

# 风洞旋转轴天平信号处理系统设计

毛世鹏<sup>1,2</sup>, 王萍<sup>1,2</sup>, 李盛文<sup>1,2</sup>, 周志坚<sup>1,2</sup>, 姚顺禹<sup>1,2</sup>, 李聪<sup>1,2</sup>

(1. 航空工业空气动力研究院, 哈尔滨 150001; 2. 低速高雷诺数航空科技重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 螺旋桨滑流带来的复杂气动力影响目前只能在风洞试验中获得, 为了准确测量气动力从而获得螺旋桨滑流的影响量, 使用旋转轴天平直接与螺旋桨相连并高速同步旋转进行风洞试验; 对旋转轴天平的试验原理、数据处理方法进行了深入研究, 设计开发了风洞旋转轴天平信号处理系统; 综合考虑了信号衰减、电磁环境等干扰问题, 通过时钟背板触发启动采集, 保证了信号采集的同步性, 系统整体处理精度等指标都满足试验技术要求; 还创新性地开发出了风洞动态数据连续测量技术, 大幅提高了试验效率; 经过多次风洞试验测试, 实现了对旋转轴天平信号的调理、采集和处理功能, 为高效率、低噪声的先进螺旋桨设计和涡桨飞机气动噪声设计提供了技术支持。

**关键词:** 风洞; 旋转轴天平; 信号处理; 滑环; 同步触发; 连续测量

## Design of Signal Processing System for Wind Tunnel Rotating Shaft Balance

MAO Shipeng<sup>1,2</sup>, WANG Ping<sup>1,2</sup>, LI Shengwen<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhijian<sup>1,2</sup>, YAO Shunyu<sup>1,2</sup>, LI Cong<sup>1,2</sup>

(1. Aerodynamics Institute of China Aviation Industry Corporation, Harbin 150001, China;

2. Low Speed High Reynolds Number Aeronautical Key Laboratory, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The complex aerodynamic influence caused by the propeller slipstream can only be obtained in wind tunnel tests at present. In order to accurately measure the aerodynamic force and obtain the influence of the propeller slipstream, a rotating shaft balance is directly connected to the propeller and rotates synchronously at a high speed to conduct the wind tunnel test. In-depth research on the experimental principles and data processing methods of the rotating shaft balance was carried out, and the wind tunnel rotating shaft balance signal processing system was designed and developed. Comprehensive consideration of signal attenuation, electromagnetic environment and other interference issues, the acquisition is triggered by the clock backplane to ensure the synchronization of signal acquisition, and the overall processing accuracy of the system and other indicators meet the technical requirements of the test. It also innovatively developed the continuous measurement technology of wind tunnel dynamic data, which greatly improved the test efficiency. After many wind tunnel tests, the functions of conditioning, collecting and processing the signals of the rotating shaft balance have been realized, providing technical support for high-efficiency, low-noise advanced propeller design and turboprop aerodynamic noise design.

**Keywords:** wind tunnel; rotating shaft balance; signal processing; slip ring; synchronous trigger; continuous measurement

## 0 引言

采用涡轮螺旋桨发动机的飞机具有起飞着陆距离短、巡航时间长等特点, 在运输机、通用飞机、支线客机等机种上有着广泛的应用。螺旋桨会对飞机产生较大的动力影响, 如果不能确定产生的影响量, 螺旋桨滑流会在很大程度上降低飞机的气动效率; 但如果可以对不利影响进行分析并给与消除, 螺旋桨滑流则可以大大地提高飞机的气动效率<sup>[1]</sup>。

以往螺旋桨滑流风洞试验都是采用特制大功率伺服电机作为螺旋桨驱动装置<sup>[2]</sup>, 但是随着功率、扭矩的要求越来越高, 目前已无法满足动力模拟的需求。而涡轮空气马达是一种由高压气驱使轴体转动, 带动螺旋桨旋转的一种装置, 具有体积小、功率大等优点, 同体积下功率是电机的5~10倍, 用于风洞试验中能够获得更准确的试验结果<sup>[3]</sup>。

旋转轴天平是为在风洞模拟螺旋桨滑流试验中准

收稿日期: 2021-10-29; 修回日期: 2021-12-13。

作者简介: 毛世鹏(1984-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事风洞测试与控制方向的研究。

引用格式: 毛世鹏, 王萍, 李盛文, 等. 风洞旋转轴天平信号处理系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1): 175-180.

