

高耸塔式结构动力特性设计与测试*

吴泽玉¹, 王东炜², 王复明³

(1. 华北水利水电大学土木与交通学院 郑州, 450045) (2. 郑州大学土木工程学院 郑州, 450000)

(3. 郑州大学水利与环境学院 郑州, 450000)

摘要 为了满足上置设备工作需要, 高耸塔式结构基频要大于某一给定数值。通过对结构基频计算公式和结构变形曲线分析, 增大结构基频应以降低结构顶部质量和提高结构底部刚度为主的频率调整基本原则。基于空间有限元理论, 通过模态分析获得了结构的频率和振型。利用环境激励下结构振动模态参数识别方法对雷达塔进行动力检测。采用模态识别法求出结构的前三阶频率、振型和阻尼值。引入模态置信因子和标准化模态差准则, 对计算振型数据和实测振型数据进行分析比较, 以验证有限元计算的准确性。该研究成果为深入研究高耸塔式结构频率调整、准确预测结构的动力响应提供可靠依据。

关键词 动力特性; 现场测试; 模态置信因子; 标准化模态差准则; 功率谱

中图分类号 TU355; TH123

引言

结构自振频率和振型仅与结构的刚度和质量相关, 是结构的固有特性, 故称之为结构的特征参量^[1]。结构自振频率和激励频率遇合不仅增大计算结构的动力效应, 而且因设备-结构之间共振效应造成设备或结构的破坏^[2-4], 以及人致振动造成使用者的舒适性降低和安全性问题^[5-7]。

为了满足气象雷达的使用性能, 混凝土结构多普勒雷达塔一般较高, 有的甚至超过 100 m。根据气象雷达的工作要求, 雷达塔的基本频率需要大于 1 Hz。设计如此高大结构, 基频满足使用要求并非易事。笔者通过对结构基频计算公式和结构变形曲线进行分析, 提出最优频率调整方法, 利用有限元程序和现场实测, 验证所设计结构满足设备工作需要。

1 动力特性设计

已知结构基频计算公式为

$$f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_1}{M_1}} \quad (1)$$

从式(1)可以看出, 如需调整结构基本自振频

率, 需从改变结构的基本振型质量 M_1 和基本振型刚度 K_1 。对于高耸结构, 一般楼板刚度与筒体刚度相比, 不起决定作用, 结构整体变形可等效为纯弯梁模型, 结构简图和梁模型如图 1, 2 所示。

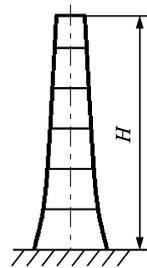


图 1 高耸结构

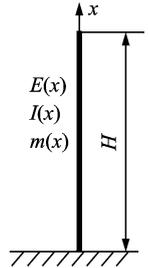


图 2 纯弯梁模型

Fig. 1 High-rise building Fig. 2 Pure bending beam

由结构动力学可知, 结构基本振型质量和基本振型刚度可表示为

$$M_1 = \int_0^H \bar{m}(x) \Phi_1^2(x) dx \quad (2)$$

$$K_1 = \int_0^H E(x) I(x) \left[\frac{d^2 \Phi_1(x)}{dx^2} \right]^2 dx \quad (3)$$

其中: $E(x)$, $I(x)$ 和 $\bar{m}(x)$ 分别为随结构高度而变化的弹性模量、截面惯性矩和分布质量; $\Phi_1(x)$ 为结构的基本振型形态。

通常纯弯悬臂梁基本振型 $\Phi_1(x)$ 没有解析解,

* 国家自然科学基金资助项目(50978232); 河南教育厅资助项目(14B560029); 华北水利水电大学高层次人才基金资助项目(201246)

