

基于 RMxpirt 磁路法的双定子永磁无刷直流电机设计方法

刘沛麟, 赵朝会
(上海电机学院, 上海 201306)

摘要: 双定子永磁无刷直流电机(DS-PMBL)因其高机械集成度、高转矩密度而具有较高的应用价值。但其特殊的结构,难以用现有的设计程序进行电磁设计。将基于 Ansys 软件中的 RMxpirt 模块并结合传统磁路计算法,借助定子裂比优化法探讨将 DS-PMBL 拆分成两个单定子永磁无刷直流电机(内电机和外电机),分别展开设计,最终将两个设计方案合理拼接成 DS-PMBL 模型,并通过相关仿真试验验证模型的性能。

关键词: 双定子永磁无刷直流电机; RMxpirt 磁路法; 内电机; 外电机

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)11-0061-06

Design of Dual-Stator Permanent Magnet Brushless Based on RMxpirt

LIU Peilin, ZHAO Chaohui
(Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Dual-Stator Permanent Magnet Brushless (DS-PMBL) has great application value by its high mechanical integration and high torque density. However, DS-PMBL can not be designed by current program because of its special structure. Probed into splicing the whole DS-PMBL design as two parts design—inside motor&outside motor based on the RMxpirt with traditional magnetic circuit method by split ratio of stator. Finally, the model's performance would be verified by curve of magnetostatic air-gap flux density and dynamic simulation.

Key words: dual-stator permanent magnet brushless (DS-PMBL); RMxpirt magnetic circuit method; inside motor; outside motor

0 引言

双定子永磁无刷直流电机(Dual-Stator Permanent Magnet Brushless, DS-PMBL)对比传统单定子永磁无刷直流电机,空间利用更为充分、机械集成度更高、控制策略更为灵活,同时由于转子采用的杯环结构,所以转子的转动惯量较后者更小,电机整体转矩密度更大,控制响应更为迅速^[1]。

文献[2]基于传统单定子永磁电机在尺寸固定情况下提升设计转矩存在一定难度,提出一种在原外定子永磁电机内部增加一个内定子的双定子永磁电机结构,目的在于从理论计算角度能大幅度提升永磁电机的转矩,并设计出样机验证设计方法可行性。文献[3-4]基于单层气隙永磁电

机裂比优化设计思路^[5-6],首先定义 DS-PMBL 的裂比为内定子外径与外定子外径之比,通过公式推导了内、外电机功率与裂比的关系式,进而求出能使 DS-PMBL 达到最大输出功率的最优裂比,并最终通过样机验证结论。文献[7-9]研究双定子永磁电机串联磁路的若干问题,首先通过传统磁路法推导出串联磁路的双定子永磁电机转矩特性公式,从公式中分析内、外定子间的磁干涉性;而后从公式中提炼了串联磁路双定子永磁电机齿槽转矩分量,分析内、外定子错位可在不影响反电动势基波幅值前提下削减绕组反电动势中谐波量,并通过样机证明结论;最后通过公式推导证明了在三相单层永磁体串联磁路的双定子永磁电机中绕组的自感和互感均不是常数,除了恒定分量外,

还存在一个二次谐波分量,而磁耦合不仅发生在各相绕组间还发生在内、外定子绕组间。文献[10]借助有限元软件讨论绕组反电动势谐波最优削弱下内、外定子的最佳错开角。文献[11]通过内、外电机的绕组自感和互感情况讨论双定子电机应用串联磁路和并联磁路的优劣势,最终设计一种串联磁路的 20 槽 22 极的五相双定子永磁电机,电机转子采用永磁体双层排布的串联磁路(绕组高自感、低互感、气隙磁密波形几乎不受电枢反应影响)。文献[12-13]借助 3D 有限元软件设计一种锥形转子结构的双定子永磁电机,由于锥形转子增大了气隙的计算长度,从而减小了定转子的耦合面积;同时研究得到了通过控制内电机定子电流实现弱磁调速的方案。文献[14]研究一种轴向充磁的双定子永磁电机,其内、外定子绕组与电源总线角型连接形成一种六相永磁电机,理论、仿真和试验均证明该设计对比传统六相永磁电机在不牺牲容磁能力和转矩输出情况下,可大幅降低电机涡流损耗。文献[15]运用传统永磁电机矢量控制技术结合对双定子电机模型电枢磁链的解耦分析,提供了一种能应对一相短路或断路的容错控制方式,并通过试验证明可行性。文献[16]设计了一种转子螺旋运动式的双定子永磁电机,由内定子绕组磁链提供旋转转矩,外定子绕组磁链提供直线运动转矩,借助有限元软件,改变内、外定子电枢磁链,提高电机的运行性能,并最终通过试验证明了样机能在最高转速 1 000 r/min 下至少移动 75 m,且电机起动反应迅速,各项指标波形表现稳定。

