

航空职业教育“十三五”规划教材  
机务维修专业定向士官培养系列

# 飞机机载设备概论

朱国军 张亿军 主 编  
丁 谦 何自力 吕志忠 参 编

航空工业出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是一本系统介绍飞机机载设备的专业教程。全书共分十章。第一到三章介绍了飞机电源、飞机输配电系统、飞机用电设备；第四到六章介绍了飞机仪表与显示系统、飞机导航系统、飞行控制系统；第七到九章介绍了飞机通信系统、机载雷达系统、电子对抗设备；第十章介绍了航空机载武器系统的航炮、导弹武器、火箭武器、轰炸武器、瞄准具、照相枪、火箭弹射座椅等。书中每章后附有思考题，便于学习使用。

本书内容全面，深入浅出，通俗易懂，可作为高职高专院校飞行技术、飞机维修等专业的教材，也可作为航空企事业单位、部队官兵、广大航空爱好者的培训和自学用书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

飞机机载设备概论 / 朱国军, 张亿军主编. -- 北京: 航空工业出版社, 2020. 4

航空职业教育“十三五”规划教材. 机务维修专业定向士官培养系列

ISBN 978-7-5165-2236-3

I. ①飞… II. ①朱… ②张… III. ①机载设备-职业教育-教材 IV. ①V217

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 053134 号

## 飞机机载设备概论 Feiji Jizai Shebei Gailun

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区京顺路 5 号曙光大厦 C 座四层 100028)

发行部电话: 010-85672663 010-85672683

北京富泰印刷有限责任公司印刷

2020 年 4 月第 1 版

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 13

全国各地新华书店经售

2020 年 4 月第 1 次印刷

字数: 294 千字

定价: 32.00 元

# 前言

世界上最早期的飞机，除了机体之外，只有发动机和操纵系统。但是，飞机上仅有这些设备和系统是远远不够的，随着科学技术的发展和人们对飞机安全性与舒适性要求的不断提高，许多新的设备和系统不断装备到飞机上，共同组成了现代飞机结构复杂、价格昂贵的飞机机载设备与系统。

飞机要完成特定的飞行任务，实现其作为空中作战或运输平台的作用，必然需要许多设备和系统。例如，要使飞行员或自动驾驶系统能够随时监控飞机及其系统的工作状态参数，以便根据需要随时做出修正动作或进行其他操作，就必须在飞机上设置仪表与综合显示设备、故障告警系统和自动监测设备等；飞机上绝大部分设备都需要使用电力作为能源，因此就必须设置机载电源与电气系统；随着飞机飞行距离的增大，要使飞机以最短或最合理的航路到达远方某一目的地，就必须设置导航设备与系统；为了减轻飞行员在长时间飞行中的操纵负担，就需要加装自动飞行控制系统；军用飞机需要对敌方地面、海面和空中目标实施攻击，就必须装备相应的各种机载航空武器及其火力控制系统；飞机与地面、空中飞行的飞机和空间在轨卫星之间要保持有效的通信联络，便需要无线电通信设备和数据传输设备等；为了对敌方武器系统中的电子设备实施有效的干扰、欺骗或压制，同时保护己方的各类机载设备和系统不受敌方的干扰和攻击，发挥出固有性能，就需要设置机载电子对抗系统。

同时，飞机机载设备和系统还是飞机作战效能的“倍增器”，特别是现代飞机，在其原有气动外形和主体结构不变的前提下，只要提高机载设备的性能，就可使其作战效能有很大的提高。例如一架普通的第二代战机，装上地物回避雷达和地形跟踪雷达，便可实现超低空突防，使飞机的进攻方式发生质的变化，也使其作战效能大幅度提高。

本教材的编写突出了科普特色和军事特色，力求以浅显易懂的语言介绍相对深奥的知识，系统、科学、规范地介绍了飞机机载设备的基本知识，并突出了新装备、新技术方面的内容。全书围绕飞机机载设备这一主题，分四部分做了介绍，分别是飞机电气系统、飞机仪表与导航系统、机载电子设备与系统、航空机载武器系统。

内容编写力求通俗易懂，以适应不同机型、不同专业、不同层次的人员学习、了解飞机机载设备的基本情况，为他们日后学习、掌握其他课程和开展与航空相关的工作打下一定的基础；同时也为他们正确认识航空、较全面地认识飞机、正确把握自己在航空领域中的地位和作用提供帮助。在编写中注意了教材的完整性和系统性，力争达到简明、扼要、科学、适用。

本教材由长沙航空职业技术学院的朱国军、张亿军、丁谦、何自力、吕志忠等编写，朱国军编写了第一章、第二章，吕志忠编写了第三章、第四章，何自力编写了第五章、第六章，张亿军编写了第七章、第八章、第九章，丁谦编写了第十章；全书由朱国军、张亿军主编，统编全书与审校，长沙航空职业技术学院熊纯、文韬、段新华等对本书进行了详细的审查，提出了不少宝贵的意见和建议。书中引用了许多作者的论文、论著及其研究成果，这些文献对于本书的编写起到了非常重要的作用，在此对他们表示深深的敬意和诚挚的感谢。

因编者水平有限，加之本教材内容涉及范围广泛，难免有不足或错误之处，诚恳希望使用者和关心本教材的同志予以批评指正。

编者

2019年12月

# 目 录

<b>第一章 飞机电源系统</b> .....	1
1.1 飞机电气系统概述 .....	1
1.2 直流电源系统 .....	2
1.3 航空蓄电池 .....	10
1.4 直流电源的并联运行及控制与保护 .....	17
1.5 交流电源系统 .....	24
1.6 交流电源的并联运行及控制 .....	36
1.7 飞机电能变换设备 .....	40
<b>第二章 飞机输配电系统</b> .....	45
2.1 飞机导线和电缆 .....	45
2.2 电路控制装置 .....	48
2.3 电路保险装置 .....	54
2.4 飞电网网构成形式 .....	57
2.5 飞机输配电方式 .....	59
2.6 供电系统的电磁兼容问题 .....	65
<b>第三章 飞机用电设备</b> .....	70
3.1 飞机电动机构 .....	70

3.2	飞机燃油系统电气设备 .....	71
3.3	灯光照明设备 .....	72
3.4	起飞着陆装置和减速板电气设备 .....	76
3.5	飞机操纵系统电气设备 .....	78
3.6	发动机起动电气系统 .....	79
3.7	发动机工作状态电气控制系统 .....	80
<b>第四章 飞机仪表与显示系统 .....</b>		<b>82</b>
4.1	航空仪表的发展 .....	82
4.2	航空仪表的分类 .....	83
4.3	发动机工作状态参数的测量与显示 .....	84
4.4	飞行状态参数的测量与显示 .....	90
4.5	驾驶导航参数的测量与显示 .....	95
4.6	电子综合显示器 .....	96
<b>第五章 飞机导航系统 .....</b>		<b>101</b>
5.1	导航系统概述 .....	101
5.2	无线电导航系统 .....	103
5.3	惯性导航系统 .....	107
5.4	卫星导航系统 .....	109
<b>第六章 飞行控制系统 .....</b>		<b>111</b>
6.1	飞行控制系统的发展历史 .....	111
6.2	自动驾驶仪 .....	113
6.3	飞行轨迹控制 .....	113
6.4	自动着陆控制 .....	114
6.5	电传操纵系统 .....	115

<b>第七章 飞机通信系统</b> .....	118
7.1 无线电波的传播特性 .....	118
7.2 电台的基本工作方式 .....	121
7.3 高频通信系统 .....	122
7.4 甚高频通信系统 .....	123
7.5 卫星通信系统 .....	123
7.6 数据链 .....	125
<b>第八章 机载雷达系统</b> .....	132
8.1 机载雷达的发展概况 .....	132
8.2 机载脉冲雷达的工作原理 .....	133
8.3 常见的机载火控雷达 .....	135
8.4 机载火控雷达的工作方式 .....	137
8.5 机载火控雷达与其他系统的交连 .....	138
8.6 光学雷达 .....	138
8.7 机载雷达的发展趋势 .....	140
<b>第九章 电子对抗</b> .....	141
9.1 电子侦察 .....	141
9.2 电子干扰 .....	143
9.3 实体摧毁 .....	144
<b>第十章 航空机载武器系统</b> .....	146
10.1 航炮 .....	146
10.2 导弹武器 .....	155
10.3 火箭武器 .....	163
10.4 轰炸武器 .....	173
10.5 瞄准具 .....	185



10.6	照相枪.....	188
10.7	火箭弹射座椅.....	192
<b>参考文献</b> .....		200



# 第一章 飞机电源系统

## 1.1 飞机电气系统概述

现代飞机装备大量的机载设备，进行飞机操纵控制以发挥其战术技术性能和完成飞行任务。如，航空发动机的起动、点火和控制系统，航空仪表、飞行控制、导航系统，通信和航空电子系统，空调和供气系统，防火系统，燃油系统，液压系统，防冰加温系统，应急救生系统，氧气系统，起落架收放、机轮刹车和舱门启闭系统，照明和信号系统，供电系统等等。航空发动机在把燃料的化学能转化成机械能，使飞机向前运动的同时，还通过转子及其减速机构带动各种形式的二次能源设备，例如液压泵、气压泵和发电机等。

以上设备包含两个部分，即能量消耗设备和能量产生、变换、控制、分配及存储设备，即能源部分。现代飞机设备的能源有三种：电能、液压能和气压能。例如，仪表和导航设备靠电能工作；操纵飞机舵面的作动机构大多为液压动作筒，靠液压能工作；机轮刹车不少用气压能工作。为了与推动飞机飞行的航空发动机的主能源相区别，上述能源又称飞机二次能源，其大多都是借航空发动机一次能源转换而来的。

由于电能易于输送、变换和控制，绝大部分机载设备都采用电能作为工作能源。随着电气技术水平的不断提高，国外正在研制的“多电飞机”，甚至“全电飞机”，将用电能取代液压能和气压能，飞机上所有的操纵和转换都由电提供能量来进行。

飞机上用来产生电能的系统叫作飞机电源系统，用于传输、分配、转换和控制电能的系统叫作飞机配电系统，两者总称为飞机供电系统。用电能工作的机载设备称为用电设备，供电系统和用电设备统称为飞机电气系统。

