

团 体 标 准

T/CPASE MT 012-2021

# 桥门式起重机金属结构裂纹损伤压电阻抗 监测试验方法

Piezoelectric Impedance Monitoring Test Method for Crack Damage of Metal  
Structure of Bridge and Gantry Crane

征求意见稿

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国特种设备安全与节能促进会 发布

## 前 言

本标准按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》制定的规则起草。

本标准由广东省特种设备检测研究院珠海检测院提出。

本标准由中国特种设备安全与节能促进会归口。

本标准起草单位：广东省特种设备检测研究院珠海检测院、XXX。

本标准主要起草人：苏宇航、李继承、XXX。

本标准为首次发布。

# 桥门式起重机金属结构裂纹损伤压电阻抗监测试验方法

## 1 范围

本标准规定了桥门式起重机金属结构裂纹损伤压电阻抗监测试验的术语和定义、试验原理及方法、试验仪器、试验条件、试验程序、结果评价、记录和报告、异常情况处理。

本标准适用于在一般环境中工作的桥门式起重机，不适用于易燃易爆、可燃性气体、粉尘及有腐蚀性气体、核辐射、有毒气体环境下使用的桥门式起重机。

其他类型设备金属结构裂纹损伤的压电阻抗监测试验可以参照本标准执行。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 6067.1 起重机械安全规程 第1部分：总则

GB/T 14405-2011 通用桥式起重机

GB/T 14406-2011 通用门式起重机

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**裂纹长度 crack length**

从参考平面到裂纹尖端的主平面尺寸的线性测量。

注：用毫米（mm）表示。

### 3.2

**裂纹扩展量 crack extension**

裂纹长度的增加量。

注：用毫米（mm）表示。

### 3.3

**压电效应 piezoelectric effect**

某些材料，在被施加作用力时，能使其表面上产生电荷积累且可逆的效应。

### 3.4

**机械阻抗 mechanical impedance**

机械系统中在某一给定点和自由度的力与速度的复数比。

### 3.5

**电阻抗 electrical impedance**

压电传感器两端加载电压与通过电流的复数比。

### 3.6

**耦合电阻抗 coupled electrical impedance**

压电传感器通过表面粘贴方式与起重机金属结构形成刚性连接后的电阻抗。

### 3.7

**电阻抗谱 electrical impedance spectroscopy**

压电传感器电阻抗模值、实部、虚部与检测频率的关系图。

### 3.8

**谐振频率 resonant frequency**

电阻抗谱中峰值或谷值对应的检测频率。

### 3.9

**频率偏移 frequency shift**

不同损伤状态下起重机金属结构的谐振频率偏移量。

### 3.10

**均方根偏差 root mean square deviation (RMSD)**

不同损伤状态下，起重机金属结构电阻抗谱之间的相对偏差，定义式为：

$$RMSD(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^{i=N} x_i^2}} \times 100$$

$N$  为电阻抗谱中的数据点数， $x_i$  和  $y_i$  ( $i=1,2,3\cdots N$ ) 分别为起重机金属结构处于不同损伤状态下电阻抗谱中对应数据点的电阻抗值。

### 3.11

**基准信号 standard signal**

在整个监测时间段内，初次测量的空载试验条件下，压电传感器的电阻抗信号。

### 3.12

**参比信号 reference signal**

基准信号测量完成后，起重机经过一定服役周期，压电传感器的电阻抗信号。

## 4 试验原理及方法

#### 4.1 试验原理

将压电传感器与被监测起重机金属结构表面进行刚性连接,利用压电传感器与起重机之间的耦合电阻抗,间接反映起重机金属结构机械阻抗的变化,进而监测起重机金属结构裂纹的萌生与扩展,原理图见图1。

