

87.1757
LYY

高等学校试用教材

机车电器原理

刘韵云 编

中国铁道出版社

内 容 简 介

本书共分五章，介绍触头系统、灭弧系统、传动机构、典型电器和磁性元件。

本书以讲解电器原理基本理论为主，并列举电传动机车的现用电器，力求理论结合实际。对电器设计方面的必要内容也作了适当讲述。

本书可作高等学校机车电传动专业教材，也可供铁路有关厂段及一般电器工厂的技术人员、工人参考。

高等学校试用教材

机车电器原理

刘 韵 云 编

中国铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{4}$ 印张：12.25 字数：307 千

1980年4月 第1版

1980年4月 第1次印刷

印数：0001—4,000 册 定价：1.30 元

前 言

在电传动机车上的电器统称为机车电器，它是组成机车电传动和自动化系统的基本元件，主要起着切换、检测、控制、调节和保护的作用。

机车电器的类型和分类方法较多，主要有：

1. 按所接入的电路分为主电路电器、辅助电路电器、控制电路电器、照明电路电器等；
2. 按用途分为开关电器、控制电器、保护电器和调节电器等；
3. 按传动方式分为手动电器、电磁式电器、电空传动电器、电动机传动电器等；
4. 按电流种类分为直流电器、交流电器等；
5. 按电压高低分为低压电器、高压电器等；
6. 按执行机构的结构分为有触点电器和无触点电器。

随着半导体新型器件和大规模集成电路的不断出现，也使得电传动和自动化系统发生深刻的变化，这种变化推动着电器制造事业的发展。

从当前情况来看，毫无疑问，半导体无触点电器与有触点电器比较具有很多优点，主要是：不怕振动、工作可靠、操作频率高、寿命长、体积小、重量轻、维修方便，适用于防火、防爆等场合，有利于实现系统的自动化等等。

但是，半导体无触点电器也有它不足之处，主要缺点是：半导体无触点电器在导通时有较大的管压降，功率损耗较大，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都很差，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，目前电传动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，而是要求两者各自发挥其优点，克服其缺点，取长补短，互相结合，从而推动电器制造事业的发展。

例如DS10系列快速自动开关(见本书第四章第三节)，其检测装置采用直流互感器，保护装置采用半导体脱扣器，开断故障电路则采用触头；这种电器是由磁性元件、半导体无触点装置、有触点电器组合而成。同时目前电传动机车上采用了较多的有触点电器，今后仍会采用一定数量的有触点电器，因此，在机车电传动专业中，除设置《半导体电路基础》、《脉冲与数控技术》、《电子计算机原理》、《自动控制基础》等有关半导体技术等课程外，还必须设置本课程。

1977年在上海召开的铁道部所属高等院校制订机车电传动专业教学计划会议上，确定本课程为本专业的专业课，授课时间为50~60学时，主要讲授有触点电器和磁性元件的基本原理。

根据以上精神，本书分为五章讲述：第一章为触头系统；第二章为灭弧系统；第三章为传动机构；第四章为典型电器；第五章为磁性元件。目前国内生产的电器正处在更新换代阶段，但新产品尚未投入批量生产，因此本书第四章的典型电器只是选自正在使用的老产品。全书以介绍电器原理为主，以保证教材的相对稳定。

本书由北方交通大学王立文同志主审，肖幼萍、陶碧玉同志和上海铁道学院薛彭雨同志在审阅过程中也提出了许多宝贵的意见；西南交通大学连级三、王锡义、林木森、马开国同志对教学大纲提出了许多宝贵意见并提供了有关资料；华中工学院龚向阳同志也提供了有关资料；在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平较低，编写时间短促，一定有不少缺点和错误，恳请读者批评和指正。

编 者 1979.4

目 录

第一章 触头系统.....	1
第一节 概述.....	1
第二节 触头的接触电阻.....	3
第三节 电器和触头的发热.....	5
第四节 导体和触头的电动力.....	16
第五节 触头的振动、磨损和熔焊.....	22
第六节 触头材料.....	25
第二章 灭弧系统.....	27
第一节 电弧产生和熄灭的物理过程.....	27
第二节 电弧中电位分布和伏安特性.....	29
第三节 直流电弧及其熄灭.....	30
第四节 交流电弧及其熄灭.....	32
第五节 灭弧装置.....	38
第六节 无电弧开断电路.....	40
第三章 传动机构.....	41
第一节 直流电磁机构.....	41
第二节 交流电磁机构.....	72
第三节 电空传动机构.....	80
第四节 电动机传动机构.....	84
第四章 典型电器.....	87
第一节 接触器.....	87
第二节 继电器.....	98
第三节 熔断器和断路器.....	130
第四节 组合传动电器.....	147
第五章 磁性元件.....	163
第一节 磁性元件的工作原理.....	163
第二节 磁放大器在电传动机车上的应用*.....	182

第一章 触头系统

第一节 概 述

两个导体相互接触的地方称为电接触。电接触用以使电流由一个导体流到另一个导体，完成电路接通的任务，因此又叫接触联接。接触联接是电器的重要部分，可分为三大类：

(1) 固定接触联接；(2) 滑动接触联接；(3) 可动接触联接。

固定接触联接是指接触处不发生相互分离和相对移动的联接，例如用螺钉或铆钉将两个导体固定在一起的联接；用锡焊或储能点焊将两个导体焊接起来的联接。

滑动接触联接是指一个接触面沿另一个接触面移动。为了保证可靠的电接触，在两个移动的接触面间加有一定的互压力，例如直流电机的换向器，交流电机的滑环和电刷，滑线电阻的滑臂等。

可动接触联接是指两个导体可以分离，又可以接触。分离用以开断电路，接触用以接通电路。一般可动接触联接简称为电器触头，可动部分为动触头，固定部分为静触头。本章只讨论可动接触联接（触头）。

