

航空高等院校教材

飞机交流电源系统

《飞机交流电源系统》编写组



国防工业出版社

飞机交流电源系统

《飞机交流电源系统》编写组

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系统地叙述了飞机交流电源系统的主要组成元件（同步发电机、恒速传动装置、电压调节器、控制保护器等）的工作原理，以及飞机电源的并联运行中的无功功率和有功功率的调节。同时也阐述了飞机交流电源设计的有关问题，并列举了一些典型线路。此外对变频器也做了简要的介绍。

本书为高等航空院校的教材，也可供从事飞机电气工程的科研、设计、制造和使用维护的技术人员、工人参考。

飞机交流电源系统

《飞机交流电源系统》编写组

*

国防工业出版社 出版

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装

*

787×1092¹/₁₆ 印张17¹/₄ 400千字

1979年12月第一版 1979年12月第一次印刷 印数：0,001—1,900册

统一书号：15034·1943 定价：1.80元

目 录

第一章 概论	1	§ 5-4 同步发电机并联运行稳定性的 基本概念	120
§ 1-1 飞机电源系统的发展概况	1	§ 5-5 无功电流的自动均衡	122
§ 1-2 飞机交流电源系统的基本形式	5	§ 5-6 有功电流的自动均衡	139
§ 1-3 飞机交流电源系统的基本参数	7	§ 5-7 投入并联的自动控制	142
§ 1-4 飞机交流供电的质量要求	11	第六章 飞机交流电源系统的 控制与保护	152
第二章 恒速传动装置	17	§ 6-1 概述	152
§ 2-1 概述	17	§ 6-2 飞机交流电源系统典型 控制线路之一	154
§ 2-2 齿轮差动式液压恒速传动装置	20	§ 6-3 飞机交流电源系统典型 控制线路之二	161
§ 2-3 恒速传动装置的转速调节和保护	27	§ 6-4 飞机交流电源系统保护线路的 一般问题	164
§ 2-4 恒速传动装置的技术要求和 基本数据	34	§ 6-5 短路故障及差动保护	170
第三章 飞机交流发电机	36	§ 6-6 激磁故障保护	173
§ 3-1 概述	36	§ 6-7 不稳定故障保护	184
§ 3-2 无刷交流发电机的特性和参数	41	§ 6-8 同步汇流条短路故障与逆序保护	189
§ 3-3 无刷交流发电机的激磁系统	45	§ 6-9 转速(频率)故障及其保护	193
§ 3-4 无刷交流发电机的激磁方式	56	§ 6-10 飞机交流电源控制保护装置示例	197
§ 3-5 飞机交流发电机的结构和冷却简介	63	第七章 飞机交流电源的设计问题	201
第四章 飞机交流发电机电压的 自动调节	66	§ 7-1 概述	201
§ 4-1 概述	66	§ 7-2 电源容量的确定	203
§ 4-2 检测比较电路	70	§ 7-3 二次电源——变压整流器	207
§ 4-3 磁放大器式调压器的基本工作原理	78	§ 7-4 飞机电网计算	214
§ 4-4 晶体管式调压器	82	第八章 变速恒频交流电源系统的 基本原理	235
§ 4-5 静态偏差	95	§ 8-1 概述	235
§ 4-6 自动调压系统的静态设计	99	§ 8-2 交流-交流变频器	236
§ 4-7 温度偏差	107	§ 8-3 交流-直流-交流变频器	253
§ 4-8 其它典型调压线路	105	§ 8-4 恒速传动装置与变频器的比较	269
第五章 飞机交流电源的并联运行	112	主要参考资料	270
§ 5-1 概述	112		
§ 5-2 飞机交流电源的并联条件	113		
§ 5-3 无功功率与有功功率的调节	118		

第一章 概 论

§ 1-1 飞机电源系统的发展概况

飞机电源是现代飞机上不可缺少的重要组成部分。它的作用是产生电能以供应机上各种用电设备（如雷达、飞行控制、导航、通信、武器控制、照明、加温防冰等）用电。

现代飞机电源系统一般由主电源系统、二次电源和应急电源等组成。主电源系统是飞机上全部电负载的能源。二次电源是用来变换主电源的电压、电流或频率的电源设备。应急电源是一个独立的电源系统，当主电源系统不能提供足够功率（或主电源系统完全失效）时，向机上的重要用电设备供电。此外，少数中、大型飞机上还有辅助电源系统，它的作用是在航空发动机不运转时，给机上用电设备供电。

在早期（四十年代前）的飞机上，绝大多数飞机上都采用直流电源系统（6 伏，12 伏），后来发展为 28.5 伏的低压直流电源系统。并采用蓄电池为应急电源。这种低压直流电源系统一直沿用到现在。五十年代以来，有些飞机上逐渐发展和采用了交流电源系统。

随着飞机性能和自动化程度的日益提高，用电设备的类型和数量都增多了，用电量也大了。飞机对电源系统的依赖性越来越大，飞机电源系统工作的可靠性、供电质量、重量等都直接影响到飞机的安全和性能。因此要求飞机电源系统可靠性高、重量轻、体积小、供电质量好和维护方便等。

图 1-1 表示飞机电源系统安装容量的增长情况，从二十年代末期到七十年代，机载电源的安装容量增加了几百倍。目前高性能的战斗机电源的安装容量一般为 60~120 千伏安，大型运输机为 120~270 千伏安，重型轰炸机为 240~480 千伏安。正在发展中的指挥机甚至高达 1200（八台 150 千伏安发电机）千伏安。

