

1-8-2019

Optimization of Frictionless Cylinder-structure Based on PSO

Liu Yu

BeiJing Institute of Petrochemical Technology Information Engineering School , Beijing 102617, China;

Gouxin Zhao

BeiJing Institute of Petrochemical Technology Information Engineering School , Beijing 102617, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Optimization of Frictionless Cylinder-structure Based on PSO

Abstract

Abstract: Aerostatic frictionless cylinder is the critical component of pneumatic gravity compensation device, the key of its design is to take all related factors into consideration for optimum performance. To optimize the structure of aerostatic frictionless cylinder, the optimal parameters in the cylinder are proposed, which maximizes the bearing capacity in radial direction and keeps the leakage at a relatively low level. *Through analyzing the structure of the aerostatic frictionless cylinder, a mathematic model of the aerostatic frictionless cylinder is deduced. Based on simulations, the relationship during the structural parameters, the bearing capacity and the leakage is acquired. It is possible to calculate a group of relatively optimal parameters by particle swarm optimization algorithms(PSO).* This analysis method and results play an effective role in guiding the structural design of the aerostatic frictionless cylinder.

Keywords

aerostatic frictionless cylinder, structure optimization, bearing capacity, PSO

Recommended Citation

Liu Yu, Zhao Gouxin. Optimization of Frictionless Cylinder-structure Based on PSO[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3564-3570.

基于粒子群优化算法的无摩擦气缸结构优化

刘昱, 赵国新

(北京石油化工学院 信息工程学院, 北京 102617)

摘要: 静压气浮式无摩擦气缸作为气动重力补偿器中关键部件, 其结构设计关键在于统筹兼顾各种相关因素, 使其具有最优的性能。为优化无摩擦气缸的结构, 提出在气缸结构设计中, 存在一组最优结构参数, 使得径向承载能力最大的同时保证相对较小的泄漏量; 通过分析气缸结构, 推导其数学模型, 得到单个参数对径向承载能力及泄漏量的关系; 利用粒子群优化算法(PSO)对其结构参数进行优化, 得到一组最优结构参数; 该分析方法与结果对静压气浮式无摩擦气缸结构设计起到有效的指导作用。

关键词: 静压气浮式无摩擦气缸; 结构优化; 承载力; 粒子群

中图分类号: TP241.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 09-3564-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809043

Optimization of Frictionless Cylinder-structure Based on PSO

Liu Yu, Zhao Gouxin

(BeiJing Institute of Petrochemical Technology Information Engineering School, Beijing 102617, China)

Abstract: Aerostatic frictionless cylinder is the critical component of pneumatic gravity compensation device, the key of its design is to take all related factors into consideration for optimum performance. To optimize the structure of aerostatic frictionless cylinder, the optimal parameters in the cylinder are proposed, which maximizes the bearing capacity in radial direction and keeps the leakage at a relatively low level. Through analyzing the structure of the aerostatic frictionless cylinder, a mathematic model of the aerostatic frictionless cylinder is deduced. Based on simulations, the relationship during the structural parameters, the bearing capacity and the leakage is acquired. It is possible to calculate a group of relatively optimal parameters by particle swarm optimization algorithms(PSO). This analysis method and results play an effective role in guiding the structural design of the aerostatic frictionless cylinder.

Keywords: aerostatic frictionless cylinder; structure optimization; bearing capacity; PSO

引言

为保证太空站、飞行器等系统的高可靠性及精度, 在轨飞行前必须在地面上利用零重力系统对其各子系统进行动力学试验^[1]。目前, 零重力

系统的实现方式主要为被动或主动控制的悬挂系统两种^[2-4]。气动重力补偿系统作为一种特殊的零重力系统, 由于其具有刚度低、行程长等优点, 在低频动力学测试中得到了广泛运用。作为气动重力补偿系统的核心部件之一的气浮无摩擦气缸, 对其进行稳定的压力控制时, 控制效果受制于泄漏流量大小以及活塞径向承载能力, 因此必须对其参数进行优化^[5]。

气浮无摩擦气缸的设计关键在于统筹兼顾各



收稿日期: 2016-11-18

修回日期: 2017-01-22;

