

基于应变计的起重机结构监测技术研究

赵琪 桑浩

(山东省特种设备检验研究院集团有限公司 山东 济南 250000)

摘要：本文对起重机结构监测技术进行研究，通过综述法分析应变计在结构监测中的应用价值。首先，以电阻应变计构造和工作原理作为研究出发点，确定该设备装置能够实现对起重机结构应力变化的监测目标。其次，在具体研究中，对起重机设备性能、监测内容、采集器、控制器等主要设备参数与结构单元进行论述。最后根据起重机结构监测问题，制定了科学的解决方案，通过及时识别危险源、采取主动控制措施，使得起重机机械设备结构监测有序开展。研究最终取得显著成果，能够提升起重机结构监测技术水平，为特种设备安全可靠使用提供保障。

关键词：应变计；起重机；结构监测；技术

0 引言

随着我国重工业与机械加工行业发展，起重机械保有量有所提高。根据国家市场监督管理总局数据，截至 2021 年，全国登记在册起重机械为 273.02 万台，检测机构持证数量达到 348 家，同比上升 8.75%，机械设备保有量位居世界第一。然而，起重机械安全问题仍十分严峻，因起重机械事故造成的死亡人数居高不下，因此，做好基于应变计的起重机结构监测尤为关键。

1 电阻应变计的构造与工作原理

1.1 应变计构造

电阻应变计的主体结构一般包括金属栅、基底、粘接剂、引线与覆盖层。

金属栅是应变计的核心部分，主要功能是将应变计的变化转换成金属栅电阻变化，其外观形状与设计尺寸对应变计的使用性能产生直接影响。

基底与粘接剂需要配合使用，在机械结构应变监测中起到重要的辅助作用。

引线则是连接金属栅的导线，被粘结在基底上，以确保引线位置与形状变化、基底变形具有一致性。

覆盖层具体是指覆盖在金属栅上的绝缘层，其目的是保护金属栅，避免该部分受外界环境影响。

1.2 工作原理

金属材质导线、电阻值与长度、截面积、电阻率之间的关系可通过以下公式描述：

$$R=\rho \frac{L}{A}$$

式中： R —导线的电阻值；
 ρ —导线的电阻率；

L —导线长度；
 A —导线的截面积。

当电阻应变计导线在轴线方向受一组方向相反、大小相同的力时，则金属导线在轴线方向会发生变形，使得电阻值随之改变，即应变—电阻效应。

在起重机结构监测中，需要在结构表面安装一段相同直径的金属丝，当结构受到外力作用发生变形时，则金属丝随之出现变化。根据上述公式可将金属丝的位置应变转化为金属丝电阻变化，由此完成对起重机结构监测目标。

2 基于应变计的起重机结构监测技术分析

2.1 起重机设备与监测内容

2.1.1 设备性能参数

被监测对象为桥式抓斗卸船机起重机，其被安装在码头专用轨道上，工作机构具体包括起升、俯仰、大车行走、小车行走。起重机的主要受力结构包括大梁、门架与拉杆。起重机主要性能参数见表 1。

表 1 起重机主要性能参数指标

项目	参数	项目	参数
额定生产率 / (t/h)	350	大车运行速度 / (m/min)	100
额定起重量 / t	10	大车行走轮数 / 个	16
基距 / m	18	小车运行速度 / (m/min)	20
轨距 / m	10.5	驾驶室移动速度 / (m/min)	20
工作风压 / (N/m ²)	≤ 250	抓斗起升速度 / (m/min)	75/35
起升高度 / m	14/14	最大轮压 / kN	300
电源	380V，50Hz	非工作风压 / (N/m ²)	≤ 1000

2.1.2 结构监测内容

起重机特种设备结构监测内容包括焊接式电阻、采集器、控制器，监测系统包括工况及远程传输系统。其中，传感器与采集器以短导线的方式连接；采集器与控制器之间的连接方式为 RS485 协议通信；控制器、工况机、服务器之间的通信方式为 TCP/IP 协议。

2.1.3 采集器与控制器

在起重机金属结构应变的实际监测中，使用 DH1101 焊接式应变计，其中采集器与控制器均选用 DH5990 系统，采集器主要技术指标见表 2。

表 2 应变计采集器主要技术指标

项目	参数或标准	项目	参数
桥臂电阻 /Ω	120	采样速率 / (m/min)	100
供桥电压 /V	2.5 (DC)	满度值 / με	±30000
桥路方式	全桥	A/D 位数 / 位	24
输入方式	DIF_DC、GND	噪声 / με	峰值 < 2
采集电源方式	集中供电	零漂	3/8h
供电电压范围 /V	DC10 ~ 36	温度漂移 / (μV/℃)	με < 0.1
功耗 /W	< 2	工作温度范围 /℃	-30 ~ 70

