

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.03.006

## 悬索桥主缆索寿命期内可靠度指标确定方法\*

易富<sup>1</sup>, 孙悦<sup>2</sup>, 杜常博<sup>2</sup>, 李军<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学建筑与交通学院, 辽宁阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁阜新 123000)

**摘要:**以某工程为背景,应用Midas civil并基于主缆面积、弹性模量和极限强度的时变模型对主缆进行腐蚀模拟,其后,在车辆疲劳荷载作用下得到疲劳应力幅,并对Manson-Coffin公式进行修正得到主缆在寿命期内的S-N曲线,由此估算出主缆关键位置在寿命期内的疲劳寿命,利用Matlab编制主缆关键位置在寿命期内的失效概率和可靠度指标计算程序。研究表明:除锚固和索塔位置外,主缆其它位置应力均呈对称分布;在寿命期为100年时,索塔位置疲劳应力幅变化量最大,锚固位置疲劳寿命最低且可靠度指标退化最快;主缆可靠度指标与使用年限、当地环境、主缆长度以及基准长度存在一定关系,最终给出了悬索桥主缆索在腐蚀条件下的可靠度指标计算公式。

**关键词:**悬索桥;主缆腐蚀;S-N曲线;疲劳寿命;可靠度指标

**中图分类号:**U448.25 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2132(2020)03-0358-07

## Determination Method of Reliability Index of Main Cable Life of Suspension Bridge

YI Fu<sup>1</sup>, SUN Yue<sup>2</sup>, DU Changbo<sup>2</sup>, LI Jun<sup>2</sup>

(1. School of Architecture and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** In order to determine the calculation method of reliability index of the main cable of a suspension bridge under corrosion condition, the corrosion simulation of main cable is carried out by using Midas civil and time-varying model of main cable cross-sectional area, modulus of elasticity and ultimate strength based on the background of a certain project. The fatigue stress amplitude is obtained under the fatigue load of vehicle, and the S-N curve of the main cable during the life cycle is obtained by modifying Manson-Coffin formula, and the fatigue life of the key position of the main cable during the life cycle is estimated. The calculation program of failure probability and reliability index of key position of main cable during life cycle is compiled by MatLab. The research results shows that except for anchoring and cable tower position, the stresses in other positions of the main cable are symmetrically distributed, and when the life period is 100 years, the variation of fatigue stress amplitude in the cable tower position is the largest, the fatigue life of the anchor position is the lowest and the reliability index is the fastest. The reliability index of main cable is related to service life, local environment, main cable length and reference length. The calculation formula of reliability index of the main cable of suspension bridge under corrosion condition is put forward. The research results provide certain reference for practical engineering.

**Keywords:** suspension bridge; main cable corrosion; S-N curve; fatigue life; reliability index

\* 收稿日期:2018-06-24;修回日期:2018-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51774163)资助

作者简介:易富(1978-),男,教授,博导。主要从事环境岩土工程及道路工程方向的研究。Email:yifu9716@163.com

通讯作者:孙悦(1994-),女,硕士。主要从事桥梁工程方向的研究。Email:1214940705@qq.com

# 引言

悬索桥的主缆索是主要的传力、受力构件,主缆病害是悬索桥的主要病害,主缆损伤直接影响桥梁的使用年限和安全。国外通过对福斯公路大桥、塞文桥和威廉斯堡桥等的主缆检测发现,主缆钢丝内部腐蚀较为严重<sup>[1-3]</sup>。随着使用年限的增加,在超过疲劳强度后,逐渐累积的疲劳损伤会导致主体结构突然发生断裂,甚至会造成桥梁结构垮塌。

