

低压配电线路中的电弧故障与防控

任长宁 (美国理想工业中国有限公司北京代表处, 北京市 100738)

杨 栋 (乌鲁木齐市公安消防支队, 乌鲁木齐市 830001)

Arc Fault Prevention and Control for Low-voltage Distribution Branch Line

Ren Changning (Ideal Industries, Inc. Beijing Office, Beijing 100738, China)

Yang Dong (Urumqi Public Security Fire Control Detachment, Urumqi 830001, China)

Abstract This paper analyzes the arc fault in low-voltage distribution line and introduces the domestic and foreign related standards, the development of protective device and the arc fault locating technology. In addition, it also explains the importance of arc fault prevention for low-voltage distribution line.

Key words Fire protection Electrical fireproofing Arc fault Detection Arc fault circuit interrupters (AFCI)

摘要 对低压配电线路中的电弧故障进行分析, 并对国内外相关标准、保护电器发展情况、电弧故障定位技术进行介绍, 阐述对低压配电线路电弧故障防控的重要性。

关键词 消防 电气防火 电弧故障 检测 电弧故障断路器 (AFCI)

1 电弧故障是电气火灾主因

据公安部消防局 2005 年至 2010 年统计, 我国电气火灾发生率均接近或超过 30%, 高居各类火灾原因之首。而据 2003 年至 2007 年国内重特大电气火灾起火源统计^[1], “电气线路引起火灾”比例高达 58.44%, 居首位 (见图 1)。

美国电气火灾年度发生率虽然不到 4%^[2], 但对住宅建筑电气火灾的分析^[3]表明: 在配电系统的各种设备或装置中, 线路同样是电气火灾的主要原因, 所占比例高达 46.8%, 如果将“电源插头线”也计入在内, 则故障比例高达 58.1% (见图 2)。

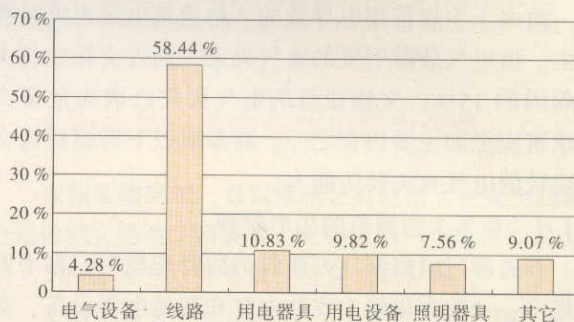


图 1 2003 年至 2007 年国内重特大电气火灾火源统计
Fig. 1 2003 ~ 2007 statistics of domestic serious electrical fires

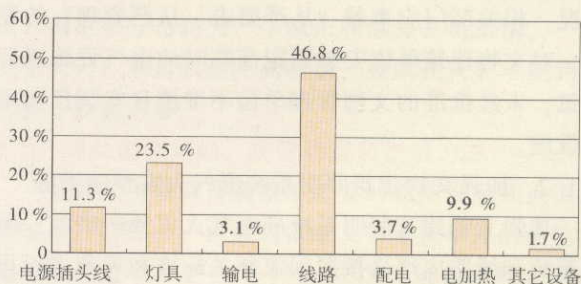


图 2 美国消防数据中心 2003 年至 2005 年导致住宅建筑电气火灾的设备统计
Fig. 2 National Fire Data Center (US) 2003 ~ 2005 statistics of equipment causing residential building electrical fires

作者信息

任长宁, 男, 美国理想工业中国有限公司北京代表处, 高级工程师, 全国建筑物电气装置标准化技术委员会 (SAC/TC205) 成员, 全国电器附件标准化技术委员会 (SAC/TC67) 成员, 中国消防协会电气防火委员会成员。

杨 栋, 男, 乌鲁木齐市公安消防支队, 高级工程师。

美国消防数据中心 (U. S. Fire Administration · National Fire Data Center) 对占住宅建筑电气火灾 89% 的起火源进行了分析^[3], 从排名在前 5 位的起火源种类 (见表 1) 可知: 由各类电弧故障导致的住宅建筑电气火灾, 比例高达 45.5%。

表 1 美国消防数据中心统计排在前 5 位的起火源 (2003 ~ 2005)

Tab. 1 Top 5 fire origins according to the statistics of National Fire Data Center (US) (2003 ~ 2005)

火源种类	比例
电气损坏、故障及其他问题	35.4%
不确定的电弧性短路	26.0%
绝缘失效造成的电弧性短路	15.1%
连接不良和导体断裂造成的电弧	4.4%
机械损坏、故障及其他问题	3.8%

综上所述可知: 低压配电线路 (包括电源插座与设备引线) 的电弧故障是引起建筑物电气火灾的最主要原因。中外电气火灾在相同的物理定律支配下, 电气火灾的起因具有值得研究的共性, 它给电气防火指明了方向——将防控配电线路电弧故障放在首位!

