

doi: 10.7690/bgzdh.2020.11.007

单机螺旋桨带动力试验系统研制

霍国, 王政, 刘晓林, 康洪铭, 叶健

(中国空气动力研究与发展中心低速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为提高风洞单发螺旋桨带动力试验效率, 设计搭建单机螺旋桨带动力试验系统。详细阐述系统组成, 从主控平台选择、信号接口电路设计、驱动器控制电路和反馈电路 4 方面介绍系统设计, 风洞螺旋桨带动力试验时采用零拉力控制, 并进行试验验证。结果表明: 该系统控制精度高, 电磁兼容性好, 自动化程度高, 可大幅提升试验效率, 试验准备时间由 48 h 缩短至 12 h, 并已在多期课题型号试验中得到成功应用。

关键词: 风洞; 螺旋桨带动力; 零拉力控制; 电阻; 效率

中图分类号: TP27 **文献标志码:** A

Development of Single Engine Propeller Test System

Huo Guo, Wang Zheng, Liu Xiaolin, Kang Hongming, Ye Jian

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

Abstract: In order to improve the efficiency of single propeller driving test in the wind tunnel, a single propeller driving test system was designed and built. The composition of the system was described in detail. The system design was introduced from four aspects: main control platform selection, signal interface circuit design, driver control circuit and feedback circuit. The results show that the system has high control accuracy, good electromagnetic compatibility and high degree of automation, which can greatly improve the test efficiency. The test preparation time has been shortened from 48 hours to 12 hours, and successfully applied in many tests.

Keywords: wind tunnel; propeller driving force; zero tension control; resistance; efficiency

0 引言

螺旋桨飞机由于具有起飞状态拉力大、巡航状态经济效率高等优点, 被广泛运用于小型低速飞机和中小型运输机, 在军用、民用应用领域占有重要地位, 发展势头迅猛。4 m×3 m 风洞是目前我国国内流场品质最好、试验能力最强的气动试验风洞, 成立以来承担了大量的重点型号试验任务, 其中包括各种型号的带动力试验^[1]。2012 年, 4 m×3 m 风洞螺旋桨带动力试验系统研制成功后, 风洞课题试验数量与日俱增。系统主要由 4 面驱动器柜、1 面控制柜、1 面监控柜、1 台上位机柜、10 台永磁交流伺服电机及 1 个不锈钢水站组成^[2], 子设备、线缆众多, 存在搬运工作量大、接线繁琐、重复工作等缺点。

风洞螺旋桨试验流程要求先在地面调试间进行调试, 摸清螺旋桨负载特性及安全性, 考核电机及控制系统性能是否正常; 地面调试完成后, 将控制系统、电机及水冷系统搬运至风洞现场, 再进行单桨水滴舱试验, 模拟发动机工作曲线, 选取螺旋桨桨叶角及电机拟运行转速; 最后进行全机测力试验,

以获得飞机在有滑流状态的气动特性^[3]。试验完成后要拆除系统, 搬回放置地, 整个过程中至少接、拆线 2 次, 搬运 3 次, 故工作量较大。另外, 近年来随着型号试验的发展变化, 单发螺旋桨带动力试验数量逐渐较多, 低速所不同风洞均有涉及。螺旋桨地面调试及单发风洞试验时均需要将原系统搬运接线, 准备时间至少 48 h, 严重影响风洞螺旋桨试验效率^[4], 急需一套单机螺旋桨带动力试验系统, 以满足地面调试、单发螺旋桨带动力风洞试验所需, 提升风洞试验效率。

笔者利用 1 台艾默生 SP3403 驱动器, 增配 NI 公司的 CDAQ 控制器、工业一体机、进线滤波器、制动电阻、水冷机、SM-Resolver 模块等设备搭建单机试验系统, 将试验准备时间大幅缩减, 解决了原系统长期存在的问题。

1 系统组成

如图 1 所示, 控制系统由 SP3403 驱动器、工业一体机、NI 公司 CDAQ 平台下的模拟量输入模块、数字 I/O 模块以及相应的手动控制按钮和面板显示仪表等组成。工业一体机与风洞管理系统上位

