

降低分支电路电气火灾风险的措施与预防性检测

任长宁

北京东长安街 1号东方广场 W1座 911室，美国理想工业公司北京代表处，100738

摘要：通过对短路、连接不良和谐波等建筑物分支电路电气火灾成因分析，结合国内外实际工程中使用的工艺、装置及检验仪表，为分支电路的施工、验收、维修、维护提出建议，实现消除电气火灾隐患，提高用电安全性。

关键字：电气防火 分支电路 导线连接器 测试仪表

一、国之大事，死生之地，存亡之道，不可不察。

电是现代文明支柱，国家经济命脉。发电、输电、用电，任一环节出现问题，都会对国计民生产生重大影响。单就电气火灾一项，从公安部消防局近 4 年统计（表 1.1），问题严重性可见一斑：

表 1.1 近年来电气火灾统计数据（www.119.cn）

年份	全国火灾总数	电气火灾比例（%）
2009 年 1-7 月	8.28 万起	280.0%（居首位）
2008 年	13.3 万起	30.1%（居首位）
2007 年	15.9 万起	28.8%（居首位）
2006 年	22.2 万起	26.1%（居首位）
2005 年	14.3 万起	21.9%（居第二位）

相比之下，根据美国国家防火协会（NFPA）和美国消费类产品安全委员会统计，约 9% 的火灾和 7% 的死亡是因用电造成的。日本每人平均用电是中国的 8 倍，而电气火灾只占火灾原因的 2%-3%。中国每年触电死亡约 8000 人，电击死亡率与法国相比是 400:1。

分析造成这种状况的原因，有技术的理论与实践问题，也涉及管理措施和体制的问题。我国现行电气规范，源于前苏联电站部的《电气装置安装规程》，该规程与国际电工标准（IEC）有很大不同，被总结成：“重发（电）、轻配（电）、不管用（电）。”与发达国家相比，对方更重视电气系统的设计、安装和管理来消除电气火灾隐患。例如，美国《国家电气规范（NEC）》中涉及电气防火的条款，都是由美国消防协会（NFPA）制订的；对电气火灾隐患的检查，设有独立于施工和用户的第三方检测机构，其检测报告是业主使用和保险公司承保火险的重要依据。

本文通过对建筑电气火灾成因的分析，结合国内外工程中使用的工艺、装置及检测仪表，为分支电路的施工、验收、维修、维护提出一些建议，在预防电气火灾方面为用户提供快速查明故障、消除安全隐患的手段。

二、视其所以，观其所由，察其所安——分析电气火灾原因

在燃烧三角形——火源、燃料、氧气中，线路过载、连接不良和谐波产生的高热就是火源。通过热成像或红外测温技术，能快速准确地发现电气线路中的高热点（图 2.1）。《DB11/065-2000 北京市电气防火检测技术规范》3.3 规定：“电气防火检测应在电气设备和线路经过 1h 以上时间的有载运行，进入正常热稳定工作状态温度变化小于 1℃/h 后进行。”

但温升只是表象，消除电气火灾隐患必须深入分析其成因，并采取相应措施，才能消除隐患。



图 2.1 使用 IDEAL 热像仪和红外线测温仪测量电气线路高热点

（一）过载与防范

电气短路是最严重的过载，50%以上的电气火灾由短路引起。短路分为：“金属性短路”和“电弧性短路”。电气隔离是防止不同电位导体间绝缘被破坏或绝缘强度下降引起短路的根本方法；安装过载和漏电保护装置，是防止短路危害蔓延的有效方法。

1. 电气隔离的检测

《GB50303-2002 建筑电气工程施工质量验收规范》中规定，设备进场、安装、工序交接时，都要对电器、装置、线间、线对地的绝缘电阻进行测试，（3.2.10：灯具绝缘电阻值不小于 2MΩ；3.2.11：开关、插座绝缘电阻值不小于 5MΩ；18.1.2：低压电线和电缆、线间和线对地的绝缘电阻值必须大于 0.5MΩ）；《GB50150-2006 电气装置安装工程电气设备交接试验标准》中还明确了测试仪表的电压等级，“100V - 500V 的电气设备或线路，采用 500V 兆欧表”测试。图 2.2 是两款典型的数字式绝缘强度测试仪，比传统手摇式仪表操作更简单，测试更精确。

