

文章编号:1671-8879(2015)06-0071-08

考虑不确定性的既有桥梁网络管养对策优化

王晓明^{1,2}, 贺耀北³, 贺拴海^{1,2}

(1. 长安大学 桥梁工程研究所, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064; 3. 湖南省交通规划勘察设计院, 湖南 长沙 410008)

摘要:为了实现辖区桥梁整体的优化管理,提出一种考虑不确定性的既有桥梁网络整体管养策略优化分析方法。采用可靠度指标评价桥梁构件、个体与网络的多级性能层次;构建了网级桥梁管养策略的优化框架;并分别建立了寿命期内桥梁性能演变的概率模型,以及养护策略效应和网络养护成本的数学模型;基于 Visio 网络图形建模方法,发展了一种桥梁网络拓扑结构的自动识别技术;提出一种基于失效分支矩阵的网络性能概率评价方法,并以运营荷载和环境作用状况下的网络路径连通性能为例进行优化及分析。研究表明:该方法强化了对大节点数复杂网络的分析能力;该技术与多目标优化算法结合,实现了考虑不确定性的网级管养策略优化的全程计算机化;网级优化的 Pareto 前缘给出的都是全局最优解,网级管养优化策略明显提高了桥梁网络的整体性能,有效避免了传统决策引起的木桶短板效应,实现了资金的全局最优分配。

关键词:桥梁工程;桥梁网络;性能;可靠度;管养策略优化;网络拓扑

中图分类号:U445.72,U445.74

文献标志码:A

Maintenance strategy optimization of existing bridge network with consideration of uncertainty

WANG Xiao-ming^{1,2}, HE Yao-bei³, HE Shuan-hai^{1,2}

(1. Institute of Bridge Engineering, Chang'an Univsity, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Bridge Detection Reinforcement Technology Ministry of Communication, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Transportation Survey and Design Institute of Hunan Province, Changsha 410008, Hunan, China)

Abstract: A novel maintenance optimization approach under uncertainty was proposed for existing bridge network to optimize the whole management. The reliability index was employed to evaluate the multilevel performance of bridge component, individual and network. The network-level maintenance optimization framework was constructed. The probability model of bridge life-cycle performance was established. Besides, the mathematical models of network maintenance strategy effect and cost were presented. Based on Visio network graphic modeling method, an auto-identification technology of bridge network topology was developed. A network performance probability evaluation method based on failure branch matrix was put forward. The network path connectivity subject to traffic loads and environmental erosion was taken as an example and analyzed. The results show that the method proposed in this paper can strengthen the processing

收稿日期:2015-06-21

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51308055);教育部高校博士新教师基金项目(20130205120001);中国博士后科学基金项目(2013M532000);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2013G1211010)

作者简介:王晓明(1983-),男,山西应县人,副教授,工学博士,E-mail:wxm512061228@gmail.com。

ability for larger-node and complex network. The combination of the method and the multi-objective optimization algorithm realizes the whole computerization for the network-level maintenance strategy optimization with consideration of uncertainty. Pareto solution of network-level optimization is the global optimal solution. The network-level maintenance optimal strategies obviously improve the integral performance of bridge network, avoid the short board effect caused by the traditional strategies effectively, and achieve the global optimal allocation of funds. 2 tabs, 12 figs, 23 refs.

Key words: bridge engineering; bridge network; performance; reliability; maintenance strategy optimization; network topology

0 引言

在役桥梁的材料劣化引起结构性能退化,需要管理养护来确保桥梁在给定寿命期内安全运营。为了制定合理的维护方案,管养策略优化逐渐成为研究热点,用以保持投入资金与获得性能间的合理平衡。

目前,国内外关于在役桥梁管养策略的研究已经取得显著成果,该领域的发展方向为:①评价指标从确定性向不确定性转变,相比基于专家评分建立的变权综合评定法^[1]、荷载试验评定法^[2]、分析计算评估方法^[3],可靠度方法采用不确定形式描述物理量,科学反映主观对客观的认知^[4-7],当退化旧桥抗力、效应、计算模式明显有别于规范模型时,使用可靠度指标尤为必要;②研究时域从中短期向给定寿命(或寿命周期)转变,随着材料退化数学模型的研究日渐成熟^[8-9],使得制定给定寿命期限内的优化决策成为可能,当然,通过日常检查来不断更新模型数据,是这一过程准确实施的重要保证;③研究对象从个体向网络转变,现有研究多针对桥梁构件或个体^[10-13],管理部门管辖的桥梁一般为多座,从桥梁网络的角度看,桥梁个体的优化策略属于局部最优解,而辖区桥梁整体的优化管理需要全局解。

研究时域的延长与研究对象的网络化相结合,将使得养护策略组合成双重指数级增长;采用概率方法描述桥梁结构状态和桥梁网络性能的不确定性,会使性能评价及优化的计算量剧增。因此,实施基于可靠度的桥梁网络管养策略优化需要克服 3 个关键问题:①能够考虑网络不确定性的桥梁网络管养框架与模型;②桥梁网络拓扑结构的自动识别技术与复杂网络性能的概率评价方法;③高效、稳定的多目标优化算法。

