

# 基于事故树的布达拉宫雷击火灾风险分析与保护

卢慧慧<sup>1</sup>, 杨仲江<sup>1</sup>, 刘健<sup>1</sup>, 杨虎<sup>2</sup>, 许永彬<sup>2</sup>

(1. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏南京 210044; 2. 西藏自治区气象局防雷中心, 西藏拉萨 850000)

**摘要:** 布达拉宫自兴建以来曾遭受多次不同程度雷击,一旦雷击引发火灾会造成不可挽回的损失,因此需要进行科学合理的雷击火灾分析以有效指导布达拉宫减灾工作。对于布达拉宫雷电可能引起火灾的风险,建立布达拉宫雷击火灾事故树,综合考虑布达拉宫因雷电引发火灾事件发生的可能过程、可能途径。最后对雷击火灾事故树最小割集、最小径集、基本事件的结果重要度进行比较,同时分析布达拉宫地区雷电活动规律。分析结果表明:布达拉宫雷击火灾事故树一共有22个基本事件,有308种可能导致布达拉宫因雷击引起火灾事件发生的途径。布达拉宫雷击火灾防护是一项复杂工程。研究表明,最便于采取的防护措施是加强其雷电防御能力,如清除引雷隐患、安装电涌保护器、进行等电位连接等。

**关键词:** 布达拉宫;雷电;火灾;事故树分析

**中图分类号:** X915.5 **文献标识码:** A

## 0 引言

布达拉宫是藏族人民宝贵的建筑艺术财富,也是人类举世无双的历史文化遗产<sup>[1,2]</sup>。布达拉宫的殿堂基本采用石木结构,建材多选用木质材料,包括殿梁、柱、天花板等在内的诸多构件,且表面大多刷有油漆等易燃物质,如若发生雷击事件,极有可能造成火灾。所以,雷电对布达拉宫威胁最大的危害是雷击易引起火灾<sup>[3]</sup>。据史料记载,历史上布达拉宫曾发生四次火灾,遭受过三次雷击,都造成不同程度的损失<sup>[4]</sup>。因此开展布达拉宫雷击火灾风险评估工作,减少或避免评估对象遭受雷击而引发的灾害显得极其重要。

本研究采用事故树对布达拉宫雷击火灾风险进行评估。通过分析雷电引起布达拉宫火灾的危害途径<sup>[5]</sup>,综合分析事故发生的全面过程,建立布达拉宫因雷电引起火灾的事故树图<sup>[6-8]</sup>。通过对事故树的定性分析,得到布达拉宫雷电火灾的基本事件、最小割集和最小径集。研究避免雷电引起火灾的最有效和主要的途径。分析布达拉宫地区雷电活动规律以及现有防雷措施的防护效果。最后针对性提出相应改进措施。

## 1 布达拉宫雷击火灾风险分析

根据对以往古建筑火灾案例的统计分析表明,

因雷电导致的火灾比重占相当大的一部分。布达拉宫历史上也曾有因雷击导致火灾的实例:松赞干布修建的布达拉宫,在公元762年因遭受雷击引起火灾,造成布达拉宫内除了帕巴拉康和曲结竹普两地的其余房屋基本被烧毁。

经过相关案例分析,雷电引发火灾的主要原因有:

1) 雷电流幅值一般能达到 $10^5$ A,且放电时间非常短,因而由于雷电流的热效应,短时间内大量热量无法向外迅速扩散,导致雷击部位温度快速升高,从而引发火灾。

2) 雷电波会沿线路及金属管道传播入建筑物内,使得配电设备、电气线路的绝缘层击穿后短路,产生危险电火花,引燃木质材料等易燃物,造成火灾。

布达拉宫由于其独特的地理位置、周围环境、结构分布、建筑材料以及使用情况,极易引发火灾,火灾形势有以下特点:

1) 火灾隐患多,将造成的损失大、影响大。

布达拉宫的布局、结构以及建材等先天因素导致其耐火性差,易发生火灾。此外,布达拉宫的管理和使用等方面也存在引发火灾的不利因素。由于建造在先,消防在后,造成火灾预防不易、扑救困难。

