

燃油计量型孔几何正反设计方法研究

张恕森, 王 曦

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘要: 针对燃油计量活门特殊型孔的几何型面问题, 提出了 1 种分段分析的设计方法。在已知燃油流量和计量活门位移函数关系的条件下, 根据随动活塞和燃油流量的函数关系, 利用分段型面设计法进行正向设计, 在已知计量活门几何型面的条件下, 确定开度与随动活塞位移之间的函数关系, 进行反向设计用于计算仿真。结果表明, 在计量活门工作范围内, 正向设计计算结果与实际数据的最大相对误差小于 0.5%, 证明正向设计方法具有很高的准确性; 通过 1 组实例对正反向设计进行了相互验证, 证明反向设计方法具有工程实用性。

关键词: 计量活门; 几何型面; 分段设计; 液压执行机构; 供油系统; 航空发动机

中图分类号: V233.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.13477/j.cnki.aeroengine.2018.03.009

Forward and Reverse Design Method of Fuel Metering Valve Geometrical Profile

Zhang Shu-sen, WANG Xi

(School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: This paper proposed a design method based on segmental analysis to deal with the geometrical profile problem of the fuel metering valve special hole. Under the condition of known fuel flow and metering valve displacement function, the forward design is performed using segmental profile design method based on the functional relationship between the follower piston and the fuel flow. Under the condition that the geometrical profile of the metering valve is known, the functional relationship between the opening degree and the follower piston displacement is determined, and the reversed design is used to numerical simulation. The results show that the maximum relative error between the forward design calculation results and the actual data is less than 0.5% within the working range of the metering valve, which proves that the forward and reverse method has high accuracy. The forward and reverse design were verified by a set of examples to prove that the reverse design has engineering applicability.

Key words: metering valve; geometrical profile; segmental design; hydraulic actuator; oil supply system; aeroengine

0 引言

液压执行机构因其自身的功能特点, 目前仍是航空发动机中不可缺少的部分^[1-2]。无论是传统的液压机械还是数控方式, 燃油泵、油门、计量活门主油路仍是主燃油系统和加力燃油系统的必要执行系统或元件^[3-4]。而燃油计量装置更是发动机供油系统的核心, 其性能和可靠性决定了整个控制系统的优劣和发动机的可靠性^[5]。利用 Matlab/Simulink 或者 AMESim 平台对燃油计量装置进行的仿真研究, 主要针对供油规律、压差控制器稳定性等, 很少有针对计量活门型孔

的研究^[6-7]。

本文提出了燃油计量型孔的几何正反设计方法, 并由 AMESim 实例验证了计算的函数关系的准确性。

1 计量活门介绍

计量活门是航空发动机计量装置中的重要元件, 由计量活门套筒和计量活门构成, 与压差控制器构成带压差控制器的计量开关, 压差控制器用于保持计量活门前后油压差稳定^[8-9]。

计量活门套筒上有对称的进油方孔, 装在燃油泵控制器的壳体中, 燃油通过壳体上的油路进入 2 个进油孔

收稿日期: 2017-10-19

作者简介: 张恕森(1993), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为航空发动机控制; E-mail: 592082576@qq.com。

引用格式: 张恕森, 王曦. 燃油计量型孔几何正反设计方法研究[J]. 航空发动机, 2018, 44(3): 55-59. ZHANG Shusen, WANG Xi. Forward and reverse design method of fuel metering valve geometrical profile[J]. Aeroengine, 2018, 44(3): 55-59.

