

文章编号: 1001-7372(2012)03-0002-49

## 中国公路交通学术研究综述·2012

《中国公路学报》编辑部

**摘要:** 为了促进中国公路交通行业科技水平和管理水平的提高, 推动中国公路交通事业的发展, 通过对近年来国内外公路交通行业各领域(包括: 道路工程、桥梁工程、隧道工程、交通工程、公路运输经济、汽车工程和机械工程)的研究状况进行总结、分析, 系统梳理了国内外公路交通行业的学术研究现状、热点、存在问题、具体对策以及发展前景, 以期从事公路交通行业的学者提供新颖的研究视角和基础的研究资料。

**关键词:** 综述; 道路工程; 桥梁工程; 隧道工程; 交通工程; 公路运输经济; 汽车工程; 机械工程

中图分类号: U4 文献标志码: A

### An Academic Research Summary on China Highway and Transport : 2012

Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*

**Abstract:** In order to improve the technological and management level of highway transportation industry in China, so as to promote its development. The development of highway transportation industry both at home and abroad in recent years, including road engineering, bridge engineering, tunnel engineering, traffic engineering, highway transportation economy, automotive engineering and mechanical engineering, was summarized and analyzed, and the academic research status, focuses, problems, specific measures, as well as prospects of the development both at home and abroad were systematically analyzed. The research may provide a new perspective and some basic research materials for scholars who are engaged in highway transportation industry.

**Key words:** summary; road engineering; bridge engineering; tunnel engineering; traffic engineering; highway transportation economy; automotive engineering; mechanical engineering

## 0 引言

新中国成立 60 多年来, 中国公路交通事业发生了翻天覆地的变化, 有关公路交通的学术研究成果也是层出不穷。为了更加准确、翔实地反映近年来各国公路交通行业的研究状况, 《中国公路学报》编辑部围绕本刊的栏目设置, 约请中国公路交通行业各领域(道路工程、桥梁工程、隧道工程、交通工程、公路运输经济、汽车工程和机械工程)的专家、学者 30 余人, 总结、梳理了中国公路交通行业的学术研究现状、存在问题、具体对策以及发展前景。希望能抛砖引玉, 给从事公路交通科研工作的广大学者、硕

博士研究生等提供一个了解全行业学术研究成果的平台, 促进中国公路交通科技的进步与创新。

## 1 道路工程

近年来, 中国公路建设发展迅速, 截至 2011 年底, 中国公路总里程达到  $410.64 \times 10^4$  km, 其中高速公路  $8.49 \times 10^4$  km, 农村公路  $356.40 \times 10^4$  km, 极大地促进和保障了中国经济、社会发展。在公路里程大幅增长的同时, 中国公路工作者在路基工程、路面工程和路线几何设计方面取得了许多研究成果, 这些研究成果的应用, 对于提高中国公路建设水平, 保证公路工程质量起到了非常重要的作用。现

从路基工程、路面工程、路线几何设计等角度,对公路工程技术研究成就及展望综述如下。

### 1.1 路基工程

中国公路建设规模的不断扩大和公路等级的提高,对公路工程设计施工技术提出了更高的要求。随着高等级公路向工程地质条件复杂地区的延伸,路基工程建设中面临的技术难题逐渐增多。中国公路工程技术人员经过多年的研究与实践,在路基设计方法、路基沉降预测与控制、路基稳定性分析、特殊路基处治技术等方面取得了丰硕的研究成果,为中国公路工程建设事业的飞速发展做出了重要贡献,同时也为今后公路路基工程的设计与施工积累了宝贵经验。

#### 1.1.1 公路路基设计方法与理念

传统的设计方法中将路基与路面单独进行设计,汽车荷载假定为静荷载,路基设计中采用压实度和加州承载比(CBR)值作为路基强度控制指标,对不同设计等级公路的路基最小强度与压实度提出了相应要求,未考虑交通等级、轴载水平及车辆重载、超载等因素的影响。随着公路运输的不断发展,高速重载车辆的比重不断增加,动载对公路工程结构的影响愈加明显。路基工程的研究重点由土的物理性质、静力学性质、承载能力等转为车辆动载作用下路基土体的强度疲劳特性和变形疲劳特性<sup>[1]</sup>。相关学者根据中国公路运输现状及路基结构动力特性分析结果,提出了适应重载交通的交通等级与路基设计标准轴载,路基设计计算指标采用路基土的动强度与动模量,设计验算指标为路面高温时路基土的动应变值,以满足重载交通对公路路基强度的要求<sup>[2]</sup>。

随着可持续发展战略的提出和公众环境保护意识的逐渐增强,公路路基设计中需要考虑环境保护的要求。因此,在公路路基设计过程中,融入了环境保护的设计理念,在路基设计的同时进行环境影响评估,并进行环境保护设计,和公路路基开挖同时设计、同时施工、同时验收,促进资源的高效利用,将路基开挖对生态和自然环境造成的影响降到最低限度,使公路周边的自然环境尽量不受公路建设的影响,动物的迁徙路线和当地居民的生活平衡尽量不被打破,从而实现公路建设与环境的和谐发展<sup>[3]</sup>。

#### 1.1.2 路基沉降预估方法与控制标准

在路基设计时,为了制定有效的沉降处治方案并对路基施工质量进行监控,需要对不同时期路基沉降及最终沉降量进行预估计算。作为土力学中经

典的土体变形计算方法,分层总和法是最早用于计算路基沉降的理论方法之一。但该计算方法假定地基土在侧向无变形,只在竖向发生压缩变形,导致软土地基沉降计算结果偏小。现有地基规范提供的修正系数取值范围大,沉降计算结果精度有待提高。应力路径法计算方法合理,但对取样标准要求较高,且试验工作量大、技术难度较高,实际应用受到很大限制。随着数值拟合技术的发展,多种曲线模型被用于沉降预估计算,如指数曲线模型、双曲线模型、Logistic模型、Verhulst模型、生长曲线模型等。曲线模型对于预估路基工后沉降和最终沉降量具有较高精度,但需较长时间的观测资料,否则会造成推算值存在较大误差<sup>[4]</sup>。非线性有限元数值模型的发展使得路基沉降计算可采用非线性、弹塑性、粘弹性等多种土体应力-应变关系的模型,还能考虑到较为复杂的土体本构关系,如粘弹塑性模型、考虑损伤效应的弹塑性损伤模型等。有限单元法还可考虑复杂的边界条件、土体应力-应变关系的非线性特性、土体的应力历史及多场耦合效应,可模拟现场逐级加荷和处理超填土问题,能考虑侧向变形、三维渗流对沉降的影响,并能求出任意时刻的沉降、水平位移、孔隙水压力和有效应力的变化<sup>[5]</sup>。路基沉降预估计算的准确性和可靠性不断提高。

各国对于路基沉降控制标准的研究基本上经历了3个阶段。第1阶段是以允许错台高度或允许工后沉降为指标的控制标准,该阶段的研究主要以现场试验为主,以绝对工后沉降为指标的控制标准基本上要求桥头过渡段沉降小于30 cm,以允许错台高度为指标的沉降控制标准在1.5~5.0 cm之间。第2阶段是以允许纵向坡差为指标的沉降控制标准,该标准的制定主要针对设置桥头搭板的路桥过渡段,有关学者提出的控制标准为:允许纵向坡差在0.4%~1.0%之间。第3阶段是以人体振动舒适性为指标的控制标准,该标准的提出主要依据《人体承受全身振动的评价指南》(ISO 2631—2:2003),以车辆-路面耦合系统动力响应分析为基础,提出的沉降控制标准考虑了行车速度等因素,该标准合理性相对较高<sup>[6]</sup>。沉降控制标准的制定逐渐由安全性控制标准向舒适性控制标准的方向发展。

#### 1.1.3 公路路基稳定性分析方法

中国对于路基稳定性计算方法的研究,始于20世纪初。早期在工程实践中路基稳定性评价主要采用3类方法:工程地质类比法、理论计算法、规范推荐法。工程地质类比法的可靠性与设计人员的认识

和经验有关,存在较大的主观随意性。路基稳定性分析的理论算法多采用 Fellenius 法或简化 Bishop 法等极限平衡法<sup>[7]</sup>。这些方法由于数学模型不确定性和参数不确定性两方面因素容易造成计算结果与实际相差较大。现行规范针对不同地区、不同年代、不同土质,给出高度在 30 m 以内边坡的相应坡率。随着理论分析方法的不断改进,目前已形成一系列路基稳定性分析方法,包括极限平衡法、可靠性分析法、极限分析法和数值分析法。其中以极限平衡法发展较为完善,在实际工程中应用较为广泛。近年来,大量运筹学方法应用于岩土工程中,在边坡工程中较为活跃的主要有神经网络和遗传算法。神经网络模型可以预测边坡的稳定性,进行边坡影响因素的敏感性分析,构筑边坡动态变形知识库等。遗传算法在公路路基工程中主要用于边坡最危险滑面搜索问题<sup>[8-9]</sup>。

#### 1.1.4 特殊路基处治技术

公路特殊路基主要包括软土路基、冻土路基、湿陷性黄土路基、盐渍土路基等。

##### (1) 软土路基处治技术

中国软土地基处治技术的发展历程基本上分为 2 个阶段。第 1 阶段是中国软土地基处治技术发展的起步阶段。20 世纪五六十年代,为了满足中国基础建设的需要,从前苏联引进了大量的软土地基处治技术。其中包括:化学灌浆法、砂石垫层法、堆载预压法、砂桩挤密法和灰土桩等软基处治技术。因为当时缺乏相关的技术标准和规范,而软土工程性质差异性较大,许多工程在建设过程中没有结合具体情况,使得软基处治措施效果不能充分发挥,一定程度上限制了软土地基处治技术的推广应用<sup>[10]</sup>。

第 2 阶段是中国软土地基处理技术的发展阶段。从 20 世纪 70 年代末至今,各种处治技术如石灰桩、碎石桩、强夯法等在实际工程建设中得到了应用和推广,尤其是软土复合地基处治技术得到了快速发展。近年来,随着节能环保理念的加强,利用工业废渣和城市建筑垃圾处理地基成为许多学者研究的重点内容,先后研究并开发了水泥粉煤灰碎石桩复合地基、水泥碎石桩复合地基、二灰土复合地基、砂石桩复合地基和渣土桩复合地基。这些柔性桩复合地基在近几年中国公路软土地基处治中得到了应用。目前,复合地基处治技术已成为公路软土地基加固的主要形式,在工程实践中积累了一定的经验,已经形成了多种复合地基施工技术和方法,包括各类砂石桩复合地基、低强度桩复合地基、刚性桩复合

地基、灰土桩复合地基、水泥粉喷桩复合地基、加筋土地基等<sup>[11-12]</sup>。综合性的地基处治技术成为今后中国公路软土地基处治的主要发展方向。

##### (2) 冻土路基处治技术

在多年冻土地区修筑路基后,路基填土与原地层的物理、热物理性质和含水量的不同以及日照、蒸发、冷凝等条件的改变,使路基在修筑前后周围环境与地基土之间的热交换发生了较大变化,引起原天然冻土上限发生变化。冻土融化使路基出现融沉,路面遭受不同程度的损坏。针对多年冻土地地区的路基病害,中国工程技术人员根据实际情况,制定了许多行之有效的工程措施,最初的方法是加高路基以增加热阻,该方法曾被广泛使用,但经过实践检验,路基下的冻土仍然出现了融化,由此出现了路基病害<sup>[13]</sup>。目前各国对多年冻土区道路工程的处理措施主要分为保护多年冻土和破坏多年冻土两大类。对多冰冻土或少冰冻土地段的路基可采取破坏多年冻土的措施。对富冰冻土、饱冰冻土和含土冰层地段可采取保护冻土的措施。目前工程上使用最多的技术措施有挤塑保温板、热棒技术、通风管路基、碎、片块石路基、遮阳板路基等<sup>[14-15]</sup>。由于不同技术措施的工作特性不同,对冻土路基的稳定效果也有所不同,应该根据冻土的分布特征、气候特征、施工可行性、造价、路基的长期稳定性选择具体的处理措施。

##### (3) 湿陷性黄土路基处治技术

中国对于黄土工程性质研究的发展分为 4 个阶段。第 1 阶段为新中国建国初至 1966 年的 10 余年间,中国学者对湿陷性黄土各项工程性质进行了大量试验研究,提出了湿陷性黄土地基处理方法,并明确应根据地基土湿陷类型和等级、建筑类别等选择不同的地基处理方法。第 2 阶段从 1966~1978 年,进一步发展和完善了黄土湿陷性的判别标准,对湿陷性黄土的容许承载力进行了深入的研究,得出了容许承载力与含水量及液限、孔隙比的数量关系,并根据研究成果颁布了《湿陷性黄土地区建筑规范》(TJ 25—78)。第 3 阶段为 1978~1990 年,在黄土的微观结构研究方面取得了突破性进展,在黄土的应力-应变关系及本构模型研究方面,先后提出了 6 种不同情况下黄土的应力-应变关系曲线;发展并完善了湿陷性黄土地基处理新方法,如强夯法、灰土挤密桩、化学加固法、振冲法等。1990 年至今,湿陷性黄土地基处理技术有了飞速发展,在黄土的动力学特性研究方面,众多学者从试验方法、强度标准、特性规律、水、力荷载路径、动静强度关系等方面进行

了系统研究<sup>[16-17]</sup>。目前,在黄土动力特性研究中,将水力、静力、动力特性和土的湿密结构特征综合作用下的力学效应和物理机制的研究与黄土的区域性变化相结合是研究的主要方向。

#### (4) 盐渍土路基处治技术

盐渍土路基处治技术主要分为:水分隔断、结构加固和去除盐分3类。早期对于盐渍土路基的处治主要采用水分隔断法,通过提高路基高度、设置砂石材料隔断层、土工布隔断层等方法,隔断毛细水上升通道,同时增大路基的整体强度,防止地表水、降水通过面层下渗。目前采用结构加固法处治盐渍土路基技术主要有:强夯法、浸水预溶结合强夯法、挤密桩加固地基法。去除盐分的方法有:换填法、浸水预溶法、化学处治法。由于盐渍土路基工程性质受水分、温度、盐分及应力作用影响较大,目前,相关学者通过室内试验和理论分析对温度场、水分场、盐分场以及应力场等多场耦合作用下的盐渍土路基盐胀特性进行了研究,提出了相应的控制措施<sup>[18]</sup>。随着试验观测技术及理论分析模型的完善,多场耦合作用下盐渍土路基受力与变形特性及稳定性分析将成为盐渍土路基工程研究的主要方向。

### 1.2 路面工程

路面受荷载和环境的双重作用,使用条件复杂。中国公路工程技术人员在积极引进、吸收国外路面建设先进经验和成果的同时,开展了大量的研究工作,涉及路面材料、结构、施工及养护维修等方面,有效提高了路面使用性能,延长了路面使用寿命。

#### 1.2.1 路面材料

##### 1.2.1.1 路面面层材料

###### (1) 沥青混合料

中国沥青混合料方面的研究主要包括:常规改性沥青的流变特性及其混合料路用性能评价方法与质量控制技术;废胶粉改性沥青、废塑料改性沥青、硅藻土改性沥青、岩沥青与其改性沥青、冷铺沥青混合料、高模量沥青混凝土、温拌沥青混合料、浇注式沥青混凝土、环氧沥青混凝土、阻燃沥青混凝土等新型改性沥青或沥青混合料的路用性能、评价方法及材料组成设计方法研究。1987年美国启动的“公路战略研究计划”(SHRP),在沥青及其路面性能2个领域取得了很多的成果,中国新的沥青标准制定也借鉴了其中一些思想。沥青玛蹄脂碎石(SMA)起源于德国,具有优良的综合路用性能,引入中国后,中国工程技术人员通过研究和实践,已经掌握了其材料组成设计和压实成型关键技术,目前得到较为

广泛的应用<sup>[19]</sup>。开级配抗滑磨耗层(OGFC)是大空隙沥青混合料,研究表明其具有较好的排水、抗滑及降噪等功能<sup>[20]</sup>,中国目前OGFC的使用并不算多,主要原因是担心其强度和耐久性不足。

目前有研究人员尝试将新型高科技材料作为添加剂加入沥青混合料,最为突出的是相变材料和纳米材料的研究与应用。相变材料在物相转变时具有吸热及放热的特性,因此可将相变材料应用于沥青路面中,以调节沥青混合料的温度变化。纳米材料可以通过改变沥青路面材料的微观结构来实现宏观性能的改变,由于其独特的表面特性,与沥青发生相互作用后将会改变沥青的界面特性<sup>[21]</sup>。

沥青混合料是典型的粘弹塑性体,在低温小变形范围内接近线弹性体,在高温大变形活动范围内表现为粘塑性体,而在通常温度的过渡范围内为一般粘弹性体。自20世纪80年代起,沥青及沥青混合料的本构关系一直是研究的热点,具有代表性的就是引入了粘弹塑性,描述车辆重复荷载作用下沥青混合料的变形特征。沥青路面变形在时间域内具有非线性,为了能够较好地解决这个问题,需要考虑与时间和荷载历程同时相关,为此,各国研究者建立了多种不同的沥青混合料模型,这些模型为深入研究沥青混合料的力学行为,预测路面使用性能和寿命奠定了基础。

###### (2) 水泥混凝土

路面水泥混凝土方面主要研究内容包括钢纤维水泥混凝土、连续配筋水泥混凝土、聚合物改性水泥混凝土和多孔水泥混凝土等新型道路水泥混凝土的性能评价、材料组成设计及施工工艺。由于工程造价和认识上的原因,这些种类的混凝土目前在中国应用范围较小。振碾式水泥混凝土成型方法与普通水泥混凝土差别较大,材料组成及路用性能也有所不同,由于平整度差等原因,振碾式水泥混凝土在水泥混凝土路面中的应用一直没有受到重视。目前,随着大型摊铺设备的普及,路面平整度已经能够得到很好的控制,在今后的研究和应用中,振碾式水泥混凝土的使用可能会有所突破<sup>[22]</sup>。

此外,有研究人员试图借鉴沥青及沥青路面气候分区的做法,构建水泥混凝土耐久性气候分区,并在此基础上提出多指标控制的道路水泥混凝土材料设计体系。

##### 1.2.1.2 路面基层材料

###### (1) 柔性基层

国外在20世纪60年代后期,大量使用以沥青

碎石为代表的柔性基层。国外使用经验表明,采用沥青碎石基层能够减少路面开裂,延长路面的使用寿命。近几年,中国加强了对沥青碎石配合比设计方法及相关路用性能研究,并在不少地方进行了应用,取得了较好效果。但沥青碎石较高的价格在一定程度上限制了其使用范围。半开级配排水沥青碎石主要用做排水基层,但各国研究资料均表明,开级配排水沥青碎石基层的抗疲劳性能较差,耐久性不足<sup>[23]</sup>,在没有很好解决这个问题之前,其使用会受到很大的限制。级配碎石在国外广泛用于路面结构的基层与底基层,但在中国较少应用。主要原因在于级配碎石基层对集料要求较高,此外在施工中需要进行严格的控制。目前,中国对级配碎石性能及施工质量控制关键技术的研究逐渐增多,相信其使用量也会随之增加。

### (2) 半刚性基层

中国从20世纪80年代开始,在路面建设中大规模使用半刚性基层。中国对于半刚性基层的研究主要目标是在保证较高强度的情况下提高抗裂、抗冲刷性能。研究内容主要包括:混合料集料级配、混合料组成设计、相关试验方法以及压实成型方式的研究。研究发现:混合料中增加粗集料含量,使之形成骨架密实结构有利于提高强度、减少开裂<sup>[24]</sup>;在室内采用振动方式成型试件能够与振动压路机的成型方式更吻合;此外,针对半刚性基层的性能测试试验方法得到了进一步的完善和补充。目前,有很多研究机构着眼于半刚性基层的成型方法上,期望通过成型方法的改良进一步提高基层的性能。此外,在解决好强度和耐久性问题后,具有排水功能的大孔隙水泥稳定碎石材料会在多雨地区基层中得到更多的应用。

### (3) 贫混凝土基层

贫混凝土基层的主要优势是具有很高的强度。对于承受重交通的水泥混凝土路面,各国学者多推崇采用贫混凝土基层,其中包括振捣贫混凝土、多孔贫混凝土<sup>[25]</sup>。从成型方式上可分为碾压式贫混凝土基层和摊铺式贫混凝土基层。贫混凝土在很多性能上接近于普通水泥混凝土。由于刚度较大,目前需要进一步研究的是贫混凝土基层施工及使用过程中的抗裂性问题,目前贫混凝土基层的应用主要局限于对路面承载力要求高的路段。

## 1.2.2 路面结构

### (1) 沥青路面结构

中国现行的沥青路面设计采用双圆垂直均布荷

载作用下的多层弹性层状体系理论,以设计弯沉值为路面整体刚度的设计指标,以沥青层底拉应力作为高等级公路沥青路面厚度设计的验算指标。中国现行公路沥青路面设计方法存在设计指标单一、与路面破坏状态不符、材料力学指标计算及测试方法不合理、对湿度及温度等环境因素考虑不周等问题。针对上述不足,中国开展了基于多指标的沥青路面结构设计方法及设计参数研究,以期对设计方法进一步完善。

长期以来中国沥青路面的主要结构是半刚性基层沥青路面,结构类型过于单一,难以适合不同地区的使用状况。近些年,中国研究人员不断完善和改进半刚性基层沥青路面结构,提出了包括增加半刚性基层厚度、设置柔性过渡层和应力吸收层、使用多孔排水基层等各种方法,期望提高半刚性基层沥青路面的适用性和使用性能,取得了良好的效果。与此同时,很多地方尝试研究和应用柔性基层沥青路面,也取得了一定的效果。从目前整体使用情况来看,在今后相当长的一段时期内,半刚性基层沥青路面仍是中国沥青路面的主导形式。

### (2) 水泥混凝土路面结构

国外影响较大的水泥混凝土路面设计方法有:美国AASHTO混凝土路面设计方法和美国波特兰水泥协会(PCA)混凝土路面设计方法等。

中国的水泥混凝土路面设计以弹性半空间地基有限大矩形板模型为基础。从20世纪50年代至今,中国在水泥混凝土路面设计理论与方法方面不断改进,目前的设计采用可靠度设计方法,以行车荷载和温度梯度综合作用产生的疲劳断裂作为设计的极限状态,该方法综合了多年来中国道路界在科学研究和工程实践中积累的成果和经验,可用于指导中国当前混凝土路面工程设计。

水泥混凝土路面的性能很大程度上取决于基层的性能。中国早期的水泥混凝土路面不太重视基层的性能,由此导致不少水泥混凝土路面出现严重的损坏。目前中国等级较高的水泥混凝土路面大多采用水泥稳定碎石基层,通过研究发现,水泥混凝土路面基层最重要的是应具备良好的抗冲刷性能。一些地方在水泥混凝土路面中使用了多孔排水基层,以减少由于冲刷破坏引起的路面破损,但出于对多孔排水基层耐久性的担心,应用受到一定限制。

## 1.2.3 路面施工质量控制技术

### (1) 路面施工质量控制体系研究

路面施工过程中的质量控制是影响路面性能的

重要因素。路面施工是一个复杂的系统工程,存在很多不确定因素和变异性。由于缺乏完善的质量管理体系,不少路面施工质量失控,导致路面在使用过程中出现严重问题<sup>[26]</sup>。目前通过引入模糊数学对路面施工过程管理体系的研究取得了一定成果,但研究成果与目前实际状况有一定的差距。

#### (2) 路面压实质量检测方法

以往的压实测试方法速度慢、无法满足快速施工的要求,同时对路面造成损坏。因此在压实质量检测方面的研究受到关注。

核子密度仪在过去40多年一直是世界各地路面材料密度检测中最广泛使用的方法,出于对辐射的忧虑,国外出现了利用电磁辐射测试热沥青混合料的相对密度的无核密度仪<sup>[27]</sup>。近几年,中国很多科研机构尝试在施工中使用无核密度仪测试热沥青混合料的相对密度,并取得一定的效果。但无核密度仪不能测试含有水分路面材料的压实状况。

手持式落锤弯沉仪能够测试落锤冲击承载板时在承载板中心处产生的弯沉和压力,根据压力和位移的峰值可以确定出回弹模量值。在理论上,密实度不同的路面材料在冲击状态下回弹模量值一定不同,因此,目前有很多研究试图建立手持式落锤弯沉仪测试值与路面压实度之间的关系,以找到能够快速无损检测压实状况以及压实均匀性的方法。此外,中国还有研究者在压路机压实轮上安装压实度计(振动传感元件),通过压实轮压实过程中振动参数的变化对所压材料的密实程度进行实时、连续的检测,并将测试结果及时反馈给操作人员,以便更好地控制路面压实质量。

#### (3) 路面混合料离析研究与控制

施工过程中路面混合料材料出现离析是导致路面使用性能下降的重要原因。近年来,研究者开始借助颗粒物基本特性研究路面混合料离析发生的机理,并通过路表渗水情况、密度变化情况、构造深度的差异以及芯样断面的图像分析研究离析的检测方法;还有研究者通过对摊铺设备的改进提高摊铺过程中混合料的均匀性,这些研究取得了一定的成果,但总体而言,对离析机理认识仍显不足,而且混合料离析检测大多针对路表或芯样表面进行,不能反映混合料内部状况,路面施工过程中缺乏混合料离析程度的实时监测手段。

对于沥青混合料而言,除了混合料离析以外,温度离析同样对路面质量有重要影响。1984年,美国国家沥青中心联合几所大学采用红外热成像技术对

沥青混合料摊铺过程中的温度离析进行了研究,并通过研究提出了相关温度离析的判断标准,但在实际使用中,发现存在标准与实际不符的问题,其主要原因是红外线虽然对大范围的温度变化有较好的分辨效果,但难以反映混合料内部的温度变化。中国这几年也有不少研究者利用红外热成像技术研究沥青混合料施工过程中的温度离析,但目前大多局限于探索阶段,距将红外技术用于沥青混合料温度离析的实际检测和控制仍有很大一段距离。

#### 1.2.4 路面养护维修技术

随着公路里程的增加,路面养护维修技术越来越受到重视,高效、节能、环保的养护维修技术受到广泛关注和重视,路面再生利用是其中的重点。

##### (1) 沥青路面厂拌及现场冷再生技术

沥青路面再生利用可分为厂拌冷再生和现场冷再生。厂拌冷再生生产的混合料质量可得到较好控制,这方面的研究主要关注再生混合料材料组成对路面使用性能的影响,研发新型再生剂,以期进一步提高混合料的性能。

沥青路面现场冷再生是利用专用再生机械,对加入新料(水泥、乳化沥青、再生剂等)的旧沥青混凝土路面及稳定碎石基层在一定深度范围内进行现场重新拌和、摊铺等工序,随后进行找平和碾压作为道路基层或底基层,这种方法能够重复利用原路面基层与面层材料,缩短工期、节约资源、保护生态环境、降低工程造价。路面现场冷再生技术在国外使用相对成熟,近些年受到中国养护管理部门的重视。大型专用设备是现场冷再生中的关键,目前中国主要使用进口设备,因此,研发适应国情的路面再生机是一项重要的工作。旧路经过铣刨后形成的再生材料的变异性大,混合料组成复杂,在大多数情况下,需要掺入新材料加以改善,同时需要加入适当的结合料使其具备一定的强度,因此,适合于路面再生料特征的混合料性能评价、组成设计及路面结构设计方法也是目前研究的重点。此外,路面冷再生施工现场复杂、状况多变,合理的质量控制体系及方法也是今后需要研究的重要内容。

##### (2) 沥青路面厂拌及现场热再生技术

与沥青路面冷再生类似,沥青路面热再生也分为厂拌热再生和现场热再生。厂拌热再生与普通沥青混合料生产过程没有太大区别,只是主要材料为沥青混合料铣刨料,因其主要用于路面面层,性能要求较高,其研究重点在于进一步研究铣刨料含量对沥青混合料性能的影响,并通过配合比优化提高其

使用性能。

沥青路面现场热再生是采用加热系统(加热机)在现场把需要再生的沥青路面均匀加热至要求的温度,然后再用复拌系统(机组)将加热后的沥青路面翻松、添新沥青混合料或再生剂,并与翻松的旧料拌和后重新摊铺、压实,连续作业一次成型翻新沥青路面。通过长期的发展,国外沥青路面热再生技术比较成熟,已形成一套比较完整的再生技术。中国已有这方面的尝试,研究人员开展了沥青混合料再生原理、再生剂的开发、再生路面的配合比设计、再生路面的质量标准、再生路面的施工工艺及质量控制等各个方面的研究工作,并根据研究成果出台了符合中国沥青路面实际情况的一些标准和规范。今后的工作是扩大应用范围,再通过实际工程应用进一步开展相关研究,完善相关的标准和规范。

### (3)水泥混凝土路面再生利用技术

旧水泥混凝土路面碎石化再生技术在国外早有应用,其主要设备为多锤头碎石化和共振碎石化。中国于2002年从美国引进该项技术,主要采用多锤头碎石化方法,在这方面开展的研究工作包括碎石化设备的研发、水泥混凝土板碎石化后承载力的研究以及碎石化后加铺层设计方法。目前中国有不少地区采用这种方法进行旧水泥混凝土路面的改造,今后需要进行路面性能的长期观测并不断优化施工方案。

#### 1.2.5 特殊路面

随着路面建造技术的发展,具备特殊功能的路面不断出现。其包括:桥面铺装、隧道路面、多孔排水路面、降噪路面、露石水泥混凝土、融冰雪路面等。

##### (1)桥面铺装

桥面铺装的使用环境比普通路段路面的使用环境更加恶劣,大温差、大变形以及水损坏是导致桥面铺装的重要原因<sup>[28]</sup>。近些年桥面铺装研究内容主要包括桥面铺装损坏的原因和机理分析、桥面铺装防水材料的研究和性能研究、适应桥梁使用环境的桥面铺装新材料研发、桥面铺装结构性能研究以及桥面铺装施工工艺及质量控制措施研究。材料方面的研究结果表明:普通沥青及普通沥青混合料很难满足要求,环氧沥青、天然沥青与普通石油沥青混合物、SBS改性沥青及高粘度聚合物改性沥青等胶结料,可以对桥面铺装性能进行全方位的改善。根据一段时期的研究,目前中国设计规范中按照桥梁等级不同,给出了几种典型的桥面铺装方案,但桥梁种类繁多,使用环境差异大,在今后的研究中需要进一

