

目 录

一、 引言 .....	2
二、 产品概述 .....	3
2.1 现有电气火灾监控系统的组成 .....	3
2.2 现有电气火灾监控系统的不足 .....	3
2.3 故障电弧检测技术开始被重视 .....	4
2.4 国家标准加快出台 .....	4
2.5 家和物联在电气火灾监控领域的现状 .....	错误！未定义书签。
三、 故障电弧分析 .....	5
3.1 故障电弧的起因 .....	5
3.2 电弧的基本性质 .....	6
四、 故障电弧的检测原理 .....	14
4.1 故障电弧的试验设备 .....	14
4.2 故障电弧数据库的建立 .....	15
4.3 硬件设计 .....	16
4.4 软件设计 .....	17

# 一、引言

在我国经济高速发展的过程中，火灾的频繁发生给社会和公共安全造成了极大的危害，据国家权威部门统计，我国每都有 30%以上的火灾是由电气火灾引起的，其中 2012 年 1-10 月份全国共发生火灾 11 万起，其中电气引起火灾共 33385 起，占总数的 30.3%。在数量和危害程度上占据其它火灾之首。电气火灾，对人身及财产造成了巨大损失。电弧故障是造成电气火灾的主要原因之一，而传统的断路器只能保护剩余电流、过流和短路的情况，而许多严重的火灾事故往往是由低于额定电流的故障电弧引起的。因此，对故障电弧的起因及监控探测进行研究具有十分重要的意义。

本文主要对故障电弧探测装置的工作原理，故障电弧检测的硬件和软件的技术实现进行了阐述。

## 二、产品概述

### 2.1 现有电气火灾监控系统的组成

电气火灾监控系统基本组成包括：电气火灾监控设备、剩余电流式电气火灾监控探测器以及测温式电气火灾监控探测器；该系统能够对被保护线路中的电流、剩余电流、温度进行监视，并及时发现电气火灾隐患，预防电气火灾发生。

电气火灾监控系统集监视、报警、控制、集中管理与一体，监控探测器一般挂接在总线上的支路上，接受主控制器的命令，并传送全部信息；主控制器处理接收来的数据，监控被探测电气线路单相、三相电流，剩余电流，温度等参数的变化。当参数异常时，剩余电流互感器、温度传感器等终端检测元件对信息进行采集，并送到监控探测器里，超出设定值时即发出报警信号，同时输送到监控设备中，经进一步识别判定，当确认可能会发生火灾时，监控设备发出火灾报警信号，报警指示灯亮，发出报警音响，并在液晶显示屏上显示报警信息。

### 2.2 现有电气火灾监控系统的不足

许多严重的火灾事故是由线路中低于额定电流或预期短路电流的故障电弧引起的。这些危险的电弧可能发生在设计不合理的或者老化的供电线路上、电器插头以及家用电器的电源线，内部线束或零部件绝缘上。当故障电弧发生时，线路上的漏电、过流和短路等保护装置，可能无法检测到故障电弧或者无法迅速动作切断电源，极易引发火灾。

## 2.3 故障电弧检测技术开始被重视

故障电弧检测技术，最初被国内研究院所和厂家所认知，多是通过 AFCI（故障电弧断路器）和 UL1699 标准。然而美国电网与中国电网的实际情况却相差很多，无论从电压，频率，配电系统结构等方面都有所不同，照搬 UL 1699 标准必然无法适应中国的实际情况。近些年来，国内研究院所和厂家，投入了大量的人力物力，在故障电弧引发火灾的机理，故障电弧模拟仿真，故障电弧检测方法，故障电弧试验平台，故障电弧检测产品实际工程应用等方面，都做了大量的研究和尝试，为故障电弧检测技术在国内的发展和应用奠定了坚实的基础。

## 2.4 国家标准加快出台

2011年12月，在全国消防标准化技术委员会第六分技术委员会会议上，完成了对 GB 14287.4 《电气火灾监控系统 第4部分：故障电弧探测装置》征求意见稿的讨论。国家标准的加快出台，势必对故障电弧检测技术在电气防火领域中的推广和应用起到积极的促进作用，国家标准的实施更可大幅度降低由故障电弧导致电气火灾发生的数量和几率。

## 三、故障电弧分析

当两电极间的电场强度足够大，极间自由电子的运动能量撞击空气中的中性分子或原子并足以使其游离出更多带负电的自由电子和带正电的正离子时，电场强度会进一步加强。在该电场中，电子撞向阴极，而正离子撞向阳极。若正离子的能量能使阴极游离出新的电子，辉光放电就转化为弧光放电，即形成电弧。由此可见，电弧是一种气体游离放电现象，也是一种等离子体。GERM2ER等的研究表明：接通过程产生的电弧与触头材料及电路电压有关，而分断电路过程产生的电弧还取决于电路的电流。交流电弧也有类似特性。

### 3.1 故障电弧的起因

引起电弧故障的原因很多种，但主要可以概括为以下三点：

#### (1) 绝缘碳化

在很多情况下都能形成碳化路径，例如：将两个电极放在电缆绝缘层上，对电极通以高电压，就可以直接在电缆表面形成电弧；潮湿的绝缘表面和污染物综合作用导致绝缘表面有漏电流流通，逐渐形成碳化路径，最终使绝缘碳化。

#### (2) 空气电离

燃烧和预电弧都能电离空气。如果配电母线发生严重的电弧故障，首先会喷出大量的电离气体，这些电离气体会飞出一定距离，这时遇到另外一条线路，就很容易引起空气分解导致电弧产生。而且燃烧会使空气介电强度降低，使空气更容易发生电离。

### (3) 短路

短路有两种形式：一种是金属性短路；另一种是电弧性短路。后者是由于导体暂时性接触引发的，起初触点周围的金属物质逐渐融化，磁场力趋向拉开接触的导线，从而液体桥断开。

## 3.2 电弧的基本性质

电弧可分为正常电弧和非正常电弧（即故障电弧）两种。一般认为，电器的正常开关、插头插拔等操作引起的电弧属正常电弧；而触头松动、绝缘老化、击穿、接地故障等引起的电弧视为故障电弧。故障电弧分为串弧、并弧和接地弧。

电弧的电流和电压波形一般不是简单的正弦波形。经研究发现，并联电弧的性质更具一般性，而串联电弧的性质收到负载类型的影响，特性较为复杂。下面先讨论电弧的普遍性质。经过对大量电弧波形的研究，发现说有电弧都具有一些共同的特性：

