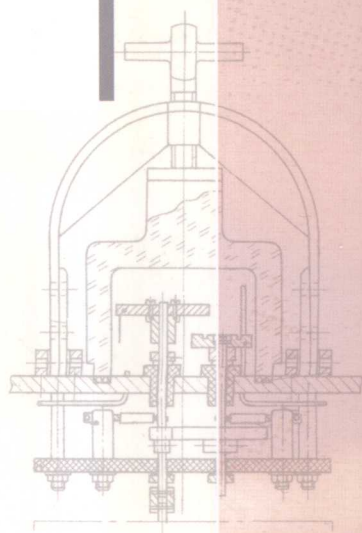


刘树林 刘健 著

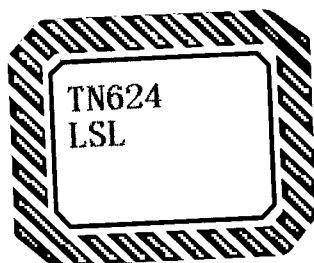


本质安全开关 变换器



本质安全开关变换器

刘树林 刘 健 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地论述了本质安全开关变换器的组成原理、分析和设计方法,内容主要包括本质安全电路理论和本质安全火花试验方法基础(绪论)、本质安全开关变换器的组成和原理、本质安全开关变换器的稳态和极限参数分析方法、本质安全开关变换器输出短路放电特性及非爆炸输出本质安全判据、本质安全开关变换器电感分断放电特性及非爆炸内部本质安全判据、输出本质安全型和本质安全型开关变换器的设计方法等。

本书适合于从事煤矿、石油、化工等易燃、易爆危险工作环境下本质安全电路与开关电源研究、开发、生产和使用的工程技术人员和管理人员阅读,也可供高等学校教师、研究生及高年级学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

本质安全开关变换器/刘树林,刘健著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-021534-5

I. 本… II. ①刘…②刘… III. 开关-变换器-研究 IV. TN624

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 043840 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:宋玲玲
责任印制:刘士平 / 封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 5 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008 年 5 月第一次印刷 印张:14

印数:1—3 000

字数:261 000

定价:36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<路通>)

序

工作在爆炸性危险环境中的电气、电子设备与普通电气设备相比,具有许多特殊要求,其中的关键是必须将电路正常工作或故障时的火花放电能量限制在足够安全的范围内,不致引燃爆炸性环境的可燃性气体或其混合物,为此,必须对其采取防爆措施。在各种防爆形式中,本质安全型电气设备从电路的电气参数选择上保证了防爆性能,具有安全程度最高、体积最小、重量最轻、携带和维护最方便和造价低廉等优点。因此,用于爆炸性危险场所的电气系统和电器设备,凡是可以或有希望设计成本质安全型的,总是尽量设计成本质安全型。

在本质安全理论及本质安全电路的研究方面,已取得了一些成果,但针对开关变换器这类非线性、时变的复杂电路的研究报道却较少。

本质安全防爆电源是本质安全型电气设备的最关键环节,传统采用工频变压器隔离的本质安全线性电源应用较为广泛,但其缺点也越来越明显,而开关电源具有效率高、电网适应性强、体积小和重量轻等诸多优点,所以采用本质安全型开关电源取代传统本质安全电源具有广阔的应用前景。

基于上述背景,作者通过对本质安全开关变换器系统深入的研究,提出了许多新理论、新结构和新方法,并用实例和试验结果验证了理论分析和所提出结构的正确性和可行性。

作者将取得的研究成果整理成书,可为相关科技人员设计、研制本质安全型开关变换器或本安型开关电源提供理论指导,且有助于在爆炸性环境下推广应用效率高、体积小、重量轻的本质安全型开关电源产品。

尽管在本质安全开关变换器领域仍存在许多问题有待于进一步深入研究,但是该书作者这种敢为人先的创新精神值得称赞,特此作序作为鼓励。

张 刚

国家防爆电气产品质量监督检验中心

2008年1月

前 言

应用于煤矿、石化等易燃、易爆危险性环境的电气电子设备必须满足防爆的要求,本质安全是最佳的防爆形式,本质安全型电气设备已在危险性环境得到越来越广泛的应用。然而,目前作为本质安全型电气设备重要组成部分的防爆直流电源多为隔爆型的线性电源,效率低、工作电压范围窄,且因使用工频变压器而十分笨重。显然,以本质安全型开关电源取代笨重的、成本高昂的隔爆型线性电源,必将是一种趋势。

