

文章编号:1671-251X(2017)11-0098-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017.11.020

隔爆型变频一体化永磁同步电动机研制

张艳敏, 苏浩, 蒋青璋

(青岛海西电机有限公司, 山东 青岛 266550)

摘要:国内刮板输送机转动惯量大,启动转矩大,导致其驱动电动机的启动比较困难,普通的异步电动机难以胜任。针对该问题,研制了1 200 kW隔爆型变频一体化永磁同步电动机。该电动机采用优化的电磁方案,将电磁负荷控制在合理范围内,可满足弱磁调速要求;结构设计充分考虑变频供电特点、隔爆性能要求及体积和质量限制,符合相关防爆要求,且结构紧凑;冷却方案设计充分考虑散热能力和余量,确保电动机有合理的温升限值。有限元分析结果表明,该电动机主轴挠度和强度、铁芯隔磁桥强度均在合理范围内。样机试验结果表明,该电动机具有良好的恒转矩特性和调速性能。

关键词:刮板输送机;永磁同步电动机;变频一体化;启动转矩;弱磁调速;水冷

中图分类号:TD614 文献标志码:A 网络出版时间:2017-10-27 09:40

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20171027.0940.020.html>

Development of explosion-proof permanent magnet synchronous motor with variable-frequency drive integration

ZHANG Yanmin, SU Hao, JIANG Qingzhang

(Qingdao Haixi Electric Machine Co., Ltd., Qingdao 266550, China)

Abstract: Domestic scraper conveyor has big rotary inertia and starting torque, which makes starting of its driving motor difficult, so the ordinary asynchronous motors can't fulfill the task. In view of the problem, explosion-proof permanent magnet synchronous motor with variable-frequency drive integration was developed. The motor uses optimized electromagnetic scheme to control electromagnetic load in a reasonable range, and meet requirements of weak magnetic speed control. Characteristics of variable frequency power supply, explosion-proof performance requirements and volume and weight restrictions are fully considered during structural design, the structure is compact and in line with relevant explosion-proof requirements. Cooling capacity and margin are fully considered in cooling program design to ensure that the motor has a reasonable temperature rise limit. The results of finite element analysis show that deflection and strength of spindle, and strength of core bridge are within a reasonable range. The prototype test results show that the motor has good constant torque characteristics and speed regulation performance.

Key words: scraper conveyor; permanent magnet synchronous motor; variable-frequency drive integration; starting torque; speed regulation with field weakening; water cooling

收稿日期:2017-07-31;修回日期:2017-08-23;责任编辑:胡娴。

作者简介:张艳敏(1984—),女,山东德州人,工程师,硕士,主要研究方向为电动机设计,E-mail:zhangyanmin0524@163.com。

引用格式:张艳敏,苏浩,蒋青璋.隔爆型变频一体化永磁同步电动机研制[J].工矿自动化,2017,43(11):98-102.

ZHANG Yanmin, SU Hao, JIANG Qingzhang. Development of explosion-proof permanent magnet synchronous motor with variable-frequency drive integration[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(11): 98-102.

0 引言

目前国内刮板输送机转动惯量大,而且启动所需的转矩大,导致其驱动电动机的启动比较困难,普通的异步电动机难以胜任。500 kW 以下的刮板输送机可以采用双速电动机解决这个问题。双速电动机有 2 套绕组,其中慢速绕组负责启动,启动完毕则切换到快速绕组正常工作。对于双速电动机来说,功率越大,慢速绕组承受的压力越大。一般来说,500 kW 是双速电动机的极限。500~800 kW 刮板输送机可采用电磁耦合器或者液力耦合器解决启动问题。在启动时耦合器不加载,电动机接近于空载启动。当电动机启动到额定转速后,慢慢让耦合器加载,从而慢慢启动刮板输送机,不至于损坏电动机和链条。功率越大,液力耦合器的故障率越高,且存在发热的问题。无论哪一种耦合器,其功能都相当于软启动器,并没有增加启动转矩。通常认为电动机额定功率超过 800 kW 就不适合采用电磁耦合器或者液力耦合器来启动了。