收稿日期: 2020-06-28; 修回日期: 2020-08-02

作者简介: 霍国(1982—), 男, 陕西人, 硕士, 工程师, 从事风洞螺旋桨带动力试验系统研究。E-mail: 120818603@qq.com。

机通过工业以太网进行连接，以上位机联机管理方式运行，也可以现场进行系统手动/自动控制，两者之间通过“手动/自动”旋钮进行切换。选择自动控制模式时，Labview 界面可完成对电机、驱动器参数设置，显示电机、驱动器、单机水冷的实时数据，并将数据存储在硬盘上。选择手动模式时，在面板上可以通过按钮和旋钮进行手动操作控制，面板仪表实时显示电机温度、转速，Labview 界面只作监视显示用。

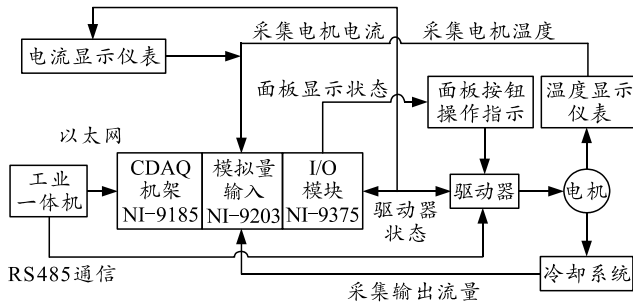


图 1 系统原理

自动控制过程中，需要增加模拟量输入模块，24 V 隔离 I/O 模块。考虑到系统的稳定性、抗干扰性及空间布置，选用 NI 公司导轨式安装的 CDAQ 模块式系统。该系统具有空间尺寸小、抗干扰性强、接线简单方便等特点。

1.1 SP3403 驱动器

根据 3 种永磁交流伺服电机最大额定电流为 35 A 的指标，综合成熟工程经验及现场条件，驱动器选取 CT 公司的 Unidrive SP3403 交流驱动器(高频版)，具有较好的兼容性，具备过流、过压、过热、超速等故障检测功能。该驱动器在正常负载时，8 kHz 载波频率下，最大可持续输出电流达到 56 A，满足 3 种电机的需求，并具备伺服控制模式。其主要参数设置如表 1^[5]所示。

表 1 SP3403 主要参数设置

| 参数 | 永磁交流伺服电机/kW | | |
|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | 12 | 15 | 18 |
| 额定电压/V | 380 | 380 | 380 |
| 额定电流/A | 25 | 30 | 35 |
| 极对数 | 3 对极 | 4 对极 | 4 对极 |
| 最高转速/(r/min) | 16 000 | 13 000 | 13 000 |
| PI 设置 | 0.01/0.5 | 0.002 5/0.1 | 0.002 5/0.1 |
| 制动电阻投入 | Pr0.15=FAST | Pr0.15=FAST | Pr0.15=FAST |
| 控制精度/(r/min) | ±1 | ±1 | ±1 |
| 最高频率/Hz | 800 | 867 | 867 |
| 载波频率/kHz | 8 | 8 | 8 |
| 激磁频率/kHz | 6 | 6 | 6 |
| 电压/V | 7 | 6 | 6 |

因本项目控制对象为带旋转编码器反馈装置的

永磁交流伺服电机，调速范围广(0~16 000 r/min)、稳态精度高(≤±1 r/min)；键盘选取 SM-Keypad，反馈装置选取 SM-Resolver 旋转变压器模块，确保了驱动器输出电压与电机反电动势相匹配，实现旋转变压器信号的转化，电机转速得到有效控制。伺服模式适用于带反馈装置的永磁无刷电机，电机速度由驱动器直接控制，藉此确保转子速度合乎要求。因电机磁场可由转子中的永磁体自激产生，故对磁通控制不作要求。为确保输出电压与电机反向电动势准确匹配，反馈装置必须提供绝对位置信息，始终提供满转矩输出(即使速度降为零)。

1.2 试验电机

试验电机为永磁交流伺服电机，功率分别为 18/15/12 kW^[6]，最高转速分别为 13 000/13 000/16 000 r/min，电机冷却方式均采用定子隔离外部强迫式水冷，均采用旋转变压器作为反馈器件，3 种电机激磁供电电压分别为 6 V/6 kHz、6 V/6 kHz、7 V/6 kHz；因此，需要对驱动器旋变模块励磁供电进行改造。

