

文章编号:1000-8055(2012)04-0882-08

基于均匀设计的粒子群优化在减压器 优化设计中的应用

郑赞韬, 池元成, 陈 阳
(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 采用粒子群优化算法,对涡轮泵气封减压试验系统中的关键部件减压器进行结构优化设计.在优化过程之前采用两次均匀设计的方法缩小设计变量的取值范围,以提高计算效率.通过调节气封系统中的主要部件气体减压器的结构参数,使得减压器的出口压强稳定,满足工程需求.优化结果显示,通过两次均匀设计后,设计变量的取值范围得到有效压缩,减少了优化过程的计算量.与初始设计相比,减压器的出口压强振幅明显减弱,达到了工程设计的要求.

关 键 词: 粒子群优化; 均匀设计; 减压器; 涡轮气封系统; 液体火箭发动机
中图分类号: V434 **文献标志码:** A

Particle swarm optimization of pressure reducing regulator based on uniform design

ZHENG Yun-tao, CHI Yuan-cheng, CHEN Yang
(School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The pressure reducing regulator which was the key point of turbo-pump gas-sealed decompressing experiment system was optimized by PSO (particle swarm optimization). Uniform design was used twice before the optimization for the sake of reducing computing quantity. The structure parameters of pressure reducing regulator were optimized to obtain steady outlet pressure meeting engineering requirement. The result indicates that the range of variables was compressed availably through twice of the uniform design. Compared with initial point, the swing of outlet pressure decreases obviously according with engineering design.

Key words: particle swarm optimization; uniform design;
pressure reducing regulator; turbo gas-sealed system; liquid rocket engine

均匀设计(uniform design, UD)是由方开泰教授、王元院士等于 1978 年提出的一种试验设计方法^[1-2].均匀设计挑选试验点的依据是“均匀分散”,而非“整齐可比”,可使每个因素的每个水平仅做一次试验,因此其试验次数比正交设计明显减少,特别适合于多因素多水平的试验和系统模型完全未知的情况.如在我国导弹设计中,曾提

出过 5 因素、31 水平、总试验次数不超过 50 次的试验设计.如用全面试验需要 2 800 多万次,用正交设计最少也需要 961 次试验,都不满足要求.而用均匀设计仅需要 31 次试验,其优越性非常突出.作为我国独创的一种重大的科学试验方法,进一步完善其理论以及应用具有重要的现实意义和研究价值.均匀设计的核心是均匀设计表的合理

收稿日期:2011-06-02; 修订日期:2012-01-16

作者简介:郑赞韬(1979—),女,湖北襄阳人,讲师,博士,研究方向液体火箭发动机多学科优化设计与仿真技术.

构造,但随着水平数的增大一般的构造法所需要的计算量也在不断增大,因此很难自动构造出水平数较大的均匀设计表.通常文献中都只给出了水平数 31 以下的均匀设计表,这极大的限制了均匀设计在更广泛领域的应用.

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法是由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出的一种优化算法^[3],是计算智能领域的一种群智能算法.它同遗传算法类似,是一种基于迭代的优化工具.但是,它并没有遗传算法用到的交叉以及变异操作算子,而是粒子在空间追随最优的粒子进行搜索.它是基于群体的优化技术,显示出较强的并行性.而且无需梯度信息,只需利用目标的取值信息,具有很强的通用性.由于算法容易理解,且易于编程实现,近年来发展很快,在许多领域都得到了成功的应用^[4-11].

本文将均匀设计方法与粒子群算法相结合,对某液体火箭发动机试验台的涡轮减压气封试验系统中的关键部件气体减压器进行了结构优化.通过优化前后结果的对比显示了均匀设计在提

高寻优速度、减小仿真试验次数方面发挥了积极作用.

1 方法简述

在给定水平数、因子数后,构造均匀设计表就是对一组数进行组合,运算各个组合的均匀性度量值,找到值最小的一个组合.因此可以将均匀设计表的构造转化为一个单目标的优化问题.

1) 均匀性度量及生成向量法

均匀设计主要考虑试验点在试验范围内的均匀散布,均匀性度量正是用于测度点集的均匀性的标准.采用现在应用最广泛的均匀性准则,该准则具有如下性质:将每个试验点的 s 个坐标任意调换,相应的偏差不变.

