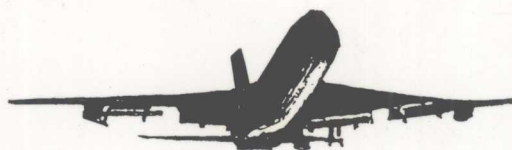


民航飞机电气及通信系统

朱新宇 胡 焱 编



西南交通大学出版社

民航飞机电气及通信系统

朱新宇 胡焱 编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 提 要

本书介绍了民航飞机电气、通信系统的基本概念、基本原理与特性。第一篇介绍飞机电气系统, 主要内容包括: 蓄电池、直流发电机、直流供电的控制与保护、恒速传动装置、交流发电机的控制与保护、变速恒频交流电及不中断供电的实现、电能变换装置、常见电路装置及用电设备, 最后介绍了电磁干扰的概念及防护措施。第二篇介绍了飞机通信系统, 主要介绍了无线电波传输的基本知识、通信机的收发原理、卫星通信的实现过程以及典型的飞机通信系统。第三篇介绍了典型民用航空飞机的供电系统。书中每章后附有思考练习题, 便于学习使用。书中打*号的章节可以根据实际情况选学。

本书为飞行技术专业的专用教材, 也可以作为民用航空相关专业学生的选修课用书, 或供航空爱好者、民用航空管理及航空技术实施部门的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

民航飞机电气及通信系统/朱新宇, 胡焱编. —成都:
西南交通大学出版社, 2002.9 (2005.5 重印)
ISBN 7-81057-671-2

I. 民... II. ①朱...②胡... III. ①民用飞机-航
空电气设备②民用飞机-航空通信-通信系统
IV. V24

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第055257号

民航飞机电气及通信系统

朱新宇 胡焱 编

*

责任编辑 张华敏

封面设计 朱开文

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段111号 邮政编码: 610031 发行科电话: 87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbsxx@swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张: 11.625

字数: 288千字 印数: 1501—2360册

2002年9月第1版 2005年5月第2次印刷

ISBN 7-81057-671-2/V · 008

定价: 17.80元

图书如有印装问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

本书是根据飞行技术专业培养目标及培养全面素质飞行人才的要求编写的。为了便于学生学习使用，将原有《飞机电气系统》和《无线电通信》两书合二为一，对胡福兴编写的《飞机电气系统》和苏新宇编写的《无线电通信》进行了全面改编，在此基础上编写了《民航飞机电气及通信系统》。

在编写过程中，结合原书在使用过程中的反馈信息，吸取各任课教师多年的教学经验，紧密联系民用飞机电气系统、通信系统的应用实际和发展趋势，对原有内容进行了较大幅度的修改与补充，删去了已经较少使用或不用的设备内容，增加了不中断供电、电磁干扰及其抑制、变速恒频交流电、蓄电池充电器、电子变压整流器等新内容，对卫星通信、机载通信设备进行了全面的更新。本书力求内容充实，覆盖面广，充分反映当前的民航实际，便于学生学习。

本书分为三篇，第一篇为飞机电气系统，主要介绍了飞机直流电源、交流电源及其调压、控制保护设备的基本原理和基础理论知识，对常用的飞机电路设备、电能变换设备以及飞机电源的并联供电、不中断供电、输配电知识也进行了较为详尽的阐述。此外，还简要介绍了飞机电力传动装置、发动机电力起动方法、灯光照明及警告设备。第二篇为飞机通信的基本知识，重点介绍了通信机的收发原理和常用通信设备的使用方法，还介绍了无线电波的传输、干扰及抑制措施等内容。第三篇介绍了典型的民航飞机供电系统系统，提供了一个民用航空飞机供电系统的概貌，便于学生以后进行机型改装。

本书由民航飞行学院朱新宇担任主编，第一篇和第三篇由朱新宇编写，第二篇由胡焱编写。何晓薇副教授和何建老师审阅了全书，并提出了宝贵的意见。本书编写过程中得到了飞行学院交通分院、教务处、飞行技术系领导的大力支持，他们为提高教材质量付出了大量心血；电子电气教研室的全体教师对全书内容进行了初审，并提出了中肯的建议，在此一并感谢。

由于资料 and 水平所限，书中缺点和错误在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

2002年5月

目 录

第一章 飞机电气系统概述	1
第一节 飞机供电系统的功用和构成	1
第二节 用电设备	4
第三节 未来先进飞机的电源系统	5
思考练习题	7
第二章 飞机直流供电系统	8
第一节 航空蓄电池	8
第二节 飞机直流发电机	12
第三节 直流发电机的电压调节	17
第四节 直流电源的控制与保护	20
第五节 直流电源的并联供电	22
思考练习题	26
第三章 飞机交流供电系统	27
第一节 概 述	27
第二节 飞机无刷交流发电机	30
第三节 恒速恒频交流电源	32
第四节 变速恒频交流电源	36
第五节 交流发电机电压调节	37
第六节 交流发电机的并联运行	40
第七节 飞机交流电源的控制关系	43
第八节 飞机交流发电机的故障及其保护	50
第九节 现代飞机的控制保护器	54
思考练习题	57
第四章 飞机电能变换设备	58
第一节 旋转变流机	58
第二节 静止变流器	59
第三节 变压整流器 (TRU)	61
* 第四节 蓄电池充电器	64
思考练习题	67
第五章 电路装置及配电	68
第一节 导线及其连接装置	68
第二节 电路控制装置	70
第三节 电路保护装置	77
第四节 飞机配电方式	79
第五节 飞机电气综合控制系统	81
思考练习题	83

