

文章编号: 1000-8055(2006)03-0601-05

涡扇发动机多回路切换系统 稳定性分析

刘晓锋¹, 隋岩峰¹, 何保成², 于达仁¹

(1 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2 航天科工集团公司 31 所, 北京 100074)

摘要: 研究了典型的涡扇发动机控制系统(通常包含转速控制、加减速控制与温度保护控制等功能)的稳定性问题, 研究表明这是一类特殊的多回路切换控制系统, 论文推导了其稳定性的充分条件: 涡扇发动机多回路控制系统在各单个回路稳定并且控制回路连续切换条件下是稳定系统。

关键词: 航空、航天推进系统; 涡轮风扇发动机; 线性切换系统; 连续切换

中图分类号: V 233. 7

文献标识码: A

Switching Stability Analysis of Multi-Control Loops for Turbofan Engine

LIU Xiao-feng¹, SU I Yan-feng¹, HE Bao-cheng², YU Da-ren¹

(1 School of Energy Science and Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2 The 31st Research Inst., Beijing 100074, China)

Abstract: The stability of the turbofan engine control loops (which commonly includes speed control, acceleration/deceleration control and temperature protection control) was researched in this paper. The research showed that the turbofan engine control system was a special multi-switch control loops. A sufficient condition was given that made multi-control loops for turbofan engine control system be stably switched through every stable control loop and continuous switching.

Key words: aerospace propulsion system; turbofan engine; linear switched system; continuous switching

涡扇发动机控制系统中主要包括: 转速控制、加减速控制与温度保护控制等功能^[1], 这些控制功能分别由相应的控制回路来独立完成, 如图 1 所示。这样的多回路控制系统不同于工业过程控制中常见的串级控制、解耦控制等, 其特点是多个控制回路通过竞争决定哪个回路起实际的控制作

用, 每个时刻只能有一个回路起作用。

目前在控制器的设计过程中, 假设这几个控制回路的工作情况不会发生多次切换。这种情况下单个回路的稳定性可以保证控制回路切换时的稳定性, 所以在工程实践中通常简单地认为保证各个单回路稳定就满足了系统稳定条件; 然而我

收稿日期: 2005- 12- 12; 修订日期: 2006- 04- 05

作者简介: 刘晓锋(1979-), 男, 山西太原人, 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院博士生, 主要从事航空发动机控制理论的研究

们在实际工作中发现,在某些工况下,例如当转速回路控制下的发动机接近温度保护边界或加速减速边界时,就会发生双回路的频繁切换,甚至会发生 3 个回路的同时切换,由此导致过发动机的不稳定。

本文的研究表明,上述涡扇发动机控制系统是一类特殊的多回路切换控制系统,其稳定性问题有着特殊性,必须研究系统在切换过程中的稳定性。基于这样的认识,本文将分析切换系统的一般性理论应用到涡扇发动机多回路切换的稳定性分析中,从而在理论上给出涡扇发动机多回路切换系统稳定性分析方法,并利用此方法研究了某涡扇发动机多回路连续切换系统的稳定性。

1 涡扇发动机多回路切换系统

1.1 多回路控制系统描述

如图 1 所示涡扇发动机 3 个控制回路的功能分别是:转速控制、温度保护以及加速减速控制回路。转速控制回路按发动机控制计划给定高压转子转速给定值 $n_{H\text{ref}}$,并将该给定与发动机的实际转速 n_H 进行比较形成控制信号;加速减速控制回路主要根据高压转子转速 n_H 与 P_2 确定供给发动机的最大、最小供油量给定值 $Q_{mf\text{ref}}$,该值与发动机的实际供油量 Q_{mf} 比较形成控制信号,以确保发动机在加速减速运行不会发生贫富油熄火现象;温度保护回路通过比较发动机高压涡轮后的温度 T_4 与给定值 $T_{4\text{ref}}$ 给出控制信号,确保发动机不会超温工作^[2~5]

