

# 斜拉索在随机风-车-覆冰联合作用下的 疲劳可靠度分析

谭冬梅, 罗素珍, 瞿伟廉, 毛善明, 刘晓飞

(武汉理工大学 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

**摘 要:**为了分析随机风-车荷载及覆冰联合作用下的斜拉索的疲劳可靠度,以武汉天兴洲长江大桥为工程背景进行研究。首先,根据 Monte Carlo 法组成随机车队,模拟随机车辆荷载谱,将车辆模型转化为节点动力荷载输入斜拉桥模型中,通过谐波叠加法生成风速时程,将风荷载引起的静风力、抖振力、气动自激力施加到斜拉桥模型中;然后,依据横风向驰振理论,考虑扇形索覆冰引起的自激振动影响,采用 Fluent 软件模拟拉索在覆冰状态下的升力系数,求出  $30^\circ$  风攻角下的升力并施加到拉索上,将拉索计算出的时程力施加到对应的主梁模拟点上;最后,基于累积损伤理论,分别对斜拉桥在单一车荷载、风-车荷载联合作用及风-车-覆冰联合作用下拉索的疲劳可靠度进行分析,得到拉索的疲劳可靠度指标。研究结果表明:风-车荷载联合作用下拉索的疲劳可靠度指标明显低于单一随机车荷载作用下的疲劳可靠度指标,最短索的疲劳可靠度指标降低了约 21%;覆冰会降低拉索的疲劳可靠度指标,但其降低幅度不大,考虑到覆冰作用引起的最大索力大于其他 2 种工况的最大索力,其影响不能忽略;风荷载对拉索的疲劳可靠度影响显著,且随着拉索长度增大,影响也逐渐增大。该方法主要是将荷载以节点动力荷载的形式施加到桥面模拟点上,因此该方法同样适用于其他桥梁的疲劳可靠度分析。

**关键词:**桥梁工程;疲劳可靠度;累积损伤理论;覆冰;风-车联合作用;自激振动

**中图分类号:**U448.27 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.02.011

## Fatigue reliability analysis of stay cables under combined effect of wind-vehicle load and iced accretion

TAN Dong-mei, LUO Su-zhen, QU Wei-lian, MAO Shan-ming, LIU Xiao-fei

(Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge & Structure Engineering, Wuhan University of Technology,  
Hubei 430070, Wuhan, China)

**Abstract:** To analyze the fatigue reliability of stay cables under the combined effects of random wind load, vehicle load, and ice accretion, the Tianxingzhou Yangtze River Bridge was considered as the engineering background for specific research. First, the load spectrum of a random vehicle was simulated according to the Monte Carlo method. The vehicle model was transformed into the model of node dynamic load input cable-stayed bridge. The time history of wind speed was generated through the harmonic superposition method. The static wind force, buffeting force,

and aerodynamic auto-excited force due to wind load were applied to the model. The horizontal wind galloping effect of fan-shaped iced accretion cable was then considered using the principle of auto-excited vibration. Fluent software was used to simulate the lift coefficient in the ice accretion cable. The lift was applied to the cable at an angle of  $30^\circ$ . The time history of the cable when applied to the corresponding simulated point girders was observed. Finally, based on the cumulative damage theory for cable-stayed bridge in random vehicle load, the combined effect of random wind-vehicle load and iced accretion under the fatigue reliability of cable was analyzed to obtain the fatigue reliability index of the cable. The results show that the fatigue reliability index of the cable under the combined effects of wind load and vehicle load is less than that under single random vehicle load. The fatigue reliability index of the shortest cable decreased by approximately 21%. Iced accretion had minimal effect on the fatigue reliability index. Considering that the maximum force caused by the iced accretion is greater than the maximum force of the other two cases, the effect cannot be ignored. The effect of wind load on fatigue reliability is significant. The degree of influence increased from short to long cables. This method is mainly to load in the form of a node dynamic load applied to the bridge deck simulation point. Therefore, the proposed method can also be applied to the fatigue reliability analysis of other bridges. 11 figs, 25 refs.

**Key words:** bridge engineering; fatigue reliability; cumulative damage theory; iced accretion; combined effect of wind-vehicle load; auto-excited vibration

## 0 引言

随着斜拉桥跨径的增加,拉索逐渐变长,导致拉索出现柔度大、质量小、阻尼低等特点,斜拉桥在实际运营过程中拉索始终处于高应力状态,在风-车荷载联合作用下,长期承受变幅荷载作用;同时拉索覆冰会在风荷载的作用下,使拉索因气流作用而发生自激的纯弯曲大幅振动,拉索在振动下易产生疲劳破坏。大量研究表明,拉索是斜拉桥中最易破坏且寿命最低的构件<sup>[1]</sup>,因此,对拉索的疲劳可靠度研究至关重要。

各国学者对拉索的疲劳可靠度问题进行了大量研究。法国学者对诺曼底大桥拉索抗弯疲劳性能进行了研究,促使法国颁布了第一个关于斜拉索抗弯疲劳性能检验的标准规范<sup>[2]</sup>。Faber 等在研究平行钢丝拉索时,指出拉索寿命服从威布尔分布,并根据贝叶斯理论更新了平行钢丝的强度与疲劳寿命评估模型<sup>[3]</sup>。Cremona 等基于 Monte Carlo 法通过安全系数对拉索进行安全评估,建立了拉索可靠性评估的模型<sup>[4]</sup>。Zhang 等提出了一种先进的概率加载模型,该模型可根据不同时间间隔内的车辆流量变化和年流量变化速率来模拟桥上运行的车辆,得到关键位置的疲劳可靠度<sup>[5]</sup>。Alduse 等提出了另一种贝叶斯理论来确定疲劳损伤,并通过提供损伤值的

