

改进型蚁群算法在内燃机径向滑动轴承优化设计中的应用

李 智¹, 卢兰光²

(1. 武汉工业学院 电气信息工程系, 武汉 430023; 2. 清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室)

Application of Improved Ant Colony Algorithm to Optimization of Radial Bearing in Internal Combustion Engine

LI Zhi¹, LU Lan-guang²

(1. Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;

2. State Key Laboratory of Automobile Safety and Energy Conservation, Tsinghua University)

Abstract: To satisfy the maximum C_p of radial bearing in an internal combustion engine so as to reach the optimization of radial bearing is practical. The optimized parameters including the inside diameter, shaft diameter, width and C_p can meet the requirements of practical production technology. And the algorithm is more efficient than the genetic algorithm does. It also gives a new way for solving similar internal combustion engine optimization problems.

摘要: 运用改进型蚁群算法,在最大限度地满足液体动力润滑径向滑动轴承的承载量系数值,以达到滑动轴承承载能力的前提下,对内燃机径向滑动轴承进行了优化设计,计算机仿真结果证明:优化后的轴承孔直径、轴径直径、轴承宽度、承载量系数等参数都符合实际工艺要求,且优化结果明显优于遗传算法的优化结果,从而表明了改进型蚁群算法是一种切实有效的优化算法,该算法为内燃机的各种优化设计问题提供了新的思路和方法。

关键词: 内燃机;蚁群算法;滑动轴承;优化设计

Key Words: I. C. Engine; Ant Colony Algorithm; Radial Bearing; Optimization Design

中图分类号:TK402

文献标识码:A

1 概述

蚁群算法是由意大利 M. Dorigo 在仿生学成果的基础上提出的^[1],是一种随机搜索算法,与遗传算法、模拟退火算法等模拟进化算法一样,通过候选解组成的群体在进化过程来寻求最优解^[2],具有以下特点:较强的鲁棒性,对基本算法模型稍加修改,即可应用于其它问题的求解;分布式计算,是一种基于种群的算法,具有并行性;易于与其它的方法相结合,以改善算法的性能。

诸多研究表明,蚁群算法具有很强的寻优能力,不仅利用了正反馈原理,在一定程度上加快了进程

的速度,还有一种本质并行的算法,不同个体之间不断进行着信息交流和传递,从而能够相互协作,有利于发现较好的解。

2 蚁群算法

2.1 蚁群算法原理

自然界蚂蚁群体在没有任何外界指导信息的情况下,总能找到从食物源到巢穴的最短路径。受这一行为的启迪,Dorigo 等人将其抽象建立了蚂蚁系统算法模型。理论和实践证明这种算法模型对求解组合优化问题效果良好,下面说明蚂蚁系统的生物

原型——真实蚂蚁群体的工作原理。

研究表明,自然界蚂蚁寻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信息数量的多少选择前进的方向,在经过一个长的过程后,在较短路径上蚂蚁留下的信息激素量变得较大,而蚂蚁越来越多地集中在信息激素量较大的路径上,从而找到了一条最短的路径。

由于包含了一个反馈的过程,自组织使得蚂蚁群体的行为趋向结构化,这也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。

2.2 蚁群算法模型及其实现

蚁群算法在实现过程中,未达到结束条件时,执行以下活动:(1)蚂蚁的行为,即蚂蚁在一定的限制条件下寻找一条路径;(2)轨迹(即信息激素)浓度的挥发;(3)后台程序,主要是完成单个蚂蚁无法完成的任务,如根据全局信息对信息激素浓度进行更新。

由于最初的蚁群算法思想起源于离散的网络路径问题,下面以一维搜索为例,引申到 n 维空间的函数求解。在函数优化问题中,假定优化函数为

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

转移概率准则:设 m 个人工蚂蚁,刚开始时位于区间 $[a, b]$ 的 m 等分处,蚂蚁的转移概率定义为

$$p_{ij} = \frac{\tau_j^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{j=1}^m \tau_j^\alpha \eta_{ij}^\beta} \quad (1)$$