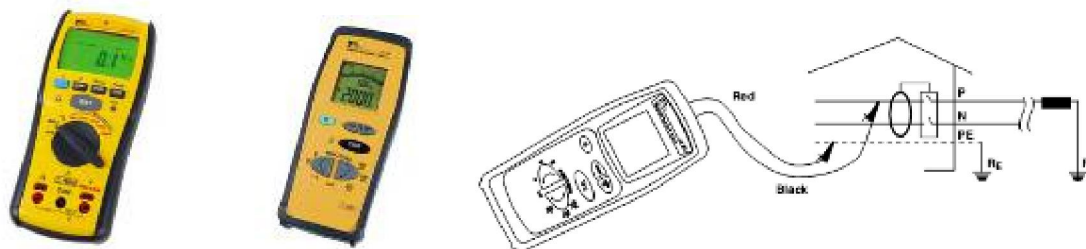


图 2.2 IDEAL 61-797/795 型数字绝缘强度测试仪与实际应用示意图

2 短路的防范

单纯的绝缘强度测试只能解决线路或设备“一时一处”是否安全的问题，无法作到“时时监测”，因此需要在线路上安装保护装置。

(1) 金属性短路的防范

正确使用质量可靠的过载保护装置，如：保险丝、熔断器、空气开关等，就能有效防止线路严重过载引起的火灾。

(2) 接地故障的防范

正常情况下，保护地线是不带电的，因而断线或接触不良不能被及时发现。发生漏电时，不仅有电击危险，还会出现打火或电弧，进而导致火灾。由于接地故障电流量级在几 mA 到几百 mA，不能依赖过载保护装置进行防范，而必须使用“剩余电流保护器 RCD”(国外称：接地故障断路器 GFCI) 进行保护。发达国家的用户进线如未设置 RCD 装置，当地供电公司将不与接电；《IEC1200-53 1994-10 593.3》规定，采用两级或三级 RCD 装置防止因漏电引起的电气火灾与人身触电事故；我国《GB50045-95 高层民用建筑设计防火规范(2005 版)》9.5 中原则性地规定了对“漏电火灾报警系统”的要求，但不是强制执行条款。

(3) 带电导体间电弧的防范

普通 RCD 不能对“相/零”间电弧性短路起保护作用。美国上世纪 90 年代开始使用“电弧故障断路器 (AFCI, Arc Fault Circuit Interrupter)”(图 2.3)。AFCI 的安装与 RCD 相同，但触发条件不同，它通过监测电弧特有波形、持续时间、频率，实现对下游线路的长期监测与保护。

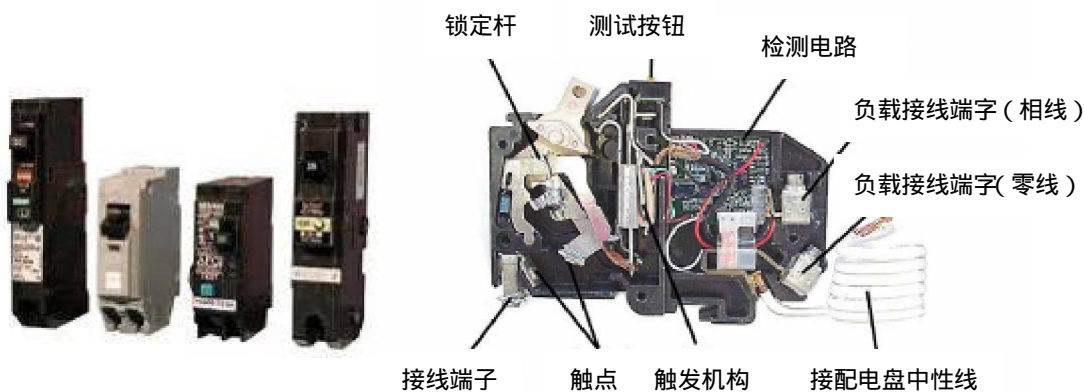


图 2.3 电弧故障断路器 (AFCI)

美国《国家电气规范》1999 版 (210.12B) 中最早提及此类装置；2002 版中规定，卧室中所有单相 (120V) 15A 及 20A 回路都要安装 AFCI；2008 版中进一步要求，在住宅所有 (120V) 15A 及 20A 回路都要安装此类装置。遗憾的是，我国的工程规范中还没有类似规定。

