

飞机电气元件

朱普安 编



中国民航出版社

V242
1019

V242
1019-1

飞机电气元件

朱普安 编



30833393

中国民航出版社

833393

图书在版编目 (CIP) 数据

飞机电气元件/朱普安编. —北京: 中国民航出版社,
1997. 7
ISBN 7-80110-123-5

I. 飞… II. 朱… III. 飞机-电气元件-高等学校-教材
IV. V242.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 16343 号



飞机电气元件

朱普安 编

*

中国民航出版社出版发行
(北京市朝阳区光熙门北里甲 31 号楼)
邮政编码 100028 电话: 64290477

北京广内印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 21.75 字数: 529 千字
1997 年 7 月第 1 版 1997 年 7 月第 1 次印刷 印数: 1—5 000 册
ISBN 7-80110-123-5/V·063 定价: 40.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

序 言

我国民航在实现社会主义现代化进程中，其发展速度为国际民航界所瞩目。过去的十年，我国民航事业为适应国民经济建设的需要，推进技术装备现代化，为使民航生产力加速发展，先后淘汰了一批适航性差的老旧飞机，引进了一批现代化的中、大型运输机，例如 B737—300、B757、B767、B747—400、MD—82、A300—600 和 B777 等。

这些现代飞机的电气设备有了飞跃的发展，普遍采用了计算机控制、数据传输、电气传动系统，实现了自动飞行控制。这就必将对机务维修人员在技术上提出更高的要求。

中国民航学院朱普安副教授，总结了多年的教学经验，对使用了十多年的《飞机电器学》教材进行修改与补充，编写了《飞机电气元件》一书。该书按教学计划要求结合现代飞机电气设备的需要，删去了《飞机电器学》中已过时的内容，增补了“测量用互感器”“飞机常用电传感器”“飞机的电磁干扰控制和静电放电防护技术”等三章内容。我希望《飞机电气元件》一书的出版，对提高教学质量，打好航空电气技术专业的技术基础起到积极的作用。

翟建平

1995 年 11 月

前 言

本书是根据教学计划的规定和教学大纲的要求,为飞机电气技术专业编写的专业基础课教材。重点是分析现代飞机常用电气元件的典型结构、工作原理、特性参数,以及有关的计算、调整和检测的方法;阐述电气元件使用过程中出现的技术问题,例如电接触,电弧、火花放电,电磁干扰和静电放电等现象的物理本质,造成的危害以及控制、防护的具体方法和技术措施。本教材不涉及各类电气元件的设计计算方法、制造工艺和材料等内容。

为了适应现代民航机务工程的需要,结合多年教学实践的体会,本教材是将原有《飞机电器学》讲义经过全面的修订和改编而成的,并更名为《飞机电气元件》。改编后的教材删除了陈旧过时的内容,增加了新近研制开发并在现代飞机上已普遍应用的新型电气元件,例如“固态继电器”“磁保持接触器和平衡力式接触器”“双重点火激励器”等。考虑到飞机发动机点火电器的完整性,把“活塞式发动机点火系统”也编入在内。除此以外,为满足教学和生产的实际需要,新编了第六章“测量用互感器”,第九章“飞机常用电传感器”和第十章“飞机的电磁干扰控制和静电放电防护技术”。其中“飞机常用电传感器”是从机电结合的角度,把飞机、发动机中使用的各种传感器的原理、结构和性能作了全面深入的介绍和分析,这对提高分析和判断故障的能力会有很大的帮助。因为现代飞机应用的电气或电子设备的种类和数量越来越多,尤其是微机的大量使用,对飞机系统的电磁兼容提出了很高的要求。这些设备工作时一方面会受到来自外界(其他的电气或电子设备)的电磁干扰,另一方面该设备本身也要不断地产生电磁干扰信号,干扰其他设备的正常工作。因此,电磁兼容在飞机系统的设计、制造、使用和维护的各个阶段都必须引起高度重视和认真对待。在第十章中详细地分析了产生电磁干扰的要素和电磁干扰控制的技术措施和具体的方法。掌握这些知识和技术,便可自觉地维护飞机系统电磁兼容的完整性,确保各系统安全可靠工作。在这一章中还还对飞机的静电放电的安全防护作了专门的论述,目的是使机务人员避免因不符合静电放电的防护规范而损坏静电放电敏感的器件和设备,造成人为的故障。