步对桥面铺装的装材料和施工工艺开展研究,并通过性能观测不断积累经验。此外,应该开展桥面铺装结构性能试验,通过加速加载试验对新材料、新结构或新工艺进行试验论证。

##### (2)隧道路面

隧道路面处于相对封闭的环境,直接受外界自然因素影响较少,但隧道内温度、湿度、基础强度与一般公路差别较大<sup>[29]</sup>。目前关于隧道路面的研究内容主要涉及路面材料、结构、抗滑以及降噪。近些年的使用情况调查表明,以往水泥混凝土路面是隧道路面的主要类型,但沥青混凝土路面在隧道中的应用正逐年增加。在隧道水泥混凝土路面中,研究人员研究了将多孔水泥混凝土、钢纤维水泥混凝土以及露石水泥混凝土应用到隧道路面中。在沥青混凝土方面,SMA沥青混凝土成为隧道沥青路面的主要选择;从安全角度出发,还有不少关于阻燃沥青混凝土的研究,此外,为了便于施工,适用于隧道施工条件的温拌沥青混凝土也得到研究。到目前为止,隧道内路面结构和材料设计仍然没有专门的规范和指南,在隧道路面结构设计时则更多的是在套用公路或城市道路设计规范。此外,隧道路面的维修保养技术仍然需要开展更多的研究。

##### (3)多孔排水路面、降噪路面

当沥青混合料空隙率达到15%~25%时,路面会具排水和降噪的功能。排水路面、降噪路面在国外有较为广泛的应用。如日本80%以上的新建和改建公路路面采用多孔沥青混合料。近些年,这方面的研究主要集中在孔隙特征与排水性能以及降噪性能之间的关系,以及孔隙对常规力学性能以及高温、低温、水损坏、抗滑性能的影响,同时对多孔沥青混合料的施工特性进行了研究,这些研究成果为多孔沥青混合料的应用提供了依据。此外,中国适用于多孔沥青混合料的高粘改性剂研发也在进行,并已经能够替代进口产品在实际中应用。多孔沥青混合料使用中存在的重要问题是孔隙会随着使用时间出现被灰尘等杂物堵塞,造成排水、降噪功能的衰减,因此进一步的研究主要针对孔隙恢复方法或者具有自清洁功能的多孔沥青混合料。另外有研究表明,在沥青混合料中掺入橡胶类改性剂也能抑制行车噪音。

##### (4)露石水泥混凝土

露石水泥混凝土是通过调整水泥混凝土材料组成,并借助特殊的施工工艺,使水泥混凝土中的粗集料露出表层。其主要目的在于提高路表抗滑性、降

低行车噪音、减少路表阳光反射等<sup>[30]</sup>。露石水泥混凝土路面在发达国家有研究与应用实例,近年来,中国对露石水泥混凝土的研究主要集中在粗集料的选择、表面粗集料分布状况对路面抗滑性能、降噪性能以及防眩性能的影响规律方面,此外通过施工工艺的研究提供了较为完整的施工方法。但由于施工过程相对比较复杂,目前仅在一些隧道水泥混凝土路面施工中得到应用。

#### (5)融冰雪路面

路面在冬季降雪和结冰对行车安全有非常不利的影 响,以往的做法主要是洒盐类的融雪剂,而研究和 使用表明常用融雪剂会对路边植物的生长造成严 重影响,同时有研究者发现长期使用融雪剂也会对 路面的耐久性造成一定影响。目前这方面的研究主 要有:在沥青混合料掺入橡胶颗粒,让路面具有一定的 弹性,促使薄冰在车辆的碾压下破碎,这种方法在 一些地方得到应用,起到了一定的效果;还有在路面 中埋入管道,利用太阳能或地热,通过热交换原理提 高冬季路面温度,促使冰雪尽快融化<sup>[31]</sup>,各国在特 殊路段有应用的例子,但出于成本的考虑,应用受到 限制,此外这种路面的维修也比较困难。还有在路 面中加入导电物质的研究,试图通过电流发热使路 面升温,从而一定程度抑制路面结冰,但耗电量大仍 是应该考虑的问题。

### 1.3 线形设计理论与方法

线形设计理论与方法研究主要是指公路线形指 标(或参数)及其组合方法、评价方法与实现技术的 研究,近年来取得了如下一些成果。

#### 1.3.1 线形设计指标

一部分学者对线形设计指标和线形要素组合等 设计依据进行研究,对现行规范的相关内容进 行建议和修正。在平面设计方面,张景涛<sup>[32]</sup>和潘仁泉<sup>[33]</sup> 均认为目前《公路工程技术标准》(JTJ B01—2003) 中推荐的极限最小半径值不符合现代汽车特性,对 车辆横向稳定性考虑不足;并根据汽车动力学原理 提出了基于多刚体汽车模型的平曲线半径计算方法, 得出了更切合现代汽车特性的计算公式。张先勇等<sup>[34]</sup> 在分析各国横向力系数相关研究的基础上, 确定适合中国的横向力系数标准,建立了适合中国 道路和交通特性的平曲线设计用元素。

由于公路建设逐渐由平原微丘地区向山岭重丘 地区推进,促进了有关纵断面设计和平纵组合设计 方面的研究。裴玉龙等<sup>[35]</sup>认为中国《公路路线设计 规范》中关于最大纵坡和坡长的设计规定过于严格,

研究提出了中国高等级公路的坡长限制值、公路的 最大坡度值,同时给出了陡坡上设置爬坡车道的坡 度值参考指标。庄传仪等<sup>[36]</sup>认为现行规范中以货 车总质量作为主导车型选择依据的做法缺乏理论根 据,存在设计车型与实际运行车型不一致的弊端;并 对汽车上坡运行特性展开研究,提出了用于纵坡设 计主导车型选择的理论依据,建立了汽车功率质量 比计算模型,可为合理确定公路路线最大纵坡坡度 和不同纵坡的最大坡长提供基础依据。潘兵宏<sup>[37]</sup> 在路段试验与场地试验的基础上,结合下坡时汽车 的运动方程,分别建立了无辅助制动和发动机制动 2 种情况下的主制动器温升预测模型,提出了山区 高速公路平均纵坡和坡长限制指标值和界定高速公 路长大纵坡的标准和原则,此成果将写入《公路路线 设计细则》。

近年来,中国不少研究人员对准确计算三维条 件下的行车视距进行了有益的探索。具有代表性的 有:公路行车视距检验的三维表面模型方法<sup>[38]</sup>,利 用空间两点通视原理计算分析空间视距的三维视距 面法<sup>[39]</sup>以及运用空间解析几何原理,结合高速公路 平、纵、横面线形建立的新的三维视距计算模型<sup>[40]</sup>。 国外部分学者将公路行车道和路肩等几何特征以参 数化的形式来描述,提出了计算三维视距的方法和 数学模型<sup>[41]</sup>;通过构建一般公路的三维计算模型提 出了驾驶人视线在三维道路计算模型中的遮挡计算 方法<sup>[42]</sup>。这些三维视距模型的建立为全世界公路 三维视距的研究提供了新的思路。

#### 1.3.2 线形评价方法

在实践中发现,只保证技术指标满足标准、规范 的要求,并不一定能保证车辆的行驶安全(在不涉及 车辆性能、道路交通环境以及违法驾驶等条件下)。 设计者能否对标准、规范设计指标进行合理组合应 用是一方面的原因;车辆不会完全按照既定的设计 速度行驶是另一方面的原因。针对这一问题,将评 价环节引入设计流程之中,对基于设计速度的设计 成果进行检验和修正,实行动态设计,是路线设计方 法的发展趋势。许多学者对线形设计质量的评价指 标、方法和标准展开了研究。

近年来各国研究和应用的主要方法是以运行速 度为基础的路线设计方法,预测车辆的运行速度是 该方法的关键。德国、澳大利亚等国家多采用这种 方法提出了各自的运行速度预测模型。中国《公路 项目安全性评价指南》(JTJ/T B05—2004)通过路 段实测回归方法建立了不同类型路段上车辆的运行



速度预测模型。然而,目前建立的模型都有一定的局限性和弊端,因此,针对运行速度预测模型的研究仍在进行当中。对于平曲线路段,用路段实测回归法建立了双车道乡村道路直线-曲线过渡段运行速度预测模型<sup>[43]</sup>;在确定影响驾驶人选择速度影响因素的基础上,建立了高速公路自由流大型车在不同平曲线及其相连路段情况下的运行速度预测模型<sup>[44]</sup>。对于纵坡路段,根据汽车的动力性能和行驶力学理论建立了上、下坡路段车辆的理论运行速度模型<sup>[45]</sup>。

然而,部分学者<sup>[46]</sup>指出利用运行速度评价路线线形存在局限性。而目前在中国的标准和规范中,对于如何评价公路线形设计质量只是一般的定性描述,并无明确的定量指标。因此,一部分学者对便于量化的评价指标和方法进行研究<sup>[47]</sup>;针对道路安全审计中如何量化评价线形的设计质量这一重大技术问题,构造了高速公路线形设计质量量化评价模型,建立了设计质量与事故率的内在联系;提出了基于曲率变化率的公路线形质量评价方法及曲率变化率的安全评价标准;采用速差量作为度量速差的指标,提出用速差作为应用可能速度进行线形设计评价的标准;提出了预览视距这一量化指标,将驾驶人的视觉特性和道路空间线形特征应用于山区高速公路线形安全性评价。

还有一部分学者试图提出更为精确和全面的评价方法:以制动毂温度作为控制指标,建立了货车温度预测模型和评价标准<sup>[48]</sup>;建立了公路运行速度协调性、线形指标的设计一致性、驾驶工作负荷度等安全性评价模型,据此建立了全面的定量分析的路线安全性评价体系<sup>[49]</sup>。

通过以上对各国研究现状的分析可以看出:在线形设计指标方面,基于车辆功率质量比参数的公路路线纵坡及相应的坡长研究更符合各地区的实际情况,将是今后较长时间的纵坡研究方向;在线形评价方法方面,基于运行速度、驾驶人心理、生理反应(或驾驶负荷)或者计算机仿真等的评价方法与实现技术仍将是未来的研究热点。

## 2 桥梁工程

土木工程是一个古老的学科,因而被认为不会有多少发展。然而,近20年来由于材料、结构分析方法和施工技术的进步,在桥梁工程领域仍然取得了很大进展。本文中着重介绍桥梁工程在以下几方面的进展及发展趋势。

### 2.1 可持续桥梁工程的新理念

随着对有限资源的节约和对环境的保护受到人们的日益重视,经济的可持续发展成为各国政府的战略目标,国际上出现了低碳节能型工程、可持续性工程和绿色工程的新概念<sup>[50-51]</sup>。21世纪的桥梁结构设计更加重视结构安全耐久性、低碳节能性、全寿命经济性、降低不可再生资源的消耗、工业和建筑废料的再利用以及减少对环境的破坏和影响<sup>[52]</sup>,已提出可持续桥梁工程的新理念。可持续桥梁工程包含的基本概念如下(文献<sup>[50]</sup>,<sup>[51]</sup>):可持续桥梁工程的基本原则为桥梁的可再生利用性能,其目标为长期增长和不威胁后代的发展;桥梁工程的可持续由经济、生态和社会可持续性构成,具体包括安全可靠、结构耐久性、功能适用性和能力可扩展性等4项基本要求;可持续桥梁工程要通过规划、设计、施工、使用和拆除等5个阶段来实施。

### 2.2 基于性能的桥梁设计方法

基于性能的设计方法最早产生于结构抗震研究领域<sup>[53]</sup>,并被各国有关建筑结构抗震设计规范采用。近年来,国外学者开展了基于性能设计的桥梁抗震分析、钢拱桥非线性分析、桥塔分析与混凝土桥墩抗震评价。日本已提出了基于性能的公路桥设计规范。同济大学陈艾荣教授在文献<sup>[51]</sup>中提出了基于性能的桥梁抗风设计、船撞设计方法。各国已有的桥梁性能设计研究多集中在极端作用下的设计方法,如抗震、船撞和抗风设计,很少涉及桥梁性能设计的其他领域。概括讲,根据文献<sup>[52]</sup>新世纪桥梁结构性能设计应包括如下主要内容:安全性能、使用性能、耐久性能、经济性能、低碳节能性能、再生利用性能和环保性能。传统的允许应力法和经验概率极限状态法已不能满足桥梁性能设计发展的需求,因此研发第三代桥梁结构性能设计方法十分必要,也将是桥梁结构设计理论发展的新方向。

### 2.3 几何非线性分析

斜拉桥、悬索桥以其良好的结构性能、巨大的跨越能力以及简洁优美的造型在现代桥梁结构中占据重要的地位。现代结构理论、高强材料、计算机技术以及施工方法的进步,使它在近50年间迅速发展,最大跨径记录一再被刷新。已完成设计的意大利Messina海峡悬索桥的跨度已达到3300m,2008年建成通车的中国苏通斜拉桥的跨度达1088m。跨径的增大推动着结构设计理念、分析方法和施工技术的发展。

Fleming<sup>[54]</sup>用等效模量法考虑斜拉索垂度效

应,将稳定函数增至5个以考虑弯矩对轴力的影响,用拖动坐标系考虑大位移影响,用增量-迭代方法求解非线性方程组,应用于斜拉桥的静、动力分析。文献[54]成为斜拉桥几何非线性分析的经典文献,1979~2004年的25年内,虽然斜拉桥的跨度记录从当初的404 m猛增到890 m,且已突破1 000 m大关,但几乎所有研究者采用的理论和方法仍没有超出文献[54]的基本框架。随着跨度的增大,高强材料的应用,斜拉桥刚度下降较快,迫切需要更精确的理论和方法来彻底理解和精确预测结构响应。因此,可以从非线性求解列式和斜拉索模拟2个方面加以改进。

桥梁结构分析软件中大多采用UL或TL列式,很少采用性能优异的CR列式,这是由于CR列式与根深蒂固的增量思维不太一致,且算法与现有程序不易兼容的原因。少数研究者将CR列式引入斜拉桥和悬索桥的几何非线性分析,实际上,基于CR列式全量法的多阶段、多工况桥梁结构分析具有巨大的优越性,除了提高计算精度和效率外,还使得体系转换等工况的处理简便、统一。但如何在采用CR列式全量法的同时计入组合截面效应,是摆在广大桥梁工作者面前的一个更大难题,甚至极少有研究者涉及这一问题,应该大力攻克这一难题。

从文献[55]提出悬链线索单元开始,经过许多学者的改进和完善,悬链线索单元算法已经成熟和系统化,并在悬索桥和斜拉桥分析中应用非常广泛。悬链线索单元基于解析解,可以精确模拟任何应力水平、任何长度的悬索,是模拟自锚式悬索桥主缆、吊索的首选工具。但至今只有文献[56],[57]采用悬链线索单元模拟斜拉索、考虑施工过程计算斜拉桥非线性效应。对大跨斜拉桥来讲,施工过程中斜拉索应力低,位移大,迫切需要引入高精度的悬链线索单元进行斜拉桥施工过程分析。在斜拉桥分析中悬链线索单元之所以未被广泛采用,最大的原因就是采用这种方法计算斜拉索时,必须事先根据某个指定条件确定无应力索长 $L_0$ ,且在斜拉桥施工过程中 $L_0$ 可能发生改变,工程师不易接受,算法难于与现有软件结合。

文献[56]基于悬链线理论提出斜拉索单索问题的统一求解方法,它可以解决斜拉桥计算中几乎所有的单索静力问题,包括了文献[57]~[66]中的所有情况,通用性强,且基于精确的解析理论。该算法扫清了将悬链线索单元引入斜拉桥施工过程分析的障碍。

同时,文献[56]中基于CR列式全量法,采用悬链线索单元模拟斜拉索,建立考虑施工过程的苏通大桥几何非线性精细化模型。该方法是世界上首次开发实现。研究表明该方法在计算精度和计算效率上远超文献[54]中方法,值得大力推广。文献[54]中方法引起的恒载应力误差在10%以内,主梁成桥标高相差超过0.5 m。对于张拉工况,文献[54]中方法增加荷载步数并不能提高其计算精度。超大跨度斜拉桥施工控制时应采用精细化的分析方法。

为了改善模拟斜拉索的精度,同时避免文献[56]中高效算法而需要专门重新开发程序软件,也有研究者采用多段杆单元法模拟斜拉索<sup>[67-68]</sup>。多段杆单元法的原理直观简单,但缺点也很多,且需要专用桥梁软件或对通用软件二次开发才能实现,且计算效率很低,索端角度的精度稍差。

悬索桥几何非线性分析基本原理与斜拉桥基本相同,但悬索桥鞍座-主缆切点变化及鞍座顶推模拟需要特殊处理。大多数研究者<sup>[69]</sup>采用的简化方法是通过多个杆、梁单元及刚臂模拟主缆与鞍座的切点以及鞍座相对于桥塔的偏心,模拟困难,效率低下。文献[70]首次提出鞍座-索单元,在单元内部隐含了主缆与鞍座相切及主缆无应力长度保持不变这2个重要条件,将鞍座及其顶推的模拟融为一体,是目前对此问题最理想的解决方案。目前只实现了平面鞍座-索单元,对空间缆索悬索桥的相关问题研究还是空白。

悬索桥锚跨索股力的均匀性也受到关注,文献[71],[72]中分别采用数值解析法和有限元法建立了精细化分析模型。

总之,桥梁几何非线性分析的基本理论方法已能够满足下一代超大跨度桥梁建设的需要,但需要将优秀的研究成果与优秀的分析软件结合,才能真正形成生产力。

## 2.4 施工监控

从现代控制论的观点,施工监控方法归纳为:开环控制、闭环反馈控制以及自适应控制3种主要类型。传统的施工监控仅对施工过程进行了控制,若同时对于关键构件制造和安装进行控制,即对桥梁施工的全过程进行控制,则可以达到规避质量及安全风险、显著提高控制质量的双重目的<sup>[73]</sup>。这对于大跨度尤其是超大跨度斜拉桥而言是非常必要的。

在多多罗大桥施工控制中,引入了“精度控制”的概念,以构件的几何形态作为控制手段,以主梁节段和斜拉索的制造及安装长度作为控制对象,对构

件的制造和安装过程进行全过程控制。

中国将精度控制称为无应力状态控制、无应力构形(或制造构形)控制、几何控制,其本质基本相同。中国苏通大桥、荆岳长江大桥也采用了这一监控思路。应该特别指出的是,制造单元级别上很小的角度误差,也可能随切线拼装急剧放大,实际工程中不可仅依赖几何控制,应进行误差随机模拟分析。

### 2.5 施工过程随机模拟

传统的工程结构分析,通常采用确定性的力学模型,采用代表值参数系统代替本原系统。采用随机结构分析模型更能反映结构的本质特征,从概率意义上把握结构行为。中国《公路斜拉桥设计细则》(JTJ/T D65-01—2007)的条文说明中强调斜拉桥设计和施工高度耦合,但没有说明施工误差对成桥状态的具体影响程度。千米级斜拉桥的恒载效应的变异会不会随悬臂长度的增加而显著放大到不可接受的范围,是设计者十分担心的。

部分研究者对施工监控中的因素(如梁段重量、斜拉索弹模、斜拉索制造长度和塔高等)进行参数敏感性分析<sup>[74]</sup>,都属于确定性计算,没有考虑误差为随机变量这一重要特征,不能从概率意义上把握其影响。Shinozuka<sup>[75]</sup>系统地研究了采用随机模拟方法进行随机结构分析。后来许多学者<sup>[76-78]</sup>研究了材料、几何尺寸、荷载等随机因素变异时结构的响应规律或可靠度,都是针对使用阶段或单个工况,没有考虑施工过程。

部分研究者研究了斜拉桥恒载索力的概率确定<sup>[79-80]</sup>,其共同缺点是以成桥恒载索力为研究对象,即隐含假定所有斜拉索一次张拉完成。

文献<sup>[56]</sup>,<sup>[81]</sup>采用 Monte-Carlo 与有限元相结合的随机模拟方法,将斜拉桥的各个梁段自重、张拉索力看成随机变量,进行苏通大桥施工过程随机模拟。结果表明:考虑梁段自重、张拉索力为具有2%的变异系数的正态随机变量时,在保证率为95.44%下,苏通大桥主梁上缘、下缘的恒载应力变异分别为 $\pm 6, \pm 8.6$  MPa,主塔的恒载应力变异为 $\pm 0.4$  MPa,斜拉索恒载应力变异为 $\pm 28$  MPa,塔顶水平坐标变异为 $\pm 0.06$  m,主梁标高变异为 $\pm 0.15$  m。故梁段自重、张拉索力变异对钢主梁斜拉桥恒载应力的影响不如对混凝土主梁斜拉桥那么明显,但其对恒载构形的影响不可忽略。该研究成果可以打消人们的顾虑,即斜拉桥恒载效应的变异处在可控范围之内。

建议考虑以下因素对斜拉桥和自锚式悬索桥施

工全过程进行随机模拟分析,研究施工阶段及成桥阶段效应的概率特征,研究对误差的敏感性:①斜拉索长度安装误差、索力测试误差;②斜拉索弹模误差、锚点位置误差;③主梁的制造长度和角度误差,梁段重量误差;④梁、塔的刚度误差;⑤温度、风的影响。

### 2.6 近期桥梁抗震研究的若干新进展

现代桥梁抗震技术发展于1975年美国圣费南多地震之后,早期主要为隐含延性的准强度抗震设计。至1994年美国北岭地震、1995年日本阪神地震及1999年中国台湾集集地震,因震害推动作用桥梁抗震取得了极大进展。20世纪末国外主要桥梁抗震规范均完成了修订,普遍采用了延性抗震设计及能力设计原理,强调了桥梁结构的细部构造要求,并纳入了减震、隔震内容,同时积极地向基于性能/位移的抗震设计发展。

中国在1976年唐山大地震后开展了桥梁抗震研究,至1989年颁布了基于准强度设计理论的《公路工程抗震设计规范》(JTJ 004—89),此后近20年直至2008年汶川大地震后,颁布了《公路桥梁抗震细则》(JTJ/T B02-01—2008),开始引入延性抗震设计。2011年住房和城乡建设部颁布了《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011),在地震设防水准(以重现期定义)、桥梁抗震体系、概念设计和减(隔)震设计细节等方面又有所进步。

#### 2.6.1 近期桥梁震害的启示

2008年汶川8级大地震震害调查表明,宜重视桥梁近断层地震动响应及防落梁措施、小半径曲线梁桥地震防倒塌设计、桥梁延性抗震设计及细部配筋和深水高桥墩地震损伤及控制等抗震问题。

2010年智利发生8.8级强烈地震,部分未设置横隔板的主梁腹板发生(剪切)撕裂状破坏,由此对横隔板(或横向桥面系)的抗震作用很有必要重新评估。1座钢梁桥固定支座的焊接节点在下翼缘处开裂,部分支撑屈曲<sup>[82]</sup>。1994年美国北岭地震钢梁桥震害也主要集中于端部支座及其支撑上。

2011年日本东近海发生9.0级强烈地震并引发海啸。尽管测得的最大加速度峰值为 $2.9g$ ,但桥梁地震表现总体良好。海啸造成部分桥梁垮塌,主要为基础抗冲刷能力不足而倾覆和主梁受水流的冲击力或浮力作用而落梁。日本桥梁隔震采用的层叠橡胶支座、高阻尼橡胶支座和铅芯橡胶支座等地震表现不算完美,部分发生了断裂、局部龟裂和倾斜(永久位移)等破坏现象。

### 2.6.2 桥梁抗震试验与数值分析

在震害调查基础上注意试验和数值紧密结合已成为现代桥梁抗震研究的重要特点,试验方面具有代表性的为美国 NEES 计划和日本的 E-Defense 大型振动台。值得提及的是近些年快速发展起来的子结构拟动力试验技术<sup>[83]</sup>,其工作为借助现代试验、数值手段研究复杂桥梁倒塌及抗震问题提供了很好的范例。美国学者亦完成了 1994 年北岭地震桥墩(弯)剪切破坏机理的分布式混合模拟试验。

美、日还合作或独立完成了部分桥墩(含原型)振动台试验,研究目的除评价抗震规范、发展数值模型外,还涉及确定新型材料或新型结构的抗震性能,如 SMA 配筋、纤维增强混凝土(ECC)和配预应力束新型桥墩。结果表明前者可有效控制桥墩地震倒塌,而后者在控制早期开裂及降低残留位移方面优势明显<sup>[84]</sup>。

在试验研究的推动下,桥梁非线性地震反应数值模拟技术也取得了长足进步,美国 PEER 建立了地震工程开放模拟系统 Opensees 平台。在钢筋混凝土桥墩方面,主要在基于柔度法的纤维梁柱单元基础上,结合修正压力场理论(MCFT)或拉压杆桁架模型(Strut and Tie Model)开发了可考虑弯曲、剪切、轴力以及扭转相互耦合作用的非线性分析模型,实现了试验及部分典型震害现象的模拟<sup>[85-87]</sup>。

### 2.6.3 桥梁减隔震技术的发展

1989 年美国 Loma Prieta 地震后,加州主要采用铅芯橡胶支座等减隔震措施来提高既有桥梁的抗震能力。日本在 1990 年提出利用铅芯橡胶支座和高阻尼橡胶支座的桥梁减震方案。据统计,至 20 世纪末已建成上百座减隔震桥梁。

减隔震设计从传统梁式桥也扩展到了大跨度桥梁,如旧金山金门大桥(悬索桥)就在上部结构加装了较多粘弹性阻尼器以进行抗震加固。2005 年希腊建成的里翁-安蒂里翁跨海大桥通过在桥塔基础与地基之间设置滑移垫层以及在主桥(斜拉桥)加装液体粘滞阻尼器,使之可抵御水平、竖向各 2 m 的断层运动位移及强烈地震动作用。中国江阴长江大桥、苏通长江大桥亦采用液体粘滞阻尼器的减震方案。智利的 Amolanas 桥为悬臂连续梁桥,最高墩近百米,采用了摩擦支座和两侧桥台处设置液体粘滞阻尼器的组合减震方案。另外,多种减隔震装置组合应用以获得更优的桥梁减震方案也是一个重要发展趋势。中国的武汉天兴洲公铁长江大桥采用了磁流变阻尼器(MR)与液体粘滞阻尼器的混合控制

方案,以抑制主梁纵向地震、列车制动及行车移动荷载作用下的振动响应。

### 2.6.4 临近断层桥梁抗震问题

断层地表破裂及近断层地震动效应(含速度脉冲、地面永久位移和竖向地震动)造成大量桥梁破坏已在多次地震中重现。目前已就近断层地震动效应对桥梁结构地震反应影响做了较多讨论,在研究手段上非线性时程分析结合统计方法被较多采用,地震动输入除了天然近断层地震波外,还提出了利用谐波脉冲函数模拟近断层地震动,亦发展了基于地震学方法的模拟技术,以更好地将断层-地震动特性-结构破坏机理研究紧密结合<sup>[88-89]</sup>。

2003 年日本学术振兴会设立了为期 3 年的“断层附近基础设施抗震设计与对策”全国合作研究项目。美国应用技术委员会 ATC 和多地震工程研究中心(MCEER)2002 年合作完成了“桥梁抗震设计 LRFD 方法指南”(NCHRP12-49)项目,规定桥梁距离活动断层 10 km 以内要考虑竖向地震动作用。该指南和“加州断层地表破裂风险评估试用指南”还给出了相关设计准则以评估断层地表破裂位移影响。

中国抗震规范对包括桥梁在内的各类工程结构物更多的是提出对活断层的简单避让原则,尚缺少定量化计算内容,使临近活动断层的工程结构抗震设计面临困难。

### 2.6.5 桥梁抗震评价与加固技术

自 20 世纪 60~70 年代日本和美国就开始了大规模的桥梁抗震评估与加固工作,主要是加装限位器等防落梁装置。1989 年美国 Loma Prieta 地震之后,桥梁抗震评价和加固领域获得了实质性的进展,提出了以优先级评价和非线性静力分析为核心的评价方法,也发展了多种加固技术,如设置拉索限位器、钢板或纤维复合材料外包柱体、加装阻尼耗能装置等,还进行了大量室内外试验研究,在此基础上美国的联邦公路管理局(FHWA)总结出版了《公路桥梁抗震加固手册》。日本 1995 年阪神地震后提出《公路桥梁抗震设计和加固指南》,在日本全国范围内大量开展桥梁抗震加固工作,至 2011 年日本东近海强烈地震,抗震加固后的桥梁都表现出良好的抗震性能。

桥梁抗震评价在确定性方法基础上正逐步地向地震易损性分析方向发展,即从概率角度评估桥梁在不同地震水准下的损伤水平,通常用易损性曲线表述。各国已经提出了可综合考虑地震动、桥梁结构构件及系统不确定性,基于大量非线性时程分析

或增量动力分析技术的地震易损性曲线建立方法,也在积极考虑将服役期限、地基失效(液化)和经济损失估计等因素纳入。

开展既有桥梁抗震性能评价和加固是一项降低震害的卓有成效的措施,但中国尚未开展大范围的桥梁抗震评价与加固工作。

## 2.7 风-车-桥耦合振动研究

### 2.7.1 风-车-桥耦合振动系统研究的意义

随着现代桥梁跨度的不断增加以及苏通大桥、杭州湾跨海大桥、东海大桥、青岛海湾大桥、港珠澳跨海大桥等一批长大跨江跨海大桥的新建或实施,桥位处大风频袭所导致的风对通行车辆的影响问题受到了越来越多的重视。在强风作用下,行驶在振动桥梁上的车辆的安全性和舒适性以及桥梁结构安全研究不仅是一个科学问题,而且也是一个实际的工程问题,同时关于强风作用下关闭交通的临界风速标准的确定更是一个影响广泛的社会问题和经济问题。如果发生桥梁上大风所导致的行车事故,不仅会因车辆破坏、桥梁损毁、人员伤亡、交通中断、货物和人员滞留等带来直接和间接的经济损失,还会影响大众的心理,让其出行时另择他路,甚至还会带来极为不良的社会影响。

### 2.7.2 风-车-桥系统分析研究回顾

Guo等<sup>[90-92]</sup>分别提出了一套用于分析脉动风作用下公路车辆通过桥梁时车辆及桥梁的响应分析框架,但未考虑桥梁和车辆间相互的气动影响。

文献<sup>[93]</sup>首先建立了一个较为完善的风-车-桥系统空间耦合分析模型,编制了相应的分析模块,并嵌入到自行研发的桥梁结构动力分析软件BDANS(Bridge Dynamic Analysis System),然后分别建立了风环境下行驶于振荡桥梁上的车辆受到侧向突发阵风时的车辆安全性分析方法以及车辆驾驶舒适性评价方法,并进行了详尽的参数分析。

在随机车流下的风-车-桥分析框架建立方面,同时Chen等<sup>[94]</sup>首先将多轴车辆采用单轴荷载进行等效建立随机车流下系统分析框架,并对该等效方法的可行性进行了研究。同时Chen等<sup>[95]</sup>又对随机车流进行模拟,采用建立的等效处理方法研究了随机车流和风荷载下的桥梁动力行为。韩万水等<sup>[96]</sup>在高速公路交通荷载观测基础上建立了随机车流下风-车-桥系统分析框架。

