

doi: 10.7690/bgzdh.2018.06.006

FL-12 风洞螺旋桨带动力试验系统

霍 国^{1,2}, 康洪铭¹, 刘晓林^{1,2}, 王 政¹, 陈辅政¹

(1. 中国空气动力研究与发展中心低速所 103 室, 四川 绵阳 621000; 2. 西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为提升 FL-12 风洞螺旋桨带动力试验能力, 研制一套螺旋桨带动力试验系统。该系统主要用于模拟螺旋桨滑流特性及非对称动力状态下飞机的气动特性。介绍试验装置系统组成和设计, 并分析地面调试结果。结果表明: 该系统在转速控制精度和系统自动化程度等方面有很大提高, 部分技术指标达到国际先进水平。

关键词: 风洞; 螺旋桨带动力; 驱动器; 计算机控制; 调试

中图分类号: TP206⁺.1 **文献标志码:** A

Propeller Driving Force Test System in FL-12 Wind Tunnel

Huo Guo^{1,2}, Kang Hongming¹, Liu Xiaolin^{1,2}, Wang Zheng¹, Chen Fuzheng¹

(1. No. 103 Laboratory, Low Speed Institute, China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China; 2. School of Information Engineering, Southwest University of Science & Technology, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to improve the capability of propeller driving force of FL-12 wind tunnel, a propeller driving force test system is developed in the FL-12 wind tunnel. This system is mainly used for the simulation of propeller slipstream features and the asymmetric aerodynamic characteristics. This paper mainly introduces the system composition and the system design, the ground debugging results are analyzed at the same time. The results show that the system has greatly improved the speed control accuracy and the degree of system automation, and some technical indexes have reached the international advanced level.

Keywords: wind tunnel; propeller driving force; driver; computer control; debug

0 引言

FL-12 风洞是我国目前流场品质最好、试验能力最强的一座回流式闭口试验段低速风洞, 自建立以来, 承担了大量的飞机型号试验, 螺旋桨带动力试验是其中一项^[1]。飞机螺旋桨带动力试验主要是为获得螺旋桨滑流特性对飞机气动特性的影响, 为飞机设计、气动特性预测和飞行性能评估提供可靠的试验数据^[2]。FL-12 风洞螺旋桨带动力试验系统研制以来, 大力提升了 FL-12 风洞螺旋桨带动力试验能力, 成功在多个型号试验中得到应用, 如运八系列飞机、蛟龙 600、某型无人机和风力机等型号试验^[3]。

1 关键技术取得的进步

1) 电机采用永磁交流伺服电机方案, 功率密度达到 2 kW/kg, 达到国际先进水平。

2) 控制系统精度高: 4 000~13 000 r/min, 0.05%; 650~4 000 r/min, 0.1%。

3) 采用 PLC 控制, PROFIBUS 总线通信, 自动化程度高, 对主要变量实时监控, 安全可靠。

4) 电磁兼容性好, 不影响其他弱电系统工作, 可同步运行。

2 系统组成

动力系统由 4 面驱动器柜、1 面控制柜、1 面监控柜、7 台永磁交流伺服电机和电机水冷系统组成^[4], 系统组成见图 1。

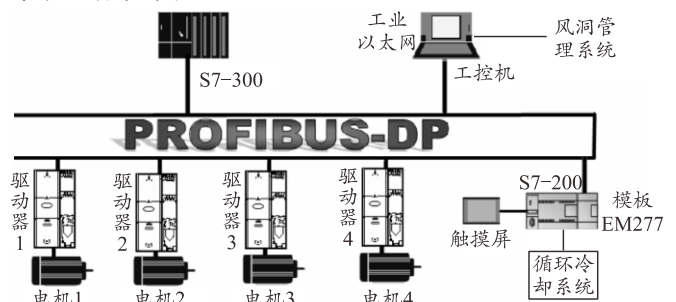


图 1 系统组成

2.1 永磁交流伺服电机研制

2.1.1 电机参数选取

根据 GJB6753 电机功率选取公式如下:

$$P_{\max} \geq 1.2 P_c k_m^2 \frac{\rho_s v_s^3}{\rho_c v_c^3} \quad (1)$$

收稿日期: 2018-04-05; 修回日期: 2018-04-23

作者简介: 霍 国(1982—), 男, 陕西人, 学士, 工程师, 从事风洞动力系统运行研究。

其中：修正系数 1.2 由试验方法引入，考虑了桨模型效率减小、桨轴偏离来流等； P_c 为模拟对象功率； k_m 为模型比例； ρ_s / ρ_c 为试验与飞行环境空气密度比，直接置为 1； v_s / v_c 为试验与飞行速度比，FL-12 风洞取 0.8^[5]。式(1)变为

$$P_{\max} \geq 0.6144 P_c k_m^2 \quad (2)$$

螺旋桨带动力试验影响因素一般包括模拟对象转速、模型比例、试验风速、试验环境和试验方法等。GJB6753 提供的估算公式为：

$$n_{\max} \geq 1.05 \frac{60v_s}{\lambda_{\min} D_p} = 1.05 \frac{v_s}{v_{c\min}} n_c / k_m; \quad (3)$$

$$n_{\min} \geq 0.95 \frac{60v_s}{\lambda_{\max} D_p} = 0.95 \frac{v_s}{v_{c\max}} n_c / k_m \quad (4)$$

其中：修正系数 1.05、0.95 由试验方法引入； n_c 为模拟对象转速； k_m 为模型比例； $v_s / v_{c\max} \approx 40 / v_{c\text{巡}}$ ，FL-12 风洞螺旋桨带动力试验常用风速 40 m/s^[6]。几款经典机型参数见表 1。由上述公式计算得出 FL-12 风洞电机参数需求见表 2。

表 1 几款经典飞机参数

飞机特性	E-2D	冲锋 8	A-400M	US-2	C-130J	Tu-95	AN-70
翼展/m	24.56	28.42	42.36	33.15	40.41	50.04	44.06
起飞质量/kg	26 083	29 256	136 500	47 700	74 389	185 000	145 000
巡航速/(km/h)	602	667	753	470	657	711	750
功率/kW	3 917	3 781	8 206	3 357	3 424	11 025	10 440
数量	2	2	4	4	4	4	4
桨直径/m	4.11		5.34	4.42	4.11	5.6	4.5
桨形式	8 叶	6 叶	8 叶	6 叶	6 叶	4/4 对转	8/6 对转
桨转速/(r/min)	1 069	1 020/850	689	1 092	1 014	698	822

表 2 电机参数需求

FL-12 风洞特性	E-2D	冲锋 8	A-400M	US-2	C-130J	Tu-95	AN-70
模型展宽比	0.512	0.592	0.588	0.592	0.674	0.626	0.612
模型比率	0.083	0.083	0.056	0.071	0.067	0.050	0.056
模型比率倒数	12	12	18	14	15	20	18
电机功率/kW	17	16	16	11	9	17	20
最高转速/(r/min)	10 282	10 421	12 839	12 771	11 725	12 423	12 423
最低转速/(r/min)	1674	1 803	3 559	2 533	2 149	2 158	2 158

结合目前国内电机制造水平及风洞试验现状，确定 FL-12 风洞螺旋桨带动力试验电机参数：

电机尺寸： $\Phi 85 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ ， $\Phi 85 \text{ mm} \times 190 \text{ mm}$ ；

