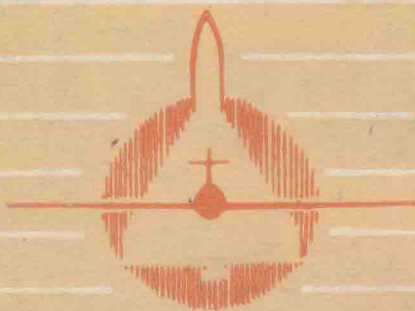


飞机供电系统

(修订本)

蒋志扬 李颂伦 主编



国防工业出版社

飞机供电系统

(修订本)

蒋志扬 李颂伦 主编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书阐述飞机供电系统的组成、形式、主要参数、质量指标等的基本知识；较系统地叙述了飞机交、直流电源系统的主要组成部分和系统（交、直流发电机、航空蓄电池、恒速传动装置、电压调节系统、控制保护器等）的工作原理；以及飞机电源的并联运行的投入与无功功率和有功功率的调节，同时也阐述了飞机电网的设计计算问题。此外对发展中的飞机供电系统也作了简介。在每章末还列出思考题和练习题。

本书为航空高等院校的教材，也可以供从事飞机电气工程的科研、设计、制造和使用维护的工程技术人员参考。

飞 机 供 电 系 统

（修 订 本）

蒋志扬 李颂伦 主编

王坡 副

*

国防工业出版社出版

（北京市海淀区紫竹院南路23号）

（邮政编码100044）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张18¹/₂ 428千字

1990年4月第一版 1990年4月第一次印刷 印数：0,001—2,000册

ISBN 7-118-00631-9/V·51 定价：3.70元

前 言

本书是根据航空教材编审委员会 1984 年 5 月所通过并于 1986 年 10 月修订的《飞机供电系统》课程教学大纲要求, 在 1979 年版《飞机交流电源系统》基础上修订再版的。

编写中考虑了教材《飞机交流电源系统》的使用情况并吸取了各航空高等院校有关教师讲授该课程的教学经验。本书内容的选取既考虑目前我国飞机供电系统生产、科研的实际状况又注意介绍国内外的发展趋势和预研成果。

本书的基本内容为: 飞机供电系统的基本知识; 电压自动调节; 并联运行; 控制与保护; 电网的设计与计算; 发展中的飞机供电系统简介。本书各章末附有适量的思考题和练习题供选用。通过对本书的学习, 读者可以对飞机供电系统有一个基本的、较全面的了解, 并能进行基本的分析和计算。

本书由南京航空学院、北京航空航天大学与西北工业大学三校合编。其中: 第一、七章、三章中航空蓄电池、八章中 § 8-4 节由蒋志扬编写; 第二、三、八章由严仰光、沈志尧编写; 第四章由沈颂华编写; 第五章由李颂伦编写; 第六章由钱振雄、李颂伦编写。全书由西北工业大学蒋志扬、李颂伦任主编。

本书于 1988 年 3 月由航空工业部教材编审室组织有关专家进行了评审。参加评审的有: 丁道宏、邱贤承, 许巧保、马俊峰等, 他们提出了许多宝贵的意见, 在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中, 得到有关工厂、研究所、院校许多同志的大力支持和帮助, 也在此表示衷心的感谢。

由于水平和时间的限制, 书中可能还有缺点和错误, 请广大读者批评指正。

编 者

1988 年 9 月

目 录

第一章 概论	1
§ 1-1 飞机供电系统的作用和组成	1
§ 1-2 飞机电源系统类型和电源功率选择	3
§ 1-3 飞机供电系统的特点与发展概况	8
§ 1-4 飞机供电系统的基本参数	12
§ 1-5 飞机供电系统的质量要求	16
思考题和练习题	22
第二章 飞机发电机传动	23
§ 2-1 发电机的航空发动机直接传动	23
§ 2-2 电磁式恒速传动装置	24
§ 2-3 齿轮差动式液压恒速传动装置	25
思考题和练习题	40
第三章 飞机发电机与航空蓄电池	41
§ 3-1 飞机直流发电机的特点	41
§ 3-2 飞机无刷交流发电机的特性和参数	45
§ 3-3 无刷交流发电机的励磁系统	49
§ 3-4 两级式无刷交流发电机的复励	57
§ 3-5 永磁发电机和永磁直流无刷发电机	63
§ 3-6 飞机发电机的冷却与容量	67
§ 3-7 航空蓄电池的功用及其构造特点	69
§ 3-8 航空蓄电池的特性	70
思考题和练习题	74
第四章 飞机发电机电压自动调节系统	75
§ 4-1 概述	75
§ 4-2 飞机调压系统的组成与调压方式	76
§ 4-3 炭片式调压器	81
§ 4-4 飞机晶体管式调压器	85
§ 4-5 飞机交流发电机调压系统的稳定性	108
思考题和练习题	128
第五章 飞机供电系统的并联运行	129
§ 5-1 概述	129
§ 5-2 飞机直流电源系统的并联运行	130
§ 5-3 飞机交流电源系统的并联条件	139
§ 5-4 投入并联的自动控制	144
§ 5-5 无功功率与有功功率的调节	153
§ 5-6 无功电流的自动均衡	155

