

# 转子闭口槽在高效电机中的应用\*

汤惠明<sup>1</sup>, 顾卫东<sup>1</sup>, 顾德军<sup>1</sup>, 孙佰义<sup>2</sup>

(1. 上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司, 上海 200063;

2. 广东肯富来泵业股份有限公司, 广东 佛山 528000)

**摘要:** 高效电动机采用转子闭口槽工艺, 可以减小转子齿槽产生的损耗, 提高电机效率。通过闭口槽样机试制及样机试验数据, 验证了转子闭口槽结构性能, 得出该工艺可行, 并提出相应的工艺措施。

**关键词:** 高效电机; 闭口槽; 桥拱高度; 杂散损耗

**中图分类号:** TM 305.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)05-0077-03

## Application of High Efficiency Motor by Rotor Enclose Slots\*

TANG Huiming<sup>1</sup>, GU Weidong<sup>1</sup>, GU Dejun<sup>1</sup>, SUN Baiyi<sup>2</sup>

(1. Shanghai Engineering Research Center of Motor System Energy Saving Co., Ltd.,

Shanghai 200063, China;

2. Guangdong KENFLO Pump Co., Ltd., Foshan 528000, China)

**Abstract:** The process of rotor enclose slots of high efficiency motor could reduce loss of rotor cogging and increase efficiency. The results could be validated against prototype test data. Also correspond technology measure was proposed.

**Key words:** high efficiency motor; enclose slots; height of arc; stray losses

## 0 引言

三相异步电动机由于定、转子齿槽的存在, 旋转时会产生脉振损耗。转子采用闭口槽, 使有效气隙缩短, 并削弱了气隙磁场的脉动, 从而减少激磁磁势, 降低谐波磁场的损耗, 有助于改善电机性能。

采用转子闭口槽, 在降低电机的杂散损耗和铁耗的同时, 会增加转子漏抗, 造成功率因数下降, 定子负载电流增加, 定子损耗增大; 起动转矩和起动电流降低, 转差率增大<sup>[1-2]</sup>。因此在采用闭口槽时, 应同时考虑诸性能数据的变化, 使电机整体性能最优。

## 1 闭口槽样机试制

桥拱高度  $H_0$  是闭口槽转子的一个重要参数,

在转子槽型相同的情况下, 选择不同的桥拱高度对电机性能会有不同程度的影响。本文通过 3 个规格的样机型式试验, 根据试验数据, 分析采用不同的桥拱高度对电机性能的影响。图 1 为闭口槽转子槽型示意图, 表 1、表 2、表 3 分别为 3 个规格样机的试验数据汇总。

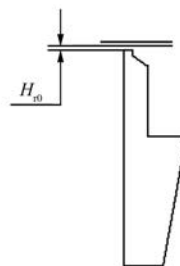


图 1 闭口槽转子槽型示意图

\* 基金项目: 上海市科学技术委员会科技计划项目(15DZ1201400)

作者简介: 顾德军(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为高效电机设计。

表 1 YE3-225M-2 45 kW 闭口槽试验数据

类别	试验	试验	试验	试验	试验	试验
	值 1	值 2	值 1	值 2	值 1	值 2
规格	半闭口槽		闭口槽 ( $H_{ro}=0.2$ )		闭口槽 ( $H_{ro}=0.5$ )	
效率/%	93.176	93.150	93.291	93.070	94.200	93.330
功率因数	0.900 4	0.904 0	0.901 7	0.902 0	0.898 2	0.897 0
电流/A	80.82	80.91	80.82	81.30	80.82	81.41
定子铜耗/W	792.8	759.0	790.0	764.0	777.6	775.0
转子铝耗/W	534.3	490.0	537.0	538.0	476.9	512.0
铁耗/W	472.4	504.0	470.1	427.0	451.6	409.0
机械耗/W	788.0	1 010.0	798.4	1 100.0	701.0	973.0
杂散损耗/W	708.4	540.0	640.9	516.0	363.7	536.0
$I_{st}/I_n$	8.56	8.73	8.81	8.27	8.71	8.74
$T_{st}/T_n$	2.68	3.01	2.81	2.20	2.71	3.00
$T_m/T_n$	3.580	3.635	3.640	3.640	3.610	3.632
温升/K	63.00	60.55	61.60	59.07	59.40	62.45
噪声/ (dB·A <sup>-1</sup> )	84.18	85.00	85.54	85.00	84.76	85.00
振动/ (mm·s <sup>-1</sup> )	0.98	1.60	0.87	1.60	0.93	1.60

