

# 无刷力矩电机力矩波动系数实测值与设计值差异性

石宏顺<sup>1,2</sup>, 夏 堃<sup>3</sup>, 崔浪浪<sup>1,2</sup>, 朱志能<sup>1,2</sup>

- (1. 贵州航天林泉电机有限公司, 贵州 贵阳 550081;  
2. 国家精密微特电机工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550081;  
3. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

**摘要:** 力矩波动系数是衡量无刷力矩电机品质的重要指标。在电机的研制和生产过程中, 样机力矩波动系数实测值往往高于设计值。为此, 通过样机试验与模拟仿真, 从样机生产过程中绕组线圈、三相电流、定转子偏心等分析产生该差异性的原因, 结果表明偏心是引起样机实测值大于设计值的主要原因, 三相电流、绕组线圈影响次之。通过优化结构设计降低定转子偏心量, 并考虑偏心引起的力矩波动对设计值进行修正, 可提高力矩波动系数设计值与实测值的一致性。

**关键词:** 无刷力矩电机; 力矩波动; 差异性; 线圈; 电流; 偏心

中图分类号: TM 306 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)04-0071-06

doi: 10.12177/emca.2019.181

## Difference Between Measured and Designed Values of Torque Fluctuation Coefficient in Brushless Torque Motor

SHI Hongshun<sup>1,2</sup>, XIA Kun<sup>3</sup>, CUI Langlang<sup>1,2</sup>, ZHU Zhineng<sup>1,2</sup>

- (1. Guizhou Aerospace Linquan Motor Co., Ltd., Guiyang 550081, China;  
2. National Engineering Research Center for Small and Special Precision Motors, Guiyang 550081, China;  
3. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Torque fluctuation coefficient is an important index to measure the quality of brushless torque motor. In the process of development and production of motors, the measured value of the torque fluctuation coefficient of the prototype is higher than the designed value. Through the prototype test and simulation, the causes of the difference are analyzed from the aspects of winding coil, three-phase currents, and eccentricity of stator and rotor in the production process of the prototype. The results show that eccentricity is the main reason for the measured value to be higher than the designed value, while three-phase current and winding coil have less effects on the difference. By optimizing the structure design of the motor to reduce the eccentricity of stator and rotor and correcting the design value according to the torque fluctuation caused by the eccentricity, the consistency between the design value and the measured value can be improved.

**Key words:** brushless torque motor; torque fluctuation; difference; coil; current; eccentricity

## 0 引言

永磁式无刷力矩电机具有力矩大、转速低、可

靠性高等特点, 可直接作为伺服系统中的直驱动力, 不再需要中间传动机构(如减速器), 逐渐应用在卫星天线驱动系统、火炮转台、雷达转台、数

收稿日期: 2019-12-19; 收到修改稿日期: 2020-02-23

作者简介: 石宏顺(1992—), 男, 工程师, 研究方向为微特电机设计。

控机床等高精度伺服系统中。

力矩波动系数是衡量高精度力矩电机品质的重要指标。力矩波动过大将会引起伺服机构动作误差,造成预定动作无法精确完成。影响力矩波动的因素是多种多样的,如材料、结构设计、电磁设计、加工工艺等自身内部原因,也有驱动器控制精度、位置传感器精度等外部原因。随着力矩电机应用范围越来越广,大量的国内外学者投入到低力矩波动电机的研究中来。在通过优化电机电磁方案降低力矩波动的研究中,唐先全<sup>[1]</sup>采用了极弧偏心、削角、不完全偏心的3种形状永磁体改善气隙磁场的正弦性来降低力矩波动;宋金龙<sup>[2]</sup>通过采用多块不同磁性能的永磁体进行组合代替单块永磁体来改善气隙磁场的正弦性来降低力矩波动;冯小军等<sup>[3]</sup>设计了无槽式无刷力矩电机消除了齿槽转矩对力矩波动的影响,并在永磁体进行削角处理,使得样机实测力矩波动为0.27%;王成元等<sup>[4]</sup>采用转子斜极来降低齿槽转矩对力矩波动影响,其样机实测力矩波动的1%;陈思儒<sup>[5]</sup>分析了不同槽口宽度降低齿槽转矩对力矩波动影响,并指出槽口宽度减小齿槽转矩减小,但并非槽口宽度越小其齿槽转矩越小,存在最优槽口;王栋梁等<sup>[6]</sup>分析了集中式绕组斜槽或斜极的方法,有效降低了力矩波动。在通过优化外部驱动器控制精度方面降低力矩波动的研究中,Chapman等<sup>[7]</sup>通过优化驱动器电流控制策略提高电流品质来降低力矩波动;洪南生等<sup>[8]</sup>通过优化驱动器电流导通角降低力矩波动;刘亚清等<sup>[9]</sup>基于参数自适应迭代学习控制的抑制策略降低力矩波动;陈鸣<sup>[10]</sup>提出了一种用星形-三角形混合连接绕组替代三相星形绕组降低力矩波动。

