

文章编号: 0451-0712(2006)01-0044-05

中图分类号: U442

文献标识码: A

桥梁全寿命设计方法框架性研究

邵旭东, 彭建新, 晏班夫

(湖南大学桥梁工程研究所 长沙市 410082)

摘 要: 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。研究了桥梁寿命周期成本的组成, 并以此建立混合寿命周期成本优化模型, 通过优化分析, 得到最优的桥梁设计方案。通过算例研究, 验证了该方法的有效性。该方法的实现不仅能保证桥梁提供长期稳定的服务水平, 而且能起到控制长期投资、减小对社会不利影响的目的。

关键词: 寿命性能; 全寿命设计; 寿命周期成本分析方法; 服务水平

1 研究背景

经过近几十年的快速发展, 我国桥梁的数量已十分庞大。其中不少桥梁由于外界环境的作用, 桥梁性能劣化, 出现过高的维护成本, 造成严重的经济损失, 与桥梁可持续发展战略不符。国外也有同样的困扰, 美国土木工程师协会(ASCE)在 1998 年 4 月的报道中指出: “ASCE 给美国的国家土木设施一个平均的等级为 D, 估计需要花费 13 000 亿美元才能够挽救这种长期忽略的问题”。桥梁长期的服务水平、后期维护成本和寿命周期管理等问题已引起社会各界的关注。

纵观以上问题, 提出桥梁全寿命性能设计显得十分重要。目前我国在桥梁性能设计方面是不全面的, 例如, 已经包括的桥梁性能有:

- (1) 设计标准(荷载等级, 平、纵、横设计等);
- (2) 安全性和耐久性;
- (3) 美学;
- (4) 对桥位周边环境影响的评估和保护。

而未包含的桥梁性能有:

- (1) 今后维修改造的难易程度及成本;
- (2) 维修改造时能否保持交通通畅, 是否能维持较高的服务水平;
- (3) 交通阻塞对人的心理和环境影响评估。

本文提出的桥梁全寿命设计方法, 即基于寿命周期成本(Life-Cycle Cost, 简称 LCC)的设计方法,

就是以桥梁服务水平为基础, 寿命周期成本总和现值最小为目标的设计方法。

它是以最小的全寿命投入获取最优的桥梁长期服务水平这一性能为目标的新设计方法。亦为基于寿命性能的桥梁设计方法, 这在国外被称为下一代桥梁设计方法(Next generation bridge design method)。

该方法的核心是在设计阶段便考虑桥梁建成后的养护、维护和管理问题, 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为目的。

将“全寿命性能设计”的概念引入桥梁设计、施工和维护的工程实践中, 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。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。

2 寿命周期成本分析方法

寿命周期成本及全寿命经济性概念首先由美国军方于 20 世纪 60 年代提出, 到 20 世纪 80 年代, 在各个领域都有一定的研究与应用, 是进行投资决策的重要依据。

从 20 世纪 80 年代开始, LCC 方法逐渐应用到道路交通行业, 人们开始研究建设项目的全寿命成

本优化问题,从成本的角度提出全寿命管理的观念,综合考虑建设成本,选择全寿命成本最优的方案。美国联邦公路局(FHWA)^[1]和州公路管理单位(SHAS)经常用它作为评估工具,以期能够获得更好的决策目标。

寿命周期成本分析方法,就是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,不仅要考虑初始建造成本、设计成本,还要考虑服役期间桥梁检查、养护、维护等各种成本,将“未来的成本”折现为“今天的钱”(即为净现值,Net Present Value,简称NPV),才可以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,还是以后采用基于性能的改造方案^[2],都要在设计阶段做出经济规划、预算和比较,得出最优的方案,建设单位要对基础设施项目的“全寿命”负责,这样,避免了“短期行为”给社会带来经济损失。

