半主动悬架PID控制的研究和优化

郭全民　雷蓓蓓
（西安工业大学电子信息工程学院　西安　710021）

摘　要：为解决汽车半主动悬架系统PID控制中，PID控制器参数选择的经验性和主观性，提出采用粒子群算法对PID控制器中的参数进行优化。首先建立汽车半主动悬架系统的模型，并对其进行PID控制，然后利用粒子群算法的并行全局搜索能力对PID控制参数 K_p、K_i、K_d 进行整定，以此来改善汽车半主动悬架PID控制的性能。仿真结果表明，基于粒子群算法优化的PID控制不仅解决了参数整定的问题，而且相对于PID控制的悬架和被动悬架而言，使汽车的乘坐舒适性和操纵稳定性有所提高。

关键词：半主动悬架；PID；粒子群
中图分类号：U463.33　　**文献标识码**：A　　**国家标准学科分类代码**：510.8020

Research and optimization for semi-active suspension PID control

Guo Quanmin　Lei Beibei
(School of Electronics and Information, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: To solve the problem that selection of the PID controller parameter is experimental and subjective in automotive semi-active suspension system PID control, Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is proposed for optimizing of PID controller parameter. First, establish a model of automobile semi-active suspension system, and carry PID control on it, than use parallel global search ability of PSO to setting parameters K_p, K_i, K_d of PID control, in order to improve the performance of the PID control semi-active suspension. The simulation results show that PID control based on PSO algorithm not only solved the problem of the parameter setting, and compared with the PID control of suspension and passive suspension, to make the car ride comfort and handling stability improved.

Keywords: the semi-active suspension; PID; particle swarm optimization (PSO)

1　引　言

悬架系统作为车辆的重要组成部分[1]，能够缓冲路面冲击、衰减由路面不平引起的车身振动等。传统的被动悬架因为阻尼、刚度不可调很难满足汽车性能的改善，主动悬架又由于其造价高，结构复杂而不能广泛使用。介于两者之间的半主动悬架就因为阻尼可调，造价又不高且性能又与主动悬架接近而得到汽车行业大力发展[2]。

半主动悬架的设计关键是其控制方法策略。PID控制是经典控制理论之一，由于其算法简单，可靠性高的特点[3]，被广泛应用与工业控制中，同样适用汽车悬架的半主动控制中。但是它的参数主要是人工调整，具有很大的主观性，也不能保证过的最优的性能。因此，提出利用粒子群算法全局搜索能力对PID控制的3个参数进行整定[4]，通过仿真实验和对比分析，来验证方法的有效性。

2　二自由度1/4半主动悬架系统模型的建立

二自由度1/4半主动悬架模型能够反映出汽车在垂直方向上的振动[5]，并且能够表现悬架的动态性能指标（车身垂直加速度、悬架动挠度及轮胎动载荷），二自由度1/4的悬架模型如图1所示。其中 m_s 为簧载质量，m_u 为非簧载质量，k_s 为悬架弹簧刚度，k_t 为轮胎刚度，f 为阻尼器的可调阻尼力，c_0 为被动阻尼系数，x_1 为簧载质量位移，x_2 为非簧载质量位移，x_3 为路面输入。

收稿日期：2015-01

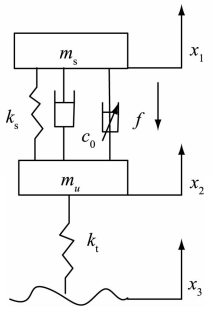

图1 二自由度1/4半主动悬架模型

路面输入采用滤波白噪声，其时域数学模型为[6]：

$$\dot{q}(t) = -\alpha v q(t) + \omega(t) \tag{1}$$

式中：$q(t)$为车轮所受的路面随机激励；v为汽车的行驶速度；$\omega(t)$为限带白噪声(均值为0，强度为1)；α为一常系数，不同路面的参数估计值α的值不同。(B级路面中α = 0.130 3)。

