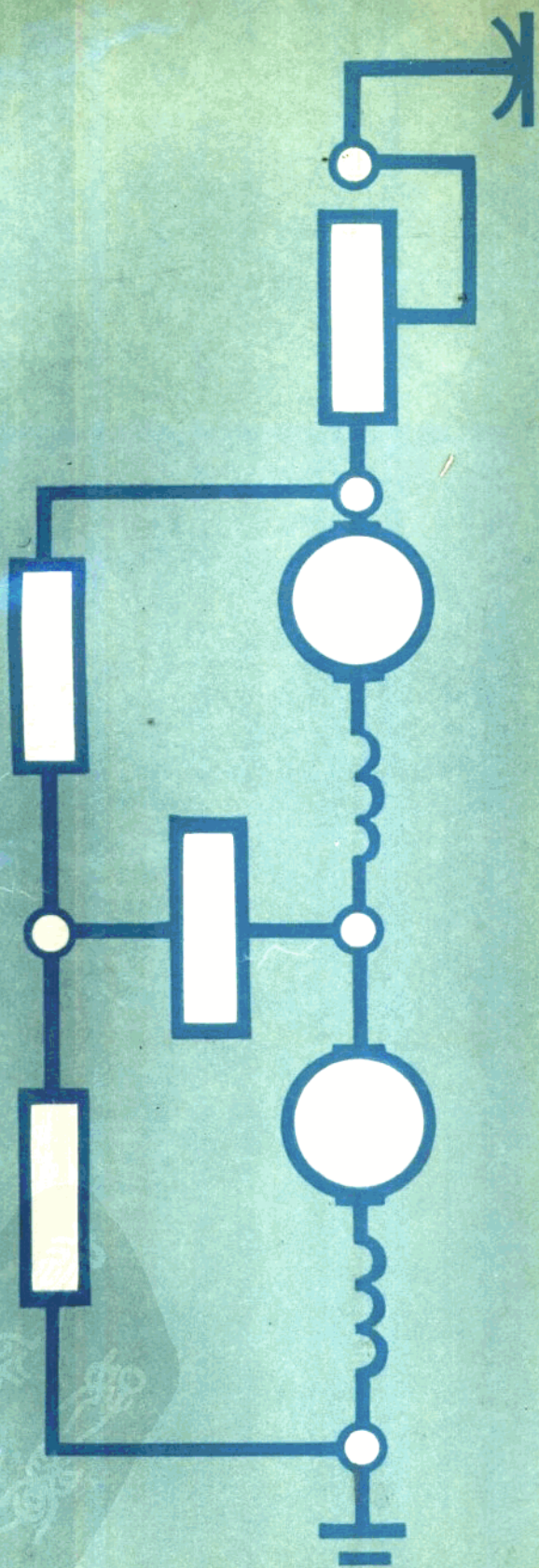


工业电力机车牵引电器及控制



杨正华 编著

冶金工业出版社

GONGYE DIANLI JICHE QIANYIN DIANQI JI KONGZHI

U264.2
1-197

工业电力机车牵引电器及控制

杨正华 编著

冶金工业出版社

(京)新登字036号

内 容 简 介

本书共分六章，主要内容有：直流有触点电器的基本理论；直流工业电力机车主要电器的构造、作用及修理；直流电力机车高、低压电气线路的基本理论及主要环节；ZK14- $\frac{7}{9}$ /550、ZG80-1500-2、ZG150-1500、EL-1、37E-1等五种车型的电气线路原理图说明；电力机车电气线路的检修；直流电力机车斩波调速的基本原理和几种典型线路；逆变器的原理及应用等。

本书可供从事工业电力机车运用与检修工作的工人、工程技术人员使用，也可作为中等专业学校和技工学校工业电力机车专业及厂矿工业电力机车运用与检修人员的技术培训教材。

工业电力机车牵引电器及控制

杨正华 编著

冶金工业出版社出版发行

(北京北海沿大街嵩祝院北巷35号)

新华书店总店科技发行所经销

河北省阜城县印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张18.75 插页2 字数444千字

1994年12月第一版 1994年12月第一次印刷

印数00,001—3170册

ISBN 7-5024-1179-8

TD·190 定价19.00元

前 言

由于工业电力机车功率大、效率高、牵引性能好，而且操作方便、节省燃料、运营费用低廉、乘务人员有良好的劳动条件，尤其是启动快、爬坡能力强，很适用于露天矿山的铁路运输，所以，在冶金、煤炭、石油等部门得到了广泛的应用。新中国成立以来，工业电力机车有了很大的发展，成为工矿铁路运输的重要动力设备。为了满足生产和培训工业电力机车运用与检修人员的需要，作者在搜集国内外资料的基础上，根据教学实践编写了这本书。

