

文章编号:1004-5309(2009)-0065-08

基于火灾动力学模拟的古建筑火灾探测系统设计研究

郭子东¹, 吴 烦², 吴立志³, 徐晓楠¹

(1. 中国人民武装警察部队学院 消防工程系, 河北 廊坊 065000;

2. 西藏林芝消防支队, 西藏 林芝 850400;

3. 中国人民武装警察部队学院 组织计划处, 河北 廊坊 065000)

摘要: 古建筑的消防安全工作作为古建筑保护工作内容的重要组成部分, 需要深入开展的消防科学的研究工作。目前我国, 缺少关于古建筑防火安全方面的规范, 通常使用的处方式规范一般不适用于古建筑。性能化方法能够提供更加灵活和符合实际的解决方案。并且这可能是唯一可行的使古建筑达到可接受风险水平的方法。以布达拉宫东大殿为研究对象, 探讨了性能化防火分析方法在古建筑防火保护中的应用。以对古建筑进行早期探测报警为目标进行了消防设施设置。应用 FDS 软件进行了模拟研究, 根据模拟结果进行分析, 得到了一些有益的结论并应用于消防设施设置。通过对探测器响应时间分析, 探测器的设置合理, 能够在第一时间报警, 并且实现了消防安全设计的科学化、合理化和成本效益的最优化。

关键词: 性能化; 古建筑; 防火分析; 火灾模拟

中图分类号: TU29 **文献标识码:** A

0 引言

“保护古建筑”是国际标准技术委员会关于消防工程方面规定的目标。古建筑和其他建筑一样遭受着火灾的威胁。但和大多数其他建筑不同的是, 古建筑具有重大的文物价值、历史价值和艺术价值, 是国家和民族的宝贵财富, 具有不可再生性, 一旦发生灾害, 易造成无法弥补的损失^[1]。

古建筑建造在先, 消防在后, 消防安全方面的法律法规相对缺乏, 而现代建筑法律法规又不能完全适用于古建筑消防工作中。造成长期以来古建筑消防保护工作出现缺乏度量, 无据可依的局面。目前我国, 缺少关于古建筑防火安全方面的规范, 通常使用的处方式防火规范一般不适用于古建筑, 将其应用于古建筑甚至会产生有害的结果。因此, 消防

工作者需要使用其它的方法保证古建筑的消防安全。实际上, 性能化方法能够提供更加灵活和符合实际的解决方案。并且这可能是唯一可行的使古建筑达到可接受风险水平的方法。

性能化方法在解决传统“处方式”方法存在困难的古建筑防火上具有不可替代的优势。通过设定古建筑的防火安全目标, 运用各种手段达到目标要求, 这种方法本身具有很大的灵活性。火灾模拟作为实现性能化目标的一种工具得到了广泛的应用。古建筑本身不可能进行实体火灾实验, 通过火灾模拟软件对古建筑建立数学模型, 模拟出其在不同火灾场景下的火灾蔓延过程, 得出烟气蔓延和温度分布等, 从而合理的进行消防投资, 最大限度地减小火灾损失^[2]。性能化方法已经成为世界性建筑设计发展的必然趋势, 特别是对于我国历史文物建

收稿日期: 2008-11-05; 修改日期: 2009-4-02

作者简介: 郭子东(1980.8-), 男, 汉族, 河北廊坊武警学院消防工程系火灾理论教研室讲师, 安全技术及工程专业硕士研究生, 在读博士。研究方向为火灾风险评估, 火灾模拟。

筑比较广泛的现状,古建筑防火性能化评估方法将会起到积极的作用^[3]。

本文以布达拉宫东大殿为研究对象,探讨性能化防火分析方法在古建筑防火保护中的应用。应用 FDS 软件对该建筑进行火灾模拟,以早期探测报警为目标进行消防设施设置。

1 布达拉宫东大殿火灾模型的建立

1.1 布达拉宫东大殿概况

布达拉宫东大殿是一独立的敞开式空间,其北部是达赖的宝座,上方悬挂着“振锡绥疆”的匾额。大殿的东壁上绘有唐朝金成公主进藏的故事壁画。大殿长 27.8m,宽 25.8m,高约 6m,面积为 717m²,大殿中有 38 根大柱。