确测量气动力、从而更精确的获得螺旋桨滑流影响而设计<sup>[4]</sup>。其他常规天平只能测量飞机总体受到的气动力影响，不能准确反映出螺旋桨的滑流影响。而旋转轴天平直接与螺旋桨相连并高速同步旋转，将信号数据计算后得到天平轴系下的载荷，再经过轴系转换就能够得到螺旋桨六分量载荷，可以准确获得螺旋桨滑流的影响量<sup>[5]</sup>。

## 1 试验原理及系统结构

### 1.1 旋转轴天平试验原理

旋转轴天平随螺旋桨旋转，需要高速滑环来传输信号并为其供电，长距离传输还容易受到电磁干扰和信号衰减的影响<sup>[6]</sup>；输出的动态信号也需要确定每个数据点的角位置，保证数据与相位信息一一对应，这对采集同步性有着较高的要求，不同采集卡通道间不能有超过 2 微秒的相位差<sup>[7]</sup>；国内风洞试验静态数据连续测量技术已经很成熟了，但是还没有动态数据连续测量的经验，需要研究与其他静态数据同步连续测量的试验方法。不同于其他常规天平，信号采集、处理的方法都更加复杂，因而需要研制一套高精度、高可靠性的信号处理系统，来保证获取准确的旋转轴天平数据<sup>[8]</sup>。

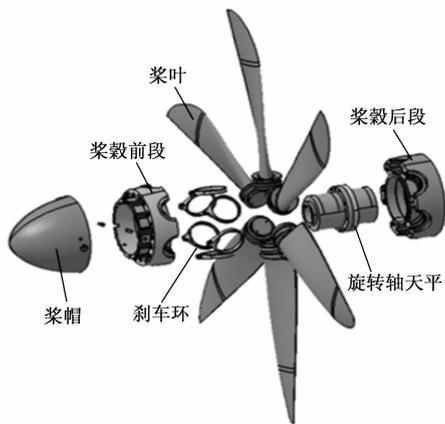


图 1 螺旋桨、旋转轴天平示意图

风洞滑流试验中使用旋转轴天平测量螺旋桨的气动力，固定在涡轮空气马达主轴上，直接螺旋桨相连并高速同步旋转<sup>[9]</sup>。旋转轴天平一般按照六分量天平设计，采用有限元方法计算螺旋桨旋转轴天平在六分量设计载荷下的位移及角度变化<sup>[10]</sup>，提取螺旋桨旋转轴天平体上关键位置处的动、静态应力值，得到该关键位置处各分量载荷的监测计算系数，用于在风洞试验时进行螺旋桨旋转轴天平的载荷实时监控<sup>[11]</sup>，

保护螺旋桨旋转轴天平使用过程中不发生不可逆的过载损坏。

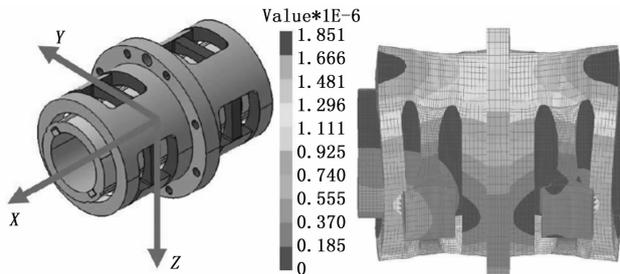


图 2 旋转轴天平结构与有限元分析示意图

试验中，需要将旋转轴系下的天平信号转换成固定轴系下的螺旋桨气动力<sup>[12]</sup>。首先将螺旋桨旋转轴天平在旋转过程中采集到的信号数据计算得到天平轴系下的载荷，再经过轴系转换，转换角度为数据采集时刻的天平轴系与短舱轴系的角度<sup>[13]</sup>，把天平载荷转换到短舱固定轴系上，得到短舱轴系下的螺旋桨六分量载荷，同时需要扣除螺旋桨的重力影响量。

### 1.2 系统结构

螺旋桨旋转轴天平信号处理系统由直流稳压电源、高速滑环、信号调理设备、PXI 动态数据采集系统、角位置采集器、控制主机和在线校准装置等几部分组成。系统原理框图如图 3 所示。