随着时代的发展,桥梁结构设计的主流方法是以可靠度为理论基础的概率极限方法<sup>[4]</sup>。W. Zhang等<sup>[5]</sup>利用有限元数值模拟方法(FEM)对考虑车辆和风耦合作用下的大跨斜拉桥正交异性钢桥面板的疲劳可靠度进行了研究;T. Guo等<sup>[6]</sup>根据长期健康监测的状态评估方法(SHM)进行车辆数据采集,对钢箱梁细节疲劳进行了研究,上述研究结果表明:FEM和SHM两种方法得到的疲劳可靠度相同,为基于FEM进行疲劳可靠度的评估奠定了基础。陈志为等<sup>[7]</sup>通过对连续损伤模型简化提出一种大跨桥梁疲劳可靠度评估方法;刘建等<sup>[8]</sup>采用疲劳可靠度理论对自锚式悬索桥钢箱梁细节在随机荷载作用下的疲劳可靠度进行了研究;陈小雨等<sup>[9]</sup>通过试验确定了悬索桥主缆镀锌钢丝的剩余抗力和腐蚀外观之间的对应关系;刘扬等<sup>[10]</sup>基于实测车流数据对悬索桥钢箱梁细节疲劳可靠度进行分析,基于S-

N曲线和Miner准则建立了考虑交通量参数的悬索桥钢箱梁细节疲劳可靠度模型,并分析车辆运行状态和交通量增长对悬索桥钢箱梁细节疲劳可靠度的影响;李慧乐等<sup>[11]</sup>确定了桥梁构件等效疲劳应力幅及循环次数的概率模型,基于S-N曲线对其进行疲劳可靠度评估,提出一种基于车桥耦合随机振动系统的钢桥疲劳可靠度评估方法;国内众多研究者对悬索桥可靠度<sup>[12-16]</sup>的研究成果丰富了可靠度理论,但对悬索桥主缆索某个位置在腐蚀情况下的可靠度指标研究及其算法涉及较少。

本文在前人研究的基础上以某工程为依托,利用Midas civil对主缆进行有限元计算,结合Matlab编制主缆关键位置Weibull分布函数计算程序,对主缆可靠度指标进行研究,进一步得到悬索桥主缆各个位置可靠度指标计算公式。

## 1 主缆抗力退化模型

### 1.1 工程背景

本文以某主跨为1 418 m,边跨为20.726 m+166 m+402 m,垂跨比为1:9.003,两根主缆中心距为34 m,桥面宽度为33 m,桥面最大纵坡<3%,桥面横坡为2%,双向6车道,当地实际pH值为5.01,年平均温度为16℃,年平均相对湿度为68%的工程为依托,全桥纵向立面如图1所示。

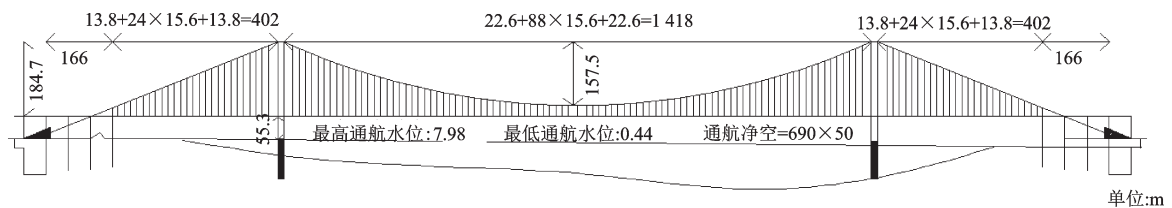


图1 全桥纵向立面

Fig. 1 Longitudinal elevation view of the whole bridge

### 1.2 主缆钢丝腐蚀电流密度 $i_{corr}$

该桥由pH值差异所造成的修正系数 $\gamma_1 = -0.025$ ,腐蚀电流密度 $i_{corr1} = 1.084 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,由相对温度和湿度所造成的修正系数 $\gamma_2 = -1.552$ ,腐蚀电流密度 $i_{corr2} = 12.048 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。则腐蚀电流密度 $i_{corr} = i_{corr1} + i_{corr2} = 13.132 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

### 1.3 主缆面积时变模型

腐蚀电流密度 $i_{corr} = 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,相当于钢丝横

截面半径每年11.6 mm的损失<sup>[17]</sup>,故均匀腐蚀深度与腐蚀电流密度和使用年限的关系为:

$$P_{av} = 0.0116i_{corr}t \quad (1)$$

式中, $P_{av}$ 为均匀腐蚀深度,mm; $i_{corr}$ 为腐蚀电流密度, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ;  $t$ 为使用年限, $y_r$ 。

