

航空燃油柱塞泵滑靴油膜的多目标优化设计

徐佩佩, 叶志锋, 王 彬

(南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 以锥形转子球面斜盘轴向燃油柱塞泵为研究对象, 在分析滑靴油膜设计中的摩擦功率损失、泄漏功率损失、容积效率随滑靴的机械结构参数变化的基础上, 基于遗传算法对上述多变量、多目标优化问题进行计算。权重系数法优化结果表明: 优化后燃油柱塞泵设计点的摩擦功率损失和泄漏功率损失减少了 7% 左右, 容积效率略微提升, 并且优化得到的机械结构参数在不同转子转角和柱塞倾角的情况下也显示出性能上的优势, 从而证明了多目标遗传算法对设计航空燃油柱塞泵油膜静压润滑是一种有效的方法。

关 键 词: 燃油柱塞泵; 滑靴; 油膜; 遗传算法; 多目标优化

中图分类号: V233.2

文献标志码: A

Multi-objective optimization design of slipper film in aero-engine fuel piston pump

XU Pei-pei, YE Zhi-feng, WANG Bin

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Spherical swash plate axial piston pump with conical cylinder was taken as research object, the friction power loss, leakage power loss and volumetric efficiency with the change of slipper mechanical structure parameters in slipper film design was analyzed, then the genetic algorithm was used for the multi-variable multi-objective optimization problem. Weighting coefficient optimization results show that after optimization the friction power loss and leakage power loss of the fuel piston pump in design point reduce by about 7%, the volumetric efficiency improves slightly. And the optimized parameters of mechanical structure also show a performance advantage in the cases of different rotor tilt angles and plungers. Thus this proves the multi-objective genetic algorithm is an effective method for the design of hydrostatic pressure lubrication film in aero-engine fuel piston pump.

Key words: fuel piston pump; slipper; film; genetic algorithms;
multi-objective optimization

航空发动机燃油控制系统中, 燃油柱塞泵(下文简称柱塞泵)因其输出压力高, 便于对燃油量进行控制和结构紧凑等特点而获得广泛的应用。目前我国柱塞泵的平均无故障工作时间、寿命周期和效率等性能指标与国外同类产品相比存在较大的差距, 除材料等因素外, 设计技术落后是重要原因。

其中柱塞与斜盘摩擦副的设计是柱塞泵的关键技术之一。现在的柱塞泵普遍使用带有滑靴的柱塞, 这类柱塞依靠滑靴中间的油池, 在滑靴和斜盘之间形成一定厚度的油膜和静压润滑, 避免斜盘与滑靴的直接接触摩擦。静压润滑^[1-3]下, 滑靴与斜盘之间的摩擦副的设计主要是油膜厚度设

收稿日期: 2013-05-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费青年科技创新基金(NS2012140)

作者简介: 徐佩佩(1990—), 女, 江苏南通人, 硕士生, 研究方向为航空发动机控制元件及系统的设计、仿真。

计,理论上设计适当的油膜厚度,就可保证斜盘与滑靴之间为纯液体摩擦.油膜厚度不够会导致滑靴与斜盘润滑不充分,机械效率下降,且磨损过快,缩短柱塞泵的使用寿命;油膜厚度设计过大则造成很大的泄漏损失.文献[4-5]给出了在吸、排油一个周期内滑靴油膜厚度的动态变化规律,以及合理的油膜厚度计算公式,并可借此油膜厚度公式推算出摩擦功率损失、泄漏功率损失和容积效率的计算公式^[1].因为滑靴的尺寸参数不仅对滑靴油膜及静压润滑都有一定的影响^[4],而且对上述多个性能指标亦产生影响,所以滑靴油膜厚度设计是一个多变量、多目标优化问题.这些优化目标之间是一种相互矛盾和竞争的关系且计算公式非线性,采用一般的方法很难得到满意解.在众多优化算法中,遗传算法对此具有显著的优越性.遗传算法借鉴生物界自然选择和遗传机制的随机化搜索算法,搜索不依赖于梯度信息,尤其适用于处理传统搜索方法难以解决的复杂和非线性问题^[6-7].

