

厨师机用新型永磁游标直驱电机的研究与设计

王文雄

(深圳市牧人电器五金制品有限公司 广东深圳 518000)

摘要:对于当前厨师机中减速传统系统传递力度过程中存在噪音、效率低等不足,研究设计一款新型永磁游标直驱电机。其转子磁钢的极对数为28个、调磁极数是36个、定子绕组极对是8个,选择多齿分裂极绕组结构。主要介绍了电机结构以及原理,分析了空载电磁、负载电磁等性能,希望能够为相关单位与人员提供参考。

关键词:厨师机;永磁游标电机;研究分析

前言:厨师机主要用于果蔬榨汁、绞肉、打蛋、和面等操作。传统厨师机一般是借助传动机构把电机动力的传递到作业区域。常见厨师机前端设置一个串激电机,借助减速机构把前端高速低力矩进行低速大力矩转换。该机构为传动系统,一般采用齿轮传动、皮带传动方式。皮带或是齿轮结构较为复杂,一般需要采用润滑油进行润滑,给后期维护工作带来一定困难,还会影响食品安全。所以,需要采用永磁电机进行优化^[1]。

1 电机结构以及原理

图1是电机结构图。

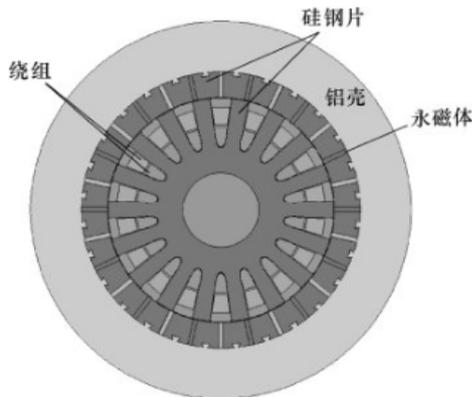


图1 游标电机结构图

本文设计的游标电机参数如下:磁钢牌号为35SH;硅钢牌号为50w1300;匝数为55;转子磁钢数为28;定子磁钢数为18;调制极数为36;定子槽数为18;轴径为20mm;气隙为0.6mm;轴长为60mm;定子内径为100mm;定子外径为140mm。

永磁齿轮和游标电机均是以磁通调制原理为基础运行,设计原则并无较大差异。永磁齿轮涵盖低速外转子、高速内转子以及调磁环等构件。游标电机选择高速电枢磁场对高速内转子进行替代,通过定子齿体统调制效能,输出低速大转矩^[2]。

游标电机转速、定子齿数、转子与定子磁极对数关系如下:

$$P_m, k = |mp + kn| \quad (1)$$

其中, n_s 为定子齿数, p 为电枢绕组磁极对数。 $K=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 。 m 为 $1, 3, 5, \dots$ 。

在 k 为 -1 , m 为 1 情况下,气隙谐波磁场通过定子齿调制后,达到最强状态,转子磁场和电枢磁场之间电角速度相同,两者转速根据相应比例运转,能够得到以下转速比:

$$G_r = (P - ns) / P \quad (2)$$

2 空载电磁分析

2.1 齿槽转矩

对于齿槽转矩而言,转子与定子的铁心开槽是其主要来源,永磁体处于旋转状态时,电机的气隙磁场中储能会出现波动,进而形成力矩。相关人员深入研究齿槽转矩,强调在转子与定子中所有齿距变化中齿槽转矩呈现周期性发展趋势,同时确定基于不斜槽条件下齿槽转矩计算公式:

$$T_{\text{cog}} = \frac{\pi ZL}{4u_0} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_r \frac{nz}{2P} \sin nza \quad (3)$$

其中, n 是让 $nz/2P$ 变成整数的整数; R_2 是定子内半径; R_1 是转子外半径; L 代表铁心轴长。

对在转子上设置磁钢、钉子上设置磁钢以及转子、定子均设置磁钢条件下齿槽转矩进行仿真处理。通过相关结果能够发现,虽然将磁钢设置到转子与定子上能够提升电机反电动势,然而也会导致齿槽转矩进一步提升。基于转子、定子均设置磁钢条件,齿槽转矩的峰值是 369 nNm ,在低速大力矩的调速场合中,可以保持较小的齿槽转矩^[3]。

2.2 空载磁场分析

在本游标电机中,虽然转子部位磁力闭合线为56极,然而进行定子齿磁场调制处理过程中,定子侧铁心磁力闭合线仅为16极,所以,可以将定子侧看做16槽18极同步电机。按照游标电机内磁场与外磁场传动比公式进行计算: $G = -P1/P2$,能够获得,游标电机内磁场和外磁场之间转速比是 $7:2$,所以在转子对一对磁极转过过程中,定子侧磁场转角为 45° 。因为在磁场强度不断提升过程中,硅钢片磁感应强度开始逐渐饱和,所以设计电路此路参数过程中,应该确保磁轭、齿宽以及其他重要部位磁密低于硅钢片BH曲线膝点。

