DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.01.007

既有预应力空间索杆系结构的安全性评价方法

王永泉[1],谭卓群[1],李世宏[2],邵 翔[2]

(1.河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098;2.江苏建研建设工程质量安全鉴定有限公司,江苏 南京 210008)

摘要:为解决考虑拉索腐蚀程度的既有预应力空间索杆系结构安全评价技术难题,研究建立了基于结构自身特性和拉索腐蚀程度的安全性客观评价方法。首先,建立了空间索杆系在瞬间断索下的动力响应分析方法,并通过三索结构算例验证了该方法的合理性和可行性;其次,根据判断矩阵构建理论和断索分析结果,建立了考虑拉索腐蚀程度的索杆系中各拉索权重系数确定方法;在此基础上,建立了拉索腐蚀程度的隶属函数,构建拉索索系的安全评语集,根据权重系数和拉索腐蚀程度检测结果,建立了既有预应力空间索系安全性的模糊综合评价体系。依托于某基于空间索杆系结构,对所构建的权重确定方法、隶属度函数和模糊综合评价模型进行了初步的应用和合理性验证。

关键词:空间预应力索杆系;拉索腐蚀;结构安全评价;权重系数;模糊综合评价

中图分类号:TU393.3 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2019)01-0041-07

Safety evaluation method of existing prestressed cable truss structure

WANG Yongquan[1], **TAN Zhuoqun**[1], **LI Shihong**[2], **SHAO Xiang**[2]

(1. *Colloge of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*;
2. *Jiangsu Institute of Building Construction Engineering Quality Safety Appraisal Co., Ltd., Nanjing* 210008, *China*)

Abstract: In order to solve the safety evaluation problem of existing prestressed cable truss structures considering the corrosion degree of cables, an objective evaluation system is established based on the characteristics of the structure and the corrosion degree of the cables. Firstly, the dynamic response analysis method of cable-strut system under the instantaneous break is established, and the rationality and feasibility of proposed method are verified by three cable structures. According to the construction theory of judgment matrix and the result of the cable breaking analysis, the method for determining the weight coefficient of each cable in the cable-strut system is established considering the corrosion degree of the cable. On this basis, the membership function of the corrosion degree of the cable is established, and the safety evaluation set of the cable system is built. At last, based on the weight coefficient and the corrosion degree of the cable, the fuzzy comprehensive evaluation system is established for the safety of existing prestressed spatial cable system. Furthermore, the weight coefficient determination method, the membership function and the fuzzy comprehensive evaluation model are applied and verified by a practical spatial cable-strut structure.

Key words: spatial cable-strut structure; cable corrosion degree; structure safety evaluation; weight coefficient; fuzzy comprehensive evaluation

复杂形态空间预应力索杆系结构是一类由刚性撑杆与柔性拉索组成的空间杂交结构体系,由于其独特的建筑造型和合理的受力特点,近年来被广泛应用于体育场馆、机场航站楼、火车站站房、会议展览中心等大型公共建筑中[1-5]。由相关文献可知,空间预应力索杆系结构在公共建筑中的大量工程应用接近15 a,即索杆系结构服役年限尚短,暂未出现因拉索腐蚀导致的结构垮塌事故。但是,针对预应力钢丝束拉索耐腐蚀性

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20171498)

作者简介:王永泉(1981—),男,副教授,博士,主要从事工程结构检测与加固研究。E-mail:wyq_hhu@hhu.edu.cn

引用本文:王永泉,谭卓群,李世宏,等.既有预应力空间索杆系结构的安全性评价方法[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):41-47.
WANG Yongquan, TAN Zhuoqun, LI Shihong, et al. Safety evaluation method of existing prestressed cable truss structure[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(1):41-47.

的研究结果表明[6-8],国内厂家生产的镀锌钢丝束拉索在自然环境中使用寿命为10~20 a,如所处环境恶劣,则拉索使用寿命仅为5 a[9-11]。空间索杆系结构中的拉索常暴露于大气环境中,经受风、雨、紫外线、气体等复杂环境长期侵蚀,容易导致钢丝束出现锈蚀、断丝等病害,研究结果表明,一旦拉索出现严重病害将会导致整个结构处于危险状态,甚至引发群死群伤的重大安全事故。本文着眼于复杂形态空间预应力索杆系结构中的核心部件——拉索,研究其服役期间的安全状态,有助于及时发现危险源,并提出合理的修复方案,以期尽早建立复杂形态空间预应力索杆系结构的安全评估方法,为工程换索方案决策提供理论依据与技术支持,解决这类大型公共建筑安全防患的技术难题。

