

# 改进蚁群算法设计拉式膜片弹簧

刘国光, 周剑平

(黄石理工学院 机械与动力工程系, 湖北 黄石 435003)

**摘 要:** 通过对拉式膜片弹簧载荷—变形特性的综合分析, 考虑各种约束条件, 提出了一种新的多目标优化设计数学模型. 该模型以在摩擦片磨损极限范围内, 弹簧压紧力变化的平均值最小及驾驶员作用在分离轴承装置上的分离操纵力的平均值最小为共同优化目标, 使离合器后备系数稳定, 离合器分离力的平均作用力较小. 蚁群算法是一种新型的元启发式优化算法, 该算法具有较强的发现较好解的能力, 但同时也存在一些缺点, 如容易出现停滞现象、收敛速度慢等. 将遗传算法和蚁群算法结合起来, 在蚁群算法的每一次迭代中, 首先根据信息量选择解分量的初值, 然后使用变异操作来确定解的值. 最后, 通过实例与其他优化方法的结果进行比较. 结果表明, 该算法有较好的收敛速度及稳定性.

**关键词:** 离合器; 拉式膜片弹簧; 蚁群算法

**中图分类号:** TH135

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-754X(2004)06-0334-04

## Improved ant colony algorithm for optimization design of pull-type clutch diaphragm spring

LIU Guo-guang, CHOU Jian-ping

(Department of Mechanics and Power Engineering, Huangshi Institute of Technology, Huangshi 435003, China)

**Abstract:** This paper presents a new multi-objective optimization design mathematical model by comprehensively analyzing the load-deflection characteristics and possible constraints of pull-type clutch diaphragm spring. This model takes the minimum of average compressing force of spring within the scope of the friction slice wear and the driver's minimum manipulating force on separating bearings as optimization objectives, which can bring a more stable reservation coefficient and a smaller declutching force. As a novel meta-heuristic optimization algorithm, ant algorithm possesses powerful ability in searching better solutions coexisting with the disadvantages such as easily immersing into stagnation, slow convergence speed and so on. Ant algorithm is combined with genetic algorithm. In each iteration of ant colony algorithm, the first step is to choose initial values of components by adopting the trail information, and then determine the solution by cross and mutation operations. Finally, comparison between this solution and the ones gained from other optimization algorithms is conducted, the result of which indicates that this algorithm have a much higher stability and convergence speed.

**Key words:** clutch; pull-type diaphragm spring; ant colony algorithm

在汽车的膜片弹簧离合器中, 膜片弹簧同时起压紧弹簧和分离杠杆的作用. 它的特性决定离合器的主要工作性能优劣, 使得在离合器的开发中, 膜片弹簧的设计显得尤为重要, 国内学者提出了多种不同的优化设计模型, 并采用不同的优化方法进行求解<sup>[1~5]</sup>. 本文讨论用改进蚁群算法对其结构参数进

行多目标优化设计.

### 1 拉式膜片弹簧的工作特点

采用膜片弹簧作为离合器的压紧弹簧有很多优点. 其一, 膜片弹簧可以兼起压紧弹簧和分离杠杆的双重作用, 从而简化了离合器的结构, 减轻质量, 缩

收稿日期: 2004-09-15.

作者简介: 刘国光(1946—), 男, 浙江鄞县人, 教授, 从事机电一体化及优化设计理论等研究, E-mail: hsgzlgg@sina.com.cn.