3 对保护装置的检测

无论 RCD (GFCI) 还是 AFCI，都有疲劳、老化、失灵的可能。据统计，15% 的 RCD 不能被正常触发。因此，UL (Underwriters Laboratories) 认证机构要求每月对 RCD 检查一次；《GB50254-96 电气装置安装工程低压电器施工及验收规范》5.0.2.4 规定，“电流型漏电保护器安装后，除应检查接线无误外，

还应通过实验按钮检查其动作性能，并应满足要求。”；《GB13955-2005 漏电保护器的安装和运行》7.3 规定：“用于手持式电动工具和移动式电气设备和不连续使用的剩余电流保护装置应在每次使用前进行试验”。但仅凭保护装置上的测试按钮对其进行功能验证，存在两点不足：

1) 装置没有显示功能，不能提供触发电流和响应时间，是否满足指标要求，不得而知；

2) 装置本身能触发，不代表远离配电箱的远端插座或用电器处发生故障时也能可靠触发。例如：保护装置与用电器间的线路有高阻点，漏电信号无法被保护装置检测到，此时即使装置本身正常也不能起到保护作用。

解决方法是在用电器（或插座）处“现场测试”。图 2.4 所示仪表，能在安装有 RCD/AFCI 配电盘的下游线路（插座）上模拟接地或电弧故障，验证保护装置能否可靠触发，并显示断电响应时间。



图 2.4 IDEAL 61-165 型交流分支电路分析仪

（二）电气连接不良与防范

电气连接分为“固定连接”和“活动连接”。前者指设备端子与线路、线路与线路之间的永久连接；后者指开关触点、插头与插座间的连接。连接处的接触电阻所产生的高温、电火花会成为电气火灾的火源，有过载时，情况更甚。

1 细导线的电气连接

《JGJ 16-2008 民用建筑电气设计标准》“表 7.4.2”规定：“固定敷设的电缆和绝缘电线，电力和照明线路，铜导线最小截面积为 1.5 mm^2 ”；《GB50096-1999 住宅设计规范》6.5.2 要求，交流供电使用 2.5 mm^2 导线。可见，接续细导线是普通商用和民用建筑电气工程中最常见的施工环节。

但是《GB50168-2006 电气装置安装工程 电缆线路施工及验收规范》主要侧重高压（6kV 以上）输电电缆的施工与验收；《GB50303-2002 建筑电气工程施工质量验收规范》中仅是导线与端子或设备的连接规范，而针对导线与导线，尤其细导线（ 2.5 mm^2 及以下）的接续，没有明确规定。规范的缺失，使导线接续成为最容易出现问题的环节。

我们不妨借鉴国外规范中的导线接续方式和方法，以美国《国家电气规范》为例，110.14 B 条款这样规定：“（B）接合。导体应使用特定连接装置接合或连接，或采用铜焊、熔焊、锡焊等溶化金属或合金方法连接。焊接前，首先应将导线接合或连接在一起，以保证机械和电气可靠性，然后再进行焊接。所有接合与连接点，以及导体自由端，都应用绝缘物覆盖，或采用特定绝缘装置达到同样效果。导线连接器或用于导体直埋的连接（编接、插接、捻接、叠接、拼接等）安装方法，都应列入此类用途。”

规范实际提出了两种导线连接方式：“特定连接装置”或“绞接后焊接”。

(1) 绞接 + 焊接

这种连接方式的优点是：连接可靠，机械与电气强度都有保证。缺点是：

1) 导线绞接后必须焊接，但在实际施工中容易被忽视或因施工条件限制无法实施，简单绞接无法保证连接质量；

2) 绝缘胶带长期使用后可能松脱；

3) 防水性能差或不防水；

4) 不适于不易焊接的铝线对接；

5) 需要焊接工具，操作不便

(2) 特定连接装置

中国用户可能对 NEC 中提到的“导线连接器”较陌生，但在欧美国家，导线连接器已被使用近 90 年了。由于早期制造材料是陶瓷，所以当时又称其为“陶瓷连接器”(图 2.5)，后来业内都把此类部件叫做“接线帽”，其名称源自 IDEAL 公司 1939 年注册的“WIRE-NUT®”导线连接器(图 2.6)商标。



图 2.5 早期陶瓷连接器



图 2.6 IDEAL WIRE-NUT® 旋接式导线连接器的使用与结构示意图

UL 认证机构根据 NEC、ANSI/NFPA 70 规定，专门制定了 UL 486C (接线用导线连接器) 条款，明确了此类连接器适用线径范围、导线种类、导线材质、耐压等级。

