

航空发动机动力涡轮超转试验方法研究

温会云 岳洋

中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002

[摘要] 以涡轴发动机为研究对象, 对动力涡轮超转试验方法展开研究。提出了负载调节法、切断传动轴法、切断间隔套法及转速超调法四种动力涡轮超转的试验方法, 并阐述了各方法的基本原理、优缺点及应用情况。在实际试验中可以根据不同的试验目的选择相应的试验方法, 或采用多种方法相结合的方式。

[关键词] 航空发动机; 动力涡轮; 超转方法

DOI: 10.33142/ec.v4i6.3869

中图分类号: V263.14

文献标识码: A

Study on Scheme of Experiment for Function of Over Speed of Power Turbine of Turboshaft Engine

WEN Huiyun, YUE Yang

AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou, Hunan, 412002, China

Abstract: Taking the turboshaft engine as the research object, the study on the function of over speed of power turbine was carried out. In this study, four methods of over speed were proposed, which were load regulation, cutting transmission shaft, cutting interval cover and over speed regulating and the basic principle, advantages, disadvantages and application of the methods are introduced in detail. In the actual test, we can choose the corresponding test method or combination of multiple methods according to different test purposes.

Keywords: turboshaft engine; power turbine; function of over speed

直升机是典型的军民两用产品, 广泛应用于作战、运输、救护、巡逻、旅游等领域。作为直升机动力装置的涡轴发动机, 通过动力涡轮轴、主减速器内的离合器、减速齿轮将动力传给旋翼, 传动轴系复杂, 任何一个环节出现故障都可能引起发动机动力涡轮出现异常, 导致动力涡轮转速瞬间急剧上升, 动力涡轮超转破裂, 若出现非包容情况, 高速高能的危险碎片穿透机匣飞出, 会击伤飞机的机舱、油箱、液压管路和电器控制线路等, 导致机舱失压、油箱泄漏起火、操控失灵等二次破坏, 严重危及飞行安全。为避免发生飞行安全事故, 涡轴发动机需要在动力涡轮发生真实超转的情况下验证其控制系统动力涡轮超转保护功能是否满足设计要求, 同时还要验证保护功能失效时发动机的包容性^[1~3]。涡轴发动机动力涡轮超转方法的确立便成为上述验证试验开展的前提。

本文针对涡轴发动机开展动力涡轮超转试验方法的研究。考虑到安全性、经济性, 针对不同的试验目的, 提出不同的超转方法。

1 负载调节法

负载调节法主要是在发动机使用燃气涡轮转速 n_g 模式控制时, 发动机数控系统通过调节供油流量来控制燃气涡轮转速 n_g , 动力涡轮转速 n_p 则由功率吸收装置独立控制, 试验时, 功率吸收装置设置为恒转速控制模式, n_p 转速到 100% 后缓慢增加 n_p 转速设定值, 在发动机功率足够的情况下, 功率吸收装置可自身通过调节负载来使 n_p 转速达到设定值, 实现 n_p 超转。

负载调节法通过调节功率吸收装置负载可以实现 n_p 超转的目的, 但该方法是一个相对缓慢的过程, 不能真实反应发动机装机状态输出轴断裂或控制系统失控而导致的动力涡轮转速快速超转的情况。

2 切断传动轴法

动力涡轮包容性验证试验一般对需要断裂的叶片进行加工, 整机试验时使动力涡轮超过某较高转速, 从而达到叶片破裂, 验证包容性的目的。试验时为了达到动力涡轮超转需要采用载荷失去或轴失效的方式进行实现。国外普遍采用切断发动机和车台功率吸收装置之间传动轴的方法来进行发动机整机包容性的验证试验(图 1), 如法国阿赫耶 1C 发动机。

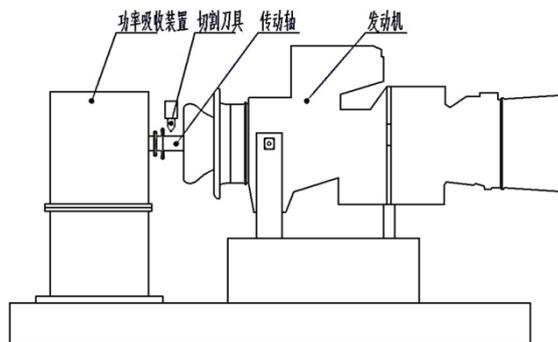


图1 切断转动轴法示意图

该方法可以达到载荷失去或轴失效而导致动力涡轮超转的目的，同样可以用于控制系统动力涡轮保护功能的验证。但是由于切削时传动轴的转速很高，切断后摆动很大，会损坏发动机输出轴组件和功率吸收装置，试验风险比较大，而且每次试验都需要破坏一个传动轴，成本也比较高。

