

用模型喷管模拟研究发动机组外向辐射传热^{*}

程惠尔, 牛 禄

(上海交通大学 动力与能源工程学院, 上海 200030)

摘 要: 根据热辐射理论, 分析空间发动机组外向辐射传热的基本特点, 得出在地面用模型喷管——电热喷管缩比件模拟这一传热现象的必要条件为两者几何相似, 壁面热流密度 q 以及表面黑度 ε 相等。可行性分析为地面模拟试验提供了科学的依据, 其结论可用来指导试验。

关键词: 并联火箭发动机; 发动机喷管; 地面模拟试验; 辐射传热; 可行性研究

中图分类号: V434, TK124

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2001) 02-0126-03

Simulation research for radiation heat transfer of engine group by model nozzles

CHENG Hu-er, NIU Lu

(School of Power and Energy Engineering, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

Abstract: According to the theory of heat radiation, the essential characteristic of outward radiation heat transfer of engine group was researched, and the necessary conditions for simulation research of this heat transfer phenomenon using nozzles, subscale component of electrically heated nozzles were given out to be similar geometrically, and equal for heat flux q and emissivity ε on wall surface for the two. Feasibility analysis provides scientific basis for ground simulation test. Its conclusion can be used for guiding the test.

Key words: Rocket engine cluster; Engine nozzle, Ground simulation test; Radiative heat transfer; Feasibility study

1 引 言

与单台情况完全不同, 由 4 台并联发机构成的发动机组不可避免地存在外向辐射传热, 致使壁温发生明显畸变, 不再保持周向均匀一致的态势。为此, 曾对四对角喷管外向辐射角系数及外向辐射传热时壁温的影响进行了研究^[1,2]。本文则论证高空发动机组外向辐射传热地面模拟试验应当遵循的几何和物理条件, 以便为地面模拟试验研究的可行性及试验结果的可信性提供科学的理论依据。

2 实际喷管和模型喷管的角系数

发动机推力室如图 1 所示, 壁面参数方程及无量纲参数方程可表示为

$$x = \rho \cos \varphi \quad (1)$$

$$y = \rho \sin \varphi \quad (2)$$

$$z = f(\rho) \quad (3)$$

$$x = \rho \cos \varphi \quad (4)$$

$$y = \rho \sin \varphi \quad (5)$$

$$z = f(\rho) \quad (6)$$

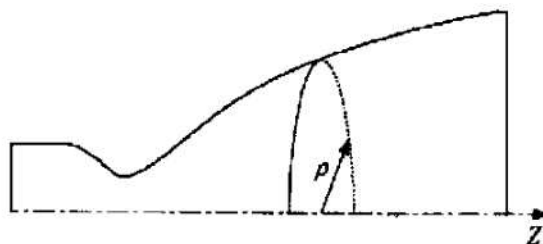


Fig. 1 Configuration of the thrust chamber

式中直角坐标与极坐标的对应关系式(1)和(2)由图 2 给出, 式(3)说明喷管外径 ρ 与所在轴向位置 z 存在某种对应关系, 诸无量纲坐标和参数的定义为 $\bar{x} = x/$

* 收稿日期: 2000-06-26; 修订日期: 2000-09-01。

作者简介: 程惠尔 (1940—), 男, 教授, 研究领域为推进系统的传热传质。

$L, \bar{y} = y/L, \bar{z} = z/L$ 以及 $\bar{\rho} = \rho/L$, 其中 L 为推力室或喷管全长。

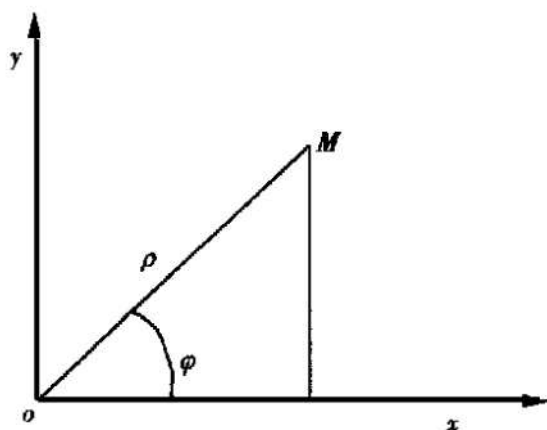


Fig. 2 The corresponding relation of rectangular coordinates and polar coordinates

