

上 篇
飞机电气系统

1 飞机电气系统概述



微信扫一扫
彩图更生动

1.1 飞机供电系统概述

1.1.1 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总称为飞机供电系统，包括从电能产生到用电设备端的全部设备、控制元件和线路。它又可分为飞机电源系统和飞机输配电系统两部分。

飞机电源系统是飞机上电能产生、调节、控制和变换部分的总称，是指由飞机电源到电源汇流条间的部分。通常飞机电源系统由主电源(primary power)、辅助电源(auxiliary power)、应急电源 (emergency power)、二次电源 (secondary power) 和外部电源 (external power) 及其连接与监控装置部分组成，如图 1.1 所示。

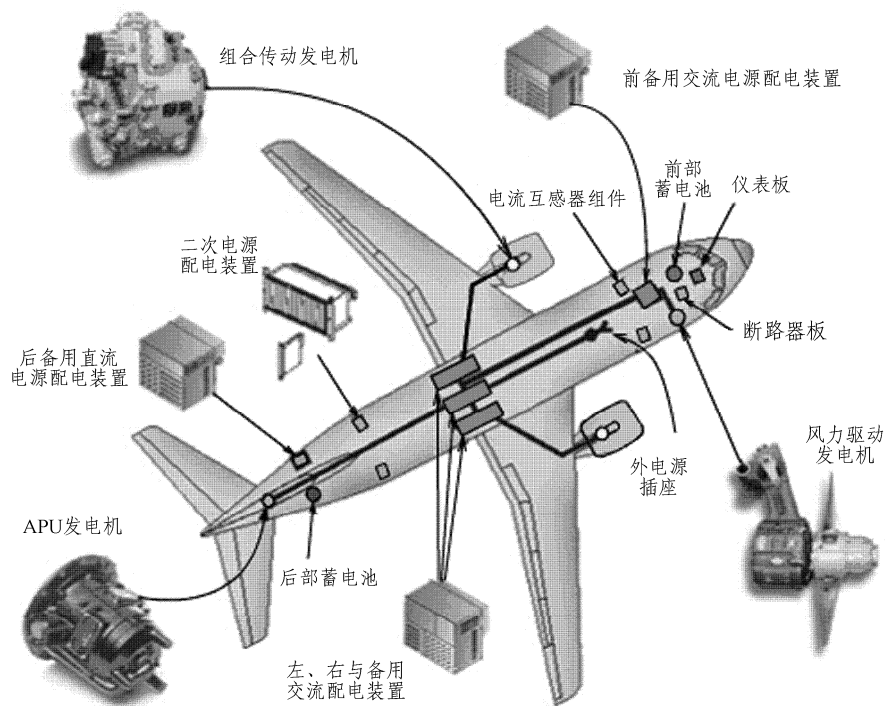


图 1.1 飞机电源系统组成示意图

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，负责在飞机正常飞行期间向全机提供足够数量和一定质量的电能，满足机载用电设备的需要。

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。在中、大型飞机上，采用辅助动力装置（Auxiliary Power Unit，APU）驱动的发电机作为辅助电源；在小型飞机上，则采用蓄电池作为辅助电源。

应急电源是在主电源发生故障后向飞机飞行必需的用电设备供电的电源。由于应急电源容量小、储能有限，当飞机上仅有应急电源供电时，飞机必须在就近机场着陆。在小型飞机上，应急电源仅采用蓄电池；而在中、大型飞机上，为满足 ETOPS（延程运行）需要，除蓄电池外，通常还安装有冲压空气涡轮（Ram Air Turbine，RAT）发电机或液压马达驱动发电机（Hydraulic Motor Generator，HMG）作为应急电源。

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对特殊电压或频率的需要。

飞机停于机场时，为了环保和经济，最好由机场的外部电源供电。外部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之用。

飞机供电系统是飞机的重要子系统，在 CAAR-121 部第 313 条“其他设备”中对电源的安装做了规定：

飞机只有安装下列设备，方可以实施本规则的运行：(c) 符合运输类飞机型号合格审定适航要求的电源和配电系统，或者在任一电源或者配电系统部件失效时，利用外部电源，能为所需要的仪表和设备供电的发电和配电系统。在系统中准许使用普通部附件，只要局方认为其设计能合理地防止失效。当使用由发动机驱动的多个电源时，它们应当分别安装在各台发动机上。



飞机输配电系统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。

飞机输配电系统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。

分散式配电系统是将各电源产生的电能送到各自的配电装置，并通过它们向就近的用电设备供电。一旦某电源出现故障，由它供电的设备转由其他正常工作的电源供电。这种

配电方式比较简单可靠。

混合式配电系统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。此时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，这样可以简化中心配电装置，减轻飞机电网质量。

