

文章编号: 1002-0268 (2011) 06-0067-08

基于全寿命周期成本分析的桥梁设计研究综述

谷音, 黄威, 卓卫东
(福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: 为系统阐述全寿命周期成本分析的桥梁设计的研究现状, 介绍了全寿命周期成本分析的研究背景、基本概念和原理, 综述了寿命周期成本分析方法在桥梁结构全寿命设计方案决策的研究现状、关键技术和使用前景。总结国外全寿命周期成本基本理论体系, 对全寿命周期成本模型和框架的研究进行了介绍, 将两种最具代表性的模型进行了对比。归纳了近年国内桥梁全寿命周期成本的构成以及计算方法的研究概况, 指出寿命周期成本主要由管理单位成本、用户成本和社会成本组成, 分析了计算成本各组成部分中的困难, 总结目前基于全寿命周期成本的桥梁设计中存在的问题。为基于全寿命周期成本的桥梁全寿命设计、维护、投资方案决策以及桥梁管理系统开发提供必要的研究背景。

关键词: 桥梁工程; 成本模型; 优化设计; 全寿命周期; 总体框架

中图分类号: U442.5⁺3

文献标识码: A

Review of Research of Bridge Design Based on Life Cycle Cost Analysis

GU Yin, HUANG Wei, ZHUO Weidong
(School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350108, China)

Abstract: In order to systematically expound the research situation of bridge design based on concept of life cycle cost (LCC) analysis, the research background, basic concept and principle of LCC analysis were introduced. The research status, the appropriate key technologies, and the prospects of LCC analysis for bridge design were illustrated. The study of basic theoretical system of LCC on board was summarized. The models of LCC and the study of framework were showed. The two most representative models were compared. The composition and calculation method of the bridge life cycle cost (BLCC) at home were introduced as well. LCC consists of per-unit cost of management, cost of users and social cost. The difficulties and obstacles encountered in calculation of the components were analyzed, and the existing problems in bridge design based on LCC were summarized. The study presented a necessary background for bridge design, maintenance, investment decision-making and the development of bridge management system based on LCC.

Key words: bridge engineering; cost model; optimal design; life cycle cost; overall framework

0 引言

传统的建设管理体制和桥梁设计理念的先天缺陷是我国目前桥梁出现质量和耐久性问题的关键原因。要从根本上改变目前这种状况, 传统的基于现状的设计 (Design for the Status) 桥梁设计方法已经

不再适合现状的发展趋势。20世纪70年代以后, 国内外学者在认真总结过去工程实践经验教训的基础上, 逐步提出基于结构耐久性设计 (Durability Design) 的理念, 将寿命期的概念引入到结构设计中。20世纪90年代, 又进一步明确提出基于结构寿命周期的设计理念, 即结构全寿命设计 (Integrated

收稿日期: 2010-09-15

基金项目: 福建省自然科学基金项目 (2010J01287); 中国博士后科学基金项目 (20070420112)

作者简介: 谷音 (1976-), 女, 福建福州人, 博士, 博士后, 副教授. (cinoa@126.com)

Life Cycle Design of Structure) 的新理念^[1-5]。本文阐述了国内外全寿命周期成本分析的理论体系和周期成本模型的研究现状,为基于全寿命周期成本的桥梁全寿命设计提供必要的理论基础。桥梁全寿命设计方法代表桥梁设计方法发展趋势,对促进桥梁设计理论的进步,贯彻可持续发展的方针,提高桥梁的耐久性和使用性能,延长使用寿命,降低桥梁全寿命周期总成本,推动桥梁设计、施工及维护、管理水平的提高,都具有十分重要而深远的意义^[2-4]。

1 全寿命周期成本分析方法

全寿命周期成本分析方法(LCCA)是指在设计阶段确定桥梁从建成到寿命终结时的总成本。在进行设计方案比选时,不仅考虑初始建造成本、设计成本,还考虑服役期间桥梁检查、养护、维护等各种成本,将未来成本折现为净现值(Net Present Value, 简写 NPV),才可用于对设计方案的评估。从本质上说,不论事先采取基于时间的养护措施还是以后基于性能的改造方案^[5],都要在设计阶段作出经济规划、预算和比较,得出最优的方案。其目标是以最小的全寿命投入获得最优的桥梁长期服务水平性能,核心是在设计阶段便考虑桥梁建成后的养护、维修和管理问题,综合评估桥梁建造成本、用户成本和社会成本,力求达到总体资源消耗最小。将全寿命性能设计的概念引入桥梁设计、施工、维护和管理中,将会使桥梁寿命期的服务水平和长期投资控制得到更有力和更全面的保证。全寿命性能设计符合桥梁建设以人为本、节约资源的科学发展要求,因而有长远的理论和工程价值。桥梁设计方法的创新将是21世纪桥梁可持续发展技术进步的一个重要标志^[3]。

采用LCCA对工程项目评估的原则是保证结构正常服役的前提下($BSI > BSI_{\min}$, BSI 为桥梁服务水平指标, $BSI_{\min}$ 为桥梁最低可接受服务水平),整个寿命周期内总成本的净现值最小。寿命周期成本计算模型可用公式(1)表示^[7]:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{[\sum_{k \in K} \sum_{j \in J} Cost(k, j, t)]}{(1 + r_t)^t} \cdot p_c(k, j, t), \quad (1)$$