本质安全开关电源通常由一个隔离的开关变换器和若干开关变换器级连构成,因而,本质安全开关变换器是本质安全开关电源的核心,由于其功率较大,因此面临的本质安全问题更为突出。

作者针对本质安全开关变换器进行了深入系统的研究,并将所取得的一些研究成果整理成书,书中的许多概念、拓扑结构和分析方法是首次提出的,难免存在不妥之处,望读者批评指正。

作者的研究工作得到了教育部跨世纪优秀人才支持计划、陕西省教育厅产业化培育基金及西安市科技攻关项目基金的资助;在课题的进行过程中,得到煤炭科学研究总院抚顺分院孟庆海博士、美国 Linear Technology 公司毛鸿博士、西安科技大学张燕美教授以及南阳防爆电气研究所、国家防爆电气产品质量监督检验中心张刚教授级高级工程师与程曙光工程师的帮助和支持,在此一并表示感谢!国家防爆电气产品质量监督检验中心张刚教授级高级工程师还认真审阅了本书的第1、2章,并提出了许多宝贵建议,在此表示感谢。在成书的过程中,还得到了杨银玲、刘辉、钟久明、陈勇兵、寇蕾、梁欢迎、李艳、李芳芳和曹笛笛等同志的热心支持和无私帮助,在此表示感谢。

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 爆炸性环境用电气电子设备的防爆形式	1
1.1.1 爆炸性环境危险物质的分类及产生爆炸的条件	1
1.1.2 主要防爆形式原理及其标志	2
1.1.3 防爆形式的选择及其应用	3
1.2 本质安全电路理论及其发展与现状	4
1.2.1 本质安全电路的基本概念	4
1.2.2 本质安全电路理论研究现状与发展	5
1.3 本质安全型电气设备及其应用	7
1.3.1 本质安全型电气设备的特点与适用场所	7
1.3.2 本质安全型电气设备的保护等级和分类	7
1.3.3 本质安全型电气设备的应用	8
1.4 本质安全防爆系统的组成原理和发展	9
1.4.1 本质安全防爆系统的组成和原理	9
1.4.2 本质安全防爆系统中安全栅的研究现状与发展	9
1.5 本质安全防爆电源系统的组成及现状与发展	10
1.5.1 危险性环境对本质安全防爆电源的要求	10
1.5.2 本质安全防爆电源系统的组成和原理	11
1.5.3 本质安全防爆电源的发展和现状	12
1.6 本质安全开关变换器的组成原理及分类	15
1.6.1 概述	15
1.6.2 本质安全开关变换器系统组成和原理	16
1.6.3 输出本质安全型开关变换器和本质安全型开关变换器	17
1.7 本质安全开关变换器的主要技术性能要求和指标	18
1.7.1 主要技术性能要求	18
1.7.2 主要技术指标	21
第 2 章 本质安全电路及本质安全防爆电源的分析与设计	23
2.1 本质安全电路的主要放电形式	23
2.1.1 火花放电	23

2.1.2	电弧放电	24
2.1.3	辉光放电	25
2.2	本质安全电路的本质安全性能判别	25
2.2.1	本质安全电路的爆炸性试验方法	25
2.2.2	本质安全电路的非爆炸判断方法	28
2.3	直流电路的本质安全性能分析及设计	30
2.3.1	简单电阻性电路的本质安全特性分析和设计	31
2.3.2	简单电感性电路的本质安全特性分析和设计	32
2.3.3	电容电路的本质安全特性分析和设计	33
2.3.4	复杂电路的本质安全特性分析和判断	35
2.4	本质安全电路中的保护性元件和组件	40
2.4.1	保护性元件和组件及其作用	40
2.4.2	保护性元件和组件的分类和应用	40
2.5	本质安全防爆系统中安全栅的分析和设计考虑	41
2.5.1	安全栅及其分类	41
2.5.2	齐纳式安全栅	42
2.5.3	晶体管保护式安全栅	44
2.5.4	可控硅式安全栅	45
2.5.5	安全栅允许的分布参数和设计考虑	46
2.5.6	安全栅的选择和应用	47
2.6	本质安全防爆电源的分类及其设计考虑	49
2.6.1	本质安全防爆电源的分类	49
2.6.2	独立电源的设计	50
2.6.3	外接电源的设计考虑	51
2.6.4	电源电路故障对本质安全性能的影响及实现本质安全的措施	52
2.6.5	本质安全防爆电源的常用输出限能保护方式	54
2.7	隔爆兼本质安全线性稳压电源	58
2.7.1	隔爆兼本质安全线性稳压电源的组成和原理	58
2.7.2	实用隔爆兼本质安全线性稳压电源电路分析	62
2.7.3	隔爆兼本质安全线性稳压电源存在的问题	64
2.8	隔爆兼本质安全开关稳压电源	65
2.8.1	概述	65
2.8.2	隔爆兼本质安全开关稳压电源的组成和原理	66
2.8.3	隔爆兼本质安全开关稳压电源实例分析	67
2.8.4	隔爆兼本质安全开关稳压电源存在的问题	71
2.9	本章小结	72