本书共分六章，前三章为直流牵引电器。主要介绍直流有触点电器的基本理论和直流工业电力机车高、低压电器的构造、作用及检修。这部分内容以ZG150-1500型工业电力机车用的电器为主，并适当地介绍了应用较多的ZG80-1500、EL-1、37E-1等型工业电力机车用的电器的特点，以适应生产的需要。为了便于读者理解，书中对各种电器的构造及作用，尽量用简单的原理图加以说明。第四章至第六章为直流电力机车的控制。这部分在介绍直流电力机车主线路与控制线路的基本理论和主要环节的基础上，对ZK14- $\frac{7}{9}$ /550、ZG80-1500、ZG150-1500、EL-1、37E-1等五种矿山大量使用的工业电力机车的电气线路图作了较详细地分析与说明。这样，既从理论上作了必要的阐述，又注意到了从事工业电力机车运用和检修工作的实际需要，力求理论联系实际。在第六章中对直流电力机车斩波调速原理和几种典型线路，以及逆变器原理等作了适当介绍，以期满足推广这项新技术的需要。

本书适合于从事大型工业电力机车运用与检修工作的工人、工程技术人员的需要，而且也可供从事小型工业电力机车运用及检修工作的工人、工程技术人员参考，同时还可作为中等专业学校与技工学校的工业电力机车专业及厂矿工业电力机车运用与检修人员的技术培训教材。

本书由湘潭牵引电气设备研究所池耀田同志主审，冶金工业出版社同志在审阅过程中也提了许多宝贵的意见，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限和编写时间仓促，书中难免存在一些缺点和错误，恳请读者批评指正。

编 者

1649/57

目 录

第一章 直流有触点电器的基本理论	1
第一节 牵引电器概述.....	1
第二节 触头机构.....	3
第三节 熄弧装置.....	15
第四节 传动机构.....	24
第二章 高压电器	36
第一节 受电器.....	36
第二节 隔离开关.....	54
第三节 电磁接触器.....	56
第四节 电空接触器.....	58
第五节 组合接触器.....	62
第六节 电阻器.....	67
第七节 转换器.....	70
第八节 保护电器.....	75
第三章 低压电器	95
第一节 蓄电池.....	95
第二节 电压调整器.....	99
第三节 司机控制器.....	105
第四节 电联锁阀与再生阀.....	109
第四章 直流电力机车的控制原理	112
第一节 电力机车控制系统及电气线路概述.....	112
第二节 直流电力机车的主线路原理.....	114
第三节 直流电力机车的控制线路.....	127
第五章 直流工业电力机车电气线路实例及检修	137
第一节 ZK14- $\frac{7}{9}$ /550型电力机车电气线路.....	137
第二节 ZG80-1500-2型电力机车电气线路.....	140
第三节 ZG150-1500型电力机车电气线路.....	151
第四节 EL-1型电力机车电气线路.....	167
第五节 37E-1型电力机车电气线路.....	197

第六节 电气线路的检修.....	228
第六章 电子技术在电机车上的应用.....	234
第一节 直流斩波调速概述.....	234
第二节 直流斩波器电路.....	237
第三节 直流斩波调速主电路.....	240
第四节 直流斩波调速控制电路.....	259
第五节 逆变器原理及在工业电机车上的应用.....	283
附 录	276
一、国产工矿电机车型号及其意义.....	276
二、国产牵引电器的型号及其意义.....	277
三、电力传动设备常用文字符号的汉语拼音字母含意.....	278
四、电力牵引中机车方面的部分名词术语.....	273

第一章 直流有触点电器的基本理论

第一节 牵引电器概述

一、牵引电器的分类

所谓牵引电器是指在电传动机车（如电力机车、电动车辆和电传动内燃机车上），起着开关、控制、调节、检测和保护作用的电气装备，它是电传动机车的重要组成部分。其分类一般有以下几种方式：

1. 按牵引电器所接入的电路分

（1）主电路电器 即接在电传动机车的牵引电动机电路中的电器。如受电弓、高速断路器、电控接触器、牵引-制动转换器等；

（2）辅助电路电器 电传动机车的辅助电路包括：空气压缩机、通风机、低压发电机等的电动机的电路以及取暖用的电炉电路等。接在辅助电路中的电器有电磁接触器、熔断器、开关等；

（3）控制电路电器 在高电压、大功率的电力机车和内燃机车上，一般均采用以低电压控制高电压的所谓间接控制系统，控制电压常用48V与110V。接在控制电路中的电器有司机控制器、按钮开关、电磁阀、电压调节器、灯具等。

