文章编号: 0258-2724(2010)03-0405-06 DOI: 10.3969/j.issn. 0258-2724.2010.03.015

基于改进 PSO 算法的磁浮列车 PID 控制器参数优化

刘 东^{1,2}, 冯全源², 蒋启龙^{1,3}

(1. 西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031; 2. 西南交通大学信息科学与技术学院,四川 成都 610031; 3. 磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室,四川 成都 610031)

摘 要:为减小磁浮列车气隙控制中非线性的影响,将粒子群优化(PSO)算法用于磁浮列车控制器参数优化, 并在线性递减权重粒子群算法的基础上,提出了一种改进的粒子群优化算法.算法采用了邻域结构、停滞检测以 及对全局最佳粒子的微扰,以改善算法的优化速度和收敛性.仿真和实验结果表明,将改进算法获得的优化参数 用于磁浮列车的比例积分微分(PID)控制器,比原有 PID 控制器的输出超调减小45%.

Parameter Optimization of Maglev PID Controller Based on Improved PSO Algorithm

LIU Dong^{1,2}, FENG Quanyuan², JIANG Qilong^{1,3}

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. Key Laboratory of Magnetic Suspension Technology and Maglev Vehicle, Ministry of Education, Chengdu 610031, China)

Abstract: To reduce the effect of nonlinearization on maglev gap control, the PSO (particle swarm optimization) algorithm was used to optimize the parameters of a maglev controller, and an improved algorithm was proposed based on the linear decreasing weight particle swarm optimization (LDW-PSO). In order to improve the optimization speed and convergence performance, neighborhood topologies, stagnation detection and global best perturbation were adopted to build the improved algorithm. The simulation and experiment results show that the output overshoot of an optimized PID (proportional-integral-derivative) controller based on the improved algorithm is 45% smaller than that of a traditional PID maglev controller.

Key words: PSO (particle swarm optimization) algorithm; stagnation detection; maglev; PID controller

PID 控制是比例积分微分(proportion integral differential)控制的简称,是最早发展起来的控制策略之一.由于其具有算法简单、鲁棒性好、可靠性高

等优点而被广泛应用于工业过程控制领域,工业控制 90% 以上使用的是 PID 类控制器^[1]. PID 控制的效果取决于控制器的 3 个参数:比例系数 K_p、积

收稿日期: 2008-11-20

基金项目:国家 863 计划资助项目(2008AA809508);国家自然科学基金重大项目(60990320;60990323);国家自然科学基金-中物院 联合基金资助项目(10876029)

作者简介: 刘东(1978 -),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为电力电子技术、智能控制以及阵列信号处理,电话:13981916076, E-mail:liudong@swjtu.edu.cn

通讯作者: 冯全源(1963 -), 男, 教授,博士生导师, 主要研究方向为集成电路设计、RFID 技术、嵌入式系统、移动天线与智能天线系统、微波及毫米波技术、自适应信息处理、电磁兼容与环境电磁学、微波器件及材料等, E-mail: qyfeng @ home. swjtu. edu. cn

分系数 K_i 和微分系数 K_d . 为了更好地应用 PID 控制, PID 控制器的参数整定与优化已成为一个重要的研究课题^[1]. 经典的 PID 参数整定方法为 Ziegler-Nichols 整定法,虽然可以计算出 K_p 、 K_i 和 K_d 的值,但是实际控制效果往往不能达到设计者的预期. 对于一些具有高阶、时滞及非线性特性的 复杂对象,采用 Ziegler-Nichols 整定的方法很难满足控制要求. 目前,一些智能优化方法已成功应用 到 PID 控制器的参数优化中^[23],但也存在早熟收 敛及收敛速度慢等问题.

1995 年 Eberhart 博士和 Kennedy 博士提出了 一种基于群体智能理论的演化计算方法——粒子 群优化算法(particle swarm optimization, PSO)^[4], 通过种群粒子间的合作与竞争,产生群体智能指导 优化搜索.与常规遗传算法(SGA)相比较,它具有 算法简单、易实现、计算量小和计算效率高的优 点^[5]. 标准的 PSO 算法与 SGA 相似,在算法后期也 存在着易陷入局部极值点的现象. 对于 PSO 算法, 惯性权重ω和全局最优粒子对算法影响很大.采 用自适应的参数策略或者提高全局最优粒子的质 量与多样性都可以有效地提高 PSO 算法的性能. 文献[6-7]简介了惯性权重和全局最优粒子的不同 改进策略. 文献[7]的介绍表明了带固定最大迭代 次数的线性权值递减方式更为有效,对全局最优粒 子进行扰动可以降低算法早熟收敛的概率. 文 献[9-10]将粒子群算法成功用于系统辨识和路径 规划,文献[11-13] 实现了将粒子群算法用于不同 控制场合的 PID 参数优化.

