Littelfuse®

Expertise Applied | Answers Delivered



POWR-*SPEED*®
熔断器



技术应用指南

技术应用指南

目录

1.0 简介 3
2.0 功率半导体器件 4
2.1 功率半导体器件分类 4
3.0 过电流保护基本原理 6
3.1 过电流状况 6
3.2 过电流类型 6
3.3 保护功率半导体器件 6
3.4 什么是高速熔断器? 7
3.5 高速熔断器结构 8
3.6 高速熔断器样式 8
3.7 熔断器操作 10
3.8 高速熔断器性能特性 11
3.8.1 时间电流曲线 11
3.8.2 峰值允通曲线 14
3.8.3 完全熔断 I^2t修正系数曲线 17
3.8.4 峰值电弧电压曲线 19
3.8.5 温度降额曲线 20
3.8.6 功率损耗修正系数曲线 21
4.0 尺寸准则 22
4.1 额定电压 22
4.1.1 工作频率的影响 (E_f) 22
4.1.2 时间常数的影响 (E_{fc}) 23
4.1.3 再生负载的影响 (E_{reg}) 23
4.1.4 符合熔断器标准的影响 23
4.2 额定电流 24
4.2.1 高速熔断器额定电流的大小 24
4.3 分断额定电流 36
4.4 完全熔断I^2t值 (最大可承受能量) 36
4.5 峰值电弧电压 36
5.0 应用注意事项 37
5.1 保护功率转换器件 37
5.1.1 整流器电路的保护注意事项 37
5.1.2 逆变器电路的保护注意事项 38
5.1.3 直流母线的保护注意事项 39
5.2 保护 UL 电机分支电路 39
5.3 保护基于 IGBT 的器件 40
5.4 并联高速熔断器 40
5.4.1 理论性能预估 41
5.4.2 确认正确尺寸的应用条件 42
5.4.3 选择正确安装、布局和附件 43
5.5 串联高速熔断器 43
6.0 安装准则 44
7.0 POWR-*SPEED*®**系列** 46
8.0 附件 47
8.1 微动开关 47
8.2 螺杆块 48
9.0 术语和定义 49
免责声明 51

1.0简介

功率电子技术是有助于现代世界的技术。功率电子技术利用功率半导体器件将电力从一种形式有效地转换、控制并调节成为所需的输出形式，其广泛用于可再生能源发电、交通运输、公用事业和工业设施等应用。

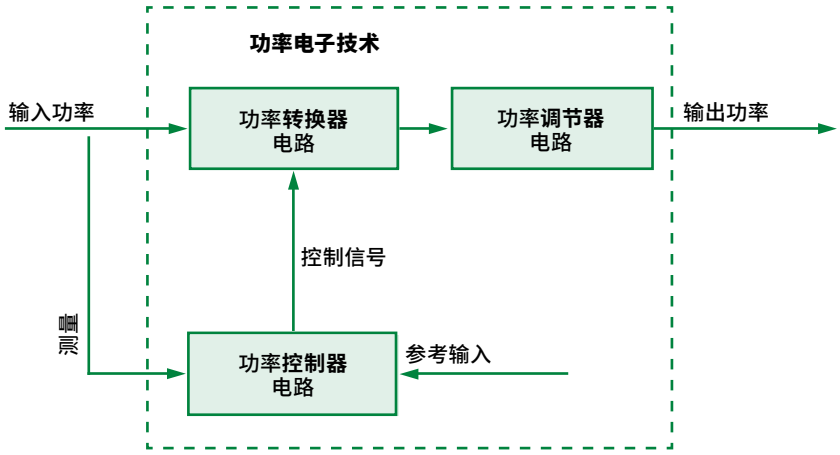


图 1: 功率电子系统框图

图1所示为典型功率电子系统框图，其中使用转换器电路将接收到的输入功率从一种形式转换为另一种形式（交流-直流-交流）。这种转换基于从控制器电路接收的控制信号，之后这一信号使用调节器电路进行过滤并作为输出提供。大多数功率电子应用中采用这种典型设置。

功率半导体器件是用作电力控制和转换开关的大功率电子器件。在现代功率电子技术中采用功率半导体器件是为了满足对更高功率效率的需求，最终目标是尽可能实现接近100%的功率效率。除了功率效率之外，还需要尽可能缩小器件尺寸，这是功率半导体替代了以往的机械电子元器件的一个推动因素。

采用功率半导体器件的典型设备包括逆变器、整流器、电动汽车电池管理系统、机车牵引驱动器、工业电机驱动器、工厂自动化系统、空调、计算机、电信设备、电池充电器等。

为了防止这些非常敏感的功率半导体器件发生过电流故障，需要一种动作速度极快的低能量允通电路保护器件。高速熔断器是世界上可用于保护这些敏感器件的唯一器件。

2.0 功率半导体器件

当科学家 R·N·霍尔在 1952 年推出由锗制成的第一个功率二极管时，人们才开始使用功率半导体器件。这些器件以最小功耗在电感电路中进行开关（开启/关闭）的能力是该器件的关键特性。

在20世纪60年代和70年代，许多研究人员做出了重大贡献，推出了很多我们迄今仍在使用的常用功率半导体器件。开发功率半导体器件的关键推动因素是其材料消耗低、成本低、效率高。

功率半导体器件是功率半导体元器件和驱动器电路的组合。 这些元器件由硅、锗和砷化镓等材料制成，主要用于开关应用。 驱动器电路是一种低压电子电路，向功率半导体元器件提供控制信号，使其能够开启/关闭。

在应用中广泛使用的典型功率半导体元器件包括：

- 绝**缘**栅双**极晶**体管 (IGBT)
- **金**属**氧**化物**半**导体**场效**应**晶**体管 (MOSFET)
- **可**控**硅整**流器 (SCR)，也称晶闸管
- **双**极**结晶**体管(BJT)
- **栅**极**关**断 (GTO) 晶闸管
- **集**成**栅**极**换**流**晶**闸管 (IGCT)
- **结**栅**场效**应**晶**体管 (JFET)
- 二极管

功率半导体器件属于现代电气系统中使用的最复杂的器件之列，它们本质上对过热、过载、电压尖峰、浪涌和峰值电流均敏感。

2.1 功率半导体器件分类

根据每个器件上的终端数量对功率半导体器件进行分类。 最常用的是两端和三端器件。

两端器件是那些状态取决于所连接的外部电源电路的器件。PIN 二极管和肖特基二极管是最常用的两端器件。

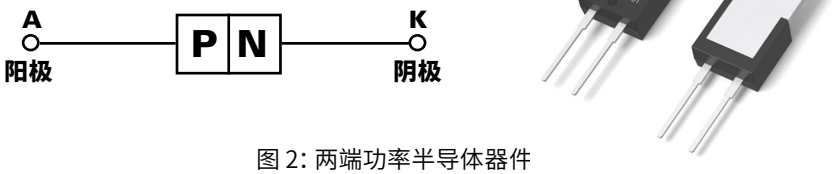


图 2：两端功率半导体器件

三端器件的状态不仅取决于其外部电源电路，还取决于其驱动端（该端通常称为栅极或基极）上的信号。三端器件的示例包括功率 MOSFET、JFET、IGBT、BJT 和 SCR。

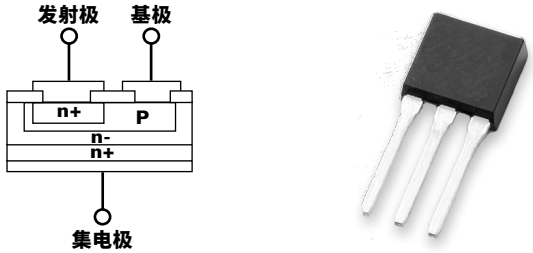


图 3: 三端功率半导体器件

如果这类功率半导体器件中添加隔离电路并封装为单个单元，则这一器件被称为功率半导体模块或功率模块。图4所示为典型功率半导体模块框图。

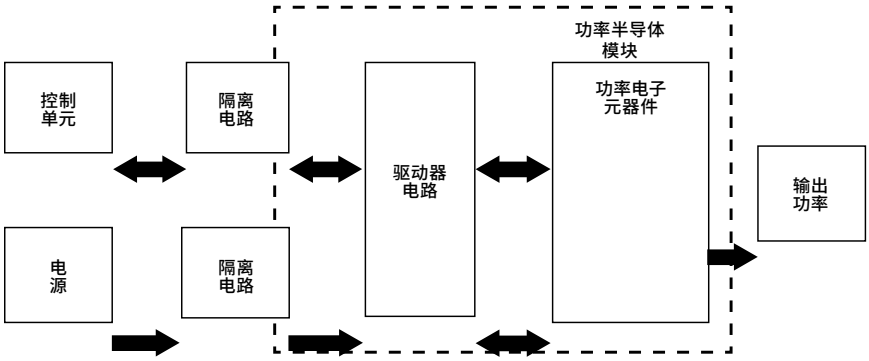


图 4: 功率半导体模块框图

功率半导体器件按照其载流能力进行封装。 它们通常可采用三种不同的封装配置:

- 分立式封装: 电流高达几百安培
- 模块封装: 100A 至 4000A
- 盘式封装: 1000A 至 6000A



图 5: 功率半导体器件封装

3.0 过电流保护基本原理

即使对于经验丰富的功率电子设计工程师而言，了解您的应用的保护要求并选择正确的熔断器也可能是一个既令人望而生畏又极耗时间的过程。 开发优质过电流保护的一个重要部分是了解系统需求和过电流保护器件的基本原理。 在本节中，将讨论高速熔断器的过电流保护、结构和工作特性的基本原理。

3.1 过电流状况

过电流是指大于设备、导体或器件在规定条件下承载的额定电流的任何电流。每个电气系统最终都会遇到过电流。除非及时移除，否则即使中等程度的过电流也会使系统元器件快速过热，从而可能破坏绝缘、导体和设备。大过电流可能会熔化导体和蒸发绝缘。

非常大的电流产生可以弯曲和扭曲汇流排的磁力。这些大电流可以从端子中拔出电缆并使绝缘体和隔离物裂开。不受控过电流还通常伴随着起火、爆炸、有毒烟气和恐慌。这不仅会破坏电气系统和设备，还可能造成附近人员受伤或死亡。

3.2 过电流类型

术语 “过电流” 包含两种类型的故障状况：

- 过载故障状况
- 短路故障状况

过载故障状况： 定义为局限于正常电流路径的过电流，如果允许在电路中持续存在，则会导致对设备和/或连接的配线造成损坏。

在任何过热发生之前，过电流保护装置必须断开与遇到连续过载的电路和设备的连接。即使是中等程度的绝缘过热也会严重降低所涉及元器件和/或设备的寿命。

通常情况下，小于设备或应用额定电流 600% 的过电流称为过载故障电流。由于机械障碍或设备堵塞状况导致系统中持续存在暂时浪涌电流时，通常在应用中出现过载状况。

短路故障状况： 从电路中正常电流路径流出的过电流是短路故障状况。绝缘击穿或连接故障是短路故障的最常见原因。

当发生短路故障时，电流绕过正常负载并流经较短路径，因此称为短路。 短路故障通常分为三类：螺栓故障、电弧放电故障和接地故障。在 “术语和定义” 一节中，对各种类型的短路给出了定义。

通常情况下，大于设备或应用额定电流 600% 的过电流称为短路故障电流。 由于事故、人为错误、掉落工具、误用或绝缘击穿等情况的发生，通常在应用中出现短路状况。

3.3.保护功率半导体器件

功率半导体采用小封装尺寸，结合了大功率处理和快速开关能力。 这些器件在正常运行期间产生过多热量，且耐热能力较低。 此外，尺寸的减小会对器件耐受过电流和过电压的能力产生影响。 这导致器件需要额外装置（如散热片和/或强制空气/液体冷却）来散热，帮助它们冷却。



图 6: 功率半导体器件

图 6 所示的功率半导体器件的性能也在很大程度上受到其在运行过程中所处理的电气、机械、热和环境等各种应力的影响。当这些应力水平超过其耐受极限时，设备往往会出现故障。

人们认为由各种应用条件引起的热应力是半导体故障的主要因素，并可导致灾难性的状况，如可明显造成大范围损害的壳体破裂、起火和爆炸。

事实证明，高速熔断器是为这些敏感功率半导体器件提供适当级别保护的保护装置。

3.4 什么是高速熔断器?

高速熔断器是用于半导体电路保护的热控电流控装置。它们具有专门设计的元件外形轮廓和主体结构，可提供保护半导体器件所需的各种必要短路特性，如低能量允通 (I^2t) 、峰值电流 (I_{PEAK}) 小、电弧电压低和散热量大。

这种类型的熔断器由一个或多个封闭在小室内的载流元件组成。 该小室配有触点 (也称为刀片/端板或终端) ，以便熔断器可以轻松插入电路中或从电路中取出。与普通工业熔断器不同，高速熔断器没有有意延时功能。

这些过电流保护装置称为高速熔断器，有时也称为整流器熔断器、超快速动作熔断器、超快速熔断器、非常快速熔断器或半导体熔断器。

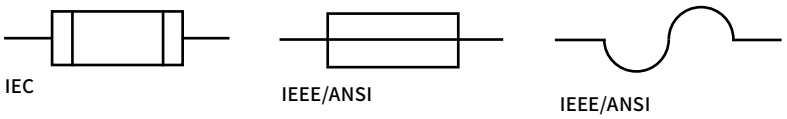


图 7: 各种国际标准中电路中熔断器的表示法

高速熔断器分为两大类: 全范围高速熔断器和部分范围高速熔断器。IEC 60269 标准按照使用类别对熔断器工作特性进行分类，以两字母符号/代码 (例如gG、aR、gR、aM等) 的形式表示。

全范围高速熔断器: 该类别的熔断器可对过载和短路过电流状况提供保护，具有指定的使用类别符号gR。第一个字母 ‘g’ 表示全范围保护，而第二个字母 ‘R’ 表示半导体器件应用。

部分范围高速熔断器: 该类别的熔断器仅对短路过电流状况提供保护，具有指定的使用类别符号aR。在这种情况下，第一个字母 ‘a’ 表示部分范围保护，而第二个字母 ‘R’ 表示半导体器件应用。

3.5 高速熔断器结构

高速熔断器的设计和结构及其尺寸和端接均独一无二。这样做是为了避免将这些熔断器误用于本领域的任何其他普通工业应用中。高速熔断器结构采用高等级材料，下面予以说明。

元件：高速熔断器包含一个或多个电流敏感元件。每个元件在一点或多点处横截面减小。在每个元件中，减小的横截面提供被测电阻。

每个元件的电阻和每个熔断器中使用的元件数量通常决定了熔断器的额定电流。高速熔断器包含由银、镀银铜、铜或其他合适材料制成的元件。

主体材质： 高速熔断器中使用的最常用主体材料是玻璃增强三聚氰胺和高等级陶瓷。玻璃三聚氰胺坚固且防断裂，而陶瓷具有较高的散热和耐高温能力。

安装端子： 典型的高速熔断器端子由铜合金材料组成。一些额定电流较小的高速熔断器由拉制黄铜制成，旨在正确释放应力。这些熔断器的端子通常也进行镀覆，以减少腐蚀并提供小电阻连接。

填充物材料：高速熔断器含有填充物，填充物主要用于消除电流分断期间产生的电弧放电。采用高等级石英硅石晶体填充材料有助于提高熔断器的限流能力。此外，填充物有助于维持熔断器内的热量平衡，同时使元件具有稳定性。这种稳定性允许采用较小元件横截面，从而提高了短路性能。

3.6 高速熔断器样式

根据尺寸、安装和原产地对高速熔断器样式进行大致分类。最常见样式是：

- 北美传统圆形主体
- 正方形主体
- 圆柱或金属箍
- 英国标准 (BS88) 栓接

北美传统圆形主体：这些圆形主体栓接样式高速熔断器 (图 8 和 9) 在北美地区最常用于保护功率半导体器件。这些熔断器由优质玻璃三聚氰胺主体、铜端子、高等级石英硅石填充物和 99.9% 纯银元件的操作机构制成。

