

齿轮式燃油泵结构参数多目标多约束优化

柯诗毅¹, 叶志锋¹, 钱一凡², 王彬¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016; 2. 汉堡技术大学 电磁理论学院, 德国 汉堡)

摘要:在航空宇航推进领域,提高发动机综合推重比已经成为主要的发展方向。为满足航空发动机主要附件之一的燃油泵流量大、体积小、质量轻的要求,根据齿轮泵的设计需求、零件强度、加工工艺等确定设计约束条件,以体积小、质量轻、流动脉动系数小为优化目标,利用一般遗传算法和非支配排序遗传算法分别进行齿轮泵结构参数的单目标、多目标优化。结果表明:优化后的体积与流量脉动系数都有明显减小。此方法可为齿轮式航空燃油泵的设计提供参考。

关键词:燃油泵;遗传算法;多约束;多目标优化

中图分类号:V233.22⁺ **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)05-0144-04

Multi-objective and Multi-constraint Optimization of Structural Parameters of Aviation Fuel Pump

KE Shiyi¹, YE Zhifeng¹, QIAN Yifan², WANG Bin¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Institute for Electromagnetic Theory, Hamburg University of Technology, Hamburg Germany)

Abstract: In the field of aerospace propulsion, improving the comprehensive thrust-to-weight ratio of engines has become the main development direction. In order to meet the requirements of large flow, small volume and light weight of the fuel pump, one of the main accessories of the aero-engine, this paper determines the design constraints according to the design requirements of the gear pump, the strength of the parts, and the processing technology. With large flow, small volume and small flow pulsation coefficient as the optimization objective, the single-objective and multi-objective optimization of the structural parameters of the gear pump were carried out by the general genetic algorithm and the non-dominated sorting genetic algorithm respectively. The results show that the optimized volume and flow pulsation coefficient have been reduced significantly, and this method can provide reference for the design of gear type aviation fuel pump.

Keywords: fuel pump; genetic algorithm; multiple constraints; multi-objective optimization

0 引言

随着航空技术的飞速发展,对航空装备的性能要求也越来越苛刻。为了提高航空发动机的综合推重比,必须千方百计减小每一个零部件的体积、质量^[1]。燃油泵作为航空发动机燃油系统中的核心元件,其体积、质量和性能都备受设计人员关注。齿轮泵因其可靠性和功重比高、结构简单、成本低,是目前最常用的航空发动机燃油泵。齿轮泵的设计存在众多参数的选择优化问题,在相同的额定流量、压力下,存在不同的参数组合,也就存在不同的体积、质量和性能^[2]。随着我国自行设计水平的提高,对齿轮泵设计方法进行深入地研究具有重要的工程应用价值。

本文根据齿轮泵的设计需求,提出齿轮泵关键零件强度、加工工艺等设计约束条件,以体积小、质量轻、流动脉动系数小为优化目标,利用一般遗传算法对齿轮泵参数进行寻优计算,利用非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行多目标优化,通过理论计算验证了此方法的有效性。

1 齿轮泵的结构参数优化问题

1.1 齿轮泵优化目标函数的确定

本文研究的齿轮式燃油泵中采用的是外啮合齿轮泵,其工作原理如图1所示,主要是由相互啮合的齿轮、壳体、端盖以及传动轴等零件组成。

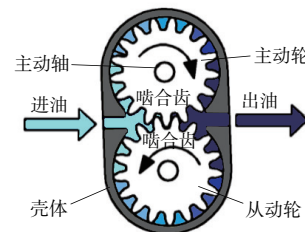


图1 外啮合齿轮泵工作原理

齿轮泵旋转时,吸油腔的体积增大形成低压将油液吸入,然后随着齿轮转动到达排油腔。同理,排油腔的容积减小形成高压将油液排出^[3]。改变泵的供油量或出口阻力都可以改变供油压力。

