

doi: 10.7690/bgzdh.2024.02.008

立式风洞新型方向场动压场组合测量装置

刘江涛, 廖威, 孔鹏, 霍国

(中国空气动力研究与发展中心低速所, 四川 绵阳 622722)

摘要: 为满足立式风洞方向场动压场测量需求, 提出一种双倒“T”型结构的方向场动压场组合测量装置方案。采用电机同步控制实现排管架的水平和垂直方向运动, 排管架横截面采用 NACA0020 对称翼型, 将原有直径 12 mm 的五孔探针优化为 8 mm, 并进行现场安装调试。检测结果表明, 该装置水平和垂直方向的位移同步控制精度为 0.2 mm。在立式风洞进行一期方向场动压场测量试验, 结果表明: 该装置性能较为先进, 准确地测得了立式风洞试验段模型区内的方向场和动压场数据, 能够作为今后立式风洞流场校测主力装置之一。

关键词: 立式风洞; 方向场; 动压场; 测量装置

中图分类号: TJ011; V211.74 **文献标志码:** A

A New Combined Measuring Device for Directional Field and Dynamic Pressure Field in Vertical Wind Tunnel

Liu Jiangtao, Liao Wei, Kong Peng, Huo Guo

(Low Speed Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 622722, China)

Abstract: In order to meet the requirements of the measurement of the dynamic pressure field in the vertical wind tunnel, a combined measurement device with double inverted “T” structure is proposed. The horizontal and vertical movement of the pipe rack is realized by the synchronous control of the motor. The cross section of the pipe rack adopts NACA0020 symmetrical airfoil. The original five-hole probe with a diameter of 12 mm is optimized to 8 mm, and the field installation and commissioning are carried out. The test results show that the control precision of the device in the horizontal and vertical directions is 0.2 mm. The first phase of the directional field and dynamic pressure field measurement test was carried out in the vertical wind tunnel. The results show that the performance of the device is more advanced, and the directional field and dynamic pressure field data in the model area of the vertical wind tunnel test section are accurately measured, which can be used as one of the main devices for flow field calibration in the future.

Keywords: vertical wind tunnel; directional field; dynamic pressure field; measuring device

0 引言

流场品质主要是指风洞流场各参数(如压力、温度、密度和气流方向等)分布的均匀程度^[1], 是衡量风洞设计的主要指标^[2]。就低速风洞而言, 这些气流参数包括动压场、方向场、轴向静压梯度、湍流度、气流温度、动压稳定性和气流噪声等。流场品质的优劣直接影响试验结果的精度和准度^[3]。一座风洞在建成之初就需要进行全面的流场品质测量和评估, 在改造或是使用一定年限后也必须重新测量^[4]。在流场品质参数测量中, 动压场和方向场的测量难度相对较大, 采用的测量装置也较为复杂, 一般采用移测装置进行测量^[5]。

中国空气动力研究与发展中心的 $\Phi 5$ m 立式风洞是一座回流式开口试验段垂直风洞, 主要用于研究飞机尾旋及改出特性、直升机垂直升降特性、降落伞及舱伞组合体阻力特性^[6]。 $\Phi 5$ m 立式风洞自

2005 年建成以来, 共进行了 4 期流场校测, 对方向场和动压场参数测量采用的是双塔式伞试验支撑装置^[7-9], 均只测量了自试验段出口以上 4 m 高内的空间流场, 试验段 4 m 以上的空间气流品质如何未知。依据《低速风洞和高速风洞流场品质要求》GJB1179A—2012, 开口试验段的方向场动压场测量应取试验段高度、宽度和长度的 70%, 且测量截面 ≥ 5 个(在模型区内 ≥ 3 个)。从掌握立式风洞试验段流场品质完整性角度考虑, 有必要增加其余空间的方向场动压场测量, 为此提出研制新型方向场动压场组合测量装置。

1 装置研制

1.1 总体方案

$\Phi 5$ m 立式风洞试验段呈竖直状态, 直径为 5 m, 高度为 6.8 m, 为测量模型区内流场, 移测架装置

收稿日期: 2023-10-18; 修回日期: 2023-11-23

第一作者: 刘江涛(1982—), 男, 湖北人, 硕士。

具有大行程、大跨度、大尺度等特点，且装置应具有定位精度高以及不能进入流场等要求；因此，整体结构采用双倒“T”型结构形式，装置基础和垂直运动单元采用模块化设计确保结构的强度和刚度，排管架的水平和垂直方向上的运动均采用 2 台电机同步运动实现。

