

21世纪 民航高等教育规划教材

飞机电源系统

FEIJI DIANYUAN XITONG

◎ 刘建英 任仁良 编著



中国民航出版社

013045039

V242.2
05

21 世纪民航高等教育规划教材

飞机电源系统

刘建英 任仁良 编著



V242.2
05

中国民航出版社



北航

C1651599

图书在版编目 (CIP) 数据

飞机电源系统/刘建英,任仁良编著. —北京:
中国民航出版社, 2012. 11
ISBN 978-7-5128-0096-0

I. ①飞… II. ①刘… ②任… III. ①飞机-电源
IV. ①V242. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 256074 号

责任编辑: 杨玉芹

飞机电源系统

刘建英 任仁良 编著

出版 中国民航出版社
地址 北京市朝阳区光熙门北里甲 31 号楼 (100028)
排版 北京民智奥本图文设计有限公司
印刷 北京华正印刷有限公司
发行 中国民航出版社 (010) 64297307 64290477
开本 787 × 1092 1/16
印张 19.5
字数 459 千字
版本 2013 年 2 月第 1 版 2013 年 2 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-5128-0096-0
定价 40.00 元

(如有印装错误, 本社负责调换)

内 容 简 介

本书是目前中国民航大学组织的“21 世纪民航高等教育规划教材”之一，主要用于航空电气专业本科学生的教学。本书主要介绍了民航运输机电源系统的组成及各部分的工作原理，主要内容包括航空蓄电池、飞机直流电源、飞机交流发电机的驱动、励磁、调压、并联、控制及保护电路，以及飞机二次电源、应急电源和飞机电网的概况。在飞机电网一章中，重点介绍了新型飞机 B787 的配电系统。最后介绍了新修订的航空电源标准 ISO1540：2006 的主要内容。每章后都附有复习思考题，便于学生有重点地复习。

本书主要用于航空电气专业本科学生的教学，也可供民航机务维修工程技术人员参考。

前 言

随着航空技术的飞速发展，先进的高新技术在民航运输机上的使用越来越普遍。我国民航业已经引进了 A380、B787 等新一代飞机，其上使用了大量的、不同于目前机型的新型航空电气设备。为了保障飞机的正常运营，航空公司迫切需要一批掌握新型航空技术的机务维修人才。因此，作为培养人才的高等学校应充分满足行业需求，而高质量的教材是实现这一目标的首要保证。为此，特编写出版新的《飞机电源系统》教材。

与 2004 年出版的《飞机电源系统》教材相比，新版教材增加了航空蓄电池的分量，使其单独成为一章，并在该部分增加了 B787 飞机上所使用的航空锂离子蓄电池的内容；二次电源和应急电源也单独成为一章；此外，还增设了飞机电网和配电系统的内容，以及新修订的航空电源标准。因此，新版的《飞机电源系统》在内容的完整性和质量上都得到了大幅度提高。

本书共分 10 章。第 1 章介绍了飞机电源系统的组成、类型及各种电源系统的特点等；第 2 章介绍了蓄电池的基本知识和三种主要的航空蓄电池；第 3 章介绍了飞机直流电源系统，并简单介绍了高压直流电源系统；第 4 章介绍了目前主流机型所使用的液压机械式恒速传动装置的构造及原理，以及航空无刷交流发电机的励磁方式，在本章最后还介绍了新型的交流起动发电机及变速恒频交流电源；第 5 章介绍了交流发电机电压调节系统的组成、工作原理和动静态特性，并以 B737 飞机的发电机调压器为例，分析了实际调压器的组成和工作原理；第 6 章介绍了交流电源系统的并联运行；第 7 章介绍了飞机交流电源系统的控制及保护电路，部分电路取材于 B737NG 飞机的发电机控制组件 GCU；第 8 章简要介绍了飞机的二次电源、应急电源及应急灯供电电路的工作原理；第 9 章介绍了飞机电网的构型和配电系统的发展，以及多电飞机电网的特点，重点介绍了 B787 飞机的配电系统；第 10 章介绍了新修订的国际航空电源标准 ISO1540:2006 的主要内容。

