

# 辅助动力装置独立超转保护控制设计研究

何敏祥\* 张霄宇 季晟

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

**摘要:** 针对辅助动力装置超转故障,开展独立超转保护控制设计研究。介绍了独立超转保护总体设计方案、超转保护方法及 BIT 检测。研究确定了转速信号选择、超转保护转速,超转判断逻辑为任意一路转速(转速 1 或转速 2)大于超转保护转速,即判断 APU 超转;APU 超转后,通过紧急停车进行超转保护;设计 APU 转速低于 10%,取消超转保护停车。同时为满足适航要求,设计机内自测试(BIT)功能,通过注入不同转速,检测转速传感器、独立超转保护电路等硬件,确保独立超转保护装置能正常工作。通过 APU 地面台架整机试验,验证独立超转保护有效。

**关键词:** 辅助动力装置;独立超转保护;设计研究

中图分类号: V233

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

辅助动力装置(auxiliary power unit,简称 APU)一般是指飞机主动力装置(发动机)之外可独立输出压缩空气或供电的小型燃气涡轮发动机。APU 的功能主要是在地面和空中启动主发动机,为客舱供气并为各种机载设备提供辅助电源。<sup>[1]</sup>

超转指转子转速超过最大稳态转速。APU 超转事故轻则造成发动机自身物理结构受损,如叶片断裂;重则危及飞机飞行安全。鉴于超转的巨大危害,超转保护系统被认为是发动机控制系统中最关键的保障系统之一<sup>[2-3]</sup>。按照运输类飞机适航标准(CCAR-25-R4)<sup>[4]</sup>规定:“APU 转动控制和停车能力:在 APU 继续转动会危及飞机的安全时,必须停止 APU 转动的措施”。

早期的 APU 控制器采用机械液压式燃油控制器,如霍尼韦尔公司的 GTCP85 系列和汉胜公司的 T-62T 系列,具有体积大、机械损耗高、可维护性弱等缺点。随着电子技术的飞速发展,笨重、落后的机械液压式超转保护系统逐步被轻巧、先进的电子超转保护装置取代,电子式超转保护成为主流。目前空

客 A320 上的 GTCP131-9、APS3200、波音 787 上的 APS5000 等,均采用全权限电子控制器(FADEC),其超转保护设计同样采用独立超转保护控制。<sup>[5]</sup>

本文通过开展辅助动力转速超转保护控制设计,主要开展了超转保护方法和机内自测试(built-in-test,简称 BIT)检测,提出一种 APU 独立超转保护系统。该系统与 APU 电子控制器中的超转保护相互独立。

## 1 总体方案

带独立超转保护电路的 APU 控制器,一般设计两套超转保护控制架构:一套为控制器软件超转保护,另一套为超转保护电路保护;两套超转保护功能相互独立,如图 1 所示。

**软件超转保护:** APU 电子控制器 CPU 中的软件具备正常工作转速控制和软件超转保护功能。通过在 FADEC 软件中设置超转保护转速,当 APU 转速超过软件超转保护转速时,APU 超转保护停车。

**硬件独立超转保护:** 基于硬件的独立超转保护控制设计,通过分离元器件设计的独立超转保护硬件电路。一般设计原理为通过频压转换芯片,将转

\* 通信作者. E-mail: heminxiang@comac.cc

**引用格式:** 何敏祥,张霄宇,季晟. 辅助动力装置独立超转保护控制设计研究[J]. 民用飞机设计与研究,2024(4):41-45. HE M X,ZHANG X Y,JI S. Study of APU in autonomous over-speed protection[J]. Civil Aircraft Design and Research,2024(4):41-45(in Chinese).

