

基于蚁群算法的液压土锚钻机动力头优化设计

李 智, 郑 晓

Optimization of Driving Head of Hydraulic Drill for Underground Anchorage on Ant Colony Algorithm

Li Zhi, Zheng Xiao

(武汉工业学院, 湖北 武汉 430023)

摘 要: 运用蚁群算法和 MATLAB 语言, 以液压土锚钻机动力头重量为目标函数, 编制了液压土锚钻机动力头优化计算仿真程序, 计算机仿真结果表明符合工艺要求, 从而证明了蚁群算法是一种切实有效的优化方法。

关键词: 土锚钻机; 动力头; 蚁群算法; 优化

中图分类号: TH122; TP391 文献标识码: B 文章编号: 1000-4858(2004)12-0003-04

1 蚁群算法

近年来, 模拟某一生物自然现象或过程而发展起来的智能计算技术, 由于其具有高度并行与自组织、自适应、自学习等特征, 为传统的人工智能方法注入了新的活力。例如遗传算法及其一些改进算法^[1]、蚁群算法及其改进算法^[2]等, 特别是蚁群算法, 它是由

意大利学者 M. Dorigo 在仿生学成果的基础上提出的^[3], 并且采用该算法对 TSP 问题、分配问题^[4]、Job -

收稿日期: 2004-05-14

基金项目: 湖北省教育厅重点科研项目(2002A01008)

作者简介: 李智(1964—), 男, 湖北武汉人, 副教授, 博士, 主要从事现代优化理论的教学与科研工作。

一个全新的制动机构。EMB 应用于轿车上, 取消了传统的液压制动系统, 作动机构是电动机, 执行机构仍是制动器。制动时, 驾驶员踩下电子制动踏板, 电子制动踏板带有踏板感觉模拟器, 踏板行程信号通过 CAN 总线传送至控制器, 控制器实时向电动机发出作动信号, 实施 ABS 制动。

与 EMB 类似的还有电子液压制动系统 (Electronic Hydraulic Braking-EHB), 它取消了传统制动系统中的真空助力器, 制动主缸等部件。作动机构是液压力装置, 执行机构是制动器。制动时, 驾驶员踩下电子制动踏板, 电子制动踏板带有踏板感觉模拟器, 踏板行程信号通过 CAN 总线传送至控制器, 控制器实时向车轮液压装置发出作动信号, 对制动器实施 ABS 制动。

(7) 在 ABS 系统中嵌入电子制动力分配装置 (Electronic Brake Force Distribution-EBD), 构成了 ABS + EBD 系统。EBD 的功能就是在汽车 ABS 开始制动压力调节之前, 高速计算出四个轮胎与路面间的附着力大小, 然后调节制动器制动力, 达到制动力与附着力的匹配, 进一步提高车辆制动时的方向稳定性, 同时尽可能地缩短制动距离^[7]。

(8) 在 ABS 系统的基础上扩展成车速记录仪 (Ve-

hicle Speed Recorder-VSR), 又称汽车黑匣子, 该装置通过实时采集的四个车轮轮速信号, 再现交通事故发生过程中汽车的实际运行轨迹和驾驶员对车辆的操作情况, 以便于公安交通管理部门能准确判断事故的责任。

参考文献:

- [1] 柯愈治. ABS 压力调节器技术规范的探索[J]. 重型汽车, 1995(5).
- [2] William K. Lennon, Kevin M. Passino. Intelligent control for brake systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 7, No. 2, March 1999.
- [3] Jiang Fang-jun. An application of nonlinear PID control to a class of truck ABS problems[R]. Proceedings of the 40th IEEE Conference, Vol. 1, 2001.
- [4] Chih-Min Lin, Chun-Fei Hsu. Neural-network hybrid control for antilock braking systems[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 14, No. 2, March 2003.
- [5] Alexander Kolbe. Teves MKIV anti-lock and traction control system[R]. SAE 900208.
- [6] Ralf Schwarz, Rolf Isermann. Modeling and control of an electromechanical disc brake[R]. SAE 980600.
- [7] M. Nakazawa, O. Isobe, etc. Braking force distribution control for improved vehicle dynamics and brake performance [J]. Vehicle System Dynamics, Jun. 1995.