3 切断间隔套法

考虑试验风险和试验成本，在涡轴发动机和功率吸收装置之间增加带有支点功能的切断装置，其作用是在不破坏发动机动力输出轴的情况下实现发动机负载丢失的功能，同时保护发动机和功率吸收装置等设备的安全。

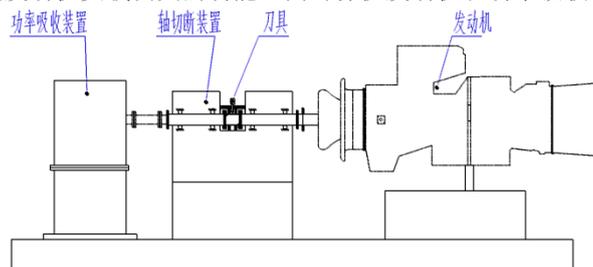


图2 切断间隔套法示意图

切断装置由底座、前支点、后支点、叠片联轴器、进刀机构、防护罩等设备组成。切断装置的工作原理：前支点和后支点安装在底座上，两个支点之间采用联轴器连接，前支点连接发动机，后支点连接功率吸收装置。进刀机构沿水平进刀，切断联轴器中间的间隔套，间隔套切断后由安装在防护罩上的限位环进行半轴的摆动限位，以保护叠片装置、支点轴承以及发动机、功率吸收装置不受损坏。

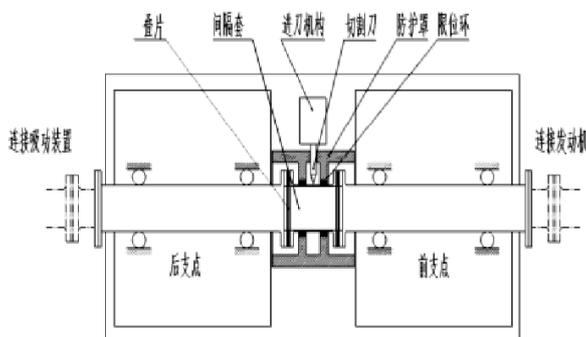


图3 切断装置示意图

该方法避免了直接切割发动机输出轴，降低了试验过程中损坏发动机和车台设备的风险，同时还达到了载荷失去或轴失效而导致动力涡轮超转的目的，同样可以用于控制系统动力涡轮保护功能的验证。经试验验证，每次更换间隔套、切割刀具和限位环即可重复使用，每次试验的成本大大降低。

4 转速超调法

现在大多数涡轴发动机控制系统是数字电子式，数字电子式发动机控制系统一般要求具有独立的低压转子转速超

转保护装置。独立超转保护装置（见图4）尽管与主控部分装在一个机箱内，共同构成电子控制器 ECU，但在硬件上相对独立。独立超转保护装置一般采用双通道结构，每个通道具有相同的硬件，输入输出信号也一样。独立超转保护装置主要由 CPU 系统电路、信号调理电路、输出控制电路及电源电路组成。

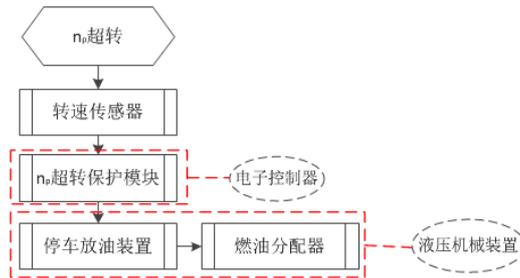


图4 超转保护装置原理图

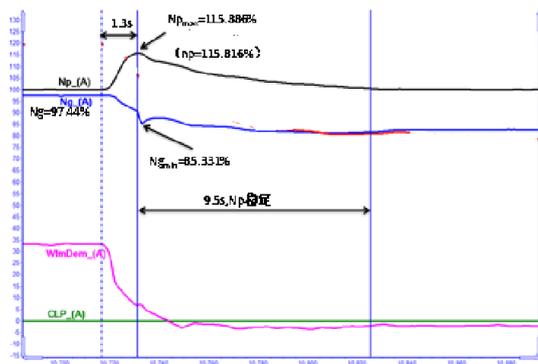
对于目前大多数涡轴发动机控制系统， n_p 独立超转保护和再点火控制结合在一起。采用的控制逻辑是当两个通道同时判断 n_p 超转时，切断燃油，进行超转保护，两个通道中的一个通道判断 n_p 超转时，就发出再点火信号，接通点火装置，实现再点火。

涡轴发动机在进行超转保护系统功能验证试验时，为达到超转目的，一般采用调低超转保护值的办法来实现超转保护功能检查。这一方法可初步验证超转保护功能是否正常，但由于转速低于实际超转转速，无法模拟真实超转情况下，超转保护系统的响应速度和控制精度。

