

# 游乐设施状态监测与故障诊断

## 第 5 部分：应力检测/监测方法

GB/T36668《游乐设施状态监测与故障诊断》分为以下 6 个部分：

- 第 1 部分：总则；
- 第 2 部分：声发射监测方法；
- 第 3 部分：红外热成像监测方法；
- 第 4 部分：振动状态监测方法；
- 第 5 部分：应力检测/监测方法；
- 第 6 部分：运行状态监测方法。

本部分为 GB/T36668 的第 5 部分。

本部分按照 GB/T1.1—2009 给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本部分由全国索道与游乐设施标准化技术委员会(SAC/TC250)提出并归口。

本部分起草单位：中国特种设备检测研究院、河北大学、济南大学、武汉理工大学。

本部分主要起草人：丁克勤、沈功田、陈光、尹欣然、宋伟科、刘关四、刘然、方立德、曹树坤、赵章焰、周伟、张洋。

1 范围 GB/T36668 的本部分规定了使用电阻应变片对游乐设施关键结构部件进行应力检测的方法和使用光纤光栅传感器对游乐设施大型框架结构或支承件进行应力状态监测、疲劳损伤诊断的方法。

本部分适用于新制造和在用游乐设施的关键结构部件应力检测、游乐设施大型框架结构或支承件的应力状态监测及疲劳损伤诊断。

2 规范性引用文件下列文件对于本文件的应用是必不可少的。

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。

凡是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。

GB8408 大型游乐设施安全规范

GB/T13992 金属粘贴式电阻应变计

GB/T18159 滑行车类游乐设施通用技术条件

GB/T20306 游乐设施术语

GB/T20737 无损检测通用术语和定义

GB/T20921 机器状态监测与诊断词汇

GB/T33213 无损检测基于光纤传感技术的应力监测方法

GB/T33218 无损检测基于光纤传感技术的设备健康监测方法

GB/T34370 (所有部分) 游乐设施无损检测

GB/T36668.1 游乐设施状态监测与故障诊断

## 第1部分:总则

3 术语和定义 GB/T20306. GB/T20737. GB/T20921. GB/T36668. 1 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 应力检测 stressdetection 使用电阻应变片对游乐设施关键结构部件进行应力测试, 并对应力进行定性定量分析。

3.2 应力状态监测 stressstatemonitoring 采用监测仪器在线监测游乐设施大型框架结构或支承件的应力变化, 当监测的应力值接近控制值时发出报警, 并基于监测数据进行结构疲劳损伤寿命预测。

3.3 损伤诊断 damagediagnosis 利用游乐设施结构的应力响应数据分析结构物理参数的变化, 判断结构损伤状况的过程。

## 4 方法概述

### 4.1 应变片应力检测方法

4.1.1 基本原理将电阻应变片粘贴或焊接在游乐设施关键结构部件上, 应变片敏感栅随着被测结构伸长或缩短, 使得敏感栅电阻值随之变化。电阻应变片的电阻变化率与所测应变成正比, 通过测量电阻应变片的电阻, 可以计算出检测区域的应变。

4.1.2 检测目标使用电阻应变片对游乐设施关键结构部件进行应力检测的目标主要

包括以下 3 个方面：a) 获得游乐设施关键结构部件的应力分布规律和应力集中情况；b) 检验游乐设施关键结构部件的强度；c) 验证游乐设施关键结构部件的设计合理性。

4.1.3 优点和局限性使用电阻应变片进行应力检测主要有以下优点：a) 测量灵敏度与精度高；b) 容易安装；c) 测量范围广；d) 可以测量多种力学信号, 如扭矩、剪切应力、集中应力等。其局限性如下：a) 受电磁干扰, 测量结果易因干扰发生漂移；b) 不适用于长期监测。

4.1.4 干扰因素电磁和无线电频率干扰可能影响应力检测结果, 为防止电磁干扰, 桥盒和应变片之间的连线要用屏蔽线, 并且屏蔽网要做好接地处理。

## 4.2 光纤光栅传感应力监测方法

4.2.1 基本原理将光纤光栅传感器粘贴或焊接在游乐设施的大型框架结构或支承件上, 游乐设施工作时的载荷和外界环境变化将引起其结构应力和温度等物理量发生变化, 导致光纤光栅传感器的光栅周期或有效折射率发生变化, 光纤光栅反射中心波长发生漂移。通过检测光纤光栅传感器中心波长的漂移量, 即可得到被测结构温度和应力等物理量的变化情况。

