

电弧故障断路器检测技术及相关标准

时间：2014-01-06 09:37 来源：低压电器杂志 编辑：魏志娟

作者：周积刚 / 刘金琰上海电器科学研究院

摘要：本文在对电弧故障检测技术分析及相关标准研究的基础上，提出了终端电路用电弧故障断路器的关键检测技术、主要性能要求和试验方法。

关键词：电弧故障断路器 (AFDD) 检测技术 电压波形 电流波形标准 电弧故障动作特性 串联电弧故障试验 并联电弧故障试验 屏蔽试验误脱扣试验 碳化通道电缆试品 电弧发生器

The Detection Technique and Related Standard for Arc Fault Detection Device

ZHOU Jigang , LIU Jinyan

(Shanghai Electrical Apparatus Research Institute, Shanghai 200063, China)

Abstract: Based on research of the detection technique and related standard for Arc Fault Detection Device, the text puts forward the key detection technique, performance requirements and test method of Arc Fault Detection Device used in terminal circuit.

Key word: arc fault detection device(AFDD); detection technique; current waveform; voltage waveform; standard; operating characteristics; series arc fault tests; parallel arc fault tests; masking test; unwanted tripping test; preparation of the cable specimens; arc generator

1 概述

用电引起的电气火灾逐年上升，已成为引发火灾的最主要原因。据统计我国在 2011 年电气火灾在整个火灾事故中所占的比重已超过 34%，严重威胁着人民生命财产安全，已成为火灾防治的重点，必须采取技术措施从根本上抑制电气火灾的发生。

现有的过电流保护电器和剩余电流保护电器不能降低由于电弧故障引起的电气火灾危险，这类电气火灾事故约占整个电气火灾的 30% 左右，而且主要是发生在配电终端电路中。

电弧故障断路器，又称为电弧故障检测装置 (简称 AFDD，在美国称 AFCI) 是一种新颖的电弧故障保护电器，它能检测电气线路中的电弧故障，并在引发电气火灾以前切断电路，有效地防止终端电路的电弧故障引起的电气火灾。电弧故障断路器最早是由美国从 90 年代开始研究，并于 1999 年 2 月制订了 UL1699《电弧故障断路器》标准(第一版)。随着技术的改进，电弧故障断路器已在北美地区迅速得到普及和推广。AFDD 弥补了其他保护装置的不足，极大地提高了电气火灾的防护水平。针对我国电气火灾居高不下的消防形势，相关政府管理部门和企业已在研究相关的规程和产品，我国在终端电气线路中推广 AFDD 产品已势在必行，因此 AFDD 是一种具有广阔市场前景和发展潜力的产品。

2 电弧故障断路器的检测技术

2.1 故障电弧的特点

电弧是一种气体游离放电的现象，电弧产生的同时往往伴随着闪光、高温、高压和电流和电压波形的

变化，为此检测电弧的方法可采用检测电弧发出的弧光，红外热能，电磁波，以及异常的电压、电流波形等特征来识别电弧的存在。

在低压配电终端线路中的电弧故障可分为三类：串联电弧故障、并联电弧故障、接地电弧故障。串联故障产生于一根导体发生机械断裂，或接头处松开，或在插头接触不好等，故障电弧与负载是串联的。串联故障的电流受到负载限制，因而电流可能小于负载电流。并联电弧故障是一种短路电弧故障，例如把一束导体中二根导体绝缘表面机械损伤而相碰，故障电弧往往是与负载并联的。并联电弧电流决定于绝缘损坏程度和线路阻抗的大小，并且往往是间隙性的故障。因而，一般的过电流和剩余电流保护装置是不能检测串联和并联电弧故障的。接地电弧故障发生于带电导线接地，或绝缘损坏与接地的金属导体接触，故障电弧电流的大小与接地电阻大小有关。一般的电气保护装置有时也可能检测不到故障。

检测电弧故障首先要分析故障电弧的特性，发生电弧往往伴随着强烈的弧光、高温、噪声和电磁辐射等现象，同时电压和电流的波形也会发生变化，这些现象和特征可以作为故障电弧检测的基础。故障电弧的电流电压波形特征：由于每次过零时电弧点燃和熄弧过程，使得电流波形每次过零附近出现肩部平坦的电流波形，电压波形除在电弧点燃和熄弧处出现较高的峰值以外，其余部分近似矩形波。图1为电阻电感混合负载电弧故障电流电压波形，在阻性和感性负载时，由于电感的作用，在电压突变的地方电流的突变和平肩部更为明显。

电弧故障断路器是根据故障电弧的特点来检测，并及时排除电弧故障。但实际上在正常电气线路中，会存在大量正常电弧，例如开关电器操作产生的电弧、电动机电刷产生的电弧、弧焊机产生的电弧、插头插拔过程中产生的电弧等。此外，许多电子设备也会产生类似于故障电弧的电流波形和电压波形，例如由开关电源供电的计算机负载波形，也呈现类似于故障电弧平坦的肩部。因此，电弧故障断路器必需要能区别正常电弧和故障电弧，这样才能迅速、有效地提供保护，同时防止误动作的发生，这是电弧故障断路器的技术关键。

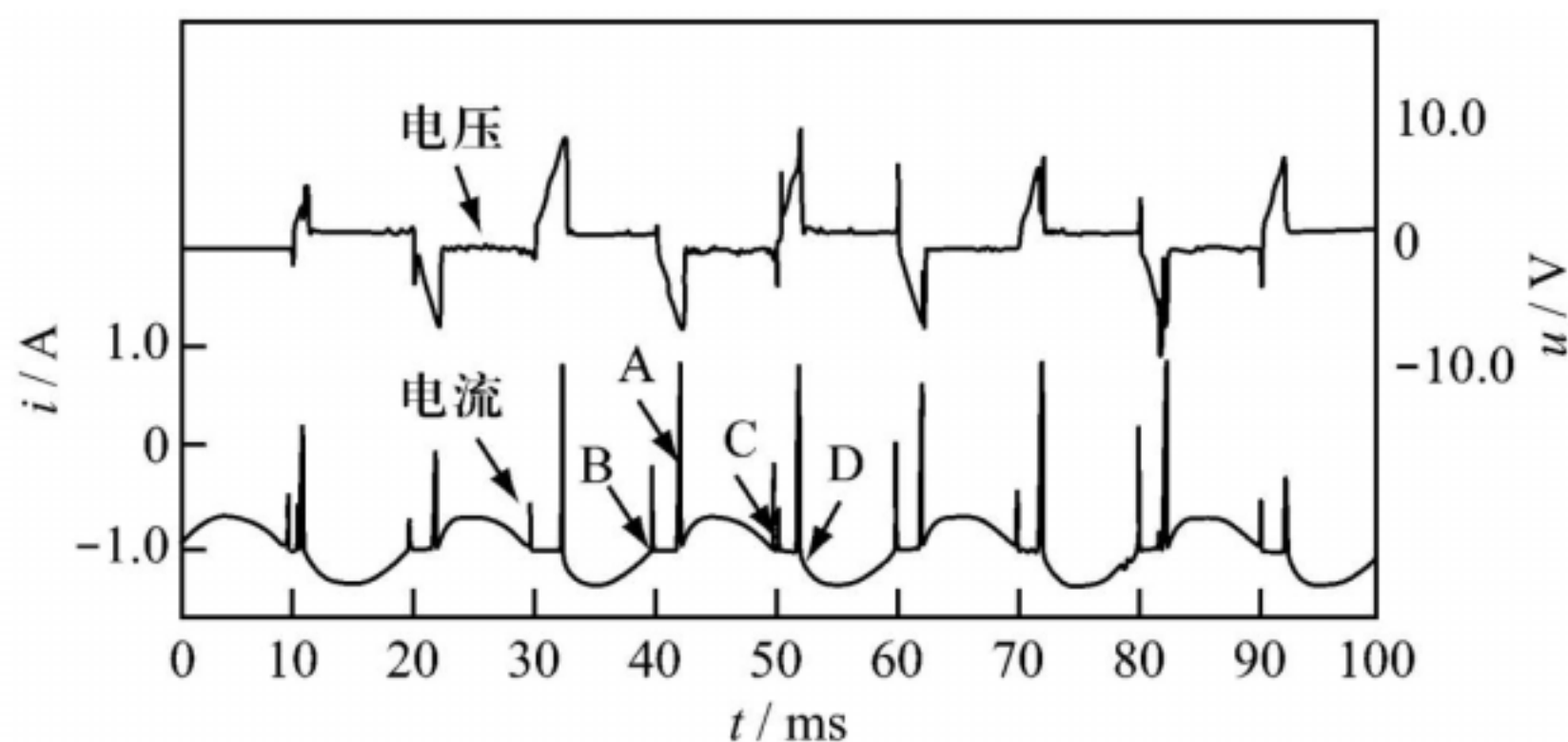


图1 电阻电感混合负载电弧故障的电流电压波形

2.2 故障电弧检测技术

终端电路用电弧故障断路器主要采用基于电压电流波形的电弧检测方法。在出现电弧故障时，电网中故障电压和故障电流的波形会呈现不同的特性。综上所述，故障电弧的电流电压波形具有以下特征：

- 1) 每个周期在电弧熄灭过零和重燃期间，电弧电流波形会出现两个电流短暂为零的“平肩部”；

2)故障电弧电压和电流的波形是不稳定的和随机的 ;

3)电压和电流的波形包含有高频噪声 ;

4)电弧电流 di/t 高于正常电流波形 ;

