

中华人民共和国行业标准

港口水工建筑物结构健康监测 技术规范

JTS/T 312—2023

主编单位：中交四航工程研究院有限公司

批准部门：中华人民共和国交通运输部

施行日期：2023年3月1日

人民交通出版社股份有限公司

2023·北京

交通运输部关于发布 《港口水工建筑物结构健康监测技术规范》的公告

2023 年第 6 号

现发布《港口水工建筑物结构健康监测技术规范》(以下简称《规范》)。《规范》为水运工程建设推荐性行业标准,标准代码为 JTS/T 312—2023,自 2023 年 3 月 1 日起施行。

《规范》由交通运输部水运局负责管理和解释,实施过程中具体使用问题的咨询,由主编单位中交四航工程研究院有限公司答复。《规范》文本可在交通运输部政府网站水路运输建设综合管理信息系统“水运工程行业标准”专栏(mwttis.mot.gov.cn/syportal/sybz)查询和下载。

特此公告。

中华人民共和国交通运输部
2023 年 1 月 10 日

制定说明

随着我国港口建设的发展,水工建筑物服役状态已受到广泛重视,对建筑物全寿命周期维护提出更高的要求。结构健康监测具有无损、实时和对港口正常营运影响小等特点,并能及早发现结构健康问题,为建筑物安全服役提供更好的保障。近年来,我国结构健康监测技术取得了长足的进步,在港口水工建筑物的应用逐渐增多,为进一步推广结构健康监测的应用和提高港口运营水平,交通运输部水运局组织相关单位,在归纳、总结我国港口水工建筑物结构健康监测技术实践经验的基础上,经深入调查研究、广泛征求意见、反复修改完善,制定本规范。

本规范共分7章9个附录,并附条文说明,主要内容包括监测内容与方法、结构健康监测、数据采集与处理、系统维护等。

本规范主编单位为中交四航工程研究院有限公司,参编单位为交通运输部天津水运工程科学研究所、中交天津港湾工程研究院有限公司、中交上海三航科学研究所有限公司和中交水运规划设计院有限公司。本规范编写人员分工如下:

- 1 总则:王胜年 熊建波
 - 2 术语:熊建波 方翔
 - 3 基本规定:王永平 苏林王 熊建波 方翔 彭海华
 - 4 监测内容与方法:苏林王 熊建波 方翔 刘梅梅 刘红彪 孙洋波 刘思国
刘现鹏 朱德华 董桂洪
 - 5 结构健康监测:熊建波 方翔 刘梅梅 孙洋波 刘思国 刘红彪 彭海华
李元青 李治学 张强 杨海成 范志宏 周红星
 - 6 数据采集与处理:苏林王 熊建波 范志宏 方翔 李治学 董桂洪
 - 7 系统维护:熊建波 杨海成 方翔
- 附录A:李治学 孙洋波 方翔
附录B:刘梅梅
附录C:刘梅梅
附录D:刘梅梅
附录E:方翔 董桂洪
附录F:杨海成 范志宏
附录G:方翔 熊建波
附录H:董桂洪
附录J:熊建波

本规范于2021年4月29日通过部审,2023年1月10日发布,自2023年3月1日起

施行。

本规范由交通运输部水运局负责管理和解释。各单位在执行过程中发现的问题和意见,请及时函告交通运输部水运局(地址:北京市建国门内大街11号,交通运输部水运局技术管理处,邮政编码:100736)和本规范管理组(地址:广东省广州市前进路157号,中交四航工程研究院有限公司,邮政编码:510230),以便修订时参考。

目 次

1	总则	(1)
2	术语	(2)
3	基本规定	(3)
4	监测内容与方法	(4)
4.1	一般规定	(4)
4.2	安全性和适用性监测	(4)
4.3	耐久性监测	(6)
4.4	环境要素监测	(7)
5	结构健康监测	(9)
5.1	一般规定	(9)
5.2	高桩码头	(10)
5.3	重力式码头	(12)
5.4	板桩码头	(13)
5.5	斜坡码头与浮码头	(15)
5.6	防波堤与护岸	(16)
6	数据采集与处理	(19)
6.1	一般规定	(19)
6.2	数据采集	(19)
6.3	数据传输	(19)
6.4	数据存储和管理	(19)
6.5	数据处理	(20)
7	系统维护	(23)
附录 A	监测设备主要性能指标	(24)
附录 B	静力水准法	(28)
附录 C	卫星导航定位法	(30)
附录 D	全站仪自动监测法	(33)
附录 E	监测数据记录表	(35)
附录 F	基于电流监测的牺牲阳极剩余保护年限预测	(36)
附录 G	基于氯离子渗透监测的钢筋混凝土结构使用年限预测	(37)
附录 H	基于腐蚀锋面监测的钢筋混凝土结构使用年限预测	(39)
附录 J	本规范用词说明	(40)

引用标准名录	(41)
附加说明 本规范主编单位、参编单位、主要起草人、主要审查人、总校人员 和管理组人员名单	(42)
条文说明	(45)

1 总 则

1.0.1 为规范港口水工建筑物结构健康监测的技术要求,做到技术先进、耐久适用、监测可靠和经济合理,制定本规范。

1.0.2 本规范适用于码头、防波堤与护岸等港口水工建筑物服役期内的结构健康监测。

1.0.3 港口水工建筑物结构健康监测除应符合本规范规定外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 结构健康 Structural Health

结构在服役过程中能够实现其预期功能的一种状态。

2.0.2 结构健康监测 Structural Health Monitoring

利用现场的、无损的、实时的方式采集结构与环境信息,分析结构反映的各种特征,获取结构因环境因素、损伤或退化而造成的改变。

2.0.3 监测系统 Monitoring System

为实现建筑物一定监测功能的监测设备和监测软件的集成。

2.0.4 腐蚀锋面 Corrosion Front

氯离子等引起腐蚀的物质在混凝土内部分布中,能使钢筋开始锈蚀的临界值的位置点连成的面。

2.0.5 数据管理系统 Data Manage System

借助操作系统的支持对数据库和系统资源进行统一管理和控制的软件。其主要功能包括数据库的建立、数据定义、数据操作、数据库的运行管理和维护。

3 基本规定

- 3.0.1 港口水工建筑物应根据其重要性和所处环境复杂程度实施结构健康监测。
- 3.0.2 结构健康监测宜与建筑物同步设计、同步实施和同步使用。
- 3.0.3 结构健康监测应进行专项设计,专项设计包括监测目的、监测对象、监测项目、监测精度、数据采集方式与频次、监测系统组成、数据处理和系统维护等内容。
- 3.0.4 监测项目应结合监测目的、对象、结构特点和环境特征等进行选择。对建筑物自身健康状态和监测项目影响较大的环境要素应同步进行监测。
- 3.0.5 监测点的布置应具有代表性,受荷不利和腐蚀严重的部位宜适当增加布置点。
- 3.0.6 监测项目精度应结合具体工程项目合理选择。
- 3.0.7 监测数据采集频次应能反映被监测结构的行为和状态,并应满足结构健康监测数据的应用条件。监测数据采集方式应根据需要选择自动或人工方式。
- 3.0.8 监测系统应包括监测传感器、数据采集与处理设备及其配套的供电、防护辅助设备等硬件系统,数据库管理系统、预警系统和数据分析评估等软件系统。
- 3.0.9 监测系统应考虑建筑物寿命,选用成熟、可靠的硬件和软件产品。
- 3.0.10 不可更换的监测系统硬件应有适度的冗余。传感器应采用长寿命或可更换的产品。
- 3.0.11 监测系统软件应与硬件匹配,具有兼容性、扩展性和良好的用户使用性。
- 3.0.12 监测系统应根据监测要求和现场情况选择合适的数据传输模式。
- 3.0.13 监测系统的安装施工不得降低港口水工建筑物整体性能。
- 3.0.14 港口水工建筑物服役期间应定期对监测系统进行巡视和维护。港口水工建筑物维修、加固或改建时,应对监测系统采取保护措施。
- 3.0.15 监测系统发生变动时,应建立新旧系统的转换关系。

4 监测内容与方法

4.1 一般规定

4.1.1 港口水工建筑物结构健康监测内容应包括安全性和适用性监测、耐久性监测、环境要素监测三个类别。

4.1.2 监测方法应根据监测类别、监测项目及参数、监测设备及其性能、监测频次等确定。

4.2 安全性和适用性监测

4.2.1 港口水工建筑物应根据结构特点进行安全性和适用性监测,监测项目宜包括应变监测、位移与变形监测、裂缝监测、振动监测等。

4.2.2 应变监测应符合下列规定。

4.2.2.1 应变监测宜为三向应变监测,主应力方向明确的部位可设置成单向或双向应变监测。

4.2.2.2 应变监测应选用电阻应变计、振弦式应变计或光纤类应变计等传感器。应变计的选择应考虑建筑物服役期间的环境条件,并应满足下列要求:

(1) 量程与量测范围相适应,应变量测的精度为满量程的0.5%,监测值为满量程的30%~80%;

(2) 监测长期处于潮湿、易腐蚀和高电磁干扰的结构应变时,采用光纤应变计;需要监测动荷载作用下的结构应变时,采用电阻应变计和光纤应变计;

(3) 混凝土构件选择大标距的应变计;应变梯度较大的应力集中区域,选用标距较小的应变计;

(4) 应变计具备温度补偿功能;

(5) 电阻式应变传感器的测量片和补偿片选用同一规格产品,并进行屏蔽绝缘保护,性能指标符合附录A的有关规定;

(6) 振弦式应变传感器通过与之匹配的频率仪进行测量,频率仪的分辨率不大于0.5Hz,性能指标符合附录A的有关规定;

(7) 光纤光栅应变传感器和解调系统各项指标满足监测对象对待测参数的要求,并符合附录A的有关规定。

4.2.2.3 应变监测应采用自动采集的方式,监测频次应每10min不少于1次。

4.2.3 位移与变形监测应符合下列规定。

4.2.3.1 位移与变形监测应包括垂直位移监测、水平位移监测、倾斜和挠度监测。

4.2.3.2 垂直位移、水平位移和倾斜监测应配合进行,并记录与其相关的水文、气象条件和荷载变化情况。各次监测均应采用相同的监测线路和监测方法,并在规定的环境条件下进行。

4.2.3.3 垂直和水平位移监测宜选择静力水准法、卫星导航定位法、全站仪自动监测法、位移计法,并应满足下列要求:

- (1) 采用静力水准法时符合附录 B 的规定;
- (2) 采用卫星导航定位法时符合附录 C 的规定;
- (3) 采用全站仪自动监测法时符合附录 D 的规定;

(4) 结构缝或其他易发生相对变形区域安装位移计进行局部相对变形测量;位移计不与结构发生相对位移,测量位移的方向与建筑物可能发生位移的方向一致。

4.2.3.4 倾斜监测宜采用倾斜传感器直接测量,或采用水平位移与垂直位移监测推算。挠度监测宜采用位移计或挠度计。

4.2.3.5 位移与变形监测设备量程应为测点位移估计值或允许值的 2 倍~3 倍,精度应为测点位移估计值的 1/10。位移计性能指标应符合附录 A 的有关规定。

4.2.3.6 位移与变形监测宜采用自动采集的方式,监测频次应满足下列要求:

(1) 垂直位移与水平位移监测频次第一年每 1 个月不少于 1 次,第二年每 6 个月不少于 1 次,以后每 1 年不少于 1 次,出现异常变位或发生异常情况时增加监测频次,并符合现行行业标准《港口设施维护技术规范》(JTS 310)的有关规定;

(2) 倾斜和挠度监测频次根据倾斜或挠度变化速度确定,与垂直位移监测及水平位移监测频次相协调,发现倾斜增大时及时增加监测频次;

(3) 位移与变形监测初始值的确定结合监测内容、方法、控制精度等因素,并取至少连续监测 3 次的稳定值的平均值作为初始值;

(4) 同时开展位移与变形监测、应变监测时,两者监测频次同步。

4.2.4 裂缝监测应符合下列规定。

4.2.4.1 裂缝监测参数应包括裂缝宽度、长度和深度。

4.2.4.2 裂缝宽度监测宜采用电子裂缝观察仪、振弦式测缝计、应变式裂缝计或光纤类位移计。

4.2.4.3 裂缝宽度监测宜采用自动采集的方式,监测频次应根据裂缝变化速度确定。在裂缝发生初期应每半个月不少于 1 次,裂缝发展趋于稳定后,应每 1 个月不少于 1 次。裂缝发展异常时,应加密监测频次。

