

轴改桨发动机控制系统特点分析

曾夏青 李 峰 吴兴浪 周 正 冯 安

中国航发湖南动力机械研究所 湖南株洲 412002

摘 要: 轴改桨技术是目前世界上涡桨发动机的主要研制手段之一, 虽然轴改桨发动机核心机与涡轴发动机保持一致, 但控制系统方面存在诸多差异。本文从负载特性、螺旋桨控制、使用条件、工作状态等方面对轴改桨发动机控制系统主要影响因素与特点进行了详细分析, 阐明了造成轴改桨发动机控制系统差异的内在原因, 并阐述了涡桨发动机控制系统的技术难点, 可为后续轴改桨发动机控制系统设计提供借鉴。

关键词: 轴改桨; 涡桨发动机; 负载特性; 螺旋桨控制

轴改桨技术是目前世界上涡桨发动机的主要研制手段之一, 通过充分利用现有成熟涡轴发动机的核心机和功率输出端技术, 能够使研制工作量和风险大大减小。国外典型的轴改桨发动机有通用电气公司基于T700涡轴发动机改型发展的CT7系列涡桨发动机, 罗·罗公司基于RTM322-01涡轴发动机改型发展的RTM322-06/16涡桨发动机以及霍尼韦尔公司基于TSE331涡轴发动机改成的TPE331涡桨发动机^[4]。

国外在轴改桨发动机研究方面经验比较成熟, 已成功研制出多型已服役涡桨发动机; 国内轴改桨发动机研究工作主要集中在中国航发湖南动力机械研究所, 凌天铎等人对轴改桨发动机主要特点与研制难点进行分析总结, 并成功研制出了涡桨-9发动机^[4-5]。

由于涡轴发动机和涡桨发动机在装机对象以及使用方式上存在着较大差异, 轴改桨发动机控制系统的影响因素也是多方面的。本文从负载特性、螺旋桨控制、使用条件、工作状态等方面对轴改桨发动机控制系统主要影响因素与特点进行分析, 并阐述了涡桨发动机控制系统的技术难点, 旨在为后续轴改桨发动机控制系统设计提供一定借鉴。

一、控制系统特点分析

(一) 负载特性

对于涡轴发动机而言, 其负载为产生升力、转动惯量特别大且转速调节时间较长的旋翼; 对于涡桨发动机而言, 其负载为产生推力或拉力、转动惯量相对较小且转速调节响应更快的螺旋桨。负载特性的不同, 决定了控制系统调节规律、限制参数、加减速控制等方面的不同。

1. 调节规律

以双转子涡轴发动机和涡桨发动机为例, 由于涡轴发动机负载旋翼的调节响应慢, 而燃气涡轮转速 n_g 响应则快很多, 因此采用等自由涡轮转速的调节规律, 具体可表示为:

$$W_f \rightarrow n_p = const$$

式中: W_f 为燃油流量; n_p 为动力涡轮转速。

涡桨发动机由于负载螺旋桨转速易于调节, 并可以通过改变桨距调节其转速。故涡桨发动机通常以燃气涡轮转速 n_g 、螺旋桨转速 n_s 同时作为被控参数, 以燃油流量 W_f 、螺旋桨的桨叶角 ϕ 作为调节中介, 其调节规律为:

$$W_f \rightarrow n_g = const, \phi \rightarrow n_s = const$$

2. 加减速控制

涡轴发动机由于旋翼负载惯性过大, 在调节旋翼总距时, 需对发动机功率采取提前控制, 以防止旋翼负载突然的变化导致动力涡轮转速变化过大的情况发生。对于涡桨发动机则不需要考虑加减速过程中的提前控制问题。以RTM322-06涡桨发动机为例, 其加减速控制方案采用燃气发生器转速变化率来进行, 即用 dn_g/dt 加速度控制规律, 直接对发动机的功率进行控制, 螺旋桨可根据需要随时通过变距方式进行转速调节。同时, RTM322-06发动机在控制系统中增加了喘振保护措施, 对其最大燃油流量进行了限制, 并在软件中引入了 W_f/P_3 曲线以防止工作线向喘振线靠拢。

(二) 螺旋桨控制

涡桨发动机控制系统可以看成是核心机控制系统基础上增加了一螺旋桨控制系统。螺旋桨控制部分的增加,

对轴改桨发动机控制系统产生了巨大影响, 本文通过对纯机械液压式和数字电子式两类螺旋桨控制系统的组成和原理进行分析, 阐述螺旋桨控制的特点。

1. 机械液压式

典型的机械液压式螺旋桨控制系统以涡桨-9发动机为例, 其主要由螺桨调速器、螺桨限速器组成。其中, 螺桨调速器通过控制桨距来调节螺旋桨转速, 螺桨限速器通过增大螺旋桨桨距来减小转速从而限制螺旋桨超转为防止小桨距和反桨工作下螺旋桨超转, 同时配有信号转换装置, 将螺桨调速器所接受的螺旋桨转速超转信号经过变换后传递给燃油调节器并控制燃油调节器减少供