根据牛顿第二运动定律可得到两自由度半主动悬架系统模型振动的微分方程：

$$\begin{cases} m_s\ddot{x}_1 + k_s(x_1 - x_2) + c_0(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - f = 0 \\ m_u\ddot{x}_2 - k_s(x_1 - x_2) - c_0(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_t(x_2 - x_3) + f = 0 \end{cases} \tag{2}$$

根据微分方程在MATLAB/Simulink中建立汽车半主动悬架的仿真模型[7]如图2所示。

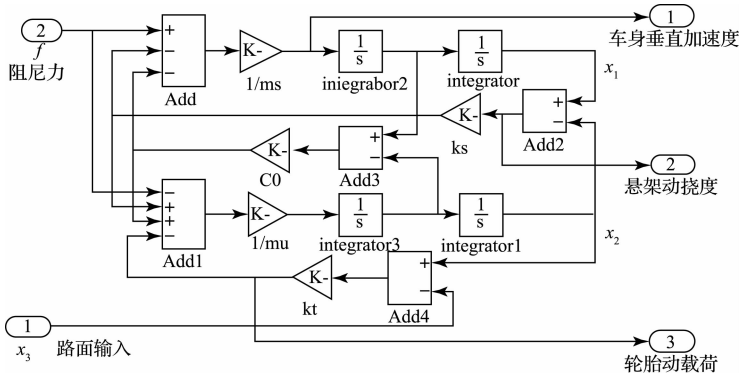

图2 汽车半主动悬架的仿真模型

3 半主动悬架的PID控制

PID(proportion integration differentiation)控制器由比例单元(P)、积分单元(I)和微分单元(D)组成，又称为比例-积分-微分控制器，因其算法简单，可靠性高，使用过程中不需要精确的系统模型，而成为工业生产中应用广泛的控制器，其数学表达式为式(3)所示：

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{K_i}\int e(t)\mathrm{d}t + K_d\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

式中：$e(t)$是系统误差；K_p为比例系数，K_i为积分系数，K_d为微分系数，分别是对系统误差信号及其积分与微分量的加权，控制器通过这样的加权就可以计算出控制信号，驱动受控对象。如果控制器设计合理，那么控制信号将能使误差超减小的方向变化，达到控制的要求。

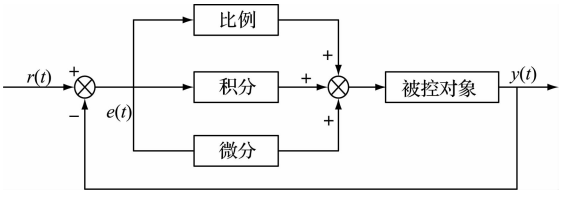

图3 PID控制原理

传统的PID控制原理如图3所示，主要由PID控制器和被控对象组成，系统根据设定值$r(t)$和实际输出值$y(t)$得到控制偏差$e(t)$，对偏差$e(t)$进行比例、积分、微分运算，将其进行线性组合得到控制量$u(t)$对被控对象进行控制[8]。