中^[10-11]。计量活门装在计量活门套筒内,与燃油反馈凸轮、随动活塞传动摇臂装在同一轴上,由随动活塞带动旋转,结构如图1所示^[12-13]。

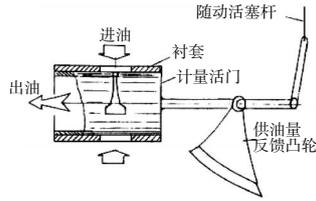


图1 计量装置结构

计量活门上有基本对称的2个特殊型孔,如图2所示。当随动活塞带动计量活门转到活门上型孔进到衬套上的方孔内时,燃油由衬套上的方孔进入计量活门的型孔内,并经中心孔流向停车开关。

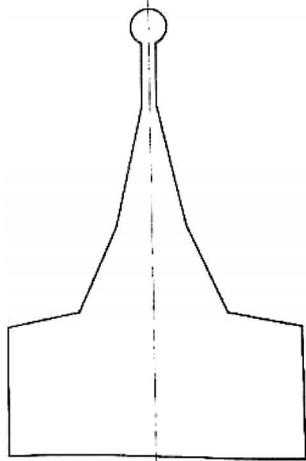


图2 计量活门型孔型面

计量活门特殊型孔的开度 A (燃油流通面积) 与计量活门的转动角度 (相对衬套方孔边缘的位移量 x) 或随动活塞的位移量 m 成指数关系,即

$$A = C_1 e^m \quad (1)$$

通过计量活门的燃油流量

$$G = \mu A \sqrt{2\rho(p_{in} - p_{out})} \quad (2)$$

或

$$G = C_2 e^m \sqrt{2\rho(p_{in} - p_{out})} \quad (3)$$

式中: $C_2 = C_1 \mu$; G 为燃油质量流量; μ 为流量系数; ρ 为燃油密度; C_1, C_2 为与型孔几何相关的常数; p_{in}, p_{out} 为计量活门前后油压差。

2 正设计问题

由给定的流量函数关系确定型孔几何设计问题。从式(2)可见,计量活门接近于薄壁式节流口,流体流过的紊流状态,可以不考虑雷诺数的影响。等压差控制器保持了计量活门前后压差稳定,也可以不考虑压差变化对流量稳定性的影响,只对型面进行分析。

由于燃油流量与随动活塞位移量成指数关系,同时燃油流量又由型孔开度所决定,从而决定了型孔开口的特殊性^[4]。为了降低加工难度,型面设计为多段简单几何面的组合型面,本文的设计方法也为分段型面设计法。

2.1 简单几何面分析

首先确定各简单几何面开度与位移量之间的

函数关系。已知型孔开口多为三角形、梯形、矩形的组合型面,而梯形又可以分为三角形和矩形的组合,所以只要分析三角形几何和矩形几何的函数关系,就能组合出各种复杂型面。为简便只分析 x 轴为对称轴的上半部分面积 S ,表示为

