



第1章

飞机电源系统

1.1 概述

1.1.1 飞机电源系统的功用和组成

1. 飞机电源系统的功用

所有飞机都要使用电能,其主要用途是:

- (1) 电能转换成热能,如厨房用电、电热防冰类负载等;
- (2) 给电子设备供电,如计算机、显示器、传感器、控制器等;
- (3) 电能转换成机械能,如电动油泵、电动风扇、电磁活门等;
- (4) 照明,如驾驶舱、客舱照明,航行灯、着陆灯等。

2. 飞机电源系统的组成

飞机电源系统主要由电源、控制及保护装置和供配电网等几个部分组成。

1) 电源

为了保证飞机在各种情况下的正常供电,按照电源的来源和用途,飞机电源系统由主电源、辅助电源、应急电源、二次电源和地面电源组成,如图 1.1-1 所示。

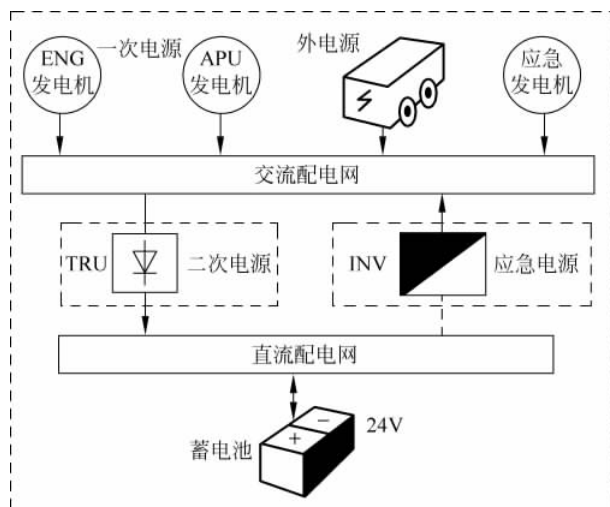


图 1.1-1 飞机电源系统组成示意图

主电源：是指由航空器发动机驱动的发电机所提供的电源。

辅助电源：是指由辅助动力装置(APU)驱动的发电机或机载电瓶提供的电源，飞机在地面或空中主发电机失效时，可以由 APU 发电机提供电源。

应急电源：飞机在飞行中主电源失效时，飞机上的关键设备由应急电源供电。应急电源有机载电瓶、变流机(器)、冲压空气涡轮发电机(RAT. G)、液压马达驱动的发电机(HMG)等。

二次电源：是将主电源一种形式或规格的电能转变为另一种形式或规格的电能，以满足不同用电设备的需要。如变压整流器(TRU)和变流机(器)(INV)，前者将 115/200V 的交流电变成 28V 直流电，后者将 28V 直流电变成 115V 交流电。

地面电源：飞机在地面时，由地面电源车或逆变电源向飞机供电。

2) 控制及保护装置

飞机电源系统的控制包括对发电机进行调压、发电机的励磁控制、发电机输出控制、发电机并联控制和汇流条控制等。电源系统保护装置的作用是当电源系统发生故障时，切断发电机的励磁和输出。如交流电源系统设置的保护项目有过压(OV)、欠压(UV)、过频(OF)、欠频(UF)、过流(OC)、差动(DP)等保护；直流电源有过压(OV)、反流、过载等保护。

3) 供配电网络

发电机到负载的供配电网络的作用是将电能输送到负载，主要包括汇流条、电源分配系统(配电)、过流(短路)保护器(跳开关)等。

1.1.2 飞机主电源系统的种类

飞机的主电源主要有两种形式，一种是直流电源，一种是交流电源。早期的航空器大多采用直流电源，现代航空器大多采用交流电源。根据适航要求，为了保证飞行安全，所有运输用航空器必须安装有直流备用电源系统。

传统的低压直流发电机容量较小，一般为几千瓦到十几千瓦，电压采用 14V DC 或 28V DC。小型飞机一般以直流电源为主电源，直流电源由有刷直流发电机(DC generator)、交流-直流发电机(DC alternator)或航空蓄电池提供，机载设备所需的交流电由旋转变流机或静止变流器(INV)提供。低压直流电的优点是采用单线配电，安全性高，导线重量相对较轻，控制保护设备简单，适用于用电量比较小的飞机。

