

铜铝混合转子在超高效电机中的应用

孙军建, 王国龙, 李亚丽

(卧龙电气驱动集团股份有限公司, 浙江 绍兴 312300)

摘要: 随着对电机能效要求的大幅提升,通过增加电机材料和体积的方法来提高能效,会产生电机外形尺寸和制造成本大幅增加的问题,尤其在防爆系列电机中,由于其较大的定子外径,将产生客户安装尺寸干涉的现象。因此,提出了一种铜铝混合转子的方法,通过铜铝混合转子的特性介绍和计算分析,说明了铜铝混合转子在超高效电机中的效率提升作用,以及在降低成本和抑制电磁噪声方面的良好效果。

关键词: 超高效电机; 铜铝混合转子; 电磁噪声; 能效

中图分类号: TM 305.1 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)10-0068-06

doi: 10.12177/emca.2020.116

Application of Copper-Aluminum Hybrid Rotor in Ultra-High Efficiency Motor

SUN Junjian, WANG Guolong, LI Yali

(Wolong Electric Group Co., Ltd., Shaoxing 312300, China)

Abstract: With the substantial increase in the energy efficiency requirements of motor, the energy efficiency is improved by increasing the material and volume of the motor, which has caused the problem of a large increase in the size and manufacturing cost of the motor. This problem is rather severe in the explosion-proof series of motors due to their larger stator outer diameter which will cause interference in installation dimensions. Aiming at this problem, a copper-aluminum hybrid rotor scheme is provided. Based on the introduction of characteristics, calculation and analysis of copper-aluminum hybrid rotors, the role of copper-aluminum hybrid rotor in improving the efficiency of ultra-high efficiency motor, reducing costs and suppressing electromagnetic noise is illustrated.

Key words: ultra-high efficiency motor; copper-aluminum hybrid rotor; electromagnetic noise; energy efficiency

0 引言

随着节能减排和环保的双重压力,以高效电机为代表的节能设备在市场上备受关注,尤其是超高效电机的市场推广已迫在眉睫。2014年12月,国家发改委、财政部、工信部、国家质检总局等七部委联合印发了能效“领跑者”制度实施方案,提出将能效领跑者指标纳入强制性国家标准,并要求电机系统领域应重点推广达到国家1、2级能效标准的电机,这是中国高效电机的市场发展趋势^[1]。

发达国家对高效电机的研究较早,在电机行业中,领跑者主要是美国和欧盟。根据美国能源部的统计,在美国生产制造业中的中小型电机(1~125 HP, 0.75~100 kW)所使用的电力达60%,因此推广高效电机意义重大^[2]。国外科技工作者在提高能效的方法上进行了许多探索,例如:德国 Schuffenhauer 等^[3]对铸铜转子感应电机的效率和运行特性进行了深入的研究,对不同容量和体积的铸铜感应电机进行了对比分析,计算得到不同转速下铸铜感应电机的效率、转矩和功率因数等参数,并与铸铝转子进行了详细比较。

收稿日期: 2020-05-11; 收到修改稿日期: 2020-08-02

作者简介: 孙军建(1980—),男,工程师,研究方向为高效节能电机设计及应用。

德国 Doppelbauer 等^[4]对工业和农业用铸铝转子感应电机进行了研究,对比分析了不同转子笼条材料对感应电机构件损耗和效率的影响,为铸铜转子的研究提供了重要的参考。美国的电机制造商很早就认识到,由于铝的导电率只有铜导电率的 60%,因此用铜取代铝应用在鼠笼式感应电机中,可以显著提高电机的能源效率。