式中, NPV 表示一个工程寿命周期成本总和的净现值; k 表示成本种类,包括管理单位成本、用户成本、社会成本; j 表示每个成本种类项目,如管理单

位成本包括材料、人工、设计等成本; t 表示成本发生的时间; T 表示分析周期; r_t 表示该年的基准贴现率; $p_c(k, j, t)$ 表示对应每一种成本发生的概率。

目前工程师对基础设施系统的分析、设计、维护、管理和寿命周期性能预测的知识逐渐积累,但由于存在诸多不确定性因素,LCCA方法在桥梁工程中的使用尚属于起步阶段。研究涵盖多学科内容,包括工程学、经济学、力学、优化分析理论以及可靠度概念。应采用系统的方法来理解技术、环境、经济、社会、政治对基础设施工程的综合影响。为实现这一点,必须建立模型分析结构,比较和评价不同设计方案的风险和效益,根据现有的知识在安全、经济、可持续发展等方面找到平衡点来最大化满足社会需求。

2 国外研究现状

2.1 全寿命周期成本基本理论体系的研究

寿命周期成本的概念首先由美国军方于20世纪60年代提出^[8],应用于军用器材采办领域,并迅速推广到民用企业。20世纪80年代开始,寿命周期成本的方法逐渐应用到交通领域,人们开始研究建设项目的全寿命成本优化问题。鉴于以往对基础设施耐久性认识不足或重视不够而引起许多经济损失的惨痛教训,以美国为首的国家率先针对道路、桥梁等基础设施项目提出寿命期成本分析的概念,即全寿命经济分析(Total Life Cycle Cost Analyze)。在分析过程中必须要确定桥梁从建成到其寿命期结束的总费用。简而言之,桥梁在其整个寿命过程中要使用多少净现资金。全寿命经济分析法的本质是要求在设计施工阶段,无论是事先采取防护措施还是以后坏了再修,都要做出经济预算和比较,承建者要对工程的全寿命负责到底,这样可避免短期行为给后人带来的麻烦与巨大经济损失。

桥梁结构寿命周期成本分析是交通基础设施管理和辅助决策的最有效评估工具。美国联邦公路总局(FHWA)陈述了全寿命周期成本分析的主要作用就是为了在寿命周期内安全运营的前提下,使综合花费成本最少,实现技术可靠、经济合理^[9]。

在近20年内,桥梁全寿命周期成本(Bridge Life Cycle Cost, 简称 BLCC)研究已经取得令人瞩目的成就,很多研究者提出桥梁设计、养护和更新的生命周期成本分析(LCCA)和生命周期成本评估的方法。以Frangopol^[10-18]为代表的美国学者对全寿命周期成本进行了全面研究,Frangopol在近20年内发

表多篇关于桥梁全寿命成本分析的论文,全面介绍了桥梁寿命周期成本的框架,包括设计成本、施工成本、检测成本、预防性或完全性维护成本、改造成本、失效成本、地震灾害作用成本等。NCHRP^[19]对全寿命成本构成做出详细研究,全寿命成本主要包括机构成本、用户成本和第3方成本,又对每种成本构成进一步划分,明确了用户成本和环境成本的含义。缅甸学者 Singh^[20]以预应力混凝土桥梁为例研究了 LCCA 的构成,主要包括机构成本、用户成本、事故和其它额外成本,提出用户成本的计算模型:用户成本=时间延误成本+燃油额外增加成本+汽车额外维修增加的成本,并根据自己国内的情况进行了参数的确定。英国学者 Orshan^[21]从建筑设计方案比较角度出发,探讨了在建筑方案设计中应该全面考虑项目的建造成本和运营维护成本的概念和思想。以 Asko Sarja^[22]为代表的日本学者对工程全寿命设计进行了研究,主要涉及到环境与生态、混凝土材料、结构耐久性设计,并对桥梁的成本优化、养护期成本优化、性能评价等等进行一系列研究。Kong 和 Frangopol^[23-24]用改良事件树的分析方法求出基于寿命周期的概率维护成本,提出针对劣化结构进行维护成本分析时,不仅需要考虑维护方案对成本的影响,也需要考虑维护成本同结构性能提高之间的关系,并且详细论证了维护成本同可靠度提高之间的关系。Mori 和 Ellingwood^[25]研究了混凝土结构检测和维护一系列行为对结构自身的影响,提出以可靠度为基础、寿命周期成本最小为目标的检测维护的方案。Philip Cady^[26]在寿命周期成本的分析中提出考虑折现率的合成模型,在交通基础设施的寿命周期成本优化分析过程中也考虑折现率的影响。Wen^[27]研究了在多灾害下结构全寿命周期成本的优化。

2.2 全寿命成本模型

国外对于桥梁的建设期成本均是采用估算的方法来进行计算,即先估算修建一座桥大概需要的劳动力、材料、设备的数量,再按劳动力的工资、材料单价和设备单价进行计算。而对运营期成本的计算时,有两个具有代表性的研究模型:基于条件的维护成本模型和基于可靠性的维护成本模型。

荷兰学者 Rijkswaterstaat 提出基于条件的维护成本模型,假设每次维修后桥梁的功能会恢复到初始建设状态的功能,并假设每次维护都相互独立。模型如公式(2)、公式(3)、公式(4)所示^[28]:

$$E(K(n, \alpha)) = \sum_{i=1}^n \alpha^i p_i [c_i + E(K(n-i, \alpha))], \quad (2)$$

$$\alpha = [1 + (r/100)]^{-1}, \quad (3)$$

当桥梁服务年限比较长时,采用下式:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E(K(n, \alpha)) = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} \alpha^i c_i p_i}{1 - \sum_{i=1}^{\infty} \alpha^i p_i}, \quad (4)$$

