

地铁车辆用 JD155 永磁同步牵引电动机的设计

符敏利, 何思源, 李益丰, 彭 俊

(株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 介绍了基于多物理场耦合仿真的轨道交通用永磁同步牵引电动机的设计方法。以沈阳地铁二号线用 JD155 永磁同步牵引电动机为例, 介绍了该电动机的关键参数的选取、结构、试验和运行情况、与异步牵引电动机的比较以及下一阶段的工作。试验结果证明, JD155 永磁同步牵引电动机在效率和节能效果、维护、外形尺寸等方面都优于异步牵引电动机。

关键词: 轨道交通; 永磁同步牵引电动机; 设计; 地铁车辆; 仿真

中图分类号: U231; TM351

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2012)03-0012-05

Design of JD155 Permanent Magnet Synchronous Traction Motor for Metro Vehicle

FU Min-li, HE Si-yuan, LI Yi-feng, PENG jun

(Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: This paper describes the design method based on multi-physics coupling simulation of permanent magnet synchronous traction motor for rail transit. Taking JD155 permanent magnet synchronous traction motor for Shenyang Metro Line 2 as an example, it introduces the selection of critical parameters, structure, testing and operation of the motor and the comparison with asynchronous traction motor. The next stage of work is then proposed. The experiments show that the JD155 permanent magnet synchronous traction motor has more advantages than asynchronous traction motor in the aspects of efficiency and energy-saving, maintenance, outline dimension etc.

Key words: rail transit; permanent magnet synchronous traction motor; design; metro vehicle; simulation

0 引言

与异步牵引电动机相比, 永磁同步牵引电动机具有高效节能、轻量化、过载能力强、噪声低等优点。在国外, 对永磁同步牵引电动机的研究发展迅速, 其中以 Bombardier、Alstom 及三菱等公司为代表, 已开始小批量生产 永磁电动机国际标准 IEC 60349-4^[1] 经近三年的起草也已进入 FDIS (最终国际标准草案) 阶段。

株洲南车时代电气股份有限公司从 2003 年开始进行永磁同步牵引电动机的研究, 先后开发出 40 kW、100 kW 等 5 个系列 10 余种电动汽车用永磁同步牵引电

动机, 并装车运行, 目前已有 2000 多台投入商业运行。通过几年的努力, 公司已建立起比较完善的基于电磁场、温度场、流体场、应力场的永磁同步牵引电动机开发平台。2009 年, 在电动汽车永磁同步牵引电动机所取得成功经验的基础上, 公司又开始进行轨道交通用永磁同步牵引电动机的研究工作, 并于 2011 年成功开发出沈阳地铁二号线用 JD155 永磁同步牵引电动机。这也是国内首次将永磁牵引电动机实际应用在轨道交通领域。

本文介绍了基于多物理场耦合仿真的轨道交通用 JD155 永磁同步牵引电动机设计过程。

1 基于多物理场耦合仿真的永磁同步牵引电动机设计方法

永磁同步牵引电动机设计任务与异步牵引电动

收稿日期: 2012-02-25

作者简介: 符敏利 (1967-), 男, 高级工程师, 现从事永磁电机的研发工作。

机相同,即在给定的体积、重量、安装空间的边界条件下,设计出能满足全网压范围的与逆变器相匹配的车辆牵引、制动曲线的电动机^[2-3]。在设计中必须考虑到:

- (1)电动机在最高中间回路电压、最低中间回路电压和额定中间回路电压下的输出转矩满足车辆的牵引、制动特性;
- (2)电动机在全工况范围的温升必须满足定子绕组所采用的绝缘系统、永磁体和轴承允许的温升限值;
- (3)在最低中间回路电压和最高转速下的失步转矩倍数必须保留一定的裕量;
- (4)起动点的最大电流小于逆变器的允许电流;
- (5)电动机的额定点效率、最高效率和效率分布满足设计要求;
- (6)电动机的重量、外形尺寸满足转向架的要求;
- (7)电动机的冷却条件(冷却介质的流量、流阻等)满足辅助系统的要求;
- (8)电动机的结构强度满足设计要求;
- (9)电动机的反电势和短路电流满足逆变器和控制系统的要求。