Hassanain 和 Loov^[3]讨论了钢筋混凝土桥梁构件和桥梁体系的成本优化并综述了钢筋混凝土构件的寿命周期成本分析方法和过程。Liu^[4]等人用寿命周期维护成本和维持桥面板性能的措施的加权进行最优方案决策。Miyamoto^[5]等人通过成本最小、承载力和耐久性最大研究现有的最优化维护方案。Lee 和 Chang^[6]在土木结构寿命期间通过寿命周期总成本最小为目标选择最优维护方案,得出维护时间和维护方法,得出了一个方便使用且行之有效的方法评估土木结构性能和决策最优维护方案,并指出管理系统中数据的准确性是非常关键的。Kong 和 Frangopol^[7,8]利用时变可靠度的方法,并结合 Monte Carlo 模拟方法研究成本—维护—桥梁可靠度的关系,以及维护方案的优化。

寿命周期成本包括管理单位成本、用户成本以及社会成本,如图 1 所示。

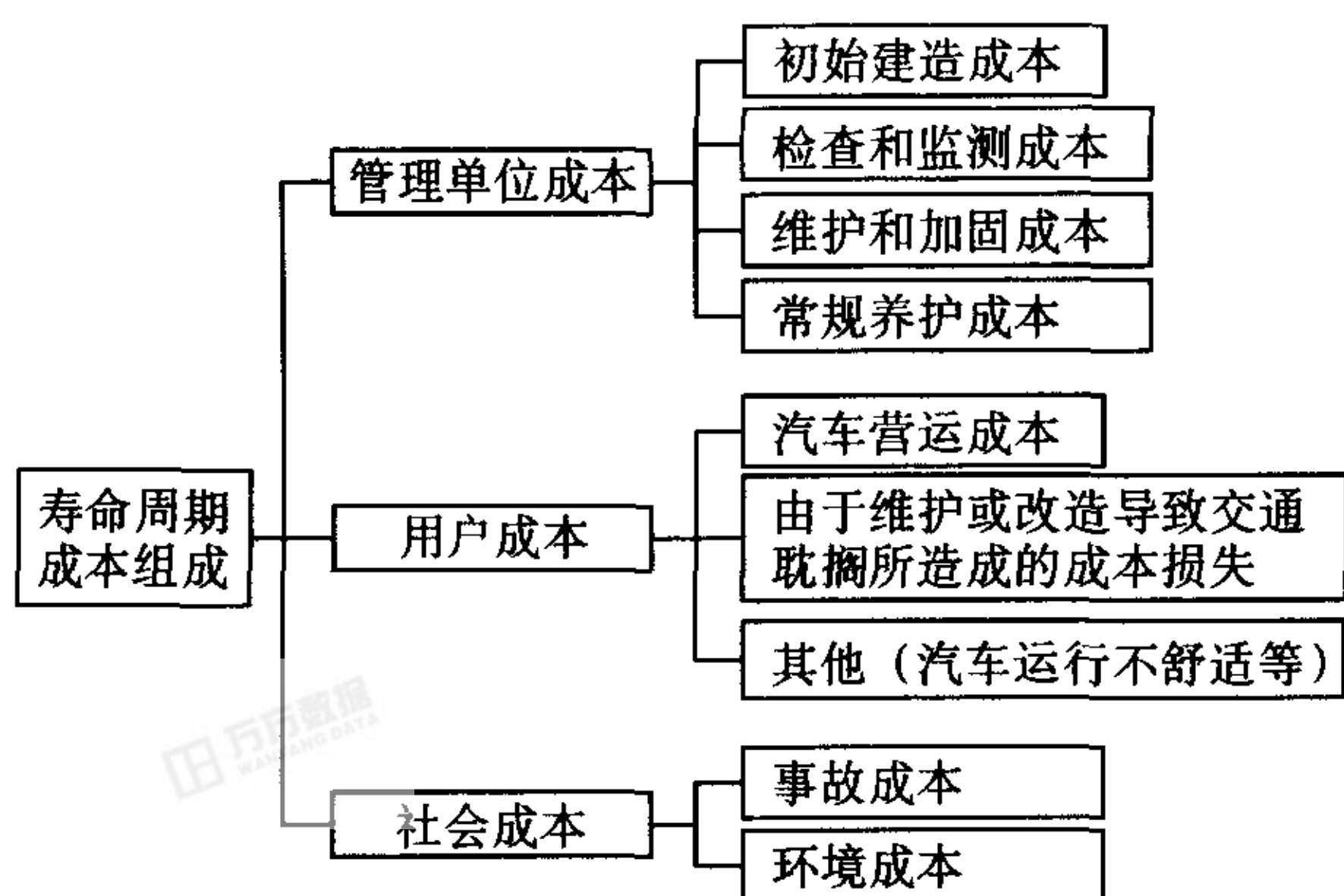


图 1 桥梁全寿命周期成本组成

对于单座桥梁*i*,其寿命周期成本现值可以写成:

$$NPV = C_{Mi} + C_{Ui} + C_{Si}$$

$$= c_{M0} + \sum_{t=1}^T \{ (1+r)^{-1} [c_{Mi}(t) \cdot p_{Mi}(t) + c_{Ui}(t) \cdot p_{Ui}(t) + c_{Si}(t) \cdot p_{Si}(t)] \} \quad (1)$$

式中: NPV 为寿命周期成本现值总和; C_{Mi} 、 C_{Ui} 、 C_{Si} 分别为管理单位成本、用户成本和社会成本; c_{M0} 为初期建设成本; $c_{Mi}(t)$ 、 $c_{Ui}(t)$ 、 $c_{Si}(t)$ 分别为桥梁在 t 年的管理单位成本、用户成本和社会成本; r 为折现率; T 为结构寿命分析周期; $p(\cdot)$ 为每种成本发生的概率。

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;而养护成本、将来维护或改造成本比较难确定,目前已成为学者研究的热点,取得了较多的成果,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。通过使用美国交通仿真软件,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,从而可以进行用户成本评估。

目前对社会成本的计算缺乏成熟模型,通过仿真软件模拟,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,其他指标有待于进一步研究。

3 研究目标

提出的设计目标是在桥梁寿命周期内,以寿命周期成本分析为基础,桥梁服务水平为边界条件,寿命周期成本总和现值最小,即以最小的投入获得最优的服务,可以用下式表达:

$$\min NPV \quad \text{约束条件: } BSI \geq BSI_{\min} \quad (2)$$

式中: NPV 为桥梁结构寿命周期成本现值总和; BSI 为桥梁服务水平指标; BSI_{\min} 为桥梁最低可接受的服务水平指标。

上述方程实际上是一个优化问题,在满足桥梁服务水平的条件下,桥梁寿命周期成本现值总和最小。该研究涵盖桥梁工程、交通工程、环境工程等多个学科,属交叉学科研究。内容包括工程学、经济学、力学、优化分析以及系统集成等。

求解该优化问题,必须对其中以下几个问题展开系统研究:

- (1) 影响桥梁性能的不确定性参数研究;
- (2) 桥梁劣化机理研究;

- (3)维护方案研究;
- (4)维护—成本—性能的关系研究;
- (5)折现率分析;
- (6)维护路段交通流模型研究。

4 桥梁全寿命设计流程

桥梁全寿命设计必须考虑各种参数的随机性,以及材料和施工质量、周围环境影响的不确定性,使

得人们有可能利用可靠指标或失效概率,科学和定量地描述结构的安全可靠程度以及服务水平;另一方面应考虑如何以最低的合理成本达到规范所要求的技术指标,产生出最佳的经济效益。总之,该方法通过计算寿命周期内总成本,利用优化算法对设计方案进行评估,决策出最优的设计方案。该设计方法的基本思路如图 2 所示^[9]。

