

DOI: 10.7652/xjtuxb201706018

大气边界层风洞的风机动力系统优化设计

唐博^{1,2}, 杨斌¹, 任莹辉¹

(1. 西北大学化工学院, 710069, 西安; 2. 华东理工大学机械与动力工程学院, 200237, 上海)

摘要: 为满足风洞实验模拟真实野外大气边界层的要求,提出了双风机驱动的风机动力系统方案,并采用数值风洞技术对双风机的3种不同布置方案和单风机驱动条件下风洞内定常边界层流动特性及风机系统动力性能进行了对比分析。数值模拟结果表明:3种双风机动力系统方案均可满足风沙迁移全领域的风速要求;相比之下,双风机两端分布的设计方案在保证低惯性的前提下,使风洞内边界层流动最大风速和湍流度值最高可达 54.28 m/s 和 13.46%,是单风机驱动情况下的 176.60% 和 141.83%,更适于进行野外风沙迁移乃至沙尘暴过程的风洞模拟,是4种风洞动力系统设计方案中最优化的结果,可应用于现有沙风洞的升级改造。

关键词: 大气边界层风洞; 风机; 数值模拟; 风速; 湍流度

中图分类号: O359;X169 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)06-0110-05

Optimal Design of the Power System of ABL Wind-Tunnel

TANG Bo^{1,2}, YANG Bin¹, REN Yinghui¹

(1. School of Chemical Engineering, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: A power system with dual fans for atmospherical boundary layer (ABL) wind-tunnel is proposed to simulate the actual ABL. Numerical wind-tunnel technology is used to compare the steady boundary flow fields in the wind tunnel among four schemes of the wind tunnel power system, that is, three different arrangement schemes of dual-fan power system a scheme of single power fan. Simulation results show that the dual-fan systems generate the wind velocity enough to cover whole condition of aeolian sand transport. Especially when the air in the wind-tunnel is driven by dual fans located at both ends of the wind-tunnel, the wind velocity and turbulence intensity of the boundary layer flow reach 54.28 m/s and 13.46%, respectively, and are 176.60% and 141.83% of those of single fan scheme. So it is most suitable for simulations of field aeolian sand transport or even sand storm processes in ABL wind-tunnel. The power system with dual fans located at both ends of the wind-tunnel is the optimal scheme among the four schemes of the wind tunnel power system. This research may provide a reference for the improvement of existing wind-tunnel involving sand motion.

Keywords: atmospherical boundary layer wind-tunnel; fan; numerical simulation; wind velocity; turbulence intensity

大气边界层风洞(简称 ABL 风洞)是用来模拟 大气边界层内空气流动状态的一类风洞,最早被用

收稿日期: 2016-08-21。 作者简介: 唐博(1992—),男,硕士生;杨斌(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11102153);陕西省自然科学基金基础研究计划青年人才资助项目(2013JQ2001)。

网络出版时间: 2017-03-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170328.1133.012.html>

于研究污染物扩散问题^[1-2],进而在环境、建筑、汽车、化工、机械等领域得到了广泛应用^[3-4]。ABL 风洞在风沙迁移研究中的应用最早可追溯到 20 世纪 40 年代,Bagnold 和 Chepil 等利用边界层风洞开展了风沙运动和土壤侵蚀的实验研究^[5-6],兹纳门斯基还曾专门设计和建造了沙风洞^[7]。由于在风沙迁移的风洞实验中采用原型沙,缩尺比为 1,意味着在尺寸有限的风洞内无法完整模拟全尺度的野外阵风场和沙床地表条件,只能是近地表野外风沙流场的近似复现,风洞内的大气边界层流动与近地表野外阵风等比相似。野外阵风为无规律随机变化的非定常湍流,若想实现近地表野外阵风的真实复现,对风洞动力系统有极高的要求:首先,为了模拟野外风沙连续迁移乃至沙尘暴过程,风洞内气流流速要足够高,主流风速至少要达到 25 m/s^[8];其次,为了实现风洞内风速的非定常变化,动力风机要在保证高流量的前提下惯性尽可能小,以便变速调节;最后,风洞内气流流场应具有高湍流度,以模拟近地表强湍流大气^[9]。采用单台风机驱动难以同时满足上述条件。本文针对西北大学风沙环境实验室建设的单风机吸气式 ABL 风洞,提出了双风机驱动的动力系统优化方案,采用数值风洞技术,对比分析了单/双风机的 4 种不同动力系统方案下风洞内边界层的定常流动特性,从而确定最优化的动力系统方案,用以指导现有风洞的升级改造。

