

# 解决工业级系统失效率和寿命的方案中的应用举措及新趋势

## Application measures and new trends in the solution of failure rate and life of industrial system

吴康

**摘要:** 本文仅将对SiC MOSFET的快速短路检测与保护和IGBT和MOSFET免受ESD损坏与静电击穿及新型静电防护(ESD)技术等二大热点作研讨。与此同时对伴随可靠性解决方案中的SiC MOSFET的快速短路检测与保护及高速SoC和RFIC电磁串扰解决方案应用中举措及新趋势作分析说明。

**关键词:** 短路检测, 门级驱动, 栅极氧化层, 静电击穿与保护

**Abstract:** This paper will only focus on the rapid short-circuit detection and protection of SiC MOSFET, IGBT and MOSFET from ESD damage and electrostatic breakdown, and new electrostatic protection (ESD) technology. At the same time, the measures and new trends in the application of high speed SoC and RFIC electromagnetic crosstalk solutions for SiC MOSFETs with reliability solutions are analyzed.

**Keywords:** Short-circuit detection, gate level drive, Grid oxide layer, Electrostatic breakdown and protection

### 引言

当今系统可靠性设计和分析成为工业级系统的一个重要举措, 由此也遇到了更多的挑战, 如静电放电(ESD)和电磁干扰(EMI)及其一些极端应用环境, 如航空航天、汽车和医疗领域。这些已成为设计能否顺利及时完成和产品使用寿命的关键。应该说, 影响设计完成和产品与系统使用寿命特殊性和重要性的因素由多种, 而普遍而又突出是SiC MOSFET可靠性保护与IGBT和MOSFET免受ESD损坏是关系并成为到工业级系统失效率和寿命的痛点与挑战。这是工业级系统设计者与厂商必须应对的重要热点所在。

值此本文仅将对SiC MOSFET的快速短路检测与保护和IGBT和MOSFET免受ESD损坏与静电击穿及新型静电防护技术等二大热点作研讨。与此同时对伴随可靠性解决方案中的SiC MOSFET的快速短路检测与保护及高速SoC和RFIC电磁串扰解决方案应用中的举措及新趋势作分析说明。

### 1 SiC MOSFET的快速短路检测与保护

SiC功率MOSFET由于其出色的物理特性, 在充电

桩及太阳能逆变器等高频应用中日益得到重视。因为SiC MOSFET开关频率高达几百K赫兹, 门极驱动的设计在应用中就变得格外关键。因为在短路过程中SiC MOSFET的高短路电流会产生极高的热量, 因此SiC MOSFET需要快速的短路检测与保护。同时, 电流关断速率也需要控制在一定范围内, 防止关断时产生过高的电压尖峰。为此探讨了几种能够实现快速短路保护的方法, 并且通过实际测试验证了可行性。

#### 1.1 SiC MOSFET短路特性

功率器件有多种不同的短路模式, 其中最严重的一种是桥臂短路, 在这种短路模式下, 电流迅速上升, 同时器件承受母线电压。为此需要首先对这种短路模式下的MOSFET的行为进行研究。SiC功率MOSFET短路测试平台(见图1(a))与短测试线路(见图1(b))。测试驱动板由专为单管SiC MOSFET研发。例如待测器件可为TO-247 4pin封装的IMZ120R045M1。测试在室温下进行。其IMZ120R045M1(1200V碳化硅沟槽MOSFET, 封装见图1(b)红线管脚所示)可用于充电桩换电站器件、储能航空电源等。