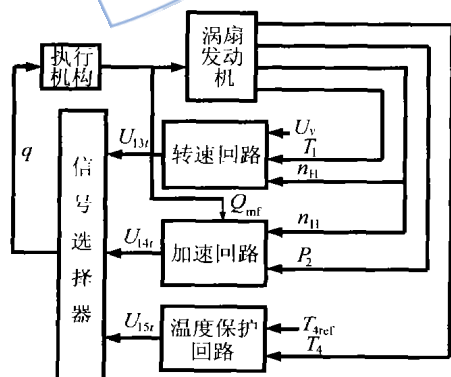


图1 发动机控制系统工作简图

Fig. 1 Simplified diagram of the turbofan control system

1.2 涡扇发动机模型

发动机的线性模型经常使用状态空间法这种

表达形式。在用状态空间法描述动态系统时,状态变量组的选择非常重要。在涡扇发动机中,当只考虑两个独立转子部件为储能元件时,状态变量选取为两个轴上的转子转速 n_H 与 n_L 。但由于在研究涡扇发动机切换稳定性问题过程中,不仅需要建立转速控制系统的数学模型,还需要建立发动机温度保护与加速控制系统的数学模型。这样在考虑选取状态变量时,应当考虑到在加速控制系统中闭环反馈控制发动机的参数是发动机燃油流量。从而综合考虑之后选择的状态变量不仅是两个轴上的转子转速,而且还包括发动机燃油流量。从而涡扇发动机多回路切换控制系统在某一转速附近作波动时可以看作由 3 个可切换的线性系统构成。

其动态方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} \dot{n}_H \\ \dot{n}_L \\ \dot{Q}_{mf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & b_2 \\ -k_1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_H \\ n_L \\ Q_{mf} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{n}_H \\ \dot{n}_L \\ \dot{Q}_{mf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & b_2 \\ -k_2 C_1 & -k_2 C_2 & -k_2 d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_H \\ n_L \\ Q_{mf} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{n}_H \\ \dot{n}_L \\ \dot{Q}_{mf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & b_2 \\ 0 & 0 & -k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_H \\ n_L \\ Q_{mf} \end{bmatrix} \quad (3)$$

公式(1)~(3)分别为转速控制、温度保护和加速控制回路起作用时的闭环系统状态方程,其中的 k_1 , k_2 和 k_3 为相应的控制器增益。从上面的分析可以看出,涡扇发动机符合切换系统的一般特性,此控制系统可归结到切换系统问题进行研究。

2 线性切换系统及稳定性分析

2.1 线性切换系统的稳定性和切换条件密切相关

切换系统与一般的系统相比较具有复杂性和特殊性,它可以看作是由一组连续微分方程子系统和作用在其中的切换规则构成^[6]。对于系统

$$\dot{x}(t) = f_i[x(t), t], \quad x \in R^n \quad (4)$$

满足如下切换规则:

- (1) 每个 f_i 都是全局 Lipschitz 连续的;
- (2) 为了避免系统频繁切换引起的颤动,要

求系统在有限的时间内进行有限次的切换。相应线性切换系统为:

$$\dot{x}(t) = A_i x(t) \tag{5}$$

这里:

$$i \in \{1, 2, \cdots, N\}, \quad x(t) \in R^n$$
$$A_i \in R^{n \times n}$$

定义 设初始时刻为, 称:

$$\sigma = \{x_0; (i_0, t_0), (i_1, t_1), \cdots, (i_n, t_n), \cdots,$$
$$i_k \in \{1, 2, \cdots, m\}, k \in N\} \tag{6}$$

为切换序列, 其中: (i_k, t_k) : 在 $t_k \leq t \leq t_{k+1}$ 时, 状态轨迹沿着 $\dot{x}(t) = f_{i_k}[x(t), t]$ 运行, N 为非负整数。

显然, 若切换序列确定, 则切换系统运动的轨迹是确定。

考虑下面的线性切换系统:

$$\dot{x}(t) = A_i x(t), \quad i = 1, 2$$

这里:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -1 & 2 \\ -20 & -1 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} -1 & 20 \\ -2 & -1 \end{bmatrix}$$

