

# 高空飞艇螺旋桨驱动电机分析

罗 玲<sup>1</sup>, 刘卫国<sup>1</sup>, 窦满峰<sup>1</sup>, 杨旭东<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学自动化学院, 西安 710072; 2. 西北工业大学航空学院, 西安 710072)

**摘 要:** 高空飞艇的一些概念设计中采用电动机驱动螺旋桨的电推进系统, 对该系统中电动机的关键技术进行分析, 为高空飞艇螺旋桨驱动电机的研制提供参考。针对高空飞艇的电源和不同电动机的特点, 分析了螺旋桨驱动电机应首选稀土永磁无刷直流电动机。根据高空飞艇对螺旋桨的推力要求, 分析了满足螺旋桨驱动需求的驱动电机的额定参数确定。结合高空环境的特点, 从材料选择、轴承润滑和电机温升等方面对驱动电动机的高空适应性设计进行了探讨。稀土永磁无刷直流电动机驱动螺旋桨的地面试验表明所设计的电动机样机具有高效率, 能够满足螺旋桨驱动需求。

**关键词:** 高空; 飞艇; 稀土; 永磁; 无刷直流电动机; 螺旋桨

**中图分类号:** TM351

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-1328(2009)06-2140-05

**DOI:** 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.06.015

## 0 引言

高空飞艇具有的可机动或定点、载荷能力强等优势, 在民用领域的通信、环境监测、资源勘探等方面和军事领域的预警、导弹防御、海岸线、边境线的巡逻、激光武器或其他作战设备的运载平台等方面可发挥重要的作用。近年来, 国内外对高空飞艇的兴趣日益增加<sup>[1-9]</sup>。

对高空飞艇的大载荷要求使得传统的发动机推进难以应用。在高空飞艇的概念设计<sup>[1][8]</sup>和 Sounder 计划的飞艇模型<sup>[2]</sup>中采用了图 1 所示电推进系统。该电推进系统由太阳能/燃料电池系统给电动机供电, 经减速箱驱动螺旋桨旋转, 实现飞艇的定点、主动控制和机动。

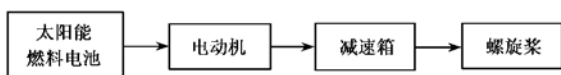


图 1 电推进系统结构图

Fig. 1 Configure of an electrical propulsion system module

参考文献对电推进系统的动力装置—电动机没有介绍, 本文根据高空飞艇的电源系统、螺旋桨对电机的需求和电机的运行环境, 对该电动机的选型、额定参数确定和高空适应性设计等关键技术进行分

析, 为高空飞艇螺旋桨驱动电机的研制提供参考。

## 1 驱动电机选型

电动机按电源类型可分为直流电动机和交流电动机。高空飞艇概念设计中电源由太阳能电池和燃料电池联合提供, 采用直流电动机不需要电源变换。

稀土永磁无刷直流电动机采用电子换相, 解决了有刷直流电机换向火花和高空换向困难的问题。小功率稀土永磁无刷直流电动机在国内飞机上已得到成功应用。

稀土永磁无刷直流电动机稳态工作时, 转速可用式(1)表示

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T_{em} \quad (1)$$

式中:  $n$  为转速 ( $r/min$ ),  $U$  为电枢电压 ( $V$ ),  $C_e$  为电势常数,  $\Phi$  为每极气隙磁通 ( $Wb$ ),  $R$  为电枢电阻 ( $\Omega$ ),  $C_T$  为转矩常数,  $T_{em}$  为电磁转矩 ( $N \cdot m$ )。

由式(1)确定的稀土永磁无刷直流电动机的调节特性如图 2 所示。从式(1)和图 2 可知, 通过调节电枢电压可实现无级调速, 并且不改变机械特性的斜率, 调速范围宽。通过控制器可以改变电动机的转向, 这增加了电机与螺旋桨的适应性。采用稀土永磁体励磁, 稀土永磁无刷直流电动机没有励磁损

