

# 考虑拉索抗力退化的斜拉桥体系可靠度评估\*

刘扬<sup>1</sup>,汪勤用<sup>1,2†</sup>,鲁乃唯<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114;2.长沙理工大学 南方地区桥梁长期性能提升技术  
国家地方联合工程实验室,湖南 长沙 410114)

**摘要:**疲劳损伤和大气腐蚀作用致使斜拉索性能退化,影响斜拉桥运营期的安全水平.为了分析拉索抗力退化对斜拉桥体系可靠度的影响,建立了斜拉索抗力退化的串并联概率模型,提出基于机器学习的斜拉桥时变体系可靠度分析方法.以经典斜拉桥和某大跨度双塔混凝土斜拉桥为工程背景,研究了考虑拉索抗力退化的结构时变体系可靠度.研究结果表明:对于稀索体系的小跨度斜拉桥,随着斜拉索抗力的逐步退化,桥梁结构体系的主要的失效路径为由梁和塔的弯曲失效逐渐转变为由拉索腐蚀引起的拉索强度失效;当拉索抗力退化后的可靠度低于主梁关键截面可靠度时,结构体系可靠度将显著降低;对于密索体系的大跨度斜拉桥,在拉索疲劳和腐蚀共同作用下,该斜拉桥体系可靠指标将在29年降低到5.2.

**关键词:**斜拉桥;抗力退化;腐蚀;强度失效;风险评估;体系可靠度

**中图分类号:**U448.27

**文献标志码:**A

## System Reliability Assessment of Cable-stayed Bridges Considering Cable Resistance Degradation

LIU Yang<sup>1</sup>, WANG Qinyong<sup>1,2†</sup>, LU Naiwei<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. National Joint Engineering Research Laboratory for Long-term Performance Improvement Technology for Bridges in Southern China, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** Fatigue damage and atmospheric corrosion lead to the degradation of cable performance, which affects the lifetime safety risk of the cable-stayed bridge. In order to investigate the influence of cable resistance degradation on the system reliability of cable-stayed bridges, a series-parallel probability model of the cable resistance was established. A framework for time-variant system reliability evaluation of cable-stayed bridges was presented based on machine learning. Both a typical bridge and a long-span cable-

\* 收稿日期:2017-03-08

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973计划)资助项目(2015CB057705), Major State Basic Research Development Program of China (973 Program)(2015CB057705);国家自然科学基金资助项目(51378081), National Natural Science Foundation of China (51378081);南方地区桥梁长期性能提升技术国家地方联合工程实验室开放基金资助项目(16BCX05), Open Fund of National Joint Engineering Research Laboratory for Long-term Performance Improvement Technology for Bridges in Southern China(16BCX05);长沙理工大学研究生科研创新项目(CX2016BS01), Graduate Student Research and Innovation of CSUST(CX2016BS01)

作者简介:刘扬(1973-),男,湖南华容人,长沙理工大学教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: wangqinyong\_civil@163.com

stayed bridge were selected as prototypes to investigate the influence of the cable degradation on their structural system reliability indices. Numerical results show that the dominant failure sequence of the short-span bridge with short-spacing cables changes from the bending failure of girders and pylons to the tensile failure of cables due to the cable corrosion. As a result, the structural system reliability significantly decreases in the period that the cable reliability is inferior to the one of the critical girder. For the long-span bridge with long-spacing cables, the system reliability index decreases to the threshold value 5.2 in the 29-year service period taking into account both fatigue and corrosion.

**Key words:** cable-stayed bridge; resistance degradation; corrosion; strength failure; risk assessment; system reliability

斜拉桥结构体系的优点之一是斜拉索为主梁提供了弹性支撑<sup>[1]</sup>. 然而, 拉索作为斜拉桥的主要承重构件, 易受大气腐蚀及车载疲劳损伤致使强度降低<sup>[2]</sup>. Mehrabi 等<sup>[3]</sup> 研究发现 Hale Boggs 桥的 72 根斜拉索中有 39 根在 25 年服役期后需修复或更换. 拉索强度退化增加了拉索断裂的风险, 同时可能导致其他拉索、主梁的破坏, 甚至整个结构的倒塌, 工程结构设计中需采用抗连续性倒塌的理念对此类结构进行设计. 虽然斜拉桥的相关设计规范中提出了鲁棒性的建议, 但仍需进一步研究随机因素与斜拉索抗力共同作用下既有斜拉桥的体系可靠度.

拉索腐蚀或拉索断裂情况下的斜拉桥的力学性能研究成为近年来的一个研究热点. Xu 等<sup>[4]</sup> 运用椭圆近似模拟精确描述高强度钢丝腐蚀坑, 并对腐蚀坑的几何形态参数计算和统计分析, 表明腐蚀拉索的极限承载能力与横截面面积的不均匀减小有关. Xu 等<sup>[5]</sup> 利用串-并联体系研究了在假定腐蚀分布的拉索横截面处的力学行为. Mozos 等<sup>[6]</sup> 对斜拉桥在拉索断裂时的应力进行了数值和实验研究. Zhou 等<sup>[7]</sup> 利用车桥-风耦合振动模型研究了拉索损伤引起的大跨度斜拉桥在汽车荷载作用下的动力性能. Aoki 等<sup>[8]</sup> 采用鲁棒性设计以避免拉索损伤的传递.

除了上述力学行为的研究进展, 斜拉桥可靠性评估领域也得到了深入的研究. 刘扬等<sup>[9]</sup> 提出了一种基于更新支持向量的体系可靠度分析方法, 将传统的用于构件可靠度分析的支持向量机(SVM)改进并应用于斜拉桥体系可靠度分析. Li 等<sup>[10]</sup> 利用结构健康监测数据评估了大跨度桥梁的可靠性. 由于斜拉桥是静态不确定的结构, 体系可靠度理论吸引了广大研究学者的关注. Bruneau<sup>[11]</sup> 利用体系可靠度方法分析斜拉桥的最终全局行为, 发现 9 种潜在的失效模式. Liu 等<sup>[12]</sup> 开发了一种自适应支持向量回归(ASVR)方法, 适用于包括斜拉桥等复杂结构

的体系可靠度评估. 鲁乃唯等<sup>[13]</sup> 提出了一种基于联合智能算法的大跨度斜拉桥结构体系可靠度分析方法. 然而, 考虑拉索抗力退化的斜拉桥体系可靠性评估的研究进展相对滞后, 其关键原因是结构失效模式的复杂性和拉索抗力退化将增大结构分析繁冗的计算工作量. 传统的方法, 如  $\beta$  约界法、分支约界法<sup>[14]</sup> 等在大跨度桥梁中的应用也相对不足.