1 基于ADINA的瞬间断索分析方法

精确模拟断索瞬间的索结构动力响应,是确保断索分析准确性和可靠性的核心所在,基于有限元软件ADINA中的显式动力分析[12],结合模拟断索的单元生死功能,建立了一种空间索杆系结构的断索分析方法,其分析过程如下:(a)建立结构的几何模型,选定单元类型,选定材料类型,划分网格,施加自重,设置边界条件及分析类型,然后进行模态分析计算。计算结束后,提取两阶主要振型的固有频率,求解瑞利阻尼常数α。(b)根据索杆系结构的拉索初始拉力施加拉索初应变,对整个模型施加瑞利阻尼系数α,定义时间步、时间步长来确定结构的初始状态,对模型进行第二次计算。(c)以模型的第二次计算为基础进行重启动,设置要断裂的拉索单元"死"的时刻,重新定义时间步和时间步长进行计算。计算结束后,进行后处理,提取剩余拉索的索力和结构的变形。

为验证所构建断索分析方法的正确性,建立典型空间索杆系模型——3根索(编号为LS1、LS2、LS3)、1根桅杆,拉索之间的夹角为120°,拉索的横截面面积为10 198 mm^2,桅杆采用直径2 200 mm、壁厚30 mm的钢管,3根拉索施加相同的初应变,即$\varepsilon=0.002$。拉索底部和桅杆底部均为铰接约束。

从三索模型受力的定性分析可知,当3根拉索中有1根拉索断裂,则原来的平衡体系被打破,在剩余2根拉索的作用下,桅杆将出现转动,直至结构坍塌,而剩余2根拉索在阻尼作用下其索力将会减小为零。而且,由于结构对称,剩余2根拉索的变化将完全一致。

根据上述的断索分析流程对结构进行断索分析,设置总时间为10 s,在5 s时将LS1"杀死",时间步设为0.000 1 s。对计算结果进行后处理,提取剩余拉索的索力变化,如图1所示。

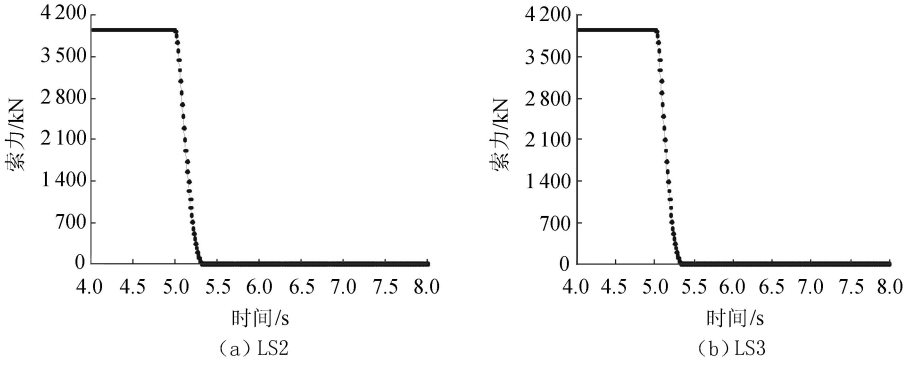

图1 LS1断后LS2和LS3的索力变化曲线

Fig. 1 Cable force variation curve of LS2 and LS3 after the fracture of LS1

从图1可知,LS2和LS3的索力大小及变化趋势完全一致,符合对称结构的结果。在LS1断裂后,结构变为可变体系,桅杆向背离LS1的方向倾倒,直至索杆系整体垮塌,LS2和LS3的索力为零。上述结果验证了基于ADINA断索分析方法的可行性和合理性。