分布,全面分析了使用边界和超过概率的疲劳损伤<sup>[6]</sup>。李春祥等推导出疲劳可靠度计算公式,计算了不同风攻角下拉索的应力时程,得到了拉索的疲劳寿命<sup>[7-8]</sup>。目前,国内外对于斜拉索在车载作用下的疲劳可靠度研究比较多<sup>[9-12]</sup>。李岩等基于累积损伤理论分析了随机车载及风载联合作用下拉索的疲劳可靠度,并表明风荷载对拉索的疲劳可靠度影响很大<sup>[13]</sup>。根据中国电力系统覆冰情况统计,中国北方地区虽然天气寒冷,但由于空气湿度小,拉索覆冰不明显,长江以南地区由于湿度大,拉索容易遭受覆冰灾害的影响<sup>[14]</sup>。谭冬梅等指出覆冰会改变拉索截面形状,形成不稳定的气动外形,导致拉索发生自激振动<sup>[15]</sup>。

综上,现有研究大多数只考虑了斜拉桥在随机车载及风载作用下拉索的疲劳可靠度分析,或者仅分析覆冰对斜拉桥的危害,并未综合考虑风-车-覆冰联合作用时拉索的疲劳可靠度。因此,本文主要对斜拉索在随机风-车荷载及覆冰联合作用下的疲劳可靠度进行研究,采用累积损伤理论,用古德曼方程对构件的应力-疲劳(S-N)曲线进行修正,应用雨流计数法求得拉索的等效应力幅,最终得到拉索的疲劳可靠度指标。本文计算结果可以对拉索的疲劳可靠度及疲劳寿命进行预测,为拉索系统的维护与换索提供依据。

## 1 基本原理

### 1.1 随机车队生成流程

斜拉桥在实际运营期间,车辆通过桥面的过程是随机的,大量的统计研究表明,车型服从均匀分布,车总质量和轴重一般服从对数正态分布<sup>[16]</sup>。

车型  $X$  服从均匀分布,其期望为  $E_1(X) = (a+b)/2$ ,方差为  $D_1(X) = (b-a)^2/12$ 。其中  $a, b$  为随机变量  $X$  的取值范围。

车总质量和轴重服从对数正态分布,其期望为  $E(X) = e^{\mu + \sigma^2/2}$ ,方差为  $D(X) = e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)$ 。其中  $\mu, \sigma$  为对数正态分布的 2 个参数。

根据车辆概率模型和车辆荷载统计表;可以用 Monte Carlo 法组成随机车队<sup>[11]</sup>,具体流程如图 1 所示。

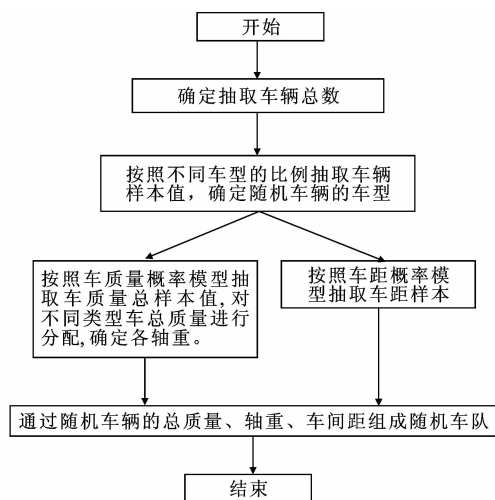


图1 仿真车队生成流程

Fig. 1 Simulation team formation process

### 1.2 斜拉桥脉动风场理论

桥梁的抖振主要是气流中的大气来流的脉动成分造成的,其虽然没有颤振破坏的危害大,但是由于抖振发生的频率比较高,致使斜拉索长期处于交变应力状态,容易引起拉索的疲劳损伤。对桥梁抖振时域的模拟,主要在于脉动风场的模拟,采用基于 Kaimal 谱的谐波叠加法得到桥梁各模拟点的风速时程<sup>[17]</sup>,采用静力三分系数计算出的静风力荷载<sup>[18]</sup>,再按照 Scanlan 提出的准定常气动公式计算抖振力时程<sup>[17]</sup>;将所得的风荷载施加到斜拉桥模型上,进行瞬态动力学求解。

谐波叠加法利用谱分解和三角级数叠加来模拟随机过程样本<sup>[19]</sup>,本文运用的基于谐波叠加法形成的桥梁风场模拟公式为

$$u_I(t) = \sum_{j=1}^I \sum_{K=1}^{N_C} |H_{Ij}(\omega_K)| \sqrt{2\Delta\omega} \cdot \cos[\omega_K t - \theta_{Ij}(\omega_K) + \varphi_{jK}] \quad (1)$$

式中:  $u_I(t)$  为第  $I$  个节点的水平脉动风速;  $t$  为时间;  $\theta_{Ij}(\omega_K)$  为  $H_{Ij}(\omega_K)$  的随机相位;  $\omega_K$  为双索引频率;  $\Delta\omega = \omega_{up}/N_C$  为频率增量,  $\omega_{up}$  为截断圆频率,  $N_C$  为频率采样点数;  $\varphi_{jK}$  为在区间  $[0, 2\pi]$  均匀分布的独立相位角;  $H_{Ij}(\omega_K)$  为 Kaimal 谱中脉动风场两点的互谱密度函数矩阵的分解矩阵,是下三角矩阵。

在运用统计方法描述脉动风的过程中,脉动风速的功率谱密度函数体现了某频率域上脉动风的能量大小,在各风速谱中,应用 Kaimal 谱能够较好地反映风谱密度随高度的变化。通过 MATLAB 程序编程模拟,采用谐波叠加法生成的风速时程如图 2 所示。

