

微型低湍流标定风洞结构设计研究

郝春生,李汇军,张思聪,周晨阳,胡捷
(南京航空航天大学 航天学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对大型风洞造价昂贵,小型风洞便捷性不够的现状,为了对风速传感器进行标定,设计了一种微型便携移动低速标定风洞。该风洞的尺寸仅有 630 mm,级别达到了桌面级。采用轴流风机作为动力段,风洞提供稳定风速标定范围为 30 m/s~60 m/s。介绍了洞体结构设计和流体仿真,给出了各个位置尺寸的计算方法。结构设计采用 Cfturbo 和 SolidWorks 进行三维建模,同时运用 Ansys CFX 完成了涵道流体计算。计算结果表明:出口气流均匀,湍流度较小,实验段的最大轴流风速稳定;且出风口风场速度稳定面积占比 75%以上,满足实验设计要求。该设计方案可行,可作为标定风洞使用。

关键词:标定风洞;涵道结构设计;数值模拟;轴流风机

中图分类号:V211 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)05-0109-04

Structural Design of Miniature Low Turbulence Calibrated Wind Tunnel

HAO Chunsheng, LI Huijun, ZHANG Sicong, ZHOU Chenyang, HU Jie

(Institute of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In view of the high cost of large wind tunnels and the inadequate convenience of small wind tunnels, to calibrate the wind speed sensor, a portable low-speed calibration wind tunnel is designed. The size of the wind tunnel is only 630 mm, but its level comes to the desktop level. Axial fan is used as the power section in this wind tunnel. It gives the wind tunnel a stable wind speed calibration range of 30 m/s to 60 m/s. The structure design and fluid simulation of the cave are briefly introduced. The calculation method of each position and size is given out in the structure design. In the structure design, Cfturbo is used with SolidWorks to build its three-dimensional model, and Ansys CFX is used to do the calculation of culvert fluid. The calculation results show that the outlet air flow is uniform, the turbulence is small, the maximum axial flow velocity in the experimental section is stable, and the outlet air field velocity stability area accounts for more than 75%, which meets the requirements of the experimental design. The scheme is feasible and can be used as a calibration wind tunnel.

Keywords: calibration wind tunnel; structure design of culvert; numerical simulation; axial fan

0 引言

工程运用中风速测量技术是重要的一环。风速测量传感器使用前必须标定,才能保证精准度。大型风洞可以提供稳定的风速段,但是标定成本太高,因此有必要研发微型标定风洞,不但应用方便、成本低,而且标定质量较高。这对于提升风洞实验室的风速测试水平具有重要的现实意义^[1]。

热线测试技术对传感器的标定要求很高,每次使用前都要进行标定,这就对标定设备提出了很高的要求^[2]。所以标定风洞的基本要求与风速传感器的工作条件有直接的关系,普通风速仪测量范围集中在 0~30 m/s,部分热线风速仪的量程达到了 0~60 m/s。

浙江大学的余世策等在 2014 年进行了小型直流标定风洞的研制^[2],但是该标定风洞的尺寸接近 5 m,控制系统采用主动变频控制,不仅不方便移动,而且主动控制方

式精度不高。内蒙古农业大学的刘海洋等在 2016 年进行了可移动低速风洞的设计与试验^[3],该标定风洞的尺寸也达到了 2.63 m,实验段风速 0~17.6 m/s,虽然在可移动性得到了提升,但是标定风洞的标定范围降低了很多。

根据这一实际情况,研制出一种微型、经济、实用的直流标定风洞。本文以南京航空航天大学风洞实验室微型直流标定风洞为例,详细讨论了风洞洞体结构设计、仿真模拟,对标定风洞的研究有着较高的参考价值。

1 涵道气动结构设计

1.1 涵道气动轮廓

目前主流的标定风洞控制方式大多采用交流变频控制系统,这种控制系统存在耐久性的问题,并且标定风洞本身第一次使用需要风速仪反向标定,较不方便。在上述分析前提下,提出如下总体设计方案:1) 标定风洞整体尺

基金项目:国家自然科学基金项目(411775039)

