

活门型孔“化方为圆”算法

苏志善^{1,2}, 李华聪¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710129;
2. 中国航空发动机集团有限公司 西安动力控制科技有限公司, 西安 710077)

摘 要: 通过对航空发动机控制系统活门型孔的流量系数稳定性控制的方法进行研究,提出了一套能够将方形活门型孔转化为有规律排列组合小圆孔的算法,并通过实例验证了算法的正确性,同时转化误差小于 0.7%,基本实现了工程意义上的等流量系数。该算法将加工工艺性差且计量精度低的方形活门型孔转化为有规律排列组合小圆孔,消除了方形型孔流量系数变化的影响,改变了活门型孔加工方法,减少了对人和环境的危害,提高了活门型孔的计量精度,减小了活门的液动力,具有极大的工程应用价值。该算法可以实现将方形、梯形(含三角形)及其组合型孔等任意型孔的转化,具有工程上的普遍适用性。

关 键 词: 航空发动机控制系统; 活门型孔; 流量系数; 化方为圆; 螺距

中图分类号: V233 **文献标志码:** A

Algorithm of “turning square into circle” for valve hole

SU Zhishan^{1,2}, LI Huacong¹

(1. School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Xi'an Engine Control Technology Company Limited,
Aero Engine Corporation of China, Xi'an 710077, China)

Abstract: By studying the method of flow coefficient stability control of valve hole in aero-engine control system, a set of algorithms for transforming the square hole into small circular holes with regular arrangement were proposed. The correctness of the algorithm was verified by an example, and the conversion error was less than 0.7%, which basically realized the constant flow coefficient in engineering sense. The algorithm converted the square holes with poor machining process and low measurement accuracy into small round holes with regular arrangement and combination. So the influence of changes in flow coefficient caused by square holes was eliminated, the processing method of the valve hole was changed, the hazards to people and the environment were reduced, the measurement precision of the valve hole was improved, and the hydraulic power of the valve was reduced, presenting great engineering application value. The algorithm can transform the square, trapezoid (including triangle) and its combined holes, showing universal applicability in engineering.

Key words: aero-engine control system; valve hole; flow coefficient; turning square into circle; pitch

收稿日期:2020-02-07

作者简介:苏志善(1984—),男,博士生,主要从事航空发动机燃油控制系统设计研究。

引用格式:苏志善,李华聪. 活门型孔“化方为圆”算法[J]. 航空动力学报,2020,35(10):2235-2240. SU Zhishan, LI Huacong. Algorithm of “turning square into circle” for valve hole[J]. Journal of Aerospace Power,2020,35(10):2235-2240.

航空发动机控制系统中液压执行机构是不可或缺的重要组成部分^[1-2],无论是传统的液压机械控制系统还是全权限的数控系统,计量活门仍是主燃油系统和加力燃油系统中最重要的核心部件,其流量计量规律和精度直接决定了整个发动机燃油控制系统的控制精度和品质^[3-5]。以往一些研究人员是利用 Matlab、Simulink 或者 AMESim 等仿真平台对燃油计量装置的供油规律、压差控制器稳定性进行研究^[6-7],也有一些研究人员针对计量活门型孔的设计方法和回油活门型孔对计量装置特性影响进行研究^[8-9],但是关于活门型孔的方圆转化问题的研究确很少。活门型孔“化方为圆”转化后,有利于加工实现,基本实现了工程意义上的等流量系数,同时能够大大减小活门液动力,对控制品质提高有较大意义,因此有必要对活门型孔的“化方为圆”算法进行研究。

1 活门型孔设计基本原则及误差分析

目前,航空发动机燃油控制系统的活门型孔设计一般都是利用如下的经典流量计算公式进行计算:

$$q_v = \mu S \sqrt{\frac{2g\Delta p}{\rho}} \tag{1}$$

式中 q_v 为体积流量, μ 为流量系数, S 为型孔面积, g 为重力加速度, Δp 为压差, ρ 为燃油密度。即:默认 μ 为固定值并确定 Δp ,通过改变 S ,来实现 q_v 的计量。而 S 直接取决于活门型孔的形状与活门开度 X ,最终流量规律为 $q_v = f(X)$,而函数关系 $f(X)$ 就是活门型孔形状的直接体现。常规的圆形、方形、三角形的面积 S 和活门开度 X 的关系前人都已经进行了详细的分析和计算^[10],具体见图 1。

