

doi: 10.7690/bgzdh.2022.09.011

基于 NI cDAQ 的旋转天平实时速压测量系统

唐 领, 康洪铭, 刘晓林, 万秋平

(中国空气动力研究与发展中心低速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对实际风洞试验中, 速压波动较大导致的旋转天平得到的数据精度不高问题, 设计基于 NI cDAQ 的旋转天平实时速压测量系统。阐述多点静压落差法测量速压的原理和方法, 介绍测量系统的硬件组成和软件设计, 并将该系统应用在 $\Phi 5$ m 立式风洞旋转天平试验中。结果表明: 该系统稳定可靠, 能有效克服速压波动较大的问题, 提高试验数据的精准度, 为风洞试验提供有力保障。

关键词: NI cDAQ; 低速风洞; 多点静压落差法; 旋转天平

中国分类号: TP216 **文献标志码:** A

Rotary Balance Real-time Velocity and Pressure Measurement System Based on NI cDAQ

Tang Ling, Kang Hongming, Liu Xiaolin, Wan Qiuping

(Low Speed Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the problem of low accuracy of the data obtained by rotary balance due to the large fluctuation of the velocity pressure in the actual wind tunnel test, a real-time velocity pressure measurement system of rotary balance based on NI cDAQ is designed. The principle and method of the multi-point static pressure drop method for measuring the velocity pressure are described, and the hardware composition and software design of the measuring system are introduced. The system is applied to the rotary balance test in the $\Phi 5$ m vertical wind tunnel. The results show that the system is stable and reliable, and can effectively overcome the problem of large fluctuation of velocity pressure, improve the accuracy of test data, and provide a strong guarantee for wind tunnel test.

Keywords: NI cDAQ; low speed wind tunnel; multi-point static pressure drop method; rotary balance

0 引言

$\Phi 5$ m 立式风洞是我国第一座大型立式风洞, 主要用来研究飞机尾旋运动特性。其中旋转天平试验是用来获得尾旋运动中复杂气动特性的重要手段, 不仅可直接预测稳态尾旋平衡点及其性质, 而且可为飞机从尾旋的进入、发展、改出的历程提供准确的试验数据^[1-3]。目前, 在 $\Phi 5$ m 立式风洞开展旋转天平试验主要是通过名义速压进行计算, 即风洞以稳风速或者稳转速方式开车, 根据空风洞测量的试验段大气压、温度、风速拟合成一个固定的名义速压(也称动压)插值表, 最后在试验数据处理过程中, 利用名义速压将气动载荷计算成无量纲的气动力和力矩系数^[4]。

由于旋转天平试验大多采用尾撑或背撑, 试验所用的支撑系统也比较庞大, 弧形轨和模型高速旋转时会造成试验段速压有较大波动。随着旋转天平试验数据精度标准的提高, 需要设计一种速压测量系统提供实时准确的风洞试验段速压, 此外该系统

还需具有良好的可靠性和稳定性, 能在高噪声和震动、强电磁干扰的风洞现场工作。针对上述问题, 笔者设计一种基于美国国家仪器(NI)公司 cDAQ 开放式模块化数据采集硬件平台, 适用于旋转天平试验的实时速压测量系统。该系统通过 Labview 实现数据采集与传递, 利用 3 倍标准差法和多点静压落差法进行数据处理与计算, 具有实时、准确测量试验段中心处速压的功能, 同时还具有较强的抗震、抗干扰能力。

1 测量原理及设计方案

1.1 测量原理

在开展旋转天平试验时, 如果在试验段直接用风速管测量动压, 旋转天平弧形轨和试验模型离风速管较近, 在旋转运动时会造成风速管附近的流场紊乱和不均匀; 因此, 采用该测量方法难以准确测量气流动压。

通过计算收缩段入口和出口静压差来获得速压

收稿日期: 2022-05-28; 修回日期: 2022-06-26

作者简介: 唐 领(1996—), 男, 四川人, 从事风洞试验技术研究。E-mail: 1141698301@qq.com。

的方法称为压强落差法。为消除流场不均匀的影响，笔者采用多点静压落差法^[5]。如图 1 所示，在收缩段入口、出口垂直截面上每隔 90°开孔，分别布置 4 个静压探头，同一截面静压探头采用管路连接做物理平均。由于静压探头设置在离试验段较远的平直洞壁上，减小了由于外界环境及模型大攻角状态引起的风速不均匀性对风速反馈值的影响；因此，大型风洞一般采用此方法^[6]。