齿轮泵瞬时供油量就是在一瞬时单位时间内,泵排出的液体体积,即

$$Q_1 = dV/dt \quad (1)$$

设主动齿轮和从动齿轮中心 O_1 、 O_2 至啮合点 K 的啮合半径分别为 x 和 y ,如图 2 所示。当齿轮旋转 $d\varphi$ 角度时,主动轮和从动轮的啮合点到齿顶圆的齿廓线扫过的面积为:

$$\frac{1}{2}R_c^2 d\varphi - \frac{1}{2}x^2 d\varphi \quad (2)$$

$$\frac{1}{2}R_c^2 d\varphi - \frac{1}{2}y^2 d\varphi \quad (3)$$

式中 R_c 为齿顶圆半径。

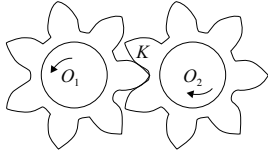


图 2 外啮合齿轮啮合点

设齿宽为 b ,则

$$Q_1 = b[R_c^2 - (x^2 + y^2)/2]\omega \quad (4)$$

式中 ω 为齿轮旋转角速度。

根据齿轮啮合点与齿轮中心的关系(图 3),可以求得:

$$x^2 = f_i^2 + r^2 - 2f_i r \cos\theta \quad (5)$$

$$y^2 = f_i^2 + r^2 + 2f_i r \cos\theta \quad (6)$$

式中 f_i 为瞬时啮合点 K 沿啮合线到节点 P 的长度; r 为节圆半径。可以得出

$$Q_1 = b\omega(R_c^2 - r^2 - f_i^2) \quad (7)$$

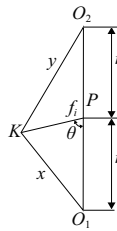


图 3 啮合点与齿轮中心的几何关系

由于 f_i 是变量,所以随着啮合点 K 的位置发生变化时,瞬时脉动量也会发生变化,假设重叠系数 $\varepsilon = 1$,则瞬时供油量最大值为

$$Q_{1,\max} = b\omega(R_c^2 - r^2) \quad (8)$$

当在初始啮合点和终止啮合点时, f_i 分别等于 $-f/2$ 和 $f/2$, f 表示初始啮合点到终止啮合点的长度。则由图 3 可知,瞬时供油量最小值为初始啮合点和终止啮合点时。

$$Q_{1,\min} = b\omega[R_c^2 - r^2 - (f/2)^2] \quad (9)$$

所以当齿轮运动时,瞬时供油量周而复始地按抛物线脉动变化。流量脉动是齿轮泵噪声的主要来源,因此将流

量脉动系数作为目标函数。

作为高功率密度的动力辅助装置,为了减轻电动燃油泵的质量,将其体积也作为目标函数,考虑安装齿轮轴的体积,根据齿轮啮合关系可以计算出齿轮泵的体积为

$$V = m^2 z(z+3)(b+2l) + \frac{\pi}{4}[m^2(z+3)2b+2d^2l] \quad (10)$$

取设计变量 m, z, b, d, l 为 X :

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T \quad (11)$$

将其代入式(10)可将目标函数转换成数学模型。

1.2 约束条件

本文采用变位齿轮,根据需求查阅手册和文献确定了以下约束条件^[4-6]。

1) 齿宽约束

$$3m \leq b \leq 12m \quad (12)$$

齿宽越大,齿轮输出流量越大,对加工精度要求也越高。

2) 速度约束

$$\frac{\pi m(z+3)n}{60\,000} - V_{e,\max} \leq 10 \text{ (m/s)} \quad (13)$$

齿顶圆速度过快会导致油液无法及时充满齿谷,容易发生气蚀现象。

3) 幅宽约束

$$\Delta r = r_g - \frac{1}{2}D = \frac{m(z-2.5) + 2\xi m}{2} - \frac{D}{2} \quad (14)$$

式中: r_g 为齿根圆半径; D 为节圆直径; ξ 为变位系数。

幅宽 Δr 会影响齿轮泵的端面泄漏,一般齿根圆到齿轮轴的距离要大于 2 mm。

4) 轴承的宽径比

$$0.5 \leq l/d \leq 1.5 \quad (15)$$

5) 齿顶厚约束

$$m(z+3) \left[\frac{\pi + 4x \tan\alpha}{2z} + \text{inv}\alpha - \text{inv}\alpha_a \right] \geq 0.15m \quad (16)$$

