

# 民航 飞机

CIVIL AIRCRAFT  
ELECTRICAL SYSTEM

## 电气系统



朱新宇 彭卫东 何建  
编



西南交通大学出版社  
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

# 民航飞机电气系统

朱新宇 彭卫东 何建 编

西南交通大学出版社

·成都·

-----  
图书在版编目(CIP)数据

民航飞机电气系统 / 朱新宇, 彭卫东, 何建编. —  
成都: 西南交通大学出版社, 2010.4

ISBN 978-7-5643-0634-2

I. ①民… II. ①朱…②彭…③何… III. ①民用飞机—航空电气设备 IV. ①V242

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第060095号  
-----

民航飞机电气系统

Minhang Feiji Dianqi Xitong

朱新宇 彭卫东 何建 编

责任编辑	高平
特邀编辑	张阅
封面设计	本格设计
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段111号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮 编	610031
网 址	<a href="http://press.swjtu.edu.cn">http://press.swjtu.edu.cn</a>
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	20.875
字 数	520千字
印 数	1—3 000册
版 次	2010年4月第1版
印 次	2010年4月第1次
书 号	ISBN 978-7-5643-0634-2
定 价	28.00元

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

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于不同的国家，其技术资料的使用语言和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

于中国民航飞行学院

2009年5月

# 目 录

绪论 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 .....	6
第一章 电器基本知识 .....	10
第一节 电接触和气体导电的基本理论 .....	10
第二节 磁路基本理论* .....	22
第三节 电磁铁 .....	27
第二章 电路装置 .....	31
第一节 导线及其连接装置 .....	31
第二节 电路控制装置 .....	39
第三节 电路保护装置 .....	54
第三章 航空电机 .....	62
第一节 概述 .....	62
第二节 直流电机的基本结构和工作原理 .....	65
第三节 直流电机的电枢反应和换向 .....	71
第四节 直流发电机运行特性 .....	75
第五节 直流电动机 .....	79
第六节 三相同步交流发电机 .....	81
第七节 三相异步电动机 .....	86
第八节 单相异步电动机 .....	90
第九节 控制电机 .....	93
第十节 变压器 .....	100
第四章 飞机蓄电池 .....	108
第一节 飞机铅酸蓄电池 .....	108
第二节 VRLA 蓄电池 .....	119
第三节 飞机碱性蓄电池 .....	123

<b>第五章 飞机直流供电系统</b> .....	132
第一节 直流发电机的电压调节 .....	132
第二节 直流电源的并联供电 .....	137
第三节 直流电源的控制与保护 .....	141
第四节 旋转变流机及静止变流器 .....	144
第五节 直流发电机在飞机上的使用 .....	147
第六节 飞机直流电网 .....	150
<b>第六章 飞机交流供电系统</b> .....	152
第一节 概述 .....	152
第二节 航空无刷交流发电机 .....	156
第三节 恒速恒频交流电源 .....	159
第四节 变速恒频交流电源 .....	169
第五节 交流发电机电压调节 .....	172
第六节 交流发电机的并联运行 .....	175
第七节 飞机交流电源的控制关系 .....	181
第八节 飞机交流发电机的故障及其保护 .....	188
第九节 现代飞机的控制保护器 .....	193
第十节 变压整流器 .....	196
<b>第七章 发动机电力起动</b> .....	205
第一节 启动系统的主要机件及其工作原理 .....	205
第二节 活塞发动机起动 .....	213
第三节 喷气发动机的起动 .....	216
<b>第八章 飞机电气控制系统</b> .....	220
第一节 飞机电动机械 .....	220
第二节 飞机襟翼收放电路 .....	224
第二节 调整片操纵电路 .....	226
第三节 起落架收放电路 .....	228
第四节 顺桨系统 .....	231
<b>第九章 飞机灭火系统</b> .....	240
第一节 概述 .....	240
第二节 火警探测系统 .....	240
第三节 灭火系统 .....	247
第四节 灭火系统的维护 .....	255

---

<b>第十章 飞机灯光照明及警告信号设备</b> .....	257
第一节 灯光照明设备 .....	257
第二节 警告信号设备 .....	270
<b>第十一章 电磁干扰及防护</b> .....	277
第一节 电磁干扰及其危害 .....	277
第二节 电磁干扰的控制 .....	281
第三节 静电及防护技术 .....	289
第四节 典型飞机系统的电磁干扰源分析 .....	298
<b>第十二章 典型民航飞机供电系统*</b> .....	302
第一节 TB-20 飞机供电系统 .....	302
第二节 新舟-60 飞机供电系统 .....	303
第三节 B737-300 飞机供电系统 .....	307
第四节 B777-200 供电系统 .....	311
第五节 B747-400 供电系统 .....	314
<b>附录 1 电气设备维护规则</b> .....	317
第一节 电气设备一般维护规则 .....	317
第二节 飞机线路的检查与维护规则 .....	318
第三节 地面电源及检查与使用规则 .....	320
<b>附录 2 常用电气符号对照</b> .....	324
<b>参考文献</b> .....	326