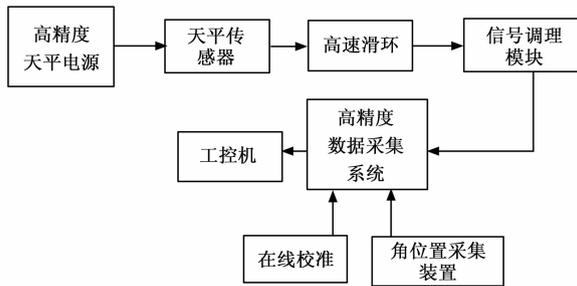


图 3 系统结构框图

旋转轴天平供电由直流稳压电源通过滑环来提供，天平输出的小信号容易受到电磁干扰和长距离传输衰减的影响，就近接入信号调理设备放大传输，接入 PXI 动态数据采集系统，采集的数据利用推导信号处理方法计算成气动力数据<sup>[14]</sup>。为了补偿滑环通道阻值在高速旋转时的变化，将天平电压也进行采集，用于消除供电误差。采集系统由角位置脉冲触发控制，角位置脉冲由控制系统产生<sup>[15]</sup>。

## 2 系统设计

### 2.1 信号处理

将旋转轴天平与螺旋桨固联，在螺旋桨以  $\omega$  角

速度旋转时, 天平感受重力  $G$ 、惯性力  $A$ 、螺旋桨的 6 分力 ( $Y X Z M_y M_x M_z$ ), 其中:  $O-XYZ$  为机体轴,  $O-XY' Z'$  为天平轴。

考虑到在低转速下 (30 转以下), 惯性力几乎可以忽略。在无风时进行一周的低转速天平数据采集, 和试验数据进行对应位置的处理, 可以得到没有重力的天平输出数据, 其公式如下:

$$X_{\text{天平}} = X_{\text{螺旋桨}} \cdot \int M_{x\text{天平}} = M_{x\text{螺旋桨}} \quad (1)$$

$$Y_{\text{天平}} = Y_{\text{螺旋桨}} \cos(\omega t + \varphi) + Z_{\text{螺旋桨}} \sin(\omega t + \varphi) + AY \quad (2)$$

$$Z_{\text{天平}} = Z_{\text{螺旋桨}} \cos(\omega t + \varphi) - Y_{\text{螺旋桨}} \sin(\omega t + \varphi) + Ax \quad (3)$$

$$M_{y\text{天平}} = M_{y\text{螺旋桨}} \cos(\omega t + \varphi) + M_{z\text{螺旋桨}} \sin(\omega t + \varphi) + AY \quad (4)$$

$$M_{z\text{天平}} = M_{z\text{螺旋桨}} \cos(\omega t + \varphi) - M_{y\text{螺旋桨}} \sin(\omega t + \varphi) + Ax \quad (5)$$

式中,  $\omega$  为天平旋转速度,  $t$  为转动时间,  $\varphi$  为采集滞后相移角,  $AY$ 、 $Ax$  为惯性力在天平轴  $Y$ 、 $Z$  方向的投影。从公式中可以看出, 只要求出相移角, 就可以求出作用在旋转轴天平上的气动力。我们可以选取一个角度将测量装置和天平固联, 传感器每转一周输出一个完整的正弦波, 其输出零位和天平的零位完全相同, 此时测量的波形满足:

$$S = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

式中,  $S$  为采集系统测量的角度传感器输出值,  $A$  为传感器输出波形的幅值。

采用积分处理可得:

$$\int_0^{2\pi} S \cos(\omega t) d(\omega t) = A \pi \sin(\varphi) \quad (7)$$

$$\int_0^{2\pi} S \sin(\omega t) d(\omega t) = A \pi \cos(\varphi) \quad (8)$$

$$\varphi = \text{atn} \left[ \frac{\int_0^{2\pi} S \cos(\omega t) d(\omega t)}{\int_0^{2\pi} S \sin(\omega t) d(\omega t)} \right] \quad (9)$$

试验时, 将  $\int_0^{2\pi} \Upsilon_{\text{天平}} \sin(\omega t) d(\omega t)$ 、 $\int_0^{2\pi} \Upsilon_{\text{天平}} \cos(\omega t) d(\omega t)$  定积分, 可以用数值积分代替<sup>[16]</sup>。采用辛普森公式进行数值计算, 如果每周分点数不少于 24 点, 则数值积分和定积分误差小于 0.015%, 完全可以满足试验的精度要求。

