

基于激光遥测方法的某在役风电塔现场实测分析

戴靠山^{1 2)}✉, 王 英²⁾, 黄益超²⁾

1) 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092 2) 同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092
✉ 通信作者, E-mail: kdai@tongji.edu.cn

摘 要 风力发电塔作为一类特殊的高柔结构, 顶部支撑的风机在工作状态下对塔身产生动态激励, 目前的风电塔振动实测通常采用接触式传感器。为发展风电塔现场非接触测试技术, 本文对激光遥测方法进行阐述, 利用加速度计和激光遥测设备对某 1.5 MW 风电塔进行环境脉动激励下的动力实测, 对两种仪器的现场使用及测试结果进行对比, 分析遥测方法的优势。利用得到的多组实测信号, 分别采用峰值拾取法和随机子空间识别法进行分析处理, 获得该风电塔的自然频率。

关键词 风力发电塔; 激光测振仪; 动力实测; 自振频率; 信号分析

分类号 TK83; TU279.7

Field testing of an in-service wind turbine tower using a laser based remote sensing method

DAI Kao-shan^{1 2)}✉, WANG Ying²⁾, HUANG Yi-chao²⁾

1) State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2) Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China
✉ Corresponding author, E-mail: kdai@tongji.edu.cn

ABSTRACT As a special slender structure, a wind turbine tower with a turbine on the top of the structure is sensitive to dynamic loading. Therefore, it is critical to accurately assess the vibrational behaviors of the wind turbine tower. To facilitate field testing of wind turbine towers, a laser Doppler vibrometer was proposed in the ambient vibration testing. Comparisons between the conventional contact accelerometer method and the laser based remote sensing method were made in the aspects of testing efficiency and result validity. Based on a series of vibration signals collected from a 1.5 MW wind turbine tower, the natural frequencies of this tower were obtained by using different vibration analysis methods.

KEY WORDS wind turbine towers; laser Doppler vibrometers; ambient vibration tests; natural frequency; signal analysis

20 世纪 90 年代以来, 我国大力发展风能产业, 在西部以及东部沿海地区已建立许多大规模风电场, 并且在 2010 年超越美国成为全球风电装机容量第一大国^[1]。了解已建成风电塔的结构特性, 有助于针对我国服役一定阶段风电场发展科学的设备安全评估方法。我国现行的风电塔设计文件明确要求塔筒固有频率与叶片通过频率之间有适当的间隔^[2], 单靠设计阶段的计算很难准确考虑地基土等因素对结构动力特性

的影响; 对建成后风电塔现场实测, 获得其振动特性, 也是目前认证机构主要关心点之一。实际上, 风机运行期间也多需要进行振动监测, 以便及时发现异常情况进行停机检修^[3]。风电塔是一类高耸柔性结构, 地震作用对其影响可能较大^[4]。我国沿海及西北等风能充沛的地区大部分处于地震带, 然而早期我国风电塔塔筒设计多参照欧洲标准, 未系统地研究符合我国地理特性的设计规范^[5]。明确风电塔的动力特性有助于

收稿日期: 2015-12-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208382); 上海市国际科技合作基金项目(16510711300); 土木工程防灾国家重点实验室自主研究课题(SLDRCE14-B-02); 上海科技支撑计划资助项目(13dz1203402)

研究其在动力作用下的响应,完善相关结构设计理论.因此,发展高效的现场实测手段和科学的数据分析方法是关系风场安全运行的一个重要工作.

关于风电塔结构的现场测试已有一些报道.马人乐等^[6]对内蒙古某风场中三座风电机组进行环境脉动实测,并根据实测数据提出一种新的风电塔筒建模方法.黄帅等^[7]基于实测提出某风电塔在位移、暴风荷载等方面的设计不足.Kilic 和 Unluturk^[8]设计了一套基于无线网络的风电塔结构健康监测系统,并进行实测验证了其可行性.大量的现场实测需要高效率的测量方式,然而目前风电塔振动实测通常采用接触式传感器,需要人工将传感器安装于风电塔适当位置,费时费力.一些新型非接触测试手段近来得到研究关注.Chang 和 Ji^[9]利用摄影测量对一风电塔进行监测,得出该风电塔叶片与塔身的振动特性;但该方法需要在测量部位安装识别标志.Pieraccini 等^[10]利用微波雷达对风电塔进行测试,方便有效地得出其振动特性,然而其研究发现结构表面过于平整会降低该雷达信号的反射效果.

