

doi: 10.7690/bgzdh.2026.02.005

螺旋桨飞机风洞试验动力参数实时监测系统

顾 艺, 霍 国, 叶 健, 宋 晋, 薛 伟

(中国空气动力研究与发展中心低速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对螺旋桨带动力试验系统地面调试问题, 设计一种螺旋桨动力参数实时监测系统。利用 NI 便携式数据采集系统测量螺旋桨天平信号, 通过创建虚拟仪器数据采集任务和表格化天平公式, 实时获得螺旋桨的拉力和扭矩等动力参数; 在地面调试时, 通过获取实测螺旋桨动力参数, 可实时掌握当前螺旋桨在不同桨叶角、转速工况下的负载特性, 结合对驱动器参数的监测获取电机出力性能。结果表明: 在风洞试验时, 该系统作为备份的快捷测试手段, 可帮助快速排除或定位数据测试方面的问题。

关键词: 螺旋桨飞机; 风洞试验; 动力参数; 实时监测

中图分类号: V211.44 **文献标志码:** A

Real-time Monitoring System for Dynamic Parameters of Propeller Aircraft in Wind Tunnel Test

Gu Yi, Huo Guo, Ye Jian, Song Jin, Xue Wei

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

Abstract: A real-time monitoring system for propeller dynamic parameters is designed to solve the ground debugging problem of propeller with power test system. The signal of propeller balance is measured by NI portable data acquisition system, and the dynamic parameters of propeller, such as tension and torque, are obtained in real time by creating virtual instrument data acquisition tasks and tabulating balance formulas; During ground debugging, the load characteristics of the current propeller under different blade angles and rotating speeds can be grasped in real time by obtaining the measured propeller dynamic parameters, and the motor output performance can be obtained by monitoring the driver parameters. The results show that the system can be used as a backup and quick test means to help quickly eliminate or locate data test problems in wind tunnel tests.

Keywords: propeller-driven aircraft; wind tunnel test; power parameters; real-time monitoring

0 引言

螺旋桨飞机具有推进效率高、经济性好的特点, 被广泛用作亚音速客机、运输机等; 同时还具有低速飞行时升力大、起降速度低的优点, 使其在军用运输机和前线飞机领域, 有着难以替代的地位和广阔的应用前景^[1]。螺旋桨动力系统对飞机性能影响很大, 在预测飞机气动特性、飞行性能时应充分考虑。该影响分为直接影响和间接影响: 直接影响主要指螺旋桨产生的力、力矩等动力参数; 间接影响指滑流影响, 是螺旋桨滑流与飞机各部件的相互作用引起的, 使飞机的升力、下洗和舵效均发生改变, 操纵性和稳定性都受到影响。必须在风洞中对螺旋桨飞机模型进行带动力试验, 获得螺旋桨动力对飞机性能影响的可靠数据^[2]。在带动力试验中, 需进行螺旋桨的动力模拟, 实现动力相似, 才可模拟其扰流特性。在风洞试验时, 通常用电机驱

动几何相似的定距螺旋桨, 但桨叶可在一个较宽的安装角范围内作调整, 通过改变桨叶角实现模型螺旋桨和实物螺旋桨在拉力系数 T_C 、扭矩系数 Q_C 、功率系数 C_P 上的一致, 从而实现螺旋桨动力的间接模拟^[3]。

螺旋桨带动力试验系统主要包括螺旋桨组件、电机、驱动器、控制系统和冷却系统等^[4]。按照试验流程, 首先要进行地面调试, 主要目的是掌握参试螺旋桨的负载特性, 验证其高速旋转的安全性, 并测试螺旋桨与电机的匹配性^[5]。螺旋桨的负载特性与桨叶角及转速有关, 电机在固定转速下驱动电压不变, 螺旋桨负载越大, 则驱动电流也越大; 因此, 通过监测电机电流可间接地了解螺旋桨的负载特性, 一般以不超过额定电流 80% 为安全边界。此方法考察的是输入端电能, 因耦合磁场能和热损耗的不确定, 无法确知实际输出的机械能; 因此, 对螺旋桨负载特性的认识是较为模糊的。当监测到驱

