

引文格式:

曾求洪,肖春,刘杰中. 倾斜安装电机振动特性研究 [J]. 集成技术, 2019, 8(3): 76-81.

Zeng QH, Xiao C, Liu JZ. Research on vibration characteristics of tilted induction motor [J]. Journal of Integration Technology, 2019, 8(3): 76-81.

倾斜安装电机振动特性研究

曾求洪¹ 肖 春² 刘杰中¹

¹(湖南华菱涟源钢铁有限公司 娄底 417000)

²(娄底市工贸职业中专 娄底 417000)

摘 要 因为安装空间和实际运行的需要,电机在倾斜工作状态下容易产生振动超标。该文针对倾斜安装异步电机结构特点,设计了倾斜安装异步电机的振动特性实验装置,分析了含有减振垫的异步电机系统刚度特性,通过有限元分析计算出了不同厚度减振垫的刚度系数。实验中,采用不同厚度橡胶减振垫进行振动测试分析,结果显示,在倾斜 5° 的安装条件下,异步电机共振转速随减振垫刚度的减小而明显减小。该研究结果可为倾斜安装电机与减振器振动特性匹配、设计与安装提供理论参考。

关键词 异步电机; 倾斜安装; 减振垫; 刚度系数; 共振

中图分类号 TH 113.1 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20180820001

Research on Vibration Characteristics of Tilted Induction Motor

ZENG QiuHong¹ XIAO Chun² LIU Jiezhong¹

¹(Hunan Valin Lianyuan Iron & Steel Co., Ltd., Loudi 417000, China)

²(Loudi Industrial and Trade Vocational Secondary School, Loudi 417000, China)

Abstract Subject to the space of installation and working condition, tilt-mounted asynchronous motor is prone to excessive vibration. In this paper, an experimental device is designed to investigate the vibration characteristics of tilt-mounted asynchronous motor by considering its structural characteristics. The stiffness characteristics of asynchronous motor system with vibration damping pad are analyzed firstly. Finite element analysis is used to calculate stiffness coefficient of vibration damping pad with different thickness. In real experiments, different thickness of rubber vibration isolation cushion are used for the vibration test and analysis. And the experimental results show that, the resonance speed of asynchronous motor decreases with the reduction of vibration damping pad stiffness, while the tilt angle of 5° is adopted. This conclusion can provide guidance for the design and installation of tilt-mounted asynchronous motor and shock absorber.

Keywords asynchronous machine; tilt installed; damping pad; stiffness coefficient; resonance

收稿日期: 2018-08-20 修回日期: 2019-04-15

作者简介: 曾求洪(通讯作者), 硕士, 工程师, 研究方向为机械动力学研究、旋转设备故障诊断、机器人应用与二次开发等, E-mail: 1248579609@qq.com; 肖春, 硕士, 研究方向为传感器技术、机器人应用与二次开发等; 刘杰中, 硕士, 研究方向为旋转设备故障诊断、机器人应用等。

1 引言

因为安装空间和实际运行的需要, 电机不能水平安装, 而采用倾斜安装的方式。电机倾斜安装时, 转子存在质量偏心。而在电机运转时, 由于质量偏心而产生的离心力容易导致电机振动超标。

国内外在关于电机振动特性研究中获得了许多有意义的研究成果。宾光富等^[1]应用有限元法研究零部件间连接方式对异步电机固有频率的影响, 发现异步电机各阶固有频率随着零部件间连接刚度值增大而增加的规律; 余虎等^[2]应用高频加速度计对电机高频振动进行测试, 并通过测试结果分析指出高频加速度计准确测试的适用范围; 李国栋等^[3]研究双余度电机在发生故障转换成单余度运行时, 其电磁力不仅在幅值上发生变化, 谐波含量也更加丰富, 直接造成其偏心振动, 这对双余度永磁同步电机的本体结构设计和控制其振动噪声方面可提供一定指导; 谢颖等^[4]运用频谱分析的方法, 从时域及频域特征量的角度, 定量分析了磁性槽楔对电机电磁振动的影响, 并通过试验进行了验证; 刘建勋等^[5]对安装不同刚度性能的橡胶减振器进行振动测试, 找到了适合发电机的减振器, 该研究为发电机选配适合的减振器提供了参考; 刘锋等^[6]利用转子系统的刚度特性方法研究出了不平衡磁拉力作用下电机转子系统自由振动的解析解并研究电机振动特性。然而, 目前国内外对倾斜安装电机振动特性研究仍较少。本文运用某型三相异步电机搭建倾斜安装电机试验台来研究其振动特性, 采用 B&K PULSE 系统对电机在安装不同厚度的减振垫倾斜 5° 安装下某些主要测点做振动测试。通过其后处理分析软件 REFLEX 将各测点的振动加速度信号转化为振动速度信号, 从而得到各测点的振动烈度。结果显示, 倾斜安装工况下电机共振转速随着减振垫刚度的减小而明显减小。本文

