

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.03.015

基于回流多风扇主动控制引导风洞的风场模拟试验

陈彬^{1,2} 姚裕³ 易弢^{1,2} 李先影⁴ 王健^{1,2}

(1. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福州, 350007;

2. 国网公司强台风环境抗风减灾实验室(培育), 福州, 350007;

3. 南京航空航天大学航空学院, 南京, 210016; 4. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

摘要: 为了深入开展复杂建筑物及输配电线路的台风风荷载研究,提升复杂建筑物及输配电线路抗台风灾害的能力,拟研制一种回流多风扇主动控制风洞。为了突破回流多风扇主动控制风洞结构设计的关键技术,验证全尺寸风洞能否达到预期指标,研制了回流单动力段主动控制引导风洞。文中主要介绍了该引导风洞的结构设计和主动来流(均匀流场和湍流流场)模拟试验。试验结果表明:该引导风洞的最大风速达到 18.2 m/s;正弦脉动流场风速为 15.1 m/s(平均速度) \pm 3.8 m/s(振幅)时,最大频率为 7 Hz;正弦脉动风场模拟相似度高达 94.3%。

关键词: 多风扇主动控制;风洞;湍流;回流;台风

中图分类号:V211.7 文献标志码:A 文章编号:1005-2615(2019)03-0374-08

Wind Field Simulation in Small-Scale Model of Closed-Circuit Multiple Controlled Fan Wind Tunnel

CHEN Bin^{1,2}, YAO Yu³, YI Tao^{1,2}, LI Xianying⁴, WANG Jian^{1,2}

(1. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou, 350007, China; 2. State Grid Cultivating Laboratory of Wind Resistance and Disaster Mitigation Under Severe Typhoon Environment, Fuzhou, 350007, China;

3. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The multiple controlled fan wind tunnel is designed to investigate the typhoon wind load and improve the resistance ability for complex buildings and transmission tower-line systems (TTLS). In order to achieve the key technology during the structure design of the full-scale wind tunnel, a small-scale model of the closed-circuit single controlled fan wind tunnel is established. The uniform and turbulence characteristics of the atmospheric boundary layer (ABL) in the small-scale wind tunnel are discussed. The obtained results show that the value of the maximum average wind speed can reach 18.2 m/s and the maximum circular frequency is 7 Hz. Meanwhile, the mean wind speed of the sinusoidal wave flow is 15.1 m/s at the peak of amplitude of 3.8 m/s. The generated sinusoidal wave flow has a high correlation coefficient at 94.3% with the target.

Key words: multiple controlled fan; wind tunnel; turbulence; closed-circuit; typhoon

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0309100)资助项目;国家自然科学基金(51375230)资助项目;国家电网公司科技“强台风环境配电网风涝灾害预警及应急复电关键技术研究及示范应用”(SGTYHT-16-JS-198)资助项目;江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX19_0166)资助项目。

收稿日期: 2018-12-26; **修订日期:** 2019-01-23

通信作者: 姚裕,男,副研究员, E-mail: yy503@126.com。

引用格式: 陈彬,姚裕,易弢,等. 基于回流多风扇主动控制引导风洞的风场模拟试验[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(3):374-381. CHEN Bin, YAO Yu, YI Tao, et al. Wind Field Simulation in Small-Scale Model of Closed-Circuit Multiple Controlled Fan Wind Tunnel[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(3):374-381.

风洞中风场模拟技术主要有被动和主动两种模拟技术^[1]。被动模拟技术是指利用尖劈、格栅和粗糙元等被动湍流发生装置形成所需模拟湍流场的模拟技术,被动模拟装置不需要能量输入^[2-4]。通过被动模拟技术虽然在一定程度上能够模拟大气边界层风场,但它们对低频湍流模拟不足且在高频段湍流功率谱密度函数偏高,与实际情况不符;湍流积分尺度小,难以满足风洞试验对大比例湍流积分尺度的要求,因此引出了各种主动模拟技术来加强风洞中低频湍流成分模拟。主动模拟技术是指利用可控制运动机构装置向风洞中的气流注入随机脉动能量,主动模拟装置有振动翼栅、振动尖劈和多风扇阵列等^[5-7]。主动模拟技术能够弥补被动模拟技术中湍流积分尺度小且湍流强度随高度的增加衰减过快等方面的不足。多风扇阵列风洞是目前较完善的主动模拟技术^[8-9]。