式中, $E(K(n, \alpha))$ 为维护的期望成本; r 为折现率; p_i 为桥梁在第 i 年维护的概率; c_i 为桥梁在第 i 年维护的成本; n 为桥梁服务年限。

美国学者 Frangopol 在上述基础上提出的基于可靠性的维护成本模型^[29]分为完全维护和预防维护。其中完全维护模型为:

$$C_{i1} = C_0 + p [\Delta\beta_i(t)]^q, \quad (5)$$

式中, C_{i1} 为第 i 次完全维护的成本; C_0 为与可靠度提高无关的部分维护成本; $\Delta\beta_i(t)$ 为结构在 t 时刻进行了第 i 次维护而使可靠度指标提高 $\Delta\beta$; p 、 q 为成本参数。

预防维护模型如公式(6)所示:

$$C_{i2} = C_0^a + g [\Delta\alpha_i(t)]^h, \quad (6)$$

式中, C_{i2} 为第 i 次预防维护的成本; C_0^a 为没有导致结构劣化速度减缓的部分维护成本; $\Delta\alpha_i(t)$ 为结构可靠度的蜕变速度减小值; g 、 h 为成本参数。

两者都应用于在全寿命成本最小的情况下确定出最佳的维修方案。环境成本不存在市场价格,无法对其进行直接估算。一些学者通过调查民众对由于环境变化引起的身体健康、农业、以及土壤流失等问题所愿意支出的成本来估算环境成本,取得了一系列成果^[30]。

3 国内研究现状

3.1 全寿命周期成本的认识发展

国内在桥梁全寿命经济性方面的研究近年来得到了广泛重视,许多文献针对桥梁寿命期成本概念、桥梁经济性评价以及提高桥梁寿命周期经济性的一些可行措施进行讨论,指出应将桥梁寿命周期成本作为衡量桥梁成本的指标,并以此来评价桥梁的经济性^[2-4]。2000年,我国发布《建设工程质量管理条例》(中华人民共和国国务院第279号令),首次以政令形式规定“设计文件应符合国家规定的设计深度要求,注明工程合理使用年限,建设工程实行质量保修制度——基础设施工程最低保修期限为设计文件规定的该工程的合理使用年限”。此规定实际

是对建筑工程的耐久性提出明确要求,即要求实施建筑工程的“全寿命责任制”^[31]。以往在建筑工程验收后,设计和工程承包方一般不再承担使用期间环境破坏、修复、重建等相关义务和责任,这就造成大量工程因耐久性不足引起的由国家承担的经济损失。国务院第279号令中的上述规定,实际上是贯彻实施基础设施工程的“全寿命责任制”。2004年国务院提出关于投资体制改革的决定,进一步明确企业的投资主体地位,决策、投资、建设、管理、风险等均由企业承担,因此在项目前期的规划、设计研究阶段,进行工程全寿命周期成本计算是当务之急。

近年来桥梁生命周期成本分析在国内兴起,并很快成为研究热点。郭卓明^[32]针对桥梁结构在国民经济中的特殊性,引入基于效益——成本分析的桥梁设计目标可靠度确定的分析方法,然后利用交通网络分析方法,借用运输项目经济评价中的国民经济评价分析模型,并吸收灾害经济研究的最新成果,对桥梁破坏的社会经济损失进行分项计算,得出桥梁在一定使用年限内的损失期望。陈艳艳^[33]研究了桥梁破坏对整个交通系统造成的直接及间接经济损失,根据用户成本的构成,通过建立交通需求及分配基于全寿命周期成本的桥梁设计理论研究模型,进行了单位用户成本的评估;通过对加固投资与加固后带来的经济效益(经济损失减少)的比较,提出对于桥梁加固方案比较经济可行的评估方法。吴海军^[8]等介绍了寿命周期成本分析的概念及其应用于桥梁工程的发展历程,阐述了它的基本原理,探讨了桥梁寿命周期成本的构成,并给出相应计算公式。黄侨^[34]等根据预应力混凝土桥梁时效分析理论,提出预应力混凝土桥梁全寿命分析理论的雏形,并整合新的结构耐久性能定量分析理论,为桥梁工程中存在的耐久性问题及全寿命预测分析提供新的解决途径,并为今后该类桥梁的维护、加固和改造提供科学的依据。王福敏研究员^[35]利用寿命周期成本的思想提出了对旧桥进行维护性加固工作,提出桥梁寿命周期成本不能只考虑建设期的成本,应该综合考虑该桥的间接成本,主要包括社会影响成本、远期综合成本、潜在成本和诱增成本等,并且参考澳克兰海湾大桥破坏原因就武隆乌江二桥旧桥改造决策中如何考虑桥梁寿命期成本问题进行了介绍。刘小虎^[36]研究了桥梁加固方案选择及资金分配策略。基于系统工程的理论和动态可靠度的概念,给出一个完整的三层次的桥梁加固方案和资金分配的

