

民航维修工程系列教材

# 民航飞机电气系统 (第2版)

Civil Aircraft Electrical System

主 编 朱新宇

副主编 刘 璐 许将军  
彭卫东 何 建

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

---

图书在版编目 ( C I P ) 数据

民航飞机电气系统 / 朱新宇主编. —2 版. —成都:  
西南交通大学出版社, 2021.2  
ISBN 978-7-5643-7940-7

I. ①民… II. ①朱… III. ①民用飞机—电气系统—  
高等学校—教材 IV. ①V242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 269036 号

---

Minhang Feiji Dianqi Xitong

民航飞机电气系统  
(第 2 版)

主编 朱新宇

---

责任编辑 何明飞  
封面设计 原创动力

---

出版发行 西南交通大学出版社  
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号  
西南交通大学创新大厦 21 楼)

邮政编码 610031  
发行部电话 028-87600564 028-87600533  
网址 <http://www.xnjdcbs.com>  
印刷 四川森林印务有限责任公司

---

成品尺寸 185 mm × 260 mm  
印张 22.75  
字数 565 千  
版次 2010 年 4 月第 1 版 2021 年 2 月第 2 版  
印次 2021 年 2 月第 9 次  
定价 78.00 元  
书号 ISBN 978-7-5643-7940-7

课件咨询电话: 028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

## 前言 // PREFACE

(第2版)

随着中国步入民航强国的行列，对民航特有人员的需求量不断增大，中国民航飞行学院承担着培养机务维修高级应用人才的重任，因此必须在出好人才，快出人才上贡献力量。航空电气技术是机务从业人员必须掌握的基本知识之一，《民航飞机电气系统》第1版已经使用了10年，通过连续在飞行器动力工程（航空发动机维修）、电子信息工程（航空电子设备维修）、飞行器制造与工程（飞行器结构修理）、航空机电设备维修等专业的使用，收集了教学反馈信息，而且，随着时间推移，教学内容和领域内的科学技术都在持续更新，编写组决定对教材进行修订。

本书介绍了电器设备、电气系统的基础知识及民航飞机主要电气设备的组成和功用，包括电路装置、航空电机、直流电源系统、交流电源系统、发动机启动与点火系统、飞机电气控制系统、灭火系统、灯光照明及警告信号、电磁

干扰与防护等内容。在本书的最后一章，还对在我国使用量较大、具有典型意义的飞机的电源系统做了介绍，并结合电气系统维护的实际，在附录中提出了维护注意事项。波音 787 型飞机和空客 350 型飞机投入现役，也标志着多电飞机时代的开启，在教材更新中引入了部分相关联的知识。为了突出法规对民航飞机维修的重要作用，将民航法规在教材中进行了体现。

由于民用航空国际化的性质，使得在民航服役的飞机来自不同的国家，其技术资料的使用语言和各种符号的标准不尽相同，为了让使用过本书的人尽快掌握所学内容，能够顺利适应民用航空中不同机型的维护，书中对不同的符号标准和图中所用文字并未完全统一。同时，对于在机务维护中常遇到的电气系统的概念都给出了其英文对应词汇，以利于读者熟悉英文文献的表达方式。

在本次修订时，教材内容有两个方面的重要变化。一是将适航维修相关法规与电气技术相结合，便于读者理解法规对于指导维修工程实施的重要作用；二是加入了维修案例，对于一部分在维修工作涉及较多的内容，引入了维修案例分析，使读者在阅读本书后对电气系统的维修有了初步认识，为参加维修工作奠定了基础。本书中带“\*”的内容属于选学内容，可根据教学情况选择。

本教材为培养学员从事电气相关工作提供基本理论知识和一般的故障及排除方法，书中提供的资料和数据并不能直接作为机型维修或维护工作的依据，实际工作必须参照飞机制造公司配备的维修手册或技术说明书进行。书中虽然引入了维修案例，但由于能够较为完整反映电气知识的案例较难获取，因此难以覆盖全部的知识点，请读者见谅。本书在编写过程也从维修类 App 中获得了大量的材料，如阮工频道、民航机务论坛、机务在线等，在此一并感谢。

本书由中国民用航空飞行学院朱新宇教授担任主编，刘璐副教授、许将军副教授、彭卫东教授、何建教授担任副主编。其中，刘璐编写了第三章，许将军编写了第四和第五章，彭卫东编写了第六章，何建编写了第八和第九章，朱

新宇编写了其余章节并进行了书中案例的整理。

在本书编写过程中得到了教务处和航空工程学院的大力支持，在此一并感谢。由于时间紧，资料有限，编者水平也有限，教材定会存在许多不足和疏漏之处，请读者提出宝贵意见，我们将认真改正。

编 者

于中国民用航空飞行学院

2020年10月

## 前言//PREFACE

(第1版)

随着中国步入民航大国的行列，对民航特有人员的需求量不断增大，中国民航飞行学院承担着培养机务维修高级应用人才的重任，因此必须在出好人才、快出人才上贡献力量。航空电气技术是机务从业人员必须掌握的基本知识之一，在这样的大背景下学院组织编写了《民航飞机电气系统》一书，作为热能与动力工程（航空发动机维修）、电子信息工程（航空电子设备维修）、飞行器制造与工程（飞行器结构修理）、航空机电设备维修等专业的教材。

本书介绍了电器设备、电气系统的基础知识及民航飞机主要电气设备的组成和功用，包括电路装置、航空电机、直流电源系统、交流电源系统、发动机起动与点火系统、飞机电气控制系统、灭火系统、灯光照明及警告信号、电磁干扰与防护等内容。在本书的最后一章，还对在我国使用量较大的、具有典型意义的飞机的电源系统做了介绍，并结合电气系统维护的实际，在附录中提出了维护注意事项。

由于民用航空国际化的性质，使得在民航服役的飞机来自不同的国家，其技术资料的使用语言和各种符号的标准不尽相同，为了让使用过本书的人尽快掌握所学内容，能够顺利适应民用航空中不同机型的维护，书中对不同的符号标准和图中所用文字并未完全统一。同时，对于在机务维护中常遇到的电气系统的概念都给出了其英文对应词汇，以便于读者熟悉英文文献的表达方式。

本教材为培养学员从事电气相关工作的基本知识提供理论知识和一般的故障及排除方法，书中提供的资料和数据并不能直接作为机型维修或维护工作的依据，实际工作必须参照飞机制造公司配备的维修手册进行。

本书由中国民航飞行学院朱新宇教授、彭卫东副教授、何建副教授编写，由朱新宇担任主编。在本书编写过程中得到了教务处和航空工程学院的大力支持，在此一并感谢。

由于时间紧，资料有限，编者水平也有限，教材难免会存在不足之处，请读者提出宝贵意见，我们将认真改正。

编者

于中国民用航空飞行学院

2009年5月



# 目 录// CONTENTS

绪论	飞机电气系统概述	错误!未定义书签。
第一节	飞机供电系统的功用和构成	错误!未定义书签。
第二节	用电设备	错误!未定义书签。
第三节	未来先进飞机的电源系统	错误!未定义书签。
	复习思考题	错误!未定义书签。
第一章	电器基本知识	2
第一节	电接触和气体导电的基本理论	2
第二节	磁路基本理论*	13
第三节	电磁铁	18
	复习思考题	21
第二章	电气线路互联系统	错误!未定义书签。
第一节	导线及其连接装置	错误!未定义书签。
第二节	电路控制装置	错误!未定义书签。
第三节	电路保护装置	错误!未定义书签。
	复习思考题	错误!未定义书签。
第三章	航空电机	错误!未定义书签。
第一节	概 述	错误!未定义书签。
第二节	直流电机的基本结构和工作原理	错误!未定义书签。
第三节	直流电机的电枢反应和换向	错误!未定义书签。
第四节	直流发电机运行特性	错误!未定义书签。
第五节	直流电动机	错误!未定义书签。
第六节	三相同步交流发电机	错误!未定义书签。
第七节	三相异步电动机	错误!未定义书签。
第八节	单相异步电动机	错误!未定义书签。
第九节	控制电机	错误!未定义书签。
第十节	变压器	错误!未定义书签。

复习思考题 .....	错误!未定义书签。
<b>第四章 飞机蓄电池 .....</b>	<b>错误!未定义书签。</b>
第一节 飞机铅酸蓄电池 .....	错误!未定义书签。
第二节 VRLA 蓄电池 .....	错误!未定义书签。
第三节 飞机碱性蓄电池 .....	错误!未定义书签。
第四节 锂离子电池 .....	错误!未定义书签。
复习思考题 .....	错误!未定义书签。
<b>第五章 飞机直流供电系统 .....</b>	<b>错误!未定义书签。</b>
第一节 直流发电机在飞机上的使用	错误!未定义书签。
第二节 直流发电机的电压调节	错误!未定义书签。
第三节 直流电源的并联供电	错误!未定义书签。
第四节 直流电源的控制与保护	错误!未定义书签。
第五节 旋转变流机及静止变流器	错误!未定义书签。
第六节 飞机直流电网 .....	错误!未定义书签。
复习思考题 .....	错误!未定义书签。
<b>第六章 飞机交流供电系统 .....</b>	<b>错误!未定义书签。</b>
第一节 概 述 .....	错误!未定义书签。
第二节 航空无刷交流发电机	错误!未定义书签。
第三节 恒速恒频交流电源	错误!未定义书签。
第四节 变速恒频交流电源	错误!未定义书签。
第五节 变频交流电源 .....	错误!未定义书签。
第六节 混合供电系统 .....	错误!未定义书签。
第七节 交流发电机电压调节	错误!未定义书签。
第八节 交流发电机的并联运行	错误!未定义书签。
第九节 飞机交流电源的控制关系	错误!未定义书签。
第十节 飞机交流发电机故障及其保护	错误!未定义书签。
第十一节 现代飞机的控制保护器	错误!未定义书签。
第十二节 变压整流器 .....	错误!未定义书签。
复习思考题 .....	错误!未定义书签。
<b>第七章 地面电源与发动机电力启动 ..</b>	<b>错误!未定义书签。</b>
第一节 地面电源 .....	错误!未定义书签。
第二节 启动系统的主要机件及其工作原理	错误!未定义书签。
第三节 活塞发动机的启动	错误!未定义书签。
第四节 喷气发动机的启动	错误!未定义书签。
复习思考题 .....	错误!未定义书签。
<b>第八章 飞机电气控制系统 .....</b>	<b>错误!未定义书签。</b>

