



International Association for
Bridge Maintenance and Safety
国际桥梁维护与安全协会



International Association for Bridge
Maintenance and Safety China Group
国际桥梁维护与安全协会中国团体

**Bridge Maintenance, Safety and Management:
The Big Data Era**

桥梁维护、安全与运营管理 ——迎接大数据时代

陈艾荣 冯良平 阮欣 编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

桥梁维护、安全与运营管理

——迎接大数据时代

陈艾荣 冯良平 阮欣 编



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书重点介绍了大数据时代背景下桥梁维护、安全与运营管理面临的问题和挑战,从桥梁维护与安全应用实际出发,介绍了桥梁结构运营维护、桥梁运营荷载、桥梁模型修正等多个方面的研究进展,提出了基于海量数据的桥梁管养维护新方法,介绍了基于桥梁管理养护需求的决策方法与管养体系。

本书可供从事桥梁设计、管理养护及相关研究人员使用,也可供高等院校相关专业的高年级本科生和研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁维护、安全与运营管理:迎接大数据时代/陈艾荣,冯良平,阮欣编. —北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.5

ISBN 978-7-114-12217-0

I. ①桥… II. ①陈… ②冯… ③阮… III. ①桥—维修②桥—安全管理③桥—运营管理 IV. ①U445.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 082977 号

书 名:桥梁维护、安全与运营管理——迎接大数据时代

著 作 者:陈艾荣 冯良平 阮 欣

责任编辑:曲 乐 卢俊丽

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:720×960 1/16

印 张:19.5

字 数:311 千

版 次:2015 年 5 月 第 1 版

印 次:2015 年 5 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-12217-0

定 价:70.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)



在役桥梁的安全性和耐久性问题日益得到关注,桥梁的安全管理和科学维护正在成为全世界桥梁工程界的研究热点。国际桥梁养护与安全协会(International Association for Bridge Maintenance and Safety)是专注于这一领域的国际学术协会,它成立于1999年,协会的宗旨为提升桥梁养护、安全和管理领域的国际交流与合作,增强理论与实践之间的沟通,促进技术发展和创新。协会创建以来,通过主办和协办国际会议、技术论坛等活动,为桥梁管养相关领域的工程师、管理者和研究人员提供了一个相互了解和交流的平台,对促进领域发展做出了积极贡献。

国际桥梁养护与安全协会主办和协办的众多会议和专题活动中最为重要的是桥梁维护、安全和管理系列国际会议。自2002年起,逢双年,已分别于西班牙、日本、葡萄牙、韩国、美国、意大利和中国举办了七届会议。第七届会议于2014年在中国上海召开,会议吸引了来自近40个国家的700余位代表,收到600余篇论文摘要,并最终录用了396篇论文。在为期五天的会议中,组织方共邀请了9位领域内顶尖学者发表了大会主题演讲,并组织了48场专题研讨会,获得了圆满成功。

在业内同仁的支持下,2012年,成立了国际桥梁养护与安全协会的中国团组(IABMAS - China Group),目的是促进和提升国内桥梁维护与安全领域内的研究及学术联系,促进领域内工程师、管理者和研究人员的学术交流。协会的主要活动是举办两年一次的全国桥梁维护与安全学术会议。2012年,第一届会议与团组成立大会同期在同济大学召开,来自全国多家高等院



校与研究单位近 200 人参加, 10 位特邀嘉宾在会上发表了主题演讲。会后, 团组将部分演讲内容扩充整理, 出版了《桥梁维护、安全与运营管理——技术与挑战》一书。2013 年 4 月第二届全国桥梁维护与安全学术会议在重庆交通大学召开, 会议邀请了多位领域内顶尖专家学者发表了主题演讲, 并选取了 40 篇高质量会议论文以《重庆交通大学学报》增刊的方式正式出版。