4.2.4.4 裂缝长度和深度监测宜根据裂缝宽度的监测变化情况,确定监测方式和频次。

4.2.5 振动监测应符合下列规定。

4.2.5.1 振动监测应包括振动响应监测和振动激励监测。

4.2.5.2 振动监测所用加速度、速度传感器和振动监测记录器性能指标应符合附录 A 的有关规定。

4.2.5.3 振动监测可采用相对测量法或绝对测量法,并应符合现行国家标准《建筑与

桥梁结构监测技术规范》(GB 50982)的有关规定。

4.2.5.4 振动监测应采用自动采集的方式,采样频率应根据不同结构形式和监测目的选择。

4.3 耐久性监测

4.3.1 钢结构耐久性监测项目应包括电位监测、电流监测和涂层监测等。

4.3.2 采取阴极保护的钢结构应实施电位监测,并应符合下列规定。

4.3.2.1 电位监测应配备长效参比电极,并宜采用双参比电极。参比电极性能应符合现行国家标准《船用参比电极技术条件》(GB/T 7387)的有关规定。

4.3.2.2 参比电极及电缆应具有防水性和耐海水腐蚀性。

4.3.2.3 电位监测设备性能应符合附录 A 的有关规定。

4.3.2.4 采用外加电流阴极保护时,电位监测可与外加电流阴极保护中的监测模块共用。

4.3.2.5 电位监测宜采用自动采集的方式,监测频次应每 3 个月不少于 1 次。

4.3.3 采取阴极保护的钢结构宜进行阴极保护电流监测,并应符合下列规定。

4.3.3.1 电流监测应选用对阳极发生电流影响较小的传感器,宜采用霍尔传感器,并应安装在电流回路中。

4.3.3.2 传感器及电缆应具有防水性和耐海水腐蚀性。

4.3.3.3 电流监测设备的量程应与阳极发生电流匹配,性能应符合附录 A 的有关规定。

4.3.3.4 采用外加电流阴极保护时,电流监测可与外加电流阴极保护中的监测模块共用。

4.3.3.5 电流监测应采用自动采集的方式,监测频次应根据阳极发生电流变化情况确定。

4.3.4 采用涂层保护的钢结构宜实施涂层监测,并应符合下列规定。

4.3.4.1 涂层监测应采用交流阻抗法。

4.3.4.2 涂层监测传感器应为三电极体系,并涂覆与钢结构一致的涂层。

4.3.4.3 交流阻抗监测设备应符合附录 A 的有关规定。

4.3.4.4 涂层监测宜采用自动采集的方式,监测频次应每 3 个月不少于 1 次。

4.3.5 混凝土结构耐久性监测项目宜包括氯离子渗透监测、腐蚀锋面监测、钢筋锈蚀监测和冻融监测。

4.3.6 钢筋混凝土氯离子渗透监测应符合下列规定。

4.3.6.1 监测参数应包括氯离子电位和温度。

4.3.6.2 监测传感器应包括参比电极和银/氯化银氯离子探针。参比电极应选用银/氯化银参比电极或二氧化锰参比电极。

4.3.6.3 温度应能反映氯离子探针附近混凝土温度。

4.3.6.4 监测传感器应布置在钢筋混凝土保护层中,且埋设深度不宜低于 2cm。采用

后埋式传感器时,应保证所采集的数据能反映既有混凝土的状态。

4.3.6.5 氯离子渗透监测设备的性能应符合附录 A 的有关规定。

4.3.6.6 氯离子渗透监测宜采用自动采集的方式,监测频次应每 3 个月不少于 1 次。

4.3.7 钢筋混凝土腐蚀锋面监测应符合下列规定。

4.3.7.1 监测参数应包括宏电池电压、宏电池电流和温度。

4.3.7.2 监测传感器应包括阳极、阴极和参比电极。阳极材质宜与结构中钢筋相同,阴极材料应具有惰性,参比电极应选用银/氯化银参比电极或二氧化锰参比电极。

4.3.7.3 温度监测应能反映阳极处混凝土的温度。

4.3.7.4 监测传感器应能监测钢筋混凝土保护层中不少于 4 个不同深度处的参数。采用后埋式传感器应保证所采集的数据能反映既有混凝土的状态。

4.3.7.5 腐蚀锋面监测设备的性能应符合附录 A 的有关规定。

4.3.7.6 腐蚀锋面监测宜采用自动采集的方式,监测频次应每 3 个月不少于 1 次。

4.3.8 钢筋锈蚀监测应符合下列规定。

4.3.8.1 钢筋锈蚀监测参数应包括钢筋腐蚀电位,宜包括钢筋腐蚀速率。

4.3.8.2 钢筋腐蚀电位监测应配备参比电极,采用半电池电位法测量。钢筋腐蚀速率监测应采用包括工作电极、辅助电极和参比电极的传感器,采用线性极化法测量。

4.3.8.3 参比电极应为银/氯化银或二氧化锰参比电极,工作电极应与结构中钢筋同材质,辅助电极应由不锈钢或惰性金属制成。

4.3.8.4 钢筋腐蚀速率传感器应安装在构件最外层受力钢筋上。

4.3.8.5 钢筋腐蚀电位和钢筋腐蚀速率监测设备应符合附录 A 的有关规定。

4.3.8.6 钢筋锈蚀监测宜采用自动采集的方式,监测频次应每 3 个月不少于 1 次。

4.3.9 混凝土冻融监测应符合下列规定。

4.3.9.1 监测参数应包括混凝土内电阻或残余应力,并应同时监测环境温度。

4.3.9.2 监测混凝土内电阻应采用电阻传感器,监测混凝土内残余应力宜采用光纤光栅传感器。传感器布置宜满足监测钢筋混凝土保护层不同深度的要求。

4.3.9.3 监测应根据环境温度,选择在可能出现冻融作用的期间实施,冻融监测宜采用自动采集的方式,监测频次应每天不少于 1 次。

4.4 环境要素监测

4.4.1 环境要素监测宜包括温度监测、湿度监测、水位或潮位监测、水深监测、地下水位监测、土压力监测、孔隙水压力监测和深层水平位移监测等。

4.4.2 温度监测应符合下列规定。

4.4.2.1 长期温度监测时,监测结果应包括日平均温度、日最高温度和日最低温度。

4.4.2.2 温度监测精度应为 0.5℃,温度传感器宜选用监测范围大、精度高、线性化及稳定性好的传感器。

4.4.2.3 温度监测宜采用自动采集的方式,监测频次应每天不少于 5 次。

4.4.2.4 实施因温度变化对结果影响较大的监测项目时,所用传感器应具有温度监测

功能,或在传感器附近安装温度传感器,且两者监测频次应同步。

4.4.3 湿度监测应符合下列规定。

4.4.3.1 湿度应用相对湿度表示,湿度监测精度宜为2%RH。湿度计监测范围应为12%RH~99%RH。

4.4.3.2 湿度传感器应选择响应时间短、温度系数小、稳定性好和湿滞后作用低的产品。

4.4.3.3 长期湿度监测时,监测结果应包括日平均湿度、日最高湿度和日最低湿度。

4.4.3.4 湿度监测宜采用自动采集的方式,监测频次应与温度监测同步。

4.4.4 水位或潮位监测应符合下列规定。

4.4.4.1 水位监测应符合现行行业标准《水运工程测量规范》(JTS 131)的有关规定。

4.4.4.2 潮位监测应符合现行行业标准《港口与航道水文规范》(JTS 145)的有关规定。

4.4.4.3 水位或潮位监测宜采用自动采集的方式。

4.4.5 水深监测应符合现行行业标准《水运工程测量规范》(JTS 131)的有关规定,并宜采用自动采集的方式。

4.4.6 地下水位、土压力、孔隙水压力和深层水平位移监测应符合现行行业标准《水运工程地基基础试验检测技术规程》(JTS 237)的有关规定,监测宜采用自动采集的方式,监测频次应每天不少于1次。

5 结构健康监测

5.1 一般规定

5.1.1 港口水工建筑物结构健康监测的类别、项目和监测点的布置应根据港口水工建筑物的形式、结构特点和所处环境条件综合确定。

5.1.2 安全性和适用性监测前应对结构和基础的内力分布以及动力特性做全面分析,明确结构和地基静、动力反应最不利的部位,确定监测项目。

5.1.3 结构耐久性监测前应评估建筑物腐蚀风险和导致腐蚀的主要因素,确定监测项目。

5.1.4 监测点的布置应符合下列规定。

5.1.4.1 监测点应结合建筑物结构形式和施工监控实施情况进行布置。

5.1.4.2 应变监测点应布置在构件受力不利的位置和构件的控制断面上。

5.1.4.3 垂直位移监测点应设置在结构缝两侧、不同结构分界处两侧、不同基础或地基交接处两侧、建筑物周边线内侧和墩式结构的角点处;水平位移监测点应设置在建筑物周边线和转角点、纵横轴线上、沉降缝或伸缩缝两侧、基础或断面发生变化的两侧;倾斜监测点应沿竖直线在顶部和底部上下对应布置,对于分层倾斜,应按分层部位上下对应布置;挠度监测点应布置在挠度最大处。

5.1.4.4 裂缝监测应选择对构件影响大的活动裂缝或发展趋势不确定的裂缝进行,监测点应至少布置在裂缝的最宽处和末端,监测点数量应能反映开裂程度、裂缝特征及变化趋势。

5.1.4.5 振动监测点宜根据码头结构动力计算结果、振型特点和所需监测振型阶数综合确定,应布置在主要振型振幅最大或较大部位,并避开节点位置。

5.1.4.6 采用阴极保护的钢结构电位监测点在水下区应能反映不同部位的电位差异,在泥下区宜根据现场可操作性布置。钢结构电流监测点的布置应能反映典型位置阳极的消耗情况。钢结构涂层监测点应布置在大气区、浪溅区和水位变动区等部位。

5.1.4.7 钢筋混凝土耐久性监测点应布置于浪溅区和水位变动区内的各类构件。冻融监测点应布置于水位变动区的各类构件。

5.1.4.8 温度、湿度监测点布置应反映建筑物中温度场、湿度场的变化规律。

5.1.4.9 水位或潮位的监测点布置应根据水域特点和工程需要确定。

5.1.5 结构健康监测系统的搭建应包括传感器的安装和数据采集与处理设备的安装与调试。

5.1.6 传感器的安装应符合下列规定。

- 5.1.6.1 安装前应确认传感器的有效性。
- 5.1.6.2 安装应牢固。长期监测时,宜采用焊接或栓接方式安装。
- 5.1.6.3 传感器安装位置应满足设计及产品技术要求。安装后应记录安装位置,钢筋混凝土氯离子渗透监测、腐蚀锋面监测的传感器还应记录埋设深度。
- 5.1.6.4 安装在构件表面的传感器,安装后应做好传感器的防护。
- 5.1.6.5 预埋式传感器在混凝土浇筑前应及时检查传感器的有效性,出现问题时应及时更换。混凝土振捣点位应避开传感器安装位置合理距离。
- 5.1.6.6 后埋式传感器安装对建筑物造成的破损,应在安装后及时修补。
- 5.1.6.7 不同类型传感器的电缆宜分类集中引出保护,无电子识别编号的传感器应在电缆上标注传感器编号。
- 5.1.6.8 传感器电缆走线时,整条电缆应得到有效的保护,保护措施根据现场合理选择,电缆保护管宜选用镀锌钢材或PVC材质。
- 5.1.6.9 安装后应及时对传感器及电缆进行检查,发现问题应采取补救措施。
- 5.1.6.10 安装完成后,应及时进行调试并测定初始值。
- 5.1.7 数据采集与处理设备安装与调试应符合下列规定。
- 5.1.7.1 数据采集与处理设备应与传感器性能匹配,满足被测物理量的要求。
- 5.1.7.2 数据采集与处理设备安装位置选择应综合考虑设备与传感器之间电缆长度的影响,以及数据采集设备维护的便利性等因素。数据采集设备与传感器应建立明确的拓扑关系。
- 5.1.7.3 数据采集与处理设备应有不间断电源保障,并确保各种天气条件下的使用性。
- 5.1.7.4 数据采集与处理设备安装后应进行调试。调试完后,应设置标识,并采取必要的防护措施。

5.2 高桩码头

5.2.1 高桩码头的结构健康监测项目应根据结构形式和特点按表5.2.1选择。

表5.2.1 高桩码头结构健康监测项目

监测类别	监测项目	梁板式	无梁板式	墩式	多层式	浮式	柔性靠船桩式	
安全性和适用性	应变监测	●	●	●	●	△	●	
	位移与变形监测	垂直	●	●	●	●	△	○
		水平	●	●	●	●	△	●
		倾斜	●	●	●	●	△	○
		挠度	○	○	○	○	—	—
	裂缝监测	●	●	●	●	○	—	
振动监测	△	△	△	△	△	△		

续表 5.2.1

监测类别	监测项目		梁板式	无梁板式	墩式	多层式	浮式	柔性靠船 桩式
耐久性	钢结构	电位监测	●	●	●	●	●	●
		电流监测	○	○	○	○	○	○
		涂层监测	△	△	△	△	△	△
	混凝土结构	氯离子渗透监测	●	●	●	●	●	—
		腐蚀锋面监测	●	●	●	●	●	—
		钢筋锈蚀监测	●	●	●	●	●	—
		冻融监测	○	○	○	○	○	—
环境要素	温度、湿度监测		●	●	●	●	●	●
	水位或潮位监测		●	●	●	●	●	●
	水深监测		●	●	●	●	●	●