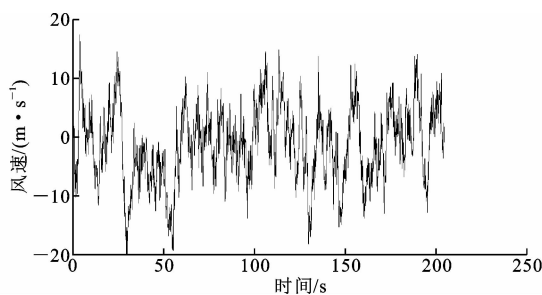


图2 主梁某模拟点纵向脉动风速样本

Fig. 2 Sampling of a simulated point's longitudinal fluctuation

### 1.3 覆冰拉索自激振动原理

拉索在冬季雨雪条件下表面结冰后,其截面形状由圆形变为非圆形,当拉索的截面气动力系数达到某一特定值时,覆冰拉索将发生低频、高幅的自激振动。从本质上讲,拉索的自激振动是在脉动风的作用下发生的驰振。拉索的自激振动会加剧拉索的疲劳损伤,从而导致拉索的疲劳破坏。根据覆冰导线的驰振研究,Den Hartog 首次提出了横风向驰振理论,即认为在风荷载作用下,模型会在横风向产生运动的位移变量,导致相对风攻角的变化,产生的气动负阻尼是引起驰振的主要因素<sup>[20]</sup>。

偏心覆冰斜拉索在风的作用下会产生升力,从而诱发自激振动。这种自激振动产生的条件是平均升力系数产生了负斜率,产生气动负阻尼,拉索不断从外界吸收能量,产生大幅振动<sup>[21]</sup>。拉索模型的升力和阻力如下所示

$$\begin{cases} F_L = C_L \rho U^2 L B / 2 \\ F_D = C_D \rho U^2 L B / 2 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $F_L$  为斜拉索模型的升力, 沿来流速度方向逆时针旋转  $90^\circ$  为升力的正方向;  $F_D$  为斜拉索模型的阻力, 沿来流方向为正;  $C_L$ 、 $C_D$  分别为升力系数和阻力系数;  $\rho$  为空气密度, 取  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $U$  为前方均匀来流风速;  $B$  为斜拉索模型截面特征长度;  $L$  为斜拉索模型长度。

#### 1.4 拉索疲劳可靠度基本原理

描述材料  $S-N$  曲线的最常用形式是幂函数式, 即

$$S^m N = C \quad (3)$$

式中:  $m$ 、 $C$  均为与材料、应力比及加载方式有关的参数<sup>[17]</sup>;  $N$  为材料的疲劳寿命;  $S$  为循环应力的应力幅。

##### 1.4.1 基于疲劳破坏的累积损伤模型

对于一般承受恒幅荷载的构件, 可以采用  $S-N$  曲线来估计疲劳寿命, 但是对承受变幅荷载的斜拉索, 无法直接用  $S-N$  曲线估算疲劳寿命。因此, 在考虑拉索的疲劳损伤时, 常见的方法是 Miner 线性累积损伤理论。

线性累积损伤理论认为构件的破坏是一个损伤累积的过程, 构件的损伤随着循环次数的增加而增大, 直至破坏。构件在应力水平  $S_i$  的作用下, 经过  $n_i$  次循环的损伤  $D_i = n_i / N_i$ 。则在  $k'$  个应力水平  $S_i$  作用下, 各经受  $n_i$  次循环的总损伤  $D$  为

$$D = \sum_{i=1}^{k'} D_i = \sum_{i=1}^{k'} n_i / N_i \quad i = 1, 2, \dots, k' \quad (4)$$

破坏准则为

$$D = \sum_{i=1}^{k'} n_i / N_i = 1 \quad (5)$$

式中:  $n_i$  为在  $S_i$  作用下的循环次数, 由载荷谱给出;  $N_i$  为在  $S_i$  作用下循环到破坏的寿命, 由  $S-N$  曲线确定。

##### 1.4.2 疲劳可靠度分析

斜拉索在运营期间处于高应力状态, 拉应力均值会使疲劳寿命降低, 古德曼 (Goodman) 方程可以很好地反映平均拉应力对拉索疲劳寿命的影响, 故需要对构件的  $S-N$  曲线进行修正<sup>[13]</sup>, 即将式 (3) 修正为

$$S_{eq}^m N = C \quad (6)$$

式中:  $S_{eq}$  为等效应力幅,  $S_{eq}^m = (K_e S)^m$ , 系数  $K_e = 1 / (1 - S_m / S_b)$ ,  $S_m$  为时程应力均值,  $S_b$  为材料极限强度值<sup>[17]</sup>。

斜拉索作为斜拉桥的主要受力构件, 容易在风、车等随机荷载作用下发生疲劳破坏, 因此在考虑拉

索的疲劳寿命时需要用一个随机变量来表示。在实际可靠性分析中, 常用的疲劳寿命分布为威布尔 (Weibull) 分布<sup>[22]</sup>, 其概率密度函数  $f(N)$  为

$$f(N) = \frac{k}{c} \left( \frac{N}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{N}{c}\right)^k} \quad (7)$$

式中:  $k$ 、 $c$  分别为形状因子、特征寿命, 均可由经验值来表示。

由威布尔概率密度函数可求得其均值  $\mu_N$ , 标准差  $\sigma_N$  及变异系数  $V_N$ 。其中:  $\mu_N = c\Gamma(1 + 1/k)$ , 伽玛函数  $\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{(x-1)} dt$ ;  $V_N$  的均值取  $0.53$ <sup>[23]</sup>, 则形状因子和变异系数的表达式为  $k = V_N^{-1.08}$ 。

