

doi: 10.7690/bgzdh.2016.03.002

# 开关磁阻电机航空作动器模糊控制方法

金波, 陈伟, 胡羲

(中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司技术中心, 成都 610092)

**摘要:** 采用模糊控制方法设计了模糊逻辑与积分环节相结合的开关磁阻电机控制系统。该方法采用位置、电流双闭环控制策略, 根据系统响应过程中的误差和误差变化, 通过按专家知识总结的模糊规则对位置进行闭环控制, 在积分环节减小了位置静差, 弥补了模糊控制的不足。在 Matlab/Simulink 环境下建立系统模型并进行仿真。仿真结果表明: 该控制系统具有较快的响应速度和较高的精度, 满足航空作动器的应用需求。

**关键词:** 开关磁阻电机; 航空作动器; 位置伺服; 模糊控制; 积分

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A

## Fuzzy Control Method of Switched Reluctance Motor Aviation Actuator

Jin Bo, Chen Wei, Hu Xi

*(Aeronautic Technology Institute, AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)*

**Abstract:** The control system of switched reluctance motor is designed by using the fuzzy control method. In this method, the position and current double closed loop control strategy is adopted. According to the error and change-in-error in the transient period, position of SRM is controlled through the fuzzy logic rules which are summarized based on the knowledge of experts. The integration can help to efficiently eliminate static errors, which compensates the disadvantage of fuzzy logic. The control system was modeled and simulated in Matlab/Simulink. The simulation results show that the control system has fast response, high accuracy, and meets the application requirements of aviation actuators.

**Keywords:** switched reluctance motor; aviation actuator; position servo; fuzzy control; integration

### 0 引言

随着电力电子技术的不断发展,多/全电飞机被认为是未来航空工业的发展方向<sup>[1-4]</sup>。传统的航空作动器主要利用的是液压、气动及机械等传统动力源,这些传动方式虽性能优良,但也存在质量大、成本高、响应慢和结构复杂等缺点,无法更好地应用于现代航空系统。早在1916年, D. T. Glass-Hooper提出了电力作动器的概念。第二次世界大战期间,电力作动器就已经应用于英国的“V”型轰炸机<sup>[4]</sup>。航空作动器肩负着驱动飞机舵面的任务,应该具备高可靠性、高功率密度、高效率和高鲁棒性等特点<sup>[5-7]</sup>,同时也应该满足质量轻、尺寸小、控制简单和成本低等要求。

在航空电力作动系统中,电机是至关重要的一部分。直流电机因为电刷和换相器的原因,不适合作为航空作动器;因此,电机的选取就被局限于感应电机、磁阻电机和永磁电机当中。

开关磁阻电机 (switched reluctance machine, SRM) 被认为是最符合飞机应用要求和约束的主要考虑对象之一,其转子上无任何形式的绕组或永磁体,制造成本较低,转动惯量小,易于加、减速;

机械强度高,可高速运行而不变形,适用于恶劣的应用环境<sup>[8]</sup>;定子极上嵌放集中绕组,绕组端部短而牢固,绝缘结构简单;各相的电路及磁路相互独立,系统可缺相运行,具有较高的容错能力。事实证明,在合理的设计及控制下,SRM的功率密度完全可以和传统的电机相媲美。

传统的PID控制由于结构简单、控制方便等优点,得到了广泛应用;然而SRM实际运行时有很高的非线性和时变不确定性,难以建立精确的数学模型。采用传统的PID控制策略,不仅参数整定复杂,而且难以获得最佳的控制效果。不同于常规的控制算法,模糊控制理论采用基于自然语言的控制规则,不依赖精确的数学模型,采用人类思维中的模糊量,构造简单,容易实现模糊控制规则,易于被人接受。但常规的模糊控制仍然存在自适应能力不足和控制精度不高的缺点。

笔者针对航空作动器的精度和性能要求,采用位置、电流双闭环的控制方法。针对SRM的高度非线性特性,采用模糊逻辑和积分环节相结合的控制策略。在Matlab/Simulink环境下建模并仿真,验证了控制方法的有效性。

