

高等学校规划教学参考书

本质安全电路设计

张燕美 李维坚 编著

煤炭工业出版社

高等
学校
规划
教学
参考
书

本
质
安
全
电
路
设
计

类
号

726
209

ISBN 7-5020-0683-4/TD·628

书号: 3452 定价: 1.95元

社

高等学校规划教学参考书

本质安全电路设计

张燕美 李维坚 编著

煤炭工业出版社

(京) 新登字042号

内 容 提 要

本书是在总结了以编者为首的学科组在西安矿业学院安全火花试验室进行的教学科研工作的基础上编写的。全书通过对各类本质安全电路的介绍, 提供了设计本安电路的基本思想和方法。读者可以根据使用环境和要求, 按书中的设计步骤进行分析、计算。书中还提供了本安电路的计算机辅助分析方法。

本书可供从事井下电控及监测、保护、信号通讯等方面的工程技术人员阅读, 亦可作为大专院校有关专业师生的教学参考书。

高等学校规划教学参考书

本质安全电路设计

张燕美 李维坚 编著

责任编辑: 胡玉雁

煤炭工业出版社·出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂·印刷

新华书店北京发行所 发行

开本787×1092mm¹/₁₆, 印张7¹/₄

字数166千字 印数1—1,375

1992年9月第1版 1992年9月第1次印刷

ISBN 7-5020-0683-4/TD·628

书号 3452 A0163 定价 1.95元

前 言

本质安全电路的研究与设计是60年代起在我国迅速发展起来的一门学科，由于它适合应用于有爆炸危险环境中，特别是煤矿井下，因此受到人们青睐。国内外研究机关和防爆检验单位均做了大量工作，提供了设计分析资料以及试验点燃曲线，使本质安全电路在我国推广应用的条件已趋成熟。

本书的目的是通过对各类本安电路的介绍，由简入繁，提供设计的基本思路和方法，使读者有章可循，能根据各自的使用环境和任务要求，按书中提供的设计步骤进行分析计算。这样在电路产品或样机送交检验（国标规定）前，已能做到心中有数，可以大大节省设计时间。

本书共分七章，包括简单直流电路、复杂直流电路、工频交流电路以及带铁芯电感电路的分析和设计。第五、六两章介绍了与本安电路密切相关的安全栅电路，从构成原理分析，安全栅亦可看成是本安电路的一个组成部分。第七章介绍了本安电路的计算机辅助分析方法，可以使计算和查表工作大为简化。

本书可供从事井下电控及监测、电子技术及保护、信号通讯等方面的工程技术人员阅读，也可作为大专院校有关专业学生的教学参考书。

本书在编写过程中，参阅了抚顺、重庆、上海和南阳等防爆研究所提供的技术资料，并参考利用了本院历年来研究生和本科生的毕业论文资料。全书由本院电气工程系杨仲平教授审阅。在此，对上述有关单位和同志表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中必有许多缺点和错误，恳切希望广大读者批评指正。

编 者

1991年3月

1991/3

目 录

绪 论	1
第一章 本安型简单直流电路设计	4
第一节 不同性质电路产生电火花的过程	4
第二节 临界点燃曲线	5
第三节 电阻电路的计算	9
第四节 电感电路的计算	10
第五节 电容电路的计算	11
第六节 提高电感电路安全性的措施	12
第七节 简单电感电路火花放电能量的计算	17
第二章 本安型复杂直流电路的设计	19
第一节 双电感电路、带二极管及短路环的电感电路等效电感的折算	19
第二节 带电阻分路、带压敏电阻分路的电感电路及一般形式复杂电感电路等效电感的计算	27
第三节 电感电路并联电容时对本安特性的影响	28
第四节 RLC 串联电路试验曲线	30
第三章 工频交流电路	33
第一节 设计工频交流本安电路的一般原则	33
第二节 用稳压管分流器提高交流电感电路的安全性	36
第四章 带铁芯电感的本质安全电路	38
第一节 静态电感和动态电感	38
第二节 铁芯线圈等效电感的计算	39
第三节 铁芯电感电路设计实例	43
第五章 安全栅的选择与设计	45
第一节 概述	45
第二节 安全栅的工作原理	46
第三节 齐纳式安全栅电路的估算	55
第四节 安全栅连接电缆的最大允许电感 L_p 、最大允许电容 C_p 及 L/R 比值的确定方法	58
第六章 可控硅安全栅	61
第一节 可控硅式安全栅电路的工作原理	61
第二节 可控硅式安全栅电路的估算	66
第三节 可控硅式安全栅产品的试验	81
第七章 本安电路的计算机辅助分析	83
第一节 国标本安电路最小点燃电流、电压曲线的数学模型	83
第二节 简单电路及复杂电感电路的计算机程序	88
第三节 计算机评价铁芯电感电路的本安性	94