5)除电弧熄灭和重燃部分外,电弧电压波形近似于矩形。

因此,电弧故障断路的检测技术就是如何提取电弧波形的特征,并识别正常电弧和故障电弧的差异,确保AFDD正确动作。电弧故障检测方式,首先采用电流传感器检测电路中的电压或电流信号,将检测到的信号进行变换放大、滤波,经滤波器处理后的高频信号或低频信号,输入微处理器,由微处理器按预先设定的算法进行计算和判断,并和存贮器的数据进行对比,如判断为电弧故障,则发出脱扣信号,使电弧故障断路器分断。这种方式可以检测其下端电路和用电设备中发生的电弧故障,比较适合于在终端电路中使用。

2.3 基于波形检测的电弧故障断路器的工作原理

从国内外公司的研究成果来看,根据电弧特征的提取方式和数据处理方式不同,电弧故障断路器的主要工作原理如下:

(1)检测故障电弧典型频谱的电弧故障检测系统

图2是施耐德公司电弧故障检测系统工作原理框图,原理框图的左边表示电气装置,右边虚线框内的部分是电弧检测系统展开示意图。电弧故障检测系统安装在电气装置中,用以监视电气装置中的接地故障和电弧故障。

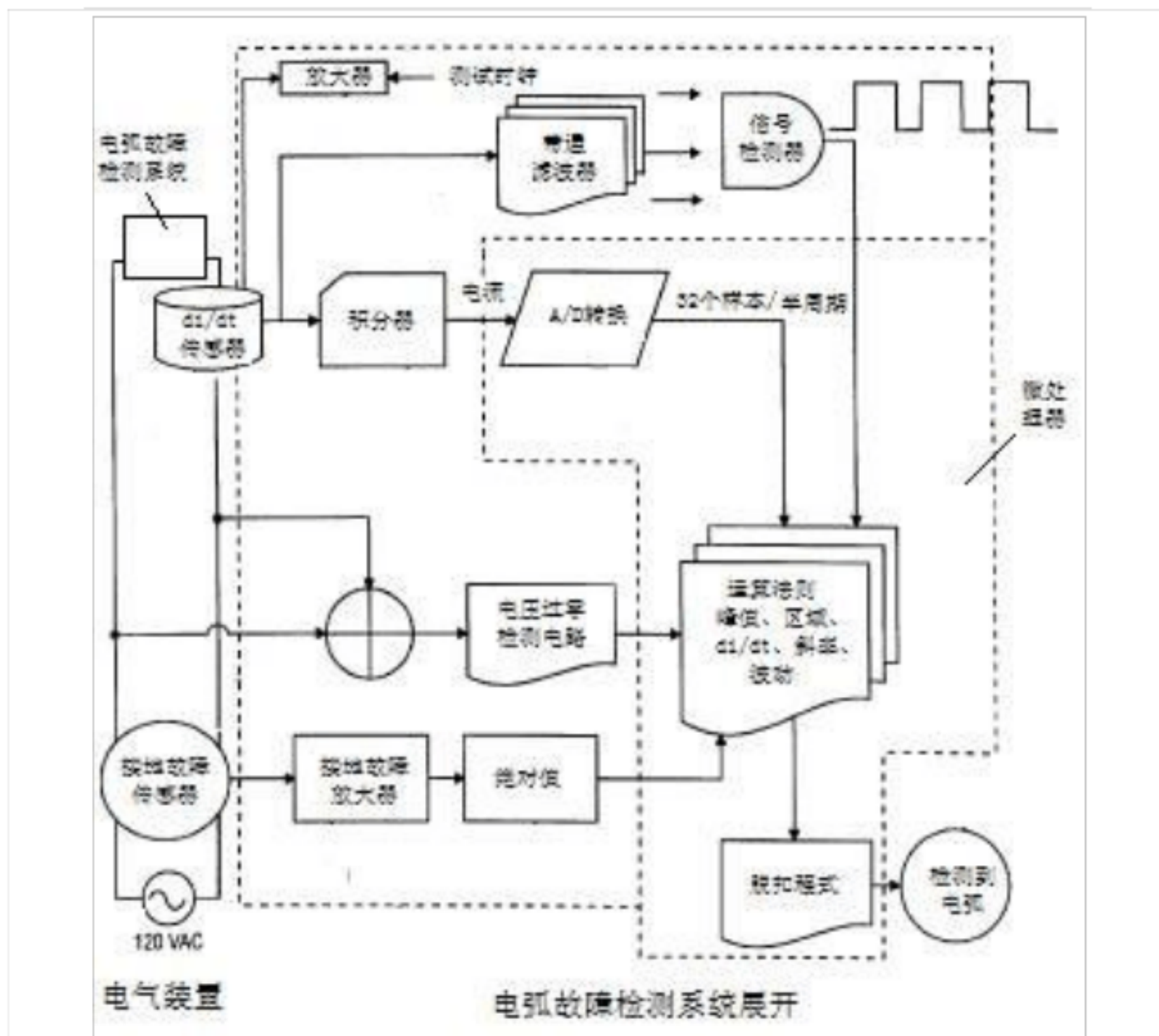


图2 施耐德公司电弧故障检测系统原理框图

电弧故障检测系统由 di/dt 传感器、带通滤波器和信号检测器（电弧故障检测电路）、积分器（电流测量电路）、电压过零检测电路、接地故障传感器、接地故障放大处理电路、微处理器（包括 A/D 转换和运算器）等组成。

di/dt 传感器用来检测电气装置中的电流变化率，传感器铁心由磁性材料制成，例如铁淦氧或导磁粉末模压制成，以便感应快速变化的磁通。传感器铁心的导磁率应适当减小，以便在较大的电弧电流通过时不会使铁心饱和，确保其能检测电弧。 di/dt 传感器二次回路输出的感应电压与一次回路电流的瞬时变化率成正比。调整传感器的参数使其输出的信号的范围和频谱，可将电弧从负载中区分出来。 di/dt 传感器的输出信号分二路，一路提供给由带通滤波器和信号检测器组成的电弧故障检测电路，另一路提供给测量电流的积分器。带通滤波器是一个宽频噪声检测器，由一个或几个带通滤波器组成。选择带通滤波器的频率范围，以便检测代表电弧故障典型频谱的频段噪声，带通滤波器将通过滤波器的频段信号传送给信号检测器，与基准电平相比较，如达到足够的电平，则输出一个脉冲。带通滤波器的信号送入一个与门，如果几个带通滤波器同时输出脉冲，则与门送出一个脉冲至微处理器，由微处理器计数并用于电弧检测运算。传感器的另一路信号送入积分电路测量电流，积分电路的输出与电路的交流电流成正比。积分器的输出信号由 A/D 转换器采样，A/D 转换至少输出一组 8 位字节的采样数据。采样电流被转换成电流峰值、电流区域、 di/dt 最大值等信号贮存于每半周期电压。

为防止频率漂移的影响，通过电压过零电路检测电压过零点，并通过内置定时器测量电压过零点之间

的时间，修正采样频率，确保每个周期的采样数恒定。

微处理器接收带通滤波器的脉冲信号，每半周期的电流峰值、电流区域、最大 di/dt 、电流波动等信号，根据预定的方式进行运算和判别，确定是否发生电弧故障。如确定发生电弧故障，发出脱扣指令使断路器断开电路。

(2)采用“三周期算法”判断的电弧故障检测系统

图3所示是德州仪器公司检测电弧故障设备的原理框图。检测电弧故障设备由电流传感器、输入感测电路、电弧感测电路、电源、脱扣电路处理单元和开关装置组成。电流传感器用以监视通过开关装置的电流，并检测电流中的高频分量提供给输入感测电路，输入感测电路对交流信号进行滤波和整流，并将经过整流的信号提供给电弧感测电路。电弧感知电路将有可能发生电弧的电压电平和数字信号提供给处理单元，随后在处理单元中测量电压电平，并使用一种或多种算法分析电压测量结果和数字信号，以确定该信号是电弧故障还是干扰负载产生的信号，如判定是电弧故障信号，触发脱扣电路，使开关装置断开被保护电路。