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51405023);

作者简介: 刘昱(1983-), 男, 回族, 云南, 博士, 副教授, 研究方向为流体传动与控制; 赵国新(1963-), 男, 辽宁, 硕士, 教授, 研究方向为系统优化。

<http://www.china-simulation.com>

• 3564 •

种相关因素,使其具有最优的性能^[6]。然而,目前气浮无摩擦气缸的设计多以经验为主,缺乏一套行之有效的优化设计方法^[7]。

对于此类多目标优化问题,各优化目标之间由于存在相互制约关系,较难使所有优化目标同时达到最优性能。因此,通常在多个目标之间进行协调,寻找折中最优解^[8]。

传统的优化算法,如单纯形法、牛顿迭代法、共轭方向法等主要针对单目标优化问题。这类优化算法通常具有搜索效率高,收敛速度快等特点。但是,对于那些计算梯度信息较为困难的问题,传统优化算法则无能为力。同时,对于那些优化目标函数是多模态、多峰的问题,传统优化方法会很快陷入局部最优解,而且很难跳出局部最优。

进化算法是一类模拟“优胜劣汰”行为的启发式搜索算法,具有较强的自组织性及自适应性。与传统优化算法相比,其不需要计算优化目标函数的梯度信息。在一次独立运行过程中可以得到多个解,非常符合多目标优化问题最优折中解的特点。另外,由于进化算法具有潜在的分布式及并行性的特点,其在解决大规模优化问题上有着明显的优势。因此,进化算法解决了传统优化方法在处理复杂多目标优化问题时面临的局限性。

粒子群优化算法(PSO)是一种具有代表性的进化算法,其原理是模拟鸟群和鱼群捕食等社会群体行为,算法结构简单、设置参数少,收敛速度也快很多,特别适合实参数优化问题。近年来粒子群算法在函数优化、多目标规划、组合优化及多任务调度等许多领域得到了广泛的应用^[9]。

本文针对重力补偿器中的关键部件气浮无摩擦气缸,为使其达到更好的性能,首次将粒子群优化算法引入气缸结构参数的设计中,实现了气缸参数的优化。

1 活塞与缸筒间的气体流动模型

为了得到无摩擦气缸的气体泄漏流量和活塞径向承载能力与结构参数之间的关系,需要分析缸

套内壁和活塞间的气膜压力分布状况^[10]。考虑气缸活塞半径远远大于气膜厚度,活塞表面曲率的影响可以忽略,而将气膜及活塞表面沿周向展开成平面进行研究,如图1所示。在圆周方向将活塞的表面根据单排节流孔的数目分成 n 等份,则每一等份 $i=1,2,\dots,n$ 的宽度均为 $b=\pi D/n$,同时假定,气膜厚度在每一等份中为常数且等于该节流孔处的间隙值 $h_i(i=1,2,\dots,n)$ 。

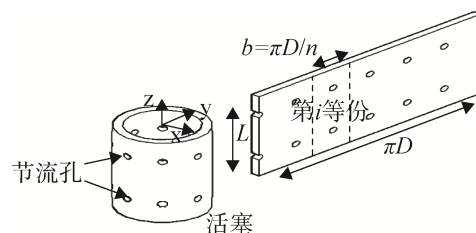


图1 活塞沿周向展开示意图

Fig. 1 Sketch of piston in circumferential direction

任意等份 i 中间隙内气体流动如图2所示。活塞长度 L ,活塞直径为 D ,两个活塞端面到两侧节流孔中心线的距离均为 l ,节流孔直径为 d ,节流孔前压力即气缸供气压力为 p_c ,两排节流孔后压力分别为 p_{d1i} 和 p_{d2i} ,大气压力和密度分别为 p_a 、 ρ_a 。

