

文章编号:1673-2049(2018)06-0050-07

# 武汉体育中心游泳馆屋顶网架结构风致疲劳性能分析

刘 晖, 查启斌, 王雪亮

(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:**以武汉体育中心游泳馆屋顶网架结构为研究对象,分析其在随机风荷载作用下的疲劳损伤性能。先根据该结构风洞试验结果结合数值模拟得到作用在结构上的风荷载,再利用 ANSYS 对结构进行应变时程分析,通过雨流计数法进行应变循环历程统计,最后基于 Miner 损伤准则计算总累加损伤和估算疲劳寿命。据此编制了适用于网架结构疲劳分析的程序,可计算出所有杆件在不同工况下的风致疲劳损伤值和疲劳寿命。为了研究结构在损伤情况下的疲劳性能,分析获得了不同风向角下的易损杆件,假设这些杆件首先发生刚度降低,来分析结构完好、有损伤结构在设计风速和良态风速下的疲劳性能。结果表明:在设计风速下结构完好时,有杆件会发生疲劳损伤或破坏;随着结构刚度降低,发生疲劳损伤和破坏的杆件数量大幅增加;即使是在良态风速下,随着结构刚度降低,在 100 年建筑使用寿命内也出现了杆件疲劳损伤和破坏;对网架结构来说,特别是当结构有损伤服役时,风致疲劳是结构巨大安全隐患,应引起高度重视。

**关键词:**网架结构;风致疲劳;刚度降低;疲劳性能;Miner 损伤准则

**中图分类号:**TU393.3

**文献标志码:**A

## Wind-induced Fatigue Performance Analysis of Roof Gird Structure of Natatorium in Wuhan Sports Center

LIU Hui, ZHA Qi-bin, WANG Xue-liang

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

**Abstract:** Taking the roof gird structure of the natatorium in Wuhan Sports Center as the study object, the fatigue performance under random wind load was analyzed. Firstly, based on the wind tunnel test results and the numerical simulation, the wind load acted on structure was obtained, then the strain time history was analyzed by ANSYS. The strain cycles history was counted by rain-flow counting algorithms. Finally, the total cumulative damage and fatigue life of members were calculated based on Miner damage criteria. A program was worked out to calculate the wind-induced fatigue damage and fatigue life of all members of gird structure under different conditions. In order to study the fatigue performance of the damaged structure, the vulnerable members under different wind directions were found. The stiffnesses of members were assumed to decrease firstly the fatigue performance of the undamaged and damaged structure under the design wind speed and normal wind speed were analyzed. The results indicate that there are members with fatigue damage occurrence when undamaged structure under design wind load. As the structural stiffness decreases, the number of fatigue damage members increases considerably.

收稿日期:2017-12-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51438002,51078301)

作者简介:刘 晖(1972-),女,陕西咸阳人,教授,工学博士,E-mail:drliuh@263.net。

Even in the normal wind speed, with the structural stiffness reduces, there are fatigue damage members occurrence within the 100 years of the service life. Therefore, for the gird structure, especially when the structure works with damage, wind-induced fatigue is a huge security hazard to the structure, and should be paid more attention.

**Key words:** gird structure; wind-induced fatigue; stiffness reduced; fatigue performance; Miner damage criteria

## 0 引言

大型空间网架结构是一种应用非常广泛的工程结构形式,风荷载是这类结构的主要设计荷载,结构在风荷载作用下容易产生疲劳损伤或破坏<sup>[1]</sup>。2004年,位于法国巴黎戴高乐机场的一候机厅突然发生倒塌,事故调查表明:结构在长期风荷载作用下,具有焊接初始裂纹处的疲劳损伤不断累积,从而导致结构破坏<sup>[2-4]</sup>。因此,研究大型网架结构在风荷载作用下的疲劳性能对保证该结构风致安全具有重要的工程意义。