使用导线连接器除实现导线可靠的电气连接外，还有以下优点：

1) 无需焊接；

2) 安装过程中导线自然完成绞接，连接、绝缘一次完成；

3) 徒手操作，无需安装工具；

4) 需要时连接器可方便地拆下，检查接点情况，连接器本身也可反复使用；

5) 特殊设计的连接器能防水、防潮、防腐蚀。

导线连接器在安全性、适应性、可靠性等方面具有如此多的优点，所以发达国家的电工在细导线接续工作中已很少单独使用绝缘胶带了。

2 活动电气连接

开关、插座是最常见的，由内部金属簧片形成的活动电气连接部件，通过材料和制造工艺保证触点接触面积与压力。活动连接处接触电阻过大就会造成高温和打火（图 2.7），两侧接线的绝缘层还会因高温老化，引起短路。



图 2.7 因接触电阻和大负载造成线路烧毁故障

3. 电气连接质量的检查

电气连接大多是隐蔽工程，简单目检很难发现问题。虚接和线损造成的压降，只有在负载运行时才能显现。《GB50052-95 供配电系统设计规范》4.0.4 规定，“正常运行情况下，用电设备端子处电压允许值在 +5% ~ -10% 之间”。“带载压降”超标说明：要么线路容量不够，要么线路中存在故障点。

图 2.8 所示仪表就是一款能仿真 5A、8A、10A 负载，实现快速测量线路压降的工具；避免使用大功率假负载，使测量工作变得简单、快速、安全、有效。



图 2.8 IDEAL 61-164cn 型交流电路分析仪

除测量压降，预估线路带载能力外，此仪表还能实现：

- 1) 带电测试相线、零线、保护地线阻抗，精确定位高阻点位置；
- 2) 依据《GB50303-2002》中的强制条款（22.1.2），快速鉴别插座接线方式——左零、右火、中间地；
- 3) 测量电压峰值和有效值，评估“波形系数”，衡量谐波情况；
- 4) 现场测试 RCD 性能——触发与响应时间，操作简单到“只按一键”！

（三）谐波影响与检测

非线性负载产生谐波，它会使功率因数下降和线路过载，成为电气火灾隐患。

(1) 谐波使功率因数下降，线损增加。

图 2.9 是典型的开关电源输入电压与电流波形，经傅立叶分析可知，电流中含 3、5、7 等奇次谐波，根据三角函数的正交特性，高次谐波功率为 0 ($\int_{-T/2}^{T/2} \sin(\omega t) \sin(3\omega t) dt = 0$, $\int_{-T/2}^{T/2} \sin(\omega t) \sin(5\omega t) dt = 0$ )，换言之，虽然非线性负载上的电压与电流同相，但功率因数不等于 1。谐波含量越高，功率因数越低，线损越大。

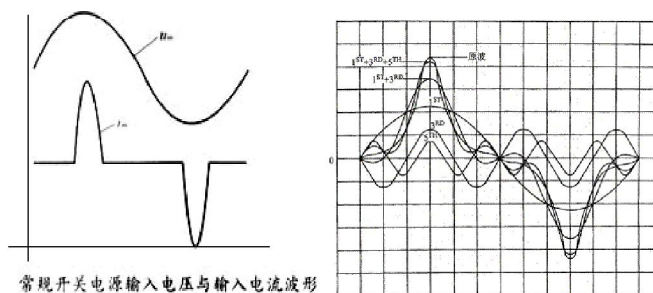


图 2.9 开关电源输入电流的谐波分析

(2) 谐波造成中性线过载

《GB50054-95 低压配电设计规范》2.2.6 规定，“在三相四线配电系统中，中性线的允许载流量不应小于线路中最大不平衡负荷电流，且应计入谐波电流的影响。”

这是因为，如果供电系统含有 3 倍次谐波（3、9、15.....等奇次谐波）电流，它们将在中性线上叠加（图 2.10），严重时谐波电流甚至超过相线电流，造成中性线过载。