收稿日期: 2015-10-31; 修回日期: 2016-01-21

作者简介: 金波(1981—),男,陕西人,工程硕士,工程师,从事飞行控制与系统仿真研究。

### 1 SRM 航空作动器的结构和数学模型

文中所研究的机电航空作动器由开关磁阻电机和丝杠螺母传动机构组成，丝杠螺母将开关磁阻电机的旋转运动转变为直线运动，而后驱动翼面等完成既定动作。上述结构可参见文献[9]，这里不再赘述，下文仅对开关磁阻电机的结构进行简要介绍。

#### 1.1 开关磁阻电机驱动系统结构

开关磁阻电机为双凸极结构，定子极绕有集中绕组，转子上既无绕组也无永磁体；因此结构简单，机械强度高。典型的三相 12/8 极开关磁阻电机截面图如图 1 所示。

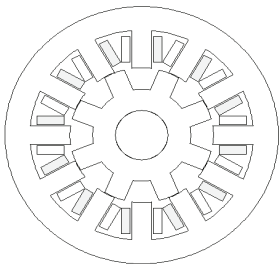


图 1 三相 12/8 极开关磁阻电机截面图

笔者采用的功率变换器为三相不对称半桥功率变换器如图 2 所示。每相连接 2 个功率开关管和 2 个续流二极管。

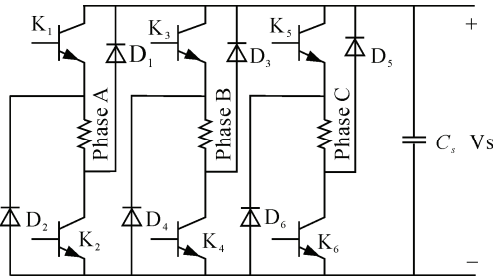


图 2 三相不对称半桥功率变换器

#### 1.2 开关磁阻电机的数学模型

开关磁阻电机的运行遵循基本的电磁规律，假设各相结构和电参数对称，不计磁滞、涡流损耗及绕组互感，根据电路基本定律，可以写出 SRM 第  $k$  相的电压平衡方程：

$$U_k = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \quad (1)$$

式中  $U_k$ 、 $R_k$ 、 $i_k$  以及  $\psi_k$  分别为第  $k$  相绕组的端电压、相电阻、相电流和磁链。其中磁链  $\psi_k$  是绕组电流  $i_k$  和转子位置角  $\theta$  的函数，可用电感  $L_k$  和电流  $i_k$  的乘积表示：

$$\psi_k(i_k, \theta) = L_k(i_k, \theta) i_k \quad (2)$$

每相绕组所产生的电磁转矩  $T_k$  根据磁共能  $W_k'$

计算，即

$$T_k = \frac{\partial W_k'}{\partial \theta} \quad (3)$$

根据力学原理，电机转子机械运动方程可表示为

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + k_f \omega + T_L \quad (4)$$

式中： $T_e$  为电磁转矩； $J$  为转动惯量； $\omega$  为转子机械角速度； $k_f$  为摩擦系数； $T_L$  为负载转矩。

#### 1.3 丝杠螺母传动方程

丝杠螺母传动是将旋转运动转化为直线运动的一种理想传动方式，它具有结构紧凑、传动平稳和噪声低等优点，被广泛应用于各种工业设备和精密仪器。其中，滚珠丝杠螺母具有摩擦损失小、传动效率高等优点，而滑动丝杠螺母具有结构简单、可自锁等优点。可依据具体应用需求进行选用。

基于电机的旋转角度和丝杠螺母传动机构的相关参数，可得到丝杠直线位移行程<sup>[10]</sup>：

$$S = \frac{P\theta L}{2\pi m} \quad (5)$$

式中： $S$  为螺母运动的直线位移； $\theta$  为电机转过的机械角度； $P$  为丝杠螺距； $L$  为丝杠线数； $m$  为减速比。

### 2 模糊控制策略

#### 2.1 模糊控制器的设计

模糊控制是一种基于语言变量的非线性控制方法，具有结构简单、易于理解、运算量小和对硬件要求低的优点。模糊控制通过数字计算机来实现，包括模糊化、模糊推理和反模糊化 3 个重要部分。随着被控对象复杂程度的提高，建立在精确数学模型上的传统控制方法已经难以满足实时控制的要求。而模糊控制是建立在人工经验基础上的，不需要了解被控对象的精确数学模型，所以它能完成传统控制方法所不能完成的任务；但是，因为缺少积分环节，档级有限，普通的模糊控制精度并不高。针对 SRM 作动系统快速性好、精度高的要求，笔者将积分环节与模糊控制相结合，得到的模糊-积分控制系统，其原理框图如图 3 所示。

