

DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2010.09.022

混合遗传算法在磁性液体密封齿形优化中的应用*

杨文明 李德才 张海丽

(北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044)

摘要:为使小生境遗传算法快速收敛,减少总的运算时间,在小生境遗传算法中融入局部贪婪性搜索过程,形成混合遗传算法。基于该算法,对磁性液体密封齿形进行优化设计。结果表明,混合遗传算法同样能够找到多组最优解,但与小生境遗传算法的计算过程相比,显著减小了进化代数,且总的运算时间减为原来的82%。

关键词:混合遗传算法;小生境遗传算法;磁性液体密封;齿形优化;局部搜索

中图分类号: TB42; TP30 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-0150(2010)9-091-4

A Hybrid Genetic Algorithm and Its Application in Teeth Shape Optimization in Magnetic Fluid Seal

Yang Wenming Li Decai Zhang Haili

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The hybrid genetic algorithm formed by the improvement of niche genetic algorithm using the thought of local search algorithm was studied, which can accelerate the convergence of the algorithm and reduce the total calculating time. This algorithm was used to optimize the teeth shape in magnetic fluid seal. The result shows that multi-group optimal solution is found, the evolutionary generations reduce greatly and the total calculation time decrease to 82% compared with niche genetic algorithm.

Keywords: hybrid genetic algorithm; niche genetic algorithm; magnetic fluid seal; teeth shape optimization; local search

磁性液体密封是一种新型的零泄漏密封,它具有压力、真空和防尘等多种密封形式^[1],并已经应用于化工、国防、制药和航空航天等多个领域中^[2]。而现在,这种密封的设计主要是在材料已经确定的基础上,从经验总结的参数范围中选取设计参数^[2]。这样的设计往往能够满足使用要求,但选择的设计参数并非最优值,且容易造成材料的浪费。孙明礼等^[3]用 Ansys 软件自带的优化设计器对磁性液体密封齿形进行了优化设计,这种方法能够找到较优解,且运算速度较快,但由于其算法自身的局限性,很难保证找到全局最优解。

遗传算法是一种适用性较强的全局优化算法^[4-5],合适的遗传算法能够找到优化问题的所有最优解^[6-7]。但在磁性液体密封齿形的优化中,由于复杂的边界条件导致对磁场分布的计算较为困难,与遗传算法结合起来计算更为不易。作者曾应用小生境遗

传算法,结合专业的磁场计算软件 Ansys 对密封齿形进行过优化,这样虽然能够找到不止一个的全局最优解,但收敛速度较慢,需要进化上百代才能得到满足要求的解,这在普通计算机上计算需要近 17 h。

本文作者在小生境遗传算法的基础上,融入局部贪婪性搜索过程,使进化过程尽快收敛,并结合 Ansys 软件计算磁场分布,在其他条件确定的情况下,找到使密封耐压达到最大的最优齿形设计。

1 磁性液体密封齿形优化设计的数学模型

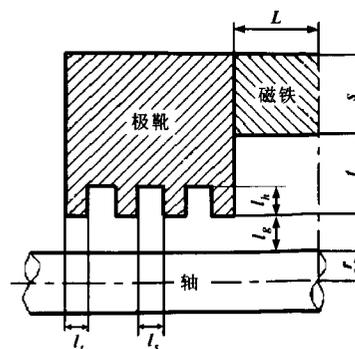


图1 磁性液体密封结构示意图

Fig 1 Typical structure of magnetic fluid seal

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(50875017)。

收稿日期: 2010-04-08

作者简介: 杨文明(1985—),男,博士研究生,主要研究方向为磁性液体的理论及应用。E-mail: 06116260@bjtu.edu.cn。

图1为磁性液体密封结构示意图。其中的优化设计参数为图中的齿宽 l_1 、槽宽 l_2 和槽深 l_h ，各齿的尺寸相同。

密封设计中通常以耐压能力为设计目标，且单个齿下的耐压可以写成^[1]：

$$\Delta p = \mu_0 M_s (H_{\max} - H_{\min}) = \mu_0 M_s \Delta H \quad (1)$$

式中： μ_0 、 M_s 分别为真空磁导率和磁性液体的饱和磁化强度； H_{\max} 、 H_{\min} 分别为密封间隙内磁性液体所在区域磁场强度的最大值和最小值。