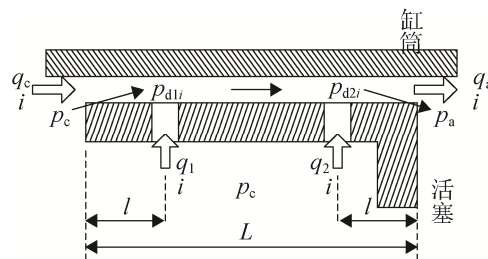


图2 间隙气体流动模型

Fig. 2 Model of airflow

根据流体润滑理论,在假设条件下,间隙内气体压力分布可由非定常雷诺方程描述。雷诺方程是描述流体润滑力学特性的二维偏微分方程,但是求其解析解的难度很大。为了便于工程计算和参数优化,对于任意等份 i 在间隙内流动的气体做如下假设:

①空气为满足理想气体定律的理想气体;

②气体无径向、周向流动,呈无惯性一维轴向流动;

③间隙中气体流动为等温过程^[11];

④气体流动为纯粘性流动,粘性系数为常数;

⑤气体流动是稳态的,忽略气体的质量及惯性力。

气体运动方程简化为:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: μ 为气体粘性系数; u 为气体沿 x 方向的运动速度; p 为间隙内的压力分布。

对式(1)在气膜厚度方向积分,并忽略活塞运动速度,得到缸筒和活塞间隙流动的质量流量方程^[11]:

$$q_i = \frac{bh_i^3 \rho_a}{12\mu p_a} \cdot p \frac{dp}{dx} \quad (2)$$

根据质量连续性方程,有:

$$q_{ai} = q_{0i} + q_{1i} + q_{2i} \quad (3)$$

式中: q_{0i} 为通过端面间隙的气体质量流量; q_{ai} 为每等份间隙流出的总质量流量; q_{1i} 和 q_{2i} 分别为流过两个节流孔的质量流量。

由于长度很短,气体在较短的节流孔中流动可看做是绝热过程。因此,单个节流孔的质量流量方程为:

$$q = C_f A p_0 \sqrt{\frac{2\rho_a}{p_a}} \psi(p_d, p_0) \quad (4)$$

式中: A 为节流面积; C_f 为气体流量系数; p_0 、 p_d 为节流孔前后压力; k 为气体比热比,对空气而言 $k=1.4$; ψ 为孔口流量函数,由气体流动状态确定:

$$\left(\frac{p_d}{p_0}\right) = \begin{cases} \sqrt{\frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_d}{p_0}\right)^{2/k} - \left(\frac{p_d}{p_0}\right)^{k/(k+1)} \right]}, & \frac{p_d}{p_0} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)} \\ \frac{k}{2} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/(k-1)}, & \frac{p_d}{p_0} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)} \end{cases} \quad (5)$$

在此处,根据式(4)求得 q_{1i} 和 q_{2i} :

$$\begin{cases} q_{1i} = C_f A p_0 \sqrt{\frac{2\rho_a}{p_a}} \psi\left(\frac{p_{d1i}}{p_c}\right) \\ q_{2i} = C_f A p_0 \sqrt{\frac{2\rho_a}{p_a}} \psi\left(\frac{p_{d2i}}{p_c}\right) \end{cases} \quad (6)$$

在任意等份 i 中间隙中气体呈一维稳态流动,不存在周向压力梯度,即在高度坐标 x 处宽度 b 内的压力不变。为分析气膜的压力分布,式(2)分离变量后对 x 和 p 积分,得到:

$$p_0^2 - p^2 = \frac{24\mu q_{0i} p_a}{bh_i^3 \rho_a} x \quad (7)$$

由于存在多个节流孔,气体节流后压力不同。当 $x=0, l, L-l, L$ 时, $p=p_c, p_{d1}, p_{d2}, p_a$ 。分段做定积分计算,得到:

$$\begin{cases} p_0^2 - p_{d1i}^2 = \frac{24\mu l p_a}{bh_i^3 \rho_a} q_{0i}, & x \in [0, l] \\ p_{d1i}^2 - p_{d2i}^2 = \frac{24\mu (L-l) p_a}{bh_i^3 \rho_a} (q_{0i} + q_{1i}), & x \in [l, L-l] \\ p_{d2i}^2 - p_a^2 = \frac{24\mu l p_a}{bh_i^3 \rho_a} q_{ai}, & x \in [L-l, L] \end{cases} \quad (8)$$