短轴向尺寸;其二,膜片弹簧与压盘以整个圆周接触,能使压力均匀分布,可避免偏磨;其三,膜片弹簧具有一般螺旋弹簧所没有的比较理想的非线性弹性特性(图1),在一定的磨损范围内,其压紧力几乎不变,且使离合器分离所需的踏板力较小,从而有利于减轻汽车驾驶员的劳动强度。

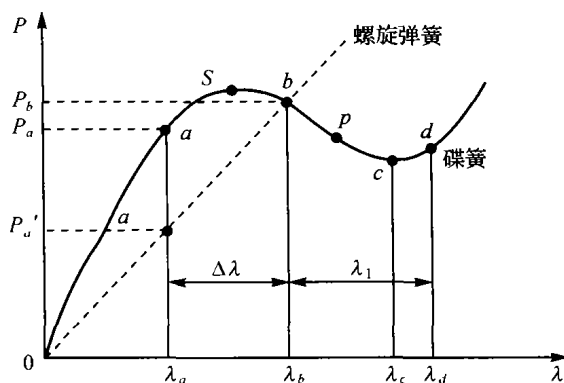


图1 膜片弹簧与圆柱螺旋弹簧载荷—变形特性曲线

Fig. 1 The characteristics of loading—deflection of diaphragm spring and cylindrical spiral spring

而拉式膜片弹簧离合器比推式具有更多的优点。拉式膜片弹簧离合器的膜片弹簧是以中部而不是大端与压盘相压,因此在同样压盘尺寸时可采用直径较大的膜片弹簧,从而在不增大分离的操纵力的条件下提高压盘的压紧力与离合器的扭矩容量,特别适合重型汽车使用。

拉式离合器盖支承处一直受向上的力和变形,但因分离力小于压紧力,于是从接合状态到分离状态的向上变形逐渐减小,所以离合器盖的变形量小,刚度大。另外,拉式膜片弹簧离合器膜片弹簧分离指的变形也都小于推式的,即减小了分离轴承的分离行程。因此拉式膜片弹簧离合器的总刚度比推式的要大,其分离效率高,分离特性较好。

拉式膜片弹簧离合器膜片弹簧取消了中间支承,减少了很多摩擦副和摩擦损失,且拉式的支点在膜片弹簧的外缘处,使分离杠杆比扩大,使得操纵更为轻便灵活;拉式离合器无论在接合或分离状态,膜片弹簧的大端与离合器盖支承环始终保持接触,减小了分离空行程,提高了分离效率,降低了在操纵离合器时产生的冲击和噪声。

## 2 拉式膜片弹簧的载荷—变形特性

目前通用的拉式膜片弹簧载荷—变形特性仍采用1936年Almen-Laszlo提出的近似公式<sup>[5]</sup>。

在结合位置,载荷 $P_1$ 作用在支承半径 $L$ 与加载半径 $e$ 处,在 $L$ 或 $e$ 处产生的大端变形量为 $\lambda_1$ ,则

$$P_1 = \frac{\pi E h \lambda_1 \cdot \ln \frac{R}{r}}{6(1-\mu^2)(L-e)^2} \cdot \left[ \left( H - \lambda_1 \frac{R-r}{L-e} \right) \left( H - \frac{\lambda_1}{2} \cdot \frac{R-r}{L-e} \right) + h^2 \right]; \quad (1)$$

在分离位置时,小端分离载荷 $P_2$ 作用在小端半径 $r_p$ 处,则

$$P_2 = \frac{\pi E h \lambda_1 \cdot \ln \frac{R}{r}}{6(1-\mu^2)(L-r_p)(L-e)} \cdot \left[ \left( H - \lambda_1 \frac{R-r}{L-e} \right) \left( H - \frac{\lambda_1}{2} \cdot \frac{R-r}{L-e} \right) + h^2 \right]; \quad (2)$$

式(1)和式(2)中,

$E$ ——材料弹性模量,  $\text{N}/\text{m}^2$ ;

$h$ ——膜片弹簧的厚度,  $\text{mm}$ ;

$r$ ——支承环平均半径,  $\text{mm}$ ;

$\mu$ ——泊松比;

$H$ ——膜片弹簧的内截锥高度,  $\text{mm}$ ;

