



涡轴发动机闭环过渡态控制规律设计*

Research on Closed Loop Transient Control Law of Turboshaft Engine

贾琳渊 陈玉春 赵强 / 西北工业大学动力与能源学院

摘要: 为实现对发动机过渡态的精确控制、减弱过渡态过程对发动机寿命的影响, 本文建立了适用于自由涡轮涡轴发动机过渡态控制规律设计的功率提取法模型, 并在全飞行包线和全寿命周期内, 对涡轴发动机闭环加减速控制规律设计方法进行了研究。

关键词: 涡轴发动机; 功率提取法; 闭环控制规律; 性能老化

Keywords: turboshaft engine; power extraction method (PEM); closed loop control law; performance deterioration

0 引言

在发动机的加减速过程中, 涡轮前温度和发动机转速变化量以及变化速率均很大, 对发动机的寿命产生重大影响。涡轮发动机加减速时间是衡量发动机性能的重要标志之一, 缩短发动机加减速时间对于许多飞机来说非常重要, 减小发动机加减速时间的一种有效途径是, 在满足压气机工作稳定性限制、涡轮进口总温限制以及燃烧室稳定工作限制的条件下(以下称为三大约束条件), 合理设计(优化)发动机的过渡态控制规律。

航空涡轴发动机开环调节方案往往需要预留较大的裕度, 这就导致了在某些状态下不能充分发挥发动机的加速潜能^[1]。闭环加减速控制规律则通过对燃气发生器转子加减速率的控制, 并结合涡轮进口总温的限制来实现对发动机加减速过程的准确控制。本文利用适用于自由涡轮涡轴发动机的功率提取法, 对涡轴发动机闭环加减速控制规律进行了研究, 得到了一些有参考价值

的结果和结论。

1 闭环加减速控制规律设计方法介绍

1.1 改进的功率提取法简介

文献[2]、[3]提出并发展了适用于涡轮发动机加减速控制规律设计的新方法——功率提取法。其特点是, 发动机稳态特性计算中无须满足压气机和涡轮的功率平衡(涡轮功率大于压气机功率的部分, 就是额外功率提取, 也是加速功率), 只需满足流量平衡即可。

目前的文献中并未明确地给出改进的功率提取法在涡轴发动机加减速控制规律设计中的应用。但是, 笔者经过研究发现功率提取法在涡轴发动机中仍然适用。这是因为涡轴发动机在加减速过程中, 控制目标之一是保持自由涡轮转速不变^[4-5]。在这种情况下, 自由涡轮转子加速率为零, 亦即加减速功率为零。可见, 功率提取法在涡轴发动机中使用, 只需要从燃气发生器转子上提取一部分功率(加速功率)。

综上所述, 可应用于自由涡轮涡轴发动机的功率提取法模型如下。

1) 定喘振裕度法: 自变量为 T_4 、高低压涡轮换算流量 TFF_{hp} 和 TFF_{lp} ; 平衡方程为: 高压涡轮进口流量平衡、低压涡轮进口流量平衡及尾喷管流量平衡。

2) 定余气系数法: 自变量为压气机压比 ZC 、高低压涡轮换算流量 TFF_{hp} 和 TFF_{lp} ; 平衡方程与定喘振裕度法相同。

1.2 闭环加减速控制规律设计方法

对于飞行包线宽广、寿命长的涡轴发动机而言, 如果将加减速控制规律设计为唯一的开环控制规律^[2-3], 是不合适的, 原因如下。

1) 飞行条件(飞行高度)、气候条件以及发动机的性能老化会使得发动机的稳态工作线的变化比较严重, 因而要实现发动机所有情况下的加减速, 必须使得加速工作线非常靠近喘振边界。

2) 非常靠近喘振边界的加速工作线对于高大气温度以及性能老化的发动机来说是必要的, 但对于低大气温度以及新的发动机来说却是不必要的, 虽然加速时间非常短, 但是加速过程中的涡轮进口总温非常高, 不利于提高发动

* 基金项目: 航空科学基金项目(2009ZB53018)

