

公路桥梁 与改扩建新技术

潘永祥 © 著



云南大学出版社
YUNNAN UNIVERSITY PRESS

公路桥梁与改扩建新技术

潘永祥 著



云南大学出版社
YUNNAN UNIVERSITY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

公路桥梁与改扩建新技术 / 潘永祥著 . -- 昆明 :
云南大学出版社 , 2019
ISBN 978-7-5482-3615-3

I . ①公… II . ①潘… III . ①公路桥 - 改建②公路桥
- 扩建 IV . ① U448.145.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 008946 号

策划编辑: 王翌洋
责任编辑: 王翌洋
封面设计: 黄伟娟

公路桥梁与改扩建新技术

潘永祥 著

出版发行: 云南大学出版社
印 装: 昆明理焯印务有限公司
开 本: 787mm×1092mm 1/16
印 张: 11
字 数: 185
版 次: 2019 年 1 月第 1 版
印 次: 2019 年 1 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-5482-3615-3
定 价: 38.00 元
社 址: 昆明市一二一大街 182 号
(云南大学东陆校区英华园内)
邮 编: 650091
电 话: (0871) 65033244 65031071
E-mail: market@ynup.com

若发现本书有印装质量问题, 请与印厂联系调换, 联系电话: 0871-64167045。

前 言

随着高速公路建设的飞速发展，我国的高速公路建设速度也在逐步加快。但由于我国经济的迅猛发展，交通量成倍增长，我国的高速公路的发展速度仍不能满足经济发展的需要。同时，由于已建成的高速公路和桥梁的运营情况随着使用时间的加长而不断下降，目前我国早期修建的许多公路和桥梁出现了通行能力差、服务水平低等现象，已经不能满足社会和经济发展的需要。为了提高公路服务水平，许多高速公路都面临着改建、扩建、提升道路等级的问题，公路桥梁的改扩建已迫在眉睫。改扩建的基础工程复杂，技术难题多，工程管理难度大，如何对公路桥梁改扩建工程进行有效管理成为当前应该重点考虑的重大问题。

本书在写作过程中，参考了一些同行专家、学者的相关著作和论文，并吸取了他们的一些研究成果，在此谨致诚挚的谢意。限于作者水平，书中难免有许多不妥之处，恳请同行专家、学者和广大读者给予批评指正。

潘永祥

2018年10月20日

目 录

第一章 改扩建公路桥梁综合优化技术	1
第一节 现有公路桥梁技术性能评价与拆除原则	1
第二节 桥梁加固优化对策	12
第三节 桥梁加宽方式优化	16
第四节 加宽桥梁桥面铺装优化	22
第五节 改建桥梁施工优化技术	26
第二章 高速公路改扩建现状评价及设计优化	37
第一节 高速公路现状病害分析	37
第二节 高速公路技术现状评价	43
第三节 改扩建高速公路路线设计优化	55
第四节 高速公路主线上跨桥梁改扩建优化	67
第五节 高速公路改扩建工程精细化管理	74
第三章 高速公路改扩建工程关键技术	93
第一节 拟改扩建高速公路基础数据处理技术	93
第二节 拟改扩建高速公路状况评价技术	99
第三节 改扩建高速公路技术指标决策研究	109
第四节 高速公路扩建形式和扩建方案的选择	113
第五节 高速公路改扩建其他工程拼接技术	119
第六节 高速公路改扩建工程交通组织研究	125
第四章 高速公路改扩建期间交通组织优化	130
第一节 高速公路改扩建特性分析	130
第二节 高速公路改扩建道路通行能力分析	135
第三节 高速公路改扩建交通组织方案	137

第五章 普通干线公路加宽改扩建技术	143
第一节 普通干线公路改扩建方案研究	143
第二节 普通干线公路新、旧路基拼接技术研究	147
第三节 普通干线公路新、旧桥梁拼接技术研究	150
第六章 拓宽后桥梁结构相互作用分析	154
第一节 桥梁拓宽方法研究	154
第二节 不同连接方式对桥梁通行能力的影响分析	162
第三节 拓宽桥梁收缩徐变差异分析	164
第四节 下部结构沉降差异对拓宽桥梁的影响	166