给发动机的燃油流量, 从而改变发动机输出功率, 以保持或限制螺旋桨的给定转速。

目前的数字电子式螺旋桨控制系统主要还是机械液压控制与数字电子控制组合而成的混合式控制系统。以RTM322-06/16两款典型的轴改桨发动机为例, 该螺旋桨控制系统保留了配重平衡、超转调速器, 地面 β 方式控制, 顺桨活门、高压液压泵、电动顺桨泵、桨距变换机构等。螺桨调速器可在85%~100%范围内任意选择和恒定。桨速调节装置则采用双通道数字式电子控制技术, 电子控制回路基本原理如图1所示, 控制计划与控制律均在电子控制器中由软件程序实现。

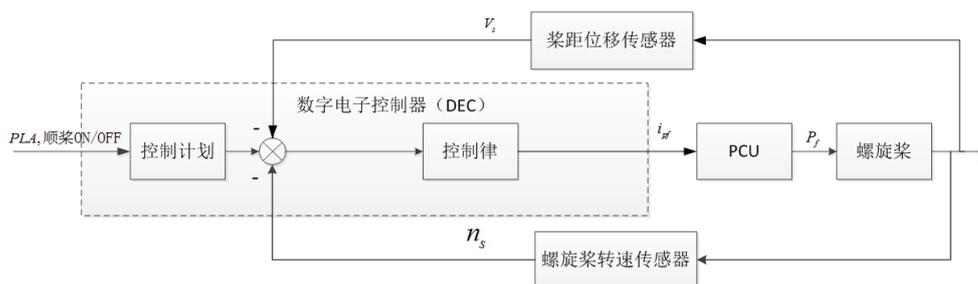


图1 螺旋桨电子控制回路

(三) 使用条件

一般地, 涡轴发动机改型成涡桨发动机后, 其装机对象也发生了改变。涡轴发动机主要作为直升机等旋翼机的动力装置, 而涡桨发动机主要用于中小型运输机和侦察机等固定翼飞机, 装机对象的不同决定了轴改桨发动机使用条件的差异, 主要体现在涡桨发动机使用包线更宽, 飞行速度更快以及喘振裕度更低。

本文从防喘控制、降噪控制以及供油能力三方面阐述使用条件对控制系统造成的影响。

1. 防喘控制

由于涡桨发动机飞行高度达到9000~12000m, 受高空低雷诺数以及进气条件恶化影响, 其喘振裕度相对于涡轴发动机大大减小, 对控制系统防喘功能的需求也相应增加。

2. 降噪控制

涡轴发动机和涡桨发动机在使用过程中都存在着噪声过大的困扰, 其中涡轴发动机对于旋翼噪声降噪主动控制目前还没有很好的解决办法, 涡桨发动机在双发及多发飞机的使用过程中探索出了一种螺旋桨噪声主动抑制方法, 即通过螺旋桨同步同相控制方案来减小涡桨飞机讨厌的噪声和振动。

3. 供油能力

轴改桨发动机由于飞行高度的增加, 飞行速度的提高, 进气条件随之恶化, 需对控制系统燃油泵的供油能力进行改造提升, 主要需考虑在原来的供油规律基础上进行高度和速度补偿的拓展, 提升燃油增压泵的增压能力以减小燃油泵在高空时的汽蚀危险以及对燃油泵调节器最大燃油流量限制和最小燃油流量限制进行重新设定。

(四) 工作状态

涡轴发动机主要工作于30sOEI、2minOEI、起飞、最大连续等状态, 而涡桨发动机主要工作于起飞、最大连续/爬升、慢车、顺桨、反桨等状态。工作状态的不同, 决定了轴改桨发动机控制系统有着独特的控制方式。

1. 顺桨控制

对于涡桨飞机, 因某种原因出现空中停车时, 螺旋桨不顺桨, 会产生很大的负拉力, 这将对飞行安全带来很大的影响。对于单发螺旋桨飞机, 风车状态下螺旋桨因气流冲击自动高速旋转将增大飞机的飞行阻力; 对于多发螺旋桨飞机, 其中某一发动机失效则会产生很大的不对称阻力导致发动机强烈的俯仰或者造成全部机械停车和起火。因此, 为了减小阻力和防止进一步破坏, 螺旋桨必须能够将桨叶持平, 或位于任何一面都不产生气