本文提出了考虑拉索抗力退化的斜拉桥结构体系可靠度分析方法. 首先, 采用串-并联体系建立拉索的抗力退化概率模型. 然后, 提出了集成机器学习技术的计算框架和运算程序. 最后, 选择两座斜拉桥作为算例, 分析拉索抗力退化对结构体系可靠度的影响, 并得出了疲劳和腐蚀效应引起的拉索抗力退化对结构构件失效路径和体系可靠度的影响规律.

## 1 拉索抗力退化公式

### 1.1 拉索强度的数学模型

平行钢丝和钢绞线是桥梁工程中斜拉索的常见类型. 平行拉索由直圆平行钢丝及聚苯乙烯管组成. 除了材料特性, 平行钢丝的强度也与钢丝的长度、数量及拉索抗力退化有关<sup>[15]</sup>. 首先, 研究由拉索长度及数量的影响下拉索抗力退化的数学模型.

如图 1 所示, 拉索可在并联系统中建模. 其中每根钢丝可模拟为串联系统, 所有钢丝一起工作形成并联系统. 对于串联系统, 可将取决于钢丝长度的相关因素来模拟单根钢丝. 钢丝中的材料属性和缺陷可通过在串联系统中定义为  $L_0$  的相对长度来考虑. 拉索强度随相对长度的减少或钢丝长度的增大而降低. 因此, 拉索强度模型中相对长度和钢丝长度都应被考虑, 拉索强度分布函数可采用 Weibull 分布函数来表示:

$$F_z(z) = 1 - \exp\left[-\lambda \left(\frac{z}{u}\right)^k\right] \quad (1)$$

式中: $z$  是钢丝的强度; $\lambda$ 、 $u$  和  $k$  是极限承载力试验和最大似然估计法的 Weibull 分布中的参数. 钢丝强度可由比例因子  $\lambda$  的函数表示, 比例因子  $\lambda$  是钢丝样本的长度和相对长度之间的比率. Faber 等<sup>[16]</sup>开展的 100 m 长钢丝实验研究表明:未受损钢丝( $\lambda=3$ )和被腐蚀钢丝( $\lambda=200$ )的钢丝强度平均值分别为 1 748 MPa 和 1 650 MPa. 根据 Faber 的结论, 钢丝强度的变异性是可忽略的.

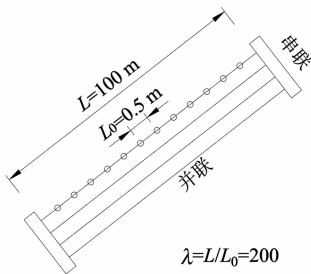


图1 斜拉索并联系统

Fig. 1 A parallel-series system of a stay cable

除了单根钢丝的串联系统之外,斜拉索由多根钢丝并联而成,如图1所示.在并联系统中,拉索中钢丝数量的增加会导致每根钢丝的平均强度降低,这就是所谓的丹尼尔效应.一般来说,强度可以减少高达约8%,且丹尼尔效应的偏差可忽略.

## 1.2 拉索强度的抗力退化

鉴于高应力拉索更容易被腐蚀<sup>[17]</sup>,拉索将在腐蚀和循环应力的长期作用下锈蚀并断裂.因此,拉索抗力退化是现有拉索支撑结构的桥梁中常见的现象.拉索的抗力退化有不同的形式,包括应力腐蚀开裂、点腐蚀、腐蚀疲劳和氢脆变,这些都降低钢丝的强度和延性,导致拉索的使用寿命降低.本研究考虑了大气腐蚀和疲劳损伤导致的拉索抗力退化.

在疲劳损伤累积理论中,在平均应力范围内未损坏的钢丝的失效时间可以假定为相同且独立的.具有最小失效时间的钢丝首先在体系中断开,随后,剩余的钢丝的应力将重新分布.因此,初始失效时间的概率分布函数为<sup>[18]</sup>:

$$F_N(S_{eq}, N) = 1 - \exp\left[\left(\frac{\Delta S_{eq}}{r_c}\right)^\alpha \left(\frac{N}{K}\right)^m\right] \quad (2)$$

式中: $\Delta S_{eq}$  和  $N$  分别为等效应力范围和应力循环次数; $\alpha$ 、 $m$  和  $K$  是通过实验测试估算的未知系数; $r_c$  是与拉索横截面面积相关的参数. Faber 等<sup>[16]</sup>利用超声波检查技术研究疲劳应力退化机理,提出主缆、吊杆及拉索在未腐蚀和腐蚀两种情况下抗力退化的

功能函数.基于 Faber 等<sup>[16]</sup>的研究结果,对 20 年服役期的未腐蚀和腐蚀钢丝的强度系数进行内插,如图2所示.

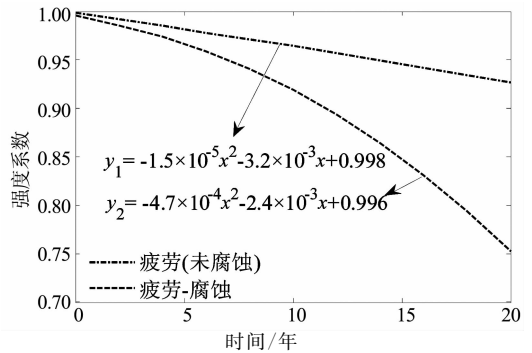


图2 疲劳及腐蚀作用下的拉索强度系数  
Fig. 2 Strength coefficients of a stay cable due to fatigue and corrosion effects

如图2所示,未腐蚀的拉索强度仅跟疲劳损伤有关,腐蚀的拉索强度跟疲劳与腐蚀均相关.可以看出,疲劳作用和疲劳腐蚀效应共同作用下的拉索在20年服役期内的强度系数分别为0.928和0.751.此外,疲劳效应的曲线接近线性,然而疲劳腐蚀效应的曲线是非线性的.因此,腐蚀作用是导致拉索强度快速降低的重要因素.

