

矿用工程车轴向磁通永磁牵引电机

孙 奥, 冯桂宏

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘 要: 为了在矿用工程车原有结构的基础上改善整车的传动系统, 对牵引电机的体积提出了较高的要求。然而, 通过研究发现, 常规的径向电机不满足体积要求。因此, 设计了一款轴向磁通永磁电机, 既能够满足电机的空间体积要求, 也能满足运行工况的要求。为了保证电机在各种工况下均能稳定运行, 对电机的空载与负载、温度与转子机械强度进行了有限元分析, 并设计了电机水路结构。

关键词: 轴向磁通永磁电机; 拓扑结构; 电机设计; 有限元分析

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)04-0077-06

doi: 10.12177/emca.2020.227

Axial Flux Permanent Magnet Traction Motor of Mine Engineering Vehicle

SUN Ao, FENG Guihong

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: In order to improve the transmission system of the whole vehicle on the basis of the original structure of the mine engineering vehicle, higher requirements are put forward on the volume of the traction motor. However, it is found that the conventional radial motor cannot meet the volume requirements. Therefore, an axial flux permanent magnet motor is designed, which can not only meet the spatial volume requirements of the motor, but also meet the requirements of operating conditions. In order to ensure the stable operation of the motor under any kind of operating conditions, the finite element analysis of the no-load and load conditions is carried out, the water structure of the motor is designed, and the finite element analysis is carried out on the temperature of the motor and the mechanical strength of the rotor.

Key words: axial flux permanent magnet motor; topological structure; motor design; finite element analysis

0 引 言

矿业对于社会发展有着重要的作用。随着国家的发展, 矿用工程车的发展在不断更迭。矿车的驱动系统也不断升级, 由机械传动到电传动, 不仅减少了传动系统的体积, 同时增加了传动系统的效率, 减小了污染^[1]。矿用工程车主要的工作特点是满载上坡, 空载下坡, 并且一直往复运行, 上坡时电机负荷较大, 下坡时几乎为空载运行, 且驱动电机

需要频繁的起动与制动。因此, 在设计矿用工程车牵引电机的过程中, 主要考虑以下 5 个条件^[2]:

- (1) 不改变矿用工程车的原有结构;
- (2) 频繁的起动与制动;
- (3) 适用于恶劣的工作环境;
- (4) 质量和体积较小, 可靠性高, 效率高;
- (5) 过载能力强, 有一定的扩速能力。

与传统的异步电机相比, 永磁电机体积小, 功率密度大, 效率、可靠性高, 转速范围大, 振动噪声

收稿日期: 2020-12-08; 收到修改稿日期: 2021-01-26

作者简介: 孙 奥(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机设计。

冯桂宏(1963—), 女, 硕士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为特种电机及其控制。

小,更加适合用于机车牵引电机。永磁牵引电机不仅具有良好的起动性能,还能获得平稳的转矩性能^[3]。为了进一步节约成本,在改造矿用工程车的驱动系统时,不改变整车的原有结构,即在原有的空间范围内放置牵引电机,这就对电机的体积要求比较严格。通过对比设计发现,常规的径向永磁电机体积不能满足安装要求,因此选择功率密度较高的轴向磁通永磁电机作为矿用工程车的牵引电机。

与径向磁通永磁电机相比,轴向磁通永磁电机具有峰值扭矩和堵转转矩高、转动惯量小、结构紧凑、功率密度高、散热性能良好、振动小、噪声低等优点,更加适用于矿用电动工程车的驱动系统^[4-5]。基于上述分析,提出了一种应用在矿用工程车上的轴向磁通牵引电机。根据电机的运行工况,设计电机的电磁方案,建立三维模型并进行有限元的仿真,分析电机运行性能并计算损耗,对电机的温度场与转子机械强度校核,保证了电机在各种工况下均能稳定运行。

1 电机结构

1.1 电机结构的选择

在矿用工程车原有结构的基础上改变整车的驱动系统,留给牵引电机的体积较小。从实际情况得到整个牵引电机最大的安装空间为一个200 mm×720 mm×720 mm的长方体。电机采用水冷结构,其中水路与机壳均会占用一部分体积。因此,电机进行机电能量转换的有效体积小于安装空间的体积限制。

矿用工程车的实际工况一般为满载上坡,空载下坡。满载上坡的时间约占一个运行周期的60%,且电机需要频繁的起停。矿车满载上坡时,电机需要长时间保持一定的转矩输出,由于电机冷却性能的限制,一般取满载上坡时的工况为额定工况。根据实际情况分析得到牵引电机的基本参数,如表1所示。