## 2.2 高速滑环

试验时, 滑环旋转端随着涡轮空气马达轴和旋转

轴天平一起高速旋转。滑环在设备中起到电信号传输作用, 外部电源通过滑环为旋转轴天平供电, 同时滑环将旋转轴天平及桨叶应变信号传输到采集设备。试验转速较高, 转动过程中, 可能造成通道接触电阻增大, 需要滑环接触电阻变化较小, 并将校准电压信号通过滑环接入采集设备, 以便于对传输损失进行补偿。

表 1 滑环基本参数

参数	指标
通道数	28
转速	最大转速 10 000 rpm
绝缘电阻	大于 1 000 MΩ
动态接触电阻	不大于 50 mΩ

## 2.3 高精度采集

实际在风洞试验过程中, 对于旋转轴天平、转速、振动等电信号的同步有着严格的要求, 需要和转速对应的位置/相位信息一一对应, 因而对整个采集系统不同板卡的采集同步性有着较高的要求。考虑到同步与触发的原则, 采用背板参考时钟方案, 所有模块均采用 CLK10 及 CLK100 进行时钟同步, 以同步触发总线进行内部触发启动, 使整个系统在信号采集所有数据的时间严格对应, 保证了采集系统同步和触发的一致性<sup>[17]</sup>。

旋转轴天平的数据采集精度要优于 0.02%, 还要具有较高的采样率和数据传输带宽来保证动态数据的采集。系统选用了基于 PXI 总线的测试设备, 采集精度可以满足需求, 具有高达 200 K 的采样率, 可以保证数据的完整性。采用了 PXI 的背板时钟, 以同步触发总线进行内部采集触发启动, 保证了采集的同步性<sup>[18]</sup>。

利用 Labview 编写了数据采集程序, 该软件能够与风洞试验主控程序实时通讯, 收发数据信息和操作指令, 同时控制 PXI 设备进行信号的采集和预处理<sup>[19]</sup>。

还编制了试验主控软件, 可以进行采集参数的设置, 读取天平原始数据文件, 可以按照公式和算法进行计算修正, 来获得气动分析人员期望的数据结果, 试验最终结果按照要求存入服务器中<sup>[20]</sup>。软件具体功能如图 5 所示。

该系统软件界面可视化程度高, 参数的修改直观简单, 通过多次试验的使用验证, 满足数据采集的使用需求。



图 4 采集软件示意图

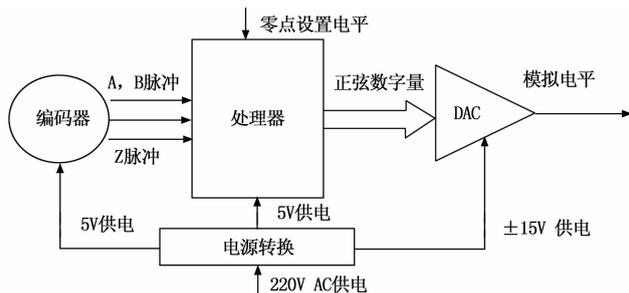


图 6 编码器信号转换器结构图

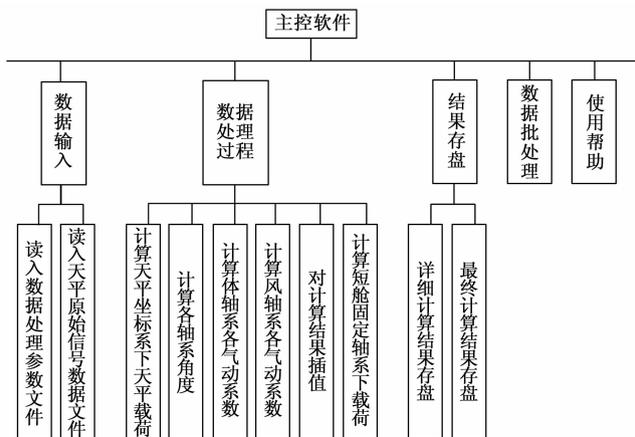


图 5 系统软件功能示意图

### 2.4 角位置采集

角位置采集装置由编码器信号转换器、旋转编码器和相关软件构成，其核心部件是编码器信号转换器。

旋转编码器信号转换器，是一种将增量式旋转编码器输出信号，转换成对应的轴角正弦值，再以模拟电压的形式输出的设备。具体实现方法是利用 CPLD 及高性能处理器接收并处理增量式旋转编码器输出信号，计算脉冲数并转换为相应轴角，再计算出正弦值，最后用高精度数/模转换器件（即 DAC）转换成模拟电压输出。转换器由脉冲信号接收器件、主处理器、数/模转换器件、基准电平器件、电源处理模块几部分组成。