《飞机电气元件》除了作为飞机电气技术专业本科、专科和成人大专的教材以外,也可作为其他机务专业的选用教材,还可作为机务专业的中专、技校的教学参考书。使用本教材时,按照不同的层次,在内容上可以适当取舍。本书对从事飞机机务工程的技术人员有很好的参考价值。

本书由翟建平副教授审稿。中国民航训练中心主任钦庆生副教授对本教材的编写给予极大的支持,并对教材内容的选取提出了建设性的意见。杨守环、桂建勋和盛乐山三位副教授对本书书稿提出了许多宝贵的修改意见。王锦凤老师为抄写书稿和绘制插图付出了辛勤劳动。张永生、吕海波同志为本书提供了不少有用的资料。还有其他很多同志也为本书的编写提供了帮助。编者谨向他们表示最深切的谢意。

此外,本书的出版得到机电系主任于智礼教授、教务处王长昇处长、刘宝忠副处长和

李美荣科长的热情关怀和帮助,编者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中可能存在许多不当和错误之处,敬请读者批评指正。

编者

于中国民航学院机电系

1995年11月20日

目 录

绪论	(1)
第一章 电磁铁	(5)
1.1 电磁铁的结构与工作原理	(5)
1.2 气隙磁导的计算	(7)
1.3 直流电磁铁的吸力和吸力特性	(20)
1.4 交流电磁铁	(25)
1.5 新型电磁系统介绍	(31)
1.6 铁磁材料的特性	(33)
第二章 电接触	(38)
2.1 电接触的基本概念	(38)
2.2 触点的结构形式与结构参数	(39)
2.3 接触电阻	(41)
2.4 触点的发热、熔焊和冷焊	(48)
2.5 触点的电动力和触点弹跳	(53)
2.6 电弧的物理过程和基本特性	(55)
2.7 触点磨损	(76)
2.8 飞机电器中的熄弧装置及熄火花电路	(80)
第三章 航空继电器	(88)
3.1 继电器的一般介绍	(88)
3.2 电磁继电器	(91)
3.3 固态继电器	(106)
3.4 混合式继电器	(119)
3.5 特种继电器	(122)
第四章 航空接触器	(136)
4.1 概述	(136)
4.2 单绕组接触器	(137)
4.3 双绕组接触器	(139)
4.4 机械自锁式接触器	(141)
4.5 磁保持接触器和平衡力式接触器	(144)
4.6 航空接触器的检修	(149)
第五章 磁放大器	(153)
5.1 概述	(153)
5.2 普通磁放大器的原理	(154)
5.3 普通磁放大器的特性和参数	(160)
5.4 反馈磁放大器	(163)
5.5 自饱和磁放大器	(166)

5.6	双拍磁放大器	(171)
第六章	测量用互感器	(175)
6.1	概述	(175)
6.2	测量用互感器的构造原理	(176)
6.3	测量用互感器的误差及准确度	(178)
6.4	电压互感器的选择	(182)
6.5	电流互感器的正确使用	(182)
6.6	在功率和能量测量中测量用互感器的使用	(184)
6.7	穿心式电流互感器和钳形电流表	(187)
第七章	飞机的电路保护电器	(190)
7.1	对电路保护电器的要求	(190)
7.2	熔断器	(191)
7.3	自动保护开关	(202)
7.4	熔断器和自动保护开关的比较	(207)
第八章	飞机发动机的点火电器	(208)
8.1	概述	(208)
8.2	电火花点火的基本概念	(208)
8.3	涡轮喷气式发动机的点火电器	(212)
8.4	航空活塞式发动机的点火系统	(225)
8.5	航空电嘴	(231)
8.6	点火电器输出电压的测量	(239)
第九章	飞机常用电传感器	(242)
9.1	概述	(242)
9.2	温度传感器	(244)
9.3	压力传感器	(254)
9.4	位移、角位移传感器	(274)
9.5	液位和流量传感器	(279)
9.6	加速度和振动传感器	(283)
9.7	转速和扭矩传感器	(292)
第十章	飞机的电磁干扰控制和静电放电防护技术	(295)
10.1	概述	(295)
10.2	形成电磁干扰的三要素	(297)
10.3	屏蔽、接地与滤波	(299)
10.4	几种电磁干扰的抑制方法	(317)
10.5	静电放电防护技术	(326)
参考资料		(336)