当给定磁性液体种类后，其饱和磁化强度 M_s 为一定值，由式(1)可知，此时磁性液体密封的耐压取决于密封间隙内的磁场强度。因此，在优化设计中以磁场强度的最大值和最小值的差值 ΔH 为目标函数，使得该值为最大的齿形设计，也即是耐压达到最大的齿形设计。结合现有的设计原则^[2]，对于通常的密封间隙为0.1 mm的密封结构，优化设计的数学模型可以写成：

$$\begin{cases} \max f(X) = \sum_{i=1}^n (H_{\max}^i - H_{\min}^i) = \sum_{i=1}^n \Delta H^i \\ \text{s. t. } 0.3 \leq l_1 \leq 0.5 \\ 2 \leq l_2 \leq 3 \\ 2 \leq l_h \leq 3 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $X = [l_1, l_2, l_h]^T$ ， $f(X)$ 为目标函数， n 为齿数， $i=1, 2, \dots, n$ ，式中数值的单位为mm。

2 混合遗传算法的实现方法

应用小生境技术能够使遗传算法避免收敛于局部最优解，但其收敛速度较慢，耗费时间较长。为了加速收敛，将收敛速度较快的可行方向法这种局部搜索算法的思想^[8]融入小生境遗传算法，即在每一代的进化中，将选择、交叉和变异后的群体中各个体作为初值，再进行一次局部搜索运算，搜索所得的较优个体代替原个体，较差的个体则舍掉。总的优化步骤为：

(1) 随机生成由 l_1 、 l_2 、 l_h 各参数值组成的规模为 M 的初始群体；

(2) 计算群体中各个个体的适应度并按适应度大小进行降序排列，记忆前 N 个个体；

(3) 进行选择、交叉和变异运算；

(4) 群体与记忆的 N 个个体合并形成具有 $M+N$ 个个体的新群体，计算新群体中各个体的适应度函数值；

(5) 对所有个体进行局部搜索操作并形成新的群体和适应度集合；

(6) 进行小生境淘汰运算；

(7) 将运算后得到的 $M+N$ 个个体进行降序排列，记忆前 N 个个体；

(8) 终止条件判断，若不满足终止条件，则将第(5)步排序中的前 M 个个体作为下一代群体，然后转到第(3)步继续运算；否则输出结果。

2.1 适应度函数值的计算

由于目标函数值 $f(X)$ 总是非负，所以直接利用目标函数值作为个体适应度。适应度的计算步骤为：首先，Matlab主程序输出经选择、交叉和变异后的参数值，接着，启动Ansys软件，利用Ansys的APDL编程将参数读入，按读入的参数值建立密封结构模型，并进行网格划分和施加边界条件等操作，然后计算磁场分布并输出目标函数值。最后，Matlab将目标函数值读入，并进行后续的计算。Matlab输出参数并启动Ansys的命令为：

```
fid = fopen('e:\input.txt','wt');
aa = x(a,:);
fprintf(fid,'%6.4f%6.4f%6.4f\n',aa);
fclose(fid);
system('D:\Ansys\v110\ANSYS\bin\intel\ansys110 -b -p ane3fl -i e:\field_cal.txt -o e:\vm.out')
```

其中 x 为由各个体组成的矩阵，field_cal.txt为Ansys的APDL程序文件名。

Ansys读入参数的命令为：

```
*create,ff
*dim,exa,,1,3
*vread,exa,e:\input.txt,,kij,1,1,3
(3F6.4)
*end
```

Ansys输出目标函数值的命令为：

```
*dim,dis,,1,2
dis(1,1) = capability
*mwrite,dis,e:\output.txt,,kij,1,1,1
(1F11.3)
*end
```

其中capability为目标函数值。Matlab读入目标函数值的命令为：

```
fid = fopen('e:\output.txt','r');
b = fgetl(fid);
fclose(fid);
```

2.2 局部搜索操作

局部搜索操作的步骤为，对于群体中的每个个体 x_p^0 ($p=1, 2, \dots, N$ (群体中的个体数))，首先在 $(-1, 1)$ 区间内产生伪随机数 r_i ($i=1, 2, \dots, NVAR$ (变量个数))； $j=1, 2, \dots, k$ (搜索方向数)，按下式计算随机单位向量 e^j ：

$$e^j = \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^{NVAR} |r_i^j|\right)^{1/2}} \begin{bmatrix} r_1^j \\ r_2^j \\ \vdots \\ r_{NVAR}^j \end{bmatrix} \quad (j=1, 2, \dots, k)$$

