

高速公路现代化管理技术的研究

潘玉利

交通部公路科学研究所

摘要： 伴随着经济的高速发展，中国高速公路经历了惊人的增长速度。高速公路已经成为支持国家经济发展与社会进步的重要基础设施。为了保持高速公路的服务水平、减少高速公路资产的损失，延长高速公路使用寿命，有必要采用先进的技术对庞大的高速公路资产进行科学管理。本文结合高速公路养护管理状况，讨论了高速公路资产监测与管理的科学方法和关键技术。通过提高新技术应用水平，加速我国高速公路资产管理现代化、规范化和科学化。

关键词： 高速公路，资产，养护管理，监测，评价，预测，优化，养护规划，日常养护

前言

随着时间的推移、交通量增长和自然环境的变化，高速公路资产会出现不同程度的自然老化、损坏和使用性能降低。高速公路资产监测与管理的目的是通过科学的手段和方法，延长道路使用寿命，使高速公路处于良好的技术状态、确保道路使用者出行的快速、舒适和安全。

高速公路资产养护管理工作的首要问题是弄清高速公路资产的组成及在高速公路资产组成中，那些资产最易损坏？那些资产对道路使用者的利益影响最大？及各组成资产的损坏发展规律？根据交通部《高速公路养护质量检评方法》（交通部，2003），高速公路资产应由路基、路面、桥涵构造物、沿线设施和绿化组成。

国内外研究文献表明，在高速公路资产组成中，路面最为重要、其次是桥涵构造物、然后才是路基（边坡）、沿线设施和绿化。路面是道路使用者直接接触的部分，路面的养护质量好坏直接影响道路使用者的利益。好的路面状况会给司乘人员带来轻松、愉快的心情和舒服的旅行环境；差的路面将对道路使用者产生多方面的不利影响，例如由于路面颠簸引起的行驶不舒服和旅行疲劳感，降低行车速度，延长在途时间，增加车辆运营费用（燃油、配件、轮耗）及由于拥挤所诱发的交通事故。桥涵构造物的养护状况与交通安全关系密切，路基边坡的坍塌可能会堵塞交通，但是绿化的养护质量只影响道路的景观，对行车速度和舒适程度不产生直接的影响。因此，高速公路资产管理应该分清层次和重点。本文针对高速公路资产的养护管理，讨论了如下5方面的问题：

- 1) 高速公路资产状况快速监测；
- 2) 全国统一的养护质量评价方法；
- 3) 高速公路损坏预测（预警）技术；
- 4) 科学的养护规划与计划；
- 5) 日常养护管理。

1. 高速公路资产状况快速监测

高速公路资产监测与管理的方法是用科学技术，对高速公路使用性能及养护质量进行量化检测、客观评价、科学决策和快速修复。由于高速公路资产包括路基、路面、桥涵构造物、沿线设施和绿化等各个方面，内容多且有许多项目无法用量化指标描述。因此有必要将高速公路资产进行分类、列出常见的损坏、确定能够快速且量化检测的指标。将不能量化或不能通过设备检测的损坏列为日常人工检测的范围。高速公路资产各组成部分的主要损坏类型包括：

- 1) **路基：** 路肩边沟不洁、路肩损坏、边坡坍塌、水毁冲沟、路基构造物损坏、路缘石缺

- 损、路基整体沉降和排水系统淤塞；
- 2) **路面：** 结构强度不足、道路不平整、抗滑性能低、沥青路面的龟裂（及块裂、纵裂、横裂、坑槽、松散、沉陷、车辙、波浪拥包、泛油和修补不良）、水泥路面的破碎板（及裂缝、板角断裂、错台、唧泥、边角剥落、接缝料损坏、坑洞、修补损坏、拱起和层状剥落）；
 - 3) **桥涵构造物：** 桥头跳车、伸缩缝损坏、泄水孔堵塞、栏杆护栏损坏、翼墙锥坡损坏、上跨桥防护网损坏、隧道洞体损坏、隧道渗漏、积水和排水不良、通风、监视系统故障、照明设施故障、涵洞损坏淤积；
 - 4) **沿线设施损：** 收费站服务区管理不善、防撞护栏缺损、隔离栅损坏、紧急电话缺损、标志缺损和标线缺损（不含管线）；
 - 5) **绿化：** 绿化空白路段和绿化管护不善。

