

民用航空器维修人员执照教材

航 空 电 气

盛 乐 山 主 编

科学出版社

1994

序

把经济建设真正转移到靠科技进步和提高劳动者素质的轨道上来,是十一届三中全会决定的工作重点转移的进一步深化。因此,加强岗位培训是民航“八五”期间教育工作的中心任务,通过在职培训使民航的劳动者素质得以提高。为贯彻这一中心任务,不仅要号召变为实际行动,而且要做到有检查、考核的标准,这就需要编写一定数量的、坚持学用一致原则的适用教材。这是一项基础性的、不可忽视的建设。随着民用航空器适航管理工作的不断发展,具有法律意义的维修人员执照考核制度不断完善,出版一套配合考核的必读教材的要求也越来越迫切。本套教材的编写正是基于以上要求与宗旨而完成的。

自1987年起,中国民用航空局航空器适航司和科教司就开始组织本教材的编写工作,并委托民航第一研究所和中国民用航空学院负责具体实施。参加本教材编写的同志多是来自民航教育第一线的资深教师,或是富有多年实际维修经验的专业人员,这对于保证教材的编写质量是十分有益的。

从实际编写情况来看,本教材的编写忠实地贯彻了历次编委会议提出的编写要求。在内容的深度和广度上,较好地体现了理论与实践相结合的原则。在编写过程中还注意了突出民航工作的特点并兼顾了维修人员的现有理论水平。因此,作为民用航空器维修人员执照考核教材是比较合适的。

由于编写此类教材在民航尚属首次,无论是从组织者还是从编著者的角度来说均缺乏经验。而且本教材的编写没有现成国外蓝本可资借鉴,不同于国外教材,故难度较大,再加上基层需求强烈,造成时间紧张,因此出现疏漏情况在所难免。希望广大读者和各类专业人员在阅读时提出宝贵意见,予以斧正。

经编委会确定,本套教材正式定名为《民用航空器维修人员执照教材》,分《航空无线电》、《航空仪表》、《航空电气》和《航空电子电气基础》四册出版。

在向我们的读者介绍本套教材的同时,我们衷心地向参加编写的全体编著人员表示感谢。没有他们的辛勤劳动和不懈努力,我们今天能向大家推荐这套教材是不可想象的。我们由衷地期待着他们能在今后的工作中再接再厉,编写出更多更好的教材,为我国民航事业的发展做出新贡献!

《民用航空器维修人员执照教材》编委会

1991年6月7日

前 言

本书是根据中国民用航空局颁布的《民用航空器维修人员合格审定的规定》编写的航空电气专业基础执照教材。全书分为12章,比较系统地介绍了飞机电气系统的基础理论知识。

由于现代科学技术的迅速发展,飞机电气设备也在不断更新,本书在编写中着重说明各系统及其设备的共性原理和基础理论知识,并在此基础上介绍一些典型电路的结构和工作原理,内容以美英大型飞机电气设备为主,力求能适应当代飞机的先进水平和发展趋势,同时又兼顾到历史和现状,以满足对原有一些机型和中、小型飞机维护修理的需要。此外,在介绍基础理论知识的同时,注意结合民航维修工作的实际需要,介绍了一些维修实践基础知识。

本书在编写过程中,考虑到我国民航现有各层次人员的差距和不同需要,力求能具有一定深度和广度,尽量避免应用复杂的数学推导,力求从物理意义的角度深入浅出说明问题。同时,考虑到当前飞机多为引进的实际,为了维护修理人员实际工作的方便,书中的逻辑符号、电路符号、计量单位部分地保留了美英等国的习惯用法,请读者注意本书列出的常用数表。

本书由盛乐山编写第一、四、八、九章及第十二章部分,桂建勋编写第二、六章,杨守环编写第三章,金国忠编写第五章,翟建平编写第七章及第十二章部分,张永生编写第十、十一章。全书由阎国庆、王维民和盛乐山同志审稿,最后由盛乐山统编修改定稿。

本书的编写工作是在中国民用航空局适航司、科教司、民航局第一研究所、中国民用航空学院各级领导的关怀和支持下进行的,并得到民航各界同仁的热情帮助;本教材编委会和科学出版社的同志对本书内容进行了认真的审议,提出了许多宝贵意见,编者在此表示衷心感谢!

