

高速电梯曳引机主轴组件综合性能检测装置设计与分析

江叶峰¹, 苏万斌¹, 易灿灿²

(1. 嘉兴市特种设备检验检测院, 浙江 嘉兴 314050; 2. 武汉科技大学, 湖北 武汉 430081)

摘要:针对长期在复杂工况下运行的高速电梯曳引机主轴综合性能是否失效无法准确判断的问题,设计一种高速电梯主轴组件可靠性检测装置。根据高速电梯主轴双支撑简支结构的特点,确定了装置的原理、结构和测试流程。通过在试验装置上由电机驱动高速电梯曳引机使主轴高速旋转,获取在旋转过程中所产生的振动信号以及轴承的温度信号,再经过相应传感器进行数据采集;结合温度值的设计上限阈值、振动值的波峰因子临界阈值和峭度临界阈值,分析判断高速电梯曳引机主轴或轴承是否失效。试验表明:高速电梯主轴组件综合性能检测方法和失效判据准确,达到一定的量化应用要求。

关键词:高速电梯; 主轴组件; 温度; 振动; 检测装置; 方法

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2022)04-0196-04

Design and Analysis of Comprehensive Performance Test Device for Spindle Assembly of High Speed Elevator Tractor

JIANG Yefeng¹, SU Wanbin¹, YI Cancan²

(1. Jiaxing Institute of Special Equipment Inspection, Jiaxing 314050 China;

2. Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: To solve the long standing problem of failing to accurately judge the comprehensive performance of high-speed elevator spindle running under complicated working conditions, a reliability device for high speed elevator spindle components was developed. According to the characteristics of high-speed elevator shaft double support simply-supported structure, the principle, structure and test process of the device were determined. With the test device, the motor driven by high speed elevator traction machine was applied to run spindle at high speed to obtain the vibration signal and bearing temperature signal generated in the spindle spinning process, and relevant data was acquired by appropriate sensors. Combined with the upper limit threshold of temperature value, the peak factor critical threshold of vibration value and the kurtosis critical threshold value, the failure of the spindle or bearing of the high-speed elevator traction machine was analyzed and judged. The test results show that the comprehensive performance test method and failure criterion of high-speed elevator spindle assembly are accurate and can meet certain quantitative application requirements.

Keywords: high-speed elevator; spindle assembly; temperature; vibration; detection device; methods

0 引言

高速电梯曳引机主要部件包括曳引轮、支架底座组件、主轴组件(包含主轴和轴承等部件)、带绕组定子铁芯、钳式制动器组件、用于在紧急情况下连接并安装盘车装置等。高速主轴作为其核心部件主要采用双支撑简支结构,主轴组件包括内转子和外转子结构两大系列,其结构紧凑,可用于无机房或有机房中^[1]。双支撑简支结构永磁同步无齿轮曳引机的工作原理是通过快速电流跟踪变频装置和高精度速度传感器(编码器)的检测、反馈以及控制,以同步转速进行转动;由具备与直流电机相同的线性、恒定转矩及可调节速度的电动机平稳地直接驱动曳引轮,通过曳引轮与钢丝绳的摩擦来实现电梯轿厢的上下运动^[2]。

高速电梯主轴组件长期服役于高速变载工况下,除了正常的主轴本体和轴承的疲劳磨损外,更多情况是因主轴及轴承的磨损、打滑失效引起的摩擦磨损。由于目前常规的主轴均由铸铁制成,主轴在铸造完成至加装后长期在高速复杂工况使用过程中,可能会产生损伤,造成强度下降或产生安全隐患。因此,需要开发一种对高速电梯主轴组件的可靠性进行检测的方法和装置,为高速电梯的安全性提供保障。

1 设计原理

高速电梯主轴及轴承失效的明显表现特征就是主轴温度升高、振动加剧。因此,通过对主轴及轴承温升和振动的检测来反映主轴及轴承是否发生失效。根据主轴及轴承的失效模式及表现特征,对其失效的检测有以下几种

基金项目:2020年度浙江省质量技术基础建设项目(20200126)