在上述高速公路资产损坏列表中，能够用快速设备监测的指标实际上只有有限的几个，而且主要集中在路面方面。这些指标包括路面结构强度、道路平整度、路面抗滑性能、路面车辙和路面损坏（裂缝等）。对其它类型的损坏，目前国内外通用的做法是采用基于手持设备的人工检测。我国从事道路快速检测技术的研究历史只有 20 年，主要研究领域仅限于路面结构强度、道路平整度、路面抗滑性能、路面车辙和路面裂缝检测。

路面结构强度检测：

路面弯沉是评价高速公路路面结构强度的重要指标。最初通过贝克曼梁利用杠杆原理进行人工检测，后来开发了落锤式弯沉仪（FWD）和自动弯沉仪等设备。目前国内外专家正在开发基于激光技术的路面弯沉快速检测设备（图 1），期望检测速度为 80km/h 以上（2004）。



1) 稳态动力弯沉仪 2) 落锤式弯沉仪 3) 激光动态弯沉仪

图 1 路面弯沉检测设备

道路平整度检测：

道路平整度影响旅行舒适性、行车安全性和运输经济性，是道路使用者最关心的指标。道路平整度检测一般分为断面类和反应类 2 种。断面类平整度检测设备直接测量道路纵断面高程，反应类平整度设备通过测量车辆与路面的相对位移来计算国际平整度指数（IRI）。目前道路平整度检测技术基本成熟，主要设备有纵断面分析仪、激光断面仪和颠簸累积仪（图 2）。



1) APL 纵断面分析仪 2) 激光断面仪 3) 拖车式颠簸累积仪

图 2 道路平整度检测设备

路面抗滑性能检测：

路面抗滑性能影响道路行车的安全性，评价方法包括路面摩擦系数和路面纹理构造深度。摩擦系数最早采用英国的 TRL 摆式仪，后来发明了横向力系数快速检测设备（SCRIM）。世界道路协会（PIARC）1992 年组织了 16 个国家 47 种设备，在西班牙和比利时的 54 个路段进行了摩擦系数和构造深度比较，提出了国际抗滑指数 IFI（James, 2001）。常用的抗滑性能检测设备见图 3。



图 3 路面抗滑性能检测设备

路面破损状况检测：

路面损坏是高速公路最常见、也是最难量化检测的一个指标。以前依靠人工检测，上世纪 80 年代国外研究机构利用摄影技术开发了路面摄影检测车（图 4-1），后来随着 CCD 图像采集及图像分析技术的出现，道路研究人员开始利用图像采集及识别技术检测路面损坏。图像采集及识别技术处于初级的研究、应用阶段，很多关键技术需要解决。其中包括，精确定位技术、图像采集及压缩技术、图像处理技术和图像识别分类技术。我国西部交通建设科技项目“沥青路面快速检测与养护技术的研究”正在实施上述关键技术的研究工作。该项目的初步技术成果已被英国意向（MOU）采购（图 4-3）。图 4-2 为交通公路科学研究所正在研究中的“路面图像采集系统 CiCS”。



图 4 路面损坏检测设备及技术

2. 全国统一的养护质量评价方法

我国高速公路通车里程已经接近 3 万公里，早期建成的高速公路陆续进入了大中修养护时期。在确定高速公路大中修投入之前，迫切需要解决的问题是高速公路的养护质量的科学评价，包括数据检测周期、评价方法和评价标准。

数据检测周期：

数据显示，高速公路的路面结构强度、抗滑性能和道路平整度的变化要比路面损坏（裂缝、坑槽等）缓慢的多。根据国外有关文献、养护需求、设备性能和检测成本，认为高速公路结构强度和路面抗滑性能检测周期宜设为 2 年 1 次，道路平整度 1 年 1 次。其余指标包括路基、桥涵构造物、沿线设施和绿化，由于状况变化频繁应缩短检测周期，检测频率可设定为 3 个月 1 次（表 1），这样有助于将高速公路养护质量定期评价工作与高速公路的日常巡视检查和日常养护工作有机地结合起来。

