

# 高压高效管式隔爆型三相异步电动机设计

白照昊

(卧龙电气南阳防爆集团股份有限公司, 河南 南阳 473008)

**摘要:** 设计了一种高压高效管式隔爆型三相异步电动机。介绍了该电机的整体结构及定子、机座、转子、风扇、轴承、接线盒设计特点。该电机在电机效率、圆周偏心布管、高强度隔爆件、轴贯通曲路、稀油润滑滚动轴承、高防护、低振动、低噪声等设计方面具有创新性。通过产品样机测试试验和数据分析证实了该电机的先进性。

**关键词:** 异步电机; 隔爆电机; 偏心布置; 稀油润滑

**中图分类号:** TM 343<sup>+</sup>.2   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1673-6540(2020)04-0059-05

**doi:** 10.12177/emca.2019.191

## Design of High-Voltage High-Efficiency Tube Flameproof Type Three-Phase Asynchronous Motor

BAI Zhaohao

(Wolong Electric Nanyang Explosion Protection Group Co., Ltd., Nanyang 473008, China)

**Abstract:** A high-voltage high-efficiency tube flameproof type three-phase asynchronous motor is designed. The design advantages of the whole structure and the stator, frame, rotor, fan, bearing and junction box of the motor are introduced. The motor design shows innovation in the aspects of efficiency, circumferential eccentric tube arrangement, high strength flameproof parts, shaft through winding, thin oil lubricated rolling bearing, high protection, low vibration, low noise, etc. The advancement of the designed motor is proved by analyzing the test data of the product prototype.

**Key words:** asynchronous motor; flame-proof motor; eccentric arrangement; thin oil lubrication

## 0 引言

电动机应用市场广阔,耗电量占比大,但目前市场上部分电动机效率较低、损坏较大,因此电动机市场节能潜力巨大。提高电动机效率,有利于实现节能减排目标。开发高压高效电机,不仅符合国家政策要求,更能提升中国电机行业综合竞争力。特别地,高压高效管式隔爆型三相异步电动机具有广阔的市场空间。通过开发研制,形成系列化、标准化的产品,将有助于市场快速推广<sup>[1-2]</sup>。

因此,卧龙电气南阳防爆集团股份有限公司

对高压高效管式隔爆型三相异步电动机开展了研究,重点分析影响电动机效率的电机内部铁耗、定子绕组损耗、笼型转子损耗之间的分配关系,合理调整参数,以最大限度地提高效率。在此基础上完成了高压高效管式隔爆型三相异步电动机设计。在结构设计方面,主要考虑符合防爆电机相关标准的参数要求,提高电机整体结构强度;考虑机座内各部件对风路的影响,通过优化设计减小电机内部的局部风阻,同时保证定子整体的强度要求;在机座、风扇的结构设计方面,主要通过电机内外风路的计算与分析,重新优化电机的风路结构,包括冷却管布管、内外风扇等部件,以降

收稿日期: 2019-12-23; 收到修改稿日期: 2020-03-03

作者简介: 白照昊(1962—),男,硕士,高级工程师,研究方向为电机、驱动控制产品设计与制造。

低机械损耗,提升电机效率。

本文介绍了高压高效管式隔爆型三相异步电动机结构设计的特点,指出了设计中的主要创新点。产品样机测试结果表明设计的电机效率达到或超过有关标准中 1 级能效要求。

## 1 设计目标

高压高效管式隔爆型三相异步电动机设计要求包括:防护等级——IP55、IP56、IP65、IP66<sup>[3]</sup>;效率——1 级能效<sup>[4]</sup>;防爆级别——Ex d I Mb、Ex d IIA T4 Gb、Ex d IIB T4 Gb、Ex d IIC T4 Gb;安装方式——IMB3(也可做成 IMB35、IMV1);冷却方式——IC511。其他参数要求如表 1 所示。

表 1 高压高效管式隔爆型三相异步电动机部分设计指标

参数名称	参数值
中心高/mm	500~800
额定电压/kV	3~11
额定频率/Hz	50、60
功率范围/kW	160~4 500
极数	2~20
相数	3
热分级/℃	155(F)
温升等级/K	80(B 级温升)

