

文章编号:1671-251X(2017)07-0032-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017.07.007

矿用隔爆型高压高效三相异步电动机研制

刘彦华¹, 乔建伟², 霍大勇³, 连晗¹

(1. 河南工业职业技术学院 电子信息工程系, 河南 南阳 473008; 2. 卧龙电气南阳防爆集团股份有限公司, 河南 南阳 473008; 3. 喀什大学 物理与电气工程学院, 新疆 喀什 844006)

摘要:针对现有电动机因耗电量较大、效率较低引起的能源浪费和环境污染等问题,研制了矿用隔爆型高压高效三相异步电动机。详解介绍了电动机的研制目标、定转子槽数配合的选取、定转子冲片尺寸的确定、电磁计算过程中主要参数设计、结构设计等。样机试验结果表明,所研制的电动机效率试验值全部超过了GB 30254—2013《高压三相笼型异步电动机能效限定值及能效等级》中的1级能效等级要求,同时满足低噪声、低振动的设计要求。

关键词:隔爆型三相异步电动机; 高压高效; 电磁计算; 结构设计; 能效等级; 节能减排

中图分类号:TD614 文献标志码:A 网络出版时间:2017-06-27 16:15

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20170627.1615.007.html>

Development of mine-used flameproof three-phase asynchronous motor with high voltage and high efficiency

LIU Yanhua¹, QIAO Jianwei², HUO Dayong³, LIAN Han¹

(1. Department of Electronic Information Engineering, Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473008, China; 2. Wolong Electric Nanyang Explosion Protection Group Co., Ltd., Nanyang 473008, China; 3. College of Physics and Electricity Engineering, Kashgar University, Kashgar 844006, China)

Abstract: In view of problems of energy waste and environmental pollution caused by high power consumption and low efficiency of existing motors, a mine-used flameproof three-phase asynchronous motor with high voltage and high efficiency was developed. Development goals, selection of slot matching of stator and rotator, determination of punch size of stator and rotator, main parameters design in electromagnetic calculation, and structure design of the motor were introduced detailedly. Prototype test results show that test values of efficiency of the developed motor are more than the value of energy efficiency grade of level 1 in GB 30254-2013 *High Voltage Three-phase Cage Asynchronous Motor Energy Efficiency Limit and Energy Efficiency Level*, and at the same time, it can meet design requirements of low noise and low vibration.

Key words: flameproof three-phase asynchronous motor; high voltage and high efficiency; electromagnetic calculation; structure design; energy efficiency grade; energy-saving and emission reduction

收稿日期:2017-03-09;修回日期:2017-05-25;责任编辑:胡娴。

基金项目:河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目(2013GGJS-243);河南省科技厅科技攻关计划项目(162102210101)。

作者简介:刘彦华(1977—),女,河南新乡人,副教授,工程硕士,主要从事电气及自动控制技术方面的教学与科研工作,E-mail:396348991@qq.com。通信作者:乔建伟(1975—),男,河南驻马店人,高级工程师,主要从事高压电动机的设计与开发工作,E-mail:13693770659@163.com。

引用格式:刘彦华,乔建伟,霍大勇,等. 矿用隔爆型高压高效三相异步电动机研制[J]. 工矿自动化,2017,43(7):32-36.

LIU Yanhua, QIAO Jianwei, HUO Dayong, et al. Development of mine-used flameproof three-phase asynchronous motor with high voltage and high efficiency[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(7): 32-36.

