

燃油主副出口开启特性及流量分配调控参数计算及验证

陈川, 石拓, 杨亚军, 李英杰
(四川航天烽火伺服控制技术有限公司, 成都 611130)

摘要: 针对燃油调节器主副出口组件参数匹配难、串装试验效率低等问题, 以一体化燃油主副出口组件为基础, 系统分析了影响主、副出口开启特性及燃油流量分配的影响因素及影响规律。利用 AMESim 软件构建了精确的仿真模型, 对各影响因素及影响规律进行了定量计算。利用 Isight 建立以调控参数为优化变量, 建立了设计尺寸链及参数强关联性为约束条件的多目标优化数学模型, 得到了影响燃油主副出口开启压力及特定位置燃油流量分配的最优调控参数, 并在样机上对最优调控参数进行了试验验证。结果表明: 试验结果与仿真优化结果相符, 最优调控参数为弹簧刚度 23.41 N/mm、支座下垫片 0.5 mm、支座上垫片 1.0 mm、弹簧垫片 1.0 mm、阀座活门配合间隙 0.0102 mm, 证明了建模仿真及多参数寻优联合优化方法, 能够解决强关联参数问题的可行性和有效性。

关键词: 燃油调节器; 燃油出口; 开启特性; 调控参数; 优化仿真; 航空发动机

中图分类号: V233.9

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2023.06.012

Calculation and Verification of Opening Characteristics and Flow Distribution Regulation Parameters of Main and Auxiliary Fuel Outlets

CHEN Chuan, SHI Tuo, YANG Ya-jun, LI Ying-jie

(Sichuan Aerospace Fenghuo Servo Control Technology Co., Ltd., Chengdu 611130, China)

Abstract: Aiming at the problems of difficult parameter matching of main and auxiliary outlet components of the fuel regulator and low efficiency of installation and test, based on the integrated main and auxiliary fuel outlet components, the influencing factors and laws affecting the opening characteristics and the fuel distribution of the main and auxiliary fuel outlets were systematically analyzed. An accurate simulation model was constructed using AMESim, and the influencing factors and influencing laws were quantitatively calculated. A multi-objective optimization mathematical model was established using Isight with regulation parameters as optimization variables and design dimension chain and strong parameter correlation as constraints. The optimal regulation parameters affecting the opening pressure of main and auxiliary fuel outlets and fuel flow distribution at specific positions were obtained, and the optimal regulation parameters were verified by experiments on the prototype. The results show that the experimental results are consistent with the optimization simulation results. The optimal regulation parameters are the spring stiffness of 23.41N/mm, support lower gasket thickness of 0.5mm, support upper gasket thickness of 1.0 mm, spring gasket thickness of 1.0mm, and plunger fitting clearance of 0.0102mm. The feasibility and effectiveness of the joint-optimization method adopting modeling and simulation and multi-objective optimization in solving problems with strongly correlated parameters is proved.

Key words: fuel regulator; fuel outlet; opening characteristic; regulation parameters; optimization simulation; aeroengine

0 引言

燃油调节器是航空发动机燃油流量控制系统的核心执行机构^[1], 根据发动机控制指令, 调整脉宽调制快速电磁阀占空比, 改变计量活门控制腔油液压力

使其动作引起通流面积变化, 从而控制和调节发动机燃烧室的喷油量。相较传统单一燃油主出口结构, 通过一体式燃油主、副出口的结构设计及流量分配, 有利于减小燃油出口压力脉动, 提高发动机的燃烧稳定性避免富油现象, 还能满足发动机燃烧室对导弹在慢

收稿日期: 2022-06-16 基金项目: 国家级基金项目资助

作者简介: 陈川(1989), 男, 工程师。

引用格式: 陈川, 石拓, 杨亚军, 等. 燃油主副出口开启特性及流量分配调控参数计算及验证[J]. 航空发动机, 2023, 49(6): 74-78. CHEN Chuan, SHI Tuo, YANG Yajun, et al. Calculation and verification of opening characteristics and flow distribution regulation parameters of main and auxiliary fuel outlets [J]. Aeroengine, 2023, 49(6): 74-78.

