doi: 10.7690/bgzdh.2021.01.008

FL-12 风洞高功率密度永磁电机研制

霍　国，王　政，康洪铭，刘晓林，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：针对某型水陆两栖飞机带动力风洞试验要求，设计 5 台 12 kW 永磁交流伺服电动机，采用磁路分析法及有限元分析仿真设计，具有大功率、小尺寸、高转速特点。地面调试结果表明：电磁设计软件模拟结果与调试结果基本吻合，研制电机功率密度达到 2.0 kW/kg，达到国际先进水平，具有较高的工程应用价值。

关键词：风洞；带动力；仿真；高功率密度；永磁电机
中图分类号：V211.754　　**文献标志码：**A

Development of High Power Density Permanent Magnet Motor in FL-12 Wind Tunnel

Huo Guo, Wang Zheng, Kang Hongming, Liu Xiaolin, Ye Jian
(*Low Speed Institute*, *China Aerodynamics Research & Development Center*, *Mianyang* 621000, *China*)

Abstract: In order to meet the requirements of a certain type amphibious aircraft of the wind tunnel test, 5 sets 12 of kW permanent magnet AC servo motors were designed. The motor was adopted by magnetic circuit analysis method and finite element analysis simulation, which were characterized by high power, small size and high speed. The ground debugging results show that the simulation results of electromagnetic design software are basically in agreement with the debugging results, and the power density of the developed motor reaches 2.0 kW/kg, which reaches the international advanced level and has high engineering application value.

Keywords: wind tunnel; driving force; simulation; high power density; permanent magnet motor

0　引言

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、飞行性能评估提供可靠的试验数据[1]。FL-12 风洞长期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[2]。我所于 1997 年成功研制 FL-12 风洞螺旋桨带动力试验系统，电机为水冷式三相异步交流变频电机，外形尺寸 Φ95 mm×190 mm，功率 8 kW，最高转速 13 000 r/min，转速反馈方式为码盘+光电二极管，经过多年使用，绝缘老化严重，性能下降，2008 年电机报废[3]。2010 年 FL-12 风洞带动力试验系统研制后，FL-12 风洞螺旋桨带动力试验水平得到大幅度提高[4]，试验电机为外部强迫水冷式永磁交流伺服电机，外形尺寸 Φ85 mm×160 mm，标称功率 15 kW，最高转速 13 000 r/min，采用旋转编码器作为反馈器件，2012 年 3 月份完成某大型灭火/水上救援水陆两栖飞机第一期带动力试验。试验完成后，型号方反馈电机的转速偏低，导致最大模拟拉力系数不能满足，只能被迫采取降风速方法，但风速偏低会造成数据会有部分非线性失真；因此，需重新研制试验电机以满足试验要求。

1　型号试验电机需求

螺旋桨带动力系统应按试验项目要求确定其最高转速，考虑到试验设备应留有一定的转速裕量，驱动系统最大输出转速按式(1)确定。考虑到试验时一般采用缩比模型进行，试验雷诺数明显小于实际雷诺数，将导致螺旋桨模型效率低于实物效率；此外，模型与实物间的一些差异，也会降低螺旋桨模型效率，使所需功率相对增加；因此，按式(2)确定驱动系统最大输出功率。在进行螺旋桨飞机带动力模型试验时，通常需要进行零拉力甚至负拉力试验项目。根据以往试验实践，此时螺旋桨的转速可能会低于自由风车状态(即驱动系统不工作)；因此，试验时驱动系统实际上需要吸收来自螺旋桨的输出功率。此时，按式(3)确定最小输出功率(实际上需要由驱动系统吸收来自于螺旋桨的输出功率)。螺旋桨驱动系统最大输出扭矩用式(4)确定，螺旋桨驱动

收稿日期：2020-08-04；**修回日期：**2020-09-14
作者简介：霍　国(1982—)，男，陕西人，硕士，高级工程师，从事风洞螺旋桨带动力试验系统研究。E-mail: 120818603@qq.com。