用电设备分布在飞机上各个系统和各个位置，电气系统的主要作用是向发动机起动、点火和控制系统，飞机舵机操纵、起落架收放和刹车防滑系统，武器及火力控制系统，生命保障、火警探测和保护系统，照明和服务系统，各种机载电子设备（例

如航空仪表、导航设备、雷达、电子对抗设备)等提供电能。大量用电设备客观上要求飞机要有一个高效、稳定的电气系统。

飞机电源系统由主电源、辅助电源、应急电源和二次电源组成。

主电源由航空发动机驱动,由发电机及其传动、调节、控制和保护设备等组成,向所有机载用电设备提供电能。

机载辅助电源一般配备于中大型飞机,例如轰炸机和运输机上。当主电源发生故障不能正常工作,或者不必要工作时,由它或地面电源向飞机上的主要设备供电。常用的辅助电源是航空蓄电池或辅助动力装置(APU)驱动的发电机。由于用电量的急剧增大,现代大型飞机的辅助电源已经基本上采用辅助动力装置驱动的发电机供电。此外,辅助动力装置还可以向飞机提供其他形式的能源,例如高压气源、液压源等。

从理论上讲,任何设备的可靠性都达不到100%,电源系统也是如此。所以,为了保证飞行安全,防止飞行过程中主电源发生故障不能正常供电,飞机上都设置了应急电源,以保证飞机安全返航或就近降落。应急电源是一个独立的电源,一般由蓄电池或辅助动力装置驱动的发电机组成。蓄电池是化学电源,可以完成化学能和电能之间的相互转换。目前飞机上使用的蓄电池有三种:酸性铅蓄电池、碱性锌银蓄电池和碱性镍镉蓄电池,现代飞机上使用较多的是碱性锌银蓄电池和碱性镍镉蓄电池。应急发电机一般由飞机上的应急空气冲压涡轮驱动。

二次电源的功用是将主电源提供的电能变换成其他形式或规格的电源,以便满足不同用电设备对不同电能形式的要求。例如,低压直流系统中的变流机、交流系统中的变压器和整流器等,可以把交流电整流成直流电,或者把直流电转换成不同频率和电压的交流电。

## 1.2 直流电源系统

### 1.2.1 直流发电机

常用的航空直流发电机有两种形式:一种是直流发电机,另一种是交流一直流发电机。

#### 1. 直流发电机

典型的飞机直流发电机如图1-1所示,其结构主要由定子、转子、换向器、电刷组件等部分构成。

##### (1) 结构

①定子。定子主要由磁极、励磁线圈、电刷组件和壳体组成。磁极和励磁线圈

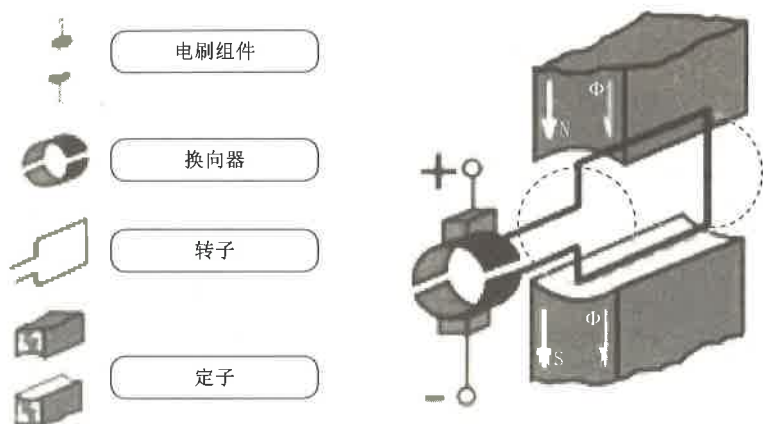


图 1-1 直流发电机构造

用来产生磁场；壳体的作用有两个，一是为磁极产生的磁场提供磁通路，二是作为发电机的机械结构，用于安装其他部件和固定发电机。壳体由铁磁材料构成。图 1-2 (a)、(b) 分别为两极电机和四极电机的定子结构图。

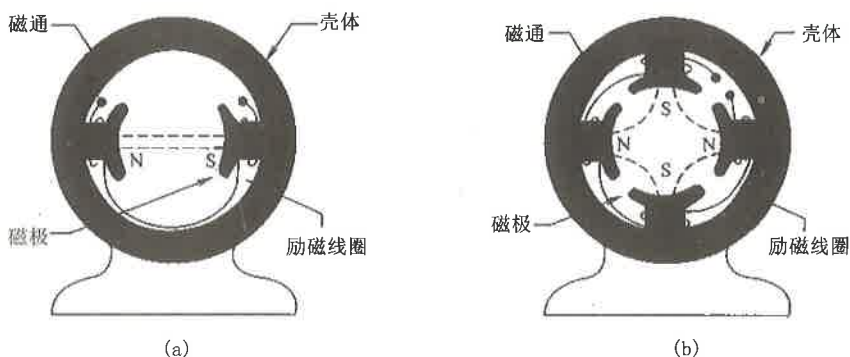


图 1-2 定子结构图

②转子。转子由铁心、电枢线圈、换向器和转轴组成，如图 1-3 所示。电枢线圈在转子转动时，切割磁力线，产生交流电动势。每个电枢线圈的两端按规定的顺序连接在换向器上。

③换向器和电刷组件。换向器和电刷组件的作用是将电枢线圈产生的交流电转换成直流电，由电刷输出。电刷结构如图 1-4 所示，电刷表面在弹簧的作用下与换向器表面紧密接触。电刷装在刷架上，刷架安装在定子上。

## (2) 励磁方式

根据励磁线圈的接线不同，直流发电机可以分为串励式、并励式和复励式，如图 1-5 所示。串励式发电机的励磁线圈与负载电路串联，励磁电流随负载的增加（电

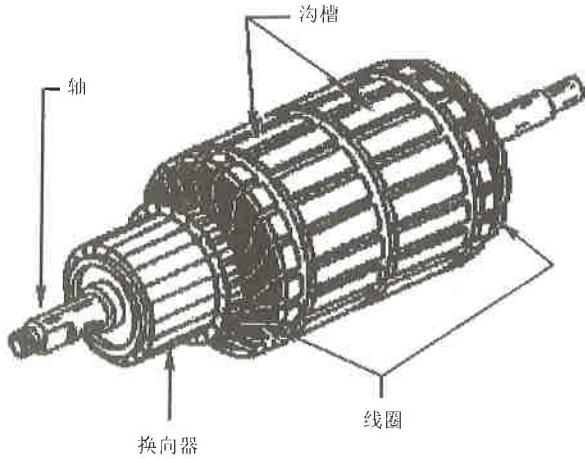


图 1-3 转子组成

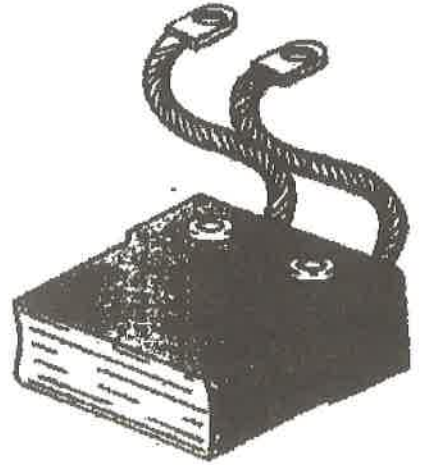


图 1-4 电刷结构

阻减小)而增大,使发电机输出电压上升。要维持电压不变,可在励磁线圈两端并联一可变电阻(调压器)分流一部分励磁电流。这种发电机多用在恒速恒负载或负载起动电流大的情况下,其缺点是电压调整困难,因此飞机上一般不使用。并励式发电机的励磁电流小,电压调整相对容易,一般小型飞机都采用这种发电机。

复励式发电机兼有串励式发电机和并励式发电机的特点,常用于直流起动发电机。

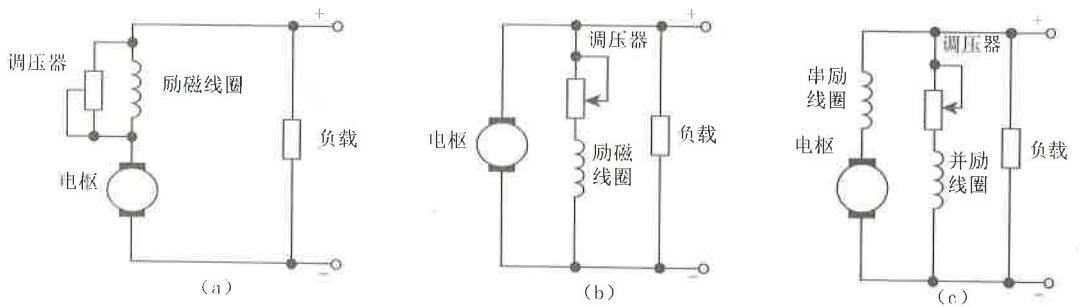


图 1-5 电刷结构

### (3) 电枢反应

当接通发电机负载时,电枢线圈中就有电流流过。根据电磁定律,在电枢线圈中就会产生磁场,该磁场称为电枢磁场。电枢磁场与主磁场(由励磁线圈产生)相互作用,使主磁场发生扭曲,如图 1-6 所示。磁场扭曲程度随发电机输出电流的增大而增大。主磁场畸变除了降低发电机效率外,还使换向时(电枢线圈中的电流随转子旋转而快速改变方向的现象称为换向)产生火花,严重时烧坏换向器和电刷。图 1-6 (a) 表示只有励磁磁场,没有电枢电流(发电机不输出)时的磁力线分布情况;图 1-6 (b) 表示发电机没有励磁,只有电枢电流产生的磁场;图 1-6 (c) 表示两个磁场同时存在时,电流产生的磁场对主磁场产生的影响,这种影响称为电枢反应。