注:①●为应监测项,○为宜监测项,△为可监测项;

②冻融监测仅适用于受冻地区;

③氯离子渗透监测仅适用于海港高桩码头。

5.2.2 监测点布置应符合下列规定。

5.2.2.1 应变监测宜选择应力较大的相邻3个排架作为监测对象,重点监测梁、板、桩等关键构件,应变监测点布置应满足下列要求:

- (1) 梁和板的监测点布置在内力较大部位;
- (2) 桩的监测点结合受力情况和传感器安装条件进行布置;
- (3) 同一类型构件监测点数量不少于10个。

5.2.2.2 位移与变形监测点应根据最不利荷载组合下梁、板、桩等关键构件的挠度、位移和倾角,选择变形、位移和倾角最大或较大的位置。垂直、水平、倾斜和挠度监测点数量分别不应少于4个。

5.2.2.3 结构振动监测点数量不应少于6个。

5.2.2.4 钢管桩耐久性监测点布置应满足下列要求:

- (1) 电位监测选择建筑物钢管桩总数的10%实施,且不少于5根;
- (2) 选择离阳极最近和最远的钢管桩实施电位监测;
- (3) 实施电位监测的钢管桩,电位监测点覆盖至少3个不同高程,三个高程分别为泥面高程 h_1 ,设计低水位以下约1.0m处高程 h_2 ,泥面高程与设计低水位之间的高程 $h_3 = (h_1 + h_2)/2$;
- (4) 牺牲阳极阴极保护电流监测点覆盖不同高程的阳极,监测点数量不少于阳极总数的5%,且不少于5个。

5.2.2.5 混凝土耐久性监测的钢筋混凝土氯离子渗透、腐蚀锋面和钢筋锈蚀监测点布置应满足下列要求:

- (1) 沿码头前沿线均匀设置监测断面,监测断面与码头前沿线垂直,数量不少于3个,码头端部适当增加监测断面,墩式码头各个墩均设置不少于1个监测断面;

(2) 每个监测断面在梁、板、桩帽等不同混凝土构件中各设置不少于 1 个监测点,同类构件制作方式不同,对应增加监测点,同一构件包含多种腐蚀条件时,在各腐蚀条件对应的部位均设置监测点;

(3) 各监测点均包含氯离子渗透、腐蚀锋面和钢筋锈蚀的监测。

5.2.2.6 混凝土冻融监测点应包括水位变动区中不同类型构件,每类构件不宜少于 2 个。

5.2.2.7 温度和湿度监测点分别不应少于 3 个。

5.2.2.8 水位或潮位监测点不应少于 1 个。

5.2.2.9 水深监测点应根据码头港池区域确定,数量不应少于 3 个。

5.3 重力式码头

5.3.1 重力式码头的结构健康监测项目应根据结构特点按表 5.3.1 选择。

表 5.3.1 重力式码头结构健康监测项目

监测类别	监测项目		重力式码头
安全性和适用性	应变监测		△
	位移与变形监测	垂直	●
		水平	●
		倾斜	●
	裂缝监测		●
振动监测		△	
耐久性	混凝土结构	氯离子渗透监测	○
		腐蚀锋面监测	○
		钢筋锈蚀监测	○
		冻融监测	△
环境要素	温度、湿度监测		●
	水位或潮位监测		●
	水深监测		●
	碇后地下水位监测		△
	土压力监测		△
	孔隙水压力监测		△

注:①●为应监测项,○为宜监测项,△为可监测项;

②冻融监测仅适用于受冻地区;

③氯离子渗透监测仅适用于海港重力式码头。

5.3.2 监测点布置应符合下列规定。

5.3.2.1 应变监测点应根据码头结构应力计算结果、堆载、结构外形等综合确定,监测点数量不宜少于 2 个。

5.3.2.2 位移与变形监测点布置应满足下列要求:

(1) 监测点的选择避开障碍物;

(2) 码头垂直、水平和倾斜监测点布置在结构缝两侧,每个分段分别不少于4个。

5.3.2.3 振动监测点数量不应少于6个。

5.3.2.4 混凝土耐久性监测的钢筋混凝土氯离子渗透、腐蚀锋面和钢筋锈蚀监测点布置应满足下列要求:

(1) 沿码头前沿线均匀设置监测断面,监测断面与码头前沿线垂直,数量不少于3个,码头端部适当增加监测断面,墩式码头各个墩均设置不少于1个监测断面;

(2) 每个监测断面在胸墙、梁、板等不同混凝土构件中分别设置不少于1个监测点,同类构件制作方式不同,对应增加监测点,同一构件包含多种腐蚀条件时,在各腐蚀条件对应的部位均设置监测点;

(3) 各监测点均包含氯离子渗透、腐蚀锋面和钢筋锈蚀的监测。

5.3.2.5 混凝土耐久性监测的冻融监测点应包括水位变动区中不同类型构件,每类构件不宜少于2个。

5.3.2.6 温度和湿度监测点分别不应少于3个。

5.3.2.7 堆载较大或堆载变化幅度较大的重力式码头,墙后土压力、基底孔隙水压力或墙后地下水位监测断面的选择应具有代表性,且不应少于3个。每个监测断面下,墙后土压力每层土监测点不应少于1个,且宜布置在各层土的中部;土层厚度大于3m时,每层土的监测点总数不应少于2个;应力变化较大的土层,监测点应加密;基底孔隙水压力或墙后地下水位监测点不应少于1个。

5.4 板桩码头

5.4.1 板桩码头的结构健康监测项目应根据结构形式和特点按表5.4.1选择。

表5.4.1 板桩码头结构健康监测项目

监测类别	监测项目		无锚板桩	单锚或多锚板桩	斜拉桩式板桩	遮帘式或半遮帘板桩	卸荷式板桩
安全性和适用性	应变监测		○	●	○	●	●
	位移与变形监测	垂直	●	●	●	●	●
		水平	●	●	●	●	●
		倾斜	●	●	●	●	●
	裂缝监测		●	●	●	●	●
振动监测		△	△	△	△	△	
耐久性	钢结构	电位监测	●	●	●	●	●
		电流监测	○	○	○	○	○
		涂层监测	△	△	△	△	△
	混凝土结构	氯离子渗透监测	●	●	●	●	●
		腐蚀锋面监测	●	●	●	●	●
		钢筋锈蚀监测	●	●	●	●	●
		冻融监测	△	△	△	△	△

续表 5.4.1

监测类别	监测项目	无锚板桩	单锚或多锚板桩	斜拉桩式板桩	遮帘式或半遮帘板桩	卸荷式板桩
环境要素	温度、湿度监测	●	●	●	●	●
	水位或潮位监测	●	●	●	●	●
	水深监测	●	●	●	●	●
	雨后地下水位监测	○	○	○	○	○
	土压力监测	○	○	○	○	○
	孔隙水压力监测	△	△	△	△	△
	深层水平位移监测	○	○	○	●	●

注:①●为应监测项,○为宜监测项,△为可监测项;

②应变监测包含前墙应变监测和拉杆应变监测;

③冻融监测仅适用于受冻地区;

④氯离子渗透监测仅适用于海港板桩码头。

5.4.2 监测点布置应符合下列规定。

5.4.2.1 应变监测应选择受力较大的断面作为监测对象,重点监测前墙、拉杆等关键构件,应变监测点布置应满足下列要求:

(1) 监测点布置在内力较大部位;

(2) 前墙应变监测不少于5个断面,每断面监测点结合受力情况和传感器安装条件进行布置,且不少于2个;

(3) 拉杆应变监测数量不少于拉杆总数的3%,且不少于5根。

5.4.2.2 位移与变形监测点应选择位移和倾角最大或较大的位置进行布置。垂直位移、水平位移和倾斜监测点数量分别不应少于4个。

5.4.2.3 振动监测点数量不应少于6个。

5.4.2.4 前墙为钢板桩时,钢板桩耐久性监测应满足下列要求:

(1) 电位监测选择钢板桩总数的1%实施,且不少于5根;

(2) 选择前墙迎水面中央处和边缘处的钢板桩实施电位监测,条件允许时,增加前墙背水面远离中央处的钢板桩实施电位监测;

(3) 同一钢板桩前墙迎水面的电位监测点覆盖至少3个不同高程,3个高程分别为泥面高程 h_1 ,设计低水位以下约1.0m处高程 h_2 ,泥面高程与设计低水位之间的高程 $h_3 = (h_1 + h_2)/2$;

(4) 钢板桩电流监测点覆盖板桩中央处和边缘处的阳极以及不同高程的阳极;数量不少于阳极总数量的5%,且不少于5个。

5.4.2.5 混凝土耐久性监测中的氯离子渗透、腐蚀锋面和钢筋锈蚀监测点布置应满足下列要求:

(1) 沿码头前沿线均匀设置监测断面,监测断面与码头前沿线垂直,数量不少于3个,码头端部适当增加监测断面;

(2) 每个监测断面在不同混凝土构件中分别设置不少于1个监测点,同类构件制作

方式不同时相应增加监测点,同一构件包含多种腐蚀条件时,在各腐蚀条件对应的部位均设置监测点;

(3)各监测点均包含氯离子渗透、腐蚀锋面和钢筋锈蚀的监测。

5.4.2.6 混凝土耐久性监测的冻融监测点应包括水位变动区中不同类型构件,每类构件不宜少于2个。

5.4.2.7 温度和湿度监测点分别不应少于3个。

5.4.2.8 水位或潮位监测点不宜少于1个,相邻泊位设有监测点时可共用监测数据。

5.4.2.9 水深监测点的位置和数量应覆盖码头前沿水域。

5.4.2.10 墙后地下水位监测宜覆盖码头中部和端部,选择不少于3个断面,每断面布置不少于1个监测点。

5.4.2.11 土压力监测点的位置和数量宜与前墙应变监测点的位置和数量对应。

5.4.2.12 孔隙水压力监测点宜根据码头平面尺寸布置,且不少于1个。

5.4.2.13 深层水平位移监测点应根据土层分布布置,每层不少于1个。

5.5 斜坡码头与浮码头

5.5.1 斜坡码头与浮码头的结构健康监测项目应根据结构特点按表5.5.1选择。

表5.5.1 斜坡码头与浮码头结构健康监测项目

监测类别	监测项目		斜坡码头	浮码头
安全性和适用性	应变监测		●	●
	位移与变形监测	垂直	●	○
		水平	●	○
		倾斜	○	○
裂缝监测		△	△	
耐久性	钢结构	电位监测	○	○
		电流监测	○	○
		涂层监测	○	○
	混凝土结构	腐蚀锋面监测	○	○
		钢筋锈蚀监测	○	○
		冻融监测	△	△
环境要素	温度、湿度监测		●	●
	水位或潮位监测		●	●
	水深监测		●	●
	土压力监测		○	△
	孔隙水压力监测		○	△

注:①●为应监测项,○为宜监测项,△为可监测项;

②冻融监测仅适用于受冻地区。

5.5.2 监测点布置应符合下列规定。

5.5.2.1 应变监测点宜布置在结构荷载效应最大或较大的位置,重点监测桩、重力式

桥墩、桥台、挡土结构、架空斜坡道和引桥等关键部位,监测点分别不应少于2个。堆载较大或变化幅度较大的斜坡码头,宜对土压力或基底孔隙水压力进行监测,测点分别不应少于2个。

5.5.2.2 支撑墩、桥台等构件的垂直位移和倾斜监测的测点应全覆盖。坡面的垂直位移、水平位移等监测点应根据荷载情况和影响码头结构整体稳定的部位综合确定,监测点分别不应少于3个。

5.5.2.3 趸船等钢结构保护电位监测点应覆盖结构两端与中间位置,监测点不应少于3个。钢引桥等钢结构涂层监测点应覆盖结构底部和顶部,监测点不宜少于3个。

5.5.2.4 钢筋混凝土墩、梁和板宜进行腐蚀锋面监测和钢筋锈蚀监测,墩的监测点宜设置在设计高水位以上和平均水位附近,梁、板的监测点宜设置在构件底部中央,同类构件监测点不宜少于3个。

5.5.2.5 温度和湿度监测应沿码头方向设置不少于3个监测断面,监测断面与码头前沿线垂直,每个监测断面宜在坡道、趸船上设置监测点,且分别不少于1个。

5.6 防波堤与护岸

5.6.1 防波堤与护岸的结构健康监测项目应根据结构形式和特点按表5.6.1选择。

表5.6.1 防波堤与护岸结构健康监测项目

监测类别	监测项目		防波堤		护岸	
			直立式	斜坡式	直立式	斜坡式
安全性和通用性	位移与变形监测	垂直	●	●	●	●
		水平	●	●	●	●
		倾斜	△	—	△	—
耐久性	钢结构	电位监测	○	—	○	—
		涂层监测	○	—	○	—
	混凝土结构	氯离子渗透监测	△	△	△	△
		腐蚀锋面监测	△	△	△	△
		钢筋锈蚀监测	△	△	△	△
		冻融监测	△	△	△	△
环境要素	温度、湿度监测		●	○	●	○
	水位或潮位监测		△	△	○	○
	水深监测		△	△	○	○
	地下水位监测		—	—	○	○
	土压力监测		—	△	△	△
	孔隙水压力监测		—	△	—	△
	深层水平位移监测		—	—	○	○