绪 论

一、飞机电气元件的定义及其重要性

现代飞机是一个庞大而复杂、自动化程度很高的系统，它含有许多子系统和分系统。在这些系统中需要用到多种电气元件，起着切换、控制、保护、检测、变换、放大和调节等作用。电气元件可以直接作用于电气系统的电气参数，也可以通过改变电气参数对非电系统或非电过程起到某种作用。这里所说的电气参数有二类：一类是电参量，包括电压、电流、功率、能量、相位和频率等；另一类是电路参数，包括电阻、电容、电感、互感及介电常数等。因此，电气元件是一个非常广泛的概念，它不仅用途和功能多种多样，品种和规格繁杂众多，而且工作原理各异。要把电气元件全部罗列出来是一件困难的事情，也没有必要。本书按其功能对飞机电气元件限定如下：

- (1) 手动操纵元件——指各类机电开关，包括拨动开关、按钮开关、摇按开关、旋转开关、微动开关、手动变阻器等；
- (2) 自动、远动控制元件——指各类继电器、交流接触器、直流接触器等；
- (3) 自动保护元件——指各种熔断器、断路器、自动保险开关等；
- (4) 测量、放大与变换元件——指各种电传感器、磁放大器、测量用互感器等；
- (5) 进行能量变换的特殊电器——飞机发动机的点火电器；
- (6) 电气连接元件——指各种电气插头和插座等。

一个系统能否正常地工作，在很大程度上取决于该系统所用的电气元件是否可靠。随着飞机自动化程度不断提高，系统中所用电气元件的数量越来越多。就拿常用的继电器来说，在早期的中型运输机上只用到 45 只，到了 50 年代中期，一架大型运输机才用 90 只，70 年代的大型运输机也只应用 200 只。现代的民航客机上（例如 B757、MD—82）直接装机的和安装在各种机载设备中的继电器、接触器达千只以上。其他的电气元件的数量也是成百上千的。这么多的电气元件，只要其中一个元件工作不正常，就会使整个系统工作发生故障，就要直接或间接地影响到安全飞行。有时甚至是一个元件中的一个触点失效，也会危及飞行安全。可见，电气元件在现代飞机系统中起着十分重要的作用。

二、飞机电气元件的工作条件

从基本构造和工作原理来看，应用于飞机上的电气元件与地面设备或系统中所应用的电气元件是相同的。但它们的工作条件却存在着很大的差别，飞机上的工作条件比地面设备的工作条件要恶劣得多。因为飞机不仅要在地面上停留，而且必须能够在不同的高度、地区、季节和气象条件下飞行。随着飞机飞行高度和飞行速度的提高，使得飞机电气元件的工作条件，即气象环境和力学环境变得更坏。为了使电气元件能在上述条件（即工作环境）下可靠地工作，有必要对这些环境条件作概略的介绍。

1. 气象环境

气象环境或气象条件系指大气的成分、压力、湿度和温度四个方面。

(1) 大气成分：高空、低空、海平面上和陆地上大气所含的成分各不相同。在高空，氧气和水分下降，臭氧成分增加；湿热地带的大气中含有霉菌，海平面上空的大气中含有盐雾，沙漠地区的上空有沙尘。电气元件在大气中工作时，其金属部分会被氧化。当飞机在海洋上空飞行时，海洋的水蒸气含有盐分，这些盐雾会加速金属部分的氧化，造成化学腐蚀和变色，降低它的机械强度和电气连接的可靠性。霉菌可以使有机绝缘材料发霉变质而降低绝缘性能。对于暴露于大气中的继电器、接触器及开关电器的触点，由于氧化及腐蚀作用将导致接触电阻的增加，降低触点的工作可靠性等。

(2) 大气压力：随着飞行高度的升高，大气压力下降，不利于电气元件的散热。有触点的电气元件随着大气压力降低使得触点的断弧能力下降，间隙的击穿电压降低。

(3) 大气湿度：南方的大气湿度较高，尤其是在黄梅雨季，相对湿度可达 98%。这样的湿度条件会使电气元件的抗电强度降低，绝缘电阻变小，也易使电气元件的金属构件局部或全部发生氧化和锈蚀。

(4) 大气温度：飞机的机动性很大，它可以在很短的时间内由北方飞到南方或由南方飞到北方，能在炎热的夏季里飞行，也能在严寒的冬季飞行。飞机电气元件工作的环境温度变化范围比较大，还会受到高低温的冲击。高温时，金属部分氧化加剧，有机绝缘材料易于老化；低温时，材料组织会发生变化而使其性能恶化（例如绝缘材料开裂、弯曲和分层，橡胶制品硬化等）。

