

# 换流站阀厅结构自动化健康监测系统设计研究

史松峰 蔡亦竹

国网上海市电力公司经济技术研究院 上海 200235

**摘要：**换流站设备改造工程的结构自动化健康监测可分为设备改造施工阶段和运营阶段。换流站设备改造工程中一般伴随结构加固，以及大型设备更换时的拆卸和安装，在此过程中，对阀厅结构进行自动化健康监测显得十分重要。本文通过对换流站阀厅结构自动化健康监测系统的设计研究，提出了换流站阀厅结构自动化健康监测系统的设计原则、系统构成和系统功能、目标，为各地换流站设备改造工程的结构健康监测提供参考和借鉴。

**关键词：**换流站；阀厅钢结构；健康监测

## 引言

我国较早期兴建的换流站服役至今已超过30年，换流站内的设备老化现象亟待整体改造，对其设备进行国产化替代亦成为当务之急。换流站阀厅多采用钢结构，其结构特点表现为跨度大、层高高以及使用荷载大等方面。换流站设备改造工程中一般伴随结构加固，以及大型设备更换时的拆卸和安装，在此过程中，对阀厅结构进行自动化健康监测显得十分重要。

结构自动化健康监测主要是通过通过在结构构件上安装各类传感器，利用无损传感技术采集结构健康状态相关参数，对结构构件的工作状态进行长期的在线监测，获取结构在施工和实际运营状态下的真实响应，并有效利用监测信息反演结构的状态，进而对结构的安全可靠度进行评估。结构健康监测可分为施工过程和运营过程两个阶段：施工阶段监测是为了保证工程顺利完工，从工程施工开始，对关键结构的关键部位进行监测，分析结构健康状态，并及时将结果反馈给施工方和设计方；运营阶段监测是对所有关键结构进行监测，并分析结构的健康状态，预测结构的健康趋势<sup>[1]</sup>。

## 1 监测系统的设计原则

考虑到换流站阀厅多为钢结构房屋，针对其结构特点，确定了其自动化健康监测系统的设计原则如下：

### 1.1 安全性

安全性包括物理安全、网络安全和数据安全。物理安全是指监测硬件系统设备不受物理破坏，即各类硬件系统的安装位置要经过合理规划，确保不被人破坏。网络安全主要涉及到数据的传输和存储，网络安全是保护监测系统在数据传输和存储过程中不受攻击的关键，需采用站内局域网的形式进行数据传输和存储。数据安全需采用可靠的存储介质，可通过在站内设置服务器将数据存储在服务上，防止数据丢失、损坏及外泄。

### 1.2 可靠性

监测设备及其附属设施应安装简单、不易损坏，安装要牢固可靠，易于线路布置，系统可以真实可靠地反映阀厅钢结构的各项监测指标信息。

### 1.3 实用性

根据对换流站阀厅钢结构房屋关键部位的监测，系统能够有效用于换流站阀厅钢结构的健康监测，及时发现结构的损伤情况并给出预警，能够有效用于指导换流站设备改造工程中的健康监测及改造后的日常结构运营维护，提升换流站内房屋建筑信息管理的效率、安全性和可持续性。

### 1.4 经济性

利用阀厅钢结构每一跨结构形式相类似的特点，对传感器的布置进行优化后，选取具有代表性的监测点，采用具有典型性、少而精的监测信息但包含尽可能多的构件状态信息，以实现经济合理的目的。

### 1.5 针对性

根据换流站阀厅钢结构房屋的受力特点以及构件危险性分析结果，确定结构构件的关键节点和代表性部位（如应力集中的位置、变形控制点等），并对其进行重点监测，为换流站阀厅房屋结构在设备改造阶段和后续运营阶段的安全使用提供保障。

### 1.6 可维护性

在换流站设备改造过程中和改造后的运营期内，监测系统（特别是实体传感器、采集仪、服务器等主要设备）要便于日常维护、检修。

### 1.7 便捷性

换流站内部一般有自己的数字化管理系统，结构自动化健康监测系统要能与换流站内部的数字化管理系统打通，接入并成为站内数字化管理系统的一环，方便站内运营管理人员对监测信息进行统一管理。