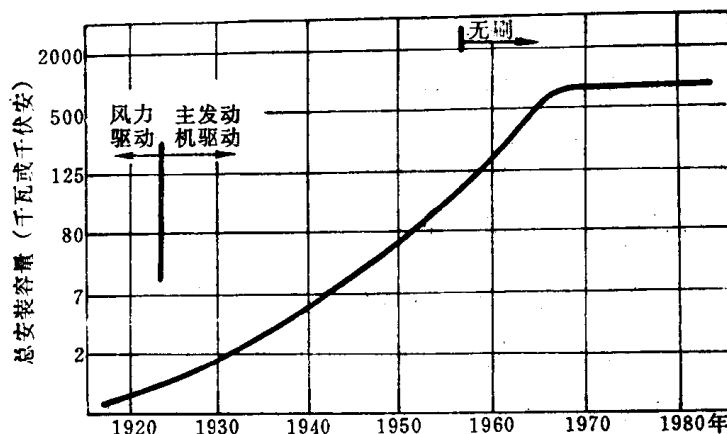


图1-1 机载电源系统安装容量增长情况

随着航空技术的迅速发展，尤其是喷气技术在航空应用之后，低压直流电源系统逐渐不适应现代飞机的要求。因此，五十年代以后开始采用交流电源。

现代飞机为什么逐渐采用交流电源来代替低压直流电源?我们从三个主要方面来说明。

一、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。由于航空技术的迅速发展,飞机的速度、高度、航程等性能均有很大提高。对电气化、自动化的要求也不断提高。因此,用电设备和用电功率大大地增加。电源的装机容量已达几十千瓦,甚至几百千瓦。若再沿用 28.5 伏的低压直流电源系统,供电系统的重量、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 公斤,约占飞机总重量 1.75%。由此可见,供电系统的重量过大,势必影响飞机的性能。

减轻飞机供电系统重量的有效途径之一,是适当地提高电源电压。仍以上述飞机电网为例,若将电源电压由 28.5 伏提高到 120 伏,估算电网导线的重量可降到 150 斤左右。

但是,电网电压的升高,将引起直流电机的换向条件恶化,以及开关电弧的熄灭等问题,降低了电源系统工作的可靠性。120 伏高压直流电源系统仅用于个别飞机上。

二、飞机电源工作环境条件的变化

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。在一般环境条件下,炭刷的磨损不大,换向情况也正常。但是近代飞机高度和速度的增大,环境条件变得不利于直流电机的正常工作。例如,在高空条件下,大气空气稀薄,含水量急剧减小(在 10 公里高空约为海平面的 $\frac{1}{360}$),使直流发电机换向困难,炭刷磨损变得很严重。尽管航空电刷取得了较大进展,但仍不能从根本上改变这种情况。

初期交流发电机也有滑环和炭刷,由于电流密度比直流发电机炭刷上的小得多,所以电刷磨损情况比直流发电机好些。

在高空条件下,由于空气稀薄,发电机的冷却效果下降。例如,在 15 公里高空时,进入发电机的冷却空气量减少五分之三。

此外,飞机速度的提高,使得应用迎面气流(通风)冷却发电机渐渐成为不可能。例如,当飞行速度为 2160 公里/小时,在 10~20 公里的高空,用来冷却发电机的冷却空气温度达 180°C。因此,要考虑采用新的冷却方法。例如应用液体作为冷却介质。但是,直流电机的损耗将近有 75% 在转子上,采用液体冷却的方法在密封等问题上有较大的技术困难。

三、功率变换问题

现代飞机上的雷达、导航、飞行控制系统等用电设备需要各种不同电压的交流电和直流电。因此,就有从主电源系统得到不同电流种类、电压大小的功率变换问题。

如果主电源系统是低压直流系统,要获得与主电源不同的直流,一般采用直流升压机;要获得不同电压(不同频率)的交流电,则采用变流机。不论是升压机,还是变流机,其效率很低(在 60% 以下),以现代的歼击机为例,一般要将 50% 左右的直流电功率变换成交流电功率,因此能量变换时损失较大,功率变换设备的重量也大(一般为 10 公斤/千瓦)。

此外升压机和变流机都存在换向器，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，虽然解决了工作可靠性问题，但目前重量、效率和质量等都有待改进提高。

采用交流电作为主电源后，上述问题可得到适当解决，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，同时采用液体冷却（即循油冷却），工作可靠性大大提高。近期发展了喷油冷却的组合电源装置，使系统更趋完善；

(2) 电源电压提高，电网等设备重量可大为减轻；

(3) 交流电不仅变压方便，而且变流也较方便。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，由于没有旋转部件和电刷，因而可靠性高、体积小、重量轻（重量功率比 1.5~2 公斤/千瓦）、效率高（在 80% 以上）。此外现代飞机一般只有 10% 左右的交流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、制造方便、可靠性高、寿命长。这也是恒频交流电系统得到广泛应用的因素之一。

为了解决低压直流电源不适应航空技术发展要求，曾探讨了多种途径。出现了各种方案，例如，高压直流系统、变频交流电系统、恒速恒频交流电系统、变速恒频系统以及双流发电机系统等等。但是目前以频率为 400 周/秒、电压为 115/200 伏的三相四线制恒速恒频交流电源系统得到最广泛的应用。下面将简要地介绍一下：恒速恒频交流系统的发展概况。