生成向量法是构造均匀设计表的常用方法之一,其核心是构造均匀设计的生成向量^[1].

给定水平数 n 、因子数 s 和均匀性准则 C ,相应的均匀设计就是求度量指标 C 最小的子阵.变换 u_{ij} 为 $x_{ij} = (2u_{ij} - 1)/2n$, C 表述如下式所示:

$$C(h) = \left[\left(\frac{13}{12} \right)^s - \frac{2^{1-s}}{n} \sum_{k=1}^n \prod_{i=1}^s \left(2 + \left| x_{ki} - \frac{1}{2} \right| - \left| x_{ki} - \frac{1}{2} \right|^2 \right) + \frac{1}{n^2} \sum_{k,l=1}^n \prod_{i=1}^s \left(1 + \frac{1}{2} \left| x_{ki} - \frac{1}{2} \right| + \frac{1}{2} \left| x_{li} - \frac{1}{2} \right| - \frac{1}{2} |x_{ki} - x_{li}| \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

在均匀设计表的构造中,当 n, s 较大时,计算量非常大.以 $n=101, s=5$ 为例,计算量达到 7.52875×10^7 次.因此有必要对均匀设计表的构造进行研究,进一步提高效率的同时力求达到均匀设计表的自动构造.

2) 均匀设计表构造的最优化问题表达

将均匀设计表 $U_n(ns)$ 的构造看作一个单目标最优化问题进行求解,其中目标函数是 C .在个体编码上将个体设为

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{is}) \quad x_{ij} \in [1, s] \quad (2)$$

式中 $x_{ij} = (v_{j1}, \dots, v_{jm}), v_{jk} = (2u_{jk} - 1)/2n, n$ 为试验设计水平数, s 为试验设计因子数, u_{js} 为试验设计表 $U_n(ns)$ 由生成向量法生成的 U -矩阵中的点.

将均匀设计表的构造问题转化为了一个单目标的最优化问题,其表达形式如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(X) = C(X) \\ \text{s. t.} \quad & x_i = x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{is} \\ & j \leq x_{ij} \leq \varphi(n) - s + j \quad (j = 1, \dots, s) \\ & x_{ij} < x_{ik} \quad (i < k) \end{aligned}$$

2 粒子群优化的并行过程

并行的执行过程是 PSO 算法的优势.通过并行计算能够提高计算效率,PSO 方法能够实现两种方式的并行.

如果粒子的种群数较大,可将种群分为若干部分,分别在不同的计算机上进行局部 PSO 优化,将各个计算机每次计算的全局最优值传递到一台计算机上进行比较,选出最好的一个作为新的全局最优值再回传到每个计算机中再依次计算.在每个计算机上做部分粒子的 PSO 是并行执行的过程.图 1(a)给出并行过程简示.

另外一种方式是,将种群中的粒子分配到不同的计算机上,计算粒子对应的目标值.计算结果传递到一台计算机上,根据结果更新全局最优值和个体最优值,计算新的粒子群数,更新后粒子再传递到每个计算机上进行新的目标值的计算.在每个计算机上做单个粒子的目标值计算是并行执行的过程,可视为仿真的并行.图 1(b)给出并行过程简示.

两种并行模式各有特点,当粒子种群数较大时,适宜选用图 1(a)并行模式.当仿真过程复杂时,适宜选用图 1(b)所示并行模式.