为减轻自身重量,东大殿建筑墙体多采用木材、草类,其承重结构均为木柱、木梁,多为松木,所以其耐火等级低,为四级。殿内悬挂经幡、哈达、宝塔伞、唐卡、幔帐、垂帘等易燃的织物品,并有大量的地毯、坐垫等,火灾荷载非常大,着火后火势传播速度也非常快。

1.2 火灾场景的分析与设计

在火灾成长热释放速率的计算上,多采用“时间-平方火灾”来设计,其中由火焰成长参数 α 的改变

可区分火灾成长速度为极快速、快速、普通、慢速等四种情况。考虑到该建筑内可燃物非常多,火灾荷载很大,以及在建筑内的典型建筑材料-松木的燃烧特性,设定火灾初期火源的热释放速率按 t^2 快速增长,火焰成长参数 $\alpha = 0.047 / (\text{kJ} \cdot \text{s}^{-3})$,火灾峰值功率为 10000kW^[4]。热释放速率将在 461.2 秒时达到设定的最大值。对古建筑进行 600 秒的模拟,即 TIME TWFIN = 600。之后根据这 10 分钟内火势蔓延情况和温度分布情况等来进行相关消防设计。

1.3 边界及初始条件

整个计算区域的默认边界采用绝热、无滑移的壁面边界条件,在此边界上速度为 0。建筑物的开口处采用(距地面 0m)南侧 1 个门(1.5m × 2m)、东北侧一个门(1.5m × 2m)的自然通风口与外界相通。建筑内初始温度设为 20°C。

1.4 计算模型

图 1 为东大殿计算模型图。整个计算区域实际尺寸为 27m × 25m × 6m,划分的网格数为 54 × 52 × 12。在不加火灾报警探测系统和自动喷水灭火系统的条件下,考虑到火灾蔓延的因素和实际各处的火灾危险性,将着火点设在香油台 1 位置处,火源为台上的酥油灯,起火点距南墙面 1.76m,距东墙面 1.3m,如图 2 所示。

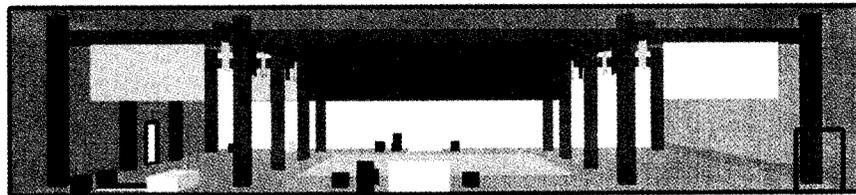


图 1 东大殿计算模型图

Fig. 1 The simulation model fig of east palace

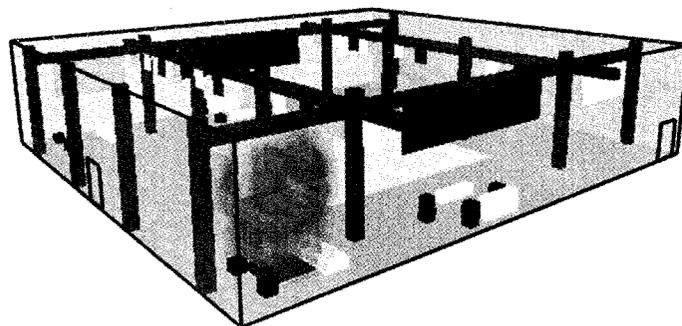


图 2 火源位置示意图

Fig. 2 The sketch map of fire source

2 模拟结果的分析与讨论

2.1 烟气流动分析

由于殿内存在大量可燃物,且地毯、挂毯这类产烟量大的织物以及木材很多,使得着火后,着火点迅速产生大量烟气,并很快通过天花板蔓延到整个大殿。殿内烟气的蔓延情况如图3-5所示。

由图可知,东大殿在着火后,产生大量烟气。 $T = 10s$ 时,烟气由着火点香油台1处上升到屋顶。烟气在 $T = 30s$ 时由天花板迅速蔓延,此时,屋顶烟气浓度最大。 $T = 100s$ 时,烟气蔓延到大殿绝大部分空间,浓度由上到下降低。由于烟气迅速扩散,殿内能见度极低,不利于人员疏散。但考虑到古建筑中历史文物的珍贵性和不可修复性,本文不考虑人员安全疏散方面的问题,主要进行快速报警、快速控火、快速灭火方面的性能化设计,尽最大可能在火灾