永磁同步牵引电动机设计流程图如图1所示。

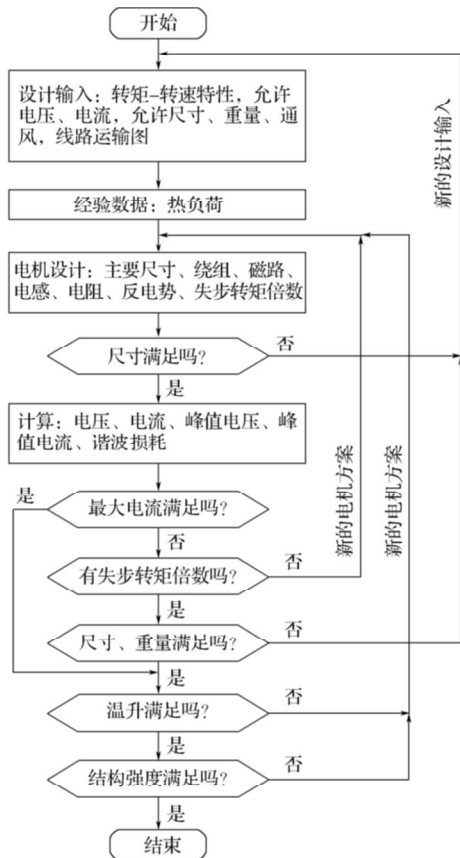


图1 永磁同步牵引电动机设计流程图
Fig.1 Design flow of permanent magnet synchronous traction motor

在永磁同步牵引电动机中,存在多物理场,包括:电磁场、温度场、流体场、应力场,这些物理场内部相互

耦合。电动机的设计过程实际上就是求解这些物理场。

为了充分利用永磁电动机的优点,电动机的功率和转矩密度一般很高,即电动机的电磁负荷取值较高。为了解决高功率、高转矩密度永磁同步牵引电动机中电磁、温升、结构等方面的计算精度问题,不仅需要对电磁场、温度场、流体场、应力场等多物理领域进行仿真分析,而且需要采用多物理场的耦合仿真分析,解决多物理场之间相互影响的问题。常有的耦合关系有电和磁的耦合、流体-温度耦合、电磁-温度-结构耦合等。

在完成各物理场仿真的基础上,可以采用双反应理论的原理,进行永磁同步牵引电动机在整个运行范围内的性能参数的计算。

1.1 电磁仿真

由于永磁电动机的复杂性,必须采用电磁场有限元分析对电动机的磁场进行仿真分析。电磁仿真的一般过程为:通过静态场计算得到永磁同步电动机气隙、定子齿部、定子轭部等部位的磁密波形和磁密分布图,进而求取气隙磁通、气隙基波磁密及各次谐波幅值、反电势、漏磁系数、波形系数、直轴电感、交轴电感等电动机的重要参数;可以通过瞬态场计算得到电动机绕组内的反电势曲线、电动机气隙中传递的电磁转矩曲线、定转子铁心损耗、永磁体涡流损耗、齿槽转矩、反电势THD等。JD155永磁同步牵引电动机的空载磁密分布图和空载气隙磁密波形分别如图2、图3所示。

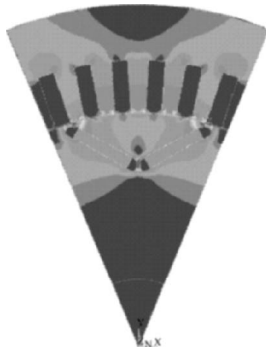


图2 磁密分布图
Fig.2 Flux density distribution diagram

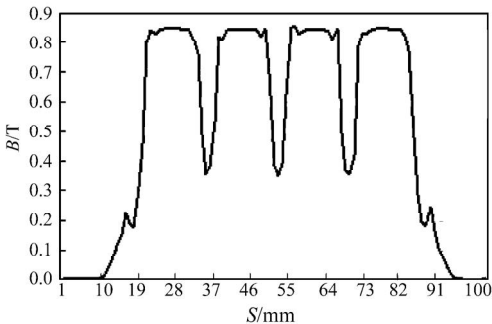


图3 气隙磁密
Fig.3 Air-gap flux density

1.2 温度场仿真

忽略永磁电动机转子产生的损耗,可以采用简单的二热源法预测永磁同步牵引电动机定子绕组和定子铁心的平均温升。但预测电动机各部分温度分布,尤其是永磁体的温度必须采用温度场仿真分析。