磁浮列车的电磁悬浮部分是一个典型的开环 不稳定非线性系统^[14],传统的磁浮列车控制器设 计是在系统平衡点附近进行局部线性化,当要求磁 浮系统在一个大的间隙范围内稳定工作时,采用传 统方法优化的控制器性能变差甚至产生不稳定,给 控制器设计带来了困难^[15].

本文提出了一种改进算法,其基本思想是当发 现优化可能陷入停滞时才调整ω,并对最优粒子进 行扰动,使得增强粒子活性更具针对性,更加有效. 同时为了增加种群的多样性,算法采用了 Ring 型 邻域结构以及 LocalBest 策略以削弱全局最优粒子 的影响力.将该算法应用于磁浮列车控制系统的 PID 控制器参数优化中,仿真结果验证了改进算法 优化磁浮列车控制系统 PID 控制器参数方法的有 效性.

1 改进 PSO 算法

PSO 算法是一种群体智能算法,利用 m 个粒 子组成的粒子群在 D 维目标搜索空间中以迭代的 方式寻找最优解.在每步迭代中,第 i 个粒子速度 与位置都按文献[6]中的式(1)和式(2)进行更新. 本文的改进算法采用了 Ring 型邻域结构以及 LocalBest 策略以削弱全局最优粒子的影响力,并 采用与文献[8]类似的ω 调整策略以及对全局最 佳粒子的扰动,同时添加了停滞检测,使参数调整 更具针对性.

对于 Ring 邻域拓扑结构的 LocalBest PSO 算法,其每步迭代中的第 *i* 个粒子速度与位置更新表达式如下:

$$v_{id}(t+1) = wv_{id}(t) + c_1r_{1d}(t)[p_{id} - x_{id}(t)] +$$

$$c_2 r_{2d}(t) \lfloor p_{ld} - x_{id}(t) \rfloor, \qquad (1)$$

 $x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + x_{id}(t+1),$ (2) 式(1)和(2)中: i = 1, 2, ..., m; d = 1, 2, ..., D;D 维向量 $x_i(t) = v_i(t)$ 分别为粒子 i 在 t 时刻的位 置与速度; p_i 为粒子 i 曾经历过的个体最优位置; p_g 为所有邻域个体曾经历过的全局历史最优位 置; w 为惯性权; $c_1 \ c_2$ 为加速系数; $r_{1d} \ r_{2d}$ 为在 [0,1]内均匀分布的随机数. 传统 PSO 算法公式中 的 p_g 被替换成个体邻域最优 p_l ,以期削弱全局最 优粒子的影响力,增强粒子群寻优能力.

改进算法中,惯性权重 ω 在算法停滞时才进 行递减,优化顺利时 ω 值不变.同时,在停滞时对 全局最优粒子 p_s 之外的粒子重新初始化.惯性权 重 ω 的计算如式(3),其中: t_{iter} 为当前迭代次数; $\omega_{max run}$ 为固定最大迭代次数^[8],本文中取 100.

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times mod(t_{iter}, \omega_{\max}, un) / \omega_{\max}, un).$$
(3)

同时改进算法在每次迭代时,检测当前 *p_g* 是 否停滞.如果连续 *N* 次迭代,*p_g* 的变化小于一个阈 值,就表明种群有可能陷入局部最优,此时的参数 可能不太适合,需要按预定策略进行调整,并对当 前的 *p_i* 进行扰动以改变它的位置,其它粒子仍然 采用原来的更新方法.这种算法在后面的测试中显 示出较好的性能.

2 磁浮列车 PID 控制器参数优化

PID 控制是按偏差的比例、积分和微分的线性 组合来控制的一种调节器,其数学表述为:

$$u(t) =$$

$$K_{\rm p}\left[e(t) + \frac{1}{T_{\rm i}}\int_0^t e(t)\,\mathrm{d}t + \frac{T_{\rm d}\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}\right],\qquad(4)$$

其中: $K_p \, \langle K_i = K_p / T_i \rangle$ 和 $K_d = K_p T_d \rangle$ 分别为比例、积分和微分参数; e(t)为反馈偏差; u(t)为输出控制量. PID 参数优化的目的是选择合适的比例、积分和微分参数,从而优化控制器的控制效果.

2.1 编码、参数空间和适应度函数

PID 控制器的参数优化实际上是 3 维函数的 优化问题,粒子群算法采用实数编码,对于 PID 参 数寻优中的粒子可直接编码为(*K*_p,*K*_i,*K*_d). 粒子 群算法的搜索空间是以试凑法得到的参数结果为 中心进行扩展而成,本文改进算法的搜索控制空间 为[0,1 000].