策略。其策略以可靠度作为协调参数,投入资金为解耦参数,建立了宏观的道路网络系统与微观的桥梁结构构件之间的联系。张克波和朱建华^[37]把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,把方案的优选决策转化为方案价值的分析比较。在利用已有的研究成果基础上,为桥梁维修加固提供了一种新思路。徐岳^[38]等通过比较加固桥梁与新建桥梁的差异,对加固桥梁与新建桥梁的生命周期成本进行了横向对比分析,并提出了基于桥梁加固工程生命周期成本分析的评价方法。邵旭东^[3]等分析了目前桥梁设计方法存在的问题,在寿命周期成本分析的基础上,提出了一种新的基于桥梁性能的桥梁全寿命设计方法和思路,即在满足桥梁服务水平的前提下,以桥梁全寿命周期成本最小为优化目标对设计方案进行评估。研究了桥梁寿命中期成本的组成,并以此建立混合周期成本优化模型,通过优化分析,得到最优桥梁设计方案。陈艾荣、马军海^[39]提出在整个使用寿命周期内的成本最小和总体可运营性最优为目标的基于全寿命的混凝土连续桥使用寿命评估方法。徐国平^[40]等结合我国桥梁设计实情,提出桥梁全寿命设计基本概念以及桥梁全寿命设计不同阶段设计内容和流程,有益探讨了桥梁工程全寿命设计方法。萧赓^[41]等分析干线公路荷载特性及对公路桥梁结构全寿命成本的影响,比较提高桥梁荷载等级前后桥梁的全寿命成本。

从社会需求、学科发展和工程应用前景来看,现有的理论与方法仍有不完善之处,目前桥梁工作者对服役结构的可靠度、维护成本、寿命预测分别研究,但没有从设计角度研究这些问题,做到防范于未然,使桥梁结构设计期间考虑具有可预见的服务水平和维护成本。桥梁的生命周期成本分析(LCCA)因时变抗力和随机极端荷载作用会导致与结构寿命期内的强度、使用性、耐久性、退化和损伤不同的失效而变得复杂,它会导致非常复杂的成本和不确定性评估,通常缺乏与各种直接和间接损失有关的成本数据和用于评估的不确定性数据。因此,使桥梁生命周期成本预测达到要求的精度仍然很难。但如果各种方案采用同样的方法进行计算,可以用生命周期成本进行方案比较。最小期望生命周期成本已经广泛用作新结构体系的设计优化准则,但现有研究主要是针对已建结构的生命周期成本的构成、计算模型和优化方法,对于在设计阶段需要

确定桥梁生命周期中的哪些成本和如何确定,目前还缺乏系统的研究。

3.2 全寿命周期成本模型和框架研究

全寿命周期成本是工程项目设计、开发、建造、使用、维修和报废等过程中发生的费用,即该工程项目在其确定寿命周期内或在预定有效期内所需支付的研究费用、制造安装费、运输维修费、报废回收费用的总和。近年来我国不少学者和专家对全寿命周期成本的构成及计算模型的研究作出巨大贡献。

高玲玲^[42]在国外全寿命周期成本研究的基础上,通过对我国38座典型大桥的调查分析基于我国现阶段造价管理体系和计算理论,提出适合我国国情的桥梁全寿命周期成本分析理论、分析方法和桥梁全寿命周期的成本构成。基于桥梁全寿命设计理念,系统分析了典型大桥桥型结构构件的养护、维修和专项检测成本,并对桥梁全寿命涉及到的建设期、运营期和拆除期的各个阶段的成本构成进行了框架分析,分析了各成本的内涵,并给出了各阶段成本设计的计算模型,最终得出桥梁全寿命周期成本分析模型。桥梁全寿命周期成本计算模型如式(7)所示:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7 + C_8 + C_9 + C_{10} + C_{11}, \quad (7)$$

式中, C 表示全寿命周期成本; C_1 表示建设期成本; C_2 表示管理成本; C_3 表示养护成本; C_4 表示专项成本; C_5 表示维修成本; C_6 表示保险成本; C_7 表示阻塞引起的成本; C_8 表示绕行引起的成本; C_9 表示事故引起的成本; C_{10} 表示环境影响成本; C_{11} 表示拆除成本。

钟卿^[43]研究了桥梁结构寿命周期成本的框架,系统阐述桥梁结构其寿命周期内的机构成本、用户成本和社会成本,分析了各自特点,重点介绍了寿命周期成本中的社会成本和用户成本,通过一系列研究将空气污染物及用户耽搁时间同成本损失建立相对应关系。改良事件树法比较客观全面的反映桥梁结构寿命周期内的维护事件,并且采用概率的算法求得桥梁结构寿命周期的维护概率成本。寿命周期成本计算模型如式(8)所示:

$$C_{LCC} = C_A + C_U + C_P, \quad (8)$$

式中, C_{LCC} 表示寿命周期成本; C_A 表示机构成本; C_U 表示用户成本; C_P 表示社会成本。

吴海军博士和陈艾荣教授^[44]提出桥梁寿命周期成本由机构成本和使用者的成本组成,并对寿命周期成本的计算模型进行初步研究,指出桥梁全寿命周

期成本分析模型:

$$LCC = DC + CC + MC + RC + UC + SV, \quad (9)$$

式中, DC 为设计成本; CC 为建设成本; MC 为维修成本; RC 为修复成本; UC 为使用者成本; SV 为剩余价值(可正,亦可负)。

叶建仁^[45]阐述和研究了全寿命周期成本的构成及计算模式,初步分析初始成本和初始可靠度之间的量化关系,通过计算公式拟合初步得到简支梁桥的初始造价与初始可靠度之间的数量关系,阐明了基于检查精度的维修成本、检查成本和失效成本的计算模式,分析了维修成本对桥梁性能的影响,并介绍了桥梁失效成本的评估与分析模型。指出桥梁全寿命周期成本计算模型如式(10)所示:

$$W = C_C + C_M + C_F, \quad (10)$$

式中, C_C 表示初始造价或初始费用; C_M 表示检测维护费用; C_F 表示失效损失或失效成本。各部分费用的计算模型又进一步探讨, C_C 采用王光远研究的结构最优可靠度数学模型 $C(p_r) = \left[1 - \frac{1}{\alpha} \ln(1 - p_r) \right] C_{C0}$; C_M 分3类:日常维护(Routine Maintenance, 简称RM)、预防维修(Preventive Maintenance, 简称PM)和维修加固(Essential Maintenance, 简称EM),即 $C_M = C_{RM} + C_{PM} + C_{EM}$; C_F 目前无法进行精确计算,采用比较笼统的估算^[42]。

邵旭东^[2]等分析了全寿命周期成本的整体研究框架,提出基于全寿命周期成本的全寿命方法的关键技术。(1) 桥梁服役过程中的劣化机理研究。桥梁服役过程暴露在大气环境下,发生混凝土碳化,钢筋锈蚀,桥梁的承载能力下降,服务水平降低,深入研究了混凝土结构劣化机理,为制定桥梁维护方案提供理论支持。(2) 多指标桥梁性能评价模型。提出桥梁多指标性能评价模型,如健康指标、性能指标、可靠度指标。对桥梁的状态进行量化。(3) 桥梁劣化维护方案研究。研究影响桥梁性能下降的因素,针对次要因,合理制定桥梁维护方案。(4) 桥梁维护-成本-服务水平的综合关系研究。桥梁服务水平下降时,需要维护,则要花费成本。对同种维护方案来讲,成本越高,桥梁性能提高越高。研究桥梁维护-成本-服务水平的综合关系,得出最优维护方案。(5) 折现率模型研究。在桥梁寿命周期成本分析中,折现率是一个非常重要而又敏感的参数,折现率的高低关系到最优桥梁设计、维护方案的决策。(6) 维护路段交通流模型研究。桥梁维

护过程中,对周围交通造成影响,对维护路段的交通流进行预测模拟,建立模型,用于评估用户成本和社会成本。(7) 智能优化算法研究。通过对寿命周期成本组成的研究,建立混合的寿命周期成本模型,定义边界条件,利用智能优化技术,可以决策出最优的设计方案。

马军海^[46]等把桥梁全寿命设计概况为使用寿命设计、美学设计、性能设计、环境生态设计、监测养护与维修设计及成本分析等6大过程设计,从业主、社会和使用者的需求出发,根据3个阶段对基于全寿命的桥梁设计主要过程的工作内容和目标的分析,建立一个基于全寿命的桥梁设计总体框架图,并从桥梁生命周期成本分析的概念出发,根据基于全寿命的桥梁设计思想,分析了基于全寿命的桥梁设计涉及的生命周期成本构成,分别建立了各个构件成本的相应计算方法和计算公式,根据不同设计阶段的计算分析需要,提出3种层次的桥梁生命周期成本分析模型。

综上可知,寿命周期成本主要由管理单位成本、用户成本和社会成本组成,其中管理单位成本包括初始造价、将来改造和维护成本、周期养护成本、日常管理成本、设计费用成本以及荷载试验成本等,用户成本包括汽车运行成本、交通耽搁成本和其他(不舒适)等,社会成本包括事故成本、环境影响成本以及其他,如图1所示。

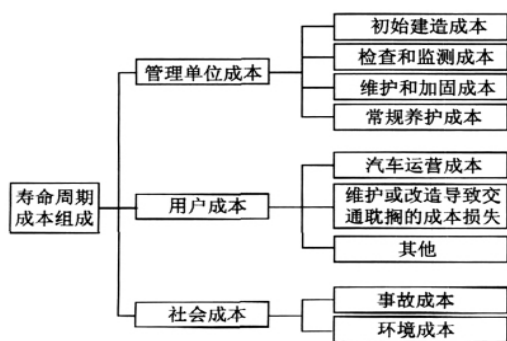


图1 桥梁寿命周期成本组成图

Fig.1 Composition of LCC

管理单位成本中,初始成本、设计成本和荷载试验成本比较容易确定。养护成本、将来的维护或改造成本比较难确定,养护成本与桥梁寿命可靠度、将来采用的维护方案有关。用户成本与桥梁结构所处的路线、桥梁位置、交通状况、桥梁结构的性能状态以及环境等因素相关,比较复杂。美国交通仿真软件(TransModeler)^[47-49]可以较好地模拟桥面维

护时车辆的运行情况、交通延误情况、燃油消耗等参数,可以计算出由于维护造成交通堵塞所产生的尾气排放指标,其他指标有待进一步研究。

4 结论

国外在桥梁的社会成本和用户成本方面已经有了一定的研究,我国由于社会、经济以及服务水平的限制,目前研究此领域受到许多限制。但作为以环保和发展为中心政策的当今中国,社会成本和用户成本的研究有十分重要的意义。