布达拉宫具有文物和历史双重保护价值,具有唯一性和不可替代性。如若遭受火灾,容易造成无可弥补的损失。由于布达拉宫内部珍藏了大批的宝

贵文物,如书画、文籍、佛像、法器,一旦发生火灾,将会造成巨额经济损失,而其在历史文化上的价值损失更是难以估量的。

布达拉宫是藏族的宝贵历史文化遗产,其构造别具一格,有很强的艺术特点,一旦损坏,必将引来各界的广泛关注,造成不良的社会影响。

### 2) 火灾预防难、火灾控制难、火灾扑救难。

布达拉宫大量采用松、杉、柏、香樟等含油脂较多的木材制作,其木构件长年受酥油香火的熏烤及自然侵蚀,干燥、极易起火燃烧,火灾荷载大,加之内部诱火因素众多,使用功能复杂,火灾预防困难。

布达拉宫的宫殿均为组群分布,相互之间没有设置防火间隔,主、配殿间以长廊相接,宫宇叠砌,连绵起伏。一旦起火,火灾容易蔓延。布达拉宫处在山巅,位高风大,着火迅猛,燃烧迅速,易形成轰然,火灾控制难。

布达拉宫依山而建,车道崎岖、坡度大;内部设施不足,水源缺乏;文物众多,经书纸粉,盲目用水扑救,造成了火灾扑救困难。

## 2 布达拉宫雷电引起火灾事故树

### 2.1 事故树建立

鉴于相关火灾事故数据的匮乏以及其他方面的限制,精确算出布达拉宫因雷电引起火灾事故的概率较为困难,因此采用事故树分析法对布达拉宫雷电引起火灾风险进行定性分析。事故树分析法是安全性分析和可靠性分析的一种重要的科学方法。运用布尔逻辑模型,即描述安全系统工程中事件的关系,来研究复杂事故系统。事故树模型描述事故从结果到原因发生的完整过程,因而通过这类事故树图能够逻辑推理出事故的因果关系。根据事故树编制原则,首先以“布达拉宫雷电引起火灾”作为顶上事件。调查分析导致顶上事件发生的各类起因,然后通过相关事件符号及符合条件的逻辑门把这些原因按照逻辑关系串连在一起。在这个过程中将引起顶上事件的基本事件看作顶上事件,采取类似方法继续推理向下分析,直到确定最基本的原因事件。根据上述分析,建立布达拉宫雷电引起火灾事故树,如图 1 所示,基本事件见表 1。

