

文章编号 1004-924X(2009)02-0301-05

基于微分进化算法的双波长 光纤 F-P 传感系统结构优化

单 宁, 史仪凯, 刘 霞
(西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072)

摘要:针对光纤法布里-珀罗(F-P)传感器在实际应用中易偏离工作点,造成输出信号衰减,信噪比降低问题,提出了双波长稳定技术,建立了双波长稳定系统的数学优化模型。采用全局搜索能力强,收敛速度快,鲁棒性好,能有效解决复杂优化问题的微分进化算法(DE)进行了全局结构优化。结果表明,DE算法能在较短的运行时间内得到全局最优解,误差 $< 10^{-3}$,优化目标下降了89.46%,且运行时间有所减少;证明该算法正确可行,高效可靠,为光纤F-P传感器的结构优化设计提供了实验基础。

关键词:微分进化算法;光纤传感系统;Fabry-Perot干涉仪;结构优化;全局最优

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Structural optimization of double wavelength optical fiber F-P sensing system based on differential evolution algorithm

SHAN Ning, SHI Yi-kai, LIU Xia

(School of Mechatronics, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: On the basis of Differential Evolution (DE) algorithm with strong capabilities of global searching, fast convergence speed, good robustness and easy to optimize complex problem, a technology of double wavelength stabilization is put forward to resolve the problems that optical fiber F-P sensor deviates from working point easily and causes the attenuation of output signal and the decrease of Ratio of Signal to Noise (RSN). The mathematic optimal model of double wavelength stabilization system is established, and structure of the system is optimized by using DE algorithm. The results indicate that the global optimal solution can be obtained in a shorter running time, the object is decreased by 89.46% and calculation error is less than 10^{-3} . The results reported above prove that this algorithm is proper and feasible, and can be used for the structural optimization design of optical fiber F-P sensor.

Key words: Differential Evolution (DE) algorithm; optical fiber sensing system; Fabry-Perot interferometer; structural optimization; global optimization

收稿日期:2008-03-14;修订日期:2008-05-04.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50275125);航空科学基金资助项目(No. 2007ZE53050)

1 引言

进化算法与经典的迭代算法相比较,主要特点在于进化算法从初始种群出发,每步迭代同时处理一个种群。该算法对函数的要求不高,在求解优化问题时,甚至不要求目标函数有明确的表达式;而且,该算法不容易陷入局部最优,尤其对组合优化、多态优化、混合规划及非凸非光滑优化等问题做得相当成功。目前常用的进化算法有遗传算法、模拟退火算法、蚁群算法等^[1-4],但是这些算法复杂,控制参数多且不易选择,鲁棒性和收敛性差,对于处理不可微、非线性、多极值函数容易陷入局部最优。

微分进化算法(Differential Evolution Algorithm, DE)是由 Storn R 和 Price K 在 95 年提出的一种基于实数编码的进化算法^[5-6],具有并行计算特点,全局搜索能力强,鲁棒性好,收敛速度快,能更简单、有效地解决复杂优化问题^[7-9]。因此,微分进化算法已广泛应用于参数辨识、聚类分析、滤波器优化等许多领域^[10-12]。本文针对光纤 Fabry-Perot (F-P) 传感器在实际应用中易偏离工作点,造成输出信号衰减,信噪比降低的问题,提出了双波长稳定技术,建立了双波长光纤 F-P 传感系统的数学优化模型,提出了基于 DE 算法的全局结构优化方法。实验结果表明,DE 算法切实可行,高效可靠,能很好地用于光纤 F-P 传感系统的结构优化设计。

2 DE 算法原理

DE 算法是一种用于解决复杂实数空间内有多个连续变量全局优化问题的算法,其基本思想是:先确定初始化种群个体数目和优化搜索的范围,产生初始化种群;然后对种群中的每个个体从当前种群中随机选择 3 个点,以其中一个点为基础,其它两个点为参照做一个扰动,所得点与这个个体交叉后进行“优胜劣汰、适者生存”的自然选择,保留较优者,实现种群的优化,重复选择过程,直到满足精度要求。

对于任意一个全局优化问题都可以转化成如下的极值问题

$$\min f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (1)$$

式中 f 为目标函数, x_n 是连续变量。则其 DE 算

法主要包括初始化种群、变异、交叉和选择,直至满足全局最优,具体可以描述为:

