

格构塔架顺风位移响应实用计算模型 与求解内力位移加载法*

柳国环, 李宏男

(大连理工大学土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 基于风洞试验得到的格构式塔架顺风向一阶广义荷载谱, 利用导出的实用高阶广义荷载谱, 进一步导出了位移反应的实用计算公式, 提出了“位移加载”求解格构塔架内力的方法, 并以一输电塔为例描述了该方法的实现过程。与已有方法相比, 计算公式可考虑高阶模态的贡献且推导过程更加合理, 建议的内力求解方法可避免传统方法中需要建立等效静力风荷载的这一步骤。针对格构式高耸结构, 文中位移计算公式实用, 内力求解方法合理, 操作简单, 可进一步推广应用。

关键词: 风洞试验; 广义荷载谱; 输电塔; 等效静力风荷载

中图分类号: P315.9; U442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4523 (2009) 01-0001-05

引言

不同于一般建筑结构, 格构式塔架 (例如: 输电塔) 是一种镂空率较高结构^[1-3], 较难甚至无法通过多点同步测压方法对作用其表面的风荷载进行准确测量, 而常采用高频底座天平 (High Frequency Force Balance, 简称HFFB) 技术得到结构基底弯矩 (或扭矩), 进一步可得到一阶振型广义力和一阶广义荷载谱。邹良浩博士在同济大学风洞试验室采用HFFB技术对3个不同类型的格构塔架半刚性模型进行了风洞试验, 考虑了一阶振型惯性力的影响^[4,5], 首次拟合出了格构式塔架一阶振型广义荷载谱, 给出了高阶广义荷载谱的解析模型; 文献[6]推导出了实用高阶广义荷载谱表达式; 于秀雷等考虑了一阶振型的贡献推导了格构塔架的等效静力风荷载 (Equivalent Static Wind Loads, 简称ESWLs) 简化公式^[7]。此外, 文献[8~11]分别对不同结构类型的ESWLs方面作了相关研究。

为了便于工程应用, 本文基于上面风洞试验得到的顺风向一阶振型广义荷载谱, 采用在此基础上导出的实用高阶广义荷载谱, 进一步导出了计算位移反应的实用计算公式, 该公式可考虑高阶振型贡

献, 正确利用了单纯数学意义上的双边功率谱 $R(\omega)$ 与相应的具有实际意义的单边功率谱 $S(f)$ 的转化关系。针对格构式塔架, 提出了将“位移加载”求解其构件内力方法, 该方法简单合理, 可以为工程设计人员减少工作量。

1 实用高阶广义荷载谱模型

文献[6]对实用高阶广义荷载谱模型进行了推导, 这里给出简要描述。

格构塔架的实用模型高阶广义荷载谱表达式为

$$S_n^G(f) = \frac{\Phi_{L_R} \Phi}{\Phi_{L_R} \Phi} S_1^G(f) \quad (n=1, n=Z) \quad (1)$$

式中 $S_n^G(f)$ ($n=2, n=Z$) 与 $S_1^G(f)$ 分别表示高阶与一阶广义荷载谱; Φ 和 Φ_{L_R} 表示振型向量和位置矩阵; $S_n^G(f)$ 与 $S_1^G(f)$ 的本质联系是结构的振型。其中, $S_1^G(f)$ 可对文献[4]在试验基础上统计得到的顺风向的一阶广义荷载谱 (该谱为单边功率谱) 作简单数学变化得到, 即

$$S_1^G(f) = \frac{a(fB/V_H)^{1.05}}{f[1+b(fB/V_H)^2]^{1.5}} \sigma^2 \quad (2)$$

式中 $\sigma = (1/2)C_M \rho V_H^2 A R$ 为塔架基本振型广义荷载均方根; C_M 为基本振型广义荷载均方根系数, a

* 收稿日期: 2007-11-09; 修订日期: 2008-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50638010); 教育部创新团队基金资助项目 (IRT0518); 高等学校博士点基金资助项目 (20060141027)