本书由中国民航大学刘建英副教授、任仁良教授主编，其中第 1、3、4 章除 4.4、4.5 节外由刘建英编写，第 2、8、9、10 章由任仁良、冯建朝编写，第 5、6 章由赵迎春编写，第 7 章及 4.4、4.5 节由董惠芬编写，杨占刚、强喜龙也参与了部分内容的编写工作。全书由刘建英统稿，任仁良教授除了编写新增加的 4 个章节的全部内容外，还对教材大纲和其余章节的内容提出了许多修改意见，保证了教材的质量。

中国民航科学技术研究院院长、高级工程师姜春水审阅了全书，并提出了宝贵意见。本书在编写过程中还得到了中国民航大学航空自动化学院领导和学校教材科的大力支持，在此一并表示感谢。同时还要感谢中国民航出版社各位编辑为此书所付出的辛勤劳动。

尽管作者付出了很大努力，但由于资料和水平所限，书中仍然存在不少瑕疵，敬请广大读者批评指正。

编者
2012年7月

目 录

前言

第 1 章 飞机电源系统概述	1
1.1 飞机电源系统及机载用电设备概况	1
1.1.1 飞机电源系统的组成及功用	1
1.1.2 机载用电设备的种类	2
1.2 飞机电源系统的种类及特点	5
1.2.1 低压直流电源系统	5
1.2.2 变速变频交流电源系统	6
1.2.3 混合电源系统	7
1.2.4 恒速恒频交流电源系统	7
1.2.5 变速恒频交流电源系统	9
1.2.6 270 V 高压直流电源系统	10
1.2.7 新型恒压变频交流电源	11
1.3 飞机电网的线制及参数	11
1.3.1 飞机电网的线制及特点	11
1.3.2 飞机电网的主要参数	13
复习思考题	15
第 2 章 航空蓄电池	16
2.1 航空蓄电池的基本知识	16
2.1.1 航空蓄电池的功用	16
2.1.2 蓄电池的常用术语	17
2.1.3 蓄电池的充电方法	22
2.2 酸性蓄电池	25
2.2.1 铅酸蓄电池的结构和工作原理	25
2.2.2 铅酸蓄电池的充放电特性	27

2.3	碱性蓄电池	30
2.3.1	概述	30
2.3.2	镍镉蓄电池的结构	30
2.3.3	镍镉蓄电池的基本工作原理	32
2.3.4	镍镉蓄电池的充电和电解液调整	35
2.3.5	镍镉蓄电池的容量测试和深度放电	37
2.3.6	飞机电瓶充电器	38
2.4	锂离子电池	40
2.4.1	概述	40
2.4.2	锂电池的结构和基本工作原理	41
2.4.3	典型航空锂电池充放电方法和容量检测方法	44
	复习思考题	46
第3章	飞机直流电源系统	47
3.1	直流发电机	47
3.1.1	直流发电机	47
3.1.2	直流-交流发电机	50
3.1.3	两种直流发电机的特点	51
3.2	直流发电机的电压调节	52
3.2.1	振动式调压器	52
3.2.2	晶体管调压器	54
3.2.3	炭片调压器	55
3.3	直流发电机的并联运行	56
3.3.1	直流发电机与蓄电池的并联运行	56
3.3.2	直流发电机的并联运行	60
3.4	直流电源的控制与保护	64
3.4.1	限流保护	64
3.4.2	反流断路器	65
3.4.3	过电压与过励磁保护	66
3.4.4	短路故障及其保护	68
3.5	高压直流电源系统	69
3.5.1	高压直流供电系统的特点	69
3.5.2	高压无刷直流发电机	71
	复习思考题	76