四十年代中期到五十年代中期，这是恒速恒频交流系统发展的最初阶段。1946 年首次应用液压恒速装置获得恒频交流电源，并装备了飞机。这一时期的电源系统采用液压差动式恒速传动装置、气冷有刷交流发电机转速为 6000 转/分、炭片调压器和机电式控制保护器。

随着高空高速飞机的出现 ($M > 2$ 和高度大于 2 万米)，使有刷交流发电机的使用受到了限制。五十年代后期，无刷交流发电机研制成功，用旋转整流二极管来取代炭刷、换向器和滑环，从而大大提高了飞机交流发电机的寿命和高空性能。同时，为了满足高空高速飞机的需要，成功地利用发动机滑油在发动机壳体及空心轴内循环来进行冷却，并把转速提高到 8000 转/分。

同时半导体技术的发展，使晶体管式调压器和控制器，逐步地取代了炭片式调压器和机械式控制保护器，并发展晶体管式组合控制保护器，它综合了调节、控制和保护的功能，进一步减轻重量，提高了可靠性。这个时期，恒速恒频交流系统得到了广泛使用。

早期的液压差动式恒速传动装置是靠液压马达和液压泵来传递功率的。这种恒装的寿命较短，可靠性差。六十年代初期，发展了轴向齿轮差动式恒速传动装置，大部分功率由差动齿轮来传递，而液压马达和液压泵起到控制，并传递小部分功率，从而减轻了重量，提高了可靠性和寿命。

七十年代以来，恒速恒频交流系统有了新的发展，其特点是发电机采用喷油冷却并和恒速装置结合成一体，构成组合电源装置，同时采用集成电路为主体的发电机控制器。

喷油冷却方法综合了气冷和循油冷却方法的优点，把增压滑油直接喷到发电机绕组及其他发热部件上，显著地提高冷却效率，使发电机重量减轻25%左右，寿命及可靠性大大提高。喷油冷却发电机的转速从8000转/分提高到12000转/分。并采用高导磁磁钢（铁钴钒），从而使发电机的重量可减轻50%左右。此外，喷油冷却发电机还能在150%额定负载下连续运行，因为喷油冷却效果极好，以致于它的额定容量不是由散热能力来确定的，而是由正常规定的性能要求（如短路能力、过载、电压瞬变、波形等）来确定的。目前采用的喷油结构有喷嘴和堤坝两种。

组合电源装置是六十年代后期出现的。它把轴向齿轮差动式恒速传动装置和喷油冷却发电机组合在同一壳体中，共用一个油腔，省去一个轴承，取消旋转油封。从而减轻了重量，并提高了可靠性。

半导体集成电路在航空上的应用，不仅可减少发电机控制器的重量和体积，而且使电源系统有可能实现更多的保护功能。并能实现故障的预检测和故障隔离，进一步实现供电系统的自动化。

图1-2为恒速恒频系统重量减轻的情况。表1-1则列出恒速恒频系统的重量和可靠性数据。目前恒频电源系统一般具有过压、欠压、过频、欠频、差动等保护，并联运行的系统还具有过激磁、欠激磁和同步汇流条保护。有的飞机电源系统还具有开相、过载、防振荡、发电机轴承和旋转二极管过热故障保护等项目。

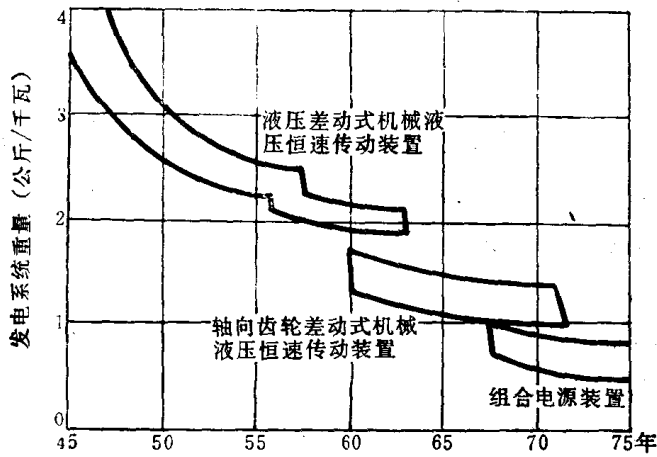


图1-2 恒速恒频发电系统重量的下降

表1-1 恒速恒频发电系统的重量和可靠性数据

项 目	使用年代	四十年代中期	五十年代中期	六十年代中期	七十年代中期
系统功率(千伏安)		40	40	60	60
系统重量(公斤)		145	99	63	43
系统重量功率比(公斤/千伏安)		3.6	2.5	1.22	0.71
系统可靠性(平均故障间隔时间, 小时)		/	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。

§ 1-2 飞机交流电源系统的基本形式

交流电源系统的形式随着飞机类型和其性能、任务以及用电设备的不同而有所不同。电源系统形式的选择或改变是涉及到生产、使用等一系列因素。同时又要考虑到继承性问题。因此，为新机种选择一个合理的而又满足飞机性能要求的交流电源系统是一个复杂的综合技术问题。

目前国内外正在使用的飞机电源系统是多种多样的，有低压直流系统、恒速恒频交流系统、变频交流系统、交流和直流的混合电源系统以及高压直流电源系统等。但现代大、中型飞机广泛地采用恒速恒频交流电源系统。

