

引射式跨声速风洞流场控制软件设计

韩逸非, 冯娜娜

(延安大学 物理与电子信息学院, 陕西 延安 716000)

摘要: 目前提出的引射式跨声速风洞流场控制软件抽气端压力过大, 导致排气阀气流排气速度变化过于剧烈; 设计了一种新的引射式跨声速风洞流场控制软件, 在风洞的控制程序中引入了马赫数和雷诺数, 对控制质量进行试验检测, 以实现风洞系统能够达到更精准快速的控制水平; 在风洞流场控制系统中引入解耦系统, 对风洞测试各部分参数进行解耦筛选, 提高各参数的准确度, 有利于控制系统实现精准控制; 实验结果表明, 设计的引射式跨声速风洞流场控制软件能有效降低引射式跨声速风洞流场控制软件抽气端压力, 使排气阀气流排气速度处于稳定状态。

关键词: 引射式; 跨声速风洞; 流场控制; 控制软件

Design of Flow Field Control Software for Ejecting Transonic Wind Tunnel

Han Yifei, Feng Nana

(College of Physics & Electronic Information, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

Abstract: The flow field control software of the currently proposed transonic wind tunnel has too much pressure on the suction side, which leads to excessive changes in the exhaust velocity of the exhaust valve. A new flow field control software for ejecting transonic wind tunnels is designed, Mach number and Reynolds number are introduced into the wind tunnel control program, and the control quality is tested and tested to realize the wind tunnel system can achieve more accurate and rapid. Introduce a decoupling system into the wind tunnel flow field control system to decouple and screen each part of the wind tunnel test parameters, improve the accuracy of each parameter, and help the control system to achieve precise control. The experimental results show that the designed flow field control software of the ejected transonic wind tunnel can effectively reduce the pressure at the exhaust end of the flow field control software of the ejected transonic wind tunnel, so that the air exhaust velocity of the exhaust valve is in a stable state.

Keywords: ejector; transonic wind tunnel; flow field control; control software

0 引言

风洞是一种依靠动力装置驱动对流动气体进行操控的管道系统, 在空气流动、气流控制等研究领域得到广泛应用, 尤其是在航空航天技术、飞行器研究技术等领域应用最为广泛。各种飞行产品的研发过程必须要经过风洞实验检测, 对飞行器不同情况下的飞行能力进行测试, 因此, 风洞技术研究在空气动力学领域和航空航天工程领域占有十分重要的位置^[1-2]。

随着飞行器研究和航空航天技术的不断更新发展, 对风洞技术研究也提出了更高的要求。提高风洞的质量和性能是推动飞行器研究和航空技术不断发展的基础前提^[3-4], 根据目前风洞技术操作控制方面存在的排气阀气流排气速度剧烈问题, 本文设计了一种引射式跨声速风洞流场控制软件, 实验结果表明, 该软件能够有效提高控制能力。

1 引射式跨声速风洞流场控制程序

1.1 引射式跨声速风洞概念

风洞实验室是用人工方式产生和控制气流, 模拟飞机

周围气流, 测量气流对实验对象的影响, 观察物理现象的综合管路。在空气动力学实验中, 它是最常用、最有效的一种工具^[5-6]。

风洞试验是飞机研制的一个重要环节。试验期间, 模型或物体被固定在风洞中, 进行不同程度的吹风, 通过测试和控制设备获得试验数据^[7]。为使试验结果准确, 试验流量必须与实际流量相类似, 即必须满足相似律的要求。但是, 由于受风洞大小和功率的限制, 很难同时模拟一个风洞内所有类似的参数。试验结果表明, 在满足试验标准的前提下, 风洞中气流的速度、分布均匀性、气流方向与轴线的背离程度、压力梯度、截面温度分布、湍流强度和气流噪声级等条件均可得到改善。