第一作者简介:郝春生(1996—),男,安徽淮南人,硕士研究生,研究方向为旋转机械轴流风机设计及计算流体分析。

寸不宜过大;2)在风速要求范围内保证稳定工作的基础上,结构尽量简单;3)出口流场湍流速度满足风速仪的试验要求。标定风洞由动力段、扩散段、蜂窝器、稳定段、收缩段组成如图1所示。动力段由轴流风机供能,出口尺寸 $\phi 90\text{ mm}$,面积为 $6.4 \times 10^{-3}\text{ m}^2$,试验需要标定测试的风速传感器的迎风面积为 $8 \times 10^{-5}\text{ m}^2$,占出风口面积的1.25%。入口尺寸 $\phi 250\text{ mm}$,收缩比7.72:1;收缩曲线采用双三次收缩曲线;整体长度630 mm,达到桌面级别。

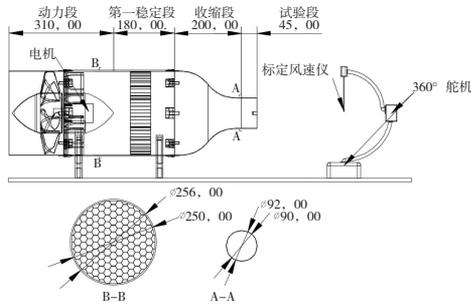


图1 微型标定风洞结构图

1.2 动力段设计

动力段是为标定风洞提供风源的重要组成部分,其中轴流风机体积较小,且结构简单,便于安装,采用电机驱动,降低风扇对气流的影响,将电机置于后置导叶整流罩内。轴流风机主要参数计算如下。

1) 比转速

比转速可以用来表征不同类型的通风机性能的主要参数,通常 $R+S$ 级^[4]轴流通风机比转速 >200 ,比转速大表明其流量大而压力小,同时,比转速由全压、流量和转速决定,并影响着叶轮直径等参数^[5]。

$$n_s = 5.54n \frac{Q_v^{\frac{1}{2}}}{p_{tF}^{\frac{3}{4}}}$$

计算可得比较速 $n_s = 220$ 。

2) 叶轮直径

叶轮直径直接影响通风机的性能和结构。并且叶轮直径受全压的限制,受比转速的影响^[6]。

$$D = \frac{60K_u \sqrt{2p_{tF}/\rho}}{\pi n}$$

式中: K_u 为系数,取 $n_s = 259$, K_u 取2.53,计算得 $D = 0.25$ 。

3) 轮毂比

轮毂比对轴流风机的用途及气动流型选择有着较大的影响,其中电机固定在后导叶处,因此轮毂的尺寸也由电机直径尺寸决定,所以轮毂比是轴流风机设计中全局性问题。

$$\bar{d} = \frac{d}{D} = \frac{p_{tF}}{\rho \eta_1 c_a u_t} \times \frac{2 \sin \beta_m}{\tau C_{cy}}$$

其中: η_1 是全压效率,取0.85; c_a 为轴向速度; u_t 是叶片顶的圆周速度; β_m 是平均气流角; τC_{cy} 是叶根截面的空气动力负荷因子。计算得 $\bar{d} = 0.48$, $d = 0.12$ 。

计算得到轴流风机的主要参数后,导入CFturbo进行参数化建模,翼型采用NACA65-010,叶片数目为7,导叶数目为9。叶片轮廓如图2所示。

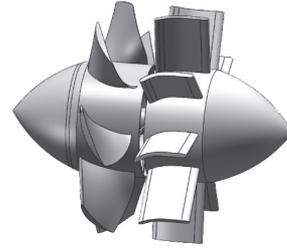


图2 轴流风机叶片模型

1.3 收缩段设计

气流经过稳定段进入收缩段,得到均匀加速,从而达到额定流速,收缩段的设计直接决定实验段的流体质量,所以收缩段的设计是风洞设计中至关重要的部分。收缩段的设计和性能主要取决于收缩比 C 和收缩曲线,收缩比定义为收缩段入口处横截面积与收缩段出口处横截面积的比值^[5]。收缩比 C 与气流在收缩段速度增量成正比,另外较大的收缩比可以减小能耗,同时也可以一定程度上降低2个方向的分速度,在一定程度上降低相对湍流速度,但是收缩比过大的话,收缩段之前的稳定段的面积过大,不仅成本高,而且容易引起漩涡及影响各向同性^[6]。收缩段出口处的湍流强度与收缩段入口处的湍流强度比为湍流度减小收缩比作用系数,湍流度减小收缩比作用系数 f_c 与收缩比 C 的关系为:

$$f_c = \frac{\left\{ \frac{3}{4} C^2 \cdot [\ln(4C^3) - 1] + \frac{3C}{2} \right\}^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{3} C} \quad (1)$$