第 3 章 本质安全开关变换器的稳态特性及极限参数分析	74
3.1 引言	74
3.2 开关变换器的能量传输过程和工作模式分析	75
3.2.1 开关变换器的结构特点	75
3.2.2 开关变换器的能量传输过程	77
3.2.3 开关变换器的工作模式和临界电感	79
3.2.4 三种开关变换器的能量传输过程和工作模式比较	80
3.2.5 仿真与实验验证	82
3.3 开关变换器的工作范围和工作模式分界	85
3.3.1 开关变换器的工作范围和工作模式分界	85
3.3.2 开关变换器的最小和最大临界电感	86
3.3.3 三种开关变换器的最小和最大临界电感	88
3.4 开关变换器的输出电压纹波分析	89
3.4.1 CISM 时的输出电压纹波分析	90
3.4.2 IISM-CCM 时的输出电压纹波分析	90
3.4.3 IISM-DCM 时的输出电压纹波分析	91
3.4.4 开关变换器的最大输出电压纹波分析	93
3.4.5 三种开关变换器的输出电压纹波和最小电感比较	94
3.4.6 仿真与实验验证	95
3.5 开关变换器的电感电流分析	100
3.5.1 CCM 变换器的电感电流分析	101
3.5.2 DCM 变换器的电感电流分析	101
3.5.3 开关变换器的最大电感电流分析	102
3.5.4 三种开关变换器的电感电流比较	103
3.5.5 仿真与实验验证	106
3.6 本章小结	108
第 4 章 开关变换器输出短路特性及非爆炸输出本质安全判据	109
4.1 简单电容电路短路放电特性分析	109
4.1.1 简单电容电路的无触点短路放电特性	109
4.1.2 简单电容电路的有触点短路放电特性	110
4.2 开关变换器的输出短路保护电路和本质安全型 Boost 变换器	113
4.2.1 本质安全开关变换器的输出短路保护电路	113
4.2.2 基于本质安全的 Boost 开关变换器的改进电路	117
4.3 开关变换器的输出短路放电特性	120
4.3.1 开关变换器的输出等效电容电路及其特点	120
4.3.2 开关变换器的输出短路放电特性分析	120

4.4 本质安全开关变换器的输出短路释放能量分析	124
4.4.1 开关变换器的输出短路释放能量的组成	124
4.4.2 CCM 开关变换器的输出短路释放能量	125
4.4.3 DCM 开关变换器的输出短路释放能量	127
4.4.4 开关变换器在整个动态工作范围内的最大输出短路释放能量	129
4.4.5 三种开关变换器的输出短路释放能量比较	131
4.5 开关变换器的输出短路等效电容和输出本质安全判据	135
4.5.1 开关变换器的输出短路等效电容及输出短路等效电路	135
4.5.2 开关变换器的输出本质安全判据	135
4.5.3 开关变换器的输出本质安全判据验证	136
4.5.4 实验验证	136
4.6 本章小结	140
第5章 开关变换器的电感分断放电特性及非爆炸内部本质安全判据	141
5.1 引言	141
5.2 简单电感电路分断放电特性分析	141
5.2.1 简单电感电路的分断放电过程和放电形式	141
5.2.2 简单电感电路的分断放电模型	144
5.3 开关变换器的电感分断放电特性	145
5.3.1 开关变换器中的电感电路及其与简单电感电路的区别	145
5.3.2 开关变换器最危险的分断位置及分段时刻	147
5.3.3 开关变换器的电感分断放电特性分析	149
5.4 开关变换器的电感分断放电特性分析方法——等效电阻法	152
5.4.1 等效电阻法	152
5.4.2 等效电阻法求解步骤	154
5.4.3 等效电阻法的应用	161
5.5 开关变换器内部本质安全的判断	162
5.5.1 开关变换器的等效简单电感电路和内部本质安全判据	162
5.5.2 开关变换器内部本质安全的判断方法	162
5.5.3 理论临界点燃电容的求解方法	163
5.5.4 实验验证	164
5.6 本章小结	167
第6章 本质安全开关变换器的设计	168
6.1 引言	168
6.2 输出本质安全开关变换器的设计	169
6.2.1 输出本质安全开关变换器的设计方法	169
6.2.2 三种输出本质安全开关变换器的设计方法比较	171