日本宫崎大学的多风扇主动控制风洞为直流式风洞,动力段由 11×9 (行 \times 列)个风扇构成,通过计算机独立驱动伺服电机,试验段总长为15.5 m,宽2.6 m,高1.8 m,最大风速为15 m/s^[10-11],文献[12]中风场模拟效果与实测台风的相似度可达93.8%。复杂建筑物及输配电线路具有高耸、跨度大特点,例如常见的高压输电塔-线体系总跨度约为2 000 m、高度150 m,若试验模型跨度缩尺比为200:1,高度缩尺比为50:1,则试验模型跨度为10 m,高度3 m。但由于该试验段截面尺寸有限,难以满足输电塔-线体系台风风荷载试验。

美国佛罗里达国际大学的多风扇主动控制直流风洞(12-fan WOW)由 2×6 (行 \times 列)个风扇组成,试验段截面宽6.1 m,高4.3 m,风速最高70 m/s^[13-15]。文献[16]中给出了该风洞风场模拟结果,该多风扇主动控制风洞风场模拟效果比常规大气边界层风洞风场模拟效果好。

美国企业和家园安全协会的多风扇主动控制风洞为直流式风洞,动力段由 15×7 (行 \times 列)个风扇组成,试验段入口截面宽19.8 m,高9.1 m,最高风速可达58 m/s,风洞电机的模拟转速和目标转速相似度在95%以上^[17-19]。该风洞能够进行台风、冰雹、风雨和火灾试验,是目前最为先进且功能最多的台风风场模拟设备^[20]。

同济大学的多风扇主动控制风洞(TJ-5),由 12×10 (行 \times 列)个风扇组成,每台风扇由伺服控制系统独立驱动,可实现大气边界层气流特性的主动控制模拟。风洞试验段截面宽1.5 m,高1.8 m,最高风速达18 m/s^[21-22]。该风洞试验段截面尺寸较小,限制了输电塔-线体系台风风荷载试验的开展。

国网福建省电力有限公司电力科学研究院拟建成一座回流大尺度试验段多风扇主动控制风洞,以供开展电网设备的近地层台风风荷载研究,提升电网设备抗台风灾害的能力。为了突破回流大尺度试验段多风扇主动控制风洞结构设计的关键技术,验证全尺寸风洞能否达到预期指标,研制了“回流单动力段主动控制引导风洞”,并开展了最大风速试验、风速突增试验、最大变频能力试验以及正弦脉动流场模拟试验。

1 湍流特性基本参数计算

风场的湍流特性,主要体现为湍流强度、湍流积分尺度、阵风因子以及脉动风速功率谱等。

1.1 湍流强度

湍流强度主要反映风的脉动强度,定义为脉动风速标准方差与平均风速的比值^[23]

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U} \quad (1)$$

式中: u 为脉动风速; U 为平均风速; σ_u 为脉动风速 $u(t)$ 的标准差。 $\sigma_u^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt$,方差 σ_u^2 相当于湍流脉动风速的动能。由于方差(或标准差)表示随机变量瞬时值向平均值两侧偏离的程度,因此湍流统计理论中可以使用标准差与平均值之比来定量表示湍流的强弱,即湍流强度。

1.2 湍流积分尺度

湍流积分尺度是脉动风中湍流漩涡平均尺寸的度量,反映脉动风速空间相关性的强度^[24]

$$L_u = \int_0^\infty \rho_{uu}(x) dx \quad (2)$$

$$\rho_{uu}(x) = \overline{u_1(t)u_2(t)} / \sigma_u^2 \quad (3)$$

式中: $\rho_{uu}(x)$ 指空间两点的同一方向脉动速度 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 的互相关系数。

