

永磁同步电机定转子合装工艺的研究及应用

夏红勇, 杨下沙, 兰万玲
(中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412000)

摘要: 针对永磁同步电机(PMSM)定转子合装时容易吸附在一起导致定子绕组和轴承擦伤等问题, 分析了定转子相吸的具体原因, 提出一种简单实用的定转子合装工艺方案, 并通过现场试装验证了该方案的可行性。最后将 PMSM 定转子合装工艺进行了推广应用, 不但解决了绕组、轴承擦伤等问题, 提升电机装配质量, 而且大幅度提升了电机装配效率。

关键词: 永磁同步电机; 定转子合装工艺; 电机装配

中图分类号: TM 305 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)05-0100-05

doi: 10.12177/emca.2020.008

Research and Application of Stator and Rotor Assembly Technology of Permanent Magnet Synchronous Motor

XIA Hongyong, YANG Xiasha, LAN Wanling
(CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China)

Abstract: In view of the problems such as abrasion of stator winding and bearing caused by easy attraction between stator and rotor during the assembly of permanent magnet synchronous motor (PMSM), the specific causes of stator and rotor attraction are analyzed, and a simple and practical stator and rotor assembly process is put forward. The feasibility of the scheme is verified by on-site trial assembly. The stator and rotor assembly technology of PMSM is popularized. It not only solves the problems of winding and bearing abrasion, and improves the assembly quality, but also greatly improves the assembly efficiency of the motor.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); stator and rotor assembly technology; motor assembly

0 引言

永磁同步电机(PMSM)采用钕铁硼等稀土永磁材料励磁, 具有结构简单、运行可靠、体积小、质量轻、损耗小、效率高、功率因数高等显著优点^[1], 在节能减排大趋势下, 越来越多的 PMSM 作为列车的牵引动力源应用到轨道交通领域。PMSM 按照永磁体在转子上的位置不同一般可分为, 表贴式永磁电机和内置式永磁电机^[2]。目前中国国内制造的 PMSM 多为内置式磁路结构, 其结构简单, 工艺实施较为成熟。

随着永磁同步牵引电机应用越来越广泛, 各种异型结构(如空心轴、弹性悬挂)的 PMSM 不断涌现, PMSM 总装配工艺越来越复杂导致工装种类繁多难于区分, 不但占用现场生产场地而且对电机装配工的要求越来越高, 这些均是现场急需解决的实际难题。

PMSM 总装配的难点在于定转子合装时如何有效克服定、转子由于不同心而产生的偏心磁力, 避免定、转子相吸造成绕组绝缘、轴承擦伤等质量问题。为此, 本文提出了一种 PMSM 定转子合装工艺方案, 通过现场小批量试装验证了该方

收稿日期: 2020-01-10; 收到修改稿日期: 2020-03-13

作者简介: 夏红勇(1985—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向轨道交通牵引电机、永磁电机。

案的可行性,最后将其推广应用,以提高 PMSM 装配质量及效率。

1 PMSM 定转子合装工艺

目前最常用的 PMSM 定转子合装方法有 3 种。

(1) 利用组装机,消除磁力并精确定位^[3]。例如某电机厂设计的永磁电机工艺采用假转子、组装机等非标准设备完成定转子合装。设计不带磁性的假转子,用假转子校正定转子中心后拆卸假转子然后安装永磁转子,通过组装机完成定转子精确定位确保定转子合装质量。该方法工艺性强、操作性可靠,但是成本高,需要专用设备和假转子;非标设备需要足够的强度才能满足功率较大的牵引电机的转子磁力;工作效率低,每组装一台电机均需要重新调整设备,准备工作时间长,无法满足节拍生产;操作较为复杂、繁琐。

(2) 利用液压装配机^[4]。这种方式将定子放置在带滑动底座的机床上,使用顶紧装置将转子水平固定,然后滑动底座从而实现定转子合装。该方式适用于磁力较小的小型永磁电机,电机过大,顶紧装置需要足够的强度才能满足电机的转子磁力。