中保护珍贵的历史文化遗产,减少损失。

2.2 温度变化及分布

通过对大殿着火后温度上升情况进行模拟,来分析在大殿内设置感温火灾探测器和由热敏元件控制动作的闭式喷头的可行性。

(1)分析大殿内靠近火源的 $X = 8m$ 截面处和离火源较远的 $X = 24m$ 截面处温度随时间变化的分布。截面温度分布如图6-9所示。

由图可知,在靠近火源的截面 $X = 8m$ 处,着火40s后,截面顶部靠近着火点的温度超过 $70^{\circ}C$;截面上部温度在100s时已经达到 $100^{\circ}C$ 。在远离火源的 $X = 24m$ 界面处,顶部温度在着火后80s时上升到 $60^{\circ}C$;在180s后顶部温度超过 $80^{\circ}C$ 。

(2)分析截面 $Z = 5.5m$ 处的温度变化情况。如图10-13所示。

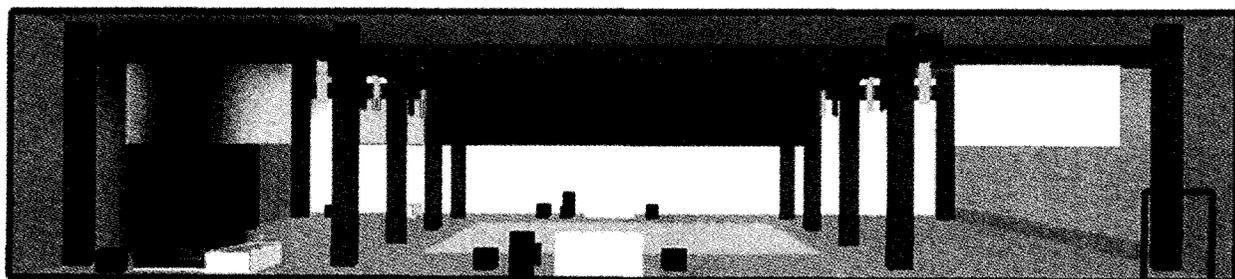


图3 10s时的火场烟气分布示意图

Fig. 3 The distribution sketch map of smoke at 10 seconds

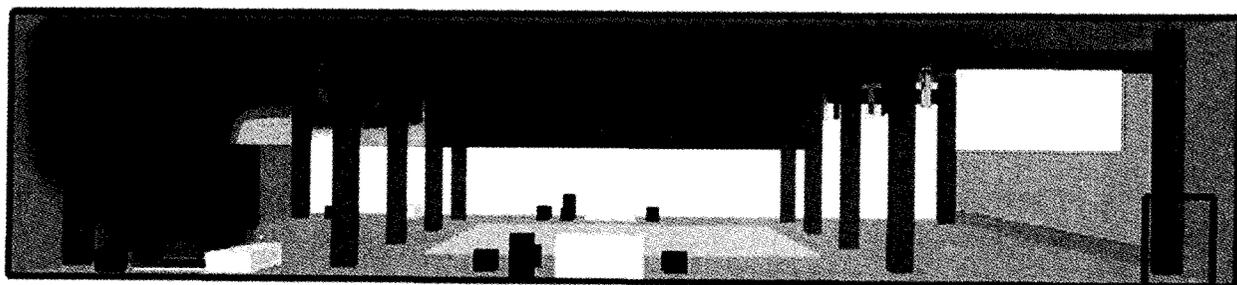


图4 30s时的火场烟气分布示意图

Fig. 4 The distribution sketch map of smoke at 30 seconds

由 $Z = 5.5m$ 截面温度分布图可知,在着火后10s时,着火点正上方高5.5m处温度达到 $60^{\circ}C$,一

般由热敏元件控制动作的闭式喷头公称动作温度为 $68^{\circ}C$ 。即当火灾发生后20s以内,着火点正上方的

