

# 节流阀阀芯型面优化设计

雷 恒, 程亚威, 谢 宁, 张赤氏  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 简要叙述了液氧/煤油火箭发动机节流阀阀芯型面优化设计的方法。原有节流阀的流阻特性不满足发动机使用要求, 根据系统对节流阀的参数要求, 采用分段插值拟合法对节流阀阀芯型面重新进行了优化设计, 优化后的节流阀液流试验合格, 并通过了发动机热试车考核, 其性能完全满足系统要求。

**关键词:** 液氧/煤油火箭发动机; 节流阀; 阀芯型面; 优化设计

**中图分类号:** V434

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2009) 04-0026-04

## Optimized design of the throttle valve core contour

Lei Heng, Cheng Yawei, Xie Ning, Zhang Chimin  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The procedure of the throttle valve core contour optimized design for LOX/kerosene rocket engine was described in this paper. The original design of the throttle valve core contour can not meet the requirement of the engine system. New methods were applied in throttle valve core contour optimization. The ground test result of the engine system proved that the newly designed valve were qualified.

**Key words:** LOX/kerosene rocket engine; throttle valve; valve core contour; design optimization

## 0 引言

在液体运载火箭飞行过程中, 为了减小火箭

飞行过载和优化其飞行弹道, 需要对火箭发动机的推力和混合比进行调节与控制。在某液氧/煤油发动机中, 通过在发动机燃料一级泵出口设置节流阀, 根据箭体指令要求改变其压降, 从而改

收稿日期: 2009-04-01; 修回日期: 2009-04-20。

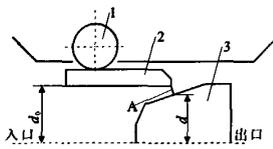
作者简介: 雷恒 (1975—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机阀门技术。

变推力室燃料流量, 达到调节发动机混合比的目的。

节流阀是发动机混合比调节系统的执行元件, 其工作原理见图 1。当发动机混合比需要调节时, 控制信号使节流阀的电机组件驱动齿轮轴旋转, 齿轮带动齿套前后移动, 使齿套与阀芯间的流通面积  $A$  发生改变, 从而调节发动机推力室燃料路的压降, 实现发动机混合比的调节。调节过程中, 阀芯的型面是控制节流阀调节性能的关键因素。

原节流阀液流试验后的流阻特性曲线见图 2, 试验数据在齿轮轴角度无量纲值 1~8 和 11~16 内呈二次分布, 而在 8~11 内呈线性分布。对试验数据全程拟合得到的节流阀流阻特性误差较大, 其相关系数  $R^2=0.99$ , 标准偏差  $SD=34.5\%$ , 不满足发动机对节流阀设计参数的要求。在节流阀实际使用时比较繁琐: 因流阻特性全程拟合的误差大, 故需分段拟合以确定齿轮轴角度。为满足发动机对节流阀的使用要求, 对原节流阀的阀芯型面必须重新进行优化设计。

本研究主要介绍节流阀阀芯优化设计的方法、仿真计算及试验验证结果。



1-齿轮轴; 2-齿套; 3-阀芯

图 1 节流阀原理

Fig.1 Principle of the throttle valve

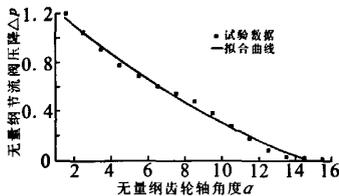


图 2 原节流阀流阻特性

Fig.2 Flow resistance characteristic of the original throttle valve

## 1 优化设计

### 1.1 设计参数要求

节流阀主要设计参数要求见表 1。

表 1 节流阀主要设计要求

Tab.1 The main design requirement of the throttle valve

| 项 目         | 代号及要求  | 单位                |
|-------------|--|-------------------|
| 额定流量        | $q_m$  | kg/s              |
| 介质密度        | $\rho$   | kg/m <sup>3</sup> |
| 额定工况下压降     | $\Delta p_{nom}$                                   | MPa               |
| 额定流量下压降调节范围 | $\Delta p_1 \sim \Delta p_2$                       | MPa               |
| 额定流量下流阻特性方程 | $\Delta p(\alpha) = A_0 + A_1\alpha + A_2\alpha^2$ |                   |
| 特性方程相关系数    | $R_2 \geq 0.99$                                    |                   |
| 特性方程标准偏差    | $SD \leq 5\%$                                      |                   |