通过采用专用温度场和流体场分析软件,可以对电动机内冷却介质流体场和电动机内部温度场进行仿真分析,从而准确计算电动机内部的温度分布。电动机内部的损耗热源包括定子绕组铜耗、定转子铁心损耗、永磁体涡流损耗、机械损耗和杂散损耗,其中,定子铜耗采用电阻损耗公式计算,定转子铁心损耗、永磁体涡流损耗采用电磁仿真中得到的数据,机械损耗、杂散损耗采用经验公式计算。JD155 永磁同步牵引电动机某一运行工况下的温度场分布图如图4所示。

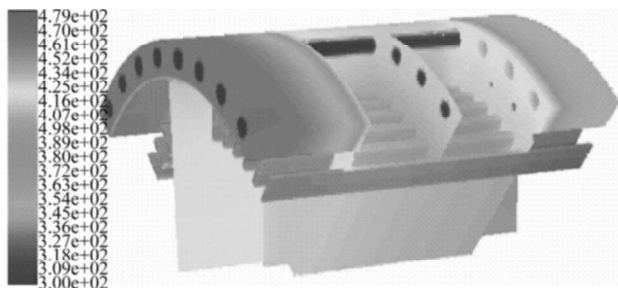


图4 温度场分布图

Fig.4 Distribution diagram of temperature field

1.3 应力场仿真

由于轨道交通用永磁电动机外部运行环境很复杂:对电动机的冲击振动很大,电动机频繁加速、减速和制动,尤其是钢轨接头产生的冲击应力、齿轮传动产生的附加应力以及逆变器供电所产生的突然短路转矩和高频振动。为保证安全,必须对电动机各结构件进行应力场的仿真分析。对于永磁同步牵引电动机来说,至少应该对转轴、冲片、机座等关键部件进行应力场分析计算。