国内,随着电机效率的大幅提升,以及三相异步电机行业标准对安装尺寸 C、M、N 的要求,导致 H132 机座号以下的电机外形不能过大,否则将造成安装干涉,这是导致小机座号电机无法较大提升效率的一个原因。另一个原因是,在外径不能放大的条件下,可以通过采用增加铁心长度的思路来进行效率提升,但由于槽型无法增大(过大时,导致齿部、轭部尺寸过窄,边缘效应突显,磁密饱和,致使铁耗急剧增大),将导致效率提升较缓慢,且到一定程度时则无法提升,由于铁心较长,工艺性变差,使电机制造成本大幅增加;起动电流也将变大,后续控制成本也大幅增加^[5]。

针对上述问题以及国内外研究的现状,本文将通过采用铜铝混合转子设计,在保证外形不变的条件下,提升电机效率,改善电磁噪声及起动性能,并降低制造成本。

1 设计原理及特征

众所周知,现代铜转子电机作为新型高效电机,利用铜优异的导电性能,进一步降低转子损耗,提高电机效率,是提高中小型鼠笼式电机效率的技术和方法中的最佳途径之一^[6-7]。但由于(1)存在铸铜工艺和模具寿命(高温铸铜液对模具产生的热冲击)的技术难题,导致无法进行市场化推广应用;(2)铸铜电机的成本过高,致使市场使用率较低^[8-9]。为此,综合上述原因,引入铜铝混合转子概念,在保证外形安装尺寸的条件下,提升电机效率,降低生产成本。

1.1 转子模型

铜铝混合转子模型如图 1 所示。包含铜、铝 2 种材质的导条。其中,转子冲片设计可根据设计任务书要求(本文示例根据 YBX4-132M-4 的设计要求),采用圆形槽、梨形槽、双鼠笼槽等。梨形槽冲片模型如图 2 所示。

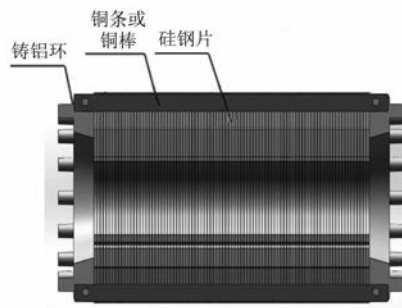


图 1 铜铝混合转子模型

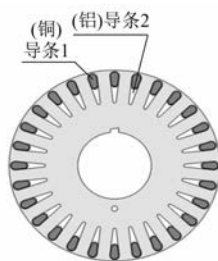


图 2 梨形槽冲片模型

1.2 设计计算

1.2.1 设计说明

设计该类型的铜铝混合转子电机时,转子槽型中存在 2 种不同的电阻率 ρ 材料,故需要参考双鼠笼电机设计原理,并结合上述转子模型。同时,为了获得较好的起动性能,转子槽型可采用电阻率较小的紫铜,除了减小转子铝耗,还可以抑制较大的起动电流。该类型电机具体计算过程在此不细述,可查阅相关资料。其中铜条的放置(深灰色部分的为铜棒或铜条)模型如图 3~图 7 所示。

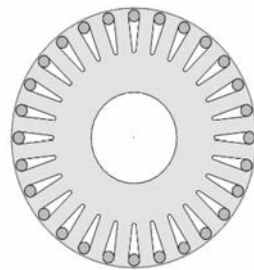


图 3 1号铜棒放置模型

几种铜条放置模型,在实际设计时应根据效率提升的实际情况选用。例如效率提升幅度要求较小时,应选用 1 号铜棒放置模型;还对起动电流有要求时,应选用 5 号双铜棒放置模型;如效率提升幅度要求较大,可以选用 2 号、3 号、4 号模型。