由于腐蚀的不确定性,本文将均匀腐蚀和点蚀结合起来,得到剩余截面积与腐蚀电流密度 $i_{corr}$ 的关系为:

$$A = 0.5 \left[ \theta_1 \left( \frac{D_0}{2} \right)^2 - b \left| \frac{D_0}{2} - \frac{P_{av}^2}{D_0} \right| + \theta_2 P_{av}^2 - b \frac{P_{av}^2}{D_0} \right] \quad (2)$$

式中,  $D_0$  为初始截面直径, mm;  $R$  为点蚀系数<sup>[18]</sup>,  $R = P/P_{av1}$ ,  $P_{av1} = 0.0116i_{corr}Rt$ ,  $R$  服从极值 I 型分布;  $\theta_1 = 2\arcsin(b/D_0)$ ;  $\theta_2 = 2\arcsin(b/2P_{av})$ ;  $b = 2P_{av} \times \sqrt{1 - (P_{av}/D_0)^2}$ 。

该桥主缆初始直径为 0.78 m, 初始截面积为 0.477 6 m<sup>2</sup>, 根据式(2)可得到主缆在寿命期内的面积时变模型。

#### 1.4 主缆弹性模量和极限强度时变模型

乔燕等<sup>[18]</sup>通过对腐蚀钢丝做静力拉伸试验得到腐蚀钢丝的力学参数统计, 分别对腐蚀钢丝的名义弹性模量、名义极限强度、名义屈服强度和名义延伸率的分布做了显著性分析, 得到腐蚀钢丝的力学性能符合对数正态分布和正态分布, 且对数正态分布较显著。本文在其基础上, 拟合得到弹性模量与腐蚀深度的折减关系式, 极限强度与腐蚀深度的折减关系式, 变异系数均取 0.1。

$$E = E_0 P_{av}^{-0.03005} \quad (3)$$

式中,  $E_0$  为主缆钢丝初始弹性模量, 取为  $2.05 \times 10^5$  MPa, 根据式(3)可得到主缆在寿命期内的弹性模量时变模型。

$$f_y = f_{y0} P_{av}^{-0.00498} \quad (4)$$

式中,  $f_{y0}$  为主缆钢丝初始极限强度, 取为 1 670 MPa, 根据式(4)可得到主缆在寿命期内的极限强度时变模型。

#### 1.5 建立有限元模型

利用 Midas civil 建立全桥有限元模型, 桥塔位置类型为用户定义, 其它位置类型为数据库。塔柱为变截面, 只列出桥塔、塔座和承台这三个关键位置的建模参数, 初始建模参数见表 1, 全桥有限元计算模型如图 2 所示。

由于本文主要模拟主缆在腐蚀条件下的可靠度指标变化情况, 故只考虑主缆时变模型。在有限

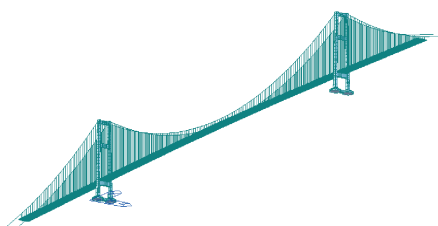


图 2 有限元计算模型

Fig. 2 Finite element calculation model diagram

表 1 有限元建模参数

Table 1 Parameters table of finite element modeling

项目	弹性模量/MPa	容重/(kN·m <sup>-3</sup> )	面积/m <sup>2</sup>
主缆	2.05E+5	78.5	0.477 6
吊杆	2.05E+5	78.5	2.605 8E-3
加劲梁	2.06E+5	76.98	1.795 9
桥塔	3.45E+4	25.51	39.205 7
塔座	3.25E+4	25	1 145.557 5
承台	3E+4	25	84

元建模时根据式(2)输入不同的面积、根据式(3)输入不同的弹性模量、根据式(4)输入不同的极限强度, 发现在荷载工况为恒载+降温荷载+风荷载+移动荷载时, 主缆应力变化量较大, 主缆关键位置应力值见表 2。由表 2 可知: 在寿命期 100 年时, 右端索塔处应力最大, 为 611.22 MPa; 除锚固和索塔位置外主缆其它位置应力呈对称分布。对有限元模型进行车辆疲劳加载得到疲劳应力幅, 主缆关键位置疲劳应力幅变化量如图 3 所示。由图 3 可知: 由于腐蚀的不确定性, 主缆各个位置损伤程度不同, 主缆疲劳应力幅随着使用年限的增加呈不规则变化, 但总体呈上升趋势。