第一章 改扩建公路桥梁综合优化技术

第一节 现有公路桥梁技术性能评价与拆除原则

公路桥梁技术性能评价是通过评价桥梁的使用状况，对其当前的损伤及缺陷进行全面、细致并深入的现场检测，从而明确其缺陷的部位、性质、严重程度及其发展趋势，找出导致缺陷的原因，以便于评价、分析其缺陷对桥梁使用性能和安全性能的影响，并做出对桥梁的综合评价，为桥梁维护、加固及改扩建设计提供及时并有针对性的资料。同时，桥梁技术性能评价也是桥梁养护管理部门了解桥梁技术性能、进行养护分析、制订养护计划、确定养护方案、优选投资项目的重要依据。

一、现有公路桥梁技术性能评价方法

公路桥梁的技术性能评价就是通过多种评价方法确定出桥梁的技术等级，包括桥梁各部件及整体的承载能力等，制订出对应的养护处治方案。养护规范法、层次分析法、模糊综合评定法、荷载试验评定法、结构计算分析法、专家系统评定法、基于结构可靠性理论的方法、灰色理论法和神经网络法等是我国现阶段最为常见的桥梁技术性能评价方法。

在上述的各种评价方法中，养护规范法、荷载试验评定法和结构计算分析法已经在实际的工程中被广泛应用；专家系统评定法、模糊综合评定法和层次分析法在科研领域内被广泛研究，在实际的工程中并没有被广泛应用；现在更有一些新生的评价方法还处于科学研究阶段，例如，神经网络法、结构可靠性理论法和灰色理论法等。上述的任何一种评价方法都有其本身的优点和缺点，因此不可以简单直观地判断出其优良劣差。为了对桥梁做出符合实际的技术性能评价，必须

要综合考虑评价过程中的每种指标和影响因素，这样的评价过程才会更加科学，更加合理。

本书将采用养护规范法、静载试验法及功能适应性评价法对公路桥梁进行技术性能评价。

（一）养护规范法

养护规范法的主要依据是《公路桥涵养护规范》（JTG H11—2004）。首先，专业的桥梁检测技术人员要细致地检查桥梁的外观损害，然后依据检查的技术资料，选取考虑各个构件权重的评价法来评价桥梁技术性能。

桥梁构件的缺损状况评价标准主要依据以下三个原则：①确保检测一致性；②便于制订养护方案；③为桥梁的技术性能评价提供可靠依据。

1. 桥梁检查内容

表 1-1 桥梁检查内容

检查对象		检查内容
结构历史与现状调查		收集桥梁建设、养护维修和加固改造技术资料
桥面系		1.调查桥面铺装平整度、开裂、坑穴、剥落、分层或表面污迹 2.调查防撞护栏开裂、混凝土缺损情况 3.泄水管是否完整，布局是否合理，桥面排水是否畅通 4.伸缩缝有无损坏、阻塞、泄漏及伸缩缝两侧的桥面状况
桥面线性		测量桥面线性，与竣工或设计桥面标高比较，判断桥梁是否沉陷、变形
上部构造	主梁	1.混凝土是否发生开裂、剥落、起层、侵蚀及其他恶化现象 2.是否有过大变形或异常裂缝 3.混凝土强度是否达到设计要求 4.混凝土碳化深度是否影响正常使用