## 2 体系可靠性评估框架

### 2.1 斜拉桥结构体系的特征

斜拉桥是由多个串联或并联构件组成的复杂系统,并由这些构件组成系统来支撑外部荷载.随着桥跨的增大,力学性能和失效模式表现出各自的独特性,这些都影响斜拉桥的体系安全性.除了要考虑构件级别的特性,如拉索的非线性行为<sup>[19]</sup>,还应进一步考虑体系的特性.

首先,由于斜拉索的高应力,使得索塔和主梁均表现出梁柱构件的特性.因此,梁柱效应是其结构体系的显著特征.弯矩和轴力之间的关系将影响构件刚度系数和内力.梁柱的相互作用为二阶效应,可采用稳定性函数予以考虑.假设中空矩形截面,其中最终的中性轴位于腹板处,通过塑性分析,轴向弯曲相互作用的曲线可写为<sup>[20]</sup>:

$$\frac{M}{M_p} = 1 - \left(\frac{P}{P_p}\right)^2 \frac{A^2}{4\omega Z_x} \quad (3)$$

式中: $M$  为施加的力矩; $M_p$  为在无轴向荷载情况下的塑性力矩值; $P$  为施加的轴力值; $P_p$  为在无施加力矩情况下的塑性轴力值; $\omega$  为腹板厚度; $Z_x$  为弯曲塑性模量.

其次,由于斜拉桥是由主梁、斜拉索和索塔构成的不确定的体系,其失效模式和失效路径直接影响体系的可靠度.一般来说,斜拉桥的潜在失效模式是索塔和主梁的弯曲失效、斜拉索的强度失效和索塔的稳定失效.识别失效路径的常规方法与所选择的搜索方法有关.对于斜拉索的脆性破坏,采用删除失效的拉索而构成失效路径;对于混凝土构件的延性破坏(如主梁或索塔的弯曲失效),采用在失效位置处添加塑性铰来构成失效路径.采用分支约界法,即 $\beta$ 约界法,逐个搜索失效单元,组成失效路径.假定斜拉桥单元数量为 $n$ ,若 $k-1$ 个单元( $r_1, r_2, \dots, r_{k-1}$ )均已失效,则第 $k$ 个单元的条件可靠指标为:

$$\beta_{r_k}^{(k)} = \beta_{r_k/r_1, r_2, \dots, r_{k-1}}^{(k)} = \Phi^{-1} [P(E_{r_k}^{(k)})] \quad (4)$$

式中: $E_{r_k}^{(k)}$ 表示第 $k$ 个构件失效事件; $P(\cdot)$ 表示事件发生的概率; $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为累积分布函数逆函数; $\beta_{r_k/r_1, r_2, \dots, r_{k-1}}^{(k)}$ 是第 $k$ 个单元的条件可靠性指标.斜拉桥各单元的条件可靠指标由基于SVR的响应面方法计算得出<sup>[9]</sup>.

筛选潜在失效构件的前提条件为<sup>[21]</sup>:

$$\beta_{r_k}^{(k)} = \beta_{\min}^{(k)} + \Delta\beta \quad (5)$$

式中: $\beta_{\min}^{(k)}$ 为第 $k$ 个失效过程中所有单元的最小可靠指标; $\Delta\beta$ 在第1步取3,此后取1.由约界方法筛选出所有失效单元之后,采用串并联模型形成失效树,数学表达式为:

$$\begin{cases} E_i = \bigcap_{j=1}^n E_j; \\ E_s = \bigcup_{i=1}^m E_i. \end{cases} \quad (6)$$

式中:结构体系的失效事件 $E_s$ 由 $m$ 个独立的失效模式 $E_i (i=1, \dots, m)$ 组成,每个独立的失效模式 $E_i (j=1, \dots, n)$ 由 $n$ 个失效构件并联而成.

从以上推导可看出,式(4)中考虑了梁柱效应.失效路径搜索准则如式(4)、式(5)所示.除了上述这些特性之外,拉索的抗力退化将增加体系可靠度的计算耗时.因此,应特别注意采用有效的计算框架.

## 2.2 斜拉桥体系可靠度评估框架

鉴于斜拉桥的特性和拉索抗力退化的特征,一个有效的计算框架应满足以下要求:首先,由于构件失效概率极小,较高的计算精度是基本要求.传统方法,如一次二阶矩法(FOSM)和响应面法(RSM)不适合解决这个问题.第二,由于寻找首要失效路径是一个耗时的过程,应具备较高的计算效率.基于上述公式,本文采用基于ASVR<sup>[12]</sup>的机器学习方法.运用考虑拉索抗力退化的改进方法作为智能算法分

析框架的特殊应用.分析框架流程图如图3所示.

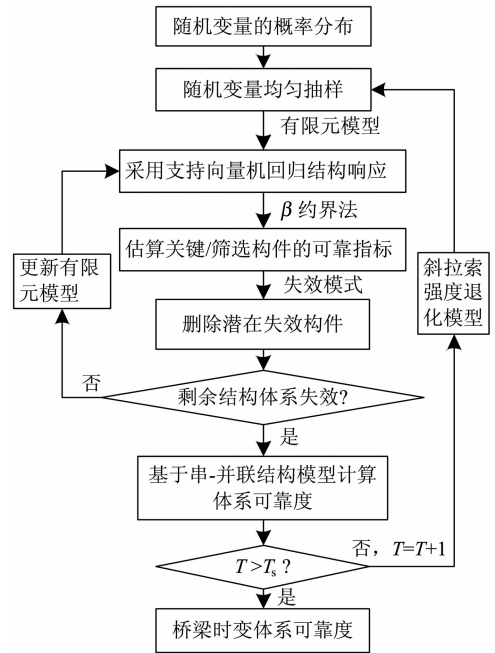


图3 计算框架流程图

Fig. 3 Flowchart of the proposed computational framework

如图3所示,图中的主要过程包括基于ASVR方法的体系可靠度评估和拉索抗力退化模型的更新两个方面.SVR和ASVR方法在结构体系可靠度评估中的应用具体步骤参见文献[12,22].本文主要描述与拉索抗力退化相关的程序.首先,将拉索强度作为初始值,并逐步实现体系可靠度评估;其次,更新拉索强度模型,如图2所示;然后重新评估构件和体系可靠度.值得注意的是,失效树应在拉索强度发生改变时重建,因为拉索抗力退化可能改变构成失效路径中的潜在失效构件;最后,若达到结构服役周期 $T_s$ ,则整个过程将停止并输出结构服役周期的系统可靠指标.拉索抗力退化引起的体系可靠度降低将通过体系时变可靠指标反映出来.

