

# 基于响应面法的某轻型商用车悬架布置分析与优化

胡斌<sup>1</sup>, 周云茂<sup>2</sup>

(1. 招商局检测车辆技术研究院有限公司 国家客车质量检验检测中心, 重庆 401329;

2. 重庆瑞驰汽车实业有限公司, 重庆 401133)

**摘要:** 本文针对某轻型商用车麦弗逊前悬架在平行轮跳工况下前束角变化非线性显著的问题, 提出一种基于响应面法(RSM)与改进粒子群算法(MPSO)的协同优化方法。首先通过中心复合设计安排试验方案, 并运用多体动力学仿真获取样本数据; 在此基础上, 以转向拉杆内外硬点的空间坐标为设计变量, 构建了前束角变化量、外倾角变化量及上跳行程前束角变化梯度的预测模型, 并对模型进行了显著性分析; 随后利用该预测模型, 结合改进粒子群算法对悬架性能进行优化求解, 最终从 Pareto 解集中筛选出最优方案。优化结果表明: 前束角变化量由  $0.724^\circ$  降低至  $0.493^\circ$ , 上跳行程前束角变化梯度由  $-8.78 (\text{°})/\text{m}$  优化为  $-4.11 (\text{°})/\text{m}$ , 前束角变化曲线趋于平缓且变化范围显著收窄。本研究为悬架系统的设计与性能提升提供了有效的解决方案, 对工程实践具有指导意义。

**关键词:** RSM; MPSO; 麦弗逊悬架; 前束角; 硬点优化; 中心复合设计

中图分类号: U463.33

文献标志码: A

DOI: 10.15917/j.cnki.1006-3331.2025.06.004

## Analysis and Optimization of Suspension Layout for a Light Commercial Vehicle Based on Response Surface Methodology

HU Bin<sup>1</sup>, ZHOU Yunmao<sup>2</sup>

(1. China Merchants Testing Vehicle Technology Research Institute Co., Ltd., National Coach Quality Inspection and Test Center, Chongqing 401329, China; 2. Chongqing Ruichi Automobile Industry Co., Ltd., Chongqing 401133, China)

**Abstract:** This research addresses the significant nonlinear variation in the toe angle during parallel wheel travel of a MacPherson front suspension in a light commercial vehicle. It proposes a collaborative optimization method that integrates response surface methodology (RSM) and modified particle swarm optimization (MPSO). First, the method defines the experimental plan using a central composite design and obtains sample data through multi-body dynamics simulations. Subsequently, it utilizes the spatial coordinates of the inner and outer hardpoints of the tie rod as design variables to establish predictive models for the variation in toe angle, camber angle, and the gradient of toe angle change during jounce travel. Then, the method performs a significance analysis on these models. Next, it employs these predictive models with the MPSO algorithm to optimize suspension performance, ultimately selecting the optimal solution from the Pareto solution set. The optimization results demonstrate that the toe angle variation decreases from  $0.724^\circ$  to  $0.493^\circ$ , and the toe angle change gradient during jounce travel improves from  $-8.78 (\text{°})/\text{m}$  to  $-4.11 (\text{°})/\text{m}$ . Consequently, the toe angle change curve becomes smoother, and its variation range narrows significantly. This research provides an effective solution for suspension system design and performance enhancement, offering valuable guidance for engineering practice.

**Key words:** RSM; MPSO; MacPherson suspension; toe angle; hardpoint optimization; central composite design

在汽车动力学领域,悬架系统的设计和优化是确保车辆行驶稳定性、乘坐舒适性和操控性的关键。悬

架硬点作为连接悬架元件与车辆主体的关键节点,其设计参数对车辆动态响应具有显著影响。因此,有目

收稿日期: 2025-08-21。

第一作者: 胡斌(1990—),男,硕士,工程师,主要从事底盘性能研究工作。E-mail: 272177527@qq.com。

标、有针对性地调整悬架结构布置硬点,以满足整体设计性能目标,可大幅缩短产品开发周期<sup>[1]</sup>。

在科研实践中,采用高效的试验设计策略对于提升试验效率、明确研究目标及迅速获得准确结果具有重要意义。当前,悬架设计领域主要采用正交试验法、均匀试验法和响应面法<sup>[2]</sup>。正交试验法是通过精心规划的试验来探究各因素对试验结果的影响,并使用极差分析与方差分析来评估这些因素对响应值的影响程度及其统计显著性<sup>[2]</sup>。然而,极差分析在误差表达方面存在不足,并且在分析因素间的相互作用时,试验设计过程可能会变得复杂。均匀试验法是通过将试验点均匀分布在整个试验范围内,以单个点代表特定水平,从而减少试验次数<sup>[3]</sup>。然而,这种方法并不适用于分析模型中的主要效应和交互效应。

响应面法作为一种统计学方法,可以有效地解决多目标优化问题。该方法是通过一系列设计点的试验,利用回归分析拟合出优化目标和优化变量之间的解析表达式,以此来预测非试验点的响应值<sup>[3]</sup>。工程中的很多影响因素之间的耦合关系很难用一个线性的函数进行表达,因此采用响应面法构建简化的输入输出模型,成为一种行之有效的途径<sup>[4]</sup>。