0 引言

电动机作为各种驱动设备的源动力,被广泛应用于各行业。据统计,中国每年电动机的耗电量占所有发电量的65%以上,电动机效率总体比其他国家低1%~2%。电动机的使用不但消耗了大量能源,还会造成环境污染。如一台20 000 kW的异步电动机,若效率提高1%,每小时可节约电能200 kW·h。为此,我国发布了GB 30254—2013《高压三相笼型异步电动机能效限定值及能效等级》,该标准按照不同电压、不同极数、不同冷却方式,将高压三相异步电动机划分为3个能效等级,从高到低分别是1级能效、2级能效、3级能效^[1]。该标准的实施加快了高效电动机的推广,取得了节能减排效果,并促进了装备制造业的结构调整和升级换代。

矿用隔爆型高压高效三相异步电动机是为响应国家节能减排政策而开发的新一代隔爆型电动机,主要用在煤矿环境下的防爆场合,用于拖动煤矿通风机、水泵、带式输送机等设备,防爆要求按照GB 3836.1—2010《爆炸性环境 第1部分:设备通用要求》和GB 3836.2—2010《爆炸性环境 第2部分:由隔爆外壳“d”保护的设备》进行设计。该电动机为1级能效,其他性能满足JB/T 1044—2014《Y2系列、YX2系列高压三相异步电动机技术条件及能效等级(机座号355—560)》^[2];采用已经验证可靠的新技术、新材料、新工艺,具有节能、环保、紧凑、安装使用方便等特点,对国家节能减排、环境保护具有重要意义。

1 研制目标

矿用隔爆型高压高效三相异步电动机技术参数如下:型号为YBX3 315—560;额定功率为185~2 240 kW;额定电压为3.3~11 kV;极数为2~12 P;额定频率为50,60 Hz;工作制为S1(连续);防爆标志为ExdIIBT4;相数为3;防护等级为IP54,IP55;绝缘等级为F级(B级温升考核);安装方式为IMB3(也可做成IMB35,IMV1);冷却方式为IC411;环境温度为-15~40 ℃;海拔高度为0~1 000 m^[3]。

2 电磁设计

2.1 定转子槽配合的选取

在相数、极数不变的情况下,电动机的定子槽数决定了每极每相槽数,每极每相槽数的大小对电动机的性能参数、附加损耗、绝缘材料用量等都有影

响。因本次是高效电动机设计,选取定子槽数时,在防止引起电磁振动和电磁噪声的情况下,以降低损耗、提高效率为主要目的^[4-5]。

每极每相槽数较大时,定子谐波磁场减少,附加损耗降低,谐波漏抗减少,同时每槽导体数减少,槽漏抗减少,效率增高,但是由于线圈数量增多,引起线圈有效材料增多,定子电阻增大,定子铜耗较大,影响效率,因此,选取槽数时应综合考虑。在选取转子槽数时,还要考虑和定子槽数相配合,即槽配合。如果槽数配合不合适,会使电动机性能恶化,如导致附加转矩、附加损耗、噪声及振动加大,使效率降低、温度升高,出现尖锐的电磁噪声,严重时甚至导致电动机无法启动^[6-7]。

在YX2系列电动机基础上进行优化调整,选取YBX3系列电动机的槽数配合,见表1,其中H为中心高, Q_1 、 Q_2 分别为定子、转子槽数。

表1 不同极数、不同中心高对应的槽数配合
Table 1 Slot matching with different centers and different poles

H/mm	2P		4P		6P		8P	
	Q_1	Q_2	Q_1	Q_2	Q_1	Q_2	Q_1	Q_2
315	42	32	48	38	54	42	—	—
355	42	32	48	38	54	42	48	44
400	42	32	48	38	54	42	72	58
450	42	32	48	38	72	56	72	58
500	48	40	60	72	72	56	72	58
560	48	40	60	72	72	56	72	88

2.2 定转子冲片尺寸的确定

最常用的定子槽形有梨形槽、梯形槽、半开口槽、开口槽4种。3 kV及以上的中高压电动机一般选用开口槽,这是因为中高压电动机的绕组采用成型线圈,线圈的主绝缘要在线前包扎,下线后再进行真空浸漆。但开口槽会加大气隙磁场的磁导齿谐波分量,引起较大的空载附加损耗,因此,YBX3系列电动机采用磁性槽楔,但槽漏抗也将增大。