本文借助双定子裂比法,结合传统磁路法和 RMxpri 模块,将所要设计的 DS-PMBL 模型概念性地地区分成内转子和外转子电机分别进行磁路计算,而后将两个设计合理的模型拼接成 DS-PMBL,并通过有限元模型对拼接后的 DS-PMBL 进行电磁性能分析。

1 DS-PMBL 的拓扑结构及性能参数

本文设计的 DS-PMBL 考虑应用在一种微型车的驱动轮上,如图 1 所示。整车驱动属于一种直驱方式,因此电机整体的外径尺寸结合实际应不超过 200 mm;参考这类微型车在不考虑电池节能管理的情况下最高时速可以达到 50 km/h,按

照 200 ~ 250 mm 的轮径计算转子转速超过 1 300 r/min;结合这类电动微型车的功率和电源要求,最后设计的 DS-PMBL 输出额定功率控制在 450 ~ 550 W,电源电压确定为 48 V。DS-PMBL 径向截面拓扑结构如图 2 所示。虚线标明了 DS-PMBL 分离设计的区域即内电机和外电机部分。



图 1 电动微型车 3D 模拟图

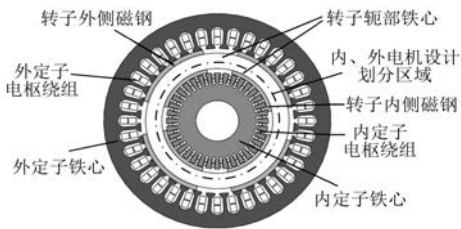


图 2 DS-PMBL 径向截面拓扑结构

根据文献[5]研究定义的内、外气隙功率比与 DS-PMBL 裂比之间的关系有

$$k_g = \frac{P_1}{P_o} = \frac{A_{sl}D_{gl}}{A_{so}D_{go}} \tag{1}$$

式中: k_g ——功率分割比;

P_1 、 P_o ——内、外气隙功率;

A_{sl} 、 A_{so} ——内、外定子槽面积;

D_{gl} 、 D_{go} ——内、外定子外径。

结合实际需求和理论分析推导,表 1 给出了 DS-PMBL 设计要求范围。

表 1 DS-PMBL 设计要求

参数名称	参数值
功率/W	500~550
功率分割比 k_g	0.4~0.5
设计内电机功率/W	150~180
设计外电机功率/W	350~390
设计内电机定子外径 D_{gl} /mm	82~88
设计外电机定子外径 D_{go} /mm	175~185
A_{sl} 与 A_{so} 比例	0.8~0.9
设计额定转速 n_N /(r·min ⁻¹)	1 400~1 500
设计电压/V(DC)	48

2 DS-PMBL 磁路设计

2.1 内、外电机主要尺寸确定方法

永磁电机的主要尺寸包含了电枢轴向长度和电枢径向直径,两者设计的合理性对电机性能有重要影响。两个单定子电机的尺寸设计要求满足式(2):

$$D^2 l_{ef} = \frac{6.1 P^*}{a_p^* K_{NM} K_{dp} A B_{\delta} n} \tag{2}$$

式中: D ——电枢径向直径;
 l_{ef} ——电枢轴向长度;
 P^* ——输入功率;
 a_p^* ——极弧系数;
 K_{NM} ——气隙磁场波形系数;
 K_{dp} ——电枢绕组系数;
 A ——线负荷;
 B_{δ} ——气隙磁密;
 n ——转速。