BBD( Box-Behnken Design)是一种常用的响应面模型构建试验方法。该方法具有近似旋转性的球面设计特点,试验点均匀分布在球面上。相较于中心复合区设计试验,其没有轴向点,因而能降低试验次数<sup>[5]</sup>。二者的主要区别在于中心复合区设计为多因素三水平以上试验,而 BBD 则为多因素三水平试验。基于此,本文选用中心复合区设计。

本文以某轻型商用车前麦弗逊悬架为研究对象,利用 CATIA 软件建立悬架多体动力学模型,再基于响应面法进行中心复合区设计试验。通过在 ADAMS/Car 中建立悬架模型并进行平行轮跳仿真获取设计所需的试验结果。基于此结果,对轮跳工况前束角变化量、外倾角变化量和上跳行程前束角变化梯度指标进行预测,并分析预测模型的显著性。最后,应用该预测模型对转向拉杆硬点参数进行优化,确定最优的硬点参数并加以验证。

## 1 ADAMS/Car 中多体动力学模型的建立

ADAMS/Car 软件基于多刚体系统动力学理论,采用拉格朗日方程方法建立系统动力学方程。该软件通过定义系统中每个刚体的位置与方位来建模<sup>[6]</sup>。

本文在 ADAMS/Car 软件的 Template Builder 模块中,搭建了包含悬架与转向的前悬架仿真试验台。

### 1.1 麦弗逊悬架模型搭建

麦弗逊悬架具有结构简单、良好的操作稳定性与乘坐舒适性等优点。本文研究的轻型商用车前悬架正是麦弗逊悬架,其悬架硬点坐标见表 1。

表 1 麦弗逊前悬架左侧关键硬点坐标  
(右侧坐标沿 Y 轴对称) mm

硬点名称	X	Y	Z
hpl_top_mount	32.708	-610.239	332.704
hpl_strut_lwr_mount	8.808	-632.162	-200.625
hpl_tierod_outer	-138.293	-736.100	-306.245
hpl_tierod_inner	-190.854	-376.000	-287.128
hpl_subframe_rear	367.721	-421.782	-348.901
hpl_subframe_front	-301.848	-422.728	-333.901
hpl_wheel_center	-3.764	-790.000	-287.567
hpl_lca_outer	-12.167	-754.904	-398.518
hpl_lca_rear	284.542	-409.000	-363.637
hpl_lca_front	-6.355	-405.400	-376.536

根据以上硬点坐标,分别搭建了下控制臂、减振器、弹簧、转向节、驱动轴及转向横拉杆等刚性部件。通过运动副与橡胶衬套将各个部件连接起来,并建立转向系统与悬架试验台之间的通信器<sup>[7]</sup>。最终完成的麦弗逊悬架模型如图 1 所示。

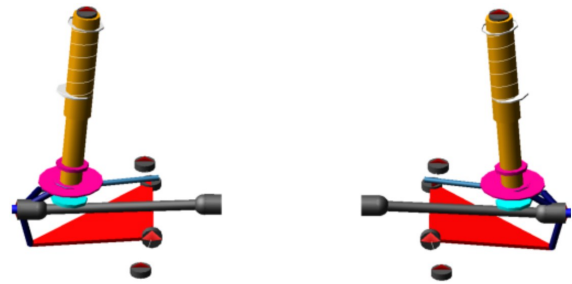


图 1 麦弗逊悬架模型

### 1.2 转向系统模型

转向系统主要由转向盘、转向柱、连杆及转向齿轮机构等部件组成。该系统主要控制车辆的行驶方向,使驾驶员能更好地操纵汽车,保证车辆的行驶安全。根据硬点坐标及约束进行建模,转向系统的主要硬点坐标参数见表 2。根据硬点坐标搭建的转向系统模型如图 2 所示。

表 2 转向系统左侧关键硬点坐标(右侧坐标沿 Y 轴对称)

硬点名称	mm		
	X	Y	Z
hpl_rack_house_mount	-190.854	-301.100	-287.128
hpl_rack_house_mount	-234.874	-248.500	-338.882
hpl_tierod_inner	-190.854	-376.000	-287.128
hps_intermediate_shaft_forward	-159.500	-285.500	-71.961
hps_intermediate_shaft_rearward	82.585	-385.000	329.473
hps_pinion_pivot	-173.855	-206.000	-287.357
hps_steering_wheel_center	580.000	-385.000	665.000



图 2 转向系统模型

### 1.3 悬架装配体搭建

在 ADAMS/Car 的 Standard 模式下, 将建立好的麦弗逊悬架模型及转向系统模型分别创建子系统, 之后将这两个子系统与悬架试验台进行装配, 最终得到的装配体模型如图 3 所示。

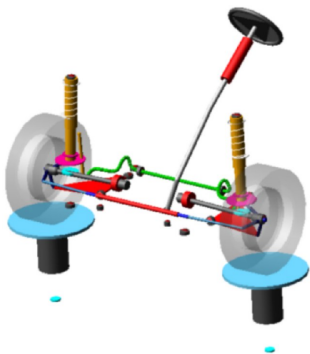


图 3 麦弗逊悬架试验台装配模型

## 2 悬架运动学仿真分析

悬架平行轮跳仿真试验分析是汽车悬架系统设计和评估中的一个重要环节。该试验通过模拟车辆驶过障碍物或起伏路面时悬架的变化, 用以评估悬架的运动学特性, 如车轮外倾角、主销后倾角、主销内倾角及前束角随轮跳行程的变化规律。此项分析可以帮助工程师理解和优化悬架系统在实际行驶中的性