4.2.2 监测目标光纤光栅传感应力监测是为了监测游乐设施大型框架结构或支承件持续工作期间的应力时间历程曲线。一方面是对出现的异常及时发现并采取补救措施, 另一方面是基于实时监测的应力数据对结构进行损伤诊断分析和寿命预测。

4.2.3 优点和局限性使用光纤光栅传感进行应力状态监测主要有以下优点：

- a) 容量大。可在一根光纤上同时测量几十个点的多种参量变化。
- b) 精度高。不受光源功率波动、光纤微弯效应及耦合损耗等因素影响。
- c) 无零漂。出厂后不需要定期检定, 系统维护成本很低。
- d) 抗电磁干扰。电绝缘材料做成的光纤利用光子传输信息, 避免了电磁场干扰。
- e) 耐久性好。光纤化学性能稳定, 耐酸碱腐蚀能力强, 适合在恶劣环境中使用。
- f) 便于安装。传感器结构简单、尺寸小, 适于各种应用场合, 尤其适合于埋入材料内部构成所谓的智能材料或结构。
- g) 可长周期监测。

其局限性如下：

- a) 点式监测, 一个传感器只能覆盖结构一个测点；

b) 光纤光栅传感器同时受应变和温度变化, 在监测应变时, 应进行温度补偿。

4.2.4 干扰因素光纤光栅传感器存在应变和温度的交叉敏感问题, 单个光纤光栅反射波长的变化难以分辨出应变和温度的变化量。使用光纤光栅传感器进行应力监测时, 应对光纤光栅传感器进行温度补偿。

5 安全要求本章并未列出实施时所有的安全要求, 使用本部分的用户应在实施前建立安全准则。实施过程中的安全要求至少如下:

a) 检测/监测人员应遵守游乐设施现场运行的安全要求, 根据检测/监测地点的要求穿戴防护工作服和佩戴有关防护设备;

b) 检测/监测时, 应注意游乐设施启动及运转时轿厢的移动, 防止人员碰撞及连接电缆和光缆的阻碍;

c) 在进行高空操作时, 应考虑检测/监测人员、设备等坠落因素, 并采取必要的保护措施。

6 人员要求按本部分进行应力检测或应力监测的人员应经过相关专业培训, 同时熟悉游乐设施检验规程。

7 设备和器材要求

7.1 应力检测设备器材应力检测所需仪器设备器材及工具主要包括: 已安装数据采集软件的电脑、电阻应变仪、带线及适配插座的应变片、砂纸、棉纱/棉球、丙酮/乙醇、黏结剂、聚乙烯/四氟乙烯薄膜、游标卡尺和钢卷尺等。

7.2 应力监测设备器材

7.2.1 光纤应力监测硬件系统 (见图 1) 光纤应力监测硬件系统由光纤传感子系统、数据采集子系统和数据传输子系统组成, 包括: 光纤光栅传感器、解调仪、传输光缆、计算机、数据发送模块等单元。其中光纤光栅传感器、解调仪和传输光缆的性能应符合 GB/T33213 的规定。

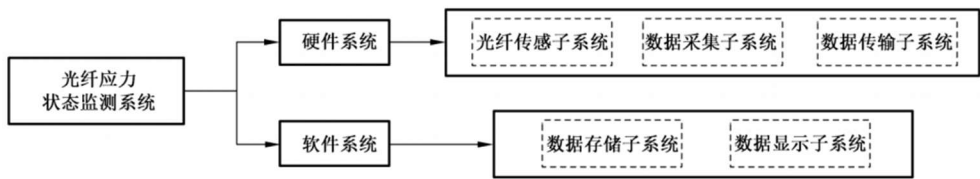


图 1 光纤应力监测系统示意图

7.2.2 光纤应力监测软件系统（见图 1）软件系统应至少包括初始化设置模块、数据显示模块、数据处理模块、数据分析模块。各模块功能如下：

- a) 初始化设置模块:对待测设备的传感器布点编号、测点位置、监测物理量、分辨率、应变系数、工作温度等信息进行配置与管理,对测点部位材料参数进行配置。
- b) 数据显示模块:实现所有测点位置、各测点实时数据和历史数据的曲线显示,并显示各测点历史最大值。
- c) 数据处理模块:对数据进行接收和实时存储,并实现各测点数据查询。
- d) 数据分析模块:对各测点监测数据进行筛选、压缩;对数据进行统计分析;实现基于损伤度的结构健康状态诊断和基于累积损伤理论的结构剩余寿命预测等。