易知此切换系统的两个子系统都是稳定的。下面选取两种不同的切换策略使得此系统得到两种截然不同的结果。取初始值为 $x_0 = [0.1; 0.1]$, 首先选取切换策略(I)为: 当系统轨迹进入第一、三象限时, 此系统切换到第二个子系统; 当此系统轨迹进入到第二、四象限时, 系统切换到第一个子系统。其状态轨线的相平面如图2所示, 得到系统是发散的。选取切换策略(II)为: 当系统轨迹进入第一、三象限时, 此系统切换到第一个子系统; 当此系统轨迹进入到第二、四象限时, 系统切换到第二个子系统。其状态轨线的相平面如图3所示, 得到系统是渐近稳定的。

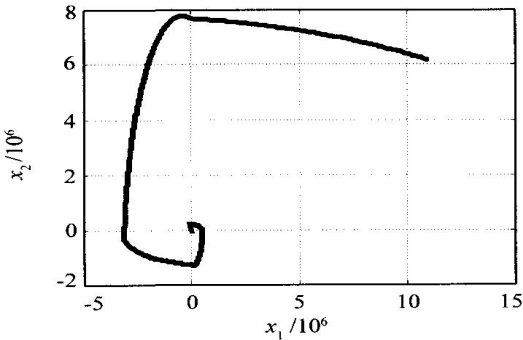


图2 系统在切换策略(I)下的相平面

Fig 2 Diagram of phase plane of the system under the first switching strategy

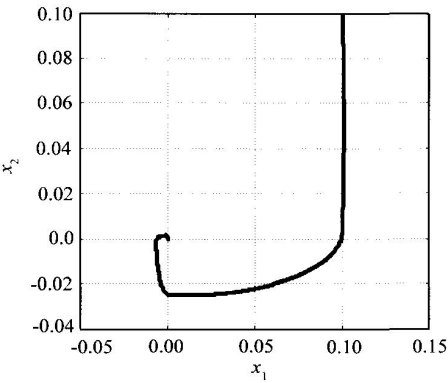


图3 系统在切换策略(II)下的相平面

Fig 3 Diagram of phase plane the system under the second switching strategy

从上面这个例子看出, 切换系统选择不同的切换策略, 切换系统的稳定性可以得到截然相反的结论(稳定/不稳定)。说明研究涡扇发动机切换控制系统的稳定性以及稳定条件是非常必要的。

2.2 稳定性判定方法

在切换系统的研究中, 切换系统的稳定性是研究最为集中的问题, 已经取得了很多研究成果^[7~12]。研究切换系统稳定性常用的方法是 Lyapunov 函数法。文献[13]用多 Lyapunov 函数方法分析特定切换策略下的系统稳定性。其对应的物理含义是子系统在演变过程中状态是收敛的, 并且下一阶段的能量比上一阶段的小。切换系统的稳定性不但与子系统是否稳定有关, 还与切换控制函数有关(已从上一节的例子中看出)。

设 $x \in R_i$ 区域时, 系统处于第 i 个子系统, 且第 i 个子系统到第 j 个子系统切换面是一个曲面 $f_{ij}(x)$ 。

假设 设切换系统的所有子系统的稳定状态空间满足:

$$R_i \cap R_j = f_{ij}(x), \quad \bigcup R_i = R^n \tag{7}$$

定理^[14] 对于切换系统式(5), 如果切换控制序列式(6)满足下列条件:

(1) 当 $x \in R_i$ 时, 存在对称矩阵 P_i , 满足:

$$x^T P_i x > 0 \tag{8}$$

$$x^T (A_i^T P_i + P_i A_i) x > 0 \tag{9}$$

(2) 从第 i 个子系统到第 j 个子系统的切换面是 $f_{ij}(x)$, 在切换面上:

$$x^T P_i x = x^T P_j x \tag{10}$$

则在满足条件(1)与(2)的切换系统式(5)沿着切换序列式(6)的运动轨迹是渐进稳定的。且

L yapunov 函数为 $V(x)=x^TP_ix_0$ 。

证明 首先 $V(x)$ 正定, 其次当 $x\in R_i$ 时:

$$\frac{dV[x(t)]}{t}=x^T(A_i^TP_i+PA_i)x$$

若: $x\in f_{ij}(x)$, 有: $\frac{dV[x(t)]}{t}<0$

对于上述定理, 给出下面两点注解:

