

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.05.002

# 故宫官式古建筑保护中火灾报警系统冷凝水问题研究

李月

(故宫博物院, 北京 100009)

**摘要:** 冷凝水反流是吸气式火灾自动报警系统在古建筑展厅中使用经常遇到的问题。为解决因冷凝水反流导致的设备故障, 采用对故宫某展馆温度、湿度现场实时监测, 以便为解决问题提供依据。结果表明: 在7、8月间, 空气相对湿度大多超过60%, 且古建筑闷顶的上、下空间温差较大, 容易在火灾报警系统吸气过程中形成冷凝水, 由此提出加装重力排水装置的优化改造方案, 可有效控制冷凝水倒流至报警机。通过2年的实际使用情况验证, 有效地解决了冷凝水回流的问题, 具有较好的应用效果。

**关键词:** 故宫古建筑; 冷凝水反流; 温湿度监测; 重力排水装置

中图分类号: TU892

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)05-0010-07

## Research on Condensate Water in the Fire Alarm System under the subject of Ancient Architecture Conservation Project of the Palace Museum

LI Yue

(The Palace Museum, Beijing, 100009, China)

**Abstract:** The back flow of condensed water frequently leads to aspirating fire alarm system malfunction in the galleries of ancient architecture. By real-time monitoring the temperature and humidity of a certain gallery of the Palace Museum, this paper proposed solutions to deal with the equipment malfunction cause by the back flow of condensed water. The result are as follows. The humidity is high and the temperature differential below and above the ceiling of the ancient architecture is relatively high between July and August which made condensed water be generated easily in the aspiration system. This paper proved that by installing a gravity drainage device, the back flow of condensed water can be solved effectively.

**Keywords:** ancient architecture of the Palace Museum; back flow of condensed water, temperature and humidity monitoring, gravity drainage device

古建筑是重要的历史文化遗产, 是国家文明的重要标志, 是全人类共同的宝贵财富<sup>[1-2]</sup>。明清官式古建筑的总体布局强调中轴对称, 一般是高大建筑居中, 两侧配有配殿、庭廊、庑殿等。建筑殿堂相连, 廊道相接, 建筑结构架空有序, 供氧便利。房屋主体材料大量使用木质的梁、柱、檩、椽、斗拱、藻井等可燃构件, 表面刷油漆或绘制彩画, 室内有大量挂画、垂帘等易燃的装饰材料, 一旦发生火灾很容易迅速蔓延扩大。古往今来, 我国历史上大量古建筑损失的事实证明, 火灾是古建筑的大敌, 尤其对于木结构的明清官式古建筑, 火灾的危害是毁灭性的<sup>[3]</sup>。2018年2月17日, 西藏最早的土木结构建筑大昭

寺, 其供奉有释迦牟尼佛像的后殿二楼右侧通风室着火, 过火面积约50 m<sup>2</sup><sup>[4]</sup>。2019年1月6日, 四川省绵阳市江油市全国重点文物保护单位云岩寺东岳殿发生火灾, 过火面积约120 m<sup>2</sup>, 大殿主体建筑被烧毁<sup>[5]</sup>。2020年5月4日, 第六批全国重点文物保护单位芙蓉村古建筑群之芙蓉司马第民居发生火灾, 过火建筑面积约1246 m<sup>2</sup>, 发生火灾的司马第大屋是芙蓉村古建筑群中规模最大的民居之一, 始建于清代的康熙年间<sup>[6]</sup>。可见尽早发现火情在明清官式古建筑的保护中就显得尤为重要。

吸气式烟雾探测火灾报警系统能够在极早期发现火情, 为扑救火灾争取黄金时间, 同时可以兼顾保

收稿日期: 2024-03-30

修稿日期: 2024-05-05

基金项目: 国家重点研发计划“大型明清古建筑(群)安全风险预警关键技术研究”(2021YFC1523500)

