

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.06.006

基于 6σ 稳健性方法的滑移门平顺性优化研究^{*}

张立强¹, 钟泓骏¹, 陈梓铭², 张松³

(1. 中南林业科技大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410000; 2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082; 3. 重庆长安汽车欧尚研究院, 重庆 400023)

摘要:针对国内外滑移门平顺性优化的目标多为单目标,且没有考虑到不确定因素对优化结果影响的问题,提出了一种基于 6σ 稳健性设计的滑移门平顺性多目标优化方法。基于 ADAMS/View 建立了滑移门系统的刚柔耦合多体动力学模型,对其运动机构进行了参数化设计,通过灵敏度分析筛选出对滑移门动力学特性影响较大的结构参数作为设计变量;建立了滑移门系统的二阶响应面近似模型,采用遗传算法对滑移门运动机构进行了多目标确定性优化,采用蒙特卡洛抽样法对确定性优化结果进行了 6σ 质量分析;对滑移门平顺性进行了 6σ 稳健性优化。研究结果表明:优化后的中导向轮载荷峰值和滑移门质心加速度峰值相比初始值分别降低了 36.3% 和 23.8%,在提升了滑移门平顺性的同时,稳健性和可靠性也得到了提高。

关键词:滑移门;平顺性;多体动力学;多目标优化设计; 6σ 稳健性优化

中图分类号:TH122;U461.4

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)06-0584-06

Robustness optimization of ride comfort for sliding door based on 6σ method

ZHANG Li-qiang¹, ZHONG Hong-jun¹, CHEN Zi-ming², ZHANG Song³

(1. Mechanical and Electrical Engineering Institute, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410000, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Changan Oushang Automobile Institute, Chongqing 400023, China)

Abstract: Aiming at the problem that investigations on the ride comfort of sliding door were mainly carried out by single objective optimization method and ignored the influence of uncertain factors, in present work, a method combined multi-objective optimization with 6σ robust design was utilized to improve the ride comfort of sliding door. The rigid-flexible coupled multi-body dynamic model of sliding door was established and parameterized by ADAMS/View, and the corresponding parameters which do highly effect on the dynamic characteristics were selected as design variables by sensitivity analysis. Then, a second-order response surface model was built. Based on the established mode, multi-objective dynamic optimization was carried out by using non-dominated sorting in genetic algorithm- II. Finally, 6σ robustness optimization was conducted on the optimization results by sampling method of Monte Carlo. The results indicate that the load peak of middle guide roller and the acceleration peak on center of mass is reduced by 36.3% and 23.8% respectively. The method improves the ride comfort of the sliding door visibly, and increases the robustness and reliability of the optimization scheme simultaneously.

Key words: sliding door; ride comfort; multi-body dynamic; multi-object optimization; 6σ robustness optimization

0 引言

平顺性对滑移门整体性能有着直接的影响,因此需要对其动力学特性进行分析与优化。

目前,为了改善滑移门的运动平顺性,国内外学者已经开展了诸多研究,并取得了一些成果。文献[1]

滑移门是商用车常用的一种车门形式,其运动平

收稿日期:2018-11-27

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2681)

作者简介:张立强(1978-),男,黑龙江鸡西人,副教授,主要从事汽车轻量化设计、制造技术方面的研究。E-mail:21384881@qq.com

针对滑移门在经过导轨弯道处时出现的晃动问题,提出了一种用欧拉螺线对中导轨轨迹的不连续曲率进行设计的方法,仿真结果表明滑移门在经过导轨弯道处的运动稳定性得到了提高;文献[2]研究发现汽车部件的柔性化处理会使仿真结果中测点的加速度发生突变,揭示了刚体模型替换成有限元模型,部件进行柔性化处理后能获得更高的仿真精度;朱庆成等^[3]为了解决滑移门在开闭运动过程中迟缓的问题,基于滑移门的虚拟样机模型,以承重轮载荷最小为优化目标,改善了承重轮的受力突变问题;廖鸿胡等^[4]运用正交试验方法,得出滑移门质心的运动规律,并揭示了中导轨和铰链销的空间位置对平顺性的影响;高云凯等^[5]针对滑移门滚轮磨损严重的问题,基于模态综合法构建了滑移门的虚拟样机模型,通过合理的仿真脚本控制和实车试验,揭示了导向轮和承重轮所承载荷的规律变化,并提出了设计改进方案。