在第二次会议成果的基础上, 同时结合近两年来国内在桥梁安全、维护领域中的最新研究进展, 我们邀请了来自工程单位和高等院校的 10 位专家, 编写了本书。本书重点介绍了大数据时代背景下桥梁维护、安全与运营管理研究面临的挑战与进展, 从桥梁维护与安全应用实际出发, 说明了桥梁结构运营状态、桥上荷载形式、桥梁结构模型等多个方面对数据的采集与处理方法, 建立了基于海量数据的健康监测与维护管理过程, 引进了基于桥梁管理养护需求的决策方法与体系建设。

在我国桥梁维护与安全领域研究需求的不断推动下, IABMAS 中国团组得到了迅速的发展, 在国内和国际相关领域内的影响力日益增强。中国团组也将利用这一优势, 更好地组织国内相关研究领域内的学术交流, 进一步促进领域发展, 为社会进步做出积极贡献。2015 年 5 月将在长安大学召开第三届全国桥梁维护与安全学术会议, 就可持续桥梁、桥梁长期性能、桥梁维护策略等研究主题开展广泛深入的讨论。在此也借这个机会, 对关注与支持中国桥梁维护与安全领域发展的研究者与读者致以真诚的谢意。

由于时间紧迫、编者水平有限, 书中难免有错漏, 望广大读者不吝赐教。

国际桥梁维护与安全协会中国团组 主席

陈艾荣

2015 年 3 月



第1章 大型桥梁的管养体系	1
1.1 引言	1
1.2 大型桥梁养护理念	2
1.3 大型桥梁管理制度	6
1.4 大型桥梁管养模式	9
1.5 大型桥梁管养技术	11
1.6 大型桥梁管养人员能力胜任模型	17
1.7 结语	21
本章参考文献	21
第2章 大跨度桥梁养护管理系统	23
2.1 引言	23
2.2 桥梁养护管理系统的发展现状	25
2.3 现有桥梁养护管理系统的问题	31
2.4 大跨度桥梁养护管理系统关键问题研究	36
2.5 某大跨径组合梁斜拉桥养护管理系统简介	44
2.6 结语	47
本章参考文献	48



第3章 BIM技术在桥梁领域的应用与发展	53
3.1 引言	53
3.2 建筑工程中的BIM应用	54
3.3 目前桥梁领域中可能的BrIM应用	63
3.4 BrIM技术应用的思考	69
3.5 结语	71
本章参考文献	72
第4章 面向管理需求的桥梁工程风险评估	75
4.1 引言	75
4.2 风险评估的基本过程	76
4.3 管理需求对风险评估的影响	80
4.4 基于寿命周期成本分析的风险决策	85
4.5 复杂施工技术的风险评估和管理	89
4.6 桥梁总体施工方案评估和管理	93
4.7 桥梁运营阶段风险评估和管理	99
4.8 结语	106
本章参考文献	106
第5章 信号处理在桥梁健康监测中的应用	109
5.1 引言	109
5.2 信号处理与特征提取	111
5.3 信号处理的新方法	123
5.4 改进的经验模态分解方法	124
5.5 信号处理在模型修正中的应用	129
5.6 结语	135
本章参考文献	137
第6章 舟山跨海大桥监测数据挖掘与分析	145
6.1 引言	145

6.2	监测系统总体架构	146
6.3	数据挖掘与分析方法	148
6.4	数据分析系统	151
6.5	系统使用方法	176
6.6	结语	177
	本章参考文献	178
第7章	基于动态图像的车辆识别及其分布特征研究	180
7.1	引言	180
7.2	桥面车辆识别	183
7.3	桥面车辆跟踪	190
7.4	数据识别与分析	194
7.5	结语	202
	本章参考文献	203
第8章	悬索桥钢箱梁疲劳裂纹分布特征与检测技术	206
8.1	引言	206
8.2	疲劳裂纹主要分布特征	207
8.3	疲劳裂纹的检测技术	211
8.4	疲劳裂纹几何特征超声波检测技术	219
8.5	疲劳裂纹几何特征检测技术应用	225
8.6	结语	234
	本章参考文献	235
第9章	混凝土梁桥疲劳安全监测与维护管理	239
9.1	引言	239
9.2	混凝土结构的疲劳研究综述	241
9.3	疲劳荷载模型	249
9.4	疲劳安全评估	252
9.5	疲劳安全维护管理策略	265



