

考虑拉索抗力衰减及破断的斜拉桥可靠性分析*

晏班夫[†], 孙雁峰, 邹祺祺

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:采用阶段临界强度分枝-约界法对一座斜拉桥模型进行了主要失效模式的搜索,分析了拉索抗力衰减及拉索破断情形下系统主要失效模式和系统可靠度的变化情况.结果表明:未出现断索情形时,结构系统主要失效模式间的相关性很高,但在有拉索破断后,主要失效模式间的相关性出现了明显分组特征;系统可靠度指标随着拉索抗力的衰减而逐渐降低,考虑拉索破断时,外索破断后剩余结构系统可靠度指标降低较多,得到了破断后对剩余结构系统可靠度影响最大的拉索位置,可为斜拉桥结构设计提供参考.

关键词:斜拉桥;拉索破断;系统可靠度;分枝-约界法;失效模式

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

System Reliability Analysis on the Cable-stayed Bridge Considering Cable Breakage and Resistance Degradation

YAN Banfu[†], SUN Yanfeng, ZOU Qiqi

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The is paper employed the stage critical strength-considered branch-bound method to explore the major failure mode of a cable-stayed bridge, and investigated the variations of major failure mode and system reliability in the cases of cable breakage and resistance deterioration. The study indicates that, in the case of without cable breakage, the correlation among the major failure modes of the structure is high, while the correlation appears to clear grouping characteristics in the case of a sudden failure of a cable. The system reliability decreased with the resistance deterioration of the cable. Moreover, the remaining structural system reliability indices decreased remarkably in the case of the breakage of the outside cable, and the dominant cable that has the greatest impact on the system reliability was captured to guide the further structural design.

Key words: cable-stayed bridge; cable breakage; system reliability; branch-bound method; failure mode

斜拉桥为大型超静定结构,其设计安全储备和冗余度较高,局部破坏一般不会引起桥梁整体的失效.拉索为斜拉桥的主要受力构件,容易受到疲劳、

腐蚀、磨损、车辆撞击、火灾等因素的影响而导致拉索截面损失、承载能力下降、甚至破断;断索在桥梁结构中产生的冲击荷载可能引起整个桥梁的“链

* 收稿日期:2016-07-29

项目基金:国家自然科学基金资助项目(51578227), National Natural Science Foundation of China(51578227)

作者简介:晏班夫(1972—),男,湖南冷水江人,湖南大学副教授,博士

[†] 通讯联系人, E-mail: yanbanfu@hnu.edu.cn

式”连续倒塌^[1].为提高斜拉桥结构体系的安全性,有必要对其进行系统可靠性分析.

结构系统可靠度理论在工程中的应用始于 Moses^[2]创立的应用于结构系统的可靠性分析极限状态体系;随后,Frangopol 等^[3]对具体桥梁工程采用系统可靠度理论研究了其系统可靠度在剩余服役期内的衰减规律,并提出了一种基于可靠度理论来判定桥梁等大型复杂结构中关键构件的方法;Deng 等^[4]对预应力混凝土梁桥在动力荷载作用下的系统可靠度指标进行了相关计算和研究;刘建华等^[5]对斜拉桥结构系统可靠性进行了研究,运用全局分枝-约界准则搜索了某公铁两用斜拉桥在列车荷载作用下的主要失效模式,并对其相关性和系统可靠度进行了分析;王春生等^[6]提出了铆接钢桥构件和结构的系统疲劳可靠性分析方法,并编制了基于 Monte Carlo 算法的可靠性分析程序;Yan^[7]提出了一个基于概率的斜拉桥的评估框架:首先确定由于爆炸荷载造成直接损失的概率,然后评估由于构件破坏而导致桥梁倒塌的概率;刘晓奎等^[8]根据现有桥梁结构系统可靠性评估方法,提出了一种近似方法,并将其应用于苏通大桥系统可靠度计算.

本文采用阶段临界强度分枝-约界法^[9]对一座斜拉桥模型进行仅考虑拉索失效时的主要失效模式搜索,计算各失效模式间的相关性及系统的可靠度,并分析斜拉索抗力衰减对结构系统可靠度的影响;同时计算该斜拉桥模型在不同断索情形下的系统可靠度.