续表

检查对象		检查内容
下部构造	盖梁	1.混凝土是否发生开裂、剥落、起层、侵蚀及其他恶化现象 2.是否有过大变形或异常裂缝 3.混凝土强度是否达到设计要求 4.混凝土碳化深度是否影响正常使用
	桩柱	1.混凝土是否发生开裂、剥落、起层、侵蚀及其他恶化现象 2.有无局部冲刷现象
	锥坡	1.砌石是否发生开裂、侵蚀及其他恶化现象 2.有无局部冲刷现象
混凝土强度检测		对主要构件重点控制部位和其他混凝土强度有怀疑的部位利用回弹法进行强度检测,了解混凝土的强度分布情况,判断混凝土有无强度异常
混凝土碳化测试		结合桥梁表观病害,对主梁、盖梁、墩柱等进行碳化深度测试,判断混凝土保护层是否仍然保护钢筋不被锈蚀
钢筋分布及保护层厚度检测		结合桥梁表观病害,对主梁、盖梁、墩柱等进行钢筋分布及保护层测试,判断钢筋与设计是否相符及构件耐久性
钢筋锈蚀检测		结合桥梁表观病害,对主梁、盖梁、墩柱等进行钢筋锈蚀测试,判断钢筋是否锈蚀及锈蚀程度

2. 桥梁检查方法

(1) 桥梁结构历史与现状检查。专业检测人员可以向设计、施工、监理以及管理单位询问桥梁在建设和使用期间存在的问题及其处治情况,详细了解该桥梁在使用期间发生的特别状况,全面收集相关的设计、施工、监理等技术资料,包括原始计算书、设计图纸、施工原始记录、监理日志、工程质量事故发生和处治记录、施工组织设计、结构竣工图及施工临时工程等相关技术数据。

(2) 结构尺寸复核及缺损状况检查。在检测的过程中对结构构件的总体尺寸及细部尺寸采用钢尺丈量的方法测得,目前通常使用的测量工具有钢卷尺和游标卡尺,还会用到照相机和手工锤等工具。对主梁和下部结构的检查主要为构件混凝土表面的孔洞、蜂窝、麻面、混凝土剥落、渗水侵蚀和钢筋外漏锈蚀等,同时

还要观察并记录结构构件是否存在变形。

(3) 桥梁裂缝状况详细检查。为了对桥梁有一个正确合理的评价,应仔细检查并记录裂缝的长度、宽度、位置和数量等数据,对测得的技术数据进行分析,得到裂缝的整体规律。

桥梁开裂状况的重点抽查应覆盖有代表性的外露表面。检查裂缝时主要靠人工目力观测,同时借助钢尺和刻度放大镜等工具,经过测量确定裂缝的长度、位置和宽度。在构件上用记号笔标注出长度大于 20 cm,宽度大于 0.05 mm 的裂缝走向,并在两端标出区域段。当某一区域内裂缝分布十分密集时,可选择典型的主裂缝进行区段标注。

桥梁裂缝状况的检查可利用照片或草图记录,照片能够直观地反映出裂缝的实际状况,草图则可对裂缝的长宽深、位置及走向加以描述,能够对裂缝的性质、成因和特征有更加详细的统计。

(4) 桥梁混凝土强度检测。桥梁构件的混凝土强度检测可以采用回弹法测定。为了比较全面地反映桥梁混凝土强度,有代表性地选择病害较严重的区域,分别对其主梁(板)、盖梁和桥墩进行检测。在选择区域内布置十字交叉的测区,同时要保证相邻两测区在纵桥方向的间距小于 2m。

(5) 混凝土碳化检测。为了全面了解混凝土的质量,可结合桥梁的表观病害,对主梁、盖梁和墩柱等构件进行碳化检测。碳化检测采用在混凝土新鲜破损面喷洒 1%酒精酚酞试剂,利用游标卡尺进行测量。

(6) 混凝土钢筋保护层厚度及钢筋分布检测。根据桥梁结构的特点,构件钢筋分布检测和混凝土保护层厚度检测的关键部位主要选在主梁(板)底、盖梁底面和墩柱侧面等区域。该检测可用钢筋扫描仪保护层测定仪进行,检测时,将仪器探头沿固定测线在混凝土构件表面移动,当移动到钢筋位置时,仪器即可自动显示出钢筋保护层的厚度,记录保护层厚度并在构件表面标示出钢筋位置,即可得到所测构件的钢筋分布状况(数量与定位)及保护层厚度信息。