表1 电机参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	178
线电压/V	416
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 000
额定转矩/(N·m)	1 700

根据表1参数进行永磁电机的设计。为了确定牵引电机的结构,进行对比设计分析。根据上述需求,选取径向结构进行设计。径向永磁电机基本参数如表2所示。

表2 径向永磁电机基本参数

参数名称	参数值
定子外径/mm	650
定子冲片长度/mm	160
定子内径/mm	470
热负荷/(A ² ·cm ⁻¹ ·mm ⁻²)	1 392.88

电机的轴向长度包括定子冲片的轴向长度、绕组端部长度、端盖厚度,绕组端部与端盖之间还需要留有一些冗余空间。经过计算电机的轴向长度超过原有的体积要求。径向结构永磁电机不能满足安装需求,其主要问题是径向结构电机功率密度有限,因此本文选取功率密度更大的轴向磁通结构进行设计,验证电机的体积是否满足要求。

1.2 拓扑结构

轴向磁通永磁电机的拓扑结构一般分为单转子单定子、双转子单定子、单转子双定子、多盘式结构^[6]。单定子单转子结构存在严重的轴向磁力,使轴承的使用寿命减小,一般不适用于牵引电机。

与单定子单转子相比,其余拓扑结构不存在单边磁力,因此得到了广泛的应用。单定子双转子结构如图1所示。图1(a)为N-N结构,该结构定子轭部容易饱和,电机轴向长度较长;图1(b)为N-S结构,定子绕组散热差。双定子单转子结构如图2所示。图2(a)转子采用表贴式结构,转子轭部尺寸较大,永磁体固定困难;图2(b)采用内置式结构,功率密度大,永磁体安装简单,有一定的磁阻转矩利于电机弱磁扩速运行,适用于车用领域。多定子多转子结构复杂,安装困难,一般不用于牵引电机^[7-10]。

矿用工程车工作环境恶劣,路面平整度差,对电机的可靠性提出了较高的要求,而内置式转子

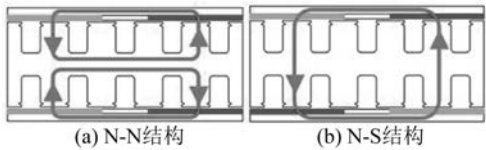


图1 单定子双转子拓扑结构

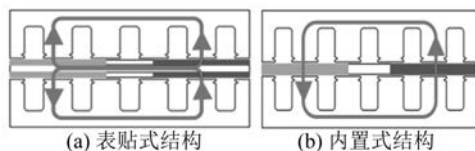


图2 双定子单转子拓扑结构

结构能够保护永磁体,且抗冲击能力强。由于电机的体积有限,热负荷大,而双定子结构拥有更好的散热能力,因此选择内置式双定子单转子结构。

根据电机功率和转速首先确定电机的内外径,假设电机内外圆半径之比为

$$k_d = \frac{D_{in}}{D_{out}} \quad (1)$$

式中: k_d 为电机内外圆半径之比; D_{in} 为电机定子内圆直径; D_{out} 电机定子外圆直径。

双定子单转子轴向磁通永磁电机的电磁转矩 T_d 与电机尺寸的关系如下:

$$T_d = \frac{1}{4} \pi B_{avg} A D_{out} (k_d - k_d^3) \quad (2)$$

式中: B_{avg} 为气隙磁密有效值; A 为线电流密度有效值。

电机采用水冷的结构,且约有 60% 的时间运行在满载状态下,因此在设计电机时,可以通过适当增加热负荷来减小电机的体积。由式(2)可知, k_d 取 $1/\sqrt{3}$ 时,转矩密度最大。确定电机定子外径为 600 mm,内径为 345 mm。

对于永磁电机来说,电机的极槽配合与电机的运行性能,振动与噪声密切相关。永磁电机作为矿用工程车的牵引电机,电机的转矩脉动以及噪声是一项重要指标。因此,电机的极槽配合选取尤为重要。绕组结构选用分数槽集中绕组,可以减小绕组端部长度,增加槽的利用率,减低铜耗与材料成本,降低电机的齿槽转矩。车用永磁牵引电机常见的电机极槽配合一般有:8 极 9 槽、8 极 12 槽、14 极 12 槽。