取试验步长为 α ，按式 $x^j = x_p^0 + \alpha e^j (j=1, 2, \dots, k)$ 计算 k 个随机点。接着检验这 k 个随机点是否在可行范围内，计算可行点的目标函数值，如果该值大于初始值的目标函数值，则用该随机点代替原个体进入群体，同时保存其目标函数值以便于适应度的计算。

2.3 小生境淘汰运算

小生境淘汰运算的基本思想是：首先两两比较群体中各个个体之间的距离，若这个距离在预先指定的距离 L 之内，再比较两者之间适应度的大小，对其中适应度较低的个体施加一个较强的罚函数以极大地降低其适应度，使其在后面的进化中被淘汰的概率就极大，从而维护了群体的多样性。距离 D 采用 Hamming 距离：

$$\|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^{NVAR} (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad \begin{matrix} (i=1, 2, \dots, M+N-1) \\ (j=i+1, \dots, M+N) \end{matrix}$$

式中： $NVAR$ 为变量个数； M 为初始群体中的个体数； N 为记忆的个体数； x_{ik} 、 x_{jk} 为个体中的变量。

3 具体算例及优化结果分析

3.1 优化控制参数及密封结构其他参数的选取

算例中选取群体规模 $M=16$ ，记忆个体数 $N=4$ ，最大遗传代数为 100，二进制编码位数为 5，距离 $D=0.0005$ ，搜索方向数 $k=3$ ，试验步长 $\alpha=0.01$ 。密封结构中除优化参数外其他参数的选取为 $l_g=0.1$ mm， $L=3$ mm， $s=5$ mm， $t=4$ mm， $r=10$ mm， $n=4$ 。永磁铁材料选为钕铁硼 NdFeB-33SH，极靴材料选择电工纯铁，轴材料为 45# 钢。

3.2 计算结果与分析

表 1 为优化结果参数，混合遗传算法得到 2 组最优解，这可给密封结构的设计增加一定的灵活性。

表 1 计算结果参数值

Table 1 The resultant parameters of the optimization

参数	取值区间	常用典型值	优化结果	
			第一组	第二组
l_i/mm	0.3, 0.5	0.4	0.397	0.398
l_j/mm	2, 3	2.5	2.193	2.992
l_k/mm	2, 3	2.25	2.064	2.004

图 2 示出了混合遗传算法与小生境遗传算法优化相同问题时迭代次数与目标函数值的关系曲线的对比。可以看出，混合遗传算法迭代 30 次的优化结果与小生境遗传算法迭代 100 次的优化结果相同。而优化过程中耗时主要在调用 Ansys 计算目标函数值上，普通计算机上 Ansys 计算一次密封磁场分布大约需 30 s。整个优化过程中，混合遗传算法比小生境遗传算法减少调用 Ansys 次数 360 多次，减少用时约 3 h，总用时约为原来的 82%。

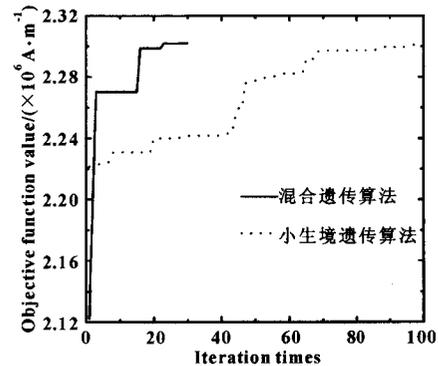


图 2 两种方法目标函数值与迭代次数关系的比较

Fig 2 The comparison of relationship between objective function value and iteration times in different methods

混合遗传算法迭代 30 次后，磁场强度差值最终收敛于 2.302×10^6 A/m，比典型值下的 1.976×10^6 A/m 增加了约 16.5%，如果选取磁性液体的饱和磁化强度为 0.05 T，忽略其他条件的影响，则优化后单侧齿的密封耐压可增加约 2.05 kPa。

表 2 优化前后密封间隙内磁场强度的对比

Table 2 Comparison of the magnetic field intensity in the sealing gap before and after optimization $\times 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$