6.2.3 输出本质安全开关变换器的设计实例	173
6.3 本质安全开关变换器的设计	177
6.3.1 本质安全开关变换器的设计方法	177
6.3.2 本质安全开关变换器设计实例	179
6.4 本质安全开关变换器的最小工作频率设计	181
6.4.1 工作频率对本质安全开关变换器元器件设计区域的影响	181
6.4.2 输出本质安全开关变换器的最小工作频率	181
6.4.3 本质安全开关变换器的最小工作频率	183
6.5 外接负载电路的影响及本质安全开关变换器的设计步骤	186
6.5.1 负载电路对本质安全电路性能的影响	186
6.5.2 本质安全开关变换器的设计步骤	187
6.6 本章小结	187
参考文献	189
附录 A 主要符号说明	198
附录 B 电感和电容电路的临界点燃曲线	202
B1 I 类电阻性电路最小点燃电流曲线	202
B2 I 类电感电路临界点燃曲线	203
B3 I 类电感电路临界点燃曲线 (扩展范围)	204
B4 I 类电容电路最小点燃电压曲线 1	205
B5 I 类电容电路最小点燃电压曲线 2	206
后记	207

第 1 章 绪 论

1.1 爆炸性环境用电气电子设备的防爆形式

1.1.1 爆炸性环境危险物质的分类及产生爆炸的条件

工作于爆炸性环境的电气电子设备,必须满足防爆安全性能的要求。爆炸性环境是指在大气条件下,可燃性物质以气体、蒸气、粉尘、纤维或飞絮的形式与空气形成的混合物,在被点燃后,能够保持燃烧并自行传播的环境。易燃易爆性物质的种类繁多,而针对具有不同易燃易爆性物质的环境,应用于其中的电气电子设备所采取的防爆措施也是不同的。因此,弄清爆炸性环境所含易燃易爆性物质及其类型,对防爆形式的选择、防爆电气电子设备设计和应用至关重要。

1. 爆炸性环境分类和易燃易爆性物质分级^[1~3]

爆炸性环境按所含易燃易爆性物质形态可分为两类:爆炸性气体环境和爆炸性粉尘环境。根据爆炸性气体类型的不同,爆炸性气体环境又可分为Ⅰ类和Ⅱ类两种类型,因此,爆炸性环境可分为三类。Ⅰ类:煤矿甲烷(瓦斯)气体环境;Ⅱ类:除煤矿甲烷气体之外的其他爆炸性气体环境;Ⅲ类:爆炸性粉尘(纤维或飞絮物)环境。

2. 危险场所及其划分^[1~3]

危险场所就是指存在着易燃、易爆气体、蒸气、液体、可燃性粉尘或者可燃性纤维而具有引起火灾或者爆炸危险的场所。典型的危险场所,如石油化工业中爆炸性物质的生产、加工和储存过程中所形成的环境、煤矿井下(由于煤层中不断渗透出的甲烷气体而形成的工作环境)等。按危险场所中存在物质物态的不同,将危险场所划分为爆炸性气体环境和可燃性粉尘环境;按场所中危险物质存在时间的长短,将两类不同物态下的危险场所分别划分为三个区。