(1) 如果将L yapunov 函数看作系统演变过程中的能量变化, 那么若切换系统稳定, 则在系统演变过程中系统能量是减少的;

(2) 上述定理中的条件 2 的物理含义是系统的控制能量是连续变化的, 这一点具有实际物理意义, 根本在于系统状态是连续的。下面给出在涡扇发动机多回路切换控制系统稳定性中的应用。

3 涡扇发动机切换控制系统稳定性分析

某型涡扇发动机系统工作于一转速 n_{H0} 附近。经验证 3 个回路都是能独立稳定运行的回路, 但是在实际试车过程中控制器输出却发生大幅的低频振荡。

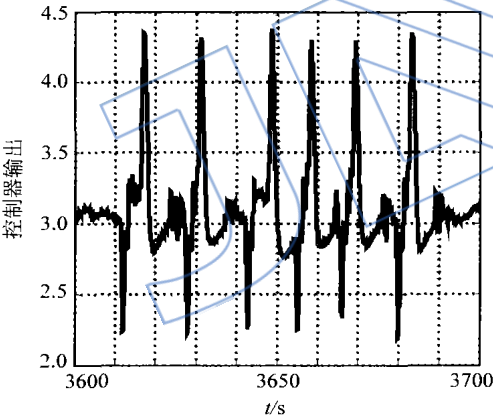


图 4 控制器的输出

Fig 4 Diagram of the controller's output

如图 4 所示, 此次试车为转速与加速控制回路进行切换时控制器输出, 通过对控制器硬件进行研究, 找出了使发动机产生振荡的原因, 即控制回路切换时阶跃信号通过微分环节进入了系统, 给控制器输出带来了脉冲信号从而引起了发动机的振荡。此时温度控制回路是常数, 对回路没有影响, 而转速控制回路与加速控制的切换也是比较平稳的。但是切换时转速控制回路 n_H 的切入和切出分别以正向阶跃和负向阶跃的形式加入到系统。经分析虽然这部分信号不能通过选择, 但是却

可以通过微分环节进入系统。这样, 转速控制回路的切入切出就给系统带来了脉冲信号。正是这种由于微分环节将切换信号以脉冲的形式带入了控制器, 使系统有了振荡的源头。

从上面的分析就进一步验证单单假设各个子系统都是稳定不能保证整个系统的稳定性, 也从另一个层面揭示了连续切换这一条件的重要性。

根据第三节中给出的定理以及前文分析的涡扇发动机切换控制的规则, 利用MATLAB 计算L yapunov 函数为:

$$P_1=P_2=P_3=$$

$$\begin{bmatrix} 0.0962 & -0.0016 & 0.2478 \\ -0.0016 & 0.0264 & 0.0805 \\ 0.2478 & 0.0805 & 0.9122 \end{bmatrix}$$

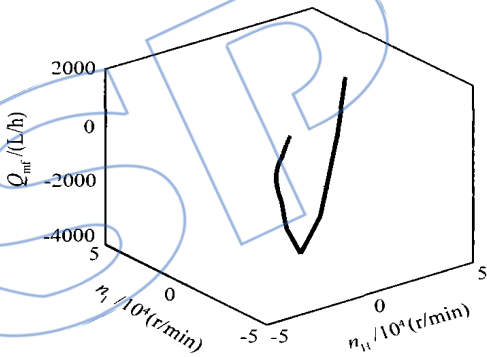


图 5 系统在连续切换条件下相平面

Fig 5 Diagram of phase plane of the turbobfan control system under the continuous sw itching condition

