

基于 Halbach 阵列的机器人关节电机 关键技术研究

葛红岩^{1,2}, 卓亮^{1,2}, 刘勇^{1,2}, 杨荣江^{1,2}

(1. 贵州航天林泉电机有限公司, 贵州 贵阳 550008;
2. 国家精密微特电机工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550008)

摘要: 机器人关节电机对电机的过载能力、电机重量、响应速度有较高的要求, 而传统的力矩电机转子外径较大, 转子重量和转动惯量较大, 响应慢。基于 Halbach 阵列设计了一款机器人用关节电机, 利用了 Halbach 阵列的磁屏蔽作用。使用非导磁铝合金作为转子轭部的材料, 降低了转子的质量和转动惯量, 提高了电机的响应速度。分析了 Halbach 阵列的优势, 列举了几种常见的 Halbach 阵列结构, 确定了电机的尺寸参数。通过电磁场有限元仿真分析了基于 Halbach 阵列的机器人关节电机的磁钢尺寸对电机性能的影响。最终通过试验验证了该技术的有效性。

关键词: 机器人关节电机; Halbach 阵列; 有限元; 磁钢

中图分类号: TM 351; TM 341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)12-0065-05

doi: 10.12177/emca.2020.173

Research on Key Technologies of Robot Joint Motor Based on Halbach Array

GE Hongyan^{1,2}, ZHUO Liang^{1,2}, LIU Yong^{1,2}, YANG Rongjiang^{1,2}

(1. Guizhou Aerospace Linquan Motor Co., Ltd., Guiyang 550008, China;

2. National Engineering Research Center for Small and Special Precision Motors, Guiyang 550008, China)

Abstract: Robot joint motors have higher requirements for the motor's overload capacity, motor weight and response speed. However, the traditional torque motor has larger rotor outer diameter, rotor mass and moment of inertia, and thus slower response. Based on the Halbach array, a joint motor for robots is designed. The magnetic shielding effect of the Halbach array is utilized, and non-magnetic aluminum alloy is used as the material of the rotor yoke, so as to reduce the mass and moment of inertia of the rotor and improve the response speed of the motor. The advantages of Halbach array are analyzed. Several common Halbach array structures are listed. The size parameters of the motor are determined. The influence of the size of the magnetic steel based on the Halbach array on the performance of the motor is analyzed by the electromagnetic field finite element simulation. Finally, the effectiveness of the technology is verified by experiments.

Key words: robot joint motor; Halbach array; finite element; magnetic steel

0 引言

Halbach 结构最早在 1973 年由学者 Mallianson 发现, 1979 年, 物理学家 Klaus Halbach

教授对其进行了完善延续至今^[1-3]。随着对 Halbach 永磁体阵列结构研究的深入, 各国学者将其应用于多种永磁电机结构设计中^[4-7]。Halbach 阵列结构的应用越来越多且研究也越来越深入,

收稿日期: 2020-07-06; 收到修改稿日期: 2020-11-03

作者简介: 葛红岩(1989—), 男, 工程师, 研究方向为永磁电机设计与多物理场计算。

同时随着各种仿真软件应用到设计与研究中,该结构在常规永磁电机中也越来越多^[8-12],因此研究其在实际工程上的应用具有重大的意义。

本文以 1 台机器人关节用永磁同步电机(PMSM)为例,基于 Halbach 磁钢阵列进行转子设计,设计过程中通过仿真研究了 Halbach 阵列中磁钢尺寸对电机性能的影响。最后,通过试验验证了 Halbach 阵列设计的可行性及其性能优势。

1 Halbach 阵列的结构与优势

常见的 Halbach 阵列磁钢排列如图 1 所示^[12-13]。

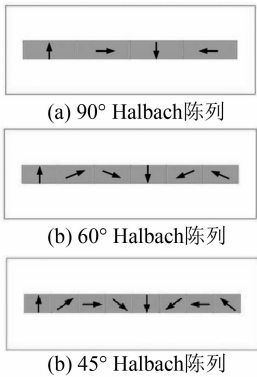


图 1 常见的 Halbach 磁钢排列

图 1(b)和图 1(c)的充磁工艺较难,充磁后磁场一致性也会较差,故文中采用图 1(a)中的 90°阵列排布。该结构具有单边去磁效果,故转子可采用不导磁的质量密度较低的金属,从而有效降低电机的重量和转动惯量,提高电机的动态响应能力;同时提高气隙磁场的正弦性,降低电枢反应后的磁场畸变率,减少气隙磁场的谐波含量,降低峰值电流和铁心损耗,提高电机的过载能力和效率。

