

涡喷发动机压气机的单元控制体模型

廉小纯 吴 虎 陈辅群 沈韶瀛
(西北工业大学发动机系, 西安, 710072)

AN ELEMENTAL CONTROL VOLUME MODEL OF COMPRESSOR IN TURBOJET ENGINE

Lian Xiaochun, Wu Hu, Chen Fuqun, Shen Shaoying

(Department of Aero. Power, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072)

摘 要 根据控制体理论, 建立了涡喷发动机中压气机的逐级数学模型。采用特征线关系数值求解质量、动量和能量方程。方程中的叶片力和轴功由稳态的级特性提供, 并由一阶滞后方程考虑其动态效应。该模型可以模拟进口温度 (或压力) 瞬变下压气机的逐级响应, 寻找首先失速的关键级。数值结果表明, 引起失速的进口温升近似地与进口温升率呈线性关系。

关键词 逐级模型, 压气机, 涡喷发动机

中图分类号 V235.111, V231.13

Abstract A stage-by-stage mathematical model of the compressor in a turbojet engine is developed based on the control volume theory. The characteristic relationship is applied to solve the governing equations of mass, momentum and energy for each control volume. The stage forces and shaft work required to solve equations are derived from a set of steady-stage performance. A first-order lagging equation is used to account for dynamic effects. This model can simulate the compressor response to inlet temperature transients and find the critical stage. It is shown from the results that the inlet temperature rise just prior to system instability is approximately linear with the inlet temperature ramp rate.

Key words stage-by-stage model, compressor, turbojet

自 70 年代末, 特别是 80 年代以来, 国外发展了压气机的逐级模型^[1]。直接把非定常的质量、动量和能量守恒方程应用于控制体, 其特点是精度高、频响高, 可以在级的基础上给出压气机对进口温度和压力瞬变的动态响应。本文应用一元时关逐级控制体模型对三级压气机^[2]作了对进口温度瞬变的动态响应数值计算, 得出了若干重要结论。

1 物理模型和基本控制方程

在压气机中, 一排转子叶片及其后面的静子叶片即一级, 用一个控制体代表。压气机前面的进口段和后面的出口段也分成若干控制体, 其轴向长度不大于最长的压气机级的轴向长度, 以保证适当的频率响应。图 1 表示一个控制体的示意图, 对每个控制体可写出如下质量、动量和能量守恒基本控制方程

$$\frac{\delta(QA)}{\delta t} + \frac{\delta \dot{m}}{\delta x} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\delta \dot{m}}{\delta t} + \frac{\delta(\dot{m}C_x)}{\delta x} + \frac{\delta(pA)}{\delta x} = F + p \frac{\delta A}{\delta x} \tag{2}$$

$$\frac{5(EA)}{5t} + \frac{5H}{5x} = W_s + Q \quad (3)$$

图 1 和上述方程中, Q 为密度; A 为流道横截面积; \dot{m} 为质量流量; C_x 为轴向速度; p 为静压; F 为叶片力; $H = \dot{m} C_p T_t$ 为总焓; $E = Q e + \frac{1}{2} C_x^2$ 为能量函数; W_s 为单位长度单位时间加功量; Q 为单位时间单位长度加热量; t 为时间; x 为轴向坐标。