附 录.....	96
I. 本质安全电路放电时间特性曲线	96
I. 复杂电感性电路的计算公式	98
II. 函数 $f(x)$ 数据表.....	100
IV. 评价本质安全电路的计算机源程序	102
参考文献	109

绪 论

根据国家标准GB3836·4—83关于爆炸性环境用防爆电气设备本质安全型电路和电气设备“i”的规定,本质安全电路的定义为:“在规定的试验条件下,正常工作或规定的故障状态下产生的电火花和热效应均不能点燃规定的爆炸混合物的电路”。这种电路是防爆电气设备中最安全的,因为即使在故障状态下,它也不会引起爆炸危险。这里所说的故障状态是指与本安性能有关的电气元件损坏和电路连接处发生故障。

全部电路均为本质安全电路的电气设备称为本质安全型电气设备,它的标志符号为“i”。

一、本安型电路发展的简单回顾

本安型电路最早出现在1914年,英国学者首先将本质安全技术用于煤矿井下电铃信号线路。最原始的本安型电源是一个24V电池和一个与其串联的限流电阻。到1938年开始采用交流电源,用一只降压变压器和一个外接电阻限流,并附加一系列安全措施,如将变压器的原边和副边置于铁芯的不同侧,并附加良好的绝缘衬垫,以防止原副边绕组短路或与铁芯接触。到了50年代,英国、苏联和西德等国,在本安防爆理论和实际应用方面都取得了显著进展。本质安全型设备在我国应用时间不长,60年代初期开始有本安型产品问世,但产品的应用范围十分有限。近年来,随着煤炭生产机械化程度的提高,电子技术和自动控制技术的发展,在井下电控、信号通讯以及各种监测仪表和保护装置等方面,已日益广泛地采用本安型设备。

二、本安型电气设备的优点

众所周知,传统的隔爆型电气设备的防爆手段是将可能产生电火花的电路部位全部封装于隔爆外壳中,但外壳并非全封闭,只是在结合部保持一定宽度和间隙。当壳内气体混合物发生爆炸时,不仅外壳的强度能承受爆炸时的压力,而且自间隙逸出的电火花已减弱到不能引起环境气体爆炸的强度。如果电路开关设备功率大,控制元件多,则隔爆外壳将大而笨重。本质安全型电气设备则完全摆脱了笨重的隔爆外壳,因而重量轻、体积小、节约大量钢材、价格较低、制造维修方便,故在石油、化工、煤炭等工矿企业危险环境中广泛应用。

三、安全火花试验装置

火花试验装置是研究电路本安性能的基本设备。根据该装置绘制的各种点燃曲线是设计本安电路的依据。因此有必要首先对它的结构和试验方法作一简介。

国际电工委员会(简称IEC)推荐西德的火花实验装置作为国际标准,已得到各国公认。国内各防爆检验机构如抚顺、重庆等检验站均已仿制。安全火花电路及产品设备经检验合格后,发给防爆合格证,才允许投入生产及下井使用。

图0-1表示本质安全电路火花实验装置图。装置是由容积不小于250cm³的爆炸容器及其中的一组接点组成的。有机玻璃容器罩内充以规定浓度的试验气体。一个接点电极为铜质圆盘4,盘面上开有两道沟槽,另一个接点电极是被夹持在黄铜极握2中的四根钨丝3。

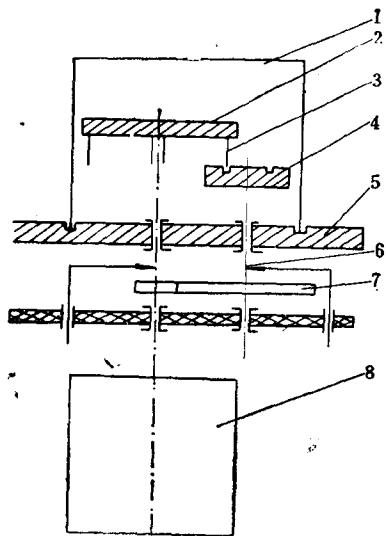


图 0-1 本质安全电路试验装置

1—爆炸容器罩；2—极握（黄铜）；3—金属丝（钨）；
4—锡接触圆盘；5—铜质底盘；6—汇流器；
7—传动齿轮；8—电动机

锡盘和极握同时经过减速齿轮被外接电机 8 带动旋转。如图所示，锡盘和极握的两轴与容器外壳绝缘，两轴均配有气密封套。根据设计，极握每转一周，在电极间将出现 8 个短路火花和 8 个断路火花，火花出现总数由特设计数器计数。当容器内发生火花引起之爆炸时，则由专用光敏元件检测，经控制元件放大后动作，使计数器停止计数并切断电源，这样就得到一个引爆火花次数和电路参数的数据。