鉴于此,本文首先从网络的角度对辖区桥梁整体性能开展研究,建立考虑不确定性的桥梁网络管

养框架、模型与优化流程。在此基础上,重点研究桥梁网络拓扑结构的自动识别技术,以及可适用于大节点数复杂网络性能的概率评价方法,以期在综合考虑维护经济性、运营安全性的基础上,计算机一次性实现辖区桥梁管养策略的全局最优解。

1 考虑不确定性的桥梁网络管养框架

本文研究的桥梁网络的组成三要素为:始终点、路径、桥梁,路径的性能失效只取决于路径上桥梁的性能失效^[14]。

1.1 桥梁网络的性能层次

不同的主体,在各种情况对桥梁网络有着相异的性能要求^[15-19]。按照性能满足的需求级别,将桥梁网络性能归纳如表 1 所示。

表 1 桥梁网络性能层次

Tab. 1 Performance levels of bridge network

级别	性能	性能含义
I	路径连通性	始、终点间能够到达的能力
II	交通运输性	始、终点间能够输送某量值交通量的能力
III	耗时稳定性	始、终点间能够在某时间限值之内抵达的能力

桥梁网络的不同级别性能适用于不同的状况。性能 I 的路径连通性是基本要求,需要首先满足。此外,在日常运营中,更为关注的是交通运输性与耗时稳定性。对于自然灾害后的救灾生命线,需要根据不同的设防等级,重点考虑桥梁网络的性能 I 与 II;路径连通性用于保证与灾区的陆上联系,实施群众转移;交通运输性可以确保运输救灾物资与设备,开展灾后重建。此外,由于网络连接始、终点的重要程度不同(如城镇与乡村),性能 II 的具体要求也不同。

由于影响上述性能的各因素客观上是不确定的,故性能表达式中各计算参数应为随机变量,因此需要采用可靠度来描述各项性能,通过失效概率或可靠度指标来表征各性能的实现程度。

1.2 考虑不确定性的网络管养对策多目标优化模型

考虑不确定性的桥梁养护策略优化,实质上是高可靠度与低养护费的博弈。从管理部门的角度出发,面临的决策问题是:①在现有资金投入下,使桥梁网络在一定的年限内保持最高的可靠度;②要求桥梁网络达到预期的可靠指标时,采取何种策略才能使得投入的养护资金最少;③在明确不同费用在最优使用时与可靠度指标的对应关系后,根据实际进行选择。上述 3 类决策问题都可通过以下模型描述。

桥梁网络的养护策略优化目标:在管养年限内,桥梁网络最不利年份的可靠度最大,且养护费用最小。约束条件:网络内各座桥梁在管养年限里性能都不低于目标可靠度指标。数学上可表示为

$$\begin{cases} \min F_1 = \sum_{t=t'}^{T-1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{nij} \\ \max F_2 = \min\{f(\beta_1(t), \dots, \beta_i(t), \dots, \beta_n(t)) \mid t' \leq t \leq T-1\} \\ \text{s.t. } \beta_i(t) \geq [\beta_i], t' \leq t \leq T-1, i=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_1 为桥梁网络养护策略总费用; F_2 为桥梁网络总性能; C 为养护费用; $t \in (t', T-1)$, 表示第几年, t' 为初始年份, T 为桥梁使用寿命要求; $i \in (1, n)$, 表示第几座桥梁, n 为网络内桥梁总数; $j \in (1, m)$, 表示第 i 座桥梁的第几个构件, m 为桥梁个体的构件数; $\beta_i(t)$ 为第 i 座桥梁年份 t 时的可靠度指标; $f(\beta)$ 为桥梁网络性能的可靠度函数; $[\beta_i]$ 为第 i 个桥梁个体性能的目标可靠度指标。

客观上的不同状况,要求桥梁网络满足不同层次的性能。在管养策略优化中,表 1 中的网络性能可通过式(1)中可靠度指标 β 所对应的极限状态来描述。

桥梁网络管养策略优化流程如图 1 所示。整个流程以桥梁网络拓扑结构自动识别技术为先导,以网络性能概率评价方法为关键,结合双循环多目标优化算法,实现了桥梁网络管养策略优化的全部计算机化。