变频一体化电动机能够很好地解决启动问题。特别是永磁电动机,其启动转矩大,低速稳定性好^[1],特别适用于刮板输送机。本文根据刮板输送机实际隔爆工况要求,研制了 1 200 kW 隔爆型变频一体化永磁同步电动机^[2-3],用于替代进口变频电动机,应用于井下刨煤机、带式输送机和刮板输送机等。与同类型的进口异步电动机相比,本文研制的电动机具有以下优势:电动机低速时可输出较大的转矩;永磁电动机功率因数较高,可提高效率,减少损耗。一体化永磁同步电动机研制成功,可大大改善采煤机的性能,提高采煤效率,节约能源,对促进煤矿装备的技术革新有重要意义。

1 变频一体化永磁同步电动机主要技术指标

变频一体化永磁同步电动机主要技术指标如下:额定功率为 1 200 kW;额定电压为 3 300 V;最高恒功转速为 1 800 r/min;额定工作频率为 50 Hz;额定效率≥95%;绝缘等级为 F;防护等级为 IP54;防爆等级为 ExdI Mb;工作制为 S1;冷却水压不大于 3 MPa^[4]。

电动机满足 1.2 倍长期过载要求,1.7 倍过载要求 2 min,启停频率为 120 次/h,可实现在线监测,保护功能完善。

2 变频一体化永磁同步电动机电磁设计

变频一体化永磁同步电动机满足弱磁调速要求,配合向量控制可基本实现每个换相点都在电动机相电流和相反电势的自然过零点处,从而避免电流换相时产生较大的转矩波动。

2.1 电动机主要参数设置

变频一体化永磁同步电动机设计参数见表 1。

表 1 电动机设计参数

Table 1 Motor design parameters

名称	参数	名称	参数
电动机外径/mm	810	极数	4
单边气隙/mm	3	定子槽数	60
功率因数	0.99	转子磁极结构	内置式 V 形

2.2 电动机电磁场仿真

对电动机空载特性和负载特性^[5]进行仿真,设磁钢矫顽力 $h_{cc}=890\ 100\text{ A/m}$,剩磁 $B_r=1.116\text{ T}$ 。

给定转速为 1 500 r/min,计算得到空载时的磁场云图分布,如图 1 所示,其中最大磁通密度为 2 T。

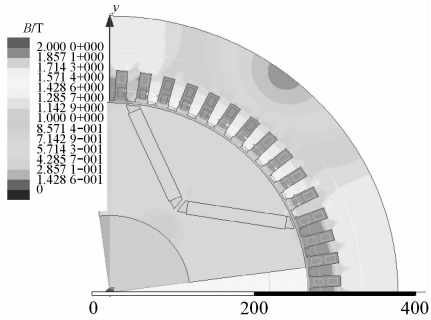


图 1 空载时的磁场云图分布

Fig. 1 Nephogram distribution of magnetic field with no-load

加载相电压幅值为 2 400 V 的正弦电压源,仿真得到内功率因数角为 55°时的转矩波形,如图 2 所示,平均转矩约为 7.841 kN·m。

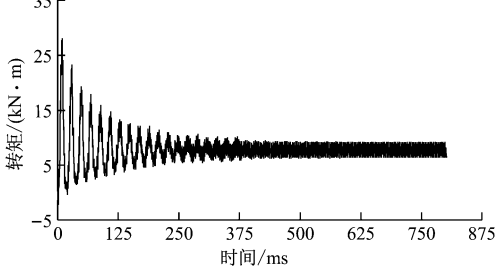


图 2 内功率因数角为 55°时的转矩波形

Fig. 2 Torque waveform when angle of power factor is 55°

设置转速为 1 800 r/min, 加载电流有效值为 450 A, 控制电流超前导通 62° , 仿真得到内功率因数角为 62° 时的转矩波形, 如图 3 所示, 平均转矩为 $6.385 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。因为额定转矩为 $6.366 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 所以, 电动机可以满足弱磁调速到 1 800 r/min 的要求。

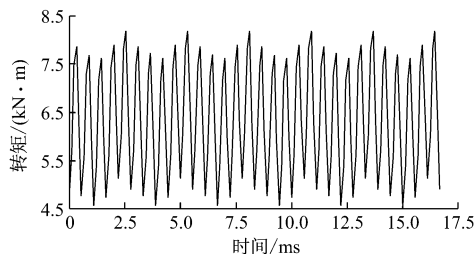
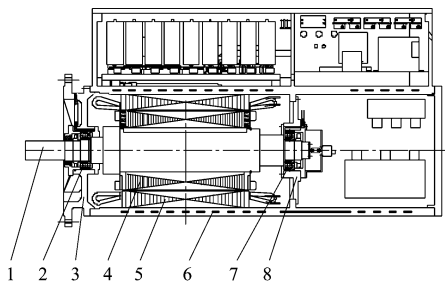