收稿日期: 2016-01-11; 修回日期: 2016-03-15

但 $\Phi_1(x)$ 的基本振型与该梁在 $\bar{m}(x)$ 水平效应作用下挠度曲线形状是一致的,如图3所示。其二阶导数 $\Phi_1''(x)$ 如图4所示。由图3和图4可见,从结构的底面到顶部,基本振型 $\Phi_1(x)$ 横坐标值迅速增大,而其二阶导数 $\Phi_1''(x)$ 横坐标值则急剧减小。通过分析可知,结构上部 $\bar{m}(x)$ 的改变对式(2)的影响较大,下部 $E(x)$ 和 $I(x)$ 的改变对式(3)的影响较大。所以在对高耸结构基本频率 f_1 进行调整时,重点以改变结构上部的分布质量 $\bar{m}(x)$ 和结构下部的横向刚度 $E(x)$ 和 $I(x)$ 为宜。此结论可作为高耸结构基本频率调整或控制设计的基本原则。

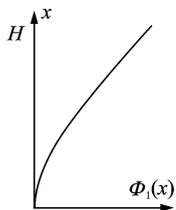


图3 基本振型

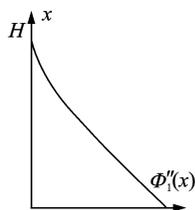


图4 基本振型二阶导数

Fig. 3 Fundamental mode model Fig. 4 Two order derivative of fundamental mode

对于等截面梁、楔形梁和锥形梁的纯弯悬臂结构,其基频^[8]可表示为

$$f_1 = \frac{\alpha}{2\pi H^2} \sqrt{\frac{EI_0}{m_0}} \quad (4)$$

其中: α 为不同截面形式的系数,等截面为3.516;楔形结构为5.315;锥形结构为8.718; \bar{m}_0 和 I_0 分别为悬臂结构底截面分布质量和惯性矩。

在材料、高度和底截面相同的情况下,楔形结构和锥形结构比等截面结构基频分别提高51.2%和148.0%。高耸结构如需提高结构基频值,应以锥形结构为宜。

2 多普勒雷达塔结构设计

根据结构自振频率调整的基本原则,即降低结构顶部质量、增大底部结构刚度,设计了新一代多普勒雷达塔。雷达塔自下而上刚度变化是通过增减剪力墙的数量和改变混凝土的强度等级实现;严格控制顶部设备层质量。雷达塔主塔高为109.32 m,共24层,地下1层,地上裙房3层,塔身23层。塔身主体结构由3条交角为120°的薄壁箱形塔肢组成,塔肢截面沿塔身高度方向不断发生变化。

经过审查图纸和现场实地查看,该雷达塔主体结构平面布置较为规则,结构竖向无转换层或加强层。结构的平面图和剖面图如图5所示。

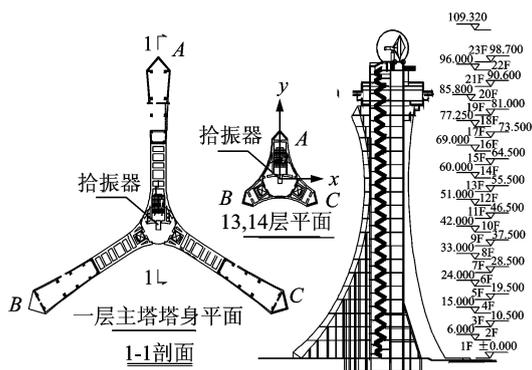


图5 雷达塔立面与剖面图

Fig. 5 Radar tower elevation and section graph

3 动力特性测试方案

3.1 现场测试所需设备

采用低频宽带振动测试系统进行现场测试,该系统包括:笔记本电脑和16通道信号采集仪1台;3891型低频测振仪和导线各一套;罗盘仪1台等。

3.2 测点布置与归一化

动力测试内容包括雷达塔前三阶频率、振型和阻尼比。采用环境激励方法进行测试,本次测试测站设在11层,测点分别设置在1,4,8,11,14,17,20和23层。测试主要采集结构的加速度信号,采样频率为200 Hz。现场测试以雷达塔的东西向为 x 向,以雷达塔的南北向为 y 向,进行双垂直方向的水平测试。为了保证测试系统工作可靠性,在实施现场测试之前对测试系统进行归一化验证,归一化的测点选在11层。1,2通道归一化曲线如图6所示。