测试段尺寸为 $2.4\text{ m} \times 2.4\text{ m}$, 风洞硬件设备主要包括阀口系统、喷射器、混合器、消声器、收缩器、喷管、测试、补偿、扩散、排气、消声等部分, 其中喷射器是风洞的主要驱动设备。该装置是通过高压流体流经喷嘴所形成的高速气流, 喷出另一种低气压流体, 并在装置内进行能

收稿日期: 2020-11-12; 修回日期: 2020-12-04。

基金项目: 陕西省能源大数据智能处理省市共建重点实验室研究基金(IPBED11、IPBED16); 延安市科技计划项目(2019ZCNZ-001); 延安大学产学研合作项目(CXY201902); 延安大学重点项目(YDJGZD18-04)。

作者简介: 韩逸非(1998-), 男, 陕西铜川人, 本科, 主要从事电子信息工程方向的研究。

引用格式: 韩逸非, 冯娜娜. 引射式跨声速风洞流场控制软件设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(1): 59-62.

量交换和物料混合, 实现输送。引射器组成结构如图 1 所示。

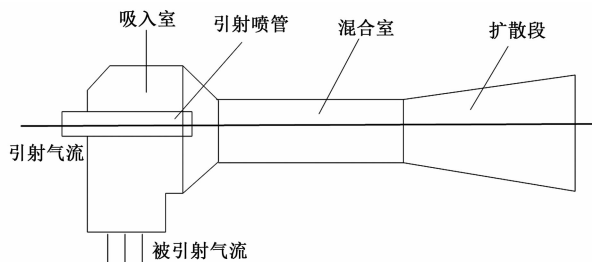


图 1 引射器组成结构图

1.2 风洞流场控制结构

引射式跨声速风洞控制系统的核心是对风洞运行的参数控制, 即对风洞实验中气流流速、气压分布、气流方向、温度分布等多个测试方面的参数进行控制。例如, 气压控制需要风洞控制系统操控风洞设备中的调压阀和排气阀; 气流流速和分布需要对指控室、抽气段进行组合控制等^[8-9]。如图 2 为风洞控制组成结构:

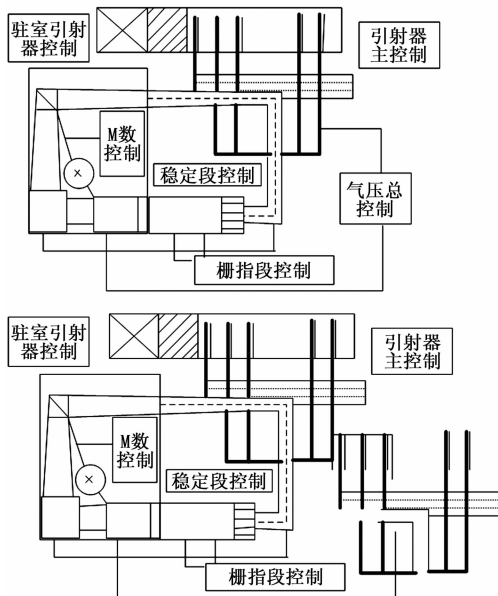


图 2 风洞控制结构组成

引射式跨声速风洞系统的控制软件程序占据了总控核心的重要位置^[10]。研究更新控制软件的程序设计能够提高控制软件的配置水平, 增强感应能力和操控的灵活性, 使风洞流场控制更流畅高效, 节省人力物力资源和实验耗费的时间^[11]。

2 引射式跨声速风洞流场控制软件设计

2.1 气流动态布局控制系统设计

我国当前的跨声速风洞实验装置在气流运行方式上一般采用半回流引射式或者下吹直流式的气流布局方式。本文的引射式跨声速风洞控制系统设计了增压回引射式气流布局方式, 通过安装多个喷压管和引射器, 设计多喷管增

压的操作程序, 通过控制系统下达指令, 启动引射器, 使气流能够在风洞的回环装置中循环运动。相比于传统的风洞气流布局控制系统, 本文的控制系统软件可同时对抽气段、驻室、栅指、排气阀等 4 个甚至多个工作单位进行同时控制或组合操控, 形成独特的驱动系统和排气系统。这种多装置组合形成的系统可以实时操控稳定段的气压值, 也能够其他部分运行过程中对某个环节进行单独控制, 提高了控制系统整体效率的同时, 也提高了各个部分的数据精准度^[11-12]。

