

影响不对称支撑圆形钢天线风致疲劳寿命的因素

王钦华^{1,2}, 顾明¹

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 汕头大学土木工程系, 广东汕头 515063)

摘要:在求得结构不同风向、风速下风致响应以及结构所在位置处的风速风向联合分布函数的基础上, 基于经典的疲劳累积损伤理论, 对一实际不对称支撑圆形截面钢结构进行风致疲劳寿命估计。通过实例分析的结果, 讨论了风向、结构表面粗糙度、涡激共振以及平均风速等重要因素对结构风致疲劳寿命的影响。计算结果表明: 1) 风向对结构的风致疲劳累积损伤影响较大, 在出现概率大的风向区间内造成的疲劳累积损伤较大; 2) 结构表面粗糙度对结构的风致疲劳寿命影响也较大, 疲劳寿命随着表面粗糙度的增加而减小; 3) 涡激共振对结构的疲劳寿命有一定的影响, 在计算结构的风致疲劳寿命时, 不应该忽略涡激共振的影响; 4) 平均风荷载对结构的风致疲劳寿命影响较小。

关键词: 不对称支撑结构; 风致疲劳寿命; 风速风向联合分布; 结构表面粗糙度; 涡激共振

中图分类号: TU312.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2010)04-0019-07

Influence Factors on Wind-induced Fatigue Life of Steel Circular Antenna with Asymmetric Brace

WANG Qin-hua^{1,2}, GU Ming¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China;

2. Department of Civil Engineering, Shantou university, Shantou 515063, P. R. China)

Abstract: Wind-induced responses of a single steel circular antenna with an asymmetric brace were computed considering wind speed and direction joint distribution function at location of the structure, and then wind-induced fatigue life of the structure was estimated in frequency domain and time domain, respectively. Some parameters, including wind direction, surface roughness, vortex-induced resonance and mean wind speed, which would have effects on the wind-induced fatigue life of the structure, were discussed. It is found that 1) wind direction has great effects on wind-induced fatigue damage, that is, significant fatigue can occur in wind direction of high probability; 2) the more roughness the surface of structure is, the shorter the wind-induced fatigue life is; 3) the effects of vortex resonance on wind-induced fatigue life should not be neglected; 4) the mean velocity has slight impact on the wind-induced fatigue life of the structure.

Key words: structure with asymmetric; wind-induced fatigue life; wind speed and direction joint distribution function; surface roughness; vortex-induced resonance

收稿日期: 2009-12-27

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(50621062); 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90715040); 国家自然科学基金重点项目(50638010)

作者简介: 王钦华(1979-), 男, 博士, 主要从事结构抗风研究, (E-mail) concrete60mp@163.com。

对于轻质、柔性结构,风荷载是其主要的控制荷载,结构在风荷载的作用下产生较大幅度的振动,而结构在经历了大量的应力循环后,易发生风振疲劳破坏。风振疲劳破坏的例子较多^[1-7],但是对于风振疲劳研究的文献较少。Gu 等^[8]对上海地区的气象资料进行统计分析得到了该地区风速风向联合分布函数,并对杨浦大桥进行抖振响应分析,得到每个风向角各个风速下钢箱梁关键点处的应力功率谱密度函数,用蒙特卡洛方法模拟了关键点处的应力时程,然后用雨流计数法对应力时程进行计数得到应力范围的分布函数,在此基础上对杨浦大桥进行风振疲劳分析。M. Dionne 和 A. G. Davenport^[9]建立了阵风响应因子和风振疲劳之间的关系,其文献将结构的响应分为背景响应和共振响应两部分,用 Miner 累积损伤理论计算结构的疲劳寿命,这个方法只能用于由顺风向力引起的疲劳问题。M. P. Repetto 和 G. Solari^[10]将结构的应力响应分为背景响应和共振响应,用累积损伤理论对结构进行顺风向疲劳寿命分析。此后, M. P. Repetto 和 G. Solari^[11-13]考虑了顺风向力、横风向力以及涡激共振的影响对圆形线状结构进行风振疲劳寿命分析,但其文献中没有详细讨论风向、结构表面粗糙度以及平均风速对疲劳寿命的影响。文献^[14-15]基于一钢质天线气动弹性模型风洞试验结果,分别用频域和时域的方法研究了其风致疲劳。