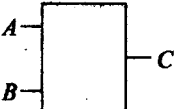
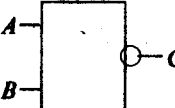
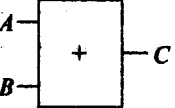
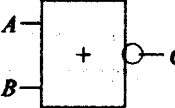
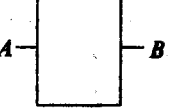
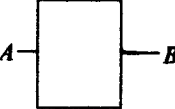
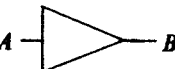
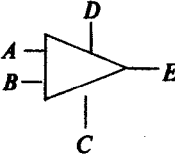
系统地编写航空电气专业基础执照教材在民航系统尚属首次,由于编者经验和水平所限,书中缺点错误在所难免,恳请读者批评指正。

编者

1991年8月

本书常用数表

1. 常用逻辑符号对照表

名 称	国家标准	本书符号	英文名称	逻辑关系
与 门			AND GATE	$C = A \cdot B$
与非门			NAND GATE	$C = \overline{A \cdot B}$
或 门			OR GATE	$C = A + B$
或非门			NOR GATE	$C = \overline{A + B}$
放大器			AMPLIFIER	$B = KA$
非 门 (反相器)			INVERTER	$B = -KA$
驱动器 (激励器)			DRIVER	

注: K 为放大倍数, $K > 0$.

2.常用单位及其换算关系

	名 称	符 号	换 算 关 系
长 度	米	m	
	千米,公里	km	1 km = 1000 m
	厘米	cm	100 cm = 1 m
	毫米	mm	1000 mm = 1 m
	微米	μm	$1 \times 10^6 \mu\text{m} = 1 \text{ m}$
	英里*	mile	1 mile = 1609.344 m
	英尺*	ft	1 ft = 0.3048 m
	英寸*	in	1 in = 2.54 cm
	海里	n mile	1 n mile = 1852 m
时 间	小时	h	
	分	min	
	秒	s	
	毫秒	ms	1000 ms = 1 s
速 度	米/秒	m/s	
	公里/小时	km/h	1 km/h = 0.2778 m/s
	海里/小时	n mile/h	1 n mile/h = 0.5144 m/s
	英尺/秒*	ft/s	1 ft/s = 0.3048 m/s
转 速	转/分	r/min	1 r/min = 1 rpm = $(1/60)\text{s}^{-1}$
质 量	克	g	
	千克,公斤	kg	1 kg = 1000 g
	磅*	lb	1 lb = 0.454 kg
	盎司*	oz	1 oz = 28.35 g
密 度	克/立方厘米	g/cm^3	
容积, 体积	立方米	m^3	
	立方厘米	cm^3	$1 \times 10^6 \text{cm}^3 = 1 \text{m}^3$
	升	L(l)	1 L = 10^{-3}m^3
	美加仑*	USgal	1 USgal = 3.785 L
	英加仑*	UKgal	1 UKgal = 4.546 L
压力, 压强	帕[斯卡]	Pa	1 Pa = 1 N/m ²
	标准大气压	atm	1 atm = $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$
	毫米汞柱*	mmHg	1 mmHg = 133.32 Pa
	公斤/平方厘米*	kg/cm^2	1 kg/cm^2 = $9.8 \times 10^4 \text{Pa}$
	磅/平方英寸*	psi	1 psi = 1 lb/in ² = 6894.76 Pa
流 量	千克/秒	kg/s	
	磅/秒*	lb/s	1 lb/s = 0.454 kg/s
	磅/分*	lb/min	1 lb/min = 0.00757 kg/s
	升/分	L/min	