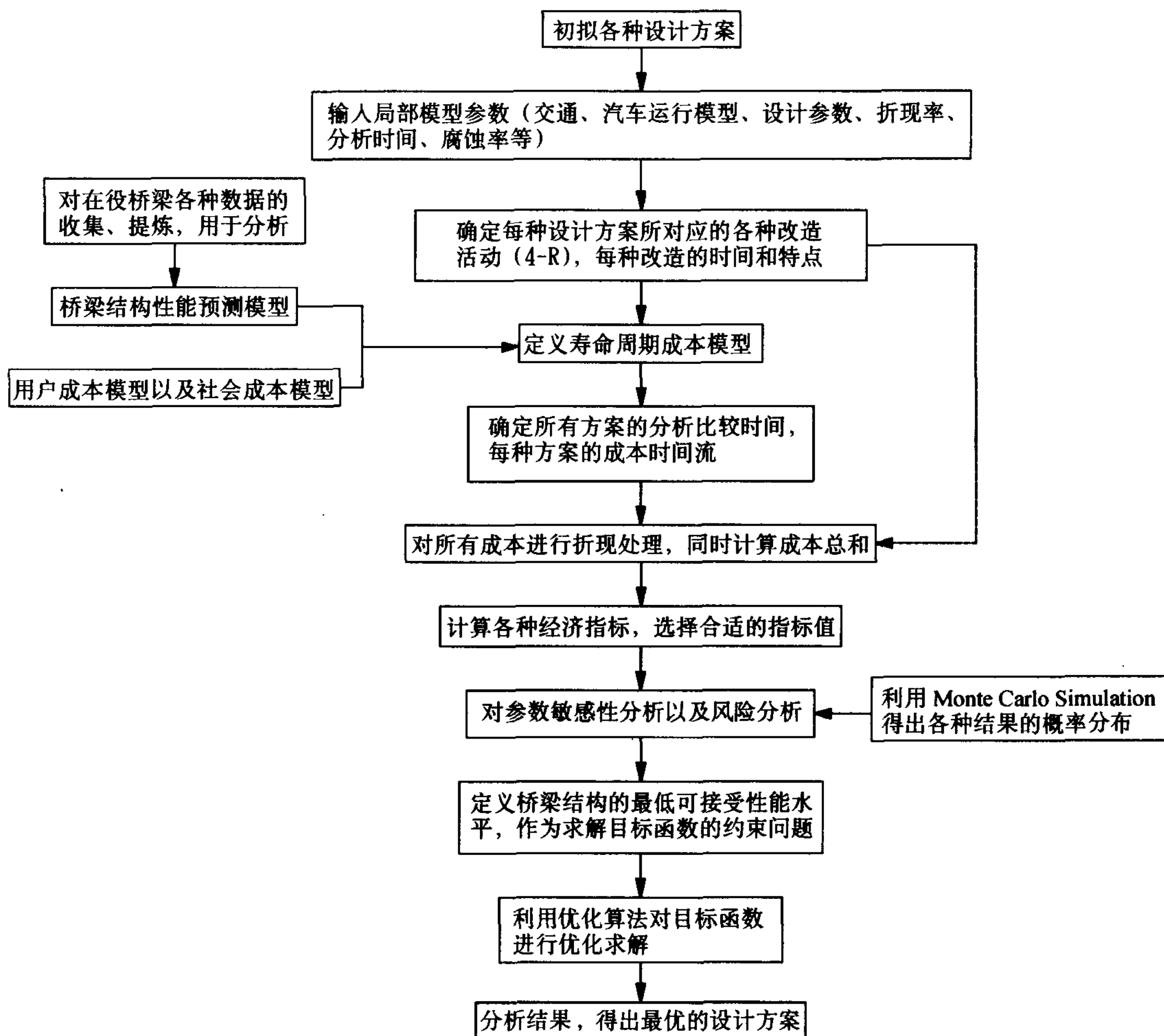


图 2 桥梁全寿命设计方法基本框架

5 案例研究

对某四车道公路的桥宽设计方案进行评估,在设计阶段有两个设计方案。

方案一:常规四车道方案(桥宽 16 m,为双向四车道,干混凝土路面);

方案二:五车道方案(中间车道平时不用,在进行桥面翻新时开启备用车道,桥宽 19.5 m,为双向四车道,干混凝土路面)。

对两个设计方案的寿命周期成本分别进行评

估,其参数如表 1。

5.1 建造成本

$$C_{im1} = 16 \text{ m} \times 0.5 \text{ 万元/m}^2 \times 300 \text{ m} \\ = 2400 \text{ 万元}$$

$$C_{im2} = 19.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ 万元/m}^2 \times 300 \text{ m} \\ = 2925 \text{ 万元}$$

5.2 用户成本

假定每隔 10 年、15 年、20 年翻新一次桥面,桥面施工要求翻新车道在封闭交通的情况下进行,具

表 1 分析参数

项 目	符 号	参 数
桥长	L	300 m
寿命期	T	100 年
初期建设费用单价	Cp	5 000 元/m ²
车辆过桥收费	m	10 元/辆
燃油价格	p	4 元/L
折现率	r	4%
平均车速	V	80 km/h
双向交通量	k	1 600 辆/h
大车与小车比例		3 : 7