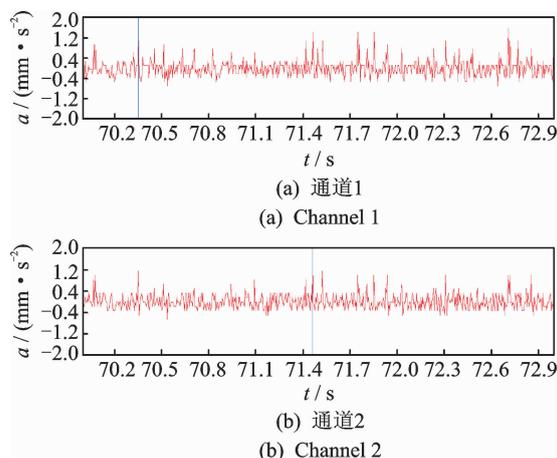


图6 1,2通道归一化加速度反应曲线

Fig. 6 1 and 2 channel normalized acceleration response curve

4 有限元计算与现场测试对比

4.1 雷达塔有限元分析

雷达塔中剪力墙和楼板采用壳单元模拟,梁和柱用空间梁单元模拟。对于雷达塔顶部放置的雷达,因不计算雷达设备的受力和变形,可用空间质量单元模拟。雷达塔共分为 8 564 个单元和 6 491 个节点,对此结构作动力特性分析。由于雷达塔周围装饰性构件已用沉降缝分开,故不计对动力特性的影响,雷达塔有限元模型如图 7 所示。采用 Block Lanczos 求特征值方法计算了前三阶频率计算。

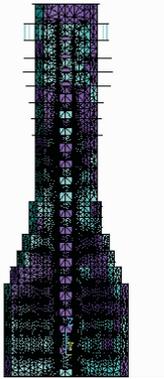


图 7 雷达塔有限元图

Fig. 7 Radar tower finite element model

4.2 雷达塔现场测试分析

因为测试是在环境激励(风脉动或地脉动)条件下进行,输入是未知的,所以在对结构模态参数识别时只能利用输出的相应信号。从系统识别的角度是输入未知,利用输出来识别系统参量。计算雷达塔的动力参数时,需知各测点的自功率谱、本层与参考楼层的互功率谱以及识别结构振型需用的相位谱。为了减小篇幅,这里仅给出 11,14,17,20 和 23 层自功率谱以及 11,14,17 和 20 层与 23 层的互功率谱,分别如图 8 和图 9 所示。

4.3 环境激励下结构振动模态参数识别方法

环境激励下结构模态参数识别方法众多,较常用方法包括峰值法(peak picking,记为 PP)^[9]和随机子空间识别法(stochastic subspace identification,记为 SSI)^[10]。两种方法各有优缺点:峰值法简单实用,但精度欠佳;随机子空间识别法能弥补峰值法的缺点,但数据处理相对较为复杂,频率识别可选用任意自谱或互谱峰值确定。