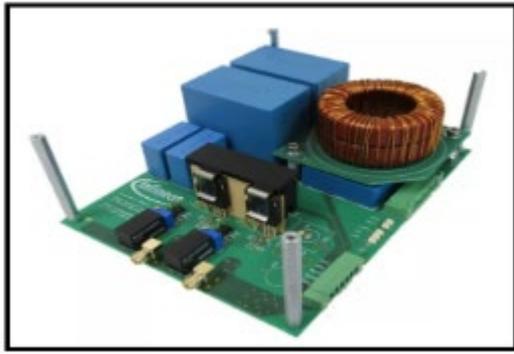


图 1(a) 所示为 SiC 功率 MOSFET 短路测试平台

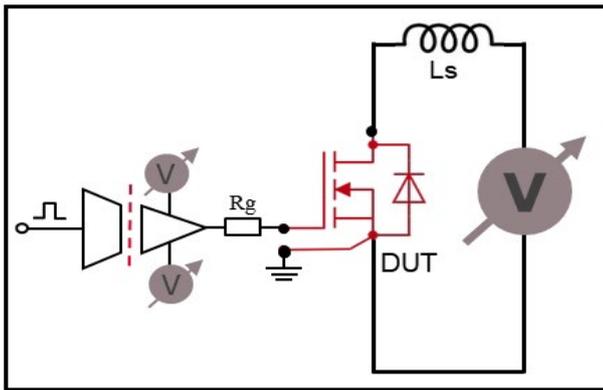


图 1(b) 所示为 SiC 功率 MOSFET 短路测试线路

具体应用：如在 400V 和 800V 两种母线电压下，且门极电压在 12V, 15V, 18V 情况下的可获得短路电流波形。该短路电流波形短路起始阶段，漏极电流快速上升并且到达最高值，在门极电压分别为 12V 和 15V 情况下，电流峰值分别为 170A 和 270A。电流峰值过后，漏极电流开始显著下降，门极电压为 12V 和 15V 的情况下分别为 130A 和 180A。这是因为载流子迁移率随温度的上升而下降，从而短路电流下降。

该测试波形也证实了 TO-247 封装的 4pin CoolSiC™ MOSFET 在 15V 门极驱动电压条件下，拥有至少 3μs 的短路能力。短路脉冲结束后，可能发生两种情况：其一、被测器件安全关断，漏极电流降至 0A。其二、短路期间积累的能量超出了器件极限，比如门极驱动电压过高或者母线电压过高，都可能引起热失控，导致器件失效。

## 1.2 SiC MOSFET 短路保护方法

目前有 4 种常用的短路检测及保护方法，其原理示意图如图 2 所示。其中最直接的方式就是使用电流探头或者分流电阻检测漏极电流。最常用的方法是检测饱和压降。MOSFET 正常导通时漏极电压约为 1~2V。短路发生时，短路电流会迅速上升至饱和值，漏极电压也会上升至母线电压。一旦测试到的  $V_{ds}$  高于预设的参考值，被测器件会被认为进入短路状态。另一个典型的短路检测解决方案是监测  $di/dt$ 。在高功率 IGBT 模块中，发射极与功率发射极之间存在寄生电感。在开关操作中，变化的电流会在电感两端产生电压  $V_{eE}$ 。通过检测这个电压，即可以判断器件是否进入短路状态。导通状态下， $V_{ds}$  检测需要一定的消隐时间防止误触发。另外，基于  $di/dt$  的检测方式依赖于寄生电感  $LeE$  的值。除此之外，短路检测还可以通过检测门极电荷的特性来实现。短路发生时，门极波形不同于正常开关波形，不存在米勒平台。这种方法不需要消隐时间，也不依赖  $LeE$ 。

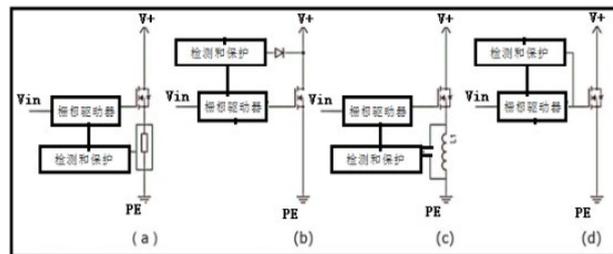


图 2 所示为 4 种常用的短路检测及保护方法

## 1.3 基于采用无磁芯变压器的快速短路保护电路搭建及测试波形

\* 关于快速短路保护电路搭建及基本架构

SiC MOSFET 短路保护电路技术采用无磁芯变压器技术来隔离信号，短路保护通过退饱和和检测功能实现。可以提供高达 2A 的输出电流，因此可以直接驱动 SiC MOSFET (见图 3 右红管引脚)，无需推挽电路。而评估板通过隔离变压器给高边和低边分别提供隔离电源。评估板上有吸收电容，用来抑制电压过冲。待测器件通过一根短线缆实现桥臂短路，杂散电感预估为 100nH。为了实现快速保护，使用 66pF 的电容将消隐时间设定在约 2μs，触发电平由 driver IC 内部设置并固定在 9V。另外，一个