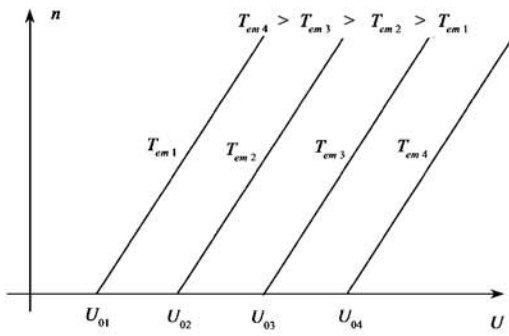


图 2 稀土永磁无刷直流电动机的调节特性

Fig.2 Speed-armature voltage curve of REPM BLDC motor

耗,效率高,功率密度高。

文献[1]提到,用于高空飞艇电推进系统,电励磁的交流异步电机在多电机同轴驱动时,一台电机的故障或切除对同轴的其他电机影响小。但是,相比稀土永磁无刷直流电动机,交流异步电机调速性能差、效率低、功率密度低,而且需增加将直流电逆变成交流电的逆变器,逆变器的增加会降低电推进系统的效率,因此文献[1]提到的交流异步电机优势得不到体现。

从电推进系统整体的结构简单性、效率、可靠性和控制性能综合考虑,稀土永磁无刷直流电动机是高空飞艇电推进系统动力装置的首选。

## 2 电机额定参数的确定

额定参数表示了电机的主要性能和使用条件,是设计电机的依据。下面根据与电源系统和螺旋桨匹配的原则,分析螺旋桨电推进系统中稀土永磁无刷直流电动机额定参数的确定。

### 2.1 额定电压

飞机上低压直流电源额定电压为 28.5 V,高压直流电源额定电压为 270 V。电机功率一定,电压越高,电流越低,线路上损耗越小,可提高电推进系统的效率,但高电压需要更多的太阳能电池串联。因此额定电压应根据高空飞艇采用的电源系统来确定。目前 270 V、300 V 较为多见。

### 2.2 额定功率

高空飞艇螺旋桨在输入功率一定的情况下,随着飞行高度和风速的变化,其推力也在不断变化。为满足螺旋桨推力不断变化的需求,驱动电动机的转速和转矩也需不断调节。

图 3 中曲线 1、2 为某工作高度范围内

对应一定风速范围的极限转速-转矩特性,曲线 3 为额定电压下电机经减速箱输出的转速-转矩特性。

若螺旋桨在一定高度、风速范围内输入功率恒定,为曲线 4 所示的功率值  $P_1$ ,则由曲线 1 和曲线 4 的交点 A 可确定螺旋桨所需的最高转速  $n_{max}$ ,由曲线 2 和曲线 4 的交点 B 可确定螺旋桨所需的最大转矩  $T_{max}$ 。为满足一定高度、风速范围内螺旋桨能够随时吸收功率  $P_1$ ,减速箱的额定功率  $P'_N$  应为

$$P'_N = T_{max} \times \frac{2\pi}{60} n_{max} \quad (2)$$

设减速箱的效率为  $\eta_g$ ,则电机的额定功率  $P_N$  应为

$$P_N = \frac{P'_N}{\eta_g} = \frac{\pi T_{max} n_{max}}{30 \eta_g} \quad (3)$$

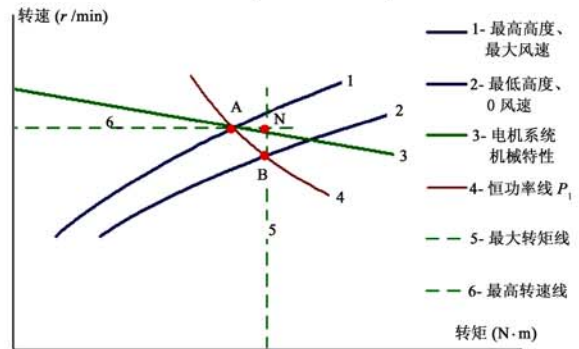


图 3 螺旋桨与电机系统的转速-转矩特性

Fig.3 Speed-torque curves of propeller and REPM BLDC motor driving system

### 2.3 额定转矩

稀土永磁无刷直流电动机的电磁转矩  $T_{em}$  正比于电枢电流  $I_a$ 。螺旋桨转矩越大,电机电磁转矩越大,电枢电流增加,铜损耗和发热增加。高空空气稀薄,电机散热条件差,为确保电机的长时安全运行,电机不宜过载运行。因此与螺旋桨随时吸收功率  $P_1$  相匹配的减速箱额定转矩  $T'_N$  应为