在经历了对风-车-桥系统研究的不断学习积累,韩万水等<sup>[97-100]</sup>在以下方面有所创新:提出了与驾驶人调控行为和运动状态相关的侧滑力模型以及

考虑汽车坐标随动特性的驾驶人行为模型,创造性地建立了更加符合车轮与桥面接触状态本来面貌的汽车-桥梁系统侧向耦合关系;提出了基于风速风向联合分布的桥面侧风所致车辆事故概率性分析框架;将驾驶人反应行为模型引入到随机车流下的分析系统,从而将安全性和舒适性统一到一个分析框架中;采用Visual C++6.0作为开发平台,并采用动态链接库、进程通信和共享文件等技术实现界面程序与后台Visual Fortran计算程序之间的信息交互,并运用OpenGL函数库实现风环境下随机车流动态过桥可视化。

### 2.7.3 风-车-桥系统研究面临的问题

尽管各国对风-车-桥系统开展了一定的研究,但下列几个基础性的问题需要进一步的研究。

#### (1) 风-车-桥系统的气动特性

主梁、桥面附属构造物(栏杆、中央分割带及风障等)、桥塔(桥塔区域附近)以及桥面所通行随机车流的气动特性相互影响。因此,随机车流下的风-汽车-桥梁系统的气动特性试验技术和分析方法将是未来研究的重中之重。

#### (2) 风-车-桥系统耦合关系的建立和耦合机理研究

风环境下车-桥系统耦合关系是行车安全、舒适性评价和桥梁响应研究的基础,一旦耦合关系改变,整个系统响应将随之改变。当车辆行驶在侧向风作用下的大跨度桥梁时,在平均风和脉动风的作用下桥梁产生较大的侧向平均响应和抖振响应,从而显著改变车-桥系统的耦合振动特性,此外,由于汽车承受较大的侧向风力和倾覆力矩的作用,车辆施加给桥梁的荷载不仅有竖向力还有侧向力,而由于侧滑力的存在将会显著增大桥梁的侧向响应,侧滑力产生的桥梁侧向响应将会再次影响车-桥系统的侧向耦合振动特性,因此,风环境下车-桥系统的侧向响应计算是一个非线性迭代计算过程,如何从车辆动力学角度出发研究车-桥系统接触关系和相互作用机理将是未来的研究重点。

#### (3) 风-车-桥系统的随机车流特性

公路桥梁承受的交通荷载是一个十分复杂的时变的随机过程。公路交通荷载的调查分析以及风-随机车流-桥梁系统的建立应该是未来研究的重点和发展方向。现有研究已经初步建立了一个针对单主梁模型的具有考虑双向多车道、车速、横向位置、车型、车重等参数随机功能的分析系统。但是依然存在以下问题:①交通荷载调查数据不够全面,区域

代表性不强;②系统分析时车辆的气动参数没有考虑桥面随机车流之间气动干扰的影响;③公路桥梁活荷载种类繁多,目前的车辆动力分析模型还不能够涵盖现有公路桥梁上行驶的典型车辆,并且典型车辆悬挂系统参数有待进一步确定;④分析系统的集成、动态可视化及软件实现尚需要进一步研究。

#### (4)风-车-桥系统的评价准则

风-车-桥系统本质上是多重随机激励作用下的时变系统,系统输入包括路面粗糙度、脉动风和随机车流。系统输入非平稳性和系统的时变特性必然使系统输出的响应为非平稳过程,另外系统自身的非线性因素和每次仿真分析长度限制进一步加剧了系统响应的非平稳特性。因为系统响应是非平稳的,如何可靠地评价桥梁的振动响应及系统的安全性是一个非常复杂的问题,因此车辆行驶安全、驾驶舒适性、桥梁振动水平和安全方面的评价体系需要进一步的研究。

#### (5)风-车-桥系统的疲劳问题

在桥梁整个使用寿命期内,桥梁的强度和空气动力稳定分析通常只需确定最不利情况即可,但是疲劳损伤是一段时间内各种荷载作用下的构件使用状态的体现。在桥梁运营过程中承受的风和随机车流荷载是导致桥梁构件疲劳的主要因素,然而基于风-车-桥系统耦合振动分析进行疲劳损伤预测的研究几乎没有<sup>[101-103]</sup>。基于风-车-桥系统的疲劳研究,一个挑战就是系统含有较多的不确定因素,比如运营期间桥梁的力学性能指标,随机车流和风荷载的作用存在很大的变异性,如何考虑这些变量从而得到较符合实际的疲劳分析模型需要进一步研究。

### 2.8 拱桥的现状与技术发展趋势

目前,石拱桥、钢拱桥、钢筋混凝土拱桥和钢管混凝土拱桥跨径的世界纪录均在中国,它们分别是主跨径 146 m 的山西丹河新桥(石拱桥)、主跨径 550 m 的上海卢浦大桥(钢拱桥)、主跨径 420 m 的万州长江大桥(钢筋混凝土拱桥)和主跨径 460 m 的巫峡长江大桥(钢管混凝土拱桥)。

桥梁设计大师林元培院士指出“中国的斜拉桥与拱桥已进入国际先进行列”。原国际桥梁协会主席伊藤学在 2006 年接受《桥梁》杂志记者采访时说:“中国的拱桥水平非常高,我对拱桥的技术十分钦佩”。近年来,在**高强高性能材料应用**、组合结构应用和施工技术方面,拱桥有新的发展。

#### 2.8.1 高强高性能材料应用

对于大跨混凝土拱桥,减轻自重成为其应用可

行性的关键。采用活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete,简称 RPC)是最具潜力的一种方案。以 420 m 的万州长江大桥为原型的 RPC 拱试设计研究表明,与原桥相比,主拱圈可减轻自重 40%,且可采用悬臂拼装法施工,而不必采用**劲性骨架**施工法,可节约钢材 1 500 t 左右。RPC 拱的模型试验研究表明,RPC 模型拱破坏之前具有明显的塑性变形,属于塑性破坏,未发生类似于 RPC 轴压试验构件的脆性破坏。RPC 应用最大的障碍是它的材料造价较高,为此开展的最优性价比的研究已取得阶段性的成果。

#### 2.8.2 组合结构应用

为减轻结构自重,国外近 20 年修建的混凝土拱桥,拱上建筑多采用钢-混凝土组合结构。对比分析表明,跨径 204 m 的克罗地亚 Skradin 桥整个结构的自重比该国跨径为 200 m 的原 Maslenica 桥减轻了 35%。同样,拱上立柱也可以采用钢管混凝土或钢立柱。

主拱结构采用钢-混凝土组合结构,它比拱上建筑更为有效,同时还有利于施工。为此,中国提出了多种形式的钢-混凝土组合箱拱结构包括:重庆交通大学提出了钢箱-混凝土组合拱桥;福州大学提出了钢腹板(杆)-混凝土组合拱新桥型。

#### 2.8.3 施工技术

拱桥的发展是与施工技术的进步分不开的。钢管混凝土**劲性骨架**法是使中国混凝土拱桥跨径取得重大突破、且一跃而成为世界第一的关键所在。但该方法施工工序复杂,在大跨拱桥施工中已较少使用。当这一方法应用于钢腹板(杆)-混凝土组合箱拱时,由于没有腹板混凝土需要浇筑,将大大减化施工,将会使这一方法重新焕发活力<sup>[104]</sup>。

近年来钢拱桥、钢管混凝土拱桥中,大节段吊装的方法得到了应用。广州的新光大桥主跨拱肋分五大段,采用同步液压提升技术安装施工,其中中段拱肋组拼轴线长度为 168.0 m,约 2 850 t,用 16 台 3 500 kN 同步液压千斤顶提升,提升总质量 3 078 t,高度 85.6 m。

对于大跨度的混凝土拱桥,悬臂施工+劲性骨架的组合施工方法是一种常用的方法,即拱脚段采用悬臂法施工,拱顶段采用**劲性骨架**法。法国米勒 602 m 拱桥方案与日本 600 m 混凝土拱桥试设计也都建议采用这种施工方法。对于多室箱、分离式肋的拱结构,还可以考虑横向的分阶段施工。在克罗地亚的 1 000 m 拱桥试设计中,就提出了横向分阶

段施工的方案<sup>[105]</sup>。这些施工方法值得研究。

#### 2.8.4 小结

在跨径超过 300 m 的桥梁中,一般情况下斜拉桥具有更强的竞争能力;而在 200 m 跨径以下,现代预应力连续刚构因其施工优势而受到欢迎。因此,拱桥的竞争能力已较过去有很大的削弱。应该说,作为引领桥梁技术进步的拱桥时代已经过去。大跨径钢拱桥在道路桥梁中已丧失经济上的竞争力,因此对超越现在的跨径应持慎重的态度,为纪录而纪录的倾向应该制止。

对于广大的山区、海岛等地区,拱桥仍是具有很强竞争力的桥型<sup>[106]</sup>。拱具有极高的美学价值,拱桥也有可能因其优美的造型而被选用。然而,中国目前存在着一种不良的倾向,桥梁设计单纯追求造型的新奇,采用复杂甚至异化的结构,而不考虑经济、功能等要求,这种不良倾向应该制止。

对于大量的还在使用中的拱桥,它们的评估、维修、加固、改造等,应引起充分的关注,并需要大量的研究与实践。

#### 2.9 桥梁耐久性与耐疲劳设计

随着人类对桥梁耐久性和疲劳失效问题认识的深入,加强桥梁的耐久性和耐疲劳设计已成为桥梁界的共识。交通运输部组织实施的混凝土桥梁耐久性重大研究计划成果将完善公路混凝土桥梁的耐久性设计、施工与维护<sup>[107]</sup>。随着公路混凝土桥梁耐久性设计规范和公路钢桥设计规范编制完成,将为桥梁耐久性和耐疲劳设计提供技术支撑。随着对大跨度混凝土桥梁开裂、下挠机理研究的深入,解决这一关键工程问题的技术措施已基本明确<sup>[108-109]</sup>。但钢桥面与腹板间隙疲劳开裂问题尚未得到彻底解决。正交异性钢桥面板作为目前大、中跨径钢桥桥面板的一种重要结构形式,由于其具有自重轻、极限承载力大、适用范围广、施工周期短和梁高低、造型美观等特点,受到了各国桥梁设计者的青睐,它的应用已成为衡量一个国家钢桥设计和制造水平的标志<sup>[110-115]</sup>。中国已建和在建的大跨径钢桥也大都采用正交异性钢桥面板。由于正交异性钢桥面板结构构造与受力较复杂,在车辆轮载的直接反复作用下易于疲劳失效。20 世纪 90 年代建成的虎门大桥的正交异性钢桥面板已出现疲劳问题(文献<sup>[50]</sup>,<sup>[116]</sup>),随着使用时间的延续,这些桥梁还将继续面临疲劳开裂的危险。中国针对钢桥面板的静力和稳定性能<sup>[117]</sup>,以及开口肋桥面板的疲劳性能已有一定的研究<sup>[118]</sup>,但对带闭口肋的正交异性钢桥面板

的疲劳机理、关键细节的疲劳应力分布特征研究较少,远远不能适应工程发展的需求。关于正交异性钢桥面板出现疲劳开裂,最早见报道的是 1966 年建成通车的英国 Seven 桥,1971 年和 1977 年在钢桥面板中发现了 3 种焊接细节的疲劳裂纹。德国的 Haseltal 和 Sinntal 桥分别于 1960 年和 1968 年投入使用不久后钢桥面板也出现了疲劳裂纹。此外,日本、美国、荷兰、法国等国也都发现了钢桥面板的疲劳开裂事例。针对钢桥面板部位出现的这些疲劳裂纹,自 20 世纪 70 年代起,欧洲、日本、美国等先后对钢桥面板进行了大量的疲劳试验研究,并在其设计规范中明确要求对钢桥面板进行抗疲劳设计<sup>[119]</sup>。现代正交异性钢桥面板中存在大量疲劳敏感部位:挖孔区域、加劲肋与横隔板的连接端部和加劲肋与盖板的连接等。在车辆荷载作用下,横隔板和加劲肋腹板的面外变形,使得挖孔区域和加劲肋与横隔板连接端部形成复杂的面外和面内组合应力;另外,闭口加劲肋只能在外侧与盖板进行焊接,熔深过大可能把加劲肋腹板烧穿,熔深过小可能导致熔透不足,从而过早地出现疲劳裂纹。正交异性钢桥面板的疲劳性能复杂,试验研究是桥面板疲劳研究的可靠手段,廉价高效的数值分析也必须通过试验加以验证。目前中国对正交异性钢桥面板的疲劳性能研究空白较多,可供工程设计参考的足尺疲劳试验数据十分有限,在一定程度上制约了钢桥面板的应用。近年,长安大学开展了钢桥面板的足尺疲劳试验,试验研究结果为钢桥面板的抗疲劳设计提供了有益参考(文献<sup>[113]</sup>~<sup>[115]</sup>)。

钢桥的疲劳可分为荷载疲劳和面外变形疲劳 2 类,前者只需计算荷载作用下钢梁的面内应力即可进行疲劳设计与分析,这已被工程师所熟知;但面外变形疲劳并不与荷载直接相关,而是取决于细节处的局部面外变形。已有研究表明钢板梁桥、钢箱梁桥、钢框架桥墩等都存在有大量面外变形引起的疲劳裂纹<sup>[120-123]</sup>。美国里海大学学者的最新研究结果(文献<sup>[112]</sup>)表明,钢桥中的疲劳裂纹 90% 为面外变形疲劳裂纹。钢桥中出现如此大量的面外变形疲劳裂纹,主要原因是钢桥设计时一般只考虑面内变形与应力,并未考虑腹板间隙处面外变形导致的局部数值很大的二次弯曲拉应力。钢桥出现的严重面外变形疲劳问题引起了研究人员的广泛关注,以 Fisher 教授为代表的外国学者(文献<sup>[122]</sup>,<sup>[123]</sup>)对此开展了深入的研究。中国学者黄侨等在文献<sup>[120]</sup>中对焊接钢桥的面外变形疲劳成因与对策进

行了综述介绍;王春生等在文献[121]中对连续钢板梁桥的腹板间隙面外变形疲劳应力进行了数值分析,通过参数分析确定了影响面外变形疲劳应力的主要结构参数,并探讨了超载车辆荷载对腹板间隙面外变形疲劳失效的影响。

## 2.10 高性能钢桥与新型组合结构桥梁的研究进展

### 2.10.1 高性能钢桥

高性能钢(HPS)是一种新材料,在桥梁工程中已有工程应用。近几年来,美、日、德、加等国对高性能钢进行了深入研究,并在实际工程中大力推广应用高性能钢桥<sup>[124-128]</sup>。高性能钢(桥)具有优良的物理化学性能,其可焊性、断裂韧性、耐腐蚀性与屈服强度均有提高,从而使高性能钢桥整体造价十分经济,可节约10%的钢材;焊接时不需要预热(或预热温度较低),使工作条件大为改善,从而提高了产品制造质量和疲劳性能,并且氢致开裂的几率大为降低;高性能钢的韧性很高,低温脆断现象很难发生,同时也提高了忍受大裂纹的能力,从而为疲劳裂纹的探测、加固赢得了充裕时间;高性能钢桥的总重可以减小20%,采用普通结构钢和高性能钢组成的混合截面梁的设计更为经济、合理。由于高性能钢桥可以降低综合建造费用,亦可减小结构高度、桥头引道高度与维护费用,截止到2004年美国已有200多座高性能钢桥,AASHTO 2003版规范中规定可采用高性能钢建造桥梁,可见美国已进入HPS桥梁时代。日本的桥梁用高性能钢屈服强度分为500 MPa(BHS500)、700 MPa(BHS700)两种,BHS500适用于中小跨桥梁,BHS700适用于大跨桥梁。据1999年的统计数据,日本高性能钢已经占有所有桥梁用钢量的22%,其中耐候钢材占高性能钢的将近70%(占全部钢铁产量的15%)。2005年国际桥梁与结构工程协会(IABSE)邀请多位国际著名钢桥研究专家,共同撰写了一本关于高性能钢及其工程应用的研究报告,对世界各国在高性能钢桥受力性能研究和工程应用方面取得的进展进行了系统总结,并指出高性能钢桥具有可持续工程结构的特性,符合桥梁性能化设计发展趋势,必将拥有广阔的创新发展空间。

在国外高性能钢桥快速发展的同时,中国桥梁工程界与钢铁行业也对中国产高性能钢与高性能钢桥的建设给予了极大关注,取得了阶段性的研究与工程应用成果。中国桥梁高性能钢材生产和应用起步较晚,目前桥梁用钢以Q345q和Q370qE为主流钢种,Q420qE,Q420qD陆续采用。当前,中国钢桥

正向大跨度发展,而且多线并桥、公铁合用桥增多,桥梁恒载加大,桥梁用钢必然向高强度、高性能发展。国产高性能桥梁钢具有成本低、韧性好、强度高、对环境友好等特点,符合当今资源节约型和环境友好型社会的发展要求。近年,王春生等对高性能钢桥静力与疲劳性能开展了深入的试验与理论研究,取得了阶段性成果(文献[127],[128]);包括对中国舞阳钢厂采用控温控轧技术生产的高性能钢HPS 485W进行了一系列的材料基本力学性能、断裂韧性、裂纹扩展速率试验,焊接工艺评定与焊缝疲劳性能试验,以及混合设计钢梁抗弯性能试验、数值与理论分析;与鞍钢合作,开展Q500qE的综合力学性能与结构性能试验,并在公路桥中推广应用鞍钢生产的系列高性能桥梁钢。

### 2.10.2 新型组合结构桥梁

钢-混凝土组合梁能够满足现代桥梁结构对“轻型大跨”、“预制装配”和“快速施工”的要求,因此钢-混凝土组合梁已成为很具竞争力的桥型<sup>[129]</sup>。中国芜湖长江大桥、上海南浦大桥、福建青州闽江桥、厦门厦漳跨海斜拉桥的桥面结构以及大量的中小跨度桥梁均采用了钢-混凝土组合梁。但传统的钢-混凝土组合梁很难适应第三代桥梁结构性能化设计的基本要求,研发可满足第三代桥梁结构要求的新型高性能组合结构桥梁已成为桥梁体系创新的重要方向。将高性能钢和高性能混凝土有机组合形成高性能钢-混凝土组合结构桥梁,既能同时发挥高性能钢和高性能混凝土的力学性能,又能充分利用组合结构的优越结构性能,因此高性能钢-混凝土组合结构桥梁是新材料和新结构的有机结合,在新世纪桥梁工程领域必将具有广阔的应用前景(文献[52])。

清华大学聂建国教授率先进行了钢-高强混凝土组合梁的静力性能试验研究,研究表明高强混凝土用于钢-高强混凝土组合梁并考虑组合作用可行,钢-高强混凝土组合梁具有良好的受力与变形性能<sup>[130]</sup>。长安大学王春生等<sup>[131-134]</sup>对高性能组合梁、新型管翼缘组合梁、钢-高性能混凝土组合桥塔进行了大量试验、数值与设计简化方法研究,完成了带圆管、方管翼缘和波形腹板的新型管翼缘组合梁抗弯、抗剪系列试验与理论研究,研究结果表明高性能管翼缘组合梁具有良好的延性和稳定性,结构整体性能优于采用工字形钢主梁的传统组合梁;针对不同断面与钢混连接构造的高性能组合桥塔节段开展了承载力试验与理论分析,试验结果表明钢-高性能混凝土组合桥塔具有承载力大、稳定性好的特点。



## 2.11 桥梁疲劳使用安全监测、评估新技术

在过去的50年里,中国修建了数十万座桥梁,这些桥梁承受着日益繁重的车辆荷载,交通量的激增、过重的轮载和环境侵蚀作用导致桥梁出现了疲劳开裂、腐蚀疲劳失效等突出病害,由此造成的桥梁构件的疲劳损伤不容忽视,由于车辆超载或过度损伤导致整座桥梁垮塌的灾难性事故也时有发生,既有桥梁的疲劳寿命和使用安全日益受到桥梁管理部门的高度重视<sup>[135-138]</sup>。为了确保既有桥梁的安全使用,开展既有桥梁疲劳寿命和使用安全评估研究具有重要的理论意义与工程实用价值。但在中国现行公路桥梁设计与评估规范中,目前尚无系统的桥梁疲劳设计与评估规定。因此,研究钢桥、混凝土桥梁疲劳性能,探究疲劳损伤的智能监测新技术,给出抗疲劳设计与疲劳安全评估规定十分必要。正在修编的《公路工程结构可靠性设计统一标准》已提出钢桥、混凝土桥梁疲劳设计与疲劳可靠性评估的基本规定。

文献<sup>[139]~[141]</sup>对桥梁疲劳损伤的声发射监测技术和结构动位移精细化测量技术进行了试验与实测研究,为桥梁疲劳使用安全评估提供了损伤信息。经过系统、深入研究,文献<sup>[135]</sup>,<sup>[137]</sup>建立起了既有钢桥疲劳使用安全评估的确定性与概率性方法,并成功应用于多座既有钢桥疲劳寿命评估与维护策略的确定。文献<sup>[138]</sup>提出了既有混凝土桥梁疲劳寿命评估模型与方法,并应用于实桥疲劳评估。文献<sup>[142]</sup>深入研究了基于无损探测信息的既有钢桥疲劳可靠度更新评估方法,编制了更新评估程序,实桥评估结果证实了更新评估方法的可靠性。文献<sup>[135]~[142]</sup>研究成果为完善既有桥梁疲劳使用安全监测与评估系统奠定了基础。

## 2.12 桥梁桩基设计理论发展与面临的挑战

### 2.12.1 深水桩基受力计算研究

伴随着桥梁地地质条件的日益复杂,桥梁桩基结构尺寸也越来越大。如欧美及日本的钢管桩长度已达100 m以上,桩径超过2 500 mm;中国苏通大桥主桥2个主墩基础分别采用131根直径2.5~2.85 m,长约120 m的灌注桩群桩基础;南京长江二桥主塔墩基础反循环钻成孔灌注桩直径为3 m,深度竟达150 m<sup>[143-144]</sup>。传统计算方法主要以地基土的承载能力来控制设计;对于这种大跨径桥梁深水桩基,往往其承载能力尚远未达到极限状态,而受到上部结构的容许变形限制。因此按变形控制基桩承载力已成为大跨径桥梁深水桩基设计理论的一个

重要发展方向。

荷载传递法在工程中应用广泛,常用的桩土界面荷载传递模型有双曲线模型、指数模型、理想弹塑性模型等<sup>[145-146]</sup>。文献<sup>[147]</sup>在采用三折线型传递模型的基础上,实现了各种土体模型的统一。

然而,大跨径桥梁深水桩基侧摩阻力的发挥机制、超长大直径桩的有效桩长以及相邻桩基由于工程地质条件差异而导致桩顶沉降差异等问题仍然是目前桩基设计理论未能妥善解决的难题之一。

委内瑞拉Marracaibo大桥中应用的桩端后压浆技术<sup>[148]</sup>,在砂土和粘土中,其极限承载力提高幅度可达到2~3倍。中国苏通大桥群桩基础采用桩端后压浆技术进行加固,试桩经过压浆试验表明,总侧阻提高幅度为12.39%~52.87%,端阻提高1.46~6.21倍。侧阻力增量对桩极限承载力的贡献为56%~88%。总体来说,桩端后压浆在改善超长桩荷载传递特性等方面具有非常明显的效果<sup>[149-151]</sup>,对桩端承载力有一定的提高<sup>[152-154]</sup>,能避免盲目增加桩长以减少沉降的做法<sup>[155-157]</sup>,但后压浆后桩身的荷载传递机理及其理论计算模型等也尚需进一步探讨。

### 2.12.2 软弱地基中桥梁桩基受力研究

当桩周欠固结软土沉降大于桩基沉降时,桩土界面的摩阻力不仅不能提供抗力,反而成为作用在桩上的荷载——即桩侧负摩阻力<sup>[158-160]</sup>。各国因负摩阻力考虑不周而导致的工程事故较多。在理论上,已有不少研究工作,试验研究工作因其复杂性而少有报道。

软土流变引起的地位移也是导致桥梁桩基失效、给工程结构带来严重安全隐患的一个重要因素,该方面的研究有待进一步深入<sup>[161]</sup>。

此外,因桩侧土体水平抗力较弱,基桩在竖向荷载作用下犹如细长杆件将产生屈曲破坏。其理论研究国外已有不少解答,如Timoshenko解、模拟计算机解等、幂级数解、初始后屈曲性状的研究等。中国学者也进行了较多探讨,如文献<sup>[162]~[163]</sup>的能量法临界荷载解,文献<sup>[164]</sup>采用二次摄动技术。

### 2.12.3 岩溶区桥梁桩基受力研究

桩端岩溶顶板厚度是制约岩溶区桩基设计的主要因素。影响岩溶的因素具有多样性和模糊性,从而给该类桩基设计带来了极大的困难。

岩溶区基桩的嵌岩深度确定往往是决定基桩是否穿越“葫芦串”溶洞的主要因素。目前在工程实践中对岩溶区嵌岩桩的荷载传递机理尚缺乏足够的认

识,通常是以桩端阻力为主,而忽视了桩侧阻力的有利作用。文献[165]提出将桩顶沉降量作为设计控制指标确定基桩嵌岩深度的计算方法。

岩溶区桩端溶洞顶板稳定性分析方法多为传统半定量或定性法<sup>[166-175]</sup>。由于岩溶地区地质条件的复杂性,其影响因素众多,如桩基础上部承受荷载、桩径、溶洞跨度、裂隙发育程度、施工工艺等因素均对桩基的稳定性具有一定的影响,其研究均有待于进一步深入与完善。

#### 2.12.4 陡坡段桥梁桩基受力研究

对于山区公路,为满足公路线形的需要及保护自然环境,较多基桩置于高陡边坡段甚至悬崖峭壁上。高陡边坡上桥梁桩基具有承重与阻滑双重功能,其受力性状远比抗滑桩和平地两侧无坡度的单一倾斜受荷桩要复杂得多<sup>[176]</sup>。

坡体岩土体等对基桩产生的推力是该类桩基的主要荷载之一,近年来各国学者进行了一定的理论与试验研究<sup>[177-179]</sup>。滑坡推力分布受滑坡的类型、滑动面形状、部位、地层性质、基桩变形情况及地基系数等综合因素的影响,分布相当复杂<sup>[180-181]</sup>,目前,在抗滑桩研究领域,一般将滑坡推力的分布简化为三角形、矩形和梯形3种<sup>[182-183]</sup>。实际上上述3种假设与实际情况均存在一定的差别。而抛物线方程则基本反映上述规律,中国一些滑坡现场试桩的实测资料也证明了这一点。

陡坡段桩基外侧土体抗力的发挥也是目前该类桩基设计计算面临的问题之一<sup>[184]</sup>。文献[185]采用有限差分解研究了双桩结构的 $P-\Delta$ 效应(荷载-位移效应)。

针对高陡斜坡上桥梁桩基稳定性分析的研究鲜有报道。为了满足山区高速公路快速发展及对技术支持的需要,有必要进一步完善现有规范,对高陡边坡上桥梁桩基础的稳定问题做更深一步的研究。

#### 2.12.5 桥梁桩基动力分析研究

桩基动力设计计算理论取得了长足的进展,如动力作用对于桩基受力性状、承载力及沉降等的解析、数值分析、试验分析、以及工程实测等多种方法与技术等。

可液化场地的桥梁桩基震害是造成重大经济损失和人员伤亡的主要原因<sup>[186-188]</sup>。2008年汶川地震震中映秀镇附近、临近成都郫县等地区均发现较大面积砂土液化,并且液化引起喷砂冒水、地表裂缝、地面沉降、侧移等现象十分普遍,造成了许多桥梁桩基的破坏。文献[189]综述了日本地震过程中

的桩基破坏形式,例如振动效应、液化及运动等。文献[190]系统介绍了单桩和群桩在地震载荷作用下线性和非线性动力学的理论与计算方法,以及一些定性的结论,并比较了各种理论的优缺点,考察了桩-桩、土-桩-承台、土-桩-结构、土的液化及相互影响等。

桩-土-上部结构动力相互作用的研究是近年来现代桥梁桩基动力研究领域的热点问题之一。文献[191]通过对土-桩-框架结构1/2比例模型进行了动力相互作用的试验研究。文献[192]通过离心机动力模型试验,观测了饱和砂土层中单桩-上部结构在强震中的反应,并通过数值方法导出了桩土水平相对位移和侧向土阻力的演变。文献[193]为了研究抗滑桩加固边坡的地震响应和桩土相互作用规律,利用土工离心机及专用振动台动态进行了砂土边坡动力离心机模型试验。文献[194]通过振动台模型试验,探讨了相互作用对结构动力特性和结构地震反应的影响,并进一步对土-桩-结构系统进行了振动台模型试验。

总之,由于桩基非线性振动及非线性动力学特性的复杂性,以及桩周岩土体非线性粘弹性,使得对桥梁桩基动力响应、动力稳定性和动力学行为等问题的研究十分困难,粘弹性桩基非线性动力学特性及其与上部结构、桩周岩土体共同作用的研究是该领域的热点和难点。

#### 2.13 小结

项海帆院士指出:不要满足于规模大和速度快的成绩,而要在创新、质量和美学上下功夫。只有创新的成果才能赢得国际同行的赞服,才能真正提高中国桥梁的国际地位。21世纪中国面临更大规模的桥梁建设高潮,抓住这个机会,可能使中国从桥梁大国成长为桥梁强国。

### 3 隧道工程

中国公路隧道技术水平的真正发展源于20世纪末的近15年,随着一批长大山岭隧道的建成通车,在形成宝贵研究成果的同时开启了地下工程领域建设的新篇章。进入21世纪近10年,公路交通网逐渐向西部崇山峻岭穿越,向离岸深水延伸,向城市发展。现从修筑规模、结构形式、设计理论、施工技术、运营监控及维修养护等角度,对公路隧道研究成就及展望综述如下。

#### 3.1 修筑规模

公路隧道修筑规模不断扩大,主要体现在隧道

数量、长度、断面面积和隧道群的增加。中国公路隧道正以年均 350 km 的速度递增,截至 2010 年底,中国有公路隧道 7 384 座、5 122.6 km,其中,特长隧道 265 座、1 138 km,长隧道 1218 座、2 020.8 km。世界公路隧道的长度已从 20 世纪初的二三千米已发展到现在的数十千米,目前世界上长度排名前三的公路隧道分别是挪威的洛达尔隧道(24.5 km)、中国秦岭终南山隧道(18.02 km)和瑞士圣哥达隧道(16.9 km)。随着交通流量的不断扩大,公路隧道断面面积不断增大,其数量也日趋增多。美国贝克隧道断面面积达 467 m<sup>2</sup>,日本名神高速公路三车道隧道断面面积达 170~230 m<sup>2</sup>,中国广州的龙头山隧道断面面积达 230 m<sup>2</sup>[195]。中国公路隧道长度和断面增大的同时,在公路里程中所占比重也显著增大,在浙江、四川、重庆、陕西等地出现了大量的隧道群。浙江省雨台温高速公路猫狸岭隧道群,全长 8.17 km,隧道占 64%;重庆市渝湘高速公路白马至武隆段羊角隧道群,全长 24.76 km,隧道占 85%<sup>[196]</sup>。