磁场强度	优化前				第一组优化				第二组优化			
	1 齿	2 齿	3 齿	4 齿	1 齿	2 齿	3 齿	4 齿	1 齿	2 齿	3 齿	4 齿
H_{\min}	0.955 8	0.968 7	1.005 6	0.975 5	0.996 7	1.012 7	1.015 8	0.979 2	0.949 0	0.936 3	0.953 8	0.931 1
H_{\max}	5.775 8	5.985 3	5.985 7	5.923 3	6.795 0	6.784 8	6.783 7	6.656 9	6.666 1	6.713 0	6.739 4	6.671 7
ΔH	4.820 0	5.016 6	4.980 1	4.947 8	5.798 3	5.772 1	5.767 9	5.677 7	5.717 1	5.776 7	5.785 6	5.740 6
$\Sigma(\Delta H)$	19.76				23.02				23.02			

表 2 为优化前后密封间隙内磁场强度值的对比。可以明显看出优化后所有齿下 ΔH 和的增大情况,也即密封耐压较优化前明显增大。由于在永久磁铁的种类和尺寸确定后,密封间隙内磁场强度的大小取决于整个密封结构的磁路设计。密封齿作为磁路的一部分,其形状的设计直接影响着永久磁铁的工作点。优化后密封间隙内 ΔH 的和明显增大,说明优化后的齿形设计能使永久磁铁的磁性能得到最大程度的利用,永久磁铁的工作点更接近其最佳工作点。

此外,还发现,优化后各个齿下的 ΔH 相差较小,这是由于各齿的尺寸相同使得各齿所在磁路的磁阻近似相同的缘故。

4 结论

将局部贪婪性搜索过程融入小生境遗传算法形成的混合遗传算法能够有效地对磁性液体密封齿形进行优化。经与小生境遗传算法对同样问题的优化过程及结果进行对比,混合遗传算法同样可以找到多组最优解,但所需的进化代数明显减少,总的计算时间减为原来的 82%。

参考文献

- [1] Rosensweig R E. Ferrohydrodynamics [M]. New York: Dover Publications, INC, 2002.
- [2] 李德才. 磁性液体的理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 孙明礼, 李德才, 何新智, 等. 磁流体密封的磁场数值分析及优化设计 [J]. 真空科学与技术学报, 2007, 27(3): 269 - 272.
Sun Mingli, Li Decai, He Xinzi, et al. Simulation and design of magnetic fluid sealing devices [J]. Journal of vacuum science and technology, 2007, 27(3): 269 - 272.
- [4] Mistuo G, Runwei C. Genetic Algorithms and Engineering Optimization [M]. New York: Wiley & Sons, 2000.
- [5] 陈伦军. 机械优化设计遗传算法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [6] 刑立宁, 陈英武, 蔡怀平, 等. 求解全局优化问题的智能遗传算法 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(4): 1067 - 1069.
Xing Lining, Chen Yingwu, Cai Huaiping, et al. Intelligent Genetic Algorithm for Global Optimization Problem [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(4): 1067 - 1069.
- [7] 刘志刚, 王建华, 耿英三, 等. 一种改进的遗传模拟退火算法及其应用 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(5): 1099 - 1101.
Liu Zhigang, Wang Jianhua, Geng Yingsan, et al. A Modified Genetic Simulated Annealing Algorithm and Its Application [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(5): 1099 - 1101.
- [8] 孙靖民, 梁迎春. 机械优化设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [9] 梁玉蓉, 谭英杰. PP/黏土纳米复合材料的结构与性能 [J]. 化工学报, 2008, 59(6): 1571 - 1576.
Liang Yurong, Tan Yingjie. Structure and properties of PP/OMMT nanocomposites [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(6): 1571 - 1576.
- [10] 陈爽. 油酸修饰纳米粒子的摩擦学性能比较 [J]. 润滑与密封, 2007, 32(2): 108 - 110.
Chen Shuang. Comparison of the tribological properties of oleic acid capped inorganic nanoarticles [J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(2): 108 - 110.
- [11] 田玉明, 徐明霞, 刘祥志. 氧化钛纳米线阵列的溶胶凝胶模板合成与表征 [J]. 化工学报, 2006, 57(6): 1442 - 1446.
Tian Yuming, Xu Mingxia, Liu Xiangzhi. Preparation and characterization of highly ordered titanium oxide nanowire arrays by sol-gel template method [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(6): 1442 - 1446.
- [12] 陈爽, 杨军. 油溶性 CuO 纳米颗粒的抗磨性能研究 [J]. 润滑与密封, 2007, 32(7): 48 - 50.
Chen Shuang, Yang Jun. Study of the antiwear ability of oil-soluble CuO nanoparticles [J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(7): 48 - 50.
- [13] Lou W J, Chen M, Wang X B, et al. Novel single source precursors approach to prepare highly uniform Bi₂S₃ and Sb₂S₃ nanorods via a solvothermal treatment [J]. Chem Mater, 2007, 19: 872 - 878.
- [14] Duan T P, Lou W J, Wang X B, et al. Size-controlled synthesis of orderly organized cube-shaped lead sulfide nanocrystals via a solvothermal single-source precursor method [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects, 2007, 310: 86 - 93.
- [15] Chen X Y, Zhang Z J, Zhang X F, et al. Single-source approach to the synthesis of In₂S₃ and In₂O₃ crystallites and their optical properties [J]. Chem Phys Lett, 2005, 407: 482 - 486.
- [16] Liu W. Low temperature synthesis of hexagonal phase ZnS nanocrystals by thermolysis of an air-stable single-source molecular precursor in air [J]. Mater Lett, 2006, 60: 551 - 554.