电压和电流的波形包含有高频噪声；

沿电弧有电压降；

除有设备进行补偿的情况，由于沿电弧有电压降，对同一条线路的同一点上电弧电流低于非电弧电流；

电弧电流的上升速率一般高于正常电流；

电弧电流的每一个半周期波都在正常电流的过零点前熄灭，再过零点后复燃，在每半个周波形成一段几乎是平的零电流区域。把它命名为“平肩部”。

电压波形接近于矩形。

电弧通常是散布于正常电流之间零星闪波。

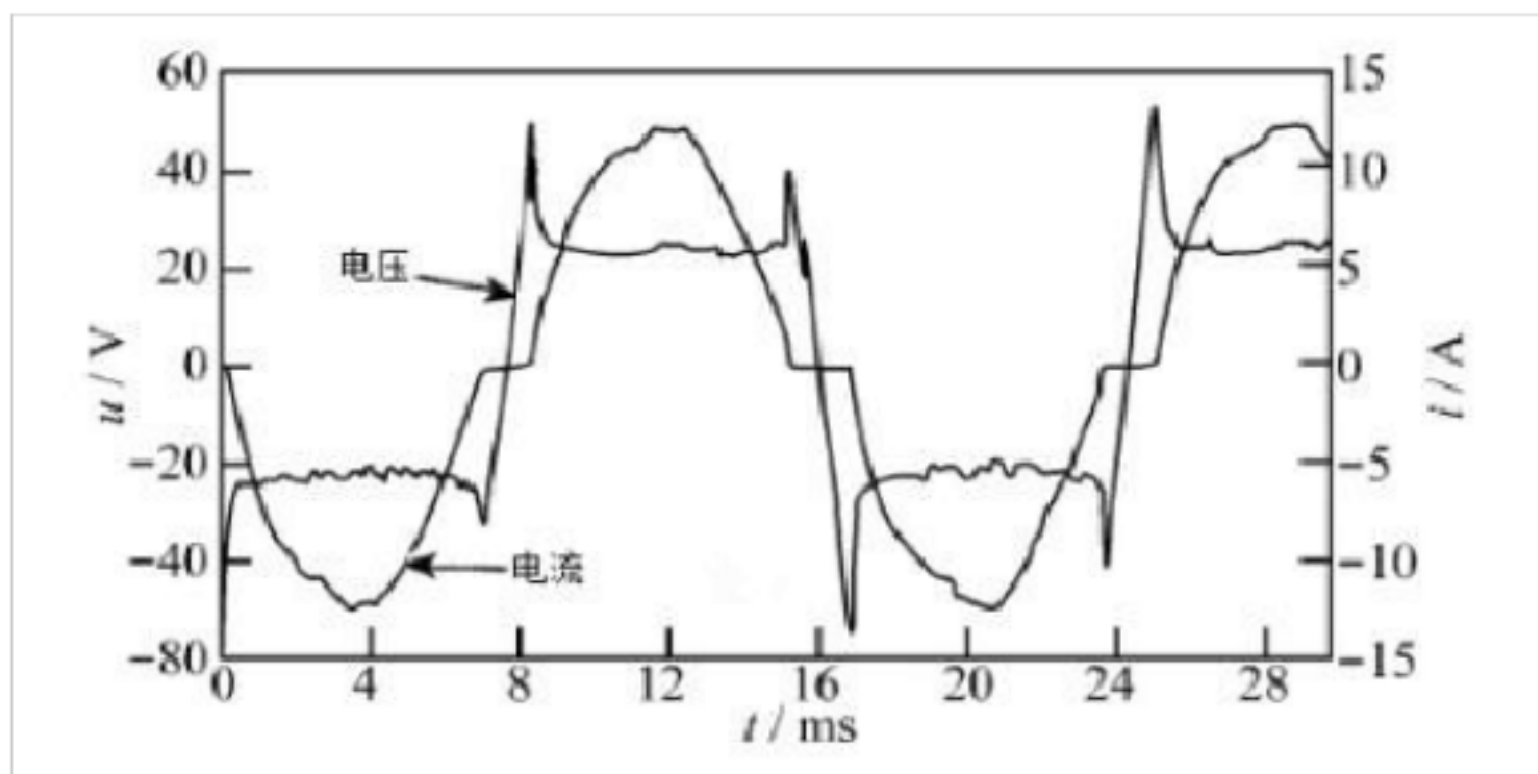


图 3.2.1 一般电弧的特性

从图 3.2.1 中的电流电压波形，还可以看到其他一些电弧普遍特性，下面会详细介绍故障电弧的特性。

#### (1) 并联电弧的普遍特性

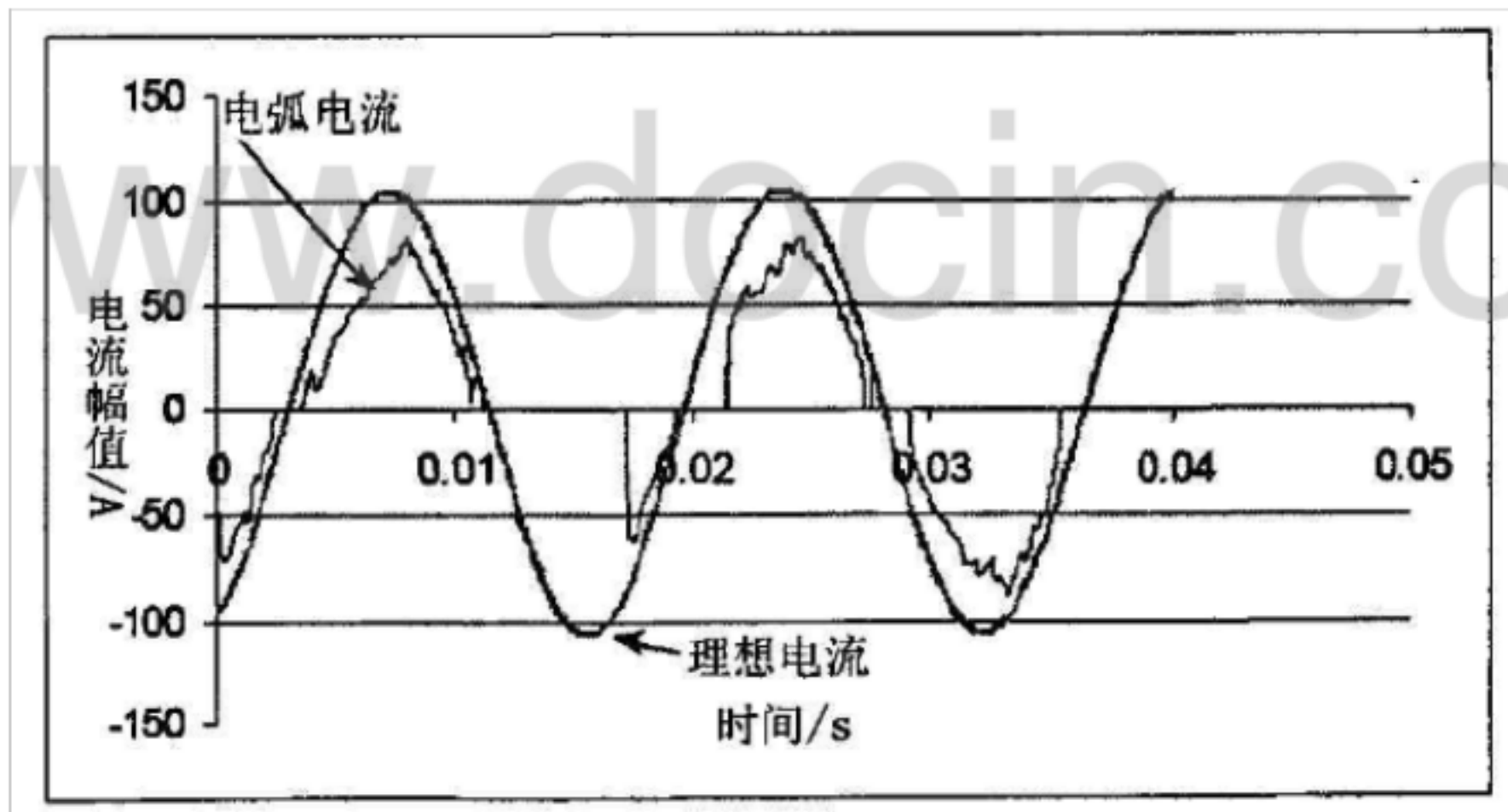


图 3.2.2 75 安培并联电弧电流曲线

图 3.2.2 表示的是用金属刀片切断 NM-B型电缆产生的平行电弧，引起电弧连接的短路故障，断开点的短路电流为 75A.从图中可以得到电弧电流的特点包括：

电流幅值小于理想状况 ；

高频闪络

电流曲线有“平肩部”的存在 ；

上升的幅度在 部分比理想状况陡峭 。