续表

	名 称	符 号	换 算 关 系
温 度	开[尔文] 摄氏度 华氏度*	K ℃ °F	$K = t + 273.15$ $K = \frac{5}{9}(°F + 459.67)$ $°C = \frac{5}{9}°F - 17.8$ $°F = 1.8°C + 32$
电工单位	伏 千伏 毫伏 安 毫安 微安 欧姆 千欧 兆欧 微法 瓦 千瓦 伏安 赫(兹) 千赫 周/秒	V kV mV A mA μA Ω kΩ MΩ μF W kW VA Hz kHz c/s	$1\text{ kV} = 1000\text{V}$ $1\text{V} = 1000\text{mV}$ $1\text{A} = 1000\text{mA}$ $1\text{A} = 10^6\mu\text{A}$ $1\text{W} = 1\text{J/s}$ $1\text{kW} = 1000\text{W}$
其 他	分贝 焦耳 卡* 千卡/小时, 大卡/小时	dB J cal kcal/h	$1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$ $1\text{cal} = 4.18\text{J}$

表中带*的单位为非许用计量单位。

目 录

序

前言

本书常用数表

第一章 开关电器及其基本理论	(1)
第一节 电接触和气体导电的基本理论	(1)
一、概述	(1)
二、接触电阻	(2)
三、气体导电的物理本质	(4)
四、触点间的电弧与熄弧方法	(6)
五、火花放电和灭火花电路	(9)
六、触点的磨损及常用触点材料	(10)
第二节 航空继电器	(12)
一、电磁式继电器	(12)
二、延时继电器	(17)
三、极化继电器	(20)
四、特种继电器	(23)
第三节 航空接触器	(24)
一、单绕组接触器的工作原理	(25)
二、双绕组接触器的工作原理	(26)
三、磁锁型电路断路器	(27)
四、机械自锁型接触器	(29)
五、电流接触器	(29)
六、典型航空接触器介绍	(30)
七、接触器主要参数的调整	(33)
第四节 电路保护电器	(34)
一、对电路保护电器的基本要求	(34)
二、熔断器	(35)
三、自动保险电门	(37)
四、跳开关	(39)
第二章 航空电机	(41)
第一节 概述	(41)
一、航空电机的分类	(41)
二、航空电机的工作条件	(41)
三、航空电机的主要特点	(43)
第二节 直流电机的基本结构和工作原理	(44)
一、直流电机的基本结构	(44)
二、直流发电机的基本原理	(46)
三、直流电动机的基本原理	(47)
第三节 直流电机的电枢反应	(48)
一、交轴电枢反应	(48)
二、直轴电枢反应	(49)

第四节 直流电机的换向	(50)
一、换向的电磁理论	(51)
二、改善换向的措施	(53)
第五节 直流发电机	(53)
一、直流发电机稳态运行时的基本方程式及功率关系	(54)
二、直流发电机的自励原理	(55)
三、直流发电机的运行特性	(56)
第六节 直流电动机	(58)
一、直流电动机的特性	(58)
二、直流电动机的起动和调速	(60)
三、直流电动机的反转和制动	(61)
第七节 电机的发热与冷却	(62)
一、直流电机的铭牌数据	(62)
二、电机的发热与冷却	(63)
第八节 三相异步电动机	(64)
一、三相异步电动机的工作原理	(65)
二、三相异步电动机的结构	(68)
三、三相异步电动机的运行原理	(69)
第九节 两相和单相异步电动机	(72)
一、交流伺服电动机的工作原理	(72)
二、单相异步电动机的工作原理	(74)
三、三相异步电动机的单相运行	(75)
第十节 飞机同步发电机的基本组成和工作原理	(75)
一、基本组成和工作原理	(76)
二、两极式同步发电机与三级式同步发电机的比较	(76)
第三章 飞机直流电源系统	(77)
第一节 航空蓄电池	(77)
一、铅蓄电池	(77)
二、银锌蓄电池	(91)
三、镍镉蓄电池	(96)
第二节 电压调节器	(98)
一、概述	(98)
二、炭片电压调节器	(99)
三、晶体管电压调节器	(117)
第三节 直流发电机的并联供电	(121)
一、发电机并联供电负载分配的均衡性	(122)
二、发电机并联供电的稳定性	(130)
第四节 直流电源的控制与保护	(133)
一、发电机的输出控制与反流保护	(133)
二、发电机的励磁控制与过电压保护	(135)
三、直流供电系统的短路与短路保护	(141)
第五节 飞机直流电网	(145)
一、飞机电网的构成	(145)
二、飞机直流电网的类型	(147)
三、电磁干扰的抑制	(150)