2 电机电磁参数的确定

为了满足机器人关节电机高过载、低重量、快速响应等要求,电机采用集中绕组,绕组端部小,尽可能多的极数,但极数太多会导致电机转速和频率过高,在控制器开关频率 10 kHz 的前提下不易控制。

基于 Halbach 阵列的转子设计其转子轭部为

不导磁的铝合金,电机极数及磁钢厚度在一定范围内尽可能地削弱转子轭部的磁密,若设计不当会导致电机的漏磁较大,电机的性能下降较多,因此综合考虑采用 10 极 12 槽的极槽配合。样机参数如表 1 所示。

表 1 样机参数

参数名称	设计值	参数名称	设计值
极数	10	气隙长度/mm	1
槽数	12	磁钢牌号	Sm ₂ Co ₁₇ -32H
定子外径/mm	85	磁钢厚度/mm	5
定子内径/mm	48	铁心长/mm	43
额定转矩/(N·m)	2	过载转矩/(N·m)	12
额定转速/(r·min ⁻¹)	6 000	额定电压/V	270

3 基于 Halbach 阵列的有限元仿真

基于 Halbach 阵列的电机磁密分布如图 2 所示。磁钢采用 90°Halbach 阵列排布,可以看出转子轭部的磁密较低,电机转子轭部可以采用铝合金,对电机的性能输出影响较小,与传统转子轭部采用导磁钢相比,减轻了转子的重量与转动惯量,提高了电机动态特性。

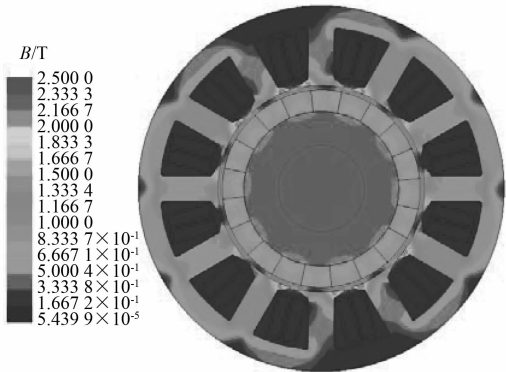


图 2 基于 Halbach 阵列的电机磁密分布

对空载性能及转矩过载点进行仿真,得到电机的 A 相反电动势及其傅里叶分析结果如图 3、表 2 所示。从图 3、表 2 可以看出, Halbach 阵列具有较好的正弦性,谐波含量较小。

表 2 A 相反电动势傅里叶分析

谐波次数	1	3	5	7	9	11
过载	135.2	1.91	0.401	0.228	0.158	0.332
空载	94	0.104	0.528	0.001	0.276	0.007

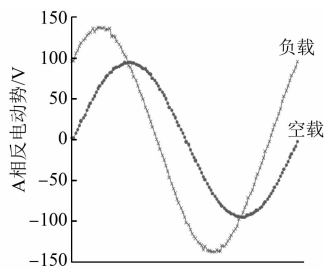


图3 A相反电动势

4 磁钢极弧系数对电机性能的影响

对磁钢尺寸进行定义,设定辅助磁钢的极弧系数为 r_1 ,Halbach 阵列主磁钢与辅助磁钢的间隙应尽可能小,设定主磁钢的极弧系数为 $1-r_1$,辅助磁钢与主磁钢的厚度相同均为 h_s ,如图4所示。分析对比不同极弧系数下 A 相反电动势波形,并对其进行傅里叶分析,结果如图5和表3所示。

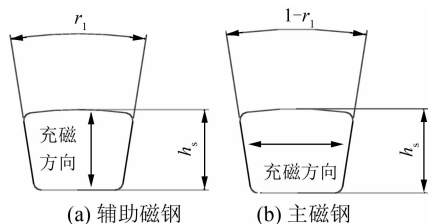


图4 主磁钢与辅助磁钢示意图

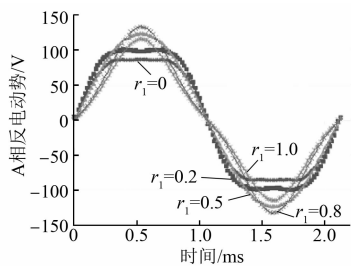


图5 不同极弧系数下的 A 相反电动势波形

表3 不同极弧系数下的 A 相反电动势波形傅里叶分析

极弧系数 r_1	基 波	3 次谐波
0	99.061 322 29	14.239 422 55
0.1	107.444 998 5	17.240 405 69
0.2	114.443 797 9	16.889 709 38
0.3	119.289 336 2	13.264 715 21
0.4	122.512 622 2	7.082 883 413
0.5	123.431 214 7	0.333 502 398
0.6	122.882 752 3	7.549 177 68
0.7	120.033 631 4	13.261 601 03
0.8	115.504 373 3	16.453 292 33
0.9	108.831 957 8	16.432 638 22
1.0	100.715 504 7	13.435 687 27