1 静压润滑下理想油膜厚度

柱塞泵的滑靴静压润滑设计通常采用图1所示结构^[1],柱塞内腔压力油通过进油腔直径 d_0 的节流小孔流入滑靴中心的油池,油压由输入油压 p_m 降为油池油压 p_0 ,油池中的油再沿滑靴和斜盘间的环形端面缝隙流入转子腔,图中 p_r 为转子腔油压, d_1 为油池直径, d_2 为斜盘直径.

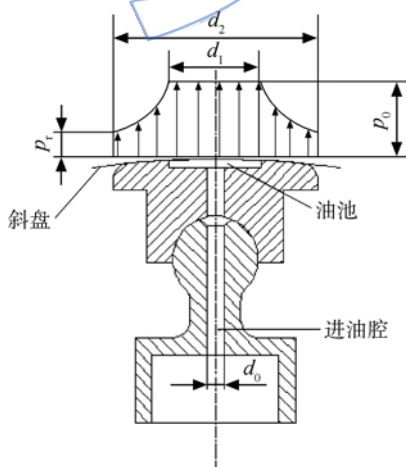


图1 滑靴静压润滑结构与压力分布

Fig. 1 Structure of slipper hydrostatic pressure lubrication and pressure distribution

对滑靴油膜进行静压润滑分析得油膜厚度的计算公式^[4]

$$S = \left[\frac{3d_0^2 q \mu_0 \ln(d_2/d_1)}{2(p_0 - p_r)} \right]^{\frac{1}{3}} \left(\frac{2p}{\rho} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (1)$$

其中

$$p = \begin{cases} p_m - p_0 & \alpha = 0^\circ \sim 180^\circ \\ p_{out} - p_0 & \alpha = 180^\circ \sim 360^\circ \end{cases}$$

式中 α 为转子转角, q 为流量系数, μ_0 为油液黏度, ρ 为油液密度, p_m 为进油腔压力, p_{out} 为排油腔压力.

一般确定好进油腔和排油腔压力后,求解油膜厚度就需要解出 p_r 和 p_0 .

对柱塞受力分析^[3]可得

$$p_r = p_m + \frac{\rho}{2} (R_2^2 - R_1^2) \omega^2 \quad (2)$$

其中 R_1, R_2 为转子甩油孔两端径向半径; ω 为转子转速.

对滑靴结构与压力场分析,可得滑靴分离力为^[3]

$$F_{hd} = \frac{\pi}{4} d_2^2 p_r + \frac{\pi}{2} (p_0 - p_r) \frac{d_2^2 - d_1^2}{4 \ln(d_2/d_1)} \quad (3)$$

对式(3)变换,可得到 p_0 的计算公式

$$p_0 = \left(F_{hd} - \frac{\pi}{4} d_2^2 p_r \right) \frac{8 \ln(d_2/d_1)}{\pi (d_2^2 - d_1^2)} + p_r \quad (4)$$

当滑靴在一定油膜厚度下稳定工作时,分离力 F_{hd} 与滑靴压紧力 F_a 平衡,即 $F_a = F_{hd}$.

柱塞对滑靴的压紧力^[3]为

$$F_a = (F_{l1} + F_{s1} + F_i + F_{cz}) \frac{1}{\cos \psi} + F_{l2} + F_{s2i} \quad (5)$$

其中 F_{l1} 是柱塞内的油压力; F_{s1} 是柱塞弹簧力; F_i 是相对运动惯性力(下标 i 表示柱塞轴线方向,下同); F_{cz} 是离心力; ψ 是柱塞轴线与滑靴轴线的夹角; F_{l2} 是转子腔内的油压力; F_{s2i} 是每个柱塞所受的返回盘弹簧力.

对柱塞泵用坐标法^[8-10]进行运动学参数分析,可得到球头的位移 s_i 、柱塞移动的速度 v 及加速度 a 关于转子转角 α 和斜盘倾角 φ 的复杂计算关系.

从而式(5)中只油膜厚度不仅与 d_0, d_1, d_2 这3个变量有关,还与 α, φ 和 ω 有关,即油膜厚度的计算公式可表示为 $S = f(d_0, d_1, d_2, \alpha, \varphi, \omega)$.