作者简介: 李月(1987-), 男, 高级工程师, 主要从事古建筑修缮保护领域安全技术防范方面研究。E-mail: china19870223@163.com

护建筑吊顶彩画的原貌展示<sup>[7]</sup>, 现已广泛应用于明清古建筑消防工程中。刘国柱<sup>[8]</sup> 通过从古建筑对烟雾报警的要求、古建筑结构及其内部装饰特殊性入手, 结合空气采样早期烟雾报警的灵敏性、自学习功能、远程组网等功能, 总结出古建筑火灾自动报警设计中, 选用空气采样早期烟雾探测的必要性。赵玉宝等<sup>[9]</sup> 通过在承德普宁寺、包头武当召寺院、无锡灵山梵宫等古建筑群中, 使用吸气式早期火灾智能预警系统进行火灾监控, 分析了吸气式火灾智能预警系统在古建筑应用的先进性, 说明了相对于传统火灾自动报警系统, 更加适合文物古建筑火灾自动报警工作。任海龙<sup>[10]</sup> 通过分析大悲阁安装火灾探测技术的选型特点, 结合大悲阁古建筑环境和结构特点, 介绍了吸气式烟雾探测技术的应用案例。吴希晖等<sup>[11]</sup> 结合极早期空气采样火灾报警系统的性能和设计要求, 通过在正定隆兴寺弥陀殿试点项目的实际应用, 对火灾报警设备在设计施工、管线铺设、安装调试等方面做了一些探索, 找出了适合弥陀殿结构的最佳管线设计安装方法, 积累了宝贵的设计、施工经验。但通过调研吸气式烟雾探测火灾报警系统, 发现在古建筑长期使用中, 受建筑结构、展览温湿度控制等因素影响, 闷顶和展厅内温差较大, 采样管中易产生冷凝水, 倒流回报警主机, 导致设备出现故障。此故障在故宫某展厅就曾出现过, 不仅危害了建筑的消防安全, 而且会造成重大的经济损失。

针对上述问题, 大多数情况采用以下两个解决思路。第一个解决思路是通过增加系统维保频次, 经常从主机端反吹高压空气, 对管道进行干燥, 去除水气<sup>[12]</sup>。但上述解决方法, 并没有针对古建筑环境进行深入研究。尤其是在水蒸气不易排出室外、湿气较大的夏季时, 为减少古建筑内水蒸气倒流影响系统正常运行的可能, 对设备维护保养的次数就会成倍增加。维护保养操作时, 就需要长期经常插拔采样管口, 可能会导致连接管脱落或断裂, 影响报警系统从受保护区域内抽取烟雾的能力, 最终降低报警系统的及时性和准确性<sup>[13]</sup>。同时, 笔者在古建筑消防实际工作中发现, 大多数古建筑群规模庞大, 建筑分布相对分散。逐一对每个建筑的报警设备进行维护, 就要投入大量专业技术人员、设备设施, 给使用单位的正常工作和预算支出都会造成困难。另一个解决思路是在闷顶内直接加装除湿设备和风干机, 可以除去空气中的水分, 保持环境处于干燥的状态<sup>[14]</sup>。但是, 除湿是一个持续的过程, 需要设备 24

h 不间断运行。长时间在木质古建筑中使用电气设备, 尤其是在夜间无人值守的古建筑内部, 是存在安全隐患的。而且, 在闷顶内放置除湿机和风幕机, 对古建筑吊顶承重负荷要求较高, 维护人员开展日常安全巡检、维护保养等工作都需要攀爬脚手架或梯子, 存在较大困难。

因此, 本文拟采取数据实时监测和试验分析的方法, 结合古建筑结构特点、季节等多维数据特征, 开展温度、湿度数据采集分析, 并结合实际使用情况提出建议, 合理改进空气采样报警采样管路, 解决冷凝水倒流导致设备故障的问题。

## 1 官式古建筑温度、湿度监测试验

### 1.1 试验概况

结合木结构官式建筑结构特点, 选取故宫某开放展馆进行温度、湿度监测试验, 该展馆在大多数情况下, 会展出书画、拓片类文物。吸气式烟雾探测火灾报警系统主机安装在展馆闷顶下方, 采样管网敷设在闷顶内, 主机内有激光型感烟火灾探测器、空气过滤器、空气采样管网、火灾报警及显示控制单元等设备。系统通过分布在探测区域的的采样孔, 主动将空气抽吸到探测腔内分析<sup>[15]</sup>, 探测空气样本中的火灾因子, 吸气式烟雾探测火灾报警系统工作示意图如图 1 所示。