表 2 YX3-225M-4 45 kW 闭口槽试验数据

类别	试验	试验	试验	试验	试验	试验
	值 1	值 2	值 1	值 2	值 1	值 2
规格	半闭口槽		闭口槽 ( $H_{ro}=0.2$ )		闭口槽 ( $H_{ro}=0.5$ )	
效率/%	93.429	93.549	94.182	93.998	93.991	94.155
功率因数	0.864 6	0.864 0	0.849 3	0.855 2	0.841 9	0.842 5
电流/A	84.64	84.54	85.47	85.08	86.45	86.21
定子铜耗/W	923.8	903.6	913.3	893.9	915.7	930.4
转子铝耗/W	628.2	631.3	637.2	639.2	648.0	625.9
铁耗/W	743.2	728.7	540.6	559.1	585.4	525.9
机械耗/W	123.2	115.9	132.5	129.8	130.8	127.1
杂散损耗/W	746.7	723.5	556.5	656.6	597.1	584.0
$I_{st}/I_n$	7.65	7.64	7.61	7.64	7.48	7.55
$T_{st}/T_n$	2.23	2.28	2.32	2.30	2.24	2.27
$T_m/T_n$	2.78	2.74	2.76	2.90	2.75	2.73
温升/K	70.6	68.9	62.6	61.7	58.6	65.6
噪声/ (dB·A <sup>-1</sup> )	75.88	76.34	75.42	76.42	80.58	77.98
振动/ (mm·s <sup>-1</sup> )	2.48	2.43	2.39	1.88	3.79	1.87

表 3 YE4-280M-4 90 kW 闭口槽试验数据

类别	试验值	
	半闭口槽	闭口槽( $H_{ro}=0.5$ )
效率/%	95.41	95.87
功率因数	0.898	0.878
电流/A	37.7	39.3
定子铜耗/W	1 317.9	1 369.4
转子铝耗/W	852.7	799.4
铁耗/W	839.0	636.6
机械耗/W	316.9	301.9
杂散损耗/W	1 027.4	785.7
$I_{st}/I_n$	6.90	6.72
$T_{st}/T_n$	2.24	2.18
$T_m/T_n$	2.92	2.70
温升/K	52	54
铁心/轴承/机壳温度/°C	42K/45/39.5	40K/49/43
噪声/(dB·A <sup>-1</sup> )		82
振动/(mm·s <sup>-1</sup> )		0.4