时间：2014-01-06 09:37 来源：低压电器杂志 编辑：魏志娟

图3 德州仪器公司检测电弧故障设备的原理框图

详细的电路结构如图 4 所示，电流传感器为互感器 TR1，将电流的高频分量从初级线圈 L1 耦合到 L2，TR1 为弱耦合互感器。感测电路由电容器 C1、电阻器 R1-R2 及二极管 D1-D6 组成，电流传感器的次级线圈 L2 连接在电容器 C1 与电阻 R2 之间，电容器 C1 对 L2 输出的 AC 信号进行高通滤波。电阻器 R1 和 R2 连接后接地，为 L2 提供接地基准。二极管 D1-D2 和 D4-D5 组成全波整流桥，在 S 点输出全波整流信号。D3-D6 和电弧感测电路的电容 C2 形成记录电路，使 S 点的输出电平与感测电路的输入成正比。电弧感测电路由电容器 C2、积分电容器 C3、电阻器 R3-R7、运算放大器 OPA 以及二极管 D7 组成。电容器 C2 和电阻器 R4 连接在电弧感测电路输入端 S 与地之间。运算放大器 OPA 与电阻 R5-R6 形成非反相放大器，电容器 C2 连接到运放的正向输入端，运放输出端连接二极管 D7、电阻 R7 和积分电容器 C3，C3 一端接地一端与微处理器的引脚 9 连接。电阻 R7 和电容器 C3，构成低通滤波器，以过滤高频噪声。电弧感测电路的作用是将 C2 的电压变化转换为一定宽度的响应有效 di/dt (" 电弧事件 ") 脉冲，电弧事件增加，C3 上的积分电压也增加。微处理器采用 MSP430F1122 或其他任何合适的微处理器，微处理器的引脚 9 在每个线电压半周期靠近电压过零处测量一次电容器 C3 上的电压 V_{C3} ，即积分电容器 C3 上所累积的电压和，并且在每次测量后将 C3 上的电压置零。微处理器将测量电压经过 A/D 转换贮存在存储器中。OPA 的输出直接连接到微处理器的引脚 13，向微处理器提供脉冲计数信号，微处理器使用内部计数器监视脉冲计数信号，以跟踪信号内发生的脉冲，微处理器贮存与测量电压和脉冲计数有关的数据，并使用一种或多种算法处理数据，以确定所述的电压 / 脉冲是电弧事件还是干扰负载。脱扣电路由电容器 C5-C7、电阻器 R11-R12、二极管 D9、可控硅 SCR1 组成。开关电路由整流桥 D12-D15、脱扣线圈、压敏电阻 MOV1 组成。电源电压经过脱扣线圈连接到整流桥，整流桥输出端经过二极管 D8 与脱扣电路的 SCR1 阳极连接。当微处理器检测到电弧故障时，在引脚 14 输出一个高电平，SCR1 导通，脱扣线圈通以电流，使开关装置脱扣。电源部分由 R13-R20、电容器 C8-C10、二极管 D10 和稳压管 D11 组成。稳压管 D11 经过电阻 R20 与微处理器引脚 2 (V_{CC} 正端) 连接，给微处理器提供电源。C8 接在 R16、R17 连接处地之间并向微处理器引脚 8 提供基准电压 (V_{RFF})，电容 C8 上电压与整流桥 D12-D15 成正比，即与电路的线电压成正比，因而微处理器通过 V_{RFF} 可监视电路的线电压，从而确定何时测量电容器 C3 的电压。

检测电弧故障的关键是如何处理检测到的信号，本原理图中是采用三周期算法 (TCA) 来减少误动作发生。三周期算法是：计算周期 1 的数值 ($V[n-1]$) 的减去周期 2 的数值 ($V[n]$)，并取绝对值，得到第一计算值；计算周期 3 的数值 ($V[n+1]$) 减去周期 2 的数值 ($V[n]$)，并取绝对值，得到第二计算值；计算周期 3 的数值 ($V[n+1]$) 减的去周期 1 的数值 ($V[n-1]$)，取绝对值，得到第三计算值，接着计算第一值加第二值减去第三值，并取绝对值，即 TCA 步骤如下式所示：

$$TCA = (|V[n] - V[n-1]| + |V[n+1] - V[n]| - |V[n+1] - V[n-1]|) \quad (1) \text{ 式}$$

TCA 计算的每个求和代表在各自采样周期内发生的电弧总数，如采样周期终点确定的求和超过预定的最大阈值，则认为检测到电弧故障，微处理器触发 SCR1，使开关装置断开负载的电源。

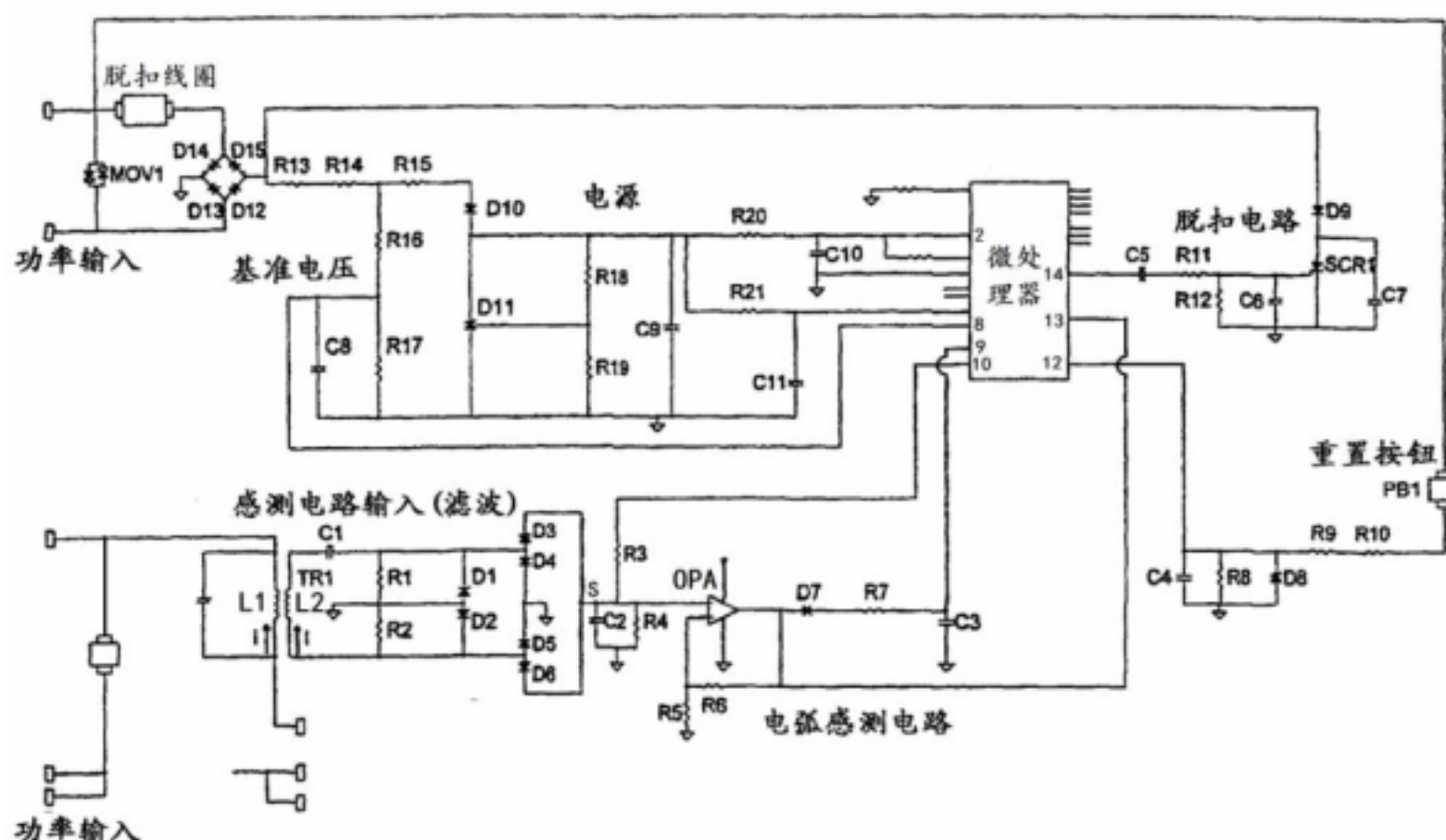


图4 德州仪器公司检测电弧故障设备的原理框图

从上述几种电弧故障检测方式可以看出，基于波形检测的检测原理的关键技术如下：

- 1) 采用电流互感器采集电弧电流的高频信号，尤其是电压过零区域电弧电流突变的高频信号，作为采集电弧电流的最主要依据，将高频信号送入微处理器进行处理和判断。因此，采集电弧电流的互感器一次回路只有一根相导线或中性线通过。互感器应具有一定的高频响应特性、低铁损、高饱和磁感应密度和较好的稳定性。
- 2) 采集电压信号，电弧的高频信号及变化状况作为判断和计算的依据之一，同时作为基准电压输入微处理器，用于采集、处理电流高频信号和确定电流电压相位的时间基准，采集信号贮存于微处理器，作为计算的依据。
- 3) 信号处理电路，信号处理电路采用微处理器和合适的软件进行处理。信号处理电路的关键是如何提取故障电弧的特征，将其从类似波形中区分开来。微处理器根据检测回路输入的电弧电流和电压波形的数据，例如电流和电压的峰值、 di/dt 、电弧电流变化趋势、电压与电流的相位角等特性数据，采用合适的算法进行计算，提取电弧电流和电压波形的特征，与贮存的负载特性进行比较，由此确定检测到的电弧是故障电弧还是正常电弧。目前，常用的算法有“三周期”算法，计算电弧电流变化的趋势；采用傅里叶分解来分析电弧电流的谐波成分；采用小波变换分析方法分析电流中周期性的奇异点来判断是否发生电弧故障等，也有学者提出可将非线性的混沌理论和分形理论运用到故障电弧的特征信息提取之中。相信随着对故障电弧算法和各种正常电弧负载研究的深入和数据的积累，采用电流电压波形检测故障电弧的精确度会越来越高，使电弧故障断路器的可靠性进一步提高。

3 电弧故障断路器相关标准

3.1 主要性能要求及技术指标

目前与电弧故障断路器相关的产品标准有：美国的 UL1699 《电弧故障断路器》、IEC 62606 :2013 《电弧故障检测装置的一般要求》（第一版），以及我国正在制订的国家标准《电弧故障保护电器（AFDD）的一般要求》等。这些标准根据 AFDD 的功能，提出了相应的性能要求和试验方法，主要的性能要求如下：

(1)电弧故障动作特性

电弧故障断路器应能检测接地电弧故障、并联电弧故障和串联电弧故障。其在相应电弧电流下的动作时间如表 1和表 2所示，表 1为小电弧电流下的最大分断时间，表 2为大电弧电流下的最大分断时间（用0.5 s内允许的最大电弧半波数来表示），大电弧电流可以由接地电弧故障或并联电弧故障产生。

