

# 桥梁维修 多目标优化

Bridge Maintenance Multi-objective Optimization



曹明澜 秦小刚 马晔 阎保钢 贾新征 著

中国建筑工业出版社

# 桥梁维修多目标优化

Bridge Maintenance Multi-objective Optimization

曹明澜 秦小刚 马 晔 阎保钢 贾新征 著

中国建筑工业出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

桥梁维修多目标优化 / 曹明澜等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2012. 12

ISBN 978-7-112-14988-9

I. ①桥… II. ①曹… III. ①桥—维修 IV. ①U445.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 296839 号

**桥梁维修多目标优化**

Bridge Maintenance Multi-objective Optimization

曹明澜 秦小刚 马 晔 阎保钢 贾新征 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京永峥印刷有限公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13 $\frac{3}{4}$  字数: 339 千字

2012 年 12 月第一版 2012 年 12 月第一次印刷

定价: 39.00 元

ISBN 978-7-112-14988-9

(22910)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

桥梁维修（包括预防性维修和加固修复等重大维修）方案优化往往面临多个决策目标，既要维修费用低，又要修后使用寿命长；既要可靠度高，又要修后技术状况出色，如何统筹考量这些目标以得到最优维修方案，是亟待解决的难题。本书在系统分析国内外桥梁维修优化研究与应用发展现状的基础上，创新性地提出了一种桥梁维修多目标优化的新方法，并通过示例阐述了该方法的实际应用。该方法系国内外首创，它实现了对多个优化目标的统筹考量与统一度量，建立了统一简明的维修指标表达公式，能够方便高效地进行维修方案的评价分析与多目标优化，比国内外目前使用的方法更优越、更简捷。事实上，本书以桥梁为例创立的这种方法是一种新的设施资产维修方案多目标优化方法，它构思新巧，原理明确，适用范围广泛，任何长寿命、高造价基础设施（例如，公路、铁路、桥梁、隧道等交通基础设施，水库大坝、调水工程等水工建筑，重大工业与民用建筑，港口码头、海洋平台等海工建筑，电力系统，通讯系统，能源输送系统等）和固定资产（例如，大型仪器设备、大型船舶、飞机、重要武器装备等）的维修方案多目标优化问题，都能用该方法获得其最优维修方案。本书可供关注基础设施与固定资产维护维修的相关管理人员、科研人员、工程技术人员和高校师生参考使用。

\* \* \*

责任编辑：姚荣华 张文胜

责任设计：李志立

责任校对：姜小莲 刘 钰

# 前 言

桥梁是重要的交通基础设施之一。我国目前是世界上桥梁建设规模最大的国家，正处于大规模桥梁建设阶段，并逐步进入大规模建设与维护改造并重的阶段。根据国外经验，在未来二十年内，我国将出现大范围的桥梁老化现象，桥梁维修任务将急剧增加。在此背景下，研究创立一种新的桥梁维修方案多目标优化方法，无疑是适时的、及时的和非常必要的。

目前我国的状况与美国 20 世纪 60 年代类似。那时，美国桥梁界正忙于进行大量新桥的建设与探索，对桥梁维修管理未予足够重视，这种忽视的后果导致美国的桥梁事业陷入“大建一大修一重建”的恶性循环中，并为此付出了巨大代价。不仅造成美国的桥梁维修发展缓慢，而且随着交通量、车辆荷载的增加和结构本身的自然老化，致使大量桥梁结构过早出现病损，严重影响了桥梁功能的正常发挥，还导致后续桥梁维修费用大幅度增加。这种局面一直持续到 20 世纪 60 年代末期，当时发生了几起桥梁倒塌事故，才终于让美国相关部门如梦方醒。此后，在役桥梁的管理维修与维护改造问题受到美国桥梁界的高度重视，其桥梁维修管理得到不断完善。因此，我国要汲取美国的教训，避免重蹈覆辙，要未雨绸缪，从现在起便应高度重视桥梁维修管理，及早开展桥梁维修方案多目标优化方法研究，为满足我国即将来临的大量的桥梁维修需求做好理论上和方法上的充分准备。

关于桥梁维修，我国目前普遍存在以下问题：重建轻养，疏于预防，忽视在役桥梁的养护管理和预防性维修，“头疼医头，脚疼医脚”，缺乏长远规划和系统规划，缺乏从全寿命观点和在系统层次上对多个维修目标的统筹考量，致使许多桥梁实际使用年限远未达到其设计使用年限，或导致过早过多的中修大修，造成大量资源的消耗和浪费。因此，研究创立桥梁维修方案多目标优化方法，并由此研发基于预防维修、全寿命分析和系统观点的桥梁养护维修最佳实施策略，编制相应的长远维护规划，变被动“治病”为主动“防病”，从而延长桥梁寿命，节约资源，促进我国可持续发展战略的贯彻实施。

