

足尺沥青路面加速加载 试验实践导论

Introduction of Full Scale Accelerated Pavement Test on Asphalt Pavement Practice

田泽峰 范兴华 刘云全 著



東北大學出版社
Northeastern University Press

足尺沥青路面加速加载试验实践导论

Introduction of Full Scale Accelerated Pavement Test on
Asphalt Pavement Practice

田泽峰 范兴华 刘云全 著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 田泽峰 范兴华 刘云全 2012

图书在版编目 (CIP) 数据

足尺沥青路面加速加载试验实践导论 / 田泽峰, 范兴华, 刘云全著. —沈阳: 东北大学出版社, 2012. 12

ISBN 978-7-5517-0277-5

I. ①足… II. ①田… ②范… ③刘… III. ①沥青路面—路面实验
IV. ①U416.217.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 315759 号

内容简介

本书由笔者在总结三年来辽宁省开展足尺沥青路面加速加载试验研究所积累的经验和取得成果的基础上编著而成。全书分为上、下两篇, 上篇为方法篇, 详细介绍基于 MLS66 的足尺沥青路面加速加载试验方法, 包括足尺路面加速加载设备与试验、MLS66 的操作和维护、试验设计及其实现、路面破损及其表征、加速加载试验数据的采集; 下篇为实践篇, 内容为利用 MLS66 开展足尺沥青路面加速加载试验的实例介绍, 包括钢桥面铺装加速加载试验、橡胶沥青路面加速加载试验和微表处加速加载试验。

本书可供道路工程技术人员以及路面试验设备研制人员参考, 同时作为国内首次采用第三代直线式足尺路面加速加载设备开展足尺沥青路面加速加载试验的总结, 可以为未来拟选用此类设备的科研机构在试验设计、设备使用、路面性能评价和路面结构响应分析方面提供借鉴。

出版者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路3号巷11号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph@neupress.com

http: // www. neupress. com

印刷者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发行者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 240mm

印张: 11.5

字数: 219千字

出版时间: 2012年12月第1版

印刷时间: 2012年12月第1次印刷

责任编辑: 郭爱民 潘佳宁

封面设计: 刘江旸

责任校对: 叶子

责任出版: 唐敏智

ISBN 978-7-5517-0277-5

定 价: 28.00 元

前 言

现行的沥青路面设计通常将车辆荷载视为静荷载或近似等效静荷载,这使得现行的沥青路面设计参数不能全面地反映实际交通荷载下的路面结构行为,经常出现沥青路面的实际使用寿命低于其设计寿命的现象。特别是在我国经济快速发展的今天,重载、超载现象较为普遍,现行沥青路面设计的这种局限性尤为突出。通过长期观测路面性能,总结导致路面发生损坏的原因,分析路面结构的损伤机理以修正沥青路面材料和结构设计参数,是改善沥青路面设计可靠性的有效手段。然而,值得注意的是,开展路面长期性能(Long-Term Pavement Performance)研究受到资金投入、研究周期和实施条件的限制,并不容易被普遍接受。在这种情况下,路面加速加载试验(Acceleration Pavement Test, APT)成为了一种切实可行的路面性能检验和研究手段。

20世纪初,英国建造的“道路机器”首次让世界认识了针对路面结构的“加速加载”试验思想,在此之后,美国铺筑的阿林顿试验车道使路面加速加载试验受到了普遍的关注。经过近百年的发展,路面加速加载试验手段和方法得到了不断的完善。截至目前,利用大型可移动直线式路面加速加载设备开展试验成为该领域的主流趋势。

我国于20世纪80年代引进了足尺路面加速加载试验设备,到目前,已有多家研究机构拥有路面加速加载试验系统,这些设备或设施为我国的路面设计和路面性能评价提供了大量颇具参考价值的学术成果和经验数据。2009年,笔者所在单位——高速公路养护技术交通行业重点实验室(沈阳)——引进了第三代大型可移动式足尺路面加速加载设备MLS66。时至今日,此台设备已经累计完成加载1500余万次,完成了4项针对不同沥青路面结构的试验项目。

为总结利用MLS66开展足尺沥青路面加速加载试验的科研实践经验,笔者撰写了本书,以求为业内同行提供借鉴和参考。

本书共分为上、下两篇。上篇为方法篇,在总结已开展的足尺沥青路面加速加载试验项目的基础上,参考国内外足尺路面加速加载试验的研究发展现状,阐述了开展路面加速加载试验的基本方法、加载方案设计、试验设备操作与维护以及试验过程中的数据采集。其中:第1章,介绍路面加速加载试验的概念和国内