§ 5-7 有功电流的自动均衡·····	172
§ 5-8 交流电源系统并联运行稳定性基本概念·····	176
思考题和练习题·····	183
第六章 飞机电源系统的控制与保护 ·····	185
§ 6-1 概述·····	185
§ 6-2 飞机低压直流电源系统的控制与保护·····	186
§ 6-3 飞机交流电源系统的控制·····	191
§ 6-4 飞机交流电源系统故障与保护的特点·····	203
§ 6-5 短路故障及差动保护·····	206
§ 6-6 励磁故障及保护·····	210
§ 6-7 不稳定故障保护·····	218
§ 6-8 同步汇流条短路故障与逆序保护·····	224
§ 6-9 不并联交流电源系统及新型控制保护器简介·····	229
思考题和练习题·····	233
第七章 飞机电网 ·····	234
§ 7-1 概述·····	234
§ 7-2 电网计算与保护·····	236
§ 7-3 短路电流的计算·····	243
思考题和练习题·····	262
第八章 发展中的飞机供电系统 ·····	263
§ 8-1 概述·····	263
§ 8-2 变速恒频电源系统·····	264
§ 8-3 高压直流供电系统·····	282
§ 8-4 飞机固态配电系统·····	284
§ 8-5 关于全电飞机的概念·····	286
思考题和练习题·····	288
参考文献 ·····	289

第一章 概 论

§ 1-1 飞机供电系统的作用和组成

飞机供电系统是现代飞机的一个重要组成部分，它的作用是向飞机上所有用电设备（如飞行控制系统、各种电子设备、武器控制、照明、防冰设备、生活设施等）提供电能。为用电设备的正常工作提供条件，以保证飞机的安全飞行和完成运输或作战任务。

由供电系统和用电设备组成飞机电气系统。供电系统指的是电能的生产、变换和输配的一整套装置所组成的一个完整系统，它也可以分为电源系统（又称发电系统）和配电系统（在飞机上由于电能传输距离短，用电设备比较集中，输配电系统在航空上通常叫做配电系统）两大部分。

电源系统按其用途可以分为主电源、二次电源和应急电源，有时还包括辅助电源。主电源由航空发动机传动的发电机和电源调节保护设备等构成。主电源是飞机上全部用电设备的能源。

二次电源是将主电源电能变换为另一种形式或规格电能的装置，用以满足不同用电设备的需要，是飞机电源系统的重要组成部分。在低压直流电源系统中，有变流机、静止变流器、直流升压机和直流变换器，将低压直流电变换成交流电或高压直流电。在交流电源系统中，有变压器和变压整流器，将一种交流电变换成另一种电压的交流电或直流电。

应急电源是一个独立电源系统，飞行中当主电源发生故障时，航空蓄电池或应急发电机即成为应急电源，向飞机上的重要用电设备供电。当航空发动机不工作时（如地面检修维护时），这时由地面电源车供电或靠辅助电源供电。航空蓄电池或由一种小型机载发动机、发电机和液压泵等构成的辅助动力装置是飞机上常用的辅助电源。

配电系统由电网、配电装置和电网保护装置等组成，它的作用是将电源所产生的电能传输和分配到飞机上各用电设备上去。

配电方式一般可分为集中式、分散式和混合式配电系统。

集中式配电的原理图如图 1-1 所示。采用这种配电方式时，所有电源所产生的电能都输送到中心配电装置，即所有电源（发电机）并联于一个公共电网上进行工作，然后由配电装置将电能分配到各用电设备。这个方式的主要优点是：当一台发电机损坏时，用电设备仍能由其他发电机继续供电；操作维护方便。由于这些优点，这种配电方式在直流配电系统中得到广泛应用。这种系统的缺点是配电系统重量大，中心配电装置笨重，一旦受到损坏，所有用电设备均断电。