## 2 结构设计

高压高效管式隔爆三相异步电动机系列采用隔爆型圆周布管结构,使用钢板机座和铸铁端盖,具有负荷能力强、通风散热好等优点。电动机分别设计独立的外冷却风路和内冷却风路,以最小的损耗取得最佳冷却效果。电动机定子、转子、绕组端部产生的热量通过内风扇及带径向通风的转子共同作用,流经机座圆周冷却管,与外风路进行热交换,被外部冷却气流带走。电动机整机外观如图 1 所示。

下面分别就电动机的风路、定子、机座、转子、轴承和接线盒介绍该电机的设计特点。

### 2.1 风路设计

高压高效管式隔爆三相异步电动机风路设计如图 2 所示,分为内风路和外风路。内风扇为对称轴流扇,在转子铁心两端各设一个。转子旋转后,通过内风扇将电机内部两端冷风带入转子铁心内部,再通过定、转子铁心径向通风道将电机热



图 1 高压高效管式隔爆三相异步电动机整机外观

量带出,经机座冷却管冷却后进行循环。外风扇为单向离心扇,进风口带消音罩,可以降低风路噪声<sup>[5]</sup>。

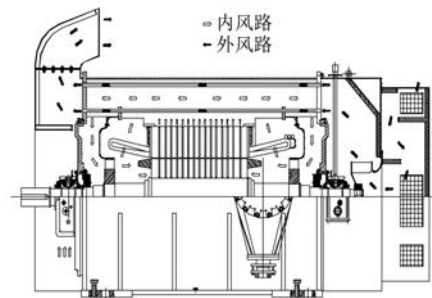


图 2 风路设计示意图

### 2.2 定子

定子采用压入外装压结构。定子绕组采用 F 级绝缘(最高允许温度 155 ℃)。定子线圈采用双玻璃丝包薄膜带绕包铜扁线绕制,经绕包主绝缘并整体真空压力浸漆(VPI)后具有较高的电气强度、机械强度、绝缘性能、防潮性和热稳定性<sup>[6]</sup>。

### 2.3 机座

机座外壳采用高强度钢板卷制焊接而成,内部为加强筋结构设计。冷却管圆周分布。机座整体刚性强,满足水压试验和耐爆压力测试要求。

### 2.4 转子

2 000 kW 以下电动机采用铝鼠笼转子,用离心铸铝工艺或压铸铝工艺将液态纯铝浇注到转子铁心槽中,一次性浇铸成型,将转子导条与端环铸成一个整体。铸铝转子结构和工艺保证了电动机转子的可靠性,同时使电动机具有满意的转矩特性。

大功率(≥2 000 kW)电动机采用铜条转子。铜条转子采用可靠的导条紧固和端环焊接工艺以

及高速电动机的护环结构,确保可靠运行<sup>[6]</sup>。

## 2.5 轴承

根据电动机功率和转速,轴承采用滚动轴承和滑动轴承 2 种形式。滚动轴承设有不停机注、排油装置,在电动机连续运转情况下可定期加注润滑脂进行维护、保养。滑动轴承为端盖式球面滑动轴承,采用压力供油润滑、油环自润滑或复合式润滑方式,同时采取了防止轴电流的措施。

## 2.6 接线盒

主接线座采用分体式结构,使接线盒在保证空腔足够大的基础上避免法兰盘的粗大结构,并且接线盒内部绝缘子安装方便,铸造和加工工艺性好,接线盒安装紧固件不外露,外观简洁。接线盒盖根据计算采用大圆弧设计,安装螺栓增加保护措施,采用不均匀壁厚设计,消除应力集中点。隔爆面均采用止口隔爆,增设拆卸孔,便于现场安装拆卸。

# 3 设计的技术创新特点

## 3.1 提高电机效率的设计

该项目设计前针对能效提升进行了专项分析论证,采取针对性措施,以期从根源上着手提高电机效率。电机效率的核算方法为:

$$\eta = \frac{P_2}{P_{Fe} + P_{fw} + P_{Cu1} + P_{Al2} + P_s + P_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $P_2$ 为电机的额定输出功率; $P_{Fe}$ 为铁耗; $P_{fw}$ 为机械损耗; $P_{Cu1}$ 为定子绕组损耗; $P_{Al2}$ 为转子绕组损耗; $P_s$ 为总杂散损耗。