根据式(2),取内、外电机相关参数如表 2 所示。

表 2 内、外电机关于式(2)相关参数

参数名称	内电机	外电机
额定功率/W	150	370
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500	
定子槽数	36	
极对数	2	
效率/%	85	
极弧系数	0.7	
相数	3	
线负荷/(A·m ⁻¹)	14 000	
电枢轴向长度/mm	30	
电枢径向直径/mm	60	130
气隙径向长度/mm	0.5	0.4
磁负荷/T	0.68	

2.2 电机绕组排布

内、外电机定子绕组均选取双层叠绕组排布。内、外电机绕组排布如图 3、图 4 所示。内、外电机定子一相绕组绕线方式如图 5 所示。

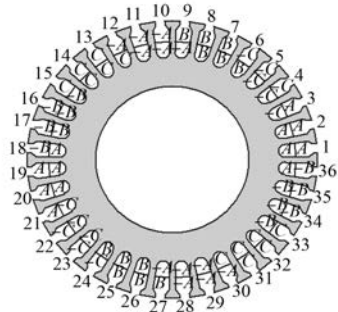


图 3 内电机定子绕组绕线方式

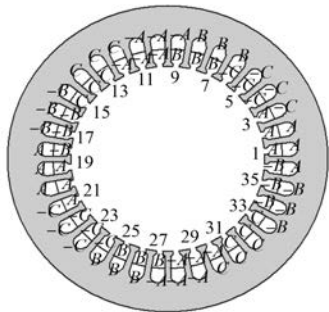


图 4 外电机定子绕组绕线方式

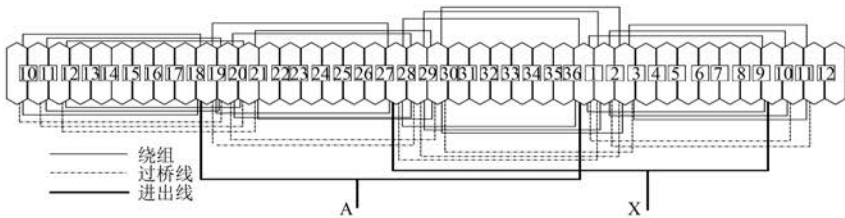


图 5 DS-PMBL 内、外定子一相绕组绕线方式图

2.3 定子尺寸确定

如图 6 所示的 1/4 对称模型,其单极的磁力线约被平均分配在 6 个齿上。6 个齿中的磁力线又分成了两路朝两个方向的轭部穿过,理论上定子轭部厚度应该为单个齿宽的 3 倍,实际应用中定子轭部厚度应稍大于 3 倍齿宽,即有式(3):

$$B_{yoke} = 3.1 B_{t1} \tag{3}$$

通过式(4)、式(5)获得所设计电机的定子内径 D_{in} 和定子外径 D_{out} ,计算所得参数如表 3 所示。

$$D_{in} = D - 2(H_{s0} + H_{s1} + 0.3) \tag{4}$$

$$D_{out} = D_{in} + 2(H_{s0} + H_{s1} + H_{s2} + 0.5B_{s2} + B_{yoke}) \tag{5}$$

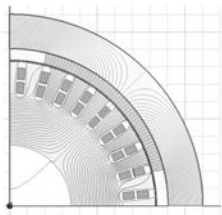


图 6 某 4 极 36 槽外转子电机磁力线示意图

表 3 内、外电机定子相关尺寸数据

参数名称	内电机定子/mm	外电机定子/mm
定子轭部 B_{yoke}	5.98	15.59
定子内径 D_{in}	56.4 (取 55)	126.4 (取 126)
定子外径 D_{out}	87.8 (取 87)	181.1 (取 181)