该文在求得结构不同风向、风速下风致响应以及结构所在位置处的风速风向联合分布函数的基础上,基于经典的疲劳累积损伤理论,对不对称支撑圆形截面钢结构进行风致疲劳寿命估计,通过实例分析的结果,详细讨论了风向、结构表面粗糙度、涡激共振以及平均风速等重要因素结构风致疲劳寿命的影响。

1 结构风致疲劳寿命分析理论

结构风致疲劳寿命的分析方法可以分为 3 类:第 1 类是时域法,其目的是从用于疲劳分析的应力时程响应中,通过雨流计数法计数得到应力范围或者应力幅值的概率密度分布函数,第 2 类是基于随机振动和概率论的频域方法,其目的是由应力功率谱响应通过穿越分析得到应力范围或者应力幅值的概率分布密度函数。第 3 类主要针对考虑背景响应不可忽略的结构风致疲劳问题,为了缩减计算量,提高计算效率,先根据随机振动理论求得用于疲劳分析的应力响应谱,再用 Monte Carlo 法模拟应力时程,计数后求得应力范围或者幅值的概率密度函数,

Gu 等^[8]定义这种方法为频-时域方法。以上 3 类方法是基于线性疲劳累积损伤理论,其主要不足在于:损伤与荷载状态无关;累积损伤与荷载次序无关;不能考虑荷载间的相互作用。

1.1 风致疲劳寿命时域分析方法

由于结构的疲劳累积损伤与风向角和风速有关,首先要定义工况,假设每一个风向角范围 $[\theta_i, \theta_{i+1}]$ 下风速范围 $[v_j, v_{j+1}]$ 是第 $[i, j]$ 个工况,每个工况出现的概率为 p_{ij} ,可以由风速风向分布联合函数求得;第 $[i, j]$ 个工况下,单位时间内应力范围出现次数的数学期望为 $f_{L_{ij}}$,应力范围的概率密度函数 $f_{S_{ij}}$;单位时间内,第 k 级应力范围出现的次数为:

$$n(\bar{S}_k) = P_{ij} f_{L_{ij}} f_{S_{ij}}(\bar{S}_k)(S_k - S_{k-1}) \quad (1)$$

式中,应力范围的概率密度函数 $f_{S_{ij}}$ 是采用雨流计数法对应力时程进行计数,根据计数结果拟合得到;单位时间内应力范围出现次数的数学期望为:

$$f_{L_{ij}} = n_{ij} / t_{ij} \quad (2)$$

式中, n_{ij} 为用雨流法计数第 $[i, j]$ 个工况下的应力时程得到的应力范围的总次数; t_{ij} 为第 $[i, j]$ 个工况下应力时程的时间。

第 $[i, j]$ 个工况下的累积损伤为:

$$D_{[i,j]}^l = \sum_{k=1}^l \frac{n(\bar{S}_k)}{N(\bar{S}_k)} = \sum_{k=1}^l TP_{ij} f_{L_{ij}} \frac{f_{S_{ij}}(\bar{S}_k)(S_k - S_{k-1})}{N(\bar{S}_k)} \quad (3)$$

结构在时间 T 内总的累积损伤为:

$$D_r = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n D_{[i,j]} = T \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l P_{ij} f_{L_{ij}} \frac{f_{S_{ij}}(\bar{S}_k)(S_k - S_{k-1})}{N(\bar{S}_k)} \quad (4)$$

式中, $\bar{S}_k = (S_{k-1} + S_k) / 2$, S_k 为第 k 个应力范围, $S_0 = 0$ 兆帕; $N(\bar{S}_k)$ 为在应力范围 \bar{S}_k 的常幅疲劳荷载作用下结构疲劳破坏的循环次数。

1.2 风致疲劳寿命频域分析方法^[15-16]

对于随机平稳应力过程 $s(t)$,假设其应力幅值和峰值总数为相互独立的随机变量。如果该应力过程的应力范围分布用连续的概率密度函数表示,根据 $S-N$ 曲线和疲劳累积损伤准则,疲劳累积损伤可以改成下列的连续形式:

$$D = \int_0^\infty dn / N = \frac{m_p}{A} \int_0^\infty S^m f_s(S) dS \quad (5)$$