### 3.2 结构形式

隧道支护结构及断面型式的多样化呈现是公路隧道技术进展的一个重要方面。从以新奥法(NATM)为理论基础的复合式衬砌<sup>[197]</sup>发展到以挪威法(NTM)为基础的单层衬砌结构<sup>[198]</sup>,以及配合盾构法修筑的装配式衬砌是当前公路隧道的主流型式。而近年来由于线形修正、防蚀、防撞等特殊要求,盾构工法双层衬砌开始逐渐进入工程技术人员的视野。多年来,双洞分离式方案一直以来是公路隧道(尤其是高速公路隧道)的主流布局方式,但遇到受地形条件限制、路线总体线形要求或特殊的桥隧相连等情况时,连拱隧道与小净距隧道则应运而生。金(华)-丽(水)-温(州)高速公路的建成是中国连拱隧道在防排水工艺、中墙型式、修建技术、设计理论等方面技术发展的一次飞跃<sup>[199]</sup>,为中国后期连拱隧道的推广应用奠定了基础。随着京福高速公路上小净距隧道大量修建及紫坪铺隧道的建成通车,小净距隧道在中岩墙加固、施工方法、荷载理论等方面也取得了长足的进步<sup>[200-201]</sup>。除此之外,交叉岔隧道、螺旋隧道等新型结构形式也相继出现并带来了系列新的技术问题。

### 3.3 设计理论

以钻爆开挖为主的矿山法是公路隧道发展的先导,伴随着施工工艺及岩体力学的发展,具有深远影响的新奥法基础理论被提出。但实践表明,以锚喷

支护的实践和岩体力学理论为基础的新奥法并非适用于任何岩体环境,应结合具体情况做进一步的探索研究。挪威法便是这一建设理论的进一步发展,但以 Q 系统为基础的围岩分级结合高性能材料构成隧道支护体系的挪威法如何与中国的实际情况相结合并在公路隧道中推广应用一直是困扰工程界的一个难题。进入 21 世纪以来,随着工程建设规模的逐渐加大,以新奥法与挪威法为基础理论的隧道设计与施工理念已不能满足日益复杂的隧道工程建设要求,以压力拱理论和新奥法为基础的新意法(NITM)<sup>[202]</sup>随之产生,并且逐渐得以推广。

基础理论发展的同时带来了公路隧道设计理论与方法的革新,设计方法同样经历了由工程类比法、收敛-约束法、荷载-结构法、地层-结构法到信息化动态设计法的变迁。但由于地下工程围岩的复杂多变性,各种设计理论与方法均有各自的适用性与局限性。难以全面适应特殊复杂的地下工程环境,因此,如何将已有的建设、设计理论与中国公路隧道的具体特点进行有机融合,创建一套适合中国国情的“隧道修建法”理论体系与设计方法是中国业界学者、专家面临的重大问题之一。

公路隧道的设计理念也在不断更新。起初的隧道设计以保证施工和运营安全为主,很少考虑到景观问题。随着社会对环境景观的日益重视,隧道景观设计成为公路隧道设计的重要内容之一<sup>[203-205]</sup>。目前,对于隧道景观的研究多集中于洞口景观,对于洞内景观的研究较少,秦岭终南山公路隧道特殊灯光带的实施,为洞内景观设计开启了先河。目前,公路隧道的设计理念正朝着更加人性化的方向发展。

### 3.4 施工技术

目前,隧道主要施工方法有钻爆法、掘进机法(TBM)、盾构法、沉管法等。

#### 3.4.1 钻爆法

中国山岭公路隧道普遍采用新奥法的指导思想以钻爆法进行施工。钻爆法中常用的全断面法、台阶法、环形开挖留核心土法、双(单)侧壁导坑法、中隔壁法(CD法)、交叉中隔壁法(CRD法)等开挖方法,已经日渐成熟,基本可确保普通隧道施工的安全。但是,随着公路隧道的修建长度及埋置深度不断增大,隧道的长、大、深埋等特点日趋明显,岩爆、大变形等系列地质灾害问题频发,并由此开展了大量研究工作,取得了系列研究成果。同时,向高海拔地带的过渡是公路隧道近年来另一个发展趋势,抗冰冻问题随之也被提到了议事日程。

### 3.4.2 TBM 法

从 20 世纪 50 年代开始,国外 TBM 研发制造与应用取得了突破,真正走向了实用并在实际施工过程中得到长足发展,目前已经成为一种成熟的隧道施工设备并发展为一项重要的隧道施工技术和方法。欧美国家隧道施工首选 TBM 法,不仅仅是长大隧道,即使长度为 3~4 km 甚至更短也会优先选用 TBM 法施工。小 TBM 快速进行导洞的掘进,后部用钻爆法扩大,该组合造价低,灵活方便,成洞速度比全断面钻爆法提高 2 倍以上,能充分发挥 TBM 和钻爆法各自的优点,将是 21 世纪施工新模式。随着中国 TBM 研发、生产水平的提高,在以后的山岭公路隧道中,TBM 法将逐步增多,对于大断面隧道的施工,势必也将用到 TBM 与钻爆法相结合的施工方法。

### 3.4.3 盾构法

随着现代盾构装备技术的长足进步,盾构法逐渐成为应对软弱地层、跨越江海等复杂困难条件的主要施工工法,并在世界范围内公路隧道的建设中得到了大量应用<sup>[206]</sup>,如著名的日本东京湾横断公路隧道、德国易北河第四隧道等。尤其是近年来,以武汉长江隧道、上海延安东路隧道、上海崇明长江隧道、南京长江隧道、杭州钱江隧道、杭州庆春路隧道等为代表的一大批大型水下盾构公路隧道工程在中国长江中下游以及长三角水域陆续营建,这些大型越江公路隧道通常具有 10~15 m(甚至超过 15 m)的大断面,埋深浅、承受水压极高,设计与施工难度极大,把中国盾构法修建公路隧道的规模和修建技术推进到了新的高度。

在盾构法公路隧道结构分析方法方面,早期的分析方法均将隧道结构简化为二维或假三维问题,由于断面增大、管片结构尺寸增加,采用三维壳体和实体开展的精细化分析方法得到了大量应用,并逐渐在中国形成了“梁-弹簧模型进行管片结构内力总体计算,壳-弹簧-接触模型进行块体结构空间应力分布精细分析”的综合分析方法。在结构型式方面,装配式衬砌一直是各国盾构法修筑的隧道所采用的主要衬砌结构形式,由于抗震、线形修正、防蚀等要求,双层衬砌开始出现。在结构防水措施方面,随着中国多座越江盾构法隧道的修建,逐渐形成了由管片自防水、管片外涂层防水、接缝防水,注浆孔、螺栓孔防水与壁后注浆、盾尾充填注浆防水等共同构成的多道防水技术体系。在盾构法公路隧道施工技术方面,随着中国南京长江隧道、上海崇明长江隧道等

大型盾构隧道工程的相继贯通,中国在软土地层、高透水砂卵石地层以及软硬不均地层等多种环境条件下超大直径泥水平衡盾构施工时开挖面稳定问题<sup>[207-208]</sup>、掘进过程中的流固耦合问题<sup>[209-211]</sup>、结构上浮机理及控制对策<sup>[212]</sup>、盾构机长距离连续掘进<sup>[213-214]</sup>等方面有了巨大的突破,极大地推进了盾构法修筑公路隧道的技术水平。

### 3.4.4 沉管法

中国采用沉管法修建公路隧道起步较晚,但无论工程规模还是工程难度都已跻身世界前列,如中国台湾高雄港海底隧道、香港东港跨港隧道、宁波甬江隧道、广州珠江沉管隧道、上海外环越江隧道等,单节管段长度不断增加,断面越来越大,隧道地基适应性也越来越广,尤其是近期在建的港珠澳跨海大桥岛隧工程沉管隧道,全长 6.753 km,是世界上最长的沉管隧道,其单节管段长度最长达 180 m。目前,在地基处理技术方面,应用较多的为荷兰在 20 世纪 70 年代发明的压砂法与日本在 20 世纪 70 年代推出的压注混凝土法和压浆法。在防水技术方面,从早期的忽视底板防水,采用刚性节段接头的方法,转变为考虑节段接头作用机理,可满足高水压、长寿命的系统防水体系。在抗震设计方面,逐渐从柔性管节接头结构设计向采用多质点-弹簧模型或动力时程法设计迈进。在施工技术方面,攻克了回淤、流急漩涡、纵向不均匀沉降、混凝土温控浇筑以及长大管节寄放、浮运和沉放等多项技术难题,极大提升了沉管法修建公路隧道的技术水平。

### 3.5 营运监控

由于隧道特殊的结构和环境条件,为了保证洞内行车的舒适性与安全性,需要对隧道营运进行以通风、照明及防灾救援控制为核心的智能监控。中国成渝高速公路缙云山隧道、中梁山隧道的建成运营使中国采用纵向通风的公路隧道长度首次突破了 3 km,中国秦岭终南山隧道采用竖井送排方式使纵向式通风长度突破了 18 km。这种采用竖(斜)井或平导送排风的通风方式理论上可不受隧道长度的限制,从而大大延伸了纵向式通风的适用长度。公路隧道通风控制方法目前逐渐由固定程序控制、后馈式控制逐渐向智能控制转变<sup>[215]</sup>。公路隧道照明控制目前主要采用时序控制法及光强控制法,而基于司乘人员视觉心理感受的控制法则是今后隧道照明控制的主要发展方向。该方法基于公路隧道照明虚拟现实技术<sup>[216]</sup>,测试司乘人员穿越隧道时的视觉心理主观感受,并进行视觉心理评价,根据评价结果

实现对单体隧道及隧道群照明的最优控制。

公路隧道防灾救援是以火灾工况场景模拟<sup>[217-218]</sup>、通风网络计算<sup>[219]</sup>为理论基础,通过制定各种工况下的控制预案来实施。

中国公路隧道智能监控逐渐由单隧道、单系统模式向多隧道、多系统联动控制模式转变<sup>[220]</sup>。

### 3.6 维修养护

公路隧道在后期长期营运过程中的结构安全性问题、病害问题是世界各国未来将面临的棘手难题,从修建伊始就应引入“少维修”的概念<sup>[221]</sup>,使结构物具有符合使用要求的耐久性,确保隧道营运安全,实现并延长隧道结构使用寿命成为未来地下工程工作者的主要任务。

目前关于结构耐久性问题的研究主要集中在材料自身性能方面<sup>[222]</sup>,而专门针对隧道工程耐久性问题的研究也是近年来由于既有地下工程营运期间各类问题的凸显及跨江越海工程和近海隧道的大量修建才逐渐兴起<sup>[223]</sup>。重点开展了因地下水长期侵蚀(包含海水中的氯离子侵蚀)引起的锚杆失效、钢筋锈蚀、混凝土腐蚀劣化等问题的研究,并由此对引发衬砌结构实际承载力下降进行了有益的探索<sup>[224]</sup>。

为有效治理公路隧道因病害引发的营运期结构安全性问题,各国开展了大量隧道病害检测及健康评估方面的研究<sup>[225-227]</sup>,快速无损检测技术得到了迅速发展,模糊评判、灰色理论及神经网络等各种数学手段也被引入到各种病害引起的结构健康度评估中<sup>[228]</sup>。锚杆补强、回填压注、内表面补强等维护加固技术的效果通过试验得到了进一步验证<sup>[229-232]</sup>,充实了病害隧道加固设计方案的同时填补了中国研究的空白。

随着“预防为主”、“早期发现”、“及时维护”、“对症下药”<sup>[233]</sup>维护管理理念的逐渐深入及相关科技水平的提高,针对各类特长及复杂地质条件下的公路隧道及海域公路隧道开展从施工到营运期结构健康状态全寿命长期监测的理念被提出并付诸于工程实践,实现了针对高速公路隧道结构安全与健康状态监测、数据采集与处理、评价及预警系统的全套新技术<sup>[234-235]</sup>;并呈现出从单体隧道逐渐发展为同时监控同区域同期修建的众多隧道的发展趋势,由此而提出了公路隧道结构健康安全状态的标识系统的基本理念<sup>[236]</sup>。

总体而言,公路隧道修筑规模不断扩大,公路隧道越修越长,断面面积越来越大,结构形式越来越丰

富,施工技术越来越先进,TBM法、盾构法、沉管法在公路隧道中的应用逐步增多;公路隧道设计理念越来越人性化,环保、节能、艺术等理念逐步融入到隧道设计中;运营监控及维修养护趋于智能化、系统化。虽然近年来针对公路隧道设计理论、施工技术、运营监控及维修养护方面的研究取得了一系列成果,但与此同时,也尚有诸多问题待进一步深入研究,未来还有很长的路要走。

## 4 交通工程

交通工程的发展先后经历了步行时代、马车时代、汽车时代和高速公路时代,目前已迈入智能交通时代,每一个时代交通工程学的研究内容、研究方法都经历了质的转变。在当前智能交通时代,为适应信息化、智能化的挑战和发展趋势,交通工程学的发展正在经历一场变革和自我突破,各种社会因素的影响和技术变革成了交通工程学新发展方向上的催化剂,引导交通工程学迈向学科交叉、复杂大系统、网络化等方向发展。

### 4.1 各国研究现状

#### 4.1.1 国外研究现状

##### (1) 交通流理论

道路交通流理论研究是随着交通运输和汽车工业发展起来的,是研究其随时间与空间变化规律的理论和方法体系,经历了以概率论分析方法为代表的创始阶段、以流体力学分析方法为代表的快速发展阶段和以交通流动力学模型为经典成果的稳步发展阶段<sup>[237-241]</sup>。

目前,国际上较有影响力的交通流理论是德国学者 Helbing 和 Kerner 提出的三相交通流理论,该理论用物理学中相变的思想来研究交通流,提出了“畅行相”、“同步相”和“堵塞相”的概念。总的来说,1980年代以来,国际上交通流理论研究进展缓慢,本质上仍沿用1950年代的跟驰模型和流体动力学模拟方法,虽在具体细节上有所改进,但总体上未见重大突破,交通流宏观理论虽有发展,但研究水平还有待进一步提高。

##### (2) 交通规划理论与方法

城市交通的发生源于土地利用,城市规划与交通规划的互动主要通过土地利用实现。20世纪70年代美国交通部提出了“交通发展和土地发展”的研究课题,揭开了土地利用和交通规划综合研究的序幕。国外学者更关注现代综合运输体系对城市形态、土地利用布局及土地价格的影响<sup>[242]</sup>。除了定

性分析外,交通对土地利用的定量关系模型也成为研究的热点<sup>[243]</sup>。这些模型中大多将交通需求作为影响土地利用的变量,计算交通设施引起的居住就业数量变化和空间分布。自从 Mitchell 和 Rapkin 提出城市交通是土地利用的函数以来,人们从对狭义的土地利用与交通关系的研究扩展为对广义的城市形态与出行行为关系的探讨,比较不同城市形态和结构对交通需求、交通模式、交通出行特征的影响<sup>[244]</sup>。

在城市交通规划理论的核心——交通需求预测方面,国际上普遍采用“四阶段”模型,但由于城市个体出行行为特征随着社会信息化等影响所表现出的差异越来越大,国际学术界已开始反思传统的“四阶段”交通需求预测方法在新环境下运用的可行性,不少学者通过建立基于出行活动的组合分析模型研究出行目的、出行分布及方式划分等环节间的作用关系,为交通需求预测提供了新的思路<sup>[245]</sup>。

在交通供需关系方面,国际上主要从宏观和微观 2 个层次开展研究。宏观层次通过确定城市土地利用、交通网络结构和交通政策等的重大发展方向来引导城市交通需求和交通供给的分布,强调交通引导城市发展的 TOD 模式至今仍是研究的热点。微观层次主要通过交通网络均衡理论研究交通需求与交通供给在城市空间相互作用的关系,如 Wardrop、Beckmann 等人提出的交通网络用户均衡理论和系统最优理论,并由此衍生出交通分配的模拟算法和解析模型、Logit 模型、组合网络模型、随机均衡分配模型、动态分配等模型及相关算法相继提出并被广泛研究<sup>[246-249]</sup>。近年来,功能匹配与耦合理论在交通领域也有了初步应用,使得交通需求与交通供给、城市土地利用与交通出行之间的互动关系研究更为深入。

公共交通作为运输效率最高、能源消耗最少的出行方式,自 20 世纪 60 年代以来一直是各国学者研究的热点,并直接影响了一些国家(如巴西等)城市布局与交通设施的结构调整<sup>[250]</sup>。相关研究主要集中在公交线网优化理论、公交客流预测与分配模型、公交运营调度方法等方面<sup>[251]</sup>。随着公交网络结构复杂度的增加,在公交线网布设上由最初的经验化方法逐步向分层分级的综合优化方法转变。各国学者针对公交网络的特点,分析了更广泛意义下公交用户的出行行为,建立了基于有效超级路径的 Logit 分配模型,从而推动了公交客流分配技术的发展。同时,对城市公交优先通行技术进行了大

量研究,以期提升公交系统的通行效率。

### (3) 交通安全

总结国外道路交通安全研究发展历程,大致经历了交通事故统计分析与安全评价、道路交通事故预测、道路交通事故分析与预防研究等阶段,在每一个阶段都产生了一系列分析方法和指标。

道路交通事故统计分析研究过程中,产生了事故绝对数、相对数、因果分析、事故树分析、事故再现分析等方法来对事故进行分析。在道路交通安全评价研究过程中,产生了相对事故率法、灰色评价方法、模糊评价方法、模型法、事故强度分析法、质量控制法、改进的质量控制法、概率-数据统计法、冲突点法等一系列方法评价道路安全水平或管理水平。同时,在这一阶段中,事故多发点的研究工作也随之开展起来,许多国家都根据自己道路交通事故发生特点,制定了许多判定事故多发点的标准以及治理改善措施,但这些研究和改善多是从事后进行研究和改造,缺乏事先控制。

在道路交通事故预测研究中,人们从宏观和微观两方面入手,提出了一系列事故预测技术,如判断法、时间序列分析法、回归分析法、灰色预测法、组合预测法、多角度交通事故预测法等,这些方法无疑对事故改善和预防打下了良好基础。

在道路交通事故分析与预防研究中,驾驶人方面,为了改善年轻驾驶人的安全状况,美国提出了全面建立和完善驾照分布发放制度;此外,确保路上行驶的驾驶人具有充分的驾驶能力也是一个重要的交通事故预防措施;同时,人口老龄化问题让如何保障老年驾驶人的驾驶能力成为了一个重点课题。驾驶行为方面,控制侵略性驾驶一直是交通安全领域的一个关注点;此外,酒后驾车、分神或疲劳驾驶也是威胁道路交通安全的一个显著因素,因此,如何保证驾驶人在驾驶过程中处于清醒状况也是重要的研究课题。其他交通参与者方面,行人和自行车是重点关注对象,如何为行人和自行车提供安全的出行环境成为一个重要课题。车辆方面,鉴于摩托车与卡车的安全问题日益严重,目前该方面研究主要着眼于如何解决摩托车及卡车给道路带来的安全隐患;另外,对于普通车辆,也有专项用于提高车辆安全性能的研究,如对防抱死制动系统的正确使用、车内一氧化碳探测技术以及改善车辆和道路的协调性研究。道路设计与管理方面,针对事故类型,减少机动车与火车之间的碰撞事故,减少正面碰撞及跨越中央分隔带行驶到对向车道所引起的碰撞,以及确

保车辆不偏离正常行驶车道为3个研究重点;约40%的死亡事故涉及驶离道路,因此,路侧净区与减轻车辆驶出道路的事故后果也成为一个重要的研究专项;此外,道路施工区交通事故的研究现状使得其安全问题日益得到重视。

#### (4) 交通控制

道路交通控制包括公路交通控制和城市道路交通控制两方面,高速公路、城市快速路的交通控制方法已趋于成熟,如今在这方面的研究已逐渐减少;而面对交通拥挤、环境污染等一系列城市病的出现和加剧,交通控制的重点已转移到城市道路,其控制的主要手段为交通信号控制。

城市道路交通信号控制经过几十年的发展,在定时信号控制和感应信号控制方面已经形成了较完善的理论体系,但这两类信号控制方式因其固有的缺陷,面对交通拥挤问题所提出的挖掘道路资源潜在效率的要求,交通信号控制的研究热点已转移到自适应信号控制、干线/区域信号协调控制、交通信号控制仿真等方面<sup>[252-253]</sup>。此外,交通控制和交通诱导是分不开的2个主题,在城市交通规划中不可能无限制地增加道路宽度和其他辅助设施,如何在空间意义上调度交通成为了一个具有重要现实意义的研究课题,因此把交通诱导和交通信号控制有效地结合,也成为了交通信号控制领域一个重要的研究方向<sup>[254]</sup>。

在研究方法方面,因交通信号控制属于典型的学科交叉,因此其他各相关学科的研究成果都可能会给交通信号控制研究带来突飞猛进的发展。众多最新的数学、统计学、计算机科学、控制科学研究成果都已应用到交通信号控制研究中<sup>[255]</sup>,对提高道路交通网络通行效率起到了积极作用。

在交通信号控制系统方面,国外发达国家几乎都有符合自身交通特点的交通信号控制系统,其中不乏很多享誉世界的产品,如TRANSYT系统、SCOOT系统、SCATS系统等。这些比较老的信号控制系统通常依赖于传统的交通流参数:周期、步长、绿信比。在最新研制出来的交通信号控制系统中,已经转而使用相位的长度和相序来代替传统的交通流参数,如PRODYN系统、OPAC系统、RHODES系统等。

在交通检测技术方面,从传统的线圈检测已过渡到目前以视频检测、超声波检测为主,以红外线视频检测、声学检测、地磁检测、磁成像检测、激光雷达检测等为辅的检测方法上来。美国加州大学伯克利

分校率先把无线传感器网络用于交通车辆检测,使得交通预测的精确度得到了前所未有的提高。

#### (5) 交通管理

交通管理经过几十年的发展,已由交通组织管理过渡到目前的交通需求管理和道路交通应急管理等方面。

交通需求管理作为一种新型交通管理理念,它为解决城市交通拥挤问题提供了一种有效方法。交通需求管理通过合乘、停车换乘、鼓励使用大容量的公共交通系统、集中进行货物的收集和转运、弹性工作时间、用通信技术代替出行、利用城市规划减少交通、停车收费、拥挤收费、机动车排放限制等一系列措施,处理有限交通设施与不断增长的交通需求、刚性交通需求与弹性交通需求之间的矛盾,使有限的交通设施得到最有效的利用,最大限度地保证必要的出行。其研究重点主要集中在交通需求管理策略及措施、管理策略评价方法及策略的实施保障体系等方面。

在西方发达国家,道路交通应急管理已经成为整个国家危机处理相当重要的组成部分。尤其是进入21世纪后,一些发达国家把交通应急救援管理作为维护社会稳定、保障经济发展、提高生活质量的重要工作内容,美国、日本和欧盟的一些国家都已建立起了运行良好的交通应急与救援系统,目前仍在进一步完善中<sup>[256]</sup>。重大危险源辨识是交通应急管理的前提,其获取大多依赖于既有统计信息和道路上交通流检测设备采集的信息,如感应线圈、雷达、红外传感器、GPS测速仪等,近些年来无线技术成为交通信息采集的新技术和系统开发应用的新方向<sup>[257]</sup>。

美国将高速公路紧急救援的全过程称为高速公路事故管理(Freeway Incident Management),这一过程由6个部分组成,具体包括调查和取证、反应时间、现场管理、清理时间、驾驶人员信息和恢复交通时间等。在高速公路重要路段还有巡警在路上进行监视,对紧急事件进行处理;美国在管理中心设置急救中心,接到紧急电话的事故报告后,立即向最近的急救站发出指令出动救护车,或派直升飞机抢救。救护车通过无线电话与急救站、医院取得联系,及时组织救援工作。

#### (6) 城市停车

国外对城市停车问题的研究始于20世纪40年代,随着停车问题表现形式的演化,研究的重点也经历了停车需求特性、停车资源优化、停车需求管理、

停车信息化等多个阶段。

停车需求特性的研究是揭示停车行为以及开展停车交通规划、建设和管理的基础,是最早研究的领域并延续至今。

停车设施资源供给优化以车辆停放的供需平衡为主要目标,伴随着国外机动车快速增长所产生的交通问题而涌现出一批成果,又集中形成3个主要方向:①公共建筑物(商业、居住、办公等)停车设施泊位配建标准的研究,配建停车场是城市停车供给的主体,通常占据停车泊位总供给的70%左右,并和不同城市经济和机动化发展水平等密切相关<sup>[258]</sup>,国外对各种用地功能停车配建指标的制定呈现出从不断提高到约束泊位供给上限以及和停车管理措施相结合的趋势;②公共停车设施选址布局规划研究,公共停车设施以服务各种停放目的的需求为目标,是建筑物配建停车设施的重要补充,将停车便利性、最大允许步行距离、停车设施造价等作为约束条件和优化目标的选址模型和评价方法得到了广泛研究和应用,用于设施选址及泊位分配;③停车设施建造技术,由于城市用地资源的约束性,停车泊位供给形式也从地面停车向地下停车库、立体停车楼和机械式停车设备的开发和建设转化。

20世纪80年代后,停车需求管理逐渐成为发达国家重视的研究方向,世界各国许多城市的停车交通政策逐渐从尽量满足需求开始转向了使用停车需求管理策略来缓解停车矛盾。面向各种用地特性的居住停车、工作地停车、校园停车等管理方法,以及停车泊位共享、停车收费等理论方法的研究拓展和丰富交通需求管理的内容,是当前研究的重点方向。

随着信息技术的发展,智能交通技术为缓解城市停车交通问题提供了新的解决途径,德国、日本、美国分别在欧洲、亚洲和美洲率先研究和实践了停车信息诱导系统。互联网技术、无线通讯、车载导航、可变信息板等技术的开发和应用不仅可以帮助驾车者在出行前、出行途中和出行端点优化车辆停放行为选择决策、提高车辆停放效率、减少车辆寻泊过程,还为停车设施管理者提高服务质量、均衡停车供需分布提供了支持。随着信息技术的进一步发展,停车交通的智能化发展是今后研究的重要方向之一。

#### (7) 智能交通系统

智能交通系统作为提升路网通行效率、缓解城市交通拥堵和保障道路交通安全的有效手段,正越

来越受到学术界的极大关注和政府、产业界的大力支持。

美国方面,进入21世纪后,尤其是“9·11”事件发生后,美国政府将ITS的发展重点放在了信息服务、通信和安全上,并在其中增加了社会保安和车辆装载物品监控等内容。其重要理念是服务的理论,政府所有的工作就是围绕怎样为公众提供快捷、高效、安全的交通体系而逐渐展开,并进一步深化和系统化。

欧盟方面,1988年由欧洲10多个国家投资50多亿美元,联合执行一项旨在完善道路设施,提高服务质量的DRIVE计划。其含义是欧洲用于车辆安全的专用道路基础设施。目前欧洲各国正在进行TELEMATICS的全面应用开发工作,计划在全欧洲范围内建立专门的交通无线数据通信网。智能交通系统的交通管理、车辆行驶和电子收费等都围绕TELEMATICS和全欧洲无线数据通信网展开。

日本于1998年8月7日策划制定了智能交通系统(ITS)的整体设想。在推行个别子系统实用化过程中,考虑到诸多个别系统的复杂性,明确了共享情报构成要素等问题,在保证系统综合化和各系统之间的互换性的同时,还必须确保系统今后的扩张性。目前,日本已完成了符合本国国情和特点的智能交通系统整体框架的前期制定工作;并据此计划,注重该系统的综合效率,以及和各国标准化走势的和谐。

#### 4.1.2 中国研究现状

中国在交通流理论、交通规划、交通安全、交通控制、交通管理和城市停车方面的研究起步落后于国外,但发展速度较快。

在交通流理论方面,随着ITS的广泛应用及车辆动力性能的不断提升,车辆驾驶者能够获得越来越多的动态路况信息及车辆操控特性,目前交通流理论研究主要集中在动态信息对车流的影响分析及更大范围的车流流动及变化规律等方面。

在交通规划方面,中国学者从空间结构、土地利用强度等不同的角度给予了具体论述,认为两者之间存在一种相互联系、相互制约的互动作用及反馈关系<sup>[259-260]</sup>。此外,一大批学者从中国实际出发,定量研究土地利用模型、交通系统与建设用地之间的关系,在建模手段和模型结构等方面阐述了适合中国国情的城市土地利用与交通系统关系模型<sup>[261]</sup>。

交通信号控制系统的开发也取得了较大进展,以大学、科研院所和专业公司为代表的研究机构,到目



前为止开发的智能化交通信号控制系统不下 10 种,大部分都进行了商业应用,效果比较理想。甚至为了提高交通信号控制系统具备适应天气及道路环境变化的能力,交通环境检测技术也应用到了交通信号控制系统中,包括湿度、温度、能见度、冰雪检测器等。

在交通安全方面,研究理念有所转变,从事故后“治理”走向了事故前预防预警。预防包含:在道路交通设施的规划、设计过程中,运用安全评价等技术,尽可能消除潜在的事故隐患;对运营期的道路根据运营状况定期对道路上交通运行状态进行评估,根据评估情况及时对道路上可能演变成事故多发点的路段进行改善,在事故黑点形成之前改善这些路段,并将此项业务列入道路养护管理程序中;以及采取现代科技手段和信息化技术,根据实时气象条件、道路设施状况、交通流状态采取控制对策预防事故的发生。

在交通管理方面,如何通过交通需求管理来减少大型活动的出行总需求、调整出行方式和交通流时空分布,以保障大型活动的顺利举办,已成为目前中国学术界研究的热点问题。此外,通过交通需求管理的一些措施(如尾气排放限制、道路限行、牌照竞拍政策、牌照限购政策等)来压缩中心城区的机动车出行需求、缓解中心城区的交通拥堵状况,已成为中国交通工程界缓解城市交通拥堵问题的共识。