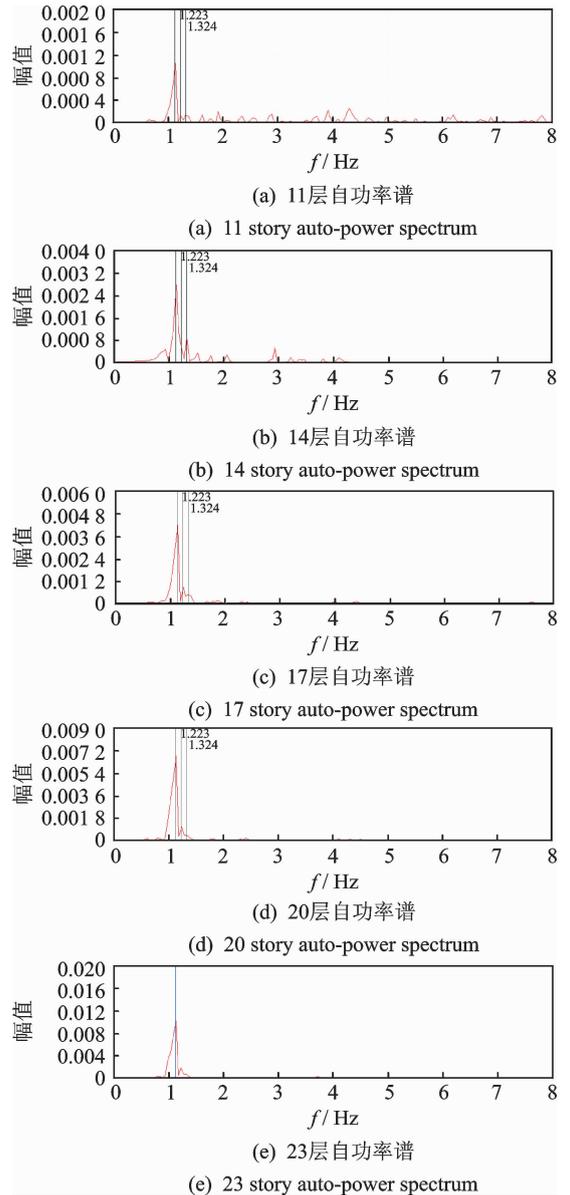


图 8 11,14,17,20 和 23 层的自功率谱

Fig. 8 11,14,17,20 and 23 auto-power spectrum

4.4 有限元计算值与实测值对比

两种方法识别出的前三阶频率实测值和计算值如表 1 所示。可以看出,有限元计算值和随机子空间识别法值较为接近,最大误差值不到 11%,说明随机子空间法识别精度高,同时也表明现场测试结果较为可靠。振型由自谱及互谱的峰值和相位谱确定,在自谱和互谱图上相同频率处功率谱峰值及 0°或 180°相位谱确定振型曲线上的相对比值为

$$\varphi_{li} / \varphi_{mi} = \mathbf{G}_{lm}(f_i) / \mathbf{G}_{mm}(f_i) \quad (5)$$

其中: φ_{li} 和 φ_{mi} 分别为 i 阶振型 l 测点和 m 测点横坐标的相对值; $\mathbf{G}_{lm}(f_i)$ 和 $\mathbf{G}_{mm}(f_i)$ 分别为频率为 f_i 时 l 测点与 m 测点的互谱值和 m 测点的自谱值。