在 IEC 火花试验装置上进行试验时，对试验方法和标定条件有严格规定，其原则是选取最危险的环境和临界参数，以使被检验的产品经受最严格的考验，这样才使设计的参数更为安全可靠。例如，被试气体为甲烷-空气混合物时，取其浓度为 $8.3 \pm 0.3\%$ ，因为在该浓度下最易爆炸。针对不同环境和

电路参数，检验站有详细规定和要求，此处不再赘述。

四、影响火花点燃能力的因素

影响火花点燃能力的因素很多，主要有可燃气体的成分和浓度、温度、流速；电极触头的材质、形状、分离速度；电路的电气参数如电压、电流、频率、阻抗等。另外，像直流电路电极的极性，交流电路的相位等，有时也能对火花的点燃状况产生意想不到的影响。

各种爆炸介质都存在一个最易点燃的浓度：甲烷爆炸界限是 $5\% \sim 15\%$ ，电火花最易点燃的浓度为 8.5% ；氢气的爆炸界限为 $4\% \sim 75\%$ ，电火花最易点燃的浓度为 21% 。

爆炸介质的温度越高，所需点燃能量越小，介质湿度越大，越不易点燃，介质的流速越高，越不易点燃。

电极的材质熔点低、材质软的金属比熔点高、硬度大的金属电极更危险，其中锡是最易点燃爆炸性介质的金属，故在 IEC 火花试验装置中规定以锡盘为电极。

五、本书中常用术语解释

1. 本安电路设计参考曲线

在特定的最恶劣试验条件下，即采用该种混合物最易点燃的浓度进行试验，做出的各种电气参量间关系。标准曲线包括：电阻性电路的电源电压与最小点燃电流关系曲线，电感性电路在电源电压不同时电感量与最小点燃电流关系曲线，电容性电路电容量、放电限流电阻与最小点燃电压关系曲线。

2. 关联电气设备

指设备内部的电路或电路的某些部分不需要完全制成本质安全型，但其中仍有一些电路可能影响与其相关联的本质安全型电路的安全性能，这类设备被称为关联电气设备。

3. 本安电路的等级

按使用场所和安全程度,本安型电气设备及其关联设备可分为 i_A 和 i_B 两个等级。 i_A 级是指电路在正常工作,一个和两个故障时,均不能点燃爆炸性气体混合物的电气设备。正常工作时的安全系数取2,一个故障时安全系数取1.5,两个故障时安全系数取1。正常工作有火花的触点须加隔爆外壳或气密外壳,或者加倍提高安全系数。

i_B 级指在正常工作和一个故障时不能点燃爆炸性气体混合物的电气设备。正常工作时安全系数取2,一个故障时安全系数取1.5。正常工作有火花的触点要加隔爆外壳或气密外壳保护,并且有故障自动显示的措施。一个故障时安全系数取1。

由以上规定可看出, i_A 等级本安型电气设备的安全程度高于 i_B 等级。

4. 本安电路的最小点燃能量

这是研究电路本安性能的基本参数。它是指在特定试验条件下(最易点燃的放电方式、最易点燃的介质浓度),放电火花点燃爆炸性气体混合物的最小能量。对甲烷-空气混合物来说,最小点燃能量为0.28mJ。氢气混合物浓度为21%时,最小点燃能量为0.019mJ,煤尘与空气混合物的最小点燃能量为40mJ。

按最小点燃能量可确定爆炸危险性的分类:甲烷为I类大于0.28mJ,II类为0.17~0.28mJ,III类0.06~0.17mJ,IV类0.014~0.06mJ。

5. 最小点燃电流

在规定的试验条件下,对电阻电路和电感电路用火花试验装置进行3000次火花试验,能够发生点燃的最小电流,此电流降低5%即不能点燃。

6. 最小点燃电压

在规定的试验条件下,对电容电路用火花试验装置进行3000次火花试验,能够发生点燃的最小电压,此电压降低5%即不能点燃。

第一章 本安型简单直流电路设计

为能清晰说明本安电路的设计思路和方法,我们由简单直流电路开始。所谓简单电路是指回路中只包含一种纯电阻、电感或电容元件。在本章中,首先概述简单电路产生电火花的原因,然后说明作为设计依据的临界点燃曲线,同时举出设计方法及例题,最后针对最为常见的电感性电路,提出提高其安全性的措施。

第一节 不同性质电路产生电火花的过程

所谓电火花,包括电路中两电极断开时(如电路切换)的放电断路火花,以及电路闭合时的电火花。

电路切换时产生的电火花是电源能量和电路储能元件释放能量联合向通断电极间隙处放电的结果。而电路闭合时产生之电火花常常是因高压使气体电离造成电弧放电。由于电路负载性质(电阻性、电感性、电容性)、电路通断情况及通断速度不同,电火花亦有所区别。