将上述参数代入式 (7) 得可靠度函数  $p(N)$  为

$$p(N) = 1 - F(N) = e^{-\left(\frac{N}{c}\right)^k} \quad (8)$$

式中:  $F(N)$  为威布尔分布的概率分布函数, 工程上一般取  $N = 2 \times 10^6$ , 即循环次数不超过 200 万时, 不会发生疲劳破坏。

对于式 (8), 当威布尔变量  $N_p$  大于某一数值  $N_q$  的概率时, 可得到构件的存活概率  $p_a(\cdot)$  为

$$p_a(N_p > N_q) = \int_{N_q}^{+\infty} f(N_p) dN_p = e^{-\left(\frac{N_q}{c}\right)^k} \quad (9)$$

化简可得

$$\ln c = -\frac{1}{k} \ln \left( \ln \frac{1}{p} \right) + \ln N_q \quad (10)$$

式中:  $p$  为可靠度。

工程中一般用  $S-N$  曲线中可靠度为 50% 时来考虑构件的安全储备, 即可靠度  $p = 0.5$ , 则有

$$\ln c = -\frac{\ln(\ln 2)}{k} + \ln N_q \quad (11)$$

当采用古德曼方程对构件的  $S-N$  曲线进行修正时, 就可得到给定应力幅  $S$  作用下的拉索的疲劳可靠度  $P(N)$  公式为

$$P(N) = e^{-\left(\frac{N}{c K^{-m} S^{-m} e^{-\ln(\ln 2)/k}}\right)^k} \quad (12)$$

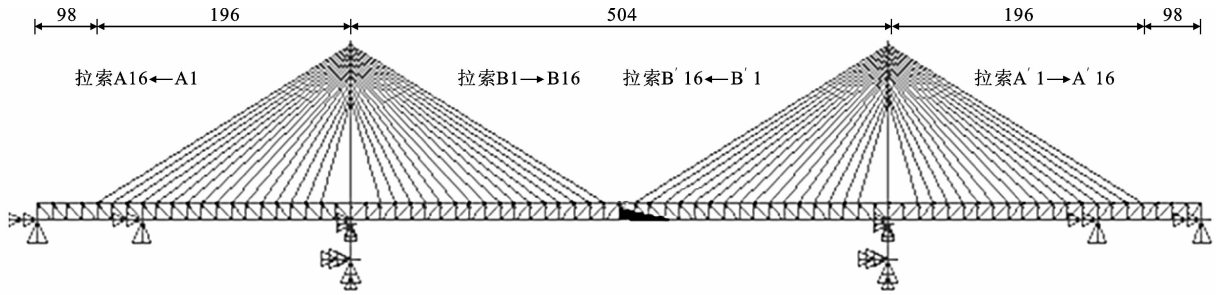
## 2 数值算例

本文以武汉天兴州斜拉桥为工程背景, 采用有限元软件 ANSYS 建立斜拉桥有限元模型, 分别对斜拉桥在车载、风-车载及风-车-覆冰联合作用下的疲劳可靠度进行研究。

该桥采用双塔三索面三主桁结构形式, 主桥跨度为 1 092 m, 主梁为板桁结合钢桁架, 主塔采用混凝土结构, 承台以上高 188.5 m 主跨两侧各有  $3 \times 16$  根镀锌平行钢丝斜拉索, 全桥共 192 根斜拉索。模型中主梁及梁塔组合部分采用 Beam4 单元, 三梁式结构形式, 索单元采用 Link10 单元, 板单元采用

Shell63 进行模拟。经计算,该模型一阶振型为主梁纵漂,频率为 0.087 Hz,二阶振型为主梁对称侧弯,

频率为 0.224 Hz。桥梁模型及拉索编号如图 3 所示。



单位: m

图 3 桥梁模型及拉索编号

Fig. 3 Bridge model and cable number

## 2.1 随机车流荷载的模拟

由于没有该桥的具体交通调查结果,故采用 2006 年九江长江大桥的交通统计量<sup>[24]</sup>,将年平均日交通量作为模拟样本容量;采用 Monte Carlo 法进行随机车辆荷载模拟,按总质量服从均匀分布、车间距  $X$  服从对数正态分布,取车间距对数的均值和标准差分别为  $\mu_{\ln X} = 4.83$ ,  $\sigma_{\ln X} = 1.12$ <sup>[11]</sup>。根据不同类型车辆所占的比例及车质量和车间距的概率模型,按随机车队生成流程图,利用 MATLAB 统计工具箱抽取 1 列由 100 辆车组成的随机车队。图 4 为模拟的随机车辆荷载谱。

置了 57 个风荷载模拟点,在主梁上每隔 28 m 设置 1 个模拟点,共 40 个;主塔沿竖向布置了 17 个模拟点。取设计基本风速为  $V_{10} = 29.9$  m/s,地面粗糙度  $Z = 0.05$ ,计算出主梁设计基准风速为  $V_d = 37.3$  m/s;截止圆频率  $\omega_{up} = 2\pi$  rad/s,  $N = 1\,024$ ,  $\Delta t = 0.1$  s。

风荷载的抖振响应分析一般包括三部分:①平均风速引起的静风荷载;②脉动风引起的抖振力;③自身结构振动引起的自激力。

### 2.2.1 静风力的施加

静风力的求解方法一般采用静力三分力系数方法,即均匀风在桥梁结构中的静力行为。为了计算静风力,需通过试验获得当地桥梁的抗风性能参数。对于主梁来说,为了使静风力和抖振力互相影响较小,静力三分力系数一般采用  $0^\circ$  风攻角的三分力系数,即阻力系数  $C_H$  取 0.894(0.913)、升力系数  $C_V$  取 0.350(0.371)、力矩系数  $C_M$  取 0.084(0.089),括号内为下游来风。按静力等效原则将单元长度乘以静风单位荷载得到静风力,施加到单元节点上。