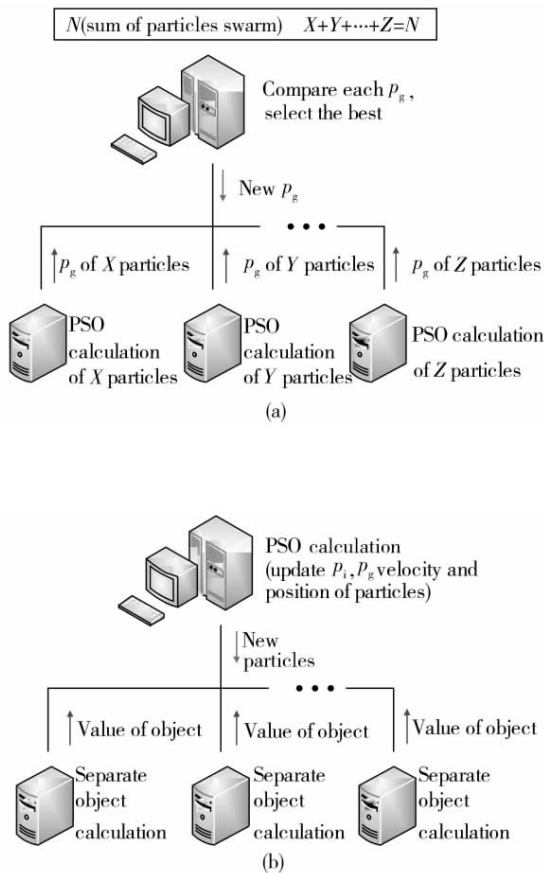


图 1 PSO 并行模式

Fig. 1 Parallel execution mode of PSO

3 减压器优化

图 2 为涡轮泵气封减压试验系统简图,包含 13 个组合件. FS1 代表流体源,GP(1~6)表示 6 段气体管路,GV(1~3)表示 3 个气体阀门,CV1 代表缓开阀,GPRR1 表示气体减压器,Gov1l 代表高压气瓶.

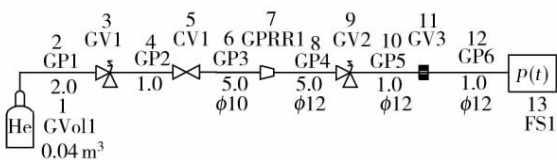


图 2 试验系统简图

Fig. 2 Sketch map of experimental system

高压气瓶流出的高压氦气经减压器降压后通

过孔板 GV3 喷射出去,形成稳定流量的氦气射流吹到涡轮泵轴上产生气封效果.系统工作情况可分为两个过程:减压器低压腔建压阶段即阀芯闭合阶段和稳定射流阶段.减压器是利用节流原理工作的部件,其作用是使流入的高压气体压降至工作要求的值并稳定在一定的压力范围内.优化减压器结构使得低压腔出口压力变化在可接受的范围内,以满足工程需求.在进行粒子群算法优化前,采用两次均匀设计以缩减设计变量的可调范围.

3.1 仿真模型

认为气体管流为一维理想气体流动,气体管道壁面选用一维传热模型.采用经典 4 级 4 阶龙格-库塔法对减压器动态过程进行数值仿真.减压器动态仿真模型为有限体积模型^[12].图 3 为减压器简图.图 4 为减压器的有限体积控制体积单元.工程单位提供的系统初始状态为:高压氦气瓶—电磁阀(GV1)上游腔之间管路气体压强为 35 MPa,电磁阀(GV1)下游腔—电磁阀(GV2)上游腔之间的管路气体压强为 0.1 MPa,电磁阀(GV2)下游腔之后的管路气体压强为 0.1 MPa,管路温度为 278 K.缓开阀开启孔等效直径为 0.1 mm,减压器阻尼孔直径为 1.0 mm,减压器膜片正向刚度为 403.3 N/mm,减压器主弹簧的预压缩量为 11.5 mm,电磁阀(GV1)的打开时刻为 0.5 s 电磁阀(GV2)的打开时刻为 5 s.氦气瓶体积为 0.04 m³.