在城市停车方面,20 世纪 90 年代后研究力度有所加大,如“九五”科技攻关对大城市停车场系统规划技术进行了研究<sup>[262]</sup>,侧重对停车场现状与政策等内容的调查,并提出了停车场系统规划程序的框架,为后续研究工作奠定了良好的基础。公共建筑物(商业、居住、办公等)停车设施泊位配建标准的研究,中国也经历了由普适性标准的制定向各城市结合发展阶段的差异自行制定标准和滚动调整的过程。随着电子、机械技术的快速发展,智能化停车设施技术也在不断更新,致力于提供高效的停车泊位供给服务。

在通行能力分析理论方面,传统理论中对通行能力的研究主要集中在相对独立交通设施的通行能力研究方面,虽然能够体现交通实体与设施的微观特性和结合特性,但是不能够从更大方面或者系统层面考虑设施衔接特性和交通流影响关系。针对复杂系统的通行能力分析方法,已取得大量的理论研究成果。未来通行能力分析理论的发展,应运用交通流理论、微观仿真理论、系统分析理论,从更大层面充分考虑交通系统特性、交通实体微观特性,分析

其对通行能力的影响关系并建立切实可行的建模分析方法。

目前,中国智能交通系统的发展也非常迅速。为了推动智能交通技术的推广应用,国家“十五”科技攻关重大专项“智能交通系统关键技术开发和示范工程”确定了包括杭州、深圳、上海、北京、广州等在内的中国 10 个示范城市,在这些城市中北京和广州走在前列。在北京市已颁布的《北京交通发展纲要》明确提出到 2010 年初步实现智能化交通管理的近期目标,并将建立以智能交通系统为技术支持的“新北京交通体系”作为北京城市交通发展的长远目标。“十一五”期间,北京市投资 2 000 亿元用于交通基础设施建设,其中智能交通在交通总投资中占有 1.5% 的比例。

城市中交通管理、建设、公安等多个部门的协作都需要智能交通系统的协调管理,因此需要建设高效便捷的信息共享平台。交通管理平台也将作为目前很多城市正在建设的应急联动系统的一部分,在城市突发事件的应急指挥中起到相应的作用。城市道路管理系统中还包括信号灯控制系统、路况指示系统、车牌识别系统、道路视频监控系统等。信号灯控制系统和路况指示牌是为了帮助管理部门和车辆更了解所处的路况条件,以便进行最合理的道路管理和道路选择,提高道路运输的效率。车牌识别系统和道路视频监控系统除提高道路运输效率外,还对城市治安监控起到一定的作用。道路视频监控系统是以上系统中应用最为广泛的系统,在众多城市的“平安城市”建设中,道路视频监控已经被纳入建设范围,并将在未来的城市建设和管理中崭露头角。

## 4.2 存在的问题

### 4.2.1 城市交通拥堵日益严重

据统计,在中国 667 个城市中,约有 2/3 的城市交通在“高峰”时段出现拥堵。中国城市的交通发展有其自身的特点,对于中国的城市交通拥堵问题,专家们从多个角度进行了分析,认为产生交通拥堵问题的原因有:①道路交通特性和车流特性不匹配;②交通需求密度与交通供给密度不匹配;③道路间断流交通特性与快速公交不匹配;④城市道路的级配理论造成各路段的交通特性不匹配;⑤城市交通规划的思路与城市交通发展的客观规律不匹配;⑥动态交通设施与静态交通设施不匹配;⑦快行系统与慢行系统不匹配。

### 4.2.2 交通引起的能源和环境问题日益严重

道路交通成为中国能源需求增长最快的领域之

一,在可预见的未来,这种增长势头会更加迅猛。中国交通运输行业油品消耗占全社会油品消耗的33%。其中,道路交通工具所消耗的车用燃油约占70%。据住房和城乡建设部统计,目前中国交通能耗已占全社会总能耗的20%,如不加以控制,将达到30%。同时,机动车污染物排放成为很多大中城市空气污染的主要来源,对城市空气质量构成了严重威胁。

#### 4.2.3 交通安全问题

2011年,中国共发生涉及人员伤亡的道路交通事故210 812起,共造成62 387人死亡。从事故原因看,超速行驶、酒后驾驶、疲劳驾驶仍然是导致交通事故多发的主要原因。特别是超速行驶导致的事故死亡人数占全部死亡人数的14.2%,这个比例还是相当高的。从事故发生的地点、道路情况看,高速公路的事故仍然呈上升的趋势。交通事故是造成出行时间无法预测、出行成本增加、事故率上升、威胁人身安全、环境污染加剧、能源浪费等的一个重要原因,造成了重大的经济损失和社会影响。造成交通事故的原因很复杂,综合起来主要有以下几个方面:机动车驾驶人驾驶技术水平不高、机动车安全性能较差、群众交通安全意识和交通法规意识淡薄、道路交通安全设施不完善、道路交通安全管理与运行机制存在缺陷等。

#### 4.2.4 交通规划问题

在城市规划与交通规划的互动方面,现有研究主要针对城市规划的某一要素(如土地利用)与城市交通的单个方面(如道路建设),仅停留在研究城市规划与交通规划的单向作用机理,缺乏对城市规划与交通规划的多尺度要素、互动反馈及协调对策研究。交通需求预测方面,随着社会的高度信息化,城市居民的出行行为具有更多的选择性和复杂性,交通的出行发生、方式选择和路径选择间关系变得密不可分,城市交通需求预测理论需要朝着“一体化”或复合模型方向发展。交通供需分析方面,大部分研究成果主要限于机动化交通出行和网络流均衡方面,无法完全满足中国城市交通发展中面临的课题与挑战,同时缺乏交通需求与交通供给之间的系统耦合机理研究,缺乏对交通供需均衡和非均衡辩证关系的认识。公交优先发展方面,在传统中心城区聚焦型布线模式前提下形成的公交优先理论难以适应高强度、多样化的公交出行需求,常规公交、轨道交通以及快速公交等不同层次的公交网络在服务区域和功能层次上并未得到协调和整合。

#### 4.2.5 城市停车问题

机动车保有量的持续增长必然带来停车需求的增加,而城市有限的用地资源又决定了仅靠停车泊位供给数量的增加对于供需矛盾的缓解缺乏可持续性,甚至刺激个体机动车交通的增加,如果不加以解决,将带来更多的交通拥堵和安全隐患。充分挖掘现有道路资源以提供更多的停车泊位是很多城市应对停车供需矛盾所采取的主要措施;然而,越来越多的道路资源被用于设置路边停车位,或者道路开口供路外停车场车辆进出,不仅显著影响机动车、非机动车和行人的有序通行,而且增加了停车延误,降低交通安全性。伴随着城镇化进程的发展,人们在郊区居住、在城内工作的“职住分离”现象越来越普遍,在缺乏可替代出行方式的背景下,通勤出行对于小汽车的依赖性显著,不仅带来对居住、工作用地的停车需求压力,而且高峰时段产生大量的机动车交通,是城市停车难和交通拥堵的主要原因之一。

### 4.3 发展对策

#### 4.3.1 城市交通拥堵对策

城市交通本身是一个复杂动态的网络系统,必须从支持以人为本,以科学性为基础,以综合性为手段,以整体性为目标,进行多层次、系统化、全方位优化,才能缓解日益严重的交通拥堵,创建一个快捷、安全、高效的交通环境。缓解城市交通拥堵的对策主要从宏观层面、中观层面和微观层面3个方面来阐述。从宏观层面来讲,科学进行城市功能定位和城市规划,是缓解城市交通拥堵的根源。从中观层面来讲,合理引导交通需求是缓解城市交通拥堵的有效措施;以方式转换促增效及以系统组织促均衡使得各类交通有序的运转,达到交通需求与供应的匹配与均衡,从而达到交通系统管理缓解交通拥堵的效果。从微观层面来讲,合理有效的交通组织与管理、相关的法律法规及政策、TOD模式下的公共交通导向、合理进行硬件设施的建设、智能交通一体化发展都可以从一定程度上缓解城市交通拥堵。

#### 4.3.2 低碳交通体系

低碳城市交通是一种以低能耗、低污染、低排放为根本特征的城市交通发展模式。建设低碳城市交通系统的核心在于促进城市交通系统提高能源利用效率、改善能源消耗结构、减缓对气候变化的影响。主要途径是通过科学的组织和优化城市交通资源,在满足社会经济发展和城市居民出行需求的前提下,减少交通拥挤,降低污染和能源消耗,促进社会公平,最大程度地减少碳排放总量。

#### 4.3.3 交通安全对策

交通安全对策包括正常运行情况和交通事件影响情况的交通安全对策。

##### (1) 正常运行情况下的交通安全对策

包括主动性交通安全对策和被动性交通安全对策。主动性交通安全对策主要指提前发现交通事故发生的潜在影响因素,并采取积极、有效的对策,把诱发交通事故的潜在因素消灭在萌芽里。主要对策包括:①加强交通管理和制度建设。具体措施有完善、健全相关法规及标准;引进 ISO 9002 质量控制体系,以提高管理水平;完善灾难性事故预防和应急救援体系;严格执法制度,加强对上路车辆的管理;加强各种设备的综合利用;运用现代科技管理方法等。②优化道路交通设施。具体措施有进一步提高路面摩擦因数;调整道路线形;优化防水、排水设施等。③优化完善交通工程设施。具体措施有优化完善交通监控系统、优化改善交通安全设施系统(交通标志、交通标线、护栏、防眩设施、隔离设施、可变信息标志、视线诱导设施、防撞垫、阴坡设施等)等。被动性交通安全措施主要指对交通事件影响的控制,研究内容主要包括交通防护设施的完善以及安全带的使用等。

##### (2) 交通事件影响情况下的交通安全对策

法国的实践表明,对于交通事故重伤者,在 30 min 内获救,其生存率为 80%,在 90 min 内获救,其生存率仅为 10% 以下,而中国交通事故死亡者中大约 40% 为当场死亡,60% 死于送往医院途中或在医院中死亡。建立以缩短紧急救援对策的响应时间、提高救援的有效性和可靠性、恢复高速公路隧道的通行能力、降低直接和间接的经济损失及人员的伤亡为目的的交通事故紧急救援系统是十分必要的。针对不同路段(隧道、长大下坡、互通式立交等)、不同天气(雨雪、雾、恶劣天气等)、不同路网环境(并列型路网、高速环线+放射型路网等)等条件下的交通事故制定不同的紧急交通组织预案,是事故后不同事故类型快速反应的基础。

高速公路交通事故的发生造成的损失往往是非常严重的,危害性极大。一般性交通事故,只要处置及时,措施到位,对高速公路交通正常运行影响并不大,一旦发生重、特大交通事故,交通堵塞少则几十分钟,多则数小时,处置不及时就可能引发二次事故。因此,对高速公路交通事故的二次预警主要是对重、特大交通事故预警,达到预防或减少事故发生,确保高速公路安全畅通的目的。明确警情、确定

警源、分析警兆、警度预报和警情输出是高速公路预警管理的理论管理框架。

#### 4.3.4 公交优先发展对策

目前中国城市公共交通系统建设总量严重滞后,结构比例失调。世界大城市的公共交通系统承载的人口出行比重平均在 50%~60% 之间,日本东京大于 80%,而中国的公交出行比例不足 30%。城市交通拥堵严重,交通延误持续增大,迫切需要加快落实公交优先的战略,不断提高城市公共交通的竞争力和吸引力,充分发挥公共交通在城市交通运输体系中的主导作用,降低公众对小汽车的依赖,引导城市交通集约化发展。根据交通运输部道路运输司组织起草的《城市公共交通“十二五”发展规划纲要》,到“十二五”末,北京等人口在 1 000 万以上的城市基本建成城市轨道交通网络,公共交通出行分担率达到 40% 以上。

#### 4.3.5 交通规划对策

城市综合交通系统作为保障城市功能运行的最重要的基础设施,在维系城市经济和社会基本功能方面发挥着重要的基础作用。但是,中国城市综合交通系统功能低下,业已成为中国城市社会经济发展和城市功能发挥的瓶颈,制约着城市的可持续发展。为更好地指导实践问题,城市交通规划研究中应强调城市规划与交通规划的互动及一体化,交通规划思想应由被动适应型向主动引导式交通供需平衡转变,公交规划理论应由低承载力常规公交优化向高承载力多模式公交系统整合转变。

#### 4.3.6 城市停车对策

在提高城市停车泊位供应总量和创新停车设施建设(立体化、智能化)的同时,应特别加强对于停车需求的精细化管理,研究和应用分区(中心区和外围片区停车供给)、分类(路内、路外停车)、分时(需求高峰期和平峰期)、分价(停车收费措施)等多角度的需求控制方法,以实现停车供给容量约束条件下的动态供需平衡。

需要基于机动车辆停放对空间交通资源占用的位置差异性(路边停车、交叉口影响区以及路外停车等),研究不同位置车辆停放对动态交通(纯机动车流、非机动车流及混合交通流)的相互影响规律,制定停车设施的资源配置和交通组织优化方法,减小动静态交通的相互干扰。需要加强停车设施建设与其他交通方式的有效衔接,如换乘停车设施与交通枢纽的综合资源配置,将小汽车交通截流在交通拥堵和停车供需矛盾突出的范围之外。加强对于居住

用地和工作(单位)用地建筑物停车设施配建标准研究,并优化相应的通勤机动化出行和停放管理措施。

车辆的停与行密切关联,相互影响。通过提升停车交通需求的合理性和完善停车交通资源供给的有效性,不仅可以增加停车便利程度,而且可以改善道路交通运行环境,因此动、静态交通的协调发展(如停车设施容量和道路设施容量的协调,动态交通运行和车辆停放协调、区域拥挤收费和停车设施收费协调等),是未来停车交通的研究重点。

车辆停放必然带来社会成本的占用,因此,必须确定和竖立“停车者应为其使用的停车设施支付费用”的观念。各国研究和实践表明,停车收费管理和产业化是未来发展的趋势,不仅可以为企业带来很好的经济效益,而且基于停车收费的收入可以转化为支撑城市公共交通等其它交通方式的渠道,为可持续发展的城市交通提供支持。

智能化交通技术为驾车者在出行前、出行途中乃至出行目的地停车信息服务和管理提供了新的手段,并影响着停车行为选择,无论是科技工作者还是政府决策部门,都可以利用新的技术方法,提高个体车辆停放效率、区域停车资源利用效率、均衡道路交通流,是未来的重要发展方向。

## 5 公路运输经济

### 5.1 需求、供给和价格

1980年英国交通研究实验室的“公共运输需求”研究成果是近30余年来有关公共运输需求的权威标准<sup>[263]</sup>。这项研究基于非滞后时间序列进行分析,研究表明使用公交车的需求价格弹性是-0.3,而使用频率的需求弹性则为0.6。弹性数据表明,为了增加公共交通需求,使用补贴以改善服务质量比简单地降低运价更加有效。

在接下来的10年间,研究重点转移到一些更加微观的政策问题中,如各运输方式比较、各运输方式间的交叉弹性等。代表性的成果如文献<sup>[264]</sup>等。

在中国,孙世峰<sup>[265]</sup>将微观经济学中的费用效益弹性理论模型和非集计模型结合,探讨交通因素发生变化对交通需求者和供给者的影响;郑宪强<sup>[266]</sup>使用成本-需求均衡分析对私车的出行行为进行了研究,结论表明,出行成本中固定成本对私车出行量的影响是中性的,而可变成本与私车出行量负相关。

在供给及价格方面,张学武<sup>[267]</sup>探讨了运输价格形成机制,认为交通运输价格的主要决定因素是

社会平均运输成本、运输市场供求状况和运输市场结构,以及国民经济与社会发展要求和社会承受能力;任英伟等<sup>[268]</sup>分析了影响高速公路可变收费标准制定的主要因素,并讨论不同时段收费费率同交通量的关系,建立了出行者选择的二元Logit模型;熊琦<sup>[269]</sup>探讨了加强干线收费公路基于需求管理收费定价的对策,认为交通的时间、空间分布以及交通结构是交通需求定价的主要因素。

### 5.2 成本、规模和效率

规模经济一直以来都是运输经济关注焦点。Lee等<sup>[270]</sup>认为交通经营规模收益递增最明显体现在保养和维修活动中,但在巴基斯坦的城际公交运输研究中认为缺乏证据证明运输有规模经济<sup>[271]</sup>。

交通运输生产率的研究是主要基于边际生产率,使用数据包络分析法及统计分析法。这些研究包括城市交通效率,不同补贴机制的相对效率以及不同竞争制度下经营的相对效率<sup>[272]</sup>。

在西班牙,公有制运输公司中的工资要比私有制公司高18%,而整体成本要高42%,通过实现私有化可以实现8%~23%的成本节约<sup>[273]</sup>。在新西兰,公开投标为国营企业可以减少40%的早期服务费用,但为私人经营单位仅减少5%。

这一系列的证据表明了从所有权的变更中可以挖掘节约潜力,但近年来开始逐步综合考虑消费者利益与成本节约间的平衡。

### 5.3 费用和补贴

#### 5.3.1 补贴和效率

以提高效率为目的补贴的作用取决于很多因素。比较明显的是补贴的支付形式。如对车辆支付的补贴预期将导致车辆提前更换和购置更昂贵车辆<sup>[274]</sup>。文献<sup>[275]</sup>对美国运输公司1983至1992年间的时序数据进行了分析,发现补贴的最大利润归于劳动力。

#### 5.3.2 补贴和收入分配

对交通补贴的再分配是复杂的。它依赖于:①补贴的类型或补贴资金的使用;②补贴资金的来源;③长远“价值效应”,如地价的变化;④运输效率。Frankena<sup>[276]</sup>对加拿大城市公共交通的补贴前2个因素进行了探索。

对低收入群体进行针对性的补贴通常很难实现。比如在存在种族隔离的南非,为生活区距工作区10个街区的工人按周提供补贴,公共汽车运营人接受优惠券之后到相关机构换取现金,以获得真正的“经济票价”。

### 5.3.3 补贴与环境

许多国家和地区出于环境的考虑对交通进行补贴。Small<sup>[277]</sup>曾估计一辆私家车的消费是28美分每人英里,而一辆满载50人的公共汽车的成本却只有0.2美分每人英里。因此,公共汽车每车英里节约的最大成本为13美分。

### 5.4 属性和商品化

萨缪尔森将公路视为公共物品的观点,对研究公路公共产品属性有重要的影响。斯蒂格利茨<sup>[278]</sup>认为,应当将公路划分为两类:拥挤的公路和不拥挤的公路。不拥挤的公路属于公共物品;而拥挤的公路则不太符合公共物品的特征。

随着中国国务院、交通运输部有关“公路是公益性设施,从理论上讲应由政府无偿提供”、“公路是公共物品,具有很强的公益性”的表态,公路属于公共物品的理念逐渐成为主流。但朱伽林<sup>[279]</sup>认为一件物品应当由政府提供还是市场提供,也许并不取决于这种物品在经济学中被界定为“公共物品”还是“私人物品”,而是由社会经济管理的需要或者社会公众的选择来决定的。

20世纪以后,经济学中逐步兴起了一个新的概念:准公共物品。胡丘陵对湖南常宁市推行2条公交线路免费交通作出的解释是:城市公共交通本属于准公共物品,需要向乘客收费;但随着政府财政实力的增强,政府将有能力推行免费城市公交,将准公共物品转变为公共物品<sup>[280]</sup>。杨琦<sup>[281]</sup>认为,由于一般公路交通量小,而且往往实行免费通行,其非竞争性和非排他性很强,接近于纯公共产品;而高速公路通行能力大,在中国一般实行收费,既具有非竞争性又具有明显的非排他性,是典型的准公共产品。

关于公路的商品化问题,毛昌杰于1990年最先提出了公路属于商品,具有商品属性的观点<sup>[282]</sup>。徐海成<sup>[283]</sup>分析了公路的商品属性,认为非收费公路和收费公路之间存在着本质上的区别。非收费公路具有商品属性,但不是现实商品,而收费公路则具备成为现实商品的一切要素,属于商品的一种;刘婕<sup>[284]</sup>以SCP分析范式为理论基础,从市场结构、市场行为、市场绩效3个方面分析了中国高速公路的产业组织现状,认为中国高速公路产业的发展尚处于产业化发展自然进化状态,需要政府的扶持和引导,并加强政府管制。

### 5.5 管制与管制改革

#### 5.5.1 巴士市场改革

改革者认为,在质量标准控制的基础上,准入和

票价可以完全自由化<sup>[285]</sup>。自由化的改革引起伦敦地区公交每车千米成本减少接近40%,伦敦以外的地方票价增长了24%,载客量则下跌了31%,因此许多专家认为放松管制是失败的<sup>[286]</sup>。

许多其他欧洲国家跟随英国的改革措施,但是与英国相比改革幅度较小,速度较慢。瑞典是这批国家中第1个进行改革的国家,改革时将运输市场分为24个郡,每个郡各有一个公共交通管理所,这是正式的有限责任公司,其股票属于郡议会和政府当局。自1989年以来,这些公共交通管理所接管了负责提供的公共交通服务。

在澳大利亚的阿德莱德和佩思,政府保留了公有的公共汽车队和公共汽车站,后来以“总成本加补助激励”的基金管理合同模式出租给私人公司。在墨尔本,公共汽车队和公共汽车站以“扩大收入”的地方性合同方式出售给竞标者。这些改革措施降低了22%~38%的成本。在新西兰,1991年,公共汽车市场已经完全解除管制,私人部门经营取代公共部门经营后,公共汽车运营成本降低了40%。

#### 5.5.2 出租车市场改革

Schreiber<sup>[287]</sup>认为出租车市场上的管制问题本质上是因为存在信息不对称,乘客在既定的时间和地点,不能自主选择其他更便宜或者更贵的出租车。因此完全的自由化可能会导致更多的出租车运力供给和高票价,因此认为票价管制和自由进入的政策相结合是最优的。同样,Williams<sup>[288]</sup>认为该分析只适用于巡游出租车市场,而排队等候、电话预定等出租车市场是否适合自由竞争悬而未决。Teal等<sup>[289]</sup>通过对美国实施出租车自由进入的城市的调查结果分析,发现出租车票价不跌反涨。

### 5.6 交通运输与经济发展水平及发展方式

#### 5.6.1 交通与经济发展

在大城市,可以认为交通会对经济的增长做出积极贡献。Venables<sup>[290]</sup>研究得出,城市通勤交通的总体效益乘数为2.25。同样,研究表明伦敦地铁的现代化投资会在未来10年内每年使得英国GDP增加0.06%<sup>[291]</sup>。相比之下,在一些发展中国家,大规模的地铁投资项目补贴与经济增长呈负相关。总的来说,基础设施投入效果关键在于投资的质量和国民经济发展所处阶段。

在中国,吴迪<sup>[292]</sup>引入协整理论与误差修正模型,建立了反映公路运输与国民经济之间均衡趋势的长期方程,及反映二者间短期变动关系的误差修正模型,并运用投入产出模型和产业关联理论定量

分析了公路运输业单位产值的增加对国民经济增长所带来的影响;刘奕等<sup>[293]</sup>选取了数据包络分析及C2R模型方法,对高速公路的社会经济适应性进行了评价,并对输入指标的利用率和投入效率进行了分析;与此研究类似,张士俊<sup>[294]</sup>运用系统工程的理论方法,结合高速公路的技术经济特性,尝试改进了城市间作用的引力作用测度方法,建立了一个适合区域高速公路社会经济适应性评价的模型;除上述宏观层面的研究工作外,部分研究还从公路交通行为的表现——交通量入手,以微观的视角来分析其与社会经济发展的相互关系,例如,王晖等<sup>[295]</sup>在对大量交通量统计数据以及相应的经济发展指标分析后,认为公路交通量与经济量的相关性变得越来越密切,同时在时空分布上呈现出一定的差异化特征,并且两者将在不断的交替拉动过程中呈现一体化的发展态势。

#### 5.6.2 交通和空间发展

交通对人们日常生活空间的影响相当明显。早期的伦敦呈现星形模式,存在一个高就业率的城市中心,这归因于早期铁路放射形发展特征。美国有研究表明,华盛顿进入市中心的地铁系统对房价和人们居住地的选择有显著影响<sup>[296]</sup>。另外,研究表明交通在促进就业方面也具有显著作用<sup>[297]</sup>。

此外,被看做引起郊区化的轨道交通,近年来却被认为是对抗中心城市衰退的工具。Fouracre等<sup>[298]</sup>研究表明,轨道交通系统确实有维持中心城市生存能力的功能。“交通导向发展”的城市发展理念近年来越来越受到重视<sup>[299]</sup>。

在中国,刘舒燕<sup>[300]</sup>采用了系统结构分析方法,通过构造邻接矩阵和可达矩阵,建立了高速公路产业带社会效益分析层次结构模型。孙志超<sup>[301]</sup>建立了一种基于投入产出分析的测算方法,对公路交通行业促进经济增长和拉动社会就业的贡献程度进行了定量测算。

#### 5.7 小结

公路运输经济学的发展以一般经济学理论为支撑,国际上的公路运输经济学研究以经济学的一般理论关注于需求、费用、管制等公路运输经济核心问题,而中国的研究在很长一段时间似乎与主流经济学没有很好的融合在一起。本部分并不试图探索经济学理论解释公路运输现象中的一致性,而是追溯过去几十年内公路运输经济学中若干核心问题思想的发展,重在对相关主题的叙述与总结,以期为中国公路运输经济理论的发展提供借鉴。

## 6 汽车工程

### 6.1 概述

经过长期发展,汽车已成为当今世界第一大商品,改变了世界的机器。据统计,2011年全球汽车产量已达8 010万辆,总保有量超过10亿辆,市场规模庞大,产业链长而宽广;与美、欧、日等汽车工业发达国家和地区相比,中国汽车工业起步较晚,经过多年的发展,中国汽车产业规模已经达到世界级水平。截至2011年底,中国汽车产销规模双双突破1 840万辆大关,成为世界第一大汽车市场。现代汽车已成为机电一体化的高科技产品。自1980年代以来,电子技术广泛应用于汽车产品,出现了汽车电子化趋势,电子器件成本占汽车总成本的比例逐渐上升。在汽车设计与开发以及制造领域,电子计算机辅助设计和制造、计算机集成制造、虚拟仿真技术等也得到迅速普及应用,从而大大缩短了开发和设计时间,降低了成本。当前,汽车生产柔性化、敏捷化趋势深入发展。网络技术也越来越多地应用于汽车设计开发以及制造和生产经营,全球采购、网络销售等电子商务正在使汽车经营方式发生根本性的变革。进入21世纪以来,为应对能源供应形势趋紧、环境污染不断加重的严峻挑战,在全世界范围内,以汽车电子信息技术为核心的技术革新、技术发明等大批涌现;汽车在节能、排放、安全等方面的技术创新也越来越多地由量变到质变,汽车产品及汽车制造正在发生深刻变化。

近年来,世界汽车的技术进步主要体现在以下几个方面:为满足各国日益严格的环保法规,汽车排放的有害气体和二氧化碳量大大降低;汽车普遍装备安全带、安全气囊、ABS、ASR、ESP等,其主动安全性和被动安全性不断提高和改善;燃油经济性明显提高,一些经济型轿车的油耗指标降到更低的水平,节能的先进柴油机轿车在欧洲等地区已得到大面积推广应用;在高档轿车领域,已普及以缸内直喷增压中冷、火花点火、分层稀薄燃烧、变压缩比、变排量、使部分气缸休眠等为主要技术特征的变气门相位和升程的VVT-i汽油发动机技术;推广使用比较清洁的、以天然气、液化石油气、甲醇汽油为代表的代用燃料汽车;积极发展混合动力汽车并逐步实施产业化,重视研发燃料电池汽车技术。

### 6.2 标准与法规

#### 6.2.1 汽车标准和法规概况

一个国家的汽车技术标准水平,充分反映了其

汽车产品技术水平和试验技术水平,同时,也是汽车设计、开发及制造的最重要依据之一。近些年来,随着中国汽车产品技术水平的不断提高,汽车标准的技术水平也逐渐与国际标准接轨。特别是汽车强制性标准(在国外称为技术法规),从汽车安全、环保和能耗等方面对汽车产品的技术性能加以规定,从而有效地控制了汽车对人身安全和生态环境以及资源造成的负面影响或伤害<sup>[302]</sup>。

中国的汽车标准体系已基本建立。截至2008年底,中国已批准发布的汽车摩托车标准共计1169项,其中,汽车强制标准91项。2010年,新发布汽车国家标准22项,汽车行业标准25项。这些标准绝大部分都是参照ISO,SAE(美国汽车工程师学会)标准和ECE(欧洲经济委员会)法规而制定的<sup>[303]</sup>。新标准的制定和实施对提高汽车产品的安全性、环保性、经济性和可靠性等起到非常重要的作用,促进了汽车技术进步和新能源技术研究的开展。

中国汽车标准的国际化工作也取得了新突破,并参与了ISO与IEC国际标准投票工作以及国际标准的制订工作,首次成功向IEC提交电动汽车充电接口提案,同时向ISO提交LED前照灯标准提案<sup>[304]</sup>。

#### 6.2.2 汽车强制性标准

中国汽车强制性标准体系主要包括安全、环保、节能、防盗。其中安全标准按照主动安全、被动安全和一般安全划分。中国的汽车强制性标准(法规)工作起步于20世纪90年代初期,1995年开始逐步实施。到2007年中国发布的汽车强制性标准91项,这一数字在2011年已经突破100项,其中,安全标准72项(涉及主动安全26项,被动安全23项,一般23项),环保与节能强制性标准19项。

汽车强制性标准在推动汽车节能减排技术发展方面一直起着主导作用。2011年7月1日,中国全面实行乘用车第4阶段排放标准,即国Ⅳ排放标准,同时所有生产、进口、销售的轻型汽油车、两用燃料车、单一气体燃料车必须符合国Ⅳ标准的要求。这些标准发布后,使得中国汽车产品在排放污染物控制技术方面,跃上了一个新台阶,普遍采用了OBD(发动机排放自动检测)、高压共轨柴油机等先进排放控制系统,技术水平日渐与国际水平看齐。同时,也促使中国油品质量显著改善和提高。

新的强制性标准发布实施后,需要有相应的试验能力保障。为了实施国Ⅳ、国Ⅴ排放标准,各汽车产品检测机构和中国大型汽车企业都建立了低温冷

启动实验室,以便进行标准中要求的 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的试验;为了对汽车产品安全性能进行检验,各大检测机构也都建立了能进行100%正面碰撞、后部碰撞、40%正面偏置碰撞和侧面碰撞试验室。