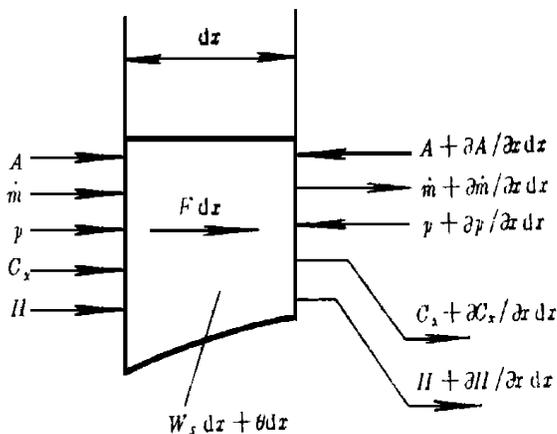


图 1 控制体示意图

为了求解上述方程组, 必须有压气机的分级特性, 本模型使用级的稳态特性曲线, 在接近旋转失速区, 对级的叶片力和轴功采用一阶时间滞后方程

$$S \frac{dX}{dt} + X = X_{ss} \quad (4)$$

式中, S 为时间常数; X 为叶片力或轴功; X_{ss} 为 X 的稳态值。

在发动机中, 燃烧室可能对压气机的稳定性影响很大。由于实际的燃烧过程十分复杂, 因此仅近似地用一元模型最终的放热结果。假定放热是在整个燃烧室控制体内, 其总的放热量由下式计算

$$Q_t = H_u \left(\frac{f}{1+f} \right) \dot{m} \quad (5)$$

式中, H_u 为燃料的低热值; f 为油气比; \dot{m} 为流过燃烧室的空气质量流量。总的放热量认为均匀地分布于每个单元长度上。

2 数值计算方法

方程(1) ~ 方程(3) 中, 独立的自变量为 3 个, 若取为静压 p , 轴向速度 C_x 和当地声速 a , 经推导可得如下 3 个计算方程式

$$\left(2 - \frac{ak}{k} \right) \frac{5a}{5t} + C_x \left(2 - \frac{ak}{k} \right) \frac{5a}{5x} - \frac{a}{p} \frac{5p}{5t} - \frac{aC_x}{p} \frac{5p}{5x} - a \frac{5C_x}{5x} = \frac{aC_x}{A} \frac{dA}{dx} \quad (6)$$

$$C_x \frac{5C_x}{5x} + \frac{5C_x}{5t} + \frac{a^2}{kp} \frac{5p}{5x} = \frac{a^2 F}{kpA} \quad (7)$$

$$\hat{h} \frac{5a}{5t} + C_x \hat{h} \frac{5a}{5x} + C_x \frac{5C_x}{5t} + C_x^2 \frac{5C_x}{5x} - \frac{a^2}{kp} \frac{5p}{5t} = \frac{a^2}{kpA} (W_s + Q) \quad (8)$$

式中, $\hat{h} = \frac{dh}{da} = \frac{C_p}{(da/dt)}$; $\hat{k} = \frac{dk}{da}$; h, k 分别为气流的焓和绝热指数。

方程 (6) ~ 方程 (8) 为双曲线型, 可用特征线法求解。经推导, 得 3 个特征方程为

$$\frac{dx}{dt} = C_x \quad (9)$$

$$\frac{dx}{dt} = C_x + a \quad (10)$$

$$\frac{dx}{dt} = C_x - a \quad (11)$$

相应的 3 个相容性方程为

$$\hat{h} da - \frac{a^2}{pk} dp = (I_3 - I_2) dt \quad (12)$$

$$dC_x + \frac{a}{pk} dp = \left\{ -I_1 + \frac{I_2}{a} [(1-k)C_x + a] + I_3 \frac{k-1}{a} \right\} dt \quad (13)$$

$$-dC_x + \frac{a}{pk} dp = \left\{ -I_1 + \frac{I_2}{a} [(1-k)C_x - a] + I_3 \frac{k-1}{a} \right\} dt \quad (14)$$

式中, $I_1 = \frac{aC_x}{A} \frac{dA}{dx}$; $I_2 = \frac{a^2 F}{pkA}$; $I_3 = \frac{a^2}{pkA} (W_s + Q)$ 。