第四章 飞机交流电源系统	(154)
第一节 概述	(154)
一、飞机电源系统的发展概况	(154)
二、交流电源系统的主要优缺点	(156)
第二节 飞机交流电源系统的基本形式及主要参数	(157)
一、飞机交流电源系统发电的基本形式	(157)
二、飞机交流电源系统供电方式的分类	(159)
三、交流电网供电馈线的连接方式	(159)
四、交流电源系统的主要参数	(160)
第三节 恒速传动装置	(162)
一、概述	(162)
二、差动游星齿轮系的工作原理	(164)
三、液压泵与液压马达的工作原理	(167)
四、正差动状态与负差动状态时的工作情况	(171)
五、转速调节系统	(173)
六、输入脱开装置	(175)
第四节 飞机交流发电机的结构形式和励磁方式	(176)
一、有刷交流发电机	(176)
二、无刷交流发电机的基本形式	(177)
三、交流发电机的相复励电路	(179)
四、旋转整流器	(181)
第五节 交流发电机电压的自动调节	(184)
一、概述	(184)
二、电压检测比较电路	(186)
三、磁放大器式电压调节器	(189)
四、晶体管式电压调节器	(195)
第六节 飞机交流发电机的并联供电	(202)
一、概述	(202)
二、并联供电的条件	(203)
三、无功功率与有功功率调节的基本概念	(206)
四、无功电流的自动均衡	(207)
五、有功电流的自动均衡	(211)
六、投入并联的自动控制	(213)
第七节 飞机交流电源的控制关系	(216)
一、概述	(217)
二、单独供电的控制关系	(218)
三、并联供电的控制关系	(219)
四、主要控制的逻辑关系	(220)
第八节 飞机交流电源的保护电路	(222)
一、交流电源系统的故障及保护中的一般问题	(222)
二、短路故障与差动保护	(223)
三、励磁故障及保护	(224)
四、不稳定故障保护的概念	(227)
五、同步汇流条短路故障与逆序保护	(228)

第九节 变压整流器	(229)
一、对航空变压整流器的要求	(230)
二、航空变压整流器的组成与线路工作原理	(231)
第五章 发动机起动与点火系统	(239)
第一节 概述	(239)
一、航空活塞式发动机的起动与点火系统	(239)
二、涡轮螺旋桨发动机的起动与点火系统	(240)
三、涡轮风扇发动机的起动与点火系统	(242)
第二节 起动系统的主要机件及其工作原理	(242)
一、起动机	(242)
二、磁电机与磁电机开关	(244)
三、起动点火线圈	(250)
四、高能点火器	(251)
第三节 活塞式发动机的起动	(252)
一、电动机起动	(253)
二、手摇起动	(254)
第四节 涡轮螺旋桨发动机的起动	(254)
一、涡轮螺旋桨发动机起动工作的种类	(254)
二、电力起动的增速措施	(255)
三、涡轮发动机的起动工作概况	(257)
第五节 涡轮喷气发动机的起动	(260)
一、起动空气的来源	(260)
二、起动工作概况	(261)
第六章 燃油系统	(264)
第一节 概述	(264)
一、燃油箱和输油管路的设置	(264)
二、通气系统	(265)
第二节 压力加油及抽油系统	(267)
一、系统的组成	(267)
二、工作情况	(270)
第三节 燃油供油系统	(271)
一、供油系统的组成	(271)
二、供油系统工作情况	(274)
第四节 电动增压泵的工作原理	(275)
一、容积式电动增压泵的基本工作原理	(275)
二、离心式电动泵的基本工作原理	(275)
三、离心式电动油泵的特性	(277)
第五节 燃油油量和流量的测量	(280)
一、燃油油量的测量	(280)
二、燃油流量的测量	(282)
第七章 飞机操纵系统电气设备	(284)
第一节 飞机操纵系统概述	(284)
第二节 飞机襟翼收放电路	(285)
一、襟翼的功用	(285)
二、襟翼收放的控制电路	(286)