电机额定功率：15 kW，18 kW；

额定电压/电流：三相，380 V/40 A/50 A；

额定转速：13 000 r/min；

额定转矩：11/13 N m；

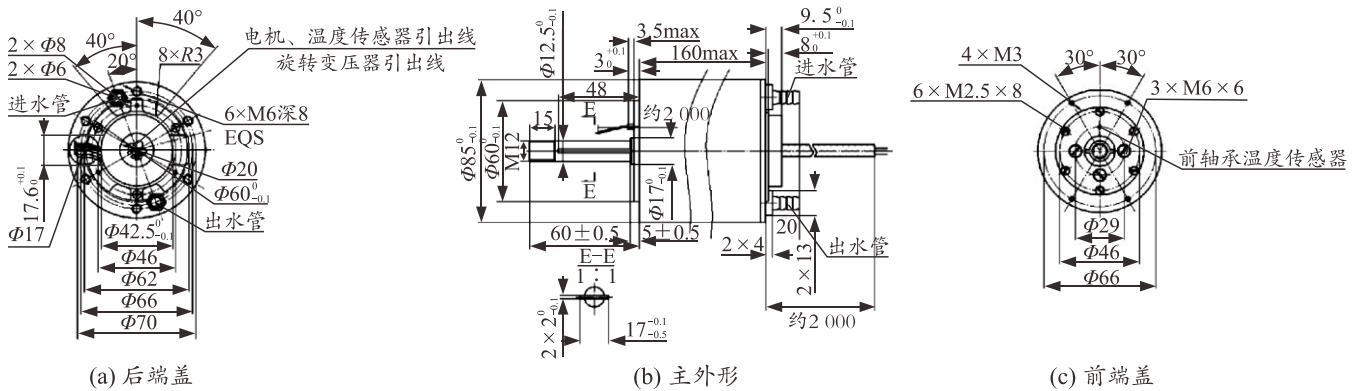
极数：8 极；

调速比：1:20 无级调速；

转速精度：0.1%。

2.1.2 电机研制

电机整体外形如图 2 所示。



J85ST-X01 永磁交流伺服电动机外形安装尺寸 (15 kW 电机)

图 2 电机设计外形

1) 定子铁芯。

① 定子冲片选取 1J22 高性能导磁材料。冲片

制造成铁芯后，采用手绕嵌线工艺，更有利于减小端部尺寸，降低铜损耗。为了尽量减小电机发热，

在设计中采用了 14 匝 11 根并绕的方案。

② 导线材料选取 220 °C 温度等级的漆包线，保证电机电枢的热可靠性^[7]。

③ 电机内部电枢部分的温升最高，因此电枢部分采用真空浸漆工艺，绝缘漆要能够耐温 180 °C 以上，以增加绕组部分的导热系数，降低绕组温升。

④ 电机定子绕组端部内设单、双环形水槽，形成完整的路径及空间，内部水路设计成扇形 140° 放射多孔水槽，材料采用纯铜镀镍，如图 3 所示。

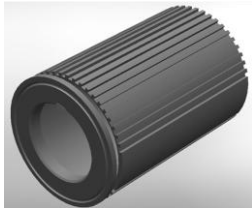


图 3 机壳水路

2) 转子设计。

① 永磁体选取多段拼接且充好磁能的 2:17 高性能钕钴磁钢，磁钢与导磁体用耐高温粘接剂 DG-2，最重要的是钕钴永磁材料具有高耐温等级，能够耐受 200 °C 的温度，具有很高的热可靠性。

② 转轴材料选择 30CrMoSi，转子轴采用大直径比设计，具有较小的转动惯量和较高强度。

③ 采用 8 极 9 槽的槽极配合形式，表面内嵌式磁钢形式，气隙磁密优化设计，最大程度减小转矩波动。

④ 转子表面内嵌式磁路结构，能够增加转子部分结构强度^[8]。

2.2 控制系统

监控系统、现场控制系统之间以及 4 台伺服驱动器之间采用 PROFIBUS 现场总线方式连接构成网络通信系统。控制系统采用西门子 S7-300PLC 作为主站，监控系统作为二级主站，4 台伺服驱动器及 S7-200PLC 作为从站。S7-200PLC 监控冷却循环系统。现场控制系统采用触摸屏作为人机操作界面。S7-300PLC 实现对 4 台伺服驱动器的运行控制，监控驱动器的电流、电机转速等运行状态和设置伺服驱动器的调节参数。监控系统采用工控机控制：工控机将操作设置参数通过通信的方式下传给 S7-300PLC，S7-300PLC 将运行状态上传给工控机，由工控机实时显示运行状态并记录保存数据。运行参数既可在工控机上设置，又可在现场控制系统柜的触摸屏上设置。在工控机和触摸屏上也可以设置伺服驱动器的调节参数，以便使驱动器性能最佳。