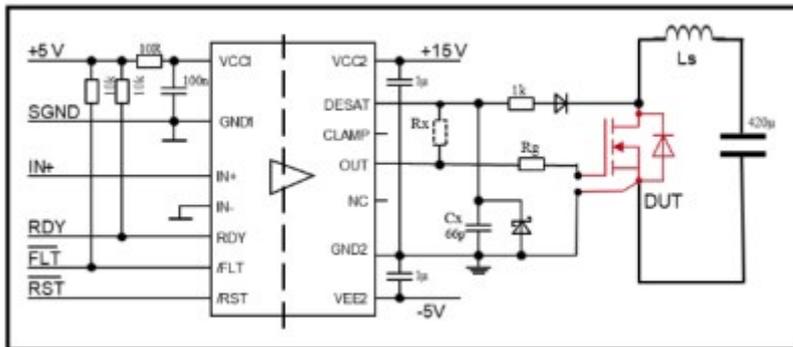


图 3 所示为快速短路保护电路基本架构

2~3kΩ 的电阻  $R_x$  也可以用来加速短路的识别速度，但本次测试中没有使用。基本架构见图 3 所示。

当今 SiC MOSFET 短路保护电路技术器件已广泛应用，其典型的是 1ED020I12-F 芯片。

\* 用基本架构的快速短路保护电路的测试波形结果

图 4 所示为基于基本架构测试波形。在测试波形中有 4 路信号，CH1 是 1ED020I12-F2 desat 引脚处测得的电压信号，CH2 是测得漏极电流。CH3 与 CH4 分别为漏源电压 (Vds) 与栅源电压 (Vgs)。测试波形如图 4 所示。短路电流初始尖峰值达到 250A。1ED020I12-F2 DESAT 引脚电压在短路开始后呈线性上升，在大约 2us 时到达 9V，然后驱动芯片开始关断输出，将驱动电压下拉至负值，SiC MOSFET 成功地在 2.5us 之内成功关断。

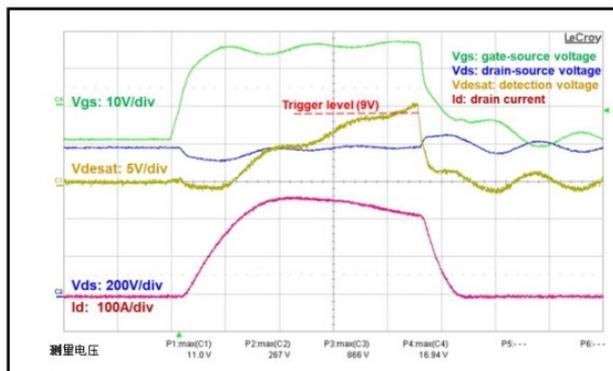


图 4 为基于基本架构的快速短路保护电路测试波形结果

上图中 Vgs : gate-source voltage 是栅极相对于源极的电压; Vds : drain-source voltage 是漏源电压; Vdesat : detection voltage 检测电平 Id : drain current 漏极电流

## 1.4 由上应用举措的归纳

\* 在实际应用中，门极电压对于驱动 SiC MOSFET 来说非常重要，尽管更高的驱动电压可以带来降低  $R_{DS(on)}$  的好处，但是较高的门极电压会带来更高的短路电流。通过测试可以看到，在母线电压 800V，栅极电压 18V，短路脉冲 4us 的情况下，器件会出现短路失效。因此，出于导通特性与栅氧化层寿命及短路保护的折衷考虑，我们依然推荐 15V 的正驱动电压。SiC MOSFET 与 IGBT 相比短路耐受时间比较短。但是，选择合适的驱动 IC 及外围电路设置，SiC MOSFET 依然能在短路时安全关断，从而构建非常牢固与可靠的系统。