对于粒子群优化算法来说,必须采用一个合适 的适应值函数来控制优化方向.对 PID 参数优化的 判据要考虑控制偏差趋于零、有较快的响应速度和 较小的超调量等方面的影响.磁浮控制器的功能主 要是改善系统的暂态响应和降低超调,可以采用绝 对误差与时间积分指标最优(ITAE)准则,适应值 函数^[11]如式(5).

$$J = \int_{0}^{t} |e(t)| dt.$$
 (5)

2.2 磁浮列车控制器的 PID 控制模型

磁浮列车电磁悬浮系统通常是多电磁铁结构, 每个模块的运动有纵向、侧移、升降及摇摆、侧滚、 俯仰6个自由度.通过机械解耦,整个系统可以分 解为单个悬浮磁铁的控制问题.因此,单电磁铁悬 浮系统的分析和综合是磁浮列车系统分析和控制 的基础.图1所示为单电磁铁与导轨组成的悬浮系 统原理结构图.图中 Φ_m 、 Φ_T 和 Φ_L 分别为气隙磁 通、总磁通和漏磁通,u(t)和i(t)分别为电磁铁电 压和电流,c(t)和h(t)分别为实际气隙和轨道面 与参考平面之间的距离.在分析单电磁铁悬浮系统 的动力学模型时,忽略漏磁通及铁芯和导轨中的磁 阻,电磁铁仅有垂直方向上的移动,规定力的方向 是向下为正.

单个电磁铁的电磁吸力为:

$$F(z,i) = \frac{B^2 S}{\mu_0} = \frac{\mu_0 N^2 i^2(t) S}{4z^2(t)},$$
(6)

式中: N 为电磁铁绕组匝数; z(t)为气隙; S 为铁 芯极面积; i(t)为控制线圈电流.

由式(6)可知,电磁吸力 F(z,i)与气隙 z(t)成 非线性反比关系,这正是电磁悬浮系统固有的不稳



图1 单电磁铁悬浮动态模型

Fig. 1 Dynamic model for single electromagnet suspension 定性的本质原因所在.

电磁铁绕组回路的电压方程为:

$$u(t) = Ri(t) + \frac{d(L(z,i)i(t))}{dt} = Ri(t) + \frac{\mu_0 N^2 S}{2z(t)} \cdot \frac{di(t)}{dt} - \frac{\mu_0 N^2 S}{2z(t)} \cdot \frac{dz(t)}{dt}.$$
 (7)

电磁铁垂直方向在扰动力 $f_{d}(t)$ 的作用下,其运动 方程为:

$$m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} = mg - F(z,i) + f_d(t).$$
 (8)

在平衡点 (z_0, i_0) ,其电磁吸力与 mg 相等,即:

$$F(z_0, i_0) = \frac{\mu_0 N^2 i_0^2 S}{4z_0^2} = mg.$$
(9)

综上所述,式(6)~(9)构成的一组非线性方 程即是单电磁铁的数学模型,它完全确定了电磁铁 垂直方向的状态.在平衡点(z₀,i₀)附近局部线性 化,得:

$$m\Delta \ddot{z}(t) = K_z \Delta z(t) - K_I \Delta i(t) + \Delta f_d(t), \quad (10)$$

$$\Delta u(t) = R\Delta i(t) + L_0 \Delta \dot{i}(t) - K_l \Delta \dot{z}(t), \quad (11)$$

$$\vec{x} \div: K_z = \frac{\mu_0 N^2 i_0^2 S}{2 z_0^3}, \quad K_I = \frac{\mu_0 N^2 i_0 S}{2 z_0^2}, \quad L_0 = \frac{\mu_0 N^2 S}{2 z_0}.$$

式(7)、(8)经拉氏变换可得气隙 z 对输入电 压 u 的传递函数:

$$\frac{\Delta z(s)}{\Delta u(s)} = -\frac{K_I}{mL_0 s^3 + mRs^2 - K_z R},$$
(12)

系统的特征方程为:

$$mL_0s^3 + mRs^2 - K_z R = 0. (13)$$

由 Routh 判据可知,这是三阶不稳定系统,与 前面根据吸力特性所得结论一致.因此,要使系统 稳定,必须采用反馈控制.目前,吸力型磁浮列车控 制多采用 PID 控制器,其框图见图2.图中, *G*_p(*s*)、 *G*(*s*)和 *F*(*s*)分别为功放环节(斩波器)、被控对象 (电磁铁)和反馈环节(传感器)的传递函数.