从式(1)可以看出,高效电机设计的关键是分析、优化和降低电机各部分损耗。针对各部分损耗,提出以下效率改善措施。

(1) 铁耗。优化电磁方案,并采用 Ansoft、ANSYS CFX、Fluent 等有限元计算分析手段,对电机损耗进行精准分析,优化对比,合理选择三圆、槽配合、节距和槽型,以改善磁路分布,降低定子铁耗。

(2) 机械损耗。优化电机内外部风路设计,减小风阻,使内风扇、外风扇、冷却管分布与电机散热性能相匹配,从而减小通风损耗;减小转子重量,合理地进行轴承选型,从而减少轴承摩擦损耗。

(3) 定子绕组损耗。通过减小绕组端部长度、减小节距、缩短铁心长度等措施降低定子绕组损耗。

(4) 转子绕组损耗。通过增大导条截面积、减少定子绕组匝数、减小节距、缩短铁心长度等措施降低转子绕组损耗。

(5) 总杂散损耗。通过选择合适的槽配合、加大气隙、转子斜槽、转子表面酸洗、采用封闭槽等措施降低总杂散损耗。

## 3.2 圆周偏心布管机座设计

对于 IC511 电机冷却结构,冷却管布置在定子铁心周围,能够 360° 直接参与内外风路热交换,散热面积大,热交换能力强。电机转子铁心与定子铁心对齐,均为带径向通风道结构。在电机通电转子旋转后,转子铁心与内风扇共同作用,高效地将转子铁心、定子铁心、绕组等发热件产生的热量随内风路气流充分与冷却管外表面接触,冷却管内管为外风路冷风气流,从而带走电机热量。

电机内部发热会导致电机内部气体受热,根据“热会上浮”原理,电机内部气体温度分布并不是圆周均布,而是上端温度较高。因此,该项目电机机座为偏心机座设计。采用的 IC511 电机冷却结构如图 3 所示。从图 3 可以看出,冷却管圆周分布不均匀,上部管多,下部管少。这种冷却管布置更加合理,能更有效地实现散热。

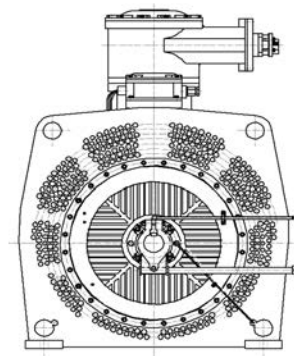


图 3 IC511 电机冷却结构

## 3.3 高可靠性隔爆技术

防爆电机领域主要防爆型式为隔爆型、增安型、正压型和无火花型。相比较而言,隔爆型电机具有防爆性能好、维护简单、综合成本低廉、可靠性高等突出优点。本文设计的高压管式隔爆型电机的高可靠性防爆技术主要表现在高强度隔爆件

和轴贯通曲路。

### 3.3.1 高强度隔爆件设计

以电机机座设计为例。机座主要由壁板、法兰环、间隔环、支撑环、外罩、加强筋、冷却管等零部件构成。该项目立足于贯通、支撑原理,两端壁板用圆周 10 根加强筋焊接相连,间隔环、支撑环、外罩、加强筋、壁板也相互焊接。其中,加强筋为 30、45 mm 厚钢板,壁板为 45 mm 厚钢板,外罩、间隔环、支撑环均为 12 mm 厚钢板卷制,冷却管为壁厚 2 mm 无缝钢管,机座整体耐压强度高。

电机涉及隔爆零部件主要包括机座、端盖、轴承装置和接线盒。上述零部件在生产过程均需水压试验检验,要求无结构损坏、无影响隔爆性能的永久变形,水压试验持续 10 s,不滴水为合格。

### 3.3.2 轴贯通曲路设计

隔爆型电机传爆失效多为轴贯通部分。为了保证电机在防爆危险场所的可靠运行,在满足 GB 3836.2—2010<sup>[2]</sup> 防爆规程要求的间隙和长度的基础上将轴贯通结构适当加长,同时增加一道曲路,采用双曲路隔爆结构。轴贯通曲路结构如图 4 所示。