1.3 寿命期桥梁性能演变的概率模型

受环境作用(如混凝土碳化、氯离子侵蚀、冻融循环等)与车辆荷载提高的影响,寿命周期内桥梁的

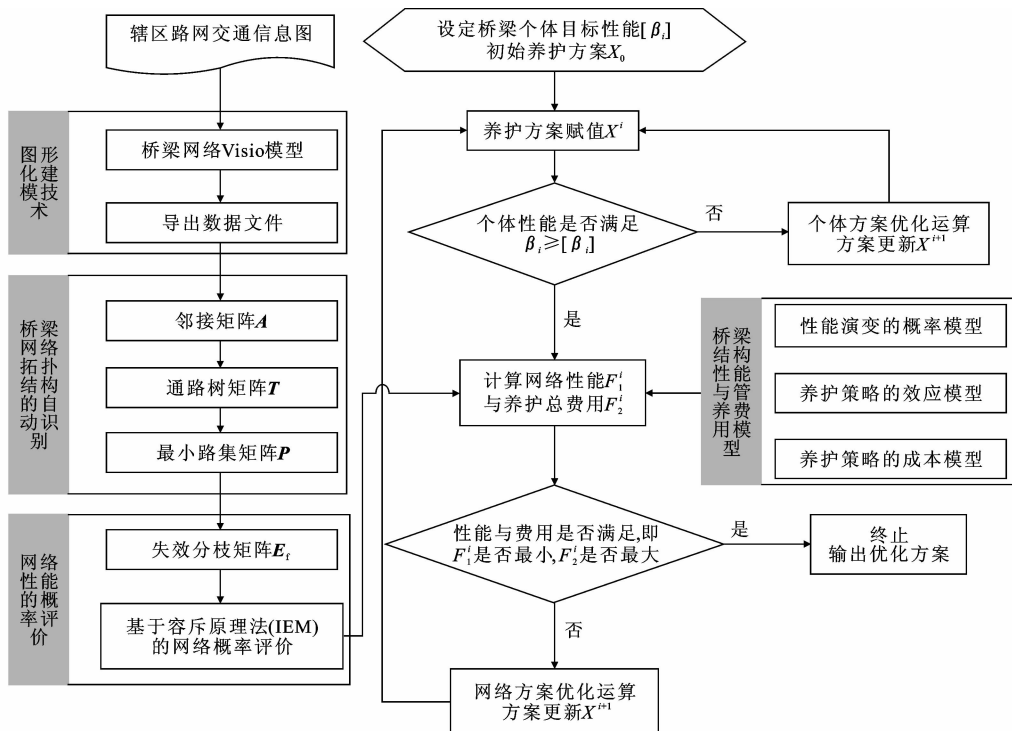


图 1 考虑不确定性的网级桥梁养护策略优化流程

Fig. 1 Bridge network maintenance strategies optimization framework considering uncertainty

性能退化可能会非常严重。在材料退化数学模型的基础上,采用概率方法考虑退化与随机车辆荷载的不确定性,能够有效预测寿命期内桥梁结构的性能

演变。

桥梁结构的体系失效模式,通常可模拟为 1 个具有 n 个串联子系统,每一子体系为具有 m 个并联

构件的混联体系,其失效概率为

$$P_f(t) = \{1 - [1 - P_{f,i}(t)]^n\}^m \quad (2)$$

式中: $P_{f,i}$ 为第 i 个构件的失效概率,对应的功能函数为 $Z_i(t) = R_i(t) - S_i(t)$, $Z_i(t)$ 、 $R_i(t)$ 、 $S_i(t)$ 分别为第 i 个构件在时间 t 的功能函数、抗力与效应。

应用独立开发的混凝土简支梁桥体系时变可靠度分析系统 V1.0,采用 FORM 方法求解构件可靠度,采用 PCM-IPCM 方法求解体系可靠度,生成寿命周期内桥梁性能演变的概率模型,如图 2 所示。

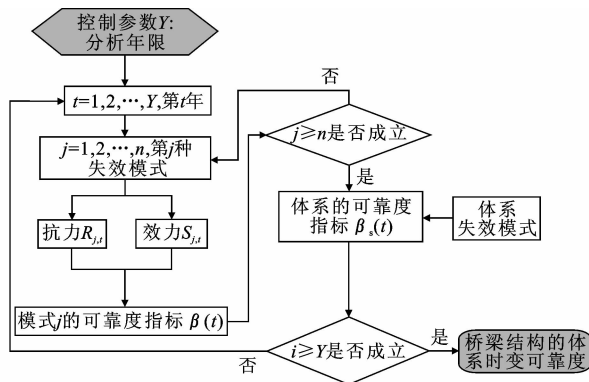


图 2 寿命期桥梁性能的时变可靠度分析流程

Fig. 2 Time dependent reliability analysis process of bridge performance during service life period

1.4 养护策略的效应模型

对桥梁结构进行养护后,桥梁的可靠度状态随之改变。为考虑养护对桥梁初始时变可靠度指标 $\beta(t)$ 值的作用,建立如下 2 种模型描述

$$\beta_m(t) = \begin{cases} \beta(t) & 0 < t < T \\ \beta(t) + \gamma & t \geq T \end{cases} \quad (3)$$

$$\beta_m(t) = \begin{cases} \beta(t) & 0 < t < T \\ \beta(T)h(t) & T \leq t < T + t_a \\ \beta(t - t_a) & t \geq T + t_a \end{cases} \quad (4)$$

式中: γ 为可靠度指标 β 值的跃升量,描述养护后 β 值的提升量(突变); $h(t)$ 为可靠度指标 β 值的年度退化率减少量,描述养护后可靠度曲线的曲率变化; t_a 为可靠度指标 β 值的年度退化率减少量的作用时间; T 为养护时刻; $\beta_m(t)$ 为养护后的时变可靠度指标。

