

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

吴琼,陈辉,乔建伟,杜振坤,李玉娇,
朱新年,吴小夫.
一种冷冻机专用高压高速开启式三相
异步电动机.
电机与控制应用,2021,48(8):67.



SEARI
上电科

NCMS
上科电机

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术,
辐射智能制造产业发展



· 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址: 上海市武宁路505号

手机: 18918357509

电话: 021-62574990-436

传真: 021-62163904

邮箱: wangcj@seari.com.cn

一种冷冻机专用高压高速开启式三相异步电动机

吴琼¹, 陈辉¹, 乔建伟¹, 杜振坤¹, 李玉娇¹, 朱新年¹, 吴小夫²

(1. 卧龙电气南阳防爆集团股份有限公司, 河南 南阳 473008;

2. 浙江金龙电机股份有限公司, 浙江 台州 318058)

摘要: 简要介绍了一种冷冻机专用高压高速开启式三相异步电动机的设计, 重点突破高效节能、高功率密度、结构紧凑、低振动、低噪声等电机的设计难点, 综合考虑电动机的主要性能参数(效率、功率因数、启动电流、温升、噪声、振动等), 在电磁和绝缘设计方面进行优化, 采用减薄绝缘措施, 引入梯形线圈设计; 结构设计以产品可靠性为前提进行突破和改进, 优化风路结构, 降低机械损耗和机械噪声。产品的测试数据验证了该产品的技术先进性。

关键词: 三相异步电动机; 冷冻机; 开启式; 低振动; 低噪声

中图分类号: TM 343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)08-0067-05

doi: 10.12177/emca.2021.056

A Special High Voltage High Speed Open Type Three-Phase Asynchronous Motor for Refrigerators

WU Qiong¹, CHEN Hui¹, QIAO Jianwei¹, DU Zhenkun¹, LI Yujiao¹, ZHU Xinnian¹, WU Xiaofu²

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

2. Zhejiang Jinlong Electrical Machinery Stock Co., Ltd., Taizhou 318058, China)

Abstract: The design of a high voltage and high speed open three-phase asynchronous motor for refrigerators is briefly introduced. The product focuses on the breakthrough of high efficiency, energy saving, high power density, compact structure, low vibration, low noise and other motor design difficulties. The main performance parameters of the motor (efficiency, power factor, starting current, temperature rise, noise, vibration, etc.) are comprehensively considered. Electromagnetic and insulation designs are optimized by using thinned insulation measures and introducing trapezoidal coil design. On the premise of the reliability of the product, improvement of the structural design is realized by optimizing the wind path and reducing the mechanical consumption and noise. The test data of the product verify the technological advancement.

Key words: three-phase asynchronous motor; refrigerator; open type; low vibration; low noise

0 引言

压缩冷冻机是制冷系统的核心, 通常称为制冷机组的主机, 在商用空调、工业制冷、食品冷冻、冷藏、制冰、气体压缩等领域得到了广泛的应用^[1]。对压缩冷冻机驱动电机的设计制造水平有

较高的要求, 如: (1) 高效节能, 绿色环保, 低能耗设计; (2) 高功率质量比, 外形紧凑, 轻量化设计; (3) 高效的换热系统, 低噪, 低振动设计^[2-4]。

本文研制的冷冻机专用高压高速开启式三相异步电动机, 型号 Y500-2, 3 000 hp, 10 kV; 防护等级 IP23; 安装方式 IMB35; 轴承形式为滑动轴承