1.3 阵风因子

阵风因子是描述风脉动强度的特征量,通常定义为阵风持续周期内脉动风速的最大值与平均风速之比^[25],即

$$G_u = \frac{\max(u(t))}{U} \quad (4)$$

1.4 脉动风速功率谱

脉动风速功率谱描述了脉动风能量在频率域的分布情况,反映脉动风中不同频率成分对湍流脉动总动能的贡献^[26]。

已知脉动风速 $u(t)$,经傅里叶变换有

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t)e^{-j\omega t} dt \quad (5)$$

式中 $X(\omega)$ 为 $u(t)$ 的频谱。

2 引导风洞研制与测量设备

2.1 引导风洞

图1是引导风洞示意图,采用回流结构,由动

力段、试验段、拐角及拐角导流片、回流段、蜂窝器、阻尼网以及压力平衡缝等组成。引导风洞长8 m,宽2.2 m,高0.48 m。图中位置点1,2,3,4是测点位置。图2是引导风洞实物图。

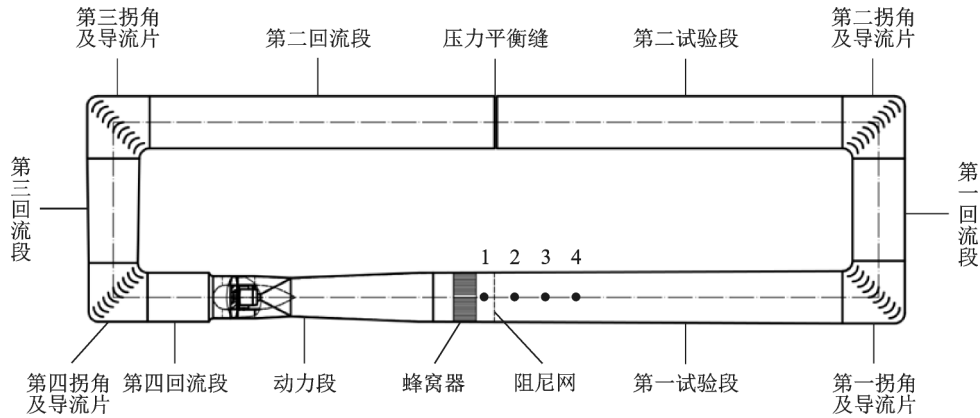


图1 引导风洞结构示意图

Fig.1 Schematic of the small-scale model of the closed-circuit single controlled fan wind tunnel



图2 引导风洞实物图

Fig.2 The small-scale model of the closed-circuit single controlled fan wind tunnel

图3是动力段示意图,由集气段、动力段前段、动力段中段、动力段后段、扩散段、整流罩前罩、整流罩中罩、整流罩尾罩、风扇转子系统、电机、支撑片及止旋片等组成。集气段是半径为 R 的喇叭口;动力段前段和动力段中段为圆筒结构,由于动力段中段出口为圆形,而扩散段入口为矩形,为保证动力段中段与扩散段联接安装,必须在两者之间有圆-方过渡段,即动力段后段;扩散段主要是降低气流流速,减小气流能量损失,采用二维扩散设计,扩散角不大于 5° ;整流罩前罩和整流罩尾罩采用流线型旋成体型线,整流罩中罩为圆筒结构。

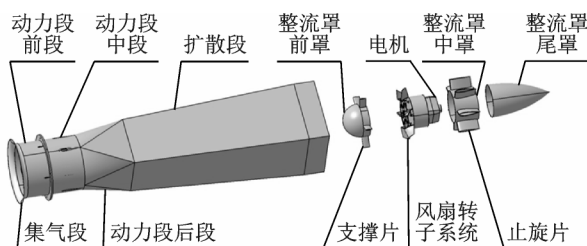


图3 动力段结构示意图

Fig.3 Exploded diagram of 3D structure for the power system

风扇转子系统(图4)直径为0.48 m,桨毂比为0.6;电机型号为松下MSME502GCG;支撑片、止旋片分别采用NACA0015对称翼形和NACA0018对称翼形。