下面从原理上讨论一下飞机交流电源系统的基本形式。

一、变频交流电源系统

现代的喷气式飞机的发动机在地面空载和最大功率运转时的转速变化范围很大(例如，涡轮喷气发动机为 1:3；涡轮螺旋桨发动机为 1:1.3)。当交流发电机直接由发动机来传动，发电机的输出频率也将在这个比例范围内变化。以这种发电机作为飞机主电源，即是变频交流电系统。

变频交流电系统的优点是不需要恒速传动装置，因而系统重量轻、结构简单、可靠性高、维护方便、成本低、效率高(可达 80% 以上)。

一些防冰和加温负载比例很大的大型运输机和民航机可先考虑选用这种变频交流电源系统；一些对电源系统要求不高的飞机和直升飞机也可考虑采用这种电源系统。

这种电源系统的主要缺点是发电机之间很难并联运行。在非正常情况下(如故障状态)，不间断供电的能力不如恒频交流电源系统。并且要附加一些恒频电源装置(供应飞机上需恒频的用电设备)，使配电网络的布局上变得复杂一点，并使整个供电系统的重量增加。此外，对用电设备来说，会使变压器、电动机等重量增加。

由于这种变频交流电源系统的完整性(所谓完整性指的是供电系统在非正常情况下保持系统功能所固有的能力)不如恒频交流电源系统，因此，这种电源系统的适用性差，没有得到广泛使用。

二、恒速恒频交流电源系统

为了在飞机上获得恒频交流电，方法之一就是在电源系统中增加一个称之为恒速传动装置设备。该设备置于发动机传动机匣与发电机之间(图 1-3)，它把转速变化的发动机输出功率转换成恒速的输出功率加到发电机上，从而保证飞机发电机输出恒频交流电。



图 1-3 恒速恒频电源系统方块图

根据发电机的要求，恒速传动装置的输出转速一般为 6000、8000 转/分和 12000 转/分。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。目前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功率小于 30 千伏安的交流发电机。

恒速恒频交流电源系统具有下列一些优点，因此恒速恒频交流电源系统获得了广泛应用。这些优点是：

(一) 恒速恒频电源系统中使用的用电设备和配电系统重量轻，因此整个电气系统的重量功率比小。此外供电质量好、配电系统简单、保护简单、能并联运行，并具有供电系统完整性等优点。

(二) 目前飞机上有相当比例的电动机负载（一般可达发电容量的 30% 或更高），这些电动机必须以恒频交流电供电。恒定频率的电源，对用电设备的设计有利，有利航空装备的标准化。

(三) 由于这种恒速恒频电源系统具有高的系统完整性，对发展和采用电传操纵系统提供可靠电能源。

恒速恒频电源系统的缺点主要表现在恒速传动装置上。虽然恒速传动装置经历了二、三十年的发展，有了很大的进展。但是这个装置始终是这种电源系统中成本最高，维护最困难、可靠性低（与系统其他部件比较而言）的环节。目前广泛使用的机械液压式恒速传动装置存在着结构复杂，加工要求高，无法用于起动状态等缺点。这些因素促使了发展从另一途径以获得恒频交流电，即发展变速恒频交流电源系统的原因。

三、变速恒频电源系统

在变速恒频电源系统中，发电机是直接由发动机来传动的。由于发动机的转速不是恒定的，因而发电机输出的交流电的频率也是变化的。然后再用变换装置把变频交流电变换成频率为恒定的（例如 400 赫）交流电。这是获得恒频交流电的另一方法。目前变速恒频系统从变换方式上分，有两种形式：

(一) 交-直-交变速恒频电源系统

这种变速恒频系统由一台普通的航空无刷交流发电机，变换装置以及控制、保护设备等所组成。图 1-4 表示这种变速恒频系统的原理示意图。

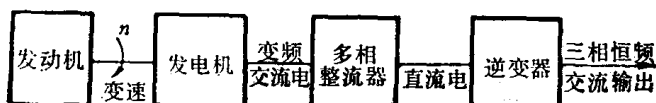


图1-4 交-直-交变速恒频系统方块图

发电机输出的变频功率经多相整流器变为直流电。再经三个独立的逆变器（可控硅式变流器）把直流电变换成矩形波的交流电。三相矩形波交流电经过波形综合就得到三相正弦波的交流电。经滤波器使输出波形平滑。

(二) 交-交变速恒频电源系统

这种变速恒频系统是由一台高频交流发电机、变换装置以及控制、保护设备等所组成。图 1-5 表示这种变速恒频系统的原理示意图。

系统的基本工作是：交流发电机输出的较高频率的交流电直接通过变频器（可控硅式变频器）变换成为所需要的三相恒频交流电。为了防止对电源系统的干扰，发电机的输出

电缆等均需加屏蔽。

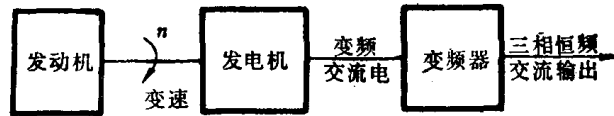


图1-5 交-交变速恒频系统方块图

我们简单的介绍了上述二种变速恒频电源系统的基本概念。关于这种变速恒频电源系统的详细工作过程，将在本书中第八章中叙述。

这种变速恒频电源系统在国内正在广泛进行研制。由于存在一些技术问题（如在容量相同的条件，它的重量比组合电源重等），还没有在飞机上正式使用。

四、混合电源系统

混合电源系统（有时也叫复合电源系统）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。从目前的飞机装备情况来看，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发电容量增加的矛盾。