由于资金具有时间价值,为了将分析年限内发生的各种成本换算成统一的具有可比性的现在价值,需要一个重要的参数:折现率,它的取值对投资方案的选取有很大的影响。一般地,折现率越大,增加初始投资延长项目使用寿命的方案就越会受到抑制,事实上,对于桥梁这种基础设施来说,由于分析期比较长,对折现率的科学选定,是一个非常困难的问题,也是值得研究和深思的问题。

桥梁全寿命周期成本分析结果的可靠性取决于数据和信息的数量及其准确性。目前国内相关数据很少,并且外部环境的千变万化和项目本身的复杂性造成人们预测能力的局限性。需要对可能构成风险的不确定性因素进行分析与辨识,在此基础上进行风险估计,才能预估项目的经济成本。国内需要开展维护、结构性能和维护成本之间的研究,并建立一个比较完善的桥梁数据库,对促进维护成本模型进一步发展,结构性能模型进一步细化和优化维护方案做出贡献。

目前国内全寿命桥梁设计理论与方法的研究才刚刚起步,很多桥梁工作者对全寿命桥梁设计仅限于概念,对全寿命桥梁设计的内涵和主要内容、体系还缺乏认识。若更好地把全寿命桥梁设计新理念及方法向桥梁全寿命设计方法过渡,需要探求合理的全寿命桥梁设计总体框架。

参考文献:

References:

- [1] SARJA A. Integrated Life Cycle Design of Structures [M]. London and New York: Spon Press, 2002: 1-139.
- [2] 邵旭东,彭建新,晏班夫. 桥梁全寿命设计方法框架性研究 [J]. 公路, 2006 (1): 44-49.
SHAO Xudong PENG Jianxin YAN Banfu. Framework Research on Design Method for Bridge Life Cycle [J].

- Highway, 2006 (1): 44-49.
- [3] 张爱林. 基于功能可靠度的结构全寿命设计理论研究综述 [J]. 北京工业大学学报, 2000, 26 (3): 55-58.
- ZHANG Ailin. Reviews for the Research of Performance Reliability-based Design Theory for the Whole Service Life of Structures [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2000 26 (3): 55-58.
- [4] 陈艾荣, 马军海. 桥梁全寿命设计方法及关键科学问题 [C] //2005 年全国公路科技青年论坛论文集. 北京: 人民交通出版社, 2005: 168-184.
- CHEN Airong, MA Junhai. Design of the whole Life Bridge and the key scientific issues [C] // National Youth Forum on Science and Technology Proceedings Highway, Beijing: China Communications Press, 2005: 168-184.
- [5] 叶文亚, 李国平, 范立础, 等. 预应力混凝土桥梁全寿命设计研究现状和展望 [C] //上海市公路学会第7届年会学术论文集. 北京: 人民交通出版社, 2005: 166-170.
- YE Wenya, LI Guoping, FAN Lichu, et al. The Status and Prospects of Life Cycle Design of Prestressed Concrete Bridge [C] //The Seventh Annual Conference of the Shanghai Institute of Road Engineering. Beijing: China Communications Press, 2005: 166-170.
- [6] KONG J S, FRANGOPOL D M. Prediction of Reliability and Cost Profiles of Deteriorating Bridges under Time-and performance-controlled Maintenance [J]. Journal of Structure Engineering, 2004, 130 (12): 1865-1874.
- [7] JAWAD D. Life Cycle Cost Optimization for Infrastructure Facilities [D]. New Jersey, USA: State University of New Jersey, 2003.
- [8] 吴海军, 陈艾荣. 寿命周期成本分析方法在桥梁工程中的应用 [J]. 公路, 2004 (12): 33-38.
- WU Haijun; CHEN Airong. Application of Life Cycle Cost Analysis Method to Bridge Structures [J]. Highway, 2004 (12): 33-38.
- [9] FHWA. Life Cycle Cost Analysis Primer Office of Asset Management, FHWA-HF-02-047 [R]. Washington, D. C.: FHWA, 2002: 608-618.
- [10] FRANGOPOL D M, LIN K Y. Life-cycle Cost Design of Deteriorating Structures [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123 (10): 139-140.
- [11] FRANGOPOL D M. Life-cycle Cost Analysis for Bridge [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 66 (6): 210-236.
- [12] FRANGOPOL D M, KONG J S. Evaluation of Expected Life-cycle Maintenance Cost of Deteriorating Structures [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129 (5): 682-691.
- [13] LIU Min, FRANGOPOL D M. Optimal Bridge Maintenance Planning Based on Probabilistic Performance Prediction [J]. Engineering Structures, 2004, 26 (7): 991-1002.
- [14] NOORTWIJK J M V, FRANGOPOL D M. Two Probabilistic Life-cycle Maintenance Models for Deteriorating Civil Infrastructures [J]. Engineering Mechanics, 2004, 19 (4): 345-359.
- [15] KONG J S, FRANGOPOL D M. Probabilistic Optimization of Aging Structures Considering Maintenance and Failure Costs [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131 (4): 600-616.
- [16] LIU Min, FRANGOPOL D M. Multiobjective Maintenance Planning Optimization for Deteriorating Bridges Considering Condition, Safety, and Life-cycle Cost [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131 (5): 833-842.
- [17] LIU Min, FRANGOPOL D M. Optimizing Bridge Network Maintenance Management under Uncertainty with Conflicting Criteria: Life-cycle Maintenance, Failure, and User Costs [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132 (11): 1835-1845.
- [18] OKASHA N M, FRANGOPOL D M. Lifetime-oriented Multi-objective Optimization of Structural Maintenance Considering System Reliability, Redundancy and Life-cycle Cost Using GA [J]. Structural Safety, 2009, 31 (6): 460-474.
- [19] Guide for Mechanistic-empirical Design [R]. Washington, D. C.: NCHRP, 2004.
- [20] SINGH D, TIONG R L K. Development of Life Cycle Costing Framework for Highway Bridges in Myanmar [J]. International Journal of Project Management, 2005 (23): 37-44.
- [21] ORSHAN O. Life Cycle Cost: A Tool for Comparing Building Alternative [J]. Journal of structure Safety, 1999, 21 (4): 357-372.
- [22] ASKO S. Integrated Life Cycle Design of Structures [M]. London and New York: Spon Press, 2002.
- [23] KONG J S, FRANGOPOL D M. Life-cycle Reliability-based Maintenance Cost Optimization of Deteriorating Structures with Emphasis on Bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129 (6): 818-828.
- [24] KONG J S, FRANGOPOL D M. Cost-reliability Interaction in Life-cycle Cost Optimization of Deteriorating Structures [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130 (11): 1704-1712.
- [25] MORI Y, ELLINGWOOD R. Maintaining Reliability of