联立式(3)、(6)、(8),三个非线性方程构成方程组,见式(9):

$$\begin{cases} \left(p_0^2 - p_{d1i}^2 \right) - \frac{24\mu l p_a}{bh_i^3 \rho_a} \left(q_{ai} - C_f A p_0 \sqrt{\frac{2\rho_a}{p_a}} \psi\left(\frac{p_{d1i}}{p_c}\right) - C_f A p_0 \sqrt{\frac{2\rho_a}{p_a}} \psi\left(\frac{p_{d2i}}{p_c}\right) \right) = 0 \\ \left(p_{d1i}^2 - p_{d2i}^2 \right) - \frac{24\mu (L-l) p_a}{bh_i^3 \rho_a} \left(q_{ai} - C_f A p_0 \sqrt{\frac{2\rho_a}{p_a}} \psi\left(\frac{p_{d2i}}{p_c}\right) \right) = 0 \\ \left(p_{d2i}^2 - p_a^2 \right) - \frac{24\mu l p_a}{bh_i^3 \rho_a} q_{ai} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

对于活塞任意等份 i 都有三个方程,待求出的未知量为 p_{d1i} 、 p_{d2i} 和 q_{ai} , 故问题封闭可解。由于方程具有较强的非线性, ψ 函数使得方程变为超越方程, 只能通过数值解法求取方程组的解。

2 气缸泄漏量与活塞径向承载力

将所有等份的气体质量流量叠加, 得到气缸总泄漏质量流量 q , 即为:

$$q = \sum_{i=1}^n q_{ai} = \sum_{i=1}^n (q_{0i} + q_{1i} + q_{2i}) \quad (10)$$

由数学模型可以推导出活塞间隙内气体的压力分布为:

$$p = \begin{cases} \left(p_0^2 - (p_0^2 - p_{d1}^2) \frac{x}{l} \right)^{1/2}, & x \in [0, l] \\ \left(p_{d2}^2 - (p_{d1}^2 - p_{d2}^2) \frac{x-l}{L-2l} \right)^{1/2}, & x \in (l, L-l] \\ \left(p_{d2}^2 - (p_{d2}^2 - p_a^2) \frac{x-(L-l)}{l} \right)^{1/2}, & x \in (L-l, L] \end{cases} \quad (11)$$

活塞偏心压力投影关系如图3所示。

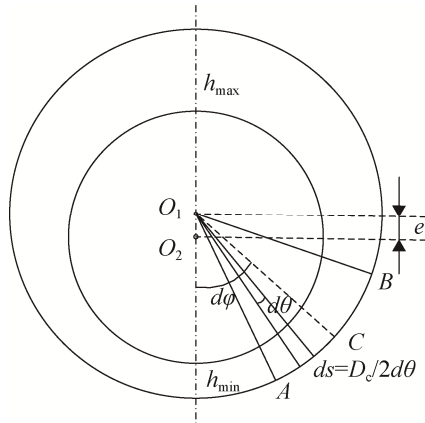


图3 活塞偏心力投影

Fig. 3 Eccentric force-projection of piston

活塞间隙的分布规律为:

$$h_i = h_0 (1 - \varepsilon \cos \varphi_i) \quad (12)$$

式中: φ_i 为基准线与节流孔中心线的夹角; ε 为偏心率; e 为活塞的偏心量; h_0 为平均径向间隙, 且有 $\varepsilon = e/h_0$, $\varepsilon \in [0, 1]$ 。

图中 AB 为第 i 等份弧长, 单位轴向长度合力在该等份上的投影为:

$$F = 2 \int_0^{\pi/n} p ds \cos \theta = Dp \int_0^{\pi/n} \cos \theta d\theta = Dp \sin \frac{\pi}{n} \quad (13)$$