2. 按牵引电器的用途分

（1）控制电器 用来操纵电传动机车的电器。如接触器、司机控制器及控制用继电器等；

（2）保护电器 用于电传动机车保护方面的电器，如用于过电压、过电流、短路保护等的电器。主要有高速断路器、熔断器、避雷器及保护用继电器等；

（3）调节电器 维持电量在一定范围内变化，以保证供电质量及电器操作的准确性的电器，如电压调节器等。

3. 按牵引电器的传动方式分

（1）手动电器 可用手直接操作的电器，如刀开关、各种按钮开关、司机控制器等；

（2）自动电器 又可分为：

1) 电磁式传动——以电磁力进行动作的电器，如电磁接触器、继电器等；

2) 压缩空气传动——以压缩空气力量进行动作的电器，如电空接触器、组合接触器、转换开关等；

3) 电动机式传动——随电动机的转动而动作的电器，如电动机式组合接触器。

另外，还可根据使用电压的高低，分为高压电器和低压电器；根据电流种类，分为直流电器及交流电器；根据执行机构的结构，分为有触点电器和无触点电器等。

二、牵引电器的运行条件

由于牵引电器安装在机车上，所以，它的工作条件具有如下特点：

(1) 连续而强烈的振动。机车运行时要产生强烈的振动，如不加以考虑，则电器往往会产生误动作，因此要求牵引电器应能承受振动。

(2) 周围空气污染严重。机车运行时，空气形成涡流，将灰砂尘土带入电器内部。另外，雨雪还会侵入装在电机车下部和车顶上部的电器中。因此，牵引电器的结构设计必须与所使用的环境相适应。

(3) 温度和湿度变化很大。牵引电器需要在温度为 $-40\sim+40^{\circ}\text{C}$ 和相对湿度为80%的情况下工作，故所使用的材料必须适应这一情况。

(4) 电机车主电路的电压在较大的范围内波动，电流则随牵引电动机的工作状态而变化。

(5) 牵引电器的安装受到空间尺寸的限制。故对其安装方式、外形及大小都必须加以周密地考虑，以保证其安装紧凑、维修方便。

(6) 工业电力机车在运用中操作频繁（尤其调车作业）。因此，对牵引电器的磨损必须引起极大重视。

由于牵引电器的工作条件与工作环境相当恶劣，所以，必须保证它在机车运行时有最大的可靠性。为此，对牵引电器提出如下具体要求：

(1) 在规定的情况下，正确和可靠地工作；

(2) 有足够的机械寿命和电寿命。如耐机械磨损和电弧烧损等；

(3) 有足够的电稳定性和热稳定性。如电器的工作不受通过大电流时产生的电动力和温度升高的影响等；

(4) 电器本身的功耗要小；

(5) 操作、维护和检修要方便与安全；

(6) 有尽可能小的体积、重量和成本，有良好的工艺性，便于生产。

三、牵引电器的发展趋势

牵引电器有如下发展趋势：

(1) 从接触器、继电器、开关等有触点电器逐步过渡到由半导体等元件组成的无触点电器，以提高牵引电器工作的可靠性。由于无触点电器没有触点及可动部分，因此，它的主要优点是：可靠性，灵敏度和操作频率都比较高，动作参数（如电流、电压、时间等）不受冲击、振动的影响，寿命长、体积小，重量轻，维修方便。所有这些优点，对牵引电器来说，显得特别重要。因此，半导体元件或磁性元件所组成的无触点牵引电器发展前途很大。

(2) 从单个电器过渡到成套电器或成套装置。所谓成套装置（比如成套控制设备），并不是把一般结构的电器简单地或机械地联在一起，而是将所有电器、组件和小体积的零件按照一定的要求有机地组合在一起。这样，就可以减小电器的体积，降低成本，也便于维修。

(3) 从使用金属材料过渡到压制的塑料。这样可以节省金属，简化生产工艺，同时

也容易达到使牵引电器适应各种气候条件的可能性。可以广泛采用环氧树脂、硅有机绝缘材料和聚乙烯玻璃纤维等，来压制各种各样的牵引电器零部件，例如触头支架、连接杆、电器外壳、灭弧装置等等。

(4) 趋向于用可互换的标准组件，以构成各种形式、大小不同的牵引电器。

(5) 小型化。牵引电器的小巧性，不仅使所需要的材料减少，而且也便于用在成套装置上。所以，应该把小型化看作评价牵引电器结构的标准之一。

从当前情况来看，虽然半导体无触点电器与有触点电器相比较具有如上所述的优点，但是，半导体无触点电器也有它的不足之处。其主要缺点是：半导体无触点电器在导通时有较大的电压降，功耗较大，发热较甚，需要有一套散热装置；在阻断时有较大的残余电流，不能完全切断电路；承受过载和过电压的能力很差，需要有一套快速过载保护装置和过电压吸收装置；它在调节过程中波形畸变，对通讯系统产生干扰等等。

基于上述原因，目前电力机车的主电路和控制电路中，有触点电器不可能完全被半导体无触点电器所取代。所以，本篇将根据我国现有工业电力机车的实际情况和工业电力机车检修及运用工作的特点，简要地介绍直流有触点电器的部分基本理论，在此基础上以国产ZG150-1500型电力机车用牵引电器为主，介绍一些主要的高、低压牵引电器的结构、工作原理、维护及检修要点。