(1) 对爆炸性气体环境,三个区域分别为 0 区、1 区和 2 区。0 区:爆炸性气体环境连续出现或长时间存在的场所;1 区:在正常运行时,可能出现爆炸性气体环境的场所;2 区:在正常运行时,不可能出现爆炸性气体环境,如果出现也是偶尔发生并且仅是短时间存在的场所。

(2) 对可燃性粉尘环境,三个区域分别为 20 区、21 区和 22 区。20 区:在正常

运行过程中可燃性粉尘连续出现或经常出现,其数量足以形成可燃性粉尘与空气混合物和(或)可能形成无法控制和极厚的粉尘层的场所及容器内部;21区:在正常运行过程中,可能出现粉尘数量足以形成可燃性粉尘与空气混合物,但未划入20区的场所;22区:在异常条件下,可燃性粉尘云偶尔出现并且只是短时间存在、可燃性粉尘偶尔出现堆积或可能存在粉尘层并且产生可燃性粉尘空气混合物的场所。如果不能保证排除可燃性粉尘堆积或粉尘层时,则应划分为21区。

3. 爆炸性混合物产生爆炸的条件^[4]

爆炸是指物质从一种状态经过物理变化或化学变化,突然变成另一种状态并放出巨大的能量而产生的光和热或机械功。在此仅谈及爆炸性混合物的爆炸,即所有的可燃性气体、蒸气及粉尘与空气所形成的爆炸性混合物的爆炸,这类爆炸需要同时具备三个条件才可能发生:①必须存在爆炸性物质或可燃性物质;②要有助燃性物质,主要是空气中的氧气;③就是还要存在引燃源(如火花、电弧和危险温度等),它提供点燃混合物所必需的能量。只有这三个条件同时存在,才有发生爆炸的可能性,其中任何一个条件不具备,就不会产生燃烧和爆炸。因此,采取适当的措施,使三个条件不同时具备即可达到防止爆炸的目的。由于爆炸性混合物普遍存在于煤炭、石油、化工、纺织和粮食加工等行业的生产、加工和储运等场所,如发生爆炸则危害极大,于是,人们采取了多种防爆技术方法,防止爆炸危险性环境的形成及其爆炸。

1.1.2 主要防爆形式原理及其标志

1. 防爆形式及其原理

危险环境的所有设备必须满足防爆要求,根据所采取的防爆措施,可把防爆电气设备分为本质安全型、隔爆型、增安型、正压型、油浸型、充砂型、浇封型、n型、特殊型和粉尘防爆型等^[1~3]。其中隔爆型、增安型、正压型、本质安全型和浇封型应用较多,其原理简述如下。

(1) 隔爆型。一种采用隔爆外壳实现防爆的形式,用字母“d”表示。隔爆外壳能够承受通过外壳的任何接合面或结构间隙渗透到其内部的可燃性混合物在内部爆炸而不损坏,并且不会引起外部由某种或多种气体及蒸气形成的爆炸性环境的点燃。

(2) 增安型。其原理是对在正常运行条件下不会产生电弧、火花和危险高温的电气设备采取一些附加措施以提高其安全程度,防止其内部和外部部件可能出现危险高温、电弧和火花的电气设备,用字母“e”表示。

(3) 正压型。它是一种通过保持设备外壳内部保护气体的压力高于周围爆炸

性环境压力的措施来达到安全的电气设备,用字母“p”表示。通过保持其内部保护气体的压力高于周围爆炸性环境压力的措施,以免爆炸性混合物进入外壳来达到安全的电气设备。保护气体是用来保持正压或将可燃性气体或蒸气的浓度稀释到爆炸下限以下的气体,可以是空气、氮气或任何其他非可燃性气体及它们的混合物。

(4) 本质安全型——简称本安型。本质安全防爆形式要求设备内部的电路在规定的条件下,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爆炸性混合物,用字母“i”表示。本质安全型是从限制电路中的能量入手,通过可靠的控制电路参数将潜在的火花能量降低到可点燃规定的气体混合物能量以下,导线及元件表面发热温度限制在规定的气体混合物的点燃温度之下。

(5) 浇封型。其防爆原理是将可能产生引起爆炸性混合物爆炸的火花、电弧或危险温度部分的电气部件,浇封在浇封剂(复合物)中,使它不能点燃周围爆炸性混合物(见 GB 3836.9 标准),用字母“m”表示。采用浇封措施,可防止电气元件短路、固化电气绝缘,避免了电路上的火花以及电弧和危险温度等引燃源的产生,防止了爆炸性混合物的侵入。