目前,国内外滑移门平顺性大多是在确定性优化的范畴内进行设计研究,并没有考虑到不确定性因素对最优解的影响,然而在实际生产中,存在许多不确定因素如制造误差、装配误差等,导致性能指标的波动,从而使得优化设计失效。

鉴于以上情况,本文将通过对滑移门运动机构进行参数化建模,建立滑移门系统的二阶响应面近似模型,把多目标优化与 6σ 稳健性设计结合起来,进行滑移门平顺性的优化设计。

1 滑移门刚柔耦合模型及试验验证

1.1 滑移门刚柔耦合模型的建立

某款MPV车型的滑移门系统主要由滑移门、铰链和导轨3部分组成,其中,铰链包含了导向轮和承重轮,它们通过滚轮销和轴承销固定连接于安装座,与导轨接触配合,使得滑移门能够进行开闭运动。

为了提升滑移门多体动力学模型的仿真精度,滑移门和铰链的建模需要经过Nastran来生成模态中性文件^[6],通过ADAMS/View中Flexible Bodies中的命令,调用模态中性文件来创建柔性体的滑移门和铰链,使得滑移门系统在动力学仿真过程能够体现出变形情况,提高模型的仿真精度。

本文建立的滑移门刚柔耦合模型如图1所示。

其中,本研究将滑移门上如玻璃升降器、内外饰等其余部分简化成质量点与滑移门建立连接,以减少仿真过程中不必要的计算成本。为了模拟滑移门实际开闭过程中的状态和位置,在滑移门仿真模型中增加密

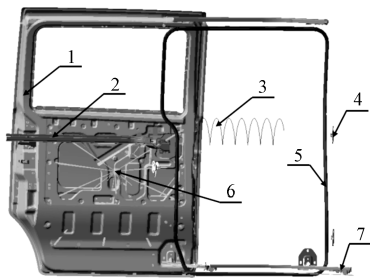


图1 滑移门刚柔耦合模型

1—柔体门;2—刚体导轨;3—加载力;4—限位器;
5—密封条;6—质量点;7—刚体铰链

封条和限位器,加载40 N大小的力在门把手处,并通过Step函数模拟实际过程中力的大小变化,力方向沿着车长方向。

1.2 滑移门动力学特性分析

在工程实践中,需要引入两项能测量的物理量作为滑移门平顺性的评价指标。其中:安装在中铰链上的导向轮所受到的冲击载荷大小能被使用者直接感受到;另外当中导向轮载荷突变值较大时,对滑移门运动过程中导向轮的磨损情况也将产生不利影响。因此,引入中导向轮载荷峰值作为滑移门平顺性的评价指标;滑移门的质心加速度能够直接影响到使用者的观感,同时也能反映出滑移门在开闭过程中的抖动强弱情况。在滑移门把手处加载特定驱动力,其全开所需时间作为滑移门平顺性和轻便性的评价指标。

本研究在ADAMS/View中对滑移门系统的刚柔耦合模型进行关闭过程的仿真实验,得到中导向轮载荷峰值和质心加速度峰值分别为561.7 N和1.64 g,峰值对应的是滑移门关闭过程中第2个中导向轮进入导轨弯道处的时候。此外,在滑移门的开启过程仿真实验中,滑移门全开所需时间为1.95 s。

1.3 试验验证

由于实车试验场试验受外界因素影响较大,且不能避免装配误差对滑移门平顺性能的影响,本文采用试验台对滑移门进行实验,如图2所示。



图2 滑移门性能测试台架

由于直接测量中导向轮载荷和质心加速度的难度较大,且设备成本过高,本研究将测点选取在滑移门外板上,通过在滑移门外板上的测点处安装加速度传感器,可以测得滑移门在关闭过程中的加速度和滑移门的全开所需时间。经过在试验台架上的多次滑移门开闭试验,得到 A、B、C、D、E 这 5 组测点的加速度试验数据。本文选用 E 测点的试验数据,通过与滑移门模型相同测点仿真得到的数据进行对比分析。