至于构成无触点牵引电器的半导体等元件的理论，一般电子技术书中均有介绍，本书从略。

第二节 触头机构

两个导体相互接触处称为电接触，其作用在于使电流从一个导体流到另一个导体中去，完成电路接通的任务，因此，又叫接触联接。它是有触点电器的重要部分，可分为固定的、可动的、滑动的三大类。

固定接触联接 指接触处不发生相互分离和相对位移的联接。例如，用螺钉或铆钉将两个导体固定在一起，此种情况又称为夹紧的固定联接；再如，用焊接的方法将两个导体联接起来，此种情况又称全金属的固定联接。

可动接触联接 指两个导体可以分离，又可以接触。所以，也叫做可分合的接触联接。分离用以开断电路，接触用以接通电路。一般将这种联接的可动部分称为动触头，固定部分称为静触头，两者统称为触头。是我们这一节里所要讨论的主要内容。

滑动接触联接 指一个接触面沿另一个接触面移动，而不破坏它们之间的电接触。例如，直流电机的换向器或交流电机的滑环对电刷；受电弓滑板对接触网等的联接，均属于滑动接触联接。

一、触头的接触电阻及其影响因素

1. 接触电阻

如图1-1所示，设某导体的长度为 l ，其电阻值为 R_1 ，若将该导体切断，然后加以适当的压力使其重新接触在一起，再测出其全长 l 的电阻值 R_2 ，我们将发现 $R_2 > R_1$ ，这是由于切断以后再接触，便在接触处产生了附加电阻，该电阻称为接触电阻。因为不论接触表面怎样精细加工，总是要有微小的凸凹，两接触面实际接触情况示意于图1-2，只有若

于凸起的点真正发生了接触，而导体的大部分表面并未接触。实际接触面积比导体截面积小得多，电流通过实际接触的地方要收缩。这种由于实际导电面积减小，电流在接触处收缩而产生的附加电阻，被称为收缩电阻。这是产生接触电阻的原因之一；原因之二是导体的接触表面暴露在空气中受到氧化作用，形成氧化膜。对于多数金属材料来说，这种氧化膜的电阻率都是比较大的。当两金属面接触时，氧化膜就夹在接触面之间，使导电困难，这种附加电阻被称为膜电阻。

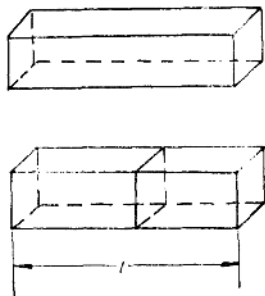


图 1-1 接触电阻力形成

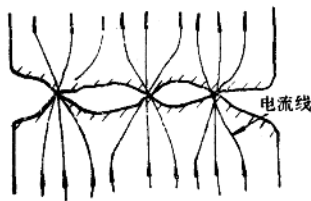


图 1-2 接触面的微观状态

因此，可以说接触电阻是电流在导体接触处收缩而形成的收缩电阻与材料表面氧化而形成的氧化膜电阻之和。

2. 影响接触电阻的因素

(1) 接触压力 接触压力是影响接触电阻的重要因素。当视在接触面积一定时，接触压力在开始增加的阶段，由于触头在接触处产生弹性变形，有效接触面积增加，接触电阻减小得很快，到一定程度后再增加触头压力，有效接触面积增加得不多，接触电阻减小得少，并逐渐趋于稳定值。可见，触头接触电阻与触头压力之间呈近似于双曲线的关系。

(2) 触头材料 触头材料对接触电阻的影响主要决定于它的电阻系数和抗压强度。触头材料的电阻系数越低，接触电阻就越小，如银触头接触电阻比铜小。触头材料的抗压强度越低，在同样的压力下，实际接触面积增加，接触电阻变小。但采用抗压强度很低材料不能保证触头本身的机械强度，所以，有时在较硬金属制成的触头上敷以较软的材料，如铜触头镀锡，铁触头镀镉等，这样，还可以防止氧化。

(3) 接触形式 接触形式分为点、线、面三种。只在一点或很小的面积上发生接触称为点接触；沿着线或极狭窄表面发生接触的称为线接触；沿着宽阔表面发生接触的则称为面接触。接触形式对接触电阻的影响，由于接触压力的大小而不同。在压力较小时，线接触的压力集中，其实际接触面积较面接触大。因此，接触电阻较面接触要小。同时，线接触容易消除氧化膜，而面接触受到装配质量的影响，接触电阻不稳定。点接触虽然压力集中，但只有一点接触，接触电阻较大，而且点接触时散热面积小，温度容易过高。所以，点接触多用于小接触压力下的小电流的场合，如20安培以下的继电器触头；接触器和自动开关的辅助触头等。由于面接触散热面积大，所以，适用于大电流的电器，例如，大容量接触器和自动开关的主触头。线接触广泛应用于各种中、小容量的接触器、自动开关及高压断路器的触头。