2.2 风洞控制系统软件程序设计

本文在传统的风洞控制系统的软件设计基础上, 引入了一个解耦控制程序, 该程序能够控制各环节参数之间的耦合作用, 对一些缺失部分进行补偿, 以达到削弱耦合作对系统控制整体运行过程造成的影响。因此需要在风洞控制系统中设计解耦环节, 以实现控制中心对耦合作用的削减控制, 解耦程序接入控制器主要有以下几种方式:

1) 解耦环节设置在控制中心之前。这种方式是考虑到部分受影响信息进入控制系统会造成控制系统程序混乱的情况, 在控制系统前端装置解耦系统, 使得各部分数据进入控制中心之前就能够受到解耦环节的监测调整, 削弱参数受耦合作用影响的程度, 使数据更加准确地传入控制中心, 控制中心也能更准确地下达相应命令。

2) 在控制系统内装入解耦程序。这种方式在目前的的风洞控制系统中比较常见, 在控制系统内部安装结构程序, 所占据空间较小, 系统控制效果也更好, 而且不会对控制中心造成额外负担, 可实现控制系统内部数据解耦操控一体化。但是这种方式会导致解耦程序没有相对独立时更完整, 解耦能力也会受到限制; 同时解耦环节与控制系统之间的联系更为复杂, 不利于实验装置对控制中心和解耦环节单独进行检测。

3) 解耦环节安装在反馈线路。这种安装方式能够在信息数据到达总控制系统进行反馈之前, 对数据参数进行检测和解耦操作, 能够有效地提高控制系统承受耦合作用影响的参数干扰的防御能力, 对于其他方面的数据干扰问题, 也有一定的解决能力。但是这种设置方法会增强解耦环节的内部处理复杂程度, 使得控制中心在解耦方面的负担较大, 容易导致控制系统操作紊乱, 信息延迟等不良影响。

4) 解耦环节设置在控制器与控制对象之间。这种安装方式能够使解耦环节了解到控制对象的参数特征, 能够根据控制对象和接收到的各项参数之间的关系, 进行相应的解耦操作。这种方式减轻了控制系统对接耦合环节的控制压力, 增强了解耦过后的数据和控制对象之间的适配性, 使控制中心作出的指令更加合适准确, 而且这种安装方式对解耦环节的程序结构要求不高, 相比于其他方式也更为简单。因此, 这种安装方式在当前的实际实验中得到的应用较为广泛。但也存在一定的不足, 即控制对象发生调整变化时, 解耦环节的各方面参数配置也要进行相应的调整变化。

本文选择了将解耦环节置入控制系统和控制对象之间的接入方法，这种设计方法能够减小控制系统的操作压力，还能有效地提高各项数据参数的质量和准确性，而且结构简单，容易操作，有利于系统整体操作运行，并且不会对控制系统对控制对象进行解耦控制造成影响。这种解耦程序装置方式如图 3 所示。

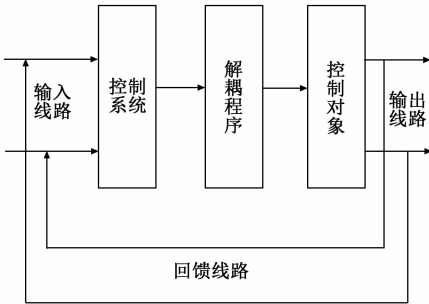


图 3 解耦程序安装结构示意图

本文解耦环节程序设计中选择的是对角矩阵解耦方法，该方法是在传递函数矩阵解耦方法的基础上，结合对角矩阵运算方法对参数进行解耦运算。运算的原理是对系统中的主要参数进行传递函数矩阵运算后，非对角数据的结果不为零，则表示该函数矩阵不是对角矩阵。这种适用于引射式跨声速风洞控制系统的解耦方法运算原理如图 4 所示。

