

定子斜槽对永磁电机轴承的影响

何思源, 符敏利, 杨金霞

(株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 作为永磁电机抑制齿槽转矩的有效方法, 定子斜槽已被广泛地用于永磁电机设计中, 但由此会带来轴向力问题, 严重时甚至影响轴承的使用寿命。文章从理论上分析了采用定子斜槽对电机轴承受力情况的影响, 提出了合理设计轴承结构以减少定子斜槽对轴承寿命影响的方法。应用实例验证了该方法的有效性和实用性。

关键词: 定子斜槽; 轴承; 轴向分力; 结构设计

中图分类号: TM351

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2012)02-0059-04

Influence of Skewed-slot Stator on the Bearing of Permanent Magnet Motor

HE Si-yuan, FU Min-li, YANG Jin-xia

(Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: As an effective method to reduce cogging torque, skewed-slot stator has been widely adopted in the design of permanent magnet motor. However, skewed slot would produce axial force which may affect the life of bearing. This paper theoretically analyzes the effect of skewed-slot stator on the bearing force and proposes a method that the bearing structure is reasonably designed to decrease the effect of skewed slots on the bearing life. Validity and availability of the method are verified by the results of real running example motors.

Key words: skewed-slot stator; bearing; axial force; structure design

0 引言

近年来, 永磁电机在许多领域得到越来越广泛的应用。永磁电机因存在齿槽转矩会导致转矩脉动较大, 严重时将影响系统的控制精度, 引起振动及噪声等问题^[1]。定子斜槽是解决永磁电机齿槽转矩问题行之有效且广泛应用的方法^[2], 但由此产生的轴向电磁分力会使电机轴承的受力情况恶化, 从而影响轴承的使用寿命。

本文通过分析采用斜槽定子的永磁电机对轴承产生轴向分力的机理, 对此轴向分力进行了实例计算, 并说明了其对轴承寿命的影响, 最后提出了斜槽定子永磁电机轴承结构的合理设计以及减少轴向力对轴承影响的方法。

1 定子斜槽对电机轴承受力的影响

1.1 直槽与斜槽在结构上的区别

电机的定子铁心由定子冲片叠压而成, 根据叠压时冲片间相对位置的不同, 分为直槽和斜槽(图1)铁心。直槽定子铁心叠压时, 相邻两冲片槽中心对齐, 叠压后, 铁心冲片槽中心的连线与电机轴线平行; 斜槽定子铁心叠压时, 相邻两冲片的冲片槽按同一方向旋转 β 度(即定子铁心的斜槽角), 叠压后, 冲片槽中心的连线与电机轴线成 β 角。

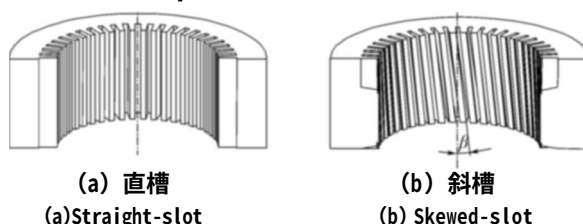


图1 直槽定子铁心和斜槽定子铁心

Fig.1 Straight-slot stator core and skewed-slot stator core

收稿日期: 2011-10-08

作者简介: 何思源(1970-), 女, 工程师, 主要从事电机研究。

1.2 直槽和斜槽定子中的通电导体受力分析

图2示出直槽和斜槽定子中的通电导体受力情况,其中 I_a 为定子线圈中的电流, F_T 为通电线圈产生的电磁力, F_{ma} 为 F_T 沿电机轴的轴向分力, F_{mt} 为 F_T 垂直于电机轴的径向分力, $\otimes$ 表示永磁转子的磁场方向。在永磁体产生的转子磁场中,定子槽中的通电导体受到电磁力的作用,磁场、电流和电磁力三者的方向满足左手定则,导体所受的电磁力与导体垂直。对于直槽内的导体,其所受的电磁力 F 垂直于轴线,无轴向分量;而对于斜槽内的导体,所受的电磁力 F_T 不垂直于轴线,在轴向有分量。