1 风洞几何模型及动力系统组成

1.1 风洞模型

研究对象为一台低速开式风洞,如图 1 所示,实验段长宽高分别为 9 000、940、940 mm;风洞进、排气口直径为 1 500、940 mm;A、B 段可用于布置风机,其长度 L_A 、 L_B 随所装风机的形式而变化,当 A 未装风机时, $L_A=500$ mm。

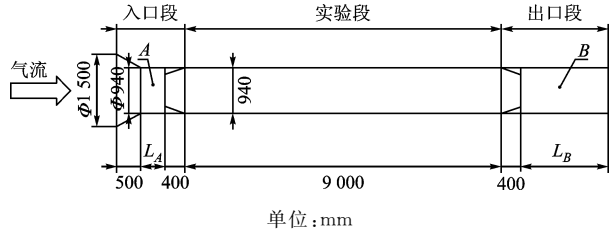


图 1 风洞示意图

1.2 风洞动力系统设计方案

单风机动力系统方案记为 F_0 ,采用 1 台轴流风机为风洞提供动力,风机安装于风洞 B 段内(吸气

式, $L_B=1\,800$ mm),5 片等截面扇叶布置于风扇轴中部,叶片高度为 370 mm,叶顶间隙为 0;风机两端装有简易整流罩,如图 2 所示。

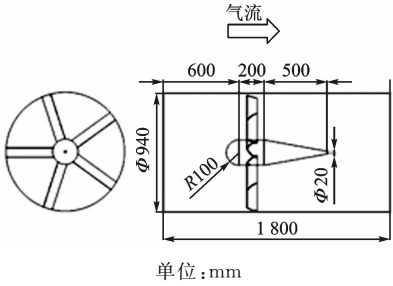
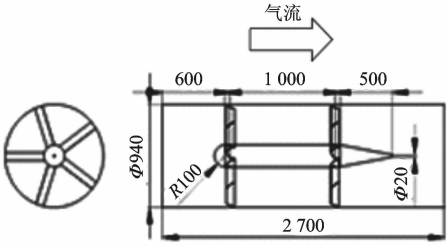
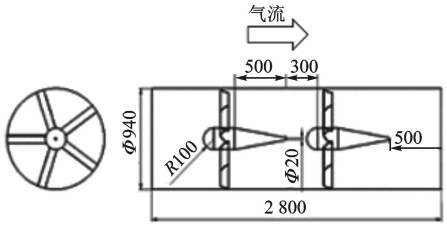


图 2 单风机尺寸及安装位置简图

双动力风机系统采用 2 台同规格风机为风洞提供动力,按照风扇组装形式及安装位置的不同又可分为双风机同轴(记为 F_1)、异轴(记为 F_2)及双风机两端分布(记为 F_3)3 种方案,其中方案 F_1 、 F_2 中 2 台风机均布设于风洞出口 B 段内,如图 3 所示;两端分布方案 F_3 中 2 台风机则分别位于风洞 A 段和 B 段内,任一段内风机安装位置均与单风机驱动方案一致。



