

平流层飞艇动力推进系统的分析与设计

刘新强, 贺卫亮
(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 针对平流层飞艇螺旋桨与电动机匹配问题,建立了无刷直流电动机模型和螺旋桨推力模型;结合匹配设计和电动机转速控制,在 Simulink 中设计了螺旋桨与电动机控制系统仿真模型,研究飞艇在 0~10 m/s 巡航速度下动力推进系统控制响应问题;采用图形用户界面(GUI)编写螺旋桨与电动机匹配界面,开发了一种螺旋桨与电动机匹配软件;结果得到飞艇在 0~10 m/s 巡航速度下推进系统匹配设计的工作曲线,即螺旋桨工作转速为 535~1071 r/min,推进系统工作效率为 0.558~0.593,为高空螺旋桨与电动机的匹配设计提供了参考依据。

关 键 词: 平流层; 直流无刷电动机; 螺旋桨; 匹配设计; 图形用户界面; 控制响应; 工作曲线

中图分类号: V274 **文献标志码:** A

Analysis and design of stratospheric airship propulsion system

LIU Xin-qiang, HE Wei-liang
(School of Astronautics,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: For the problem of propeller and motor matching, brushless direct current (DC) motor model and propeller thrust model were constructed. In order to research the control response problems of propulsion system at 0 to 10 m/s cruising speeds and different wind speeds, the simulation model of control system was designed in Simulink by combining matching design with motor speed control. The interface of propeller and motor matching was compiled in graphical user interface (GUI). Propeller and motor matching software was developed. The matching design curve for operation at 0 to 10 m/s cruising speed, i. e. : the working range of the propeller from 535 to 1071 r/min and the overall efficiency of the propulsion system from 0.558 to 0.593, was obtained, which can be used as the reference basis for the matching design between high altitude propeller and motor.

Key words: stratospheric; brushless direct current (DC) motor; propeller; matching design; graphical user interface (GUI); control response; working curve

目前国内外对平流层飞艇开展了广泛研究。平流层飞艇推进系统采用直流电源对电动机供电,电动机驱动螺旋桨转换成推力对飞艇运动进行控制^[1]。为了实现飞艇定点、可控飞行,电动机驱动螺旋桨系统是低速临近空间飞行器的主要推进系统^[2-3],而螺旋桨与电动机匹配问题又是推进系统核心问题。为了解决匹配问题,需要对螺旋桨和电动机分别进行建模,组合成完整的动力推进系统模型,进而对整个推进系统的匹配特性进行分析。

在电动机模型方面,何琳琳、罗玲等主要对推进系统动力装置进行研究,确定直流无刷电动机可以用作平流层动力推进装置,但没有建立直流无刷电动机数学模型^[1,4]。在螺旋桨模型方面,侯

远波、雷光新等采用叶素理论,取螺旋桨 75% 半径处的基本参数,建立螺旋桨推力模型^[5-6];苗景刚等采用四次多项式拟合的方法得到螺旋桨推力计算模型^[7];王海峰等采用风洞实验和 CFD 数值仿真计算螺旋桨推力系数,进而获得螺旋桨推力计算模型^[8];以上文献侧重于螺旋桨的分析、设计和电动机的选择问题,对螺旋桨与电动机匹配特性的研究相对较少,在飞艇的动力系统仿真分析中,没有建立完整的高空动力推进系统模型。

本文针对平流层动力推进系统,建立了电动机模型和螺旋桨推力模型,对螺旋桨与电动机匹配问题进行研究,采用 GUI 编写人机交互界面,开发了一款螺旋桨与电动机的匹配软件;利用 Simulink 建立螺旋桨模型、直流无刷电动机调速模型以及风场变化模型,研究了平流层飞艇(简称飞艇)动力推进系统控制响应问题,根据仿真模型和仿真参数,得到了飞艇在不同运行工况下,推进系统匹配设计曲线。