第三节 缝翼和扰流板的操纵	(288)
一、前缘缝翼的操纵	(288)
二、扰流板的操纵	(288)
第四节 水平安定面的操纵和起飞不安全警告	(289)
一、水平安定面的操纵	(289)
二、起飞不安全警告	(290)
第五节 调整片的功用及操纵电路	(292)
一、调整片的功用	(292)
二、调整片操纵电路举例	(293)
第六节 起落架收放及刹车防滑	(294)
一、起落架收放操纵电路	(294)
二、起落架收放手柄锁控制电路	(295)
三、刹车防滑系统	(296)
四、模拟式刹车压力自动调节装置	(298)
第七节 顺桨系统	(300)
一、螺旋桨	(300)
二、螺旋桨的自转、飞转、顺桨和逆桨	(302)
三、顺桨系统的组成及其控制电路	(303)
第八节 失速警告系统	(309)
一、概述	(309)
二、失速警告系统工作原理	(309)
第八章 飞机座舱环境控制系统	(312)
第一节 概述	(312)
一、飞机座舱环境控制系统的基本任务	(312)
二、大气物理特性及其对人体生理的影响	(312)
三、克服空中环境危害的技术措施	(314)
四、气密座舱的形式及对气密座舱的要求	(314)
第二节 座舱供气系统	(317)
一、座舱空气的来源与用途	(317)
二、供气系统的一般方案与典型飞机的供气系统	(317)
三、供气系统的主要附件	(322)
四、辅助动力装置的引气和双引气警告电路	(326)
五、供气系统的指示与操纵面板	(327)
第三节 座舱空气调节系统	(329)
一、概述	(329)
二、流量控制	(330)
三、空调组件的工作原理	(333)
四、座舱温度调节系统	(344)
五、座舱空气分配系统	(350)
第四节 座舱增压系统	(351)
一、概述	(351)
二、座舱压力调节的基本原理和规律	(352)
三、气动式座舱增压系统	(354)
四、微机-电动式座舱增压系统	(356)

第五节 电子/电气设备冷却系统	(360)
一、概述	(360)
二、波音 737 飞机的电子/电气设备冷却系统	(360)
三、麦道-82 飞机的电子/电气设备冷却系统	(361)
第九章 飞机防冰系统	(364)
第一节 飞机结冰与气象的关系	(364)
一、飞机结冰的几种物理形式	(364)
二、云的形成与分类	(365)
三、飞机结冰的主要气象参数	(368)
第二节 飞机结冰对飞行性能的影响	(368)
一、结冰强度与结冰程度	(369)
二、冰形	(369)
三、机翼及尾翼结冰的影响	(370)
四、发动机进气部件及螺旋桨结冰的影响	(372)
五、风档玻璃及测温测压探头结冰的影响	(373)
第三节 飞机防冰的一般方法	(373)
一、机械除冰系统	(373)
二、液体除冰系统	(375)
三、热气防冰系统	(375)
四、电热防冰系统	(376)
五、我国民航主要机型的防冰方法	(379)
第四节 飞机结冰信号装置	(379)
一、探冰棒	(381)
二、探冰灯	(381)
三、压差式结冰信号器	(381)
四、金属导电环式结冰信号器	(382)
五、探冰马达	(384)
六、放射性同位素结冰信号器	(385)
七、膜片振动式结冰信号器	(387)
第五节 风档玻璃的防冰及防雾	(389)
一、风档玻璃的防冰方法	(390)
二、风档防冰控制中的问题	(390)
三、风档玻璃的防雾	(391)
第十章 飞机灭火系统	(392)
第一节 概述	(392)
一、燃烧的三个要素	(392)
二、火的种类及其对应的灭火剂	(392)
三、飞机防火系统	(393)
第二节 火警探测系统	(393)
一、概述	(393)
二、火警探测系统主要部件的定义及功用	(394)
三、火警探测系统的工作原理	(395)
四、烟雾探测系统的工作原理	(408)
第三节 灭火系统	(410)
一、概述	(410)