2 配电线路中的电弧故障

2.1 种类

低压配电线路中的电弧按其性质有“好”、“坏”之分。

所谓“坏弧”, 特指“故障电弧”, 它在电气系统中发生的时间与地点不可预知, 发生规模和持续时间难以控制, 容易持续、发展、蔓延, 最终造成设备与线路损坏, 直至导致电气火灾。按发生位置, 故障电弧又可分为三类, 即:

- a. 带电导体 (相线与相线、相线与中性线) 之间的电弧, 也称为“电弧性短路”。因电弧与线路上的正常负载呈并联关系, 又称为“并联型电弧”^[17]。
- b. 带电导体与接地导体 (如: PE 线、接地的设备导电外壳等) 之间的电弧, 也称为“电弧性接地故障”或“电弧性漏电”。
- c. 带电导体自身断裂或因接触不良产生的电弧。因电弧与负载呈串联关系, 也称为“串联型电弧”^[17]。

所谓“好弧”, 是相对“故障电弧”而言的, 也称“正常操作弧”或“安全电弧”。在正常使用条件下, 此类电弧不可避免或很难避免, 但其发生的时间与地点却可预知, 并可通过工艺手段控制其发生规模和持续时间, 在受控条件下不会造成设备或线路损坏, 更不会酿成火灾事故。

2.2 发生过程

根据起弧过程, 低压配电线路中的电弧可分为: ①非接触电弧——不同电位导体间的绝缘介质 (或空气间隙) 被高电压击穿时的电弧; ②直接接触电弧——载流导体在分断时产生的电弧; ③间接接触电弧——绝缘材料表面或材料本身受环境影响, 导致绝缘强度下降后形成了碳化通道, 出现“爬电”、“闪络”和“燃弧”。

2.2.1 非接触电弧

在彼此绝缘的两金属电极上施加足够高的电压, 电极间绝缘介质 (如空气) 电离, 形成击穿电弧。发生非接触电弧的最重要条件是电压值, 实验证明: 对 10 mm 的空气间隙施加 30 kV 电压, 才会燃弧; 但如果极间电压小于 300 V, 则不论极间空气间隙多小, 间隙都不会被击穿^[4]。

因此, 对于安装符合要求且正常运行中的低压配电系统来说, 出现此类击穿电弧的可能很小。

2.2.2 直接接触电弧

大气中的载流导体在断开过程中, 总会经历一个接触面积很小的阶段, 此阶段电流密度很高, 造成分断处金属材料强烈发热以致汽化, 金属表面也会产生“热电发射”现象。导体开始脱离时形成的间隙很小, 电场强度极大, 电子在强电场作用下形成“场强发射”。具有足够动能的电子与间隙内中性介质点产生碰撞, 温度急剧增加 (电弧温度高达 6 000 ~ 7 000 °C, 甚至 10 000 °C 以上^[5]), 气体分子和金属蒸汽的电离态得以维持, 并形成稳定的导电通路, 电弧就此形成。只有当导体间隙足够大或导体电流被切断时, 电弧才会熄灭。

此类电弧属于“串联型电弧”也称“分断电弧”, 其起弧过程也被形象地称为“拉弧”。实验证明, 只要电压超过 12 ~ 20 V, 被分断电流超过 0.25 ~ 1 A, 就会拉弧。以铜导体为例, 分断时最小起弧电压为