触头是电器的执行机构，是非常重要的部件，直接关系到电器工作的可靠性。触头按接触方式分为三种：(1) 点接触；(2) 线接触；(3) 面接触（图1-1）。

点接触是指两个导体只在一点或者很小的面积上发生接触的触头（球面-球面；球面-平面），常用于20安以下的小电流电器，如继电器的触头；接触器和自动开关的辅助触头等。由于接触面积小，为了保证其可靠性，接触的互压力（触头压力）也较小。

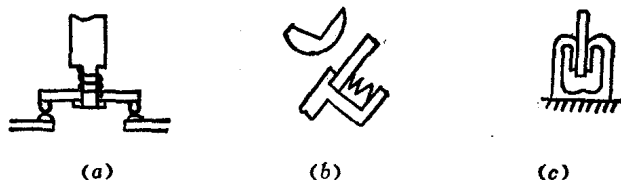


图1-1 触头的型式

(a) —— 点接触；(b) —— 线接触；(c) —— 面接触。

线接触是指两个导体沿着线或者较窄的面积发生接触的触头（圆柱-圆柱；圆柱-平面），其接触面积和触头压力都适中，常用于几十安至几百安电流的中等容量电器中，例如中、小容量的接触器和自动开关的主触头。

面接触是指两个导体沿着较宽广的表面发生接触的触头，其接触面积和触头压力都较大，多用于大电流的电器，例如大容量接触器和自动开关的主触头。由于结构上的原因；闸刀开关常采用面接触的形式。

现以线接触触头为例，说明触头的主要参数。

(1) 触头接触电阻 动触头和静触头接触时，除了触头材料本身的电阻外，还在两触头接触处产生附加电阻，称为接触电阻。接触电阻过大会引起触头温升过高，甚至两触头熔焊在一起而不能正常开断，因此，要设法减小接触电阻。

(2) 触头的研磨过程及研距 动触头和静触头接触过程中，触头接触表面既有滚动，又有滑动，滚动和滑动的过程称为触头的研磨过程。研磨所产生的距离称为研距，如图1-2

所示。由于触头表面有滑动，所以可以擦除触头表面的氧化层及脏物，减小接触电阻。研磨过程的研距，可使正常工作的接触线（最终接触线）和开始接触线（最后分开线）错开，以免电弧烧损正常工作的接触线，保证其接触良好。

（3）触头超程 触头超程是指触头闭合后，如果将静触头拿去，动触头继续前移的距离（图1—3中的距离 r ）。触头超程是用来保证触头有一定的压力，并在允许磨损范围内仍能可靠地工作。

（4）触头的初压力和终压力 触头闭合后，其接触处有一定的互压力，称为触头压力。触头压力主要是由触头弹簧产生的。触头弹簧有一预压缩，使得动触头刚和静触头接触瞬间就有互压力，称为触头初压力。触头具有初压力可以防止刚接触时的碰撞振动及电动斥力使两触头弹开。动、静触头研磨过程结束时的接触压力就是触头终压力。触头终压力使得实际接触面积增加，接触电阻减小。

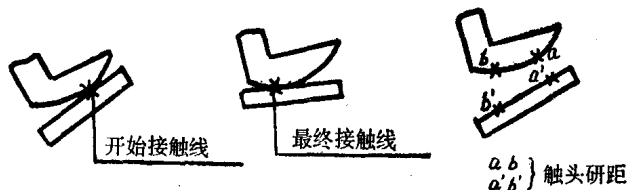


图1—2 触头的研磨过程及研距

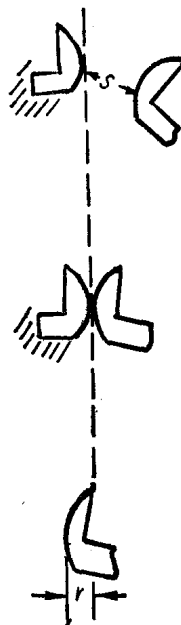


图1—3 触头开距 s 和超程 r

（5）触头开距 触头开距是指触头在断开时，动触头和静触头间的距离（图1—3中的距离 s ）。触头开距必须保证可靠地断开电路，具有足够的绝缘能力，经得起过电压的冲击而不被击穿。

触头开距、超程、初压力和终压力都是必须进行检测的重要参数。这些参数对电器的工作有重要的影响，因而需要深入讨论。为此，我们来讨论触头的四种工作情况：

（1）触头处于闭合状态 在这种工作状态下，正常工作时有电流通过，因而在接触电阻及触头回路的导体电阻上有功率损耗，使触头发热，必须保证触头及其导电回路的温升不应超过允许值。有些电器在短路故障时有短路电流通过，巨大的短路电流会使触头强烈发热，还会在触头回路间形成很大的电动斥力，力图推开触头或者减少触头压力，甚至使触头支架变形，因此，要求触头及其导电回路经得起短路电流引起的发热和电动力的严重考验，即要求电器具有足够的热稳定性和电动稳定性。

（2）触头闭合过程 在这个过程中，动触头作加速度运动。当动触头和静触头刚接触时会产生碰撞，因此，应讨论电器的操作力和反作用力的配合，讨论触头的振动、磨损和熔焊等问题。