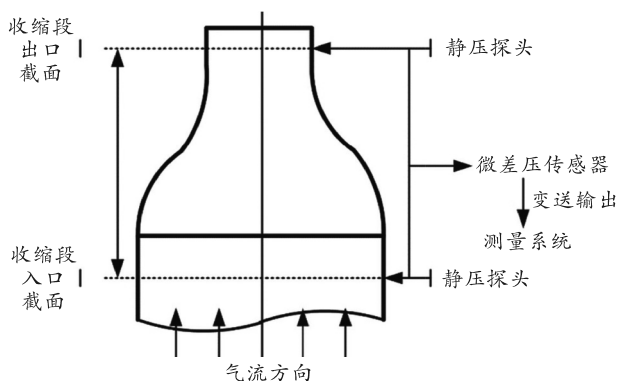


图1 多点静压落差法

在风洞收缩段出口、入口、试验段中心点处分别取平行截面 A、B、C，由于气流在流动过程中与洞壁摩擦，存在流动损失，根据伯努利方程：

$$P_B + \rho v_B^2 / 2 = P_A + \rho v_A^2 / 2 + k_{BA} \times (\rho v_A^2 / 2)。 \quad (1)$$

式中： P_B 、 P_A 分别为 B、A 截面静压值； v_B 、 v_A 分别为 B、A 截面的风速； ρ 为空气密度； k_{BA} 为 B 和 A 截面之间能量损失系数。

再由 A、C 截面动压比和连续方程：

$$(\rho v_C^2 / 2) / (\rho v_A^2 / 2) = (v_C / v_A)^2； \quad (2)$$

$$S_B v_B = S_A v_A = S_C v_C。 \quad (3)$$

式中： S_B 、 S_A 、 S_C 分别为 B、A、C 截面的面积； v_C 为 C 截面的风速。由式(1)–(3)可得：

$$\rho v_C^2 / 2 = (P_B - P_A) / \left(\left[1 + k_{BA} - (S_A / S_B)^2 \right] \times (S_C / S_A)^2 \right)。 \quad (4)$$

根据式(4)，引入动压修正系数 $\delta = 1 / \left(\left[1 + k_{BA} - (S_A / S_B)^2 \right] \times (S_C / S_A)^2 \right)$ ，最后得到试验段速压 q 与 AB 截面的静压差具有以下关系：

$$q = \delta (P_B - P_A)。 \quad (5)$$

由上式可知，利用吹风试验时通过测得 AB 截面的静压落差和试验前测得的动压修正系数，即可得到试验段中心速压，再通过测得试验段大气密度，可以计算出试验段中心点风速。

1.2 设计方案

实时速压测量系统采用以虚拟仪器技术为主体

的设计方案。系统由计算机硬件资源、模块化仪器硬件、传感器、信号调理模块以及用于数据分析、过程通信及图形用户界面的软件组成，系统结构如图 2 所示。虚拟仪器是利用高性能的模块化硬件结合计算机强大的数据计算、分析及处理能力，完成各种测试、测量和自动化应用^[7]，相较于传统仪器测量技术，具有拓展性强、配置灵活、功能强大等特点，另外可快速进行大量重复性试验，也是传统仪器测量系统无法比拟的。

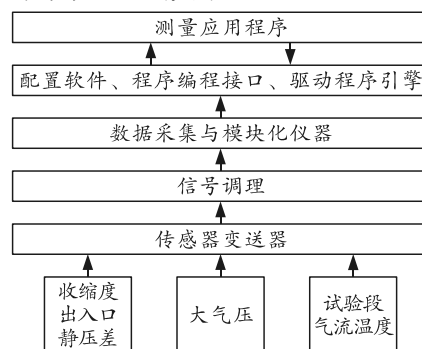


图2 测量系统组成

测量系统主要包括 2 部分：1) 通过数据采集硬件平台和传感器测量所需的压力、温度信号，使之变成标准电流或电压信号；2) 数据处理，即将测量信号调理和计算。

1.2.1 采集系统硬件组成

数据采集平台采用 NI 公司 cDAQ-9189 开放式模块化数据采集硬件平台，专为便携式数采系统设计。cDAQ-9189 的特征与优势包括：1) 通过基于网络的时间自动同步测量数据，保证长距离、分布式测量系统的精确同步，便于安装和管理；2) 能使用多种采集模块组合满足不同测控参数要求，模块直连被测信号，拓展性好；3) 系统具有 50 g 抗冲击和 5 g 抗震动性能，工作温度范围在 -40~70 °C，因此可将采集系统部署在被测设备附近，缩短线路长度，降低传感器布线长度，减小电磁干扰的影响，提高测量精度；4) 通过 NI-DAQmx 驱动进行软件开发，自动同步多个机箱，实现简单编程。