$$S = f(x) \quad (4)$$

故总面积

$$A = 2S \quad (5)$$

2.1.1 三角形几何

面积位移关系如图3所示。

$$y = kx = \tan\alpha \cdot x \quad (6)$$

$$S = \frac{1}{2} y \cdot x = \frac{1}{2} \tan\alpha \cdot x^2 \quad (7)$$

面积为抛物线关系,抛物线函数关系如图4所示。

$$S = \frac{1}{2p} x^2, \text{焦点}(0, \frac{p}{2})$$

因为三角形面积 S 与 x 的关系为抛物线,由 $\frac{1}{2}$

$$\tan\alpha = \frac{1}{2p} \text{得}$$

$$p = \frac{1}{\tan\alpha} \quad (8)$$

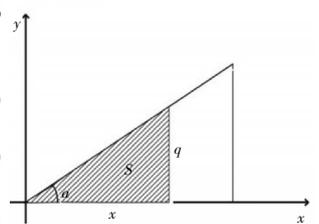


图3 三角形几何面积位移关系

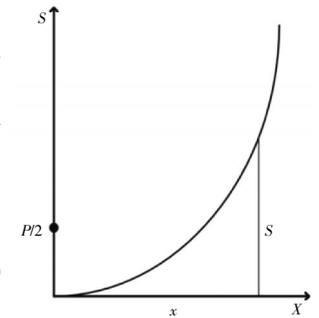


图4 三角形几何函数位移关系

2.1.2 矩形几何

矩形几何面积位移关系如图5所示,矩形几何函数位移关系如图6所示。

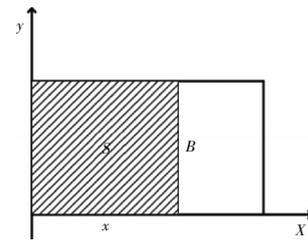


图5 矩形几何面积位移关系

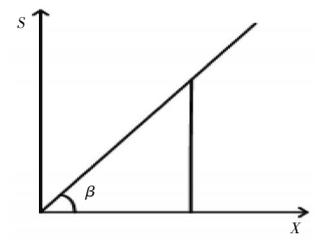


图6 矩形几何函数位移关系

$$S = Bx = \tan\beta \cdot x \quad (9)$$

即有

$$\tan\beta = B \quad (10)$$

2.2 实例分析

为便于分析,只针对单个型孔进行研究。已知某计量活门型孔开度与位移量的函数关系如图7所示,设

计该计量活门型面。

根据曲线形状大致将其分为6段,如图8所示。分段时采用观测法,为了保证仿真精度,可以尽量多分段。需要注意的是,三角形几何只能出现在第1段,之后的曲线段部分均为梯形几何。

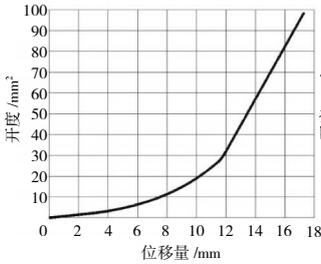


图7 某计量活门开度与位移量函数关系

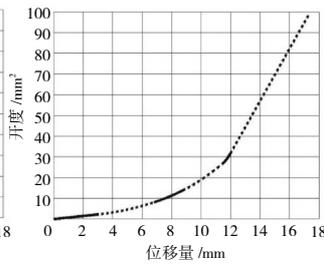


图8 开度与位移量函数的分段

从图中可见,第1段和最后1段近似为一次函数,型面为矩形几何;中间4段为复杂曲线,为梯形几何,得到草图如图9所示。未知量为 B_1, α_2 (或 B_2)、 $\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, B_6$ 。

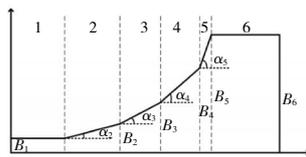


图9 计量活门型面设计

2.2.1 第1段分析

取函数图像第 n 段终点为 (x_{nend}, A_{nend}) ,由 2.1.2 分析可得

$$2B_1 = \tan\beta_1 \tag{11}$$

$$\beta_1 = \arctan \frac{A_{1end}}{x_{1end}} \tag{12}$$

式中: β_1 为第1段函数图像倾角,代入图8中取点得到 (x_{1end}, A_{1end}) 为 $(2.9, 2.2)$, $B_1 = 0.38$ 。

2.2.2 第2段分析

中间4段复杂函数关系曲线为梯形几何,可以分解为三角形和矩形的组合型面,函数关系也为一次函数和抛物线函数的叠加关系。将第2段分解为矩形和三角形,矩形长为 $x_{2end} - x_{1end}$,宽为 B_1 ;三角形为 $B_2 - B_1$,高为 $x_{2end} - x_{1end}$,待求量为 α_2 。

由

$$A_2(x) = A_{1end} + 2\Delta A_{2x \text{ square}} + 2\Delta A_{2x \text{ triangle}} \tag{13}$$