(3) 利用导向套、假轴及导向杆导向定位。设计一个导向套安装在非传动端端盖上,设计一个假轴安装在转子转轴上,假轴和导向套之间采用间隙配合,这样便可对定转子合装的非传动端进行定位。设计 4 根高精度导向杆安装在传动端机座上,以此来对定转子合装的传动端进行定位。这样便可最大程度的保证定转子同心,从而使定转子间的吸引力较小,先通过组装变位机将定转子立式合装到转子在自身重力作用下不能下落为止。设计 2 个拉杆安装在传动端机座上,装好液压泵,利用组装变位机将定子转向,变为卧式组装,对液压泵加压,完成定转子合装^[5]。

永磁同步牵引电机定、转子合装时转子若没有准确的导向保证,定、转子将以很强的磁力吸附、抱死,难以分离^[5],最终导致合装失败。因此,定转子合装过程中需要解决 2 个难点:(1) 如何减小定、转子之间的磁力,并防止二者相吸;(2) 定、转子合装过程中,转子重力小于合装过程阻力时如何解决。

2 PMSM 定转子合装工艺

2.1 制定定转子合装工艺方案

根据电磁学的知识,由于定转子基本均是对称圆周结构,若定转子绝对同心,即定转子的轴向中心线完全重合,则转子对定子的电磁吸力为零,这样定转子之间便不再有吸力的作用,电机立式定转子合装时在转子自身的重力作用下便可顺利完成。定转子轴向中心线偏离的越大,定转子之间的单边磁拉力越强,转子便越易向相近的一方相吸。因此,如何确保定转子合装过程中精确导向,保证定转子合装过程中的定转子同心度是解决、转子相吸的关键。

定、转子合装过程中阻力大于转子自身重力时如何解决。定、转子合装时,转子在下落过程中受到定、转子之间强大的磁力作用,转子越往下落,和定子交叠的部分越多,受到的单边磁拉力越强,导向工装越容易弯曲变形。转子刚开始下落时,受到的单边磁拉力为主的阻力作用小于转子自身的重力,转子可以缓慢下落;当下落到一定距离,转子受到的阻力和自身的重力相等时,转子便不再下落。可以通过合理选择导向工装配合公差、选择合适材料、增强导向工装抗弯能力,降低合装过程中转子偏摆、增加转子质量等方法来有效降低定转子间吸力,同时确保转子下落时自身重力大于转子下落过程中的阻力。定转子合装时通过导向装置精确定位,转子在自身重力作用下缓慢下落即可完成定转子合装。

偏心磁拉力计算式^[6]为

$$F = \beta \frac{DLB^2}{46.3\delta} e_0 \quad (1)$$

式中: D 为转子铁心外径; L 为转子铁心进入定子的有效长度; B 为气隙磁密; δ 为电机气隙; e_0 为偏心量。

表 1 计算了 2 种典型永磁牵引电机定转子合装时理论上允许的最大偏心量,其中 F 理论计算值以临界点转子自身重力等于定转子偏心磁拉力为参考。由表 1 可知,要保证转子自重大于定转子偏心磁拉力,定转子合装时导向工装必须确保转子的最大偏心量小于 0.134 mm,实际中在导向工装作用下定转子合装过程中转子进入定子约 2/3 时偏心磁拉力最大,因此考虑工装制作成本

取最大偏心量 0.12 mm 来设计导向工装,以确保现有永磁牵引电机在导向工装作用下定转子偏心量不大于 0.12 mm,从而保证转子在自身重力作用下缓慢下落,即可完成定转子合装。

表 1 2 种典型结构 PMSM 偏心量计算值

型号	D/mm	L/mm	B/T	F/N	e_0 /mm
TQ-160	336	320	0.83	3 500	0.166
TQ-105	220	165	0.85	1 450	0.134