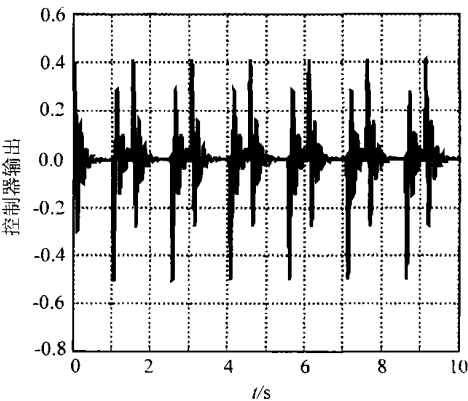


图 6 转速与加速控制回路切换时控制器输出

Fig 6 Diagram of sw itched signalw ith speed and acceleration control loops

可看出特征根是正的, 从而此系统在任意连

续切换条件下切换是指数稳定的。对此发动机控制系统进行仿真如图 5 所示。从图中也可以看出系统是收敛的。

图 6 为转速与加速控制回路不连续切换时控制器输出仿真图, 可见系统是不稳定的。

4 结 论

本文应用已知定理及计算方法对典型系统进行分析, 得出在连续切换条件下的任意稳定性切换系统切换是指数稳定这一普遍性的结论。

可以看出对于涡扇发动机中设计良好稳定的各控制回路在连续切换时依然是稳定的。在实际的生产中, 许多类似的动力系统都有这样的特点, 包括多个控制回路和保护回路。本文的分析也对类似系统的多回路切换提供了理论上的指导。当然, 有些切换系统并非连续切换, 但在此理论框架下可以进行进一步的研究。

参考文献

- [1] 尚义. 航空燃气涡轮发动机[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [2] 樊思齐, 徐芸华. 航空推进系统控制[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.
- [3] 杨育武. 弹用涡喷发动机转速稳定性研究[J]. 飞航导弹, 2004, 6: 54~56.
Yang Yuwu. Stability Analysis of Speed Control System for Missile - Used Turbofan Engine [J]. *Winged Missiles Journal*, 2004, 6: 54~56.
- [4] 陈光明, 樊丁. SQP 方法在航空发动机加速过程控制中的应用研究[J]. 航空动力学报, 1999, 14(3): 313~316.
Chen Guangming, Fan Ding. Application of SQP to Acceleration Control of Turbofan Engine [J]. *Journal of Aeroengine Power*, 1999, 14(3): 313~316.
- [5] 姜彩虹. 航空发动机燃气温度控制系统的设计研究及应用[J]. 航空动力学报, 2003, 18(4): 519~523.
- Jiang Caihong. Design Investigation and application of an Aeroengine Gas Temperature Control System [J]. *Journal of Aeroengine Power*, 2003, 18(4): 519~523.
- [6] Liberzon D, Morse A S. Basic Problems in Stability and Design of Switched Systems [J]. *IEEE Control System Magazine*, 1999, (10): 59~70.
- [7] Hespanha J P. Logic-Based Switching Algorithms in Control[D]. Ph.D. Thesis, Dept of Electrical Engineering, Yale University, 1998.
- [8] Hou L, Michel A N, Ye H. Stability Analysis of Switched Systems[A]. In Proceeding of 35th Conference on Decision and Control[C]. 1996: 1208~1212.
- [9] Beldiman O, Bushnell L. Stability, Linearization and Control of Switched Systems[A]. In Proceedings of the American Control Conference[C]. San Diego, California, 1999: 2950~2954.
- [10] Li Z G, Wen C Y, Soh Y C. Stability of perturbed switched nonlinear systems[A]. In Proceedings of the American Control Conference[C]. San Diego, California, 1999: 2969~2973.
- [11] Xuping Xu, Antsaklis P J. On the Reachability of a Class of Second-Order Switched Systems[A]. IEEE Conference Decision and Control[C]. 1999: 2955~2929.
- [12] Pettersson S, Lennartson B. Stabilization of Hybrid Systems Using a Min-Projection Strategy [A]. Proceedings of the American Control Conference [C]. 2001: 223~228.
- [13] Branicky M S. Multiple Lyapunov Functions and Other Analysis Tools for Switched and Hybrid Systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(4): 475~482.
- [14] 杨磊, 金海燕, 张果, 李俊民. 一类切换系统的连续分段 Lyapunov 函数[J]. 电机与控制学报, 2003, 4(7): 339~343.
Yang Lei, Jin Haiyan, Zhang Guo, Li Junmin. Continuous Piecewise Lyapunov Functions for a Class of Switched Systems [J]. *Electric Machines and Control*, 2003, 4(7): 339~343.