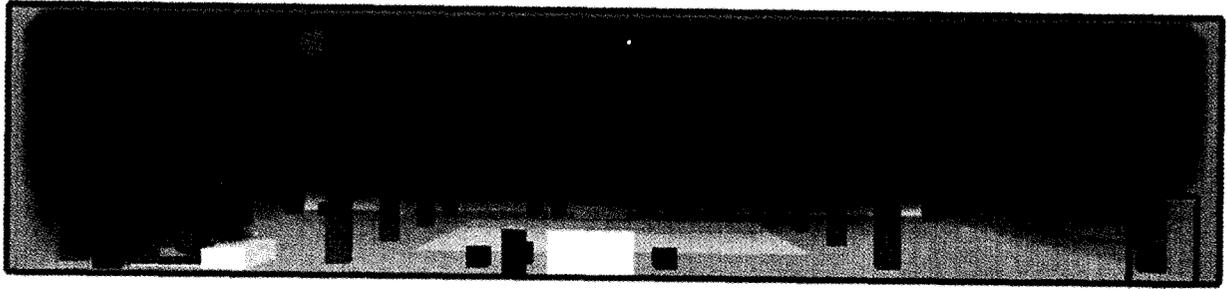


图 5 100s 时的火场烟气分布示意图

Fig. 5 The distribution sketch map of smoke at 100 seconds

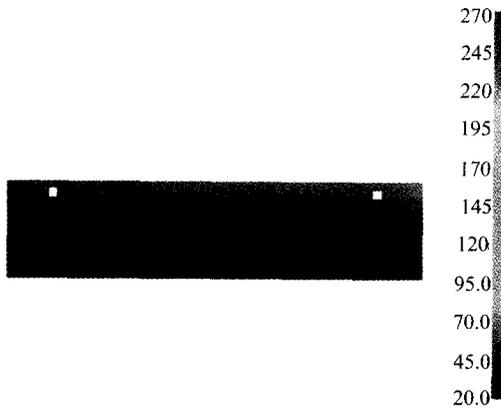


图 6 40s 时 X=8m 截面温度分布图

Fig. 6 The temperature slice of X=8m at 40s

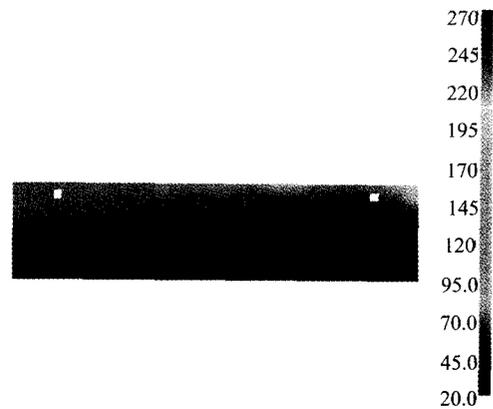


图 7 100s 时 X=8m 截面温度分布图

Fig. 7 The temperature slice of X=8m at 100s

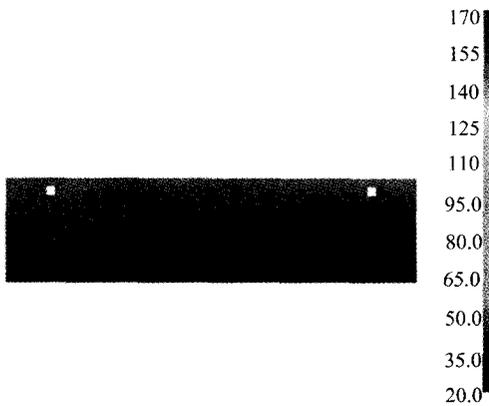


图 8 80s 时 X=24m 截面温度分布图

Fig. 8 The temperature slice of X=24m at 80s

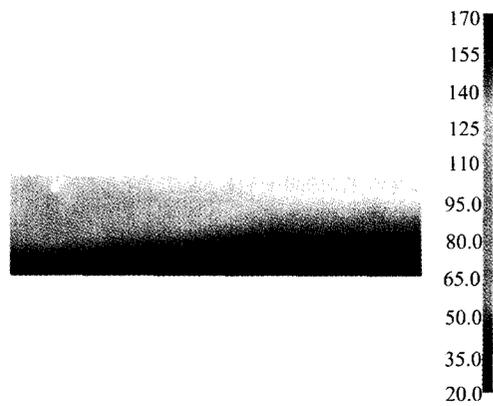


图 9 180s 时 X=24m 截面温度分布图

Fig. 9 The temperature slice of X=24m at 180s

喷头就会开始动作。60s 后,着火点附近的局部温度达到 100°C,整个大殿内温度都明显上升,靠近火源的喷头都能达到动作温度。120s 后,靠近火源区域的温度超过 100°C,最高达 125°C 大殿内顶部绝大部分的温度超过喷头动作温度。着火后 180s 时,火源上方温度超过 200°C,大殿顶部所有区域的温度都超过 80°C,即所有的喷头都将动作。分析着火点处的温度上升情况可知,最近水喷头将在 20s 内