第一作者简介:江叶峰(1985—),男,浙江嘉兴人,工程师,硕士,研究方向为特种设备检验检测技术。

方法:在主轴及轴承部位设置温度传感器,检测主轴及轴承的温度变化;用振动传感器检测高速电梯主轴,特别是主轴及轴承部位的振动信号。

通过在主轴及轴承部位安装温度传感器来检测温度的变化,并以此为依据来判断主轴及轴承是否发生失效。主轴及轴承在运转过程中,由于摩擦的原因会发热,并且当主轴及轴承的表面出现磨损或是损伤后,这种摩擦会加剧,因而发热也会增加,主轴及轴承的温度就会升高。而高速电梯主轴的安装特点使得主轴及轴承的温升受其他因素的影响很小,温度传感器测试到的温升就是主轴及轴承由于摩擦产生的温升。所以这种方法适合于对主轴失效的检测。通常主轴及轴承的温度随着主轴及轴承运转开始慢慢上升,1~2h后达到稳定状态。主轴及轴承的正常温度因机器的热容量、散热量、转速及负载的不同而不同^[3]。如果润滑或安装部位不合适,则主轴及轴承温度会急剧上升,出现异常高温,这时必须停止运转,并检查主轴及轴承是否已经失效。因此在试验过程中用温度传感器监测温度,无论是量测主轴及轴承本身或其他重要零件的温度,如果是在运转条件不变的情况下,任何的温度改变均可表示主轴及轴承已发生故障或已失效。脂润滑条件下的高速主轴及轴承的温度超过一定值时,也可判定为主轴及轴承已经失效。

通过检测高速电梯主轴,特别是主轴及轴承部位的振动信号,并以此为依据来判断主轴及轴承是否发生失效。实际上,当主轴及轴承的振动甚至整个高速电梯主轴的振动加剧时,可以通过某些振动参数的变化体现出来。因此,采用振动传感器检测高速电梯主轴,特别是主轴及轴承部位的振动信号,再通过后续处理得到相应的振动参数,并以此作为依据来判断主轴及轴承是否发生失效是一种比较适用的检测方法。

主轴在长时间的高速旋转情况下,通过传感器采集主轴及轴承的温度变化信息,并通过显示仪进行显示,同时通过分析单元记录传感器采集的主轴及轴承温度变化信息,然后对记录的温度变化信息进行处理,判断主轴或轴承是否失效。根据温度传感器确定的主轴或轴承的温升超过规定的温升阈值或温度阈值时,即可判定对应的主轴或轴承失效。

通过传感器采集主轴及轴承的振动变化信息,分析单元根据所述振动信号从以下几个指标,判断主轴或轴承是否失效:根据所述振动信号确定波峰因子,若波峰因子超过规定的波峰因子阈值时,则判定所述主轴或轴承失效;或者根据所述振动信号确定峭度,当峭度超过规定的峭度阈值时判定所述主轴或轴承失效。

由振动信号确定波峰因子具体包括下述步骤:

1)按照下述公式计算反映振动能量大小的有效值^[4]:

$$R = \left[\sum_{i=1}^N (|x_i| - \bar{x})^2 / N \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: R 表示有效值; x_i 是单位时间间隔内采集到的振动加速度数据; \bar{x} 是所述单位时间间隔内采集到的振动加速度数据的平均值; N 是单位时间间隔内采集到的数据的个数。根据上述计算公式可知,由于是对时间进行平均,因而反映振动能大小的有效值 R 对具有表面皱裂等无规则

的异常能给出较好的评价,可用于主轴及轴承磨损异常的检测。主轴及轴承正常动转时,其振动信号的能量水平不是很高,基本上是峰值的 $1/3 \sim 1/5$ ^[5]。

2)按照下述公式计算表示振幅最大值的峰值:

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{pi} \quad (2)$$

式中: P 表示峰值; n 是将采集到的数据进行分段的段数; x_{pi} 是第 i 段的振动加速度数据的峰值。峰值 P 是振幅的最大值,对轴承表面损伤类的故障较为敏感,特别对轴承早期的表面剥落损伤检测效果较好。

3)按照下述公式计算波峰因子^[6-7]:

$$C = P/R$$

式中 C 表示所述波峰因子。根据上述计算公式可知,波峰因子 C 是一无量纲参数,对轴承的局部剥落、压痕、凹坑等故障非常敏感,且不受振动信号绝对水平的影响;在无油润滑的情况下,可用于轴承磨损故障的判断,适合于轴承的失效检测。正常情况下, $C \leq 6$ 。

由振动信号确定峭度的计算公式如下:

$$K = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (|x_i| - \bar{x})^4}{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (|x_i| - \bar{x})^2}{N} \right]^2} \quad (3)$$