### 1.8 多样性

监测指标要能反映出阀厅结构的关键信息，要求监测系统不仅要能同时兼容多种监测指标，监测系统的内容、系统架构和使用还可随时便捷地根据实际管理需要，不断地扩充监测内容。

### 2 监测系统的构成

本结构自动化健康监测系统的构成由传感器子系统、信息采集与传输子系统、信息处理与分析子系统构成，传感

器子系统主要由应力、倾斜、沉降、振动、温湿度、风速风向等传感器组成，信息采集与传输子系统主要由采集仪、服务器组成，信息处理与分析子系统主要包含一个自动化在线监测系统平台。

本结构自动化健康监测系统的构成图如图1所示，传感器子系统如图2所示，信息采集与传输子系统如图3所示，信息处理与分析子系统如图4所示。

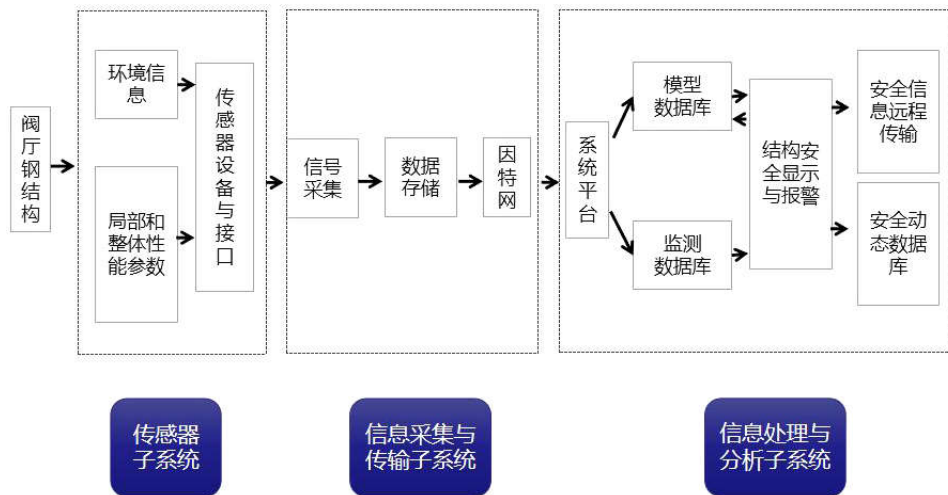


图1 结构自动化健康监测系统的构成图



图2 传感器子系统



图3 信息采集与传输子系统



图4 信息处理与分析子系统

### 3 监测系统的功能和目标

换流站阀厅房屋结构经过多年的使用，其安全性和抗震性能可能出现无法满足现行规范中的相关要求，故换流站设备改造过程中一般存在结构加固，并伴随大型设备的拆卸和安装，为了解阀厅钢结构在新设备吊装过程中及运营阶段的结构安全状态，需对阀厅房屋进行结构自动化健康监测。

为能系统、高效、实用地为换流站阀厅设备改造过

程提供技术支持,要求系统能够实时采集数据,定期分析数据,分析阀门加固施工和设备拆卸过程中构件内力的变化情况,并能做到及时预警。在设备改造工程完成后,分析结构运行随时间增加而产生的累积效应以及遇到突发事件时结构状态,可以协助换流站管理人员掌控阀门钢结构监测构件的力学指标及其变化情况,系统针对换流站运营环境和结构特点编制管理软件,以方便换流站的管理运营单位按照系统既定的监测内容掌握结构的整体健康状况<sup>[2]</sup>。

换流站阀门在设备改造阶段和运营阶段结构自动化健康监测系统的主要功能和目标应包括如下几个方面。

### 3.1 应力监测

结构应力直接关系到结构的安全状态,是判断结构安全最直接的指标,对于应力的异常变化应给予足够的重视。一般是通过测量结构的应变再换算为应力值,通过对关键构件局部应变的测量,实时了解钢结构的应力变化状态,分析并评估其安全状态。