由解析几何基本原理不难导得喷管表面上任一点 P (其坐标为 x_1, y_1, z_1 , 其参数为 ρ_1, φ_1) 的法线 n_1 方程及该处的微元表面积计算式为^[3]

$$\frac{x-x_1}{-f'(\rho_1)\cos\varphi_1} = \frac{y-y_1}{-f'(\rho_1)\sin\varphi_1} = \frac{z-z_1}{1} \quad (7)$$

$$dA_1 = \rho_1 \sqrt{1+[f'(\rho_1)]^2} d\rho_1 d\varphi_1$$

对于喷管另一表面位置 Q , 如果相应坐标用 x_2, y_2 及 z_2 表示, 参数为 ρ_2, φ_2 , 同样可以写出该处法线 n_2 的方程和微元表面积为

$$\frac{x-x_2}{-f'(\rho_2)\cos\varphi_2} = \frac{y-y_2}{-f'(\rho_2)\sin\varphi_2} = \frac{z-z_2}{1} \quad (8)$$

$$dA_2 = \rho_2 \sqrt{1+[f'(\rho_2)]^2} d\rho_2 d\varphi_2$$

喷管表面两点 $P(x_1, y_1, z_1)$ 和 $Q(x_2, y_2, z_2)$ 的直线距离为

$$R = \sqrt{(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2 + (z_2-z_1)^2} \quad (9)$$

PQ 直线的方程为

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1} \quad (10)$$

由空间几何原理可知, 若直线 L_1, L_2 的方程分别为

$$\frac{x-x_1}{p_1} = \frac{y-y_1}{q_1} = \frac{z-z_1}{r_1},$$

$$\frac{x-x_2}{p_2} = \frac{y-y_2}{q_2} = \frac{z-z_2}{r_2},$$

则二直线 L_1 和 L_2 形成的夹角 φ 满足下述关系:

$$\cos\varphi = \frac{p_1 p_2 + q_1 q_2 + r_1 r_2}{\sqrt{p_1^2 + q_1^2 + r_1^2} \sqrt{p_2^2 + q_2^2 + r_2^2}}$$

据此, 若令直线 PQ 与推力室表面 P 处上的法线 n_1

形成的夹角为 θ_1 , 与推力室表面 Q 处上的法线 n_2 形成的夹角为 θ_2 , 则由式(7)~(9)和(10), 可得

$$\cos\theta_1 = \frac{-f'(\rho_1)\cos\varphi_1(x_2-x_1) - f'(\rho_1)\sin\varphi_1(y_2-y_1) + (z_2-z_1)}{R \sqrt{1+[f'(\rho_1)]^2}} \quad (11)$$

以及

$$\cos\theta_2 = \frac{-f'(\rho_2)\cos\varphi_2(x_2-x_1) - f'(\rho_2)\sin\varphi_2(y_2-y_1) + (z_2-z_1)}{R \sqrt{1+[f'(\rho_2)]^2}} \quad (12)$$

根据热辐射理论, 推力室表面相距为 R 的微元面积 dA_1 对另一微元面积 dA_2 的角系数可表示为^[4]

$$X_{1,2} = \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi R^2} dA_2 \quad (13)$$

无量纲化后, 可得角系数表达式

$$X_{1,2} = F(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2, \bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{z}_1, \bar{z}_2)$$

再代入式(4)~(6)关系得

$$X_{1,2} = F_1(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2, \bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2) \quad (14)$$

由此表明, 无量纲参数 $\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2, \bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2$ 相同的两个相似表面间的角系数是相同的, 具体地说, 对于喷管和喷管缩比件(试验用喷管), 只要这两个喷管(或几个喷管构成的辐射体系)在几何上是相似的, 那么实际喷管体系中两个表面的角系数必等于喷管缩比件体系中几何上与它相对应的那两个表面间的角系数, 就是说, 实物(表面间)的角系数将等于模型(表面间)的角系数。

3 实际喷管和模型喷管的壁温分布

考察对角布置喷管辐射体系的热交换规律。将每个喷管分成 N 个区段, 每个区段 i 的面积为 A_i , 温度为 T_i , 黑度为 ϵ_i , 它和其他三个喷管诸区段 j 的角系数用 $X_{i,j}$ 表示。利用有效辐射 J 的概念, 对任一区段或节点 i , 可写出能量平衡方程式

$$\sum_{j=1}^N \frac{J_j - J_i}{X_{i,j}} = q_i \quad (15)$$

展开式(15), 得

$$(J_i - J_1)X_{i,1} + (J_i - J_2)X_{i,2} + \dots + (J_i - J_N)X_{i,N} = q_i \quad (16)$$