收稿日期: 2024-11-16; 修回日期: 2024-12-20

第一作者: 顾 艺(1975—), 女, 江西人。

通信作者: 霍 国(1982—), 男, 陕西人, 硕士。

动器参数发生不稳定现象时，也不易分辨是控制系统 PID 调节问题还是受到了负载端的影响，如螺旋桨的动平衡问题、部件组装的牢固可靠性问题等。

笔者设计一套螺旋桨动力参数实时监测系统：地面调试时，在电机后端加装螺旋桨专用天平，利用 NI 便携式数采系统测量天平信号，通过创建虚拟仪器数据采集任务和表格化天平公式，实时输出螺旋桨的拉力和扭矩等动力参数，可量化获取螺旋桨的负载特性；与驱动器参数的监测同步进行，可更为全面地掌握带动力试验系统在当前试验条件下的运行性能，为试验系统的安全稳定运行提供更为直观的指导，提高地面调试工作的质量和效率。进入风洞试验后，该系统可作为风洞测量系统的备份，当天平信号或试验数据出现异常时，以其即插即用的便捷性，可帮助快速排除或定位数据测试方面的问题，缩短排故时间，提高排故效率。

1 硬件构成

如图 1 所示，系统的硬件部分主要由螺旋桨专用天平、NI 9949 附件组、NI 便携式数采系统和实时监测计算机组成，可实现同时对 2 台螺旋桨动力参数的实时监测。

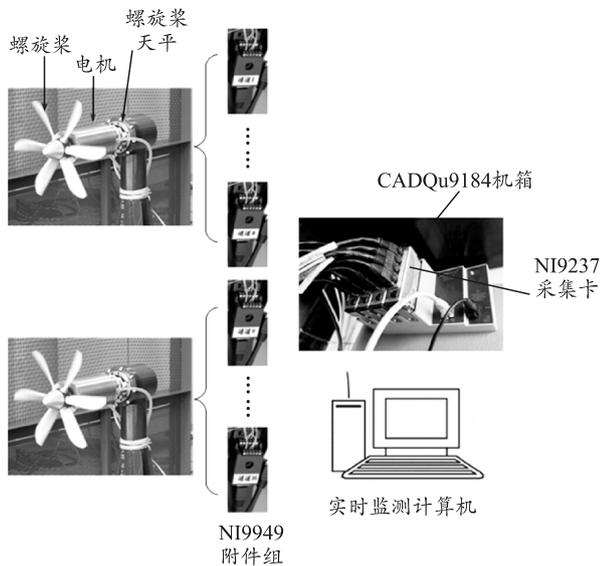


图 1 硬件构成

1.1 螺旋桨专用天平

如图 2 所示，某螺旋桨专用天平 DDL02 系列设计为四柱梁与两端固定梁组合结构形式，外形呈圆柱状，尺寸为 $\Phi 85\text{ mm}$ (直径) $\times 85\text{ mm}$ (长度)。四柱梁测量法向 Y、侧向 Z 载荷和滚转力矩 M_x 载荷，两端固定梁测量轴向 X 载荷和俯仰力矩 M_z 、偏航力矩 M_y 载荷。两端固定应变梁设计采用等强度梁

形式，能有效避免应力集中和应力变化梯度过大的问题，便于应变计粘贴和测量。采用柱销定位并以 6 颗 M5 螺钉与电机后端盖连接，确保安装准确可靠。中部设计直径 23 mm 通孔，安装导线套管，方便电机动力线缆和天平信号线缆走线，预留电机冷却水管通行开槽两处，中部安装保护罩保护应变计、测量元件及导线安全^[6]。

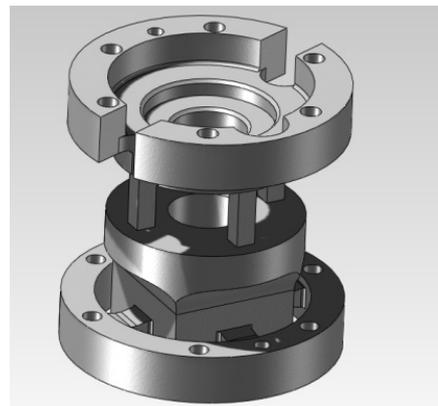


图 2 DDL02 系列天平 3 维结构

六分量电桥均采用惠斯顿全桥测量，设计了 8 组电桥，其中 X 分量用 4 组电桥组合输出， M_x 、 M_z 、 M_y 分量用 2 组电桥组合输出；Y 和 Z 分量以单一电桥输出。分量电桥组合及设计载荷如表 1 所示。为保障某风洞某 4 发螺旋桨飞机风洞试验，DDL02 系列天平共加工制作 5 台，其中 1 台备用。