由于混合电源系统是由二个（或二个以上）不同类型的电源系统组成的，因而它综合了这些电源系统的优点，能够不经过功率变换可直接获得另一种形式的电功率。这种混合电源系统的最大缺点是配电系统较为复杂。

近年来，专门用于混合电源系统的交直流双输出发电机已研制成功，使混合电源系统的重量有所减轻，可靠性得到提高，必须指出，这种混合电源装置仅用于小容量的飞机电源系统中。

§ 1-3 飞机交流电源系统的基本参数

交流电源系统的参数包括电压、频率、相数和连接方法。这几个参数的选择与电源系统以及用电设备的重量，尺寸和性能有密切关系，因而必须从整个机载电气系统的角度对它们进行研究和讨论。

一、电 压

在确定电源系统额定电压值时应考虑许多因素，主要是：

馈电线的总长度以及传输功率的大小；

配电系统的重量；

电源设备和用电设备的重量；

电网所允许的电压降；

系统高空工作的可靠性；

人员的安全性；

短路电流的大小；

功率损耗，

绝缘强度和熄弧时间等。

在这些因素中传输功率的大小以及配电系统重量的合理性往往是起着主导作用。在飞机主电源系统的形式从低压直流变为三相交流的过程中，把电压从 30 伏增至 115/200 伏就是为了解决发电机安装容量增加导致配电系统重量过大的矛盾。在额定功率、馈电线长度和电流密度相同的条件下，115/200 伏 400 赫三相（功率因数为 0.75）的交流系统的配电线重量仅为 28 伏低压直流系统的 30%。目前有趋势把交流电源系统调节节点的电压从 115/200 伏增至 230/400 伏，也正是为了排除由于发电机安装容量增加而使配电系统重量过大的缺点。图 1-6 表示采用 115/200 伏和 230/400 伏的两种发电机馈电线重量的对比。

电压提高能使配电系统重量下降，因为在同样负载的条件下高电压可选用截面积小的导线；同时所允许选用的馈电线电压降也增加，这样可选用更细的导线。但必须指出，导线截面积的减小不得超过其机械强度所规定的限度，如 0.2 毫米²。所以过份提高电压也不能进一步减轻导线的重量，因为此时导线截面积并不由电流密度或馈电线电压降来决定，而是为导线本身的机械强度所限制。一般情况，按机械强度来选择的导线重量约占导线总重量的 20~30%，根据电压降或功率损耗来选择的导线重量约占 70~80%。

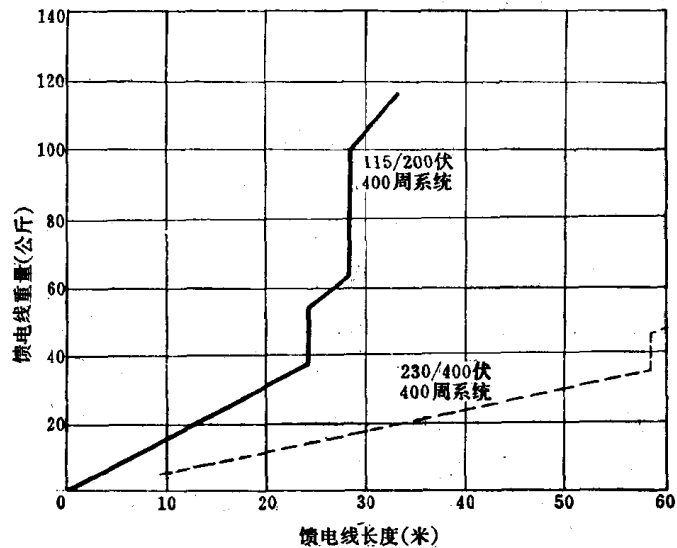


图1-6 90千伏安系统的发电机馈电线的重量

当然，其他因素也是起作用的。对用电设备来说，选用电压的高低与其重量是有一定关系的。但研究表明，除非电压值大约在 600 伏以上，工作电压对用电设备重量的影响不大。

从确保人员安全的观点出发，400~2000 赫交流电的电压值不得超过 40 伏。因而仅考虑人员的安全，并不希望工作电压过高。

从系统高空工作可靠性的观点出发，也不希望工作电压过高。经验证明，当电压在 30 伏以下时，短路的后果实际上并不危险。当电压较高时，特别在直流的情况下，火灾的危险性增加。

从功率损耗的角度来说，当然采用较高的工作电压为好。

综合上述各种因素的影响，并在试验使用的基础上可得出交流主电源系统目前采用 115/200 伏的电压值较为合适。当然，把 115/200 伏作为额定电压值，继承性也是个原因，因为早在飞机低压直流系统为主电源的四十年代，就用变流机向交流用电设备提供 115 伏单相功率了。

二、频 率

机载电气系统中大部分的元部件的尺寸、重量以及性能都与电源系统的频率有很大关系。目前，飞机上主电源的频率额定值都定为 400 赫。但这些并不是说，已证实 400 赫为最佳频率。