可知

$$\Delta A_{2 \text{ triangle}} = (A_{2end} - A_{1end} - 2A_{2 \text{ square}}) / 2 \tag{14}$$

$$A_{2 \text{ square}} = (x_{2end} - x_{1end}) \cdot B_1 \tag{15}$$

由 2.1.1 分析可得

$$p_2 = \frac{(x_{2end} - x_{1end})^2}{2\Delta A_{2 \text{ triangle}}} \tag{16}$$

$$\alpha_2 = \arctan \frac{1}{p_2} \tag{17}$$

代入图8中取点得到 (x_{2end}, A_{2end}) 为 $(6.8, 8.1)$, $\alpha_2 = 11.3^\circ$ 。

$$B_2 = B_1 + (x_{2end} - x_{1end}) \cdot \tan\alpha_2 \tag{18}$$

其中 $B_2 = 1.15$ 。

2.2.3 其余段分析

由第 2.2.1、2.2.2 节的普遍方法可得 $\alpha_3 = 18^\circ$, $\alpha_4 = 24.5^\circ$, $\alpha_5 = 80.5^\circ$, $B_6 = 6.3$ 。求得所有未知量,设计完毕。

2.3 分段型面设计法

由以上设计思路可以得出型孔几何正设计的普遍方法——分段型面设计法:

(1) 首先应画出型孔开度 A 与相对衬套边缘位移量 x 的函数关系 $A = f(x)$ 曲线(若已知燃油流量 G 与 x 或者 G 与随动活塞位移 m 的函数关系,可先转化为面积与位移间的函数关系);

(2) 采用观测法分别用斜直线和曲线(一次函数曲线和抛物线的叠加曲线)近似代替原曲线;

(3) 还原为数学表达式,并再分解出局部坐标系下斜直线和抛物线公式;

(4) 斜直线对应矩形几何,其矩形宽度为 $B = \frac{1}{2} \tan \beta$, β 为函数图像倾角;抛物线对应三角形几何为 $\tan \alpha = \frac{S(x_1)}{x_1}$, x_1 为局部坐标系中相对横坐标, α 为三角形几何与型孔中轴线夹角。

3 反设计问题

已知几何型孔,反求型孔面积 $A(x)$ 与 x 的对应关系,由此可得燃油流量 G 与随动活塞位移 m 间的函数关系,可用于 AMESim 建模中计量活门的面积计算及建模仿真^[5]。

3.1 计算方法

以图8所设计的计量活门型孔为例进行计算,依旧采用分段计算的方法。

3.1.1 第1段 $(0 \leq x \leq 2.9)$

矩形几何

$$A_1(x) = 2B_1 \cdot x_1 \tag{19}$$

$$A_{1end} = 2.2$$

3.1.2 第2段至第5段

梯形几何

$$A_n(x) = A_{(n-1)end} + 2(\Delta A_{x \text{ square}} + \Delta A_{x \text{ triangle}}) \tag{20}$$

$$A_n(x) =$$

$$A_{(n-1)\text{end}} + 2[B_{(n-1)} \cdot (x_n - x_{(n-1)\text{end}}) + \frac{(x_n - x_{(n-1)\text{end}})^2 \cdot \tan \alpha_n}{2}] \quad (21)$$

即有第 2 段 ($2.9 \leq x \leq 6.8$)

$$A_2(x) = 2.2 + 2[1.15 \cdot (x_2 - 2.9) + \frac{(x_2 - 2.9)^2 \cdot \tan 11.3^\circ}{2}], \text{ 由此可}$$

得其余各段函数关系。

3.1.3 第 6 段

$$A_6(x) = A_{5\text{end}} + 2B_6 \cdot (x_6 - x_{5\text{end}}) \quad (22)$$

由各段函数关系得 $A=f(x)$ 的分段函数关系, 如图 10 所示。

3.2 误差分析

通过上述反设计的计算方法可以得到型孔开度 $A(x)$ 与 x 的函数关系, 型孔几何由正设计方法得到, 因此, 对比计算结果与实际数据可以验证正设计的准确性。

在同一坐标系下画出计算结果与实际数据的函数关系, 如图 11 所示。虚线为计算结果, 实线为给定数据。可以看到 2 条曲线几乎完全重合, 在计量活门工作范围内最大相对误差小于 0.5%, 证明正设计方法具有很高的准确性。