1 结构体系的失效模式搜索

1.1 阶段临界强度分枝-约界法

阶段临界强度分枝-约界法属于荷载增量法的一种,最早由董聪等^[9]提出,可描述为:由 n 个单元组成的结构系统中,设 r_1, r_2, \dots, r_{k-1} 共 $(k-1)$ 个单元已相继失效,每个单元失效时对应的结构系统荷载增量因子分别为 $\Delta F_{r_1}^{(1)}, \Delta F_{r_2}^{(2)}, \dots, \Delta F_{r_{k-1}}^{(k-1)}$. 则搜索第 k 阶段的候选失效单元 $r_k [r_k \in (1, 2, \dots, n), r_k \notin (r_1, r_2, \dots, r_{k-1})]$ 的流程主要包括如下 4 个步骤^[9]: a) 计算各阶段构件的加载系数 $a_{r_k}^{(i)}$; b) 计算第 k 阶段构件 r_k 的有效强度; c) 计算第 k 阶段系统阶段临界强度 $R_{s,r_k}^{(k)}$; d) 给定分枝-约界参数,选取失效候选单元.

其中,第 k 阶段构件 r_k 的有效强度 $R_{r_k}^{(k)}$ 计算如下:

$$\begin{cases} R_{r_k}^{(k)} = R_{r_k}^{I_{r_k}} - I_{r_k} \times \sum_{i=1}^{k-1} a_{r_k}^{(i)} \Delta F_{r_1}^{(i)} m_{r_i} \\ \Delta F_{r_1}^{(i)} = \frac{R_{r_1}^{(i)}}{a_{r_k}^{(i)}}, I_{r_k} = \text{sign}[a_{r_k}^{(k)}] \end{cases} \quad (1)$$

设 r_1, r_2, \dots, r_k 共 k 个单元已相继失效,且由于相应的失效单元已被删除(不能继续承载),基于增量加载理论,此时结构系统的加载过程可表示为:

$$\begin{bmatrix} R_{r_1}^{I_{r_1}} \\ R_{r_2}^{I_{r_2}} \\ \vdots \\ R_{r_k}^{I_{r_k}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{r_1}^{(1)} & 0 & \cdots & 0 \\ m_{r_1} a_{r_2}^{(1)} & a_{r_2}^{(2)} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{r_1} a_{r_k}^{(1)} & m_{r_2} a_{r_k}^{(2)} & \cdots & a_{r_k}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_{r_1}^{(1)} \\ \Delta F_{r_2}^{(2)} \\ \vdots \\ \Delta F_{r_k}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

相应的第 k 阶段系统的阶段临界强度 $R_{s,r_k}^{(k)}$ 为:

$$\begin{cases} R_{s,r_k}^{(k)} = \Delta F_{r_k}^{(k)} + \sum_{i=1}^{k-1} \Delta F_{r_1}^{(i)} m_{r_i} = m^{(k)} \Delta F^{(k)} \\ \Delta F^{(k)} = [\Delta F_{r_1}^{(1)}, \Delta F_{r_2}^{(2)}, \dots, \Delta F_{r_k}^{(k)}]^T \\ m^{(k)} = [m_{r_1}, m_{r_2}, \dots, m_{r_{k-1}}, 1] \end{cases} \quad (3)$$

式(1)~式(3)中: $R_{r_k}^{I_{r_k}}$ 为单元 r_k 的承载能力(拉索单元已减去其初张力); m_{r_i} 为材料选择参数,当失效单元 r_i 由理想弹塑性材料组成时, $m_{r_i} = 1$; 当失效单元 r_i 由理想脆性材料组成时, $m_{r_i} = 0$.

上述的阶段临界强度分枝-约界法主要适用于输电线塔等恒载对结构影响较小的桁架结构的可靠性分析,由于恒载对桥梁结构的受力及失效模式的影响较大,因此在运用该方法分析桥梁结构系统可靠性时需对其做适当的改进,考虑恒载的影响时,结构的系统的加载过程如式(4)所示^[10]:

$$\begin{bmatrix} R_{r_1}^{I_{r_1}} \\ R_{r_2}^{I_{r_2}} \\ \vdots \\ R_{r_k}^{I_{r_k}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{r_1}^{(1)} & 0 & \cdots & 0 \\ m_{r_1} a_{r_2}^{(1)} & a_{r_2}^{(2)} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{r_1} a_{r_k}^{(1)} & m_{r_2} a_{r_k}^{(2)} & \cdots & a_{r_k}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_{r_1}^{(1)} \\ \Delta F_{r_2}^{(2)} \\ \vdots \\ \Delta F_{r_k}^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{r_1}^{(1)} \\ G_{r_2}^{(2)} \\ \vdots \\ G_{r_k}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

写成矩阵形式为 $\mathbf{R}_s^{(k)} = \mathbf{A}_k \Delta \mathbf{F}^{(k)} + \mathbf{G}^{(k)}$. 式中: \mathbf{A}_k 称为广义加载矩阵. 上式两边同时乘以 \mathbf{A}_k 的逆矩阵 \mathbf{A}_k^{-1} , 可得:

$$\Delta \mathbf{F}^{(k)} = \mathbf{A}_k^{-1} (\mathbf{R}_s^{(k)} - \mathbf{G}^{(k)}) \quad (6)$$