解决电枢反应的方法有两种：一种是电刷架可调，使电刷安装在合成磁场的中性面上 [见图 1-6 (c) 中的 ab 线]。但当发电机输出电流变化时，产生的磁场强度也改变，磁场中性面的位置也会发生变化。一般将电刷调定在发电机输出额定电流时的中性面位置上，但当发电机的负载电流偏离额定值时换向会产生火花。小型发电机一般采用调整电刷位置的方法。另一种是增加换向磁极。换向磁极线圈与电枢线圈串联，输出电流越大，产生的换向磁场就越强（见图 1-7），

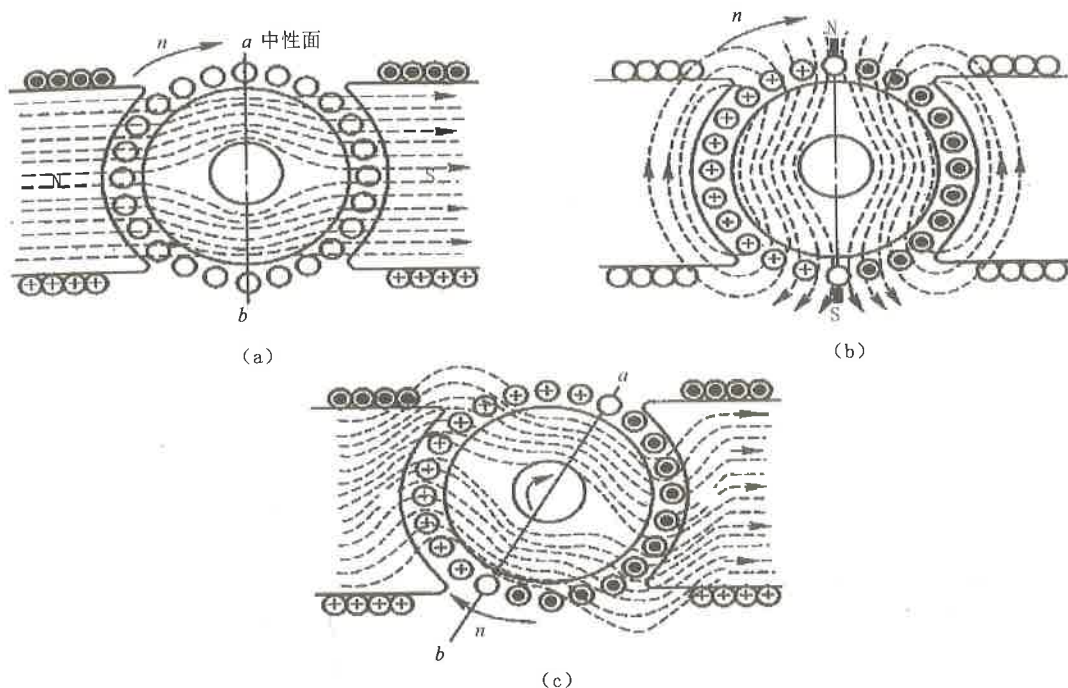


图 1-6 电刷结构

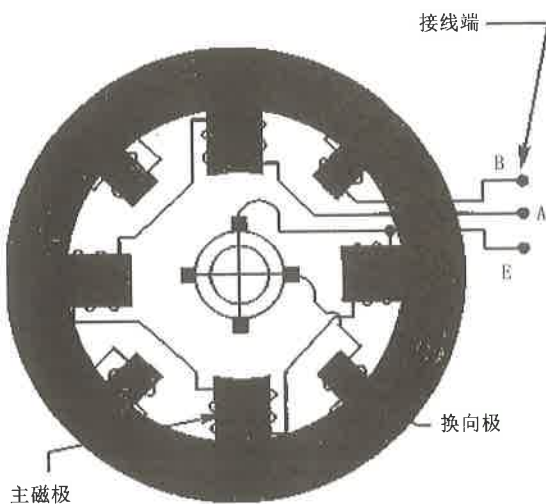


图 1-7 换向磁极

用于抵消电枢反应的影响。较大的发电机一般采用换向磁极的方法或两种方法都采用。

## 2. 交流一直流发电机

为了克服直流发电机换向困难（尤其是在高空）、换向时产生火花及换向器和电刷维护工作量大的缺点，可以采用交流一直流发电机，如图 1-8 (a) 所示。其基本原理是采用交流发电机，交流发电机发出的交流电经二极管整流后变成直流电，再输送到飞机电网供负载使用。

交流一直流发电机由转子 [见图 1-8 (a)]、定子 [见图 1-8 (b)] 和整流器 [见图 1-8 (c)] 组成。

与直流发电机相反，交流一直流发电机的励磁线圈装在转子上，励磁电流通过电刷和滑环 [见图 1-8 (b)] 加到励磁线圈上，因此磁场是转动的。由于输入的是直流电，所以没有换向问题。三相星型连接的电枢线圈装在定子上，三相交流电通过 6 只整流二极管全波整流成直流电后输出 (见图 1-9)。图中将励磁线圈装在转子

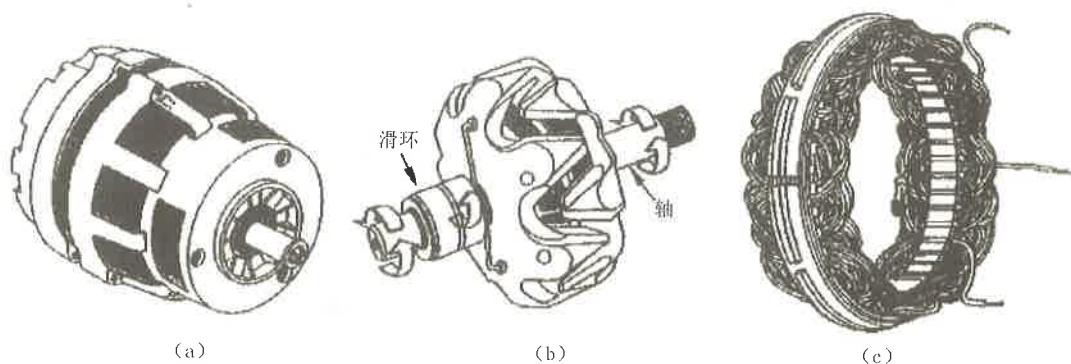


图 1-8 交流一直流发电机构造

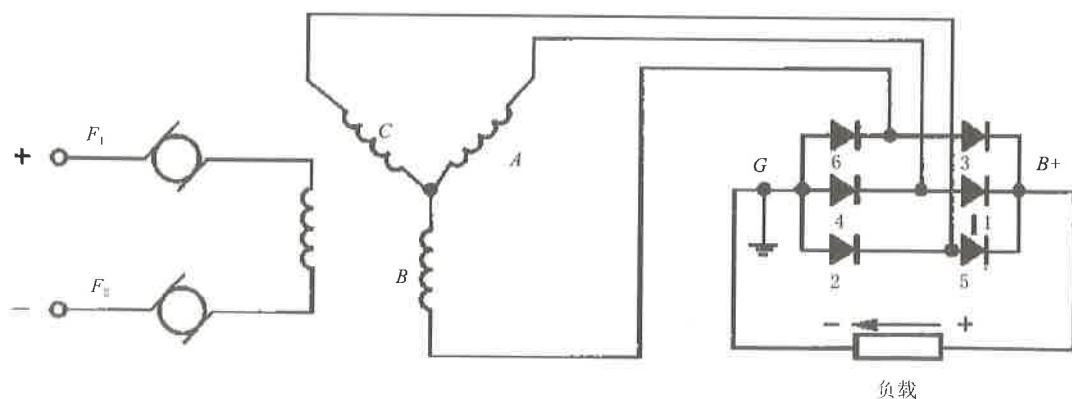


图 1-9 交流一直流发电机的全波整流电路

上, 三相电枢线圈和整流二极管装在定子上。

### 3. 两种直流发电机的优缺点

直流发电机主要有以下几方面的优点:

(1) 能作为起动发电机用。起动发动机时, 用作电动机, 发动机起动后转为发电机状态, 一机两用, 从而减轻机载设备的重量。

(2) 改变励磁方式, 可以做成不同特性的发电机或电动机。

但直流发电机也有以下缺点:

(1) 高空时由于湿度和氧气含量低, 换向困难, 电刷磨损严重。

(2) 换向时产生火花, 对机载电子设备产生干扰; 换向器和电刷磨损大, 维护工作量大。

(3) 结构复杂, 重量重。

交流一直流发电机有以下优点:

(1) 结构简单, 重量轻。

(2) 无机械换向装置, 高空性能良好, 工作可靠, 维护工作量小。

交流一直流发电机的主要缺点有:

(1) 不能作为起动发电机用。

(2) 过载能力较差。

## 1.2.2 直流电源调压器

飞机直流电源的额定电压为 28V, 但当负载变化或发电机转速改变时, 电压将偏离额定值, 因此, 必须由调压器来自动调整发电机的励磁电流, 以保持输出电压恒定。增加发电机的励磁电流, 发电机输出电压增高, 反之则减小。

常用的调压器有振动式调压器、晶体管调压器和炭片调压器等。

### 1. 振动式调压器

振动式调压器如图 1-10 所示, 主要由以下几部分组成:

(1) 电磁铁——用于敏感发电机的电压。电磁线圈并联在发电机输出端, 电压越高, 电磁铁产生的电磁吸力越大。电磁铁的作用是拉开触点。

(2) 弹簧——弹簧的作用是使触点闭合。

(3) 触点——触点闭合, 使电阻短路, 励磁电流增大, 发电机电压升高。

(4) 电阻——触点断开时, 将电阻串入励磁线圈, 使励磁电流减小, 发电机电压下降。

振动式调压器的工作原理简述如下:

当发电机开始转动时, 发电机自激发电。此时, 由于发电机电压低, 电磁铁吸力小, 弹簧的拉力大于电磁铁的吸力, 使触点闭合, 励磁电流上升, 发电机输出电压上

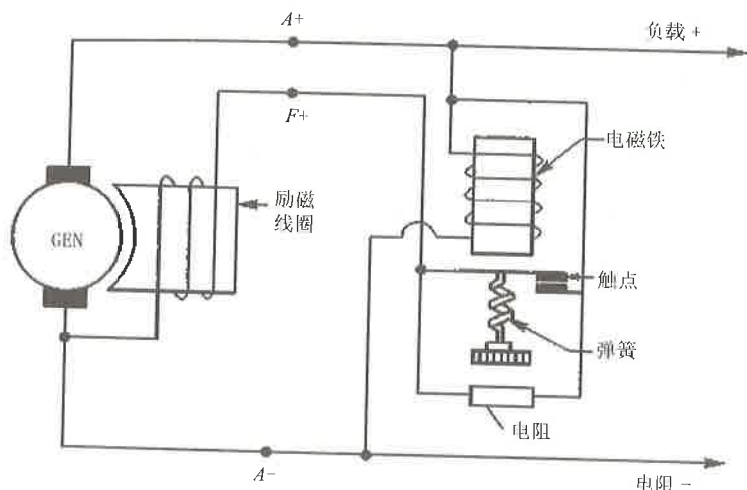


图 1-10 振动式调压器

升。当发电机电压上升到一定值（大于额定值）时，电磁铁吸力大于弹簧拉力，触点打开，这时电阻串入励磁线圈中，使励磁电流下降，发电机电压下降；当发电机输出电压下降到一定值（小于额定电压）时，弹簧拉力又大于电磁铁吸力，触点合上，将电阻短路，发电机电压上升……如此循环，使发电机电压恒定在 28V。调整弹簧拉力，就能调整发电机的输出电压值。

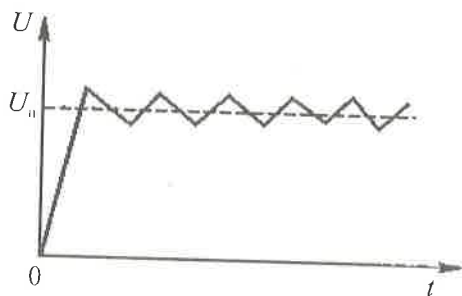


图 1-11 振动式调压器的工作波形

发电机输出电压波形如图 1-11 所示。

这种调压器主要用于小型发电机，其优点是结构简单，重量轻。缺点是触点频繁开合，容易磨损和产生干扰；发电机输出电压有微小波动。

## 2. 晶体管调压器

为克服振动式调压器机械触点开合引起的问题，可以采用无触点开关，即用大功率晶体管代替机械触点。典型晶体管调压器原理如图 1-12 所示。

电路主要由以下两大部分组成：

电压敏感电路——由电阻  $R_3$ 、 $R_4$ 、 $R_5$  和电容  $C_2$  组成。

开关放大电路——由三极管  $T_1$ 、 $T_2$  和二极管  $D_1$ 、稳压管  $Z_2$  及电阻  $R_1$ 、 $R_2$  组成。

晶体管调压器的工作原理与振动式调压器基本相同。当发电机电压低于一定电压时，稳压管  $Z_2$  截止 →  $T_1$  截止 →  $T_2$  导通，电源“+”端通过  $D_1$ 、 $T_2$  加到励磁线圈的  $F_2$  端，再回到电源的“-”端，使发电机电压上升；当电压上升到一定值时， $Z_2$  击穿导通 →  $T_1$  导通 →  $T_2$  截止，励磁线圈断电（励磁线圈中的反电势通过续流二极管



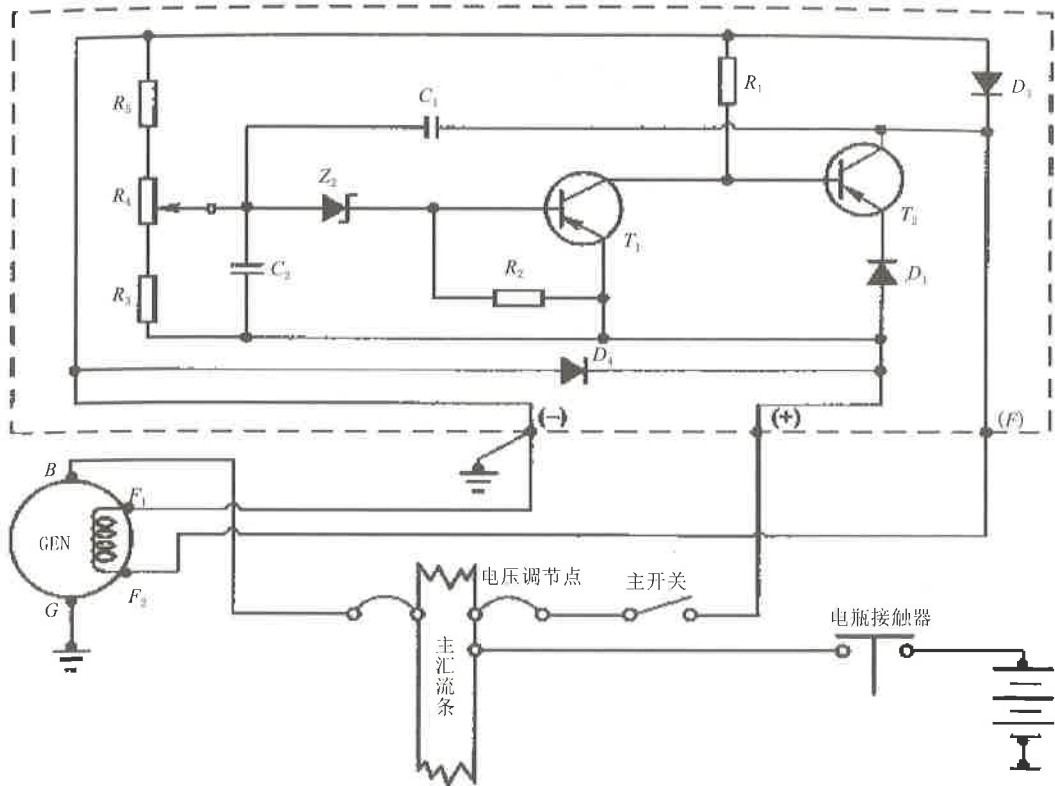


图 1-12 晶体管调压器

$D_3$  释放), 发电机输出电压下降; 当电压下降到一定值时,  $Z_2$  又截止……。如此循环, 使发电机输出电压保持在额定值上。当负载增大时,  $T_2$  的导通时间变长, 截止时间变短, 以维持输出电压不变。调整  $R_4$  就能调定发电机的输出电压值。

$C_1$  为负反馈电容, 用于提高调压的稳定性。二极管  $D_4$  的作用是防止调压器或发电机极性接反, 起到保护调压器的作用。

晶体管调压器具有调压精度高、体积小、重量轻、工作可靠等优点, 目前被大多数飞机所采用。

### 3. 炭片调压器

晶体管调压器和振动式调压器都采用通断励磁电流来调节发电机电压, 这会引起发电机电压在小范围内波动, 从而影响动态稳定性。是否能在励磁电路中串联一个可变电阻, 通过改变可变电阻值来改变励磁电流, 从而使发电机输出端电压的波动减小? 回答是肯定的, 炭片调压器就是采用了上述原理 (见图 1-13)。

炭片调压器各组成部分及功用如下:

(1) 炭柱——由一片一片炭片叠成, 炭柱电阻的大小与加在炭柱上的压力成反比。压力越大, 电阻越小。炭柱上所受的力等于弹簧反力减去电磁吸力。

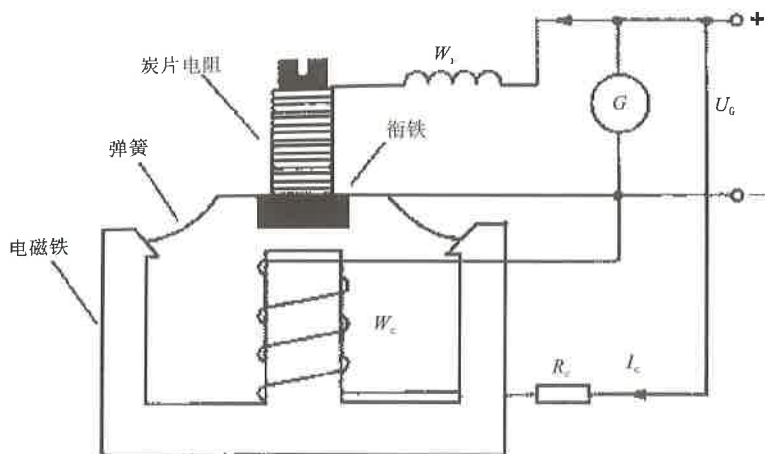


图 1-13 炭片调压器

(2) 弹簧——弹簧的作用是压紧炭柱，使炭柱电阻减小。

(3) 电磁铁——电磁铁产生的电磁力的作用是拉松炭柱，使炭柱电阻增加。

(4) 调节电位器或调节螺钉——用于调整电磁铁的电流，从而调整发电机的额定输出电压。

炭片调压器的工作原理简述如下：

当电压升高时→电磁拉力增大→炭柱被拉松→电阻增大→励磁电流减小→电压下降；当电压下降时→电磁拉力下降→炭柱被压紧→电阻减小→励磁电流增大→电压升高。这样就可以使电压保持恒定。

炭片调压器一般用于大功率直流发电机中。

## 1.3 航空蓄电池

蓄电池是将化学能直接转化成电能的一种装置。充电时，将电能转换为化学能；放电时，将化学能转换为电能。蓄电池在各类飞机上都有所应用，是非常重要的辅助电源和应急电源。

航空蓄电池的种类很多，按照用途不同，航空蓄电池可分为飞机蓄电池和地面蓄电池两种。飞机蓄电池的作用是在飞机发动机不供电时，提供维持飞行必需的电能，必要时可以作为飞机发动机的起动电源。地面蓄电池主要作为地面检查用电设备和起动发动机的电源。此外，蓄电池在直流系统中还可起到良好的平波作用。

按照电解质的性质不同，航空蓄电池可以分为酸性蓄电池和碱性蓄电池两大类。飞机上常用的酸性蓄电池是铅酸蓄电池，其电解质是稀硫酸；常用的碱性蓄电池有

镍镉蓄电池和锌银蓄电池，其电解质是氢氧化钾。

### 1.3.1 铅酸蓄电池

铅酸蓄电池是法国人普兰特于 1859 年发明的，距今已经历了 150 余年的发展历程。铅酸蓄电池在理论研究、产品种类及品种和产品电气性能等方面都得到了长足的进步，不论是在交通、通信、电力、军事，还是在航海、航空的各个经济领域，铅酸蓄电池都起到了重要作用。目前在小型飞机上，铅酸蓄电池应用较多，如塞斯纳、钻石等系列飞机。与普通铅酸蓄电池相比，航空铅酸蓄电池极板较薄，电解液密度大，能保证较大的活性物质利用系数和较小的内阻，并且重量轻，尺寸小，起动性能好；缺点是寿命较短，通常仅为普通蓄电池的  $1/10 \sim 1/5$ 。

