

doi: 10.12052/gdutxb.180019

基于遗传算法的多约束叠合梁斜拉桥钢梁 维护策略优化

赵晓健

(广东省高速公路有限公司, 广东 广州 510623)

摘要: 结合桥梁结构劣化模型制定合理的管养维护方案能够有效地降低管养费用, 提高管养维护效率. 本文采用了基于可靠度指标的桥梁结构劣化模型, 以桥梁使用状况为边界条件, 全寿命造价的费用总和最小为约束条件获取最优的桥梁结构维护策略. 应用遗传算法对某斜拉桥大桥叠合梁的钢梁维护策略进行了优化分析, 得到了该桥钢梁的最佳维护策略, 证明了该方法的可行性.

关键词: 结构劣化模型; 管养维护策略; 可靠度指标; 遗传算法; 优化

中图分类号: TU312 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-7162(2018)04-0075-06

Cable-stayed Bridge Steel Girder Maintenance Strategy with Multiple Constraints Optimization Based on Genetic Algorithm

Zhao Xiao-jian

(Guangdong Expressway Co., Ltd. 1, Guangzhou 510623, China)

Abstract: A reasonable maintenance program made combining with the bridge deterioration model can effectively reduce the maintenance cost and improve the efficiency of maintenance. The bridge deterioration model is applied based on reliability index. With the bridge condition as boundary condition, and the maintenance cost minimized in the whole service life as constraint condition, the optimal bridge maintenance strategy is obtained. A genetic algorithm (GA) is applied to optimize the steel girder maintenance strategy of Haihuang Bridge. The result shows the feasibility of the method.

Key words: structural deterioration model; maintenance strategy; reliability index; genetic algorithm; optimization

桥梁结构是公路交通的关键节点, 其技术状况直接影响到整条线路的通行能力和行车安全. 随着我国社会经济的快速发展和国家对公路管理体制的调整, 普通国、省干线公路车流量大增, 部分线路的交通量趋于饱和, 甚至已大大超过公路设计交通量, 特别是大型、特大型重载货车对公路设施损害^[1]很大; 另一方面, 受到严酷恶劣环境(寒旱、潮湿、腐蚀和水下环境等)的侵蚀, 材料的自然老化等自然或人为的突变灾害等因素的耦合作用, 桥梁结构将不可避免地发生损伤积累和抗力衰减, 从而抵抗自然灾害、甚至正常环境作用的能力下降, 桥梁结构所具有的正常服务水平也随着降低, 给桥梁的正常使用埋下了巨大的隐患.

大跨径斜拉桥一般是交通线路上的控制性工程, 一旦对其实施较大的管养维护措施或者加固手段, 难免影响交通的正常通行, 造成恶劣的影响. 因此, 制定大跨径斜拉桥的合理管养策略是值得重点研究的课题.

赵品^[1]研究了基于既有检测评定数据的混凝土桥面板性能的退化规律, 提出了与我国桥梁养护规范相适应的混凝土桥面板养护策略. 朱明敏^[2]建议桥梁养护管理, 应该贯穿桥梁结构的整个寿命过程. 朱劲松^[3]在桥梁性能劣化分析的基础上, 以全寿命成本最小为目标, 对钢桥维护策略优化的多目标冬天优化方法进行了研究. 王晓明^[4]采用可靠度指标来评价桥梁各构件、个体与网络的多级性能层次, 对路网级

桥梁管养策略进行优化。邵旭东^[5]研究了维护方案与结构可靠度指标之间的关系,并提出了寿命周期内总成本中各单项成本的计算公式。LIU M, FRANGOPOL D M 等^[6-9]指出,桥梁管理的目的是要合理分配和使用有限的资源,以在全寿命期成本与全寿命期可靠度之间取得平衡;提出了在确保桥梁可靠度基础上,使桥梁寿命期内总成本最小化的桥梁最佳检测、维修养护的一般方法。