在1.2倍最高转速(即超速)时,JD155 永磁同步牵引电动机的转子冲片应力图如图5所示,电动机悬挂安装结构的应力图如图6所示。

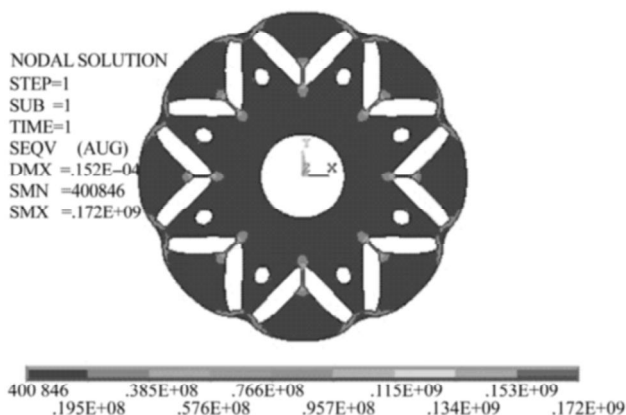


图5 转子冲片应力图

Fig.5 Stress diagram of rotor sheet

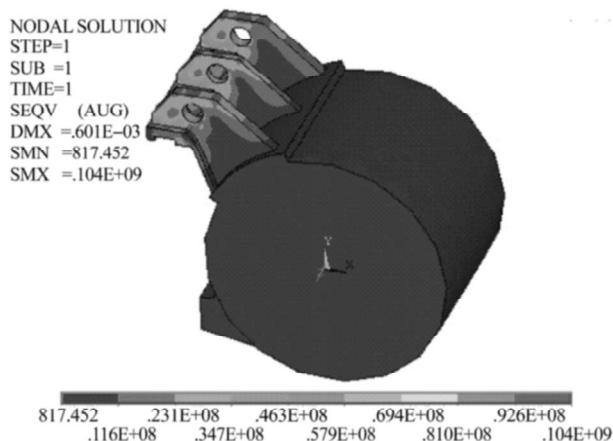


图6 悬挂安装结构应力图

Fig.6 Stress diagram of suspension and installation structure

1.4 电磁-流体-温度-结构耦合仿真

在电磁、流体、温度、结构耦合仿真分析中,运用有限元仿真软件建立电动机用于电磁、流体、热、结构仿真的统一的几何模型和有限元计算模型。首先进行电动机的电磁分析,计算获取电动机电磁参数,进一步获得电动机各有限元单元的电磁发热、电磁力分布;在同一个有限元模型中,修改温度领域的物理属性(单元材料属性),利用电磁分析得到的热源分布,进行电动机的流体-温度分析,得到电动机各有限元单元的温度,进而获得电动机各部位的温升数据;最后在同一个有限元模型中,修改结构领域的物理属性(单元材料属性),利用电动机电磁分析得到的电磁力分布以及流体-温度分析获得的温度分布,进行结构分析,在电磁和温度影响下得到电动机内部的应力和变形情况。

1.5 性能参数和特性曲线的计算

永磁同步牵引电动机设计的一个重要目的是计算电动机在整个工作范围内的性能参数和特性曲线,即计算电动机定子频率、电压、转矩、功率、电流、反电势、效率和功率因数等与转速之间的关系。尽管从原理上讲,可以利用场的方法计算出整个工作范围内的性能参数,但采用该方法很费时。对于工程应用来讲,采用场路结合的方法比较切实可行。

利用1.1节介绍的电磁仿真方法,在求取反电势、交直流同步电感等参数后,依据同步电动机双反应理论可以对永磁牵引电动机的性能参数进行计算,包括电动机电压、电流、定子频率、功率因数、效率、失步转矩倍数等。根据计算结果,可以绘制出电动机在不同中间回路电压下的特性曲线和效率分布(MAP)图。

2 JD155 永磁同步牵引电动机关键参数的选取

2.1 牵引特性、制动特性及额定功率

为了更好地和相同工况下的异步牵引电动机进行比较,JD155 永磁同步牵引电动机的牵引、制动特性与原

于沈阳地铁二号线的YQ190-3 异步牵引电动机的相同，JD155牵引和制动特性如图7所示。同样，其额定参数取值与YQ190-3亦相同，即：额定功率为190 kW；额定转速为1 800 r/min。另外，为了装车考核方便，JD155永磁同步牵引电动机采用YQ190-3异步牵引电动机的外形接口尺寸。

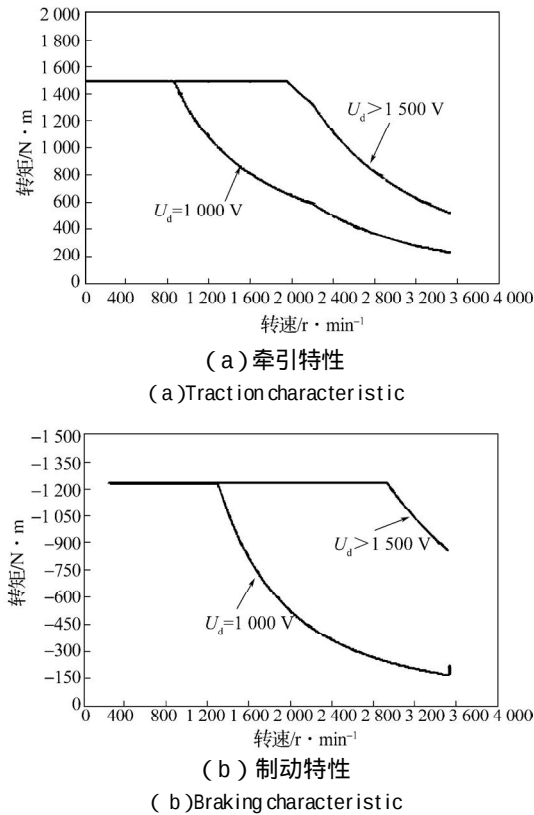


图7 JD155 永磁同步牵引电动机牵引、制动特性
Fig.7 Traction and braking characteristic of JD155 permanent magnet synchronous traction motor