在确定电源系统频率额定值时，需要考虑的因素有：

对整个机载电气系统重量的影响，
对供电系统以及用电设备性能的影响，
目前材料的部件，如磁性材料和轴承的生产水平。

在这三个因素中，对设备重量的影响是首要的，是选择使用频率的主要准则。下面我们讨论一下频率对一些主要设备重量的影响。

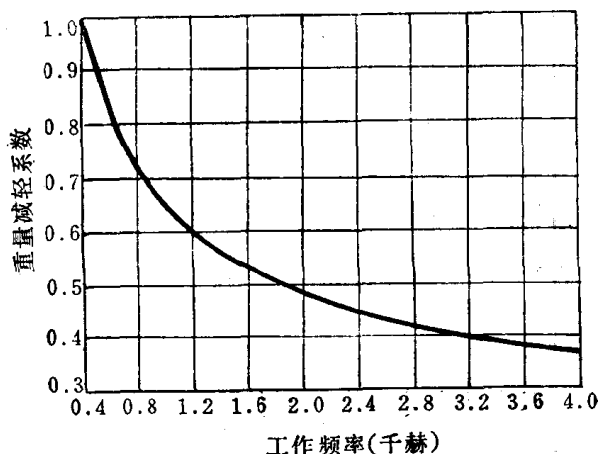


图1-7 变压器重量减轻与频率的关系

对变压器和磁放大器这类静止的电磁装置来说，重量将随着频率的增加而下降。图1-7表示功率在 10 伏安~10 千伏安之间的采用普通材料制成的变压器的重量与工作频率的关系。

对航空电子设备来说，当提高电源频率时能减轻一些重量。因为电源变压器、滤波器、电容器等元件的重量有所下降。

对发电机和电动机等设备来说，则有个最佳频率值。电机的有效材料的重量将随着频率的上升而下降。

对发电机来说，在提高频率而电压不变的条件下能产生更大的功率。而在转速不变的频率增加的情况下，只有在提高极对数的条件下才会减轻重量。就目前发电机的功率和转速条件下，电磁激磁的发电机的频率在 300~500 赫以及永磁发电机约为 800 赫较为合适。

对电动机来说，转速高能使其重量减轻。但并不要求过高的频率，因为电动机只能在轴承所允许的转速范围内工作。由于一般要求电动机的转速在 8000~12000 转/分的范围之内，又要求不带齿轮机构的电动机大部分能设计成 3 或 4 对极的，以便使电动机在所希望的转速范围内具有足够数量的转速等级，从而确保电动机在使用中有灵活性。根据频率是与转速和极对数乘积成正比的关系式，就得出最佳频率大约为 400 赫。另外，对需要减速齿轮机构的电动机来说，更不希望频率过高，因为转速的选择还受到齿轮机构效率的影响，而效率随着传动比的增加而下降。

对配电线来说，其重量随着频率的提高而增加。因为频率高时导线的阻抗就增加，这就使得导线上的电压降和损耗增大，为了使导线的电压降和损耗保持在所允许的范围之内，就得加大导线尺寸，致使导线重量增加。并且导线重量和损耗的增长是随着导线尺寸的加大而加剧的。如就 115/200 伏 400 赫交流系统而言，对 13.6 毫米²或更细的电缆来说重量和损耗的增加约为 1%，对粗一点的 53.2 毫米²的电缆则约为 11%，对更粗的 84.9 毫米²的电缆则为 30%。应该指出，当频率高时，如上千赫，导线还得加屏蔽。这将使配电线

重量大为提高。另外，频率升高引起配电线重量增加的数值甚至会比它导致用电设备重量减轻之值更大。

上面在讨论频率对设备重量的影响时已涉及到一些对设备性能影响的内容，下面再讨论一下频率对转换元件性能的影响。频率的高低对转换元件触点间的电弧熄灭过程是有影响的。实验证明在 400~600 赫的频率范围内，电弧燃烧时间最短。并且电弧熄灭之后，触点间电压的增长率比电弧期间空气介质强度的恢复率慢。因此，电压第一次过零电弧熄灭后，电弧就不再产生。故目前转换元件的最佳工作频率在 300~600 赫之间。

从上述分析可看出，飞机电源系统的频率选在 400 赫左右是合理的。另外，把频率额定值定为 400 赫，继承性也是个原因。因为早在四十年代，飞机上已使用 400 赫的交流电了。

三、相 数

以交流电为主电源系统的飞机上，基本上采用三相制。在某些混合电源系统的飞机上也有采用单相制的。

三相交流系统与单相交流系统相比较，具有许多优点，主要是：在输送相同功率条件下，三相输电的用铜量仅为单相输电用铜量的四分之三；

三相电动机的性能比单相电动机的性能好，结构简单，起动容易；

三相（四线制）交流系统有两个电压值，即相电压值和线电压值，因此可节省一些变压器；

三相交流系统的生命力高，不会因一相导线损坏断开而使整个系统失去供电能力。

单相交流电源系统的优点是：单相系统的配电设备比三相系统简单，用飞机壳体作为电网的回线，则配电系统重量可减轻以及保护装置简单等。

四、连接方式

目前采用交流主电源系统的飞机都采用四线制，也就是 Y 形连接以及中线接地的方式。采用四线制有下列优点：

以飞机壳体代替中线，从而减轻了电网设备的重量；

在三相电路中用三相开关，在 115 伏单相电路中则用单相开关；

在电动机也接地的条件下，可使电动机在一相开路时也能满意地起动和运行。这就提高了系统供电的可靠性；

不需附加导线，即能提供 115 伏的交流电；

多相功率以 200 伏的电压传输，而不是接地的 115 伏电压。

当然，四线制也有不足之处。一方面是存在零序电流，使电流的波形畸变。不接地的三相交流电源系统也有它的独到之处，即仅一根线接地不会出现故障；对其他设备的感应干扰小；由于三次谐波电压相抵消，改善了发电机的谐波特性。