#### 1. 铅酸蓄电池的工作原理

##### (1) 电动势的产生

铅酸蓄电池的正极板物质是二氧化铅 ( $\text{PbO}_2$ )，负极板物质是海绵状的铅 ( $\text{Pb}$ )，电解液是稀硫酸 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )。在硫酸溶液中水分子的作用下，少量二氧化铅 ( $\text{PbO}_2$ ) 可与水生成可分解的不稳定物质氢氧化铅 [ $\text{Pb}(\text{OH})_2$ ]，氢氧根离子 ( $\text{OH}^-$ ) 在溶液中，铅离子 ( $\text{Pb}^{2+}$ ) 留在正极板上，故正极板上缺少电子。负极板海绵状的铅 ( $\text{Pb}$ ) 与电解液中的稀硫酸 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 发生反应，变成铅离子 ( $\text{Pb}^{2+}$ )，铅离子 ( $\text{Pb}^{2+}$ ) 转移到电解液中，负极板上留下多余的两个电子。可见，在电池开路的时候，由于化学作用，正极板上缺少电子，负极板上多余电子，两极板间就产生了一定的电位差，这就是铅酸蓄电池的电动势。一个单体的铅酸蓄电池电动势约为 2.1V。

##### (2) 放电及充电过程

如图 1-14 所示，铅酸蓄电池放电时，在蓄电池的电位差作用下，负极板上的电子经负载进入正极板形成电流  $I$ ，同时在电池内部进行化学反应。

负极板上每个铅原子放出两个电子后生成的铅离子 ( $\text{Pb}^{2+}$ ) 与电解液中的硫酸根离子 ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) 反应，在极板上生成难溶的硫酸铅 ( $\text{PbSO}_4$ )。正极板的铅离子 ( $\text{Pb}^{4+}$ ) 得到来自负极板的两个电子 ( $2e$ ) 后，变成二价铅离子 ( $\text{Pb}^{2+}$ ) 与电解液中的硫酸根离子 ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) 反应，在极板上生成难溶的硫酸铅 ( $\text{PbSO}_4$ )。正极板水解出的氧离子 ( $\text{O}^{2-}$ ) 与电解液中的氢离子 ( $\text{H}^+$ ) 反

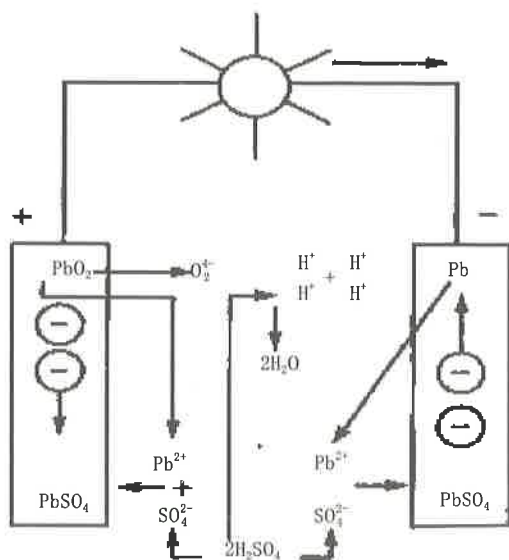


图 1-14 铅酸蓄电池的放电过程

应，生成稳定物质水。

电解液中存在的硫酸根离子和氢离子在电力场的作用下分别移向电池的正负极，在电池内部形成电流，整个回路形成，蓄电池向外持续放电。放电时稀硫酸( $H_2SO_4$ )浓度不断下降，正负极上的硫酸铅( $PbSO_4$ )增加，电池内阻增大(硫酸铅不导电)，电解液浓度下降，电池电动势降低。

如图 1-15 所示，充电时，应外接直流电源，使正、负极板在放电后生成的物质恢复成原来的活性物质，并把外界的电能转变为化学能存储起来。

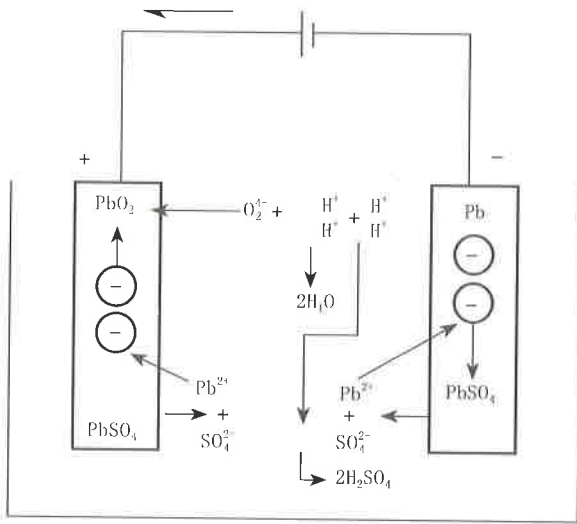
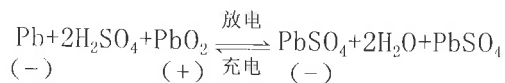


图 1-15 铅酸蓄电池的充电过程

正极板在外界电流的作用下，硫酸铅( $PbSO_4$ )被离解为二价铅离子( $Pb^{2+}$ )和硫酸根负离子( $SO_4^{2-}$ )，由于外电源不断从正极吸取电子，故正极板附近游离的二价铅离子( $Pb^{2+}$ )不断放出两个电子来补充，变成四价铅离子( $Pb^{4+}$ )，并与水继续反应，最终在正极板上生成二氧化铅( $PbO_2$ )。负极板上，在外界电流的作用下，硫酸铅( $PbSO_4$ )被离解为二价铅离子( $Pb^{2+}$ )和硫酸根负离子( $SO_4^{2-}$ )，由于负极不断从外电源获得电子，则负极板附近游离的二价铅离子( $Pb^{2+}$ )被中和为铅( $Pb$ )，并以海绵状铅附在负极板上。

电解液中，正极不断产生游离的氢离子( $H^+$ )和硫酸根离子( $SO_4^{2-}$ )，负极不断产生硫酸根离子( $SO_4^{2-}$ )，在电场的作用下，氢离子( $H^+$ )向负极移动，硫酸根离子( $SO_4^{2-}$ )向正极移动，形成充电电流。

充放电时的化学方程式如下：



### (3) 电解液的变化

从铅酸蓄电池充放电的过程可以看出，铅酸蓄电池在放电过程中产生水，电解液浓度会逐渐降低。相反，在充电过程中消耗水，电解液的浓度会逐渐升高。

## 2. 主要电气参数

### (1) 电动势

单体电池的电动势一般为 2.1V，标称为 2V，能最低放电到 1.5V，充电到 2.4V。在应用中，经常用 6 个单体铅酸蓄电池串联起来，组成标称 12V 的铅酸蓄电池。此外，还有 24V、36V、48V 等型号。

### (2) 内阻

航空铅酸蓄电池的内阻一般较小，为百分之几到千分之几。内阻在不同条件下是变化的。在充放电过程中，由于电解液的不断变化，蓄电池的内阻也在不断变化。放电时间越长，内阻越大；放电电流越大，内阻越大；低温时，内阻也增大。

### (3) 容量

蓄电池的容量是指完全充电状态下，按一定放电条件，放电到所规定的终止电压时所释放的电量，用 capacity 表示。不同的放电条件下，蓄电池能够释放的电量是不一致的。放电电流越大，有效容量越小；温度越低，有效容量越小。为了设定统一条件，规定了一个标准的放电条件：电解液温度为 20℃，放电电流为额定值，放电方式为连续放电。蓄电池容量的单位是安时 (Ah)。

### (4) 放电及充电特性

蓄电池的放电过程可以分为四个阶段：放电初期、放电中期、放电后期及放电终了。其特性曲线如图 1-16 所示。

放电初期 (AB 段)：极板空隙内外电解液密度差很小，电解液扩散速度慢，空隙内的硫酸被大量消耗，补充不足，电动势下降迅速。

放电中期 (BC 段)：极板空隙内外电解液浓度差别较大，扩散速度快，空隙内硫酸的消耗和补充基本相同，电动势下降缓慢，电压基本稳定。

放电后期 (CD 段)：极板上沉积的硫酸铅增多，将空隙堵塞，空隙内硫酸浓度下降，电动势下降迅速。

放电终了 (D 点以后)：当蓄电池放电到 D 点以后，蓄电池已经失去了放电能力，此点为蓄电池的放电终了电压。此时如果继续放电，蓄电池电压将下降到零，如 D 点以后虚线所示。过量放电会损坏蓄电池寿命，因此在 D 点以后不允许继续放电。当放电停止以后，由于硫酸的扩散作用，极板空隙内的硫酸浓度又有所上升，电动势也会逐渐上升。

蓄电池的充电与放电过程基本类似，如图 1-17 所示。随着充电时间的延长，到了充电后期，基本上极板上所有的活性物质都已经参与反应，这时如果再继续充电，电流基本上全部用于电解水，可能会使蓄电池大量产气而鼓包，影响蓄电池寿命。