1 模型建立

1.1 直流无刷电动机模型

直流无刷电动机模型^[9]如图 1 所示。

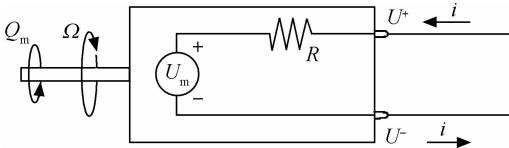


图 1 直流无刷电动机模型图

Fig. 1 Mathematical model of brushless DC motor

直流无刷电动机最重要的常数是 K_v 值, K_v 值是电压每升高 1 V, 电动机增加的转速。图中内部反电压 $U_m = \Omega/K_v$ 。应用电流平衡方程和能量守恒方程,推导电流方程如下:

$$i(\Omega, U) = \left(U - \frac{\Omega}{K_v} \right) \frac{1}{R} \quad (1)$$

式中 U 为电动机输入电压, R 为电动机内阻, Ω 为电动机转速。

扭矩与输入电压和转速之间关系式

$$Q_m(\Omega, U) = \left[\left(U - \frac{\Omega}{K_v} \right) \frac{1}{R} - i_0 \right] \frac{1}{K_v} \quad (2)$$

式中 i_0 为电动机空载电流。

电动机输出功率与输入电压和转速之间关系式

$$P_{\text{shaft}}(\Omega, U) = \left[\left(U - \frac{\Omega}{K_v} \right) \frac{1}{R} - i_0 \right] \frac{\Omega}{K_v} \quad (3)$$

电动机效率与输入电压和转速之间关系式

$$\eta_m(\Omega, U) = \left(1 - \frac{i_0 R}{U - \Omega/K_v} \right) \frac{\Omega}{U K_v} \quad (4)$$

1.2 螺旋桨模型

螺旋桨的理论分析方法主要有动量理论、叶素理论和片条理论。叶素理论将桨叶分为有限个微小段(称为叶素),然后,根据翼型理论得到每一个叶素上的气动力,并认为绕过每个叶素的气流是二维的,因此,叶素之间互不影响,最后沿径向求解桨叶上的总气动力^[5,10]。动量理论误差太大,片条理论需大量迭代计算,工程实用性较差。因此,本文的螺旋桨分析基于叶素理论建立模型。

根据叶素理论,螺旋桨推力主要产生在 60%~90% 半径间的桨叶部位上,最大推力发生在旋转半径约 75% 的叶剖面处,以此处的参数作为螺旋桨的特征参数。为了简化分析,本文采用 75% 处的参数代替 60%~90% 处的螺旋桨参数,通过叶素理论获得单个螺旋桨的推力与效率^[5]。

单个螺旋桨的推力为

$$T_p \approx \frac{1}{2} \rho C_l b V^2 (0.9r - 0.6r) \frac{\cos(\gamma + \varphi)}{\cos \gamma} \quad (5)$$

式中 ρ 为大气密度, C_l 为升力系数, b 为弦长, V 为气流相对于叶素的几何合成速度, r 为螺旋桨半径, φ 为 V 与旋转平面的夹角, γ 为叶素阻升角。

螺旋桨扭矩为

$$M_p \approx \frac{1}{4} \rho C_l b V^2 (0.81r^2 - 0.36r^2) \frac{\sin(\gamma + \varphi)}{\cos \gamma} \quad (6)$$

螺旋桨效率为

$$\eta_p \approx \frac{\tan \varphi}{\tan(\gamma + \varphi)} \quad (7)$$

2 螺旋桨与电动机参数匹配

2.1 参数匹配设计

螺旋桨与电动机的匹配设计,即螺旋桨的转速和电动机的转速相等,电动机输出功率等于螺旋桨输入功率^[11]。具体匹配过程如下:给定飞艇飞行的速度,以及飞艇飞行时所需推力 T ,就可以得到每个螺旋桨需产生的推力,由螺旋桨推力-转速曲线得到其转速;进而在螺旋桨效率和扭矩曲线中得到螺旋桨的效率和扭矩点;电动机在某一输入电压下的扭矩曲线恰好过螺旋桨的扭矩点,即满足匹配设计要求。

电动机和螺旋桨有较好的匹配是指电动机

和螺旋桨同时都在较高的效率下运行,这意味着在满足推进功率要求的前提下,两者在同一转速下都处于高效率下运行^[12].