1.5 桥梁网络的养护成本模型

在服役期内对桥梁网络中不同的桥梁采取养护措施以后,将产生对应的桥梁网络养护成本现值

$$I_{LCC_{\text{maint}, \text{network}}} = \sum_{i=1}^{N_B} \sum_{j=1}^{N_i^{\text{maint}}} \frac{C_{ij}^{\text{maint}}(t_{ij})}{(1+v)^{t_{ij}}} \quad (5)$$

式中: $I_{LCC_{\text{maint}, \text{network}}}$ 为 $LCC_{\text{maint}, \text{network}}$ 的计算参数; N_B 为桥梁网络中的桥梁数码; N_i^{maint} 为生命周期内桥梁

i 的养护次数; $C_{ij}^{\text{maint}}(t_{ij})$ 为桥梁 i 第 j 次养护的单位成本以及作用时间; v 为货币折扣率。

2 桥梁网络拓扑结构的自动识别与性能的概率评价方法

2.1 基于 Visio 的桥梁网络图形化建模技术

桥梁网络优化的自动化,既要求满足用户界面的形象化网络输入,又要求能将输入的网络图高效地转变为计算机可操作的数据文件。

本文采用 VSTO 技术,对 Microsoft Office Visio 2007 进行二次开发,借由 Visio 强大的框图功能生成桥梁拓扑网络图形,如图 3 所示。



图 3 Visio 模型桥梁属性对话框

Fig. 3 Visio model dialog box for bridges properties

在 Visio 模型图中,每个流程输入框代表了 1 个桥梁顶点,流程之间的每条连线则代表了相应桥梁顶点的连通关系,并用箭头区分道路的方向性。每个桥梁顶点包含 2 个信息:①显示在流程框中的桥梁名称,如 $B_1 \sim B_5$;②桥梁在数据库中的编号,隐藏在流程框的属性中,是桥梁的唯一身份标识。

通过 VSTO 技术,可将 Visio 模型中对象属性导出为一定格式的数据文件。本文由 Visio 模型生成“桥梁网络模型文件”类型的文件。该文件实质上是 1 个 XML(extensible markup language)数据文件,根节点 Root 下面包含 2 个子节点: Bridges、Links,分别用来存储 Visio 模型中的桥梁顶点与道路连线。Bridges 节点下又包含多个 Bridge 节点,每个 Bridge 节点对应 Visio 模型的 1 个桥梁节点,包含 2 个属性:桥梁名称以及桥梁编号;Links 节点下包含多个 Link 节点,每个 Link 对应 Visio 模型中的 1 条道路连线,包含 3 个属性:起始节点、终止节点以及权重。将 Visio 模型导出为“桥梁网络模型文件”,完成了桥梁网络由图到数据的识别过程。

2.2 桥梁网络拓扑结构的自动识别

本文发展了 1 套网络拓扑结构自动识别技术,使得计算机可以自动识别“抽象”的图形表达。该技术包括 3 步:①由“桥梁网络模型文件”构造桥梁网络的邻接矩阵 A ;②生成不含回路的通路树矩阵 T ;③建立最小路集矩阵 P ,完成对拓扑结构图的计算

机识别。

对于桥梁网络 $G = \{V, E\}$, 其邻接矩阵 A 可表示为

$$A = [a_{ij}]_{n \times n} \in \{0, 1\}^{n \times n} \quad (6)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \langle v_i, v_j \rangle \in E \\ 0, & \langle v_i, v_j \rangle \notin E \end{cases} \quad (v_i, v_j \in V) \quad (7)$$

式中: $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 为桥梁网络 G 的点集; $v_i (\in V)$ 为点; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, 为 V 上的二元关系, 即 G 的弧集; n 为网络中的节点数目(起点、终点及桥梁节点); 在连通的情况下 $a_{ij} = 1$ 表示节点连通, 否则 $a_{ij} = 0$ 。

当节点数较小时, 网络的最小路集可采用布尔行列式法方便求解: ① 将桥梁网络的邻接矩阵 A 与单位矩阵 I 相加得矩阵 $A + I$; ② 划去输入节点所在列和输出节点所在行, 得到新的矩阵 A' ; ③ 展开矩阵 A' , 各项取正值, 去掉冗余项, 求得最小路集。

对于大节点数网络, 用邻接矩阵和布尔行列式法求所有最小路集的运算量很大。本文采用搜索法的思想, 建立了先确定通路树矩阵 T , 后确定最小路集矩阵 P 的两步优先搜索算法(DDFS): ① 从邻接矩阵 A 起点行, 即第 1 行开始, 找到该行非零列对应的桥梁集合 $List_B$; ② 对于集合 $List_B$ 中的每座桥梁, 从邻接矩阵 A 的对应行中, 寻找该桥非零列对应的桥梁集合 $List_B$; ③ 直到通路分支的最后 1 个节点为终点时, 终止对于该分支的递归, 形成通路树矩阵 T ; ④ 遍历矩阵 T , 排除非最小路, 形成最小路集矩阵 P , 详细流程见图 4。