测点 E 加速度仿真-实验曲线如图 3 所示。

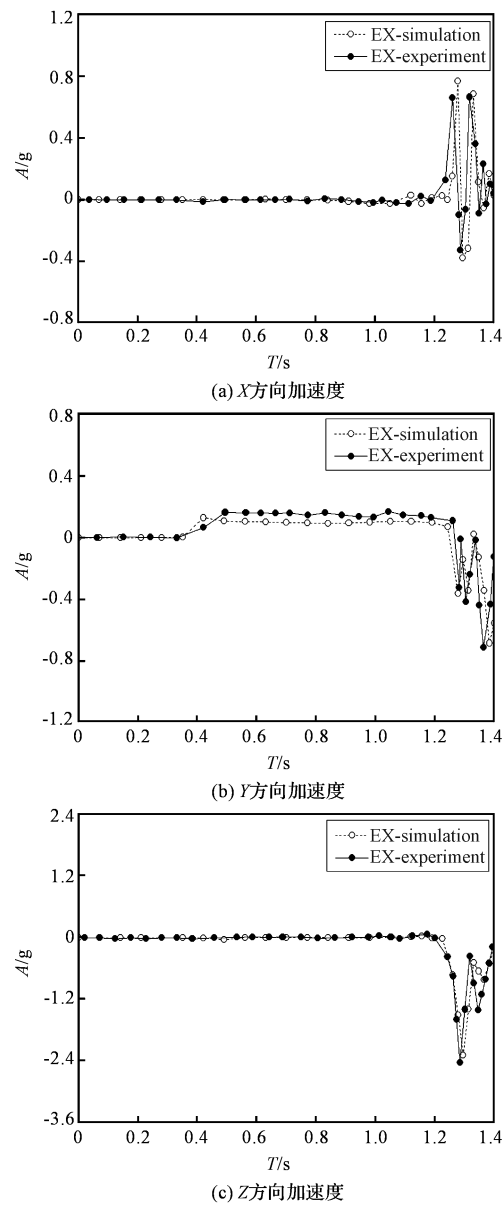


图 3 测点 E 加速度仿真-实验曲线

由图 3 可以看出:试验得到的加速度曲线与模型仿真得到的曲线趋势一致,对比加速度的峰值,仿真误差为 11.6%,表明该滑移门系统模型的仿真精度足够高,可以代替实际试验来指导滑移门平顺性的性能分析。

2 近似模型构建

2.1 滑移门运动机构参数化设计

由于滑移门系统的动力学特性较为复杂,本文基于滑移门系统中结构参数之间的函数关系,通过对上中下 3 条导轨和中下 2 个铰链的结构进行参数化设计,使得滑移门系统的仿真模型能够对预先设置好的可变参数组合进行自动仿真,得到滑移门系统在不同参数值下的仿真结果。导轨通过轨迹线生成,而轨迹线通过 Polyline 样条线功能创建,对样条线上各点的三维坐标进行参数化即可实现导轨的参数化设计,对导轨圆弧段进行 100 等分。其中,样条线上任意点的坐标为:

$$\begin{cases} XN_i = XR_i - R_i * \sin\left(\theta_i * \frac{N}{100}\right) \\ YN_i = YR_i + R_i * \cos\left(\theta_i * \frac{N}{100}\right) \end{cases} \quad (1)$$

导轨和铰链结构参数如图 4 所示。

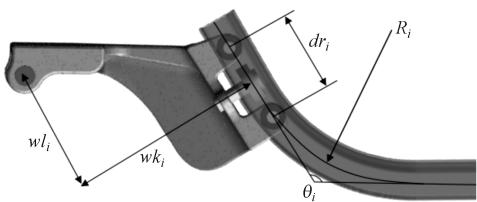


图 4 导轨和铰链结构参数

通过参数化导轨和铰链结构,可得到滑移门系统的 12 个设计变量,如表 1 所示。

2.2 设计变量筛选

本研究通过参数化滑移门系统的导轨和铰链得到设计变量,通过将 ADAMS/View 集成到多目标优化软件 Isight 中进行 DOE 试验设计,对影响滑移门动力学特性的 12 个结构参数进行灵敏度分析。

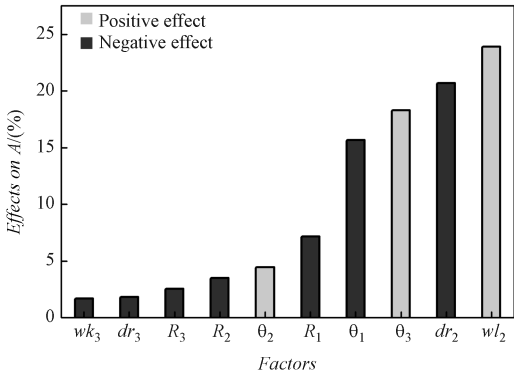
本文选取拉丁超立方进行抽样。其中,设置样本数量为 500 个,得到设计变量对中导向轮载荷峰值、滑移门质心加速度峰值,以及滑移门全开所需时间 3 个滑移门动力学特性指标的 Pareto 图^[7]。