270V 高压直流电源系统采用无刷直流发电机，电网重量也大大减轻，但由于 270V 高压直流电绝缘防护要求高，控制相对复杂，变压比较困难，目前在民航运输机上没有得到广泛应用。但某些大型飞机上的部分用电设备采用 270V 高压直流供电，是由 115/200V 经全波整流得到的直流电。

现代大中型飞机都采用交流电作为主电源。交流电源与直流电源相比，主要有以下优点：

- (1) 交流发电机采用无刷发电机，没有换向问题，减少了噪声、电磁干扰和维护工作量；
- (2) 交流电源电压等级高，发电机输出功率大，发电机和配电导线重量轻；
- (3) 交流—交流、交流一直流的电压变换容易，功率损耗小。

由于交流电源优点突出，现代大型运输机大都采用交流电源作为主电源。无刷交流发电机的容量大，目前的单机容量已经超过了 250kW·A，电压等级有 115/200V 和 230/400V

两种,目前除了 B787 飞机的主发电机采用 230/400V 外,其余机型的主发电机都是 115/200V。

交流电源分为恒频交流电和变频交流电两大类,前者的额定频率为 400Hz,后者的频率范围一般在 360~800Hz。在以交流电为主电源的飞机上,所需直流电源由变压整流器 (TRU)或航空蓄电池提供。

随着航空新技术的发展,飞机自动化程度越来越高,对电源容量的要求也越来越大。表 1.1-1 列出了典型主流机型的电源容量。

表 1.1-1 各种飞机的电源容量

飞 机 型 号	投入使用年份	发电机总功率			总功率/kV·A 或 kW
		直流/kW	交流/kV·A		
			变频	恒频	
DC2	1932	1.5			1.5
DC3	1935	3			3
DC4	1939	12			12
SIEBEL	1945	4			4
MYSERE IV A	1952	6			6
CARAVELLE	1955	27			27
BREGUET ALIZE	1956	12	20		32
BOEING 707	1958			160*	160*
CARAVELLE SAS	1961	27	36		63
BREGUET ATLANTIC	1961	18	140	24	182
TRANSALL	1962		180	18	198
SUPER FRELON	1964	27		28	55
DC8	1966			160	160
BOEING B737	1966			80	80
LOCKHEED C5A	1968			240	240
CONCORDE	1969			160	160
BOEING B747	1969			360*	360*
AIRBUS A300	1972			270*	270*
MIRAGE 2000	1980			40	40
BOEING B767	1981			270*	270*
ATR 42	1983	24	40		64
AIRBUS A320	1987			270*	270*
RALALE	1990		80	1.2	81.2
AIRBUS A340	1991			415*	415*
AIRBUS A330	1993			345*	345*
AWACS				675	675
BOEING B777	1995			360*	360*
AIRBUS A380	2006		840*		840*
B787	2007		1470*		1470*

注: * 表示包括 APU 发电机

1.1.3 飞机电网的线制及参数

1. 电网的线制

目前的民航运输机其机体结构一般是金属及其合金,因此电网和负载可以利用机体构成回路。当飞机机体结构采用金属材料时,可以起到地线或中性线的作用,一般是电源的“负端”或中性线接于飞机机体上,负载可以接在正线或火线与机体之间。这种电网结构减少了电缆数量,减轻了电网的重量,简化了安装和维护工作。直流电源都采用这种接法。但新型飞机如 B787 的机体结构大量采用非金属复合材料,需要专门设置零线。

目前大多数采用金属材料作机体结构的飞机,三相交流电源普遍采用负线或中性线接机体的电网构型。中性线接于机体的三相交流电源系统如图 1.1-2 所示。同时,这种供电方式还可以提供两种规格的电压,即相电压 115V 和线电压 200V。

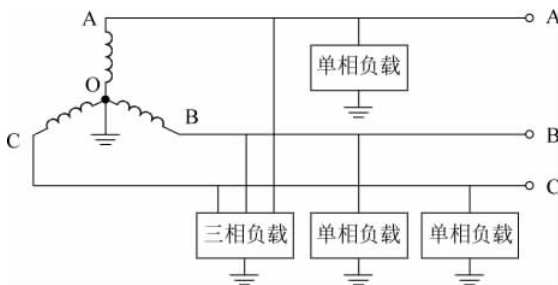


图 1.1-2 以机体为中线的三相四线制

2. 飞机电网的参数

飞机供电系统的基本参数包括电压、频率、相数等,这些参数与供电系统、配电系统和用电设备的性能、体积、重量和制造成本等有着密切的关系。现代飞机供电系统的基本参数如下:

- (1) 低压直流电源: 电压为 14 VDC 或 28V DC,一般采用单线制。
- (2) 恒频交流电源: 电压为 115/200V AC,频率为 400Hz,三相四线制。
- (3) 变频交流电源: 电压为 115/200V AC 或 230/400V AC,频率为 360~800Hz(其中窄变频为 360~650Hz,宽变频为 360~800Hz),三相四线制。
- (4) 高压直流电源: 电压为 270V DC,单线制或双线制。

1.2 航空蓄电池

1.2.1 航空蓄电池的基本知识

1. 航空蓄电池的功用

根据适航要求,任何飞机必须安装应急直流电源。航空蓄电池(或称电瓶)是最基本的应急直流电源。当飞机在飞行过程中主电源和其他辅助电源都失效后,必须由蓄电池向飞机上的重要设备供电,以维持飞机紧急着陆。适航条例规定,在应急情况下,电瓶应至少能维持 30min(双发延程飞行(ETOPS)为 1h 以上)向重要设备供电。

概括起来说,电瓶的主要功用有:①在飞机直流电源系统中,切换大负载时起到维持供电系统电压稳定的作用;②用于起动发动机或 APU;③在应急情况下,向重要的飞行仪表和导航设备等供电,以保证飞机安全着陆。

目前飞机上常用的电瓶有酸性和碱性两种,大型飞机大多采用碱性电瓶,锂电池也在飞机上得到了应用,如 B787 飞机,而小型飞机主要采用酸性电瓶。飞机电瓶为时控件,装机一定时间后必须离位,在内场(电瓶维修车间)进行检查、充电、容量检测和维护,以消除电瓶固有的记忆特性(镍镉蓄电池),恢复其额定容量,确保飞机飞行安全。当电瓶的实际容量达不到额定容量的 85%时,就不能装机使用。电瓶离位检查的时间间隔与其型号及所安装飞机的机型有关,如我国某航空公司机队维修方案中要求的机载电瓶送进内场检查和测试的时间间隔如表 1.2-1 所示。

表 1.2-1 不同飞机电瓶离位检查的时间间隔

机 型	时间间隔(FH: 飞行小时; 或 DAYS: 天)
EMB145	600FH
B737CL	750FH
B737NG	1000FH
B747	1800FH
B757	2000FH
B777	400DAYS
A319/320/321	1000FH
A330	365DAYS

2. 航空蓄电池的常用术语

1) 放电速率

放电速率(discharging rate)简称放电率,常用时率和“C”速率(倍率)表示。时率是以放电时间表示的放电速率,即以某电流放电至规定终止电压所经历的时间。例如某电池额定容量为 40A·h,以 5 小时率(表示为 C₅)放电,则该电池应以 8A 电流放电。

“C”速率常用来描述电瓶的充放电速率,单位为 A。将充足电的电瓶用 1h 放电至终止电压的放电速率称为 1C,如容量为 40A·h 的电瓶,以 1C 的放电速率放电,则放电电流为 40A;以 C/2 放电则为 20A;以 0.1C 放电(或充电),则其放电(或充电)电流为 4A。

2) 额定电压

额定电压(nominal voltage)是指蓄电池以 2 小时率放电(即电瓶充满电后用 2h 放电到终止电压),并放出 80%的电量时,电瓶所能维持的电压。如航空蓄电池的额定电压为 24V,指的是充满电后的电瓶以 2 小时率放电,当放出 80%的电量时,蓄电池应能维持在 24V。而实际的电瓶充满电后的电压一般达 28V 以上。

3) 放电终止电压

放电终止电压(the endpoint voltage)是指电瓶以一定电流在 25℃环境温度下放电至能反复充电使用的最低电压。

一般单体铅酸电池终止电压为 1.8V。铅酸航空蓄电池由 12 个单体电池串联组成,因此铅酸电瓶的放电终止电压为 21.6V。单体碱性电池的放电终止电压为 1V,碱性电瓶由

19 个或 20 个单体电池组成,因此其放电终止电压为 19V 或 20V。

4) 容量

充满电的蓄电池在一定放电条件下所能放出的电量称为容量(capacity),容量的单位为安培小时,简称安时($A \cdot h$)或毫安时($mA \cdot h$)。1 个安培小时是指电瓶用 1A 电流向负载放电,可以持续放电 1h。此外,蓄电池的容量可以分为理论容量、实际容量和额定容量。