shop 问题^[5]等进行了仿真求解,解的质量优于或至少等效于演化算法、模拟退火算法及其他一些启发式算法。

蚁群算法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^[6],它具有以下特点:

(1) 较强的鲁棒性 对基本蚁群算法模型稍加修改,即可应用于其他问题的求解;

(2) 分布式计算 蚁群算法是一种基于种群的算法,具有并行性;

(3) 易于与其他的方法相结合 蚁群算法很容易与其他的启发式算法相结合,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,它不仅利用了正反馈原理,在一定程度上加快了进程的速度,而且是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。

1.1 蚁群算法原理

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,单个的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,在较短的路径上蚂蚁留下的信息激素的量变得较大,而蚂蚁越来越多的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。

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,其原因就是在于包含了一个反馈的过程,这也是蚂蚁算法的最重要的特征。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。

1.2 蚁群算法模型及其实现

Dorigo 等人提出的蚂蚁群体优化的元启发式规则较好地描述了蚁群算法的实现过程,其过程可以表示如下。

当没有达到结束条件时,执行以下活动:

(1) 蚂蚁的行为,即是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,比如说根据全局信息对信息激素浓度进行更新;如达到条件,结束。

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

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

其中, p_{ij} 表示蚂蚁从位置 i 转移到位置 j 的概率; τ_j 成为蚂蚁 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

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

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

$\Delta \tau_j$ 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。于是,函数 $f(x)$ 的寻优就借助 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。

由此可见,当蚂蚁的数量足够多,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 $[a, b]$ 做穷尽的搜索,逐渐收敛到问题的全局最优解。

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^[7]:

(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 $Z_k (k=1, 2, \dots, m)$, 记录当前的最好解;

(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) 输出目前的最好解;

在具体的算法过程中, 邻域设定可根据具体优化问题来定, 比如一维问题就是直线搜索, 二维问题可定义为圆等。搜索半径的大小和所要得到的最优解的精度有关, 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。

2 液压土锚钻机动力头数学模型^[8]

液压土锚钻机是建筑工程单位广泛使用的、进行土层锚固的专用设备, 用于各类土层的锚固以及在强风化岩层和卵石层中钻孔等。动力头是其核心部分, 对该部分进行优化设计, 可以在有效地满足动力需求的基础上, 减小体积、减轻重量, 使得传动平稳、可靠, 因此, 本文采用蚁群算法对液压土锚钻机动力头进行优化设计, 仿真结果证明切实可行。

2.1 设计变量与目标函数

动力头主要结构和参数如图1所示, 输入转矩 $T_1 = 600 \text{ N}\cdot\text{m}$, 传动比 $i = 7$, 由于动力头的重量主要由箱体的尺寸决定, 而箱体的尺寸又由齿轮及轴的结构尺寸决定。因此, 在优化设计时, 以动力头重量为目标的优化设计可转化成以齿轮和轴这一核心部件的体积为目标的优化设计。

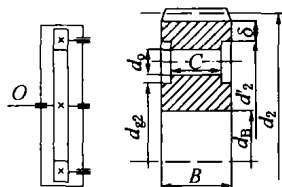


图1 动力头结构及参数

齿轮的几何尺寸及结构尺寸计算公式:

$$d_1 = mz_1; d_2 = mz_2; D'_2 = mz_1 i - 10m; d'_2 = 1.6d'_2; d_0 = 0.25(mz_1 i - 10m - 1.6d'_2); C = 0.2B.$$