图4 风扇转子系统实物图

Fig.4 Photograph of the fan system

2.2 测量系统

风场测量系统(图5)由皮托管、压力传感器、数据采集卡组成,文中所有试验的采样周期为1 000 Hz。

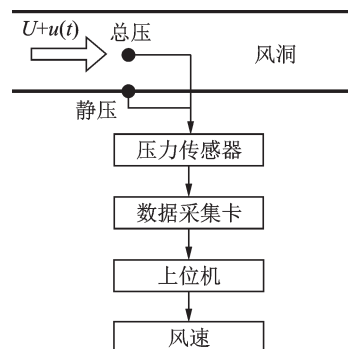


图5 风场测量系统

Fig.5 Measurement system of the wind field

压力传感器将皮托管测得的总压和静压转化为电信号,数据采集卡读入压力传感器信号,并传送给上位机,上位机进行数据处理,得到实际风速。风速数据处理依据伯努利方程

$$p + \frac{1}{2} \rho V^2 = p_0 \quad (6)$$

式中: p 为静压; $\frac{1}{2} \rho V^2$ 为动压, ρ 为空气密度, V 为风速, p_0 为总压。

2.3 控制系统

风场风速的控制策略是基于风速的实时测量值反馈调节电机转速,从而实现风速的实时控制。为了实现对风速的精确控制,本文研究了单闭环

(图6)和双闭环(图7)两种控制方式。

单闭环控制系统由伺服电机、伺服驱动器、PLC及上位机组成,通过伺服电机中的编码器反馈信号给伺服驱动器构成伺服电机转速闭环控制。

双闭环控制系统则是在单闭环控制系统基础上,引入风速传感器直接测量风场风速,并将风速反馈给上位机,形成风速闭环控制。这样可以消除电机到最终风速的误差,获得较高的控制精度,保证系统的可靠与稳定。

采用上述两种控制方式,脉动风速模拟对比曲线如图8所示,采用单闭环控制方式,相似度为87.1%;采用双闭环控制方式,相似度为94.3%,相似度提高了7.2%。

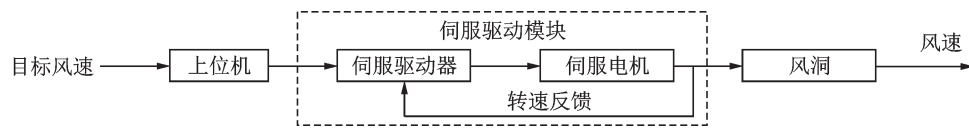


图6 单闭环控制系统

Fig.6 Single closed-loop control system

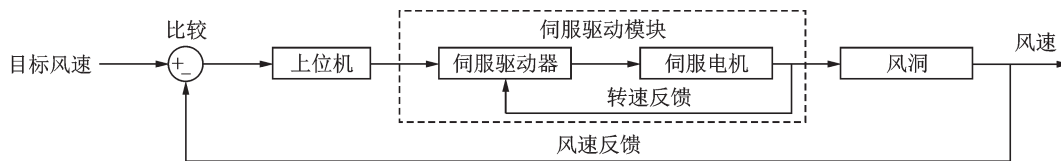


图7 双闭环控制系统

Fig.7 Double closed-loop control system

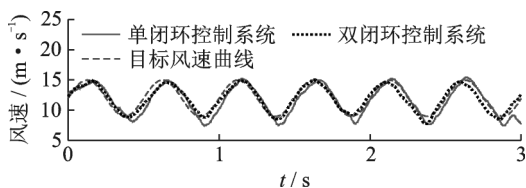


图8 单闭环控制系统与双闭环控制系统的脉动风速模拟对比曲线

Fig.8 Comparison of the measured single and double closed-loop curves with the target wind speed

3 试验结果与分析

多风扇主动控制风洞最突出的特点是能够模拟高端流度、强离散型和强突变性的台风、下击暴流等非良态风风场。因此,要对风洞风速的突变特性进行深入研究,具体包括:最大风速试验、风速突增试验、最大变频能力试验以及正弦脉动风速曲线的模拟试验。

