

# 应用于 APU 电起动的分段式控制策略

## The Subsection Control Strategy Used for the Auxiliary Power Unit Electrical Start

袁海宵 / Yuan Haixiao

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘要:

民用飞机辅助动力装置(APU)是保证飞机安全和舒适性的重要系统。大电流长时放电对蓄电池的使用寿命有不利影响,同时起动时间过长对 APU 也有不利影响。在使用蓄电池作为起动 APU 的功率来源时,为了减小对蓄电池和 APU 的损害,需要使用较小的蓄电池输出电流在较短的时间内将 APU 起动。采用功率-电流分段式控制的起动方式可以在较短的时间内,以对蓄电池和 APU 损伤最小的方式实现 APU 的起动。对延长蓄电池和 APU 使用寿命具有重要意义。

**关键词:** APU; 电起动; 控制策略

[Abstract] The auxiliary power unit (APU) is an important system of the civil aircraft for the aircraft safety and comfort. Large current output for long time will cause disadvantage effect on battery usage life. Also the too long start time will damage APU. So when start the APU by using the battery as the input power, for the purpose of reducing the damage to battery and APU, it is needed to start the APU in a shorter time by a lower battery output current. The subsection of power-current control strategy can start the APU in shorter time with the lowest damage to the battery and APU. This is important for extending the use life of APU and battery.

[Key words] APU; Electrical Start; Control Strategy

## 0 引言

民用飞机的辅助动力装置(APU)主要作用是起动主发动机、为客舱供气并为各种机载设备提供电源<sup>[1]</sup>。APU 的起动通常使用蓄电池作为起动功率来源,在地面上也可以采用地面电源供电。为了在空中实现 APU 的功能,必须在飞机上配备相应的蓄电池用于 APU 起动。镍镉蓄电池由于具有温度适应范围宽、自放电低、循环和储存寿命长、能以大电流放电、耐过充放电能力强、维护简单等特点而被广泛应用于民用飞机上<sup>[2]</sup>。APU 电起动可以采用蓄电池直接驱动直流电动机实现,使用的机型有 A320 等;也可以采用控制器驱动无刷电机实现,使用的机型有波音 737 等。为了实现起动 APU 的功能,要求蓄电池具有较大的电流和功率输出能力,尤其是在蓄电池容量较小或未完全充电的时候,而蓄电池的使用寿命跟放电次数和大电流放电时间

直接相关。另外,起动时间过长对 APU 点火器等设备的使用寿命也有较大影响。本文将针对采用起动控制器驱动电机的 APU 电起动系统进行分析。在这种起动系统中,采用优化的电起动控制策略能够缩短起动过程并提高 APU 起动的成功率,对提高蓄电池和 APU 的可靠性具有重要的意义。

## 1 APU 电起动系统的原理

### 1.1 APU 电起动系统组成

APU 电起动系统一般包括如下设备:蓄电池,功率转换单元,起动控制器和起动电机。如图 1 所示。

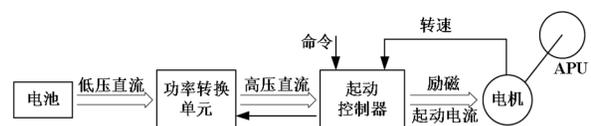


图 1 APU 电起动系统

飞机蓄电池提供 24V 直流电源,经过功率转换单元变换成高压直流 270V;起动控制器利用 270V 高压直流电驱动起动电机,并由起动电机拖动 APU 实现涡轮转子加速。当转速从零开始上升后,电起动系统将先拖动 APU 达到涡轮点火转速,涡轮进行点火;接着起动电机与涡轮共同驱动 APU 直至加速到起动机脱开转速,APU 电起动系统完成起动功能<sup>[3]</sup>。

### 1.2 APU 电起动的条件

为了在较短时间内成功起动 APU,起动电机的输出转矩要大于 APU 的滞阻转矩并在电起动周期内提供足够大的加速度。APU 的起动滞阻转矩在转速为零时最大,随着转速的升高逐渐下降。特性曲线如图 2 所示。