从图5、表3可以看出, r_1 从0到0.1,A相反电动势的基波及3次谐波会随之增加; r_1 从0.1到0.5,基波会随之增加,3次谐波随之减少,反应到波形从平顶波向标准正弦波过渡; r_1 从0.6到0.9,基波会随之减少,3次谐波随之增加,反应到波形从标准正弦波向标准尖顶波过渡; r_1 从0.9到1.0,基波及3次谐波会随之减少; $r_1=0.5$,相反电动势基波数值最大,3次谐波最小,故该电机设计极弧系数为0.5。

5 磁钢厚度对电机性能的影响

设定辅助磁钢的极弧系数为 h_s ,Halbach 阵列主磁钢与辅助磁钢由于要实现一端磁场抵消,一端磁场加强的作用,主磁钢与辅助磁钢的厚度应尽量相近,设定主磁钢的厚度也为 h_s ,如图4所示。分析对比不同磁钢厚度下 A 相反电动势波形,并对其进行傅里叶分析,如图6~图9所示。

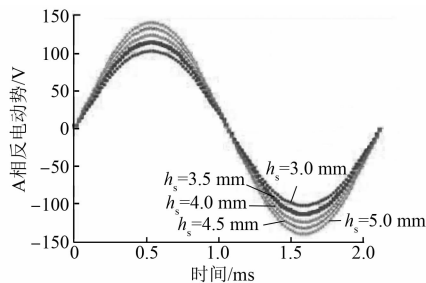


图6 不同厚度下的 A 相反电动势波形

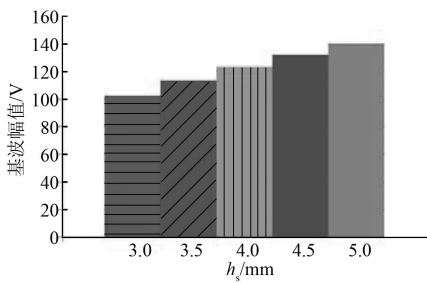


图7 不同厚度下的 A 相反电动势基波幅值

从图9可以看出, h_s 从3 mm到5 mm,A相反电动势的基波及3次谐波会随之增加,3次谐波占基波的比例也会随着增加,但从工程实际应用中看,极弧系数为0.5,不同厚度下谐波含量虽有差别,但已经较小,对电机的性能影响也较小,故磁钢厚度主要影响的是基波的数值,在设计中,磁钢的厚度主要影响磁钢的磁通量、转子的转动惯

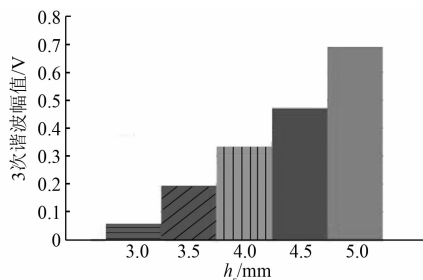


图8 不同厚度下的 A 相反电动势 3 次谐波幅值

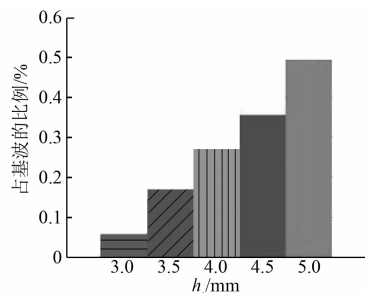


图9 不同厚度下的 A 相反电动势 3 次谐波占基波比例量、转子的质量等。

6 电机试验及与仿真结果对比分析

转子由轴、转子轭部、磁钢和转子护套组成。轴采用钢材制成,保证输出轴的结构强度,转子轭部采用非导磁的铝合金,磁钢采用钕钴稀土磁钢,转子轭部极磁钢的实物如图 10 所示。磁钢排列采用 Halbach 阵列,如图 11 所示。磁钢粘接在转子轭部形成转子组件,为了减小转子涡流损耗,转子轴向分 4 段,转子实物图如图 12 所示。

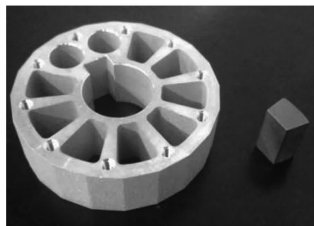


图10 磁钢与转子轭部实物图

电机实物图如图 13 所示。电机试验测试台如图 14 所示。对比电机的试验值与仿真值,结果如图 15 和图 16 所示。可以看出,试验结果与仿真测算结果相差较小,说明针对 Halbach 阵列的仿真研究有试验支持,研究结果有实际意义。