f_c 与 C 的关系曲线如图3所示^[7-9]。

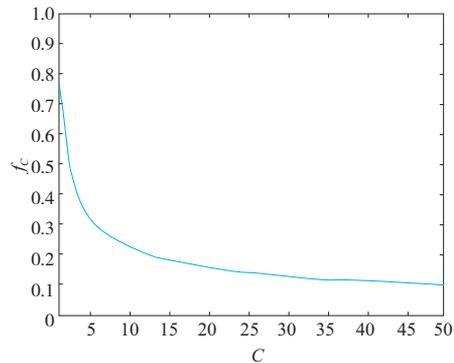


图3 收缩比作用系数 f_c 与收缩比 C 的关系曲线

由图3可得,收缩比在0~5之间时, f_c 减小得比较明显;在15~50之间, f_c 的变化不大。考虑到成本问题,而且过大的收缩比需要二次收缩,所以收缩比取5~10之间。本风洞收缩比取7.72:1,常用的收缩曲线有维持辛斯基收缩曲线、双三次曲线、五次方曲线,公式分别为:

$$R = \frac{R_2}{\sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \right] \frac{\left(1 - \frac{3X^2}{A^2} \right)}{X^2} \frac{1}{\left(1 + \frac{A^2}{X^2} \right)}}}$$

$$R = \begin{cases} R_1 - 4(R_1 - R_2)(X/l)^3 & X/l \leq 1/2 \\ R_2 + 4(R_1 + R_2)[1 - (X/l)]^3 & X/l > 1/2 \end{cases}$$

$$R = R_2 + (R_1 - R_2)[1 - 10(X/l)^3 + 15(X/l)^4 - 6(X/l)^5]$$

图4是3种曲线的对比图,由图中可以看出:维特辛斯基曲线在进口部分收缩较其他2个曲线快,后半段收缩平缓,这样可以较大程度地保证出口处速度均匀,但是可能会出现逆压梯度^[9];双三次曲线和五次方曲线的进口都比较平缓,双三次曲线在进出口处都比五次方曲线更为平缓,本风洞采用更平缓的双三次曲线。

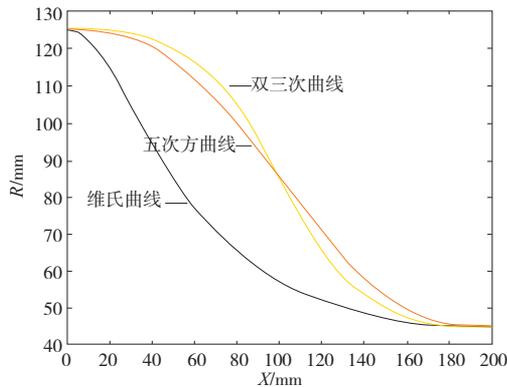


图4 3种曲线的对比图

1.4 蜂窝器设计

为了提高进入收缩段的气流品质,需要在稳定段安装蜂窝器和阻尼网。由于此风洞的尺寸较小,且整体结构为3D打印材料。所以简化掉阻尼网,蜂窝器对气流有导向作用,有效降低气流横向的湍流度^[2],蜂窝器由许多小截面管道组成,其中六角形蜂窝管的阻力损失最小^[10],本蜂窝器长度尺寸为75mm,对边尺寸为20mm。

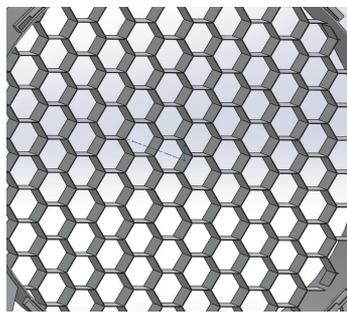


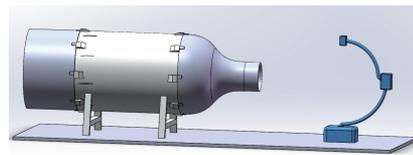
图5 蜂窝器结构放大图

2 风速仪两自由度夹具设计

出口气流的湍流强度影响标定风洞的品质^[11],为了不影响到出口的速度场,设计两自由度二维热线风速仪夹具,夹具力臂采用1/4圆弧段,最大限度地减少对流场的影响。在舵机与上、下臂连接处安装红外线,交点在风速仪探头处,使风速仪探头始终位于夹具两自由度轴线交点处也是标定风洞的轴线处,夹具采用360°高精度舵机驱动,这样可以不改变风速仪探头位置而改变探头的指向角度,测量出口气流场的不均匀性也可以测量出口风速方向角。夹具实物及整体效果图如图6所示。