第一节	飞机电动机械 .....	错误!未定义书签。
第二节	飞机襟翼收放电路 ....	错误!未定义书签。
第三节	调整片操纵电路 .....	错误!未定义书签。
第四节	起落架收放电路 .....	错误!未定义书签。
第五节	顺桨系统* .....	错误!未定义书签。
	复习思考题 .....	错误!未定义书签。
<b>第九章</b>	<b>飞机灭火系统 .....</b>	<b>错误!未定义书签。</b>
第一节	概 述 .....	错误!未定义书签。
第二节	火警探测系统 .....	错误!未定义书签。
第三节	灭火系统 .....	错误!未定义书签。
第四节	灭火系统的维护 .....	错误!未定义书签。
	复习思考题 .....	错误!未定义书签。
<b>第十章</b>	<b>飞机灯光照明及警告信号设备</b>	<b>错误!未定义书签。</b>
第一节	灯光照明设备 .....	错误!未定义书签。
第二节	警告信号设备 .....	错误!未定义书签。
	复习思考题 .....	错误!未定义书签。
<b>第十一章</b>	<b>电磁干扰及防护 .....</b>	<b>错误!未定义书签。</b>
第一节	电磁干扰及其危害 ....	错误!未定义书签。
第二节	电磁干扰的控制 .....	错误!未定义书签。
第三节	静电及防护技术 .....	错误!未定义书签。
第四节	典型飞机系统的电磁干扰源分析	错误!未定义书签。
	复习思考题 .....	错误!未定义书签。
<b>第十二章</b>	<b>典型民航飞机供电系统* ....</b>	<b>错误!未定义书签。</b>
第一节	RS20 型飞机供电系统	错误!未定义书签。
第二节	波音 737-300 型飞机供电系统	错误!未定义书签。
第三节	波音 777-200 型飞机供电系统	错误!未定义书签。
第四节	波音 747-400 型飞机供电系统	错误!未定义书签。
第五节	A350 型飞机供电系统	错误!未定义书签。
<b>附录一</b>	<b>电气设备维护规则 .....</b>	<b>错误!未定义书签。</b>
第一节	电气设备一般维护规则	错误!未定义书签。
第二节	飞机线路的检查与维护规则	错误!未定义书签。
<b>附录二</b>	<b>常用电气符号对照 .....</b>	<b>错误!未定义书签。</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>错误!未定义书签。</b>







扫码获取  
本章数字资源

# 第一章 电器基本知识

## 第一节 电接触和气体导电的基本理论

### 一、概 述

电源和用电设备之间通过导线和各种控制保护电器连通。两个或几个导体互相接触之处叫作电接触。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，它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，而它的原因可能多种多样，因此，研究电接触的本质及特征十分必要。

按照导体连接方式的不同，电接触可以分为两种基本类型，即静态电接触和动态电接触，其常见分类方式如图 1-1 所示。

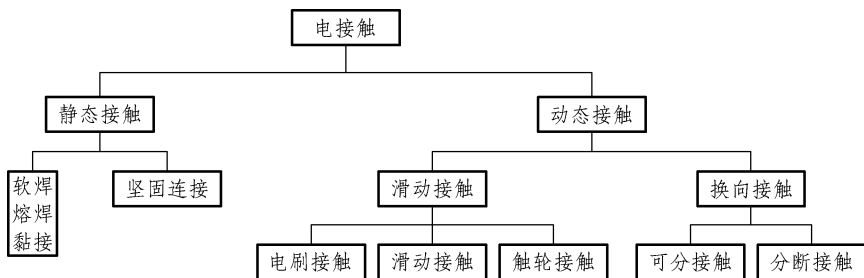


图 1-1 电接触的分类

静态接触又称为固定接触，所有接触元件通过刚性或弹性连接形成永久连接。静态接触可分为不可分离连接（软焊连接、熔焊连接和黏接）和可分离连接（夹持连接、紧固连接和绕接连接）。不可分离连接具有很高的机械强度，低而稳定的接触电阻。紧固连接是采用螺栓、螺钉进行机械连接，或使用夹具等中间部件进行连接，通常用于可装配或拆卸而不破坏连接的完整性。

在动态接触中，至少有一个接触元件刚性或弹性地连接到设备的运动部件上。按照接触的运动条件，动态接触可以分为换向接触和滑动接触。换向接触又可以分为可分离接触（电连接器和断路器）和分断接触（各种开关、接触器、断路器等），分断接触用于周期性接通和断开的电路。

开关电器触点由不同的金属和合金制造而成，尺寸和形状也各不相同。在使用时应正确

选择触点材料、额定值、外形等，如果不能正确选择，容易导致接触问题，甚至接触故障。

触点的结构形式多样，常用的有单断点触点和双断点桥式触点，如图 1-2 和图 1-3 所示。单断点触点本身的灭弧能力比较差，在大负载的开关电器中一般不采用。双断点桥式触点多用于航空接触器的触点系统。由于这种结构形式本身具有较强的熄弧能力，对开断具有几十伏电压的直流电路特别有效，所以控制飞机直流电源的接触器都采用双断点桥式结构。控制飞机交流电源的接触器也采用双断点桥式触点。

按照动静触点接触面外形的几何形状可以分为点接触、线接触和面接触 3 种，如图 1-4 所示。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，继电器的触点一般都是点接触的形式；面接触可以通过较大的电流，触点上的压力也较大，接触器的触点都采用面接触的形式；线接触的能力介于上述二者之间。

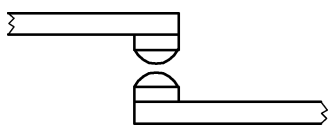


图 1-2 单断点触点结构

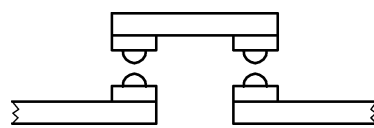
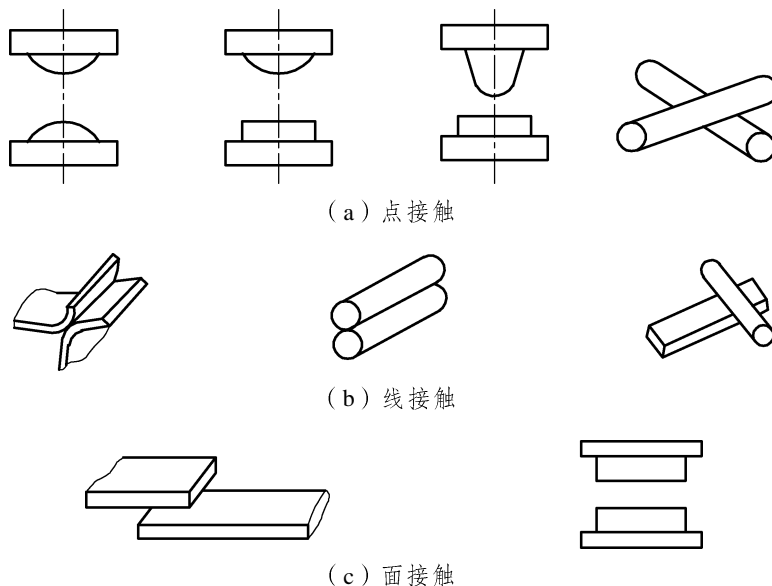


图 1-3 双断点桥式触点



(a) 点接触

(b) 线接触

(c) 面接触

图 1-4 触点的接触形式

触点除触点高度、直径等外形尺寸以外，还有以下 4 个主要结构参数。

(1) 触点间隙：指在断开状态时，动静触点间的最小距离。此时活动铁心与静铁心之间的距离称为磁间隙。

(2) 触点超行程：在闭合过程中，动静触点开始接触后，传动机构继续运动，直达其终点，若动触点不受静触点的阻碍，它会从开始接触的位置起，活动铁心继续向静铁心运动的一段距离称为触点的超行程（也可称为备用行程）。设置超行程是为了增大触点的终压力而减小触点的接触电阻，保证触点工作的可靠性。