实验结果可为倾斜安装电机与减振器振动特性匹配、设计与安装提供指导与参考。

2 电机系统刚度特性

倾斜安装电机振动特性试验台由电机倾斜板、减振垫及机座组成。如果需要求解减振垫的刚度系数^[7], 那么可将整个电机系统当作是由电机倾斜板、减振垫及机座串联而成, 则系统的等效刚度系数 k 应满足关系式:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \quad (1)$$

其中, k_1 、 k_2 和 k_3 分别为电机倾斜板、减振垫及机座的刚度系数, 已知 $k_3 > k_1 > k_2$ 。将公式(1)转化为:

$$k = 1 / \left(\frac{1}{k_2 k_3} + \frac{1}{k_1 k_2} + \frac{1}{k_1 k_3} \right) \quad (2)$$

由于 k_3 、 k_1 远大于 k_2 , 故 $\frac{1}{k_1 k_3}$ 可忽略不计。显然系统的等效刚度系数 k 是由减振垫刚度系数 k_2 决定的。可将电机系统看作是一个无阻尼系统^[8], 其固有频率为:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

其中, m 为电机系统质量。

减振垫减振效率 $E = 1 - 1/z^2$, 其中 z 表示减振垫减振系数。当系统处于共振区时, $z = 0.8 \sim 1.2$ 。

因为整个电机系统的质量 m 不变, 而由公式(2)和公式(3)可知, 电机系统的振动固有频率由系统的等效刚度系数 k 决定。由此可知, 电机系统的固有频率是由减振垫的刚度系数决定的。当电机减振垫的刚度减小时, 系统的固有频率降低, 因此所对应的电机系统共振区的转速越低, 在电机工作转速内的减振效率越高。

采用有限元法^[9-11]分别将 4 种不同厚度(2 mm、

4 mm、6 mm、8 mm)的橡胶减振垫划分为有限个单元进行受迫振动响应仿真分析^[12-14],并分别计算这4种不同厚度减振垫的刚度值。

根据电机的实际工况,减振垫受力主要来自电机通过倾斜板的传导。因此,将激励施加在与倾斜板有效接触面的减振垫上,其中,激励均为正弦激励,幅值为1 000 N,电机转速均为1 800 r/min。减振垫有限元模型如图1所示,划分网格单元8 850个,节点19 881个。因篇幅所限,只列其一。

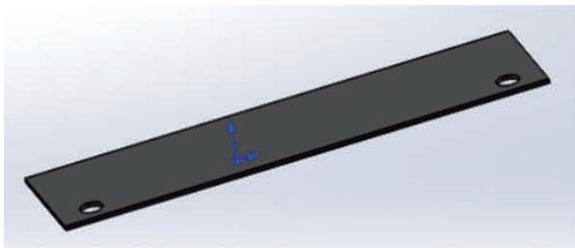


图1 电机橡胶减振垫有限元模型(其一)

Fig. 1 The finite element model for damping pad of the motor (one)

减振垫在电机运行时主要承受垂向力,因此本文将减振垫简化为垂直方向上的刚度进行计算。运用有限元软件分别对4种不同厚度的减振垫施加正弦激励,时间0.05 s的瞬态仿真计算。通过有限元仿真计算的减振垫刚度值如表1所示。

表1 电机减振垫刚度值计算结果

Table 1 The calculation results of the stiffness value for damping pad of the motor

减振垫编号	减振垫厚度(mm)	刚度(kN/mm)
1	8	6
2	6	9
3	4	12
4	2	15

3 倾斜安装电机振动测试与分析

3.1 振动测试方法与内容

采用某型三相异步电机搭建倾斜安装电机试

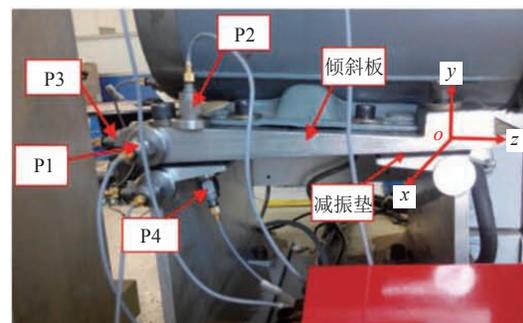
验装置研究倾斜安装下电机的振动特性。具体地,采用国际上最具有权威的测试系统,也是做振动测试等研究具有代表性的系统——B&K PULSE系统,对电机在安装不同厚度的减振垫倾斜5°时某些主要测点做振动测试。其中,测试所用的传感器为加速度传感器,数据采集时间为10 s,采样频率为3.2 kHz。三相异步电机技术指标如表2所示。