式中: α 为压力角; α_a 为齿顶圆压力角。由于采用了变位齿轮,齿顶厚度一般要大于 1.5 m 。

6) 轴承承载能力约束

$$p = \frac{F}{ld} \leq [p] \quad (17)$$

$$p_v = \frac{Fn}{19\,100b} \leq [p_v] \quad (18)$$

式中: l 为轴承宽度; F 为轴承负载。

$$F = \frac{8.5\Delta p b d_a}{2} \quad (19)$$

7) 齿面接触疲劳约束和齿轮弯曲强度约束

$$\sigma_H = \delta \sqrt{\frac{F_1}{\pi b} \cdot \frac{1/\rho}{1-\mu_p^2}} \leq [\sigma]_H \quad (20)$$

$$\sigma_F = \frac{2K_1 T Y_F}{z b m^2} \leq [\sigma]_F \quad (21)$$

式中: F_1 为啮合力; K_1 为载荷系数; Y_F 为齿形系数; Δp 为进出口压差; T 为液压力对从动轮的转矩; E 为弹性模量; μ_p 为泊松比。

8) 重叠系数约束

$$\varepsilon = \frac{z}{\pi} (\tan \alpha_d - \tan \alpha) \quad (22)$$

$$\tan \alpha_d = \arccos \left(\frac{zm}{2r_d} \cos \alpha \right) \quad (23)$$

式中: α_d 为实际啮合角; r_d 为齿顶圆半径。

航空燃油泵的重叠系数一般要求 $\varepsilon \geq 1.05$, 优化后齿轮泵的流量输出不应小于优化前。

2 遗传算法及实现

2.1 单目标优化问题

遗传算法是通过模拟生物的进化来对目标优化, 通过复制、交叉和变异形成子代, 再通过筛选在子代中选出较优个体进行组合形成新一代。遗传算法主要步骤如下。

1) 初始化种群。一般通过二进制编码将对象抽象成特定的符号序列。

2) 适应度函数。为了评价所得到的个体的优劣程度, 选择适应性函数来评价种群个体的优劣, 为筛选个体做准备。

3) 选择运算。遗传算法根据生物进化, 为了产生更良好的后代, 需要选择优良的父代。根据选择运算确定优良的父代, 以此将优良的基因遗传下去。

4) 交叉运算。在父代种群中进行交配来产生新的个体。

5) 变异运算。模仿生物进化时的基因突变, 将小概率扰动施加于子代, 使其产生新的变化。

6) 判断终止条件。终止条件一般是设置的进化代数, 当计算达到所设置的进化代数时则终止运算。

Matlab 软件中由英国谢菲尔德大学开发遗传算法工具箱已经具有 GUI 界面, 可以很方便进行参数寻优^[7]。将目标函数编译为适应度函数并在 Fitness function 中调用, 线性不等式约束条件编译后在 linear inequalities 以矩阵形式输入, 非线性不等式编译后在 Nonlinear constraint function 中调用。以矩阵方式输入边界值, 确定初始种群、交叉比率和变异率^[8-9]。体积优化结果如图 4 所示。

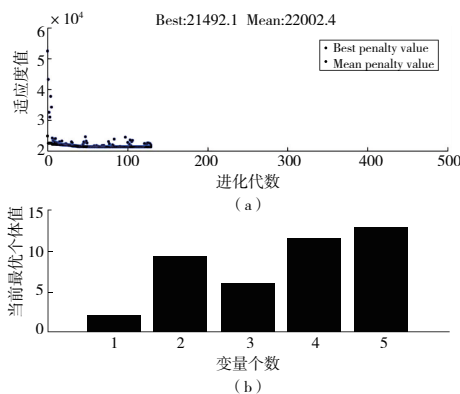


图 4 体积函数优化结果

通过遗传算法进行单目标寻优, 与优化前的参数进行对比, 最后目标的函数体积降低了 8%。详见表 1。

表 1 单目标优化前后参数对比

参数	优化前	优化后
模数 m/mm	2.5	2.0
齿数 z	7	9
齿宽 b/mm	7.7	5.9
轴颈直径 d/mm	11.7	11.5
轴颈长度 L/mm	13.00	12.85
体积 V/mm^3	23 425	21 492