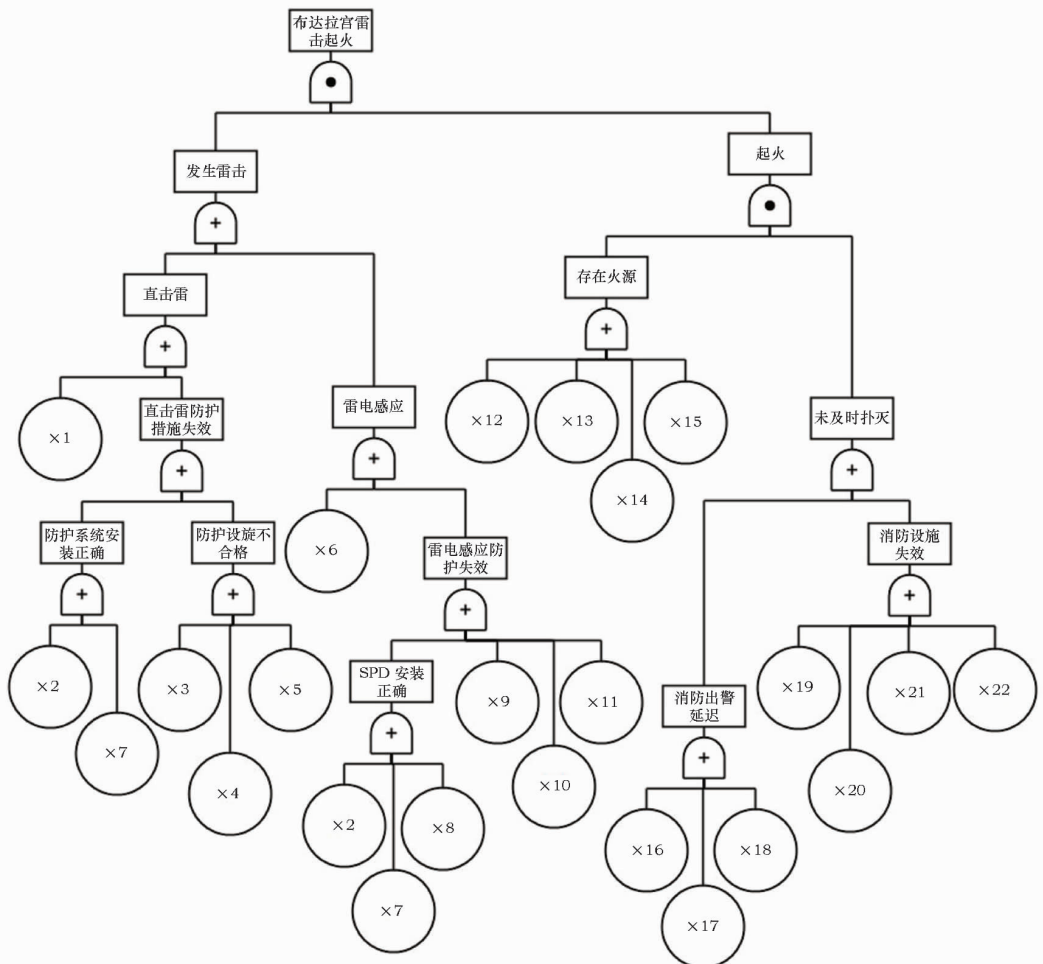


图 1 布达拉宫遭雷击起火事故树

Fig. 1 Potala Palace lightning fire accident tree

表 1 事故树基本事件表  
Table 1 Events of fault tree

符号	含义	符号	含义	符号	含义	符号	含义
X <sub>1</sub>	未安装直击雷防护系统	X <sub>7</sub>	雷电频繁	X <sub>13</sub>	建筑构件	X <sub>19</sub>	消防技能缺失
X <sub>2</sub>	雷电流幅值过大	X <sub>8</sub>	雷电流陡度过大	X <sub>14</sub>	电器设备	X <sub>20</sub>	消防器材故障
X <sub>3</sub>	接地电阻过大	X <sub>9</sub>	屏蔽措施不到位	X <sub>15</sub>	内部摆放可燃物	X <sub>21</sub>	无火灾报警系统
X <sub>4</sub>	防护装置腐蚀	X <sub>10</sub>	SPD 选型配合不当	X <sub>16</sub>	火灾报警延迟	X <sub>22</sub>	消防器材不足
X <sub>5</sub>	防护装置遭人为破坏	X <sub>11</sub>	等电位措施不到位	X <sub>17</sub>	消防车道不畅		
X <sub>6</sub>	未安装 SPD	X <sub>12</sub>	电气线路	X <sub>18</sub>	消防警力不足		

2.2 事故树分析

根据布尔代数法计算该事故树的 22 个基本事件,可得最小割集 308 组,最小径集 3 组。最小径集如表 2 所示。

表 2 最小径集  
Table 2 The minimal path set

$P_1 = \{X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8 X_9 X_{10} X_{11}\}$
$P_2 = \{X_{12} X_{13} X_{14} X_5\}$
$P_3 = \{X_{16} X_{17} X_{18} X_{19} X_{20} X_{21} X_{22}\}$

不同的基本事件对顶上事件的影响程度不同,17 个基本事件的结构重要度如下:

$$I(X_{15}) = I(X_{14}) = I(X_{13}) = I(X_{12}) > I(X_{22}) = I(X_{21}) = I(X_{20}) = I(X_{19}) = I(X_{18}) = I(X_{17}) = I(X_{16}) > I(X_{11}) = I(X_{10}) = I(X_9) = I(X_8) = I(X_7) = I(X_6) = I(X_5) = I(X_4) = I(X_3) = I(X_2) = I(X_1)$$

事故的基本事件虽然只有 22 件,但最小割集个数共 308 组,表明有 308 种可能导致布达拉宫因雷击引起火灾事件发生的途径,说明该事件的可能性和危险性较大。从结构重要度角度考虑, X<sub>12</sub> ~ X<sub>15</sub> 的结构重要度最大,对顶上事件发生影响最重要。其次是 X<sub>16</sub> ~ X<sub>22</sub>,最后是 X<sub>1</sub> ~ X<sub>11</sub>。一旦最小割集里的所有基本事件一同出现,布达拉宫就会发生雷击引起火灾事件。最小径集个数共 3 组,如若能阻止 3 个径集里的任意一个发生,就能够防止布达拉宫雷击火灾事故的发生。