表2 三相异步电机技术指标

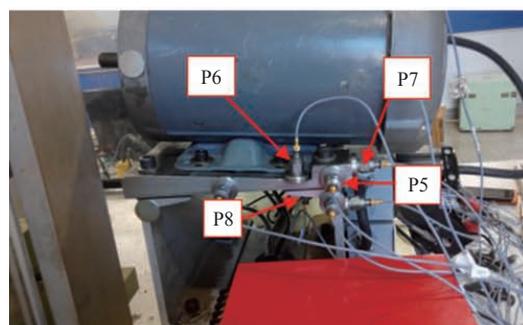
Table 2 Qualifications of three-phase asynchronous motor

参数	数值
重量(kg)	16.578
相数/级数	3/4
额定功率/峰值功率(W)	190/380
定子/转子槽数	24/22
额定电压(V)	220
额定转速/峰值转速(r/min)	2 450/3 000

对倾斜5°安装下的电机系统进行的振动测试布点如图2所示。



(a) 电机左减振垫处测点



(b) 电机右减振垫处测点

图2 振动测试布点图

Fig. 2 Position of test point

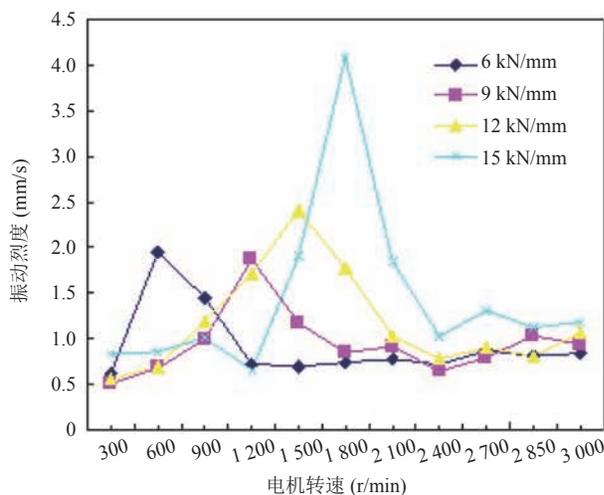
倾斜安装电机各测点位置及振动测试方向如表 3 所示。其中, P1、P2、P5 和 P6 测点用于电机的共振转速测试, P3、P4、P7 和 P8 测点用于测试各个方向上的振动值, 即振动加速度。

表 3 各测点编号与测点位置

Table 3 Number and position of test point

测试部件	测点编号	测点位置	测点方向
电机左减振垫处	P1	左支承-电机横向	x
	P2	左支承-电机垂向	y
	P3	左支承-电机轴向	z
	P4	左支承-电机垂向	y
电机右减振垫处	P5	右支承-电机横向	x
	P6	右支承-电机垂向	y
	P7	右支承-电机轴向	z
	P8	右支承-电机垂向	y

对倾斜安装电机安装的不同厚度减振垫, 测试不同刚度的减振垫在不同电机转速下的振动情况。由仿真计算得出 4 种电机减振垫刚度值分别为 6 kN/mm、9 kN/mm、12 kN/mm 及 15 kN/mm。电机转速分别为: 300 r/min、600 r/min、900 r/min、1 200 r/min、1 500 r/min、1 800 r/min、2 100 r/min、2 400 r/min、2 700 r/min、3 000 r/min。



(a) P1 测点 x 方向上的振动烈度数据图

3.2 振动测试结果及分析

采用 B&K PULSE 系统对倾斜 5° 状态下的电机进行振动测试, 采集有效的振动加速度信号, 并运用其后处理分析软件 REFLEX 将振动加速度信号转化为振动速度信号, 得到了各测点的振动时域图, 从而得出振动速度有效值, 即振动烈度。减振垫刚度为 6 kN/mm、转速为 3 000 r/min 时 P1 测点的时域图如图 3 所示, 由于篇幅所限, 其余不同减振垫刚度、不同转速以及不同测点的时域图不再列出。

