

高速异步电动机转轴的疲劳特性分析

孙 雪, 代 颖, 王小飞, 赵剑飞

(上海大学 机电工程及自动化学院, 上海 200072)

摘 要: 基于 Ansys 多物理场仿真软件平台, 对高速异步电动机的转轴进行疲劳特性分析, 校核高速异步电动机转轴的疲劳强度和高速运行的可靠性, 预测电机转轴的寿命; 分析电磁力对转轴疲劳寿命的影响, 判断疲劳特性的类型。对比分析作用于电机结构的电磁力波频率、幅值和电机转轴各阶模态的固有频率, 校核电机转轴的强度。在转轴不会因电磁振动发生断裂的前提下, 将电磁力等效为静应力分析转轴的疲劳特性, 校核电机轴在电机寿命周期内是否会发生短周期疲劳损坏; 并采用凹圆角设计进一步提高转轴的结构可靠性, 提高电机的转轴寿命。

关键词: 转轴; 疲劳寿命; 电磁力; 模态; 异步电动机

中图分类号: TM 343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)03-0097-06

Fatigue Characteristic Analysis of the Shaft of High Speed Induction Motor

SUN Xue, DAI Ying, WANG Xiaofei, ZHAO Jianfei

(School of Mechanical and Electronic Engineering and Automation, Shanghai University,
Shanghai 200072, China)

Abstract: Based on the ANSYS multi field simulation software platform, the fatigue characteristic analysis of the shaft of the high speed induction motor was carried out. The fatigue strength and the reliability of high speed operation of the high speed induction motor shaft are checked. And the life of the motor shaft is predicted. The influence of the electromagnetic force on the fatigue life of the shaft is analyzed. And the type of the fatigue characteristic is judged. The frequency and amplitude of the electromagnetic force acting on the motor structure and the natural frequency of each order of the motor shaft are compared and analyzed. And the strength of the motor shaft is checked. When the shaft does not break due to the electromagnetic vibration, the electromagnetic force is equivalent to the static stress. And the fatigue characteristic of the shaft is analyzed. Whether the motor shaft occurs the short cycle fatigue damage during the life cycle of the motor is checked. The concave fillet design is adopted to further improve the structure reliability of the shaft and the shaft life of the motor.

Key words: shaft; fatigue life; electromagnetic force; modal; induction motor

0 引 言

电主轴异步电动机结构紧凑、重量轻、振动小、噪声低、响应快、运行效率高、工作特性好, 易于实现主轴定位, 同时可以控制轴的振动与温升运行参数, 得到广泛应用^[2]。电主轴在高速运转状况下的可靠性成为人们关注的重点。在电机运行的过程中, 定、转子谐波磁场相互作用产生随时

间和空间变化的径向电磁力波, 转轴在瞬态电磁力的循环作用下, 常常会产生疲劳损伤而遭到破坏。

本文以一台槽配合为 24/32 的高速电主轴异步电动机为研究对象, 基于 Ansys 多物理场仿真平台, 对电机进行多物理场分析, 校核高速异步电动机转轴的疲劳强度和可靠性, 具体分析流程如图 1 所示。首先分别分析电机的径向电磁力波和电机转轴的固有模态; 然后分析电磁振动对转轴疲劳寿命的影响,

作者简介: 孙 雪(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电机与电器。

代 颖(1980—), 女, 博士后, 研究方向为电机的振动噪声、车用电机的设计分析、同步发电机的瞬态分析、电机的多物理场分析。

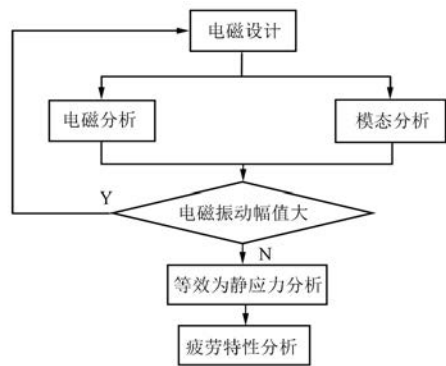


图1 高速异步电动机转轴疲劳特性分析流程

判断疲劳特性的类型。若发生电磁共振从而产生短周疲劳时,则须重新进行电磁设计。

1 高速异步电动机的电磁场分析

高速异步电动机在通电时,定、转子谐波磁场相互作用产生随时间和空间变化的径向电磁力波。产生的径向电磁力循环作用在电机转轴上,会引起转轴的弯曲振动,从而产生疲劳损伤破坏,进而影响高速异步电动机转轴的疲劳寿命。