图3所示的关键步骤是在拉索强度更新之后返回到训练样本的采样.该过程表明,只更新单根拉索的可靠指标而不重新评估失效路径是不合理的.相反,看似多余的计算工作对于获取主要失效路径是必要的.这个结论将从算例分析中得到检验.

拉索抗力退化的引入将导致额外的计算量.为了使计算更高效,基于该框架开发了名为“复杂结构可靠性分析软件V1.0”(CSRA)的图形用户界面(GUI)程序.该程序是基于两个商业程序(MATLAB和ANSYS)开发的,CSRA程序的主要过程如

图 4 所示。

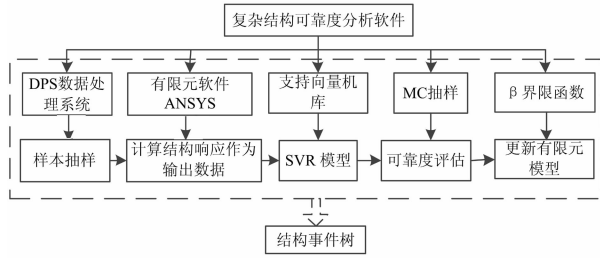


图 4 复杂结构可靠性分析软件流程图  
Fig. 4 Flowchart of the complex structural reliability analysis software

其中,利用数据处理系统(DPS)<sup>[23]</sup>来生成将用于训练 SVR 模型的均匀分布样本。LIBSVM(支持向量机库)<sup>[24]</sup>是一个 MATLAB 程序包。MCS(蒙特卡罗抽样方法)可以是直接 MCS 或改进的 MCS。 $\beta$ 界限函数如式(4)和式(5)所示。在分析路径结束时更新有限元模型,然后逐步重新评估构件的可靠度,最终在串并联系统中评估结构体系可靠度。

### 3 算例分析

#### 3.1 Brotonne 斜拉桥

Bruneau<sup>[11]</sup>分析了图 5 中所示的小跨径斜拉桥的结构体系可靠度的影响。该斜拉桥为独塔,每侧有 2 根斜拉索,在主梁及索塔上的拉索锚固件之间的距离为 30 m。更多关于材料、截面特性及功能函数的细节可参见文献[11]。本算例在此基础上研究了斜拉索强度退化对该斜拉桥失效路径及体系可靠度的影响。

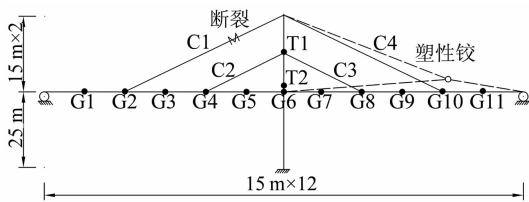


图 5 小跨径斜拉桥的尺寸及失效模式  
Fig. 5 Dimensions and failure modes of a short-span cable-stayed bridge

#### 3.2 失效树的构建

在此算例分析中,结构力学行为假设为线性和弹性(与 Bruneau 的方法一致)。拉索断裂失效事件为脆性破坏,混凝土主梁和桥塔被认为是塑性的,通过塑性破坏机理定义结构体系的失效。塑性断裂机理由塑性铰位置和塑性能力确定,由弯曲失效控制。潜在失效位置如图 5 所示,该塑性铰的出现也是该

斜拉桥体系失效的标志。主梁的 G1~G11 点和索塔的 T1、T2 点受弯曲失效控制,拉索的 C1~C4 构件受强度失效控制。

从体系层面的角度来看,如拉索断裂,直接删除拉索,并重新评估新结构的承载能力。若发生主梁或索塔的弯曲失效,则在发生弯曲失效的位置添加塑料铰。由于结构刚度和抗力每个阶段都在改变,这意味着剩余的结构构件将重建为新的结构体系。当过程结束时,失效路径的发展将在构件失效的情况下停止,最终构件的失效概率是非常高的。为节省计算量应停止该过程,即便该结构仍具备一定的承载能力。由于 Bruneau 已提供了明确的极限状态函数,因此 ASVR 方法在此不用作近似及更新桥梁模型,而采用图 2 所示的拉索的强度系数直接更新极限状态函数。基于上述假设,构建了拉索未产生抗力退化和拉索产生 20% 抗力退化的事件树,见图 6。其中图 6(a)源自于文献[12],图 6(b)是在文献[12]的基础之上,采用本文的分析方法及图 2 所示强度退化系数计算得出。

从图 6 可以得出以下结论:1)随着拉索强度降低 20%,C2 拉索的失效概率从  $0.154 \times 10^{-7}$  急剧下降至  $0.243 \times 10^{-4}$ 。2)主要失效路径发生变化,最初主要失效模式在 G10 和 G2 处的塑性铰处开始,拉索性能退化导致 C2 拉索失效作为主要失效路径的开始,随后是 G6 梁的弯曲失效。最后,结构体系的失效概率从  $1.53 \times 10^{-6}$  增加至  $44.6 \times 10^{-6}$ 。综上所述,拉索抗力退化不仅降低了拉索的可靠性,而且对结构主要失效模式和体系可靠度有着显著影响。

#### 3.3 体系可靠度评估

为了研究拉索抗力退化对斜拉桥体系可靠度的影响,利用图 1 所示的拉索性能退化模型来更新和重新评估体系的可靠性。图 7 给出了桥梁 20 年服役期的时变体系可靠度。

从图 7 可看出,与图 2 所示的拉索强度模型相比,体系可靠指标具有相似而不同的趋势。相似的是考虑疲劳和腐蚀共同作用与仅考虑疲劳作用下,体系可靠指标均降低。不同的是疲劳和腐蚀共同作用下的体系可靠指标从服役期的第 13 年开始快速下降。这种现象可通过图 6 所示的失效树来解释,其中主要失效模式为拉索强度降低到临界值时的拉索失效转变为结构体系失效。由此得出,在服役期的 13 年内,疲劳和腐蚀共同作用下拉索失效的概率大于 G10 梁弯曲失效的概率,这是原先的主要失效模式。因此,持续的拉索抗力退化导致主要失效模式从梁到拉索的变化。这种变化亦使得体系可靠指标的快速下降。然而,这种变化并未从疲劳作用下的可靠指