2 基于判断矩阵的拉索权重确定法

在复杂形态的预应力索杆系结构中,拉索、桅杆之间相互影响,设计人员有时也无法直接判定索杆系中拉索的重要性排序,若同时考虑使用若干年后各拉索的腐蚀,拉索权重的确定则更加困难。在复杂形态预应力索杆系结构断索分析结果的基础上,尝试构建了一种可考虑拉索腐蚀的、较为客观的拉索权重确定方法,具体步骤如下:

a. 建立预应力索杆系结构模型。根据空间预应力索杆系结构的设计图纸或根据现场检测的结果,建立预应力索杆系结构的分析模型。其中,拉索的索力值为 $F_i'(i=1,2,\cdots,n)$,其中 n 为模型中拉索的数量。

b. 构建索力矩阵 $\boldsymbol{P}$。由断索模拟分析可得,复杂形态预应力索杆系中某一根拉索断裂后,其余拉索的索力会剧烈变化直到结构达到新的平衡状态。分别提取第 j 根拉索断裂后第 i 根拉索索力变化过程中的最大值 $F_{j,i\max}(i,j=1,2,\cdots,n)$,并形成相应的矩阵 $\boldsymbol{P}$,其中 $F_{i,i\max}=0(i=1,2,\cdots,n)$。

c. 构建拉索相互影响程度矩阵 $\boldsymbol{H}$。根据提取的 $F_{j,i\max}$ 和结构实际索力 F_i',可计算出第 j 根拉索断裂后第 i 根拉索索力的最大变化程度为 $\eta_{j,i\max}(i,j=1,2,\cdots,n)$(式(1)),进而构建相应的拉索相互影响程度矩阵 $\boldsymbol{H}$(式(2))。若第 k 根拉索断裂后结构垮塌,说明第 k 根拉索重要性程度明显高于其他拉索,则 $\eta_{k,i\max}$ 和 $\eta_{i,k\max}(i=1,2,\cdots,k-1,k+1,\cdots,n)$ 可不纳入矩阵 $\boldsymbol{H}$,在第 **d** 步判断矩阵中直接给定 $a_{ki}=9(i=1,2,\cdots,k-1,k+1,\cdots,n)$。

$$\eta_{j,i\max}=\frac{F_{j,i\max}-F_i'}{F_i'} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}\eta_{1,1\max} & \cdots & \eta_{n,1\max}\\ \vdots & & \vdots\\ \eta_{1,n\max} & \cdots & \eta_{n,n\max}\end{bmatrix} \tag{2}$$

d. 构建判断矩阵 $\boldsymbol{A}$。根据 $\boldsymbol{H}$ 的结果,提出了判断拉索两两之间相互比较的策略:若 $\eta_{i,j\max}>\eta_{j,i\max}$,则表示第 i 根拉索比第 j 根拉索重要,相对重要程度 a_{ij} 可由式(3)计算得出(四舍五入取整),用了 1 ~ 9 标度法构建拉索重要性判断矩阵 $\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{n\times n}$,其中 $a_{ii}=1$。

$$a_{ij}=\frac{\eta_{i,j\max}}{\eta_{j,i\max}} \tag{3}$$

e. 确定拉索权重向量 $\boldsymbol{w}$。判断矩阵 $\boldsymbol{A}$ 通过一致性检验后,即可计算 $\boldsymbol{A}$ 的权重向量 $\boldsymbol{w}$,此 $\boldsymbol{w}$ 中各数值大小即是各根拉索在索系的权重。

以浙江大学体育馆屋盖上部索杆系为分析对象[13],该结构体系中的桅杆斜拉索网系统可形成单独受力体系,拉索 S1、S6 ~ S7 组成中部稳定索网。背索 S2-1 和背索 S2-2 一端与桅杆顶部相连,另一端与地锚支座铰接。前索 S3 ~ S5 一端与桅杆顶部相连,另一端通过铸钢节点与中部稳定索网相连,索杆系三维结构图如图 2 所示,初始状态下索力如下:S5-2、S5-1、S4-1、S3-3、S3-2、S3-1、S2-1、S2-2 的索力分别为 1 154.75 kN、667.29 kN、324.23 kN、250.06 kN、322.35 kN、412.84 kN、1 117.42 kN、1 691.94 kN。