\* SiC MOSFET 的栅极氧化层可靠性是关系到工业级 SiC MOSFET 的栅极氧化层可靠性——失效率和寿命的问题。大量的栅极氧化层早期失效多年来一直在阻碍 SiC MOSFET 的商业化进程，并引发出对 SiC MOS 开关像 Si 技术一样可靠的怀疑，过去十年里，SiC 技术已发展得基本成熟，SiC MOS 器件的栅极氧化层可靠性已逐步取得改进。这为它们成功地送入大众市场打开了大门。

## 2 保护 IGBT 和 MOSFET 免受静电放电 (ESD) 损坏

### 2.1 问题引发

功率 MOSFET 用户都非常熟悉“静电敏感器件”警告标志，见图 5 所示。然而，越熟悉越容易大意。从统计的角度来看，单个 MOSFET 不太可能被静电放电 (ESD)

损坏。然而，在处理成千上万个 MOSFET 时，极小的故障都可能带来极大的影响。



图 5 所示为“静电敏感器件”警告标志

在研讨 ESD 对功率 MOSFET 的危害问题之前，有必要先对与之相关的 ESD 与静电保护新理念作说明。

## 2.2 相关的 ESD 与静电保护理念

\* 上述的 ESD 是指什么？ESD 是静电放电。静电是指一个表面相对于另一个表面或地产生的电子过量或不足。电子过量的表面带负电，电子不足的表面带正电。静电的电压（伏特）和电荷（库伦）是可测量的。物体上的静电荷会导致电子分布的不平衡。当电子从一个物体向另一个电压电势不同的物体转移而尝试重新建立平衡时，发生静电放电（ESD）。静电敏感器件（如功率 MOSFET）成为放电路径的一部分，或者位于静电场范围内时，它可能被永久性损坏。

\* 那静电又该如何的产生 摩擦起电是最常见的静电起电方式。摩擦两种材料，即两种材料接触后再分离会产生摩擦起电。两个物体互相摩擦时，因为不同物体的原子核束缚核外电子的本领不同，所以其中必定有一个物体失去一些电子，另一个物体得到多余的电子。异质材料，尤其是表面电阻率高的材料对摩擦起电特别敏感。感应起电是另外一种静电起电方式。当一个物体接近带高强电荷的物体或高能量的 ESD 时发生感应起电。

\* 新型静电击穿检查技术 工艺尺寸的减小使栅氧化层厚度不断变薄，源漏的结深不断变浅，源漏越来越靠近，这使得晶体管的栅极和衬底、源漏之间、源漏与衬底的静电击穿电压越来越低，静电防护的设计窗口越来越小，因静电泄放造成的芯片失效越来越多；另一方面，静电泄放时，峰值电流高达数十安培，仅靠经验或者检查泄放路径

的阻值，不能分析静电泄放时峰值电流可能带来的风险。为解决纳米级设计所面临的越来越多的静电防护方面的挑战。为此应用晶体管级和门级的静电击穿检查工具（如开拓型 pathfinder），可以帮助用户在设计过程中和签核时对静电防护进行有效检查。

而静电击穿检查工具是基于路径电阻检查的工具，可以对信号 PAD- 电压源、信号 PAD- 地、信号 PAD- 静电防护单元 - 地、电源 - 静电防护单元 - 地等静电泄放路径的电阻进行检查，如图 6 所示，同时，可对静电泄放时的峰值电流（见图 6 所示的红、紫、绿回路电流）进行检查，设计者可以根据检查报告，对不符合静电防护设计规则的路径进行修正，可协助设计人员完成 SoC（系统级芯片）、数模混合和模拟电路单元在早期原型、电路优化和芯片验收的全部阶段的工作，提升产品良率。