有鉴于此，近十年来，我们针对桥梁维修方案多目标优化的理论与方法开展了系统研究并取得了初步成果：通过原始创新，以桥梁为例，研究解决了长寿命高造价设施资产维护维修优化问题的两个瓶颈难题，一个难题是如何统一考量多个维修优化目标，另一个难题是如何建立便于进行维修方案分析评价与多目标优化的、在形式上具有统一性与简约性的维修指标分析模型与计算公式，建立了一种新的设施资产维修方案多目标优化方法。该方法适用于任何长寿命高造价的基础设施（例如，公路、铁路、桥梁、隧道等交通基础设施，水库大坝、调水工程等水工建筑，重大工业与民用建筑，港口码头、海洋平台等海工建筑，电力系统，通讯系统，能源输送系统等）的维护维修优化，同样适用于任何昂贵固定资产（例如，大型的船舶、武器，飞机，航天器，潜艇，航空母舰，重要的设备仪器等）的维护维修优化。

本书是这些研究成果的总结。

本书通过原始创新建立了桥梁维修多目标优化的理论框架与基本方法体系，包括桥梁维修优化、桥梁评估、桥梁管理系统、桥梁维修优化全寿命成本分析方法、桥梁劣化预测与劣化模型、桥梁维修多目标优化基本模型、桥梁预防维修基本优化、桥梁维修多目标组合优化和桥梁维修多目标优化示例。

本书的作者分工如下：郑州大学曹明澜负责绪论、第6、7、8章和第5.2节，郑州科技学院秦小刚负责第1章和第9.2节，交通运输部公路科学研究院马晔负责第2.1、2.2节、第5.1、5.3、5.4节，河南省工程咨询中心阎保钢负责第3章和第9.3节，南阳市规划设计院贾新征负责第9.1、2.3节和第4章。此外，曹明澜的研究生祁晓娜、魏杏、宋希文和杨帅帮助完成了部分插图的绘制工作和部分表格公式的格式统一工作，在此表示感谢。另外，我们在写作过程中参考了大量国内外文献，在此，我们谨向每位文献作者表示衷心感谢。再者，我们特别感谢中国建筑工业出版社的编辑对本书出版的大力支持和辛勤付出。

本书相关研究工作得到国家自然科学基金项目（项目号：51278468和51208471）和河南省教育厅自然科学研究计划项目（项目号：2010A560015）及郑州大学研究生教育支持基金的资助。

由于桥梁维修多目标优化问题是一个新的研究课题，是涉及桥梁工程技术、工程经济学、运筹学、优化理论、管理科学等多学科知识的复杂课题，目前还有许多问题尚需进一步完善，由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

# 目 录

绪论 .....	1
0.1 背景意义与问题的提出 .....	1
0.2 主要内容与内容组织 .....	3
第 1 章 桥梁维修优化 .....	5
1.1 概述 .....	5
1.2 多目标优化 .....	13
1.3 基于状态的桥梁维修优化方法 .....	19
第 2 章 桥梁评估 .....	28
2.1 概述 .....	28
2.2 桥梁评估方法 .....	32
2.3 DER&U 桥梁状态评估方法 .....	37
第 3 章 桥梁管理系统 .....	55
3.1 概述 .....	55
3.2 国内桥梁管理系统 .....	58
3.3 国外桥梁管理系统 .....	71
3.4 下一代基于可靠度的桥梁管理系统 .....	76
第 4 章 桥梁维修优化全寿命成本分析方法 .....	80
4.1 概述 .....	80
4.2 桥梁养护寿命周期经济分析法 .....	82
4.3 混凝土桥面维修优化全寿命分析方法 .....	86
第 5 章 桥梁劣化预测与劣化模型 .....	95
5.1 桥梁技术状况劣化预测 .....	95
5.2 桥梁劣化模型概述 .....	116
5.3 桥梁线性劣化模型 .....	118
5.4 桥梁非线性劣化模型 .....	120



<b>第 6 章 桥梁维修多目标优化基本模型</b>	123
6.1 基本概念	123
6.2 桥梁维修措施的效果模型	128
6.3 有预防维修时的桥梁劣化模型	131
<b>第 7 章 桥梁预防维修基本优化</b>	138
7.1 劣化模型参数取值	138
7.2 预防维修次数与首次重大维修时间计算步骤	140
7.3 关键指标确定与维修成本计算	143
7.4 维修效果指标计算	144
7.5 维修经济分析	146
7.6 预防维修的基本优化方法	148
<b>第 8 章 桥梁维修多目标组合优化</b>	154
8.1 预防维修结合型组合优化	155
8.2 预防维修叠加型组合优化	158
8.3 重大维修与预防维修的连接型组合优化	171
8.4 重大维修与预防维修的叠加组合优化	174
<b>第 9 章 桥梁维修多目标优化示例</b>	179
9.1 桥梁维修的多目标优化程序与类型划分	179
9.2 不同类型桥梁维修多目标优化示例	182
9.3 桥梁构件维修优化示例	193
<b>参考文献</b>	204