动力的零位置，这称为螺旋桨的“顺桨”。

2. β 控制

β 控制主要适用于小桨距和反桨状态，当螺旋桨选择 β 范围，桨叶将移动到非常细的螺距位置，称为“地面细螺距”。当螺旋桨进入地面细螺距位置时，就会有显著的气动刹车效果。 β 控制模式的存在使得涡桨发动机在地面着陆滑跑时能够以小桨距及反桨状态工作，从而大大缩短飞机的滑跑距离，多发飞机转弯时还可缩小转弯半径。

3. 负拉力控制

负拉力控制与 β 控制类似，主要运用于涡桨发动机的地面反桨状态。当发动机随飞机着陆后，功率杆被拉回到地面慢车位置，这就使发动机在最小功率状态，螺旋桨在最小正桨距（零度）。如果要求较短的着陆滑跑距离，功率杆可以拉到低于地面慢车位置，并进入负拉力范围。

二、技术难点

(一) 控制回路设计

涡桨发动机输入为燃油流量和桨叶角，主要输出为螺旋桨功率和螺旋桨转速。涡桨发动机控制系统理论上包括两个控制回路，一是通过燃油流量控制螺旋桨转速，二是通过桨叶角控制螺旋桨转速。但实际上这两个控制回路间是相互耦合干扰的。考虑涡桨发动机工程应用的灵活性，采用分散控制策略，即通过解耦方式，首先将多输入多输出的系统解耦成几个单输入输出的控制回路，然后对每个回路进行设计，双回路控制原理如图2所示。

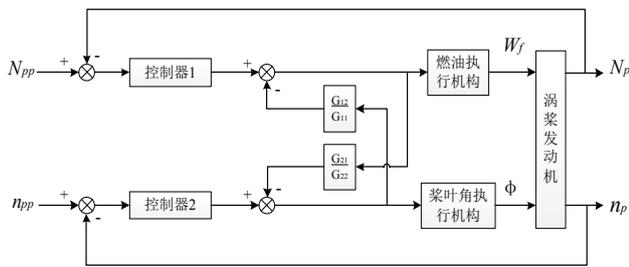


图2 双回路控制原理

(二) 功率管理设计

功率管理为涡桨发动机双回路控制系统提供顶层管

理指令，包括螺旋桨功率管理计划和前馈燃油计划。

螺旋桨功率管理计划先按功率杆基准插值出标准大气条件下的螺旋桨功率，再根据不同的飞行条件对其进行修正，以适应飞行包线范围内非标准条件下的螺旋桨需求功率；前馈燃油计划将功率杆和飞行条件的二元函数关系替换为目标螺旋桨换算功率和换算转速的二元函数关系，在全飞行包线范围内能够快速满足目标螺旋桨功率所需求的燃油流量，实现控制系统快速调节跟踪，具体见图3。

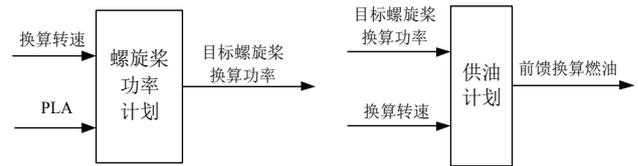


图3 螺旋桨功率计划和前馈燃油计划

结论

本文从轴改桨发动机负载特性、螺旋桨控制、使用条件、工作状态四个方面详细阐述了轴改桨发动机控制系统的影响因素和特点，揭示了系统差异的内在原因，并就涡桨发动机控制系统设计的技术难点进行了剖析。

分析结果表明，轴改桨发动机控制系统相对于涡轴发动机存在较大差异，通过识别这些差异可针对性开展如加减速、降噪、顺桨等方面的特定设计，本文分析形成的设计经验可为今后涡桨发动机控制系统设计提供借鉴。

参考文献

- [1] 樊思齐, 李华聪, 樊丁. 航空发动机控制 (下册) [M]. 西安, 西北工业大学出版社, 2008.
- [2] 廉筱纯, 吴虎. 航空发动机原理 [M]. 西安, 西北工业大学出版社, 2005
- [3] R.A.Midgley. Advanced Turboprop And Turbofan Transmissions. 1986
- [4] 凌天铎. “轴改桨”泛论, [J]. 南华动力, 1999, 01
- [5] 顾永根, 凌天铎. 我国自行研制的第一种“轴改桨”发动机涡桨9的性能、结构、研制和试验 [J]. 推进技术, 1998, 12