标变化中观察到,这是因为拉索强度还未降低至强度临界值。

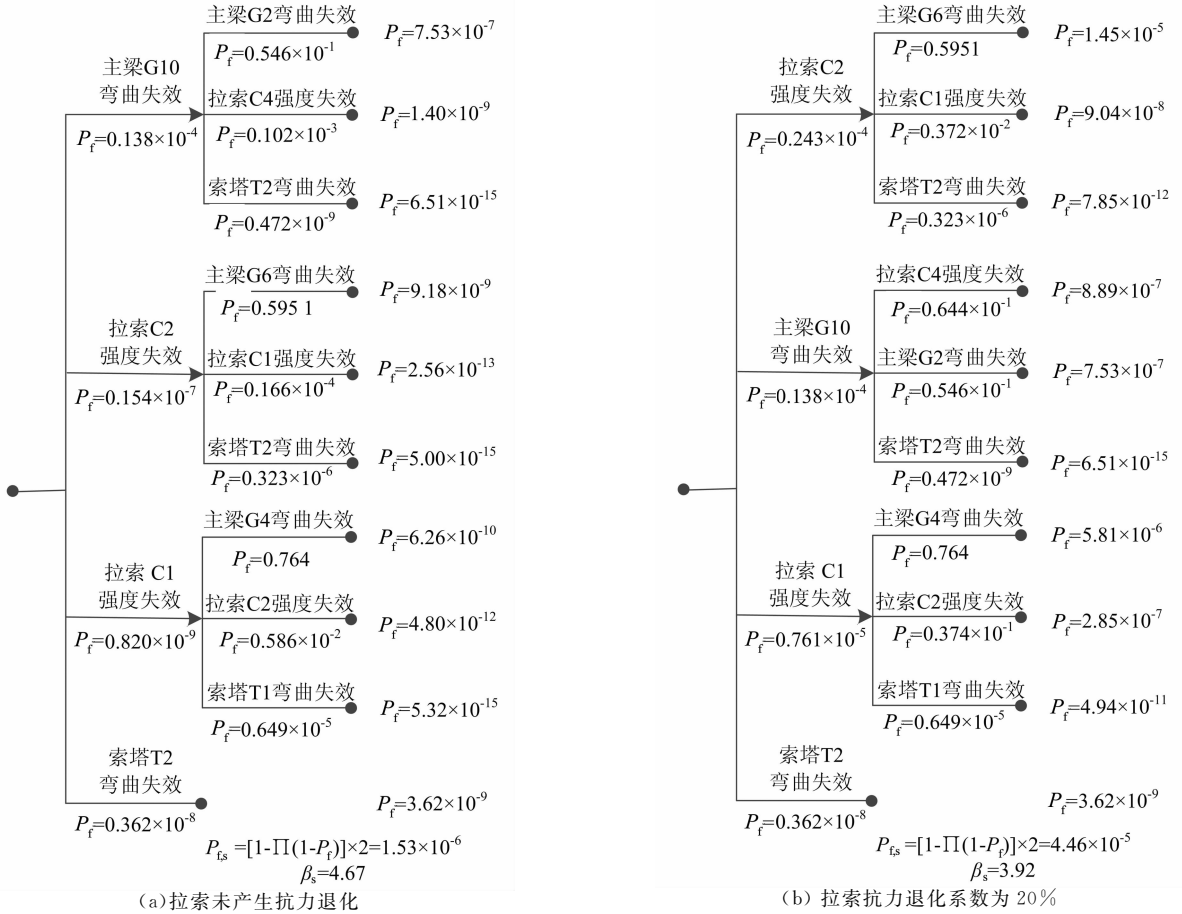


图 6 斜拉桥失效树  
Fig. 6 Event trees of the cable-stayed bridge

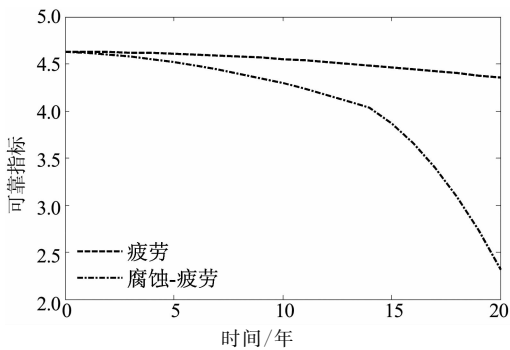


图 7 考虑拉索抗力退化影响的斜拉桥体系可靠指标  
Fig. 7 System reliability index of the cable-stayed bridge subject to cable degradation

### 4 工程实例

#### 4.1 工程概况

康博大桥是泸渝高速公路上的一座刚构体系混凝土斜拉桥. 该桥具有双索塔双索面, 拉索呈扇形. 索塔和主梁节段由两侧的 34 对拉索连接. 桥梁的尺

寸如图 8 所示, 其中  $C_s^1$  和  $C_m^1$  分别表示边跨和中跨的第一对拉索;  $G_s^1$  和  $G_m^1$  分别表示边跨和中跨的第一对主梁;  $P_1$ 、 $P_2$  及  $P_3$  表示索塔和主梁的弯曲失效控制节点. 其中, 公路-I 级汽车荷载简化为跨中的均布荷载<sup>[25]</sup>.