# 绪 论

## 0.1 背景意义与问题的提出

### 0.1.1 背景与意义

根据发达国家的发展历程，一个国家的基础设施建设分为三个阶段：第一是大规模建设阶段；第二是新建与维护改造并重阶段；第三是维护改造阶段。

我国目前正处于大规模桥梁建设阶段，并即将进入桥梁新建与维护改造并重的第二阶段。截至 2011 年底，单是我国内地的公路桥梁（不包括铁路桥梁）就多达 68.94 万座，并以每年超过 3 万座的速度增加。在这些桥梁中，有相当一部分已使用几十年，正逐步进入病害多发期；更有甚者，有些桥梁仅仅使用了十几年、二十来年，便不得不面临大修。究其原因，一是由于我国经济快速发展带来交通量和车辆荷载增加，原有设计技术标准低，承载能力和通行能力不足；二是桥梁自然老化；三是对桥梁缺乏科学的养护、维护。这些都导致了病害、缺损与老化桥梁数量呈增长趋势，因此我国桥梁维修任务将日益艰巨。

可以预见，随着我国交通事业的进一步发展，在桥梁总数将继续大幅度增加的同时，亟待维修改造的桥梁数也必将日益增多。然而，我国正处于交通事业的快速发展阶段，交通基础设施建设方面的投资占去了很大的财政预算比例，受国家财力所限，能够投入到桥梁维修方面的资金远不能满足需要，许多亟待实施的桥梁维护、维修、加固、修复和更新活动都需要花钱，这势必带来资金紧缺问题。因此，如何分配使用有限的资金并把它们用在最需要的地方，以确保公路畅通与桥梁安全，怎样进行桥梁维修方案的比较、分析与优化，是我国桥梁界亟待解决的重要问题。

美国等西方发达国家早已进入桥梁维护改造阶段，但他们在桥梁建设的发展过程中曾经走过弯路。20 世纪 60 年代，美国桥梁工程界正忙于进行大量新桥的建设与探索，桥梁维护管理在很长时期内发展非常缓慢。这种局面直到 20 世纪 60 年代末期才开始转变。当时有几起桥梁倒塌事故，使美国上下大为震惊。此后，服役桥梁的管理维修与维护改造问题引起了美国桥梁界的高度关注和重视。经过几十年的持续发展，目前美国的桥梁维护管理日臻完善。我国目前的状况跟美国 20 世纪 60、70 年代类似，因此，我们要汲取美国的教训，未雨绸缪，借鉴国外桥梁管理维修的成功经验，重视这方面的探索与实践，以尽快提高我国的桥梁维修管理水平。

桥梁维修优化的四个主要优化目标是：维修成本、桥梁寿命、桥梁状况和可靠度，这些目标会互相制约，需对其统筹兼顾。因桥梁安全性、桥梁状况和桥梁寿命不能用货币衡量，致使这四个主要优化目标难以被统一考虑。因此，本书通过研究提出的“合理收益

法”，将桥梁寿命延长、桥梁状况和可靠度的富余以货币收益的形式体现出来，从而能够对其进行对比分析与综合考虑，能够移植更多经济学概念与方法到桥梁维修方案经济分析与多目标优化中，进而建立桥梁维修多目标优化的基本理论与方法。

### 0.1.2 问题的提出

桥梁维修优化，既是一个理论与方法问题，又是一个工程应用问题，它涉及桥梁工程、技术经济学、计算机技术和优化技术等领域的知识，需要进行多学科的交叉研究。在理论方面，国内外众多学者开展了大量的研究，取得了一些成果；在应用方面，国内外研究开发的桥梁管理系统中有的在一定程度上具有桥梁维修决策优化的功能。但是由于桥梁结构系统本身的复杂性，加之目前对桥梁全寿命使用期内的各种不确定性影响因素缺乏全面深入的掌握，因此，桥梁维修方案优化特别是多目标优化研究尚处于探索阶段，尤其是在理论方面，更有待进一步研究。本书将重点研究解决桥梁维修优化的以下几个关键问题：

#### (1) 桥梁劣化与维修效果模型的简明表达方式问题

准确科学的桥梁劣化与维修效果模型，是进行桥梁维修方案分析与决策优化的基础工作。然而，由于桥梁的劣化存在很大的不确定性，桥梁的结构形式繁多，不同的结构存在不同的劣化模式，同时由于各种桥梁维修措施产生的维修效果千变万化，所以如何寻求或创造一种简单、明晰、形式统一的方式来表达各式各样的桥梁劣化与维修效果模型，是一个进行桥梁维修多目标优化亟待解决的基础性问题。