当接触压力很大时,在相同压力下三种接触形式的接触电阻是差不多的,因为此时接触面积决定于材料的抗压强度。因此,在大压力下,应从触头的散热条件与机械强度来考虑接触形式。

(4) 触头温度 根据实验得知,当触头接触处的温度在 200°C 以下时,触头温度与接触电阻 R_j 的关系为:

$$R_j = R_{j_0} \left(1 + \frac{2}{3} \alpha_0 \theta \right) \quad (1-1)$$

式中 R_{j_0} ——触头在 0°C 时的接触电阻, (Ω);

α_0 ——触头材料的电阻温度系数, ($1/^{\circ}\text{C}$);

θ ——触头温度, ($^{\circ}\text{C}$)。

触头材料的电阻温度系数为 α_0 ,而接触电阻的电阻温度系数为 $\frac{2}{3}\alpha_0$,这是由于触头接触处发热而软化,使接触面积扩大所致。当温度超过 200°C ,达到触头材料(铜)的软化点以后,实际接触面积迅速增大,接触电阻迅速减小。如果温度达到触头材料的熔化温度,接触处熔焊在一起,接触电阻骤然降低到很小值,但触头已不能分离,电器无法进行正常的工作。因此,触头温度不能超过允许值。

(5) 触头表面情况 触头表面加工的粗糙程度适中,能得到较小的接触电阻,如果过于光滑或过于粗糙都会使接触电阻增大和不稳定。因此,在加工触头表面时,不需要抛光或磨光,以免接触面稍有破坏或装配不好时,使接触电阻增加。另外,也不要使用砂布打磨接触面,以防金刚砂粒粘在触头表面上增加接触电阻。实践证明,用手工锉刀加工触头的表面是最好的方法。

接触表面的清洁度对接触电阻也有影响,当接触面上有氧化膜、油垢和灰尘等不良导电物质时,都会使接触电阻增大。尤其是铜触头表面氧化会使接触电阻急剧增加。接触电阻上的损耗增加,触头温度增高,当高于 70°C 时铜触头氧化加剧,接触电阻更加剧增,从而导至恶性循环。因此,铜触头一般有研磨过程,以擦除氧化层。对于固定联接,则铜镀锡(或镀锡)以免氧化。与铜相反,银氧化后的电阻系数与纯银差不多,并且在温度升高时其值的增加也不多。因此,为了减少铜的氧化膜对接触电阻的影响,可在铜触头表面镀银。但银有熔点低、易烧焊的缺点。所以,在大电流的情况下,为避免触头烧焊,一般不采用镀银的方法,而是把氧化铜片焊在铜触头表面上,这样既可减少铜的氧化膜对接触电阻的影响,又可耐高温。

(6) 触头表面的化学腐蚀 采用不同的金属做成触头对(动、静触头)时,由于两金属接触处有电位差,当潮湿时,在触头的接触处会发生电解作用,而使触头发生化学腐蚀,引起接触电阻增加。

金属材料的电化顺序是Au、Pt、Ag、Cu、H、Sn、Ni、Co、Ca、Fe、Cr、Zn、Mn、Al、Ag。通常以氢作为零电位,氢以前的为正电位,氢以后的为负电位。选取触头对时,应取电化顺序中位置靠近的,以减小化学电势,例如,不宜采用铝—铜,钢—铜做触头对。

除上述因素外,还有一些因素也直接影响接触电阻的大小,如触头周围介质的情况、潮气和腐蚀性气体等都会使接触电阻增加。

根据以上分析,为使接触电阻减小,只要围绕有关因素采取相应的措施,如适当地增大接触压力,选取电阻系数低的触头材料,采用适当的触头加工方法,保持触头表面的清洁等,就可以把它限制在较小的范围内。

通过实验,得出估算接触电阻的经验公式:

$$R_i = \frac{K_i}{(0.102F)^m} \quad (1-2)$$

式中 R_i ——接触电阻 ($m\Omega$);

K_i ——与触头材料,表面情况,接触方式等有关的系数,见表1-1;

F ——触头压力 (N);

m ——与接触形式有关的系数,其值为0.5~1,点接触为0.5,面接触为1,线接触为0.5~0.8。

表 1-1 几种触头材料的 K_i 值

触 头 材 料	K_i	触头材料	K_i
银—银	0.06	铝—铝	3~6.7
铜—铜	0.08~0.14	铝—铜	0.98
黄铜—黄铜	0.67	铜—铜镀锡	0.7~1
黄铜—铜	0.38	铝—黄铜	1.9

必须着重指出:经验公式(1-2)的局限性很大,不能概括各种因素对接触电阻的影响。即使在大致相同的条件下,接触电阻的分散性也特别大。因此,不同研究者得出的系数(K_i 和 m 值)的差别也很大。公式(1-2)也只能做估算用。