1.1 电磁场解析法分析

根据麦克斯韦方程和电磁力波理论,可以得到作用于电机气隙中单位面积的径向电磁力波,如式(1):

$$p_r(\theta,t) = \frac{1}{2\mu_0} [B^2(\theta,t) - B_t^2(\theta,t)] \tag{1}$$

式中: $B(\theta,t)$ ——径向气隙磁密;

$B_t(\theta,t)$ ——切向气隙磁密;

μ_0 ——真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。

由于铁心内的磁导率远大于气隙内的磁导率,磁通线几乎垂直于定子和转子铁心表面,故气隙磁密的切向分量可以忽略不计。因此,式(1)可简化为式(2)所示:

$$p_r(\theta,t) \approx \frac{B^2(\theta,t)}{2\mu_0} = \frac{1}{2\mu_0} [B_1^2(\theta,t) + 2B_1(\theta,t)B_2(\theta,t) + B_2^2(\theta,t)] \tag{2}$$

式中: $B_1(\theta,t)$ ——定子磁场产生的气隙磁密;

$B_2(\theta,t)$ ——转子磁场产生的气隙磁密。

通过式(2)可知,径向电磁力波可以分为3种:定子谐波产生的电磁力波;定子谐波与转子

谐波相互作用产生的电磁力波;转子谐波产生的电磁力波。其中定子谐波次数 ν 和转子谐波次数 μ 分别如式(3)、式(4)所示:

$$\nu = (2k_1m_1 + 1)p, \quad k_1 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \tag{3}$$

$$\mu = k_2Z_2 + p, \quad k_2 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \tag{4}$$

式中: m_1 ——电机的相数;

p ——电机的极对数;

Z_2 ——转子槽数。

定子磁场 ν 次谐波产生的电磁力波:

$$\omega_r = 2\omega_\nu; \quad f_r = 2f_\nu; \quad r = 2\nu \tag{5}$$

定子磁场 ν 次谐波和转子磁场 μ 次谐波相互作用产生的电磁力波:

$$\omega_r = \omega \pm \omega_\mu;$$
$$f_r = f \pm f_\mu = \begin{cases} f k_2 \frac{Z_2}{p} (1-s) \\ f \left[k_2 \frac{Z_2}{p} (1-s) \pm 2 \right] \end{cases}; r = \nu \pm \mu \tag{6}$$

转子磁场 μ 次谐波产生的电磁力波:

$$\omega_r = 2\omega_\mu;$$
$$f_r = 2f_\mu = 2f \left[1 \pm k_2 \frac{Z_2}{p} (1-s) \right]; r = 2\mu \tag{7}$$

本文中高速异步电动机为 24/32 槽 2 极电机,其额定转速为 60 000 r/min,根据式(3)~式(7),可以得到各阶次的电磁力波,如表1、表2所示。由表1、表2可知,在该 24/32 槽异步电动机中,定子谐波与转子谐波相互作用产生了 2、4、6 次的电磁力波。

表1 定子/转子产生的电磁力波

电磁力	数值		
定子谐波产生的电磁力	2	-10	14
转子谐波产生的电磁力	2	-62	66

表2 定子和转子相互作用产生的电磁力波

转子谐波	定子谐波								
	1	-5	7	-11	13	-17	19	-23	25
1	2	-4/-6	6	—	—	—	—	—	—
-31	—	—	—	—	—	—	—	—	-6
33	—	—	—	—	—	—	—	—	—
-63	—	—	—	—	—	—	—	—	—
65	—	—	—	—	—	—	—	—	—

1.2 电磁场有限元分析

本文以 24/32 槽 2 极的高速异步电动机为研究对象,其额定功率为 2.5 kW,额定转速为 60 000 r/min。图 2 为高速异步电动机的横截面几何结构。