9.6 结语	267
本章参考文献	268
第 10 章 桥梁结构滚石冲击效应分析方法	274
10.1 引言	274
10.2 滚石运动特性分析	276
10.3 桥梁滚石冲击效应分析	279
10.4 桥梁滚石冲击性能评价	288
10.5 结语	298
本章参考文献	299

第1章 大型桥梁的管养体系



冯良平

中交公路规划设计院有限公司,北京市德胜门外大街85号,
100088

1

1.1 引言

中国拥有众多宽阔的河流、峡谷和漫长的海岸线。为了适应交通运输的需要,中国政府在大约20年的时间内耗费巨资,建设了大量的大跨径桥梁。这其中,不乏类似于苏通大桥、港珠澳大桥等世界级的超大工程。为了保证这些桥梁的正常通行,中国政府每年需要花费巨资进行桥梁养护。然而,随着大型桥梁设计的轻柔化、复杂化,以及桥梁安全事故的频频发生,大型桥梁的养护管理问题越来越突出。我国现行的养护规范及管理模式,主要针对的是中小型混凝土桥梁,对大型桥梁的适用性还有待完善。因此,建立与大型桥梁结构相适应的养护管理制度,构筑高效、科学、合理的养护管理体系,是十分必要的。

大型桥梁管养体系是桥梁养护管理活动中的组织结构、职权和责任划分、制度建设与执行的总称。根据我国目前长大桥梁的产权性质的不同,可分为经营性管理体系和非经营性管理体系。经营性管理体系的管理主体为



经营性桥梁业主单位,采用的是“谁收费、谁管养”模式。非经营性管理体系的管理主体为地方交通运输主管部门及其公路管理机构,均采用的是“管养分离”模式。受地区经济发展水平、管养模式、资金保障等各方面因素的影响,不同管养体系下桥梁的总体的管养水平存在差异。在本章中,分别从养护理念、管理制度、管养模式、管理体系等方面进行论述。

1.2 大型桥梁养护理念

传统的桥梁养护主要是指桥梁的检查和保养。广义的桥梁养护概念是指为保证桥梁运营期的安全性、适用性、耐久性而采取的各种工程行为。基于这样的概念,桥梁养护行为的介入应从建设期开始,一直延伸到桥梁寿命的终结。对于大跨径桥梁,“七分建,三分养”显得尤为重要。桥梁养护行为主要包括以下几个方面。

建:建设期从设计的角度提出要求,为日后开展桥梁养护工作创造条件。

管:为运营期的桥梁管养建立科学合理的管理体系和管理制度,指导养护工作的顺利开展。

养:对桥梁结构进行例行的保养,包括小规模의 修补。

查:采用人工、自动或半自动的方式采集和发现与桥梁安全相关的各类信息。

评:从安全、适用、耐久等各个角度,对桥梁结构的状况进行评估。

修:对桥梁出现的损伤进行维修和加固。

研:与桥梁管养相关的各类科研工作。

1.2.1 预防性养护理念

桥梁的预防性养护是指为了防止桥梁病害的发生和延迟桥梁轻微病害的进一步扩展,以减缓桥梁病害发展速度、延长桥梁使用寿命为目的的养护作业。它是一种周期性的强制保养措施,它并不考虑桥梁是否已经有了某种损坏,而是通过采用先进的检测技术,努力拓宽人们对于桥梁早期病害的认识空间,提前发现桥梁隐藏的隐形病害,并施以正确的预防性养护措施,其核心是要求采用最佳成本效益的养护措施,强调养护管理的计划性和科学性。

针对大型桥梁,应按以下原则和措施,建立桥梁预防性养护制度。

1) 累积信息,科学评价

在桥梁养护中,汇集桥梁养护管理的基础资料,全面加强桥梁检测评定基础性工作,定期开展桥梁技术状况调查,不断完善、更新桥梁数据库,及时掌握桥梁的使用状况。同时,汇总分析桥梁养护病害修复的记录、采取的措施、修复后的结构改善等情况。通过资料积累,为桥梁养护提供大量、及时、准确的数据信息,为桥梁养护科学决策提供依据。依托桥梁数据库等管理系统,组织技术检测,分析桥梁日常检查数据,研究对比各项技术性能指标,分析桥梁技术状况的演变,实现桥梁病害及交通状况预警,制订桥梁周期性养护工程计划,提高桥梁养护管理的科学决策水平。