#### (2) 桥梁维修决策多目标优化的分析方法问题

工欲善其事，必先利其器。不同的维修情形与不同的劣化模式会构成许多种不同的组合。目前国际上惯用的基于分段计算法的维修监控指标表达公式复杂繁多且不统一，特别不便于进行维修多目标优化分析。因此，采用什么方法来体现和表达这些组合才能方便有效地进行桥梁维修方案的评价分析与多目标优化，是一个值得探究的基本问题。

#### (3) 桥梁维修方案评价分析与多目标优化的经济方法问题

经济学中的投资决策问题已有相当成熟的评价指标与评价方法。如何统筹考量桥梁维修多目标优化有四个主要目标——维修成本、桥梁寿命、桥梁状况和可靠度，如何将桥梁寿命、桥梁状况和可靠度以货币收益的形式体现出来，使决策者能够像经济学对投资方案进行经济性分析、评价与优化那样对桥梁维修的方案进行经济性分析、评价与优化，从而可以移植更多的经济学概念与方法到桥梁维修多目标优化中，是一个具有方法指导意义的基本课题。此外，关于桥梁动态维修成本问题，同样需要进行研究。

#### (4) 桥梁维修多目标优化的理论与方法问题

关于桥梁维修多目标优化问题，运用神经网络、进化算法等方法也能提供给决策者最优解或一揽子满意解，但这些实用算法缺乏桥梁维修方面的理论基础，并产生灵活性与合理性不能兼得的缺陷。由于不知道这些结果的产生原因，如果按照最优解（常是唯一的）标准作决策，当这样的最优解不符合桥梁管理者的具体要求时，决策者往往就束手无策了（灵活性丧失）；如果在一揽子满意解中选取方案，则会使决策更易带有主观随意性（合理性丧失）。有鉴于此，当务之急的是，要研究建立桥梁维修多目标优化的基本理论并提出基于该理论的桥梁维修多目标优化的方法，以便让决策者既知其然又知其所以然，从而

能够灵活处理千变万化的实际维修问题，能够有理有据地对维修优化问题进行透彻分析，使维修决策更加合理。

## 0.2 主要内容与内容组织

### 0.2.1 主要内容

本书首先系统分析和探讨桥梁维修优化、桥梁评估、桥梁管理系统和桥梁维修优化全寿命成本分析方法等内容，然后主要研究桥梁维修多目标优化方法，包括桥梁劣化预测与劣化模型、桥梁维修多目标优化基本模型、桥梁预防维修基本优化、桥梁维修多目标组合优化和桥梁维修多目标优化示例等内容。本书通过原始创新，包括新的概念与方法的提出以及模型的创立等，建立了桥梁维修多目标优化的理论框架与基本方法体系，据文献检索，这些皆属国内外首创，书中所建立的模型和所提出的计算公式与分析方法比目前国外在维修优化分析中采用的简单有效得多。其中关键的创新性内容包括：

#### (1) 提出了桥梁劣化与维修效果模型的简明表达方式

通过提出“生效函数”，创立了一种桥梁劣化与维修效果模型的简明表达方式，借助于这种全新的表达方式，不管桥梁劣化与维修效果模型如何复杂，都能以简单、明晰、形式统一的方式把它们表达出来，从而方便进行桥梁维修方案分析与决策优化。

#### (2) 提出了桥梁维修多目标优化的高效分析方法

基于上述桥梁劣化与维修效果模型的简明表达方式，通过综合运用“效果叠加法”和“生效函数法”，提出了一种桥梁维修多目标优化的高效分析方法，借助于这种新的方法，不管桥梁的不同维修情形与不同劣化模式的组合如何复杂，都能够以简明统一的方式给出桥梁维修监控指标的表达式，从而方便有效地进行桥梁维修方案的评价分析与多目标优化。

#### (3) 提出了桥梁维修方案评价分析与多目标优化的经济方法

通过提出“合理收益法”，使得桥梁维修多目标优化的四个主要目标——维修成本、桥梁寿命、桥梁状况和桥梁可靠度得以统一度量，从而实现对这些目标的统筹兼顾。由于该法把桥梁寿命、桥梁状况和可靠度以货币收益的形式体现出来，从而使决策者能够像经济学对投资方案进行经济分析、评价与优化那样对桥梁维修的方案进行经济分析、评价与优化，进而可以移植更多的经济学概念与方法到桥梁维修多目标优化中。基于“合理收益法”，本书进一步提出了用于桥梁维修方案比较评价与优化的一系列经济指标，建立了桥梁维修的动态维修成本计算公式，提出了桥梁维修方案评价分析与多目标优化的经济方法。

#### (4) 建立了桥梁维修多目标优化的理论框架与方法体系

基于上述成果，本书进一步提出了桥梁预防维修基本优化与组合优化方法，提出了重大维修与预防维修的组合优化方法，提出了首次重大维修时间、预防维修次数等参数的计算公式，提出了一系列维修效果指标及其计算公式，给出了这些方法的示例，建立了桥梁维修多目标优化的理论框架与方法体系。