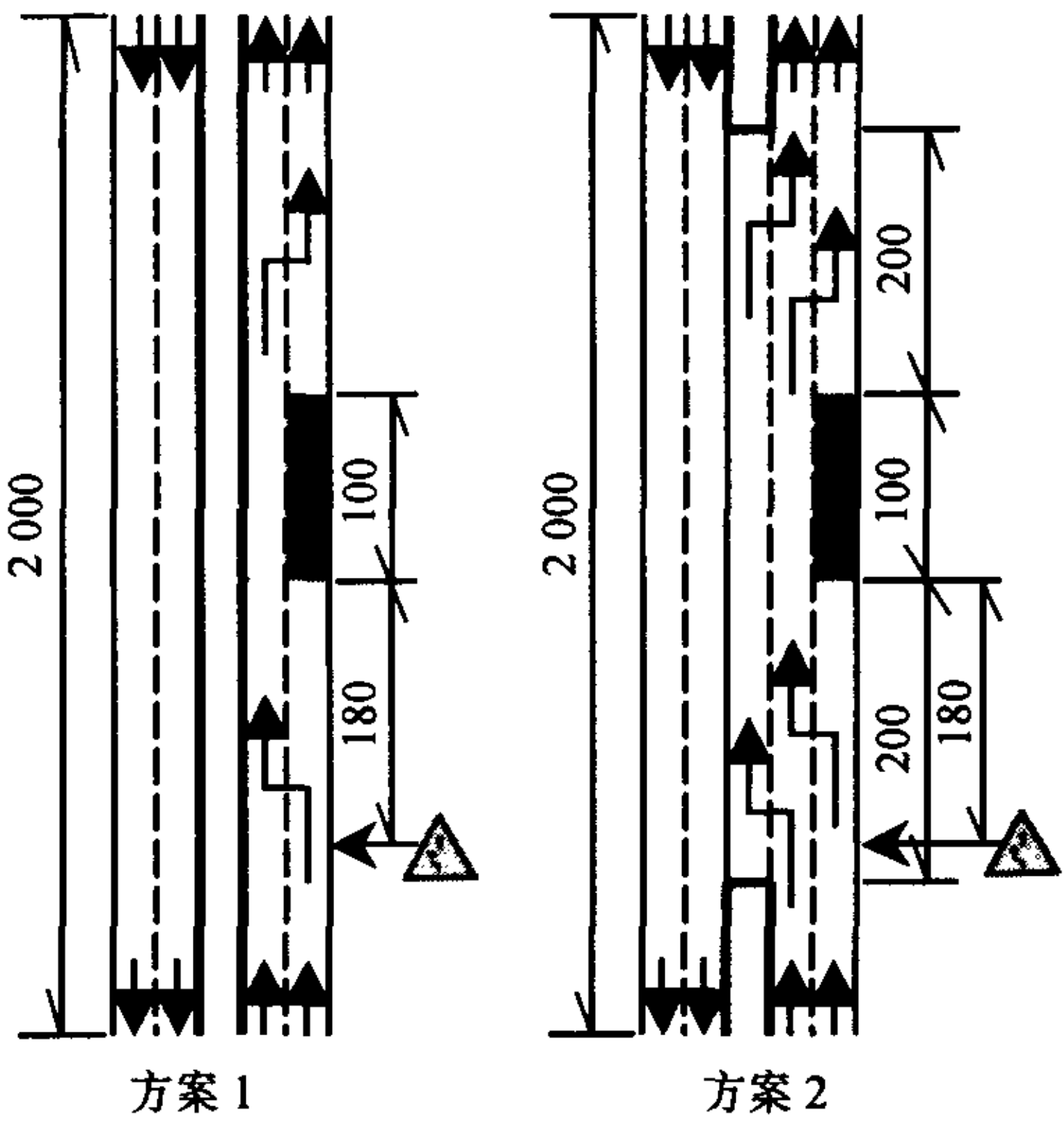
体的封闭范围为当前施工位置所在车道 100 m 内的区域。本方案对封闭交通可能带来的影响进行分析。进行用户成本评估时交通影响分析受施工影响的路段为 2 km。