2 目标函数

2.1 摩擦功率损失

柱塞泵工作时,存在于滑靴与斜盘之间的油膜按一定速度流动,因此滑靴与斜盘之间为黏性

摩擦,存在摩擦功率损失.

滑靴与斜盘间的黏性摩擦力为^[3]

$$F_f = \mu_0 \frac{\pi}{4S} \omega R (d_2^2 - d_1^2) \quad (6)$$

式中 R 为滑靴工作面中心到转子轴的距离.

则摩擦功率损失为

$$\Delta P_f = F_f R \omega = \mu_0 \frac{\pi}{4S} \omega^2 R^2 (d_2^2 - d_1^2) \quad (7)$$

2.2 泄漏功率损失

滑靴与斜盘间的油膜需要维持一定的厚度,即要有从柱塞中心高压腔引油经油膜向转子低压腔的持续流量,对柱塞泵而言存在泄漏功率损失.

泄漏功率损失^[1]

$$\Delta P_q = (p_{in} - p_r) \cdot \frac{\pi S^3 (p_0 - p_r)}{6 \mu_0 \ln(d_2/d_1)} \quad (8)$$

2.3 容积效率

容积效率与油的泄漏流量直接相关,容积效率为^[1]

$$\eta = \frac{Q_t - Q}{Q_t} = 1 - \frac{2S^3 (p_0 - p_r)}{3 \mu_0 \ln(d_2/d_1) d_z s_{max}} \quad (9)$$

式中 Q_t 是理论流量, Q 是泄漏流量, d_z 为柱塞直径, s_{max} 是柱塞最大行程. 对式(7)~式(9)分析滑靴结构参数的影响, 可发现 α, φ, ω 是相对独立的变量且对滑靴结构参数的设定不构成影响. 因此当 α, φ, ω 一定时, 这 3 个目标函数值随滑靴参数 d_0, d_1, d_2 的变化关系是相互矛盾和竞争的, 它们寻优方向不同, 并且计算公式是非线性的, 一般的优化方法不适用. 目前来讲, 这个问题是设计滑靴油膜的关键性问题, 因此本文运用适用于非线性问题的遗传算法对此问题进行多目标优化.

3 遗传算法的多目标实现

以某型柱塞泵为模型, 确定好相关参数的初猜值, 如流体密度、动力黏度、柱塞泵内腔油压等, 再选取特定的设计点做优化. 在本文中, 在一定转速 ω_d 下, 选取一个特定的转子转角 α_d 和斜盘倾角 φ_d 作为设计点, 则此模型的目标函数可简化为 $\eta = f_1(d_0, d_1, d_2)$, $\Delta P_f = f_2(d_0, d_1, d_2)$, $\Delta P_q = f_3(d_0, d_1, d_2)$. 优化的目的是使得摩擦功率损失、泄漏功率损失最小的同时容积效率尽可能大, 并求得对应的理想油膜厚度. 采用 MATLAB 遗传算法工具箱^[11-12]进行优化时, 采用最大值作为评价函数, 所以将这 3 个目标函数按式(10)线性变换以得到对应的适应度函数^[13-15].

$$\begin{cases} F_1 = \eta = f_1 / [\max(f_1)] \\ F_2 = 1 - \Delta P_f = 1 - f_2 / [\max(f_2)] \\ F_3 = 1 - \Delta P_q = 1 - f_3 / [\max(f_3)] \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\max(f_i), i=1, 2, 3$ 是目标函数最大值, 事先并不可知, 因此它的值是保守估计得出的值, 与实际有些许误差但不影响分析.