由于风电塔结构体量较大,人工激励困难,所以往往采用环境脉动作为激励源.这类测试方法通常仅针对响应信号进行处理.基于输出信号的数据处理方法可分为频域法、时域法和时频域法.频域计算方法的优点是计算量小,可用于数据的初步分析,常用的频域法有峰值拾取法(peak-picking, PP)、频域分解法(frequency domain decomposition, FDD)等;时域计算方法是计算精度高,但计算量大,适合用于数据的精细分析,常用的时域方法有基于状态空间模型的特征系统实现算法(eigensystem realization algorithm, ERA)、随机子空间识别(stochastic subspace identification, SSI)、基于自回归滑动平均模型(auto-regressive and moving average model, ARMA)等;时频域分析法可研究时变性系统的特征,常用的时频域分析法有小波变换(wavelet transform, WT)、希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)等^[11].

为发展风电塔现场非接触测试方法,分别利用压电式加速度计和激光多普勒测振仪(laser Doppler vibrometer, LDV)对一座 1.5 MW 风电塔开展了环境脉动激励下的动力实测,对两种仪器的现场使用及测试结果进行对比,分析遥测方法的优势.利用得到的风电塔多组实测信号,分别采用峰值拾取法和随机子空间识别法进行分析处理,计算获得该风电塔的前三阶自振频率.

1 激光遥测的基本原理

激光器的诞生使获得纯度高、平行性好的相干光源成为可能,各种基于激光技术的测量方法也随之迅

速发展.主要的基于激光技术的测量方法有全息干涉测量技术、散斑法测量技术、激光三角法测量技术、激光多普勒测量技术等.其中,激光多普勒测振技术具有非接触性,对被测物体不产生影响,响应速度快,测量频带宽,分辨率高,对反射面要求不高,且不受温度影响等优点,被广泛应用于各种流体测量以及固体表面运动速度测量^[12].

多普勒效应是波动的特有性质,当波源、观察者、介质或反射点发生相对运动时,观察到的波与波源产生的波相比频率(或波长)会发生变化,即多普勒频移.图 1(a)是以反射点发生运动为例的多普勒效应示意图.当反射点发生运动时,观察点接收到的波形频率不同于波源发出的波形频率.如图 1(b)所示,*O*为光源,*S*为观察者,*T*为被测运动物体(反射点),则由被测物体运动引起的多普勒频移 f_D 可表示为式(1)^[13].通过测得该频移量 f_D 即可由式(1)推知被测物体的运动速度信息.

$$f_D = \frac{1}{\lambda} |u(e_s - e_o)|. \tag{1}$$

式中 u 为被测物体的运动速度, λ 为所采用激光的波长, e_o 和 e_s 分别为光源到被测物体和被测物体到观察者的单位向量.

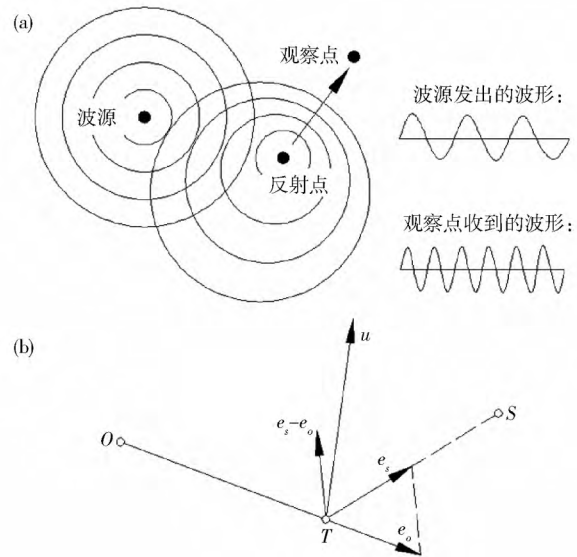


图 1 激光多普勒测振基本原理. (a) 多普勒频移; (b) 测振方法
Fig.1 Laser Doppler vibrometer basics: (a) Doppler frequency shift; (b) velocity measurement

激光多普勒技术是通过被测物体散射光的多普勒效应来测振的.基于激光多普勒技术,通过不同的光路设计,可以实现多种不同的测量要求.常见的激光多普勒测振仪类型有单点式激光测振仪、扫描型激光测振仪、三维激光测振仪、多点激光测振仪、远距离激光测振仪等.图 2 为一种典型的激光多普勒测振仪的光路示意图.由激光器产生的激光由分光镜分为两

束: 一束通过透镜后投射于被测物体, 由于透镜的聚焦作用, 可以使得激光汇聚于一点, 便于瞄准微小目标; 另一束则通过布拉格盒调制, 作为参考光投射于观测器. 被测物体的反射光线同样传递到观测器. 通过对比参考光线与反射光线干涉图样的变化可得到频移量 f_D . 通过合理的透镜选择与组合, 该种激光多普勒测振仪可以测量小到毫米级, 大到几十米甚至几百米远目标的振动测量. 随着集成光路的发展, 激光多普勒测振仪的生产趋于小型化和便携化, 市场也更为广泛.