注:①●为应监测项,○为宜监测项,△为可监测项;

②冻融监测仅适用于受冻地区;

③氯离子渗透监测仅适用于海港防波堤与护岸。

5.6.2 监测点布置应符合下列规定。

5.6.2.1 位移与变形监测点布置应满足下列要求：

(1) 垂直位移监测选择位移和变形较大的位置设置监测断面, 监测断面间距不大于 500m, 且监测断面不少于 3 个, 每个断面在结构顶部和平台处布置监测点;

(2) 水平位移监测选择位移和变形较大的位置设置监测断面, 监测断面间距不大于 500m, 且监测断面不少于 3 个, 每个断面在中心、两侧平台及坡脚处布置监测点;

(3) 倾斜监测选择倾斜较大的位置设置监测断面, 监测断面间距不大于 500m, 且监测断面不少于 3 个, 每个断面在结构立面顶部布置监测点。

5.6.2.2 钢结构耐久性监测点布置应满足下列要求：

(1) 电位监测不少于 3 个断面;

(2) 每个断面的电位监测点布置至少 3 个不同高程, 3 个高程分别为泥面高程 h_1 , 设计低水位以下约 1.0m 处高程 h_2 , 泥面高程与设计低水位之间的高程 $h_3 = (h_1 + h_2) / 2$ 。

5.6.2.3 混凝土耐久性监测中的氯离子渗透、腐蚀锋面和钢筋锈蚀监测应沿防波堤或护岸走向选取至少 3 个监测断面, 每个监测断面应与防波堤或护岸走向垂直, 并应在不同腐蚀条件对应部位中分别布置不少于 1 个监测点, 各监测点均包括氯离子渗透、腐蚀锋面和钢筋锈蚀的监测。

5.6.2.4 混凝土冻融监测点应设置在水位变动区, 且不宜少于 2 个。

5.6.2.5 温度和湿度监测点应沿防波堤或护岸走向布置, 监测点数量分别不应少于 3 个。

5.6.2.6 水位或潮位监测点布置应满足下列要求：

(1) 防波堤水位监测不少于 3 个断面, 每个断面在外侧和内侧分别设置不少于 1 个监测点;

(2) 护岸水位监测分别监测护岸结构前方水位和后方地下水位, 分别不少于 3 个监测点。

5.6.2.7 水深监测点布置应满足下列要求：

(1) 防波堤水深监测选择水深和水深变化较大的位置, 设置不少于 3 个断面, 每个断面在外侧和内侧分别设置不少于 1 个监测点;

(2) 护岸水深监测选择水深和水深变化较大的位置, 布置在护岸结构前方, 监测点不少于 3 个。

5.6.2.8 地下水位监测点应布置于护岸后方回填土体内, 监测点不应少于 3 个。

5.6.2.9 土压力监测点布置应满足下列要求：

(1) 斜坡式防波堤或护岸土压力监测选择代表性和最危险的位置, 不少于 3 个断面, 布置在断面中心处; 自防波堤或护岸结构底面向下每一土层不少于 1 个监测点, 土层较厚时, 适当增加监测点;

(2) 直立式护岸土压力监测选择代表性和最危险的位置, 不少于 3 个断面, 监测点布置在护岸结构与后方土体界面位置; 自地面向下每一土层不少于 1 个监测点, 土层较厚时, 适当增加监测点。

5.6.2.10 孔隙水压力监测应选择代表性和最危险的位置,不少于3个断面,布置在断面中心处。每个断面沿深度方向布置监测点,间距宜取2m~4m,且每一土层不少于1个监测点。

5.6.2.11 深层水平位移监测点应根据土层分布设置,每层不应少于1个。

6 数据采集与处理

6.1 一般规定

6.1.1 结构健康监测系统的信息采集、数据传输、数据存储和管理等功能应协调。

6.1.2 结构健康监测系统的数据处理应针对原始数据进行数据筛选和运算分析,并应用于结构预警和健康评估。

6.2 数据采集

6.2.1 数据需要做相关分析时,所有相关数据宜同步采集。不能同步采集时,可选择伪同步采集或异步采集。

6.2.2 采集的数据宜采用国际单位制,数据记录表宜符合附录 E 的规定。

6.3 数据传输

6.3.1 数据传输应具有对各种数据予以接收、交换和传输的能力。数据传输应保证其可靠性、高效性和传输质量,并应符合下列规定。

6.3.1.1 历史数据均值有效数字位数不统一时,应与最多有效数字位数一致。

6.3.1.2 采集得到的数据和历史数据的差值应在一定范围内,可根据具体情况设定阈值,超过阈值时,应检查系统的运行状态。

6.3.2 数据传输方式的选择应因地制宜,综合考虑数据传输距离、建筑物特点和现场条件、网络覆盖状况、已有的通信设施、实施费用等因素,选择有线、无线或两种传输方式组合。

6.3.3 采用有线传输数据时,宜利用已有的光纤通信网或部门级局域网等数据传输线路,设置必要的中继器或转发器,选取适当的传输介质;同时应充分利用现场数据采集器的接口。

6.3.4 采用无线传输数据时,应根据工程现场运营的网络、现场实际情况选择合适的无线传输方式。

6.3.5 数据传输应具有备用机制。

6.4 数据存储和管理

6.4.1 数据的存储与管理应以工程项目为单位建立数据管理系统。

6.4.2 数据库的设计应遵循安全性、可兼容性、标准性和经济性的原则,并应具备数据的共享性、数据结构的整体性、数据库与应用系统的统一性。

6.4.3 数据库管理系统应具备监测设备管理、监测信息管理、结构模型信息管理、数据转储管理、用户管理、安全管理等功能。

6.4.4 数据库管理系统的选择应考虑下列因素：

- (1) 系统支持对海量数据的高效管理机制；
- (2) 异常情况下的容错功能；
- (3) 系统恢复功能。

6.4.5 数据库管理系统的运行应符合下列规定。

6.4.5.1 数据库管理系统应处于安全的物理环境。对数据库管理系统资源的处理应限定在可控制的访问设备内。

6.4.5.2 数据库管理系统正式应用前应进行试运行操作,包括功能测试和性能测试。

6.5 数据处理

6.5.1 监测数据处理前,应正确判断粗差、系统误差、偶然误差,剔除由监测系统自身引起的异常数据,并应针对健康监测数据的异常查明原因,对设备、方法、精度和周期、预警值等提出改进意见。

6.5.2 数据处理应包括预警和评估。

6.5.3 港口水工建筑物结构健康监测预警应符合下列规定。

6.5.3.1 预警内容应包括预警级别、报警传感器编号和位置、报警监测值和预警值。

6.5.3.2 预警应设置黄色和红色两级。

6.5.3.3 各类监测变量预警值设定宜满足下列要求：

(1) 安全性和适用性监测项目大于0.8倍设计值时,进行黄色预警;大于设计值或一个月发现10次以上黄色预警时,进行红色预警;

(2) 耐久性监测项目大于0.8倍设计值时,进行黄色预警;大于设计值时,进行红色预警;

(3) 环境要素监测项目大于0.8倍设计值时,进行黄色预警;大于设计值时,进行红色预警。

6.5.3.4 出现黄色预警应开展健康监测评估;出现红色预警应查明报警原因,采取检查、应急管理确保建筑物安全运营的措施,并按现行行业标准《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》(JTS 304)的有关规定及时进行专项检测评估。

6.5.4 结构健康评估应符合下列规定。

6.5.4.1 结构健康应按安全性、适用性和耐久性分类评估。

6.5.4.2 采用专用软件进行结构健康评估时,评估软件应具备自动评估的功能。

6.5.4.3 监测数据应及时整理与分析,绘制监测物理量过程线图、各监测物理量在时间和空间上的分布特征图、各物理量之间的相关关系图。

6.5.4.4 对建筑物结构健康评估每年不应少于1次。

6.5.5 结构安全性和适用性健康评估应符合下列规定。

6.5.5.1 结构安全性监测数据分析与评估,应以现场调查和监测结果为依据,监测数

据不完整时,应进行补充检测,并应根据承载能力极限状态验算的结果,按表 6.5.5-1 进行等级划分及处理。

表 6.5.5-1 港口水工建筑物安全性评估分级标准及处理要求

等级	分级标准	处理要求
A	安全性符合国家有关标准要求,具有足够的承载能力	不必采取措施
B	安全性略低于国家有关标准要求,尚不显著影响承载能力	宜加强检测监测,视情况采取维护措施
C	安全性不符合国家有关标准要求,显著影响承载能力	及时进行修复、补强,视条件和要求恢复到 A 级或 B 级标准
D	安全性严重不符合国家有关标准要求,已严重影响承载能力	立即进行修复、补强,视条件和要求恢复到 B 级标准或报废

6.5.5.2 结构适用性监测数据分析与评估,应以现场调查和监测结果为依据,监测数据不完整时,应进行补充检测,并应根据正常使用极限状态验算的结果,按表 6.5.5-2 进行等级划分及处理。

表 6.5.5-2 港口水工建筑物适用性评估分级标准及处理要求

等级	分级标准	处理要求
A	建筑物整体完好,变形、位移均在设计允许范围内	不必采取措施
B	建筑物整体完好,变形、位移略超出设计允许范围,但不影响正常使用	宜加强检测监测,视情况采取维护措施
C	建筑物整体破损明显,变形、位移明显超出设计允许范围,影响正常使用	及时进行修复、补强,视条件和要求恢复到 A 级或 B 级标准
D	建筑物整体破损严重,变形、位移过大,显著影响安全性和整体使用功能	立即进行修复、补强,视条件和要求恢复到 B 级标准或报废

6.5.6 耐久性监测数据分析与评估应符合下列规定。

6.5.6.1 钢结构牺牲阳极阴极保护效果评估应结合电位监测结果和电流监测分析,按表 6.5.6-1 进行等级划分及处理。

表 6.5.6-1 牺牲阳极阴极保护效果评估分级标准及处理要求

等级	分级标准	处理要求
A	电位在 $-1.10V \sim -0.85V$ 之间,阳极剩余保护年限满足剩余设计保护年限要求	不必采取措施
B	电位在 $-1.10V \sim -0.85V$ 之间,阳极剩余保护年限不满足剩余设计保护年限要求	查明原因并及时采取措施
	电位在 $-0.85V \sim \varphi_0$ 之间	
C	电位为 φ_0	查明原因并立即采取措施

注:①电位为相对于 Cu/饱和 $CuSO_4$ 参比电极的电位;

② φ_0 为钢结构的自然腐蚀电位;

③阳极剩余保护年限预测应符合附录 F 的规定。

6.5.6.2 钢结构外加电流阴极保护效果评估应根据电位监测结果,按表 6.5.6-2 进行等级划分及处理。

表 6.5.6-2 外加电流阴极保护效果评估分级标准及处理要求

等级	分级标准	处理要求
A	电位在 $-1.10\text{V} \sim -0.85\text{V}$ 之间	不必采取措施
B	电位在 $-0.85\text{V} \sim \varphi_0$ 之间	查明原因并及时采取措施
C	电位为 φ_0	查明原因并立即采取措施

注:①电位为相对于 Cu/饱和 CuSO_4 参比电极的电位;

② φ_0 为钢结构的自然腐蚀电位。

6.5.6.3 钢结构涂层保护效果评估应根据阻抗监测结果,按表 6.5.6-3 进行等级划分及处理。

表 6.5.6-3 涂层保护效果评估分级标准及处理要求

等级	分级标准	处理要求
A	阻抗值大于 6000Ω	不必采取措施
B	阻抗值在 $200\Omega \sim 6000\Omega$ 之间	及时开展专项检测
C	阻抗值小于 200Ω	立即开展专项检测和修补

6.5.6.4 钢筋混凝土结构使用年限评估应根据氯离子渗透监测或腐蚀锋面监测数据进行预测,并按表 6.5.6-4 进行等级划分及处理。

表 6.5.6-4 钢筋混凝土结构使用年限评估分级标准及处理要求

等级	分级标准	处理要求
A	预测的使用年限不小于设计使用年限的 125%	不必采取措施
B	预测的使用年限小于设计使用年限的 125%,但不小于设计使用年限	及时开展专项检测
C	预测的使用年限小于设计使用年限	立即开展专项检测

注:①采用氯离子渗透监测方法预测使用年限应符合附录 C 的规定;

②采用腐蚀锋面监测方法预测使用年限应符合附录 H 的规定;