即动作给水。

3 火灾探测系统的设计

火灾探测系统,即常说的火灾自动报警系统,它是基于火灾发生后烟、热、光的变化,用电子器件捕捉,然后反馈给值班人员,并发出警报,告诉人们发生了火灾。常用的火灾探测器有感烟探测器和感温探测器。

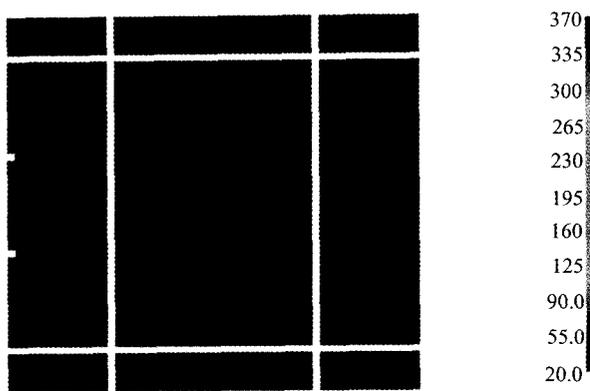


图 10 10s 时 Z=5.5m 截面温度分布图

Fig. 10 The temperature slice of Z=5.5m at 10s

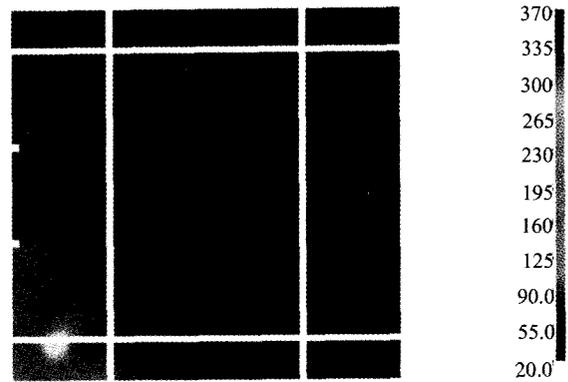


图 11 60s 时 Z=5.5m 截面温度分布图

Fig. 11 The temperature slice of Z=5.5m at 60s

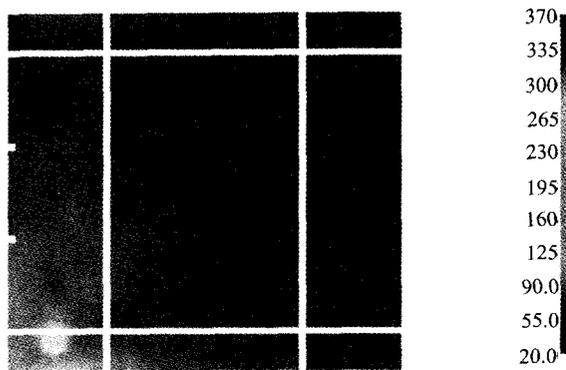


图 12 120s 时 Z=5.5m 截面温度分布图

Fig. 12 The temperature slice of Z=5.5m at 120s



图 13 180s 时 Z=5.5m 截面温度分布图

Fig. 13 The temperature slice of Z=5.5m at 180s

3.1 感烟探测器的选择与设置

由于古建筑结构不易改造并且要尽量保持历史原貌等原因,大部分古建筑只有依靠原有的自然通风口来进行排烟。因此,可以利用古建筑火灾发烟量大、产烟迅速的特点,在建筑内设置离子感烟探测器,这样利于在第一时间发现火灾并发出警报,为在第一时间扑灭初期火灾创造有利条件。

另外,由于烟雾粒子对光的吸收和散射作用,使得殿内消光系数变化,可以考虑设置减光式光电感烟探测器。根据布达拉宫东大殿的火灾模拟结果,将离子感烟探测器和减光式光电感烟探测器引发动作的主要因素,即烟气浓度和消光系数随时间变化的情况做比较,从而选择更为合适的探测器^[5]。通过比较烟气蔓延和消光系数在同一截面处不同时间的分布图可得,烟雾浓度变化和消光系数的变化相似,都可作为火灾发展的判断依据。但考虑到东大殿内挂有许多挂毯等,容易出现遮挡,使减光式光电感烟探测器误报。另外,由于古建筑结构的限制,设置点型火灾探测器比线型火灾探测器更合理^[6]。