第六章 飞机用电设备	84
第一节 电动机械	84
第二节 飞机发动机的电力起动设备	85
第三节 灯光照明设备	90
第四节 测量仪表与告警指示设备	93
思考练习题	97
第七章 电磁干扰及防护	98
第一节 电磁干扰的危害	98
* 第二节 电磁兼容及干扰的传播	101
第三节 电磁干扰的控制	104
* 第四节 静电及防护技术	110
第五节 典型飞机系统的干扰源分析	117
思考练习题	119
第八章 通信的基本知识	120
第一节 通信概述	120
第二节 无线电波的传播规律	125
第三节 各波段无线电波的传播特点	133
思考练习题	137
第九章 无线电收/发原理	138
第一节 无线电收/发原理概述	138
第二节 幅度调制	142
第三节 卫星通信	146
思考练习题	154
第十章 典型民航飞机通信系统	155
第一节 音频选择系统 (ASS)	155
第二节 高频通信系统 (HF COMM)	157
第三节 甚高频通信系统 (VHF COMM)	159
第四节 选择呼叫系统 (SEL CAL)	159
第五节 座舱话音记录器 (CVR)	160
第六节 内话系统 (IVT)	161
第七节 旅客广播系统 (PA)	162
思考练习题	163
* 第十一章 典型民航飞机供电系统	164
第一节 TB-20 飞机供电系统	164
第二节 新舟-60 飞机供电系统	165
第三节 B737-300 飞机供电系统	168
第四节 B777-200 飞机供电系统	172
第五节 B747-400 飞机供电系统	175
附录 1	177
附录 2	179
参考文献	180

第一章 飞机电气系统概述

第一节 飞机供电系统的功用和构成

一、电源系统的组成和功用

飞机上电能产生、调节、控制、变换和传输分配系统统称为飞机供电系统，包括从电能产生一直到用电设备端的部分，可分为飞机电源系统和飞机输配电系统两部分。

飞机电源系统是飞机上电能产生、调节、控制和电能变换部分的总称。通常飞机电源系统由主电源、辅助电源、应急电源、二次电源和地面电源及其联接与监控部分组成。主电源由航空发动机直接或间接传动的发电机及其变换调节、控制保护设备等构成，在飞机正常飞行时向全机提供足够数量和一定质量的电能，满足用电设备的需要。辅助电源是飞机发动机未工作或部分主电源发生故障时向飞机供电的电源。应急电源是主电源故障后向飞机飞行必须的用电设备供电的电源，由于应急电源容量小或储能有限，此时飞机必须在就近机场着陆。二次电源由电能变换器构成，用于将主电源产生的一种形式的电能转变为另一种或多种形式的电能，以适应不同用电设备的需要。飞机停于机场时，最好由机场的地面电源供电，地面电源通过电缆和机身的插头插座向飞机供电，以供在地面通电检查机上用电设备和起动发动机。

飞机电源系统是指由飞机电源到电源汇流条间的部分，飞机输配电系统则是指由电源汇流条到用电设备端的部分。飞机输配电系统又称飞机电网，由电线、配电装置和保护元件等构成。

配电方式有集中式、分散式和混合式三种。集中式配电系统设有中心配电装置，所有电源的电能都送到此配电装置，所有用电设备也通过电线接到配电装置，所以飞机上的电源都处于并联工作状态，这种配电方式仅适合于小型飞机。分散式配电是各电源产生的电能送到各自的配电装置，并通过它向就近的用电设备供电，一旦某电源故障，则原由它供电的设备转由正常电源供电，这种配电方式比较简单可靠。混合配电方式设有多个用电设备汇流条，分布于用电设备附近，称为二次配电装置，所有电源的电能仍集中在中心配电装置，二次配电装置由中心配电装置供电，这样可以使中心配电装置简化。

配电系统的控制方式有：常规式、遥控式和固态式。常规控制方式的电源线 and 用电设备输电线都集中于座舱内的中心配电装置，由飞行员控制电源和用电设备电路的接通或断开。遥控式的配电汇流条设于用电设备附近，飞行员在座舱内通过继电器或接触器接通或断开电路，故座舱内只有控制线，没有供电线。固态配电系统应用微型计算机和分时多路

传输总线来控制电源和用电设备的通或断，既有遥控式的特点，又简化了控制线，减轻了飞行人员的负担，降低了飞机电网的重量，提高了电网的可靠性和维修性。

此外，根据电压分类时，有低压和高压（60 V 以上）电网两种。如根据电流类型来划分，则有直流电网和交流电网。就交流电网来说，又有单相和三相电网之分。就电网的线制来划分，则有单线、双线、三线、四线等几种。根据电网的用途来划分，则有主电网（即供电网）、配电网、辅助电网和应急电网等。

二、正常和非正常供电

在飞机的飞行准备、起飞爬升、着陆和停机等各个阶段，要对飞机进行操纵和完成执行飞行任务所需的工作，若此时供电系统能连续地完成其全部功能性工作，称为飞机正常供电状态。该工作状态中有用电设备的转换、发动机转速的改变、汇流条的切换和同步，多发电机系统的并联或解除并联等。