表 2 主缆关键位置应力值

Table 2 Stress value at key position of main cable

单位: MPa

关键位置	0年	20年	40年	60年	80年	100年
左端锚固	501.11	515.12	530.03	545.90	567.16	580.72
1/8截面	499.74	513.37	527.87	543.29	563.93	577.07
左端索塔	516.00	530.77	546.52	563.29	585.78	600.14
1/4截面	486.23	499.46	513.54	528.51	548.55	561.31
跨中	476.13	489.08	502.86	517.51	537.11	549.59
3/4截面	486.23	499.46	513.54	528.51	548.55	561.31
右端索塔	529.34	543.77	559.12	575.45	597.30	611.22
7/8截面	499.74	513.37	527.87	543.29	563.93	577.07
右端锚固	502.74	516.43	530.99	546.48	567.20	580.41

## 2 主缆可靠度指标计算与拟合

### 2.1 修正 Manson-Coffin 公式

因为缺乏该桥主缆的 S-N 曲线实验数据, 故基于 Seeger 算法并对 Manson-Coffin 公式进行修正, 得

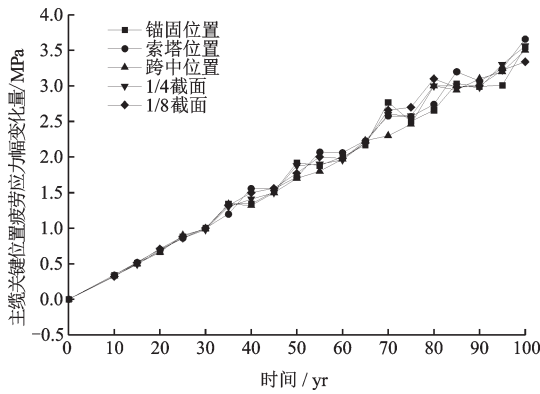


图3 主缆关键位置疲劳应力幅变化量

Fig. 3 Diagram of variation of fatigue stress amplitude at key position of main cable

到该桥主缆的S-N曲线。

当高周疲劳时,忽略塑性疲劳的影响,故 Manson-Coffin 修正公式为:

$$S_e = \sigma'_f (2N)^b \quad (5)$$

式中,  $S_e$  为等效应力幅;  $\sigma'_f$  为疲劳强度系数, 取值为材料真实的平均应力乘以安全系数;  $N$  为疲劳寿命;  $b$  为疲劳强度指数,  $b = -0.398$ 。

考虑疲劳缺口系数、尺寸系数和表面加工系数的影响, 得到该桥主缆的S-N曲线为:

$$\log N = 11.729 - 2.511 \log S_a \quad (6)$$

式中,  $S_a$  为计算应力幅,  $S_a = \frac{k_f}{\epsilon\beta} S_e$ ;  $k_f$  为疲劳缺口系数,  $k_f = 2.971$ ;  $\epsilon$  为尺寸系数,  $\epsilon = 0.5625$ ;  $\beta$  为表面加工系数,  $\beta = 1$ ;  $S_e$  为等效应力幅,  $S_e = S / (1 - \sigma_m / \sigma_b)$ 。

主缆S-N曲线如图4所示。根据 Midas civil 建立的初始模型, 锚固位置初始疲劳应力  $S = 43.01$  MPa、索塔位置初始疲劳应力  $S = 42.09$  MPa、跨中位置初始疲劳应力  $S = 40.56$  MPa、1/4截面初始疲劳应力  $S = 41.32$  MPa、1/8截面初始疲劳应力  $S = 41.78$  MPa, 主缆关键位置计算应力幅如图5所示。由图5可知: 主缆计算应力幅随着使用年限的增加逐渐变大, 且增长速率加快, 大致成抛物线形状。根据式(6)估算出主缆关键位置疲劳寿命如图6所示。由图6可知: 随着主缆使用年限的增加疲劳寿命逐渐降低。悬索桥钢丝绳的疲劳性能在《公路悬索桥吊索(JT/T449-2001)》中的规定为<sup>[19]</sup>: 在脉动荷载加载下, 应力幅为 150 MPa时, 经  $2 \times 10^6$  次脉冲循环加载试验, 断丝率不大于 5%, 该桥主缆锚固位置疲劳应力幅为 46.56 MPa, 远小于规定的 150 MPa, 锚固位置疲劳寿命为  $7.3 \times 10^6$  次, 远大于规