桥梁的性能劣化是不可避免的现实问题,因此,在桥梁性能劣化的进程中施以经济合理的管养措施方案以保证其服务能力是桥梁管养应对桥梁劣化问题给出的解决方案。这样,该问题可以转化为在最小费用基础上获得最佳维护效应的目标函数优化问题。该问题的目标函数为全寿命使用期内的费用成本最小化,约束条件包括结构可靠度指标、可接受的结构状态评估登记、承载力水平和结构剩余寿命等。

1 基于可靠度指标控制的桥梁管养策略优化

1.1 桥梁结构劣化模型

桥梁的劣化由大量因素共同作用产生的,而且各因素存在大量的不确定性。一般来说,桥梁的劣化因素包括:混凝土收缩徐变、氯离子侵蚀、混凝土碳化诱发的钢筋锈蚀、预应力损失、冻融循环引起的损伤、硫酸盐侵蚀、施工质量、重载交通、环境污染引发的化学反应、钢结构疲劳、地震损伤、河流冲刷等。另外,对于不同的桥梁结构类型,其劣化模式一般是不同的。

国外有研究人员将NBI (National Bridge Inventory, 美国国家桥梁状态数据库) 视为线性或者非线性模型,更有JIANG M和SINHA K I^[10]提出了针对混凝土桥梁上部结构的多项式非线性状态模型:

$$CS(t) = 9 - 0.28877329t + 0.0093685t^2 - 0.00008877t^3, \quad (1)$$

式(1)中, $CS(t)$ 为第 t 年时 NBI 状态分值。

KONG JS^[11]提出了包含3个随机变量的结构可靠度指标两段线性劣化模型;曹明兰^[12]认为四阶段线性劣化模型能够更为精确定义桥梁的劣化状态,对桥梁劣化过程的描述更为详细,以此可以延伸到 N 阶段线性劣化模型,当 N 取得足够大时,其计算精度能够满足工程的应用要求。此外,他认为混凝土桥梁的劣化过程应该是一个平缓发展的过程,因此可以定义直线曲线型劣化模型和直线曲线直线型劣化模型来描述混凝土桥梁的劣化状态。

这些模型的定义,均是建立在桥梁结构无预防养护的前提下,而实际情况则是当桥梁结构劣化到一定程度时,会给予一定的维护保养或者加固以提高其可靠度。因此,桥梁劣化模型应该考虑到加固对可靠度指标 β 的影响,如图1所示。

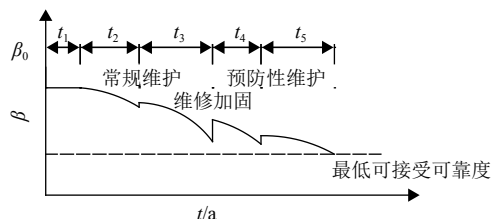


图1 维修加固与预防性维护影响下桥梁劣化模型

Fig.1 Bridge deterioration model influenced by maintenance and preventive maintenance

对于模型中的常规维护、维修加固和预防性维护的概念,结合我国《公路桥涵养护规范》(JTGH11-2004)^[13]给出的定义,可以这样理解:

常规维护:为保障桥梁的正常运营而对不影响桥梁结构安全的小病害(或损伤)进行的简单处理。对应于小修保养范畴:对桥涵构造物进行预防性保养和修补其他轻微损坏部分,使其保持完好状态。

预防性维护:判断结构存在某种严重病害发生可能,为保障后续不为之付出更多代价,在前期即实施维修养护工作以预防桥梁向更坏的状态发展而导致增加后去的维修加固成本。对应于中修维护范畴:对桥涵构造物一般性和局部损害进行定期的修理加固,以恢复原状况。

维修加固:存在不处理即会对桥梁运营造成重大安全隐患的病害,是为保证桥梁结构安全所必需实施的维修加固工作。对应于大修加固范畴:对桥涵构造物的较大损坏进行周期性的综合修理,以全面恢复到原设计标准的技术状况,或当桥涵构造物局部损害或承载力不足时进行的修复和补强措施,或在原技术等级范围内进行局部改善和个别增建,以逐步提高其通行能力。