我们可以注意到：没有两个半周波的波形是相同的 ；在波形某些局部，可以看到更为明显的电弧的特征 。

既然电弧是有切断电缆硬气的，发生电弧之前是没有正常电流做参照的条件下识别出电弧电流的特性 。

图 3.2.3 是完全相同的电路和条件下进行第二次实验所记录的波形，它与图 3.2.2 的波形不同，也不存在高频闪，但是其他特性是相同的，这说明电弧的概率特性和电弧保护的检测装置为了能够检测到电弧的产生并与正常负荷区分开，需要同时得到多个特征证实电弧的存在 。

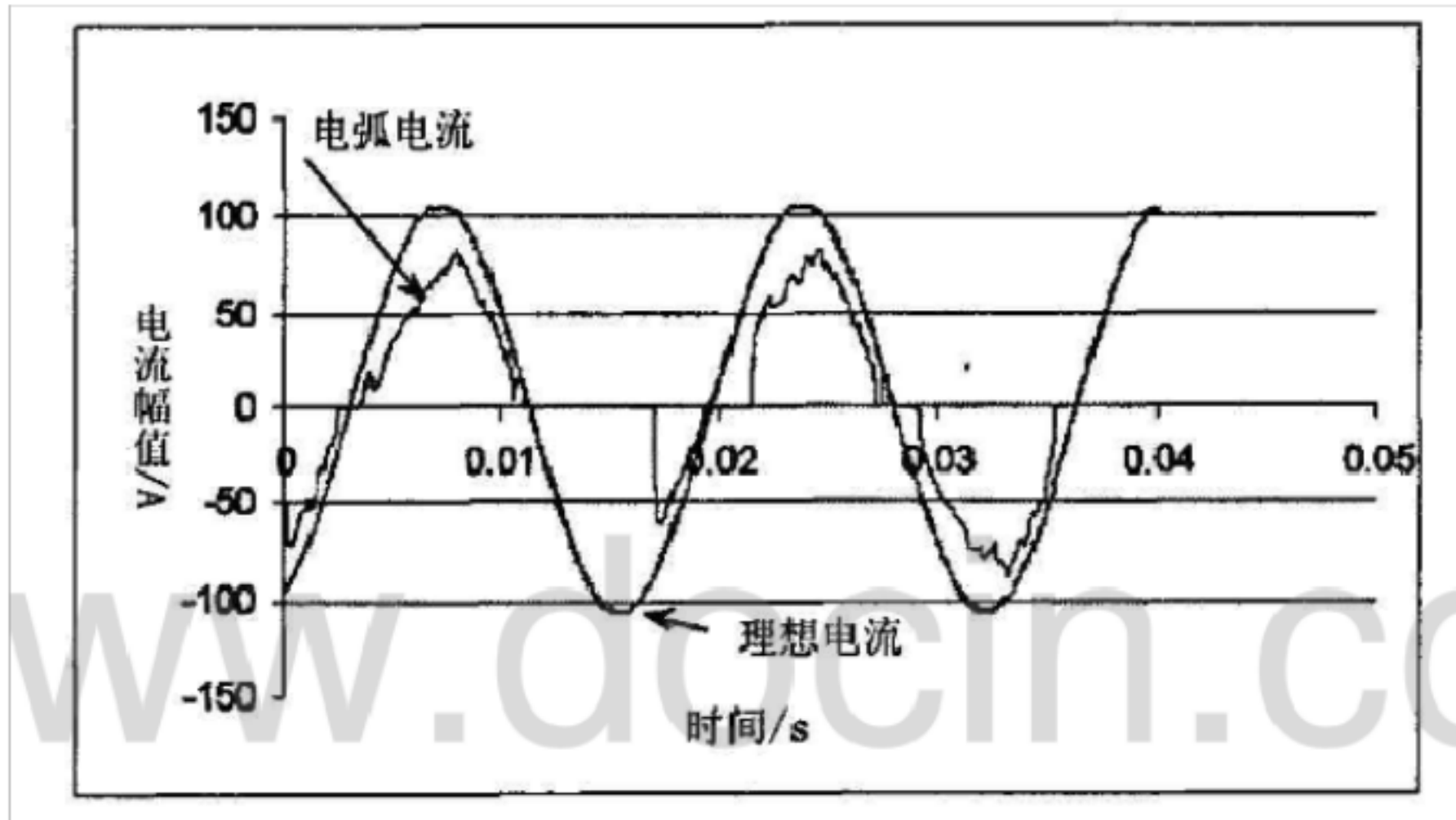


图 3.2.2 75 安培并联电弧电流曲线二

### 串联电弧的普遍性质

发生串联电弧时，我们可以观察到电流变小，同时受负荷本身的影响出现异常的波形。为了能够检测与负荷串联的电弧，研究电弧发生前后波形的变化与研究电弧的性质同样重要。

检测电弧 - 正常电流的差异最容易，但是发生故障电弧时前后两个半周期波也会变化，如果没有同正常电流相比较，会被认为检测到电弧。一些负荷具有非常类似于故障电弧的特征。因此对于这些情况，需要检测若干个半周波直到确认存在电弧的概率比较大。以图 3.2.3-3.2.6 为例，故障电弧同正常电弧是存在相当大的差异的，但肉眼一般很难发现，必须通过高精度分析才能辨别。