文中的模糊-积分控制器由模糊控制器和积分环节组成，其中  $e$  为位置偏差； $ec$  为位置偏差变化率； $U$  为输出控制量； $k_e$  和  $k_{ec}$  为量化因子； $k_u$  为比例因子。 $e$ 、 $ec$  和  $U$  均选取常用的 7 个语言变量值，即 NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。其论域设定为

{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6}。

输入输出变量均采用三角形隶属度函数，其具体函数形式为

$$U(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (6)$$

式中  $a$ 、 $c$  和  $b$  分别表示函数的两端和顶点。输入、输出变量隶属函数如图 4 所示。

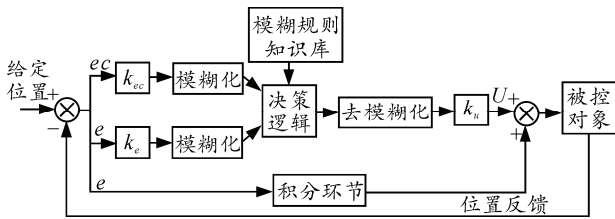


图 3 模糊控制系统结构

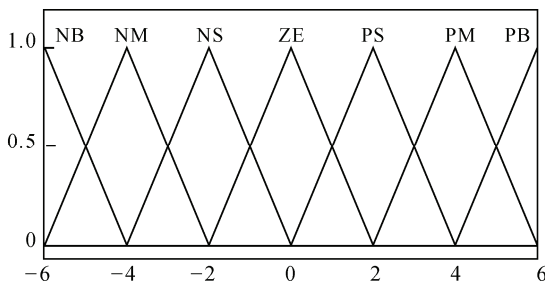


图 4 模糊控制系统输入、输出变量语言值隶属函数

### 2.2 模糊规则的选取

模糊控制规则是整个控制器的关键部分，其设计的合理程度与最终的控制效果间有很大关系。系统输出变量  $U$  的模糊控制规则如表 1 所示。

表 1 输出变量  $U$  模糊控制规则

$ec$	$e$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

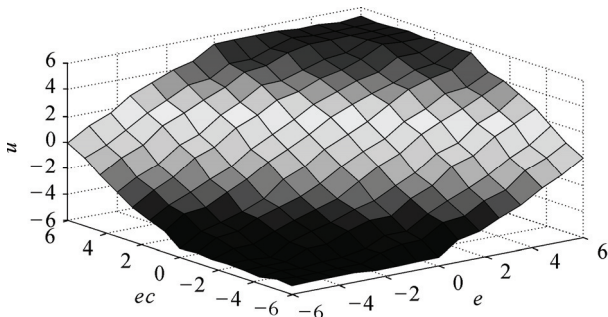


图 5 模糊控制规则曲面

相应的模糊控制规则曲面如图 5 所示。由图中可以看出，规则曲面具有高度的非线性，有效地反映了专家的知识。

### 3 SRM 航空作动系统模型的建立

利用 Matlab/Simulink 环境建立系统模型，采用位置、电流双闭环控制方法。其中位置环采用模糊控制和积分环节调节，电流环采用滞环控制，图 6 为作动器控制系统框图。将蜗杆传动机构的位移信息传送给系统的位置控制器，经过模糊控制器后输出每相的参考电流，而后进行电流滞环控制。需要说明的是开关磁阻电机的相电流和位置间无直接关系，但相电流的大小会通过电机转速间接地影响对位置的调节过程。当实际位置距离参考位置较远时，位置误差较大，此时模糊控制器输出较大的参考电流，电机转速较高，转子实际位置快速逼近其给定值，以提高系统的响应速度；当实际位置距离参考位置较近时，位置误差较小，此时模糊控制器输出较小的参考电流，电机转速较低，转子实际位置缓慢逼近其给定值，以减小甚至消除系统的超调。