（3）触头处于断开状态 触头必须有足够的开距，以保证可靠地断开电路。

（4）触头在开断过程中 这是触头最繁重的工作过程。当触头开断电流时，一般在两触头间会产生电弧，我们必须设法可靠地熄灭电弧，并尽可能减少触头的电磨损。这种工作

状态比较复杂，在第二章灭弧系统中专门讨论。

第二节 触头的接触电阻

一、接触电阻

我们来做个试验，先测量导体 ab 段的电阻 R_1 ，如图1—4a所示，然后将这根导体切断，加以适当的压力使其接触，再测量 ab 段的电阻 R_2 ，如图1—4b所示。比较测量结果后得出 R_2 大于 R_1 ，这是由于切断以后再接触产生附加电阻所致，该电阻称为接触电阻。因为两个接触表面无论怎样精细加工，它们不是整个面积接触，而是一些点相接触（图1—5）。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。图1—6为一个实际接触点附近电流线收缩的示意图。由于电流线收缩，有效导电面积减小，导体有效电阻增加，从而形成接触电阻，这是原因之一；原因之二是导体的接触表面暴露在空气中受到氧化作用，形成氧化层薄膜，例如对于铜导体，其氧化铜薄膜的导电性能很差，当接触面加以互压力后，有些接触点的氧化铜薄膜被挤破，导通电流，而有些接触点的氧化铜薄膜仍存在，导电能力差，所以有效导电面积更小，有效电阻更增加。

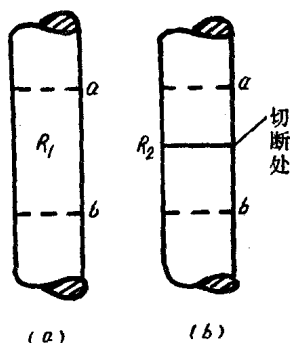


图1—4 接触电阻的形成
(a) 整根导体；(b) 对接导体。

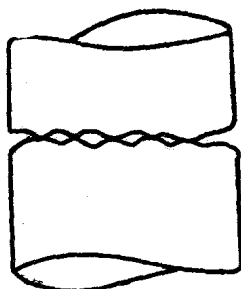


图1—5 接触面的接触情况

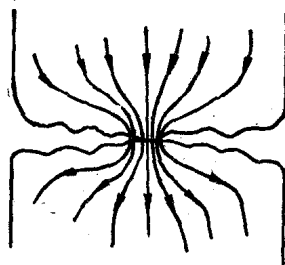


图1—6 实际接触点附近电流线收缩示意图

接触电阻与触头材料、触头压力、接触形式、表面状况等有关，该值可用下式估算：

$$R_K = \frac{K}{F^n} \quad (1-1)$$

式中 R_K ——触头接触电阻（欧）；

F ——触头压力（公斤）；

n ——与触头接触形式有关的常数，其值在0.5到1之间，点接触为0.5，面接触为1，线接触为0.5~0.7；

K ——决定于触头材料、接触表面加工方法、接触表面状况等有关的常数。表1—1列出了当接触表面没有氧化层及脏物时的 K 值，以供参考。

表1—1

触 头 材 料	K	触 头 材 料	K
铜—铜	$(0.08 \sim 0.14) \times 10^{-8}$	铝—铜	0.98×10^{-8}
黄铜—黄铜	0.67×10^{-8}	铝—黄铜	1.9×10^{-8}
铝—铝	$(3 \sim 6.7) \times 10^{-8}$	铜—铜镀锡	$(0.07 \sim 0.1) \times 10^{-8}$
黄铜—铜	0.38×10^{-8}	银—银	0.06×10^{-8}

二、影响接触电阻的因素

影响接触电阻的因素为：

1. 接触压力 接触压力是影响接触电阻的重要因素。

由式 (1-1) 得：

$$R_K F^n = K$$

从上式可知，触头接触电阻与触头压力呈近似双曲线关系。当视在接触面积一定时，接触压力在开始增加的阶段，由于触头接触处弹性变形，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，接触电阻减小得较少，并逐渐趋于稳定值。再增加压力，只会增加传动机构的重量和体积，而接触电阻减小得很少。

小容量触头常采用点接触的双断点桥式触头，其结构难以实现研磨过程来消除氧化层，所以触头材料不用铜，而采用银或银基合金（因为银被氧化后的导电能力和纯银相差不多）。

银触头的最小触头压力一般不小于20克。随着额定电流的增加，触头压力也要增大。触头压力和电流比值的经验数据如下：一般小容量触头不得小于3.5克/安；接触器触头为7~15克/安；自动开关的触头为10~50克/安。

因为铜容易氧化，同时氧化铜的导电性能很差，所以铜触头通常都采用线接触，这样做容易实现研磨过程以擦除氧化层和脏物。铜触头的最小触头压力通常不小于300克，触头压力和电流的比值对于接触器可取15~30克/安，即是银触头的两倍，对于自动开关可再增加一倍。如果铜触头做成面接触，触头压力还可增大，以增大接触面积，减少接触电阻。

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压皱极限强度。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。触头材料的压皱极限强度越小，在同样压力下实际接触面积增加，接触电阻就越小。但采用压皱极限强度很低的材料不能保证触头本身的机械强度，所以有时在较硬的材料上敷以较软的材料，如铜镀锡。铜镀锡还可防止氧化。

3. 触头温度 当触头接触处的温度在200°C以下时，实验测得触头温度与接触电阻的关系为：

$$R_K = R_{K_0} \left(1 + \frac{2}{3} \alpha_0 \theta \right) \quad (1-2)$$

式中 R_{K_0} ——触头在0°C时的接触电阻（欧）；

α_0 ——触头材料的电阻温度系数（1/°C）；

θ ——触头温度（°C）。

触头材料的电阻温度系数为 α_0 ，接触电阻的电阻温度系数为 $\frac{2}{3}\alpha_0$ ，这是因为触头接触处发热而软化，使接触面积扩大所致。随着温度的升高，超过200°C，而达到触头材料（铜触头）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，接触电阻骤降到很小值，但触头已不能分离，电器已不能正常工作。因此，触头温升不能超过允许值。

4. 触头表面情况 触头表面进行适当的加工，表面粗糙程度适中，能得到较小的接触电阻，精细磨光接触面以及表面很粗糙，都会使接触电阻增大和不稳定。

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，触头温升增加。当高

于70°C时铜触头氧化加剧时, 接触电阻更加剧增, ……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(或烫锡)以免氧化。银氧化膜的导电率与纯银一样, 因此, 银触头不怕氧化。