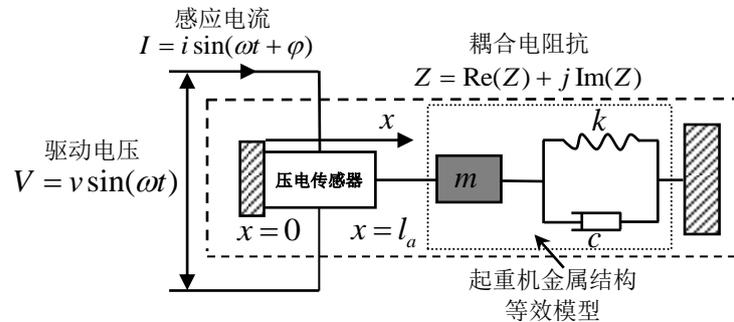


图1 试验原理图

#### 4.2 试验方法

4.2.1 在压电传感器正负电极两端施加恒定电压的正弦波激励信号,从起始监测频率开始,以固定的频率间隔,连续增加正弦波的频率。在不同激励频率下分别测量出压电传感器的电阻抗值,得到压电传感器电阻抗值随激励频率变化的电阻抗谱。

4.2.2 通过分析起重机金属结构不同服役周期下压电传感器电阻抗谱的变化,监测起重机金属结构是否出现裂纹及裂纹扩展情况。

### 5 试验仪器

#### 5.1 一般要求

5.1.1 应有产品质量合格证明文件。

5.1.2 应有使用操作说明书。

5.1.3 应有校准证书,校准项目应至少包含激励电压、频率分辨率和监测频段。

#### 5.2 仪器组成

5.2.1 应至少包含压电传感器、通道切换开关、正弦信号激励模块、电阻抗测量模块、结果显示与存储模块、信号传输模块、控制模块、电阻抗分析处理模块,仪器部件组成简图见图2。

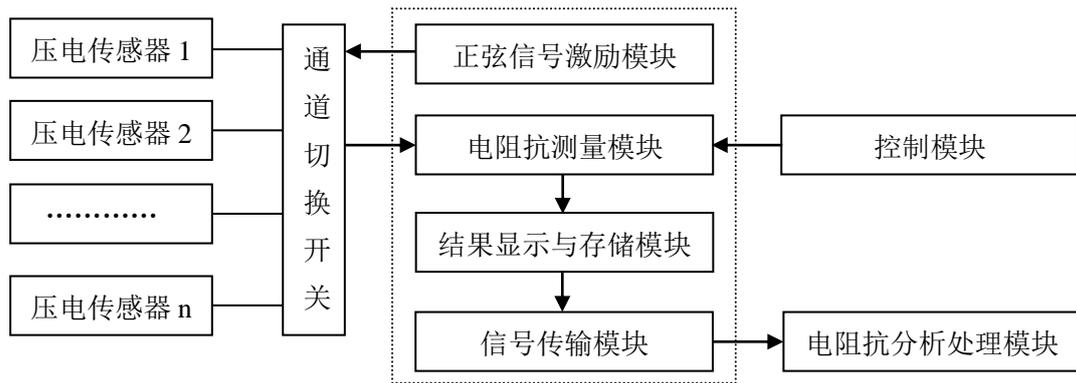


图2 试验仪器组成框架图

### 5.3 性能要求

5.3.1 激励信号的电压范围应在 1~10V 之间。

5.3.2 频率分辨率应小于等于 1Hz。

5.3.3 监测频段应至少覆盖 1kHz~100kHz。

5.3.4 压电传感器可以选用锆钛酸铅（PZT）或者偏聚四氟乙烯（PVDF）等具有压电效应材料制成的压电片。

5.3.5 PZT 压电传感器的长期有效工作温度应控制在 0~50℃ 范围内，其他类型压电传感器的工作温度范围应结合其特性确定。

### 5.4 功能要求

5.4.1 应具备数据采集、显示及保存功能。

5.4.2 压电传感器应采用防水封装。

## 6 试验条件

### 6.1 试验对象

当桥门式起重机出现以下情况之一时，应进行裂纹损伤压电阻抗监测：

- a) 金属结构已经发现裂纹，符合 GB 6067.1 第 3.9.3 规定的；
- b) 处于严重腐蚀环境（如海边、潮湿地区等）且使用时间超过 15 年的，或处于强风区域且使用频率较高的；
- c) 主要受力构件发生腐蚀、焊缝或母材开裂、损坏或局部变形较大时；
- d) 相关法律法规标准要求进行状态监测的；
- e) 负责特种设备安全监察管理的政府部门认为有必要时；
- f) 使用单位有需求的。