对于网架结构风致疲劳,许多学者做了大量研究,取得了一定的成果,提出了许多疲劳分析方法<sup>[5-7]</sup>。刘会军等<sup>[8]</sup>对北京奥运会羽毛球馆采用总寿命法进行疲劳分析,结果表明,随着平均风速增大,疲劳杆件的数目增多,但是结构在承受本地 50 年一遇风速作用时不存在发生疲劳破坏的可能。高博青等<sup>[9]</sup>对单层网壳结构的整体疲劳性能进行了分析,得到该结构不同矢跨比、不同平均风速下的抗疲劳性能。王强<sup>[10]</sup>以深圳大运会主体育场大跨度悬挑屋盖结构为工程背景,研究了引起悬挑屋盖结构风致疲劳损伤的主要贡献风向角与主要贡献风速区间。叶继红等<sup>[11]</sup>采用热点应力法对小曲率单层球面网壳结构风致振动疲劳进行了分析,结果表明,热点应力法所得疲劳损伤值更大,更偏于安全,最先出现疲劳的部位与平均风压及脉动风压的分布有关。这些研究结果表明:平均风速(风压)的大小和分布是引起结构发生疲劳的重要因素,随着平均风速增大,结构杆件疲劳损伤值增大,发生疲劳损伤杆件数目增多;由于风荷载相较于地震、车辆等随机荷载幅值小,因此在平均风速较大甚至远超过建筑物所在地设计风速情况下才会发生疲劳损伤。网架结构随着使用年限增加,结构不可避免地存在损伤进而引起结构刚度降低,那么就会加速网架结构风致疲劳损伤的发生,有可能在平均风速较小的情况下结构发生风致疲劳损伤。因此,研究网架结构在不同平均风速及不同结构状态下的风致疲劳性能是十分必

要的。

本文以武汉体育中心游泳馆屋顶网架结构为工程背景,研究其在设计风速、良态风速、结构完好及有损伤情况下的风致疲劳性能。

## 1 网架结构风致疲劳分析理论与流程

疲劳累积损伤理论有很多,目前应用最广泛的是 Miner 线性累加损伤理论<sup>[12]</sup>。该理论操作简单,易于实现,由于网架结构体型复杂,杆件众多,计算量大,因此本文也采用 Miner 线性累加损伤理论。该理论认为,疲劳损伤是线性累加的,并且各应力幅值之间相互独立,那么每个循环试样的疲劳损伤值  $D_1$  为

$$D_1 = 1/N_1 \quad (1)$$

式中: $N_1$  为试样破坏的重复次数。

由式(1)可知,若应力幅值  $S_{a1}$  作用  $n_1$  次,则材料的损伤值  $D_{n1}$  就为  $n_1/N_1$ 。同样地,在循环次数依次为  $n_2, n_3, \dots, n_n$  及应力幅值  $S_{a2}, S_{a3}, \dots, S_{an}$  下各损伤值  $D_{n2}, D_{n3}, \dots, D_{nn}$  为

$$D_{n2} = n_2/N_2, D_{n3} = n_3/N_3, \dots, D_{nn} = n_n/N_n \quad (2)$$

则试样总累积疲劳损伤值  $D$  为

$$D = D_{n1} + D_{n2} + \dots + D_{nn} \quad (3)$$

当试样总累积疲劳损伤值  $D=1$  时,试样发生疲劳破坏。一般地,黑色金属及其合金经  $2 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$  次循环荷载后仍不破坏,就认为它能承受无限次循环,因此假设当总累积疲劳损伤值  $D > 1 \times 10^{-7}$  时,杆件会发生疲劳<sup>[9]</sup>。网架结构风致疲劳损伤分析具体流程如下:

(1)利用大型有限元软件 ANSYS 建立结构有限元模型。

(2)根据风洞试验得到的结构风载体型系数和基于准定常假设的数值模拟方法得到作用于结构上的风荷载。

(3)将风荷载作用在网架结构上,通过有限元分析得到网架结构中杆件的应变时程。

(4)利用雨流计数法<sup>[13]</sup>对应变历程进行统计,得到具有一定应变幅值的应变循环,并记录循环

次数。

(5)结合应变-寿命曲线( $\epsilon$ - $N$  曲线),采用 Manson-Coffin 模型计算单个应变幅值循环对应的疲劳损伤及其疲劳寿命;Manson-Coffin 模型的疲劳应变-寿命曲线对应的疲劳寿命估算公式为

$$\frac{\Delta\epsilon_a}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \epsilon'_f (2N)^c$$

(4)