根据文献[1]中传统的设计方法, 可将某模型滑靴结构参数的初猜值 $[0.8, 10, 20.5]$ mm. 结合柱塞泵模型其他结构尺寸和一般滑靴结构要求, d_0 一般在 $0.6 \sim 1.2$ mm 之间, $d_0 < d_1 < d_2$, $d_2 \approx 2d_1$, 综上, 本文中的约束条件如下:

$$\begin{cases} 0.2 \text{ mm} \leq d_0 \leq 1.2 \text{ mm} \\ 6 \text{ mm} \leq d_1 \leq 12 \text{ mm} \\ 15 \text{ mm} \leq d_2 \leq 25 \text{ mm} \end{cases} \quad (11)$$

本文采用权重系数变换法^[13-14]多目标遗传算法^[15-18]进行优化, 权重系数变换法是将 3 个适应度函数加权相加用单目标优化的方法进行优化. 即优化目标函数为

$$U = \sum_{i=1}^3 w_i F_i \quad (12)$$

式中 w_i 是加权系数, 根据偏好信息来确定, 在优化过程中也可以按照优化结果进行微调. 在本文的算例中, 设定进油腔压力 $p_{in} = 0.3$ MPa, 转子转速为 4122 r/min 和斜盘倾角 $\varphi = 7^\circ$, 可求得不同转子转角下的各个适应度函数值, 对结果分析确定权重系数的范围. 本文中 w_1 取得比 w_2 大 3 个数量级才能使优化有价值, 本文采用两组不同的权重系数 W_1, W_2 进行优化.

4 优化结果与分析

在本文中, 以 $\alpha = 90^\circ, \varphi = 7^\circ, \omega = 4122$ r/min 为设计点重点研究优化前后性能参数的变化.

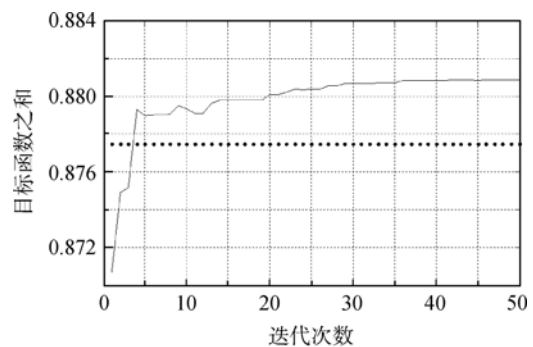
4.1 权重系数 W_1 的优化结果

权重系数 $W_1 = [0.5, 0.2, 0.0001]$ 优化后, 油膜厚度为 1.0951×10^{-5} m, 在油膜厚度设计的数量级范围之内, 目标函数值变化具体见表 1 和图 2.

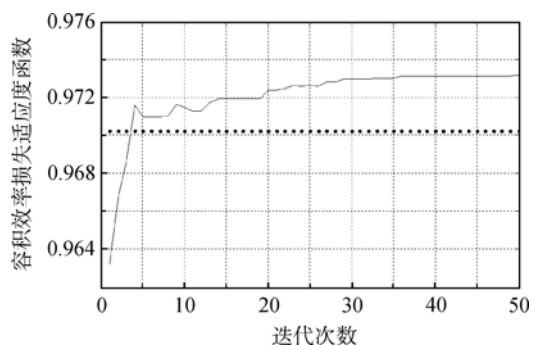
表 1 权重系数 W_1 的优化结果

Table 1 Optimized results of weight coefficient W_1

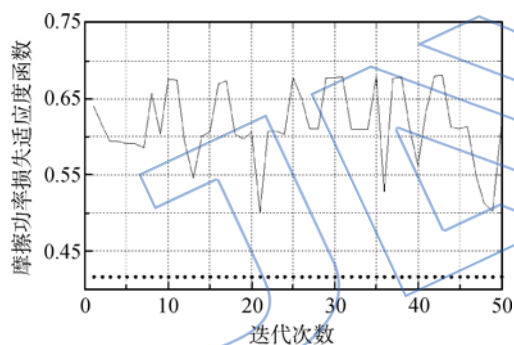
尺寸参数	$\eta/\%$	$\Delta P_f/W$	$\Delta P_q/10^{-5} W$
优化前	97.02	36.5183	6.429
优化后	97.32	33.8757	5.782