电动机与螺旋桨匹配关系式为

$$(I_p + I_m)\dot{n} = Q_m J_{jsb} - M_p \tag{8}$$

式中 J_{jsb} 为减速器减速比; I_p, I_m 分别为螺旋桨、电动机转子的转动惯量; Q_m, M_p 分别为电动机扭矩、螺旋桨扭矩.

2.2 参数匹配软件设计

国外软件在计算螺旋桨推力时,使用的是 Abbott 经验公式,该公式忽略了螺旋桨的前进速度,适用范围有限^[13]. 本文在 Matlab 的 GUI 平台下设计了一款可视化的软件,该软件基于叶素理论建立螺旋桨模型,考虑了螺旋桨前进速度,相比于经验公式,更接近于实际工况.

软件结构框图如图 2 所示. 该软件主要用于寻找螺旋桨与电动机的扭矩匹配点,并获得螺旋桨的推力、扭矩和效率曲线,以及电动机的扭矩、效率和输出功率曲线,显示匹配点处数据.

在图形用户界面中,文本编辑器用于电动机参数和螺旋桨参数的输入,坐标轴用于显示电动

机曲线和螺旋桨曲线,以及匹配曲线. 软件运行界面如图 3 所示.

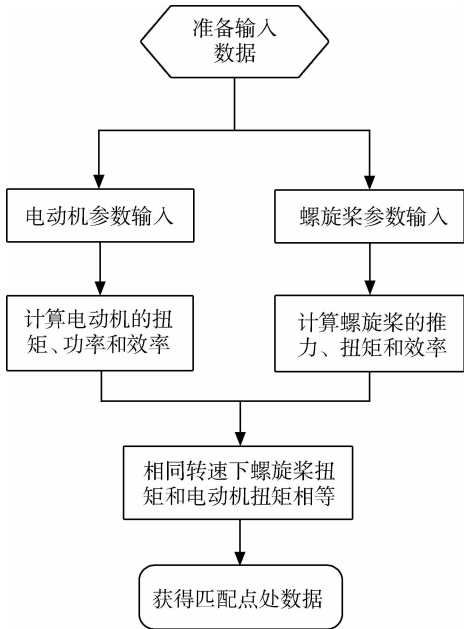


图 2 螺旋桨-电动机匹配软件结构框图
Fig. 2 Structure diagram of propeller-motor matching software

