

基于改进型 PSO 算法的汽车转向参数优化*

唐斌 江浩斌 陈龙 耿国庆

(江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

摘要: 提出了基于模拟退火(SA)修正的改进型粒子群算法(SA-PSO)的转向参数优化方法。建立了整车动力学模型、转向系统模型、高速“路感”模型和转向能耗模型,并对模型进行了验证;给出了低速转向轻便性、高速转向“路感”和能耗的量化指标;提出了以轻便性、“路感”和能耗量化指标的平方和根最小值为目标函数,以各参数取值范围为约束条件的最优化问题;构建了基于模拟退火修正的改进型粒子群优化算法(SA-PSO)的自适应度函数,运用改进型粒子群算法获得了转向参数的全局最优解;SA-PSO与PSO的优化结果对比表明,SA-PSO的全局收敛性强、收敛速度快;通过优化参数与另外两组参数双纽线、高速中间位置小转角转向、转向能耗仿真验证了优化方法的有效性和优化结果的正确性,最后分别进行了转向参数优化前、后的双纽线、高速中间位置小转角转向、转向能耗试验,结果表明,优化后的转向使转向轻便性、高速转向“路感”和节能性均得到改善。

关键词: 汽车 转向系统 转向 参数优化 SA-PSO 算法

中图分类号: U463.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0319-08

Optimization of Rotary Valve Parameters Based on Improved PSO Algorithm

Tang Bin Jiang Haobin Chen Long Geng Guoqing

(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to improve comprehensive steering performance, the approach based on simulated annealing modified particle swarm algorithm (SA-PSO) for parameters optimization of rotary valve was proposed. Models of vehicle dynamics, steering system, high-speed road feel and energy consumption were built. The quantitative indexes of low-speed steering portability, high-speed road feel, energy consumption of rotary valve were derived. Optimization problem with minimal root of quadratic sum of the indexes of steering portability, road feel and energy consumption were defined as objective function, and the scope of the parameters as constraints was put forward. The fitness function of particle swarm optimization algorithm (PSO) modified by simulated annealing theory was constructed. The global optimal solution of rotary valve parameters was obtained by using the improved PSO algorithm. SA-PSO and PSO optimization results were presented, which indicated that the improved PSO provided stronger global convergence and faster convergence speed. The correctness of optimization method was verified through contrastive analysis of the steering performance above-mentioned under optimized parameters and other two sets of parameters. Finally, the experiments of lemniscate steering, high-speed steering and energy consumption were carried out. The results demonstrate that comprehensive steering performance is optimal with optimized parameters of rotary valve.

Key words: Automobile Steering system Rotary valve Parameters optimization SA-PSO algorithm

收稿日期: 2014-10-14 修回日期: 2014-12-18

* 国家自然科学基金资助项目(51275211)、江苏省第四期“333工程”科研资助项目(BRA2013217)、江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ12_0665)和江苏省高校自然科学基金资助项目(14KJB580003)

作者简介: 唐斌, 讲师, 博士, 主要从事汽车转向系统动态建模与控制研究, E-mail: tangbin5219@126.com

引言

转阀是液压助力转向系统(包括HPS、ECHPS和EHPS)的关键部件^[1],对于转向系统不管是助力特性还是液压油经过转阀时的压降形成的无用能耗,都与汽车转阀参数密切相关,国内外学者对液压助力转向系统助力特性及转阀参数对其的影响进行了研究^[2-4]。以往对转阀参数的设计往往采用试凑法,再根据样件的试验结果反复修改参数,直到达到满意的效果,该方法既耗时又增加研发成本。近年来有学者提出了运用最小二乘法^[5]和正交试验的方法^[6]优化转阀参数提高低速转向轻便性、高速“路感”,但以上的研究都没有考虑能耗因素,而且没有从提高低速转向轻便性、高速“路感”和转阀能耗综合性能的角度对转阀参数进行优化设计。

转阀参数对低速转向轻便性、高速“路感”和转阀能耗的影响此消彼长,以转阀预开隙为例,较小的预开隙虽能满足低速转向轻便性,但会使高速“路感”下降、转阀能耗上升。因此要提高综合性能,就要以三方面的性能为综合目标优化转阀参数。粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)是进化技术的一种,源于对鸟群捕食行为的研究,具有并行处理特征,鲁棒性好,理论上可以较大的概率找到优化问题的全局最优解,且易于实现,计算效率高,已成功地应用于求解多种复杂的优化问题^[7-9]。为了提高粒子群收敛的速率和效率,通过模拟退火算法(SA)修正粒子的适应度^[10],利用Metropolis准则判断新位置是否被接受,可避免对算法参数的盲目调节。

本文建立整车动力学模型、转向系统模型、高速“路感”模型和转阀能耗模型,量化轻便性、“路感”和转阀能耗,建立转阀参数多目标优化模型,运用基于模拟退火改进的粒子群算法优化转阀参数,通过仿真和试验对比分析转阀参数优化前、后的整车低速轻便性、高速“路感”和能耗。