根据影响程度排名的前 10 名滑移门运动平顺性影响因素的 Pareto 图,如图 5 所示。

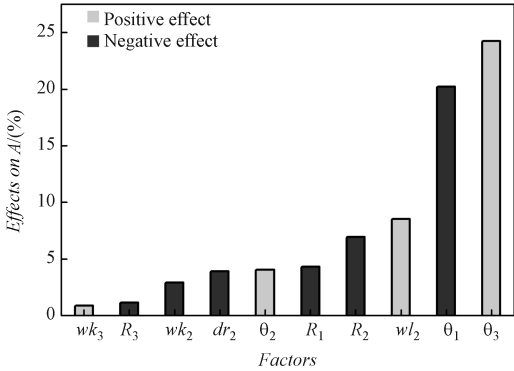
由图 5 可知:下铰链销与下导向轮中垂线的距离 wl_3 、中铰链销中心与导向轮中心连线的距离 wk_2 和下铰链销中心与导向轮中心连线的距离 wk_3 对各指标的影响均很小。本研究选取其余 9 个影响较大的结构参数作为设计变量,根据工程经验和文献[8],并考虑到实际加工过程中的不确定性,设定各设计变量均服从正态分布,变异系数为 0.01,取值范围如表 1 所示。

表 1 滑移门系统设计变量

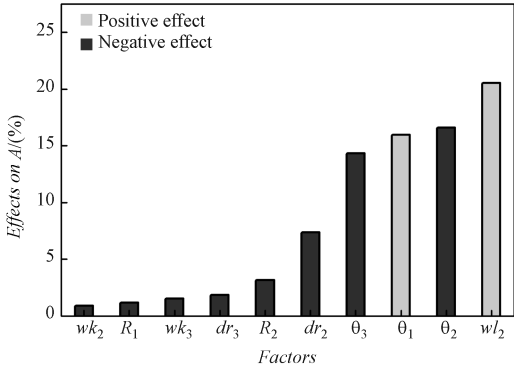
设计变量	描述	初始值	下限	上限	分布类型	变异系数
dr_2/mm	中导向轮间距	45	40	50	正态分布	0.01
dr_3/mm	下导向轮间距	50	40	60	正态分布	0.01
$\theta_1/({}^\circ)$	上导轨直线段夹角	153	150	156	正态分布	0.01
$\theta_2/({}^\circ)$	中导轨直线段夹角	117	114	120	正态分布	0.01
$\theta_3/({}^\circ)$	下导轨直线段夹角	155	152	158	正态分布	0.01
R_1/mm	上导轨圆弧半径	450	200	400	正态分布	0.01
R_2/mm	中导轨圆弧半径	100	80	120	正态分布	0.01
R_3/mm	下导轨圆弧半径	800	600	1 000	正态分布	0.01
wl_2/mm	中铰链销与导向轮中垂线的距离	60	50	70	正态分布	0.01
wk_2/mm	中铰链销中心与导向轮中心连线的距离	88	78	98	正态分布	0.01
wl_3/mm	下铰链销与导向轮中垂线的距离	42	32	52	正态分布	0.01
wk_3/mm	下铰链销中心与导向轮中心连线的距离	37	27	47	正态分布	0.01