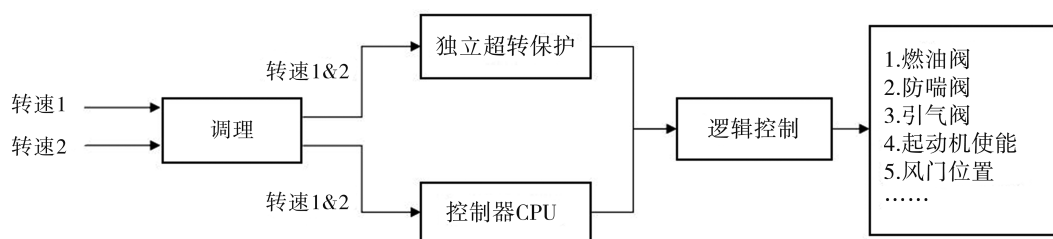


图 1 APU 独立超转保护系统结构

速频率信号转换为电压信号并进行信号调理,将调理后的信号与一个代表超转转速的标准电压信号共同接入比较器电路,当 APU 超过阈值转速时,频压转换芯片输出电压大于基准电压,比较器输出电压信号切断供油等信号。

## 2 超转保护

### 2.1 转速信号选择

辅助动力装置一般设计两个转速传感器,输出的转速分别定义为转速 1 和转速 2。通过 APU 自检测,检查转速 1 和转速 2 是否有效,防止转速失效影响 APU 超转保护,提高超转保护控制安全性。根据检测结果对转速信号进行选择,具体选择方法如下:

- 1) 若两个转速传感器均出现故障,则应设置故障“两个转速信号均失效”,APU 转速失效;
- 2) 若转速 1 失效,转速 2 有效,APU 转速为转速 2;
- 3) 若转速 2 失效,转速 1 有效,APU 转速为转速 1;
- 4) 若转速 1 和转速 2 均有效,APU 转速为:
  - a. 转速 1 和转速 2 差值大于 5%,APU 转速取两个转速中的高转速值;
  - b. 转速 1 和转速 2 差值小于 5%,APU 转速为两个转速的平均值。

### 2.2 超转保护转速确定

#### 2.2.1 影响因素分析

APU 超转保护控制系统,应控制 APU 不会因转速过高导致 APU 结构受损等;同时也不能影响 APU 正常工作。因此,APU 超转保护转速应大于稳态工作转速,小于超转破裂转速/转子包容转速。

通常,APU 设计时,把稳态工作转速定义为 100%。参考相关型号及规范,APU 超转破裂转速/转子包容转速一般为 110%~120% 转速<sup>[3,7]</sup>。影响 APU 转速的主要因素有:1) APU 工作时转速波动,一般转速波动值在-1%~1%之间;2) 引气负载和电负载的接通/断开,导致转速变化;3) APU 停车控制

过程,执行机构的响应时间等引起转速超调,具体影响分析见表 1。

表 1 超转保护转速影响因素

影响因素	转速值
稳态工作转速	100%
超转破裂转速/转子包容转速	110%~120%
转速波动	-1%~1%
气负载+电负载	±3%~±5%
超调转速	2%~3%

#### 2.2.2 转速确定

APU 一般具备正常工作转速控制、超转保护(软件)以及独立超转保护(硬件)功能。参考 APU 稳态工作转速一般为 100%,超转破裂转速/转子包容转速一般为 110%~120%,同时考虑 APU 自身转速波动值、气负载和电负载对转速的影响以及超转超调转速等因素,确定各转速参考值为:

- 1) 正常工作转速:一般为设计点转速,100%转速;
- 2) 软件超转保护转速:大于正常工作转速,可参考设置为 106%转速;
- 3) 独立超转保护转速:大于或等于软件超转保护转速,可参考设置为 110%转速(文中代指独立超转保护转速)。

### 2.3 超转判断逻辑

#### 2.3.1 判断分析

APU 转速一般有两路转速信号,一般可采用“两路转速均超出”或“任意一路转速超出”的判断方法,判断 APU 转速超转,具体判断分析结果见表 2。

表 2 超转判断分析及结果

超转判断逻辑	转速信号 1	转速信号 2	超转保护
两路转速均超出	未超出	未超出	不保护
两路转速均超出	超出	未超出	不保护
两路转速均超出	未超出	超出	不保护

表2(续)