在对起重机结构进行监测时，也需要使用控制器单元。控制器与采集器之间以 RS-485 通讯，各通讯模块之间的扩展距离为 200m，一般选取压线端子作为通讯拓展线，该部分主要承担供电与信号传输任务。在本次起重机结构应变的监测中，要求每台控制器与 8 组采集模块相连接，每 8 个模块作为一组，可同时控制 64 台采集模块。为实现对起重机结构的准确监测，要求 1 台计算机最多控制 8 台控制器，并做好通讯、电源部分的隔离保护。本次起重机结构监测用控制器的外观尺寸为 330mm × 230mm × 150mm。

其中，输出到采集模块的电压范围为 DC36V，通过以太网及 MODBUS 两种方式连接各控制器，并在结构上预留 MODBUS 接口位置，控制器通讯接口采取 LAN 网口作为主要连接方式，其电源部分多采用 220V 交流电^[1]。当技术条件不允许时，也可以采用 DC10 ~ 36V 直流供电方式。在实际应用环境，要求控制器的功率 ≥ 150W，工作温度范围在 -30 ~ 70℃，防护等级应达到 IP65。

2.2 结构问题分析与主动控制方案

2.2.1 问题描述

对卸船机起重机金属结构进行检查后，发现起重机部分有以下问题：

(1) 起重机主梁、拉杆、外观、前门架经过检查后，未发现明显裂纹、变形与腐蚀问题，而在主梁端部有连接螺栓少量缺失问题发生；

(2) 后门架与电气房两边位置均有部分腐蚀，其中电气房西侧门架的腐蚀量为原有板材厚度的 (10.2-7.3) / 10.2 × 100% = 28.4%，东侧门架的腐蚀量为原有板材厚度的 (10.2-8.1) / 10.2 × 100% = 20.6%，由此可知，腐蚀率均超过 10%；

(3) 前桥架内部后端均有积水问题；

(4) 部分连接部分有螺栓缺损现象；

(5) 起重机桥架内部存在锈蚀问题；

(6) 司机室轨道与主梁下盖板焊缝有烧穿问题发生。

2.2.2 危险源的识别

在具体监测工作中，为确保起重机工作性能良好，要求相关人员利用应变计完成对起重机金属结构应变的可靠监测。起重机械风险评估是将安全系统与风险管理理念应用在实际中的有效举措。在具体风险评估中，要求相关人员能够以生命周期理论对起重机金属结构进行评估，同时对危险源进行判断，并采取可行的风险预防措施，使机械设备能够稳定安全运行。

以起重机结构监测为例，为实现对危险源的及时辨识，相关人员需要制作一份风险清单，对危险状态、风险等级进行划分，并使用应变计对金属结构进行全面监测，当出现较大的应力值变化时，则做好技术分析。在起重机金属结构失效中，将故障分为两大类，一类是结构断裂，另一类是整机失稳。一般情况下，当发生超载荷事件时，则造成相关金属构件的压力增加，易发生裂缝问题^[2]。此外，在对应力变化进行分析时，也需要考虑磨损、腐蚀、变形、连接失效与应力集中对起重机金属结构造成的影响。

在对起重机结构的检测中，相关人员需要对结构受损程度进行评估，根据可信最坏情况对严重程度等级进行划分，并考虑结构受损造成的经济损失。在本次检验中，技术人员将起重机金属结构的受损严重程度划分为：A - 非常严重、B - 严重、C - 较轻与 D - 轻微。在起重机结构损伤等级判断中，也需要对具体步骤进行优化，首先，需要完成对各种危险源风险等级的评估，并选取最高风险等级作为该项目的最终风险评估结果；其次，对每个项目风险等级进行细化，做好安全状况评估；最后需要根据评估结果决定是否继续使用起重机设备。

在起重机风险等级评估完成后，相关人员也对起重机的安全状况进行评分，评分方式为百分制，取值范围 0 ~ 100 分，评分值越高，表明安全状况等级越高，具体评估方式与指导意见如表 3 所示。

通过应用上述危险源识别措施，能够帮助相关人员及时发现起重机结构存在的问题，并对起重机设备进行安全状况评估。建议相关人员根据评估结果，结合起重机械事故统计数据、机械故障历史及设备使用环境等关键信息，对起重机的使用安全性作出全面评估。针对存在

表 3 起重机设备结构安全状况等级评估结果

安全状况等级	评分值（分）	建议内容
一级	$D \geq 90$	继续使用
二级	$75 \leq D < 90$	继续使用
三级	$65 \leq D < 75$	采取风险降低措施，并做好使用监护
四级	$55 \leq D < 60$	监护使用、限制条件使用
五级	$D < 55$	终止使用，并根据行业相关标准规范进行报废处理