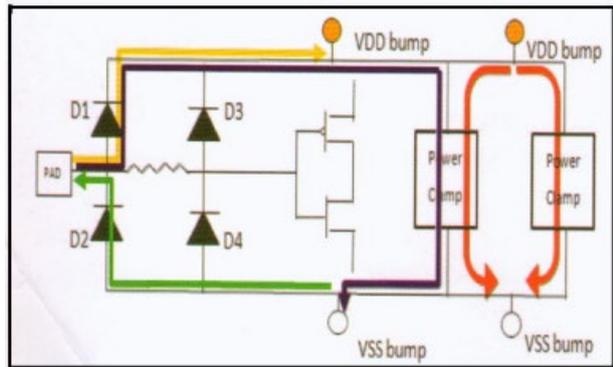


图 6 为静电防护检查原理

## 2.3 那 ESD 对功率 MOSFET 的危害又是怎样的呐？

应从故障模式解析。功率 MOSFET 最大的运行优势之一是：当达到 ESD 超高输入电阻时（典型值  $>4 \times 10^9$  ohms），它会关闭。功率 MOSFET 的栅极可以视为一个低电压，如六角形金属半场效晶体（HEXFET）器件电压为 +20V 的低泄露的电容。从图 7 所示六角形金属半场效晶体基本结构可知，电容器极板主要由硅栅极和源极金属化形成。电容器介质是氧化硅栅极绝缘。

当栅源电压高到跨过栅介质时，MOSFET 发生 ESD 损坏。此时栅氧化层上的微孔被烧坏，器件永久性损坏。如同任何电容，必须给功率 MOSFET 的栅极充电以便达到特定的电压。更大的器件有更大的电容，电压每上升一伏也需要更多的电荷，因此比较小的 MOSFET 更不容易

