

# 基于动静态分析的地铁隧道设备安全预警系统集成\*

范乐乐<sup>1</sup> 於 泽<sup>1</sup> 何丽坤<sup>2</sup> 袁世杰<sup>2</sup> 篮 杰<sup>1</sup> 余伟之<sup>1</sup> 刘 健<sup>1</sup>

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉;

2. 中铁十六局集团北京轨道交通工程建设有限公司, 101100, 北京)

**摘 要** [目的] 针对地铁隧道内列车高速运行引发的周期性风压及设备自振导致的紧固件松动, 传统人工检修存在响应滞后、预判缺失等问题, 亟待开发智能预警系统, 实现设备状态的实时监测与风险预警, 提升运维管理效能。[方法] 基于隧道设备松动机理, 构建基于动静态分析的地铁隧道设备安全预警系统。该系统通过分布式传感器采集设备振动数据, 提取振动特征, 并采用集中管理模式对设备振动状态进行实时监测与智能预警。以某地铁车站隧道为例, 对该系统进行了实验室模拟和隧道实测对比分析。[结果及结论] 基于动静态分析的地铁隧道设备安全预警系统预警准确率符合设计要求。该系统完成了设备维护模式从被动处置向主动预防的转变, 构建了覆盖数据采集、智能分析与决策支持的完整技术体系, 实现了设备振动异常的及时识别与风险预判, 形成统一高效的运维管理机制, 有效降低了设备故障风险。

**关键词** 地铁; 隧道; 设备安全预警系统; 动静态分析

**中图分类号** U231.96

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.20245545

## Integration of Metro Tunnel Equipment Safety Early Warning System Based on Static-Dynamic Analysis

FAN Lele<sup>1</sup>, YU Ze<sup>1</sup>, HE Likun<sup>2</sup>, YUAN Shijie<sup>2</sup>, LAN Jie<sup>1</sup>, YU Weizhi<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>1</sup>

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China; 2. China Railway 16th Bureau Group Beijing Rail Transit Engineering Construction Co., Ltd., 101100, Beijing, China)

**Abstract** [Objective] In response to issues such as periodic wind pressure caused by high-speed train operations in metro tunnels and fastener loosening due to equipment self-excitation, traditional manual maintenance suffers from delayed responses and insufficient predictive capabilities. It is urgently necessary to develop an intelligent early-warning system to achieve equipment status real-time monitoring and risk alerting, thereby improving the efficiency of operation and maintenance management.

[Method] Based on the tunnel equipment loosening mechanism, a metro tunnel equipment safety early-warning system is constructed using static-dynamic analysis. The system collects vibration data through distributed sensors, extracts vibration features, and adopts a centralized management model for real-time monitoring and intelligent early-warning of equipment vibration status. Taking a specific metro station tunnel as an example, a comparative analysis for laboratory simulation and in-situ tunnel test is conducted. [Result & Conclusion] The safety early-warning system for metro tunnel equipment based on static-dynamic analysis could meet the design requirements in terms of early warning accuracy. The system enables a transition from passive response to proactive prevention in equipment maintenance, and establishes a comprehensive technical framework encompassing data acquisition, intelligent analysis, and decision support. It achieves timely identification of abnormal equipment vibration and risk forecasting, forming a unified and efficient operation and maintenance management mechanism, and effectively reduces the risk of equipment failure.

**Key words** metro; tunnel; equipment safety early-warning system; static-dynamic analysis

在地铁建设、运营和维护过程中, 隧道设备安全问题逐渐显现, 动力设备尤为突出。现行振动监测系统虽然能监测设备本体振动, 但仅在振动超限时报警, 响应滞后且缺乏预测分析能力<sup>[1]</sup>。本文根据地铁区间隧道中设备安装要求, 综合信号采集技术、振动信号分析及故障诊断技术建立安全预警系统, 实现设备运行安全维护管理<sup>[2]</sup>。

## 1 隧道设备松动机理分析

### 1.1 设备松动安全分析

隧道中设备(含风机、管道等)可分为2类: 一类是自带动力的设备, 即自振型设备; 另一类是被

\* 中铁建地下空间利用领域科研计划项目(2024-W18)

动振动型设备<sup>[3]</sup>,其振动激励来源于列车经过时引起的气流或振动。设备在振动的情况下发生松动乃至脱落,究其原因因为安装固定应力不足或长期振动,其中由于振动导致松动的可能性最大。当螺栓紧固件受横向应力作用逐渐松动时,其本身的振动特性将改变,即振动波形及频谱出现变化<sup>[4]</sup>。