③采用上述方法预测使用年限值不一致时,取小值。

6.5.6.5 混凝土中钢筋锈蚀状态评估应根据钢筋腐蚀电位的监测结果,按表 6.5.6-5 进行等级划分及处理。

表 6.5.6-5 钢筋锈蚀状态评估分级标准及处理要求

等级	分级标准	处理要求
A	钢筋腐蚀电位大于 -200mV	不必采取措施
B	钢筋腐蚀电位在 $-200\text{mV} \sim -350\text{mV}$ 之间	及时开展专项检测
C	钢筋腐蚀电位小于 -350mV	及时采取相应措施

注:电位为相对于 Cu/饱和 CuSO_4 参比电极的电位。

6.5.6.6 混凝土冻融监测评估应根据监测结果绘制混凝土内电阻或残余应变随时间的变化曲线,并根据曲线的拐点判断冻融循环作用下劣化加速的开始。出现劣化加速后,应及时进行冻融专项检测。

7 系统维护

- 7.0.1 港口水工建筑物管理单位应针对自身实际情况制定健康监测系统维护方案。系统维护方案应至少包括系统维护范围、维护内容和维护频率等内容。
- 7.0.2 监测设备的运行状况和工作环境应进行定期检查,发现问题应及时修复改善,必要时更换监测设备。
- 7.0.3 传感器宜每年进行校核,发现问题应及时维修或更换。放置现场的数据采集设备应定期进行清洁、维护。
- 7.0.4 实施自动采集的监测系统宜每年进行1次人工比测。
- 7.0.5 监测数据库应定期进行备份。
- 7.0.6 监测系统发现异常应及时进行检修,掌握系统运行状况,分析监测系统存在问题,提出系统改进或处置意见。
- 7.0.7 建筑物遭受地震等严重自然灾害后,应对监测系统进行全面检查。
- 7.0.8 监测系统管理维护应做好记录,并存档备查。

附录 A 监测设备主要性能指标

A.0.1 电阻式、振弦式和光纤光栅式应变传感器的主要技术指标应分别符合表 A.0.1-1 ~ 表 A.0.1-3 的规定。

表 A.0.1-1 电阻式应变传感器的主要技术指标

项 目		技 术 指 标	
应变计电阻	对平均值的偏差	单栅	$\pm 0.2\%$
		双栅	$\pm 0.7\%$
		多栅	$\pm 0.8\%$
	对标称值的偏差	$\pm 0.5\%$	
灵敏系数	对平均值的偏差	1%	
蠕变	对平均值的分数 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	± 3	
	极限工作温度下的蠕变 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	20	
热输出	平均热输出系数 ($\mu\text{mV}/\text{m}^\circ\text{C}$)	1.5	
	对平均热输出的分散 ($\mu\text{mV}/\text{m}$)	± 30	

表 A.0.1-2 振弦式应变传感器的主要技术指标

项 目	技 术 指 标
量测范围 (μE)	≥ 1000
灵敏度 (μE)	1.0
精度 (% FS)	≤ 0.5
工作温度 ($^\circ\text{C}$)	-20 ~ 80
材质	不锈钢

表 A.0.1-3 光纤光栅式应变传感器的主要技术指标

项 目	技 术 指 标
量测范围 (μE)	≥ 1000
灵敏度 (μE)	1.0
精度 (% FS)	≤ 0.2
工作温度 ($^\circ\text{C}$)	-30 ~ 120
连接方式	熔接或 FC/APC 连接器连接

A.0.2 结构健康监测所用的光纤光栅解调设备的性能参数应符合下列规定。

A.0.2.1 对于静态测量,波长测量精度应小于 3pm ,重复性应小于 5pm ,波长年漂移量应小于 30pm 。

A.0.2.2 对于动态测量,波长测量精度应小于 5pm ,重复性应小于 10pm ,波长年漂移

量应小于 60 μm 。

A.0.2.3 波长宜采用 HCN 或 C₂H₂ 气体吸收光谱的波长。

A.0.3 位移计的基本性能参数应符合表 A.0.3 的规定。

表 A.0.3 位移计的基本性能参数

仪器名称	综合误差(%FS)	不重复度(%FS)	迟滞(%FS)	分辨力(%FS)
振弦式位移计	≤2.5	≤0.5	≤1	≤0.15
差动电阻式位移计	≤2	≤1	≤1	≤0.15
电容式位移计	≤0.7	≤0.25	≤0.25	≤0.1
电位器式位移计	≤1.5	≤0.5	≤0.5	≤0.1
差动变压器式位移计	≤1	≤0.4	≤0.4	≤0.1
电感式位移计	≤1	≤0.4	≤0.4	≤0.1
光纤光栅式位移计	≤2	≤1	≤1	≤0.1

A.0.4 加速度传感器的主要技术指标应符合表 A.0.4 的规定。

表 A.0.4 加速度传感器的主要技术指标

项 目	技术指标		
	力平衡加速度计	电动式加速度计	ICP 压电加速度计
灵敏度 V/(m/s ²)	0.125	0.3	0.1
满量程输出(V)	±2.5	±6	±5
频率响应(Hz)	0~80	0.25~80	0.3~1000
动态范围(dB)	≥120	≥120	≥110
线性度误差	≤1%	≤1%	≤1%
工作温度(℃)	-10~50	-20~50	-10~50
信号调理	线性放大、积分	线性放大、积分	ICP 调理放大

A.0.5 速度传感器的主要技术指标应符合表 A.0.5 的规定。

表 A.0.5 速度传感器的主要技术指标

项 目	技术指标	备 注
灵敏度 V/(m/s ²)	1~25	可调
满量程输出(V)	±5	—
频率响应(Hz)	0.1~100	可调
动态范围(dB)	≥120	—
线性度误差	≤1%	—
工作温度(℃)	-20~50	—
信号调理	线性放大、积分、滤波	—

A.0.6 振动监测记录器应由数据采集单元、触发单元、存储单元、计时单元、通信单元、控制单元、显示单元和电源单元组成。主要技术指标应符合表 A.0.6 的规定。

表 A.0.6 振动监测记录器的主要技术指标

项 目	技术指标
满量程输入(V)	±2.5 或 ±5, 单端、差分输入可选

续表 A.0.6

项 目	技 术 指 标
动态范围(dB)	≥ 120
频率响应(Hz)	0 ~ 80
分辨率(bit)	≥ 16
系统噪声(LSB)	≤ 1
触发模式	阈值触发、STA 与 LTA 差、比值触发、手动触发等
采样率(sps)	50、100、200、500, 可编程
时间服务	标准 UTC, 内部时钟精度优于 10^{-6} , GPS 校时精度优于 1ms
数据通信	RS-232 实时数据流串口、通信速率 9600bit/s、19200bit/s、57600bit/s、115200bit/s
数据存储	CMOS 静态或 RAM 固态硬盘, 容量不小于 1TB, 可扩展容量
道间延迟	无
零点漂移(V/°C)	< 100
软件	包括通信程序, 图形显示程序, 其他实用程序和监控、诊断命令
工作温度(°C)	-20 ~ 50
工作湿度(RH)	$< 90\%$

A.0.7 耐久性监测设备的主要技术指标应符合表 A.0.7-1 ~ 表 A.0.7-7 的规定。

表 A.0.7-1 钢结构电位监测设备的主要技术指标

项 目	技 术 指 标
分辨率(mV)	1
量程(V)	-2 ~ +2
输入阻抗(M Ω)	≥ 10

表 A.0.7-2 阴极保护电流监测设备的主要技术指标

项 目	技 术 指 标
分辨率(μ A)	1

表 A.0.7-3 钢结构涂层监测设备主要技术指标

项 目	技 术 指 标
频扫范围(Hz)	$10^{-4} \sim 10^5$
AC 信号幅值(mV)	5 ~ 100
阻抗测量量程($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	$10^3 \sim 10^{10}$

表 A.0.7-4 钢筋混凝土氯离子渗透监测设备的主要技术指标

项 目	技 术 指 标
分辨率(mV)	1
量程(V)	-2 ~ 2
输入阻抗(M Ω)	≥ 10

表 A.0.7-5 混凝土腐蚀锋面监测设备的主要技术指标

项 目	技 术 指 标
电位测量量程(V)	-2 ~2
电位测量分辨率(mV)	1
电流测量量程(mA)	-2 ~2
电流测量分辨率(μ A)	0.1

表 A.0.7-6 钢筋腐蚀电位监测设备的主要技术指标

项 目	技 术 指 标
分辨率(mV)	1
量程(V)	-2 ~2
输入阻抗(M Ω)	≥ 10

表 A.0.7-7 极化电阻法监测钢筋腐蚀速率设备的主要技术指标

项 目	技 术 指 标
分辨率($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	1
量程($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	220 ~2.2 $\times 10^7$

附录 B 静力水准法

B.0.1 水工建筑物位移与变形监测项目可根据建筑物类型,位移与变形监测类型和项目勘察、设计、施工、使用或委托方的要求,按表 B.0.1 选择监测等级。

表 B.0.1 水工建筑物位移与变形监测的等级、精度指标及其适用范围

等级	沉降监测点测站高差中误差(mm)	位移监测点坐标中误差(mm)	主要适用范围
特等	0.05	0.3	特高精度要求的位移与变形监测
一等	0.15	1.0	结构安全等级为一级的位移与变形监测;重要的水工建筑物位移与变形监测等
二等	0.5	3.0	结构安全等级为二级的位移与变形监测;重要的水工建筑物位移与变形监测等
三等	1.5	10.0	结构安全等级为二级的位移与变形监测;一般的水工建筑物位移与变形监测等
四等	3.0	20.0	临时性结构的位移与变形监测;精度要求低的位移与变形监测

注:①沉降监测点测站高差中误差:对静力水准监测,为相邻沉降监测点间等价的高差中误差;

②位移监测点坐标中误差:指的是监测点相对于基准点或工作基点的坐标中误差、监测点相对于基准线的偏差中误差、建筑物上某点相对于其底部对应点的水平位移分量中误差等。坐标中误差为其点位中误差的 $1/\sqrt{2}$ 倍。

B.0.2 静力水准监测应根据监测精度要求和预估沉降量,选取相应精度和量程的静力水准传感器。对一等、二等沉降监测,宜采用连通管式静力水准;对二等及以下等级沉降监测,可采用压力式静力水准。采用静力水准监测进行沉降监测,宜将传感器稳固安装在待测结构上。

B.0.3 一组静力水准监测系统应由一个参考点和多个监测点组成。采用多组串联方式构成监测路线时,在相邻组的交接处,应在同一建筑结构的上下位置设置转接点。监测范围小于 300m,且转接点数不大于 2 个时,应将一端的参考点设置在相对稳定的区域作为工作基点;否则,宜在监测路线的两端分别布设工作基点。工作基点应定期与基准点联测。

B.0.4 静力水准监测的技术要求应符合表 B.0.4 的规定。

表 B.0.4 静力水准监测技术要求(mm)

沉降监测等级	一等	二等	三等	四等
传感器标称精度	≤ 0.1	≤ 0.3	≤ 1.0	≤ 2.0
两次监测高差较差限差	0.3	1.0	3.0	6.0
环线及附合路线闭合差限差	$0.3\sqrt{n}$	$1.0\sqrt{n}$	$3.0\sqrt{n}$	$6.0\sqrt{n}$

注:n 为测站个数。

B.0.5 静力水准监测装置的安装应符合下列规定。

B.0.5.1 管路内液体应具有流动性。

B.0.5.2 监测前向连通管内充水时,可采用自然压力排气充水法或人工排气充水法,不应将空气带入,管路应平顺,不应出现 Ω 形,管路转角不应形成滞气死角。

B.0.5.3 安装在室外的静力水准系统,应采取保证全部连通管管路温度均匀的措施,避免阳光直射。

B.0.5.4 对连通管式静力水准,同组中的传感器应安装在同一高度,安装高程差异不应消耗其量程的20%;管路中任何一段的高度均应低于蓄水罐底部,但不宜低于0.2m。

B.0.6 静力水准监测系统的数据采集与计算应符合下列规定。

B.0.6.1 监测时间应选在气温最稳定的时段,监测读数应在液体完全呈静态下进行。

B.0.6.2 每次监测应读数3次,读数较差应小于表B.0.4中相应等级的仪器标称精度,取读数的算术平均值作为监测值。

B.0.6.3 多组串联组成静力水准观监测线时,应先按测段进行闭合差分配后计算各组参考点的高程,再根据参考点计算各监测点的高程。

B.0.7 静力水准监测系统应定期进行校准。使用期间应定期维护,发现性能异常时应及时修复或更换。

附录 C 卫星导航定位法

C.0.1 卫星导航定位法监测等级划分应符合第 B.0.1 条的规定。

C.0.2 卫星导航定位法可用于二等、三等和四等位移监测。对二等监测,应采用静态模式;对三等、四等监测,可采用静态模式或动态模式。

C.0.3 卫星导航定位监测设备的选用应符合表 C.0.3 的规定。

表 C.0.3 卫星导航定位监测设备选用

位移监测等级		二等	三、四等
静态监测	接收机类型	双频	双频或单频
	标称静态精度	$\leq (3\text{mm} + 1\text{ppm})$	$\leq (5\text{mm} + 1\text{ppm})$
动态监测	接收机类型	—	双频
	标称静态精度	—	$\leq (5\text{mm} + 1\text{ppm})$
	基准站接收机天线	—	扼流圈天线
	标称动态精度	—	$\leq (10\text{mm} + 1\text{ppm})$