表1 额定电压为 230V 的 AFDD 分断时间极限值

试验电弧电流 (a)	3A	5A	10A	16A	32A	63A
最大分断时间	1s	0.5s	0.25s	0.15s	0.12s	0.12s

(a) 试验电流是试验电路中发生燃弧前的预期电流。

表2 额定电压 230V 的 AFDD 在 0.5s 内允许的最大电弧半波数

试验电弧电流 (a)	75A	100A	150A	200A	300A	500A
N (b)	12	10	8	8	8	8

(a) 试验电流是试验电路中发生燃弧前的预期电流。
(b) N 是额定频率下的半波数。

(2)电弧故障断路器在负载侧连接各种电气器具时应正确动作

在电弧故障断路器的负载侧连接各种负载时，例如，电子式开关电源、真空吸尘器、电子式调光器、荧光灯等类似故障电弧的负载时，电弧故障断路器不会产生误动作，并不会因这些负载的屏蔽作用而失去判别能力，应能继续检测电弧故障。

(3)电弧故障断路器应具有能检查电弧检测电路的试验装置

电弧故障断路器应具有手动触发或自动触发或两种兼有的检查电弧检测电路的试验功能。手动试验时，电弧故障断路器应脱扣。自检试验功能应每次接通时执行，并且检测间隔不应超过一天。自检过程中，进行试验时不要求断开触头。

在试验功能执行过程中，电气装置的保护导体不应带电。

3.2 主要的试验方法

与电弧故障检测有关的试验有：串联电弧故障试验、并联电弧故障试验、屏蔽试验和误脱扣试验等。

3.2.1 碳化通道电缆试品制备和电弧发生器

在电弧故障检测时通常采用具有碳化通道的电缆或电弧发生器来产生电弧，具体的制作方式如下：

(1)碳化通道电缆试品制备

将两根截面积为 1.5mm² 的导线紧密地捆绑在一起（如用胶带），应使用平行导线电缆。可采用符合 GB/T 5023.1 附录 A 的60227 IEC41 分类的扁形铜皮软线或其他类似的导线。

电缆试品按下列方式准备：

a) 电缆截成最小长度为 200mm，并在电缆试品两端 25mm 处将其分成单股导线；

b) 从电缆一端将两根导线间的绝缘层切开 50mm，切割深度应能露出导线而没有切断任何线丝；

c) 绝缘切口用黑色的 PVC 电气绝缘带包裹两层，然后再在外面用玻璃纤维带包裹两层；

d) 在电缆上绝缘切口的另一端将导线的绝缘剥开约 12mm，以连接试验电路。

然后对电缆试品进行预处理，以便在两根导线之间的绝缘上产生碳化导电通道：

a) 电缆试品连接一个能提供 30mA 短路电流和至少 7kV 开路电压的电源，通电约 10s，或者至停止冒烟；

b) 电缆试品连接一个能提供 300mA 短路电流的电路，电压至少为 2kV 或足以使电流流过。电路通电约 1 分钟，或者至停止冒烟。

如果与碳化路径串联的一个 100W/220V 的白炽灯或等效阻值，在 220V 时能开始发光，则认为已形成了碳化路径。

(2) 电弧发生器

电弧发生器由一个固定电极和一个移动电极构成，其结构图如图 5 所示。

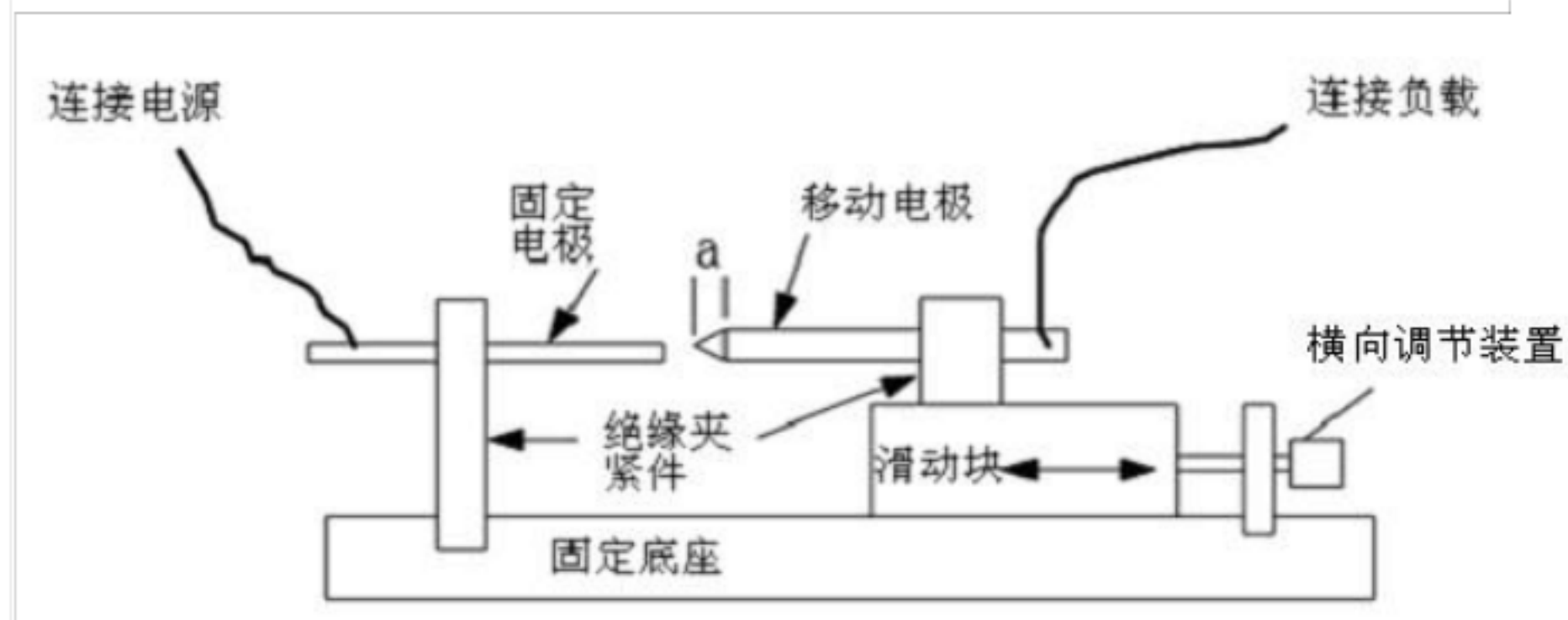


图5 电弧发生器

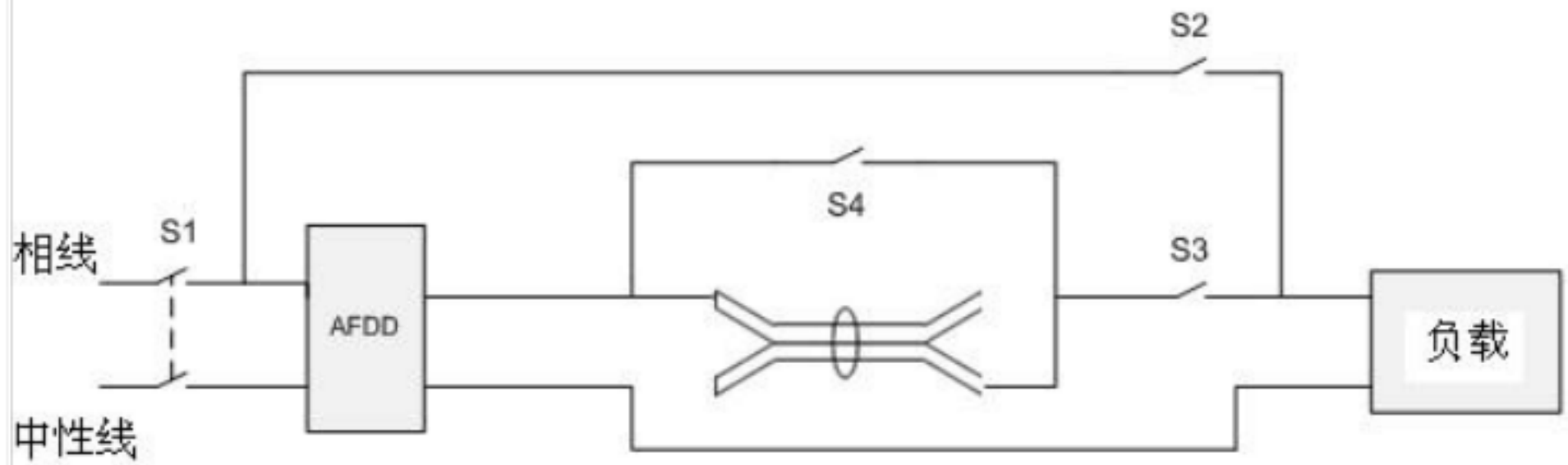
一个电极为直径 6mm 的碳-石墨棒，另一个电极为铜棒。一个或两个电极的燃弧端可制成尖端，如图所示，“a”的尺寸约为 $17 \pm 7.5\text{mm}$ 。

当接入电路中时，两个电极分开至一个合适的距离，应在电极间产生稳定的燃弧。

3.2.2 串联电弧故障试验

串联电弧故障试验电路如图 6 所示，将电缆试品和 AFDD 串联进行试验。每次试验时都应使用新的电缆试品。试验应在 AFDD 的额定电压及表 1 规定的每个电弧电流等级下进行试验，AFDD 应在表 1 对试验的电弧电流规定的时间内断开电弧故障。

图6 串联电弧故障试验电路图



串联电弧故障检测试验的方式分以下几种：

- (1) 验证电路中突然出现串联电弧故障时的正确动作；
- (2) 验证接入带串联电弧故障负载的正确动作；
- (3) 验证闭合串联电弧故障时的正确动作；
- (4) 极限温度下的试验。