圆形孔加工简单、成本低,作为过油孔非常合

适,但是 X 和 S 规律关系复杂且不成比例(具体见图 1),无法作为某种规律需求的型孔。三角形型孔和方形型孔虽然加工复杂、成本较高,但是 X 和 S 规律关系规律简单清晰,能够方便计算,所以常常用于实现某种规律。目前,国内外航空发动机控制系统中实现规律的活门型孔大部分均为方形、三角形、梯形或这些型孔的组合形状。

例如:方形型孔按式(1)计算可得 q_v 为

$$q_v = \mu S \sqrt{\frac{2g\Delta p}{\rho}} = \mu B X \sqrt{\frac{2g\Delta p}{\rho}} \tag{2}$$

式中 B 为活门型孔宽度。令

$$\beta = \mu B \sqrt{\frac{2g\Delta p}{\rho}} \tag{3}$$

则可得

$$q_v = \beta X \tag{4}$$

即体积流量 q_v 和活门开度 X 成线性比例关系,而 β 为流量增益,它是压差 Δp 、流量系数 μ 、活门型孔宽度 B 等影响因素综合计算后的最终系数。

但是由于随着活门开度 X 的变化,流量系数 μ 也会随着变化^[11],详见图 2,其中 $X_{\max}$ 是活门最大开度,这样就导致最终的实际流量曲线与理论计算规律曲线不符,两者的差异见图 3。通过上述分析可知,理论计算曲线和实际流量曲线的差

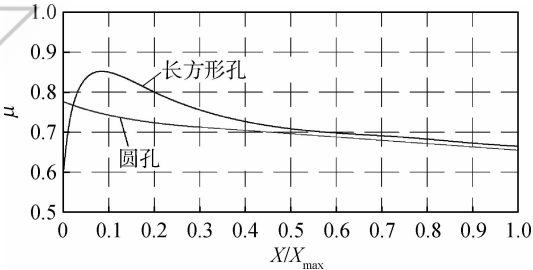


图 2 流量系数随开度变化曲线

Fig. 2 Variation curves of flow coefficient with opening

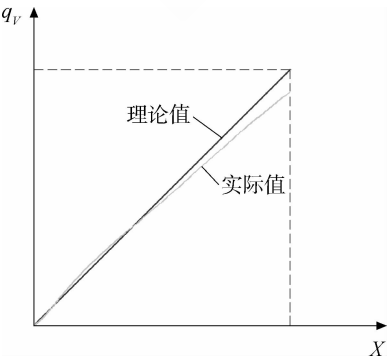


图 1 型孔面积-活门开度曲线

Fig. 1 Valve hole area-opening curve

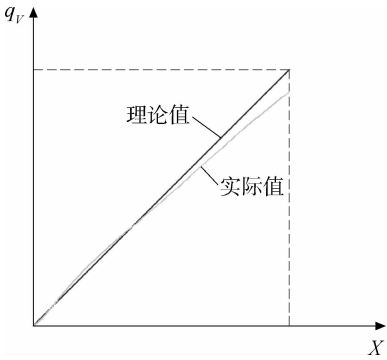


图 3 理论计算流量规律和实际的差异

Fig. 3 Difference of flow rule between calculation and practice

异主要是由于流量系数 μ 随着活门开度 X 的增大而变小导致的,那么只要能够控制流量系数 μ 在活门开度 X 的变化过程中保持基本不变就能保证实际流量曲线和理论计算曲线的一致性。而如何改变型孔结构保证流量系数 μ 在活门开度 X 的变化过程中保持基本不变就是本文的关键环节。

2 流量系数稳定性控制的微分思想

由于流量系数与压差、液体黏度、型孔形状、型孔大小等因素有关^[11],在航空发动机控制系统设计过程中压差 Δp 一般都是由压差活门控制,均为固定值;液体黏度也是由发动机燃料决定,国内一般均为三号喷气燃料,也不会变化。唯一能够引起流量系数 μ 变化的只有型孔形状和型孔大小。由于传统的方形型孔流量要变化,型孔大小必然变化,这也就必然会引起流量系数 μ 变化。那么为保持在型孔开度变化(即面积变化)过程中型孔形状和型孔大小保持,利用数学微分的思想,把一个大的型孔拆分为若干个微小型孔,保证每