根据电机的参数大致确定以下 3 种极槽配合:24 极 27 槽、24 极 36 槽、28 极 24 槽。在电机输出转矩、热负荷及各部分磁密相近的条件下,对这 3 种极槽配合轴向磁通永磁电机进行有限元仿真分析。其中,空载反电动势中的谐波畸变率、齿槽转矩是对电机性能影响较大的 2 个指标。表 3 所示为 3 种不同极槽配合下电机的性能对比。

表3 不同极槽配合下电机的性能对比

参数名称	24 极 27 槽	24 极 36 槽	28 极 24 槽
空载反电动势/V	216.08	216.67	217.04
谐波畸变率/%	4.12	6.54	6.54
齿槽转矩/(N·m)	41.956	193.61	32.280
转矩脉动/%	1.28	26.63	5.27
效率/%	94.3	94.2	94.1

通过表 3 分析得到,24 极 27 槽的电机相对于其他 2 种极槽配合,谐波畸变率、齿槽转矩、转矩脉动较小,效率较高,因此本文选取 24 极 27 槽的极槽配合。

在永磁体的设计方面,除了满足电机运行性能外,还要考虑制造与装配简单,利用率高,因此永磁体的结构选取扇型结构。

永磁体工作点磁密 B_m 和相应的气隙磁密 B_δ 为^[11]

$$B_m = \frac{\sigma K_F B_r}{\sigma K_F + \mu_r \frac{\delta}{h_M}} \quad (3)$$

$$B_\delta = \frac{B_r}{\sigma K_F + \mu_r \frac{\delta}{h_M}} \quad (4)$$

式中: σ 为漏磁系数; K_F 为气隙磁密分布系数; B_r 为永磁体剩磁密度; μ_r 为永磁体相对磁导率; δ 为总气隙长度; h_M 为永磁体磁化方向长度。

电机的气隙磁密一般选取 0.85 T 左右,根据式(3)与式(4)大致确定电机永磁体的尺寸。电机永磁体磁化方向长度取 12 mm,极弧系数 0.76,气隙长度取 2 mm。矿用工程车用牵引电机转速较高,为了减小电机定子损耗,定子齿磁密与轭部磁密不应过大。齿磁密与轭磁密取 1.5 T 左右,电机采用分数槽集中绕组,跨距为 1,既减小了绕组的端部距离,也降低了电机铜耗。为了保证永磁体不发生高温失磁,永磁体采用 N38UH。因为电机大约只有 60% 的时间工作在满载上坡状态,所以热负荷选取在 $1\,300\text{ A}^2/\text{cm}\cdot\text{mm}^2$ 以上。下文将对电机的温度场进行分析,保证电机工作温度在合理的范围内。电机效率初步设计在 95% 左右。