分散式配电的原理图如图 1-2 所示。采用这种配电方式时，各电源产生的电能分别输送到各自的配电装置，然后由它给其靠近的用电设备供电。各配电装置之间经过自动转换

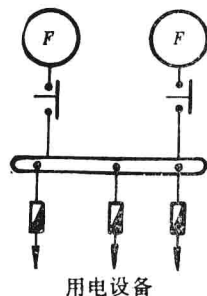


图1-1 集中式配电系统原理图

开关可互相转换。当其中任一电源损坏时，由该电源供电的用电设备就通过自动转换开关转接到另一电源上去。这种系统适应于电路分支较多、用电设备连接导线截面较大的场合。这种配电系统的优点是：避免了电源并联运行的复杂性，同时对电源来说，它的结构（如控制、保护装置等）比较简单，因而提高了系统的可靠性，这种配电方式在交流供电系统中存在着可能出现的“拍频”干扰，因此，在系统设计时要注意。

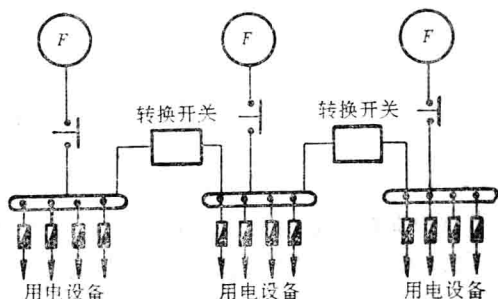


图1-2 分散式配电系统原理图

混合式配电的原理图如图 1-3 所示。在这种系统中，由电源产生的电能都输送给中心配电装置。除了中心配电装置之外，还有若干个二级配电装置，也叫分配电装置，它们安装在飞机的不同部位。各用电设备可分别由上述两种配电装置供电。这种配电系统具有集中配电与分散配电的优点，可以大大减小导线重量，简化并减小中心配电装置的重量。但是，这种系统易受损坏的缺点仍然和集中式配电一样，因为只要中心配电装置遭到破坏，全部用电设备的供电立即中断，这种配电方式目前广泛地用于中型飞机上。

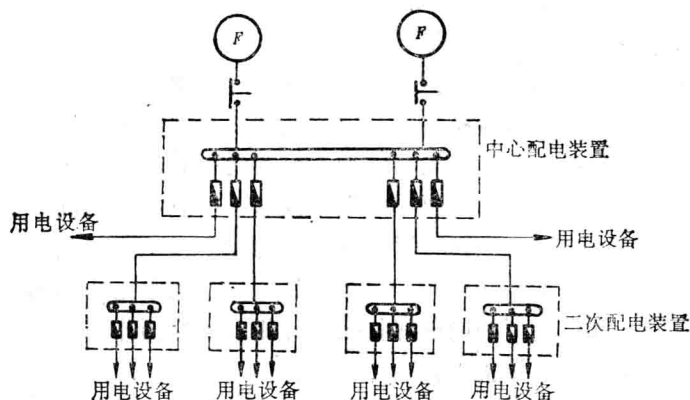


图1-3 混合式配电系统原理图

配电系统的控制方式可分为常规式、遥控式和固态式三种。常规控制方式的配电功率线全部引入座舱内的配电中心或中心配电装置，早期和目前小型飞机均采用此类配电控制方式。遥控控制方式的配电汇流条靠近用电设备，由飞机上乘员发出的遥控信号通过功率控制器（如接触器）对用电设备进行控制，座舱内只引入控制线，现代大、中型飞机均采用此类配电控制方式。固态配电控制方式是由计算机控制的一条多路传输总线传递全部信息和控制信号，再由功率控制器对用电设备进行控制，这种控制方式的配电取消了众多的控制线，具有遥控式特点，因此可以减轻导线重量，提高供电的可靠性和自动化程度。这种固态配电系统从 80 年代以来得到了发展，逐步应用到先进飞机供电系统中（见第八章）。

配电系统重量通常是电源系统重量的好几倍。对大型飞机来说，尤其是这样。因此

设法减轻配电系统的重量是很重要的, 因为减轻包括配电系统在内的飞机设备的重量, 可以增加飞机的有效载荷和提高飞机航程, 一般飞机设备增加1kg, 飞机就要增加3~4 kg 的重量, 即飞机结构、发动机和燃料均将增加重量。

总之分配电能所采取的方式对向用电设备供电的可靠性和连续性以及与之有关的飞机的战斗生存力等有很大影响。

§ 1-2 飞机电源系统类型和电源功率选择

飞机上采用的电源系统的类型随着飞机类型及其性能、任务要求以及用电设备的不同而有所不同。飞机电源系统类型的选择或改变还要涉及到生产、使用等一系列因素, 同时又要考虑继承性问题。因此, 为新机种选择一个合理的而又满足飞机性能要求的电源系统是一个复杂的综合技术问题, 需要进行充分的论证。

目前国内外正在使用的飞机电源系统是多种多样的: 有低压直流电源系统, 恒速恒频交流电源系统、变速恒频交流电源系统、混合电源系统、变频交流电源系统、以及高压直流电源系统等。

