

文章编号:1005-0523(2019)01-0100-09

# 基于 DFSS 的汽车制动踏板感觉优化设计

谢敏松

(泛亚汽车技术中心有限公司,上海 201206)

**摘要:**基于 DFSS 方法,针对某车型开发过程中制动踏板感觉存在“偏软”的问题,对制动减速度低于 0.3 g 的制动工况下的制动踏板力和制动踏板行程进行优化设计。首先,通过用户新车性能调查数据及客户呼声,确定客户关注的性能指标;其次,通过制动性能试验获取上述性能指标与制动减速度的关系,并对试验结果进行分析确定目标值;然后,结合制动系统开发经验,通过普氏选择方法,确定制动系统配置的最优方案;最后,分析并确定控制因子和噪声因子,通过正交试验获得制动踏板力和制动踏板行程的优化值,并与目标值进行对比。结果表明,优化值和目标值有良好的吻合度,为后续优化提供了经济、有效的方法。

**关键词:**DFSS;制动踏板感觉;制动踏板力;制动踏板行程;优化设计

**中图分类号:**U463.5

**文献标志码:**A

随着汽车工业的不断发展,国内的汽车保有量节节攀升,用户对汽车的要求越来越高,汽车的制动性能作为车辆的安全性能之一一直被十分关注,而其中的制动感觉尤为如此<sup>[1]</sup>。制动踏板感觉是驾驶员对制动系统主观评价的一个重要因素。制动踏板感觉是驾驶员踩下制动踏板时,通过制动踏板力、制动踏板行程和制动状态对制动性能的主观感受。即使制动性能符合相关法规和设计的要求,制动踏板感觉仍会存在“偏软”或“偏硬”的问题,制动踏板感觉“偏软”对应着小的制动踏板力、长的制动踏板行程,以及较弱的减速能力,其优势在于中低速行驶时,制动力更容易把控,劣势在于紧急制动时需要更大的制动力和更长的制动踏板行程。制动踏板感觉“偏硬”则恰好相反<sup>[2]</sup>。

在某车型开发项目中,为了保证制动踏板力和制动踏板行程与制动减速度之间具有良好的线性关系且在汽车空载、满载状态下均具有良好的制动踏板感觉,需要对汽车制动踏板感觉进行优化设计<sup>[3-7]</sup>。

主观评价是最终的评判方式,在新车型开发过程中,占据着不可替代的重要作用。为了减少试验次数以及工程师调试的盲目性,更高效的解决问题,基于 DFSS 方法,在建立汽车仿真模型的基础上,进行汽车制动性能仿真试验,对影响因素进行预测,为制动踏板感觉优化提供指导方向。基于 DFSS 方法,优化后的设计方案可作为标准方案供后续开发项目参考,降低失效频度,提高设计可靠性。

针对某车型开发过程中制动踏板感觉存在“偏软”的问题,应用 DFSS 这一系统的业务改进方法体系,通过完整的 IDDOV 流程,即 Identify(识别机会)、Define Requirements(定义要求)、Develop Concept(开发概念)、Optimize Design(优化设计)、Verify & Implementation(确认和实施)来解决上述问题<sup>[8-12]</sup>。

## 1 识别机会

识别机会阶段是 DFSS 方法的第一个阶段,在该阶段主要为确保任务完成而设定计划。综合考虑了完成该项目所需的人工工时、样件费用以及试验认证费等,合理地制定了每个阶段的计划完成时间和主要工作,明确了团队成员的主要分工。

收稿日期:2018-06-18

作者简介:谢敏松(1983—),男,工程师,硕士,研究方向为底盘系统设计。

在某车型开发项目中,根据 J.D.Power 用户新车性能调查数据表明,该车型制动踏板感觉存在“偏软”问题。本文通过 DFSS 方法确定汽车制动踏板感觉的优化目标。根据中国用户汽车使用测量结果表明,中国用户在制动减速度低于 0.3 g 的制动工况下,制动踏板使用频率占有所有制动次数 99%以上。因此,本文仅对上述制动工况下的制动踏板感觉进行优化。

## 2 定义要求

### 2.1 客户呼声

针对外部和内部的客户呼声,将客户要求转变成工程指标,最终建立一套使客户满意、合理的性能指标。针对外部客户和内部客户对汽车制动踏板感觉的要求进行调研,制动踏板感觉客户呼声如表 1 所示。