和 b 为拟合参数,对于输电塔,依次为0.08, 14.6和113.5^[4]; ρ 为空气密度; A 和 B 分别为风来流方向格构塔架的轮廓面积和底部宽度; V_H 为输电塔顶部平均风速; R 为塔架实心面积与轮廓面积的比值。

2 考虑多模态贡献的位移实用计算公式推导

为了更便于工程应用,本节根据结构动力学和随机振动理论,进一步推导出了可考虑高阶振型贡献的位移反应实用计算公式。

根据模态叠加法^[12],结构 z 高度位置的实际位移反应可表达为

$$y(z, t) = \sum_{n=1}^N \Phi_n(z) q_n(t) \quad (3)$$

相应地,由随机振动理论知识可知^[13,14], z 高度位置的 y 传递函数可表达为

$$H_y(z, i\omega) = \sum_{n=1}^N \Phi_n(z) H_n(i\omega) \quad (4)$$

式中 $H_n(i\omega) = \{K_n [1 + i2\xi(\omega/\omega_n) - (\omega/\omega_n)^2]\}^{-1}$, 是广义位移 $q_n(t)$ 的传递函数; $K_n = M_n \omega_n^2$ 为第 n 阶振型的广义刚度; N 表示振型参与的数目。此时, z 高度位置的位移输出功率谱可表示为

$$S_y(z, \omega) = \sum_{n=1}^N \Phi_n(z) |H_n(i\omega)|^2 R_n(\omega) + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \Phi_k(z) \Phi_l(z) H_k(i\omega) H_l(i\omega) \cdot \gamma_{kl} \sqrt{R_k(\omega) R_l(\omega)} \quad (5)$$

式中 $R_{j(k,l)}(\omega)$ 为第 j (k, l)阶振型的功率谱密度(严格数学意义的双边功率谱,下文将被替换为上节中具有物理意义的单边广义荷载谱); γ_{kl} 为相关系数,可表示为^[15]

$$\gamma_{kl} = \rho_{kl} u_{kl} \quad (6)$$

其中

$$\rho_{kl} = \frac{\int_{\omega_0 - \delta/2}^{\omega_0 + \delta/2} \Phi_n(z) \left[|H_n(i\omega)|^2 R_n(\omega) d\omega + \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^2 |H_n(i\omega)|^2 R_n(\omega) \delta \right]}{\int_{\omega_0 - \delta/2}^{\omega_0 + \delta/2} \frac{\Phi_n(z)}{M_n^2 \omega_n^4} \left[R_n(\omega) d\omega + \frac{(1 - 2\xi_n)^2}{4\xi_n^2} R_n(\omega) \delta \right]} \quad (10)$$

式(10)虽然给出了 $\sigma_y(z)$ 的表达式,但尚不能利用其直接对结果进行计算,下面将分别确定上式中 δ , $R_n(\omega)$ 和 $\int_{\omega_0 - \delta/2}^{\omega_0 + \delta/2} R_n(\omega) d\omega$ 的具体表达式。

$$\frac{8\sqrt{\xi_k \xi_l (\lambda_{kl} \xi_k + \xi_l) \lambda_{kl}^2}}{(1 - \lambda_{kl}^2)^2 + 4\xi_k \xi_l \lambda_{kl} (1 + \lambda_{kl}^2) + 4(\xi_k^2 + \xi_l^2) \lambda_{kl}^2} \quad (7)$$

$u_{kl} =$

$$\operatorname{Re} [R_{kl}(\omega)] / \sqrt{R_k(\omega) R_l(\omega)} \Big|_{\omega = \omega_m \text{ or } \omega_j} \quad (8)$$

有限自由度的结构体系受风荷载激励产生振动,此物理过程在随机振动领域称之为多点输入多点输出。式(6)中, ρ_{kl} 反映了不同模态之间的相关性; u_{kl} 反映了多点激励输入的相关性。式(7)中, $0 < \lambda_{kl} = f_k/f_l - 1$;式(8)中, $\operatorname{Re} [R_{kl}(\omega)]$ 表示第 k 和 l 阶广义荷载谱互谱密度的实部。