### 1.2 设计方法

节流阀阀芯设计流程如图 3 所示, 具体的设计步骤如下。

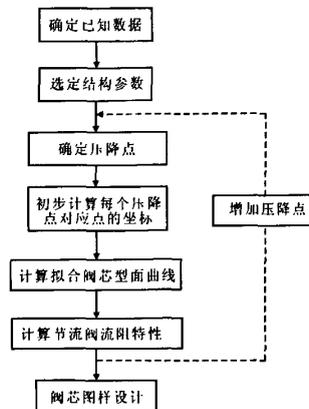


图 3 节流阀阀芯型面设计流程

Fig.3 Design process of the valve core contour

#### (1) 确定已知数据

根据发动机设计要求, 确定设计已知数据, 一般包括  $q_m$ ,  $\rho$ ,  $\Delta p_1$ ,  $\Delta p_{nom}$ ,  $\Delta p_2$ 。

#### (2) 选定结构参数

齿轮轴分度圆直径选定为  $d_{thy}$ , 齿轮轴转动

范围定为  $\alpha_{\min} \sim \alpha_{\max}$ , 由此确定出齿套运动的总行程  $L$  为  $\pi d_{\text{th}}(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})/360$ 。

### (3) 确定压降点

额定流量下压降调节范围为  $\Delta p_1 \sim \Delta p_2$ , 设计时应考虑一定的裕量  $\Delta p_n$  和  $\Delta p_x$ , 使压降调节范围大于设计要求范围, 取为  $\Delta p_{\min} \sim \Delta p_{\max}$ , 其中  $\Delta p_{\min} = \Delta p_1 - \Delta p_n$ ,  $\Delta p_{\max} = \Delta p_2 + \Delta p_x$ , 为此初步计算时考虑三个压降点, 即  $\Delta p_{\min}$ 、 $\Delta p_{\text{nom}}$  和  $\Delta p_{\max}$ 。

### (4) 计算型面点坐标值

设计时取齿套行程为 0 时对应节流阀压降为  $\Delta p_{\min}$ , 行程最大时对应压降为  $\Delta p_{\max}$ , 压降为  $\Delta p_{\text{nom}}$  时对应的行程取最大行程的一半。根据公式 (1) 计算每个压降所对应的节流面积  $A_i$ , 公式 (2) 计算阀芯直径  $d_i$ , 公式 (3) 和公式 (4) 计

算阀芯型面点  $x_i$  和  $y_i$  值, 结果见表 2。

$$A_i = \frac{q_m}{C_d \sqrt{2\rho\Delta p_i}} \times 10^3 \quad (1)$$

$$d_i = \sqrt{d_0^2 - 4A_i / (\pi \cos\theta_i)} \quad (2)$$

$$x_i = L_i \quad (3)$$

$$y_i = d_i / 2 \quad (4)$$

式中,  $A_i$  为节流面积,  $\text{mm}^2$ ;  $q_m$  为节流阀额定流量,  $\text{kg/s}$ ;  $C_d$  为流量系数, 初步设计时取 0.95;  $\rho$  为介质密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\Delta p_i$  为节流阀压降,  $\text{MPa}$ ;  $d_i$  为阀芯直径,  $\text{mm}$ ;  $d_0$  为齿套内径,  $\text{mm}$ ;  $\theta_i$  为节流阀阀芯型面角度,  $^\circ$ , 初步设计时不考虑角度影响;  $x_i$  为阀芯型面第  $i$  个点的  $x$  值,  $\text{mm}$ ;  $L_i$  为齿套位移值,  $\text{mm}$ ;  $y_i$  为阀芯型面第  $i$  个点的  $y$  值,  $\text{mm}$ 。

表 2 初步计算结果

Tab.2 Primary calculation results

| 压降<br>$\Delta p_i/\text{MPa}$ | 节流面积<br>$A_i/\text{mm}^2$ | 齿套位移<br>$L_i/\text{mm}$ | 阀芯直径<br>$d_i/\text{mm}$ | 阀芯型面点<br>$x_i$ 值 /mm | 阀芯型面点<br>$y_i$ 值 /mm | 备注         |
|-------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|------------|
| $\Delta p_{\min}$             | 395.84                    | 0                       | 35.5                    | 0                    | 17.75                | $x_1, y_1$ |
| $\Delta p_{\text{nom}}$       | 114.27                    | 15.7                    | 40.2                    | 15.7                 | 20.1                 | $x_2, y_2$ |
| $\Delta p_{\max}$             | 80.8                      | 31.4                    | 40.8                    | 31.4                 | 20.4                 | $x_3, y_3$ |