超转判断逻辑	转速信号 1	转速信号 2	超转保护
两路转速均超出	超出	超出	保护
任一转速超出	未超出	未超出	不保护
任一转速超出	超出	未超出	保护
任一转速超出	未超出	未超出	保护
任一转速超出	超出	超出	保护

若采用“两路转速均超出”时<sup>[8]</sup>,触发超转保护判断的逻辑。如存在一路转速信号失效,此时即使另外一路转速信号超出,因为不满足“两路转速均超出”的判断逻辑,不会触发超转保护,存在 APU 超转状态下不触发超转保护的风险。

若采用“任意一路转速超出”,触发 APU 超转保护的判断逻辑。任一路转速超出限制转速,均会触发超转保护,APU 安全性更高;但存在转速信号错误,错误触发超转保护的风险,导致 APU 停车。

综上分析,采用“任意一路转速超出”,触发 APU 超转保护的判断逻辑,APU 工作安全性更高。同时为降低超转保护的虚警率,应对转速信号进行滤波等调理,以及对转速信号 BIT 检测。

2.3.2 判断逻辑

按照 APU 采用“任意一路转速超出”触发 APU 超转保护的判断逻辑,APU 电子控制器独立超转保护控制过程见图 2。

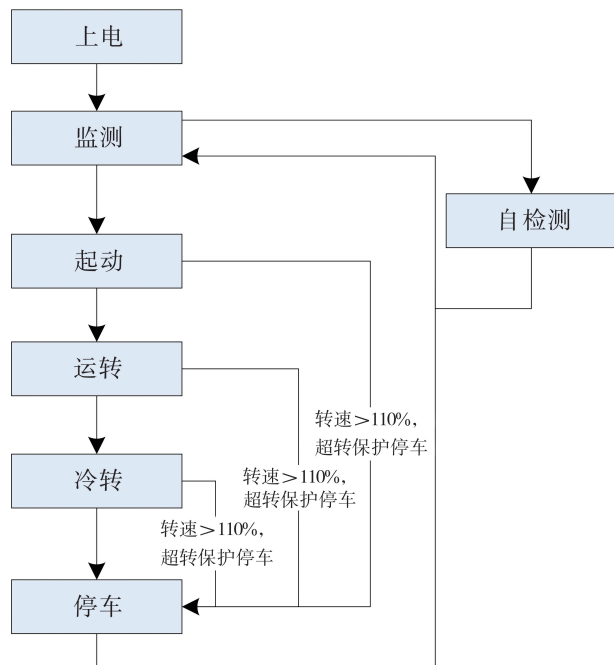


图 2 APU 独立超转保护控制

无论在地面状态还是空中飞行状态,当 APU 转速大于超转保护转速时,都应设置 APU 转速超转故障,具体判断逻辑如下:

- 1) 上电阶段和自检测阶段,独立超转保护电路失效,同时转速 1 或转速 2 大于 110%时,且持续时间大于一定时间,应设置转速超转故障;
- 2) 在所有其他阶段,当转速 1 或转速 2 大于 110%且持续时间大于一定时间时,应调用硬件独立超转保护,APU 保护停车,并设置转速超转故障。

2.4 超转处置措施

2.4.1 研究分析

APU 转速超出且触发超转保护后,初步分析,可选择降低转速、正常停车以及紧急停车的处置措施。

- 1) 降低 APU 转速:通过减小 APU 燃油流量,降低 APU 转速。辅助动力装置一般设计采用恒定转速控制,仅设计一个稳定转速工作状态。APU 在低转速状态无法稳定工作,会导致 APU 停车;此外,部分 APU 型号转速低于 95%时,会触发“欠速”故障,从而导致 APU 停车。

- 2) 正常停车:APU 发出停车指令,在转速 100%状态下运转一定时间(60 s)的冷转后,关停 APU。若采用正常停车的措施,APU 需在转速 100%的状态下工作 60 s,如冷转阶段工作时 APU 转速超转状态不能立即消除,则存在转速超出保护转速的风险。