数据调查频率

表 1

调查项目	调查内容	调查频率
A: 路面	路面结构强度 (PSSI)	全面调查: 每 2 年 1 次
	路面抗滑性能 (SRI)	全面调查: 每 2 年 1 次
	道路平整度 (RQI)	全面调查: 每 1 年 1 次
	路面破损状况 (PCI)	全面调查: 每 3 个月 1 次
B: 路基	路基、路肩、边坡、边沟	全面调查: 每 3 个月 1 次
C: 桥涵构造物	桥梁、涵洞、隧道	全面调查: 每 3 个月 1 次
D: 沿线设施	收费站、服务区、标志和标线等	全面调查: 每 3 个月 1 次

评价方法：

高速公路资产的养护质量可采用养护质量指数 MQI (Expressway Maintenance Quality Index) 和相应分项指标评价。MQI 的值域为 0-100，相关指标体系见图 5 及式 1。

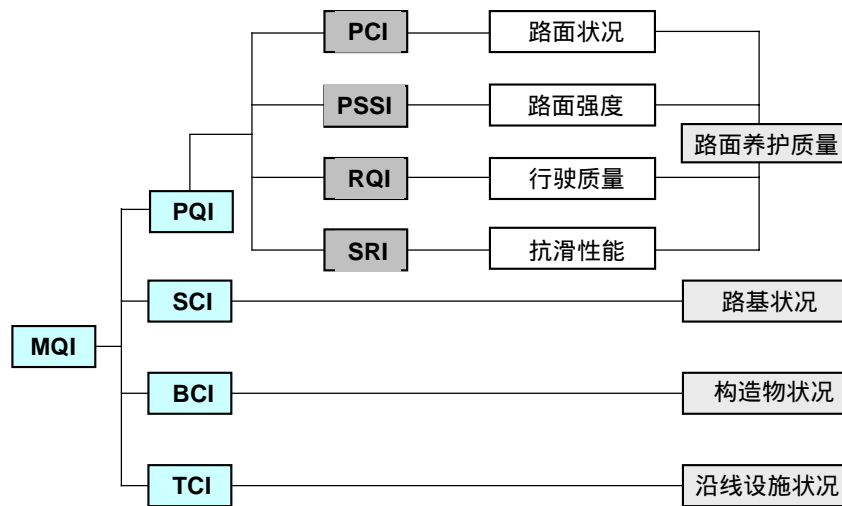


图 5 高速公路养护质量评价体系

$$MQI = w_{PQI} PQI + w_{SCI} SCI + w_{BCI} BCI + w_{TCI} TCI \quad (1)$$

其中：

- MQI — 高速公路养护质量指数；
- PQI — 路面养护质量指数；
- SCI — 路基养护状况指数；
- BCI — 桥涵构造物养护状况指数；
- TCI — 沿线设施养护状况指数。

评价标准：

根据 MQI 和相应分项指标的评价结果，可将高速公路资产的养护质量分为优、良、中、次、差 5 个等级，相应评价标准见表 2。根据高速公路养护质量指数的概念和意义，MQI 应经常保持不低于 80，各分项指标也应保持不小于 75。当 MQI 的分项指标值低于 75 时，应该采取相应的修复措施、改善路况。

高速公路养护质量标准

表 2

评价等级	优	良	中	次	差
MQI	90	80, <90	70, <80	60, <70	<60
PQI, SCI, BCI, TCI	90	80, <90	70, <80	60, <70	<60

3. 高速公路损坏预测（预警）技术

上世纪上半叶，人们在大量应用沥青材料修筑道路的同时，就开始关注由于沥青材料本身特性所引起的各种损坏。半个多世纪以来，对沥青材料和沥青混凝土路面的研究产生了许多重要的理论和关键技术。尽管如此，道路工程师仍无法阻止路面裂缝的发展和雨后坑槽的出现，许多问题至今依然是公路部门关注的对象。目前，更多的努力被放在如何掌握路面的损坏衰变规律、确定各种因素的影响程度、预测路面的使用年限，即所谓的长期性能研究上。实际上，除了路面外大部分高速公路资产的损坏是无法预测的，许多损坏的发生带有一定的随机因素和不确定性。