### 真空吸尘器

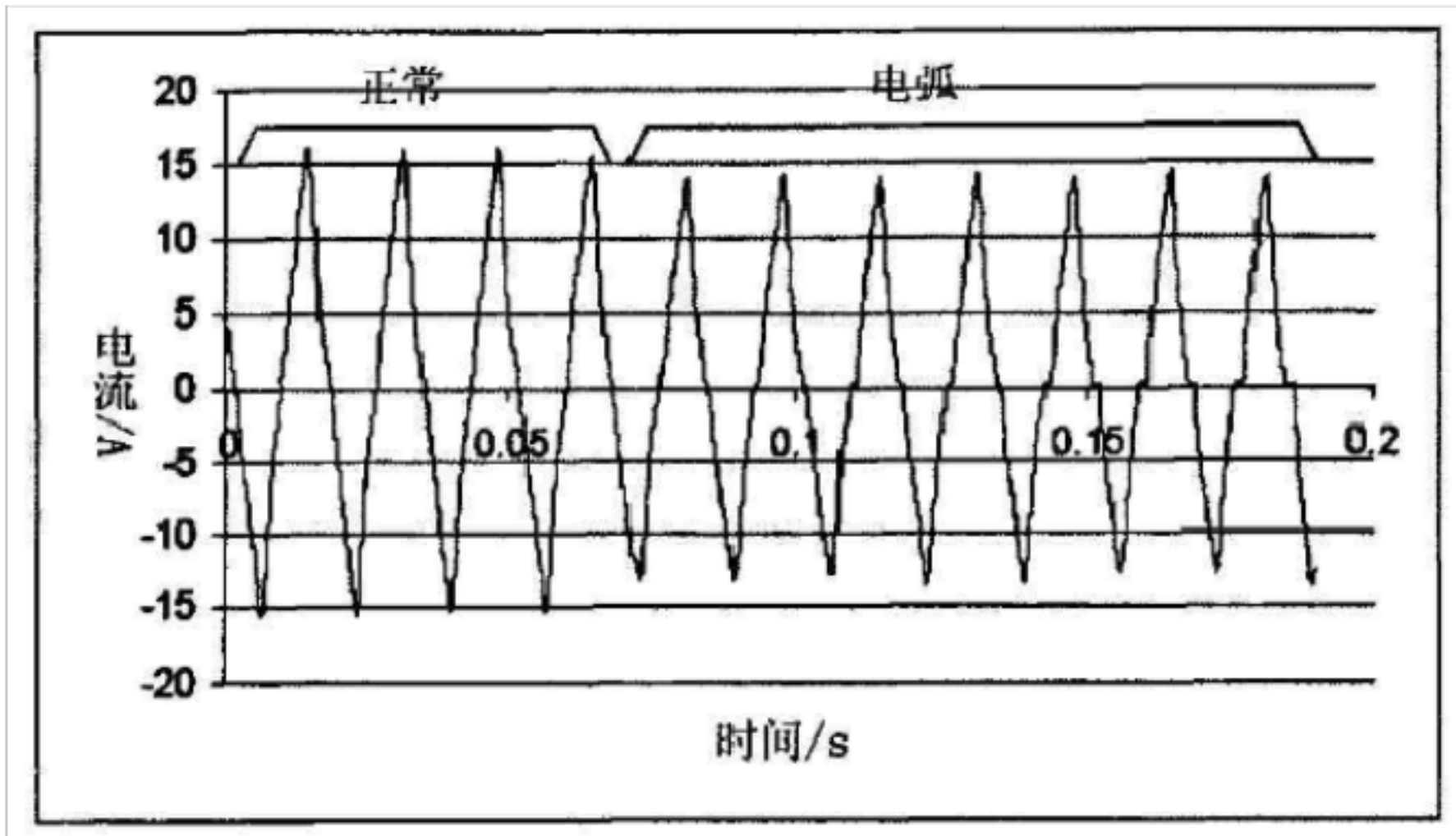


图 3.2.3 真空吸尘器的电弧电流曲线

图 3.2.3 表示的真空吸尘器的通用点击运转时电线发生串联电弧时的电流波形，可以注意到一下特征：

- A. 存在平肩部分；
- B. 峰值有变化；
- C. 电流增长速率有变化。

个人计算机

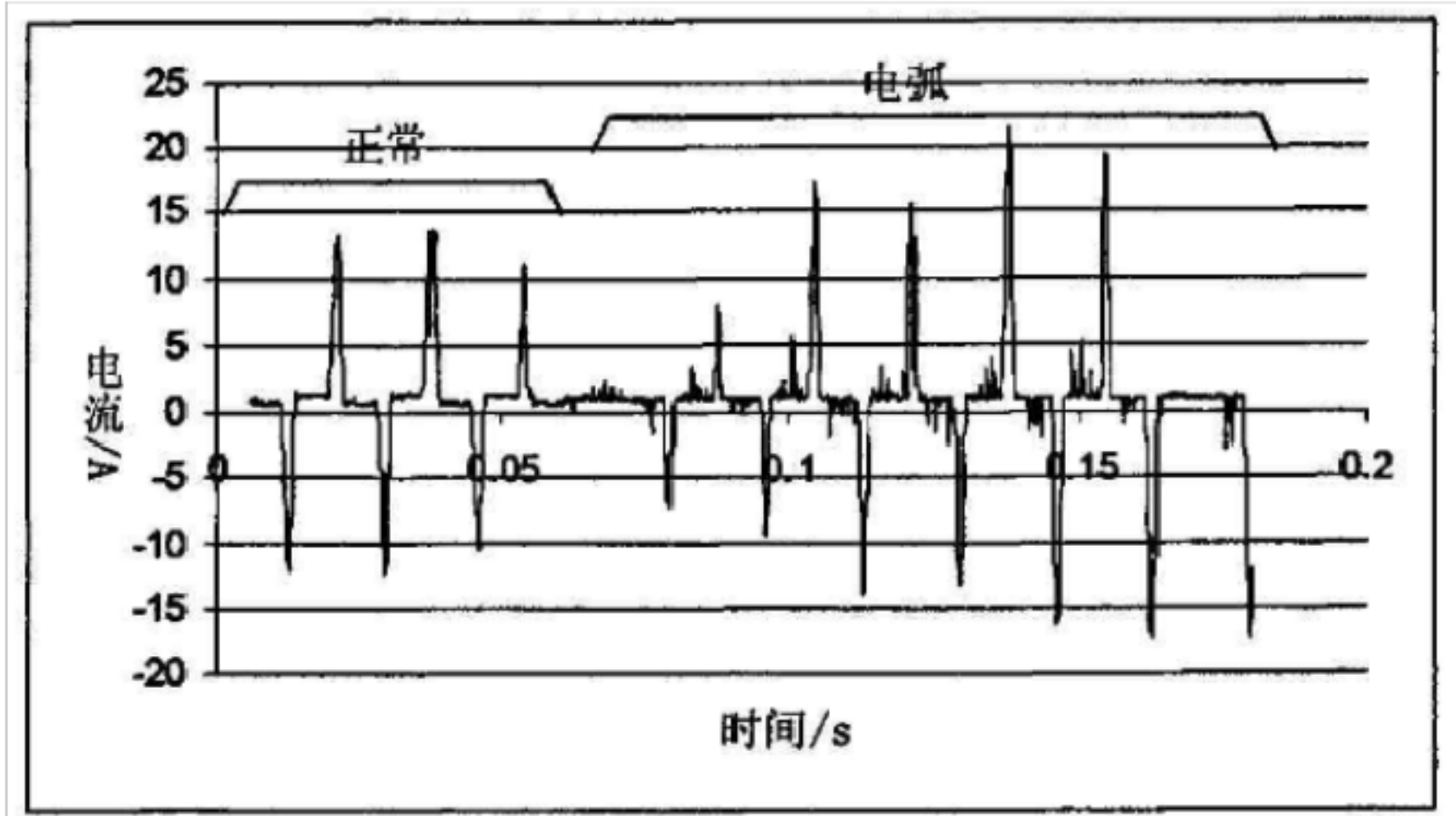


图 3.2.4 个人计算机的电弧电流曲线