7.3 设备的维护和校准仪器设备应进行周期性的检测和调节来校正仪器的参数,以保证仪器功能。使用前,应仔细检查、校对检测/监测用仪器设备,所备仪器应满足检测/监测项目内容、精度的要求,在校验有效期内,并处于完好状态。使用过程中,如发现仪器设备产生错误或部分变化,也应对仪器功能进行检查和调节,维护工作应按照制定的书面程序进行,并应对每次维护检查的结果进行记录。光纤光栅传感器的校准应按 GB/T33213 的要求进行,其他部件的校准应按仪器制造商规定的方法进行。使用完成后,应按照仪器设备存放管理要求存放仪器设备。

## 8 检测/监测工艺规程

8.1 通用检测/监测工艺规程从事应力检测/监测的单位应按本部分的要求制定通用检测/监测工艺规程,其内容应至少包括如下要素:

- a) 适用范围;
- b) 引用标准、法规;
- c) 实施人员资格;
- d) 检测/监测仪器设备;
- e) 被检测/监测设备与部件的信息:名称、类型、编号、结构形式、尺寸、安装地点、设计与运行参数;
- f) 传感器安装位置及传感器安装方式;
- g) 运行工况;
- h) 检测/监测过程和数据分析解释;
- i) 检测/监测结果的评定;

j) 检测/监测记录、报告和资料存档;

k) 编制、审核和批准人员;

l) 编制日期。

8.2 检测/监测作业指导书或工艺卡对于每个被检测/监测部件或每套被检测/监测设备,应按照 9.1 的要求制定应力检测/监测作业指导书或工艺卡。

## 9 检测/监测方法

### 9.1 检测/监测前的准备

#### 9.1.1 资料审查资料审查应包括下列内容:

- a) 被检测/监测件制造文件资料:产品合格证、质量证明文件、竣工图等,充分了解被检测/监测设备的结构、运动和工作模式等;
- b) 被检测/监测件运行记录资料:日常维护保养记录、开停车情况、运行参数、载荷变化情况以及运行中出现的异常情况;
- c) 检验资料:历次检验与监测报告、以往应力测试数据;
- d) 其他资料:修理和改造的文件资料等。

9.1.2 现场勘查应对现场的安全隐患进行排查,并合理选择仪器设备的安置地点,保证人员和仪器设备的供电与安全问题。

#### 9.1.3 实施条件确定

9.1.3.1 人员联系方式的确定根据现场情况确定实施条件,建立应力检测/监测人员和设备运行控制人员的联络方式。

9.1.3.2 游乐设施运行程序根据设备的类型和实际运转工况确定设备的运行程序。

#### 9.1.4 检测/监测点的确定

- a) 根据设计单位或使用单位的要求确定;
- b) 依据 GB8408,选择相应的重要零部件和关键轴;
- c) 根据结构有限元仿真分析得到的结构应力热点区确定,在不影响检测/监测的情况下,传感器应安装在尽可能靠近应力热点区的部位;
- d) 根据历史损伤数据分析的结果确定;
- e) 应考虑整机的运动特点,最好考察整机的最大应力状态;
- f) 对于滑行车类游乐设施检测/监测点应覆盖 GB/T18159 规定的被测结构。

9.1.5 检测/监测作业指导书或工艺卡的编制对于每个被检测/监测部件或每套被检测/监测设备,应根据使用的仪器和现场实际情况,按照通用检测/监测工艺规程编制应力检测/监测作业指导书或工艺卡,确定应变片或光纤传感器安装的部位和表面条件,同时对被检测/监测设备进行测绘,对检测/监测部位进行编号,画出被检测/监测设备结构示意图。

9.1.6 应变片选型应变片选型要求如下:

- a) 尺寸大小: 1mm、3mm、5mm、10mm 等;
- b) 电阻值: 120 $\Omega$ 、350 $\Omega$ 、1000 $\Omega$  等;
- c) 待测试件材质,涉及不同的温度补偿,如: 钢材约为  $HX10^{-6}/^{\circ}C$ . 铝材约为  $23X10^{-6}/^{\circ}C$  等;
- d) 导线长度: 1m、3m、5m 等;
- e) 轴数: 单轴、双轴、三轴。贴片前,还应对待用的应变片进行外观检查和阻值测量。外观检查可凭肉眼(必要时借助放大镜)进行,重点观察敏感栅有无锈斑和缺陷、是否排列整齐、基底和覆盖层有无损坏以及引线是否完好。阻值测量可采用惠斯顿电桥或数字欧姆表,检查敏感栅是否有断路、短路,并进行阻值分选,对于共用温度补偿的一组应变片,阻值相差不得超过 0.5 $\Omega$ 。同一次测试中采用的应变片,其灵敏系数应相同。

## 9.2 传感器的安装

9.2.1 应力检测传感器的安装应力检测采用电阻应变片,其粘接工艺按 GB/T13992 的规定进行,具体如下:

- a) 贴片前,应对待用的应变片进行外观检查和阻值测量。
- b) 待测表面的清洁:对于金属零件,首先清除表面油漆、氧化层和污垢。
- c) 待测表面的打磨:用细砂纸沿  $45^{\circ}$  交叉方向进行打磨,打磨后粗糙度应达到 3.2 $\mu m$  左右,打磨面积约为应变片面积的 5 倍左右。
- d) 待测表面的清洗:用洁净棉纱或脱脂棉球蘸乙醇或丙酮等易挥发溶剂对贴片部位进行反复擦洗,直至棉纱或棉球上见不到污垢为止。
- e) 应变片的定位:在待测表面上画出贴片的准确部位。
- f) 贴片工艺(见图 2): 粘结剂分常温固化和加热固化两种,一般选用常温固化胶水。贴片过程为:在贴片位置涂抹胶水,用应变片背面将胶水涂匀,用镊子拨动应变片,调整位置和角度。定位后,在应变片上垫一层聚乙烯或四氟乙烯薄膜,用