极限温度下的试验：AFDD 依次在下列条件下，进行本文 3.2.2 中(1)的试验：a) 周围温度：-5℃，仅在表 1 最小电流值和 0.85 倍额定电压下进行；b) 周围温度：+40℃ AFDD 先在合适电压下通以额定电流至热稳定状态。仅在 AFDD 额定电流和 1.1 倍额定电压下试验。达到稳态之后，断开负载电流，并立即进行脱扣试验。

3.2.3 并联电弧故障试验

- (1) 验证限流并联电弧时的正确动作

按表 2 的规定，当 0.5s 内电弧半波数量达到表中的要求时，AFDD 应能断开电弧故障。

一个电弧半波是指 10ms(额定频率 50Hz) 期间产生的所有电流波形。在此期间可能部分时间但不是所有时间均有电流流过。一个完整正弦半波电流不可视为一个电弧半波。

在故障电流为 75A 和 100A 的情况下进行试验，试验电路图按图 7。

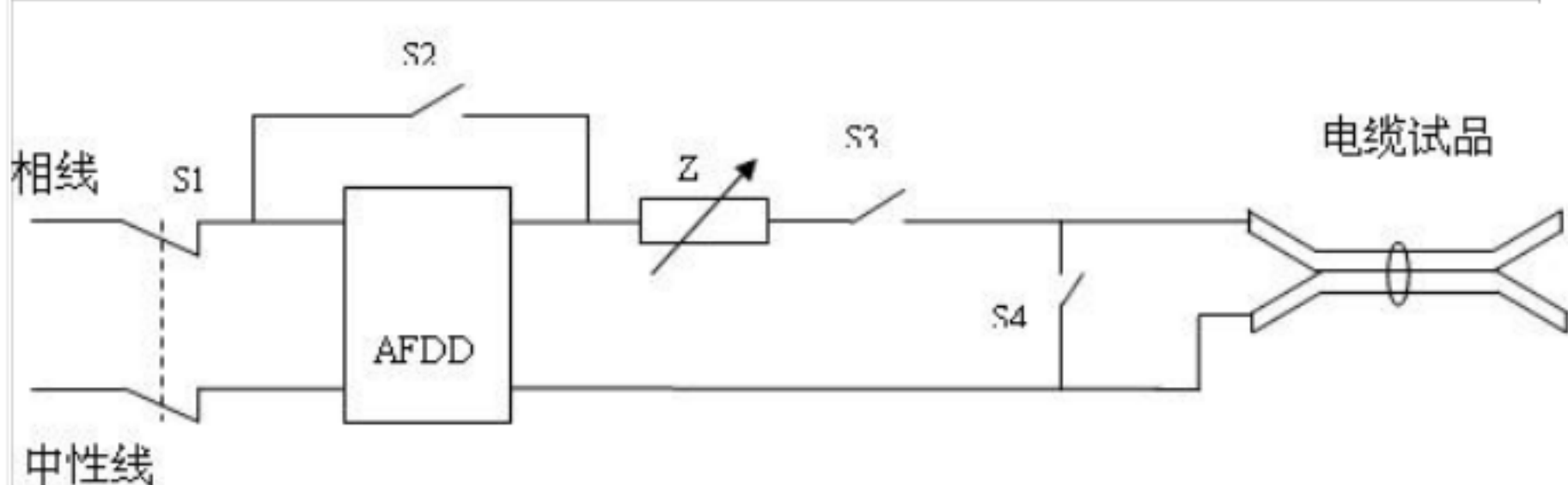


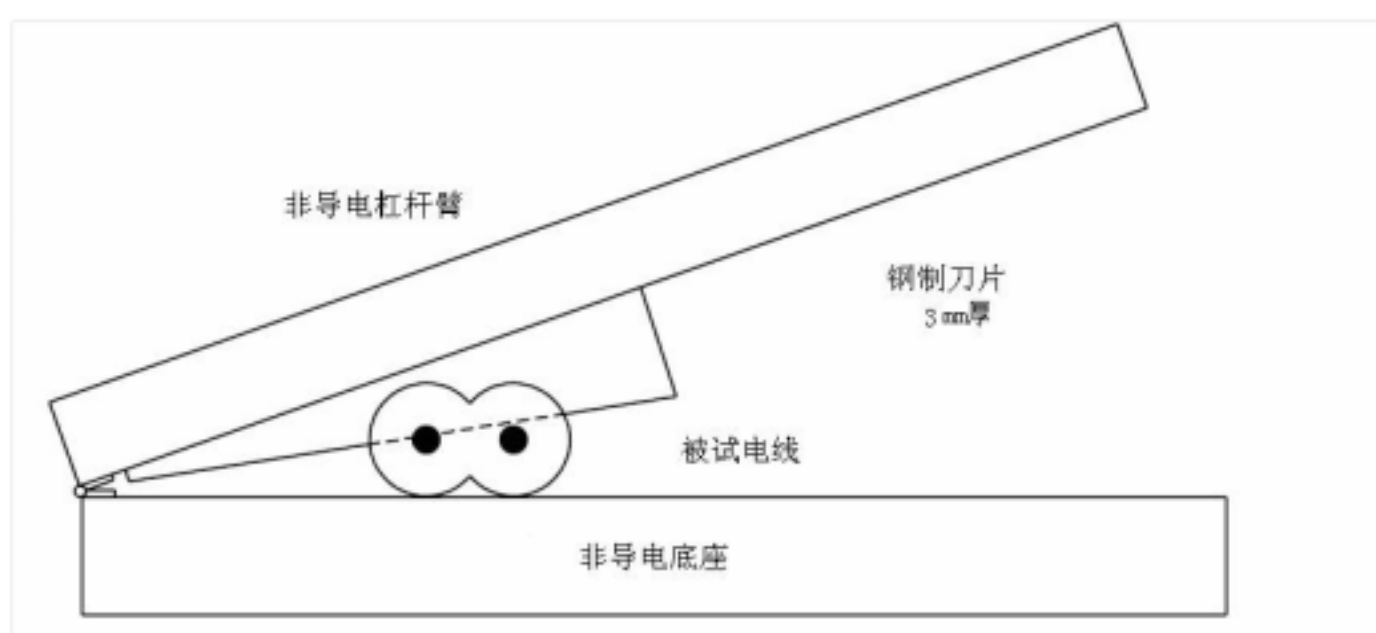
图7 并联电弧故障试验电路

如果燃弧半波在 0.5s 内达到表 2 规定的数量，AFDD 应断开电弧故障。如果燃弧少于表 2 规定的半波数且 AFDD 没有脱扣，则用新的电缆试品重复进行试验。

(2) 验证切割电缆并联电弧试验时的正确动作

试验电路图仍采用图 7 的试验电路图，但图中的电缆试验品用图 8 切割电缆试验装置（或采用等效的装置）替代。

图8 切割电缆试验装置



钢制刀片厚度应为 3mm，外形尺寸约为 32mm × 140mm。刀片应固定在杠杆臂上以保持一定的切割角来达到效果。试验时，刀片应定位，使其与第一根导线可靠接触，而与另外一根导线产生电弧接触。

被试电缆样品应为常用的两根导线并紧密地扎在一起（如用胶带），其截面积按表 4 的规定。样品最大长度应为 1.2m，且应按图 8 所示置于刀片下面。

表4 对应于额定电流的试验铜导体

额定电流 I_n A	$I_n \leq 6$	$6 < I_n \leq 13$	$13 < I_n \leq 20$	$20 < I_n \leq 25$	$25 < I_n \leq 32$	$32 < I_n \leq 50$	$50 < I_n \leq 63$
S mm ²	1	1.5	2.5	4	6	10	16

试验应在 AFDD 的额定电压和表 2 的预期电弧电流下进行，通过阻抗 Z 调整试验电弧电流。在每个电流等级下采用三个样品进行试验。每个电缆试品应仅用于一次试验。

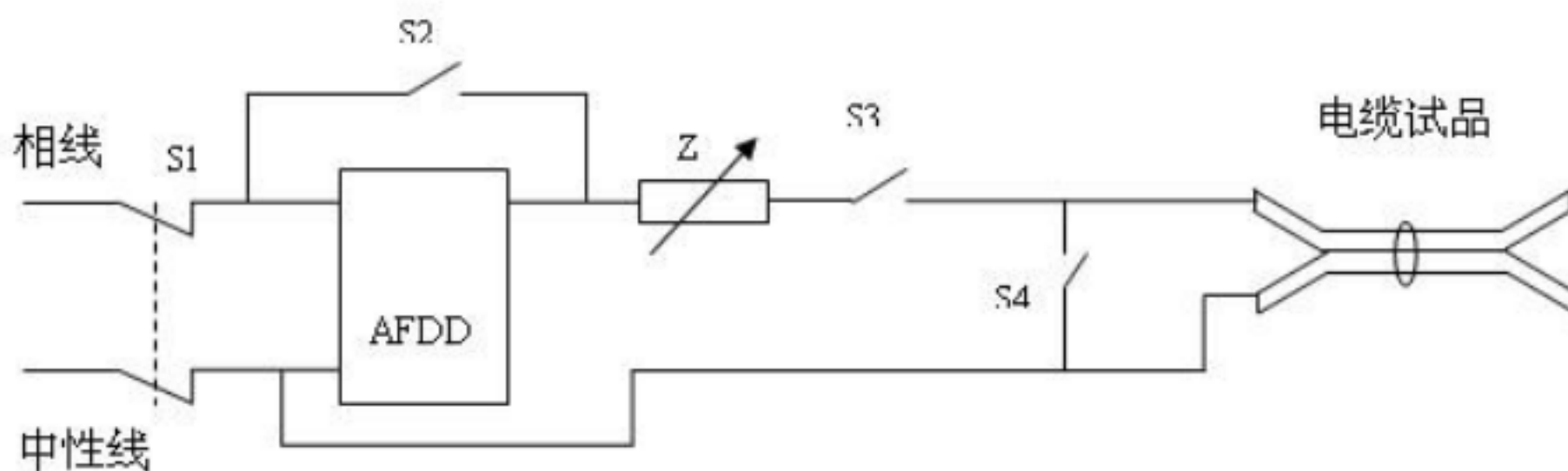
如果燃弧半波在 0.5s 内达到表 2 规定的数量，AFDD 应断开电弧故障。如果燃弧少于表中规定的半波数且 AFDD 没有脱扣，则用新的电缆试品重新进行试验。