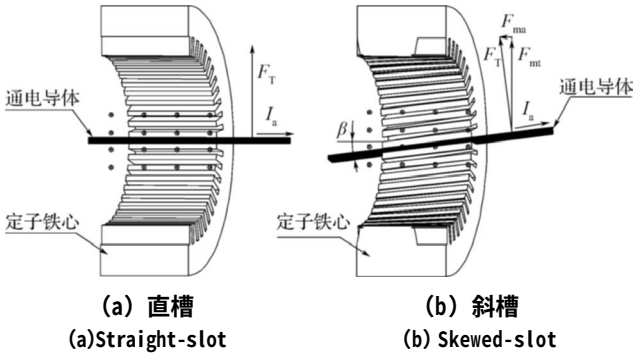


图2 通电导体产生的电磁力
Fig.2 Electromagnetic force produced by electricity conductors

根据作用力与反作用力的原理,对于定子斜槽永磁电机,转子将承受额外的轴向力 F_{ma} 。在电机结构中,转子通过轴承来支撑和定位,因此,此轴向力最终作用在轴承上。

1.3 轴向力的模拟试验

我们进行了轴向力模拟试验以验证上述分析。在嵌线定子内表面放入小的铁质圆柱体(实际试验采用小轴承),定子绕组通三相交流电,观察小轴承的运动轨迹,以模拟电机转子受力情况。

对于直槽定子电机,小轴承沿圆周表面滚动,无轴向移动(图3),说明小轴承不承受轴向力;对于斜槽定子电机,小轴承沿圆周表面滚动,同时沿轴向从A端向

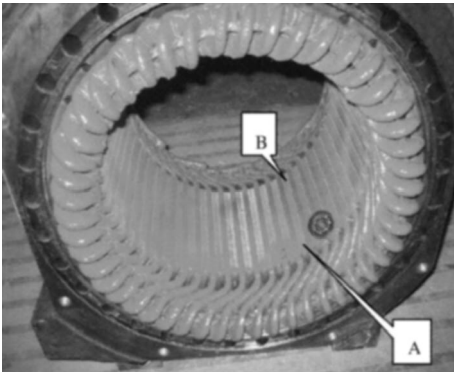


图3 直槽定子小轴承无轴向位移
Fig.3 Small bearing of straight-slot stator without axial displacement

B端移动(图4),这说明小轴承承受了轴向力。若改变通电相序,小轴承的圆周运动方向改变,同时,小轴承从B端向A端移动,这说明小轴承在转向改变的同时其承受的轴向力的方向也发生改变。模拟试验结果表明,定子斜槽永磁电机的转子和轴承将承受轴向力,对于具有正反转的电机,转向相反时,轴承承受的轴向力方向相反。

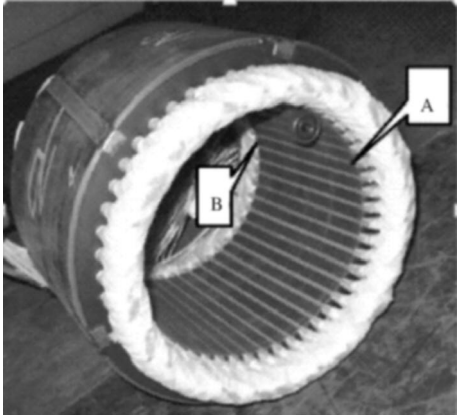


图4 斜槽定子小轴承有轴向位移
Fig.4 Small bearing of skewed-slot stator with axial displacement

2 轴承受力分析与寿命计算

作为连接电机转子的唯一承载部件,轴承起支撑并分隔定子和转子、保持气隙均匀、传递负荷、对转子进行定位等作用^[3],因此在电机结构设计中,轴承的受力分析及其结构优化设计非常关键。