(3) 触点的初压力：动、静触点刚接触时，触点间的压力（超行程之前的触点压力）。它主要是限制和防止触头在接通时的机械振动。

(4) 触点的终压力：带动触点的传动机构运动到终点之后，触点间的压力（超行程之后的触点压力）。终压力一般为初压力的 1.5~2 倍。终压力是为了保证触头在闭合状态下接触电阻较小、从而使其温升不致超过容许值。

触点压力的第一个作用是抗热熔或抗熔焊，它将已接触的点压皱变形，使接触面积增加，从而减小了接触电阻。这时，在流过同样电流时触点的发热就会减轻。换句话说，即在同样的发热条件下，触点允许通过的电流就相应地增大。

触点压力的第二个作用为清膜能力。它将触点表面膜压破，使触点金属直接接触，从而使其接触电阻减小并稳定。

触点压力的第三个作用称为抗振能力。它能消除外界的振动与冲击，确保不致因这些因素而使接触电阻增大，甚至发生触点瞬时断开造成断电事故。

触点在工作过程中，总是要经历以下 4 种工作状态：

- (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 4 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 3 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

当两个金属导体互相接触时，在接触区域内存在着一个附加电阻，这个附加电阻称为接触电阻，它是电接触中客观存在的重要的物理现象之一。

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，就算是经过精加工和研磨抛光工序的触点，在微观上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 1-5 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。

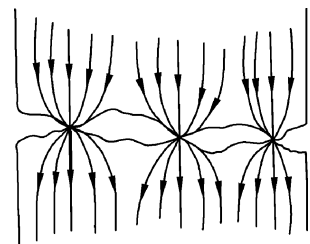


图 1-5 接触面电流的收缩现象



收缩电阻主要取决于触点材料性质与接触点附近的电流线分布状况。这又与接触点数目、形状、相互间隔、实际接触面积等一系列因素有关。一般来说，收缩电阻与材料电阻率成正比，与材料硬度的平方成正比，与压力和接触点数目的平方根成反比。

## 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。膜电阻的存在，使接触电阻值大大升高，甚至造成触点不通，这种现象叫作触点污染。对于小负荷的触点，污染是造成接触故障的主要原因之一。

膜电阻由接触表面膜层及其他污染物所构成。从接触表面状态分析，表面污染膜可分为较坚实的薄膜层和较松散的杂质污染层。洁净的金属表面，一旦暴露在大气中，便会很快生成几微米的初期氧化膜层，如铜只要 2~3 min，镍约 30 min，铝仅需 2~3 s，其表面便可形成厚度约 2  $\mu\text{m}$  的氧化膜层。即使特别稳定的贵金属金，由于它的表面能较高，其表面也会形成一层有机气体吸附膜。此外，大气中的尘埃等也会在接触件表面形成沉积膜。

膜电阻的存在对触点的接触电阻影响很大，它不仅使接触电阻阻值增大，而且还会使接触电阻严重不稳定，甚至会使触点的导电性能遭到完全的破坏。为了恢复良好的导电性，可以利用机械力的作用（如增加接触压力）把膜压碎。增加触点压力还可增大接触面积、减薄吸附层，这些因素都使接触电阻下降，并且使电接触稳定可靠。切换大电流的触点，由于伴随而产生的电流热效应和电弧的烧损，可以使膜因烧灼而被破坏；也可以提高施加于触点间的电压，在静电场的作用下膜被击穿，在绝缘膜中形成许多细微的金属针孔通道，供大电流通过，由此可使接触电阻显著地下降。

需要指出的是，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，借助膜层提高接触电阻的稳定性。

## （二）接触电阻的效应

### 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，其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。

### 3. 触点的熔焊

电流流过闭合触点时会使触点温度上升，过高的温度会使触点局部熔化，并焊接在一起，使触点无法继续工作，这种故障现象称之为触点的熔焊。

当通过闭合触点上的电流达到一定值时，触点的接触电阻下降，接触表面出现熔化痕迹，



这时的电流称为熔化电流。当继续增大电流，使触点接触表面熔化的面积和深度继续扩大。当电流超过开始熔化电流的 20% ~ 30% 时，触点开始焊接，此时要使触点分开需要施加较大的力，对应的电流称为开始焊接电流。电流越大，触点焊接越牢固，焊接力也越大，直至接近和达到触点某基体金属的抗拉强度。这种触点熔焊现象常见于大电流电器，如飞机发电机的输出接触器等。

当巨大的短路电流流过闭合触点时，触点间的电动斥力会导致触点间压力减小，甚至可能使触点完全分离而形成电弧。在压力极度减小的情况下，通过大电流以及形成电弧这两种情况都会使触点局部熔化。短路电流切除以后，电力消失，熔化的触点重新闭合在一起，极易造成严重的熔焊故障。

#### 4. 触点的冷焊

触点的冷焊也称为触点的黏接或黏附。它是指无须焊剂的情况下，由于集中压力载荷的作用，使得要连接的触点的接触面积变大，使障碍焊接的保护膜破坏，外加载荷使暴露的纯净金属基体紧密接触，从而产生新的原子级的结合，在外加压力作用下实现焊接。这是清洁的触点在完全无电流通过的情况下，由于触点的接触表面上塑性变形而引起的。

塑性变形区的金属在压力作用下会产生一种塑性流动，如果存在切向（相对于接触表面）作用力，譬如驱使触点相对活动的作用力，会使这种塑性变形更加显著。塑性流动使接触表面扩大，并且使两金属的界面更加接近。如果两个金属界面上的原子之间的距离已接近或等于同一金属内原子间的距离，那么不同金属的原子间就会出现明显的吸引力，叫作黏接力。黏接力与物质内部原子之间结合力具有同样的性质。可见，冷焊是在完全无电流情况下“焊”在一起的。

黏接现象与金属的各种物理及机械性质有关，环境也会极大地影响黏接。试验证明，在一定条件下，在氮气中的黏接会比真空中的黏接严重。

冷焊现象对于小压力、高可靠要求的触点是一大危害。触点“冷焊”故障常发生于小型密封继电器中，这类继电器常用金或金合金做触点的镀层或压制触点，以保证接触电阻的稳定性。这是因为一方面金是塑性材料，化学亲和力好，又不会在表面生成氧化膜；另一方面，这类继电器触点都密封于惰性气体中，所以极易发生触点的冷焊故障。

目前，解决冷焊问题的主要方法是合理选用触点材料。另外，触点间的相对摩擦会使触点表面的吸附层逐渐减薄，并加强触点材料的塑性流动。这些对防止冷焊都是不利的。因此，从这一点出发，又应避免触点间过分的相对滑动。显然这与前述利用触点间的相对摩擦以减小膜电阻是矛盾的。

### （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。要得到低值而稳定的接触电阻，以提高电接触的可靠性，就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

触点材料的性质会直接影响接触电阻的大小，这些材料的性质包括电阻率、材料的机械

强度和硬度以及化学性质等。采用的触点材料要从减小收缩电阻、膜电阻以及获得稳定的接触电阻等几个方面来综合考虑。触点材料的电阻系数越小，接触电阻也就越小；触点材料的压皱强度越小，接触电阻也就越小。

银可作为数十安培到数千安培电流的触点。研究可知，银触点长时间闭合通过电流时电阻下降，发热破坏了氧化膜。在长时间加热状态下，微观粗糙表面上的局部变形可使接触区域增加。银的氧化物在 100 °C 时已经开始热分解，随着温度升高，分解速度加速增加。银触点的主要缺点是冷焊，使触点断开需要很大的力。这时，应选用能抵抗冷焊和具有稳定接触电阻的材料。目前，在航空电器中使用最为广泛的材料还是银合金。

铜在一般温度下就会加剧氧化，这种触点需要高的压力和具有摩擦接触的表面。在闭合状态下连续工作时，铜触点的接触电阻增加很快，这对稳定工作不利。它可作为中负荷和大负荷的触点材料。

近年发展起来的金属陶瓷材料（粉末冶金），如银-氧化镉作为触点材料具有接触电阻低而稳定的特点，尤其是温度升高时接触电阻减小。同时，随着压力增加，接触电阻按抛物线规律下降。因此已被广泛应用于接触器和继电器中，特别是大电流交流接触器中，其电寿命比纯银和银-镍合金有很大的提高。

## 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，原因就是看收缩电阻和膜电阻哪个减少得更多。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。

接触压力对接触电阻的大小有着重要的影响，没有足够的压力，只靠加大接触面的外形尺寸，并不能使接触电阻有明显的下降。接触压力增大，当接触点压强超过一定值时，可以使触点表面的吸附膜减少到 2~3 个分子层；当超过材料屈服强度时，产生塑性变形，表面膜被压碎出现裂缝，增大了金属的接触面，使接触电阻值迅速下降。因此，接触压力对膜电阻的影响也是显著的。综合以上两个方面，加大接触压力，使收缩电阻和膜电阻都减小，所以总的接触电阻将减小。

## 3. 接触表面所处环境

暴露在空气中的接触面，若不加以覆盖，任何接点材料都会产生氧化作用，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。

触头表面光洁度越差，越容易污染和生成氧（或硫）化膜，因而接触电阻越大。这不仅增大了触头损耗，有时甚至使电路无法正常接通，尤其是在电压较低、电流较小的场合。为

了保证接触电阻值小而稳定，要求触点表面的光洁度越高越好。光洁度高的触点不易受污染，也不易生成有机膜和无机膜等，即减少周围介质对触点接触电阻的影响。为了达到较高的光洁度往往采用机械、电或化学抛光等工艺。但在某些情况下，为了增加接触触点，甚至有意在接触面上压上花纹。