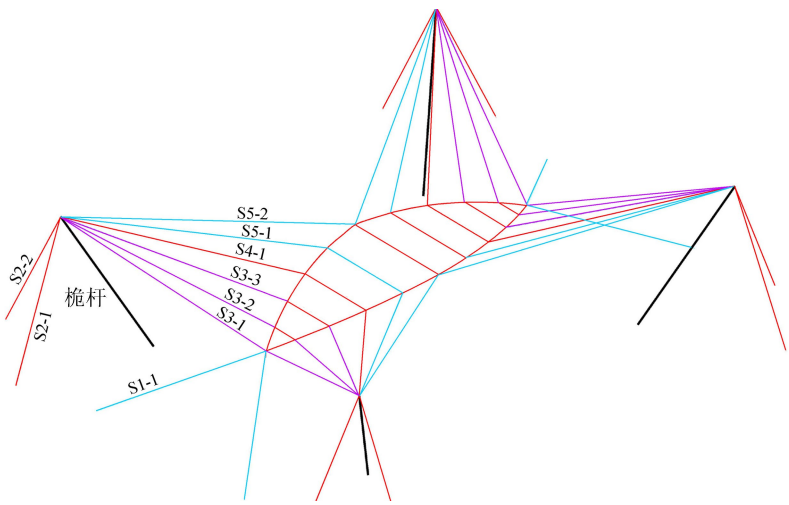

图 2　浙江大学体育馆索杆系结构

Fig. 2　Cable system in the gymnasium of Zhejiang University

在 ADINA 有限元模型中,用 Beam 单元模拟桅杆,Truss 单元模拟拉索,所有拉索和桅杆只划分为 1 个单元。根据上述断索分析流程对该结构进行断索分析。其中,瑞利阻尼系数 $\alpha=0.1616$,总时间设置为 600 s,时间步设置为 0.000 1 s,断索时间设置在 350 s 时,分析时间至 420 s 结束。以背索 S2-1 断裂为例,计算可得出背索 S2-1 断裂后其余各拉索索力变化,图 3 为索力变化较典型的拉索 S5-2、S2-2、S3-1 和 S4-1 索力变化曲线。

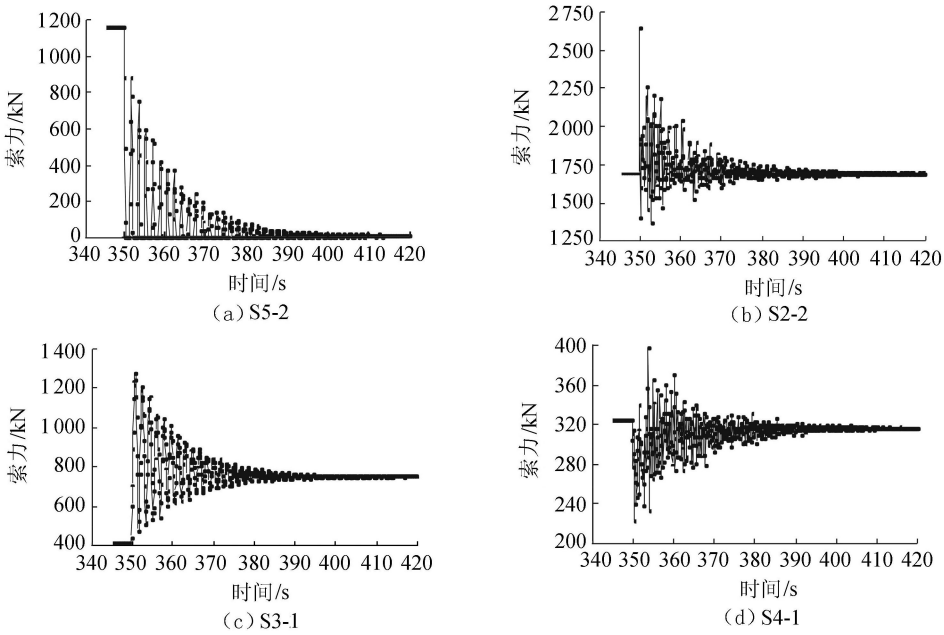

图3 拉索S2-1断裂后部分拉索索力变化曲线

Fig. 3 Change curve of several cable force after the cable fracture of S2-1

拉索S2-1断裂后的索力重新平衡过程中,S3-2、S3-1和S2-2的索力增长幅度较大,分别为31.26%、208.49%、56.26%;S4-1和S3-3索力最大变化幅度分别为22.81%、19.46%,而S5-2瞬间松弛,索力降为零,S5-1的索力也突然减小。在410 s时,结构达到新的平衡状态,经过波动后S5-2最终索力为12.60 kN,索力变化幅度达到-98.91%。同时,S5-1和S4-1的索力也减小,变化幅度分别为-23.07%、2.54%,而S3-3、S3-2、S3-1的索力变化幅度分别为2.98%、10.16%、81.62%。在新的平衡状态下,S2-2的索力变化幅度最小,仅为-0.10%。分析可知,在S2-1断裂后,桅杆向背离S2-1的方向倾斜,导致S5-2、S5-1和S4-1的最终索力都减小,而与之相邻的拉索S3-2和S3-1索力增大。虽然S2-1为背索,在其断裂后,结构却没有倒塌。从各拉索与桅杆之间的布置来看,S3-2和S3-1分担了原本S2-1的索力,故二者索力增大,并且与S2-2和桅杆之间组成新的平衡位置,从剩余拉索的索力变化幅度也可知,这个新的平衡位置和原来一样能保持桅杆不倒下。依次进行各拉索的断索分析,提取其余拉索索力在重新平衡过程中的索力最大值 $F_{j,i\max}$,结果如表1所示。