综上所述,电机的定子外径为 600 mm,绕组跨距为 1,电机气隙为 2 mm,转子长度 12 mm,定

子厚度 45 mm, 单边水路厚度 20 mm, 端盖厚度 25 mm, 电机轴向总长 196 mm, 满足实际的空间要求。

轴向磁通永磁电机整体拓扑结构爆炸图如图 3 所示。

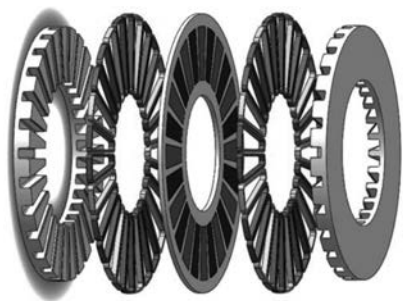


图 3 轴向磁通永磁电机整体拓扑结构爆炸图

2 有限元分析

由于轴向磁通永磁电机的气隙磁场沿径向与轴向均有变化, 其分布是一个三维函数。为了增加计算的准确性, 建立电机的三维模型, 如图 4 所示。

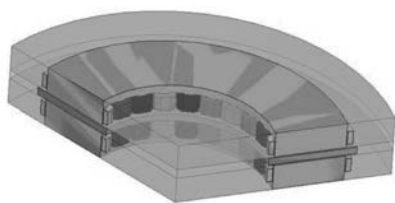


图 4 电机三维模型仿真图

为了减小计算量, 通过添加周期性边界条件, 取电机的 1/3 模型进行仿真计算。

2.1 空载特性

通过有限元仿真得到永磁电机的空载反电动势、齿槽转矩、气隙磁密和磁密云图, 如图 5~图 8 所示。

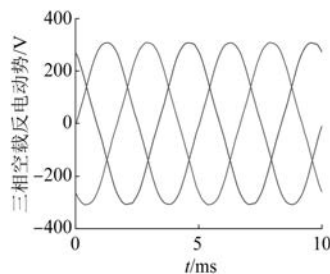


图 5 三相空载反电动势

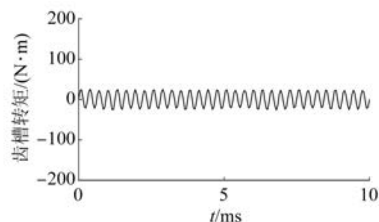


图 6 空载齿槽转矩

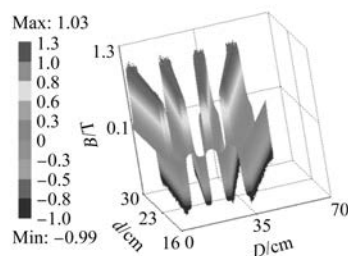


图 7 气隙磁密

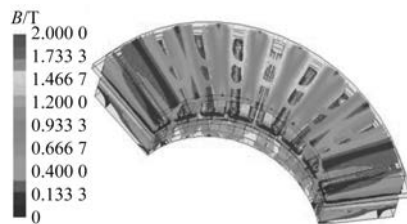


图 8 磁密云图

通过仿真得到电机空载反电动势相电压有效值为 216.08 V, 电机的齿槽转矩为 41.956 N, 占额定转矩的 1.28%, 气隙磁密为 0.823 T。仿真数值与计算数值的误差均在合理范围内, 证明了本文电磁设计的合理性。

2.2 负载仿真

通过仿真得到电机在额定点的定转子铁耗, 永磁体涡流损耗, 铜耗, 输出转矩, 结果如图 9、图 10 所示。

为了验证设计的牵引电机在控制器电压与电流限制条件下, 能在全区域范围内稳定运行(最高转速为 2 500 r/min), 利用有限元计算了电机的效率 MAP 图, 结果如图 11 所示。

通过仿真得到电机的额定转矩为 1 695.342 N·m, 转矩脉动为 2.5%, 铜耗 2.345 kW, 定子铁耗 1.523 kW, 永磁体涡流损耗 1.236 kW, 转子铁耗 18.732 W。通过各部分损耗

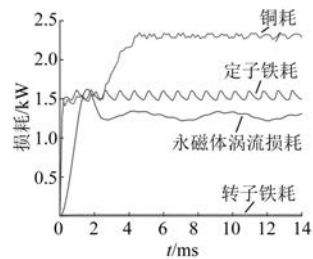


图 9 电机损耗

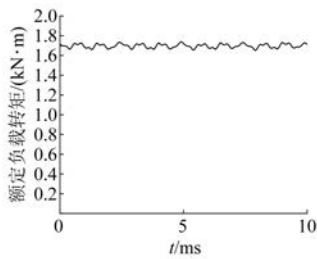


图 10 额定负载时的转矩波形

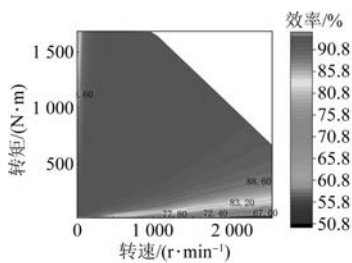


图 11 效率 MAP 图

可以估算电机在额定点效率为 94.5%,与理论及设计值相符。

通过图 11 可以看出,电机可以达到工程车所需的峰值转速及峰值转速下所需的转矩,即设计的电机能在全区域范围内运行。电机的高效运行区间占比超过 85%,可以提高整车的续航能力。

2.3 转子强度仿真

因为矿用工程车转速较高,最高转速可达到 2 500 r/min,所以需要保证转子的强度。转子采用不锈钢的材料,通过有限元仿真软件中添加转速激励,仿真得到转子的形变如图 12 所示,转子应力如图 13 所示。

由图 12、图 13 可以看出,电机转子在最高转速下,转子的形变量极其微弱,转子受到的应力远小于材料的屈服应力,证明转子设计合理。

2.4 温度场仿真

车用电机对温度的要求比较严格,温度过高

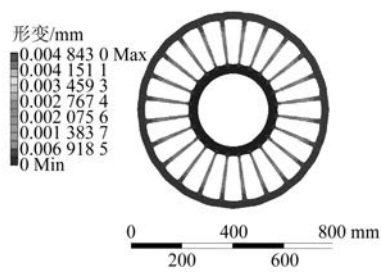


图 12 电机转子形变

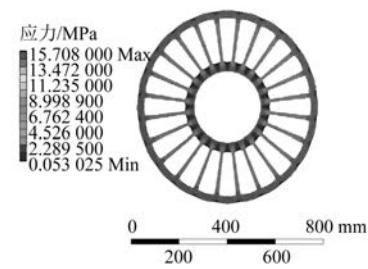


图 13 电机转子应力图

会使永磁体退磁,因此在设计电机时对电机的热负荷要求比较严格。为了确保电机运行的可靠性,需要对电机的温度场进行仿真。目前主要采用电机温升的计算方法主要有简化公式法、等效热路法、等效热网络法、有限元法、温度场流体场耦合法。为了更加准确地计算电机的运行温度,本文采用温度场流体场耦合法。