雷达塔前三阶有限元计算振型和现场实测振型

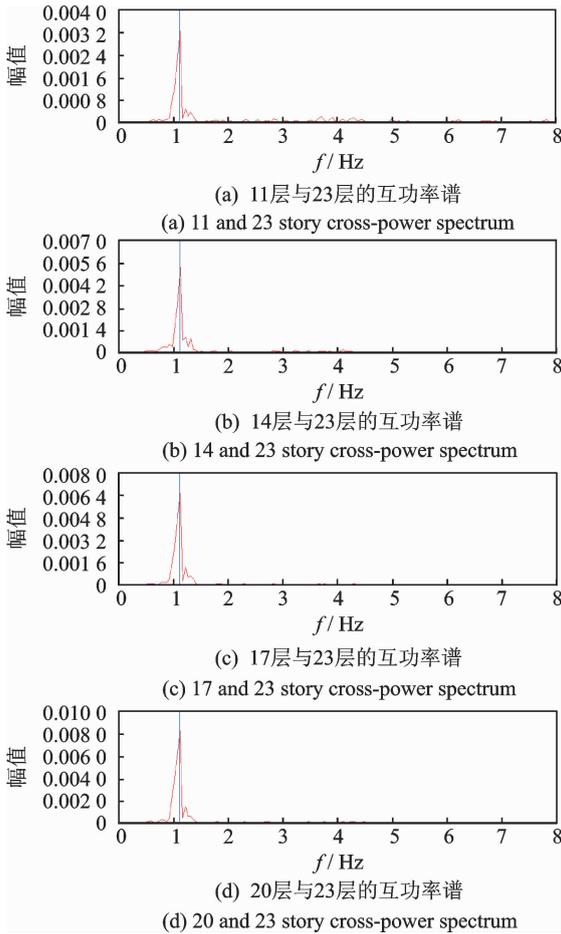


图 9 11,14,17 和 20 层与 23 层的互功率谱

Fig. 9 11,14,17,20 and 23 cross-power spectrum

对比如图 10 所示。

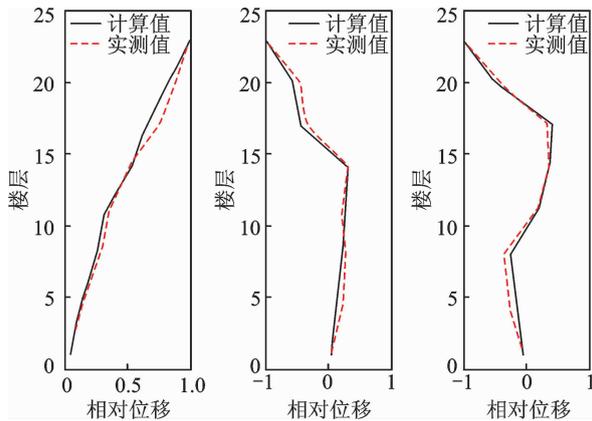


图 10 前三阶振型实测曲线与计算曲线对比

Fig. 10 Contrast modes between measurement and calculated curve

为了进一步分析实测振型与计算振型的相近程度,引入模态置信准则(modal assurance criteria,简称 MAC)和标准化模态差准则(normalized modal difference,简称 NMD)进行量化分析^[11-12]。两准则

的计算公式为

$$MAC(\boldsymbol{\varphi}_i^A, \boldsymbol{\varphi}_i^B) = \frac{[(\boldsymbol{\varphi}_i^A)^T (\boldsymbol{\varphi}_i^B)]^2}{[(\boldsymbol{\varphi}_i^A)^T \boldsymbol{\varphi}_i^A][(\boldsymbol{\varphi}_i^B)^T \boldsymbol{\varphi}_i^B]} \quad (6)$$

$$NMD(\boldsymbol{\varphi}_i^A, \boldsymbol{\varphi}_i^B) = \sqrt{\frac{1 - MAC(\boldsymbol{\varphi}_i^A, \boldsymbol{\varphi}_i^B)}{MAC(\boldsymbol{\varphi}_i^A, \boldsymbol{\varphi}_i^B)}} \quad (7)$$

其中: $\boldsymbol{\varphi}_i^A$ 和 $\boldsymbol{\varphi}_i^B$ 分别为第 i 阶有限元计算振型和实测振型。

MAC 指标表示计算振型与实测振型的相关程度,MAC=1 表示完全相关;MAC=0 表示完全无关。一般情况下,MAC>0.8 时,可认为相关性较好,MAC<0.4 时,表示模态相关性较差。

NMD 能较好地估计计算振型和实测振型平均差别,NMD 值越小,说明两组振型相关性越好。雷达塔前三阶振型模态置信准则值和标准化模态差准则值如表 2 所示。可以看出,有限元值和实测值相关性较好,二者合理性得到相互验证。

表 1 有限元计算与实测频率值

Tab. 1 Frequency difference between measurement and FEM results

振型阶次	计算结果	SSI 法	PP 法
1	1.256	1.123	1.031
2	1.329	1.223	1.198
3	1.401	1.324	1.285

表 2 实测结构振型与有限元计算振型 MAC 和 NMD

Tab. 2 MAC and NMD between value measurement and FEM

振型阶次	MAC	NMD/%
1	0.967	11.23
2	0.978	10.45
3	0.953	9.64

阻尼比采用半功率法求解,先计算出个各测点与参考测点之间的互功率谱,再计算出互功率谱上半功率所对应频率,满足

$$|H(f_1)|^2 = |H(f_2)|^2 = \frac{1}{2} |H(f_i)|^2 \quad (8)$$

阻尼比的计算式为

$$\xi_i = (f_2 - f_1)/2f_i \quad (9)$$

雷达塔前三阶阻尼比如表 3 所示。

表 3 实测结构阻尼比

Tab. 3 Damping ratio derived from measurement

振型阶次	阻尼比
1	4.8
2	2.3
3	0.75

5 结束语

通过对结构基频计算公式和高耸塔式结构变形曲线进行分析,提出增大结构基频以减小上部结构质量、增大下部结构刚度为主的频率调整基本原则。结合三维有限元模拟方法和现场实测方法对雷达塔的动力特性进行分析和实测,实现对结构动力性能的全面了解。为气象雷达安全、可靠工作提供了关键参数,也为计算结构动力响应提供了重要参量。