变频交流电源系统在混合电源系统中仍常被选用。作为独立主电源目前已用得不多。但对遥控飞机来说, 这种系统仍然是一个可供选择的电源系统。

高压直流电源系统是正在发展的一种先进飞机电源系统。目前在少数飞机上已经局部采用 270 V 高压直流电源供电 (见第八章)。

下面从原理上介绍飞机电源系统的基本类型和电源功率选择。

一、飞机电源系统类型

(一) 低压直流电源系统

低压直流电源系统的主电源是由直流发电机, 电压调节器、反流切断器和过压保护器等组成。额定电压为 28.5 V。由变流机或静止变流器把低压直流电变换为交流电作为二次电源。常用蓄电池作为应急电源。

低压直流电源系统是飞机最早使用的电源系统。这种低压直流系统本身结构简单, 在技术和使用维护上比较成熟, 又可利用起动/发电机来完成发动机的起动任务。直到 50 年代, 这种低压直流电源系统仍然在不少飞机上广泛地使用。

二十多年来, 这种低压直流电源系统在技术发展和改造方面取得了较大的进展。例如: 无刷直流发电机、固态发电机控制保护装置和静止变流器等研制成功, 并装机使用。使得这种低压直流电源系统在可靠性、维护性、性能和重量等方面都有较大的提高。

这种低压直流电源系统仍然在教练机、直升机、小型运输机 (如农业飞机) 和遥控飞机上广泛使用。它是小型飞机 (单通道发电容量不大于 12 kW) 可供选择的最佳电源系统。

(二) 恒速恒频交流电源系统

恒速恒频交流电源系统的主电源是由恒速传动装置和交流发电机及其励磁调节、控制保护装置等组成的 400Hz、115/200 V 三相交流电源系统。交流发电机的容量有 20、30、60、90、120 等千伏安。由变压整流器把交流电变换为直流电作为二次电源。飞机

蓄电池或应急交流发电机作为应急电源。有的飞机上还装有辅助动力装置作为辅助电源。

为了获得恒频交流电，方法之一就是在发电机与发动机之间增加一个称之为恒速传动装置的设备（图 1-4）。这个设备的作用是把转速变化的发动机输出功率变换成恒定转速的输出功率加到发电机轴上，从而使飞机交流发电机输出恒频交流电。



图1-4 恒速恒频电源方块图

根据发电机的要求，恒速传动装置的输出转速一般有 6000 r/min 、 8000 r/min 和 12000 r/min 等。

目前采用的恒速传动装置按能量转换方式来分有液压式、气压式、电磁式、机械式、机械液压式和空气涡轮等，使用得最广泛的是机械液压式恒速传动装置。电磁机械式和液压式恒速传动装置主要用于传动小于 $30 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 的交流发电机。

70 年代以来，恒速恒频电源系统采用了喷油冷却技术、组合电源装置以及集成电路的发电机控制装置，提高了系统的性能和可靠性。这种恒速恒频电源系统容量大、重量轻、工作可靠，是目前国内外军用飞机和民航客机上最广泛使用的一种飞机电源系统。

（三）变速恒频交流电源系统

变速恒频交流电源系统的主电源是由发动机直接传动的无刷交流发电机和变频器组成的 400 Hz 三相交流电源系统。二次电源、应急电源和辅助电源与恒速恒频交流电源系统基本相同。

这种系统是将发电机变频交流电功率通过变频器变换成频率恒定的交流电功率。变频器是一种电子变换装置，现用它来代替恒速恒频交流电源系统中结构复杂、成本高和维护困难的恒速传动装置。

目前变频器的变换方式有两种形式：

1. 交-直-交型变速恒频电源系统

这种变速恒频电源系统由飞机无刷交流发电机、变换装置和控制、保护设备等组成。

图 1-5 表示这种系统的原理示意图。

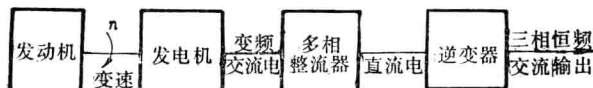


图1-5 交-直-交型变速恒频系统方块图

交流发电机输出的变频功率经多相整流器变换为直流电，再经过逆变器把直流电变换成交流电。

2. 交-交型变速恒频电源系统

这种变速恒频电源系统由高频交流发电机、变换装置和控制、保护设备等组成。图 1-6 表示这种系统的原理示意图。

这种系统基本工作是：交流发电机输出较高频率的交流电直接通过变频器变换成为所需要的三相恒频交流电。

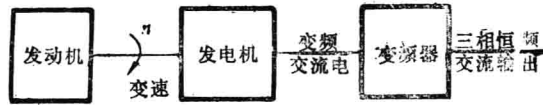


图1-6 交-交型变速恒频电源系统方块图

这种变速恒频电源系统经过二十多年的研制，在70年代初正式装机试用。

以上我们仅介绍了变速恒频电源的基本概念。关于这种系统的工作原理，将在本书第八章中叙述。

（四）混合电源系统

混合电源系统（或称为复合电源系统）指的是由变频交流电源和恒频交流电源组成的电源系统；也可以是由变频交流电源或（和）恒频交流电源与低压直流电源组成的电源系统。从目前飞机装置的情况来看，采用这种混合电源系统的新飞机是不多的。