13 V, 最小起弧电流为 0.43 A, 分断 220 V 交流电路时, 起弧最小电流为 0.5 A^[5]。电弧一旦建立, 维持 10 mm 长的电弧只需 20 V 电压^[4]。

2.2.3 间接接触电弧

不同电位导体间有机绝缘材料在外界因素(如:机械损伤、温度变化、阳光、盐类或油污等)影响下, 其表面和内部绝缘强度会下降, 发生间接接触燃弧。

a. 表面“爬电”。不同电位导体间绝缘材料表面上的盐分或导电尘埃积累到一定程度时, 先是出现星星火花, 其热量会使绝缘材料表面炭化, 最终形成电弧。

b. 内部“炭化通道”。不同电位导体间绝缘材料内部受侵蚀而老化, 导致泄漏电流增加。电流热效应长时间积累, 使有机材料炭化, 形成导电通路, 电弧随即产生。

上述过程中, 如果线路中出现雷电过电压或操作过电压, 劣化的线路绝缘极易被迅速击穿而建立电弧。

2.3 配电线路电弧的危险性

2.3.1 火灾危险性大

电弧本身是等离子态的高温气体, 只要故障点周围有可燃材料和足够的氧气, 必然引起剧烈燃烧。低压配电线路中的非阻燃绝缘材料(如:导线护套)极易因此被电弧引燃。

2.3.2 故障难以预知与检查

低压配电线路中绝缘与导体缺陷都是随机发生的, “坏弧”出现的时间、地点、大小都无法预知。低压线路安装多为隐蔽工程, 即使明敷线路, 也会由于绝缘缺陷或炭化痕迹过于微小而无法识别, 发生在绝缘内部的缺陷更是无从得知。

凭借常规绝缘测试仪表测试, 一方面受测试条件的限制(如:停电检测)不能及时发现问题;另一方面, 外界条件导致绝缘的老化与失效是动态的——今天测试合格不代表明天仍然安全。

2.3.3 常规保护电器的局限性

出现电弧故障时, 最行之有效的办法只有一个——断电!

正确选用和安装剩余电流动作保护电器(RCD), 能防止“电弧性接地故障”, 但对于不产生剩余电流

的“并联型电弧”和“串联型电弧”, RCD 则无能为力。由于电弧性短路并不产生过载, 简单采用常规短路、过负荷保护电器都不能实现及时断电。即使电弧性短路发展为金属性短路, 保护装置启动, 往往火灾已经形成!

3 配电线路的电弧防控

3.1 金属管布线的防火作用

如果能通过施工工艺, 将故障控制在极有限范围内, 且有效防止故障高温引燃线路周围可燃物, 那么待线路中出现符合保护条件的: 剩余电流、过负荷电流或短路电流时, 就可实现断电保护。从某种意义上讲, 这是一种“欲擒故纵”的做法。

在已设置常规保护电器的低压配电系统中, 采用与保护接地导体(PE)可靠连接的金属管布线, 在很大程度上能实现上述要求。金属管内的导线一旦出现电弧故障, 燃烧被限制在金属管内, 当故障发展为金属性短路时, 断路器或熔断器可实现断电保护; 当带电导体与金属管壁接触, 形成接地故障时, RCD 可实现断电保护。

由于金属管本身的机械强度高、阻燃、导热、导电等特性, 与明敷或穿非金属绝缘套管相比, 穿金属管敷设的线路具有以下特点:

- 受外界因素影响小, 绝缘受损的可能性降低;
- 金属管对导线有一定散热作用;
- 屏蔽作用, 防止雷电(感应)过电压对绝缘的破坏。

因此, 采用穿金属管敷设的低压配电系统, 本身具有较高的安全性。

美国芝加哥地区的建筑物配电系统均要求采用穿金属管敷设方式, 线路火灾只是全美国同期水平的 1/4 (如图 3 所示)^[6]。

但是成本高、施工工艺要求高等原因, 限制着金属管布线的使用, 而且金属管不能覆盖, 包括墙壁插座、插头线或设备电源引线在内的整个配电系统。据统计, 超过 11% 的电气火灾是由这部分线路引起的(如图 2、图 6 所示)。

3.2 电弧故障保护电器

3.2.1 AFCI 简史

20 世纪 30 年代, 已有人研究通过分析线路中电

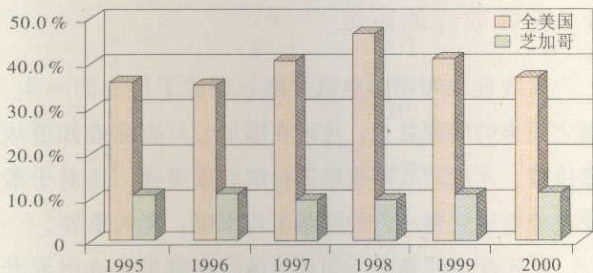


图 3 芝国哥与全美国平均电气火灾发生率对比
Fig. 3 Average electrical fire incidence contrast of Chicago and America