2.2 极数

为充分利用永磁电动机的优点，JD155 永磁同步牵引电动机采用8极。

2.3 磁路结构

磁路结构对电动机和系统影响很大。轨道牵引用永磁同步牵引电动机有二种典型的磁路结构：表面式和内置式。其中，表面式电动机为大逆变器小电动机方案；内置式电动机反之，为小逆变器大电动机方案。通过比较分析，在JD155电动机中采用内置式磁路结构。

2.4 反电势的选择

反电势是联系逆变器、电动机之间的关键参数，直接影响电动机的性能和系统参数的选择。原则上讲，电动机的最大反电势的峰值不得高于逆变器的最大直流电压。为合理选择电动机的反电势，须从反电势对逆变器和控制的影响、电动机的电流、效率分布、功率因数分布、逆变器容量、电动机体积等多角度进行分析比较，找出适应地铁列车运行的反电势。

2.5 短路电流的选择

短路电流是另一个联系逆变器与电动机的关键参数。通过分析短路电流对电动机过载能力（失步转矩倍数）、永磁体抗失磁能力、系统高速重投的影响，采用优化分析方法，选取最佳的短路电流。

3 JD155 永磁同步牵引电动机参数和结构

3.1 基本参数

JD155永磁同步牵引电动机的基本参数如表1所示。

表1 JD155 永磁同步牵引电动机的基本参数
Tab.1 Basis parameters of JD155 permanent magnet synchronous traction motor

额定功率 / k W	额定电流 / A	额定转速 / r · min ⁻¹	额定效率 / %	额定转矩 / N · m	最大转矩 / N · m
190	142	1800	96.3	1 008	1 480

3.2 结构

3.2.1 定子

定子采用全叠片无机壳结构，具有重量轻、体积小、散热效果好等优点。成型的定子绕组嵌入到定子铁心中，然后整体真空压力浸渍，在端部采用端箍和绑扎绳固定牢靠。整个定子具有良好的电气、机械和热稳定性能。定子冲片采用高导磁率、低损耗的硅钢片，冲片上有通风孔。电动机采用能承受逆变器供电的热分级为200的绝缘系统。

3.2.2 转子

转子由永磁体和转子铁心等组成。嵌装完永磁体的转子应进行动平衡和表面处理。为充分利用磁阻转矩和保护永磁体，电动机采用内置式结构。永磁体为耐高温的钕铁硼。转子铁心由转子冲片、转轴、压圈等组成。转子冲片的强度必须满足电动机在1.2倍最高转速下不产生有害变形。转轴采用高强度合金钢，其强度须保证在正常运行下，尤其是电动机突然短路时不产生破坏。

3.2.3 端盖和轴承系统

传动端端盖和非传动端端盖均采用具有优良铸造性能、机械性能和抗震性的球墨铸铁。两个端盖上均有加油嘴和排油孔，能定期为轴承补充新的润滑脂并清理废油脂。为降低轴承的温升，在端盖上设置散热筋。

传动端和非传动端轴承均采用绝缘轴承和非接触式迷宫密封结构。

3.2.4 温度和速度监控

为了监控电动机在试验和运行中各部分的温度，在电动机定子铁心、定子线圈端部和槽内埋置大量的温度传感器。

在电动机的非传动端安装检测电动机速度和位置

的旋转变压器(旋变)。旋变定子通过激励源产生磁场,电动机运行时,旋变转子切割旋变定子磁场使旋变定子正弦、余弦绕组输出的电压值发生变化,控制系统通过采集旋变定子输出的正弦、余弦信号可准确判断电动机转子的磁极位置。

3.2.5 通风与冷却

电动机为全封闭结构,采用自带同轴风扇的外循环冷却方式,如图8所示。

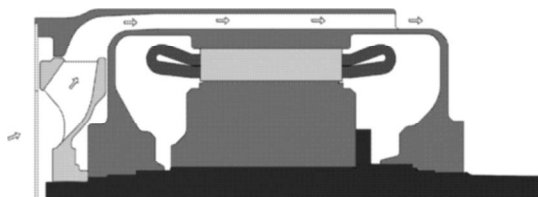


图8 JD155 通风结构

Fig.8 Ventilation structure of JD155

为提高冷却效果和降低噪声,在风扇设计和风路设计中采取了一系列措施,并通过试验不断改进完善。

4 试验和运行考核

在JD155 永磁同步牵引电动机生产完成后,根据 IEC 60349-4 制定的电动机试验大纲,对其进行了广泛的地面试验工作,包括型式试验、例行试验和研究性试验。主要试验项目包括:定子绕组直流电阻测量、定子绕组绝缘电阻的测量、开路试验、稳态短路试验、特性试验、温升试验、耐压试验、振动试验、噪声测量、齿槽转矩测量。结果表明,所有试验项目均满足电动机技术条件的要求。