1 系统建模

1.1 整车动力学模型

为了研究车辆低速转向轻便性、高速转向“路感”和系统能耗,建立整车动力学模型^[11],具有侧向、侧倾和横摆3个自由度的整车动力学微分方程为

$$\begin{cases} I_z \dot{\omega}_r + I_{xz} \ddot{\phi} = a(F_{yfl} + F_{yfr}) \cos\delta - b(F_{yrl} + F_{yrr}) \\ m(\omega_r + \dot{\beta})u - m_s h \dot{\phi} = \\ (F_{yfl} + F_{yfr}) \cos\delta + F_{yrl} + F_{yrr} \\ I_x \ddot{\phi} - m_s u h (\omega_r + \dot{\beta}) + I_{xz} \dot{\omega}_r = \\ - (D_1 + D_2) \dot{\phi} - (C_1 + C_2 - m_s h g) \phi \end{cases} \quad (1)$$

式中 m 、 m_s ——整车和悬架质量

I_x 、 I_z ——绕 x 、 z 轴的转动惯量

I_{xz} ——惯性积

a 、 b ——质心至前、后轴的距离

F_{yfl} 、 F_{yfr} 、 F_{yrl} 、 F_{yrr} ——前左、前右、后左、后右轮的侧向力

h ——质心至侧倾中心在 z 轴方向的距离

δ ——前轮转角 u —— x 轴方向车速

D_1 、 D_2 ——前后悬架侧倾阻尼

C_1 、 C_2 ——前后悬架侧倾刚度

ω_r ——横摆角速度 β ——质心侧偏角

ϕ ——车身侧倾角

1.2 转向系统模型

转向系统主要分为机械部分和液压部分。机械部分主要包括:转向盘、螺杆、螺母、齿扇、摇臂轴,数学模型如下^[12]

$$J_s \ddot{\theta}_d + B_c \dot{\theta}_d + K_c (\theta_d - \theta_{lg}) = T_d \quad (2)$$

$$J_{lg} \ddot{\theta}_{lg} + B_{lg} \dot{\theta}_{lg} = K_c (\theta_d - \theta_{lg}) - FL \quad (3)$$

$$M_{lm} \ddot{x}_{lm} + B_{lm} \dot{x}_{lm} = F + F_a - F_{cs} \quad (4)$$

$$J_{cs} \ddot{\theta}_{cs} + B_{cs} \dot{\theta}_{cs} = F_{cs} r_{cs} - T_p \quad (5)$$

$$F_a = \Delta p A_p \quad (6)$$

$$T_a = \frac{F_a s}{2\pi} \quad (7)$$

$$A_p = \pi r^2$$

其中

式中 θ_d ——转向盘转角 A_p ——活塞面积

J_s ——转向盘-转向管柱的等效转动惯量

B_c ——转向盘粘性阻尼系数

K_c ——扭杆刚度

θ_{lg} ——转向螺杆转角

T_d ——驾驶员输入转矩

J_{lg} ——转向螺杆转动惯量

B_{lg} ——转向螺杆粘性阻尼系数

F ——转向螺杆的轴向力

L ——螺杆中心距

M_{lm} ——转向螺母质量

x_{lm} ——转向螺母位移

B_{lm} ——转向螺母粘性阻尼系数

F_a ——液压助力 T_a ——助力转矩

s ——螺杆导程 θ_{cs} ——齿扇转角

F_{cs} ——等效到齿扇上的阻力

J_{cs} ——齿扇转动惯量

B_{cs} ——齿扇粘性系数

r_{cs} ——齿扇分度圆半径

T_p ——等效到摇臂轴上的转向阻力矩

液压部分主要包括转阀和液压缸。转阀控制着助力油压的大小和方向,由阀芯、阀套、扭杆组成,阀芯与阀套间有阀口,其结构如图1所示,主要参数包

括短切口长度 L_1 、短切口宽度 W_1 、预开间隙长度 L_2 、预开间隙宽度 W_2 、阀芯半径 R ，其中阀芯半径假设不变，因为修改此参数会造成转向结构较大的改变和成本的增加。

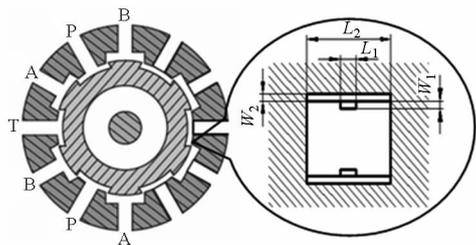


图 1 转向阀示意图

Fig. 1 Sketch of rotary valve

转向阀工作时，与助力缸相连的阀口面积一个增大，另一个减小，如果忽略面积增大的阀口的压降，那么助力缸两端的压差近似等于阀口两端的压差，可以表示为

$$\Delta p = \frac{\rho Q^2}{2C_d^2 A_1^2} \quad (8)$$

式中 Δp ——压差 ρ ——液压油密度
 Q ——流量 C_d ——流量系数
 A_1 ——阀口面积

阀口面积是分段的，求解过程为

$$A_1 =$$

$$\begin{cases} W_1 L_1 + W_2 L_2 - L_2 R \Delta \theta & (0 \leq \Delta \theta < W_2 / R) \\ W_1 L_1 + W_2 L_1 - L_1 R \Delta \theta & (W_2 / R \leq \Delta \theta \leq (W_1 + W_2) / R) \end{cases} \quad (9)$$