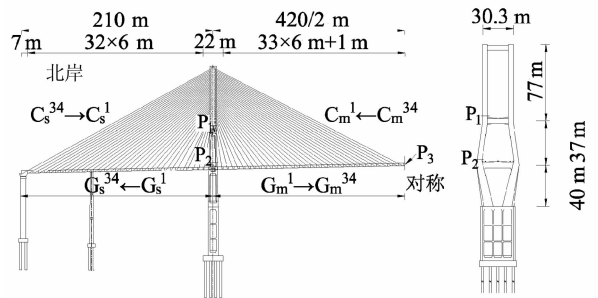


图 8 某大跨度斜拉桥结构尺寸  
Fig. 8 Dimensions of a long-span cable-stayed bridge

#### 4.2 拉索特性值及相关参数

平行钢丝的特性值: 直径  $\varphi = 7$  mm, 极限抗拉

强度  $f_b = 1\ 770\ \text{MPa}$ , 弹性模量  $E_s = 1.9 \times 10^5\ \text{MPa}$ , 容重  $\gamma_s = 78\ \text{kN/m}^3$ . 主梁和索塔的特性值: 极限抗压强度  $f_{ck} = 50\ \text{MPa}$ , 弹性模量  $E_c = 3.45 \times 10^4\ \text{MPa}$ , 容重  $\gamma_c = 26\ \text{kN/m}^3$ . 通过 Ernst 方程来估算拉索的弹性模量. 4 对最长拉索的特性值见表 1. 其中  $N_s$  为拉索中的钢丝数量,  $A_s$  为拉索的横截面面积,  $E_{s, \text{Ernst}}$  为拉索的等效弹性模量,  $P_0$  为拉索索力,  $P_b$  为拉索的强度. 平行钢丝的特性值参见斜拉索设计规范<sup>[26]</sup>. 随机变量包括弹性模量、等效容重、横截面面积及主梁、索塔及拉索的强度. 桥梁各随机变量可参见文献<sup>[12]</sup>.

表 1 4 对最长斜拉索的特性值

Tab. 1 Properties of the fourth longest stay cables

拉索编号	$N_s$	$A_s$ /m <sup>2</sup>	$E_{s, \text{Ernst}}$ /MPa	$P_0$ /N	$P_b$ /kN
$C_m^{34}, C_m^{34}$	253	$9.73 \times 10^{-3}$	$1.864 \times 10^5$	6 440	17 235
$C_m^{33}, C_m^{33}$	241	$9.28 \times 10^{-3}$	$1.860 \times 10^5$	6 066	16 417
$C_m^{32}, C_m^{32}$	241	$9.28 \times 10^{-3}$	$1.852 \times 10^5$	5 665	16 417
$C_m^{31}, C_m^{31}$	223	$8.58 \times 10^{-3}$	$1.841 \times 10^5$	5 580	15 191

### 4.3 拉索动态响应有限元分析

采用 ANSYS 建立了该桥的有限元模型, 如图 9 所示. 其中, 拉索为 LINK180 单元, 主梁和索塔为 BEAM188 单元. 汽车荷载采用中跨的均布力考虑.

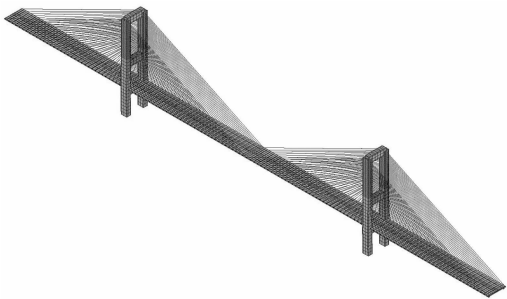


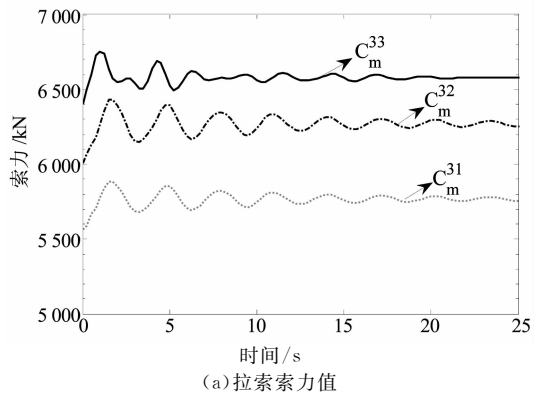
图 9 斜拉桥有限元模型

Fig. 9 Finite element model of the cable-stayed bridge

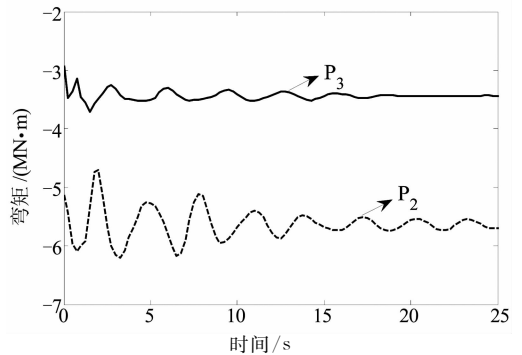
以  $C_m^{31}$ 、 $C_m^{32}$  和  $C_m^{33}$  拉索以及  $P_2$  和  $P_3$  主梁为例, 分析了  $C_m^{34}$  拉索突然断裂时的动态响应. 响应历程如图 10 所示. 从图 10 可以看出, 在  $C_m^{34}$  拉索突然断裂时, 拉索索力值和主梁弯矩值都增加且产生波动. 拉索最大索力和主梁最大弯矩的动态放大系数分别为 1.03 和 1.09. 此外, 靠近失效拉索的构件具有更强的响应.

考虑拉索和混凝土弹性模量  $E_s$  和  $E_c$  的变异性, 斜拉索和主梁截面面积  $A_s$  和  $A_c$ 、主梁抗弯矩性矩弹性矩  $I_c$ 、汽车荷载  $Q$  为随机变量. 假定  $E_s$  和  $A_s$  的变异系数为 0.05, 其余变量的变异系数为 0.1, 生成

6 因素 20 水平的均匀设计样本点, 样本数量为 20 个. 基于有限元模型的确定性分析结果, 由 SVR 学习机器拟合样本点的响应面函数. 此外, 通过删除失效构件并重新评估新结构的响应来更新 SVR 模型. 与汽车荷载相关的  $C_m^{33}$  拉索索力的响应函数、拉索的横截面面积和  $C_m^{34}$  拉索断裂如图 11 所示, 其中  $F_{C_m^{33}}$  为  $C_m^{33}$  拉索的索力,  $Q$  为汽车荷载在中跨的均布力,  $A_s$  为横截面面积.



