燃油计量装置回油型面特性分析

曾德堂[1,2],王 曦[1],覃道亮[1],徐 敏[1]
(1.北京航空航天大学 能源与动力工程学院,北京 100191;
2.西安航空动力控制有限公司,西安 710077)

曾德堂(1976),男,在读博士研究生,从事航空发动机控制、设计与建模仿真研究。

收稿日期:2010-03-19

摘要:回油型面会影响活门动、稳态特性,体现活门回油能力,决定活门流量、压力增益及流量-压力系数等特性。提出了等面积法分析回油型面理论,研究了三角形、矩形、圆形、锥形4种回油型面特性,探讨了型面与流量、压力增益及流量-压力系数的关系,揭示了型面特性的变化规律。

关键词:回油型面;等面积分析法;流量-压力;增益

Fuel Scavenger Contour Performance Analysis of Fuel Metering Devices

ZENG De-tang[1,2], WANG Xi[1], TAN Dao-liang[1], XU Min[1]
(1.School of Jet Propulsion, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Xi'an Aviation Power Control Co., Ltd, Xi'an 710077, China)

Abstract: *The fuel scavenger contour can affected the dynamic and steady-state characteristics, reflected the valve scavenger ability, decided the characteristics of the valve flow, pressure gain and flow-pressure coefficient. The fuel scavenger theory of equal-area analytics was proposed. The triangle, rectangle, circle shape fuel scavenger characteristics were studied. The relations among the contour and flow, pressure gains, flow and pressure coefficients were discussed. The variation law of the contour characteristics was revealed.*

Key words: fuel scavenge contour; equal-area analytics; flow - pressure; gain

1 引言

关于燃油计量装置回油型面的研究开展较广,但鲜有论文发表;另由于试验周期、条件以及成本因素等使得试验不可避免存在一定局限性,虽然试验法适合工程应用,但对全面研究与分析回油型面特性规律仍有不足之处,相对于试验法来说,采用等面积分析理论,有助于深化对回油型面设计认识及理解,有利于消化-吸收以及掌握型面对装置动稳态影响机理。国内涉及型面设计、分析文献较少,已有的研究也仅局限在型面设计尺寸,并未进行型面设计及特性分析[1,2];而其他研究对型面设计多采用仿制与试验相结合的方法。

本文借鉴已有研究成果,并对其不足,采用等面积分析法研究了三角形、矩形、圆形及锥形等回油型面特性机理,揭示了各型面对装置动稳态特性、计量精度及调节时间的影响。

2 回油型面及特性方程

航空发动机控制系统广泛采用液压型面结构,特别是燃油计量装置,如计量活门型面、回油活门型面结构等。燃油计量装置结构如图1所示,该装置由齿轮泵、压差活门及计量活门等组成,其

回油型面集于压差活门中。压差活门通过自调功能,保持前后压差恒定,实现计量流量与流通面积成线性关系。而回油活门则保证多余燃油回流，回油型面决定活门回油能力，并影响装置动稳态特性、计量精度及调节时间。发动机复杂多变的工况,使得工作时所需燃油变化量大,为保证装置可靠回油,满足动稳态性能要求,因而分析回油型面特性是必要的。

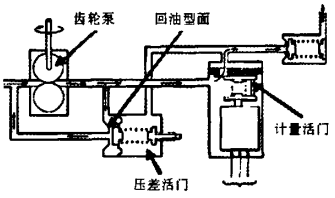

图1 燃油计量装置结构

2.1 回油型面

在工程应用中，活门回油型面不管多复杂,一般都由三角形、矩形、圆形及锥形等型面构成。如图2所示。

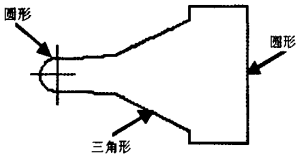

图2 某计量装置回油型面结构

流量增益、压力增益及流量-压力系数构成了型面特性，其中流量增益表示负载压降一定时，阀单位位移所引起负载流量变化的大小，流量增益影响装置开环增益,进而影响装置的响应时间、稳定性及稳态误差等，而压力增益表示阀控执行元件组合起动承载负载能力，流量-压力系数则影响控制执行元件阻尼比和速度刚度[3]。

2.2 特性方程

2.2.1 三角形特性方程

三角形型面结构如图3所示,特性方程如下。

流通面积

$$A=y^2\mathrm{tg}\,\beta \quad (1)$$

式中:y 为位移;β 为角度。

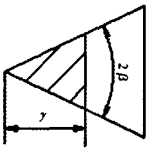

图3 三角形

流量

$$Q=C_d y^2\mathrm{tg}\,\beta\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (2)$$