则第 k 阶段系统的阶段临界强度如式(5):

$$\begin{aligned} R_{s,r_k}^{(k)} &= \Delta F_{r_k}^{(k)} + \sum_{i=1}^{k-1} \Delta F_{r_1}^{(i)} m_{r_i} = m^{(k)} \Delta \mathbf{F}^{(k)} = \\ &= m^{(k)} \mathbf{A}_s^{-1} \mathbf{R}_s^{(k)} - m^{(k)} \mathbf{A}_k^{-1} \mathbf{G}^{(k)} = \\ &= \sum_{i=1}^k d_{R_i}^{(k)} R_{r_i}^{I_{r_i}} - d_G^{(k)} g \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $G^{(k)}$ 为第 k 阶段恒载在构件 r_k 中产生的荷载效应; $d_G^{(k)} = m^{(k)} m^{(k)} \mathbf{A}_k^{-1} \mathbf{G}^{(k)} / g$; $\mathbf{G}^{(k)} = [G_{r_1}^{(1)},$

$G_{r_2}^{(2)}, \dots, G_{r_k}^{(k)}]$.

最后,给定分枝-约界参数 c_k ,通过式(7)选取第 k 阶段系统失效候选单元 r_k .

$$\begin{cases} R_{s(\min)}^{(k)} = \min[R_{s,r_k}^{(k)}] \\ R_{s,r_k}^{(k)} \leq c_k R_{s(\min)}^{(k)} \end{cases} \quad (7)$$

对于约界参数 c_k ,从物理因素考虑,对于阶段临界强度分枝-约界准则,其合理的取值区间为 $1 \leq c_k \leq 2$ ^[9].

1.2 失效模式搜索流程

结构系统在构件逐步失效而最终导致整体失效的过程中,其有限元模型需根据构件失效信息不断更新,即将构件失效信息载入现有有限元模型,同时也需要将有限元计算结果输入到失效模式搜索程序中^[11].本文利用 ANSYS 的 APDL 语言参数化建模功能和 MATLAB 编制程序来实现失效模式搜索流程,如图 1 所示.

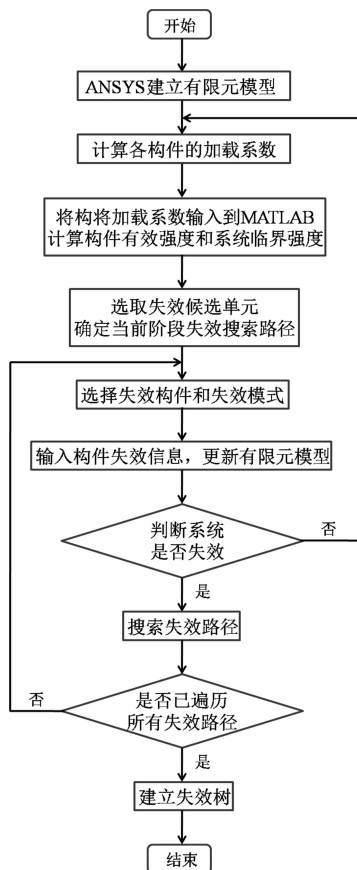


图 1 失效模式搜索流程

Fig.1 Searching flowchart of failure mode

2 结构系统可靠度计算方法

由上节内容得到系统的主要失效模式 m_1, m_2, \dots, m_n 后,设第 i 个失效模式发生的事件为 E_i ,系

统失效事件为 E_{fs} .进一步假设第 i 个失效模式由 q_i 个相继发生的失效状态组成,第 i 个失效模式的第 k 个失效状态发生的事件表示为 $E_i^{(k)}$,则系统失效这一事件可表示为^[9]:

$$\begin{cases} E_{fs} = \bigcup_{i=1}^n E_i \\ E_i = \bigcap_{k=1}^{q_i} E_i^{(k)} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可以看出,系统失效概率计算问题可归结为串-并联混合模式的失效概率计算问题.当得到了桥梁结构各主要失效模式的功能函数时,事件 E_i 的失效概率可直接采用单元可靠度理论求得.此时,桥梁结构系统可靠度计算问题转化为单纯的串联系统可靠度计算问题^[10].对于串联系统的可靠度求解,目前主要有 FORM(First-Order Reliability Method)法、区间估计法和点估计法等.