表 1 制动踏板感觉客户呼声  
Tab.1 Voice of customers for brake pedal feel

客户分类		客户呼声
外部客户	车主	制动感觉迅速、有力
		制动无抖动
		制动无噪声
		制动无灰尘
内部客户	财务部门	制动系统低成本设计
	生产部门	制动系统相关零件设计轻量化
	项目团队	

### 2.2 目标确定

工程团队将开发车型和主要竞争车型作为优化目标群,采用制动踏板感觉评估打分的方式对开发车型和 6 款竞争车型的轻度、中度两种制动强度下的制动踏板力和制动踏板行程进行打分,并计算平均分。其中,5 分为最高分,1 分为最低分。选择分数最高两款车型作为汽车制动踏板感觉的优化目标。汽车制动踏板感觉评估如表 2 所示。

表 2 制动踏板感觉评估  
Tab.2 Evaluation of brake pedal feel

竞争车型评估	开发车型	竞争车型 A	竞争车型 B	竞争车型 C	竞争车型 D	竞争车型 E	竞争车型 F
轻制动踏板行程	3.25	3.90	3.36	3.23	3.29	4.25	2.78
中制动踏板行程	3.17	3.78	3.41	3.15	4.14	4.50	3.39
轻制动踏板力	3.25	4.00	3.40	3.23	3.85	4.38	2.78
中制动踏板力	3.33	4.10	3.50	3.31	4.00	4.38	3.22
平均分	3.25	3.94	3.42	3.23	3.82	4.38	3.04

### 2.3 目标转化

由表 2 可知,竞争车型 A 和竞争车型 E 为制动踏板感觉评估分数最高的两款车型。选择该两款车型进行制动踏板感觉指数的客观数据测量,并对制动减速度与制动踏板力、制动减速度与制动踏板行程分别进行拟合,拟合函数作为制动踏板力和制动踏板行程的优化目标。经实车试验,制动减速度与制动踏板力关系如图 1 所示,制动减速度与制动踏板行程关系如图 2 所示。

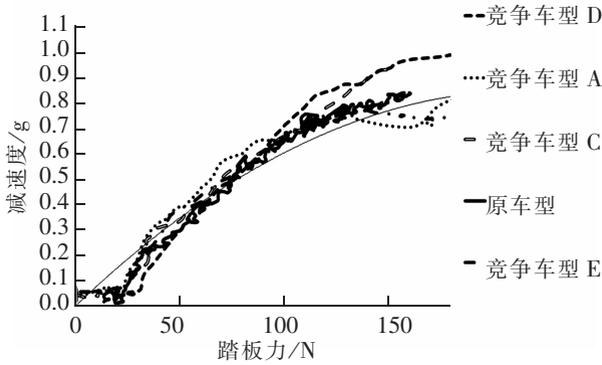


图1 制动踏板力和制动减速度图

Fig.1 Pedal force and deceleration

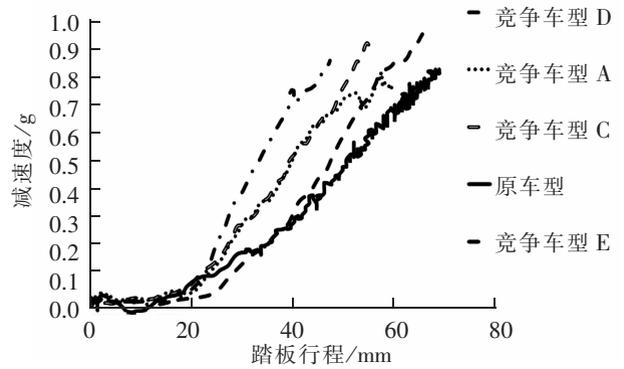


图2 制动踏板行程和制动减速度

Fig.2 Pedal travel and deceleration

目标制动踏板力与目标制动减速度的数学表达式为

$$y_1 = 0.3843 \ln(x) - 1.1214 \quad (1)$$

目标制动踏板行程与目标制动减速度的数学表达式为

$$y_2 = 0.3843x^2 - 0.04x + 0.3439 \quad (2)$$

式中: $y_1$ 为目标制动踏板力,N; $y_2$ 为目标制动踏板行程,mm; $x$ 为制动减速度,g。选择制动减速度0.05,0.1,0.2,0.3g下的制动踏板力和制动踏板行程作为汽车制动踏板感觉优化目标值,如表3所示。

表3 制动踏板感觉优化目标

Tab.3 Optimization target of brake pedal feel

制动减速度/g	制动踏板力优化目标值/N	制动踏板行程优化目标值/mm
0.05	21.1	14.5
0.1	24.0	21.5
0.2	31.1	29.6
0.3	40.4	34.1