3.1 最大风速试验

伺服电机从0 r/min依次加速到500,1 000,1 500,2 000,2 500和3 000 r/min时,测得风场中位置1的实际风速依次为3,6.1,9.1,12.1,15.1和18.2 m/

s(图9)。当伺服电机为额定转速(3 000 r/min)时,风速最大为18.2 m/s。进行风洞试验时,风速会有一些的相似比,若风速比为1:5时,可模拟风速为90 m/s的台风风场。

将伺服电机转速与风场风速进行线性拟合得到伺服电机转速与风速的传递函数

$$y = 0.006 1x \quad (7)$$

式中: x 为伺服电机转速, y 为风场风速,比例系数 $k=0.006 1$,利用此传递函数可实现风速的闭环控制。

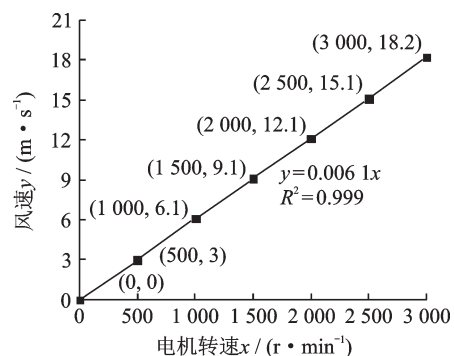


图9 伺服电机转速与风场风速

Fig.9 Relationship between servo motor speed and wind speed

3.2 风速突增试验

为了研究风场的瞬时突变特性,进行了电机转速从0 r/min分别加速到1 000,1 500,2 000,2 500和3 000 r/min试验。通过分析风场中位置1的风速变化曲线(图10),得到风速的突增时间依次为22,34,49,75和136 ms,加速度依次为277,267,247,201和134 m/s²(图11)。试验结果优于文献[22]中的数据(风速从0 m/s加速到5 m/s,需要1.16 s)。

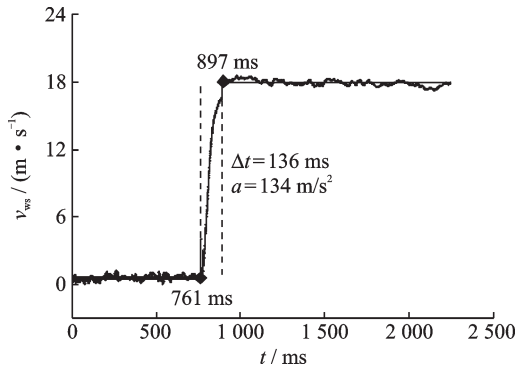


图10 电机转速从0 r/min加速到3 000 r/min过程中位置1风速变化曲线

Fig.10 A typical variation curve of the wind speed with different servo motor speeds from 0 to 3 000 r/min

3.3 最大变频能力试验

风场的频率变化性能是一个很重要的参数,反映风场的湍流度大小,风洞风场的变频特性由伺服电机决定。分别进行了3类正弦风速脉动试验:(I)伺服电机基速1 500 r/min、振幅375 r/min

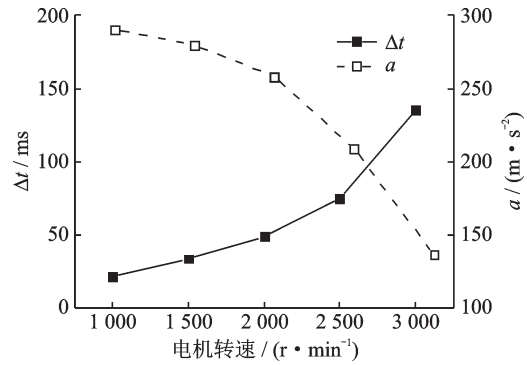


图11 风速突增试验结果

Fig.11 Experimental results of sudden speed change test

(振幅与基速的比值为25%);(II)伺服电机基速2 000 r/min、振幅500 r/min(振幅与基速的比值为25%);(III)伺服电机基速2 500 r/min、振幅625 r/min(振幅与基速的比值为25%),测试点为位置1。3类正弦脉动风速实测曲线与拟合曲线之间的时域和频域对比结果分别见表1,2。