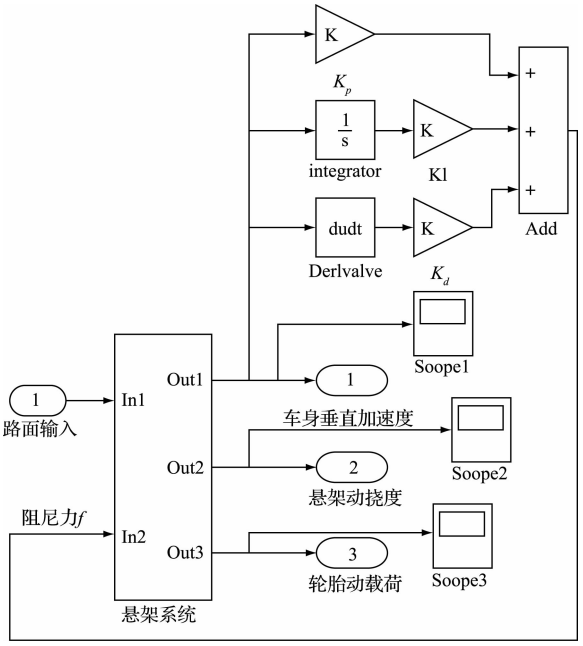

图4 汽车半主动悬架的PID控制

根据PID控制原理，以车身垂直加速度作为控制对象，以尽量减小车身垂直加速度为目的，采用车身加速度与参考加速度(设为0)之间的偏差作为控制器输入，半主动悬架系统的可调阻尼力作为系统输出，采用试凑法对PID控制器进行参数整定，在MATLAB/Simulink中建立仿真模型如图4所示。

4 粒子群对PID控制器的优化

粒子群算法(PSO)最早是由Kennedy和Eberhart在1995年提出的，他们根据鸟类捕食行为得到启发用于求解优化问题[9]。算法的基本思想是随机初始化粒子群，而每一个粒子都代表问题的一个可行解，它有自己的位置和速度，粒子的优劣是由其对应一个适应度函数来评判，粒子在可行解的空间追踪当前搜索到的最优值，通过不断的迭代、搜索和更新自己的位置和速度来寻找全局最优解使适应度函数值最小。利用粒子算法这种并行全局搜索的能力可以实现对PID控制器参数的整定，寻找到最优值，使悬架系统的控制性能达到最佳。

对于粒子群优化半主动悬架PID控制来讲，采用最影响车辆乘坐舒适性和操作稳定性的悬架的3个性能指标：车身垂向加速度 $\dot{x}_1^{\,2}$、悬架动挠度 (x_1-x_2)、轮胎动位移 (x_2-x_3) 作为算法的粒子的个体。由于它们的单位以及数量级不一致，因此将其除以响应的被动悬架性能指标值，得到粒子群算法的适应度函数值，该优化问题的表述如式(4)所示。

$$\begin{aligned}&\min imize L=\frac{rms[\ddot{x}_1^2(X_i)]}{rms[\ddot{x}_{1p}^2(X_i)]}+\frac{rms[(x_1-x_2)(X_i)]}{rms[(x_{1p}-x_{2p})(X_i)]}\\&+\frac{rms[(x_2-x_3)(X_i)]}{rms[(x_{2p}-x_{3p})(X_i)]}\\&X_i(K_p,K_i,K_d),1<X_i<50,i=1,2,3\\&\text{s.t.}\begin{cases}rms[\ddot{x}_1(X_i)]<rms[\ddot{x}_{1p}(X_i)]\\rms[(x_1-x_2)(X_i)]<rms[(x_{1p}-x_{2p})(X_i)]\\rms[(x_2-x_3)(X_i)]<rms[(x_{2p}-x_{3p})(X_i)]\end{cases}\end{aligned}\tag{4}$$

式中：rms 代表均方根值，$\ddot{x}_{1p}$，$x_{1p}-x_{2p}$，$x_{2p}-x_{3p}$ 分别代表被动悬架的车身垂直加速度、悬架动挠度、轮胎动位移。X_i 代表PID参数矩阵。

粒子在搜索空间中的速度和位置根据式(5)确定。

$$\begin{aligned}v_{i+1}&=\omega v_i+c_1r_1(P_i-x_i)+c_2r_2(Q_i-x_i)\\x_{i+1}&=x_i+v_{i+1}\end{aligned}\tag{5}$$

式中：v 表示粒子的速度，ω 是惯性因子，c_1、c_2 为加速常数，r_1、r_2 为[0,1]内的随机数，P_i 是粒子目前搜索到的最优位置，Q_i 是整个粒子群目前搜索到的最优位置，x_i 表示粒子的位置。