系统输出轴最大轴向承载能力用式(5)确定。

$$n_{\max} \geqslant 1.05 \cdot 60 v_s \big/ \left(\lambda_{\min} * D_p\right); \tag{1}$$

$$P_{\max} \leqslant 1.2 P_c k_m^2 \rho_s v_s^3 \big/ \left(\rho_c v_c^3\right); \tag{2}$$

$$P_{\min} \leqslant -0.05 P_{\max}; \tag{3}$$

$$M_{\max} \geqslant 600 P_c k_m^2 \left(\rho_s v_s \lambda_{\min} D_p\right) \big/ \left(\pi \rho_c v_c^3\right)。 \tag{4}$$

$$T_{\max} \geqslant 1.2 T_{c\max} k_m^2 \rho_s V_s^2 S / 2 \tag{5}$$

式中：$P_{\min}$ 为驱动系统最小输出功率，kW；$n_{\max}$ 为驱动系统输出最大转速，r/min；v_s 为试验远前方气流速度，m/s；$\lambda_{\min}$ 为试验模拟的最小前进比；D_p 为螺旋桨直径，m；$P_{\max}$ 为驱动系统最大输出功率，kW；P_c 为试验模拟最大拉力系数所对应的飞机发动机输出功率，kW；k_m 为模型与实物几何尺寸比率；ρ_s 为模型远前方气流密度，kg/m^3；ρ_c 为对应于 P_c 的大气密度，kg/m^3；v_c 为试验模拟最大拉力系数所对应的飞机飞行速度，m/s；$M_{\max}$ 为驱动系统在最大使用输出转速附近的最大输出转矩，N•m；$T_{\max}$ 为最大使用输出转速附近的轴向承载能力，N；$T_{c\max}$ 为试验模拟的最大拉力系数。结合上式计算，并经过充分地调研后，得出大型灭火/水上救援水陆两栖飞机对风洞电机需求见表 1。

表 1　对 FL-12 风洞试验电机需求

试验需求	FL-12			
风速/(m/s)	35	40	45	50
转速/(r/min)	133 21	155 24	171 27	190 30
转矩/(N·m)	5.1	6.7	8.5	10.5
功率/kW	7.1	10.7	15.2	20.9

从表中可以看出：型号对电机需求主要是转速要高、转矩较大，目前低速所所有电机无法满足 FL-12 风洞 40 m/s 试验需求。因此，需要对螺旋桨试验电机进行能力提升，对驱动电机详细要求见表 2[5]。

表 2　电机参数需求

项目	参数	备注
外形尺寸/mm	$\Phi 85 \times 160$	见图 1
电机类别	永磁同步交流伺服电机	
电机功率/kW	12	
额定转矩/(N·m)	8.2	
额定转速/(r/min)	14 000	
最高转速/(r/min)	16 000	
额定电压/V	380	
额定电流/A	25	
激磁频率 kHz/电压/V	6/7	
间断工作制	工作 15 min 间隔 20 min	

2　电机设计关键技术

根据以上电机参数需求，得出电机的负载工作曲线如图 2 所示。

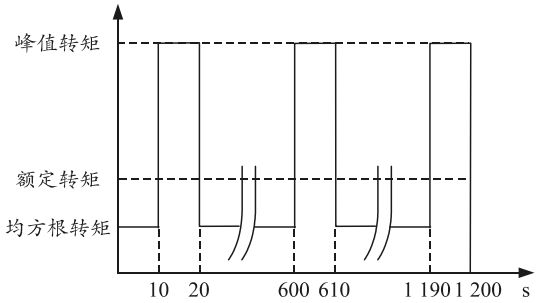

图 2　电机负载工作制

从电机的技术指标以及工作曲线上可以看出，电机具有以下特点：

电机输出额定转矩和均方根转矩时，要求转速不变(额定转速)；电机输出峰值转矩时转速设定为 14 000 r/min；输出峰值转矩时间为 900 s。

分析电机的技术指标以及工作制曲线，电机具有以下技术难点：

1) 高过载能力。

电机的输出转矩达到 8.2 N • m。

2) 高功率密度。

12 kW 电机质量 6 kg，电机在水冷却状态下的输出功率密度能够达到 2 kW/kg，功率体积密度达到 13.22 MW/m^3，达到国际先进水平。

3) 宽温区工作能力。

电机的工作环境能够达到-25～150 ℃。

4) 间断工作特性。

电机的工作时间为 15 min，休息 20 min。其工作控制方式为 0～14 000 r/min 为恒转矩控制，14 000～16 000 r/min 转速区间为恒功率控制，使电机的输出特性达到极限。