式中: $\Delta\epsilon_a$  为应变幅值; $\sigma'_f$  为疲劳强度系数; $E$  为弹性模量; $b$  为疲劳强度指数; $\epsilon'_f$  为疲劳延性系数; $c$  为疲劳延性指数。

(6)基于 Miner 线性累加损伤理论<sup>[14]</sup>,可得到该段历程的疲劳累积损伤,最后得出杆件的累积疲劳损伤值。

网架结构疲劳性能分析具体步骤如图 1 所示。根据网架结构风致疲劳分析基本步骤,编制了相应的疲劳分析程序,可减少工作量,提高工作效率。先通过 ANSYS 提取所有杆件时程应变数据,再利用 MATLAB 软件基于雨流计数法对时程应变数据进行处理,最后输入相应疲劳性能参数,即可获得所有杆件的疲劳损伤值。

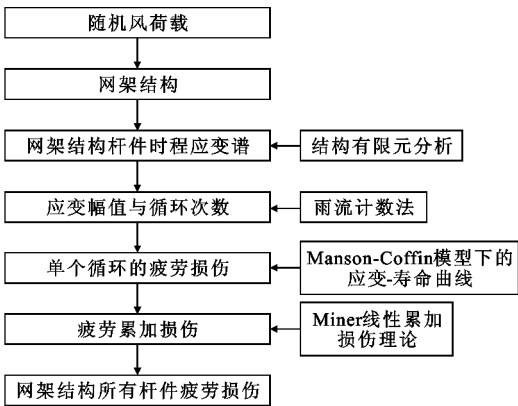


图 1 网架结构风致疲劳分析基本步骤

Fig. 1 Basic Steps of Wind-induced Fatigue Analysis of Gird Structure

空间网架结构在 100 年建筑使用年限内各不同平均风速下风致总累积疲劳损伤值可采用如下公式进行计算

$$D = \frac{100 \times 365 \times 24 \times 3\,600}{s} \sum_{i=1}^n D_i p_i$$

(5)

式中: $100 \times 365 \times 24 \times 3\,600$  是将 100 年的时间换算成以秒为单位的时间; $D_i$  为在第  $i$  种风速下杆件在  $s$  秒内的风致累积疲劳损伤; $p_i$  表示 100 年内第  $i$  种风速出现的概率。

如果采用公式(5)计算结构中杆件发生风致疲劳破坏时对应的疲劳寿命年数,就先设定杆件发生

疲劳破坏的总累积疲劳损伤值  $D$  的阈值,即总累积疲劳损伤值大于该值时杆件就视为已发生疲劳破坏,此时建筑使用年限就是未知数,即杆件发生风致疲劳破坏时对应的疲劳寿命年数。因此,已知总累积疲劳损伤值  $D$ ,就可采用公式(5)计算出结构中杆件发生风致疲劳破坏时对应的疲劳寿命年数。

2 工程背景

武汉体育中心游泳馆屋顶平面近似为椭圆形,其长轴为 118.5 m,短轴为 75.6 m。游泳馆屋顶网架结构杆件、节点众多,结构较柔,为风荷载敏感体系,在风荷载作用下容易产生疲劳损伤或破坏,故有必要对其进行风致疲劳分析。武汉体育中心游泳馆的效果图如图 2 所示。结构杆件的材料采用 Q345 钢,弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.3,材料的疲劳性能参数<sup>[15]</sup>如表 1 所示。



图 2 武汉体育中心游泳馆效果图

Fig. 2 Design Sketch of Natatorium in Wuhan Sports Center

表 1 材料疲劳性能参数

Tab. 1 Fatigue Performance Parameters of Material

参数	疲劳强度系数 $\sigma'_f$ /MPa	疲劳强度 指数 $b$	疲劳延性 系数 $\epsilon'_f$	疲劳延性 指数 $c$
参数值	375	-0.12	-0.739	-0.582

工程所在地气象局在 1987 年至 1996 年这 10 年内,对距地面 10 m 自动记录平均时距为 10 min 的每日最大风速资料进行整理,统计出的不同风速  $V$  与风向角出现的概率如表 2 所示。

3 风致疲劳性能分析

3.1 有限元模型的建立

根据工程结构原始设计资料,结合结构特点以及相关基本假定,选用 Beam188 单元建立结构杆件模型,Mass21 单元建立结构节点模型,Link8 单元建立水平弹簧支座模型。通过有限元软件 ANSYS 建立的结构有限元模型共有 3 042 个节点、12 233

