

6-1-2020

Multi-objective Optimization to the Suspension of an Off-road Vehicle Based on Kriging Approximate Modeling

Hongni Zhou

1. Hubei Key Laboratory of Automotive Power Train and Electronic Control, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China; ;

Feng Ying

1. Hubei Key Laboratory of Automotive Power Train and Electronic Control, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China; ;

Zhenxiao Wang

2. Technology Center of Dongfeng Motor Group Com., Ltd, Wuhan 430058, China;

Weibing Fan

2. Technology Center of Dongfeng Motor Group Com., Ltd, Wuhan 430058, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Multi-objective Optimization to the Suspension of an Off-road Vehicle Based on Kriging Approximate Modeling

Abstract

Abstract: Based on a Dongfeng off-road vehicle, the kinetic simulating and integrating process of the independent suspension assembly was established by integrating the multidisciplinary optimization software iSIGHT and ADAMS/Car. *The optimal objective considered the variation quantity and tendency of the suspension alignment parameters as the wheels traveling was proposed*, and the multi-objective optimization of the suspension was achieved by applying the DOE analysis and NSGA-II genetic algorithm. To enhance the optimal efficiency, a high-precision approximate model was established based on Kriging approximate modeling method. The results suggest both the simulating curves of two models are closing to the objective character curves after the optimizing, and the optimization results are also good. And that when using the Kriging approximate model to do the optimization, the calculating rate can be improved greatly. *Based on approximate modeling method, and by using the multi-objective genetic algorithm, the simulating and integrating technology*, the design efficiency of the system can be enhanced greatly.

Keywords

dependent suspension, wheel alignment parameters, iSIGHT, kriging approximate model, multi-objective optimal method

Recommended Citation

Zhou Hongni, Feng Ying, Wang Zhenxiao, Fan Weibing. Multi-objective Optimization to the Suspension of an Off-road Vehicle Based on Kriging Approximate Modeling[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(1): 49-56.

基于 Kriging 近似建模的某越野车悬架多目标优化

周红妮¹, 冯樱¹, 汪振晓², 范卫兵²

(1. 湖北汽车工业学院汽车动力传动与电子控制湖北省重点实验室, 湖北 十堰 442002;

2. 东风汽车集团股份有限公司技术中心, 湖北 武汉 430058)

摘要: 以东风某越野车为样车, 利用多学科优化软件 iSIGHT 集成 ADAMS/Car, 建立了独立悬架运动学仿真集成流程, 提出了同时考虑悬架轮跳时定位参数变化量与变化趋势要求的悬架优化目标, 并通过 DOE 分析与 NSGA-II 遗传算法实现了悬架多目标优化。为提高优化效率, 利用 Kriging 方法建立了高精度的近似模型进行优化。结果表明: 优化后两种模型的仿真曲线都向目标特性曲线靠近, 优化效果良好; 且采用 Kriging 近似模型计算速度得到极大提高。基于近似建模方法, 通过多目标遗传算法和仿真集成技术, 可大大提高系统设计的效率。

关键词: 独立悬架; 定位参数; iSIGHT; Kriging 近似模型; 多目标优化

中图分类号: U463.4 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 01-0049-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201701008

Multi-objective Optimization to the Suspension of an Off-road Vehicle Based on Kriging Approximate Modeling

Zhou Hongni¹, Feng Ying¹, Wang Zhenxiao², Fan Weibing²

(1. Hubei Key Laboratory of Automotive Power Train and Electronic Control, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China;

2. Technology Center of Dongfeng Motor Group Com., Ltd, Wuhan 430058, China)

Abstract: Based on a Dongfeng off-road vehicle, the kinetic simulating and integrating process of the independent suspension assembly was established by integrating the multidisciplinary optimization software iSIGHT and ADAMS/Car. The optimal objective considered the variation quantity and tendency of the suspension alignment parameters as the wheels traveling was proposed, and the multi-objective optimization of the suspension was achieved by applying the DOE analysis and NSGA-II genetic algorithm. To enhance the optimal efficiency, a high-precision approximate model was established based on Kriging approximate modeling method. The results suggest both the simulating curves of two models are closing to the objective character curves after the optimizing, and the optimization results are also good. And that when using the Kriging approximate model to do the optimization, the calculating rate can be improved greatly. Based on approximate modeling method, and by using the multi-objective genetic algorithm, the simulating and integrating technology, the design efficiency of the system can be enhanced greatly.