触头表面的清洁程度对接触电阻影响较大, 要经常注意清扫, 但触头压力大的影响较小。

5. 触头表面的化学腐蚀 采用不同的金属做成触头对时, 由于两金属接触处有电位差, 当水分渗入时, 在触头对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An、Pt、Ag、Hg、Cu、H、Sn、Ni、Co、Ca、Fe、Cr、Zn、Mn、Al、Mg。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。电镀层或涂层也要注意电化顺序, 例如钢镀锌或镍, 铜镀锡等。

总之, 通常采取选择合适的触头材料, 适当加工触头接触面, 增加触头间的互压力, 使触头在接触过程中产生研磨, 加强对触头的清扫等措施, 以减小接触电阻。

第三节 电器和触头的发热

电器是由导电材料、导磁材料、绝缘材料等组成, 利用电磁现象而工作的。在导体中有电阻损耗, 在导磁材料中有磁滞和涡流损耗, 在绝缘材料中有介质损耗。所有这些损耗都变成热能, 一方面提高电器零部件的温度, 另一方面散发到周围介质中。

电器工作时的温度不能过高, 否则绝缘材料会迅速老化, 甚至引起绝缘击穿, 造成短路故障; 导电材料也会因为强烈氧化或机械强度不足, 引起机械变形而造成动作不灵等故障。此外, 导磁材料的性能会恶化甚至失去导磁性能而不能可靠地工作。

电器工作时的温度也不宜过低, 因为电器工作时的温度太低, 说明材料没有被充分利用。

因此研究电器的发热, 目的是为了在保证电器可靠工作的条件下, 缩小电器体积, 减轻重量, 节约材料。

电器工作的环境温度, 各部件的允许温升等由有关技术条件规定。应指出的是电传机车电器的工作环境要比工业电器恶劣得多, 因为在夏天, 当机车停在祖国的南方, 灼热的太阳暴晒, 可使车内的温度高达+50°C以上, 在柴油机室工作的电器, 条件更差。在冬天, 当机车停留在祖国的东北, 装在车体外面的电器, 周围环境温度低到-40°C以下。

一、均质导体的发热与冷却

1. 导体的发热

电流通过导体时产生电阻损耗功率为:

$$P = K_f I^2 R \quad (1-3)$$

式中 P ——电阻损耗功率(瓦);

I ——通过导体的电流(安);

R ——导体的电阻(欧);

K_f ——附加损耗系数。

当为直流电流时, $K_f = 1$ 。当为交流电流时, $K_f > 1$ 。这是因为集肤效应和邻近效应使导体有效截面减小, 有效电阻增加。

附加损耗系数 K_f 等于集肤效应系数 K_1 和邻近效应系数 K_2 的乘积:

$$K_f = K_1 \cdot K_2$$

集肤效应和邻近效应现象在电工基础中进行过理论分析并导出计算公式。在电器中, 由于导体的形状和位置比较复杂, 难以准确计算, 一般都是估计这些系数的数值范围。

集肤效应系数的大小与导体材料、截面形状和面积及电流频率等有关, 图 1—7 是圆截面实心导体和空心导体的集肤效应系数。表 1—2 列出了方截面导体的集肤效应系数, 以供参考。图 1—7 中及表 1—2 中的符号为: q ——导体截面积 (毫米²); d ——导体直径 (毫米); ρ ——导体材料电阻系数 (欧·毫米²/米); f ——电流频率 (赫); Δ ——空心导体管壁厚度 (毫米); h 及 Δ ——分别表示长方形导体的宽度和厚度 (毫米)。

邻近效应是由于两根以上的载流导体间的磁场相互作用, 使电流分布不均而引起的。电流频率越高, 两根导体间的距离越短, 导体的电阻越小, 则邻近效应越显著。表 1—3 列出了两个平行圆导线的邻近效应系数 K_2 的数值, 以供参考。

除了电阻损耗外, 交流电流还会在导体中产生磁滞和涡流损耗。

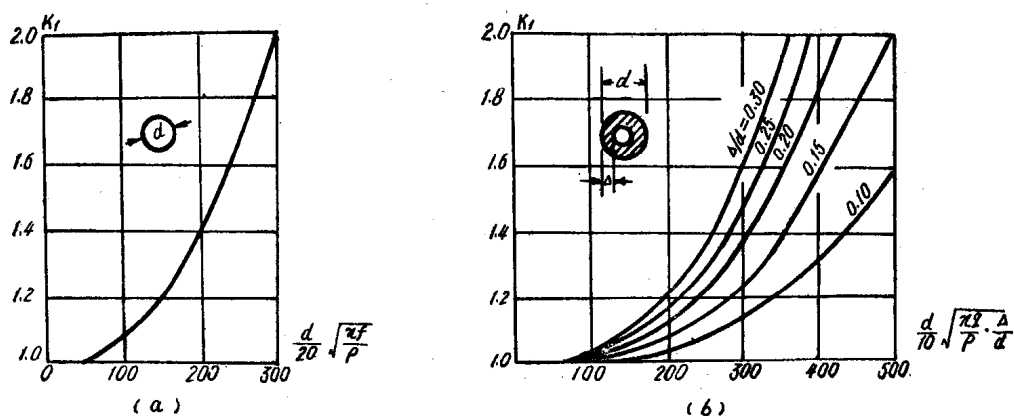


图 1—7 导线集肤效应系数
(a) 实心导体; (b) 空心导体。

长方形导体 h/Δ 值不同的集肤效应系数 K_f

表 1—2

h/Δ	$\sqrt{\frac{fq}{49 \times 10^8}}$										
	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	8
1:1	1.18	1.36	1.55	1.74	1.93	2.1	2.28	2.46	2.68	2.84	3.22
2:1	1.13	1.30	1.49	1.67	1.84	2.05	2.21	2.40	2.58	2.77	3.16
4:1	1.12	1.28	1.38	1.49	1.58	1.78	1.94	2.10	2.24	2.39	2.70
6:1		1.26	1.36	1.46	1.57	1.68	1.79	1.90	2.09	2.20	2.64
8:1			1.34	1.43	1.51	1.60	1.70	1.79	1.90	2.04	2.37
12:1				1.40	1.48	1.56	1.63	1.71	1.79	1.7	2.06