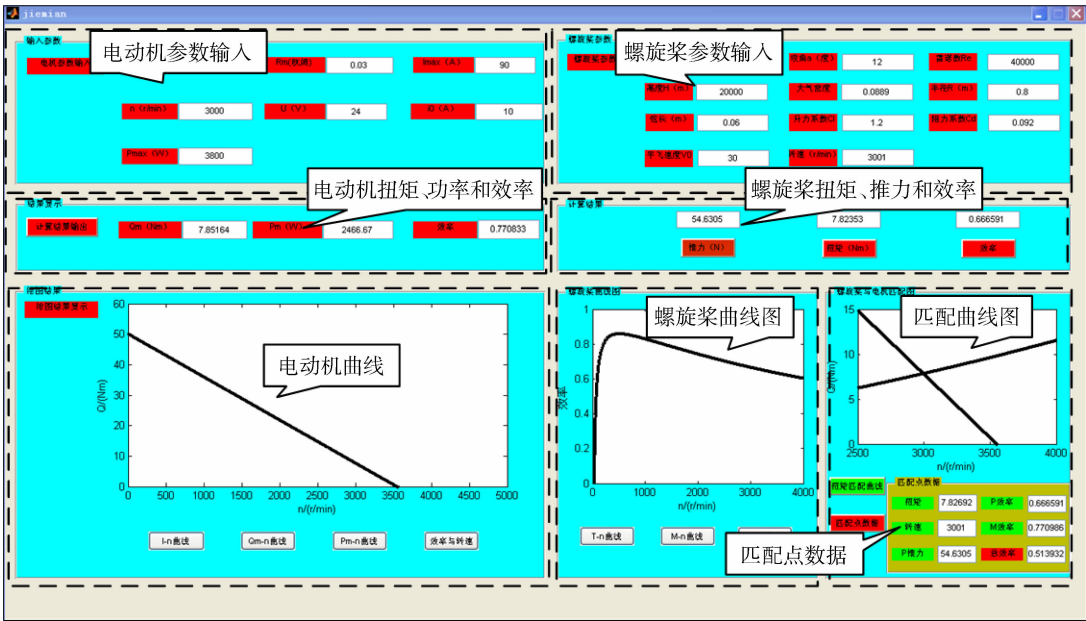


图 3 螺旋桨-电动机匹配软件运行界面
Fig. 3 Operation interface of propeller-motor matching software

3 推进系统控制模型的建立

飞艇是低速飞行器,风场对其有很大影响,飞艇抗风所需的能源消耗功率与风速的三次方成正

比. 抗风速度余量是指平流层飞艇最大飞行速度与飞艇所处环境中最大风速之比. 该指标主要用来衡量平流层飞艇在其生存环境中的飞行性能. 抗风速度余量越大,飞艇的抗风能力越强,适应环

境风场的能力越强^[14]. 飞艇在巡航或定点驻留时, 必须提供抗风力所需的推进动力. 该推力与艇身横截面积、风速的平方成正比^[5,15-16].

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A v^2 \tag{9}$$

式中 C_d 为飞艇的阻力系数, ρ 为大气密度, A 为飞艇特征阻力面积.

直流无刷电动机调速系统传递函数为^[17]

$$\frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{\frac{1}{K_e}}{\frac{JL_a}{K_t K_e} s^2 + \frac{JR_a}{K_t K_e} s + 1} \tag{10}$$

其中 R_a 为电枢电阻, J 为电动机轴上总转动惯量, K_t 为电动机转矩常数, K_e 为反电动势系数, L_a 为电枢绕组电感, Ω 为电动机角速度, U_a 为电枢电压.

电动机转速采用比例-积分-微分(PID)控制, 控制系统结构框图如图 4 所示.

本文在 Simulink 中建立飞艇推进系统各模块模型: 飞艇螺旋桨模型、直流无刷电动机调速模型以及风场变化模型. 平流层风向比较稳定, 假设飞艇通过调整姿态使其处于迎风方向, 即推力和阻力方向在同一直线上. 首先, 由空速得到飞艇阻力, 换算成螺旋桨推力, 进而得到螺旋桨转速; 第二, 根据建立的螺旋桨和电动机仿真模型, 按照动力推进系统匹配关系, 将电动机的输出扭矩通过减速器接到螺旋桨的输入端, 得到匹配转速; 第三, 由巡航速度要求, 获得螺旋桨转速差信号, 经电动机转速控制系统, 使螺旋桨转速达到巡航要求; 最后, 加入风速变化模型, 研究控制系统动态响应问题. 控制系统结构框图如图 5 所示.