式中, dn 是在区间 dS 内应力范围的循环次数,它等于该区间内应力范围出现的概率 $f_s(S)dS$ 和应力幅值总次数 m_p 的乘积; m, A 是与材料性质有关的常数。

第 $[i, j]$ 工况下,单位时间内造成的疲劳累积损伤 $D_{0_{ij}}$ 为:

$$D_{0ij} = \frac{f_{L_{ij}}}{A} \int_0^{\infty} f_{S_{ij}}(S) S^m dS \quad (6)$$

式中, $f_{L_{ij}}$ 为第 $[i, j]$ 工况下单位时间内应力范围总数的数学期望; $f_{S_{ij}}(s)$ 为应力范围概率密度函数。以上 2 个参数可以通过疲劳分析关键点处的应力功率谱密度函数而求得^[13]。

T 时间内由第 $[i, j]$ 工况下内造成的累积损伤为:

$$D_{ij} = \frac{T}{A} P_{ij} f_{L_{ij}} \int_0^{\infty} f_{S_{ij}}(S) S^m dS \quad (7)$$

结构在时间 T 内的累积损伤为:

$$D = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n D_{ij} = \frac{T}{A} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n P_{ij} f_{L_{ij}} \int_0^{\infty} f_{S_{ij}}(S) S^m dS \quad (8)$$

应力参数定义为:

$$\Omega = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n P_{ij} f_{L_{ij}} \int_0^{\infty} S^m f_{S_{ij}}(S) dS = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n P_{ij} f_{L_{ij}} E(S^m)_{ij} \quad (9)$$

式中, $E(S^m)_{ij} = \int_0^{\infty} S^m f_{S_{ij}}(S) dS$

用等效窄带法^[16]求得的应力参数为:

$$\Omega = (2\sqrt{2})^m \Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} P_{ij} \nu_{0,ij}^+ (\sigma_{x,ij})^m \quad (10)$$

将公式(10)代入到公式(8)后,得

$$D = T\Omega/A \quad (11)$$

1.3 结构风致疲劳寿命分析流程

以上简单介绍了风致疲劳寿命分析方法,该节给出进行结构风致疲劳寿命分析流程:

1) 根据结构附近气象站处的风速风向实测资料,得到结构处的风速风向联合分布函数,计算每个风向风速区间出现的概率以及每个风向角下不同重现期对应的最大风速。由于在计算结构的风致疲劳寿命时,需要计算每个风速风向区间造成的疲劳累计损伤,每个风向区间下风速的最大值须根据疲劳寿命作为重现期来确定。