玻璃三聚氰胺主体吸收熔断器散发的热量。镀银铜端子具有出色的电气接触性能，可连接至熔断器座或汇流排。高等级石英硅石可熄灭熔断器操作期间产生的电弧。银元件采用独特设计，减小了横截面积，可持续承载额定电流。在过电流故障期间，这些元件在截面减小位置处熔化得更快，因而消除过电流故障并限制能量允通至任何下游器件。



图 8: 高速熔断器的剖视图



图 9: 北美圆形主体样式熔断器

正方形主体：这些高速熔断器（图10a和10b）由优质陶瓷主体、镀银铜端子、高等级石英硅石填充物和含99.9%纯银元件的操作机构制成。这些熔断器有不同尺寸可供选择，以满足现代功率半导体器件所需的各种电气要求。



图 10a：PSR 系列

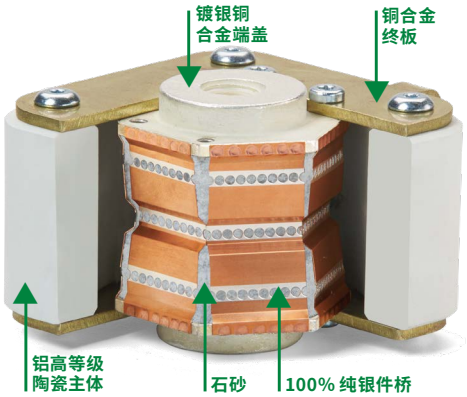


图 10b：正方形主体样式熔断器

与三聚氰胺材料相比，陶瓷主体具有更好的耐热能力并且提供更高的抗电弧放电能力。这些熔断器的核心由多个平行成排的专门设计的银或铜银元件组成，这些元件旨在承载额定电流并在过电流状况期间熔化。这些熔断器内部的填充物是高等级石英硅石，然而，与使用疏松填充物的其他熔断器不同，这种填充物处于被称为石砂的固体状态。这种石砂设计具有卓越的灭弧能力、低能量允通性能并改善了直流性能。图 10a 中所示正方形主体样式熔断器称为平端，这类主体中汇流排直接连接到熔断器。

圆柱或金属箍主体：圆柱或金属箍样式高速熔断器（图 11a 和 11b）由于其紧凑型尺寸和可直接安装到印刷电路板上的能力而受到用户的广泛青睐。这些熔断器的典型应用包括电源和控制电路。这些熔断器由三聚氰胺或陶瓷主体组成，而端帽通常为镀铜材料，旨在提供较好的导电性。内部元件为纯银材料，并填充有高等级石英硅石填充物。



图 11a：L25S 系列

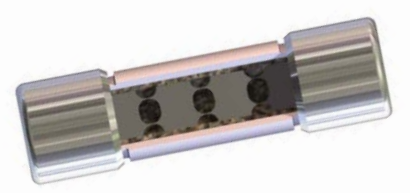


图 11b：圆柱或金属箍样式熔断器

圆柱或金属箍样式高速熔断器可采用标准外壳尺寸，其中包括：

- 10.3 mm x 38.1 mm
- 14.3 mm x 50.8 mm
- 20.6 mm x 50.8 mm
- 20.6 mm x 127.0 mm

3.7 熔断器操作

就熔断器如何操作而言，熔断器内部的可熔元件会熔化，保护与其连接的下游器件。因此，通常将熔断器称为电路中的牺牲装置或最薄弱的环节。

可熔元件经过专门设计，可连续承载规定数量的电流而不开路。这被称为熔断器的额定电流。当电流流经这些元件桥或限制时，会产生热量。在传热平衡（产生的热量等于散发的热量）实现之前，熔断器元件继续按预期承载电流。

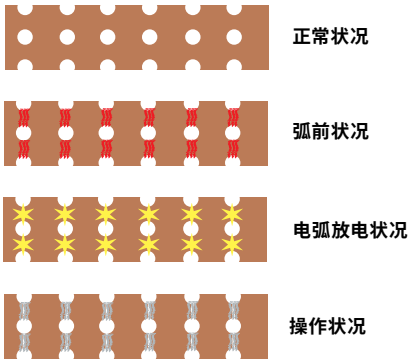


图 12: 操作期间熔断器元件的变化

当由于发生过载或短路等过电流状况而导致传热不平衡时，产生的热量大于散发的热量。这会导致可熔元件的限制或薄弱点处的温度上升。

当温度上升达到可熔元件的熔点（铜为 1,984°F / 1,085°C，银为 1,763°F / 962°C）时，元件桥开始熔化并断裂，导致经熔断器流至电路的电流分断。

在发生短路的情况时，可熔元件会开始熔化，然后在几毫秒内分离。然而在此期间，熔断器内部产生电弧，然后被石英硅石砂填充物材料熄灭。下图所示为其操作期间熔断器内的电流和电压性能。

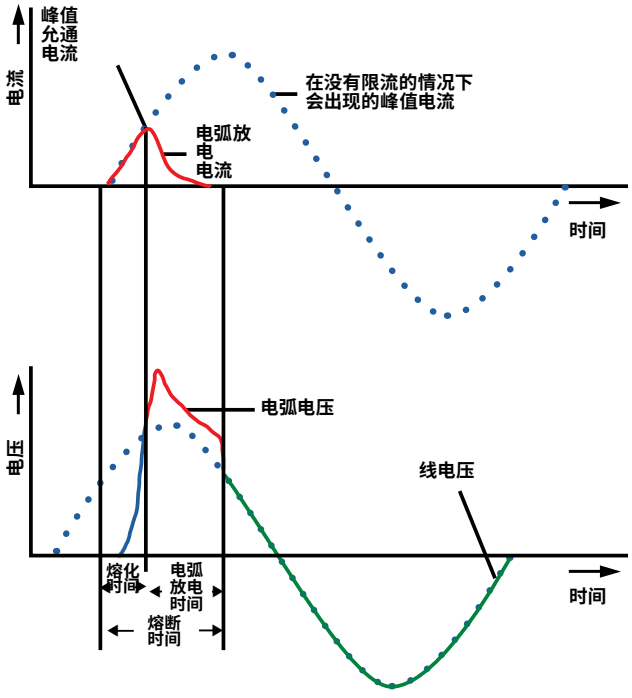


图 13: 熔断器操作期间的电流和电压性能

在熔断器故障电流分断期间产生的热能通常以焦耳表示，通常称为安培平方秒（A^2s 或 I^2t）。它与操作时间（‘t’ 单位为秒）内的电流（‘I’ 单位为安培）的平方成正比。所产生的热能表示为熔化 I^2t、电弧放电I^2t和熔断 I^2t。

熔化 I^2t：这是在过电流发生后至熔断器元件熔化之前通过熔断器的热能。它等于均方根电流平方乘以熔化时间（单位：秒）。

电弧放电I^2t： 这是在电弧放电期间熔断器通过的热能。它等于均方根电弧放电电流平方乘以电弧放电时间（单位z秒）。

熔断 I^2t： 也称为完全熔断 I^2t，这是从过电流开始直到电流被完全分断期间流经过电流装置的 I^2t。熔断 I^2t 是熔化 I^2t 加上电弧放电I^2t 的总和。

3.8 高速熔断器性能特性

高速熔断器的性能能力以各种特性曲线的形式确定，其中对两种或以上的电气性能进行比较并用图形表示。典型高速熔断器特性曲线包括：

- 时间电流曲线
- 功率损耗性能曲线
- 温度降额曲线
- 峰值允通电流曲线
- 电弧电压曲线
- I^2t 曲线

3.8.1 时间电流曲线(TCC)

高速熔断器 TCC 是在任何给定预期对称（故障）电流下熔断器的虚拟弧前（熔化）时间的图形表示或性能图。它根据标准测试条件并在 20°C 至 25°C 的环境温度范围内生成。

TCC 代表熔断器的反时间-电流关系特性，说明熔断器的弧前（或熔化）时间如何随着预期对称（故障）电流的增加而减小。TCC 用于确定给定对称（故障）电流的熔断器熔化时间，并选择某个应用的正确熔断器额定值的变更权。

TCC 的 X 轴表示对称均方根（故障）电流 (Ifault)，单位为安培。Y 轴表明熔断器的虚拟弧前（熔化）时间($T_{pre\text{-}arc}$)。这是熔断器内部从过电流状况开始到瞬间电弧放电开始的时间间隔。

如果要确定熔断器的熔化时间，首先在 X 轴（参考点 A）上确定对称（故障）电流的位置，如图 14 所示。从点 A 向上延伸一条直线，直到它与点 B 处的熔断器 TC 曲线相交。然后向左移动，标识 Y 轴（参考点 C）上的对应值，它就代表熔断器弧前（熔化）时间。

在图 14 的示例中，此应用可用的对称（故障）电流为 1800A，在 X 轴中标识为 A 点。沿着从 A 点延伸的直线，直至它在 B 点处与 TCC 相交。然后向左移动到 Y 轴（C 点）确定所选熔断器的弧前（熔化）时间 = 0.002 秒。

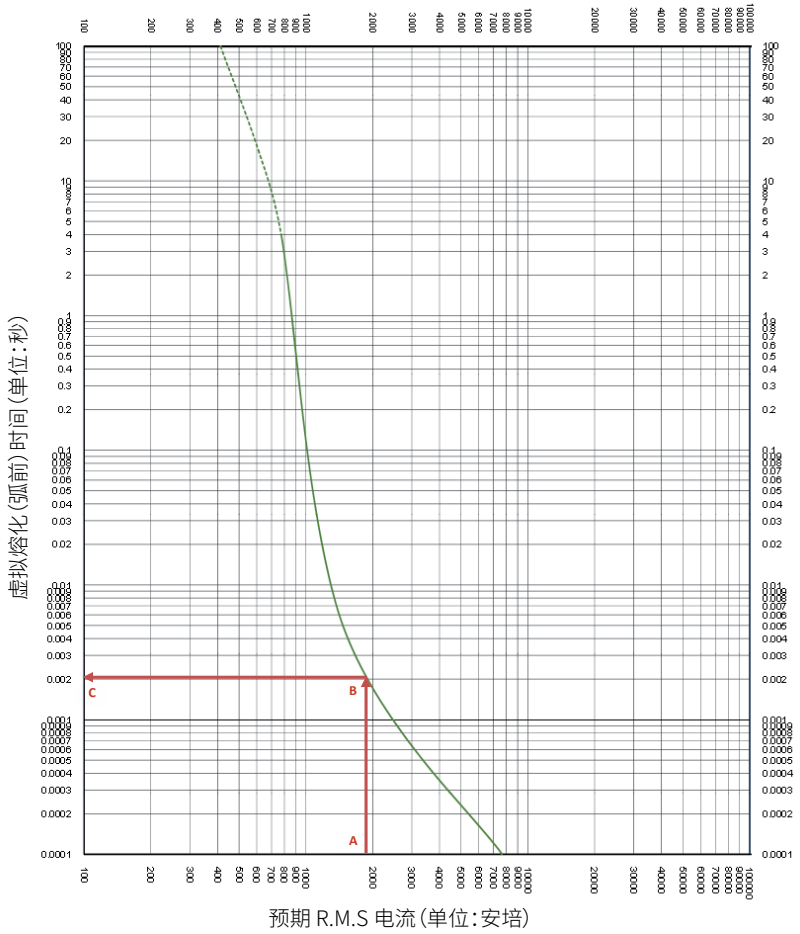


图 14: 时间电流特性曲线 - 弧前（熔化）时间确定

不安全操作区： 高速熔断器提供保护的短路电流在其 TCC 上用实线标识。 在熔断器保护极限值之外的电流范围（通常是小过载故障电流）在其 TCC 上用虚线表示。 实线和虚线的交点表示熔断器的最小分断电流。

由于在小过电流情况下应用高速熔断器时存在很大热风险，因此不建议在此虚线区内进行操作。

图 15 是具有实线和虚线区的部分范围高速熔断器TCC 的典型示例。

图上方标出的阴影区表示该熔断器的不安全操作区。

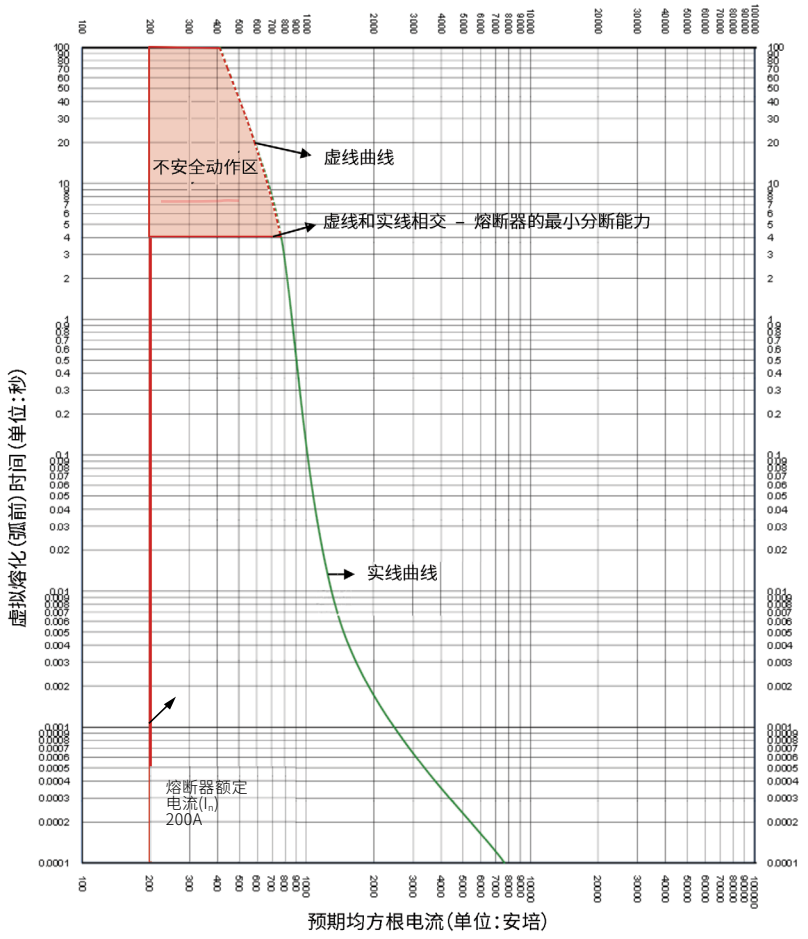


图 15: 时间电流特性曲线 - 安全和不安全操作区确定

在为不断变化的负载电流应用选择高速熔断器时，应谨慎行事，比如使该应用的负载电流不落入所选熔断器的不安全操作区。

3.8.2 峰值允通曲线

峰值允通电流曲线说明了在完全熔断期间通过熔断器的最大瞬时电流。这代表熔断器的限流能力。单个熔断器系列数据表中提供了 Littelfuse 高速熔断器的峰值允通曲线。这些曲线用于确定给定的熔断器是否可以妥当保护某个特定设备。