在完成地面组合试验及可靠性试验后,JD155 永磁同步牵引电动机(图9)安装在沈阳地铁二号线第20列车上进行运行考核。目前已完成7 000 km的空载和装沙袋AW3(车辆超员负荷)工况下负载运行,现正在进行载客运行考核。在运行中,电动机运行可靠,温升较低。

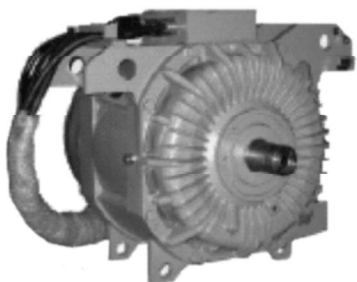


图9 JD155 永磁同步牵引电动机

Fig.9 JD155 permanent magnet synchronous traction motor

5 与异步牵引电动机的比较

JD155 永磁牵引电动机设计模式可直接替换异步牵引电动机。与YQ190-3比较,JD155 永磁同步牵引电动机在效率和节能效果、维护、重量和外形尺寸等方面具有

较大优势。

5.1 效率和节能效果

从计算和试验台上的试验结果来看,JD155 电动机比YQ190-3的损耗降低40%,即额定点效率提高约3%。从现场运用情况来看,节电率超过10%。

5.2 维护

YQ190-3 异步牵引电动机采用开启通风冷却方式,冷却风中含有的尘埃、铁屑等杂质,会污染电动机内部,需要定期解体清扫;JD155 电动机采用全封闭结构,不需解体清扫,原理上讲降低了维护费用,提高了电动机的可靠性。具体效果有待进一步验证。

5.3 重量和外形尺寸

YQ190-3 电机质量为620 kg,而JD155 电动机质量为575 kg,减轻约8%。整个JD155 电动机的长度比YQ190-3的短约30 mm。

6 结语

在数年的基础研究和电动汽车用永磁同步牵引电动机的开发与运用基础上,我们成功开发出地铁车辆用JD155 永磁同步牵引电动机,同时建立起基于多物理场耦合仿真的永磁同步牵引电动机开发平台,初步建立起永磁同步牵引电动机的制造体系和试验体系。

但是,由于永磁电动机的复杂性,在国际上对永磁电动机的设计、制造还在不断深化研究中。JD155 的开发成功,仅仅是一个起点,还必须持续开展研究工作。除了扩大应用规模外,还必须投入巨大精力解决制约永磁同步牵引电动机发展和应用的技术难点,包括:

- (1) 永磁电动机的RAMS 技术研究;
- (2) 高饱和、深弱磁情况下的永磁电动机参数和损耗的准确计算与测量;
- (3) 全封闭永磁电动机热管理技术的研究;
- (4) 直驱永磁同步牵引电动机的研究。

参考文献:

- [1] IEC 60349-4 Electric traction rotating electrical machines for rail and road vehicles Part 4: Permanent magnet synchronous electrical machines connected to an electronic converter[S].
- [2] Moritz W D, Röhik J. Drehstrom-Asynchronmotoren für elektrische Triebfahrzeuge Entwicklung und Auslegungskriterien[J]. EB, 1979(3): 65-69.
- [3] 王渤洪. 创新的直接传动动力转向架Syntegra[J]. 机车电传动, 2002(2): 44-51.
- [4] Thomas Koch. Permanentmagneterregte Synchronmaschine als Direktantrieb für die elektrische Traktion[M]. Shaker Verlag 2006.
- [5] 符敏利. 电动汽车用永磁同步牵引电动机设计[J]. 变流技术与电力牵引, 2007(5): 48-52.
- [6] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 机械工业出版社, 1997.