1.2 结构设计

$\Phi 5\text{ m}$ 立式风洞方向场动压场组合测量装置主要包括 2 组 X 向(水平)直线运动模块、2 组 Z 向(垂直)直线运动模块和排管架，装置结构如图 1 所示。排管架的水平运动通过 X 向直线运动模块上的电机同步运动实现，排管架的垂直运动通过 Z 向直线运动模块上的电机同步运动实现。

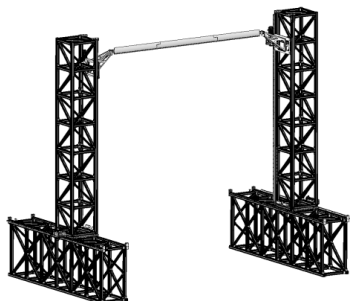


图 1 $\Phi 5\text{ m}$ 立式风洞流场校测装置 3 维图

X 向直线运动模块与 Z 向直线运动模块组成结构类似，均由伺服电机、行星减速器、齿轮齿条副、导轨滑块副、安装基板和铝合金框架等构成。 X 向直线运动模块铝合金框架固连在地基上，整套装置与风洞试验段之间没有接触，避免气流引起装置振动，对试验数据产生影响。

1.2.1 运动模块的选型

根据 X 和 Z 向直线运动模块所需承受载荷，对其关键部件进行选型。由于直线运动模块所承受载荷差距较小，考虑到设备的通用性和维护保养便利性，以受载恶劣的情况为准， X 和 Z 向直线运动模块选择同一型号的减速器、导轨滑块副和齿条齿轮。

齿轮齿条副的模数选择 4，齿轮齿数 24。减速机的减速比定为 60，选用 DYNABOX 75 EXPERT60 C 型蜗轮蜗杆减速器。为减少回程间隙，保证机械传动精度，减速器输出端采用胀紧套连接。

X 和 Z 向运动速度设定为 10 mm/s ，位置控制精度 $\pm 0.2\text{ mm}$ 。驱动电机选用松下 A6 系列交流伺服电机，采用绝对值编码器作为反馈器件，其中 X 向直线运动模块的 2 台电机额定功率 1.0 kW 、额定扭矩 $4.8\text{ N}\cdot\text{m}$ ，额定转速 $2\ 000\text{ r/min}$ 、最大转

速 $3\ 000\text{ r/min}$ 、带抱闸功能，用于实现水平方向运动； Z 向直线运动模块的 2 台驱动电机额定功率 1.5 kW 、额定扭矩 $7.2\text{ N}\cdot\text{m}$ ，额定转速 $2\ 000\text{ r/min}$ 、最大转速 $3\ 000\text{ r/min}$ ，用于垂直方向运动。电机均具备过电压、过电流、过热等故障检测功能和报警保护功能；同时，电机还有良好的滤波、EMC、接地等特性，可有效降低对其他装置的信号和电源干扰。

1.2.2 装置的强度和刚度设计

采用有限元法对装置进行静力学、模态分析，采用刚性单元模拟部件间的相互连接关系，如焊接、螺栓连接等或者用于集中载荷的施加。对于非连接用的细微工艺孔以及小的倒角和圆角在建模时进行简化。有限元模型如图 2 所示。

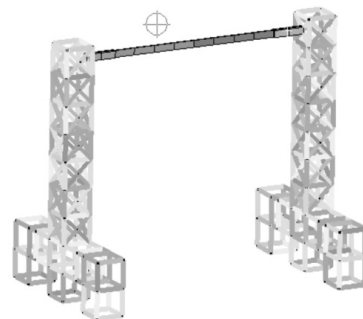


图 2 装置有限元模型

铝合金框架和排管架的材料为 6061，泊松比均为 0.33，密度为 $2\ 810\text{ kg/m}^3$ ，弹性模量 72 GPa 。其他材料为 45，泊松比均为 0.3，密度为 $7\ 800\text{ kg/m}^3$ ，弹性模量 210 GPa 。边界约束条件分别为铝合金框架连接面节点的 6 个自由度。

根据强度理论，当应力值达到材料的屈服极限时，材料就会发生屈服破坏。在各种工况下，装置的应力都不应超过材料的许用应力，根据第四强度理论选择 VonMises 应力进行强度分析。图 3 给出了排管架的位移云图，其最大位移为 $2.125\ 8\text{ mm}$ ，则挠度为 $0.000\ 354\ 3$ ，符合设计需要。

