

航空发动机全飞行包线小偏差动态数学模型

李 剑, 谢寿生, 丁康乐
(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要:针对某涡扇发动机电子调节器仅在最大和加力状态工作这一特点,根据大气条件和发动机调节规律,提出将飞行包线划分为83个区域,对每个区域用“质心”点参数代替区域及其边界点参数的飞行包线小偏差方法。通过对某涡扇发动机全飞行包线的数字仿真,结果证明该方法对建立全飞行包线发动机动态方程有效。

关键词:飞行包线;质心;动态方程

中图分类号:V23 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2002)05-0012-05

航空发动机的动态过程是个十分复杂的非线性数学模型^[1]。建立非线性数学模型尽管计算精度较高,但由于工程量很大,算法复杂以及算法稳定性等问题^[2-3],使得动态模型的计算速度和有效性在工程应用中受到一定的影响。利用线性化方法,建立线性模型,对于一般工程问题而言具有一定的精度,而且使问题简化,便于解决工程问题。通常使用的小偏差线性动态模型,一般适用于研究稳态点附近小范围内的发动机动态特性^[4],不能在全飞行包线范围内建立发动机控制系统的数学模型。

本文提出的全飞行包线小偏差动态数学模型,将飞行包线按照一定的准则划分为若干区域,通过建立各区域“质心”点的小偏差动态方程来近似描述航空发动机在飞行包线中的动态数学模型,用变系数动态方程描述航空发动机在全飞行包线中的数学模型。

1 飞行包线的划分方法

- 1)根据大气条件特点,以 $h = 11$ km 为界将飞行包线按高度划分为两个区域;
- 2)根据所研究发动机调节规律的特点,以进口总温为 251 K、288 K、330 K、368.47 K 对飞行包线进行第二步划分;
- 3)对各分区,如果边界点与质心点调节时间的相对变化量在 8% 的范围内,结束分区;否则再选择一定的总温和高度对分区进一步划分,再比较边界点与质心处动态指标的差异。

按照上述方法对飞行包线进行划分,可以划分出 83 个区域,分区以后的飞行包线如图 1 所示:

2 质心点参数的求取

由于进口总温 T_0^* 对发动机的动态性能影响较大,因此可以选取以进口总温函数作为各分区的边界函数之一。进口总温函数 $T_0^*(M_a, h)$ 是:

$$T_0^* = (288.15 - 6.5h) \times (1 + 0.2M_a^2) \quad h < 11 \text{ km}$$
$$T_0^* = 216.5 \times (1 + 0.2M_a^2) \quad h \geq 11 \text{ km}$$

此外,为了方便质心点坐标的计算,可以选择飞行高度作为各分区的另一个边界函数。定义各分区的质量分布密度函数 $\rho(M_a, h)$ 为

收稿日期:2001-08-27

作者简介:李 剑(1978-),男,江西丰城人,硕士,主要从事航空发动机控制与故障诊断的研究;
谢寿生(1959-),男,广东郁南人,教授,博士生导师,主要从事航空发动机控制与故障诊断研究。

$$\rho(M_n, h) = (288.15 - 6.5h) \times (1 + 0.2M_n^2) \quad h < 11 \text{ km}$$

$$\rho(M_n, h) = 216.5 \times (1 + 0.2M_n^2) \quad h \geq 11 \text{ km}$$

对每一块分区,按照曲面积分求质心的方法,确定每一分区质心的坐标。各分区质心点坐标的计算公式为

$$\bar{M}_n = \frac{\iint_D M_n \rho(M_n, h) d\sigma}{\iint_D \rho(M_n, h) d\sigma}$$

$$\bar{h} = \frac{\iint_D H \rho(M_n, h) d\sigma}{\iint_D \rho(M_n, h) d\sigma}$$

式中: D 为所选区域面积, (\bar{M}_n, \bar{h}) 为所选区域的质心坐标。

3 计算结果分析

任意选择一个区域进行计算,比较边界点与质心点之间的动态指标,若动态指标的相对变化量在 8% 的范围内,就认为该质心点的动态指标能够代表该区域其它各点的动态指标。例如,选择包线中的第 13 区域,见图 2。