能表现。

平行轮跳试验主要用于评估悬架系统在垂直方向上的运动学特性。通过模拟车辆在正常行驶中经过减速带或坑洼路面的情况, 分析悬架系统对车轮运动的影响。该试验有助于了解悬架系统在垂直运动时的几何变化, 包括车轮的前束角、外倾角和主销倾角等参数的变化。

平行轮跳仿真工况主要是设置双轮的跳动行程与仿真步数, 通过对实车进行 K&C 试验分析得到轮胎跳动的上下行程, 结合实际本文设置的跳动行程为  $[-76 \text{ mm}, 76 \text{ mm}]$ , 仿真步数为 100 步<sup>[8]</sup>。

通过运行上述平行轮跳试验工况, 可在 ADAMS/PostProcessor 后处理软件中获得悬架各性能参数随轮跳行程变化的曲线。本文主要研究前束角随轮跳行程的变化规律。

前束角仿真曲线如图 4 所示。从图中可以看出其随轮跳的变化呈明显非线性。仿真结果中存在不合理的变化特性: ①无论悬架压缩还是拉伸, 前束角均呈减小趋势, 存在不合理现象; ②在整个悬架运动过程中, 前束角的绝对值变化过大, 会导致悬架与轮胎的寿命缩短; ③前束角变化梯度过大, 会导致转向不灵敏, 并增加轮胎偏磨的风险。

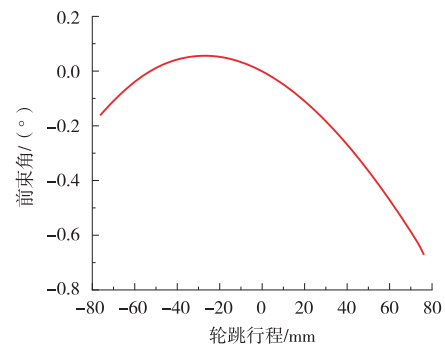


图 4 前束角仿真结果

在悬架设计中, 期望的前束角变化梯度呈线性关系, 线性的前束角变化梯度具有以下优势:

1) 线性变化规律便于在实际工程中预测和控制车辆的动态响应。

2) 有助于保持车辆的操控稳定性。车轮在垂直跳动时, 前束角的微小变化会影响汽车的横向稳定性。合适的前束角变化能够抵消车轮外倾引起的侧倾推力, 从而延长轮胎的使用寿命。

综上所述, 图 4 所示的前束角变化曲线不合理, 需进行优化。鉴于悬架一个硬点可能会影响多个指

标<sup>[9]</sup>,本文根据工程经验,选取对前束角影响较大的转向横拉杆内外硬点为设计变量。为使曲线逼近线性,将前束角变化量及上跳行程前束角变化梯度设为响应值;同时,为考察优化过程对外倾角的影响,将外倾角变化量也纳入响应值,以分析其显著性。

### 3 响应面法悬架性能预测

#### 3.1 响应面法原理

响应面法是一种序贯方法,能够以较少的试验次数定量和定性分析变量之间的关系<sup>[10]</sup>,并结合方差分析验证因子的显著性,从而建立高精度的预测模型。因此,本章采用响应面法进行试验设计。响应面法主要是通过方程拟合设计变量与响应值  $y$  之间的试验数据,具体表达式见式(1)。

$$y=f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)+\varepsilon \quad (1)$$

式中: $f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)$ 为响应面函数; $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 为设计变量; $\varepsilon$ 为误差。

响应面法的实施主要包括设计与分析两个步骤。其分析过程通过 F 检验、显著性  $P$  值及多元相关系数  $R^2$  等统计指标来评估模型对数据的拟合优度。其中, $R^2$  越接近 1,表示拟合效果越好,其表达式见式(2)。

$$R^2 = \frac{S_R^2}{S_T^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{S_E^2}{S_T^2} \quad (2)$$

式中: $\hat{y}_i$ 为样本估计值; $\bar{y}$ 为样本均值; $y_i$ 为样本数; $S_T^2$ 为偏差平方和; $S_R^2$ 为回归平方和; $S_E^2$ 为残差平方和,其表达式见式(3)。

$$\begin{cases} S_T^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \\ S_R^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \\ S_E^2 = S_T^2 - S_R^2 \end{cases} \quad (3)$$

响应面法的试验设计方法主要分为 BBD 与中心复合区设计,BBD 试验设计研究因素一般为 3 至 4 个,中心复合区设计常用于多因素设计。本文所研究的因素为 6 个,分别是转向横拉杆内外点的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  坐标。所以本文选用中心复合区设计试验设计方法。

#### 3.2 中心复合区设计试验设计方案

基于 Design Expert 软件进行中心复合区设计试验,设置六因素的中心复合区设计试验,六因素为  $A$ ;

$ix; B: iy; C: iz; D: ox; E: oy; F: oz$ 。根据上文悬架性能,选择 $[-76 \text{ mm}, 76 \text{ mm}]$ 轮跳仿真工况下的前束角变化量。中心复合区设计试验因素水平数据见表 3。