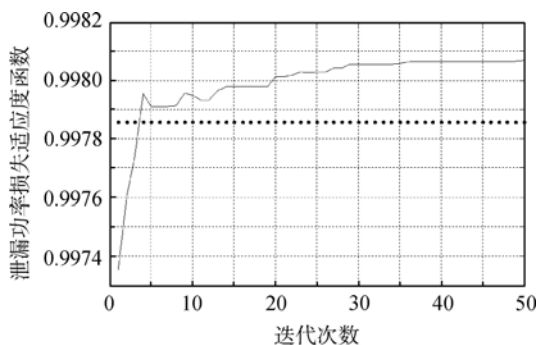
(a) 总目标优化函数值



(b) 容积效率损失适应度函数值



(c) 摩擦功率损失适应度函数值



(d) 泄漏功率损失适应度函数值

图2 权重系数 W_1 优化效果图Fig. 2 Optimized results with the method of weight coefficient W_1

图2分别显示了目标函数值之和及各子目标函数的适应度函数随迭代次数的变化曲线,实线表示优化参数,虚线表示原始参数(固定值)。表

1 则将优化前后目标函数在数值上的变化。

图3是优化过程中,最优子代的滑靴结构参数随迭代次数的变化情况。

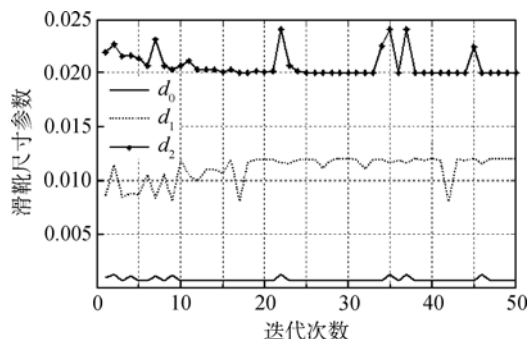


图3 滑靴尺寸参数随迭代次数的变化

Fig. 3 Slipper parameters vary with iterations

由图3可知,遗传算法多目标优化的结果令人满意,总目标函数及各子目标函数优化后的性能参数相比于原始参数都有明显提高。仔细分析数据,可以发现摩擦功率损失具有明显下降,而容积效率损失和泄漏功率损失则有小幅度下降。分析发现这是跟子目标函数的权重系数密切相关的,下面用另一组权重系数来对比两个优化结果。

4.2 权重系数 W_2 的优化结果

权重系数 $W_2 = [1, 0.1, 0.0001]$ 时的优化结果见表2。

表2 权重系数 W_2 的优化结果Table 2 Optimized results of weight coefficient W_2

尺寸参数	$\eta/\%$	$\Delta P_f/W$	$\Delta P_q/10^{-5} W$
优化前	97.02	36.5183	6.429
优化后	98.00	37.5155	4.320

从表2可以看出,增加容积效率的权重后,优化得到的容积效率显著上升,但同样带来摩擦功率损失增加到37.5155 W的代价,比原始参数还要来得大,这是增加了容积效率权重减少摩擦功率损失权重的缘故。因此在实际应用中,可依照不同的优化侧重点来分配权重从而达到满意的优化效果。

4.3 优化后全工况性能参数变化情况

为了更好地研究上述优化结果的理论和工程意义,用特征点在权重系数 W_1 下的优化尺寸(0.6, 12, 20) mm 来进行全工况性能比较,即 $\alpha = 0^\circ \sim 360^\circ$ 时的性能参数与优化前参数进行比较。结果见图4~图6。在下面3个图中,粗虚线表示优化