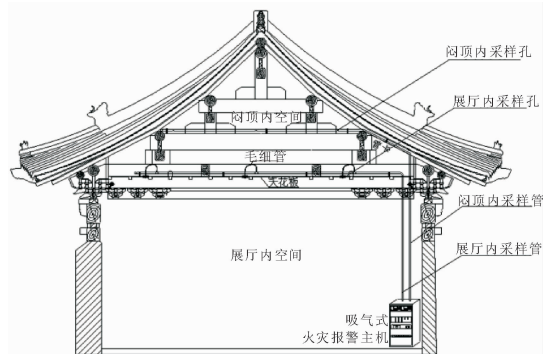


图 1 吸气式烟雾探测火灾报警系统工作示意图

当报警系统采集空气分析火灾因子时, 也会伴随吸入空气中的水蒸气。而过滤器只能除去采样气体中的纤维屑和绝大多数的大颗粒灰尘, 无法过滤空气中的水气。在冬季时, 空气湿度低, 水蒸气很少, 系统可以正常运行。在春、夏、秋季节, 尤其是季节交替的时候, 空气中湿度高, 当管路两端存在较大温差, 水蒸气遇冷低于其露点温度时, 在管路中会冷却形成冷凝水, 沿着采样管壁倒流回报警主机, 导致设备出现故障<sup>[16]</sup>。根据《博物馆建筑设计规范》中

对藏品防护的温湿度要求,减少展陈过程中文物受到展厅环境的腐蚀<sup>[17]</sup>,尤其当展出书法、国画等保存要求更为特殊的纸质材质文物时,展厅会长期使用精密空调等设备控制温度、湿度,以保证文物处于最佳状态<sup>[18]</sup>。因此,长期使用温控设备引起的展厅与闷顶内的温差,就会更为明显,产生冷凝水的现象也更为常见。

为保证本次监测数据的全面性和有效性,试验选取全年的温度、湿度数据进行分析(即 2021 年 1 月 1 日至 12 月 31 日)。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 监测设备

基于对古建筑最小干预的考虑,监测设备选用温湿度一体化集成传感器,连续监测环境参数,定期采集试验数据。该设备的温度数据精度为  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ,湿度数据精度为  $\pm 3\%$  RH,工作环境为  $-40^{\circ}\text{C} \sim +75^{\circ}\text{C}$ 。试验选取每 1 h 自动记录一次监测数据,满足古建筑实际使用情况。

### 1.2.2 监测位置

温度、湿度监测的点位布置原则,是根据建筑布局和结构特点进行确定的。经过综合考量,本试验在建筑前殿、后殿及穿廊的闷顶内和展厅内,共安装 5 处设备,确保了建筑不同位置监测数据的全面性和代表性。为了不破坏古建筑的原貌展示,设备安装方式分别选用了在闷顶内横梁浮搁和在闷顶下抱箍的工艺,对接触的建筑本体采取了有效保护措施。记录设备安装具体位置如图 2 所示。其中,监测点 1、监测点 3、监测点 4 是在展厅闷顶下的,监测点 2、监测点 5 是在闷顶内的。

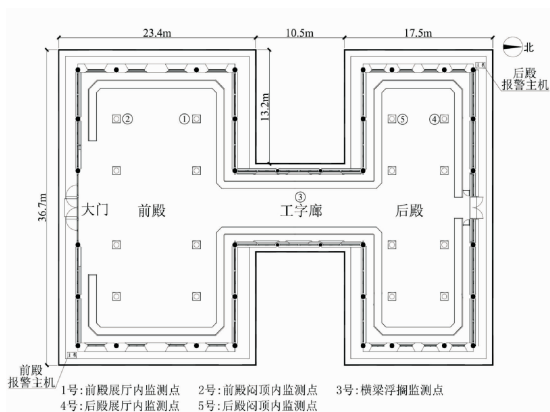


图 2 监测设备安装位置平面图

### 1.3 监测数据

该馆的温度随北京季节特点,呈现出周期性交替的变化规律。2021 年展馆闷顶内年平均温度

$16.45^{\circ}\text{C}$ ,平均湿度 45.73%。全年当中最高气温  $31.3^{\circ}\text{C}$ ,出现在 7 月 25 日 23 时。最低气温  $-4^{\circ}\text{C}$ ,出现在 12 月 30 日 7 时。平均气温最高的月份为 7 月,平均值为  $27.52^{\circ}\text{C}$ ,平均气温最低的月份为 12 月,平均值为  $3.76^{\circ}\text{C}$ 。展馆闷顶内日平均气温及月平均气温分布如图 3 所示。2021 年展馆展厅内年平均温度  $16.41^{\circ}\text{C}$ ,平均湿度 46.0%。全年当中最高气温  $31.0^{\circ}\text{C}$ ,出现在 8 月 5 日 4 时。最低气温  $-1.8^{\circ}\text{C}$ ,出现在 12 月 31 日 2 时。平均气温最高的月份为 7 月,平均值为  $27.03^{\circ}\text{C}$ ;平均气温最低的月份为 12 月,平均值为  $4.78^{\circ}\text{C}$ 。展厅内日平均气温及月平均气温分布如图 4 所示。