二、典型飞机灭火系统工作举例	(414)
第四节 灭火系统的维护	(423)
一、火的防护	(423)
二、灭火系统的维护	(424)
第十一章 警告信号和灯光照明系统	(426)
第一节 警告信号系统概述	(426)
一、警告信号系统的功用	(426)
二、警告信号的类型	(426)
三、警告信号系统主要组成元件及其功用	(426)
第二节 飞机警告信号典型举例	(428)
一、安-24、运-7型飞机起落架和襟翼位置信号	(428)
二、安-24、运-7型飞机高空信号 (失密信号)	(431)
三、安-24、运-7型飞机紧急状态信号	(433)
四、麦道-82型飞机的主警告和主提醒系统	(436)
五、波音747-SP型飞机的音响报警系统	(437)
六、波音757、767型飞机的发动机指示和机组警戒系统 (EICAS)	(443)
第三节 灯光照明系统	(447)
一、概述	(447)
二、驾驶舱照明	(448)
三、客舱照明	(449)
四、机外灯光信号和照明	(449)
五、应急照明	(452)
第十二章 辅助动力装置	(454)
第一节 辅助动力装置的功用和组成	(454)
一、辅助动力装置的功用	(454)
二、辅助动力装置的组成	(454)
三、辅助动力装置的控制与显示	(457)
第二节 辅助动力装置的起动系统	(459)
一、辅助动力装置起动系统的组成	(459)
二、辅助动力装置的起动程序	(460)
三、辅助动力装置的起动电路	(461)
四、燃油电磁活门的控制	(462)
参考文献	(464)

第一章 开关电器及其基本理论

开关电器是一种在正常情况和故障情况下能人工或自动地接通和断开电路的电气装置。它在航空器上有着很重要的用途。

开关电器种类繁多，结构形式和动作原理各不相同，但由于它们都是对电路承担控制和保护任务的电器设备，因而具有许多共性的理论问题，即电磁转换原理、电接触理论和电弧理论。电磁转换的基本原理属于电工基础的内容，本章从应用的角度着重讨论电接触和电弧的基本原理，然后按开关电器的不同功能分类进行具体讨论。

第一节 电接触和气体导电的基本理论

一、概 述

从电源到用电设备总是要用导线和各种控制保护电器连通的。我们把两个或几个导体互相接触之处叫做电接触。电接触的作用是将电流的通路从一个线路延续到另一个线路中去。电接触连接是电器线路中非常重要的一部分，对电器系统的工作有着重要意义，接触不良是电器系统的一种常见故障，而它的原因却可能多种多样，因此，研究电接触的共同本质问题是十分必要的。

按照导体连接方式的不同，电接触可以分为三大类：

(1) 固定接触。是指用螺钉或铆钉将相互连接的导体压紧，或者用焊接的方法将连接处焊牢，或者如同波音飞机上所使用的一种专用“接合器”将导体连接起来，这些方法都使被连接的导体在工作过程中没有相对运动。

(2) 滑动接触。是指相互连接的导体，其中的一个可以在固定导体上沿一定轨道滑动，如滑线电阻。

(3) 可分接触。是指连接导体可通可断的连接形式称为可分接触。在这种电接触形式中，直接实现电接触的导体对称称为触头或触点，其中的一个是固定的，称为固定触点，另一个则为活动触点。触点是开关电器的重要组成部分，在电气系统中，它是控制电路通断的关键，常常是系统中工作可靠性最差的环节，因此，它是我们研究电接触的主要对象。

触点的结构形式多样，按接触方式不同可以分为点接触、线接触和面接触三种。点接触多用于电流比较小、电压比较低而触点压力不大的触点；面接触用于与此相反的情况；线接触则介于二者之间。

触点在工作过程中，总是要经历以下四种工作状态的：

- (1) 闭合状态，保证电流顺利通过。
- (2) 断开状态，保证电路可靠断开。
- (3) 闭合过程，由断开状态到闭合状态的过渡过程。

(4) 断开过程, 由闭合状态到断开状态的过渡过程。

触点在上述四种工作状态下, 会发生一系列的物理化学变化, 主要可以归纳为接触电阻、气体放电 (电弧与火花) 和触点磨损等三方面的问题, 下面围绕这些问题进行讨论。