(7) 钢筋锈蚀电位检测。为全面了解桥梁主要构件钢筋锈蚀状况,需要对钢筋锈蚀进行检测。工程上,锈蚀检测一般采用钢筋锈蚀电位检测仪,是利用极化电极原理通过铜/硫酸铜参考电极来测量混凝土表面电位,利用通用的自然电位法判断钢筋的锈蚀程度。测量时测区选择在有钢筋锈蚀迹象或可能发生钢筋锈蚀的区域,在测区内绘制方形网格以确定测点位置,测点间距取 10 cm,将测点位置

充分润湿后即可逐点进行钢筋锈蚀电位的测量。

3. 桥梁技术性能评价

依据桥梁全面检测 results 和《公路桥涵养护规范》(JTG H11—2004) 的规定, 根据文献中的各部件指标权重的调整, 按照桥梁各部件权重的综合评定方法, 计算出桥梁技术性能综合评分, 判断桥梁等级, 详见表 1-2:

表 1-2 各部件指标权重

序号	分部权重		部件权重	
	名称	指标权重 W	部件名称	指标权重 W
1	上部结构	45	主要承重构件	33.8
			一般承重构件	5.6
			支 座	5.6
2	下部结构	30	墩台和基础	22.5
			地基冲刷	7.5
3	桥面系	15	桥面铺装	3.5
			伸缩缝	3.5
			桥头与路堤连接处	3.5
			栏杆护栏	2.3
			排水设施	1.1
			人行道	1.1
4	附属设施	10	调治构造物	4.4
			灯具和标志	1.4
			锥坡与护坡	1.4
			翼墙与耳墙	1.4
			其 他	1.4

桥梁技术性能评价公式如下:

$$D_r = 100 - \sum R_i W_i / 5$$

式中: R_i 为桥梁各部件最终评定标度, 可参照检查结果和养护规范进行赋值。

对桥梁评价分类边界进行定义, 一类、二类、三类、四类和五类的确定界限详见表 1-3。

表 1-3 桥梁等级类别、分值接线和养护措施

类别	分值界限	养护措施
一类	$D_r \geq 88$	正常养护
二类	$88 > D_r \geq 70$	小修
三类	$70 > D_r \geq 55$	中修
四类	$55 > D_r \geq 40$	大修
五类	$40 > D_r$	改建

(二) 静载试验法

静载试验法是对桥梁施加试验性荷载从而对桥梁的结构性能进行评定的方法。这种方法非常直观，比较可靠，工程技术人员非常容易接受。静载试验是在桥梁结构上加以同设计荷载相当的外部荷载，在此荷载作用下，选用相应检测仪器测出桥梁的裂缝、应力和挠度等参数的实际变化情况，然后将检测结果与结构按相同外部荷载作用下的理论计算值或设计值相比较，来分析桥梁构件的承载力，可以利用校验系数 λ 表示：

$$\lambda = \frac{\text{测点实测值}}{\text{测点理论计算值}}$$

$\lambda=1$ 时，表示实测值和理论值完全相同；

$\lambda < 1$ 时，表示桥梁承载能力状况较好，承载能力有富余；

$\lambda > 1$ 时，表示桥梁承载能力状况较差，设计强度或刚度不够。

(三) 功能适应性评价法

为了在总体上把握桥梁的技术性能，有必要在养护规范法和静载试验法评价的基础之上加以功能适应性评价。

桥梁功能适应性指的是在目前交通需求下，桥梁的设计荷载、桥下净空和行车道宽度等指标的适用程度，通过对桥梁的功能适应性评价可以为桥梁的改扩建决策提供技术依据。本书拟通过对现有旧桥的可利用程度进行分析，提出旧桥的可利用系数，该系数可以用旧桥行车道宽度的适应性来近似表示。