理论容量是指蓄电池极板上的活性物质的质量按法拉第电解定律计算而得到的最高理论值。为了比较不同系列电池理论容量上的差异,常用“比容量”的概念,即单位体积或单位质量电池所能放出的理论电量,单位为 $A \cdot h/kg$ 或 $W \cdot h/kg$ 。例如,常用的酸性电瓶的比容量为 $0.79A \cdot h/kg$,而碱性电瓶可达到 $1.11A \cdot h/kg$ 。可见,碱性电瓶的比容量高于酸性电瓶,这表明在相同容量下,碱性电瓶的体积重量更小。这也是现代飞机上大都采用碱性电瓶的原因之一。

实际容量是指电瓶在一定条件下所能输出的实际电量。它等于放电电流与放电时间的乘积,单位为 $A \cdot h$ 。一般情况下,实际容量小于理论容量。因为组成一个实际电瓶时,除了活性物质外,还包括非反应成分,如外壳、导电零件等,同时还与活性物质被有效利用的程度有关。电池的实际容量主要与电池正、负极活性物质的数量及利用率有关。活性物质的利用率主要与放电速率、放电形式、放电温度及电极的结构和制造工艺等因素有关。

额定容量(rated capacity)也叫保证容量,是按照国家或有关部门颁布的标准,保证电池在一定放电电流和温度下放电到终止电压时应达到的容量。我们常说的电瓶容量一般指额定容量。

从理论上讲,1 个 $100A \cdot h$ 的电瓶用 100A 放电时应能放电 1h,50A 可以放电 2h,20A 可以放电 5h。但实际情况并非如此。对碱性电瓶来说,上述结论基本正确(碱性电瓶内阻很小)。而对于酸性电瓶,大电流放电时由于极板迅速被硫酸铅覆盖,使电瓶内阻增加,电瓶容量迅速下降,这也是酸性电瓶的主要缺点之一。例如,一个 $25A \cdot h$ 的酸性电瓶用 5A 放电能放 5h,用 48A 放电则只能维持 20min,其实际容量仅为 $16A \cdot h$,如用 140A 放电仅用 5min 就放完了,电瓶的实际容量下降到了 $11.7A \cdot h$ 。

从电瓶结构和使用条件考察,影响电瓶容量的因素主要有 5 个方面:①极板面积的大小;②极板活性物质的多少;③电解液的密度;④放电时的温度;⑤放电速率和放电方式。

增大极板面积,增加活性物质的数量,电瓶的容量将增加。但在电瓶结构之外,电瓶的新旧程度、电解液密度、放电温度、放电电流的大小等就成为影响容量的主要因素。其中放电电流大小和放电温度的影响最大。例如,在 $50^{\circ}F$ ($10^{\circ}C$) 时,一个充满电的酸性电瓶以一定电流可以放电 5h,但在 $0^{\circ}F$ ($-18^{\circ}C$) 时以同样电流放电只能放电 1h。因为当温度下降时,化学反应的速度变慢。镍镉电瓶对放电温度及放电率敏感度较低,但随着温度的降低,放电容量也会减小。电瓶容量与温度之间的关系如图 1.2-1 所示(放电速率为 1C)。

充放电速率对电瓶的输出容量也有影响,实践表明,用较小电流对电瓶充电比大电流(不包括快速充电)充电,在同等条件下,电瓶能放出的电量更多,因此,一般采用 $C/2$ 及以下的小电流充电。在同等条件下,放电速率越大,容量越小。例如,一个由 20 个单体电池串联组成的、额定容量为 $40A \cdot h$ 的镍镉电瓶,其放电终止电压为 20V,当用 1C 放电时,其容量约为 $42A \cdot h$,10C 放电时容量大约只有 $25A \cdot h$,而用 20C 放电,则电压马上低于 20V,如图 1.2-2 所示。