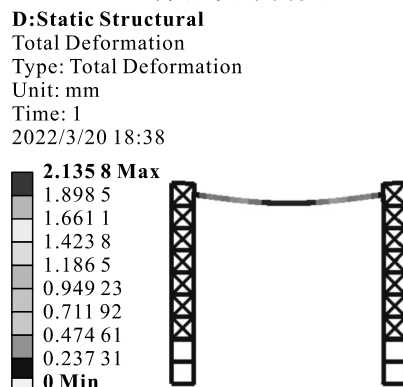


图 3 排管架位移云图

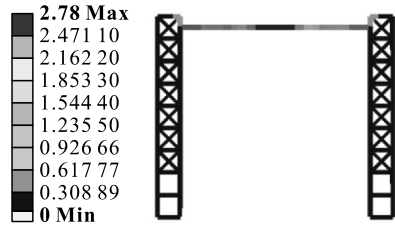
1.2.3 装置固有模态分析

由于网格数量较大,采用 LANCZOS 方法进行模态计算。LANCZOS 方法支持稀疏矩阵,可以提高速度,减少对磁盘的要求。从共振角度考虑,最少保留固有频率位于外载频率范围内的所有模态,一般算到工作频率的 10 倍以上会出现高阶频率;因此,选择前 6 阶的固有频率看其是否在共振区内。各阶的固有频率如表 1 所示,各阶振型如图 4 所示。由此可知,装置的第一阶固有频率为 4.45 Hz,大于气流激振力,可以避开共振频率。

表 1 装置前六阶固有频率 Hz

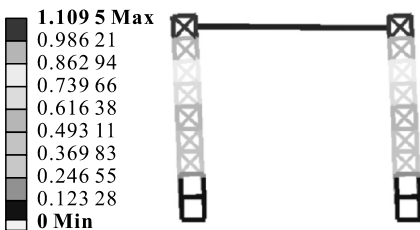
模态	频率	模态	频率
一阶	4.45	四阶	9.21
二阶	6.41	五阶	12.44
三阶	7.67	六阶	13.31

C:Modal
Total Deformation
Type:Total Deformation
Frequency: 4.452 4 Hz
Unit: mm
2022/3/20 18:45



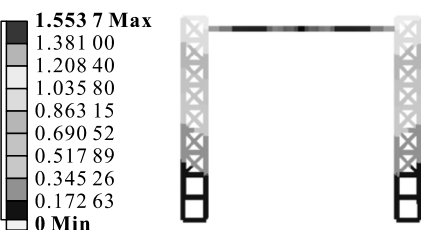
(a) 一阶振型

C:Modal
Total Deformation 2
Type:Total Deformation
Frequency:6.41 Hz
Unit: mm
2022/3/20 18:45



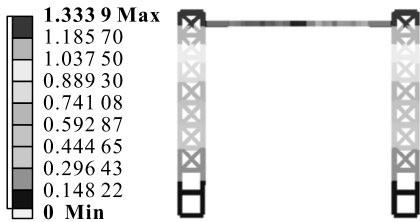
(b) 二阶振型

C:Modal
Total Deformaton 3
Type:Total Deformation
Frequency: 7.673 Hz
Unit:mm
2022/3/2018:46



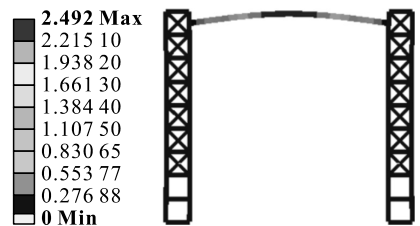
(c) 三阶振型

C:Modal
Total Deformation 4
Type:Total Deformation
Frequency:9.217 9 Hz
Unit: mm
2022/3/20 18:46



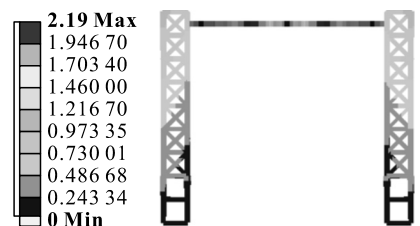
(d) 四阶振型

C:Modal
Total Deformation 5
Type:Total Deformation
Frequency: 12.441Hz
Unit: mm
2022/3/20 18:47



(e) 五阶振型

C:Modal
Total Deformation 6
Type:Total Deformation
Frequency: 13.306 Hz
Unit:mm
2022/3/20 18:47



(f) 六阶振型

图 4 装置各阶振型

1.3 控制部分

控制系统由控制柜、交流参数稳压电源、PLC、工业一体机、输入输出模块、线性电源、继电器和通信模块等组成,以 PLC 为核心,依托工业一体机,对整个系统实施管理。控制系统具有对电机转速精确控制,电机驱动器参数设置与状态获取,驱动器、电机和冷却系统状态监控,运行数据记录、回放等功能。控制系统如图 5 所示。