在结构基频调整原则基础上,设计了多普勒气象雷达塔。建立空间有限元模型,利用 Block Lanczos 法对雷达塔进行了动力特性分析,得到结构的频率和振型。在输入未知的条件下对雷达塔进行环境激励振动测试。采用模态参数识别法和半功率谱法识别结构的频率、振型和阻尼。对比结构前三阶自振频率计算值和实测值,随机子空间识别法所得频率值和有限元计算的最大相对误差不超过 11%,表明实测结果较为可靠。作为混凝土结构的雷达塔,第 1 阶阻尼比为 4.8%,略小于规范规定的 5%,可能是雷达塔中附属构件较少所致。为了对比有限元计算振型和实测振型的相关性,引入了 MAC 和 NMD。前三阶模态置信准则都接近于 1,标准化模态差最大在 12%以内,表明计算振型和实测振型具有良好的相关性。

参 考 文 献

- [1] Clough R, Penzien J. Dynamics of Structures[M]. Berkeley, California: Computers and Structures, 1995.
- [2] 汪志昊,刘飞,吴泽玉,等. 某面粉厂房楼板的振动控制[J]. 建筑结构,2015,45(19):32-36.
Wang Zhihao, Liu fei, Wu Zeyu, et al. Vibration control of floor for a flour mill building [J]. Building Structures,2015,45(19):32-36. (in Chinese)
- [3] 王英杰,时瑾,魏庆朝. 单车过桥下弹性车体共振与消振现象分析[J]. 振动与冲击,2015,34(2):1-8.
Wang Yingjie, Shi Jin, Wei Qingchao. Resonance and vibration cancellation analysis of a vehicle with flexible car body moving over multi-span bridge[J]. Vibration and Shock, 2015, 34(2): 1-8. (in Chinese)
- [4] 盛涛,张善莉,单伽钲,等. 地铁诱发的环境振动及振源减振效应的实测与分析[J]. 振动、测试与诊断,2015,35(2):352-358.

Sheng Tao, Zhang Shanli, Shan Jiazeng, et al. In-situ measurement and analysis of subway-induced environmental vibrations and effectiveness of vibration-source suppression methods[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(2): 352-358. (in Chinese)

- [5] Filippo L, Filippo C. Structural health monitoring of the Roman arena of verona, italy[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2013, 4(3): 227-246.
- [6] Bachmann H. A firefly algorithm for the design of force and placement of friction dampers for control of man-induced vibration in footbridges[J]. Optimization and Engineering, 2014, 16(3): 633-661.
- [7] Jones C A, Reynolds P, Pavic A. Vibration serviceability of stadia structures subjected to dynamic crowd loads: a literature review[J]. Sound and Vibration, 2011, 33(5): 1531-1566.
- [8] 王光远. 建筑结构的振动[M]. 北京:科学出版社,1978:92-120.
- [9] Suhas T,Victor J. Peak picking NMR spectral data using non-negative matrix factorization[J]. BMC Bioinformatics, 2014, 15(1): 15-46.
- [10] Dohler M, Mevel L. Efficient multi-order uncertainty computation for stochastic subspace identification[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 38(2): 346-366.
- [11] Bai Y, Keller K. Model parameter identification for a GFRP pedestrian bridge [J]. Composite Structure, 2008, 82(1): 90-100.
- [12] 袁爱民,戴航,孙大松. 基于 EI 及 MAC 混合算法的斜拉桥传感器优化布置[J]. 振动、测试与诊断,2009,29(1):55-59.
Yuan Aimin, Dai Hang, Sun Dasong. Optimal sensor placement of cable-stay bridge using mixed algorithm based on effective independence and modal assurance criterion methods[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(1): 55-59. (in Chinese)



第一作者简介:吴泽玉,男,1976年9月生,博士、讲师。主要研究方向为复杂结构动力设计和减振控制。曾发表《基于振型的 pushover 方法的研究与实例》(《建筑科学》2012年第3期)等论文。

E-mail: 13598437507@163.com