车、巡航和加速过载阶段不同的燃油流量需求,是武器装备实现战术动作并提高命中率的重要保障。该结构需要同时保证主、副出口的开启特性及在开启过程中特定位置的燃油流量分配。但由于零件加工累积误差、各参数关联性强等因素导致4个参数难以同时满足。通常采用的以串装试验验证后动态调节需反复拆装,导致效率低、验证周期较长、产品性能一致性难以保证。而数字化仿真技术的应用为实现工程应用低成本、产品研制短周期,以及为产品参数优化、故障分析与排查提供了重要的技术手段^[2-4]。

国内外学者针对燃油主副出口的开启特性及流量的精确分配开展了广泛的研究。吴吉麟等^[5]针对传统机械式燃油分配方案的不足,提出了1个燃油泵加多路燃油调节器的燃油分配方案;李鑫等^[6]针对航空发动机双环腔燃烧室改进提出了一种基于等流量阀阀芯的燃油分配器;彭凯^[7]、郭令仪^[8]等以现有燃油分配器为基础,分别开展了参数仿真及参数优化。但上述研究基本都集中在分级燃烧分配方案的改型设计、参数仿真及优化方面。对解决现有及类似结构中强关联多参数的匹配及寻优问题的指导性不强。

为此,本文提出一种解决燃油主副出口强关联多参数匹配问题的新方法,即:通过AMESim^[9]模型仿真,得到影响主、副出口开启特性及特定位置燃油流量分配的调控参数。利用Isight^[10-11]建立多目标优化数学模型,采用NSGA-II遗传算法^[12]求解得到最优调控参数,并通过试验验证最优调控参数及该方法的有效性。

1 燃油主、副出口及流量分配原理

燃油调节器主、副出口结构(如图1所示)由支座、支座调整垫片、衬圈、弹簧、弹簧调整垫片、活门、阀座等零件组成,其主、副出口分别通向等值喷嘴(模拟发动机喷油机构)。初始安装状态时,活门下端硫化胶面与支座上端面接触,副出口阀座及活门形成一定的负重叠量,主、副出口均关闭。当

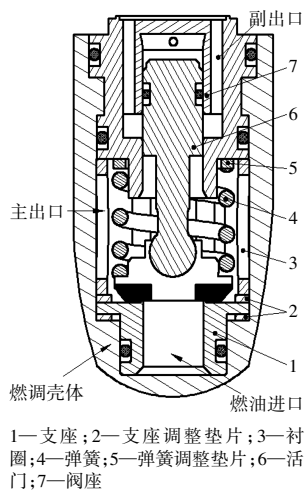


图1 燃油调节器主、副出口结构

燃油进口压力升高,推动活门向上移动,燃油主出口打开,燃油经衬圈环槽通过单向阀流向发动机燃烧室。此时,阀座与活门的负重叠量将减小,副出口流量来自二者因配合间隙引起的泄漏。当燃油进口压力继续升高,主出口开度继续增大,阀座与活门的负重叠量减小至零,此时副出口临界开启,副出口的泄漏量将达到最大。当活门在进口压力油作用下继续上移时,副出口完全开启,从而通过主、副出口实现燃油流量分配。

根据燃油主、副出口开启特性及燃油流量分配原理^[13],主出口开启、副出口未开启时结构如图2所示。图中: p_1, q_1 为组件进口压力及流量; p_2, q_2 为主出口压力及流量; p_3, q_3 为副出口压力及流量; δ_1 为支座垫片厚度; δ_2 为弹簧垫片厚度; d_1 为支座通孔内径; d_2 为活门外径; h 为活门与支座的开度; L 为阀座与活门的负重叠量。

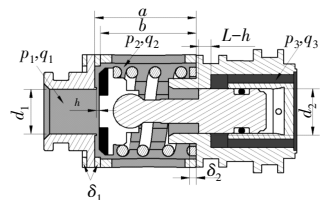


图2 主出口开启、副出口未开启时结构

从图中可见,在燃油主出口开启($h>0$)、副出口未开启(即 $h\leq L$)的过程中,燃油主出口是向发动机主燃烧室供油的主要通道。忽略库仑摩擦力、液流的瞬态液动力及液体黏性变化等因素,在主出口打开时,活门在弹簧力、进口燃油压力作用下建立的力平衡关系为

$$\Delta p_z \cdot \frac{\pi}{4} d_1^2 = kx \quad (1)$$

式中: k 为弹簧刚度; x 为弹簧压缩量; Δp_z 为燃油主出口前后差压, $\Delta p_z = p_1 - p_2$ 。

此时,根据圆环平面缝隙液流,可计算出主出口的流量^[14]为

$$q_z = \frac{\pi \cdot h^3}{6\mu \ln \frac{r_2}{r_1}} \Delta p_z \quad (2)$$

式中: μ 为3号航空煤油动力黏度; r_1 为支座孔口半径; r_2 为活门密封端面半径。

当 $h < L$ 时,副出口未开启,副出口流量可按偏心环形缝隙流量公式计算,该过程任一位置在液压力与弹簧力平衡作用下,可认为阀座与活门之间无相对轴向运动,且未设计使用均压槽,活门与阀座将在液压力的作用下呈最大偏心状态,则主出口开度为 h 时,