但是原来采用低压直流电源系统的飞机，在改型时或增添新的用电设备，可以通过采用这种混合电源系统的方式来解决机载电源容量增加的矛盾，或者在电源设计时采用混合电源系统来回避暂时无法克服的技术问题。

在某些运输机和直升机上加温和防冰等设备用电量比较大，它们的工作与电源频率无关。这些设备可以使用变频交流电。

近年来，专门用于混合电源系统的交直流双输出的发电机已研制成功，使混合系统的重量有所减轻，可靠性得到提高。

由于混合电源系统有二个或二个以上不同类型电源组成，因而这种混合系统综合了这些电源的优点和特点，能够不需经过功率变换而直接获得另一种形式的电功率。但是，这种混合电源系统的一个主要缺点是配电系统较为复杂。

二、电源功率选择

电源功率选择指的是飞机上主电源系统功率的确定，下面简要地介绍飞机电源功率选择的基本原则和步骤。

主电源功率的选择必须以保证电气负载的总用电量为原则。另外，还应该满足机载用电设备所提出的要求。在这些要求中，对电源功率选择起主要作用的是重量轻、体积小及供电可靠与连续的要求，此外还应有一定的裕量。

电源功率的选择有一定的复杂性，这是由于飞机电源的总负载在飞行过程中不是固定的，此外，还与昼、夜气象、气候等飞行条件及所完成的飞行任务有关。为正确确定飞机电源容量，必须对用电设备进行统计分析，作出电源负载图。负载图是用电设备所消耗功率或消耗电流与飞行时间的关系曲线，一般是通过计算制成的。

根据飞机的战术和技术要求，每一类型飞机可制定许多不同的飞行方案。从选择电源容量角度考虑，找出用电量最大的飞行方案或飞行任务。例如，歼击机于夜间战斗，此时，接通用电设备最多；轰炸机在敌境进行夜间和轰炸任务时用电量最大；民航机在冬季夜间飞行，需要大量加温、照明和生活服务设施情况下用电量最大。

为了便于统计设备用电量，将飞行任务划分为若干个阶段。以歼击机为例，可划

表1-2 交流供电负载表

编号	用电设备名称	功率因数	有功功率 (W)	无功功率 (var)	飞行阶段							
					飞行前准备	滑行	起飞爬升	巡航	巡航与战斗	着陆	应急	飞行后检查
1												
2												
⋮												

在电气负载统计的基础上,就可绘制电源负载曲线图。在交流供电负载曲线图上,分别作出有功功率和视在功率的负载曲线。在直流供电负载曲线图上,仅有有功功率的负载曲线。图 1-7 表示由交流供电系统供电的电源负载曲线图。为了区别起见,用电设备由地面电源或机上备用电源供电的部分均以阴影线表示。

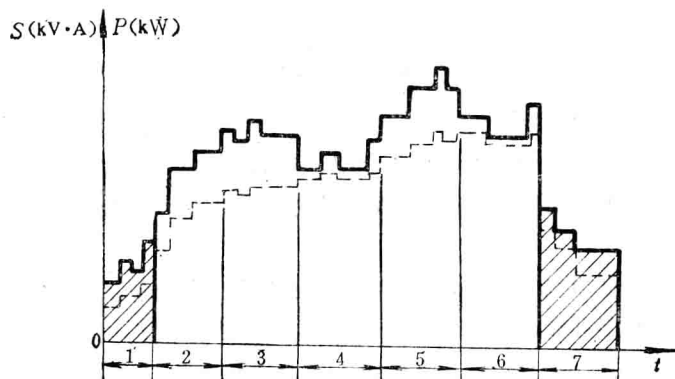


图1-7 交流供电系统的电源负载曲线图

1—飞行前准备；2—滑行；3—起飞与爬升；4—巡航；5—巡航与战斗；
6—返航着陆；7—飞行后检查。

应急负载曲线图根据所有主发电机均遭到损坏的最坏情况下作出,制作应急负载曲线图时应保证继续飞行到降落地点必须工作的用电设备用电,其余的用电设备可以假定已被断开。

除了已指出上述两种负载曲线图外,还必须考虑在多发发动机的飞机上装有多台发电机,如果其中有的发电机发生故障,则应去掉一些次要用电设备,飞机还应完成一定的飞行任务,这就是不正常工作下的负载图。