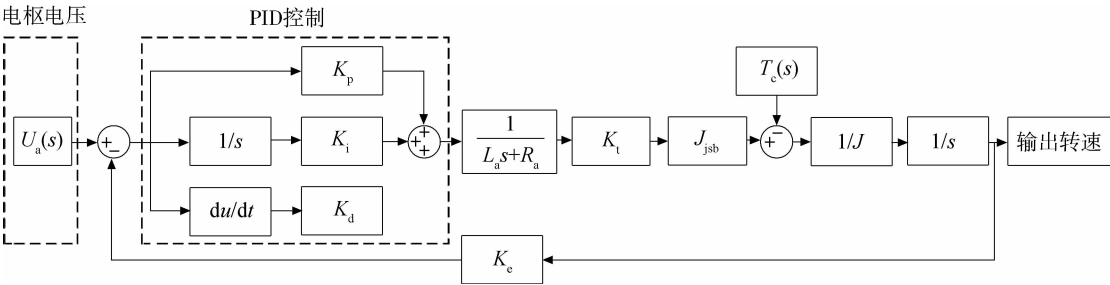


图 4 电动机转速控制系统
Fig. 4 Speed control system of motor

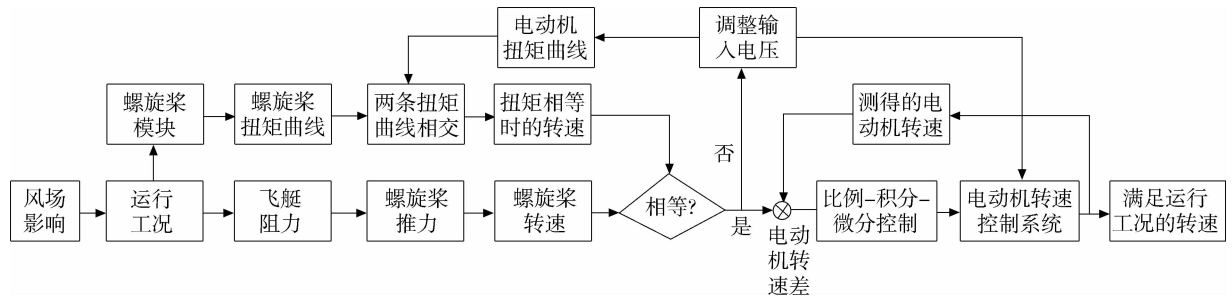


图 5 控制系统结构框图
Fig. 5 Structure diagram of the control system

平流层飞艇螺旋桨与电动机匹配特性计算流程如下:

- 1) 由飞艇总体设计参数和螺旋桨参数计算螺旋桨推力, 以及螺旋桨升力系数和阻力系数.
- 2) 将螺旋桨升力系数和阻力系数代入式(5)、式(7)得到螺旋桨转速 n_s 和效率.
- 3) 由电动机参数计算电动机扭矩, 并由式(6)计算螺旋桨扭矩, 两扭矩相等得到输入电压.

4) 由式(4)得到电动机效率, 最后得到整个动力推进系统的总效率.

4 仿真算例及分析

飞艇总体设计参数如表 1 所示. 在仿真分析过程中, 设飞艇巡航高度 20 km, 巡航速度 (V_0) 依次取 0, 5, 10 m/s (地面坐标系), 风速为 10 m/s. 选取 Eppler 387 翼型, 且螺旋桨 $0.75r$ 处安装角为

16.8°。该翼型在全攻角范围内的升阻特性比较稳定,且受雷诺数的影响较小^[13,18]。螺旋桨与电动机初始参数如表 2 所示,且螺旋桨与电动机转子的转动惯量和为 50 kg·m²,减速器减速比为 2,减速器效率为 0.95。

表 1 飞艇总体设计参数
Table 1 Design parameters of the airship

初始参数	数值
飞艇阻力系数 C_d	0.04
飞艇体积/m ³	261800
巡航高度/km	20

表 2 螺旋桨与电动机初始参数
Table 2 Design parameters of the airship

参数	数值
螺旋桨直径/m	4
0.75 <i>r</i> 处弦长/m	0.4
输入电压 U/V	60
$K_v/((r/min)/V)$	60
电动机内阻 R/Ω	0.02
空载电流 i_0/A	10

根据文中第 3 节的计算流程得到匹配数据如表 3 所示(表中 η_m 为电动机效率, η_{total} 为动力推进系统总效率)。动力推进系统在不同巡航速度下,螺旋桨与电动机匹配点处的状态值。由表中的数据可以看出匹配设计的螺旋桨效率和电动机效率比较高,这表明电动机和螺旋桨的匹配设计较好。

表 3 不同巡航速度下动力推进系统匹配值
Table 3 Matching values of propulsion system with different cruising speed

参数	$V_0/(m/s)$		
	0	5	10
U/V	20.7	32.9	46.4
T_p/N	181.4	408.6	726.8
$M_p/N \cdot m$	41.6	93.7	166.6
η_p	0.778	0.778	0.778
η_m	0.802	0.787	0.755
η_{total}	0.593	0.582	0.558