两个平行圆铜导线间的邻近效应系数 K_2

表 1-3

导线直径 (毫米)	导 线 轴 间 距 离 (毫米)							
	25	50	75	100	125	150	175	200
25	1.20	1.05	1.02	1.01	1.00	—	—	—
50	—	1.50	1.60	1.09	1.07	1.05	1.03	1.01
70	—	—	1.80	1.40	1.14	1.10	1.08	1.05

磁滞和涡流损耗与磁感应强度、频率、导磁材料性质有关，一般可按下列经验公式计算：

$$P_1 = \sigma_1 \frac{f}{100} B_m^2 V \gamma \cdot 10^5 \text{ (瓦)} \quad (1-4)$$

$$P_2 = \sigma_2 \left(\frac{f}{100} B_m \right)^2 V \gamma \cdot 10^5 \text{ (瓦)} \quad (1-5)$$

式中 P_1 ——磁滞损耗 (瓦)；

P_2 ——涡流损耗 (瓦)；

σ_1, σ_2 ——磁滞和涡流损耗系数，可在电工手册中查到有关材料的经验数据；

f ——电源供电频率 (赫)；

B_m ——导磁体中磁感应强度幅值 (韦伯/厘米²)；

V ——导磁体的体积 (厘米³)；

γ ——导磁体的比重 (千克/厘米³)。

2. 导体的散热

电阻损耗、磁滞和涡流损耗的功率都变为热能，一部分用来提高导体 (发热体) 的温度，另一部分借传导、对流、辐射三种方式散到周围介质中。

(1) 传导 热传导是在传热体中由温度高的地方向温度低的地方传递热量。因为温度高的地方分子的动能大，热传导实质上是导体 (传热体) 的分子在运动中相互碰撞时传递动能的过程。银、铜、铝等导体传导热量的性能都非常好。

在导体 (传热体) 中，每秒钟由温度高的地方向温度低的地方传导的热量 P_1 与导热面积 q 和温差 $\theta_2 - \theta_1$ 成正比，与距离 δ 成反比，即：

$$P_1 = \lambda q \frac{\theta_2 - \theta_1}{\delta} \text{ (瓦)} \quad (1-6)$$

式中 q ——导体 (传热体) 的截面积 (厘米²)；

$\frac{\theta_2 - \theta_1}{\delta}$ ——温度梯度 (°C/厘米)；

λ ——导热系数 (瓦/厘米°C)。

(2) 对流 对流散热是导体 (发热体) 处在流体中，借流体的运动而进行传热的过程。每秒钟由对流散走的热量 P_2 与导体的散热面积 S 、导体与周围介质 (流体) 的温差 $\theta - \theta_0$ 成正比，即：

$$P_2 = K_c (\theta - \theta_0) S \text{ (瓦)} \quad (1-7)$$

式中 θ ——导体 (发热体) 的温度 (°C)

θ_0 ——周围介质 (流体) 温度 (°C)

S ——导体冷却表面面积 (厘米²)；

K_c ——对流散热系数 (瓦/厘米²°C)

对流散热系数 K_c 与流体的运动速度、温度、热容量有关，还与导体表面（散热面）的温度、导体放置方式及几何形状与尺寸等有关。通常根据具体情况由实验来确定 K_c 值。

(3) 辐射 辐射散热是导体（发热体）的热量用电磁波辐射的形式散发到外界。辐射散发的热量 P_s 与导体（发热体）表面的绝对温度、表面状态和颜色等有关。导体（发热体）从绝对温度为 T_1 的表面 S 辐射到绝对温度为 T_2 的无限空间去时，每秒钟由辐射散走的热量 P_s 为：

$$P_s = CS \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (\text{瓦}) \quad (1-8)$$

式中 T_1 ——导体（发热体）表面 S 的绝对温度（°K），

T_2 ——外界的绝对温度（°K），

S ——导体（发热体）辐射表面面积（厘米²），

C ——辐射散热系数（瓦/厘米²·度⁴）。

电器的发热和散热的问题非常复杂，实际计算散热时，由于按导热系数 λ 、对流散热系数 K_c 和辐射散热系数 C 三种散热公式分别计算不容易做到准确，故一般是综合考虑，用牛顿公式来进行热计算，即：

$$P = \mu s \tau, \quad (1-9)$$

式中 P ——导体（发热体）每秒钟散走的热量（瓦），

μ ——综合散热系数（瓦/厘米²度），

s ——有效散热面积（厘米²），

θ ——导体的温度（°C），

θ_0 ——周围介质的温度（°C），

τ ——导体的稳定温升， $\tau = \theta - \theta_0$ （°C）。

表1-4列出了综合散热系数 μ 的经验数据，供根据牛顿公式1-9进行热计算时作参考。

综合散热系数 μ 的经验值

表1-4

发 热 体 及 其 布 置 方 式	μ	附 注
水平布置的圆铜导线（直径1~6厘米）	$(9 \sim 13) \times 10^{-4}$	直径小时取上限
窄边直立的扁平铜导线	$(6 \sim 9) \times 10^{-4}$	
复以绝缘漆的铸铁或钢表面	$(10 \sim 14) \times 10^{-4}$	
具有绝缘纸的线圈	$(10 \sim 13) \times 10^{-4}$	
硅钢片叠成的铁心	$(10 \sim 13) \times 10^{-4}$	
镍铬丝或康铜丝制成的瓷柱电阻	23×10^{-4}	对应瓷体外表面
镍铬带或康铜带制成的框架电阻	$(10 \sim 14) \times 10^{-4}$	对应全部导体表面
具有平板外箱变阻器	$(15 \sim 18) \times 10^{-4}$	对应外箱侧表面