### (5) 计算型面曲线及仿真计算

根据每个压降对应的型面点数据, 按公式 (5) 计算阀芯每段型面的角度  $\theta_i$ , 得到节流阀阀芯型面曲线如图 4 所示 (型面 1)。根据阀芯型面曲线, 对节流阀流阻特性进行仿真计算, 如果流阻特性方程相关系数  $R$  大于 0.99, 说明阀芯型面满足参数要求。如果  $R$  小于 0.99, 说明阀芯型面不满足要求, 需增加阀芯压降点, 重新计算型面曲线, 再进行仿真计算直至满足要求为止。图 5 为增加压降点后节流阀阀芯型面 (型面 2)。图 6 为节流阀计算及试验流阻特性结果, 其特性方程相关系数  $R$  为 0.995。阀芯型面确定后, 在阀芯前端增加导流部分, 最终阀芯图样如图 7 所示。

$$\theta_i = \arctg[(y_{i+1} - y_i) / (x_{i+1} - x_i)] \quad (5)$$

式中,  $\theta_i$  为阀芯第  $i$  段型面的角度,  $^\circ$ ;  $y_{i+1}$  为阀芯型面第  $i+1$  个点的  $y$  值,  $\text{mm}$ ;  $x_{i+1}$  为阀芯型面第  $i+1$  个点的  $x$  值,  $\text{mm}$ 。

## 2 试验验证

设计改进的节流阀首先进行了液流试验, 试验结果合格, 拟合后流阻特性见图 6, 特性方程相关系数为 0.999, 标准偏差为 5%。由图 6 可以看出仿真结果与试验结果吻合, 两者相差不大于  $\pm 10\%$ , 差异的主要原因有: (1) 仿真计算时流量系数取定值, 而实际节流阀的流量系数与仿真值之间存在一定的差异; (2) 流量系数随阀芯型面角度的改变而改变, 仿真计算时的流量系

数均是按定值计算; (3) 节流阀齿套实际装配位置与仿真计算的角度存在一定的偏差。

改进阀芯后的节流阀参加了发动机试车, 试车中节流阀按控制电机指令调节角度, 成功地改变了发动机推力室燃料路的压降, 实现了发动机混合比的调节。



图 4 节流阀阀芯型面 1

Fig.4 Contour 1 of the valve core

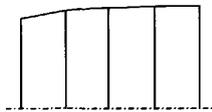


图 5 节流阀阀芯型面 2

Fig.5 Contour 2 of the valve core

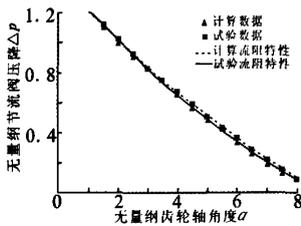


图 6 节流阀计算及试验流阻特性

Fig.6 Calculating and testing flow resistance characteristic of the valve

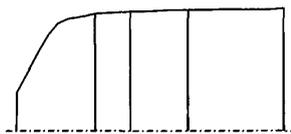


图 7 节流阀阀芯图样

Fig.7 Sketch of the valve core profile

### 3 结论

采用分段插值拟合法设计的阀芯进行了液流试验, 试验结果表明, 仿真计算结果与试验结果基本吻合, 说明这种优化设计方法正确。改进阀芯后的节流阀液流试验合格, 满足发动机参数要求, 直接参加了发动机热试车, 在试车过程中, 节流阀很好地满足了发动机混合比调节的要求。

### 参考文献:

- [1] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [2] 休泽尔 D K. 液体火箭发动机现代工程设计 [M]. 朱宁昌, 葛李虎, 董锡鉴, 等译. 北京: 中国宇航出版社, 2004.
- [3] 金朝铭. 液压流体力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
- [4] 周棣, 王东. 水液压节流阀关键技术的设计研究[J]. 阀门, 2008, (5): 8-10.
- [5] 阎庆华, 林大钧. 结合 Matlab 软件分析节流阀流量特性[J]. 液压与气动, 2004, (1): 54-55.
- [6] 刘卫国. MATLAB 程序设计与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [7] 曾维亮. 航天自控发动机减压阀的研究 [J]. 火箭推进, 2001, 27(5): 9-14.
- [8] 练章华, 刘干, 易浩, 等. 高压节流阀流场分析及其结构改进[J]. 石油机械, 2004, 32(9): 22-24, 41.
- [9] 称亚威, 李小明, 陈维宇. 液氧主阀的方案及设计[J]. 火箭推进, 2007, 33(2): 21-23, 56.
- [10] 王定军, 王新建, 方吉汉, 等. 姿态控制系统安全阀排放研究[J]. 火箭推进, 2008, 34(3): 35-38.

(编辑: 陈红霞)