(1) 初始化种群:确定种群规模 N , 杂交概率 P_c , 变异因子 $F \in [0, 1]$, 在给定的约束边界范围内随机产生服从均匀分布的初始种群 $X(t) = \{X_1(0), X_2(0) \dots X_N(0)\}$, 其中 $X_i(0) = \{x_1^{(i)}(0), x_2^{(i)}(0), x_3^{(i)}(0), \dots, x_n^{(i)}(0)\}$ 为 n 维向量, 进化代数 $t = 0, N$ 一般取 $5n \sim 10n$ 。 i 表示个体在种群中的序列。

(2) 变异:首先计算种群中每个个体 $X_i(t)$ 的目标值 $f(X_i(t))$, 对个体进行评价;然后在种群中随机选取 3 个个体, 其中两个个体按一定的向量差加权后与另一个个体求和, 从而产生新的个体

$$X_i(t) = X_i^1(t) + F[X_i^2(t) - X_i^3(t)], \quad (2)$$

式中 $r_1, r_2, r_3 \in [1, N]$ 为随机产生的互不相同的 3 个整数。

(3) 交叉与选择:有时为了增加新种群的多样性, 将产生的新个体与旧个体进行交叉操作以再次产生新个体, 然后将新个体与旧个体按一定评判指标进行选择

$$X_i(t+1) = \begin{cases} X_i(t) & f(X_i(t)) < f(X_i(t)) \\ X_i(t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

(4) 终止:直至种群 $X_i(t+1)$ 满足需要的精度要求, 则输出 $X_i(t+1)$ 中具有最小目标值的个体作为最优结果, 否则转(2)继续进行。

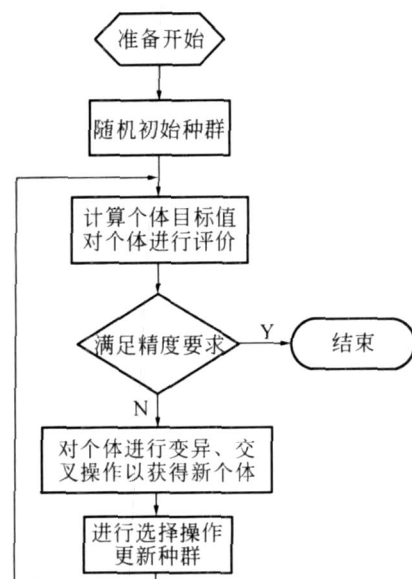


图 1 DE 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of DE algorithm

根据 DE 算法的基本原理和方法,利用 DE 算法求解优化问题的算法流程图如图 1 示。

3 光纤 F-P 传感系统优化模型

图 2 所示的光纤 F-P 传感器,在实际应用中,由于加工误差和受外界环境因素影响,常会引起 F-P 腔初始腔长变化,使工作点易偏离正交点,造成输出信号衰减,信噪比降低。针对这一问题,传感器的光源须选择超稳定可调谐激光光源,但是其成本太高,对干扰敏感。双波长稳定技术^[13-14]是通过合理设计传感系统两路输出光的波长,使两路输出信号处于正交状态来保证传感器工作点处于最大灵敏区。传统的双波长稳定技术,两路输出光的波长是通过近似方法得到的,导致输出信号正交精度低,难以实现双波长的稳定优点。

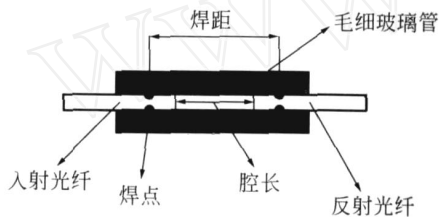


图 2 F-P 传感器结构示意图

Fig.2 Structural diagram of F-P sensor

根据光干涉原理,F-P 腔长与两路光相位的关系有^[15]

$$m = \frac{4 \cdot nd}{\lambda} \quad m = 1, 2, \quad (4)$$

式中 d 为 F-P 腔的腔长; λ 为光波长; n 为 F-P 腔折射率。本文传感系统使用 1 × 2DWDM 输出两路光,在两路输出光近似为单色光条件下,与中心波长对应的两路输出光的相位差为