2) 假设结构的风致疲劳寿命,根据假设的疲劳寿命计算每个风向区间要考虑的最大风速。

3) 计算每个风向风速区间下,用于疲劳分析的应力响应。

4) 基于疲劳累计损伤理论用时域方法或者频域方法计算结构的疲劳寿命。

5) 判断假设的疲劳寿命与计算得到的疲劳寿命的差值是否满足要求,如果是,结束;如果不是,返回到

第 2) 步后循环计算,直到假设的疲劳寿命与计算得到的疲劳寿命的差值满足要求为止。

为了使结构风致疲劳寿命分析流程表述更加直观,图 1 给出了流程图。

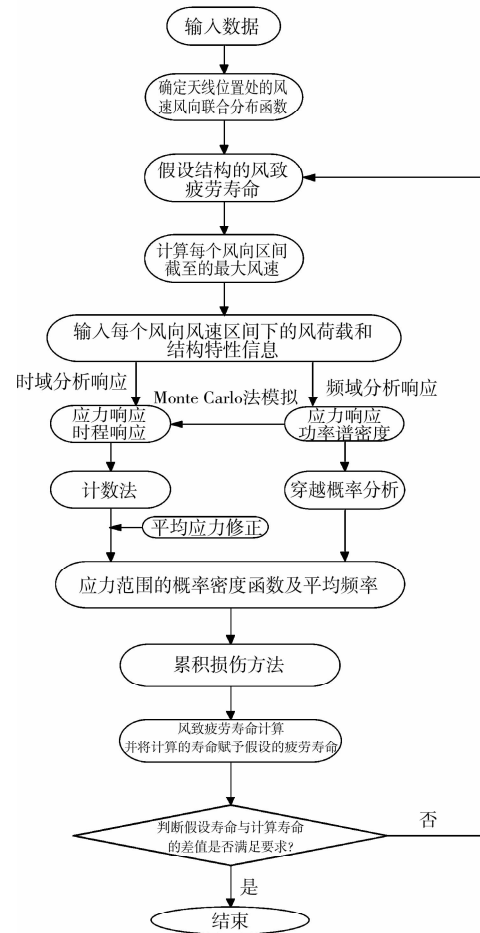


图 1 风振疲劳寿命分析流程图

2 实例分析

以某一位于上海的超高层建筑上的天线为实例进行分析,该高层建筑主楼高度为 245 m,主楼上部天线高为 87 m。天线顶端离地高度为 333 m。天线由下往上分段等截面,每段高度依次为 34 m、27 m、26 m,其直径分别为 2.4 m、1.75 m、1 m,壁厚各为 3 cm、2.5 cm、2 cm。在距离底部 34 m 处有一个斜支撑其直径为 1 m,见图 2 所示。

文献[14]中给出了天线结构位置处的风速风向联合分布函数,文献[17]介绍了求解不同风向角、风速下用于疲劳寿命分析的结构响应的方法。该文用文献[17]中的方法对天线结构疲劳关键点处进行应力响应分析,结构关键点的位置见文献[14]。此外,为了考虑结构表面粗糙度对结构风致疲劳寿命的影响,根据文献[18]结构表面粗糙度 ϵ 分别选用 0.002、

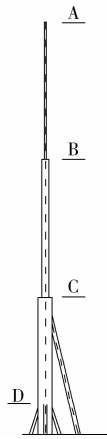


图 2 天线结构图

0.001 2、0.000 4。以 22.5 度风向间隔,将 0~360 度风向划分为 16 个风向区间。不考虑斜撑对结构风场影响时,结构关于 X、Y 轴对称,所以只计算 0~90 度风向下的响应即可,有关风向角的定义如图 3 所

示。风速范围间隔 $\Delta v_j = v_{j+1} - v_j$ 为 1 m/s, $v_0 = 0$, 在分析过程中以 $\bar{v}_j = (v_{j+1} + v_j)/2$ 。计算了 0~90 度风向角、所有风速下,结构关键点处的名义应力响应,由于篇幅的限制这里只给出几个典型工况下的名义应力响应。图 4 给出了不同风向、风速以及结构表面粗糙度下结构的名义应力响应谱。

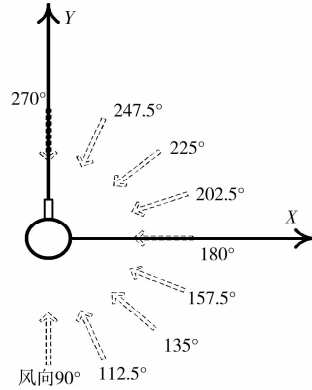


图 3 风向角的定义

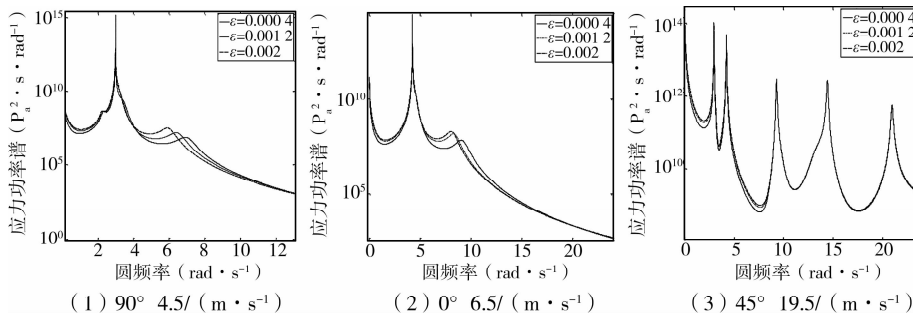


图 4 不同风向、风速以及结构表面粗糙度下结构的名义应力响应谱

由图 4(1)可知,在 90 度风向角 4.5 m/s 风速下,应力功率谱在 0.475 Hz 处出现唯一峰值,这是因为在该风向角和风速下结构发生一阶涡激共振。(2)图表明,在 0 度风向角 6.5 m/s 风速下结构发生二阶涡激共振。由(3)图可知,应力功率谱出现几个峰值,但在 0.475 Hz 和 0.675 Hz 处峰值最大,这表明在此风向角下结构的一阶和二阶阵型对结构响应的贡献较大。图 4 中所有的图表明在相同的风向角