3. 导体的温升与温降

导体通过电流后产生的功率损耗都变成热量，使导体的温度升高，并散走到周围介质中去。根据能量守恒定律可得热平衡公式为：

$$P dt = \mu s \tau dt + CG d\tau \quad (1-10)$$

式中 P ——导体通过电流产生的功率损耗 (瓦)；

μ ——综合散热系数 (瓦/厘米²·°C)；

s ——有效散热面积 (厘米²)；

τ ——导体温升, $\tau = \theta - \theta_0$ (°C)；

C ——导体比热 (瓦秒/千克·°C)；

G ——导体重量 (千克)；

t ——通电时间 (秒)。

根据式 1-10 可得：

$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{\mu s}{CG} \tau - \frac{P}{CG} = 0 \quad (1-11)$$

解微分方程式 1-11 得：

$$\tau = \frac{P}{\mu s} + A e^{-\frac{\mu s}{CG} t} \quad (1-12)$$

式中 A ——根据初始条件决定的积分常数。

当 $t = 0$ 时, $\tau = \tau_0 = 0$, 即在通电前, 导体的温度与周围介质温度相同, 则得：

$$A = -\frac{P}{\mu s}$$

将上式代入式 1-12 得：

$$\tau = \frac{P}{\mu s} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) = \tau_y (1 - e^{-t/T}) \quad (1-13)$$

式中 $\tau_y = \frac{P}{\mu s}$ ——在负载功率 P 下长期发热的稳定温升 (°C), 这公式也可从牛顿散热公式 1-9 导出；

$T = \frac{CG}{\mu s}$ ——发热时间常数 (秒)。

当 $t = 0$ 时, $\tau = \tau_0 \neq 0$, 即在通电前, 导体已有温升 τ_0 , 则 $A = \tau_0 - \frac{P}{\mu s}$ 代入式 1-12 得：

$$\tau = \tau_y (1 - e^{-t/T}) + \tau_0 e^{-t/T} \quad (1-14)$$

根据式 1-13 和式 1-14 可作出导体的温升曲线 (图 1-8)。图 1-8 中, 曲线 1 为 $t = 0$ 时, $\tau_0 = 0$ 的情况；曲线 2 为 $t = 0$ 时, $\tau_0 \neq 0$ 的情况。两者的初始温升虽然不同, 但稳定温升还是一样的。

发热体的稳定温度 $\theta_s = \tau_y + \theta_0$, 即稳定温度是稳定温升 τ_y 与周围介质温度之和。

发热时间常数 T 代表温升 τ 增长的快慢, 以时间 $t = T, 2T, 3T, 4T \dots$ 代入式 1-13, 可得 τ/τ_y 值 (表 1-5)。

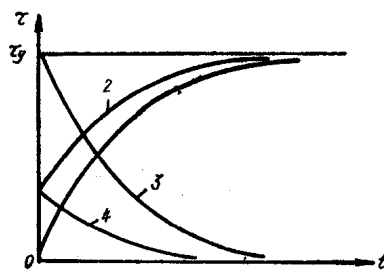


图 1-8 导体温升与温降曲线

表 1-5

t	T	$2T$	$3T$	$4T$	$5T$
τ/τ_y	0.632	0.866	0.950	0.982	0.993

从表 1—5 可知, 当 $t = T$ 时, 温升达到稳定值 τ_v 的百分之六十三以上。当 $t = 4T$ 时, 达到百分之九十八以上, 在工程计算中, 认为经 $4T$ 以后, 温升已达到稳定值 τ_v 了。对一些具体的电器零部件, 时间 $4T$ 有多长呢? 对电器线圈, $4T$ 约为 1~3 小时; 对电阻元件, 约为 15~30 分钟; 对反向器、转换开关等热容量较大的电器约为 4~6 小时。

如果发热体温升上升到某一定值后切断电源, 则 $P = 0$, 温度将下降, 根据能量守恒定律可得:

$$CGd\tau + \mu s\tau dt = 0 \quad (1-15)$$

$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{\mu s}{CG}\tau = 0 \quad (1-16)$$

将式 1—16 积分后得:

$$\tau = Be^{-t/T}$$

式中 B —— 积分常数, 根据初始条件决定。

如果冷却是从稳定温升 τ_v 开始, 即 $t = 0$ 时, $\tau = \tau_v$, 则:

$$\tau = \tau_v e^{-t/T} \quad (1-17)$$

如果冷却是从 τ_0 开始, 即 $t = 0$ 时, $\tau = \tau_0$, 则:

$$\tau = \tau_0 e^{-t/T} \quad (1-18)$$

发热体切除电源后进行冷却的降温曲线如图 1—8 中曲线 3 和曲线 4 所示。

4. 电器的发热工作制

根据电器发热温升是否达到稳定温升值以及切除电源冷却而降温是否下降到周围介质温度, 分为三种工作制, 即长期工作制、短时工作制和断续工作制。

(1) 长期工作制 长期工作制是指导体(发热体)的温升能够达到稳定值的工作制度。

电传动机车经常起车、调速和停车, 机车电器在起车调速运行时发热, 在停车时冷却, 对于站线长、发热时间常数小的电器, 例如各种电阻、继电器及小容量接触器等在起车和运行期间, 温升都能达到稳定值。