粒子群算法对悬架系统的PID控制的参数优化过程如图5所示。

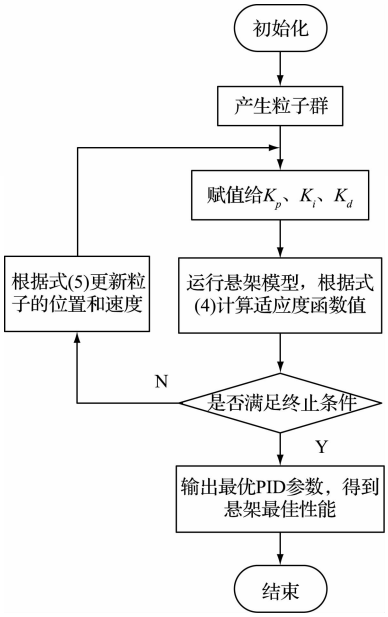

图5 PID控制参数的优化过程

1)产生粒子群。粒子群的搜索空间为三维，每个粒子的位置为 $V_i(K_{pi1},K_{ii2},K_{di3})$，$i=1,2,3$，根据PID控制器参数整定的经验，将3个参数的取值范围设定为[1,100]。

2)将群体中每个个体一次赋值给PID控制器的参数，然后运行控制系统的Simulink模型，得到该组粒子参数对应的PID控制力及对应的悬架性能指标。

3)根据式(4)求出种群中各个体的适应度函数值，判断其是否满足粒子群算法的终止条件，达到全局最优位置切满足最小界限。若满足，则退出粒子群算法，并得到最优个体，输出悬架的最佳性能；若不满足，则根据式(5)更新粒子的位置和速度，转置步骤2)。

5 仿真结果与分析

仿真采用的悬架参数如表1所示[10]。

表1 模型仿真参数

m_s/kg	487.685
m_u/kg	49
k_s/(N·m^{-1})	45 480
k_t/(N·m^{-1})	604 690
c_0/(N·s·m^{-1})	2 546.5

经过粒子群算法的优化整定得到 K_p、K_i、K_d 的值分别为69.47、0.02、26.91。设定汽车车速为50 km/h，路面采取国家标准的B级路面，路面仿真结果如图6所示。

为了验证粒子群算法优化的PID控制有效改善了悬架系统的性能[10]，在相同的仿真条件下，选择PID控制的悬架和被动悬架的性能进行对比分析，各种悬架系统的车身垂直加速度、悬架动挠度以及轮胎动载荷的仿真结果如图7～9和表2所示。