2.2.1 监控系统的设计

监控系统由工控机、CP5611 卡、以太网接口卡和计算机人机界面等组成，其结构如图 4。

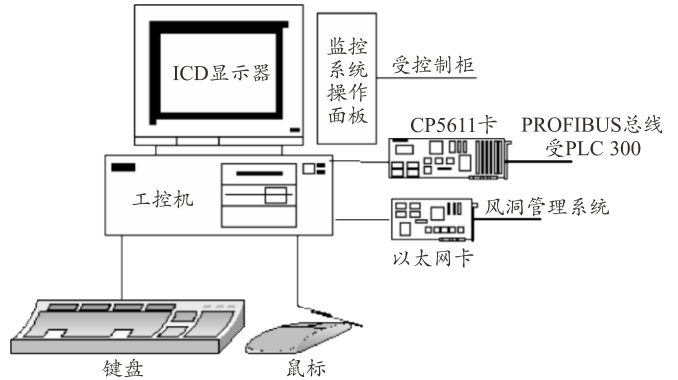


图 4 监控系统构成

监控系统通过 PROFIBUS 总线接口卡与现场控制系统的 S7-300 通信。操作面板设置急停按钮和伺服驱动器使能旋钮，伺服驱动器使能和现场控制系统伺服驱动器使能同时有效，伺服驱动器才能使能允许运行。

2.2.2 现场控制系统的设计

采用西门子 S7-300 PLC 作为主站，控制 4 台伺服驱动器和 S7-200 PLC 从站。S7-200 PLC 监控循环冷却系统，通过通信扩展模块 EM277 接入 PROFIBUS 总线。面板装有按键、选择开关、指示灯和触摸屏。触摸屏显示现场运行状态和参数，并可设置参数和操作运行。现场控制系统通过 PROFIBUS 总线与监控系统相连接。现场控制系统具体硬件设计如图 5。

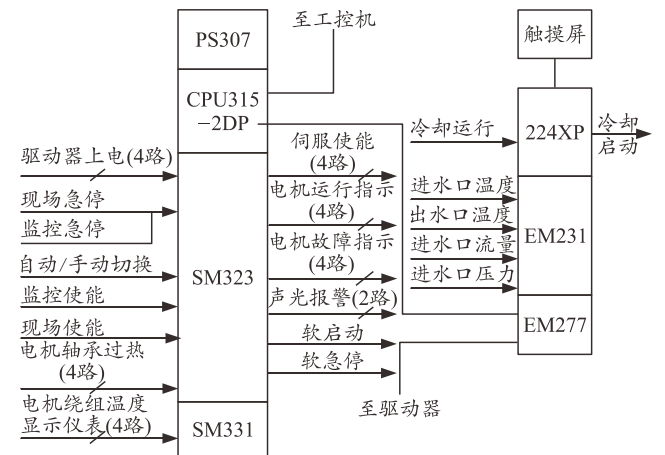


图 5 现场控制系统硬件设计

2.3 水冷系统

由于电机体积小、功率大、发热量高，试验中，

往往要求电机长时间运行。为保证电机的正常工作，需要对电机进行不间断散热。一般电机的冷却方式可选油冷、水冷 2 种。考虑到水冷技术比较很成熟、成本较低，对环境影响小，容易实现，加之试验中短舱体积环境所限，笔者采用循环水冷却方式。其主要技术参数如下：

- 电源采用三相：380 V；
- 整机功率：10 kW；
- 额定流量：24 L/min；
- 系统压力范围：0~0.6 MPa；
- 系统制冷量：4.2 kW；
- 冷却介质：纯净水。

2.4 测量天平

螺旋桨天平尺寸： $\phi=85\text{ mm}$ ， $L=85\text{ mm}$ ，其主要参数见表 3，天平安装示意图见图 6。

表 3 天平参数

分量	Y/N	X/N	$M_z/(N \cdot m)$	$M_x/(N \cdot m)$
载荷	300	400	36	20

天平材料：F141；

连接方式：天平两端通过连接件分别与电机和模型连接，由 6 颗 M6 螺钉紧固；

结构方式：天平设计为四柱梁和两端固定梁的方式，四柱梁负责 Y、 M_x 、 M_z 分量测量，两端固定梁负责 X 分量测量，天平中空，设计了直径 $\phi 20\text{ mm}$ 通孔，方便电机动力线缆、信号线缆走线^[9]。