Keywords: dependent suspension; wheel alignment parameters; iSIGHT; kriging approximate model; multi-objective optimal method

引言

在车轮跳动或车厢侧倾过程中, 车轮定位参数



收稿日期: 2016-06-07 修回日期: 2016-08-11;
基金项目: 湖北省自然科学基金(2014CFA120), 湖北省教育厅科学技术研究计划(Q20161804), 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室开放基金(2014-08);
作者简介: 周红妮(1981-), 女, 湖北十堰, 硕士, 讲师, 研究方向为汽车动力学仿真及其控制等。

的变化对汽车操纵稳定性、平顺性及轮胎磨损有较大的影响。在车轮跳动或车厢侧倾时, 如果悬架定位参数的变化不能满足设计要求, 可通过调整硬点的位置来改进悬架的运动特性, 这是现代悬架设计和开发中经常用到的方法。独立悬架空间结构复杂, 各参数之间也存在相互影响, 进行调整时需要相互权衡才能获得理想的悬架特性, 这就给设计带

<http://www.china-simulation.com>

来了较大的难度。因此，独立悬架的优化设计是一个复杂的多目标优化问题，而多目标遗传算法是解决该问题的有效方法。国内对独立悬架的优化设计已有较多研究，对于定位参数的优化目标虽有不同的考虑，但大多集中于尽量减小悬架轮跳时定位参数的变化量^[1-6]。本文提出了同时考虑定位参数变化量与变化趋势要求的悬架优化目标。为了进一步提高计算效率、降低设计研发周期，近年来近似建模技术在机械系统设计与研发中的应用广泛^[7-9]。

目前，在悬架运动学和动力学仿真分析方面，利用多体动力学仿真软件 ADAMS 及其 Insight 模块对悬架进行优化设计是国内较为通用的研究方法，但是在解决复杂系统的多目标优化问题方面，基于参数的多学科设计优化软件 iSIGHT 软件却更胜一筹。

本文以东风某越野车为样车，基于 ADAMS/CAR 和 iSIGHT 软件集成技术，应用 Kriging(克里格)近似建模方法和多目标遗传算法对该车前悬架机构进行优化设计。对于独立悬架系统的优化设计，国内已有较多研究，而利用近似建模方法，通过多目标遗传算法和计算机仿真集成技术进行优化设计，可有效解决传统优化方法的不足、大大提高系统设计效率。

1 前悬架总成运动学仿真建模

样车前悬架系统为上下臂不等长的双横臂独立悬架，主要由上、下横臂总成、螺旋弹簧、液压减振器、横向稳定杆总成和一些支架及连接件组成。与该独立悬架配用的转向传动机构采用断开式转向梯形，转向器采用循环球式。根据样车三维数模，提取悬架与转向机构关键点数据，并进行模型简化，利用 ADAMS/Car 软件分别建立该越野车前悬架子系统和转向系子系统多体动力学模型，并与悬架测试试验台组装构成前悬架总成仿真模型，如图 1 所示。悬架与转向子系统模型运动部件较多，各部件之间的运动链接副也较为复杂，其类型及数量统计如表 1 所示。

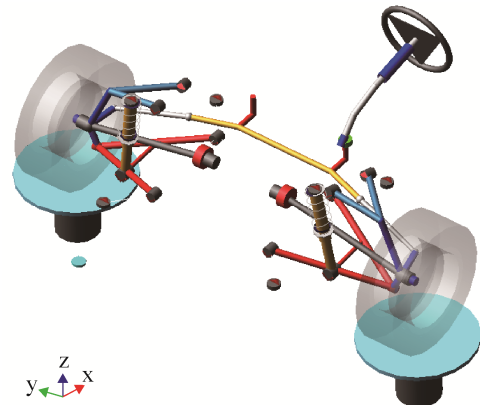


图 1 ADAMS/Car 前悬架仿真模型
Fig.1 ADAMS/Car Front Suspension Simulating Model

表 1 悬架与转向子系统运动副数量

Tab.1 Motion Pair Amount of Suspension and Steering system

类型	运动部件	旋转副	球副	移动副	圆柱副
悬架	35	2	6	6	3
转向	19	5	2	1	2
类型	虎克铰	等速副	固定副	虚约束	耦合副
悬架	-	6	11	1	-
转向	2	-	9	2	4

车轮垂直跳动分析是悬架性能分析中非常重要的方法。欲设计出理想的悬架系统，首先需要对其运动特性，即车轮上下跳动时车轮定位参数和轮距变化等运动规律做出准确的描述和判断。在 ADAMS/CAR 中，可通过对悬架总成进行轮跳仿真得到车轮垂直跳动行程中悬架各性能参数的变化曲线。

2 设计变量与目标函数

2.1 设计变量

影响双横臂独立悬架轮跳运动特性的关键设计硬点包括：上控制臂的前支点(uca_front)、外支点(uca_outer)、后支点(uca_rear)；下控制臂的前支点(lca_front)、外支点(lca_outer)、后支点(lca_rear)；转向横拉杆的内支点(tierod_inner)、外支点(tierod_outer)，共计 8 个硬点。选取每个硬点的 x , y , z 三个坐标作为设计变量，共计 24 个设计变量。

由于各个设计变量对每个定位参数随轮跳的变化影响程度各不相同，且设计变量过多会使后续

优化迭代计算量过大, 比较耗时。因此需要分析不同设计因素(设计硬点 x , y , z 方向的坐标值称为因素)在一定范围内对优化目标响应的影响程度, 进而选择有效的设计变量进行优化计算。