其中 $\Delta \theta = \frac{T_d}{k_c} \quad (10)$

式中 $\Delta \theta$ ——阀芯与阀套相对转角

1.3 转向路感模型

高速转向“路感”用转向盘对侧向加速度的梯度表征^[13]，以转向盘中间位置操纵稳定性试验来评价，表示为

$$E = \frac{dT_d}{da_y} \quad (11)$$

车辆高速中间位置小转角转向的阻力矩可以近似表示为

$$T_p = F_y d = ma_y d \quad (12)$$

式中 F_y ——侧向力 a_y ——侧向加速度
 d ——侧向力力臂之和

高速转向过程中同样满足力矩平衡方程，因此有

$$T_d + \frac{\Delta p A_p s}{2\pi} = \frac{T_p}{i\eta_+} \quad (13)$$

将式(8)、(12)代入式(13)，得

$$T_d + \frac{\rho Q^2 A_p s}{4\pi C_d^2 (g(T_d))^2} = \frac{ma_y d}{i\eta_+} \quad (14)$$

式中 $g(T_d)$ ——阀口面积对转矩的函数

i ——转向系统传动比

η_+ ——转向系统正向传动效率

1.4 转向阀能耗模型

普通汽车在 80% 左右的运行里程(时间)中都处于直线行驶状态^[14]，因此只要考虑直行工况下转向阀消耗的功率。汽车直行时，阀芯处于阀套中间位置，与动力缸左、右缸分别相连的阀口的面积相等，记为 A_0 。转向阀消耗的功率为

$$P_v = \Delta p Q = \frac{\rho Q^3}{2C_d^2 A_0^2} \quad (15)$$

2 模型验证

为了验证上述所建模型，选取 11 m 的大客车为研究对象，进行车速 70 km/h 时正弦小转角输入下的仿真和试验。图 2 是试验测得的方向盘转角变化曲线，把此转角变化曲线输入模型，仿真得到横摆角速度和侧向加速度，如图 3、4 所示，图中仿真曲线与试验曲线基本一致，表明建立的模型准确。大客车及其转向系统的主要参数如表 1 所示。

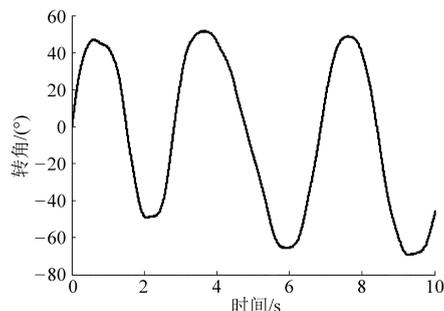


图 2 实测的方向盘转角变化曲线

Fig. 2 Steering angle from experiment

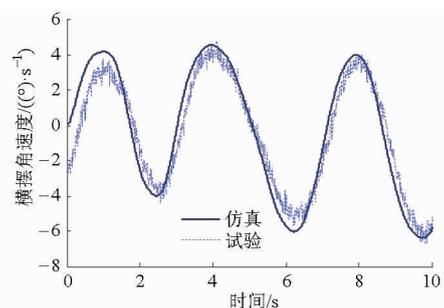


图 3 横摆角速度仿真与试验对比

Fig. 3 Comparison of yaw velocity between simulation and experiment

为了验证转向阀模型，根据前面建立的数学模型(式(8)~(10))，结合表 1 中的转向阀参数，设定摇臂轴转角为零，仿真了转向阀入口的油压，结果如图 5 所示。图 6 为试验得到的助力特性曲线，图 6 中，助力特性曲线上上升部分与下降部分不重合，这是由于试验时摇臂轴不能完全固定，转向器的内摩擦力矩导致操纵力矩比回复力矩大；从图 6 还可以发现，转矩为零时，助力油压并不为零，这是由于转向器中油缸