根据角数 $X_{i,j}$ 的完整性, 对 N 个凸表面或微凹表面构成的封闭体系, 上式将简化为

$$-J_i X_{i,1} - J_2 X_{i,2} + \dots + J_i + \dots - J_N X_{i,N} = q_i \quad (17)$$

若用矩阵表示方程(17), 则对全部推力室表面, 有

$$A \cdot J = q \quad (18)$$

式中, A 是 $N \times N$ 的方阵, 其矩元素为

$$\begin{cases} a_{i,j} = -X_{i,j} & i \neq j \\ a_{i,i} = 1, & i = j \end{cases} \quad (19)$$

J 和 q 则是 N 阶列向量。如果 q_i 是已知或可求的, 由式(18)可解得有效辐射 J_i , 进而求出该处的黑体辐射力和温度

$$E_{bi} = q_i \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} + J_i \quad (20)$$

$$T_i = C_o \left| \frac{E_{bi}}{100} \right|^{\frac{1}{4}} \quad (21)$$

式中黑体辐射系数 $C_o = 5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ 。

将试验用喷管同样划分成 N 个相对应的区段, 上面已经证明, 只要保证喷管(体系)和其缩比件几何相似, 它们的对应表面间的辐射角系数是相等的, 即 $X_{i,j} = X'_{i,j}$ 。若缩比件喷管任意区段的温度和黑度分别用 T'_i 和 ε'_i 表示, 有效辐射和热流密度分别用 J'_i 和 q'_i 表示, 于是对缩比件喷管, 同样可写出用矩阵表示的能量方程

$$A'J' = q' \quad (22)$$

既然实际喷管角系数等于模型喷管的角系数 $X_{i,j} = X'_{i,j}$, 而地面模拟试验若保持 $q'_i = q_i$, 则由能量方程式(18)和(22)可知, 实际喷管和模拟试验用喷管的有效辐射必相等, 即 $J'_i = J_i$, 由此得到模拟件的黑体辐射力和温度

$$E'_{bi} = q'_i \frac{1 - \varepsilon'_i}{\varepsilon'_i} + J'_i \quad (23)$$

$$T'_i = C_o \left| \frac{E'_{bi}}{100} \right|^{\frac{1}{4}} \quad (24)$$

就是说, 模型的壁温分布和喷管的壁温分布是相同的, 即 $T'_i = T_i$ 。

4 讨 论

在导出第 3 节结论时, 业已要求实际喷管的表面

黑度 ε 和模拟试验用喷管的表面黑度 ε' 保持相等。实际喷管即飞船变轨发动机推力室材料是昂贵的铌合金, 而模拟试验用的喷管为不锈钢材料, 两者的黑度或辐射率有一定差别。采用喷涂专门的涂层材料于地面试验用不锈钢喷管缩比件表面, 使上述有关 ε 的要求基本得到满足。

由于发动机组的最低飞行高度为 200 km, 其工作环境为绝对压力远小于 0.01 Pa 的真空, 该环境在地面试验中可以采用真空舱来保证, 此时导热和对流已可完全忽略, 喷管间介质极为稀薄, 对辐射传热的影响也可以不予考虑, 故本文推导喷管间的热交换只考虑辐射一种传热方式。经过分析, 发动机的热喷流对壁温分布的影响可忽略, 这样就可以用电加热器模拟发动机内的高温燃气, 以满足热流密度 q 相等的条件。

5 结 论

用模型喷管——电热喷管缩比件模拟发动机组外向辐射传热的地面试验是可行的。模拟试验的必要条件为: (1) 模型喷管与实际喷管两者之间保持几何相似; (2) 热流密度分布 q 相等; (3) 表面黑度分布 ε 相等。

参考文献:

- [1] 程惠尔, 洪 鑫, 卢万成. 四对角喷管外向辐射角系数的数值模拟[J]. 推进技术, 1999, 20(2).
- [2] 牛 禄, 程惠尔. 四并联高温推力室外向辐射传热对其壁温分布的影响[J]. 推进技术, 2000, 21(16).
- [3] 数学手册编写组. 数学手册[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.
- [4] 翁中杰, 程惠尔, 戴华淦. 传热学[M]. 上海: 上海交大出版社, 1989.

(编辑: 盛汉泉)