式中: K 表示峭度; x_i 是单位时间间隔内采集到的振动加速度数据; \bar{x} 是单位时间间隔内采集到的振动加速度数据平均值; N 是单位时间间隔内采集到数据的个数。根据上述计算公式可知,峭度 K 也是无量纲参数,适用于表面损伤类故障,特别是早期表面损伤类故障的诊断。在正常情况下 $K \leq 4$ ^[8]。

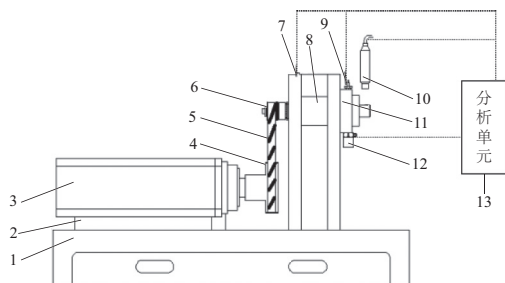
与之相对应的,根据振动信号判断主轴或轴承是否失效可以包括:在波峰因子超过规定的波峰因子阈值时,或者在峭度超过规定的峭度阈值时,判定主轴或轴承失效。波峰因子阈值优选为6,峭度阈值优选为4。

通过前述的有效值 R 、峰值 P 、波峰因子 C 、峭度 K 等反映振动特性的参数来判断主轴或轴承是否失效的优势在于:由于高速电梯主轴轴承的主要失效模式是磨损或表面损伤,波峰因子 C 和峭度 K 对这种形式的失效较为敏感,而且波峰因子 C 和峭度 K 是无量纲的参数,不受工况(包括负荷、转速、环境条件等)的变化、不同振动测试位置的影响,所以波峰因子 C 和峭度 K 能对高速电梯主轴的早期故障实现准确的诊断^[9-10]。此外,通过波峰因子 C 和峭度 K 判定高速电梯主轴的轴承是否发生磨损或表面损伤,能够获取统一的、可靠的失效判据。具体而言,当满足波峰因子 $C > 6$ (波峰因子阈值)和峭度 $K > 4$ (峭度阈值)中的任何一个条件时,即可判定轴承发生表面损伤或磨损失效。

2 结构组成

高速电梯的高速主轴部件是安装在箱体上的。该试验装置的驱动系统是高速电机,经钢丝绳传动后,使主轴高速旋转。为了对主轴部件在高速旋转下进行可靠性试验,可分别对温度、振动、转速3个机械量进行测量与分

析,判断主轴部件是否失效。检测装置包括用于支撑高速电梯主轴和轴承的支撑装置、用于驱动主轴旋转的驱动装置、用于采集主轴在旋转过程中所产生振动信号的振动传感器、采集在主轴旋转过程中轴承温度信号的温度传感器、用于根据振动信号和温度信号中的至少一者判断主轴或轴承是否失效的分析单元(图1)。



1—箱底;2—电机座;3—电机;4—主动曳引轮;
5—钢丝绳;6—从动曳引轮;7—温度传感器;8—主轴;
9—温度传感器;10—速度传感器;11—轴承座;
12—振动传感器;13—分析单元。

图1 检测装置结构示意图

支撑装置包括箱底、箱体、电机座、轴承座,箱体和电机座位于箱底上部,轴承座位于箱体的右侧,轴承座和箱体支撑主轴及轴承。

驱动装置包括电机、主动曳引轮、从动曳引轮、主轴和钢丝绳。主动曳引轮与输出轴连接,从动曳引轮与高速电梯的主轴连接,主动曳引轮与从动曳引轮通过钢丝绳连接。位于箱底之上的电机座支撑电机,电机的输出轴连接主动曳引轮,主动曳引轮通过钢丝绳与连接高速电梯主轴的从动曳引轮相连接,从而实现电机带动主轴的旋转。

数据采集模块包括温度传感器、振动传感器和速度传感器。温度、振动和速度传感器能够采集到主轴旋转过程中主轴及轴承的相应信号,可根据采集到的信号获取主轴及轴承的相应参数变化。

数据分析模块:分析单元与振动传感器和温度传感器通信连接,通过分析单元记录通过传感器采集的振动变化信息、温度变化及速度变化信息,然后对记录的温度、振动和速度变化信息进行处理,分析单元根据振动传感器采集的振动信号和温度传感器采集的温度信号中的至少一者判断主轴或轴承是否失效。