根据文献 [3], 很容易将上述方程组写成有限差分形式, 本文采用改进的欧拉预估校正法数值求解。

3 边界条件

进口边界上可给定总压和总温随时间的变化, $p_t = p_t(t)$; $T_t = T_t(t)$ 。压气机之前的进口段第一个控制体取为等截面的管道, 其中无叶片力、无热交换、无轴功, 并假定无摩擦力, 此时特征方程 (11) 和相容性方程 (14) 简化为

$$\frac{dx}{dt} = C_x - a, \quad -dC_x + \frac{a}{pk} dp = 0 \quad (15)$$

在任意时刻进口边界上的气流参数可根据给定的 $p_t(t)$, $T_t(t)$ 和方程 (15) 迭代求得。

在出口边界上, 当流动为亚音速时, 给定静压为边界条件。由特征理论可知, 此时有 (9) 式、(12) 式和 (10) 式、(13) 式两组方程用于出口边界。若不考虑出口边界上控制体内的摩擦和热交换, 上述两方程组简化为

$$\frac{dx}{dt} = C_x, \quad a^2 dQ - dp = 0 \quad (16)$$

$$\frac{dx}{dt} = C_x + a, \quad Q dC_x + dp = 0 \quad (17)$$

在给定静压时, 由 (16) 式、(17) 式可求得任意时刻出口边界上的其它气流参数。当出口边界为堵塞流动条件时, 在最后控制体的出口边界上, 流量函数等于常数

$$\frac{\dot{m} \sqrt{T_t}}{A p_t} = \text{const}$$

假定最后一个控制体内流动是等熵的, 则最后计算站上的总压和总温分别等于前一站上的相应值, 这样就能顺利计算得出口边界上的气流参数。

4 计算结果分析

本文对文献 [2] 的 3 级压气机进行了数值计算, 其主要几何参数和稳态的级特性可参阅文献 [2]。将压气机系统分成 8 个控制体, 进口段 3 个, 压气机段 3 个, 出口段 2 个, 另外还有 1 个稳压箱。计算时给定进口边界上的总压和总温

$$p_t(t) = \text{const} \quad (18)$$

$$T_t(t) = 288.15 + DTt \quad (19)$$

在稳压箱的出口边界上为堵塞流动, 所以采用如下条件

$$\dot{m}_2 = L \frac{p_t A_t}{\sqrt{T_t}} = L \frac{p_p A_t}{\sqrt{T_p}} \quad (20)$$

对于稳压箱, 因体积很大, 出口截面积很小, 故箱中的静压和静温分别等于箱中的总压 p_p 和总温 T_p , 而 p_p 和 T_p 的动态变化可由下列方程描述

$$\frac{dp_p}{dt} = (\dot{m}_1 T_{t1} - \dot{m}_2 T_p) \frac{c_p(k-1)}{V_p} \quad (21)$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{p_p L} \left[\frac{RT_p^2}{V_p} (\dot{m}_2 - \dot{m}_1) + T_p \frac{dp_p}{dt} \right] \quad (22)$$

在 (20) 式~ (22) 式中, p_p 和 T_p 分别为稳压箱中的压力和温度; m_1 和 m_2 为箱进口和出口的质量流量; A_t 为箱出口截面积; T_{t1} 为箱进口总温。对上述方程组, 本文采用 4 阶龙格 2 库塔方法求解。计算中, 进口的总温变化率 DT 分别取为 $DT = 1\ 000, 2\ 000, 3\ 000, 4\ 000, 5\ 000\text{K/s}$, 5 种情况。

图 2 是压气机出现不稳定时的进口温升与温升率的关系, 可以看出近似地为线性关系。其原因可解释为: 对具体的多级压气机, 存在着临界的稳态进口温升, 它引起某个级首先失速。当进口温升率高时, 引起某级失速的进口温升必大于临界的稳态进口温升。这是因为进口温度扰动需经过一定的时间才能达到首先失速的关键级。假定气流的轴向速度不变, 则压气机失速时的进口温升与温升率成正比。

图 3 是压气机失速时的压比 2 流量系数值与稳态特性的比较。图中的实线代表稳态下的特性, 虚线为旋转失速, 而几个离散点表示不同温升率下的压气机失速时的压比和相应的流量系数值。可以看出, 随着进口温升率的增加, 出现失速时的压比损失增加。