式中, H_{s0} 、 H_{s1} 、 H_{s2} 、 B_{s2} 对应于图 7 梨形槽关键尺寸参数。

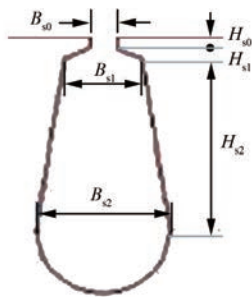


图 7 基于 RMxpirt 磁路法

2.4 控制电路选择

本文设计的 DS-PMBL 控制电路应基于现有技术较为成熟的三相六步式控制方式展开设计。本文初步拟定采用两个各自独立的控制电路,因此所设计 DS-PMBL 的控制电路需要达到以下几点。

- (1) 控制电路仅设置一套直流电压为 48 V 的电源,同时电源侧通过两条互不影响的直流母线分别给内、外电枢绕组供电。
- (2) 默认在两条直流母线进线端设置独立控制器来控制电流输入输出,同时控制器能保证各自电路上的电流时间相位同步。
- (3) 默认直流电源最大输出功率远大于内、外电机额定功率之和。
- (4) 内、外电枢绕组控制电路均采用三相六步式。

本文选取 DS-PMBL 控制电路在 Simplor 中搭建,输入控制电路如图 8 所示。由于采用两条互

相独立直流母线控制内、外定子绕组电流,因此图 8 中电路设置 2 个 48 V 的电压源,保证了内、外电路都在 48 V 直流电压下工作。由于两套电路的分离设计模拟出了直流母线供电互不影响的情况,并且仿真模型的运行完全不计器件间差异,保证了各电枢绕组电流同相位,所以此设计符合本文设计初衷。

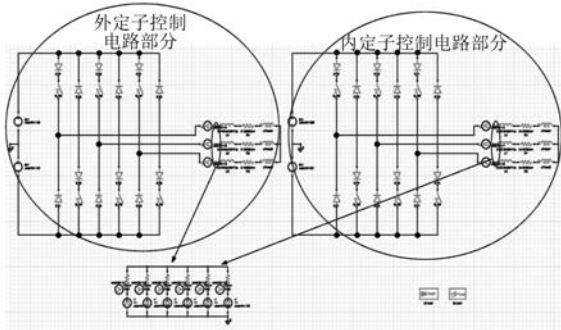


图 8 DS-PMBL 理想控制电路模型

2.5 RMxpirt 磁路计算法

RMxpirt 是 Ansys 的一个仿真模块,其仿真原理主要是基于等效磁路法,具体表现为将电机内部非线性化、分布不均的磁场耦合问题划分为分段线性、分布均匀的磁路叠加问题。通过这个模块往往能较快速、简单地得出电磁参数,但所得出结果的计算精度不高,因此通常被用以得到电机设计的初始方案,并可进行一些趋势化的分析,但设计出的模型往往达不到工程应用要求。

图 9 给出了内、外电机 RMxpirt 模型图。表 4 给出了通过 RMxpirt 仿真优化之后内、外电机重要参数的清单。

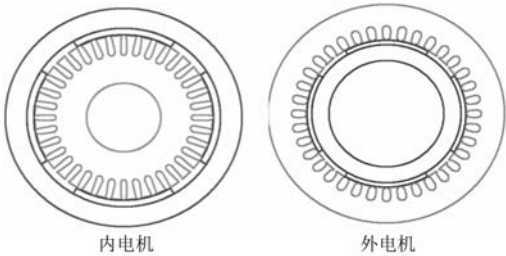


图 9 内、外电机 RMxpirt 模型图

3 有限元仿真

利用 Maxwell 2d 所具备较准确的仿真能力,对 DS-PMBL 的静态气隙磁密和起动运行过程进行仿真分析。

表 4 RMxpirt 仿真优化后内、外电机重要参数清单

参数	内定子	外定子
额定输入功率/W	171.36	414.55
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 550	1 532
效率/%	87.59	89.92
气隙磁密 B _g /T	0.684	0.656
定子齿磁密/T	1.77	1.54
定子轭部磁密/T	1.15	1.23
转子轭部磁密/T	1.68	1.79
电枢电流密度/(A·m ⁻²)	4.15	3.49
电机起动转矩/(N·m)	11	25.18
定子绕组交直轴互感/H	0.001 39	0.000 83
定子绕组交直轴电感/H	0.001 72	0.000 94
定子绕组交直轴时间常数	0.002 87	0.005 97