在以上尺寸公式中, m 是模数; z_1 、 z_2 分别为小、大齿轮齿数; d_1 为小齿轮分度圆直径(mm); B 为齿宽(mm)。

由以上尺寸, 可得出动力头的近似体积:

$$V_1 = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_z^2) B \quad (4)$$

$$V_2 = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_B^2) B \quad (5)$$

$$V_3 = \frac{\pi}{4} (D_2'^2 - d_{g2}^2) (B - C) + \frac{\pi}{4} (4d_0^2 C) \quad (6)$$

$$V_4 = \frac{\pi}{4} d_B^2 (l + a') - \frac{\pi}{4} d^2 (l - a') \quad (7)$$

$$V_5 = 2\pi(4z_1 m + 2a')^2 + 2\pi(4z_1 m + 20)l \quad (8)$$

故有动力头的总体积为:

$$V = 2V_1 + V_2 - V_3 + V_4 + V_5 \\ = f(B, z_1, m, l, d_z, d_B, d, a') \quad (9)$$

式(9)中, l 为轴的支撑跨距(mm); d_z 为主动轴直径(mm); d_B 为从动轴内孔直径(mm); a' 为从动轴伸出端长度(mm); d 为空心输出轴内径(mm)。式(9)即为动力头的目标函数式。优化设计变量取与目标函数式总体积 V 相关的参数, 即设计变量取

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8]^T \\ = [B, z_1, m, l, d_z, d_B, d, a']^T$$

2.2 约束条件

约束条件考虑以下12种情况:

(1) 避免发生根切, 小齿轮齿数不小于17。

$$g_1(X) = 17 - x_2 \leq 0 \quad (10)$$

(2) 保证齿轮承载能力, 避免负载沿齿宽分布不均, 齿宽系数必须在16~35之间。

$$g_2(X) = x_1/x_3 - 35 \leq 0 \quad (11)$$

$$g_3(X) = 16 - x_1/x_3 \leq 0 \quad (12)$$

(3) 齿轮模数取大于等于2。

$$g_4(X) = 2 - x_3 \leq 0 \quad (13)$$

(4) 按结构关系, 轴的支撑跨距应满足下列关系。

$$g_5(X) = x_1 - x_4 + 0.25x_6 + 20 \leq 0 \quad (14)$$

(5) 由主、从动轴的结构关系, 有以下约束关系。

$$g_6(X) = 20 - x_5 \leq 0 \quad (15)$$

$$g_7(X) = x_5 - 35 \leq 0 \quad (16)$$

$$g_8(X) = 150 - x_6 \leq 0 \quad (17)$$

$$g_9(X) = x_6 - 200 \leq 0 \quad (18)$$

(6) 按齿轮的接触疲劳和弯曲疲劳强度条件,取载荷系数 $k = 1.3$;小齿轮传递的转矩取 $T'_1 = T_1/2$,即 $300 \text{ N}\cdot\text{m}$;齿轮的许用接触应力为 690 MPa ;小齿轮与大齿轮的许用弯曲应力取 185 MPa 。

$$g_{10}(X) = 336 \times \sqrt{kT'_1 \times 73 \times 1428/x_1 / (4x_2x_3)} \leq 0 \quad (19)$$

$$g_{11}(X) = 2kT'_1 / (100x_1x_2x_3^2 Y_{F1}) - 18460 \leq 0 \quad (20)$$

$$g_{12}(X) = 2kT'_1 / (100x_1x_2x_3^2 Y_{F2}) - 18460 \leq 0 \quad (21)$$

式(20)、(21)中, Y_{F1} 、 Y_{F2} 为齿根弯曲力矩。

(7) 按轴的弯曲强度条件,取轴所受转矩 $T = T_1$;取轴的许用弯曲应力为 75 MPa ;取转矩和弯曲作用性质差异系数为 0.59 ,对空心轴有

$$g_{13}(X) = \sqrt{\frac{M^2}{4} + (0.59T_1)^2 / (0.1x_5^3)} - 7500 \leq 0 \quad (22)$$

$$g_{14}(X) = \sqrt{M^2 + (0.59T_1)^2} / (0.1(x_6^3 - x_7^3)) - 7500 \leq 0 \quad (23)$$