第4章 飞机交流发电机的传动和发电	77
4.1 概述	77
4.1.1 交流发电机的传动方式	77
4.1.2 恒装与变频器的比较	78
4.2 恒速传动装置	79
4.2.1 概述	79
4.2.2 差动游星齿轮系的工作原理	80
4.2.3 液压泵-液压马达组件的工作原理	83
4.2.4 转速调节系统	88
4.2.5 恒装的故障保护及基本参数	91
4.3 交流发电机的结构形式和励磁方式	93
4.3.1 航空同步发电机的结构形式	94
4.3.2 同步发电机的励磁方式	95
4.3.3 旋转整流器的结构和工作原理	104
4.4 交流起动/发电机	110
4.4.1 交流起动/发电机的结构	110
4.4.2 APU 交流起动/发电机的工作原理	111
4.5 变速恒频交流电源系统	119
4.5.1 变速恒频交流电源概述	119
4.5.2 典型变速恒频交流电源简介	122
复习思考题	123
第5章 交流发电机电压调节系统	125
5.1 概述	125
5.1.1 飞机发电机调压技术的发展	125
5.1.2 调压器的功用	126
5.2 交流发电机的调压方式	127
5.2.1 固定相(或线)电压调节	127
5.2.2 三相平均电压调节	128
5.2.3 最高相电压调节	130
5.2.4 正序电压调节	130
5.2.5 几种调压方式的比较	132
5.3 PWM 型晶体管调压器	132
5.3.1 检测电路	134

5.3.2	比较电路	134
5.3.3	脉宽调制 (PWM) 电路	135
5.3.4	整形和功率放大电路	136
5.3.5	调压器调压过程	137
5.4	PWM 型晶体管调压器的静态特性和动态分析	138
5.4.1	调压系统的静态特性	138
5.4.2	调压系统的动态分析	143
5.5	飞机交流发电机调压器举例	149
	复习思考题	155
第 6 章	飞机交流电源的并联运行	156
6.1	并联供电的特点及条件	156
6.1.1	单独供电与并联供电	156
6.1.2	飞机交流电源并联供电的条件	157
6.2	投入并联的自动控制	161
6.2.1	自动并联控制电路的组成	162
6.2.2	自动并联检测电路工作情况分析	163
6.3	无功功率的自动均衡	169
6.3.1	同容量发电机并联运行时无功功率调节的基本原理	169
6.3.2	无功功率自动均衡的基本方法	170
6.3.3	典型无功均衡线路分析	170
6.4	有功功率的自动均衡	175
6.4.1	有功功率自动均衡的基本方法	175
6.4.2	典型有功均衡线路分析	175
	复习思考题	178
第 7 章	飞机电源系统的控制与保护	179
7.1	概述	179
7.1.1	飞机电源系统的控制	179
7.1.2	飞机电源系统的故障与保护	180
7.2	飞机电源系统的控制	181
7.2.1	飞机电源系统的基本控制关系	181
7.2.2	发电机励磁控制继电器 GCR 及其控制	183
7.2.3	发电机电路断路器 GCB 及其控制	186

7.2.4	汇流条联接断路器 BTB 及其控制	188
7.2.5	外电源接触器 EPC 及其控制	191
7.2.6	辅助电源断路器 APB 及其控制	193
7.3	电源系统的频率故障及其保护	194
7.3.1	频率(转速)故障的产生及危害	194
7.3.2	转速故障及其保护方法	195
7.3.3	频率保护线路	195
7.4	电源系统的电压故障及其保护	198
7.4.1	过电压故障及其保护	198
7.4.2	欠电压故障及其保护	202
7.4.3	过载及其保护	203
7.5	电源系统的短路故障及其保护	204
7.5.1	发电机馈线短路故障及其差动保护	204
7.5.2	旋转整流器故障及其保护	207
7.5.3	永磁发电机短路故障及其保护	210
7.6	电压不平衡和不稳定故障及其保护	213
7.6.1	电压不平衡故障及其保护	213
7.6.2	电压不稳定故障及其保护	215
7.7	并联供电系统中的无功不均衡故障及其保护	219
7.7.1	励磁故障的产生及保护指标	220
7.7.2	典型过励磁保护线路	220
7.7.3	欠励磁保护线路	223
7.8	相序故障及其保护	224
7.8.1	相序故障及其危害	224
7.8.2	相序检测电路的工作原理	224
	复习思考题	226
第8章	二次电源、应急电源和地面电源	227
8.1	变压整流器	227
8.1.1	变压整流器的主要性能指标	228
8.1.2	变压整流器的组成	230
8.1.3	变压整流器的典型线路	232
8.1.4	机载变压整流器线路举例	234