对于格构塔架而言,考虑结构自振频率较离散和系统小阻尼因素,上式中的交叉项可忽略不计。此时,结构在 z 高度位置处的 y 标准差可表达为

$$\sigma_y(z) = \sqrt{\int_{\omega_0 - \delta/2}^{\omega_0 + \delta/2} S_y(z, \omega) d\omega = \int_{\omega_0 - \delta/2}^{\omega_0 + \delta/2} \sum_{n=1}^N \Phi_n(z) |H_n(i\omega)|^2 R_n(\omega) d\omega} \quad (9)$$

式(9)中的积分计算采用分段处理方法^[15]。即:当 ω 在 ω_n 附近较小范围 δ 时, $|H_n(i\omega)|^2 = 1/(4K_n^2 \xi_n^2) = 1/(4M_n^2 \omega_n^4 \xi_n^2)$,动力效果较明显;当 $\omega < \omega_n - \delta/2$ 时,考虑工程结构一般为小阻尼,此时 $|H_n(i\omega)|^2$ 为窄带过程^[7],从图形上看, $|H_n(i\omega)|^2$ 在结构自振频率 ω_n 共振范围 δ 外下降趋势明显,这时动力作用可近似于静力考虑,即 $|H_n(i\omega)|^2 = 1/K_n^2 = 1/(M_n^2 \omega_n^4)$;当 $\omega > \omega_n + \delta/2$ 时, $R_n(\omega)$ 与 $|H_n(i\omega)|^2$ 下降趋势均明显且逼近于零,这样可忽略该积分区间计算结果对 $\sigma_y(z)$ 的影响。此时, $|H_n(i\omega)|^2 R_n(\omega)$ 可以由第一区间的拟静态响应分量和第二区间 δ 内的共振响应分量。考虑第三区间的影响很小,可将拟静态分量的积分区域扩大到整个区域计算,但此时需要在 δ 区间的共振响应分量基础上减去相应的静力反应(只保留动力的放大效应分量,由此可避免共振分量对应的静力反应的重复计算,这一点不同于文献[15])。根据上述思想及共振时动力放大系数 $\beta = 1/(2\xi)$,可得

确定 δ 工程结构一般为小阻尼,此时 $|H_n(i\omega)|^2$ 为窄带过程^[7],在积分区间 δ 范围内 $R_n(\omega)$ 可近似视为白噪声,即 $R_n(\omega) \Big|_{\omega = (\pm \omega_n - \delta/2, \pm \omega_n + \delta/2)} = R_{\text{const}}$,因

此可根据下式确定 δ

$$2\delta = \frac{\int_0^+ |H_n(i\omega)|^2 R_{const} d\omega}{\int_0^+ |H_n(i\omega)|^2 R_{const} d\omega} = \frac{\int_0^+ |H_n(i\omega)|^2 d\omega}{\left[\frac{1}{(4M_n^2 \omega_n^4 \xi_n^2)} \right]} = 2\pi\xi_n \omega_n \quad (11)$$

$$\Rightarrow \delta = \pi\xi_n \omega_n \quad (12)$$

确定 $\int_0^+ R_n(\omega) d\omega$ 应该说明, 以上推导过程中, $R_n(\omega)$ 是具有严格数学意义的双边功率谱密度, 而基于实验得到的是具有实际物理意义的单边广义荷载谱 $S_n^G(f)$ 。双边输出功率谱 $R_o(\omega)$ 与相应的单边输出功率谱 $S_o(f)$ 关系表示为下式 (限于篇幅, 具体推导与说明详见文献 [18])

$$S_o(f) = 4\pi R_o(\omega) \quad (13)$$

在此, 值得说明的是, $S_o(f) = 2\pi R_o(\omega)$, 否则会给出计算结果带来影响。由于传递函数只与结构有关, 即 $H_n(f) = H_n(\omega)$, 则根据式 (13) 以及输入与输出功率谱的关系, 可得

$$|H_n(f)|^2 S_n^G(f) = 4\pi |H_n(\omega)|^2 R_n(\omega) \quad (14)$$

将式 (13) 代入上式并作数学整理, 可得

$$R_n(\omega) = \frac{1}{4\pi} S_n^G(f) = \frac{\Theta_n}{4\pi} S_n^G(f) \quad (15)$$