尺寸对应的性能参数,细实线表示原始尺寸对应的性能参数。

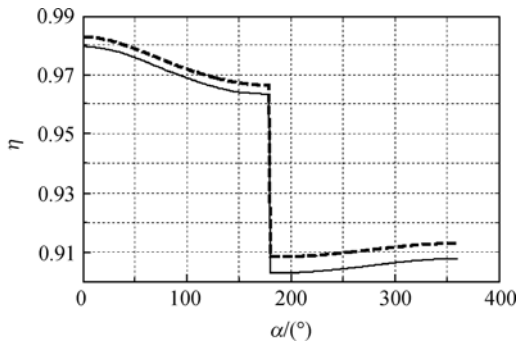


图4 容积效率随转子转角的变化情况
Fig. 4 Volumetric efficiency vary with α

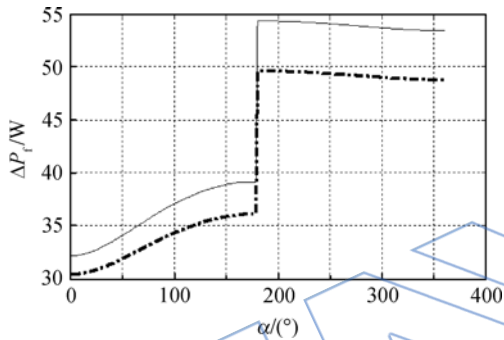


图5 摩擦功率损失随转子转角的变化情况
Fig. 5 Friction power losses vary with α

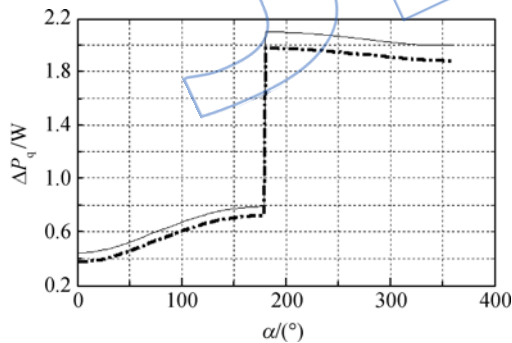


图6 泄漏功率损失随转子转角的变化情况
Fig. 6 Leakage power losses vary with α

从这3个图中可以看出在全工况情况下,优化后的性能参数都比优化前有明显的提高.在排油区($\alpha=180^\circ\sim 360^\circ$)性能参数提高得更显著,相对于容积效率和泄漏功率损失,摩擦功率损失降低的绝对值比较大.说明了优化后的滑靴结构尺寸可以作为柱塞泵模型的设计尺寸。

柱塞泵的斜盘倾角也影响着滑靴油膜厚度和相关的性能指标,对此本文还探究了不同的斜盘

倾角情况下的优化情况,在这里给出摩擦功率损失分别在 $\varphi=3^\circ, 14^\circ$ 时的优化效果图。

同样地,图7~图8中粗虚线表示优化后的摩擦功率损失,细实线表示初始参数的摩擦功率损失.从图中不难发现,在不同的斜盘倾角下,遗传算法优化后的结构参数对应的摩擦功率损失均减少。

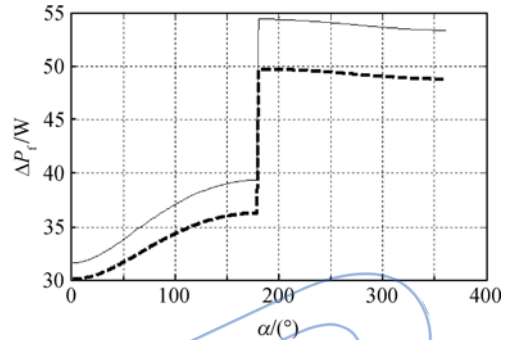


图7 $\varphi=3^\circ$ 时摩擦功率损失优化情况
Fig. 7 Optimization of friction power losses when φ is equal to 3

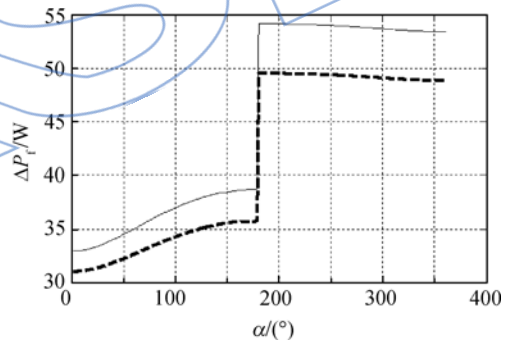


图8 $\varphi=14^\circ$ 时摩擦功率损失优化情况
Fig. 8 Optimization of friction power losses when $\varphi=14^\circ$

研究发现,在其他斜盘倾角及不同的转子转速下,各个目标函数优化后性能指标都有所提高,图线变化也与上图相似,由于篇幅其余图表结果不再一一赘述。

5 结 论

本文基于遗传算法对柱塞泵的滑靴结构参数进行了多目标优化,得到了以减少摩擦功率损失、泄漏功率损失同时提高容积效率为目标的滑靴结构参数以及相对应的理想油膜厚度.计算结果表明,滑靴结构参数优化后柱塞泵的多个性能指标比优化前有了不同程度的提高,从而证明了多目标遗传算法对设计柱塞泵油膜静压润滑是一种有

效的方法. 本文还探究了转子转角和斜盘倾角对柱塞泵性能的影响, 对柱塞泵滑靴油膜的多目标优化设计有指导性意义.