结构应力监测的主要功能和目标如下:(1)应力与应变监测可以实时掌握结构的受力状态和变形情况,及时发现问题并采取措施进行调整和修正,从而提高阀门在结构加固和设备拆卸安装过程中的施工质量。(2)应力与应变监测可以发现结构的偏差和异常情况,预警可能的风险和危害。通过应变监测,判定构件的安全状态,并进行安全预警。(3)根据监测的结构应力/应变数据,对结构加固设计模型进行反演和修正,可以有效控制材料的消耗和加固施工过程中的浪费,提高资源利用率。

### 3.2 变形监测

在建筑工程中,结构变形可能导致建筑物结构的不稳定,甚至引发严重的结构破坏。因此,结构变形监测被视为建筑安全的守护者,它能够及时发现变形问题并采取相应的措施,确保建筑物的使用安全。结构变形监测主要包含对变形体进行各种沉降、倾斜、水平位移的变形监测等。

结构变形监测的主要功能和目标如下:(1)监测阀门钢结构在设备改造施工阶段变形的数据,了解阀门钢结构中关键构件在大型设备的拆卸和安装过程中的变形情况,确保拆、装过程中杆件不发生较大的变形。(2)在结构运营期间,对房屋的不均匀沉降和倾斜情况进行监测,当监测点位出现较大变形时能及时预警,防止出现结构破坏。

### 3.3 振动监测

结构振动是结构整体刚度和质量的关键指标之一,是结构安全和损伤的表征<sup>[3]</sup>。引起结构振动的因素有风、

地震和机械振动等。风引起的振动不断地作用于结构,地震对结构影响则是突发性的,机械振动是随着机器的运行带来持续振动不断作用于结构。结构振动监测主要功能和目标如下:(1)利用结构动力特性的变化来对结构的整体性能进行损伤监测,即将结构系统的实测结构模态特性与健康结构的模态特性进行比较,判断结构是否发生损伤。(2)通过振动监测,了解结构动力响应情况,可以及时发现潜在的安全隐患,为阀门结构的改造加固和日常维护提供依据。

### 3.4 风速风向监测

风速风向监测,是评价结构风动效应的最直接指标。风速风向监测主要功能和目标如下:(1)风灾监测。在建筑物风灾监测中,风速传感器也被广泛应用于风灾监测中。在风灾发生时,风速会发生变化,通过测量风速的变化,可以预测风灾的发展和影响范围,从而为建筑物的安全保护提供重要的参考。(2)风效应预警。对于大跨度结构来说,其风效应明显,有必要针对不同风效应制定预警指标。(3)在建筑物火灾监测中,风速传感器也被广泛应用于火灾监测中。在火灾发生时,火焰会产生高温和高压,通过测量风速的变化,可以预测火灾的发展和蔓延速度,从而为火灾的扑灭提供重要的参考。

### 3.5 温湿度监测

在建筑物环境监控中,温湿度监测是一个重要的环节。它能够帮助建筑物管理员保障建筑物舒适度和健康水平,提高生产力和劳动者的生活品质。另外,温湿度监测还能为建筑物管理员提供及时的环境数据,帮助他们针对潜在的风险和问题进行及时的处理和调整,保证建筑物的健康与安全。结构温度的变化对钢结构的影响是多方面的,不仅涉及力学性能的变化,还包括结构变形和失效的风险,通过在钢结构上安装温度传感器,监测结构温度场,能有效提高结构健康监测系统的准确性。温湿度监测主要功能和目标如下:(1)通过测量结构不同部位的温度,对结构构件应变测量数据进行温度补偿和修正,从而使应变监测更加精准。(2)做好温度的控制及防护是保证钢结构安全使用的关键,当构件的温度超过允许的界限时,及时给出预警。(3)钢结构在潮湿、高温、多灰尘、多化学气体的恶劣环境中,易发生表面锈蚀和内部腐蚀现象,并会导致钢结构的力学性能下降,做好湿度控制是减少钢结构锈蚀的关键因素。