式中, p_{ij} 为蚂蚁从位置 i 转移到位置 j 的概率; τ_j 为蚂蚁 j 的邻域吸引强度; η_{ij} 定义为 $f_i(x) - f_j(x)$, 即目标函数差异值;参数 $\alpha, \beta \in [1, 5]$, 该范围的取值是一个经验值,目前尚无理论上的依据。强度更新方程

$$\tau_j^{i+1} = \rho \tau_j^i + \sum_k \Delta \tau_j \quad (2)$$

$$\Delta \tau_j = Q/L_j \quad (3)$$

$\Delta \tau_j$ 反映第 j 只蚂蚁在本次循环中吸引强度的增加; Q 为正常数,其范围 $0 < Q < 10000$; L_j 表示本次循环中 $f(x)$ 的增量,定义为 $f(x+r) - f(x)$; $0 \leq \rho \leq 1$, 体现强度的持久性。函数 $f(x)$ 的寻优借助 m 个蚂蚁的不断移动来进行;当 $\eta_{ij} \geq 0$ 时,蚂蚁 i 按概率 p_{ij} 从其邻域 i 移至蚂蚁 j 的邻域;当 $\eta_{ij} \leq 0$

时,蚂蚁 i 做邻域搜索(搜索半径或步长为 r),即每个蚂蚁要么转移至其他蚂蚁处,要么进行邻域搜索。

可见,当蚂蚁数量足够多,搜索半径足够小,这种寻优方式相当于一群蚂蚁对定义区间 $[a, b]$ 做穷尽搜索,逐渐收敛到问题全区间最优解。上述函数优化过程不受优化函数是否连续、是否可微等限制,较之经典搜索方法具有明显的优越性和稳定性。

函数优化问题的蚁群算法步骤^[3]:

(1) $\text{count} \leftarrow 0$ (count 是迭代步数或搜索次数); 各 τ_j 和 $\Delta \tau_j$ 初始化;

(2) 将 m 个蚂蚁置于各自的初始邻域;每个蚂蚁按概率 p_{ij} 移动或做邻域搜索;

(3) 计算各个蚂蚁的目标函数 $Z_k (k=1, 2, \dots, m)$, 记录当前最优解;

(4) 按强度更新方程修正轨迹强度;

(5) $\Delta \tau_j$ 修正, $\text{count} \leftarrow \text{count} + 1$;

(6) 若 count 小于预定的迭代次数,则转到(2);

(7) 输出目前最优解。

在具体的算法过程中,邻域设定可根据具体优化问题来定,如一维问题为直线搜索,二维问题可定义为圆等。搜索半径的大小和所要得到最优解的精度有关,若问题的局部最优点密集,全局最优解不易得到时,则必须设置较小的 r , 蚂蚁个数 m 则主要和搜索空间(定义域)有关,搜索空间越大,所需要的蚂蚁个数越多。

3 改进型蚁群算法

尽管蚁群算法有其优点,但在实验中还是发现在计算过程中,有时会陷入局部最小,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两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。如对优化问题:

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

采用蚁群算法得到一组局部极小值 X_1 , 采用遗传算法将该值进行遗传变异,变异成 X_2 , 变异过程中将 X_1 转化为二进制表达式 $X_1 = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$, 其中 $x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 为 X_1 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_1 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_1 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_1 劣的解,保存比 X_1 优的解。程序完成设定

的遗传变异次数后,就能有效搜寻到较 X_1 优化的解 X_2 ,再采用蚁群算法在 X_2 的邻域内进行寻优。

经此遗传变异后,可以跳出局部极小的区域,使解的质量得到提高。图 1 示出了这种遗传变异的过程,通过遗传变异,局部极小值 X_1 转化为 X_2 ,跳出了局部区域,可继续向最优解 X_3 逼近,从而提高了解的质量。

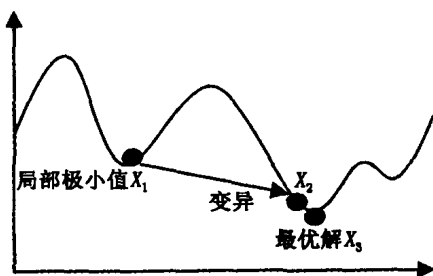


图 1 局部极小值的变异

4 内燃机径向滑动轴承数学模型

液体动力润滑径向滑动轴承广泛地应用于内燃机中。一般,在其设计中都是按经验在一个取值范围内选取轴承宽径比、轴承孔及轴颈相对间隙等参数。文献[4]提出液体动力润滑径向滑动轴承的优化设计方法,考虑了轴承承载能力的一个重要参数——承载量系数(又称索氏数) C_p 。在滑动轴承的其他参数相同时, C_p 值越大,轴承承载能力也越大,反之亦然。本文根据这种设计思想,采用改进型蚁群算法对内燃机径向滑动轴承进行了优化设计。