通过分析展馆展厅和闷顶内日平均气温及月平均气温(图 3、图 4),易知:从 6 月开始,日平均气温逐步攀升超过  $25^{\circ}\text{C}$ 。在 7 月下旬至 8 月上旬这段时间,每日的平均气温均接近全年最高温度。在 9 月中下旬,气温逐步降低至  $25^{\circ}\text{C}$  左右。因为考虑文物保存要求和游客参观体验,展厅在 6 月至 9 月对观众开放的这段时间,会长期使用空调。闷顶内空间由于与展厅有彩画吊顶分割,但与室外通过椽档实时空气流通,闷顶内温度近同于室外夏季的温度。这就导致闷顶内和展厅内出现较大温度差,基本在  $3^{\circ}\text{C}$  至  $5^{\circ}\text{C}$  间,为冷凝水形成提供了条件。



图 3 闷顶内日平均气温及月平均气温分布图

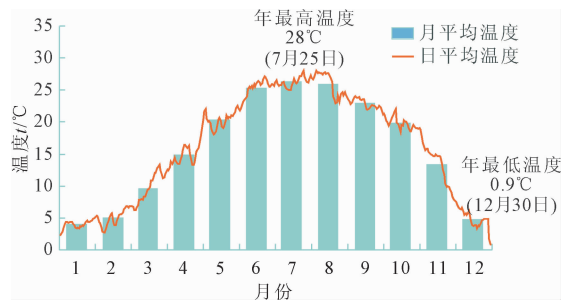


图 4 展厅内日平均气温及月平均气温分布图

相对湿度反映了空气中水蒸气含量接近饱和的程度<sup>[19]</sup>。相对湿度越大,空气吸收水蒸气的能力就越弱,相应就更容易产生冷凝水<sup>[20]</sup>。另外,在空气

含湿量保持不变的情况下冷却空气,空气的相对湿度会随着温度的下降而增大<sup>[21]</sup>。

2021年展馆闷顶内年平均湿度44.52%,全年中最高湿度为72.7%,出现在8月26日16时;最低湿度为23.13%,出现在12月29日18时;平均湿度最高的月份是7月和8月,其中湿度在60%以上的天数约占80.65%,闷顶内日平均湿度和月平均湿度分布如图5所示。2021年展厅内年平均湿度46.93%,全年中最高湿度为82.24%,出现在8月29日17时;最低湿度17.99%,出现在12月29日20时;平均湿度最高的月份是7月和8月,湿度在60%以上的天数约占96.77%。展厅内日平均湿度及月平均湿度分布如图6所示。

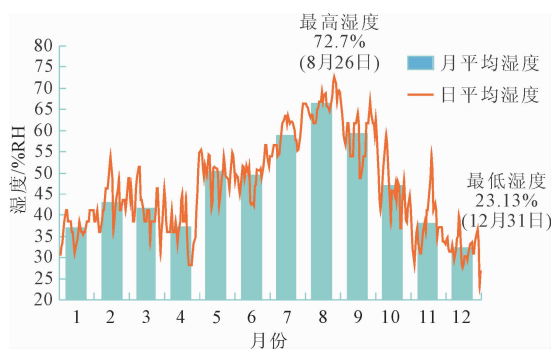


图5 闷顶内日平均湿度及月平均湿度分布图

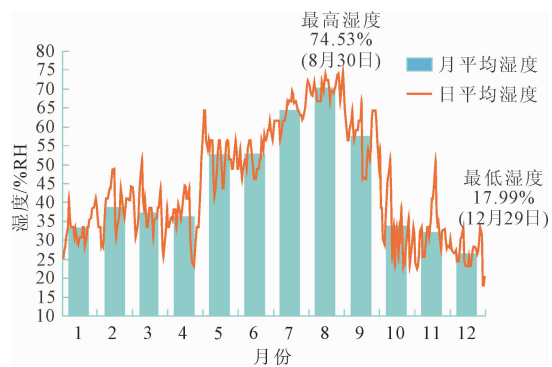


图6 展厅内日平均湿度及月平均湿度分布图

根据闷顶和展厅内日平均湿度及月平均湿度分布观察(图5、图6),并结合笔者常年工作经验可知:在当年的7月和8月,空气中相对湿度较高,尤其是7月下旬至8月下旬的这段时间。虽然在5月上旬和9月中下旬,经常会下雨,出现相对湿度超过60%的情况(图5、图6中的小波动为下雨导致),但产生冷凝水是一个持续的过程,下雨导致的短暂湿度升高并不会出现冷凝水回流,而在7月至8月间,因为季节原因,空气中湿度是持续稳定在60%以上,且此时闷顶内与展厅内温差很大,就容易在采样