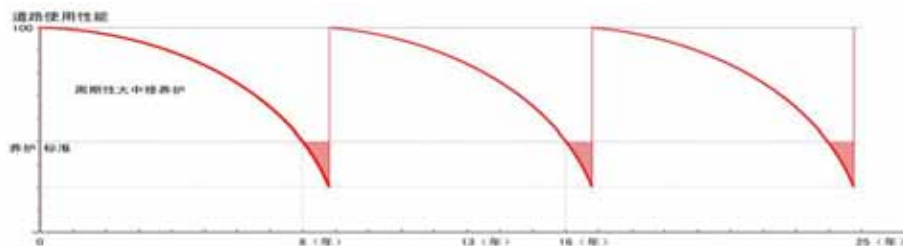
在高速公路资产管理中，路面的长期性能预测最重要，也是最复杂的技术之一。我国开展高速公路长期性能数据调查只有不足 10 年的时间，有些损坏如车辙也只是最近几年才被关注的，对高速公路路面使用性能衰变规律知识的掌握十分有限。已有的数据显示，高速公路使用性能的衰变速度取决于建设初期的路面结构、结构厚度、后期大中修养护方案、养护周期、日常养护效果、交通量和交通组成等多项因素。路面结构及厚度影响路面的大中修养护周期和衰变规律，尽管没有证据显示路面的大中修养护周期与路面结构厚度成线性关系，但是国外经验证明，与薄弱路面结构（图 6-1）相比，厚强路面结构（图 6-2）的大中修养护周期要明显长的多。路面大中修养护周期的延长意味着在高速公路的设计寿命中，将减少大中修次数，降低大中修施工对交通的干扰。高速公路后期养护方案（大中修结构，图 6-3）也会影响路面使用性能变化。严格、规范的日常养护（图 6-4）是路面使用性能正常衰变的保障。有效的日常养护尽管不会明显延长路面的使用寿命，但是不规范和不及时的日常养护肯定会缩短路面的大中修养护周期。

高速公路长期使用性能衰变规律一般用数学公式或数学模型表示。无论数学公式还是数学模型，“其结构必须简单、变量有限，并且满足二个要求：i）能够科学合理的解释大量的观测数据，ii）能够准确地预测未来的发展趋势”（Hawking, 1988）。国内外研究人员已经开发设计了多种路面长期性能预测方程包括理论关系模型。式 2（修正 S 形预测方程）被国外许多公路管理部门用于路面长期使用性能的预测，式中的参数反映了高速公路的路面和交通特性，其值决定了路面的衰变速度。

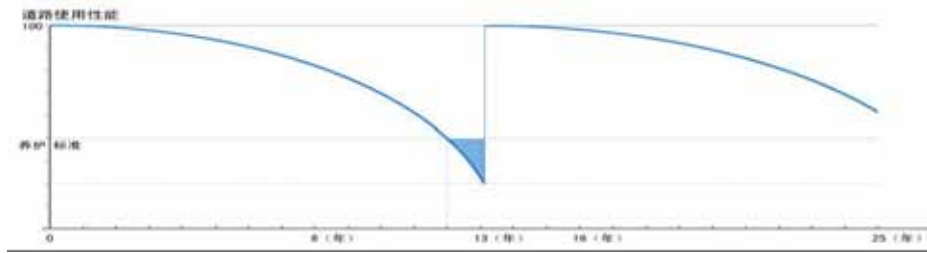
$$RQI = \frac{RQI_{\max} - RQI_{\min}}{1 + a_0 \text{Exp}(a_1 \times t)} + RQI_{\min} \quad (2)$$

式中：

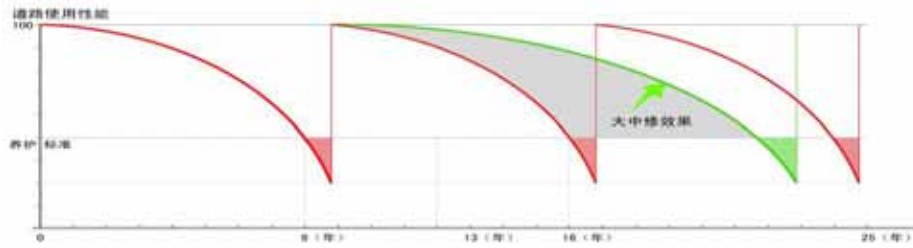
- RQI — 路面使用性能预测指标；
- $RQI_{\max, \min}$ — 与施工质量和养护标准有关的参数；
- a_0, a_1 — 与路面结构及厚度有关的标定参数；
- t — 使用年限。