表 1 DDL02 天平电桥组合及设计载荷

分量	电桥组合	设计载荷
Y/N	Y	300
X/N	$X_1+X_2+X_3+X_4$	400
$M_z/\text{N}\cdot\text{m}$	X_2-X_1	45
Z/N	Z	300
$M_y/\text{N}\cdot\text{m}$	X_4-X_3	45
$M_x/\text{N}\cdot\text{m}$	$M_{X1}+M_{X2}$	25

1.2 NI 9949 附件组

NI 9949 附件组由 16 组 NI9949 转接模块和配套 RJ50 线缆组成。NI9949 是一个将 RJ50 插头转螺栓端子的转接模块，在应变和桥基测量中，用于实现传感器端和测量模块的快速连接。天平电桥通过 NI9949 转 RJ50 的接线定义如表 2 所示。

表 2 天平电桥转 RJ50 接线定义

天平电桥	RJ50	天平电桥	RJ50
激励电压 EX+	4	激励反馈 RS-	7
激励电压 EX-	5	桥路信号 AI+	2
激励反馈 RS+	6	桥路信号 AI-	3

每组附件分别对应天平的一组电桥和测量模块的一个通道，共 16 组，实现 2 台螺旋桨专用天平共 16 组电桥至 NI 便携式数采系统 16 通道应变信号采

集模块的连接。

1.3 NI 便携式数采系统

针对应变信号采集，基于 NIcDAQ-9184 机箱及 NI9237 采集卡，搭建 NI 便携式数采系统。cDAQ 系列机箱具有总线供电功能，专为小型便携式传感器测量系统设计，其中 9184 为一款 4 插槽以太网连接机箱。NI9237 采集卡为一款 4 通道，24 位半桥/全桥模拟输入模块，带有 4 个 RJ50 插座，可提供 4 个半桥/全桥的连接和一个外部激励电压源，每个通道都带有一个独立的 24 位模数转换器和输入放大器，可同步放大 4 个通道的采样信号。连接全桥电路时，必须连接桥路信号 AI+/AI-、激励电压 EX+/EX-以及激励反馈 RS+/RS-等 6 路信号，负载端电压采样可连续地校正由激励导线引起的增益误差，采集模块对此进行自动补偿^[7]。

利用一个 NIcDAQ-9184 机箱搭载 4 块 NI9237 采集卡，实现 16 通道应变信号测量，满足 2 台螺旋桨专用天平信号采集。在实时监测计算机上安装 NI MAX 和 NIDAQmx 软件，即可连接机箱进行采集模块的配置和测试，通过编写用户软件来创建用户的采集任务。

2 软件设计

应用 LabWindows/CVI 编写了实时监测软件。采用模块化和结构化的设计理念，由主函数、子函数、控件回调函数来描述软件的结构、流程和算法。根据螺旋桨动力参数实时监测的需求，采用图形用户界面 (graphical user interface, GUI)，设计了试验与采集参数设置、天平信息配置与数据显示以及数据绘图显示 3 大界面区域，自左向右分布，如图 3 所示。