编码器信号转换器能够处理的编码器最高转速为 25 000 转/分，脉冲计数误差不超过 ±2 个/周，输出 ±10 V，输出电平误差不超过 ±2 毫伏。输入 A、B、Z 相脉冲输入，A、B 两相脉冲相位差为 90 度，编码器正转时 A 相在前，反转时 B 相在前，转换器能自动识别编码器的线数和转动方向，并能进行错误识别输出。

### 2.5 信号调理

旋转轴天平输出的信号只有几个毫伏，需要经过滑环长距离传输，容易受到电磁干扰和信号衰减的影响。这里采用天平信号就近接入前端信号调理设备，放大为伏级信号的传输方法。使用低噪声放大器对幅度很小、频率不超过 150 Hz 的小信号进行预处理，为了避免数字信号处理时出现频谱混叠，还要进一步对模拟信号进行抗混叠滤波，并通过功率放大器实现小信号放大。

### 2.6 同步触发

因为机构高速转动，不同的采集卡需要同步触发，通道间不能有超过 2 微秒的相位差。这里采用等位置触发采集，保证采集周期的完整性。螺旋桨在高速旋转时，控制转速和实际转速会存在一定的误差。此时如采用定时采集，就不能保证做到整周期采集，影响试验结果的准确度。采用等位置触发采集，从根本上解决了这个问题，避免了由此造成的积分误差。采集设备中采用了 PXI 的背板时钟，以同步触发总线进行内部采集触发启动，保证了采集的同步性。

### 2.7 动态数据连续采集

国内风洞试验静态数据连续测量技术已经很成熟了，但是还没有动态数据连续测量的经验。在测试过定时触发等多种方法后，结果都不甚理想，最终选用了移动窗体观察法。具体方法为天平转动一周，间隔 100 ms 设立一个观察窗，每隔 0.8 s 进行一次采集，窗内大约有 500 个数据点，经过三阶巴特沃斯滤波后，平均为一个数据点进行存储，这样得到的数据更加线性，重复性较好。与法国 F1 风洞的试验数据对比，处理后的结果一致，证明了该方法的准确性。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 试验步骤和方法

为了验证螺旋桨旋转轴天平的信号处理方法，以

及带动力试验时选择螺旋桨的桨叶角等参数, 首先需要进行单桨试验, 作为全机带动力试验前的预备性风洞试验, 获取正式试验时螺旋桨的转速、试验风速、桨叶角及螺旋桨效率等数据。



图 7 风洞螺旋桨滑流单桨试验图

在验证了信号处理方法满足试验要求后, 利用单桨试验获得的螺旋桨相关数据, 组织开展全模试验, 用来获取螺旋桨滑流影响量数据<sup>[21]</sup>。

与国外风洞使用相同模型获得的数据进行对比, 验证结果的准确性。

### 3.2 试验数据结果

本项目在中国航空工业空气动力研究院 FL-9 低速增压风洞首先进行了基于旋转轴天平的滑流单桨试验, 采集旋转轴天平动态数据, 利用数据处理方法对原始数据进行处理, 经过处理后的数据曲线更加平滑有序, 便于对结果的分析。将天平载荷转换到短舱固定轴系上, 得到短舱轴系下的螺旋桨六分量载荷, 用来分析滑流影响量<sup>[22]</sup>。