从控制事故发生的角度来看,控制雷电的发生是比较困难的,因此过去多将其作为不可控因素,一般不做重点考虑,但从现实雷击事故发生角度必须重视雷电的威胁。

布达拉宫所处地势较高,容易遭受直接雷击,大量木材构造一旦遭受雷击极易着火。同时由于消防管道、自来水、电话、监控系统等现代化设施的增加,雷电静电感应和电磁感应极容易产生雷电波侵入,导致设备烧坏或线路烧断。宫殿内的灯具、香火炉、

酥油灯等遇到火花又极易被引燃。因此应加强对建筑中可燃物构件,易燃物品的阻燃处理,及时清理堆放的可燃、易燃物品。

最有利于采取的预防措施就是加强布达拉宫的雷电防护,构建完整的雷电防护体系,包括接闪、引下、接地、屏蔽、等电位连接各方面。

3 雷电防护措施

3.1 布达拉宫雷电活动规律

为了更好地研究布达拉宫因遭雷击而引起的火灾事故,对布达拉宫所在的地区拉萨市的闪电监测资料进行分析。以下图片的原始数据均来源于西藏防雷中心。

图 2 是拉萨市 2009 ~ 2014 年间地闪的逐月累加统计表,如图 2 所示,闪电主要发生在雨季(6 ~ 9 月),其中 6 ~ 8 月的闪电次数最高。

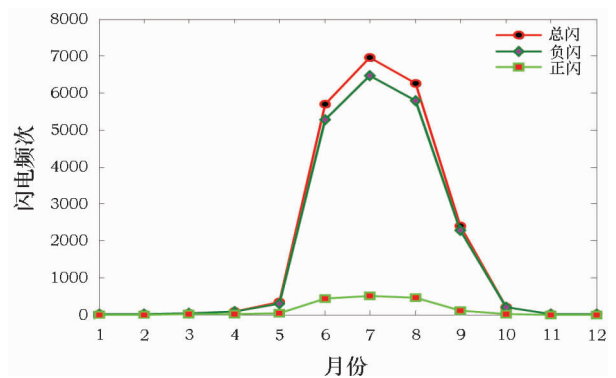


图 2 拉萨市闪电次数月变化曲线

Fig. 2 Lhasa lightning frequency curves of each month

图 3 是拉萨市闪电的逐时分布图。由图 2 可知,一天之中 15:00 ~ 23:00 是闪电集中发生的时段。这是由于该段时期强对流发生的条件较好,而闪电多发时间段是下午 1:00 到第二天凌晨 4:00,并在晚上 7:00 达到峰值<sup>[9]</sup>。拉萨市闪电的低发时间段是早晨 5:00 至正午 12:00 左右,这段时期的平均闪电频数只有高发时期的 4% 左右。

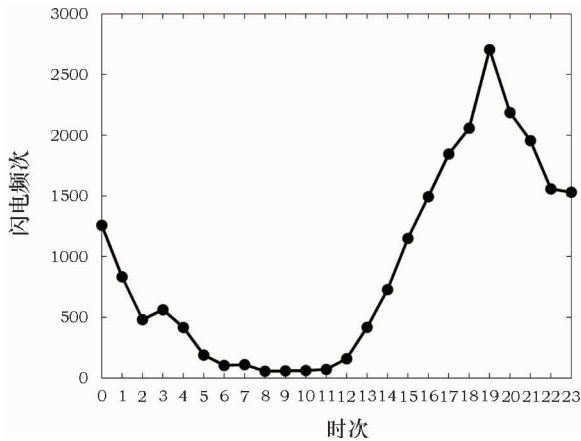


图3 拉萨市闪电次数日变化曲线

Fig. 3 Lhasa lightning frequency of daily change curves

### 3.2 布达拉宫防雷现状

红宫的主要灵塔金顶是采用金和铜等极易导电的金属材料制成。如果金顶要起到避雷针作用,必须满足以下条件:一是建筑物的基础周边应该有设置接地体;二是金顶和金属吊饰到地面接地体之间必须至少有一个良好的金属引下线(泄流通道)。布达拉宫的金顶和各种金属装饰都没有任何连贯的可以作为引下线的金属线<sup>[10-12]</sup>,并不具备接闪功能。