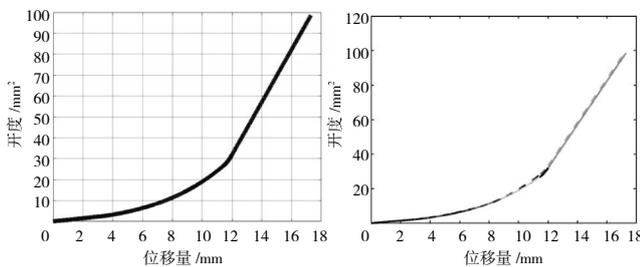


图 10 型面位移与开度的函数关系

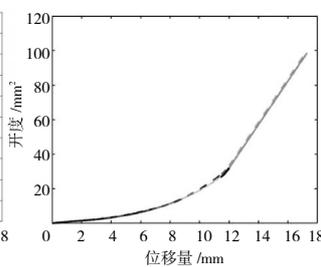


图 11 计算结果与实际数据对比

3.3 实例应用

由第 3.1 节计算方法得图 2 中计量活门型孔在 AMESim 中的模型, 如图 12 所示。该计量活门为某型

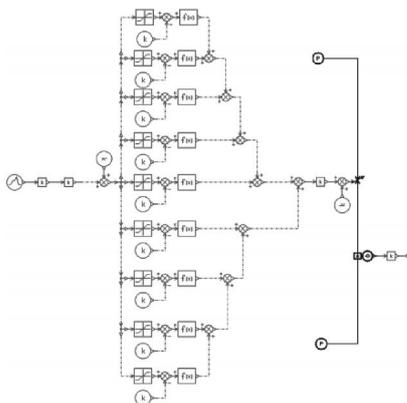


图 12 某计量活门 AMESim 模型

涡扇发动机主燃油泵部分的计量装置。依据该型发动机试验大纲, 给定等压差活门压差为 0.96 MPa, 左端接口为随动活塞的位移, 输出端为主燃油流量。

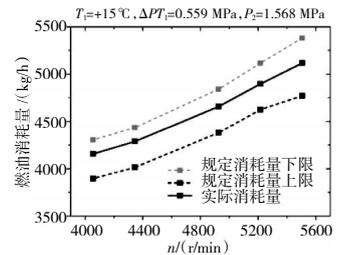


图 13 某发动机转速 - 流量仿真曲线

代入该涡扇发动机的 AMESim 模型, 验证在温度 $T_1=+15^\circ\text{C}$, $P_3=1.568$ MPa 时的加速性能, 各转速下主燃油流量满足试验规定要求, 如图 13 所示。这也说明 G 与随动活塞位移 m 之间的函数关系满足试验要求, 证明反设计计算方法的工程实用性。

4 结束语

本文通过对燃油计量型孔几何型面进行分段计算、分析, 可以在已知燃油流量与函数关系的情况下利用分段型面设计法进行正向设计, 也可以在已知计量活门几何型面的情况下对流量位移关系进行计算, 用于计算仿真。并通过正反设计的实例验证了该设计方法的正确性。

参考文献:

- [1] 吴天翼, 樊丁, 杨帆, 等. 某型航空发动机 FADEC 系统设计与仿真[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(1): 106-111.
WU Tianyi, FAN Ding, YANG Fan, et al. Design and simulation of FADEC system of one certain type aeroengine [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(1): 106-111. (in Chinese)
- [2] Calabrese M A, Skarbek L F, Shah P H, et al. Using a digital fuel control system and digital engine controller for US Navy LM2500 engines [J]. American Society of Mechanical Engineers, International Gas Turbine Institute, Turbo Expo (Publication)IGTI, 2002(2B): 1035-1039.
- [3] 薛梅新, 吴迪, 朴英. 加力燃油泵压出室非设计工况内流特征数值模拟 [J]. 航空动力学报, 2012, 27(2): 419-424.
XUE Meixin, WU Di, PIAO Ying. Numerical simulation of flow characteristics in afterburning chamber of afterburner fuel pump under non-design conditions [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(2): 419-424. (in Chinese)
- [4] 王彬, 赵皓岑, 叶志锋. 加力燃油计量装置的 AMESim 仿真研究 [J]. 航空发动机, 2014, 40(5): 62-66.
WANG Bin, ZHAO Haocen, YE Zhifeng. AMESim simulation of afterburning metering unit for fuel system [J]. Aeroengine, 2014, 40(5): 62-66. (in Chinese)
- [5] 刘培培, 马静, 彭凯, 等. 基于 AMESim 的涡桨发动机燃油计量装置仿真 [J]. 机械制造, 2011(8): 19-21.