(a) 中导向轮载荷峰值



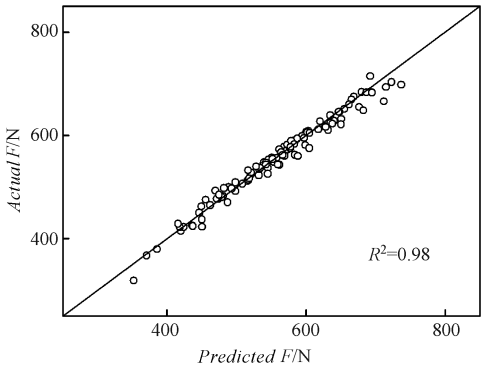
(b) 滑移门质心加速度峰值



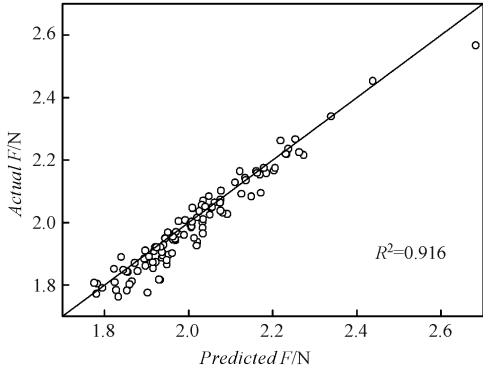
(c) 全开所需时间

图 5 滑移门运动平顺性影响因素 Pareto 图

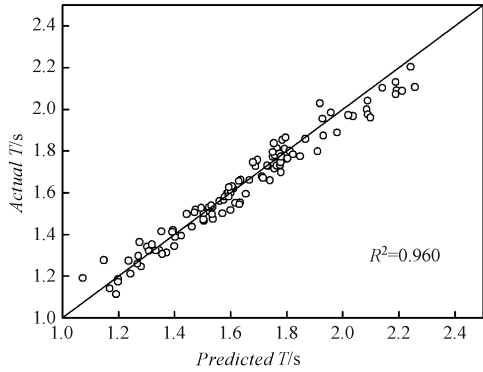
根据前面所得样本点数据,笔者对滑移门的中导向轮载荷峰值、滑移门质心加速度峰值和滑移门全开所需时间这 3 个动力学特性指标采用响应面方法进行拟合,所得拟合模型的精度如图 6 所示。



(a) 导向轮载荷峰值



(b) 滑移门质心加速度



(c) 全开所需时间

图 6 拟合模型的精度

2.3 响应面近似模型构建

本文采用响应面法来构建二阶响应面模型。

从图 6 中可以看出:中导向轮载荷峰值 F 、滑移门质心加速度峰值 A 和滑移门全开所需时间 T 的拟合优度 R^2 分别为 0.98、0.916 和 0.96,表明该近似模型达到了可以代替多体动力学模型的精度,后续优化工作将由二阶响应面模型来完成。

3 多目标稳健性优化

3.1 确定性多目标优化

中导向轮载荷峰值和滑移门质心加速度峰值过大都会对滑移门的运动平顺性造成恶劣影响。因此,本文以降低中导向轮载荷峰值 F 和滑移门质心加速度峰值 A 作为优化目标,将滑移门全开所需时间 T 小于

等于 1.8 s 作为约束条件,对应滑移门开启过程中的轻便性要求,建立多目标优化数学模型:

Variable: $R_i, \theta_i, dr_j, wl_j, wk_j$

Objective: $\min F, A$

s. t: $T \leq 1.8 \text{ s}$

$i = 1, 2, 3 \quad j = 2, 3$

(2)

本文采用第二代非支配遗传算法(NSGA-II),设定最大遗传代数为 30,群体规模为 16,对二阶响应面模型进行寻优求解,将得到的设计变量依次代入滑移门系统动力学分析模型中进行计算,得到确定性最优解。

初始值、确定性最优解和稳健性最优解如表 2 所示。

表 2 初始值、确定性最优解和稳健性最优解

变量	初始值	确定性最优解				6σ 稳健性最优解			
		结果	标准差 σ	σ 水平	可靠度	结果	标准差 σ	σ 水平	可靠度
dr_2/mm	45	48.20	0.482	8	1	43.42	0.434 2	8	1
dr_3/mm	50	60	0.62	8	1	58.26	0.582 6	8	1
$\theta_1/(\text{°})$	153	153	1.55	8	1	152.61	1.526 1	8	1
$\theta_2/(\text{°})$	117	119.35	1.193 5	8	1	118.64	1.186 4	8	1
$\theta_3/(\text{°})$	155	153.31	1.533 1	8	1	154.12	1.541 2	8	1
R_1/mm	450	230.58	2.302	8	1	240.62	2.406 2	8	1
R_2/mm	100	110	1.2	8	1	115.30	1.153 0	8	1
R_3/mm	800	950	9.5	8	1	943.56	9.435 6	8	1
wl_2/mm	60	65	0.62	8	1	62.09	0.620 9	8	1
T/s	1.95	1.78	0.19	2.51	0.952	1.76	0.142	8	1
F/N	561.7	324.5	2.86	—	—	357.56	1.84	—	—
A/g	1.64	1.24	1.03	—	—	1.25	0.53	—	—