因此,选择在东大殿设计安装点型离子感烟探测器。

大殿内设置感烟探测器的保护面积为 60m^2 , 由于一个探测区域内所需设置的探测器数量,不应小于下式的计算值:

$$N = \frac{S}{K \cdot A} \quad (1)$$

式中 N 是探测器数量,只(N 应取整数); S 是探测区域面积, m^2 ; A 是探测器的保护面积, m^2 ; K 是修正系数,(特级保护对象宜取 $0.7 \sim 0.8$,一级保护对象宜取 $0.8 \sim 0.9$,二级保护对象宜取 $0.9 \sim 1.0$)。

通过计算可知应设置 15 个感烟探测器,考虑到之前分析的古建筑中烟气蔓延的特点,仅在大殿可能出现火灾蔓延位置的天花板和梁上设置感烟探测器。由于烟气会迅速蔓延开,即使是在探测器保护范围外的地方着火,探测器也能较早做出响应^[7]。另外,在没有设置感烟探测器的地方会设置感温探测器来进行保护。

3.2 感温探测器的选择与设置

由公式(1)得出大殿应设置 45 个感温探测器。

根据实际情况,只在殿内着火后温度变化幅度较大,变化较快的地方设置感温探测器^[8]。这样,感烟探测器和感温探测器合理搭配,发挥各自的优势。

由于感温探测器对温度的敏感,选择报警温度为在 60℃ 的双金属型定温式火灾探测器。由模拟结果可知当火灾发生后 10s 时,着火点上方的温度已达到 55℃,即探测器很快就会做出相应。探测器报警后,自动喷水灭火系统开始由干式系统转化为湿式系统。20s 内,着火点上方温度就会达到喷头的动作温度,即喷头热敏元件破裂,开始喷水。

考虑到这种感温探测器保护面积较小,只在火灾危险性较大的位置设置,即两个香油台和两个休息台。本文模拟条件下的感温探测器的保护面积是 20m²,保护半径是 3.6m。根据香油台在大殿内的坐标计算其近似面积

$$\begin{aligned} S_1 &= (X_2 - X_1)(Y_2 - Y_1) \\ &= (4.76 - 1.3)(3.5 - 0.8) \\ &= 9.342\text{m}^2 \end{aligned}$$

因此,每个香油台上方仅设置一个感温探测器即可。探测器设在香油台中心位置,这样可确保香油台的每个角落都在探测器保护半径内。

同理,休息台的近似面积为:

$$\begin{aligned} S_2 &= (X_2 - X_1)(Y_2 - Y_1) \\ &= (15.1 - 9.9)(3.6 - 0.6) \\ &= 15.6\text{m}^2 \end{aligned}$$

每个休息台上方也仅设置一个感温探测器即可。为可确保休息台的每个角落都在探测器保护半径内,应在休息台中心位置设置。

因此,大殿内仅需设置 4 个感温探测器。坐标分别为(3.03, 2.15), (3.03, 22.85), (12.5, 2.1), (12.5, 22.9)。

3.3 探测器的组合设置

由模拟结果云图可知,烟气沿大殿内墙蔓延,先扩散到大殿四周,再向大殿中间蔓延。因此,感烟探测器应主要设置在靠近墙的位置。

另外,考虑到 4 个感温探测器的设置位置,在大殿仅设计安装 10 个感烟探测器即可。探测器分布如图 14 所示。

图中,△表示感温探测器,○表示感烟探测器。感温探测器 1、3 和 2、4 分别监视殿内两个香油台和两个休息台的安全。感烟探测器 1、2、7、8、9、10 沿整个大殿内墙设置,除设有感温探测器的位置,大殿内墙四周都受到感烟探测器保护;感烟探测