### 6.2 试验环境

6.2.1 为确保试验人员安全和测试结果的准确性，露天设备测试时应在天气晴朗的条件下开展，避免在阴雨天气下进行。

6.2.2 检测环境最大相对湿度不应大于 95%。

6.2.3 检测环境中不应含有腐蚀性和易燃性气体、导电尘埃。

6.2.4 试验现场应整洁，不应有影响试验进行的物品和设备。

6.2.5 检测环境中不得存在与监测频段相同的振动噪声。

6.2.6 测量时，基准信号与参比信号的环境温度差别应控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内，以增加监测结果的准确性。

### 6.3 试验人员

6.3.1 应具备桥门式起重机的基本知识，充分了解受检桥门式起重机金属结构的应力分布情况。

6.3.2 应经过测试培训，掌握本标准所规定的试验方法及要求。

6.3.3 现场裂纹损伤监测时，宜有 2 名以上试验人员。

6.3.4 应穿戴相应的劳保用品。

### 6.4 试验用文件

试验应至少配备下列文件：

- a) 必要的起重机技术文件；
- b) 压电阻抗现场监测实施方案。

## 7 试验程序

### 7.1 压电传感器安装位置及数量确定

7.1.1 应根据起重机主要受力结构件图和定期检验结果，选择应力集中部位、裂纹萌生部位作为重点监测部位。桥式起重机的重点监测部位宜参考附录 C 确定，门式起重机在桥式起重机监测部位的基础上宜增加支腿焊缝部位。

7.1.2 压电传感器的设置位置应尽量靠近重点监测部位，两者之间的距离应不大于 300mm。

### 7.2 传感器粘贴及封装

7.2.1 应打磨压电传感器设置位置金属结构表面的油漆使其出现金属光泽。

7.2.2 压电传感器宜通过胶水粘连等方式与起重机金属结构刚性相连。

7.2.3 工作于腐蚀性气体和潮湿环境的压电传感器应进行封装处理，防止压电传感器的镀银电极老化失效。

### 7.3 粘结剂固化

应根据粘结剂使用要求放置足够时间确保其充分固化，待压电传感器与起重机金属结构之间的粘结力稳定后再进行基准信号测量。

#### 7.4 监测频段选择

对于任一压电传感器，选择 2 个以上频率范围作为监测频段，其中谐振峰数量应不少于 3 组，数据点数量应不少于 200 个，相邻数据点之间的频率间隔应不大于 100Hz。

#### 7.5 系统稳定性验证

7.5.1 在选定的监测频段内应进行不少于 3 次的传感器电阻抗测量，以电阻抗谱形状和频率偏移作为指标对系统稳定性进行评价。

7.5.2 电阻抗谱整体形状应保持一致，各谐振峰频率偏移不大于 2 倍频率间隔表明系统达到稳定状态。

7.5.3 如多次测量后，系统仍无法保持稳定状态，应对电阻抗测量仪器进行校准。

#### 7.6 载荷试验

##### 7.6.1 载荷试验分类

载荷试验分为空载试验和额载试验。

##### 7.6.2 空载试验方法

空载试验用于长期监测起重机金属结构裂纹的萌生和扩展过程，不同监测周期空载试验结果可以相互比较，其试验过程如下：

a) 空载试验时，除小车应固定在主梁上相同位置外，其余应参照GB/T 14405-2011中6.9.2和GB/T 14406-2011中6.9.2空载试验的要求进行。

b) 应在完成7.1~7.5步骤后，进行基准信号测量。

c) 起重机应处于空载状态，记录小车在主梁上的位置，在选定的监测频段内分别进行3次以上的信号测量，保存测量结果。

d) 经过设定的监测周期后，完成7.5步骤，在选定的监测频段内重复进行电阻抗信号测量，保存测量结果。

##### 7.6.3 额载试验方法

用于在发现裂纹后判断起重机金属结构在额定载荷工况下裂纹是否会出现快速扩展，同一监测周期的额载试验结果仅用于和相同周期的空载试验结果相比较，其试验过程如下：

a) 额载试验时，小车应固定在主梁上相同位置，且最大载荷应为1.0倍额定起重量或允许监控使用的起重量，其余应参照GB/T 14405-2011中6.9.3和GB/T 14406-2011中6.9.3静载试验的要求进行。

