

文章编号: 1001-2486 (2001) 03-0009-03

## 考虑入口和出口容积效应的涡轮动力学模型\*

刘 昆, 张育林

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 建立了考虑涡轮入口和出口容积效应的涡轮动力学模型, 利用该模型计算了燃气涡轮气瓶启动的动态响应过程, 分析了影响涡轮动态特性的主要因素。计算结果表明: 涡轮前容积对涡轮入口压力和出口背压的过渡过程均有显著的影响, 涡轮后容积对涡轮入口压力的过渡过程影响不大, 对涡轮出口背压的影响显著。

**关键词:** 液体火箭发动机; 涡轮; 动力学模型

中图分类号: V421 文献标识码: A

## A Gas Turbine's Dynamics Model Accounting Before-turbine and Post-turbine Capacity

LIU Kun, ZHANG Yu-lin

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A dynamic model of gas turbine, which takes both before-turbine and post-turbine capacity into consideration, is developed. The dynamic behavior of gas turbines in start-up by high-pressure gas is calculated by using the model, and its principal influence factors are analyzed. The calculated results show that the before-turbine capacity has notable influence on the transients of both entrance and exit pressures of the gas turbines, the post-turbine capacity mostly affects the dynamic processes of the turbines' exit pressures, and has little influence on the turbines' entrance pressures.

**Key words:** Liquid Propellant Rocket Engines, Gas turbines, Dynamic models

对确定的工质, 涡轮的功率取决于质量流量和压比, 所以涡轮入口和出口压力的动态特性在涡轮的动态特性中起主导作用。文献 [1] 的实验研究表明, 当入口压力产生一个阶跃变化, 涡轮出口背压的变化过程与涡轮后的容积大小密切相关, 容积小时变化快, 容积大时变化慢。文献 [1、2] 都指出, 工质在涡轮通道中的流体动力学特性可以用 L-R-C 等效线路来描述。实际上, 涡轮的流道很短, 气体工质在涡轮流道中停留的时间极短, 其惯性可以忽略不计。另一方面, 在液体火箭发动机的起动过程, 涡轮入口压力的建立过程与涡轮喷嘴前容积大小也密切相关, 因此, 这里我们提出涡轮的一个 C-R-C 模型, 将涡轮等效为集中体积 - 阻力 - 集中体积连接而成的组合元件, 这样的模型也便于与考虑分布参数特性的气体管道的有限元状态变量模型相连接<sup>[3]</sup>。

## 1 涡轮工质流动的 C-R-C 动力学模型

如图 1 为涡轮等效元件的示意图, 对容积  $V_1$  和  $V_2$  应用质量守恒和能量守恒定律, 可以得到

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{\gamma}{V_1} \left( p_1^{\text{in}} \cdot Q_1 - p_1 \left( \frac{\dot{m}_t}{\rho_1} \right) \right) \quad (1)$$

$$\frac{d\rho_1}{dt} = \frac{1}{V_1} (\rho_1^{\text{in}} \cdot Q_1 - \dot{m}_t) \quad (2)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{\gamma}{V_2} (RT'_2 \cdot \dot{m}_t - p_2^{\text{exit}} Q_2) \quad (3)$$

$$\frac{d\rho_2}{dt} = \frac{1}{V_1} (\dot{m}_t - \rho_2^{\text{exit}} Q_2) \quad (4)$$

\* 收稿日期: 2000-12-15  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59886003)  
作者简介: 刘昆 (1965-), 男, 副教授, 博士。

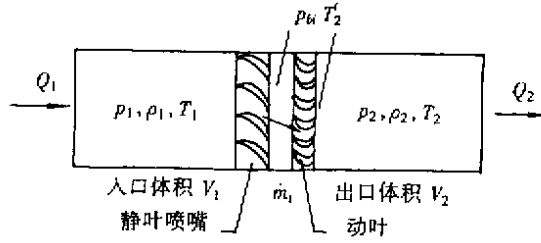


图1 涡轮等效的 C-R-C 元件示意图

Fig.1 Illustration of gas turbines' equivalent C-R-C model component

式中,  $\gamma$  为工质气体的比热比,  $R$  为工质气体常数, 上标 in 表示入口体积单元的入口边界参数, 上标 exit 表示出口体积单元的出口边界参数, 二者按迎风格式确定,  $T_2'$  为涡轮动叶出口处的气体温度,  $\dot{m}_t$  为涡轮的质量流量, 按下式确定:

$$\dot{m}_t = \frac{C_t A_t p_1^*}{\sqrt{RT_1^*}} \cdot \Gamma_t \quad (5)$$

$$\Gamma_t = \begin{cases} \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}, & \frac{p_{bi}}{p_1} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \\ \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[ \left(\frac{p_{bi}}{p_1}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_{bi}}{p_1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, & \frac{p_{bi}}{p_1} > \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (6)$$

式中, 上标“\*”表示总参数,  $C_t$  为涡轮喷嘴的流量系数,  $A_t$  为涡轮喷嘴的最小流通截面积,  $p_{bi}$  为涡轮静叶喷嘴出口处压力, 按下式确定<sup>[4,5]</sup>:

$$p_{bi} = p_1 \cdot \left[ \Omega_T + (1 - \Omega_T) \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (7)$$

式中,  $\Omega_T$  为涡轮的反力度, 对于冲击式涡轮,  $\Omega_T = 0$ ,  $p_{bi} = p_2$ , 对于反力式涡轮,  $\Omega_T$  与涡轮速度比和压比有关, 其关系式由涡轮吹风试验得出。