(a)同轴双动力风机



(b)异轴双动力风机

单位:mm

图 3 双动力风机尺寸及安装位置简图

2 模拟方法

2.1 网格划分

几何建模及网格划分采用 Gambit 完成, x 、 y 、 z 轴分别代表风洞轴向、垂向、展向;模型分区进行网格划分,风机安装段采用 Tet/Hybrid 单元 TGrid 法划分,其余部分采用 Hex/wedge 单元 Cooper 方

法划分。

2.2 计算方法及边界条件

湍流模型采用 RNG $k-\epsilon$ 模型,通过对湍动黏度进行修正,以适应本例的旋转风扇结构;采用多重参考系法(MRF)处理风机动、静部分的相互作用;求解采用有限体积法;压力与速度耦合采用 SIMPLEC;压力的离散方式采用 PRESTO! 法,它较适于处理含旋转与高曲率的流动^[10]。

边界条件设置:进出口采用压力条件,表压为 0 Pa;单/双风机的转速恒定,均为 3 000 r/min;设定实验段壁面粗糙度为 300 mm,粗糙常数为 0.7。

3 结果分析

3.1 无关性验证

图 4 给出了单风机驱动方案 F_0 的数值模拟网格无关性验证结果。质量流量 q_m 为风洞进口处的模拟值,网格数分别为 524 099、1 216 430、1 745 621、2 192 735、2 590 360、2 951 451。由图 4 可知,当网格数超过一定值后,模拟计算结果基本趋于稳定,不再受网格数量的影响。结合计算残差精度的结果,该方案中模型网格数选择 1 745 621。类似地,方案 $F_1 \sim F_3$ 的模型网格数选为 1 847 835、1 223 262、1 215 664。

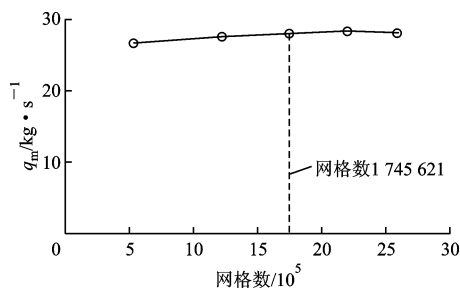


图4 质量流量模拟值随网格数的变化趋势

3.2 单风机系统风洞流场模拟结果及分析

图 5 给出了实验段 $A_1 \sim A_3$ 横截面中心垂线上的平均风速 u 、湍流度 T 、湍流耗散率 ϵ 随高程(到风洞底板的距离) z 的分布, $A_1 \sim A_3$ 横截面距实验段入口的距离分别为 1 500、4 500 及 7 500 mm。考虑到对称性,图中仅绘出了风洞的下半区域。3 个截面上的边界层流动特性参数随高程的变化趋势基本相同。 A_1 的风速廓线与 A_2 、 A_3 的有一定差异,应是由流动未充分发展及阻力损失造成。湍流度分布的数值差异是由于风机的扰流作用随位置接近而迅速增强。湍流耗散率曲线基本重合,说明边界层的流动特性在流向得到了较好的保持。采用压力边界

条件及全结构模拟可以避免出现一般 ABL 模拟使用两方程 RANS 湍流模型和标准的壁面函数所遇到的边界层特性变差情况^[11-12]。下面的分析将主要基于 A_2 横截面上的模拟数据。