由表 2 可知:中导向轮载荷峰值由 561.7 N 降到 324.5 N,降幅为 42.2%;滑移门质心加速度峰值由 1.64 g 降到 1.24 g,降幅为 24.4%;滑移门全开所需时间降为 1.78 s。由此可见,在满足约束条件的情况下,滑移门平顺性得到了明显的提升。

3.2 确定性优化方案的 6σ 质量分析

滑移门系统的确定性优化方案是通过将设计变量在约束条件下逼近约束边界来找到最优解,而在实际生产中,当设计变量的参数因不确定性因素如装备误差或制造误差发生扰动时,确定性优化方案可能会因为设计变量超出了约束条件,使得优化结果失效。因此,为了保证滑移门系统的优化结果的可靠性,需要对该优化方案进行 6σ 质量分析。

本文通过采用蒙特卡洛抽样法对确定性优化方案进行 6σ 质量分析^[9]。考虑到不确定因素对设计变量的影响,基于滑移门系统的响应面模型,采用描述性抽样方法进行 1 000 次抽样,得到关于滑移门系统的确定性优化方案的 σ 质量水平、标准差 σ 和可靠度(表

2)。其中,约束条件滑移门全开所需时间没有达到 6σ 质量水平,设计变量的可靠性远低于 99.999 999 8%,需要对滑移门的运动平顺性进行 6σ 稳健性优化。

3.3 6σ 稳健性多目标优化

本文采用 6σ 稳健性优化技术,通过减少滑移门系统设计变量的波动对优化目标的影响,从而降低目标函数的敏感度,提高优化方案结果的可靠性。其中,多目标稳健性优化的模型为^[10]:

$$\min [f_1(\alpha_{\mu 1}, \alpha_{\sigma 1}), f_2(\alpha_{\mu 2}, \alpha_{\sigma 2}), \dots,$$
$$f_i(\alpha_{\mu i}, \alpha_{\sigma i}) \dots, f_m(\alpha_{\mu m}, \alpha_{\sigma m})]$$
$$\text{s. t } \mu_{G_j} - n\sigma_{G_j} \leq C$$
$$x_L + n\sigma_x \leq x \leq x_U - n\sigma_x \quad (3)$$

式中: $f_i(\alpha_{\mu i}, \alpha_{\sigma i})$ —第 i 个目标的质量特性; m —产品质量特性的个数; σ_{G_j} —不同约束条件下的标准差; C —约束值。

n 为 σ 水平:当 n 设为 6 时,模型为 6σ 稳健性优化设计的数学模型。本研究以降低中导向轮载荷峰值和滑移门质心加速度峰值作为优化目标,滑移门全开所

需时间小于等于1.8 s作为约束条件,滑移门运动平顺性的稳健性优化模型如下:

$$\begin{aligned} & \min \mu(F) + 6\sigma(F) \\ & \mu(A) + 6\sigma(A) \\ \text{s. t. } & \mu(T) + 6\sigma(T) \leq 1.8 \text{ s} \\ \text{d. v. } & 40 + 6\sigma(dr_2) \leq \mu(dr_2) \leq 50 - 6\sigma(dr_2) \\ & 40 + 6\sigma(dr_3) \leq \mu(dr_3) \leq 60 - 6\sigma(dr_3) \\ & 150 + 6\sigma(\theta_1) \leq \mu(\theta_1) \leq 156 - 6\sigma(\theta_1) \\ & 114 + 6\sigma(\theta_2) \leq \mu(\theta_2) \leq 120 - 6\sigma(\theta_2) \\ & 152 + 6\sigma(\theta_3) \leq \mu(\theta_3) \leq 158 - 6\sigma(\theta_3) \\ & 200 + 6\sigma(R_1) \leq \mu(R_1) \leq 400 - 6\sigma(R_1) \\ & 80 + 6\sigma(R_2) \leq \mu(R_2) \leq 120 - 6\sigma(R_2) \\ & 600 + 6\sigma(R_3) \leq \mu(R_3) \leq 1\,000 - 6\sigma(R_3) \\ & 50 + 6\sigma(wl_2) \leq \mu(wl_2) \leq 70 - 6\sigma(wl_2) \quad (4) \end{aligned}$$