供电系统的非正常工作状态是一种意外的短时失控状态，它的发生是不可控制的，发生的时刻也是不可精确预测的，但它恢复到正常工作状态是一个可控制的动作。例如配电线短路，一旦发生短路则短路处电流迅速增大，电网电压急剧降低，从而使电网中别的用电设备可能不能正常工作，但因随后该电路中的保护装置动作，切除了短路，系统又恢复正常。又如，在不并联运行的多发电系统中，若其中一台发电机发生故障，该发电机的控制器将它的励磁电路切断，并将发电机输出的馈电线中的接触器断开，于是由该电机供电的所有用电设备都失去了电能供应，但随后供电系统将这些用电设备转换到正常工作的发电通道，则它们又恢复了正常工作。

若飞行中飞机主电源不能提供足够的或符合规定要求的电功率，要求使用应急电源的工作状态，称为供电系统的应急工作。由于应急电源容量小，只能向飞行和降落所必须的设备供电，且供电时间有限。

由地面电源向飞机电网供电使飞机用电设备工作的状态，称为地面电源工作状态。

民用飞机通常采用两台或两台以上的发动机，每台发动机上装一台或两台发电机，以提高主电源可靠性。为了提高发电和配电系统的可靠性，在一个主发通道故障时，由该通道供电的设备应转接到其他正常发电通道，以实现主电源的备份。但是，即使是多发动机的飞机，多套主电源在运行过程中仍有可能完全失效，因此应急电源是必须的。

应急电源有两种类型：应急蓄电池和应急发电机。前者因贮能有限，属于短期供电应急电源，一般规定应急供电时间为 30 min；后者属于长期供电电源。蓄电池供电时，供电电压将随供电时间的增加而降低，甚至低到 18 V ~ 20 V，应急设备必须在这样低的电压下正常工作。

对于在国内航线使用的飞机，应急供电时可到就近机场或备降机场着陆，且所用通信和着陆仪表设备用电量不大，应急电源容量可以小些。对于跨洋飞行的飞机，在到达任一机场前，必须进行长时间飞行，飞机上除有国内飞行用设备外，还有短波通信和无线电测向器等用电设备，但用增大蓄电池容量来满足应急供电要求是不现实的，宜采用应急发电机。

应急电源必须具有独立性，它应不依赖于主电源或别的电源而能自行工作。

三、电源容量的选取

飞机电源系统的容量是指主电源的容量，等于飞机上主发电系统的台数与单台发电系

统额定容量的乘积。直流电源容量单位为千瓦 (kW)，交流电源为千伏安 (kVA)。

发电系统的额定容量是在电源质量指标符合技术要求的长期连续工作时的最大容量。地面工作时，因只能靠内装风扇冷却，允许输出功率较小。在高空时，尽管进气温度降低了，但大气密度也同时降低，散热效果变差。低速飞行，进风量小；超音速后进气温度因绝热压缩而急剧升高，也使发电机最大允许容量降低。变速工作的直流发电机低速时的功率极限受励磁绕组热的限制，高速时受摩擦损耗和换向条件的限制。喷油冷却交流发电机的最大允许工作容量受飞行高度及速度的影响较小，但变速交流发电机的低速最大允许工作容量也受励磁过大的限制。

电源系统的容量不仅取决于发电机和变换器（对于 VSCF 电源），还与从电源到电源汇流条的主馈线容量有关，馈电线的容量应等于电源的额定容量。

飞机低压直流发电机的额定容量有 3、6、9、12 和 18 kW 数种。交流电源的额定容量有 15、20、30、40、60、90、120 和 150 kVA 等数种。

飞机交流发电机允许在 150% 额定负载下工作两分钟，在 200% 额定负载下工作 5 s。VSCF 电源发电通道的过载能力要低些。

在多发电机电源系统中，一个发电通道出现故障，不应卸去用电设备，仅在两个或两个以上发电通道故障时才需要卸去次要用电设备。在没有负载自动管理的飞机上，卸载工作由飞行员完成，由于飞行员操作的滞后，这种情况下往往导致电源过载。2 min 过载要求是为了满足电源故障时人工监控负载的需要和短时工作用电设备的需要；5 s 过载是为了满足电动机起动和配电路导线接地短路排除故障的需要。

飞机电源的容量取决于用电设备的用电量大小，如果电源还有起动航空发动机的功能，则还应满足起动的需求。飞机用电设备决定于飞机的类型及其任务，大型飞机的用电设备比小飞机多得多，而旅客机的设备与货运机又有很大的不同。同一飞机在不同飞行阶段，使用的用电设备也不同。通常民用飞机的飞行阶段有：飞行前准备、滑行、起飞与爬升、巡航、下滑与着陆及飞行后检查等。图 1-1 为飞机电源地面使用情况示意图。