针对上述结果分析及常规永磁电机定转子合装的研究方式,确定了一种定转子合装工艺方案图,如图 1 所示。

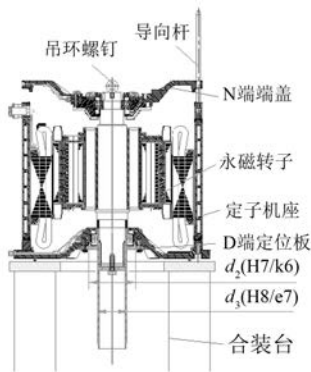


图 1 定转子合装工艺方案图

这种定转子合装工艺采用定位板精确定位定子中心,采用导向筒精确定位转子中心,导向杆在定转子合装过程中配合导向筒完成导向作用,定转子合装台(或组装变位机)立式完成定转子合装。定转子合装工艺方法:(1)将定转子合装台放置在水平地面上,将定位板安装到定子 D 端端盖轴承外盖安装止口中用 4 颗工艺螺栓对称紧固。(2)将定子上翻转台翻身 D 端端盖朝下立式放置,通过吊运设备将定子吊运到合装台正上方中心基本对其后将定子缓缓放置在合装台上,用 4 颗螺栓将定子固定到合装台上确保合装台机定子的总质量大于转子质量 4 倍以上(确保定转子合装过程中定子不会被转子吸起)。(3)将压装好非传动端端盖的转子翻身立式吊起,将导向筒安装到转轴传动端上用螺栓对称紧固到位,然后将转子吊运到定子正上方。(4)在定子端面螺孔中对称均布安装 4 根(端面安装螺孔为 8 个)或 6 根(端面安装螺孔为 12 个)螺钉,对齐定转子中心后缓慢下放转子使导向筒最底部喇叭口进入定

位板导向孔。(5)转动另一端端盖使端盖安装孔对齐机座上导向杆及定子端面安装螺孔,缓慢下放转子使导向杆穿过端盖安装孔,转子在自身重力作用下缓慢下落直到端盖止口接触机座止口。(6)取下机座上的导向杆,用螺栓采用对称紧固方式将端盖紧固到机座上按要求紧固力矩,取下转轴上的导向筒及紧固螺栓,用导向杆穿过非传动转轴上吊环螺钉轻轻撬动吊环螺钉检查确认电机转子能正常转动,说明定转子合装顺利完成。

定转子合装工装如何确保精确定位,关键是定位基准及配合公差的选择,根据转轴结构不同对实心轴和空心轴 2 种分别进行研究。

对于实心轴以转轴外油封安装部位作为导向筒安装基准,设计工装时转轴与导向筒配合部位内径 d_1 公差采用 H7/g6 小间隙配合,如图 2 所示。

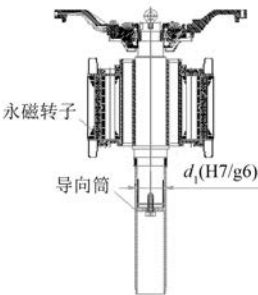


图 2 实心转轴与导向筒配合示意图

对于实心轴电机定位板以轴承外盖安装止口部位(或机座端盖安装止口部位)作为定位板安装基准,设计工装时定位板止口外径 d_2 与轴承外盖安装部位配合公差采用 H7/k6 过渡配合,定位板中心导向孔与导向筒外径 d_3 的配合公差采用 H8/e7 小间隙配合,如图 3 所示。

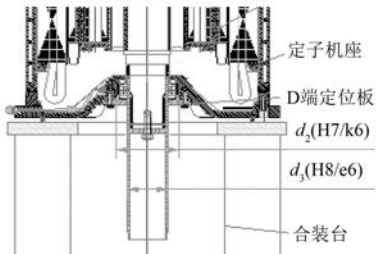


图 3 定位板与导向筒、端盖配合示意图

对于空心轴转轴以转轴内径止口部位(或转轴外油封安装止口部位)作为导向筒安装基准,

导向筒止口外径 d_1 根据转轴止口内径而定, 导向筒与转轴止口之间采用 H7/g6 小间隙配合, 如图 4 所示。

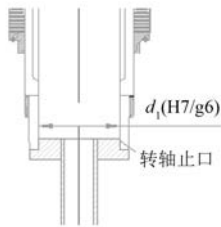


图 4 空心转轴与导向筒配合示意图

以轴承外盖或机座端盖安装止口部位作为空心轴电机定位板安装基准时, 设计工装时定位板止口外径 d_2 与机座端盖安装止口部位配合公差采用 H7/k6 过渡配合, 定位板中心导向孔与导向筒外径 d_3 的配合公差采用 H8/e7 小间隙配合, 如图 5 所示。