## 1.2 螺栓松动故障机理

螺栓松动是非转动部分配合松动的一种,由于非线性可能引起转子的分数阶次谐波共振(亚谐波共振),其频率为转速的  $1/n$  倍( $n=2,3,\dots$ )。螺栓松动除产生低频振动外,还存在同频或倍频振动,将产生典型的二倍转频振动或伴随高阶次频率振动<sup>[5]</sup>。

### 1.2.1 自振设备螺栓松动故障机理

对于自振型设备,以吊装射流风机为例,其产生二倍转频的故障机理见图1。射流风机转子系统的等效不平衡质量旋转到1点时,不平衡力竖直向下,使风机向下压紧支座;旋转到2点时,不平衡力竖直向上,将风机拉起,离开支座;旋转到3点时,不平衡力向上的分力为0。风机每旋转1圈,均对支座产生两个作用力。当风机落下,对轴承座施加第二个力,此种松动产生的振动频率是二倍转速频率。

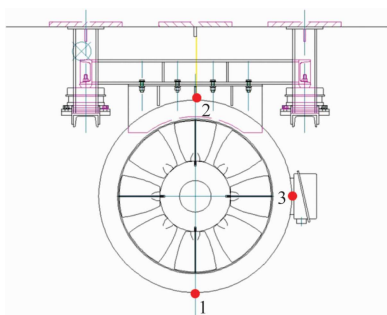


图1 射流风机松动产生二倍转频的故障机理

Fig.1 Failure mechanism of double frequency conversion caused by jet fan loosening

射流风机松动产生高阶次转频的故障机理见图2。射流风机转子系统的等效不平衡质量旋转到1点时,风机左侧受到向上的作用力,风机紧固点B呈现抬起趋势;旋转到2点时,不平衡力竖直向上,将风机拉起,离开风机支座;旋转到3点时,风机右侧受到向上的作用力,风机紧固点A呈现抬起趋势;旋转到4点时,受到向下的作用力,风机落下,压紧风机支座。射流风机按次序摇摆的松动可产生二、三、四或更高阶次转速频率的振动。

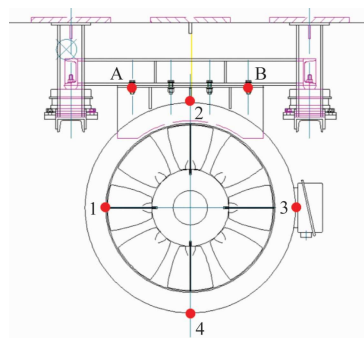


图2 射流风机松动产生高阶次转频的故障机理

Fig.2 Failure mechanism of high-order rotational frequency caused by jet fan loosening

螺栓松动使转子系统在水平和竖直方向具有不同的临界转速。当高阶次频率处的振动强度大于转速频率处出现振动强度的  $1/2$  时,螺栓产生机械松动的可能性较大。

### 1.2.2 非自振设备螺栓松动故障机理

对于非自振型设备,当紧固螺栓螺母松动回旋,螺栓螺母对紧固件的约束力急剧下降。对于未运行的射流风机以及静止状态的管道、支架等设备部件,螺栓预紧力的变化可反映其松动程度。

## 1.3 基于振动频谱分析原理的动态分析

利用FFT(快速傅里叶变换)频谱分析仪将波形转换成频谱。在工程中,傅里叶转换成离散傅利叶变换<sup>[4]</sup>的前提条件为:①假设信号为周期函数-傅里叶级数有限积分;②使用数值积分式,以便计算机运算<sup>[6]</sup>。

设备振动诊断的基本原则如下。

1) 识别特征频率:不同部件故障会在频域中产生特定的特征频率。例如,动不平衡故障主要在转速频率处出现明显的频率成分,轴不对中故障会在频谱中出现转速频率的倍频成分,油膜涡动故障的特征频率通常为转速频率的  $0.4 \sim 0.8$  倍,轴承故障则会在频谱中出现轴承的边频以及与轴承结构相关的特征频率等<sup>[7]</sup>。此外,频谱的形状可以提供故障的严重程度和发展趋势的信息。例如,当频谱中某个特征频率的幅值逐渐增大时,说明对应的故障可能在加剧;若频谱中出现了新的频率成分,可能预示着设备出现了新的故障或故障类型发生了变化<sup>[8]</sup>。