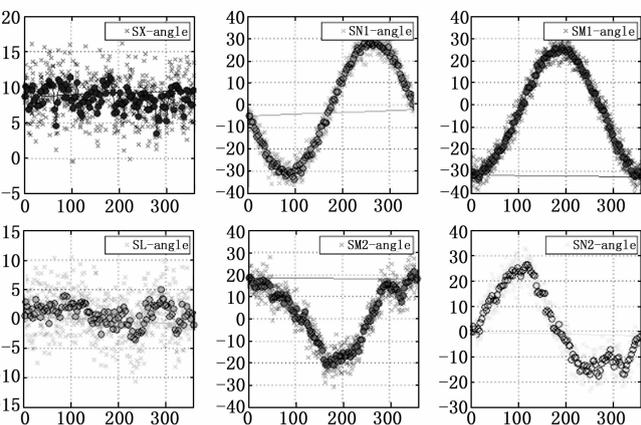


图 8 天平原始信号处理前后对比图

单桨试验后进行了 XX 涡桨飞机全模带动力试验, 试验系统可以对旋转轴天平的信号进行调理、采集和处理, 系统功能满足设计指标。

试验过程中该系统可以实现旋转轴天平动态信号

与其他试验信号同步连续采集, 不同采集卡可以同步触发, 天平信号未发现明显的衰减或干扰。将试验结果与相同模型在 F1 风洞获得的数据进行对比分析。

### 3.3 结果分析

图 9 是 FL-9 风洞和法国 F1 风洞相同模型滑流试验的数据对比, 可以看出结果十分一致。经过支架干扰修正、质量流量修正、洞壁干扰修正后, 可以准确的得到模型受到的螺旋桨滑流影响量<sup>[23]</sup>, 标志着此次研制的旋转轴天平信号处理系统试验能力满足设计指标和滑流试验的技术要求。

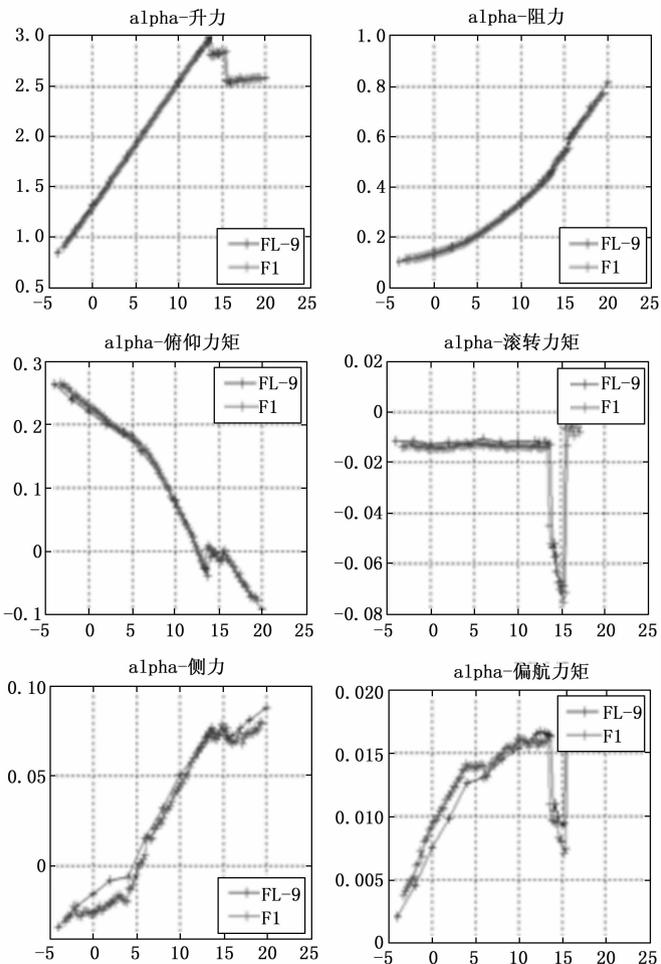


图 9 不同风洞试验数据对比图

## 4 结束语

螺旋桨滑流风洞试验是验证涡桨飞机气动力设计的一项重要特种试验, 是准确获得螺旋桨滑流对飞机气动布局和操稳性能影响的最主要手段。旋转轴天平信号处理系统的成功研制, 大大提高了试验结果的准确性, 为后续螺旋桨滑流试验提供了有力的技

术保障。

1) 通过新系统的地面调试和在型号试验中的成功应用, 标志着旋转轴天平信号处理系统的研制项目取得了圆满成功, 系统操作方便, 运行稳定可靠, 维护简便, 还兼具了一定的功能扩展性。

2) 新系统达到了预期实现的技术指标。采集精度可以达到 0.02%, 采样率 200 k; 进行了前端信号调理, 避免了信号衰减和受到干扰; 通过时钟背板触发启动采集, 保证了与其他信号的采集同步性。