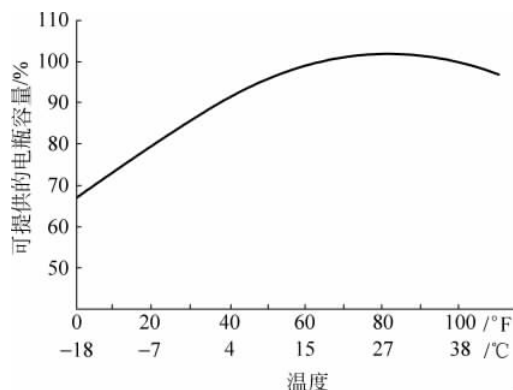


图 1.2-1 电瓶容量与温度的关系

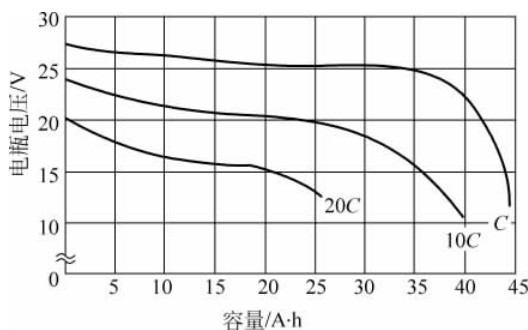


图 1.2-2 容量与放电率的关系

随着充放电次数的增加,电瓶容量会逐步下降,一般当实际容量低于额定容量的85%时,就不能装上飞机使用。

此外,电解液的密度与电瓶容量的关系也不是单调的,密度太大或太小都会导致电瓶容量下降,只有在规定密度值下,电瓶的容量才能达到最大值。

5) 内阻

蓄电池的内阻(internal resistance)使电流通过电池内部时受到阻力,使蓄电池的输出电压降低。蓄电池的内阻不是常数,在放电过程中会随时间不断变化,这是因为活性物质的组成、电解液密度和温度都在不断变化。

蓄电池的内阻包括欧姆电阻和极化电阻。欧姆电阻主要由电极材料、电解液、隔膜的电阻以及各部分的接触电阻等组成,它与电池的结构、制造工艺及装配的松紧度等有关,并遵循欧姆定律。其中电解液的密度太高或太低都会导致内阻增大,因此在维护过程中,电解液的密度必须依据制造厂家给出的参数确定。

电瓶在充放电过程中,正、负极板进行电化学反应时极化引起的内阻称为极化电阻。极化电阻主要与电池的工作条件有关,放电电流和温度对其影响很大。在大电流放电时,电化学极化和浓差极化(极板附近的电解液浓度与相对远离极板的电解液浓度不同)均增加,使极化电阻增大。温度降低对离子的扩散有不利的影响,使化学反应速度变慢,故在低温条件下,蓄电池的极化电阻将增加。

一般飞机上常用的酸性电瓶的内阻为 $30\text{m}\Omega$ 左右,而碱性电瓶内阻只有 $10\text{m}\Omega$ 左右。

6) 自放电

电池的自放电(self discharging)是指电池在存储期间容量降低的现象。当极板或电解液中含有杂质时,就容易组成腐蚀微电池,消耗电极材料,导致容量降低。此外,当电池表面有导电物质或放置在潮湿及高温的环境中时,也会加剧电池的自放电。

7) 深度放电

深度放电(deep discharging)主要用于碱性电瓶。当电瓶进行离位检查时,需要在内场进行深度放电,主要用于消除碱性电瓶固有的记忆效应和电瓶在反复充电后产生的单体电池电压不平衡现象(尤其是在飞机上采用恒压充电时比较严重),以恢复电瓶的容量。

深度放电就是在电瓶放电到终止电压后,继续放电,把所有电量都放完,再用短路夹短接单体电池的两端。

8) 充电效率

当蓄电池充电时,有一部分电量消耗在水的分解上,同时由于蓄电池存在内阻,其消耗的能量都以热量的形式释放掉。此外,充入电瓶的电能也不能全部输出,因为自放电、电极活性物质的脱落、活性物质结块等问题也降低了实际的输出容量。一般情况下,充电输入的安时数是额定安时数的140%的情况下,就可以认为电瓶已经充满电。

9) 使用寿命

在规定条件下,电瓶的有效寿命期限称为使用寿命(life)。电瓶的使用寿命包括使用期限和使用周期。使用期限是指电瓶可供使用的时间,包括电瓶的存放时间。使用周期是指电瓶可供重复使用的次数。电瓶每经历一次全充电和全放电称为一个周期或一个循环。若以循环方式考核,铅酸电瓶的使用寿命为300~500次或更多;碱性镍镉电瓶的使用寿命较长,为500~1000次。