个小型孔形状和大小不变,这样就能保证在型孔开度变化过程中已经完全打开的每个微小小孔流量系数 μ 不变,虽然在每一个小孔打开过程中流量系数 μ 会有一些变化,但是已经打开的小孔流量系数不会变化,从而保证在活门开度 X 变化过程中保证总的流量系数 μ 基本不变。由于结构设计的需要,小孔必须有实体结构支撑,所以在保证面积 S 和活门开度 X 的关系不变的前提下,微分思想的转换过程如图 4 所示。

由于工程和理论总是有差异的,理论上的微小型孔在工程中无法实现,也就无法实现总流量系数 μ 完全不变,但是只要在工程设计中保证微小型孔在能实现的情况下达到足够小,也就能够保证总流量系数 μ 基本不变,这样也就能够完全满足工程实际需要。由于工程中最容易实现的形状就是小圆孔,所以微分转化的最终思路是将方孔转化为若干各小圆孔的排列组合。而如何排列若干小圆孔的位置保证开度 X 和面积 S 的关系和方孔的 X - S 关系一致就是本文所研究的“化方为圆”算法。

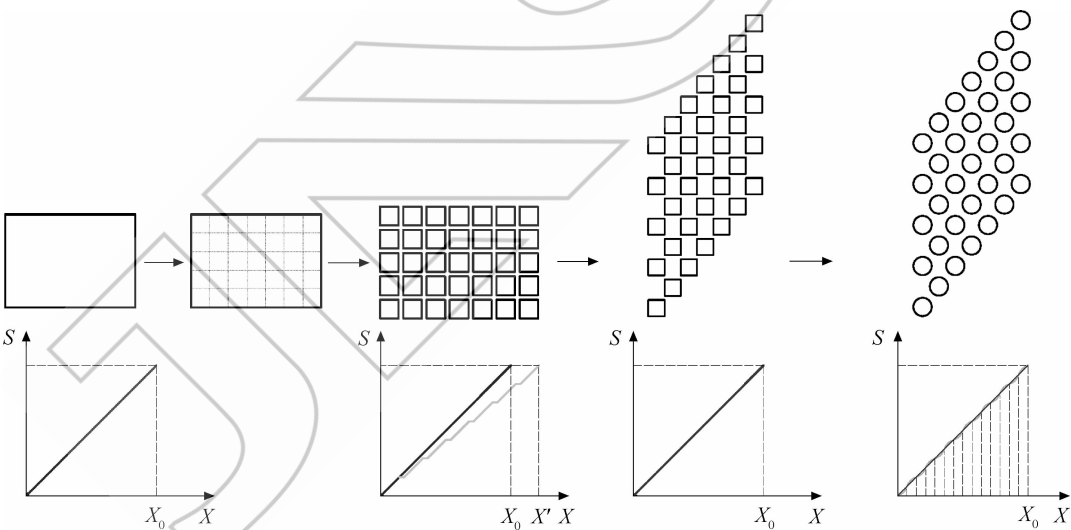


图 4 “化方为圆”微分转化示意图

Fig. 4 Differential transformation schematic diagram of “turning square into circle”

3 “化方为圆”算法

3.1 方形型孔转化为圆孔算法

“化方为圆”算法就是利用“直径形状相同的小圆孔流量系数相同”这个优点,在保证流量规律一致的前提下,将方形(或梯形)型孔转换为若干规则小圆孔组合的一种思路和具体计算方法。

鉴于方形型孔的面积 S 和开度 X 函数关系为一次函数关系,根据图 4 的微分转化思想,最好

转化方式就是转化为一系列等螺距排列的小圆孔组合,所以算法的核心就是计算出图 5 中方形型孔的宽度 B 和圆孔的半径 r 和螺距 C 的数学关系,图 5 中 A 为长度。

由图 5 方形型孔可知, $S = BX$, 经过详细的几何数学理论分析和计算,等螺距排列小圆孔组件的面积-活门开度数学对应关系式为

$$S = \frac{an\pi r^2}{C}X$$

(5)