2. 力学环境

飞机电气元件经常要受到强烈的振动、冲击和离心加速力的作用。

(1) 振动：电气元件固定处由于飞机发动机等振动源和气动力而产生振动，其频率一般为 10~400 Hz，振动加速度为 4~6 g。

(2) 冲击：飞机在着陆、制动和突然变速等情况下都会对电气元件产生冲击作用，冲击的次数一般为 40~100 次/min，冲击加速度为 4~50 g。

(3) 离心加速度：飞机在转弯飞行时，所产生的离心加速度可达 15 g。

恶劣的力学环境给飞机电气元件造成强烈的机械应力负荷，可能会给电气元件带来非常严重的后果，如元件破裂、紧固件松动、零件变形等，振动和冲击还会使有触点的电气元件发生误动作，或者使得接触电阻增大或变得不稳定。

三、对飞机电气元件的基本要求

由于飞机电气元件在飞机系统中起着重要的作用，而它们的工作条件又很恶劣，为确保飞机的安全飞行对电气元件最基本的要求如下：

1. 工作可靠

这是对电气元件的一项最基本要求。除了保证飞机电气元件能在前述的气象环境和力学环境下可靠地工作外，还应当保证它们在飞机上供电电压不稳定情况下，电气元件应能保证继续工作。

2. 尺寸小重量轻

现代飞机上所使用的电气元件的数量很多，减少每一个电气元件的重量都对飞机有着直接的意义。在设计制造飞机电气元件产品时，常常为结构部件选用优质特种材料和提高其他材料的负荷。一架飞机的空间尺寸是有限的，电气元件的外廓尺寸的增大会占去飞机的有限空间，有时会使飞机个别部分尺寸增大，以致引起结构重量增加，使飞机气动力性

能变坏。因此,减小电气元件的外廓尺寸也是基本要求之一。

3. 高强度

这里所说的强度是指机械强度、抗电强度和耐热强度。

对飞机电气元件的机械强度,除了一般要求外,在抗振动稳定性方面还有特殊要求。在飞机上经常产生不同频率和振幅的振动。由于振动而产生的方向不定的加速度或飞机作机动飞行产生的单向加速度都将作用到电气元件上,有的零件和部件甚至要承受加速度为 50 g 的动负荷。因此,要求电气元件必须能够在这样的情况下可靠地工作。

在抗电强度、耐热强度方面的要求也比较高,应保证电气元件不会因绝缘材料的绝缘性能不够、导电部分与金属部分的间距不够而形成电击穿,或因为耐热材料的耐热能力不够而形成热损坏。

4. 电气元件的工作不受飞机在空间的位置和飞行状态的影响

飞机在飞行时可以有各种不同的飞行姿态,安装在飞机上的电气元件也就可以有不同的空间位置或处于不同的运动状态——加速、减速等。在这些情况下,电气元件应具有独立的动作性能而不受它所处的空间位置、状态的影响。这种要求是确保具有运动部件(如继电器、接触器的触点)的电气元件不产生误动作的必要条件。

5. 电气元件的工作不受周围气象环境的影响

温度、气压、湿度是影响电气元件的寿命、工作能力(触点的断弧能力)……等的气象因素。排除或减少这些因素对电气元件的影响是提高电气元件的寿命,增加工作可靠性,保证良好性能的必要措施。因此,将电气元件密封充气就是为此目的,可以使电气元件的工作不受飞机飞行高度的影响。

6. 其他方面的要求

- (1) 便于维修;
- (2) 标准化,系列化,便于选用和更换;
- (3) 价格低廉。

从以上对电气元件的基本要求来看,设计制造一个满足性能要求的电气元件产品并非易事,要从设计制造、材料工艺和测试检验各个环节上严把质量关,采取先进有效的措施。

四、本课程目的及基本内容

飞机电气元件是飞机电气技术专业的专业基础课程。学习本课程的目的是使学生掌握现代飞机常用的电气元件的典型结构、工作原理、特性参数等方面的知识以及有关的分析计算、调整检测的方法;了解和熟悉关于电接触、气体放电、电磁干扰及静电放电等物理现象的原理、危害以及控制、防护的方法和技术;为学习后续的飞机电气设备课程和参加民航机务维修工作打好扎实的理论基础,掌握必需的工程实践知识。