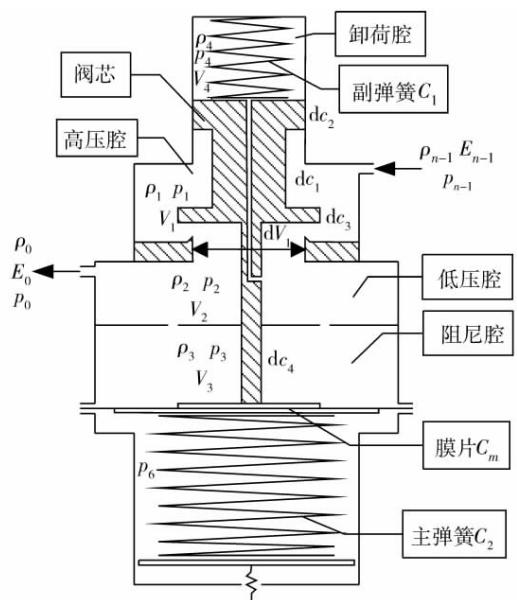


图 3 逆向卸荷膜片式减压器简图

Fig. 3 Converse unloading pressure reducing regulator with diaphragm

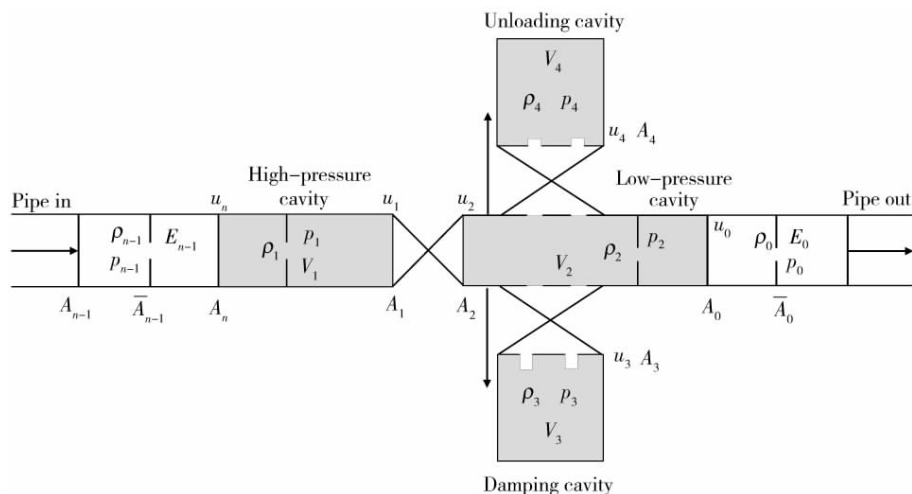


图 4 减压器的有限控制体积单元

Fig. 4 Finite control volume grids of pressure reducing regulator

3.2 优化模型

涡轮气封试验减压系统要求当高压气瓶压强随着气体的消耗由最初的 35 MPa 降低到 4.6 MPa 的过程中,减压器出口压强保持在 3.4 MPa 附近,正负偏差小于 0.2 MPa。以减压器 5 个重要参数作为设计变量。

优化模型定义为

1) 设计变量

根据减压器的结构,结合工程部门的经验,选取影响减压器动态性能的参数作为设计变量,包括阻尼孔直径 d 、高压腔等效长度 L_1 、低压腔等效长度 L_2 、阀芯质量 M 、阻尼系数 λ 等 5 个参数。

2) 优化目标

减压器出口压强 p_2 设定为 (3.4 ± 0.2) MPa,在优化问题中属于望目特性。

由于系统为动态过程,因此优化目标是在系统达到稳定后的减压器出口压强,即稳定射流阶段的出口压强。为便于计算,将目标转化为

$$\min \Delta = \min \sum_{t=t_0}^T \left(\frac{p_2^t - 3.4}{3.4} \right)^2$$

式中 $t_0 = 5$ s, $T = 10$ s,动态仿真过程的每个时间步长设为 0.01 s。

3.3 优化策略

在使用粒子群算法对减压器进行优化计算前,使用了两次均匀设计来提高计算效率。采用均匀设计是为了缩小设计变量的寻优范围,并非求出精确结果。因此在第一次构造均匀设计表后,采用绝热模型的仿真程序进行计算。在第二次构造均匀设计表后,应用一维传热模型的仿真程序进行计算。采用绝热模型的目的是为了减少动态仿

真计算耗时。

在应用 PSO 算法时,采用 10 台计算机并行计算的模式(图 2(b)),即取粒子种群个数为 10,在第 1 台计算机上进行 PSO 计算,仿真过程在 10 台计算机上并行执行。在每次仿真结束后,其余 9 台计算机将仿真结果数据文件传递至第 1 台进行 PSO 计算。这台计算机再将更新后的 9 个粒子数据文件分别发送至其余 9 台计算机进行下一次仿真计算,以提高计算效率。进行优化的计算机同时执行其中一个粒子的仿真计算。

4 仿真与优化结果分析

本文用于仿真计算的单台计算机的配置为:中央处理器(英特尔双核 2.4),内存(2 G)。对于单个设计点减压器系统工作 10 s 的仿真计算耗时为 10 h。如果使用传统优化策略势必带来巨大的计算耗时,因此有必要采用有效的方法减小计算消耗,提高优化效率。而本文采用的均匀设计的方法能通过缩减设计变量的取值范围达到减少计算量的目的。