差压传感器选用 ABB 266DSH 系列高精度微差压传感器，量程为 0~2 kPa，精度为 0.04%。大气压传感器选用 Druck 的 PTX7517-0010 绝压传感器，量程为 80~120 kPa，精度为 0.075%。气流温度传感器选用 JWB/P-4-3-0/01，类型为 PT100，工作温度为 -50~100 °C，精度为 0.05%。微差压传感器采用硅油填充，传感器发生倾斜或晃动会导致内部薄膜变形，输出电信号失真，造成系统误差。为确保

数据真实可信，将该传感器与稳风速控制系统所使用的微差压传感器和大气压传感器一并放置在试验段洞壁附近，并安装支架用于固定传感器，其现场安装如图 3 所示。

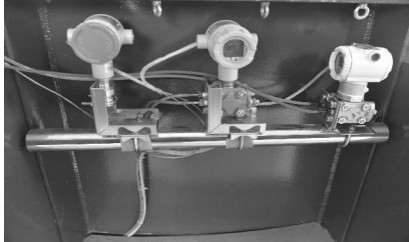


图 3 传感器现场安装

本系统所有传感器均为两线制 4~20 mA 电流信号输出，只需使用一块带有 8 个模拟电流输入通道的 NI-9203 数据采集卡即可完成所有测量任务。该数据采集卡具有 16 位分辨率以及 200 kS/s 的最大采样率，采集精度满足系统设计的要求，再配合 ADAM-3014 模拟信号光电隔离模块，可显著降低噪声信号，提高测量准确度。对于 NI 的数据采集卡，在计算机安装好驱动程序后，利用 MAX 配置软件对数据采集卡进行初步配置和试采样，MAX 可利用测试面板验证和诊断硬件运作情况，调用 DAQ 助手建立数据采集任务。

1.2.2 软件设计

采集及处理软件采用 Labview 图形化编程软件开发，软件界面如图 4 所示。Labview 是一种标准的测量用分析、计算及处理软件的开发环境，目前已被广泛使用在数据采集和仪器控制行业，利用 Labview 实现数据采集过程，主要包括 5 个环节：
1) 创建采集任务；2) 采样参数设置；3) 开始任务；4) 进行“读取”或“写入”数据操作；5) 采集完成后，清除任务，释放内存。