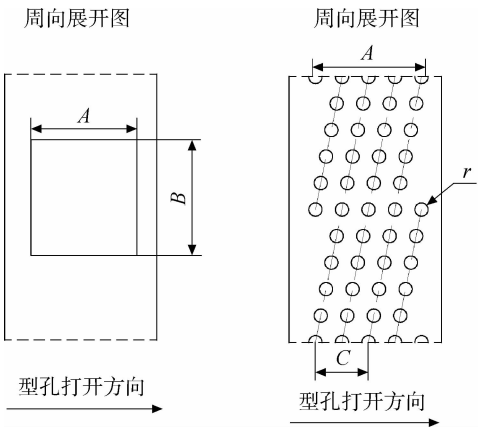


图 5 方形型孔转化对比示意图

Fig. 5 Schematic diagram of square hole transformation

即可得宽度 B 为

$$B = \frac{an\pi r^2}{C} \tag{6}$$

式(5)和式(6)中 a 为螺旋曲线头数, n 为一圈螺距上的小孔个数。

3.2 梯形型孔转化为圆孔算法

鉴于梯形型孔的面积和开度函数关系为二次函数关系,如图 6 所示,即可算得

$$S = \frac{B_2 - B_1}{2A} X^2 + B_1 X \tag{7}$$

由于宽度 B_2 随着开度 X 的增加而增加,即可以通过将螺距 C 和开度 X 建立关系,使等螺距的圆孔排列变成变螺距的圆孔排列方式,详见图 6。同时通过研究,计算出图 6 梯形孔的宽度 B_1 、 B_2 、初始螺距 C_0 、半径 r 和变螺距曲线的数学关系。

经过详细的理论计算和分析,梯形型孔面积和活门开度的数学对应关系式为

$$S = \frac{1}{2} \left(\frac{an\pi r^2}{C_0} + \frac{an\pi r^2}{C_0 + kX} \right) X \tag{8}$$

即得

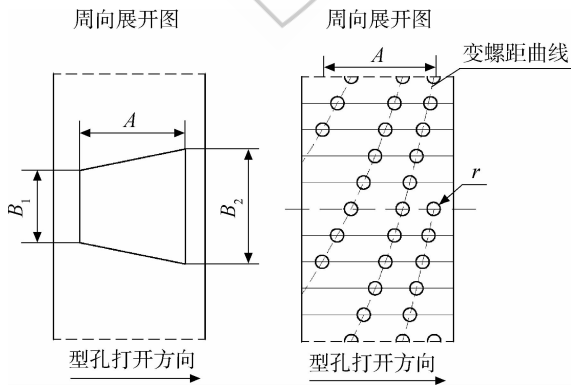


图 6 梯形型孔转化对比示意图

Fig. 6 Schematic diagram of trapezoidal hole transformation

$$B_1 = \frac{an\pi r^2}{C_0} \tag{9}$$

$$B_2 = \frac{an\pi r^2}{C_0 + kX} \tag{10}$$

式中 $C_0 + kX$ 为螺距变化规律曲线; k 为变螺距曲线的螺距变化增益。

通过以上算法研究,可以将梯形型孔转化为变螺距螺旋排列的小圆孔组合,如果把初始螺距 C_0 的值取得较大,那么 B_1 就很接近于零,也就实现了三角形型孔的“化方为圆”。

综上所述,“化方为圆”的核心就是寻找螺距 C 和活门开度 X 的关系,最终计算出面积 S 和开度 X 的关系,即: $S = f(X)$ 。

3.3 “化方为圆”算法精度影响分析

由文中第 3.2 节分析计算可知图 5 方形型孔转化为圆孔组件后的面积 S 和活门开度 X 的关系见式(5),其中宽度计算见式(6),所以通过分析可知,影响转化精度的主要因素是半径 r ,即半径越小,转化的精度越高,同时螺距 C 也就会越小,小孔个数 n 和螺旋曲线头数 a 也就相应会变大,但是 n 和 a 必须为整数,所以保证式(6) B 值不变的前提下, r 越小、螺距 C 越小、小孔个数 n 和螺旋曲线头数 a 越大,转化精度越高。同理,梯形型孔的精度影响和方形型孔一样。

3.4 “化方为圆”参数选取规则

考虑到可加工性,式(6)中宽度 B 的转化过程中, r 不能取太小,尽量选取 $r = 0.25, 0.5, 0.75$ mm(直径为 0.5、1、1.5 mm)这样的又小又常规的尺寸,有利于钻孔刀具的通用性,螺旋曲线头数 a 也不能取太多,一般取对称的 2 或 4 即可,单圈小孔个数 n 尽量取 18、27、36,这样每个孔圆周 360° 上的相对位置角度值为 20°、15°、10° 这样的整数值。最后根据活门的实际结构大小,综合考虑选取确定好 r 、 a 、 n 三个参数后,利用式(6)计算出螺距 C 。同理,梯形型孔的选取规则和方形型孔一致。