机的使用寿命。

可以考虑设计闭环加速控制规律来满足长寿命涡轴发动机的加减速控制需要。根据研究经验,考虑采用发动机燃气发生器转子加速度和涡轮进口总温限制相结合的方法来设计闭环加速控制规律。首先必须研究燃气发生器转子加速度随飞行状态、气候条件的变化关系,同时还要研究一定的转子加速度下,不同状态的发动机(新发动机或者性能衰减的发动机)对应的涡轮进口总温的变化,以便获得涡轮进口总温(工程实际中以涡轮出口总温来代表)的限制值。

因此,涡轴发动机功率提取法模型设计闭环加减速控制规律的方法如下。

1) 根据发动机稳定性设计的要求,获得发动机加速过程中压气机喘振裕度损失随发动机换算转速的变化关系。

2) 根据发动机稳态计算的结果和压气机喘振裕度损失,确定压气机的喘振裕度,利用1.1节建立的定喘振裕度法,在发动机的飞行包线内进行计算,获得燃气发生器转子加速度随飞行高度、大气条件和燃气发生器换算转速的变化关系,进而获得闭环的燃气发生器转子加速度控制规律。

3) 根据所研究的涡轴发动机的

特点,给定在发动机性能老化并且必须进行大修或报废时的发动机各部件特性参数的变化值,利用定喘振裕度法,计算性能老化的燃气发生器转子加速度对应的涡轮进口总温与发动机换算转速的关系。

4) 结合上述2)和3)计算得到的燃气发生器转子加速度和涡轮进口总温限制,构成了发动机闭环加速控制规律。

5) 根据燃烧室特性,确定慢车状态到最大状态之间熄火边界的油气比随发动机换算转速的关系。

6) 根据燃烧室熄火特性,利用1.1节建立的定余气系数法,在发动机的飞行包线内进行计算,获得燃气发生器转子减速度随飞行高度、大气条件和换算转速的变化关系,进而获得闭环燃气发生器转子减速度控制规律。

7) 根据所研究的涡轴发动机的特点,给定在发动机性能老化并且必须进行大修或报废时的发动机各部件特性参数的变化值,利用定余气系数法,计算性能老化的燃气发生器转子减速度对应的涡轮进口总温随发动机换算转速的关系。

8) 结合上述6)和7)计算得到的燃气发生器转子减速度和涡轮进口总温限制,构成了发动机闭环减速控制规律。

2 算例与分析

2.1 不考虑发动机性能老化的闭环加速控制规律设计

本文以长寿命涡轴发动机为研究对象,发动机的工作包线为:飞行高度 H 为0~5km,大气温度 T_H 为-40~45℃(一般不考虑涡轴发动机的速度特性);发动机地面静止状态、标准国际大气条件下(ISA),从60%转速到最大转速的加速时间要求为8s;压气机设计点喘振裕度为15%;发动机性能老化后,地面静止状态、标准国际大气条件下的涡轮进口总温允许升高值为100K。

确定满足地面静止条件发动机加速时间的加速过程中,压气机喘振裕度损失为5.0%。需要说明的是,一般加速过程中的喘振裕度损失应该是换算转速的函数,但采用等喘振裕度损失来设计加速控制规律,并不影响闭环加速控制规律设计方法的正确性和合理性。

在定喘振裕度法的计算程序中,给定压气机喘振裕度损失为5.0%,分别计算得到 H 以及 T_H 对燃气发生器转子加速度 dn/dt 与转子换算转速 n_{cor} (相对值)之间的影响如图1和图2所示。

从图1和图2可以看出:随飞行高度 H 的增加, dn/dt 下降,这是发动机空气流量降低的缘故;随大气温度 T_H 的变化, dn/dt 保持不变,这是因为在飞行马