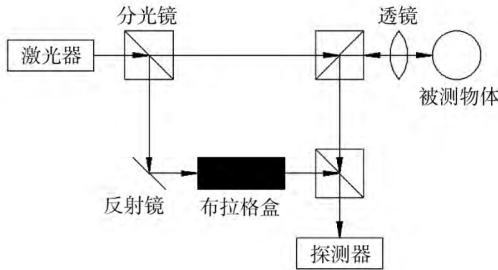


图2 激光多普勒测振仪的结构示意图

Fig.2 Basic structure of a laser Doppler vibrometer

2 风电塔振动实测

为比较不同测试方法的差别, 先后利用激光多普勒测振仪和加速度传感器两种方法对一风电塔进行动力测试(图3(a)和(b)). 实测对象为某风力发电场的一座1.5 MW 水平轴风力发电塔塔筒. 该风力发电塔于2007年建成投产, 叶片数量为3, 叶片轴心高度为65 m, 叶片长度均为34.5 m. 塔筒净高63.15 m, 底部直径4.04 m, 顶部直径2.96 m, 由2个法兰分成三段, 每段内部连接采用焊接, 内部共有五个工作平台(图3(c)). 塔筒底部有一个宽0.83 m, 高2.40 m的长椭圆形门洞, 门洞底部标高为1.30 m. 风电塔基础采用灌注桩基础.

测试采用远距离激光多普勒测振仪, 其光路设计同图2, 最大测量距离为300 m, 技术参数如表1所示. 试验过程中首先在距离风电塔约200 m左右的空旷场地上布置好测振仪、采集仪、电脑等仪器(图4), 再用测振仪配置的光学望远镜对测量位置进行瞄准, 同时聚焦激光, 之后在电脑上利用测振仪器配套的采集软件选择所需的采样频率和采集时间, 即可进行数据的连续采集和储存. 因塔筒为圆柱形, 为减少侧向振动引起的测量误差, 试验中注意尽量瞄准测量高度塔筒的中间位置. 试验中分别获得了轮毂(2组数据)、塔筒上部(5组数据)和塔筒中部(6组数据)三个位置垂直于叶片方向的振动速度时程, 采样频率选择为240 Hz, 采样时长为5~10 min. 整个现场测试, 包括仪器架设、数据采集等工作, 两个多小时即完成, 而其中仪器架设只用了大致10 min.