外具有代表性的足尺路面加速加载试验设备（设施）及其数据采集；第2章，介绍MLS66的组成、原理、核心部件、环境控制装置以及操作维护要点；第3章，介绍加速加载试验设计流程、试验参数和环境模拟方法；第4章，介绍在路面加速加载试验条件下，路面损坏与实际沥青路面损坏之间的对应关系，以及路面损坏的记录与表征方法；第5章，介绍足尺沥青路面加速加载试验的数据采集系统与数据采集。下篇为实践篇，介绍了辽宁省利用足尺路面加速加载设备MLS66开展试验的情况。其中：第6章，介绍钢桥面铺装加速加载试验，是MLS66运抵中国后开展的第一个足尺路面加速加载试验，本次试验以MLS66模拟行车荷载，对铺装两种铺装结构的钢桥模型加载，考察了铺装层与钢桥面板的协同变形能力，铺装层抗车辙、抗水损害、抗疲劳特性，为确定滨海路辽河特大钢桥桥面铺装方案提供了决策依据；第7章，高速公路橡胶沥青路面加速加载试验，本次试验以在路面结构内部埋设大量力学传感器为突出特点，利用埋设于路面结构内部的力学传感器采集重复荷载作用下，路面结构的应力应变数据，以分析不同加载阶段橡胶沥青路面的力学响应特性；第8章，微表处加速加载试验，本次试验将MLS66应用于预防性养护技术方案的性能评价，在无法于较薄的微表处层和半刚性沥青路面面层之间布设层间黏结检测仪器的情况下，通过埋设于半刚性路面结构内部各类力学传感器，监测到了微表处层发生较大程度推拥变形的加载阶段，并考察了微表处层的抗疲劳特性。

本书由田泽峰执笔，范兴华、刘云全审稿。在本书的撰写过程中，作者的同事张怀志、姜鹏、陈千、高爽、王波为部分章节内容提供了有关的资料和数据；在开展足尺路面加速加载试验的实践过程中，作者的同事张书立、吴永良及其所带领的机械维修组，对MLS66设备的使用和维护倾注了大量的精力，所积累的经验成为本书部分章节内容的必要素材；同时对于本书的出版，辽宁省交通科学研究院院长王永康教授级高级工程师给予了全力的支持和帮助，在此，作者向上述领导和同事的辛勤工作与默默奉献表示衷心地感谢。

三年来，高速公路养护技术交通行业重点实验室（沈阳）在开展足尺沥青路面加速加载试验研究的过程中，得到了辽宁省交通厅与兄弟单位，辽宁省高速公路建设局、高速公路管理局、交通规划设计院、交通厅公路管理局的领导、专家和同事们的大力支持，在此一并对这些单位的同仁表示衷心感谢。

由于作者水平有限，书中错误之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作者

2012年10月于沈阳

目 录

上篇 方法篇

第 1 章 足尺路面加速加载试验	3
1.1 引 言	3
1.2 沥青路面设计方法	4
1.2.1 基于经验的设计方法	4
1.2.2 基于力学的设计方法	6
1.3 设计中的路面性能检验	8
1.3.1 路面长期使用性能研究	9
1.3.2 路面加速加载试验研究	10
1.4 有代表性的 APT 设备/设施	14
1.4.1 可控车道试验	14
1.4.2 固定线型 APT	17
1.4.3 其他类型	26
1.5 APT 的信息采集	26
1.5.1 管理信息	28
1.5.2 荷载信息	28
1.5.3 路面状况	29
1.5.4 材料特性	30
1.5.5 环境因素	32
1.5.6 路面响应	33
1.5.7 路面性能	34
1.6 本章小结	34
第 2 章 MLS66 的操作和维护	36
2.1 MLS 公司的 APT 设备	36
2.2 MLS66 的组成与原理	37