1.3 滤波器

外置 EMC 滤波器选取 Schaffner 公司的 4200-6305 正弦波进线滤波器，确保驱动器正常运行，对周围设备的干扰降至最低。

1.4 外部设备

原系统水站为不锈钢罐体，存在体积大、质量大、笨重和搬运不便等缺点，经过大量试验验证，单台电机所需水冷却流量约 3 L/min。考虑到轻便节能等因素，选取由同飞制冷公司生产的 MCW-15C/X-01-1225 精密电机水冷机。为防止电机在运转过程中，冷却机意外停机、管路漏水等意外状况对电机造成的损害，控制系统需实时监测电机冷却流量。在冷却机回路中增加涡流流量变送器，型号为 LWGB-10ZX，量程 0~12 L/min，输出信号为 4~20 mA，模拟量信号输送至 NI-9203 进行采集监控，同时在软件中增设系统逻辑控制、信号检测回路检测。

2 系统设计

伺服驱动主回路电路原理如图 2 所示。系统主回路中，三相工频交流电源经滤波器、空气断路器进入驱动器，通过交-直-交变频、变压后，驱动电机运转。通过驱动器控制键盘 SM-Keypad 进行给

定，并进行参数设置，在控制回路中，速度给定和来自电机旋转变压器反馈信号一同送至驱动器的速度调节器进行比较，运算后作为电机频率给定信号送至微处理器，微处理器对频率给定和电机频率/电压关系、电机电流进行综合运算，处理后控制逆

变器的输出频率和电压，使电机按给定转速稳定运行。系统增设外置 24 V 控制电源，可在主电源未加电时对控制电路供电，保证 SMAApplications 自动化模块、SM-Resolver 旋转变压器模块、电机旋转变压器以及通信正常工作，并可查看设置驱动器参数。

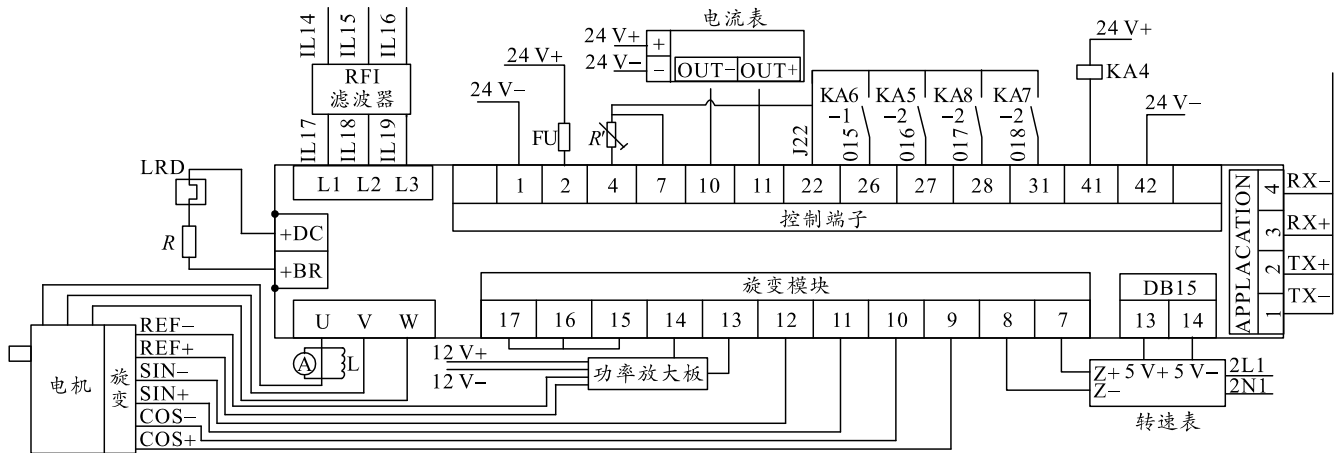


图 2 主回路电路原理

2.1 主控平台选择

主控平台选用 NI 公司 CDAQ 平台的 NI-9185 控制器。该控制器配置标准的以太网接口，可以在 -10~40 °C 工作，完全满足当前设计要求，有 4 路插槽，方便以后拓展。该系统具有空间尺寸小、抗干扰性强和接线简单方便等特点。