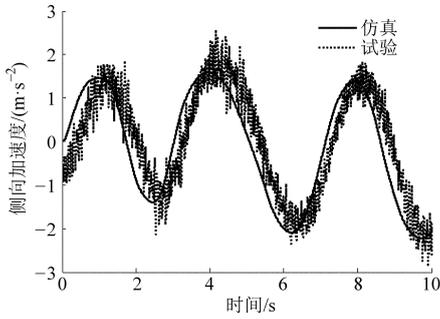


图4 侧向加速度仿真与试验对比

Fig. 4 Comparison of lateral acceleration between simulation and experiment

表1 整车及转向系统参数

Tab. 1 Parameters of vehicle and steering system

参数	数值
整车总质量 m/kg	16 000
车辆质心至前轴的距离 a/m	3.5
车辆质心至后轴的距离 b/m	2.5
前轮侧偏刚度 $k_f/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$	-140 000
后轮侧偏刚度 $k_r/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$	-150 000
车辆绕 z 轴的转动惯量 $I_z/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	50 000
扭杆刚度 $K_c/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$	170
转向管柱等效转动惯量 $J_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.009
转向轴转动阻尼系数 $B_c/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	0.022 5
转向螺杆等效转动惯量 $J_{lg}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.005 5
转向螺杆阻尼系数 $B_{lg}/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	0.03
转向螺杆导程 s/m	0.014
转向螺杆中心距 L/m	0.01
转向螺母质量 M_{lm}/kg	3.5
转向螺母阻尼系数 $B_{lm}/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.03
齿扇等效转动惯量 $J_{cs}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.028
齿扇的粘性阻尼系数 $B_{cs}/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	0.025
齿扇分度圆半径 r_{cs}/m	0.046 75
活塞液压缸半径 r/m	0.06
短切口宽度 W_1/m	0.000 4
短切口长度 L_1/m	0.015
预开间隙宽度 W_2/m	0.000 45
预开间隙长度 L_2/m	0.02
阀芯与阀套的配合半径 R/m	0.014

两端的油压不能测量,因此试验时测量的是转阀入口的油压。不难看出,仿真结果与试验结果基本一致,说明本文所建的转阀模型有效。

3 优化模型

转阀参数与转向轻便性、高速“路感”、转阀能耗密切相关,但是一组转阀参数不可能使上述性能均达到最优,因此,应从提高综合性能的角度优化转阀参数,使转向系统的综合性能最优。

转向轻便性和高速“路感”性能属于主观评价的范畴,没有统一的绝对数值。

低速转向时转向盘转矩并非越小越好。ZF公

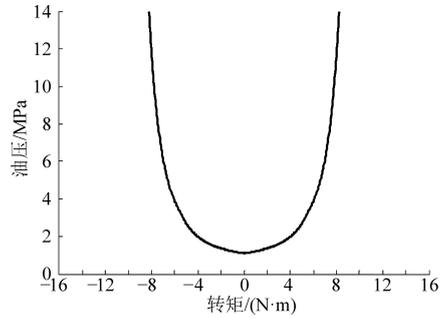


图5 仿真的助力特性曲线

Fig. 5 Simulated boost curve

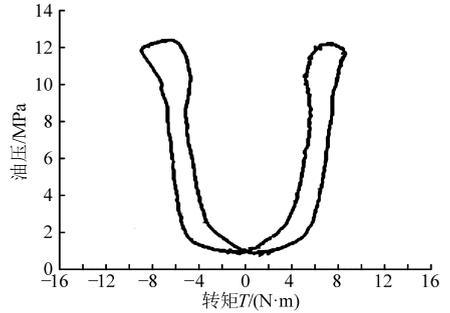


图6 试验的助力特性曲线

Fig. 6 Experimental boost curve

司推荐的最佳转矩范围为 $3 \sim 5 \text{ N}\cdot\text{m}$ ^[15],由于本文研究的车辆为大客车,因此本文选取 $5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。低速转向时的转向盘转矩与推荐值越接近,轻便性越好,轻便性的指标量化为

$$f_1(x) = \frac{|T_d - T'_d|}{T'_d} \quad (16)$$

高速“路感”并非越大越好,路感过大会导致转向响应慢。文献[16]推荐的车辆路感范围一般为 $8.8 \sim 25.1 \text{ N}\cdot\text{m}/g$ 。为了保证大客车高速行驶具有较强的路感,本文选取 $25.1 \text{ N}\cdot\text{m}/g$ 。高速转向的路感与推荐值越接近越好,高速“路感”指标量化为

$$f_2(x) = \frac{|E - E'|}{E'} \quad (17)$$

转阀能耗指标量化为

$$f_3(x) = \frac{|P_v - P_{vmin}|}{P_{vmin}} \quad (18)$$

以上性能的理想状态是存在一组参数使原地转向转矩、高速“路感”、转阀能耗完全等于推荐值,即上述性能指标的理想点为 $(0, 0, 0)$,而实际上只要存在一组参数使3项性能指标距理想点的距离最小,就能说明综合性能最优,最优化问题的目标函数表示为

$$f(x) = \min \left(\sum_i f_i^2(x) \right)^{1/2} \quad (i=1,2,3) \quad (19)$$

$$x = (L_1, W_1, L_2, W_2)$$

约束条件为各变量取值范围: L_1 ($1 \sim 15 \text{ mm}$), W_1 ($0.1 \sim 1 \text{ mm}$), L_2 ($10 \sim 30 \text{ mm}$), W_2 ($0.1 \sim 1 \text{ mm}$)。