$$= 4 \cdot nd \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad (5)$$

由式(5)可以看出,为了使两路输出光满足正

交,只需两路输出光的相位差等于 $\pi/2$ 。为此建立数学模型

$$\left. \begin{aligned} \min |f(\lambda_1, \lambda_2, d)| &= \min \left| 4 \cdot nd \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) - \frac{\pi}{2} \right| \\ \text{st} \quad d_{\min} &\leq d \leq d_{\max}; \quad \lambda_{\min} \leq \lambda_1 \leq \lambda_{\max} \\ \lambda_{\min} &\leq \lambda_2 \leq \lambda_{\max}; \quad 0 \leq \lambda_2 - \lambda_1 < \frac{\lambda_1}{2d} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 $n = 1$; d_{\min} 、 d_{\max} 分别为 F-P 腔设计要求的最小与最大长度; λ_{\min} 、 λ_{\max} 分别为光源光谱范围内的最小波长和最大波长。

由于传统 DE 算法一般用于求解无约束规划,因此采用罚函数法将(6)转化为无约束问题

$$F(\lambda_1, \lambda_2, d, M_t) = |f(\lambda_1, \lambda_2, d)| + M_t \sum_{e=1}^2 \left[\frac{G_e(\lambda_1, \lambda_2, d) + |G_e(\lambda_1, \lambda_2, d)|}{2} \right]^2 \quad (7)$$

式中 $M_{t+1} = 0.1(t+1) + M_t$ 为惩罚因子; G_e 为罚函数,有

$$\begin{cases} G_1(\lambda_1, \lambda_2, d) = \lambda_1 - \lambda_2 \\ G_2(\lambda_1, \lambda_2, d) = \lambda_2 - \lambda_1 - \frac{\lambda_1}{2d} \end{cases} \quad (8)$$

此时,对于无约束问题式(7)则可以按上述 DE 算法的流程进行优化求解。

4 DE 算法优化算例及结果

本文传感系统光源采用 ASE 宽带光源的波长范围为 1 525 ~ 1 610 nm,假设 F-P 腔设计要求的长度范围为 15 ~ 50 μm 。采用 DE 算法对双波长光纤 F-P 传感系统进行优化设计,DE 算法的参数设置分别为: $N = 20$; $F = 0.5$; $P_c = 0.2$; $M_0 = 3$;最大迭代次数为 100 次。与经典迭代算法进行比较,结果如表 1 所示。可以看出,采用 DE 算法可以很好地对双波长光纤 F-P 传感系统进行优化设计,误差 $< 10^{-3}$,明显优于经典迭代算法,优化目标下降 89.46 %;运行时间有所减少,表明该方法充分利用了设计资源,显示了该方法的高效性。

表 1 优化结果对比

Tab.1 Comparison of optimal results

	F-P 腔长 $d(\text{nm})$	波长 $\lambda_1(\text{nm})$	波长 $\lambda_2(\text{nm})$	运行时间(s)	目标值
经典迭代算法	17 800	1 543.33	1 560.20	0.982	0.003 7
DE 算法	15 000.1	1 578.68	1 599.72	0.695	0.000 39

5 结 论

本文针对光纤 F-P 传感系统工作点易偏离问题,提出了波长光纤稳定技术,建立了双波长稳定 F-P 传感系统的数学优化模型,采用 DE 算法

对其进行结构优化,解决了传统优化求解过程中易陷入局部最优解的问题,得到了很好的优化结果,优化目标下降了 89.46%,并经过较短的运行时间便得到了优化结果,充分利用了设计资源,提高设计效率。该方法正确可行,高效可靠,为光纤 F-P 传感系统的结构优化设计提供了实验基础。

参考文献:

- [1] 陈华,叶东,陈刚,等. 遗传算法的数字图像相关搜索法[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(10): 1633-1637.
CHEN H, YE D, CHEN G, *et al.*. Digital image correlation search method based on genetic algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1633-1637. (in Chinese)
- [2] 叶东,刘长英,车仁生,等. 基于遗传算法的像机虚拟立体校准技术研究[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(14): 485-489.
YE D, LIU CH Y, CHE R SH, *et al.*. Dummy solid camera calibration technology using genetic algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(14): 485-489. (in Chinese)
- [3] 孟勃,朱明. 粒子滤波算法在非线性目标跟踪系统中的应用[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(9): 1421-1426.
MENG B, ZHU M. Nonlinear object tracking using particle filter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1421-1426. (in Chinese)
- [4] 汪源源,蔡铮. 应用自适应模拟退火和多分辨率搜索实现医学超声图像的拼接[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(6): 1100-1106.
WANG Y Y, CAI ZH. Mosaic of medical ultrasound image based on adaptive simulated annealing and multiresolution searching[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1100-1106. (in Chinese)
- [5] STORN R, PRICE K. DE-A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous space[R]. *Berkeley: Technical report TR-95-012, ICSI*, 1995.
- [6] STORN R, PRICE K. DE-A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous space[J]. *Journal of Global Optimization*, 1997, 11(4): 341-359.
- [7] MAYER D G, KINGHORN B P, ARCHER A A. Differential evolution-an easy and efficient evolutionary algorithm for model optimization[J]. *Agricultural Systems*, 2005, 83(3): 315-328.
- [8] FAN H Y, LAMPINEN J A. Directed mutation operation for the differential evolution algorithm[J]. *International Journal of Industrial Engineering: Theory Applications and Practice*, 2003, 10(1): 6-15.
- [9] CRUZ I L L, WILLIGENBURG L G V, STRATEN G V. Optimal control of nitrate in lettuce by a hybrid approach: differential evolution and adjustable control weight gradient algorithms[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2003, 40(1): 179-197.
- [10] CHANG W. Parameter identification of Rossler's chaotic system by an evolutionary algorithm[J]. *Science*, 2006, 29: 1047-1053.
- [11] STORN R. Designing Nonstandard Filters with Differential Evolution[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2005, 22(1): 103-106.
- [12] PATERLINIA S, KRINK B T. Differential evolution and particle swarm optimisation in partitioned clustering[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2006, 50(5): 1220-1247.
- [13] PULLIAM W, PUSSLER P, MLCAK R, *et al.*. Micromachined, SiC fiber optic pressure sensors for high temperature aerospace applications[J]. *SPIE*, 2000, 4202: 21-30.
- [14] DE OLIVEIRA R, RAMOS C A, MARQUES A T. Health monitoring of composite structures by embedded FBG and interferometric Fabry-Perot sensors[J]. *Computers and Structures*, 2007, 86(3): 340-346.

[15] DAHLEM M, SANTOS L, FERREIRA L A, et al.. Passive interrogation of low-finesse Fabry-

Perot cavities using fiber bragg grating[J]. *Photonics Technology Letters*, 2001, 13(9):990-991.

作者简介:



单 宁(1980 -),男,山东东明人,博士研究生,主要从事激光超声检测技术及传感器设计的研究。E-mail: ssnn3193 @163.com

刘 霞(1979 -),女,河南西华人,博士研究生,主要从事机械可靠性设计,检测技术自动化方面的研究。E-mail: ssnn3193 @163.com

导师简介:

史仪凯(1952 -),男,陕西兴平人,工学学士,教授,博士生导师,主要从事电工电子技术、传感器设计、检测技术自动化等方面的研究。E-mail:ykshi @nwpu.edu.cn

下期预告

压电微动工作台动态迟滞模型研究

张 栋¹,张承进¹,魏 强²

(1. 山东大学 控制科学与工程学院,山东 济南 250061;

2. 泰山学院 物理与电子科学系,山东 泰安 271021)

为实现压电微动工作台快速准确运动定位,研究了其运动定位模型。压电工作台的运动定位精度主要受到工作台动态特性和迟滞特性的影响,在介绍这两类典型特性模型及其适用范围的基础上,提出了能够同时体现压电工作台动态特性和迟滞特性的动态迟滞模型,并给出了采用 Prandtl-Ishlinskii (PI)迟滞算子的动态迟滞模型参数辨识途径。以 TRITOR100 型压电工作台进行实验研究,结果表明:当压电工作台在 $30\ \mu\text{m}$ 的定位范围内以 $\pm 900\ \text{V/s}$ 的输入电压速率进行快速运动定位时,动态迟滞模型的模型精度比以往常用的线性动态模型和迟滞模型有较大提高,其平均误差为 $0.16\ \mu\text{m}$,最大误差为 $0.38\ \mu\text{m}$ 。为高性能运动定位工作台控制系统的设计提供了必要的模型基础。