### 3 开发概念

#### 3.1 方案选择标准

结合制动踏板感觉客户呼声及开发经验,制动系统方案选择应遵循如下标准:

- 1) 开发车型制动踏板感觉达到竞争车型最优水平;
- 2) 制动系统反应时间短;
- 3) 紧急制动踏板力小;
- 4) 制动系统设计成本低;
- 5) 制动系统设计重量小;
- 6) 制动噪声小;
- 7) 制动灰尘少;
- 8) 制动温度低;
- 9) 制动无抖动;
- 10) 制动可靠性好。

#### 3.2 开发设计方案

根据开发车型的设计参数及制动系统开发经验,整车重量与制动系统配置关系如图3所示。其中A1,A2代表不同的制动角;B1,B2代表不同的类型的摩擦片;C1,C2代表不同类型的助力器。制动系统配置如表4所示,制动系统4种方案如表5所示。

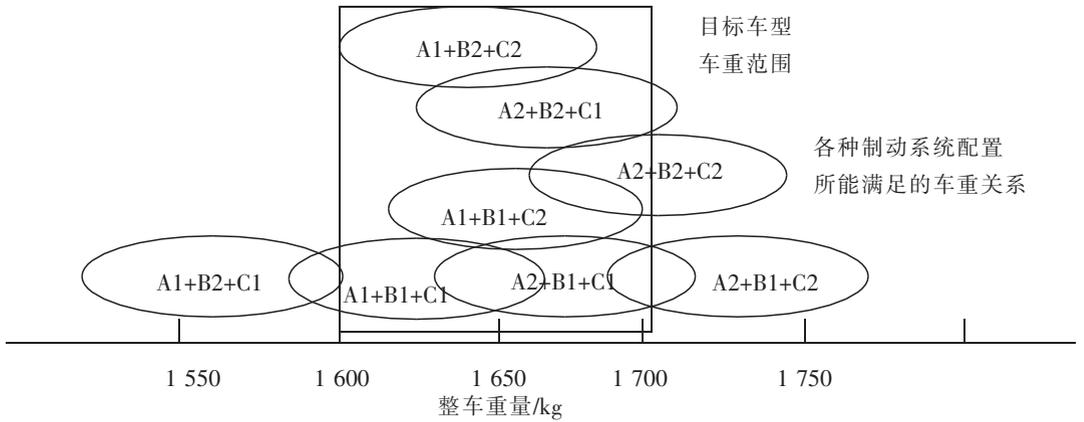


图 3 整车重量和制动系统配置

Fig.3 Vehicle mass and brake usage matrix

表 4 制动系统配置  
Tab.4 Brake usage matrix

类型	制动角	摩擦片	助力器
1	14°	低金属	10°单膜片
2	15°	NAO	7°+8°双膜片

表 5 开发车型制动系统方案  
Tab.5 Proposal selection of brake usage matrix

方案	制动角	摩擦片	助力器
P1	14°	低金属	7°+8°双膜片
P2	15°	低金属	10°单膜片
P3	15°	NAO	10°单膜片
P4	15°	NAO	7°+8°双膜片

3.3 设计方案对比

采用普氏选择方法对上述 4 种开发车型制动系统方案进行 2 轮选择,选出最优制动系统方案。评价技术要求包括:真空失效制动踏板力、紧急制动踏板力、制动踏板行程、成本、重量、噪声、制动灰尘、制动角温度。

第一轮普氏选择以方案 P1 为基准,将其他两种变化按照所列标准进行评判,如果现有方案优于方案 P1,则在相应表格里填“+”;若劣于方案 P1,则在相应表格里填“-”;若相同,则在相应表格里填“S”。第一轮普氏选择如表 6 所示。

表 6 第一轮普氏选择  
Tab.6 First run of the Pugh concept selection

技术要求	P1	P2	P3	P4
真空失效制动踏板力		+	+	+
紧急制动踏板力		+	+	+
制动踏板行程		-	-	-
成本		+	+	-
重量		-	-	-
噪声	基准	S	+	+
制动灰尘		S	+	+
制动角温度		+	+	+
S+(优势)		4	6	5
S-(劣势)		2	2	3
SS(相同)		2	0	0