## 绪论 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

飞机上电能的产生、调节、控制、变换和传输分配系统统称为飞机供电系统 (Power Supplying System), 包括从电能产生一直到用电设备端的部分, 它又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 (Aircraft Electrical Power System) 是飞机上电能产生、调节、控制和电能变换部分的总称。飞机电源系统通常由主电源、辅助电源、应急电源、二次电源和地面电源及其连接与监控部分组成, 飞机电源系统组成如图 0-1 所示。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, 它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

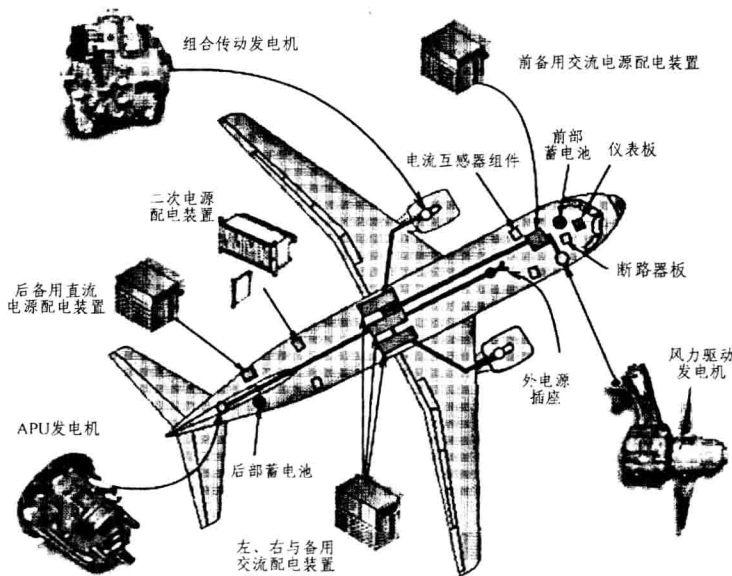


图 0-1 飞机电源系统组成示意图



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。

在飞机输配电系统中，根据配电方式的不同分为集中式、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导线连接到配电装置，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，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和用电设备输电线都集中于座舱内的中心配电装置中，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，没有电力线。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，减小了飞机电网的质量，提高了电网的可靠性和维修性。

此外，根据电压分类，有低压和高压（60 V 以上）电网两种。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、发电机转速的改变、汇流条的切换和同步、多发电机电系统的并联或解除并联等。

供电系统的非正常工作状态则是一种意外的短时失控状态，它的发生是不可控制的，发生的时刻也是无法精确预测的，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，但由于该电路中的保护装置随之动作，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。

应急电源有两种类型,应急蓄电池和应急发电机。前者因储能有限,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 18~20 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,飞机上除安装有国内飞行所需用电设备外,还有短波通信和无线电测向器等用电设备,用电量较大,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,利用液压或气压能发电。

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(kV·A)。

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。发电系统的工作状态受环境因素的影响,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 kW、6 kW、9 kW、12 kW 和 18 kW 等数种;交流电源的额定容量有 15 kV·A、20 kV·A、30 kV·A、40 kV·A、60 kV·A、90 kV·A、120 kV·A 和 150 kV·A 等数种。

飞机交流发电机允许在 150%额定负载下工作 2 min,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。

## 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、发动机启动和电点火系统、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，这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。根据机载设备重要性的不同，供电系统将采用不同的供电余度，如图 0-2 所示。普通负载由主发电机供电；重要负载可由主发电机为主蓄电池供电，而飞行关键负载则可由主发电机、应急发电机、主蓄电池、飞控蓄电池和主发电机及应急发电机的永磁机供电，构成了六余度供电。应急发电机可由发动机引气或液压电动机二余度驱动。