定的  $2 \times 10^6$  次, 故该桥主缆在寿命期内仍满足使用要求, 不会发生断裂。

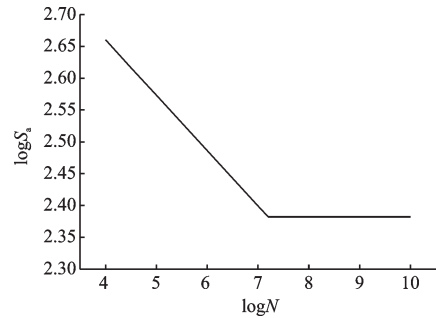


图4 主缆S-N曲线

Fig. 4 S-N curve graph of main cable

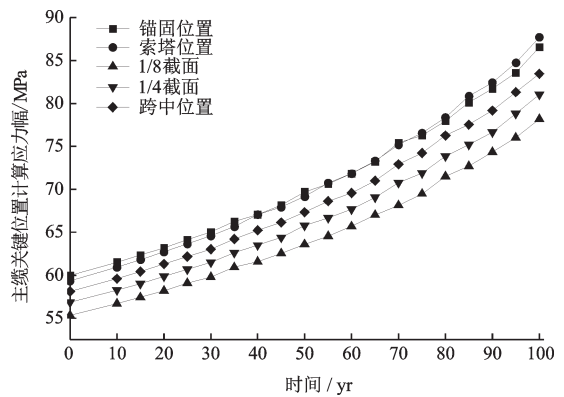


图5 主缆关键位置计算应力幅

Fig. 5 Calculation of stress amplitude at key position of the main cable

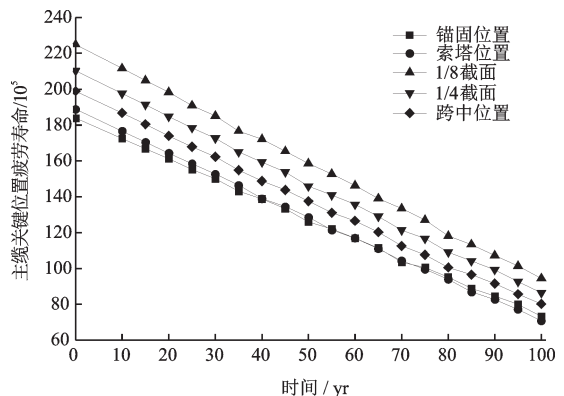


图6 主缆关键位置疲劳寿命

Fig. 6 Key position fatigue life of the main cable

## 2.2 主缆疲劳可靠度指标计算

根据 Weibull 密度分布函数并考虑 Goodman 修正式, 在  $(0, N)$  时间内结构不发生破坏的概率为:

$$L_{(N)} = \exp\left\{-\left[\frac{N}{k_e^{-b} S_a^{-b} c \exp(-\ln \ln 2/k)}\right]^k\right\} \quad (7)$$

式中,  $k$  为形状因子,  $k = V_N^{-1.08}$ ,  $V_N$  为变异系数,  $V_N = 0.53$ ;  $c$  为特征寿命,  $c = 10^{11.729}$ ;  $b$  为与材料相关的系数,  $b = 2.511$ ;  $k_e = 1/(1 - S/S_b)$ ;  $\Gamma(x)$  为伽玛函数,  $\Gamma(x) = \int_0^\infty \exp(-t)t^{x-1} dt$ 。

主缆的可靠度指标为:

$$\beta = \frac{\mu_N}{\sigma_N} = \frac{c\Gamma(1 + \frac{1}{k})}{c\left\{\Gamma(1 + \frac{2}{k}) - [\Gamma(1 + \frac{1}{k})^2]\right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