长期工作制时的热计算按牛顿公式 1—9 进行。机车电器各零部件的稳定温升

$$\tau_v = \frac{P}{\mu s}$$

不应超过《机车电器基本技术条件》规定的允许值。

(2) 短时工作制 短时工作制是指导体

(发热体) 的温升尚未达到稳定值后就切除电源, 停止发热而进行冷却, 一直冷却到周围介质温度时再重新接入电源进行发热的工作制度。图 1—9 表示在短时工作制下的发热体温升与温降曲线, 图中 P_1 为短时工作制时的功率。在工作期间 t_p 时, 发热体温升为 τ_2 , 若让 P_1 长期作用时, 发热体升到稳定温升 τ_1 。设功率 P_2 长期作用时的稳定温升为 τ_2 , 根据牛顿公式可得:

$$P_1 = \mu s \tau_1$$

$$P_2 = \mu s \tau_2$$

及

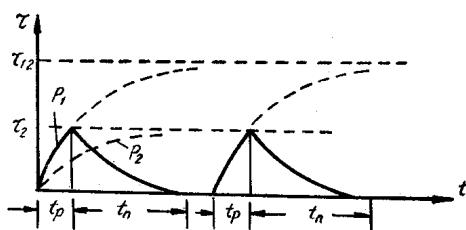


图 1—9 短时工作制的温升与温降特性曲线

长期负载功率 P_2 作用下的稳定温升 τ_2 就是短时负载功率 P_1 作用下在工作时间 t_P 内的温升。机车电器在长期工作制下达到允许温升 τ_2 的功率为 P_2 时, 在短时工作制下达到同样允许温升 τ_2 的功率 P_1 就可以提高, 提高的倍数称为功率过载倍数 K_P 。根据上两式可得功率过载倍数 K_P

$$K_P = \frac{P_1}{P_2} = \frac{\mu_S \tau_1}{\mu_S \tau_2} = \frac{\tau_1}{\tau_2}$$

又
$$\tau_2 = \tau_1 (1 - e^{-t_P/\tau})$$

$$\therefore K_P = \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{\tau_1}{\tau_1 (1 - e^{-t_P/\tau})} = \frac{1}{1 - e^{-t_P/\tau}} \quad (1-19)$$

如果知道导体 (发热体) 的发热时间常数 T , 短时工作制的工作时间 t_P , 就可根据式 1-19 求得功率过载倍数 K_P 。再根据允许长期工作制负载功率 P_2 , 不难得出允许短时工作制的负载功率 P_1 为:

$$P_1 = K_P P_2。$$

将 $e^{-t_P/\tau}$ 展成泰勒级数:

$$e^{-\frac{t_P}{\tau}} = 1 - \frac{t_P}{T} + \left(\frac{t_P}{T}\right)^2 \cdot \frac{1}{2!} - \left(\frac{t_P}{T}\right)^3 \cdot \frac{1}{3!} - \dots$$

当电器的发热时间常数 T 较大, 而短时工作制的工作时间 t_P 很短时, 即 $\frac{t_P}{T}$ 很小时, 则:

$$e^{-\frac{t_P}{T}} \approx 1 - \frac{t_P}{T}$$

将上式代入式 1-19 得:

$$K_P = \frac{1}{1 - e^{-t_P/\tau}} \approx \frac{1}{t_P/\tau} = \frac{T}{t_P} \quad (1-20)$$

由于功率 P 与电流的平方成正比, 不难得出电流过载倍数 K_I 为:

$$K_I = \frac{I_1}{I_2} = \sqrt{\frac{P_1}{P_2}} = \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-t_P/\tau}}} \quad (1-21)$$

当 $\frac{t_P}{T}$ 很小时, 则:

$$K_I \approx \sqrt{\frac{T}{t_P}} \quad (1-22)$$

(3) 断续工作制 断续工作制是指导体 (发热体) 的发热 (温升) 和冷却 (温降) 周期性地不断循环的工作制度, 如图 1-10 所示。在发热和冷却的过程中, 当导体在发热期间的温升值等于在冷却期间的温降值时, 即达到稳定的发热与冷却状态, 这时导体的温升便在上限值 $\tau_{上}$ 与下限值 $\tau_{下}$ 之间摆动, 如图 1-10 所示。

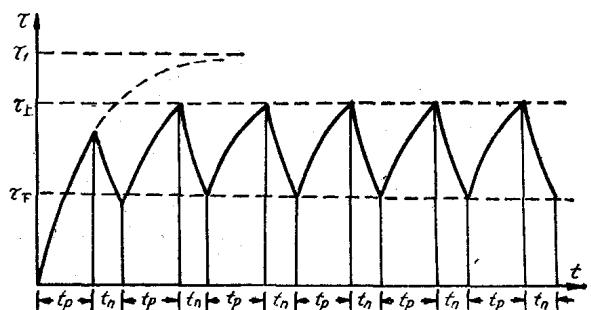


图 1-10 断续工作制的温升与温降特性曲线

断续工作制时的功率过载倍数 K_P

为:

$$K_P = \frac{P_1}{P_2} = \frac{\mu_s \tau_1}{\mu_s \tau_2} = \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{\tau_1}{\tau_{\text{上}}}$$

式中 P_1 ——断续工作制时的功率 (瓦);

P_2 ——允许长期工作制时的功率 (瓦);

τ_1 —— P_1 时的稳定温升 ($^{\circ}\text{C}$);

τ_2 —— P_2 时的稳定温升 ($^{\circ}\text{C}$)。在断续工作制的功率 P_1 作用下, 其上限温升 $\tau_{\text{上}}$ 不应超过 τ_2 , 即 $\tau_{\text{上}} = \tau_2$, 否则就会过热。

设断续工作制时的工作时间为 t_P , 休息时间为 t_n , 在负载 P_1 的作用下达到稳定状态时, 上限温升为 $\tau_{\text{上}}$, 下限温升为 $\tau_{\text{下}}$ 。如果 P_1 长期作用, 则可达到稳定温升为 τ_1 。