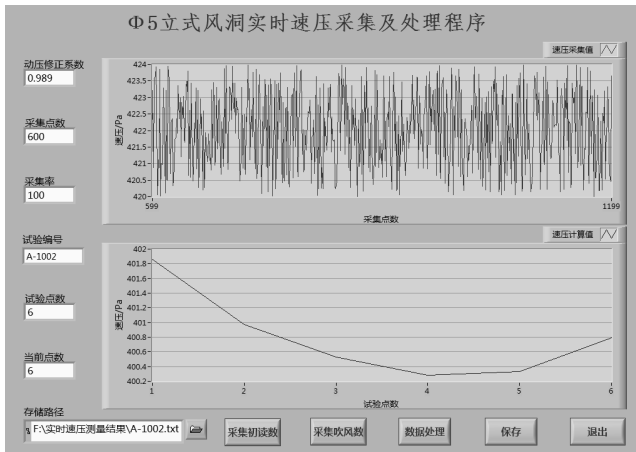


图 4 采集及处理软件界面

根据要求编写的采集及处理软件具有以下功能：数据采集、数据处理、数据显示与存储等，软件运行流程如图 5 所示。

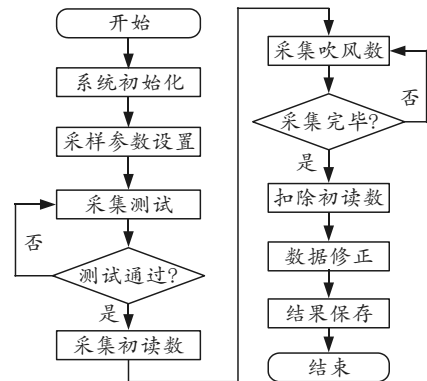


图 5 数据采集软件运行流程

数据采集主要借助 DAQmx VI。DAQmx VI 是对数据采集卡进行操作时用户可控制的最底层函数。相较于 DAQ 助手，该途径能在采集过程中改变采集率和采集点数，使用起来更加灵活，还便于通过断点和探针来调试程序，了解程序运行情况。

1.2.3 数据处理方法

程序中滤波器均选用 Butterworth 低通滤波器，可在所有频率上提供平滑响应^[8]，滤波器截止频率为 50 Hz，在使用时可根据现场情况对截止频率进行修改。数据处理部分软件代码如图 6 所示。

在大多情况下，测量过程中所产生的随机误差是遵循正态分布规律的，正态分布的数值特征为：在相同条件下采集 $n(n \geq 10)$ 个点的数，各点的值分别为 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ ，这 n 个点的算数平均值 \bar{X} 为：

$$\bar{X} = (X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n) / n \quad (6)$$

由概率论的大数定律可知，在无限增加测量次数后，算数平均值必然趋近于真实值；但在实际测量时测量次数有限，其值仍是一个随机变量，服从正态分布规律， n 个点的算数平均值的标准偏差可由下式计算：

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / n(n-1)} \quad (7)$$

当测量点数 $n > 10$ 以后，随着 n 的增加， σ 变化趋于稳定；因此，可以通过增加测量点数来减少随机误差，提高测量精度。

在软件调试过程中发现，在等精度重复测量时，存在偶发的某测量值偏离算数平均值较大的问题。为解决该问题，程序在数据处理时依据 3σ 准则(拉

依达准则)——测量值的剩余误差的绝对值大于 3σ 范围, 则认为该点测量值含有粗大误差, 为异常值, 的概率约为 0.27%, 即如果某次测量值超出 $\bar{X} \pm 3\sigma$ 程序将自动剔除该点。