和风速下,结构表面粗糙度 ϵ 越大结构的响应就越大。

图 5 给出了不同表面粗糙度下结构的应力根方差随风速的变化规律。图 5 中(1)~(4)图表明不考虑涡激共振时结构的应力响应随着风速的增大而增大;结构的粗糙度 ϵ 对结构的应力响应影响较大。在相同风速条件下,粗糙度 ϵ 越大,结构的应力响应也越大。

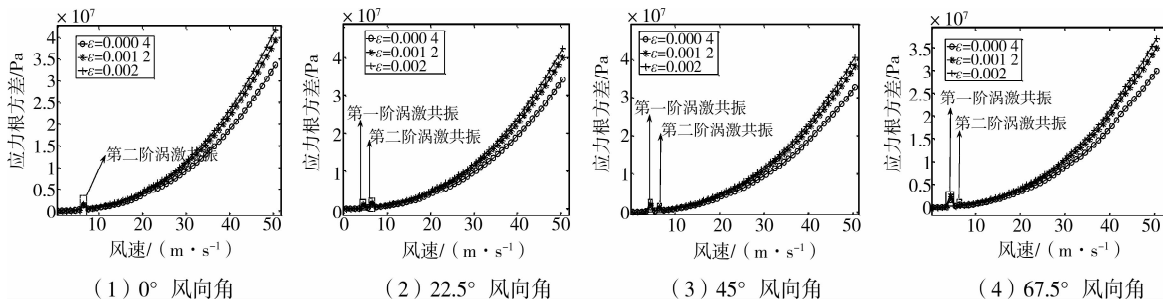


图 5 不同风速风向角风速下应力根方差

在求得不同风向角、风速下结构应力响应的基础上,对结构进行风致疲劳寿命估计。在计算结构的风振疲劳寿命时,根据《钢结构设计规范》(GB50017-2003)规定,构件连接类别选为 8 类,其 $S-N$ 曲线参数为 $m = 3, A = 4.1 \times 10^{11}$ 。以下讨论了风向、结构表面粗糙度、涡激共振以及平均风速等重要因素对结构风致疲劳寿命的影响。

2.1 平均风速对疲劳寿命的影响

根据应力响应功率谱,用 Monte Carlo 方法模拟了应力时程响应,并用雨流法对应力时程响应进行计数,用 Goodman 法则考虑了平均风荷载引起的平均应力的影响,得到了应力范围出现的概率,对天线进行风致疲劳寿命估计。

当表面粗糙度为 0.001 2 时,考虑平均风速的影响,用时域法计算得到的结构的风致疲劳寿命为 116.37 a;不考虑平均风速影响,用时域方法计算得

到的风致疲劳寿命为 117.95 a。从中可以看出平均风速对结构风振疲劳寿命影响较小。图 6—图 7 给出了 2 个典型风向角和风速下,模拟的应力时程响应,用雨流法计数应力时程并考虑平均应力影响的应力范围及其出现的次数以及应力范围在结构疲劳寿命期内的累积损伤。图 6 中(1)图表明 90 度风向角 4.5 m/s 风速下,结构发生一阶涡激共振的应力幅值为 4 MPa 左右,所以(2)图中用雨流计数法得到的接近 8 MPa 的应力范围(应力幅值的 2 倍)出现的次数最多,(3)图说明以某一阶振型振动产生的应力时程,产生疲劳累积损伤的应力范围为应力幅值的 2 倍。图 7 是考虑前 5 阶振型后得到的应力时程,其(3)图表明出现次数最多的小应力范围产生的疲劳累积损伤较小,而出现次数相对较少的大应力范围造成的累积损伤较大。