(a) 拉索索力值



(b) 主梁弯矩值

图 10  $C_m^{34}$  拉索突然断裂时临界点的响应历程

Fig. 10 Response histories of the critical points subject to sudden rupture of the  $C_m^{34}$  cable

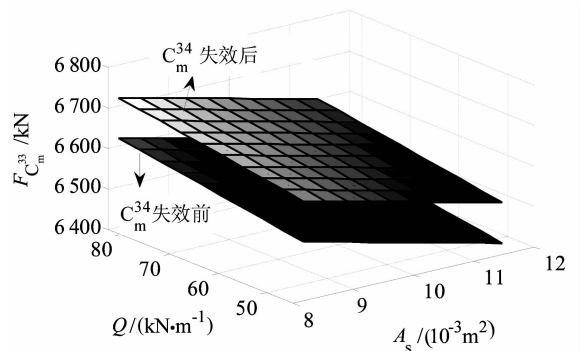


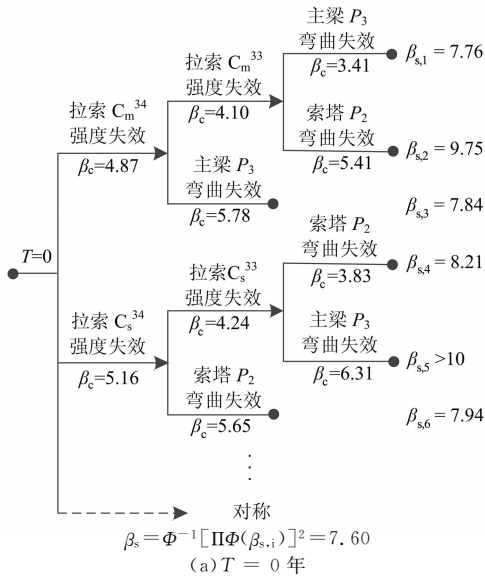
图 11  $C_m^{34}$  断裂时  $C_m^{33}$  拉索索力的响应面

Fig. 11 Response surfaces of the  $C_m^{33}$  cable force due to  $C_m^{34}$  rupture

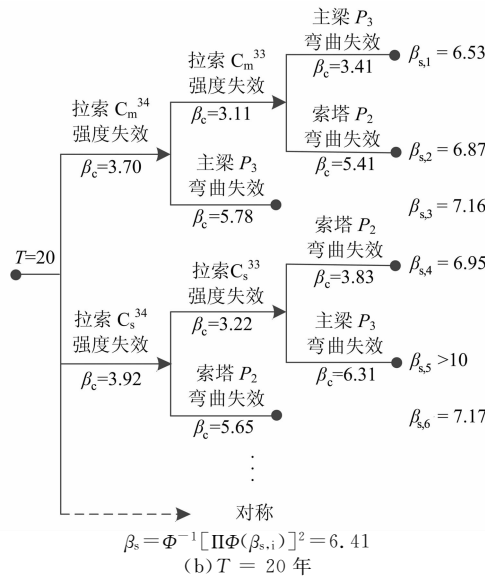
### 4.4 失效树建立及体系可靠度评估

基于所提出的分析框架, 并考虑疲劳和腐蚀的

共同作用,建立了斜拉桥的失效树,如图12所示.由于索塔每侧有34对拉索,它们具有较高的相关性系数,选择最长的拉索包括  $C_m^{34}$  和  $C_s^{34}$  用于失效树的首层以简化计算.图12中示出了在不同服役阶段中斜拉桥的两个失效树.



(a)  $T = 0$  年



(b)  $T = 20$  年

图12 大跨度斜拉桥失效树

Fig. 12 Event trees of the long-span cable-stayed bridge

如图12所示,存在两个主要失效路径.第1个失效路径是中跨拉索( $C_m^{34}$ 和 $C_m^{33}$ )的强度失效,然后是中跨主梁( $P_3$ )的弯曲失效.第2个失效路径是边跨拉索( $C_s^{34}$ 和 $C_s^{33}$ )的强度失效,随后是索塔的弯曲失效( $P_2$ ).考虑6个失效路径以及桥梁结构的对称性,对于 $T=0$ 年和 $T=20$ 年,斜拉桥的体系可靠指标为7.60和6.41.40年服役期的桥梁体系可靠指标如图13所示.

从图13可以看出,桥梁的体系可靠指标在服役期间由于疲劳和腐蚀效应共同作用致使拉索抗力退

化而快速下降.根据公路工程结构可靠度设计统一标准,在脆性破坏控制下的桥梁可靠指标应大于5.2.考虑到目标可靠指标 $\beta_0=5.2$ ,如图13所示,拉索的合理服役期限应在29年内.与疲劳作用相比,腐蚀作用下拉索的强度及体系可靠指标下降得更为快速.因此,采取有效的防腐措施并及时更换腐蚀严重的拉索对于确保斜拉桥的寿命周期安全是非常必要的.

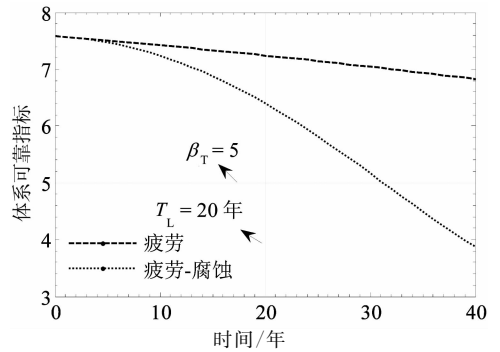


图13 受拉索性能退化影响的斜拉桥体系可靠指标  
Fig. 13 System reliability indices of the cable stayed bridge subject to cable degradation

### 5 结论

本文构建了考虑疲劳损伤和大气腐蚀作用下拉索抗力退化概率模型,提出了考虑拉索抗力退化的斜拉桥体系可靠度分析方法,并验证了该分析方法的可行性.构建了某大跨双塔混凝土斜拉桥在服役期的失效树,分析了斜拉索退化对其结构体系可靠度的影响.主要得出以下结论:

- 1) 学习机器能够捕捉到斜拉桥的拉索垂度、梁柱效应等引起的功能函数非线性特征与斜拉索失效引起的动力效应,加之斜拉索退化与删除失效单元对支持向量的更新,在分析斜拉桥的时变体系可靠度方面具有较好的适用性.
- 2) 疲劳和腐蚀作用下斜拉索在20年服役期内的强度退化系数分别为0.928和0.751,疲劳效应的曲线接近线性,然而疲劳腐蚀效应的曲线是非线性.
- 3) 斜拉索抗力退化将导致稀索体系斜拉桥主要失效路径由主梁弯曲失效转移至斜拉索强度失效,从而导致结构体系可靠指标随服役时间迅速下降.
- 4) 斜拉索抗力退化未导致密索体系斜拉桥失效路径转移,但腐蚀疲劳作用导致斜拉索抗力出现明显下降,结构体系可靠指标仍有低于目标可靠指标的风险.