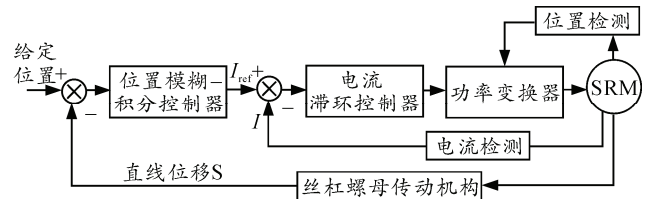


图 6 SRM 航空作动器控制系统框图

#### 3.1 SRM 本体模块

图 7 为开关磁阻电机本体模块。该模块是基于三相 12/8 极 SRM 的电磁特性测试数据，运用混合训练的小波神经网络建立<sup>[11]</sup>。

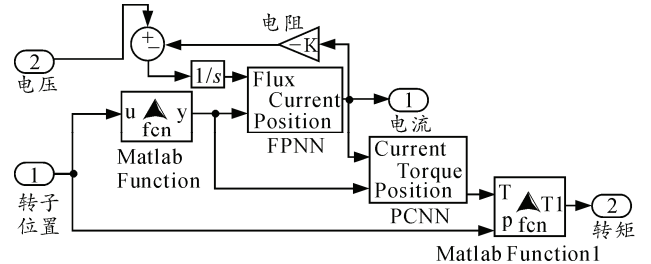


图 7 SRM 本体模块

#### 3.2 位置控制模块

位置控制模块由模糊控制与积分环节组成，其模块结构如图 8 所示。模糊控制的输入为位置误差及其微分，其中位置误差的微分代表了误差的变化趋势，模糊控制的输出为电机相绕组电流的参考值，去模糊化通过常用的重心法实现，模糊控制输入与输出变量的关系参见表 1 和图 5。模糊控制中量化

因子  $k_e$ 、 $k_{ec}$  和比例因子  $k_u$  的选取与电机参数以及系统的性能要求相关，文中模糊控制器输入输出变量的模糊集论域均为  $[-6,6]$ ，而位置误差的范围为  $[-180^\circ \sim 180^\circ]$ ，则位置误差的量化因子为  $k_e = 6/180 = 0.03333$ ；笔者设定电机最大转速为  $800 \text{ r/min}$ ，则位置误差变化率的范围为  $[-4800 \sim 4800 (\text{^\circ/s})]$ ，可得位置误差变化率的量化因子为  $k_{ec} = 6/4800 = 0.00125$ ；笔者设定电机相电流最大值为  $23 \text{ A}$ ，则比例因子为  $k_u = 23/6 = 3.8333$ 。

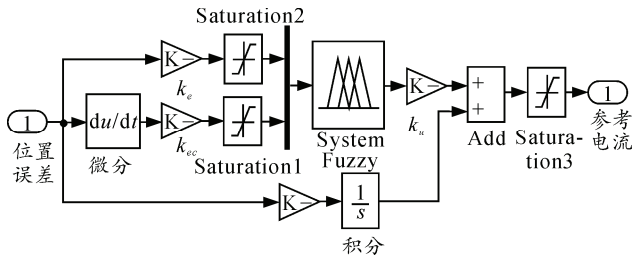


图8 位置控制模块

### 3.3 电流控制模块

由于电机的转速不会太高，电流控制模块采用滞环比较器进行控制即可，主要对电流进行斩波控制。首先设置一个电流偏差的上限  $I_{\max}$  和电流偏差下限  $I_{\min}$ ，控制器的输入为参考电流  $I_{\text{ref}}$  和实际电流  $I$  的差值  $I_{\text{ref}} - I$ 。所以，当  $I_{\text{ref}} - I$  超过上限  $I_{\max}$  时，实际电流  $I$  偏小，给主开关管开通信号；当  $I_{\text{ref}} - I$  低于下限  $I_{\min}$  时，实际电流偏大，给主开关管关断信号。如此反复，便可将相电流维持在设定的上下限之间。

### 3.4 换相逻辑模块

图9为换相逻辑模块。由于三相12/8极开关磁阻电机的电感周期为  $45^\circ$ ，将实际位置角度与  $45^\circ$  求余，得到  $0^\circ \sim 45^\circ$  范围内的位置角。再将该角度与开通角和关断角进行比较，同时考虑滞环输出，得到三相开关管的驱动信号。