4 SA - PSO 算法及优化结果

4.1 粒子群优化算法

在粒子群算法(PSO)中,每个优化问题的潜在解都可以想象成 D 维搜索空间上的一个点,这些点被称为粒子,共有 N 个粒子组成一个群体。每个粒子性能的优劣程度取决于待优化问题目标函数确定的适应值,每个粒子有一个速度决定其飞行方向和速率,粒子们追随当前的最优粒子在解空间中进行搜索^[17-19]。

PSO 初始化为一群随机粒子(随机解),然后通过迭代找到最优解。在每一次迭代中,粒子通过跟踪两个极值来更新自己;第一个就是粒子本身所找到的最优解,这个解称为个体极值 p_{best} ;另一个极值是整个种群目前找到的最优解,这个极值是全局极值 g_{best} 。

假设在一个 D 维的目标搜索空间中,有 N 个粒子组成一个群落,其中第 i 个粒子表示为一个 D 维的向量

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}) \quad (i=1, 2, \dots, N)$$

第 i 个粒子的“飞行”速度也是一个 D 维的向量,记为

$$v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}) \quad (i=1, 2, \dots, N)$$

第 i 个粒子搜索到的最优位置称为个体极值,记为

$$p_{ibest} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}) \quad (i=1, 2, \dots, N)$$

整个粒子群搜索到的最优位置为全局极值,记为

$$g_{best} = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$$

在每一次迭代过程中,更新自己的速度和位置,即

$$v_{ik}(t+1) = wv_{ik}(t) + c_1r_1(p_{ik}(t) - x_{ik}(t)) + c_2r_2(p_{gk}(t) - x_{ik}(t)) \quad (20)$$

$$x_{ik}(t+1) = x_{ik}(t) + v_{ik}(t+1) \quad (i=1, 2, \dots, N; k=1, 2, \dots, D) \quad (21)$$

式中 t ——迭代代数

w ——惯性权重,决定粒子群全局搜索和局部搜索的均衡能力

c_1, c_2 ——学习因子,一般取 2

r_1, r_2 —— $[0, 1]$ 范围内的均匀随机数

4.2 基于 SA 修正的适应度函数

适应度函数是目标函数到适应度之间的转换规则,应具有单值、非负等特点,取目标函数为适应度函数,则适应度函数表示为

$$F = \text{Fit}(x) = \left(\sum_i f_i^2(x) \right)^{1/2} \quad (i=1, 2, 3) \quad (22)$$

为了增强算法的收敛性,加入模拟退火算法(Simulated annealing, SA)对粒子的适应度进行修正

$$F' = \exp(T_0 p^i F) \quad (23)$$

式中 F' ——修正后的适应度

T_0 ——模拟退火的初始温度

p ——衰减因子

对粒子由原位置变为新位置的接收概率用模拟退火中的 Metropolis 准则确定,即

$$p = \begin{cases} 1 & (F'_n < F'_o) \\ \exp\left(-\frac{F'_n - F'_o}{T(t)}\right) & (F'_n \geq F'_o) \end{cases} \quad (24)$$

其中 $T(t) = \frac{T_0}{\lg(t+1)} \quad (25)$

式中 F'_n, F'_o ——粒子新位置和原位置的适应度

$T(t)$ ——第 t 代的温度

4.3 优化过程

选取短切口长度 L_1 、短切口宽度 W_1 、预开间隙长度 L_2 、预开间隙宽度 W_2 为解向量的 4 个解元。优化步骤如图 7 所示。

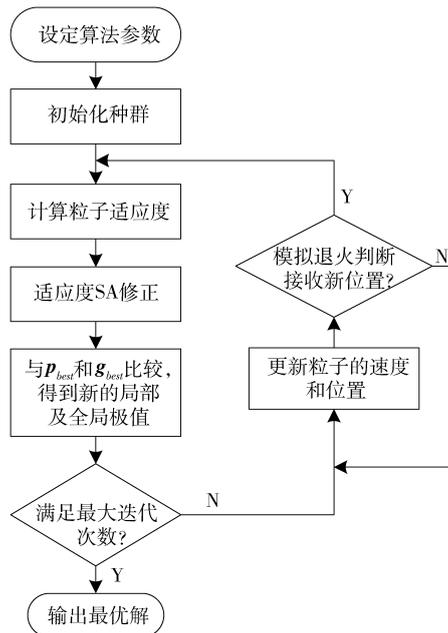


图 7 改进型粒子群优化流程

Fig. 7 Process of improved particle swarm optimization

4.4 优化结果

图 8 为粒子群的初始位置图,从图中可以看出,粒子均匀分布在空间中,为找到最优解提供了前提条件;图 9 为 SA - PSO 与 PSO 的适应度的迭代过程对比,从图中可以看出,改进型 PSO 迭代到第 8 代时就找到了全局最优解,最优解为(12.962 104 mm, 0.381 576 mm, 21.937 912 mm, 0.478 653 mm),而 PSO 直到第 23 代才找到最优解,而且目标值高于 SA - PSO。对比结果表明 SA - PSO 比 PSO 全局收敛性强、收敛速度快。