在汽车安全强制性标准方面,近些年,中国发布了关于汽车侧面碰撞的乘员保护等7项强制性标准。其中,汽车侧面碰撞乘员保护标准对提高乘员的被动安全性具有重要意义,使中国汽车安全评价体系得到完善,为开展汽车产品的C-NCAP(中国新车评价规程)工作提供了技术支持<sup>[305]</sup>。由于汽车安全性与公众的生命财产安全、社会和经济等重大问题相关,所以中国汽车强制性标准中,安全标准占有较大比例,这也是世界各国汽车技术法规的普遍特点。汽车的安全性能与汽车安全标准主要涉及“主动安全”、“被动安全”和“一般安全”3个方面。主动安全主要包括灯光及警示装置、车轮悬架、制动和转向、汽车行驶的稳定性及可靠性等。2003年批准发布《乘用车正面碰撞乘员保护》(GB11551—2003)强制性国家标准,这标志着中国安全技术法规进入了一个重要的发展时期。一般安全是指与车辆安全性相关的车辆结构以及防盗装置、视野、指示与信号装置等。目前,碰撞相容性安全法规的走向为国际安全法规的研究趋势<sup>[306]</sup>。也就是说,目前法规研究趋势,并不是单纯地、无限地提高单车的安全性,而是考虑两车发生碰撞时,车辆能够吸收碰撞产生能量、减少车辆变形,有效降低碰撞发生对人员的伤害<sup>[307]</sup>。

《校车安全条例》的发布以及《专用校车学生座椅系统及其车辆固定件的强度》(GB24406—2012)、《专用校车安全技术条件》(GB24407—2012)、《校车标识》(GB24315—2009)等关于校车的标准的颁布实施,为中国校车的发展奠定了良好基础。

#### 6.2.3 汽车推荐性标准

中国新能源汽车标准的制定工作是伴随着中国新能源汽车产业化发展而产生的。中国将新能源汽车分为纯电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车3种类型并制定相应标准。因对这3类新能源汽车研究开发的进度不同,所以相关标准制定工作也不同步。中国在“九五”期间开始制定纯电动汽车标准,“十五”期间制定混合动力汽车标准,“十一五”期间制定燃料电池汽车标准。而目前,为推动电动汽车商业化发展,中国正加快制定相关基础设施的技术标准。截至2011年底,中国电动汽车标准已达

53项(含11项报批稿)。

未来10年内,按照中国新能源汽车的相关政策和国际上技术发展的趋势,混合动力汽车和纯电动汽车将作为一种比较成熟的交通工具得到规模化的应用。相应地,标准体系也应该能满足政府管理、企业研发、检验认证机构试验等的需要。因此,2010~2020年期间,重点任务是在现有的基础上,补充完善该领域的标准,尤其是要加大对动力电池、电机以及充电系统等方面标准的研究力度,争取达到标准覆盖全面的目标。另一方面,燃料电池电动汽车也将得到一定范围的应用,与此相应地规划出台一些标准,用来满足对车辆性能评价、基础设施规范等的要求。

中国针对商用车的标准体系目前已初步形成。截至目前,中国商用车强制标准已达47项,可以覆盖到车辆的主动安全、一般安全、车辆结构、碰撞与防护、节能、噪音等诸多方面。这些标准提高了对商用车安全技术的要求,无论从主动安全还是被动安全方面,都能在在一定程度上减少人员的伤亡。在国际范围内,加强重型商用车燃料消耗量评价与管理已经形成共识,但由于重型商用车产品种类、使用条件和技术状态远比轻型汽车复杂,国际普遍认为重型商用车燃料消耗量评价难度高于轻型汽车,推进难度也较大。在安全方面,正面碰撞标准扩展到N1类汽车,《商用车前下部防护标准》和《商用车驾驶室成员保护》、最高车速限制装置相关标准也已经发布,而侧倾稳定性要求已报批。关于车辆噪声标准,目前中国执行的噪声限制还是欧洲20世纪90年代中期的标准,而国际噪声标准法规已有了新规定,因此,中国该领域的标准也正在修订过程中。

为适应新的汽车技术发展形势,近两年,中国着手进行汽车电子技术标准的制定,主要针对3个层次的电子产品,涉及五大领域,即:关于各类传感器等组件或部件的产品标准、针对单纯的电子控制系统产品标准或基础性标准、覆盖所有控制系统的网络通讯协议标准(CAN总线)、影响所有电子产品的电磁抗扰标准、有关术语和图形符号等基础标准。

为贯彻落实关于建设节约型社会和环境友好型社会的基本国策,涉及汽车产品回收利用的管理政策研究、报废车辆标准的制定以及车内空气质量的评价规范<sup>[308-309]</sup>,也是近些年标准化工作的重点。

#### 6.2.4 中国汽车标准和法规的未来发展

综上所述,尽管中国强制性标准一直在争取与国际汽车先进法规接轨,但限于中国汽车产品的水

平和实施技术法规的具体国情,使得中国的标准与国际(发达国家和地区)相关法规仍然存在一定的差距。例如燃油消耗,国际上普遍采用碳当量计算方法进行评价,而中国则是采用等速百千米油耗限值评价;关于安全,国际上已经建立乘员保护、儿童约束系统项目,而中国还缺少此项规定;关于材料回收利用,国际上已建立起成熟的材料回收利用体系,而中国虽然已经制定了回收利用率的管理法规,但是有关的基础技术工作还尚未开始。可以预见未来中国汽车强制性标准将紧紧跟随国际汽车技术法规的发展潮流,争取在法规项目和法规技术水平上,尽快与国际法规接轨。同时,将进一步加大标准的技术性研究力度,积极引导汽车产品技术水平不断提升。

#### 6.3 汽车控制技术

汽车控制的终极目标是要实现汽车乘坐的舒适性和保证汽车行驶的安全性。汽车是地面车辆,真正起作用影响汽车行驶性能的是汽车轮胎的纵向力和侧向力,因此,汽车控制的基本思路和原理就是在给定的路面附着系数和车轮法向力的情况下,对车轮滑动(转)率和侧偏角进行适当的影响和控制,来间接调控轮胎的纵向力和侧向力,最大限度地利用轮胎和路面之间的附着力,提高汽车的主动安全性、机动性和舒适性。

##### 6.3.1 重型商用车控制技术

随着汽车工业和高速公路的快速发展,以各种重型车辆(包括重型车辆单车、重型汽车列车)为载体的公路运输业得到蓬勃发展。欧美等发达国家的公路运输以重型半挂车为主体,其运输量已达公路运输总量的65%以上。中国在此方面也发展迅速,已成为世界上重型车辆市场增长最快的国家,重型半挂车保有量也迅速增加。但在重型车辆安全性能方面,由于缺乏安全措施,交通事故频发,带来巨大经济损失和人员伤亡,如2007年,中国重型车辆肇事即造成21505人死亡,是欧美发达国家的5倍以上<sup>[310]</sup>。因此,重型半挂车的安全性越来越引起人们的重视,特别是其稳定性控制方面更是世界各大生产厂家和研究机构的关注热点。

中国虽已成为重型车辆生产大国,但高档次产品和关键技术尤其在主动安全性技术方面仍然依赖于国外。发达国家在重型车辆主动安全性产品研发方面,已经从理论研究走向产品阶段,尽管其产品功能单一,功能和可靠性等方面还有待于进一步提高,但在交通事故控制方面已经起到了积极作用<sup>[311]</sup>。

今后重型半挂车仍然向更大型和更高速的方向



发展,随之而来的是其稳定性控制难度大大增加,稳定性控制产品的需求量和精确度也要大幅提高,这就要求针对其稳定性控制的研究要必须进一步加快以跟上其步伐。中国在重型半挂车研究方面还处于起步阶段,特别是稳定性控制方面基础非常薄弱。尽快加强中国重型车辆,尤其是重型半挂车安全产品的自主开发能力,防止汽车产业核心技术空心化势在必行。

### 6.3.2 汽车悬架控制技术

悬架是现代汽车最重要的部件之一,决定着车辆的操纵稳定性、乘坐舒适性和行驶安全性,与悬架有重要关联的车辆动载对路面损坏程度有重要影响。悬架系统阻尼匹配决定车辆悬架的特性,对车辆行驶平顺性和安全性具有重要的影响,同时,悬架系统阻尼比的设计或选取,也是设计悬架系统各组成部件的重要依据参数。尽管有很多学者对基于行驶平顺性(车身振动加速度)的车辆悬架最佳阻尼比和基于行驶安全性(车轮动载)的车辆悬架最佳阻尼比分别进行了研究,然而,由于悬架系统阻尼比影响相互矛盾的车辆平顺性和安全性,并且受车辆悬架减振器阻尼实时仿真问题的制约,先前国内外对车辆行驶在不同路况和车速情况下的悬架系统最佳阻尼比始终未建立优化设计数学模型,仅给出了一个可行性设计区,即被动悬架阻尼比在 $0.2\sim 0.5$ 范围内。因此,车辆设计时只能凭借经验、参照其他相近类型车辆,根据实际车辆的类型进行选择,很难使车辆悬架达到最佳阻尼匹配,使车辆达到最佳减振效果。周长城等<sup>[312]</sup>建立了基于舒适性和安全性的半主动悬架系统实时最佳阻尼比数学模型,利用该数学模型可得到在不同行驶路况和车速情况下的悬架系数实时最佳阻尼比,从而在保证满足车辆行驶安全性和车辆悬架动挠度要求的前提下,使车辆舒适性达到最佳。

### 6.3.3 汽车控制策略

从20世纪80年代至今,汽车控制技术研究的发展轨迹是:控制算法由单一方法发展为多种算法组合;控制系统由单一系统的单独控制发展为多系统的集成控制;控制目标由单一目标发展为多个目标;控制策略由单层次发展为分层策略;控制系统由仅考虑简化的线性系统发展为更接近实际情况的非线性系统。下面就这条轨迹的若干节点作一简述。

#### (1)多种算法组合

各种控制算法都是为了获得最优的控制效果。经典控制理论的PID算法是以反复试凑为基础。

现代控制理论的LQR最优控制要建立系统准确的状态空间数学模型,可以得到最优的解析解。自适应控制针对被控对象结构已知而参数未知的情况进行设计;模糊控制不需掌握系统精确的数学模型,而需根据经验制定模糊规则。神经网络是由大量处理单元(神经元)组成的高度并行的非线性动力系统,具有可学习性和巨量并行性。鲁棒 $H_\infty$ 控制较好地解决了能量有界信号的干扰控制问题,使被控系统有较强鲁棒性; $H_2$ 控制较好地解决了白噪声信号的干扰抑制问题,使被控系统有较好的动态性能。针对各种算法的优缺点,汽车控制系统产生了多种组合控制算法,包括最优和自适应控制组合、模糊与自适应控制组合、模糊神经网络控制、模糊鲁棒控制组合以及 $H_2/H_\infty$ 混合鲁棒控制等<sup>[313]</sup>。

#### (2)多系统集成控制

多系统集成控制要解决的2个关键问题是:①避免子系统间的互相冲突和干扰;②通过系统间的通讯和动作协调,尽量挖掘各子系统功能潜力从而实现最优性能。这类研究有:主动悬架(主动悬挂阻尼控制系统ADC或连续性阻尼控制系统CDC)与主动前轮转向(AFS)的集成<sup>[314-315]</sup>、ADC(或CDC)与ABS的集成<sup>[316]</sup>、CDC与ESP的集成<sup>[317-318]</sup>。

#### (3)分层控制策略

分层控制策略的功能可以体现在如下2个方面:①根据当前行驶状况求出车辆稳定所需的控制力或力矩(例如主动稳定横摆力矩 $M_{za}$ ),然后将其分配到各个子系统的目标状态值(如每一车轮滑移率或轮胎侧偏角),最后供执行层控制器跟踪调节;②给出某子系统多个控制策略间的切换指令(如悬架控制中的抓地性策略或舒适性策略)。

文献<sup>[319]</sup>研究了电子稳定控制系统(ESP)和电动助力转向(EPS)系统之间的协调控制,先由EPS系统获得的信息估计轮胎侧向附着极限,再将该信息通知ESP控制器,当轮胎进入非线性域时适当减少车轮纵向力,以避免轮胎力饱和。文献<sup>[320]</sup>先根据侧向加速度简单划分主动前轮转向(AFS)和EPS的工作域,然后基于模糊规则再对 $M_{za}$ 进行具体分配。文献<sup>[321]</sup>运用分布式智能递阶控制策略建立主动底盘分层协调控制结构。相对于单独子系统控制,采用分层式协调控制策略能更好地改善整车综合使用性能。

### 6.3.4 热点、不足与展望

目前,汽车控制技术研究还是侧重于系统建模、仿真以及算法的研究,对控制器的设计、开发尤

其是在实车上的应用还相对薄弱。比较集中的研究热点有:制动能量的回收,馈能悬架,空气悬架,惯性蓄能悬架等。

未来的车辆控制系统将会向线控驾驶(X-by-wire)的趋势发展,这样操纵机构和执行机构之间的机械连接将被取消,执行机构所需的能量和控制信息均由电线传递。操纵机构和执行机构之间只有不断的信息交换,没有机械运动和机械能量的传递。除了在常规的4个子系统(即制动、驱动、转向及悬架)上进行主动控制外,近年来还出现了在车轮外倾、前束参数与空气动力学方面的控制系统。这些新型控制系统有望在未来得到更广泛的应用,这将为车辆动力学控制及集成提供更多的自由度。另外,研究和制定汽车开放性系统构架AUTOSAR(Automotive Open System Architecture),可使汽车系统和控制软件具有开放性和标准化接口,加速汽车底盘电子控制系统的网络化,最终实现汽车驾驶的全自动化。

#### 6.4 汽车代用燃料技术

中国目前已经深深地感受到了石油供应所带来的压力:汽车(包括农用车)消费石油占中国总石油消费量的一半以上,2011年全国汽油消耗8600多万吨,柴油消耗1.6亿吨以上。由于汽车市场的持续升温,石油的安全风险也不断增大。近年来,世界各国都在积极探索交通能源的多元化方向,新能源产品的开发与应用成为世界能源与汽车工业发展的焦点。开展新能源汽车研究,实现车用能源多元化,虽是无奈之举,但也是保障汽车能源可持续供应的有效途径。

基于对能源和环境方面的长远考虑,世界上许多国家愈来愈重视清洁汽车的开发和应用,目前世界上应用新能源汽车达数千万辆。在各种新能源中,醇类(甲醇和乙醇)燃料、压缩天然气(CNG)、液化石油气(LPG)、生物柴油等燃料技术与汽车应用技术相对比较成熟,网络较易建立,产业化规模容易形成。具有代表性的车用甲醇汽油(M15)已经在山西、陕西、浙江、江苏等省份推广应用;由中国工业和信息化部组织的高比例甲醇燃料汽车的试点运行也在上海、山西、陕西正式启动。CNG燃料汽车已经在中国北京、西安、成都、重庆等主要城市成功运行多年,福特、丰田、本田、菲亚特等汽车公司还开发了达到超低排放的CNG汽车。与此同时,电动汽车、混合动力和燃料电池汽车的研究开发工作也取得了可喜的进展。

##### 6.4.1 醇类代用燃料

作为发动机代用燃料的醇类主要有甲醇、乙醇2种。甲醇、乙醇由于其不完全燃烧的产物中影响臭氧形成的成分较少,在美国排放标准中被列为清洁燃料。

甲醇的生产原料是以煤炭为主,每生产1t甲醇,需要消耗煤炭1.5~1.7t,车用燃料甲醇的生产成本为1200~1500元·t<sup>-1</sup>,而市场甲醇销售的合理价位在2500元·t<sup>-1</sup>左右,与汽油的价格相比,甲醇汽油的应用存在较大的利润空间,具备了市场化应用的基础<sup>[322]</sup>。

甲醇可直接作为内燃机的燃料,应用中有以下特点:①有利于完全燃烧,燃烧时产生较多的水和较少的CO<sub>2</sub>;②有效质量燃油消耗率高,甲醇燃料形成混合气的热值高,与汽油相比应用中汽车的动力性能略有提高;③甲醇具有较高的辛烷值,具有良好的抗爆震性能;④甲醇的燃点比汽油高,不易于发生火灾事故,比使用汽油安全;⑤甲醇对某些非金属材料(如塑料、橡胶等)有溶胀作用,对某些金属材料(如锡、铅、铝等)有轻微的腐蚀作用,在燃料技术中应采取相应的措施;⑥甲醇与汽油同属中等毒性物质,甲醇由于没有明显的刺激性气味,更容易被误用;⑦甲醇汽油常温常压下为液体,操作容易,储带方便。

乙醇汽油E10已在河南、安徽、黑龙江等省份应用。乙醇的制造成本较高,主要是从植物中获得,可以谷类、甘蔗和任何含淀粉或糖类的农作物为原料,采用生物发酵方法制成;也可由乙烯水合制成。目前,国际上燃料乙醇的总产量约为每年4063万t。巴西是世界上最大的乙醇生产国之一,主要生产原料是甘蔗。美国燃料乙醇的生产主要依靠转基因玉米、薯类及甘蔗等发酵制取。当前中国燃料乙醇的原料主要来源于玉米、糖料等作物,但是为了保证中国的粮食安全,“十一五”期间国家停止审批以粮食为原料的燃料乙醇项目,而且严禁用粮食生产乙醇。未来生物乙醇燃料的发展方向是纤维素乙醇,即用秸秆等为原料生产乙醇,这样既可以降低成本也可以有更广泛的原料来源。

##### 6.4.2 天然气燃料

天然气燃料在汽车上的应用包括压缩天然气(CNG,甲烷)和液化石油气(LPG,丙烷、丁烷)。也有与汽/柴油共用的双燃料车(Bi-fuel Vehicle)或混合燃料车(Dual-fuel Vehicle)。燃气汽车相关技术已经成熟,并进入商业化阶段。而且更重要的是,燃气汽车电子控制技术的研究和应用水平、排放控制

技术的研究和应用水平已经达到与燃油汽车的相关技术同步发展的程度。车用供气系统从初期的第1代技术进入第3代技术,第4代技术也即将试验、研究完成。第3代车用供气系统技术对应于汽油闭环电控喷射技术,主要特征是完全闭环电控气体喷射加上与所用燃料相适应的三元催化器,控制精度可与汽油电控喷射媲美。第4代技术与第3代不同之处在于,天然气被直接喷射进入发动机气缸,更为有效地提高了发动机的动力性能。

天然气具有来源丰富、燃料经济性好、排污少、发动机使用寿命长、维修费用少、怠速及过渡工况运行稳定等优点,近年来在世界范围迅速发展。但是用作汽车能源主要存在动力性较低、储气瓶占用空间较大、汽车用户的初始投资较大、建站费用高、燃料携带不便等缺点。

#### 6.4.3 生物质能

以生物柴油为主的车用燃料是一种理想的替代燃料,因为它可以像普通柴油一样在内燃机中使用而无需改造发动机,并保持同等的有效载荷和续航里程。生物柴油具有和普通柴油相近的热值、燃料经济性,并由于更好的润滑性而使操作顺畅和发动机磨损减小,高燃点使得储存和操作更加安全。生物质能的来源丰富,仅植物每年储存的能量的微小部分即可满足全球的能源消费。植物进行光合作用时吸收 $\text{CO}_2$ ,其完整的产业链可导致大气中的温室气体减少。生物质能不含硫,没有硫化物的排放,也不会造成酸雨。但是,植物油中的脂肪胶和杂质易使燃油过滤器堵塞,植物油的粘度和初馏点高,雾化差,易结胶,且燃烧室易积碳、活塞环易粘结,还由于液态植物油泄漏到油底壳中,使润滑油易变质<sup>[323]</sup>。

目前,中国已经颁布了BD100, B5两项生物柴油国家标准。纯生物柴油一般都是甲酯和乙酯。如果要在柴油机上大量使用,必须先降低生物柴油的运动粘度。价格问题仍然是制约生物柴油商业化的最大障碍。

从诸多新能源及新能源汽车技术的对比分析,结合中国主要能源的格局,在目前的情况下,推广甲醇汽油和天然气汽车作为中国新能源的发展是最为实际的。低比例的甲醇汽油可以在原车上直接使用,不用进行改装,高比例的甲醇汽油在原车上使用时,只需安装一个灵活燃料控制器(ECU)就可以使用。电能与电动汽车是汽车业发展的方向,其技术的突破与商业竞争能力的提高还需要一定的时间。

#### 6.5 电动汽车技术

电能用作汽车能源的主要优点是来源非常丰富,运行零污染而且噪声小,结构简单维修方便,能源效率高等。但是电动汽车目前面临的主要问题是成本高、蓄电池充电时间长、寿命短和电池能量密度低及由此派生出来的汽车续航里程短、动力性差及体积质量大等问题。由于能量密度低,为了保证必要的续航里程,就要装备庞大的、笨重的电池组,占有空间大,又影响有效装载。电池的寿命为2~3年,充电时间一般需要6~10 h<sup>[324]</sup>。

近年来,汽车动力系统最大的突破是混合动力技术,它为汽车动力系统的转型奠定了基础平台。采用混动式汽油混合动力系统的轿车,城市工况可节油40%左右,优于柴油轿车,尤其为城市工况的排放控制提供了有效的新途径。今后,混合动力的发展将呈现两大特点。一是轿车混合动力的模块化愈加明显,逐步推进汽车动力的电气化,演化进程表现为:微混合→轻混合→深混合→全混合。“微混合”只具备自动启停、怠速关机功能。“轻混合”以并联式混合动力发动机为主体。“深混合”以混动式为特征,随着电功率的比例逐步提高,混合程度不断增强,最终过渡到可充电式的串联式“全混合”。二是城市客车混合动力系统的平台化趋势。发电机组+驱动电机+储能装置构成了混合动力系统的基本技术平台。通过换用不同的发电机组,适应从汽、柴油内燃机到氢能燃料电池各种不同的能源动力转化装置,形成油电、气电、电电各种不同混合动力,促进动力系统的平稳过渡与转型。

混合动力汽车发展的瓶颈是动力蓄电池,新型动力电池尚不能很好地满足汽车使用要求,已经产业化的国外混合动力轿车用的动力电池,也还存在初始成本高,使用寿命短等问题。尽管混合动力的产业化,将会大为促进动力电池的技术进步,但是近30年来车用动力电池研发的经验表明,其技术进步过程将呈现出长期、稳步和渐变的特征。

## 7 机械工程

工程机械是公路建设质量与公路建设事业快速发展的重要保障,公路建设事业的快速发展也促进了工程机械市场的成熟与壮大:2010年中国工程机械行业销售额突破4 000亿元人民币,超越北美、日本、西欧成为全球最大的工程机械市场;到2015年,随着“十二五”规划中西部基础设施项目和交通水利项目的开工建设,中国工程机械行业市场需求将达

到8 370~8 510亿元<sup>[325-326]</sup>。

新中国建国60多年,尤其是改革开放30多年来,中国工程机械行业取得了突飞猛进的发展,逐步建立了独立和比较完整的研发、生产制造和销售体系<sup>[327]</sup>,形成了江苏徐州、湖南长沙、山东、长三角地区工程机械产业集群<sup>[328]</sup>,和以江苏徐州、浙江宁波、山东济宁为代表的工程机械零配件基地,培育了以徐工集团、中联重科、三一重工为代表的一批规模企业。2011年,多达11家中国公司跨入全球工程机械制造商50强行列,中国继美国、日本之后,成为工程机械销售额规模和份额世界第三大国。

公路建设工程机械主要包括搅拌、摊铺和压实3个大类。

### 7.1 沥青搅拌设备技术现状与发展趋势

中国沥青搅拌设备从20世纪60年代后期起步,进入21世纪,中国沥青搅拌设备制造企业已达60多家,初步实现了产业规模化和普及化。许多世界著名企业已在中国设立了办事处和配套加工厂,或在中国建厂,就地制造、销售沥青搅拌设备。国际品牌公司入驻中国,一方面提高了中国沥青搅拌设备的整体设计和制造水平,另一方面引起了中国市场的激烈竞争<sup>[329]</sup>。

沥青搅拌设备可分为强制间歇式<sup>[330]</sup>和连续滚筒式<sup>[331]</sup>两大系列:强制间歇式沥青搅拌设备是一个比较传统的且被世界大多数国家接受的产品,连续滚筒式沥青搅拌设备与传统强制间歇式沥青搅拌设备的最大区别是将骨料的筛分由加热后改为加热前,从而带来设备整体的简化和成本降低,在美国超过80%采用连续滚筒式沥青搅拌设备<sup>[332-333]</sup>。

干燥滚筒是沥青搅拌设备的关键组成部分,除了要保证所生产的热骨料满足质量要求,还要能用最低的热量消耗获取最大的生产能力<sup>[334]</sup>。在设计干燥滚筒时,除对滚筒的结构参数优化设计外<sup>[335]</sup>,还应对燃烧器的燃烧效率、火焰形状、燃气速度等进行合理的配套,使滚筒内形成连续、均匀的料帘,强化骨料和燃气的热交换进程,提高换热效果<sup>[336-337]</sup>。燃烧器按燃料种类可分为轻油燃烧器、重油燃烧器、煤粉燃烧器、气体燃烧器、水煤浆燃烧器和混合型燃烧器,混合型燃烧器又可分为油气燃烧器、煤油燃烧器和煤油气三用型燃烧器<sup>[338]</sup>;除尘系统采用两级除尘方式:二级多布袋除尘器,一般一级配重力除尘器;二级文丘里湿式除尘器,一般一级配多管旋风除尘器,现多数设备配一级重力除尘器和二级布袋除尘器<sup>[339]</sup>。

中国沥青搅拌设备的关键技术几乎全部来自国外,普遍缺少核心技术,主要表现在3个方面:①燃烧器与干燥滚筒的匹配是一种盲目、随机组合;②受烘干筒加热能力、振动筛筛分效果、搅拌缸、计量系统、冷骨料规格的影响,沥青搅拌设备生产能力普遍低于设计生产能力;③沥青搅拌设备的噪声、烟气黑度普遍达到环保要求,但对人体危害较大的飘尘、烟气排放严重超标<sup>[340]</sup>。

节能减排与再生是沥青搅拌设备下一步发展的主要趋势。美国道路沥青铺装协会(NAPA)在2007年以指令的形式提出了沥青搅拌设备的节能途径,从原材料管理、排烟温度、燃烧器使用、电机变频控制等9个方面论述了沥青搅拌设备的节能方法;与间歇式设备相比,连续式沥青搅拌设备动力消耗可降低约25%,燃油节约 $1.0\sim 1.5\text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ;与传统热拌沥青混合料相比,温拌沥青混合料热骨料加热温度只有 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,可节能20%;如果用 Sasobit 添加剂,温拌沥青混合料(添加剂、添加剂+水、加水发泡等多种形式)的生产温度可以降低 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,使沥青搅拌设备的 $\text{CO}_2$ 排放量每年降低43.9%<sup>[341]</sup>。

随着中国公路逐步进入到“建养并进”时期,对旧沥青混合料的再生功能是今后沥青搅拌设备的另一重要发展方向,其最关键技术是在对回收料加热过程中,保证沥青不老化。美国 Astec 公司生产的双层滚筒连续式沥青搅拌设备,回收料可加到夹层中,避免了沥青老化的问题,回收料添加量最高可达50%;强制间歇式沥青搅拌设备要配备一套回收料的供给、提升、干燥、加热、贮存、称量和有害气体处理系统,边宁荷夫公司的干燥筒,回收料在燃烧区贴筒壁走,燃烧器火焰的周围包裹一圈一次风,使火焰不扩散,从而避免了沥青老化,热效率较高<sup>[342]</sup>。

### 7.2 沥青混凝土摊铺设备技术现状与发展趋势

20世纪50年代,Barber-Greene公司生产了BG系列摊铺机,成为世界上各生产厂家参考的标准机型;20世纪60年代,自动找平系统在摊铺机上逐渐普及,液压驱动工作装置(如熨平板的振动系统、振捣梁的振捣系统、刮板输料系统等)逐渐得到应用;20世纪80年代,全液压驱动的履带式、轮胎式摊铺机得到了广泛的应用;20世纪90年代末,摊铺机熨平板(自动伸缩双振捣梁,可变频变幅等)、计算机数字化自动化控制技术、EPM管理系统、自动找平技术得到了快速提升与发展<sup>[343]</sup>。

自1934年美国发明了具有浮动熨平板的摊铺

机以来,摊铺机技术发展始终围绕着找平控制系统。随着世界机械工业和电子技术水平的发展进步,摊铺机找平控制系统经历了人工固定基准、接触式虚拟浮动基准和非接触式虚拟浮动基准3个阶段<sup>[344]</sup>,从找平系统模型、熨平板运动学模型等多个方面对影响沥青路面摊铺平整度的因素和评价方法<sup>[345]</sup>进行了研究。

混合料摊铺过程中的离析问题,是沥青混凝土摊铺机技术研究的另一重点,从产生原因<sup>[346]</sup>、评价方法、结构设计<sup>[347]</sup>和施工工艺<sup>[348-349]</sup>等多角度探讨了解决摊铺离析的方法,并提出了并机梯队摊铺工艺和转运-摊铺新工艺<sup>[350]</sup>。

中国产沥青混凝土摊铺机在定置参数、供料系统静态参数、行驶性能、刮板与螺旋料位控制、找平系统运动参数及性能、行驶与供料液压系统性能、熨平板相关技术参数、整机结构尺寸性能参数与国外先进水平保持同步,发动机功率及液压系统匹配合理,但整机液压、机械、电子的协调控制作业方面存在缺陷,使机器的作业品质有所下降,故障率较高,可靠性低<sup>[351]</sup>。

双层摊铺技术是路面施工领域革命性的技术革新,其特点是粘接层和磨耗层同时摊铺,使粘接层沥青得到很好的预压实,并使2层沥青在“热+热”的状态粘合,增强了层间的粘接力;压实和摊铺设备不必再从粘接层上通过,将粘接层的变形量降到了最低;提供了降低沥青混合料施工温度的机会,从而降低了混合料生产过程中的能量消耗和废气排放;磨耗层混合料用量降低一半,但寿命得到大幅度提高;磨耗层和粘接层之间无需乳化沥青增强粘合力,降低了筑路成本;粘接层的摊铺厚度可以从传统摊铺工艺的10 cm降低到8 cm,节省材料;减少因天气原因对施工的影响等<sup>[352]</sup>。

NovaChip是广泛应用的超薄混凝土磨耗层之一。20世纪90年代科氏公司在美国取得NovaChip的使用许可权,并引进专用设备,到2002年,在美国的使用面积已超过2 300万m<sup>2</sup>。NovaChip专用施工设备NovaPaver摊铺机主要由受料斗、输送带、粘层油储罐、粘层油喷洒和计量系统、振捣熨平板等部分组成,振捣振幅为4.5级,最大摊铺宽度为6.0 m,摊铺速度可达10~36 m·min<sup>-1</sup><sup>[353]</sup>。

### 7.3 压实设备技术现状与发展趋势

20世纪50年代以前,静作用压实机械一直占有主导地位,压实效果的提高主要依靠增加压路机的重量来实现;振动压实技术和振动压路机的出

现使得压实效果的增长不再简单地依靠重量或线压力的增大;20世纪70年代末,液压控制技术在振动压路机上的应用使振动参数的调节成为可能,出现了无级调速、调频、有级调幅(双级)式的振动压路机,为压实工作参数的优化调节奠定了基础。