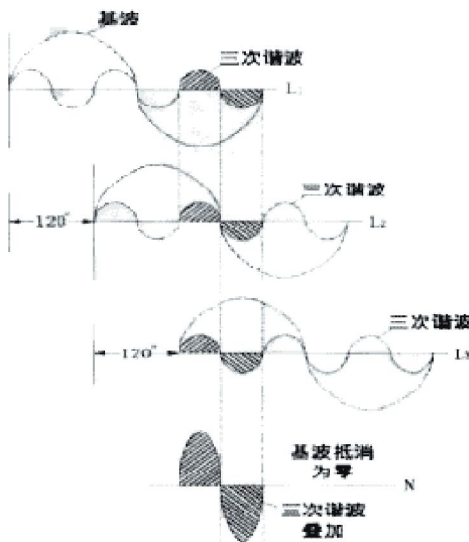


图 2.10 三次谐波在中性线上叠加

(3) 谐波的检测

由于谐波影响易被忽视，维护人员在遇到谐波造成的过载时，往往误认为保护装置容量小，而更换更大的断路器，给电气火灾埋下了隐患。图 2.11 所示仪表能分析到 50 次谐波并能记录各种电参数进行

深入分析。

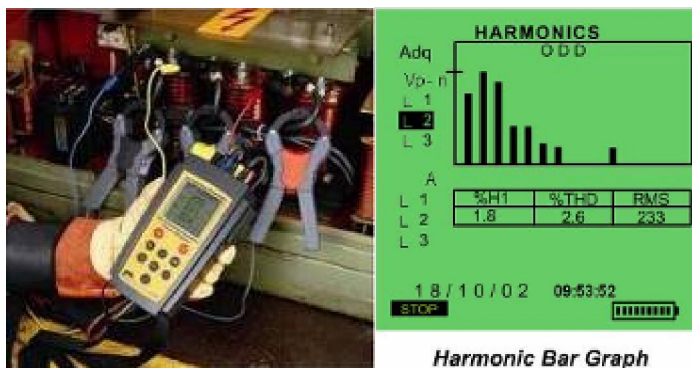


图 2.11 IDEAL 61-805 电能分析仪与频谱分析结果



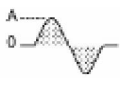
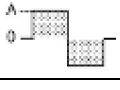

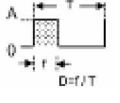
图 2.12 含有谐波的交流电波形

在不能获得谐波详细成份时,可依据“总谐波畸变率(THD%)”对谐波含量进行评判。《GB/T14549-93 电能质量公用电网谐波》规定,低压系统的 THD%小于 5%为正常。

由于谐波使交流电波形发生畸变(图 2.12),导致交流电的“波形系数”,即:电压峰值与有效值之比不再等于 $\sqrt{2}$ 。因此,通过计算“波形系数”也能了解谐波情况,数值偏差越大,说明谐波含量越多。

表 2.1中列举了几种典型波形的波形系数。

表 2.1 几种典型波形的波形系数

波形	有效值 (Vrms)	波形系数 (CF) = 峰值 /有效值
	$\frac{1}{\sqrt{2}}A$ 0.707	$\sqrt{2}$ 1.414
	A	1
	$\frac{1}{\sqrt{3}}A$	$\sqrt{3}$ 1.732
	$A\sqrt{D}$ D: 占空比	$\frac{A}{A\sqrt{D}} = \frac{1}{\sqrt{D}}$

三、百战百胜，非善之善者也；不战而胜，善之善者也。

及时、快速、成功地发现和扑救电气火灾固然重要,但无论损失多小都是亡羊补牢。严格按照现有规范,借鉴发达国家先进经验,正确选择和使用施工零部件和检测器具,不断完善施工、验收、维护和维修手段,实现不战而驱火患,这才是对防范电气火灾的最高境界——防火患于未燃!

参考文献

1. 王厚余《低压电气装置的设计安装和检验》中国电力出版社
2. David A. Dini P.E. *Some History of Residential Wiring Practices in the U.S.* Underwriters Laboratories Inc.
3. National Electrical Code, ANSI/NFPA 70 2008
4. UL 486C: Splicing Wire Connectors
5. 《JGJ 16-2008 民用建筑电气设计规范》
6. 《GB50303-2002建筑电气工程施工质量验收规范》
7. 《GB50150-2006电气装置安装工程电气设备交接试验标准》
8. 《GB13955-2005剩余电流动作保护装置安装和运行》
9. 《GB50254-96 电气装置安装工程低压电器施工及验收规范》
10. 《GB50168-2006 电气装置安装工程 电缆线路施工及验收规范》
11. 《GB50054-95低压配电设计规范》
12. 《GB50052-95供配电系统设计规范》
13. 《GB/T14549-93电能质量公用电网谐波》
14. 《DB11/065-2000北京市电气防火检测技术规范》