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、触点间的电弧与熄弧方法

#### （一）触点放电的基本理论

干燥的空气以及氧气、氢气、氮气、二氧化碳、各种惰性气体都是很好的绝缘体，它们的原子和分子都呈电中性。然而，触点间隙中的气体，在发生电弧或火花放电时，能够维持电路中的电流继续流通，它们不再是绝缘体而变成了导电的气体。此时，这些气体中的原子和分子已不再是电中性，而有由气体游离产生的带电粒子存在。

当外界作用于原子的能量足够大，使得最外层电子吸收了这部分能量后能够挣脱原子核引力的束缚而成为自由电子，而原来是中性的原子或分子（简称中性粒子）由于失去一个电子而变成带正电荷的正离子，这种现象称为游离。游离所需的能量叫作游离能。

如果外界作用于原子的能量足够大，使得正常轨道上运转的电子吸收这些能量以后，不能脱离原子核引力范围，只能使电子跳到较外层的轨道上，从而增加了原子的内能，这种现象称为激励。激励所需的能量称为激励能。

游离产生新的带电粒子，使气体中带电粒子的含量增加。与此同时，在游离气体中还进行着一个相反的过程，即存在着带电粒子不断减少的过程，这个过程叫作消游离。所谓消游离是指游离气体中带电粒子自身消失或失去电荷而变为中性粒子的现象。消游离的方式有复合和扩散两种。

两个带有异号电荷的粒子相遇后相互作用而消失电荷的现象叫作复合。

游离气体中的带电粒子，由于热运动从浓度较高的区域向周围浓度较低的气体移动的现象叫作扩散。扩散的结果使游离气体中的带电粒子减少，这相当于游离气体产生了消游离的作用。

#### （二）电弧的产生

在大气中开断电路时，通常会在触点间隙（以下简称弧隙）中产生一团温度极高，发出强光并能够导电的近似于圆柱形的气体——电弧。电弧在生产和生活中早已得到广泛的应用。但是开关触点间隙中的电弧却是十分有害的，它主要存在以下危害：

- （1）延迟了电路的分断时间。
- （2）延长了切断故障的时间。
- （3）电弧的高温会烧损用来接通和开断电路的触点，或发生熔焊现象。
- （4）高温引起电弧附近电气绝缘材料烧坏，造成母线短路，烧毁设备，烧伤操作人员，

甚至能引起开关电器的爆炸和火灾。

(5) 形成飞弧造成电源短路事故。

(6) 电弧是造成电器的寿命缩短的主要原因。

触点在断开或接通电路时，间隙是变化的。当断开电路使触点分离时，触点间的压力逐渐下降，接触电阻逐渐增大，导致触点温度提高。当温度高到金属熔点之后，金属局部熔化，熔化的金属桥接在两个触点之间，成为维持电流的通道。这种现象叫作金属液桥，简称液桥。液桥存在时间很短，可由触点继续运动而被拉断。在金属桥断开后，可能出现下面的情况：

(1) 触点间直接生成电弧。

(2) 触点间隙被击穿而发生火花放电。

(3) 在金属桥断裂后的瞬间出现短弧。

触点在闭合过程中也可能发生类似的现象，特别是当触点发生“回跳”或“拍合”现象时情况更为严重，可能由于电弧而产生触点的合闸熔焊。

触点断开时直接生成电弧的条件，必须是被断开电路的电流和断开后加在触点间的电压都超过某个固定的数值，这个数值称为触点的极限燃弧电流和极限燃弧电压。极限燃弧参数的大小与触点材料及空气介质等条件有关。

### (三) 飞机电器中常用的熄弧方法

#### 1. 气体吹弧

利用电弧产生的高温，使某些灭弧物质受热后产生大量气体将电弧吹熄。如 KM 型接触器的触点罩盖就是利用灭弧材料（石棉-有机硅基树脂）制成的，当电弧发生时，灭弧材料受热产生大量气体吹向电弧，加强消游离过程；同时产生的大量气体使电弧燃烧区气压增大，阻止了游离过程，从而使电弧熄灭。

#### 2. 磁吹弧

图 1-6 所示为磁吹弧原理，磁场方向和图面垂直并指向图面，电流方向如图中箭头所指。电弧因受电磁力  $F$  的作用向距触点较远的地方拉长，受冷却而加强消游离过程，从而使电弧熄灭。磁场可由永久磁铁产生，也可由专用的熄弧线圈产生。

飞机电器有利用触点导电片的电流产生的磁场来吹弧的，如图 1-7 所示，称为自磁吹弧，KM 型接触器即属此类。图 1-7 (a) 为对接式触点，图 1-7 (b) 为改进型，活动触片与固定触片成  $100^\circ$  的安装角。

用双断点触点开断电路，如图 1-7 (a) 所示，当活动触点向上运动与静触点分离时，在左右两个弧隙中产生了两个彼此串联的电弧。这样在相同的条件和相同的电流时，其阴极压降和阳极压降都是单断点触点的 2 倍。因此，它可以在较小间隙下获得较高的伏安特性。

采用双断点触点熄弧对于开断具有几十伏电压的直流电路特别有效，因为此时阴极压降

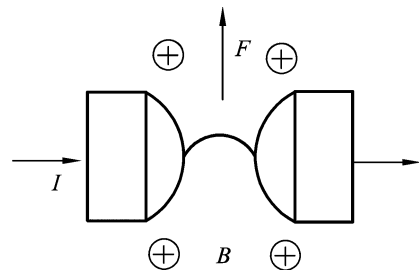


图 1-6 磁吹弧原理

与阳极压降之和（每个断点的阴极压降与阳极压降之和都在十几伏以上）在整个电弧电压中占有较大的比例。目前，飞机直流系统是 28 V，采用双数回点触点熄弧措施之后，触点的熄弧能力已经足够，其他措施只起辅助作用。

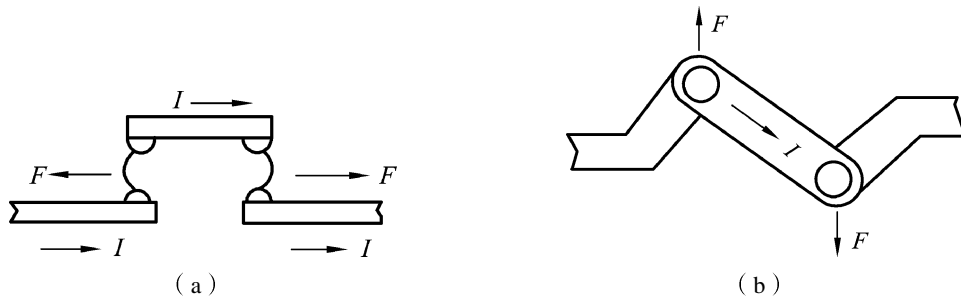


图 1-7 自磁吹弧原理

### 3. 利用石英砂粒间隙熄弧

这种方法常用于电路保护设备的熔断器中。在电路严重过载或短路时，熔丝熔化成为蒸气，很容易产生电弧。为熄灭电弧，在熔断器中放置石英砂，当形成电弧时，由于高温与蒸气压力的作用，使电弧中的带电质点向周围扩散而渗入石英砂粒的空隙中，受到石英砂的冷却，并加强消游离作用，将电弧熄灭。这种方法可用于熄灭从几安培到几百安培大电流的电弧。

### 4. 玻璃管式熔断器熄弧

飞机上使用的小功率电路的熔断保护器，常将熔丝封装在玻璃管里。当电路过载或短路时，熔丝被熔化，这时将产生电弧并有金属蒸气，由于管内压力增大而使游离受到阻止。另外，管内热量可由管壁及金属管脚很快传递出去，在冷却作用下加强了消游离过程，从而使电弧熄灭。

### 5. 利用加速弹簧熄弧

对飞机上的普通电门及自动保险电门，在构造上装有加速动作弹簧，使触点断开的动作速度加快，迅速将电弧拉断。

## 四、火花放电和灭火花电路

### (一) 火花放电的产生

触点断开时，如果电路电流小于极限燃弧电流，则在金属液桥断裂后不会发生电弧。但是，由于电路中电感的存在，自感电势将会使触点间出现高电压。当触点间的电压达到间隙的击穿电压时，便产生火花放电。

火花放电与电弧放电不同，它是由于触点间隙被击穿引起电路忽通忽断的一种不稳定放电现象。而电弧放电是在满足极限燃弧参数的条件下，在金属液桥断裂后，在触点间隙中生成的一种连续放电现象，而且电弧可能稳定燃烧。

火花放电主要是由电感中储存的能量引起的，火花放电不稳定的原因在于触点间隙具有

的电容作用。当触点刚分离时，储存在电路电感中的能量要释放出来，于是产生自感电势给触点充电，当触点电压升高到触点间隙的击穿电压时（一般为 270 ~ 330 V），触点间隙被击穿，这样为触点所充的电荷又被释放出来。当放电中止，自感电势又再次对触点充电，电压再次升高，间隙再次被击穿。但这时由于间隙在不断增大，再次击穿电压比前一次击穿电压更高。如此充电和放电，直至间隙增大到一定距离以后，才使电路真正断开，电感内的储能也就通过多次火花放电转变为热能而消耗掉了。