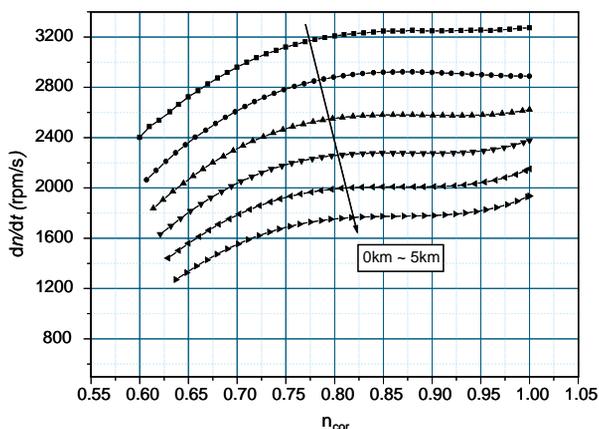


图1 高度和换算转速对加速率的影响

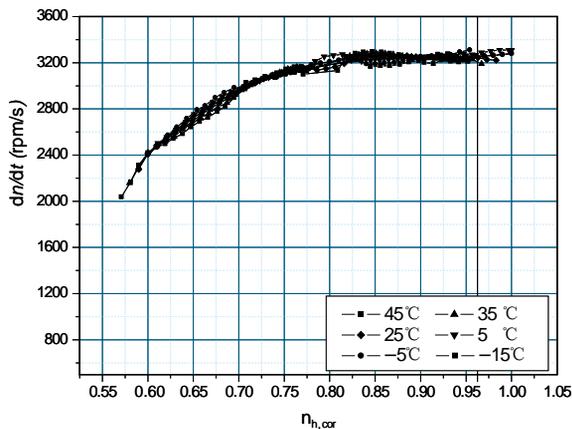


图2 大气温度和换算转速对加速率的影响

赫数不变的情况下($M_{a0} \equiv 0.0$), n_{cor} 相等即可保证发动机工作点相似的缘故。可见, 采用 dn/dt 作为闭环加速控制规律时, dn/dt 实际上只与 H 和 n_{cor} , 这给控制规律设计带来了方便。

进一步考虑将 dn/dt 除以压气机出口总压 P_3 作为换算的转子加速率, 并将不同 H 下的 $(dn/dt)_{cor}$ 绘制于图3中。从图3中可以看出, 不同飞行高度对应的 $(dn/dt)_{cor}$ 十分接近, 可以认为 $(dn/dt)_{cor}$ 与 H 无关, 而仅是 n_{cor} 的单值函数。采用合理的数学方法进行处理(从略), 可以获得 $(dn/dt)_{cor}$ 与 n_{cor} 之间的关系为:

$$\begin{aligned} (dn/dt)_{cor} = & (-86.62 + 5085.71 n_{cor}^2 \\ & - 7897.27 n_{cor}^{2.5} + 3217.54 n_{cor}^3) \times 10^{-5} \end{aligned} \quad (1)$$

按照式(1)计算得到的 (dn/dt) 就是所研究的涡轴发动机的闭环加速度控制规律。

2.2 加减速过程中涡轮进口总温的限制

假设分别将压气机、燃气发生器涡轮和自由涡轮的效率降低1.5%(代表发动机性能老化的一般规律)后, 利用稳态特性计算得到地面静止状态、标准国际大气条件下的涡轮进口总温正好升高值为100K。在定喘振裕度法的计算程序中, 给定压气机喘振裕度损失为5%, 计算得到地面静止状态下的 $T_{4,max,des}$ 随燃气发生

器换算转速之间的关系如图4所示。

由于在同样的压气机过渡态工作点时, 燃气发生器基本相似, 故将图4中的加速过程 T_4 极限值作为加速过程中的限制时, 必须经过换算后才能够作为加速过程中的涡轮进口总温限制(工程实际中, 如果采用涡轮出口总温作为限制, 同样需要换算), 具体的换算公式为:

$$T_{4,max} = T_{4,max,des} \times T_2 / T_{2,des} \quad (2)$$

式中: $T_{4,max}$ 为对应 T_2 的涡轮进口总温限制值, $T_{4,max,des}$ 为图4中的 $T_{4,limit}$; T_2 为某种飞行条件下的发动机进口总温, $T_{2,des}$ 为设计点的发动机进口总温。

式(1)的闭环加速度控制规律和式(2)的涡轮进口总温限制, 共同构成了所研究的涡扇发动机的闭环加速控制规律。

2.3 发动机闭环减速控制规律设计

在定余气系数法的计算程序中, 给定燃烧室贫油熄火余气系数, 按照2.1节的思路和方法, 可以获得发动机的闭环换算减速度与换算转速及高度之间的关系。值得注意的是, 由于给定发动机的余气系数不能保证燃气发生器的工作状态相似, 因此换算的闭环减速度同时与其换算转速及飞行高度相关。此处亦不再给出换算减速度的变化规律。