五、结 论

在目前的技术条件下，以绝大多数现役飞机电源系统的安装容量为基础，综合考虑电

源和配电系统以及用电设备方面的影响，采用下列基本参数是合理的：

- (1) 三相四线制；
- (2) 额定电压 115/200 伏（发电机端 120/208 伏）；
- (3) 额定频率 400 赫。

应该指出，只是说 115/200 伏 400 赫三相四线制交流电源系统在目前大多数情况下是令人满意的。根据航空技术发展情况，可能采用较高电压的系统，例如采用 230/400 伏 400 赫三相四线制交流电源系统。另外，研究表明，在超音速运输机上系统的最佳频率应在 800~2400 赫之间，相电压应在 230~575 伏之间。

§ 1-4 飞机交流供电的质量要求

飞机供电系统的质量指标除了功率特性的全部指标应符合一定的技术要求之外，还应包括在所有飞行条件下的供电可靠性、战斗或事故条件下的供电完整性或不间断性、保护和转换装置的快速性和准确性、系统的电磁相容性等等。有些特性是很难用数字和图表来描述的。下面仅讨论能用数字和图表来衡量的几项特性的指标。

一、稳态电压极限

所谓稳态电压极限指的是在稳态条件下用电设备端电压的最大变化范围。这个极限的大小主要受以下三个因素的影响，即电源系统的电压精度，线路压降以及电压不平衡。

电源系统的电压精度就是调压精度，其定义为

$$\text{电压精度} = \frac{\text{稳态时调节点上的最大电压偏差}}{\text{额定电压}}$$

电压精度主要与负载变化、波形变化（虽然通常用有效值来表示电压大小，但感受电路检测之值却在平均值和峰值之间）、漂移和温度、设备的互换性以及电源系统的频率精度（转速容差）等因素有关。在工程上常用电压偏差来表示电压精度。电压精度最早定为 115 ± 5 伏，到六十年代定为 115 ± 3 伏，目前达到 115 ± 1.5 伏的水平。事实上就是说明了系统调压技术水平的提高。

应该指出，用电设备端的电压变化要比电压精度的范围大，因为从调节点到用电设备之间还有线路压降。根据用电设备的要求，通常按线路压降的大小把用电设备分成 A、B 和 C 三类。它们所允许的线路压降分别为 2 伏、4 伏和 8 伏。A 类电设备为数很少，使用它必须特别注明；飞机上大部分用电设备都属 B 类；C 类用电设备是那种能在比 B 类用电设备所允许的稳态电压极限范围宽的电压范围内工作的设备，它们通常是间断工作的。

把电压精度，线路压降以及电压不平衡的大小等相加就得到稳态电压极限值。目前正常稳态电压极限度定为 108~118 伏，应急状态下稳态电压极限定为 102~124 伏。

稳态电压极限的大小对用电设备的性能、可靠性和重量影响较大。因为，若能给出电压变化范围较小的交流电，就能使电动机产生更大的输出力矩以及给出更精确的输出；就能使采用半导体器件的电子设备具有更高的可靠性，因为降低了半导体结点的温度，就能省去或减轻许多用电设备中装有的稳压装置，从而减轻设备重量。

二、电压不平衡

相电压不平衡既是影响稳态电压极限的主要因素之一，又是供电质量的指标之一。制造良好的发电机在负载对称的条件下电压一般总是对称的。相负载不平衡是造成电压不平衡的主要原因。电压不平衡这个指标二十多年来一直是这样定的，当两相间的不平衡负载达到15%的额定电流时，允许最大相电压与最小相电压之间有3伏的差值。这个要求限制了发电机的电抗，并使之具有大的故障电流容量。

电压严重不平衡将产生一些不良的后果，即

- (1) 使单相用电设备上的电压较大地偏离额定值。因为调压器无法在电压不平衡的情况下使三个相电压都保持为额定值；
- (2) 降低了异步电动机的输出力矩。此时，除正向力矩外，还产生了与逆序电压平方成正比的逆向力矩；
- (3) 电机转子发热加剧。三相电压不对称时，逆序磁场感应出的电流使转子发热；
- (4) 三相整流器输出电路中出现低频的电压脉动。

三、电压瞬变

电压瞬变是指电压值超出稳态极限，并在一定时间内回到稳态极限内的短暂的变化状态。无论原动机转速突然变化还是负载突然变化都会引起电压瞬变。但常以负载转换法为手段来测量一个供电系统的电压瞬变性质。由负载突然变化到调压过程结束，即进入稳态所经历的时间叫做瞬变的持续时间。说明电压瞬变的另一项特性是幅值，即突然加上负载时电压的最大下降值或突然卸去负载时电压的最大上升值。在工程上，衡量一个供电系统的电压瞬变特性是用一数学函数，即

等值阶跃函数来表示的。根据瞬变浪涌电压与其等值阶跃函数作用相当的原理，要求把一复杂的瞬变浪涌电压转换为它的等值均方根值的函数。图1-8是B类用电设备的交流浪涌阶跃函数包络线，其中曲线5和6对应着10%~85%~10%的负载转换法，曲线2和3对应着20%~170%~20%的负载转换法，曲线1和4是非正常工作条件下的要求。