对于 FORM 法,假定 $G_i(u)$ 为桥梁结构失效模式中第 i 个失效事件的功能函数, u 为标准正态化随机向量,将功能函数线性化之后,系统失效概率计算实质上为多维正态分布函数的计算问题^[12]:

$$\begin{aligned} P_{fs} &= P\left[\bigcup_{i=1}^m G_i(u) \leq 0\right] \approx P\left[\bigcup_{i=1}^m (\beta_i - \alpha_i^* T u) \leq 0\right] \\ &= P\left[\bigcup_{i=1}^m v_i \geq \beta_i\right] = 1 - P\left[\bigcap_{i=1}^m v_i \leq \beta_i\right] = 1 - \Phi_m(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{R}) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\boldsymbol{\beta}$ 为各失效事件的可靠度矩阵; \mathbf{R} 为相关系数矩阵.由于上式属于高维积分,不便于实际工程中运用, Thoft-Christensen 和 Sorensen 通过引入当量相关系数的概念^[13]:

$$\rho_c = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n \sum_{j=k+1}^n \rho_{kj} \quad (10)$$

将式(9)的计算近似简化为:

$$\Phi_n(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{R}) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) \prod_{i=1}^n \Phi\left(\frac{\beta_i - \sqrt{\rho_c} t}{\sqrt{1 - \rho_c}}\right) \quad (11)$$

点估计法中,以 PNET 法(概率网络估算技术)^[14]应用最为广泛.该方法首先根据系统各失效模式间的相关系数矩阵确定其相关程度,并将其分为若干组,选出各组中失效概率最大的失效模式作为该组的代表失效模式,用 P_{f_iG} 表示;然后,假定每个代表失效模式之间近似相互独立,则系统的失效概率可由式(12)计算得到:

$$P_{fs} = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P_{f_iG}) \quad (12)$$

由式(12)可知,FORM 法主要适用于系统各失效模式间的相关性接近的情况,而 PNET 法则适用于系统失效模式分组特征明显的情况.

3 拉索抗力衰减与破断

3.1 拉索抗力衰减规律

斜拉索在运营期间容易遭受自然环境腐蚀和疲劳损伤等的耦合作用而使其抗力随着服役时间的延长而逐渐降低.拉索腐蚀后,其材料的物理化学特性并未发生明显变化,即拉索内钢丝或钢绞线的弹性模量和单位面积的抗拉强度值基本无变化,其抗力的衰减(极限强度的降低)主要是由于腐蚀导致拉索截面积的损失^[15].

对于拉索抗力衰减规律,文献[10]比较了两种构件抗力衰减概率模型:平稳化随机过程模型和独立增量随机过程模型,并提出了改进的独立增量随机过程概率模型.为简化后续系统可靠度计算时的复杂性,本文假定拉索的抗力衰减概率模型为平稳化随机过程模型,即将抗力表示为^[16]:

$$R(t) = \alpha(t)R_0(t) \quad (13)$$

式中, $\alpha(t)$ 为确定性函数; $R_0(t)$ 为平稳随机过程,而 $R(t)$ 则称为平稳化随机过程.由于平稳随机过程的数字特征(期望值、方差等)均与时间计算起点无关,因而取 $R_0(t)$ 在初始时刻($t=0$)的数字特征作为代表值,而将初始时刻的结构抗力记为 R_0 .本文选取幂函数模型来描述拉索的抗力时变衰减规律,衰减函数如式(14)所示^[16]:

$$\alpha(n, k_1) = \left(1 - k_1 \frac{n}{T}\right)^r \quad (14)$$

式中: T 为拉索使用年限,此处假定为 30 a; k_1 和 r 由试验资料或工程经验确定,根据文献[16],取 $r=2$,并假定拉索服役 30 a 后抗力 R_{30} 分别衰减为初始抗力 R_0 的 0.8, 0.7 和 0.6 倍,则 k_1 分别为 0.105 6, 0.163 3 和 0.225 4,图 2 给出了拉索抗力时变衰减规律图.

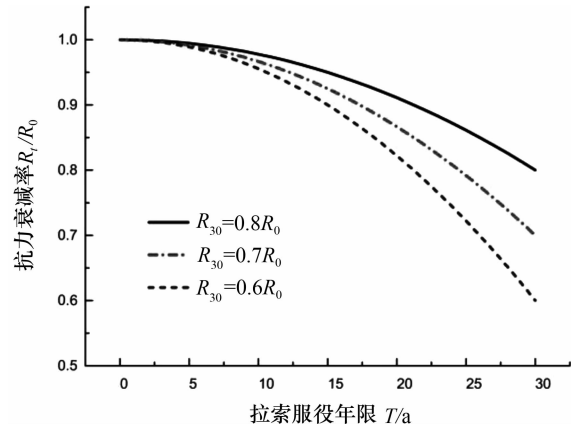


图 2 拉索抗力衰减

Fig.2 Cable resistance degradation curve

3.2 拉索破断

拉索作为斜拉桥的主要受力构件之一,直接布置在主塔和主梁外部,容易受到车辆撞击、火灾等偶然极限荷载的直接作用而导致拉索破断.斜拉桥在单根拉索破断后,其内力将重分配到剩余结构其他构件中,若其他构件存在损伤等可能引起抗力降低的情况,则有可能在拉索破断后也被损坏,甚至有可能出现连续破坏的情形.本文研究了不同位置拉索破断对结构系统可靠度的影响.