2.1 轴承受力分析与计算

水平安装的电机轴承受力情况如图5所示。图中, F_{GR} 为作用在转子铁心中部的径向力, F_{CR} 为作用在转轴传动端的径向力, F_a 为作用在定位端轴承的轴向力, F_{r1} 为传动端轴承的支反力, F_{r2} 为定位端轴承的支反力, L 为两轴承中心间距, L_c 为负荷加载位置距传动端轴承中心的距离, L_a 为传动端轴承中心到转子中心的距离, L_b 为转子中心到非传动端轴承中心的距离。

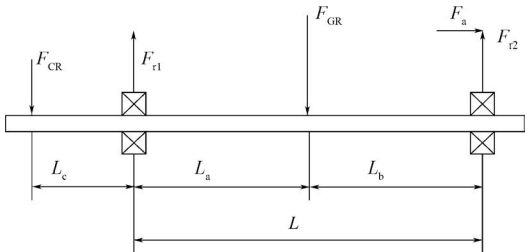


图5 水平安装的电机轴承受力情况
Fig.5 Forces of the motor bearing installed horizontally

根据文献[4],图5中各力的计算方法如下:

(1) 单边磁拉力^[5]

$$F_M = k\pi D L B_s^2 f_0^2 / 2 \mu_0 \tag{1}$$

式中： k ——经验系数； D ——定子内径； L ——铁心长度； B_{δ} ——气隙磁密； f_0 ——平均偏心度； μ_0 ——真空磁导率。

(2) 作用在转子铁心中部的径向力

$$F_{GR}=G+F_M \tag{2}$$

式中： G ——转子重量。

(3) 作用在转轴传动端的径向力

$$F_{CR}=0.15F_t+G_1 \tag{3}$$

式中： G_1 ——半联轴器重量； F_t ——传动件圆周力。

$$F_t=T_{\beta}/(D'/2) \tag{4}$$

式中： T_{β} ——负载转矩； D' ——高弹联轴器等效传动节圆直径。

(4) 斜槽定子产生的轴向电磁分力

$$F_{ma}=T_N\times\sin\beta/(D/2) \tag{5}$$

式中： T_N ——电磁转矩； β ——定子斜槽角。

(5) 作用在定位端轴承的轴向力

$$F_a=0.1F_t+F_{ma} \tag{6}$$

(6) 传动端轴承的支反力

$$F_{r1}=[F_{CR}\times(L_c+L)+F_{CR}\times L_b]/L \tag{7}$$

(7) 定位端轴承的支反力

$$F_{r2}=(F_{CR}\times L_c+F_{GR}\times L_a)/L \tag{8}$$

2.2 轴向负荷对永磁电机轴承寿命影响

轴承系统不但要承受电机的径向负载，还需对整个电机的轴系进行轴向定位。轴承结构在配置设计中，通常一端为定位端，另一端为游动端^[6]。当电机运行时，

如果存在着轴向负荷，那么定位端轴承将承受轴向力。在常见的一球一柱的轴承配置结构中，通常采用深沟球轴承作为定位端轴承。

一定大小范围内的轴向力不会对轴承的正常工作带来影响；为减少轴承噪声，必要时可设计施加一定的轴向预紧力^[3]。但轴向力一旦过大，使游隙过度减小，则轴承滚动体在保持架和内外圈的挤压下进行自转和公转，导致摩擦阻力增大、轴承温升增高，加速滚动体和保持架的磨损，影响轴承的使用寿命，严重时会造成轴承抱死^[3]。

以一台永磁电机样机为例，对比采用直槽定子和斜槽定子时定位端轴承寿命的计算结果，说明斜槽定子对轴承寿命的影响。该电机主要参数为：额定转矩 $T_N=210\text{ N}\cdot\text{m}$ ；额定转速 $n=1\,900\text{ r/min}$ ；斜槽角 $\beta=7.5^\circ$ 。定位端轴承采用6308深沟球轴承，其额定动负荷 $C_r=42\,300\text{ N}$ ，额定静负荷 $C_0=24\,000\text{ N}$ 。