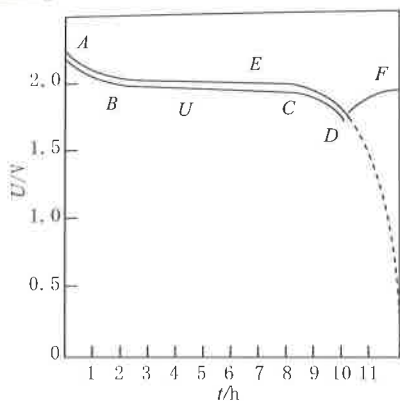


图 1-16 放电特性

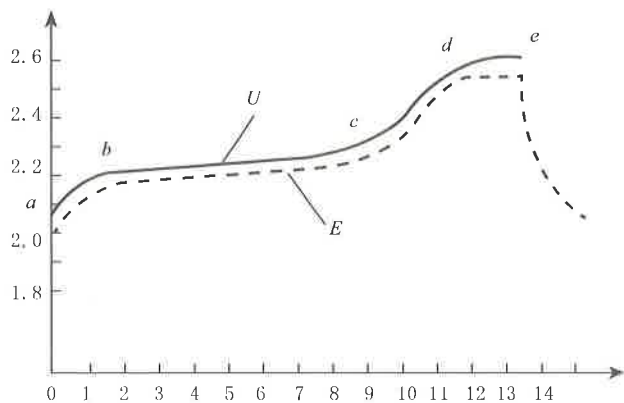


图 1-17 充电特性

当停止充电后，由于硫酸的扩散作用，电动势会逐渐下降，最终会趋于稳定。

#### (5) 典型铅酸蓄电池性能

以 12HK-28 型铅酸蓄电池为例，其主要性能数据如下：

- ① 单体额定电压：2V。
- ② 单体电池终止电压：1.7V。
- ③ 充足电电压：2.13 ~ 2.17V。
- ④ 额定容量：28Ah。
- ⑤ 额定电流：2.8A（10h 放电率），5.6A（5h 放电率）。
- ⑥ 额定电压：24V。
- ⑦ 短时间（3.5min）放电电流：170A。

#### 3. 构造

铅酸蓄电池包装在防酸、防震的壳体内，壳体一般由聚苯乙烯等材料制成。铅酸蓄电池都是由单体电池串联而成，单个平板之间由多孔隔板隔开，避免物理接触引起的短路。其构造如图 1-18 所示。

#### 4. 注意事项

(1) 地面通电时一般不允许使用飞机蓄电池，地面检查飞机用电设备和起动机时，应使用地面电源。

(2) 每次飞行前，应对飞机蓄电池进行电压检查，用双倍额定电流放电时，蓄电池的电压不应低于其额定值；为了保证紧急情况下的使用，要确保飞机上的蓄电池容量在 75% 以上，容量不足的蓄电池不允许装机使用。

(3) 低温情况下，尽量避免使用飞机蓄电池起动机，因为低温会使蓄电池的放电能力下降，并且低温大电流放电会影响蓄电池的寿命。

(4) 禁止用蓄电池长时间进行大电流放电或过量放电，以防止极板严重硬化，

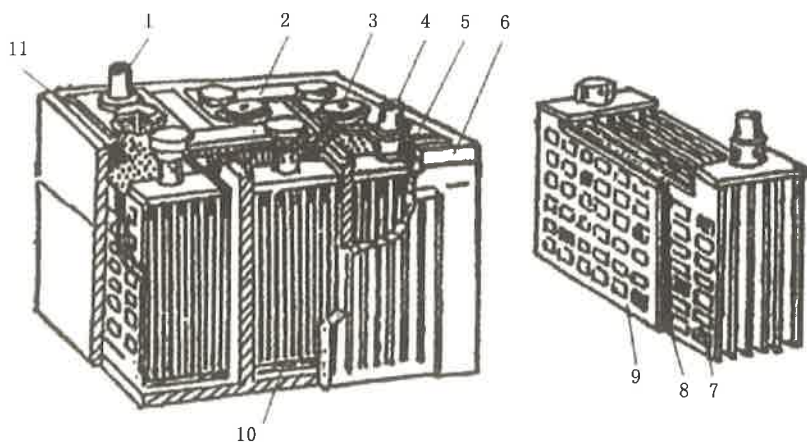


图 1-18 铅酸蓄电池构造

1—负极柱 2—连条 3—加液孔盖 4—正极柱 5—壳盖 6—外壳  
7—正极板组 8—隔板 9—负极板组 10—肋条 11—封胶

缩短蓄电池寿命。

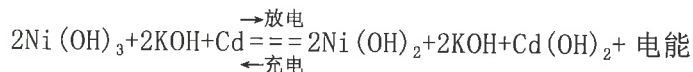
### 1.3.2 镍镉蓄电池

镍镉蓄电池的正极物质是氢氧化镍  $[\text{Ni}(\text{OH})_3]$ ，负极板物质是镉 (Cd)，电解液是氢氧化钾 (KOH)，属于碱性蓄电池。与铅酸蓄电池相比，镍镉蓄电池具有较长的使用寿命，其充放电次数为 300 ~ 800 次，最高可达 2000 次，使用期可长达 3 ~ 10 年。另外，镍镉蓄电池具有良好的大电流放电特性，自放电电流小，充电放置半年后仍具有 70% 以上的容量；其次，镍镉蓄电池还具有低温特性好、结构牢固、维护简单等优点。镍镉蓄电池在大型飞机上应用较为广泛，如在空客 350XWB 宽体飞机上就采用了镍镉蓄电池，其主要缺点是造价相对较高，单个电池输出电压较低，因此体积比铅酸蓄电池更大。

#### 1. 镍镉蓄电池的工作原理

充电时，极板之间有离子的交换，氧离子 ( $\text{O}^{2-}$ ) 从负极板转移到正极板，只要有充电电流存在，这个过程就一直持续，直到负极板上的氧离子 ( $\text{O}^{2-}$ ) 都被去除，留下金属镉 (Cd)，正极板变成氧化镍 ( $\text{NiO}$ )。放电过程与充电过程相反，正极板失去氧离子 ( $\text{O}^{2-}$ )，而负极板逐渐获得氧离子 ( $\text{O}^{2-}$ )，正常放电期间，没有气体释放。

镍镉电池的充放电化学方程式如下：



在充放电过程中，电解液氢氧化钾（KOH）不参与反应，故电解液的密度和液面高度几乎不变。因此不能通过电解液的变化来判断蓄电池的充放电状态，通常用测量电压的方式来判断充放电程度。

## 2. 镍镉蓄电池的使用及维护

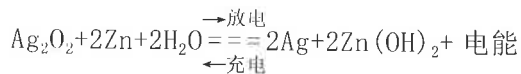
单体镍镉蓄电池的电动势一般为 1.34 ~ 1.36V，基本不受电解液密度和温度的影响。镍镉蓄电池存在一种称为热失控的效应，即当蓄电池接入能提供高电流的恒定充电电压的情况下，热失控会使温度增高，从而使电池内部电阻降低，进而使更多的电流进入蓄电池，引起恶性循环。极端情况下，产生的热量足以烧坏电池，因此给镍镉蓄电池充电需要用专门的方法，在电池里加装温度传感器，用于检测是否有热失控的情况发生。

### 1.3.3 锌银蓄电池

锌银蓄电池在充电后，其正极板活性物质是过氧化银（ $\text{Ag}_2\text{O}_2$ ），负极板活性物质是锌（Zn），电解液是以氢氧化钾（KOH）为主并配以锌酸盐的饱和水溶液，是一种碱性蓄电池。放电结束后正极板活性物质变为银（Ag），负极板活性物质变为氢氧化锌 [ $\text{Zn}(\text{OH})_2$ ]。

锌银蓄电池的突出优点是体积小，重量轻，容量大，此外还具有放电电压平稳和自放电小的特点；主要缺点是寿命短，容易产生内部短路故障，造价也较高。

锌银蓄电池的充放电化学方程式如下：



锌银蓄电池由于放电过程中电解液中的水参与化学反应，因此，放电时电解液的密度会越来越小。

### 1.3.4 其他蓄电池

在飞机上还有其他类型的蓄电池，如锂电池和镍金属氢化物电池等。

锂电池家族包含 20 多个不同的产品，阳极、阴极及电解液都有很多种，选择的材料类型取决于成本、使用、寿命、温度等多种因素。锂电池是目前非常有前景的航空蓄电池技术，和铅酸蓄电池等其他电池相比，其具有寿命长、重量轻、维护少、充电时间短、能量密度大、无记忆效应等优点。

但是目前锂电池不会迅速替代飞机主电池，因为锂电池在安全性方面存在一定不足，如电解液容易自燃，存在自爆的可能性等。此外，其成本较高，并且电池制成以后每年都会损失一些存储容量，电池老化速度受到温度影响，温度越高，老化



速度越快。镍金属氰化物电池与密封式镍镉产品技术类似，在放电时能产生恒定电压，有非常好的长期储电性能和很长的循环寿命（充放电超过 500 次）。这种电池不需要维护，但是充放电却需要格外小心，不正确的充电或过量放电可能造成此类电池的永久性损坏。目前，已研制出新一代镍金属氰化物 12V 电池，作为一般滑翔机上的常规密封铅酸蓄电池的直接替代品，已经成为世界上较先进的蓄电池之一。

### 1.3.5 蓄电池的安装及排气

飞机根据其尺寸配有一个或两个主电池，电池一般安装在配电点附近，以减少线路损耗。电池舱内一般配有接盘，用于收集溢出的电解液，保护飞机机体。由于电池从飞机上脱落会有失火的危险，因此电池安装必须可靠固定。

蓄电池必须安装有排气装置，使气体排出并容纳电解液的溢出，如图 1-19 所示。排气管路通常是橡胶或其他耐腐蚀的导管，通过它将气体排到飞机外（通常是机身蒙皮处）。在加压飞机上，机舱与外部的压力差把气体导入排气系统，有些蓄电池带有捕获器，用于保存有害气体和蒸汽。

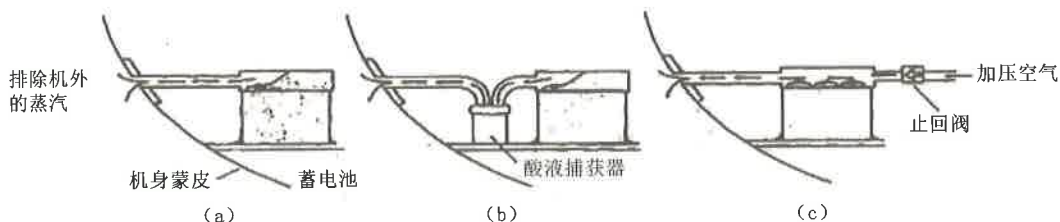


图 1-19 飞机蓄电池的排气

## 1.4 直流电源的并联运行及控制与保护

### 1.4.1 概述

对于多台发电机的供电系统，每台发电机可以单独向用电设备供电，也可以并联运行向设备供电。单独供电时，如果某台发电机发生故障被切除，则此发电机连接的负载要转由正常发电机供电，就需要一定的转换时间，可能造成暂时的供电中断，这对于计算机等设备而言是不利的。并联供电可以大大提高供电的可靠性，个别发电机故障并切除后不影响负载的供电。并联供电电网容量增大，可满足大的起动电流和尖峰负载的用电需求，在负载突变时，可以减轻对电网的冲击，改善供电