表1 一条拉索断裂后其余拉索的索力最大值

Table 1 Maximum cable forces of rest cables after one cable breaks kN

拉索编号	断S5-2	断S5-1	断S4-1	断S3-3	断S3-2	断S3-1	断S2-1
S5-2	0	1 614.13	1 430.03	1 285.26	1 271.17	1 196.79	1 154.75
S5-1	1 114.89	0	927.07	833.59	856.53	742.97	667.29
S4-1	519.00	714.78	0	519.76	441.85	404.25	398.20
S3-3	355.58	331.89	442.90	0	472.60	308.71	298.73
S3-2	488.26	372.60	352.43	507.09	0	468.85	423.12
S3-1	480.67	513.81	471.83	520.33	651.97	0	1 273.55
S2-1	1 117.42	1 483.97	1 475.48	1 424.44	1 513.67	1 571.64	0
S2-2	1 943.90	2 334.31	1 949.16	1 909.01	1 840.56	1 691.94	2 643.79

注:拉索S2-2断裂后,结构整体垮塌。

根据初始状态的索力和表1,依据拟定的相互影响程度矩阵 $\boldsymbol{H}$ 和判断矩阵 $\boldsymbol{A}$ 构建方法,分别计算断索后拉索的最大变化幅度,计算得出 $\boldsymbol{H}$,然后,经两两比较得出 $\boldsymbol{A}$,对 $\boldsymbol{A}$ 进行一致性检验,可知 $\boldsymbol{A}$ 的最大特征值 $\lambda_{\max}=8.8782$,$C_R=0.0890<0.10$,说明 $\boldsymbol{A}$ 满足一致性检验。然后,求得 $\boldsymbol{A}$ 的归一化后的特征向量 $\boldsymbol{w}$:

$$\boldsymbol{w}=(0.1202,0.0870,0.0415,0.0349,0.0916,0.0420,0.0711,0.5117) \tag{4}$$

从 $\boldsymbol{w}$ 中排序权重的大小可得拉索重要性排序为:S2-2>S5-2>S3-2>S5-1>S2-1>S3-1>S4-1>S3-3。由此排序及各根拉索在结构中所处位置可知,背索S2-2是结构中最重要的一根,它在维持结构稳定方面具有重要意义,在结构日常维护过程中要时刻关注它的损伤状态,以免对结构产生不良后果。重要性次之的为前索

S5-2。从表 1 中可知,当前索 S5-2 断裂后,索 S5-1 ~ S2-2 的索力最大变化幅度 η 分别为 67%、60%、42%、51%、16%、15%、0%、15%,高于其他前索断裂时其余各索索力的最大变化幅度。该结果说明前索 S5-2 断裂对各前索的影响相比其他前索的断裂造成的影响更大。

3　考虑拉索腐蚀的结构安全评价方法

在进行考虑拉索腐蚀的空间索杆系结构安全评价时,选择采用可将一些边界不清、不易定量的因素定量化,从多个因素对被评价事物隶属等级状况进行综合性评价的模糊综合评价法[14]。

3.1　因素集和评语集

空间预应力索杆系结构中,拉索是结构中的核心部件,索系中的任何一根拉索发生变化都会影响整个索系的受力状况。因此,在空间预应力索杆系的安全性模糊综合评判中,把进行了腐蚀程度检测[15]且参与结构安全评价的拉索作为因素集,即 $U=\{u_1,u_2,\cdots,u_m\}$, m 为参与评价的拉索数量。