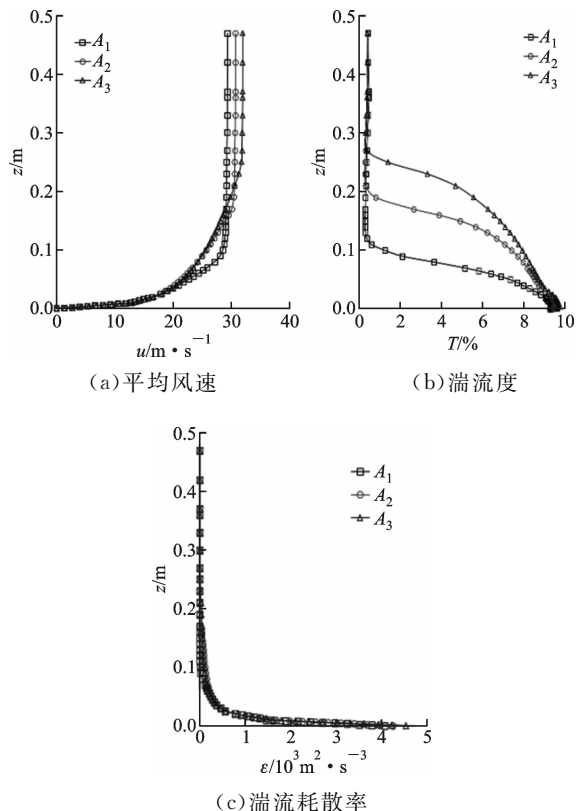


图5 实验段不同横截面上的边界层流动特性参数对比

由图 5a 求得 A_2 横截面处边界层厚度 $\delta = 184$ mm,采用 Richards 和 Hoxey 的修正对数律公式^[12]

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z + z_0}{z_0} \quad (1)$$

对边界层内的风速廓线进行拟合,求得粗糙度 $z_0 = 2.77$ mm,摩阻风速 $u_* = 2.887$ m/s。这一结果与下垫面性质为 5~6 cm 植被覆盖的地表情况^[9]基本一致。

距壁面 9 mm 处 $T_{\max} = 9.49\%$,之后湍流度随高度升高而减小,到达外层后湍动能基本趋于稳定。湍流耗散率分布与高程近似满足反比关系,壁面附近耗散率较大,说明湍动能在壁面附近损耗较大。

3.3 双风机系统风洞流场模拟结果及分析

图 6 给出了 $F_1 \sim F_3$ 这 3 种双风机动力系统方案中过风洞轴线的垂直切面($x-y$ 平面)的速度云图。图 7 给出了双风机两端分布驱动的风洞实验段 $B_1 \sim B_5$ 5 个不同横截面上中心垂线处的边界层流动特性曲线, $B_1 \sim B_5$ 距离实验段入口的距离分别为 1 500、3 000、4 500、6 000 和 7 500 mm。双风机两

端分布方案由于吹、吸气送风方式同时作用,特别是吹气作用的影响^[13],使风洞实验段内的速度沿流向变化较为明显,最大速度点并未出现在风洞中心附近,其位置高度与单端双风机布置方案相比下降了 50%左右;继续从最大速度点直到风洞中心,风速反而逐渐降低(见图 7a)。随着流动的发展,实验段的边界层厚度逐渐增大,最大风速逐渐减小,壁面附近的湍流度和湍流耗散率也沿着流向逐渐减小; $B_3 \sim B_5$ 上的参数差异相对很小,说明流动在 B_3 处已达到充分发展。

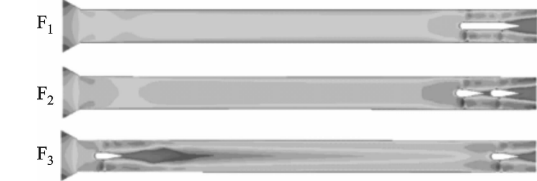


图 6 双风机驱动风洞切面的速度云图

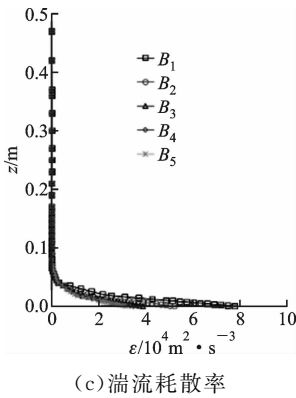
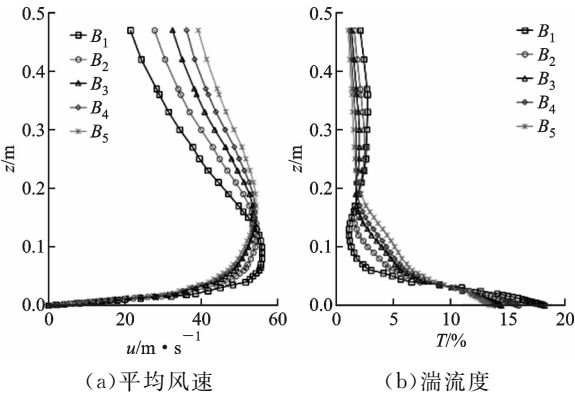