上述文献中,多数是从优化电机电磁设计方案的角度来降低力矩波动,虽然一定程度上降低了力矩波动设计值,但是样机实测值与设计值往往存在一定差异,产生这种差异性原因是本文主要研究的内容。本文从生产过程中产生力矩波动的绕组线圈、三相电流、定转子偏心等方面进行分析,并基于样机试验和模拟仿真分析结果,为低力矩波动力矩电机的研制和生产提供参考及指导。

## 1 无刷力矩电机工作原理

无刷力矩电机是伺服系统中的一部分,是系

统中将电能转换为机械能的设备。伺服系统原理图如图1所示。由电源、驱动器、永磁无刷力矩电机、位置反馈传感器、负载等组成,驱动器通过安装在电机转子上的传感器反馈的位置信号,控制与定子绕组连接的相应的功率开关器件的导通或关闭,从而在定子上产生圆形旋转磁场,与转子上的永磁体产生的永磁磁势发生电枢反应进而驱动永磁转子旋转,转子输出相应的力矩和转速<sup>[11]</sup>。

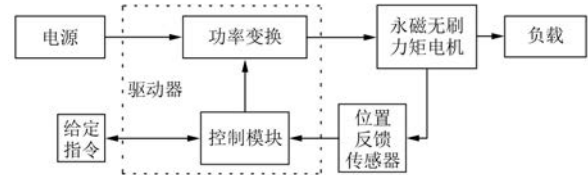


图1 伺服系统原理图

## 2 力矩波动实测值与设计值差异影响因素

电机力矩波动系数通常是在理想的条件下计算的。理想的条件包括:三相绕组线圈匝数及电阻一致、三相电流正弦对称、定转子气隙均匀对称等。实际上,由于生产工艺的原因,三相绕组线圈匝数、电阻可能出现差异,定转子偏心会引起气隙不均匀、不对称;而驱动器会引起三相电流非正弦、不对称。这些因素会导致力矩波动实测值大于设计值。

本文以2台某型分装式永磁无刷力矩电机(简称为“F电机”,仅包含定子和转子)为例进行分析。F电机设计参数如表1所示。样机实物如图2所示。为了降低电机力矩波动,该电机采用了极弧偏心式永磁体提高气隙磁场的正弦性,其力矩波动系数设计值为0.69%。实测2台样机力矩波动系数值分别为5.71%和5.94%,约为设

表1 F电机设计参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
工作电压/V	28	力矩波动系数/%	0.69
驱动方式	正弦波	每槽匝数	306
结构形式	内转子	电枢外径/mm	99
额定力矩/(N·m)	1	电枢内径/mm	70.2
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	1	电枢长度/mm	14
极数	32	气隙长度/mm	0.6
槽数	33	永磁体极弧偏心/mm	16



图2 F电机样机实物图(含测试工装)

计值的8倍。为了分析实测值和设计值的差异性,分别从绕组线圈、三相绕组电流、定转子相对偏心等生产过程因素分析实测值偏离设计值的原因。

2.1 绕组线圈对力矩波动的分析

对于小批量、定制化产品,电枢往往采用人工绕线,因此生产过程会出现多绕、少绕的现象。为了分析绕组线圈匝数出现少绕或多绕对力矩波动的影响,以F电机进行分析。F电机接线如图3所示。在29号与30号齿之间的线圈中少绕0~10匝,基于Ansoft分析匝数对力矩波动影响,分析结果如图4、图5所示。