表 7 第二轮普氏选择  
Tab.7 Second run of the Pugh concept selection

技术要求	P3	P4
真空失效制动踏板力		S
紧急制动踏板力		+
制动踏板行程		S
成本		-
重量		-
噪声	基准	S
制动灰尘		S
制动角温度		S
S+(优势)		1
S-(劣势)		2
SS(相同)		5

由表6可知,经过第一轮普氏选择,方案P3和方案P4为最优二方案,以方案P3为基准进行第二轮普氏选择,第二轮普氏选择如表7所示。

经过两轮普氏选择最终确定方案P3为后续进行仿真分析优化的方案。

## 4 优化设计

### 4.1 理想函数

驾驶员对制动踏板施加制动力,在真空助力器的作用下顶杆推动制动主缸运动,在制动管路内建立液压,推动制动器活塞压紧制动盘产生制动力矩。在理想状态下,根据能量守恒定律,驾驶员对制动踏板所做的功与汽车动能的改变量之间成线性关系。

### 4.2 控制因子及水平

制动系统中影响制动踏板感觉的因素包括:助力器增跳力、助力器助力比、制动钳刚度、制动钳回退特性、摩擦片压缩特性和软管膨胀量。各因素的影响压力区段和影响程度如表8所示。

本文仅对制动减速度低于0.3 g的制动工况下的汽车制动踏板感觉进行优化设计。因此,选择对低压力区段影响较大的助力器增跳力、助力器助力比和制动钳回退特性作为控制因子。控制因子及水平如表9所示,共有3个控制因子,每个控制因子3水平。结合设计经验选取助力器增跳力、助力器助力比3水平。制动钳回退特性由制动系统供应商设计方案确定,通常包括Type1和Type2两种方案。

表8 制动踏板感觉影响因素  
Tab.8 Influence factors of brake pedal feel

参数	助力器增跳力	助力器助力比	制动钳刚度	制动钳回退特性	摩擦片压缩性	软管膨胀量
影响压力区段/bar	0~10	0~80	5~200	0~10	5~100	0~100
影响程度	++	++	0	+	0	0

表9 控制因子及水平  
Tab.9 Control factors and signal levels

参数	$L_1$	$L_2$	$L_3$
助力器增跳力/N	200	400	600
助力器助力比	6	7	8
制动钳回退特性	Type 1	Type 2	Type 1

### 4.3 噪音因子及水平

制动系统中影响实际表现的主要因素包括:生产部门排气加液的抽真空水平、真空助力器起跳力、路面附着系数、真空度供给水平。考虑到路面附着系数通常高于0.8,真空度供给水平对制动减速度低于0.3 g的制动工况影响较小。

因此,本文选择生产部门抽真空公差范围和助力器起跳力工艺波动作为噪音因子,作为稳健性评价指标。噪声因子及水平如表10所示。

表10 噪音因子及水平  
Tab.10 Noise factors and signal levels

参数	$N_1$	$N_2$
抽真空公差范围/mbar	4	6
助力器起跳力/N	75	85

#### 4.4 正交试验设计

本文采用正交试验设计方法来进行试验优化设计。该方法是一种高效、经济的试验设计方法,其因子水平均衡搭配,数据点分布均匀,能大大减少试验分析的次数<sup>[14]</sup>。

根据现有控制因子、噪音因子的数量及水平,确定采用 L9 正交列表,如表 11 所示。其中  $X$  代表助力器增跳力, $Y$  代表助力器助力比, $Z$  代表制动钳回退特性。

表 11 试验正交列表  
Tab.11 Orthogonal arrays

试验	控制因子			噪音因子	
	$X/N$	$Y$	$Z$	$N_1$	$N_2$
1	200	6	Type1		
2	200	7	Type2		
3	200	8	Type1		
4	400	6	Type2		
5	400	7	Type1	1 水平	2 水平
6	400	8	Type1		
7	600	6	Type1		
8	600	7	Type1		
9	600	8	Type2		