现今的布达拉宫新增了照明、消防、通讯、报警、电器、监控等设备,各种管线为雷电波侵入提供了通道,但没有任何防弱电设备、防雷电感应、防静电等措施。布达拉宫大部分的电源线、信号线及其他线路均为架空进入,又无专用配电箱、配线盒、线路布置混乱。这更增加了遭受雷电灾害的风险。

### 3.3 布达拉宫雷电防护措施

由于布达拉宫和现代建筑的结构以及所选用的建材大相径庭,因而布达拉宫的雷电防护规划与现代建筑的防护设计差别较大。布达拉宫的直击雷防护不宜装配常用的接闪器,不仅影响美观,而且阿嘎土极脆易裂,不便安装接闪器。此外,还存在如风压造成建筑物二次损坏等可能因素。需要根据布达拉宫建筑结构特点,科学合理地利用可以作为接闪器的金顶以及屋顶的各种金属装饰,防止配备的新防雷装置对建筑原貌有所影响<sup>[13]</sup>。

1) 直击雷防护措施。充分利用布达拉宫金顶和屋顶各种金属装饰作为雷电接闪器,并用引下线把它们良好地接到地网里,同时做好屋顶的各种金属间(包括金顶)的等电位连接。

2) 雷电波侵入的防护措施。包括供电线、网络线、电话线、监控系统线路等在内的所有从建筑物

外引入的金属线必须在引进之前穿金属管埋地或做等电位连接。依照有关标准,在各线路系统上装配符合要求的避雷器,且对各系统间进行等电位连接。

3) 清除引雷隐患。各种进户或贴墙金属管道(包括穿线金属管、自来水管、消防管、排水管等),在进户的地方做等电位连接后应加装足够抗压的塑料管或其他有绝缘特性的管道。

4) 重点加强防护。由拉萨市闪电次数月分布统计表以及闪电次数日变化曲线图可知,6~8月份为雷电多发期,且这三个月属于旅游的旺季。同时13:00至17:00属于布达拉宫开放时间段,又为闪电的多发时期,因而为了避免人员伤亡以及经济损失,需要在这几个月的相关时段重点加强雷电防护。此外,必须确保报警系统正常工作,现场拥有充足的未发生故障的消防器材,同时保证足够的消防警力。条件允许的情况下,保持消防车道的通畅。

## 4 结论

建立布达拉宫雷电火灾事故树,对布达拉宫因雷电引起火灾进行风险分析,得到如下结论。

1) 布达拉宫雷电火灾事故树一共有3个最小径集,308个最小割集以及22个基本事件。

2) 最有利于控制布达拉宫因雷电引起火灾事故的预防措施就是加强对布达拉宫的雷电防护,尤其是雷电感应防护,比如对入户各类线缆加装电涌保护器,对各类金属管道、金属构件作等电位连接。

3) 为了达到较好雷电防护效果,需要因地制宜地采取接闪、屏蔽、合理布线、等电位连接等措施的配合对布达拉宫进行防护。

## 参考文献:

- [1] 唐语,徐淑娟.布达拉宫建筑初探[J].山西建筑,2010,36(19):22-23.  
TANG Yu, XU Shu-juan. On exploration of buildings in Potala Palace[J]. Shanxi Architecture, 2010,36(19):22-23.
- [2] 胡海燕.布达拉宫世界文化遗产管理的现状、问题及对策[J].西藏研究,2006(4):74-81.  
HU Hai-yan. A study on the management of Potala Palace as World cultural heritage[J]. Tibetan Studies,2006(4):74-81.
- [3] 杨成山,辛延俊,王军,等.塔尔寺古建筑的雷电环境分析与防护措施[J].文物保护与考古科学,2015,27(3):20-25.  
YANG Cheng-shan, XIN Yan-jun, WANG Jun, et al. Analysis of the lightning environment and protective measures to protect the ancient buildings of Taer Lamasery[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2015,27(3):20-25.
- [4] 王清华.布达拉宫的历史变迁研究[D].拉萨,西藏大学,2012.  
WANG Qing-hua. Research on the historical changes of the Potala