限流熔断器在故障发生后的前半个周期内分断严重短路。限流熔断器还可将可用故障电流的峰值电流降至小于没有熔断器情况下出现的数值。图 16 所示为这种降低情况。

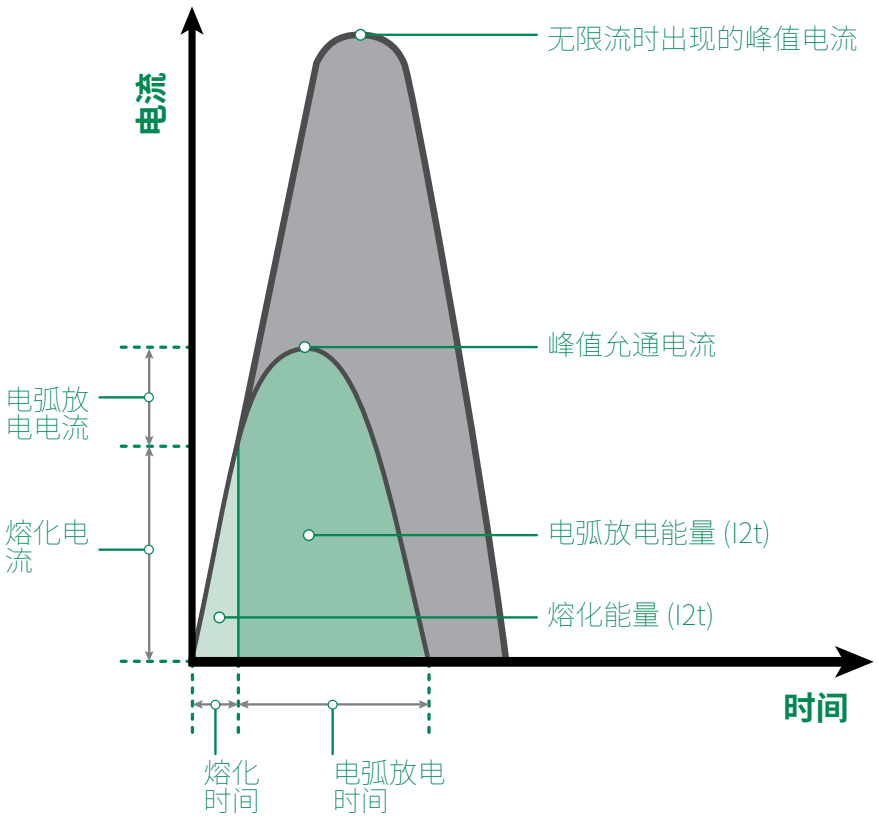


图 16: 熔断器的限流效应

如图 17 所示，在峰值允通曲线上以图形方式显示了熔断器的限流效应。曲线底部的值表示可用（也称为潜在或预期）的均方根对称故障电流。沿着曲线左侧的值代表各种熔断器额定值的瞬时可用峰值电流和峰值允通电流。

在具有典型 15% 短路功率因数的电路中，可用电流的瞬时峰值约为均方根对称值的 2.3 倍。这由曲线上斜率为 2.3:1 的 A-B 线段表示。

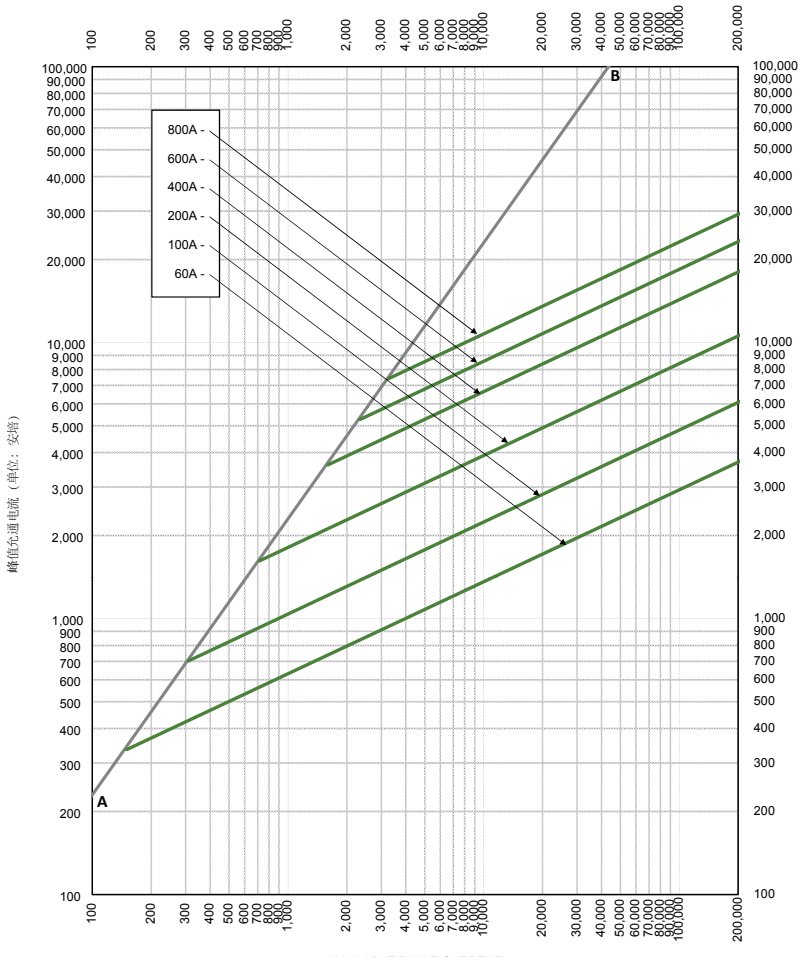


图 17: 峰值允通曲线

从 A-B 线段分出的对角线曲线说明了给定熔断器系列的不同熔断器额定电流的限流效应。

限流熔断器在其限流范围内分断电流时，会减少故障电路中的电流。如果用具有相当阻抗的实心导体替代该器件，则该减少量明显小于在相同电路中可获得的减少量。

这很重要，因为电流产生的磁力是峰值电流平方的函数。如果限流熔断器的峰值允通电流为可用峰值的十分之一，则磁力减小到小于没有熔断器情况下数值的 1/100。

使用峰值允通图表（“上下颠倒”）：请参考图 18，作为示例。对于 100,000 均方根安培的给定可用故障电流，确定 600A、500V L50QS 系列熔断器是否能够充分保护具有 22,000A 短路额定电流的设备。

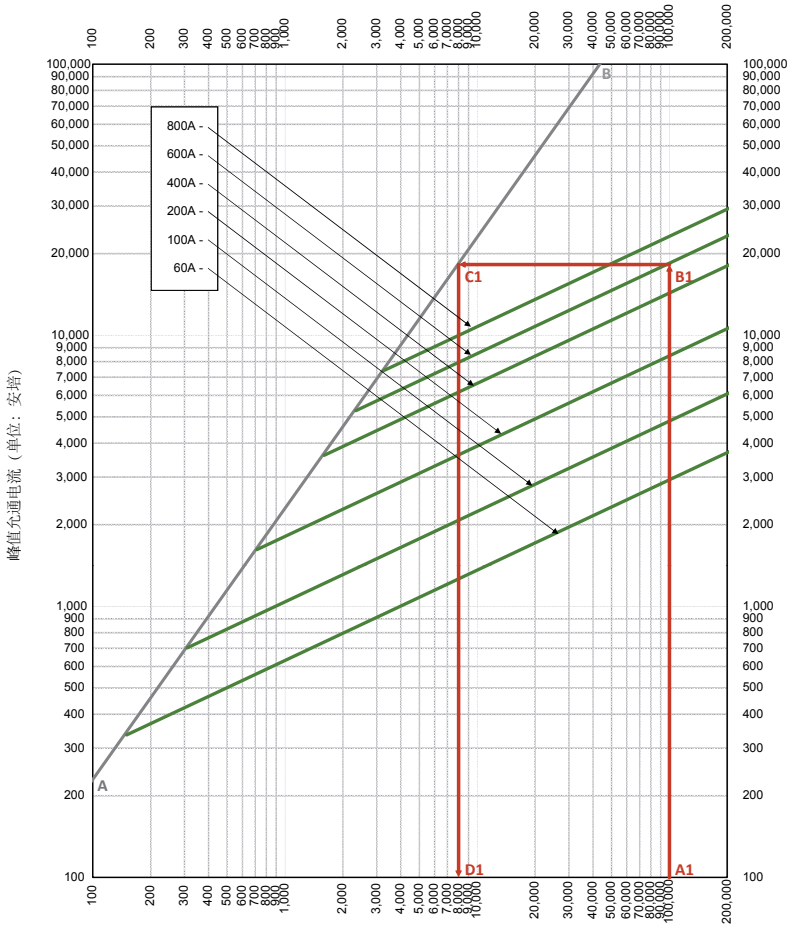


图 18: L50QS 系列峰值允通曲线

首先从曲线底部（A1 点）找到 100,000A 可用故障电流的位置，然后沿此值向上至与 600A 熔断器曲线（B1 点）的交点。接下来，沿着该点水平向左与 A-B 线段相交（点C1）。最后，读到曲线底部（D1 点）读取约 8,000A 的值（允通电流）。

根据分析，所选熔断器已经将 100,000A 可用电流降至看似或相当于 8000A。现在该熔断器可用于安全保护此应用中连接的某个设备及其 22,000A 的额定短路电流。

3.8.3 完全熔断 I²t 修正系数曲线

安培平方秒也称为 I²t 是描述由电流产生的热能的一种方式。当熔断器在其限流范围内分断电流时，该词通常表示为熔化、电弧放电或完全熔断 I²t。所选熔断器的完全熔断 I²t 应小于半导体器件端子或外壳的熔化/爆炸 I²t。

图 19 所示为典型高速熔断器的熔化 I²t 和完全熔断 I²t 值。该图说明了以图形格式表示 I²t 值的较古老方式，其中曲线的 X 轴代表以千安培表示的均方根预期短路故障电流，Y 轴代表I²t值，以安培平方秒(A²s) 表示。在该曲线中绘制了在不同预期故障电流下的熔化和完全熔断 I²t 值。

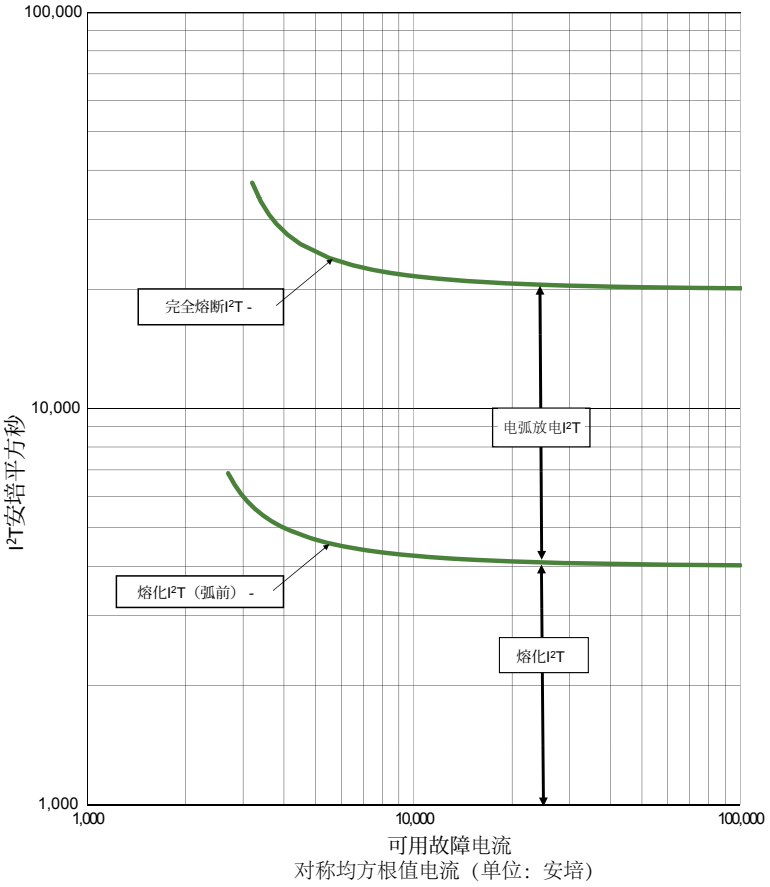


图 19: I²t 特性曲线

对于低级别的短路故障电流，熔化 I²t和完全熔断 I²t 曲线较高，因为熔化熔断器元件需要较长时间。相比之下，对于较高级别的短路，故障电流I²t 曲线保持不变。

这些曲线不再公布，因为以表格格式在额定电压下进行测试时，公布熔化和完全熔断 I²t 已成为普遍行业惯例。使用 I²t 修正系数曲线确定小于额定电压的其他电压的 I²t 值。

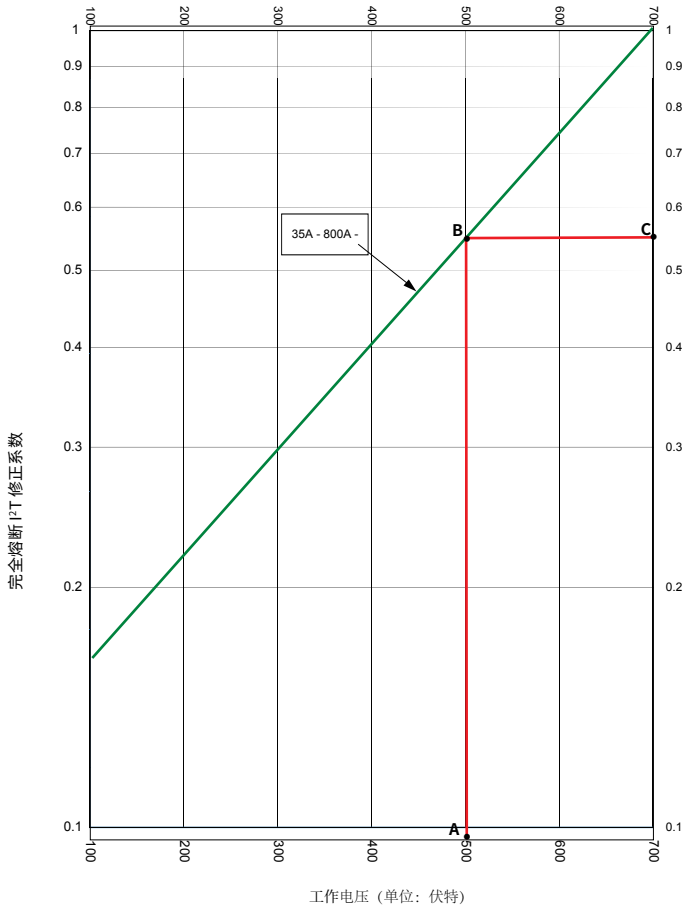


图 20: 完全熔断 I^2t 修正系数曲线

图 20 所示为 Littelfuse L70S 系列高速熔断器的完全熔断 I^2t 修正系数曲线。X 轴代表应用的工作电压 (单位: 伏特)，而 Y 轴代表完全熔断 I^2t 修正系数，它是在降低电压下测得的完全熔断 I^2t 值与额定电压下的完全熔断 I^2t 值的比率。

示例:

确定 L70S125 熔断器在 500 Vac 工作电压下的完全熔断 I^2t 值。

根据相应熔断器数据表，在额定电压(700 Vac) 下的完全熔断 I^2t 值为14,700 A^2s。

使用完全熔断 I^2t 修正系数曲线，可以通过在曲线的 X 轴上找到A点位置并沿着电压线向上直到在 B 点处满足修正系数曲线来获取在 500 Vac 降压时的修正系数。在点 C 处的 Y 轴上的相应值代表修正系数，数值为0.55。

接下来，将修正系数 0.55 乘以额定电压 (在本示例中为14,700 A^2s) 的完全熔断 I^2t 值，从而确定完全熔断 I^2t 值。因此，对于本示例而言，在 500 Vac 的降压下，L70S125 熔断器的完全熔断 I^2t 值为8,085 A^2s (14,700 A^2s x 0.55 = 8,085 A^2s) 。

当选择在降低或变化电压环境下使用的熔断器时，该 I^2t 修正系数曲线非常有用。在熔断器选择过程中，应谨慎行事，比如所选熔断器的 I^2t 值应小于半导体器件元件的耐受额定值，以确保妥当的熔断器保护。

3.8.4 峰值电弧电压曲线

电弧（电弧放电）电压是在电弧放电期间在过电流保护器件上发生的瞬态电压。它通常表示为峰值瞬时电压（V_{PEAK}或E_{PEAK}）。

当过电流故障状况期间可熔元件的桥接开始变软和熔化时，熔断器内部会产生电弧放电。熔断器内部产生的电弧传导电子流或故障电流，直至被填充物材料（硅砂）熄灭。影响峰值电弧电压的其他因素包括额定电压和功率因数。

在此电弧放电期间，电弧电阻会在熔断器端子上产生高于系统电压的峰值瞬时电弧电压。高速熔断器内部产生的电弧电压将出现在以串联形式连接至熔断器的功率半导体器件上作为瞬时反向电压。