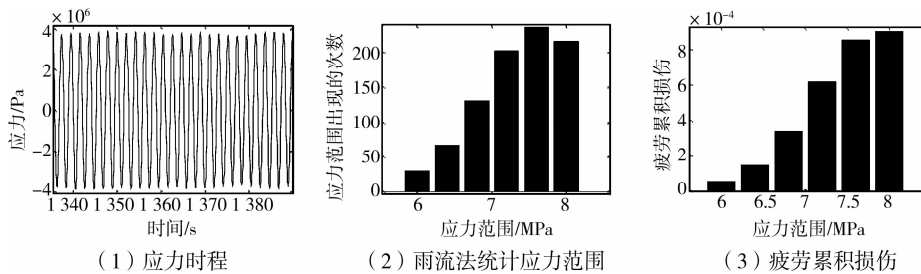


图 6 90 度风向角 4.5 m/s 风速下雨流计数结果和累积损伤

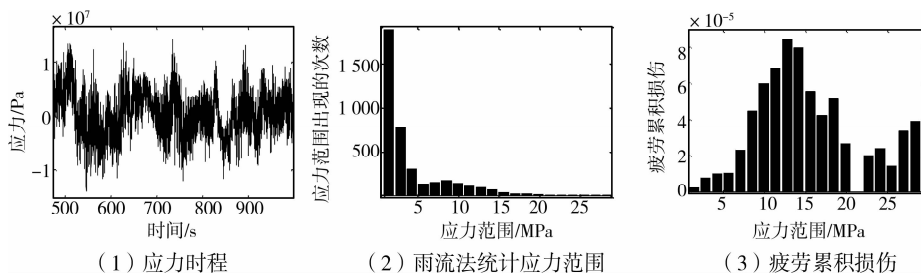


图 7 45 度风向角 19.5 m/s 风速下雨流计数结果和累积损伤

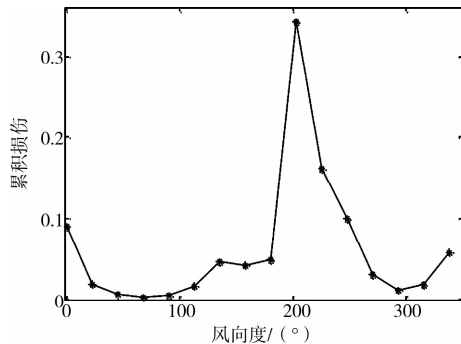


图 8 考虑涡激共振时累积损伤随风向角的变化

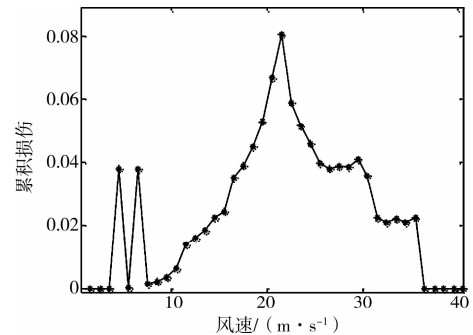


图 9 考虑涡激共振时累积损伤随风速的变化

图 8 和图 9 给出了疲劳累积损伤随风向角和风速的变化规律,从图 8 中可以看出风向角对疲劳累

计损伤的影响较大。从图 9 中可以看出 4.5 m/s、6.5 m/s 以及 20~30 m/s 风速下产生的疲劳累

损伤较大,这是因为:在 4.5 和 6.5 m/s 风速下结构产生涡激共振,20~30 m/s 风速下引起结构较大的应力。

2.2 结构表面粗糙度对疲劳寿命的影响

表面粗糙度分别为 0.000 4、0.001 2 以及 0.002 时,用频域法计算得到的结构风致寿命分别为 142.57 a、101.54 a 以及 91.62 a。由此可见,结构表面粗糙度对圆形单体结构的风致疲劳寿命影响很大,结构的疲劳寿命随着表面粗糙度的增加而减小。这是因为当雷诺数大于 4×10^4 时,结构表面粗糙度对结构的阻力系数影响很大,阻力系数随着结构表面粗糙度的增加而增大,因此结构的应力响应随着结构表面粗糙度的增加而增大。图 10 给出了风速