图 2 磁浮列车 PID 控制器框图

Fig. 2 Maglev PID controller frame

2.3 算法流程

基于改进粒子群算法的磁浮 PID 控制器参数 优化算法的基本流程如下:

 ① 确定控制器参数 K_p、K_i和 K_d取值范围的 上下界,粒子群随机初始化.

② 初始化粒子历史最优位置 *p_i*、粒子领域最优位置 *p_i* 和全局最优粒子位置 *p_g*. 将粒子的 *p_i* 设为当前位置,计算出 *p_i* 和 *p_g*.

③ 计算每个粒子的适应值,更新 p_g 和 p_i .如果 p_g 的适应值累积减小,达不到阈值要求,则停滞计数器加 1,反之,计数器清零.

④判断是否满足收敛准则,如果满足,则转到⑧.

⑤ 如果停滞计数器大于等于 N,转到⑦;反之 转到⑥.

⑥ 按照式(1)和式(2)更新粒子速度和位置,转到③.

⑦ 计数器清零,按照式(3)更新ω,重新初始 化全局最优粒子 *p*_s之外的粒子,转到③.

⑧ 输出 p_g 作为 PID 控制器的优化参数, 结束.

本文采用 Matlab 语言编程实现. 仿真实验中, 改进 PSO 算法参数选取如下:粒子数 N = 30,惯性 因子 ω 的范围为[0.9,0.4],加速因子 $c_1 = c_2 =$ 1.5,迭代次数 T = 20,粒子的搜索范围和飞行速度 范围按式(1)和式(2)选取.

3 仿真及实验结果

以图 2 的磁浮列车控制器为控制对象,用表 1 中不同方法得到的 PID 参数进行仿真和实验.

图 3 为不同 PID 控制器的阶跃响应曲线,给定 气隙值 0.008 m,阶跃时间为 0.5 s. 从图 4 的收敛 趋势曲线比较图可得出,改进 PSO 算法的收敛速 度及搜索能力都优于 LDW-PSO 算法,说明了改进 策略的有效性.

表1 磁	数浮列车 PID	控制器优化参数
------	----------	---------

Tab. 1 Optimized parameters of maglev PID controller

优化方法	K _p	K _i	
试凑法	550	250	90
LDW-PSO	977.088 2	822.239 5	149.8928
改进 PSO 算法	971.5140	714.7986	173.487 6



图 3 不同 PID 控制器阶跃响应





图 4 不同 PSO 适应值收敛曲线 Fig. 4 Fitness convergence of different PSOs

从表 2 中可以看出,与试凑法和 LDW-PSO 方 法相比较,改进 PSO 算法优化的 PID 控制器效果 最好,比原有 PID 控制器的输出超调减小了 45%, 负调和上升时间等性能指标与试凑法得到的 PID 控制器相比都得到了不同程度的改善.

表 2 不同 PID 控制器响应比较

Tab. 2Response comparison of different PID controllers%				
输出响应性能指标	试凑法	LDW-PSO	改进 PSO	
超调	183.75	110.00	100.00	
负调	16.06	5.50	0.00	
上升时间/s	0.75	0.74	0.74	

图 5~7 为不同 PID 控制器位移响应实验结 果. 从图中可以看出, 与试凑法、LDW-PSO 方法优 化后的控制器响应相比较, 改进 PSO 算法优化的 PID 控制器实际效果最好, 说明改进 PSO 对磁浮 PID 控制器参数进行优化的有效性. 图 8 是磁浮试 验车.



图 5 改进 PSO 优化后的磁浮车控制器位移响应 Fig. 5 Response of optimized controller



图 6 LDW-PSO 优化后的磁浮车控制器位移响应 Fig. 6 Response of LDW-PSO optimized controller



图 7 试凑法优化的磁浮车控制器位移响应 Fig. 7 Response of traditional controller



图 8 磁浮试验车 Fig. 8 Maglev test equipment

4 结 论

本文对 PSO 算法进行了改进,将停滞检测引 人到 PSO 算法中,并将改进后的 PSO 算法应用到 磁浮列车 PID 控制器参数的寻优. 仿真和实验结 果表明,本文改进 PSO 算法比 LDW-PSO 算法具有 更快的收敛速度和更高的效率以及全局收敛性,优 化后的磁浮 PID 控制器效果比试凑法得到的 PID 控制器有了很大改善,在工程上具有良好的应用前 景和推广价值.

致谢:本文的研究工作得到 2009 西南交通大学青 年百人计划和西南交通大学青年教师科研起步项 目(2009Q014)的资助.