3 测试流程

高速电梯主轴或轴承性能检测流程如图2所示。主轴高速旋转,通过传感器采集高速电梯主轴及轴承的转速变化信息、振动变化信号、温度变化信息,并通过数据采集处理后由显示仪进行显示。通过驱动高速电梯主轴高速旋转并获取主轴在旋转过程中主轴所产生的振动信号以及轴承的温度信号,从而根据振动信号和温度信号中的至少一者判断高速电梯主轴或轴承是否失效。由此,可以根据主轴或轴承的可靠性采取对应措施以保障高速电梯的安全性。

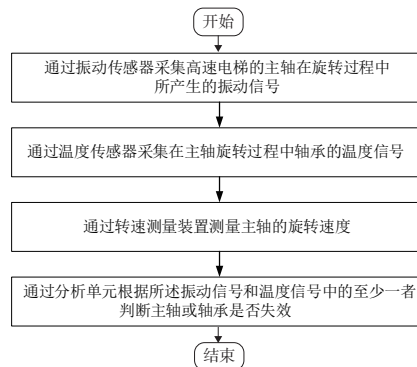


图2 检测流程图

4 数据分析

为了验证高速电梯主轴综合性能测试装置的精度,在这里选取某一永磁同步无齿轮曳引机双支撑筒支结构主轴进行测试,额定速度为4m/s,分别测试3个信号采集点:温度值1、温度值2和振动值,速度控制由速度传感器来实现。表1、表2所示为双支撑筒支结构主轴在所设计的试验平台上的实测结果,其中实测数据是指主轴在试验时间的高速旋转情况下,通过传感器采集主轴及轴承的温度、振动变化信息,并通过显示仪进行显示,同时通过分析单元记录传感器采集的主轴及轴承温度和振动变化信息。设计值是指该永磁同步无齿轮曳引机双支撑筒支结构主轴厂家生产时在相应运转速度下的理论值。

在该试验装置中对于几个检测位置的选取如下:温度传感器分别与一对滚动轴承相接触,用以检测轴承的温度信号;位于轴承座下方的振动传感器,用以检测轴承的振动信号;位于轴端上方的光电传感器,用以检测转轴的转速信号。传感器分别与相应的显示仪相连接,对高速电梯主轴工作期间的各种信号进行采集、处理。测试对象分别为一根正常主轴和一根故障主轴,并记录相应速度。

表1 温度实测结果

参数	主轴状态	试验时间/min	设计值/ ℃	实测值/℃			
				第1次	第2次	第3次	
温度值1	正常主轴	30	63	61	65	63	
		60	64	63	62	65	
	故障主轴	90	65	64	63	64	
		30	63	65	66	68	
	温度值2	正常主轴	60	64	67	69	68
			90	65	66	67	69
故障主轴		30	63	62	63	63	
		60	64	65	63	64	
	正常主轴	90	65	64	65	64	
		30	63	67	67	68	
	故障主轴	60	64	75	79	78	
		90	65	79	85	82	

表 2 振动测试结果

参数	主轴状态	测试时间/ min	设计值	实测数据		
				第 1 次	第 2 次	第 3 次
振动值	正常 主轴	30	$C \leq 6$	$C=3.9$	$C=3.5$	$C=3.7$
			$K \leq 4$	$K=2.3$	$K=2.1$	$K=2.2$
		60	$C \leq 6$	$C=4.3$	$C=4.7$	$C=4.5$
			$K \leq 4$	$K=3.2$	$K=2.9$	$K=3.3$
		90	$C \leq 6$	$C=4.1$	$C=4.3$	$C=3.8$
			$K \leq 4$	$K=2.9$	$K=2.8$	$K=2.6$
	故障 主轴	30	$C \leq 6$	$C=6.6$	$C=7.2$	$C=6.9$
			$K \leq 4$	$K=4.3$	$K=4.6$	$K=4.2$
		60	$C \leq 6$	$C=7.3$	$C=7.7$	$C=6.9$
			$K \leq 4$	$K=4.5$	$K=4.9$	$K=5.1$
		90	$C \leq 6$	$C=7.8$	$C=7.9$	$C=7.7$
			$K \leq 4$	$K=5.2$	$K=4.8$	$K=4.6$

正常主轴和故障主轴的温度与振动的设计值都是一样的,温度值的设计上限是 65℃,振动值的波峰因子临界值为 6,峭度值临界值为 4。从正常的无故障主轴测试装置的试验结果来看,高速主轴连续运转之后,高速主轴的温度和振动基本保持在合理的精度范围之内,随着试验时间的增加,轴承处的温度和振动有明显的升高,总体上与速度和时间成正比例关系;对于存在故障的主轴,从测试结果来看温度和振动参数明显高于正常值,而且随着试验时间的延长温度和振动越来越厉害,尤其是温度值 2 所测的数据相对温度值 1 高出很多,基本可以判定在温度值 2 测点的轴承存在故障。试验结果验证了高速电梯主轴组件综合性能检测方法和失效判据是正确的。