收稿日期: 2021-03-06; 收到修改稿日期: 2021-06-02

作者简介: 吴琼(1986—), 女, 硕士, 研究方向为高压三相异步电动机的设计与开发。

陈辉(1985—), 男, 研究方向为高压三相异步电动机的设计与开发。

乔建伟(1975—), 男, 高级工程师, 研究方向为高压三相异步电动机的设计与开发。

自润滑;相同功率下,中心高比卧龙电气南阳防爆集团股份有限公司一般负载的同系列电机(YX560-2)降低了一个中心高。

1 电机电磁设计

1.1 电机设计指标

对标其他电机厂相同规格电机的性能指标,以满足压缩冷冻机对驱动电机的严苛要求为目标,设定了产品的技术指标。效率为 96.5%(Ⅱ级能效);功率因数为 0.9;温升为 60 K;噪声为 85 dBA;空载振动为 2.3 mm/s;带载振动为 2.8 mm/s。

1.2 设计输入控制

电机的三圆、气隙、槽型选择、冲片材质等如表 1 所示;其中定子线圈采用先进的梯形线圈结构设计,端部线圈上下层、相与相间隙更均匀,有效缩短绕组端部长度;采用先进的减薄绝缘体系,使用磁性槽楔^[5-6],槽楔厚度为 4 mm。

表 1 电机基本电磁设计参数	
设计输入参数	设计参数值
三圆 D_1 、 D_{i1} 、 D_{i2} /mm	880、475、230
气隙/mm	4.0
定子槽型	1 号开口槽
转子槽型	3 号槽
冲片材质	50W470

1.3 计算结果控制

磁负荷控制:定子齿部磁密不超过 1.8 T;电负荷控制:定子电流密度、导条电流密度 4.6 A/mm²,端环电流密度 3 A/mm²;热负荷控制:3 000 A/mm³。

2 电机结构设计

2.1 总 装

该电机整体为箱式结构,NEMA D 法兰安装,冷却方式为开启式,双轴承支撑,顶罩在电机上方。电机由定子、转子、轴承、接线盒、端盖、通风冷却系统等组成。电机整机图如图 1 所示。

2.2 定 子

定子主要由机座、定子铁心、定子绕组、加热器组成。

机座采用钢板焊接,两侧板采用整块钢板折

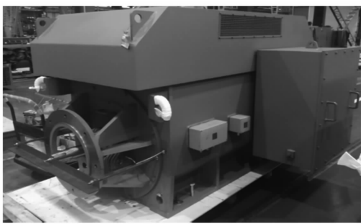


图 1 箱式开启式电动机

弯结构,提高强度;侧板内侧增加吸音棉,对电机的整体降噪有良好的效果。

定子铁心由定子冲片、定子压圈、筋叠压焊接而成。定子冲片采取带槽沉筋式焊接,满足定子铁心强度需求的同时,解决了大定子冲片外径与中心高的匹配问题。定子铁心最大的特点是新设计减薄的齿状定子压圈结构,如图 2 所示,与以往带齿压板、定子压圈结构相比,直接减少定子铁心轴向长度 50 mm,同时提高了压圈对铁心齿部的压力,使定子铁心叠压后,能够保证片间压力,避免了因为片间压力不足引起的电机振动、异响及损耗大的问题。

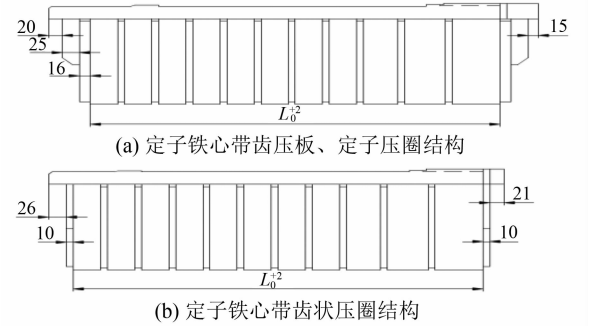


图 2 定子铁心结构对比示意图

定子绕组采用环氧酸酐树脂^[7]、含促进剂的少胶云母带、层压玻璃布板的绝缘体系,有效提高了线圈的绝缘性能、防潮性能及防电晕性能。其特点在于使用了先进的减薄绝缘体系,主绝缘厚度为 4.0 mm,整体提升电动机定子线圈的散热性能;采用了先进的梯形线圈结构设计,如图 3 所示,端部线圈上下层、相与相间隙更加均匀,且有效缩短了绕组端部长度,进而缩短轴系的轴向距离。