2.3 空载的反电动势分析

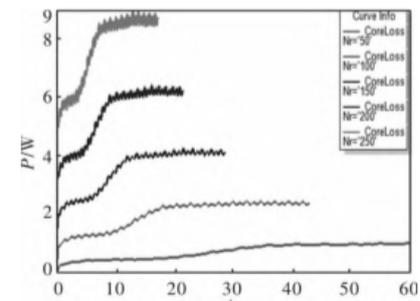
旋转转子中永磁体,由此形成的旋转磁场在通过定

子铁心线圈中会形成感应电压，即反动电势。在同步电机中，随着反动电势正弦度不断提升，电机转矩也会更加恒定，能够促使电机转速波动得到有效控制。通过相关仿真结果显示，本游标电机磁钢极弧与槽型设计，让相反电动势中存在高次谐波。同时，以仿真数据情况能够发现，电动机的反动电势并非 ABC，而是 ACB，表明此类游标电机可以实现转速反相处理。

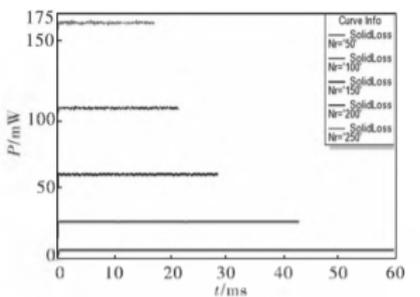
本文游标电机将磁钢安装到定子齿两极位置，磁钢能够充当调磁环中不导磁内容，同时可以促使电机气隙磁密得到进一步提升。同时，传统永磁电机的反动电势主要是源于转子上永磁体，游标电机的转子缺乏永磁体，然而也能够通过线圈形成反动电势。在只有定子存在磁钢、转子存在磁钢以及转子、自定均设置磁钢情况下，对电机 B 相的反电动势展开对比分析，最终结果显示，在转子与定子上均进行磁钢设置，与转子设置磁钢条件相比，提升 54%反动电势，与仅在定子上设置磁钢条件相比，提升 182%反动电势，就是基于现有体积，可以充分提转矩密度。并且转子中无磁钢，同样能够在线圈中形成反动电势，相比于转子上设置磁钢条件反动电势叠加，与转子、定子均设置磁钢条件的反动电势并无较大差异。

2.4 空载损耗

在经典永磁电机理论中，硅钢片中涡流损耗、磁滞损耗、附加损耗等是铁耗主要来源。此类损耗数值和电机硅钢片厚度、铁心磁密、电流频率以及硅钢片表面镀层之间具有紧密关联。同时，基于交变磁场环境，钕铁硼磁钢会出现涡流损耗。根据温升与成本考虑，本文选择 50w1300 硅钢设计游标电机，选择 35SH 钕铁硼材料。下图为游标电机基于不同转速的磁钢涡流损耗与空载损耗。



(a) 不同转速下的空载铁耗



(b) 不同转速下的磁钢涡流损耗

图 2 游标电机基于不同转速的磁钢涡流损耗与空载损耗

3 负载特性分析

在负载状态下，电枢电流会形成磁场，进而对电机磁通密度产生影响，由此对损耗产生影响。额定转速的各种功率因数条件，在发电运行过程中，损耗受到负载电流的影响见下表。

表 1 电磁损耗受到负载电流的影响

负载状况	空载	额定电流		
q 轴与电流磁动势夹角		-30°	0°	30°
铁耗	93W	112W	98W	76W
铝壳涡流损耗	101W	180W	136W	78.9W
永磁体涡流损耗	36W	61W	44.3W	28.3W
电磁转矩	0	-235N·m	-260N·m	-217N·m

通过上表能够发现，发电状态不同，电机损耗、输出功率、输出端电压等也会有所不同。在 q 轴和输出电流夹角是 0° 条件下，电枢电流磁动势与永磁体磁动势之间相互垂直。略有增加合成磁场，输出转矩达到最大值。在负载电流比 q 轴滞后情况下，电流具有增磁效能，电机对无功进行吸收，提高输出电压，增加铁耗。在输出电流比 q 轴超前情况下，电枢电流具有去磁效能，电阻损耗减小，此种影响在铝壳涡流损耗中具有显著体现，同时此种损耗具有较大占比，所以，应该对电机各种工况下的损耗情况进行充分考虑^[4]。