(a) 夹具实物图



(b) 标定风洞示意图

图6 夹具实物及整体效果图

3 标定风洞流场数值模拟设置

3.1 网格划分

风扇叶片模型由CFturbo导入solidworks,然后进行整体涵道建模,并进行结构简化,简化后风洞如图7所示。其中将整个风洞分成4个部分,分别是旋转域叶轮、静止域后导叶、静止域进口、静止域出口。结构化网格的质量高于非结构化网格,且同尺寸标准下网格数量低于非结构化网格。叶轮和导叶结构复杂,采用结构化网格,这样可以解决因为网格质量太差或网格数量过多导致计算出错的问题。分别对边界层及复杂结构处进行加密处理,4个域的网格划分结构如图8所示,结构化网格采用turbogrid划分,要提前对叶轮、导叶进行流道提取。静止域的进出口网格采用icem划分。

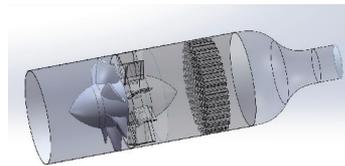
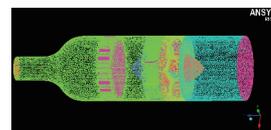
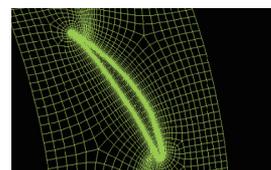


图7 标定风洞简化图



(a) 标定风洞整体网格



(b) 叶轮机匣结构网格

图8 网格划分结构图

3.2 边界条件

整个风洞涵道分为4个域,旋转域 R (rotating) 设置转速 1 400 r/min,参考压力为 1 Pa,传热模型选择 Total Energy,流模型设置成更适合旋转机械的 SST $\kappa-\epsilon$ 模型。进口设置速度进口(进口速度 8 m/s),总温 293 K,出口设置参考气压 0 atm,其余均设置为 wall,因为有4个域,所以需要设置3个 interface,其中有两个设置转静交界面 Frozen Rotor, 360degree。边界条件设置如图9所示。求解精度设置为 10^{-5} 。

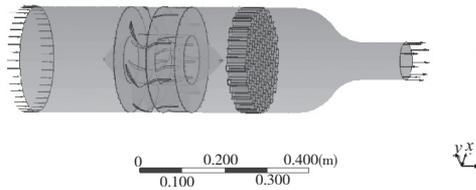
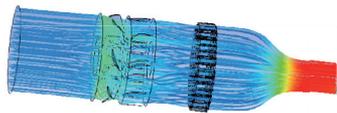


图9 边界条件

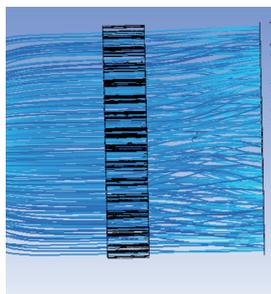
4 标定风洞流场数值模拟结果分析

4.1 出口速度场均匀性分析

风洞整体及蜂窝器前后局部放大流线图如图10所示。叶轮旋转对进口产生负压,气流经过叶轮加速,后置导叶加蜂窝器起到了很好的导流作用。图10(b)可以看出气流流经蜂窝器后流场均匀性得到了显著提高,气流的切向速度经过蜂窝器得到减弱,这是因为蜂窝器打散了大尺度涡,加速湍流耗散,极大地降低了湍流度。出口气流的速度场风速如图11、图12所示,出口风速为65 m/s时,在出口截面中部7.6 cm 范围内,风速较为稳定,相对误差较小,出口风速为32 m/s时,速度风场均匀截面积变小,风场均匀性相对较差,随出口速度增加逐渐趋于稳定,出风口速度为32 m/s时,不稳定风场边界层厚度为1 cm,风场稳定面积占比75%以上。风速均匀截面积远大于标定风速仪,可以满足标定风洞设计要求。