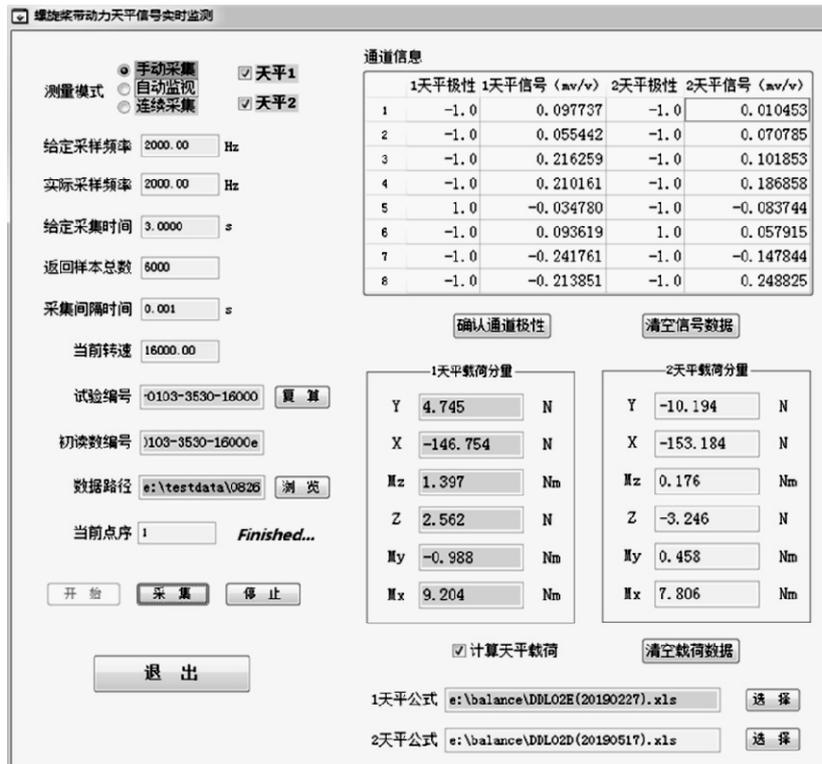


图 3 软件主界面

2.1 功能设计

1) 设计单/双螺旋桨监测应用场景，天平 1、2 分别默认连接 cDAQ-9184 插槽 1/2 和插槽 3/4 对应的 2 块 9237 采集卡，天平通道和采集卡通道默认按顺序连接，勾选天平后将自动创建对应的 NI DAQ 采集任务；

2) 设计手动采集、自动监视、连续采集 3 种测量模式，分别对应单次点击采集、间断循环采集和

不间断连续采集；

3) 设计天平通道极性配置功能，使其桥路电压变化趋势 (增大或减小) 符合对应的应力方向 (正向或负向)，当执行采集任务时，自动进行通道极性转换；

4) 将天平公式表格化，在采集任务前将系数数组读入内存，执行采集任务后进行实时计算；

5) 实时显示天平通道信号数据和曲线图，实时

显示天平分量数据和点绘图；

6) 在已知试验条件下，对已有采集数据进行复算，复算至螺旋桨动力参数。

2.2 流程设计

软件工作流程如图 4 所示。

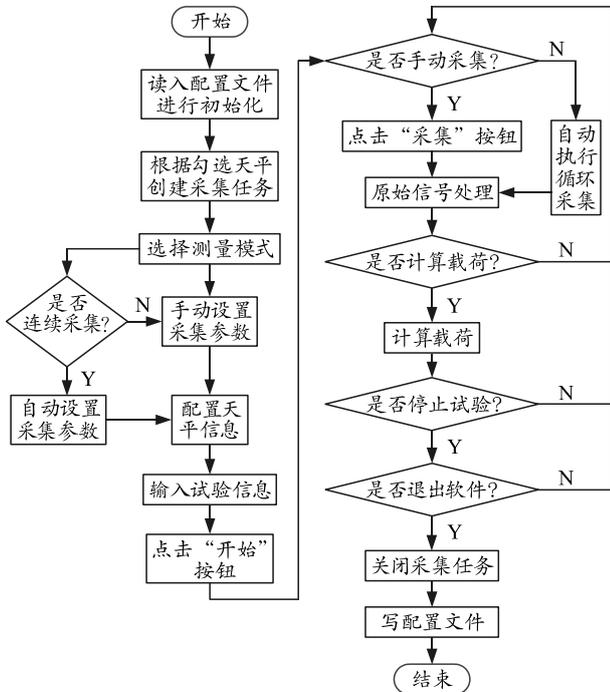


图 4 软件工作流程

通过读取配置文件对软件参数设置进行初始化，根据勾选天平情况自动创建采集任务，按照不同的测量模式进行采集参数设置及开展采集和实时计算、显示的任务，并按约定格式进行数据存储。

2.3 采集任务主要函数

1) CreateDAQTaskInProject()。

该函数用于在项目工程中创建 DAQ 采集任务，返回任务句柄，通常利用 CVI 的 Tools 中的 Create/Edit DAQmx Tasks 编辑通道配置后自动产生，再根据用户需要进行定制化修改，例如本项目就涉及对天平勾选的判断与对应处置。该函数包含创建模拟输入应变通道的子函数，用于定义通道物理地址、通道名、输入范围、电桥连接方式、激励源、激励电压、桥阻值等参数，典型的通道配置函数如下：

```
DAQmxCreateAIStainGageChan(
taskOut, //任务句柄
"cDAQ9184-1ACB9BDMOD1/ai1", //物理地址
"strain1_1", //通道名
-0.025, 0.025, //输入范围
```

```
DAQmx_Val_Strain, //应变信号
DAQmx_Val_FullBridgeI, //全桥
DAQmx_Val_Internal, //内部激励
5,1,0,350,0.3,0,""); //激励电压等
```