手指轻轻挤压出多余的胶水和气泡，待胶水初步固化后再松开手指。粘贴好的应变片应保证位置准确、粘接牢固、胶层均匀、无气泡和整洁干净。

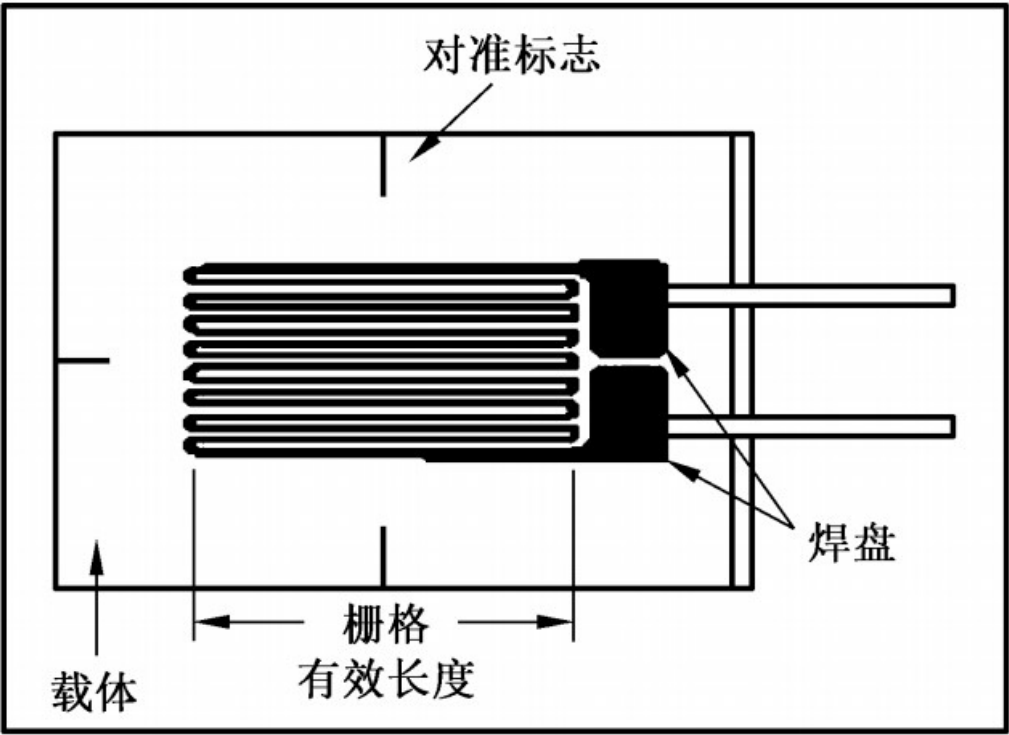


图 2 应变片粘贴结构 7F 意图

- g) 导线的焊接与固定:待胶水固化后,进行导线焊接与固定。常温静态测量可使用双芯多股铜质塑料线做导线,动态测量应使用三芯或四芯屏蔽电缆做导线。应变片和导线间的连接最好通过接线端子,焊点确保无虚焊。导线最好与试件绑扎固定,导线两端应根据测点编号做好标记。
- h) 贴片质量检查包括外观检查、电阻和绝缘电阻测量。外观检查主要观察贴片方位是否正确,应变片有无损伤,粘贴是否牢固和有无气泡等。绝缘电阻测量可以检查有无断路、短路。
- i) 应变片及导线的防护:应变片受潮会降低绝缘电阻和粘接强度,严重时会使敏感栅锈蚀;酸、碱及油类浸入甚至会改变基底和粘结剂的物理性能。为了防止大气中游离水分和雨水、露水的浸入,在特殊环境下防止酸、碱、油等杂质侵入,对已干燥、固化并已焊接好导线的应变片,应立即涂上防护层。常用室温防护剂有凡士



林、蜂蜡、石蜡、炮油和松香的混合物、环氧树脂等。

9.2.2 应力监测传感器的安装应力监测采用光纤光栅传感器，其安装方法按照 GB/T33213 的要求。

9.3 系统初始设置应力检测的初始设置如下:测试前，在设备静止状态下，进行仪器调零。设备停止运行后，卸载到无载应力状态，检查各应变片回零情况，回零良好可进行下一次测试，否则应检查设备连接状态重新测量。应力监测的初始设置如下:将已安装好光纤光栅传感器的监测系统开机预热至系统稳定工作状态，对光纤光栅传感器进行初始参数设置，记录此时的传感器波长。

9.4 检测/监测实施对于应力检测，如设备具有多种工况，应在设备实际运行的每一种工况下分别测试。每种工况连续测试至少 3 次。对于每一种工况,在空载、偏载、满载条件下分别进行测试。对于应力监测，自监测系统调试完成后,监测系统需在设备正常运行期间进行连续、实时监测。

9.5 检测/监测数据分析对于应力检测，应严格记录检测开始时间和结束时间，设备运行工况和应力时程曲线应在检测记录中清晰标识。对于应力监测，监测记录可以按照月度、季度、年度等周期定期编制，监测数据应在设备全生命周期内予以保存。

## 10 检测/监测数据处理方法

10.1 检测数据处理方法检测数据应进行异常值剔除，异常值剔除参考 10.2。

10.2 监测数据处理方法首先将应力监测采集的应力-时间历程数据处理成便于提取循环数的数据，这个过程包括异常值剔除、等值数压缩、峰谷值检测和无效幅值的去除。

- a) 异常值剔除:检测出异常大的值并进行去除;
- b) 等值数压缩:将采样应力-时间历程中，连续相等的数据只保留一个;
- c) 峰谷值检测:将数据中的峰谷值提取出来，为下一步无效幅值去除做准备;
- d) 去除无效幅值:将应力幅值很小的对疲劳影响不显著的数据元素去除。

## 11 评估方法

### 11.1 基于应力数据的安全判定方法

11.1.1 载荷应力计算

载荷应力计算分为：

a) 沿轴向粘贴的应变片的应力计算：

$$\sigma_t = E\epsilon_t$$

式中：

$\sigma_t$  ——施加载荷作用下的测试应力值,单位为帕(Pa)；

$E$  ——弹性模量,单位为帕(Pa)；

$\epsilon_t$  ——应变测量值,无量纲。

b) 应变花的应力计算：

$$\sigma_2 = \frac{E}{2} \left[ \frac{\epsilon_0 + \epsilon_{90}}{1 - \mu} \pm \frac{\sqrt{2\epsilon_0^2 + 2\epsilon_{90}^2 + 4\epsilon_{45}^2 - 4(\epsilon_0 + \epsilon_{90}) \cdot \epsilon_{45}}}{1 + \mu} \right]$$