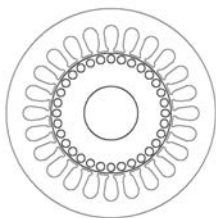


图 2 高速异步电动机的横截面几何结构

建立高速异步电动机的模型,采用时步有限元法,仿真电机 60 000 r/min 额定负载工况的电磁力特性。图 3 为电机额定负载工作点的二维磁密分布云图;图 4 为气隙磁密波形。通过对径向气隙磁密进行谐波分析,可以发现气隙磁密中主要有 2、4、6 次谐波,其中 2 次谐波的幅值较大。如图 5 所示为高速异步电动机 60 000 r/min 时径向气隙磁密的时空 2D FFT 分析结果。

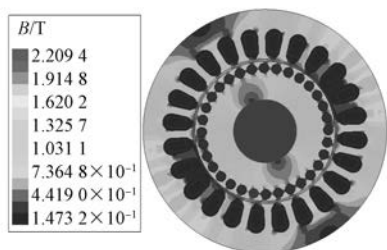


图 3 异步电动机 60 000 r/min 时磁密分布云图

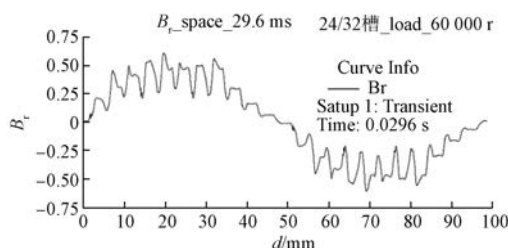


图 4 异步电动机 60 000 r/min 时径向气隙磁密空间分布

根据式(2),可以通过电机的气隙磁密计算得到电磁力波。图 6 所示为高速异步电动机的电磁力波时空分布。可以发现电磁力波在 0 阶、2 阶、4 阶、6 阶处均有分布,0 阶、6 阶电磁力波分布在 0 倍

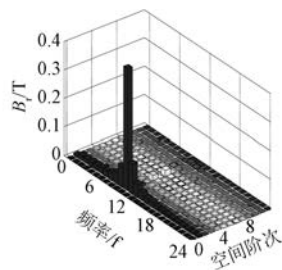


图 5 异步电动机 60 000 r/min 时径向气隙磁密时空分布

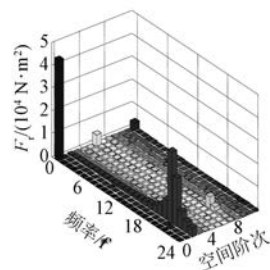


图 6 异步电动机 60 000 r/min 时径向电磁力波时空 2D FFT 分布

频处,2 阶、4 阶电磁力波主要分布在 20 倍频附近。径向电磁力是高速异步电动机转轴产生弯曲振动从而缩短疲劳寿命的主要原因,幅值很大的电磁力波会使转轴产生较大的振动,而某些电磁力波也会因与转轴发生共振使转轴产生较大的振动。因此在电机结构设计时,要尽可能减小电磁力谐波幅值,还要尽量避免电磁力波与转轴发生共振,从而减小对高速异步电动机转轴疲劳寿命的影响。

2 高速异步电动机的转轴模态分析

当作用在高速异步电动机转轴上的电磁力频率与转轴结构的某些固有频率接近时,结构将发生共振现象,会产生很高的动应力,从而导致较大的形变,使转轴在寿命周期内发生疲劳损坏。因此,在进行电机设计时,要尽量避免电磁力波与转轴发生共振,减小转轴的振动,进而提高转轴的疲劳寿命。

模态是机械结构的固有特性,每一阶模态都具有特定的固有频率、阻尼比和模态振型。本文通过建立高速异步电动机的转轴结构有限元仿真模型,分析了转轴前 5 阶的固有频率和振型,如图 7 所示。转轴结构的弹性模量为 210 GPa,密度为 7 850 kg/m³,泊松比为 0.3。