3类正弦脉动风场的最大频率依次为13,9和7 Hz,拟合度依次为96%,94.5%和86%。对比3类风场数据可知:当平均风速和风速振幅增大、振幅与平均风速的比值一定时,风场的湍流强度、湍流积分尺度、阵风因子均呈增大的趋势;但由于电机本身的性能参数,电机的最大变频能力减弱,即风场的脉动频率减小;实测脉动风场与其拟合风场的拟合度降低。

3.4 正弦风速曲线(SIN流)的模拟

SIN流是湍流场风速模拟的一部分,表示输出

表1 3类正弦脉动风速实测曲线与拟合曲线之间的对比

Tab.1 Comparison of the wind speed-time curves between the measured and fitted values of the sinusoids under different conditions

类型	电机参数		风速-时间曲线	拟合曲线
	平均转速/(r·min ⁻¹)	幅值/(r·min ⁻¹)		
I	1 500	375 (25%)		$u_1(t)=9.1+2.2\sin(2\pi\times 13\times t)$ <ul style="list-style-type: none"> 拟合度: 96% 平均风速: 9.1 m/s 幅值: 2.2 m/s 频率: 13 Hz
II	2 000	500 (25%)		$u_2(t)=12.1+3\sin(2\pi\times 9\times t)$ <ul style="list-style-type: none"> 拟合度: 94.5% 平均风速: 12.1 m/s 幅值: 3 m/s 频率: 9 Hz
III	2 500	625 (25%)		$u_3(t)=15.1+3.8\sin(2\pi\times 7\times t)$ <ul style="list-style-type: none"> 拟合度: 86% 平均风速: 15.1 m/s 幅值: 3.8 m/s 频率: 7 Hz

表 2 3类正弦脉动风速实测曲线与拟合曲线之间的功率谱对比

Tab.2 Comparison of the power spectrum-frequency curves between the measured and fitted values of the sinu- soids under different conditions

类型	电机参数		功率谱-频率曲线	湍流特征
	平均转速/ (r · min ⁻¹)	幅值/ (r · min ⁻¹)		
I	1 500	375 (25%)		<ul style="list-style-type: none"> • 湍流强度: 7% • 湍流积分尺度: 0.12 m • 阵风因子: 1.15
II	2 000	500 (25%)		<ul style="list-style-type: none"> • 湍流强度: 19% • 湍流积分尺度: 0.20 m • 阵风因子: 1.29
III	2 500	625 (25%)		<ul style="list-style-type: none"> • 湍流强度: 28% • 湍流积分尺度: 0.33 m • 阵风因子: 1.43

风速是有一定幅值、周期以及相位的正弦波。实际上,任何风场都可以看作是多个不同频率、幅值、相位的SIN流的叠加,SIN流风场的模拟对于大气边界层湍流模拟风洞的研究具有实际意义。

设目标脉动风速时程表达式为

$$u(t) = U + A \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (8)$$

式中:U为SIN流的均值,A为SIN流的幅值,f为SIN流的频率,φ为SIN流的初始相位。

在SIN流模拟中,由于实际信号中均值的存在,而交流伺服电机开始运行时速度为0 r/min,如果一开始就加载风速信号,加速度过大可能会损坏电机。所以开始要另设一段加速阶段,即:从0 r/min加速到均值,然后再加载脉动风速信号(图12)。

模拟目标脉动风速时程曲线

$$u(t) = 12.1 + 3 \sin(2\pi \times 2t) \quad (9)$$

已知目标脉动风速时程的平均风速为12.1 m/s,幅值为3 m/s,频率为2 Hz,初始相位为0,根据式(7),伺服电机的基准转速约为2 000 r/min,幅值约为500 r/min,试验结果见图13,与目标脉动风速时程曲线的相似度为94.3%。