3　方案设计

3.1　电机主要参数

永磁交流伺服电动机的主要尺寸由所需的最大转矩和动态性能指标确定，最大转矩与电磁负荷和电动机主要尺寸 D(定子铁心内径)与 L(定子铁心有效长度)关系如下：

$$D^2 L = \frac{4T \times 10^4}{\sqrt{2}\pi BA}。 \tag{6}$$

转动惯量可近似表示为：

$$J = \frac{\pi}{2} \rho_{Fe} L \left(\frac{D}{2}\right)^4 \times 10^{-7}。 \tag{7}$$

由此可得：

$$D = \sqrt{8\sqrt{2} PBA \big/ \left(\omega \rho_{Fe} \times 10^{-3}\right)}。 \tag{8}$$

其中：T 为输出转矩；B 为气隙磁通密度；A 为电负荷。对于电压型变频器驱动的电动机，电机的铁心叠长和定子内径可以根据达到动态特性所需的最大转矩来确定，另外设计时要综合考虑驱动系统的性能和系统的工作制来选择电磁负荷。12 kW 电机最高转速 16 000 r/min，外形尺寸 Φ85 mm×160 mm，定子设计外径 74.5 mm，永磁体有效长度 116 mm，气隙 0.5 mm。

3.2　电磁方案设计

3.2.1　设计方案

在电机外型确定条件下，电机指标最高转速 160 00 r/min，转矩 8.2 N·m 的设计方案，对电机体积要求严格，减小其端部长度以达到最大利用铁心长度。电机的主要损耗如下式所示：

$$P_1=P_2+P_{cu}+P_{Fe}+P_{ad}+P_{mec}。\tag{9}$$

其中：P_1 为电机的输入功率；P_2 为电机的输出功率；P_{cu} 为电机的铜耗；P_{Fe} 为电机的铁耗；P_{ad} 为附加损耗；P_{mec} 为机械损耗。由此可见，适当增加铁耗，减小铜耗，提高产品可靠性。电机负载为螺旋桨负载，有 $T\propto n^2$。电机中 $T\propto I$、$P_{cu}\propto I$ 可得到 $P_{cu}\propto n^2$。且电机中 $P_{Fe}\propto f^{1.3}$。电机的铁耗主要在定子铁心易散热，且耐温高，而电机铜耗在绕组，不易散热，且高温影响绝缘，端部散热困难，温升高；因此，电机采用 6 极方案，相对于 4 极方案，铜耗减小，减小绕组端部的发热，铁耗增加，易于散热，且 4 极 6 槽的电机定子轭部较大和转矩波动的效果不理想。选定 6 极 9 槽的方案进行设计[6]如图 3 所示。

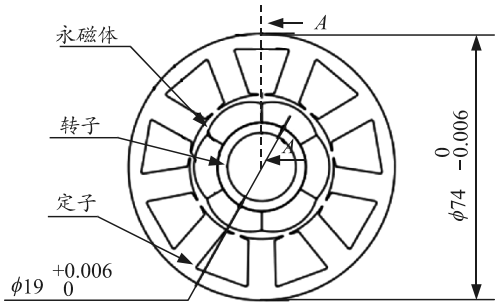

图 3　定子冲片结构

3.2.2　定子设计

1) 定子铁心材料选取 JN250-35。由于电机的转速和工作频率较高，选择具有低铁损耗和较高饱和磁密的硅钢片作为铁心材料，在减小铁损耗的情况下，提高电机的极限输出能力。

2) 导线材料选取 220 ℃温度等级的 0.49 mm 漆包线，并绕 11 根，绕成 15 匝导线。槽绝缘记为 0.25 mm 厚度，则电机槽满率为 68%(下线可以保证)。假定绕组电流为有效值 21 A，则电机的电密为 12.5 A/mm^2。每相电阻为 0.12 Ω，则铜耗为 184 W，保证电机电枢的热可靠性。