电路放电形式有三种,即火花放电、弧光放电和辉光放电。火花放电一般是低压大电流的情况,本安电路中电容放电,化学电源放电即属此类。弧光放电多因高压击穿使空气电离造成。电感电路因开关速度快,储能多,易诱发弧光放电。辉光放电多发生在高电压小电流条件下,一般认为电压需高达200~300 V以上,有时它会在弧光放电的后期发生。

一、断路火花

1. 电阻性电路:无储能元件,火花能量来源于电源。当电路分断时,开关电极接触面迅速减小,接触部位电流密度急剧增加,极间电阻逐渐增大,极间电压同时增大。在电流、电压双重作用下,电极局部熔化形成液态金属桥,随后桥体破坏,产生金属蒸气,电极间电压骤升。当电压高于起弧电压时就产生电火花放电,或称电弧放电。电火花持续时间约100~300 μ s。火花持续时间越长,从电路吸收能量越多,耗散能量也越多。

2. 电感性电路:电感为储能元件,当电路断开时,电流不能突变,而在电极间隙处产生瞬间反电势很大,反电势大小还和电感值,分断速度有关。在高压作用下,电弧放电后还产生辉光放电。除电源能量外还有电感储能($W = \frac{1}{2}LI^2$)也释放到放电间隙,这就增加了放电强度,还加长了放电时间。因此电感电路的断路火花危险性更大。

3. 电容性电路:电容电路在开断时,因电极间不存在电位差,故电路中无电流,无产生电火花之危险。

二、闭路火花

1. 电阻性电路:当电路闭合时,两电极加速相互接近,此时若电源电压较高,则在接触前瞬间使空气击穿电离,产生电弧放电。若电源电压较低,电极接触之前不会产生电离现象。当电极接触瞬间,最高凸出点先接触,并有一定接触电阻。因该点电流密度很大,会使电极熔化,并出现气化层。由于气体复盖层的作用,使电极被隔离中断。当电极继续靠近时,重新发生接触,如此循环往复,直到两电极完全压紧闭合为止。

2. 电感性电路：电路闭合时，电流从零开始上升，不易产生强烈火花放电，和断路相比，放电能量的多。因此对电感性电路而言，可以只考虑断路火花。

3. 电容性电路：电容具有两端电压不能突变的特点。当电路闭合时，电源放电和电容储能放电将同时出现，此过程与纯电阻电路放电情况类似。根据电容器上电压高低，闭合过程可能放电。电容器瞬间放电电流很大且极为迅速，能量也特别集中，因此电容火花点燃能力更强，危险性更大。所以在电容电路设计中，对电容值及跨接电压限制很严格，一般 $10\mu\text{F}$ 电容在甲烷-空气混合物中设计允许最高电压为 12V 。

第二节 临界点燃曲线

本质安全电路的设计是在产品防爆送检之前进行的。如何能保证所设计的电气参数符合本质安全的要求，这是应首先解决的。为审查和验收方便，国标 GB3836.4—83 中给出了各种典型电路的最小点燃电流、最小点燃电压曲线，为设计和使用提供了依据。