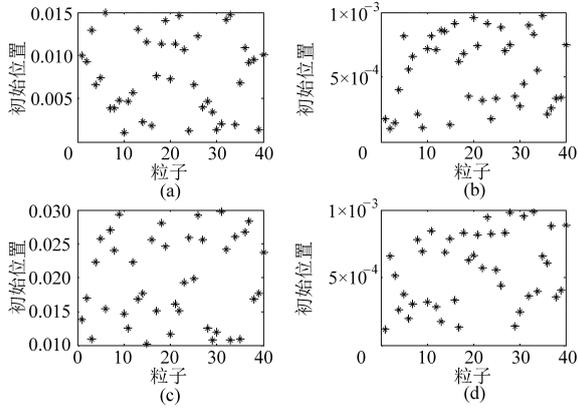


图8 粒子群初始位置

Fig. 8 Initial location of particle swarm

(a) 第1维 (b) 第2维 (c) 第3维 (d) 第4维

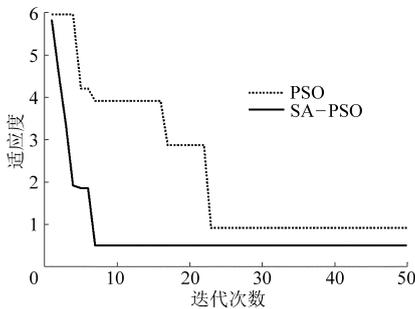


图9 适应度对比

Fig. 9 Comparison of fitness value

5 优化效果验证

为了验证转阀参数优化的效果,根据工程经验选取另外两组转阀参数:参数1(3 mm, 0.6 mm, 15 mm, 0.4 mm)、参数2(10 mm, 0.8 mm, 20 mm, 0.7 mm),分别通过双纽线、高速中间位置小转角转向、转阀能耗仿真对比3组转阀参数下车辆的低速轻便性、高速“路感”和能耗。

由于双纽线的转角需用椭圆积分的方法求解,并且没有具体的解析形式^[20],因此用试验得到的转角作为双纽线仿真的输入,仿真结果如图10所示。由图10可见,参数1、参数2、优化参数下的转向盘最大转矩分别为4.2、10.1、5.6 N·m。

高速中间位置小转角转向项目是用来评价汽车高速转向“路感”,以幅值为30°,周期为5 s的正弦转角输入,仿真了3组转阀参数下侧向加速度与转矩的关系,结果如图11所示。计算0 g处的转向盘转矩梯度,参数1、参数2、优化参数下的转向盘转矩梯度分别为10.2、128.5、26.7 N·m/g。

仿真了以70 km/h车速直行时3组转阀参数下转阀消耗的功率,结果如图12所示。参数1、参数2、优化参数下的转阀消耗的功率分别为519.5、65.3、132.3 W。

综合分析图10、图11和图12可见,参数1下的

车辆低速轻便性最优,但是高速“路感”最弱,而且能耗也最高;参数2下的车辆低速轻便性最差,但是高速“路感”最强,能耗最低;改进型粒子群优化参数下的低速轻便性、高速“路感”、能耗均适中,低速转向时转向盘的最大转矩接近推荐值5 N·m,高速“路感”接近推荐值25.1 N·m/g,说明采用优化后的转阀,转向系统综合性能最优,从而验证了改进型粒子群优化方法的有效性。

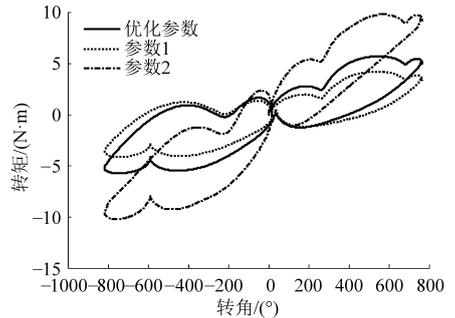


图10 双纽线对比

Fig. 10 Comparison of lemniscate

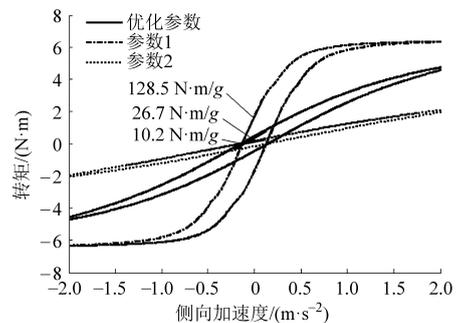


图11 高速中间位置小转角转向对比

Fig. 11 Comparison of high-speed steering

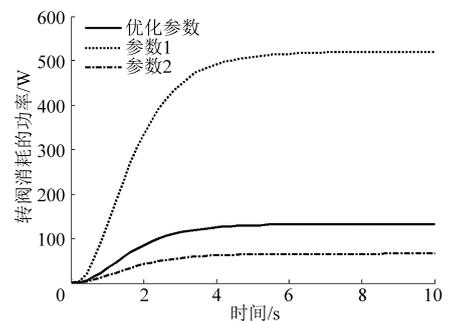


图12 转阀能耗对比

Fig. 12 Comparison of rotary valve energy consumption

6 实车试验

车辆为SLK6118型大客车,技术参数如表2所示,搭载NTS测力转向盘、测速仪、陀螺仪和LMS数据采集仪,主要测量转向盘转角、转矩、车速、侧向加速度、液压系统的流量和压力,分别进行转阀参数优化前、后的双纽线试验、中间位置小转角转向试验和直线工况的能耗试验,出于安全的考虑,中间位置小转角转向试验和直线行驶的能耗试验的车速定为