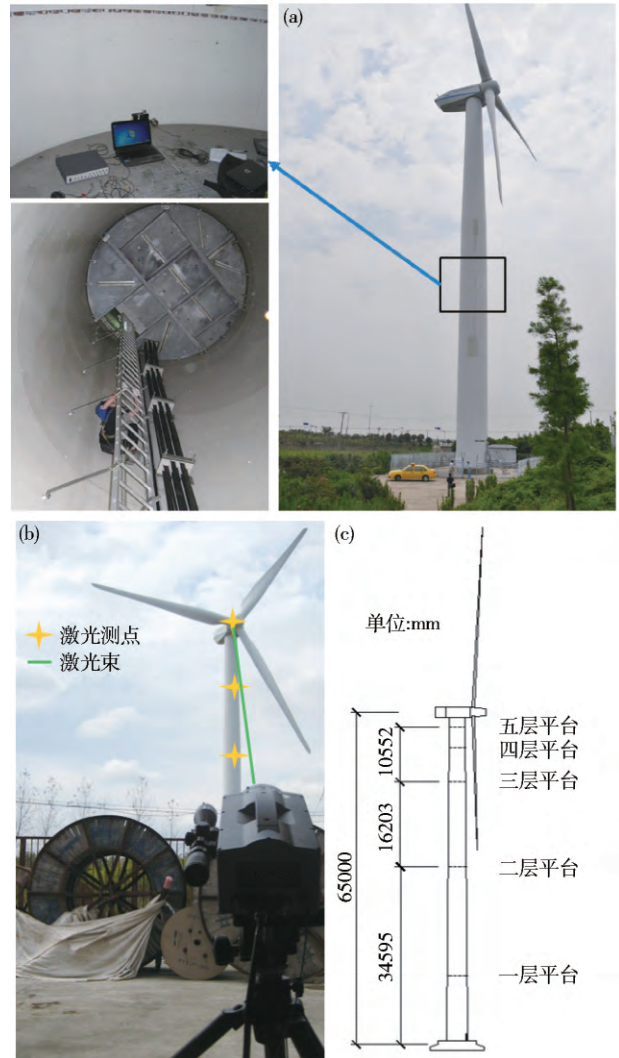


图3 利用加速度计与激光测振仪对风电塔进行实测. (a) 加速度计布设; (b) 激光测振仪布设; (c) 风电塔尺寸

Fig.3 Field testing of a wind turbine tower: (a) accelerometer deployment; (b) laser Doppler vibrometer setup; (c) structural dimension



图4 激光多普勒测振仪系统

Fig.4 Laser Doppler vibrometer system deployment

采用现场测试中常用的布设加速度传感器的方法进行对比试验,其中加速度计为单轴压电式传感器,技术参数如表 1 所示.测试过程中首先需要依靠人工攀爬将加速度计、连接线、采集仪、电脑等仪器设备放置在塔筒内部的平台上,再在平台上将加速度计通过连接线与采集仪和电脑相连接,同样通过采集软件控制采样频率和采样时间进行信号采集,见图 5.本试验中

所使用采集软件为同济大学土木工程学院自主开发的 SVSA 系统.试验采样频率为 50 Hz,采样时长为 5 ~ 10 min.获得包含三个平台(二层、三层和五层)高度侧向振动的数据 9 组.现场近 6 h 才完成测试,其中攀爬不同高度的塔筒进行传感器布设,特别是传感器引线连接等工作,花了 3 h 才得以完成,相比激光遥测的方法,现场工作量多出许多.

表 1 两种传感器的技术参数

Table 1 Technical parameters of the sensors

技术参数	低频加速度计	技术参数	激光多普勒测振仪
准确度	(40000 mV) / g	精度设置	(0.4 ~ 100) mm·s ⁻¹ ·V ⁻¹
幅值范围	0.12 g	测试幅值	1 m·s ⁻¹
频带	(0.5 ~ 1000) Hz, ±10%	测试带宽	(0 ~ 25) kHz
精度	5 × 10 ⁻⁷ g	仪器大小	235 mm × 320 mm × 150 mm
冲击保护	100 g	保护等级	IP-20
质量	310 g	仪器质量	6 kg



图 5 基于加速度计的振动测试系统

Fig. 5 Accelerometer-based vibration measurement system

所测风电塔风场未设置测风塔,故实测中未实时对风速进行精确测量.现场实测当天通过手持风速仪读数所记录的风速较小,未达到所测风机的切入风速(即风速 < 3.5 m·s⁻¹),测试过程中风机处于停机状态,且在测试时间段未出现强烈阵风,故可以把风激励理想为平稳随机过程,基本满足环境振动测试方法的使用前提.由于现场试验的实际情况,加速度计布置位置高度与激光多普勒测振仪测量高度并非一一对应,但风电塔的二层平台(布置加速度计)和塔筒中部(激光多普勒测振仪瞄准点)高度相近,选取此位置两种传感器采集到的数据为例进行比较.分别截取 50 s 两组数据的典型时程,如图 6 所示.

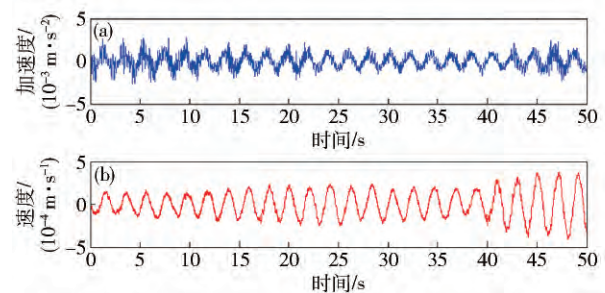


图 6 由加速度计和激光测振仪测得的典型时程信号。(a) 加速度计; (b) 激光测振仪

Fig. 6 Acceleration and velocity time histories: (a) typical accelerometer data; (b) typical laser Doppler vibrometer measurement

P_a/P_{a1} 作归一化处理.其中: P_a 为归一化的 a 方法所有数据的平均功率谱密度函数, P_{a1} 为 a 方法第一个峰值所对应频率的功率谱密度函数幅值.处理后的频域数据对比如图 7 所示.