根据设计变量的个数和设计变量的取值范围特点,采用 10 水平 5 因子的均匀设计表来安排试验设计,如表 1 所示。由于设计变量的数量级相差很大,首先将设计变量无量纲化,表 2 为设计变量的取值范围。根据表 1,将各个变量按取值范围十等分,分别作为水平 1 至水平 10,进行第一次试验设计。

根据第一次试验,在试验 8 和试验 10 取到了最优值,由此判定可能存在最优值的范围如表 3 所示。

表 1 10 水平 5 因素均匀设计表

Table 1 Uniform design with 5 factors and 10 levels

因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5
1	2	4	5	8
2	4	8	10	5
3	6	1	4	2
4	8	5	9	10
5	10	9	3	7
6	1	2	8	4
7	3	6	2	1
8	5	10	7	9
9	7	3	1	6
10	9	7	6	3

表 2 无量纲化后的变量范围

Table 2 Variable range of eliminating dimensional affection

名称	取值范围
阻尼孔直径 d/mm	$[0.20, 1.20]$
高压腔等效长度 L_1/mm	$[3.3060, 33.060]$
低压腔等效长度 L_2/mm	$[2.2180, 22.180]$
阀芯质量 M/kg	$[0.8220, 8.220]$
阻尼系数因子 λ/s	$[1.0, 5.0]$

表 3 设计变量范围设定

Table 3 Variable range after the first experiment design

名称	取值范围
阻尼孔直径 d/mm	$[0.900, 1.50]$
高压腔等效长度 L_1/mm	$[14.877, 18.183]$
低压腔等效长度 L_2/mm	$[14.417, 16.635]$
阀芯质量 M/kg	$[4.5210, 6.1650]$
阻尼系数因子 λ/s	$[1.6, 2.0] \cup [4.3, 4.8]$

表 3 中,设计变量的取值范围比表 2 大幅度缩小.根据表 3,同样应用表 1,进行第二次试验设计.结果显示第 10 次试验的 Δ 值最小,由此可以确定存在最优值的取值范围还原后如表 4 所示.

对比表 2 的取值范围,表 4 的取值范围显著减小,在此基础上采用改进的粒子群算法求解,极大的提高了求解效率.在粒子群算法的寻优过程中,将仿真任务分配到 10 台计算机上运行,大大

提高了计算效率.在两次迭代后,满足误差范围条件,寻优结束.表 5 为 4 种状态下各个参数的值.

表 4 设计变量范围设定

Table 4 Final scale of variables

名称	取值范围
阻尼孔直径 d/mm	$[1.45, 1.55]$
高压腔等效长度 L_1/mm	$[16.350, 19.836]$
低压腔等效长度 L_2/mm	$[14.896, 15.534]$
阀芯质量 M/kg	$[0.0448, 0.0551]$
阻尼系数因子 $\lambda/10^{-4}\text{s}$	$[1.7, 1.9]$

表 5 4 种情况下设计变量和目标值对比

Table 5 Parameters of four conditions

	Original design	First DOE	Second DOE	PSO design
d/mm	1.0	1.19	1.5	1.585
L_1/mm	33.06	30.24	18.11	17.88
L_2/mm	21.28	15.53	15.91	17.54
M/kg	0.0822	0.0493	0.0543	0.0428
$\lambda/10^{-4}\text{s}$	4	1.88	1.80	1.6
Δ	26.408	1.474	0.378	0.0545

根据表 5 可得出以下规律,增大阻尼孔直径、高压腔等效长度和减小阀芯质量有利于减压器出口压强的稳定.