将常规维护与预防性维护、维修加固统一到一个结构劣化模型中,三者的区别在于对结构可靠度提升作用不同,常规维护对结构可靠度提升最小、预防性维护稍高、维修加固提升作用最为明显。

上文中分析了桥梁结构随时间变化劣化模型,并以可靠度指标表征结构的劣化状态。有研究人员认为^[3],可以从材料、荷载及环境三方面因素来设计桥梁结构的劣化模型,并且需要反映出结构损伤程度及损伤累积过程。因此,定义基于可靠度的桥梁结

构劣化模型为

$$\beta(t) = \begin{cases} \beta_0, & 0 \leq t \leq t_l; \\ \beta_0 [1 - E_1 S_e \alpha_1^{(t-t_l)}], & t > t_l. \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, β_0 为结构初始可靠度指标,假设服从正态分布; t 为桥梁通车时间; E_1 为可靠度指标的环境影响因子,根据桥梁所处位置的空气温度、湿度、风场特性等参数确定, $E_1 > 1$; α_1 为可靠度指标损伤累积系数,根据结构的应力状态、挠度发展及交通量情况确定; t_l 为初始劣化时间; S_e 为等效损伤系数,由式(3)确定:

$$S_e = \sum \frac{\gamma_i}{f_{y_i}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (3)$$

式(3)中, $\Delta\sigma_i$ 为第*i*个关键部位的应力幅; f_{y_i} 为第*i*个关键部位材料的屈服强度; γ_i 为相应的综合影响系数且满足 $\sum \gamma_i = 1$.

考虑到结构可能存在的保养维护和加固维修,当可靠度指标劣化到一定程度时,通过保养维护和加固维修,可以提高可靠度指标. 针对考虑保养或维修加固过程结构可靠度劣化分析,做如下假设: (1) 保养或维修加固后结构可靠度劣化模型不变; (2) 进行保养或维修加固时结构所处可靠度水平为一定区间上的随机变量; (3) 保养或维修加固结束后可靠度指标的提高程度也是随机变量; (4) 每次加固后结构的可靠度指标不会超过结构初始可靠度; (5) 小修保养、中修维护及维修加固措施均能提升结构可靠度指标,且3项措施实施后的结构劣化模型保持一致.

1.2 桥梁管养成本模型分析

吴宇蒙^[14]提出了全寿命周期的成本模型,囊括了在确定的寿命周期内为建立和保持既有桥梁结构的使用功能所需要耗费的一切费用总和,定义了全寿命周期费用(Life Cycle Cost, LCC). LCC由管养单位成本与用户成本构成,其表达式为

$$T = M_c + I_c + R_c + E_c + D_c + U_c. \quad (4)$$

式(4)中, T 为桥梁建成后整个寿命周期内的费用总和; M_c 为养护费用之和; I_c 为检测监测费用之和; R_c 为维修费用之和; E_c 为环境费用之和; D_c 为桥梁最后的拆除费用; U_c 为桥梁中断交通或阻碍交通时相关用户增加的成本.

2 基于遗传算法的桥梁维护策略优化方法

在桥梁寿命周期内,以全寿命造价分析为基础,桥梁使用状况为边界条件,全寿命造价的费用总和

最小,即在各种维护方案中选择以最小的投入获得最优的维护效果,表达式为

$$\begin{cases} \min(M_c + I_c + R_c + E_c + D_c + U_c), \\ \text{s.t. } \beta \geq \min\beta, T \geq 100 \text{ a.} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, β 为可靠度指标; $\min\beta$ 为桥梁最低可接受的正常使用可靠度指标; T 为计算管养费用周期.