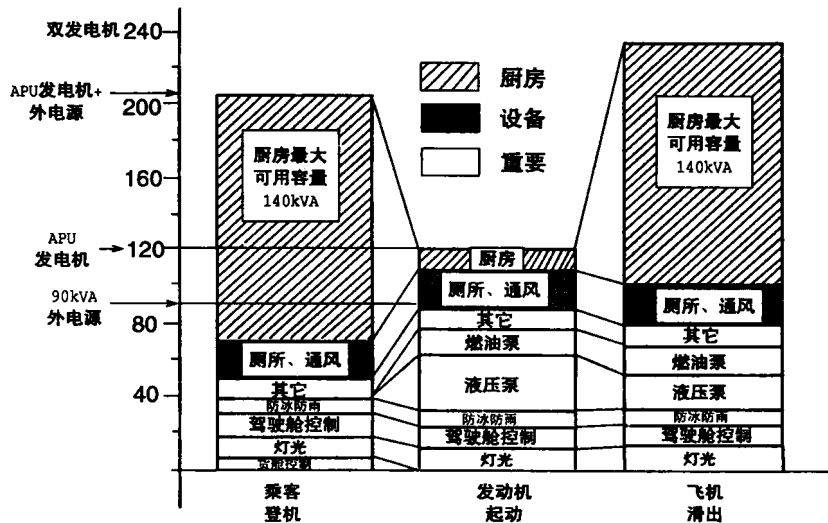


图 1-1 飞机电源地面使用情况示意图

第二节 用电设备

广义地说，飞机电气系统是飞机供电系统和飞机用电设备的总称。狭义的飞机电气系统是指飞机供电系统、电气照明与灯光信号系统、电气防冰和加温系统、发动机起动和电点火系统、飞机电力传动系统的总和。

飞机用电设备按其重要性可分为三类：① 飞行关键设备，如仪表、飞行控制系统、仪表着陆系统和通信电台等，它们是确保飞机安全返航或就近降落（包括维持可操纵飞行）所必需的最低限度的用电设备，它们一旦供电中断，将威胁飞机和机上人员的安全，为此，必须将其配置在重要负载汇流条上。正常供电期间由主电源供电，当主电源失效转入应急供电时，应能自动或人工地转为由应急电源供电。② 任务关键设备是完成飞行任务所必需的设备，如民用飞机中的座舱增压和空调设备等。在飞机应急供电时，为确保重要负载得到供电，将视故障的严重程度，切除部分乃至全部任务关键设备。③ 一般用电设备，如座舱照明和厨房炊具等，它们不能正常工作，并不危及飞行安全，故当主电源发生局部故障而提供的功率有限时，为确保对重要负载和主要负载的供电，根据故障的严重程度，将首先切除部分以至全部一般用电设备。

飞机用电设备类型很多，对供电也有不同的要求，下面进行简单的论述。

1. 用电设备的供电频率特性

有些飞机用电设备必须使用直流电，有的必须使用交流电，有的则二者均可。有的在使用交流电时必须使用恒频交流电，有的也可以使用变频交流电。直流电磁铁、接触器和继电器、直流电动机只能使用直流电。集成电路、微机芯片不仅应供给直流电，而且要求直流电压较稳定。变压器、磁放大器和交流电动机只能供交流电，通常希望供给频率较稳定的交流电。白炽灯和电加温设备既可供交流电，也可供给直流电，它们对交流电的频率也没有要求，可由变频交流电源供电。

2. 用电设备的起动特性

白炽灯点燃前后的灯丝电阻相差数十倍，故接通电源时的电流要比正常工作电流大得多，但因灯丝的热惯性很小，故一般不计及初始接通电源的过程。电动机则不同，它的起动电流大，起动时间长，有明显的起动过程。若飞机供电系统发生故障，导致供电短暂中断，从而使电网中的电动机停转，则当一旦恢复供电时，这些电机同时起动，将会给电网带来很大的冲击。实际上，任何用电设备都有一个从起动到稳态的工作过程，但多数设备的这个过程都较短，一般可以忽略不计。

3. 用电设备的输入电压特性

不同用电设备的工作电压是不同的。集成电路、计算机芯片的工作电压为 $\pm 15\text{ V}$ 和 5 V ，并可以进一步减小；飞机用白炽灯工作电压有很多种，一般功率越小工作电压越低；但雷达发射机的功率管工作电压则达数千伏。多数交流电动机的额定电压为 $115\text{ V}/200\text{ V}$ ，直流电动机的额定电压为 27 V 或 270 V 。电源电压变化范围对用电设备的影响很大。

供电电压的变化有两种，稳态电压变化和瞬态电压变化。稳态电压不稳定是由于飞机使用过程中工作环境变化、发电机转速或负载大小变化所造成的，是一种缓慢的变化。瞬态电压变化是由供电系统突加或突卸负荷、电源或汇流条切换或系统故障引起的短时电压

变化,持续时间从几个毫秒至上百毫秒的电压瞬变常称为电压浪涌,持续时间 10 μ s 左右的电压瞬变称为电压尖峰。集成电路、微机芯片、电子元件对电压的稳态和瞬态变化很敏感,电压变化过大会导致永久性损坏。

4. 用电设备对供电系统的影响

用电设备运行的数量和功率,用电设备的投入与切除,直接影响到供电系统的工作,对供电电压大小、频率、电压波形和供电系统的发热状态、机械应力、电应力等都有影响。用电设备性质的不同,影响的程度也不同。对于线性负载,总的影晌较小,但是在三相系统中,三相负载配置的不对称,会导致三相电压的不平衡和使三相电机损耗加大。电动机是一种特殊用电设备,它的起动特性和稳态运行特性差别很大,直接起动时起动电流很大且有较低的功率因数,对电网电压电流和频率都有影响。直流电机的特性和工作状态直接与供电电压有关,当电压大于电动势时,为电动机工作状态;当电压约等于电动势时,电机空载工作,基本上不吸取电源功率;当电压小于电动势时,为发电机工作状态,电机向电网提供功率,即贮存于电机内的机械能向电能转化。故大型电动机在电网突然短路、电网电压降低时,工作于发电机状态,也向短路点输送电流。