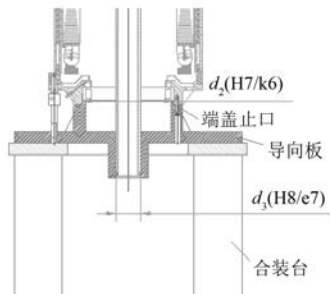


图 5 空心轴电机定位板与导向筒、端盖配合示意图

为了控制定转子合装过程中的转子偏摆量, 对于转子铁心长度小于转子铁心外径的, 定位板上导向孔的长度不小于电机铁心长度的 1/5; 对于转子铁心长度大于转子铁心外径的, 定位板上导向孔的长度不小于电机铁心长度的 1/3。

导向工装的抗弯曲能力决定其定位精度, 为了确保定、转子合装时的定位精度, 需要对选取的导向工装抗弯强度进行核算, 导向筒设计选材时考虑到经济耐用可靠, 原材料通常选用不锈钢钢管。

不锈钢钢管导向筒抗弯强度核算:

$$\sigma = FL/W = 32DFL/[3.14(D_1^4 - d^4)] \quad (2)$$

式中: D_1 为导向筒外径; FL 为导向筒受到最大单边磁拉力时对应力矩; d 为导向筒内径。

导向筒采用不锈钢钢管, 钢管的屈服极限为

535 MPa, 由于钢管受到的力矩是按最大偏心量计算的, 实际定转子合装过程中由于导向筒及定位板导向定位作用, 转子下落过程中偏心量小于最大偏心量, 因此导向筒受到的力矩小于最大力矩, 由表 2 可知, 2 种电机导向筒抗弯强度满足要求, 因此导向筒采用不锈钢钢管, 以满足工装设计

表 2 2 种典型电机导向筒抗弯强度核算值

型号	D/mm	L/mm	d/mm	F/N	σ/MPa
TQ-160	89	620	70	3 500	50.80
TQ-105	58	400	40	1 450	39.12

通过上述导向工装定位基准、配合公差的选择及导向筒抗弯强度核算, 理论上按此要求设计加工的导向工装能够满足定转子合装时精确定位导向要求, 以 TQ-105 及 TQ-160 型电机为例, 按上述要求设计出的导向工装能够确保电机定转子合装时的最大偏心量能控制在 0.12 mm 范围内, 从而保证电机定转子合装过程中转子自身重力大于转子下落过程中阻力, 使得图 1 的立式定转子合装时在导向工装作用下通过转子自身重力作用顺利完成定转子合装。

2.2 定转子合装工艺方案验证

针对图 1 所确定的 PMSM 立式定转子合装工艺方案, 以 TQ-105 实心轴及 TQ-160 空心轴 2 种典型电机为例分别设计制作了 2 种电机定转子合装所需的工装, 通过现场试用来验证该方案的可行性。

TQ-105 型永磁电机是一款空轨车牵引电机, 采用悬架试结构, 电机体积相对较小结构成熟, 目前所生产的永磁牵引电机大部分是实心轴, 因此这种结构永磁电机具有代表性。TQ-105 型永磁电机定转子合装实物图如图 6(a) 所示。

TQ-160 型永磁电机是一款永磁同步直驱牵引电机采用空心轴结构, 电机体积相对较大, 目前所生产的几种永磁同步直驱牵引电机结构基本是参照这种结构设计的。TQ-160 型永磁电机定转子合装实物图如图 6(b) 所示。

通过现场试用验证, 证明永磁电机定转子合装过程中在精确定位导向工装作用下, 能够确保定转子合装过程中偏心量在理论计算范围内, 从而保证转子下落过程中以偏心磁拉力为主的阻力