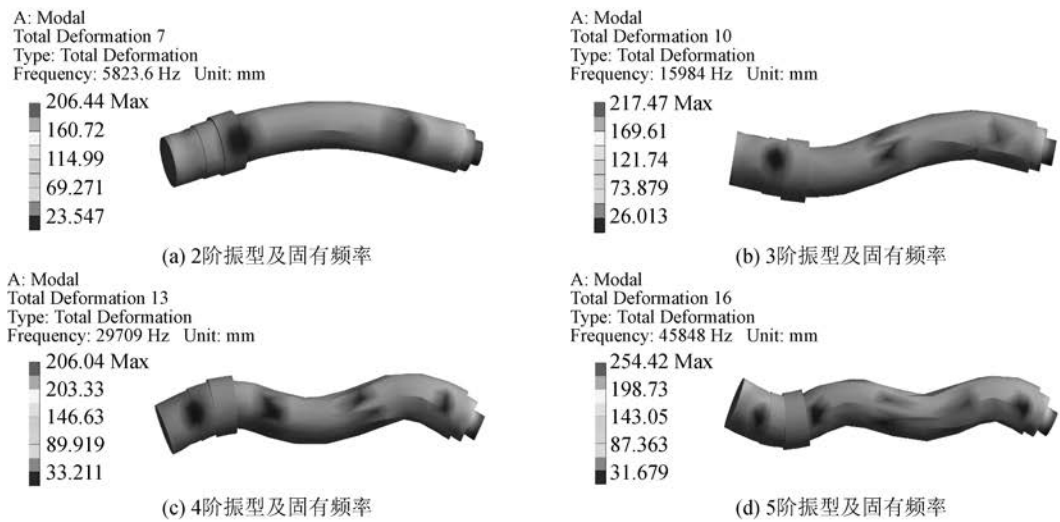


图7 转轴结构各阶次模态振型及其固有频率

由图7可知该高速异步电动机转轴结构的2阶模态和4阶模态的固有频率分别为5 823.6 Hz和29 709 Hz,与前文分析的2次和4次电磁力波频率相差较远,产生的电磁振动幅值很小,所以电磁振动短时间内不会导致结构发生损坏。为便于计算,本文将交变的电磁力等效成有效值相同的静应力,进行应力疲劳寿命分析,从而得到转轴的疲劳特性。

3 高速异步电动机转轴的疲劳寿命分析

疲劳破坏是指在重复交变载荷作用时,材料所承受的最大应力仍然低于屈服极限的许用应力情况下,就会在局部位置产生裂纹,经过一段时间后突然破坏。按照寿命长短,可将疲劳分为高周疲劳和低周疲劳:高周疲劳失效前,交变应力往往比材料的屈服极限小得多,循环次数较高,一般为 $10^5 \sim 10^7$ 次;低周疲劳失效前,交变应力接近或高于材料屈服极限,循环次数较少,一般为 $10^4 \sim 10^5$ 次。

由于电机转轴在电磁力长时间循环作用时,可能会产生疲劳损伤破坏,因此,电机的可靠性问题倍受人们关注。本文首先将高速异步电动机产生的径向电磁力等效为静应力加载到转轴上,对其进行应力分析,然后以受力分析的结果为基础,结合材料的S-N曲线,对转轴进行疲劳寿命分析。S-N曲线指外加的应力水平与构件疲劳寿命直接的关系曲线,其中S指的是应力幅值,N指的

是疲劳寿命,一般以疲劳破坏前的循环次数表示。

3.1 高速异步电动机转轴的静态应力分析

电机转轴材料为45号钢,材料特性如表3所示。本文采用四面体自由划分网格模型对转轴进行网格划分。网格划分完成后,根据转轴在高速异步电动机中的实际情况,在前后轴承位置分别施加轴承约束,并将之前得到的径向电磁力加载到转轴上,进行有限元计算,得到转轴静态分析的应力云图及转轴形变,如图8、图9所示。

表3 45号钢材料特性

参数名称	参数值
弹性模量/GPa	210
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 850
泊松比/%	0.3
屈服强度/MPa	310
极限强度/MPa	600



图8 异步电动机的转轴应力云图

由图8可知,高速异步电动机转轴的最大应力值为 $1.156 5 \times 10^{-7}$ MPa,转轴材料的屈服强度为310 MPa,最大应力值远低于材料的许用应力,表示该转轴具有足够的刚度和强度储备,在寿命周