借鉴 GB 50292—2015《民用建筑可靠性鉴定标准》[17] 中构件安全性等级划分的方法,将空间索杆的安全评价等级划分为 4 个,即安全评语集为:$V=\{v_1,v_2,v_3,v_4\}$,其中,v_1 为安全(A 级)、v_2 为次安全(B 级)、v_3 为不安全(C 级)、v_4 为危险(D 级)。

3.2　拉索腐蚀程度隶属函数

由于拉索腐蚀程度的确定存在着边界模糊性[16],通过确定拉索腐蚀程度的隶属函数,充分考虑等级之间的过渡状态,从而解决了等级之间的边界模糊性。本文采用“偏小型梯形分布”和“偏大型梯形分布”组合来确定拉索腐蚀程度的隶属函数 $\mu(\rho)$,见式(5),其中 ρ 表示腐蚀程度。

$$\begin{cases}\mu_{\mathrm{A}}(\rho)=\begin{cases}1 & 0<\rho\leqslant 10\\ -\dfrac{1}{5}\rho+3 & 10<\rho<15\\ 0 & \rho\geqslant 15\end{cases} \qquad \mu_{\mathrm{B}}(\rho)=\begin{cases}\dfrac{1}{5}\rho-2 & 10<\rho\leqslant 15\\ 1 & 15<\rho<25\\ -\dfrac{1}{5}\rho+6 & 25\leqslant\rho<30\end{cases}\\ \mu_{\mathrm{C}}(\rho)=\begin{cases}\dfrac{1}{5}\rho-5 & 25<\rho\leqslant 30\\ 1 & 30<\rho<35\\ -\dfrac{1}{5}\rho+8 & 35\leqslant\rho<40\end{cases} \qquad \mu_{\mathrm{D}}(\rho)=\begin{cases}0 & \rho\leqslant 35\\ \dfrac{1}{5}\rho-7 & 35<\rho<40\\ 1 & \rho\geqslant 40\end{cases}\end{cases} \tag{5}$$

假定浙江大学体育馆空间预应力索杆系出现了不同程度的腐蚀,各索段的腐蚀程度分别为 S5-2 腐蚀 40.74%、S5-1 腐蚀 4.88%、S4-1 腐蚀 7.88%、S3-3 腐蚀 7.09%、S3-2 腐蚀 32.79%、S3-1 腐蚀 37.89%、S2-1 腐蚀 35.30%、S2-2 腐蚀 41.17%。

根据拉索腐蚀程度的隶属函数(式(5)),计算得出索杆系中参与安全评价拉索的腐蚀程度隶属度矩阵 $\boldsymbol{R}$ 如下:

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 1\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0.422 & 0.578\\ 0 & 0 & 0.940 & 0.060\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{6}$$

3.3　模糊综合评价集和评价方法

根据模糊综合评价方法,已知 $\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{w}$ 时,可经模糊运算来确定模糊综合评判向量 $\boldsymbol{B}=(b_1,b_2,\cdots,b_m)$,其中,$b_j(j=1,2,\cdots,m)$ 称为模糊综合评判指标,表示评判对象对评语集的第 x 个元素的隶属度。采用乘积求和型的合成运算方法计算 b_j,即

$$b_j = \sum_{i=1}^{n} (w_i r_{ij}) \tag{7}$$

根据模糊综合评判向量的计算结果,按照最大隶属度原则,对考虑拉索腐蚀后的空间索杆系安全性进行模糊综合评判。

3.4 示例

仍以浙江大学体育馆的索杆系结构模型为例,将上述腐蚀程度赋予对应拉索,然后进行索杆系的断索分析,得到考虑拉索腐蚀后的断索分析结果(表2),据此构建相互影响程度矩阵 $\boldsymbol{H}$ 和判断矩阵 $\boldsymbol{A}$,即可求出考虑腐蚀程度的每根拉索重要性权重值。

表2 考虑拉索腐蚀后的断索分析结果

Table 2 Analysis results of the cable fracture considering cable corrosion kN

拉索编号	断S5-2	断S5-1	断S4-1	断S3-3	断S3-2	断S3-1	断S2-1
S5-2	0	1 253.11	1 022.17	935.74	942.66	865.58	837.44
S5-1	1 048.07	0	986.16	906.94	864.70	740.38	690.23
S4-1	472.11	668.90	0	497.03	432.86	379.88	340.53
S3-3	347.82	323.26	452.23	0	471.13	307.13	297.10
S3-2	396.62	361.44	341.80	478.12	0	384.93	414.78
S3-1	342.41	425.7	379.06	409.12	465.86	0	1 052.99
S2-1	941.88	1 372.39	1 323.07	1 364.92	1 241.63	1 260.73	0
S2-2	1 710.93	1 822.52	1 753.89	1 719.05	1 554.29	1 472.00	2 164.73