基于滑移门系统的二阶响应面近似模型,本文选取表1中9个设计变量作为噪声因素,采用第二代非支配遗传算法方法,对滑移门平顺性进行 6σ 稳健性多目标优化,得到稳健性优化结果。通过与初始值和确定性优化结果的对比可知:稳健性优化方案最优解的中导向轮载荷峰值和滑移门质心加速度峰值分别为357.56 N和1.25 g,相比于确定性优化方案最优解的324.5 N和1.24 g,增加33.06 N和0.01 g,但对比初始方案的561.7 N和1.64 g,降低了204.14 N和0.39 g,降幅分别为36.3%和23.8%,滑移门的运动平顺性优化效果仍旧显著;同时,质量水平从 2.51σ 提高到 8σ ,表明滑移门平顺性的动力学特性指标对不确定因素引起的设计变量波动的敏感度降低。

综上所述,两个优化方案的滑移门运动平顺性都得到了提高,但相比确定性优化方案结果,滑移门运动平顺性的稳健性优化方案结果具有更好的稳健性和可靠性。

4 结束语

(1)基于ADAMS/View软件,本文对建立的滑移门刚柔耦合仿真模型进行了多体动力学特性分析,通过开展台架试验,验证了滑移门多体动力学模型的可靠性,表明模型能够代替实际试验指导滑移门平顺性

的性能分析;

(2)基于滑移门系统运动机构之间的函数关系,运用ADAMS/View的参数化功能,对滑移门系统进行了参数化建模,通过ADAMS与Isight的联合仿真进行了灵敏度分析,揭示了影响滑移门运动平顺性的主要因素;

(3)建立了滑移门系统的二阶响应面模型,通过对滑移门运动平顺性的 6σ 稳健性优化,提高了滑移门的运动平顺性,降低了优化结果对不确定因素的敏感度,优化结果的可靠性和稳健性得到了提高。

参考文献(References):

- [1] CHEN Zi-ming, LI Luo-xing, WU Yun-long, et al. Study of the sliding door shaking problem and optimization based on the application of euler's spiral[J]. *SAE Int. J. Veh. Dyn., Stab., and NVH*, 2018, 2(3): 213-222.
- [2] WU Guang-qiang, FAN Guo-dong, GUO Jian-bo. Ri-de comfort evaluation for road vehicle based on rigi-d-flexible coupling multibody dynamics[J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2013, 3(1): 39-43.
- [3] 朱庆成,王军杰. 某微型车中滑门开启性能分析与优化[J]. *机械设计与制造*, 2011(6): 149-151.
- [4] 廖鸿胡,赵云飞,成艾国,等. 基于正交试验的汽车滑移门平顺性优化研究[J]. *机电工程*, 2010, 27(12): 49-52.
- [5] 高云凯,马干干,杜倩倩. 滑移门系统刚柔耦合多体动力学性能研究[J]. *汽车技术*, 2016(9): 1-3, 8.
- [6] 席敏,刘桂萍,雷飞,等. 考虑片间接触的汽车钢板弹簧动力学建模[J]. *汽车工程*, 2012, 34(8): 751-755.
- [7] 钱立军,丁玲,祝安定. 基于iSIGHT的薄壁直梁件抗撞性多目标优化[J]. *合肥工业大学学报:自然科学版*, 2014, 37(2): 145-149.
- [8] 刘鹏飞. 汽车滑移门系统的运动学和多刚体动力学建模与参数优化[D]. 上海:上海交通大学机械与动力工程学院, 2013.
- [9] 黄石华,成艾国,胡朝辉,等. 基于 6σ 稳健性的拼焊板车门轻量化研究[J]. *汽车工程*, 2011, 33(3): 262-266.
- [10] 莫旭辉,赵宇航,钟志华,等. 基于 6σ 稳健性方法的汽车行驶平顺性优化[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2012, 43(11): 4286-4292.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

张立强,钟泓骏,陈梓铭,等. 基于 6σ 稳健性方法的滑移门平顺性优化研究[J]. *机电工程*, 2019, 36(6): 584-589.

ZHANG Li-qiang, ZHONG Hong-jun, CHEN Zi-ming, et al. Robustness optimization of ride comfort for sliding door based on 6σ method[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(6): 584-589.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>