图 7 实验段不同横截面上的边界层流动特性对比

鉴于等比尺度模拟野外大气边界层需要较大的边界层厚度,本文选取 B_5 截面作为实验截面与方案 $F_0 \sim F_3$ 下 A_2 截面的流动特性进行对比。表 1、表 2 给出了 4 种方案下的风机系统动力性能参数及相应边界层流动特性参数的对比,其中 P 为截面的平均静压, $u_{\max}$ 为最大风速。图 8 为 4 种方案下的边

界层流动中平均风速与湍流度随高程的分布对比。

表 1 风机动力性能对比

动力系统	$q_m/\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	P/Pa	$u_{\max}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
F_0	28.08	-585.31	30.74
F_1	37.34	-1 039.88	40.979
F_2	39.07	-1 162.30	43.28
F_3	48.09	-228.86	54.28

表 2 边界层流动特性参数对比

动力 系统	δ/mm	z_0/mm	$u_* / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\epsilon_{\max} / \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$	$T_{\max} / \%$
F_0	184	2.77	2.887	4 256.06	9.49
F_1	186	2.94	3.905	9 645.27	9.64
F_2	196	3.52	4.267	9 835.61	9.97
F_3	145	0.54	3.889	31 381.78	13.46

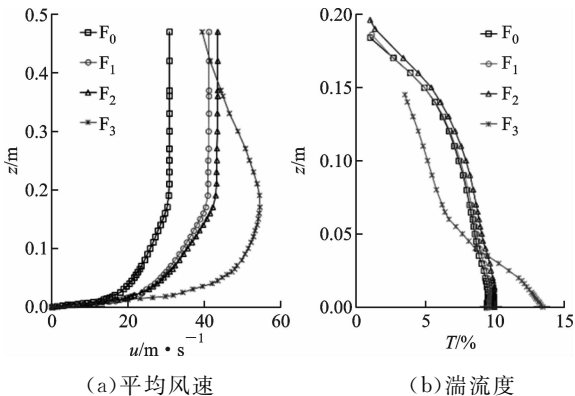


图 8 风洞内边界层流动特性对比

考虑到实际风洞中变径段、纱网、蜂窝器、劈尖、粗糙元等都会造成较大的阻力损失,以及吸气式风洞由于轴向长度远大于纵向和垂向长度而造成的吸气面积受限等原因,单风机驱动方案中风洞内的实际风速会远小于理论模拟值,因而不能确保满足强风沙迁移实验的风速要求。双风机同轴驱动方案相比于单风机系统,风速增加了 33.28%,实现了良好的增速效果,但由于 2 组风机安装在同一驱动转轴上,动力系统的惯性极大,因此难以进一步变转速模拟野外非定常阵风环境,且对轴及电机都有较高的要求。双风机异轴或两端分布驱动方案均具有足够的动力性能和低惯性特点。风机两端分布驱动时,风洞内的最大风速和湍流度比双风机异轴驱动方案增加了 25.42% 和 35%,是单风机驱动方案的 176.60% 和 141.83%,更重要的是最大湍流度达到了 13.46%,属于高湍流强度,更适于模拟近地表强