b) 在完成7.6.2 b) 步骤后，移动小车将主起升机构移动到主梁的最不利位置加载。

c) 加载过程应分阶段进行，逐步加载到1.0倍额定起重量或允许监控使用起重量，便于观察监测结果的整体变化规律。应至少分为3次加载，宜按照0.5、0.75和1.0倍额定起重量或允许监控使用起重量加载。

d) 对于每种加载情况，在选定的监测频段内分别进行3次以上的信号测量，保存测量结果。

### 8 结果评价

#### 8.1 空载试验结果

空载试验结果应以基准信号和不同服役周期下测得的参比信号作为比较对象，以电阻抗谱整体形状、频率偏移和均方根偏差 RMSD 值作为评价指标，当监测结果同时满足以下要求时，起重机金属结构未出现裂纹或者裂纹未扩展，结论为合格：

- a) 电阻抗谱整体形状不发生畸变；
- b) 主要谐振峰频率偏移小于 3~5 倍频率间隔；
- c) RMSD 值小于首次测量电阻抗谱之间 RMSD 值的 3~5 倍。

## 8.2 额载试验结果

额载试验结果应以本次空载试验测量的压电传感器电阻抗谱作为基准，不同载重量静态加载条件下测得的电阻抗谱作为比较对象，应以电阻抗谱整体形状、频率偏移和均方根偏差 RMSD 值作为评价指标。当出现以下三种情况时，应按照相应条款判定试验结果：

a) 在不同载重量连续静态加载过程中，若出现某一加载重量时电阻抗谱整体形状发生严重畸变，则应停止继续加载，表明自该载重量开始起重机金属结构处于塑性变形或裂纹扩展状态，试验结果为不合格。

b) 整个额载试验过程中，随着加载重量的增加，主要谐振峰频率偏移和 RMSD 值整体上呈现不断增大的趋势，如果在加载试验后期频率偏移和 RMSD 值出现快速增大，达到或超过初始载重量条件下的 5 倍以上，表明自该载重量开始起重机金属结构处于塑性变形或裂纹扩展状态，试验结果为不合格。

c) 整个额载试验过程中，主要谐振峰频率偏移和 RMSD 值处于缓慢增加状态，最大增加量小于初始载重量条件下的 3~5 倍，表明在加载状况下监测部位的变形在弹性范围内，没有塑性变形发生，起重机在不大于试验所用载荷的重量范围内可以监控使用，试验结果为合格。

## 8.3 结果处理

8.3.1 如果 8.1 的空载试验结果不合格，表明桥门式起重机被监测位置附近可能出现裂纹萌生或裂纹扩展，应进一步采用目视检查、渗透检测、磁粉检测等手段确定裂纹位置、裂纹长度或裂纹扩展量，在采取相关措施保证起重机安全之前暂停使用。

8.3.2 如果 8.2 的额载试验结果不合格，表明桥门式起重机出现结构刚度下降的情况，在加载额定起重量时出现塑性变形或裂纹扩展，使用时应降低有效起重量，缩短监测周期，严重时应停止设备使用。

## 9 记录和报告

### 9.1 记录

应按照监测工艺规程的要求记录监测数据和有关信息，除此之外，还应至少包括监测报告中要求的内容。

### 9.2 报告

监测报告的内容应按照监测要求编制，且至少应包括以下内容：

- 委托单位和使用单位的名称；
- 使用地点；
- 制造单位名称；
- 被监测起重机的类别、品种、型号规格和产品编号；

- 监测仪器和传感器的型号；
- 监测现场温度、湿度；
- 监测部位示意图；
- 监测试验结果；
- 监测及审核人员签名及监测日期。

### 9.3 记录和报告保存期限

9.3.1 监测记录和报告的格式见附录 A。

9.3.2 监测记录和报告应长期保存。

## 10 异常情况处理

### 10.1 桥门式起重机工作状态异常

进行起重机额载试验过程中，在加载到某一载重量时，起重机金属结构处于塑性变形或裂纹扩展状态，表现为一个或多个压电传感器电阻抗谱出现严重畸变。继续进行加载试验可能导致起重机倾覆、起吊物品坠落等危险事故，应立即停止额载试验，将起吊物安全放至地面。在查明故障部位及原因之前停止设备使用。