推进系统总效率为螺旋桨输出功率与电动机输入功率之比,即螺旋桨效率、电动机效率与减速箱效率三者的乘积共同决定推进系统效率。

根据仿真模型和仿真参数,对同一高度、不同巡航速度下的推进系统进行仿真,高度 20 km,气流速度 10,15,20 m/s(曲线 7、曲线 8、曲线 9),电动机输入电压 20.7,32.9,46.4 V(曲线 4、曲线 5、曲线 6),电动机输出功率 2.3,7.9,18.7 kW(曲线 1、曲线 2、曲线 3)。得到推进系统扭矩-转速曲线如图 6 所示,在曲线中取 3 个典型工况(A,B,C),工况 A(41.61 N·m,535 r/min)、工况 B(93.69 N·m,803 r/min)、工况 C(166.6 N·m,1071 r/min)这 3 个点为推进系统在不同巡航速度时的匹配设计点,即巡航速度曲线、电动机输入电压曲线和电动机输出功率曲线相交的点,将点平滑连接得到推进系统匹配设计曲线,这对飞艇动力推进系统设计有一定的参考意义。

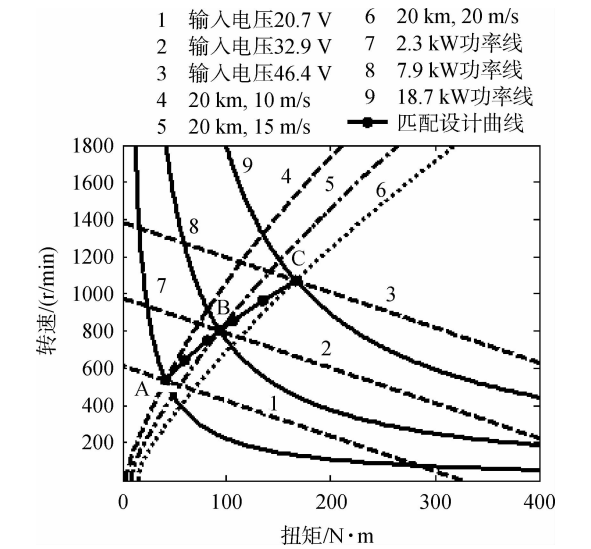


图 6 推进系统工作特性曲线
Fig. 6 Operating characteristic curves of the propulsion system

图 7 为巡航速度为 0 m/s 和 10 m/s 螺旋桨推进系统动态响应图。巡航速度为 0 m/s,螺旋桨达到 535 r/min(匹配转速)需 30 s;巡航速度为 10 m/s,螺旋桨达到 1071 r/min 需 35 s。

巡航速度为 0,5,10 m/s 时,调整电动机转速控制的 PID 参数, $K_p=16$, $K_i=0.01$, $K_d=3$, 控制效果如图 8 所示。飞艇定点时,即巡航速度为 0 m/s,在 2 s 处风速增加(Δv)3.5 m/s 和 5 m/s 时,推进系统响应曲线如图 9 所示。

图 7 和图 8 对比可以分析:巡航速度为 0,5,

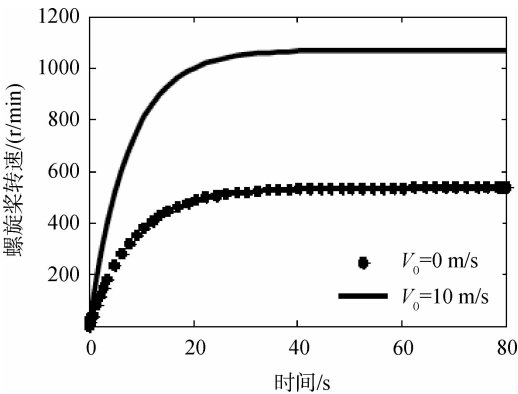


图 7 不同巡航速度推进系统动态响应曲线
Fig. 7 Propulsion system's dynamic response curves of 0 m/s and 10 m/s