表 2 风速、风向角分布概率

Tab.2 Distribution Probabilities of Wind Speed and Wind Direction

风向角/(°)	$V=3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$V=6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$V=9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$V=12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
0	0.045	0.038	0.011	0.001
30	0.040	0.038	0.009	0.001
60	0.023	0.013	0.002	0.000
90	0.015	0.008	0.002	0.001
120	0.030	0.022	0.006	0.001
150	0.050	0.038	0.012	0.002
180	0.047	0.044	0.017	0.004
210	0.046	0.055	0.027	0.009
240	0.044	0.053	0.028	0.010
270	0.042	0.036	0.012	0.003
300	0.034	0.017	0.004	0.001
330	0.036	0.021	0.005	0.001

根杆件,结构有限元模型如图 3 所示。根据所建立的结构有限元模型,分析得到结构前 10 阶的自振频率,如表 3 所示。

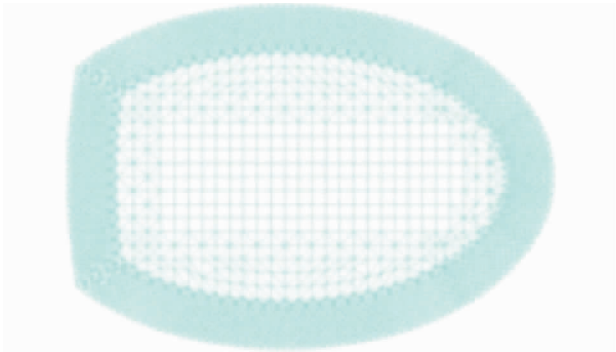


图 3 结构有限元模型

Fig.3 Finite Element Model of Structure

表 3 结构前 10 阶自振频率

Tab.3 The First 10 Orders Natural Vibration Frequency of Structure

阶次	1	2	3	4	5
自振频率/Hz	0.436	0.459	0.525	1.542	2.256
阶次	6	7	8	9	10
自振频率/Hz	2.800	3.110	3.535	3.694	3.755

结构自振频率不仅较低而且分布密集,因此,结构对风荷载较为敏感,在风荷载作用下容易产生振动,结构可能会产生风致疲劳损伤或破坏。因此,有必要研究其风致疲劳性能问题。

3.2 风洞试验与风荷载模拟

风洞试验是在汕头大学的大气边界层风洞内进行的。试验按照国家《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)<sup>[16]</sup>中的规定在试验段内以二元尖塔、

挡板及粗糙元模拟出所需要的地貌类型<sup>[17]</sup>。试验几何模型与建筑原型相似,如图 4 所示。



图 4 结构风洞试验模型

Fig.4 Wind Tunnel Test Model of Structure

风洞试验以 15°为间隔,测试 24 个风向角下建筑物(屋盖)表面的风压分布。结果表明,90°风向角下体型系数较大,且迎风面积较大。因此,本文选取 90°风向角来进行疲劳性能研究。90°风向角下的结构体型系数分布如图 5 所示。为了与 90°风向角对比,本文还分析了风速概率较大的 210°风向角的结构疲劳性能。

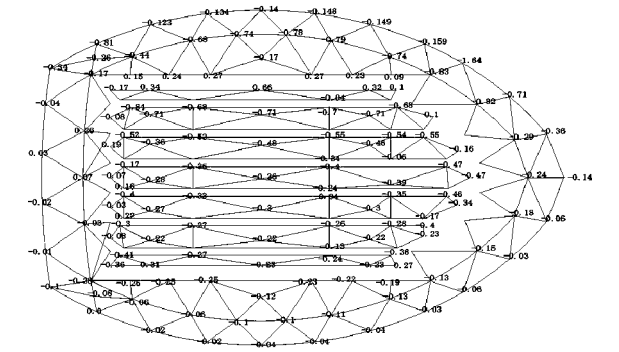


图 5 90°风向角下的结构体型系数分布

Fig.5 Structural Shape Coefficient Distribution Under 90° Wind Direction

目前,模拟风荷载随机过程的方法主要有线性滤波器法、谐波叠加法等<sup>[18-19]</sup>。谐波叠加法有比较严谨的理论依据,且计算方便简捷。因此,本文依据结构风洞试验数据,基于风场准定常假定,采用谐波叠加法,顺风向选用 Davenport 风速谱,横风向选用 Panofsky 风速谱,模拟得到网架结构上的脉动风压时程。