火花放电通常在较高气压的条件下生成，电流密度比较高，并伴随有高温，因而会引起触头烧损；火花放电还会在线路中产生虚假的高频信号，对电子设备和无线电通信造成干扰。因此，必须设法减弱或消除火花。

## （二）灭火花电路

针对电感储能是引起火花放电的主要原因，因此，只要采取措施，将被断开电路中电感的能量消耗掉，就可以避免产生火花放电，这只要给电感储能提供一个放电回路就可实现。常见的触点灭火花电路如图 1-8 所示。

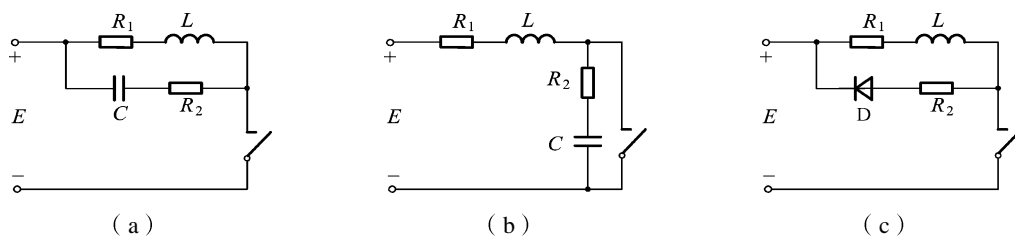


图 1-8 常用灭火花电路

图中  $R_1$  与  $L$  一起代表感性负载。图 1-8 (a) 是在负载两端并联电容器，图 1-8 (b) 是在触点两端并联电容器。当触点断开时，电感中的能量可以通过  $R_2$ 、 $C$  灭火花电路形成通路，使电感中的磁能在  $RLC$  振荡回路中消耗掉；对图 1-8 (b) 的电路，因电容两端电压不能突变，所以触点刚断开时加在触点间的电压很小，到电容充电具有较高电压时，触点间隙已增大了。图 1-8 (c) 采用整流二极管与负载反向并联，在正常稳态时，灭火花电路不起作用，只有在触点断开过程中，自感电势使整流二极管导通，从而将电感的能量消耗在触点之外。

对于图 1-8 (a) 中所示电路， $R_2$  可以为  $R_1$  的 5 ~ 10 倍，而且应该避免电感、电容发生谐振。图 1-8 (b) 中所示电路，一般可取  $C = 0.5 \sim 2 \mu\text{F}$ ， $R_2 = \frac{U_C^2}{a}$ ， $U_C$  是加在电容器上的电压； $a$  是与触头材料有关的系数，对于银触头， $a = 140$ 。对于图 1-8 (c) 中电路，放电电阻  $R_2$  一般为线圈电阻  $R_1$  的 5 ~ 10 倍，二极管的反向电压宜为电源电压的 2 倍。

## 五、触点磨损

触点在工作过程中，由于受到机械、化学、热、电等各种因素的影响，触点材料会产生损耗或定向的转移，这种现象称为触点磨损。触点磨损会造成触点表面破损、变形，使触点压力、接触电阻、触点间隙等参数发生变化，严重时甚至使触点无法正常工作。

## （一）触点的磨损形式

触点磨损有3种形式：机械磨损、化学磨损和电磨损。

机械磨损是指在断开和闭合电路过程中由于触点之间的撞击和磨损等机械力的作用而引起的触点磨损。机械磨损会使触点变形、开裂和磨损。触点压力越大，机械磨损越快。机械磨损并不是触点磨损的主要形式。

化学磨损是指周围环境中有害气体对触点材料的化学腐蚀引起的触点磨损。化学腐蚀使触点表面形成非导电性膜，使得触点接触电阻增大，并且不稳定，严重时完全破坏触点的导电性能。这层膜在触点相互碰撞和触点压力等机械作用下逐渐剥落，形成金属材料的损耗。

触点在分合电路过程中，触点间隙中进行着剧烈的热和电的物理过程，伴随而产生金属液桥、电弧和火花放电等现象，引起金属材料的转移、喷溅和汽化，使触点材料损耗和变形。这种现象引起的触点磨损，称为电磨损，也称为电腐蚀，它是触点磨损的主要形式。

## （二）电磨损

### 1. 液桥磨损

液桥现象主要发生在断开过程中触点分离之前，由于触点压力减小、接触电阻增大而引起的高温使触点金属局部熔化而产生的。如果触点表面不平或者表面上存在着能够导电的污染物，在闭合过程中触点表面上的微小突起部分首先接触，也可能发生液桥现象。

实验证明，由于液桥的作用，触点在多次操作以后，其阳极金属减少形成凹坑，而阴极金属增多形成瘤或针尖，凸出接触表面，这种现象称为金属转移，它将阳极触点金属转移到了阴极上去。产生这种现象的原因主要是液桥上的最高温度点在靠近阳极处，当液桥被拉断时，断裂点位于温度最高点附近，这样，熔化金属中的较大部分被带到阴极。

### 2. 电弧磨损和火花磨损

电弧和火花放电时，正离子或电子对电极的轰击会使触点温度升高，使金属局部熔化和汽化。金属蒸气的扩散和金属液体的溅射是造成磨损的主要原因。

放电形式不同，对触点的影响也不同。火花磨损与液桥磨损相似，触点材料由阳极向阴极转移，即阳极磨损；而电弧的情况相反，触点材料由阳极向阴极转移，即阴极磨损。

### 3. 减少电磨损的方法

为了减小电磨损，应该选用燃弧电流、燃弧电压和熔点均较高的材料做触点，防止产生电弧和液桥；在触点材料中适当加入非贵金属，利用非贵金属的氧化物避免磨损材料的连续堆积；也可采用两种不同的金属材料做触点，使液桥的最高温度点自动调节到两极间的中心点，使磨损量达到最小；此外还可以选用新型的多层复合触点。

现代飞机上千线电路中使用的接触器触点控制电流很大，在多次操作后触点的电磨损会比较严重，在维护飞机时对各种大容量的接触器（或继电器）触点的磨损情况必须认真检查，发现触点严重磨损时应及时更换。在内场维修时，应对受损的触点表面进行打磨修理。

## 六、触点的使用与维护



为了保证触点能够可靠地接通和断开电路，工作的触点应该满足以下条件：

(1) 触点应工作在规定的条件之下，所控制电路的电压和电流都不应该超过额定值。

(2) 保证触点上的压力在正确范围内。应保持机件内的弹簧等机构的良好和工作正常，一般不要轻易分解机件，经过分解装配后，需要检查接触压力是否符合规定。

(3) 保持触点的清洁。触点上不应有任何外来物。

(4) 防止水、油、尘土等进入机件内部。根据工作状况可以对机件进行包扎、密封处理。

使用时，如果触点承受了过大的电流将大大降低使用寿命。对于一个 120 V/40 W 的白炽灯来说，额定电流为 0.33 A。而灯丝在冷态下的电阻值很低，接通初期的冲击电流可以达到 6 A，如果使用 2 A 的触点，将导致早期失效。

在电动机和变压器使用中也可能存在同样的情形，或在其他存在大量分布电容的地方。在电动机启动时，启动电流可以达到正常值的 6 倍，甚至更多。例如，一台 3 A 的电动机启动电流可以达到 18 A 以上，因此触点选用的额定功率至少应为 20 A。此外，当断开电门使电动机停止运行时，在减速直至停止运行的过程中，电动机相当于一台发电机，在电门断开时，触点间将产生破坏性的电弧，从而使得触点过早失效。因此，必须对电弧进行抑制。

当继电器等开关电器与负载间的距离较远时，线路间的分布电容对于继电器及其触点会产生特殊的问题。在触点闭合后，在负载电流形成之前，线路分布电容被充电，对于触点来说相当于时间短路，吸收的电流将远超过负载电流。在线路中分布电容很大时，在选择继电器等开关电器时，瞬时冲击电流的影响必须考虑在内。

在含有触点的电器中，需按要求对触点进行检查。因为在触点工作过程中，由于经常有火花、电弧和材料转移等作用存在，触点表面会受到一定的烧伤和损失。在规定的条件内，在额定电压和额定电流下，这种烧伤和受伤并不严重，如图 1-9 (a) 所示，不影响触点的正常工作。当触点工作在规定范围以外（如高温）、超过额定电压、超过额定电流等条件下，触点会受到严重的烧伤，使得超过 50% 的触点表面或在触点直径的 70% 范围内凹凸不平，如图 1-9 (b) 所示，这种触点不能继续使用，必须进行修理或更换。

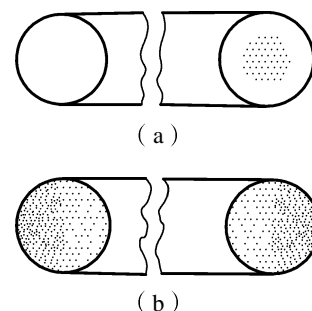


图 1-9 触点状况

## 第二节 磁路基本理论\*

在变压器、电机、电磁铁等电器中，为了把磁场限制在一定的空间范围之内，常用高磁导率的铁磁材料做成一定的形状（称为铁心），使之形成一个磁通的路径，使磁通的绝大部分通过这一路径闭合，这个磁通的路径称为磁路。