图 3 内功率因数角为 62° 时的转矩波形

Fig. 3 Torque waveform when angle of power factor is 62°

3 变频一体化永磁同步电动机结构设计

变频一体化永磁同步电动机的结构设计充分考虑变频供电特点、隔爆性能要求及体积和质量的限制。电动机结构符合 GB 15703—1995《隔爆型电机基本技术要求》的防爆要求, 并且结构紧凑。整个电动机的结构如图 4 所示。



1—轴; 2—圆柱滚子轴承; 3—驱动端端盖; 4—转子; 5—定子;
6—螺旋冷却水道; 7—深沟球轴承; 8—非驱动端端盖

图 4 变频一体化永磁同步电动机结构

Fig. 4 Structure of permanent magnet synchronous motor with variable-frequency drive integration

3.1 转子结构设计

针对电动机弱磁调速和隔爆的特点, 转子磁极结构设计成内置式 V 形结构, 并在转轴上设计隔爆面。转子铁芯两端设计有压板, 以保证铁芯的整体性。转子铁芯与转轴之间为过盈配合, 通过导向平键传递扭矩。转子铁芯轴向固定方式: 一端通过轴肩固定, 另一端通过弧键固定。磁钢装配到铁芯之后, 通过两端的挡板固定。挡板上焊有扇叶, 通过转子带动旋转, 搅动空气, 从而冷却绕组端部。

内置式磁极结构永磁体在铁芯内部, 漏磁较大,

永磁体利用率低, 必须采取相应的隔磁措施。但隔磁措施会使转子结构趋于复杂, 机械强度变差, 因此, 设计时要同时考虑隔磁效果和机械强度。

3.2 定子结构设计

定子采用外压装型式, 以方便嵌线、浸漆及旋转烘焙等。定子线圈为成型硬绕组, 为消除谐波, 定子铁芯采用斜槽结构。

定子机座基本为全焊接结构, 下圆上方。上部 3 个空腔安装变频电源功率器件、控制箱、主接触器、预充电电阻、变压器等元件; 小腔体为独立的隔爆进线电缆腔体^[6]。整个定子机座的强度足够, 在电动机内部起爆产生 1 MPa 的压强下未被破坏^[7-8]。

3.3 轴承及端盖设计

轴承采用“一球一柱”两轴承支撑方式, 轴伸端为圆柱滚子轴承, 非轴伸端为深沟球轴承。优化设计不停机注排油装置, 针对电动机变频供电的特点, 2 个轴承全部采用内圈绝缘的方式^[9]。

端盖通过止口与电动机机座相连接, 驱动端端盖具有足够的机械强度支撑整个电动机的悬臂安装。同时端盖与机座间、轴承内盖与转轴间、轴承内盖与端盖间都具有足够的防爆间隙。

3.4 出线盒结构设计

整个电动机内部存在点燃源, 因此, 电缆采用简洁引入方式, 在电动机的顶部角中设置一个专门的接线空腔。主电源的电缆引入采用压盘式结构, 电源的电缆引入及信号线的引出采用压紧螺母式结构, 具体结构按照 JB 4262—1992《防爆电器用橡胶套电缆引入装置》中的标准结构设计。

3.5 冷却方案设计

矿用隔爆一体化电动机的散热问题是至关重要的, 对于封闭的隔爆壳体内部, 不能使用风冷散热^[10-12]。由于本文中电动机采用的是永磁同步方案, 整个电动机的热源主要为定子, 故整个电动机的冷却方式采用水冷, 用水套机座保证。电抗器箱和变频器水冷板内采用易制造的折返式水路^[13], 电动机的机座采用螺旋水道, 同时前后端盖也采用带有串联水道的冷却方式。冷却水的流量为 40 L/min, 冷却水先冷却变频电源, 再冷却电动机。

变频器与永磁电动机集成于一体, 且水冷通道共用的结构特点, 决定了本文研制的电动机的体积比其他分体式防爆电动机大大缩小, 并且结构紧凑, 可以通过总线与上位机连接来接收转速等指令信息, 实时反馈自身运行状态。