#### 4.5 制动性能仿真试验

采用制动性能仿真软件对上述正交试验进行仿真实验,获取制动踏板力、制动踏板行程与制动减速度之间的关系分别如图 4,图 5 所示。

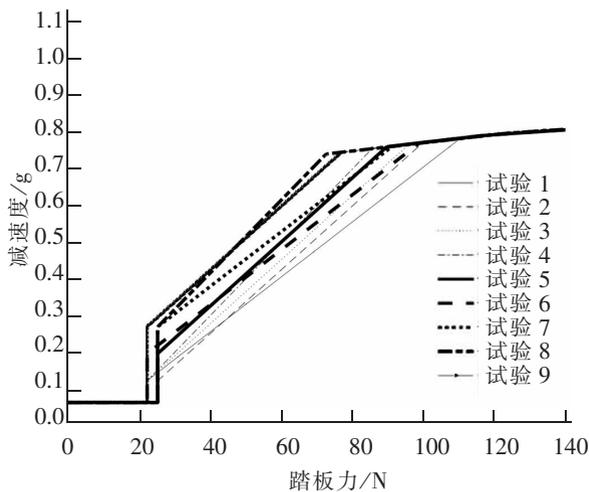


图 4 制动踏板力和制动减速度  
Fig.4 Pedal force and deceleration

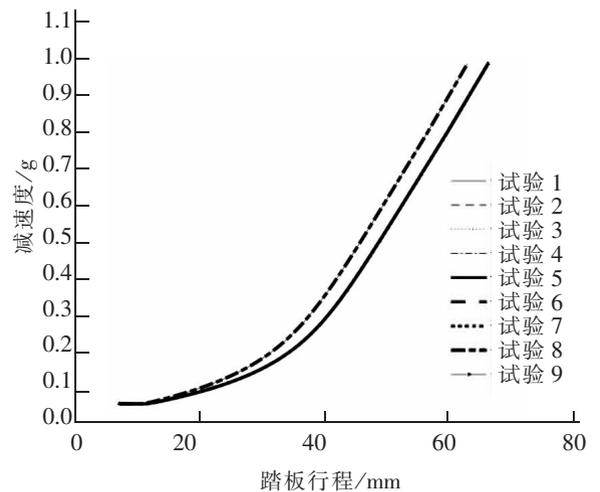


图 5 制动踏板行程和制动减速度  
Fig.5 Pedal travel and deceleration

#### 4.6 制动性能仿真试验结果分析

制动减速度为 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 g 的制动工况的试验结果分别如表 12, 表 13 所示。

表 12 制动踏板力和制动减速度  
Tab.12 Pedal force and deceleration

试验	制动减速度/g								信噪比	平均值
	0.05		0.1		0.2		0.3			
	$N_1$	$N_2$	$N_1$	$N_2$	$N_1$	$N_2$	$N_1$	$N_2$		
1	21.4	24.4	22.1	25.1	30.9	37.2	44.2	47.3	25.2	167.9
2	21.5	24.4	22.1	25.0	32.2	35.2	43.6	46.6	25.2	165.9
3	21.5	24.5	22.1	25.0	31.0	33.9	40.9	44.2	24.4	158.7
4	21.5	24.4	22.1	25.0	24.1	27.1	37.4	40.4	22.8	141.0
5	21.6	24.5	22.1	25.0	23.8	26.8	35.2	38.2	22.2	136.0
6	21.6	24.6	22.1	25.0	23.6	26.5	33.6	36.5	21.7	132.0
7	21.5	24.5	22.1	25.0	22.3	25.6	27.6	30.6	20.0	117.4
8	21.6	24.6	22.1	25.0	22.3	25.2	27.2	30.1	19.9	116.1
9	21.7	24.6	22.1	25.0	22.2	25.2	26.5	29.5	19.7	114.6

表 13 制动踏板行程和制动减速度  
Tab.13 Pedal travel and deceleration

试验	制动减速度/g								信噪比	平均值
	0.05		0.1		0.2		0.3			
	$N_1$	$N_2$	$N_1$	$N_2$	$N_1$	$N_2$	$N_1$	$N_2$		
1	13.1	15.9	20.9	24.0	31.7	35.0	37.6	41.0	27.0	149.8
2	14.0	16.8	23.0	26.1	34.6	37.9	40.5	43.9	26.9	161.8
3	14.0	16.8	23.0	26.1	34.6	37.9	40.5	43.9	26.9	161.8
4	12.6	15.4	23.0	26.1	34.6	37.9	40.5	43.9	27.3	161.3
5	12.6	15.4	23.0	26.1	34.6	37.9	40.5	43.9	27.3	161.3
6	11.8	14.6	20.9	24.0	31.7	35.0	37.6	41.0	27.4	149.4
7	11.1	13.9	23.1	26.2	34.5	37.8	40.5	43.9	27.6	160.8
8	11.9	14.7	21.0	24.1	31.6	34.9	37.6	41.0	27.4	149.4
9	11.1	13.9	23.1	26.2	34.5	37.8	40.5	43.9	27.6	160.8