$$T'_N = T_{max} \quad (4)$$

设减速箱的减速比为  $j_g$ ,电机的额定转矩  $T_N$  应为

$$T_N = \frac{T'_N}{j_g \eta_g} \quad (5)$$

### 2.4 额定转速

稀土永磁无刷直流电机可以采用调压调速和弱磁调速。采用弱磁调速扩速范围有限,并且弱磁后

电枢电流升高并引起损耗增加,因此弱磁调速在高空环境中不宜使用。

采用调压调速,为满足螺旋桨随时吸收功率  $P_1$  的需求,需将螺旋桨的最高转速设为减速箱的额定转速  $n'_N$ , 即

$$n'_N = n_{\max} \quad (6)$$

电机的额定转速  $n_N$  应为

$$n_n = n'_N \times j_g = n_{\max} \times j_g \quad (7)$$

### 3 电机高空适应性的设计

#### 3.1 高空大气环境

表 1 为大气环境参数<sup>[1]</sup>。从表 1 可知,大气环境的温度和导热系数在 12000–20000 m 高空保持不变,温度为  $-56.35^\circ\text{C}$ 。20000 m 以上高空,随着海拔高度的增加温度上升,导热系数增加。50000 m 高空时,温度上升至  $-2.35^\circ\text{C}$ 。大气环境的气压和密度随着海拔高度的增加而降低。因此稀土永磁无刷直流电动机在高空处于低气压、低温的运行环境,电机设计时必须采取相应的措施才能实现可靠运行。

表 1 大气环境参数<sup>[1]</sup>

Table 1 Standard atmosphere<sup>[1]</sup>

海拔高度 (m)	温度 ( $^\circ\text{C}$ )	大气压力 (Pa)	密度 ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	导热系数 ( $\text{Kcal m s}^{-1}\text{k}$ )
0	15.15	101330	1.225	0.6053E-5
12000	-56.35	19400	0.312	0.4664E-5
15000	-56.35	12110	0.195	0.4664E-5
18000	-56.35	7570	0.102	0.4664E-5
20000	-56.35	5530	0.0889	0.4664E-5
30000	-46.5	1200	0.0184	0.4859E-5
40000	-22.65	287	0.0040	0.5330E-5
50000	-2.35	79.8	0.0010	0.5721E-5

#### 3.2 材料的选择

电机中的主要材料包括硅钢片、稀土永磁材料、导线材料以及绝缘材料和浸渍漆等。为提高电机的效率,减少电机的发热,硅钢片应尽量选用低损耗材料,导线应选用导电性能好的铜线。从减小电机体积重量、提高电机功率密度考虑,硅钢片应选用饱和磁感应强度高的材料,稀土永磁材料应选用磁能积大、磁性能稳定性好的材料,稀土永磁体  $\text{SmCo}_2$ :17 可满足要求。

电机中的绝缘材料除绝缘作用外,还起着散热、支撑和固定等作用。聚酰亚胺漆及改性马来酰亚胺层压玻璃布板允许工作温度高于  $180^\circ\text{C}$ ,耐低温性也好,不

易发生固化、变脆和开裂,可适用于高空环境。

#### 3.3 轴承的润滑

高空螺旋桨电推进系统通过调节电机的转速、转矩来改变螺旋桨推力以抵抗风速变化的影响,电机的负载和转速长期处于变化状态,轴承润滑剂的冷却作用十分重要。地面电机常用的润滑油润滑性能好、冷却效果好,但其粘度受温度影响大,不宜用于低温环境。在低温低气压条件下,常用的航空润滑脂会出现凝固、挥发等问题,需根据高空低温低气压条件选用航天用润滑剂或研制专用润滑剂。

#### 3.4 电机的温升

电机产生的热量一般以导热、对流和辐射三种形式向外传递。在高空环境下,电机绝大部分热量将通过空气对流和热传导的方式传递出去。

根据牛顿冷却公式:

$$Q = \alpha F(t_w - t_f) \quad (8)$$

式中:  $Q$  为对流换热热量,  $F$  为对流换热面积,  $t_w$  为固体壁的温度,  $t_f$  为冷却空气温度,  $\alpha$  为对流换热系数。

由式(8)可知,电机的对流换热热量正比于空气的对流换热系数和电机表面温度与冷却空气温度的差值。

与地面环境相比,高空环境参数只有温度、密度和压力发生了变化,其中压力变化对温升的影响反映为密度对温升的影响。

##### 3.4.1 温度对电机温升的影响

环境温度对温升的影响,体现在对电机损耗和冷却介质散热能力的影响。对于空气冷却的电机,对损耗的影响主要体现在可变损耗上。

###### (1) 环境温度对可变损耗的影响

假定负载不变的情况下,电机电枢电流保持不变,环境温度变化只会引起绕组电阻的变化,绕组电阻随环境变化的关系如式(9)所示。

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{234.5 + \theta_2 + t_2}{234.5 + \theta_1 + t_1} \quad (9)$$

式中:  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  为绕组工作温升,  $R_1$ 、 $R_2$  为环境温度  $t_1$ 、 $t_2$  时的绕组电阻。