2.2 目标函数

国内对独立悬架的优化设计已有较多研究, 对于定位参数的优化目标制定也各有不同。文献[1]中将车轮跳动时定位参数的变化曲线与设计参数值所围成的面积最小作为优化目标; 文献[2]建立了响应面近似模型, 利用前轮定位参数的响应面函数设定优化目标; 文献[3]根据加权法将多个目标进行组合, 减少了目标的个数, 并通过目标的容限值确定加权系数; 文献[4]根据各定位参数相对平衡位置变化量的绝对值最小为优化目标; 文献[5-6]根据各定位参数相对于目标定位参数的变化量平方和的加权之和最小形成单一目标, 并根据位置加权法选取加权系数。以上目标函数的设计主要以各定位参数在车轮跳动时的变化量最小为目标, 没有考虑到对变化趋势的要求, 例如前轮前束在设计时为了使汽车获得一定的不足转向特性, 希望前束角在前轮上跳时为弱负前束变化, 下跳时为弱正前束变化; 而目标加权法中对于加权系数的选取, 可能会受到设计者主观因素影响, 有待进一步研究。独立悬架运动学优化通常通过各关键点的调整进行, 而各定位参数之间的相互影响较为复杂, 相对于单目标优化方法, 多目标优化能更好解决这一问题。

考虑到车轮定位参数对汽车操纵稳定性、平顺性及轮胎磨损的影响, 悬架设计中要求: 前轮定位参数在车轮跳动过程中的变化范围要尽量小, 而且还应满足一定的变化规律。因此, 本文以前轮各个定位参数变化曲线与目标特性曲线差别最小为优化目标, 目标函数以两曲线差值的绝对值的均值最小进行描述, 构成一个多目标优化问题。将优化目标描述成适用于 iSIGHT 软件的 4 个目标函数, 如式(1)~(4)所示:

$$\text{Object1} = \min(\text{mean}(\text{abs}(\text{Toe} - \text{Toe}')))) \quad (1)$$

$$\text{Object2} = \min(\text{mean}(\text{abs}(\text{Camber} - \text{Camber}')))) \quad (2)$$

$$\text{Object3} = \min(\text{mean}(\text{abs}(\text{Caster} - \text{Caster}')))) \quad (3)$$

$$\text{Object4} = \min(\text{mean}(\text{abs}(\text{Track} - \text{Track}')))) \quad (4)$$

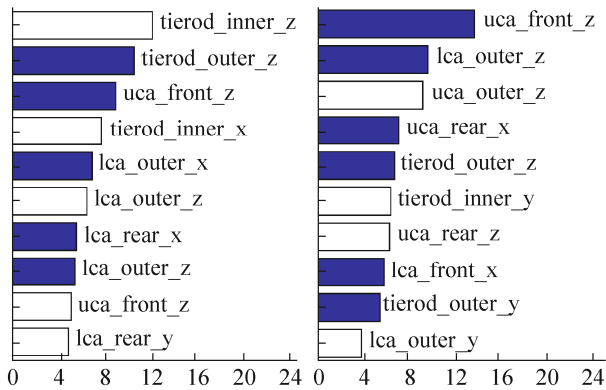
式中: Toe, Camber, Caster 和 Track 分别代表前轮前束角、车轮外倾角、主销后倾角和车轮轮距变化量这 4 个定位参数随轮跳的变化; Toe', Camber', Caster' 和 Track' 为对应的目标特性。目标特性可根据实际情况与预定的设计要求确定, 或参考同级别成熟车型悬架定位参数的实验数据分析的统计结果进行设定。也就是说, 如果提供理想目标特性, 通过相关的技术方法对悬架关键硬点位置的进行优化设计, 就能使优化后的悬架运动学特性接近目标特性。

3 设计变量 DOE 分析

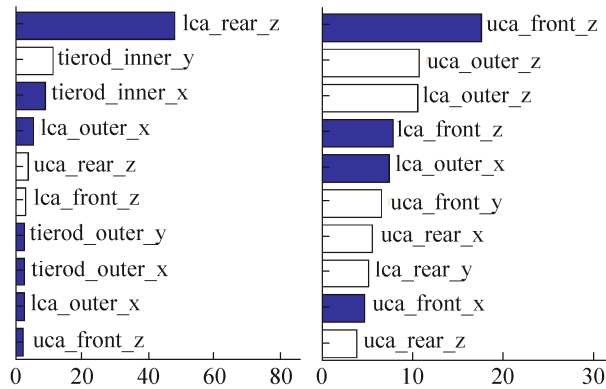
利用 iSIGHT 软件实现 ADAMS/CAR 运动学仿真集成, 建立了悬架设计变量 DOE 分析流程, 并采用正交数组法(Orthogonal Arrays)进行 DOE 分析。正交数组法由于数据点分布均匀、齐整可比, 试验次数相对较少, 且能进行各因素对响应的交互作用分析, 是一种高效、快速和经济的实验设计方法^[7]。采用正交数组法对前述 8 个硬点的 x , y , z 3 个坐标, 共计 24 个设计变量(因子)对 4 个目标响应进行 DOE 分析, 以提取合理的优化变量。