利用 Matlab 编制主缆关键位置的失效概率和可靠度指标的计算程序, 求得主缆关键位置的失效概率见表 3, 主缆关键位置的可靠度指标如图 7 所示。由表 3 可知: 随着使用年限的增加, 主缆的失效概率以不规则速率增加, 在 90~100 年间失效概率变化明显, 这是由于一般情况下, 悬索桥的设计寿命为 100 年, 在 90~100 年间悬索桥将达到设计时的使用极限, 从而失效概率大大增加。由图 7 可知: 随

着使用年限增加, 主缆锚固位置可靠度指标退化较快, 在寿命期 100 年时, 锚固位置计算应力幅为 86.548 5 MPa, 根据 S-N 曲线, 疲劳寿命  $N = 7.6 \times 10^6$  次, 可靠度指标  $\beta = 3.057 2$ , 这是由于在水蚀环境下, 锚固内主缆处在干湿交替状态, 使得腐蚀速率加快, 在同样荷载作用下, 构件应力增大, 疲劳应力幅增大从而导致计算应力幅增大, 疲劳寿命降低, 可靠度指标退化较快。

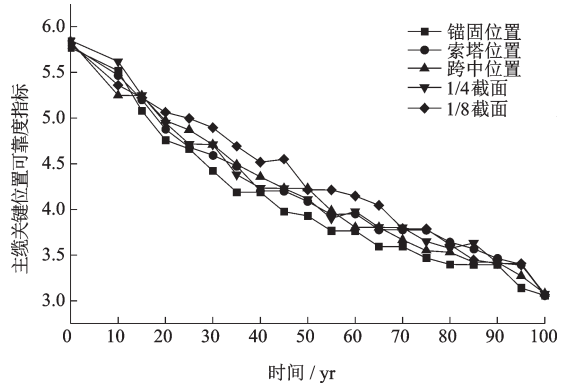


图 7 主缆关键位置可靠度指标

Fig. 7 Variation of reliability index at key positions of the main cable

表 3 主缆关键位置失效概率

Table 3 Failure probability of key positions of the main cable

关键位置	0年	20年	40年	60年	80年	100年
锚固	4.98E-9	3.39E-7	5.60E-6	5.80E-5	5.55E-4	5.56E-3
索塔	4.52E-9	1.96E-7	5.16E-6	1.98E-5	1.20E-4	5.55E-3
跨中	3.79E-9	1.30E-7	2.35E-6	4.59E-5	2.35E-4	4.79E-3
1/4截面	3.66E-9	1.45E-7	4.39E-6	1.72E-5	1.81E-4	4.93E-3
1/8截面	4.18E-9	8.66E-8	1.06E-6	6.95E-6	1.40E-4	5.22E-3

### 3 全桥主缆可靠度指标确定方法

经过推导计算, 假设主缆的计算应力幅以及可靠度指标除了与使用年限有关外还与当地实际环境、主缆的长度和基准长度有关, 期望根据上述主缆关键位置的变化得出适用于全桥主缆各个位置的可靠度指标变化公式。通过观察可靠度指标的变化规律, 假设公式如下:

$$\beta(t, L) = \gamma(t)\beta_0 - \alpha(L)\ln(t + 43.116 58) \quad (12)$$

式中,  $\beta_0$  为初始可靠度指标;  $\gamma(t)$  为与环境有关的腐蚀因子,  $\gamma(t) = 1.146 08 \cdot |t - i_{\text{corr}}|^{0.296 81}$ ;  $\alpha(L)$  为与主缆长度有关的系数, 利用最小二乘法得到:  $\alpha(L) = -1.865 2 \times 10^{-4} + 3.264 259 4 \log(L/L_0)$ ;  $L$  为各个

位置相邻吊杆间主缆长度,  $m$ ;  $L_0$  为主缆基准长度 (跨中位置相邻吊杆间主缆长度),  $m$ 。

根据计算公式得到的可靠度指标与 Weibull 分布函数得到的可靠度指标的对比如图 8 所示, 利用 Origin 软件对可靠度指标进行拟合, 得到拟合公式的相关系数均大于 95%, 主缆关键位置除个别点外公式可靠度指标计算结果与 Weibull 分布函数计算结果吻合程度较好, 故该公式可以作为悬索桥主缆的可靠度指标估算公式, 能够满足实际工程需要。