70 km/h。优化前后的转向如图 13 所示,相应的参数如表 3 所示。双纽线试验的结果如图 14 所示,优化前的最大转矩约为 8.5 N·m,优化后的最大转矩约为 5.5 N·m;高速中间位置小转角转向试验的结果如图 15 所示,优化前、后 0 g 处转向盘转矩梯度分别为 42.8、24.3 N·m/g;由于直行工况在汽车行驶总时间中占 80% 左右的时间,所以这里主要分析直行工况的能耗。转向能耗可根据转向两端的压差和流量计算得到,结果如图 16 所示,转向优化前、后的平均能耗分别为 210、180 W,能耗下降约 14%。综上所述,转向参数优化后车辆的转向轻便性、高速路感和节能性均得到改善。

表 2 大客车主要参数

Tab. 2 Main parameters of coach

参数	数值
整备质量/kg	12 000
满载质量/kg	16 000
轮胎规格	11R22.5
转向系统最大压力/MPa	14
转向器活塞直径/mm	105
转向器传动比	21.76

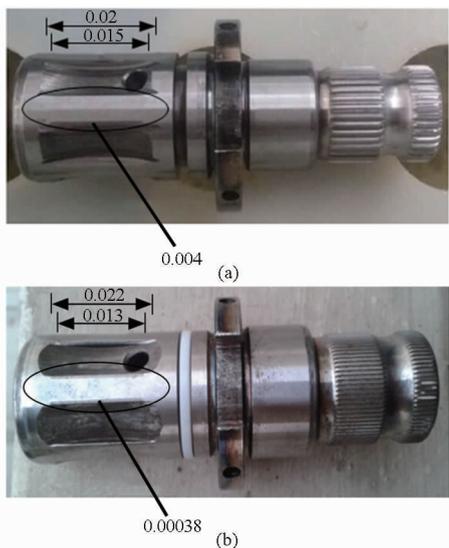


图 13 优化前后转向阀

Fig. 13 Profiles of rotary valve before and after optimization
(a) 优化前 (b) 优化后

表 3 转向参数优化前后对比

Tab. 3 Comparison of rotary valve parameters before and after optimization

参数	优化前	优化后
短切口长度 L_1	15	13
短切口宽度 W_1	0.4	0.38
预开间隙长度 L_2	20	22
预开间隙宽度 W_2	0.45	0.48

为了进一步评价转向参数优化前、后的转向系统性能,选取 3 名不同年龄的大客车驾驶员分别进

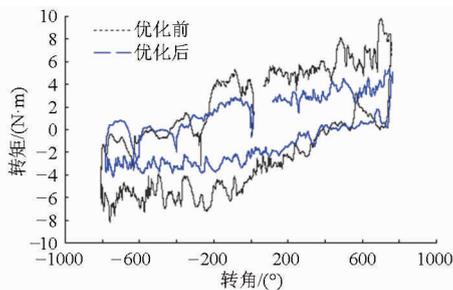


图 14 双纽线试验结果

Fig. 14 Results of lemniscate test

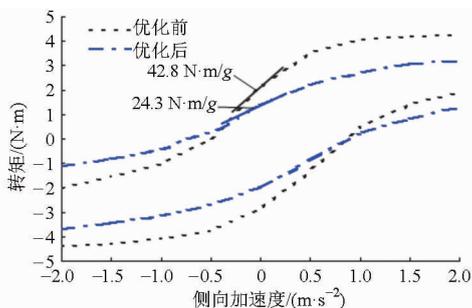


图 15 高速中间位置小转角转向试验结果

Fig. 15 Results of high-speed steering stability test

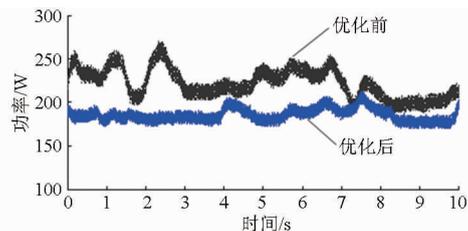


图 16 直行工况的能耗试验结果

Fig. 16 Results of power consumption test

行低速轻便性和高速路感的主观评价,采用 10 点评分法,分值越高,性能越好,评价结果如表 4 所示。可以看出,3 名驾驶员均认可转向优化后的轻便性和高速路感,表明采用优化后的转向提高了转向轻便性和高速转向“路感”。