2.2.1	MLS66 设备的组成	39
2.2.2	MLS66 加载单元	41
2.3	MLS66 的操作	47
2.3.1	设备的升降和移动	47
2.3.2	设备定位和高度调整	47
2.3.3	轴载和胎压监测	49
2.4	MLS66 的维护	52
2.4.1	日常例行维护	52
2.4.2	200 万次维护	53
2.4.3	全面维修养护	54
第 3 章	APT 设计及实现	60
3.1	行车荷载的模拟	60
3.1.1	行车荷载与加载参数	60
3.1.2	加载参数的确定	63
3.2	环境因素的考虑	69
3.2.1	路面高温	70
3.2.2	自然降雨	71
3.3	APT 方案设计	72
3.3.1	试验参数	73
3.3.2	加载方案	74
3.4	APT 方案实施	75
3.4.1	轴载的设定和调整	75
3.4.2	路面温度控制	78
3.4.3	轮迹分布的实现	80
3.4.4	模拟降雨的实现	82
第 4 章	路面破损与记录	84
4.1	沥青路面的破损	84
4.1.1	破损的分类	84
4.1.2	常见沥青路面破损的成因及表征	86
4.1.3	APT 条件下的路面破损	94
4.2	APT 条件下路面破损的记录	98
第 5 章	APT 数据的采集	103
5.1	APT 数据采集系统	103

5.2	力学响应数据的采集	104
5.2.1	技术指标的选择	104
5.2.2	传感器的选型	105
5.2.3	力学响应监测系统举例	108
5.2.4	FWD 数据的采集	112
5.3	路面性能与环境数据的采集	113
5.3.1	车辙数据的采集	114
5.3.2	环境数据的采集	115

下篇 实践篇

第 6 章	钢桥面铺装加速加载试验	121
6.1	钢桥模型与铺装结构	121
6.1.1	钢桥模型设计与分析	121
6.1.2	铺装结构形式	128
6.2	试验内容和加载方案	129
6.3	试验过程与结果	130
6.3.1	试验过程描述	130
6.3.2	试验结果	130
第 7 章	橡胶沥青路面加速加载试验	136
7.1	试验内容与路面结构	136
7.2	加载方案与数据采集	137
7.3	试验结果与分析	138
7.3.1	车辙变化规律	138
7.3.2	整体强度变化	148
7.3.3	抗滑性能	151
7.3.4	力学响应分析	152
7.3.5	路面破损记录	159
7.4	本章小结	160
第 8 章	微表处加速加载试验	162
8.1	原路面与微表处	162
8.1.1	半刚性基层沥青路面结构	162

8.1.2	微表处混合料	163
8.2	微表处施工	165
8.2.1	原路面加载后状态	165
8.2.2	微表处施工过程	166
8.3	加载方案与数据采集	167
8.4	试验结果	168
8.4.1	车辙断面与深度	168
8.4.2	构造深度	170
8.4.3	渗水系数	170
8.4.5	路面破损	171
8.4.6	力学响应	171
8.5	结 语	175

上 篇

方 法 篇

第1章 足尺路面加速加载试验

1.1 引言

路面是指利用筑路材料铺筑于路基顶面用以承受行车荷载作用的多层结构,一般由面层、基层、垫层组成。对其最基本的要求是耐久、平整和抗滑^[1]。

按筑路材料的不同,路面可分为沥青路面、水泥混凝土路面、碎石路面、砂土路面等。沥青路面以其无接缝、整体强度高、行车平稳性好、噪声低、振动小、维修方便等特点,成为高等级公路最主要的道路形式。尽管如此,与其他筑路材料不同,沥青及其混合料的材料特性受自然环境影响显著,在不同的自然环境下,沥青路面的结构行为特性差别较大,这就需要在沥青路面设计时考虑更多的影响因素。事实上,各种路面设计理论仅是对现实路面工作条件的近似,以及对沥青混合料材料特性的理想化,这种“近似”和“理想化”的理论分析和设计,难以可靠地预测沥青路面的使用寿命,因此常常发生沥青路面在未达到设计使用寿命时便失去了对行车荷载的承受能力^[2]。

对于沥青路面,另一个更为显著的特点是其早期损坏至失稳破坏失去承载能力的过程并不是短暂或瞬时的,而是在行车荷载作用下路面细微损坏长期累积的结果。尽管通车后不久,沥青路面就有可能发生一定程度的损坏,如车辙、裂缝等,但是路面结构的整体强度并未衰减,仍可以有效地承担行车荷载。而沥青路面早期损坏的存在,一方面会影响行车的舒适度,另一方面成为引发较大幅度沥青路面破坏的诱因,以致发展为路面难以行车。