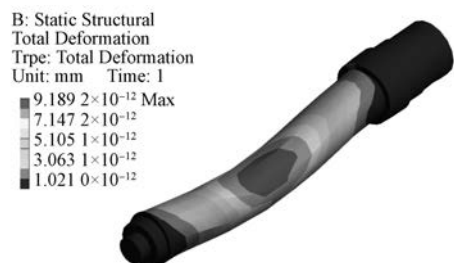


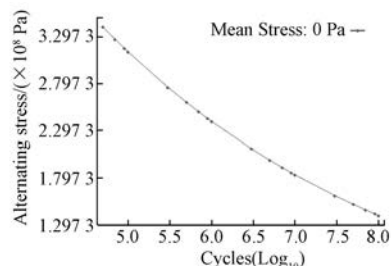
图9 异步电动机的转轴形变

期内不会发生疲劳损坏。但是根据静力分析结果,可以确定该高速异步电动机转轴的疲劳特性属于高周疲劳类型。

3.2 高速异步电动机转轴的疲劳特性分析

通过高速异步电动机转轴的静力分析可知,在电机 60 000 r/min 负载工况下,最大应力没有超过材料的屈服极限,因此转轴所承受的应力较小,对应的循环次数较高,属于高周疲劳,故本文选用适用于高周疲劳的 $S-N$ 名义应力法。名义应力法基于材料 $S-N$ 曲线,对照试件或结构疲劳危险部位的应力集中系数和名义应力,结合疲劳累积损伤理论对疲劳寿命进行估计。

在进行疲劳特性分析前首先要输入材料的疲劳寿命 $S-N$ 曲线,45 号钢在 99.9% 存活率下的疲劳寿命 $S-N$ 曲线如图 10 所示。

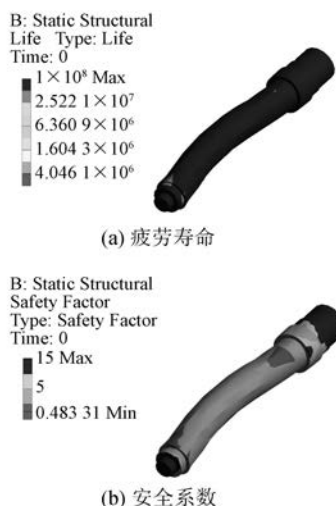
图10 45号钢在99.9%存活率下的疲劳寿命 $S-N$ 曲线

通过 Stress Life 方法进行疲劳寿命分析,其中疲劳寿命 $S-N$ 曲线考虑平均应力的影响,采用疲劳极限图 Goodman 图对计算应力谱进行修正。图 11 为高速异步电动机在 60 000 r/min 负载时转轴的疲劳寿命。由图 11 可知,高速异步电动机在 60 000 r/min 负载工况下,转轴的疲劳寿命超过 $1E8$ 次,大于 $1E7$ 次循环次数的要求,因此此时转轴具有无限疲劳寿命,说明该高速异步电动机的转轴基本上满足在电机使用寿命内不发生疲劳破坏的要求。



图11 60 000 r/min 负载时转轴的疲劳寿命

虽然高速异步电动机在 60 000 r/min 额定负载时,转轴具有无限疲劳寿命,但在一些特殊工况下,如在较大的电磁力循环作用时,某些位置仍会存在断轴隐患。通过分析可以发现,当 60 000 r/min 电磁力放大到 $2E+09$ 倍时,转轴某些部位开始出现疲劳损伤。图 12 为 $2E+09$ 倍负载时高速异步电动机转轴的疲劳特性。由图 12 可知转轴凹角附近的安全系数较低,在 $2E+09$ 倍负载时,转轴凹角位置的疲劳寿命最低点为 $2.032E5$ 次,属于低周疲劳。高速异步电动机的寿命一般为 10 年,在该极端应力工况下,疲劳寿命最低点处的应力循环次数为 $2.032E5$ 次,平均每天最多 55 次。