## 0.2.2 桥梁维修优化类型与本书的内容组织

桥梁维修优化分四个层次：第一层次是对桥梁构件的维修优化；第二层次是对某座桥梁的维修优化；第三层次是对某条公路上的所有桥梁的维修优化；第四层次是对某公路网上的所有桥梁的维修优化。

本书主要以第二层次为例建立有关模型与公式，由此提出的针对桥梁总体的维修优化方法，同样适用于第一层次桥梁构件的维修优化，只要把对桥梁总体的维修监控指标替换成对桥梁构件的维修监控指标即可，本书第9章给出了第一层次桥梁构件的维修优化的两个实例。这些方法的原理同样可用于第三和第四层次的桥梁维修优化。

根据维修优化监控指标的多少，桥梁维修优化也可分为单监控指标维修优化、双监控指标维修优化和多监控指标维修优化。维修优化监控指标是指反映桥梁或桥梁构件安全或使用功能情况的指标。

对于第二层次桥梁总体，可采用桥梁总体技术状况等级（一类到五类，一类最好）或全桥结构技术状况评分  $D_i$ （0~100，评分高表示结构状况好、缺损少），这两个状况指标可根据《公路桥涵养护规范》JTG H11—2004 中的表 3.5.2-1~表 3.5.2-3 确定；或者采用计算或估算的桥梁结构体系可靠度作为维修优化监控指标。

对于第一层次桥梁构件，可采用桥梁部件技术状况等级（一类到五类，一类最好）或桥梁部件缺损状况评定标度（0~5，0 表示完好状态，5 表示危险状态），这两个状况指标可根据《公路桥涵养护规范》JTG H11—2004 中的表 3.5.2-3 和表 3.5.2-1 确定；或者采用桥梁构件的承载力、碳化深度、氯离子含量、可靠度等作为维修优化监控指标。

关于桥梁或桥梁构件的技术状况，我国规范给出了已经为人熟悉的评定方法与评定标准。因此，维修优化以其为监控指标易于实行；而以可靠度作为监控指标，则代表着桥梁维修优化的未来发展方向。有鉴于此，本书的理论基础部分（第5、6章）是以可靠度监控指标为例建立有关的模型和公式的；而维修优化方法部分（第7、8章）则研究的是以桥梁可靠度和技术状况为监控指标的双监控指标维修优化；最后（第9章）是桥梁维修优化方法的应用部分，第9.2节是以桥梁可靠度和技术状况为监控指标的双监控指标维修优化的例子，第9.3节是桥梁构件单监控指标维修优化的两个实例，监控指标分别为混凝土保护层有效厚度和构件技术状况。

桥梁维修优化也可分为基本维修优化与组合维修优化。基本维修优化有两层意思：一是指参与优选的维修方案是由同种维修措施构成的；二是指维修优化的基本内容。组合维修优化是指参与优选的维修方案是由多种维修措施或方案组合而成的，并以基本优化内容为基础。本书第7章是基本维修优化，第8章是组合维修优化，第9章是两种维修优化的应用举例。

# 第 1 章 桥梁维修优化

## 1.1 概述

### 1.1.1 基本概念

桥梁维修优化是指每隔一定的分析期或针对某一特定时期选择最佳维修时机和最佳维护维修措施。桥梁维修优化需要综合考虑诸多方面的因素，例如：目前结构的状态等级、结构劣化、维修维护费用（直接费用 + 间接费用）、维护生命期内的利率情况、道路等级、交通管理以及交通量等。

桥梁维修优化分为单目标优化和多目标优化。

#### 1.1.1.1 桥梁维修单目标优化

桥梁维修单目标优化是指在若干约束条件下寻求某单一目标达到最优，例如维修费用最低或维护效益最佳。优化的目标函数一般是桥梁全寿命使用期内的费用最小化，其约束包括结构失效概率临界值、可接受的结构状态等级、承载力水平、结构剩余寿命等。美国的 BRIDGIT、Pontis 及其他某些州的桥梁管理系统中，一般采用费用—效益比最小化的方法来优化维护决策，而针对结构功能改善措施的优化则采用在预算资金约束下的最大效益的方法来实现。

针对桥梁维修的桥梁全寿命成本分析 BLCCA，就是以全寿命成本最小为目标的桥梁维修单目标优化，国内外已有大量的研究和实践<sup>[1-3]</sup>。

Das 较早提到，世界各地的桥梁管理部门面临的一个重要问题是，如何在资金紧缺的情况下向许多亟待实施的桥梁维修活动分配资金<sup>[4]</sup>。很多关于桥梁维修与修复的研究探讨了怎样得到成本最低、效果最佳的桥梁维修方案<sup>[5]</sup>。