表 3 因素水平表

水平	A/mm	B/mm	C/mm	D/mm	E/mm	F/mm
-2	-290	-476	-387	-238	-836	-406
-1	-240	-426	-337	-188	-786	-356
0	-190	-376	-287	-138	-736	-306
1	-140	-326	-237	-88	-686	-256
2	-90	-376	-187	-38	-636	-206

基于因素水平表,采用中心复合区设计生成了 52 组试验方案,具体方案与结果见表 4。从表中可以看出,转向横拉杆内外硬点的改变对外倾角变化量的影响较小。基于表中的试验数据,拟合了响应面法回归方程。

表 4 试验方案与结果

序号	A/ mm	B/ mm	C/ mm	D/ mm	E/ mm	F/ mm	Y1/ (°)	Y2/ (°)	Y3/ (°/m)
1	-190	-376	-287	-38	-736	-306	3.677	1.167	-25.820
2	-190	-376	-287	-138	-736	-306	0.711	1.296	2.260
3	-190	-376	-287	-138	-736	-306	0.711	1.296	2.260
4	-140	-326	-337	-88	-686	-356	0.332	1.330	4.150
5	-190	-376	-287	-138	-736	-306	0.711	1.296	-3.980
6	-190	-376	-287	-138	-836	-306	0.407	1.350	1.309
7	-240	-426	-337	-188	-686	-256	16.998	2.163	109.360
8	-140	-426	-237	-188	-686	-256	2.026	1.247	13.300
9	-190	-376	-287	-138	-636	-306	3.781	1.434	12.150
10	-140	-326	-237	-88	-786	-356	23.268	1.252	-165.390
11	-140	-426	-337	-188	-786	-256	13.507	1.997	92.820
12	-140	-426	-337	-88	-686	-256	40.736	3.043	339.980
13	-190	-376	-287	-238	-736	-306	0.369	1.329	4.840
14	-140	-326	-337	-88	-786	-256	20.679	2.463	125.940
15	-140	-426	-237	-88	-786	-256	1.705	1.246	-9.800
16	-240	-426	-237	-88	-786	-356	28.575	1.268	-167.680
17	-140	-426	-337	-88	-786	-356	0.444	1.312	3.380
18	-240	-326	-237	-188	-786	-356	10.742	0.974	-72.760
19	-240	-326	-337	-88	-786	-356	0.947	1.370	-10.080
20	-190	-376	-287	-138	-736	-406	22.195	0.937	-129.080
21	-240	-326	-237	-88	-686	-356	38.840	2.108	-239.630

表 4(续)

序号	A/ mm	B/ mm	C/ mm	D/ mm	E/ mm	F/ mm	Y1/ (°)	Y2/ (°)	Y3/ ((°)/m)
22	-240	-426	-337	-188	-786	-356	0.296	1.319	1.640
23	-240	-426	-237	-188	-786	-256	0.918	1.286	2.290
24	-240	-426	-337	-88	-786	-256	19.926	2.369	135.820
25	-290	-376	-287	-138	-736	-306	1.226	1.268	-1.011
26	-140	-326	-337	-188	-686	-256	12.485	1.945	87.400
27	-190	-376	-287	-138	-736	-306	0.679	1.298	2.130
28	-240	-326	-237	-188	-686	-256	0.833	1.289	2.430
29	-240	-426	-337	-88	-686	-356	13.198	0.869	14.440
30	-190	-376	-287	-138	-736	-306	0.711	1.296	2.260
31	-240	-326	-337	-188	-786	-256	9.858	1.820	62.520
32	-140	-326	-237	-188	-786	-256	0.372	1.347	1.640
33	-190	-376	-387	-138	-736	-306	17.603	2.239	120.080
34	-190	-376	-287	-138	-736	-306	0.711	1.296	2.260
35	-240	-326	-237	-88	-786	-256	0.493	1.314	-4.110
36	-190	-376	-187	-138	-736	-306	21.007	0.860	-119.670
37	-190	-376	-287	-138	-736	-306	0.711	1.296	2.260
38	-140	-326	-337	-188	-786	-356	1.113	1.393	1.830
39	-140	-426	-337	-188	-686	-356	1.298	1.286	13.490
40	-190	-376	-287	-138	-736	-306	0.711	1.296	2.260
41	-240	-326	-337	-188	-686	-356	0.141	1.326	1.730
42	-190	-276	-287	-138	-736	-306	0.631	1.361	-2.490
43	-90	-376	-287	-138	-736	-306	0.837	1.334	9.020
44	-190	-476	-287	-138	-736	-306	0.680	1.333	8.900
45	-190	-376	-287	-138	-736	-206	15.780	2.121	112.100
46	-240	-426	-237	-188	-686	-356	34.047	0.871	-120.170
47	-140	-426	-237	-88	-686	-356	47.289	2.478	-270.100
48	-140	-426	-237	-188	-786	-356	15.172	0.859	-91.340
49	-240	-326	-337	-88	-686	-256	33.216	2.881	206.140
50	-140	-326	-237	-188	-686	-356	13.842	0.882	-82.430
51	-240	-426	-237	-88	-686	-256	10.494	0.992	-26.800
52	-140	-326	-237	-88	-686	-256	1.698	1.233	3.570