5 结语

高速电梯主轴作为电梯曳引机的核心部件,主轴组件的轻微失效可能导致曳引机异响或者振动,严重失效可能

导致曳引轮移位从而引起曳引轮槽加速磨损、曳引绳滑出曳引轮槽等,对电梯使用形成严重的安全隐患。特别是超高速电梯,一旦发生主轴断裂或者轴承损坏,将直接导致电梯安全事故,后果不堪设想。目前市场上常规的主轴均由铸铁制成,由于在铸造过程中经过大量检测,因此在安装至高速电梯曳引机后往往都不再检测,但主轴在铸造完成并加装后,在长期的高速使用过程中可能会对主轴产生损伤,造成主轴强度下降和安全隐患,因此对其进行综合性能分析及主轴组件的寿命预测有着重要的现实意义。通过检测后,可以根据使用状况及时更换曳引机主轴组件,从而更大程度地消除由于主轴组件失效所导致的安全隐患。

参考文献:

- [1] 吴慧. 高速曳引电梯的动态特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
- [2] 蔡嘉礼. 电梯机械系统动态特性研究[J]. 建筑工程技术与设计,2017(14):2581.
- [3] 周广宇. 基于 Labview 的提升机轴承振动监测与故障诊断系统研究[D]. 青岛:山东科技大学,2012.
- [4] 钟华. 潜水电泵可靠性强化试验与统计分析的研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.
- [5] 方晶敏,陈文华,马子魁,等. 小型潜水电泵失效检测技术与方法的研究[J]. 水泵技术,2007(5):27-31.
- [6] 陈文华,方晶敏,马子魁,等. 潜水电泵失效检测技术与方法[J]. 工程设计学报,2007,14(6):443-448.
- [7] XU Y, XUE X Y, SUN Z, et al. Online spraying quality assessment system of plant protection unmanned aerial vehicle based on Android client [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166: 104938.
- [8] 蔡先锋. 选煤厂设备健康状况监测系统的应用研究[J]. 选煤技术,2015(6):66-70.
- [9] 高尚晗. 机床主轴动态特性及铣削稳定性研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.
- [10] 武雪峰. 煤层冲压一体化卸压增透物理模拟试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2017.

收稿日期:2021-04-09

(上接第 168 页)

特点,手动选取了合适的聚类中心,并改进了边界框回归损失计算方法。同时针对 YOLOv3 中单一尺度的检测模块,基于双密度层思想设计了新的检测模块,合理运用单、双卷积的并联,提供给 YOLOv3 两种不同感受野,改善网络对小目标的检测识别效果。本文改进算法在油库实际场地进行了现场测试,测试结果显示:识别系统一直保持稳定运行;准确率及实时性均满足油库作业要求,具有较高的实用价值。

参考文献:

- [1] 金肖,叶锦华,杨素珍. 多特征融合视频火灾识别研究[J]. 机械制造与自动化,2019,48(4):163-167.
- [2] 张小迪,崔海华,程筱胜,等. 一种基于同心圆的环形编码标志设计与检测[J]. 机械制造与自动化,2020,49(2):133-136,157.
- [3] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: an incremental improvement [EB/OL]. (2018-01-20) [2021-03-12]. <https://www.xueshufan/publication/2796347433>.

xueshufan/publication/2796347433.

- [4] KANUNGO T, MOUNT D M, NETANYAHU N S, et al. An efficient k - means clustering algorithm: analysis and implementation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(7): 881-892.
- [5] KARLOFF H, SURI S, VASSILVITSKII S. A model of computation for MapReduce [C]//Proceedings of the Twenty - First Annual ACM - SIAM Symposium on Discrete Algorithms. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2010.
- [6] ZHENG ZH, WANG P, LIU W, et al. Distance - IoU loss: faster and better learning for bounding box regression [J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2020, 34(7): 12993-13000.
- [7] WANG R J, LI X, LING C X. Pelee: A real - time object detection system on mobile devices [EB/OL]. (2018-04-18) [2021-03-12] <https://arxiv.org/abs/1804.06882>.

收稿日期:2021-03-24