### 2.2.2 抖振力的施加

对于主梁抖振力,在有限元模型计算时需乘以划分的单元长度,气动导纳函数偏安全取 1.0,按静力等效原则将抖振力时程施加在单元节点上。

对于主塔,通常只考虑抖振阻力,取桥塔中间段截面的尺寸计算投影面积来计算阻力,主塔横桥向静风阻力系数为 1.82,顺桥向静风阻力系数为 1.48。

### 2.2.3 气动自激力的施加

桥面单位长度受到的气动力为分布力,将其转化为作用在 2 个节点的集中力。根据公式计算桥梁的气动刚度矩阵  $K$  和阻尼矩阵  $C$ ,然后通过 ANSYS 有限元软件在模型单元节点上添加 2 个带有

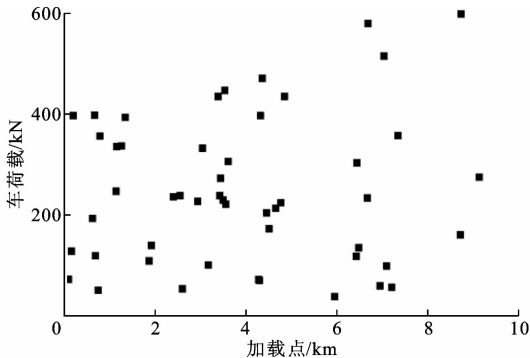


图 4 随机车辆荷载谱

Fig. 4 Traffic spectra of random vehicles

假设车队过桥的速度为 80 km/h,采用 MATLAB 编程将随机车队模型转化为节点动力荷载输入 ANSYS 整桥模型进行瞬态分析,即可得到拉索的应力时程曲线<sup>[9]</sup>。根据大桥双向交通流特征统计结果,近似认为其双向交通量大致相同,同时考虑到对分析结果影响较大的重车作用位置基本为右侧车道,因此在计算拉索疲劳可靠度时,还考虑了多车道系数 1.44 和冲击系数 1.15。

## 2.2 斜拉桥脉动风场的模拟

在 MATLAB 模拟该桥随机风场的过程中,设

刚度矩阵和阻尼矩阵的 MATRIX27 单元<sup>[25]</sup>,输入相应的参数值,从而得到用于抖振时程分析的有限元模型。考虑自激力的 MATRIX27 单元模型如图 5 所示。

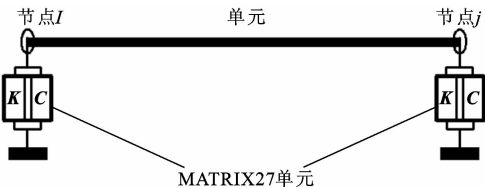


图 5 考虑自激力的 MATRIX27 单元

Fig. 5 Consider self-excited force MATRIX27 element

2.3 拉索覆冰的模拟

本文考虑的覆冰情况为扇形,假定扇形索覆冰厚 40 mm,拉索在覆冰状态下会产生升力,故在计算时只考虑升力的作用,扇形覆冰拉索模型如图 6 所示。

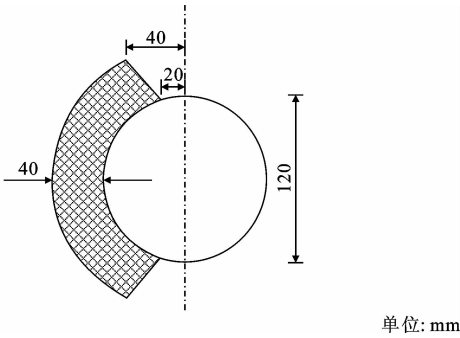
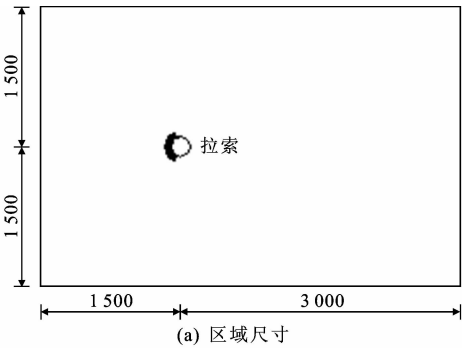


图 6 扇形覆冰拉索模型示意

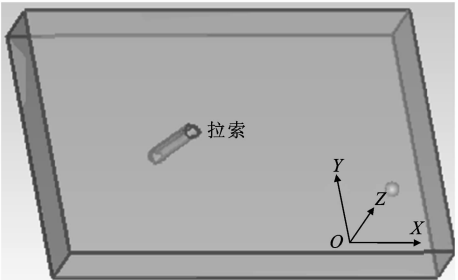
Fig. 6 Sketch of fan-shaped stay cables with iced accretion model

通过 Fluent 软件模拟拉索在覆冰状态下的升力系数<sup>[15]</sup>。本文选取拉索周围的流体流动区域为长方体区域,长度、宽度分别为 4.5、3 m,高度为拉索展向长度 0.6 m,拉索位于坐标原点,距上游流体入口 1.5 m,距下游流体出口 3.0 m,距左右流域壁面均为 1.5 m。图 7 为拉索二维平面流域图及三维模型,图 7 中,X 轴正方向为来流速度正方向,也即阻力正方向,Y 轴正方向为升力正方向,Z 轴为拉索的长度方向。

采用 Fluent 软件模拟拉索在覆冰状态下的升力系数<sup>[15]</sup>,通过模拟 0°~180°风攻角进行分析,每隔 5°风攻角建立一个覆冰模型并进行网格划分,进行数值模拟。设置风速风向,得到每个计算风攻角下的阻力与升力时程曲线,发现在 30°风攻角作用下的升力系数最大。故考虑 30°风攻角,风速取 34.2 m/s, $\rho$ 取值 1.225 kg/m<sup>3</sup>, $\Delta t=0.1$  s,输入各参数,计算升力  $F_L$ 。