注:拉索S2-2断裂后,结构整体垮塌。

重新计算可得拉索的权重系数向量 $\boldsymbol{w}$ = (0.080 9, 0.054 5, 0.045 2, 0.047 3, 0.079 3, 0.085 6, 0.082 4, 0.524 8)。

根据拉索腐蚀程度隶属度矩阵 $\boldsymbol{R}$ 和拉索权重系数向量 $\boldsymbol{w}$,计算模糊综合评判向量 $\boldsymbol{B}$,可得 $\boldsymbol{B}$ = (0.147, 0, 0.019 3, 0.660),根据安全评语集 V 和由最大隶属度法可知,上述腐蚀程度条件下的索杆系综合评判结果为D级,即拉索索系处于危险状态。

4 结 语

在结构使用期间,结构构件会遭受各种各样的损伤和病害[18-21]。对预应力钢结构中的主要受力构件拉索来说,腐蚀是最主要的病害。腐蚀造成拉索的截面面积减小,降低拉索的承载力,最终影响结构的安全状况。本文旨在建立一种可考虑拉索腐蚀程度的、相对客观的既有预应力空间索杆系结构安全评估方法,主要研究结论包括:

a. 基于有限元软件ADINA中的显式动力分析建立了空间预应力索杆系在瞬间断索下的动力响应分析方法,并通过三索结构算例对所建立的方法予以论证,所得结论验证了该方法应用的可行性。

b. 基于层次分析法的理论,根据断索分析结果,建立了索系中各根拉索的权重确定方法。依托于某空间索杆系结构,对未腐蚀和腐蚀索杆系中的各拉索权重进行分析,结果表明,拉索腐蚀程度对拉索的权重影响较大。

c. 基于模糊数学的相关理论,建立了拉索腐蚀程度的隶属函数,依据权重分析结果和腐蚀程度,构建了拉索索系的安全评语集,在此基础上建立了空间索杆系安全性的模糊综合评价方法。

d. 对于拉索材料的非线性、断索动力分析的阻尼选择、判断矩阵构建策略、隶属度函数等方面,还未做较深入的探讨和研究。

参考文献:

[1] 董石麟. 中国空间结构的发展与展望[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6):38-51. (DONG Shilin. Development and expectation of spatial structures in China[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6):38-51. (in Chinese))

[2] 金晓飞,范峰,沈世钊. 巨型射电望远镜(FAST)反射面支承结构参数敏感性分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(2):12-19. (JIN Xiaofei, FAN Feng, SHEN Shizhao. Parameter sensitivity analysis of the cable-net structure supporting the reflector of a large radio telescope-FAST[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(2):12-19. (in Chinese))

[3] 徐晓明, 张士昌, 李亚明. 苏州工业园区体育中心体育场结构设计[J]. 建筑结构, 2014,44(增刊2):161-164. (XU

Xiaoming, ZHANG Shichang, LI Yaming. Structural design of Suzhou Industrial Park Sports Center Stadium[J]. Building Structure, 2014,44(Sup2):161-164. (in Chinese))

[4] 王永泉,郭正兴,罗斌. 常州体育馆大跨度椭球形弦支穹顶预应力拉索施工[J]. 施工技术,2008, 37(3):33-36. (WANG Yongquan, GUO Zhengxing, LUO Bin. Prestressed cable construction of large-span ellipti suspended-dome in Changzhou Gymnasium[J]. Construction Technology, 2008, 37(3):33-36. (in Chinese))

[5] 郭正兴,王永泉,罗斌. 济南奥体中心体育馆大跨度弦支穹顶预应力拉索施工[J]. 施工技术,2008, 37(5):133-135. (GUO Zhengxing, WANG Yongquan, LUO Bin. Prestressed cable construction of large-span suspended-dome in Ji'nan Olympic Center Gymnasium[J]. Construction Technology, 2008, 37(5):133-135. (in Chinese))

[6] 兰成明, 李惠, 鞠杨. 平行钢丝拉索承载力评定[J]. 土木工程学报, 2013, 46(5): 31-38. (LAN Chengming, LI Hui, JU Yang. Bearing capacity assessment for parallel wire cables[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(5): 31-38. (in Chinese))

[7] 王永泉,郭正兴,罗斌. 空间预应力钢结构拉索等效预张力确定方法研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(6):53-61. (WANG Yongquan, GUO Zhengxing, LUO Bin. Study on the determination method for the equivalent pre-tension in cables of spatial prestressed steel structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(6):53-61. (in Chinese))

[8] BETTI R, MARCONI G, KHAZEM D, et al. Experimental analysis of a nondestructive corrosion monitoring system for main cables of suspension bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(7): 653-662.