3.1 DS-PMBL 有限元模型

本文设计思路为内电机和外电机模型定子互相不接触,考虑到目标电机的应用范围对模型额定功率和尺寸大小的约束作用,进而拼接过程涉及到两转子轭部重叠,故可得 DS-PMBL 有限元模型如图 10 所示,主要尺寸参数如表 5 所示。

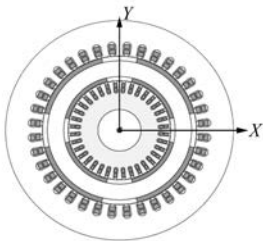


图 10 DS-PMBL 有限元模型

表 5 双定子电机模型主要尺寸参数

参数名称	参数值
外定子外径/mm	185
外定子内径/mm	125.2
外气隙径向长度/mm	0.4
转子外径(含磁钢)/mm	124.4
转子内径(含磁钢)/mm	84
内气隙径向长度/mm	0.5
内定子外径/mm	83
内定子内径/mm	35

3.2 静态气隙磁密验证

通过对 DS-PMBL 的静态仿真试验,可获得如图 11 所示转子两侧永磁体同方向充磁 1/4 模型。图 11、图 12 分别给出 DS-PMBL 在静态场仿

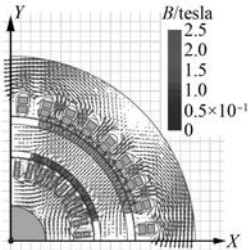


图 11 转子内外两侧磁钢同方向充磁磁密矢量图

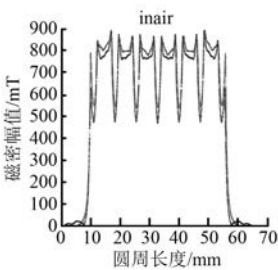


图 12 DS-PMBL 内气隙与内电机气隙磁密曲线对比

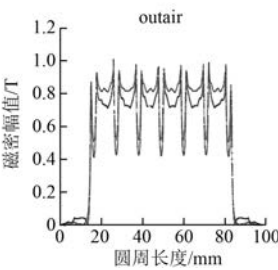


图 13 DS-PMBL 外气隙与外电机气隙磁密曲线对比

真条件下内、外气隙磁密波形与原内电机和外电机气隙磁密波形对比。由图 12、图 13 可看出,拼接后的 DS-PMBL 内、外气隙磁密波形表现均优于原单定子模型(DS-PMBL 静态内、外气隙平均磁密值分别为 0.719 T 和 0.726 T),且符合永磁无刷直流电机所需静态气隙磁密波形的标准。

3.3 起动运行验证

通过对 DS-PMBL 起动运行的仿真试验,可获得电机额定性能参数如表 6 所示。表 6 中直流母线 I、II 分别单独控制内、外定子绕组。图 14、图 15 为 DS-PMBL 从起动运行到稳定过程中转速-时间、转矩-时间波形。通过观察仿真试验参数和关键波形,得知电机运行效果符合本文设计要求。

4 结 语

本文对 DS-PMBL 的研究开展过程和所得结果如下:采用理论成熟的定子裂比法在双定子电

表 6 动态仿真试验下 DS-PMBL 额定性能参数

参数名称	参数值
输出功率/W	521.14
效率/%	88.89
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 515
转子转动惯量/(kg·m ²)	0.005 5
电机最大起动转矩/(N·m)	34.55
直流母线 I 电流/A	4.1
直流母线 II 电流/A	9.7
内定子绕组相电流/A	4.2
外定子绕组相电流/A	9.4