涡轮的功率、效率与转矩的计算采用常用的公式<sup>[2,4]</sup>。

涡轮的实际出口温度的确定: 忽略燃气的传热, 由能量方程有

$$\Delta h = \frac{1}{2}(u_2^2 - u_1^2) + \eta_t L_{ad} \quad (8)$$

式中,  $u_1$ 、 $u_2$  分别为涡轮入口和出口的绝对流速,  $\eta_t$  为涡轮的效率,  $\Delta h$  为工质在涡轮通道的实际焓降。求出  $\Delta h$  后, 涡轮动叶出口处工质的实际温度  $T_2'$  为

$$T_2' = T_1 - \frac{\Delta h}{c_p} = T_1 - \frac{(\gamma-1)\Delta h}{\gamma R} \quad (9)$$

## 2 涡轮动态响应过程分析

以高压气瓶或火药起动机吹动涡轮的情况为例进行计算分析, 涡轮入口压力和背压的变化是一个快速的动态变化过程, 它对整个发动机的起动过程有一定的影响。

图2是高压气瓶吹涡轮试验的系统示意图。对涡轮流动参数的动态响应过程进行了仿真计算。已知参数为: 气瓶压力  $p_b$  为 10MPa, 介质为常温气氢, 音速喷嘴、涡轮和节流圈的流量系数与最小流通截面积的乘积分别为 0.00011、0.001728 和 0.005026。将涡轮入口和出口段的管道体积分别等效到涡轮的入口单元体积和出口单元体积。

阀门瞬时打开后, 涡轮入口压力、出口压力在不同入口和出口单元体积下的动态响应曲线见图3和图4。

从图3和图4可以看出, 涡轮前体积对涡轮入口压力和出口背压的响应过程都有十分显著的影

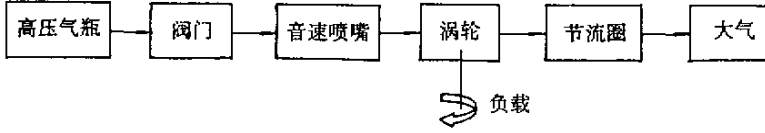


图 2 气瓶吹涡轮示意图

Fig.2 Illustration of gas turbine being blown by high-pressure gas

响，体积越小，涡轮入口压力和背压的响应过程越快；涡轮后体积对入口压力的建压过程基本上没有影响，对涡轮背压的建压过程有一定的影响，但不如涡轮前体积的影响明显，原因是图 2 音速喷嘴后的气路流阻主要集中于涡轮喷嘴，涡轮前的容积效应在涡轮入口压力和出口背压变化曲线的时间常数中起主要作用。本文的这一结论比文献 [ 1 ] 更全面地反应了影响涡轮动态特性的主要因素。

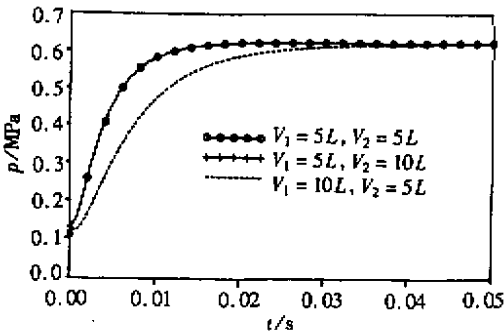


图 3 涡轮入口压力变化曲线

Fig.3 Turbine entrance pressure response curves

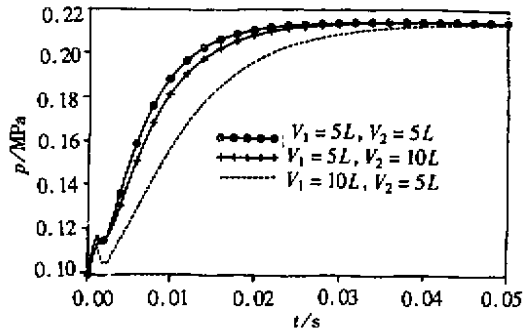


图 4 涡轮出口压力变化曲线

Fig.4 Turbine exit pressure response curves

### 3 结论

本文在涡轮的入、出口管路分割有限控制体积，建立了考虑涡轮入口和出口容积效应的涡轮流体动力学模型，计算分析了影响涡轮动态特性的主要因素。计算表明：涡轮前容积对涡轮入口压力和出口背压的过渡过程均有显著的影响，涡轮后容积对涡轮入口压力的过渡过程影响不大，对涡轮出口背压的影响显著。

### 参考文献：

[ 1 ] Kalnin V M, Sherstiannikov V A. Hydrodynamic Modeling of the Starting Process in Liquid-propellant Engines [ J ]. Acta Astronautica , 1981 , 8 : 231 ~ 242.

[ 2 ] Присняков В Ф, 邢耀国译. 液体火箭发动机及其供给系统动力学 [ M ]. 海军航空工程学院, 1988.

[ 3 ] 刘昆. 分级燃烧循环液氧/液氢发动机系统分布参数模型与通用仿真研究 [ D ]. 国防科技大学, 1999.

[ 4 ] 马欣 В А 等著. 液体火箭发动机试验研究的理论基础 [ M ]. 北京：国防工业出版社, 1978.

[ 5 ] 刘红军. 补燃循环发动机静态特性与动态响应特性研究 [ D ]. 航天工业总公司第十一研究所, 1998.