压实理论的研究更加显示出了综合性的特点,即从工作介质的材料特性、力学基础、施工方法及机器结构、运动学与动力学的角度来综合研究压实作业过程。典型的土壤振动压实理论包括:土壤共振学说、重复击实学说、内摩擦减小学说以及土壤液化学说<sup>[354-355]</sup>。

压实技术的发展更加带有多种施力方法综合作用的特点,即通过静压、揉搓、振动、捣实和冲击等多种方法的联合作用来强化压实过程,如无定向振动压实<sup>[356]</sup>、垂振式振动压实<sup>[357]</sup>、平振式振动压实、冲击压实<sup>[358]</sup>等。

振动压实理论在20世纪90年代从线性模型转向非线性模型的研究,瑞士Geodynamik建立了土壤非线性动力学模型,以土壤最基本的物理学特性作为输入参数,在不同的土壤条件和不同的机械参数下模拟滚轮与土壤相互作用的动力学特性,可用于对现有振动压路机的压实性能进行评价和对新设计的机型进行性能预测;模型的另一个功能是可以根据给定的土壤条件为压实作业选用不同的机型和不同的施工工艺,并对方案进行比较和优化<sup>[359]</sup>。压实过程中,由于被压材料压实状况不同,振动轮垂直加速度谐波分量表现出不同的特征,这些特征反映了材料被压实的程度,通过安装于振动轮上的加速度传感器,再经过信号处理及算法,得出CMV(Compaction Meter Value)值来反映材料压实状况,许多振动压路机制造商(如DYNAPAC, Caterpillar, Ingersoll-Rand)采用了CMV测试系统,与CMV系统采用类似算法的还有日本酒井(SAKAI)CCV检测系统;BOMAG公司BTM压实测量系统能够监视钢轮的加速度,通过处理产生 $\Omega$ 值,可以持续地显示被压实层的密实度数值,显示软弱地点和不均匀的地点,BCM压实管理系统,适用于大型工程的压实管理,通过颜色标明压实完毕和欠压的地点;Caterpillar压实检测系统测试值包括CMV、跳振值RMV(Resonance Meter Values)和机器驱动力MDP(Machine Drive Power),固定于驾驶室的显示器,可显示速度、振幅、振动频率、压实遍数等工程参数的实时数据,并可将数据传输至计算机,作进一步分析处理<sup>[360]</sup>。

新技术革命和现代高科技将继续推动压实机械向自动化、智能化、无人化和机器人化的方向发展。在压实过程和机器工作状态实时监测的基础上,压实机械将从局部自动化过渡到全面自动化。

#### 7.4 机群智能化工程机械

中国有3家企业(徐工集团、天津鼎盛和三一集团)承担了“十五”期间国家“863”机群智能化项目,7家企业承担了单机项目<sup>[361]</sup>。

徐工“机群智能化工程机械”项目由徐工集团与清华大学、东南大学、长安大学、重庆交通学院等共同承担,项目包括智能化摊铺机、拌和站、压路机、装载机、铰接式自卸车以及全路面汽车起重机等6种产品。

天津鼎盛“机群智能化工程机械”项目成果正逐步应用于天津鼎盛现有的摊铺机、路拌机、铣刨机、压路机、装载机等产品,全面提升了产品的高科技自动化水平。

三一重工“机群智能化工程机械”项目由三一重工联合中南大学、长沙理工大学及北京机械工业自动化研究所共同承担。分别从“沥青路面施工工艺”、“单机智能化”和“机群监控与优化调度”3个方面,研究生产过程中影响产品质量的工艺因素,以及以摊铺机为中心的施工机群最优状态匹配与协调控制。

#### 7.5 工程机械行业发展存在的不足

在中国工程机械行业辉煌的背后,仍存在诸多不足<sup>[362]</sup>:

(1)自主创新理念和能力有待加强。从引进技术、消化吸收到再创新的发展历程带动了中国工程机械整个行业的技术和质量提升,2000年前后实施的国际化配套更促进了中国工程机械行业的自主创新,进而取得目前工程机械制造大国的地位,部分整机已经达到国际领先水平。但要成为工程机械制造强国,则显得竞争手段不强,中国工程机械出口只占国际市场份额的7.6%,关键技术的创新总是首先出现在掌握核心技术的国外工程机械生产厂家的产品上,然后传入中国,被中国工程机械产品采纳。

(2)低水平同质化无序竞争状态依然不减。中国已是世界工程机械制造大国,但大部分企业没有研发平台,靠模仿或中介渠道获取产品技术资料,这些企业生产制造装备比较落后,投资少,生产的产品进入市场成本低,门槛低,从而造成低质低效产品在市场上大量流通。

(3)关键零部件核心技术及制造水平严重制约

行业发展和产业结构调整。当前中国工程机械一般配套件生产供应充足,完全能满足主机厂的需求,同时还有出口,但是高技术、高附加值的关键配套部件主要依靠进口(如传动部件、控制元件、柴油发动机及关键液压件)。中国工程机械行业主机厂多达70%的利润被外资零部件厂商掠夺,能力过剩和结构性短缺反差强烈,严重制约了中国工程机械的发展。更不能接受的是外国公司的制裁,他们拖延交货期,间接支持国外主机厂家在中国的竞争,使中国制造业蒙受巨额经济损失<sup>[363]</sup>。

(4)工程机械二手设备交易管理缺失,高能耗、高污染、低效与不安全产品在市场上大量流通,严重违背了低碳、绿色经济发展方针。

## 致 谢

本文在写作过程中,得到以下人员的协助,特致谢忱!

初稿撰写人:(以姓氏笔画为序)方志,王东升,王建伟,王建军,王春生,冯忠绪,叶飞,申爱琴,任刚,刘生全,何川,张孝祖,陈宝春,陈峻,陈涛,周长城,周国光,宗长富,郑木莲,赵一飞,赵明华,秦权,袁长伟,郭忠印,梁鹏,焦生杰,蒋建平,韩万水,裴玉龙,谭忆秋

统稿参与人:胡力群,纪小平,高志伟;梁鹏;叶飞;裴玉龙;袁长伟;陈涛;顾海荣

组稿参与人:孙守增,赵文义,王磊,马勇,刘辉

## 参考文献:

### References:

- [1] 张昀青. 移动荷载作用下半无限体的动力响应解[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 955-957.
- [2] 姚海林, 卢正, 罗海宁, 等. 交通荷载作用下 Kelvin 地基上不平整路面的动力响应分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 890-896.
- [3] 阮艳彬, 吴万平. 与路面协调设计的公路路基设计指标及使用环境探讨[J]. 公路, 2012(3): 74-78.
- [4] WANG Zhi-liang, LI Yong-chi, SHEN R F. Correction of Soil Parameters in Calculation of Embankment Settlement Using a BP Network Back-analysis Model [J]. Engineering Geology, 2007(91): 168-177.
- [5] 魏静, 蒲兴波, 钱耀峰, 等. 基于动量 BP 算法的过渡段路基沉降预测[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(1): 52-55.
- [6] 程新兴, 王选仓, 高志伟. 基于路面破坏响应的差异沉降控制标准[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30

- (5):31-34.
- [7] 汪益敏,王秉纲.公路土质路基边坡坡面冲刷稳定性的模糊综合评价[J].中国公路学报,2005,18(1):24-29.
- [8] 张永杰,曹文贵,赵明华,等.岩溶区公路路基稳定性的区间模糊评判分析方法[J].岩土工程学报,2011,33(1):38-44.
- [9] 牛衍亮,黄如宝,周直,等.三峡库区库岸公路路基安全风险评价[J].同济大学学报:自然科学版,2012,40(2):246-250.
- [10] 舒阳,孟庆山,舒思齐.高速公路拓宽路基软土工程特性试验[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(3):37-42.
- [11] 薛祥,宋连亮,贾亮,等.高速公路软土路基工后沉降预测的新方法[J].岩土工程学报,2011,33(增1):125-130.
- [12] 翁效林,张留俊.拓宽路基下软土地基工后沉降预测[J].长安大学学报:自然科学版,2011,31(1):17-21.
- [13] 丑亚玲,盛煜,韦振明.多年冻土区公路路基阴阳坡温度及变形差异分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(9):1896-1903.
- [14] 孙文,吴亚平,郭春香,等.热棒对多年冻土路基稳定性的影响[J].中国公路学报,2009,22(5):15-20.
- [15] 李雨浓,张喜发,冷毅飞,等.季冻区高速公路路基冻害调查及试验观测[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(4):617-623.
- [16] 李家春,崔世富,田伟平.公路边坡降雨侵蚀特征及土的崩解试验[J].长安大学学报:自然科学版,2007,27(1):23-26.
- [17] 翁效林,王玮,刘保健.湿陷性黄土拓宽路基变形特性及强夯法处治效应模型试验[J].中国公路学报,2011,24(2):17-22.
- [18] 杨保存,汪为巍,杨柳.南疆盐渍土路基盐冻胀变形综合防治技术研究[J].干旱区地理,2011,34(1):133-141.
- [19] 刘克非.不同纤维对SMA路用性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2011,31(4):16-21.
- [20] 乐瑜,江建.OGFC混合料抗疲劳性能试验研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2011,30(2):254-257.
- [21] 姚辉,李亮,杨小礼,等.纳米材料改性沥青的微观和力学性能研究[J].建筑材料学报,2011,14(5):712-717.
- [22] 徐方,朱婧,周明凯,等.新型碾压混凝土与聚合物改性水泥混凝土复合式路面施工关键技术研究[J].施工技术,2011,40(354):20-23.
- [23] 付其林,陈拴发,邢明亮.开级配大粒径沥青混合料水稳定性试验研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2010,33(5):717-721.
- [24] 沙爱民,胡力群.半刚性基层材料的结构特征[J].中国公路学报,2008,21(4):1-6.
- [25] 王国业,胡昌斌,杨建军.贫混凝土基层力学特性[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2009,25(6):1094-1099.
- [26] 扈惠敏.沥青路面施工质量变异性研究[D].西安:长安大学,2005.
- [27] 倪宏革,林奇云,徐静. PQI的检测原理及影响其密度测值的因素分析[J].筑路机械与施工机械化,2011,28(7):32-36.
- [28] 李志军,程国香.桥面铺装技术及沥青铺装材料的现状与发展[J].石油沥青,2006,20(3):1-7.
- [29] 许涛,黄晓明,赵永利.隧道路面类型选择及调查研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2011,35(1):181-185.
- [30] 韩森,李志玲,张东省,等.露石水泥混凝土路面性能[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(4):6-9.
- [31] 屠艳平,管昌生,李元松.地源热泵路面融雪化冰可靠性设计及应用分析[J].武汉工程大学学报,2011,33(6):61-64.
- [32] 张景涛.基于多刚体汽车模型的公路平曲线半径研究[J].中外公路,2005,25(5):1-3.
- [33] 潘仁泉.关于公路平曲线内最大横净距计算方法的商榷[J].中外公路,2005,25(2):8-10.
- [34] 张先勇,卫军,周荣贵,等.公路平曲线设计用曲线元素的研究[J].中南公路工程,2006,31(5):63-66.
- [35] 裴玉龙,邢恩辉.高等级公路纵坡的坡度、坡长限制分析[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(5):629-632,716.
- [36] 庄传仪,赵一飞,潘兵宏,等.公路纵坡设计关键参数研究[J].中国公路学报,2009,22(4):39-44.
- [37] 潘兵宏.山区高速公路平均纵坡研究[D].西安:长安大学,2008.
- [38] 王福建,曾学贵.公路行车视距检验的三维表面模型方法[J].公路交通科技,1999,16(1):20-22.
- [39] 王佐,刘建蓓,郭腾峰.公路空间视距计算方法与检测技术[J].长安大学学报:自然科学版,2007,27(6):44-47.
- [40] 张驰,杨少伟,赵一飞,等.公路三维视距的检测方法[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(3):54-57.
- [41] ISMAIL K, SAYED T. New Algorithm for Calculating 3D Available Sight Distance[J]. Journal Transportation Engineering, 2007, 133(10):572-581.
- [42] YASSER H, TAREK S. Effect of Driver and Road

- Characteristics on Required Preview Sight Distance [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2002, 29(2):276-288.
- [43] FIGUEROA A M, TARKO A P. Speed Changes in the Vicinity of Horizontal Curves on Two-lane Rural Roads [J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(4):215-222.
- [44] 钟小明, 陈永胜, 张杰, 等. 公路平曲线路段大型车运行速度模型研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(12):35-38.
- [45] 符铎, 高捷. 高速公路纵坡路段货车运行车速预测[J]. 公路交通科技, 2008, 25(6):139-143.
- [46] 胡圣能, 许金良, 杨宏志. 曲率变化率在公路线形质量设计的应用研究[J]. 郑州大学学报:工学版, 2010, 31(3):101-105.
- [47] 张景涛, 杨少伟, 潘兵宏, 等. 基于可能速度的公路线形评价标准[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2008, 28(2):40-43.
- [48] 杨宏志, 胡庆谊. 高速公路长大下坡路段安全设计与评价方法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(3):10-16, 40.
- [49] 刘建蓓, 郭忠印, 胡江碧, 等. 公路路线设计安全性评价方法与标准[J]. 中国公路学报, 2010, 23(增):28-35.
- [50] GE Y J, XIANG H F. Concept and Requirements of Sustainable Development in Bridge Engineering [J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 2011, 5(4):432-450.
- [51] 陈艾荣. 基于给定结构寿命的桥梁设计过程[M]. 北京:人民交通出版社, 2009.
- [52] WANG C S, DUAN L, ZHU J W, et al. Innovative Research of High Performance and Sustainable Steel Bridges[C]//LEI Y. Proceedings of the International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering. Nanjing:Southeast University Press, 2011:951-956.
- [53] WEN Y K. Reliability and Performance-based Design [J]. Structural Safety, 2001, 23(4):407-428.
- [54] FLEMING J F. Nonlinear Static Analysis of Cable-stayed Bridge Structures [J]. Computers & Structures, 1979, 10(4):621-635.
- [55] O'BRIEN T. General Solution of Suspended Cable Problems [J]. Journal of Structural Division, 1967, 93(S1):1-26.
- [56] 梁鹏. 超大跨度斜拉桥几何非线性及随机模拟分析[D]. 上海:同济大学, 2004.
- [57] 陈常松. 超大跨度斜拉桥施工全过程几何非线性精细分析理论及应用研究[D]. 长沙:中南大学, 2007.
- [58] 李传习. 混合梁悬索桥非线性精细计算理论及其应用[D]. 长沙:湖南大学, 2006.
- [59] KIM H K, LEE M J, CHANG S P. Determination of Hanger Installation Procedure for a Self-anchored Suspension Bridge [J]. Engineering Structures, 2006, 28(7):959-976.
- [60] LEVINSON D A, KANE T R. A Usable Solution of the Hanging Cable Problem [J]. Computers & Structures, 1993, 46(5):821-844.
- [61] 李强兴. 斜拉索静力解[J]. 桥梁建设, 1996(3):23-26.
- [62] 程纬, 易伟建, 刘光栋. 斜拉桥柔性索线型分析及快速迭代计算方法[J]. 公路, 1998(6):8-11.
- [63] 魏建东, 车惠民. 斜拉索静力解及其应用[J]. 西南交通大学学报, 1998, 33(5):57-61.
- [64] 郝超, 裴岷山, 强士中. 大跨度斜拉桥索无应力长度的计算方法比较[J]. 重庆交通学院学报, 2001, 20(3):1-3.
- [65] 方志, 李学有. 斜拉索无应力长度求解及成品索长合理确定[J]. 桥梁建设, 2009(4):54-58.
- [66] 汪峰, 刘沐宇. 斜拉桥无应力索长的精确求解方法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2010, 38(7):49-52.
- [67] 苗家武. 超大跨度斜拉桥设计理论研究[D]. 上海:同济大学, 2006.
- [68] 孙斌. 超千米级斜拉桥结构体系研究[D]. 上海:同济大学, 2008.
- [69] 柯红军, 李传习. 基于 ANSYS 的自锚式悬索桥有限元建模和分析方法[J]. 交通与计算机, 2008, 26(5):131-135, 138.
- [70] 罗喜恒. 复杂悬索桥施工过程精细化分析研究[D]. 上海:同济大学, 2004.
- [71] 罗喜恒, 肖汝诚, 项海帆. 悬索桥锚跨索股分析研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(12):45-49, 53.
- [72] 齐东春, 沈锐利, 唐茂林. 悬索桥的锚碇-锚跨单元研究及应用[J]. 公路交通科技, 2011, 28(2):82-87, 92.
- [73] 李乔, 卜一之, 张清华. 基于几何控制的全过程自适应施工控制系统研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(7):69-77.
- [74] 颜东煌. 斜拉桥合理设计状态确定与施工控制[D]. 长沙:湖南大学, 2001.
- [75] SHINOZUKA M. Monte Carlo Solution of Structural Dynamics [J]. Computers & Structures, 1972, 2(5/6):855-874.
- [76] 刘春华, 秦权. 架设阶段悬索桥静力问题的随机有限元分析[J]. 计算力学学报, 1998, 15(2):109-112.



- [77] 陈铁冰. 斜拉桥几何、材料非线性静力分析及其可靠度评估[D]. 上海: 同济大学, 2000.
- [78] 程进, 肖汝诚. 斜拉桥结构静力可靠度分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(12): 1593-1598.
- [79] 程进, 肖汝诚, 江见鲸. 斜拉桥成桥初始恒载索力概率确定[J]. 土木工程学报, 2003, 36(12): 58-63.
- [80] 王立彬, 李爱群, 靳慧. 考虑索力随机的斜拉桥结构分析[J]. 中国公路学报, 2010, 23(4): 45-50.
- [81] 梁鹏, 肖汝诚, 徐岳. 超大跨度斜拉桥施工过程随机模拟分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 52-58.
- [82] FRANK S, GALO V, JORGE A. Seismic Damage to Bridges During the 27 February 2010 Magnitude 8.8 Chile Earthquake[J]. Earthquake Spectra, 2012, 28(1): 301-316.
- [83] PINTO A V, PEGON P, MAGONTTE G, et al. Pseudo-dynamic Testing of Bridge Using Non-linear Substructures[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2004, 33(11): 1125-1146.
- [84] NOGUEZ C A C, SAIIDI M S. Shake Table Studies of a 4-span Bridge Model with Advanced Materials[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 137(2): 183-192.
- [85] KIM T H, LEE K M, YOON C, et al. Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Piers Under Earthquake I: Theory and Formulation[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(9): 1199-1207.
- [86] HALIL S, TANMOY C. Hysteretic Model for Reinforced Concrete Columns Including the Effect of Shear and Axial Load Failure[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(2): 140-146.
- [87] LEE W K, BILLINGTON S L. Modeling Residual Displacements of Concrete Bridge Columns Under Earthquake Loads Using Fiber Elements[J]. Journal of Bridge Engineering, 2010, 15(3): 240-249.
- [88] DICLELI M, BUDDARAM S. Effect of Isolator and Ground Motion Characteristics on the Performance of Seismic-isolated Bridges[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 35(2): 233-250.
- [89] KUNNATH S K, ERDURAN E, CHAI Y H. Effect of Near-fault Vertical Ground Motions on Seismic Response of Highway Overcrossings[J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(3): 282-290.
- [90] GUO W H. Dynamic Analysis of Coupled Road Vehicle and Long Span Cable-stayed Bridge Systems Under Cross Winds[D]. Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 2003.
- [91] XU Y L, GUO W H. Dynamic Analysis of Coupled Road Vehicle and Cable-stayed Bridge Systems Under Turbulent Wind[J]. Engineering Structure, 2003(25): 73-486.
- [92] XU Y L, GUO W H. Effects of Bridge Motion and Crosswind on Ride Comfort of Road Vehicles[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92: 641-662.
- [93] 韩万水. 风-汽车-桥梁系统空间耦合振动研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [94] CHEN S R, CAI C S. Equivalent Wheel Load Approach for Slender Cable-stayed Bridge Fatigue Assessment Under Traffic and Wind: Feasibility Study[J]. Journal Bridge Engineering, 2007, 12(6): 755-764.
- [95] CHEN S R, WU J. Dynamic Performance Simulation of Long-span Bridge Under Combined Loads of Stochastic Traffic and Wind[J]. Journal Bridge Engineering, 2010, 13(3): 219-230.
- [96] 韩万水, 陈艾荣. 随机车流下的风-汽车-桥梁系统空间耦合振动研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(9): 97-102.
- [97] 韩万水, 马麟, 刘健新. 风环境下汽车-桥梁系统侧向空间耦合振动关系研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(9): 97-102.
- [98] 韩万水, 马麟, 院素静, 等. 基于风速风向联合分布的桥面侧风所致车辆事故概率性分析[J]. 中国公路学报, 2010, 23(2): 43-49.
- [99] 韩万水, 马麟, 刘健新. 引入驾驶员行为的风-汽车-桥梁系统耦合振动研究[J]. 中国公路学报, 2011, 24(1): 42-50.
- [100] HAN Wan-shui, MA Lin, LIU Jian-xin. Three-dimensional Coupling Vibration of Wind-vehicle-bridge Systems Under Random Traffic Flow[C]//ICWE. The Thirteenth International Conference on Wind Engineering. Amsterdam: ICWE, 2011: 1-8.
- [101] GU M, XU Y L, CHEN L Z, et al. Fatigue Life Estimation of Steel Girder of Yangpu Cable-stayed Bridge Due to Buffeting[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 80(3): 383-400.
- [102] POURZEYNALI S, DATTA T K. Reliability Analysis of Suspension Bridges Against Fatigue Failure from the Gusting of Wind[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(3): 262-271.
- [103] WU J, CHEN S R, VAN DE LINDT J W. Fatigue Assessment of Slender Long-span Bridges: a Reliability Approach[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012,

- 16(1):47-57.
- [104] 高 婧,陈宝春.波形钢腹板钢管混凝土拱面内极限承载力试验研究[J].工程力学,2010,27(3):91-100.
- [105] 王远洋,陈宝春.1 000 m跨径混凝土拱桥研究[J].世界桥梁,2005(1):1-3.
- [106] 项海帆.关于中国桥梁界追求“之最”和“第一”的反思[J].桥梁,2012(1):12-13.
- [107] 徐 岳,唐先习,薛倬昆.混凝土桥梁合理耐用结构构造研究探讨[J].建筑结构,2010,40(增2):726-730.
- [108] 赵 煜,贺拴海,李春风,等.在役预应力混凝土箱梁开裂后承载力评估[J].同济大学学报:自然科学版,2010,38(9):1271-1275.
- [109] 石雪飞,杨 琪,阮 欣.已建大跨径PC梁桥过量下挠及开裂处治技术[M].北京:人民交通出版社,2010.
- [110] 王春生,冯亚成.正交异性钢桥面板的疲劳研究综述[J].钢结构,2008,24(9):10-13,32.
- [111] WANG C S, FENG Y C. Review of the Fatigue Behaviors and Finite Element Analysis of Orthotropic Steel Bridge Decks [C]//ASCE. Proceeding of the Second International Orthotropic Bridge Conference. Sacramento:ASCE,2008:290-304.
- [112] 王春生,付炳宁,张 芹,等.正交异性钢桥面板挖孔形式研究[J].长安大学学报:自然科学版,2012,32(2):58-64.
- [113] WANG C S, FU B N, ZHANG Q, et al. Static Test of a Full-scale Orthotropic Steel Deck Model [C]//CHAN S L, SHU G P. Proceedings of Seventh International Conference on Advanced in Steel Structures. Nanjing:Southeast University Press,2012:693-701.
- [114] WANG C S, FU B N, ZHANG Q, et al. Full-scale Fatigue Test of Orthotropic Steel Deck [C]//CHAN S L, SHU G P. Proceedings of Seventh International Conference on Advanced in Steel Structures. Nanjing:Southeast University Press,2012:710-716.
- [115] 张 芹.正交异性钢桥面板疲劳性能试验研究[D].西安:长安大学,2010.
- [116] XU W, ZHANG X N. Analysis Distress Characters and Design of Steel Orthotropic Bridge Decks Pavement in China [C]//ASCE. Proceeding of the Second International Orthotropic Bridge Conference. Sacramento:ASCE,2008:184-192.
- [117] 狄 谨,周绪红,吕忠达,等.正交异性钢箱梁U型肋加劲板极限承载力试验[J].中国公路学报,2009,22(2):59-64.
- [118] 童乐为,沈祖炎.开口纵肋的正交异性钢桥面板疲劳试验研究[J].中国公路学报,1997,10(3):59-65.
- [119] GURNEY T. Fatigue of Steel Bridge Decks [M]. Norwich:HM Stationery Office,1992.
- [120] 黄 侨,李 莹,高秀云.焊接钢桥疲劳成因及对策研究[J].北京交通大学学报,2006,30(增):50-54.
- [121] 王春生,成 锋.钢桥腹板间隙面外变形疲劳应力分析[J].建筑科学与工程学报,2010,27(1):65-72.
- [122] CONNOR R J, FISHER J W. Identifying Effective and Ineffective Retrofits for Distortion Fatigue Cracking in Steel Bridges Using Field Instrumentation [J]. Journal of Bridge Engineering,2006,11(6):745-752.
- [123] FISHER J W, JIN J, WAGNER D C, et al. Distortion-induced Fatigue Cracking in Steel Bridges: NCHRP Rep. 335 [R]. Washington DC: Transportation Research Board,1990.
- [124] 王春生,段 兰.高性能钢桥设计指南[J].世界桥梁,2007(1):60-67.
- [125] 段 兰,王春生.高性能钢桥在北美的研究及应用简介[J].建筑钢结构进展,2008,10(2):50-56.
- [126] 王春生,段 兰,袁卓亚.高性能钢在日本及欧洲的研发与应用[J].世界桥梁,2008(1):68-72.
- [127] 王春生,段 兰,王继明,等.基于混合设计的高性能钢梁抗弯性能及延性实验研究[J].中国公路学报,2012,25(2):81-89.
- [128] DUAN L, ZHENG L, WANG C S, et al. Flexural Strength Analysis of Hybrid Girders Fabricated from High Performance Steel [C]//CHAN S L, SHU G P. Proceedings of Seventh International Conference on Advanced in Steel Structures. Nanjing:Southeast University Press,2012:685-692.
- [129] 聂建国.钢-混凝土组合结构桥梁[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [130] 聂建国,李红有,唐 亮.高强钢-混凝土组合梁受弯性能试验研究[J].建筑结构学报,2009,30(2):64-69.
- [131] 王春生,宋天诣,冯亚成,等.高强钢-混凝土组合梁受力性能分析[J].交通运输工程学报,2008,8(2):122-126.
- [132] WANG C S, ZHAI X L, DUAN L, et al. Flexural Limit Load Capacity Test and Analysis for Steel and Concrete Composite Beams with Tubular Up-flanges [C]//SHEN Z Y. Proceedings of the 12th International Symposium on Tubular Structures. Boca Raton: CRC Press,2008:413-420.
- [133] 王艳丽,王春生,翟晓亮,等.带管翼缘的钢-混凝土组合梁抗弯性能试验研究[J].交通运输工程学报,2008,8(6):63-69.
- [134] 王春生,王 茜,王欣欣,等.钢-高性能混凝土组合桥

- 塔受力性能试验研究[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2011, 31(1): 51-58.
- [135] 王春生. 铆接钢桥剩余寿命与使用安全评估[M]. 上海: 同济大学出版社, 2007.
- [136] 王春生, 陈惟珍, 陈艾荣. 桥梁损伤安全评定与维护管理策略[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(4): 21-27.
- [137] WANG C S, CHEN W Z, CHEN A R. Fatigue Safety Assessment of Existing Steel Bridges in China[J]. Structural Engineering International, 2009, 19(2): 174-179.
- [138] WANG C S, LI G, DONG X H, et al. Fatigue Life Evaluation of Existing Highway Reinforced Concrete Bridges[C]//IABMAS. Proceedings of the 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. London: CRC Press, 2010: 685.
- [139] SUN L M, QIAN J. Experimental Study on Wire Breakage Detection by Acoustic Emission [J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 2011, 5(4): 503-509.
- [140] WANG C S, TIAN L, FU B N. Fatigue Cracking Monitoring and Evaluation Using AE Sensors for Existing Steel Bridges[C]//CHAN S L, SHU G P. Proceedings of Seventh International Conference on Advanced in Steel Structures. Nanjing: Southeast University Press, 2012: 740-748.
- [141] 王建锋, 马建, 马荣贵, 等. 动位移的加速度精确测量技术研究[J]. 计算机科学, 2010, 37(12): 201-202, 237.
- [142] 王春生, 刘鑫, 俞欣, 等. 基于无损探测信息的既有钢桥构件疲劳可靠度更新评估[J]. 土木工程学报, 2010, 43(8): 81-87.
- [143] 王小岗. 层状横观各向同性饱和地基中桩基的纵向耦合振动[J]. 土木工程学报, 2011, 44(6): 87-97.
- [144] 朱斌, 孔令刚, 郭杰锋, 等. 高桩基础水平静载和撞击模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1537-1546.
- [145] SEED H B, REECE L C. The Action of Soft Clay Along Friction Piles [J]. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1955(81): 112-119.
- [146] 赵明华, 何俊翹, 曹文贵, 等. 基桩竖向荷载传递模型及承载力研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2005, 32(1): 37-42.
- [147] 胡柏学, 杨明辉, 袁铜森, 等. 基于变形控制的岩溶区基桩承载力研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(8): 11-15
- [148] BRUCCE D A. Enhancing the Performance of Large Diameter Piles by Grouting [J]. Grouting Engineering, 1985(5): 9-15.
- [149] 张忠苗, 邹建, 贺静漪, 等. 黏土中压密注浆及劈裂注浆室内模拟试验分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1818-1824.
- [150] 张忠苗, 邹健, 刘俊伟, 等. 桩端后注浆浆液上返高度的理论研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2535-2540.
- [151] 黄生根, 龚维明. 大直径超长桩压浆后承载性能的试验研究及有限元分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 297-301.
- [152] 张忠苗, 辛公锋, 夏唐代, 等. 软土地基灌注桩、挤扩支盘桩和注浆桩应用效果分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 709-711.
- [153] 刘颖, 张立明, 郑刚. 不同长度单桩桩端压浆效果有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 88-94.
- [154] 张忠苗, 辛公锋. 不同持力层钻孔桩桩底后注浆应用效果分析[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(6): 85-94.
- [155] 黄生根, 龚维明. 超长大直径桩压浆后的承载性能研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 113-117.
- [156] 戴国亮, 龚维明, 薛国亚, 等. 超长钻孔灌注桩桩端后压浆效果检测[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 849-852.
- [157] 戴国亮, 龚维明, 程晔, 等. 自平衡测试技术及桩端后压浆工艺在大直径超长桩的应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 690-694.
- [158] 李典庆, 鄢丽丽. 考虑桩底沉渣的灌注桩可靠度分析方法[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 155-160.
- [159] 赵明华, 曹文贵, 刘齐建, 等. 按桩顶沉降控制嵌岩桩竖向承载力的方法[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 67-71.
- [160] 苏永华, 刘晓明, 赵明华. 摩擦桩承载稳定性的概率分析方法[J]. 水利学报, 2005, 36(4): 433-439.
- [161] 赵明华, 肖燕, 陈昌富, 等. 考虑土体蠕变特性的桥台软基变形分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 56-61.
- [162] 赵明华. 桥梁桩基的屈曲分析及试验[J]. 中国公路学报, 1990, 3(4): 47-56.
- [163] 曹文贵, 刘成学, 赵明华. 变截面桩的屈曲分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2004, 31(3): 55-58.
- [164] 贺炜, 赵明华, 邹新军, 等. 基桩屈曲问题的大挠度摄动解[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2006, 33(6): 33-37.
- [165] 雷勇, 赵明华, 马缤辉. 按桩顶沉降控制的嵌岩桩嵌岩深度计算方法[J]. 公路交通科技, 2011, 28(5): 86-91.
- [166] 黎斌, 范秋雁, 秦风荣. 岩溶地区溶洞顶板稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 532-536.
- [167] 曹文贵, 程晔, 赵明华. 公路路基岩溶顶板安全厚度