$R$ ——弹簧大端外端半径,  $\text{mm}$ 。

## 3 优化设计目标函数和设计变量

### 3.1 目标函数

如图1所示,由于膜片弹簧的非线性特性,压紧力将随着磨损量不同而变化。为了使离合器后备系数稳定,结合可靠不打滑,应使离合器在使用过程中压紧力随摩擦片磨损的变化最小。为此,在图1所示 $bsa$ 范围内取包括端点 $a$ 和凸点 $s$ 的10点,取各点压紧力对 $b$ 点压紧力变化量的平均值为最小,即目标函数

$$f_1 = \min \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} |F_{a_i} - F_b|.$$

在离合器分离时,驾驶员作用在分离轴承上的操纵力的平均值最小,使膜片弹簧离合器具有分离轻便的特点,即

$$f_2 = \min \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} |F_{b_i} - F_b|.$$

但追求操纵力的平均值最小,将导致 $asb$ 段曲线上拱,离合器后备系数稳定性变差。因此,利用权重系数变化法,分别给两个目标函数赋予不同的权重系数 $\omega$ ,构造成统一的目标函数

$$F = \min \sum_{i=1}^{10} \omega_i \cdot f_i(X), \quad (3)$$

式(3)中, $F$ 为评价函数; $\omega_i \geq 0$ ,  $\sum \omega_i = 1, i = 1, 2$ ,文中取 $\omega_1 = 0.7, \omega_2 = 0.3$ 。

### 3.2 设计变量

膜片弹簧的主要尺寸参数有许多,但从弹簧载荷—变形式可以看出,只需考虑 $H, h, R, r, L, l$ 这6

个尺寸参数及弹簧大端加载时所对应的变形量  $\lambda_1$  即可,故膜片弹簧的优化设计变量为

$$\begin{aligned} X &= [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7]^T \\ &= [H, h, R, r, L, l, \lambda_1]^T. \end{aligned}$$

### 3.3 约束条件

考虑膜片弹簧处于工作状态时压紧力的变化范围,弹簧的高厚比对载荷特性和应力特性影响及制造工艺性,满足结构布置、弹性特性和强度要求,保证操纵轻便,离合器摩擦片最大磨损后压紧力变化不超过新盘时的 5% 等,得出约束条件如下:

$$1\ 500 \leq P_2 \leq 2\ 000, \quad (4)$$

$$1.6 \leq H/h \leq 2.2, \quad (5)$$

$$4.0 \leq (L - r_f)/(L - e) \leq 5.3, \quad (6)$$

$$1.2 \leq R/r \leq 1.35, \quad (7)$$

$$2.0 \leq R - L \leq 5.0; 1.0 \leq e - r \leq 4.0, \quad (8)$$

$$0.5(R_o + R_i) \leq L \leq R_o, \quad (9)$$

$$\sigma_{d_1} \leq [\sigma_{d_1}]; \sigma_{t_2} \leq [\sigma_{t_2}]; \sigma_{t_3} \leq [\sigma_{t_3}], \quad (10)$$

(10) 式中的符号含义、计算及取值见文献[5].

$$F_c < 1\ 600\ \text{N}, \quad (11)$$

$$\left| \frac{F_b - F_a}{F_b} \right| \leq 0.05, \quad (12)$$

$$10^\circ \leq \arctg \frac{H}{R-r} \leq 15^\circ, \quad (13)$$

$$x_i \geq 0 \ (i = 1, 2, \dots, 7). \quad (14)$$

综上所述,得优化数学模型为

$$\left. \begin{aligned} \min f(x_1, x_2) \\ \text{s. t. } g_i(x_1, x_2) \leq 0 \ (i = 1, 2, \dots, 23) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

这是一个两设计变量、23 个不等式约束的非线性优化设计问题. 用内点混合惩罚函数法求解,即将目标函数和不等式约束函数构造一个新目标函数,即

$$\Phi(X, r) = F(X) + r \sum_{i=1}^{23} \frac{1}{g_i(X)}, \quad (16)$$

式(16)中,  $r$  为惩罚系数.