图 2 所示 Pareto 图为设计变量对 4 个响应目标的影响结果(只给出影响排列前 10 位的设计变量)。DOE 分析中, Pareto 图反映了所有因子对响应的贡献率, 黑色条形表示正效应, 白色则表示负效应。由图 2 可知各设计变量对 4 个目标响应(分别对应前束角、外倾角、后倾角、轮距变化)影响效果并不完全一致, 相互冲突现象存在, 其中对各个目标响应影响较大的因子有: 转向横拉杆内支点的 x , y , z 坐标 tierod_inner_x, tierod_inner_y, tierod_inner_z; 转向横拉杆外支点的 x , z 坐标 tierod_outer_x, tierod_outer_z; 上控制臂前支点 z 坐标 uca_front_z; 上控制臂外支点 z 坐标 uca_outer_z; 下控制臂前支点 z 坐标 lca_front_z;

下控制臂后支点 z 坐标 lca_rear_z ; 下控制臂外支点 x 坐标 lca_outer_x , 可选择这 10 个因子为优化变量。如果进一步考虑悬架安装、布置的实际情况, 还可进一步对优化变量进行筛选。



(a) 对目标 1 的影响 (%) (b) 对目标 2 的影响



(c) 对目标 3 的影响 (d) 对目标 4 的影响

图 2 DOE 分析 Pareto 图

Fig.2 Pareto Graph in DOE Analysis

4 建立 Kriging 近似模型

4.1 近似建模方法概述

近似建模方法是通过数学模型的方法逼近一组输入变量与输出变量的方法, 可用下式来描述输入变量与输出响应的关系:

$$y(x) = \tilde{y}(x) + \varepsilon \quad (5)$$

其中: $y(x)$ 为响应实际值, 是未知函数; $\tilde{y}(x)$ 为响应近似值, 是已知的多项式; ε 为近似值与实际值间的随机误差, 通常服从 $(0, \sigma^2)$ 的标准正态分布。

基于近似模型进行优化设计的优势在于通过建

立经验公式获得了输入与输出变量之间的量化关系, 减少了耗时的仿真程序调用, 提高了优化效率, 通常可将实际求解时间缩短几个数量级, 同时可对响应进行平滑处理, 减低“数值噪声”, 有利于更快的收敛到全局最优解点^[7]。常见的近似模型有响应面法 (RSM)、径向基/椭圆神经网络模型 (RBF/EBF)、正交多项式模型 (Orthogonal) 和克里格模型 (Kriging) 等。近年来, 由于 Kriging 近似模型具有模拟复杂响应精度较高的优点, 在复杂多学科设计优化中得到广泛应用^[8-9], 本文采用 Kriging 近似建模方法, 建立该样车前悬架运动学仿真近似模型。

4.2 Kriging 近似建模算法

Kriging 近似模型又称空间局部插值法, 是以变异函数理论和结构分析为基础, 在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方法。算法描述如下^[7]:

设 x_0 为未观测的需要估计的点, x_1, x_2, \dots, x_n 为其周围的观测点, 观测值相应为 $y(x_1), y(x_2), \dots, y(x_n)$ 。未测点的估计值为 $\tilde{y}(x_0)$, 它由相邻观测点的已知观测值加权求和得到:

$$\tilde{y}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i y(x_i) \quad (6)$$

其中: λ_i 为待定加权系数。Kriging 差值的关键就是计算权重系数 λ_i 。其必须满足以下 2 个条件:

(1) 无偏估计。设估计点的真值为 $y(x_0)$, 由于模型空间变异性的存在, $y(x_i)$, $\tilde{y}(x_0)$ 以及 $y(x_0)$ 均可视为随机变量, 当为无偏估计时,

$$E[\tilde{y}(x_0) - y(x_0)] = 0, \quad \text{即} \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$$

(2) 估值 $\tilde{y}(x_0)$ 和真值 $y(x_0)$ 之差的方差最小。即,

$$D[\tilde{y}(x_0) - y(x_0)] = \min = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i, x_0)$$

其中: $\gamma(x_i, x_j)$ 表示以 x_i 和 x_j 两点间的距离作为间距 h 时参数的半方差值; $\gamma(x_i, x_0)$ 是以 x_i 和 x_0 两点之间的距离作为间距 h 时参数的半方差值。