- Concrete Structures. II: Optimum Inspection/Repair [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120 (3): 846-862.
- [26] CADDY P D. Inflation and Highway Economics Analysis [J]. Journal of Transportation Engineering, 1983, 109 (5): 631-639.
- [27] WEN Y K. Minimum Lifecycle Cost Design under Multiple Hazards [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001: 223-231.
- [28] VAN NOORTWIJK J M. Explicit Formulas for the Variance of Discounted Life-cycle Cost [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2003, 80 (2): 185-195.
- [29] FRANGOPOL D M, KONG J S, GHARAIBEH E S. Reliability-based Life-cycle Management of Highway Bridges [J]. Journal Computing in Civil Engineering, ASCE, 2001, 15 (1): 27-34.
- [30] CHANDLER R F. Life-cycle Cost Model for Evaluating the Sustainability of Bridge Decks [R]. Ann Arbor, Michigan: University of Michigan, 2004.
- [31] 王增忠. 基于混凝土耐久性的建筑工程项目全寿命经济分析 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
- WANG Zengzhong. Life-cycle Cost Analysis for Construction Engineering Project Based on Durability of Concrete [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [32] 郭卓明, 胡勃, 袁万城, 范立础. 桥梁抗震安全防护及重要性的效益-成本分析 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1999, 27 (2): 155-159.
- GUO Zhuoming, HU Bo, YUAN Wancheng, et al. Benefit-cost Analysis of Aseismic Safety and Importance of Bridges [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 1999, 27 (2): 155-159.
- [33] 陈艳艳, 王光远. 桥梁抗震加固经济可行性评估 [J]. 世界地震工程, 2002, 18 (1): 18-22.
- CHEN Yanyan, WANG Guangyuan. Economic Feasibility Analyses of Bridge Aseismic Strengthening [J]. World Information on Earthquake Engineering, 2002, 18 (1): 18-22.
- [34] 黄侨, 杨大伟, 杨明. 预应力混凝土桥梁的全寿命设计理念研究 [C] // 中国公路学会桥梁和结构工程分会2004年全国桥梁学术会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2004: 922-925.
- HUANG Qiao, YANG Dawei, YANG Ming. Research on Life-cycle Cost Design Ideas for Prestressed Concrete Bridges [C] // Branch of Bridge and Structure, Society of Highway of China. Proceedings of 2004 Academic Conference on Bridge, Beijing: China Communications Press, 2004: 922-925.
- [35] 王福敏, 吕庆丰, 宋琼瑶. 结合桥梁寿命周期成本论武隆乌江二桥旧桥改造方案的决策 [J]. 公路交通技术, 2005 (1): 84-86.
- WANG Fumin; Lü Qingfeng; SONG Qiongyao. Discussion on Selection and Decision of Old Bridge Rebuilding Schemes for Wulong No. 2 Wu River Bridge according to Cost during Service Life of Bridges [J]. Technocogy of Highway and Transport, 2005 (1): 84-86.
- [36] 刘小虎. 桥梁加固方案选择及资金分配策略 [D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- LIU Xiaohu. Selection of Bridges Strengthening Measures and Funds Allocation Strategy [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [37] 张克波, 朱建华. 基于价值工程与变权综合评价的服役桥梁维修加固方案决策 [J]. 中外公路, 2006, 26 (1): 121-124.
- ZHANG Kebo, ZHU Jianhua. Strengthening Plan of Existing Bridge Based the Value Engineering and Synthetic Assessment with Variable Weights [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2006, 26 (1): 121-124.
- [38] 徐岳, 武同乐. 桥梁加固工程生命周期成本横向对比分析 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24 (31): 30-34.
- XU Yue; WU Tongle. Comparative Analysis of Life-cycle Cost for Bridges Strengthening [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24 (31): 30-34.
- [39] 陈艾荣, 马军海. 基于全寿命的混凝土连续梁桥使用寿命研究 [C] //第17届全国桥梁学术会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2006: 709-716.
- CHEN Airong, MA Junhai. Research on Life of the Prestressed Concrete Continuous Girder Bridges Based on Life Cycle Analysis [C] //The 17th Proceedings of the National Workshop on Bridge. Beijing: China Communications Press, 2006: 709-716.
- [40] 徐国平, 刘明虎, 耿爽. 桥梁工程全寿命设计方法 [J]. 公路, 2007 (10): 1-4.
- XU Guoping, LIU Minghu, GEN Shuang. Life-cycle Cost Design for Bridge Engineering [J]. Highway, 2007 (10): 1-4.
- [41] 萧赓, 景春光, 宋新安. 基于调查统计分析的干线公路荷载对桥梁全寿命成本的影响研究 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (11): 56-60.
- XIAO Geng, JING Chunguang, SONG Xinan. Effect of Traffic Load of Arterial Highway on Bridge Life Cycle Cost Based on Traffic Survey [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development. 2010, 27 (11): 56-60.