## 4 蚁群算法及其改进算法

### 4.1 蚁群算法原理及函数优化的步骤

研究显示,自然界蚂蚁找到从巢穴到食物源的最短路径是通过一种正反馈的机制实现的,单个蚂蚁在自己行走的路径下留下一一种挥发性的分泌物,称之为信息激素. 后来的蚂蚁根据前进道路上的信息数量的多少选择前进的方向,在经过一个较长的过程后,在较短的路径上蚂蚁留下的信息激素量变大,而蚂蚁越来越多地集中在信息激素量较大的路

径上,从而找到一条最短的路径. 蚂蚁行为的实质是简单个体的自组织行为体现出来的群体行为,每个蚂蚁行为对环境产生影响,环境的改变进而对蚁群行为产生控制压力,影响其他蚂蚁的行为. 通过这种机制,简单的蚂蚁个体可以相互影响,相互协作,完成一些复杂的任务. 自组织使得蚂蚁群体的行为趋向结构化,其原因在于包含了一个反馈过程,这是蚂蚁算法最重要的特征. 正反馈是系统演化发展的原因,这个过程利用了全局信息作为反馈,通过对系统演化过程中较优解的自增强作用,使得问题的解向着全局最优的方向不断进化,最终能有效地获得相对较优的解<sup>[6]</sup>.

根据 Dorigo 等人提出的蚂蚁群体优化的元启发式规则,函数优化问题的蚁群算法步骤如图 2 所示. 框图中的符号意义及具体计算方法见文献[6].

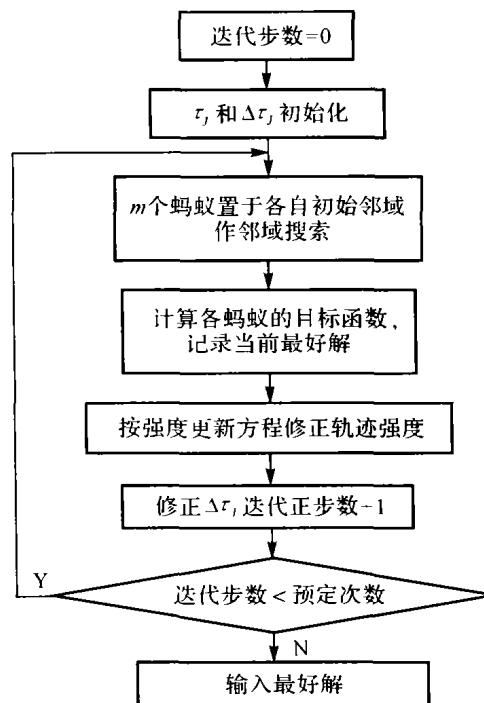


图 2 函数优化问题的蚁群算法流程图

Fig. 2 Flow diagrams for the ant colony algorithm for optimizing

### 4.2 蚁群算法的改进

尽管蚁群算法有其优点,但实验发现在计算过程中还是会陷入局部最小,使得蚂蚁完成的路径不再向最优解方向进化,从而使整个系统呈现出早熟现象.

本文的改进型蚁群算法主要思想是将遗传算法和蚁群算法这二种起源于生物仿生学的优化算法结合起来,对采用蚁群算法得到的陷入局部的解进行遗传变异,使之跳出局部范围.

即对优化问题

$$\min Z = f(X), X \in [a, b]$$

采用蚁群算法得到一组局部极小值  $X_k$ , 将该值化成二进制值后, 采用遗传算法将该值进行变异, 变异成  $X_p$ . 变异过程如下: 将  $X_k$  化为二进制表达式  $X_k = [X_{k1}, X_{k2}, \dots, X_{kn}]$ , 其中  $X_{ki} (i=1, 2, \dots, n)$  为  $X_k$  二进制表达式中的第  $i$  位. 遗传变异就是以很小的概率随机地改变  $X_k$  二进制表达式中的某些位, 使得相应的位从 1 变为 0 或从 0 变为 1, 因而  $X_k$  的值在其整个取值域内发生改变. 在遗传变异过程中, 舍

去比  $X_k$  劣的解, 保存比  $X_k$  优的解. 程序完成设定的遗传变异次数后, 就能有效地搜寻到较  $X_k$  优化的解  $X_p$ , 再采用蚁群算法在  $X_p$  的邻域内进行寻优.