C.0.4 卫星导航定位监测接收设备的检定、检验应符合现行行业标准《卫星定位城市测量技术规范》(CJJ/T 73)的有关规定,并应符合下列规定。

C.0.4.1 新购置的接收设备应进行全面检验后方可使用,检验内容应包括一般检验、常规检验、通电检验和实测检验。

C.0.4.2 每期位移监测作业前,应对所用接收设备进行实测检验。

C.0.4.3 接收机或天线受到强烈撞击后,或更新接收机部件及更新天线与接收机的匹配关系后,应按新购置设备做全面检验。

C.0.5 采用卫星导航定位监测进行位移监测作业,其点位选择应符合下列规定。

C.0.5.1 视场内障碍物的高度角不宜超过 15° 。

C.0.5.2 离电视台、电台、微波站等大功率无线电发射源的距离不应小于 200m,离高压输电线和微波无线电信号传输通道的距离不应小于 50m,附近不应有强烈反射卫星信号的大面积水域、大型建筑或热源等。

C.0.5.3 视场内通视条件宜便于采用全站仪等其他手段进行后续监测作业。

C.0.6 卫星导航定位法静态监测作业应符合下列规定。

C.0.6.1 静态监测作业的基本技术要求应符合表 C.0.6 的规定。

表 C.0.6 静态监测基本技术要求

位移监测等级	二等	三等	四等
有效监测卫星数	≥ 6	≥ 4	≥ 4
卫星截止高度角($^\circ$)	≥ 15	≥ 15	≥ 15

续表 C.0.6

监测时段长度(min)	20~60	15~45	15~45
数据采样间隔(s)	10~30	10~30	10~30
位置精度因子	≤5	≤6	≤6

C.0.6.2 二等位移监测应采用零相位天线,并采用强制对中器安置接收机天线,对中误差不应大于0.5mm,天线应统一指向正北。

C.0.6.3 监测应按规定的时间计划进行。

C.0.6.4 开机前应检查接收机电源电缆和天线等各项连接无误。

C.0.6.5 开机后应检验有关指示灯与仪表显示正常后,进行自测试及输入测站名、时段等控制信息。

C.0.6.6 接收机启动前与作业过程中,应填写监测手簿中的记录项目。

C.0.6.7 监测开始和结束时,应分别量测1次天线高,两次较差不应大于3mm,并应取其算术平均值作为天线高。

C.0.6.8 监测期间,应防止接收设备振动,并应避免触碰天线和阻挡信号。

C.0.6.9 监测期间,不应在天线附近使用电台、对讲机和手机等无线电通信设备。

C.0.6.10 作业时,接收机应避免阳光直接照射。雷雨天气时,应关机停测,并应卸下天线。

C.0.6.11 作业过程中,不应进行下列操作:

- (1)接收机关闭又重新启动;
- (2)进行自测试;
- (3)改变卫星截止高度角;
- (4)改变数据采样间隔;
- (5)改变天线位置;
- (6)按动关闭文件和删除文件功能键。

C.0.6.12 二等位移监测,宜采用高精度解算软件和精密星历进行数据处理;三等或四等位移监测,可采用商用软件和预报星历进行数据处理。监测数据的处理和质量检查应符合现行行业标准《卫星定位城市测量技术规范》(CJJ/T 73)的有关规定。同一时段监测值的数据采用率宜大于85%。

C.0.7 卫星导航定位法动态监测作业应符合下列规定。

C.0.7.1 动态位移监测应建立由参考点站、监测点站、通信网络和数据处理分析系统组成的卫星导航定位监测动态位移监测系统。

C.0.7.2 动态位移监测系统应至少设置1个参考点站,必要时增加1个参考点站。

C.0.7.3 参考点站应选在位移区域影响范围之外,距位移监测点的距离不应大于3km。

C.0.7.4 参考点站宜直接设置在位移基准点上。位移基准点不能作为参考点站时,应设置位移工作基点,并将其作为动态位移监测系统的参考点站。

C.0.7.5 高频次或变化敏感的监测点,每个天线应配置一台接收机,接收机应具备

1Hz 以上的数据输出能力;变化缓慢的位移监测点,可多个天线配置一台接收机。

C.0.7.6 参考点站和监测点站应与数据处理分析系统通过通信网络进行连通,并应保证数据实时传输。

附录 D 全站仪自动监测法

D.0.1 采用全站自动监测法进行位移监测时应符合下列规定。

D.0.1.1 测站点与监测点之间的距离宜符合表 D.0.1-1 的规定。

表 D.0.1-1 全站仪监测距离长度要求(m)

全站仪测距标称精度	全站仪测角标称精度	位移监测等级			
		一等	二等	三等	四等
1mm + 1ppm	0.5"	≤300	≤500	≤800	≤1200
1mm + 2ppm	1"	—	≤300	≤500	≤800
2mm + 2ppm	2"	—	—	≤300	≤500

D.0.1.2 边长和角度监测测回数应符合表 D.0.1-2 的规定。

表 D.0.1-2 全站仪监测测回数

全站仪测距标称精度	全站仪测角标称精度	位移监测等级			
		一等	二等	三等	四等
1mm + 1ppm	0.5"	2	1	1	1
1mm + 2ppm	1"	—	2	1	1
2mm + 2ppm	2"	—	—	2	1

D.0.2 采用全站仪前方交会法进行位移监测时,应符合下列规定。

D.0.2.1 应选择合适的测站位置,使各监测点与其之间形成的交会角在 60° ~ 120° 之间。测站点与监测点之间的距离宜符合表 D.0.1-1 的规定。

D.0.2.2 水平角、距离监测测回数应符合表 D.0.1-2 的规定。

D.0.2.3 采用边角交会时,应在 2 个测站上测定各监测点的水平角和水平距离。

D.0.2.4 仅采用测角或测边交会时,应至少在 3 个测站点上测定各监测点的水平角或水平距离。

D.0.3 采用全站仪自由设站法进行位移监测时,应符合下列规定。

D.0.3.1 设站点应与 3 个基准点或工作基点通视,且该部分基准点或工作基点的平面分布范围应大于 90°,设站点与监测点之间的距离宜符合表 D.0.1-1 的规定。

D.0.3.2 所监测的监测点中,至少有 2 个点应在其他测站同期监测。

D.0.3.3 监测时宜边角同测。水平角和距离监测测回数应符合表 D.0.1-2 的规定。

D.0.4 采用全站仪自动监测法进行位移监测时,应符合下列规定。

D.0.4.1 自动化数据采集的仪器设备应安装牢固,且不应影响监测对象的安全运营。使用期间应定期维护设备,发现性能异常时应及时修复。

D.0.4.2 全站仪的自动照准应稳定、有效,单点单次照准时间不宜大于 10s。

D.0.4.3 监测方法设计和精度估算应根据监测精度要求、全站仪精度等级、监测点到仪器测站点的视线长度确定,并应符合第 D.0.1 条~第 D.0.3 条的规定。每点每次监测的测回数宜符合表 D.0.1-2 的规定。

D.0.4.4 后台控制程序应能按预定顺序逐点监测,数据不正常时应能补测,并应根据即时指令增加监测。

D.0.4.5 多台全站仪联合组网监测时,相邻测站应有重叠的监测目标。

D.0.4.6 每期监测时均应进行基准点联测、稳定性判断、监测精度评定和监测点数据计算。

附录 E 监测数据记录表

表 E.0.1 监测数据记录表

控制号:

记录表编号:

工程名称							
监测项目				监测实施单位			
工程构件				构件编号			
监测点描述				监测点编号			
监测参数							
执行标准名称及编号							
监测仪器							
记录号	监测时间	监测参数 1	监测参数 2	监测参数 n	记录人	校核人
1							
2							
3							
4							
5							
6							
...							

附录 F 基于电流监测的牺牲阳极 剩余保护年限预测

F.0.1 牺牲阳极剩余保护年限的预测应根据电流监测数据计算牺牲阳极总发生电量,再计算牺牲阳极的质量损耗,最后通过牺牲阳极剩余质量计算得出。

F.0.2 牺牲阳极总发生电量可按下式计算:

$$Q = \sum I_i T \quad (\text{F.0.2})$$

式中 Q ——牺牲阳极总发生电量(C);
 I_i ——监测期内得到的各电流数值(A);
 T ——电流数值对应的监测时长(s)。

F.0.3 牺牲阳极的质量损耗可按下式计算:

$$\Delta m = \frac{QM}{zF\eta} \quad (\text{F.0.3})$$

式中 Δm ——牺牲阳极质量损耗(kg);
 Q ——牺牲阳极总发生电量(C);
 M ——摩尔质量(kg/mol);
 z ——反应电荷转移数,铝阳极取3,锌阳极、镁阳极取2;
 F ——法拉第常数(C/mol),取96485C/mol;
 η ——电流效率,根据牺牲阳极电化学性能试验确定。

F.0.4 牺牲阳极剩余保护年限可按下式计算:

$$t_e = \frac{m_0 - \Delta m}{\Delta m} \cdot t \quad (\text{F.0.4})$$

式中 t_e ——牺牲阳极剩余保护年限(a);
 m_0 ——牺牲阳极初始质量(kg);
 Δm ——牺牲阳极质量损耗(kg);
 t ——牺牲阳极已使用年限(a)。

附录 G 基于氯离子渗透监测的钢筋混凝土结构使用年限预测

G.0.1 基于氯离子渗透监测的钢筋混凝土结构使用年限应根据监测点处氯离子浓度随时间变化的数据,推导氯离子扩散系数和混凝土表面氯离子浓度等参数,最后利用寿命计算公式得出。

G.0.2 监测点处的氯离子浓度可按下式计算:

$$C_x(t_i) = 10^{\frac{150 - E/F}{2.303RT}} \quad (\text{G.0.2})$$

式中 $C_x(t_i)$ ——距离混凝土表面 x 处监测点在不同监测时间 t_i 的氯离子浓度(mol/L);

E ——氯离子电位(V),相对于标准氢电极;

E_0 ——标准电极电势(V),取 0.222V,相对于标准氢电极;

F ——法拉第常数(C/mol),取 96485C/mol;

R ——气体常数($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),取 $8.314 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;

T ——绝对温度(K)。

G.0.3 氯离子扩散系数和混凝土表面氯离子浓度可根据监测点处的氯离子浓度随时间变化数据,按下式通过回归分析得到:

$$C_x(t_i) = C_i + (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4D_i t_i^m t_i^{1-m}}} \right) \right] \quad (\text{G.0.3})$$

式中 $C_x(t_i)$ ——监测点处不同监测时间 t_i 的氯离子浓度(mol/L);

C_i ——混凝土初始氯离子浓度(mol/L);

C_s ——混凝土表面氯离子浓度(mol/L);

erf ——误差函数;

x ——监测点距离混凝土表面的深度(m);

D_i ——时间 t 对应的氯离子扩散系数(m^2/s);

t ——扩散系数衰减稳定时间(s),宜按 10a 换算成 s;

t_i ——监测时间(s);

m ——氯离子扩散系数衰减值,按现行行业标准《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》(JTS 304)取值。

G.0.4 钢筋混凝土结构使用年限可按下式计算:

$$t_0 = \frac{0.0317c^2}{4D_i \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_x - C_i}{C_s - C_i} \right) \right]^2} \quad (\text{G.0.4})$$

式中 t_0 ——钢筋混凝土结构使用年限(a);

- c ——保护层厚度(mm)；
- D_t ——时间 t 对应的氯离子扩散系数($10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$)；
- erf^{-1} ——误差函数反函数；
- C_{cc} ——钢筋锈蚀氯离子临界浓度(mol/L)；
- C_s ——混凝土表面氯离子浓度(mol/L)；
- C_i ——混凝土初始氯离子浓度(mol/L)。

附录 H 基于腐蚀锋面监测的钢筋混凝土结构使用年限预测

H.0.1 基于腐蚀锋面监测的钢筋混凝土结构使用年限预测应根据不同深度下传感器开始腐蚀时间计算得到。

H.0.2 传感器腐蚀判定应符合下列规定：

(1) 干燥环境下的钢筋混凝土,电偶连接 $5s$ 后,电流值不大于 $15\mu A$,或电偶连接 $24h$ 后,电流值不大于 $1.5\mu A$,判定无腐蚀;电偶连接 $5s$ 后,电流值大于 $15\mu A$,或电偶连接 $24h$ 后,电流值大于 $1.5\mu A$,判定发生腐蚀;

(2) 潮湿环境下的钢筋混凝土,记录电流随时间变化曲线,出现电流的突变增加和电位的负移时,判定发生腐蚀。

H.0.3 氯盐环境下钢筋混凝土使用年限可根据传感器埋设深度和开始腐蚀的时间按下式计算：

$$t_0 = \frac{c^2}{x_1^2} \cdot \left(\frac{10}{t_1}\right)^m \cdot t_1 \quad (\text{H.0.3})$$