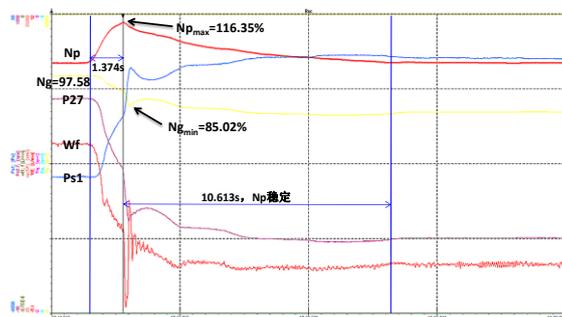
典型的涡轴发动机控制规律为动力涡轮转速 n_p 恒速控制，通过调节燃油流量，保持动力涡轮转速 n_p 为常数。在地面台架试验时，由控制系统控制发动机的燃油量以及测功器控制负载两方面来保持 n_p 为常数。在发动机进行减速试验时，负载杆快速下拉，测功器卸载，控制系统控制发动机减油，但是二者之间的时间差会引起动力涡轮转速 n_p 超调。基于上述原因，负载杆会给电子控制器负载前馈信号，来减小 n_p 超调。如果可以利用 n_p 超调，将会达到动力涡轮的真实超转的目的。

试验时可断开负载杆给电子控制器的负载前馈信号（即“水门开度信号”/负载杆“CLP 信号”），在发动机某高状态下，快速下拉负载杆使得 n_p 转速快速上升的方法实现动力涡轮超转。

在某涡轴发动机进行控制系统动力涡轮超转保护试验中，电子控制器将 n_p 超转保护值设置为 116%，在发动机运行至某高状态，快速下拉负载杆减速到空慢状态。下图给出了发动机参数变化曲线（发生超转时刻 n_p 最大值，车台测试数据比数控系统测试数据值高，原因在于数控系统的采样周期为 0.1s，低于车台的采样周期 0.001s，所以车台测到的峰值时刻值要稍大一些），数控系统参数显示，在 n_p 达到最大转速值前 0.1s-0.2s 时刻，超转电磁阀接通。车台测试的动态数据显示，在 n_p 到达峰值时刻，切断燃油，切断时间持续 0.2s。认为车台测试的数据反映了燃油供给的真实情况，控制系统显示界面的 n_p 转速，比实际传到超转放油阀处的信号有短暂的延时。超转保护功能正常，超转保护精度满足超转保护值 $116\% \pm 1\%$ 的要求。



(a) 数控系统曲线



(b) 车台动态曲线

图5 试验参数曲线图

在不同发动机运行状态下使用该方法进行试验, 试验结果表明负载杆下拉前的燃气涡轮转速越高, 动力涡轮前温度越高, 负载杆下拉后动力涡轮转速超调越大, 越容易实现超转, n_p 超调后到恢复平稳所需要的时间越长。

转经济性都大大提高。该方法由于是利用放大超调量导致超转, 超转额度并不大, 不适用于包容性这种需要较高超转速的试验验证, 但却可以在动力涡轮真实超转的状态下验证动力涡轮超转保护功能。

5 结论

速超调法相对于前两种超转方法, 不需要对连接轴系进行破坏, 安全性和

(1) 切断转动轴法和切断间隔套法同为在机械上破坏涡轴发动机和功率吸收装置的连接来实现超转的目的, 可以满足包容性验证及动力涡轮超转保护功能验证。但切断转动轴法需要破坏发动机转动轴, 经济性较差, 断轴后还会出现轴系摆动, 安全性较低; 而切断间隔套法在试验时切断只需一个间隔套, 更换间隔套后, 可重复利用, 成本相对传动轴大幅降低, 前后支点的设置避免了轴系摆动的问题, 安全性同时大幅提高;

(2) 负载调节法和转速超调法都是在控制上利用负载和发动机供油设计匹配偏差来实现转速超调。负载调节法超转过程相对缓慢而不能真实模拟快速超转; 转速超调法超转量可至 10%~20%, 不足以进行包容性试验, 但可以开展动力涡轮超转保护功能在真实超转状态下的验证, 试验过程中不需破坏轴系, 安全性和经济性均为最高;

(3) 在实际试验中, 可以根据不同的试验目的选择相应的试验方法, 或采用多种方法相结合的方式。

[参考文献]

- [1] 廉小纯, 吴虎. 航空发动机原理[M]. 陕西: 西北工业大学出版社, 2006.
- [2] 张宝诚. 航空发动机 试验和测试技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [3] 陈益林. 航空发动机试车工艺[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.

作者简介: 温会云(1989.12-), 男, 中国航空研究院, 航空推进理论与工程, 中国航发湖南动力机械研究所, 主管设计师, 工程师; 岳洋(1986.6-), 男, 南京航空航天大学, 动力机械及工程, 中国航发湖南动力机械研究所, 主管设计师, 工程师。