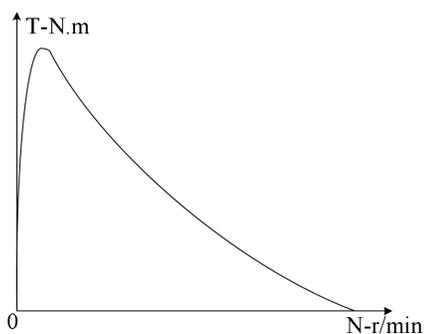


图 2 起动滞阻转矩示意图

典型的航空电机输出转矩与输入电功率和转速具有式(1)所示关系:

$$T=9.55P/n \quad (1)$$

其中, $T$ 、 $P$ 、 $n$  分别为电机输出转矩、输入电功率和转速。

从式(1)可以看出,在输入电功率不变时,随着转速的增加,电机输出转矩逐渐减小。要成功实现 APU 电起动,需要起动电机在电起动过程中的输出转矩高于 APU 的起动滞阻转矩。

对于 28V 航空直流系统,用电设备供电电压要求不低于 18V<sup>[4]</sup>,因而当功率转换单元输入电压低于 18V 或从蓄电池提取的功率无法满足起动电机功率需求时,起动过程终止。

镍镉蓄电池具有如下特性:放电电流越大,输出电压下降越大;输出电流相同时,使用环境温度越低,输出电压下降越大,特性曲线如图 3、图 4 所示。在 APU 电起动过程中,蓄电池的输出电压和输出功率能力要求保持在特定值之上,以确保功率转换单元的输入电压和起动功率需求。

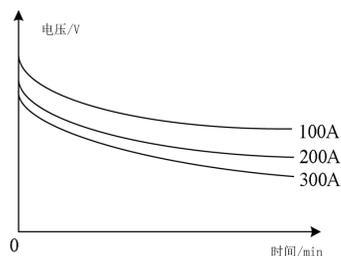


图 3 不同放电电流下蓄电池放电曲线

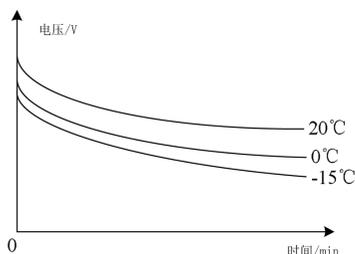


图 4 不同温度下蓄电池放电曲线

## 2 起动控制策略的对比分析

以功率转换单元输入端参数为控制对象,主要存在如下几种电起动控制策略:恒电流控制,恒功率控制和分段式控制。

### 2.1 恒电流控制原理

恒电流控制是在起动过程中保持从蓄电池输入的直流电流为恒定值,典型的恒电流控制曲线如图 5 所示。在起动过程中,随着蓄电池大电流放电,其输出电压逐步下降,因而在起动电机输出端的输出转矩也同时下降。

恒电流控制起动策略具有实现简单的优点,但是起动过程后半段时间较长且造成蓄电池输出电压下降较快。因而在环境温度较低或者蓄电池容量较小的情况下,起动时间长且易因蓄电池输出电压过快降低而起动失败。

### 2.2 恒功率控制原理

恒功率起动控制是在起动过程中保持从蓄电池获取的电功率恒定,典型的恒功率控制曲线如图 6 所示。在起动过程中,随着蓄电池大电流放电,其输出电压逐步下降,因而蓄电池输出电流逐步上升。

恒功率控制起动策略具有输出转矩稳定的优点。但是在起动过程中,蓄电池输出电流将越来越大,引起蓄电池输出电压下降越来越快。过大电流对蓄电池寿命影响较大,同时环境温度较低或者蓄电池容量较小的情况下,易因蓄电池输出电压快速降低而起动失败。

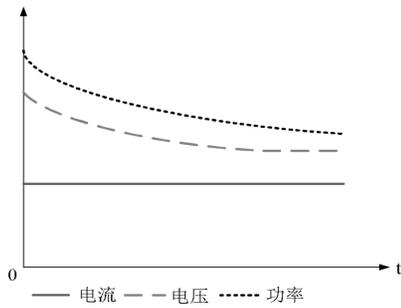


图5 恒电流起动控制曲线示意

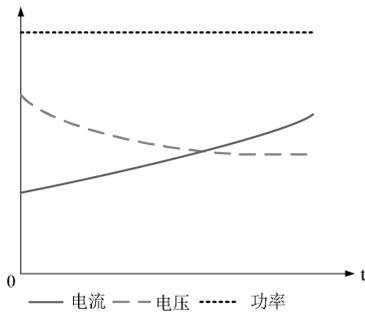


图6 恒功率起动控制曲线示意

### 2.3 分段式控制起动原理

分段式控制是对起动过程根据输入条件的变化进行不同的控制,分段式控制曲线如图7所示。在功率转换单元输入电压较高时采用恒定功率起动;当输入电压降到较低值但依然满足起动条件时采用恒定电流起动,此时进入降额起动阶段;当输入电压下降到起动终止电压时,降低起动电流以维持蓄电池输出电压稳定;若起动电流继续下降到特定值此时提取功率无法满足起动要求,起动过程结束。