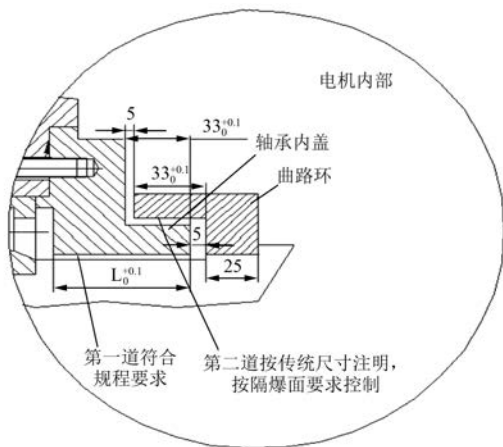


图 4 轴贯通曲路结构

第一道曲路:对于 IIB、IIC 防爆电机,GB 3836.2—2010<sup>[2]</sup> 防爆规程要求长度不小于 40 mm,该项目电机统一设计为 65 mm, IIB 电机间隙 0.4 mm, IIC 电机间隙 0.3 mm,作为第二道关卡阻断尾余火花外传。

第二道曲路:防爆规程无明确要求,不注明为隔爆面,按照隔爆面控制,参照传统尺寸长度不小于 25 mm, IIC 间隙 0.5 mm, IIB 间隙 0.8 mm,作为

首道关卡阻断绝大部分火花外传。

### 3.4 稀油润滑滚动轴承设计

稀油润滑一般用于轴承的工作转速高或工作温度高而不适合使用润滑脂的情况。例如外圈引导保持架的四点接触球轴承,由于保持架与内外圈的间隙小,润滑脂不易进入滚道,故而适合采用稀油润滑。脂润滑滚动轴承经常因加脂量过多或未按时加油等因素造成电机轴承温度高、轴承干磨致转子抱轴等使用问题。为了有效解决此类问题,成功研发了稀油润滑滚动轴承<sup>[7]</sup>,并已实现市场应用。

稀油润滑的润滑方式为油环自润滑。轴承外盖内含储油空腔(油池),固定在轴上的轴套带动油环旋转,油环下半部分浸在油池内,油环旋转带动润滑油至轴套上部,轴承内侧为锥形结构,润滑油沿旋转的轴套通过定位环与轴套间隙爬至轴承滚子处,润滑滚子后回落至下部,最后漫回到油池内,形成自循环。轴承外盖采用铸铁结构,散热性能好,油池内的润滑后温度快速降低,最终实现轴承散热。

滚动轴承稀油润滑关键技术主要为防漏油设计。本文设计对轴承外侧采用骨架油封,强度高,耐磨性、密封性好,防止轴贯通部位向轴承外部漏油。轴承外盖与轴承座采用氟橡胶 O 型密封圈密封,防止润滑油流失;轴承内侧采用一道挡板阻挡大部分润滑油,另一道为反向密封螺纹(通过旋转将润滑油驳回至轴承室内),防止润滑油进入电机内部。

### 3.5 高防护设计

对电机运用场所开展调研、分析,针对海洋平台等高盐雾、高湿度、高粉尘环境采取对应措施。通过改变接合方式、增加密封、增加保护器等技术方案,将电机防护等级提高至 IP66,可满足用户实际使用需求。

该项目电机整机防护等级达到 IP66 级别,并成功通过检验机构试验,可广泛应用于海洋平台或高粉尘场所。电机接线盒隔爆面采用止口形式,既可提高电机隔爆性,又能提高电机防护等级。在隔爆面止口部位增加环形沟槽,并将氟橡胶密封圈挤压在密封圈槽内,达到防水、防尘的目的。