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 ℃以上，以增加绕组部分的导热系数，降低绕组温升。

3.2.3　仿真计算

当绕组电流为 22 A 时，电机性能如图 4、图 5 所示。

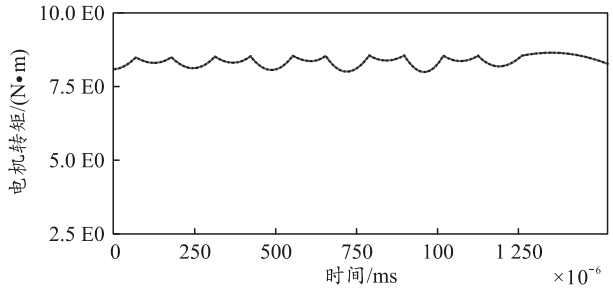

图 4　转矩仿真结果

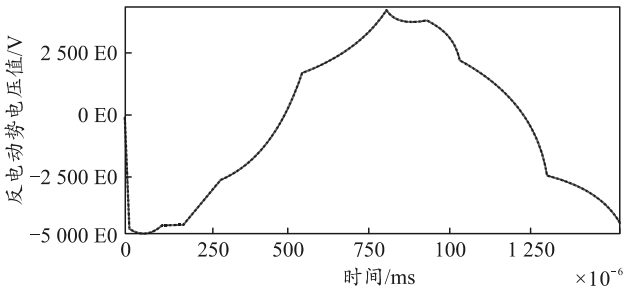

图 5　反电势仿真结果

从图可以看出，电机转矩为 8.3 N·m，超过设计指标要求。其反电动势如图 5 所示，线反电势最大值约为 470 V；控制器上母线电压为 500 V(线电压 350 V)，则绕组电阻压降为 40×0.08=3.2 V，保证控制器对电机绕组电压有 10 V 左右的控制差。此时，电机气隙磁密、齿轭部仿真结果分别见图 6、图 7。此时，定子齿部磁密最大值为 1.62 T，轭部磁密最大值为 1.42 T[7]。

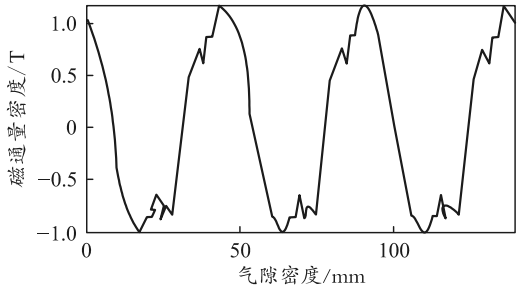

图 6　气隙磁密仿真结果

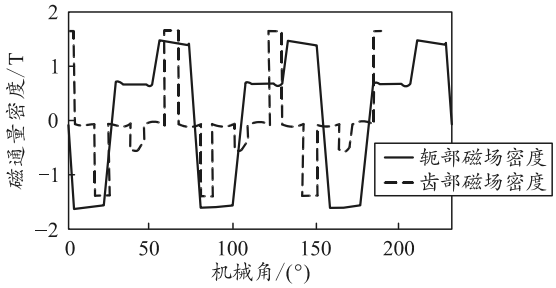

图 7　齿轭部仿真结果

3.2.4　转子设计

1) 磁钢材料选择钕铁硼稀土永磁材料，牌号 NdFeB45UH。钕铁硼稀土永磁材料具有高矫顽力和较高的剩磁，退磁曲线在第二象限基本呈线性等优异性能。

2) 转轴材料选择 2Cr13 不锈钢，转子轴采用大长径比设计，具有较小的转动惯量和较高强度。

3) 铁子铁心材料选择 JN250-35 硅钢片，能够有效降低转子涡流损耗。

4) 采用 6 极 9 槽的槽极配合形式，采用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。

5) 转子表面内嵌式磁路结构，能够增加转子部分结构强度，永磁体呈瓦片形，贴于转子铁心的表面上，永磁体提供径向的磁通。这种结构制造工艺简单、成本低、控制简单，能够提供较好的正弦波气隙磁密。

6) 由于电机在运行过程中会产生谐波，谐波会在紧固套引起涡流，使紧固套发热严重。若采用传统不锈钢紧固套，发热严重，转子结构畸变，高速情况下易引起转子磨蹭，发热严重时会引起永磁体退磁；因此，本方案采用碳纤维紧固套，具有不导磁，不导电特点，从根本上解决转子发热问题。