结合遗传算法对叠合梁斜拉桥维护策略进行优化分析,主要步骤为:

(1) 收集桥梁所在区域环境、气候、交通等方面的数据资料,查找该地区其他类似桥梁维护加固记录和相关的资料,对收集到的资料、数据做统计分析;

(2) 根据统计分析结果及模型计算确定桥梁可靠指标模型中的参数,结合专家经验确定具体桥梁各维修加固策略在不同时间实施所需的直接成本与间接成本分布;

(3) 确定优化模型中其他相关参数的分布特征;

(4) 建立优化模型,结合MC模拟利用改进的遗传算法进行求解;

(5) 按设计使用寿命作为管养费用计算周期,在该周期内,确定合适的管养策略,使得结构可靠度在目标可靠度之上的前提下,管养费用最少.

结构劣化模型中的环境影响参数、损伤及损伤累积因子的取值和优化模型中的随机变量的统计特性参数是决定优化结果准确性的关键.

3 钢梁优化维护策略分析

3.1 桥梁概况

某斜拉桥为混叠合梁斜拉桥,跨径布置为(104+116+560+116+104) m,主梁采用上字形边主梁叠合结构;主塔采用H形钢筋混凝土结构,承台以上高度分别为186.2 m和193.6 m. 主塔两侧各布置2×22根斜拉索,全桥共有斜拉索176根. 斜拉索上端采用钢锚梁与主塔连接,下端采用锚拉板与主梁连接. 桥型布置如图2所示.

这里,仅以钢梁为例,说明基于改进遗传算法的多约束叠合梁斜拉桥维护策略优化. 主梁采样双边“上”字形边主梁结合桥面板的整体断面,主梁横向中心距26 m,桥梁全宽28 m,路线中心线处梁高3.76 m,边主梁中心线处梁高3.5 m. “上”字形边主梁、横梁、小纵梁通过摩擦型高清图螺栓连接形成钢梁段,假设预制桥面板,现浇混凝土湿接缝,通过焊接于钢梁顶面的抗剪栓钉组成组合梁体系. 斜拉索梁上采样锚拉板锚固.

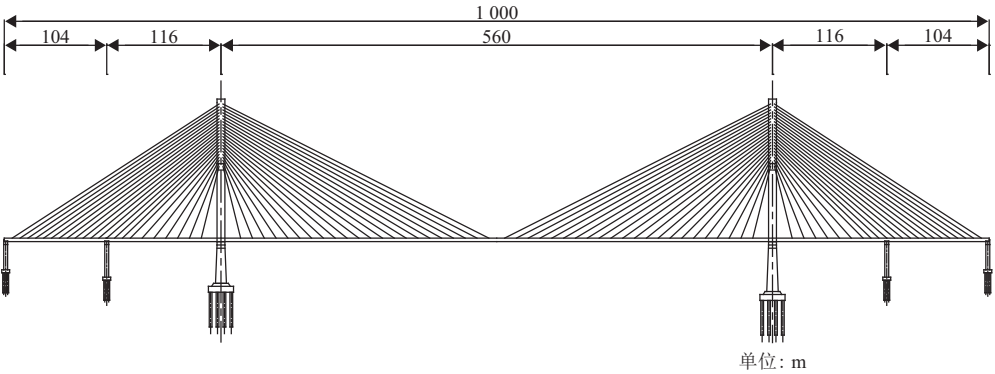


图 2 桥型布置图
Fig.2 Bridge layout

3.2 参数设置

结合文献[3]参数估计及该桥现场环境因素影响,对该桥可靠度指标劣化模型参数取值如下:环境影响因子 $E_1=1.3$,等效损伤系数 $S_e=0.053$,损伤累积系数 $\alpha_1=1.081$,目标可靠度 $\beta_{target}=4.5$.

维护策略优化模型中相关的参数分布特性应该是基于大量桥梁基础资料或者专家意见得到,为说明本方法的应用,本文中相关参数的分布特性均参考了文献[15]中的取值,如表1所示.同理,关于桥梁

的养护成本在不同地区亦存在差异,因此,关于维护成本的相关参数假设仅供参考,如要详细得到各构件维护成本,可在收集其他桥梁维护工作资料的基础上按前文给出的方法进行计算.