根据2.1所述的方法计算轴承的受力情况。定位端轴承寿命则按照文献[4]介绍的方法计算，具体如下：

$$\text{负荷比 } e=0.505\times(F_a/C_0)^{0.231} \tag{9}$$

$$\text{当量负荷 } P=X\times F_r+Y\times F_a \tag{10}$$

式中： $F_a/F_r\leq e$ 时， $X=1, Y=0$ ； $F_a/F_r> e$ 时， $X=0.56, Y=0.84\times(C_0/F_a)^{0.24}$ 。

$$\text{球轴承寿命(未修正)} L_{10}=(C_r/P)^3 \tag{11}$$

主要计算结果如表1所示，其中 L_{10} 未做修正，仅供定性分析。

表1 直槽定子与斜槽定子电机的轴承寿命计算值

Tab.1 Calculated bearing life values of straight-slot stator and skewed-slot stator

	F_M/N	F_t/N	F_r/N	F_{ma}/N	F_a/N	e	F_a/F_r	P/N	$L_{10}/\text{百万转}$
直槽定子	1 470	1 238.4	1 038.6	0	123.8	0.149 6	0.121 7	1 038.6	67 564.45
斜槽定子	1 470	1 238.4	1 038.6	77.17	201	0.149 6	0.197 5	1 214.5	53 222.89

同等条件下，样机采用斜槽定子结构时，其定位端轴承寿命仅为采用直槽定子结构时的78.8%。永磁电机的斜槽定子产生的轴向电磁分力，使轴承的受力情况恶化，影响轴承寿命，其影响程度取决于轴向负荷 F_a 与径向负荷 F_r 的比值。 F_a 仅与电磁转矩 T_N 和斜槽角 β 有关，且随着 T_N 和 β 的增大而增大；而 F_r 主要随 F_M 和 G 的增大而增大，可见电机的功率密度越大，则 F_a/F_r 值越大，斜槽定子产生的轴向电磁分力 F_{ma} 对轴承寿命造成的影响也就越大。

3 定子斜槽电机的轴承结构设计

根据产生机理，斜槽定子磁场产生的轴向力大小受制于 T_N 和 β ，不能从根本上消除。在定子斜槽电机的

轴承结构设计时，应充分考虑该轴向力带来的影响，通过合理的选型及正确的预紧设置来改善斜槽定子电机的轴承受力情况。

3.1 轴承合理选型

一般而言，在轴向力存在的情况下，最好选择能承受一定轴向力的圆柱滚子和角接触球轴承。如果受条件限制必须选择深沟球轴承，则应选择游隙大于普通组尺寸的轴承。根据SKF的轴承综合型录，在轴向负荷作用下，较大游隙的深沟球轴承可如角接触球轴承一般形成一个大于零的接触角以提高轴承刚性、减小弹性变形、保证合适的工作游隙，降低温升。

上述永磁电机样机，优化设计前采用普通组游隙深沟球轴承，空载温升测试结果为26 K；优化设计改用

C3游隙深沟球轴承后,空载试验温升为15 K。改型后首批生产4台样机,自2009年投入运用,至今未见轴承异常情况发生,运行情况良好。

3.2 正确设计预紧力

为使轴承良好运行,工作游隙的设计十分重要。根据一般准则,球轴承的工作游隙应为零,或者有轻微的预紧;但对于圆柱滚子和球面滚子轴承,在运作时必须留有一定的剩余游隙(即便游隙很小)^[7]。为了防止由于惯性力矩所引起的滚动体相对于内圈和外圈滚道的滑动、降低运行噪音、提高轴承刚性和运行精度,有些运用场合需给轴承施加预负荷。适当的预载荷有利于轴承的载荷分布,进而利于使用寿命的延长;而一旦预紧力过大,摩擦力及其产生的热量随之增大,加剧滚动体及滚道的磨损,导致轴承寿命降低,因此保持正确的预紧量非常重要^[8]。

预紧力 F_0 的大小应根据载荷情况和使用要求来确定,针对不同类型的轴承, F_0 可按照文献[9]中公式来计算。斜槽定子的轴向磁场力 F_{ma} 存在时, F_{ma} 将沿轴线方向作用在轴承内圈或外圈上,与其他预紧装置施加的力一起合成 F_0 。因此,斜槽定子电机轴承预紧力设计时,应先对斜槽定子磁场产生的 F_{ma} 进行计算,并将计算结果应用到预紧力 F_0 的计算中。

.....