对两个方案在桥面翻新时的交通组织如下。

方案 1: 施工段所在车道(100 m 范围)封闭交通,此车道上的车辆由相邻的车道通过,如图 3 所示。依据《道路交通标志和标线》的规定,在施工段前 180 m 处设置警告标志。

方案 2: 施工段所在车道(100 m 范围)封闭交

通,拆除施工段前后各 200 m 内的中央护栏作为临时车道,车辆通行如图 3 所示。在施工段前 180 m 处设置警告标志。



单位:m
图 3 交通组织

应用美国联邦公路局开发的 TSIS (Traffic Software Integrated System) 软件对上述的道路交通条件和交通组织方案进行仿真。

仿真结果如表 2 所示。

表 2 TSIS 仿真结果

指标	平均车速 km/h	行程时间 s	延误 s/车	15 min 燃油消耗/(L _y)			尾气排放/(kg/km/h)		
				小车	大车	总值	CO	HC	NO _x
不施工	79.9	90.1	0.59	47.1	132.1	179.2	1.66	0.1	0.27
方案 1	45.2	159.3	160.1	78.0	155.2	233.2	2.41	0.15	0.34
方案 2	73.4	98.1	8.72	53.8	138.4	192.2	1.95	0.11	0.30

收费损失(10 年内对桥面一次翻新,一次桥面翻新为 15 d):

$$C_{\text{收费}} = \sum_{i=1}^T \frac{f m k t_m (n - n_i)}{n} \cdot \frac{1}{(1 + r)^i} \quad (3)$$

式中: t_m 为一次维护活动的持续时间; f 为车道数; n_i 为方案 i 的行车速度;其他参数见表 1。

$$C_{\text{收费}1} = 10 \times 4 \times 1\,600 \times 24 \times 15 \times \frac{79.9 - 45.2}{79.9} \times \left[\frac{1}{(1 + 0.04)^{10}} + \frac{1}{(1 + 0.04)^{20}} + \dots + \frac{1}{(1 + 0.04)^{90}} \right]$$

$$= 2\,022.4 \text{ 万元}$$

$$C_{\text{收费}2} = 10 \times 4 \times 1\,600 \times 24 \times 15 \times \frac{79.9 - 73.4}{79.9} \times$$

$$\left[\frac{1}{(1 + 0.04)^{10}} + \frac{1}{(1 + 0.04)^{20}} + \dots + \frac{1}{(1 + 0.04)^{90}} \right]$$

$$= 378.8 \text{ 万元}$$

燃油消耗费用:

$$C_{\text{油耗}} = \sum_{i=1}^T f p t_m (L_y - L_{yi}) \frac{1}{(1 + r)^i}$$

式中: L_y 为油耗量; L_{yi} 为方案 i 的油耗量;其他参数见表 1 和式(3)。

$$C_{\text{油耗}1} = 15 \times 3 \times 4 \times 4 \times 24 \times 15 \times (233.2 - 179.2) \times \left[\frac{1}{(1 + 0.04)^{10}} + \frac{1}{(1 + 0.04)^{20}} + \dots + \frac{1}{(1 + 0.04)^{90}} \right]$$

$$=2\,829\text{ 万元}$$

$$C_{\text{油耗}2}=15\times4\times4\times3\times24\times15\times(192.2-179.2)\times\left[\frac{1}{(1+0.04)^{10}}+\frac{1}{(1+0.04)^{20}}+\dots+\frac{1}{(1+0.04)^{90}}\right]$$

$$=681\text{ 万元}$$

5.3 社会成本

目前对社会成本的评估缺乏成熟的模型,方案一和方案二的尾气排放指标如表2所示,可见方案二所造成的污染比方案一相对小一些。

通过计算,每隔10年、15年、20年桥面翻新一次计算成果汇总于表3。

表3 每隔10年、15年、20年桥面翻新一次的计算结果
(共翻新9次/6次/4次)

指 标	方案一(四车道)/万元	方案二(五车道)/万元
初始成本	2 400	2 925
维护成本	暂未计	暂未计
收费损失	2 022.4/1 212.2/803.3	378.8/227.1/150.5
燃油消耗	2 829/1 697.1/1 123.5	681/408.6/270.5
环境成本	排放指标高	排放指标低
总 计	7 250.4/5 309.3/4 326.8	3 984.8/3 560.7/3 346