4.3 建立悬架仿真近似模型

在 iSIGH 软件中, 选择 Kriging 近似建模方法, 根据之前的 DOE 分析结果进行数据采样, 指定前述的 10 各变量作为输入变量, 各个子目标作为输出响应量。由于输入变量是同类型的变量, 拟合类型选择各项同性(isotropic)。相关函数类型选择高斯函数(Gaussian)平滑近似模型, 经过初始化后得到近似模型。通过误差分析可判断建立的近似模型与样本点项的符合程度, 其中 R-Square(R^2)值如果为 1, 则表示近似模型具有高的可信度, 本文中相对 4 个响应目标的 R^2 值分别为: 0.999 7, 0.999 2, 0.985 7, 1, 表明建立的近似模型具有较高的可信度。图 3 为相对 4 个响应目标近似模型的拟合结果与样本点的接近程度, 即实际与期望间的误差, 可见精度高的模型误差分布接近 45 度对角线。图 3(c)中对响应目标 3 拟合精度较其它目标要稍微逊色一些, R^2 值也相对较小一些, 但仍具有较高的可信度。

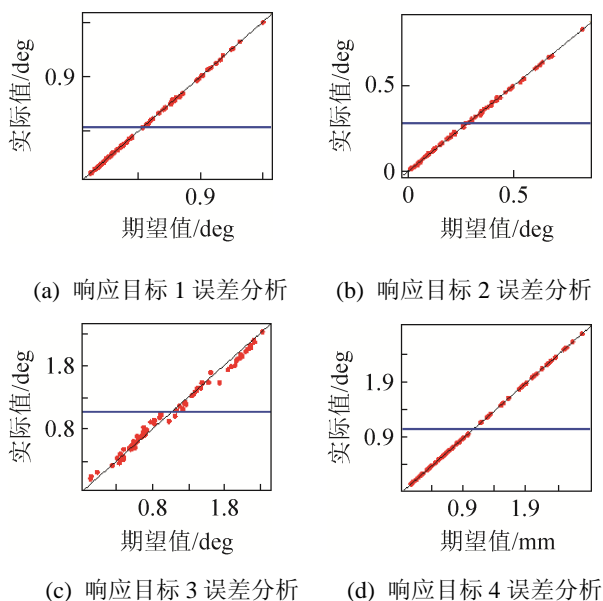


图 3 近似模型误差分析

Fig.3 Error Analysis of Approximate Model

如果建立的近似模型精度低误差大, 可以增加 DOE 样本点数量, 或选择其他近似模型提高精度。但是随着样本点的增加, 近似建模初始化计算量也会增加。值得注意的是, 如果近似模型输入和输出变量较多, 建立高精度的近似模型一般较为困难。

目前, 对于悬架优化近似建模的研究, 多数相关文献都是将多个目标通过加权进行归一化处理。在多目标情况下, 使各个响应都达到一致的高精度, 需要反复研究和尝试。

5 悬架系统优化设计

5.1 多目标优化遗传算法

大多数实际工程优化问题都属于多目标优化问题, 各子目标之间往往相互冲突。由于某一子目标的改善可能引起其它目标的降低, 即同时使多个目标均达到最优一般是不可能的。解决多目标问题的最终目的只能是在各个目标之间进行协调权衡和折中处理, 使各子目标均尽可能达到最优。法国经济学家 V. Pareto 最早研究了经济学领域的多目标优化问题, 提出了 Pareto 解集的概念。由于多目标优化问题中各子目标是相互冲突的, 优化解不可能是单一解, 而是一个解集, 称为 Pareto 最优解集。求解多目标优化问题的就是要毫无偏好地找到尽可能多的具有代表性的符合要求的 Pareto 最优解集, 根据设计要求和工程实际经验, 从中客观地选择最满意的优化结果^[8-9]。

目前, 多目标优化方法有归一化方法和非归一化方法两种。归一化方法以加权法为代表算法。而非归一化方法是采用 Pareto 机制直接处理多个目标的优化技术, 它不需要将多个目标转化为单一目标, 避免了归一化方法存在的诸多问题, 并能使所求解集前沿与 Pareto 前沿尽量接近、均匀覆盖。多目标遗传算法(MOGA)是非归一化方法的代表方法, 研究应用较为广泛。遗传算法通过对一个种群进行运算操作, 在一个进化代中可以得到多个 Pareto 最优解, 是求解 Pareto 最优解集的一种有效算法。NSGA-II 多目标遗传算法(非支配排序遗传算法)为 NAGA 算法的改进, 由于在普通遗传算法中导入了“拥挤距离”和“拥挤距离排序”的方法, 在非支配排序中, 接近 Pareto 前沿的个体被选择, 使得 Pareto 前进能力增强, 算法探索性能优良^[10-11]。本文采用 NSGA-II 遗传算法对悬架系统进行多目标优化计算。