(上接第 86 页)

Yang Guangbin, Zhao Zhe, Wu Zhishen, et al. Investigation of friction and wear behaviors of Cu(OH)₂-doped polyelectrolyte multilayers [J]. Tribology, 2006, 26(4): 300 - 305.

[8] Bakumin V N, Suslov A Y, Kuz'mina G N, et al. Topchiev, A. V. Surface-capped molybdenum sulphide nanoparticles—a novel type of lubricant additive [J]. Lubri Sci, 2004, 16: 207 - 214.

[9] Rapoport L, Fleischer N, Tenne R. Fullerene-like WS₂ nanoparticles; Superior lubricants for harsh conditions [J]. Adv Mater, 2003, 15: 651 - 655.

[10] 梁玉蓉, 谭英杰. PP/黏土纳米复合材料的结构与性能 [J]. 化工学报, 2008, 59(6): 1571 - 1576.

Liang Yurong, Tan Yingjie. Structure and properties of PP/OMMT nanocomposites [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(6): 1571 - 1576.

[11] 陈爽. 油酸修饰纳米粒子的摩擦学性能比较 [J]. 润滑与密封, 2007, 32(2): 108 - 110.

Chen Shuang. Comparison of the tribological properties of oleic acid capped inorganic nanoarticles [J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(2): 108 - 110.

[12] 田玉明, 徐明霞, 刘祥志. 氧化钛纳米线阵列的溶胶凝胶模板合成与表征 [J]. 化工学报, 2006, 57(6): 1442 - 1446.
Tian Yuming, Xu Mingxia, Liu Xiangzhi. Preparation and char-

acterization of highly ordered titanium oxide nanowire arrays by sol-gel template method [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(6): 1442 - 1446.

[13] 陈爽, 杨军. 油溶性 CuO 纳米颗粒的抗磨性能研究 [J]. 润滑与密封, 2007, 32(7): 48 - 50.

Chen Shuang, Yang Jun. Study of the antiwear ability of oil-soluble CuO nanoparticles [J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(7): 48 - 50.

[14] Lou W J, Chen M, Wang X B, et al. Novel single source precursors approach to prepare highly uniform Bi₂S₃ and Sb₂S₃ nanorods via a solvothermal treatment [J]. Chem Mater, 2007, 19: 872 - 878.

[15] Duan T P, Lou W J, Wang X B, et al. Size-controlled synthesis of orderly organized cube-shaped lead sulfide nanocrystals via a solvothermal single-source precursor method [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects, 2007, 310: 86 - 93.

[16] Chen X Y, Zhang Z J, Zhang X F, et al. Single-source approach to the synthesis of In₂S₃ and In₂O₃ crystallites and their optical properties [J]. Chem Phys Lett, 2005, 407: 482 - 486.

[17] Liu W. Low temperature synthesis of hexagonal phase ZnS nanocrystals by thermolysis of an air-stable single-source molecular precursor in air [J]. Mater Lett, 2006, 60: 551 - 554.