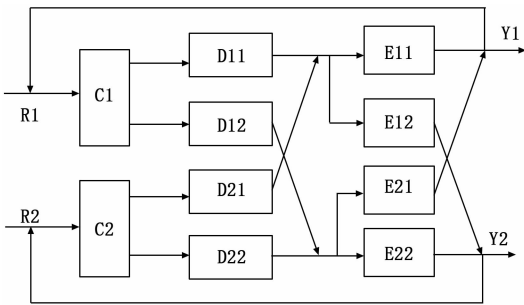


图 4 解耦程序对角矩阵运算原理图

这种方法基于解耦方法中的传统的运算方法，进行改进后使这种解耦方法非常适用于安装在控制系统和控制对象之间的解耦装置，通过引入了对角矩阵解耦计算原理，使传递函数矩阵解耦方法形成一个新型的对角矩阵解耦方法，不仅解耦范围较广，而且增加了对控制对象解耦的运算过程，从而能够使解耦程序较完整地消除控制系统中耦合参数，使控制系统运行操控更流畅，指令更准确^[13-14]。解耦图如图 5 所示。

综上所述，软件程序流程图如图 6 所示。

采用增压回引射式气流布局方式设计气流动态布局控制系统，实现对抽气段、驻室、栅指、排气阀等多个工作单位的组合操控；引入解耦控制程序，控制各环节参数耦合，通过传递函数矩阵运算实现控制中心对耦合作用的削减，得到准确的风洞流场控制指令。

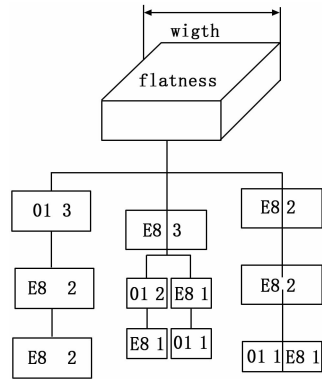


图 5 解耦图

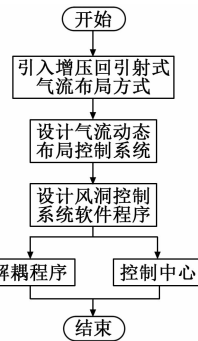


图 6 引射式跨声速风洞流场控制软件程序流程图

3 实验结果与分析

为验证设计的引射式跨声速风洞解耦控制软件的有效性，设计对比实验，选择同一控制对象和相同的风洞实验标准，将本文设计的引射式跨声速风洞控制软件与传统的跨声速风洞双转轴控制系统和跨声速风洞 FSS 控制系统进行对比。

检验风洞控制系统性能的主要指标是风洞实验中控制系统对空气场内各方面的控制效果。本文运用了马赫数和雷诺数等测试指标，对 3 种控制系统的控制水平进行了检测分析，各方面测试结果如图 7 所示。

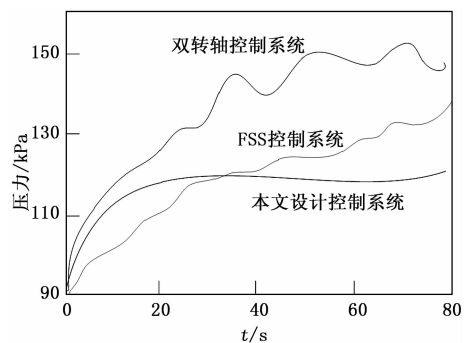


图 7 抽气段 M 数变化情况对比图

图 7 是对抽气段 M 数的变化监测，可见本文设计的控制系统软件控制下的抽气段 M 数变化更稳定，体现了控制系统对该部分气流状况控制效果更好。

M 数代表的是风洞实验气流的马赫数值, 图中可见在相同的时间对同一控制目标进行风洞气流操控, 受气流运行影响最大的抽气段部分 3 种控制系统下 M 数的变化情况, FSS 控制系统和双转轴系统控制下气流气压马赫数值波动起伏较大, 且都呈现波动上升的状态。双转轴控制系统前期气压上升很快, 后期控制能力不足, 导致其呈现明显的波动起伏; FSS 控制系统相较于双转轴控制系统稍微稳定一些, 起伏变化不太明显, 但压力值依旧呈逐渐上升状态, 且时间越长上升越明显。