二、触头闭合时的机械振动

触头的机械振动是触头在闭合过程中产生的一种十分有害的现象。是由触头的碰撞和触头系统的电动力两方面的原因造成的。

在触头闭合时,动触头与静触头因互相接触而产生撞击,结果使动触头向反方向回弹。于是,动、静触头之间出现很小的间隙,在触头弹力的作用下,动、静触头再重新碰撞,然后动触头再被弹回,直至动能消失,动、静触头才闭合。在这种振动过程中,动、静触头之间造成一连串的短电弧,烧伤触头表面并熔化部分金属,熔化了的金属以一种被称为金属蒸气的形式存在于动、静触头之间的间隙中,形成所谓的“金属桥”。这种金属桥(金属蒸气)被电动力或磁吹(见本章第二节熄弧装置)的气流冲走而散失,从而造成触头的电气磨损(简称电损)。很明显,电损的结果使触头的使用寿命大为缩短。当动、静触头接触处的局部温度达到金属的熔点时将有一部分金属被熔化,闭合后作为热源的电弧没有了,触头的温度也就随之下降,使熔化的部分金属凝固,而将动、静触头焊接在一起,其结果造成触头无法分开,从而导致严重事故,这就是一般所说的触头熔焊现象。另外,触头的振动还会使某些电器(如继电器)误动作。由此可见,触头的振动对于自身的正常工作是非常不利的。

触头闭合时的电动力,是由于接触点电流收缩引起的。当接触点附近区域通过电流时,

电流线由于收缩而产生畸变(见图1-2),以至使动、静触头间部分电流线几乎互相平行,且方向相反,产生互相排斥的力量。如果这种排斥力大于触头弹簧压力,就能使触头被推开一定的间隙,这时电流减小为零,在触头弹簧压力作用下触头又重新闭合。如此交替进行,也会产生机械振动。尤其在闭合大工作电流或故障电流的场合,电动斥力的作用就更加明显。

根据理论分析,减小触头闭合时的机械振动的措施是:

(1) 增加触头的初压力。触头的初压力是由触头弹簧的预压缩(装配时就有的压缩量)而产生的。所以,增加触头弹簧的预压缩,即可增加触头的初压力。

(2) 尽可能地减小动触头的质量,但必须考虑触头的机械强度,散热面积等问题。

(3) 降低碰撞前的速度,以减少碰撞动能。

(4) 触头的材质宜选择较软的材料。

(5) 对电磁式电器,应减小衔铁和铁芯碰撞时的振动(二次振动),其方法是吸力特性和反力特性(见本章第三节)有良好的配合;铁芯具有缓冲装置等。

(6) 改进传动系统的结构。

另外,增加触头弹簧的刚度,可以更多地吸收触头碰撞时的动能,减少触头的振动时间和振幅。

三、触头材料

触头材料对于减小触头接触电阻、降低触头温升、减小触头振动、提高电器工作的可靠性等都有很重要的意义。对触头材料有以下要求:

(1) 材料本身的电阻和接触电阻既要小且要稳定,并且具有较高的导热率与导电率。

(2) 抗熔焊、耐电弧。

(3) 耐磨性好,即具有一定的硬度和机械强度。

(4) 化学稳定性好,即要有一定的抗氧化、耐化学腐蚀的能力。

(5) 容易进行机械加工、焊接与固定。

(6) 材质均匀。

(7) 价格便宜。

目前,触头材料可分为纯金属、合金和复合材料三大类。

1. 纯金属材料

(1) 银(Ag) 在纯金属中银的导电和导热性能都是最好的,而且氧化银仍然具有良好的导电性能。但是,银有熔点低、易熔焊、硬度低、耐电气磨损和机械磨损的性能较差的缺点,所以,广泛用于小功率点接触触头。

(2) 铜(Cu) 铜具有良好的导电和导热性能,仅次于银。和银比较有较高的硬度和强度,熔点也高,价格低廉,加工容易。由于铜有这些优点,许多大电流电器用它做触头材料。铜的缺点是表面易形成氧化膜,其导电性能很差,所以铜触头多做成线接触的形式,有研磨过程以清除氧化铜的薄膜。

(3) 金(Au) 金的导电和导热性能仅次于银和铜,其他性能都相似。它的最大优点是化学稳定性好,在大气中不会氧化,接触电阻稳定。金是塑性材料,质软易变形和磨损。金用做小电流的触头材料,通常做为镀层覆盖于触头表面,一般电流不超过0.5安,

否则，电磨损很快。

(4) 铂 (Pt) 铂的化学性能稳定，不易氧化，所以接触电阻非常稳定，易于加工，适用于灵敏度高的电器和仪表之中。但是，其硬度低，价格贵，因此常制成铂合金。

(5) 钯 (Pd) 钯的电阻率及其它性能和铂相近。其价格比铂便宜，常做为铂的代用品，一般用做继电器的触头材料。

(6) 钨 (W) 钨具有熔点高、硬度高、抗熔焊、耐电弧等优点。但是，其导电性能较差，接触电阻较大，容易氧化，特别是与塑料等有机化合物的蒸汽作用后生成透明的表面薄膜几乎不导电，所以，钨一般多用作接触压力大(可破坏氧化膜)的高低压断路器的大电流触头。