2) DAQmxCfgSampClkTiming()。

该函数用于设置采集参数，根据用户在界面输入的给定采样频率和给定采样时间进行采集参数设置，函数具体如下：

```
DAQmxCfgSampClkTiming(
taskHandle, //任务句柄
"", //时钟源，缺省为主板时钟
dAcqFreq, //给定采样频率
DAQmx_Val_Rising, //采样时钟上升沿有效
```

```
DAQmx_Val_FiniteSamps, //有限样本
dAcqTime*dAcqFreq); //给定样本总数
```

NI 9237 的采样率 f_s 取决于主时基频率 f_M ，其内部带有一个频率为 12.8 MHz 的主时基，可用采样频率根据以下公式计算：

$$f_s = \frac{f_M \div 256}{n} \quad (1)$$

式中 n 为 1~31 的任意整数，而用户给定的采样频率并不正好为可用采样频率；因此，通常在设置采样参数后立刻调用 DAQmxGetTimingAttribute 函数获取实际采样频率并显示在界面上，供用户知晓及根据需要调整。

在“手动采集”测量模式下，用户可任意设置有效的采样频率和采集时间，采集间隔时间设置无效；在“自动监视”测量模式下，按用户设定的采集间隔时间自动循环执行给定采样频率和采集时间的采集任务；在“连续采集”测量模式下，软件将采样频率自动设置为 2 000 Hz、采集时间设置为 0.05 s、采集间隔时间设置为 0.001 s，自动循环执行的采集任务近似不间断地连续采集数据，可达到连续监测的效果。

3) DAQmxReadAnalogF64()。

该函数用于读取当前模拟信号数据，即执行采集动作，函数具体如下：

```
DAQmxReadAnalogF64(
taskHandle, //任务句柄
iSampleNum, //给定样本数目
-1, //读取所有数据
DAQmx_Val_GroupByScanNumber, //排序方式
```

ddataArray, //返回数据数组
*iTotal ChNm*iSample Num*, //读取数据总数
 &*iRead Sample Num,0*); //返回样本数目

由于返回数据数组 *ddataArray* 在执行采集前按给定样本数目已完成动态分配, 在采集后也须将返回样本数目显示在界面上, 供用户知晓及根据需要调整。

2.4 天平公式表格化

天平公式格式为^[8]:

$$F_i = K_{i1}N_i + K_{i2}N_i^2 \quad (2)$$

式中:

$$N_i = \Delta N_i - \sum_j (K_{ji1} \cdot F_j + K_{ji2} \cdot F_j^2) - \sum_{m,n} K_{mni} \cdot F_m \cdot F_n \quad (3)$$

式中: F_i 为各分量载荷大小; ΔN 为组合后各分量末

读数减初读数; K_{i1} 、 K_{i2} 分别为各分量的主系数和平方项系数; K_{ji1} 、 K_{ji2} 分别为 j 分量对 i 分量的一次干扰系数和平方干扰系数; K_{mni} 为 m 和 n 分量对 i 分量的交叉干扰系数; $i=\{X、Y、Z、Mx、My、Mz\}$; $j=\{X、Y、Z、Mx、My、Mz\}$, $j \neq i$; $m=\{X、Y、Z、Mx、My、Mz\}$; $n=\{X、Y、Z、Mx、My、Mz\}$, $n \neq m$ 。

由表 1 可知: 天平六分量与 8 组电桥输出信号之间存在一对一或一对多的对应、组合关系。以 DDL02 D 天平为例, 各分量与各桥对应关系如下:

$$Y=+B_2; X=+B_5+B_6+B_7+B_8; Mz=+B_7-B_6;$$

$$Z=+B_1; My=+B_8-B_5; Mx=+B_3+B_4 \quad (4)$$

设计了一张 69 行*7 列的表格, 用于存储天平通道组合及主项、单分量干扰项、交叉干扰项的一次项、二次项系数, 如图 5 所示。

	A	B	C	D	E	F	G
1		Y	X	MZ	Z	MY	MX
2	C ₁	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3	C ₂	1.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
4	C ₃	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.00000E+00
5	C ₄	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.00000E+00
6	C ₅	0.00000E+00	1.00000E+00	-1.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7	C ₆	0.00000E+00	1.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.00000E+00	0.00000E+00
8	C ₇	0.00000E+00	1.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-1.00000E+00	0.00000E+00
9	C ₈	0.00000E+00	1.00000E+00	1.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
10	C ₉	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
11	C ₁₀	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
12	K ₁₊	2.09750E-01	1.32440E-01	3.66360E-03	2.09350E-01	3.80300E-03	2.36030E-03
13	K ₁₋	2.09750E-01	1.32280E-01	3.66360E-03	2.09350E-01	3.81070E-03	2.36030E-03
14	K ₂₊	1.34380E-07	0.00000E+00	-5.61340E-10	0.00000E+00	4.71150E-10	0.00000E+00
15	K ₂₋	1.34380E-07	0.00000E+00	-5.61340E-10	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
16	K _{x1+}	0.00000E+00	2.23430E-02	9.13950E+00	-1.48030E-01	0.00000E+00	0.00000E+00
17	K _{x1-}	0.00000E+00	2.08830E-02	9.13950E+00	-1.56800E-01	0.00000E+00	0.00000E+00
18	K _{y2+}	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-8.30400E-05	0.00000E+00	0.00000E+00
19	K _{y2-}	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-1.53680E-04	0.00000E+00	0.00000E+00
20	K _{z1+}	-5.21830E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	7.20310E-04	1.33730E-01	0.00000E+00
21	K _{z1-}	-5.21830E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	-3.83150E-03	4.68260E-03	0.00000E+00
22	K _{mx1+}	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-3.10780E-04	0.00000E+00
23	K _{mx1-}	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
24	K _{my2+}	-6.29830E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.65400E-01	-3.70390E-01	-5.56270E-01
25	K _{my2-}	-6.29910E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.63660E-01	-3.70390E-01	-5.56270E-01
26	K _{mz2+}	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
27	K _{mz2-}	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
28	K _{x1+}	-1.10960E-01	-3.14100E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	-8.72330E+00	0.00000E+00
29	K _{x1-}	-1.10350E-01	-3.01840E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	-8.72330E+00	0.00000E+00
30	K _{y2+}	0.00000E+00	4.38840E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
31	K _{y2-}	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
32	K _{my1+}	-8.68070E-02	8.82170E+00	9.78150E-01	7.36860E+00	0.00000E+00	-4.58940E-01
33	K _{my1-}	-8.68070E-02	9.15360E+00	9.78150E-01	7.35870E+00	0.00000E+00	-4.58940E-01

图 5 DDL02 D 天平公式 (部分)

由图 5 可知: 表格第 1 行为分量名称, 第 1 列为参数名称; C₁~C₁₀ 表示预留了 10 个通道位置进行组合, 1 表示“+”相关, -1 表示“-”相关, 0 表示与该通道无关; 其余参数名称与天平公式中的描述一致。该表格以 Excel 文件形式编辑和存储。

在勾选了“计算天平载荷”的前提下, 当开始执行试验任务时, 软件通过调用 Excel 插件将天平公式表内数据读取至全局变量, 当执行采集任务后,

自动进行天平载荷的计算, 将计算结果显示在界面相应控件供监视, 并按约定格式存储至数据文件。

3 地面调试应用

在某带动力试验地面调试任务中, 应用该系统开展了螺旋桨动力参数实时监测, 共有 5 台电机及配套驱动控制系统、7 副螺旋桨、2 台螺旋桨专用天平参与调试。

图 6 给出了某螺旋桨 5 个桨叶角在 2 000~13 000 r/min 转速下的扭矩-转速曲线，图 7 给出了 25°~45°桨叶角在 4 个转速下的拉力-桨叶角曲线，反映了其典型工况在无来流条件下的自身载荷趋势。