上述情况表明了传统的控制系统随着控制时间推移, 控制能力也会逐渐减弱, 对长时间的风洞实验气流控制难以满足实验的精准度和稳定性要求。而本文设计的控制系统在内部控制软件程序的加持下, 控制精度和控制范围都有很大提升, 因此对于测试对象复杂并且测试水平要求高的风洞实验, 本文设计的引射式跨声速风洞控制系统软件能够满足实验要求。

图 8~10 是对风洞稳定段气压控制效果的测量数据, 由此可见, 本文设计的控制系统对气压数值的控制更精准, 更贴近对控制对象的气压目标要求。传统的控制系统下稳定段的气压控制数值与目标理想数值偏离较大, 如图 8 所示双转轴系统无法控制气压稳定上升并保持一个平均值; 通过图 9 可以看出, FSS 系统的控制在前期驱动力不足, 导致前期气压不足, 而后期气压上升迅速, 控制系统难以及时控制稳定, 总体来说效果并不理想。本文设计的软件系统对气压的控制与目标要求相差无几, 波动变化很小, 实验效果非常好, 可见本文设计的软件对气压控制的精准稳定。

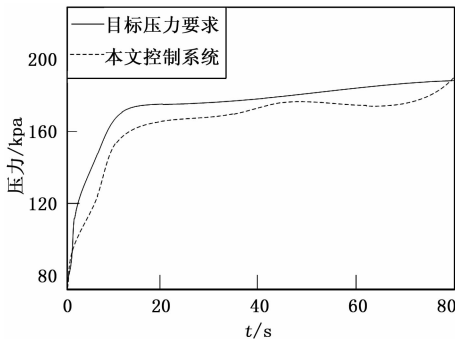


图 8 本文控制系统稳定段气压控制效果

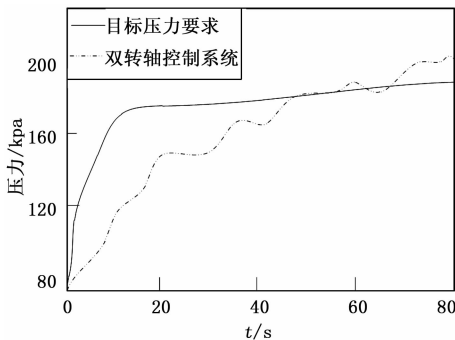


图 9 双转轴控制系统稳定段气压控制效果

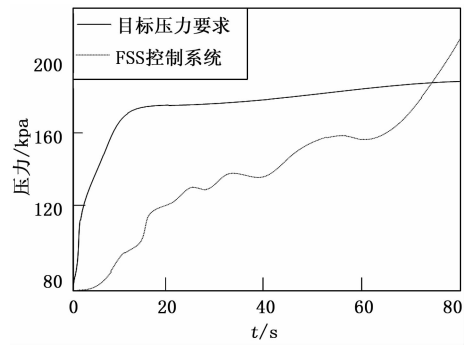


图 10 FSS 控制系统稳定段气压控制效果

图 11 为对排气阀气流速度的检测情况, 相较于传统控制系统, 明显在本文设计的控制系统控制下排气气流速度更均匀。在风洞实验过程中, 需要根据实验现场的具体情况调整风洞内部气流密度、分布情况等, 因此需要对排气阀进行精准的排气操控。