高速熔断器的峰值电弧电压曲线提供在小于其额定电压的变化工作电压下熔断器内产生的不同级别的电弧电压。这些曲线均基于以 15% 功率因数进行测试时的结果。

图 21 所示为 700 Vac 高速熔断器端子上可能出现的峰值电弧电压级别。例如，考虑使用峰值电弧电压曲线在 500V 状况下找到 400A 熔断器的峰值电弧电压的要求。首先在 X 轴上的 A 点上找到曲线底部的工作电压(500V) 位置。然后沿此值向上，直至它在点 B（这是 400A 额定电流的峰值电弧电压曲线）遇到 225-800A 曲线。从那里开始，沿着该点水平向前，直到达到 Y 轴上C 点处的峰值电弧电压。对应的 950V 电压值为 500V 工作电压下的400A 额定电流熔断器提供峰值电弧电压。

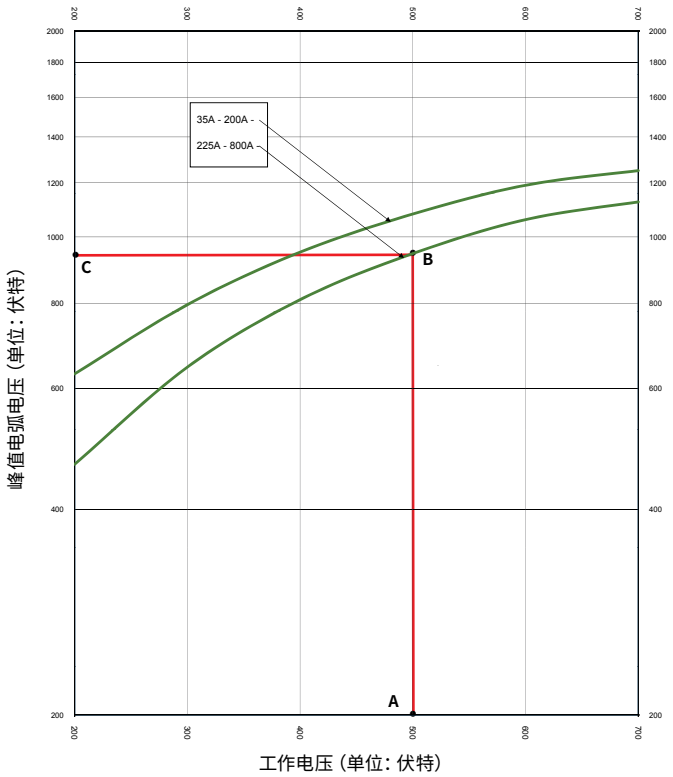


图 21: Littelfuse 高速熔断器的峰值电弧电压曲线

在熔断器选择过程期间，应谨慎行事，确保该峰值电弧电压（也称为‘反向电压’）小于功率半导体器件峰值反向电压 (PIV)，以避免半导体器件击穿。

请查阅各高速熔断器系列的数据表，以利用 Littelfuse 公布的峰值电弧电压曲线。

3.8.5 温度降额曲线

熔断器的载流能力取决于其所用应用的工作环境温度状况。 它随着环境温度的上升而下降，反之亦然。温度降额曲线可用于确定熔断器工作温度范围内的载流能力的这种变化。

温度降额曲线对不同熔断器类型而言是特定的，并且基于熔断器周围和紧邻外部的环境空气温度（通常在离熔断器几英寸范围内）。如果熔断器安装在封闭的熔断器座上，那么环境温度就是熔断器座周围紧邻空气温度。温度降额曲线显示熔断器可以安全运行的最宽环境温度范围（X 轴）（也称为工作温度范围），以及待应用到熔断器额定电流的相应降额系数。

若要使用该曲线，首先测量应用的环境温度，并在 X 轴上找到该温度的位置（例如，参考点 A1，如图 22 所示）。然后从该参考点向上延伸一条线，直到与降额曲线相交。然后向左或向右移动以找到 Y 轴上显示的对应百分比。这确定了将应用于为该应用所选熔断器额定值的额定电流的必要降额系数（升额或降额）。

在此处显示的示例中，应用的环境条件为 70°C，如X 轴上的参考点 A1 所示。将线条向上延伸直至与降额曲线相交。在这种情况下，降额曲线低于 Y 轴的 0% 部分，因此该应用会有降额。将线条延伸到曲线右侧的Y 轴，从而确定为此应用所选熔断器所需的降额百分比为20%。换言之，为此应用所选熔断器的额定电流应减少20%，计算出的电流值成为该熔断器的新额定电流。

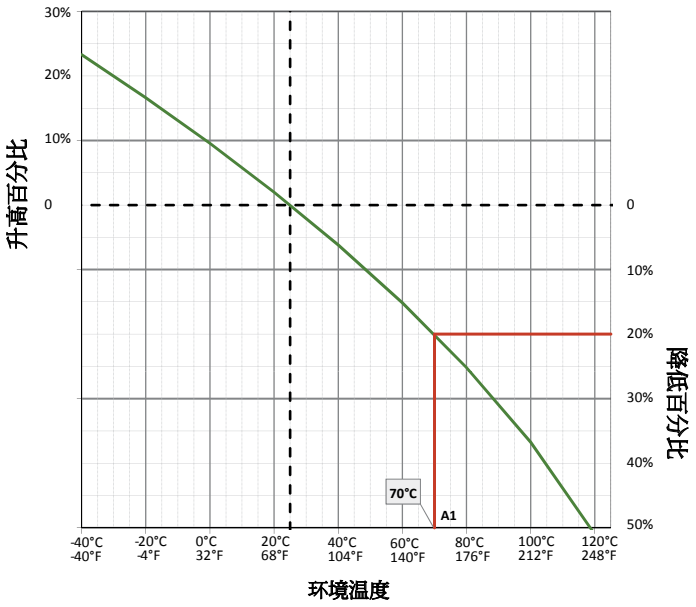


图 22: 温度降额曲线

为了完成这个示例，让我们考虑适用于这种应用的30A 熔断器。基于涉及的70°C 环境温度，现在该熔断器采用 -20% 降额系数。现在，熔断器的新额定电流变为 24A (30A – 20% = 24A)。

对于 Littelfuse 高速熔断器而言，典型储存温度范围为 -20°C 至 60°C，相对湿度为 75%。工作温度范围应为 -55°C 至 +120°C。

3.8.6 功率损耗修正系数曲线

熔断器在标称运行期间消耗的能量被称为能量损耗或功率损耗。全球标准要求熔断器制造商提供功率损耗值，并在熔断器 100% 额定电流下进行测试。

在实际应用中，高速熔断器通常不会加载到其额定电流的 100%，但可以在额定电流的 60% 至 80% 之间任意加载。Littelfuse 发布了高速熔断器在 100% 和 80% 额定电流下测试的功率损耗值。本数据可以在各熔断器数据表的电气特性表的表格中找到，表格中还有表示该熔断器系列在额定电流 30%和 100% 之间功率损耗性能的功率损耗修正系数重新确定额定值曲线。

图 23 表示高速熔断器系列的典型功率损耗修正系数曲线。曲线的 X 轴代表额定电流的百分比，而 Y 轴显示待乘以正在使用的熔断器的 100% 功率损耗值的修正系数。

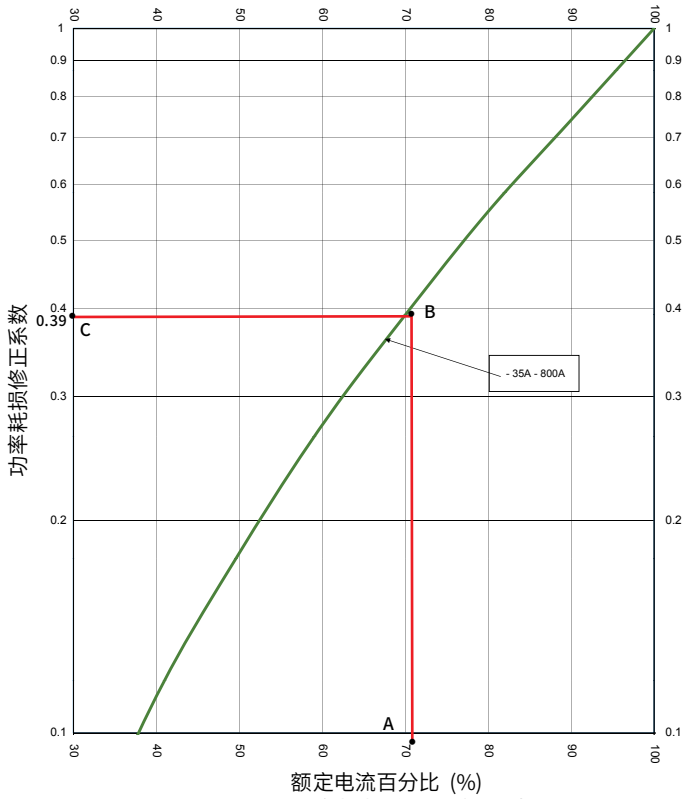


图 23: 功率损耗修正系数曲线

示例:

使用图 23 所示的功率损耗修正系数曲线确定熔断器在 70% 额定电流下的功率损耗值。熔断器数据表的额定电流功率损耗为 24 瓦。

查看图 23，首先确定 X 轴（A 点）上所需 的 70% 百分比值的位置，然后向上延伸一条线，直至达到功率损耗曲线（B 点）。

然后向左移动以确定 Y 轴（点C）上的对应值，该值代表待乘以所选熔断器的 100% 功率损耗值的功率损耗修正系数。

从 70% 额定电流曲线中确定的功率损耗修正系数为 0.39。将该系数乘以熔断器的 100% 功率损耗值得出
24W x 0.39 = 9.36W

这个 9.36W 是熔断器在加载 70% 额定电流下数学派生的近似功率损耗值。

4.0 尺寸准则

正确选择高速熔断器需要更全面地了解和考虑其产品规格，例如额定电压、额定电流、分断额定电流、熔化和完全熔断 I^2t 额定值，然后按照各种应用条件确定其正确尺寸。在本节中，一般行业准则将根据这些有影响的应用条件讨论确定高速熔断器尺寸之规范。

4.1 额定电压

熔断器的额定电压是熔断器设计的工作时最大交流或直流电压。熔断器额定值可以仅适用于交流，仅适用于直流，或同时适用于交流和直流。熔断器的额定电压必须等于或超过熔断器安装处的应用电压。

熔断器标签上的交流额定电压是可以安全使用熔断器的最大开路均方根电压。但同样重要的是要注意，直流电路中使用的熔断器必须专门针对直流应用确定额定值。熔断器标签上的直流额定电压是可以安全使用熔断器的最大直流电压。

在某些情况下，并且在某些限制条件下，仅适用于交流的额定熔断器可用于直流电路。请咨询 Littelfuse 技术服务部，了解应用此类熔断器的安全直流额定电压。影响高速熔断器额定电压大小的最常见应用条件是工作频率、再生负载和采用的代理标准。

4.1.1 工作频率的影响 (E_f)

根据 UL 和 IEC 标准，通过在 45Hz 和 62Hz 频率范围内测试来确定熔断器的交流额定电压。通常应用频率（高达 1kHz）不会影响熔断器的性能。然而，在较低频率（低于 45Hz）下，电路往往更像直流电路，这会显著影响熔断器安全清除故障电流的能力。在这种应用情况下，推荐使用额定交流电压高于应用交流电压的熔断器。

为了确定低频应用中熔断器的最小额定交流电压，应该将适当的频率修正系数(E_f)（参见下面的图 24）分解为应用交流电压，以确定适当的熔断器额定电压。

可以通过以下方式确定熔断器的最小额定交流电压：

$$E_n \geqslant \frac{E}{E_f}$$

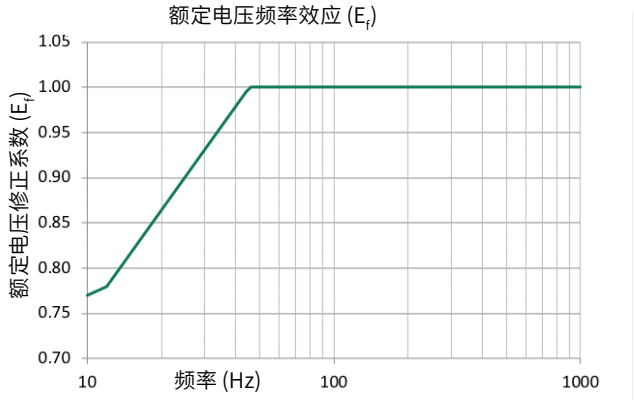


图 24：频率修正系数曲线

示例：

应用额定电压 (E)	= 480Vac
应用频率	= 30Hz
频率修正系数 (E_f)	= 0.9
熔断器最小交流电压	$E_n \geqslant \frac{E}{E_f} \geqslant \frac{480Vac}{0.9} \geqslant 533$ Vac

因此，建议使用 550 Vac 或 600 Vac 额定电压熔断器。

4.1.2 时间常数的影响 (E_{fc})

直流额定高速熔断器安全分断直流过电流的能力受电路直流时间常数 (也称为 L/R 比率) 的影响。在直流电路中，电感与电阻 (L/R) 比率确定了故障电流的上升速率(di/dt)。直流电路时间常数通常用毫秒 (ms) 表示，并且是直流电路达到其最终值 63% 所需的时间。

电路的时间常数越长，熔断器安全分断故障电流的负担越重。根据 UL 和 IEC 标准，Littelfuse 高速熔断器在时间常数 (L/R) 等于或大于 10ms 的电路中进行测试。当在时间常数超过 10ms 的电路中使用时，高速熔断器需要额外的额定电压降额。请联系 Littelfuse 技术服务部，了解此类应用。

4.1.3 再生负载的影响(E_{reg})

熔断器用于再生功率转换器应用而制动期间的电机的机械能和/或连接负载返回至交流电源时，就可能会出现换相故障。这是该电路中最糟糕的故障。在此故障期间，应用源交流电压叠加在转换器输出直流电压上，导致系统电压突然升高。这会影响熔断器安全清除故障的能力。

对于高速熔断器安全清除再生负载应用中的换相故障而言，将 1.8 的安全系数(E_{reg}) 应用到应用额定电压 (E)，以确定高速熔断器的最小额定电压 (E_n)。

$E_n = E \times E_{reg}$ 或 $E_n = E \times 1.8$

对于非再生负载，安全系数 $E_{reg} = 1.0$

4.1.4 符合熔断器标准的影响

Littelfuse 提供的高速熔断器符合 UL、IEC 标准，或在许多情况下符合两种标准，具体取决于熔断器样式。北美圆形主体样式熔断器符合 UL 248-13 标准，在熔断器 100% 交流电压下进行额定电压测试。

相比之下，正方形主体样式熔断器根据 IEC 60269-4 和 UL 248-13 标准进行测试。根据 IEC 标准，在熔断器 110% 交流电压下进行额定电压测试，以分解任何应用过载状况。

在 IEC 应用中应用北美圆形主体样式熔断器时，应将额外安全系数 0.9 分解为应用电压，以确定熔断器的额定电压。

高速熔断器最小额定电压: $E_n = \frac{E}{0.9}$

总而言之，使用以下公式确定熔断器的额定电压:

$$E_n = \frac{E \times E_{reg}}{E_f}$$

对于在 IEC 应用中使用的北美样式熔断器，熔断器的额定交流电压取决于:

$$E_n = \frac{E \times E_{reg}}{0.9 \times E_f}$$

其中:

E	=	应用额定电压
E_{reg}	=	再生负载安全系数
E_f	=	频率修正系数

4.2 额定电流

高速熔断器的额定电流定义为熔断器设计为在符合标准 (UL 和 IEC) 规定的特定条件下承载的连续交流均方根电流（以及额定交流和直流时的直流稳态电流）。

熔断器标签上印的额定电流是根据在标准测试条件下进行测试而确定的。

- **交流电路条件：** 频率范围为 45Hz 至 62Hz，环境温度为 20°C±5°C。
- **直流电路条件：** 时间常数 (L/R) 为 10ms 或更短，环境温度为 20°C±5°C。