二、接触电阻

(一) 接触电阻的产生

所谓接触电阻, 就是接触表面承受压力时, 在接触层之间表现出来的电阻。

接触电阻的产生, 主要有两方面的原因。第一, 由于接触表面的凹凸不平, 使导体的实际接触面积减小了, 因而电流流过接触面时要发生严重的收缩现象而产生所谓收缩电阻; 第二, 接触面暴露在空气中, 因而会在表面形成一层薄膜, 如氧化膜之类附着在表面上, 这就是表面膜电阻。所以, 接触电阻 (R_j) 由收缩电阻 (R_s) 和表面膜电阻 (R_M) 两部分组成。其表达式为 $R_j = R_s + R_M$

1. 收缩电阻

接触表面不可能是完全吻合的, 就是经过精加工和研磨抛光工序的触点, 也不可能是理想的平面, 总会有波纹起伏和凹凸不平, 因而实际接触时只有一些小的凸起部分相接触。当电流通过时, 从截面尺寸较大的导体进入实际接触面很小的接触点, 电流分布线会发生剧烈的收缩现象, 如图 1-1 所示。这种由于接点处实际接触面减小所呈现的电阻称为收缩电阻。

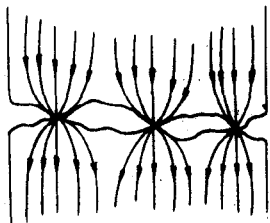


图 1-1 接触面电流的
收缩现象

2. 膜电阻

在电接触的接触面上, 常常会附有一层导电性很差的膜, 由此形成膜电阻。膜的形成主要有以下几种类型:

(1) 尘埃膜。空气中的灰粉、尘埃和纺织纤维物的固体微粒, 由于静电吸附而覆盖在接触表面上形成的膜。在外力作用下, 这些微粒容易脱落, 因而形成的电阻很不稳定。

(2) 吸附膜。水分和其他蒸发气体的分子在接触表面形成的吸附层。

(3) 无机膜。由于化学腐蚀作用在接触表面形成的金属氧化膜和其他腐蚀层。无机膜的形成取决于金属接触材料的化学性质, 并与介质温度和环境条件有关。有些金属氧化物导电性很差, 如氧化铜; 而另一些金属氧化物导电性并不差, 如氧化银。

(4) 有机膜。从绝缘材料中析出的有机蒸汽, 在电接触的金属材料表面形成的一种有机聚合物, 其电阻值和击穿电压极高, 因此危害严重。

值得指出的是, 触点上的表面膜并不都是有害的, 有时为了消除触点的冷焊现象, 反而希望在触点上形成一层薄薄的氧化膜, 有些膜层一旦形成, 还可提高接触电阻的稳定性。

(二) 触点温升和接触压降

1. 触点温升

电流通过触点时，由于导体电阻和接触电阻上的电能损耗，使触点温度上升。温度过高会使触点局部熔化并焊接在一起，使触点无法继续工作，这种故障称为触点的熔焊或粘连。

触点的发热主要集中在接触区，因为那里接触电阻最大，但是触点的最高温升点，不是在触点表面，而在接触面深处，无法直接测量。

2. 接触压降

接触点两端的电压降称接触压降。从理论上讲，接触压降与触点温升具有一定的对应关系，因而可通过测量接触压降达到间接了解触点温升的目的。检查触点的接触压降，了解接触电阻的大小及其变化，可以发现触点积炭等污染情况，清除积炭是排除故障的常用方法之一。

(三) 影响接触电阻的因素和提高电接触可靠性的方法

接触电阻的存在是客观的，但接触电阻过大和严重的不稳定现象，则是触点发生故障的重要因素。我们希望有低值而稳定的接触电阻，以提高电接触的可靠性，因此必须了解影响接触电阻的各种因素，并采取相应措施提高接触电阻的稳定性。