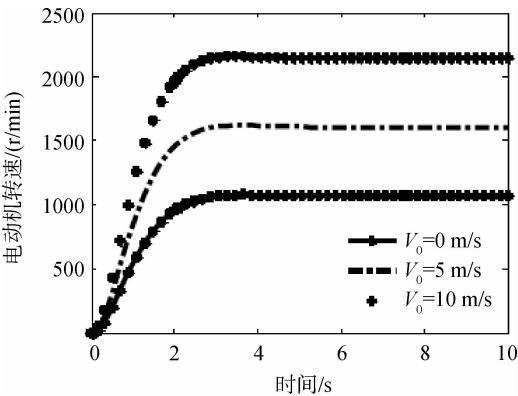


图 8 PID 控制电动机转速曲线
Fig. 8 Motor speed curves with PID control

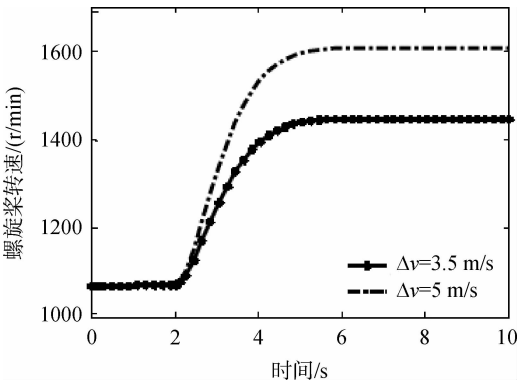


图 9 风速增加 3.5 m/s 和 5 m/s 推进系统响应曲线
Fig. 9 Propulsion system's dynamic response curves with the wind velocity increases of 3.5 m/s and 5 m/s

10 m/s,有 PID 控制的动力推进系统调节动作迅速,控制系统快速性比较高,在 4 s 内能达到所需转速,转速控制无超调,该推进系统能适应不同的巡航要求,提高飞艇的飞行性能.图 9 可以分析:

2 s 时风速增加 3.5 m/s 和 5 m/s,转速控制系统能在 4 s 内稳定,转速响应快,转速无超调,能适应小扰动干扰的风场.

5 结 论

螺旋桨-电动机推进系统的效率不仅影响平流层飞艇能量利用效率,而且还影响飞艇的结构设计等总体性能.本文主要工作:

1) 建立了电动机模型和螺旋桨推力模型,采用 GUI 编写人机交互界面,直观地显示匹配结果与曲线,开发了一款机桨匹配软件,直观明了、适用范围广.

2) 在 Simulink 中建立螺旋桨模型、直流无刷电动机调速模型以及风场变化模型.研究飞艇在巡航过程中速度变化和风速变化下的动力推进系统电动机转速控制问题.仿真结果表明:有 PID 控制的推进系统调节动作迅速,控制系统快速性比较高,能适应不同的巡航要求,且具有一定的抗风扰动能力.

3) 得到了平流层飞艇在 0 到 10 m/s 巡航速度下,推进系统匹配设计点,以及匹配设计曲线,即螺旋桨工作转速为 535~1071 r/min,推进系统总效率为 0.55.8~0.593,为飞艇的实时飞行提供参考依据.

参考文献:

[1] 何琳琳,窦满峰,王光伟.平流层飞艇电推进系统研究[J].微特电机,2009,37(12):9-12.
HE Linlin,DOU Manfeng,WANG Guangwei. Research on airscrew electric propulsion system for stratosphere airship [J]. Small and Special Electric Machine,2009,37(12):9-12. (in Chinese)
[2] 杜绵银,陈培,李广佳,等.临近空间低速飞行器螺旋桨技术[J].飞航导弹,2011(7):15-19.
DU Mianyin,CHEN Pei,LI Guangjia,et al. Low-speed aircraft propeller technology of near space[J]. Aerodynamic Missile Journal,2011(7):15-19. (in Chinese)
[3] 刘沛清,马蓉,段中喆,等.平流层飞艇螺旋桨地面风洞试验[J].航空动力学报,2011,26(8):1775-1781.
LIU Peiqing,MA Rong,DUAN Zhongzhe,et al. Ground wind tunnel test study of the propeller of stratospheric airships[J]. Journal of Aerospace Power,2011,26(8):1775-1781. (in Chinese)
[4] 罗玲,刘卫国,窦满峰,等.高空飞艇螺旋桨驱动电机分析[J].宇航学报,2009,30(6):2140-2144.
LUO Ling,LIU Weiguo,DOU Manfeng,et al. Analysis of the motor driving a propeller of high altitude airship[J]. Journal of Astronautics,2009,30(6):2140-2144. (in Chi-

nese)