每隔10年、15年和20年桥面翻新一次的计算结果比较见图4。

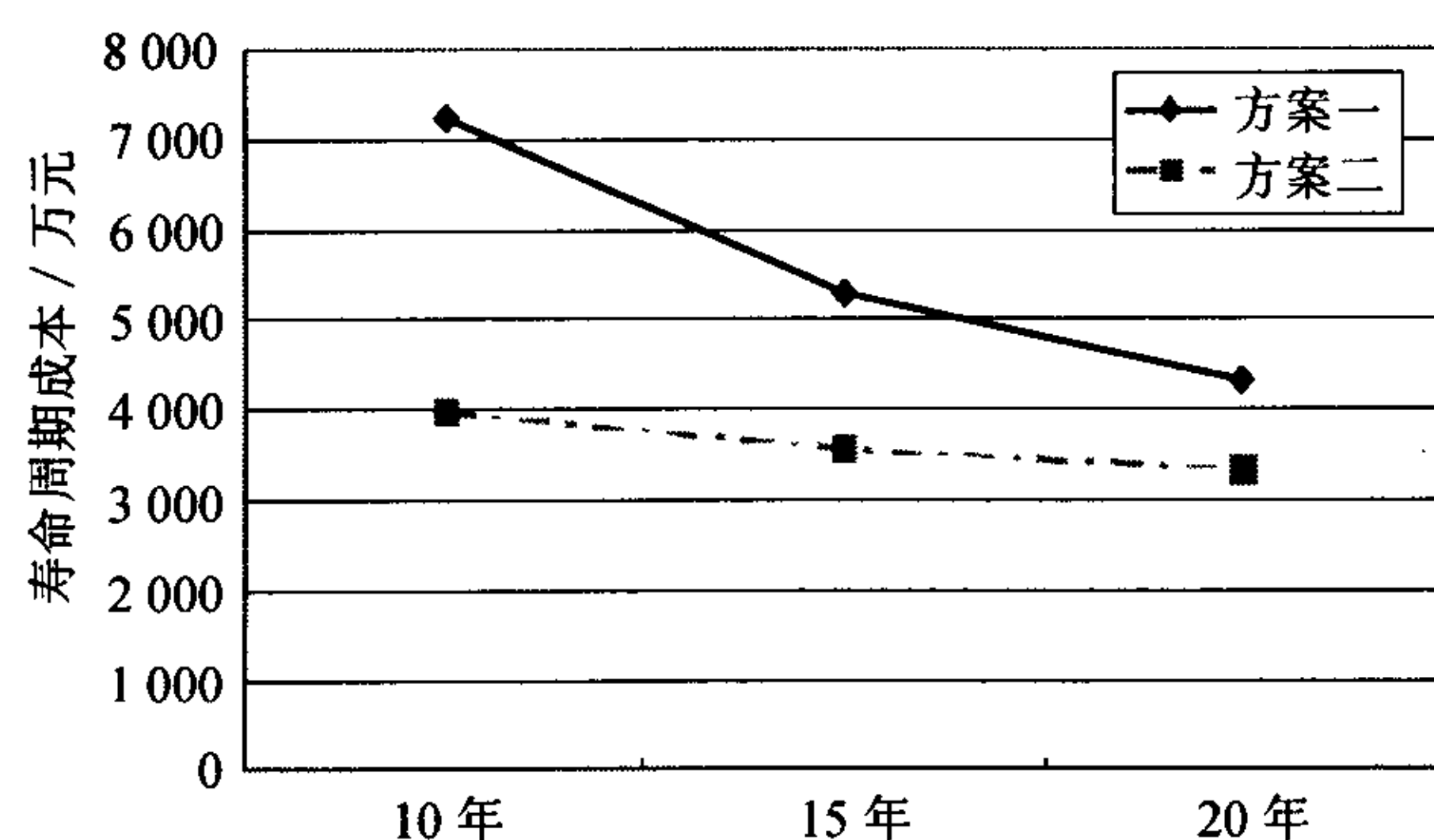


图4 寿命周期成本比较

由图4可知,随着翻新时间间隔的增长,方案二(五车道)的优势逐渐减弱。

6 结论与展望

基于性能的桥梁全寿命设计方法是20世纪90年代国外土木工程界提出的全新的桥梁设计理念,该理论以服务水平为约束条件,以寿命周期成本最低为目标,这一理论的研究在我国还处于起步阶段,该课题的研究对我国桥梁设计的发展将具有重大和持续的社会、经济价值。