2.2 多目标优化的遗传算法

通过对单目标函数进行优化分析, 齿数参数在两个目标函数中的值都比优化前大。但是随着齿数的变化, 相应的其他参数也会发生变化。为了使两个目标函数都尽可能取到最优值, 本文采用多目标优化方法来进行优化。本文设计的齿轮为标准齿轮, 则压力角为 20° , 齿顶高系数为 1。因此选取体积函数和流量脉动函数为双目标, 利用 NSGA-II 算法来对齿轮泵参数进行优化。多目标优化问题的数学模型可以表示为

$$V - \min f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)] \quad (24)$$

$$x \in X, X \in R^m$$

利用遗传算法进行求解最优解有以下几种方法。

1) 权重系数变换法

如果参数对于每个目标的影响趋势都一样, 那么可以根据各个目标函数的重要程度对其赋予权重值, 这样就可以将多个目标的优化变成一个目标的优化问题。这种变化法的优点是计算简单, 但是由于目标函数的重要值有时难以评估, 权重系数的选取更多的需要靠经验^[10]。

2) 并列选择法

通过将种群分成若干份, 每一份赋予一个目标函数, 通过择优选择的方法留下后代并重新组成新的种群, 在新的群体中进行交叉变异来得到最优解。

3) 排列选择法

基于 Pareto 最优个体前提下, 再对各个个体进行排序, 使得最优个体能够有更大的机会进入下一代种群。

4) 共享函数法

对于个体, 与其相似的个体度量值称为小生境数。

$$m_x = \sum_{Y \leq n} s[d(X, Y)] \quad (25)$$

$s(\cdot)$ 为共享函数, 它是单调递减函数, 这样可以使得相似度更小的个体遗传到下一代的概率减小。该方法可以使得解尽可能分散在整个最优解集内, 而不是集中在某一个较小区域上, 这样得到的解种类较多。

5) 混合法

混合法指的是首先按照多目标优化目标函数的个数, 将整体划分为各个小部分, 各个子目标函数在各自的群体中产生下一代。而子种群中的最优个体不参与遗传变异, 直接保留到下一代。处理过程是当所得的 Pareto 最优个体数量超过种群规模时, 才使用共享函数法来形成新一代种群。

NSGA-II 算法一般先设定遗传参数, 并初始化种群,

通过计算初始种群的个体等级和拥挤距离,得到初始精英解。然后开始迭代,对父代执行锦标赛选择算子,再执行交叉和变异算子来得到子代,将子代和父代合并,重新计算新种群的个体支配等级和拥挤距离,根据支配等级和拥挤距离选择出新一代个体作为父代重新进行迭代运算,最后导出精英解集。

由于非线性约束较强,本文种群参数选择较大取10 000,非支配前沿所占占比为0.2,均匀变异率0.5,采用数值插值交叉。所得解集如图5所示。

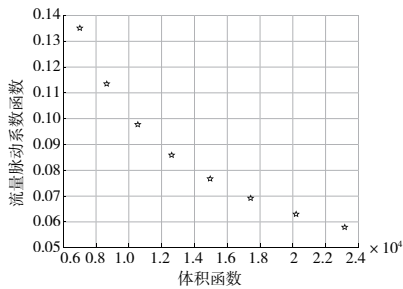


图5 Pareto 精英解集

最终优化结果为[2 10 6.3 11.06 10.12]。从结果可以看出多目标的优化结果使得体积和流量脉动系数都得到了优化,与单目标优化相比,主要是在齿数上有差别。主要是因为齿数参数上,两个目标函数发生了冲突。