另外，绕组中负载电流也会出现铜耗现象，损耗公式如下：

$$P_{铜耗} = [1 + \alpha_c (T - T_0)] R_o 3I^2 \quad (4)$$

其中，I 代表相电流的有效值 R_o 代表 T_o 绕组条件下电阻值。

4 温升过程电磁损耗分析

因为钕铁硼永磁体在温度方面具有较高敏感性，设计永磁电机过程中，应该对电机性能受到温度因素的影响情况进行充分考虑，损耗同样如此。温度和永磁体剩磁之间关系如下：

$$B_r = [1 - \alpha_{br} (T - T_0)] \cdot B_{r0} \quad (5)$$

其中，B_r 代表 T 温度条件下永磁体剩磁情况；B_{r0} 代表 T_o 温度条件下永磁体剩磁情况。

为了对分析进行简化，仅对永磁体剩磁和温度之间变化情况进行考虑，相对磁导率固定、同时退磁曲线保持直线状态。选择不同温度永磁体剩磁展开计算工作，获得不同温度点的额定损耗，同时 q 轴和电磁动势夹角处于 0 条件下，各部分电损情况见下图。

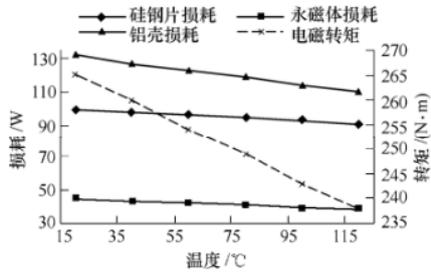


图3 电磁损耗受到永磁体温度的影响

通过上图能够发现，损耗情况能够通过线性函数进行表示。在永磁体温度由 20℃增加到 120℃条件下，剩磁降低 12%，输出转矩减小 10%，铁损减小 9%，铝壳的涡流损耗减小 17%，永磁体的涡流损耗减小 15%，电磁损耗整体减小 14%。温度对于所有部分损耗影响情况较为平坦，进行工程计算时，一般可以对永磁体运行温度进行预设，之后开展计算工作。若是对于精准度具有较高需求，应该根据温度场情况借助迭代方式开展^[5]。

上述计算仅是对永磁体温度在损耗方面影响情况进行考虑，但是在电机运行过程时，永磁体温度不是独立存在，在温度增加过程中，铝壳温度也会提升，铝温度系数是 0.00429，比铜温度系数略大。铝壳电阻增加过程中，损耗也会增加，同时电磁损耗中铝壳的涡流损耗占比较大。所以，同时分析铝壳温升与永磁体温升过程中铝壳的涡流损耗状况。因为铝壳、永磁体和转子硅钢片之间紧密连接，同时具有较大导热率，彼此之间具有较小温差，所以，进行计算时，认为永磁体与铝壳之间温度相同，所以进行计算工作时，认为两者温度相同。在铝壳与永磁体温度由 20℃增加至 120℃情况下，铝壳的涡流损耗减小 11%，并非仅基于永磁温升条件下的 17%。

进行工程分析时，应该结合具体状况科学分析关键因素，不仅可以保证工程计算需要得到满足，还可以减少计算成本与时间。

结语：综上所述，本文把传统厨师机中“高速低转矩电机、减速系统、执行系统”动能传递体系采用“低速大转矩、执行系统”动能传递体系进行替代。对于低速大转矩类型的电机选择多齿分裂极集中绕组电机，此种直驱系统能够减小厨师机整体体积，同时提升传递效率，有效提高系统可靠性。在本文游标电机中，能够将定子看做是 16 极 18 槽普通同步电机，铁心调磁极数是 36；转子永磁体的极对数涉及为 28 个，分析负载条件与空载条件下电磁性能，最终结果显示，游标电机反向变速性能良好。电机转矩具有高效率以及良好过载能力，可以满足厨师机电机预期力矩输出要求。

参考文献：

- [1] 黄海林, 李大伟, 曲荣海, 任翔. 磁齿轮复合永磁电机拓扑及应用综述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(06): 1381-1397.
- [2] 包广清, 魏慧娟, 吕盈盈. 混合永磁游标电机的交叉耦合特性分析[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(01): 105-114.
- [3] 罗瑞仁, 李建贵. 轴向磁通分裂齿式游标电机设计及性能分析[J]. 微电机, 2019, 52(11): 36-41.
- [4] 石玉君, 程子活, 蹇林旒. 两种典型的场调制型永磁电机的对比分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(01): 120-130.
- [5] 黄磊, 胡敏强, 余海涛, 施智祥, 仲伟波. 直驱式波浪发电用全超导初级励磁直线发电机的设计与分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(02): 80-86.

作者简介：王文雄（1957 年 7 月）男，汉族，湖北省黄冈市，博士，高级工程师，研究方向：小型家电造型设计。