(a) 区域尺寸



(b) 区域坐标

单位: mm

图 7 计算区域尺寸及坐标

Fig. 7 Calculate area's dimensions and coordinates

在有限元软件中,升力以节点集中力的形式加载到拉索单元上,垂直于斜拉索单元,图 8 为某拉索单元受力示意。将拉索计算出的时程力施加到对应的主梁模拟点,即可得到整桥模型中拉索的应力时程曲线。

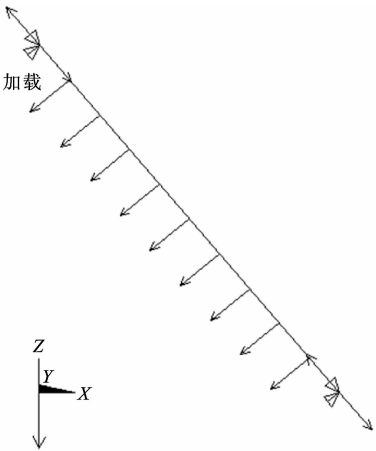


图 8 某拉索有限元模型

Fig. 8 Finite element model of a cable

2.4 拉索的疲劳可靠度分析

2.4.1 拉索应力谱计算分析

采用自编的斜拉桥风-车-覆冰动力响应分析程序,分别对桥梁模型进行随机车流下、风-车荷载作用下、风-车-覆冰共同作用下的瞬态动力学分析,得到不同工况下斜拉桥拉索的应力时程曲线,作为

疲劳可靠度分析依据。图 9 为随机车荷载作用下 A1(最短索)、A8(中间索)、A16(最长索)的拉索索

力时程。从图 9 可看出,随着拉索长度的增加,当索力趋于平稳时,A1 到 A16 的索力逐渐增大。

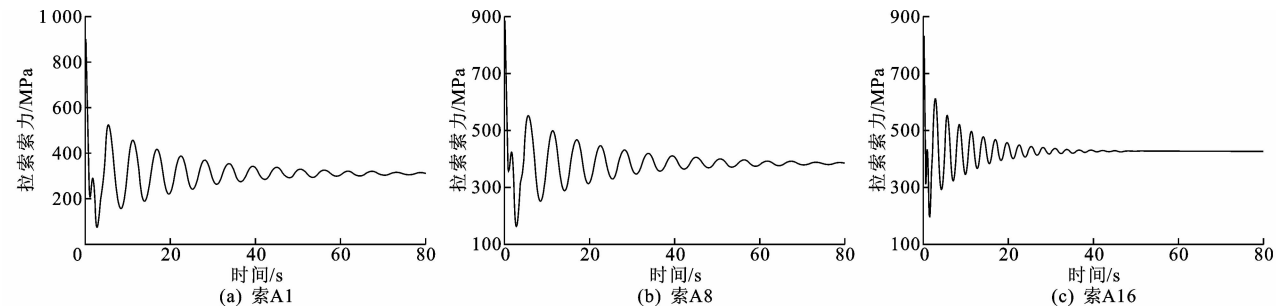


图 9 随机车荷载作用下的拉索应力时程

Fig. 9 Stress time history of random vehicle load

以最长索 A16 为例,可以得到拉索在不同工况下的应力时程,如图 10 所示。由图 10 可知,当索力趋于平稳时,单一随机车荷载作用下得到的索力明显小于风-车荷载联合作用下及风-车-覆冰联合作用下,而风-车-覆冰联合作用下,拉索索力平稳时增幅不明显,但其引起的最大索力要略大于风-车荷载联合作用下拉索索力。

分别对单一随机车荷载、风-车荷载、风-车-覆冰联合作用下的斜拉索进行了疲劳可靠度研究。计算过程中考虑结构的几何非线性和阻尼影响,得到边跨 16 根拉索在不同荷载条件下的应力时程曲线。采用雨流计数法统计拉索的 S 和 N,按照式(12)计算可得拉索的疲劳可靠度及疲劳可靠度指标,如图 11 所示。

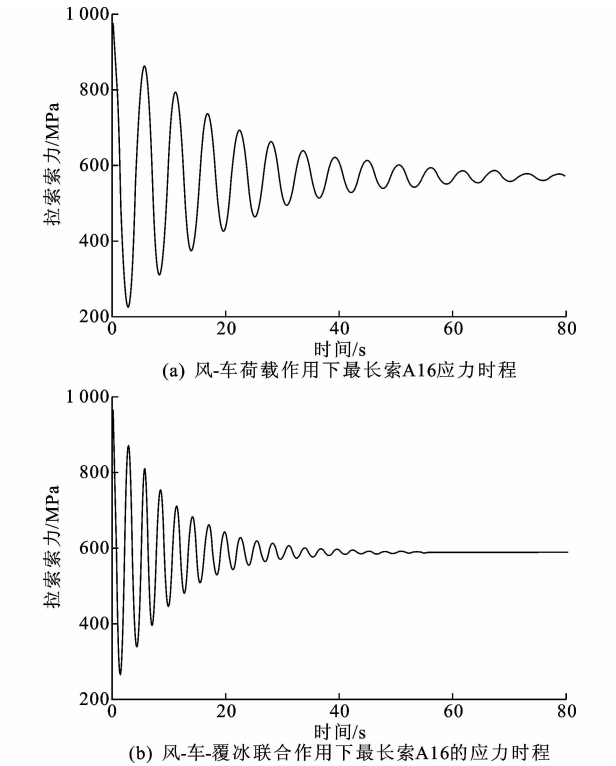


图 10 不同工况下拉索的应力时程

Fig. 10 Stress time history of different working conditions

2.4.2 拉索的疲劳可靠度指标

参照钢构件疲劳极限状态有关规定,按照安全等级为一级取拉索的疲劳可靠度指标  $\beta=3.5$ ,即当拉索的疲劳可靠度指标大于 3.5 时,认为拉索不会发生疲劳破坏。