3.3 结构风致响应分析

将获得的风荷载作用在结构上,采用 ANSYS 得到结构中杆件的应变时程。图 6 为 90°风向角下平均风速 25 m·s<sup>-1</sup>的结构杆件应变时程。

从杆件应变时程曲线可以看出,在风荷载作用下,杆件的应变幅值变化比较大,说明结构在风荷载

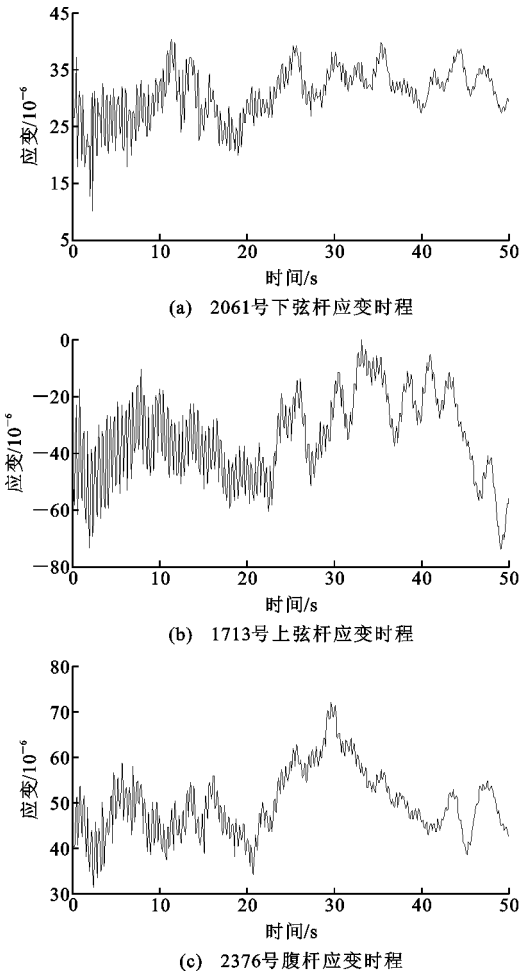


图 6 典型杆件应变时程曲线

Fig. 6 Typical Element Strain Time History Curves  
作用下可能产生疲劳损伤或破坏,故有必要研究结构在风荷载作用下的疲劳性能分析。

表 5 25 m · s<sup>-1</sup> 设计风速下风致疲劳损伤值区间划分及杆件数量

Tab. 5 Interval Division and Number of Members of Wind-induced Fatigue Damage Value Under 25 m · s<sup>-1</sup> Design Wind Speed

区间	总累积疲劳损伤值 $D$	杆件状态	不同杆件状态下的杆件数量					
			工况 1		工况 2		工况 3	
			90°风向角	210°风向角	90°风向角	210°风向角	90°风向角	210°风向角
第 1 区间	$D>1\times10^{-7}$	发生疲劳破坏	6	0	7	0	13	4
第 2 区间	$1\times10^{-9}<D<1\times10^{-7}$	发生疲劳损伤	19	8	56	14	101	22
第 3 区间	$1\times10^{-12}<D<1\times10^{-9}$	可能发生疲劳	373	65	579	86	698	156

构完好时发生疲劳破坏和损伤的杆件数量在工况 1 下 90°风向角时为 25 根,210°风向角时为 8 根;网架结构易损杆件刚度降低 10%时发生疲劳破坏和损伤的杆件数量在工况 2 下 90°风向角时为 63 根,210°风向角时为 14 根,分别为结构完好时的 2.52 倍、1.75 倍;网架结构易损杆件刚度降低 30%时发生疲劳破坏和损伤的杆件数量在工况 3 下 90°风向角时为 114 根,210°风向角时为 26 根,分别为结构完好时的 4.56 倍、3.25 倍。因此,网架结构完好