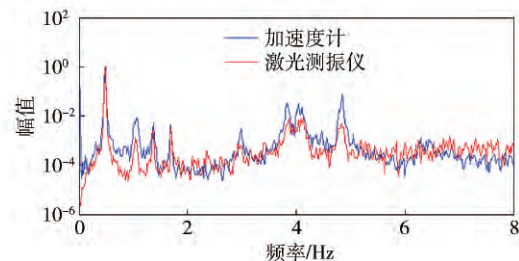


图 7 不同测试方法数据的频域信息对比

Fig. 7 Testing result comparison in the frequency domain

激光测振仪和加速度计两种仪器所测得数据分别为速度与加速度.由于现场试验布置参考点的困难,试验中未对位移进行测量,但可以利用所测的速度或加速度信号的积分获得风电塔振动的位移,鉴于本文的研究侧重点,将不进行详述.为了比较激光测振仪和加速度计所测两种数据频率成分的差异,首先将激光多普勒测振仪所得到的速度信号经过微分转化成加速度信号,再将不同数据的功率谱密度函数按照 $P'_a =$

从图 7 中对比可以看出:在塔筒中部,使用两种仪器测试所得数据的频域信息相似程度较高,使用激光多普勒测振仪可以获得可信的结构振动信号.此外,压电式加速度计受温度变化等影响严重,0 Hz 处成分明显,漂移现象严重;而激光多普勒测振仪所测得的数

据该现象不明显.

通过对比发现, 激光多普勒测振仪用于振动测试, 可以获得有效的结构振动信息, 其测量得到的振动信号与传统方法使用加速度传感器获得的信号无明显差别, 且受温度、光照等因素影响较小. 激光测试无需在塔筒上安装传感器, 因此大大缩减了振动测试的现场工作量. 远距离激光测振技术相对成熟, 对结构表面无特殊的反射要求, 获得的结构振动信号质量较高. 此外, 在现场测试中, 加速度传感器多安装在塔筒内的平台上, 因此仅能测试特定几个高度处的振动信号, 而激光多普勒测振仪则不受此限制, 对于轮毂部位等难以安放加速度计的位置仍然可以获得其振动数据. 不过由于文中所采用的激光多普勒测振仪为单点模式, 无法多点同时测量, 因而未获得结构的振型信息; 如需结构振型信息, 则可采用多台测振仪同步采样, 或采用扫描式激光多普勒测振仪进行同步多点测量. 本次试验中所测量风电塔处于停机状态, 因此变桨、偏航等风机的不同工作状态对测量未造成影响. 若进行风机运转状态下塔架振动测试, 则需要测试中选取合适的测量位置(如轮毂处、叶片背面塔身等), 以避免激光束被遮挡而导致无法有效获得所需测点振动的情况. 另外, 在对风电塔塔身振动进行测量过程中, 鉴于圆筒的几何形状, 还需处理好塔筒侧向振动导致激光瞄准点改变而引起的测量误差. 本文试验中风机处于停机状态, 对所测信号分析, 得到塔筒在垂直于激光束的平面内振幅 Δ 小于 5 mm, 由其引起的测量误差 $\delta < 0.2\% \Delta$, 在沿激光束方向振动不大于垂直激光束方向振动的条件下, 可判定侧向振动引起的测量误差可忽略(图 8). 当然, 在一些极端工况下, 塔顶位移会出现过大振动, 造成不可忽略的测量误差, 使用者需要特别注意. 另外, 在使用激光测振的现场试验中, 还需注意激光束和被测表面之间入射角度的设置, 一般在激光束与被测表面垂直的时候测量效果最好, 入射角的减小会削弱反射光的强度而影响测量效果.

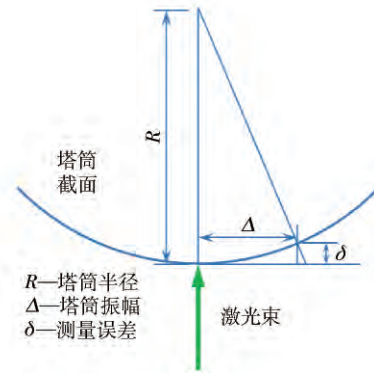


图 8 塔身侧向振动引起的测量误差分析

Fig. 8 Measurement error due to lateral vibration

3 风电塔振动特性识别

对采用两种方法获得的振动信号进行处理以获得该风电塔的振动特性, 分别利用频域中的峰值拾取法(PP)与时域中的随机子空间识别法(SSI)进行分析. 其中, 峰值拾取法是一种能够快速得出结构固有频率的算法, 该方法基于系统激励和响应关系(式(2)和式(3))在白噪声假定的基础上, 即外部输入 $F(\omega)$ 频域为常数时, 认为结构响应在结构固有频率处出现峰值, 利用该原理可获得结构的固有频率.