### 一、磁场的基本物理量

#### (一) 磁感应强度

磁感应强度是用来描述磁场内某点磁场强弱和方向的物理量，是一个矢量。它与电流（电

流产生磁场)之间的方向关系满足右手螺旋定则,其大小可用通电导体在磁场中某点受到的电磁力与导体中的电流和导体的有效长度的乘积的比值,来表示该点磁场的性质,并称作该点磁感应强度  $B$ 。其数学表达式为

$$B = \frac{F}{lI} \quad (1-1)$$

在 SI 制中,  $B$  的单位是特斯拉,简称特 (T); 以前也常用电磁制单位高斯 (Gs), 两者的关系是

$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ Gs} \quad (1-2)$$

如果磁场内各点磁感应强度  $B$  的大小相等,方向相同,则称为均匀磁场。在均匀磁场中,  $B$  的大小可用通过垂直于磁场方向的单位截面上的磁力线来表示。

## (二) 磁 通

磁感应强度  $B$  (如果不是均匀磁场,则取  $B$  的平均值)与垂直于磁场方向的面积  $S$  的乘积称为该面积的磁通  $\Phi$ , 即

$$\Phi = BS \quad (1-3)$$

可见,磁感应强度在数值上可以看成为与磁场方向相垂直的单位面积所通过的磁通,故又称为磁通密度。

在 SI 制中,  $\Phi$  的单位是韦伯,简称韦 (Wb); 在工程上有时用电磁制单位麦克斯韦 (Mx)。两者的关系是

$$1 \text{ Wb} = 10^8 \text{ Mx} \quad (1-4)$$

## (三) 磁导率

磁导率  $\mu$  是表示磁场媒质磁性的物理量,也就是用来衡量物质导磁能力的物理量。它与磁场强度的乘积就等于磁感应强度,即

$$B = \mu H \quad (1-5)$$

磁场内某一点的磁场强度  $H$  只与电流大小以及该点的几何位置有关,而与磁场媒质的磁性无关,就是说在一定电流值下,同一点的磁场强度不因磁场媒质的不同而有异。但磁感应强度是与磁场媒质的磁性有关的。当线圈内的媒质不同时,则磁导率  $\mu$  不同,在同样电流下,同一点的磁感应强度的大小就不同,线圈内的磁通也就不同了。

任意一种物质磁导率  $\mu$  和真空的磁导率  $\mu_0$  的比值,称为该物质的相对磁导率  $\mu_r$ ,  $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{B}{B_0}$ 。自然界中的物质,就导磁性能而言,可分为铁磁物质 ( $\mu_r \gg 1$ ) 和非铁磁物质 ( $\mu_r \leq 1$ ) 两大类。非铁磁物质和空气的磁导率与真空磁导率  $\mu_0$  很接近,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。

## (四) 磁场强度

磁场强度  $H$  是计算磁场时所引用的一个物理量,也是矢量,它的单位是安培/米 (A/m)。磁场内某点的磁场强度的大小等于该点磁感应强度除以该点的磁导率,即

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (1-6)$$

式(1-6)是安培环路定律(或称为全电流定律)的数学表达式。它是计算磁路的基本公式。磁场强度的大小取决于电流的大小、载流导体的形状及几何位置,而与磁介质无关。

## 二、磁性材料

### (一) 磁性材料的磁性能

磁性材料主要是指铁、镍、钴及其合金,这些磁性材料具有下列磁性能。

#### 1. 高导磁性

磁性材料的磁导率很高,铁磁物质的磁导率比非磁物质的要高很多,如硅钢的相对磁导率可达7000之多。这就使它们具有被强烈磁化(呈现磁性)的特性。

为了表示铁磁物质对磁场的性质,一般以纵坐标表示磁感应强度 $B$ ,横坐标表示磁场强度 $H$ ,这样的 $B-H$ 曲线称为铁磁材料的磁化曲线,它一般通过实验测定,如图1-10所示。

铁磁材料的磁化曲线是非线性的,如图1-10所示,它反映了铁磁材料的磁化程度随外磁场变化的规律。由 $B-H$ 曲线可知,在初始阶段( $oa$ 段), $H$ 增加时 $B$ 增加得较慢;第二阶段( $ab$ 段), $H$ 增加时 $B$ 增加得很快。

有时,也用磁导率 $\mu$ 与 $H$ 的关系曲线( $\mu-H$ 曲线,见图1-11)表示材料的磁性能, $\mu$ 值可以由 $B-H$ 曲线上相对应的点求得,即 $\mu = B/H$ 。铁磁材料的磁导率不是常数。铁磁材料的磁导率还与温度有关。当温度超过某一临界值时,铁磁物质就变得和弱磁材料一样,这一临界温度称为居里点。铁的居里点是 $768^{\circ}\text{C}$ ,镍的居里点是 $358^{\circ}\text{C}$ ,30%的坡莫合金(铁镍合金)的居里点是 $70^{\circ}\text{C}$ ,因此此种铁磁物质在 $80^{\circ}\text{C}$ 的热水中就将失去磁性。

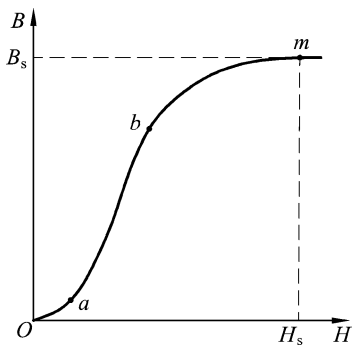


图 1-10  $B-H$  曲线

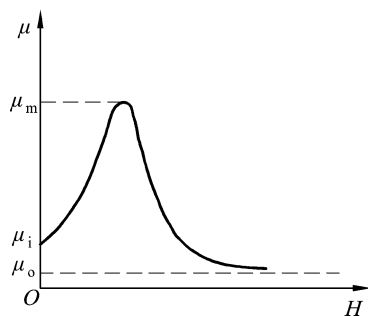


图 1-11  $\mu-H$  曲线

在相同的励磁绕组匝数和励磁电流的条件下,在采用铁心后可将磁感应强度增强几百,甚至成千上万倍,因此各种变压器、电机和电器中几乎都采用由铁磁材料构成的铁心。

#### 2. 磁饱和性

由磁化曲线可知,第三阶段( $bm$ 段), $H$ 增加时 $B$ 的增加又缓慢下来。 $b$ 点常称为膝点。过了 $m$ 点以后, $H$ 增加时 $B$ 几乎不再增加,这时铁磁材料的磁化已经达到饱和, $m$ 点的磁感

应强度称为饱和磁感应强度  $B_s$ ，相应的磁场强度为  $H_s$ 。磁饱和是由于当外磁场（或励磁电流）增大到一定值时，全部磁畴的磁场方向都转向与外磁场的方向一致。这时磁化磁场的磁感应强度即达饱和值。

由于磁化曲线是非线性的，故磁路是非线性的。

### 3. 磁滞性

在铁心线圈中通入交流电，铁心被交变的磁场反复磁化，电流变化一次，磁感应强度  $B$  随磁场强度  $H$  而变化的关系如图 1-12 所示。由图可知，当  $H$  已减到零值时， $B$  并未回到零值。这种磁感应强度滞后于磁场强度变化的性质称为磁性物质的磁滞性，由此画出的  $B-H$  曲线称为磁滞回线。

当线圈中电流减小到零值（即  $H=0$ ）时，铁心在磁化时所获得的磁性还未完全消失。这时铁心中所保留的磁感应强度称为剩磁感应强度  $B_r$ （也叫剩磁），永久磁铁的磁性就是由剩磁产生的。

如果要使铁心的剩磁消失，通常改变线圈中励磁电流的方向，也就是改变磁场强度  $H$  的方向来进行反向磁化。使  $B=0$  的  $H$  值称为矫顽磁力  $H_c$ （也叫矫顽力）。

磁化过程中，磁畴的旋转要克服其边界相互间的“摩擦”做功，所以有能量损耗，这种损耗称为磁滞损耗。磁滞损耗与频率  $f$  是一次方成正比，与最大磁感应强度  $B_m$  的二次方成正比。磁滞损耗是导致铁磁性材料发热的原因之一，对电机、变压器等电气设备的运行不利。因此，常采用磁滞损耗小的铁磁性材料做它们的铁心。

铁磁材料在交变磁化的过程中还有另一种损耗——涡流损耗，在磁通变化时，铁心中产生感应电动势，在垂直于磁力线的平面上产生感应电流，它围绕磁力线成漩涡状流动，因此称为涡流。涡流在铁心电阻上引起的功率损耗称为涡流损耗，它与频率  $f$  的二次方成正比，与最大磁感应强度  $B_m$  的二次方成正比。通常用增加铁磁材料电阻率的方法以减少涡流损耗。用硅钢片叠片的方法代替整块的材料，各片之间增加绝缘层，涡流在各层之间受阻，磁通穿过薄片的狭窄截面时，涡流被限制在沿各片中的某些狭小回路流过，这些回路中的净电动势较小，回路的长度较大，再由于这种薄片材料的电阻率大，可以显著地减小涡流损耗。磁粉未加上绝缘胶压制的磁介质以及铁氧体等都是为了减少涡流。