### 4 讨论

由上述分析可知, 只需知道当地环境 pH 值和相对湿度等环境因素, 并测量这个位置相邻吊杆间

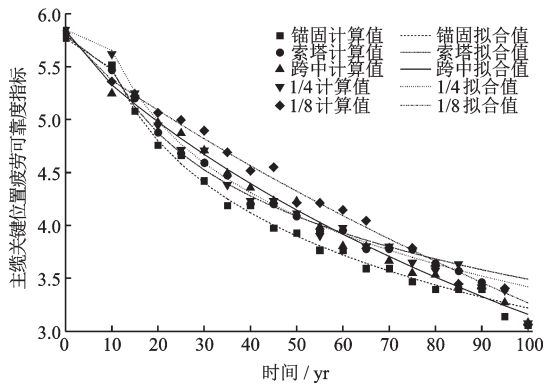


图8 主缆关键位置 Weibull 计算结果与公式计算结果对比  
Fig. 8 Comparison between Weibull calculation results and formula calculation result of key position of main Cable

的主缆长度和跨中位置相邻吊杆间的主缆的长度即可,可以随时计算得到主缆可靠度指标,从而对桥梁健康状况进行评估,保证桥梁使用安全,既省时省力又节省成本,且不需要在概率论的基础上对可靠度指标进行计算估计,得到的可靠度指标更符合实际情况。但是此公式仅适合双塔三跨悬索桥,对于独塔悬索桥和多塔多跨悬索桥仍待研究。目前我国大多数悬索桥均为双塔三跨,故该公式可以满足实际工程需要。

## 5 结 论

以某工程为研究背景,应用 Midas civil 对悬索桥主缆索进行有限元计算,并结合 Matlab 软件,研究悬索桥主缆索可靠度指标计算方法,主要结论如下:

(1)数值模拟分析表明在主缆寿命期内除锚固和索塔位置外,其它位置应力均呈对称分布。

(2)在寿命期为 100 年时,索塔位置疲劳应力幅变化量最大,主缆各个位置疲劳寿命和可靠度指标均降低,且锚固位置疲劳寿命降低最快,可靠度指标降低最多。

(3)利用 Matlab 编制主缆关键位置在寿命期内的失效概率和可靠度指标计算程序,分析发现可靠度指标与当地环境、使用年限和主缆长度以及主缆基准长度存在一定关系,表达式为:  $\beta(t, L) = \gamma(t)\beta_0 - \alpha(L)\ln(t + 43.11658)$ 。

## 参考文献:

[1] Cocksedge C, Hudson T, Urbans B, et al. M48 severn bridge main cable inspection and rehabilitation [J].

Bridge Engineering, 2010, 163(4): 181-195.  
[2] Blooms M L, Sorensen O. Prevention of main cable corrosion by dehumidification advances in cable-supported bridge [C] //The 5<sup>th</sup> International Cable-Supported Bridges Operators Conference, New York City: Taylor &. Francis, 2006: 215-230.  
[3] Betti R, Yanev B. Corrosion monitoring research of new York city bridges[R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2013.  
[4] 贡金鑫, 魏巍巍. 工程结构可靠度设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.  
Gong J X, Wei W W. Reliability design principles of engineering structure[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.  
[5] Zhang W, Cai C S, Pan F. Fatigue reliability assessment for Long-Span Bridges under combined dynamic loads from winds and vehicles[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(8): 735-747.  
[6] Guo T, Dan M F, Chen Y. Fatigue reliability assessment of steel bridge details integrating weigh-in-motion data and probabilistic finite element analysis[J]. Computers & Structures, 2012, 112: 245-257.  
[7] 陈志为, 徐幼麟. 考虑非线性累积损伤的大跨多荷载桥梁的疲劳可靠度评估[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(2): 213-219.  
Chen Zh W, Xu Y L. Fatigue reliability evaluation of long-span multi-load bridges considering nonlinear cumulative damage [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(2): 213-219.(in Chinese)  
[8] 刘建, 桂勋, 李传习. 基于健康监测的自锚式悬索桥钢箱梁细节疲劳可靠度研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(1): 69-75.  
Liu J, Gui X, Li Ch X. Detailed fatigue reliability of steel box girder of self-anchored suspension bridge based on health monitoring [J]. Highway Transportation Technology, 2015, 32(1): 69-75.(in Chinese)  
[9] 陈小雨, 唐茂林. 悬索桥主缆镀锌钢丝腐蚀过程及抗力变化试验研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(1): 60-64.  
Chen X Y, Tang M L. Experimental study on corrosion process and resistance of galvanized steel wire for main cable of suspension bridge [J]. Bridge Construction, 2018, 48(1): 60-64.(in Chinese)  
[10] 刘扬, 李明, 鲁乃唯, 等. 随机车流作用下悬索桥钢箱梁细节疲劳可靠度[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2016, 36(2): 44-51.  
Liu Y, Li M, Lu N W, et al. Fatigue reliability of steel Box girder of suspension bridge under stochastic vehicle flow [J]. Journal of Changan University (Natural Sci-