定子线圈端部增加内挡风圈结构,如图 4 所示。在支撑线圈端部机械强度的同时,可作为内风路冷却风路的导流板,提高电机的散热效率,降低电机的温升。

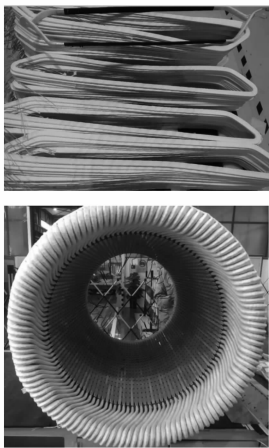


图3 梯形线圈



图4 定子线圈内挡风圈结构

2.3 转 子

转子由轴、转子铁心、内风扇组成。转轴材质为锻钢 42CrMo;采用刚性转子设计^[8],通过转子动力学分析,计算一阶临界转速值为 4 294 r/min,超出了额定转速 43%,一阶临界转速和额定转速避开率大于 20%;转子铁心为铜条转子。

内风扇采用对称离心风扇,安装在端环上、绕组端部下方,可有效缩短转轴的轴向距离。内风扇质量轻,减少机械损耗,进而提高电机效率,在保证散热的前提下,对电机的噪声降低有显著的效果。同时在风扇的幅板上预留平衡孔,用于转子平衡时固定平衡块,取消了原有的独立平衡环结构,减少了轴向安装平衡环的空间。

2.4 轴 承

该电机采用滑动轴承自润滑,为了解决滑动轴承漏油和 2P 自润滑轴承温升高的问题^[9],滑动轴承采用德国 RENKEM9S 轴承,如图 5 所示。与国内外厂家普遍采用的 EF(A 型轴承)、EM(B 型轴承)滑动轴承相比,在相同轴承台的尺寸下,EM9S 轴承体积小,轴承座外铸有散热片,散热面积大,散热效果好,满足自润滑轴承温度的要求。



图5 EM9S 轴承

该电机滑动轴承润滑油牌号为 L-TSA32(ISO VG32),轴承牌号如表 2 所示。

表 2 轴承牌号

中心高-极数	H500-2P
轴伸端轴承型号	EMNLB9S-90
非轴伸端轴承型号	EMNLQ9S-80

2.5 接线盒结构

高压主线接线盒安装在电动机右侧,接线盒设计满足 NEMA 和 GB 相关标准,防护等级达到 IP56,内部接线空间充足,接线空腔大,满足用户安装互感器的要求。接线盒下方带有泄压孔,满足用户对短路容量的要求^[10],避免短路故障对设备和人员造成的损伤。

测温接线盒采用不锈钢结构,接线盒外形美观、通用性强,防护等级可达 IP66。外形尺寸、出线口规格、模块安装等可根据用户要求进行配置,方便灵活。根据需要可以安装“黑匣子”、避雷器、温度变送器等仪表,实现了在线测量、显示、远程传输等功能。

加热器接线盒采用不锈钢或铸铝结构,内部端子、出线口规格可以根据用户要求配置。

2.6 端 盖

NEMA D 法兰安装的 B35 电机,如图 6 所示。采用法兰端盖设计,由于压缩机负载运行时转矩变化较大,法兰端盖受力较大,综合考虑法兰端盖的强度、刚度,外形尺寸要尽量紧凑。同时,考虑滑动轴承安装、拆卸、检修方便。法兰端盖采用钢板焊接,支撑筋采用梯形结构,且支撑筋的尺寸和位置进行特殊设计,强度高、稳定性好,方便轴承安装、拆卸、检修。