根据式 1-14, 在发热期间 t_P :

$$\tau_{\text{上}} = \tau_1 (1 - e^{-t_P/T}) + \tau_{\text{下}} e^{-t_P/T}$$

根据式 1-18, 在冷却期间 t_n :

$$\tau_{\text{下}} = \tau_{\text{上}} e^{-t_n/T}$$

上两式中消去 $\tau_{\text{下}}$, 可得:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{上}} &= \tau_1 (1 - e^{-t_P/T}) + \tau_{\text{上}} e^{-\frac{t_P+t_n}{T}} \\ \tau_{\text{上}} (1 - e^{-\frac{t_P+t_n}{T}}) &= \tau_1 (1 - e^{-\frac{t_P}{T}}) \\ \therefore K_P = \frac{\tau_1}{\tau_{\text{上}}} &= \frac{1 - e^{-\frac{t_P+t_n}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_P}{T}}} = \frac{1 - e^{-\frac{t_P}{T} \cdot \frac{1}{(t_P+t_n)}}}{1 - e^{-t_P/T}} \end{aligned} \quad (1-23)$$

式中 $\frac{t_P}{t_P+t_n}$ ——通电持续率, 通常用百分数来表示。

将 $e^{-\frac{t_P+t_n}{T}}$ 及 $e^{-\frac{t_P}{T}}$ 展成泰勒级数:

$$\begin{aligned} e^{-\frac{t_P+t_n}{T}} &= 1 - \frac{t_P+t_n}{T} + \left(\frac{t_P+t_n}{T}\right)^2 \cdot \frac{1}{2!} - \left(\frac{t_P+t_n}{T}\right)^3 \cdot \frac{1}{3!} + \dots \\ e^{-\frac{t_P}{T}} &= 1 - \frac{t_P}{T} + \left(\frac{t_P}{T}\right)^2 \cdot \frac{1}{2!} - \left(\frac{t_P}{T}\right)^3 \cdot \frac{1}{3!} + \dots \end{aligned}$$

当 $\frac{t_P+t_n}{T}$ 很小时, $e^{-\frac{t_P+t_n}{T}} \approx 1 - \frac{t_P+t_n}{T}$, $e^{-\frac{t_P}{T}} \approx 1 - \frac{t_P}{T}$

可得: $K_P \approx \frac{(t_P+t_n)/T}{t_P/T} = \frac{t_P+t_n}{t_P} = \frac{1}{t_P/(t_P+t_n)}$ (1-24)

电流过载倍数 K_I 为:

$$K_I = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_P}{T} \cdot \frac{1}{(t_P+t_n)}}}{1 - e^{-t_P/T}}} \quad (1-25)$$

当 $\frac{t_P+t_n}{T}$ 很小时, 则 $K_I = \sqrt{\frac{1}{t_P/(t_P+t_n)}}$ (1-26)

已知发热体的发热时间常数 T 、断续工作制的工作时间 t_p 及通电持续率 $t_p/(t_p+t_n)$ ，根据公式 1—23~1—26 求得功率过载倍数 K_P 和电流过载倍数 K_I ，再由允许长期功率或电流，可得断续工作制时的功率或电流。

短时工作制，断续工作制都可根据过载倍数提高电器的功率，充分利用设备的容量。

二、绝缘导体的发热

图 1—11 为一根长直绝缘导体的横截面示意图，图 (a) 为单层绝缘导体，导体的直径为 d ，绝缘层的外径为 D 。当绝缘导体发热到稳定温升时，设周围介质温度为 θ_0 ，绝缘层外表面的稳定温升为 τ_s ，则绝缘层外表面的温度 θ_2 为：

$$\theta_2 = \tau_s + \theta_0 = \frac{P}{\mu_s} + \theta_0 \quad (1-27)$$

其中

$$P = I^2 R = I^2 \cdot \rho \frac{1}{\frac{\pi}{4} d^2} = \frac{4 \rho I^2}{\pi d^2}$$

式中 P ——导体单位长度的电阻损耗功率（瓦/厘米）；

ρ ——导体材料的电阻系数（欧·厘米），如 ρ 的单位用欧·毫米²/米，则应乘以 10^{-4} ；

s ——导体单位长度的散热面积（厘米²）；

μ ——散热系数（瓦/厘米²·°C）。

设导体表面（绝缘层内表面）的温度为 θ_1 ，由于导体很长，可认为热流从内表面沿半径方向传到外表面后散发到周围介质中（发热到稳定状态时），所以等温面是同心圆。今取半径为 x 和 $(x+dx)$ 的两个同心圆，在热稳态下，通过半径为 x ，厚度为 dx ，绝缘导体长度为 l 的绝缘薄层所散走的热量为 P_l ，则：

$$P_l = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \cdot 2\pi x l \quad (1-28)$$

式中 P_l ——导体长为 l 的电阻功率损耗（瓦）；

λ ——绝缘层的热传导系数（瓦/厘米·°C）；

$\frac{d\theta}{dx}$ ——绝缘层中的温度梯度（°C/厘米）。

∴

$$d\theta = -\frac{P_l}{2\pi \lambda l} \cdot \frac{dx}{x} \quad (1-29)$$

上式积分后得：

$$\theta_1 - \theta_2 = \frac{P_l}{2\pi \lambda l} \ln \frac{D}{d} \quad (1-30)$$

如果把 P_l 称为热流（每秒钟流走的热量，热稳态时即为电阻损耗），

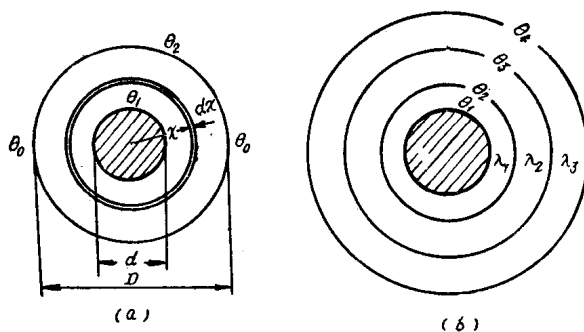


图 1—11 绝缘导体的发热
(a) —— 单层绝缘导体； (b) —— 三层绝缘导体。