正常工作电源负载图(图 1-7)和不正常工作下的负载图是选择主电源容量的主要依据,应急电源负载图是选择应急电源容量的依据。

在现代飞机上,主电源(发电机)通常都是由航空发动机来驱动的。为了保证电源系统的可靠性,一般选择发电机的数目与发动机数目相同,故主电源容量为发电机台数与发电机的额定容量的乘积。

以交流供电系统为例,单台发电机的功率为

$$S \geq \frac{KS_{\max}}{N} \quad (\text{kV} \cdot \text{A})$$

式中 $S_{\max}$ ——从电源负载图计算得到的最大消耗功率 ($\text{kV} \cdot \text{A}$);

N ——发电机台数;

K ——备用系数, 通常 $K = 1.3 \sim 1.4$ 。

主电源容量确定之后, 还要验证所选择的主电源容量能否满足设计要求。主要考虑的因素有: 发电机的转速影响, 转速下降, 发电机供电能力降低; 发电机并联运行的系统, 由于负载分配不均衡, 使电源总功率减小; 由于电网导线的阻抗压降而使供电能力下降; 发电机冷却方式对供电能力亦有影响, 如飞行高度增大, 用空气冷却的发电机的供电能力将下降。

应急电源是主电源系统以外的独立电源系统, 它的能源可来自空气涡轮或辅助动力装置等。飞机上的蓄电池也作为应急电源用。应急电源容量应根据应急负载图来选择, 以保证飞机能安全返航或就近着陆。

§ 1-3 飞机供电系统的特点与发展概况

一、飞机供电系统的工作特点

飞机供电系统与其它飞机电气设备一样, 由于有特殊的工作条件, 要满足飞机性能要求, 因而对它提出一系列技术要求, 下面介绍一些共同的基本要求:

(1) 要求供电系统工作可靠, 这是非常重要的要求, 直接关系到飞机的安全和战斗力的发挥;

(2) 供电系统的重量和尺寸要小, 这样可以使飞机的有效载荷增加;

(3) 供电系统的工作可靠, 要求不受周围介质条件的影响, 因为飞机可能处于不同的飞行高度、大气温度下。一般在 -55°C 到 $+60^{\circ}\text{C}$ 之间变化; 大气压力可以从海平面的 760mmHg 变化到 20000m 高度的 41mmHg; 周围空气的相对湿度在 $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 温度下可达到 95~98%;

(4) 供电系统的工作可靠, 要求不受空间位置、速度和加速度的影响, 例如飞机作机动飞行时, 设备元件可以受到强度达 10 g 长时间的加速度作用。飞机翻转时, 设备应能正常工作, 有工作液体的设备 (蓄电池等), 液体不应溢出。

还有由于发动机工作时产生的振动以及飞机着陆时受到撞击, 电气设备元件应能承受 10 g 以上的振动强度。

以上我们仅列出一些基本要求, 对整个供电系统及其设备元件来说是远远不够的, 对每一个系统或设备都有一个专门技术规范。以上引用的数据仅仅为了说明飞机供电系统及电气设备工作的特殊环境。其中一些要求, 对地面装置来说, 往往是没有意义的。然而对于航空设备来说, 这些要求可能起到决定性作用。

二、飞机供电系统的发展概况

在航空事业发展初期, 飞机仅限于白天、低空飞行, 而且航程短。飞机上的电气设备很简单。在早期飞机上电能仅用于点燃航空发动机内燃料混合气的电点火装置。以后

由于战争的需要,要求飞机能够实现夜间飞行和远距离飞行,1914年起飞机开始安装通讯电台、飞机内部照明、乘员的加温以及着陆灯。到20世纪20年代,直流发电机及其控制保护器以及蓄电池用于飞机以后,逐渐形成了飞机供电系统。

电能比其他形式的能量(例如液压能、气压能、机械能、化学能、人力等)有许多优点,电能容易输送、分配和变换,使用电能,很容易实现对飞机设备元件的控制并使它们的工作自动化;很容易实现各种不同的电量和非电量参数的远距离检测,在多种情况下,采用电能可以减小设备元件的重量和尺寸,可以在任何飞行条件下提高设备工作的可靠性,还可以提高飞机战斗受损后的生存力。因此,在所有飞机、直升机以及无人驾驶的飞行器上,电能都得到广泛的应用。

40年代以前的飞机上,都采用直流电源系统(6V, 12V),后来发展为28.5V的低压直流电源系统,并采用蓄电池为应急电源。

20年代中期,飞机上开始广泛应用电的方法来测量非电量参数(如电转速表、温度计、油量表等)。30年代开始应用电动液压传动装置来收放起落架,在这段时间里已采用电起动机来起动航空发动机。