建立电机的三维模型,为了简化电机模型,假定电机绝缘均匀分布,忽略集肤效应。

根据前文可知,电机主要的损耗在电机的定子绕组上,因此将电机水路结构放置在电机的定子外侧。水路结构为螺旋水道,流体匀速运动,给定入水口流速 0.000 05 m³/s,加强电机的散热能力。

电机部分材料系数如表 4 所示。

表 4 电机部分材料系数

材料名称	密度/(kg·m ⁻³)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
钕铁硼	7 500	490	8.93
硅钢片	7 700	381	35
铜	8 900	383	385
水	995	4 200	0.62
空气	1.23	1 006	0.02

设计电机水路的结构如图 14 所示。螺旋水道尽可能让水路最大面积分布在定子外侧,且流动阻力小,散热能力好。



图 14 电机水路结构

电机各部分单位生热率如表 5 所示。

表 5 电机各部分单位生热率

材料	绕组	转子	定子	永磁体
生热率/(10 ⁶ W·m ⁻³)	605	0.736	1.887	891

电机永磁体温度如图 15 所示。绕组温度如图 16 所示。

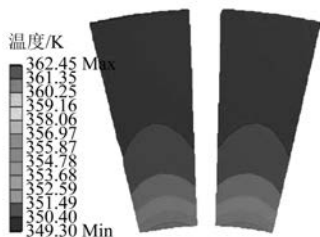


图 15 永磁体温度分布



图 16 绕组温度分布

通过仿真结果可以看出,永磁体的最高温度为 362.45 K,低于 N38UH 的退磁温度,不会导致永磁体发生退磁。绕组的温度为 377.15 K,在绕组的合理温度范围内。电机的大部分热量通过水路传到电机外侧,增加了电机的冷却效率,使电机的温升分布合理,提高电机运行的可靠性。

3 结 语

本文结合矿工工程车实际的工况与驱动电机的空间问题,在常规的径向永磁电机不满足要求的情况下,设计一款用于矿山工程车驱动的轴向磁通永磁牵引电机。得出以下结论:

(1) 与径向磁通永磁电机相比,轴向磁通永磁电机具有更大的转矩密度与功率密度,能够在矿用工程车有限的空间体积内放置牵引电机。

(2) 建立电机的三维模型进行有限元的仿真,分析了电机在额定点与全域区内的运行性能,验证了电机电磁设计的合理性。

(3) 对电机的转子强度进行校核,防止在实际生产运行过程中产生转子断裂的情况。

(4) 采用流体-温度场耦合方法,计算了轴向磁通永磁电机在额定负载的稳态温升,防止永磁体失磁与电机绕组绝缘的损坏。

【参 考 文 献】

[1] 赵艳萍. 大型矿用自卸车电传动系统研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2018.

[2] 孟开创. 某混合动力矿车电驱动系统控制策略研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2018.

[3] 颜渐德. 工矿电力机车永磁同步电机驱动系统控制策略的研究[D]. 长沙:湖南大学,2019.

[4] 黄允涛,周涛,董剑宁,等. 轴向永磁电机及其研究发展综述[J]. 中国电机工程学报,2015,35(1): 192.

[5] CAPPONI F G, DONATO G D, CARICCHI F. Recent advances in axial-flux permanent-magnet machine technology [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2012,48(6): 2190.

[6] JIN P, YUAN Y, XU Q, et al. Analysis of axial-flux Halbach permanent-magnet machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2015,51(11): 8207404.

[7] 刘向东,马同凯,赵静. 定子无铁心轴向磁通永磁同步电机研究进展综述[J]. 中国电机工程学报,2020,40(1): 257.

[8] DAGHIGH A, JAVADI H, TORKAMAN H. Design optimization of direct-coupled ironless axial flux permanent magnet synchronous wind generator with low cost and high annual energy yield [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2016,52(9): 7403611.

(下转第 103 页)