(3) 验证接地电弧故障时的正确动作

在 5A 和 75A 的电流下进行本文 3.2.3 中(1)的试验，但以产生接地电弧故障的方式，试验电路见图 9。按照表 1 中 5A 和表 2 中 75A 的规定时间，AFDD 应断开。如果电弧故障在 0.5s 内出现表 2 规定的半波数，

AFDD 应断开电弧故障。如果燃弧少于表 2 中规定的半波数且 AFDD 没有脱扣，则用新的电缆试品重新进行试验。

图9 验证对地并联电弧故障试验电路



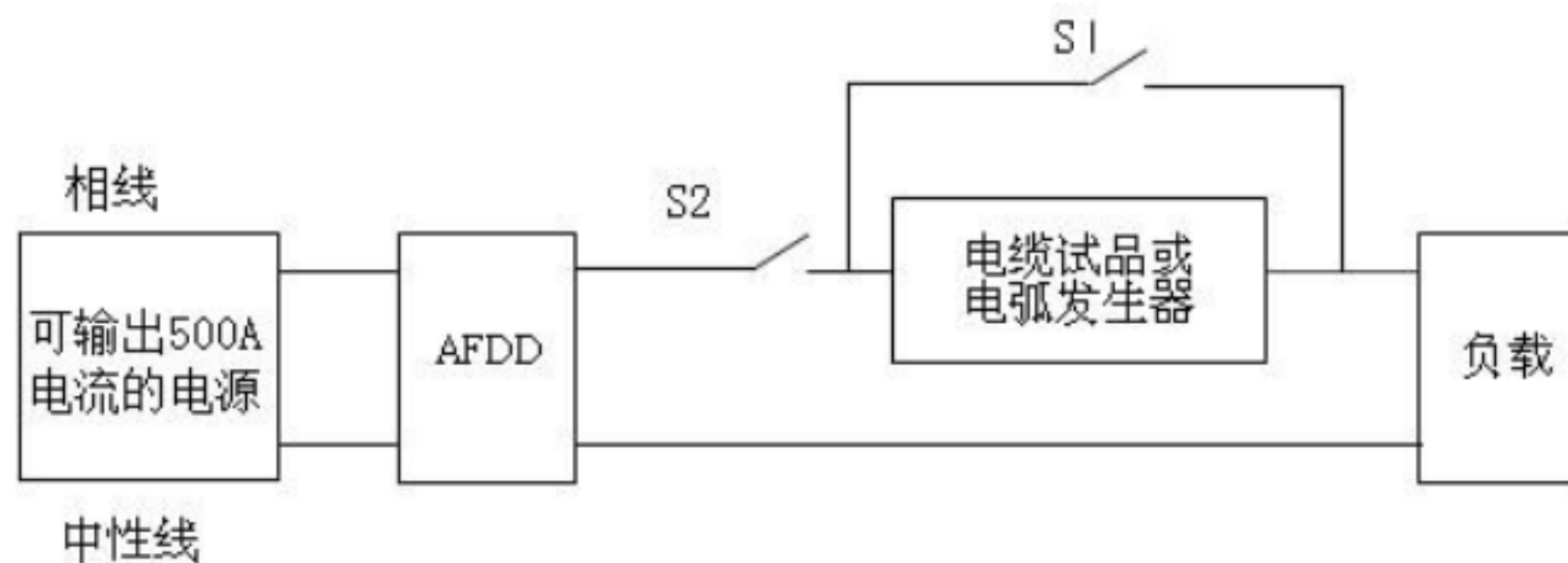
3.2.4 屏蔽试验

屏蔽试验是用来检验电弧故障断路器在各种类似电弧负载的屏蔽下仍能正确地检测电弧故障。本试验应在下列不同的抑制配置下检查 AFDD 的正确动作。屏蔽试验以 3.2.2 中(1)的试验方法为基础，可用碳化电缆试品来产生电弧故障，也可用电弧发生器来产生电弧。当采用电弧发生器时，动作时间为表 1 规定值的 2.5 倍。

(1) 抑制性负载屏蔽试验

第一组试验在不带抑制性负载的情况下进行。AFDD 和电弧发生器或电缆试品按图 10 接入电路，电流由一个阻性负载来调节。试验时 S1 断开，试验电压应是 AFDD 的额定电压，对额定电压为 230V 的 AFDD，在 3A 电流下进行试验，每个 AFDD 在应测试三次。

图10 屏蔽试验电路（抑制性和干扰性负载）



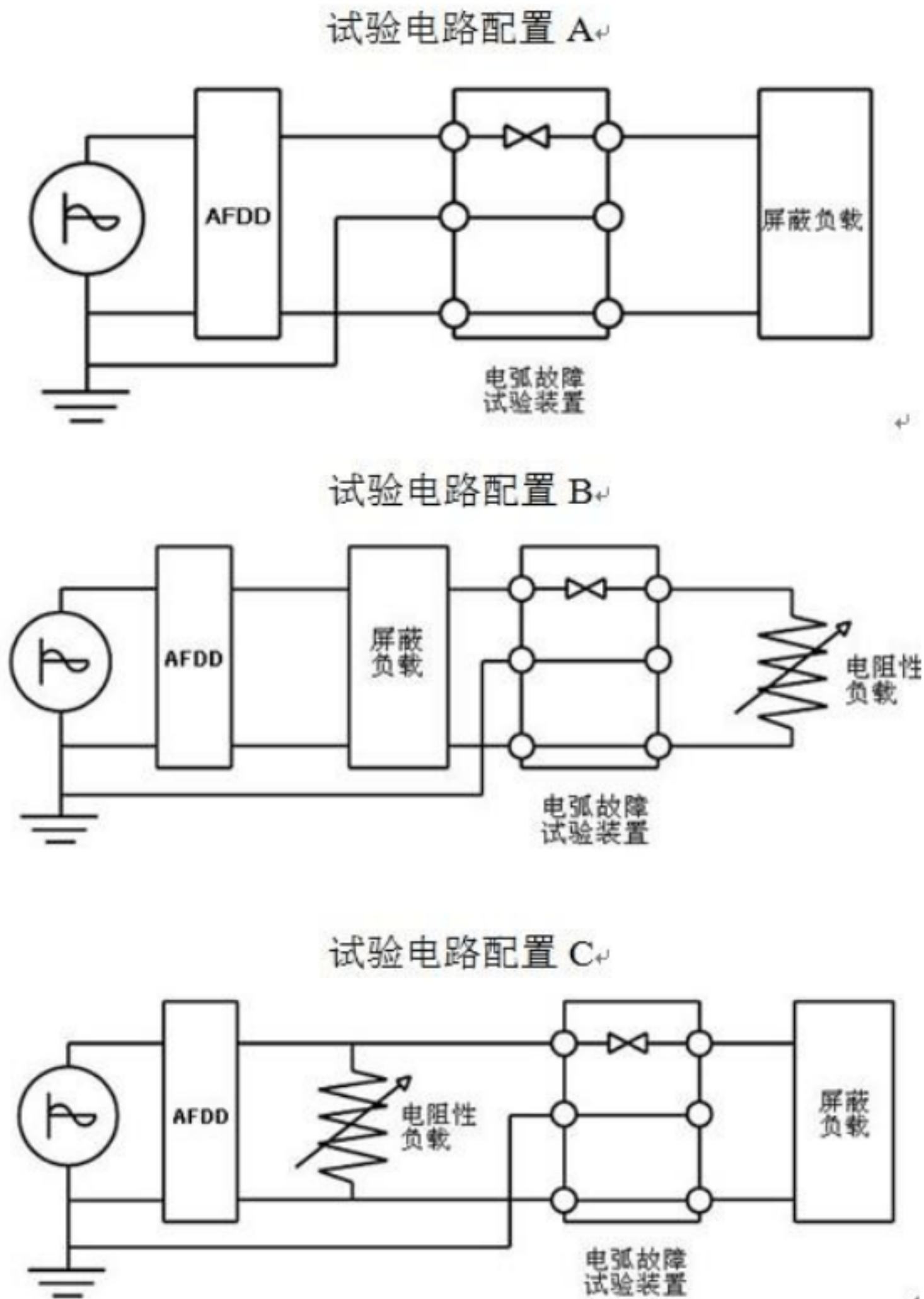


图11 屏蔽试验的试验配置

第二组试验在施加抑制性负载的情况下进行，采用同样的阻性负载。 AFDD、阻性负载 (如果有时)和电弧发生器或电缆试品接入图 11所示的每种电路配置。 AFDD 应在下述每种屏蔽负载下进行试验：