### 3.3 响应面法回归方程及显著性分析

#### 3.3.1 响应面法回归方程

根据表 4 中的数据,分别建立因素 A、B、C、D、E、F 与响应 Y1、Y2、Y3 之间的响应模型,表达式如式(4)~(6)所示。

$$Y1 = 0.1286 - 0.6084 \cdot A - 1.95 \cdot B + 1.3 \cdot C + 3.87 \cdot D + 3.16 \cdot E - 1.41 \cdot F - 0.594 \cdot A \cdot B -$$

$$0.487 \cdot A \cdot C + 0.14 \cdot A \cdot D - 1.02 \cdot A \cdot E + 0.7656 \cdot A \cdot F - 0.7034 \cdot B \cdot C - 0.2505 \cdot B \cdot D - 1.61 \cdot B \cdot E + 0.7631 \cdot B \cdot F + 0.0196 \cdot C \cdot D + 0.5059 \cdot C \cdot E - 10.71 \cdot C \cdot F + 1.88 \cdot D \cdot E - 0.1341 \cdot D \cdot F - 0.5439 \cdot E \cdot F + 0.5149 \cdot A^2 + 0.4209 \cdot B^2 + 5.08 \cdot C^2 + 0.7628 \cdot D^2 + 0.7804 \cdot E^2 + 5 \cdot F^2 \quad (4)$$

$$Y2 = 1.47 + 0.03 \cdot A + 0.01 \cdot B - 0.27 \cdot C + 0.13 \cdot D + 0.06 \cdot E + 0.25 \cdot F \quad (5)$$

$$Y3 = -0.66 + 4.83 \cdot A - 3.51 \cdot B - 72.42 \cdot C - 3.63 \cdot D + 4.3 \cdot E + 70.09 \cdot F - 3.51 \cdot A \cdot B - 3.79 \cdot A \cdot C + 2.31 \cdot A \cdot D + 4.7 \cdot A \cdot E + 5.03 \cdot A \cdot F + 10.78 \cdot B \cdot C - 2.49 \cdot B \cdot D - 1.95 \cdot B \cdot E - 7.03 \cdot B \cdot F - 30.68 \cdot C \cdot D - 17.98 \cdot C \cdot E + 1.95 \cdot C \cdot F + 3.04 \cdot D \cdot E + 27.56 \cdot D \cdot F + 15.82 \cdot E \cdot F \quad (6)$$

前束角变化量一次响应回归模型的  $R^2$  为 0.6149, 双因子交互作用(Two-Factor Interaction, 2FI)响应回归模型的  $R^2$  为 0.6675, 二次响应回归模型的  $R^2$  为 0.9633, 所以选择二次响应回归模型。

外倾角变化量一次响应回归模型的  $R^2$  为 0.6848, 2FI 响应回归模型的  $R^2$  为 0.69, 二次响应回归模型的  $R^2$  为 0.7012, 为了减小优化的计算量, 在误差相差不大的情况下, 选择一次响应回归模型。

上跳行程外前束角变化梯度一次响应回归模型的  $R^2$  为 0.8087, 2FI 响应回归模型的  $R^2$  为 0.9896, 二次响应回归模型的  $R^2$  为 0.9912。为了减小计算量, 在误差相差不大的情况下, 选择 2FI 响应回归模型。

#### 3.3.2 显著性分析

根据上述拟合表达式对响应回归模型进行显著性分析。响应回归模型的显著性由  $P$  值判定: 当  $P \geq 0.05$  时, 认为该模型不显著; 当  $P < 0.05$  时, 认为该模型显著, 且  $P$  值越小越显著<sup>[11]</sup>。响应值 Y1、Y2 与 Y3 的回归模型的方差见表 5~7。

由表 5~7 可知, Y1、Y2 和 Y3 的响应回归模型的  $P$  值都小于 0.0001, 具有高度显著性。

由表 5 可知, 单因素 B、D、E 对于前束角变化量的影响显著, 其显著性  $D > E > B$ , 其余单因素则不显著。交互项 CF 对其影响具有高度显著性, 而其他交互项影响不显著。在二次项中,  $C^2$  与  $F^2$  具有高度显著性, 其余二次项均不显著。

表5 Y1 响应回归模型方差

方差来源	自由度	F 值	P 值
模型	27	8.300 0	<0.000 1
A	1	0.462 2	0.503 1
B	1	4.730 0	0.039 7
C	1	2.110 0	0.159 7
D	1	18.700 0	0.000 2
E	1	12.430 0	0.001 7
F	1	2.480 0	0.128
AB	1	0.352 4	0.558 3
AC	1	0.236 9	0.630 9
AD	1	0.019 6	0.889 9
AE	1	1.030 0	0.319 2
AF	1	0.585 6	0.451 6
BC	1	0.494 2	0.488 8
BD	1	0.062 7	0.804 4
BE	1	2.600 0	0.119 9
BF	1	0.581 7	0.453 1
CD	1	0.000 4	0.984 6
CE	1	0.255 7	0.617 7
CF	1	114.690 0	<0.000 1
DE	1	3.520 0	0.072 8
DF	1	0.018 0	0.894 5
EF	1	0.295 5	0.591 8
A <sup>2</sup>	1	0.273 4	0.605 9
B <sup>2</sup>	1	0.182 6	0.672 9
C <sup>2</sup>	1	26.640 0	<0.000 1
D <sup>2</sup>	1	0.600 0	0.446 2
E <sup>2</sup>	1	0.628 0	0.435 8
F <sup>2</sup>	1	25.820 0	<0.000 1