2) 科学决策,制订方案

在桥梁检查中,逐步实现从人工检测到自动化检测,由破损检测向无损检测的发展,建立和完善桥梁养护管理数据库,充分发挥桥梁养护管理信息系统及养护维修工程决策系统的作用,应用计算机技术,通过科学分析桥梁技术状况的衰减规律,使桥梁质量的检测、评估和病害分析更加快捷科学,合理制订预防性养护方案,实现养护决策由经验型向科学型转变。

3) 把握时机,预防为主

预防性养护技术的关键在于养护时机的选择。桥梁预防性养护时机的选取应基于高速公路桥梁的功能性,通过科学检测及时弄清桥梁功能失效的时间。预防性养护的实施时机应该是在桥梁结构尚处于良好状况,或者只有某些病害先兆时进行。一旦结构损坏发生,预防性养护措施就不再是可行的选择。及时地采取预防性养护措施将大大减少交通延误时间,延长桥梁的使用寿命。

4) 优化资金,分类施策

以桥梁全寿命周期理论为指导,牢固树立预防性养护理念,从“养好桥、修病桥、治险桥、改危桥”的养护理念上精确把握养护标准,科学决策,优化资金分配,分类施策,提高桥梁的整体技术状况。“养好桥”是对技术状况好的一类桥梁做好日常保养,保持其良好的运营服役状态;“修病桥”是对二、三类桥梁及时维修,改善桥梁技术状况,延长桥梁使用寿命;“治险桥”是对急弯桥、窄桥、安全防护等级低等影响正常使用功能的险桥采取有效处置措施,消除安全隐患;“改危桥”是对四、五类桥梁及时采取加固或改建措施,提高危桥结构安全,有效遏制危桥出现安全事故。



5) 桥梁日常养护常抓不懈

建立日常养护管理工作的长效机制,实施预防性、经常性养护。对日常养护全面检查、考核、评比,使养护投入真正做到科学、公平、合理;建立桥梁病害快速报告、快速处治工作制度,及时处治桥梁缺陷和病害;根据桥梁病害数量、种类确定养护措施,达到小修工程标准的列小修工程,其他列保养费用,需要中修的,采取经济有效的预防性养护措施。

桥梁养护要做到“三勤”,即勤查、勤治、勤督。只有做到位,预防性养护才能做细、做深。勤查,即加强桥梁的日常巡查、经常检查、定期检查及特殊检查,是做好预防性养护的前提。勤治,是对桥梁各类病害及时处理,把险情消灭在萌芽状态,是做好预防性养护的重点。勤督,是监管部门督促巡查的真实性、齐全性以及病害处治的及时性,是做好预防性养护的保障。

在桥梁预防性养护中,还要对不同季节、不同的设施采取不同的养护措施。抓住汛期防洪排水和冬期冰雪防护两大要素。保证桥梁排水系统的完善和排水功能的正常发挥。雨季、冰冻前后,桥梁应做全面检查和维护,确保构造设施等完整无损,泄水孔无堵塞,顺畅泄水,若发现附属设施破坏或存在裂缝要尽快修复,绝不允许雨水渗漏。在病害初期,及时采取措施将各种病害隐患彻底消除。