图 5 和图 6 为初始设计和第一次均匀设计的最好结果的高、低压腔压强对比.由图 5 可以看

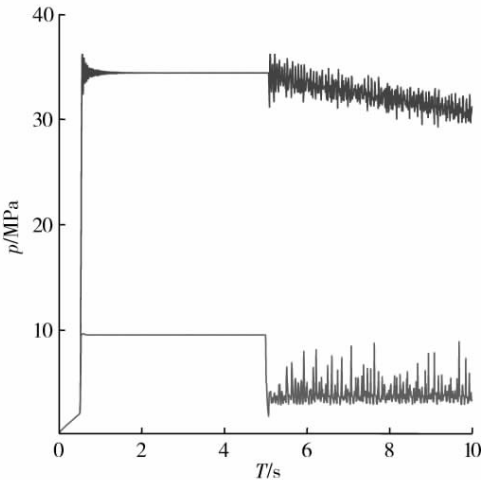


图 5 初始设计下的高低压腔的压力

Fig. 5 Response curves of inlet and outlet pressure with original design

出,在阀门 GV1 未打开时,整个系统处于初始状态. GV1 在 0.5 s 时刻打开后,由于阀门 GV2 未打开,减压阀低压腔压力迅速增大,这是高压气体的冲击作用所致. 在 5 s 时刻, GV2 打开后,低压腔压力下降,系统进入工作状态. 而高、低压腔的压力都出现了幅度不固定的振荡. 图 6 为第一次均匀设计试验中的第 8 次试验的仿真结果. 对比初始设计,高、低压腔的压力振荡都明显减弱.

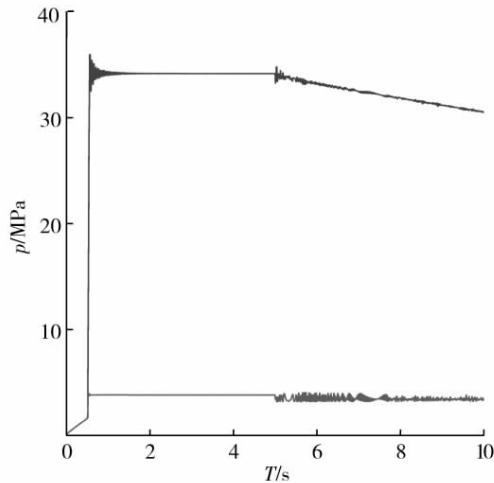


图 6 第一次均匀设计的最优结果

Fig. 6 Response curves of inlet and outlet pressure with better point of the first DOE (design of experiment)

图 7 和图 8 分别是初始设计点和第一次均匀设计最优点中的阀芯开度随时间的变化. 图 7 显示在 5 s 时刻, GV2 打开后,对于初始设计点,其阀芯开度的最大值已经达到 0.4 mm,在某些时刻甚至超过了 0.4 mm,而开度变化的最小值为 0.01 mm,变化幅度较大,说明其高低压腔的压力

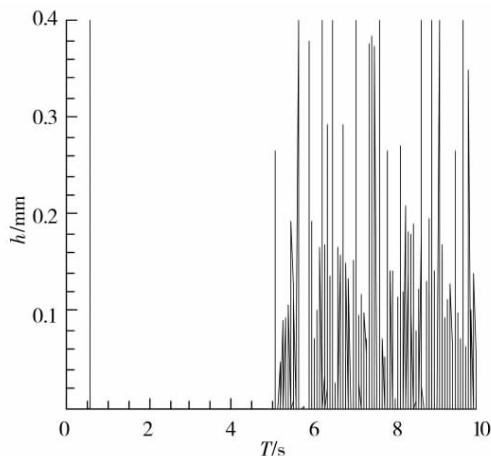


图 7 初始设计下的阀芯开度

Fig. 7 Response curve of opening of valve core with original design

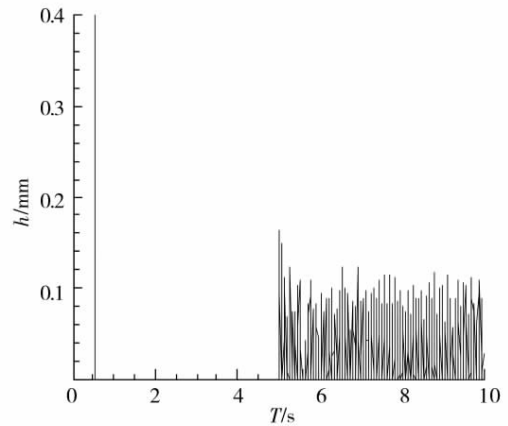


图 8 第一次均匀设计的最优阀芯开度

Fig. 8 Response curve of opening of valve core with better point of the first DOE

随之产生较大的变动. 图 8 中的阀芯开度的变化范围比图 7 有了明显减小.

图 9 和图 10 为第二次均匀设计试验中的第 10 次试验的仿真结果与最终优化结果的高、低压腔压强对比. 图中显示高、低压腔的压力振幅进一步减小.