Frangopol 等指出，桥梁管理的目的就是要最佳地分配和使用有限的资源以在全寿命成本与全寿命可靠度之间取得平衡<sup>[6]</sup>。

近年来，很多人都在尝试提出或改进有关桥梁或桥梁维修方面的检测方法、评价方法和管理方法，以便使有限的资源得到更富成效的利用<sup>[7-10]</sup>。

Kong 和 Frangopol 提出了一种基于可靠度的桥梁全寿命成本优化方法<sup>[11]</sup>，他们使用一定服务寿命期内的累计维修成本作为唯一的目標函数，以安全和服务能力水平作为约束条件。

关于桥梁维修全寿命成本优化，国内外还开发出了不少应用软件，例如，美国 Colorado 大学的 Kong 和 Frangopol 开发了一种被称为 LCADS 的桥梁全寿命分析系统<sup>[11]</sup>，该系统的功能之一就是优化。

### 1.1.1.2 桥梁维修多目标优化

最优化处理是在所有可能的选择中搜索对于某些目标来说是最优解的问题。如果仅考虑一个目标,就成为单目标优化问题,如果存在的目标超过一个并且需要同时处理,就成为多目标优化问题 (Multi-Objective Optimization)。

近年来,国内外开展了大量有关桥梁维修多目标优化的研究<sup>[12-14]</sup>。

Liu 等针对桥面维修同时进行了维修成本和平均劣化水平的最小化研究<sup>[5]</sup>; Miyamoto 等人和 Miyamoto 通过使维修成本最小化并使桥梁负荷能力与耐久性最大化探讨了现存桥梁的多目标维修优化<sup>[5,16]</sup>; Furuta 等人关于土木基础设施维修的研究则同时考虑了全寿命成本的最小化、服务寿命的最大化和目标安全水平的最大化<sup>[17]</sup>。目前日本正研究开发的关于退化混凝土桥梁的桥梁管理系统中,优化模式为在分析期内维修维护费用最小化和结构等级(包括承载力和耐久性)最大化的多目标优化规划。

传统的解决多目标优化问题的方法有多目标加权法、 $\epsilon$ 约束法、目标规划法、神经网络方法<sup>[18]</sup>、遗传算法<sup>[15,19]</sup>等,其中以目标规划法<sup>[20]</sup>最为著名。目标规划法因其模型结构的灵活性,特别适合于解决具有相互冲突目标的多目标决策问题,因而在多目标决策的实际问题中被广泛地应用。

随着数学、运筹学、系统论等相关科学的发展,优化过程中所采用的方法日趋多样化。常用的有目标规划、动态规划、线性和非线性规划、人工神经网络及遗传算法等<sup>[21]</sup>。

### 1.1.2 桥梁维修优化国内外研究状况<sup>[22,23]</sup>

本书以钢筋混凝土桥梁结构为例探讨桥梁维修优化相关问题。钢筋混凝土桥梁结构属于钢筋混凝土结构的范畴,钢筋混凝土结构目前是世界上应用最多、范围最广的结构形式。然而,随着使用年限的增加,其性能会逐渐劣化,可靠度水平会逐步下降。因此,有关其是否安全可靠,是否满足使用功能等一系列问题已引起世界各国的广泛关注。在桥梁维修优化及结构维修加固决策等有关理论和方法的问题上,国内外已有很多专家、学者和工程技术人员进行了大量的探索和研究,取得了许多研究成果。

1990年,王光远提出并建立了结构服役期间的动态可靠度分析及优化维修决策理论和在役结构强度储备评估方法<sup>[24,25]</sup>; 1992年,王光远提出了结构服役期间的动态可靠度及其维修理论的框架<sup>[26]</sup>; 1993年, Y. Mori 等通过对桥梁在运营过程中的可靠度进行分析,有效地把桥梁的可靠度评估工作与桥梁维修加固有关方面的研究结合了起来<sup>[27]</sup>。

1996年,刘玉彬、王光远基于模糊随机变量具有的不确定性的性质,定义了在役结构的动态模糊随机可靠度,并且还对在役结构进行维修决策的准则原则进行了相关阐述<sup>[28]</sup>; 郭院成、霍达根据在役结构在设计使用期内可能遇到的各种外部影响因素的特点,建立了其维修决策的数学模型,为旧建筑物的维修加固决策提供了科学的依据<sup>[29]</sup>; 屈文俊等根据经济学方面的有关理论,提出了桥梁结构维修或拆除的准则,并提出了桥梁基于其经济使用寿命的优化决策方法<sup>[30]</sup>。

1997年, J. K. Vauri 通过比较不同维修加固方案之间的差异性,提出了基于加固方案的优化分析思想; 郭院成等通过引入维修系数,提出了基于强度准则及正常使用极限状态的优化维修决策方法; 1998年,吕岳鹏通过考虑结构在其整个使用过程中可靠度会不断变化的特点,建立了结构的时变可靠度模型,从而为桥梁结构基于时变可靠度对其全寿命