3.4 结构疲劳性能分析

3.4.1 工况的确定

本文研究了 90°,210°风向角下 100 年重现期设计风速和良态风速下结构的风致疲劳性能。考虑到随着使用年限增长,结构不可避免地有损伤而导致刚度降低,一般情况下结构中刚度最先降低的往往是那些先产生风致疲劳损伤的杆件。因此,本文通过分析得到结构在设计风速下所有杆件的风致疲劳累加损伤值,并把损伤值前 1 000 个较大杆件(约占结构总杆件数的 8%)作为风致疲劳易损杆件。采用这些杆件的刚度降低来模拟结构随着使用年限增长而导致的损伤。本文研究的工况如表 4 所示。

表 4 结构风致疲劳分析工况

Tab. 4 Structural Wind-induced Fatigue Analysis Cases

工况编号	风向角/(°)	风速	结构状态
1	90,210	100 年重现期的设计风速	完好
2			1 000 根易损杆件刚度降低 10%
3			1 000 根易损杆件刚度降低 30%
4		良态风速	完好
5			1 000 根易损杆件刚度降低 10%
6			1 000 根易损杆件刚度降低 30%

3.4.2 设计风速下的疲劳性能分析

根据荷载规范<sup>[16]</sup>和工程所在地气候条件,100 年重现期的设计风速取为 25 m · s<sup>-1</sup>。将疲劳损伤值划分为 3 个区间。疲劳损伤值区间划分及不同工况下的杆件数量如表 5 所示。

从表 5 可以看出:在 25 m · s<sup>-1</sup> 风速下,网架结

时,风致结构疲劳损伤程度较轻,但是当结构出现损伤时,发生疲劳损伤或破坏的杆件急剧增多,风致结构疲劳损伤程度恶化较快。结构发生疲劳破坏和损伤的杆件数量在 90°风向角时比在 210°风向角时要多,这是因为,虽然这 2 个风向角的结构体型系数相差不大,但是 90°风向角的迎风面积最大,因此,结构所受到的风荷载较大,结构各杆件应变时程的幅值也较大。

图 7 为风向角 90°时风致疲劳损伤或破坏杆件



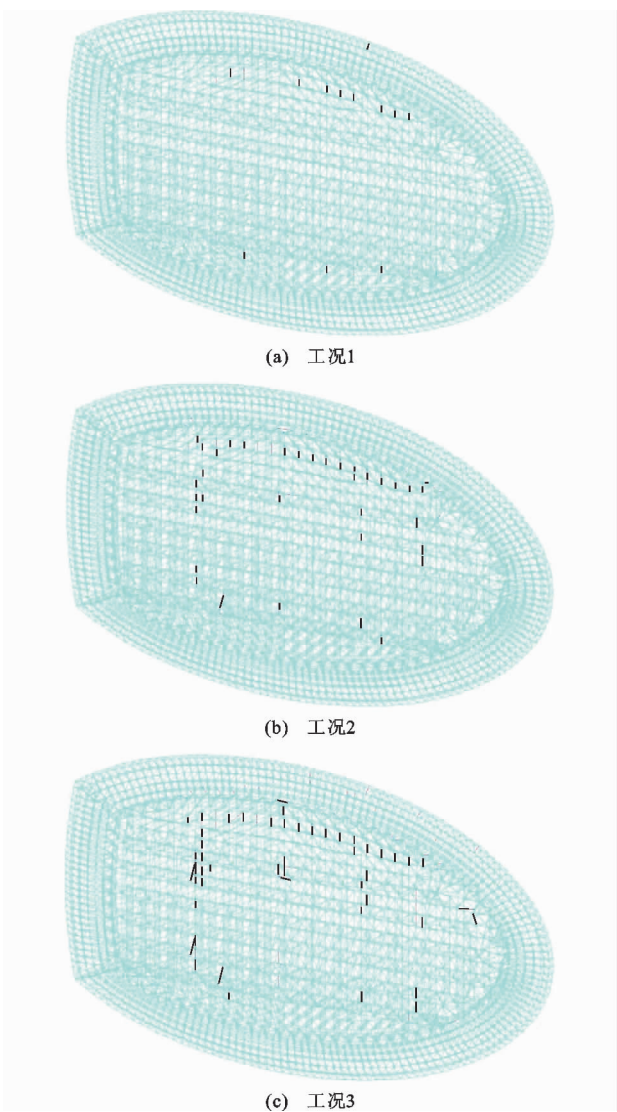


图 7 90°风向角时各工况下风致疲劳损伤或破坏杆件位置分布

Fig. 7 Location Distribution of Fatigue or Damage Members in Cases Under 90° Wind Direction