在任意等份 i 中, 不存在周向压力梯度, 故等份 i 的总合力为:

$$W_i = \int_0^L F dx = \int_0^L Dp_i \sin \frac{\pi}{n} dx \quad (14)$$

将压力分布式(11)代入式(14), 变换后得:

$$W_i = \frac{2}{3} p_0 D \sin \frac{\pi}{n} \left(l \frac{\beta_{1i}^3 - 1}{\beta_{1i}^2 - 1} + (L-2l) \frac{\beta_{2i}^3 - \beta_{1i}^3}{\beta_{2i}^2 - \beta_{1i}^2} + l \frac{\sigma^3 - \beta_{2i}^3}{\sigma^2 - \beta_{2i}^2} \right) \quad (15)$$

式中: 节流压力比 $\beta_{1i} = p_{d1i}/p_c$; $\beta_{2i} = p_{d2i}/p_c$, 供气压力比 $\sigma = p_a/p_c$, $i=1, 2, \dots, n$ 。

将活塞各等份合力对基准线的投影分量进行叠加, 得到活塞径向承载能力:

$$W = \sum_{i=1}^n W_i \cos \varphi_i \quad (16)$$

3 基于粒子群算法的结构优化

气浮无摩擦气缸具有众多结构参数, 如节流孔的数目、位置及直径、缸筒与活塞的间隙、活塞的直径和长径比等, 所有参数均会影响其性能指标, 需要兼顾多种因素, 使其达到最佳性能。

3.1 粒子群算法的基本原理

在 n 维空间中有 m 个微粒, 微粒坐标定义为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$, 目标函数作为微粒的适应 f_{fitness} 。同时, 每个微粒具有各自的飞行速度 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$ 。对于任意一个微粒 i , 其本身最优位置记为 $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$, 也称为 P_{best} 。所有微粒经过的最优位置记为 $p_g = (g_1, g_2, \dots, g_n)$, 也称为 G_{best} 。对第 t 代的第 i 个微粒, 根据下面两个式子计算第 $t+1$ 代的第 j 维的速度和位置^[12]:

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij} + c_1 r_{1j}(t)(p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 r_{2j}(t)(p_{gj}(t) - x_{ij}(t)) \quad (17)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (18)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m$; r_1 、 r_2 为 0~1 之间的随机数; c_1 、 c_2 为加速度权重。

粒子群算法的执行步骤如下:

①初始化粒子群初始位置及速度。

②根据每个粒子的适应度值求取全局最优位置 p_g 。

③对于每一个粒子，将其历史最好位置 p_i 适应度值与其目前的适应度值比较，根据比较结果更新其最优位置。

④对于每一个粒子，将全局最优位置 p_g 的适应度值与其适应度值比较，根据比较结果更新全局最优位置。

⑤根据公式(17)和(18)对粒子的位置和速度进行更新。

⑥若未实现足够好的适应度值或预设的最大代数，则返回②，否则结束。

3.2 基于粒子群算法的多目标优化

无摩擦气缸的结构参数优化问题属于典型的多目标有约束非线性规划问题，以气体总泄漏量和活塞径向承载能力作为优化目标。其优化模型可描述如下：

$$\begin{cases} \text{Maximize: } f_{\text{fitness}} = \omega_1 W(x) + \omega_2 / q(x) \\ x = [x_1, x_2, x_3, x_4] = [n, d, h_0, l/L] \\ x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}, i = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (19)$$

式中： f_{fitness} 为最大化目标函数，即活塞径向承载力最大及气缸泄漏量最小； ω_1 取值为 1， ω_2 取值为 1000； x 为设计变量； $x^{\min}$ 和 $x^{\max}$ 分别为设计变量的上下界。

气缸压力 p_c 和活塞偏心率 ε ，决定了无摩擦气缸的工作点状态，属于外部因素，在参数优化过程中将它们取为一般值即可。气浮无摩擦气缸涉及到的结构参数有：活塞与缸筒的间隙 h_0 、节流小孔的直径 d 、数目 n 和位置 l/L 、长径比 L/D 、活塞直径 D 。其中，活塞直径 D 在实际使用中由负载决定；活塞长径比 L/D 通常也由安装条件所限制；根据先验知识，将其他结构参数变量的取值范围定义如表 1 所示。