采用正确的充电和维护方法,可以延长电瓶的使用寿命,因此电瓶的维护和保养十分重要。几种常用蓄电池的主要性能对比如表1.2-2所示。

表 1.2-2 几种常用蓄电池主要性能对比

蓄电池种类 性能项目	铅酸电池	镍镉电池	镍氢电池	锂离子电池	聚合物锂电池
标称电压/V	2.0	1.2	1.2	3.6	3.6
比容量/(W·h/kg)	30~50	50~80	65~120	120~190	130~200
每月自放电率/%	5	20	30	<10	<10
循环寿命/次	300~500	500~1000	300~500	500~1000	500~1000
记忆效应	无	有	有	无	无
工作温度/℃	-20~+60	-40~+60	-20~+60	-40~+60	-40~+60
维护周期/月	4	1.5	2.5	3~6	3~6
污染状况	Pb 污染	Cd、Ni 污染	Ni 污染	无	无

3. 蓄电池的充电方法

充电是蓄电池日常维护管理的重要工作,充电设备和充电技术是做好充电工作的重要技术基础。目前所用的电瓶充电设备种类繁多。从充电方式看,有恒压充电、恒流充电和恒压恒流充电等几种方式。由于电瓶充满电后存在自放电现象,因此为了维持电瓶的容量,在飞机上还采用浮充电方式。

1) 恒压充电方式

恒压充电(constant potential charging)是指在充电过程中,充电电压恒定不变,同时,充电设备的输出电压应高于电瓶电压。由于充电初期蓄电池的电动势较低,因此恒压充电时初始充电电流很大,随着充电的进行,电流逐步减小。恒压充电曲线如图 1.2-3 所示。

恒压充电方式的优点是:①在充电设备能提供足够充电电流的情况下(大于 $10C$),充电速度快。在开始充电的 30min 内,就可以将完全放电的电瓶充到 90% 的容量;②充电设备简单;③电解液的水分损失比较小。

恒压充电的缺点是:①冲击电流大。当电瓶完全放电以后,电压很低,而充电电压保持不变,这时冲击电流很大。如一个 $40A \cdot h$ 的电瓶,冲击电流可能达到 $400A$ 。②由于各单体电池的内阻、极板、电解液不能完全一样,恒压充电时,每个单体电池分配的电压不相等,容易造成单体电池充电不平衡,有些单体过充,有些单体充不足。③当充电设备的电压设定过高或过低时,容易造成电瓶过充或充电不足。对碱性电瓶容易造成“热击穿”(thermal runaway)和“容量下降”(capacity fading)。

为了防止冲击电流过大,损伤电瓶和充电设备,有些充电设备采用恒压限流的充电方式,即在电瓶开始充电时限制充电电流的大小,但充电时间会相应延长。

2) 恒流充电方式

恒流充电(constant current charging)是指在充电过程中,电流维持恒定,充电设备的输出电压随电瓶电压的变化而改变。恒流充电曲线如图 1.2-4 所示。

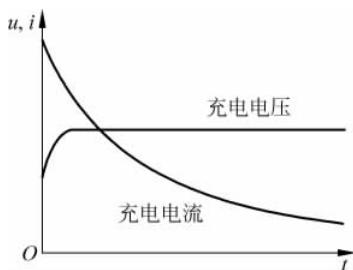


图 1.2-3 恒压充电曲线

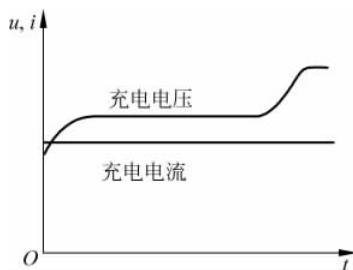


图 1.2-4 恒流充电曲线

恒流充电方式的优点是:①没有过大的冲击电流;②不会引起单体电池充电不平衡;③容易测量和计算出充入电瓶的电能($A \cdot h$)。目前电瓶离位充电大多采用这种充电方式。

但恒流充电也有一些缺点,主要有:①开始充电阶段的电流较小,在充电后期电流又过大,而且充电时间较长;②过充时析出气体多,对极板冲击大,能耗高,电解液水分损失相对要多;③充电设备比较复杂。