4 转化算法实例分析

根据上述算法和参数选取规则,将总宽度 $B = 30$ mm 的某型航空发动机控制系统的回油活门方形型孔进行“化方为圆”转化,选取螺旋曲线头数 $a = 2$,单圈螺距上的小孔个数 $n = 36$,小孔半径 $r = 0.75$,利用式(6)计算螺距 C 为

$$C = \frac{an\pi r^2}{B} = \frac{2 \times 36\pi \times 0.75^2}{30} = 4.24 \text{ mm} \tag{11}$$

转化后周向展开形状见图 7,转化后的面积和活门开度的关系为

$$S = 2 \times \frac{36\pi \times 0.75^2}{4.24} X = 30.008X \quad (12)$$

计算结果和方形型孔的 $S=30X$ 几乎完全一致。

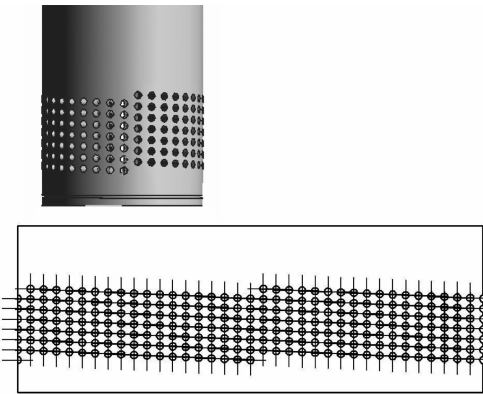


图 7 活门型孔三维图及型孔周向展开图
Fig. 7 Three-dimensional diagram and circumferential expansion diagram of valve hole

为进一步验证转换后全行程范围内面积-活门开度关系的一致性,通过计算机编程计算得到转化后的圆孔排列的面积-活门开度关系和方形型孔的对比,见图 8,两者曲线几乎重合,局部个别位置的最大误差仅为 0.7%,精度完全符合工程设计要求。目前该活门已经随着某型航空发动机控制系统附件完成了工程研制,使用效果良好。

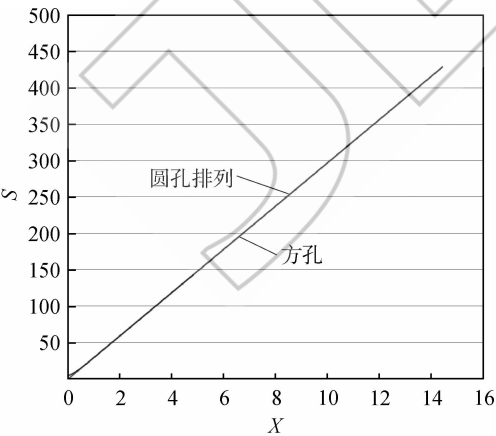


图 8 方形型孔和圆孔排列的面积与开度关系图
Fig. 8 Diagram of area and opening of square hole and circular hole arrangement

5 型孔“化方为圆”的意义

5.1 “化方为圆”对加工方法的影响

由于方孔不能通过简单的车床加工,一般通

过线切割和电火花加工^[12]。方孔改为圆孔后,型孔加工只需依靠普通数控车床,将圆孔分布规律编制成加工程序即可实现精确加工,且加工刀具为普通钻孔刀具,避免了方孔线切割和电火花等专用设备和专用电极,提高了加工效率,节约了加工成本。同时电火花加工的电极在加工过程中会磨损^[13-14],势必会影响加工精度,频繁更换电极也会加大生产成本。

5.2 “化方为圆”对人和环境的影响

由于方孔不能通过简单的车床加工,只能通过电火花和线切割加工。电火花加工需要工作液,工作液的净化,加工过程产生的有毒气体和烟雾污染,处理较为麻烦,对加工人员和环境的危害较大^[15]。线切割放电会产生强烈的电磁波,从而对人体的健康产生伤害,也会影响周围的环境^[16-17],同时线切割加工清洗过程会用到草酸清洗液,也会对环境产生影响。方孔改为圆孔后,型孔加工只需要依靠普通数控车床,避免了对加工人员和环境的危害。