7) 电机轴向力指标为-15～200 N，根据以往电机研制成功经验，前轴承选用 SKF 深沟球轴承 6 003，后轴承为 SKF 深沟球轴承 6 002，可以在满足转速的前提下提高电机的轴向载荷(±200 N)。

4　电机检测及地面调试

4.1　电阻测量

采用 MT4096LCR 表测量电机每相的相电阻，表 3 列出测试结果。

表 3　试验电机电阻测试结果　　Ω

相	A	B	C
测试阻值	0.149 9	0.149 9	0.149 9
理论值	0.15	0.15	0.15

4.2　电感测量

根据 dq0 变化式，见式(9)，以及 A、B、C 三相相电感自感、互感表达式，见式(10)及(11)。根据以上理论分析可以得出直轴电感测试原理如图 8 所示：

$$\left.\begin{aligned} L_{\mathrm{d}} &= L_{\mathrm{s0}} + M_{\mathrm{s0}} + \frac{3L_{\mathrm{s2}}}{2} \\ L_{\mathrm{q}} &= L_{\mathrm{s0}} + M_{\mathrm{s0}} - \frac{3L_{\mathrm{s2}}}{2} \\ L_{0} &= L_{\mathrm{s0}} - 2M_{\mathrm{s0}} \end{aligned}\right\}; \tag{9}$$

$$\left.\begin{aligned} L_{\mathrm{AA}} &= L_{\mathrm{s0}} + L_{\mathrm{s2}}\cos 2\theta \\ L_{\mathrm{BB}} &= L_{\mathrm{s0}} + L_{\mathrm{s2}}\cos 2(\theta - 120°) \\ L_{\mathrm{CC}} &= L_{\mathrm{s0}} + L_{\mathrm{s2}}\cos 2(\theta + 120°) \end{aligned}\right\}; \tag{10}$$

$$\left.\begin{aligned} M_{\mathrm{AB}} &= M_{\mathrm{BA}} = -M_{\mathrm{s0}} + M_{\mathrm{s2}}\cos 2(\theta + 120°) \\ M_{\mathrm{AC}} &= M_{\mathrm{CA}} = -M_{\mathrm{s0}} + M_{\mathrm{s2}}\cos 2(\theta - 120°) \\ M_{\mathrm{CB}} &= M_{\mathrm{BC}} = -M_{\mathrm{s0}} + M_{\mathrm{s2}}\cos 2\theta \end{aligned}\right\}。 \tag{11}$$

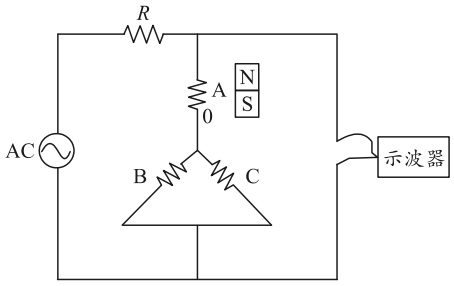

图 8　直轴电感测试原理

测试过程如下：

1) 如图连接电路，电阻阻值 15 Ω；通入直流电 10 A，使电机转子的直轴与 A 相中心线对齐，保持转子位置不变；

2) 电源改为 200 Hz 的正弦交流电，电压有效值 30 V，利用示波器记录电机两端电压 U 和电流 I；

3) 按照相同的步骤，依次通入 20、25、30、35、40 V 正弦交流电，记录电压 U 和电流 I；

4) 根据公式，计算电感 L，其中 $L_{\mathrm{d}}=(2/3)L$，求取平均值，表 4 是直轴电感测试记录数据。

$$X_L = \omega L = U_L / I_L 。 \tag{12}$$

表 4　直轴电感测试记录数据

外加电压/V	50	60	70
电压/mV	831	1 000	1 160
电流/A	1.19	1.36	1.55

4.3　地面测试

调试按照以下步骤：

1) 将被测电机带测量天平固定在负载测试平台上；

2) 螺旋桨与电机前伸轴配装；

3) 通过上位机调节电机转速，并记录电机转速、转速精度、电压、电流、绕组前后轴承温度等信号；

4) 待电机转速达到目标转速后，通过 PXI 系统采集天平信号，计算出转矩、拉力；

5) 单条次运行时间 15 min；

6) 通过调节螺旋桨桨叶角调节负载，地面调试在基本摸清电机性能前提下，对电机进行极限测试。测试内容为电机运行在最高转速 16 000 r/min 下输出额定功率、14 000 r/min 额定转矩功率、14 000 r/min 以下额定转矩运行、14 000～16 000 r/min 恒功率运行等；