质量。由于并联供电的优点，其在低压直流系统中得到了广泛的应用，在交流电网中也有所应用。

并联供电存在着负载均衡的问题，就是两台相同的发电机分担的负载是否平均的问题。在直流系统中，如果两台发电机的输出电流相同，各为总负载电流的一半，则认为负载分配是均衡的。两台发电机输出电流相差越大，则负载分配就越不均衡。交流电源的负载均衡包含有功分量均衡和无功分量均衡两部分，更加复杂。飞机电源的并联运行要求两台发电机的负载要尽可能地均衡，否则可能造成一台发电机未能发挥供电能力，而另一台发电机超出额定容量而烧毁。

控制和保护装置是飞机电源系统的重要组成部分，控制与保护是分不开的，控制往往是为了保护。实际应用中，飞机电源的主要控制对象或执行元件有四个。

(1) 发电机励磁控制继电器：控制发电机励磁电路的接通与断开，即决定发电机是否能够励磁发电。

(2) 发电机断路器：又称发电机接触器或发电机控制断路器，控制发电机能否投入电网并向各自的发电机汇流条供电，即决定发电机是否输出电能。

(3) 汇流条连接断路器：又称并联断路器，它可将各发电机汇流条与同步汇流条或连接汇流条接通与断开，即决定发电机是否并联供电或发电机汇流条之间是否交互供电。

(4) 外电源接触器：飞机停在地面，接上外电源时，它决定外电源是否向机上电网供电。

飞机电源系统控制与保护装置的作用就是人工或自动地接通、断开或转换上述开关装置。所谓控制，主要是根据供电方式的需要及一定的逻辑关系，控制上述发电机和电网的开关元件，以完成发电机和电网主要汇流条的接通、断开或转换工作。而保护一般是在发电机或电网局部出现故障时，有选择性地自动断开某些开关装置，使故障部分与正常供电系统隔离，防止故障扩大，保证系统正常供电。

除了上述基本的控制保护器件外，大型飞机上还有辅助动力装置断路器、不中断电源转换等。飞机并联与不并联运行的控制实际是对发电机控制断路器、发电机励磁控制继电器和汇流条连接断路器的控制以及对辅助动力装置断路器和外电源接触器的控制，其控制均是通过发电机控制器和汇流条功率控制器来实现的。

飞机电源系统的控制保护器有继电器型、磁放大器型、晶体管型及三者的混合等类型。目前，晶体管式控制保护器因其体积小、质量小、耗电少、动作迅速、抗振性强、工作可靠等优点而应用广泛，但也存在受温度和电压影响大、线路复杂等缺点。随着电子技术的发展，集成电路在飞机电源的控制及保护装置中得到了越来越广泛的应用。

## 1.4.2 直流电源并联运行及控制与保护

### 1. 并联运行条件与负载均衡

直流电源与电网并联的条件是：电源极性和电网极性相同，电源电压和电网电压相同。

图 1-20 为两台直流发电机并联工作原理图。A 和 B 为调节点， $U_1$  和  $U_2$  为 A、B 点电压， $U_n$  为并联汇流条电压， $R_{+1}$  和  $R_{+2}$  为电源到汇流条间的正线电阻， $I_1$  和  $I_2$  为发电机  $G_1$  和  $G_2$  的输出电流。可得方程组：

$$U_n = U_1 - I_1 R_{+1}$$

$$U_n = U_2 - I_2 R_{+2}$$

$$I = I_1 + I_2$$

所以，可得  $I_1$  和  $I_2$  的表达式：

$$I_1 = \frac{U_1 - U_2}{R_{+1} + R_{+2}} + \frac{R_{+2}}{R_{+1} + R_{+2}} \cdot I \quad I_2 = \frac{U_1 - U_2}{R_{+1} + R_{+2}} + \frac{R_{+1}}{R_{+1} + R_{+2}} \cdot I$$

$$\Delta I = I_1 - I_2 = \frac{2(U_1 - U_2)}{R_{+1} + R_{+2}} + \frac{R_{+2} - R_{+1}}{R_{+1} + R_{+2}} \cdot I$$

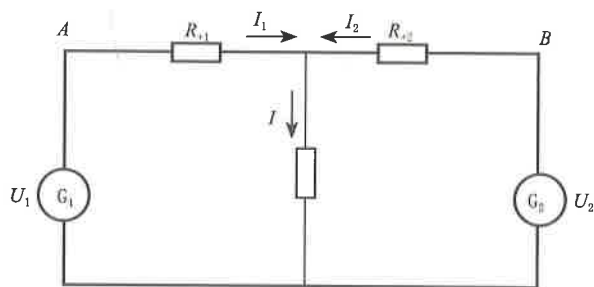


图 1-20 两台直流发电机并联原理

由此可以看到，要想两台发电机发出的电流相同，必须满足：

(1) 两个调压器所保持的电压相等，即  $U_1 = U_2$ 。

(2) 两台发电机的正线电阻相等，即  $R_{+1} = R_{+2}$ 。

满足了上述的两个条件，则负载分配就是均衡的。

### 2. 自动均衡电路

实际上，要想实现负载均衡的两个条件是非常困难的，一般情况下需要采用负载自动均衡电路来实现。不同的供电系统采用的调压器型号不同，因此负载均衡的方式也各有差异。如图 1-21 所示，下面主要介绍一下炭片式调压器的负载均衡电路。

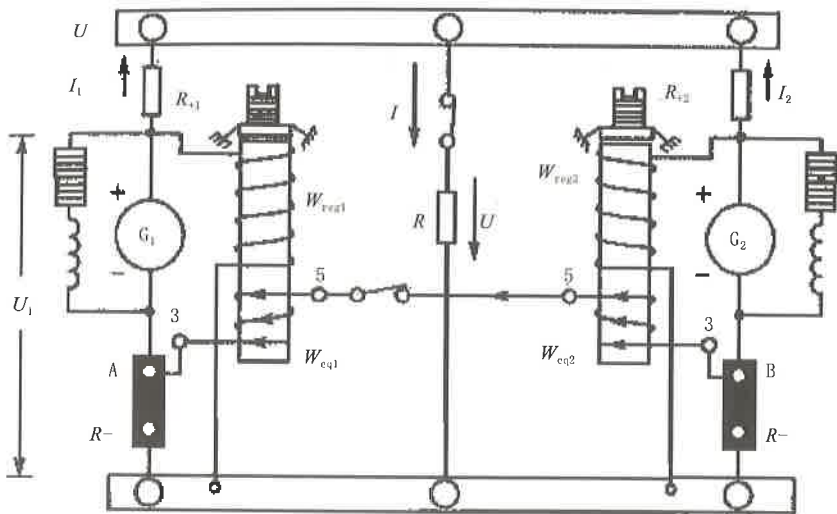


图 1-21 碳片式调压器的负载均衡电路

负极电阻由电阻温度系数很小的镍铬合金制成，电阻很小，并且  $R_{v1}=R_{v2}$ ，两个均衡线圈的匝数相同，并且  $W_{cq1}=W_{cq2}$ ，阻值也相同。

如果负载不均衡，设  $I_1 > I_2$ ，则  $A、B$  两点电位不相等， $\Phi_A < \Phi_B$ ，于是电流会从  $B$  点经过  $W_{cq1}$  和  $W_{cq2}$  流向  $A$  点。输出电流大的发电机调压器中，均衡线圈电动势与工作线圈电动势相同，调压器铁心合成的磁场增强，调压器电阻增大，励磁减小，从而降低电压  $U_1$ 。另外一个电压调节器工作方式正好相反，电压  $U_2$  升高。结果输出电流大的发电机电流  $I_1$  减小，输出电流小的发电机  $I_2$  电流增大。这样就实现了两台发电机的负载均衡。

基本上所有的负载均衡电路都是将与电流差有关的信号反馈到电压调节器，以改变调节点的电压，从而提高负载分配的均衡性。

### 3. 发电机与蓄电池的并联运行

在装有单台发电机电源系统的飞机上，发电机常与蓄电池并联运行。发电机正常工作时，向蓄电池充电，保证蓄电池储备充足的电能。发电机停车或发生故障不能发电时，由蓄电池向负载供电，以保证不发生供电中断的现象。发电机与蓄电池并联运行的原理如图 1-22 所示。

发电机与蓄电池并联运行需要满足两个条件：①发电机的极性必须与电网极性相同；②发电机电压必须稍微高于电网电压。若发电机电压低于电网电压时投入电网，则一投入就会出现反流，使发电机断开，断开后又投入，又断开，会导致系统接触器处于振荡状态，可能损坏发电机或蓄电池。关于反流的内容，将在下节讲解。

发电机与蓄电池的并联运行会出现四种情况：

- (1) 如果电网上没有接负载，则发电机仅对蓄电池充电。

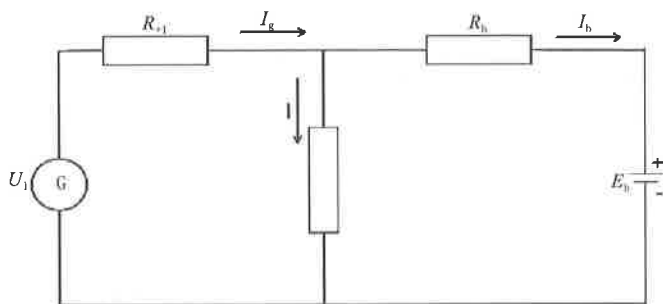


图 1-22 发电机与蓄电池并联运行原理

(2) 如果负载电流较小, 发电机除继续向蓄电池充电外, 还向用电设备供电。

(3) 负载电流增加到一定值时, 电网电压将降低到等于蓄电池的电动势, 发电机向蓄电池充电电流为零, 负载电流全部由发电机供给。

(4) 负载电流超过上述值后, 将由发电机和蓄电池共同承担负载电流, 蓄电池由充电状态转为放电状态, 电网电压将更低。

发电机与蓄电池并联运行需要注意以下问题:

(1) 为保证汇流条电压不过分降低, 通常将线路压降限制在 0.25V 以内。

(2) 调节点调定电压的高低对蓄电池的工作影响很大。如果调定电压过低, 蓄电池会在负载电流较小的情况下就开始放电, 这样会使电池容量减小, 失去应急电源的作用; 反之, 调定电压太高, 蓄电池一直处于充电状态, 则造成能量浪费。

(3) 蓄电池的充放电程度对负载分配影响较大, 在调定电压不变时, 充电不足的蓄电池与发电机并联, 充电电流会很大, 这不仅会降低蓄电池寿命, 而且会在负载较小时就使发电机过载。一旦发电机发生故障不能供电, 蓄电池也不能起应急电源的作用。因此, 未充足电的蓄电池不能装机使用。

蓄电池接入电网会对电网产生以下影响:

(1) 蓄电池的金属极板浸于电解液中, 金属与溶液界面的双电层相当于平板电容器, 称为双电层电容。由于这一等值电容器(通交隔直)的容量很大, 可达法拉级, 故具有良好的平波作用。

(2) 电网中接了蓄电池后, 显著降低了电源内阻, 因而提高了电能质量。

#### 4. 直流电源的控制与保护

(1) 直流电源控制与保护的對象

直流电源的控制是为了保证发电机与汇流条可靠地接通、断开或转换, 保证故障部分与飞机电网可靠分离。直流电源的控制主要包括: 主电源的控制; 应急电源的控制; 地面电源的控制; 起动发电机的控制。

直流电源的保护主要包括: 发电机反流保护; 过电压与过励磁保护; 发电机反极性保护; 过载保护; 短路保护。

## (2) 发电机的反流保护

发电机与蓄电池并联运行或两台发电机并联运行时，在发动机起动及停车或发电机出现故障时都可能出现发电机电压低于汇流条电压的情况，这时电流将由蓄电池流入发电机或由电压高的发电机流向电压低的发电机。这种流入发电机的电流称为反流，反流不但会无故消耗蓄电池或发电机的电能，并且过大的反流还会烧坏蓄电池或发电机。

要避免反流的危害，必须适时接通和断开发电机的输出电路，在发电机电压高于汇流条电压时接通电路，在发电机电压低于汇流条电压时断开电路，以避免反流。

反流保护器既可以起到控制发动机输出的作用，又可以起到反流保护的作用，通常的两种形式是反流切断继电器和反流断路器。

①反流切断继电器。如图 1-23 所示，在发电机正常工作且发电机总电门闭合后，反流切断继电器的并联绕组在铁心中产生足够大的磁通吸引衔铁，使其触点闭合，从而把发电机连接到了汇流条上，发电机此时通过反流切断继电器的串联线圈和触点向汇流条供电。并联绕组和串联绕组的磁场叠加，使继电器更加牢固地保持在闭合状态。

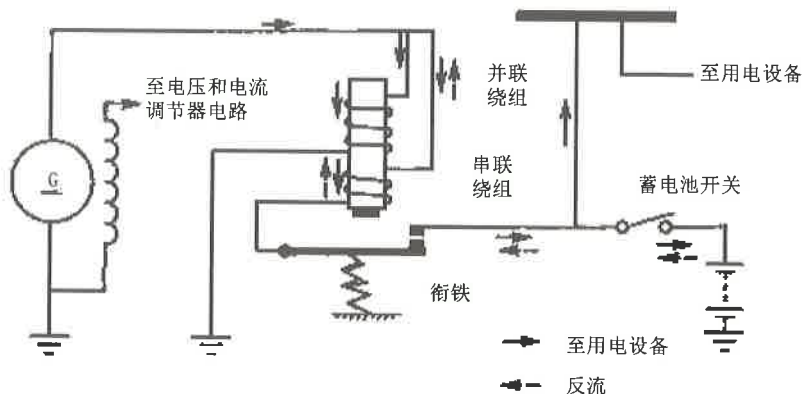


图 1-23 反流切断继电器的工作原理

当蓄电池电压高于发电机电压而出现反流时，反流将在串联绕组中产生磁场，此磁场与并联绕组磁场相反，抵消了线圈的吸力。当反流达到一定值时，电磁力将不足以克服弹簧弹力，从而使触点断开，使发电机处于离线状态，避免了发电机的损坏。

②反流断路器。发电机正常供电时，其输出电压高于飞机电瓶电压，给电瓶充电；当某些原因造成发电机电压低于电瓶电压时，电瓶电流就会倒流入发电机，使发电机变成电动机。这样会导致电瓶电能很短的时间内耗尽，失去应急电源的功

能, 给飞行安全带来隐患, 这是绝对不允许的。因此, 直流电源系统都装有反流断路器, 当出现反流时, 及时切断发电机输出端与电瓶的联系。图 1-24 为反流断路器工作原理图。

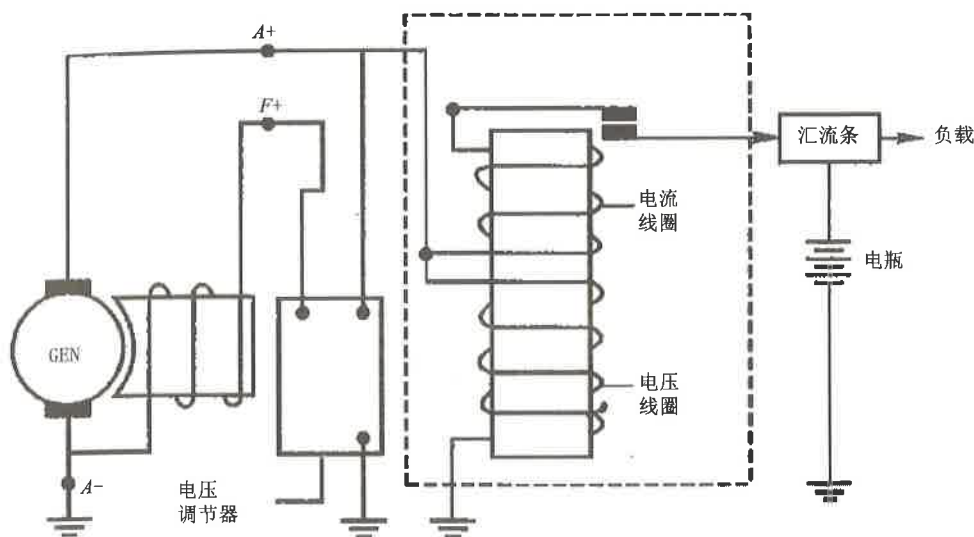


图 1-24 反流断路器工作原理图

反流断路器主要由电磁铁和一个触点组成。电磁铁上绕有一个电压线圈和一个电流线圈。当发电机电压高于电瓶电压时, 电压线圈产生的电磁拉力使触点合上, 这时电流流过电流线圈, 电流线圈产生的电磁力与电压线圈产生的拉力方向相同, 使触点更紧密地闭合; 当发电机电压低于电瓶电压时, 电流反向流动, 这时电流线圈所产生的电磁力与电压线圈的拉力相反, 使电磁拉力减小, 触点在弹簧作用下分开, 这样就断开了发电机与电瓶的联系。

目前以低压直流为主电源的飞机通常采用在发电机输出端串联功率二极管的方法来限制反流, 有效减小了系统质量。

### (3) 过电压与过励磁保护

由于发电机的励磁电路或调压器故障而使发电机电压超过稳态电压值极限, 称为过电压。过电压产生的原因包括励磁电路或调压器故障、发电机减磁或灭磁、发电机脱离电网等。对于并联运行的系统而言, 过电压的发电机将带更多的负载, 导致其电压不一定超出极限范围, 所以不能通过检测调压点的电压来判断发电机过电压故障, 一般通过检测发电机励磁绕组的电压来判断。

发电机的过电压有两种情况, 一种是持续过电压, 通常由故障引起, 持续时间较长, 危害大; 另一种是瞬时过电压, 持续时间极短, 通常危害较小。由于瞬时过电压是调压过程中的正常现象, 所以过电压保护装置不能在出现过电压时立即动作,

而应该延迟一段时间后再动作，并且过电压值越高，延迟时间应该越短，即应该具有反延时的特性。过电压保护的方法很多，采用过压继电器是一种简单的方案，此外还有集成电路制成的过电压保护器等。

#### (4) 短路及过载保护

飞机直流电网可能由于绝缘损坏、接线连接不当等原因引起短路。短路通常有两种情况：

- ①金属熔接性短路。短路电阻小，电流大，短路时间长。
  - ②间歇性短路。短路点由金属飞溅或振动引起金属导体连续碰撞。
- 短路及过载的保护通常采用熔断器及断路器实现。

## 1.5 交流电源系统

### 1.5.1 航空交流电源系统的分类

航空交流电源系统主要有三种形式：变速变频交流电源系统、恒速恒频交流电源系统和变速恒频交流电源系统。

#### 1. 变速变频交流电源系统

在变速变频交流电源系统中，交流发电机是由发动机通过减速器直接驱动的，如图 1-25 所示。这种电源输出的交流电的频率随发动机转速的变化而变化。



图 1-25 变速变频电源系统方框图

这种系统不需要恒速传动装置，结构简单，可靠性高，维护工作量小，重量轻。不足之处是：由于频率的变化，对电机类用电设备的要求随之提高。需要恒频交流电的场合，由逆变器提供。随着飞机用电量的增加，变速变频系统将成为飞机电源的主要形式，目前已被空客 380 等飞机采用。

变速变频电源系统比较适合装有涡轮螺旋桨发动机的飞机或直升机，因为涡轮螺旋桨发动机转速变化范围小，交流电的频率变化在 400 ~ 600Hz 范围内。

#### 2. 恒速恒频交流电源系统

在恒速恒频交流电源系统中，发电机是通过恒速传动装置驱动的，因此发电机输出恒频交流电，如图 1-26 所示。