- LIU Peipei, MA Jing, PENG Kai, et al. Simulation of fuel metering device in turboprop engine based on AMESim[J]. Mechanical Manufacture, 2011(8):19-21. (in Chinese)
- [6] 徐敏, 王曦, 曾德堂, 等. 现代航空发动机液压机械控制器仿真研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(12):2808-2813.
XU Min, WANG Xi, ZENG Detang, et al. Simulation on hydromechanical controller of modern aeroengine [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(12):2808-2813. (in Chinese)
- [7] 李阔, 郭迎清. AMESim 仿真技术在航空动力控制系统中的应用[J]. 计算机仿真, 2009, 26(1):107-110.
LI Kuo, GUO Yingqing. Application of AMESim in aeropower plant system [J]. Computer Simulation, 2009, 26(1):107-110. (in Chinese)
- [8] 樊思齐, 李华聪, 樊丁, 等. 航空发动机控制(下册)[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2008:283-287.
FAN Siqi, LI Huacong, FAN Ding, et al. Aeroengine control (II) [M]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University Press, 2008:283-287. (in Chinese)
- [9] 曾德堂, 王曦, 覃道亮. 燃油计量装置回油型面特性分析[J]. 航空发动机, 2010, 36(6):22-25.
ZENG Detang, WANG Xi, QIN Daoliang. Fuel scavenger contour performance analysis of fuel metering devices [J]. Aeroengine, 2010, 36(6):22-25. (in Chinese)
- [10] 谢小平, 张学军, 贺孝涛. 某型航空发动机燃油流量调节器建模与故障仿真[J]. 航空发动机, 2011, 37(4):15-18.
XIE Xiaoping, ZHANG Xuejun, HE Xiaotao. Modeling and fault simulation of an aeroengine fuel regulator [J]. Aeroengine, 2011, 37(4):15-18. (in Chinese)
- [11] 曾德堂, 赵威力, 王曦. 回油型面结构对计量装置特性影响研究[J]. 航空发动机, 2012, 38(1):41-42.
ZENG Detang, ZHAO Weili, WANG Xi. Effects of fuel returned shape on metering devices characteristics [J]. Aeroengine, 2012, 38(1):41-42. (in Chinese)
- [12] 沈兴全. 液压传动与控制[M]. 北京:国防工业出版社, 2010:30-41.
SHEN Xingquan. Fluid drive and control [M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2010:30-41. (in Chinese)
- [13] 李成功, 和彦森. 液压系统建模与仿真分析[M]. 北京:航空工业出版社, 2008:2-11.
LI Chenggong, HE Yanmiao. Modeling and simulation analysis of hydraulic system [M]. Beijing:Aviation Industry Press, 2008:2-11. (in Chinese)
- [14] 周立峰. 发动机燃油计量装置特性仿真与试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.
ZHOU Lifeng. Simulation and experiment study for characteristics of engine fuel measurement equipment [D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [15] 李华聪, 李吉. 机械/液压系统建模仿真软件 AMESim [J]. 计算机仿真, 2006, 23(12):294-297.
LI Huacong, LI Ji. Modeling and simulation software AMESim for mechanical/hydraulic system [J]. Computer Simulation, 2006, 23(12):294-297. (in Chinese)

(编辑:刘静)