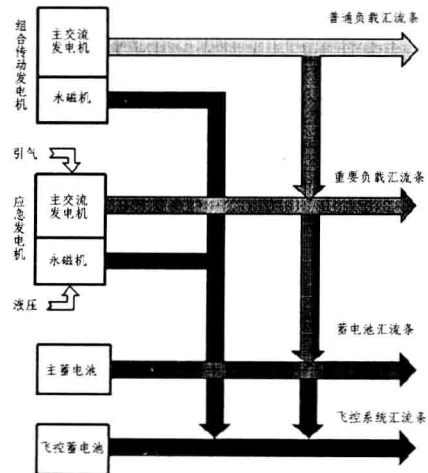


图 0-2 机载设备的余度供电

构成了六余度供电。应急发电机可由发动机引气或液压电动机二余度驱动。

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

飞机用电设备有的必须使用直流电，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

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，且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给交流电，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 $5\text{ V}$ ，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；但雷达发射机功率管的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 $27\text{ V}$ 或 $270\text{ V}$ 。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 $10\text{ }\mu\text{s}$ 左右的电压瞬变称电压尖峰。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，将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 响较小，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；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，即储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 交流电并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弱于主电源的特性,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,使得飞机的结构布局显得重复和复杂,因此,使用同一种二次能源——电源——将是一种趋势。

传统飞机发动机的动力主要满足环控系统、机械系统、液压系统、电力系统等四大系统的需要。由于系统越来越复杂,造成发动机能量利用率很低,于是人们在 20 世纪 70 年代初提出了全电飞机(All Electrical System, AEA)的概念。所谓全电飞机是一种用电力供电系统取代原来的液压、气压和机械系统的飞机,即所有的次级功率均用电的形式分配,AEA 要求实现所有有机载设备和操纵系统的电气化。而多电飞机是全电飞机发展的一个过渡过程,是用电力系统部分取代次级功率系统的飞机。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(More Electrical System, MEA)的计划,其中的一些技术已经应用在了波音公司的 787 和空客的 A380 飞机上, A380 多电飞机的方案如图 0-3 所示。

多电飞机计划是一项按技术可用性分阶段实施的研究、发展和验证计划,将引出三代不同的多电飞机。第一代多电飞机以现有技术发展计划和已安排的验证项目为基础,计划在 1998 年完成。第一代多电飞机具有足够大的发电容量,足以取代飞机上的液压系统,它在供电系统方面应实现的目标是系统可靠性提高 9 倍,系统功率密度提高 1 倍。第二代多电飞机是供电技术大发展的产物,计划在 2005 年完成。在第二代多电飞机上,发电容量将明显大

于一般的飞机用电量，从而有能力为新增的功能（如定向能武器、雷达等）提供电力。预计，第二代多电飞机的供电系统将比第一代多电飞机的轻 43%，且在供电系统方面应实现的目标是系统可靠性提高 14~19 倍，系统功率密度提高 2 倍。第三代多电飞机代表了供电技术的长远设想，其技术可用期为 2012 年。欧盟的“电传动力项目”，美国空军实验室开展的“多电飞机”项目，都取得了许多的研究成果，包括：① 发动机电力系统从发动机的起动发电机产生高压直流电，同时为发动机的燃油系统、滑油系统、助力系统和磁性轴承提供能源；② 飞

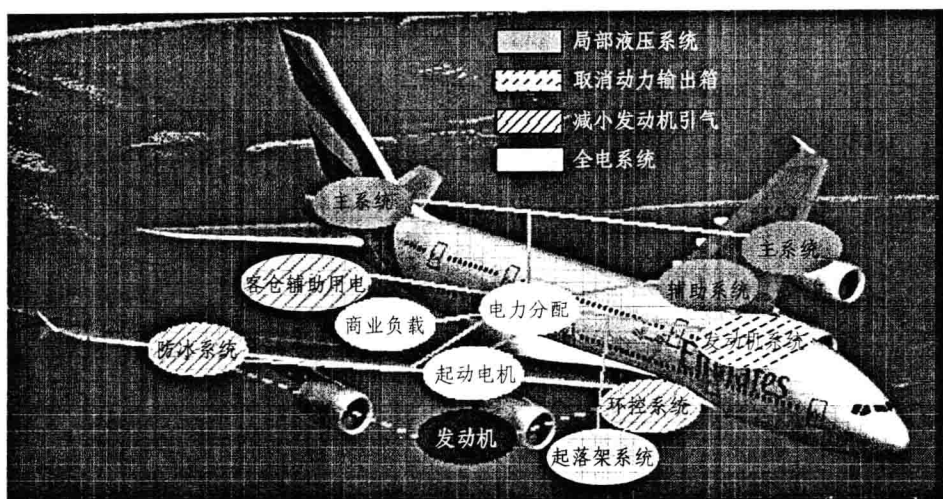


图 0-3 A380 多电飞机方案

机电力系统为机电舵机和混合动力舵机提供能源，用于起落架收放、刹车，喷口控制和平尾控制等；③ 环控系统将采用多电环控技术。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 100 kV·A 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，减小其体积和质量；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；⑤ 节省燃油，使用费用低，性能价格比高。

在目前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，尚未应用于民航客机，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 配电网质量较轻；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和质量。