此时, 利用上式并考虑关系 $\int_0^+ S_n^G(f) df = \sigma_n^2$, 可得

$$\int_0^+ R_n(\omega) d\omega = 2 \int_0^+ R_n(\omega) d\omega = 2 \int_0^+ \frac{\Theta_n S_n^G(f)}{4\pi} \cdot 2\pi df = \Theta_n \sigma_n^2 \quad (16)$$

可以看出, $\int_0^+ R_n(\omega) d\omega$ 与 σ_n^2 的本质联系为广义荷载谱振型系数 Θ_n , 符合物理意义。此时, 将式 (12), (15), (16), $|H_n(i\omega)|^2$ 和 $|H_n(i\omega)|^2$ 代入式 (10) 并作数学整理, 可得位移根方差的计算公式

$$\sigma_y(z) = \sigma_n \cdot$$

$$\sqrt{\sum_{n=1}^N \frac{\Theta_n \phi_n^2(z)}{M_n^2 \omega_n^4} \left[1 + \frac{\pi a (1 - 2\xi_n)^2 (\omega_B / 2\pi\nu_H)^{1.05}}{8\xi_n [1 + b (\omega_B / 2\pi\nu_H)^2]^{1.5}} \right]} \quad (17)$$

$$y(z) = \mu \sigma_y(z) \quad (18)$$

式中 μ 为峰因子。

从式 (17) 容易看出, 上节已导出的 Θ_n 是使 $\sigma_y(z)$ 可考虑高阶振型贡献成为现实的关键。

3 求解内力的位移加载法

内力计算需要首先建立 ESWLs, 这是常被采用

的解决问题思路 (下文称传统方法)。鉴于根据上节实用计算公式 (17) 和 (18) 已可得到关心高度的位移 (节点位移), 本节基于有限单元法的本质, 提出了将位移加载应用于求解塔架内力的方法。下面对这两种方法进行了对比并给予说明。为方便起见, 只考虑一阶振型的贡献。

3.1 传统方法

采用传统方法求解内力, 一般可分为两步:

(1) 计算 ESWLs: 利用上节中式 (18) 计算出 $y_1(z) = \mu \sigma_{y1}(z)$, ESWLs 向量 $P_1(z)$ 可表达为^[15]

$$P_1(z) = \omega_1^3 \{m(z)y_1(z)\} = \mu \omega_1^3 \{m(z)\sigma_{y1}(z)\} \quad (19)$$

式中 $m(z)$ 为关心高度的节点集中质量, 需要工程师作计算。

(2) 内力计算: 根据下式

$$Kd = P_1(z) \quad (20)$$

$$f^e = K^e d^e + f^e \quad (21)$$

式中 K^e 和 K 分别为局部坐标系下的单元刚度矩阵和全局坐标系下的结构总体刚度矩阵; d^e 为局部坐标系下的节点位移, 需要由 d 向局部坐标系转换; f^e 为固端约束力, 对于作用于节点的集中力作用而言它等于零。

(这一步为有限元思想, 为了充分体现下文位移加载法优点, 有必要作简述) 将 $P_1(z)$ 加载于结构, 首先根据式 (20) 计算出全局坐标系下的节点位移 d , 进而根据式 (21) 求解单元杆端内力 f^e 。