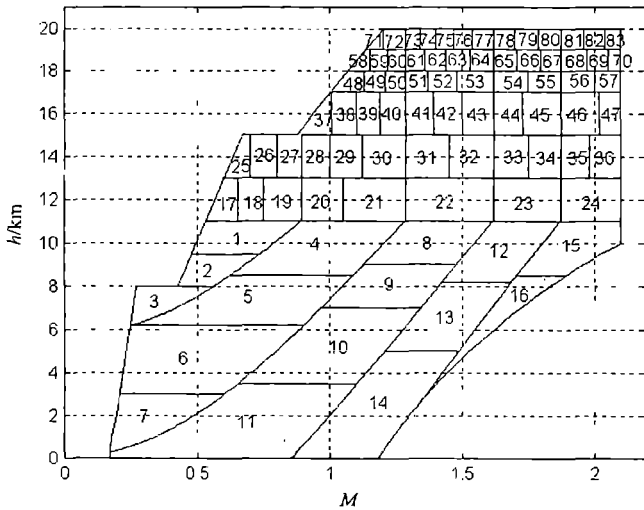


图1 飞行包线划分

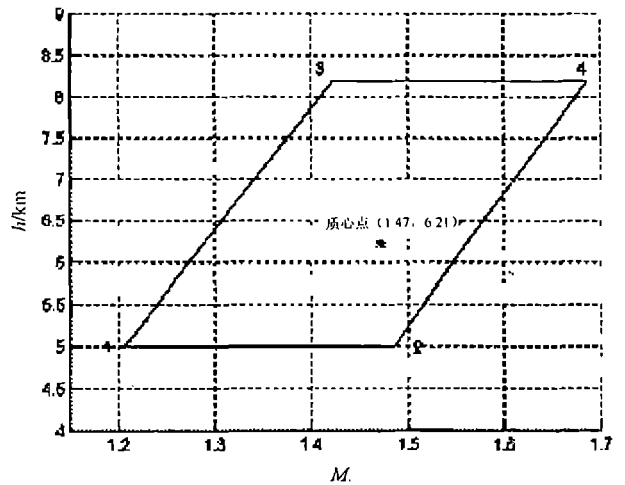


图2 飞行包线中第 13 区域

由于发动机是一个大惯性系统,系统的超调量较小,因此本文主要以调节时间作为动态指标。给定主供油量 m_f 增加 1% 的阶跃,计算出第 13 区域质心点和各边界点处高压转子相对转速 n_2 、低压转子相对转速 n_1 、高压涡轮前温度 T_4^* 、低压涡轮后温度 T_5^* 和高压压气机后压力 P_3^* 的调节时间如表 1 所示。

表 1 主供油量变化引起的调节时间变化

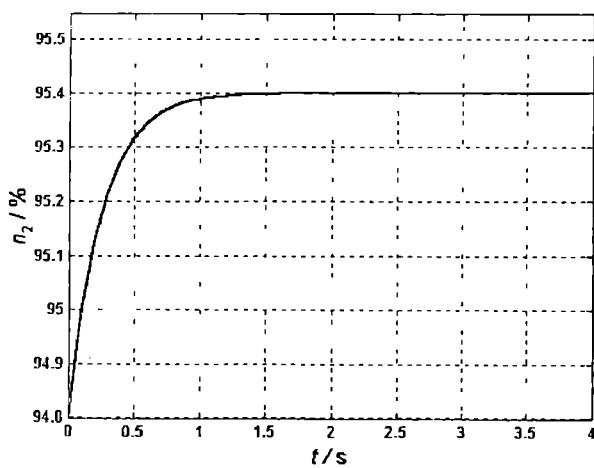
	n_2	n_1	T_4^*	T_5^*	P_3^*
1	0.945 4	1.095 6	0.678 8	0.868 8	1.095 6
2	0.927 8	1.082 9	0.662 9	0.850 5	1.082 9
3	1.048 0	1.261 0	0.711 0	0.921 2	1.261 0
4	1.030 5	1.243 2	0.693 2	0.901 7	1.243 2
质心点	0.975 6	1.170 7	0.682 9	0.878 0	1.170 7
相对误差绝对值/%	5.26	6.95	2.40	2.80	6.95