导致旧桥行车道宽度适应性下降主要有以下两方面原因：一是随着经济社会发展导致的交通状况变化，原桥梁设计采用的设计荷载等级和交通量可能不能满足目前的交通需求，因而导致桥梁通行能力受到限制。二是有一部分桥梁处于拓宽改建的道路上，桥梁上的行车道宽度小于道路行车道，在桥头处常常出现堵塞现象，导致旧桥的通行能力下降，桥梁行车道宽度适应性明显不足。旧桥的可利用系数可采用旧桥的行车道适应性程度表示，而行车道的适应性评价可以利用桥梁通行能力评价模型来量化：

$$BSI = \frac{V}{C}$$

式中： V 表示旧桥当前实际交通量，辆/h，或辆/d；

C 表示桥梁的设计通行能力。

通过上述公式可以得到桥梁的功能适应性指数值，然后依据下表判断桥梁的功能适应性。

表 1-4 桥梁功能适应性评价标准

评价等级	完全适应	基本适应	临界	不适应	完全不适应
BSI 范围	<0.7	0.7~0.9	0.9~1.1	1.1~1.4	>1.4

二、现有公路桥梁技术性能预测方法

桥梁是具有使用寿命的，其使用寿命就是在桥梁正常维护和正常使用的条件下，完成其预期使用价值的期限，在其使用期间，桥梁也会出现病态。伴随着我国蓬勃的经济发展，部分地区出现严重的车辆超载现象，在这种超额外力的荷载作用下，会导致部分桥梁出现损坏，严重威胁交通安全。

日积月累，桥梁损伤不断加剧，构件材料不断老化，结构强度不断下降，桥梁会先呈现局部破坏，再逐渐演变成整体破坏，甚至会发生坍塌事故。此时，桥梁结构已经不能满足其使用要求，无法继续承受荷载作用，也就是桥梁失去了它的使用价值，结束了它的使用寿命。因此，如果能够预测出现役公路桥梁的剩余使用寿命，就能制定出相应有效的改造加固对策，节省投资，并带来显著的社会效益。

目前，国内外关于公路桥梁技术性能的预测模型有很多种，大致可以概括为两类基本形式：回归分析预测模型和概率型预测模型。其中，回归分析预测模型依据桥梁大量的历史资料和当前检测的技术数据，分析并预测变量之间相关的影响参数，以回归分析方法为基础，将桥梁技术性能与相关变量统计拟合，预测出桥梁的剩余使用寿命。这种方法非常依赖桥梁的资料和历史数据的质量和数量，同时依赖于专业桥梁技术建模人员对桥梁技术性能和相关变量之间的内在联系的认知程度。马尔科夫预测模型和半马尔科夫预测模型是概率型预测模型的两种主要形式。判断桥梁技术性能的因素多种多样，各个因素之间又存在复杂的联系，且各有不同程度的变异性，因此选用适当的预测模型，对桥梁技术性能的预测结果显得至关重要。

本书在参阅大量文献的基础上，选用回归分析预测模型和马尔科夫预测模型来对公路桥梁技术性能进行预测。

（一）回归分析预测法

回归分析预测法要求在预测相关性的原则下，确定影响预测目标的各项预测指标，然后找出预测目标和预测指标之间的内在函数关系，用近似的数学表达式表达出来，再利用历史资料和检测数据等样本对模型进行误差检验，确定模型的估计参数，根据预测指标的变化情况进行预测。

下面是一元线性回归预测法的简要过程，已知一元线性方程：

$$Y = a + bX$$

式中： X 表示自变量， Y 表示因变量， a ， b 表示回归系数。

根据历史资料和监测数据 X_i ， Y_i ， $i=1, 2, 3, \dots, n$ (n 为实际数据点数目)，可以求出回归系数 a ， b 。

利用桥梁每个检测时刻的检测数据和分析结果，建立回归分析模型，推导出

桥梁结构损伤和使用时间之间的关系，将其作为预测桥梁结构剩余使用寿命的根据。基本过程如下：

设 D_t 为桥梁结构 t 时刻的总损伤系数， $D_t=0$ 表明结构完好没有损伤， $D_t=D_f$ 表明结构的使用寿命终结， $D_t=1.0$ 表明结构完全破坏。

D_t 是个综合性指标，必须全面考虑桥梁的结构维修费用、桥梁损伤状态、结构重要性等因素。通过综合分析，也可以选用桥梁损伤状态表达，而桥梁损伤状态则可用桥梁损伤指数 BDI 表示，它的取值范围是 $[0.0\sim 1.0]$ 。当 BDI 等于 0 时，说明桥梁无损伤；当 BDI 等于 1 时，说明桥梁处于极度危险状态。