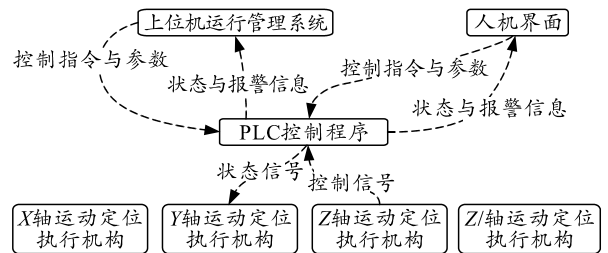


图 5 控制系统

1.3.1 控制系统硬件

PLC 控制柜主要配置 PLC、接口模块、I/O 模块、断路器、交流接触器、直流开关电源、散热风扇及配套附件等，面板上设电源指示灯、电压表、转速表、电机电压/电流/温度/转速智能数字显示等仪器仪表。其中 PLC 选用松下 FR-XH 高性能位置控制单元中的 FR-XH RTEX 系列，仪器仪表选用 SWP 产品。

功能可实现本地操作，且主要用于网络通信，手动/自动控制、正转/反转、驱动器使能/禁止控制开关、电机转速给定电位器、急停按钮以及消音复位按钮、故障灯指示等。其中断路器、接触器、电抗器、熔断器、显示仪表等选用 SWP 产品，PLC 与驱动器采用网络连接通信，具备同步控制功能。

1.3.2 控制系统软件

PLC 控制软件以功能软件 FPCWIN GR7 为基础架构进行软件编写。运行于上位监控计算机的监控软件通过以太网或 Profibus-DP 总线向 PLC 控制系统发送控制指令，PLC 控制软件通过以太网向上位机监控软件或通过 Profibus-DP 总线向人机界面上上传 X 向驱动板组、Z 向滑块总成速度数据、驱动系统的运行状态参数。可实现单动控制、X 向机构同步运动定位控制、Z 向机构同步运动定位控制、安全连锁保护和驱动控制等功能。

1.4 排管架的优化

排管架的截面形状采用 NACA0020 对称翼型。排管架内部掏空便于测压管的布置，在排管架头部有探针安装孔，并设计有排管架专用定位部件，便于探针在排管架上的安装与固定。排管架上预设检测平台，便于排管架安装初始角的测量。

1.5 五孔探针的设计

装置配套的五孔探针共 20 根，直径为 8 mm，长度为 328 mm，材质为不锈钢。探针尾部以探针的上下左右为基础，整体进刀，加工成边长为 7.5 mm 的方形，以便于探针在排管架上的定位。

2 性能测试

2.1 装置安装调试

2.1.1 X 向直线运动模块安装调试

将水平模组对准地面连接板的螺钉孔放置。激光跟踪仪部件固定在滑块上方，测量水平模组滑轨不同位置值。根据测量结果调整底座螺栓，使水平

模组轨道上表面与地面平行。然后将已调平的水平模组作为基准，调平另一侧的水平模组。将 2 组水平模组与地面的水平度控制在 0.3 mm 内。

2.1.2 Z 向直线运动模块安装调试

将 Z 向直线运动模块与水平模组上的 X 驱动板组对准连接。用激光跟踪仪测量的 Y 向模组与地面的垂直度，调整立柱顶丝螺栓使立柱与地面垂直。将 Z 向直线运动模块与地面的垂直度控制在 0.3 mm 内。

2.2 装置指标检测

安装完成后的立式风洞方向场动压场组合测量装置如图 6 所示。采用测量精度 $\leq 0.5 \mu\text{m}$ 的 VANTANGE 型激光跟踪仪进行指标检测。



图 6 方向场动压场组合测量装置

在检测过程中，将激光跟踪仪放置于地面，2 个激光反射器分别放置于装置典型位置，如测量 Z 向直线运动模块与地面的垂直度时，激光反射器分别放置于排管架连接件的平台处，如图 7 所示。



图 7 激光反射器放置位置

通过跟踪仪完成初始空间位置测量，并建立坐标系，运行装置得到多个测点的一系列空间坐标，通过空间几何关系计算得到水平度、垂直度、运动精度等关键数据。结果表明，装置的同步运动精度控制在 0.2 mm 以内，如表 2 所示。