电子设备增多,使交流供电系统的波形发生畸变。因为电子设备内部电源首先将输入 400 Hz 交流电通过二极管整流电路整流成直流电,经电容滤波后送稳压电路,整流滤波电路是一种典型非线性电路,使交流电源输入电流中出现高次谐波,该高次谐波在电源内阻抗上产生高次电压降,从而使电源电压波形畸变,损耗加大,并对电网上其他用电设备产生不良影响。通信电台发射机、雷达和电子对抗设备发射机往往还是一种脉冲工作负载,发射期间消耗功率很大,不发射时则较小,从而使供电电源长期处于瞬变状态,使供电质量降低。

供电系统分成正常、非正常和应急工作三种状态。在供电系统正常时,一般用电设备应具有设计要求的全部技术性能,除非有专门的规定,在供电特性的一定范围内设备的某些性能可以降低。在电源或汇流条转换出现供电中断时,对用电设备的性能不作要求,但恢复供电后,设备性能应全部恢复。在供电系统非正常期间,除非另有规定,一般对设备性能不作要求,但必须保证安全,一旦供电恢复正常,用电设备也应全部恢复其特性。应急供电时,由于应急电源的电气特性一般具有主电源的特性,应急状态工作的电气设备必须在这种条件下仍具有规定的特性,并保证安全可靠。

第三节 未来先进飞机的电源系统

现代飞机二次能源有液压、气压和电能等,每种辅助能源包括能量的产生、转换、调节、控制、保护、传输和分配等环节,是一个完整的系统。这些系统都以发动机为原动力,其中,液压和供电系统均遍布整个飞机。多种二次能源的使用,使得结构布局上显得重复和复杂,因此,使用一种二次能源——电源将是一种趋势。

现代飞机主电源主要有低压直流电源、恒频交流电源和低压直流电源与交流电源构成的混合电源三种。低压直流电源的调节点电压为 28.5 V,由于低压直流电源容量受到限制、功率变换困难,因而随着机载设备用电量的增加,发展了交流电源系统。早期的交流发电

机直接由发动机传动，输出变频交流电，由于变频交流电源不适应多数负载需要和不能并联，没有得到进一步的发展。自 1946 年恒速传动装置发明以来，115 V、400 Hz 恒频交流电源获得了迅速的发展，成为现代飞机的主流，但不能适应未来对电源容量的要求。波音 747-400 使用了 4 台 75/90 kVA 组合电源，还有两台 60 kVA 辅助电源；由波音 747 改装的 E-4B 空中指挥机采用了 8 台 150 kVA 组合电源，即使这样也不能满足用电量成倍增加的要求。

随着航空和电工技术的发展，20 世纪 70 年代初出现了全电飞机（AEA）的概念，AEA 要求实现所有机载设备和操纵系统的电气化，但这是一个逐渐发展的过程，在一定时期内，以电能部分地取代液压能、气压能是比较现实的，因而波音公司在 20 世纪 80 年代末提出了多电飞机（MEA）的计划。

无论是过渡性的 MEA，还是最终将要实现的 AEA，其电源系统都将具有以下特点：① 电源容量大，现代高性能飞机的电源系统已达一百千伏安以上；② 多余度不中断供电；③ 电源系统应能提供多种形式的电能，电能的多样性可以简化用电设备结构，减小其体积重量；④ 电源系统应具有计算机检测、监控、管理和保护系统，并接受飞机自动管理中心的管理。

在现在运营中的民航客机中，采用较多的恒频交流电源不适用于多电飞机或全电飞机发展的需要，主要是由于：① 恒频交流电源的效率较低，不适应大容量的需要，通常 CSCF 电源效率在 70% 以下，VSCF 电源效率能达到 80% 以上，但仍较低；② 115 V 三相四线制交流电网限制了进一步提高电源系统的容量，随着电源容量的增长，馈电线的重量又成为问题；③ 交流电源只有在满足一定条件时才能投入并联工作，交流电网实现不间断供电也比较复杂；④ 现代飞机上机载设备形式日趋多样化，恒频交流电并不一定是设备所需的理想电源。

虽然高压直流电源系统只在美国空军的 F-22 飞机上得以采用，并未应用于民航客机。但研究表明，高压直流电源具有较大的发展前途，它主要具有以下特点：① 效率较高，可以达到 90% 左右，电能质量较高；② 容易实现不间断供电，可靠性较高；③ 配电网重量较轻；④ 同交流电源相比，高压直流电源可以减小机电作动器、雷达、开关电源等内部的交流/直流变换环节，从而可以减小设备的体积重量。

在总结高压直流和恒频交流电源的研究成果的基础上，美国胜德斯特兰公司分析了未来飞机电气负载的特性，针对 MEA 的需要，提出了 270 V 直流/115 V 交流混合电源系统方案，它具有效率高、可靠性高、容错能力强、重量轻、价格低、研制风险小等特点。无刷发电机、高性能电能变换器、固态功率控制器和固态配电技术三项关键技术，均已得到了部分解决或取得了突破，在不远的将来，高压直流混合供电系统将成为先进飞机的首选电源系统。