的分布与规律,其中“粗线段”为发生风致疲劳损伤或破坏的杆件。从图 7 可以看出,结构中发生风致疲劳损伤或破坏的杆件数量随着结构中风致疲劳易损杆件刚度降低而急剧增加。同时可以看出,在 90°风向角下,结构中可能发生风致疲劳损伤或破坏的杆件主要位于来流风方向。

3. 4. 3 良态风速下的疲劳性能分析

采用公式(4)可分析出杆件出现风致疲劳破坏的寿命,如表 6 所示。从表 6 可以看出,在良态风速下,90°风向角时,当网架结构完好和网架结构易损杆件刚度降低 10%时结构杆件在 100 年建筑使用年限内都不会发生风致疲劳破坏,仅当网架结构易损杆件刚度降低 30%时,有 2 根杆件在 100 年建筑

表 6 90°风向角良态风速下各工况出现疲劳破坏的杆件及疲劳寿命

Tab. 6 Fatigue Damage and Fatigue Life of Elements in Cases Under 90° Direction Normal Wind Speed

工况编号	4	5	6	
最大疲劳损伤值	$1.3 \times 10^{-8}$	$3.1 \times 10^{-8}$	$2.3 \times 10^{-7}$	$1.5 \times 10^{-7}$
杆件编号	2061	2061	2183	2061
出现风致疲劳破坏寿命/年	750.03	324.14	43.40	66.60

使用年限内会发生疲劳破坏。210°风向角时,即使网架结构易损杆件刚度降低 30%,也没有结构杆件在 100 年建筑使用年限内发生风致疲劳破坏。因此,在良态风速下,结构风致疲劳破坏发生的可能性很小。

4 结 语

(1)网架结构发生疲劳破坏和损伤杆件主要分布于来流风方向。随着结构使用年限增加,结构不可避免地带损伤服役,会加重结构的风致疲劳,随着结构刚度降低,结构风致疲劳损伤程度急剧恶化,发生风致疲劳破坏和损伤的杆件成倍增加。这说明网架结构在有损伤情况下,风致疲劳问题应引起重视。

(2)在良态风速下,当结构刚度降低到一定程度时,在 100 年建筑使用寿命内也有杆件发生风致疲劳破坏。因此,为了保证结构的风致安全,也应重视结构在良态风速下的风致疲劳问题。特别是当网架结构在高基本风压地区服役时,风致疲劳问题更应该引起关注。

参考文献:

References:

[1] 刘 晖,瞿伟廉,王锦文,等.基于有限测点信息的大型空间网架结构智能工作状态评估技术研究[J].土木工程学报,2007,40(12):52-58.  
LIU Hui, QU Wei-lian, WANG Jin-wen, et al. A Study on Estimation of the Intelligent Work Status of Large Space Truss Structures Based on Limited Measurement Information[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(12): 52-58.

[2] 吴德飞,童根树.含初始缺陷钢结构损伤累积至断裂及后期的调查分析[J].工程力学,2006,23(8):160-167.  
WU De-fei, TONG Gen-shu. Damage Accumulation Fracture and Post Fracture Analyses for Initially Flawed Steel Structures[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(8): 160-167.