湍流大气边界层流动, 尽管其边界层厚度较小, 但是可通过铺设粗糙元加以调整, 与野外大气边界层相匹配^[14]。

4 结 论

双风机两端分布的动力系统方案可在保证低惯性的前提下, 在风洞内产生高速、高湍流度的边界层流动, 更适于进行近地表风沙迁移乃至沙尘暴过程的风洞复现, 是4种风洞动力系统方案中的最优者, 可采用这种方案对现有风洞进行升级改造。

参考文献:

- [1] SHERLOCK R, STALKER E. The control of gases in the wake of smoke stacks [J]. *Mechanical Engineering*, 1940, 52: 455-458.
- [2] SHERLOCK R, STALKER E. A study of flow phenomenon in the wake of smoke stacks [J]. *University of Michigan Engineering Reserve Bulletin*, 1941, 29: 49.
- [3] LIU Xianzhi, HAN Yan, CAI Chunsheng, et al. Wind tunnel tests for mean wind loads on road vehicles [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016, 150: 15-21.
- [4] TOMINAGA Y, BLOCKEN B. Wind tunnel analysis of flow and dispersion in cross-ventilated isolated buildings: impact of opening positions [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016, 155: 74-88.
- [5] BAGNOLD R A. 风沙与荒漠沙丘物理学 [M]. 钱宁, 林秉南, 译. 北京: 科学出版社, 1959: 28-38.
- [6] CHEPIL W S. Dynamics of wind erosion: III The transport capacity of the wind [J]. *Soil Science*, 1945,

60(6): 475-480.

- [7] ЗНАМЕНСКИЙ А И. 沙地风蚀过程的实验研究和沙堆防止问题 [M]. 杨郁华, 译. 北京: 科学出版社, 1960: 8-52.
- [8] 徐国昌, 陈敏连, 吴国雄. 甘肃“4.22”特大沙暴分析 [J]. *气象学报*, 1979, 37(4): 26-35.
XU Guochang, CHEN Minlian, WU Guoxiong. The analysis of Gansu “4.22” heavy sandstorm [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1979, 37(4): 26-35.
- [9] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 24-32.
- [10] FLUENT. *Fluent 6.3 user's guide* [M]. Lebanon: New Hampshire, 2006: 8-22.
- [11] PARENTE A, GORLÉ C, VAN BEECK J, et al. Improved $k-\epsilon$ model and wall function formulation for the RANS simulation of ABL flows [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(4): 267-278.
- [12] RICHARDS P J, HOXEY R P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the $k-\epsilon$ turbulence model [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, 46/47: 145-153.
- [13] 刘政崇. 高低速风洞气动与结构设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 40-86.
- [14] 王丽, 王元, 王大伟. 粗糙元特征对风洞中大气表面层模拟的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2009, 43(3): 87-91.
WANG Li, WANG Yuan, WANG Dawei. Effect of roughness elements on the wind tunnel simulation of atmospheric surface layer [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2009, 43(3): 87-91.

(编辑 武红江 苗凌)

(上接第85页)

- [12] CHEN H L, CHEN P S, CHIANG J S. A low-offset low-noise sigma-delta modulator with pseudorandom chopper-stabilization technique [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems: I Regular Papers*, 2009, 56(12): 2533-2543.
- [13] WANG Luo, JI Huihui, SUN Quan. A sigma-delta modulator with a novel chopper correlated double sampled integrator [C] // *Proceedings of International Conference on ASIC*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Computer Society, 2011: 449-452.
- [14] DENG Honghui, WANG Zhangmeng. A chopper-

stabilized amplifier for input signal amplification of sigma-delta ADC [C] // *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Anti-Counterfeiting, Security and Identification*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 7064968.

- [15] MOLLAZADEH M, MURARI K, CAUWENBERGHS G, et al. Micropower CMOS integrated low-noise amplification, filtering, and digitization of multimodal neuropotentials [J]. *IEEE Transactions on Bio-medical Circuits & Systems*, 2009, 3(1): 1-10.

(编辑 刘杨)