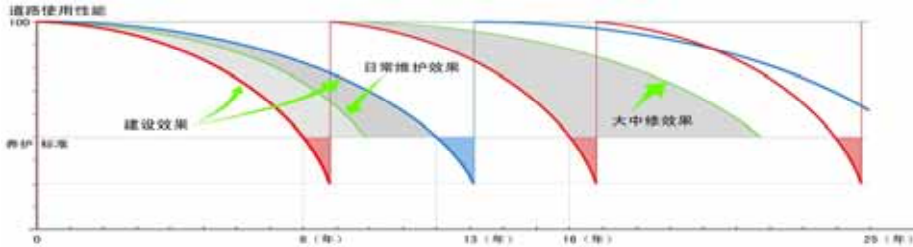
1) 薄弱路面结构



2) 厚强路面结构



3) 周期性养护影响效果



4) 日常养护影响效果

图6 路面长期使用性能预测技术

4. 科学的养护规划与计划

我国有良好的公路规划及设计方面的专家、技术和经验，但是缺少高速公路养护规划的实践，养护计划编制方法也并不令人满意。经验表明，尽管大量的初期建设投入能延长高速公路的大中修养护时间，减少道路使用者费用，但也可能导致不必要的资金浪费。反之，初期投入过少时，虽然能节省初期建设成本，但是将可能面临更高的后期养护投入。薄弱的路面及构造物将缩短大中修养护周期，并使高速公路处于经常性的养护状态，除了增加养护成本外，还将由于养护施工和路况低下导致道路使用者费用（时间、事故、运营）增加。因此，高速公路的养护管理需要实施科学的规划，在高速公路设计寿命周期内，综合考虑初期建设、后期养护与运营期间的道路使用者之间的关系。通过寿命周期费用分析 LCC (Life Cycle Cost, 2000)，降低高速公路总费用或成本（建设与养护），延长大中修养护时间，提高路况服务水平。

养护规划：

养护规划的目的是利用科学的方法，确定一定时期内（如 10 年）高速公路的大中修养护需求，制定高速公路各资产组成的战略养护标准，编制长期的高速公路养护投资方案。高速公路规划的核心问题是寻找高速公路养护投入（费用）与养护质量及社会经济效益之间的战略平衡。

在高速公路资产养护管理中，养护费用是路况改善和降低道路使用者费用的基本因素。一条高速公路从竣工开始，在其寿命周期内，要产生包括初期建设费用、后期运营与养护费用和经营期间的道路使用者（用户）费用。如图 7 所示，三部分费用构成的比例取决于道路的初期建设规模、后期养护状况、交通流量和交通组成多方面因素。三部分费用相互关联，在相关的费用之间，客观存在着由高速公路养护质量、车辆特性和交通流特性等因素共同支配的总费用的不同组合，及由这些

组合形成的寿命周期费用函数 LCC (见图-8 及式-3)。高速公路寿命周期费用函数存在着一个费用极值(总费用最小点),这个极值所代表的费用组合一般被解析为最佳的养护投资方案。目前,在我国 11 个省市 50 多条高速公路上使用的高速公路综合养护管理系统技术(CPMS),能够根据不同的高速公路(路况、几何线形、交通量等),以优化的方式确定高速公路的战略养护标准、长期养护需求和养护预算(图 9)。

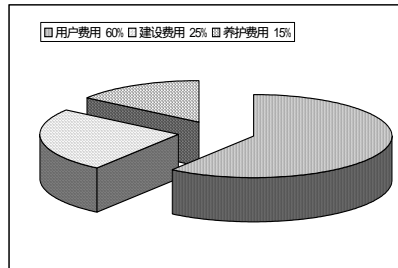


图 7 道路寿命周期费用

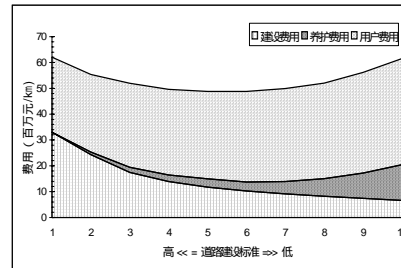


图 8 道路寿命周期费用函数

$$LCC = \sum_{t=0}^n pvrt \times [CC_t + MOC_t + UC_t] - SV_n \times pvrn \quad (3)$$

式中：

- LCC — 寿命周期费用；
- CC — 初期建设费用；
- MOC — 养护与运营费用；
- UC — 道路使用者费用；
- SV — 残值；
- pvrt — t 年的贴现系数。