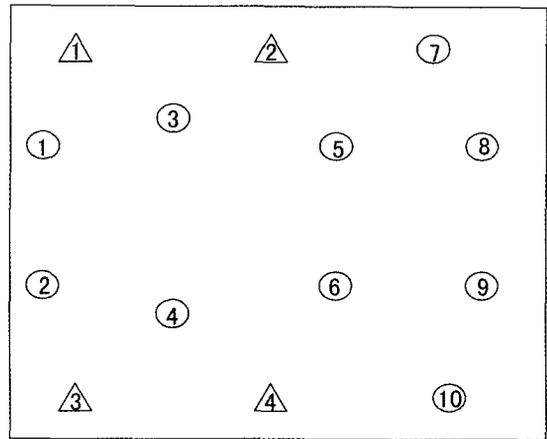


图 14 火灾探测器分布图

Fig. 14 The distribution fire detector

器 3、4、5、6 主要监视大殿中间位置。这样,整个大殿都受到火灾探测器的保护,大大减少了规范规定的应设火灾探测器数量。而且,合理地分布感温和感烟探测器更有利于尽早发现火灾,为在第一时间发现火灾并展开扑救提供了条件^[9]。

3.4 火灾探测器工作情况分析

为确保不出现误报的情况,设计当相邻最近的两个探测器都做出响应时启动报警器并联动自动喷水灭火系统。

(1) 两个感烟探测器工作

通过模拟结果可得感烟探测器达到响应条件时的时间,如图 15 所示。

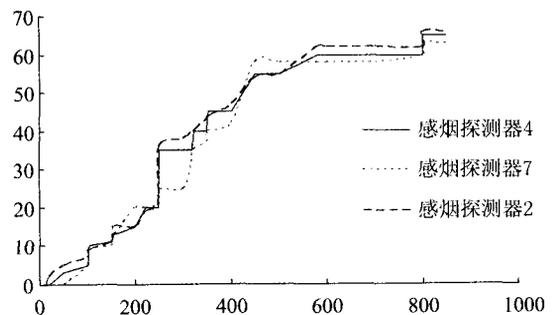


图 15 感烟探测器响应时间图

Fig. 15 The sketch map of smoke detector response time

图中 C_1 、 C_2 、 C_3 对应的时间为离着火点最近的感烟探测器 2 ($X = 1.2, Y = 8, Z = 5.9$) 和 4 ($X = 7.5, Y = 6, Z = 5.9$), 离着火点最远的感烟探测器 7 ($X = 22, Y = 22, Z = 5.9$) 的报警时间。可知,感烟探测器 2 的报警时间为 15s, 感烟探测器 4 的报警时间为 19s, 感烟探测器 7 的报警时间为

50s。为安全起见,考虑感烟探测器 2 和 4 都动作时对应的时间为感烟探测器的准报警时间,即为 19s。这样能及时报警并联动预作用自动喷水灭火系统由干式系统向湿式系统转换。在温度达到喷头动作温度时,系统即可及时喷水,控制初期火灾。

(2) 一个感温探测器和一个感烟探测器动作

考虑着火点香油台 1 处的感温探测器的工作状况,感温探测器 3 处的温度变化曲线如图 16 所示。

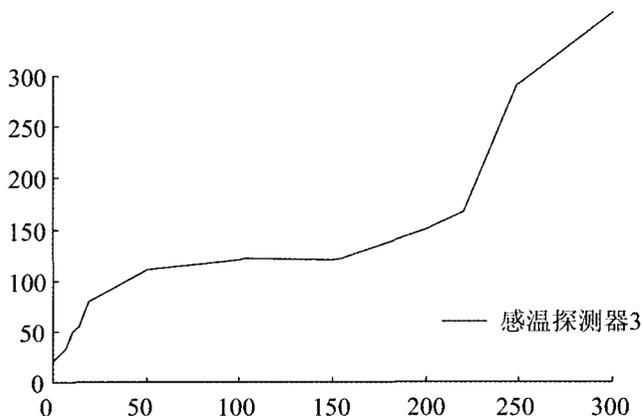


图 16 感温探测器 3 处温度变化曲线图

Fig. 16 The temperature graph of temperature detector 3

图中 C_4 为感温探测器 3 处温度随时间的变化曲线,点 A 为探测器的响应时间,即 13s。为安全起见,感温探测器等最近的感烟探测器做出反应,即感烟探测器 2 于 15s 时报警。此时,为感温探测器准报警时间,探测器联动自动喷水灭火系统开始由干式系统转化成湿式系统,并准备喷水灭火。