采用二阶段恒流充电法(steped constant current charging)可以克服恒流充电时间长的缺点,一般采用大电流(也称为主充)($1C$)充 1h,再用小电流(也称为过充)($C/10$)充 4h。这种充电方式可以有效地克服恒流充电法充电时间长的缺点,并且减小了充电过程中的水分损失,但充电设备比较复杂。没有大、小电流自动转换功能的充电设备需要人工调节。

实现恒流充电有两种基本方式,一种是采用模拟控制的方法实现电流恒定,另一种方法是采用脉宽控制方法。

恒流充电方式能有效防止碱性电瓶的容量下降(capacity fading),因此得到了广泛应用。

3) 恒流恒压充电方式

恒流恒压充电方式(constant current constant potential charging)是在电瓶开始充电时采用恒流充电方式,充电一定时间后自动切换到恒压充电方式。这种充电方式集中了恒压、恒流充电的优点,克服了恒压、恒流充电的不足,但充电设备比较复杂。现代飞机上安装的充电器大多采用这种方式,如图 1.2-5 所示。当恒电流充电($38\text{A} \cdot \text{h}$ 电瓶)至预定的电压值后,改为恒电压充电,同时充电器还可以作为 TRU 向飞机提供直流电源。

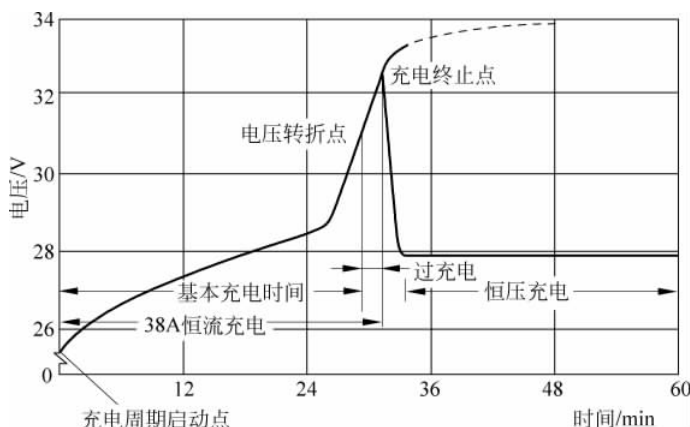


图 1.2-5 恒流恒压充电曲线

4) 快速充电方式

为了能够最大限度地加快电瓶的电化学反应速度,缩短电瓶达到满充状态的时间,同时尽量减轻电瓶正、负极板的极化现象,提高电瓶的使用效率,可以采用快速充电方式(fast charging)。快速充电主要有脉冲式充电法和 ReflexTM快速充电法等。

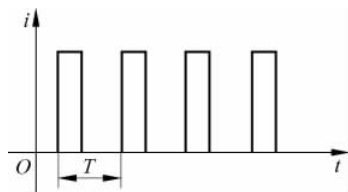


图 1.2-6 脉冲式充电曲线

脉冲充电方式首先是用脉冲电流对电瓶充电,然后让电瓶停充一段时间,如此循环,如图 1.2-6 所示。充电脉冲使电瓶充满电量,而间歇期使电瓶经化学反应产生的氧气有时间重新化合而被吸收掉,使浓差极化和欧姆极化自然而然地得到消除,从而使下一轮的恒流充电能够更加顺利地进行,使电瓶可以吸收更多的电量。脉冲间歇充电使电瓶有较充分的化学反应时间,从而有效减少析气量,提高

电瓶的充电电流接受率。

ReflexTM快速充电法是美国的一项专利技术,它主要面对的充电对象是镍镉电池。ReflexTM快速充电法的充电曲线如图 1.2-7 所示,在一个工作周期内,包括正向充电脉冲、反向瞬间放电脉冲以及停充维持 3 个阶段。由于它采用了新型的充电方法,有效减小了浓差极化和欧姆极化,大大降低了电瓶的充电时间,但充电设备比较复杂。虽然有些航空公司已经购买了这种设备(如 RF-80K 电瓶充电/分

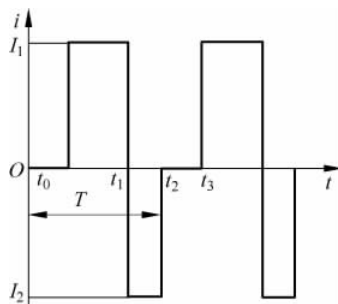


图 1.2-7 ReflexTM快速充电法的充电曲线