- Palace[D]. Lhasa, Tibet University, 2012.
- [5] 庄磊, 陆守香, 王福亮. 布达拉宫古建筑的火灾风险分析[J]. 中国工程科学, 2007, 9(3): 76-80.  
ZHUANG Lei, LU Shou-xiang, WANG Fu-liang. Fire risk evaluation for historic building of the Potala Palace[J]. Engineering Science, 2007, 9(3): 76-80.
- [6] 刘天生. 国内木构古建筑消防安全策略分析[D]. 上海: 同济大学, 2006.  
LIU Tian-sheng. Analysis of fire protection strategy on domestic timbered ancient building[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [7] 王伟军. 建筑火灾风险评估方法综述[J]. 消防科学与技术, 2008(7): 477-481.  
WANG Wei-jun. Summarization on fire risk evaluation method of building[J]. Fire Science Technology, 2008(7): 477-481.
- [8] 周健, 蒙慧玲. 我国古建筑的木结构构造与火灾危险性分析[J]. 华中建筑, 2011(12): 166-168.  
ZHOU Jian, MENG Hui-ling. Analysis of ancient architectural structures and fire risk in China[J]. Huazhong Architecture, 2011(12): 166-168.
- [9] 王娟, 谌芸. 2009—2012年中国闪电分布特征分析[J]. 气象, 2015, 41(2): 160-170.  
WANG Juan, CHEN Yun. Analysis of the 2009—2012 lightning distribution characteristics in China[J]. Meteorological Monthly, 2015, 41(2): 160-170.
- [10] 曲扎江措, 泽仁玉珍. 藏式古建筑的结构特点及其防雷措施[J]. 西藏研究, 2012(3): 105-109.  
Chodrak Gyamtso, Tsering Yudron. The structural characteristics of tibetan type ancient architecture and the thunder protection of it[J]. Tibetan Studies, 2012(3): 105-109.
- [11] 达娃多吉, 张锡成, 尼玛卓玛. 西藏古建筑雷电防护技术探讨[J]. 西藏科技, 2014(6): 61-63.  
Dava Dorji, ZHANG Xi-cheng, Nimazo Mar. Discussion on lightning protection technology of ancient buildings in Tibet[J]. Tibet's Science & Technology, 2014(6): 61-63.
- [12] 张华明, 杨世刚, 张义军, 等. 古建筑物雷击灾害特征[J]. 气象科技, 2013, 41(4): 758-763.  
ZHANG Hua-ming, YANG Shi-gang, ZHANG Yi-jun, et al. Characteristics of ancient building lightning disasters[J]. Meteorological Science Technology, 2013, 41(4): 758-763.
- [13] 张金凤. 砖石结构古建筑修缮中的规范应用问题[J]. 文物保护与考古科学, 2010, 22(2): 79-86.  
ZHANG Jin-feng. Discussion of regulations for the maintenance of masonry monuments[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2010, 22(2): 79-86.

## A fault tree study of fire risk and protection of the Potala Palace from lightning

LU Hui-hui<sup>1</sup>, YANG Zhong-jiang<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>1</sup>, YANG Hu<sup>2</sup>, XU Yong-bin<sup>2</sup>

(1. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. Bureau of Meteorology Lightning Center, Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China)

**Abstract:** The Potala Palace has been struck by lightning several times since its establishment. In order to reduce the great losses caused by lightning induced fires, it is necessary to analyze lightning-caused fires scientifically to minimize possible risk. In order to comprehensively analyze the entire process of fires caused by lightning strikes on the Potala Palace, the “fault tree” method were used to analyze multiple causes and processes of fire caused by lightning strikes. The minimal cut sets, the minimal path sets and structure importance of the essential event are given and discussed. Finally, lightning activity regularity in Lhasa area was also analyzed. The results show that there are 308 possible ways to cause fires. Prevention of fires induced by lightning strikes in the Potala Palace is a sophisticated project. The key is to improve defense ability against lightning, such as to eliminate hidden troubles, to install surge protection devices and to practice equipotential bonding.

**Key words:** The Potala Palace; Lightning; Fire accident; Fault tree analysis

(责任编辑 谢燕)