式中：

$E$  ——弹性模量,单位为帕(Pa)；

$\epsilon_0$ 、 $\epsilon_{45}$ 、 $\epsilon_{90}$  ——所测得的应变花的 3 个方向的应变,无量纲；

$\mu$  ——材料泊松比,无量纲。

11.1.2 测点应力计算

各测点应力值  $\sigma$ ,应为施加载荷作用下的测试应力值  $\sigma_t$  与自重作用下的计算应力  $\sigma_c$  之和,按下式计算：

$$\sigma = \sigma_t + \sigma_c$$

式中：

$\sigma$  ——测点应力值,单位为帕(Pa)；

$\sigma_t$  ——施加载荷作用下的测试应力,单位为帕(Pa)；

$\sigma_c$  ——在自重作用下产生的应力,应由委托单位提供其计算值,单位为帕(Pa)。

11.1.3 安全判据和结论

对于游乐设施结构关键部件各测点应力值应符合 GB 8408 的要求。各测点最大应力值应为载荷作用下监测的最大应力值,需满足如下要求。

$$\sigma_{\max} = \sigma_b / n$$

式中：

$\sigma_{\max}$  ——测点实测最大应力值,单位为帕(Pa)；

$\sigma_b$  ——材料的极限应力,单位为帕(Pa)；

$n$  ——安全系数,满足表 1 的要求。

表 1 安全系数

名称	安全系数
重要的轴、销轴及重要焊缝	>5
一般构件	>3.5(脆性材料 28)

11.2 基于应力的健康状态评估方法游乐设施大型框架结构或支承件结构健康状态评估是基于长期监测应力谱计算疲劳累积损伤。疲劳累积损伤的计算方法按 GB/T33218。对于无限寿命设计的游乐设施应符合 GB8408 中给出的安全系数值，对于有限寿命设计的游乐设施，当循环载荷的最大计算应力大于材料的疲劳极限时，

用疲劳载荷谱计算零部件的使用寿命。对服役年限接近甚至超过使用寿命的结构或部件，应根据监测数据定期进行评估。

12 检维修策略对于应力检测结果，若某结构部件的应力出现异常值，应按如下方法进行检查和维修：

- a) 使用单位自检；
- b) 若自检不能发现问题原因，利用无损检测手段进行探伤，按 GB/T34370 执行；
- c) 若大型框架结构出现问题，或发现轻微裂纹损伤，需进行相应的裂纹修复；
- d) 若形式复杂的结构出现问题，或问题较为严重，需更换部件。通过长期的应力状态监测，若应力出现异常值，排除噪声干扰的因素，需要对监测值异常的结构或部件进行检查，检查维修方法同上，根据异常程度和部件重要性，选择相应的维修策略。

### 13 记录和报告

13.1 记录应按检测/监测工艺规程的要求记录检测/监测数据或信息，至少应包括 10.2 中所列的内容，并按相关法规、标准和（或）合同要求保存所有记录。检测/监测时如遇不可排除因素的外界干扰，如人为干扰、恶劣天气等，应如实记录，并在检测/监测结果中注明。

13.2 报告检测完成或监测到时间节点出具检测/监测报告。报告的内容应根据检测/监测要求制定，至少包括以下要素：

- a) 被检测/监测设备使用单位名称、地址及联系方式；
- b) 被检测/监测设备名称、类型、安装地点、安装日期；
- c) 被检测/监测结构部件的类型、型号、材料参数；
- d) 设备说明书；
- e) 执行标准和（或）参考标准编号；
- f) 检测/监测的日期、时间；
- g) 检测/监测仪器类型（传感器类型、采集仪型号等）；
- h) 传感器安装位置示意图；
- i) 检测/监测数据原始记录及数据处理结果；
- j) 应力分析结果；
- k) 检测/监测人员、报告编写人和审核人签字；
- l) 检测/监测和出具报告的日期。