基于沥青路面的上述特点,最初的设计仅仅是沥青路面工程的起点,此后还需要通过大量调查、检验以调整和完善最初的设计,实现最终的工程目标,亦即获得更为耐久的沥青路面结构。由此,将基于不同思想的沥青路面设计方法,人为地划分为“基于经验的路面设计”和“基于力学的路面设计”,而所有设计方法都需要在设计过程中对路面的使用性能进行检验和评价。

1.2 沥青路面设计方法

在深入介绍路面加速加载试验的概念之前,需要了解沥青路面的设计方法和路面加速加载试验最初的目的是为了检验和评价沥青路面设计、修正设计参数,这些都是路面设计中路面性能评价的重要手段。因此,从沥青路面设计方法入手阐述路面加速加载试验的概念有助于读者更为深入地理解路面加速加载试验概念的实质以及路面加速加载试验的作用。

1.2.1 基于经验的设计方法

具有代表性的基于经验的设计方法为 CBR 设计法、AASHTO 方法和英国 Road Note No. 29。

1.2.1.1 CBR 设计法

CBR 设计法是 20 世纪 20 年代美国加利福尼亚州首先推荐使用的一种路面设计方法。根据多年实测结果得到一条土基(或路面材料)承载值与路面总厚度的关系曲线,而土基或路面材料的承载值用标准碎石承载能力的百分比表示,即 CBR,因此称之为 CBR 法。

根据美国加州交通部 1928—1929 年的调查,发现路面破坏的主要类型包括如下 3 种:

- ① 路面因吸水,导致土基材料发生侧向位移;
- ② 路面下的材料不均匀沉陷;
- ③ 路面下材料在多次重复荷载作用下,产生过大的弯沉。

一般认为,①②两种破坏是由于土基压实不够,而③中的破坏则是由于面层厚度不足或是基层抗剪强度不够所致^[3,4]。

CBR 设计法是以 CBR 值作为路基和路面材料的性质指标,通过对已破损或使用良好的路面的调查和 CBR 测定,建立起路基土“CBR—轴载—路面结构层厚度”三者间的经验关系,利用此关系曲线,可以按设计轴载和路基土 CBR 值确定所需的路面总厚度^[6]。

1.2.1.2 AASHTO 方法

AASHTO 方法采用现时服务指数 (*PSI*) 作为设计指标,其值可通过对路面的使用性能进行客观观测或主观评价的方法确定。“主观评价”指组成评分小组,由评分小组成员对路面分别进行评分 (0~5),所得到的评分值即表示 *PSI* 值;客观评价指量测路面的坡度变化、车辙深度、裂缝面积等状况^[5]。

$$PSI = 0.03 - 1.91\lg(1 + \overline{SV}) - 1.38\overline{RD}^2 - 0.01\sqrt{C + P} \quad (1-1)$$

式中： PSI ——路面现时服务指数（Present Serviceability Index），是一个无量纲，反映了道路使用者对路面服务质量的平均评价，其数值在1~5之间；

\overline{SV} ——平均坡度变化；

\overline{RD} ——车辙深度平均值，cm；

C ——已发展成网状的裂缝面积；

P ——修补的面积。

该设计方法最初的基本设计方程是

$$\lg W_{18} = 9.36\lg(SN + 1) - 0.2 + \frac{\lg \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} \quad (1-2)$$

式中： W_{18} ——累计标准单轴荷载（ESAL）作用次数；

ΔPSI —— PSI 从路面新建至使用年限末的差值（ $4.2 - P_i$ ），依道路等级确定；

SN ——路面结构数，表征路面结构的等效厚度。

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3 + \cdots + a_i D_i \quad (1-3)$$

式中： a_i ——第*i*层的材料系数；

D_i ——第*i*层的厚度。

路面结构数是AASHTO方法中特别定义的，用以反映路面各层（除路基外）的等效厚度。式（1-3）中的 a_i 与材料的类型和强度有关，可根据该材料的弹性模量、马歇尔稳定度、CBR值、三轴试验结果或无侧限压缩试验结果换算得到。根据预测的设计年限内的累计等效单轴荷载作用次数，利用式（1-3）可以计算出需要的最小路面结构数 SN ，再根据所采用的路面各结构层材料，利用式（1-3）可以确定路面各层的厚度。式（1-2）中的 ΔPSI 是路面初始 PSI 与使用年限末 PSI 的差值。在AASHTO设计方法中，假定新路面的 $PSI = 4.2$ ，使用期末的 $PSI = 1.5$ 。AASHTO的设计方程表明，不同的路面结构，不论其结构组合如何，只要其结构数相同，则其使用寿命和使用性能就是相同的。