图 3.2.4 是个人计算机开启后的电弧电流曲线图。开关电源正常工作时具有异常的波形，表现很多故障电弧的特征。但是，通过某些特征能够区分真正的电弧和正常波形：

- A. 电流幅值变化很大；
- B. 振幅不稳定；
- C. 电流脉冲偶尔会发生确实；
- D. 增强的高频抖动。

调光器

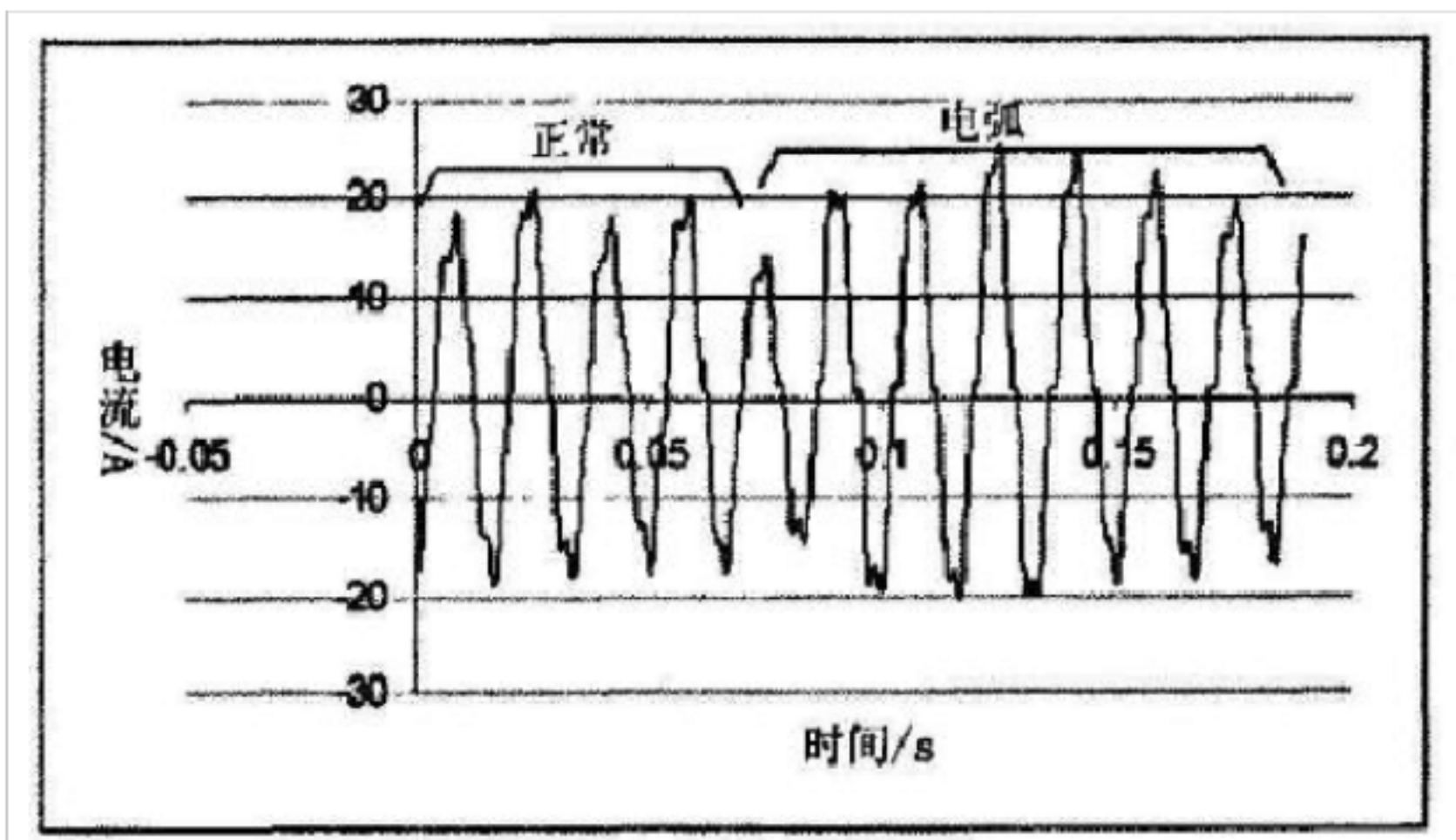


图 3.2.5 1000W 调光器电弧电流曲线

图 3.2.5 表示的是 1000 瓦调光器电弧电流曲线，它的正常波形和故障电弧波形非常类似。我们可以看到，两者之间电流幅度确定不同，电弧电流持续时间不时变化，含有高频分量。检测调光器负载的故障电弧需要较长时间。