风向区间出现的概率。图 11 给出了结构表面粗糙度参数为 0.000 4、0.001 2 以及 0.002 时,各个风速风向工况下的风致疲劳累积损伤。

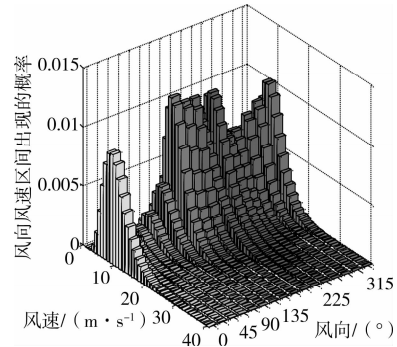


图 10 风速风向区间出现的概率

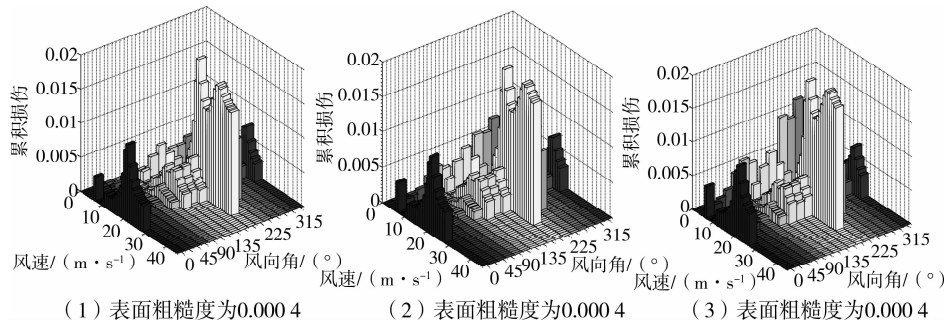


图 11 每个工况下不同结构表面粗糙度对应的累积损伤

从图 11 中可以看出 $0 \sim 25^\circ$ 以及 $150 \sim 270^\circ$ 风向角工况造成的风致疲劳累积损伤较大。 $50 \sim 120^\circ$ 风向角以及 $280 \sim 300^\circ$ 风向角下的疲劳累积损伤较小,这和图 10 表示的结构位置处风速风向区间出现的概率一致。这说明,风向对结构的风致疲劳累积损伤影响较大,在出现概率大的风向区间内造成的风致疲劳累积损伤较大。

图 11 表明:在所有风向角下,风速为 25~30 m/s 区间内的累计损伤较大;风速 4.5 m/s、6.5 m/s 时,结构发生涡激共振,此时的累积损伤也较大;大于 38 m/s 的风速产生的疲劳累积损伤为零,这是因为以结构风致疲劳寿命为重现期计算得到的每个风向区间下的最大风速都小于 38 m/s;不同表面粗糙

度结构在各个风速风向区间内疲劳累积损伤的趋势一致。

2.3 涡激共振对疲劳寿命的影响

本节分别用频域和时域的方法计算了不考虑以及考虑涡激共振影响的 3 种表面粗糙度下结构的风致疲劳寿命,其结果如表 1 所示。从表 1 中可知结构的涡激共振对结构风致疲劳寿命有一定程度的影响,是不可忽略的。图 12 给出了不同结构表面粗糙度下不考虑涡激共振时用频域方法计算的累计损伤随风速和风向的变化曲线。从(2)图中可以看出:当不考虑涡激共振影响时,小于 10 m/s 风速造成的疲劳累积损伤很小。

表 1 考虑与不考虑涡激共振时得到的风致疲劳寿命的比较

a

| 计算方法 表面粗糙度 | 频域的等效窄带法 | | 域法 | |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| | 考虑涡激共振、不 考虑平均风速的影响 | 不考虑涡激共振、不 考虑平均风速的影响 | 考虑涡激共振、不 考虑平均风速的影响 | 考虑涡激共振、考虑 平均风速的影响 |
| $\epsilon = 0.000\ 4$ | 142.57 | 148.52 | 169.51 | 165.11 |
| $\epsilon = 0.001\ 2$ | 101.54 | 108.53 | 117.95 | 116.37 |
| $\epsilon = 0.002$ | 91.62 | 96.29 | 105.44 | 102.79 |