同理,对于喷管临界截面面积 A_c 增加 1% 的阶跃,也可以计算质心点和各边界点处的调节时间,结果如

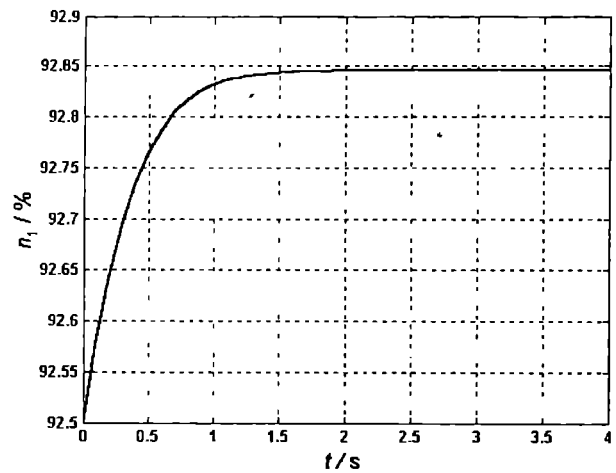
表2所示。

	n_2	n_1	T_4^*	T_5^*	P_5^*
1	0.768 3	0.975 6	1.272 9	1.108 3	0.975 6
2	0.755 6	0.882 9	1.290 5	1.085 6	0.882 9
3	0.828 8	1.061 0	1.455 9	1.258 8	1.061 0
4	0.805 6	0.983 2	1.428 3	1.241 0	0.983 2
质心点	0.780 5	0.975 6	1.365 9	1.170 0	0.975 6
相对误差绝对值%	3.54	4.76	5.87	6.53	4.76