由以上分析可知,火灾报警探测器的组合设置合理,能满足尽早发现火灾的要求。

4 结论

本文对宽敞式的砖木古建筑布达拉宫东大殿进行了研究,根据建筑结构和材料的特点,设置了起火点、火灾规模、火灾增长曲线等参数,并使用 FDS 软件进行了模拟,探讨了基于火灾动力学模拟的方法在古建筑火灾探测系统设计中的应用。得到的结论如下:

(1) 模拟结果显示,火灾烟气主要沿建筑内墙蔓延,先扩散到建筑四周再向建筑中心传播;烟气在垂直面上先向上扩散,即越朝上的空间烟气浓度越大。因此靠近建筑内墙的顶棚上可设置感烟探测器对建筑进行火灾监控;

(2) 通过对模拟结果分析,火灾发生后 10s 时,着火点上方的温度已达到 55°C ,即探测器很快就会做出相应。探测器报警后,自动喷水灭火系统开始由干式系统转化为湿式系统。20s 内,着火点上方温度就会达到喷头的动作温度,即喷头热敏元件破裂,开始喷水。考虑到这种感温探测器保护面积较小,只在火灾危险性较大的位置设置,即两个香油台和两个休息台。根据保护面积计算,每个香油台和休息台上方只需要设置一个感温探测器;

(3) 根据模拟结果,组合设置了感温及感烟探测器,通过对探测器响应时间分析,探测器的设置合理,能够在第一时间报警,并且实现了消防安全设计的科学化、合理化和成本效益的最优化。

参考文献

- [1] 刘天生. 国内木构古建筑消防安全策略分析 - 古建筑火灾风险评估技术初探 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [2] 徐彤, 王建军. 古建筑防火性能化评估方法基本框架研究 [J]. 消防技术与产品信息, 2005(2): 47 ~ 49.
- [3] 李引擎. 建筑防火性能化设计 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005, 5: 27 ~ 69.
- [4] SPEARPOINT M. J. Predicting the Ignition and Burning Rate of Wood in the Cone Calorimeter Using an Integral Model [J]. Baltimore: University of Maryland, 1999(3): 72 ~ 77.
- [5] 庄磊, 陆守香. 布达拉宫古建筑的火灾风险分析 [J]. 中国工程科学, 2007(3): 76 ~ 81.
- [6] 任海龙, 高云晖. 古建筑大悲阁火灾蔓延数值模拟 [J]. 消防科学与技术, 2007(11): 610 ~ 614.
- [7] 王桂芳. 古建筑自动消防设施的选择与设置 [J]. 消防科学与技术, 2001(3): 30 ~ 32.
- [8] 郭勇, 王厚华. 感温火灾探测器的预警时间 [J]. 消防科学与技术, 2001(5): 37 ~ 49.
- [9] 夏东海. 建筑防火设计方法的思想回归与创新 [J]. 消防科学与技术, 2005(5): 567 ~ 569.

The research of heritage buildings fire protection based on fire dynamic simulation

GUO Zi-dong¹, WU Fan², WU Li-zhi³, XU Xiao-nan¹

(1. Fire Protection Dept., Chinese People's Armed Police Force Academy, Langfang, 065000, China;

2. Linzhi City Fire Department, Fire Division of Tibet Autonomous Region, Linzhi, 046000, China;

3. Division of Research Administration, Chinese People's Armed Police Force Academy, Langfang 065000, China)

ABSTRACT: The fire protection about heritage buildings is an important part in the protection of the heritage, which needs deeper research in the science of fire protection about heritage buildings. China is lack of specific national regulations for these buildings. General prescriptive regulations can often not be met the need of heritage buildings fire protection and sometimes detrimental. In effect, a performance-based approach could offer a more robust and practical solution. It may also be the only viable means of achieving an acceptable level of fire safety in heritage buildings. The paper takes East Main Hall of Potala Palace as the research object, and the application of performance-based fire protection method in heritage buildings is discussed. The paper takes detection fires at the early stage as the object to set fire fighting facilities. FDS is used to do the simulation. By analyzing the results of simulation, some beneficial conclusions were gained and then used in the setup of fire protection establishment. Through analyzing the response time of fire detector, the setup of fire detectors are reasonable and they can give an alarm in first time. The method can realize fire protection design scientific, rationalization and cost-benefit optimization.

Key words: Performance-based Method; Heritage Building; Fire Protection Analyze; Fire Simulation.