磁性材料的损耗（通常称为铁损）主要由磁滞损耗和涡流损耗引起，而磁滞损耗比涡流损耗大。

## （二）磁性物质的分类

按磁化特性的不同，铁磁性材料可以分成 3 种类型。

### 1. 软磁材料

具有较小的矫顽力，磁滞回线较窄，它在较低的外磁场作用下就能产生较高的磁感应强度。而当除去外磁场后，磁性又基本消失。一般用来制造电机、电器及变压器等的铁心。常

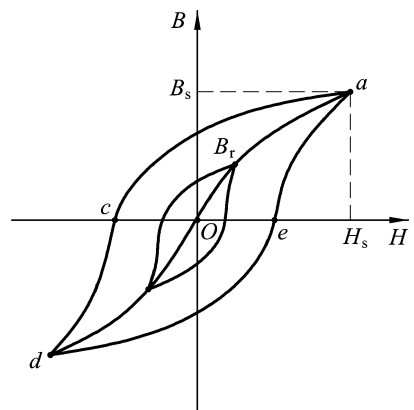


图 1-12 磁滞回线

用的有铸铁、硅钢、坡莫合金及铁氧体等。铁氧体在电子技术中应用也很广泛，可做计算机的磁心、磁鼓以及录音机的磁带、磁头。常用的软磁材料见表 1-1。

## 2. 硬磁性材料——永磁材料

具有较大的矫顽力，磁滞回线较宽，这种铁磁物质较难磁化，需在很高的外磁场作用下才能产生较高的磁感应强度。而且一旦被磁化以后，即使除去外加磁场仍能保持相当强的稳定磁性。永磁材料用来提供一个恒定磁通的磁路，一般用来制造永久磁铁。常用的有碳钢、钴钢及铁镍铝钴合金等。

## 3. 矩磁材料

具有较小的矫顽力和较大的剩磁，磁滞回线接近矩形，稳定性也良好，在计算机和控制系统中可用作记忆元件、开关元件和逻辑元件。常用的矩磁材料有镁锰铁氧体及 1J51 型铁镍合金。

在飞机的电气元件中广泛使用各种磁性材料，对于作为导磁用的软磁材料有下面一些主要要求：

- (1) 磁导率要高。在灵敏度比较高的磁系统中要求在很小的磁势作用下就能产生较大的磁通，因此希望材料的  $\mu_m$  尽可能大。对于在弱磁场下工作的磁系统则要求  $\mu_i$  较大。
- (2) 饱和磁通密度  $B_s$  要高。可导磁体的截面积，减少整个磁系统的尺寸和质量。
- (3) 矫顽力  $H_c$  要小。可减小剩磁的影响，并减小磁滞损耗。
- (4) 使用于交流的磁系统，为了减少涡流损耗，希望电阻率要高。
- (5) 对于使用环境温度较高的磁系统，希望居里点要高。

表 1-1 软磁材料的品种、牌号、主要特点及应用范围

品种	典型牌号	主要特点	应用范围
电工用纯铁或低碳电工钢	DT3、DT4、DT5、DT6、10 号钢	含碳量低（小于 0.04%）、 $B_s$ 高（达 2.15 T）、 $\mu$ 不太大、 $H_c$ 不是最小、电阻率低、冷加工性能好	一般用于直流磁系统，10 号钢的磁性能和电工用纯铁差不多，但价格便宜
铁镍合金	1J50、1J51、1J65、1J79、1J85	$\mu_i$ 、 $\mu_m$ 很高， $H_c$ 很小、 $B_s$ 不高、价格贵、磁性对机械应力敏感	高灵敏磁系统，弱磁场下工作的磁系统磁放大器
铁铝合金	1J6、1J12、1J13、1J16	电阻率高、密度小、 $\mu$ 不太大、 $H_c$ 很小、硬度高、耐磨性好、抗振动冲击性能好，当含铝量大于 10% 时较脆	可以代替某些铁镍合金及硅钢片做微电机及继电器
硅钢片	热轧：D21、D22、D23、D32、D42、D43；冷轧无取向：W21、W22、W32、W33；单取向：Q3、Q4、Q5、Q6	$B_s$ 较高、电阻率高、铁损小、导热性较差、硬度高、脆性增大	交流磁系统

铁钴合金	1J22	$B_s$ 特别高(达 2.4 T)、居里点高(达 980 °C)、电阻率不高、价格贵	适合质量、体积小, 耐高温的航空及空间元件
软磁铁氧体 (镍锌及锰锌)	R20、R60、RK1、RK4、 R1K、R10K 等	为复合氧化物烧结体, 电阻率很高、 $B_s$ 低、温度稳定性差	高频及较高频(几千赫到几百兆赫)用电磁元件

### 第三节 电磁铁

#### 一、电磁铁的基本组成

飞机上有许多电气设备或元件, 如继电器、接触器、离合器、调压器及自控、遥控中操纵各种气阀、油阀的电磁活门等都是以吸力电磁铁 [以下简称电磁铁 (electromagnet)] 作为基本的组成部分。

电磁铁是一种通电后对铁磁物质产生吸力, 把电能转换为机械能的电气元件。它主要由线圈和铁心组成, 如图 1-13 所示。铁心分成两部分, 一块是静止不动的称为静铁心; 另一块在工作过程中要产生运动而称为活动铁心或衔铁。为了减轻运动部分——衔铁负担以及便于安装, 线圈总是安装在静铁心上。

在结构上, 电磁铁既不同于变压器里的静止铁心, 也不同于旋转电机的不变的均匀磁气隙, 而是一种具有可动铁心和可变磁气隙的电磁装置。按照通入电流的性质不同, 电磁铁有直流电磁铁和交流电磁铁之分。线圈内通入直流电产生励磁的是直流电磁铁; 线圈内通入交流电产生励磁的是交流电磁铁。直流电磁铁与交流电磁铁相比, 具有体积小、质量小、性能好、结构牢固、使用寿命长等优点, 所以在飞机上普遍采用直流电磁铁作为各种电气元件的磁系统。按照产生吸力原理的不同, 直流电磁铁大致可分为 3 大类, 即拍合式、吸入式和旋转式, 如图 1-14 所示。

通常, 直流电磁铁的衔铁和铁心均由软钢或工程纯铁制成。由于飞机上均使用直流电磁铁, 因此本书中对交流电磁铁不再介绍。

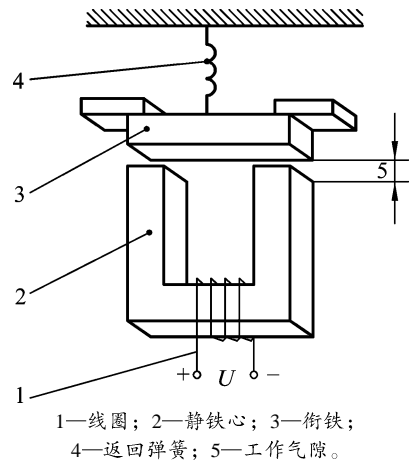
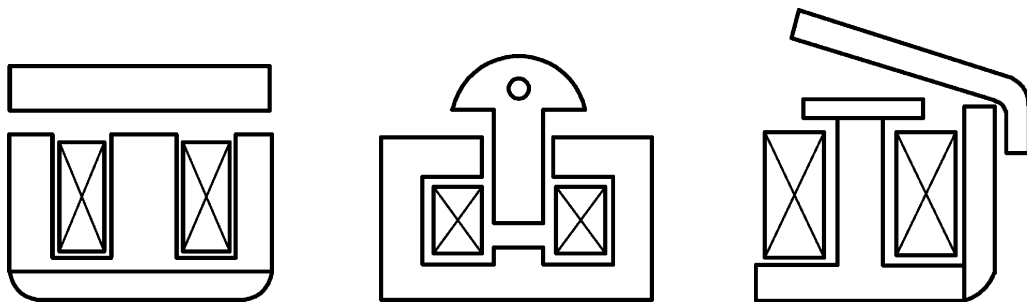


图 1-13 电磁铁结构



(a) E形电磁铁

(b) 螺管式电磁铁

(c) 拍合式电磁铁

图 1-14 电磁机构的几种结构形式

## 二、电磁铁的工作原理

在直流电磁铁中采用直流电产生励磁，通过其磁路的恒定磁通，即磁通不会随时间做周期性的变化。因此，铁心中没有磁滞损耗和涡流损耗，也就没有铁损，也不会因为铁损产生热量。直流电磁铁中产生的热量的热源只有线圈的内阻，这种损耗称为铜损。

在电磁铁中既然有可动的衔铁，那么磁路中就有相应的可变化的气隙。电磁铁之所以能产生响铃并做功正是由于其磁路中所存在的这个可变的气隙，这个气隙通常称为工作气隙。在磁路中铁心的长度通常比气隙长度大得多，但是由于空气的导磁能力比铁磁材料要小得多，所以气隙的磁阻仍要比铁磁材料大得多，线圈的磁动势大部分降落在气隙上。只有当电磁铁处于闭会或接近于闭合位置时，铁磁阻才能和气隙磁阻相比拟，此时气隙很小，铁心中的磁场已接近饱和。

电磁铁实质上也是一种机电能量转换装置，其转换过程如下：

电能（输入量）→磁能→机械功（输出能量）。

下面通过  $\pi$  形直动式直流电磁铁来说明电磁能量如何转变成机械功。如图 1-15 所示，当线圈按图示极性加上直流电压  $U$  以后，电磁参量就会发生如下变化：

$$U \rightarrow \frac{U}{R} \rightarrow IW \rightarrow \Phi \rightarrow \begin{matrix} \Phi_{\delta} \rightarrow F_x \\ \downarrow \\ \Phi_L \end{matrix}$$