所谓本质安全参数是指在最易引爆浓度的可燃性混合物中，利用火花试验装置的开断与闭合，使给定的电路参数产生电火花，进行大量的火花引爆试验而得到的曲线。

曲线中最小点燃电流和最小点燃电压的确定方法是在连续作3200次火花试验中能够发

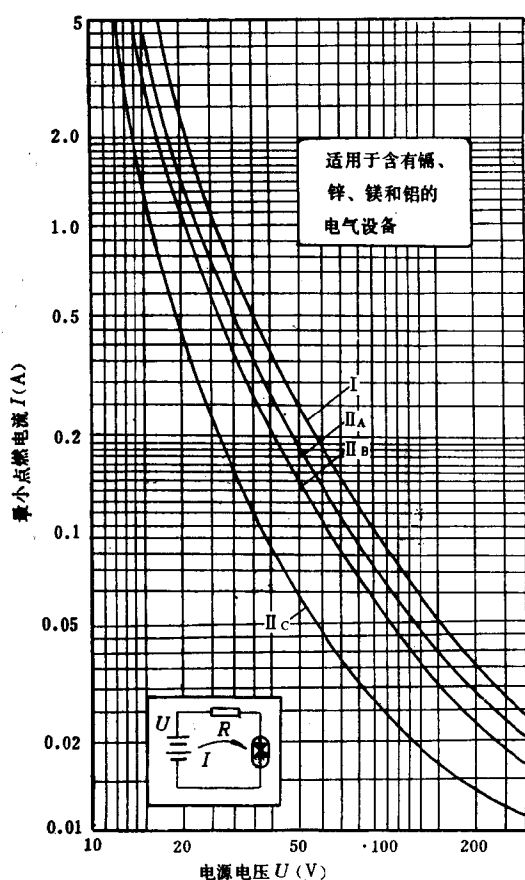


图 1-1 电阻电路点燃曲线之一

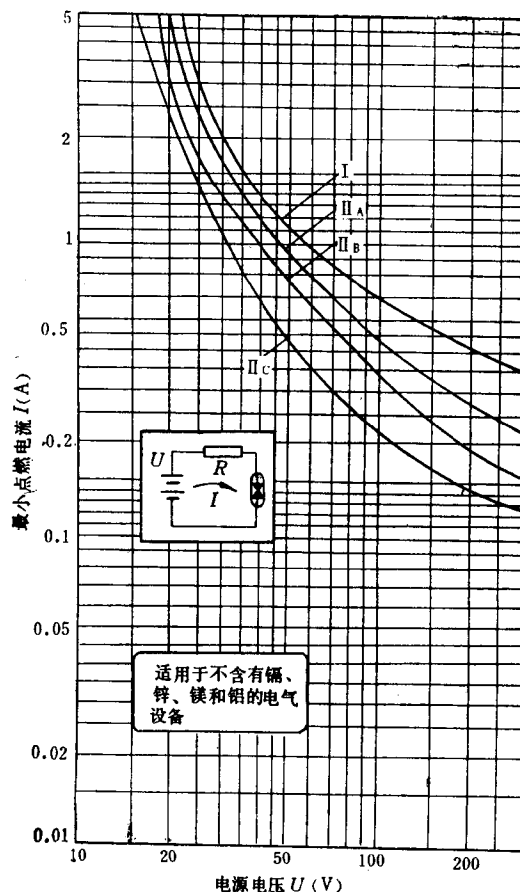


图 1-2 电阻电路点燃曲线之二

生一次点燃的最小电流（对电感电路）或电压（对电容电路），如果此电流或电压降低5%即不能点燃，该电流或电压即作为该电路的最小点燃电流或最小点燃电压。

在设计本质安全电路时，曲线中的参数不能直接采用，必须有一定的安全系数。国家规定，正常情况下，安全系数取2，一个故障时安全系数取1.5。

为使用者方便，按最基本的三种典型电路（纯电阻性、电感性、电容性电路）以及不同电路材质（是否含铜、锌、镁、铝等）绘制了一系列曲线，也可以用电气参数（电阻、电感、电容）为变化量绘制曲线。总之，三种基本电路的参量曲线反映了电压、电流、电感和电容间的相互关系和点燃特性。

图1-1、图1-2给出了电阻性电路电源电压和最小点燃电流关系曲线。曲线表明随电压增加，点燃电流急剧减少。电阻性电路一般指电感小于1mH的电路，在实际电路中，纯电阻电路几乎是不存在的。