4 算例

4.1 有限元模型的建立

本文采用 ANSYS 建立斜拉桥有限元模型.针对斜拉桥的受力特点,模型中,主梁和主塔采用梁单元 (BEAM4) 模拟,拉索采用仅受拉杆单元 (LINK10) 模拟.桥梁的立面布置及拉索编号和单元号见图 3,主塔、主梁和拉索的材料及几何参数如表 1 所示.

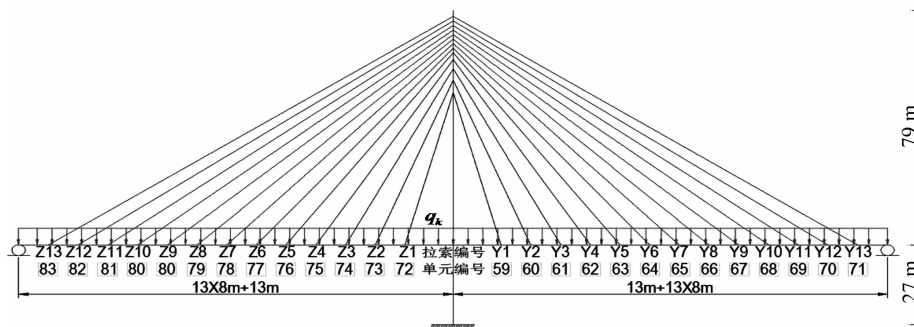


图 3 斜拉桥模型立面布置

Fig.3 Elevation of a cable-stayed bridge

表1 主梁、主塔和拉索材料及几何参数

Tab.1 Material and geometrical properties of girder, tower and cables

构件	规格	E /(GPa)	A /m ²	I_y /m ⁴	I_z /m ⁴	I_x /m ⁴	σ_y /GPa	屈服弯矩 M_y /(MN·m)
主梁	C55	35.5	22.68	32.45	167.00	106.10	—	155.34
主塔	C50	34.5	17.08	71.11	30.30	71.17	—	155.61
1,13#拉索	1860	195	0.017 1	—	—	—	1 581	—
2,7~12#拉索	1860	195	0.015 4	—	—	—	1 581	—
3~6#拉索	1860	195	0.012 0	—	—	—	1 581	—

注:①拉索屈服强度取 0.85 倍极限强度;②主梁和主塔截面的屈服弯矩为服从正态分布的随机变量,均值为对相应截面配筋后通过计算得到,变异系数分别为 0.121 和 0.135^[17].

4.2 主要失效模式的搜索

斜拉索属于柔性结构,主梁的恒载、车道荷载等都是通过斜拉索传递至主塔,且斜拉桥发生整体失效的根本原因一般是斜拉索的逐一失效,故本文在搜索失效模式时,仅考虑拉索失效引起的结构整体失效的模式。

在搜索失效模式过程中,定义斜拉桥的极限状态为某根拉索屈服导致的结构局部失效及主梁、主塔截面弯矩达到其屈服弯矩而使整个结构失效。算

例仅考虑全桥满布均载的加载情况(如图 3 所示)。考虑到结构的对称性,仅搜索右半跨拉索失效时的失效路径。对于约束参数,取 $c_k = 1.2$ 足以满足工程需要^[9]。

根据图 1 所示失效模式搜索流程,此处共搜索到 46 条失效路径,表 2 中给出了前 6 个失效模式及对应的系统临界强度表达式,图 4 给出了 64#单元(Y6 拉索)最先失效情形下生成的失效树主干。