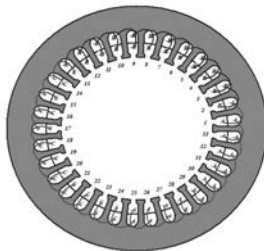


图3 电机接线图

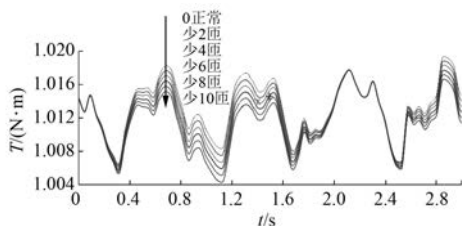


图4 少绕匝数时电磁力矩与时间曲线图

仿真结果表明当某个线圈出现少绕0~10匝时,力矩波动  $K_{fl}$  线性增加,由0.69%增大到

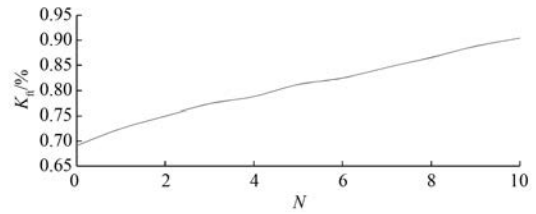


图5 少绕匝数 N 与力矩波动  $K_{fl}$  曲线图

0.90%。这是因为匝数不均等,形成了不均等、不对称的磁场和三相电阻等,导致圆周各点上力矩输出不一致,产生了力矩波动。实际生产中,少绕10匝以上,并不常见且是可避免的,实测2台样机由不同工人绕制三相电阻一致性较好、匝数准确,因此少绕或多绕并不是引起样机力矩波动实测值远大于设计值的主要原因。

2.2 绕组电流对力矩波动的分析

影响力矩电机力矩波动的另一因素是驱动器输入电枢绕组的电流品质,这与驱动器控制策略、位置传感器反馈信号精度有关。F电机为正弦波驱动电机,在三相绕组中通入三相对称的正弦波电流如图6所示。三相电流的幅值、相位、正弦度偏差均对力矩波动产生影响。以基于  $i_d = 0$  矢量控制分析电流对力矩波动影响,分别从电流幅值、相位角分析对电机力矩波动的影响。

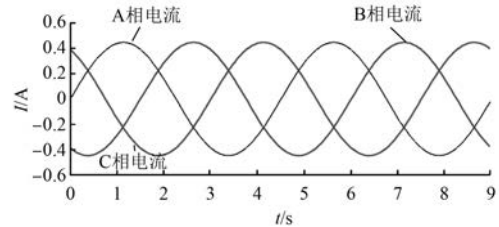


图6 输入三相正弦波电流

2.2.1 三相电流幅值不均等

在电机三相绕组通入相位差互为  $120^\circ$ 、幅值不等的正弦波电流,其中A、B相幅值相等,C相分别低于A、B相幅值的1%、2%、3%、4%、5%进行仿真分析,分析结果如图7和图8所示。

2.2.2 三相电流相位差非  $120^\circ$

在电机三相绕组通入幅值相等、相位差非  $120^\circ$ 均等的正弦波电流,其中A相初始相位角为  $0^\circ \sim 5^\circ$ 、C相初始相位角  $120^\circ$ 、B相初始相位角  $240^\circ$ 进行仿真,分析结果如图9和图10所示。