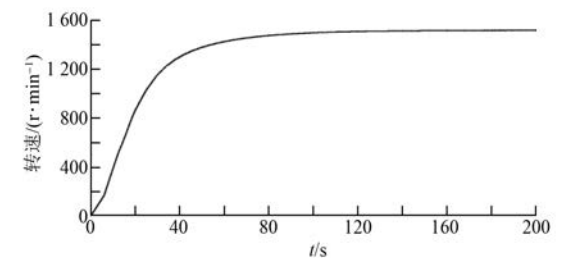


图 14 试验条件下 DS-PMBL 转速关于时间波形

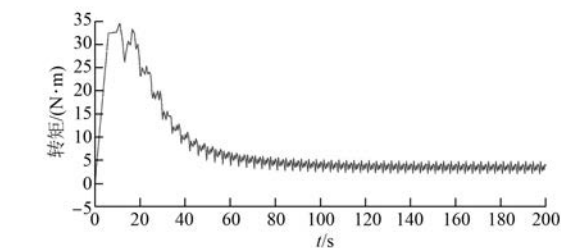


图 15 试验条件下 DS-PMBL 转矩关于时间波形

机中的应用,针对设计目标的应用场合,在结构尺寸、功率范围确定的情况下对电机划分出的两部分展开功率估算。选择估算范围内的一组功率分割数值,借助 RMxpri 模块展开磁路法设计,得到内、外电机的模型尺寸和性能参数。将两个模型在有限元软件中通过共用转子轭部拼接成 DS-PMBL。仿真试验验证本文设计的 DS-PMBL 具有较好的电磁性能,且同时具备良好的起动能力和运行稳定性。

【参考文献】

[1] 王雅玲,徐衍亮.基于电动汽车驱动的双定子永磁无刷直流电机绕组换接运行分析[J].电工技术学报,2014,29(1): 98-103.

[2] 柴凤,崔淑梅,宋立伟,等.双定子永磁同步电机的设计方法[J].微电机,1999,32(6): 12-14.

[3] 王玉彬,程明,花为,等.双定子永磁无刷电机裂比的分析与优化[J].中国电机工程学报,2010,30(30): 62-67.

[4] WANG Y B, CHENG M, FAN Y, et al. Optimal design of a double-stator permanent magnet brushless machine with series magnetic circuit [C] // Electromagnetic Field Computation (CEFC), 2010 14th Biennial IEEE Conference, 2010: 1-1.

[5] 沈建新,陈永校.永磁无刷直流电动机定子裂比的分析与优化[J].电机与控制学报,1998,2(2): 80-83.

[6] PANG Y, ZHU Z Q, HOWE D. Analytical determination of optimal split ratio for permanent magnet brushless motors [J]. IEEE Electric Power Applications, 2006, 153(1): 7-13.

[7] 程树康,寇宝泉,杨世彦,等.串联磁路结构双定子混合式直接驱动电动机的转矩特性[J].中国电机工程学报,2004,24(7): 127-132.

[8] 寇宝泉,张千帆,程树康.串联磁路结构双定子混合式直接驱动电动机的定位转矩分析及抑制策略[J].中国电机工程学报,2005,25(8): 145-150.

[9] 寇宝泉,谢大纲,程树康.串联磁路结构双定子混合式直接驱动电动机的电感特性[J].微特电机,2007,40(4): 4-7.

[10] 刘细平,林鹤云.双定子永磁同步电机齿槽转矩削弱方法[J].东南大学学报(自然科学版),2007,37(4): 618-622.

[11] 李景琪.五相双定子永磁同步电机的优化设计与分析[D].北京:北京理工大学,2015.

[12] 柴凤,欧景,裴宇龙.双定子锥形永磁同步电机的弱磁研究[J].电工技术学报,2013,28(7): 12-18.

[13] 欧景.双定子锥形永磁同步电机的弱磁研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

[14] LU Y, LI J, LU H X, et al. Six-phase double-stator inner-rotor axial flux PM machines with novel detached winding [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 1931-1941.

[15] WANG Z, WANG Y B, CHEN J, et al. Fault tolerant control of NPC three-level inverters fed double-stator-winding PMSM drives based on vector space decomposition [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017(99): 1.

[16] XU L, LIN M Y, ZHU X Y, et al. Orthogonal magnetic field analysis of a double stator linear-rotary permanent magnet motor with Orthogonally arrayed permanent magnets [J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2016, 52(7): 1-4.

收稿日期: 2017 -07 -18