按照2.2节的思路和方法, 也可以

获得发动机性能老化后, 减速过程中涡轮进口总温的极限如图4中的减速过程 T_4 极限值。在使用此减速过程 T_4 极限值时, 同样需要按照2.2节中的换算方法来计算实际的 T_4 极限值。闭环换算减速度控制规律和涡轮进口总温限制, 共同构成了所研究的涡扇发动机的闭环减速控制规律。

2.4 发动机加减速特性模拟

按照所设计的加速控制规律, 不考虑控制系统的具体控制算法和滞后效应, 分别对新发动机在 $H=0\text{km}$ 、 $Ma=0.0$ 、ISA 及 $H=5\text{km}$ 、 $Ma=0.0$ 、ISA 条件下进行加速过程动态特性计算。得到的加速过程中发动机燃气发生器转子换算转速 n_{cor} 和涡轮进口总温 T_4 随时间的变化关系分别见图5和图6所示。

按照所设计的减速控制规律, 不考虑控制系统的具体控制算法和滞后效应, 分别对新发动机在 $H=0\text{km}$ 和 $H=5\text{km}$ 、 $Ma=0.0$ 、ISA 条件下进行减速过程动态特性计算。得到的减速过程中发动机燃气发生器换算转速 n_{cor} 和涡轮进口总温 T_4 随时间的变化关系分别见图7和图8所示。