2. 防爆形式标志

各种防爆形式的标识如表 1.1.1 所示。

表 1.1.1 防爆形式及其标识

防爆形式	防爆形式标志	防爆形式	防爆形式标志
隔爆型	Exd	充砂型	Exq
增安型	Exe	浇封型	Exm (Exma/ Exmb/ Exmc)
正压型	Exp (ExpX/ Expy/ Expz)	n 型	Exn (nA/ nC/ nR/ nL)
本质安全型	Exi (Exia/ Exib)	特殊型	Exs
油浸型	Exo	粉尘防爆型	Exta/ Extb/ Extc

1.1.3 防爆形式的选择及其应用

在各种防爆形式中,隔爆型^[5~7]、本质安全型^[8~11]、浇封型^[12,13]、增安型^[14,15]和正压型^[16,17]应用较多。比较几种主要防爆形式的优缺点可知,本质安全型电气设备从电路的电气参数上保证了防爆的要求,省去了隔爆外壳,具有安全程度最高、体积最小、重量最轻、携带和维护最方便和造价最低廉五大优点。因此,用于爆炸性危险场所的电气系统和电器设备,凡是可以或有希望设计成本质安全型的,总是尽量设计成本质安全型,而不设计成隔爆型或其他类型。随着煤矿生产机械化程度的提高,电工技术和自动控制技术的发展,在井下电控、通信、循环以及各种检测仪表及保护装置方面,本质安全型将得到日益广泛的应用。

由于本质安全型电气设备具有诸多优点,在技术实现可能的前提下,应首先考虑设计成本质安全型,除非电路的输出功率太大,超出了本质安全功率范围或使用井下动力电网电源直接引入,无法设计成独立的本质安全型。尽管如此,也应尽量考虑把其中某些局部电路设计成本质安全电路,以求得更好的经济效益。便携式仪表一般容量不大,又使用独立的电池作为电源,有条件设计成本质安全型。不适合加隔爆外壳的电声器件,如喇叭、送受话器、蜂鸣器等,以及磁敏、热敏元件构成的电路,都应设计成本质安全型。

对有外部电路连接的两台以上设备组成的配套系统,应尽量减少隔爆型设备,以简化系统的结构,降低造价。如果电气设备主体只能设计成隔爆型,又没有向外引出电气部分,就没有必要设计本质安全电路。工厂用电动组合仪表,有的采用了双重防爆措施,外壳为隔爆结构,内部电路为本质安全电路,以达到更高的安全程度。

1.2 本质安全电路理论及其发展与现状

1.2.1 本质安全电路的基本概念

根据国际电工委员会(IEC)的定义,本质安全电路是指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性气体混合物的电路^[1~3]。

“规定的试验条件”是指在考虑了各种最不利的因素(包括一定的安全系数、试验介质的浓度等)的试验条件。

“电火花”是指电路中接点的动作火花(包括按钮、开关、接触器接点以及各种控制接点等动作时产生的电火花)以及电路在发生短路、断路或接地时所产生的电火花,也包括静电和摩擦产生的火花。

“热效应”是指电气元件、导线过热形成的表面温度及热能量和电热体的表面温度及热能量。

“正常工作”是指本质安全型电气设备在设计规定的条件下工作。防爆检验部门用火花试验装置对电路进行短路、断路和接地试验视为正常状态,即在检验时把电路短路、断路和接地视为必然现象。

“规定的故障状态”是指除了“可靠元件或组件”(“可靠元件或组件”是指在使用、存储和运输期间不会出现影响本质安全电路安全性能的故障的元件或组件)外,所有与本质安全性能有关的电气元件损坏或电路连接发生的故障,诸如电气元件短接、晶体管或电容击穿、线圈匝间短路等均视为规定的故障状态。在对“Exib”等级本质安全电路进行故障分析时,只考虑一个独立故障(指一个元件损坏或一个元件损坏而导致其他元件相继损坏的一系列故障),而不考虑两个或两个以上的独