6) 基于 RCM 的设备综合工程管理

目前,预防性管养的发展方向是以可靠性为中心的维修。以可靠性为中心的维修(Reliability Centered Maintenance, RCM)是目前国际上通用的、用以确定资产预防性维修需求、优化维修制度的一种系统工程方法。它的基本思路是:对系统进行功能与故障分析,明确系统内各故障的后果;用规范化的逻辑决断方法,确定出各故障后果的预防性对策;通过现场故障数据统计、专家评估、量化建模等手段在保证安全性和完好性的前提下,以维修停机损失最小为目标优化系统的维修策略。英国工商部于1974年提出的设备综合工程学的概念,即“设备综合工程学是这样一门学科,它对适用于固定资产的工程技术、管理、财务等实际业务进行综合研究,以求实现设备寿命周期费用(Life Cycle Cost)最大程度的节约,工厂机械、装置、建筑物的可靠性和有关可靠性的方案与设计,使用和费用的信息反馈,这些都属于它的研究范围。”提出了设备综合管理的特点:①追求设备寿命周期费用最经济——设备寿命周期费用=设备设置费+设备维持费;②设备综合管理包括工程技术管理、组织管理和财务管理三个方面——技术是基础、管理是手

段、经济是目的;③把可靠性和可维修性设计放到重要位置——将设备先天素质的提高放在首位;④以系统工程理论研究设备全寿命周期管理——从系统整体最优的角度考虑设备维修与管理;⑤重视设计、使用、费用的信息反馈。

对于大型桥梁的管养,建立一套基于 RCM 的现代设备综合管理科学,对预防性养护理念的总结提升,也是未来的发展趋势。

1.2.2 桥梁风险评估理念

桥梁运营期将不可避免地面临环境侵蚀、材料老化等问题,以及受到各种静载、动载长期疲劳效应的作用。随着建成后投入运营时间的推移,大桥各构件将面临退化或损坏,相应构件的刚度和强度就会出现不同程度的衰减,从而抵抗自然灾害(如台风、地震、车船撞击等)的能力就会下降。同时,如果结构未得到良好及时的保养维护,其使用寿命也会随之降低。养护制度的建立首先是对桥梁运营中可能发生的风险进行识别,根据风险性分析的结果制定结构养管对策和制度,通过结合日常巡检、定期检查、特殊检查、实时监测等手段来发现风险,最后通过养护和维修的手段来降低风险,延长结构的使用寿命。

5

1.2.3 资产管理理念

资产管理是进入 21 世纪面向资产密集型企业的企业信息化解决方案的总称。它基于“精细化、便捷化、标准化、专业化”的管理理念,采用“信息化、集成化”的技术手段,以提高企业资产可利用率、降低企业长期运行维护和管理成本为目标,通过对企业资产全寿命周期(或运营周期)的有效管理,实现资产的保值与增值。

资产管理是以企业资产、设备台账为基础;以工作单的提交、审批和执行、分析为主线;按计划检修、预防性维修、预测性维修、以可靠性为中心的维修和状态检修等多种维修管理思想,对设备进行多角度跟踪、操作、维护、维修管理;并结合物资、工具、人员等资源安排管理,以及物资准备采购管理,对设备进行全生命周期管理的过程。其目的是提高资产可利用率、降低企业运行维护成本,以优化企业维修资源为核心,通过信息化手段,合理安排维修计划及相关资源与活动,从而提高企业的经济效益和市场竞争能力。

资产全寿命周期管理理念带来的好处是资产的拥有者可以详细地管理



资产各个时期的情况,实现资产全过程的可视和可控,使资产处于持续最佳状态,并且实现其保值、增值,以及最低的总体拥有成本(Total Cost of Ownership, TCO)。如图 1.1 所示的冰山问题形象地比喻了后期运营成本与资产总成本的比例关系,即资产的前期投入,比如大桥的建设成本,仅仅占大桥全寿命成本中的一部分。



图 1.1 桥梁全寿命周期成本的冰山问题

将资产管理的理念,引入以桥梁管养为核心的企业中来,在确保桥梁资产性能安全服务于社会公众的前提下,全面提升目前桥梁管养公司管养效益,整体提高桥梁管养企业的降本增效、盈利管理水平,是引入该理念的基本目标。

1.3 大型桥梁管理制度

完善的养护管理制度是养护管理工作开展的前提。大型桥梁自通车运营之日起,就应建立与大桥结构特点和运营管理相适应的桥梁养护管理制度,从桥梁养护管理工作原则、养护管理责任划分、养护工程师制度、检查与评定制度、监测与预警制度、病害动态管理制度、养护工程管理制度、技术档案管理制度、安全事故责任追究制度、应急预案等各个方面进行详细的制度设计与建设。