式中:C_d 为流量系数;Δp 为压差;ρ 为燃油密度。

流量增益

$$k_q=\frac{\partial Q}{\partial y}=2C_d y\mathrm{tg}\,\beta\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (3)$$

流量-压力系数

$$k_c=-\frac{\partial Q}{\partial p}=-C_d y^2\mathrm{tg}\,\beta\sqrt{\frac{1}{2\rho\Delta p}} \quad (4)$$

压力增益

$$k_p=\frac{\partial Q}{\partial y}=\frac{4\Delta p}{y} \quad (5)$$

2.2.2 矩形特性方程

矩形型面结构如图4所示,特性方程如下。

流通面积

$$A=Ly \quad (6)$$

式中:L 为矩形宽度。

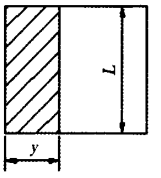

图4 矩形

流量

$$Q=C_d Ly\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (7)$$

流量增益

$$k_q=\frac{\partial Q}{\partial y}=C_d L\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (8)$$

流量-压力系数

$$k_c=\frac{\partial Q}{\partial p}=-C_d Ly\sqrt{\frac{1}{2\rho\Delta p}} \quad (9)$$

压力增益

$$k_p=\frac{\partial Q}{\partial y}=\frac{2\Delta p}{y} \quad (10)$$

2.2.3 圆形特性方程

圆形型面结构如图5所示,特性方程如下。

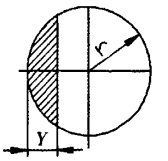

图5 圆形

流通面积

$$A=r^2\cos^{-1}\left(1-\frac{y}{r}\right)-(r-y)\sqrt{2ry-y^2} \quad (11)$$

式中:r 为半径。

流量

$$Q=C_d\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}\times\left[r^2\cos^{-1}\left(1-\frac{y}{r}\right)-(r-y)\sqrt{2ry-y^2}\right] \quad (12)$$

流量增益

$$k_q=\frac{\partial Q}{\partial y}=2C_d\sqrt{2ry-y^2}\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (13)$$

流量-压力系数

$$k_c=-\frac{\partial Q}{\partial p}=-C_d\sqrt{\frac{1}{2\rho\Delta p}}\times\left[r^2\cos^{-1}\left(1-\frac{y}{r}\right)-(r-y)\sqrt{2ry-y^2}\right] \quad (14)$$

压力增益

$$k_p=\frac{4\Delta p\sqrt{2ry-y^2}}{\left[r^2\cos^{-1}\left(1-\frac{y}{r}\right)-(r-y)\sqrt{2ry-y^2}\right]} \quad (15)$$

2.2.4 锥形特性方程

锥形型面结构如图6所示。特性方程如下。

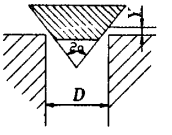

图6 锥形

流通面积

$$A=\frac{\pi}{2}(2D-y\sin 2\alpha)y\sin\alpha \quad (16)$$

式中:D 为直径;α 为角度。

流量

$$Q=\frac{\pi}{2}C_d\ (2D-y\sin 2\alpha)\,y\sin\alpha\cdot\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (17)$$

流量增益

$$k_q=\frac{\partial Q}{\partial y}=\pi C_d(D-y\sin 2\alpha)\sin\alpha\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \tag{18}$$

流量－压力系数

$$k_c=-\frac{\partial Q}{\partial p}=-\frac{\pi}{2}C_d(2D-y\sin 2\alpha)\times y\sin\alpha\sqrt{\frac{1}{2\rho\Delta p}} \tag{19}$$

压力增益

$$k_p=\frac{\partial Q}{\partial y}=\frac{4\Delta p(D-y\sin 2\alpha)}{y(2D-y\sin 2\alpha)} \tag{20}$$

3 等面积分析法

文献[3]提到型面影响系统特性，当回油面积和装置设计指标（如系统动稳态特性等）一定时，采用何种型面，决定型面增益和系数。等面积分析法就是在三角形、矩形、圆形及锥形型面回油流通面积相等情况下，分析其型面增益变化规律的方法。