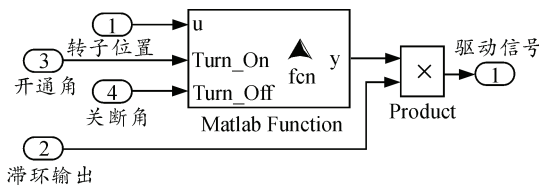


图9 换相逻辑模块

### 3.5 功率变换器模块

如前所述，文中采用的功率变换器为三相不对称半桥结构，该功率变换器在 Matlab/Simulink 工具箱中已经存在。以 A 相为例，图10是其模块结构图，可见它具有3个输入和2个输出。其中输入 G 为控制主开关器件开通关断的信号，V+、V- 分别

连接电源正负极。2个输出端  $A_1$  和  $A_2$  连接电机 A 相绕组。B、C 相类似。

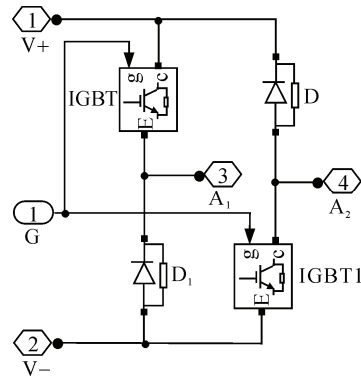


图10 功率变换器(A相)

### 3.6 丝杠螺母传动模块

根据式(5)搭建丝杠螺母传动模块，其输入为电机转过的电角度，输出为作动器推杆的直线位移。

## 4 仿真结果

根据上述模型，建立 SRM 航空作动器仿真模型，如图11所示。系统仿真参数：SRM 额定电压  $96 \text{ V}$ ，额定转速  $2000 \text{ r/min}$ ，负载转矩  $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，摩擦系数  $0.002$ ，转动惯量  $9.5867 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，开通角  $2.5^\circ$ ，关断角  $18^\circ$ ，丝杠螺母传动机构减速比  $36:1$ ，丝杠线数  $2$ ，丝杠螺距  $2 \text{ mm}$ 。

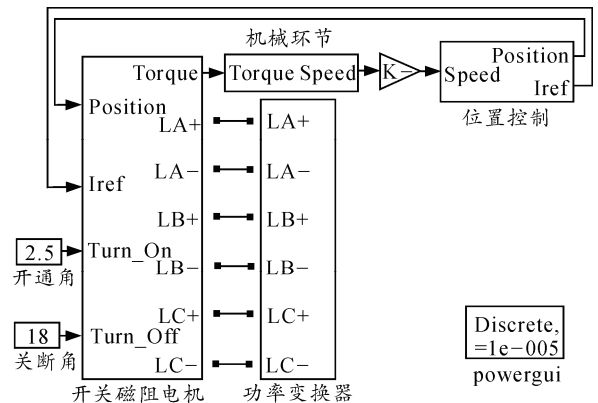


图11 SRM 航空作动系统仿真模型

仿真结果如图12所示。设定直线位移  $9 \text{ mm}$ ，系统经  $0.166 \text{ s}$  到达  $8.96 \text{ mm}$  位置，位置偏差小于  $0.45\%$ 。由图12(a)知，经过  $0.15 \text{ s}$  作动系统稳定。由图12(b)可以看出， $0 \sim 0.02 \text{ s}$  电机转速迅速上升至  $700 \text{ r/min}$ ，而后转速上升速率减缓， $0.02 \sim 0.08 \text{ s}$  转速由  $700 \text{ r/min}$  上升至  $800 \text{ r/min}$ ， $0.08 \sim 0.2 \text{ s}$  被控对象到达预定位置，电机转速迅速降为  $0$ 。可见，系统响应速度快。图12(c)为电机输出电磁转矩曲线，系统稳定后，转矩在  $0.9 \sim 1.1 \text{ N}\cdot\text{m}$  范围内波动，平均电磁转矩为  $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。图12(d)和图12(e)分别为