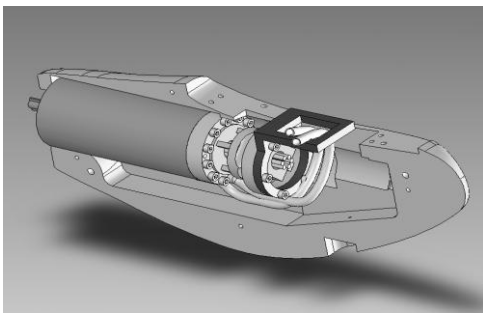


图 6 电机天平安装示意图

2.5 地面调试支撑装置

电机研制后，需要对电机进行地面考核，考虑到以后带动力试验地面调试继续使用，研制支撑装置 4 套，天平连接件 6 块，电机连接件 6 块，压板、压块若干，装置安装示意图见图 7。支撑装置通过压板、压块、螺杆固定在地面导轨上，天平通过天平连接件与装置连接，电机再与天平直接相连，电机主电缆、旋变线、传感器线需穿过天平通孔，这种安装方式可直接通过天平测得电机的转矩、拉

力等参数；电机也可直接通过电机连接件与装置直接相连。

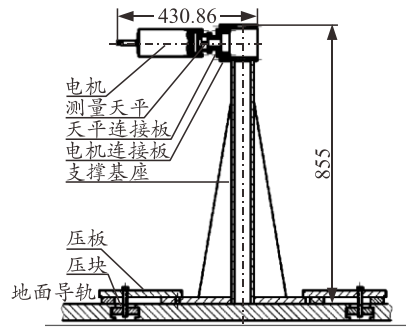


图 7 支撑装置示意图

3 系统调试

调试在地面调试间进行，带动力试验中需要运行的设备多，线路也比较复杂。为了保证试验的顺利进行，必须进行系统地面调试^[10]。

3.1 准备工作

- 1) 检测电机主电缆、旋变信号、传感器线缆绝缘、阻值；
- 2) 水冷系统储水箱清洗、加纯净水；
- 3) PROFIBUS 总线连接；
- 4) 航空插头连接；
- 5) 电源线缆绝缘、接线检查；
- 6) 驱动器参数设置检查 (SM-Resolver 模块、电机参数、PID 参数、开关频率、转速及加减速率等)；
- 7) 电机外壳良好接地；
- 8) 电机及测量天平的安装 (注意螺钉的长度，避免定子绕组损伤)。

3.2 驱动器找零

电机在运转前，必须对旋转变压器进行找零，找零时电机轴应无负载^[11]。具体操作步骤如下：

- 1) 控制柜、驱动柜上电；
- 2) 驱动器参数 0.40 置为 2；
- 3) 控制柜在面板依次拨到使能和启动；
- 4) 等待找零完成，关闭使能和启动；若在找零过程中出现 TUNE2 错误，断电后，应交换 Sin+ 和 Sin- 信号线，重新上电后，由第 1 步重新开始找零；
- 5) 参数 6.15 置为 OFF；
- 6) 参数 0.40 置为 6，自动跳 0；
- 7) 参数 6.15 置为 ON，找零完毕，电机可进入运行状态。