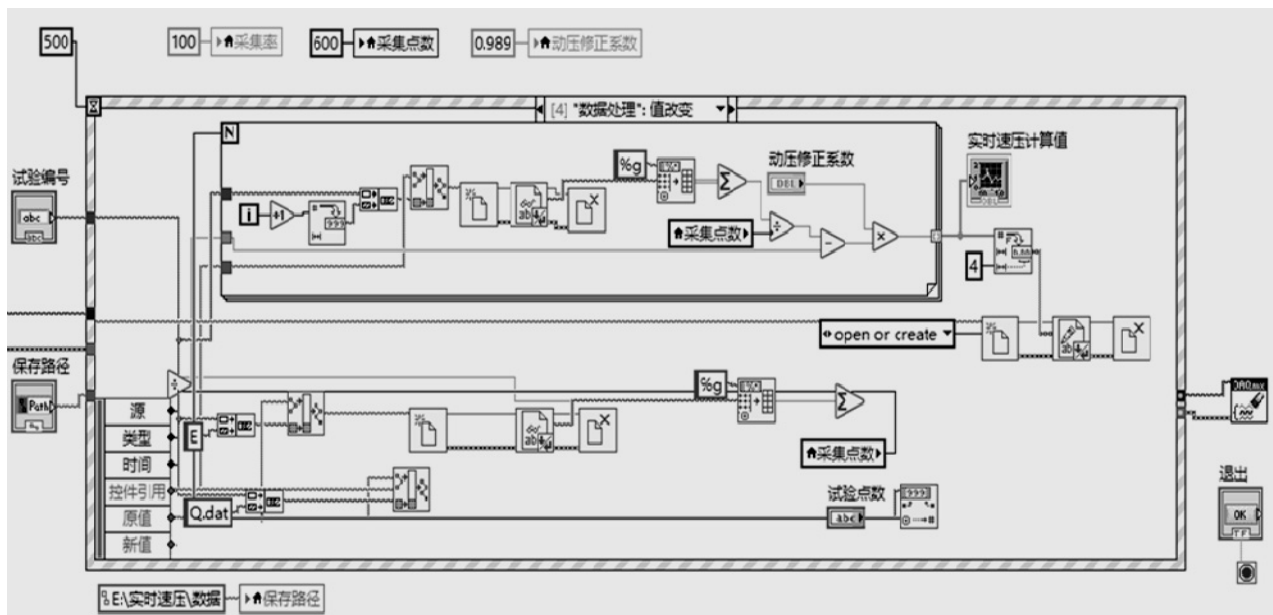


图 6 数据处理部分软件代码

2 应用

在 $\Phi 5\text{ m}$ 立式风洞开展旋转天平试验, 相比水平风洞具有显著优势, 模型重力作用于天平上的力是恒定的, 而水平风洞呈周期性变化; 因此, 立式风洞在扣除重力影响方面较为简单。

立式风洞旋转天平试验装置结构如图 7 所示, 试验模型为尾旋模型, 测力天平为杆式六分量应变天平, 在旋转过程中, 模型的迎角和侧滑角保持不变, 采用正、反转数据取平均值的方法来消除惯性力、力矩。旋转天平试验结果数据通常以相对于机体坐标系的 6 个气动分量的系数随旋转参数 λ (与模型正反旋转时的角速度和风速有关) 的变化关系给出。

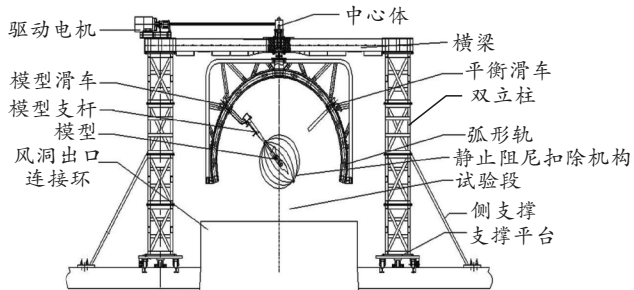


图 7 旋转天平试验装置结构

按照上节所述, 试验前需标定动压修正系数 δ , 方法为在试验段中心安装已校准的标准风速管, 风速管接微差压传感器测量试验段中心速压, 另用一台微差压传感器测量风洞收缩段静压落差 ΔP 。在不

同风速下使用该系统进行测量, 从而计算对应的 δ 值。如果把 2 台传感器交换, 重新测量一次, 根据式(8)则可以计算消除传感器误差后的 δ 值, 这样既检验了该测量系统的性能指标, 又能确保测量的准确性。

$$\delta = \xi \sqrt{(q_1/\Delta P_1)(q_2/\Delta P_2)} \quad (8)$$

式中: ξ 为标准风速管的校正系数, 取值为 0.999 9; q_1 、 q_2 分别为交换前后测得的试验段中心速压; ΔP_1 、 ΔP_2 分别为交换前后测得的收缩段静压落差。

如图 8 所示, 标定动压修正系数所采用的支撑装置是基于伞支撑装置改造的流场校测移测架。该装置能够将风速管固定在试验段中心, 并能够上下左右移动, 位移控制精度为 1 mm, 标定时风速管的轴线应与风洞中心轴线重合。