- 3) 紧急停车:APU 紧急停车程序为“APU 不经冷转直接关闭 APU”。APU 可以立即停车,最快消除超转,确保 APU 安全。

综上分析,考虑 APU 稳态工作特性和工作安全等因素,采用“降低 APU 转速”和“正常停车”的措施,无法确保 APU 超转后立即停车,因此 APU 选用“紧急停车”,确保 APU 安全。

2.4.2 紧急停车

APU 转速超出 110%,触发独立超转保护判断,APU 控制器应有“转速超转”告警信号,并进行紧急停车,关闭燃油模块阀、停止点火器点火、关闭防喘阀等。

2.5 取消超转保护停车

当 APU 转速超出保护转速,触发超转保护逻辑,APU 控制器应控制 APU 减速停车,同时控制器应记录超转保护故障。

通过研究分析,综合参考其他型号经验,一般在设置 APU 转速低于一定转速后,认为 APU 已脱离超转,处于安全状态。本文设计 APU 转速低于 10% (参考值) 控制系统取消超转告警信号,同时取消发送保护停车指令。

### 3 BIT 检测

按照国内外辅助动力装置对超转安全装置的适航要求<sup>[9-10]</sup>,“对于用于防止出现危险超转情况的超转安全装置,必须采取措施确保其能正常工作”。因此对 APU 超转保护系统设计故障进行 BIT 检测,不仅能提高独立超转保护系统的可靠性,同时也可以降低 APU 的故障率,减少维护和修理费用。

根据 APU 转速超转的故障模式影响及危害性研究分析,超转保护系统主要设计开展硬件 BIT 检测和超转保护功能 BIT 检测。

#### 3.1 硬件故障 BIT

APU 独立超转保护系统主要涉及的硬件有转速传感器及转速信号调理硬件、独立超转保护电路。通过 APU 上电和自检阶段,对超转保护相关的硬件进行检测,提高超转保护装置可靠性。如检测到超转保护系统相关硬件失效,APU 电子控制器应报硬件故障;同时为确保 APU 工作安全,应控制 APU 无法进入起动程序。APU 独立超转保护主要检测硬件如下:

- 1) 两个转速测量电路;
- 2) 转速信号调理;
- 3) 独立超转保护硬件。

#### 3.2 超转保护功能 BIT

超转保护功能 BIT 用于检测独立超转保护电路自身的逻辑故障。

通过转速注入,将已知的不同转速注入独立超转保护电路,验证读取的转速是否正确,判断超转功能是否正确。

若未能正确读取任何通道中注入的任何转速信号,电子控制器应设置转速注入测试失败故障,并判断独立超转保护故障。

### 4 APU 整机试验验证

通过独立超转保护控制设计,可完成带独立超转保护的电子控制器设计。本文通过开展 APU 地

面台架整机试验,验证独立超转保护控制系统的有效性。

为确保试验安全,通过电子控制器将 APU 超转保护限制转速降低为 99%,保证试验安全。台架验证试验中,APU 正常起动,当转速超出 99% 后,电子控制器控制 APU 自动执行了紧急停车,转速迅速降低至 0,趋势正常,数值合理;并且两次超转保护均成功,试验验证结果见图 3。

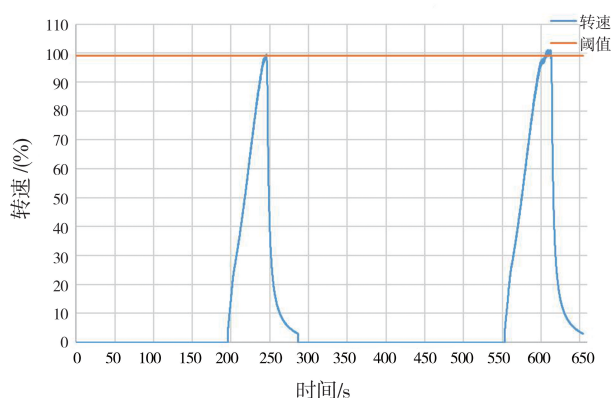


图 3 APU 独立超转保护测试时间-转速曲线图

## 5 结论

通过开展 APU 独立超转保护控制设计,主要研究确定超转保护转速、超转判断逻辑、超转保护停车以及取消超转保护的方法,并通过 BIT 检测,完成了 APU 独立超转保护设计,APU 地面台架整机试验也验证了超转保护的有效性,得出以下几点结论:

- 1) 采用软件超转保护和硬件超转保护两套超转保护控制架构,两套超转保护功能相互独立;
- 2) 综合 APU 稳态工作转速、超转破裂转速/转子包容转速、APU 自身转速波动值、气负载和电负载对转速的影响以及超转超调转速等因素,确定软件超转保护转速、硬件超转保护转速;
- 3) 采用“任意一路转速超出”触发 APU 超转保护的判断逻辑,当 APU 任意一路转速大于 110% 时,都应设置 APU 转速超转故障;
- 4) APU 触发超转保护,通过紧急停车,对 APU 进行保护,控制器应记录超转保护故障;
- 5) 当 APU 转速低于 10% (参考值) 时,控制系统应取消超转告警信号,同时取消发送保护停车指令;

6) APU 上电和自检测阶段,应对超转保护相关的硬件进行检测,如失效,APU 电子控制器应报硬件故障,并控制 APU 无法进入起动;

7) 通过 BIT 检测,判断超转保护相关硬件及超转功能是否有效。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 《飞机设计手册》总编委会. 动力装置系统设计[M]. 北京:航空工业出版社,2006.
- [ 2 ] 《世界中小型航空发动机手册》编委会. 世界中小型航空发动机手册;2006[M]. 北京:航空工业出版社,2006.
- [ 3 ] 冯大庸. 航空发动机设计手册:第14册:辅助动力装置及起动机[M]. 北京:航空工业出版社,2000.
- [ 4 ] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准:CCAR-25-R4[S]. 北京:中国民用航空局,2011.
- [ 5 ] 李东杰. 辅助动力装置的应用现状和发展趋势[J]. 航空科学技术,2012(6):7-10.

- [ 6 ] 高广华. 基于航空发动机的转速测量的研究[J]. 测控技术,2012,31(增刊):75-77.
- [ 7 ] 中国人民解放军总装备部. 航空燃气涡轮辅助动力装置通用规范:GJB3971-2000[S]. 2000.
- [ 8 ] 蒋文亮,陆千里,于真,等. 一种基于FPGA的航空发动机独立超转保护系统[J]. 航空动力学报,2016,31(2):477-483.
- [ 9 ] 中国民用航空局. 燃气涡轮辅助动力装置技术标准规定:CTSO-C77b[S]. 北京:中国民用航空局,2000.
- [ 10 ] Federal Aviation Administration. Gas turbine auxiliary power units:TSO-C77b[S]. 2000.

#### 作者简介

何敏祥 男,硕士,工程师。主要研究方向:APU设计。  
E-mail: heminxiang@comac.cc

张霄宇 男,硕士,工程师。主要研究方向:APU设计。  
E-mail: zhangxiaoyu1@comac.cc

季 晟 男,硕士,工程师。主要研究方向:APU设计。  
E-mail: jisheng@comac.cc

## Study of APU in autonomous over-speed protection

HE Minxiang\* ZHANG Xiaoyu JI Sheng

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

**Abstract:** To prevent the auxiliary power unit from over-speed, a study was done in autonomous over-speed protection. The protection overall scheme, protection strategy and built-in-test (BIT) were presented. The selection of speed signal and the protection speed were determined. If either speed 1 or speed 2 is larger than protection speed, the protection shall be performed. When an over-speed condition was detected, APU shall be shutdown. The protection shall not be performed when the APU speed was less than 10%. A built-in-test (BIT) technique was developed to meet the airworthiness requirement. The integrity of speed measuring circuitry test carried out by injecting known frequencies. Through the ground test of APU, the effectiveness of APU autonomous over-speed protection was verified.

**Keywords:** APU; autonomous over-speed protection; design

\* Corresponding author. E-mail: heminxiang@comac.cc