图4 2号铜条放置模型

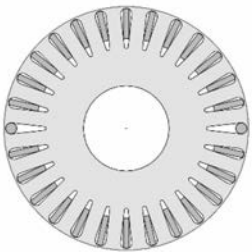


图5 3号铜棒和铜条混合模型

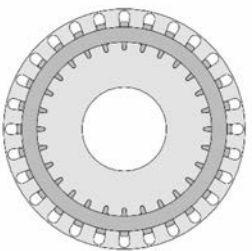


图6 4号带铜环模型

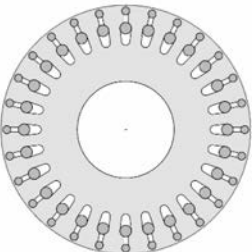


图7 5号双铜棒放置模型

1.2.2 计算分析

在起动时 $s=1$, s 为电机的转差率, 由于挤流效应的存在, 转子电流频率等于电网频率 ($f_2 = f_1$), 漏电抗较大起主要作用, 又因为槽下部的漏磁通 $\Phi_{\sigma下} > \Phi_{\sigma上}$ ($\Phi_{\sigma下}$ 为转子槽底部漏磁通, $\Phi_{\sigma上}$ 为转子槽上部漏磁通), 漏抗 $X_{2下} > X_{2上}$ ($X_{2下}$ 为转子槽底部漏电抗, $X_{2上}$ 为转子槽上部漏电抗), 所

以总阻抗集中于槽下部, 电流主要走槽上部。转子电阻 r_2 可约为直流阻值的 3 倍 (由于本文转子槽中铜铝所占比例的关系, 通常在 1.2~2.0 倍), 使得起动转矩增加, 起动电流减小。同时, 因为电流向槽口部分挤, 使得交链的总磁链数减少, 所以起动时的漏电抗也有所减少, 也有利于起动转矩的提高。另一方面, 现代高效电机的效率越高, 相应的起动转矩也越大, 起动电流也就越高, 因此采用铜铝混合转子设计时, 综合了铸铜和铸铝转子的特性, 在抑制起动电流的同时, 又能保持较好的起动转矩。3 种设计 I_{st} 、 T_{st} 和 s 对比曲线如图 8 所示。其中, 铸铝为普通铸铝转子模型的设计方案, 铜铝 1 号为转子为 1 号铜棒模型设计方案 (铜棒面积占整槽面积的之比为 29%), 铜铝 2 号为转子为 2 号铜条模型设计方案 (铜条面积占整槽面积的之比为 86%), I_{st} 为起动电流倍数, T_{st} 为起动转矩倍数, s 为转差率。

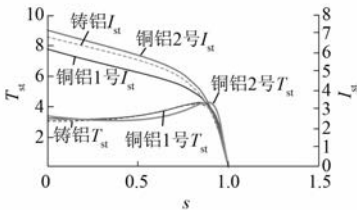


图8 3种设计 I_{st} 、 T_{st} 和 s 对比曲线

以 YBX4-132M-4 电机为例, 图 8 中 3 种设计分别对应的 3 种设计方案内容如表 1 所示。

表 1 3 种设计方案铜铝占比及主材用量

YBX4-132M-4	铸铝	铜铝 1 号	铜铝 2 号
铜占槽面积/%	0	29	86
铜面积/mm ²	0	665	1 951
铝占槽面积/%	100	71	14
铝面积/mm ²	2 277	1 611	326
铜/kg	9.5	10.3	12.1
铁/kg	74.0	68.4	68.4
铝/kg	1.82	0.85	0.21

当起动完毕, 转速升高, 转子电流频率逐渐降低, 集肤效应减弱, 转子电流分布将逐渐均匀。正常运行时, f_2 很低只有 1~3 Hz, 此时转子的漏电抗比电阻小的多, 电流按导条电阻均匀分布在导条中, 集肤效应消失, 即转子电阻、电抗均恢复正