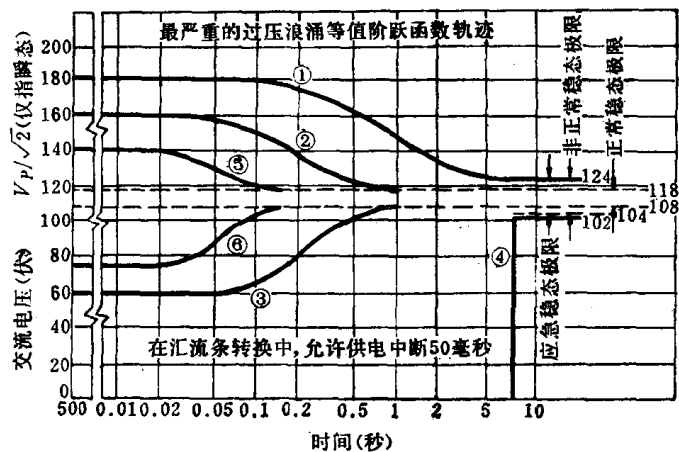


图1-8 B类用电设备的瞬态浪涌交流电压阶跃函数轨迹极限

当电压浪涌功率过大时，会给用电设备带来一些问题，如使半导体器件损坏或使机载计算机等设备误动作。

目前由于对机载电压瞬变现象研究的深入及测试技术的改善，电压瞬变应由两部分组成，把那种持续时间较长的电压瞬变现象称之为电压浪涌，它主要是由于供电系统内在的调节作用以及供电系统某部分故障或误动作引起的。把那种持续时间较短的电压瞬变现象称之为电压尖峰，它通常是由于负载转换而引起的。与电压浪涌相比，电压尖峰的幅值要

大得多。不论从系统的电磁相容性还是从航空电子设备可靠性的观点出发，都要求对电压尖峰作出适当的限制。

四、电压波形

交流电压的波形可用波峰系数、总谐波含量、单个谐波含量、畸变系数等项指标中的几个来衡量。如用波峰系数、总谐波含量和单个谐波含量，或者用波形畸变系数，波峰系数或直流分量。用前三项指标来规定对电压波形的要求是目前用得较多的一种形式。在制定这些指标时不但考虑了发电机本身，而且考虑了非线性用电设备对谐波含量的影响。一般规定波峰系数为 1.41 ± 0.1 ；总谐波含量的有效值不得超过基波电压有效值的 5%；单个谐波含量则不大于基波电压有效值的 4%。

电压波形的好坏会影响直流电源输出的脉动，并引起诸如电动机，变压器等电磁装置发热。实践的数据表明，总谐波含量大于 5% 时，用电设备的重量一般将增加。

最近有用波形畸变系数等来衡量电压波形质量的。波形畸变系数为畸变量与基波电压有效值之比；而畸变量即除基波之外的交流电压有效值，它除了包括谐波含量和非谐波含量外，还包括振幅调制所产生的分量。规定波形畸变系数不得大于 5%，或畸变频谱的极限不超出图 1-9 所示的包络线。另外同时规定波峰系数不大于 1.41 ± 0.1 或直流分量不大于 0.1 伏。

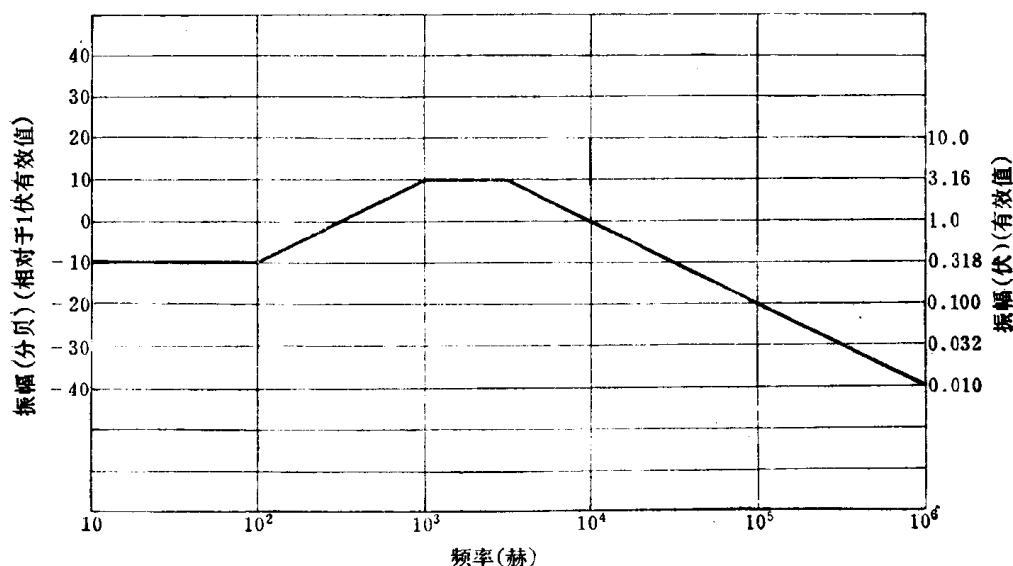


图1-9 交流电压的畸变频率

五、电压调制

所谓电压调制指的是供电系统稳态运行期间，电压围绕着峰值电压的平均值产生周期性的或随机的变化，或两者都有的变化。电压调制是由于发动机的转动不稳定、传动齿轮的扭摆、恒速传动装置输入轴的转速调制、空心轴扭矩的振荡、调压器的动作、周期性或脉冲负载、发电机气隙变化以及铁芯磁滞等非线性因素引起的。而有时周期性或脉冲负载的影响比其他因素的影响还大。电压调制将引起直流供电的脉动以及影响伺服控制系统