本文的研究结果对既有斜拉桥运营安全评估与腐蚀斜拉索的更换提供了一定的理论基础.以下内容有待进一步研究:拉索强度的特定点位测量将有



利于建立更合理的拉索抗力退化模型,建立更为完整的斜拉桥失效树,考虑各拉索的相关性系数等。

## 参考文献

- [1] YANG O, LI H, OU J, *et al.* Failure patterns and ultimate load-carrying capacity evolution of a prestressed concrete cable-stayed bridge: case study[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2013, 16(7):1283-1296.
- [2] LI H, LAN C M, JU Y, *et al.* Experimental and numerical study of the fatigue properties of corroded parallel wire cables[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2011, 17(2): 211-220.
- [3] MEHRABI A B, LIGOZIO C A, CIOLKO A T, *et al.* Evaluation, rehabilitation planning, and stay-cable replacement design for the hale boggs bridge in Luling, Louisiana[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2010, 15(4): 364-372.
- [4] XU Y, LI H, LI S, *et al.* 3-D modelling and statistical properties of surface pits of corroded wire based on image processing technique [J]. *Corrosion Science*, 2016, 111: 275-287.
- [5] XU J, CHEN W. Behavior of wires in parallel wire stayed cable under general corrosion effects[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 85(2):40-47.
- [6] MOZOS C M, APAECIO A C. Numerical and experimental study on the interaction cable structure during the failure of a stay in a cable stayed bridge[J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(8):2330-2341.
- [7] ZHOU Y, CHEN S. Numerical investigation of cable breakage events on long-span cable-stayed bridges under stochastic traffic and wind[J]. *Engineering Structures*, 2015, 105:299-315.
- [8] AOKI Y, VALIPOUR H, SAMALI B, *et al.* A study on potential progressive collapse responses of cable-stayed bridges[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2013, 16(4):689-706.
- [9] 刘扬, 鲁乃唯, 殷新锋. 基于更新支持向量的大跨度斜拉桥体系可靠度分析[J]. *计算力学学报*, 2015, 32(2):154-159.  
LIU Y, LU N W, YIN X F. System reliability assessment of long-span cable-stayed bridges using an updating support vector algorithm[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2015, 32(2):154-159. (In Chinese)
- [10] LI H, LI S, OU J, *et al.* Reliability assessment of cable-stayed bridges based on structural health monitoring techniques[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2012, 8(9): 829-845.
- [11] BRUNEAU M. Evaluation of system-reliability methods for cable-stayed bridge design[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1992, 118(4):1106-1120.
- [12] LIU Y, LU N, YIN X, *et al.* An adaptive support vector regression method for structural system reliability assessment and its application to a cable-stayed bridge[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 2016, 230(2): 204-219.
- [13] 鲁乃唯, 刘扬, 肖新辉, 等. 基于联合智能算法的大跨度斜拉桥体系可靠度评估[J]. *应用力学学报*, 2015, 32(5):858-864.  
LU N W, LIU Y, XIAO X H, *et al.* System reliability assessment of cable-stayed bridges based on a combined intelligent algorithm[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2015, 32(5): 858-864. (In Chinese)
- [14] LEE Y J, SONG J. Risk analysis of fatigue-induced sequential failures by branch-and-bound method employing system reliability bounds[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2011, 137(12): 807-821.
- [15] NAKAMURA S, SUZUMURA K. Experimental study on fatigue strength of corroded bridge wires[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2012, 18(3): 200-209.
- [16] FABER M H, ENGELUND S, RACKWITZ R. Aspects of parallel wire cable reliability[J]. *Structural Safety*, 2003, 25(2):201-225.
- [17] YANG W J, YANG P, LI X M, *et al.* Influence of tensile stress on corrosion behaviour of high-strength galvanized steel bridge wires in simulated acid rain[J]. *Materials & Corrosion*, 2012, 63(5):401-407.
- [18] MALJAARS J, VROUWENVELDER T. Fatigue failure analysis of stay cables with initial defects: Ewijk bridge case study[J]. *Structural Safety*, 2014, 51(6):47-56.
- [19] 邓继华, 邵旭东, 张阳, 等. 考虑索端刚臂的斜拉桥空间拉索非线性分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(1):21-26.  
DENG J H, SHAO X D, ZHANG Y, *et al.* Non-linear analysis of spatial stay cable with rigid arms of cable-stayed bridge[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2014, 41(1):21-26. (In Chinese)
- [20] YOO H, NA H S, CHOI D H. Approximate method for estimation of collapse loads of steel cable-stayed bridges[J]. *Steel Construction*, 2012, 72:143-154.
- [21] 刘扬, 鲁乃唯, 殷新锋. 基于体系可靠度的钢桁梁结构优化设计[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(10):3629-3636.  
LIU Y, LU N W, YIN X F. Structural optimization design of steel truss beam based on system reliability[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2014, 45(10):3629-3636. (In Chinese)
- [22] DAI H, ZHANG H, WANG W. A support vector density-based importance sampling for reliability assessment[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2012, 106:86-93.
- [23] TANG Q Y, ZHANG C X. Data processing system (DPS) software with experimental design, statistical analysis and data mining developed for use in entomological research [J]. *Insect Science*, 2012, 20(2): 254-260.
- [24] 孙炜, 薛敏, 孙天宇, 等. 基于支持向量机优化的行人跟踪学习检测方法[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(10):102-109.  
SUN W, XUE M, SUN T Y, *et al.* The optimized pedestrian tracking-learning-detection algorithm based on SVM[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2016, 43(10):102-109. (In Chinese)
- [25] 朱劲松, 肖汝诚, 何立志. 大跨度斜拉桥智能可靠度评估方法研究[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(5):41-48.  
ZHU J S, XIAO R C, HE L Z. Reliability assessment of large-span cable-stayed bridges based on artificial intelligence[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(5):41-48. (In Chinese)
- [26] JT/T 775-2010 大跨度斜拉桥平行钢丝斜拉索[S]. 北京:人民交通出版社, 2010:1-16.  
JT/T 775-2010 Stay cables of parallel steel wires for large-span cable-stayed bridge [S]. Beijing: China Communications Press, 2010:1-16. (In Chinese)