8.2 静止变流器	235
8.2.1 静止变流器概述	235
8.2.2 静止变流器的基本结构	236
8.3 飞机应急电源	239
8.3.1 飞机应急电源的种类及作用	239
8.3.2 冲压空气涡轮 (RAT) 发电机	240
8.3.3 液压马达发电机	242
8.4 应急电池组件	243
8.4.1 概述	243
8.4.2 应急照明电池组件的工作原理	245
8.5 航空器地面电源	249
复习思考题	251
第9章 飞机电网及配电系统	253
9.1 飞机电网构型和供电方式	253
9.1.1 飞机电网的种类	253
9.1.2 飞机供电方式及其电网构型	255
9.1.3 电网的控制与保护	260
9.1.4 多电飞机的电网构型	262
9.2 飞机电网配电方式及其发展概况	263
9.2.1 飞机电网配电方式	263
9.2.2 飞机配电系统的发展概况	264
9.3 B787 飞机的配电系统	267
9.3.1 概述	267
9.3.2 B787 飞机的一次配电系统	268
9.3.3 B787 飞机的二次配电系统	271
9.3.4 B787 飞机的负载自动管理	275
复习思考题	277
第10章 航空电源标准	278
10.1 概述	278
10.2 国际航空机载电源标准 ISO1540	279
10.2.1 ISO1540 对于机载交流电源的要求	279
10.2.2 机载直流电源	286

10.2.3 机载用电设备的电源适配性要求	289
10.3 国际航空地面电源标准 ISO6858	291
10.3.1 ISO6858 对于地面交流电源的要求	292
10.3.2 地面直流电源的特性	294
复习思考题	295
参考文献	296

第 1 章 飞机电源系统概述

1.1 飞机电源系统及机载用电设备概况

1.1.1 飞机电源系统的组成及功用

飞机电源系统是飞机上电能的产生、调节、变换、控制、保护等部分的总称，包含从发电机到用电设备输入端的全部环节，通常分为供电系统和配电系统两大部分。

飞机电源系统由主电源、辅助电源、应急电源、二次电源及外接电源等构成。飞机主电源是指由飞机发动机直接或间接驱动的发电系统，通常一台发动机驱动一台或两台发电机。正常飞行时，飞机主电源是机上全部用电设备的能量来源。由多台发电机构成的主电源系统，其工作可靠性更高。

当飞机作航前航后检查或起动主发动机时，主电源不工作，机上用电设备可以由辅助电源供电。辅助电源有航空蓄电池（Battery, BAT）和辅助动力装置驱动的发电机（Auxiliary Power Unit Driven Generator, APU. G）两种，小型飞机常用蓄电池，大型飞机多用辅助动力装置驱动的发电机。辅助电源一般在地面工作，也可以在空中接替失效的主发电机向飞机供电。

飞行中若主电源和辅助电源全部失效，则由应急电源供电。常用的应急电源有航空蓄电池、静变流器（Inverter, INV）和冲压空气涡轮发电机（Ram Air Turbine, RAT）或液压马达驱动的发电机（Hydraulic Motor Generator, HMG）。航空蓄电池提供应急直流电源，后三种设备可以向飞机提供应急交流电源。飞机主电源系统正常时，冲压空气涡轮发电机收在飞机机体内，应急供电时，靠迎面气流驱动涡轮带动发电机工作。由于航空蓄电池及应急发电机的容量较小，因此只能向飞机上的重要用电设备供电，以保证飞机就近着陆或返航。

可见，当飞机在地面时，航空蓄电池起辅助电源的作用，而当飞机在空中飞行时，蓄电池起应急电源的作用。

当飞机在地面进行维护、大修、加油、装卸货物等作业时，常由外接地面电源向机

上设备供电。地面电源可以提供直流电或交流电，视飞机主电源类型而定。地面电源工作时，机上主电源一般不投入电网。

二次电源是将主电源电能变换为另一种形式或规格的电能，以满足不同用电设备的需要。在低压直流电源系统中，二次电源有旋转变流机、静止变流器、直流升压机和直流变换器等，可以将低压直流电变换为交流电或高压直流电。在交流电源系统中，二次电源主要指变压整流器（Transformer Rectifier Unit, TRU），可以将三相交流电变换为 28 V 的低压直流电。