5.2 建立优化计算仿真集成流程

利用 iSIGHT 软件实现 ADAMS/Car 悬架运动学仿真集成,通过添加优化组件建立悬架系统优化计算流程。本文将上述 10 个设计变量选择为优化变量,并设置合理的变量取值范围,以 4 个车轮定位参数随车轮跳动的变化与目标特性曲线的绝对误差的平均值最小作为优化目标。在 iSIGHT 优化组件中,设置 NSGA-II 遗传算法种群个体数为 40,进化 40 代,交叉概率为 0.9,进行 1 600 次迭代计算,并得到优化结果。为了提高计算效率、缩短计算时间,将建立的 Kriging 近似模型添加到计算流程中,用近似模型代替原悬架系统仿真集成模型(非近似模型)进行优化计算,如图 4 所示。

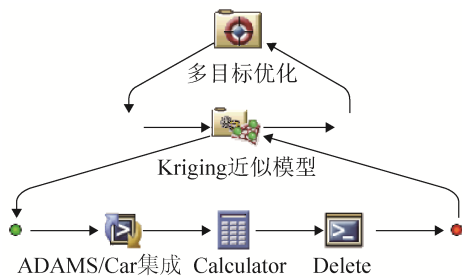


图 4 基于 Kriging 近似模型的优化集成流程

Fig.4 Integrating Process of Optimization Based on Kriging Approximate Model

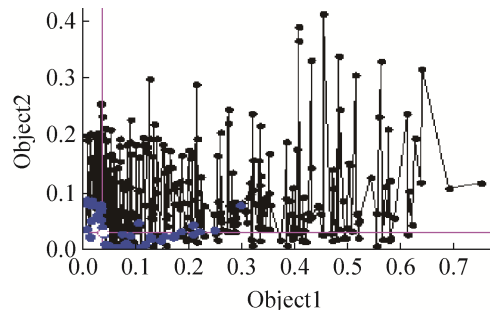
5.3 优化结果分析与比较

图 5 所示为各优化历程对应的优化目标计算结果(两两目标对应显示)。图中多个浅色个体为求解得到的 Pareto 解集,水平与垂直细线相交位置对应的历程为最终的 Pareto 最优解。表 2 为优化前、后优化变量的取值。

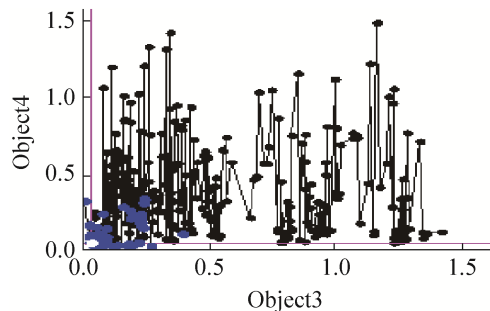
图 6 为优化前、后悬架各定位参数随车轮跳动变化曲线的比较。子图中的 4 条曲线分别为目标特性曲线、优化前曲线、不采用近似建模(即非近似模型)的优化结果曲线、以及采样 Kriging 近似模型的优化结果曲线。由图 6 可知,采用 Kriging 近似模型优化结果曲线与原非近似模型优化结果都很接近,且优化后各模型仿真曲线都向目标特性曲线靠近,与优化前相比曲线的变化范围也都有所减

小,取得较好的优化效果。细微比较,采用非近似模型进行优化与目标特性曲线最为接近、优化结果相对最好,但是在计算效率上,笔者采用计算性能一般的 PC 机寻优计算的时间大概为 6~7 h,如果采用近似模型进行优化实际求解时间只需要 10 min 左右,在优化结果差异不大的情况下,带来的却是优化效率的极大提高,这对于提高设计效率来说意义重大。

如果针对某一优化目标,模型拟合精度较高,则近似模型与非近似模型优化结果会高度一致,否则就会体现出一定差异。如图 6(c)所示,由于响应目标 3 拟合精度较其它目标稍逊一些, R^2 值相对较小,所以采用非近似模型与 Kriging 近似模型进行优化后的主销后倾角变化曲线有一定差异,但基本都向目标特性曲线靠近,且与优化前曲线相比已体现出较好的优化效果。图 6(d)中的曲线,由于响应目标 4 拟合精度最高(R^2 值为 1),所以采用两种模型进行优化后的车轮轮距变化曲线完全重合,且高度靠近目标特性曲线。



(a) object1-object2



(b) object3-object4

图 5 各目标优化历程

Fig.5 Optimization Process of All Objectives

表 2 优化前、后各变量的取值

Tab.2 Values of Variables Before and After Optimization /mm					
序号	优化变量	优化前初值	变量变化范围	非近似优化	Kriging 近似优化
1	转向横拉杆内支点 x 坐标 tierod_inner_x	185	175~195	186.24	188.40
2	转向横拉杆内支点 y 坐标 tierod_inner_y	-385	-365~-410	-399.6	-403.94
3	转向横拉杆内支点 z 坐标 tierod_inner_z	300	280~310	284.15	294.49
4	转向横拉杆外支点 x 坐标 tierod_outer_x	135	125~155	154.09	146.15
5	转向横拉杆外支点 z 坐标 tierod_outer_z	305	280~315	285.47	302.78
6	上控制臂前支点 z 坐标 uca_front_z	520	510~530	523.81	521.99
7	上控制臂外支点 z 坐标 uca_outer_z	540	520~550	526.57	520.12
8	下控制臂前支点 z 坐标 lca_front_z	140	130~160	152.38	157.86
9	下控制臂后支点 z 坐标 lca_rear_z	160	140~170	145.57	159.37
10	下控制臂外支点 x 坐标 lca_outer_x	-10	-20~5	-0.51	-1.92