由于飞机性能的进一步完善以及向高速和高空飞行过渡,带有电动装置的变距螺旋桨、调整片、襟翼、滑油散热器活门用的电动机构等相继出现。

在武器方面也使用了电动投弹器,炮塔的电气传动装置等。

在第二次世界大战之前,电能在飞机上已广泛地用于无线电通信、飞行控制及发动机控制的各种机构、控制轰炸和射击武器、照明和加温防冰等,已形成了一个较完整的飞机电气系统。

在第二次世界大战后,飞机性能在喷气技术发展的基础上有很大提高。用电设备数量和用电量均大幅度增长。为了减轻低压直流系统及设备的重量。英国曾在一些轰炸机和运输机采用过112V高压直流电源系统。但是,由于发电机在高空换向困难。这种系统没能推广使用。

航空电气设备的迅速发展是在60年代以后,现代飞机尤其是现代军用飞机,装备了大量用电设备,如飞行控制、导航、无线电通信、雷达、加温防冰、照明、信号、弹射救生、座舱温度调节以及电子对抗、导弹发射装置等。对民航机来说,旅客的生活服务系统也是重要的用电设备。

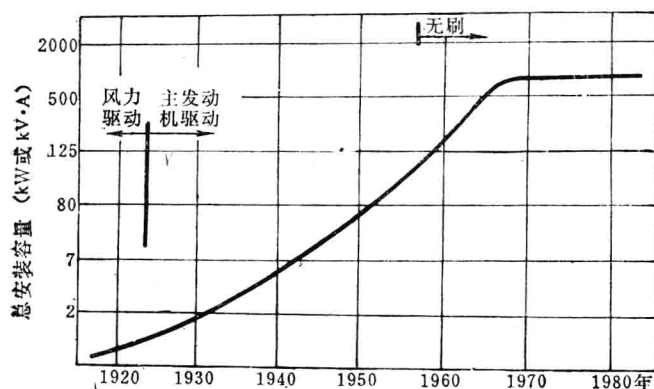


图1-8 机载电源安装容量的增长情况

随着飞机性能的提高, 机上用电设备增多了, 用电量也增大了。图 1-8 表示飞机电源安装容量的增长情况。从 20 年代末期到 70 年代飞机电源安装容量增长了几百倍。目前高性能的战斗机电源安装容量为 $60 \sim 120 \text{ kV} \cdot \text{A}$; 大型运输机和干线客机为 $120 \sim 270 \text{ kV} \cdot \text{A}$; 重型轰炸机为 $240 \sim 480 \text{ kV} \cdot \text{A}$; 正在发展中的指挥机可高达 $1200 \text{ kV} \cdot \text{A}$ (八台 $150 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 发电机)。

喷气技术在航空上应用后, 低压直流电源系统逐渐不适应超音速飞机和大型飞机的要求。50 年代以来开始采用交流电源系统, 其原因主要有:

(1) 机上用电功率不断增长

早期飞机的用电设备少, 用电量一般只有几十瓦到几百瓦。由于飞机性能的提高, 用电设备和用电功率大大地增加, 电源的安装容量已达几十千瓦, 甚至几百千瓦。若再沿用 28.5 V 的低压直流电源系统, 系统的重量和体积将增加很多。以飞机电网为例, 用低压电网传输大功率电流, 将导致电网导线很粗很重, 如某型轰炸机仅电网重量就达 630 kg , 约占飞机总重量的 1.75% 。若将电源电压由 28.5 V 提高到 120 V , 估算电网导线的重量可从 630 kg 降到 150 kg 左右。

(2) 飞机电源工作环境条件

直流电源系统中的直流电机有电刷和换向器, 就存在着换向和电刷磨损的问题。例如, 在高空条件下, 空气稀薄, 含水蒸汽量急剧减小 (在 10 km 高空约为海平面的 $1/300$), 使直流发电机换向困难, 电刷磨损严重。

在高空条件下, 由于空气稀薄, 发电机的冷却效果下降, 如在 15 km 高空上, 进入发电机的冷却空气量减少 $3/5$ 。

此外, 飞机速度的增大, 使得应用迎面气流通风冷却发电机渐渐成为不可能。例如, 当飞机速度为 2160 km/h , 在 $10 \sim 20 \text{ km}$ 高空, 用来冷却发电机的冷却空气温度达 180°C 。因此, 考虑新的冷却方法, 例如, 用液体作为冷却介质。但是, 直流电机的损耗将近 75% 在转子上, 采用液体冷却在密封等问题上有较大的技术困难。