(上接第38页)

参考文献：

[1] 孙立宁,穆春阳,杜志江,等. 基于V+v开发模型研制双轴并联混合动力客车整车控制器[J]. 吉林大学学报:工学版, 2009, 39(4): 1012-1018.
[2] 王洲. 并联式混合动力车整车控制单元的开发[J]. 西华大学学报, 2008, 27(4): 34-37.
[3] 储著林,石春,窦曼莉,等. 串联混合动力城市客车整车控制器设计与实现[J]. 电子测量技术, 2011, 34(11): 9-13.

.....

(上接第50页)

4 结语

TEC3000平台运用效果稳定可靠,为交流传动电气系统的故障定位、性能完善提供了数据支撑和分析手段。该技术平台不仅实现了既有平台的功能扩展,而且还能满足新的用户需求,提升了平台的实用性和可维护性,对变流系统的故障处理及诊断具有较强的指导

4 结语

永磁电机在采用定子斜槽削弱齿槽转矩的同时会对轴承产生附加轴向负荷,其大小与电磁转矩大小和斜槽角有关,方向与电机旋转方向和斜槽角方向有关。轴向负荷的存在,一定程度上将影响轴承的使用寿命,而合理的轴承结构设计,可以减小定子斜槽产生的轴向负荷对轴承的影响,延长轴承的使用寿命。

参考文献：

[1] 唐任远. 现代永磁电机[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
[2] 汪旭东,许孝卓,封海潮,等. 永磁电机齿槽转矩综合抑制的方法研究现状及展望[J]. 微电机, 2009, 42(12): 64-70.
[3] 王勇. 工业电机中的滚动轴承噪声[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(6): 38-41, 43.
[4] 檀力华,郭永红. 船用大型高速柴油发电机轴承专题研究[J]. 防爆电机, 2006, 132(5): 7-9, 35.
[5] 陈世坤. 电机设计[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,1994.
[6] 维德曼 E,克伦贝格尔 W. 电机结构[M]. 北京:机械工业出版社,1976.
[7] 窦锋,寇鹏,王斌. 轴承的游隙及游隙的选择[J]. 机械设计与制造, 2009(4): 264-265.
[8] 姜韶峰,刘正士,杨孟祥. 角接触球轴承的预紧技术[J]. 轴承, 2003(3): 1-4.
[9] 王雪清. 轴承使用时的预紧情况分析[J]. 轴承, 2001(2): 15-18.

[4] 左义和,项昌乐,闫清东. 混联混合动力车辆整车控制器设计[J]. 微计算机信息, 2010, 26(11): 1-3.
[5] 罗水平. 纯电动汽车整车控制器开发的探讨[J]. 海峡科学, 2010(12): 64-67.
[6] 张亚明,何洪文,张晓伟. 混合动力汽车整车控制器开发[J]. 中北大学学报, 2009, 30(6): 530-535.
[7] 陈汉顺,罗禹贡,李克强,等. 基于CAN的多能源动力总成控制单元开发[J]. 汽车工程, 2006, 28(1): 32-37.
[8] 邢甲晨,王旭东,吴晓刚. 基于TC1766的混合动力汽车整车控制器的开发[J]. 自动化技术与应用, 2011, 30(11): 12-15.

.....

意义。

参考文献：

[1] 郑蓓林,俞利明. 基于ARM微处理器的故障记录系统[J]. 现代电子技术, 2006(2): 85-87.
[2] 张曙光. CRH2型动车组[M]. 北京:中国铁道出版社, 2007.
[3] 史济建,俞瑞钊. 专家系统实现技术[M]. 杭州:浙江大学出版社, 1995.