1.2.1.3 英国 Road Note No. 29

英国 Road Note No. 29 是英国运输部运输与道路研究所（Transport and Road Research Laboratory, TRRL）和公路工程处共同制定的方法，其全称是新建道路路面结构设计指南。1960年，通过调查世界各国设计法和以往经验提出了该方

法,用于中等和重交通量的道路结构设计。此后经过1965年、1970年两次修订。该方法1970版的特点是将沥青混凝土面层和基层的厚度仅作为累积和交通量的函数来考虑;而底基层的厚度则由路基承载力、设计交通量、冰冻情况等因素确定;路基承载力采取CBR试验确定。试验是在很高的天然含水量条件下进行的,因此所得CBR值较低。其设计程序是:先把卡车辆数换算成80kN标准轴荷载的累积通过次数;再从累积次数和路基CBR值求出底基层厚度(此时尚应考虑冰冻情况),最后根据已定的基层类型求出基层厚度和面层厚度^[4]。

1.2.2 基于力学的设计方法

随着现代计算科学和高速计算机的发展,采用力学解析法进行路面设计渐渐成为行业的主流,大量基于多层弹性体理论解的计算软件层出不穷,如BISAR, CHEV, ELSYM, PDMAP, VESYS等。同一时期,即20世纪60年代中后期,有限元方法在路面分析中的灵活性得到了普遍关注,有限元方法能够较为充分地考虑材料性能,但是在动载方面却没有更多的考虑。随后,基于力学解析的设计方法中,Shell设计法和AI设计法成为了公认的较为完善的路面设计方法^[6]。

1.2.2.1 Shell设计法

Shell设计法将路面视为多层线弹性体,各层材料以动态模量/劲度表征,以厚度 h_i 、模量 E_i 和泊松比 μ_i 表示路面特征。混合料的线弹性性质以其劲度模量体现,其值取决于沥青含量、沥青劲度和沥青混合料空隙率。路基模量受应力影响,路基动态模量在现场可用动态弯沉仪测定,测定模量时,所施加荷载及土基含水量须能代表实际土基的工作状态。无结合料基层模量依赖于它的受力状态,其值取决于路基模量和基层厚度^[6,7]。在自然环境方面,仅考虑温度对沥青混合料材料特性的影响,采用如图1.1所示关系把月平均气温转化为加权平均气温,依据沥青层厚和加权月平均气温可求得路面沥青层温度 T_{mix} 。

Shell设计法中考虑了两项主要设计指标和两项次要设计指标,主要设计指标为沥青层底面的容许水平拉应变 ε_r 和路基顶面的容许竖向压应变 ε_z ,控制标准如式(1-4)和式(1-5)所示。

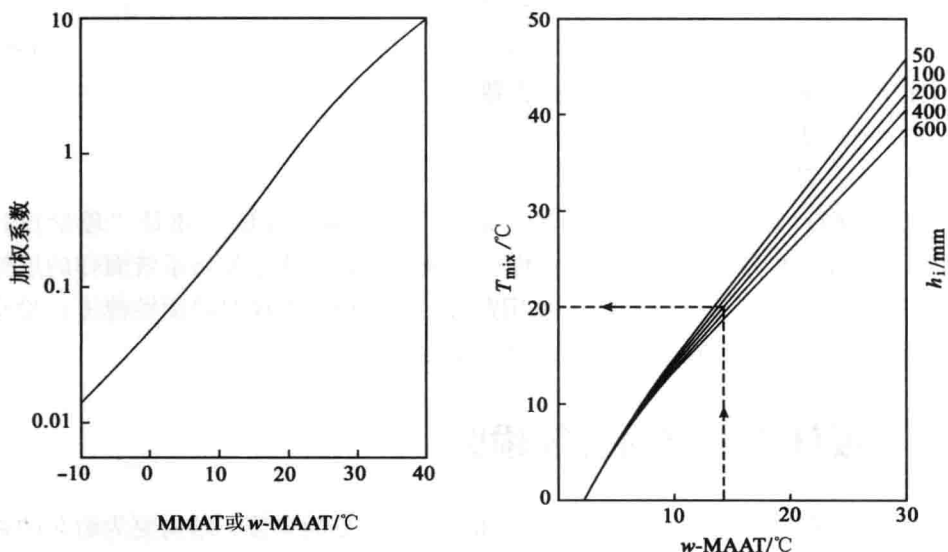
$$\varepsilon_r = C \cdot N^{-0.25} \quad (1-4)$$

$$\varepsilon_z = \alpha \cdot N^{-0.25} \quad (1-5)$$

式中: N ——累计标准荷载作用次数;