4 结 论

本文主要介绍了回流单动力段主动控制引导风洞的结构设计和控制系统的组成,并进行了最大

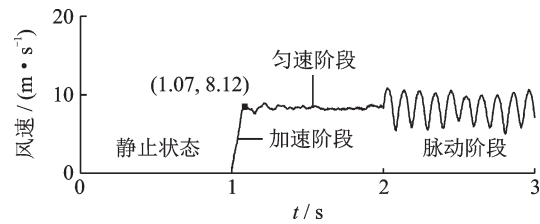


图12 SIN流模拟过程

Fig.12 A typical signal curve of the measured wind speed evolved with time

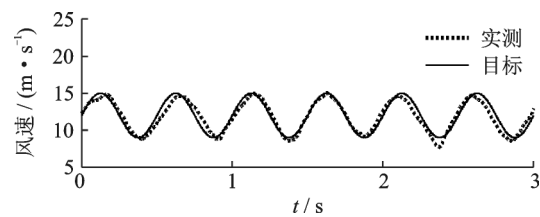


图13 频率为2 Hz的脉动风速时程模拟曲线

Fig.13 Comparison of the wind speed-time curves between the measured and target values of the sinu- soids with the fixed frequency of 2 Hz

风速试验、风速突增试验、最大变频能力试验以及正弦脉动风速曲线的模拟试验,在后续研究中,将针对任意湍流风速时程进行模拟试验。

(1) 当伺服电机为额定转速3 000 r/min时,风速最大为18.2 m/s。进行风洞试验时,若风速比为1:5时,可模拟风速为90 m/s的台风风场。

(2) 当电机转速从 0 r/min 分别加速到 1 000, 1 500, 2 000, 2 500 和 3 000 r/min 时, 位置 1 的风速突增时间依次为 22, 34, 49, 75 和 136 ms, 加速度依次为 277, 267, 247, 201 和 134 m/s²。

(3) 3 类正弦风速脉动试验: 伺服电机基速 1 500 r/min、振幅 375 r/min(振幅与基速的比值为 25%), 基速 2 000 r/min、振幅 500 r/min(振幅与基速的比值为 25%), 基速 2 500 r/min、振幅 625 r/min(振幅与基速的比值为 25%) 时, 风速的最大频率依次为 13, 9 和 7 Hz。

(4) 正弦风速曲线(SIN 流)的模拟, 模拟风速与目标风速的相似度为 94.3%。

参考文献:

- [1] OZONO S, MIYAGI H, WADA K. Turbulence generated in active grid mode using a multi-fan wind tunnel[J]. *Journal of Fluid Science & Technology*, 2007, 2(3): 643-654.
- [2] SONG P Z. Simulation of atmospheric boundary layer in an open-loop wind tunnel using spire roughness element technique[D]. Windsor: University of Windsor, 2017.
- [3] SILL B L. Turbulent boundary layer profiles over uniform rough surfaces[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1988, 31(2): 147-163.
- [4] CERMAK J E. Progress in physical modeling for wind engineering[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1995, 54/55(94): 439-455.
- [5] TEUNISSEN H W. Simulation of the planetary boundary layer in a multiple-jet wind tunnel[J]. *Atmospheric Environment*, 1972, 9(2): 145-174.
- [6] KAWATANI M, KIM H. Evaluation of aerodynamic admittance for buffeting analysis[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1992, 41(1/2/3): 613-624.
- [7] NISHI A, KIKUGAWA H, MATSUDA Y, et al. Turbulence control in multiple-fan wind tunnels[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1997, 67/68(4): 861-872.
- [8] ALY A M, BITSUAMLAK G T, CHOWDHURY A G. Full-scale aerodynamic testing of a loose concrete roof paver system[J]. *Engineering Structures*, 2012, 44(6): 260-270.
- [9] SMITH J T, MASTERS F J, LIU Z, et al. A simplified approach to simulate prescribed boundary layer flow conditions in a multiple controlled fan wind tunnel[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2012, 109(4): 79-88.
- [10] BUTLER K, CAO S Y, KAREEM A, et al. Surface pressure and wind load characteristics on prisms immersed in a simulated transient gust front flow field[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2010, 98(6/7): 299-316.
- [11] TOSHIMITSU K, NARIHARA T, KIKUGAWA H, et al. Experimental study of improved HAWT performance in simulated natural wind by an active controlled multi-fan wind tunnel[J]. *Journal of Thermal Science*, 2017, 26(2): 113-118.
- [12] CAO S Y, NISHI A, KIKUGAWA H, et al. Reproduction of wind velocity history in a multiple fan wind tunnel[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(12/13/14/15): 1719-1729.
- [13] MOONEGHI M A, IRWIN P, CHOWDHURY A G. Large-scale testing on wind uplift of roof pavers[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2014, 128(128): 22-36.
- [14] ALY A M, CHOWDHURY A G, BITSUAMLAK G. Wind profile management and blockage assessment for a new 12-fan wall of wind facility at FIU[J]. *Wind & Structures An International Journal*, 2011, 14(4): 285-300.
- [15] BAHERU T, CHOWDHURY A G, BITSUAMLAK G, et al. Simulation of wind-driven rain associated with tropical storms and hurricanes using the 12-fan wall of wind[J]. *Building & Environment*, 2014, 76(6): 18-29.
- [16] FU T C, ALY A M, CHOWDHURY A G, et al. Proposed technique for determining aerodynamic pressures on residential homes[J]. *Wind & Structures An International Journal*, 2012, 15(1): 27-41.
- [17] MORRISON M J, BROWN T M, LIU Z Z. Comparison of field and full-scale laboratory peak pressures at the IBHS research center[C]//Proceeding of ATC and SEI Conference on Advances in Hurricane Engineering. Miami, Florida: [s.n.], 2012.
- [18] SMITH J T. Simulation of prescribed boundary flow conditions in a multiple controlled fan wind tunnel[D]. Gainesville, Florida: University of Florida, 2011.
- [19] STANDOHAR A C D, ESTES H, JOHNSTON T, et al. Reducing losses from wind-related natural perils: Research at the IBHS research center[J]. *Frontiers in Built Environment*, 2017(3): 1-19.
- [20] LIU Z Z, SMITH J, MASTERS F J, et al. Assessment of wind storm facility at the insurance center for building safety research[C]//The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering. Taipei, China: [s.n.], 2009.

- [21] 曹曙阳,朱乐东,赵林. TJ-5多风扇主动控制风洞 [EB/OL]. (2017-04-08) [2018-08-30]. http://mp.weixin.qq.com/s/idD-_ryEMW4GNwYMQHjx3Q, 2017.
- CAO Shuyang, ZHU Ledong, ZHAO Lin. The closed-circuit multiple controlled fan wind tunnel TJ-5 [EB/OL]. (2017-04-08) [2018-08-30]. http://mp.weixin.qq.com/s/idD-_ryEMW4GNwYMQHjx3Q, 2017.
- [22] CAO J X, CAO S Y, GE Y J. Characteristics and performances of a newly-built actively-controlled multiple-fan wind tunnel[C]//The 9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering. Auckland, New Zealand: [s.n.], 2017.
- [23] HUI Y, YOSHIDA A, TAMURA Y. Interference effects between two rectangular-section high-rise buildings on local peak pressure coefficients[J]. Journal of Fluids & Structures, 2013, 37(37): 120-133.
- [24] VARSHNEY K, PODDAR K. Experiments on integral length scale control in atmospheric boundary layer wind tunnel[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2011, 106(1/2): 127-137.
- [25] CAO S Y, TAMURA Y, KIKUCHI N. A case study of gust factor of a strong typhoon[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2015, 138: 52-60.
- [26] TORRIELLI A, REPETTO M P, SOLARI G. A refined analysis and simulation of the wind speed macro-meteorological components[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2014, 132(132): 54-65.

(编辑:夏道家)