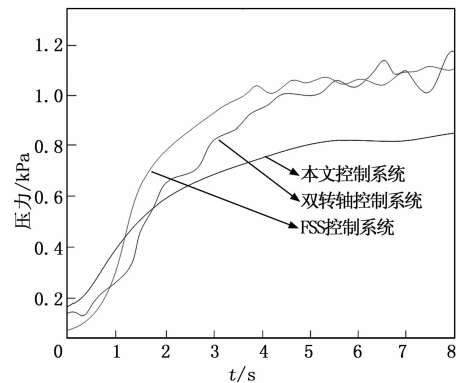


图 11 排气阀气流排气速度对比

图中可见, 传统的控制系统控制下的排气阀对气流排放的控制并不理想, 排气速度变化较大, 而且速度变化不稳定, 时间越长速度起伏变化越大, 阀门的控制越不稳定。在本文设计的控制系统操控下的排气阀排气速度虽然也有上升, 但速度增加较为缓慢, 后期趋于平稳, 排气速度接近于匀速排放, 而且没有明显的速度起伏变化, 说明控制系统对排气阀的控制能力足够强, 能够使排气阀排气速度控制在一个大致的数值范围。

结合以上数据分析能够明显看出, 本文设计的风洞控制软件系统在控制范围、控制精度、控制稳定性等方面都具有突出优势, 且适用范围广, 能够根据控制设备和控制对象的具体条件进行调整。在航空航天和飞行器研究技术日新月异的今天, 本文设计的软件系统可以考虑投入大范围推广应用。

4 结束语

本文通过对引射式跨声速风洞控制系统软件设计原理的介绍, 以及对比实验的结果分析, 表现出本系统软件设计在风洞实验领域的明显优势。本文的研究结果不仅对风洞实验系统设计提供了参考, 而且推动了相关领域的技术发

展, 为之后的风洞控制系统软件程序研究提供了宝贵经验。

参考文献:

- [1] 曹 阳, 张益盛. 连续式跨声速风洞电能监控软件设计 [J]. 测控技术, 2018, 37 (S1): 207-209.
- [2] 廖达雄, 陈吉明, 郑 娟, 等. 0.6 m 连续式跨声速风洞总体性能 [J]. 实验流体力学, 2018, 32 (6): 90-95.
- [3] 陈 旦, 杨孝松, 李 刚, 等. 连续式风洞总压和调节阀相关性研究及其应用 [J]. 西北工业大学学报, 2020, 38 (2): 325-332.
- [4] 王 莹, 高 超, 吕 哲. 跨声速风洞翼型动态失速试验系统研制 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18 (32): 95-103.
- [5] 李 峰, 高 超, 郝忠祥, 等. 连续式跨声速风洞降温系统液氮存储装置的设计与调试 [J]. 实验流体力学, 2019, 33 (5): 105-110.
- [6] 秦建华, 王博文, 唐 亮, 等. 风洞试验流程描述与解析设计 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (11): 173-176.

(上接第 65 页)

4 结束语

本文研究了涡流技术在金属表面缺陷检测中的应用, 通过有限元仿真平台, 模拟了探头的动态扫描给过程, 并分析了激励频率、激励电流大小和提高高度对检测结果的影响。通过设计基于 GMR 芯片的涡流探头并搭建相应的检测系统对铝合金 6A02 进行了检测。通过采用 DB 小波对电磁信号进行滤波处理, 取得了良好的效果。实验表明, 该探针可以检测金属表面以下 5 mm 处的缺陷。

参考文献:

- [1] Bernieri A, Ferrigno L, Laracca M, et al. Eddy Current Testing Probe Based on Double-Coil Excitation and GMR Sensor [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68 (5): 1533-1542.
- [2] 马利涛. 基于巨磁阻传感器金属材料涡流探伤系统的研究及设计 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
- [3] Zhenwei Wang, Yating Yu. Traditional Eddy Current-Pulsed Eddy Current Fusion Diagnostic Technique for Multiple Micro-Cracks in Metals [J]. Sensors, 2018, 18 (9): 2909-2919.
- [4] 王 超, 高 鹏. 基于 GMR 的电磁无损检测研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29 (6): 783-789.
- [5] Matthias Pelkner, Andreas Neubauer, Verena Reimund, Marc Kreutzbruck, Andreas Schütze. Routes for GMR-Sensor Design in Non-Destructive Testing [J]. Sensors, 2012, 12 (9): 12169-12183.
- [6] Octavian Postolache, Artur Lopes Ribeiro, H. Geirinhas Ramos. GMR array uniform eddy current probe for defect detection in conductive specimens [J]. Measurement, 2013, 46 (10): 4369-4378.
- [7] Crall Matthew, Laney Samuel, Keller Michael. Giant magne-