(3) 功率变换问题

在低压直流系统中, 要获得与主电源不同的直流电, 一般采用直流升压机; 要获得不同电压、不同频率的交流电, 则用变流机。不论是升压机还是变流机, 其效率都在 60% 以下。以现代歼击机为例, 一般要将近 50% 的直流电功率变换成交流电功率, 变换的功率损耗大。变换设备也较笨重, 其重量功率比为 10 kg/kW 。此外, 升压机和变流机都有换向器, 也存在电刷磨损和高空换向问题, 因此工作可靠性差。后来采用了变流器, 工作可靠性等有所改善。

采用交流电作为主电源后, 基本上能适应现代飞机的要求, 因为:

(1) 交流发电机没有换向器, 特别是无刷交流发电机没有滑环, 高空性能好, 可靠性大大提高, 且便于采用液体冷却使重量减轻, 近期发展了喷油冷却的组合电源装置, 使交流系统更趋完善;

(2) 电源电压提高, 电网和配电设备的重量均大为减轻;

(3) 交流电不仅变压方便, 且变流也较方便, 应用变压器和变压整流器, 就可以获得不同电压的交流电和直流电。这些功率变换装置, 由于没有旋转部件, 因而可靠性高、体积小、重量轻, 其重量功率比为 $1.5 \sim 2 \text{ kg/kW}$, 效率在 80% 以上。现代飞机

一般只有 10% 左右的交流电功率需要变换成直流电。因此, 能量变换中的损失也小。

此外, 恒频交流电机与直流电机相比较, 重量轻、结构简单、可靠性高、寿命长。这也是恒频交流电源系统得到广泛应用的因素之一。

目前, 频率为 400Hz、电压为 115/200V 的三相四线制恒速恒频交流电源系统得到广泛的应用。

在电源系统控制方面, 由于半导体器件的发展, 晶体管式调压器和保护器逐步地取代了炭片式调压器和机电式控制保护器。晶体管式组合控制保护器的发展, 综合调节、控制和保护功能。提高了可靠性和减轻了重量。70 年代后, 半导体集成电路的发展和在航空上的应用, 不仅使发电机控制器重量和体积减小, 而且使电源系统有可能实现更多的控制和保护功能。并能实现故障检测和故障隔离, 进一步实现供电系统的自动化。

机械式液压恒速传动装置经过多年的研究, 在可靠性和维护性上有提高和改善 (表 1-3), 但是这种恒速装置在结构上存在的问题, 始终是恒速恒频系统的薄弱环节。因此, 60 年代在半导体发展的基础上, 发展了变速恒频交流电源系统。经过二十多年的研制, 在 1971 年正式装机使用。目前已研制出的功率为 $40\text{kV}\cdot\text{A}$ 、 $75\text{kV}\cdot\text{A}$ 等。

表 1-3 恒速恒频发电系统的重量和可靠性数据

项目	使用年代	40年代中期	50年代中期	60年代中期	70年代中期
系统功率 ($\text{kV}\cdot\text{A}$)		40	40	60	60
系统重量 (kg)		145	99	63	43
系统重量功率比 [$\text{kg}/(\text{kV}\cdot\text{A})$]		3.6	2.5	1.22	0.71
系统可靠性 (平均 故障间隔时间, h)		/	几百	1000	1500
系统特点		采用有刷气冷发电机、液压差动式恒速传动装置、炭片调压器、机电式控制板。	采用无刷气冷发电机、液压差动恒速传动装置、电磁式调节、控制和保护装置。	采用无刷油冷发电机、轴向齿轮差动式恒速传动装置、晶体管式控制板。	采用组合电源装置、集成电路式的发电机控制装置。

采用这种变速恒频电源系统, 对整个交流供电系统体制来说, 只是一个更换电源装置的问题。目前变速恒频电源系统已开始装机试用。

变速恒频电源装置的采用是恒频电源系统的一个进展。它排除了恒速恒频交流电源系统存在的可靠性差、维护费用高的缺点。供电质量也提高了。但是, 整个交流供电体制未变, 如交流系统重量大 (与高压直流系统相比)、不易实现不中断供电以及不适应机电作动系统和全电飞机的发展等问题依然存在。

从另一方面来讲, 要进一步减轻系统重量, 不是提高系统工作电压值, 就是改变供电体制。提高交流系统的电压只能在一定程度上减轻重量。因此, 在现代科学技术高度发展的条件下, 又重新提出发展高压直流电源系统。

由于高压直流系统具有可靠性高、简单、易实现不中断供电, 适应机电作动系统和全电飞机发展的要求等优点。而所存在的技术问题 (如开关装置断弧问题) 是可以解决的。

在 70 年代末期, 为了适应机电作动系统和全电飞机的发展。某些国外航空制造公