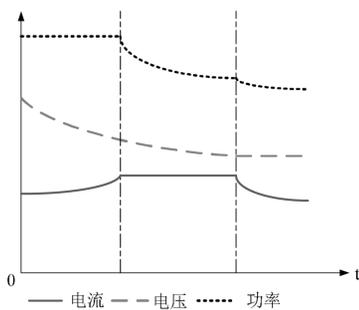


图7 分段式起动控制曲线示意

在蓄电池容量较低和因环境温度较低造成蓄电池输出能力较差的情况下,蓄电池输出电压在起动开始后下降很快。若采用恒电流或恒功率控制将很快由于输出电压过低而起动终止,造成起动失败。而采用分段式起动控制将在蓄电池输出电压下降的过程中采取对电流进行控制的措施,减缓电

压下降速度,同时兼顾起动效率,可以有效提高在较短时间内起动APU的成功率。

### 3 分段式控制的实现

分段式控制的原理框图如图8所示。起动控制器从APU控制板开关获得起动命令并且收到APU控制器发出APU可以起动的命令后开始起动过程。起动控制器命令起动功率单元工作,起动功率单元从蓄电池获取直流电源。起动控制器将从起动功率单元得到高压直流电源转换成交流电驱动起动机。同时起动控制器对起动功率单元的输入端电压和电流进行检测,并接收电机转速反馈。在满足起动条件的情况下,转速达到脱离转速后起动成功。

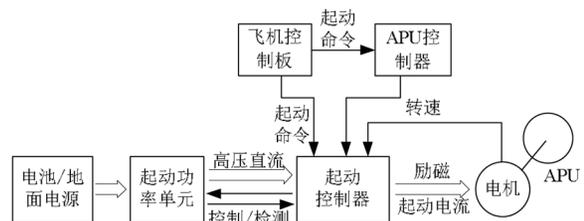


图8 分段式起动控制原理框图

分段式起动控制将根据起动控制器获取的电压、电流和转速信号进行判断来实现起动控制。限定条件假设如下:从蓄电池提取电流不超过 $I_m$ ;提取功率不超过 $P$ ;功率转换单元输入端的降额起动电压为 $V_1$ ,起动要求电压最低为 $V_s$ ;转速达到 $N$ 时电起动成功;电流降低到 $I_s$ 时电起动过程结束。

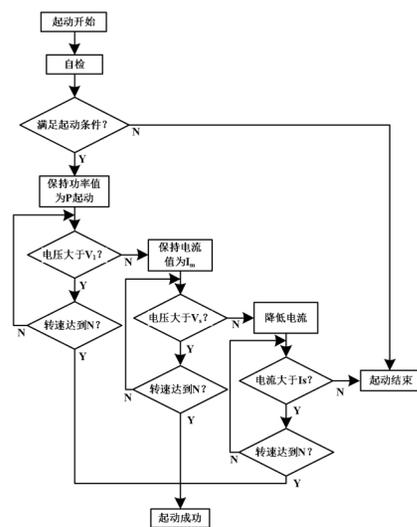


图9 分段式起动控制流程

控制流程示意如图9所示,控制流程主要包括如下步骤:

(1) 起动开始后自检。若满足 APU 起动初始条件, 进入步骤 2; 若不满足 APU 起动初始条件, 起动过程结束。

(2) 起动系统从蓄电池提取功率大小为  $P$ 。判断功率转换单元输入电压是否高于  $V_1$ 。若高于  $V_1$ , 进入步骤 3; 若不高于  $V_1$ , 进入步骤 4。

(3) 判断转速是否达到  $N$ , 若达到  $N$ , 起动成功; 若低于  $N$ , 返回步骤 2。

(4) 保持功率转换单元输入电流为  $I_m = P/V_1$ 。判断功率转换单元输入电压是否高于  $V_s$ 。若高于  $V_s$ , 进入步骤 5; 若不高于  $V_s$ , 进入步骤 6。