2) 观察波形特征:在时域中,不同故障类型的振动信号有不同的波形特征。例如,动不平衡故障的波形通常呈现出近似正弦波的波形,且波形较为

平稳,振动加速度幅值与不平衡质量成正比;轴不对中故障的波形则可能出现畸变,振动加速度波峰和波谷的幅值变化较大<sup>[9]</sup>。关注振动加速度的时域统计特征参数,包括均方根值、峰值、峭度等。其中:均方根值反映了振动信号的能量强度,当设备出现故障时,均方根值可能会增大;峰值可用于衡量振动信号的最大幅值,对于冲击性故障较为敏感;峭度则反映了振动信号概率密度分布的尖峰程度,当设备发生诸如齿轮断齿等冲击性故障时,峭度会显著增大<sup>[10]</sup>。

#### 1.4 基于预紧力测量的静态分析

螺栓松动直接导致预紧力发生变化<sup>[11]</sup>。螺栓预紧力检测主要采用电阻应变计,包括测力螺栓法和环形垫圈法两种形式<sup>[12]</sup>。其中:测力螺栓法直接替换现有螺栓,能准确测量螺栓预紧力的大小;环形垫圈法通过在螺栓处设置垫圈传感器来间接测量螺帽处的压力。电阻应变计接收的电信号与其受到的预紧力呈线性关系<sup>[13]</sup>。

### 2 隧道设备安全预警系统开发与应用分析

#### 2.1 隧道设备安全预警系统开发

地铁隧道设备安全预警系统适用于隧道风机等动力设备的振动及松动检测与预警,主要包括传感器、采集器、集中器及远程工作站<sup>[14-15]</sup>。该系统需具备动态分析与静态分析相结合的功能,以便对不同设备、不同工况进行识别与分析<sup>[16]</sup>。动态工况下,紧固件松动导致风机与支架组成的整体结构模态发生变化,其固有频率发生漂移,表现为风机振动频谱分布与共振频段漂移,可识别紧固件松动后产生的差异;静态工况下,通过对设备安装结构紧固位置预紧力的直接测量,快速识别出紧固位置出现松动。

#### 2.2 实验室模拟分析

在实验室搭建模拟激振引起的风机振动与结构松动之间相互影响的平台。该平台包括风洞、射流风机、风机控制系统、鼓风机、鼓风机控制系统、各类传感器电缆及数据采集系统。其中:风洞用于模拟隧道环境,除进出口外均封闭;鼓风机用于模拟隧道风,对风洞进行鼓风产生气流。

在实验室风机本体和紧固位置分别安装6个加速度传感器和4个预紧力传感器(见图3和图4)。经实验室模拟分析,采用加速度传感器获取风机基座振动谱,通过频谱分析提取1/3倍频程振动能量



图3 风机本体传感器安装图

Fig. 3 Installation diagram of fan body sensor

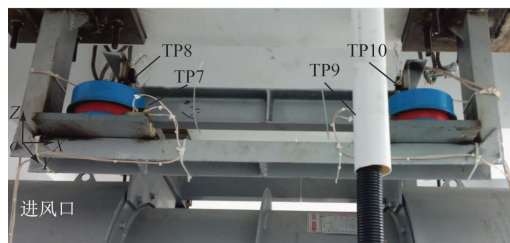


图4 预紧力传感器安装图

Fig. 4 Installation diagram of preload force sensor

作为特征量,得到进出风侧不同螺栓松动率下的振动能量差异量(实测振动能量与紧固状态下振动能量基准值差值的绝对值)(见表1)和风机振动加速度报警触发差异量(实测振动加速度峰值与报警阈值差值的绝对值)(见表2)。

表1 进出风侧不同螺栓松动率下的振动能量差异量

Tab. 1 Vibration energy variation under different bolt loosening rates on the inlet and outlet sides

螺栓松动率/%	振动能量差异量/( $(\text{m/s}^2)^2\text{s}$ )	
	进风侧	出风侧
0	1.00	1.00
25	1.21	1.15
50	1.35	1.31
75	1.51	1.46

表2 风机振动加速度报警触发差异量

Tab. 2 Alarm triggering variation in fan vibration acceleration

报警值	振动加速度报警触发差异量/( $\text{m/s}^2$ )	超限概率/%
一级预警	1.00	50
二级预警	1.15	75

#### 2.3 隧道实测分析

2022年11月18日,某地铁车站在距站台门端部150 m左右的隧道顶部安装3台射流风机,开启射流风机,并在3台射流风机上选取12个测点(每台4个)进行测试。进风侧测点TP1的X、Y向振动加速度均值对比,见图5和图6。