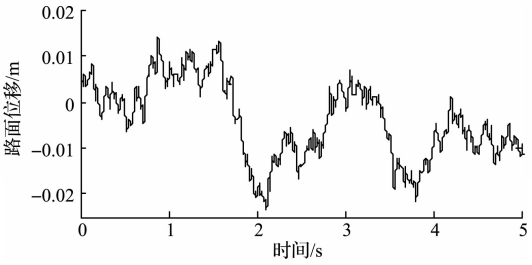

图 6　B级路面仿真结果

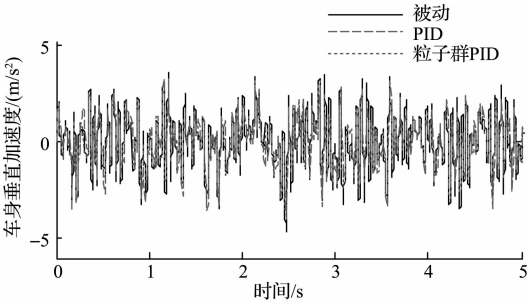

图 7　车身垂直加速度仿真结果

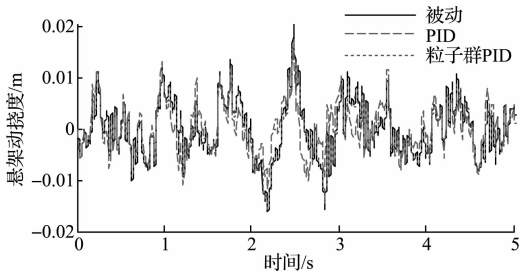

图 8　悬架动挠度仿真结果

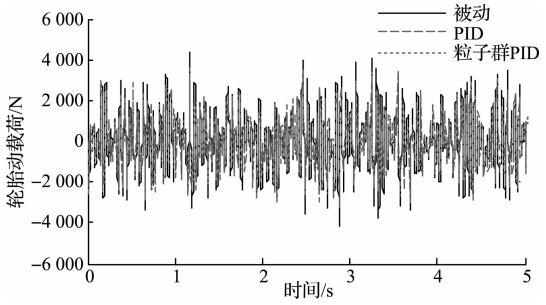

图 9　轮胎动载荷仿真结果

表 2　各控制方法的仿真结果比较

性能指标均方根值	被动悬架	PID 控制	粒子群 PID	性能改善(%)	
				PID	粒子群 PID
车身加速度	1.14	1.024	0.8998	10.18	21.07
悬架动挠度	0.004 874	0.004 298	0.003 933 80	11.85	19.29
轮胎动载荷	1158	1048	938.67	10.40	18.94

从图 4 看出，粒子群算法优化的 PID 控制的悬架的性能有了明显改善，车身垂直加速度、悬架动挠度和轮胎动载荷的均方根值分别比 PID 控制的悬架降低了 10.18%，11.85%，10.40%，比被动悬架降低了 21.07%，19.29%，18.94%。结果表明结果表明粒子群优化的 PID 控制的半主动悬架的汽车的乘坐舒适性和操纵稳定性得到了很大的提高，验证了本文所设计的粒子群优化 PID 控制方法的有效性和可行性。

6　结　论

利用粒子群算法的并行全局搜索能力，以最大改善汽车悬架系统的性能为目标对 PID 控制参数进行全面的整定和优化，克服了 PID 控制中的主观性和未能保证达到最优的缺点。同种仿真条件下在 MATLAB/Simulink 中的仿真结果表明，基于粒子群优化的 PID 控制的汽车半主动悬架系统比被动悬架系统和传统 PID 控制的半主动悬架系统更有效的降低车身垂直加速度，减小轮胎动载荷，从而提高了汽车的平顺性和操纵稳定性，从而验证了粒子群算法对 PID 控制优化的有效性，提高了 PID 控制器的准确性和控制性能。

参 考 文 献

[1] 姜婷. 汽车悬架系统的应用与发展趋势 [J]. 太原科技，2008，12(3)：83-85.

[2] 任勇生，周建鹏. 汽车半主动悬架技术研究综述 [J]. 振动与冲击，2006，25(3)：162-165.

[3] 黎君，阎世梁. 一级倒立摆模糊 PID 控制器设计 [J]. 国外电子测量技术，2012，31(4)：50-52.

[4] 王秋生，杨浩，袁海文. 基于粒子群优化的数字多频陷波滤波器设计 [J]. 仪器仪表学报，2012，33(7)：1661-1667.

[5] KANJANAVAPASTIT A，THITINARUEMIT A. Estimation of a speed hump profile using quarter car model [J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences，2013，88(5)：265-273.

[6] 中国国家技术监督局. 车辆振动输入路面不平度表示方法[Z]. GB/T 7031－1986.

[7] SHI W R，JIANG Y S，ZHAO Y. A backbone formulation algorithm in wireless sensor network based on cross-entropy method[J]. Instrumentation，2014，1(1)：38-48.

[8] 张庆洪，张桂香. 汽车性能虚拟测试系统的设计与实现 [J]. 电子测量与仪器学报，2013，27(11)：1047-1053.

[9] 王世明，王孙安，李天石. 半主动悬架的试验研究 [J]. 仪器仪表学报，2010，31(2)：214-216.

[10] 王瑞，郭全民. 基于模糊 PID 控制的汽车半主动悬架系统的研究 [J]. 计算机与数字工程，2014，42(5)：827-831.

作 者 简 介

郭全民，1974 年出生，副教授，硕士生导师，主要研究方向为计算机测控技术、图像处理及机器视觉、智能传感与信息融合等。

雷蓓蓓，1989 年出生，工学硕士研究生，主要研究方向为计算机测控技术，控制理论与控制工程。

E-mail：lei-bei@163.com