参考文献:

- [1] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 第15册 控制及燃油系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
- [2] Koc E, Hooke C J. Considerations in the design of partially hydrostatic slipper bearings[J]. Tribology International, 1997, 30(1): 815-823.
- [3] 顾民, 曾俊英, 梁万云, 等. 航空动力装置控制: 元件部分[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [4] 何必海, 孙健国, 叶志锋. 航空燃油柱塞泵滑靴静压润滑油膜计算分析[J]. 航空动力学报, 2009, 24(12): 2821-2827. HE Bihai, SUN Jianguo, YE Zhifeng. Calculation and analysis on film thickness for slippers based on hydrostatic bearing in the aeronautical fuel piston pump[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(12): 2821-2827. (in Chinese)
- [5] 何必海, 孙健国, 叶志锋. 燃油柱塞泵滑靴副和配流副油膜计算研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(6): 1437-1442. HE Bihai, SUN Jianguo, YE Zhifeng. Calculation and analysis on film thickness for slipper pair and valve plate pair in fuel piston pump[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(6): 1437-1442. (in Chinese)
- [6] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [7] 张乾. 多目标遗传算法及其在发动机控制系统设计中的应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005. ZHANG Qian. Multi-objective evolutionary algorithm in aero-engine control system design[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)
- [8] 苏三买, 常博博, 陈永琴. 倾斜柱塞式轴向柱塞泵运动学参数计算方法[J]. 计算机仿真, 2010, 27(10): 20-23. SU Sanmai, CHANG Bobo, CHEN Yongqin. Kinematics parameter calculating method for spherical swashplate type axial piston pump with incline piston. [J]. Computer Simulation, 2010, 27(10): 20-23. (in Chinese)
- [9] 陈永琴. 航空燃油柱塞泵运动学与动力学特性分析研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012. CHEN Yongqin. Research and analysis for aeroengine fuel piston pump kinematics and dynamic characteristic[D]. Xi'an: Xidian University, 2012. (in Chinese)
- [10] 陈永琴, 苏三买, 常博博. 航空燃油柱塞泵运动学参数计算的坐标法[J]. 航空动力学报, 2010, 25(2): 466-470. CHEN Yongqin, SU Sanmai, CHANG Bobo. New calculating method for aeroengine fuel piston pump kinematics parameter[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(2): 466-470. (in Chinese)
- [11] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- [12] 周正武, 丁同梅, 田毅红, 等. Matlab 遗传算法优化工具箱(GAOT)的研究与应用[J]. 机械研究与应用, 2006, 19(6): 69-71. ZHOU Zhengwu, DING Tongmei, TIAN Yihong, et al. The study and application of genetic algorithm optimization toolbox in Matlab[J]. Mechanical Research & Application, 2006, 19(6): 69-71. (in Chinese)
- [13] 刘英. 遗传算法中适应度函数的研究[J]. 兰州工业高等专科学校学报, 2006, 13(3): 1-4. LIU Ying. Research on fitness function in genetic algorithm[J]. Journal of Lanzhou Polytechnic College, 2006, 13(3): 1-4. (in Chinese)
- [14] 胡贵强. 多目标优化的遗传算法及实现[J]. 重庆文理学院学报: 自然科学版, 2008, 27(5): 12-15. HU Guiqiang. The research and implementation of genetic algorithm for multi-objective optimization[J]. Journal of Chongqing University of Arts and Sciences: Natural Science Edition, 2008, 27(5): 12-15. (in Chinese)
- [15] Goldberg D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning[M]. Boston: Addison-Wesley, 1989.
- [16] Srinivas N, Deb K. Multiobjective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(3): 221-248.
- [17] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [18] Yen G G, LU Haiming. Dynamic multiobjective evolution[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2003, 7(3): 253-274.