表 2 装置相关参数 mm

参数	参数值
装置水平方向运动范围	-1 800~1 800
装置垂直方向运动范围	2 125~7 375
X 向直线运动模块与地面的水平度	≤ 0.3
Z 向直线运动模块与地面的垂直度	≤ 0.3
X 向运动模块运动轨迹线平行度	0.4
Z 向运动模块运动轨迹线平行度	0.4
X 向同步运动精度	≤ 0.2
Z 向同步运动精度	≤ 0.2

3 风洞试验

3.1 风洞与设备

Φ5 m 立式风洞为纵向布置形式,总高 54.66 m,地下部分 15 m。试验段截面为圆形,直径为 5 m,自由射流长度为 7.5 m,试验段风速范围为 5~50 m/s。

测压设备采用 DSM4000 电子扫描压力测量系统,该系统主要包括外供气源、数据采集系统、ZOC33/64Px 扫描阀、压力校正系统 SPC3000 和电磁阀控制单元 CPM3000 等部分。

3.2 数据处理

动压场数据按式(1)~(3)处理:

$$q_i = \xi_{探}(p_{总} - p_{静}); \quad (1)$$

$$\bar{q}' = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m q_i; \quad (2)$$

$$C_{qi} = (q_i - \bar{q}') / \bar{q}' = q_i / \bar{q}' - 1. \quad (3)$$

式中: q_i 为第 i 点动压, Pa; $\xi_{探}$ 为五孔探针校正系数; \bar{q}' 为模型区内动压平均值; m 为模型区内动压测量点数; C_{qi} 为第 i 点动压场系数。

方向场数据按式(4)~(7)处理:

$$C_{p\alpha} = \frac{p_{下} - p_{上}}{p_{总} - p_{静}}; \quad (4)$$

$$C_{p\beta} = \frac{p_{右} - p_{左}}{p_{总} - p_{静}}; \quad (5)$$

$$\Delta\alpha = K_{\alpha} \cdot C_{p\alpha} + a + \Delta\alpha_{安}; \quad (6)$$

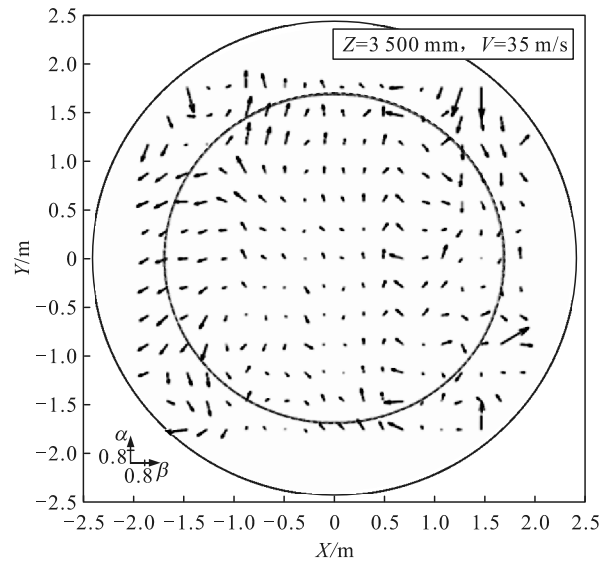
$$\Delta\beta = K_{\beta} \cdot C_{p\beta} + b + \Delta\beta_{安}. \quad (7)$$

式中: $\Delta C_{p\alpha}$ 为五孔探针迎角方向压差系数; $\Delta C_{p\beta}$ 为五孔探针侧滑角方向压差系数; $\Delta\alpha$ 为迎角方向局部气流偏角; $\Delta\beta$ 为侧滑角方向局部气流偏角; K_{α} 、 a 为迎角方向压差偏角校正系数; K_{β} 、 b 为侧滑角方向压差偏角校正系数; $\Delta\alpha_{安}$ 为迎角方向初始安装偏角; $\Delta\beta_{安}$ 为侧滑角方向初始安装偏角。