[9] YANG Wenjing, YANG Ping, LI Xueming, et al. Influence of tensile stress on corrosion behavior of high-strength galvanized steel bridge wires in simulated acid rain [J]. Materials and Corrosion, 2012, 63(5): 401-407.

[10] 王力力, 易伟建. 斜拉索的腐蚀案例与分析[J]. 中南公路工程, 2007, 32(1): 93-98. (WANG Lili, YI Weijian. Cases analysis on cable corrosion of cable-stayed bridges[J]. Central South Highway Engineering, 2007, 32(1): 93-98. (in Chinese))

[11] AOYAMA M, SHIBATA Y. Evaluation of corrosion on cast iron surfaces by fractal dimension analysis[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2001(1):403-408.

[12] 马野, 袁志丹, 曹金凤. ADINA 有限元经典实例分析[M]. 北京:机械工业出版社, 2012.

[13] 丰磊. 浙江大学体育馆斜拉索网吊挂钢屋盖施工关键技术研究[D]. 南京:东南大学, 2009.

[14] 张秋文, 章永志, 钟鸣. 基于云模型的水库诱发地震风险多级模糊综合评价[J]. 水利学报, 2014,45(1):88-95. (ZHANG Qiuwen, ZHANG Yongzhi, ZHONG Ming. A cloud model based approach for multi-hierarchy fuzzy comprehensive evaluation of reservoir-induced seismic risk[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014,45(1):88-95. (in Chinese))

[15] 郭建斌, 郑圣义. 钢闸门腐蚀安全研究[J]. 腐蚀与防护技术, 2006, 18(1):73-76. (GUO Jianbin, ZHENG Shengyi. Research on corrosion of hydraulic steel gates[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2006, 18(1):73-76. (in Chinese))

[16] 许红胜, 吴佳东, 黄娟, 等. 基于蚀坑参数的既有斜拉索钢丝腐蚀程度分级评价研究[J]. 中外公路,2015, 35(6):148-151. (XU Hongsheng, WU Jiadong, HUANG Juan, et al. Study on evaluation of corrosion degree of existing cable steel wire based on pitting parameters [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2015, 35(6):148-151. (in Chinese))

[17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑可靠性鉴定标准:GB 50292—2015 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.

[18] 郑山锁,张晓辉,黄威曾,等. 多龄期钢框架时变损伤模型研究[J]. 地震工程学报,2018,40(3):389-397. (ZHENG Shansuo, ZHANG Xiaohui, HUANG Weizeng, et al. Study on time-varying damage model of multi-age steel frame structures [J]. China Earthquake Engineering Journal,2018,40(3):389-397. (in Chinese))

[19] 王晓飞,王鹏飞,贾虎,等.基于时变地震损伤模型的多龄期钢框架结构易损性分析[J]. 地震工程学报 ,2016,38(2):192-201. (WANG Xiaofei,WANG Pengfei,JIA Hu, et al. Seismic vulnerability analysis of multiage steel frame structures based on time-varying seismic damage model[J]. China Earthquake Engineering Journal , 2016, 38(2):192-201. (in Chinese))

[20] 郑山锁 石磊 郑捷,等.近海大气环境下钢框架自振频率评估研究[J]. 地震工程学报,2016,38(5):673-677. (ZHENG Shansuo,SHI Lei,ZHENG Jie, et al. Assessment of natural frequency of steel frames in offshore atmospheric environment[J]. China Earthquake Engineering Journal,2016,38(5):673-677. (in Chinese))

[21] 张家超,杨海霞.结构损伤识别中的生物地理学优化算法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(3):234-239. (ZHANG Jiachao, YANG Haixia. Biogeography-based optimization algorithm forstructural damage detection[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(3):234-239. (in Chinese))

(收稿日期:2018-01-08　编辑:高建群)