根据上述方法和式(1)～(20)给出回油型面特性，取回油流通面积 A_i (i=1~10)作为工作点，面积以 $\Delta A=2\ \mathrm{mm}^2$ 在区间[2 20]之间递增时，得到各型面工作点特性。步骤如下：

(1)确定工作点回油面积；

(2)推导不同型面与各工作点流量、压力增益、流量－压力系数变化关系；

(3)根据装置及活门对动稳态和精度以及负载承载能力选取型面。

4 型面特性分析

三角形、矩形、圆形及锥形型面流量增益特性曲线如图 7 所示。从图中可见，随着面积增大，三角形与圆形流量增益逐渐增大，而矩形与锥形流量增益变化很小，根据文献[3]所述流量增益影响开环增益，因此，随着面积的增加，三角形、圆形型面装置系统开环增益增大，而锥形、矩形型面装置系统开环增益变化不大。

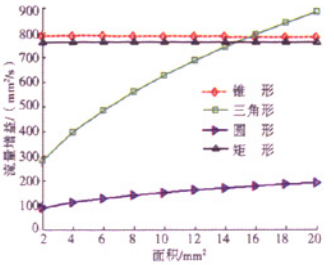

图 7 面积与流量增益

三角形、矩形、圆形及锥形型面流量－压力系数特性曲线如图 8 所示。从图中可见，随着面积增大，三角形、矩形、圆形、锥形流量压力系数增益逐渐增大，且三角形、矩形、圆形增加量基本一致，而锥形增速慢于前 3 种型面的，根据文献[3]所述流量－压力系数影响控制执行元件阻尼比和速度刚度。

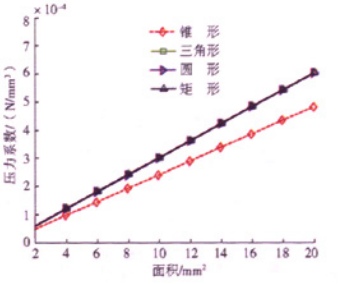

图 8 面积与流量－压力系数

三角形、矩形、圆形及锥形型面压力增益特性曲线如图 9 所示。从图中可见，随着面积增大，三角形、矩形、圆形、锥形压力增益逐渐减小，且减幅逐渐变小，根据文献[3]所述压力增益大小代表控制执行元件承载能力，因此，锥形型面承载能力最大。

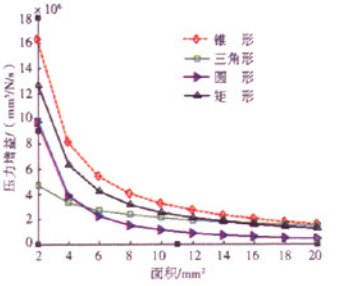

图 9 面积与压力增益

5 结论

通过等面积分析法研究了航空发动机燃油计量装置压差活门回油型面特性，获得等面积下压差回油活门三角形、矩形、圆形、锥形等回油型面压力增益、流量增益、压力－流量系数特性曲线。通过对比分析各型面特性曲线，为分段设计和分析压差活门回油型面提供以下有工程实际意义的结论。

(1)流量增益影响系统开环增益，从而决定系统动稳态性能，因此，在设计回油型面时，当控制系统对稳态性能要求高时，采用三角形或圆形型面有利于增大系统开环增益，减少系统误差；而当系统对动态性要求高时，采用矩形及锥形型面，将有利于改善动态特性。

(2)压力增益影响系统活门承载能力，是活门负载压力控制灵敏性的体现，因此在设计回油型面时，采用矩形与锥形有利于提高压差活门负载压力控制的灵敏度，而采用三角形或圆形，则在相同条件下降低活门负载压力的灵敏度。

(3)流量－压力 （下转第 38 页）

准确性。

狄克逊准则步骤如下：

a. 按大小次序排列的观测值 $x_{(1)} \leqslant x_{(2)} \leqslant \cdots \leqslant x_{(n)}$ 计算统计量。

b.按表1计算 D、D'。

c.由 n，$\alpha=0.05$，从表2中查出 $\tilde{D}_{1-\alpha}(n)$。

d.当 $D>D'$，$D>\tilde{D}_{1-\alpha}(n)$，$x(n)$ 离群；当 $D'>D$，$D'>\tilde{D}_{1-\alpha}(n)$，$x(1)$ 离群；重复a～c，否则判断无离群值。