$$X(\omega) = H(\omega) F(\omega). \quad (2)$$

式中 $H(\omega)$ 为频率响应函数, 可表示为

$$H_p(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\varphi_l \varphi_{pr}}{[1 - (\Omega/\omega_n)^2] + 2\zeta j(\Omega/\omega_n)}. \quad (3)$$

式中 l 和 p 分别为测点和激励点, r 为模态阶数, φ 为结构振型, Ω 和 ω_n 分别为外界激励频率和结构固有频率, ζ 为阻尼比.

两种传感器所测得数据的频域响应图像如图 9 所示. 从加速度数据的频域图像(图 9(a))可以得出, 前二阶结构频率分别为 0.488 Hz 和 3.967 Hz, 由于加速度计硬件敏感性和测量位置局限于塔筒内部平台高度等原因, 其采集的数据未能得到结构的第三阶频率. 激光测量数据的频域图像如图 9(b)所示. 从图中可

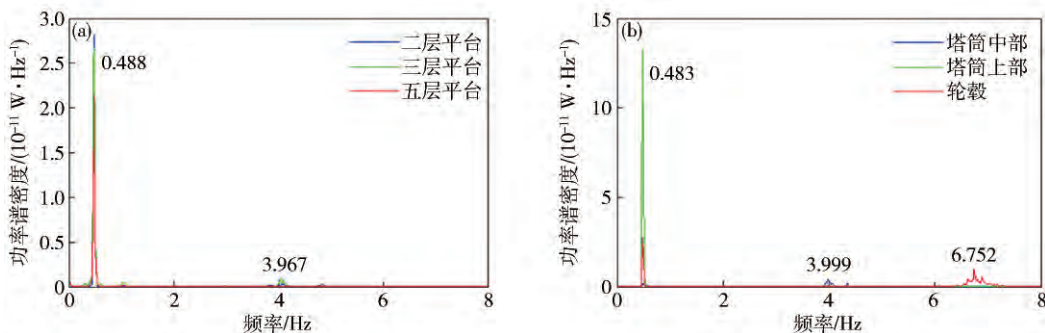


图 9 峰值拾取法计算结构频率. (a) 加速度计数据; (b) 激光测振仪数据

Fig. 9 Eigen frequencies of the wind turbine tower calculated by using the peak-picking method: (a) typical accelerometer data; (b) typical laser Doppler vibrometer measurement

以得出,前二阶结构频率分别为 0.483 Hz 和 3.999 Hz,与加速度计数据处理结果相近;此外,从激光测量轮毂位置处的数据还能得出结构的第三阶频率为 6.752 Hz.

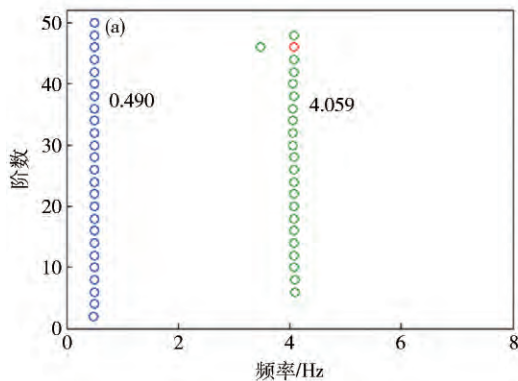
为了确保峰值拾取法识别的准确性,使用随机子空间识别法对两种测试手段获得的数据进行处理.随机子空间识别法^[14]有多种算法,以加速度计两层平台的数据和激光多普勒测振仪塔筒中部的数据(图 6)为例介绍文中采用方法.首先利用测得数据构造 Hankel 矩阵,并将 Hankel 矩阵分为“过去” H_p 和“未来” H_f 两部分(式(5)).

$$H = \begin{bmatrix} H_p \\ H_f \end{bmatrix}. \quad (4)$$

将“未来”子块作对“过去”子块的正交投影,得到投影矩阵 O :

$$O = H_f/H_p \equiv H_f H_p^T (H_p H_p^T)^{-1} H_p. \quad (5)$$

将投影矩阵进行奇异值分解(式(7)),忽略高阶近似为 0 的奇异值,只保留前 N 阶奇异值,投影矩阵得到近似.