由于飞机电气元件品种非常多,工作原理各异,所以飞机电气元件课程具有两个明显的特点。一个特点是由于不同类型电气元件的工作基于不同的物理原理,相互之间的联系并不紧密,这使得课程本身不具有系统性和连贯性,章与章之间的内容相对独立,自成体系;另一个特点是课程所涉及的知识面很广,掌握某一类电气元件的基本工作原理往往需要交叉到多门学科的知识。另外,飞机电气元件还是一门技术性很强的课程,理论与实际的联系紧密。了解和注意这些特点对学习飞机电气元件课程是有益的。

为了达到本课程之目的,在课程中所涉及的具体内容有:

- (1) 电气元件中的磁场和磁路的概念和相应的定律、定理；
- (2) 电气元件中常用的磁性材料的一般概念和基本性能；
- (3) 电磁铁的气隙磁导和吸力的计算，典型电磁铁的吸力特性；
- (4) 电接触理论与电弧理论，熄弧原理和方法；
- (5) 交直流同时磁化的磁路——磁放大器的原理、线路和特性；
- (6) 航空继电器、接触器的基本构造、特性和参数、调整和检测方法；
- (7) 飞机发动机点火电器的组成、线路和原理；
- (8) 飞机电路保护电器的种类和原理；
- (9) 飞机常用电传感器的结构、工作原理和有关的特性参数；
- (10) 电流互感器、电压互感器的构造、原理和使用的注意事项；
- (11) 飞机系统的电磁干扰的产生和抑制技术，飞机结构和机载设备中的静电放电的原理和防护技术。

显然，这些问题的基本理论大多已在物理和电路基础及其他相关课程中讲述过，本课程的任务是要将这些基本理论应用于解决实际的工程问题。

第一章 电 磁 铁

飞机上有许多电气器具或元件，如继电器、接触器、变换器、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）作为基本组成部分的。本章分析电磁铁的结构、工作原理、气隙磁导计算、吸力和吸力特性等问题。

1.1 电磁铁的结构与工作原理

1.1.1 电磁铁的一般构造与动作原理

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。主要由线圈和铁心组成。铁心有两块，一块是静止不动的称为静铁心；另一块在工作过程中要发生运动而称为活动铁心或叫衔铁。为了减轻运动部分——衔铁的负担以及便于安装，线圈总是装在静铁心上。用于自动电器的电磁铁中，还装有返回装置，常用的返回装置是弹簧，

如图 1-1 所示。

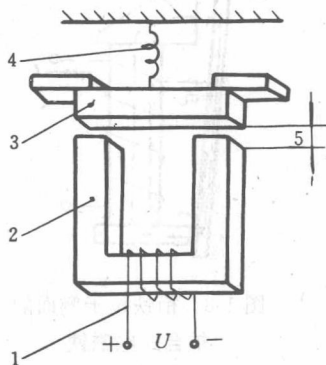


图 1-1 电磁铁结构示意图

- 1—线圈；2—静铁心；3—衔铁；
4—返回弹簧；5—工作气隙。

当线圈 1 未通电时，衔铁在返回弹簧 4 的作用下，使衔铁 3 和静铁心 2 之间保持一个比较大的气隙，这就是电磁铁处于释放位置。当线圈通电后铁心就被磁化，于是在衔铁和铁心之间产生吸力，当吸力大于返回弹簧的反力时，衔铁开始运动，使气隙减小，最后达到闭合，这就是电磁铁处于闭合位置。当线圈中的电流减小或中断时，铁心的磁化减弱，吸力减小，当吸力小于返回弹簧的反作用力时，衔铁在反作用力作用下返回到原来的释放位置。

可见，在结构上，电磁铁既不同于变压器的静止铁心，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。按照通入线圈电流的性质不同，电磁铁有直流电磁铁和交流电磁铁之分。线圈内通入直流电激磁的是直流电磁铁；线圈内通入交流电激磁的是交流电磁铁。直流电磁铁与交流电磁铁相比有许多优点，所以飞机电气元件中所使用的电磁铁均为直流电磁铁。交流电磁铁目前在飞机上很少采用，不仅操作交流电路的航空交流接触器中，其电磁系统是直流控制的，就连某些保护及控制继电器，当需要反应交流电参量时也往往是用整流器将交流转变成直流后再输给线圈的。