图12 $2E+09$ 倍负载时异步电动机转轴的疲劳特性

可采取措施改进转轴的结构,减少应力集中,提高转轴的寿命。目前,针对转轴结构的应力集中问题,提出了采用凹圆角结构、降低该处表面粗糙度值等方法,既可解决电机转轴安装轴承时轴肩倒角与轴承的干涉问题,又可解决应力集中的现象,提高转轴的寿命,并且这种方法成本也不高。图 13 为采用凹圆角的转轴结构。将 60 000 r/min 额定负载下输出的电磁力放大 $2E+09$ 倍,加载到采用凹圆角的转轴结构上,进行疲

寿命分析。图 14 为 $2\text{E}+09$ 倍负载时采用凹圆角的高速异步电动机转轴的疲劳特性。由图 14 可知,在 $2\text{E}+09$ 倍负载时,采用凹圆角结构的转轴疲劳寿命普遍提升,疲劳寿命最低点为 $3.552\ 7\text{E}6$ 次。通过对比图 12(b)和图 14(b),可以发现采用凹圆角结构的转轴安全系数均有所提升。因此,本文电机的转轴可通过采用凹圆角结构提高转轴的抗疲劳性能,延长转轴的寿命。



图 13 采用凹圆角的转轴结构



图 14 $2\text{E}+09$ 倍负载时采用凹圆角的转轴的疲劳特性

4 结 语

本文分析了高速异步电动机转轴在 $60\ 000\ \text{r/min}$ 负载工况下的疲劳特性,对电机进行了电磁力分析,从电磁力和转轴结构模态两方面校核了转轴,分析了转轴结构的疲劳特性,判断了转轴的疲劳类型,在判断转轴结构不会因电磁力产生的电磁振动发生强度破坏的前提下,将作用在转轴结构上的交变电磁力等效为有效值相同的静应力进行疲劳分析,预测了转轴结构的寿命和结构薄弱位置,并提出了提高转轴结构薄弱位置寿命的设计方法。

【参 考 文 献】

- [1] 胡伟龙.永磁同步电主轴模态计算及对声辐射系数影响规律的研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2015.
- [2] 成涛,合焊,陈小安,等.基于有限元的异步型电主轴电机电磁场分析和参数优化[J].机械,2013,40(2): 1-5,8.
- [3] 鱼滨涛,佟巍峰.表面粗糙度对国产 316LN 钢低周疲劳特性的影响[J].原子能科学技术,2015,49(9): 1660-1665.
- [4] 于慎波,李红,翟凤军,等.基于 nCode Design-Life 的永磁同步电机主轴的疲劳特性分析[J].组合机床与自动化加工技术,2017(1): 50-53.
- [5] HONG D K, WOO B C, LEE J Y, et al. Ultra high speed motor supported by air foil bearings for air blower cooling fuel cells [J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2012, 48(2): 871-874.
- [6] HONG D K, WOO B C, KOO D H. Rotordynamics and unbalance response analysis of 200 kW 15 krpm 3 phase induction motor [J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2010, 86(5): 129-132.
- [7] SZUCS A. Macro element approach for electromagnetic simulations in multi - physics and system analysis [C]. // Proc SPEEDAM Conf, 2012: 700-705.
- [8] 谢颖,王严,吕森,等.小型异步电机模态计算与试验分析[J].电工技术学报,2015,30(16): 1-9.
- [9] 韩伟,贾启芬,邱家俊.异步电机定子的振动与模态分析[J].振动与冲击,2012,(17): 91-94,115.
- [10] 姚卫星.结构疲劳寿命分析[M].北京:国防工业出版社,2003.
- [11] 代颖,崔淑梅,宋立伟.车用电机的有限元模态分析[J].中国电机工程学报,2011,31(9): 100-104.
- [12] ISHIBASHI F, MATSUSHITA M, NODA S, et al. Change of mechanical natural frequencies of induction motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(3): 922-927.
- [13] GAO Y, CHEN X, SHAO H U Q, et al. The effect of fatigue damage on mechanical property of NEPE propellant [J]. Projectiles Rockets Missiles & Guidance, 2014, 34(2): 90-93.
- [14] LU P M, ZHAO B, YAN J. Efficient algorithm for fatigue life calculations under broad band loading based on peak approximation [J]. Engineering Mechanics, 2014, 124(2): 233-236.

(下转 107 页)