(5) 判断转速是否达到  $N$ , 若达到  $N$ , 起动成功; 若低于  $N$ , 返回步骤 4。

(6) 降低功率转换单元输入电流, 以保持输入电压为  $V_s$ 。判断功率转换单元输入电流是否大于  $I_s$ 。若大于  $I_s$ , 进入步骤 7; 若不大于  $I_s$ , 起动过程结束。

(7) 判断转速是否达到  $N$ , 若达到  $N$ , 起动成功; 若低于  $N$ , 返回步骤 6。

当电起动系统进入起动成功或起动结束状态后, 将等待下一步的命令以转入下一个工作阶段。

## 4 仿真结果与分析

以起动功率需求 9kW, 蓄电池初始输出电压为 24V, 低于 18V 或转速到达 8 000rpm 结束起动过程为输入条件, 忽略导线阻抗, 在 Saber 软件平台中建模, 如图 10 所示。由于蓄电池缺少数据, 对蓄电池进行粗略模拟, 故而仿真结果仅用于表示控制方法的实现结果与趋势, 不能用于精确的数据分析与判断。

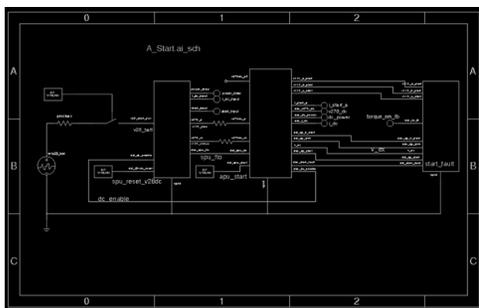


图 10 仿真模型

仿真波形如图 11 所示, 从上到下分别为转速曲线, 功率提取曲线, 蓄电池输出电压曲线和起动电流曲线。

从图 11 中可以看出, 在起动的开始阶段, 蓄电

池输出电压较高, 电起动系统从蓄电池提取的功率快速上升到最大值, 提供最大的加速度。此时电流也在随着电压的降低而在不断上升中。从第 6s 开始, 电压下降到设定的降额起动阈值时, 蓄电池输出电流达到峰值并保持稳定, 此时进入降额起动阶段, 提取功率随着蓄电池输出电压的降低而降低。从第 7s 开始, 蓄电池输出电压继续降低到起动终止电压时, 蓄电池输出电流开始下降, 提供功率也同时下降, 以保证电压的稳定。当转速达到 8 000rpm 时, 起动过程结束。仿真结果表明分段式起动控制策略能够在较短的时间内实现起动 APU 的功能。

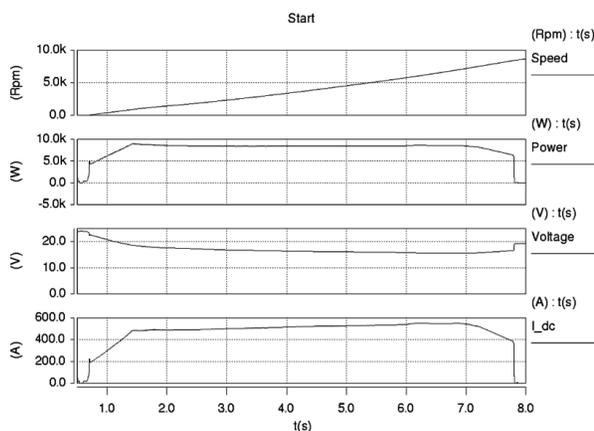


图 11 仿真波形图

## 5 结论

本文针对民用飞机 APU 起动过程中在蓄电池初始容量较小或者环境温度较低造成蓄电池输出能力较差的情况下, 对分段式电起动控制策略进行了分析, 表明此种控制策略能够提高起动的成功率并减小在起动条件较差时对蓄电池和 APU 使用寿命的影响; 通过模型仿真表明了控制策略的可行性。对飞机蓄电池及辅助动力系统的设计优化和可靠性的提升具有显著的意义。

### 参考文献:

- [1] 赵运生, 胡骏, 吴铁鹰, 陈娟娟. 大型民用飞机辅助动力装置性能仿真[J]. 航空动力学报, 2011, 26(7): 1590-1598.
- [2] 周丽娟. 浅谈航空镍镉电瓶维护[J]. 内江科技, 2012, 3: 133-134.
- [3] 李博, 章弘, 唐宏刚, 周宇穗. APU 空中起动性能及其控制规律试验研究[J]. 航空科学技术, 2011, 5: 41-44.
- [4] ISO1540 2006(E).