图中Ⅰ代表环境气体为甲烷，ⅡA代表丙烷，ⅡB代表乙烯，ⅡC代表氢气，以下各曲线符号同。

图1-3和图1-4为电容性电路的电容量、放电限流电阻和最小点燃电压关系曲线。从曲线可以看出，随着电路电容的增加，点燃电压值明显减少。

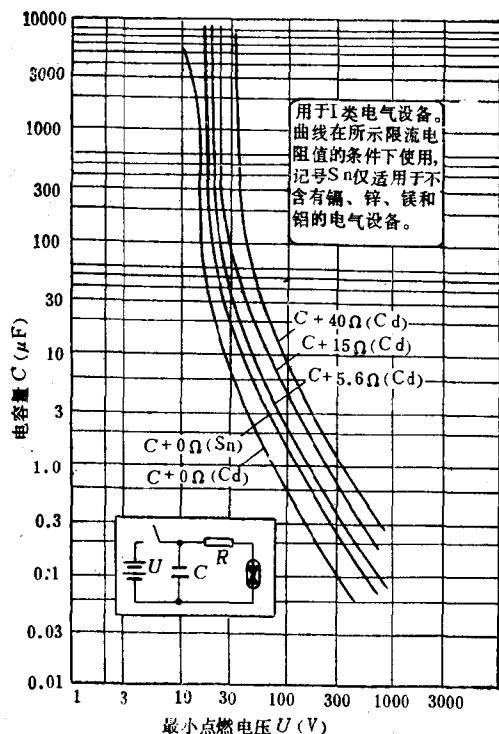


图 1-3 电容性电路点燃曲线之一

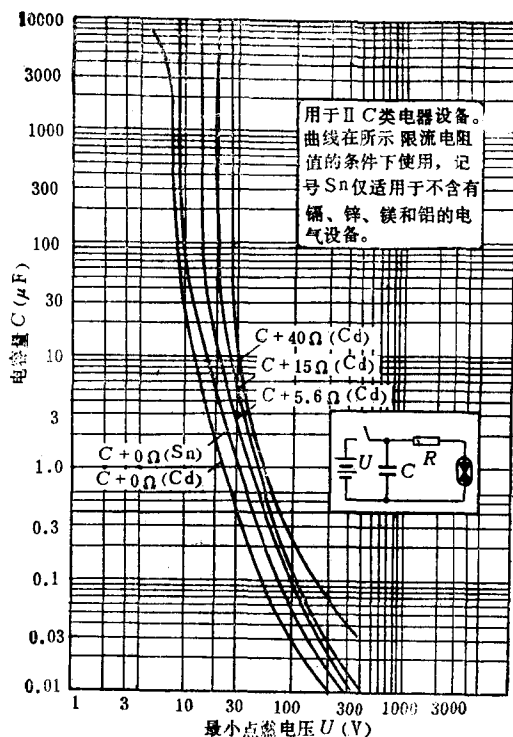


图 1-4 电容性电路点燃曲线之二

图1-5~1-8为电感性电路的电源电压、电感量与最小点燃电流关系曲线，电感量的大小决定了储能即放电能量的多少，电感量增大，最小点燃电流幅值变小，表示设计允许之安全电流值低。

图1-7和图1-8表示低电压电感性电路的点燃曲线，由图可看出在小电感时（低于

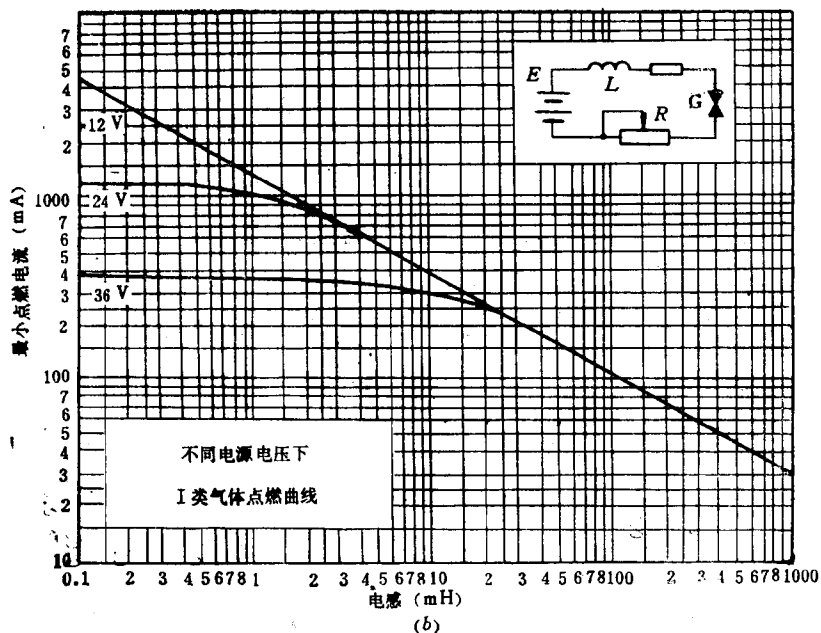
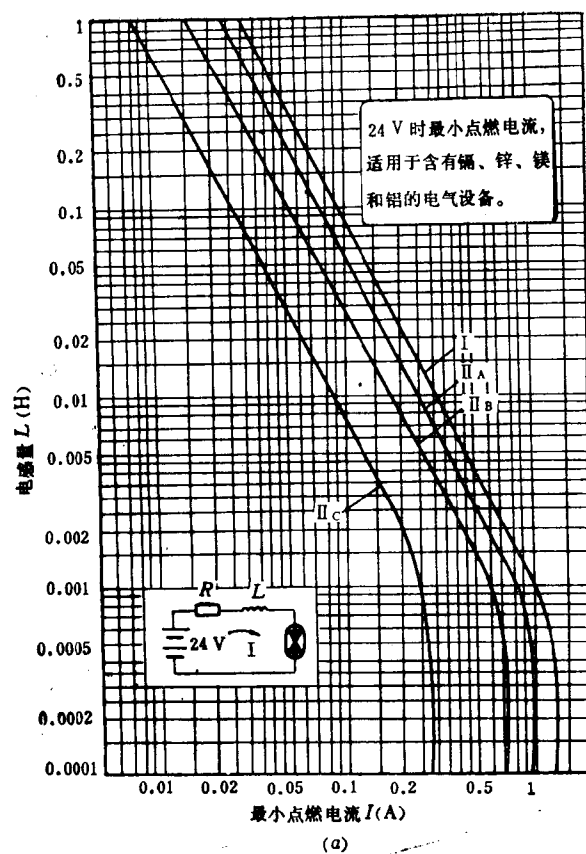