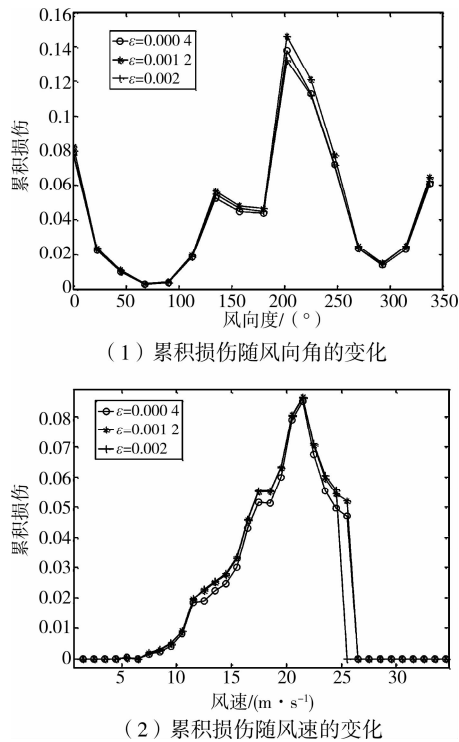


图12 不考虑涡激共振时累计损伤随风速和风向的变化

3 结论

在求得结构不同风向、风速下风致响应以及结构所在位置处的风速风向联合分布函数的基础上,基于经典的疲劳累积损伤理论,对单体结构进行风致疲劳寿命估计。得到的几个重要结论为:风向对结构的风致疲劳累积损伤影响较大,在出现概率大的风向区间内造成的风致疲劳累积损伤较大,因此在进行风致疲劳寿命分析时,需根据气象资料得到建筑物位置处的风速风向联合分布函数;结构表面粗糙度对圆形柱状结构的风致疲劳寿命影响很大,结构的疲劳寿命随着表面粗糙度的增加而减小;涡激共振对结构的疲劳寿命有一定的影响,在计算圆形柱状结构的风致疲劳寿命时,不应该忽略涡激共振的影响;平均风荷载对结构的风致疲劳寿命影响较小。

参考文献:

- [1] B N Pritchard. Steel chimney oscillations: a comparative study of their reported performance versus predictions using existing design techniques [J]. Engineering Structures, 1984, 6(4):315-323.
- [2] C VERWIEBE, A GLOCKNER. Failure of steel chimneys due to vortex excited vibration in the second mode[C]//Proceeding of 11th international conference on wind engineering. 2003. Lubbock, Tex.
- [3] 邓洪洲, 屠海明, 王肇民. 桅杆结构随机风振疲劳研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(4):19-23.
DENG HONG-ZHOU, TU HAI-MING, WANG ZHAO-MIN. Study on stochastic fatigue of guyed masts under wind load[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(4):19-23.
- [4] 张其林, U PEIL. 欧美塔桅钢结构现状研究[J]. 特种结构, 1996, 13(2):58-63.
ZHANG QI-LIN, U PEIL. Study about the current situation of guyed mast structure in Europe and American[J]. Special Structure, 1996, 13(2):58-63.
- [5] P TRANVIK, G ALPSTEN. Dynamic behaviour under wind loading of a 90 m steel chimney[R]. Alstom Power Sweden, 2002.
- [6] 王世村, 杨晓强. 高耸结构风振疲劳的随机裂纹扩展分析[J]. 钢结构, 2007, 8(22):43-47.
WANG SHI-CUN, YANG XIAO-QIANG. Stochastic analysis of fatigue crack growth for high-rise structures under wind loading[J]. Steel Construction, 2007, 8(22):43-47.
- [7] 邓洪洲, 王肇民, 马星. 桅杆结构风振响应及疲劳研究进展[J]. 特种结构, 2006, 23(3):14-18.
DENG HONG-ZHOU, WANG ZHAO-MIN, MA XING. State of the art paper about wind-induced response and fatigue of guyed masts [J]. Special Structures, 2006, 23(3):14-18.
- [8] GU M, XU Y L, CHEN L Z, et al. Fatigue life estimation of steel girder of yangpu cable-stayed bridge due to buffeting[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 80:383-400.
- [9] M CORAZAO, A G DAVENPORT. A simple relationship between the gust response factor and fatigue damage[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988, 30:45-54.
- [10] M P REPETTO, G SOLARY. Dynamic alongwind fatigue of slender vertical structure [J]. Engineering Structure, 2001, 23:1622-1633.
- [11] M P REPETTO, G SOLARY. Dynamic crosswind fatigue of slender vertical structures [J]. Wind and Structures, 2002, 5(6):527-542.
- [12] M P REPETTO. Wind-induced response and fatigue of slender vertical structures[D]. Genova The University of Genova, 2003
- [13] M P REPETTO, G SOLARY. Directional wind-induced fatigue of slender vertical structure[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(7):1032-1040.

(下转第37页)