严重安全隐患的起重机进行监护使用。当安全状况等级达到五级后，应对起重机设备作出报废处理决定，以最大程度降低设备结构应变造成的不良影响，确保起重机特种设备运行安全。

2.2.3 主动控制措施

对起重机的主要危险源进行分析后，发现危险多来源于侧翻与结构应力变化。研究指出，当起重机的高度增加时，则危险性随之增加^[3]。造成危险发生的主要因素考虑风和动态力。若以上因素未能得到及时纠正，则容易诱发起重机结构变形，使得起重机特种设备的使用安全性难以得到保障。

为解决以上问题，将主动控制措施应用在机械安全管理实践中，思路与方案如下：第一种解决思路是将起重机整机自动朝向倾翻方向相反的方向旋转；第二种解决思路是往倾翻方向相反的方向移动平衡重。应用方案一，能够在起重机处于不稳定平衡状态的最后一刻，做好起重机设备调整，预防发生倾翻；第二种解决方案则被广泛应用在工作状态下的起重机机械设备主动控制中。

在主动控制中，只有当载荷力矩达到额定荷载力矩的90%时，方可通过应力主动控制方案对平衡重作出调整。大量起重机结构应力检测实践表明，为达到理想控制效果，应确保起重机移动平衡重的工作量低于全部工作量的1%。研究指出，起重机设备并不是在所有位置均需要平衡重达到最大位移条件^[4]。只有起重机特种设备载荷达到最大幅度，且需要继续移动起重机设备时，方可将平衡重调整到最大位移位置。通过以上分析可知，当起重机处于小幅度提升最大载荷回转时，可将平衡重停留在初始位置，随后根据幅度变化，逐渐向外侧移动平衡重。

当应变计监测到起重机在最大幅度位置卸载时，容易出现平衡重力矩失衡，从而使得起重机整体结构朝向后侧倾翻。为有效避免上述问题发生，需要采取主动控制措施。建议相关人员利用应变计获取倾覆稳定系数，并确保系数保持在1.1，从而使起重机设备在使用过程中具有安全性。

2.3 结果评估与对比测试

在本次监测过程中，出现了机械滞后问题，影响监测结果准确性。经分析可知，机械滞后的直接原因为应

变计在受到外力作用后，未能完全回到初始位置，并且金属栅在残余应力影响下出现改变。起重机结构测量实践表明，当金属栅受到挤压或弯曲发生不当变形后，则容易造成粘结剂固化不牢，使应变计在机械结构测量中出现滞后问题，不利于起重机结构监测技术的可靠利用。

为评估焊接式应变计与粘贴式应变计在起重机结构监测中的应用性能，对二者产生的机械滞后性能进行对比，并做好测试结果分析。相关技术方法如下：

- (1) 对应变计监测点的初始数据进行记录；
- (2) 分别加载、卸载起重机三次，对每次卸载的读数进行记录；
- (3) 完成对各点相邻两次卸载应变读数的记录工作，并取两次测量结果绝对值较大的点，对单个应变计的机械滞后问题进行评估，取多次机械滞后的平均值，并完成全部计算。

对比测试结果表明，焊接式应变计机械滞后的平均值为1，结果数值优于粘贴式应变计机械滞后平均值2。鉴于此，在起重机特种设备结构监测中，建议相关人员使用焊接式应变计完成监测，以最大程度降低机械滞后对测试结果造成的影响，为起重机特种机械设备稳定可靠使用提供支持。

3 结语

起重机结构状态监测影响起重机的安全稳定运行，对特种设备监测行业发展起到关键作用。随着行业发展，对起重机整体结构的监测成为行业人员关注的焦点。本文通过研究起重机结构监测技术，基于电阻应变计构造与工作原理，阐述了结构监测的实现方式。并且通过对起重机设备性能参数、监测内容、采集器与控制器等主要监测单元的分析，确保结构监测技术在起重机特种设备中获得高效应用。未来在监测技术应用中，建议相关人员对危险源进行主动识别，采取更加科学有效的控制措施，并对监测结果的准确性进行评估，从而使起重机结构监测工作高质量开展，为起重机监测领域最新理念推广和技术升级贡献力量。

参考文献：

[1] 平克楠. 铸造起重机桥架结构健康监测中的疲劳寿命晚期特征[J]. 科技与创新, 2022(12): 123-125+128.
[2] 雷海东, 肖建豪. 门座起重机金属结构疲劳检测与修复工艺[J]. 港口装卸, 2021(06): 30-31.
[3] 陈莹. 起重机金属结构焊缝的综合检测与寿命估算[J]. 设备管理与维修, 2021(22): 37-38.
[4] 苏宇航, 李继承. 基于压电阻抗技术的桥式起重机焊缝监测研究[J]. 中国特种设备安全, 2020, 36(09): 39-42+75.