7) 每台电机地面运行时间不少于 3 h，电机性能得到充分考核，并全程记录数据[8]。

地面调试见图 9，调试结果见表 5。从调试结果可以看出：电机设计达到指标要求，15 min 极限测试绕组、轴承温度均可控。

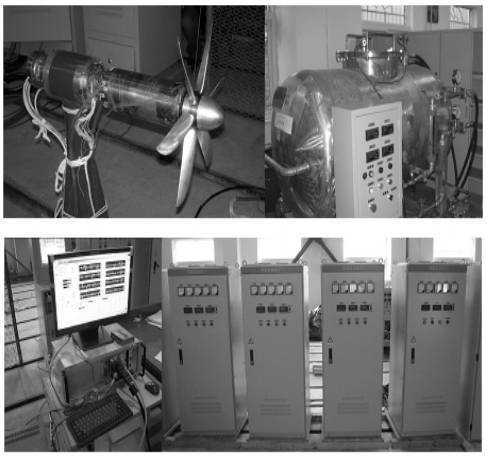

图 9　电机地面调试

表 5　地面调试数据

电机编号	转速/(r/min)	电压/V	电流/A	绕组温度	前轴承温度	后轴承温度	转矩/(N•m)	拉力/N	功率/kW	运行时间/min	桨叶角	备注
1	16 000	332	23.3	78	82	72			12.29	15	28	额定点运行
	14 000	306	26.3	87	71	75			12.13	15	40	
3	14 000	299	26.8	88	56	67			12.42	15	40	
	16 000	325	17.4	66	55	59			12.78	15	23	
4	16 000	321	24.3	89	69	66/72	7.15	155	11.98	15	28	
	14 000	298	27.7	93	72	68/77	8.06	112	11.82	15	40	
5	16 000	335	22.9		58		7.24	160	12.13	15	28	
	14 000	298	26.4		59		7.92	109	11.61	15	40	
6	16 000	335	22.8	61	63	48			12.23	15	28	
	14 000	295	25.6	64	63	49			12.37	15	40	

5 结论

通过对 5 台 12 kW 永磁电机研制，满足了某型号水陆两栖飞机风洞试验要求，电机功率密度大于 2 kW/kg，达到了国际先进水平，提升了 FL-12 风洞螺旋桨带动力试验能力，保持国内 4 m 量级风洞螺旋桨带动力试验能力领先地位，累计完成 30 余期型号试验，为我国航空航天事业做出贡献。

参考文献

[1] 李征初, 王勋年, 陈洪, 等. 螺旋桨滑流对飞机机翼流场影响试验研究[J]. 流体力学实验与测量, 2000, 14(2): 44−48.

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

[3] 霍国, 王政. FL-12 风洞带动力试验系统改造技术总结[Z]. 绵阳, 2012: 1−3.

[4] 霍国, 康洪铭, 刘晓林, 等. L-12 风洞螺旋桨带动力试验系统[J]. 兵工自动化, 2018, 37(6): 23−27.

[5] 霍国, 王政, 康洪铭, 等. FL-12 风洞螺旋桨带动力试验能力提升改造技术总结[Z]. 绵阳, 2014: 1−3.

[6] 曹继伟. FL-12 风洞永磁电机研制总结报告[R]. 2014.

[7] 李立毅, 郭杨洋, 曹继伟, 等. 高速高功率密度风洞电机磁—热特性的研究[J]. 电机与控制学报, 2013(17): 47−48.

[8] 涂清, 周波, 苏北辰. 某超声速风洞控制系统安全策略优化研究[J]. 兵工自动化, 2019, 38(2): 41−44.