2.3 优化前后的 fluent 流场分析

基于上述利用非支配排序遗传算法对齿轮泵的结构参数进行的优化参数,利用UG软件对齿轮泵进行三维建模,图6和图7分别为齿轮泵优化前后的模型图。

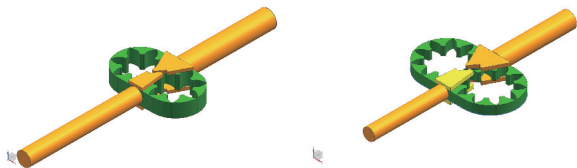


图6 优化前齿轮泵模型

图7 优化后齿轮泵模型

为了避免液压关死现象的产生,在轴承上开有异形卸荷槽。利用fluent进行流场计算,边界条件采用进出口都为压力边界,进口压强为0.1 MPa,出口压强为7 MPa。主动轴转速设置为10 000 r/min,采用非正常计算,利用动网格来设置齿轮的啮合。采用弹簧光顺法和局部网格重构法来进行动网格的设计。

从图8中可以看出在进口压强为0.1 MPa、出口压强为7 MPa的边界条件下,齿轮泵的最大流量为0.23 kg/s。优化后的齿轮泵流量脉动有了明显减小,而且优化后的出口流量也在优化前之上,符合设计需求,证明了遗传算法优化的有效性。

2.4 样机试验

图9为电动燃油泵样机,其中齿轮泵采用了上述的优化设计。

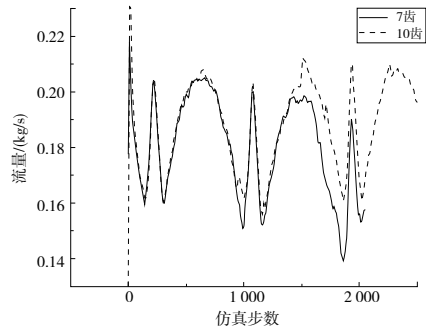


图8 优化前后流量对比图



图9 一体化电动燃油泵实物图

燃油泵的试验平台如图10所示,主要包括液压系统、驱动系统和测控系统。液压系统主要有燃油管路控制平台、燃油管路和数据采集系统。燃油管路控制平台主要是对燃油管路的工况进行控制,可以维持齿轮泵进口压力的恒定。燃油管路主要由油源、管路阀、传感器和管路组成。数据采集系统是用来采集电动燃油泵出口压力和流量数据。驱动系统主要指的是电机驱动器。测控系统为控制数据采集的设备。本文齿轮泵与驱动电机为一体化结构,驱动电机为自行设计的永磁无刷直流电机,电机的转速可以通过手动调节驱动器来实现精确控制。

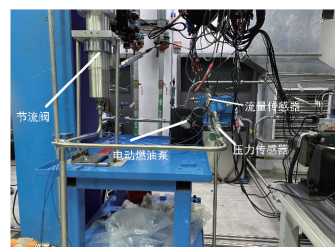


图10 电动燃油泵试验平台

由图11可知,当反压阀处于开流状态、进口压力一定时,随着电机转速的上升,出口压力和出口流量都呈上升趋势,当电机转速到达7 000 r/min时,电动燃油泵的流量达到指标550 kg/h。由于流量计最大量程为552 kg/h,本次实验流量数据只记录到552 kg/h。调节反压阀使其处于节流状态。由图12可知,压力和流量随着转速呈正比例增加,与调节阀开流状态相比,出口流量最大值为95 kg/h,主要原因是因为随着出口压力的增加,齿轮泵的进出口压差增大导致泄漏量增大。

(下转第151页)



图9 云端监测信息

本套信息感知集成系统在实际车间环境运行状况良好,可以满足实际生产中实时集成感知车间异构数据并及时共享的要求。

4 结语

本文针对云制造环境下企业生产车间数控机床品牌不一、类型多样、协议异构等因素而导致底层信息集成感知困难、企业间信息难以及时共享的问题,设计并开发了一种应用于异构数控机床的集成化感知系统,实现了实时生产数据的自动化采集和多方共享,有利于提高底层设

备的数据透明性,进而使得云制造过程中上下游企业能够整体联动、高效运作。

参考文献:

[1] 冯卫娇. 面向云制造服务的制造执行系统[D]. 重庆:重庆大学,2017.

[2] 于乃功,方林,王新爱,等. 异构数控机床数据采集系统的设计与实现[J]. 现代制造工程,2016(7):56-60,119.