1.1.2 几种典型直流电磁铁

直流电磁铁与交流电磁铁相比，具有体积小、重量轻、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

的原理不同，直流电磁铁大体上可分为三大类型，即拍合式、吸入式和旋转式。

在直流电磁铁中采用直流电激磁，通过其磁路的是恒定的磁通，即不会随时间作周期性的变化。因此，铁心中没有磁滞损耗和涡流损耗，也就不产生热量，即没有铁损。直流电磁铁中产生热量的热源只是线圈，即激磁电流通过线圈导线电阻时产生欧姆热，这种损耗称为铜损。因此，直流电磁铁的导磁体可以用整块的软钢或工程纯铁加工而成。为了把线圈产生的热量通过铁心顺利地散发到周围介质中去，线圈采用无骨架的结构并直接套在铁心柱上，使线圈与铁心之间交换热量，以增大散热效果。同时也便于加工。因此，直流电磁铁的外形一般都是“瘦长型”的。

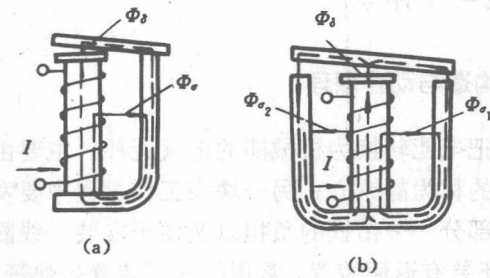


图 1-2 U 型和 E 型拍合式电磁铁

铁用得比较多，其衔铁位于线圈端部，漏磁通不通过衔铁，因此不会直接对吸片产生吸力。图 1-3 所示的电磁铁，其衔铁位于线圈的侧面，漏磁通能通过吸片，因此也对吸片产生吸力。图 1-4 所示的盘式电磁铁，其衔铁是圆盘状，在线圈的端部作直线运动，铁心是圆柱体，壳体呈碗形。以上几种电磁铁中衔铁转轴两边质量并不相等，因此抗振动和抗加速度的能力较差。近来为了适应高速飞机及航天飞行器的发展对抗振动和抗加速度性能提出的苛刻要求，发展了平衡衔铁式电磁铁，如图 1-5 所示。平衡衔铁式电磁铁的衔铁转轴两边的质量相等，并且大多数电磁铁都具有左右对称的两个工作气隙。

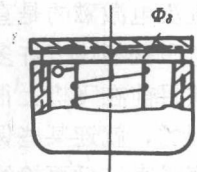


图 1-4 盘式电磁铁

拍合式电磁铁结构简单，制造和调整都比较方便，因此广泛应用在各种小型和灵敏继电器中。

二、吸入式电磁铁

吸入式电磁铁的特点是：被吸动部分是一个圆柱形的铁心，称为可动铁心，它位于螺管线圈之中。因此，也称为“螺管式电磁铁”。线圈通电后，可动铁心被更深地吸进线圈，产生直线运动。

它的主要部件如图 1-6 (a) 所示。铁心分成可动部分 1 (称为可动铁心，也称为衔铁) 和不动部分 4 (称为台座)。其壳体 6 通常呈圆形，线圈 3 包在其中，结构比较坚固。壳体

一、拍合式直流电磁铁

拍合式电磁铁的特点是：衔铁做成片状，称为吸片。线圈通电后，吸片在吸力作用下沿着磁力线的方向移动 (或转动) 一个不大的距离 (或转角)，使工作气隙减小。图 1-2、1-3、1-4、1-5 是几种典型的拍合式电磁铁。图中虚线表示主磁通 Φ_0 和漏磁通 Φ_s 的平均路径。

图 1-2 所

示的 U 型和 E 型拍合式电磁

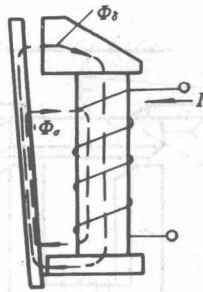


图 1-3 衔铁位于侧面的拍合式电磁铁

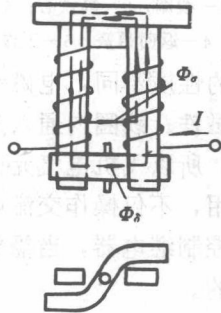


图 1-5 平衡衔铁式电磁铁

6、上端盖 2 和下端盖 7 均由软磁材料制成。非磁性套筒 5 是用作导引可动铁心的。显然，吸入式电磁铁的衔铁不易做成平衡式衔铁。

在吸入式电磁铁中，除了通过主工作气隙的主磁通 Φ_0 对可动铁心产生端面吸力外（这是主要的），通过可动铁心侧面的漏磁通 Φ_s 也产生吸力，使铁心吸入线圈，这部分吸力称为螺管吸力。吸入式电磁铁可以在较大气隙下产生较大的吸力，因此特别适用于需较大的行程和较大吸力的场合，例如在接触器、电磁阀以及各种牵引电磁铁中用得较多。改变铁心和台座端面的几何形状，例如将端面做成锥顶形，如图 1-6 (b) 所示，可以有效地改变吸力特性，使其适应不同行程和不同吸力的要求。