进行维修决策奠定了理论基础<sup>[31]</sup>。

1999年, Frangopol 综合考虑和分析了桥梁在使用寿命中的可靠度与整个寿命周期费用的关系, 为有关桥梁费用—效益管理的工作开展奠定了理论基础<sup>[32]</sup>; 同年, Das 和 Thoft-Christensen 对桥梁的可靠性状态进行了定义, 提出了基于桥梁的可靠度来对桥梁进行维修的方法<sup>[33,34]</sup>; 郭院成等研究了结构基于强度准则时的加固策略, 并针对工程实际中存在的待维修结构条件要求, 建立了在不同前提情况下的结构维修加固决策的数学模型, 并依此设计了在役钢筋混凝土结构基于维修目标可靠度条件下的构件截面维修加固策略。

2000年, Frangopol 等提出了桥梁结构基于期望费用最小维修决策方法, 并用实例说明<sup>[35]</sup>; 同年, 郭院成等研究了化工结构在其服役过程中动态可靠度的变化规律, 提出了化工结构在其设计基准期内仅考虑一次维修加固处理条件下的最优设计和维修决策的实用方法<sup>[36]</sup>, 对化工受腐蚀结构的全局优化设计具有一定的理论参考意义和工程实用价值。

2001年, 滕海文等基于在役结构的腐蚀控制方案, 并且根据结构在未来使用期内可能的损失期望值, 提出了在役结构基于腐蚀控制的优化维修决策方法<sup>[37]</sup>; 同年, Allen. C. Estes 等考虑了结构性能随时间而逐渐劣化的因素, 对有关板桥的基于最小成本的维修加固决策优化进行了研究<sup>[38]</sup>; 刘扬等在对在役桥梁检测的基础上研究了整体锈蚀和局部锈蚀两种模型下的钢筋混凝土桥梁可靠性状况, 并讨论了钢筋锈蚀速度、活荷载和恒荷载三个参数对可靠度的影响, 提出了比较科学合理的维修加固方案, 并且还对加固后桥梁的后续使用寿命作了预测<sup>[39]</sup>; 张宇贻等根据钢筋混凝土结构有关时变可靠度理论, 通过系统阐述影响桥梁结构在检测和维修优化策略方面的有关因素, 得出了桥梁结构的检测时间点和维修策略方案会对结构的失效损失产生很大影响的结论<sup>[40]</sup>。

2002年, 秦权等以结构在其整个生命过程中所发生的费用最小的原则下, 通过比较桥梁结构在不同检测与维修方案下所对应的检测费用、维修费用和失效损失大小, 从而对结构的有关检测和维修方案进行优化<sup>[41]</sup>; 同年, 杨伟军等根据桥梁在服役期的动态可靠性变化情况, 综合考虑了桥梁维修加固效益和维修加固后运营期间的经济影响, 提出了维修加固度的概念, 建立了以动态可靠性为约束, 以维修加固费用和失效损失之和为目标函数的决策模式<sup>[42]</sup>。

2003年, 卫红蕊建立了在役桥梁加固和重建两种方案的经济分析模型, 并通过比较桥梁的各技术改造方案的加固效果, 对各个方案的经济合理性做出了客观的评价<sup>[43]</sup>; 曾小刚、肖盛燮针对影响加固方案的因素具有模糊性这一特点, 提出了在确定桥梁加固方案时采用模糊综合评判法进行方案优选决策<sup>[44]</sup>。

2004年, 孙晓燕等基于服役桥梁的动态可靠度, 以后续服役期内桥梁的收益期望值最大或损失期望值最小作为目标函数, 对在役桥梁如何开展维修加固等方面的决策问题进行了相关探讨<sup>[45]</sup>; 徐岳等通过探讨和分析桥梁加固工程的经济性评价方法, 提出了基于生命周期成本来优化桥梁加固工程<sup>[46]</sup>; 王子军通过分析影响桥梁加固方案选择的因素和确定方案的基本原则, 建立桥梁加固方案的评价指标体系, 建立了多层次多方案的优选决策模型<sup>[47]</sup>。

2005年, Cheol—Kyu. Lee 通过采用遗传算法, 对钢筋混凝土桥梁有关的加固方法进行优化选择<sup>[48]</sup>; 2006年, Mark. G. Stewart 等依据桥梁中期钢筋锈蚀的多少来确定桥梁较适合的加固时间<sup>[49]</sup>; 同年, 赵卓提出了腐蚀环境下混凝土结构的主动控制及被动控制方法, 并基于腐蚀控制, 对受腐蚀混凝土结构的优化决策进行了分析研究, 为结构进一步的



维修加固决策、设计提供了依据<sup>[50]</sup>；王增忠提出了使用功能不充分系数的概念，用以分析结构功能失效的期望损失，估计结构维修的效益，并分析研究了拟建建筑工程结构的初始可靠度水平如何设置、维护维修策略如何选择和耐久性设计水平如何确定等问题，提出建筑工程项目全寿命可靠度评估框架、思路及系统分析方法<sup>[51]</sup>。