转子槽形较多,有刀形槽、平行槽、闭口槽、梯形槽、双笼转子槽等,YBX3系列电动机选用半闭口的平行槽。转子槽形尺寸对电动机的启动转矩、最大转矩、启动电流、转差率、功率因数、效率、温升都有很大影响。由于最大转矩与启动电流存在一定比例关系,转子槽形尺寸的确定除与定子槽形尺寸的确定有一些相似的原则之外,还要重点考虑电动机的启动性能要求^[8-10]。

“三圆”尺寸是指电动机的定子外径、定子内径和转子内径,决定了电动机的有效材料和关键性能。

“三圆”尺寸的确定是电动机设计的关键。由于 YBX3 系列电动机为 1 级能效,同功率电动机又比 YX2 系列电动机降低 1 个中心高,所以其“三圆”尺寸设计考虑了放大尺寸,并且在 YX2 系列电动机的

基础上进行优化调整,最终确定 YBX3 系列电动机的“三圆”尺寸,见表 2,其中 D_1 , D_{11} , D_{12} 分别为定子冲片外径、定子冲片内径,转子冲片内径。

表 2 不同极数、不同中心高的“三圆”尺寸
Table 2 Size of three circles with different centers and different poles

H/mm	2P			4P			6P			8P		
	D_1/mm	D_{11}/mm	D_{12}/mm	D_1/mm	D_{11}/mm	D_{12}/mm	D_1/mm	D_{11}/mm	D_{12}/mm	D_1/mm	D_{11}/mm	D_{12}/mm
315	540	320	150	540	340	150	540	380	170	—	—	—
355	620	350	160	620	380	160	620	430	250	620	430	250
400	700	370	170	700	430	170	700	475	300	700	475	300
450	780	410	200	780	500	270	780	525	330	780	525	330
500	880	475	230	880	560	280	880	600	360	880	600	360
560	1 000	560	270	1 000	640	320	1 000	690	410	1 000	690	410

2.3 电磁计算过程中主要参数设计

考虑结构、工艺、材料等因素,为 YBX3 系列电动机选取合适的电负荷、磁负荷、热负荷等。主要参数如下:气隙磁密为 7 000~8 000 GS;定子齿磁密为 14 000~15 000 GS;转子齿磁密为 12 000~13 000 GS;定子轭磁密为 13 000~14 000 GS;转子轭磁密为 11 000~13 000 GS;导条电密为 2.5~3.5 A/mm²;端环电密为 2~3 A/mm²;热负荷为 1 300~1 500 A²/mm³。根据以上参数控制范围,在电磁计算输出满足性能参数要求的情况下,调整设计方案,确定电动机的其他尺寸。

3 结构设计

3.1 整体结构

YBX3 315—560 系列高压高效三相异步电动机整体结构由定子、转子、轴承装置、接线盒、端盖、外风扇、端罩等部件组成,如图 1 所示。它的防爆型式为隔爆型,能够保证通过机座、端盖等接合面或结构间隙进入电动机内部的爆炸性混合物爆炸时不损坏电动机,并且不会引起电动机外部由一种、多种气体或蒸汽形成的爆炸性气体点燃。

3.2 隔爆面的设计

该系列三相异步电动机防爆标志为 EXdII, EXdIIA, ExdIIB。隔爆型电动机的设计要重点考虑隔爆接合面的三要素(间隙、宽度、粗糙度)是否满足防爆标准要求,隔爆接合面应进行防锈处理,不允许涂漆或喷塑,可被电镀。防锈油脂可在装配前涂覆在接合面上,使用的防锈油脂应未老化变硬,不含汽化溶剂,并且不会引起防爆面锈蚀。防爆接合面的宽度应不小于表 3 给出的最小值,间隙不应超过表 3 给出的最大值,粗糙度不允许超过 6.3。表 3