遭受 ESD 损坏。同样,静电放电一般不会产生突发性失效,直至栅源电压超出额定最大值的 2 到 3 倍。图 8 是典型的 ESD 损伤场景。

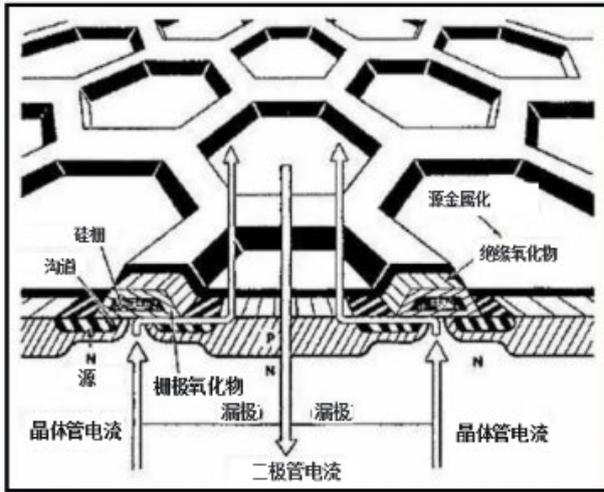


图 7 所示六角形金属半场效晶体基本结构

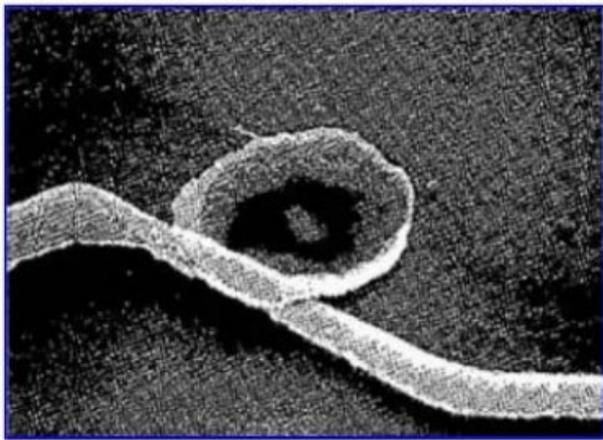


图 8 是典型的 ESD 损伤场景

这个场景是将人体模型 (HBM) 充电到 700V, 然后再放电到器件的栅极所产生的损伤。在将裸片表层从多晶硅剥离后, 用扫描电子显微镜放大 5000 倍拍摄了该照片。图 8 的实际损伤直径仅为 8 微米。ESD 损伤表现出的电气症状是栅极和源极之间的低电阻或齐纳效应, 施加的电压小于  $\pm 20$  伏。造成 ESD 损伤所需的电压至少为 1000V (具体大小取决于芯片尺寸)。这是由于承载电荷的体二极管的电容大大低于 MOSFET 的  $C_{iss}$ , 因此

当电荷转移时, 所产生的电压就会远低于原始电压。静电场也会损坏功率 MOSFET。虽然故障模式是 ESD, 但 MOSFET 的损坏是因为将 FET 的未保护栅极放置在电晕放电路径中引起的。当处理大量的 MOSFET 时, 尤其质量是第一要素时, ESD 就成为一个问题。

#### 2.4 ESD 控制的材料和方法 — 直接保护法

\* 直接保护法 保护功率 MOSFET 不受 ESD 或其它任何过度的栅极电压损伤, 首要目标是保持栅源电压不超过最大规定值 (HEXFET 为  $\pm 20$ )。这一点同时适用于电路内部和外部。

直接保护 MOSFET 的方法包括缩短栅极和源极间的距离, 或者是在栅源之间施加一个齐纳保护。直接保护法在内部电路和少数器件的应用中有效, 但在生产环节由于涉及了大量的 MOSFET 就不是很实际。

功率 MOSFET 静电保护的基本概念是尽可能防止静电积聚, 并快速有效地去除已有电荷。环境中的材料可以帮助或阻碍静电控制。这些材料可根据表面电阻率划分成 4 类: 绝缘, 防静电, 静电耗散和导电。此外, 所有参与生产的人员都应硬接地。不幸的是, 参与生产的这些人员极易受到故障电气设备的电击。同样, 长距离移动时, 也很难保持接地。因此, 应根据现实情况选择保护材料和方法。

\* 绝缘材料的应用 由于这类材料易于储存静电电荷并难以放电, 如果可能的话, 功率 MOSFET 及其整体环境需远离该类材料。由于绝缘体不导电, 因此绝缘体与地之间的电气连接无法控制静电电荷。绝缘材料包括: 聚乙烯 (普通塑料袋材质), 聚苯乙烯 (泡沫塑料杯和打包用塑料泡沫), 迈拉, 硬质橡胶, 乙烯基, 云母陶瓷, 多数其它塑料, 以及一些有机材料。必须在功率 MOSFET 处理设施中使用塑料产品时, 只能使用浸渍了导电材料和 / 或用防静电化合物处理过的物品。

#### 2.5 具体的一个有效的 ESD 防控方案的基本设计方案, 它可概括为下列应用:

确保使用封闭的导电容器储存并运输 MOSFET; 仅在静电控制工作站接地后才从容器中移走 MOSFET; 处理功率 MOSFET 的工作人员应穿戴防静电服, 并始终接地; 地板应铺设接地的防静电地毯或进行静电耗散处理; 桌子应铺设接地的静电耗散桌布; 避免使用任何类型的绝缘材料; 仅在一次性应用中使用防静电材料; 务必使用接地烙

铁安装 MOSFET ; 仅在静电控制工作站测试 MOSFET ; 同时采取上述所有防护措施, 并确保工作人员经过培训。

### 3 工业级系统失效率和寿命的保护方案新趋势

高速 SoC 和 RFIC 电磁干扰解决方案的应用 伴随着 5G、人工智能和云计算等技术趋势, 电磁干扰的问题正逐渐成为高速 SoC 和 RFIC 面临的主要设计挑战。同时, 纳米级工艺的成本陡增迫使设计管理人员探索创新性设计架构, 例如将有源器件布局在电感器件空余空间的下方或内侧, 数年前被视为科幻的风险性设计方法, 现在正