4.1 目标函数的建立

在确定液体动力润滑径向滑动轴承的各参数之前,首先要保证轴承具有足够的承载能力,也就是该轴承具有足够大的、合适的承载量系数 C_p 值。使滑动轴承在一定的使用条件下,承载量系数 C_p 的计算值尽可能大,从而可确定液体动力润滑轴承优化设计的目标函数为

$$F(X) = C_p \quad (4)$$

式中, C_p 按文献[5]中公式进行计算。

$$C_p = \frac{F\Psi^2}{2\eta VB} \quad (5)$$

式中, F 为轴承径向外载荷,N; η 为润滑油在轴承平均工作温度下的动力粘度, $N \cdot s/m^2$; Ψ 为轴承相对直径间隙; V 为轴颈圆周速度,m/s; B 为轴承宽度,m。其中:

$$V = \pi dn / (60 \times 1000) \quad (6)$$

$$\Psi = (D - d) / d \quad (7)$$

式中, d 为轴颈实际直径,mm; n 为轴颈转速,r/min; D 为轴承孔实际直径,mm,将式(6)、(7)代入式(5),有

$$C_p = \frac{9549 F (D - d)^2}{\eta d^3 n B} \quad (8)$$

即目标函数表达式

$$F(X) = \frac{9549 F (D - d)^2}{\eta d^3 n B} \quad (9)$$

4.2 约束条件

由于转速 n 是事先给定的,且 η 是和润滑油有关的参数,可通过资料查找选定。因此,设计变量选取轴承孔和轴颈的几何参数 D 、 d 、 B 。即

$$X = [x_1, x_2, x_3]^T = [D, d, B]^T$$

考虑下面几种约束情况。

4.2.1 相对间隙 Ψ 的约束

各类机器 Ψ 值必须在允许范围之内,以避免轴承温升。

$$\Psi_L \leq (D - d) / d \leq \Psi_U \quad (10)$$

$$\text{即 } g_1(X) = \Psi_U - (D - d) / d \geq 0 \quad (11)$$

$$g_2(X) = (D - d) / d - \Psi_L \geq 0 \quad (12)$$

式中, Ψ_L 为最小相对间隙; Ψ_U 为最大相对间隙。

4.2.2 最小油膜厚度约束

最小油膜厚度 h_{\min} 越小,承载能力越大。但由于受到摩擦表面粗糙度、轴和轴承的弹性变形与热变形等因素的影响不能过小,一般有

$$h_{\min} \geq [h] \quad (13)$$

$$\text{即 } g_3(X) = h_{\min} - [h] \geq 0 \quad (14)$$

式中, $[h]$ 是许用油膜厚度。

4.2.3 温度限制条件约束

轴承工作时,油膜各处的温度是不相同的,但通常认为轴承温度等于油膜的平均温度,为保证轴承的正常工作要求

$$g_4(X) = [t_m] - t_m \geq 0 \quad (15)$$

式中, t_m 为油膜平均温度, $t_m = t_i - \Delta t / 2$, $^\circ\text{C}$, t_i 为进油口温度,一般在 $35 \sim 45^\circ\text{C}$ 之间; $[t_m]$ 为允许温升,一般在 $50 \sim 75^\circ\text{C}$ 之间。轴承温升公式^[5]:

$$\Delta t = \frac{\left(\frac{f}{\Psi}\right)p}{c\rho\left(\frac{Q}{\Psi VBd}\right) + \frac{\pi\alpha_s}{\Psi V}} \quad (16)$$

式中, f 为摩擦系数; p 为轴承的工作压力, MPa; c 为润滑油的比热容; ρ 为某温度时润滑油的密度, kg/m^3 ; α_s 为表面传热系数; $\frac{Q}{\Psi VBd}$ 为耗油量系数。

4.2.4 轴承宽度约束

轴承宽度越大, 受端泄的影响越小, 承载能力就越大, 但散热能力也越差, 且轴变形大时, 轴承会发生边缘接触; 轴承宽度太小, 承载能力就很小, 一般有

$$g_5(X) = A_U d_0 - B \geq 0 \quad (17)$$

$$g_6(X) = B - A_L d_0 \geq 0 \quad (18)$$

式中, d_0 是轴颈的公称直径, m。系数 A_L 的最小值取 0.3, 系数 A_U 的最大值取 1.5。 A_L 和 A_U 的取值, 可在设计具体轴承时确定。