设初始粒子数量为 30，迭代次数为 60，按照算法流程进行迭代计算，各参数及适应度收敛过程如图 4~8 所示。

表1 结构参数取值范围

Tab. 1 Range of structural parameters

名称	范围	名称	范围
d/mm	0.1~1	n	4~16
h_0/mm	0.02~0.2	l/L	0.1~0.4
D/mm	50	L/D	1.5
p_c/MPa	0.3	ε	0.3

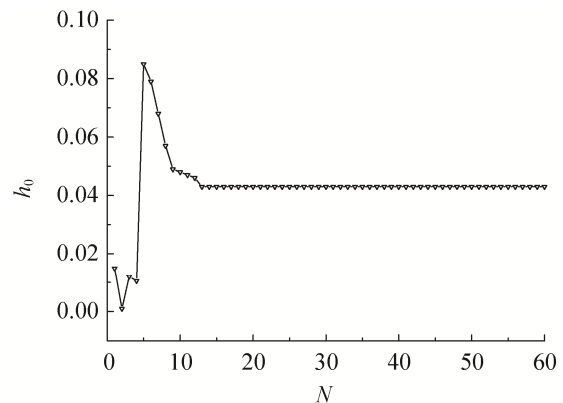


图4 间隙收敛过程

Fig. 4 Convergent process of h_0

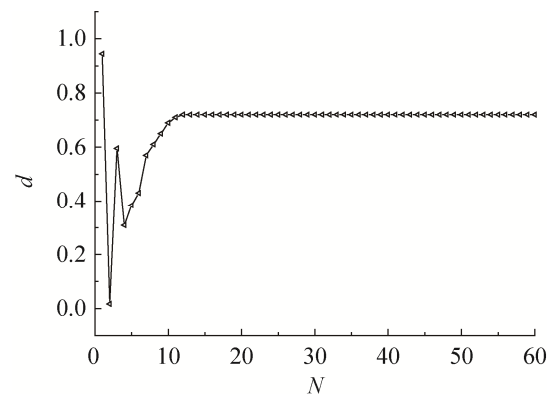


图5 节流孔直径收敛过程

Fig. 5 Convergent process of d

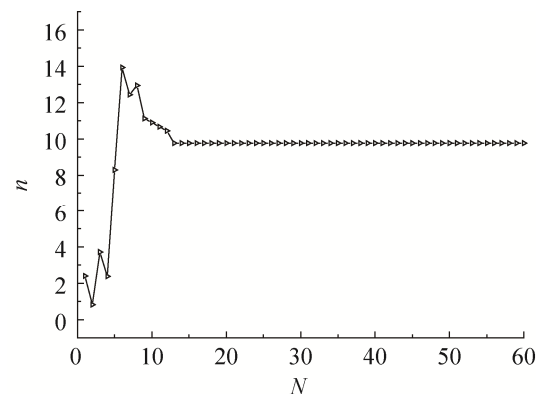


图6 节流孔数目收敛过程

Fig. 6 Convergent process of n

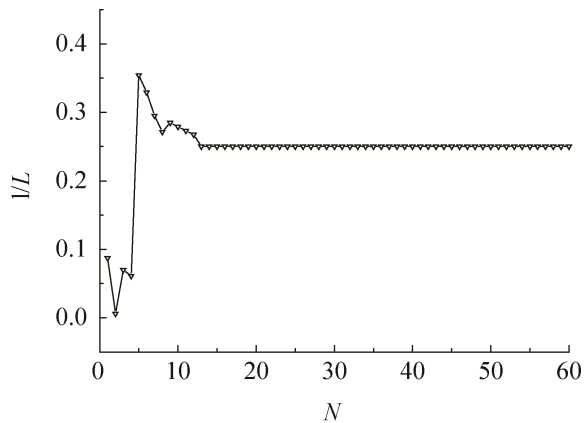


图7 节流孔位置收敛过程
Fig. 7 Convergent process of l/L

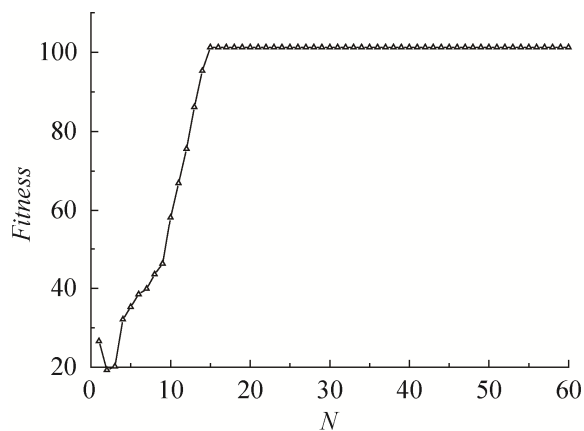


图8 适应度收敛过程
Fig. 8 Convergent process of fitness

由图4~8可以看出,粒子群算法的迭代速度很快,大概15步计算即可接近目标值。最终参数收敛值为:活塞与缸筒的间隙 $h_0=0.043$ 、节流小孔的直径 $d=0.72$ 、数目 $n=9.76$ (考虑到 n 为整数,在此取10)和位置 $l/L=0.25$,粒子群最终适应度为101.258。

3.3 优化结果验证

为了验证优化结果的有效性,笔者在参数取值范围内随机抽选了10组参数与最优参数进行对比,对比结果见表2。

由表2可清晰的看出,最优参数与其它组参数相比,在具有相对较大的径向承载能力同时也保证了较小的泄漏量,达到了综合性能最优的目的。

表2 参数对比

Tab. 2 Comparison of parameters					
h_0/mm	d/mm	n	l/L	W/N	q/Lmin^{-1}
0.043	0.72	10	0.25	69	31
0.02	0.1	16	0.36	65	55
0.04	1	15	0.3	70	212
0.06	0.2	14	0.24	56	52
0.08	0.9	13	0.19	63	232
0.1	0.3	12	0.13	72	65
0.12	0.8	11	0.1	58	109
0.14	0.4	9	0.16	47	230
0.16	0.7	8	0.21	35	330
0.18	0.5	7	0.27	27	510
0.2	0.6	6	0.33	39	670

4 结论