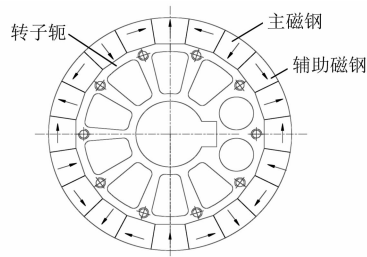


图11 磁钢粘接示意图

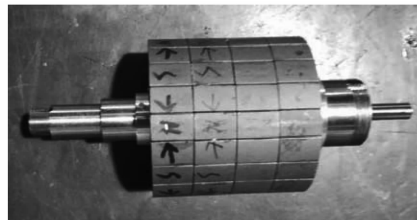


图12 转子实物图



图13 电机实物图



图14 电机试验测试台

7 结 语

本文通过对基于 Halbach 阵列机器人关节电机关键技术的研究,得到以下结论:

(1) Halbach 阵列电机在空载及过载工作点的反电动势均具有较好的正弦性;

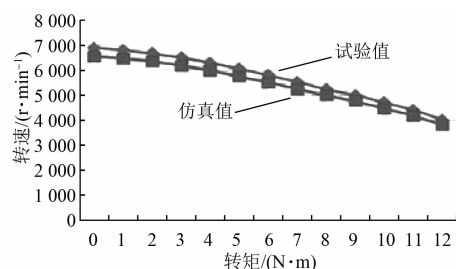


图 15 转矩与转速曲线

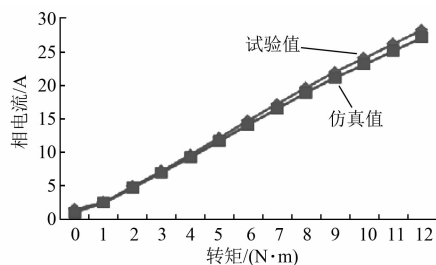


图 16 转矩与相电流曲线

(2) 磁钢厚度对磁钢的对磁场的谐波磁钢厚度主要影响磁钢的磁通量、转子的转动惯量、转子的质量等;

(3) Halbach 阵列电机可以采用非导磁转子轭部,且当辅助磁钢与主磁钢极弧系数相同时,反电动势的基波含量最大,谐波含量最小。

【参考文献】

- [1] HALBACH K. Perturbation effects in segmented rare earth cobalt multipole magnets [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1982, 198: 213.
- [2] ZHU Z Q, XIA Z P, HOWE D. Comparison of Halbach magnetized brushless machines based on discrete magnet segments of single ring magnet [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38 (5): 2997.

- [3] 王凤翔. Halbach 阵列及其在永磁电机设计中的应用[J]. 微特电机, 1999, 27(4): 22.
- [4] ZHU Z Q. Recent development of Halbach permanent magnet machines and applications [C] //2007 Power Conversion Conference-Nagoya, 2007.
- [5] 崔皆凡, 蒋莉莉, 王贺敏, 等. Halbach 磁体结构应用于永磁直线同步电机的研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 29(4): 400.
- [6] 李洪凤, 夏长亮, 宋鹏. Halbach 永磁体阵列永磁球形电动机转矩的三维有限元分析[J]. 天津大学学报, 2009, 42(11): 952.
- [7] YAN L, CHEN I, LIM C K, et al. Torque modeling of spherical actuators with double-layer poles [C] //2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006.
- [8] 王晓远, 唐任远, 杜静娟, 等. 基于 Halbach 阵列盘式无铁心永磁同步电机优化设计——楔形气隙结构电机[J]. 电工技术学报, 2007, 22(3): 2.
- [9] MARKOVIC M, PERRIARD Y. Optimization design of a segmented Halbach permanent-magnet motor using an analytical model [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(7): 2955.
- [10] BOUGHRARA K, CHIKOUCHE B L, IBTIOUEN R, et al. Analytical model of slotted air-gap surface mounted permanent-magnet synchronous motor with magnet bars magnetized in the shifting direction [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(2): 747.
- [11] XIA Z P, ZHU Z Q, HOWE D. Analytical magnetic field analysis of Halbach magnetized permanent-magnet machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(4): 1864.
- [12] 范坚坚, 吴建华. 极间隔断 Halbach 型磁钢的永磁同步电机气隙磁场解析计算及参数分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 40.
- [13] ZHU Z Q, HOWE D. Halbach permanent magnet machines and applications; a review [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2001, 148(4): 299.

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部