参考文献:

- [1] 王伟,张晶涛,柴天佑. PID 参数先进整定方法综述
 [J]. 自动化学报,2000,26(3): 347-355.
 WANG Wei, ZHANG Jingtao, CHAI Tianyou. A survey of advanced PID parameter tuning methods[J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(3): 347-355.
- [2] 任子武, 伞冶, 陈俊风. 改进 PSO 算法及在 PID 参数 整定中应用研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(10): 2870-2873.

REN Ziwu, SAN Ye, CHEN Junfeng. Improved particle swarm optimization and its application researchin tuning of PID parameters [J]. Journal of System Simulation, 2006,18(10): 2870-2873.

- [3] 陈星,李东海. 基于遗传算法的分布参数对象 PID 控制器设计[J]. 清华大学学报:自然科学版,2007,47(8):1356-1360.
 CHEN Xing, LI Donghai. PID controller design for distribution parameter systems based on genetic algorithms[J]. J. Tsinghua Univ.; Sci. & Tech.,
- 2007, 47(8): 1356-1360.
 [4] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization [C] // Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth: IEEE Service
- [5] GAING Z L. A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system [J].
 IEEE Trans. on Energy Conversion (S0885-8969), 2004, 19(2): 384-391.

Center, 1995, IV: 1942-1948.

[6] 林川,冯全源. 一种新的自适应粒子群优化算法
[J]. 计算机工程,2008,34(7):181-183.
LIN Chuan, FENG Quanyua. New adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. Computer

Engineering, 2008, 34(7): 181-183.

- [7] 林川,冯全源. 粒子群优化算法的信息共享策略
 [J]. 西南交通大学学报,2009,44(3):437-441.
 LIN Chuan, FENG Quanyua. Information sharing strategies for particle swarm optimization algorithm[J].
 Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(3): 437-441.
- [8] 金荣洪,袁智皓,耿军平,等. 基于改进粒子群算法的 天线方向图综合技术[J]. 电波科学学报,2006, 21(6): 873-878.
 JIN Ronghong, YUAN Zhihao, GENG Junping, et al. The pattern synthesis of antennas based on a modified PSO algorithm[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(6): 873-878.
- [9] 徐小平,钱富才,王峰.基于改进粒子群算法的系统 辨识新方法[J].系统工程与电子技术,2008, 30(11):2231-2236.

XU Xiaoping, QIAN Fucai, WANG Feng. Novel method of system identification based on modified particle swarm optimization algorithm[J]. Systems Engineering and Electronic, 2008, 30 (11): 2231-2236.

 [10] 杨思亮,徐世杰.基于粒子群算法的航天器姿态机 动路径规划[J].北京航空航天大学学报,2010, 36(1):48-51.

YANG Siliang, XU Shijie. Spacecraft attitudemaneuver planning based on particle swarm optim ization[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(1): 48-51.

 [11] 王介生,王金城,王伟. 基于粒子群算法的 PID 控 制器参数自整定[J]. 控制与决策,2005,20(1): 73-76.

WANG Jiesheng, WANG Jincheng, WANG Wei. Self-

tuning of PID parameters based on particle swarm optimization [J]. Control and Decision, 2005, 20(1): 73-76.

- [12] 方红庆. 一种改进粒子群算法及其在水轮机控制器 PID 参数优化中的应用[J]. 南京理工大学学报:自 然科学版,2008,32(3): 274-278.
 FANG Hongqing. Improved particle swarm optimization algorithm and its application in hydraulic turbine governor PID parameters optimization[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2008, 32(3): 274-278.
- [13] 郭大庆,李晓,赵永进. 基于改进 PSO 算法的 PID
 参数自整定[J]. 计算机工程,2007,33(18): 202-204.
 GUO Daqing, LI Xiao, ZHAO Yongjin. Self-tuning of

PID parameters based on improved PSO algorithm[J]. Computer Engineering, 2007, 33(18): 202-204.

- [14] 蒋启龙,张昆仑,连级三. 磁浮轴承系统的数学模型 与控制分析[J]. 西南交通大学学报,1999,34(4): 413-418.
 JIANG Qilong, ZHANG Kunlun, LIAN Jisan. A Mathematical model and control analysis of magnetic bearings[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1999, 34(4): 413-418.
- [15] 龙志强,洪华杰,周晓兵.磁浮列车的非线性控制问题研究[J].控制理论与应用,2003,20(3):399-402.

LONG Zhiqiang, HONG Huajie, ZHOU Xiaobing. Research of nonlinear control for maglev train[J]. Control Theory & Application, 2003, 20(3): 399-402.

(中文编辑:唐 晴 英文编辑:付国彬)