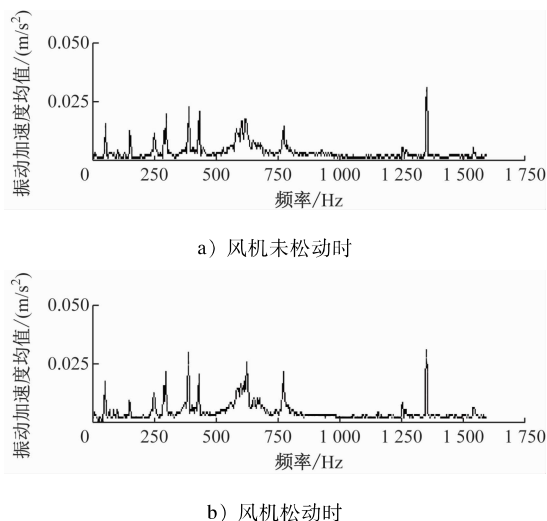


图5 两种工况下X向振动加速度均值对比

Fig. 5 Comparison of X-direction vibration acceleration mean values under two working conditions

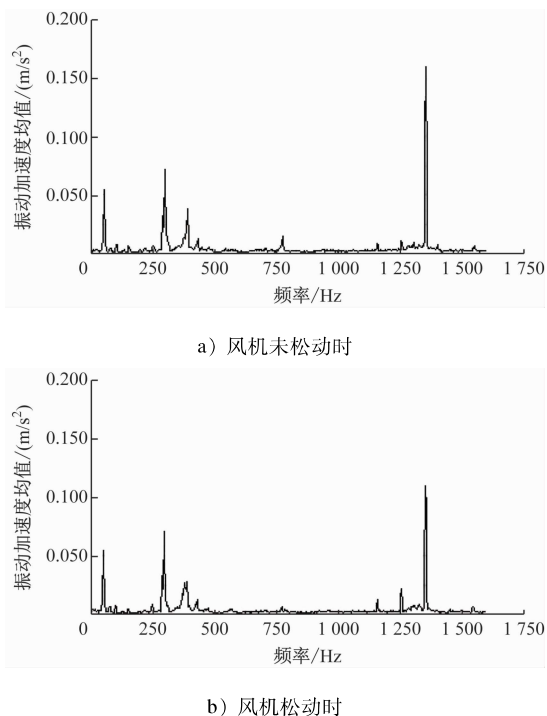


图6 两种工况下Y向振动加速度均值对比

Fig. 6 Comparison of Y-direction vibration acceleration spectrum mean values under two working conditions

## 2.4 实验室模拟与隧道实测对比分析

对数据库记录数据进行分析,结论如下:

1) 风机振动主要源于设备自身运行,自然风等外界激励源的影响可忽略不计。

2) 由于风机采用简易弹簧减振器,其运行时振动偏大,监测到的峰值加速度约为 $0.9g$ 。

3) 风机运行时,其振动主要集中在额定频率带

和固有频率倍频带。

4) 对比现场与实验室风机3个方向振动特性发现:现场测点X向振动频谱特征(均值与差异系数)与实验室正常状态(风机未松动)基本吻合,但一致性程度低于Y向;现场测点Y向振动频谱特征与实验室正常状态完全一致。

5) 经检测,现场风机振动偏大是减振器安装结构设计所致,但排除螺栓松动因素。

## 3 结语

1) 实验室与现场测试表明,基于动静态分析的地铁隧道设备安全预警系统预警准确率符合设计要求。

2) 在动静态分析相结合的基础上,提出基于设备模态差异的松动故障诊断方法。采用该方法分别从动态和静态获得设备紧固状态特征参数并加以分析,从而判别设备的松动情况。对于不同设备,因其动态及静态参数存在较大差异,故很难得到固定的报警阈值标准。地铁隧道设备安全预警系统在投运初期,可监视设备在正常状态下的静态及动态特性;通过该系统提取紧固相关特征参数,并对系统进行模态初始化;将该系统分析得到的特征参数与初始正常状态下的特征参数进行对比,当两者模态差异较大时可判别为设备松动。

3) 基于动静态分析的地铁隧道设备安全预警系统可准确识别设备松动故障并实时预警。该系统适用于地铁隧道设备螺栓连接、铆接等各类安装结构形式的松动状态监控。

## 参考文献

- [1] 沈金理. 机械装备连接松动故障特征提取方法的研究[D]. 上海: 东华大学, 2013.  
SHEN Jinli. The method of the feature extraction of the connected structure's looseness fault[D]. Shanghai: Donghua University, 2013.
- [2] 唐史峰. 城市轨道交通机电建设管理数字化转型研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(2): 1.  
TANG Shifeng. Research on digital transformation of urban rail transit electromechanical construction management[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(2): 1.
- [3] 邱明. 大型悬挂式惯性振动设备若干关键问题研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.  
QIU Ming. Research on several key problems of large suspension inertial vibration machine[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.