1. 触点材料性质

材料性质包括材料的电阻系数、机械强度和硬度等。触点材料的电阻系数愈小，接触电阻也就愈小；触点材料的压皱强度愈小，接触电阻也就愈小。

2. 接触形式与接触压力

前面讲的点、线、面三种接触形式，主要表现在对收缩电阻的影响上。一般说来，面接触的接触点最多，收缩电阻最小；而点接触收缩电阻最大。

对膜电阻的影响，主要表现在每个接触点上所承受的压力的大小。一般说来，在一定压力下，当接触面的视在面积不变时，点接触的压强最大，容易破坏接触面的表面膜层，使膜电阻减小，而面接触的膜电阻较大。

乍一看来，似乎面接触的接触点最多，接触电阻应最小。其实不然，当接触压力较小时，面接触的接触电阻不一定比点接触或线接触的接触电阻小，原因就是看上述收缩电阻和膜电阻哪个减少更多。继电器的触点压力很小，触点多数采用点接触的形式，而且触点曲率半径小，以保证必要的压强，从而获得低值而稳定的接触电阻。

3. 接触表面状况

暴露在空气中的接触面，若不加以覆盖，对任何接点材料都将产生氧化作用，在接触表面生成一层氧化膜，还会受外界尘土的污染。在各种金属氧化物中，只有氧化银的导电率与纯银差不多，其他大多数金属氧化物都比金属本身导电率低很多。

对某些可靠性要求高的继电器和接触器，为防止触点受污染，常采用密封结构，有的还在密封室内充入惰性气体或者抽成真空，以保证接触电阻低而稳定，从而减少故障的发生。

三、气体导电的物理本质

开关电器都是利用触点来开闭线路的。在触点断开通有电流的线路时，线路中的电流不是立即下降为零，它要穿过触点间的空气间隙持续导通一段时间，因而常常在触点间产生电弧或火花。电弧和火花的共同本质都是由触点间的空气导电形成的。因此，在研究电弧和火花的具体问题之前先讨论气体导电的物理过程。

(一) 气体中带电质点的产生与消失

通常情况下，空气是很好的绝缘体，它们的原子和分子是中性的。显然，在气体导电时，空气已由绝缘状态变成了导电状态。下面分析这种现象是如何产生和消失的。

1. 带电粒子的来源

物质的原子是由原子核和若干电子组成，电子分成若干层按一定轨道围绕原子核旋转。不同轨道上的电子具有不同的能级，靠近原子核者，能级较低，远离原子核者，能级较高。正常状态下，原子内的电量和能量都处于平衡状态。

当原子受到外来能量（例如光、热、碰撞）的激发时，其最外层的电子可能吸收这些能量而跳到更外层、更高能级的轨道上去。处于高能级，即外层轨道上的电子是不稳定的，它既可受原子核的吸引跳回内层较低能级的轨道上去（这时以辐射形式放出多余能量），也可在外加电子的能量相当大时跳出原子轨道而成为自由电子。失去电子的原子核便成为带正电荷的粒子——正离子。这个产生离子对的过程称为游离。这样，游离的气体是带电的。

按照带电粒子来源的不同，游离方式可以分为两大类：当电子由电极表面注入放电间隙时称为表面发射；当放电间隙本身的中性粒子游离成带电粒子时称为空间游离。

2. 表面发射

电极表面发射电子的原因可有以下几种：

(1) 热电子发射。当导体表面的温度足够高时，其表面的自由电子可以获得足够高的动能而从导体中逸出。这种现象称为热电子发射。

(2) 强电场发射。当金属表面存在较高的电场强度（大于 10^6V/cm ）时，金属表面的自由电子可能在常温下逸出而成空间的带电粒子。这种现象称为强电场发射或冷发射。

(3) 光发射。各种光线（红外线、紫外线、可见光以及其他射线）照射到金属表面时，也可能引起电子从金属表面逸出，这种现象称为光发射。光的波长越短，引起发射的效率越强，电子逸出时运动的速度也越高。

(4) 二次电子发射。在电场力作用下，正离子以高速撞击阴极，或电子以高速撞击阳极，都可以使导体表面发射电子，这种现象称为二次电子发射。

3. 空间游离

(1) 光游离。由频率较高的光线和射线的激发作用，可能使气体的中性粒子游离成带电粒子。

(2) 热游离。在高温条件下（3000—4000K），高速运动的中性气体粒子在相互碰