3.3 测量天平抗干扰措施

为避免控制系统和天平之间互相干扰，笔者对

二者进行了隔离处理，处理方法：将电机绕组引接线及旋变引接线分别进行套屏蔽波带处理；将监控柜电源由直接供电改成净化电源供电；将带动力控制系统与天平供电进行隔离。

3.4 操作调试

现场调试照片见图 8。

系统的操作界面见图 9。在工作界面中可以选择

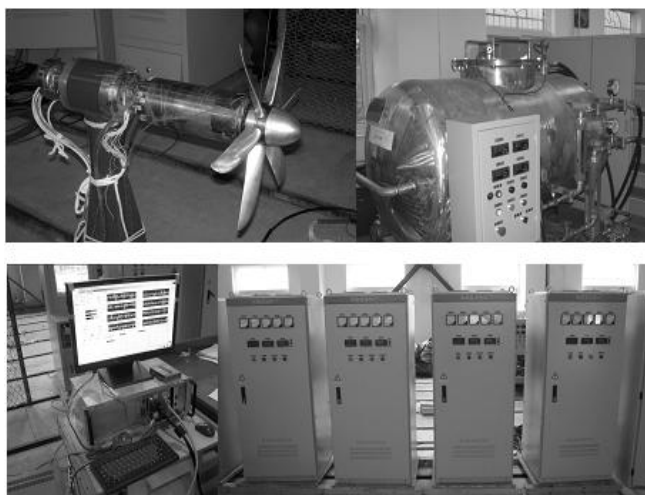


图 8 现场调试

主操作控制界面、流程监控界面、参数设置界面、数据回放、历史故障和退出界面。在工作中，对电机、驱动器和冷却系统进行检测。如果出现错误，则相应的控制系统立刻出现急停，显示出错内容及报警提示。同时故障信号界面显示出相应的错误，以便查找解决。

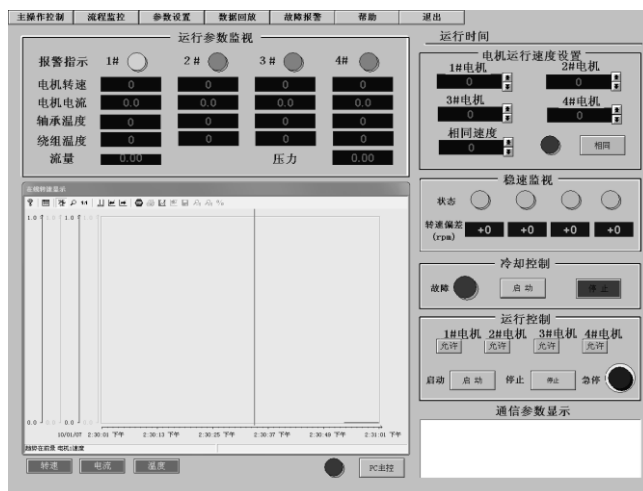


图 9 主操作监控界面

3.5 调试注意事项

- 1) 电机螺孔深度为 10 mm，采用 M6 内六角螺杆进行固定，连接托架的螺杆不能过长，避免压伤电机定子绕组；
- 2) 调试中注意电机绕组温度不能超过 180 °C，防止电机受损；
- 3) 电机机壳表面只有 1.5 mm 厚，安装时不能敲击电机；
- 4) 冷却系统水箱在调试前要进行清洗，防止箱内杂物进入电机；
- 5) 冷却水管所用三通的角度不能太大，因模型内的空间有限，角度太大容易使水管发生堵塞现象；
- 6) 电机机壳一定要可靠接地；
- 7) 开启水冷 20 min 后允许电机运行，电机停止 20 min 后允许停止水冷；

- 8) 电机运行前驱动器一定要进行找零工作；
- 9) 安装调试时，支架要安全固定，并安装保护网；
- 10) 电机在运行一段时间后，必须对电机的前端轴承进行加润滑油脂，加装完毕后，电机在空载额定转速下运行 3~5 min 后，将溢出的油脂擦掉，保证轴承的使用寿命；
- 11) 电机在加装天平时，要注意主电缆、信号电缆的走线，避免压伤线缆；
- 12) 试验或调试完成后，将电机在烘干箱 60 °C 环境中烘烤 8 h 左右后，自然冷却，在专用电机箱中存放，避免振动。

3.6 地面调试结果

表 4 列出了 FL-12 风洞飞艇螺旋桨滑流影响试验的调试数据。

表 4 调试数据

调试数据	序号							
	20110101	20110102	20110103	20110104	20110105	201001001	201001002	201001003
给定转速/(r/min)	12 500	12 500	12 500	12 500	12 500	12 700	12 700	12 700
实际转速/(r/min)	12 499	12 499	12 499	12 499	12 498	12 699	12 699	12 699
MA700 桨叶角/(°)	22	22	22	22	22	22	24	22
电压/V	312	316	329	335	314	284	310	304
电流/A	25.4	24.5	27.8	27.9	25.5	29.6	40.4	33.6
功率/kW	11.72	11.22	12.64	11.58	10.70	12.64	13.27	12.35
运行时间/min	16	15	15	15	15	15	15	15
转矩/(N·m)	8.26	8.16	9.19	8.85	8.18	9.51	9.98	9.28