- a) 起动和运行一个带通用电动机的真空吸尘器，对 230V 的 AFDD ，其满载额定电流为 5.4-6A 。
- b) 电子式开关电源 (或开关电源组)，在额定电压 230V 下总负载电流至少为 2.5A ，最小总谐波畸变 (THD) 为100% ，单独 3次谐波最小畸变率为 75% ， 5次谐波最小畸变率为 50% ， 7次谐波最小畸变为 25% 。接通开关电源 (或开关电源组)。
- c) 额定电压 230V 下，最大起动电流峰值为 $65A \pm 10\%$ 的电容起动电动机 (带载起动 (在压缩机气缸无任何气压条件下操作)并运行。

d) 对 230V 的 AFDD , 用一个带滤波线圈的 600W 电子灯光调节器 (晶闸管型)控制 600W 钨灯负载 (由 2个 150W 灯泡和 3个 100W 灯泡组成) , 调节器预先分别设定至满载、导通角 60 °、 90 °、 120 ° 以及刚使灯点亮的最小设定值 , 接通调节器。

e) 2 个 40W 荧光灯外加一个 5A 的阻性负载。

f) 总功率至少为 300W 、由电子变压器供电的 12V 卤素灯 , 再加上一个 5A 的阻性负载。

g) 手持式电动工具 , 例如功率至少为 600W 的电钻。

每个屏蔽负载在每种配置下应进行了三次试验 , AFDD 应在表 1 规定的时间内断开电路。对图 11 中 A 和 C 的配置 , 当屏蔽负载的工作电流小于 3A 时 , 可不进行试验。

(2) EMI 滤波器屏蔽试验

AFDD 安装在图 11 所示的配置 B 的电路中。对于额定电压为 230V 的 AFDD , 应采用 3A 的负载电流进行电弧试验。当采用碳化电缆试品时 , AFDD 应在表 1 规定的时间内断开电弧故障 ; 当采用电弧发生器时 , AFDD 应在 2.5 倍表 1 规定时间内断开电弧故障。 EMI 滤波器的结构如下 :

a) 滤波器 1 : 安装 2 个 0.22 μF 的 EMI 滤波器。每个滤波器应安装在两根长 15m 、 2.5mm² 的阻性负载电缆的一端。滤波器应位于大约长 2.0m 、 1.5mm² 的软电缆的末端。引燃电弧的位置如图 12 所示。

b) 滤波器 2 : 在长 15m 、 2.5mm² 电缆的末端安装图 14 所示的 EMI 滤波器 , 滤波器应位于长 2m 、 1.5mm² 的软线的末端。 AFDD 及引燃电弧的位置如图 13 所示。

屏蔽试验电缆可采用 GB/T 5023.1 附录 A 的 60227 IEC41 或 60227 IEC02 分类的导线。

L1、 L2— 6.36 mH; L3 — 0.036 mH; L4 、 L5— 1.47 mH; C1 — 1000 nF; C2 — 0.27 μF ; C3、 C4 、 C5、 C6— 0.002 μF ; R— 330 kW

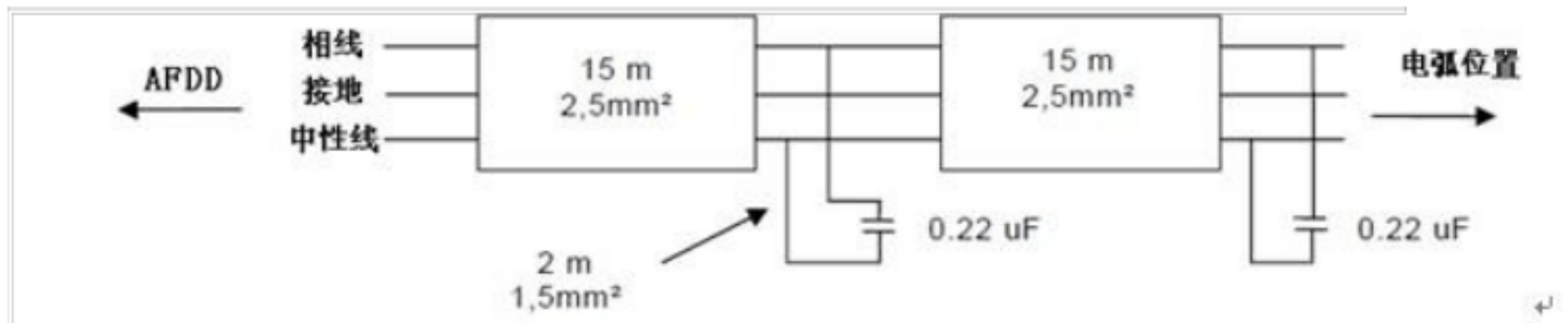


图12 滤波器1 屏蔽试验

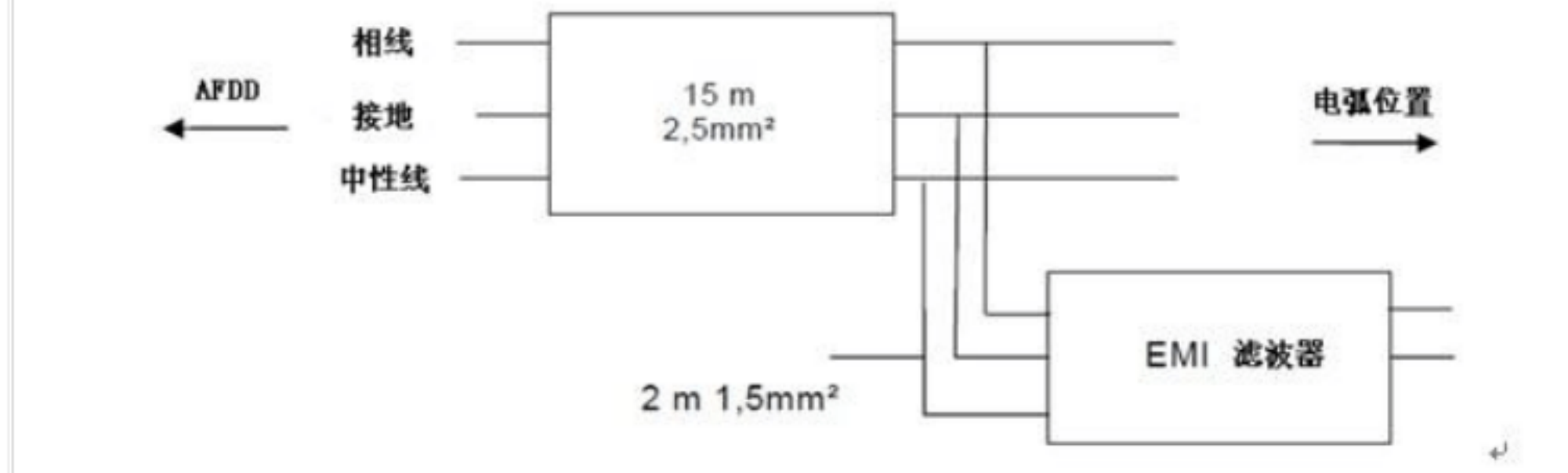


图13 滤波器2 屏蔽试验

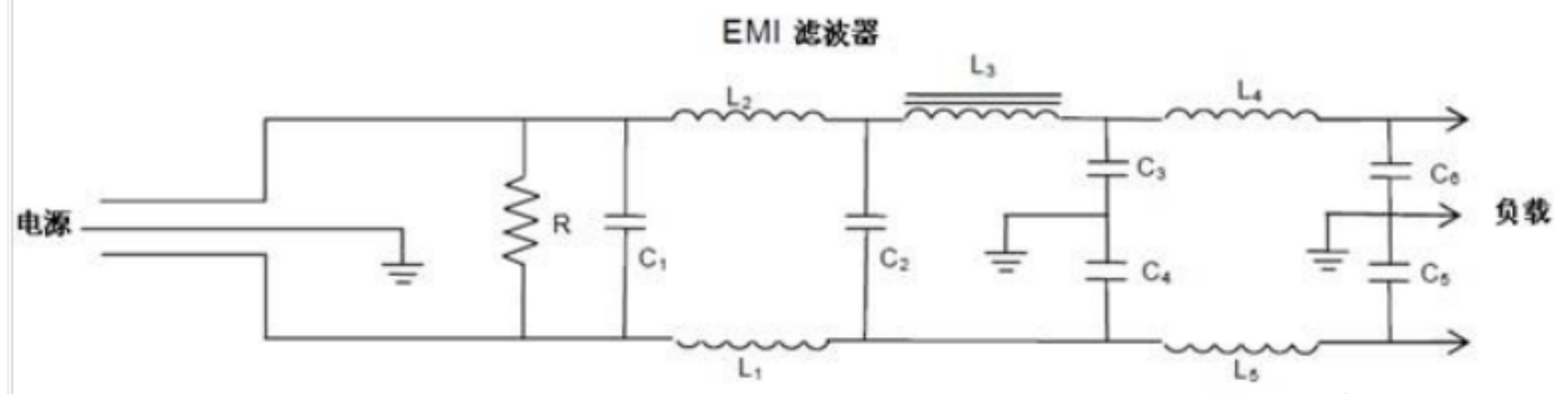


图14 试验电路图 14中的滤波器的结构

(3) 线路阻抗的屏蔽试验

AFDD 按预期要求接入分支线路，在下述线路阻抗条件下， AFDD 应按表 1规定的分断时间动作。

分支线路由长 30m、2.5mm² 的铠装电缆（带钢制套管的 2根导线）组成。额定电压为 240V 的 AFDD，电弧故障应与 3A 的负载串联，如图 15 所示。