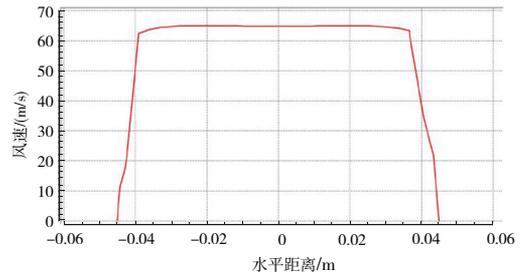


(a) 整体流线图

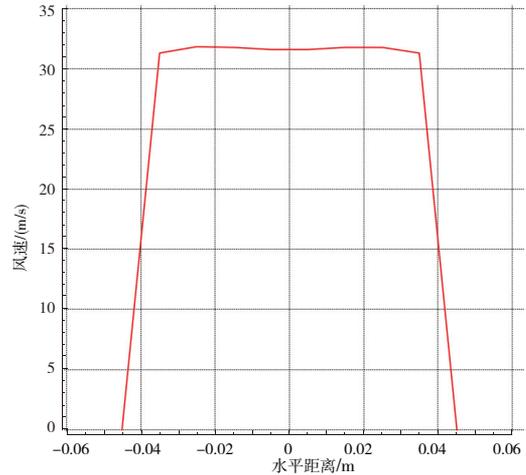


(b) 六边形蜂窝器局部放大流线图

图10 风洞整体及蜂窝器局部放大流线图

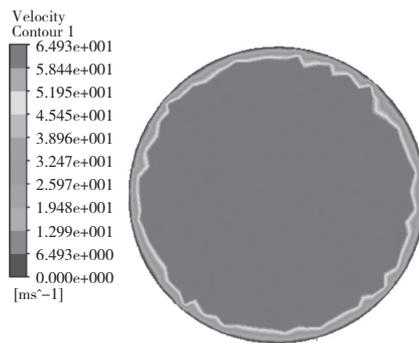


(a) 65 m/s出口风速分布图

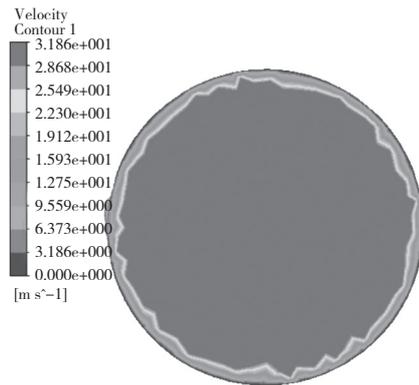


(b) 32 m/s出口风速分布图

图11 出口风速分布图



(a) 65 m/s出口横截面流场分布图



(b) 32 m/s出口横截面流场分布图

图12 出口横截面流场分布图

(下转第126页)

倾角,将使滑靴柱塞运动副以及与之连接的运动件受力减小,进而增加泵的使用寿命。

参考文献:

- [1] 徐绳武. 轴向柱塞泵和马达的发展动向[J]. 液压与气动, 2003(3): 10-15.
- [2] 高彦军, 谷立臣, 焦龙飞, 等. 油液特性对柱塞泵流量脉动影响的仿真分析[J]. 中国机械工程, 2017, 28(11): 1333-1338.
- [3] 罗向阳, 权凌. 轴向柱塞泵振动机理的研究现状及发展趋势[J]. 流体机械, 2015, 43(8): 41-47.
- [4] 袁柳樱, 项辉宇, 张力, 等. 斜盘式轴向柱塞泵磨损与润滑分析[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2006, 24(3): 24-27.
- [5] YANG Jun. Dynamic simulation of characteristic of the A11VO axial piston pump[D]. Lanzhou: University of Technology, 2012.
- [6] 黄忠华, 张明霞, 钱雪强, 等. 基于 AMESim 的新型液压抽油机系统仿真[J]. 液压气动与密封, 2013(1): 41-44.
- [7] 范海波, 金健, 邢科礼, 等. 基于 AMESim 电液比例变量柱塞泵仿真[J]. 流体传动与控制, 2013(1): 11-14.
- [8] M. Deeken. Simulation of the reversing effects of axial piston pumps using conventional CAE tools[J]. Lhydraulik Und Pneumatik, 2002(46): 276-282.
- [9] 卢宁, 付永领, 孙新学. 基于 AMESim 的双压力柱塞泵的数字建模与热分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(9): 1055-1058.
- [10] XU Bing, HU Min, ZHANG Junhui. IMPact of typical steady-state conditions and transient conditions on flow ripple and its test accuracy for axial piston pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015(5): 1012-1022.