对于钢梁的管养成本分析,按照3种管养策略来定义,常规维护、预防性维护、维修加固,3类管养策略单次费用成本遵从三角分布.单次费用统计特性均为假设,在实际应用时需根据真实统计的桥梁管养成本予以修正.

表 1 维护策略相关参数表
Tab.1 Parameters of maintenance strategy

变量	分布类型	变量特征值			
		最小值	最大值	均值	标准差
β_0	对数正态			9.0	0.05
$\Delta\beta_i(i\geq 1)$	常规维护			0.5	0.01
	预防性维护			1	0.01
	维修加固			2.5	0.02
t_i/a	对数正态			5	1
t_i/a	常规维护		(Min, Mode, Max)=(1, 2, 3)		
	预防性维护		(Min, Mode, Max)=(3, 4.5, 6)		
	维修加固		(Min, Mode, Max)=(6, 9, 12)		
N	维护加固次数		(Min, Mode, Max)=(10, 15, 20)		

项目的单次费用(万元)参数设置为:常规维护为三角分布 $T(50, 75, 100)$;预防性维护为三角分布 $T(100, 200, 300)$;维修加固为三角分布 $T(650, 850, 1\ 050)$.

3.3 计算分析

计算周期按100 a计,在100 a的运营期内,设计合理的管养策略,使得养护成本最低.采样Matlab编制基于遗传算法的多约束斜拉桥管养策略优化程序.算法流程如图3所示.

其操作步骤为:

- (1) 生成200组加固时间数据 $N_1\sim N_{200}$.
- (2) 生成200组 t_i 数据,并使得每组 $\Sigma t_i=100$;将这200组 t_i 数据进行编码,得到遗传算法的初始种群.
- (3) 将200组 t_i 数据按常规养护、预防性养护和维修加固的范围分类,在计算时按3种养护类型取对应的 $\Delta\beta$ 值.
- (4) 根据桥梁劣化模型计算最终的 β_n ,当 $\beta_n\geq \beta_{target}$ 时,计算该种养护策略的总费用,作为适应度函数.
- (5) 将适应度最小的养护策略 Σt_i 作为最优养护

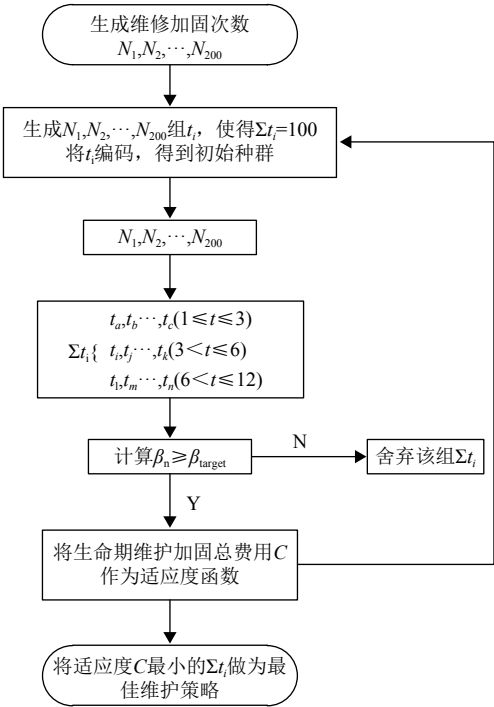


图3 基于遗传算法斜拉桥维护策略优化流程

Fig.3 Optimization of maintenance strategy for cable-stayed bridge based on genetic algorithm

策略。

根据优化结果,给出8组满足要求的维护策略,在达到设计寿命100 a后, β_n 大于目标可靠度4.5的管养策略为有效的管养策略,取8组寿命周期内管养费用最少的管养策略作为备选策略.将8组管养策略及最终管养费用、 β_n 列于表2.