管壁形成冷凝水。

在2021年7月27日凌晨,展馆后殿报警主机发生了因冷凝水流入导致的传感器短路故障。笔者通过采集故障前、后两周内的温度、湿度数据,发现在7月23日至7月31日间,闷顶内和展厅内温差很大,最大的时候可以达到4.2℃。且这段时间闷顶内湿度较大,持续在60%以上。考虑到冷凝水产生、被吸入报警主机、最终出现系统故障是一个连续的过程,所以在温差较大、湿度高持续了一周后,最终在7月27日发生故障。故障点温度、湿度数据如图7所示。

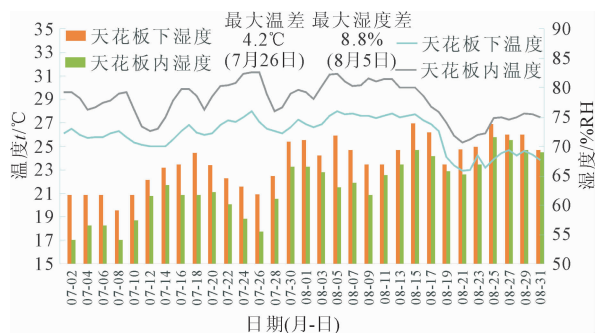


图7 故障点在7、8月的温度、湿度图

同时,为分析报警主机改变安装位置,是否与冷凝水产生有直接关系,试验在建筑前殿、后殿及穿廊共选取5个位置的监测点(图2),收集7至8月间不同位置温、湿度,用于对不同位置温湿度的差异性研究,获得的监测数据如图8所示。

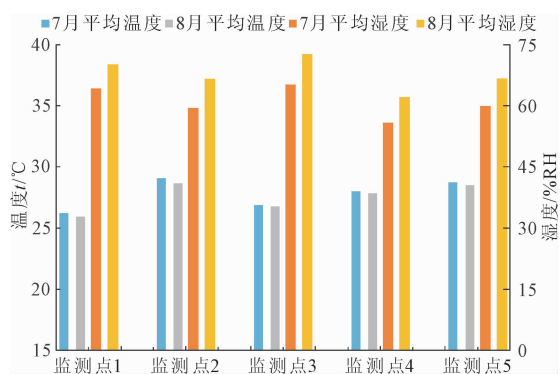


图8 不同监测点7、8月的平均温度、湿度图

由图8可知:对于监测点1、监测点3和监测点4而言,都是安装于闷顶下的。前殿设有展厅出入口,观众进出会带动空气流通。后殿考虑展览效果,将窗户全部关闭,近似于封闭空间。由于前殿空气流动大的原因,造成前殿展厅比穿廊和后殿的温度会低约1℃~2℃。后殿空气交换因为基本都依靠空调换气,湿度可以控制在一个较低的程度。监测点

2、监测点 5,都是安装于闷顶内的,可以通过椽子之间的空隙和室外进行空气流通,温度和湿度于外界基本没有区别。穿廊处的温、湿度整体情况,与建筑前殿差别不大。从建筑结构考虑,安装空气采样管路不能破坏建筑原有主体结构,试验中没有发现合适的位置,可以将采样管直接穿入闷顶进行探测。因此,穿廊处暂不考虑安装主机。另结合图 8,绘出不同监测点温度、湿度数值,见表 1 所示。

表 1 不同监测点的温湿度数值

		温度/°C			相对湿度/% RH		
		最大	最小	平均	最大	最小	平均
监测点 1	7 月	28.00	25.00	26.23	72.10	56.54	64.22
	8 月	28.00	22.90	25.92	74.53	66.82	70.20
监测点 2	7 月	31.30	26.30	29.07	66.50	53.97	59.38
	8 月	31.20	25.30	28.67	72.70	61.68	66.53
监测点 3	7 月	28.40	25.40	26.90	72.40	59.70	65.26
	8 月	28.70	23.90	26.75	82.60	66.60	72.68
监测点 4	7 月	30.50	26.00	27.98	64.25	43.69	55.86
	8 月	30.30	24.80	27.84	66.82	56.54	62.16
监测点 5	7 月	30.90	26.30	28.75	67.50	54.00	59.91
	8 月	31.90	25.10	28.50	72.70	61.10	66.67