表6 Y2 响应回归模型方差

方差来源	自由度	F 值	P 值
模型	6	7.051 05	<0.000 1
A	1	0.246 14	0.622 22
B	1	0.023 75	0.878 20
C	1	19.818 97	5.56E-05
D	1	4.434 18	0.040 83
E	1	1.039 86	0.313 30
F	1	16.743 41	0.000 18

由表6可知,单因素 C、D 与 F 对外倾角变化量的影响显著,且显著性 C>F>D,其余单因素均不显著。

表7 Y3 响应回归模型方差

方差来源	自由度	F 值	P 值
模型	21	45.570 0	<0.000 1
A	1	1.820 0	0.186 9
B	1	0.962 5	0.334 4
C	1	409.440 0	<0.000 1
D	1	1.030 0	0.318 5
E	1	1.440 0	0.239 5
F	1	383.500 0	<0.000 1
AB	1	0.769 9	0.387 2
AC	1	0.900 8	0.350 2
AD	1	0.333 6	0.567 9
AE	1	1.380 0	0.249 4
AF	1	1.580 0	0.218 1
BC	1	7.250 0	0.011 5
BD	1	0.386 6	0.538 8
BE	1	0.239 0	0.628 5
BF	1	3.090 0	0.088 8
CD	1	58.790 0	<0.000 1
CE	1	20.200 0	<0.000 1
CF	1	0.239 1	0.628 4
DE	1	0.576 1	0.453 8
DF	1	47.430 0	<0.000 1
EF	1	15.640 0	0.000 4

由表7可知,单因素 C 与 F 对上跳行程前束变化梯度的影响具有高度显著性,其余单因素则不显著。交互项 BC、CD、CE、DF 与 EF 对其影响具有显著性,且显著性 CD = DF = CE > EF > BC,其余交互项均不显著。

对所有回归方程进行了拟合优化分析,即通过多元相关系数 R<sup>2</sup> 来衡量预测值与实际值之间的相关性。R<sup>2</sup> 越接近 1,表明模型的拟合效果越好。Y1、Y2 和 Y3 的 R<sup>2</sup> 值见表 8。

表8 响应面法回归方程 R<sup>2</sup> 值

响应值	Y1	Y2	Y3
R <sup>2</sup>	0.963 3	0.684 6	0.989 6

由表 8 可知,  $Y_1$  和  $Y_3$  的拟合效果达到目标。 $Y_2$  的拟合效果较差, 这是因为所选因素对  $Y_2$  的影响较弱。因此, 选择转向横拉杆内外硬点对前束角变化曲线进行优化, 对外倾角参数影响不大。

### 3.3.3 交互作用分析

根据交互项对  $Y_1$  和  $Y_3$  的影响显著性进行分析, 交互作用结果如图 5~10 所示。

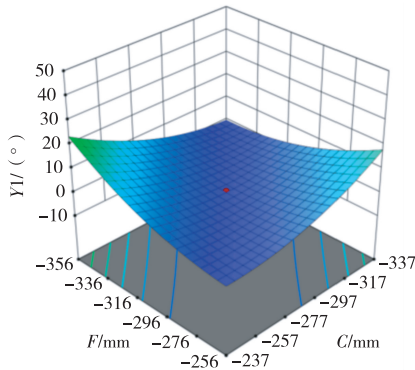


图 5 CF 交互作用下  $Y_1$  变化规律

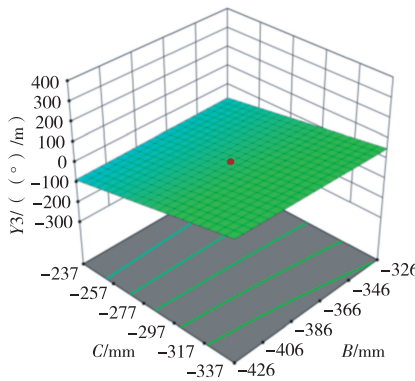


图 6 BC 交互作用下  $Y_3$  变化规律

从图 5 可以看出,  $Y_1$  与  $F$  随着  $C$  绝对值的增大, 由正相关到负相关过渡。同样,  $Y_1$  与  $C$  随着  $F$  绝对值的增大而发生变化。