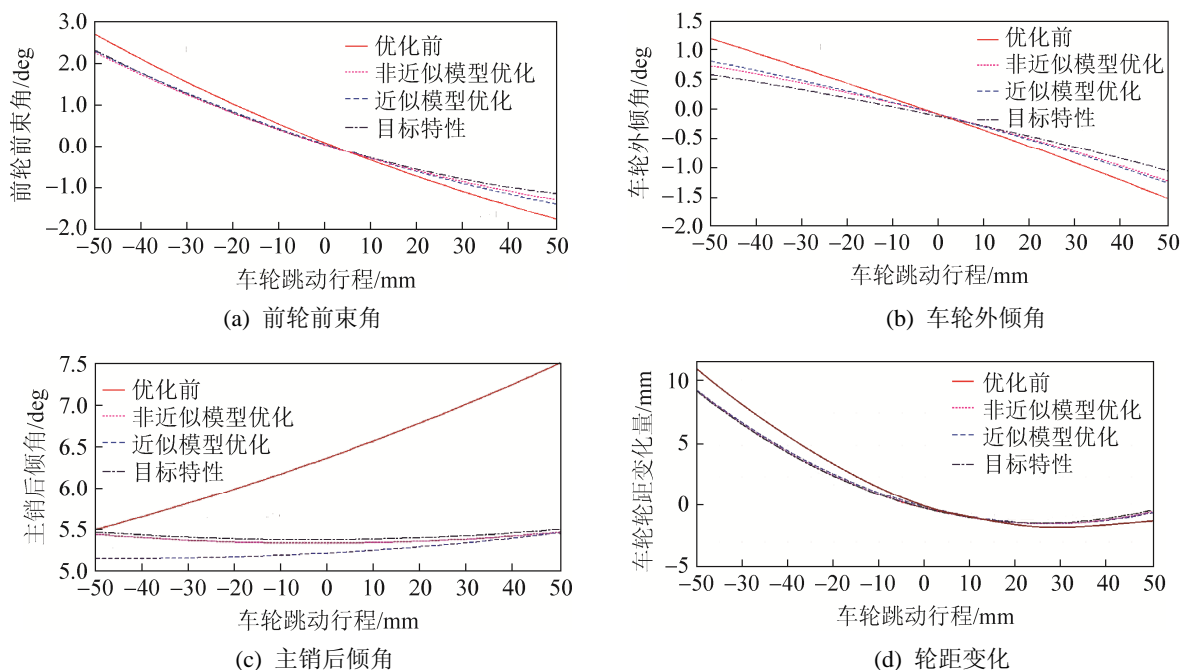


图 6 车轮定位参数优化结果比较

Fig.6 Comparison of Wheel Alignment Parameter Optimization Results

6 结论

本文利用 Kriging 近似建模方法, 基于 DOE 分析与 NSGA-II 遗传算法实现了某越野车前独立悬架运动特性的多目标优化。主要研究结论如下:

(1) 独立悬架关键点位置影响到车轮跳动时定位参数的变化, 即对悬架运动学特性产生影响。由于关键点坐标较多、涉及的定位参数输出响应也较多, 因此悬架的优化是一个复杂的多目标优化问题。利用 DOE 分析技术与多目标遗传算法可较好地解决这一问题。

(2) 利用多学科优化软件 iSIGHT 集成技术,

可充分发挥各 CAE 软件的优势、快速建立复杂的仿真流程, 利用相关的分析技术与优化算法可自动进行分析和寻优计算, 便于设计人员进行复杂系统的设计, 缩短了产品的研发周期、降低成本。

(3) 本文基于 DOE 数据采样与 Kriging 近似建模方法, 在 iSIGHT 软件中建立了高精度的近似模型来替代原非近似模型高强度的计算仿真, 研究表明: 利用近似模型进行仿真优化, 在保证较好优化结果的基础上, 系统寻优效率得到极大提高, 有效降低了系统的设计周期与成本。

(4) 悬架设计要求前轮定位参数在车轮跳动

过程中的变化范围要尽量小,而且还应满足一定的变化规律。因此,本文提出了以前轮各个定位参数变化曲线与目标特性曲线差异最小为优化目标。如果能够根据设计要求与实际情况确定理想目标特性,就能通过上述技术方法对悬架进行多目标优化,使其运动特性较好满足设计要求。

参考文献:

- [1] 侯永涛,孟令斐,赛羊羊,等. 麦弗逊悬架参数优化与仿真优化系统的构建 [J]. 机械设计与制造, 2015 (3): 217-220.(Hou Yongtao, Meng Lingfei, Sai Yangyang, et al. Construction of Parameters and Simulation Optimization System of Mcpherson Suspension [J]. Machinery and Manufacture, 2015(3): 217-220.)
 - [2] 石晶,孙艳,李卫民. 某微型电动汽车前悬架系统性能分析与优化研究 [J]. 机械设计与制造, 2015(3): 65-68. (Shi Jing, Sun Yan, Li Weimin. Analysis and Optimization of Mini Electric Car Front Suspension[J]. Machinery and Manufacture, 2015(3):65-68.)
 - [3] 李伟平,王世东,周兵,等. 基于响应面法和 NAGA-II 算法的麦弗逊悬架优化 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(6): 27-32. (Li Weiping, Wang Shidong, Zhou Bing, et al. Mcpherson Suspension Parameter Optimization Based on Response Surface Method and NSGA-II Algorithm [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2011, 38(6): 27-32.)
 - [4] 李俊鹏,李捷,杨建伟. 基于响应面模型的车辆定位参数优化 [J]. 北京建筑工程学院学报, 2013, 29(1): 7-10. (Li Junpeng, Li Jie, Yang Jianwei. Optimization of Wheel Alignment Parameter Based on Response Surface Model [J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013, 29(1): 7-10.)
 - [5] 张瑛,吴光强. 基于田口方法的汽车悬架稳健性优化 [J]. 机械与电子, 2015 (9): 3-7. (Zhang Ying, Wu Guangqiang. Robust Design Optimization of the Automotive Mcpherson Suspension Based on Taguchi Method[J]. Machinery & Electronics, 2015 (9): 3-7.)
 - [6] 张宝珍,阿米尔,肖思俊. 基于区间不确定性的前悬架多目标可靠性优化 [J]. 汽车工程, 2015, 37(6): 707-713. (Zhang Baozhen, Amir, Xiao Sijun. Multi-objective Reliability Optimization of Front Suspension Based on Interval Uncertainty [J]. Automotive Engineering, 2015, 37(6): 707-713.)
 - [7] 赖宇阳. Isight 参数优化理论与实例详解 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012. (Lai Yuyang. Isight Parameter Optimization Theory and Example Detail Introduction [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2012.)
 - [8] 任远,白广忱. 汽车悬架优化设计中的近似模型方法及其应用 [J]. 汽车技术, 2009 (3): 35-38. (Ren Yuan, Bai Guangchen. Approximation Model Method in Optimization Design of Vehicle Suspension and Its Application [J]. Automobile Technology, 2009 (3): 35-38.)
 - [9] 姜欣,陈勇,史国宏,等. 优化设计方法在整车早起开发中的对比研究 [J] 汽车技术, 2010 (4): 17-20. (Jiang Xin, Chen Yong, Shi Guohong, et al. Comparative Study of Optimization Design Method in the Early Stage of Vehicle Development [J]. 2010 (4): 17-20.)
 - [10] 周红妮,冯樱,胡群,等. 多目标遗传算法 NSGA-II 在某双前桥转向机构优化设计中的应用 [J]. 机械设计与制造, 2015 (11): 140-143. (Zhou Hongni, Feng Ying, Hu Qun, et al. Application of Multi-Objective Genetic Algorithm NSGA-II in Optimal Design on a Dual-Front-Axle Steering Mechanism [J]. Machinery and Manufacture, 2015 (11): 140-143.)
 - [11] Deb K, Agrawal S, Pratap A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II[C]// Parallel Problem Solving from Nature. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2000: 849-858.
-
- (上接第 48 页)
- [10] 刘娣,薄煜明,陈益. 基于“当前”统计模型的高动态 GPS 信号跟踪算法 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(12): 2821-2824.(Liu Di, Bo Yuming, Chen Yi. High Dynamic GPS Signal Tracking Algorithm Based on Current Statistical Model [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2010, 22(12): 2821-2824.)
 - [11] 欧阳宁烽,周彦,徐建闽. LOS/NLOS 混合环境中基于交互式多模型的鲁棒目标跟踪 [J]. 计算机应用研究, 2013, 30(11): 3465-3468. (Ouyang Ningfeng, Zhou Yan, Xu Jianmin. Interactive Multiple Model based Robust Target Tracking in mixed LOS/NLOS environments [J]. Application Research of Computers, 2013, 30(11): 3465-3468.)
 - [12] Li W, Jia Y. Consensus-based Distributed Multiple Model UKF for Jump Markov Nonlinear Systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control (S0018-9286), 2012, 57(1): 227-233.
 - [13] 秦雷,李君龙. 基于多站交互式多模型算法跟踪临近空间目标 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(10): 2486-2492. (Qin Lei, Li Junlong. Research on Multi-station Tracking for Near Space Target Based on IMM Algorithm [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2014, 26(10): 2486-2492.)