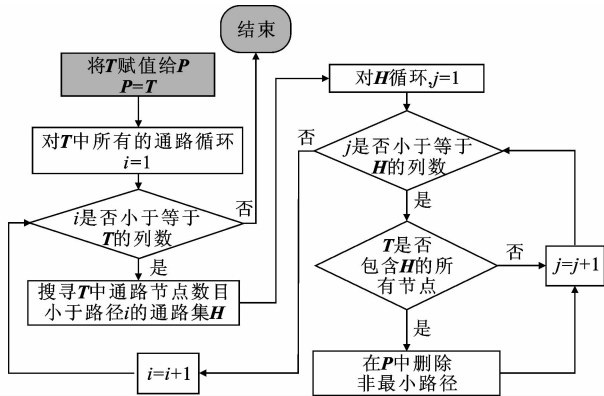


图 4 最小路集矩阵 P 的搜索法流程

Fig. 4 Generation algorithm of minimal path set

2.3 桥梁网络性能的概率评价

确定网络的最小路集 $S = \{L_1, L_2, \dots, L_n\}$ 后, 由概率加法公式可得网络的系统可靠度

$$R = P\left(\bigcup_{i=1}^n L_i\right) = \sum_{i=1}^n P(L_i) -$$

$$\sum_{i < j=2}^n P(L_i L_j) + \dots + (-1)^{n-1} P\left(\bigcap_{i=1}^n L_i\right) \quad (8)$$

相应的可靠度指标可表示为

$$\beta = -\Phi^{-1}(1 - R) \quad (9)$$

式中: Φ 为标准正态分布的分布函数。

由于桥梁网络的失效矩阵是一个大小为 $2^n \times n$ 的矩阵, 随着桥梁网络中桥梁节点的增加, 失效矩阵的行数呈指数增长, 故很容易超出计算机的数组大小上限。

为了提高大节点数网络的概率评价效率, 采用事件树^[20] 的分析思路, 构建失效分枝矩阵 E_i 对失效矩阵加以改进, 即程序并不会产生 1 个真实的失效矩阵, 而是根据失效矩阵的特点对事件树中的失效分支逐行进行辨别, 并立即判断它的状态, 生成只含失效分枝的失效分枝矩阵 E_i , 直接代入式(8) 和式(9) 中用于桥梁网络的概率评价, 算法流程见图 5。

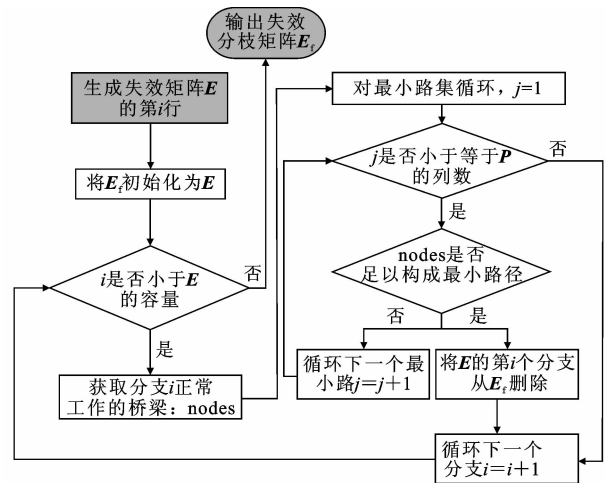


图 5 失效分枝矩阵的识别

Fig. 5 Identification of failure branch matrix

3 算 例

浙江省温州某地的桥梁网络包括 8 座桥梁(如下页图 6 所示: $B_1 \sim B_8$), 均为钢筋混凝土简支 T 梁, 使用年限为 21~23 年, 分布于不同道路支线上。考虑在一般大气环境作用下的桥梁性能退化, 桥梁个体的性能演变概率模型采用文献[21]中的方法, 考虑不确定性的材料与荷载参数见下页表 2; 养护策略的效应模型与成本模型, 采用文献[14]中的方法。

应用本文所建立的桥梁网络管养框架与方法, 解决算例(图 6)路网中桥梁的优化管养问题。主要考察在运营荷载与一般大气环境作用下, 桥梁网络的路径连通性能。

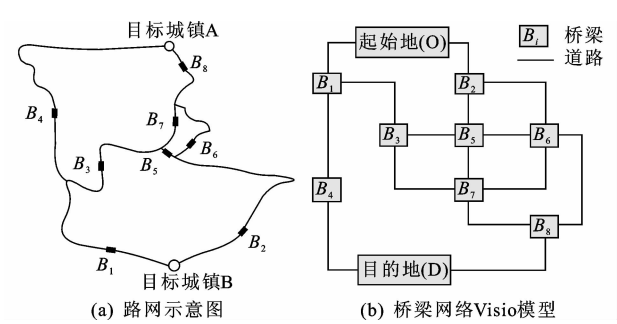


图 6 算例的路网交通信息示意图与桥梁网络 Visio 模型

Fig. 6 Road network traffic information and Visio model of the bridge network example