- [4] 杨忠平, 邵明耀, 王冠群, 等. 基于实测的地铁振动距离衰减预测参数修正方法[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(5): 80.  
YANG Zhongping, SHAO Mingyao, WANG Guanqun, et al. Correction method for metro vibration distance attenuation prediction parameters based on field measurement[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(5): 80.
- [5] 张欣恺, 刘文泉, 史俊, 等. 基于加速度计的振动形态监测系统的设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2014(1): 32.  
ZHANG Xinkai, LIU Wenquan, SHI Jun, et al. Design of vibration condition monitoring system based on accelerometer[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2014(1): 32.
- [6] 姜明顺, 孟玲, 隋青美, 等. 基于双LPFG解调的高灵敏度振动检测系统[J]. 光电子·激光, 2011, 22(8): 1207.  
JIANG Mingshun, MENG Ling, SUI Qingmei, et al. High-sensitivity vibration detection system based on double-LPFG demodulation[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2011, 22(8): 1207.
- [7] 康守强, 胡明武, 王玉静, 等. 基于特征迁移学习的变工况下滚动轴承故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 764.  
KANG Shouqiang, HU Mingwu, WANG Yujing, et al. Fault diagnosis method of a rolling bearing under variable working conditions based on feature transfer learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 764.
- [8] 曾陆洋, 延九磊, 刘峰, 等. 一种针对无键相铁道车辆的旋转部件阶次跟踪方法[J]. 铁道机车车辆, 2022, 42(2): 111.  
ZENG Luyang, YAN Jiulei, LIU Feng, et al. Order tracking method for rotating parts of non-keyphase railway vehicles[J]. Railway Locomotive & Car, 2022, 42(2): 111.
- [9] 崔诚, 陈长征, 吴焕杰, 等. 变转速下的风力机行星齿轮箱故障诊断研究[J]. 机械强度, 2022, 44(2): 263.  
CUI Cheng, CHEN Changzheng, WU Huanjie, et al. Research on fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox under variable speed[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(2): 263.
- [10] 胡春生, 李国利, 赵勇, 等. 变工况滚动轴承故障诊断方法综述[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(18): 26.  
HU Chunsheng, LI Guoli, ZHAO Yong, et al. Summary of fault diagnosis methods for rolling bearings under variable working conditions[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(18): 26.
- [11] 赵兵, 张守阳, 王辉. 航空发动机转子螺栓连接预紧力散差分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(10): 1144.  
ZHAO Bing, ZHANG Shouyang, WANG Hui. Analyses of pre-load variations in aeroengine rotor bolted connections[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(10): 1144.
- [12] 李小强, 孟庆阔, 杜一凡, 等. 拧紧策略对航空发动机单螺栓连接预紧力的影响[J]. 机械工程学报, 2020, 56(13): 231.  
LI Xiaoqiang, MENG Qingkuo, DU Yifan, et al. Influence of tightening strategy on pre-tightening force of aero-engine single-bolt connection[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(13): 231.
- [13] 丁杰, 陈鹏, 郑梦瑶, 等. 地铁车辆设备振动测试及特性分析[J]. 铁道车辆, 2023, 61(1): 71.  
DING Jie, CHEN Peng, ZHENG Mengyao, et al. Vibration test and characteristic analysis of metro vehicle equipment[J]. Rolling Stock, 2023, 61(1): 71.
- [14] 刘奔, 王涛, 钟东阶, 等. 电容式螺栓预紧力测量传感器研究[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(2): 37.  
LIU Ben, WANG Tao, ZHONG Dongjie, et al. Research on capacitive bolt pre-tightening force measurement sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42(2): 37.
- [15] 张晗. 城市轨道交通运营安全综合评估预警平台设计研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.  
ZHANG Han. Study on the design of urban rail transit operational safety assessment early warning platform[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [16] 田兴丽, 孙环阳, 张红光, 等. 城市轨道交通车辆制动系统的智能诊断与预警系统[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(11): 94.  
TIAN Xingli, SUN Huanyang, ZHANG Hongguang, et al. Intelligent diagnosis and early warning for urban rail transit vehicle braking system[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(11): 94.

· 收稿日期:2024-10-15 修回日期:2024-11-29 出版日期:2025-06-10  
Received:2024-10-15 Revised:2024-11-29 Published:2025-06-10

· 第一作者:范乐乐,高级工程师,005578@crfsdi.com  
通信作者:於泽,工程师,007161@crfsdi.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license