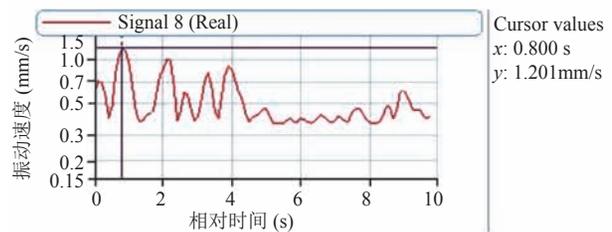
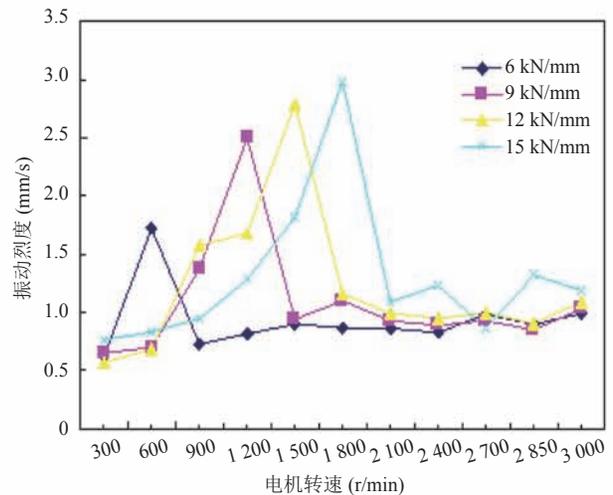


图 3 P1 测点的时域图

Fig. 3 Time-domain diagram of the P1 test point

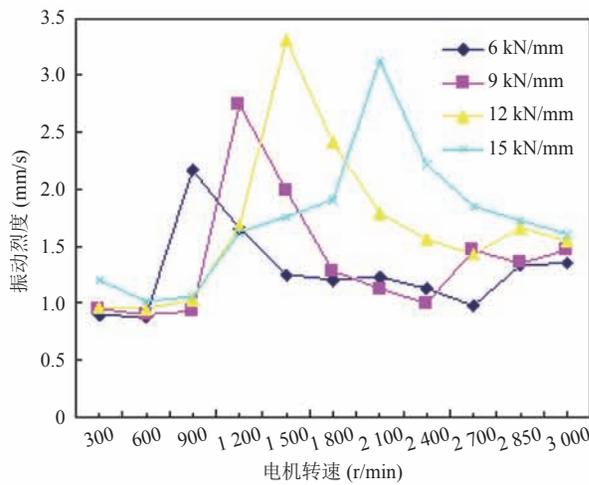
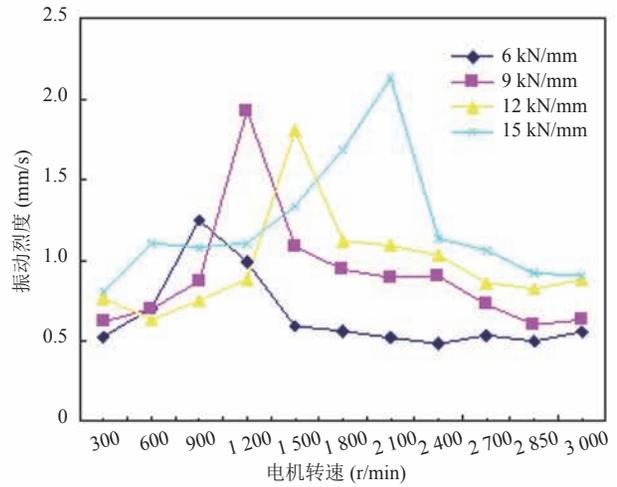
对主要测点的振动烈度值进行整理, 如图 4 和图 5 所示。其中, 图 4 为安装不同刚度减振垫的倾斜安装电机在不同电机转速下的横向振动烈度情况; 图 5 为安装不同刚度减振垫的倾斜安装



(b) P5 测点 x 方向上的振动烈度数据图

图 4 不同刚度减振垫在不同电机转速下的 x 方向上的振动情况

Fig. 4 x direction vibration severity data at different stiffness and rotate speed

(a) P2 测点 y 方向上的振动烈度数据图(b) P6 测点 y 方向上的振动烈度数据图图 5 不同刚度减振垫在不同电机转速下的 y 方向上的振动情况Fig. 5 y direction vibration severity data at different stiffness and rotate speed