2.7 通风冷却系统

通风散热、噪声是开启式 2P 高压电机设计

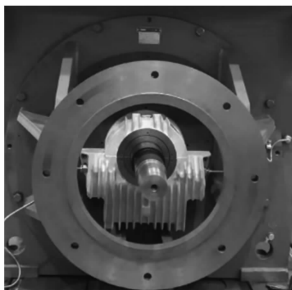


图6 NEMA D 法兰端盖

的难点。该电机风路设计特点如下:

(1) 内风扇为对称离心风扇,直接固定在转子端环上,用于冷却定子绕组端部。转子铁心中各通风道的通风槽板也相当于离心风扇,用于冷却定子铁心。

(2) 电机内部通风结构采取定转子通风道不对齐、线圈端部设计挡风圈等多种方案相结合的结构设计,在电机内部热风被顺畅带走的同时,有效降低了电机通风噪声和电磁噪声。

(3) 顶罩设计可以满足 NEMA 标准 WP11 的防护要求,通风散热、消音降噪系统采取多曲路、“W”型风路设计,如图 7 所示,该结构加长了冷却风路的路径,同时让高压高速的冷却风路充分与消音降噪材料接触,达到良好的降噪效果,开启式 2P 电机噪声达到 82 dBA。

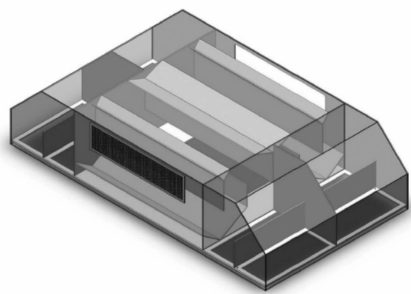


图7 “W”型消音顶罩

3 电动机实际达到的性能指标

效率、功率因数等性能使用实际负载测试采用 B 法/C 法或 E1 法,不允许采用等效负载 H 法圆图法进行测试,数据更接近实际^[11-13]。

电机试验得到实际效率为 96.85%,满足 GB 30254—2013 能效标准中 I 级能效^[14];绕组温升 42 K,轴承温升 31 K;空载振动速度值 RMS 为

1.4 mm/s;带载振动电机按照美国全国电气制造商协会(NEMA)要求,需安装在 NEMA D 法兰支架上,振动速度 RMS 为 2.5 mm/s;实际噪声为 82 dBA。

与设计指标相比,电机的试验结果性能更优异,超出设计指标。

4 产品的先进性

4.1 高效节能

电机效率达到 GB 30254—2013《高压三相笼型异步电动机能效限定值及能效等级》^[14]中 I 级能效指标要求,能耗试验通过第三方性能检测。

4.2 高转速下低振动等级

开启式 2P 电机转速高,弹性基础支撑,转子按刚性转子设计,一阶临界转速和额定工作转速避开率大于 20%,避免运行时发生共振;转子进行高速动平衡,将残余不平衡量控制到最小,平衡精度控制在 G1.0 及以下;通过机座模态分析,合理设计机座强度,定子冲片采取带槽沉筋式焊接,增加定子铁心强度。电机空载振动速度值 1.4 mm/s,负载下振动速度值 2.5 mm/s,满足了用户的低振动等级要求。

4.3 高效通风散热、低噪声等级

开启式 2P 电机空载噪声指标声压级 ≤ 82 dB,与同行业其他电机相比低了 5~8 dB,与国外同行业其他电机相比低了 3~5 dB。大幅度降低电机运行环境的噪声辐射,符合职业健康安全法律法规,为现场运行维护人员提供舒适的工作环境。

5 结 语

压缩冷冻机行业属资本和技术密集型行业,全球压缩机制造业形成了相对垄断的局面,目前国内制冷与空调用压缩机的生产厂商多数为外资在国内的合资、独资企业,驱动电机也处于国外电机垄断局面。本文研制的冷冻机专用高压高速开启式三相异步电动机,作为压缩冷冻机专用驱动电机,专为国内外压缩冷冻机厂打造原动机设备,有望打破国外电机的垄断局面。