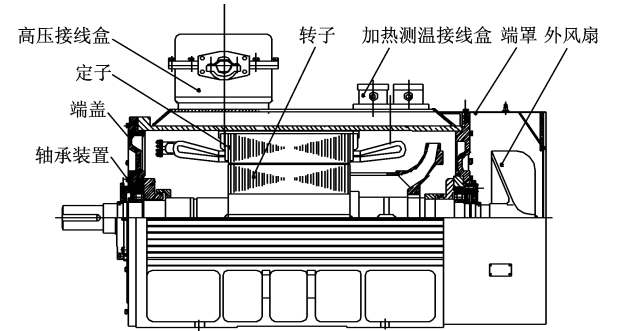


图 1 YBX3 315—560 系列高压高效三相异步电动机整体结构

Fig. 1 The whole frame of YBX3 315—560 series three-phase asynchronous motor with high voltage and high efficiency

中 V 为电动机内部腔体体积。

3.3 冷却系统

YBX3 系列电动机冷却方式为 IC411,分别设计有外风路和内风路。内外风路通过流体分析使机械损耗降到最小,冷却效果达到最好,从而提高电动机的效率,降低温升。

外风路通过外风扇的搅动使冷却空气从电动机非轴伸端进入,通过网窗、吸风嘴吹过端盖和机座表面的散热筋,从而带走热量,降低电动机表面温度。内风路通过内风扇的搅动使热的空气通过转子轴向通风孔、气隙流向机座上 4 个圆周分布的冷却风道,再进入转子轴伸端进行循环冷却。同时定子铁芯与机座接触传导散热,机座空腔与内部的热空气对流散热,定子内部也存在热量交换^[11-13]。

3.4 定子

定子由铁芯、绕组和机座组成。定子铁芯是电动机的磁路组成部分,由冲片、压圈经压装后通过扣片紧固成一体。铁芯冲片间必须保持一定的片间压

表3 隔爆型电动机外壳接合面最小宽度和最大间隙
Table 3 The minimum width and maximum clearance of flameproof motor housing

接合面 类型	接合面 最小宽度 L/mm	最大间隙/mm											
		V≤100 cm³			100 cm³<V≤500 cm³			500 cm³<V≤2 000 cm³			V>2 000 cm³		
		I	IIA	IIB	I	IIA	IIB	I	IIA	IIB	I	IIA	IIB
平面接合面、圆筒形接合面或止口接合面	6	0.30	0.30	0.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	10	0.35	0.30	0.20	0.35	0.30	0.20	0.08	0.08	0.08	—	—	—
	13	0.40	0.30	0.20	0.40	0.30	0.20	0.40	0.30	0.20	0.40	0.20	0.15
	25	0.50	0.40	0.20	0.50	0.40	0.20	0.50	0.40	0.20	0.50	0.40	0.20
旋转电动机转轴接合面	滑动轴承	6	0.30	0.30	0.20	—	—	—	—	—	—	—	—
		10	0.35	0.30	0.20	0.35	0.30	0.20	—	—	—	—	—
		13	0.40	0.35	0.25	0.40	0.30	0.20	0.40	0.30	0.20	0.40	0.20
		25	0.50	0.40	0.30	0.50	0.40	0.25	0.50	0.40	0.25	0.50	0.40
		40	0.60	0.50	0.40	0.60	0.50	0.30	0.60	0.50	0.30	0.60	0.50
	滚动轴承	6	0.45	0.45	0.30	—	—	—	—	—	—	—	—
		10	0.50	0.45	0.35	0.50	0.40	0.25	—	—	—	—	—
		13	0.60	0.50	0.40	0.60	0.45	0.30	0.60	0.45	0.30	0.60	0.30
		25	0.75	0.60	0.45	0.75	0.60	0.40	0.75	0.60	0.40	0.75	0.60
		40	0.80	0.75	0.60	0.80	0.75	0.45	0.80	0.75	0.45	0.80	0.75