### 压缩机

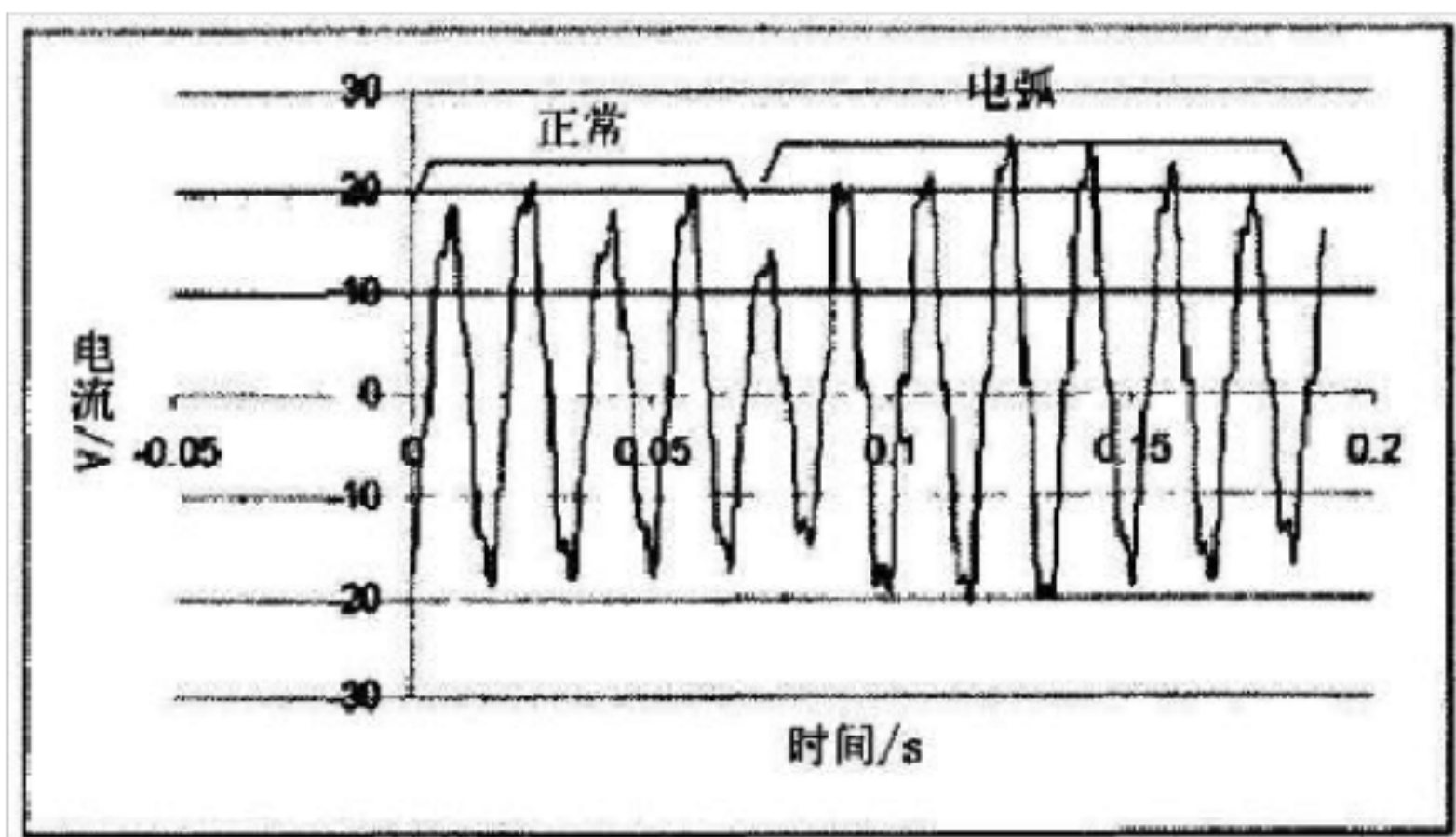


图 3.2.6 压缩机的电弧电流曲线

图 3.2.6 表示的是压缩机的电弧电流曲线。正常电流波形和故障电流

波形具有更加类似的性质，高频抖动和幅值变化都不是明确的区别依据。故

障电弧能够作为检测特征的有：

- A. 幅值的变化；
- B. 增加速率变化；
- C. 平肩部的存在。

## 四、故障电弧的检测原理

电弧具有概率特性，并不是持续不变的，许多负载的特性与串联电弧相似，因此，电弧保护的检测装置为了能够检测到电弧的产生并与正常负荷区分开来，需要同时得到多个证据证明电弧存在的概率很高而正常负荷的概率很低，这个非常重要。