副出口流量

$$q_f = 2.5 \times \frac{\pi d_2^3 \tau^3}{12\mu(L-h)} \Delta p_f \quad (3)$$

式中： Δp_f 为燃油副出口未开启时，阀座与活门阀口前后压差， $\Delta p_f = p_2 - p_3$ ； τ 为阀座/活门同心时径向间隙的一半。

当 $h=L$ 时，副出口处于临界开启状态，副出口开启后($h>L$)，阀座与活门之间形成正重叠，因主出口通流面积有限，副出口将成为向发动机供油的主要通道。

通过上述分析可知，弹簧预紧力、弹簧刚度、阀座与活门的配合间隙、初始负重叠量将影响主、副出口的开启特性及燃油流量分配。

2 AMESim 仿真建模及分析

2.1 建立 AMESim 仿真建模

根据燃油调节器主、副出口结构及工作原理，利用 AMESim 软件标准液压库及液压元件设计库，建立燃油主、副出口仿真计算模型如图3所示。该模型考虑了主出口单向阀、阀座活门工作节流边倒角和主、副出口等值喷嘴等因素。通过定义主、副出口调控参数并根据仿真计算结果对调控参数进行动态调整，就可以得到满足设计要求的计算结果，从而指导液压产品或零组件的设计优化。

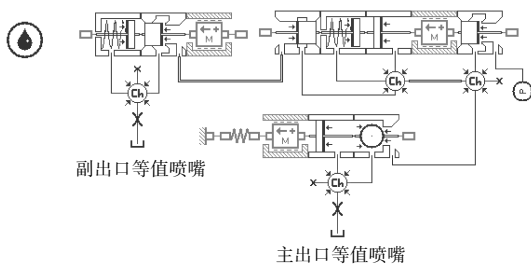
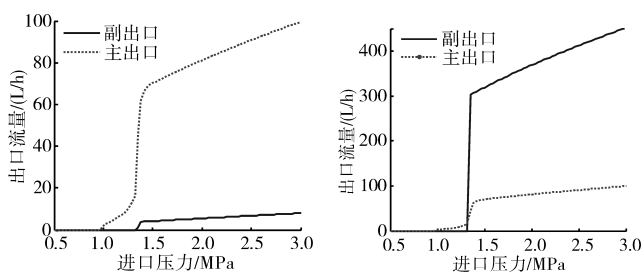


图3 主、副出口仿真计算模型

2.2 仿真结果与分析

副出口未开启和开启时，主、副出口燃油压力-流量特性及流量分配如图4所示。



(a) 副出口未开启时

(b) 副出口开启时

图4 主、副出口燃油压力-流量特性及流量分配

从图4(a)中可见，主出口开启，副出口未开启时，主出口先于副出口开启，燃油主出口流量远高于副出口流量。此时，主出口开启压力为0.96 MPa，满足0.85~1.2 MPa的开启压力条件。副出口开启压力为1.32 MPa，满足1.2~1.55 MPa的开启压力条件。此外，主出口流量为62~68 L/h时，副出口最大泄漏量为3.96 L/h，满足不超过4 L/h的设计要求；主出口流量为83~87 L/h时，副出口最大泄漏量为6.26 L/h，满足不超过15 L/h的设计要求。

从图4(b)中可见，主、副出口均开启时，燃油副出口流量远高于主出口流量，燃油副出口成为向发动机燃烧室供油的主要通道。此时，主出口最大流量稳定在100 L/h，副出口最大流量为420.9 L/h，这是由于燃油主出口通流面积有限，燃油副出口开启后，副出口流量受阀座活门节流边开度影响。由此，证明了该模型的准确性，也为后续燃油调节器系统建模提供了经过验证的仿真子模型。