通过对系统运行情况进行定期检查,笔者发现该展馆前、后殿展厅的采样管壁均附有水珠,都有明显结露现象,目前只是前殿的报警主机暂时没有发生故障。虽然前、后殿温度、湿度存在些许差异,但是并不能避免冷凝水的产生。因此,单纯调整报警主机的安装位置,是不能从根源上消除冷凝水带来的安全隐患。

## 2 冷凝水形成及影响

冷凝水是水蒸气在冷凝过程形成的液态水。当闷顶内空气被主机吸入时,因闷顶下采样管壁的温度低于露点温度,空气中的水蒸气就会在管壁析出结露,当露珠增大到一定程度就会形成了冷凝水<sup>[22-23]</sup>。冷凝水的形成原因与空气中的相对湿度,展厅内与闷顶内温度差值等因素有关<sup>[24]</sup>。

基于上述图 3—图 8 的数值和相关分析结果,认为容易产生冷凝水的原因包括以下几个方面:

(1) 在季节交替的时候,如春夏之交、夏秋之交时,天气炎热多雨,特别是在当年 7—8 月间,空气中湿度超过 60% 的天数约占 88.71%,展厅内受空调影响与闷顶内温差较大,这段时间具备产生冷凝水

的条件。

(2) 冷凝水形成的速率与吸气时气体温度和周围环境温度差值相关。在 7—8 月间,空气中水蒸气已接近饱和,展厅与闷顶内温差较大,这就更容易产生冷凝水,最终导致流入报警主机出现故障。

(3) 冷凝水倒流入报警主机是一个持续的过程。从当年 7 月中旬开始,冷凝水不断累积且无法消除,最终导致 7 月 27 日出现故障。

(4) 书画、拓片等纸质材质类的展览,要求温度、湿度基本稳定在一个固定范围内的,过低或过高的温湿度都不利于展品的保存<sup>[25]</sup>。因此,不能单纯通过调整展厅温度和湿度,去解决冷凝水倒吸入报警主机的问题。最合适的解决方法是既要满足展品保存要求,又不能影响消防设备正常运行。

## 3 火灾报警设备的改进方案

### 3.1 改进方案

消防报警设备如何在明清官式古建筑展厅使用,是文物保护领域的热点问题,既要满足珍贵文物保存环境的要求,又要确保消防设备安全有效运行<sup>[26]</sup>。因文物保存的要求,展厅会长期使用空调等调温设备,夏季时必然会导致闷顶内和展厅存在温差。空气采样报警主机在吸气时,采样气体中势必会夹带大量气液,在采样管壁形成冷凝水,这是古建筑闷顶结构特点导致的。因此,是不能从设置温、湿度环境,解决冷凝水产生问题的。同时,通过分析上述试验中建筑内不同位置的温、湿度数据,及现场实际验证可知,前、后殿采样管中均有冷凝水产生,所以,也不能单纯通过调整报警主机位置,解决冷凝水产生问题。

针对上述情况,在消防设施安装要保持文物本体的真实性、完整性的前提下,结合本实验采集到的温、湿度数据进行分析,笔者提出了一种改进方案:在采样管与报警主机间增装一个“U”型重力疏水装置(图 9),用于收集、疏导冷凝水。重力疏水装置由空气采样管网接口、储水装置、“三通”检修阀门、排水口和密封帽等组成(图 10),图 10 中排水装置、“三通”球阀和密封帽为本研究改造部件。重力疏水装置安装在展厅内,直接与报警主机管路连接,不存在温度差,杜绝了二次产生冷凝水的可能。采用上述的安装方式,也更加有利于进行设备维护保养工作。

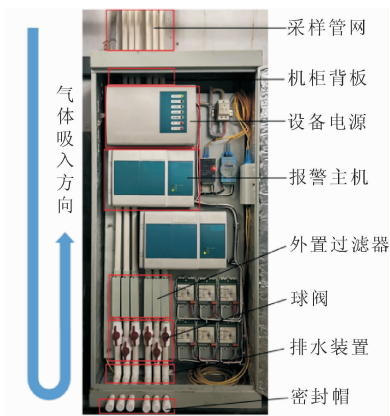


图9 重力疏水装置实物图

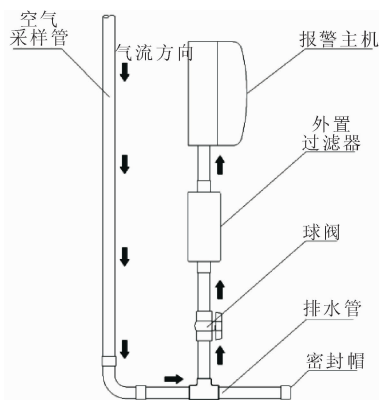


图10 重力疏水装置示意图

重力疏水装置安装时,不接触文物建筑本体,直接固定在报警主机的背板上。在报警主机下方架设底座,但不固定在地面上,可以随时搬移挪动,不会破坏文物建筑原有地面。根据吸气方向,调整主机采用倒置安装的方式。安装高度选取距离地面 1.3 m 高的位置,便于维护人员进行系统测试和检修。重力疏水装置管路一端连接至吸气管末端,一端接入到报警主机的探测腔前端。采取上述的安装方式就使得带有水气的采样气体,必须经过重力疏水装置后,才能进入报警主机探测腔。