通常情况下，熔断器并不总是在标准测试条件下应用。因此，熔断器额定电流的大小 (或选择) 取决于各种应用因素和条件。

4.2.1 高速熔断器额定电流的大小

按照本节中的以下分步骤方法正确确定 (选择) 高速熔断器额定电流的大小。

第 1 步：确定通过熔断器的正常满载电流(I_{AL})

根据功率转换电路 (交流侧或直流侧) 中熔断器的位置，通过熔断器的负载电流会不同。在大多数情况下，通常可以从应用设计工程师处获得正常负载电流。

对于正常满载电流不易获得的应用，可通过计算均方根电流 (交流侧熔断) 或稳态电流 (直流侧熔断) 来确定该值。

在功率转换应用中，面临的挑战是由于整流器输出电流的脉动特性而确定交流均方根电流和直流稳态电流 (通常表示为直流平均电流)。

单相无滤波全波整流器电路的交流均方根电流和直流平均电流之间的数学关系如下图所示。

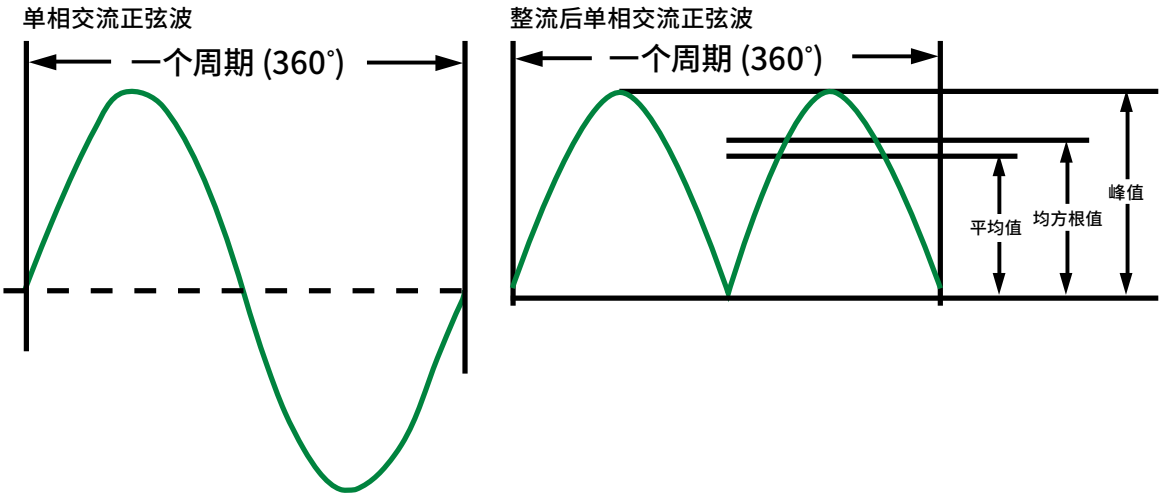


图 25: 均方根电流图示

其中，
I_{PEAK} = 峰值电流

I_{AVG} = 直流平均（输出）电流

I_{RMS} = 交流均方根电流

$I_{AVG} = 0.636 \times I_{PEAK}$

或

$I_{PEAK} = I_{AVG} / 0.636$

$I_{RMS} = 0.707 \times I_{PEAK}$

通过在上述等式中代入 I_{PEAK}，

$I_{RMS} = (0.707 / 0.636) \times I_{AVG}$

交流侧正常满载电流 (I_{AL})：**$I_{RMS} = 1.11 \times I_{AVG}$**

或

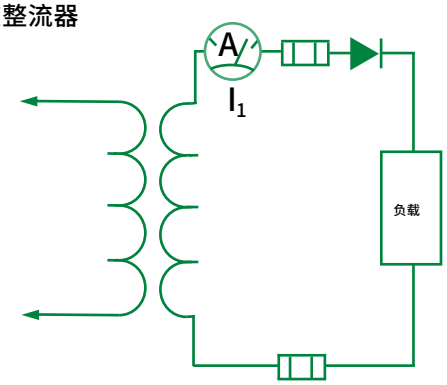
直流侧正常满载电流 (I_{AL})：**$I_{AVG} = 0.9 \times I_{RMS}$**

根据图示，通过熔断器的平均直流电流是交流均方根电流的 0.9 倍。换言之，位于电路交流侧的熔断器的均方根电流将是直流平均输出电流的 1.11 倍。

当多个半导体（如全波、并联、三相或类似电路）与多个熔断器在一个电路中使用时，通过每个熔断器的电流取决于电路中熔断器的位置。

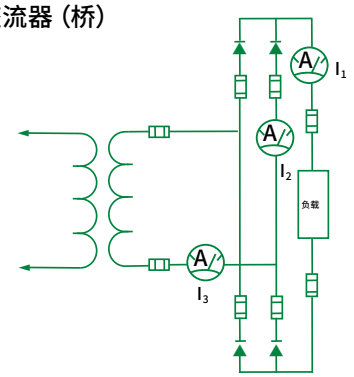
下面示例表示一些常见整流器电路选项，显示熔断器的可能放置位置以及流经熔断器的交流均方根电流（如在 100% 直流稳态负载电流下计算的数值）。

单相 - 半波整流器



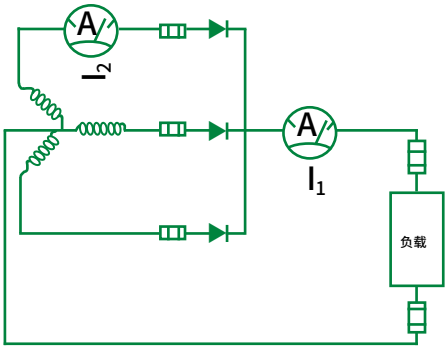
$I_1 = 1.57A$

单相 - 全波整流器（桥）



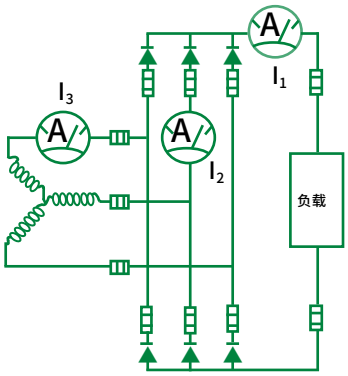
$I_1 = 1.11A$ $I_2 = 0.79A$ $I_3 = 1.11A$

三相 - 半波整流器



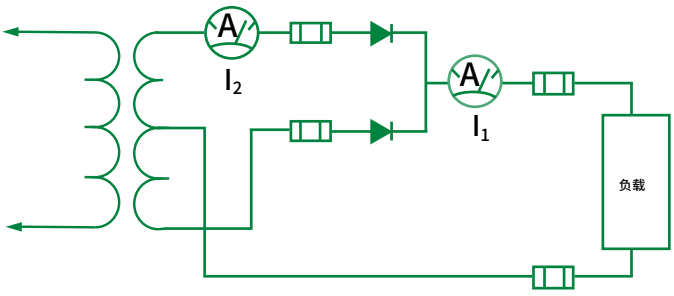
$I_1 = 1.02A$ $I_2 = 0.59A$

三相 - 全波整流器



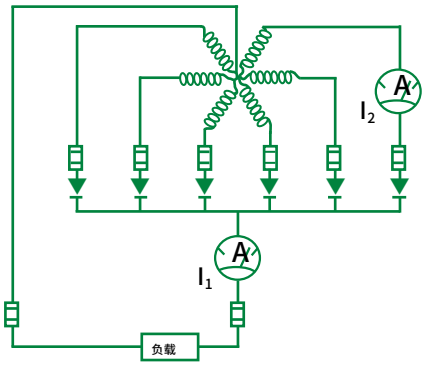
$I_1 = 1.00A$ $I_2 = 0.58A$ $I_3 = 0.82A$

单相 - 全波整流器（中心抽头）



$I_1 = 1.11A$ $I_2 = 0.79A$

六相 - 单波整流器



$I_1 = 1.00A$ $I_2 = 0.41A$

图 26: 典型整流器电路和电路中高速熔断器的位置

当通过熔断器的电流恒定且持续一小时或以上时，则计算出的正常负载电流与符合上图的交流均方根电流或直流稳态电流类似。

然而，对于涉及不断变化的负载电流的应用而言，特别是当遇到涌入电流或循环电流（经常重复的完全相同的电流循环）时，通过计算一个工作周期的均方根电流（也称为调整后正常负载电流），可获得通过熔断器的正常负载电流。

下图 27 表示典型变化负载周期。这个变化负载周期的调整后正常负载电流由以下公式提供，

$$I_{AL} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \cdots \ldots \ldots + I_n^2 t_n}{T}}$$

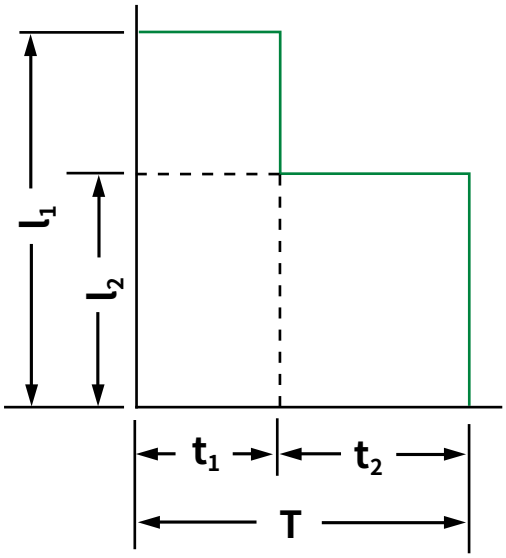


图 27: 变化负载电流（循环电流）

其中，

I_1、$I_2 \ldots I_n$: 变化均方根负载电流（安培）
t_1、$t_2 \ldots t_n$: 对应电流周期持续时间（秒）
T: 一个变化负载电流周期的总持续时间（包括任何 OFF 时间段）

示例：

确定图 28 中所示的循环电流的调整后正常负载电流。

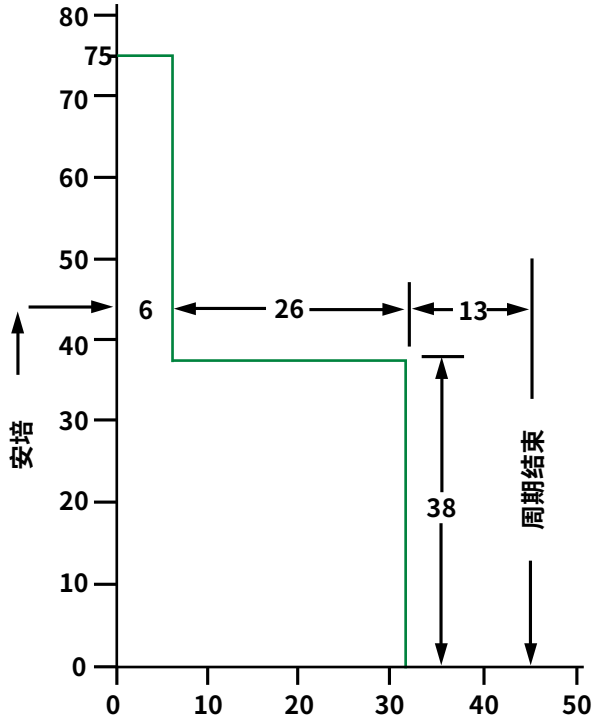


图 28：循环电流说明

其中，

I_1： 75A
t_1： 6 秒
I_2： 38A
t_2： 26 秒
I_3： 0A
t_3： 13 秒
总时间 (T)： 45 秒

$$I_{AL} = \sqrt{\frac{(I_1^2 * t_1) + (I_2^2 * t_2) + (I_3^2 * t_3)}{T}}$$

$$I_{AL} = \sqrt{\frac{(75^2 * 6) + (38^2 * 26) + (0^2 * 13)}{45}}$$

$$I_{AL} = 40A$$

对于不规则电流周期，必须在一小时的时间内计算调整后的负载电流，在此期间会出现最大的有效浪涌电流。根据浪涌电流的大小和持续时间，计算出的调整后正常负载电流 (I_{AL}) 可能远远小于系统中的浪涌。

在功率半导体应用中观察到的其他常见情况将涉及并联连接多个功率半导体器件（如图 29 所示）。在这种称为多并联连接的情况下，每个器件都受到电源转换电路每个臂/腿中单独高速熔断器的保护。

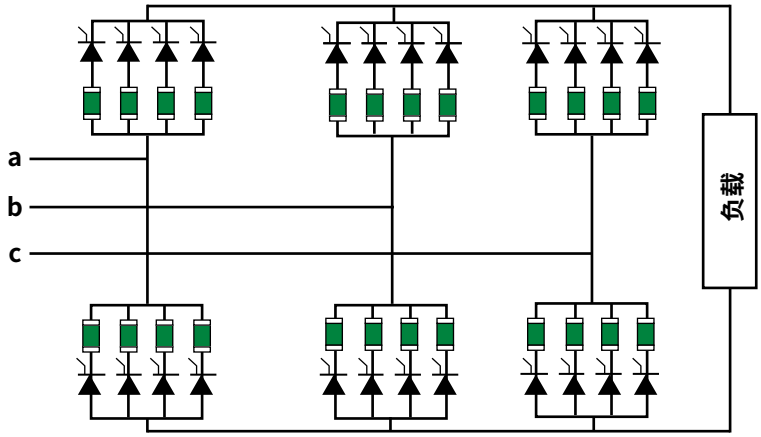


图 29：整流器电路中的多并联连接

在这种情况下，通过每个臂/腿的负载电流在全部并联路径之间均分。虽然负载均流通常不相等，但允许高达 20% 的不均匀均分。这种少一个并联路径（由于内部故障引起熔断器操作）的多并联电路也可能连续运行。因此，当确定这种多并联电路中通过熔断器的负载电流时，应考虑这两种情况。

在多并联连接电路中通过每个熔断器的正常负载电流 (I_{AL}) 由以下内容确定：

$$I_{AL} = \frac{I_{AL\ (LEG)}}{\left\{\frac{N}{(1+S)}\right\} - 1}$$

其中，

$I_{AL(Leg)}$ = 每个臂/腿中的总均方根电流

N = 每个臂/腿中并联路径总数

S = 负载分流系数 (0%-20%)

将选择的高速熔断器的额定电流可以通过将重新评定系数（在下面第2步中计算）应用到本节中确定的正常负载电流 (I_{AL}) 来确定。

第 2 步：如何确定高速熔断器的合适额定电流

作为热敏器件，有各种应用参数会影响熔断器的运行（熔化）。这反过来影响熔断器的总载流能力（额定电流）。以下是在确定高速熔断器尺寸时需要考虑的应用参数及其相应修正系数。

可以用以下公式确定高速熔断器的额定电流：

$$I_N = \frac{I_{AL}}{F_{AT} * F_{FC} * F_{WR} * F_{HZ} * F_{SS} * F_{AL}}$$

其中，

I_{AL} = 调整后正常满载电流
I_N = 该应用的高速熔断器的额定电流
F_{AT} = 环境温度修正系数
F_{FC} = 强制冷却修正系数
F_{WR} = 配线连接系数
F_{SS} = 开关修正系数
F_{AL} = 海拔高度修正系数

2a：环境温度熔断器在其运行期间受其周围紧邻空气温度（环境温度）的影响。通常情况下，在 20°C±5°C 的标准测试条件下对高速熔断器进行测试，并且可以在 -50°C 至 +125°C 的宽工作温度范围内应用。当熔断器在标准测试范围之外的环境温度下运行时，需要计算适当的环境温度修正系数并进行分解，以便正确选择熔断器额定值。环境温度修正系数(F_{AT}) 由以下公式确定：

$$F_{AT} = \sqrt{\frac{125 - T_a}{125 - T_{std}}}$$

其中，

T_a = 应用环境温度
T_{std} = 标准测试环境温度

示例：

确定安装在 55°C 环境温度条件下的熔断器的环境温度修正系数？

根据公式，计算为：

$$F_{AT} = \sqrt{\frac{125-T_a}{125-T_{std}}} = \sqrt{\frac{125-55}{125-25}} = \sqrt{\frac{70}{100}} = \sqrt{0.7}$$