式(22)、(23)中, M 为齿形系数。

(8) 根据轴的刚度条件,取轴的最大弯曲挠度小于等于 0.05 。

$$g_{15}(X) = 2.02 \times 10^{-4} x_8^2 (x_4 + x_8) / (x_6^4 - x_7^4) - 0.005 \leq 0 \quad (24)$$

(9) 空心从动轴内径应满足的条件。

$$g_{16}(X) = 1 - x_4/x_7 \leq 0 \quad (25)$$

(10) 从动轴伸出端长度 a' 应满足的条件。

$$g_{17}(X) = 1 - x_8/650 \leq 0 \quad (26)$$

(11) 由于小齿轮直接和电机相连,其直径不能太小,根据结构关系有。

$$g_{18}(X) = 50 - x_2x_3 \leq 0 \quad (27)$$

(12) 保证空心输出轴具有足够的刚度和扭转稳定性,要求输出轴的内外径之比在 $0.5 \sim 0.7$ 之间。

$$g_{19}(X) = x_7/x_6 - 0.7 \leq 0 \quad (28)$$

综上所述,液压土锚钻机动力头数学模型是一个以动力头体积最小为优化目标,具有 19 个不等式约束

的 8 维优化问题。

3 仿真计算

以 YM160 型液压步履式土锚钻机为例,根据以上数学模型,采用 Matlab 语言、蚁群算法和遗传算法,分别编制钻机动力头优化计算仿真程序,优化计算程序在 CPU1133MHz、RAM256MB 的 PC 机上运行,两种算法的仿真结果如表 1 所示。

表 1 液压土锚钻机动力头优化结果

设计变量	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
蚁群算法	4.8401	17.0398	0.2998	10.5986	2.9001	15.0521	10.4799	64.9779
遗传算法	4.8121	16.9328	0.2932	10.6033	2.8719	14.9392	10.4822	64.9465
圆整值	4.8	17	0.3	11	3	15	10	65

4 结束语

本文分别采用蚁群算法和遗传算法,对液压土锚钻机动力头进行了仿真优化计算,仿真结果:采用蚁群算法,液压土锚钻机动力头的重量比原设计减轻 24.48% ,而遗传算法优化结果比原设计减轻了 26.32% ,从计算结果可以看出,蚁群算法的寻优能力明显优于遗传算法,这表明蚁群算法应用于液压土锚钻机动力头的优化设计是成功的。遗传算法的寻优能力稍逊色,主要是因为其复制、交叉、变异等操作过于复杂,每一个步骤都会影响算法的精度。

参考文献:

- [1] 王磊,潘进,焦李成. 免疫算法[J]. 电子学报,2000,28(7):74—78.
- [2] 蒋建国,骆正虎,张浩,等. 基于改进型蚁群算法求解旅行 Agent 问题[J]. 模式识别与人工智能,2003,16(1):6—11.
- [3] Dorigo M, Bocabeau E, Theraola G. Ant algorithms and stigmergy[J]. Future Generation Computer System, 2000,16(5): 851—871.
- [4] Maniezzo V, Colomi A. The ant system applied to the quadratic assignment problem[J]. IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering, 1999,1(5): 769—778.
- [5] Colomi A, Dorigo M, Maniezzo V, Trbian M. Ant system for Job-shop scheduling[J]. Belgian Journal Operations Research Statistic Computation Science, 1994, 34(1): 39—53.
- [6] 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.
- [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.
- [8] 原思聪,王宪章,杨振乾,等. 液压土锚钻机动力头优化设计[J]. 西安建筑科技大学学报,2001,33(2):180—183.