270V 直流/115 V 交流电源系统的组成如图 1-2 所示，主要由无刷交流发电机、整流器、逆变器、固态功率控制器和发电机/系统控制保护器等构成。由飞机发动机直接传动的无刷交流发电机输出恒压变频交流电，经整流后得到恒定的直流电，该直流电经两条汇流条向用电设备供电，一条提供 270 V 直流电，另一条经过逆变器转换后提供恒频交流电，重要用电设备可以经 28 V 直流汇流条通过静止变流器、整流器等实现冗余供电，28 V 汇流条由机载应急电源（蓄电池）、直流变换器和变压整流器等实现多余度供电，发电机/系统控制保护器对系统进行控制和保护，实现电压调节，完成发电机的差动、过/欠压、欠速、过流、缺相，直流汇流条的纹波分量、过/欠压、故过流，交流汇流条的过/欠压、过/欠频、谐波含量、直流分量、差动、缺相等保护，并通过通信总线（最新采用 ARINC629）与电气负载管理中心（ELMC）和飞机自动管理中心连接。

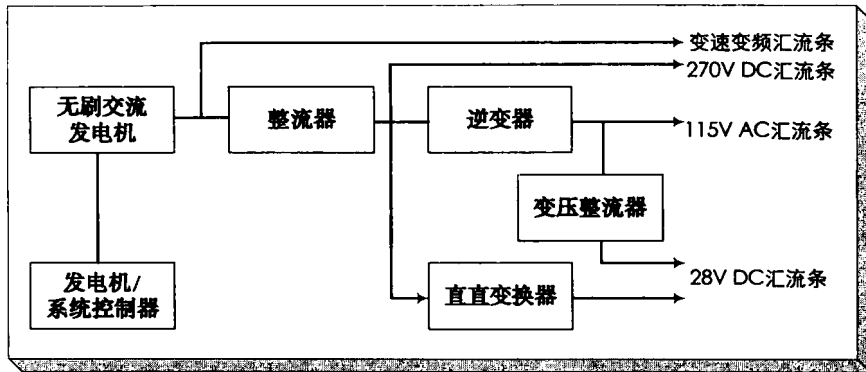


图 1-2 混合电源系统单通道构成

从结构上看，该系统可以提供多种形式的电能：① 变频交流电可直接用于加热、除雾、除冰等对电压要求不高的设备；② 高压直流汇流条可以为机电动作器、雷达、通信导航设备等供电；③ 恒频交流电为电动机、变压器等交流负载供电。这种混合电源系统适应负载发展的需要，具有继承性好、能实现余度供电的特点。

思考练习题

1-1 飞机电源系统由那几部分组成？各有何功用？

1-2 高压直流供电系统有何优点？

第二章 飞机直流供电系统

第一节 航空蓄电池

蓄电池 (storage battery) 是一种化学电源, 是化学能与电能相互转换的装置: 充电时, 它把电能转为化学能储存起来; 放电时, 它又把化学能转为电能向飞机用电设备供电。航空蓄电池有飞机蓄电池和地面蓄电池两种。飞机蓄电池是飞机上的应急电源和辅助电源, 当飞机发电机不能供电时, 向维持飞行所必需的飞行关键设备供电, 必要时也可作为起动飞机发动机的起动电源。飞机蓄电池按电解质的性质不同, 又分为酸性蓄电池和碱性蓄电池两类。常用的酸性蓄电池有铅蓄电池, 其电解质是硫酸; 常用的碱性蓄电池有镉镍蓄电池和锌银蓄电池, 其电解质是氢氧化钾。

一、铅蓄电池

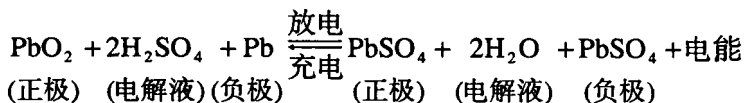
(一) 铅蓄电池的基本工作原理

铅蓄电池的正极板为二氧化铅板 (PbO_2), 负极板为海绵状铅 (Pb), 正负极板间隔板为木质或其他能通过离子的物质构成, 极板放于装有稀硫酸的容器中。把正负极板浸入稀硫酸 ($\text{PbSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$) 中, 就组成一个单体蓄电池, 由于化学作用, 两板之间会有电位差 (即电动势) 产生。实际测量说明: 二氧化铅板的电位高, 称为正极板; 铅板的电位低, 称为负极板。正、负极板之间的电位差约为 2.1 V。

放电时, 把蓄电池的正、负极通过负载而联接起来, 在电动势的作用下, 电路中就会有电流流过, 如图 2-1 所示。在外电路中, 电子流不断地从负极流向正极; 在电解液中, 则有正、负离子分别流向负、正电极, 构成了离子电流。由于电流的流通, 在正、负极板上引起一定的化学反应: 正负极板上的活性物质 (二氧化铅和铅) 都要转化为硫酸铅, 而电解液中的硫酸则要转化生成水, 硫酸的浓度不断降低。

充电时, 充电电源的正极要与蓄电池正极相接, 负极要和负极相接, 而且, 电源电压要大于蓄电池的电动势。此时, 电流的方向和放电时相反, 如图 2-2 所示。结果, 在正、负极板上引起的化学反应正好和放电时相反, 硫酸铅和水转变为硫酸和氧化铅, 硫酸浓度不断升高。

充放电时的化学反应方程可写成如下的综合形式:



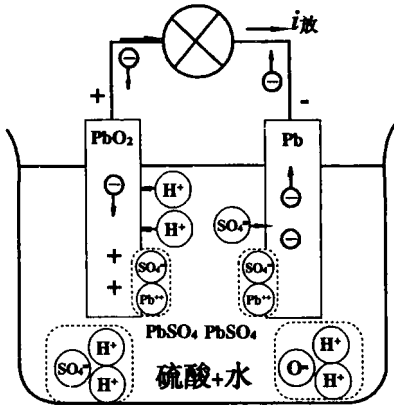


图 2-1 铅蓄电池的放电

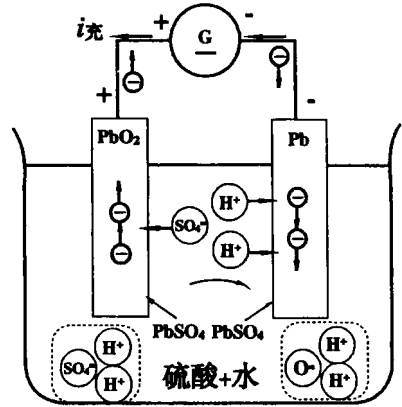


图 2-2 铅蓄电池的充电

(二) 铅蓄电池的主要电气特性

1. 电动势

铅蓄电池的电动势 E 与电解液的密度 d 有关。当温度为 15°C ，电解液密度在 $1.05\text{ g/cm}^3 \sim 1.30\text{ g/cm}^3$ 范围内变化时，单体电池的电动势 E 可用下列经验公式表示：

$$E = 0.84 + d \quad (\text{V})$$

式中 E 为 15°C 时的电解液密度。如 15°C 时， $d = 1.25\text{ g/cm}^3$ ，则 $E = (0.84 + 1.25)\text{V} = 2.09\text{ V}$ ，电动势受温度影响不大，可以忽略。

2. 内电阻

蓄电池的内电阻是衡量电池特性的一个重要参量，它主要包括电解液电阻和电解液与电极间的过渡电阻。电解液电阻在电解液密度为 1.20 g/cm^3 时最低，浓度增加，流动性差，电阻大；浓度减小，电离的分子少，电阻也大。电解液与电极间的过渡电阻决定于它们间的接触情况，因此铅电池内阻与其结构及使用状态有关。增加极板面积和片数，采用薄的隔板以减小两极板间距离，用多孔隔板，可减小电池内阻。

在充、放电过程中，电池电阻不断变化。放电时间越长，电解液越稀，电阻加大，同时，硫酸铅不断增多，硫酸铅本身不导电且密度小，逐渐堵死了极板内的微孔，阻止离子进入极板内部，使内阻加大。放电电流越大，内阻也越大。大放电电流时，电解液来不及进入极板内部，化学反应仅在极板表面进行，从而使极板电解液间过渡电阻加大。低温时，电解液的粘度加大，内阻也增大。航空铅蓄电池的内电阻较小，一般为百分之几到百分之几欧姆。

3. 端电压

蓄电池电压 U 与电动势 E 相差一内电阻压降 IR ，即

在电池充电时：
$$U = E + IR$$

而在放电时：
$$U = E - IR$$

式中， I 为充电或放电时电池内流过的电流。

图 2-3 所示为某型铅蓄电池一个单体电池的放电特性曲线,其中曲线是铅电池的放电特性, 放电电流为额定电流。在刚放电时电动势 E 下降较快, 其后在相当长的时间内电势下降速度很慢且保持不变。放电临近结束时, 电势下降速度又加快, 如果此时切断放电电路, 则电动势又有少许回升。放电初期, 极板附近及孔隙中的电解液浓度迅速下降, 导致电动势迅速下降。当极板孔隙中的硫酸浓度与极板外的浓度达到一定值后, 硫酸的扩散作用也随浓度差的加大而加大, 于是与一定放电电流对应的硫酸消耗速度与扩散速度达到动态平衡。电动势的下降速度决定于容器中电解液的平均消耗速度, 故下降缓慢了。放电快结束时, 硫酸铅将极板孔隙堵死, 孔隙内硫酸迅速下降, 导致电池电动势也迅速下降。断电后, 扩散作用使极板孔隙内的硫酸浓度逐渐与外面的一致, 故电动势有所回升。放电过程中, 电池内阻也随放电量的加大而加大, 故电池端电压的变化比电动势变化量大。

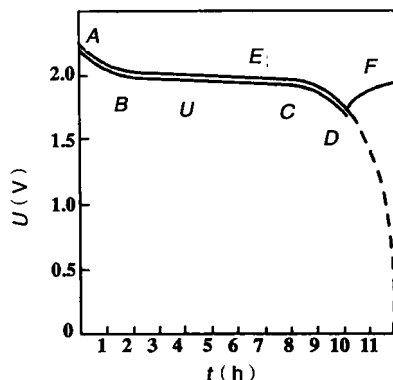


图 2-3 铅蓄电池放电曲线

图 2-4 中曲线为铅电池的充电特性曲线。充电特性中电动势的初始和中间变化情况与放电过程中的变化类似, 但它随时间的增长而增加。充电快结束时, 极板上的活性物质几乎都还原了, 若继续充电, 则因电池电压大于 2.3 V 而导致水的电解, 负极上析出氢, 正极上析出氧。它们附着于电极上, 使电极电位升高, 故电动势很快升高。在水进入电解反应后, 电动势不再增加了。停止充电后, 氢气逸出, 电极电势下降, 电解液渐趋均匀, 电动势回落到某一稳定值。随着充电时间的增长, 电池内阻降低, 故电压增加速度比电动势增长速度慢。但水电解时, 端电压很快增长到 2.6 V, 并保持不变。