### 3.6 腐蚀监测

腐蚀是材料与其所在环境反应而引发材料性能衰退的一种现象<sup>[4]</sup>,其发生的方式多种多样,危害遍及各行

各业,获取材料腐蚀过程或环境对材料的腐蚀性随时间变化的信息,可有效降低腐蚀带来的损失。腐蚀监测技术是无损检测技术的发展和 innovation,是随着传感器技术的发展而出现的一种新技术。腐蚀监测主要功能和目标如下:(1)通过监测结构关键部位钢构件的腐蚀程度,了解构件的损坏程度。(2)腐蚀监测能及时为工程技术人员反馈结构腐蚀信息,从而采取有效措施抑制或减缓腐蚀,避免腐蚀事故的发生。

### 3.7 自动化监测系统框架

本结构自动化健康监测采用自主开发的综合管理平台,该平台集成了传感器技术、无线通讯技术、数据库技术、网络云平台技术,岩土工程技术、计算机图形技术等,并采用了最新流行的Vue开发框架,可对各种传感器数据进行获取、解析、入库,去噪、补偿,同时对监测数据可进行深度学习与预测,提供专家咨询与建议。项目的监测参数,均可采用自动化监测手段,其测试精度之高,数据采集实时性、连续性、以及问题反映的直观性,均是人工采集无法比拟的。采用智能数据采集仪就可以将所有数据整合起来,再通过4G(DTU)模块进行无线传输到云端的服务器,局域网内也可以采用有线传输到实体服务器,真正实现多个传感器24小时连续数据采集上传,对监测项目进行全方位实时监控、分析。

自动化监测系统框架的功能和目标是:(1)能够实现远程无人自动化监测,无需人员多次进入现场。(2)系统可实现无线传输,无需长距离布线。(3)实现监测数据信息化管理,相关人员可以通过不同权限登入网络或者利用手机取得现场结构安全数据及安全评估信息。(4)通过监测系统得到丰富的监测数据,通过系统分析,并与模型计算结果进行对比,得出结构实际情况下的实时受力状态和变化发展趋势,了解结构的安全状况。(5)在结构出现异常情况时,系统自动进行预警,并可通过短信方式将信息及时转达给相关管理人员,并提示后台及时对结构当前状态进行安全评估。

(6)自动化健康监测系统与换流站内部的数字化管理系统打通,接入并成为站内数字化管理系统的一环。

### 4 结语

本文通过对换流站阀厅结构自动化健康监测系统的设计研究,得出以下结论:

(1)换流站设备改造工程的结构自动化健康监测可分为设备改造施工阶段和运营阶段。在设备改造施工阶段,结构自动化健康监测主要为房屋加固施工和大型设备的拆卸、吊装提供指导;在运营阶段,结构自动化健康监测主要对结构所有关键构件进行监测,分析结构的健康状态,预测结构的健康趋势。

(2)换流站阀厅结构自动化健康监测系统的设计原则需包含:安全性、可靠性、实用性、经济性、针对性、可维护性、便捷性、多样性。

(3)换流站阀厅结构自动化健康监测系统由传感器子系统、信息采集与传输子系统、信息处理与分析子系统构成。

(4)换流站阀厅结构自动化健康监测系统的监测内容主要包含:应力监测、变形监测、振动监测、风速风向监测、温湿度监测、腐蚀监测等,监测系统的主要功能和目标应从上述监测内容分别进行设计和考虑。

本结构自动化健康监测系统的总体设计可为各地换流站设备改造工程的结构健康监测提供参考和借鉴。

### 参考文献

- [1]轩慎青,陈良超,方舟,王哲.大跨度空间网格结构健康监测系统设计及应用[J].北京化工大学学报(自然科学版),2022,49(5):108-116.
- [2]刘建秀.大跨拱形空间钢管桁架结构健康监测系统设计及安装[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学.2018.
- [3]于西尧.小碓桥健康监测系统的总体设计[J].公路,2023,68(09):189-194.
- [4]石鹏飞,胡凌越,段国庆,胡科峰.腐蚀监测技术研究现状与展望[J].全面腐蚀控制,2023,37(10):23-30.