将上述管养策略中的3种管养措施进行统计,在8组管养策略中,3类管养措施的次数统计如表3所示.

从表3的结果可以看到,管养次数最少的方案所需要的寿命周期内管养维护费用最少.就3类管养措施来说,维修加固次数最多,预防性养护次之,常规养护最少.这个与惯常的桥梁养护思路是不一致的,一般来说,桥梁管养推崇多次常规养护,较少的维修加固.而该优化结果表明,多次维修加固,减少常规养护能够有效地减少桥梁寿命周期内的管养费用.并且可以看到,多数管养策略在第一个管养阶段实施了维修加固措施;常规养护措施较少的原因在于其对可靠度的提升作用非常有限.该优化结果也说明了,管养策略的优化与计算模型的参数取值息息

表2 斜拉桥管养策略¹⁾

Tab.2 Maintenance strategy of cable-stayed bridge

项目	策略							
	策略1	策略2	策略3	策略4	策略5	策略6	策略7	策略8
β_n	4.71	4.92	5.10	5.63	5.52	4.85	5.29	5.12
费用/万元	7 014.04	7 236.55	7 310.72	7 414.64	7 486.21	7 509.72	7 509.72	7 557.79
1	11.86	10.62	11.34	11.93	<u>5.96</u>	<u>4.04</u>	9.79	<u>5.58</u>
2	9.52	11.16	2.29	11.84	9.75	10.17	7.02	<u>4.55</u>
3	8.48	2.97	1.67	6.87	<u>4.65</u>	2.38	7.28	<u>4.50</u>
4	2.78	<u>5.49</u>	<u>4.20</u>	1.84	8.36	6.69	<u>6.00</u>	<u>5.73</u>
5	<u>3.59</u>	10.88	9.83	9.29	<u>5.82</u>	<u>5.27</u>	2.58	7.00
6	8.26	8.99	<u>5.65</u>	<u>5.36</u>	9.02	9.49	10.40	<u>3.78</u>
7	10.88	<u>3.20</u>	9.93	10.72	8.46	2.28	2.15	6.53
8	<u>4.91</u>	<u>5.69</u>	<u>5.28</u>	<u>4.51</u>	<u>5.54</u>	8.67	<u>3.65</u>	<u>5.85</u>
9	<u>3.33</u>	2.77	7.27	10.51	<u>4.82</u>	10.45	8.20	<u>3.02</u>
10	11.41	1.49	9.14	7.81	<u>3.99</u>	1.59	<u>3.75</u>	1.24
11	9.23	9.14	9.70	1.27	7.42	<u>5.79</u>	1.41	<u>3.96</u>
12	<u>3.90</u>	2.73	1.80	1.40	2.18	<u>3.18</u>	2.78	<u>5.61</u>
13	<u>5.08</u>	<u>3.39</u>	2.67	10.24	2.53	7.59	1.44	6.64
14	6.78	7.60	<u>4.62</u>	6.41	8.09	8.64	<u>3.96</u>	7.01
15		<u>5.97</u>	<u>5.56</u>		9.91	<u>5.99</u>	9.59	<u>5.58</u>
16		7.91	2.15		<u>3.51</u>	1.77	<u>4.97</u>	<u>5.30</u>
17			6.90			<u>3.86</u>	9.72	6.34
18						2.13	<u>5.33</u>	<u>5.03</u>
19								6.73
Σ	100	100	100	100	100	100	100	100

1) 表中加粗为维修加固措施;下横线为预防性养护测试;其他为常规养护措施.

表 3 3类管养等级统计表
Tab. 3 Statistical table of three types maintenance

次

管养等级	管养策略							
	策略1	策略2	策略3	策略4	策略5	策略6	策略7	策略8
常规养护	1	4	5	3	2	5	5	1
预防性养护	5	5	5	2	7	6	6	12
维修加固	8	7	7	9	7	7	7	6

相关。

在寿命期结构最终可靠度大于目标可靠度的前提下,策略1所需的管养费用是最低的.将策略1的结构劣化时程计算结果列于图4.