式中 t_0 ——钢筋混凝土结构使用年限(a);

c ——保护层厚度(mm);

x_1 ——传感器埋设深度(mm);

t_1 ——传感器开始腐蚀的时间(a);

m ——扩散系数衰减值, t_1 大于 $10a$ 时取 0 , t_1 小于 $10a$ 时按现行行业标准《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》(JTS 304)取值。

附录 J 本规范用词说明

为便于在执行本规范条文时区别对待,对要求严格程度的用词说明如下:

- (1)表示很严格,非这样做不可的,正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”;
- (2)表示严格,在正常情况下均应这样做的,正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;
- (3)表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的,正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;
- (4)表示允许选择,在一定条件下可以这样做的采用“可”。

引用标准名录

1. 《建筑与桥梁结构监测技术规范》(GB 50982)
2. 《船用参比电极技术条件》(GB/T 7387)
3. 《水运工程测量规范》(JTS 131)
4. 《港口与航道水文规范》(JTS 145)
5. 《水运工程地基基础试验检测技术规程》(JTS 237)
6. 《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》(JTS 304)
7. 《港口设施维护技术规范》(JTS 310)
8. 《卫星定位城市测量技术规范》(CJJ/T 73)

附加说明

本规范主编单位、参编单位、主要起草人、 主要审查人、总校人员和管理组人员名单

主编单位:中交四航工程研究院有限公司

参编单位:交通运输部天津水运工程科学研究院

中交天津港湾工程研究院有限公司

中交上海三航科学研究院有限公司

中交水运规划设计院有限公司

主要起草人:熊建波(中交四航工程研究院有限公司)

王永平(中交四航工程研究院有限公司)

(以下按姓氏笔画为序)

王胜年(中交四航工程研究院有限公司)

方翔(中交四航工程研究院有限公司)

朱德华(中交天津港湾工程研究院有限公司)

刘红彪(交通运输部天津水运工程科学研究院)

刘现鹏(交通运输部天津水运工程科学研究院)

刘思国(中交天津港湾工程研究院有限公司)

刘梅梅(中交四航工程研究院有限公司)

孙洋波(中交上海三航科学研究院有限公司)

苏林玉(中交四航工程研究院有限公司)

李元青(中交水运规划设计院有限公司)

李治学(中交四航工程研究院有限公司)

杨海成(中交四航工程研究院有限公司)

张强(交通运输部天津水运工程科学研究院)

范志宏(中交四航工程研究院有限公司)

周红星(中交四航工程研究院有限公司)

彭海华(中交四航工程研究院有限公司)

董桂洪(中交四航工程研究院有限公司)

主要审查人:张志明、仇伯强

(以下按姓氏笔画为序)

文立、田唯、吕卫清、吴锋、吴丙贵、何文钦、赵尚传、
胡家顺、徐满意、曹胜敏、程泽坤、滕爱国、魏宏大

总校人员：刘国辉、李雪莲、谢燕、马跃、李荣庆、刘连生、董方、
檀会春、王胜年、熊建波、范志宏、杨海成、方翔、董桂洪、
彭海华、李治学、刘梅梅、刘红彪、刘现鹏、刘思国、孙洋波、
李元青、赵娟

管理组人员：熊建波(中交四航工程研究院有限公司)

方翔(中交四航工程研究院有限公司)

范志宏(中交四航工程研究院有限公司)

邓春林(中交四航工程研究院有限公司)

张夏虹(中交四航工程研究院有限公司)

中华人民共和国行业标准

**港口水工建筑物结构健康监测
技术规范**

JTS/T 312—2023

条文说明

目 次

1 总则	(49)
3 基本规定	(50)
4 监测内容与方法	(52)
4.1 一般规定	(52)
4.2 安全性和适用性监测	(52)
4.3 耐久性监测	(52)
4.4 环境要素监测	(53)
5 结构健康监测	(54)
5.1 一般规定	(54)
5.2 高桩码头	(54)
5.3 重力式码头	(54)
5.6 防波堤与护岸	(55)
6 数据采集与处理	(56)
6.3 数据传输	(56)
6.4 数据存储和管理	(57)
附录 G 基于氯离子渗透监测的钢筋混凝土结构使用年限预测	(58)
附录 H 基于腐蚀锋面监测的钢筋混凝土结构使用年限预测	(59)

1 总 则

1.0.1 港口水工建筑物服役期间受力情况复杂,同时不可避免地受各种自然环境因素的作用,材料性能不断退化,导致其承载力下降。为保证港口水工建筑物在服役期内的安全性、适用性和耐久性,需定期评估其健康状态,并实施必要的维护。随着传感器、数据采集等领域的理论和技术不断发展创新,通过埋设传感器并定期甚至实时获取建筑物健康状态的监测手段逐渐为人们所接受。相比传统的检测手段,监测具有以下优势:

(1) 无需人员进场,对结构运营影响程度低。

(2) 无损诊断,获取数据时无需破坏原有结构。

(3) 传感器在建造阶段预埋,能够有针对性地埋设在后期人员难以进入的区域,避免了因人员难以进入而无法采集数据。

(4) 数据采集频次比传统检测高,有效避免了诊断的滞后性,及早发现隐患。数据具有延续性,有利于对健康状态实施准确的跟踪把握。

(5) 更方便地与物联网技术结合,实现远程监测和数据统一管理,更好地为管理监督部门所用。

传统检测中部分项目已能通过监测替代,应用结构健康监测能及早发现结构出现的健康问题。而检测能作为进一步的验证、核实的手段。结构健康监测与传统检测相结合,能够更准确、及时地对建筑物健康状态进行诊断,同时降低诊断的成本。

结构健康监测能更好地协助管理者及时了解建筑物的状态,在保障建筑物健康服役,避免出现结构安全问题,降低维护成本和积累建筑物全寿命周期健康数据等方面发挥重要作用。

1.0.2 本规范针对码头、防波堤与护岸等港口水工建筑物,包括新建和既有结构。对于新建港口水工建筑物,结构健康监测系统搭建从设计阶段介入,供选择监测的项目更多,监测点的布置更全面;对于既有港口水工建筑物,由于结构健康监测大部分项目所采用的传感器安装在构件表面,这类项目的实施与新建结构类似,但部分涉及在结构内部埋设传感器的项目,在实施时需要考虑后埋传感器与预埋传感器在读取数据方面的一致性。

本规范适用于港口水工建筑物服役期内的健康监测,不包括施工期的监测。但部分施工监测系统,若在服役期内继续使用,则同样符合本规范的规定。

3 基本规定

3.0.1 为提高港口水工建筑物健康诊断水平,更好地为运营管理部门提供维护建议,进一步提升服役期内维护质量,一般对于建筑物体量大,对经济影响重要,与人民生命财产安全相关度较高的重要港口水工建筑物,以及周围水文、腐蚀环境恶劣,结构受力复杂的港口水工建筑物安装健康监测系统,实施结构健康监测。

3.0.2 本条主要针对新建或改、扩建工程。推荐结构健康监测系统与建筑物同步设计和施工主要考虑到部分监测项目的传感器需要预埋,同步设计和施工才能保证传感器安装在指定位置。此外,同步设计能为监测系统预留专门的供电、通信线缆槽及采集设备放置点,使监测系统更好地与结构物形成整体,提高监测系统的可靠性。再者,同步施工能减少对建筑物的破坏,实施起来也更为方便。对于在役港口水工建筑物,难于实现结构健康监测系统与建筑物同步设计和施工。

3.0.4 某些工程监测项目选择需考虑满足科学研究、积累重要观测数据的需要。温度、湿度等环境要素通常对监测结果及监测评价的有影响,纳入监测的项目。此外,对建筑物自身健康状态可能影响较大的环境要素,如水文、地质、荷载等也纳入监测的项目。

3.0.5 选择具有代表性的点是为获得更为系统和全面的监测数据。监测点选择时考虑建筑物典型构件和不同暴露区域,使数据能更真实地反映建筑物的健康状态。

3.0.7 监测数据的采集分人工采集和自动采集。人工采集方式下,在人员易于访问的区域预留数据采集端口,需要采集数据时,将手持式数据采集仪器与数据采集端口相连,获取监测数据。人工采集主要用于监测数据变化缓慢,采集频次要求较低的项目。自动采集方式下,需要建立自动化的数据采集设备,按设定的频次进行数据的采样。自动采集主要应用于监测数据变化较大,采集频次要求高的项目。自动采集能将数据进一步传输到远端的服务器或个人电脑中,需要在数据采集设备中加入数据传输模块以完成数据传输的功能,适用于对数据实时性要求较高的场合。自动采集也能将采集的数据暂时存储在数据采集设备内部,定期由人工从数据采集设备中数据取出,仅需要保证数据采集设备具有足够的存储空间,保证两次人工获取数据期间数据的临时存储需要,适用于对数据实时性要求不高,且远程传输系统建立较为困难的场合。这类数据采集方式由于数据的采集是自动化的,仍将其归为自动采集。

自动采集具有以下优点:(1)降低获取数据过程中的人力成本,降低安全风险;(2)数据及时性更高;(3)消除人为因素造成的错误数据;(4)数据获取频次的调节度高。

3.0.8 传感器包括各类将待监测物理量转变成电/光信号的传感器。数据采集与处理由数据采集模块、数据传输模块、数据存储模块与线缆构成,数据采集模块与传感器匹配。数据存储模块主要指用于数据统一存储的计算机硬件系统。防护设备指针对传感器和仪

器设备的包括防水、防尘、防雷、防损坏等防护措施。数据库管理系统为实现数据的预处理、存储、管理和查询功能的软件。数据预警和分析系统主要实现数据实时在线显示、数据分析、安全预警及评估等功能。

3.0.9 港口水工建筑物设计使用年限一般为 50a,且越到后期,对建筑物健康状态的监测越为重要,因此所建立的健康监测系统需能在建筑物全寿命周期内发挥作用。对于预埋式传感器,其寿命决定了整套监测系统的寿命,提高监测系统寿命的方式主要包括以下两种:(1)通过提高传感器寿命解决,目前参比电极已有 30a 以上埋设使用经验,但更长的使用寿命还在验证中。技术上也正开发理论上寿命更长久的传感器,但其实际寿命同样仍待实际使用验证。(2)通过后埋式传感器解决,这样能做到定期更换传感器,保持整个全寿命周期内传感器有效,使用后埋式传感器需要注意其监测参数是否反映实际的情况。

3.0.15 建立新旧系统的转换关系目的是为了保持数据的一致性和连续性,使建筑物全寿命周期的监测数据不因系统升级换代而损失或无法得到有效利用。

4 监测内容与方法

4.1 一般规定

4.1.1 港口水工建筑物将结构健康监测分为安全性和适用性、耐久性、环境因素三类,主要是考虑与行业标准《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》(JTS 304—2019)相协调。

4.2 安全性和适用性监测

4.2.2.2 电阻应变计、振弦式应变计、光纤类应变计特性如表 4.1 所示。

表 4.1 各类应变监测传感器特性

特 性	电阻应变计	振弦式应变计	光纤类应变计
传感器体积	小	大	小
蠕变	较大,需提高制作技术,工艺解决	较小,适宜长期测量	较小,适宜长期测量
灵敏度	较高	较高	高
温度变化影响	可以实现温度变化的自补偿	温度变化范围较大时需要修正	温度变化范围较大时需要修正
长导线影响	需进行长导线电阻影响的修正	不影响测量结果	不影响测量结果
信号传输距离	短,小于 100m	较长	长,可达 10km
抗电磁干扰能力	差	差	好
对绝缘的要求	要求高	要求不高	无需绝缘
动态响应	好	差	好

4.2.3.3 本款列出的几种监测方法均能实现数据自动采集,其优缺点比较见表 4.2。

表 4.2 位移与变形监测方法优缺点对比

类 型	优 点	缺 点
静力水准法	造价低,施工简单	测试精度不易保证,易受环境影响
卫星导航定位法	全天候,高精度,高效率,多功能,操作简便	低灵敏度,低采样率,高成本
全站仪自动监测法	自动测量减少人为误差,抗干扰能力强,测试精度高,监测成本较低	室外恶劣环境下的工作能力差,受环境、气候的影响很大
位移计法	精度高,成本低,采样速率高	易受环境干扰,机械构件易损坏,只能测量近距离物体

4.3 耐久性监测

4.3.1 港口水工建筑物实施钢结构耐久性监测的对象一般为建筑物基础钢桩和趸船等,大多处在平均水线以下,一般采用涂层或涂层与阴极保护联用的防腐蚀措施。阴极保护

效果根据钢结构电位监测结果进行评价。牺牲阳极的溶解情况及剩余保护年限通过其发生电流的监测进行评估。涂层完整性监测及评估通过阻抗分析进行。钢结构厚度监测主要通过检测手段实施,目前没有成熟的监测方法。因此钢结构耐久性监测项目仅包括钢结构电位监测、阳极发生电流监测和涂层破损监测。