注：定子采用延边三角形接法，更换转子进行对比试验。

## 2 闭口槽样机数据分析

(1) 样机试验数据表明转子采用闭口槽可减少电机的铁耗和杂散损耗，闭口桥拱越大，下降值一般也越大。

(2) 转子采用闭口槽后，转子漏抗增大，功率因数也趋于变差，导致负载电流增加，使定转子铜耗、铝耗增加。若采用过大的桥拱，将不利于效率的提高，甚至反而下降。

(3) 转子采用闭口槽后，起动电流有所下降，但与此同时，起动转矩、最大转矩也随之减小，因此在采用闭口槽时，应同时考虑五大性能数据的变化，不能低于标准允许的限值。

(4) 转子采用闭口槽后，噪声有一定程度的降低。

(5) 若能使闭口槽电机转差率维持半闭口槽的水平，则其效率还可有一定程度的提高。

综上所述，以采用桥拱高度约为 0.2 mm 的闭口槽为最佳。考虑到桥拱高度过小，加工困难，桥拱高度可适当放大，但不宜超过 0.5 mm。

## 3 闭口槽转子的工艺措施及优点

电机闭口槽转子压铸时易导致转子导条夹杂

气孔,形成细条、断条等质量缺陷,严重影响电机的性能。

### 3.1 工艺措施

要解决压铸过程中的排气问题,在叠片时每隔 20~50 mm 夹一张开口冲片,开口冲片就是将闭口槽转子冲片的槽口冲出 1~1.5 mm 的开口,这样转子长度方向增加了多个排气面,每个排气面的排气槽数与转子槽数相等。

### 3.2 采用转子闭口槽工艺的优点

(1) 半闭口槽的槽口一般又短又小,开制合金钢及钨钢复式模具质量不易保证,采用闭口槽后可避免上述缺点。

(2) 一般转子复式模具槽口部分在使用过程中易产生毛刺及模具的爆裂,一方面使刃磨工作量增加,同时又使模具的使用寿命大大缩短。采用闭口槽工艺后,可延长模具寿命。

## 4 结 语

面对不断提高的电机能效要求,普遍采用的

方法是增加材料的投入,包括增加铁心长、增加用铜量、采用材质更好的硅钢片等。这些方法虽然提高了电机的效率,但却增加了原材料的投入及成本。

高效电机采用转子闭口槽工艺,选择合适的桥拱高度,有效减小齿谐波对电机性能的影响,降低铁耗和杂散损耗,提高电机效率。通过降低杂散损耗,达到与增加材料提高效率同样的效果,节约了材料,降低了成本。考虑到采用闭口槽工艺会降低功率因数和起动转矩,建议此工艺应用在 2 极和 4 极高效电机上。

### 【参 考 文 献】

- [ 1 ] 王岳.闭口槽转子压铸排气工艺[J].电机与控制应用,2013,40(2): 65-66.
- [ 2 ] 李利娟.转子闭口槽桥拱高度对中小型电机性能的影响[J].电机技术,2016(1): 5-6.

收稿日期: 2016 -10 -20

(上接第 51 页)

- [ 7 ] ROBINSON J, JOVICIC D, JOOS G. Analysis and design of an offshore wind farm using a MV DC grid [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2164-2173.
- [ 8 ] POPAT M, WU B, LIU F, et al. Coordinated control of cascaded current-source converter based offshore wind farm [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(3): 557-565.
- [ 9 ] MOGSTAD A, MOLINAS M, OLSEN O, et al. A power conversion system for offshore wind parks [C] // 34th Annual Conference IEEE Industrial Electronics, Orlando, USA, November 2008; 2106-2112.
- [ 10 ] HOLTSMARK N, BAHIRAT H J, MOLINAS M, et al. An all-DC offshore wind farm with series-connected turbines: An alternative to the classical parallel AC model [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2013, 60(6): 2420-2428.
- [ 11 ] FREDE B, KE M. Future on power electronics for wind turbine systems [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 3(1): 139-152.
- [ 12 ] 李海波,鲁宗相,乔颖,等.大规模风电并网的电力系统运行灵活性评估[J].电网技术,2015,39(6): 1672-1678.
- [ 13 ] LI J H, Y D L, RONALD G. Adaptive multi-mode power control of a direct-drive PM wind generation system in a microgrid [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 4(1): 217-225.
- [ 14 ] LI H, CHEN Z, POLINDER H. Optimization of multibrid permanentmagnet wind generator systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversions, 2009, 24(1): 82-92.
- [ 15 ] 徐德鸿.电力电子系统建模及控制[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [ 16 ] 严干贵,刘吉刚,穆钢,等.基于 PSCAD/EMTDC 的直驱永磁同步风力发电机多机并联运行仿真[J].电力系统保护与控制,2011,39(7): 67-73.
- [ 17 ] 徐士良.Fortran 常用算法程序集[M].北京:清华大学出版社,1992.

收稿日期: 2017 -02 -23