$$O = USV^T = [U_1 \quad U_2] \begin{bmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix} \approx U_1 S_1 V_1^T. \quad (6)$$

分解后的投影矩阵 O 通过式(8)和式(9)即可得到系统矩阵 A :

$$\Gamma = U_1 S_1^{1/2}. \quad (7)$$

$$A = \Gamma_1^{-1} \Gamma_2. \quad (8)$$

其中 Γ_1 表示 Γ 去除最后的 m 行,而 Γ_2 代表 Γ 去除前面的 m 行(其中 m 为测点数).求解系统矩阵 A 的各阶特征值 λ_N ,并按式(10)将其转换到连续空间中,即可求得系统自振频率 f_N .

$$f_N = \frac{\left| \arctan \left[\frac{\text{Im}(\lambda_N)}{\text{Re}(\lambda_N)} \right] \right| f_s}{2\pi}. \quad (9)$$

其中 f_s 为采样频率.

取系统阶次 N 的多个可能值进行计算,即得到随机子空间识别法的稳定图(图(10)).结合稳定图能够排除部分虚假模态,获得更准确的结构固有频率.

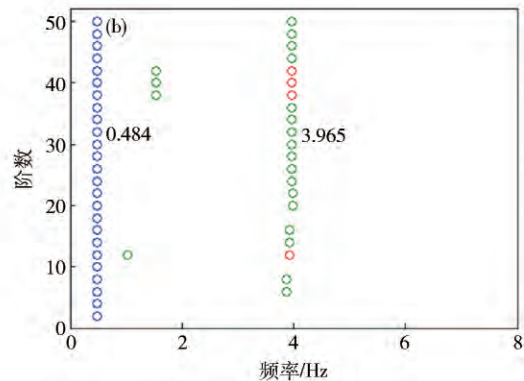


图 10 随机子空间识别法计算稳定图. (a) 加速度计; (b) 激光测振仪

Fig. 10 Stability diagram of the stochastic subspace identification method: (a) typical accelerometer data; (b) typical laser Doppler vibrometer measurement

同峰值拾取法,不同位置的数据得到的频率信息不完全相同,但分析表明各组数据差别不大.利用峰值拾取法和随机子空间识别法对加速度计测得的结构振动信号和激光测振仪获得的结构振动信号进行处理,得到结构的固有频率.对激光测振的 13 组数据和加速度计测得的 9 组数据取平均处理,对比如表 2 所示.利用激光多普勒测振仪和加速度计所测得数据计算的结构前两阶自振频率相差不大,通过对激光多普勒测振仪所测得的轮毂处数据的处理,获得了结构的第三阶自振频率,而加速度计所测得的数据则没有捕捉到第三阶模态的振动信息.激光多普勒测振仪为非接触测量,可以测量可视范围内任意位置的结构振动,结合测试前的结构模态分析,可以有效避免结构振型节点的影响,最大限度地测得所需要的结构自振特性.

表 2 实测结构固有频率对比

测试方法	Table 2 Comparison of system identification results Hz					
	第一阶		第二阶		第三阶	
	PP	SSI	PP	SSI	PP	SSI
激光多普勒测振仪	0.498	0.494	4.014	3.971	6.731	6.864
加速度计	0.488	0.485	4.032	4.039	—	—

4 结论

我国风能产业发展迅猛,已经连续五年保持风电第一大国的地位.为发展高效的现场实测手段和科学的数据分析方法,以便满足对服役一定阶段风电设备安全评估的需要,本文通过对某 1.5 MW 风电塔的现场实测和分析,发展了激光遥测的方法,得出以下几点结论:

(1) 现场测试中使用的激光非接触测量的方法可以实现结构的遥测, 无需在风电塔上安装任何设备, 较传统加速度计应用起来更加方便省时; 通过激光测振的方法可测得可视范围内任何一点的振动信息, 特别是轮毂等传统接触式传感器无法安装的位置, 测量范围广。

(2) 通过对比频域内激光遥测方法和传统加速度计获得的测试数据, 验证了激光测振仪在风电塔振动信号测试中数据的可靠性; 研究发现, 激光多普勒测振仪不受温度影响, 不会产生零点漂移现象, 但建议在现场试验中尽量保持激光束和被测表面的垂直, 以便获得较高质量的数据, 并注意一些极端工况下振动位移过大导致测点移动可能造成的测量误差。