以 BDI 表示损伤等级区间，见表 1-5：

表 1-5 桥梁损伤等级区间

损伤等级	无损伤	轻微损伤	中等损伤	严重损伤	破坏性损伤
BDI 范围	0.0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0

通常情况下， D_f 由桥梁专家根据实际工程经验赋值（本书取 $D_f=0.80$ ）。因此，与使用时间相关的函数关系表达式为：

$$D_t = f(t) + h(t)$$

上述表达式中： $f(t)$ 表示 D_t 的中值预报函数； $h(t)$ 表示全部尚未计入影响因素的附加值。

根据已知的历史资料和检测数据来确定 D_t 的数学表达式。通常情况下， $f(t)$ 的形式非常依赖以往的经验，一般会采用二次型、线性型或指数型。鉴于指数型相对较容易处理，且较容易线性化和无量纲化，因此，本书采用指数型，则上述表达式可写为：

$$D_t = kt^a + h(t)$$

线性化后得：

$$\ln D_t = \ln k + \alpha \ln t + r$$

式中： k ， a 代表由分析决定的常数； r 代表误差项，通常假定 $r \sim N(O, S2)$ ，

$$\text{令 } y = \ln D_t$$

$x = \ln t$ ， $a = \alpha$ ， $b = \ln k$ ，则有：

$$y = ax + b$$

以上是一个非常简单的线性回归问题，根据历史资料 (t_i, D_{it}) 可以算出 a ， b 的估计值 \hat{a} ， \hat{b} ，转化为原先的参数 k ， a 后， D_t 的中值预报方程即为：

$$D_t = e^{\hat{b}} t^{\hat{a}}$$

令 $D_t = D_f$ ，由上式可得：

$$t_E = \left[\frac{D_f}{e^{\hat{b}}} \right]^{\frac{1}{\hat{a}}}$$

则桥梁结构的剩余使用寿命 t 为：

$$t_x = t_E - t_c$$

(二) 马尔科夫预测法

在马尔科夫链中，系统在任意一时点上的状态取决于并且仅仅取决于系统在前一时点上的状态。

三、应用示例

例 1：以某一桥梁为例，用养护规范法对该桥梁进行技术性能评价。首先，按照桥梁检查内容，运用上述桥梁检查方法对桥梁进行详细检查，根据检查结果和养护规范，对桥梁各部件最终评定标度进行赋值，见表 1—6：

表 1-6 桥梁各部件最终评定标度

序 号	部件名称	缺失程度及 标度	对使用功能 的影响程度	发展变化状 况的修正	最终评定标 度 R_i
1	主要承重构件	2	2	0	4
2	一般承重构件	0	0	0	0
3	支 座	1	1	0	2
4	墩台及基础	1	4	-1	4
5	地基冲刷	0	2	0	2
6	桥面铺装	1	0	0	1
7	伸缩缝	1	0	0	1
8	桥头与路堤连接部	1	0	0	1
9	栏杆护栏	1	1	1	3
10	排水设施	2	0	1	3
11	人行道	1	1	0	2
12	调治构造物	0	0	0	0
13	灯具、标志	0	1	-1	0
14	锥坡与护坡	1	1	-1	1
15	翼墙与耳墙	0	0	-1	0
16	其 他	0	0	0	0

将桥梁各部件指标权重 W_i 和各部件最终评定标度 R_i 代入公式中，得到桥梁技术性能综合评分：

$$D_r = 100 - \sum R_i W_i / 5 = 44.86$$

四、现有公路桥梁拆除原则

在旧桥改扩建过程中，为了充分利用旧桥资源，对旧桥的拆除一定要慎重，要综合考虑旧桥的技术状况、旧桥的功能适应性、拆除重建的经济性、改扩建施工期间的保通及对环境的影响等因素。对于经过论证需要拆除的桥梁，在拆除过程中应遵循以下原则：