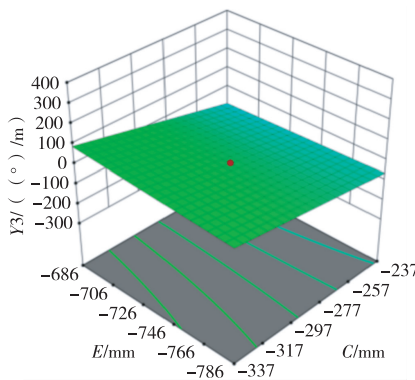


图 7 CE 交互作用下  $Y_3$  变化规律

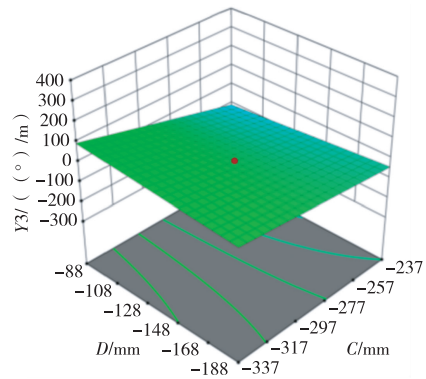


图 8 CD 交互作用下  $Y_3$  变化规律

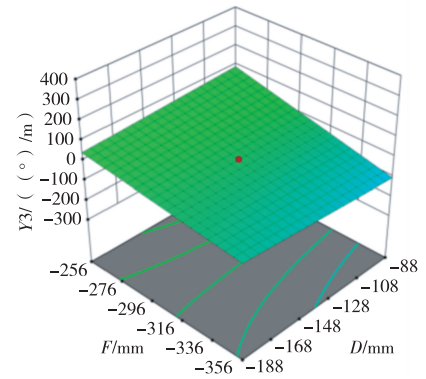


图 9 DF 交互作用下  $Y_3$  变化规律

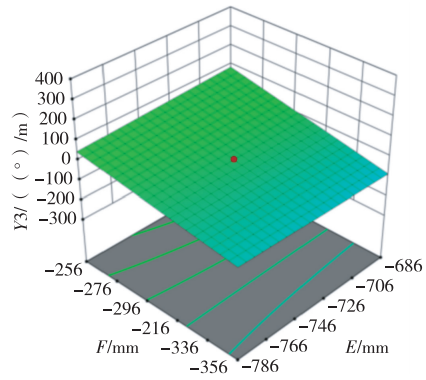


图 10 EF 交互作用下  $Y_3$  变化规律

从图 6 可以看出,  $Y_3$  随着  $B$  绝对值的增大而减小, 且随着  $C$  绝对值的增大而增大; 从图 7~8 可以看出,  $Y_3$  随着  $D$  与  $E$  绝对值的增大而减小, 且随着  $C$  绝对值的增大而增大; 图 9~10 可以看出,  $Y_3$  随着  $D$  与  $E$  绝对值的增大而减小, 且随着  $F$  绝对值的增大而减小。

## 4 基于 MPSO 算法优化悬架硬点参数

粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)<sup>[12]</sup> 是一种模拟鸟类集群觅食行为的智能优化算法。在该算法中, 每个粒子的位置代表一个潜在

解,其优劣由适应度函数评估。算法通过迭代更新每个粒子的速度和位置,使群体逐渐趋近最优解,其更新公式如式(7)所示。

$$v_{t+1} = wv_t + c_1r_1(p_b - x_t) + c_2r_2(g_b - x_t)$$

$$x_{t+1} = x_t + v_{t+1} \quad (7)$$

式中: $w$ 为惯性权重; $v_t$ 和 $x_t$ 为当前粒子的速度和位置,其范围分别为 $[v_{\max}, v_{\min}]$ , $[x_{\max}, x_{\min}]$ ;  $p_b$ 和 $g_b$ 分别表示粒子个体历史最优适应度的位置和粒子群历史最优适应度的位置; $r_1$ 和 $r_2$ 为随机数,范围在 $(0, 1)$ ;  $c_1$ 和 $c_2$ 为学习因子。

为提高寻优速度并防止算法早熟收敛,本文采用改进粒子群算法(Modified Particle Swarm Optimization, MPSO)。该算法在标准更新公式的基础上,引入一个随机粒子的信息,并依据三个特定方向进行综合调控。这种方式能有效增强种群的多样性,从而在加速收敛的同时避免陷入局部最优。速度更新公式见式(8)。

$$v_{t+1} = wv_t + c_1r_1(p_b - x_t) + c_2r_2(g_b - x_t) + c_3r_3(p_s - x_t)$$

$$(8)$$

式中: $c_3$ 为学习因子; $r_3$ 为随机数,范围为 $(0, 1)$ ;  $p_s$ 为当前粒子群的随机粒子。

根据响应面法分析,转向横拉杆内外硬点对悬架前束角变化曲线具有显著影响,将响应面法拟合的非线性预测模型与MPSO多目标寻优能力结合,对转向横拉杆内外硬点坐标参数进行多目标优化。优化过程中的限制条件数学模型见式(9)。

$$\begin{cases} \min: f(Y1, |Y2|) \\ Y2 \leq 0 \\ Y1(x) = \max f^1(x) - \min f^1(x) \\ Y2(x) = f^2(x) \\ s \leq x \leq g \end{cases} \quad (9)$$

式中: $s$ 与 $g$ 为 $x$ 的上限和下限值; $x$ 为转向横拉杆内外硬点坐标; $f^1(x)$ 为轮跳工况下前束角的变化量; $f^2(x)$ 为上跳行程中前束角的变化梯度。

经过调试选择以下算法参数:种群规模为50,粒子维度为6,位置向量为 $x = (A, B, C, D, E, F)$ ,粒子搜索空间的下限 $x_{\min} = (-290, -476, -387, -238, -836, -406)$ ,粒子搜索上限 $x_{\max} = (-90, -276, -187, -38, -636, -206)$ ,最大惯性权重 $w = 1.2$ ,学习因子 $c_1 = 1.5, c_2 = 1.5, c_3 = 0.5$ ,最大迭代次数为300。硬点坐标优化结果见表9。转向横拉杆优化前后悬架装配体对比图如图11所示。