表2 主要失效模式搜索结果

Tab.2 Searching result of the major failure modes

失效模式	失效单元序列 $i \rightarrow j \rightarrow \dots$	系统临界强度原始表达式 $\sum_{i=1}^k d_{R_i}^{(k)} R_{r_i}^{I_{r_i}} - d^{(k)} g$	临界强度均值
1	64→63→65→62	$0.3120R_{64} + 0.3324R_{63} + 0.3593R_{65} + 0.3793R_{62} - 0.2097g$	7.996 1
2	64→63→65→66	$0.3120R_{64} + 0.3324R_{63} + 0.3593R_{65} + 0.3732R_{66} - 0.3554g$	8.122 2
3	64→63→62→65	$0.3120R_{64} + 0.3324R_{63} + 0.3326R_{62} + 0.3852R_{65} - 0.3672g$	8.144 4
4	64→63→62→66	$0.3120R_{64} + 0.3324R_{63} + 0.3362R_{62} + 0.3458R_{66} - 0.3751g$	8.361 5
5	64→63→66→65	$0.3120R_{64} + 0.3324R_{63} + 0.3249R_{66} + 0.4055R_{65} - 0.3574g$	8.1822
6	64→63→66→62	$0.3120R_{64} + 0.3324R_{63} + 0.3249R_{66} + 0.3685R_{62} - 0.3735g$	8.2689
...

注: R_{64} 表示拉索单元 64 的抗拉承载能力(扣除初张力)。

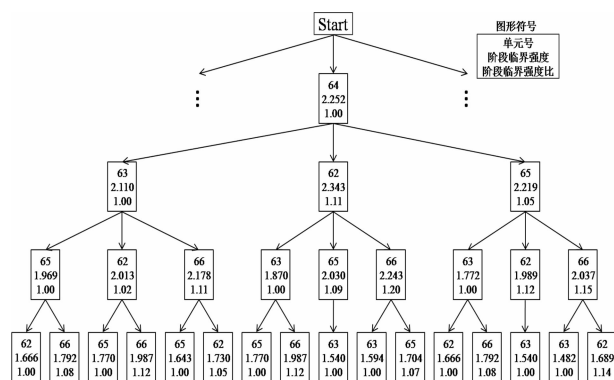


图4 失效树主干

Fig.4 Trunk of the failure tree

4.3 系统可靠度计算

在得到斜拉桥主要失效模式及相应的系统临界强度表达式之后,每个失效模式的功能函数可表

示为式(15):

$$Z_{r_1 \rightarrow r_2 \rightarrow \dots \rightarrow r_k} = \sum_{i=1}^k \alpha_{R_i} d_{R_i}^{(k)} R_{r_i}^{I_{r_i}} - \alpha_G d_G^{(k)} g - \alpha_{qk} F_{qk} \tag{15}$$

式中: α_{R_i} , α_G 和 α_{qk} 分别为描述拉索抗力、恒载和外荷载(此处为车道均布荷载)不确定性的随机变量。为简化计算,假定上述 3 个随机变量之间相互独立,根据已有文献和相关标准,其相应的分布类型和分布参数取值如表 3 所示。

表3 分布类型和分布参数

Tab.3 Distribution type and statistical parameter

随机变量	分布类型	均值	变异系数	参考文献
α_{R_i}	Normal	1.050 0	0.100	[18]
α_G	Normal	1.021 2	0.046 2	[10]
α_{qk}	Normal	0.668 4	0.199 4	[10]

在计算系统可靠度指标过程中,需计算各主要失效模式之间的相关系数矩阵,图 5 给出了 46 个主要失效模式间的相关性计算结果.

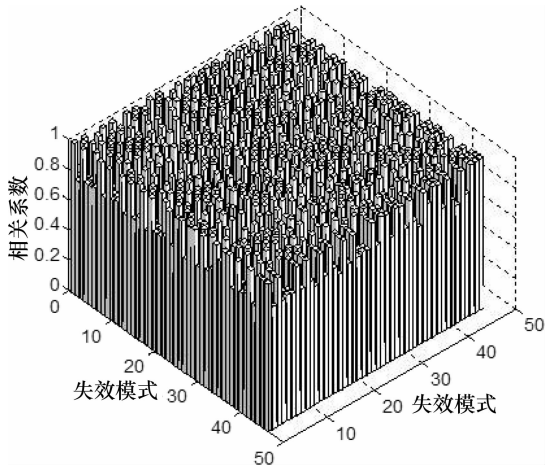


图 5 46 个主要失效模式相关系数柱状图
Fig.5 3D histogram for correlation coefficient of 46 major failure modes

可以看出,该斜拉桥模型主要失效模式之间的相关性很高,相关系数均大于 0.75.因此,可以选取 FORM 法计算系统可靠度.经计算得到,该斜拉桥模型在全桥均布满载情形下,桥梁结构系统的可靠度指标为 6.424 3.