为进一步明确各因素的影响规律，通过设定不同数值进行仿真计算。不同弹簧预紧力下主、副出口开启压力如图5所示，不同初始负重叠量下副出口流量如图6所示，不同配合间隙下副出口流量-压差曲线如图7所示。

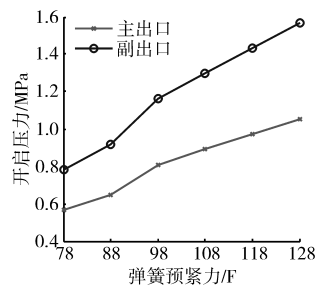


图5 不同弹簧预紧力下主、副出口开启压力

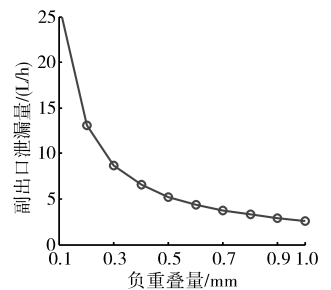


图6 不同初始负重叠量下副出口流量

从图5中可见，弹簧预紧力同时影响主、副出口的开启压力，开启压力将随着弹簧预紧力的增大呈线性升高，主、副出口开启压力之间的差值随弹簧预紧力的增大呈线性增大。

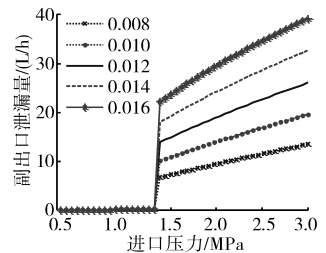


图7 不同配合间隙下副出口流量-压差曲线

从图6中可见，在其余参数不变的情况下，副出口泄漏量随着负重叠量的增加而减小。该计算结果与理论

计算相符,为满足副出口泄漏量为 0~15 L/h, 阀座/活门的负重叠量应不小于 0.174 mm; 为满足副出口泄漏量为 0~4 L/h, 阀座/活门的负重叠量应不小于 0.652 mm。

从图 7 中可见,副出口未开启时,随着阀座活门配合间隙的增大,副出口开启压力保持恒定,其泄漏量明显增大。

3 燃油流量分配的多目标优化仿真及结果分析

3.1 多目标寻优仿真模型的建立

由上述可知,弹簧预紧力由弹簧刚度和弹簧预压缩量决定,弹簧调整垫片及支座上、下调整垫片的分布又决定预压缩量和初始负重叠量。所以,弹簧刚度 k 、支座下调整垫片厚度 δ_{11} 、支座上调整垫片厚度 δ_{12} 、弹簧调整垫片厚度 δ_2 、阀座与活门的配合间隙 τ 是燃油调节器主、副出口开启特性及燃油流量分配的 5 个主要调控参数。

调整垫片的分布如图 8 所示。由尺寸链关系可知满足如下关系

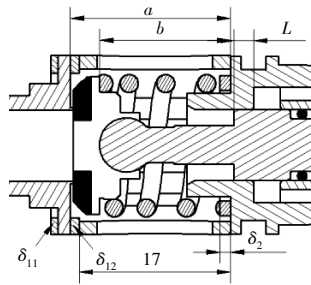


图 8 调整垫片的分布

$$\delta_{12}=a-17 \quad (4)$$

式中: a 为衬圈长度与支座调整垫片厚度之和。

弹簧调整垫片厚度 δ_2 为

$$\delta_2=b-(l-x_0) \quad (5)$$

式中: l 为弹簧自由高度; x_0 为弹簧预压缩量; b 为弹簧压缩后与弹簧调整垫片的总长度。

在满足主、副出口开启压力,且 2 个主出口流量调定的情况下,副出口泄漏量越小越好,以此建立目标函数。以影响主、副出口开启特性及流量分配的 5 个调控参数为设计变量,以设计尺寸链及参数强关联性建立对应的约束条件,建立多目标寻优数学模型。

设计变量为 $X=[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T=[k, \delta_{11}, \delta_{12}, \delta_2, \tau]^T$

目标函数:主出口流量调定为 65、85 L/h 时,副出口泄漏量最小,所以有

$$\min f_1(x) = \frac{2.5 \times \pi d_2 x_5^3 \times p_1}{12\mu(x_4 + 3.4 - \frac{\pi d_1^2 p_1}{4x_1} - \sqrt{\frac{6q_1 \mu}{\pi p_1} \ln \frac{r_2}{r_1}})}$$

$$\min f_2(x) = \frac{2.5 \times \pi d_2 x_5^3 \times p_2}{12\mu(x_4 + 3.4 - \frac{\pi d_1^2 p_1}{4x_1} - \sqrt{\frac{6q_1 \mu}{\pi p_2} \ln \frac{r_2}{r_1}})}$$