图 4~ 图 6 分别给出 $DT = 1\ 000, 3\ 000, 5\ 000\text{K/s}$ 下的压气机各级进出口静压的时间历程。从静压的随时间变化特征可以判断首先失速的关键级。在压气机失速时, 首发级进口静压突然上升而出口静压下降, 这是因为其进口气流受阻滞, 而出口有气流分离。因此, 图 4 中的首发级是第一级; 图 5 中也是第一级; 而图 6 中是第二级。

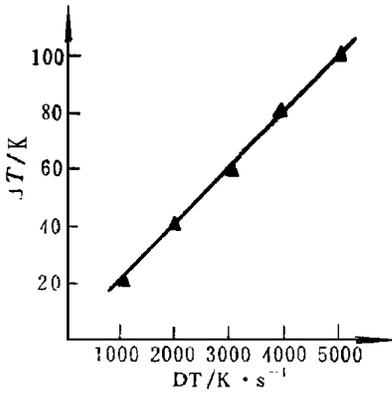


图2 压气机加速时进口温升与温升率的关系

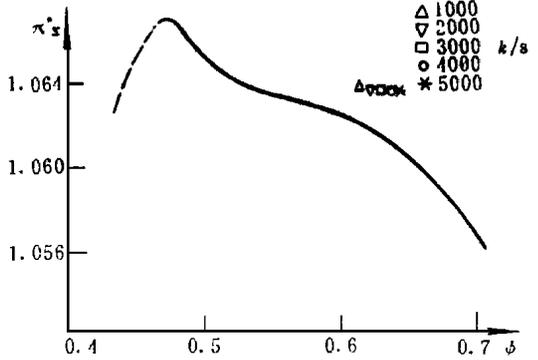


图3 压气机失速时的压比与流量系数值

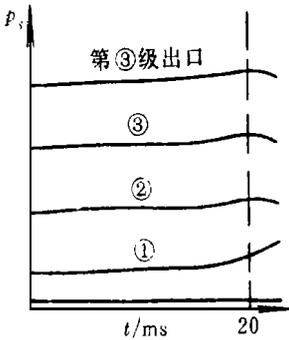


图4 各级进出口静压的时间历程 (DT = 1 000K/s)

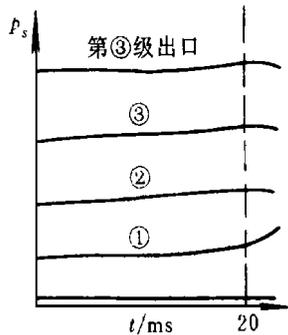


图5 各级进出口静压的时间历程 (DT = 3 000K/s)

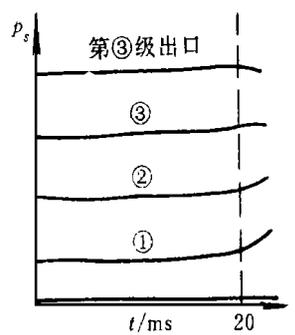


图6 各级进出口静压的时间历程 (DT = 5 000K/s)

5 结论

- (1) 所建立的逐级控制体模型用来模拟进口温度瞬变时的压气机级的动态响应是可使用的;
- (2) 引起压气机失速时的进口温升与温升率近似地成线性关系;
- (3) 随着进口温升率的增加, 压气机失速时的压比损失加大;
- (4) 不同的压气机, 首先失速的级是不同的, 对本文的算例, 首先失速的是第1级 (当 DT = 1 000、3 000K/s 时) 和第2级 (当 DT = 5 000K/s 时)。

参 考 文 献

- 1 Davis M W. A poststall compression system modeling. AEDC TR 86234, 1986
- 2 Greiter E M. Surge and rotating stall in axial flow compressor))) part 0: Experimental results and comparison with theory. ASME J of Eng for power, 1976; 98 (2): 199- 217
- 3 潘锦珊等. 气体动力学基础. 北京: 国防工业出版社, 1989