4.4 拉索抗力衰减对结构系统可靠性的影响

采用图 1 所示失效模式搜索流程搜索各阶段系统主要失效模式,并计算其相关系数矩阵.计算发现拉索抗力衰减后失效模式间的相关性未发生明显变化,故仍采用 FORM 法来计算拉索服役期内斜拉桥结构系统的可靠度.图 6 给出了不同抗力衰减情况下斜拉桥系统可靠度计算结果:随着拉索服役时间的增加,拉索腐蚀的逐渐加重,系统的可靠度指标明显降低. $T=30$ a 时,系统可靠度指标分别仅为 5.60($R_{30}=0.8R_0$),5.01($R_{30}=0.7R_0$)和 4.22($R_{30}=0.6R_0$),此时若考虑活载效应的增加、拉索断丝等其他可能因素的影响,系统的可靠度指标将低于现有计算结果.

同时,为验证上述计算结果,选取 $R_{30}=0.6R_0$ 中 $T=25$ a 和 $T=30$ a 时对应的工况采用 Monte Carlo 法进行模拟.计算得到 $T=25$ a 和 $T=30$ a 时系统可靠度指标分别为 5.25 和 4.32,本文计算结果与 Monte Carlo 法模拟得到的结果偏差分别为 -1.77%和 -2.25%,说明本文采用 FORM 法计算得到的结果是可靠的.

4.5 拉索破断对结构系统可靠性的影响

考虑图 3 所示的斜拉桥模型在右侧出现单根拉

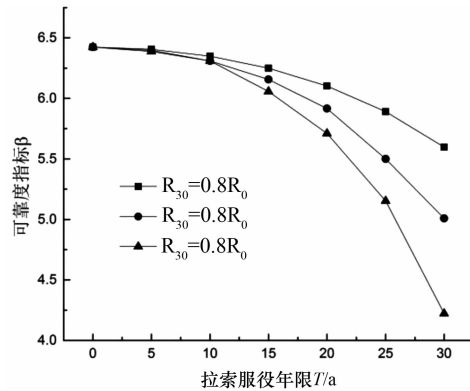


图 6 系统可靠度随拉索服役年限变化情况
Fig.6 Variation of system reliability indices with respect to the service life of the cables

索破断的情形,斜拉桥结构系统失效模式以及可靠度的变化情况,其余参数不变.

由于结构出现了拉索破断情况,故不再是对称结构,因此在搜索失效模式时需同时考虑左侧和右侧拉索失效的情况.同样采用图 1 所示失效模式搜索流程搜索斜拉桥在右侧出现单根拉索破断的情形下剩余结构的主要失效模式.此处搜索得到的失效模式中,有部分对应为冗余失效路径^[9],在计算系统可靠度时无需考虑.如对于 64 # 单元(Y6 拉索)破断情形下,在删除冗余失效路径之后,共有 58 个主要失效模式,计算其相关性如图 7 所示.

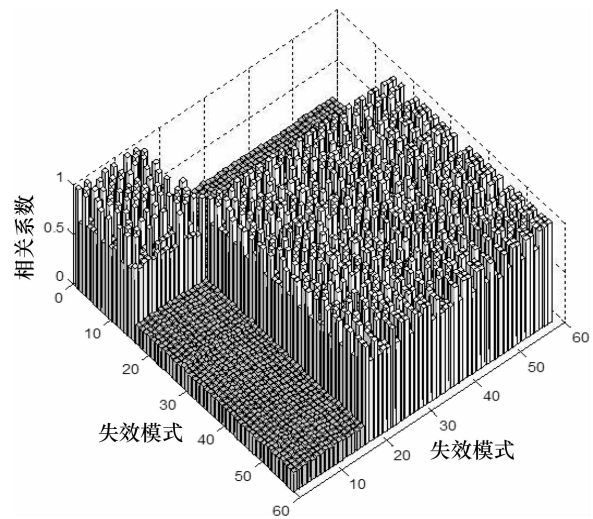


图 7 58 个主要失效模式相关系数柱状图
Fig.7 3D histogram for correlation coefficient of 58 major failure modes

由图可知,在有拉索破断情形下各失效模式的相关性分组明显,故选取 PNET 法计算相应的系统可靠度,同时,为验证 PNET 法计算结果的准确性,采用文献[19]中介绍的系统可靠度计算方法

(Ditlevsen 窄界限法,即二阶界限)计算各断索工况下的系统可靠度指标,计算结果如图 8 所示.由图可知,PNET 法计算结果均位于二阶界限内,且均靠近其下限值,说明各断索工况下采用 PNET 计算得到的结果比较准确且偏于保守.再就是位置靠外侧的拉索(如 Y10,Y11 等)破断时剩余结构的系统可靠度指标整体要低于靠内侧的拉索(如 Y1,Y2 等)破断时的情形,且对于该斜拉桥模型,Y10 拉索破断后剩余结构系统可靠度指标最低,为 5.895 2.