考虑到重力疏水装置的管道规格、强度、质量都会影响吸气式感烟火灾探测报警系统的探测效果,按照专业设计人员对现场实际环境评估的结果,管路最终选取外径 25 mm,内径 21 mm 的防阻燃的 PVC 管材,单管总长约为 2.5 m,管路材质韧性较好,耐腐蚀。在采样管路的管口和管件连接处,使用生料带和乳胶做密封处理,防止重力疏水装置管道在古建筑潮湿环境下漏水漏气。

安装采样管前,先清理管内杂物,确保管壁光滑不挂水珠,并进行打压,测试使用强度。采样管采用

“Ω”形的管卡固定在背板上,防止时间过长,管路固定不紧会出现悬空或脱落。在重力疏水装置拐角处,弯头处采用曲率半径为 70 mm 的采样管,降低增加重力疏水装置带来的空气阻力,经过设计单位现场确认,实际测试不影响火灾探测效果。底部排水装置倾斜角度约 10°,可以自动将冷凝水流到储水端,管路内实现水、气分离,冷凝水不再随着采样气体进入报警主机。储水端口处设有螺纹,并盖上密封帽,平时拧好不会漏气,保证了采样管网的气密性。

### 3.2 运行效果

该装置投入使用后,解决了冷凝水倒流至报警主机的问题。通过对 2022 年、2023 年的实际应用情况进行验证,在报警主机和空气采样管路间增加重力疏水装置,2 年的使用时间内,都没有再出现过类似故障,有效阻断了冷凝水反流入报警主机。同时,通过日常检测和每年的建筑消防设施检测,本次改造也能够保证报警系统安全有效运行,不会影响火灾探测效果。

需要说明的是,重力疏水装置增加的日常工作量,只是在夏季或夏秋之间进行维护保养时,安排维保人员手动倾倒入排水口内堆积的冷凝水,并清洁干燥密封帽,操作简单方便。在报警主机前端增设“三通”检修阀门。每当需要维护保养空气采样管网时,直接关闭“三通”检修阀门,使用高压空气反吹重力疏水装置,就可以对整体管路进行干燥处理。

## 4 结论

通过数据实时监测和试验分析的方法,分析了故宫某展厅冷凝水产生的原因,并针对冷凝水反流回报警主机的问题提出改进建议,得出以下结论:

(1) 在春夏、夏季或夏秋之交,空气湿度高,展厅和闷顶温差较大,容易在空气采样过程中形成冷凝水。采样管产生冷凝水是一个持续过程,最终导致报警主机在夏季出现故障。

(2) 在保证火灾探测器使用效果的前提下,加装重力疏水装置,通过 2 年实际使用情况检验,有效解决了冷凝水反流入空气采样报警主机的问题。

**致谢:**故宫博物院研究馆员周乾老师为本研究提供了学术指导,笔者予以感谢。

### 参考文献:

[1] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于进一步加强文物安

- 全工作的实施意见 [EB/OL]. (2017-09-09) [2017-09-20] [https://www.gov.cn/zhengce/content/2017-09/20/content\\_5226346.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2017-09/20/content_5226346.htm).
- [2] 晋宏逵. 文物建筑的价值评估与有效保护[J]. 中国文化遗产, 2015(3):14-21.
- [3] 申俊云. 浅谈古建筑火灾特点和防护对策[J]. 中国安全生产科学技术, 2007, 26(6):134-137.
- [4] 中华人民共和国中央人民政府网. 国家文物局:2018年全国重点文物保护单位火灾事故下降 50% [EB/OL]. (2019-02-01) [2019-02-01] [https://www.gov.cn/xinwen/2019-02/01/content\\_5363142.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2019-02/01/content_5363142.htm).
- [5] 中华人民共和国中央人民政府网. 国家文物局关于近期文物火灾事故情况的通报[EB/OL]. (2019-04-17) [2019-04-17] [https://www.gov.cn/xinwen/2019-04/17/content\\_5383672.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2019-04/17/content_5383672.htm).
- [6] 中华人民共和国中央人民政府网. 国家文物局关于 2020 年度文物行政执法和安全监管工作情况通报 [EB/OL]. (2021-03-24) [2021-03-24] [https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/24/content\\_5595429.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/24/content_5595429.htm).
- [7] 张泽江, 梅秀娟. 古建筑消防[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010:148-172.
- [8] 刘国柱. 空气采样早期烟雾报警器在古建筑中的应用[J]. 电气应用, 2005(11):149-151.
- [9] 赵玉宝, 李 铭. 吸气式极早期火灾智能预警系统在古建筑中的应用[J]. 消防技术与产品信息, 2009(12):24-26.
- [10] 任海龙. 大空间古建筑火灾探测方法研究[J]. 武警学院学报, 2012, 28(4):58-60.
- [11] 吴希晖, 刘东锋. 极早期空气采样火灾预警系统在古建筑本体保护中的最佳管线设计安装方法初探[J]. 消防技术与产品信息, 2007(10):37-38.
- [12] 何 晶. 空气采样早期烟雾探测系统在地铁火灾防护中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(5):126-128.
- [13] 吸气式感烟火灾探测报警系统设计、施工及验收规范:DB 11/1026—2013 [S]. 北京:北京市公安局消防局, 2013.
- [14] Kohler M T, Fischer M, Lepffer M. Identifying and blocking interrupted aspirated smoke detector (ASD) in [J]. Engineering, Environmental Science, 2011(11):19-20.
- [15] 火灾自动报警系统设计规范:GB 50116—2013 [S]. 北京:中国计划出版社, 2013.
- [16] 穆 康, 刘 京, 卢 振, 等. 城市办公建筑空调制冷系统大气排热实测分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(11):126-131.
- [17] 博物馆建筑设计规范:JGJ66—2015 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.
- [18] 张 欢, 梁 义. 纸质文物保护技术及环境控制对策[J]. 中国文物科学研究, 2010(4):20-22, 26.
- [19] 朱明亚, 潘毅群, 沙华晶, 等. 气候变化条件下中国典型城市未来天气参数与建筑能源需求预测[J]. 建筑节能, 2013, 41(3):57-64.
- [20] 白晓彬, 杨 娜, 等. 长期监测中藏式古建筑木梁应变-温度模型分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017(11):117-125.
- [21] 徐方圆, 解玉林, 吴来明, 等. 文物保存环境中温湿度研究[J]. 文物保护与考古科学, 2009, 21(S1):69-75.
- [22] 李 妮. 影响馆藏文物保存的环境因素及预防性保护浅析[J]. 东西南北, 2019, 47(23):132-133.
- [23] 张宝龙, 何建斌. 文物展柜内环境温湿度的调控与监测[J]. 辽宁省博物馆馆刊, 2021(1):267-271.
- [24] 胡 洁. 影响馆藏文物保存的环境因素及预防性保护探讨[J]. 中国民族博览, 2019(16):232-233.
- [25] 张 婵. 从字画修复看纸质文物的预防性保护[J]. 贵博论丛, 2021(1):256-266.
- [26] 张建雄. 陈列布展文物安全要素分析[J]. 中国文物科学研究, 2010(3):44-48.

(上接第 9 页)

- [15] 李翔宇, 李新源, 李明宇, 等. 不同程度渗漏水对盾构隧道长期沉降影响规律研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(5):72-79.
- [16] 李翔宇, 李新源, 秋仁东, 等. 局部渗漏水对盾构隧道长期沉降的影响规律[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(S1):197-203.
- [17] 周 建, 张 晓, 蒋熠诚. 考虑环缝接头水力劣化的盾构隧道渗漏数值分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(9):142-151.
- [18] 加 瑞, 李青苗, 杨 岗, 等. 盾构隧道渗漏对地表沉降和管片受力影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(S1):423-435.
- [19] 孙智慧, 唐 勇, 刘 涛. 盾构隧道局部渗漏水对其力学特性的影响[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(4):141-149.
- [20] 王志良, 申林方, 伍 曾. 盾构隧道局部渗漏水对周围土体孔隙水压力的影响[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(1):89-95, 115.
- [21] 朱留杰, 许伟伟, 金洪杰, 等. 地下引水隧洞施工期渗流分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20(4):113-119.
- [22] 秦 欣, 王江锋. 盾构法施工近距离下穿既有隧道变形影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2024, 22(2):7-11.