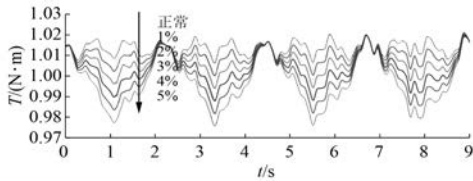


图7 C相低于A、B相电流幅值时电磁力矩与时间曲线图

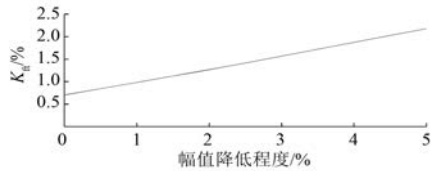


图8 C相低于A、B相电流幅值程度与力矩波动  $K_n$  曲线图

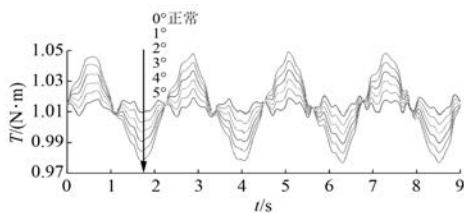


图9 A相初始相位角下电磁力矩与时间曲线图

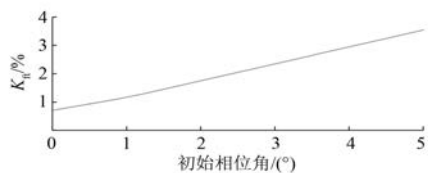


图10 A相初始相位角与力矩波动  $K_n$  曲线图

从三相电流幅值、相位角对力矩波动的影响分析结果看出,三相电流幅值、相位差不均等程度越大,对力矩波动  $K_n$  影响越大,且影响程度远大于绕组线圈匝数不均等引起的力矩波动。为了提高F电机的三相电流正弦性和对称性,测试时位置传感器采用了18位精度的SICK编码器、高精度ELMO驱动器(该套驱动器及编码器具有2.65%低力矩波动电机测试应用经历,提供三相电流品质相对较好)。但是,驱动器难以实现纯正弦三相电流输入,因此电流品质也是引起该电机力矩波动的因素之一,但不是引起实测值远大于设计值的主要因素。

### 2.3 定转子偏心对力矩波动的分析

定转子偏心也是影响力矩电机力矩波动的因

素之一。电机结构设计和工艺水平决定了转子和定子是否相对偏心(指转子外圆与定子内圆偏心),偏心则会引起气隙磁密分布不均匀、不对称,引起磁场畸变进而导致力矩波动变大。

偏心包括定子与转子的动态偏心和静态偏心,静态偏心是电机定子和转子装配后引起的自然偏心;动态偏心是电机运行过程产生偏心。以F电机为例进行分析静态偏心对力矩波动的影响。该电机为分装式电机,定子和转子单独交付用户,需采用测试工装装配后进行电机测试。为了降低产品成本,该电机采用通用工装(指同时可用在其他电机测试的工装)进行测试,如图11所示。转子和定子通过转接环与通用工装进行装配。

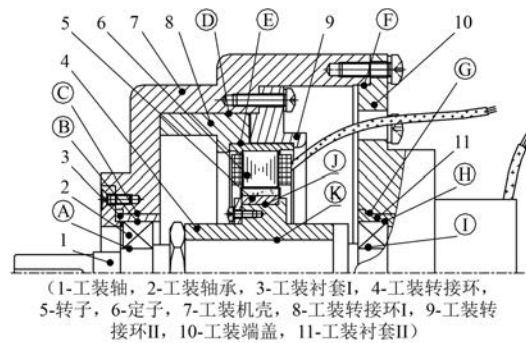


图11 电机与测试工装装配图

#### 2.3.1 转子和定子相对偏心量计算

该力矩电机在地面环境进行装配和试验,零部件多以间隙配合装配,装配过程中可能导致定子和转子会产生相对偏心。以工装机壳作为基准,依据表2所示各个零部件配合位置的间隙量计算定子和转子相对偏心量。

(1) 定子安装间隙量  $e_{\text{定子}}$  计算。

以工装机壳为基准,定子安装间隙量计算为  $e_{\text{定子}} = e_D + e_E = (0.012 \sim 0.074) \text{ mm}$ 。

(2) 转子安装间隙量  $e_{\text{转子}}$  计算。

以工装机壳为基准,计算工装轴左端轴承挡位置产生的间隙量:  $e_{\text{轴左端}} = e_A + e_B + e_C + e_{MC} = (0.008 \sim 0.039) \text{ mm}$ 。

同理,以工装机壳为基准,计算工装轴右端轴承挡位置产生的间隙量为  $e_{\text{轴右端}} = e_F + e_G + e_H + e_I + e_{MC}$ ,考虑F处安装螺钉,认为  $e_F \approx 0$ ,  $e_{\text{轴右端}} = e_G + e_H + e_I + e_{MC} = (0.008 \sim 0.039) \text{ mm}$ 。