立故障。

本质安全电路也可能产生火花,只是电路产生的任何火花都是安全的,因此,“本质安全”电路又称为“安全火花”电路。本质安全电路可以是局部电路,也可以是整个电路。

1.2.2 本质安全电路理论研究现状与发展

对“本质安全”防爆技术的研究,最早可追溯到 1886 年,由普鲁士瓦斯委员会委托亚琛(Aachen)工业大学所进行的瓦斯爆炸方面的基础性试验,并在 1898 年的后续试验中得出结论:“每一个电火花都能够引起爆炸”^[18]。

1911 年,由于电铃信号线路中产生的电火花引燃瓦斯,威尔士(Welsh)煤矿发生瓦斯爆炸;1913 年,圣海德(Senghenydd)煤矿发生同样的瓦斯爆炸,造成 400 多人丧生的惨剧;事故严重的后果促使人们对电火花进行研究并采取措施。1914 年,英国学者 Wheeler 首先对电铃信号电路中产生的电火花点燃瓦斯的特性进行了研究,并设计出火花试验装置,并于同年提出的用于煤矿井下的电铃信号线路^[19,20],这就是本质安全电路的雏形。1915 年,Thronton 参与了该项工作,并于 1916 年提出了本质安全电路的设计方法和理论^[21]。其后本质安全技术发展较快,到了 20 世纪 50 年代,英国、联邦德国、苏联等国对于本质安全防爆理论和实际应用方面的研究进展显著。在 60 年代后期和 70 年代初期,经过国际电工委员会(IEC)第 31 分技术委员会——电气防爆技术委员会(TC31)成员国共同磋商、协调,制定了国际标准 IEC79—11^[2],并在 IEC79—11 中,将联邦德国的本质安全实验研究装置推荐为 IEC 标准火花试验装置。

国外对本质安全理论方面的研究较早也较完整,主要集中于对火花放电^[4,22~24]及电弧放电^[4,25]的研究、各种因素对最小点燃电流的影响^[4,26]、最小点燃能量的确定^[4,27]、本质安全性能试验^[4,28,29]及电路设计及评价各元件对电路本质安全性能的影响^[30,31]等方面。在此基础上,进一步对电容电路^[32,33]的本质安全特性、含有线性与非线性电路的组合本质安全电路的输出短路特性^[34]、频率对本质安全性能的影响^[35,36]、安全栅的使用可靠性^[37]等方面进行了具体研究。而且,在本质安全理论方面的研究已不限于低压情况,文献^[38]还对高压分断火花点燃易燃易爆气体的特性也进行专门研究。

文献^[4]将电容电路的短路火花放电过程分成三个阶段:火花形成阶段、火花放电阶段和火花衰减阶段;而将电感电路的电弧放电过程分成四个阶段:电弧形成阶段、电弧放电阶段、熄弧阶段和辉光放电阶段。此外,还应用所建立的数学模型对火花放电及电弧放电的特性进行了分析,指出从能量等效的角度可将含电容的复杂电感电路等效为简单电感电路。

我国对本质安全技术及理论方面的研究起步较晚,但发展很快。20 世纪 50

年代初期,我国才开始制造防爆电机、防爆电器,中期开始研究本质安全理论问题;60年代初期,我国开始研制煤矿用本质安全型电气设备,并投入使用;70年代初期,开始设计制造应用于化工和石油部门的本质安全型电气设备^[39]。

国内对本质安全理论方面的研究内容也非常丰富。文献[40]对直流电阻性本质安全电路断开过程中的三种低能电弧放电特性进行了分析,得出在电弧放电期间,如果电弧功率均匀,则不会造成气体引爆,并用抛物线模型对放电波形进行了仿真。鉴于实际应用的本质安全型电气设备中大部分含有电感元件,且电感电路的分断放电对电路本质安全性能影响较大,因此,研究人员对电感电路的研究最多:如本质安全电感电路电弧放电时间的分析和测量^[41~45];本质安全电路电弧放电特性的建模分析^[46~48];电感性本质安全电路电弧放电伏安特性分析^[49,50];复杂电感电路的本质安全特性分析^[45,51,52];不同频率下,复杂电感电路的本质安全特性研究^[52];提高本质安全电感电路功率的方法^[53];最小点燃能量的测试方法^[54]等。