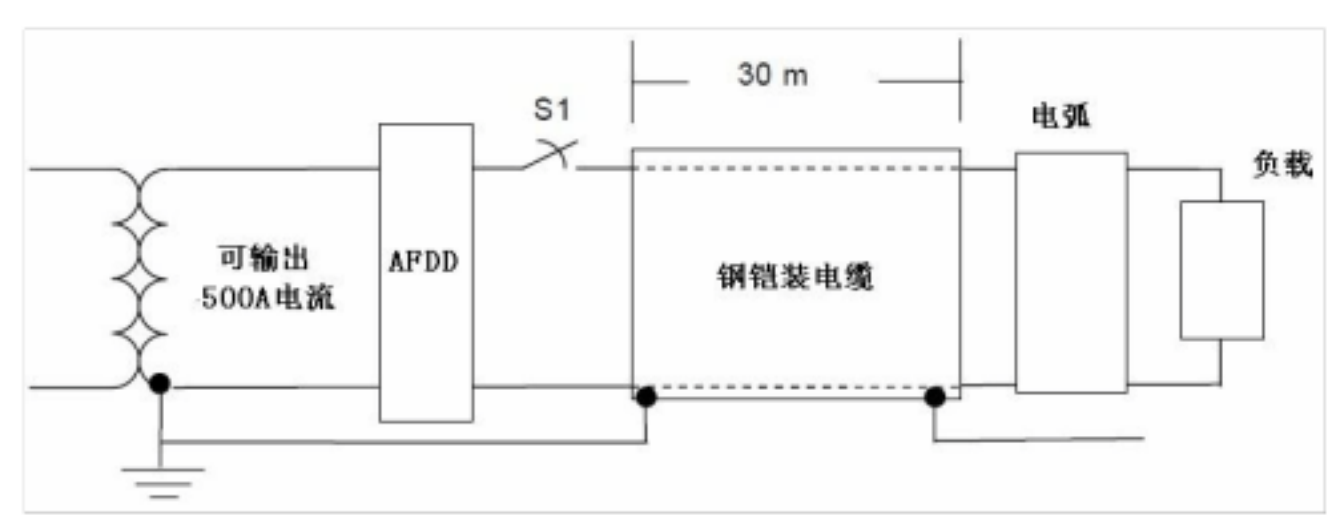


图15 线路阻抗的屏蔽试验电路图

3.2.5 误脱扣试验

(1) 串扰试验

两个分支电路由同样的相线和中线供电，如图 16 所示，安装的尽可能靠近。一个带 AFDD 保护，另一个不带 AFDD 保护（但是带传统的过电流保护），两个电路中连接的都是 5A 的阻性负载。仅不带 AFDD 保护的电路中由电弧发生器产生电弧，按 3.2.2 中 (3) 的试验条件进行试验，电弧应持续 0.5s；另一路中的 AFDD 不应脱扣。

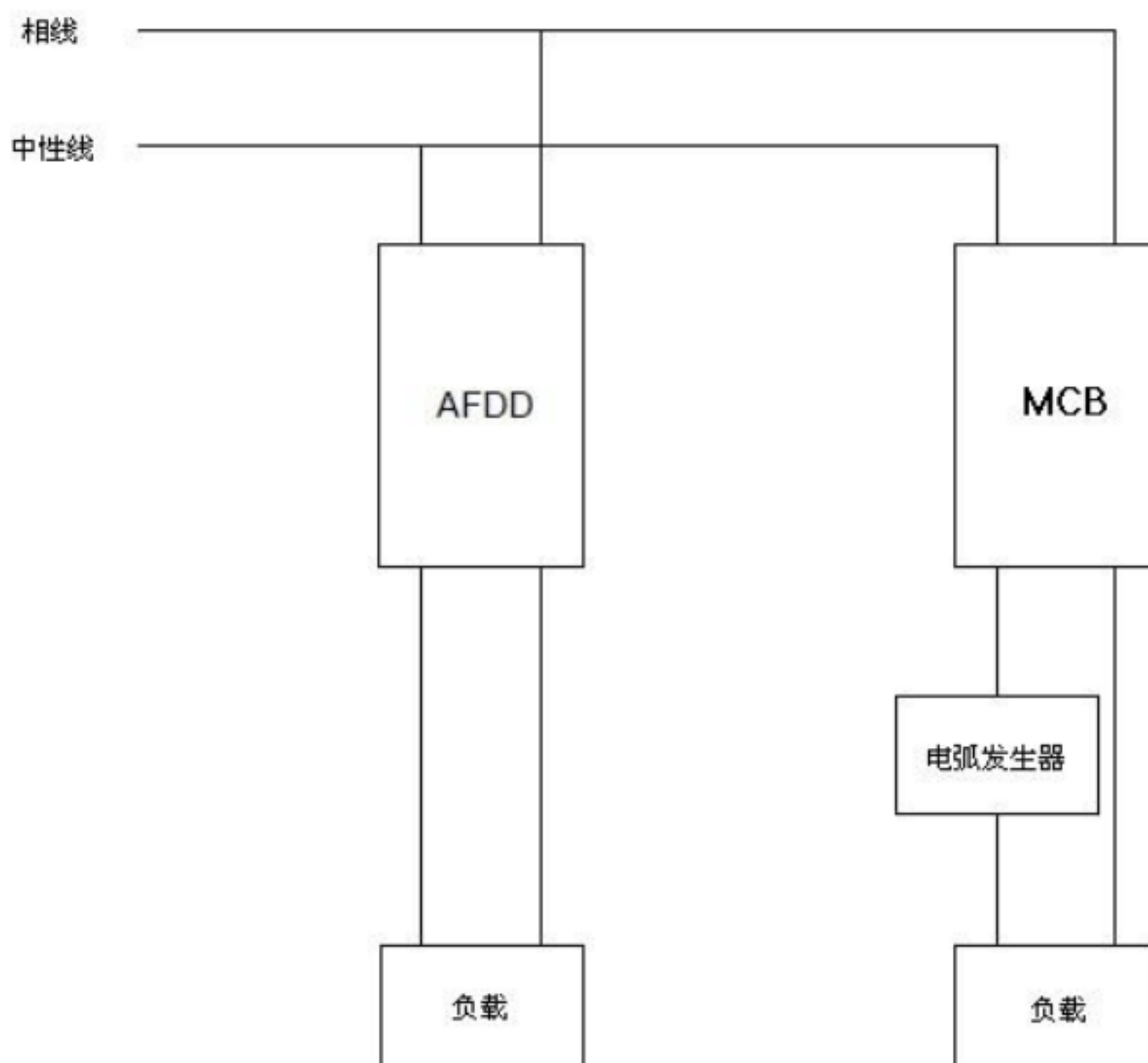


图 16 串扰试验电路图

(3) 带各种干扰负载试验

AFDD 按 3.2.4 中项 (1) 的方法，用项 a) 至项 g) 的干扰负载进行试验，但不使用图 10 中所示的电弧发生器（图中的开关 S1 闭合）。

手持式电动工具应在试验前运转 24 h。负载通电至少 15 s，至少应进行 10 次启动 / 停止操作。

在试验过程中，AFDD 不应脱扣。

4 电弧故障断路器发展前景

电弧故障断路器作为一种新型的电气火灾和安全保护电器，其电弧故障保护功能是其其他保护电器不可替代的。电弧故障断路器的问世，将补充过电流保护装置和剩余电流保护装置的不足，与现有的过电流保护装置和剩余电流保护装置构成完善的电气火灾保护系统，在电气火灾防护中发挥巨大的作用。因此，美国自上世纪九十年代发明电弧故障断路器以来，不断地在技术上取得突破，美国和加拿大等北美国家通过电气规程的制订，电弧故障断路器迅速地得到了推广和普及，至 2009 年底在北美地区已安装了 3500 万台，有效地减少了电气火灾的发生。

2009 年 5 月 1 日我国新修订的《消防法》已正式实施，其中特别强调：国家鼓励、支持消防科学研究和技术创新，推广使用先进的消防和应急救援技术、设备。无疑对新颖的电气火灾防护电器—电弧故障断路器的研究和应用起着强大的推动作用。目前，公安部沈阳消防研究所等国家消防管理部门正在制订《民用建筑电气防火设计规范》等技术规程，在人口密集、或容易发生电气火灾的场所强制推广电弧故障保护装置的使用。这些相关的产品标准、设计规范、技术规程等均将在最近几年内陆续发布和实施，将进一步促进电弧故障保护装置的普及和推广。因此，我国近几年内电弧故障断路器类的产品将呈现快速增长的势头，市场潜力十分巨大。将来随着技术的成熟还可推广到汽车、航空等领域，并向工业和商业等用途发展，将带来巨大的社会效益和经济效益。

参考文献

- [1] 赵长征、邱曼、高伟 . 电气火灾防治与调查技术 [M]. 沈阳：辽宁大学出版社， 2012
- [1] 杨艺，董爱华等，付永丽 . 低压故障电弧检测概述 [J]. 低压电器， 2009， 5：1~4
- [2] Birger Pahl, Thomas J. Schopf. Arc Faults in Residential Electrical Systems, 20
Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe [D],7.-9. Oktober 2009
- [3] Andy A. Haun, Robert F. Dvorak etc. ARC FAULT PROTECTED DEVICE: United States, US
6567250B1[P]. May 20, 2003.
- [4] 克里斯蒂· V· 派克； D· 拉比克尔· 派克等. 检测电弧故障的设备和方法： 中国，CN 1746688
A[P]. 2006-03-15.
- [5] UL 1699: Arc-Fault Circuit-Interrupters
- [6] IEC 62606:2013 Ed. 1 General requirements for Arc Fault Detection Devices