本文建立了活塞径向承载能力、气缸-活塞间隙内的气体压力分布和气体泄漏流量的数学模型,并引入粒子群优化算法对气缸的结构参数进行优化。通过设计合理的目标函数实现了气体泄漏量最小和径向承载能力最大两目标参数优化计算。利用该设计方法,获得了活塞结构参数的最优组合,仿真结果表明,该分析方法与结果对静压气浮式无摩擦气缸结构设计起到有效的指导作用。

参考文献:

- [1] Kienholz D A. Simulation of the Zero-gravity Environment for Dynamic Testing of Structures[C]. Proceedings of the 19th Space Simulation Conference. Baltimore, 1996.
- [2] Ikegami R, Eckblad M Z, Blackman J E, et al. Zero-G Ground Test Simulation Methods[C]. Proceedings of the 11th Aerospace Testing Seminar. Manhattan Beach, CA, USA: 1988: 215-226.
- [3] Woodard S E, Cooley V M. NASA CSI Suspension Methods Overview[R]. Washington D C, USA: NASA, 1989.
- [4] Michael W K, Lawrence C F. Aircraft Ground Vibration Testing at the NASA Dryden Flight Research Facility, 104275[R]. Washington D C, USA: NASA, 1993.
- [5] 路波,陶国良,刘昊,等.气悬浮无摩擦气缸的结构多目标优化设计[J].中国机械工程,2008,19(14):1681-1686.
Lu Bo, TAO Guoliang, Liu Hao, et al. Structural

- 向量机的短期负荷预测[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(11): 220-223, 227.
- SHI Xiaoyan, LIU Huaixia, YU Shuijuan. Short-time load prediction based on support vector machine optimized by catfish particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(11): 220-223, 227.
- [13] Lingling Hu, Yecai Guo, Tao Yuan, et al. Orthogonal Wavelet Transform Dynamic Weighted Multi-Modulus Blind Equalization Algorithm Based on Dynamic Particle Swarm [J]. Journal of Computers, 2013, 8(8): 2011-2017.