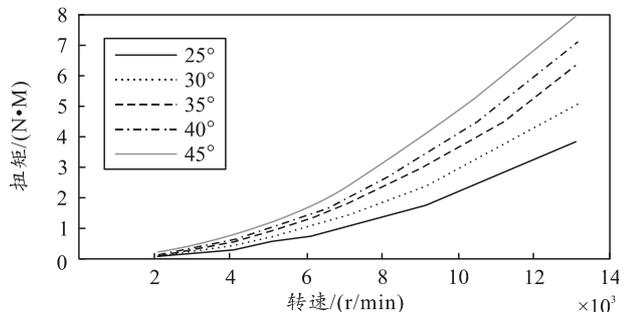


图 6 某螺旋桨典型工况扭矩-转速

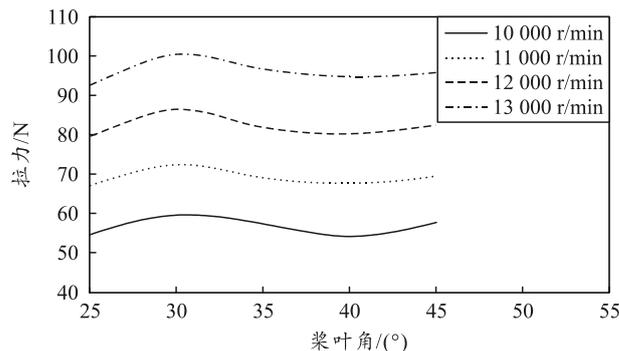


图 7 某螺旋桨典型工况拉力-桨叶角

表 3—4 给出了 2 副螺旋桨在部分典型负载工况下的调试数据。其中，以实测螺旋桨扭矩为电机扭矩，按下式计算得到电机实际输出功率：

$$P_{\text{电机输出}} = \frac{\text{转速} \times \text{螺旋桨扭矩}}{9\,550} \quad (5)$$

表 3 1#电机-3#螺旋桨调试数据

试验内容		驱动器参数		E 天平测量及计算结果		
桨叶角/(°)	电机转速/(r/min)	电压/电流/(V/A)	电机输入功率/kW	拉力/N	扭矩/(N·m)	电机输出功率/kW
21	14 000	322/10.1	5.634	119.0	3.464	5.078
	16 000	345/13.2	7.857	130.8	4.609	7.722
25	14 000	325/12.5	6.945	111.1	4.429	6.493
	16 000	354/16.7	10.087	143.0	5.854	9.808
30	14 000	326/16.5	9.131	115.1	5.939	8.706
35	13 000	318/17.0	9.036	96.8	6.020	8.195
40	13 000	314/20.2	10.713	92.5	6.892	9.382
45	12 000	294/19.3	9.548	75.8	6.719	8.443

表 4 2#电机-5#螺旋桨调试数据

试验内容		驱动器参数		D 天平测量及计算结果		
桨叶角/(°)	电机转速/(r/min)	电压/电流/(V/A)	电机输入功率/kW	拉力/N	扭矩/(N·m)	电机输出功率/kW
25	14 000	324/12.7	7.013	135.0	4.480	6.568
	16 000	360/16.5	10.148	148.9	5.982	10.022
30	14 000	326/17.2	9.490	122.1	6.293	9.225
	16 000	355/22.1	13.800	158.4	7.927	13.281
35	16 000	358/25.7	16.400	147.0	9.348	15.662
40	15 000	353/26.3	15.200	123.1	9.372	14.720
45	12 000	300/19.3	9.691	79.9	7.059	8.870
	14 500	352/28.0	16.000	116.0	10.240	15.548

驱动器参数为转速稳定状态(±1 rpm)下记录的仪表瞬时值，具有一定的波动性和时延性，而天平测量数据为一定时间周期内的平均值(本次调试为 10 s 均值)，更为准确、真实地反映了带动力试验系统的运行性能。

另外，螺旋桨天平信号的时间历程绘图可反映系统运行状态的稳定性，当出现异常尖峰信号或低频周期信号时，提示可能有异常振动或电磁干扰，应尽快停止试验开展相关检查。

4 结论

该系统实现了螺旋桨带动力试验系统的地面调试阶段双发螺旋桨动力参数的实时监测，改变了仅靠监测电机电流来定性掌握螺旋桨负载特性和电机

工作性能的传统手段，将螺旋桨负载特性进行量化输出，为优化设备控制参数和确保设备安全稳定运行提供了更为直接的指导，还可提前掌握电机系统对天平弱电信号的电磁干扰和电机温升对天平信号的影响等问题，提高了地面调试工作的质量和效率。在风洞试验时，该系统作为备份的快捷测试手段，还可帮助快速排除或定位数据测试方面的问题。总之，该系统具有较好的工程应用价值，在螺旋桨飞机风洞试验中发挥了重要作用。

参考文献：

- [1] 毛珺. 飞机螺旋桨设计与气动特性及滑流影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016: 3-5.
- [2] 张晖. 螺旋桨动力模拟试验标准化流程[G]. 绵阳: 中

国空气动力研究与发展中心低速所, 2020: 1.

[3] 王勋年. 低速风洞试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 157.

[4] 张卫国. FL-12 风洞勤务指南[G]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心低速所, 2018: 105-118.

[5] 霍国, 王政, 刘晓林, 等. 单机螺旋桨带动力试验系统研制[J]. 兵工自动化, 2020, 39(11): 27-31, 52.