2006年，张克波等将价值工程理论引入到方案决策中，通过对桥梁维修加固方案进行功能分析和生命周期成本分析，要求工程决策者综合考虑方案决策中多因素的影响，运用系统分析的方法把方案优选决策转化为方案价值的比较，为桥梁加固提供了一种新思路<sup>[52]</sup>。

2007年，张军等针对我国桥梁结构性能评估和维护加固现状，提出了基于不定性参数评估桥梁结构安全性能和基于全寿命造价对在役桥梁结构的相关维修加固工作进行决策的理念，并在此基础上建立了在役桥梁安全评估和维修加固决策的管理系统<sup>[53]</sup>；夏海兵等提出了在役桥梁的维修加固应该像新建桥梁一样进行寿命成本分析的观点，同时还提出了维修加固后桥梁的加固寿命周期成本的概念<sup>[54]</sup>。

2008年，谢桂华等以单层单跨框架结构为例，介绍了PNET法计算体系的动态可靠度方法及维修决策的方法，并提出了根据结构特点和经济性原则，确定分系统的维修可靠度及构件维修可靠度的观点<sup>[55]</sup>；边晶海等基于结构的可靠性，综述了服役桥梁维修加固决策、维修对可靠度及维修费用的影响等有关问题国内外的研究进展<sup>[56]</sup>。

### 1.1.3 桥梁维修对策与维修费用估算

#### 1.1.3.1 桥梁维修对策<sup>[57]</sup>

桥梁在进行状态评估、预测后，可以按照相应的标准制定维修对策。维修对策按照管理的具体程度，分为对策大类和对策细目。

文献[58]给出不同的桥梁状态等级下相应的对策大类，如表1-1所示。

桥梁状态对应的维修对策大类

表 1-1

等 级	BCI 值	状 态	对策大类
A 级	90 ~ 100	完 好	日常保养
B 级	80 ~ 89	良 好	日常保养、小修
C 级	66 ~ 79	合 格	专项检测后小修
D 级	50 ~ 65	不合格	中修或者大修
E 级	0 ~ 50	危 桥	大修或者改扩建

对策大类解释如下：

- (1) 日常保养：指正常的养护、检查；
- (2) 小修：指对小面积缺损部位的简单修补，少量次要部件的更换；
- (3) 中修：指缺损部位的修补面积较大，加固主体结构中的个别构件；
- (4) 大修：指加固主体结构，确保行车安全；

(5) 改造或重建：指对结构严重缺损、已处于危险状态或桥梁的宽度、承载能力已经不能满足现有交通荷载要求的桥梁，采取拓宽、提高其设计标准的加固工程或者重新修建等措施。

对策大类的划分比较粗略，只能满足整体投资的规划等应用。考虑到桥梁结构的复杂性，为了提高投资需求分析及投资控制的可靠性，对维修大类按照各构件进行进一步的划分，如表 1-2 所示。

构件维修养护对策细目表

表 1-2

对策大类	维修对象	对策细目	工作内容
正常保养	桥梁各构件	正常保养	日常清洁、保养，定期检查
小修维护	桥面铺装	局部修补	修补桥面铺装的坑槽、裂缝
	伸缩缝	局部修理	修理伸缩缝
	人行道、栏杆扶手、排水系统	局部修补	人行道栏杆扶手、排水管修补
	支座	维修	支座维修、偏移校正
	上部承重结构	局部修复	封闭裂缝、局部修补
	上部横向联系	局部修复	横向联系局部修补
	下部墩台	局部修补	墩台混凝土修补，至裂缝封闭
	下部基础	局部处理	轻微冲刷的处理
中修	桥面铺装	大面积修补	桥面铺装翻修
	伸缩缝	整体换新	更换伸缩缝
	人行道、栏杆扶手、排水系统	整体更换	人行道、栏杆、扶手重修，更换排水管
	支座	更换	支座更换
	上部承重结构	大范围修理	处理混凝土严重裂缝及其他问题
	上部横向联系	大范围修理	加固修复
	下部墩台	大范围修理	处理混凝土严重裂缝及其他问题
	下部基础	局部处理	局部冲刷处理
大修	上部承重结构	加固或更换	承重梁体加固或更换
	下部墩台	加固处理	墩台加固或严重位移处理
	下部基础	加固处理	基础加固或严重冲刷处理
改造重建	桥梁整体	提高等级	桥梁荷载等级提高、改造及拓宽
	桥梁整体	改造重建	结构改造及重建新桥
	下部墩台	加固处理	墩台加固或严重位移处理
	下部基础	加固处理	基础加固或严重冲刷处理
	桥梁整体	提高等级	桥梁荷载等级提高、改造及拓宽
	桥梁整体	改造重建	结构改造及重建新桥