经此变异后, 可以跳出局部极小的区域, 使得解的质量得到提高, 收敛速度加快.

## 5 设计实例及结论

优化设计某轻型货车单片离合器拉式膜片弹簧结构参数, 用改进蚁群算法优化, 取蚂蚁个数  $m=50$ , 变异概率  $P_m=0.02$ , 优化结果如表 1 所示.

表 1 膜片弹簧结构参数优化结果

Table 1 The optimized results of the construc-tional parameter of the diaphragm sprin

方 案	$F_b$	$F_d$	$\lambda_1$	$H$	$h$	$R$	$r$	$L$	$l$
原设计	6 525	5 326	4.21	4.71	2.45	87.00	77.00	94.00	77.00
本算法	5 790	5 326	3.62	4.40	2.44	98.10	78.10	95.58	78.10
复合形法	5 890	5 336	3.78	4.46	2.46	98.15	78.00	95.89	78.05
组合遗传算法	5 795	5 328	3.64	4.40	2.44	98.10	78.32	95.38	78.12
遗传算法	5 800	5 330	3.65	4.40	2.44	98.15	78.52	95.68	78.18

从表 1 可见, 本算法与原设计、复合形算法、组合遗传算法<sup>[1]</sup>和遗传算法<sup>[3]</sup>的优化结果相比, 所得的大端变形量为  $\lambda_1$  最小, 则离合器的使用寿命较长, 与遗传算法结果相近, 且表现了较好的收敛速度及稳定性.

从表 1 中可见, 本算法  $F_b - F_d$  的差为最小, 同时满足在离合器分离时, 驾驶员作用在分离轴承上的操纵力的平均值最小, 使膜片弹簧离合器具有分离轻便的特点, 而付出的代价是弹簧大端外端半径  $R$  增大 12.6%, 其余尺寸略有变化. 因此, 效果是明显的.

## 6 结 论

目前, 除了遗传算法、模拟退火法、禁忌搜索法、人工神经网络等热门优化类方法, 蚁群算法为复杂困难的系统优化问题提供了新的具有竞争力的求解算法. 蚁群算法思想在启发式方法范畴内已逐渐成为一个独立的分支, 正在受到越来越多的人的注意和研究, 应用范围也开始遍及许多领域.

但是, 蚁群算法还不像其他的启发式算法那样已形成系统的分析方法和具有坚实的数学基础. 参数的选择更多的是依靠实验和经验, 没有定理来确定, 且随着优化空间的维数、分区数、参与搜索的蚂

蚁组的增加, 以及最优解精度要求的提高, 算法对最优解的搜索效率将迅速降低. 因而, 在多维空间优化问题中有必要探讨出一种更有效的蚁群算法模型, 以提高优化问题最优解的搜索效率.

## 参考文献:

- [1] 郭惠听, 夏秋英, 罗颂荣. 拉式膜片弹簧结构参数的模糊优化设计[J]. 机 械, 2001, 28(3): 22-24.  
GUO Hui-xin, XIA Qiu-ying, LUO Song-rong. The fuzzy optimal for the structure parameter of pull-type diaphragm spring[J]. Machinery, 2001, 28(3): 22-24.
- [2] 夏长高, 朱茂桃. 汽车离合器膜片弹簧优化设计的数学模型分析[J]. 汽车技术, 1996, 12: 12-15.  
XIA Chang-gao, CHU Mao-tao. Analysis of the optimum design model of the diaphragm spring clutch on Automobile[J]. Automobile Technology, 1996, 12: 12-15.
- [3] 冉振亚, 赵树恩, 李玉玲. 基于遗传算法的汽车离合器膜片弹簧优化设计[J]. 重庆大学学报(自然科学), 2003, 26(9): 77-81.  
RAN Zhen-ya, ZHAO Shu-en, LI Yu-ling. Optimum design for the diaphragm spring clutch on Automobile with genetic algorithms[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science), 2003, 26(9): 77-81.