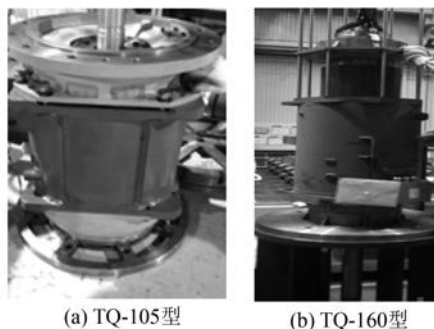


图6 TQ-105型和TQ-160型永磁电机定转子合装实物图

小于转子自身重力,立式状态下通过转子自身重力作用能够完成定转子合装,验证了这种立式定转子合装工艺的可行性。

3 PMSM 定转子合装工艺的应用

采用定位板精确定位定子中心,导向筒精确定位转子中心,导向杆在定转子合装过程中配合导向筒完成导向作用,通过转子自身重力作用立式完成定转子合装的工艺简单实用,工装耐用成本低,工装安装拆卸方便,不但降低了工人的工作强度还提升了装配效率及质量,同时很多工装可以设计成通用型以适合多个型号电机装配需要,适用于节拍化生产。

以往永磁电机定转子合装由于导向工装精度不够,导致定转子合装过程相吸,需要借助液压泵等工装将转子压入定子,这个过程不仅容易损伤轴承,而且需要2、3名熟练工人配合完成,工作难度较大,通过推广这种立式定转子合装工艺后,永磁电机定转子合装只需要1名操作工就能完成,不但保证了电机装配质量,降低了工作难度及强度,还大幅度提升了工作效率。

目前合装工艺方法已经在几个平台永磁牵引电机小批量生产中应用推广。TQ-190、TQ-230及TQ-250型永磁牵引电机均应用于下一代永磁地铁列车上,几种不同平台的下一代地铁列车在各自线路上运营考核,电机运行状态良好。特种车辆(如坦克)用永磁电机定转子合装工艺也是应用这种工艺,部分特种车辆永磁电

机已通过运营考核获得生产资质。400 km 高速列车用的永磁牵引电机也是采用这种定转子合装工艺,电机已经通过型式试验,下一步就是装车考核。2个应用这种定转子合装工艺的典型案例如图7所示。

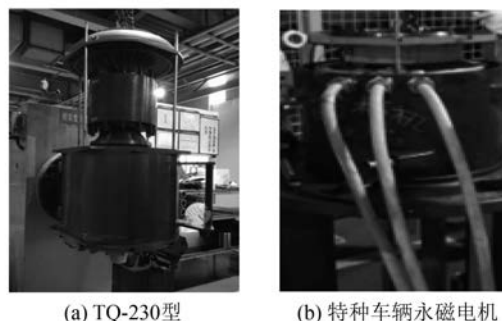


图7 永磁电机定转子合装工艺典型案例

4 结 语

(1) 本文介绍了几种常见永磁电机定转子合装工艺,分析了永磁电机定转子合装过程定转子相吸的原因,提出了一种简单实用的定转子合装工艺,通过实例验证证明了该工艺的可行性。

(2) 将这种立式定转子合装工艺进行了推广应用,不但降低了工人的工作强度及难度,提升了电机装配质量,还大幅度提升了电机装配效率。

【参考文献】

- [1] 赵清.大中型高效永磁同步电动机设计关键技术研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2006.
- [2] 郝清亮,朱少林,杨德望.中小型表面式永磁电机的制造工艺[J].电机与控制应用,2010,37(12): 63.
- [3] 牛志钧.永磁电机制造关键工艺浅议[J].电机与控制应用 2007,34(4): 59.
- [4] 李慧鑫.永磁同步电机液压装配机的设计与研究[D].青岛:青岛科技大学,2015.
- [5] 郭琳琳,郭磊.永磁同步电机总装制造工艺方案分析[J].中国新技术新产品,2015(8): 90.
- [6] 刘志珍,杨志坚,肖玲,等.异步电动机单边磁拉力的分析与计算[J].山东大学学报(工学版),2004,34(1): 59.