图 1-5

a—电感性电路点燃曲线; b—不同电压的甲烷点燃曲线

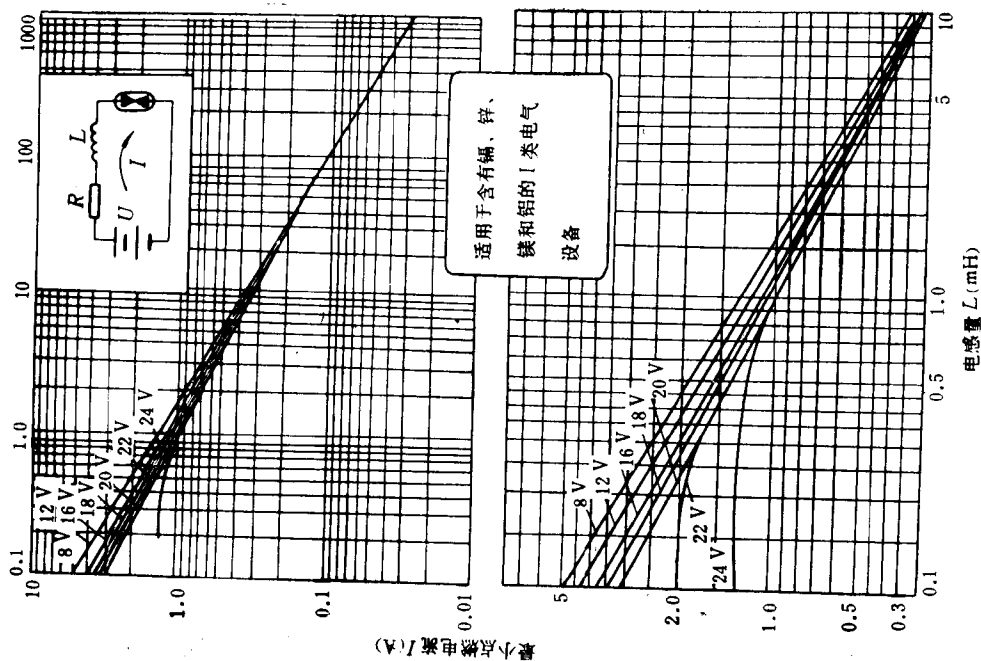


图 1-7 低电压电感电路点燃曲线之一

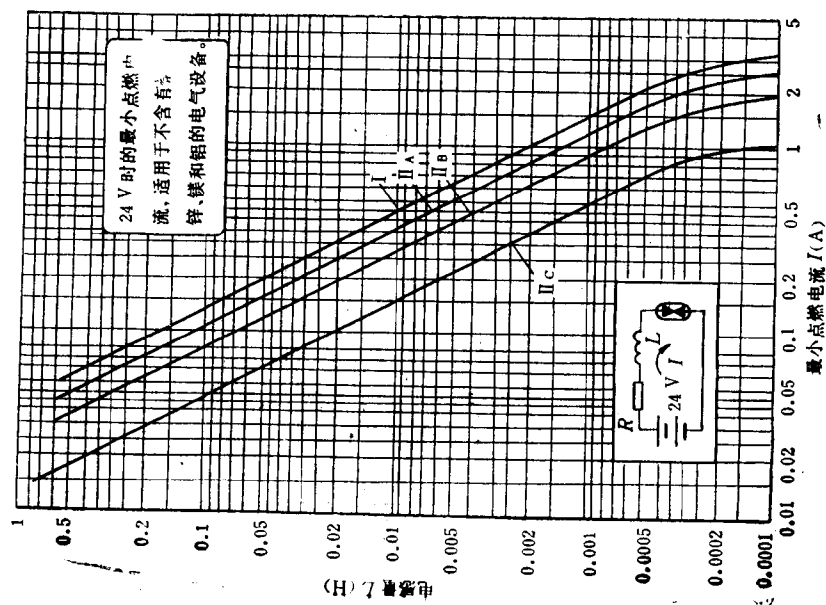


图 1-6 电感性电路点燃曲线之二

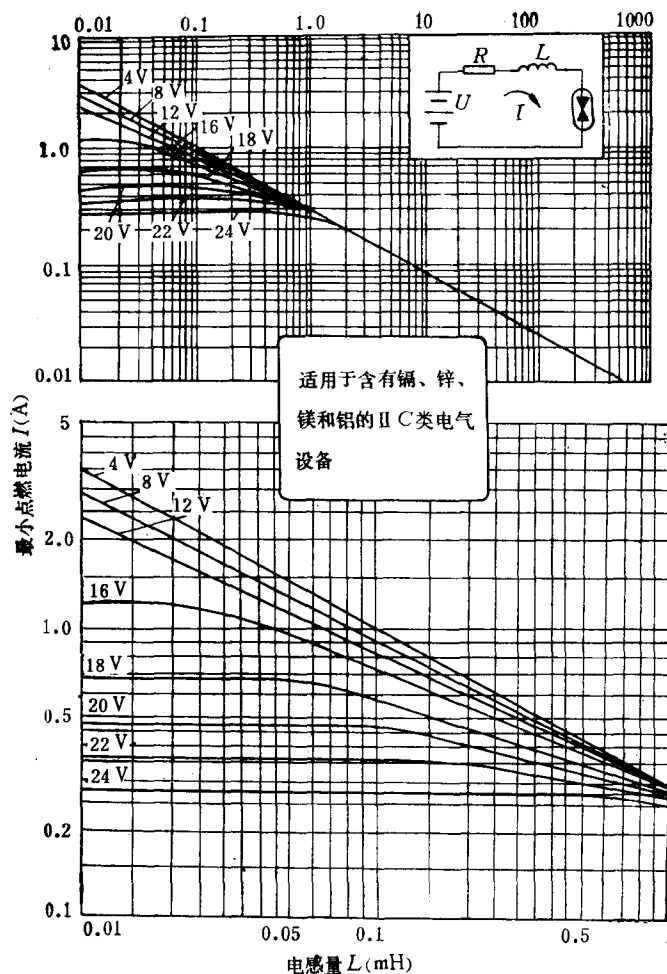


图 1-8 低电压电感电路点燃曲线之二

10mH) 点燃电流随电压的升高而急剧减少, 在大电感时 (高于100mH) 电压对最小 点燃电流值没影响。

第三节 电阻电路的计算

设计电阻回路的参数时, 应首先计算正常运行时之工作电流及事故状态下的 短路 电流, 然后验算电流值均不得超过最小点燃电流。

正常运转回路的工作电流

$$I_g = \frac{E}{R_1 + R_o} \quad (1-1)$$

式中 E ——电路电源电压, V;

R_1 ——电源内阻, Ω ;

R_o ——线路及负载电阻, Ω 。

事故状态下的短路电流

$$I_d = \frac{E}{R_1 + R_{o1}} \quad (1-2)$$

式中 R_{e1} ——短路点前之线路电阻, Ω 。

在实际设计时还应考虑到安全系数, 正常工作状态通常取安全系数 $k_1 = 2$, 故障状态下安全系数取 $k_2 = 1.5$, 即可列公式为

$$k_1 I_g \leq I_B \quad (1-3)$$

$$k_1 u_g \leq u_B \quad (1-4)$$

$$k_2 I_d \leq I_B \quad (1-5)$$

$$k_2 u_d \leq u_B \quad (1-6)$$

式中 I_g ——电路正常工作电流, A;

u_g ——电路正常工作电压, V;

I_d ——电路短路电流, A;

u_d ——电路短路电压, V;

I_B ——临界点燃曲线上的最小点燃电流, A;

u_B ——临界点燃曲线上的最小点燃电压, V。