常值,此时,由于铜导体的存在,使得转子电阻相对较小,转差率也将减小,转速提升;同时根据文献[10]转子损耗计算公式计算:

$$\bar{P}_{Al2} = \bar{I}_2^2 \bar{r}_2 \quad (1)$$

式中: $\bar{P}_{Al2}$ 为转子铝损耗的标么值; $\bar{I}_2$ 为转子电流标么值; $\bar{r}_2$ 为转子电阻标么值。

转子损耗也将相应减小,电机效率得以提高,3种设计的 η 效率对比曲线如图9所示。

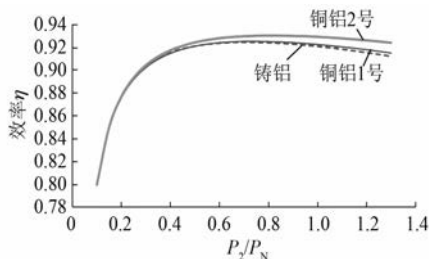


图9 3种设计的 η 效率对比曲线

图9中, P_2 为电机的输出功率, P_N 为电机的额定功率。另外,转子采用闭口槽可减少由转子齿槽产生的损耗,有利于提高电机效率。由于闭口槽的漏抗较大,杂散损耗较小,有利于减小噪声和起动电流。总之,铜铝混合转子采用闭口槽时,可以改善起动性能、工作性能和电磁噪声。

1.2.3 结构特点

(1) 因为转子斜槽工艺性差,所以定子采用斜槽,转子直槽,并且铜棒或铜条和转子槽之间需要存在0.2~1.0 mm的填充间隙。

(2) 由于电机运行时转子温度较高,2种材料之间热膨胀系数不同,导致铜棒或铜条容易脱落,因此事先需要在铜棒或铜条表面喷涂一层铜铝合金材料。

(3) 电机高温运行时,为了防止转子短路环脱落或导体位移,需要增加互锁装置,即铜棒或铜条长度比铁心长10~15 mm(单边),并在铜棒或铜条两端处进行凹陷开孔结构设计,如图10、图11所示。其中,铜棒未开孔。

1.3 工艺要求

首先将铜棒或铜条根据设计要求插入并固定在转子槽内,铁心两端伸出长度需相同;转子采用压铸铸铝工艺,调整压力,设置压铸参数(压力、铝温等控制参数同正常铸铝参数),使铝液沿转子内的空隙流入,并充分填充。脱模时,注意观察



图10 铜棒转子



图11 铜条带互锁转子

转子铝环表面有无浇口、裂纹等缺陷。铜铝混合转子实物图如图12所示。



图12 铜铝混合转子实物图

2 应用实例

为了充分说明铜铝混合转子应用在超高效电机的效果,在定子冲片相同的条件下分别采用2种设计思路进行对比说明:(1)采用传统铸铝转子设计,增加铁心的方案(在此不再赘述);(2)采用铜铝混合转子设计方案。

以设计一款YBX4-132M-4电机为例,要求额定功率7.5 kW,额定电压380 V,额定频率50 Hz,效率满足IE4-92.6%。

2.1 计算结果对比

根据上述设计要求以及卧龙电气驱动集团股份有限公司标准化的要求,初步设定电机的关键

尺寸,并且考虑到电机细长比 λ 不宜过大,以免影响工艺性。另外,B35电机的法兰安装孔同端盖连接孔需避免干涉,且考虑客户安装等方面的因素,因此外径不宜过大。故选取同Y、Y2标准电机的外径,对铁心适当加长的设计思路,来计算电磁方案,确定主要性能参数(计算方法参考《实用电机设计计算手册》第二章)^[11]。

3种设计方法的主要性能参数对比如表2所示。

表2 3种设计方案主要性能参数对比			
YBX4-132M-4	铸铝	铜铝1号	铜铝2号
效率/%	92.03	92.52	93.10
功率因数	0.835 4	0.836 2	0.835 3
起动电流 I_{st}	6.90	7.19	7.79
起动转矩 T_{st}	2.434	2.573	2.699
满载电流/A	14.1	14.0	13.9
转差率/%	2.34	2.03	1.34
热负荷/AJ	587.6	576.6	569.8