1) 模拟量输入模块。

模拟输入模块选用 NI-9203，具有 8 路模拟量输入电流采集模块，主要用于电机温升、电机电流、冷却系统流量的检测。

2) 数字 I/O 模块。

数字量输入/输出模块选用 NI-9375，具有 16 路隔离输入和 16 路隔离输出，主要用于系统开关量的检测、输出显示与控制，连接输入、输出信号，主要包括驱动控制柜上电信号、自动/手动信号、驱动器运行状态信号、驱动器使能信号、驱动器启/停信号、驱动器正反转信号、急停信号。

2.2 信号接口电路设计

伺服驱动器信号接口包括控制、通信和反馈 3 种，原理如图 3 所示。控制接口可完成手动/自动控制方式切换、驱动器禁止/使能状态、电机调速、电机启/停、电机正转/反转等操作。通信接口为 RS485 总线接口，旋转变压器反馈信号与驱动器 SM-Resolver 旋转变压器模块连接。当电机运行时，伺服驱动器旋变器接口输出脉冲信号到转速表，经系数换算显示电机转速，同时控制器读取驱动器相

关数据并在上位机界面显示。温度表通过电机中的 PT100 温度传感器测量显示电机绕组或后轴承温度，同时变送输出一路 4~20 mA 电流信号到数据采集模块。

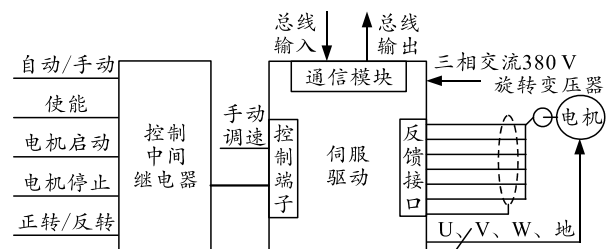


图 3 接口控制电路原理

2.3 驱动器控制电路

SP3403 驱动器控制端子有 2 排接线端子，功能主要包括模拟频率和速度的给定、温度传感器的输入、电压和电流的输出、正反转控制的选择、本地和远程控制的选择，以及驱动器的使能和复位功能等。根据实际需求，设计出如图 4 所示控制电路。

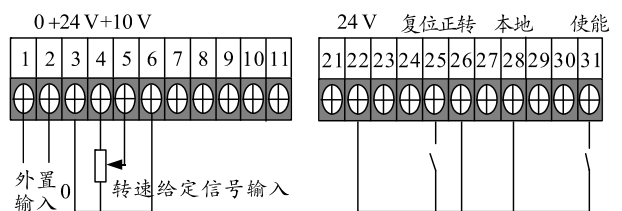


图 4 控制端子接线

端子 1、2 是控制电路外置供电电源 24 V 输入端。当市电电源供应中断时，该电源可用于调试驱动器并保证显示正常；端子 3~6 是实现电位计调节

转速给定信号，如果采用键盘按键直接输入，则全部悬空即可；端子 25 是复位端，当驱动器出现故障并排除时，可以按复位键进行复位；端子 26 和 27 分别是正转和反转控制模式的接线端子，在此选择正转控制模式并把端子 26 置高电位；端子 28 是本地和远程控制模式的接线端子，接通为本地模式，断开为远程模式，由于驱动器独立控制，选择本地控制模式并把端子 28 置高电位；端子 31 是驱动器使能端，接入一个旋钮开关用于启动与停止。

2.4 反馈电路

3 种不同功率的永磁交流伺服电机均为正弦波驱动，为此专门研制了 2 种磁阻式旋转变压器。因电机外形尺寸所限，电机转子轴向长度必须控制在一定范围内，这就要求转速反馈装置旋转变压器体积尽量小，轴向短。根据实际需求，选择 SM-Reslover 模块作为驱动器的反馈器件，并设计出如图 5 所示反馈电路。

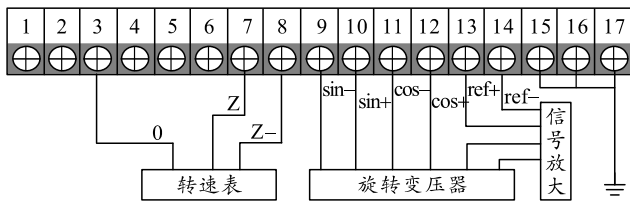


图 5 反馈电路接线

端子 7、8 输出实际转速的脉冲信号，接至 MPSW-4N 转速表可以实时显示转速值，端子 9~14 接至电机端的旋转变压器，分别为 sin-、sin+、cos-、cos+、ref+、ref-，其中 ref+、ref- 是激磁正弦电源，激磁电压为 6 V，激磁频率为 6 kHz，如果选择 12 kW 电机，则需要 7 V 激磁电源，要做信号放大处理。