成为趋势。为了降低电磁干扰风险、最大限度节省重新设计带来的高成本和时间浪费, 设计人员需要一个能够在电路和版图设计的各个阶段都能帮助他们进行电磁干扰和签核的平台, 以便他们能够对高速电路进行准确的电磁建模, 防范电磁干扰风险。正是这样一个能够提供完整的考虑电磁干扰的设计流程的平台, 他能够在高速 SoC 和 RFIC 设计的不同阶段提供对应的产品进行电磁干扰的仿真和优化, 包括: 器件及原理图设计阶段的电感器件编译与建模工具; 版图设计及布局阶段的电磁建模抽取工具; 后仿真阶段的电磁建模签核工具及全芯片级电磁干扰风险探测工具。

#### 上接166页

对容量、负荷较大的, 应采用自动空气开关, 小负荷可采用瓷底胶盖闸刀开关。自动开关应根据使用场所、额定电流与负荷、脱扣器额定电流、长短延时动作电流值大小等参数来选择。闸刀开关应根据额定电流与额定电压进行合理选用, 严禁超载, 其额定电流应为电机额定电流的 2.5 倍。自动开关应安装在干燥明亮、便于安装及维修的地方, 易燃、易爆场所要选用防爆型电气开关, 潮湿、灰尘较多等危险场所应用封闭式负荷开关 (又称铁壳开关), 闸刀开关也要装在干燥明亮处并配备专用配电箱, 电源接在静触点上, 开关按规定安装, 保证拉、合闸刀的动作灵活方便。安装开关时, 须测量触头的接触电阻, 设备或元件与导线的连接必须用端子, 导线的连接要紧固可靠。电气线路及设备接通时, 必须使用断路器或有电弧保护装置的开关, 电器的触点、导线的连接必须紧密可靠, 以免电弧及火花的产生。

运行中的自动开关要定期检查、定期清扫, 防止开关因触头发热、外壳积尘、受潮而引起闪络爆炸。开关若有损坏应及时更换。自动开关在使用到 1/4 机械寿命时, 应在操作机构、脱扣器、触点和转动部分等易出故障的地方添加润滑油, 清除开关上的毛刺、灰垢, 紧固螺钉, 必要时补焊触点。在使用中, 也要定期检查各开关刀口与导线及触点处是否接触良好, 开关胶盒、瓷底座、手柄等处有无损坏等, 视情况更换或检修。

电路须合理装设断路器、熔断器、热继电器、电流继电器, 当短路时可将电源切断, 以避免事故扩大, 不得随

意增大熔丝的直径或调整继电器或开关的整定值。在非防爆场所, 一旦出现易燃易爆气体, 电气设备必须保持原来状态, 不得接通或切断电源, 以免发生爆炸或着火。夏季高温季节, 开关触头易发热引起的着火, 为确保供电安全, 可在入夏前, 对电气开关的触头涂抹凡士林。

注意防潮, 雨季要及时开启各开关室内的空调或除湿机, 以降低开关室内的空气湿度, 避免由于电气元件的绝缘下降而发生放电和接地短路等事故, 增加电气设备的安全系数。利用远红外测温仪监控开关触头的温度, 可以全天候准确及时地对“发热”开关进行处理。

### 6 结束语

总之, 电气断路器虽说不起眼, 但却起着牵一发而动全身的作用, 一个小的开关隐患或缺陷, 都有可能引发事故, 给企业或个人造成不可挽回的损失。因此, 了解电气断路器的重要性, 掌握预防措施, 从思想上加以重视, 严格执行电气安全技术规程, 是十分必要的。随着社会不断发展中, 人们对各种灾害的认识不断加深, 电气火灾作为当前灾害中的重要组成成分, 是当前人们控制和防范的重点所在。随着电气自动化保护技术的不断应用, 使得当前电气火灾在控制和管理过程中逐步出现了良好的控制效果, 成为当前社会发展过程中重要的控制方式, 降低我国电子火灾的发生次数, 减少其发生程度, 有效的保护了国家人们财产安全和生命安全。