力,要有足够的叠压系数来保证磁路面积和铁芯成为坚实的整体。如果铁芯局部片间压力不足,发生片松,则会在电磁力作用下发生片与片间的振动,表现为“嗞嗞”的电磁噪声。而铁芯形成坚实的整体后,当激振力接近于其固有频率时,将会激起较大的电磁振动或噪声,因此,定子固有频率的计算十分重要。

机座采用高强度灰铸铁铸造而成,整体为圆筒结构,中间圆筒壁厚度为 20 mm。圆筒外面铸有垂直、水平的散热筋,既可加强机座稳定性又有散热作用。圆筒下面两侧的地脚板厚度为 30 mm,与机座铸成一体。圆筒机座结构设计简单,方便铸造。根据受力分析,合理选取紧固螺栓的大小、数量和位置,必要时可使紧固螺栓加大预紧力,提高焊接刚度^[14-15]。

3.5 转子

转子由转子铁芯与轴连接而成。铁芯和轴采用键连接和热套相结合的方式 进行装压,确保连接可靠。转子铁芯由定子冲片叠压而成,叠压系数为 0.97,叠压后采用压铸铸铝工艺将液态铝浇注到转子槽中,一次压铸成型,保证了转子导条和端环的可靠性,同时使电动机具有可靠的转矩特性。为了降低振动,转子全部按刚性转子设计,临界转速大于 1.3 倍的同步转速,挠度小于 10%气隙值。

3.6 轴承结构

据统计,电动机的故障点主要发生在旋转件部

分,而支撑旋转件的轴承装置故障占整台电动机故障的 40%~50%。YBX3 系列电动机要求具备经济高效、高可靠性、低维护、低噪声等性能特点,所以轴承装置设计是关键。

该系列电动机采用单列深沟球轴承,在负载为带式输送机 等轴伸受力较大的设备时,轴伸端选用滚动轴承,以承载更高的径向力。选取轴承型号时必须考虑轴承载荷、转速、寿命、工作环境、安装空间、润滑方式、周围条件等因素。

4 产品试验情况

试制了 6 个典型规格的电动机,其性能参数见表 4。其中, P_1 为额定功率; U_N 为额定电压; η_0 为效率考核值,即 GB30254—2013《高压三相笼型异

表 4 典型规格电动机试验数据

Table 4 Typical motor test data								
电动机型号	P_1 / kW	U_N / kV	η_0 / %	η / %	$\Delta\eta$ / %	Δt_1 / K	L_p / dB (A)	振动/ (mm·s ⁻¹)
YBX3 315-2	200	6	94.3	94.63	0.33	63	84	0.8
YBX3 55-2	400	6	95.4	96.11	0.71	74	84	1.0
YBX3 00-2	630	6	96.0	96.89	0.89	75	84	0.8
YBX3 450-4	900	6	96.3	96.32	0.02	80	84	1.2
YBX3 00-4	1 400	6	96.7	96.98	0.28	76	85	1.6
YBX3 60-2	1 600	6	96.9	97.08	0.18	80	85	1.1

步电动机能效限定值及能效等级》中的1级能效等级; η 为效率试验值; $\Delta\eta$ 为效率试验值与考核值差值; Δt_1 为温升; L_p 为噪声声压级。由试验数据可知,YBX3系列电动机效率试验值全部超过了GB 30254—2013《高压三相笼型异步电动机能效限定值及能效等级》中的1级能效等级,同时达到了低噪声、低振动的设计要求,综合性能达到国内领先水平。

5 结语

目前YBX3系列电动机已投入批量生产,现场应用结果验证了其各项性能指标达到了预期目标,特别是其高效节能特点,为用户节约了可观的费用,为节约能源、减少污染作出了贡献。下一步考虑编制煤矿用YBX3系列高压高效隔爆型三相异步电动机技术条件,将1级能效等级纳入隔爆型电动机行业标准中。另外,该系列电动机在可靠性、稳定性、工艺波动等方面还需要提高。