C ——与沥青层模量有关的系数;

α ——取0.018或0.021,保证率为95%时取0.018,保证率为85%时取0.021。



(a) 月平均气温加权系数曲线

(b) 加权月平均气温与沥青面层等效温度的关系

图 1.1 Shell 设计法中的温度加权与沥青面层等效温度关系

Shell 设计法中的两项次要指标是水泥稳定类材料底面的弯拉应力和路表面的永久变形。水泥稳定类材料底面的弯拉应力采用式 (1-6) 控制。

$$\sigma_{z2} = \sigma_{r1}(1 - 0.075 \lg N) \quad (1-6)$$

式中: σ_{z2} ——容许弯拉应力;

σ_{r1} ——材料的极限弯拉强度。

1.2.2.2 AI 设计法

与 Shell 设计法相类似, AI 设计法也把路面视为多层弹性体系, 各层材料以弹性模量和泊松比表征 (沥青混合物以动态模量表征, 粒料以回弹模量表征)。沥青混合料的动态模量及粒料的模量依据回归方程式确定, 土基回弹模量 M_r 可由室内重复三轴抗压试验确定, 或根据 M_r 与 CBR 的关系式估算而得。交通荷载以两个双轮组表示, 与路面的接触面假定为圆形, 接触压力、半径和间距一定; 设计时的临界应变位置位于双轮荷载的对称轴上。环境的影响通过面层温度对混合料劲度值的影响得以体现, 以沥青面层厚 1/3 深处的温度作为沥青层的设计温度, 由月平均气温和月平均路面温度的关系式计算得到。

AI 设计法采用沥青层底的水平拉应变 ε_r 控制沥青层的裂缝和路基表面的竖向压应变 ε_c 控制路面的永久变形。沥青处置层的变形大小则通过材料的性质来控制。路面寿命与 ε_r 和 ε_c 的关系为^[4]

$$N = a (1/\varepsilon_r)^b \quad (1-7)$$

$$N = a / (1/\varepsilon_c)^b \quad (1-8)$$

式中： N ——路面开裂时荷载的作用次数；

ε_r ——沥青面层底水平拉应变；

ε_c ——路基顶面的竖向压应变。

总结现行的沥青路面设计方法，无论是“经验设计法”还是“理论设计法”，都只是人们便于定量描述“路面—车辆—环境”这个复杂系统而作的近似于理想化的“归纳”和“演绎”。采用贴近现实的检验手段对路面性能进行检验或对实际路面的使用情况进行观测是十分必要的。

1.3 设计中的路面性能检验

为了实现道路工程的最终目标，获得服务功能更为完善、结构更为耐久的路面，仍然需要在设计中，检验拟确定的路面结构组合在实际工作环境下的性能，亦即路面设计过程中的路面性能检验。

路面性能是一个含义十分宽泛的技术术语，几乎所有表征路面服务能力的术语或指标都可归结于这一概念。1962年，Caray 和 Irick 首次提出了使用性能 (Performance) 的概念，给出了路面使用性能的经典定义，即“路面服务能力的演变过程”，按照此定义提出了 *PSI* 这一使用性能指标。1987年，美国 SHRP 研究计划“基于性能”这一思想将路面性能概念的覆盖面不断扩大，包含了路面行驶质量、损坏状况、结构力学行为、行驶安全性，以及路面材料的疲劳、变形、开裂、老化等各个方面^[6]。

对于路面性能的检验，按其覆盖范围和所获得的收益可归纳为以下4类。

- ① 将自然环境影响因素仅归纳为温度、湿度、冻融，并考虑单一因素影响的实验室路面材料性能试验或小型的结构试验；
- ② 强调自然环境影响的多因素耦合作用，但仍基于路面材料性能试验的室外路面结构试验；
- ③ 强调轴载的可控性并监测自然环境因素变化的试验路研究；
- ④ 以积累现役路面实际使用性能检测数据和长期气候统计资料的路面长期使用性能研究。

Fred Hugo 按照路面性能研究方法的投入和研究收益对比了上述4类路面性能研究方法，并给出了路面加速加载试验在各类路面性能研究中的地位，如图1.2所示^[8]。