[3] 江强. NC-Link 协议设备模型定义描述与规范检验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019

[4] 吴双玉,陆艺,郭斌. 制造车间设备远程监控系统开发[J]. 仪表技术与传感器,2021(6):72-76.

[5] 唐霞,邢嘉路,刘欢连. 基于 MTConnect 协议的数控机床数据采集方法[J]. 机械制造与自动化,2018,47(6):143-146.

[6] EDRINGTON B, ZHAO B Y, HANSEL A, et al. Machine monitoring system based on MTConnect technology[J]. Procedia CIRP,2014,22:92-97.

[7] 贾凡,熊刚,朱风华,等. 基于 MQTT 的工业物联网通信系统研究与实现[J]. 智能科学与技术学报,2019,1(3):249-259.

收稿日期:2022-03-23

(上接第 147 页)

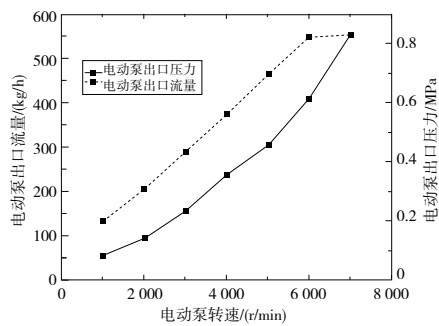


图11 压力、流量-转速特性曲线 (进口压力 0.2 MPa,调节阀 10 mm)

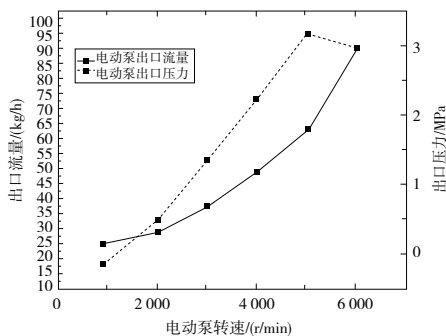


图12 压力、流量-转速特性曲线 (进口压力 0.2 MPa,调节阀 1 mm)

3 结语

本文基于遗传算法,以齿轮式燃油泵中的体积和流量脉动系数为目标函数,对齿形参数进行了寻优计算。根据计算结果对齿轮泵进行设计改进。

1)在考虑更多实际问题的基础上,加入了多个约束条件,利用遗传算法对齿轮泵结构参数进行了寻优,有利于齿轮泵整体结构的优化和性能的提升。

2)采用了非支配排序遗传算法进行了多目标寻优,寻优所得结果并无最优解,而是一组解集。在工程实际中可以根据侧重点不同,在所求的 Pareto 解集中寻找合适的解,更符合工程实际运用。

参考文献:

[1] MOREIOK NORIKO, KAKIUCHI DAIKI, OZAWA KANJI, et al. Practical development of control technology for the more electric engine[J]. IHI Engineering Review,2012,45(1):22-30.

[2] 张江红,王思霞,蒋晓琴,等. 基于遗传算法的多齿并联内啮合齿轮泵优化设计[J]. 现代制造工程,2018(4):115-118,152.

[3] 孙淮清,王建中. 流量测量节流装置设计手册[M]. 2版. 北京:化学工业出版社,2005.

[4] 濮良贵,陈国定,吴立言. 机械设计[M]. 9版. 北京:高等教育出版社,2013:186-236.

[5] 宫柏秋. 齿轮泵参数化设计方法研究与系统实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.

[6] 刘贵根. 多齿轮泵的基础理论与优化设计[D]. 淮南:安徽理工大学,2006.

[7] 刘会灯,朱飞. MATLAB 编程基础与典型应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2008.

[8] 雷英杰,张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 2版. 西安:西安电子科技大学出版社,2014:157-159.

[9] PAREJA - TOBES P, PELTA D, SANCHEZ - ROYO A, et al. Search spaces representation in optimization problems[J]. Expert Systems With Applications,2008,34(4):2891-2895.

[10] 徐佩佩,叶志锋,王彬. 航空燃油柱塞泵滑靴油膜的多目标优化设计[J]. 航空动力学报,2014,29(8):1981-1986.

收稿日期:2022-04-06