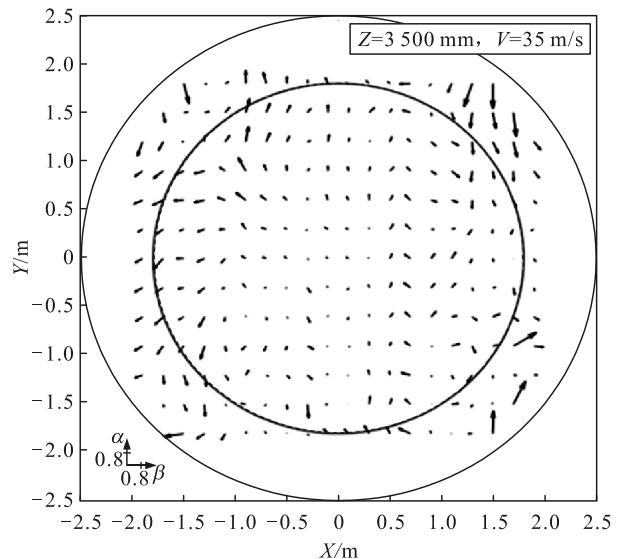
3.3 数据结果分析

3.3.1 重复性验证

图 8 给出了 $V=35$ m/s 时, $Z=3\ 500$ mm 截面 2 次测量的方向场矢量对比图,图 9 给出了 $V=35$ m/s 时, $Z=3\ 500$ mm 截面 2 次测量的动压场等值线对比。从图中可以看出: 2 次测量的方向场和动压场数据重复性很好,表明测量系统稳定正常。