1) 养护质量与养护标准



2) 养护需求分析预测

图 9 高速公路养护规划技术

养护计划：

在公路网高度发达的西方国家，长期的(5-10年)养护规划报告和年度养护计划报告是国会年度预算审批的基本依据。高速公路养护计划是与养护规划对应的短期(1年)养护项目计划程序。养护计划的目的是根据高速公路养护质量检测评定情况、大中修养护需求，确定未来一年的养护工程计划。养护计划的基本内容应包括对高速公路资产损坏状况的客观描述、养护质量评价、基本养护需求、资金约束下的工程项目优先选择和项目的实施计划安排。

养护计划的编制与资金的优化分配往往密不可分。为了使有限的高速公路养护资金发挥最大的社会经济效益，必须有一套科学的资金分配技术。我国在研究路面管理系统(1998)技术时，曾对资金约束下的优化技术进行了系统的研究，开发了相关的分配模型。通过科学的优化分配，使道路管理部门能够根据高速公路的使用状况、交通流量和交通组成等因素，确定路网中那些路段？在什么时候？用什么方法？进行养护才能发挥高速公路养护投资的最大效益。

5. 日常养护管理

如图 6-4 所示,不到位的日常养护将使高速公路损坏得不到及时的修复,不及时修复损坏的日积月累将反过来加速高速公路损坏,直到通过日常养护手段无法解决问题,而不得不缩短高速公路养护周期,提前实施大中修养护,造成高速公路资产浪费。因此,高速公路的日常养护是不能被忽视的一个重要因素。高速公路日常养护的目的是通过日常巡查、养护与修复,维持高速公路资产的完好。高速公路日常养护内容应包括路基、路面、桥涵构造物、沿线设施和绿化。

尽管我国已有 10 余年的高速公路运营、管理与养护经验,但是数据表明,在全国范围内已调查的 163 个高速公路管理机构中(交通部,2002),大部分管理机构不具有现代化的预防性养护意识,同时也缺少科学、有效的日常养护方法和技术。

高速公路日常养护管理的方法和关键技术可概括为如下几个方面:

- 1) 高速公路损坏的及时发现及快速定位(卫星定位和距离定位);
- 2) 损坏的现场描述及快速检测(便携式数据采集设备);
- 3) 损坏状况的快速上报(网络数据传输);
- 4) 基于养护专家系统的原因诊断及修复方案(专家系统、损坏机理、修复技术);
- 5) 任务单或任务列表的制作及任务委托(优先顺序、费用使用规则、合同管理);
- 6) 损坏修复质量评定及技术档案(评定方法、电子档案)。

小结

随着高速公路网的逐渐形成,高速公路资产的科学养护与管理将逐渐成为一个需要认真对待的重要课题。本文对高速公路资产管理中的一些关键技术,包括高速公路资产监测、养护质量评价方法、高速公路损坏预警、养护规划、养护计划及日常养护管理等问题,作了初浅的分析。期望通过高速公路资产管理关键技术的研究,为我国高速公路养护管理科学化、规范化和现代化建设提供技术支持。

参考文献:

- [1] 交通部. 高速公路养护质量检评方法(试行),北京:人民交通出版社,2002。
- [2] 交通部. 关于 2001 年度全国高速公路养护管理工作检查情况的通报. 交通部:交公路发[2002]35 号,2002
- [3] Snaith M S. Pavement Maintenance and Management System Manual. UK: The University of Birmingham, 1984.
- [4] Hawking S. A Brief History of Time. UK: Cox & Wyman Ltd, 1988
- [5] Carl-Gustaf Wallman. Friction Measurement Methods and the Correlation between Road Friction and Traffic Safety[R]. Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), 2001.
- [6] James C, J.J. Henry. Evaluation of IFI Calibration Procedures for New and Existing Devices[R]. Transportation Development Centre, Canada, 2001.
- [7] 曾沛霖. 干线公路(省、市级)路面评价养护系统技术开发. 七五国家重点科技攻关项目研究报告集. 北京:交通部公路科学研究所, 1990.
- [8] 潘玉利. 路面管理系统原理. 北京:人民交通出版社, 1998.
- [9] 潘玉利. 公路投资综合效益分析系统. 九五国家重点科技攻关项目研究报告, 北京:交通部公路科学研究所, 2000.
- [10] 李强, 潘玉利. 路面快速检测技术与设备研究状况分析. 北京:交通部公路科学研究所, 2004.