4.3.2.1 采用两种不同参比电极组成双参比电极,能够发挥不同类型参比电极的优势,实现优势互补,同时安装两个参比电极能够对监测数据真实性进行确认。

4.3.2.4 外加电流阴极保护一般均布置了参比电极监测电位,作为电流输出的反馈。因此结构健康监测系统的电位监测能够利用外加电流阴极保护系统的电位监测功能,节省成本。

4.3.3 对于采用了外加电流阴极保护的钢结构,电流监测主要目的是评估电源工作是否正常,一般在外加电流阴极保护系统中已具备监测发生电流的功能,无需专门安装电流监测系统。对于采用了牺牲阳极阴极保护的钢结构,实施电流监测主要目的是了解阳极溶解情况,推算阳极剩余保护年限。

4.3.3.1 阴极保护电流监测一般采用标准电阻或霍尔传感器,前者需要先断开阳极与受保护结构电路,并在其中加入标准电极,而霍尔传感器无需断开阳极与受保护结构电路,因此建议采用霍尔传感器监测电流。

4.3.3.5 在计算牺牲阳极溶解质量时需开展电流对时间的积分计算,因此电流监测需要能反映阳极电流的变化。

4.3.6 钢筋混凝土氯离子渗透监测主要通过监测混凝土内部氯离子电位,获得导致钢筋锈蚀的主要物质——氯离子在混凝土内部的浓度。在混凝土内部预埋参比电极和离子选择电极,测量两者之间的电位,并通过能斯特方程得到氯离子浓度。温度在电位与浓度转换过程中起到重要作用,因此在监测氯离子浓度的同时,监测相应点的温度。混凝土表层2cm深度范围内氯离子浓度受表面润湿作用影响波动较大,因此传感器埋深一般在2cm以上。目前,国内外监测传感器均带有氯离子探针和参比电极,具有监测氯离子浓度的功能。

4.3.7 氯离子从混凝土表面向内部渗透,碳化也是从混凝土表面向内部发展,因而钢筋锈蚀发展也呈现由外往内的规律。在保护层不同深度预埋多个与钢筋同材质的探针作为阳极,同时预埋阴极,通过测量各阳极与阴极之间的宏电池电压、宏电池电流等参数定性判断阳极的腐蚀状况,能跟踪钢筋锈蚀发展,判定腐蚀锋面的位置,预测腐蚀锋面抵达钢筋的时间,即钢筋腐蚀开始时间。

4.3.9.3 混凝土结构产生冻融破坏的两个必要条件为温度效应和含水量:即建筑物服役环境的温度具有正负交替,混凝土基体内部有足够的水分,则会发生混凝土的冻融破坏。因此进行冻融监测时,无需持续监测,一般通过监测环境温度,根据温度高低,确定是否可能出现冻融,而在冻融作用可能存在期间进行监测。

4.4 环境要素监测

4.4.2.4 温度对应力、氯离子浓度等监测项目有直接影响,因此在对应变、氯离子浓度等温度敏感参数的测量时同时获取监测点处温度,用于对最终结果展开温度修正。

5 结构健康监测

5.1 一般规定

5.1.7.2 数据采集设备大多为电子设施,安装位置考虑设备维护的便利性,选择在人员容易访问的地方,方便日后维护、更换。

同一工程会采用多台数据采集设备,每台数据采集设备又可能连接多个甚至多种传感器,建立数据采集设备与传感器的拓扑关系,便于将监测的数据与监测点对应,是日后进行监测数据的分析和结构健康评估重要的资料。

5.1.7.4 监测系统安装调试完成后,对现场的设备进行标识,能够方便后期数据采集设备维护。

5.2 高桩码头

5.2.2.4 针对钢管桩,由于不同深度水下区氧气含量不一样,泥面附近还有生物腐蚀的作用,钢管桩不同区域腐蚀情况不一致,因此对不同深度开展电位监测。离阳极最近的地区钢管桩容易发生过保护,离阳极最远的地方,钢管桩容易发生欠保护,因此电位监测覆盖离阳极最远点和最近点。阳极布置不同深度其消耗速度不一致,因此对不同深度下的阳极发生电流进行监测。

5.2.2.5 根据行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153—2015),混凝土结构按腐蚀作用程度进行部位或腐蚀条件划分,如海水环境类别可划分为大气区、浪溅区、水位变动区、水下区等不同部位。此处“腐蚀条件”指大气区、浪溅区、水位变动区、水下区等不同部位。

高桩码头实施耐久性监测的钢筋混凝土结构一般指上部结构,大多处在水位变动区、浪溅区等腐蚀严重的区域。不同构件内部钢筋布置、混凝土保护层不同,耐久性劣化发展不一样。混凝土制作方式分现浇和预制,对应的混凝土质量也不同,导致混凝土耐久性有差别,因此监测点覆盖上部结构各类构件及不同的制作方式。

码头端部适当增加监测断面主要指在突堤码头远离岸边的一端增加监测断面,因突堤码头端部受不同方向水流冲击,腐蚀情况有可能与中部不同。

5.3 重力式码头

5.3.1 重力式码头结构变形较小,因此变形变位监测,主要反映地基的变位。

5.6 防波堤与护岸

5.6.1 本条中的防波堤和护岸监测项目,是参考行业标准《水运工程水工建筑物原型观测技术规范》(JTS 235—2016)、《水运工程施工监控技术规程》(JTS/T 234—2020)和港口水工建筑物耐久性有关规范等要求,并结合天津、黄骅、宁波、连云港、广州、深圳、湛江等地的工程实践经验提出。

5.6.2 考虑防波堤所处的条件恶劣、远离海岸等因素,主要选择有代表性和对防波堤安全影响较大的位置和断面进行监测。

6 数据采集与处理

6.3 数据传输

6.3.3 有线传输是指两个通信设备之间使用物理连接,将信号从一方传到另一方。常用的介质有双绞线、同轴电缆和光缆等,常用的接口有 RS232、RS422、RS485 和 RJ45 等。

6.3.4 无线传输技术具有很多优点,以无线传输实现结构健康监测是今后发展的趋势。无线传输技术包括蓝牙(Bluetooth)、无线高保真技术(Wi-Fi)、紫蜂(ZigBee)技术、无线数传电台、通用无线分组业务(GPRS)技术、3G/4G/5G 移动通信技术。

蓝牙数据传输速率为 1Mb/s,传输距离约为 10m,支持点对点和点对多通信,工作频段 2.4GHz。主要用于小型便携式设备的匹配,这类应用被称作无线个人局域网,适用于一些设备位置和状态相对固定的连接场景。在健康监测系统中一般应用于设备状态的现场检测管理。

Wi-Fi 与蓝牙同属短距离无线技术,常用频段为 2.4UHF 和 5G SHF ISM,使用 IEEE 802.11 系列协议。设立 Wi-Fi 网络连接需要无线网卡和无线访问接入点(Access Point, AP),此网络技术具有多用户接入、数据加密、多速率发送等功能。影响无线 AP 有效传输距离的因素很多,其中中间间隔和发射功率强弱影响最大。无线网卡的覆盖范围 10m 内,无线路由器的有效距离可有 100m,最大覆盖距离约为 100m~300m。如果借助外接天线来连接,传输距离甚至可达 30km~50km。Wi-Fi 协议的特点使得距离 AP 越远传输速率和稳定性越受影响。在结构健康监测系统中,Wi-Fi 网络应用的局域网场景很多,部署也相对简单。但此方案不适用于远距离的数据传输、复杂物理结构、动态或不稳定设备间的网络连接。

ZigBee 是基于 IEEE802.15.4 标准的低功耗局域网协议,是一种短距离、低功耗的无线通信技术。主要应用在短距离范围内并且数据传输速率不高的各种电子设备之间,它使用 2.4GHz 频段,采用跳频技术,与蓝牙相比更简单,功率和费用更低。

无线数传电台是一种采用数字信号处理、数字调制解调,具有前向纠错、均衡软判决等功能的数据传输电台。工作频段大多使用 220MHz~240MHz 或者 400MHz~470MHz,有效覆盖半径大约几十千米。采用无线数传电台实现远程数据采集,相对于有线方式传输具有价格低廉、施工快捷、运行可靠、维护简单等优点,适用于远程实时监测。

GPRS 技术是通用分组无线服务技术的简称,是第二代移动通信中的数据传输技术,是从第一代的 GSM 移动网络基础上增加了一个新的网络,通过增加一些硬件设备并对原有网络升级,形成了一个新的网络逻辑实体,提供端到端、广域的无线 IP 连接。其最高传输速率为 171.2Kb/s。GPRS 技术早已在交通管理系统红绿灯信号采集和传输,远程自动

水温监测等监测中进行了很好的应用。

3G/4G/5G 分别为第三代、第四代和第五代移动通信技术。3G 网络标准包括 CDMA2000、WCDMA、TD-SCDMA,其最高传输速度为上行 384KB/s,下行 3.6Mb/s。4G 网络使用 TD-LTE 和 FDD-LTE 制式,下载速率可达 300Mb/s,上传速率可达 75Mb/s。5G 采用 28GHz 毫米波通信,采用 512-QAM 或 1024-QAM 更高的资料压缩密度调变/解调变器。5G 技术可分别适应终端密集型系统和面积较大区域的高速网络覆盖。5G 技术在大型建筑物结构健康监测系统中的最大优势在于,它支持十万的并发连接以用于支持大规模传感器网络的部署。另外,5G 网络为了适应物联网等技术的应用,可将网络延迟时间降低到 1ms 以下,这对于实时数据传输的实现意义重大。

6.3.5 数据传输具有备用机制,目的是保证在传输线路故障时获取监测数据。

6.4 数据存储和管理

6.4.2 安全性是指数据库软件产品成熟,具有可靠的技术支持,确保系统稳定运行。各种软硬件平台日趋多样化,为了满足各种不同平台系统的要求,应用软件的设计遵循可兼容的原则,与平台无关。经济性是指数据库软件产品有良好的性价比。

6.4.4 异常情况下的容错包括下列内容:

- (1) 有无操作系统故障、网络故障硬件的容错;
- (2) 有无磁盘镜像处理功能软件的容错;
- (3) 有无应用软件异常情况的容错。

恢复功能是指突然停电、出现硬件故障、软件失效、病毒或严重错误操作时,系统提供恢复数据库的功能,如定期转存、恢复备份、回滚等,使系统将数据库恢复到损坏以前的状态。

附录 G 基于氯离子渗透监测的钢筋混凝土结构使用年限预测

G.0.1 氯离子渗透监测得到的氯离子浓度是通过氯离子探针电位换算成的。该氯离子浓度一般认为是混凝土内孔隙溶液中的氯离子浓度。本附录所述计算方法均基于孔隙溶液中的氯离子浓度。

G.0.3 该方法利用氯离子浓度时间序列,即氯离子浓度随时间变化数据,以时间 t_i 作为回归变量,氯离子浓度 $C_s(t_i)$ 作为响应变量,根据公式开展回归分析得到氯离子扩散系数 D_i 和混凝土表面氯离子浓度 C_s 等参数。回归模型中考虑了氯离子扩散系数随时间的变化。为了进行回归分析,需要足够多的氯离子浓度时间序列数据,且数据需要有足够的时间跨度,使 $C_s(t_i)$ 呈现出一定的变化规律。

G.0.4 使钢筋锈蚀的氯离子临界浓度一般采用在混凝土孔隙溶液中使钢筋开始锈蚀的氯离子浓度,能够在模拟孔溶液中获得。

附录 H 基于腐蚀锋面监测的钢筋混凝土结构使用年限预测

H.0.2 目前腐蚀锋面监测较为成熟,应用较为广泛的传感器为阳极梯,根据现场使用经验,在潮湿环境中由于混凝土内部电阻下降,钝化钢筋的电流往往会大于干燥环境下的电流判定值,因此采用电流突变增加和电位负移作为腐蚀开始的标志。

H.0.3 该年限计算公式利用传感器或钢筋处的氯离子浓度达到临界值作为传感器开始锈蚀与钢筋开始锈蚀的标志,此时,两者分别满足下式:

$$\text{对于传感器: } C_{cc} = C_i + (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_1}{\sqrt{4D_{c_1} \cdot t_1}} \right) \right]$$

$$\text{对于钢筋: } C_{cc} = C_i + (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_0}{\sqrt{4D_{c_0} \cdot t_0}} \right) \right]$$

上述两式中混凝土初始氯离子浓度 C_i 、混凝土表面氯离子浓度 C_s 相同,考虑到传感器与钢筋材质相同, C_{cc} 亦相等,因此上述两式可相约简化。进一步考虑到氯离子扩散系数随时间衰减关系,可得到公式(H.0.3)。可见,公式(H.0.3)需在传感器和钢筋材质相同的基础上才能使用。若传感器与钢筋材质不相同,需要考虑其对寿命预测结果的影响。