线圈通电以后会产生激磁电流  $I = U/R$  ( $R$  为线圈的电阻)，它形成了电磁系统的激磁安匝  $IW$  ( $W$  为线圈匝数)。因此产生磁链  $\psi$  或磁通  $\Phi$ ，后者大部分通过气隙  $\delta$ ，这部分磁通称为气隙工作磁通  $\Phi_{\delta}$ ，还有一部分磁通不经过衔铁气隙，称为漏磁通  $\Phi_L$ 。前者产生电磁吸力  $F_x$ ，使衔铁运动做功；后者与衔铁无关，不能做功。

从实践中发现，在同样大小的气隙  $\delta$  下，铁心的激磁安匝  $IW$  越大，作用于衔铁的电磁吸力  $F_x$  就越大；或者说，在同样大小的激磁安匝  $IW$  下，气隙  $\delta$  越小，作用于衔铁的电磁力  $F_x$  就越大。通过理论分析可知，电磁吸力  $F_x$  与  $IW$  和  $\delta$  之间的关系可用下式来表达：

$$F_x = 5.1I^2 \frac{dL}{d\delta} \tag{1-7}$$

式中， $L$  为线圈的电感。

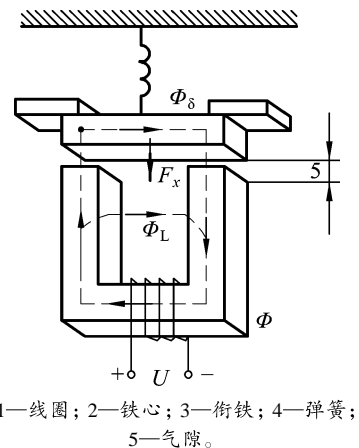


图 1-15 直流电磁铁工作原理

电磁铁的吸力特性曲线如图 1-16 所示，它描述了电磁吸力与气隙之间的关系，它是在电磁铁的安匝数为恒值的情况下作出的。一般的串接线圈和直流并激线圈都属于这种恒安匝性质。其特点为电磁吸力与气隙大小的平方成反比，气隙越大，电磁吸力越小；反之，气隙越小，电磁吸力越大。显然，电磁铁的激磁安匝数大者，它在行程中任一位置上的电磁吸力均较安匝数少者为大，即其吸力特性（图中曲线 1）位于安匝数少者（图中曲线 2）的上方。

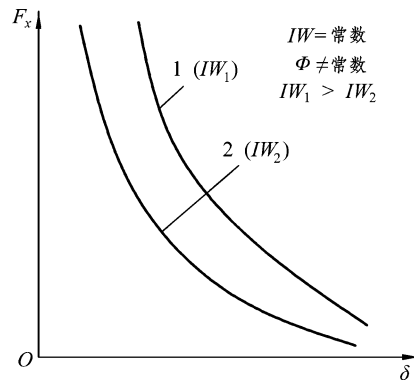


图 1-16 直流电磁铁的吸力特性

由电磁铁的吸力特性可知：电磁线圈的激磁电压的升高和降低、衔铁行程的调大和调小，都将影响到电磁铁的吸力特性，从而影响到电磁铁的工作性能。

气隙中磁力线的分布规律根据磁场的特征可归纳如下：

- (1) 磁力线互不相交并充满整个磁极之间的空隙。
- (2) 磁力线处处和等磁位面（线）相正交。
- (3) 磁极的磁导率远大于空气的磁导率，因此空气中的磁力线总是垂直于磁极表面的，磁极表面必定是等磁位面的。

磁场的分布情况与磁极几何形状及相对位置之间有下列对应关系：

- (1) 当相对磁极的端面为平行平面，并且气隙相对极面尺寸很小时，相对极面间的磁力线呈直线形，并且磁场是均匀的。但是在磁极的边缘和侧面处磁力线开始弯曲。
- (2) 互成夹角的平面之间的磁力线呈圆弧形，夹角越小，越接近圆弧。同一平面上的两个磁极（磁极的侧面）可以看作夹角为  $180^\circ$  的两个平面，其间磁力线呈半圆形。
- (3) 磁极的凸出处磁力线分布较密，而凹入部分磁力线分布较稀，甚至没有磁力线。必须指出，在磁极的凸出部分或尖角处磁力线比较集中，呈局部饱和。

电磁铁是一种依靠电磁系统中产生的电磁吸力，带动衔铁做机械运动从而对外做功的电动装置，这是一种电能-磁能-机械能的转化装置。

为了适应现代飞机高空高速飞行和耐振动、抗冲击的要求，20 世纪 60 年代发展了两种新式的电磁系统，即平衡衔铁式和平衡力式电磁系统。

所谓平衡衔铁式电磁系统（Balanced Armature Type Electromagnetic System）是一种衔铁绕通过其重心的轴线做旋转运动，以闭合两个或多个磁路工作气隙的电磁系统。由于转轴两边衔铁的质量保持平衡，故有较好的抗振动、抗冲击能力。衔铁的结构有 S 形、平行平面形和菱形。目前，其被广泛应用于航空和航天中。

平衡力式电磁系统（Balanced Force Type Electromagnetic System）是以永久磁铁作为返回装置，且在断电状态下永久磁铁对衔铁的吸力与通电时极面对衔铁的电磁吸力大致相等的电磁系统，如图 1-17 所示。



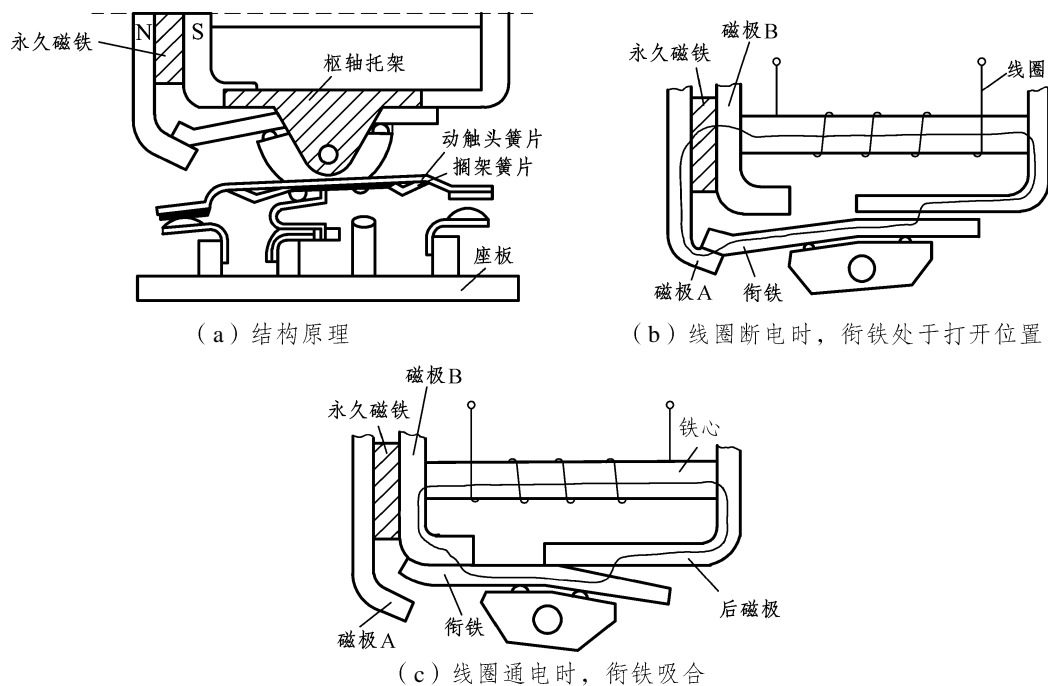


图 1-17 平衡力式电磁系统

在图 1-17 所示的磁路中加设一块永久磁铁，当线圈断电时，永久磁铁对可动衔铁产生吸力，衔铁的运动是由永久磁铁产生的吸力来操纵的。这时常闭触点的压力由永久磁铁产生，其值大小可以和线圈通电时，由电磁铁所产生的对常开触点所加的压力相等。电磁铁线圈通电时，由于电流的磁效应对可动衔铁产生电磁吸力，此时衔铁的运动由电磁力来操纵。在前述的两种情况下，即由永久磁铁产生的吸力（通过衔铁作用于常闭触点上）和由电磁铁通电时产生的电磁吸力（通过衔铁作用于常开触点上）相近。这个“相近”也就是人们所说的“平衡力”。具有平衡力特点的电磁铁的常开和常闭触点的工作能力相同——通过电流的能力和断电能力，抗冲击和抗振动能力都强。

## 复习思考题

1. 电接触是如何分类的？动静触点接触面的几何形状有哪些种类？触点形状的选取原则是什么？
2. 什么是接触电阻？接触电阻的形式有哪些？
3. 影响接触电阻的因素有哪些？如何减小接触电阻？
4. 电弧产生的条件是什么？常用的熄弧措施有哪些？
5. 触点的维护和使用注意事项有哪些？
6. 磁性材料有哪些基本特性？什么是磁滞回线？
7. 简述电磁铁的基本工作原理。