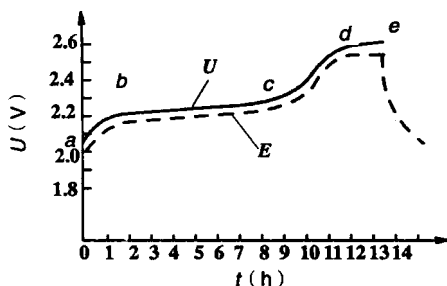


图 2-4 铅蓄电池充电曲线

充足电的单体铅蓄电池电压为 2.13 V ~ 2.17 V。

蓄电池电压与放电流大小有关。大电流放电时, 为使电解液的渗透作用与电解液消耗速度相等, 极板孔隙处电解液与容器中电解液的浓度差加大, 使电动势下降较多; 同时放电反应在极板表面进行, 反应区域大大缩小, 内电阻比小电流放电时大, 故大电流放电电压较低, 见图 2-5。这个曲线的另一个特点是放电电流越大, 允许的放电终止电压也越低。

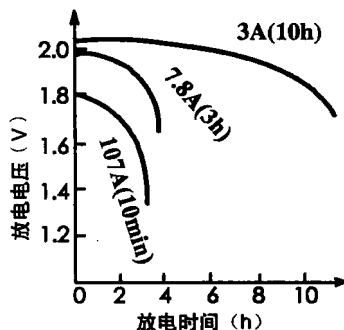


图 2-5 不同放电电流的放电特性

终止电压是指电池放电完毕时允许达到的最低电压, 超过终止电压继续放电, 电池的使用寿命将明显降低。

电池的放电特性和温度有密切关系。温度低时电解液粘度增加, 扩散能力降低。同样的放电电流, 由于低温时电解液浓度差增大, 使电池电动势下降, 同时, 电池内阻加大, 放电电压下降。图 2-6 是不同电解液温度时的放电特性。

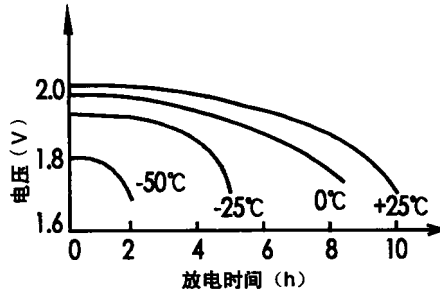


图 2-6 不同温度对放电特性的影响

4. 容量

蓄电池的额定容量是指充足电的蓄电池在 15°C 时，以 10 小时放电电流放电到终止电压时电池放出的总电量。容量的大小用放电电流与放电时间的乘积来表示，单位为安培小时，简称安时 (A·h)。图 2-7 是蓄电池容量与放电电流的关系曲线，放电电流大会使电池的有效容量减小。

放置不用的蓄电池的容量会随存放时间的增长而降低，这是由于自放电造成的。电解液或极板上有金属杂质或电池表面有污垢都会使自放电增加。

按规定，实际容量小于额定容量 75% 的蓄电池不准装在飞机上使用，应及时予以充电或更换。

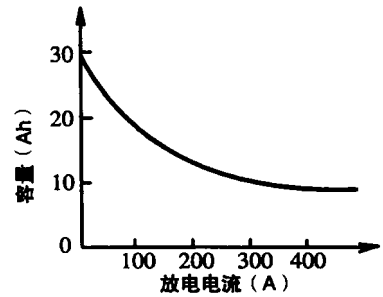


图 2-7 容量与放电电流间的关系曲线

(三) 铅蓄电池使用注意事项

为了充分发挥蓄电池的供电能力，防止故障的产生并延长其使用寿命，我们在使用中必须注意以下几点：

(1) 地面通电不允许使用飞机蓄电池。为了保证飞机有可靠的应急电源，必须保证飞机蓄电池经常贮存足够的电能。所以在地面通电检查使用各种飞机用电设备和起动发动机时，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。这样检查电压的目的有两个：其一是可确信飞机上装有飞机蓄电池且其供电电路良好；其二是可迅速判断蓄电池已处于充足电的状态，且容量在额定容量的 75% 以上。

(3) 禁止用蓄电池进行长时间大电流放电或过量放电。这是因为蓄电池进行大电流放电时，化学反应只能在极板表面进行，极板内层的有效物质由于其外层生成不易导电的硫酸铅结晶而不能完全参加化学反应。因而，放电电流越大，参加化学反应的有效物质越少，蓄电池输出的电量就越小，供电时间就会大大缩短。过量放电时，极板表面会生成大颗粒的硫酸铅结晶，再次充电时，极板上的有效物质不能还原，蓄电池就要报废。

二、镉镍蓄电池

镉镍蓄电池的镉负极为镉粉 (Cd)，另加入约 15% 的铁粉，后者用于防止镉粉结块减小容量；正极板上的活性物质为氢氧化镍 ($\text{Ni}(\text{OH})_2$)，并加入少量的石墨以改善极板的导电性能，石墨并不参加化学反应。电解液是氢氧化钾 (KOH) 的水溶液。碱性电池在使用时必须密封，避免使电解液与空气发生接触产生化学反应，而降低电池的容量。它在充电和放电时的化学反应方程可写成如下的综合表达式：