参考文献(References):

- [1] GB 30254—2013 高压三相笼型异步电动机能效限定值及能效等级[S].
- [2] JB/T 10444—2014《Y2系列、YX2系列高压三相异步电动机技术条件及能效分级(机座号355~560)》[S].
- [3] 乔建伟,刘彦华,于喜伟. YXKK315~630系列高压高效箱式三相异步电动机[J]. 电机与控制应用, 2016,43(7):63-66.
QIAO Jianwei, LIU Yanhua, YU Xiwei. YXKK 315~630 series high voltage high efficiency three-phase asynchronous motor[J]. Electric Machines & Control Application, 2016,43(7):63-66.
- [4] 孟大伟,夏云彦,杨洋,等. YKK系列中型高压电机起动特性的计算[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(7):50-53.
MENG Dawei, XIA Yunyan, YANG Yang, et al. Calculation of starting characteristics for medium-sized motors with high-voltage in YKK series [J]. Electric Machines and Control, 2011,15(7):50-53.
- [5] 党杰,张明,孙曦东. 基于磁链作为状态变量的饱和异步电机模型[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(4): 34-38.
DANG Jie, ZHANG Ming, SUN Xidong. Induction machine model using flux linkage as state variables including saturation [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2012, 31(4):34-38.
- [6] 陈世坤. 电机设计[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2000.
- [7] 汤宁平,邱培基,吴汉光. 考虑主磁路饱和时感应电机的综合矢量模型[J]. 电机与控制学报, 2002, 6(1):

- 14-17.
TANG Ningping, QIU Peiji, WU Hanguang. A saturation space vector model of induction machine [J]. Electric Machines and Control, 2002,6(1):14-17.
- [8] 夏云彦,孟大伟,何金泽,等. YJKK系列中型高压电动机绕组温升的工程计算方法[J]. 电工电能新技术, 2014,33(4):71-75.
XIA Yunyan, MENG Dawei, HE Jinze, et al. Engineering calculation of winding temperature rise for YJKK series high-voltage motor [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014,33(4):71-75.
- [9] 胡祖梁. 异步电动机起动时间的分析和计算[J]. 电工技术杂志, 1991(4):6-10.
- [10] 高景德,王祥珩,李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [11] 汪书苹,赵争鸣,冯焱径. YKK355-630系列高压三相异步电动机高效风扇的设计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009,49(1):9-12.
WANG Shuping, ZHAO Zhengming, FENG Yaojing. Design of high efficiency fan for series YKK355-630 high voltage three phase asynchronous motors [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(1):9-12.
- [12] 李贤明,王同章,周平. 大功率高速电动机高效率低噪声离心风扇的研究与设计[J]. 防爆电机, 2005, 40(1):9-12.
LI Xianming, WANG Tongzhang, ZHOU Ping. Research and design of high-efficiency low-noise centrifugal fan for high-power high-speed motor[J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2005, 40(1):9-12.
- [13] 郑国丽,周黎民,邓尧强,等. 高效电机风路结构设计参数优化[J]. 电机与控制应用, 2015,42(4):62-65.
ZHENG Guoli, ZHOU Limin, DENG Yaoqiang, et al. Wind path structure design parameters optimization of efficient motor[J]. Electric Machines & Control Application, 2015, 42(4):62-65.
- [14] 王天煜,王凤翔. 大型异步电动机定子振动与模态分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(12):41-45.
WANG Tianyu, WANG Fengxiang. Vibration and modal analysis of stator of large induction motors[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(12):41-45.
- [15] 刘雪梅,倪泽浩,李爱平. 基于ANSYS的大型异步电机转子系统动态特性分析[J]. 中国工程机械学报, 2013,11(6):480-481.
LIU Xuemei, NI Zehao, LI Aiping. ANSYS-based dynamic property analysis on robot system of large-scale asynchronous motors [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2013,11(6):480-481.