### 10.2 监测设备故障

监测设备故障表现为无法进行压电传感器电阻抗谱测量，电阻抗谱在特定监测频率出现跳跃，电阻抗测量结果重复性差等现象，应停止桥门式起重机金属结构裂纹损伤监测试验，本次试验所测得的监测数据为无效数据。

### 10.3 压电传感器失效

压电传感器由于开裂、老化、腐蚀等原因导致失效，表现为压电传感器电阻抗谱出现严重畸变或无法测量出电阻抗谱。对于该监测部位，需要更换压电传感器并重新进行基准信号测量，不同压电传感器的电阻抗谱不能相互比较。

附 录 A  
(资料性附录)

桥门式起重机裂纹损伤压电阻抗监测记录和报告

A.1 桥门式起重机裂纹损伤压电阻抗监测记录参见表 A.1

表 A.1

记录编号:

委托单位名称										
使用单位名称										
使用地点										
制造单位名称										
改造(重大修理)单位名称										
类别					品种					
型号规格					设备代码					
产品编号					单位内部编号					
出厂日期					投入使用日期					
监测仪器		名称及型号						编号		
监测条件		温度						湿度		
监测试验依据:										
监测部位示意图:										
监测结果记录										
1. 空载试验										
传感器序号	频段数	频段 1			频段 2			频段 3		
		范围(kHz)	数据点数	频率间隔	范围(kHz)	数据点数	频率间隔	范围(kHz)	数据点数	频率间隔
1										
2										

表 A.1 (续)

2. 额载试验										
传感器 序号	频段 数	频段 1			频段 2			频段 3		
		范围 (kHz)	数据 点数	频率 间隔	范围 (kHz)	数据 点数	频率 间隔	范围 (kHz)	数据 点数	频率 间隔
1										
2										
检测人:		日期:			校对:			日期:		

## A.2 桥门式起重机裂纹损伤压电阻抗监测报告参见表 A.2

表 A.2

记录编号：

委托单位名称										
使用单位名称										
使用地点										
制造单位名称										
改造（重大修理）单位名称										
类别					品种					
型号规格					设备代码					
产品编号					单位内部编号					
出厂日期					投入使用日期					
监测仪器		名称及型号					编号			
监测条件		温度					湿度			
监测试验依据：										
监测部位示意图：										
监测结果处理										
1. 空载试验：电阻抗谱整体形状是否畸变										
2. 空载试验：频率偏移										
传感器序号	频段数	频段 1			频段 2			频段 3		
		峰值 1 偏移量	峰值 2 偏移量	峰值 3 偏移量	峰值 1 偏移量	峰值 2 偏移量	峰值 3 偏移量	峰值 1 偏移量	峰值 2 偏移量	峰值 3 偏移量
1										
2										

表 A. 2 (续)

3. 空载试验: RMSD										
传感器序号	频段数	频段 1			频段 2			频段 3		
		原始	本次		原始	本次		原始	本次	
1										
2										
空载试验结论:										
4. 额载试验: 电阻抗谱整体形状是否畸变										
5. 额载试验: 频率偏移及 RMSD 值										
5.1 加载 0.5 倍额定载荷										
传感器序号	频段数	频段 1			频段 2			频段 3		
		频率偏移量	RMSD 值	是否合格	频率偏移量	RMSD 值	是否合格	频率偏移量	RMSD 值	是否合格
1										
2										
5.2 加载 0.75 倍额定载荷										
传感器序号	频段数	频段 1			频段 2			频段 3		
		频率偏移量	RMSD 值	是否合格	频率偏移量	RMSD 值	是否合格	频率偏移量	RMSD 值	是否合格
1										
2										
5.3 加载 1.0 倍额定载荷										
传感器序号	频段数	频段 1			频段 2			频段 3		
		频率偏移量	RMSD 值	是否合格	频率偏移量	RMSD 值	是否合格	频率偏移量	RMSD 值	是否合格
1										
2										
额载试验结论:										
其他无损检测方法对监测异常部位的补充检测结果:										
监测结果评定:										
检测人:		日期:		审核人:		日期:		审批人:		日期:

附录 B  
(资料性附录)  
试验仪器与试验对象的连接方法

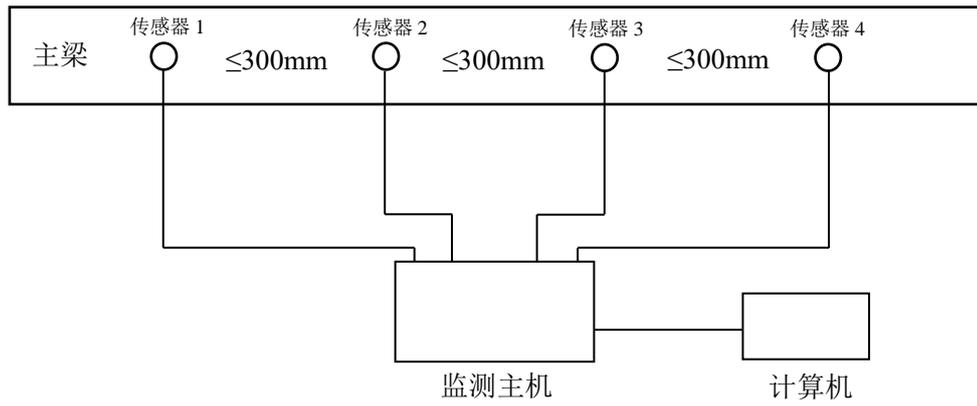


图 B.1 桥门式起重机主梁结构监测接线方法

**附录 C**  
**(资料性附录)**  
**典型桥式起重机监测参考点**

**C.1 参考点确定的主要依据**

根据结构有限元分析，确定起重机在典型工况下应力较大的点、应力幅较大的点、应力集中点等，容易引起损伤或者疲劳，并结合日常使用结果分析确定。

**C.2 参考点分布方案**

参考点分布方案遵循如下流程：

- a) 查阅起重机相关资料，现场勘查，了解设备使用情况，与设备使用单位协商制定测试方案；
- b) 参考方案中应包括有限元应力计算、测试工况、测点位置、测试要求、测试仪器及耗材；
- c) 测试工况参照起重机运行时主要工况：起重量为额定载荷并位于最低处，小车位于桥架中部。
- d) 测试点为7个或7个以上时，必测点位置可参照图C.1及表C.1。若有限元计算结果对应力集中区域超出本测点的范围，对应计算结果需增加测试点。

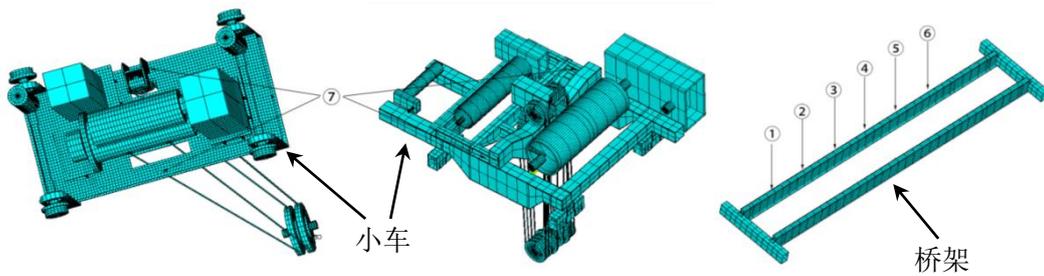


图 C.1 必测点示意图

表 C.1 必测点记录表

桥架距边梁 1/8 处 (①位置)	桥架距边梁 1/4 处 (②/⑥位置)	桥架距边梁 3/8 处 (③/⑤位置)	桥架距边梁 1/2 处 (④位置)	小车前部中位(⑦ 位置)	小车后部中位(⑦ 位置)
测点⑧	测点⑨	测点⑩			