F_{AT} = 0.84

2b: 强制冷却: 功率半导体器件由于其开关特性，通常会在正常运行条件下产生大量热量。当产生的热量超过安全工作温度极限时，该器件将不起作用。

强制空气冷却和液体冷却是这种应用中常用的两种散热方法。用于保护这些器件的熔断器也受到这种散热方法的影响，并且可以直接影响（提高）高速熔断器的载流能力。

图 30 所示的曲线决定了在确定高速熔断器的额定电流大小时所使用的强制（空气）修正系数(F_{FC})。

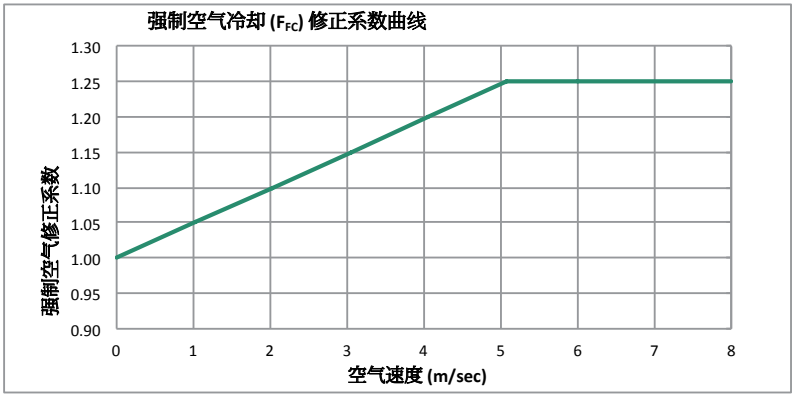


图 30: 强制（空气）冷却修正系数 (F_{FC}) 曲线

示例:

确定安装在风速为 4 米/秒的应用中的熔断器的强制空气冷却修正系数。

根据强制空气修正曲线:

平均电流密度和参考值(100%)

对于 4 米/秒的空气速度而言，F_{FC} = 1.20

对于采用液冷汇流排系统（可与强制空气冷却一起使用）的应用，在确定高速熔断器的额定电流时，可考虑 F_{FC} = 1.25 的强制冷却修正系数。

2c: 导体尺寸（配线连接系数）：高速熔断器通过电缆或汇流排端接形式的铜导体连接到系统。 端接的主要用途是传输电力，但也可作为散热装置，除去熔断器端子的热量并使其高效运行。

导体尺寸对于熔断器规格和配线/汇流排规格之间的调整至关重要。考虑不周可能会导致令人不快的熔断器开路。

导体的横截面尺寸显著影响高速熔断器的载流能力。高速熔断器的额定电流是根据采用国际标准中概述的推荐导体尺寸进行测试确定的。在现场使用这些熔断器时，任何导体尺寸的缩小都需要对熔断器的额定电流进行适当降额。换言之，应根据导体的横截面尺寸确定熔断器额定电流。

根据 IEC 60269-4 标准第 8.3.1 节，所使用铜导体的电流密度应在 1.0A/mm^2（最小值）至 1.6A/mm^2（最大值）之间（最大值）并随熔断器的额定电流而变化。为便于计算，对于导体尺寸而言，人们认为1.3A/mm^{2}是参考值 (100%)。根据此参考值和应用导体尺寸，应用中的配线修正系数 (F_{WR}) 由图 31 中所示曲线确定并相应分解，同时确定高速熔断器的额定电流大小。

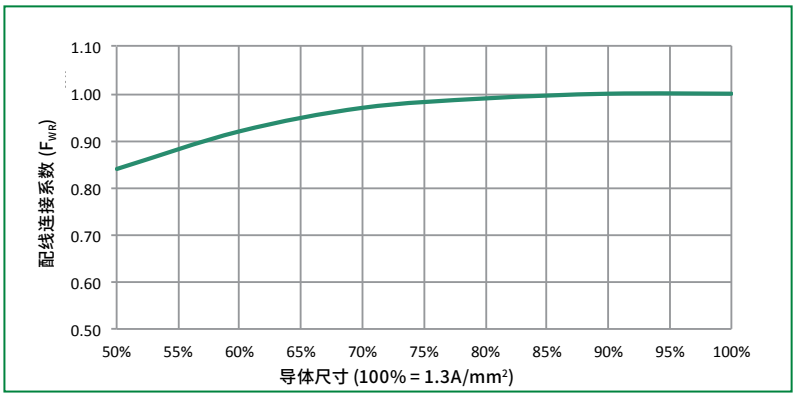


图 31: 配线连接系数 (F_{WR}) 曲线

示例:

使用横截面为 185mm^{2}的铜导体确定具有 400A 负载电流应用的配线连接系数。

负载电流: 400A

应用中使用的导体尺寸: 185mm^2

符合 IEC 标准的铜电流密度: 1.3A/mm^2

400A 的推荐导体尺寸（根据 IEC 标准）：$\frac{400A}{1.3A/mm^2} = 308mm^2$

根据上面确定的 IEC 推荐导体尺寸，所使用的应用导体尺寸约为推荐尺寸的 **60%**。

应用配线连接系数曲线中确定的 60% 值，该应用的配线连接系数为 **F_{WR} = 0.92**

2d: 频率： 高速熔断器在其熔断主体内有一个或以上采用并联连接配置的可熔元件。 当这些熔断器承受高频时，由于交流电源的电磁特性，将通过熔断器的电流限制在可熔元件的外层（被称为肌肤），产生接近效应。 这种现象导致可熔元件之间电流的不平均均流，导致热量增加，从而显著降低熔断器的载流能力并且可能导致熔断器过早操作。

高频影响熔断器额定电流。

人们认为频率高于 10kHz 的应用是非常高频率应用，并且在确定高速熔断器尺寸时需要多加注意。 请咨询 Littelfuse 技术服务部，了解此类应用。

图 32 所示的曲线决定了在确定高速熔断器额定电流大小时应考虑的频率修正系数(F_{HZ})。

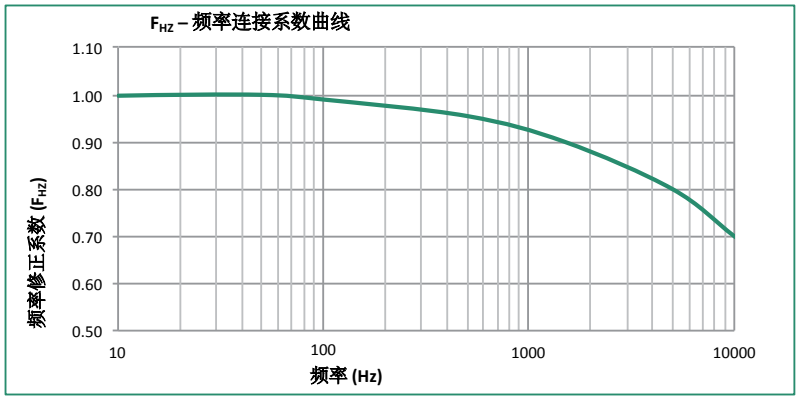


图 32: 频率修正系数 (F_{HZ}) 曲线

示例:

确定应用频率为 500Hz 的应用的频率修正系数。

应用频率: 500HZ

从图 32 所示的频率修正系数曲线可知，该应用的相应频率修正系数为 **F_{HZ} = 0.96**

2e: 开关和浪涌: 一般而言，全部电气设备都受起动-停止操作控制。 起动 (ON) 和停止 (OFF) 操作的频率以及开关期间的相关电流浪涌决定了高速熔断器的老化效应。

开-关操作引起熔断器元件的温度上升和冷却效应。 开关操作次数越多，对一段时间内熔断器载流能力的影响就越大。

下面的开关修正系数表提供了任何频繁开关应用需要考虑的推荐开关降额系数 (F_{SS})。

开关修正系数 (Fss) 表	
开关频率	**开关修正系数 (Fss)**
每年停止少于 12 次	1.00
每月停止多于一次	0.95
每周停止多于两次	0.90
每天停止多于一次	0.85
每天停止多次	0.80

表 1.开关修正系数 (F_{ss}) 表

2f: 海拔高度： 海拔高度增加至平均海平面 (MSL) 2000 米以上时，由于熔断器元件内的对流和辐射而引起的散热减少。

在计算高速熔断器额定电流时，应采用在海平面 2000 米以上每上升100米元器件的额定电流降额0.5%的一般行业惯例。

海拔高度修正系数由术语 $F_{AL} = \frac{1-(h-2000) * 0.005}{100}$ 给出，其中 'h' 是应用海拔高度。

示例

对于海平面以上 3500 米处的应用，使用的海拔高度修正系数是多少?

应用海拔高度 (h)：3500 米

海拔高度修正系数公式：

F_{AL} = (1-((h-2000)/100)*0.005)

F_{AL} = (1-((3500-2000)/100)*0.005)

F_{AL} = (1-(0.075))

F_{AL} = 0.925

海拔高度修正系数 F_{AL} = 0.925

高速熔断器的额定电流： 总之，可以用以下公式确定高速熔断器的额定电流：

其中，

I_{AL}	=	调整后正常满载电流
I_N	=	该应用的高速熔断器的额定电流
F_{AT}	=	环境温度修正系数
F_{FC}	=	强制冷却修正系数
F_{WR}	=	配线连接系数
F_{SS}	=	开关修正系数
F_{AL}	=	海拔高度修正系数

$$I_N = \frac{I_{AL}}{F_{AT} * F_{FC} * F_{WR} * F_{HZ} * F_{SS} * F_{AL}}$$

示例：

使用以下系统详情确定适用于整流器应用的合适Littelfuse POWR-*SPEED*®北美圆形主体熔断器：

交流系统电压 = 600 V

频率 = 60 Hz

环境温度 (T_a) = 65°C

强制空气冷却 = 3m/s

负载电流 = 100 A。

可用短路故障电流 = 35 kA

负载状况 = 每天停止 15 次

过载状况 = 200%，每 3 分钟持续 10 秒

晶闸管 I^2t 耐受额定值 = 20,000 A^2s

熔断器的额定电压 (E_N):

$$E_N = \frac{E}{0.9}$$

$$E_N = \frac{600}{0.9}$$

$$E_N = 667V \sim 700Vac$$

负载电流:

$$I_{AL} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2}{T}}$$

$$= \sqrt{\frac{(100^2 * 180) + (200^2 * 10)}{190}}$$

$$I_{AL} = 107.6$$

环境温度修正系数:

$$F_{AT} = \sqrt{\frac{125 - 65}{125 - 25}}$$

$$F_{AT} = 0.775$$

强制冷却修正系数

强制空气冷却: 3 米/秒

根据强制冷却修正系数图,

$F_{FC} = 1.15$

开关修正系数

每天停止次数: 15

根据开关修正系数表

$F_{SS} = 0.8$

熔断器的额定电流 (I_N)

$$I_N = \frac{I_{AL}}{F_{AT} * F_{FC} * F_{SS}}$$

$$I_N = \frac{107.6}{0.775 * 1.15 * 0.8}$$

$$I_N = \frac{107.6}{0.713}$$

$$I_N = 150.9 \sim 150A$$

计算包含涉及的全部系数在内的额定电流时，针对此应用，可以考虑零件编号为 L70QS150.V 的额定值为150 A、700 Vac/dc 和 200 kA I.R. 的 POWR-*SPEED*® 熔断器。该熔断器在 700 Vac 下的完全熔断 I^2t 的值为13,650 A^2s，其小于晶闸管器件耐受额定值 20,000 A^2s，并且满足该应用的额定电压和额定电流要求，因此可以推荐。

4.3 分断额定电流

分断额定电流定义为熔断器可以清除而不出现任何变形的均方根最大故障电流。高速熔断器和其他工业熔断器的分断额定电流通常用千安培 (kA) 表示。

所选熔断器的分断额定电流>可用故障电流

所选熔断器的分断额定电流应小于应用可用故障电流，以提供足够保护。

4.4 完全熔断I^2t值（最大可承受能量）

完全熔断 I^2t 值是在额定电压下测试时出现的最大额定值（在数据表中公布）。降低应用电压的完全熔断 I^2t 值可以使用完全熔断 I^2t 修正系数图表（参见第 3.8.3 节）获取。

完全熔断 I^2t 值<半导体器件熔断 I^2t 值

熔断器的完全熔断 I^2t 值应小于半导体器件耐受额定值或熔断 I^2t 值（用 A^2s 表示）。

4.5 峰值电弧电压

在熔断器元件操作期间出现的电压被称为电弧电压。它高于熔断器额定电压（约两倍）。在额定电压下测试时，出现熔断器的峰值电弧电压。若计算熔断器额定电压小于其额定电压的电弧电压，使用数据表中的峰值电弧电压修正系数图表（参见第 3.8.4 节）。

熔断器峰值电弧电压<半导体峰值反向电压 (PIV)

计算的峰值电弧电压应小于所使用的半导体器件的峰值反向电压 (PIV)。

5.0 应用注意事项

5.1 保护功率转换器件

高速熔断器在一般工业环境中的典型应用会涉及保护在电机控制系统（如驱动器和软起动器）、电源和加热应用中使用的功率转换设备。

图 33 表示三相功率转换器电路的典型电路。该电路中有三个基本构建模块：输入转换器（也称为整流器）、滤波器和直流连接（也称为直流公共母线）以及输出逆变器（或逆变器）。

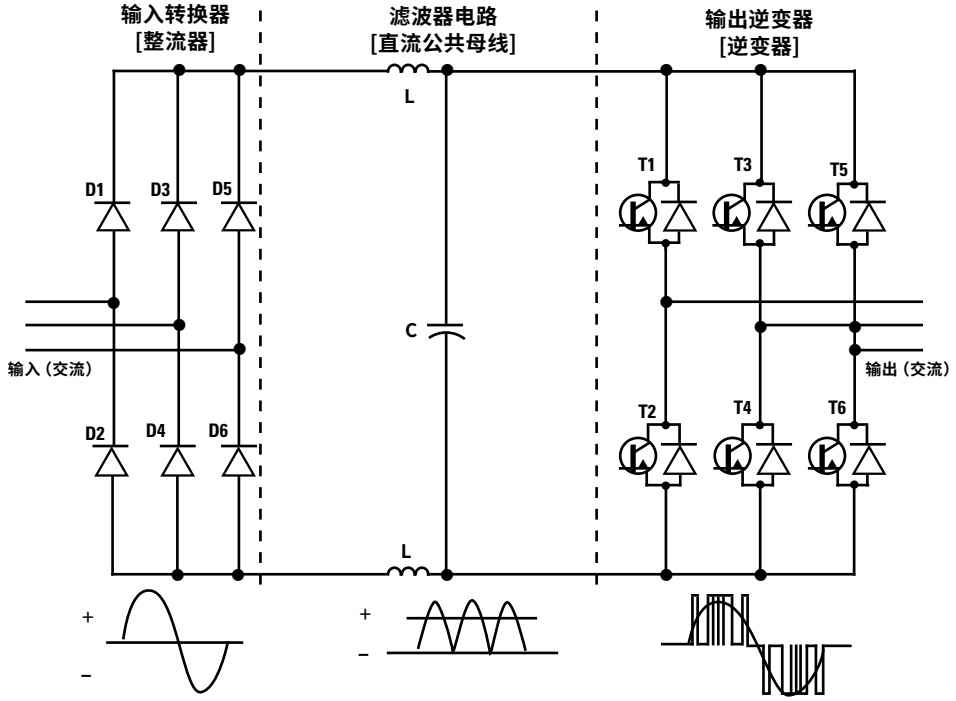


图 33：典型三相功率转换器电路

各个位置的保护要求不尽相同，但本电路中熔断器的主要用途是持续允许标称负载电流和任何准许过载电流继续而不分断。同时，选择熔断器分断在过载或短路期间引起的任何过电流故障，允通能量最小，以便保护在电路中连接的功率半导体器件。

5.1.1 整流器电路的保护注意事项

功率半导体二极管通常用于设计整流器电路，该电路的主要用途是通过允许电流仅在一个方向上流动来将交流转换为直流。整流器电路广泛应用于各种应用，从小型电源到大型高压直流电力传输系统都包括在内。