4.2.5 轴承孔和轴颈直径的限制

为保证轴承孔和轴颈直径既具有足够的加工精度, 又保证 C_p 对 Ψ 和 h_{\min} 的要求, 且不至于有 too 高的加工成本, 有

$$g_7(X) = D_U - D \geq 0 \quad (19)$$

$$g_8(X) = D - D_L \geq 0 \quad (20)$$

$$g_9(X) = d_u - d \geq 0 \quad (21)$$

$$g_{10}(X) = d - d_l \geq 0 \quad (22)$$

轴承孔直径和轴颈直径约数的上、下限可由孔轴配合公差 5~8 级精度的公差范围确定。液体动力润滑径向滑动轴承优化设计数学模型为

$$\max F(X) = \frac{9549 F(x_1 - x_2)^2}{\eta x_2^3 n x_3} \quad (23)$$

$$\text{s. t. } g_i(X) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, 10$$

5 实例仿真

已知工作载荷 $F = 32500\text{N}$, 轴颈直径 $d_0 = 152\text{mm}$, 转速 $n = 3600\text{r}/\text{min}$, 水平剖分面单侧供油, 按承载量系数 C_p 最大进行设计。有关参数的确定与处理如下:

(1) 选择轴承宽径比 $A = B/d$ 的范围, 由文献[5]知: $A_L = 0.4$, $A_U = 1.0$ 。

(2) 确定 D 和 d 的变动范围, 由 GB1801—79 中

孔轴配合公差 5~8 级公差数据得 $D = 152.01 \sim 152.08\text{mm}$, $d = 151.80 \sim 151.95\text{mm}$ 。

(3) 确定轴承相对间隙 Ψ 的变动范围, 由文献[5]知, 对发动机 $\Psi = 0.0002 \sim 0.00125$ 。

(4) 耗油量系数, 由文献[5]中图 12~16 的耗油量系数线图编制查询程序自动查询。

采用 MATLAB 语言, 运用改进型蚁群算法编制液体动力润滑径向滑动轴承优化设计程序, 在 CPU1133MHz、RAM256MB 的 PC 机上运行, 仿真结果如表所示。

表 优化结果

D, mm	d, mm	B, m	C_p
152.07932	151.89037	0.07603	0.07690

由以上优化结果, 可得出宽径比 $B/d = 0.5006$, 相对间隙 $\Psi = 0.0012$, 直径间隙 $\Delta = 0.1890\text{mm}$ 。根据 GB1801—79 选择轴承孔与轴颈的配合为 F7/e7, 轴承孔的公差为 $\Phi 152^{+0.083}_{-0.043}$ 、 $\Phi 152^{+0.085}_{-0.125}$ 。最大直径间隙 $\Delta_{\max} = 0.208\text{mm}$; 最小直径间隙 $\Delta_{\min} = 0.128\text{mm}$, Δ 在 Δ_{\max} 和 Δ_{\min} 之间。

6 结论

(1) 采用改进型蚁群算法对内燃机径向滑动轴承进行了优化求解, 从计算结果来看, 优化效果十分显著, 可在保证承载能力尽可能大的条件下, 各参数在推荐区间中获取最佳值, 满足了对轴承承载能力的要求。

(2) 改进型蚁群算法对于优化问题的求解, 尤其是结构参数优化问题, 只要优化的目标函数可以显示表达, 就可进行优化仿真计算, 且能够有效地找到最优解, 对优化对象的数学模型没有过高的要求, 不需要导数等信息, 为此类机械优化设计问题的求解提供了新思路、新方法。

参考文献:

- [1] Dorigo M, Bocabeau E, Theraola G. Ant Algorithms and Stigmergy[J]. Future Generation Computer System, 2000, 16: 851~871.
- [2] 马 良. 来自昆虫世界的寻优策略-蚂蚁算法[J]. 自然杂志, 1999, 21(30): 161~163.
- [3] 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.
- [4] 邵正宇. 内燃机径向滑动轴承优化设计[J]. 内燃机, 2002, 18(5): 13~15.
- [5] 濮良贵, 纪名刚. 机械设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.

(编 辑: 孔 毅)