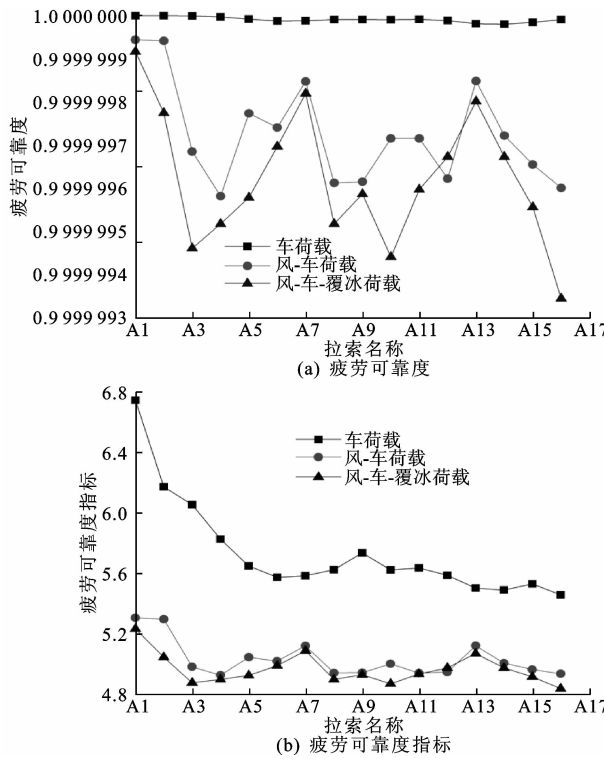


图 11 斜拉索的疲劳可靠度及可靠度指标

Fig. 11 Stay cables' fatigue reliabilities and reliability indexes

从图 11 可看出:单一随机车荷载作用下最短索 A1 的疲劳可靠度指标最高,为 6.75,最长索 A16 为 5.46;而考虑了风荷载抖振的风-车荷载联合作用下的疲劳可靠度指标降低幅度比较大,最短索 A1 的疲劳可靠度指标为 5.31,相比于单一随机车荷载的

可靠度指标降低了约 21%, 目标可靠度指标降低了约 41.2%; 在考虑覆冰驰振的风-车-覆冰联合作用下, 最短索 A1 相比于未考虑覆冰作用的疲劳可靠度指标略有降低, 但降低幅度不大, 说明只考虑覆冰状态下引起的升力作用对拉索的疲劳可靠度影响不大; 从最短索 A1 到最长索 A16, 拉索的疲劳可靠度整体趋势是逐渐增大的, 拉索的疲劳可靠度指标整体趋势是逐渐减小的, 说明大部分短索的疲劳可靠度指标要高于长索, 即长索更容易发生疲劳破坏。

### 3 结 语

(1) 基于累积损伤模型建立拉索的疲劳可靠度分析, 给出了疲劳可靠度的求解方法, 并成功应用于武汉天兴洲斜拉桥的有限元模拟, 该方法可应用于其他斜拉桥, 其分析结果具有一般性。

(2) 应用横向驰振理论模拟拉索在覆冰作用下的自激振动作用, 同时考虑风-车荷载联合作用, 得到拉索的疲劳可靠度指标。

(3) 不同工况下拉索的应力时程表明: 单一随机车荷载作用下拉索索力比较小, 考虑风荷载后拉索索力明显增大, 覆冰对拉索稳定时索力值影响不大, 但拉索最大索力明显提高, 可能使拉索发生疲劳破坏; 而且随着拉索长度的增加, 拉索索力逐渐增大。

(4) 拉索的疲劳可靠度及其指标的分布规律表明, 考虑风-车联合作用下的疲劳可靠度指标要比单一车荷载降低约 21%, 拉索覆冰会降低拉索的疲劳可靠度, 虽然影响不大, 但考虑到串列双索之间会发生尾流驰振等因素, 覆冰对拉索疲劳可靠度的影响不可忽略; 长索的疲劳可靠度要小于短索, 但均大于目标可靠度指标, 拉索不会发生疲劳破坏。

(5) 本文只是从有限元模拟的角度进行分析, 没有进行相关试验验证。鉴于拉索长期承受风及车荷载等交变载荷并长期暴露于自然环境, 极易发生腐蚀破坏, 下一步将对斜拉索在风-车荷载及覆冰联合作用下的腐蚀疲劳进行研究, 建立拉索钢丝裂纹扩展模型, 并结合拉索钢丝的腐蚀疲劳试验, 得到拉索钢丝的腐蚀疲劳寿命。

#### 参考文献:

#### References:

[1] 尚 鑫, 徐 岳. 基于灰色理论的斜拉桥拉索安全性评价[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(1): 52-55.

SHANG Xin, XU Yue. Safety-based cable's condition evaluation of cable stayed bridge with grey theory[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 52-55.

[2] SETRA. Cable stays recommendations of French interministerial commission on prestressing[S].

[3] FABER M H, ENGELUND S, RACKWITZ R. Aspects of parallel wire cable reliability[J]. Structural Safety, 2003, 25(2): 201-225.

[4] CREMONA C. Probabilistic approach for cable residual strength assessment[J]. Engineering Structures, 2003, 25(3): 377-384.

[5] ZHANG J, AU F T K. Fatigue reliability assessment considering traffic flow variation based on weigh-in-motion data[J]. Advances in Structural Engineering, 2017, 20(1): 125-138.