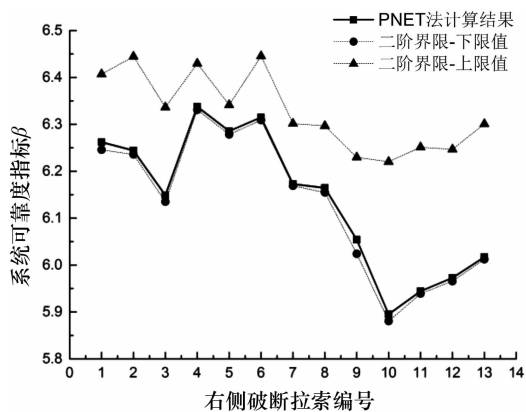


图 8 系统可靠度随破断拉索位置变化情况

Fig.8 Variations of system reliability with respect to the anchorage position of the broken cables

5 结 语

本文采用阶段临界强度分枝-约界法对一座斜拉桥模型进行了主要失效模式的搜索及系统可靠度计算,并考虑了拉索在服役期间抗力衰减及斜拉桥不同位置拉索破断情形对结构失效模式和系统可靠度的影响,主要结论如下:

1) 正常情况下,仅考虑拉索失效时,斜拉桥各失效模式之间的相关性很高,可采用 FORM 法计算系统可靠度.

2) 在考虑拉索服役期间抗力衰减时,随着拉索服役时间的增加,斜拉桥结构系统的可靠度指标逐渐降低,但失效模式间的相关性未发生明显变化.

3) 斜拉桥不同位置拉索破断对结构系统失效模式及可靠度有一定影响.其中,失效模式相关性出现明显分组特征,剩余结构系统可靠度指标对于外索破断时要低于内索破断的情形,且可以得到破断后对剩余结构系统可靠性影响最大的拉索位置,可为斜拉桥结构设计提供参考.

参考文献

- [1] MOZOS C M, APARICIO A C. Parametric study on the dynamic response of cable bridges to the sudden failure of a stay, Part I: Bending moment acting on the deck [J]. *Engineering Structure*, 2010, 32(10): 3288-3300.
- [2] MOSES F. System reliability developments in structural engineering [J]. *Struct. Safety*, 1982(1): 3-13.
- [3] GHARAIBEH E SFRANGOPOL D M, OONUFRIOU T. Reliability-based importance assessment of structural members with applications to complex structures [J]. *Computers & Structures*, 2002, 80(12): 1113-1131.
- [4] DENG L, CAI C S, BARBATO M. Reliability-based dynamic load allowance for capacity rating of prestressed concrete girder bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2011, 16(6): 872-880.
- [5] 刘建华,董聪,张玉玲. 基于 ANSYS 软件的斜拉桥结构可靠性分析 [J]. *工程力学*, 2003(增刊): 74-78.
LIU Jianhua, DONG Cong, ZHANG Yuling. System reliability of cable-stayed bridge based on ANSYS [J]. *Engineering Mechanics*, 2003(Suppl): 74-78. (In Chinese)
- [6] 王春生,陈惟珍,陈艾荣. 铆接钢桥的系统疲劳可靠度评估 [J]. *中国公路学报*, 2008, 21(5): 45-49.
WANG Chunsheng, CHEN Weizhen, CHEN Airong. System fatigue reliability assessment of riveted steel bridges [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2008, 21(5): 45-49. (In Chinese)
- [7] YAN D, CHANG C C. Vulnerability assessment of cable-stayed bridges in probabilistic domain [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2014, 14(14): 270-278.
- [8] 刘晓鉴. 大跨度斜拉桥结构系统可靠度评估 [J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2011, 6(6): 732-735.
LIU Xiaoluan. Structural system reliability evaluation of long-span cable-stayed bridges [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2011, 6(6): 732-735. (In Chinese)
- [9] 董聪. 现代结构系统可靠性理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
DONG Cong. The theory and application of modern structural system reliability [M]. Beijing: Science Press, 2001. (In Chinese)
- [10] 高欣. 在役钢管混凝土拱桥损伤与系统可靠性分析方法 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2011.
GAO Xin. Analysis methods for suspender damage and system reliability of existing concrete filled steel tubular arch bridge [D]. Harbin: College of Civie Engineeving, Harbin Institute of Technology, 2011. (In Chinese)
- [11] 高欣,欧进萍. 桥梁结构失效模式搜索的分枝-约界法 [J]. *华中科技大学学报*, 2008, 25(4): 227-231.
GAO Xin, OU Jinping. Branch and bound method for bridge failure mode approach [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2008, 25(4): 227-231. (In Chinese)

(下转第 40 页)