电机在不同电机转速下的垂向振动烈度情况。

分析图 4(a) 和图 4(b) 可知, P1 测点和 P5 测点位置在电机横向 x 方向上的共振转速随着减振垫刚度的减少而持续降低。不同刚度的减振垫所对应的横向共振点如表 4 所示。

表 4 不同刚度的减振垫所对应的 x 方向的共振点Table 4 x direction resonance point of different stiffness

减振垫刚度(kN/mm)	mount	
	P1	P5
6	600	600
9	1 200	1 150
12	1 500	1 480
15	1 800	1 800

分析图 5(a) 和图 5(b) 可知, P2 测点和 P6 测点位置在电机垂向 y 方向上的共振转速随着减振垫刚度的减少也持续降低, 不同刚度的减振垫所对应的垂向共振点如表 5 所示。由倾斜安装电机振动特性试验台所得出的振动规律可为倾斜安装工况下电机与减振器振动特性匹配、设计与安装提供指导与参考。

从上述振动数据可得, 当减振垫刚度越小时, 电机共振转速越低。因此, 采用刚度为

表 5 不同刚度的减振垫所对应的 y 方向的共振点Table 5 y direction resonance point of different stiffness

减振垫刚度(kN/mm)	mount	
	P1	P5
6	900	900
9	1 200	1 180
12	1 580	1 548
15	2 100	2 080

6 kN/mm 的减振垫能够有效避免倾斜安装下电机在工作转速时发生共振; 不同减振垫刚度所对应的共振点都出现在电机转速小于 2 400 r/min 时 (从 2 400 r/min 开始, 振动烈度趋于稳定), 因此在额定转速内其减振效率越高, 减振效果越好。

4 结 论

倾斜安装的电机, 其共振转速随着减振垫刚度的减小而降低。本文实验结果表明, 所设计的刚度为 6 kN/mm 的减振垫能够有效避免倾斜安装电机在工作转速时发生共振, 在额定转速内其减振效率越高, 减振效果也越好。本文设计的倾

斜安装电机振动特性实验装置所得出的振动规律可为倾斜安装下电机与减振器振动特性匹配、设计与安装提供指导与参考。

参 考 文 献

- [1] 宾光富, 曾求洪, 王钢, 等. 基于有限元模型的电机零部件与整机结构振动关联特性 [J]. 电机与控制学报, 2016, 20(11): 101-106.
- [2] 余虎, 郝清亮, 赵彦琦. 永磁电机高频振动测试方法研究 [J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(S2): 517-520.
- [3] 李国栋, 郝翊帆, 马东娟. 双余度电机两种模式下电磁力及电磁振动分析 [J]. 中北大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 188-193, 199.
- [4] 谢颖, 武鑫, 刘海松, 等. 采用磁性槽楔的笼型感应电机电磁振动特性研究 [J]. 电机与控制学报, 2017, 21(11): 53-61.
- [5] 刘建勋, 胡伟辉, 林胜, 等. 双馈式风力发电机减振系统的优化 [J]. 噪声与振动控制, 2011, 29(3): 29-32.
- [6] 刘锋, 刘辉, 项昌乐, 等. 基于多尺度法的电机转子在不平衡磁拉力作用下的自由振动特性分析 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 52-60.
- [7] 马爱敏, 张治君, 李群. 基于连续抗弯刚度模型的裂纹梁动力指纹损伤识别 [J]. 应用力学学报, 2019, 36(1): 14-21.
- [8] 张义民, 庄红权, 洪英. 机械振动 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 115-118.
- [9] 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.
- [10] 崔宝祥, 李世林, 段小军, 等. 标准轨道衡有限元分析 [J]. 机械设计, 2018, 35(S1): 127-132.
- [11] Chen XF, Li B, He YM, et al. Second generation wavelet finite element and rotor cracks quantitative identification method [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(2): 195-199.
- [12] Li H, Liu D, Jiang L, et al. Self-synchronization theory of dual motor driven vibration system with two-stage vibration isolation frame [J]. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), 2015, 36(2): 265-278.
- [13] Li Y, Liu JN, Xia JK. Electromagnetically excited vibration calculation for a three-phase asynchronous motor with finite element method [C] // Proceedings of 2015 International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics, 2015.
- [14] Han H, Li SG, Li Y, et al. Vibration characteristics of armature assembly in a torque motor with magnetic fluids [C] // Proceedings of the 2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics, 2015.