表 2 随机变量

Tab. 2 Random variable

种类	变量名	均值	标准差	分布类型
材料	Ⅱ级钢筋强度/MPa	363.442	26.131	正态
	保护层厚度/mm	23.7	3.6	正态
	混凝土强度/MPa	36.5	6.18	正态
	抗力计算模式不确定系数	1.098	0.071	正态
退化	碳化计算模式不确定系数	0.996	0.355	正态
	钢筋锈蚀深度计算不确定系数	1.03	0.15	正态
	钢筋锈蚀速率计算模式不确定系数	1.00	0.15	正态
荷载	P 集中/kN	30.604	2.638	极值 I
	q 均布/(kN·m ⁻¹)	1.674	0.144	

一般大气环境下,钢筋混凝土退化的机理是混凝土碳化。由本文寿命期内桥梁性能演变的概率模型,按照图 2 所示流程,计算每座桥梁个体的时变可靠度指标。考虑到结构安全等级为三级,根据可靠度标准^[22]并结合管理方要求,每座桥梁的目标可靠度指标取 3.7,即在管养期间桥梁个体的可靠度指标不得低于 3.7。管理年限本例取 20 年。

按照图 1 中的流程,首先进行桥梁网络识别。由路网交通信息,建立 Visio 桥梁拓扑网络(如图 6)。采用本文发展的网络拓扑结构自动识别技术,生成计算机可理解的“形象”表达——最小路集矩阵。图 7 为对应的最小路集示意图。

根据生成的最小路集,由图 5 所示的流程生成对应的失效分枝矩阵。由于该过程中没有生成实际的失效矩阵,避免了复杂网络引起的超大规模失效数组的出现,增强了程序处理大节点数网络的能力。

通过上述步骤形成了桥梁网络连通性能的概率评价函数,与养护策略效应、成本模型,桥梁性能演变的概率模型一起经多目标优化算法调用,进行策略优化,如图 1 所示。

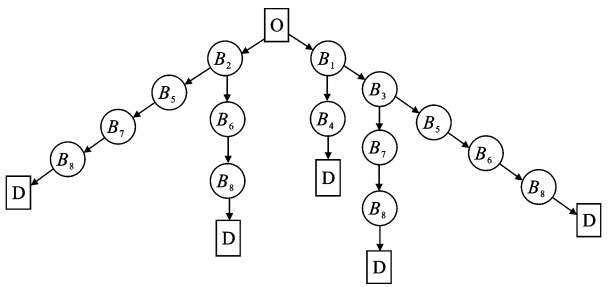


图 7 桥梁网络最小路集示意

Fig. 7 Minimal path sets of bridge network

本文采用的多目标优化算法为并行 NSGA-II 算法^[23],输出结果为一系列 Pareto 最优解集,管理方可根据自身实际方便选择。图 8 为 Pareto 最优解集,描述了养护费用与桥梁网络连通可靠度之间的正相关关系:养护费用越高,桥梁网络连通可靠度越大。Pareto 最优解是桥梁网络连通可靠度最大与养护费用最小之间相互平衡的结果,不同的解对应着不同的网络连通可靠度,同时也要求有相应的资金投入来维持桥梁网络的服务水平。

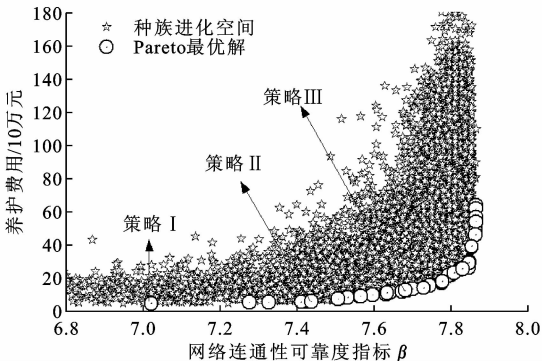


图 8 Pareto 最优解集(养护费用与网络连通可靠度指标)

Fig. 8 Pareto optimal solution set (maintenance cost & Network connectivity reliability index)

以图 8 中策略 I 为例,该策略养护费用为 48.6 万元,优化年限内的年度养护工作见图 9。可见,就桥梁个体而言,边梁需要更多的养护,这是由于边梁更易受外界环境侵蚀,且实际交通中重车偏载对边梁的危害更为严重。

策略 I 对桥梁与个体性能的作用如图 10 所示。由图可知,网络内各座桥梁的性能指标除了要参与运算确定桥梁网络的整体性能之外,还需要满足各自的约束条件。桥梁 B₁、B₃、B₅、B₈ 未经养护时,因退化,其可靠度指标均不能满足最低要求,无法继续安全运营;经策略 I 养护后,每座桥梁的可靠度均能满足最低要求。策略 I 对桥梁网络整体的作用如图 11 所示。由图可知,在管养年限内桥梁网络的连通可靠度较高,优化年限内对应的最低连通可靠度指