几种纯金属材料的物理、化学和机械性能列于表1-2中。

2. 合金材料

(1) 银合金 银常与金和钯组成合金。银合金耐大气腐蚀性能好，可塑性好，易于加工。

银钯合金的性质类似于银合金。但它具有电阻系数大而温度系数小的特点；钯对银有保护作用，它的加工性能也很好。

银铜合金具有优良的抗熔焊和耐磨性能，但含铜量不易过高，否则会像铜一样容易氧化，接触电阻不稳定。银铜合金除作触头外还可作焊接触头的银焊料。

银镍合金可以组成三元合金，主要是银镍合金中加入少量的镍或铁，可以提高触头的耐磨性能。

(2) 金合金 金镍合金一般用于弱电电路。这种合金主要优点是抗熔焊；缺点是在电弧作用下表面易氧化，使接触电阻增加。

金和铂组成的合金常用于小功率电容性电路。这种合金在常温下及加温时都不会氧化。

金和锆的合金极大的提高了硬度，也不氧化，但是具有不太显著的熔焊现象。

金、银和铂组成三元合金，常用在电话通讯电路中做继电器的触头材料，硬度高而不氧化。

(3) 钨合金 钨钨合金使用最广泛。钨的成分对提高硬度、机械强度和电阻率起重要作用，可降低温度系数。合金的耐腐蚀性能高于纯钨。它和铂钨合金相比，硬度和电阻率基本相同，但比后者耐熔；而且钨钨合金的价格便宜。含钨的成分一般以10%和18%最常用。

钨铜合金(40%铜)用做触头材料，主要优点是对触头熔焊有限制作用。由于含铜量的增加，接触表面易形成氧化膜。

(4) 铂合金 铂钨合金用做精密继电器的触头。钨成分的增加使硬度、机械强度和电阻率都增加很多，加工变得困难，因此这种合金制成的触头寿命很长。

(5) 钨合金 主要是钨钼合金，当含钼为45%时，硬度和电阻率最大，温度系数为最小。当钼为34%时，做分断触头其电磨损最小。钼成分的增加将导致触头的氧化严重，甚至使导电遭到破坏。因此，这种触头材料适合于工作在惰性气体和真空中。

(6) 铜合金 主要有铜铍锶、铜铍银、铜铍硒和铜铁镍钴合金。

铜铍锶合金是以铜为基，添加0.5~1%的铍及少量稀土金属锶。这种合金具有优越的

抗熔焊性能、灭弧能力较强、导电率接近于铜等优点。其缺点是电弧腐蚀较大。它适用于真空断路器。

铜铋银合金是在含铋0.8~1.0%的铜铋合金中添加2.3~2.7%的银,从而提高了机械强度和耐电磨损性能。其耐电压强度比铜铋银更高。适用于做真空断路器的触头。

铜铋钨合金是一种机械强度和耐电压强度都高、熄灭电弧能力强、抗熔焊性好的触头材料。适用于开断容量较大的真空断路器触头。

铜铁镍钴合金是以铜为基,添加铁、镍、钴等铁族元素。灭弧能力较强。适用于开断容量较大的真空接触器和负荷开关。

常用金属合金的物理性能列于表1-3中。

3. 复合材料

这里所指的复合材料,是将两种或两种以上的金属粉末混合,经过烧结、化学沉积、内氧化等方法制成的所谓金属陶瓷材料。

金属陶瓷材料中的两种以上金属材料,通常被称为相。每相金属各自保持了原来具有的物理性能。其中有一相金属的熔点和硬度高,在电弧高温作用下不熔化,在高温和冲击力作用下触头不变形,被称为耐熔相,它在触头材料中起骨架作用。可以起这种作用的金属有钨、钼、镍和其他金属氧化物。

另一相金属有很好的导电和导热性能,如银、铜等,起导电和热传导作用,被称为载流相。但是,具有这样性质的金属的熔点都较低,在电弧高温作用下熔化成液体。起骨架作用的金属中形成许多小孔,具有毛细管作用,液化的金属保存在毛细孔内,使触头的电磨损下降,提高了触头的电寿命。

常用的金属陶瓷材料有:

(1) 银—氧化钨 这种材料具有耐电磨损、抗熔焊和接触电阻低而稳定的特点。它被广泛应用于接触器和继电器中,特别是在大电流的交流接触器中,其电寿命比纯银和银—镍有很大提高。

(2) 银—钨 这种材料既具有银的良好导电性和易加工性,又具有钨的高熔点、高硬度、耐电弧腐蚀、抗熔焊、金属转移[(阳极表面金属在电弧的高温作用下熔化、断裂时被带到阴极表面,经过多次作用,在触头的阳极表面形成凹坑,阴极表面形成瘤子(或针状)]等特性。随着含钨量的增加,其耐电弧腐蚀性能和抗熔焊性能也逐渐提高,但其导电性能下降。