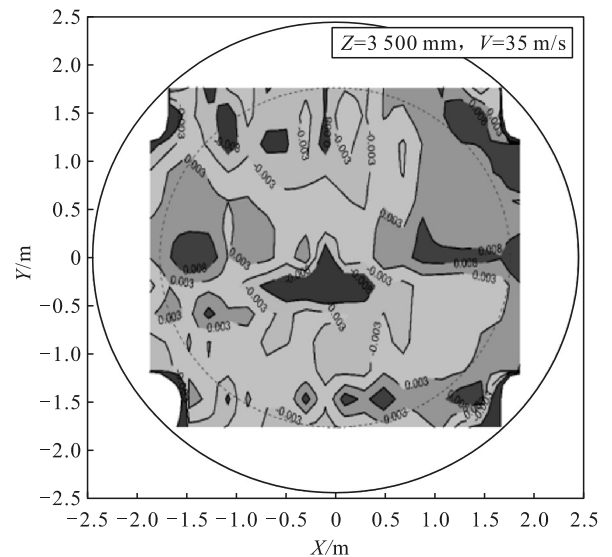


(a) 第 1 次测量结果

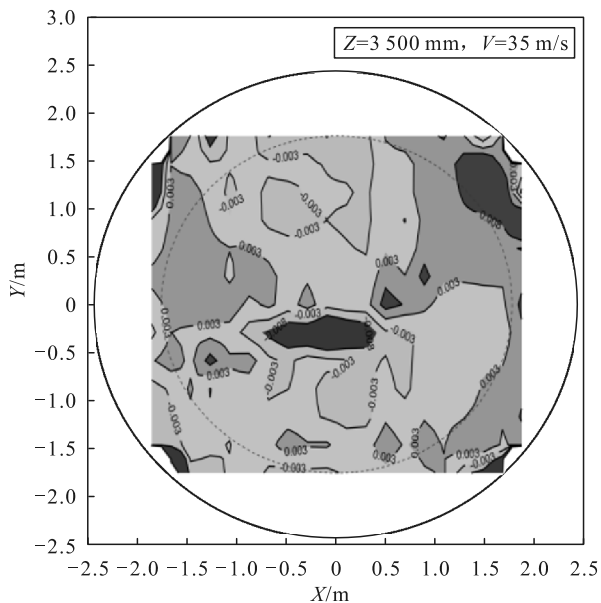


(b) 第 2 次测量结果

图 8 $V=35$ m/s, $Z=3\ 500$ mm 截面方向场矢量对比



(a) 第 1 次测量结果

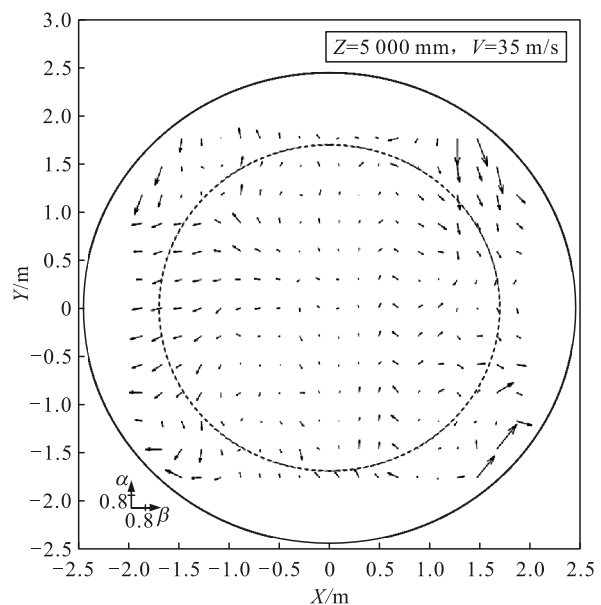


(b) 第 2 次测量结果

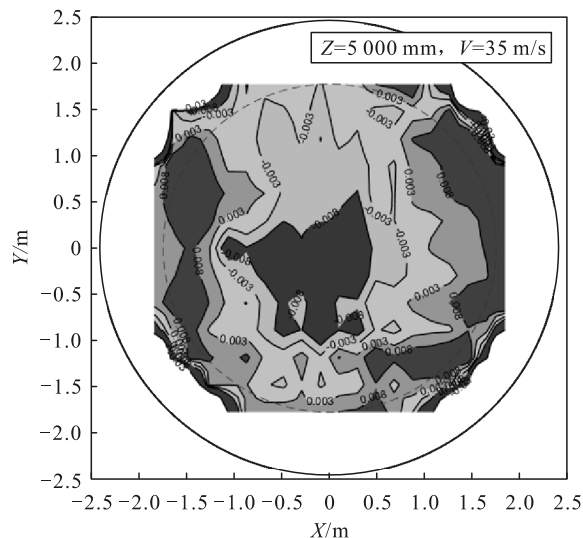
图 9 $V=35\text{ m/s}$, $Z=3\ 500\text{ mm}$ 截面动压场等值线对比

3.3.2 试验段上方方向场和动压场测量结果

本次试验完成了 $V=25$ 、 35 和 45 m/s 风速下， $Z=5\ 000$ 和 $5\ 500\text{ mm}$ 截面处的方向场动压场测量。试验结果表明，两截面不同风速下的方向场和动压场数据均符合国军标要求。图 10 给出了 $V=35\text{ m/s}$ 时， $Z=5\ 000\text{ mm}$ 截面的方向场矢量和动压场等值线，图 11 给出了 $V=35\text{ m/s}$ 时， $Z=5\ 500\text{ mm}$ 截面的方向场矢量和动压场等值线。由图 10 和 11 可知，随着试验段高度的增加，中心低压区逐渐发展变大。

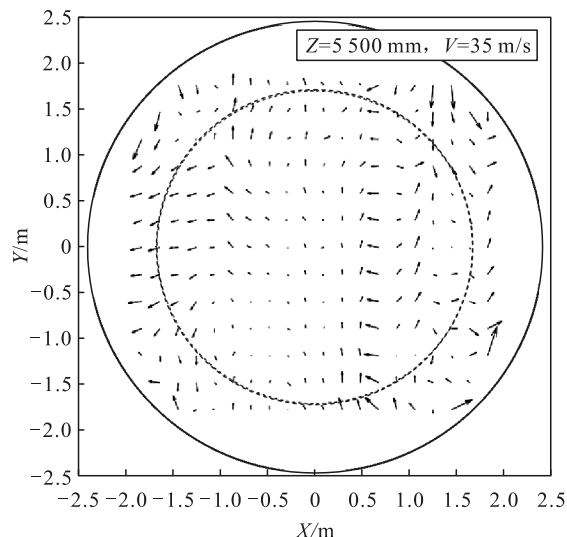


(a) 方向场矢量

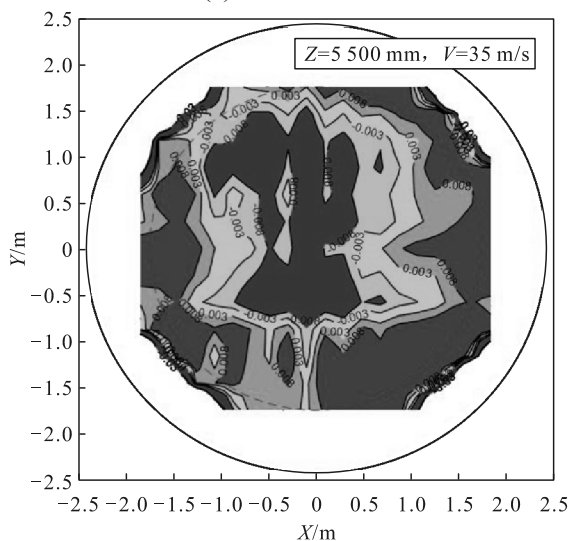


(b) 动压场等值线

图 10 $V=35\text{ m/s}$, $Z=5\ 000\text{ mm}$ 截面方向场和动压场



(a) 方向场矢量



(b) 动压场等值线

图 11 $V=35\text{ m/s}$, $Z=5\ 500\text{ mm}$ 截面方向场和动压场

4 结论

笔者在立式风洞研制了一套方向场动压场组合测量装置,通过现场安装测试和风洞试验进行了验证,得到以下结论:

1) 新装置的 X 和 Z 向同步运动控制精度控制在 0.2 mm 以内,运动控制精度较高;

2) 新装置较为准确地获得了试验段模型区上半部分的方向场动压场参数,试验结果均达到国军标合格指标;

3) 新测量装置可以更真实、更全面地测得立式风洞流场品质参数,作为今后立式风洞的主力流校装置之一。

参考文献:

[1] 王勋年. 低速风洞试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

(上接第 6 页)

优化后最大膛压为 373.2 MPa, 在约束条件范围内, 比初始方案高。这是因为火药能量随装药量增加而增加, 优化方案装药量比初始方案的装药量高, 释放火药能量也更大, 导致图 6 中优化方案的最大膛压值比初始方案的最大膛压值高, 优化算法中加入了罚函数, 并不会超出约束条件范围。

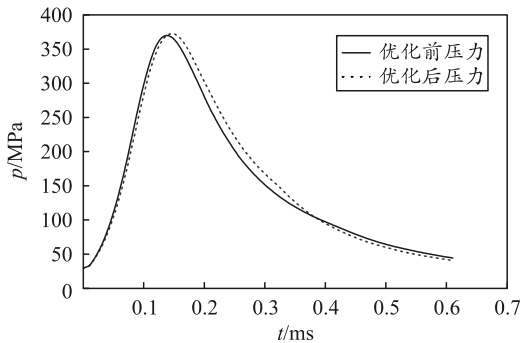


图 6 膛压曲线

4 结束语

笔者采用的鲸鱼算法具有操作简单、跳出局部最优能力强的特点。本文中的内弹道模型与鲸鱼算法结合, 在满足内弹道设计指标的前提下, 弹丸最大炮口初速提高了 17.3 m/s, 明显提高了内弹道性能; 该火炮结构简单。采用经典内弹道, 计算时间较短, 而其他类型火炮内弹道设计考虑的问题较多,

[2] 孔文杰, 杜海, 李奇轩, 等. 小型低速开口直流式风洞流场标定[J]. 西华大学学报, 2020, 39(2): 63-70.

[3] 刘江涛. 4 米×3 米风洞流场校测试验报告[R]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2013.

[4] 魏然. 4 米×3 米风洞流场校测试验报告[R]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2020.

[5] 陈太洪, 施鸿昌. 风洞单自由度移测架及其控制系统设计[J]. 工业控制计算机, 2006, 19(3): 1-2.

[6] 颜巍. 立式风洞与立式风洞试验[J]. 民用飞机设计与研究, 2016(3): 52-55.

[7] 刘欢, 宋晋, 魏然. 基于双塔机构的立式风洞流场校测架测控系统[J]. 兵工自动化, 2022, 41(1): 53-56.

[8] 熊建军, 王辉, 马军, 等. 基于龙门结构的风洞流场校测架测控系统设计与应用[J]. 测控技术, 2014, 33(12): 85-87.

[9] 兰宇. 立式风洞伞试验支撑装置控制系统研制[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.

内弹道模型复杂, 采用本方法可能出现收敛精度低等问题, 还有待改进。

参考文献:

[1] 王敬. 小口径火炮内弹道规律及优化设计研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.

[2] 李克婧, 张小兵. 改进型实数编码遗传算法在内弹道优化中的应用[J]. 弹道学报, 2009, 21(3): 19-22.

[3] 贺磊, 姚养无, 李树军. 基于改进粒子群算法的火炮内弹道多参数符合计算[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(11): 165-169.

[4] 马营, 杨臻, 赵蔚楠. 内弹道多目标优化算法对比分析[J]. 兵工自动化, 2021, 40(3): 81-85.

[5] 林庆华, 栗保明. 高装填密度钝感发射装药的內弹道遗传算法优化[J]. 弹道学报, 2008(3): 29-32.

[6] 牛培峰, 吴志良, 马云鹏. 基于鲸鱼优化算法的汽轮机热耗率模型预测[J]. 化工学报, 2017, 68(3): 1049-1057.

[7] 吴志勇, 戴弢, 鞠传香. 基于鲸鱼优化算法的多目标多式联运路径选择[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 6-13.

[8] 段海滨, 王道波, 于秀芬. 几种新型仿生优化算法的比较研究[J]. 计算机仿真, 2007(3): 169-172.

[9] 冯文涛, 邓兵. 鲸鱼优化算法的全局收敛性分析及参数选择研究[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(5): 641-651.

[10] 崔东文. 鲸鱼优化算法在水库优化调度中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 72-76.