3 结论

1) 利用本文提出的涡轴发动机闭

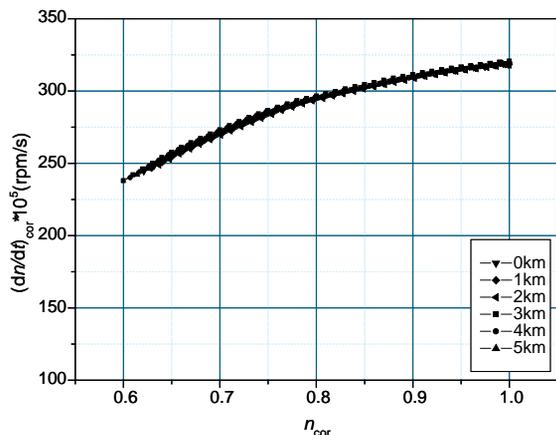


图3 换算加速率与换算转速及高度的关系

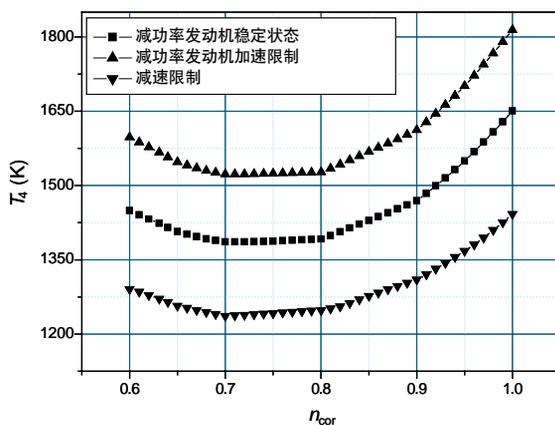


图4 发动机加减速过程中涡轮进口总温限制

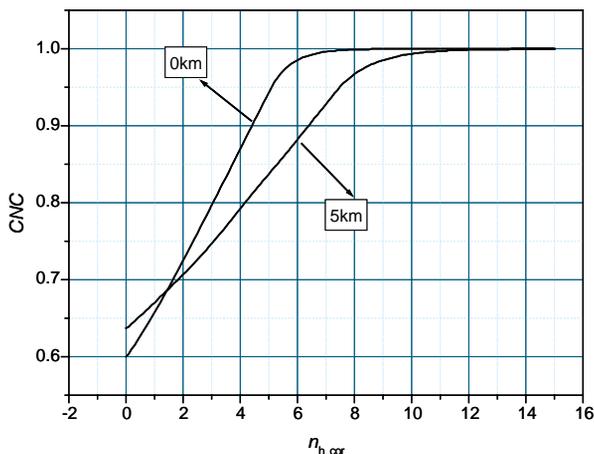


图5 核心机换算转速随时间变化关系

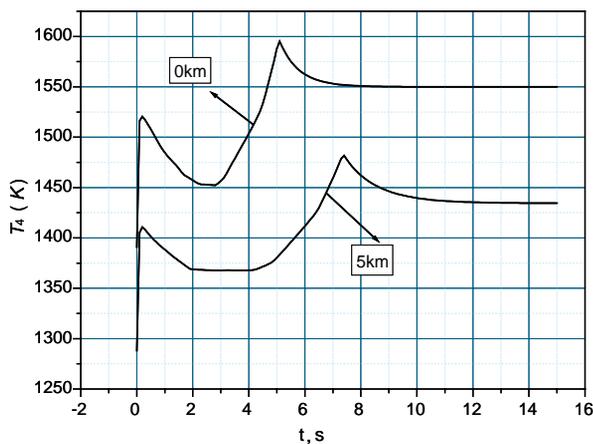


图6 涡轮进口总温随时间变化关系

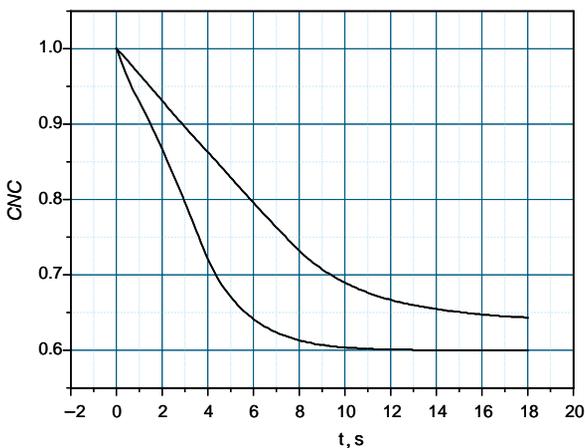


图7 核心机换算转速随时间变化关系

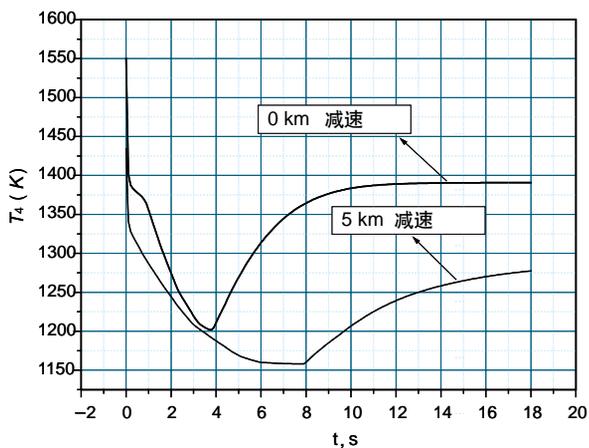


图8 涡轮进口总温随时间变化关系

环控制规律设计方法所设计的闭环加速控制规律满足了加速时间和稳定性的要求,同时涡轮前总温峰值仅超出设计点40K,对延长发动机寿命非常有利。

2) 在给定喘振裕度损失的情况下,涡轴发动机加速率仅是燃气发生器换算转速和飞行高度的函数,因为大气温度对换算加速率的影响通过换算转速体现。

3) 功率提取法简便灵活,且有很好的计算精度,可以应用于单一状态和全飞行包线内、全气候条件下的涡轴发动机控制规律的设计。

4) 本文所研究的涡轴发动机功率提取法模型仅适用于自由涡轮转速为

定值的过渡态控制规律设计,对于更大起动包线的发动机起动机控制规律设计,需要进一步考虑减速器和旋翼的特性以及旋翼的过渡态调节规律。 **AST**

参考文献

- [1] 冯海峰. 航空涡轴发动机数学建模方法与控制规律研究[D]. 西安:西北工业大学,2007.
- [2] 陈玉春,刘振德,袁宁,等.一种涡轮发动机加速控制规律设计的新方法[J].航空学报,2008,29(2):327-332.
- [3] 陈玉春,徐思远,刘振德,等.涡扇发动机加减速控制规律设计的功率提取法[J].航空动力学报,2009,24(4):

2242-2248.

[4] IO.H.聂恰耶夫.航空动力装置控制规律与特性[M].单凤桐,程振海,译.北京:国防工业出版社,1999.

[5] 黄开明.涡轴发动机性能与控制规律仿真与试验研究[D].南京:南京航空航天大学,2009.

作者简介

陈玉春,教授,主要从事航空宇航推进理论与工程研究。

贾琳渊,硕士研究生,从事航空发动机总体设计研究。

赵强,硕士研究生,从事为航空发动机总体设计研究。