输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。遥控式配电系统的配电汇流条设于用电设备附近，由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。固态式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，减轻了飞机电网的质量，提高了电网的可靠性和易维修性。

此外，飞机电网根据电压分类有低压电网和高压（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，飞机电网有单线、双线、三线、四线等几种。根据电网的用途来划分，飞机电网则有主电网（即供电网）、配电网、辅助电网和应急电网等。

1.1.2 供电状态和电源容量

1. 供电状态

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，称其处于正常供电状态。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

机系统的并联或解除并联等动作。

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无法正常工作，但随后因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，则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，于是由该发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，它们又可恢复正常工作。我国的适航法规也明确要求：任一电源的失效或故障均不得造成危险或损害其余的电源向重要负载供电的能力。

飞行中飞机主电源不能提供足够的或符合规定的电功率，而要求使用应急电源的工作状态，称为供电系统的应急工作状态。由于应急电源容量小，因而只能向飞行和降落所必需的设备供电，且供电时间有限。我国的适航法规 CCAR-25-R4 规定：在正常电源（除蓄电池之外的电源）不工作、燃油（从熄火和重新启动能力考虑）为临界状态，且飞机最初处于最大审定高度的情况下，飞机能按目视飞行规则安全飞行至少 5 min。



拓展阅读

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不低于 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，而应急设备需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的用电量不大，故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，此时，用增大蓄电池容量来满足应急供电需求是不现实的，宜采用应急发电机，利用液压或气动能量发电。

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。应急供电时，应急电源的电气特性指标一般低于主电源的电气特性指标，但在应急状态下工作的电气设备仍必须具有规定的特性，并保证安全可靠。

2. 电源容量选取

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。直流电源容量的单位为千瓦(kW)，交流电源容量的单位为千伏安(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要受环境因素的影响：当它在地面工作时，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，导致散热效果变差；飞机低速飞行时，进风量小；超音速飞行后进气温度因绝热压缩而急剧升高，也会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发热的限制，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（对于变速恒频即 VSCF 电源），还与从电源到电源汇流条的主馈线容量有关。馈电线的容量应与电源的额定容量相匹配。

飞机低压直流发电机的额定容量有 3 kW、6 kW、9 kW、12 kW、18 kW 等数种，交流电源的额定容量有 30 kV·A、40 kV·A、60 kV·A、90 kV·A、120 kV·A、150 kV·A、250 kV·A 等数种。现代民航客机供电系统容量如图 1.2 所示。

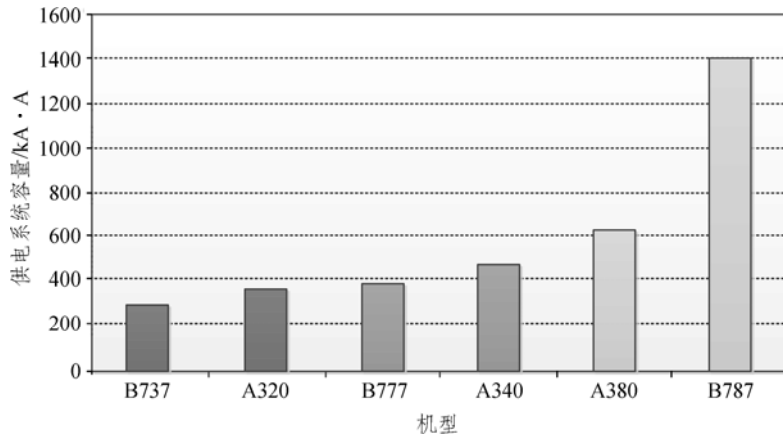


图 1.2 现代民航客机供电系统容量

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 电源供电系统的过载能力要低一些。

在多发电机电源系统中，一个发电通道出现故障，不应卸载用电设备；仅在两个或两个以上发电通道出现故障时，才需要卸去次要用电设备。在没有负载自动管理系统的飞机上，卸载工作由飞行员人工完成。由于人工操作会滞后，这种情况下往往会出现电源过载。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线路发生接地短路故障时排除故障而电源不损坏而需要的时间。

飞机电源的容量取决于机载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。飞机的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型飞机多得多，而旅客机的用电设备与货运机相比又有很大的不同。即使是同一飞机，在不同飞行阶段所使用的用电设备也不同。

在中国民航适航标准 CCAR-25 第 1351 条“电气系统和设备 总则”中规定：

发电系统包括电源、主电源汇流条、传输电缆以及有关的控制、调节和保护装



拓展阅读

置。发电系统的设计必须符合下列规定：

- (1) 电源在单独工作或并联运行时功能正常；
- (2) 任一电源的失效或故障均不得造成危险或损害其余的电源向重要负载供电的能力；
- (3) 在任何可能的运行条件下，所有重要负载设备端的系统电压和频率（如果适用）均能保持在该设备的设计限制范围之内；
- (4) 因切换、清除故障或其他原因而引起的系统瞬变不会使重要负载不工作且不会造成冒烟或着火危险；
- (5) 备有在飞行中相应机组成员容易接近的措施，以将各电源与该系统单独断开或一起断开；
- (6) 备有措施向相应机组成员指示发电系统安全运行所必需的系统参量，如每台发电机的输出电压和电流。