[5] 侯远波, 罗义平, 漆光东. 平流层飞艇螺旋桨设计技术[C]//2011 年中国浮空器大会论文集. 北京: 航空工业出版社, 2011: 251-258.

[6] 雷光新, 刘巍, 杨涛, 等. 平流层飞艇螺旋桨设计参数对效率的影响[J]. 计算机仿真, 2011, 28(5): 56-59.

LEI Guangxin, LIU Wei, YANG Tao, et al. Design parameters effects on propeller efficiency of stratosphere airship[J]. Computer Simulation, 2011, 28(5): 56-59. (in Chinese)

[7] 苗景刚, 周江华, 杨新. 基于 Matlab/Simulink 的飞艇全数字仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(9): 2658-2661.

MIAO Jinggang, ZHOU Jianghua, YANG Xin. Airship digital simulation system based on Matlab/Simulink[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(9): 2658-2661. (in Chinese)

[8] 王海峰, 宋笔锋, 钟小平. 飞艇运动建模与仿真验证[J]. 飞行力学, 2009, 27(1): 31-35.

WANG Haifeng, SONG Bifeng, ZHONG Xiaoping. Modeling and simulation verification of motion for an airship[J]. Flight Dynamics, 2009, 27(1): 31-35. (in Chinese)

[9] Lundström D, Amadori K, Krus P. Validation of models for small scale electric propulsion systems[R]. AIAA 2010-483, 2010.

[10] 刘沛清. 空气螺旋桨理论及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006, 6.

[11] 唐梓杰, 丁水汀, 杜发荣, 等. 航空二冲程活塞发动机与定距螺旋桨的匹配研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(2): 379-383.

TANG Zijie, DING Shuiting, DU Farong, et al. Method for match of two-stroke piston engine and set propeller[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(2): 379-383. (in Chinese)

[12] 康桂文, 胡雨, 李亚东, 等. 超轻型电动飞机动力系统的参数匹配[J]. 航空动力学报, 2013, 28(12): 2641-2647.

KANG Guiwen, HU Yu, LI Yadong, et al. Parameters matching of ultralight electric aircraft propulsion system[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(12): 2641-2647. (in Chinese)

[13] 聂营, 王生, 杨燕初. 螺旋桨静推力数值模拟与实验对比分析[J]. 计算机仿真, 2009, 26(3): 103-107.

NIE Ying, WANG Sheng, YANG Yanchu. Comparative analysis of propeller static thrust[J]. Computer Simulation, 2009, 26(3): 103-107. (in Chinese)

[14] 张礼学, 王中伟. 平流层飞艇环境适应性评价模型[J]. 航空学报, 2013, 34(4): 719-726.

ZHANG Lixue, WANG Zhongwei. Environmental adaptability evaluation model for stratospheric airships[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(4): 719-726. (in Chinese)

[15] Mueller J B, Zhao Y J, Garrard W L. Optimal ascent trajectories for stratospheric airships using wind energy[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2009, 32(4): 1232-1245.

[16] 聂营. 平流层飞艇高效螺旋桨设计与试验研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院 2008.

NIE Ying. The design and experiments study on high efficient propeller used for stratospheric airship[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)

[17] 梅晓榕, 柏桂珍, 张卯瑞. 自动控制元件及线路[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[18] 程钰锋, 聂万胜. 临近空间螺旋桨气动性能分析[J]. 直升机技术, 2011, (3): 8-13.

CHENG Yufeng, NIE Wansheng. The study of propeller aerodynamics characteristic in near space[J]. Helicopter Technology, 2011, (3): 8-13. (in Chinese)