表9 硬点坐标优化前后对比

项目	A	B	C	D	E	F
优化前	-190	-376	-287	-138	-736	-306
优化后	-240	-326	-237	-88	-786	-256

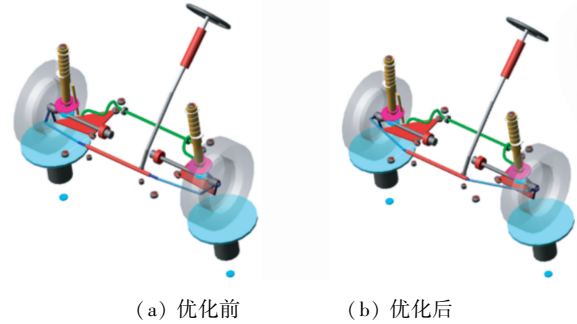


图11 转向横拉杆优化前后悬架装配体对比图

从图11可以看出,优化后转向横拉杆的转向前置梯形更加明显。优化后轮跳工况下前束角变化量与上跳行程中前束角变化梯度值见表10,仿真结果如图12所示。

表10 前束角优化前后值

项目	Y1/(°)	Y3/(°/m)
优化前	0.724	-8.78
优化后	0.493	-4.11
性能提升/%	31.9	53.2

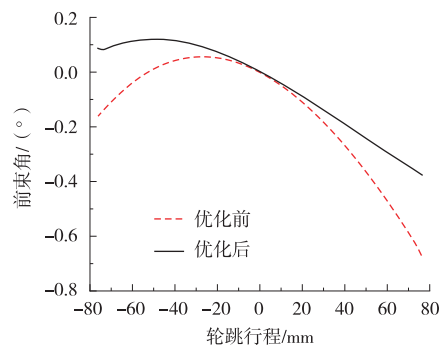


图12 悬架优化前后前束角曲线

由表10可知,前束角变化量与上跳行程中前束角变化梯度都得到了明显改善。从图12可以看出,以前束角变化量与上跳行程中前束角变化梯度为目标,通过优化转向横拉杆内外硬点坐标,有效优化了前束角变化曲线。优化后的曲线更接近线性,且变化范围减小,悬架性能得到提升。

## 5 结 论

本文基于 ADAMS/Car 软件建立了与实车设计一致的麦弗逊悬架模型。通过轮跳工况仿真分析发现,前束角随轮跳行程的变化曲线存在不合理现象。为此,采用响应面法与中心复合区设计,预测了轮跳工况前束角变化量、外倾角变化量及上跳行程前束角变化梯度,并建立了响应面回归模型,进而分析了转向横拉杆内外硬点的显著性。随后,基于响应面回归模型并结合 MPSO,以前束角变化量和上跳行程前束角变化梯度为目标,对转向横拉杆内外硬点进行了优化。最终得到以下结论:

1) 根据响应面法回归模型分析可知,转向拉杆硬点的变化对外倾角变化影响较小。

2) 通过 MPSO 算法优化转向横拉杆内外硬点后,轮跳工况下前束角变化曲线近似线性,且变化范围缩小。

本研究聚焦于某轻型商用车前悬架的硬点布置及优化分析。由于篇幅限制,未将优化后结果与整车性能进行联合分析。下一步研究将把优化前后的悬架置于整车模型中进行性能仿真分析。

### 参考文献:

- [1] 魏显坤,黄勇,石英. 基于 ADAMS/Insight 灵敏度分析的轿车前桥硬点优化[J]. 汽车维修,2024(2):11-13.  
[2] 王洪申,连亚东,黄忠金. 电主轴参数化及结合响应面法的

- 多目标优化[J]. 机械科学与技术,2022,41(9):1403-1408.  
[3] 石松宁,王大志,时统宇. 永磁驱动器偏心磁极的优化设计[J]. 东北大学学报(自然科学版),2014,35(8):1078-1082.  
[4] 卢泓坤. 基于响应面法的柴油机分区燃烧系统多参数多目标优化研究[D]. 镇江:江苏大学,2016.  
[5] 陈钊. 橡胶衬套对悬架性能的影响研究及衬套参数优化[D]. 镇江:江苏大学,2022.  
[6] 田纪伟. 基于 ADAMS/Car 的悬架系统仿真分析研究[D]. 北京:华北电力大学,2020.  
[7] 谢琪琪,方存光. 基于 ADAMS/Insight 的轮毂电机驱动的乘用车双横臂悬架的优化[J]. 内燃机与配件,2024(10):36-38.  
[8] 康学忠. 基于 ADAMS/Insight 的汽车前悬架仿真与优化[J]. 汽车实用技术,2022,47(12):39-43.  
[9] 陈军. MSC. ADAMS 技术与工程分析实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,200:128.  
[10] 陈钊. 橡胶衬套对悬架性能的影响研究及衬套参数优化[D]. 镇江:江苏大学,2022.  
[11] 周凤. 某车型副车架衬套动力学建模及整车多工况性能分析与优化[D]. 重庆:重庆理工大学,2024.  
[12] CHEN B, CHEN L Y, ZHOU F, et al. Prediction of frequency response of sub-frame bushing and study of high-order fractional derivative viscoelastic model[J]. Scientific Reports,2024(14):15767.