1.3.1 行业管理制度

目前,我国交通行业的桥梁养护管理标准规范制度正在逐步完善,尤其是最近几年连续出台了一系列的相关规章制度,为大型桥梁的管理养护起到了十分重要的指导作用。表 1.1 为目前行业出台的管理制度。

目前行业管理制度

表 1.1

阶 段	时间节点	相关规范、标准和制度
第一阶段	2004 年以前	《公路养护技术规范》(JTJ 073—96); 《公路旧桥承载能力鉴定方法》(1988 年试行版); 《公路桥梁养护管理工作制度》(1991 年)
第二阶段	2004 ~ 2011 年年末	《公路桥涵养护规范》(JTG H11—2004); 《公路桥梁养护管理工作制度》(交公路发[2007]336 号); 《公路桥梁加固设计规范》(JTG/T J22—2008)
第三阶段	2012 年至今	《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011); 《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21—2011); 《交通运输部关于进一步加强公路桥梁养护管理的若干意见》(交公路发[2013]321 号)

1.3.2 大型桥梁专用养护制度

目前,我国的养护规范和标准主要是针对中小型钢筋混凝土和预应力混凝土桥梁,大型桥梁的养护工作所参考的制度还很不完善。因此,对于大型桥梁管养机构和监管单位,有必要针对具体桥梁的特点专门研究相关的养护制度,以适应自身的桥梁管养。桥梁专用养护制度汇总见表 1.2。

桥梁专用养护制度汇总

表 1.2

名 称	内 容	修编周期
桥梁中长期养护规划	应对桥梁中长期(一般为 20 年)的养护工作进行规划。内容应包括规划期内的养护目标、养护准则、养护计划、投资估算等	4 年
桥梁专用养护标准	应包括桥梁主体结构的养护标准和桥梁机电系统的养护标准两大部分。养护标准应以现行的养护规范、评估规范为基础,结合桥梁的结构特点制定。标准应包含检查标准、养护维修标准、评估标准等	4 年



续上表

名 称	内 容	修编周期
桥梁养护手册	应包括桥梁主体结构的养护手册和桥梁机电系统的养护手册两大部分。养护手册的编制应以风险评估和构件易损性分析为基础,并应符合桥梁中长期养护规划和桥梁专用养护标准的规定	3 年
桥梁应急预案	应在风险评估的基础上制订桥梁面临的各类突发事件的应急处置方法。应每年组织对应急预案的演习工作	4 年
桥梁档案管理规程	应对桥梁基础资料、管理资料、检查资料、养护维修资料、特殊情况资料等的建档、维护做出详细规定。该规程也包含对电子化档案管理系统建立和维护的要求	4 年
桥梁固定资产管理规程	应对桥梁固定资产投资、编码、调拨、清查、报废、核算、折旧等方面的管理做出详细规定。该规程也包含对固定资产管理平台系统的建立和维护要求	4 年
桥梁专用养护定额	应根据桥梁实际情况对检查、养护、维修、加固等养护工作的取费标准做出详细规定	4 年
桥梁健康监测系统工程	应对健康监测系统的采集频率、预警指标、响应方法、评估方法、评估成果等做出详细规定	4 年

1.3.3 大型桥梁管养标准工作流程(SOP)

对于一座大桥的管养机构或监管机构,首先要根据结构特点,进行风险评估和危险性、耐久性等方面的分析,确定符合大桥自身特点的维修策略,包括:分类策略,即对不同结构或构件进行分类,确定优先等级;预防策略,对不同结构或构件的功能行为和病害影响进行分级,确定大桥可能的失效模式或故障模式;应对策略,确立在大桥出现病害或应急状况时的应对措施,包括结构状况信息采集方案,如通过结构健康监测系统、人工巡检系统等,以及发现病害或出现应急状况后的处理方案,包括作业标准、作业人员、作业工具、作业安全等内容。

当上述管养策略和管养行动纲领确定后,就应该制定相应的标准工作流程(Standard Operation Procedure, SOP)。所谓标准工作流程,就是将某一