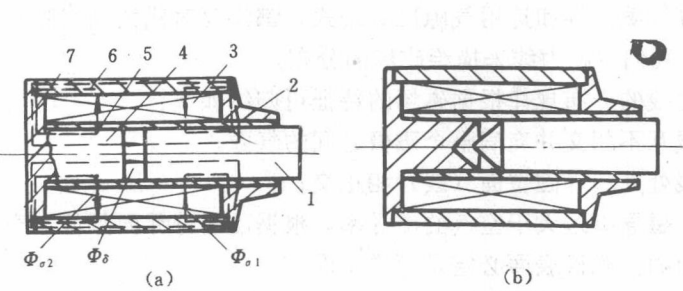


图 1-6 吸入式电磁铁

(a) 铁心为平顶；(b) 铁心为锥顶。

1—可动铁心；2—上端盖；3—线圈；4—台座（也称静铁心）；

5—非磁性套筒；6—壳体；7—下端盖。

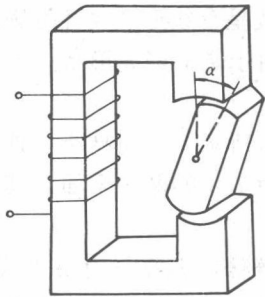


图 1-7 旋转式电磁铁

三、旋转式电磁铁

旋转式电磁铁的线圈通电后，衔铁的运动方向不是沿着磁力线的方向，而是垂直于磁力线的方向，其结构原理图如图 1-7 所示。

旋转式电磁铁能得到较大的转角（可达 $60^\circ \sim 90^\circ$ ），并且可以通过改变极面形状来改变其吸力和转角的关系。因此，在某些特殊用途的电磁元件中得到应用，例如力矩马达和线性电磁铁等。

1.2 气隙磁导的计算

在电磁铁中既然有可动的衔铁，则磁路中就有相应的可变化的气隙。因为电磁铁之所以能产生吸力并作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。此外，由于各种原因，磁路中还不可避免地存在某些非工作气隙。虽然磁路的铁心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，线圈磁势 IN 总是大部分降落在气隙上。只有当电磁铁处于闭合或接近于闭合位置时，铁磁阻才能和气隙磁阻相比拟。这是因为此时气隙很小而铁心中磁感应已趋于饱和的缘故。可见，在气隙磁阻和铁磁阻这一对矛盾中，气隙磁阻是矛盾的主要方面。具有一定安匝的磁势在磁路中能够产生多大的工作磁通，主要由气隙磁阻决定。

磁阻的倒数是磁导。在进行吸力计算时,为了方便,气隙磁阻以及漏磁阻常用倒数即气隙磁导和漏磁导表示。

气隙磁导取决于构成气隙的极面的几何形状和相对位置。要计算气隙的磁导首先要计算气隙的磁场分布,只有极少数的情况,才能通过求解拉普拉斯方程而求得磁场分布和磁导。在工程计算中只能在试验和经验的基础上采用一些近似的计算方法。常用的计算方法有分析法、分割磁场法和经验公式法。因为这些方法求得的磁导可以用数学公式表示,这便于计算电磁吸力。

1.2.1 磁极之间磁力线的分布规律

正确地计算气隙磁导和选用气隙磁导公式,都需要对磁极间气隙磁场的分布规律有比较清晰的了解。我们用磁力线来描绘磁场的分布。

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气隙;
- (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,根据磁场分界面条件,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。

图 1-8 绘出了几种典型形状的磁极之间气隙磁场磁力线的分布和等磁位面(线)的图形。由图 1-8 可见,磁极表面形状和相对位置(即磁场的边界条件)不同时,磁极间磁力线的分布情况也不相同。磁场的分布情况与磁极几何形状及相对位置之间有下列一些对应关系:

(1) 当相对磁极的端面为平行平面,并且气隙 δ 相对于极面尺寸 D 或 a (图 1-8 (a) 及 (b)) 又很小时,则相对极面间(即磁力线 1 和 2 之间)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相对侧面处磁力线开始弯曲,这是由于磁极边界形状,即等磁位面的形状所决定的。