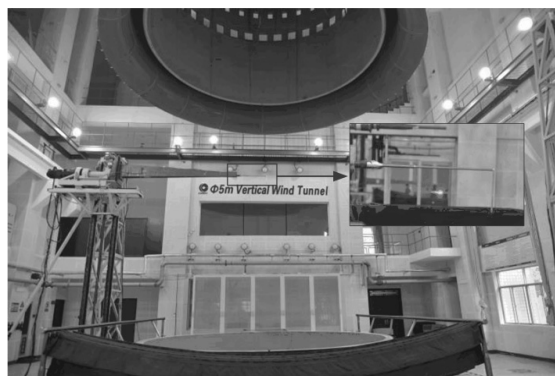


图 8 $\Phi 5\text{ m}$ 立式风洞流场校测移测架及标准风速管

表 1 给出了使用该测量系统在 $\Phi 5\text{ m}$ 立式风洞

速压控制范围内 5 组动压修正系数校测值。每组做 7 次重复性试验，最后计算其平均值和均方根偏差。

表 1 动压修正系数标定

标定项	风速/(m/s)				
	5	15	25	35	45
第 1 次	0.987 6	0.987 6	0.984 0	0.990 1	0.988 8
第 2 次	0.994 2	0.987 5	0.983 9	0.990 7	0.987 3
第 3 次	0.993 8	0.990 1	0.984 9	0.991 0	0.986 4
第 4 次	0.992 2	0.990 0	0.984 8	0.991 3	0.987 9
第 5 次	0.997 3	0.989 5	0.984 9	0.990 7	0.987 7
第 6 次	1.001 9	0.990 6	0.985 2	0.991 6	0.987 7
第 7 次	0.999 5	0.989 4	0.984 9	0.990 5	0.987 9
平均值	0.995 8	0.989 3	0.984 6	0.990 8	0.987 7
均方差	0.003 8	0.001 2	0.000 5	0.000 5	0.000 7
国军标	不合格	合格	合格	合格	合格

标定结果表明，当风速在 15~45 m/s 区间时，动压修正系数的均方根偏差均满足国军标的要求，证明该测量系统测量精度和稳定性良好，可以用于开展旋转天平试验。

试验时，每条次试验包含 5 个不同的旋转转速；因此，模型在正转、反转和静止状态下共有 11 个试验点。每个试验点采样频率为 500 Hz、采样总数为 3 000 点，取模型运动状态稳定后的采样结果平均值作为该点的实时速压值。图 9 分别给出了模型在 $\alpha=60^\circ$ 、 $\beta=0^\circ$ 、 $v=25$ m/s 时，名义速压和实时速压随旋转参数 λ 变化关系。

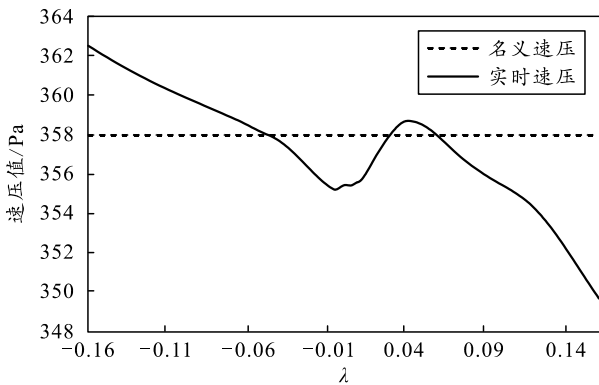


图 9 速压变化曲线 ($\alpha=60^\circ$ 、 $\beta=0^\circ$ 、 $v=25$ m/s)

从试验结果来看，旋转天平装置及模型的旋转速率和旋转方向的变化，都会对试验段实时速压产生影响；因此，在气动数据处理过程中，使用实时速压参与气动系数计算，可以提高试验数据的真实性和准确性。

3 结论

笔者设计基于 NI cDAQ 的旋转天平实时速压测量系统，运用虚拟仪器技术实现了相应的数据采集、数据处理及数据保存等相关功能，取得较为理想的测量效果。与采用名义速压进行数据处理相比，采用实时速压更能反映出真实的气动数据，有效克服了旋转天平试验中速压波动较大的问题，提高了试验数据的精准度，为风洞试验提供了有力保障。

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: 215-221.
- [2] 马军, 姜裕标, 祝明红, 等. $\Phi 5\text{m}$ 立式风洞旋转天平试验装置研制[J]. 实验流体力学, 2012, 26(2): 77-80.
- [3] 祝长江, 吕波, 虞择斌, 等. $\Phi 5\text{m}$ 立式风洞结构设计[J]. 实验流体力学, 2010, 24(2): 93-96.
- [4] 祝明红, 王勋年, 李宝, 等. $\Phi 5\text{m}$ 立式风洞尾旋试验技术[J]. 实验流体力学, 2007, 21(3): 49-53.
- [5] 辛颖, 易晖. 基于 PSDNN 神经网络的稳风速控制系统的分析与应用[J]. 直升机技术, 2015(4): 16-19.
- [6] 易晖, 熊建军, 汤永, 等. 多点静压落差法在风洞稳速压控制系统中的分析与应用[J]. 直升机技术, 2013(4): 61-62.
- [7] 杜洪亮, 张伟. 冰风洞虚拟仪器环境参数测试系统设计实现[J]. 测控技术, 2016, 35(3): 8-12.
- [8] 奥本海姆. 信号与系统[M]. 北京：电子工业出版社，2013: 449-451.