- ence Edition), 2016, 36(2): 44-51.(in Chinese)
- [11] 李慧乐, 夏 禾. 基于车桥耦合随机振动分析的钢桥疲劳可靠度评估[J]. 工程力学, 2017, 34(2): 69-77.  
Li H L, Xia H. Fatigue reliability evaluation of steel bridges based on vehicle-bridge coupled random vibration analysis [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(2): 69-77.(in Chinese)
- [12] 李建慧, 李爱群. 自锚式悬索桥静力随机分析与可靠度评估[J]. 中国公路学报, 2012, 25(6): 74-79.  
Li J H, Li A Q. Static random analysis and reliability evaluation of self-anchored suspension bridge [J]. Chinese Journal of Highway, 2012, 25(6): 74-79.(in Chinese)
- [13] 肖新辉, 鲁乃唯, 刘 扬, 等. 基于首超准则的随机车流下悬索桥加劲梁动力可靠度评估[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(10): 3 491-3 497.  
Xiao X H, Lu N W, Liu Y, et al. Evaluation of dynamic reliability of stiffened beams of suspension bridges under stochastic traffic flow based on first super-criteria [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2016, 47(10): 3 491-3 497.(in Chinese)
- [14] 晏班夫, 孙雁峰, 邹祺祺. 考虑拉索抗力衰减及破断的斜拉桥可靠性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(9): 10-16, 40.  
Yan B F, Sun Y F, Zou Q Q. Reliability analysis of cable-stayed bridge considering cable resistance attenuation and breakage [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2017, 44(9): 10-16, 40.(in Chinese)
- [15] 李文杰, 侯天宇, 赵君黎, 等. 基于可靠度理论的混凝土桥梁安全性评估方法研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(4): 87-92.  
Li W J, Hou T Y, Zhao J L, et al. Research on safety evaluation method of concrete bridge based on reliability theory [J]. Highway Traffic Technology, 2017, 34(4): 87-92.(in Chinese)
- [16] 赵少杰, 任伟新. 超限超载交通对桥梁疲劳损伤及可靠度的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(11): 3 044-3 050.  
Zhao Sh J, Ren W X. Influence of overload traffic on fatigue damage and reliability of bridges [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2017, 48(11): 3 044-3 050.(in Chinese)
- [17] Stewart M G. Spatial variability of pitting corrosion and its influence on structural fragility and reliability of RC beams in flexure[J]. Structural Safety, 2004, 26(4): 453-470.
- [18] 乔 燕, 李爱群, 缪长青, 等. 腐蚀吊索钢丝力学性能退化研究[J]. 中外公路, 2016, 36(3): 134-138.  
Qiao Y, Li A Q, Miao Ch Q, et al. Research on the degradation of mechanical properties of corrosion sling wiew[J]. Chinese and Foreign Highways, 2016, 36(3): 134-138.(in Chinese)
- [19] 公路悬索桥吊索: JT/T449-2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

(本文责编: 赵 霞)