(3) 通过对动力实测多组数据的采用峰值拾取法和随机子空间识别法进行处理, 得到该 1.5 WM 风电塔结构前三阶自振频率分别在 0.5 Hz、4.0 Hz 和 6.8 Hz 左右。由于加速度计硬件和安装位置影响, 其测试信号分析只得到结构前两阶自振频率; 对激光多普勒测振仪测得的信号分析得到前两阶自振频率识别结果与加速度计无异, 但对激光测振获得的轮毂位置数据的分析, 则可得到结构第三阶频率。

参 考 文 献

- [1] Li J F, Cai F B, Qiao L M, et al. 2014 *China Wind Power Review and Outlook*. Beijing: China Environmental Science Press, 2014 (李俊峰, 蔡丰波, 乔黎明, 等. 中国风电发展报告 2014. 北京: 中国环境科学出版社, 2014)
- [2] National Technical Committee for Standardization of Wind Machinery. GB/T19072—2010 *Tower of Wind Turbine Generator System*. Beijing: Standards Press of China, 2010 (全国风力机械标准化技术委员会. GB/T19072—2010 风力发电机组塔架. 北京: 中国标准出版社, 2010)
- [3] National Energy Administration. NB/T31004—2011 *Guidelines for Vibration Condition Monitoring and Diagnose of Wind Turbine Generator*. Beijing: China Electric Power Press, 2011 (国家能源局. NB/T31004—2011 风力发电机组振动状态监测导则. 北京: 中国电力出版社, 2011)
- [4] Ji L, Zhu L, Yao X Q, et al. Applicability of existing seismic calculation methods for wind turbines on a 5 MW wind turbine. *Acta Energ Sol Sin*, 2014, 35(11): 2300 (季亮, 祝磊, 姚小芹, 等. 现有风力发电机组地震作用计算方法对 5 MW 风力发电机组的适用性研究. 太阳能学报, 2014, 35(11): 2300)
- [5] Song B, Zeng J. Nonlinear seismic dynamic response and critical value evaluation based on limit states of wind turbine tower structures. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2013, 35(10): 1382 (宋波, 曾洁. 风电塔非线性地震动力响应规律与极限值评价. 北京科技大学学报, 2013, 35(10): 1382)
- [6] Ma R L, Ma Y Q, Liu H Q, et al. Ambient vibration test and numerical simulation for modes of wind turbine towers. *J Vib Shock*, 2011, 30(5): 152 (马人乐, 马跃强, 刘慧群, 等. 风电机组塔筒模态的环境脉动实测与数值模拟研究. 振动与冲击, 2011, 30(5): 152)
- [7] Huang S, Song B, He W S, et al. Numerical analysis of dynamic response and in-site monitoring of wind power tower considering the influence of the fluctuating wind load. *China Civ Eng J*, 2012, 45(Suppl 1): 102 (黄帅, 宋波, 贺文山, 等. 考虑脉动风影响的风电塔风致动力响应数值分析与现场监测比较. 土木工程学报, 2012, 45(增刊 1): 102)
- [8] Kilic G, Unluturk M S. Testing of wind turbine towers using wireless sensor network and accelerometer. *Renewable Energy*, 2015, 75: 318
- [9] Chang C C, Ji Y F. Flexible videogrammetric technique for three-dimensional structural vibration measurement. *J Eng Mech*, 2007, 133(6): 656
- [10] Pieraccini M, Parrini F, Fratini M, et al. In-service testing of wind turbine towers using a microwave sensor. *Renewable Energy*, 2008, 33(1): 13
- [11] Huang T L. *Study on Some Methods for Identification of Structural System and Damage* [Dissertation]. Shanghai: Tongji University, 2007 (黄天立. 结构系统和损伤识别的若干方法研究[学位论文]. 上海: 同济大学, 2007)
- [12] Lu X F. *Study on Experimental Modal Analysis and Laser Measurement Technology* [Dissertation]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007 (卢喜丰. 实验模态分析与激光测振技术研究[学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2007)
- [13] Zhang Y Y, Gong K, He S F, et al. Progress in laser Doppler velocity measurement techniques. *Laser Infrared*, 2010, 40(11): 1157 (张艳艳, 巩轲, 何淑芳, 等. 激光多普勒测速技术进展. 激光与红外, 2010, 40(11): 1157)
- [14] Van Overschee P, De Moor B L. *Subspace Identification for Linear Systems: Theory—Implementation—Applications*. Springer Science & Business Media, 1996