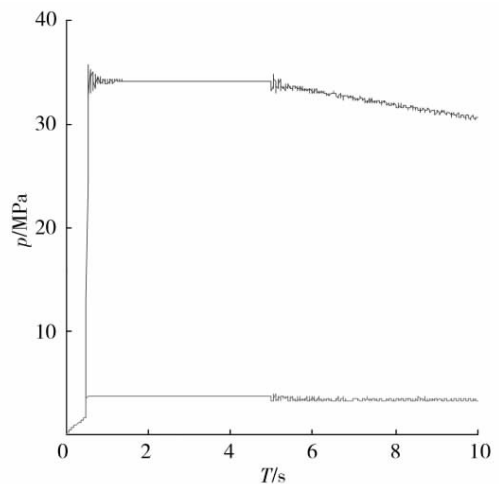


图 9 第二次均匀设计的最优结果

Fig. 9 Response curves of inlet and outlet pressure with better point of the second DOE

图 11 和图 12 是第二次均匀设计的最优点和最终的优化结果下的减压阀阀芯开度随时间的变化结果. 相对于图 7, 阀芯开度的变化范围进一步缩小. 虽然图 8 和图 11 显示的阀芯开度的变化范围相近, 但图 12 明确显示了最终设计下的阀芯开度变化范围比初始设计点大幅减小.

图 13 为最优结果的低压腔压力. 在试验系统工作 5 s 后, 应进入稳定射流阶段. 允许低压腔出

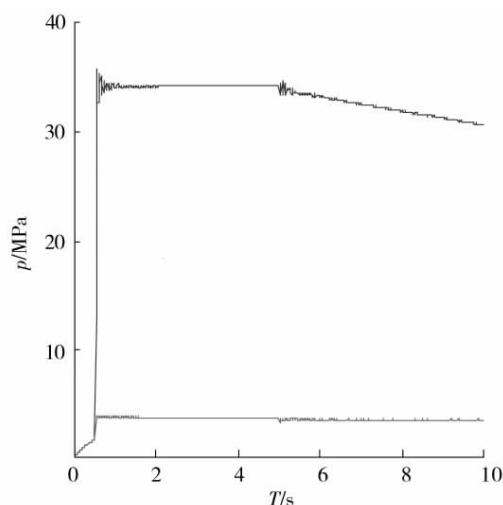


图 10 PSO 优化结果

Fig. 10 Response curves of inlet and outlet pressure with result of PSO

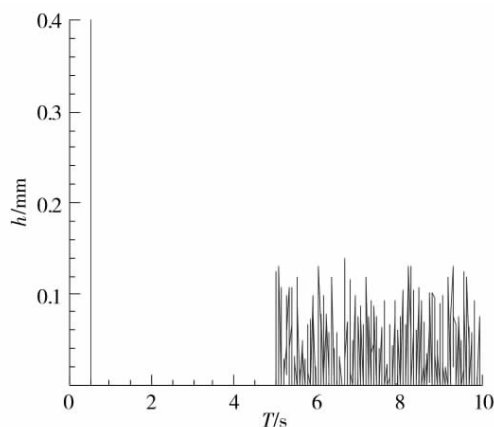


图 11 第二次均匀设计的阀芯开度

Fig. 11 Response curves of opening of valve core with better point of the second DOE

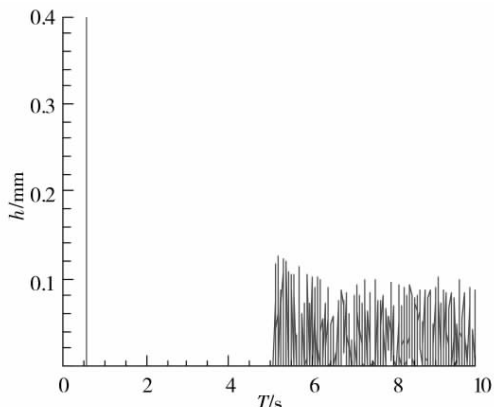


图 12 PSO 优化结果

Fig. 12 Response curve of opening of valve core with result of PSO

口的压强变化范围在 3.2~3.6 MPa 之间. 图 13 显示, 低压腔的出口压力在系统工作 6 s 后在 3.3~3.5 MPa 之间振荡, 完全符合设计要求, 即通过改变减压器结构使得气封试验系统的动态性能得到优化, 满足工程部门的需求.