对电容电路,针对其本质安全特性进行研究的报道相对要少得多,文献[39]用试探的方法对电容电路的短路放电特性和放电波形进行了分析,指出如果在电容放电支路中串入一个小小的电阻,就可极大提高电容电路的本质安全性能,且得出了在时间上或在空间上越集中的火花越容易点燃易燃易爆气体的结论——即对于存储同样能量的电容,电压越高越危险。文献[20]则仅对电容电路的短路放电特性进行了定性的分析和简要的计算。文献[55]则对容性电路的火花试验方法进行了改进,提出了不影响 IEC 标准火花试验装置物理参数和性能指标的试验容性电路的无通槽型铜盘方案,提高了试验灵敏度及可检测容性电路的容值范围。

确保电路满足本质安全要求或提高其本质安全性能的主要措施是在本质安全电路中采用保护性元件或限流限压元件;为了限制本质安全型电池组充电回路的反向短路电流,利用二极管的单向导电性作为串联保护元件^[56];为实现在本质安全电路与非本质安全电路间的信号隔离与转换,常用继电器、光电耦合器、隔离电容器等作为电隔离保护器件^[57,58];本质安全电路中通常将电阻作为限流保护元件,将稳压二极管、压敏电阻作为限压保护元件,用二极管、电容器、压敏电阻等作为电感电路的分流保护性元件^[58~60]等。用电阻或晶体管作为限流元件将需要采用大功率电阻,且在正常工作时也会产生很大功耗,为此,文献[61]、[62]建议用熔断器或微型熔丝管作为限流保护元件,正常工作时呈现小电阻,而当电流达到一定值时,快速熔断,从而使故障火花能量得到抑制,但缺点是不能恢复。

可见,国外对本质安全理论的研究起步较早也较完整,但同国内一样,对本质安全电路的理论和评价方法的研究主要针对线性电路;实现本质安全或提高本质安全性能的主要措施是采用保护性元件或限流、限压元件。而对像开关变换器这样的非线性时变电路的研究报道较少。

1.3 本质安全型电气设备及其应用

1.3.1 本质安全型电气设备的特点与适用场所

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,标志符号为“i”^[3]。本质安全型电气设备不需专门的隔爆外壳,这就大大缩小了设备的体积和重量。本质安全型电气设备对外部输电线要求不高,可节省大量电缆成本。本质安全型电气设备是通过限制电气参数,进而限制放电火花能量实现电气防爆的,也就是说设备本身就具有防爆性能,因此,与隔爆型电气设备相比,这种电气设备的安全程度更高,安全性能也更好。

根据使用场所的需要和设计的可能性,本质安全型电气设备可分为单一式(全部本质安全型)和复合式(部分本质安全型)两种形式^[63]。复合式又分为一般兼本质安全型和隔爆兼本质安全型。单一式是指从电源到负载,全部电路都是本质安全电路的电气设备,其特点是体积小,重量轻,携带方便。井下便携式仪表多数为本质安全型,如瓦斯检定器、感应电话、无线电话、红外线火源探测仪和测尘仪等。单一式也有不独立存在,需要外接本质安全电源的固定或半固定设备。

设备主机置于安全场所(如地面绞车房、调度室等),可设计成一般型,而送入井下的电路部分设计成本质安全型,这就构成了一般兼本质安全型复合式电气设备。再者设备主机虽然安装在井下危险场所,但由于设备功率太大,又使用井下动力电网为电源,无法全部设计成本质安全型,则应采用隔爆兼本质安全型。例如,矿井有线电话网、风窗遥控系统及地面瓦斯站瓦斯监控装置,都属于一般兼本质安全型;而井下信号装置、千伏级磁力启动器及采区控制、信号和通信系统等多属于隔爆兼本质安全型。

1.3.2 本质安全型电气设备的保护等级和分类

1. 本质安全型电气设备的保护等级^[2,3]

根据安全保护程度的不同,本质安全型电气设备可分为“ia”和“ib”两个保护等级。

“ia”保护等级:在适应的电压作用下,电路在正常工作、施加一个计数故障或两个计数故障,以及同时施加最不利条件下的非计数故障时,均不能点燃爆炸性混合物的电气设备。在对“ia”保护等级电路进行本质安全试验和评定时,应在电压、电流或两者结合的参数上施加相应安全系数:正常工作和/或施加一个计数故障,同时施加最不利条件下的非计数故障时,安全系数为 1.5;正常工作和施加两个计数故障,同时加上最不利条件下的非计数故障时,安全系数为 1.0。而在所有情况