3 零拉力控制

零拉力控制为风洞螺旋桨带动力试验时，风洞中气流作用于桨平面，模拟螺旋桨处于风车状态，同时让驱动器对电机进行电机转速控制，使拉力系数等于零。而且当电机的转速失控时，直流侧出现过高的泵升电压，容易造成驱动器的损坏。需要对系统进行功能扩展，使其具备零拉力控制能力^[6]。

3.1 零拉力控制原理

电机处于发电状态时，中间直流侧电压大于额定电压 U_e ，接通电阻，电阻将消耗掉电机产生的电能，从而控制住电机转速。图 6 为利用制动电阻实现零拉力控制电路。

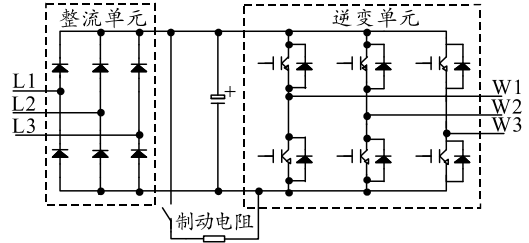


图 6 零拉力控制电路

3.2 主要参数计算

3.2.1 制动转矩

估算制动转矩，一般情况下制动转矩可由下式计算：

$$T_0 = ((J + J_f) \times (n_{前} - n_{后})) / (375 \times t) - T_{阻} \quad (1)$$

式中： J 为电机转动惯量， $kg \cdot m^2$ ； J_f 为螺旋桨负载侧折算到电机的转动惯量， $kg \cdot m^2$ ； $n_{前}$ 为稳定前速度， r/min ； $n_{后}$ 为稳定后速度， r/min ； T_0 为制动转矩； $T_{阻}$ 为负载阻转矩； t 为减速时间。

由于电机负载侧折算到电机侧的转动惯量及负载阻转矩较难估算，制动转矩的估算过程具体为：

1) 在实际试验条件下(常用桨叶角、零攻角、零侧滑，风速 40 m/s 等)，电机在外部转矩的作用下(风洞试验吹风状态下螺旋桨处于自由状态)能转到的最高转速： $n \approx 5\,000\ r/min$ ；

2) 电机达到转速所需的时间 $t=40\ s$ ；可计算出电机在恒转矩条件下的额定电磁转矩：

$$T_1 = P / \Omega = P / 2\pi n = 7.1 \quad (2)$$

其中： n 为电机最高转速， r/min ；电机最高转速为 16 000 r/min ； P 为电机额定功率，W，此处按照 12 000 W 代入计算。

同时也可知道电机在电磁力矩作用下达到此转速所需的时间。因驱动器加减速率设置为 8 s/1 000 r/min ，则电机达到此转速所需时间 $t=16\,000 \times 8 / 1\,000 = 128\ s$ 。在这 2 种情况下，电机最终具有的惯动转量一样，由此可以估算出所需要的制动转矩约：

$$T_2 = (40 / 128) T \approx 2.53\ N \cdot m$$

式中 T 为电机额定转矩，12 kW 电机额定转矩为 8.1 $N \cdot m$ 。

一般情况下，在进行电机制动时，电机内部存在一定的损耗，约为额定转矩的 18%~22%，因此，计算出的结果若小于此范围，就无需接制动装置^[7]；超出，则需另接制动电阻。该系统所需制动转矩大于损耗，所以需要接入额外的制动电阻。