(2) 互成夹角的平面之间的磁力线呈圆弧形,见图 1-8 (c) 所示。夹角越小,越接近圆弧。同一平面上的两个磁极(如磁极的侧面)可以看做夹角为 180° 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,因此,磁极表面已经不再被视为等磁位面了。

我们也可以这样来看气隙中磁通的分布规律,即磁通由磁极端面进入气隙时将产生扩散现象。有一部分磁通从四周边缘和侧面出来,如图 1-8 (a)、(b) 中 1 和 2 磁力线以外的磁通,通常称这部分扩散的磁通为边缘磁通或散磁通,以区别于相对端面间的磁通。这里需注意区分散磁通和漏磁通。散磁通仍然是气隙磁通的一部分,所以相对端面间的磁通与散磁通之和构成通过工作气隙的主磁通,而漏磁通并不通过工作气隙。当气隙不大时,散磁通所占主磁通的比例不大。但是,当气隙较大时,散磁通所占的比例会增大。与此对应,磁极之间的气隙磁导也可以相应地由并联的两部分组成,即相对极面间的磁导(称为主磁导)和边缘散磁场的磁导(称为散磁导)。当气隙不大时,主磁导占的比例很大,应该对它进行准确的计算。

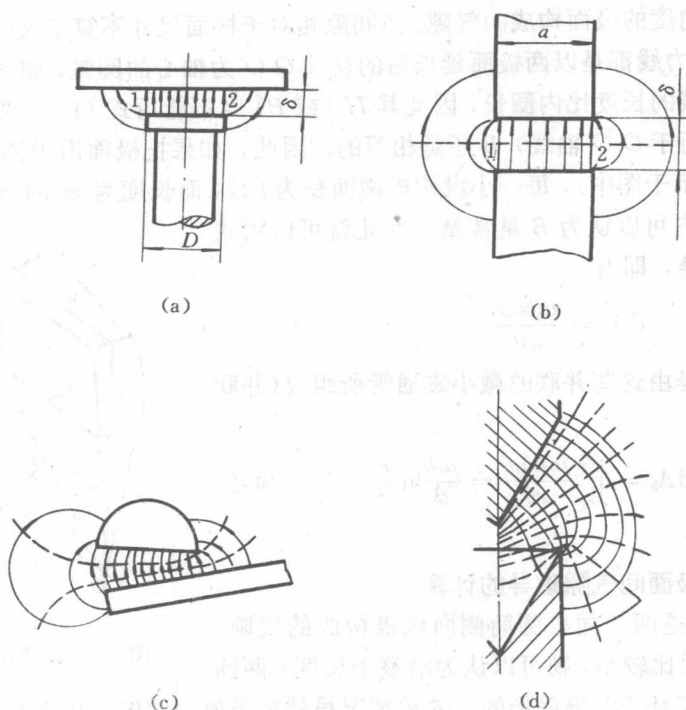


图 1-8 气隙中磁力线的分布

1.2.2 解析法计算气隙磁导

一、平行平面磁极间气隙磁导的计算

严格地讲，两个互相平行的磁极端面间的磁场（图 1-8 (a)、(b)），只有当磁极尺寸无穷大，或者气隙 $\delta \rightarrow 0$ 时，磁场才是均匀的。但是工程上通常把 $\delta/a \leq 0.2$ ， $\delta/D \leq 0.2$ 的情况，都近似地认为是均匀磁场。

对于均匀磁场，等磁位面平行于磁极端面，磁力线则垂直于磁极端面，且 $\vec{B}$ 、 $\vec{H}$ 均为常量，其磁导

$$\Lambda_s = \frac{\Phi_s}{u_s} = \frac{\int_s \vec{B} \cdot d\vec{S}}{\int_\delta \vec{H} \cdot d\vec{\delta}} = \frac{BS}{H\delta} = \frac{S\mu_0}{\delta} \quad (\text{H}) \quad (1-1)$$

式中 μ_0 ——空气的磁导率，约等于 1.25×10^{-6} (H/m)；

S ——相对磁极面的面积， $S=ab$ 或 $S=\frac{\pi D^2}{4}$ (m^2)；

δ ——气隙长度，即通过气隙内的磁力线长度 (m)。

虽然式 (1-1) 只能用于计算均匀磁场的磁导，但它却是解析法计算气隙磁导的基本公式。在非均匀磁场的情况下，总可以沿磁力线和等磁位面在磁场中取出一个微小磁通管，使