3.2 位移加载法及其优点

由式 (21) 不难看出, 根据有限单元法求解内力的必要条件是需要计算出节点位移, 并非必须得到外力。传统方法中, 将 $y(z)$ 代入式 (18) 计算 $P_1(z)$, 再通过式 (20) 求解 d 的这一过程无意义。因为, 事实上 d 中分量已经求出, 其本质即为由式 (18) 计算而得到的 $y(z)$ 。因此, 只要计算出 $y(z)$, 即可直接根据式 (21) 求解内力, 本文称之为位移加载法。与传统方法相比, 位移加载法求解内力的优点是无需 ESWLs。从物理角度分析, 若结构与其位移反应已确定, 则其构件的内力是确定的。传统方法与位移加载法是殊途同归, 不同的是前者中 ESWLs 的计算繁琐且无意义, 而后者不仅理论合理, 而且具有直接性、方便性, 可为工程设计人员减少工作量。

3.3 位移加载法的实现

位移加载法求解内力可以结合有限元 SA P2000

程序来实现。需要说明的是,采用位移加载法需要确认程序认同施加的物理量是“位移”,而不是“力”。下面采用该程序建立一输电塔模型(如图1(a)所示),规定竖直与水平向分别为 z 和 y 方向,模型由713个梁单元和402个节点组成,底部与大地连接方式为固结

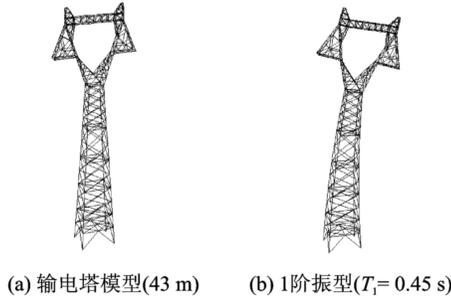


图1 输电塔模型与振型

计算参数与说明:本文对关心的40个不同高度及其对应的160个节点,分别提取振型向量 ϕ ,并计算集中质量 $m(z)$ 和节点位移 $\alpha(z)$; $\alpha = 0.16$; $V_H = 25 \text{ m/s}$; $V_H = 31.57 \text{ m/s}$; $A = 90.1 \text{ m}^2$; $B_y = 3.7 \text{ m}$; $R = 5\%$; $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$; $\xi_1 = 0.02$; ϕ 具有40个向量分量,(如图1(b)所示)。分别以传统方法与位移加载法分别计算,并将计算结果进行了比较(见图2与表1所示)与说明。

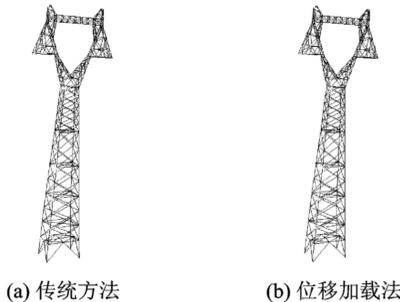


图2 输电塔加载后变形示意图

表1 位移加载法与传统方法计算结果比较

计算方法	脉动风作用下的均方根反应	
	顶点位移/m	顶部杆件/N
传统方法 (a)	0.182 [由式(30)算出]	100.3
位移加载法 (b)	0.174	107.2
(b-a)/b	-4.5%	6.4%

从表1可看出,传统方法与位移加载法结果比较接近,从数值角度验证了位移加载方法的可行性和准确性,但仍存在差异。导致这一现象的原因,可能是采用传统方法建立ESWLs时需要较多的节

点质量 $m(z)$ 进行计算,由于这是一项较为繁杂的工作,也许会给计算结果带来影响,而采用位移加载法,这一繁杂过程根本不存在。因此,无论从理论角度分析,还是考虑实际应用,有理由采用本文建议的位移加载法求解内力。

4 结束语

为了便于工程应用,本文针对格构式塔架的位移与内力反应,在其实用计算方面作了如下两项工作

(1) 基于随机振动理论,利用已有风洞试验得到的一阶广义荷载谱,并采用在此基础上导出的实用高阶广义荷载谱,进一步推导出了一一种计算格构塔架位移的可考虑高阶振型贡献的计算公式。该公式推导过程合理、简单实用。