高空环境温度低于地面温度,但高空散热条件差,高空环境温度对绕组电阻的影响小,因此对电机的可变损耗—铜损耗的影响小。

###### (2) 环境温度对散热能力的影响

当电机机壳有  $t_2 - t_1$  温度差时,热量主要通过对流和辐射散热。对采用自带风扇冷却的电机,其



对流换热系数可近似用式(10)表示

$$\alpha = A(1 - Bt) \quad (10)$$

式中:  $\alpha$  为对流换热系数,  $A$  为与流体流动特性有关的系数,  $B = 0.000145 \sim 0.000146$ ,  $t$  为风温。

高空风温低, 对流换热系数比地面大。

(3) 环境温度对冷却空气热容量的影响

冷却空气的热容如式(11)所示。

$$C_v = \frac{K}{t} = 1005.3 \frac{p}{R(273 + t)} \quad (11)$$

式中:  $C_v$  为冷却空气的热容,  $K$  为热量,  $p$  为损耗,  $R$  为绕组电阻。

由式(11)可知, 在总损耗不变, 冷却空气的热容  $C_v$  随温度  $t$  升高而减少, 散热困难, 温升增加。因此在 12000 - 20000 m 高空, 冷却空气的热容保持不变, 在 20000 m 以上高空, 随着高度增加, 冷却空气的热容减少, 散热越困难。

### 3.4.2 大气密度对电机温升的影响

对流散热, 采用自带风扇冷却的电机, 其单位面积散热量如式(12)所示

$$q = B\rho^{0.5-0.8} \theta \quad (12)$$

式中:  $q$  为单位面积散热量,  $B$  为常数,  $\rho$  为冷却空气的密度,  $\theta$  为温升。

由式(12)可知, 随着高空空气密度的降低, 对流时的空气单位面积散热量也会降低。以 15000 m 高度为例, 对流时的空气单位面积散热量会降低到地面的 16%。

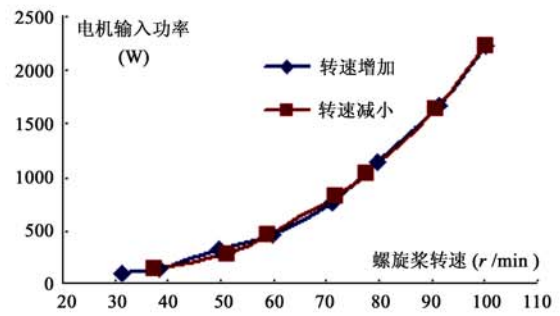
综上所述, 相比地面环境, 在负载不变的情况下, 电机在高空, 铜损耗变化小, 风损耗会大幅度下降, 高空对流换热系数和冷却空气的热容略有增加, 但单位面积散热量会大幅度下降, 故电机总的温升会远高于地面, 需通过增加电机散热面积、提高电机效率等措施来减小电机温升。

## 4 试验

稀土永磁无刷直流电动机通过减速箱带螺旋桨测得的特性曲线如图 4 所示。图 4 所示的试验结果表明该电机能够与螺旋桨相匹配, 电机调速性能好、效率高(90%)。

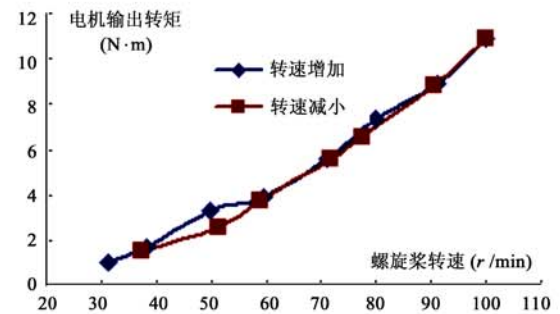
## 5 结论

本文对高空飞艇螺旋桨电推进系统的动力装置 - 电动机的选型、额定参数确定和高空温升等进行了分析, 得出如下结论:



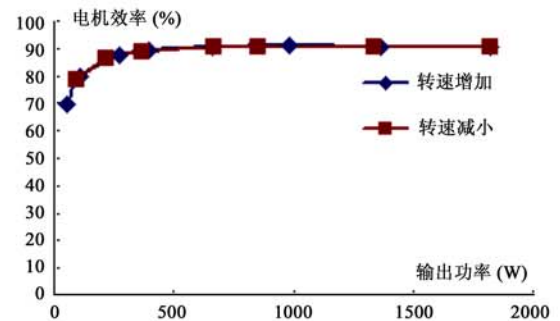
(a) 电机输入功率 - 螺旋桨转速曲线

(a) REPM BLDC motor input power-propeller speed curve



(b) 电机输出转矩 - 螺旋桨转速曲线

(b) REPM BLDC motor torque-propeller speed curve



(c) 电机效率 - 输出功率曲线

(c) Efficiency-output power curve of REPM BLDC motor

图 4 电机带螺旋桨试验曲线

Fig.4 Test curves of REPM BLDC motor driving propeller

(1) 基于高空飞艇的直流电源, 从电推进系统整体的结构简单性、效率、可靠性和控制性能综合考虑, 稀土永磁无刷直流电动机是推进系统动力装置的首选。

(2) 根据与电源系统和螺旋桨匹配的原则, 稀土永磁无刷直流电动机的额定功率应大于螺旋桨不同高度、风速下吸收的功率, 螺旋桨吸收恒定功率时的最大转矩决定了电机额定转矩, 最高转速决定了电机额定转速。

(3) 电动机的高空温升远高于地面, 需通过增

加电机散热面积、提高电机效率等措施来减小电机温升。

(4) 稀土永磁无刷直流电动机驱动螺旋桨的试验表明电机样机与螺旋桨相匹配,调速性能好,效率高。

#### 参考文献:

- [1] Colozza A. Initial feasibility assessment of a high altitude long endurance airship[R]. NASA/CR-2003-212724, 2004.
- [2] Michael S S, Edward L R. Applications of scientific ballooning technology to high altitude airships[R]. AIAA2003-6711, 2003.
- [3] Charlie Lambert. Developing architectures for high altitude air ships [J]. AIAA 2003-6781, 2003.
- [4] Colozza A, Dolce J L. High-altitude, long-endurance airships for coastal surveillance[R]. NASA/TM-2005-213427, 2005.
- [5] Jamison L, Sommer G S, Porche I R. High-altitude air-ship for the future force army[R]. Technical Report of RAND Corporation, 2005.
- [6] Duffa E A, Washbumb D C. The magic of relay mirrors, laser systems technologyII[C]. Edited by William E Thompson, Richard L Brunson, Proceedings of SPIE Vol. 5413. SPIE, Bellingham, WA, 2004.
- [7] Makrinos S T. High altitude airships for homeland security, commercial and military operations[R]. White Paper of CACI Technologies Incorporated, 2005.
- [8] 姚伟,李勇,王文隽,郑威. 平流层飞艇优化方法和设计参数敏感性分析[J]. 宇航学报, 2007, 28(6): 1524-1528. [YAO Wei, LI Yong, WANG Wen-jun, ZHENG Wei. High altitude airship optimization method and design parameters sensitivity analysis[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(6): 1524-1528(in Chinese).]
- [9] 曲东才. 飞艇研制及发展[J]. 航空科学技术, 2005, (2): 20-23. [QU Dong-cai. Study and development of airship[J]. Aeronautical Science and Technology, 2005(2): 20-23(in Chinese).]

作者简介: 罗玲(1970-), 女, 副教授/工学博士, 主要从事稀土永磁电机理论及设计、电机 CAD 的研究。  
通信地址: 西北工业大学 352 信箱 (710072)  
电话: (029)88431336  
E-mail: luoling@nwpu.edu.cn

## Analysis of the Motor Driving a Propeller of High Altitude Airship

LUO Ling<sup>1</sup>, LIU Wei-guo<sup>1</sup>, DOU Man-feng<sup>1</sup>, YANG Xu-dong<sup>2</sup>

(1. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Based on the concept configuration of the high altitude airship, electric motors were used to drive the propellers to generate thrust, however no detailed analysis on the motors was presented in the previous literatures. In this paper, the crucial problems were analyzed when the electric motors are applied for a propeller driving the high altitude airships. The main power generated by the solar array and the fuel cells equipped in the airship is in DC form, in addition, the high efficiency, high power/weight ratio and easy modulating speed-torque characteristics are demanded. Therefore the better choice for driving the propeller of high altitude airship is the rare earth permanent magnet brushless motor rather than the AC motor. In order to drive the propeller in a wide aerodynamic operational range, how to determine the rating parameters of rare earth permanent magnet brushless motors was studied. Further more, the part material selection, the bearings lubricant and the temperature rise were discussed. The experimental results showed that the rare earth permanent magnet brushless motor prototype could meet the requirement of a propeller and reached high efficiency.

**Key words:** High altitude; Airships; Rare earths; Permanent magnets; Brushless DC motors; Propellers