3.2.2 制动电阻的阻值

在风洞中进行螺旋桨带动力试验模拟零拉力状态时，电机处于风车状态运行，螺旋桨会因高风速产生的机械能经电机发生能量转化，此时驱动器处于吸收功率状态，逆变器中的二极管将能量反馈到驱动器直流侧，逆变器为整流状态。当 SP3403 驱动器长时间处于吸收能量状态，此时驱动器直流侧中电容器的电压会上升，会导致直流侧电压过高，电机转速控制不稳，从而导致驱动器故障。

$$R=U^2/(0.1047(T_0 \times 20\%)). \quad (3)$$

式中： R 为电阻， Ω ； U 为制动单元动作电压值， V ； T_0 为制动转矩， $N \cdot m$ 。

当电机转速失控，处于发电状态时，直流侧的典型电压约为 650 V，根据式(3)，估算出电阻 $R \approx 1.68 \text{ k}\Omega$ ，结合前期工程经验，选取电阻阻值为 1.8 k Ω 。电阻为波纹电阻，采用陶瓷管作为骨架，用波纹状合金电阻丝均匀绕制，将电机的再生电能转化为热能，同时也具有散热器的功效^[8]。

3.2.3 制动电阻功率

为防止风车状态时烧坏制动电阻，螺旋桨反馈功率不能超过电阻的额定功率，根据 $P=U^2/R$ ，估算出电阻工作时的最大功率来选择标称功率，根据风洞中成熟的工作经验，选取制动电阻最大消耗功率为 300 W，可满足使用要求，螺旋桨能够在目标转速稳定运行。

制动时，能量由电机返回驱动器，通常驱动器制动电机时，驱动器所吸收的最大回馈能量等于驱动器功耗，回馈能量大于驱动器功耗时，驱动器母线电压增加。缺省状态下，驱动器以 PI 调节器控制制动电机，必要时 PI 调节器会延长减速时间，以避免母线电压超出用户定义设定点。若要驱动器迅速降低负载或控制位能负载，则必须安装制动电阻器，400 V 驱动器制动单元启动电压阈值直流母线电压为 780 V，若采用制动电阻器，则需设定 Pr0.15 为 FAST 斜坡模式，电阻器的短时过载时间参数 10.30 设为 100 s，电阻器短时过载之间的最短时间间隔参数 10.31 设为 200 s^[9]。

4 软件设计

一体机软件选用 labview2018 软件进行设计与操作。根据系统设计要求，分别为主界面、运行界面、数据回放界面和故障查询界面组成。系统操作控制界面包括对当前试验中要求的数据进行显示功

能。当系统处于“自动”状态时，方可对电机控制，当系统处于“手动”状态时，该界面只是显示界面，无法对电机进行操作控制。

运行界面如图 7 所示。运行界面包括电机和驱动器参数显示、操作监控、数据曲线显示和参数设定 4 个部分。当系统处于“自动”状态时，方可控制电机。当系统处于“手动”状态时，该界面只是显示界面，无法对电机进行操作控制。电机和驱动器参数显示部分主要显示电机当前运行状态的转速、电流值、电压值、驱动器母线电压、输出功率和故障报警信息，这些参数都是直接从驱动器读出；电机温度通过数据采集进行采集完成，当显示值大于设置报警值时，该数据显示框红色闪烁。操作监控部分主要是电机运行时，使能、启动/停止、电机转速给定的操作，以及显示当前系统的手动/自动控制状态。电机转速是通过“确定”按钮进行指令的发送。当驱动器出现故障后，故障指示灯亮，显示当前故障信息，同时显示当前数据采集保存的文件地址，该地址以时间进行命名。参数设置部分是设置和读取驱动主要参数、电机运行保护值。系统运行时，驱动器参数从驱动器中直接读出，当参数修改完成点击“写入”按钮后，将参数写入驱动器。当系统运行时，数据曲线显示界面以曲线的方式显示当前数据值。当电机没有运行时，点击“打开文件”按钮，打开保存的数据文件，可以进行数据回放。同时界面还显示当前系统运行时间以及系统累加时间。



图 7 运行界面

5 风洞应用结果

图 8 为某型飞机水滴舱单桨风洞试验照片。试验过程中，单机螺旋桨带动力试验系统驱动电机及螺旋桨按照目标转速运转，累计运行 3 h，均能完成 3 000 r/min 以上转速控制精度高于万分之五的驱动控制目标，转速波动均在 ± 1 转的范围内。电机稳态拉力系数 T_c 最高可模拟至 0.2，重复性精度也达到了国军标要求。系统研制以来，累计完成某验证机地面调试、某翼型增升风洞等试验 3 项。