(2) 结合有限单元法,提出了将位移加载应用于求解格构式塔架内力的方法。该方法不仅理论合理、现实可行,而且避免了传统方法中需要建立等效静力风荷载的繁杂工作,可为工程设计人员减少工作量,值得推广应用。

参考文献

- [1] Li Hongnan, Bai Haifeng. High-voltage transmission tower-line system subjected to disaster loads [J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(9): 899—911.
- [2] 李宏男,白海峰. 高压输电塔-线体系抗灾研究的现状与发展趋势 [J]. 土木工程学报, 2007, 40(2): 39—46.
- [3] 楼文娟,孙炳楠. 高耸塔架横风向动力风效应 [J]. 土木工程学报, 1999, 32(6): 67—71.
- [4] 邹良浩. 格构式高耸结构动力风荷载模型与风振响应研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2006.
- [5] 邹良浩,梁枢果. 半刚性模型风洞试验荷载谱的处理方法 [J]. 实验流体力学, 2007, 21(3): 76—81.
- [6] 柳国环,李宏男. 格构塔架的实用高阶广义荷载谱模型与共振分量表达式改进 [J]. 土木工程学报, 2009, 42(2): 53-57.
- [7] 于秀雷. 格构式塔架风振响应与等效风荷载简化计算 [D]. 武汉: 武汉大学, 2006.
- [8] Zhou Yin, Gu Ming, Xiang Haifan. A long wind static equivalent wind loads and responses of tall building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 79(1): 135—150.
- [9] 全涌,顾明. 高层建筑横风向风致响应及等效静力风荷载的分析方法 [J]. 工程力学, 2006, 23(9): 84—88.
- [10] 陈波,武岳,沈世钊. 大跨度屋盖结构等效静力风荷载中共振分量的确定方法研究 [J]. 工程力学, 2007, 24

- (1): 51—55
- [11] 田玉基, 杨庆山, 范重, 等. 国家体育场大跨度屋盖结构风振系数研究 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28 (2): 26—31.
- [12] Anil K Chopra. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering [M]. 2nd ed. Prentice-Hall, 2000
- [13] 欧进萍, 王光远. 结构随机振动 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998
- [14] 李宏男. 结构多维抗震理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2006
- [15] 张相庭. 结构风工程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006
- [16] Guoqing Huang, Xinzhong Chen. Wind load effects and equivalent static wind loads of tall buildings based on synchronous pressure measurements [J]. Engineering Structures, 2007, (1): 287—292
- [17] 周匡毅, 顾明. 大跨度屋盖结构考虑模态耦合的抖振共振响应分析方法 [J]. 振动工程学报, 2006, 19 (2): 179—183
- [18] DE纽兰著. 随机振动与谱分析概论 [M]. 方同, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1982

A practical calculation model and approach for a long-wind displacement responses of lattice towers

L I U Guo-huan, L I H ong-nan

(State Key Lab of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A practical calculation model, based on the fundamental mode generalized force spectrum obtained in a wind tunnel test and practical higher mode generalized force spectrum model in along-wind direction of lattice tower, is further deduced and proposed to calculate along-wind displacement responses of lattice tower. In the proposed model, the contributions of higher vibration modes can be taken into account. Then, a new approach, by applying load with displacement instead of force, is presented and recommended to calculate internal forces of lattice towers. Moreover, a transmission tower structure is taken as an example to describe specific implementation process of the approach. Comparing with conventional method, the recommended approach, not requiring getting equivalent static wind loads (ESWLs), is reasonable, simple and of value to be popularized.

Key words: wind tunnel test; generalized force spectrum; transmission tower; equivalent static wind loads

作者简介: 柳国环 (1980—), 男, 博士生, 电话: (0411) 84749617; E-mail: carecivil@yahoo.com.cn