弧特征，判断其有、无、好、坏，实现断电保护的装置。1994 年 12 月，美国消费品安全委员会 (Consumer Product Safety Commission, 简称: CPSC) 向 800 家国内外厂商发出呼吁，征集电弧保护技术予以评估。19 位发明人及厂商提交了方案进行测试评估。1995 年 9 月，UL (Underwriters Laboratories) 公布测试结果：将电弧探测技术与家用断路器和接地故障断路器结合的方案，效果最好^[7]。

这种“电弧探测”与“断电保护”相结合的保护装置，就是电弧故障断路器 (Arc Fault Circuit Interrupter, 简称: AFCI)。1996 年 12 月，UL 与国家电气制造商协会 (National Electrical Manufacturers Association, 简称: NEMA)，合作编写了一份基于 120 V / 60 Hz 配电系统的 AFCI 运行要求标准草案。1997 年秋，UL 开始将标准草案转化为正式标准——《电弧故障断路器》(UL 1699 Arc - Fault Circuit - Interrupters)，并于 1999 年 2 月出版，后经 2006 年 4 月再版和 2008 年 8 月修订^[8]，目前 UL 1699 已成为设计、生产与检验 AFCI 产品最重要的标准文件。从图 4 的实验效果中可以看到，与常规短路保护装置相比，AFCI 对导线的保护效果是很明显的。

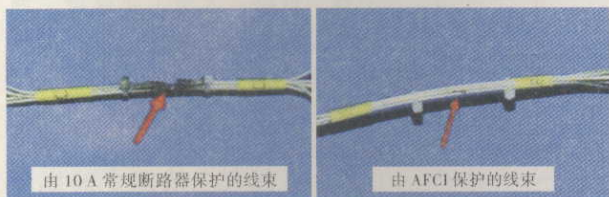


图 4 常规短路保护电器与电弧故障断路器的保护效果对比
Fig. 4 Comparison between protection results of common short-circuit protective devices and AFCI

3.2.2 AFCI 的种类

根据在线路中的安装位置与保护对象，UL 1699 将 AFCI 分为 5 类 (如图 5 所示)：①分支 / 馈电型 (branch / feeder) AFCI；②墙壁插座型 (outlet circuit) AFCI；③组合型 (combination) AFCI；④便携插线板型 (portable) AFCI；⑤引线型 (cord) AFCI。



图 5 UL 1699 定义的 5 种 AFCI 产品
Fig. 5 Five types of UL 1699 defined AFCI products

AFCI 所接负载类型越少，电弧故障识别得越精确，误动作可能越小。多种类型的 AFCI 可实现对低压配电分支线路的“分级分段”保护，提高了准确性。同时，每种 AFCI 都可以集成短路、过负荷、接地故障、浪涌抑制等功能，使保护更全面。

3.2.3 AFCI 在美国的应用情况

1997 年，美国国家电气规范 (NEC) 编写组建议在规范中增加与使用 AFCI 有关的条款。

1999 版 NEC 将“分支 / 馈电型”AFCI 列入，并在 210.12 条规定：由 AFCI 保护 15 A 及 20 A 卧室插座回路 (2002 年 1 月生效)。

2002 版 NEC 将 AFCI 的保护范围由卧室插座回路扩展到整个卧室配电回路。

2005 版 NEC 将“组合型”AFCI 引入规范 (2008 年 1 月生效)。

2008 版 NEC 将“组合型”AFCI 保护范围，由卧室配电回路扩展至家庭活动室、起居室、会客室、阅览室、小隔间、阳光房、娱乐室等的配电线路。

2011 版 NEC 除继续执行 210.12 条规定外，又对更换墙壁插座提出了要求——406.4 条的 (D)(4) 款规定：用带有 AFCI 保护功能的插座进行更换^[9]。

根据美国消防协会《住宅电气火灾》分析与调查报告中的数据^[14, 15] (见图 6)，2007 年配电线路火灾较 2003 ~ 2006 年平均值降低了 8%，人员死亡降低了 6%。而电源插头线引起的火灾及人员死亡比例并没

有明显变化。这应与2011版之前的NEC中并未规定使用“插座型”与“便携型”AFCI有关。

笔者认为,尽管不能将火灾事故下降完全归于使用了AFCI,但2003~2007年正好与NEC不断要求扩大AFCI使用范围的规定相对应,在一定程度上说明了AFCI的作用。