另外本文设计的电机,解决了现有电机存在的损耗大、功率低、可靠性差、振动噪声容易超标等问题;提升了电机产业的核心竞争力和技术含

量,提高了产品附加值;在高效、高功率密度、结构紧凑轻量化、低振动、低噪声等方面取得了创新式突破,填补了压缩冷冻机专用电机领域的空白。为国家节能减排、电动机行业技术进步贡献了一份力量。

【参考文献】

- [1] 中国机械工业联合会. JB/T 8541—2013: 容积式压缩机机械振动分级[S]. 北京:机械工业出版社, 2013.
- [2] 赵素丽. 空气压缩机噪声控制[J]. 太原科技, 2005(6): 62.
- [3] 吴华根, 罗江锋, 聂娟, 等. 螺杆空压机用消声器的设计和优化[J]. 压缩机技术, 2014(1): 1.
- [4] 石芳. 往复式压缩机的振动控制及气流脉动方法的应用[J]. 工程建设与设计, 2018(15): 83.
- [5] 梁艳萍, 陈晶, 刘金鹏. 磁性槽楔对高压感应电动机电磁参数和性能的影响[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(3): 1.
- [6] MIKAMI H, IDE K, ARAI K, et al. Dynamic harmonic field analysis of a cage type induction motor when magnetic slot wedges are applied[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1997, 12(4): 337.
- [7] FENG Q, YANG J, LIU Y, et al. Simultaneously enhanced cryogenic tensile strength, ductility and impact resistance of epoxy resins by polyethylene glycol[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2014(1): 90.
- [8] 李隆年. 电机设计[M]. 北京:清华大学出版社, 1992.
- [9] 苏湘君. 电动机轴承异常分析及处理[J]. 华电技术, 2009, 31(1): 47.
- [10] 陈辉, 乔建伟, 吴琼, 等. 释压式高压电机主接线盒短路容量研究[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(9): 61.
- [11] 赵万星, 王刚, 王友建, 等. 浅谈电机能效标准及其测试技术[J]. 电动工具, 2017(1): 20.
- [12] 强雄. 高效电动机效率测试方法的研究[J]. 电机控制与应用, 2016, 43(7): 95.
- [13] 中国电器工业协会. GB/T 1032—2012: 三相异步电动机试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2012.
- [14] 国家发展和改革委员会资源节约与环境保护司, 工业和信息化部节能与综合利用司. 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]. 北京:中国标准出版社, 2014.
- [8] 王瑾, 李岩, 贾建国, 等. 反电动势和凸极率对高效永磁同步磁阻电机稳态特性影响分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(22): 4688.
- [9] 胡然, 阮治杰, 孟献金. 变频调速技术在风机、水泵节能改造中的应用[J]. 化工管理, 2020(6): 103.
- [10] 金传伟, 毛宗源. 变频调速技术在水泵控制系统中的应用[J]. 电子技术应用, 2000(9): 38.
- [11] 王灵沼. 充水式潜水电机转子水磨耗的计算方法[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(4): 92.
- [12] BURRESS T A, COOMER C L, CAMPBELL S L, et al. Evaluation of the 2007 Toyota Camry hybrid synergy drive system[R]. Oak Ridge National Laboratory, United States, 2008.
- [13] 沈建新, 蔡顺, 郝鹤, 等. 同步磁阻电机分析与设计(连载之七) 转子不均匀分布磁障的对比分析[J]. 微电机, 2017, 50(1): 83.
- [14] 黄辉, 胡余生. 永磁辅助同步磁阻电机设计与应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2017.
- [15] MOGHADDAM R R, GYLLENSTEN F. Novel high-performance synrm design method: an easy approach for a complicated rotor topology[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 5058.
- [16] 中国电器工业协会. GB/T 30549—2014. 永磁交流伺服电动机 通用技术条件[S]. 2014.

(上接第 49 页)