2.2 测试结果对比

根据以上设计方案,以及对比分析数据,进行样机验证以及测试,测试结果如表3所示。

表3 3种设计方案的对比测试结果			
YBX4-132M-4	铸铝	铜铝1号	铜铝2号
效率/%	90.4	91.6	92.1
功率因数	0.788 2	0.798 7	0.799 4
起动电流 I_{st}	7.87	8.35	8.33
起动转矩 T_{st}	2.47	2.66	2.72
绕组温升/K	51.7	47.5	45.1
转差率/%	3.16	3.02	2.14
噪声/dB(A)	70.1	68.5	68.7

2.3 有限元模型

以YBX4-132M-4铸铝转子电机验证有限元模型的合理性,分析及试验结果见表1~表3的铸铝数据。经过对比分析可知,铸铝转子电机的效率同试验值相比误差均在5%以内,因此该分析模型是可行的。表1~表3的铜铝1号、2号数据,其中2号电机的稳态运行磁密分布如图13所示。齿部平均磁密为1.5 T,轭部平均磁密为1.1 T。

堵转转矩随时间的变化曲线如图14所示。其均值为125 N·m。

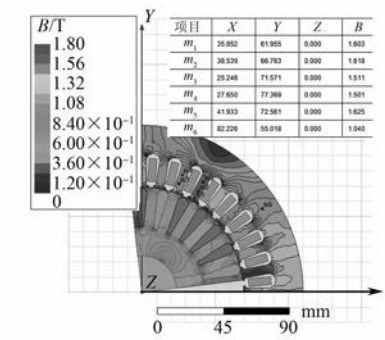


图13 2号电机的稳态运行磁密分布

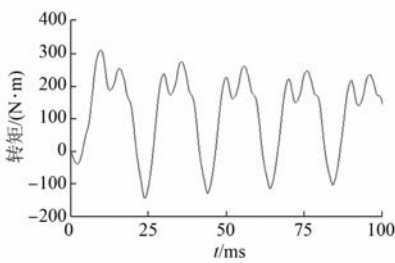


图14 2号电机堵转转矩曲线

堵转电流随时间变化的曲线如图15所示。稳定后其有效值为108 A。

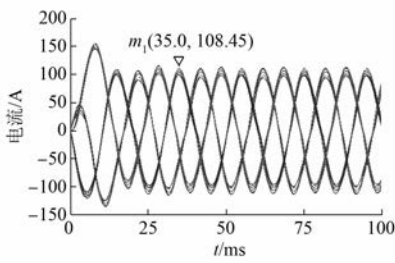


图15 2号电机堵转电流曲线

额定工况稳态运行时的定子电流曲线如图16所示。其相电流有效值为8.1 A。

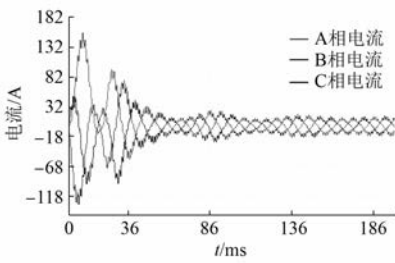


图16 2号电机定子电流曲线

2.4 结果分析

从上述有限元及试验对比结果可知,铜的电

率比铝低 40%。因此,用铜铝混合转子代替铝转子,除电机转子电阻差别外,电机的性能和特征会发生以下 3 个方面的变化。

(1) 电机效率特性的变化。由于减小了转子电阻 r_2 , 转子损耗降低(由式 1 可知), 转差也相应减少, 根据转差率 S 等于转子铝(铜)耗 P_{Al2} 与电磁功率 P_{DC} 之比^[11]:

$$S = \frac{P_{Al2}}{P_2 + P_{Al2} + P_j + P_z} \quad (2)$$

式中: P_{Al2} 为转子铝(铜)的损耗; P_j 为机械损耗; P_z 为杂散损耗。

使用铜铝混合转子经过多次试验验证, 电机总损耗下降 15% 以上, 提高了电机效率 1% ~ 2.5%。

(2) 电机机械特性的变化。使用铜铝混合转子除了减小转子电阻 r_2 , 减少转差外, 同时会增加曲线的梯度。最大转矩表达式为

$$T_M = \frac{1 - S}{2(\bar{r}_1 + \sqrt{\bar{r}_1 + \bar{x}^2})} \quad (3)$$

式中: T_M 为最大转矩; $\bar{r}_1$ 为定子电阻, $\bar{x}^2$ 为定子漏抗。

因此, 转差率减少后, 转矩将增加约 5% ~ 10%。

(3) 电机温升降低约 3% ~ 8%, 可知:

$$P_2 = m_1 U_1 I_1 \eta \cos \Phi \quad (4)$$

式中: m_1 为相数; U_1 为外施相电压; I_1 为定子电流; η 为测试效率; $\cos \Phi$ 为功率因数。

因此, 在效率提升时, 定子电流呈减小趋势, 同样冷却的条件下, 电机温升将有所降低, 除了电机寿命有所延长外, 相应的功率密度也明显提升。

总之, 与传统的铸铝转子电机相比, 除了生产成本有所提升外, 其余效率、电流、温升均具有显著的改善。可知, 与铸铜转子电机相比, 铜铝混合转子电机将具有非常明显的成本优势和可观的市场经济效益。尤其在当前越来越重视能源的充分利用与持续发展的情况下, 无论从市场还是技术角度来看, 均具有非常广阔的发展空间。因此, 铜铝混合转子应用于超高效电机的方法是行之有效切实可行的。

3 结 语

由于国家对超高效电机的各种能效政策的颁

布, 超高效电机的市场前景非常广阔, 应用量也将随之增大。使得各个电机企业想尽一切办法来降低成本及提高性能指标。铜铝混合转子电机虽有改善效率、电流、温升等优点。虽然仍然存在成本相对偏高、铜条工艺成型复杂及压力铸铝工艺易产生缺陷等问题, 还存在改进空间。但是, 随着转子及铜条制造工艺的提高、离心浇铸工艺的推广, 铜铝混合转子电机将具有非常广阔的发展前景。

后续在具体推广应用中还可以尝试改变铜条的材质, 采用电阻率较低或电导率较高的材料, 如银、铜等表面改性处理的材料。也可改变每槽的铜铝占比或者采用等份隔槽的方式进行排列。或者根据实际需要分别设计为任意常用的形状, 例如圆形、椭圆形、梨形或双鼠笼槽形等。另外, 也可以通过再制造工艺对原有效率不合格电机进行再制造, 即定子铁心不变, 适当调整线圈方案, 更换铜铝混合转子进行效率再提升, 并且由于铜铝混合转子发热量较低, 也可以考虑更换风扇提升效率。综上, 可进一步优化超高效电机性能, 以提升其市场竞争力。

【参考文献】

- [1] 苏鸿英. 压铸铜转子改进电机效率[J]. 资源再生, 2019(1): 52.
- [2] POLOUJADOFF M, MIPO J C, NURDIN M. Some economical comparisons between aluminum and copper squirrel cages [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1995, 10(3): 415.
- [3] SCHUFFENHAUER U, MIERSCH S, MICHALKE N, et al. Modeling and practical investigation of the efficiency and operational behavior of induction machines with die-cast copper rotor [C] // 2017 International Symposium on Electrical Machines (SME), 2017.
- [4] PETERS D T, COWIE J G, BRUSH E F, et al. Performance of motors with die-cast copper rotors in industrial and agricultural pumping applications [C] // IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005.
- [5] 孙红超, 刘文辉, 王富春. 高效电机设计方法的研究[J]. 防爆电机, 2014, 49(2): 1.
- [6] 伊然, 范晓彬, 李龙, 等. 铸铜转子对三相异步电机性能的影响研究[J]. 电工电气, 2017(8): 14.

(下转第 84 页)