4 变频一体化永磁同步电动机有限元分析

4.1 轴挠度及强度分析

采用 ANSYS Workbench 软件对电动机主轴进行挠度和强度分析。轴的材料属性设为 35CrMo, 抗拉强度为 980 MPa, 屈服强度为 835 MPa, 断后伸长率为 12%。约束条件主要包括电动机整体的重力、单边磁拉力、固定支撑约束力。

通过 ANSYS Workbench 的静力计算得到轴的挠度云图, 如图 5 所示。可见, 轴的最大挠度为 0.083 mm, 在合理范围内。

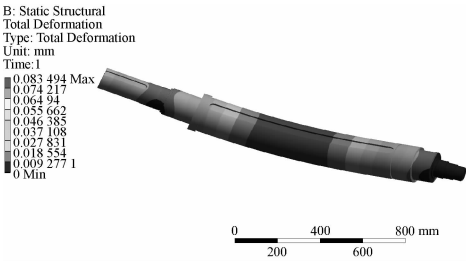


图 5 轴的挠度云图

Fig. 5 Deflection nephogram of axis

轴的强度云图如图 6 所示, 从图 6 可看出, 轴的应力集中发生在与轴承接触部位的两侧凹槽处, 轴的最大应力为 88.051 MPa, 远小于合金结构钢 35CrMo 的屈服强度 835 MPa, 符合轴的强度要求。

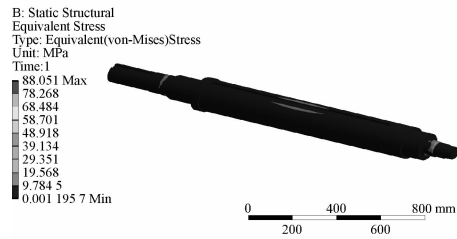


图 6 轴的强度云图

Fig. 6 Strength nephogram of axis

4.2 铁芯隔磁桥强度校核

变频一体化永磁同步电动机的转子结构形式多种多样, 为了适应电动机弱磁调速 1.8 倍的要求, 转子磁极采用 V 形磁极结构, 取 1/4 部分转子铁芯及 1 对内嵌磁钢作为模型, 使用有限元进行校核^[14-15]。

考虑重力、角速度产生的离心力影响, 铁芯内圈全固定约束, 2 个端部轴向方向约束, 进行有限元静力分析。合位移云图如图 7 所示。可见, 最大等效合位移为 0.107×10^{-4} m, 发生在转子铁芯外圈靠近磁钢处。

等效应力云图如图 8 所示。可见, 最大等效应

力为 102 MPa, 发生在隔磁桥处, 而硅钢片的抗拉强度范围为 340~440 MPa, 分析可知, 合位移、等效应力均在许用应力范围内。

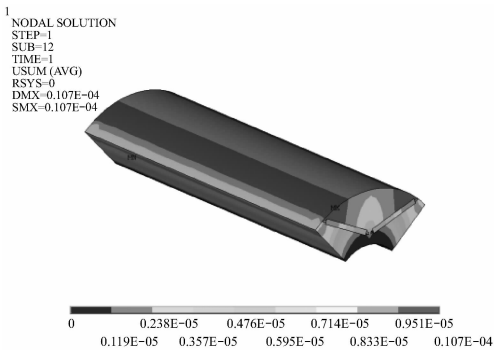


图 7 合位移云图

Fig. 7 Composite displacement nephogram

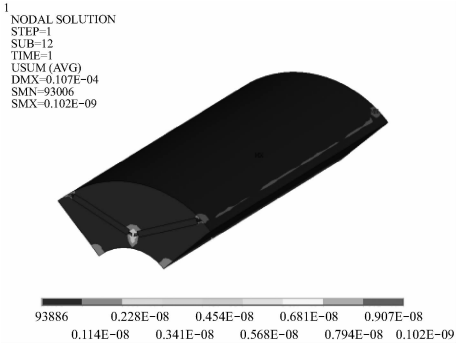


图 8 等效应力云图

Fig. 8 Equivalent stress nephogram

5 试验分析

隔爆型变频一体化永磁同步电动机集电动机和变频器于一体, 减小了体积和质量, 满足工作安装尺寸要求。弱磁调速试验结果表明, 该电动机有良好的调速性能; 负载试验结果表明, 在该电动机转速为 1 500 r/min 以下时具有良好的恒转矩特性; 发热试验结果表明, 该电动机冷却效果良好, 符合 F 级绝缘温升要求。变频一体化永磁同步电动机样机如图 9 所示。