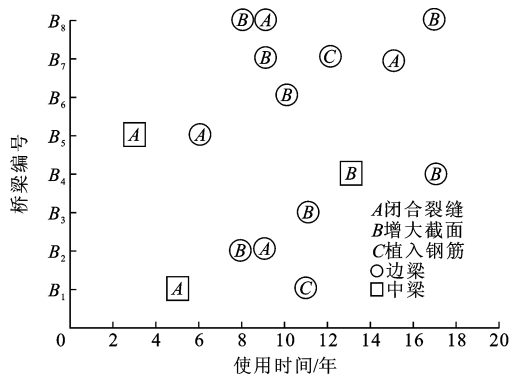


图 9 策略 I 的年度养护工况

Fig. 9 Maintenance prioritization by the representative strategy I

标为 7.02,说明路网畅通安全程度高。

图 11、图 12 分别对比了策略 I ~ III 的养护效果与养护费用。策略 I ~ III 在使得桥梁 $B_1 \sim B_8$ 的系统可靠度不低于 3.7 的前提下,花费和效果各不相同:策略 I 花费 48.6 万元,网络最低连通可靠度指标为 7.02;策略 II 花费 59.9 万元,网络最低连通可靠度指标为 7.44;策略 III 花费 102.8 万元,网络最低连通可靠度指标为 7.63。可见,当经费充足时,可以获得较高的连通可靠度;当费用紧张时,须选择合适的策略保证网络连通可靠度最高。就上述 3 种策略而言,策略 II 的效费比最好。

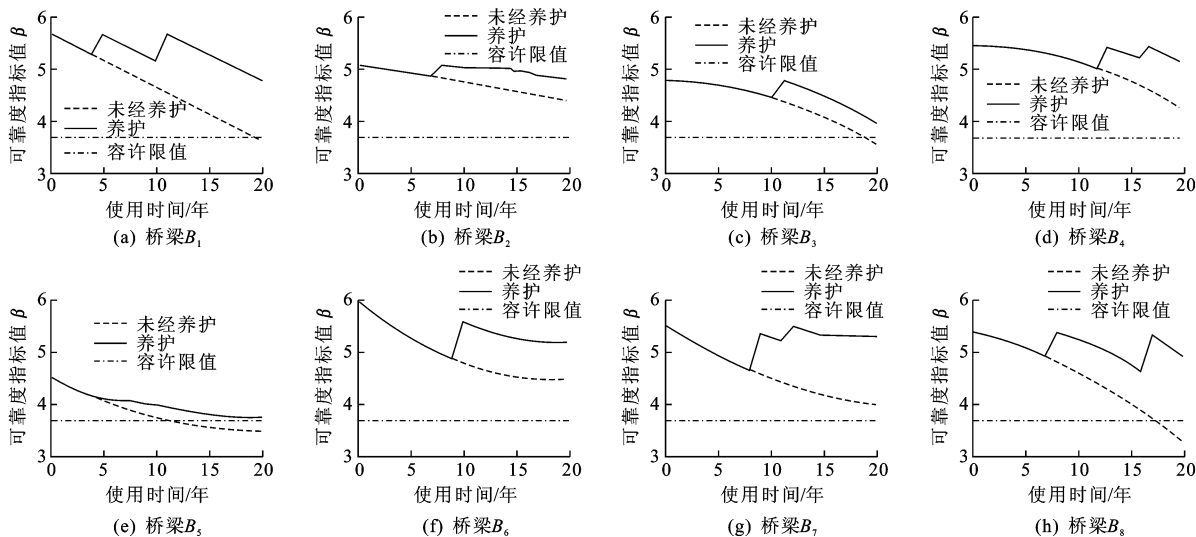


图 10 策略 I 下桥梁 $B_1 \sim B_8$ 的可靠度指标退化曲线

Fig. 10 Time-dependent reliability index of network connectivity and bridge $B_1 \sim B_8$ under strategy I

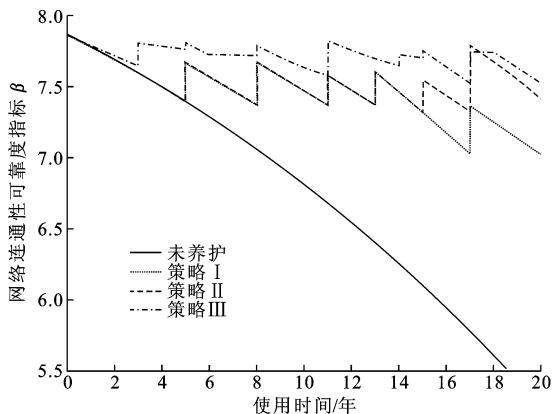


图 11 策略 I ~ III 下桥梁网络连通性的时变可靠度指标

Fig. 11 Time dependent reliability index curve of bridge network connectivity under strategy I ~ III