[6] ALDUSE B P, JUNG S, VANLI O A, et al. Effect of uncertainties in wind speed and direction on the fatigue damage of long-span bridges [J]. Engineering Structures, 2015, 100: 468-478.

[7] 李春祥, 李薇薇. 斜拉索风致振动疲劳的分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(9): 135-138.

LI Chun-xiang, LI Wei-wei. Analysis of wind-induced fatigue of inclined cable[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(9): 135-138.

[8] 李春祥, 李薇薇. 斜拉索风致动力疲劳损伤的研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(11): 61-66.

LI Chun-xiang, LI Wei-wei. Analysis of wind-induced fatigue damage of inclined cable[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(11): 61-66.

[9] 谭冬梅, 陈 杰, 瞿伟廉. 用于大跨斜拉桥拉索疲劳可靠度分析荷载的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(6): 54-59.

TAN Dong-mei, CHEN Jie, QU Wei-lian. Study on load for fatigue reliability analysis of cables of large-span cable-stayed bridge[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(6): 54-59.

[10] 王贵春, 李武生. 斜拉桥在多车辆作用下的动力响应分析[J]. 桥梁建设, 2014, 44(6): 81-87.

WANG Gui-chun, LI Wu-sheng. Analysis of dynamic responses of cable-stayed bridge under action of multiple vehicles[J]. Bridge Construction, 2014, 44(6): 81-87.

[11] 杨晓艳, 贡金鑫, 张启伟. 随机车辆荷载作用下斜拉索索力的概率模型及可靠度分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(2): 90-98.

YANG Xiao-yan, GONG Jin-xin, ZHANG Qi-wei. Analysis of probabilistic model of stay cable stress re-



- liability under random vehicle loads[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(2): 90-98.
- [12] 殷志祥,高哲,冯瑶. 车辆荷载作用下斜拉索疲劳可靠度分析[J]. 工业建筑, 2017, 47(6): 163-167.  
YIN Zhi-xiang, GAO Zhe, FENG Yao. Fatigue reliability analysis of cable of cable-stayed bridge under vehicle loads[J]. Industrial Construction, 2017, 47(6): 163-167.
- [13] 李岩,吕大刚,盛洪飞. 考虑随机车载-风载联合作用下部分斜拉索疲劳可靠度研究[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 60-66.  
LI Yan, LU Da-gang, SHENG Hong-fei. Fatigue reliability analysis on cable of cable-stayed bridge under random vehicle load and wind load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(2): 60-66.
- [14] 甘凤林,马涛,黄金花. 导线覆冰对架空输电线路结构的影响[J]. 华北电力技术, 2008, 24(8): 84-86.  
GAN Feng-lin, MA Tao, HUANG Jin-hua. Influence of conductor ice coating on transmission line structure[J]. North China Elector IC Power, 2008, 24(8): 84-86.
- [15] 谭冬梅,王凯丽. 三维覆冰斜拉索风致振动驰振分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(7): 157-160.  
TAN Dong-mei, WANG Kai-li. Galloping analysis of wind-induced vibration for 3D stay cables with iced accretion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(7): 157-160.
- [16] 李杨海,鲍卫刚,郭修云,等. 公路桥梁结构可靠度与概率极限状态设计[M]. 北京:人民交通出版社, 1997.  
LI Yang-hai, BAO Wei-gang, GUO Xiu-yun, et al. The design of highway bridge structure reliability and the probability limit state[M]. Beijing: China Communications Press, 1997.
- [17] BERGMEISTER K, SANTA U. Global monitoring concepts for bridges[J]. Structural Concrete, 2001, 2(1): 29-39.
- [18] 项海帆. 现代桥梁抗风理论与实践[M]. 北京:人民交通出版社, 2005.  
XIANG Hai-fan. Modern theory and practice on bridge wind resistance[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [19] 曹素功. 风和列车荷载作用下大跨桥梁动力分析[D]. 湘潭:湘潭大学, 2014.  
CAO Su-gong. Dynamic analysis of long-span bridge subjected to wind and train[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014.
- [20] DEN HARTOG J P. Transmission line vibration due to sleet[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1932, 51: 1074-1077.
- [21] 腾二甫,段忠东,张秀华. 新月形覆冰导线气动力特性的数值模拟[J]. 低温建筑技术, 2008(1): 86-88.  
TENG Er-fu, DUAN Zhong-dong, ZHANG Xiu-hua. Numerical simulations of aerodynamic characteristics of iced conduct or with crescent shape[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2008(1): 86-88.
- [22] 曾超. 刚桥构件按疲劳寿命服从威布尔分布的可靠度计算[J]. 西南交通大学学报, 1993, 28(5): 20-23.  
ZENG Chao. The reliability of fatigue life for steel bridge components by Weibull distribution[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1993, 28(5): 20-23.
- [23] IEC. Maritime navigation and radio communication equipment and systems-shipborne radar — Performance requirements, methods of testing and required test results[R]. Geneva: IEC, 2007.
- [24] 程高,刘永健,张俊光,等. 基于 Monte Carlo 法的多车道公路桥梁车流模拟[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2011, 30(6): 1375-1378.  
CHENG Gao, LIU Yong-jian, ZHANG Jun-guang, et al. Traffic flow simulation of multi-lane highway bridge based on Monte Carlo method[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2011, 30(6): 1375-1378.
- [25] 张茜,周绪红,狄谨,等. 大跨度钢箱梁斜拉桥施工过程风致抖振时域分析及抗风措施[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2013, 33(1): 45-66.  
ZHANG Qian, ZHOU Xu-hong, DI Jin. Time-domain analysis of wind-induced buffet and wind-resistant measures for cable-stayed bridge with steel box girder at construction on stage[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(1): 45-66.