5.3 “化方为圆”对活门液动力的影响

由于“化方为圆”算法将一个大的节流孔转化为了许多排列组合的小圆孔,此时活门凸台只控制一部分小孔的节流面积,对大部分小孔不起节流作用,即液体可以径直流过。由于实际节流孔的流量只是通过活门总流量的一部分,所以活门的液动力大大减小^[18],具体示意如图 9。

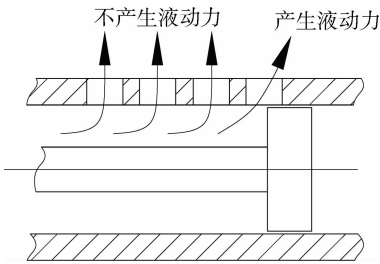


图 9 圆孔排列液动力示意图
Fig. 9 Schematic diagram of hydraulic force of circular hole arrangement

6 结 论

1) “化方为圆”算法精确地将方孔转化为有规律排列的若干小圆孔组合,把因开度变化引起的流量系数变化转化为若干等流量系数的组合,基本实现了工程意义上的等流量系数,具有非常大的工程实际意义。

2) “化方为圆”算法彻底改变了型孔形状,进而彻底改变了加工方法,节约了加工成本,减少了对人和环境的危害,具有较大的环保价值,同时能够大大减小活门液动力,对控制品质提高有较大意义。

3) “化方为圆”算法可以实现将方形、梯形(含三角形)及其组合型孔等任意型孔的转化,具有工程上的普遍适用性。

4) 本文仅研究了方形型孔转化为圆孔的算法,对于任意型孔来说,只要型孔的曲线变化和开度 X 建立关系,进而与圆孔排列的变螺旋曲线建立数学关系,也即可实现任意形状型孔的转化,这也是后续研究的一个方向。

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, SKARBEEK L F, SHAH P H, et al. Using a digital fuel control system and digital engine controller for US Navy LM2500 engines [R]. ASME Paper GT2002-30272, 2002.

[3] 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)

[4] 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)

[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, 49(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, 49(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 aero-

power plant system [J]. Computer Simulation, 2009, 26(1): 107-110. (in Chinese)

[8] 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. (in Chinese)

[9] 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)

[10] 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)

[11] 吴琪华,贺惠珠,张加桢. 航空发动机调节[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986: 39-40.

[12] 代志峰,杨晓冬. 基于旋转电极的方孔电火花加工新方法[J]. 电加工与模具, 2017(4): 52-55.
DAI Zhifeng, YANG Xiaodong. A new EDM method for square hole with rotating electrode [J]. Electromachining and Mould, 2017(4): 52-55. (in Chinese)

[13] 傅宇蕾,朱颖琛,赵万生,等. 微细电火花加工电极磨损几何形状研究及仿真[J]. 电加工与模具, 2016(1): 6-9.
FU Yulei, ZHU Yingmou, ZHAO Wansheng, et al. Geometry simulation and study on electrode tool wear in micro EDM [J]. Electromachining and Mould, 2016(1): 6-9. (in Chinese)

[14] 熊毅,邓晓. 电火花成型电极磨损规律与电极修整技术的研究与应用[J]. 现代制造工程, 2016(10): 94-98.
XIONG Yi, DENG Xiao. Research and application of EDM electrode loss rules and electrode finishing technology [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2016(10): 94-98. (in Chinese)

[15] 李德彦. 电火花加工机床的操作安全技术[J]. 安全, 2011, 32(6): 40-41.
LI Deyan. Operation safety technology of EDM machine tools [J]. Safety, 2011, 32(6): 40-41. (in Chinese)

[16] 刘永红,李小鹏,杜建华,等. 电火花加工脉冲电源电磁兼容技术研究[J]. 电加工与模具, 2006(2): 5-7.
LIU Yonghong, LI Xiaopeng, DU Jianhua, et al. Study on the EMC technology of EDM pulse generator [J]. Electromachining and Mould, 2006(2): 5-7. (in Chinese)

[17] 狄士春,王毅,于滨,等. 电火花加工脉冲电源研究现状与发展趋势[J]. 航空精密制造技术, 2002, 38(4): 15-18.
DI Shichun, WANG Tao, YU Bin, et al. Research status and development trend of EDM pulse generator [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2002, 38(4): 15-18. (in Chinese)

[18] 吴琪华,贺惠珠,张加桢. 航空发动机调节[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986: 267-269.