飞机电源系统的这种构成是基于以下目的：

- (1) 保证在各种情况下向用电设备连续可靠地供电。
- (2) 保证飞机在主电源失效时仍能安全着陆。
- (3) 保证能向不同性质的电子电气负载提供所要求的电源。
- (4) 使飞机能不依赖于地面设备的支持而自行起飞和着陆，即具备自足能力，这对军用飞机尤为重要。有的飞机还配备了备份电源，以增加供电的可靠性。

飞机配电系统的主要功能是将飞机电源系统的各种电能传输并分配给机载用电设备，并在配电系统出现故障时具备保护功能，防止故障扩大，保证重要设备的连续供电。飞机配电系统由输电线路、配电管理组件、控制和保护电器、测量监控仪表等组成。其中电能的传输线路称为飞机电网，电网中电能的汇集处称为汇流条，是配电线路的一部分。

飞机配电系统中有多个汇流条，发电机输出端所接的汇流条称为电源汇流条、主汇流条或发电机汇流条。按照负载的功能划分，负载汇流条有多种类型，如厨房汇流条、通用负载汇流条、仪表汇流条、地面勤务汇流条等。除此之外，还有电瓶汇流条、应急电源汇流条、直流电源汇流条、重要设备汇流条等。机载电子电气设备越多，所需电源容量也越大，供配电系统就越复杂，汇流条种类及数量就越多。

配电系统中的管理组件和控制保护电器负责电能的分配和管理，在正常情况下，能实现各电源之间的转换，如地面电源与机载主电源之间的转换、辅助电源与主电源之间的转换、地面电源与辅助电源之间的转换、主电源之间的转换等功能。当主电源失效时，能实现电源与汇流条间的自动切换，将故障电源隔离，由应急电源向飞机重要设备供电。

1.1.2 机载用电设备的种类

机载电子电气设备种类繁多，用途各异，对电能的要求也各不相同。如有的负载需要直流电供电，如信号灯、继电器及接触器线圈、电磁活门工作线圈等。需要交流电供电的负载对电压的大小有不同的要求，一般功率较大的负载要求单相或三相 115 VAC 供电，如飞机燃油系统中的电动液压泵；功率较小的负载一般采用 28 VAC 或 5 VAC 供电，如驾驶舱的仪表板照明灯。

飞机上的电子电气负载可以按不同的方式分类，如按照用途或重要程度可以分为四

种类型。不同类型的负载，对供电余度的要求也不一样，简述如下。

飞机上的电气负载按用途可以分为以下几类：

(1) 电动机构 主要用于飞机的操纵机构，如襟翼、舵面、力臂调节、起落架收放装置等，以及驱动燃油泵、电动活门等的电动机，其容量约占总负载的 30%。包括直流电动机构和交流电动机构。

(2) 加热和防冰负载 在大型运输机上其容量占到总负载的 40% 左右。这类负载对电能类型和质量无特殊要求，可以采用直流电、恒频交流电或变频交流电供电。

(3) 电子设备 一般采用恒频交流电供电，对电源质量要求高，其容量约占总负载的 20%。

(4) 照明设备 直流电或变频交流电均可供电，一般要求电压稳定，其容量约占 8%。

飞机类型不同、飞行任务不同时，用电设备差别很大。表 1-1 是军用飞机和民用飞机用电负载的差别对比表。

表 1-1 军用飞机和民用飞机用电负载的差别

用电设备 \ 机种	战斗机	民用飞机
武器	30%	—
航空电子设备	15%	10% ~ 20%
电动机构	25%	25% ~ 35%
防冰和厨房负载	15% ~ 20%	40% ~ 45%
控制和指示设备	10%	10%
照明设备	3%	5%