- [7] 郁文山, 金志伟, 刘龙兵, 等. 风洞主排气阀电液伺服系统仿真研究与设计 [J]. 机床与液压, 2019, 47 (16): 135-138.
- [8] 吴盛豪, 裴海涛, 陈吉明, 等. 跨声速风洞中轴探管的应用 [J]. 航空动力学报, 2018, 33 (10): 156-162.
- [9] 李 多, 曹军义, 张征宇, 等. 跨声速风洞现代试验设计方法应用研究 [J]. 空气动力学学报, 2018, 36 (1): 26-30.
- [10] 刘 哲, 尹 猛, 徐志刚, 等. 一种新型跨声速风洞捕获轨迹系统的设计与分析 [J]. 机床与液压, 2019, 47 (1): 90-94.
- [11] 战培国. 大型跨声速风洞流动显示技术综述 [J]. 飞航导弹, 2018, 407 (11): 83-86.
- [12] 刘光远, 张 林, 陈德华, 等. 跨声速风洞斜孔壁非线性流动试验 [J]. 航空学报, 2019, 40 (5): 31-38.
- [13] 杨孝松, 盖 文, 江 涛. 某扑翼飞行器风洞流场控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (11): 91-95.
- [14] 王博文, 秦建华, 黄叙辉, 等. 风洞流场控制系统规范化研究与应用 [J]. 兵工自动化, 2018, 37 (6): 33-37.

- [15] toresistance scanning of magnetic self-sensing composites [J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28 (10): 2-14.
- [8] 张恩瑜, 庞懿元, 潘 越. 基于时间序列与小波分离的畸变信号的分析 [J]. 科技创新与应用, 2017 (28): 24-25.
- [9] Dongsheng Li, Yuan Wang, Jun Lin, Shengbao Yu, Yanju Ji. Electromagnetic noise reduction in grounded electrical-source airborne transient electromagnetic signal using a stationary wavelet-based denoising algorithm [J]. Near Surface Geophysics, 2017, 15 (2): 163-173.
- [10] Han Guoqiang, Xu Zhijun. Electrocardiogram signal denoising based on a new improved wavelet thresholding. [J]. The Review of scientific instruments, 2016, 87 (8): 084303 (1-6).
- [11] 张 胜, 王智德, 黎永索, 等. 基于模式自适应连续小波能量谱的爆破振动信号特征分析 [J]. 爆破, 2019, 36 (2): 105-110.
- [12] Dai X P, Cheng ZCA, JCMB, et al. New method for denoising borehole transient electromagnetic data with discrete wavelet transform [J]. Journal of Applied Geophysics, 2019: 41-48.
- [13] Yanju Ji, Dongsheng Li, Guiyang Yuan, Jun Lin, Shangyu Du, Lijun Xie, Yuan Wang. Noise reduction of time domain electromagnetic data: Application of a combined wavelet denoising method [J]. Radio Science, 2016, 51 (6): 680-689.
- [14] Saari M M, Nadzri N A, Halil A M, et al. Design of Eddy Current Testing Probe for Surface Defect Evaluation [J]. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 2019, 16 (1): 6357-6367.
- [15] Theodoros P. Theodoulidis, Epameinondas E. Kriezis. Impedance evaluation of rectangular coils for eddy current testing of planar media [J]. NDT and E International, 2002, 35 (6): 407-414.