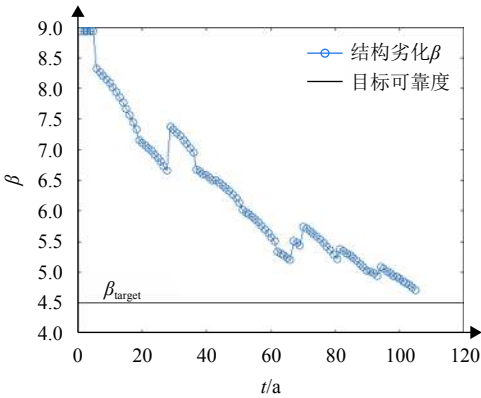


图 4 钢梁维护过程结构可靠度劣化图

Fig.4 Reliability deterioration of steel girder during maintenance

从图4可以看到,当初始劣化时间结束以后,结构可靠度指标有比较明显的降低,是由于在计算结果可靠度时,直接计算了 t_i 时刻的可靠度,未考虑劣化随时间发展的过程;后续结构的可靠度变化较为平顺.在每次管养措施实施时,都有较为明显的可靠度提升变化,说明该劣化模型能够体现管养措施对结构可靠度的提升作用,该劣化模型较为合理.

4 结论

文章考虑了桥梁结构劣化模型与桥梁管养成本模型,建立了基于遗传算法的斜拉桥管养策略优化模型,以可靠度指标反映结构寿命周期内的可靠性,以管养成本为指标计算结果寿命周期内的管养成本.以某斜拉桥桥钢梁为例,说明了该优化模型的应用方法,得出了一些有益的结论:

(1) 文章采用了文献[3]提出的结构劣化模型,不同研究人员对结构劣化过程存在不同的理解,因此对结构劣化模型的定义有所差异;为更准确提出该桥管养策略,后续研究需要在其他桥梁管养措施数据基础上,针对各构件提出适宜的结构构件劣化模

型,以获得最佳的桥梁管养策略.

(2) 文中提出了桥梁管养成本的模型,针对具体桥梁的管养成本分析,应在大样本统计基础上结合当地经济水平和技术标准确定更合理的数值,以代入斜拉桥管养策略优化模型.

(3) 文中对模型参数的选择部分基于文献资料提出的统计参数,对本桥不一定合适;因此,需要结合该桥实际情况予以修正;此外,本文仅针对钢梁的维护策略做了优化,其他结构构件的管养策略优化可按照该方法实施.

参考文献:

[1] 赵品,叶见曙,荣学亮.基于既有检测评定数据的混凝土桥面板性能退化规律及养护策略[J].公路交通科技,2012,29(5): 46-51.
ZHAO P, YE J S, RONG X L. Behavior deterioration regularity and maintenance strategy of concrete decks based on examination and evaluation results [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(5): 46-51.

[2] 朱明敏,尹新刚,王晓晶.基于生命过程的桥梁智能养护决策方法研究[J].公路交通科技,2012,8(12): 17-19.
ZHU M M, YIN X G, WANG X J. Research on intelligent maintenance decision method of bridge based on life process [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 8(12): 17-19.

[3] 朱劲松,孟会林.基于性能劣化分析的钢桥维护策略优化研究[J].世界桥梁,2010(4): 58-62.
ZHU J S, MENG H L. Research of maintenance strategy optimization of steel bridges based on performance deterioration analysis [J]. Bridge of the World, 2010(4): 58-62.

[4] 王晓明,贺耀北,贺拴海.考虑不确定性的既有桥梁网络管养对策优化[J].长安大学学报(自然科学版),2015,35(6): 71-78.
WANG X M, HE Y B, HE S H. Maintenance strategy optimization of existing bridge network with consideration of uncertainty [J]. Maintenance strategy optimization of existing bridge network with consideration of uncertainty [J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2015, 35(6): 71-78.