电源供电体制决定了飞机主电源系统发电设备本身的质量，也决定了配电装置和用电设备的质量，而且对飞机燃料从化学能转化为电能的效率也有很大区别，如高压直流电源系统的效率可以达到 90%，变频电源系统的效率可高达 95%，而变速恒频、恒速恒频、低压直流电源系统的效率分别为 82%~86%、74%~79%和 40%~56%。

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、质量轻、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。

270 V 直流/115 V 交流电源系统的组成如图 0-4 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，经整流后得到电压恒定的直流电，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、缺相保护，直流汇流条的纹波分量、过/欠压、过流保护，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。

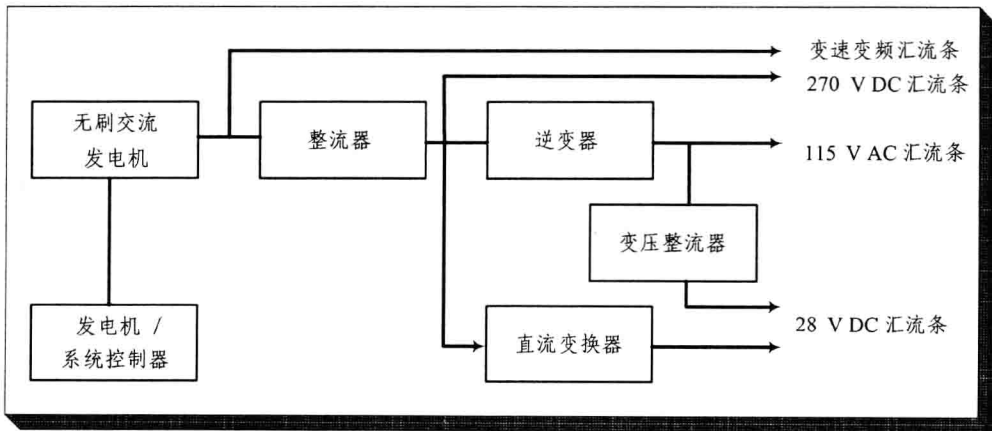


图 0-4 混合电源系统单通道构成

从图 0-4 所示供电系统的结构上看，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作动器、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、能实现冗余供电的特点。

现在以单通道系统功率为 60 kV·A，由两通道组成的恒速恒频系统（IDG）、变速恒频系统（VSCF）、变频系统（VF）、混合供电系统（10 kV·A，4 000 Hz，50 kV·A 变频）等进行

比较（见表 0-1），可见混合供电系统综合性能最优。

表 0-1 系统费用、质量和性能参数比较

	IDG	VSCF	混合系统	VF
系统质量/kg	242	247	234	214
系统可靠性 MTBF/h	1 424	1 632	1 687	1 831
系统费用比	1	0.95	0.78	0.63
系统功率质量比/(kV·A/lb)	1	0.93	0.6	0.34
维修费用率	1	0.85	0.8	0.75

### 复习思考题

1. 飞机电源系统由哪几部分组成？各有何功用？
2. 飞机电源系统的配电方式有哪几种？各有何特点？
3. 简述飞机用电设备的分类及余度供电的概念。
4. 简述多电和全电飞机的基本概念。
5. 高压直流供电系统有何优点？



# 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

从电源到用电设备总是要用导线和各种控制保护电器来连通。两个或几个导体互相接触之处叫做电接触。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，而它的原因却可能多种多样，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，电接触可以分为三大类。

(1) 固定接触：用螺钉或铆钉将相互连接的导体压紧，或者用焊接的方法将连接处焊牢，或者如同波音飞机上所使用的一种专用“接合器”将导体连接起来，这些方法都使被连接的导体在工作过程中没有相对运动，如图 1-1 (a) 所示，此类接触在现实生活中使用较多。

(2) 滑动接触：相互连接的导体，其中的一个可以在固定导体上沿一定轨道滑动，在滑动过程中，活动部分可能保持与一个固定导体块的接触，也可能分别与若干固定导体块轮流接触和分离，如图 1-1 (b) 所示。电位器、导电刷就属于这一类连接方式。

(3) 可分接触：连接导体可通可断的连接形式。在这种电接触形式中，直接实现电接触的导体称为触头或触点，其中的一个是固定的，称为固定触点或静触点，另一个则为活动触点或动触点，在工作过程中可以与静触点相接触或分离，如图 1-1 (c) 所示。开关、继电器、接触器的触点系统属于这一类接触。触点是开关电器的重要组成部分，在电气系统中，它是控制电路通断的关键，且常常是系统中工作可靠性最差的环节。



图 1-1 电接触的分类

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。在使用时应该正