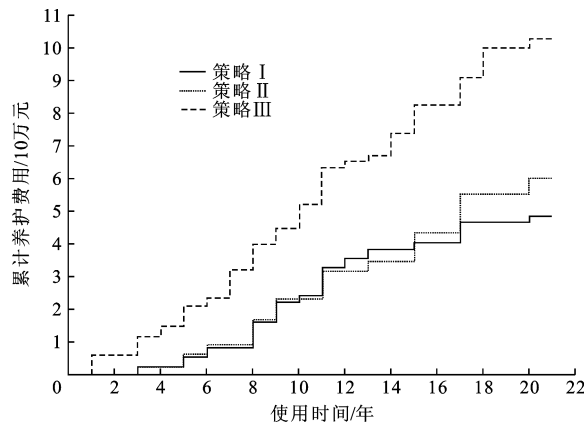


图 12 策略 I ~ III 的养护费用年度累计

Fig. 12 Annual aggregate statistics of maintenance costs of strategy I ~ III

4 结 语

(1)建立的 3 参数养护策略效应模型既能准确反应养护策略的作用,又简化了计算过程,使得框架能够适用于大节点数网络。

(2)所建立的基于 Visio 的桥梁网络图形化建模技术,很适用于桥梁网络图的信息提取,实现由图到数据的识别过程;给出的网络拓扑结构自动识别技术,以生成最小路集矩阵为目标,运算效率高,稳

定性强。

(3)引入失效矩阵描述性能失效,采用失效分枝矩阵确定网络性能的失效概率,有效修补了失效矩阵易于溢出的不足,强化了对大节点数网络分析的能力。

(4)与 GIS 地理信息系统对接的桥梁网络管养优化系统,将是进一步的研究方向。

参考文献:

References:

- [1] JTG H11—2004,公路桥涵养护规范[S].
JTG H11—2004, Code for maintenance of highway bridges and culvers[S]. (in Chinese)
- [2] 张劲泉,宿健.混凝土旧桥材质状况与耐久性检测评定指南及工程实例[M].北京:人民交通出版社,2007.
ZHANG Jin-quan, SU Jian. Materials condition durability evaluation guidelines and engineering examples of old concrete bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese)
- [3] JTG/T J21—2011,公路桥梁承载能力检测评定规程[S].
JTG/T J21—2011, Specification for inspection and evaluation of load-bearing capacity of highway bridges[S]. (in Chinese)
- [4] ISO 2394:2015, General principles on reliability for structures[S].
- [5] Melchers R E. Structural reliability analysis and prediction[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1999.
- [6] Yao J T P. Safety and reliability of existing structures[M]. Marshfield: Pitman Publishing Ltd, 1985.
- [7] Val D, Melchers R E. Reliability of deteriorating RC slab bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(12): 1638-1644.
- [8] BE 95—1347, General guidelines for durability design and redesign[S].
- [9] CECS 220:2007, 混凝土结构耐久性评定标准[S].
CECS 220:2007, Standard for durability assessment of concrete structures[S]. (in Chinese)
- [10] Lee C K, Kim S K. GA-based algorithm for selecting optimal repair and rehabilitation methods for reinforced concrete (RC) bridge decks[J]. Automation in Construction, 2007, 16(2): 153-164.
- [11] Miyamoto A, Kawamura K, Nakamura H. Development of a bridge management system for existing bridges[J]. Advances in Engineering Software, 2001, 32(10/11): 821-833.
- [12] Estes A C, Frangopol D M. Repair optimization of highway bridges using system reliability approach[J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(7): 766-775.
- [13] Miyamoto A. Development of a bridge management system (J-BMS) in Japan[C]//Furuta H, Frangopol D M. First US/Japan Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems Life Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure. Honolulu: ASCE, 2001: 179-221.
- [14] Liu M, Frangopol D M. Probability-based bridge network performance evaluation[J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(5): 633-641.
- [15] Iida Y. Basic concepts and future directions of road network reliability analysis[J]. Journal of Advanced Transportation, 1999, 33(2): 125-134.
- [16] Berdica K. An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done[J]. Transport Policy, 2002, 9(2): 117-127.
- [17] Heydecker B G, Lam W H K, Zhang N. Use of travel demand satisfaction to assess road network reliability[J]. Transportmetrica, 2007, 3(2): 139-171.
- [18] Michael B G H. Measuring network reliability: a game theoretic approach[J]. Journal of Advanced Transportation, 1999, 33(2): 135-146.
- [19] 袁修开, 吕震宙, 吕媛波. 可靠性灵敏度函数及其特征指标的条件概率模拟求解方法[J]. 计算力学学报, 2011, 28(3): 444-451.
YUAN Xiu-kai, LU Zhen-zhou, LU Yuan-bo. Reliability sensitivity measure based on reliability sensitivity function and its solution by conditional probability simulation method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011, 28(3): 444-451. (in Chinese)
- [20] Wang X M, Shi X F, Ruan X. Time-dependent reliability assessment of existing RC beam bridge[C]//Li J, Zhao Y G, Chen J B, et al. Proceedings of the International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management. Shanghai: Tongji University Press, 2010: 661-666.
- [21] GB/T 50283—1999, 公路工程结构可靠度设计统一标准[S].
GB/T 50283—1999, Unified standard reliability design of highway engineering structures[S]. (in Chinese)
- [22] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [23] Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms[M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2001.