可见，民用飞机中加热设备的功率将近占据了总用电量的一半，而加热设备对电源的频率没有要求，因此非常适合采用变频交流电供电，可以有效提高经济性。

此外，运输机的用电高峰应是冬季夜间飞行，这时的照明设备、加温防冰设备及生活用电设备用电量最大。

当飞机处于不同飞行状态时，电气负载的用电量也不相同。根据用电量的大小，可以将整个飞行过程分为几个主要阶段，如飞行前准备（包括地面维护、加油、设备预热等）、发动机起动、滑行、起飞和爬升、巡航、下降和着陆与飞行后检查等。图 1.1 是某型飞机不同飞行阶段的用电量曲线。其中航前和航后由地面电源或辅助电源供电。由图可见，飞机在起飞与爬升阶段的用电量最大，因此电源的总容量应按最大用电量选取。

民用飞机上的电气负载还可以按照重要程度进行分类，不同等级的负载，需要接在相应等级的汇流条上，以确保供电余度满足负载的要求。电子电气负载按照重要程度一

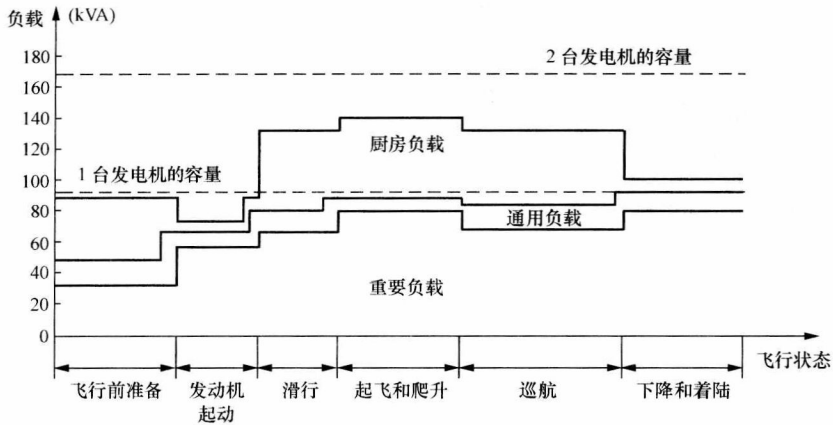


图 1.1 飞机负载分布示意图

般可以分成三个等级：

(1) 飞行关键负载或最重要负载

包括发动机的运行控制、飞机操纵控制、防火等设备。如发动机的起动点火和燃油设备，发动机推力或转速控制设备，飞机仪表、飞行操纵、导航及通讯设备，起落架收放和舱门启闭设备等。这些设备关系到飞机的安全，通常采用 4 余度供电，即两套独立的主电源，一套备用电源，一套应急电源。应急蓄电池应工作在充足电的状态，以便应急状态下有足够的电荷量向这些关键设备供电。

(2) 任务关键负载或重要负载

是完成飞行任务所必需的设备，对民用飞机来说，就是保障机上人员生活和工作所必需的设备，如座舱环境控制系统、防冰除冰设备等。重要设备通常采用 3 余度供电方式，由两套主电源和一套备用电源供电，用电设备可有选择地工作。

(3) 通用负载及厨房负载

通用用电设备如客舱照明设备、旅客娱乐设备、厨房设备等，通常由主电源供电，发生故障时若主电源容量不够，可以人工或自动卸去一些次要负载。

从图 1.1 上的曲线可以看出，飞机上的重要负载约占总负载的一半。用一台发电机就可以给全部重要负载供电。厨房的加热负载约占总负载的 40%，在起动发动机或一台主电源失效时，一般都要卸去厨房负载和通用负载。

机载用电设备的数量、功率以及特性，直接影响到供电系统的工作状态，如加热设备和电动机负载，其运行参数在初始起动时（冷态）和运行一段时间后（热态）的参数是不同的，因此对电源系统的电压、频率、内电阻等参数都有影响。用电设备的性质不同，其影响结果也各不相同。如加热设备和电动机类的线性负载，在运行的不同阶段，会影响到电源系统的电压、电流和频率的大小，但不会影响交流电源的波形及功率因数（稳态时）。但机载电子设备大都属于非线性负载，在工作时会导致电网波形畸变，谐波加大，其较低的功率因数会导致电网线路损耗增大。像无线电发射机、雷达等