参考电流波形和实际母线电流波形。

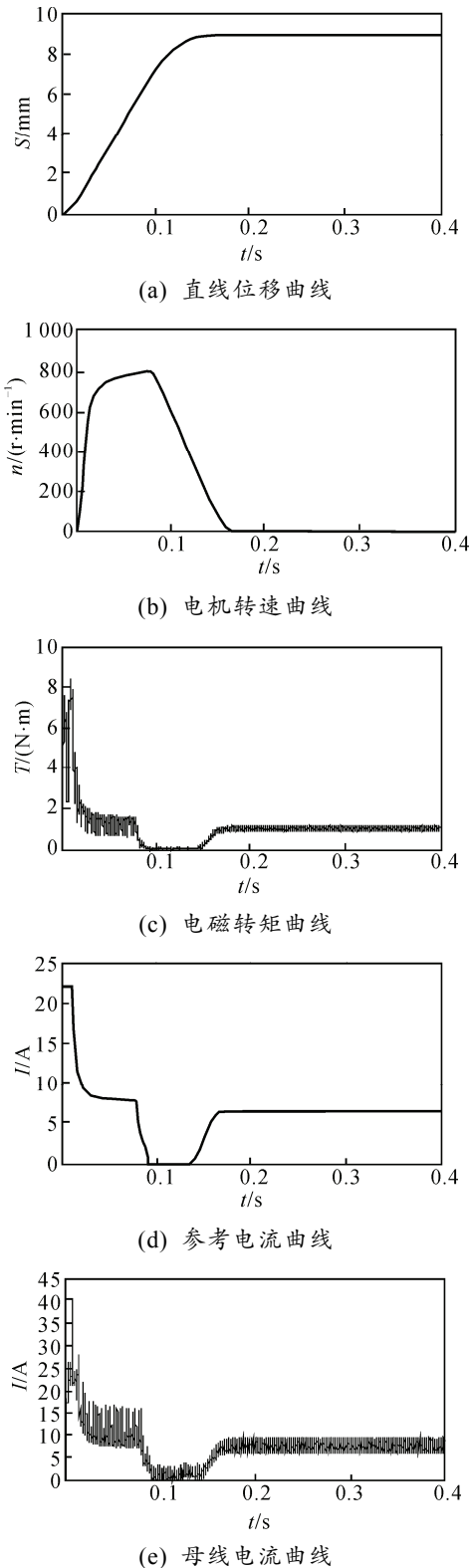


图 12 SRM 航空作动系统仿真结果

## 5 结束语

笔者对开关磁阻电机航空作动器的双闭环位置伺服控制方法进行了研究, 针对开关磁阻电机的强非线性特性, 在位置环引入了模糊逻辑, 消除了对精确数学模型的依赖, 并利用积分环节减小了稳态误差, 有效地弥补了模糊控制的不足, 并在 Matlab 中建立了作动器的仿真模型。仿真结果表明: 系统可快速而精确地完成位置伺服, 从而验证了控制方法的有效性。该研究可为开关磁阻电机在航空作动器中的应用提供参考。

## 参考文献:

- [1] Uwe Vollmer, Uwe Schafer. An at-all operating points highly efficient PMSM for HEV[J]. The World Electric Vehicle Journal, 2008, 2(4): 99-107.
- [2] Jones R I. The More-Electric aircraft: The past and the future?[C]. London: IEE Colloquium on Electrical Machines and Systems for the More Electric Aircraft, 1999: 1/1-1/4.
- [3] Pearson W. The more electric/all electric aircraft-a military fast jet perspective[C]. London: IEE Colloquium on All Electric Aircraft, 1998: 5/1-5/7.
- [4] Quigley R E J. More electric aircraft[C]. San Diego, CA: Eighth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1993: 906-911.
- [5] Boglietti A, Cavagnino A, Tenconi A, et al. The safety critical electric machines and drives in the more electric aircraft: A survey[C]. Porto: 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2009: 2587-2594.
- [6] Ganey E D. High-performance electric drives for aerospace more electric architectures Part I-Electric Machines[C]. Tampa, FL: IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007: 1-8.
- [7] Cao W, Mecrow B C, Atkinson G J, et al. Overview of electric motor technologies used for more electric aircraft (MEA)[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(9): 3523-3531.
- [8] 吴红星. 开关磁阻电机系统理论与控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 14-38.
- [9] 孙继勇. 小型飞机起落架收放机电作动器研究[J]. 机电工程技术, 2009, 38(7): 53-55.
- [10] 李程, 马瑞卿, 王翔. 基于 BLDCM 的航空作动器系统建模与仿真[J]. 微电机, 2010, 43(4): 55-57.
- [11] Song Shoujun, Ge Lefei, Ma Shaojie, et al. Accurate modeling of switched reluctance machine based on hybrid trained WNN[J]. AIP Advances, 2014, 4(4): 047130.