- [11] 徐兵, 宋月超, 杨华勇. 柱塞泵斜盘交错角降噪结构优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013(6): 1043-1050.
- [12] M. Deeken, Michael. Simulation of fluid power components using DSHplus and ADAMS[J]. 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2001, 32: 2559-2565.
- [13] 邱博, 毕新胜, 陈璐, 等. 斜盘式轴向柱塞泵动态特性研究与仿真试验[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(1): 197-201.
- [14] M. Suresh kumar, K. Manonmani. Numerical and experimental investigation of lubricating oil flow in a gerotor pump[J]. International Journal of Automotive Technology, 2011, 12(6): 903-911.
- [15] 马吉恩, 徐兵, 杨华勇, 等. 轴向柱塞泵流动特性理论建模与试验分析[J]. 农业机械学报, 2010(1): 188-194.
- [16] 魏秀业, 逯子荣, 王海燕, 等. 基于 CFD 的轴向柱塞泵流动特性的仿真研究[J]. 液压与气动, 2013(9): 63-67.
- [17] 姚春江, 陈小虎. 基于 AMESim 的轴向柱塞泵建模与仿真研究[J]. 机床与液压, 2013, 41(11): 179-182.
- [18] 杨逢瑜, 胡敏. 斜柱塞斜盘式轴向柱塞泵的流量特性[J]. 兰州理工大学学报, 2011, 37(3): 60-64.
- [19] MANRING Noah D, DONG Zhilin. IMPact of using a secondary swash-plate angle within an axial piston pump[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2004, 126(1): 65-74.
- [20] YAN Yuqing, SHI Zhanqun, ZHENG Lin. Analysis of influence factors for axial piston hydraulic pump flow fluctuation based on AMESim[J]. Hydraulic & Pneumatics, 2014(2): 104-108.

收稿日期: 2019-07-03

(上接第 112 页)

4.2 出口气流湍流强度分析

雷诺数是表征流体流动特性的重要参数。雷诺数小时, 影响流体流动的主要是各质点间的黏性力, 这时流体呈层流状态; 雷诺数大时, 影响流体流动的主要是惯性力, 这时流体呈紊流状态。对于管道来说, 雷诺数 $Re < 2\ 000$ 为层流状态, $Re > 4\ 000$ 为紊流状态, $2\ 000 \sim 4\ 000$ 为过渡状态^[3]。

$$Re = \frac{\rho v \alpha}{\eta}$$

其中: ρ 为流体密度, 这里是空气密度 1.29 kg/m^3 ; v 、 α 分别为涵道流体的平均速度及涵道直径。最大风速出口平均速度 65 m/s , 出口段长度为 0.1 m , 空气的黏滞系数 η 为 $1.8 \times 10^{-3}\text{ Pa} \cdot \text{s}$, 湍流强度计算公式为 $I = 0.16Re^{-1/8}$ 。

当电机在最大转速时, 此时湍流强度为 2%, 可以满足设计要求。

5 结语

1) 结合空气动力学在风工程的研究, 研制了一种微型直流式标定风洞, 给出了各个结构处参数确定方法;

2) 保证出风口质量的前提下, 提高了标定风洞的可操作、可移动性;

3) 利用 Ansys CFX 对整体风洞进行模拟仿真, 仿真结果表明, 出风口速度分布均匀性面积远大于标定风速

仪, 湍流强度均满足设计要求, 为之后的试验提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 蒋伟, 邹钊, 刘赞. 便携式桌面型微风速校正风洞的研发[J]. 建筑热能通风空调, 2019, 38(2): 84-87.
- [2] 余世策, 胡志华, 冀晓华, 等. 小型直流标定风洞的研制[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(3): 55-58.
- [3] 刘海洋, 孔丽丽, 陈智, 等. 可移动微型低速风洞的设计与试验[J]. 农机化研究, 2016, 38(9): 244-249.
- [4] 昌泽舟. 轴流式通风机实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 39.
- [5] 王帅, 刘小康, 陆龙生. 直流式低速风洞收缩段收缩曲线的仿真分析[J]. 机床与液压, 2012, 40(11): 100-104.
- [6] RESHOTKO E, SARIC W S, NAGIB H M. Flow quality issues for large wind tunnels[R]. AIAA, 1997: 97-225.
- [7] 侯志勇, 王连泽, 周建和, 等. 底(变)湍流度风洞设计再探讨[J]. 实验流体力学, 2011, 25(1): 92-96.
- [8] 车学科, 聂万胜, 何浩波, 等. 低湍流度风洞试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 7-10.
- [9] HUGH L D, IRA H A. The design of low-turbulence wind tunnels[R]. NACA TN, 1948: 1755.
- [10] 刘政崇. 风洞结构设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005: 58-63.
- [11] 陈克城. 流体力学实验技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.

收稿日期: 2019-07-08