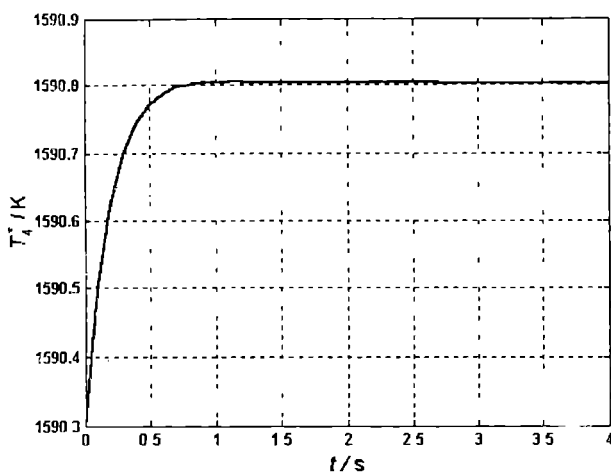
对于以上两种阶跃输入,系统的响应过程见图3。



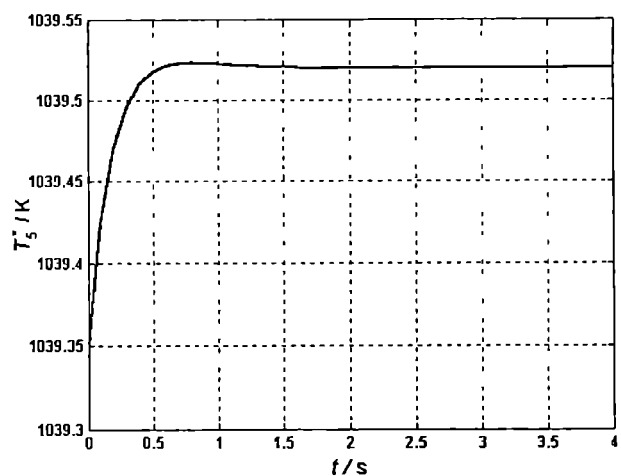
(a) 主供油量增加1%的阶跃 n_2 的变化



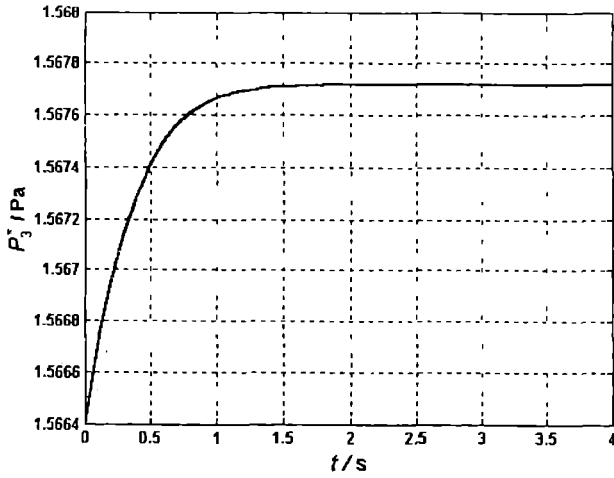
(b) 主供油量增加1%的阶跃 n_1 的变化



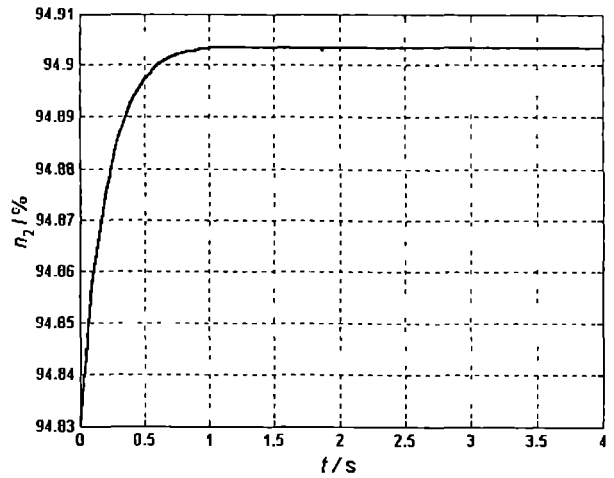
(c) 主供油量增加1%的阶跃 T_4^* 的变化



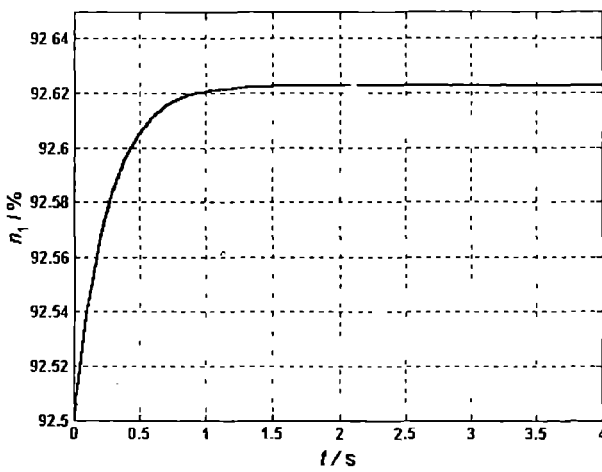
(d) 主供油量增加1%的阶跃 T_5^* 的变化



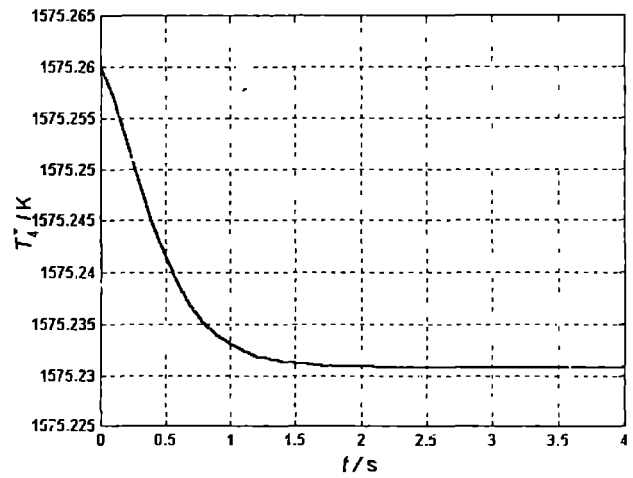
(e) 主供油量增加 1% 的阶跃 P_3^* 的变化



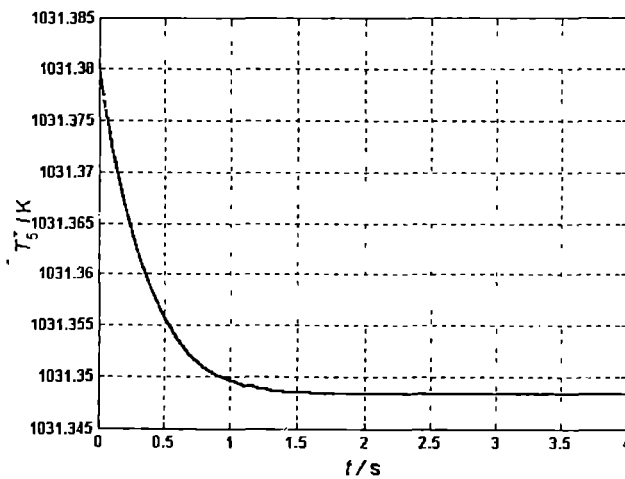
(f) 喷管临界截面增加 1% 的阶跃 n_2 的变化



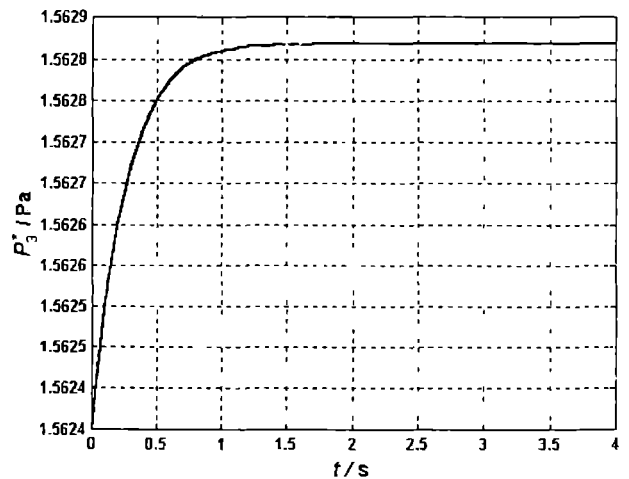
(g) 喷管临界截面增加 1% 的阶跃 n_1 的变化



(h) 喷管临界截面增加 1% 的阶跃 T_4^* 的变化



(i) 喷管临界截面增加 1% 的阶跃 T_5^* 的变化



(j) 喷管临界截面增加 1% 的阶跃 P_3^* 的变化

图 3 主供油量和喷管临界截面积增加 1% 的阶跃引起的参数变化

经计算,可得第 13 区域中质心点处的小偏差动态数学模型:

$$X = AX + BU + EV$$

$$Y = CX + DU + FV$$

其中

$$X = \begin{bmatrix} \delta n_2 \\ \delta n_1 \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} \delta m_i \\ \delta A_e \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} \delta T_0^* \\ \delta P_0^* \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} \delta T_4^* \\ \delta P_5^* \\ \delta P_2^* \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -3.372 & 1 & -0.732 & 4 \\ 1.193 & 0 & -4.448 & 4 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 2.406 & 4 & 0.357 & 8 \\ 0.907 & 8 & 0.497 & 3 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0.849 & 1 & -2.439 & 6 \\ -0.769 & 9 & -2.202 & 6 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0.089 & 0 & -0.065 & 9 \\ 0.060 & 3 & -0.058 & 4 \\ -0.000 & 9 & 0.226 & 7 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0.504 & 6 & 0.445 & 0 \\ 0.430 & 5 & -0.340 & 3 \\ 0.252 & 3 & 0.000 & 0 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} 0.791 & 5 & -0.504 & 6 \\ 0.787 & 7 & -0.421 & 7 \\ -0.239 & 1 & 0.747 & 7 \end{bmatrix}$$

从以上结果可以看出,对于第13区域,边界点相对于质心点调节时间的相对变化量均在8%以内。这说明在第13区域中,质心点与该区域内各点的动态性能很接近,因此可以近似用质心点的小偏差动态数学模型代替该区域内各点,作为整个区域的动态数学模型。计算其它区域,边界点相对于质心点调节时间的相对变化量也在8%的范围内,这说明了本文提出的包线划分方法是正确的。最终航空发动机在整个飞行包线中的动态模型可以用83组质心点处的小偏差动态数学模型来表示。

此外,对分区结果进行分析,可以看出,在 $M_a < 1$ 的包线范围内,分区数目较多,特别是在 $h > 11$ km的范围内,分区面积较小。这说明在亚音速的范围内,特别是在高空亚音速的范围内,由于雷诺数的影响,发动机进口空气流量减小,喷管处于接近完全膨胀状态,发动机的动态性能受外界条件的影响较大。

4 结论

采用本文提出的飞行包线划分方法,可以将某涡扇发动机在全包线内划分为83个区域,而且保证每个区域的边界点相对于该区域质心点的调节时间在8%以内,采用这组发动机线性动态模型可以近似描述发动机全包线的动态情况,如果要提高精度,可以将包线划分得更细。目前,高速计算机的迅猛发展对存储上百个点的参数来说,已不存在问题。此外,该方法的最大优点是保证在飞行包线范围内的所有发动机动态方程都是稳定的,而且具有一定的精度,比较目前广泛采用的热力计算方法(在飞行包线的某些区域不收敛),在工程应用方面前进了一步。因此,这种方法对于采用数字控制系统的发动机来说具有一定的应用前景。

参考文献:

- [1] DEAN F. SANJAY C, SHRIDER A. Turbofan Engine Control Design Using Robust Multivariable Control Technology [R]. AIAA-96-2587.
- [2] 郭允龙. 燃气涡轮发动机稳态和动态性能计算 [R]. 西安:空军工程学院,1987.
- [3] 王小峰,辛晓文,党怀义. 发动机稳态和动态特性模拟方法研究 [R]. 西安:空军工程学院,1986.
- [4] 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.

(编辑:姚树峰)

Research on Small Perturbation Dynamic Mathematical Modeling in Whole Flight Envelope for Aeroengine

LI Jian, XIE Shou-sheng, DING Kang-le

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In this paper the flight envelope partition method is proposed. According to the atmospheric conditions and engine regulation, flight envelope is parted to 83 regions. In each region parameters in region and at boundary points are replaced with parameters at centroid, which are constrained with dynamic quotas of engine dynamic equation. Finally the mathematical simulation of a turbofan engine performance in whole flight envelope is presented, and the results show the method is effective in establishing engine dynamic equation in whole flight envelope.

Key words: flight envelope; centroid; dynamic equation