(3)历程数据回放

发动机试车数据主要用来验证发动机设计及排故，而如何通过绘制发动机历程曲线让设计人员更加便捷地了解发动机的工作状态十分重要。本系统实现了绘制发动机多参数随时间变化曲线功能，而且考虑到全屏绘制试车历程曲线可能对局部细节描绘不清晰，特别提供了曲线局部放大功能，再考虑到用户可能将历程数据做进一步分析计算，又提供了历程数据导出功能。

表1 双侧狄克逊检验式

样本量	检验高端异常值	检验低端异常值
n=3~7	$D=r_{10}=\frac{x_{(n)}-x_{(n-1)}}{x_{(n)}-x_{(1)}}$	$D'=r_{10}'=\frac{x_{(2)}-x_{(1)}}{x_{(n)}-x_{(1)}}$
n=8~10	$D=r_{11}=\frac{x_{(n)}-x_{(n-1)}}{x_{(n)}-x_{(2)}}$	$D'=r_{11}'=\frac{x_{(2)}-x_{(1)}}{x_{(n-1)}-x_{(1)}}$
n=11~13	$D=r_{21}=\frac{x_{(n)}-x_{(n-2)}}{x_{(n)}-x_{(2)}}$	$D'=r_{21}'=\frac{x_{(3)}-x_{(1)}}{x_{(n-1)}-x_{(1)}}$
n=14~20	$D=r_{22}=\frac{x_{(n)}-x_{(n-2)}}{x_{(n)}-x_{(3)}}$	$D'=r_{22}'=\frac{x_{(3)}-x_{(1)}}{x_{(n-2)}-x_{(1)}}$

表2 双侧狄克逊检验的临界值 $\tilde{D}_{1-\alpha}(n)$

n	统计量	95%	n	统计量	95%
3	r_{10} 和 r_{10}' 中的较大者	0.970	17	r_{22} 和 r_{22}' 中的较大者	0.529
4		0.829	18		0.514
5		0.710	19		0.501
6		0.628	20		0.489
7		0.569	21		0.478
8	r_{11} 和 r_{11}' 中的较大者	0.608	22		0.468
9		0.564	23		0.459
10		0.530	24		0.451
11	r_{21} 和 r_{21}' 中的较大者	0.619	25		0.443
12		0.583	26		0.436
13		0.557	27		0.429
14	r_{22} 和 r_{22}' 中的较大者	0.586	28		0.423
15		0.565	29		0.417
16		0.564	30		0.412

4 结束语

本文介绍的航空发动机试验数据采集分析系统将航空发动机、试验设备、传感器以计算机为基础组成了1个包含航空发动机测试和试验数据管理分析的综合系统，充分地挖掘了现有数据采集设备能力，有效地管理数目繁多的试验数据，而且通过使用者对试验数据进行相关的科学分析，极大地提高了试验数据的使用效率，较好地满足了航空发动机研制和排故的需要，实现了采集信号的准确测量和试车数据的高效管理，提高了试车数据的使用效率。经实践证明，该系统工作稳定可靠，测试精度高，界面美观，满足了系统设计性能的要求，对推进试验合理进行，提升发动机研制水平，缩短发动机研制周期都具有重要的现实意义，具有较高的推广价值。

参考文献

[1]单晓明.数字化试验业务平台在航空发动机测试领域的应用与实践 [J].工程实践,2009(6):35-37.

[2]李晓松.涡喷发动机动态模拟试验台测控系统设计 [J]. 机械设计与制造,2005(10):56-57.

[3]冯荣琥.狄克逊准则剔除粗误差的微机应用 [J]. 四川标准化与计量,1995(2):29-31.

(上接第25页)系数影响装置的阻尼比与速度刚度，对于矩形型面来说，当在零位时，流量－压力系数最小，则系统阻尼比最低，能在零位稳定工作，在其他工作点也能稳定工作，在同等条件下，采用矩形和锥形比三角形和圆形能提高阻尼比和速度刚度快。

(4)采用等面积设计有利于快速设计型面和分析特性。

参考文献

[1]刘正,郭迎清,等.某型压差计量装置结构设计及性能计算[C].中国航空学会第十二届发动机自动控制学术会议论文集,2004:158-162.

[2]文元江.用EASY5分析回油式压差活门特性[J].机床与液压,2005(1):21-26.

[3]宋志安.用基于MARLAB的液压伺服控制系统分析与设计[M]. 北京：国防工业出版社,2007.

[4]Manring Noah D.Hydraulic Control Systems[M].Hoboken, New Jersey: John Wiley&Sons,Inc, 2005.