1.1.3 用电设备

广义的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。

飞机用电设备的分类方法很多，最重要的是按照设备对保证飞行安全的重要性分为三类：飞行关键设备、任务关键设备和一般用电设备。

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。它们的供电一旦中断，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，飞行关键设备由主电源供电，当主电源失效需要转入应急供电时，应能自动或人工地转为由应急电源供电。

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。

一般用电设备，如座舱照明和厨房炊具等，它们正常工作与否并不危及飞行安全，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，将首先切除部分乃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 1.3 所示。普通负载由主发电机供电，重要负载可由主发电机和主蓄电池供电，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马达二余度驱动。

在民航法规中对某些关键的系统或设备有明确的要求，例如，在适航法规 CCAR-25 第

25.1165 条“发动机点火系统”规定：“(h)涡轮发动机飞机的每个发动机点火系统必须作为重要电气负载。”

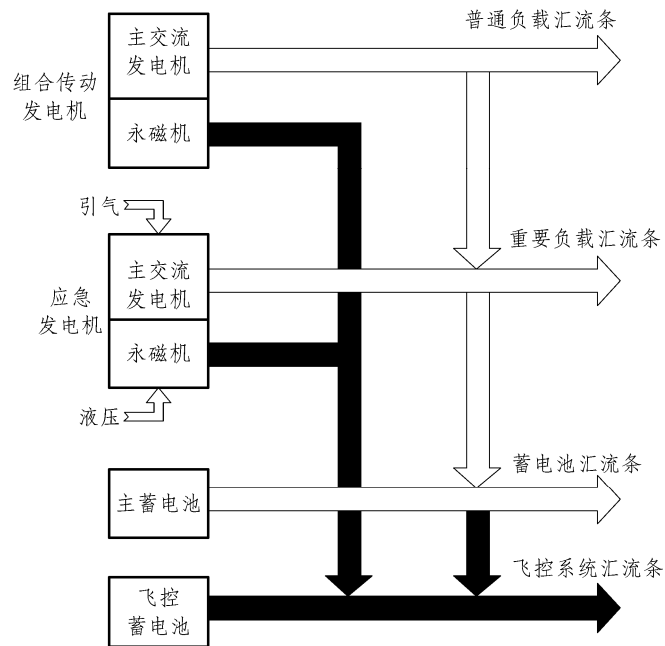


图 1.3 机载设备的余度供电

飞机用电设备的类型很多，对供电的要求也有所不同，下面进行简单的论述。

1. 用电设备的供电频率特性

有的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、微机芯片不仅应使用直流电，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使用交流电，通常希望所提供的交流电频率较稳定。白炽灯和电加温设备既可使用交流电，也可使用直流电，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

白炽灯的灯丝电阻在点燃前后相差数十倍，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，则当恢复供电时，这些电动机同时起动，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、微机芯片的工作电压为 $\pm 15\text{ V}$ 和 5 V ，并可以进一步降低；飞机用白炽灯的工作电压有很多种，一般功率越小工作电压越低；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 $115/200\text{ V}$ ，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。持续时间为几毫秒至上百毫秒的电压瞬变常被称为电压浪涌，持续时间在 $10\text{ }\mu\text{s}$ 左右的电压瞬变被称为电压尖峰。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，若电压变化过大会产生永久性损坏。

4. 用电设备对供电系统的影响

用电设备的数量和功率，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。用电设备的性质不同，影响的程度也不同。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，对电网的电压、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，作为电动机工作；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，作为发电机工作，向电网提供电能，即将机械能转化为电能。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，会使交流供电系统的波形发生畸变。电子设备工作时，其内部电源首先将输入的 400 Hz 交流电通过二极管整流电路整流成直流电，然后经电容滤波后送至稳压电路。整流滤波电路是一种典型的非线性电路，会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，不发射时消耗功率则较小，从而使供电电源长期处于瞬变状态，使供电质量降低。

在中国民航适航标准 CCAR-25 中，第 1431 条对电子设备的安装与使用提出了如下要求：

(c) 无线电和电子设备、控制装置和导线，必须安装成在任一部件或系统工作时，对中国民用航空规章所要求的任何其他无线电和电子部件或系统的同时工作不



拓展阅读

会有不利影响。(d) 电子设备必须被设计和安装成当由于电源供电瞬变或其他原因产生的瞬变时不会导致重要负载不工作。