- LIU Zhao, LÜ Zhitao, HUI Zhuo, et al. Review of Application and Research on Strut-and-tie Models for Concrete Bridges [J]. Engineering Sciences, 2008 (10): 14–21.
- [2] TJHIN T N, KUCHMA D A. Computer-based Tools for Design by Strut-and-tie Method: Advances and Challenges [J]. ACI Structural Journal, 99 (5): 586–594.
- [3] JTG D62–2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S].
JTG D62–2004, Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts [S].
- [4] SCHLAICH J, SCHÄFER K, JENNEWEIN M. Toward a Consistent Design of Structural Concrete [J]. Journal of the Prestressed Concrete Institute, 1987, 32 (3): 74–150.
- [5] Euro International Committee for Concrete, International Federation for Prestressing. Practical Design of Structural Concrete [M]. London: SETO Ltd, 1999.
- [6] BREEN J E, BURDET O, ROBERTS C. Anchorage Zone Reinforcement for Post-tensioned Concrete Girders [R]. Austin: The University of Texas at Austin, 1991.
- [7] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (4th ed.) [S].
- [8] SONGWUT H. Linear and Nonlinear Finite Element Analyses of Anchorage Zones in Post-tensioned Concrete Structures [D]. Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.
- [9] BROWN M D, BAYRAK O. Minimum Transverse Reinforcement for Bottle-Shaped Struts [J]. ACI Structural Journal, 103 (6): 813–821.
- [10] SAHOO D K, SINGH B, BHARGAVA P. Investigation of Dispersion of Compression in Bottle-shaped Struts [J]. ACI Structural Journal, 2009, 106 (2): 178–186.
- [11] 林波, 刘钊. 矩形截面梁后张锚固区劈裂力计算的拉杆模型法 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (12): 56–61.
LIN Bo, LIU Zhao. Strut-and-tie Model Method for Bursting Force Calculation of Post-tensioned Anchorage Zone in Rectangular Beam [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (12): 56–61.
- [12] SANDERS D H, BREEN J E. Post-tensioned Anchorage Zones with Single Straight Concentric Anchorages [J]. ACI Structural Journal, 1997, 94 (2): 146–158.
- [13] VECCHIO F J, COLLINS M P. The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear [J]. ACI Journal, 1986, 83 (2): 219–231.
- [14] ACI 318M-08, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary [S].
- [15] ROGOWSKY D M, MARTI P. Detailing for Post-tensioned [R]. Switzerland: VSL International Ltd., 1996.
- (上接第74页)
- [42] 高玲玲. 桥梁全寿命周期成本分析 [D]. 北京: 北京工业大学, 2008.
GAO Lingling. Life-cycle Cost Analysis of Bridge [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008.
- [43] 钟卿. 基于全寿命周期成本的桥梁设计理论研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
ZHONG Qing. Research on Bridge Design Based on Life-cycle Cost Analysis [D]. Changsha: Hunan University, 2006
- [44] 吴海军, 陈艾荣. 桥梁结构耐久性设计方法研究 [J]. 中国公路学报, 2004, 17 (3): 57–61.
WU Haijun; CHEN Airong. Study of Durability Design Method for Bridge Structures [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17 (3): 57–61.
- [45] 叶建仁. 混凝土简支梁桥全寿命周期成本及计算模型研究 [D]. 福州: 福州大学, 2010.
YE Jianren. The Study on Life Cycle Cost (LCC) and Calculation Model of Simply Supported Concrete Bridges [D]. Fuzhou: Fuzhou University. 2010.
- [46] 马军海, 陈艾荣, 贺君. 桥梁全寿命设计总体框架研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35 (8): 1003–1007.
MA Junhai, CHEN Airong, HE Jun. General Framework of Bridge Whole Life Design [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2007, 35 (8): 1003–1007.
- [47] STERZIN E D. Modeling Influencing Factors in a Microscopic Traffic Simulator [D]. Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [48] SCHORCH G T, FREUND U, SALZWEDEL H, et al. A Hierarchical Object-oriented Global Traffic Model for Simulation of Mobile Satellite Communication Networks [C] //IEEE International Conference on Personal Wireless Communications. Bombay, Indien: IEEE, 1997: 288–292.
- [49] 臧志刚, 陆锋, 李海峰, 等. 7种微观交通仿真系统的性能评价与比较研究 [J]. 交通与计算机, 2007, 25 (1): 66–70.
ZANG Zhigang, LU Feng, LI Haifeng, et al. Performance Evaluation and Comparison of Seven Microscopic Transportation Simulation Systems [J]. Computer and Communications, 2007, 25 (1): 66–70.