3) 新系统开发了动态数据连续测量技术, 提升了试验效率, 试验效率是普通阶梯测量的 4 倍, 节约了高压气的使用量, 降低了风洞试验成本。

本系统的成功研制, 将有效的缩短我国与国外先进风洞在试验水平上的差距, 填补了在该项技术上的空白。目前世界上只有法国 F1 风洞具备同等的试验能力, 标志着我国螺旋桨动力模拟试验技术达到了国际先进水平。试验系统提高了螺旋桨滑流试验数据的可靠性, 为我国涡桨飞机的研制提供有效的试验验证手段。同时本项目研制的试验设备也可作为螺旋桨性能测试和涡桨飞机噪声测量的测试平台, 为高效率、低噪声的先进螺旋桨设计和涡桨飞机气动噪声设计提供技术支持。

#### 参考文献:

- [1] 李周复, 等. 航空气动技术 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2013: 98-104.
- [2] 霍国, 康洪铭, 刘晓林, 等. FL-12 风洞螺旋桨带动力试验系统 [J]. 兵工自动化, 2018, 37 (6): 23-27, 37.
- [3] 王伟, 段卓毅, 耿建中, 等. 考虑螺旋桨滑流影响的双发涡桨飞机气动特性研究 [J]. 西北工业大学学报, 2017, 35 (6): 1105-1111.
- [4] 李尚斌, 焦予秦. 螺旋桨滑流影响的研究进展 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12 (8): 1867-1873.
- [5] 徐越, 李聪, 李盛文, 等. 涡桨飞机螺旋桨风洞测力的实验研究 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2020, 30 (2): 150-154.
- [6] 丁苗高, 张钊锋, 高格, 等. 面向桥式传感器的数字信号调理器 [J]. 仪表技术与传感器, 2016 (10): 62-65.
- [7] 王帆, 施洪昌, 盖文. 风洞测控技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2019: 90-107.
- [8] 林智慧. 虚拟仪器在数字电子技术实验中的应用 [J]. 电子制作, 2020 (Z1): 92-93, 36.
- [9] 舒海峰, 许晓斌, 孙鹏. 高超声速风洞多天平测力

试验技术研究 [J]. 实验流体力学, 2014, 28 (4): 49-53.

- [10] 吴小峰, 王飞, 叶永林. 风洞模型载荷实验测量系统开发与研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (3): 34-38, 43.
- [11] KUITCHE. Blade element momentum new methodology and wind tunnel test performance evaluation for the UAS-S45 Balaam propeller [J]. CEAS Aeronautical Journal, 2020, 11 (4): 937-953.
- [12] HUO G. Propeller driving force test system in FL-12 wind tunnel [J]. Ordnance Industry Automation, 2018, 37 (6): 23-27.
- [13] JIANG W X. Design of servo motor drive and control system used for wind tunnel test of propeller aircraft model [J]. Micromotors, 2013, 46 (7): 83-87.
- [14] 张琦. 基于 CAN 总线飞机螺旋桨滑流试验控制系统的研发与实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [15] 郭连平, 田书林, 蒋俊, 等. 高速数据采集系统中触发点同步技术研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24 (3): 224-229.
- [16] 宋巍巍, 韩杰, 周平. 风洞测力数据采集系统的设计和实现 [J]. 测控技术, 2015, 34 (12): 41-44, 48.
- [17] 李迎. 基于 PXI 的实时仿真测试系统构建技术研究 [J]. 计算技术与自动化, 2013, 32 (4): 28-32.
- [18] 黄昊宇, 黄辉, 凌忠伟, 等. 基于 PXI 总线的  $\Phi 0.5$  米高超声速风洞测量系统研制与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (9): 21-24.
- [19] 吕斌, 戴飞, 王艳芬, 等. 基于 Labview 虚拟仪器的导电滑环检测系统设计与研究 [J]. 现代制造工程, 2021 (1): 98-101.
- [20] 李江全, 刘恩博, 胡蓉, 等. Labview 虚拟仪器数据采集与串口通信测控应用实战 [M]. 北京: 北京人民邮电出版社, 2010: 237-263.
- [21] 徐传宝, 李聪, 李盛文, 等. 高雷诺数螺旋桨动力模拟风洞试验技术 [C] // 中国力学学会流体力学专业委员会, 2019 年全国工业流体力学会议论文集, 中国力学学会流体力学专业委员会: 北京航空航天大学陆士嘉实验室, 2019: 7.
- [22] YANG Y N. Propeller and inflow vortex interaction; vortex response and impact on the propeller performance [J]. CEAS Aeronautical Journal, 2016, 7 (3): 419-428.
- [23] 赵学训. 螺旋桨对飞机气动特性影响的试验研究 [J]. 空气动力学学报, 1993 (3): 251-256.