表 2 电机各配合位置间隙量

位置	零件	公差/mm	间隙量 $e$ /mm
A	轴承内圈 P6 级	0~-0.007	0~0.014
	轴承挡	-0.006~-0.014	
B	工装衬套轴承室	0.003~0.008	0.003~0.015
	轴承外圈 P6 级	0~-0.007	
C	工装机壳内圆	0~0.025	0
	工装衬套 I 外圆	0.025~0.045	
D	工装机壳内圆	0.005~0.020	0.011~0.034
	工装转接环 I 外圆	-0.006~-0.014	
E	工装转接环 I 内圆	0.001~0.020	0.001~0.040
	定子外圆	0~-0.02	
F	工装机壳内圆	0.010~0.030	0.010~0.055
	工装端盖外圆	0~-0.025	
G	工装机壳内圆	0~0.025	0
	工装衬套 II 外圆	0.025~0.045	
H	轴承室内圆	0.003~0.008	0.003~0.015
	轴承外圈	0~-0.007	
I	轴承内圈 P6 级	0~-0.007	0~0.014
	轴承挡	-0.006~-0.014	
J	工装转接环内圆	0.010~0.030	0.010~0.050
	工装轴外圆	0~-0.020	
K	转子内圆	0~0.020	0.010~0.045
	工装转接环外圆	-0.010~-0.025	

注:轴游隙 MC3 级,  $e_{MC} = 0.005 \sim 0.010$  mm。

由于工装轴左端轴承挡产生的间隙量等于工装轴右端的,即  $e_{轴左端} = e_{轴右端}$ ,故认为工装轴相对于工装机壳的间隙量为  $e_{轴} = (0.008 \sim 0.039)$  mm;

故转子相对工装机壳的间隙量为  $e_{转子} = e_{轴} + e_j + e_k = (0.028 \sim 0.134)$  mm。

(3) 转子相对于定子的偏心量  $E$  计算。

根据转子安装间隙量  $e_{转子}$  和定子安装间隙量  $e_{定子}$ ,可得到电机偏心量为  $E = 0.5 (\min |e_{转子} \pm e_{定子}| \sim \max |e_{转子} \pm e_{定子}|) = (0.008 \sim 0.104)$  mm ( $E$  表示定子圆心与转子圆心的距离)。

### 2.3.2 偏心量对力矩波动影响的仿真分析

基于上述分析,电机转子和定子的相对偏心量达到 0.008~0.104 mm,基于 Ansoft 进行定子转子偏心对力矩波动进行仿真分析(暂不考虑动态偏心)。分别针对不同的静态偏心量对力矩波动分析,仿真结果如图 12 和图 13 所示。

通过上述的分析结果可看出,当偏心量为 0

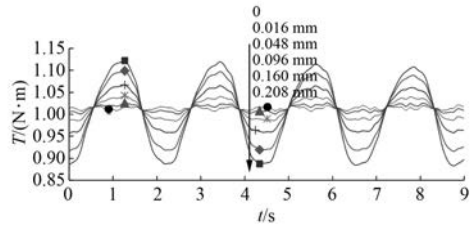


图 12 偏心量与电磁力矩曲线图

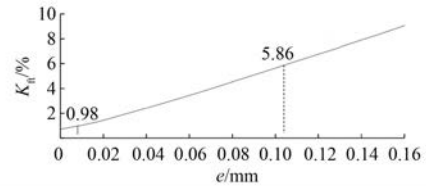


图 13 偏心量与力矩波动  $K_t$  曲线图

时,力矩波动  $K_t$  为 0.69% (设计值);最小偏心量为 0.008 mm 时,力矩波动  $K_t$  为 0.98%;最大偏心量为 0.104 mm 时,力矩波动为 5.86%。F 电机采用了通用工装进行测试,转子和定子是通过多个转接零件进行装配的,使得定子和转子相对偏心量进一步叠加,实测 2 台电机偏心量分别为 0.078、0.087 mm,按照仿真结果对应的力矩波动分别为 4.42%、4.78%。由此可知,偏心是引起该电机力矩波动实测值大于设计值的主要原因。

## 3 结 语

本文从绕组线圈、三相电流、定转子偏心等方面分析了生产过程中可能导致无刷力矩电机样机力矩波动实测值大于设计值的原因。对于 F 电机,转子和定子相对偏心引起的气隙磁密分布不均匀是引起力矩波动的主要原因,而三相电流、绕组线圈的影响次之。因此,对 F 电机的分析,为了提高样机实测值与设计预期值一致性,推荐如下方法:

(1) 优化电机结构设计减少转子和定子相对偏心量以控制力矩波动变大,并将偏心因素导致的力矩波动去修正设计值(设计值一般不考虑偏心)。应采用专用测试工装并减少不必要的转接零件,避免转子和定子相对偏心量叠加;建立转子和定子相对偏心量计算模型,通过相对偏心量计算值反复调整零件配合公差,以达到降低相对偏心量的目的;基于计算的偏心量,仿真偏心后引起



的力矩波动,修正理想状态设计值,使得设计值更接近实测值。

(2) 低力矩波动需要配备优秀的驱动控制器、高分辨率位置传感器,提供更优质的位置信号反馈和电流品质,提升三相电流的正弦性、对称性,能有效抑制电流引起力矩波动。

(3) 绕线过程,需保证各相绕组线圈一致性,可通过采用自动化绕线机进行绕线,可有效控制匝数、电阻差异引起力矩波动。

### 【参考文献】

- [ 1 ] 唐先全.基于 Maxwell 2D 的永磁同步电动机磁极优化设计[J].微电机,2018,51(5):22.
- [ 2 ] 宋金龙.抑制表贴式永磁同步电机转矩脉动的优化设计[D].成都:电子科技大学,2017.
- [ 3 ] 冯小军,范雪蕾.一种超低脉动无刷力矩电动机设计[J].微电机,2018,51(5):67.
- [ 4 ] 王成元,王贵子,夏加宽.机床转台直接驱动力矩电机的转矩优化设计[J].沈阳工业大学学报,2008,30(1):6.
- [ 5 ] 陈思儒.力矩电机的电磁设计及应力场分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2013.
- [ 6 ] 王栋梁,陈维.从转矩波动角度探讨集中绕组永磁电机电磁设计[J].电动工具,2017(4):15.
- [ 7 ] CHAPMAN P L, SUDHOFF S D, WHITCOMB C A. Optimal current control strategies for surface-mounted permanent-magnet synchronous machine drives [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(4):1043.
- [ 8 ] 洪南生,刘元江.永磁无刷直流电机转矩波动分析与降低方法研究[J].福建电力与电工,1997(3):8.
- [ 9 ] 刘亚清,邓惟滔.基于迭代学习控制的永磁同步电机转矩波动抑制策略[J].现代计算机(专业版),2018(22):14.
- [ 10 ] 陈鸣.解决无刷直流电机转矩波动的一种方法[J].微电机,2002,35(5):11.
- [ 11 ] 谭建成.永磁无刷直流电机技术[M].北京:机械工业出版社,2011.

(上接第 63 页)

- [ 4 ] 国家发展和改革委员会资源节约与环境保护司,工业和信息化部节能与综合利用司.高压三相笼型异步电动机能效限定值及能效等级:GB 30254—2013[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [ 5 ] 李贤明,王同章,周平.大功率高速电动机高效率低噪声离心风扇的研究与设计[J].防爆电机,2005,40(1):9.
- [ 6 ] 王天煜,王凤翔.大型异步电动机定子振动与模态分析[J].中国电机工程学报,2007,27(12):41.
- [ 7 ] 苏湘君.电动机轴承异常分析及处理[J].华电技术,2009,31(1):47.
- [ 8 ] 汪书苹,赵争鸣,冯堉径.YKK355-630 系列高压三相异步电动机高效风扇的设计[J].清华大学学报(自然科学版),2009,49(1):9.
- [ 9 ] 郑国丽,周黎民,邓尧强,等.高效电机风路结构设计参数优化[J].电机与控制应用,2015,42(4):62.

(上接第 70 页)

- [ 6 ] 姚骏,廖勇,李辉,等.直驱永磁同步风力发电机单位功率因数控制[J].电机与控制学报,2010,14(6):13.
- [ 7 ] 吕广强,倪俊杰,沈婷婷.基于 SVPWM 的永磁同步电机弱磁控制[J].微电机,2016,49(10):41.
- [ 8 ] 万佳,赵魁,柴凤.弱磁型永磁同步电机研究综述[J].微电机,2014,47(1):1.
- [ 9 ] 冯江华.轨道交通永磁同步牵引系统研究[J].机电传动,2010(5):15.
- [ 10 ] 袁登科,徐延东,李秀涛,等.永磁同步电动机变频调速系统及其控制[M].北京:机械工业出版社,2015.