### 4.1 故障电弧的试验设备

#### (1) 试验平台结构

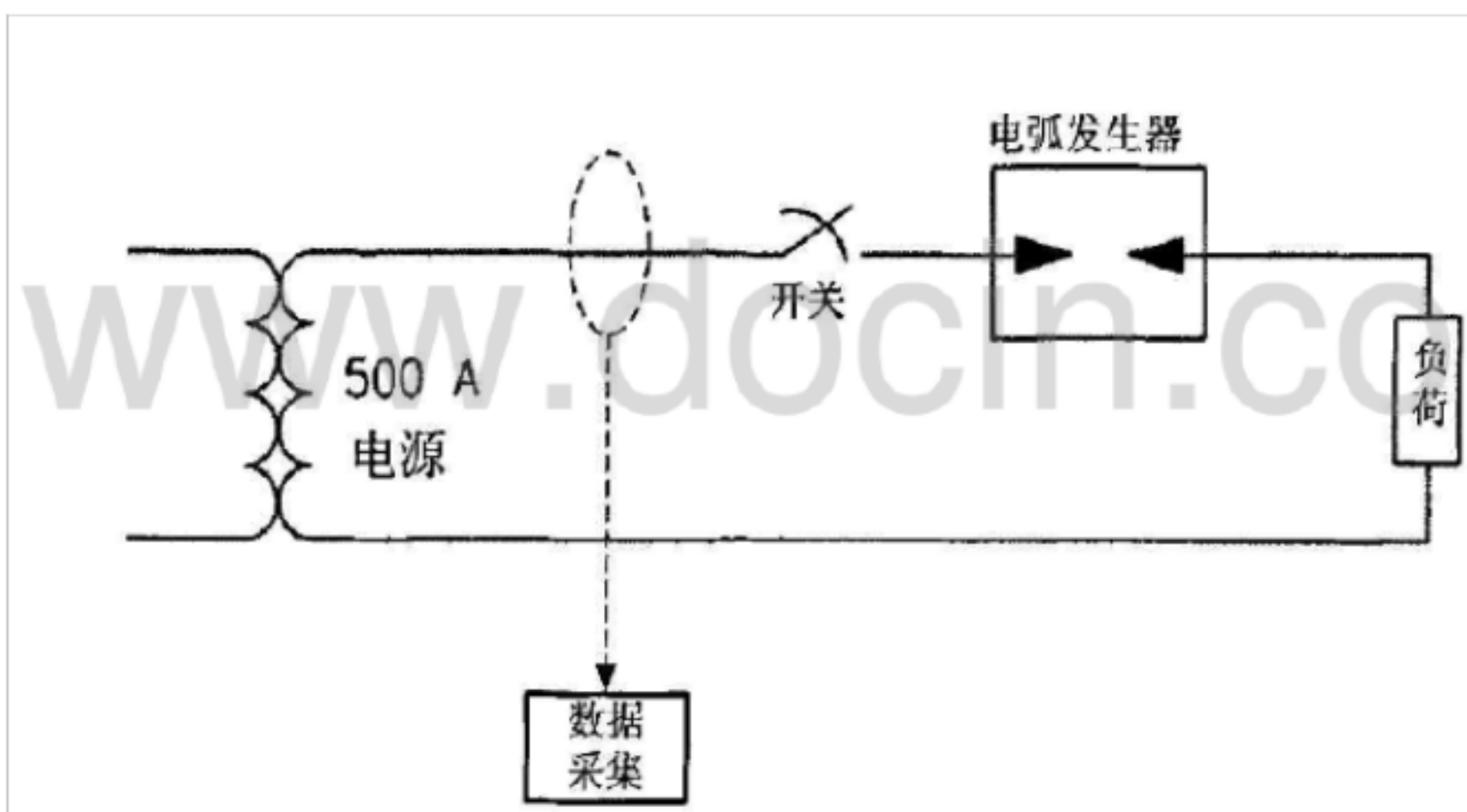


图 4.1.1 电弧试验平台结构

试验平台结构如图 4.1.1 所示，包括供电变压器，开关，电弧发生器，负载和数据采集设备。供电变压器按照标准要求能够提供 500A 电流，电压可调。

#### (2) 电弧发生器

电弧发生器是人工产生持续电弧的设备，是试验中最重要的设备。将电

弧发生器同各种负荷设备连接后，使电弧燃烧，就可以研究各种负荷状态下的电弧特性。该设备的结构如图 4.1.2 所示：

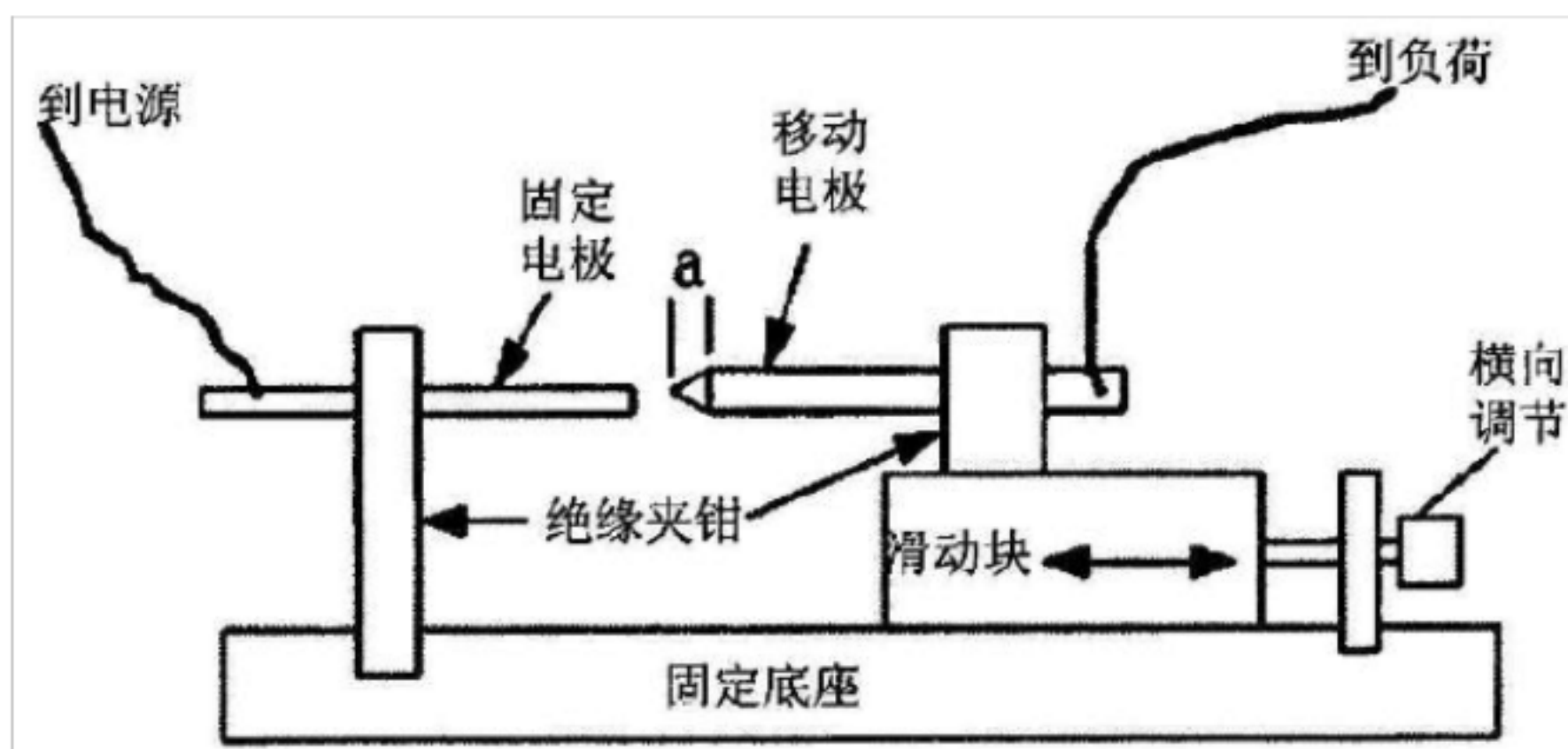


图 4.1.2 电弧发生器 ( $a=0.7\pm 0.3$  英寸)

该电弧发生装置的规格按照 UL1699标准相关条款的要求，有固定电极和移动电极组成。一个电极有直径 0.25 英寸(6.4 毫米)的碳-石墨电极棒组成，另一个铜杆。其中一个或两个电极的末梢必须是尖锐的。电极相互接触时电路应该完全闭合。

## 4.2 故障电弧数据库的建立

由于故障电弧电流波形具有非正弦性和随机性，而且在某些负荷设备环境下，启动和正常工作状况的电流波形与电弧波形具有某些相似性。而目前还没有一种电压电弧数学模型可以精确地仿真各种工作状况下的电弧波形。因此，研发故障电弧探测装置的基础是搭建故障电弧实验平台，通过大量的试验采集各种负荷下故障电弧和正常工作状态的电流数据，然后经过数据处理，研究出故障电弧与正常工作的特性差异。在此基础上所开发研制的故障电弧探测装置才能准确地检测故障电弧，而不发生误动作。