电阻电路中最危险情况是电源短路, 因电源本身往往内阻很小, 不足以限制回路电流, 结果使短路时电流大大超过点燃电流。在这种情况下可在电源回路内串接一只限流电阻, 其阻值按下式计算:

$$R = \frac{kE}{I_B} - r_{BH} \quad (1-7)$$

式中 E ——电源电势, V;

r_{BH} ——干电池或蓄电池本身的内阻, Ω 。

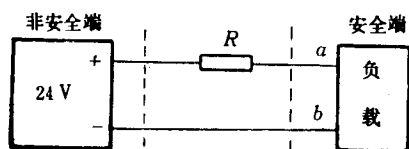


图 1-9 例 1-1 图

例 1-1 图 1-9 为一直流 24V 电源, 供给电阻性负载 $R_L = 120 \Omega$, 图中 R 表示电缆连线电阻 $R = 50 \Omega$ 。试问当 a 、 b 端短路时是否能达到本安要求, 本电路工作于含甲烷气体环境中。

解 正常工作状态的负载电流 I_1

$$I_1 = \frac{24}{R + R_L} = \frac{24}{50 + 120} = 141 \text{ mA}$$

取安全系数 $k_1 = 2$, 得 $k_1 I_1 = 282 \text{ mA}$ 查曲线图 1-1, 得最小点燃电流 $I_B = 1.24 \text{ A}$ 。

故障工作状态下的短路电流 (a 、 b 端短路) I_2 为

$$I_2 = \frac{24}{R} = \frac{24}{50} = 480 \text{ mA}$$

取安全系数 $k_2 = 1.5$ 得 $K_2 I_2 = 720 \text{ mA}$, 查曲线图 1-1 得最小点燃电流 $I_B = 1.24 \text{ A}$

将上列数值按式 (1-3) 和 (1-5) 验算, 知本线路符合本安要求, 两种情况均小于最小点燃电流。

第四节 电感电路的计算

电感性电路指含有电感元件的负载电路, 如扼流圈、继电器、电磁铁、电机等。在确定电路元件电感后, 可查阅为电感电路设计使用的最小点燃电流曲线 (图 1-5, 1-6) 计算电路工作电流和短路电流时, 对于直流电路, 仍可按前述计算电阻电路的公式。对于交流