(下转第 342 页)

- [7] ZHANG X J. Statistical leak detection in gas and liquid pipelines [J]. Pipes & Pipelines International, 1993, 7—8.
- [8] 蔡正敏, 吴浩江, 黄上恒, 等. 小波变换在管道泄漏在线监测由去噪的应用. 机械科学与技术, 2001, 20(2): 253—256.
- CAI Zheng-min, WU Hao-jiang, HUANG Shang-heng, *et al.* The pipelines leakage detection based on wavelet analysis and wave propagation method [J]. Mechanical Science and Technology, 2001, 20(2): 253—256.
- [9] 唐秀家, 颜大椿. 基于神经网络的管道泄漏检测方法及其仪器. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(3): 319—327.
- TANG Xiu-jia, YAN Da-chun. Fluid pipeline system leak detection based on neural network and pattern recognition [J]. Journal of Beijing University (Natural Science), 1997, 33(3): 319—327.
- [10] 张仁忠, 彭侠夫, 路艳洁, 等. 系统思想在管道运输泄漏监测、精确定位中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(12): 123—127.
- ZHANG Ren-zhong, PENG Xia-fu, LU Yan-jie, *et al.* The application of system idea in leak monitoring and precise location in pipeline transportation [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 1999, 19(12): 123—127.
- [11] WAI-Rafei, Barnes R J. Underlying the performance of real-time software based pipeline leak detection systems [J]. Pipes & Pipelines International, 1999, 44(6): 44—51.
- [12] KIUCHI T. A leak location method of pipeline by means of fluid transient model [J]. Journal of Energy Resource Technology, 1993, 9: 115—117.
- [13] XIA Q J. Leakage detection of pipeline system based on modeling and identification [J]. IFAC, 1992: 303—306.

.....

(上接第 337 页)

- [4] 雷贤菊. 组合遗传优化方法设计膜片弹簧 [J]. 科技情报开发与经济, 2004, 14(8): 181—182.
- LEI Xia-yn. The design of the diaphragm spring with combinative genetic optimizing method [J]. Sci/Tech Information Development & Economy, 2004, 14(8): 181—182.
- [5] 林世裕. 汽车离合器拉式膜片弹簧的设计 [J]. 江苏工学院学报, 1985, (3): 1—6.
- LIN Shi-yu. Optimum design for the diaphragm spring clutch on automobile with genetic algorithms [J]. Journal of Jiangsu Institute of Technology, 1985, (3): 1—6.
- [6] DORIGO M, BOCCABEAU E, THERAOLA G. Ant Algorithms and Stigmergy [J]. Future Generation Computer System, 2000, (16): 851—871.
- [7] 魏平, 熊伟清. 用于一般函数优化的蚁群算法 [J]. 宁波大学学报, 2001, 14(4): 52—55.
- WEI Ping, XIONG Wei-qing. Ant colony algorithm for general function optimization problems [J]. Journal of Ningbo University, 2001, 14(4): 52—55.
- [8] 詹士昌, 徐捷, 吴俊. 蚁群算法中有关算法参数的最优选择 [J]. 科技通报, 2003, 19(5): 381—386.
- ZHAN Shi-chang, XU Jie, WU Jun. The optimal selection on the parameters of the ant colony algorithm [J]. Bulletin of Science and Technology, 2003, 19(5): 381—386.