故障电弧数据库的建立是故障电弧探测装置中的难点。

## 4.3 硬件设计

硬件结构图如下图 4.3.1 所示：

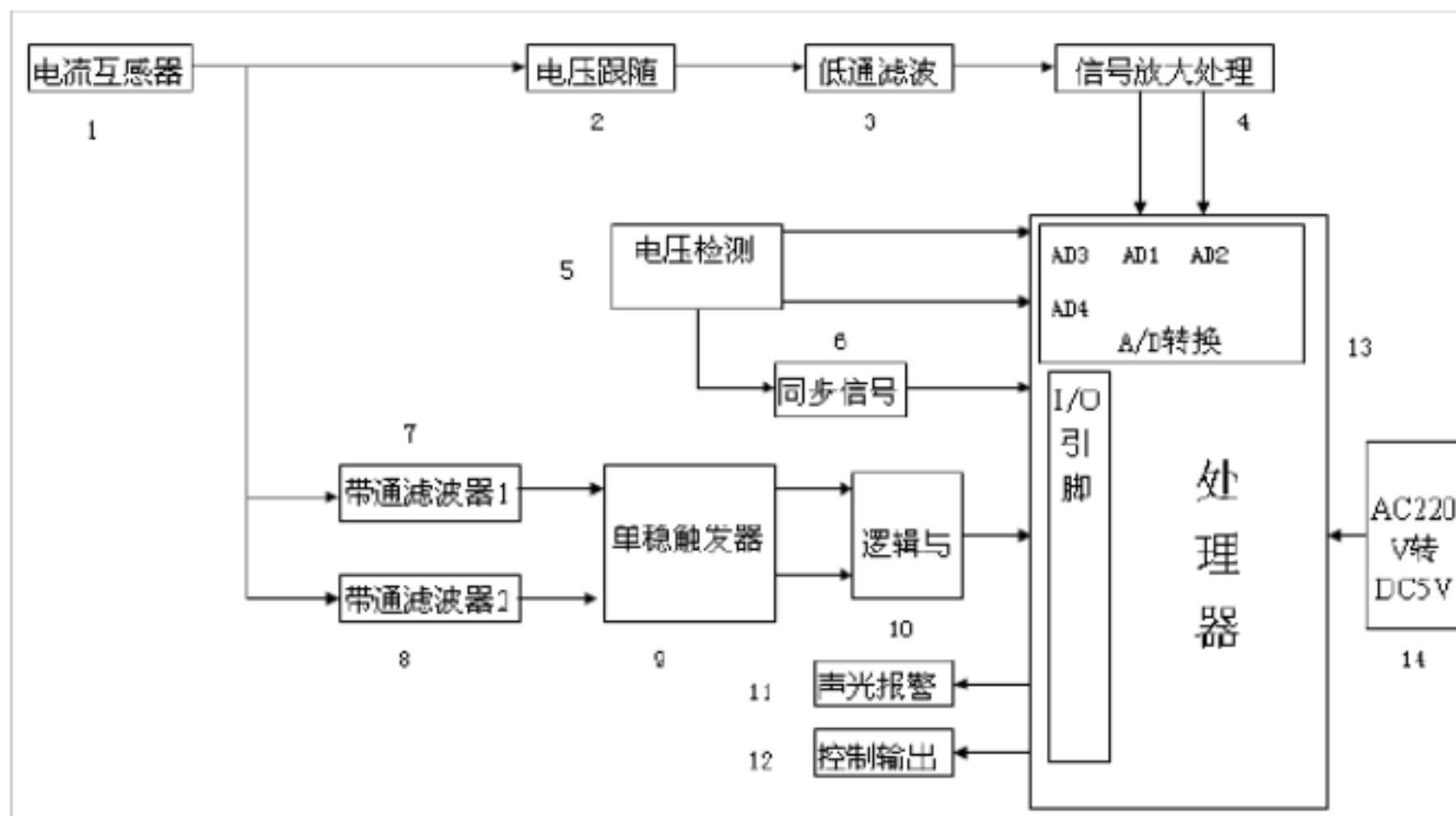


图 4.3.1 硬件原理框图

- (1) 在图中，电流互感器 1 采用气芯的电互感器，它的特点是无磁滞和磁饱和现象，它有非常好的线性和暂态特性，1 将感应信号送入 2 一个电压跟随器，以使输出信号强化。3 是一个 50-60HZ 的低通滤波器，4 是个双路非反相运放，负载电流的信号被放大后送入 13 处理。
- (2) 7 和 8 是 200KHZ 和 250KHZ 的带通滤波器，是一个对电弧电流波形的傅里叶运算，之后，信号将送入 9 一个 1ms 的单稳触发电路，之后经过 10 逻辑与送入 13 运算处理。
- (3) 5 是电压检测电路，当电弧发生时，AC 电源的电压是不稳定的。所以要对电压的绝对值进行采样，送入 13 处理。并且 6 负责检测电压的过零信号，并将此信号送入 13，用于电流采样值的运算。
- (4) 11 和 12 分别是声光报警功能和控制输出，当检测装置检测到电弧发生是通过

13 控制 11 发出声光报警，控制 12 控制输出。

(5)14 是 AC220V转 DC5V电源电路。

## 4.4 软件设计

(1) 故障电弧探测装置软件应具备以下几项基本功能：

### 准确的电弧检测

此项功能要求故障电弧探测装置能够根据对负载电流和电压的 A/D 采样，在短时间内检测出电弧的产生，这种检测包括对负载运转所产生的正常电弧检测以及负载在非正常状态所产生的电弧检测。

### 快速的电弧特性分析

此项功能要求故障电弧探测装置在检测到电弧产生后，首先根据当时电压和电流的关系，运用高效而准确的算法（现多采用傅里叶 Fourier 变换法则），得到负载的相位角状态，判断出负载的类型，从而得出电弧的产生属于正常或异常的判断，进一步作出是否声光报警和控制输出的动作。可见，这部分软件设计将决定故障电弧探测装置能否在发生故障电弧时及时做出声光报警和控制输出动作，同时，它还将决定故障电弧探测装置能否在发生正常电弧时不会产生误动作。当然，这种判断还要依靠下面一项功能作为基础。

### 丰富的负载电弧特征曲线储备

故障电弧探测装置应包括尽可能多的负载电弧特征，这需要大量的实验基础，对绝大多数的负载电弧特征进行分析，并将其存储在存储设备里中。还可以采用自学习方式，故障电弧探测装置可以在运行状态对产生的电弧进行实时的更新。

(2) 下面将根据以上功能对软件实现进行分析：

周期电流峰值，全局电流峰值，电流累加值

电弧检测的基本软件工作原理：

首先对正半周期电流峰值以及负半周期电流峰值采样，针对某一个整周期，将其正半周期的采样结果和负半周期的采样结果绝对值相加，求取平均值。然后将此周期的平均值与前一周期的平均值相比较，如果差距大于一个门限值，就判断为产生了一个电弧。需要指出的是，并不是只根据某一个周期的差距作出判断，而是将若干周期的差距累加，如果这个累加值超过了一个预先定义的累积门限，才作出最后的判断。当然，这个累积值会在一定的时间后复位。

电弧特性分析的基本软件原理：

电弧特性分析是通过电压和电流的模拟同步检测实现的。当电压过零时，其极性将发生变化，同时，其采样值呈周期变化，电流的特性也是如此，而根据傅立叶变换的基本原理，一个周期函数可以展开成无数个正弦或余弦的函数之和，函数的周期越短，其（级数）收敛越快，周期越长收敛就越慢。具体的实现方法如下：

以电压波形两次正向过零为一个整个周期，每半个周期  $N$  次采样。

首先，当电压在正半周期并且  $N$  为 0 时将正弦累积值和预先累积值复位，以此作为一次计算相位的起始。

对于余弦累积值的计算，在电压经历正半周期时，电流的余弦累积值与前一次的余弦值相加，再电压在负半周期时，电流的余弦累积值与前一次的余弦值相减。

对于正弦累积值的计算，以  $N/2$  为界，前  $N/2$  次采样中，电流的正弦累积值与前一次的正弦值相加，后  $N/2$  次采样中，电流的正弦累积值与前一次的正弦值相减。

最后，当电压在负半周期并且  $N$  到达最大采样数时作为一次计算相位的结束。

至此，线电压和电流之间的相位差已经被模拟为正弦函数和与余弦函数和之间的比率，即正切值。由于正切曲线是圆滑的单调递增函数，由此，负载运行时产生的相位差应该满足这条曲线，负载的类型也就可以被判断出来。

结合上述电弧检测的算法，对于每种负载，都可以对应一系列切断点，也就构成了不同的电弧特征曲线，以便随时判断出产生的电弧是否已超越了电弧特征曲线上的点，从而达到及时切断和避免误切断的目的。

另外，为了增加稳定性和可靠性，还可以引进其他的参数，如周期电流累积值和全局电流峰值。对于周期电流累积值，并非直接将电流值相加。

首先，需要将当前电流值与累积值比较，根据情况分别相加或相减一个比例因子，目的是避免电流的突变对采样产生过大的影响，从而实现了数字过滤的作用，这样不会因为大量瞬变电流涌入负载而导致误切断。

#### 电弧特征曲线的储备

通过以上分析可见，电弧特征曲线是区分负载类型的基础，它定义了负载发生电弧时故障电弧探测装置应该做出动作的切断点。因此，它应满足各种负载的特性，如阻性负载，容性负载，感性负载以及复合型负载，它们都具有不同的相位差特征。这些数据需要通过实验得到，存储在存储设备中。