在考虑额定功率时，整流器电路中高速熔断器的位置取决于系统的大小。图 34 所示为整流器电路中高速熔断器的典型位置。

对于额定功率较小的器件，通常仅在交流线路侧使用高速熔断器，每相安装一个熔断器。

对于较大型的电力系统而言，高速熔断器通常位于交流线路侧，并且与整流器电路每个臂上的各个功率半导体器件分别串联。

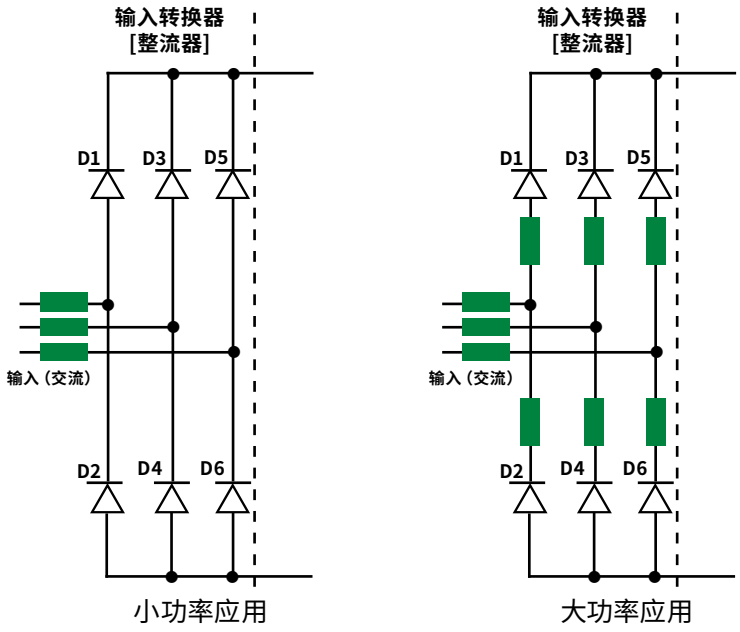


图 34: 高速熔断器在整流器中的位置

5.1.2 逆变器电路的保护注意事项

功率晶体管（IGBT、MOSFET）通常用于设计逆变器电路。使用驱动器电路的栅极脉冲开启和关闭这些晶体管器件，从直流源产生所需的交流波形。如今，逆变器电路广泛应用在电动机可调速驱动器、不间断电源 (UPS)、电池管理系统、灵活交流传输系统 (FACTS) 等应用中。

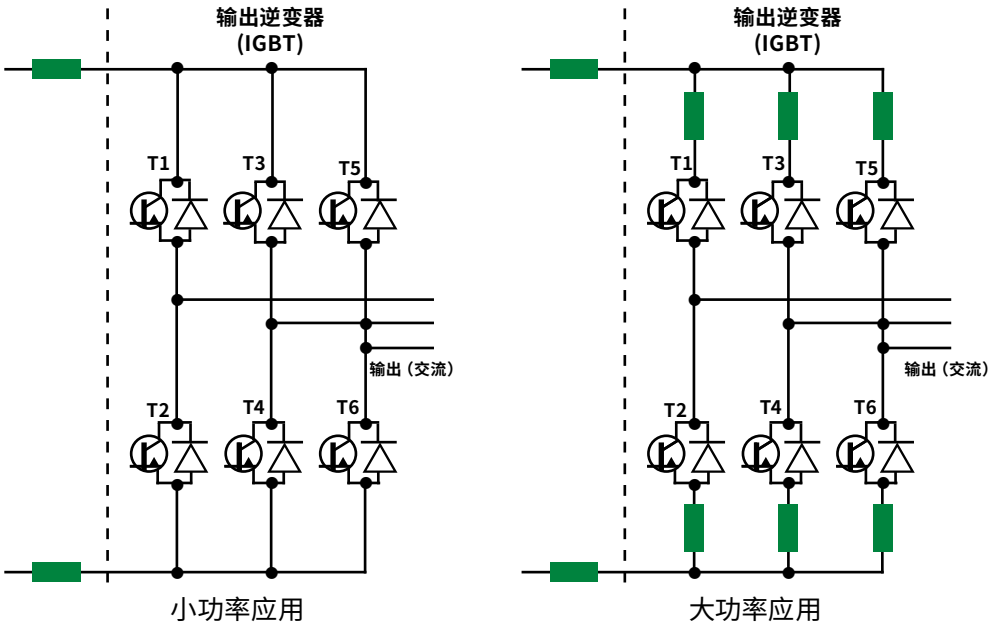


图 35: 高速熔断器在逆变器中的位置

在逆变器电路中使用高速熔断器来防止线间短路故障状况。有多种方式可能会产生这种故障，晶体管失火是其中一个主要原因。根据逆变器电路的额定功率，电路中使用的高速熔断器的位置和数量会有所不同。对于小功率应用，高速熔断器通常仅设计用在直流母线上（正负极各一个）。对于较大功率的逆变器电路，可以在直流母线侧使用熔断器，并且分别更靠近（串联）各个晶体管。

5.1.3 直流母线的保护注意事项

根据不同应用，直流公共母线（也称为直流母线）的保护要求各不相同。通常可以在组电机应用中找到直流母线配置（图 36），其中多个可调速驱动器由直流公共母线供电。这种配置提供了在加工行业中运行多台电机的最有效方式。这种配置中可能出现的典型故障状况是线间直流短路故障，需要在直流线路的正负母线上进行高速熔断器保护，以保护连接到直流母线上的驱动器。

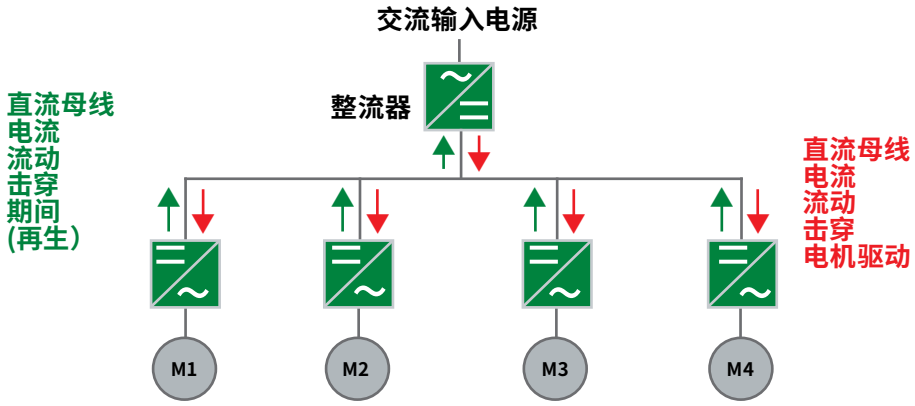


图 36：直流母线配置

在比较靠近滤波器电路的独立直流驱动器和公用电源转换电路中也需要对直流母线进行保护，这些电路可能容易发生绝缘故障，造成线间直流短路故障状况。在这个应用中建议在正和负母线上采用高速熔断。

一般而言，在保护直流母线的同时，按照直流电压专门设计并测试且直流时间常数（L/R 值）高于应用规格的高速熔断器是提供最佳保护级别的正确选择。不建议在保护直流母线的同时使用交流高速熔断器。

5.2 保护 UL 电机分支电路

人们普遍认为，根据NEC®和一般行业惯例，只有 UL 列名的熔断器（电流限制且具有适当的抑制功能）才能用于分支电路保护。然而，在特定条件下，NEC® 确实允许使用高速熔断器来保护电机分支电路。

NEC® 第 430.52(C)(5) 条概述了在使用固态设备（如驱动器和软起动器）的电机控制系统中使用高速熔断器保护电机分支电路。

根据 NEC®，使用内置过载保护来保护电机设备或通过在同一电路中连接的独立装置提供过载保护时，高速熔断器可用于分支电路保护。一个典型示例就是驱动器内置了过载保护时使用变频驱动或其他功率转换器件的较大型电机电路。为了防止任何误用，NEC® 对为希望利用该例外/部分代码的用户施加的条件就是要求提供与这些熔断器装置相邻的高速熔断器替代产品所用的标记（如零件编号、制造商等）。

由于高速熔断器有各种形状和尺寸，其只能按照 UL 248-13 标准进行 UL 认证，而无法进行 UL 列名。

5.3 保护基于 IGBT 的器件

为了实现高品质功率输出，通常在功率转换电路的低电感（或逆变器）侧使用 IGBT 等高频器件。在这种电路中普遍存在开关损耗，以最小损耗进行设计对工程师而言是一项具有挑战性的任务。这些电路中使用的电容器、汇流排和熔断器等元器件的设计确保电感尽可能小。

通常情况下，使用高速熔断器无法防止 IGBT 模块发生短路故障，但可以保护二极管和晶闸管。这背后的原因是，现在可用的 IGBT 模块可以通过专门设计的在几微秒 (μ) 内起作用的驱动器电路在短路期间立即检测并关闭。

然而，如果驱动器电路在短路故障状态期间未能关闭IGBT，或者如果在故障状态期间连接到 IGBT 的内部导体（细铝丝）熔化，则电流和电压会显著上升。这导致 IGBT 模块内部出现熔化和电弧放电情况，造成硅材料汽化，可能导致灾难性的壳体破裂故障。

高速熔断器与 IGBT 器件一起使用时，可以防止在故障状态下发生这种灾难性事件。高速熔断器可以在短路故障期间用几毫秒时间进行检测和操作。高速熔断器通过在操作期间形成完整的开路状况，可限制大电流进一步流入 IGBT 模块，从而防止出现壳体破裂。

目前市场上提供有限的专门设计 IGBT 熔断器系列，它们在高频应用中电感小。这些器件具有专门设计的元件轮廓，在它们之间提供均匀的电流分布，从而使得反向接近效应影响最小，热性能更好。然而，这种专门设计的 IGBT 熔断器也无法保护 IGBT 模块，因为它们设计用于防止在故障状态期间发生壳体破裂。

根据应用要求适当选择标准高速熔断器尺寸可以向基于 IGBT 的器件应用提供充分保护。

5.4 并联高速熔断器*

对大电流应用的需求导致需要更大和更笨重的高速熔断器。在大多数情况下，这种较大型熔断器的可用性总是受到限制，因此在工业中广泛采用并联一个或以上标准尺寸高速熔断器的做法。

熔断器的并联有其自身机遇和挑战。机遇包括：

- 保护大电流和低耐受额定值应用（如果没有 满足要求的单个大型熔断器）
- 在功率电子应用中最大限度地提高散热，最大限度地降低功率损耗
- 为原始设备制造商(OEM)、分销商和最终用户提供更好的库存管理

并联熔断器时面临的挑战包括：

- 并联连接时估算熔断器的组合性能
- 根据负载和应用条件选择正确的熔断器组合进行并联
- 采用正确的并联方法，防止误用

在北美，NEC® 不允许在现场对过电流保护装置进行并联，但根据 NEC® 第 240.8 条，准许对工厂构建的组件进行并联。

*参考文献：

格拉德威尔，B；“通过使用工程并联高速半导体熔断器组件缓解弧闪”；2014年IEEE/IAS第50届工业和商业电力系统技术大会（I&CPS）；卷号：无；页码：1-14，20-23；2014年5月；DOI（数字对象标识符）：10.1109/ICPS.2014.6839162

正确并联熔断器的第一步是选择正确的熔断器组合。行业中遵循的最佳惯例是选择具有相同规格的熔断器进行并联（即相同的额定电流、额定电压、尺寸、样式等）；换言之，使用相同零件编号。此外，只应选择具有大致相似电阻值的熔断器进行现场并联。

注意： 熔断器的性能根据系统条件而变化，因此强烈建议进行应用测试。

设计考虑事项： 设计工程师在并联熔断器时应考虑的应用因素包括：

1. 评估平行熔断器的理论（电和热）性能
2. 验证并联熔断器适当尺寸的应用条件
3. 选择正确安装布局和附件以满足应用要求

5.4.1 理论性能预估

标称额定电流 (I_{np})： 当考虑并联两个或以上熔断器时，并联熔断器的组合额定电流总是小于单个熔断器额定电流的数值总和。载流能力下降的原因是，当熔断器彼此靠近放置时环境热状况增加，而且并联熔断器中经常存在不均匀电流分布。

建议在估算并联熔断器的标称额定电流时应用降额系数 (K_p)。

当两至四个熔断器并联连接时：$K_p = 0.9$

当四个以上熔断器并联连接时：$K_p = 0.8$

并联熔断器的标称额定电流 (Inp) 由以下公式确定：

$$I_{np} = (I_1 + I_2 + \ldots + I_n) * K_p$$

示例：

当两个 100A 熔断器并联连接时，估计标称额定电流是多少？

I_1 = 100A
I_2 = 100A
K_p = 0.9（两个熔断器）
I_n = (100+100) * 0.9 = 180A

标称额定电压 (V_{np})： 并联熔断器的标称（或组合）额定电压等于组合中任何一个熔断器的单独额定电压。

时间-电流特性 (TCC)： 对于并联连接的熔断器，公布 TCC 曲线具有挑战性，因为它随连接的熔断器数量和各种其他应用条件而变化。建议使用以下公式估算并联连接熔断器的 TCC 曲线 (TCC_{np})。

$$TCC_{np} = TCC_1 * N * K_p$$

其中:

TCC_1 =组合中任何熔断器的 TCC 曲线

N =连接的并联熔断器数量

K_p = 并联熔断器降额系数

可以通过保持时间轴不变并绘制电流值的变化来将该公式应用到考虑进行并联的具体熔断器。

峰值允通电流: 除非在工厂组装完成，否则数据表中通常不提供并联熔断器的峰值允通图表。建议使用下面的公式估算并联连接的熔断器的峰值允通值 ($I_{N\text{-}PEAK}$)。

$$I_{N\text{-}PEAK} = I_{p1} * N^{2/3}$$

其中:

I_{p1} = 单个熔断器峰值允通电流
N = 连接的并联熔断器数量

安培平方秒 (I^2t Value): 在熔断器的数据表中公布当在额定电压下测试并分断电路时的熔断器的 I^2t 值。当两个或以上熔断器并联连接时，组合的I^2t_{np} 值由以下公式确定:

$$I^2t_{np} = I^2t_1 * N^2$$

其中:

I^2t_1 = 单个熔断器 I^2t 值
N = 连接的并联熔断器数量

5.4.2 确认正确尺寸的应用条件

在确定熔断器适当尺寸时，了解应用条件非常重要。熔断器的性能受应用的系统参数的影响很大。在确定高速熔断器尺寸时应考虑以下典型应用条件:

- 环境温度
- 强制冷却
- 导体类型和尺寸
- 负载条件
- 可用故障电流
- 半导体器件的耐受额定值(I^2t)
- 峰值反向电压
- 频率或时间常数
- 振动和冲击

5.4.3 选择正确安装、布局和附件

高速熔断器有不同形状、尺寸和端接可供选择，因此在并联熔断器时选择合适的形式至关重要。为了获得可靠性能，建议在并联时使用完全相同的零件编号。

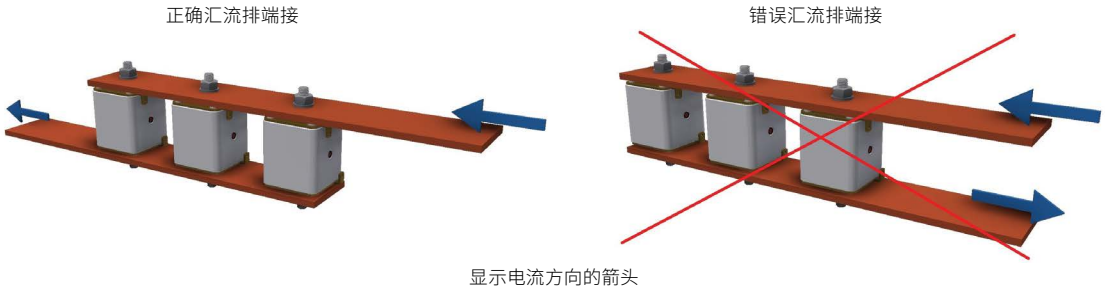


图 37: 并联两个或以上高速熔断器

与其他熔断器相比，高速熔断器运行时相当热，因此在并联熔断器时熔断器之间的距离至关重要。建议在两个并联的熔断器之间保持 10mm 至 25mm 的间距。此外，当并联使用高速熔断器时，普遍使用汇流排安装，以降低内部熔断器元件上的机械应力。