[6] 薛伟. 4 米×3 米风洞螺旋桨带动力天平 DDL02 设计报告[R]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心低速所, 2012: 6.

[7] 美国国家仪器有限公司(NI). NI9237 使用说明和产品规范[Z/OL]. <https://www.ni.com/china>.

[8] 李付华. DDL02 D 天平校准证书[Z]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心低速所, 2019: 3.

(上接第 15 页)

参考文献:

[1] 齐乃明, 张文辉, 高九州, 等. 空间微重力环境地面模拟试验方法综述[J]. 航天控制, 2011, 29(3): 95-100.

[2] 从强. 空间机构地面重力补偿设备跟踪研究[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(1): 92-99.

[3] 励红峰. 零重力多维展开试验装置研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015: 8-17.

[4] 丁敏. 大跨度伸缩式零重力模拟试验装置设计与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 7-28.

[5] 侯鹏, 李志慧, 宋涛, 等. 卫星太阳翼板面水平展开试验方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(10): 176-182.

[6] 李海月, 程泽, 赵丹妮, 等. 基于悬吊法和气浮法的多自由度微重力模拟展开试验系统研究[J]. 工程设计学报, 2020, 27(4): 508-515.

[7] 任守志, 商红军, 贾文文, 等. 二维展开太阳翼地面展开试验装置设计与验证[J]. 航天器工程, 2022(1): 56-63.

[8] 梁论飞, 高学海, 王学谦, 等. 空间望远镜展开机构地面试验系统设计[J]. 传感技术学报, 2020, 33(11): 1661-1666.

[9] 鄢青青, 刘卫, 满剑锋, 等. 火星车转移坡道机构展开

策略分析与验证[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(5): 445-449.

[10] 吴上生, 陈拓, 兰侨. 基于违约稳定法的剪式可展机构展开过程分析与仿真[J]. 机电工程技术, 2022, 51(5): 1-5.

[11] 张书洋, 张朴真, 倪彦硕, 等. 低重力环境下基于超弹性铰链的某折展机构展开动力学研究[J]. 空间电子技术, 2021(5): 46-52.

[12] 张静, 郭宏伟, 刘荣强, 等. 空间含铰可展桁架结构的非线性动力学建模与分析[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(11): 113-119.

[13] NOBUAKI N, SHOICHI L, YOSHIKI T, et al. Design and experimental production of small deployable mesh type reflector antenna[C]//44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Norfolk: AIAA, 2013: 1581-1589.

[14] SCHULTHEI D. Gravity compensation of deployable solar arrays for small spacecraft[D]. Cambridge: University of Cambridge, 2003.

[15] SHEN Y, MONTMINY S, ZHENG W P. Large SAR membrane antenna deployable structure design and dynamic simulation[C]//48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Norfolk: ALAA, 2007.

[16] YANG G Y, WANG H G. Gravity Unloading Precision Analysis of Air Bearing Facility[J]. JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING, 2019, 55(5): 1-10.

(上接第 19 页)

[5] 孙宇. 数字化多道的设计与实现[D]. 北京: 清华大学, 2009.

[6] 张软玉. 数字化核能谱获取系统的研究[D]. 成都: 四川大学, 2006.

[7] 捷创核仪. NUWA 数字化多道[EB/OL]. (2023-12-09) [2025-06-20]. <https://www.jiechuangheyi.cn/Products/Pde/SMC/37.html>

[8] 郑秋鑫, 胡创业, 屈国普, 等. 基于 DDR+LVDS 接口国产 ADC 和 FPGA 的数字多道脉冲分析器研制[J]. 核电子学与探测技术, 2025(5): 1-8.

[9] 钱云琛. 基于尖顶成形的数字多道设计及能谱分析软件研发[D]. 抚州: 东华理工大学, 2023.

[10] 张效泳, 张怀强, 张佳俊, 等. 核脉冲信号数字梯形合成成形参数优化选取[J]. 核电子学与探测技术, 2025, 45(4): 541-546.

[11] 黄海西, 洪旭, 刘俊龙, 等. 基于有限冲激响应滤波器的高斯脉冲成形算法研究[J]. 核技术, 2024, 47(12): 55-64.

[12] QIN Z J, CHEN C, LUO J S, et al. A Pulse-Shape Discrimination Method for Improving Gamma-Ray Spectrometry Based on a New Digital Shaping Filter[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2018, 145(4): 193-201.

[13] 杨柳. 基于一种新型数字滤波成形算法的能谱仪实现[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.