- 确定的数值流形方法研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6):621-625.
- [168] 赵明华,程 晔,曹文贵. 桥梁基桩桩端溶洞顶板稳定性的模糊分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8):1376-1384.
- [169] 赵明华,曹文贵,何鹏祥,等. 岩溶及采空区桥梁基桩桩端岩层安全厚度研究[J]. 岩土力学, 2004, 24(1):64-68.
- [170] WALRAVEN J C. Fundamental Analysis of Aggregate Interlock[J]. Journal of the Structural Division, 1981, 107(11):2245-2270.
- [171] JIANG D H, SHEN J H. Strength of Concrete Slabs in Punching Shear[J]. Journal of Structural Engineering, 1986, 112(12):2578-2591.
- [172] YANKELEVSKY D Z, LEIBOWITZ O. Punching Shear in Concrete Slabs[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1999, 41(1):1-15.
- [173] MENETREY P. Synthesis of Punching Failure in Reinforced Concrete[J]. Cement & Concrete Composites, 2002(24):497-507.
- [174] OH H, SI M J. Punching Shear Strength of Strengthened Deck Panels with Externally Bonded Plates[J]. Composites Part B: Engineering, 2004, 35(4):313-321.
- [175] 赵明华,雷 勇,张 锐. 岩溶区桩基冲切破坏模式及安全厚度研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2):524-530.
- [176] REESE L C. Laterally Loaded Piles: Program Documentation[J]. Journal of the Geotechnical Engineering, 1977, 103(4):287-305.
- [177] REESE L C. Analysis of Laterally Loaded Piles in Weak Rock[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(11):1010-1017.
- [178] 郑 刚,李 欣,刘 畅,等. 考虑桩土相互作用的双排桩分析[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1):99-106.
- [179] NG C W W, YAUTL Y, LI J H M, et al. Side Resistance of Large Diameter Bored Piles Socketed into Decomposed Rocks[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(8):642-657.
- [180] 赵明华,邬龙刚,刘建华. 基于  $p-y$  曲线法的承重阻滑桩内力及位移分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6):1220-1225.
- [181] 杨明辉,赵明华,刘建华,等. 高陡边坡桥梁基桩内力计算的幂级数解[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2007, 38(3):561-566.
- [182] 戴自航. 抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4):517-521.
- [183] 吴恒立. 推力桩计算方法的研究[J]. 土木工程学报, 1995, 28(2):20-28.
- [184] 刘建华,赵明华,杨明辉. 高陡岩质边坡上桥梁基桩模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3):372-377.
- [185] 赵明华,邬龙刚,刘建华. 考虑  $P-\Delta$  效应的承重阻滑桩有限差分解[J]. 工程力学, 2008, 25(3):102-106.
- [186] 徐鹏举. 可液化场地桥梁桩基地震反应分析与简化分析方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.
- [187] MEYMAND P J. Shaking Table Scale Model Tests of Nonlinear Soil-pile-superstructure Interaction in Soft Clay [D]. Berkeley: University of California, 1998.
- [188] ROSS G A, SEED H B, MIGLIACCIO R R. Bridge Foundation in Alaska Earthquake[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 1969, 95(3):4223.
- [189] MIZUNO H. Pile Damage During Earthquakes in Japan (1973-1983)[J]. Dynamic Response of Pile Foundations, 1987(1):53-78.
- [190] NOVAK M. Piles Under Dynamic Loads[C]//SHAM-SHER P. Proceedings of the Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. New York: ASCE, 1991:2433-2456.
- [191] SU Song. Centrifuge Investigation on Responses of Sand Deposit and Sand-pile System Under Multi-directional Earthquake Loading[D]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2005.
- [192] 楼梦麟,王文剑,马恒春,等. 土-桩-结构相互作用体系的振动台模型试验[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2001, 29(7):763-768.
- [193] 楼梦麟,宗 刚,牛伟星,等. 土-桩-钢结构相互作用体系的振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5):226-230.
- [194] 凌贤长,王东升,王志强,等. 液化场地桩-土-桥梁结构动力相互作用大型振动台模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(11):67-72.
- [195] 曲海锋. 扁平特大断面公路隧道荷载模式及应用研究[D]. 上海:同济大学, 2007.
- [196] 张 安. 高速公路隧道群应急预案制定与评估技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2008.
- [197] BHAWANI S, RAJAISH K G. Tunneling in Weak Rocks[M]. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- [198] 张俊儒. 隧道单层衬砌作用机理及设计方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2007.
- [199] 何 川,林 刚,汪会帮. 公路连拱隧道[M]. 北京:人民交通出版社, 2005.

- [200] 姚勇,田志宇. 并设小净距隧道中岩墙力学特征及加固措施研究[J]. 工业建筑, 2007(9): 57-60.
- [201] 姚勇,何川. 并设小净距隧道爆破振动响应分析及控制爆破措施[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 2815-2822.
- [202] LUNARDI P. Design and Construction of Tunnels ADECO-RS Approach[J]. Tunnels & Tunnelling International Special Supplement, 2000(2): 15-20.
- [203] 关向群. 隧道洞口景观设计研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(10): 36-40.
- [204] 贾玲利,赵东平. 隧道洞口景观现状及发展趋势研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(1): 88-92.
- [205] 叶飞,何川,王士民,等. 公路隧道洞口景观的构造与分析[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(2): 15-21.
- [206] 何川,张建刚,苏宗贤. 大断面水下盾构隧道结构力学特性[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [207] 袁大军,尹凡,王华伟,等. 超大直径泥水盾构掘进对土体的扰动研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2074-2080.
- [208] 李响,张子新,张冠军. 泥水平衡盾构开挖面稳定模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1074-1079.
- [209] 许金华,何川,夏炜洋. 水下盾构隧道渗流场应力场耦合效应研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3519-3527.
- [210] 原华,张庆贺,胡向东,等. 大直径越江盾构隧道各向异性渗流应力耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2130-2137.
- [211] 叶源新,刘光廷. 岩石渗流应力耦合特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2518-2525.
- [212] 叶飞,朱合华,丁文其,等. 大断面盾构隧道施工抗浮计算研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5): 849-853.
- [213] 王小忠. 盾构机在长距离硬岩中掘进的探讨[J]. 铁道工程学报, 2006(4): 52-56.
- [214] 许维青,韩福忠. 盾构隧道长距离独头掘进的控制测量技术[J]. 中国工程科学, 2010(12): 56-58.
- [215] 何川,李祖伟,方勇,等. 公路隧道通风系统的前馈式智能模糊控制[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(5): 575-579.
- [216] 马非,何川,方勇,等. 虚拟现实技术在毗邻型公路隧道照明控制中的应用初探[C]//何川. 重庆武隆至水江高速公路隧道群建设项目技术总结. 北京: 人民交通出版社, 2010: 194-197.
- [217] 闫治国,杨其新,朱合华. 长大公路隧道火灾温度场分布试验研究[J]. 东南大学学报, 2005, 35(1): 84-88.
- [218] 于丽,王明年. 长大公路隧道火灾模式下的烟雾特性研究[J]. 现代隧道技术, 2007, 44(4): 52-55.
- [219] 曾艳华,李永林,何川,等. 隧道通风网络及调节[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(2): 183-187.
- [220] 何川,王明年,方勇,等. 公路隧道群智能联动控制技术的现状与发展展望[J]. 现代隧道技术, 2008(增): 62-66.
- [221] 关宝树. 隧道维修管理要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [222] ROLLIN J, LEPERS J, BENARD P. Laying and Operating Problems Arising with Underground HV and EHV Cables[J]. Revue Generale de l'Electricite, 1974(83): 45-56.
- [223] 宋克志,王梦恕. 中国外水隧道修建技术发展动态及其对渤海海峡跨海通道建设的经验借鉴[J]. 鲁东大学学报: 自然科学版, 2009, 25(2): 182-187.
- [224] SU N. Effect of Wash Water and Underground Water on Properties of Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2002(32): 777-782.
- [225] 余健,何川,汪波,等. 衬砌背后空洞对隧道结构承载力影响的试验研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(1): 104-110.
- [226] 何川,唐志成,汪波,等. 应力场对缺陷隧道结构承载力影响的模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009(3): 227-234.
- [227] 陈洪凯,李明. 公路隧道健康诊断与控制综述[J]. 重庆交通学院学报, 2008, 25(4): 4-8.
- [228] 曹校勇. 公路隧道健康状态综合诊断方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [229] 何川,李祖伟,余健,等. 组合补强对缺陷病害隧道结构承载力影响的室内模型试验研究[J]. 公路, 2007(3): 195-201.
- [230] 李祖伟,何川,汪波,等. 锚杆补强对缺陷病害隧道结构承载力影响的模型试验研究[J]. 铁道建筑, 2007(2): 39-42.
- [231] 何川,吴德兴,汪波,等. 回填压注对缺陷病害隧道结构承载力影响的模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2008(2): 114-119.
- [232] 何川,唐志成,汪波,等. 内表面补强对缺陷病害隧道结构承载力影响的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 406-412.
- [233] 汪波. 高速公路隧道施工及营运期安全性一体化监控技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [234] 苏洁,张顶立,牛晓凯,等. 海底隧道结构监测设计研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增2): 2785-2792.
- [235] 刘胜春,张顶立,黄俊,等. 大型盾构隧道结构健康监测设计研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4):

- 741-748.
- [236] 李 讯,何 川,汪 波,等. 营运期隧道结构健康监测与安全评研究[J]. 现代隧道技术,2008(增):289-294.
- [237] LIGHTHILL M J, WHITHAM G B. On Kinematic Waves. II. a Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads[J]. Mathematical and Physical Sciences, 1955,229(1178):317-345.
- [238] PAYNE H J. Models of Freeway Traffic and Control [C]//TRB. Proc Math Models Public Syst. San Diego;Simulation Councils,1971;51-61.
- [239] GERLOUGH D L, HUBER M J. Traffic Flow Theory [R]. Washington DC: Transportation Research Board,1976.
- [240] MAY A D. Traffic Flow Fundamentals[M]. Englewood Cliffs:Prentice-Hall,1990.
- [241] TRB. Revised Monograph on Traffic Flow Theory[R]. Washington DC;Transportation Research Board,1999.
- [242] WADDELL P. Modeling Urban Development for Land Use, Transportation, and Environmental Planning [J]. Journal of the American Planning Association, 2002,68(3):297-314.
- [243] BERTOLINI L, LE CLERCQ F, KAPOEN L. Sustainable Accessibility;a Conceptual Framework to Integrate Transport and Land Use Plan-making [J]. Transport Policy,2005,12(3):207-220.
- [244] BENNET H, HOFFMAN J. The Smart Growth-climate Change Connection [R]. Boston: Conservation Law Foundation,2000.
- [245] 王 炜,任 刚,程 琳. 缓解城市交通拥堵的基础理论[R]. 北京:国家自然科学基金委员会,2006.
- [246] CHEN A, YANG H, LO H K, et al. Capacity Reliability of a Road Network:an Assessment Methodology and Numerical Results [J]. Transportation Research Part B,2002,36(3):225-252.
- [247] WATLING D. User Equilibrium Traffic Network Assignment with Stochastic Travel Times and Late Arrival Penalty [J]. European Journal of Operational Research,2006,175(3):1539-1556.
- [248] BRUNDELL-FREIJ K, ERICSSON E. Influence of Street Characteristics, Driver Category and Car Performance on Urban Driving Patterns [J]. Transportation Research Part D,2005,10(3):213-229.
- [249] ROMILLY P. Welfare Evaluation with a Road Capacity Constraint [J]. Transportation Research Part A, 2004,38(4):287-303.
- [250] BAMBERG S, HUNECKE M, BLOBAUM A. Social Context, Personal Norms and the Use of Public Transportation:Two Field Studies [J]. Journal of Environmental Psychology,2007,27(3):190-203.
- [251] JARA-DIAZ S. Modeling Public Transport Corridors with Aggregate and Disaggregate Demand [J]. Journal of Transport Geography,2008,16(6):430-435.
- [252] CUI C Y, SHIN J S, MIYAZAKI M, et al. Real-time Traffic Signal Control for Optimization of Traffic Jam Probability[J]. IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems,2012,132(1):21-31.
- [253] MOTAWAJ F, BOUYEKHF R, EL MOUDNI A. A Dissipativity-based Approach to Traffic Signal Control for an Over-saturated Intersection[J]. Journal of the Franklin Institute,2011,348(4):703-717.
- [254] HABIBIAN M, KERMANSAH M. Exploring the Role of Transportation Demand Management Policies' Interactions [J]. Scientia Iranica, 2011, 18 (5): 1037-1044.
- [255] MLADENOVIC M, ABBAS M. A Guide to Effective Adaptive Traffic Control Systems[J]. Traffic Engineering and Control,2012,53(2):52-54.
- [256] MATHERLY D, MOBLEY J. Transportation and Emergency Management Tool Kit for Communications with Vulnerable Populations: Key Research Findings [J]. Transportation Research Record, 2011 (2234):62-70.
- [257] LUDÍK T, RÁČEK J, PEKÁRKOVÁ L. New Process Management for Emergency Management;Case Study About an Accident of a Vehicle Transporting Dangerous Goods[C]//ECMC. Proceedings of the 25th European Conference on Modelling and Simulation. Krakow;ECMS,2011:323-329.
- [258] HAWORTH S L, HILTON I C. Car Parking Standards in Development Control [M]. Manchester: UMIST,1983.
- [259] 王 刚,沈建武. 城市“绿色”交通规划[J]. 规划师, 2004,20(7):63-65.
- [260] 周素红,阎小培. 广州城市空间结构与交通需求关系 [J]. 地理学报,2005,60(1):131-142.
- [261] 杨励雅,邵春福,刘智丽,等. 城市交通与土地利用互动机理研究[J]. 城市交通,2006,4(4):21-25.
- [262] 上海城市建设学院. 上海市停放车调查分析总结报告 [R]. 上海:上海市公安局交通处,1989.
- [263] WEBSTER M, BLY F. Demand for Public Transport [R]. Crowthorne:TRL,1980.
- [264] GOODWIN P B. A Review of New Demand Elasticities with Special Reference to Short and Long Run

- Price Effects[J]. *Journal of Transport Economics and Policy*, 1992(2):155-169.
- [265] 孙世峰. 基于非集计与弹性联合模型的交通需求分析[J]. *公路交通技术*, 2007(5):113-116.
- [266] 郑宪强. 出行成本对私车交通需求的影响及其政策选择[J]. *北京交通大学学报: 社会科学版*, 2012, 11(1): 5-10.
- [267] 张学武. 我国交通运输价格形成机制及变化趋势[J]. *综合运输*, 2007(6):25-27.
- [268] 任英伟, 陆 键, 项乔君, 等. 高速公路可变收费标准模型研究[J]. *公路交通科技*, 2005, 22(10):124-128.
- [269] 熊 琦. 我国收费干线公路实施基于交通需求管理的收费定价策略探讨[J]. *公路*, 2009(12):101-104.
- [270] LEE N, STEEDMAN I. Economics of Scale in Bus Transport; Britain [J]. *Journal of Transportation Economics and Policy*, 1970, 4(1):15-28.
- [271] BURNS R E. Inter-city Bus Transport in West Pakistan[J]. *Journal of Transportation Economics and Policy*, 1971, 5(3):314-343.
- [272] NOVAES A G N. Rapid-transit Efficiency Analysis with the Assurance-region DEA Method[J]. *Pesquisa Operacional*, 2001, 21(2):179-197.
- [273] RUS G, NOMBELA G. Privatization of Urban Bus Services in Spain[J]. *Journal of Transportation Economics and Policy*, 1997, 31(1):115-129.
- [274] FRANKENA M. Capital Biased Subsidies, Bureaucratic Monitoring and Bus Scrapping[J]. *Journal of Urban Economics*, 1987, 21(1):180-193.
- [275] OBENG K, AZAM G. Type of Management and Subsidy Induced Distortions in Urban Transit Firms[J]. *Journal of Transportation Economics and Policy*, 1997, 31(2):193-209.
- [276] FRANKENA M. Income Distribution and Transport Subsidies[J]. *Journal of Transportation Economics and Policy*, 1973, 7(3):215-230.
- [277] SMALL K A. Estimating the Air Pollution Costs of Transport Modes[J]. *Journal of Transportation Economics and Policy*, 1977, 6(2):109-132.
- [278] 斯蒂格利茨. 经济学:上册[M]. 北京:中国人民大学出版社, 1997.
- [279] 朱伽林. 有关公路商品属性的经济学分析[J]. *交通企业管理*, 2010(4):37.
- [280] 本报记者. 长宁“免费公交”作秀还是惠民[N]. *中国交通报*, 2008-11-5(4).
- [281] 杨 琦. 高速公路公共政策分析[M]. 北京:人民交通出版社, 2008.
- [282] 毛昌杰. 浅议公路商品属性及其发展途径[J]. *交通财会*, 1990(7):6.
- [283] 徐海成. 公路商品属性的问题研究[J]. *经济问题*, 2000(2):9-11.
- [284] 刘 婕. 我国高速公路产业组织与政府管制问题研究[D]. 西安:长安大学, 2008.
- [285] BEESLEY M E, GLAISTER S. Deregulating the Bus Industry in Britain - (C) a Response[J]. *Transport Reviews*, 1985, 5(2):123-142.
- [286] WHITE P R. What Conclusions Can Be Drawn About Bus Deregulation in Britain[J]. *Transport Reviews*, 1997, 17(1):1-16.
- [287] SCHREIBER C. The Economic Reasons for Price and Entry Regulation of Taxicabs[J]. *Journal of Transportation Economics and Policy*, 1975, 4(3):268-279.
- [288] WILLIAMS D J. Price and Entry Regulation of Taxicabs[J]. *Journal of Transportation Economics and Policy*, 1980, 9(1):105-112.
- [289] TEAL R F, BERGLAND M. Impacts of Taxicab Deregulation in the USA[J]. *Journal of Transportation Economics and Policy*, 1986, 21(1):37-56.
- [290] VENABLES A J. Evaluating Urban Transport Improvements; Cost-benefit Analysis in the Presence of Agglomeration[J]. *Journal of Transportation Economics and Policy*, 2007, 41(2):173-188.
- [291] Centre for Economics and Business Research (CEBR). The Economic Impact of the London Underground Core Investment Programme[R]. London:CEBR, 1993.
- [292] 吴 迪. 公路运输与国民经济的协同关系模型及评价方法研究[D]. 长春:吉林大学, 2010.
- [293] 刘 奕, 贾元华. 基于 DEA 模型的区域高速公路社会经济适应性评价方法研究[J]. *北京交通大学学报*, 2007, 31(3):1-5.
- [294] 张士俊. 区域高速公路社会经济适应性评价方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2007.
- [295] 王 晖, 贾元华. 交通量与经济量弹性关系的系统分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2004, 4(1):54-60.
- [296] DAMM D, LERMAN S R, LERNER-LAM E, et al. Urban Real Estate Values in Anticipation of the Washington Metro[J]. *Journal of Transportation Economics and Policy*, 1980, 24(3):315-336.
- [297] SANCHEZ T W, SHEN Q, PENG Z R. Transit Mobility Jobs Access and Low-income Labour Participation in US Metropolitan Areas[J]. *Urban Studies*, 2004, 41(7):1313-1331.
- [298] FOURACRE P R, ALLPORT R J, THOMPSON J M. The Performance and Impact of Rail MRT in De-

- veloping Countries[R]. Crowthorne;TRL,2007.
- [299] PORTER D R. Transit-focused Development:a Progress Report[J]. Journal of the American Planning Association,1998,64(4):475-488.
- [300] 刘舒燕.高速公路产业带层次结构模型研究[J].武汉理工大学学报:社会科学版,2001,14(3):229-231.
- [301] 孙志超.公路交通对经济增长和社会就业贡献及测算方法研究[D].北京:北京交通大学,2007.
- [302] 徐大伟.世界汽车安全性技术法规与标准的研究[D].武汉:武汉理工大学,2007.
- [303] (EC) No 1907/2006,Regulation of the European Parliament and of the Council on the Registration,Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) [S].
- [304] 70/156/EEC,Relating to the Protection of Pedestrians and Other Vulnerable Road Users Before and in the Event of a Collision with a Motor Vehicle and Amending Council Directive[S].
- [305] 中国汽车技术研究中心. C-NCAP 试验评价规程:2006年版[R].天津:中国汽车技术研究中心,2006.
- [306] 70/221/EEC,On the Approximation of the Laws of the Member States Relating to Fuel Tanks and Rear Underrun Protection of Motor Vehicles and Their Trailers[S].
- [307] HOBBS C A, GLOYNS P F, RATTENBURY S J. European New Car Assessment Programme (EuroNCAP)—Assessment Protocol and Biomechanical Limits[R]. Wokingham;TRL,1999.
- [308] 杨超.汽车车内空气质量标准法规现状[J].客车技术与研究,2010(1):48-51.
- [309] GB/T 27630—2011,乘用车内空气质量评价指南[S].
- [310] 麦莉,宗长富,朱天军,等.基于模型预测的重型商用车侧翻预警算法研究[J].吉林大学学报:工学版,2009,40(4):251-254.
- [311] 周长城.汽车平顺性与悬架系统设计[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [312] 周长城,孟婕.车辆悬架最佳阻尼匹配减振器设计[J].交通运输工程学报,2008,8(3):15-19.
- [313] 张孝祖,李辉,蔡双飞.四轮转向车辆  $H_2/H_\infty$  混合鲁棒控制及仿真[J].农业机械学报,2008,39(8):14-17,156.
- [314] LEE A Y. Coordinated Control of Steering and Anti-roll Bars to Alter Vehicle Rollover Tendencies[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control,2002,124(1):127-132.
- [315] 王启瑞,刘立强,陈无畏.基于随机次优控制的汽车电动助力转向与主动悬架集成控制[J].中国机械工程,2005,16(8):743-747.
- [316] SMAKMAN H. Functional Integration of Active Suspension with Slip Control for Improved Lateral Vehicle Dynamics[C]// AVEC. Proc AVEC00. Ann Arbor; AVEC,2000:15-22.
- [317] 冯金芝,喻凡,李君,等.车辆防抱制动系统与主动悬架联合控制[J].农业机械学报,2002,33(2):15-19.
- [318] COOPER N, MANNING W, CROLLA D, et al. Integration of Active Suspension and Active Driveline to Ensure Stability While Improving Vehicle Dynamics [J]. SAE Paper 2005-01-0414.
- [319] YASUI Y, KODAMA H, MOMIYAMA M, et al. Electronic Stability Control (ESC) Coordinated with Electric Power Steering (EPS)[C]// FISITA. Transactions of FISITA Congress 2006. London; FISITA, 2006:195-204.
- [320] GOODARZI A, ALIRZAIE M. A New Fuzzy-optimal Integrated AFS/DYC Control Strategy[C]// AVEC. Proc AVEC06. Taipei; AVEC,2006:112-121.
- [321] 李以农,赵树恩,郑玲.汽车主动底盘多模型分层协调控制[J].系统仿真学报,2010,22(5):1274-1278.
- [322] 刘生全,马志义,王平福,等.车用甲醇汽油燃料技术性能[J].长安大学学报:自然科学版,2007,27(4):88-90.
- [323] 中国汽车技术研究中心.中国清洁汽车技术发展路径研究[R].天津:中国汽车技术研究中心,2003.
- [324] 清洁汽车攻关项目总体组.2004年中国清洁汽车行动项目发展概况[R].北京:清洁汽车攻关项目总体组,2005.
- [325] 邹十践.“十二五”规划开局之年展望我国工程机械行业发展态势[J].交通世界,2011,18(1):26-35.
- [326] 苏子孟.工程机械行业运行情况和趋势预测[J].建设机械技术与管理,2011,24(11):80-83.
- [327] 俞璐.在改革开放中蓬勃发展的中国工程机械行业[J].机械工业标准化与质量,2009,14(12):10-13.
- [328] 刁媛,孙博为.盘点2010:中国工程机械年度产业集群[J].工程机械,2011,48(2):77-78.
- [329] 张超群.中国沥青搅拌设备技术现状和发展趋势[J].交通世界,2007,15(12):32-35.
- [330] 朱文天.强制间歇式沥青混合料搅拌设备技术及发展[J].交通世界,2006,14(4):45-49.
- [331] 孙祖望.连续式沥青混合料搅拌工艺的发展与新型的双滚筒搅拌设备[J].建筑机械,1999,19(11):24-29.
- [332] 格雷格·瑞尼格.双滚筒连续式沥青搅拌设备在美国的应用:1[J].建筑机械,2011,21(11):36-40.



- [333] 格雷格·瑞尼格. 双滚筒连续式沥青搅拌设备在美国的应用:2[J]. 建筑机械, 2011, 21(13):34-37.
- [334] 尹正潘. 强制间歇式沥青混凝土拌和机匹配理论及热量计算探讨[J]. 工程机械, 1992, 29(3):29-30, 18.
- [335] 谢立扬, 王雪, 张晨光. 沥青搅拌设备烘干筒物料颗粒运动分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(10):57-60.
- [336] 尹友中. 干燥滚筒内压力的影响和调节[J]. 工程机械与维修, 2007, 14(5):98-100.
- [337] 谢立扬, 李卫章, 宣新祥. 沥青搅拌设备燃烧器性能分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(9):4-6.
- [338] 彭长顺, 王召瑞. 沥青搅拌设备用燃烧器现状及发展趋势[J]. 工程机械, 2007, 44(8):50-53.
- [339] 余建辉. 沥青搅拌设备袋式除尘器[J]. 筑路机械与施工机械化, 2004, 21(9):17-18.
- [340] 谢立扬. 沥青搅拌设备节能减排研究现状及设备存在问题[J]. 建筑机械, 2012, 22(3):25-31.
- [341] 吴学文, 陈拴发. 基于 Sasobit、Sasowam 的温拌沥青性能研究[J]. 石油沥青, 2011, 25(4):45-54.
- [342] 李君璞, 涂启明. 间歇式沥青搅拌设备“贴”热再生料装置的设计[J]. 筑路机械与施工机械化, 2005, 22(10):13.
- [343] 焦生杰. 从沥青混凝土摊铺机的发展看沃尔沃建筑设备旗下德国 ABGTitan8820 摊铺机[J]. 筑路机械与施工机械化, 2008, 25(2):29-31.
- [344] 宋永刚, 景莉. 摊铺机找平控制系统的发展[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(9):7-10.
- [345] 孙祖望, 刘洪海. 沥青路面平整度的传递规律及其试验研究:1[J]. 筑路机械与施工机械化, 1999, 16(1):8-11.
- [346] 于槐三. 沥青混凝土摊铺机抗离析研究初探[J]. 建筑机械, 2004, 14(1):78-79.
- [347] 朱奇, 程战锋, 李自光, 等. 摊铺机螺旋分料器工作参数及结构设计的改进[J]. 建筑机械化, 2007, 9(3):27-29.
- [348] 李自光, 程战锋, 朱奇, 等. 大宽度螺旋全埋摊铺施工工艺应用研究[J]. 长沙理工大学学报:自然科学版, 2007, 4(3):65-69.
- [349] 姚奇, 张肖宁, 陈育书, 等. 基于无损检测及常规检测的单机宽幅和并机梯次摊铺效果综合分析[J]. 公路交通科技, 2007, 24(2):13-17.
- [350] 李冰, 吴仁智, 贺尚红, 等. 沥青混合料转运车及转运摊铺工艺[J]. 筑路机械与施工机械化, 2004, 21(6):24-26.
- [351] 焦生杰. 关于国产摊铺机发展的一些看法[J]. 建设机械技术与管理, 2009, 22(8):40-41.
- [352] 本刊记者. 戴纳派克双层沥青摊铺技术[J]. 建筑机械, 2009, 19(17):58.
- [353] 路凯冀, 宋世海, 李小东. 国内外 Novachip<sup>®</sup> 技术应用现状[J]. 中外公路, 2006, 26(3):94-97.
- [354] 尹继瑶. 振动压实机理与压路机的振动方式[J]. 交通世界, 2010, 23(3/4):87-90.
- [355] 孙祖望. 压实技术与压实机械的发展与展望[J]. 筑路机械与施工机械化, 2004, 21(5):4-7.
- [356] 马学良, 冯鸿福, 张胜. 振荡压实技术在海外道路施工中的应用[J]. 建设机械技术与管理, 2008, 21(12):125-129.
- [357] 本刊组织. 垂直振动压路机[J]. 筑路机械与施工机械化, 2010, 27(10):7-10.
- [358] 车胜创. 冲击式压实机的应用、研究与发展前景[J]. 筑路机械与施工机械化, 2006, 23(3):10-12.
- [359] 尹继瑶. 国外压实机械的技术创新与发展趋势:上[J]. 今日工程机械, 2011, 9(11):76-79.
- [360] 汪学斌, 王宇峰, 刘洪海. 压实在线检测技术的发展现状及前景[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(3):46-48.
- [361] 王宇. “机群智能化施工”要革传统沥青路面施工工艺的命? [J]. 交通世界, 2005, 18(9):36-40.
- [362] 苏子孟. 我国工程机械行业运行情况及“十二五”展望[J]. 建设机械技术与管理, 2010, 23(11):45-50.
- [363] 王长江. 中国液压气动行业当前态势及对策——2011年液压液力气动密封行业工作会议汇报[J]. 液压气动与密封, 2012, 32(1):4-8.