3.3 AFCI的现场验证

AFCI对配电线路的火灾防控作用是毋庸置疑的,但作为机电一体化产品,与常规保护电器一样,同样存在故障与失效问题。其工作原理更决定了:它比其他保护电器更易受所在电气线路与环境干扰的影响,出现“拒动”和“误动”。满足UL1699测试要求的AFCI,仅能说明产品本身在实验室条件下是合格的,只有进行现场验证测试才能知道:AFCI安装是否正确;是否受线路条件影响;是外界原因还是自身故障导致了“误动”或“拒动”。

正确的验证方法是:在AFCI所保护线路的下游,用专用检测仪表模拟电弧故障(如图7所示),测试AFCI保护功能,确认AFCI误动或拒动原因。

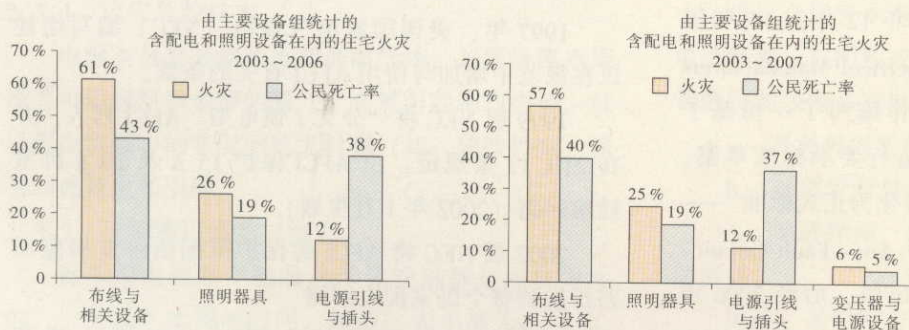


图6 住宅电气火灾主要原因
Fig. 6 Main causes for residential building electrical fires

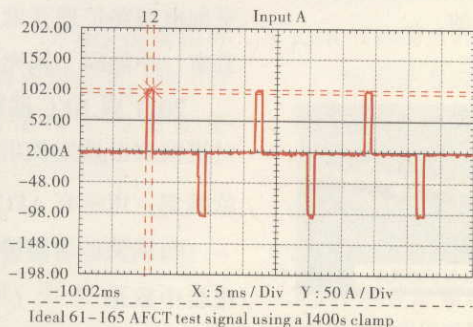


图7 AFCI现场验证仪表与故障模拟信号
Fig. 7 AFCI instrument for on-site verification instrument and analog fault signal

4 电弧故障的定位

有效发现和控制电弧故障只完成了任务的一半,随之而来的问题就是:故障在哪里?只有准确知道故障位置,才能对故障线路进行维修或更换。这对于敷设在墙壁或管路之内的隐蔽工程来说,尤为重要。

低压配电线路中,如果导体间绝缘劣化或出现开路、短路(包括电弧性短路)时,线路阻抗会发生变化,导致其中传输的电信号发生反射,反射信号的强度与阻抗变化大小相关(如图8所示)。例如:完全开路点对应波峰(图中标记Open)、完全短路点对应波谷(图中标记Short),线路阻抗相对于正常阻抗的偏离程度,反映出故障的性质与大小(图中标记50Ω处为正常阻抗,100Ω和10Ω处为异常阻抗),利用此原理就可以准确定位故障位置。

电弧故障发生后所导致的电缆阻抗下降幅度很小(仍表现为高阻状态),因此必须对常规时域反射技术加以改进,以使这种异常而微小的阻抗下降达到可识别的程度。实践证明,基于扩频通信技术的序列时域

反射(Sequence Time Domain Reflectometry, STDR)和扩频时域反射(Spread Spectrum Time Domain Reflectometry, SSTDR)最适于定位低压配电线路的电弧故障(如图9所示)。与常规时域反射测试结果类似,电弧导致的阻抗下降也表现为“波谷”,但更容易辨认与识别,其故障定位精度可达±1%^[12]。此技术除了用于建筑电气电弧故障定位,在航空电气、汽车电气、地铁、铁路、大型工业设备、通信网络等领域也被广泛使用。