约束条件

$$g_1=x_4-x_3-\pi d_1^2 p_1/(4 \cdot x_1)+2.1, g_2=x_2+x_3-1.5, g_3=19.5-x_1, g_4=x_1-26.5, g_5=0.005-x_5, g_6=x_5-0.007, g_6=x_5-0.007, g_7: x_2 \in \{0.1; 0.2; 0.5; 0.7; 1.0\}, g_8: x_3 \in \{0.1; 0.2; 0.5; 0.7; 1.0\}, g_9: x_4 \in \{0.1; 0.2; 0.5; 1.2\}$$

3.2 仿真计算及试验结果分析

Isight 软件是一款集成了 NCGA、NSGA-II、AM-GA 共 3 种遗传算法的多学科优化平台。相较于传统的多目标优化算法,Isight 可一次性求解得到的所有的全局最优解,其 Task Plan 组件集成全局优化算法和梯度优化算法进行优化设计。本文采用 Isight 自带的多目标遗传算法 NSGA-II,实现优化结果最终收敛并得到全局最优解。NSGA-II 算法是在 NSGA 算法的基础上进一步改善而来,因其在非支配遗传排序中接近 Pareto 前沿的所有个体被选中,故 Pareto 前进能力更强,具备更好的探索性能,计算收敛能力也更佳^[15]。Isight 集成优化界面及 NSGA-II 参数设置如图 9 所示。该界面主要由 Optimization 组件和 Calculator 组件组成,图中遗传算法参数设置为种群数量 500、种群代数 12、交叉概率 0.95、变异概率 0.05。通过计算得到满足多目标寻优目标函数的最优调控参数,见表 1。

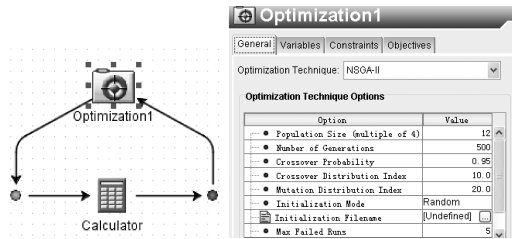


图 9 Isight 集成优化界面及 NSGA-II 参数设置

表 1 仿真计算最优调控参数

参数	弹簧刚度/ (N/mm)	支座下垫片/ mm	支座上垫片/ mm	弹簧垫片/ mm	配合间隙/ mm
数值	23.41	0.5	1.0	1.0	0.0102

依据仿真计算结果,选定弹簧初始长度(15.8±0.1) mm, 刚度(23±0.5) N/mm, 支座调整垫片下 0.5 mm, 支座调整垫片上 1.0 mm, 弹簧调整垫片 1.0 mm, 阀座/活门配合间隙 0.01 mm, 在燃油调节器试验台上开展主、副出口开启特性及流量分配样机测试,最优仿真计算结果及试验结果见表 2。

从表 2 中可见,主出口开启压力、副出口开启压力仿真与试验结果基本相同,在主出口流量 65、85 L/h 2

表2 最优计算结果及试验结果

	主出口开启压力/ MPa	副出口开启压力/ MPa	主出口流量/ (L/h)	副出口流量/ (L/h)
仿真结果	0.92	1.41	65 85	1.54 5.32
试验结果	1.06	1.40	65 85	1.98 6.13

个位置处,副出口流量仿真结果相较试验结果均偏小,这是由于虑阀座/活门在实际加工过程存在形状误差。所以,试验结果与仿真结果基本相符,证明了该组最优调控参数的有效性,也验证了通过建模仿真及参数寻优解决参数强关联性问题的可行性和有效性。

4 结论

(1)支座上调整垫片厚度、支座下调整垫片厚度、弹簧调整垫片厚度、弹簧刚度值、阀座活门配合间隙是影响燃油调节器主、副出口开启特性及燃油流量分配的主要调控参数。

(2)建立了燃油调节器主、副出口 AMESim 仿真模型,得到了各因素对开启特性及燃油流量分配的影响规律,仿真结果与实际相符,证明建立的仿真模型是准确的。

(3)运用 Isight 软件开展多目标寻优仿真计算,得到了最优调控参数,并以此数据开展样机测试,试验结果与仿真结果相符,从而为产品工程应用中解决强关联参数问题提供了一种有效的技术手段。