参考文献:

- [1] Officer Asset Management, Department of Transportation, FHWA. Life-Cycle Cost Analysis Primer[R]. 2002.
- [2] Kong J S, Frangopol D M. Prediction of reliability and cost of deteriorating bridges under time-and performance-controlled maintenance [J]. J. of Str. Eng., ASCE, 2004,130(12).
- [3] Hassanain M A, Loov R E. Cost optimization of concrete bridge infrastructure[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2003,30.
- [4] Liu C, Hammad A, Itoh Y. Multiobjective optimization of bridge deck rehabilitation using a genetic algorithm [J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 1997,12.
- [5] Miyamoto A, Kawamura K, Nakamura H. Bridge management system and maintenance optimization for existing bridge [J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2000,15.
- [6] Lee Y J, Chang L M. Rehabilitation decision analysis and life-cycle costing of the infrastructure system[J]. Construction Research, 2003.
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] Peng J X, Shao X D. Research framework of lifetime performance based bridge design method [R]. Proceeding of the 2nd International Conference of Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, 2005.

• 新书征订 •

《公路工程勘察设计招标投标指南》

编著:张宝胜

自 2002 年 1 月 1 日起,交通部开始施行《公路工程勘察设计招标投标管理办法》,标志着公路建设系统在工程建设领域率先实行了勘察设计招标投标制度,是我国公路建设领域继工程施工招标投标和工程监理招标投标以后,适应市场经济发展,满足市场竞争方式需要,实施的又一项重大改革措施。

《公路工程勘察设计招标投标指南》(2005 年 1 月出版)编著者在交通部公路司长期从事公路建设管理工作,组织和参与了《公路工程勘察设计招标投标管理办法》等多项相关法规、规章的起草制定工作,在积极推行公路工程勘察设计招标投标工作和监督管理中,接触和积累了大量的实践经验,对公路工程勘察设计招标投标工作有较深刻的理解和认识。《公路工程勘察设计招标投标指南》一书按照招标投标活动中的招标、投标、开标、评标、中标、合同签订以及监督管理等关键环节划分了十个章节,从实践与理论结合等方面,对招标投标制度在公路工程勘察设计领域的应用进行了系统的阐述,对公路工程勘察设计投标务实操作进行了具体分析,具有很强的使用性和可操作性。本书可作为从事公路工程勘察设计招标投标活动有关人员的操作指南,也可作为大专院校路桥专业、监理专业等师生学习用书,同时,也可供从事公路建设领域施工、监理招标投标活动有关人员参考使用。

有需要购买的单位或个人,请直接与我公司联系,本书定价 59 元(邮购请附加 15% 邮挂费)。

北京路鑫通交通科技书店有限公司

地 址:北京市朝阳区安苑路甲 17 号惠安轩 409 号

联 系 人:张宝利 电话:010-64955994 转 207 13901011578

邮政编码:100029 传真:010-64949318

邮购收款单位:北京路鑫通交通科技书店有限公司

开户银行:北京农业银行朝阳支行小营分理处

银行账号:042601040006673

Framework Research on Design Method for Bridge Life Cycle

SHAO Xu-dong, PENG Jian-xin, YAN Ban-fu

(Institute of Bridge Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The main problems of existing bridge design method are analyzed in this paper. On the basis of life cycle cost analysis method, a new bridge life cycle design method is proposed, which evaluates design strategies by minimizing life cycle cost under satisfying lifetime serviceability of bridges. The optimal strategy is decided by constructing cost optimization model of hybrid life cycle based on constitutes of life cycle cost. Flowchart and approach of lifetime design method are developed, and its effectiveness is demonstrated by a numerical example. This method has potential to ensure bridge long-term serviceability, and control long-term investments and decrease adverse impacts on society.

Key words: lifetime performance; life cycle design; life cycle cost (LCC) analysis method; serviceability