银—钨金属陶瓷材料的缺点是接触电阻不稳定。随着触头开闭次数的增加,接触电阻增大,严重者可达到原始值的10倍以上。

(3) 铜—钨 这种材料的性能与银—钨相似,而比银—钨更易氧化,使接触电阻迅速增大,不宜做空气开关触头。在油中不氧化、热容量大,耐电弧腐蚀和抗熔焊性能好,可用作油开关触头。

(4) 银—镍 这种触头的接触电阻低而稳定,导电和导热性好,电磨损小而均匀,在切换直流电路时,金属转移比纯银少。其缺点是在切换大电流时,抗熔焊性能差。通常和银—石墨配合使用。

(5) 银—石墨 这种触头材料的导电性好,接触电阻低,抗熔焊,在短路电流下也不会熔焊。其缺点是电磨损量大。一般含石墨量不超过5%。

表 1-2 几种金属材料性能

材料名称	电阻率 ρ_{20} $10^{-6}\Omega\cdot m$	导热系数 λ_{20} $W/m\cdot^{\circ}C$	硬度 HB MPa	电阻温度 系数 $1/^{\circ}C$	弹性模数 MPa	温度, $^{\circ}C$			密度 t/m^3	比热容 $J/kg\cdot^{\circ}C$	线膨胀系数 $10^{-6}/^{\circ}C$	电化电压 ($25^{\circ}C$) (V)
						软化	熔化	汽化				
铂Pt	0.11	70	400	0.0038	154000	540	1773	4400	21.4	135	8.9	+1.2
金Au	0.023	340	200	0.004	84000	100	1063	2973	19.3	126	14.2	+1.58
钯Pd	0.108	70	320	0.0033	120000	—	1554	4000	12.0	230	12.0	+0.83
银Ag	0.0165	418	250	0.004	75000	180	960	2600	10.5	234	19.0	+0.8
钨W	0.055	190	3500	0.005	350000	1000	3390	5930	19.3	140	4.3	+0.05
铜Cu	0.0175	380	350	0.004	120000	190	1083	2690	8.9	390	16.5	+0.345
铝Al	0.0291	210	270	0.004	72000	150	653	2300	—	960	—	-1.7
铁Fe	0.055	60	1700	0.0039	530000	—	2450	5300	22.4	126	6.6	—
钴Co	0.075	90	160	0.004	60000	—	321	765	8.6	280	30.0	-0.402
钨W	0.097	69	1250	0.0066	210000	—	1495	2900	7.87	415	12.3	-0.277
镍Ni	0.101	60	670	0.0065	260000	500	1540	2740	7.8	640	11	-0.44
钼Mo	0.052	140	2500	0.0045	350000	900	2620	4800	10.0	295	5.0	+0.25
锡Sn	0.120	64	400	0.0045	40000	100	232	2270	7.3	230	—	-0.10
铅Pb	0.061	110	330	0.0037	84000	170	419	906	7.1	390	39.7	-0.762

表 1-3 常用金属合金性能

合金成分	代 号	熔点 °C	密度 t/m ³	电 阻 ρ 10 ⁻⁸ Ω·m	导热系数 λ W/m·°C	硬度 HB MPa	生弧极限	
							U_o (V)	I_o (A)
铂 铱	PtIr10	1780	21.6	0.245	30	940		
	PtIr20	1815	21.7	0.300	17.5	1830	20	3.0
	PtIr30	1890	21.8	0.350	15.6	2440		
钯 银	PdAg40	1330	11.0	0.420	31	520	—	0.5
	PdAg95	975	10.5	0.038	220	280		
钯 铜	PdCu40	1200	10.4	0.350	—	860		0.6
钨 铱	PdIr10	1580	12.6	0.270		1200		
	PdIr18	1610	13.0	0.330		1980		
金 银	AuAg30	1025	10.6	0.104	67	320	14	0.4
	AuAg90	965	11.4	0.036	195	290	11	0.25
金 铁	AuNi5	1000	19.3	0.123		990	15	0.4
金 钴	AuZr3	1045	18.3	0.200		1200		
银 铜	AgCu7.5	778	10.3	0.019	350	550		
	AgCu50	778	9.7	0.021	315	750		
钨 钼	WMo5	3160		0.070		3000		
	WMo34	2930		0.090		2800		
银 铜	80/20	875	10.1	0.057		600	10	3.3
金 银 镍	70/25/5	1080	15.4	0.118		800		
金 银 铂	69/25/6		16.1	0.145	55	1120		
钨 银 铂	60/35/5		11.1	0.408		1920		
铜 铋 钨	Cu-Bi-Ce		8.80	0.021		450		
铜 铁 镍 钴 铂	Cu-Fe-Ni-Cu-Bi		8.80	0.10~0.11		800		