参考文献:

- [1] 王珂. 航空发动机燃油调节器建模与故障诊断[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2018.
WANG Ke. Modeling and fault diagnosis of aero-engine fuel regulator [D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [2] 王惠刚. 计算机仿真原理及应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2000: 1-18.
WANG Huigang. Principle and application of computer simulation[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2000: 1-18. (in Chinese)
- [3] 王宇, 朱煜忻, 杨军杰. 航空发动机机械液压装置产品数字化设计技术发展综述[J]. 航空制造技术, 2015(22): 102-105.
WANG Yu, ZHU Yuxin, YANG Junjie. Development review on digital design technology of aeroengine mechanical[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(22): 102-105. (in Chinese)
- [4] 沈峰, 黄金泉. 面向对象的航空发动机控制系统仿真[J]. 航空发动机, 2007, 33(1): 45-48.
SHEN Feng, HUANG Jinquan. Object-oriented simulation of aeroengine control system[J]. Aeroengine, 2007, 33(1): 45-48. (in Chinese)
- [5] 吴吉麟, 陈斐, 朱佳慧, 等. 1种新型燃油分配方案设计[J]. 航空发动机, 2020, 46(3): 54-58.
WU Jilin, CHEN Fei, ZHU Jiahui, et al. Design of a new fuel distribution scheme[J]. Aeroengine, 2020, 46(3): 54-58. (in Chinese)
- [6] 李鑫, 张荣, 叶志锋. 用于分级燃烧的高性能燃油分配器的改进设计与仿真[J]. 航空发动机, 2016, 42(5): 38-42.
LI Xin, ZHANG Rong, YE Zhifeng. Improved design and simulation of high performance fuel distributor for staged combustion[J]. Aeroengine, 2016, 42(5): 38-42. (in Chinese)
- [7] 彭凯, 樊丁, 卜振鹏, 等. 航空发动机燃油分布器故障分析与参数优化[J]. 推进技术, 2011, 32(2): 276-281.
PENG Kai, FAN Ding, BU Zhenpeng, et al. Failure analysis and parameter optimization for fuel distributor for aeroengine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(2): 276-281. (in Chinese)
- [8] 郭令仪, 时瑞军. 基于 AMESim 的燃油分配器数字仿真研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2020, 33(4): 41-45.
GUO Lingyi, SHI Ruijun. Study on digital simulation of fuel distributor based on AMESim[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2020, 33(4): 41-45. (in Chinese)
- [9] 付永领, 齐海涛. AMESim 系统建模和仿真实例教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 109-152.
FU Yongling, QI Haitao. AMESim system modeling and simulation example course[M]. Beijing: Beihang University Press, 2011: 109-152. (in Chinese)
- [10] Roichhausen K D, Ziegler K U. Supersonic and transonic compressors: past, status and technology trends[R]. ASME 2005-GT-69067.
- [11] 赖宇阳. Isight 参数化理论与实例详解[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 187-195.
LAI Yuyang. Detailed explanation of Isight parameter optimization theory and examples[M]. Beijing: Beihang University Press, 2012: 187-195. (in Chinese)
- [12] 赵瑞. 多目标遗传算法应用的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
ZHAO Rui. Analysis about the application of the multiobjective genetic algorithm[D]. Tianjin: Tianjing University, 2006. (in Chinese)
- [13] 陆文华, 陈振坤. 航空发动机附件系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 167-203.
LU Wenhua, CHEN Zhenkun. Aero engine accessory system[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2017: 167-203. (in Chinese)
- [14] 王积伟, 章宏甲, 黄谊. 液压与气压传动[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2005: 52-56.
WANG Jiwei, ZHANG Hongjia, HUANG Yi. Hydraulic and pneumatic pressure transmission[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2005: 52-56. (in Chinese)
- [15] 李世康, 李强, 谭庆, 等. 基于 Isight 的某转管武器弹簧缓冲器优化设计[J]. 兵工自动化, 2018, 37(5): 49-59.
LI Shikang, LI Qiang, TAN Qing, et al. Optimization design of certain type gatling gun weapon buffer spring device based on Isight[J]. Ordnance Industry Automation, 2018, 37(5): 49-59. (in Chinese)

(编辑: 兰海青)