在电机轴贯通安装螺栓根部和轴承外盖止口

根部增加环形沟槽,并将氟橡胶密封圈挤压在密封圈槽内,同时在轴承外盖与旋转轴结合部分采用轴承保护器(高强度骨架密封),改善这些部位的耐摩擦、耐老化性能。

### 3.6 低振动设计

管式隔爆电机定子整体刚性强。通过 ANSYS 等有限元软件进行仿真,对定子模态响应进行分析,改进机座结构设计,提高强度、提升整机的结构稳定性。

针对转子设计,通过 ANSYS 进行转子动力学分析。根据分析结果合理控制转子临界转速及挠度,提高加工精度,并进行高速动平衡及现场动平衡,以确保满足低振动要求。

### 3.7 低噪声设计

管式隔爆型电机采用前后两端加消音罩设计,增大风路路程,且消音罩上采用消音棉结构,同时采用高气动低噪声机翼型电机离心风扇<sup>[8-9]</sup>。噪声满足声压级 $\leq 85$  dB(A)。消音风罩和机翼型风扇如图 7 所示。

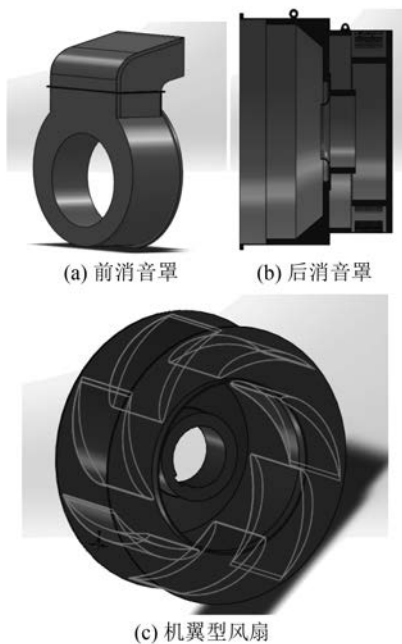


图 5 消音罩和机翼型风扇示意图

## 4 样机测试结果

2015 年开始进行产品样机及订货产品试制,先后共完成 40 多个产品试制。表 2 列出了部分典型规格样机的测试结果,并与 GB 30254—

2013<sup>[4]</sup>中 1 级能效要求及国外 2 家厂商对应型号的电机效率进行对比。

表 2 典型规格样机测试结果

电机型号	功率/ kW	电压/ kV	1 级 能效效 率/%	本设计 电机效 率/%	国外 A 电机效 率/%	国外 B 电机效 率/%
YBXKK560-2	900	6	96.3	96.6	—	95.6
YBXKK560-4	630	10	95.8	96.0	—	—
YBXKK560-8	630	6	95.8	95.9	—	95.2
YBXKK560-2	1 120	6	96.4	96.5	96.0	96.3
YBXKK630-2	1 800	6	96.7	96.7	96.4	96.7
YBXKK630-6	1 120	6	96.4	96.5	96.2	95.8
YBXKK710-2	1 800	10	96.7	96.7	95.4	96.1
YBXKK710-4	2 000	10	96.7	96.8	96.2	96.1
YBXKK710-12	630	6	95.4	95.5	—	94.8

由表 2 可见,试制的 YBXKK 系列高压高效管式隔爆型三相异步电动机效率均达到或超过 GB 30254—2013<sup>[4]</sup>中的 1 级能效要求。与国外厂商对应型号的电机相比,YBXKK 系列电动机的效率也普遍更高,证明了该高效电机设计的先进性。

## 5 结 语

通过多方面的技术攻关,解决了制约高压高效管式隔爆型电机设计的技术瓶颈,完成了高效电机设计。在三相异步电动机低中心高、高功率密度、高效率、低振动、低噪声等方面取得了新的突破,在安全可靠方面也得到了进一步提升,达到了节能降耗的目的。样机测试结果证明了该高效电机设计的先进性。设计结果将形成系列化、标准化的产品,有助于市场快速推广,实现重大的经济效益和社会效益。

### 【参考文献】

- [1] 陈伟华.电机产业的发展与政策机遇[J].电机与控制应用,2017,44(7): 1.
- [2] 中国电器工业协会.爆炸性环境第 2 部分:由隔爆外壳“d”保护的电气设备:GB 3836.2—2010[S].北京:中国标准出版社,2010.
- [3] 中国电器工业协会.旋转电机整体结构的防护等级(IP 代码)分级:GB/T 4942.1—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.

(下转第 76 页)