表 4 优化前后主观评价结果

Tab. 4 Results of subjective evaluation before and after optimization

	驾驶员 1	驾驶员 2	驾驶员 3	综合	
轻便性	优化前	8	6	7	7.0
	优化后	9	9	8	8.7
高速路感	优化前	7	7	6	6.7
	优化后	8	8	8	8.0

7 结论

(1) 研究了基于模拟退火改进的粒子群优化算法的转向参数优化方法,给出了低速转向轻便性、高速转向“路感”和转向能耗的量化指标。

(2) 提出了以轻便性、“路感”和能耗的平方和根的最小值为目标函数,以各参数的取值范围为约

束条件的最优化问题。

(3)运用模拟退火思想修正 PSO 算法的自适应度函数,增强了最优解的收敛速率和效率,最后通过对转向参数优化前、后转向轻便性、高速“路感”和

转向能耗的对比,验证了优化方法的有效性和优化结果的正确性,为 HPS 的性能提升和电控液压转向系统的开发提供了有益参考。

参 考 文 献

- Baharom M B, Hussain K, Day A J. Design of full electric power steering with enhanced performance over that of hydraulic power-assisted steering [J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2013, 227(3): 390-399.
- 高峰,刘亚辉,季学武,等. 电控液压助力转向系统的初步匹配计算[J]. *北京航空航天大学学报*, 2007, 33(5): 605-607.
Gao Feng, Liu Yahui, Ji Xuewu, et al. Primary calculation of electronically controlled hydraulic power steering [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007, 33(5): 605-607. (in Chinese)
- Vasile L N, Vasiliu N, Calinoiu C. Researches on the rotary valves of the hydraulic steering systems [J]. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 2006, 68(1): 27-34.
- Xue Yiqin, John W. Modeling of a hydraulic power steering system [J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2005, 38(2-3): 162-178.
- 郭晓林,季学武,陈奎元. 流量控制式 ECHPS 系统转向结构参数优化设计[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(11): 26-29.
Guo Xiaolin, Ji Xuewu, Chen Kuiyuan. Parameter optimization of rotary valve in the flow control type ECHPS system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(11): 26-29. (in Chinese)
- 蔡静,过学迅,方志刚,等. 基于正交试验的转向式液压力转向系统助力性能研究[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(4): 557-561.
Cai Jing, Guo Xuexun, Fang Zhigang, et al. Research on rotary valve hydraulic power steering system's assist performance based on orthogonal test [J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(4): 557-561. (in Chinese)
- Alireza A, Alireza R. A new artificial bee swarm algorithm for optimization of proton exchange membrane fuel cell model parameters [J]. *Journal of Zhejiang University: Science C*, 2011, 12(8): 638-646.
- 王云,冯毅雄,谭建荣,等. 基于多目标粒子群算法的柔性作业车间调度优化方法[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(2): 190-196.
Wang Yun, Feng Yixiong, Tan Jianrong, et al. Optimization method of flexible job-shop scheduling based on multi objective particle swarm optimization algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(2): 190-196. (in Chinese)
- 陈玲娟,蒲云. 基于粒子群算法的双目标可靠性网络设计[J]. *交通运输工程学报*, 2010, 10(5): 61-65.
Chen Lingjuan, Pu Yun. Dual-objective reliable network design based on particle swarm optimization [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2010, 10(5): 61-65. (in Chinese)
- 徐立云,徐昌飞,邓伟,等. 基于 SA-PSO 算法的发动机缸体机加工线平衡研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(2): 16-21.
Xu Liyun, Xu Changfei, Deng Wei, et al. Machining line balancing of engine cylinder block based on SA-PSO algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(2): 16-21. (in Chinese)
- 陈无畏,王妍,王启瑞,等. 汽车电动助力转向系统的自适应 LQG 控制[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(12): 167-172.
Chen Wuwei, Wang Yan, Wang Qirui, et al. Adaptive LQG control for the electric power steering system of an automobile [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(12): 167-172. (in Chinese)
- 董家寅. 比例阀式 ECHPS 系统动力学建模与仿真[D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
- Zang Huaquan, Geng Jia. Effects and solution of electric power steering system on vehicle handling stability [J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2012, 8(1): 65-72.
- Dyer G P. Analysis of energy consumption for various power assisted steering systems [C]. *SAE Paper 970379*, 1997.
- 朱骏. 液压助力转向与整车匹配的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- 余志生. 汽车理论[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- 陈帅,朱建宁,潘俊. 最小二乘支持向量机的参数优化及其应用[J]. *华东理工大学学报: 自然科学版*, 2008, 34(2): 278-282.
- 高振海,吴涛,尤洋. 基于粒子群算法的汽车自适应巡航控制器设计[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(12): 11-16.
Gao Zhenhai, Wu Tao, You Yang. Design of vehicle adaptive cruise controller based on PSO algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(12): 11-16. (in Chinese)
- Coello C A, Pulido G T, Lechuga M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2004, 8(3): 256-279.
- Boyd J P. New series for the cosine lemniscate function and the polynomialization of the lemniscate integral [J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2011, 235(8): 1941-1955.