图 9 变频一体化永磁同步电动机样机

Fig. 9 Prototype of permanent magnet synchronous motor with variable-frequency drive integration

6 结论

(1) 隔爆型变频一体化永磁同步电动机将电磁负荷控制在合理范围内,降低了冷却设计和绝缘设计的难度,提高了电动机运行可靠性。

(2) 冷却方案设计充分考虑了散热能力和余量,确保电动机有合理的温升限值。

(3) 结构设计中采用合理的结构型式和材料,确保电动机运行可靠。

(4) 整个电动机高度机电一体化,在设计中充分考虑了维护性,电动机的电源部分、控制部分、端盖轴承、转子等大部件拆装方便。

参考文献(References):

- [1] 王仁详. 通用变频器选型与维修技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [3] 王秀和. 永磁电机[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [4] GB 3836.1—2000 爆炸性气体环境用电气设备第1部分: 通用要求[S].
- [5] 乔建伟, 李洪森, 李小丽. 大容量正压型三相异步电动机的研制[J]. 防爆电机, 2016, 51(2): 26-29.
QIAO Jianwei, LI Hongsen, LI Xiaoli. Development of large-capacity pressurized three-phase induction motor[J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2016, 51(2): 26-29.
- [6] 巩利萍, 宋志安, 王俞, 等. 基于有限元法的矿用隔爆型圆筒形外壳设计[J]. 电气防爆, 2008(3): 1-6.
GONG Liping, SONG Zhi'an, WANG Yu, et al. Design on flameproof cylindrical enclosure for coal mine based on finite element method[J]. Electric Explosion Protection, 2008(3): 1-6.
- [7] 柳向龙. 矿用隔爆一体化电机结构设计及保护电路研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.
- [8] 李克生, 赵纯禹. 防爆变频调速装置隔爆外壳结构的设计[J]. 防爆电机, 2014, 49(3): 30-32.
LI Kesheng, ZHAO Chunyu. Discussion on structural design for flame-proof enclosure of variable-frequency adjustable-speed explosion-proof device[J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2014, 49(3): 30-32.

- [9] 肖立民, 刘发梅, 李静娅. 低压低速大容量绞车用隔爆型变频调速三相异步电动机的开发与应用[J]. 电气防爆, 2010(1): 21-25.
XIAO Limin, LIU Famei, LI Jingya. Development and application on flameproof frequency controlled three-phase induction motor used for low-voltage, slow-speed and high-capacity winch [J]. Electric Explosion Protection, 2010(1): 21-25.
- [10] 尹玉兴, 朱兆霞. 矿用隔爆型变频器水冷散热性能研究[J]. 煤矿机械, 2015, 36(8): 83-85.
YIN Yuxing, ZHU Zhaoxia. Research of water cooling performance of mine flameproof frequency converter[J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(8): 83-85.
- [11] 刘辉, 倪文婧, 王晓静. 防爆变频器功率元件的散热设计[J]. 煤炭技术, 2007, 26(2): 31-32.
LIU Hui, NI Wenjing, WANG Xiaojing. Heat dissipation design for power component of explosion-proof frequency converter [J]. Coal Technology, 2007, 26(2): 31-32.
- [12] 于哲. 防爆变频器水冷散热系统研究[J]. 工矿自动化, 2016, 42(1): 55-57.
YU Zhe. Research of water cooling system of explosion-proof inverter [J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(1): 55-57.
- [13] 张振伟. 矿用隔爆型变频一体机的设计和分析[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [14] 启德新, 张宝刚, 李东晓. 基于 ANSYS 的永磁同步电动机隔磁桥结构改进设计[J]. 工矿自动化, 2014, 40(10): 102-105.
QI Dexin, ZHANG Baogang, LI Dongxiao. Improvement of magnetic barriers structure of permanent magnet synchronous motor based on ANSYS[J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(10): 102-105.
- [15] 安忠良, 李国丽, 周挺. 内置式永磁发电机隔磁磁桥形状对齿槽转矩的影响[J]. 电气技术, 2014(4): 1-4.
AN Zhongliang, LI Guoli, ZHOU Ting. Cogging torque improvement for interior permanent magnet generator by changing flux-barrier shape [J]. Electrical Engineering, 2014(4): 1-4.