5 结语

低压配电线路中的电弧故障是电气火灾的最主要原因,在现有技术不能有效实现预防电弧故障发生的情况

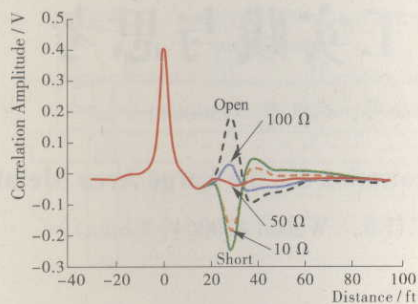


图 8 典型时域反射测试结果

Fig. 8 Results of typical time domain reflection test

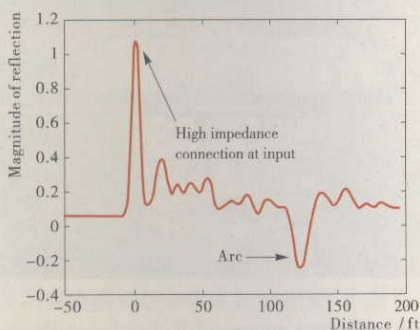


图 9 用 STDR / SSTDR 技术定位电弧故障

Fig. 9 Locating arc fault with STDR / SSTDR technology

下, 必须采取及时有效的“事后补救”措施, 在故障发生初期对线路实现保护, 使故障不扩大、不蔓延、不发展成火灾。发达国家已有经验证明, 正确采用电弧故障保护电器并配合适当的线路敷设工艺, 在很大程度上能有效控制低压配电线路中的电弧故障, 减少电气火灾发生率。

确保电弧故障保护电器的正常运行, 还要注重对保护电器本身的定期维护和检修, 以期在关键时刻发挥其应有作用。实现对电弧故障有效防控的同时, 还要对故障进行准确定位, 这样才能准确维修和排除故障, 快速恢复线路运行。

总之, 低压配电线路电弧故障防控要从设计、材料、施工、维护、检修各环节采取综合措施。我国相关部门已启动电弧保护电器标准及应用规范的制定工作, 我国电气火灾高发态势必将得到改观。⚡

参 考 文 献

[1] 邱曼, 张明, 夏大维, 等. 2003—2007年国内重特大电气火灾事故的统计分析 // 自主创新与持续增长第十一届中国科协年会论文集(3)[C]. 2009.

[2] U. S. Fire Administration / National Fire Data Center. A Profile of Fire in the United States 1995 - 2004, Fourteenth Edition [EB / OL]. (2008 - 02) [2011 - 11 - 22] <http://www.usfa.dhs.gov/statistics>.

[3] Department of Homeland Security · U. S. Fire Administration National Fire Data Center. Residential Building Electrical Fires [R], 2008.

[4] 王厚余. 低压电气装置的设计安装和检验 [M]. 第2版. 北京: 中国电力出版社, 2007: 81.

[5] 李宏文, 沈金波, 主编. 电气防火检测技术与应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 39.

[6] Timothy Arendt, Fire Safety Options in Design and Code Practices to Minimize Fire Problems Due to Aged Electrical Wiring Systems [R], 2006: 2.

[7] History of AFCL. White Paper, RPFL - COMB2 - 0807 [R]. Siemens Industry, Inc., 2009: 2.

[8] Underwriters Laboratories Inc. UL 1699: 2008 Arc - Fault Circuit - Interrupters [S]. 2008.

[9] National Fire Protection Association. NEC 1999 National Electrical Code [S]. 1999.

[10] National Fire Protection Association. NEC 2002 National Electrical Code [S]. 2002.

[11] National Fire Protection Association. NEC 2005 National Electrical Code [S]. 2005.

[12] National Fire Protection Association. NEC 2008 National Electrical Code [S]. 2008.

[13] National Fire Protection Association. NEC 2011 National Electrical Code [S]. 2011.

[14] John R Hall, Jr. Home Electrical Fires [R]. National Fire Protection Association Fire Analysis and Research Division, 2009.

[15] John R Hall, Jr. Home Electrical Fires [R]. National Fire Protection Association Fire Analysis and Research Division, 2010.

[16] Paul K Kuhn, Cynthia Furse, Ph D. Paul Smith, Locating Hidden Hazards in Electrical Wiring [R]. Aged Electrical Systems Research Application Symposium, 2006.

[17] 任长宁. 国内外电气防火检测规范比较及分析 [J]. 建筑电气, 2011 (8), 47 - 53.

2011 - 04 - 15 来稿

2011 - 11 - 29 修回