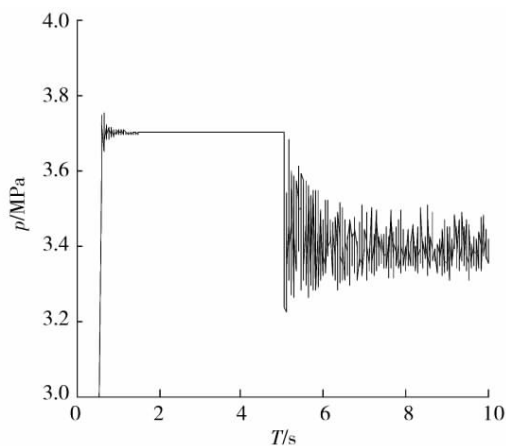


图 13 最优结果的低压腔压力

Fig. 13 Response curve of outlet pressure with optimal design

试验调试时, 该减压器曾出现高频振荡引发的啸叫现象, 说明在初始设计点确实存在振荡, 验证了仿真计算的正确性. 后经增大阻尼孔直径、增大反馈腔容积、减小反馈孔直径等一系列改进措施后未再出现振荡. 这与文中优化过程中增大阻尼孔直径的措施相符. 文中结构参数的变化趋势对减压器稳定性的影响, 可用于同类型减压器的设计中.

综合来看, 通过构造两次 10 水平 5 因素的均匀设计表进行 10 次仿真的方式, 对于缩小设计变量的取值搜索范围十分有效. 对于设计变量较多, 仿真过程复杂的优化问题, 采用均匀设计表进行试验设计能够有效提高搜索效率, 缩短计算时间.

5 结 论

本文将均匀设计与粒子群优化方法相结合, 对涡轮气封试验减压系统的关键部件逆向卸荷膜片式减压器的结构参数进行了优化. 通过构造均匀设计表进行试验设计, 缩小了设计变量的搜索范围, 提高了优化计算效率. 优化后的减压器出口压力满足工程设计要求, 优于初始设计值. 粒子群优化过程中的并行计算模式有效提高了计算效率, 值得推荐.

参考文献:

[1] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出

- 版社,2001.
- [2] 王元,方开泰. 关于均匀分布与试验设计(数论方法)[J]. 科学通报,1981,26(2):65-70.
WANG Yuan, FANG Kaitai. Concerning about uniform distribution and design of experiment[J]. Chinese Science Bulletin,1981,26(2):65-70. (in Chinese)
- [3] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C] // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, Australia; IEEE, 1995:1942-1948.
- [4] Bergh F, Engelbrecht A P. A study of particle swarm optimization particle trajectories [J]. Information Sciences, 2006, 176(8):937-971.
- [5] Kadiramanathan V, Selvarajah K, Fleming P J. Stability analysis of the particle dynamics in particle swarm optimizer[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(3):245-255.
- [6] Fernandez Martinez J L, Garcia Gonzalo E, Fernandez Alvarez J P. Theoretical analysis of particle swarm trajectories through a mechanical analogy[J]. International Journal of Computational Intelligence Research, 2008, 4(2):93-104.
- [7] Park J B, Jeong Y W, Shin J R, et al. An improved particle swarm optimization for nonconvex economic dispatch problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1):156-166.
- [8] Birkan C, Cathal H. Sequential metamodeling with genetic programming and particle swarms[C] // Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference. American; IEEE, 2009:3150-3157.
- [9] Secrest B. Travelling salesman problem for surveillance mission using PSO[D]. Ohio, USA; Air Force Institute of Technology, 2001.
- [10] Hu X, Eberhart R C. Multiobjective optimization using dynamic neighborhood particle swarm optimization[C] // Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation. Honolulu, USA; IEEE, 2002:1677-1681.
- [11] Zhang W, Liu Y, Clerc M. An adaptive PSO algorithm for reactive power optimization[C] // Proceedings of Sixth International Conference on Advances in Power Control, Operation and Management. Hong Kong; [s. n.], 2003:302-307.
- [12] 陈阳, 高芳, 张黎辉. 减压器动态仿真的有限体积模型[J]. 推进技术, 2006, 27(1):9-14.
CHEN Yang, GAO Fang, ZHANG Lihui. Finite volume model for numerical simulation on dynamic process of pressure reducing regulator [J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(1):9-14.