并联高速熔断器时，汇流排的放置和电流方向是关键因素。图 37 所示为在汇流排中并联连接的熔断器的推荐布局。

将熔断器连接到汇流排应使得输入电流和输出电流方向不相反。当以反并联配置连接熔断器时（汇流排并联，但电流向相反方向移动），附加的汇流排电阻最终会加到最外面的熔断器上。由于涉及相当大的磁力，也可能使汇流排弯曲。

使用适当的双头螺栓尺寸并施加推荐的拧紧扭矩会确保正确的端接并有助于防止任何令人不快的操作。请参阅产品的数据表，了解双头螺栓尺寸和推荐扭矩。

Littelfuse 高速正方形主体样式熔断器自身具有可视指示，表示每个熔断器的状态。用于报警信号的外部指示器开关（微动开关）可用于任何一个或多个并联熔断器，表示并联熔断器的状态。

5.5 串联高速熔断器

通常不推荐采用两个高速熔断器的串联连接。然而，在设计用于处理大功率级别的功率转换器电路（例如：使用每个臂/腿的多个功率半导体器件的整流器电路）中，高速熔断器可以设计为串联配置。在这种情况下，所选熔断器的额定电压应等于系统额定电压。此外，为了防止令人不快的操作，线路侧熔断器的完全熔断 I^2t 值应小于所有单个臂/腿熔断器的总弧前 I^2t。

完全熔断 I^2t 线路熔断器 < **腿或臂熔断器的总弧前 I^2t**

6.0 安装准则

在设计功率半导体器件的电路保护时，正确安装高速熔断器至关重要。高速连接安装和维护不当造成的热量不平衡是在现场出现令人不快操作的主要原因。本指南中简要介绍了高速熔断器安装的最佳惯例。

导体：

连接高速熔断器通常首选铜导体。可以在电缆或汇流排结构中找到这些连接器。连接器之间的合适间距（符合所采用的本地电气规范的要求）也有推荐。

端接/连接：

建议使用熔断器数据表中提到的螺钉类型和尺寸。对于 PSR 系列正方形主体熔断器，不要使用螺栓端接，而应首选螺钉和螺母组件，以防止对内部熔断器元件造成任何损坏。

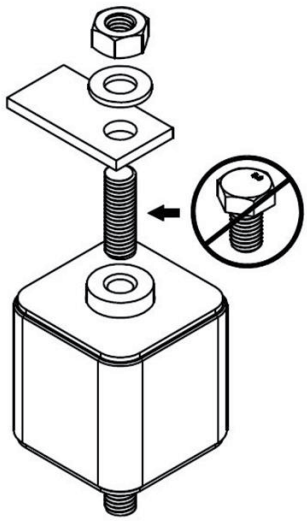


图 38：推荐的熔断器端接方式

拧紧扭矩:

建议使用熔断器和熔断器座数据表中列出的拧紧扭矩值。当施加拧紧扭矩和任何反作用力时，图 39 所示的一般建议惯例有助于确保正确的熔断器端接。

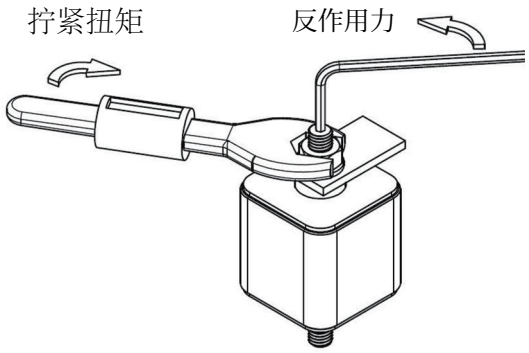


图 39: 推荐的建立连接的方式

安装对齐:

在拧紧期间应谨慎行事，以避免汇流排和熔断器端子之间出现气隙。这种气隙可能会导致对不准，从而可能导致潜在热应力或电弧放电问题。

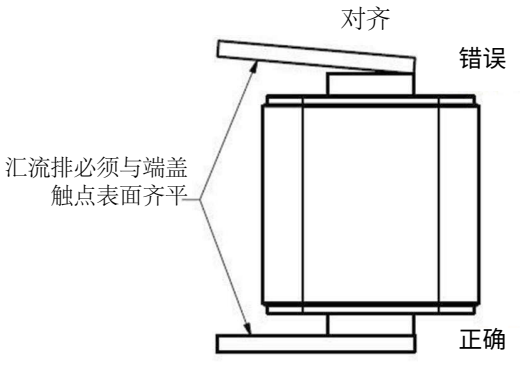


图 40 推荐的熔断器安装对齐

7.0 POWR-*SPEED*® 范围和选择指南

系列名称		电流	工作交流电压	工作直流电压	交流和直流分断范围	机构批准	应用									
							功率转换器	大功率逆变器	大功率整流器	直流母线	电源	电池管理系统	UPS	交流/直流驱动器	VFDs	加热器
PSR 系列		40-2000A	550-1300 Vac	500-1000Vdc	100kA 至 200kA - 150kA		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
L70QS 系列		35-800A	700 Vac	700 Vdc	200kA - 50kA	HF	•			•	•	•	•	•	•	•
L50QS 系列		35-800A	500 Vac	500 Vdc	200kA - 20kA	HF	•			•	•	•	•	•	•	•
L70S 系列		10-800A	700 Vac	650 Vdc	200kA - 20kA		•				•					•
L50S 系列		10-800A	500 Vac	450 Vdc	200kA - 20kA		•				•					•
L60S 和 KLC 系列		1-800A	600 Vac	无	200kA - 20kA		•				•					•
L25S 系列		1-800A	250 Vac	250 Vdc	200kA - 20kA		•				•	•		•		•
L15S 系列		1-1000A	150 Vac	150 Vdc	100kA - 20kA		•				•	•				•

8.0 附件

8.1 微动开关

Littelfuse MS 系列微动开关为 PSR 系列正方体主体熔断器提供远程指示功能。这些微动开关是三端器件（NO、NC 和 C），接触端子镀银。这些开关的最小工作电压和电流为 4 V和 1 mA。除电触点外，这些微动开关还有一个红色挡板，用于直观指示熔断器的状态。

可以使用标准螺钉直接将这些微动开关连接到熔断器端子上。熔断器熔断通过熔断器主体上的弹簧加载指示机构熔



图 41：带 NO-NC 触点的 MS 微动开关电路

断后，位开关上的端子 C 触点执行。指示状态的这种改变是永久性的，只能通过操作微动开关上的红色挡板进行手动复位才能复位。



图 42：用于 PSR 系列熔断器的 MS 系列微动开关

MS 系列微动开关适用于全部 PSR 系列正方形主体外壳尺寸。

- 零件编号 MS3H1000C 微动开关适用于 30、31、32 和 33 外壳尺寸
- 零件编号 MS7H1500C 微动开关适用于 70、71、72 和 73 外壳尺寸

这些微动开关的工作温度范围是 -60°C 至 +125°C，相对湿度为 95%。有关这些微动开关的更多信息，请参阅产品数据表。

8.2 双头螺栓模块

北美样式圆形主体熔断器（即 Littelfuse L70QS、L50QS、L25S 系列熔断器）广泛采用双头螺栓安装。Littelfuse LSCR 系列双头螺栓模块应该用于此类要求。双头螺栓模块直接安装到面板或设备底板上，导线端接到双头螺栓模块两端的螺钉上。



图 43: LSCR 系列双头螺栓模块

Littelfuse LSCR 系列模块有 700V 和 1000V 范围可供选择。应遵循 LSCR 系列数据表中的模块选择指南表，根据熔断器系列和额定电流选择合适的 LSCR 零件编号。将高速熔断器安装到这些双头螺栓模块时，建议采用数据表中提到的拧紧扭矩。

9.0 术语和定义

载流量 - 导体可以在使用条件下连续承载而不超过其温度额定值的电流（单位：安培）。它有时非正式地适用于开关或其他设备。以其额定电流来表示更适当。

额定电流 - 熔断器或其他设备上标明的电流额定值（单位：安培）。

安培平方秒(I^2t) - 描述由电流产生的热能的一种方式。当熔断器在其限流范围内分断电流时，该词通常表示为熔化、电弧放电或完全熔断 I^2t。

电弧放电故障 - 在故障点电弧放电造成的短路。电弧阻抗（电阻）有减小短路电流的趋势。电弧放电故障通过焊接故障元器件可能变成栓接故障。电弧放电故障可能是相间，也可能是相对地。

电弧放电 I^2t - 在电弧放电期间熔断器通过的热能。它等于均方根电弧放电电流平方乘以电弧放电时间。

电弧放电时间 - 熔片熔化直至过电流分断的时间（见图 1）。

电弧电压 –电弧电压是在电弧放电期间在过电流保护器件上发生的瞬态电压。它通常表示为峰值瞬时电压（V_{PEAK}或E_{PEAK}），很少作为均方根电压。

栓接故障 - 在故障点处没有电阻的短路。它是由两根导体或导体与地之间牢固的机械连接造成的。栓接故障的特点是没有电弧放电。栓接故障的示例有：放置在两个裸汇流排上面的重型扳手，或由于配线错误而导致的交叉相位状况。

熔断(I^2t) (也称为完全熔断 I^2t - 从过电流开始直到电流被完全分断期间流经过电流装置的I^2t。熔断 I^2t 是熔化 I^2t 和电弧放电I^2t 的总和。

熔断时间 - 从过电流状况开始到过电流分断点之间的时间。熔断时间是熔化时间和电弧放电时间的总和。

持续电流 - 预计持续三小时或以上的最大电流的电气负载。

限流（熔断器）- 如果用具有相当阻抗的实心导体替代该熔断器，其在限流范围内分断电流时，将故障电路中的电流减小到远远小于在相同电路中可获得的量级之熔断器。

限流范围 - 对于单独的过电流保护装置而言，限流范围从装置成为限流（阈值电流）的最小均方根对称电流值开始，延伸到该装置的最大分断能力。

接地故障 - 相导体与地面或设备框架之间的意外接触。当涉及到电气应用时，“接地”和“地”这两个词可以互换使用。

电感性负载 - 电感性负载通常是电机负载，其中电流波形滞后于电压波形。首次通电时，电感性负载吸收大量电流（涌入电流）。几个周期或几秒后，电流稳定到满载运行电流。

分断能力 (AIC) - 保护装置已经过测试并在标准测试条件下安全分断的最大可用对称均方根交流电流（对于直流熔断器为最大直流电流）。该装置必须分断所有可用的过电流直至其分断能力。此外，其通常被称为额定分断电流。

额定分断电流（IR、I.R.、AIR 或 A.I.R. - 在特定测试条件下，装置额定分断的最大均方根对称电流。分断能力和额定分断电流之间的差值在测试电路中用于确定额定电流。

熔化 I^2t - 在过电流发生后至熔片熔化之前通过熔断器的热能。它等于均方根电流平方乘以熔化时间（单位：秒）。对于不足 0.004 秒的时间，熔化 I^2t 趋近于给定熔断器的恒定值。

熔化时间 - 熔断器内部从过电流状况开始到瞬间电弧放电开始的时间间隔。

过电流 - 大于设备、导体或器件在规定条件下承载的额定电流的任何电流。

过载 - 局限于正常电流路径（例如，不是短路）的过电流，如果允许持续存在，则会导致对设备和/或配线造成损坏。

峰值允通电流 - 当可用电流在其限流范围内时，在完全熔断时间内流经过电流保护装置的最大瞬时电流。

功率因数 - 由交流电路消耗的实际电功率（用千瓦 (KW) 表示）与电流和电压的均方根值的乘积（用视在功率 (kVA) 表示）的比率。两者之间的差异是由电路中的电抗引起的，代表没有做任何有用功的功率。

恢复电压 - 操作后熔断器端子上测得的电压。

电阻性负载 - 电阻性负载或电阻性负载组是一种非电机负载，其中电流波形与其电压波形同相。它们通常用作热发生器。

RMS（均方根）电流 - 通过数学方法获得的给定交流波的有效电流值。交流电的均方根值等于产生相同热量或功率的直流电的值。均方根电流的数学表达式对应于交流波形的峰值瞬时值除以 2 的平方根。

半导体熔断器 - 专门设计用于保护功率半导体器件（如硅整流器、可控硅整流器、晶闸管、晶体管和类似元件）的熔断器。

短路 - 流出正常路径之外的电流。这是由于绝缘击穿或设备连接错误造成的。在短路情况下，电流绕过正常负载。电流取决于系统阻抗（交流电阻）而非负载阻抗。

阈值电流 - 熔断器限流时给定熔断器尺寸和类型的最小电流。这是可用均方根对称电流的最小值，它会使器件在第一个 ¼ 周期（90电角度）内开始开路，然后在 ½ 周期（180电角度）内完全切断电路。可以从熔断器的峰值允通图表确定近似阈值电流。

时间常数 - 直流电路中的电感限制电流上升的速率。电流在额定电压下达到最终值的 63% 所需的时间称为时间常数，通常用 L/R 表示，其中 L 是电感（单位：亨利），R 是电阻（单位：欧姆）。

虚拟弧前时间 - 虚拟弧前这个术语是几年前引入的，旨在帮助克服在将非限流阶段（小于 0.01 秒）中使用的术语与可用于限流阶段（> 0.01秒）的术语相关联时出现的难题。虚拟弧前时间表示为熔化能量（单位：A^2s）与均方根预期电流的平方的数学比率。

额定电压 - 熔断器设计工作的最大均方根交流电压和/或最大直流电压。例如，额定电压为 600 V 及以下的熔断器可以在低于该额定电压的任何电压下使用。

注意：没有关于在直流电路中使用交流熔断器的规定。直流电路中使用的熔断器必须具有直流额定值。

耐受额定值- 未受保护的电气元器件可以在规定时间内耐受而不会对其正常运行造成任何重大损害的最大电流。

免责声明

本《技术应用指南》旨在更好地了解高速熔断器、功率半导体器件及其在电路设计中的常见应用细节。所考虑的这些高速熔断器是电流敏感器件，设计用作电路中的故意薄弱环节。它们的功能是通过在电流过载条件下可靠工作，为功率半导体元器件或整个电路提供保护。

本指南中提及的应用准则和产品数据仅供技术参考。
熔断器参数和应用概念应得到很好的了解，以便为给定应用正确选择熔断器。强烈建议进行应用测试，而且引用测试应该用于验证电路/应用中的熔断器性能。

Littelfuse 产品仅设计用于适用的 Littelfuse 产品文件中明确规定的用途，而非其他用途（包括但不限于汽车、军事、航空航天、医疗、救生、维持生命或核设施应用、旨在通过手术植入体内的设备、或产品故障或缺乏理想操作可能导致人身伤害、死亡或财产损失的其他应用）。将产品用于适用的 Littelfuse 文件中未明确规定的任何用途均导致 Littelfuse 授予的质保失效。如在适用的 Littelfuse 文件中规定，对于在 Littelfuse 未明确指明的应用中使用产品所引起的任何索赔或损害，Littelfuse 不承担责任。Littelfuse 产品的销售和使用受 Littelfuse 销售条款和条件的制约，除非 Littelfuse 另有约定。

如需更多信息，请访问Littelfuse.com/Product-Disclaimer

Littelfuse 保留对产品设计、工艺、制造地点和文献资料进行更改的权利，恕不另行通知。如有其他问题，请联系 Littelfuse 技术服务组，电话：1-800-TEC-FUSE，电邮：techline@littelfuse.com。

如需更多信息，请访问
Littelfuse.com/POWR-SPEED

© 2018 Littelfuse, Inc.

表：PF783-MAN
修订版：2-B-061518