- [3] 徐国彬,赵杰,李沐钢.焊接球节点网架整体疲劳破坏断口分析[J].空间结构,1999,5(3):54-60.  
XU Guo-bing, ZHAO Jie, LI Mu-gang. Analysis of Break Section of Integral Fatigue Failure in Space Truss with Welded-ball Joints[J]. Spatial Structures, 1999, 5(3): 54-60.
- [4] 廖芳芳,王伟,李文超,等.钢结构节点断裂的研究现状[J].建筑科学与工程学报,2016,33(1):67-75.  
LIAO Fang-fang, WANG Wei, LI Wen-chao, et al. Review on Research Status of Connection Fracture of Steel Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(1): 67-75.
- [5] RADAJ D, SONSINO C M, FRICKE W. Recent Developments in Local Concepts of Fatigue Assessment of Welded Joints[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(1): 2-11.
- [6] THEVENET D, GHANAMEH M F, ZEGHLOUL A. Fatigue Strength Assessment of Tubular Welded Joints by an Alternative Structural Stress Approach [J]. International Journal of Fatigue, 2013, 51(2): 74-82.
- [7] DOERK O, FRICKE W, WEISSENBOM C. Comparison of Different Calculation Methods for Structural Stresses at Welded Joints[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(5): 359-369.
- [8] 刘会军,张爱林.脉动风荷载作用下弦支穹顶结构的疲劳分析[J].钢结构,2009,24(7):11-15.  
LIU Hui-jun, ZHANG Ai-lin. Fatigue Analysis of Suspend-dome Under Fluctuating Wind Load [J]. Steel Construction, 2009, 24(7): 11-15.
- [9] 高博青,刘福祺,王正光,等.随机风荷载下的单层球面网壳的整体疲劳分析[J].科学通报,2007,23(1): 106-110.  
GAO Bo-qing, LIU Fu-qi, WANG Zheng-guang, et al. Integral Fatigue Analysis of Single-layer Spherical Reticulated Shells Under Stochastic Wind Loads[J]. Bulletin of Science and Technology, 2007, 23(1): 106-110.
- [10] 王强.大跨悬挑结构的风致疲劳效应研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.  
WANG Qiang. The Wind-induced Fatigue Effects of Large-span Cantilevered Structures[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [11] 叶继红,申会谦.风荷载下空间网格结构疲劳性能[J].东南大学学报:自然科学版,2016,46(4):842-847.  
YE Ji-hong, SHEN Hui-qian. Fatigue Performance of Spatial Latticed Structures Under Wind Loads[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2016, 46(4): 842-847.
- [12] 曾春华,邹十践.疲劳分析方法及应用[M].北京:国防工业出版社,1991.  
ZENG Chun-hua, ZOU Shi-jian. Fatigue Analysis Method and Implement[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991.
- [13] 周俊,童小燕.雨流计数的快速实现方法[J].科学技术与工程,2008,8(13):3544-3547,3558.  
ZHOU Jun, TONG Xiao-yan. Rapid Realization Method of Rain-flow Counting[J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(13): 3544-3547, 3558.
- [14] MINER M A, CALIF S M. Cumulative Damage in Fatigue[J]. Journal of Applied Mechanics, 1945, 12(3): 159-164.
- [15] 方冬慧,刘永杰,陈宜言,等.Q345桥梁钢超长寿命疲劳性能研究[J].中国科技论文在线,2009,4(7):480-484.  
FANG Dong-hui, LIU Yong-jie, CHEN Yi-yan, et al. Super Long Life Fatigue Behaviors of Q345 Bridge Steel[J]. Sciencepaper Online, 2009, 4(7): 480-484.
- [16] GB 50009—2012,建筑结构荷载规范[S].  
GB 50009—2012, Load Code for the Design Building Structures[S].
- [17] 于秀雷,梁槲果,郭必武.武汉体育中心体育馆表面风压的风洞试验研究[J].建筑结构,2008,38(2):103-105.  
YU Xiu-lei, LIANG Shu-guo, GUO Bi-wu. Wind Tunnel Test for Wind Pressure on Gymnasium of Wuhan Sport Center[J]. Building Structure, 2008, 38(2): 103-105.
- [18] 袁波,应惠清,徐佳炜.基于线性滤波法的脉动风速模拟及其MATLAB程序的实现[J].结构工程师,2007,23(4):55-61.  
YUAN Bo, YING Hui-qing, XU Jia-wei. Simulation of Turbulent Wind Velocity Based on Linear Filter Method and MATLAB Program Realization [J]. Structural Engineers, 2007, 23(4): 55-61.
- [19] 边建烽,魏德敏.大跨空间结构风速时程的数值模拟理论[J].暨南大学学报:自然科学版,2005,26(1): 87-90.  
BIAN Jian-feng, WEI De-min. Wind Velocity Time-history Numerical Simulation Theories in Long-span Spatial Structures [J]. Journal of Jinan University: Natural Science, 2005, 26(1): 87-90.