制动踏板力信噪比图如图 6 所示,制动踏板力平均值图如图 7 所示。由图 6 和图 7 可知,方案 A1+B2+C1 可获得最优制动踏板力。结合制动系统设计经验, $X, Y, Z$  三因素中仅制动钳回退特性会对制动踏板行程产生影响。因此,制动钳活塞回退性能选择 1 水平(Type1),不再对制动踏板行程进行正交列表进行信噪比和平均值分析。

#### 4.7 最优设计预测和确认

根据已预测的最优设计方案, A1+B2+C1, 由于该方案不是正交列表中的组合方案, 需要对该方案的信噪比和平均值进行预测和确认, 如表 14 所示。

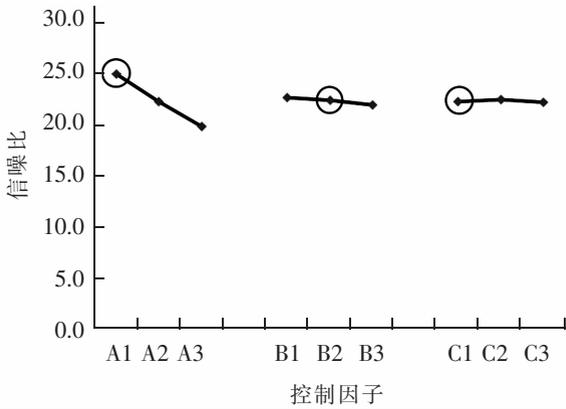


图 6 制动踏板力信噪比图

Fig.6 Brake force analysis of S/N plot

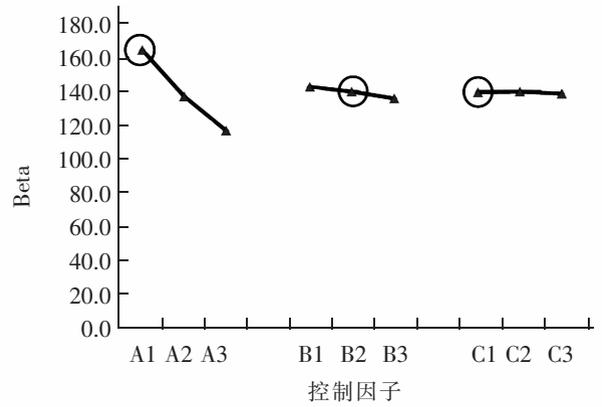


图 7 制动踏板力平均值图

Fig.7 Brake force analysis of  $\beta$  plot

表 14 最优设计预测与确认

Tab.14 The optimal design prediction and identification

项目	预测		确认	
	信噪比	平均值	信噪比	平均值
基准设计	22.2	136	22.2	136
优化设计	25.2	165.9	25.2	165.9
获益	3	29.9	3	29.9

## 5 确认

将制动踏板力和制动踏板行程的目标值和优化值进行对比。结果表明,上述两参数的目标值和优化值吻合度良好,制动踏板感觉目标参数确认如表 15 所示。

表 15 制动踏板感觉目标参数确认

Tab.15 Target identification of brake pedal feel

制动 减速度/g	制动踏板力/N				制动踏板行程/mm			
	目标	优化	偏差	累计偏差	目标	优化	偏差	累计偏差
0.05	21.1	21.5	0.4	2.8	14.5	12.6	-1.9	3.1
0.1	24.0	22.1	-1.9		21.5	20.9	-0.6	
0.2	31.1	32.2	1.1		29.6	31.7	2.1	
0.3	40.4	43.6	3.2		34.1	37.6	3.5	

## 6 结语

汽车制动踏板感觉是驾驶员对制动系统评价的一个重要因素。本文针对某开发车型中制动踏板感觉存在“偏软”的问题,基于 DFSS 方法,将客户呼声转变为可量化的工程指标;通过普氏选择的方法确定优化目标;通过制动系统仿真模型,结合控制因子和噪声因子,对制动踏板力和制动踏板行程与制动减速度的关系进行仿真;通过正交试验的方法,减少了试验次数,降低了研发成本。结果表明,基于 DFSS 方法获得的制动系统制动踏板力和制动踏板行程优化值与目标值吻合度良好。本文为制动踏板感觉优化提供了经济、有效的方法。

**参考文献:**

- [1] 石永金,袁旭亮,蔡晓斌. 乘用车制动踏板感觉的综合评价[J]. 上海汽车,2011(5):46-49.
- [2] 裴晓飞,董兴智,张灿明,等. 汽车制动踏板特性仿真及踏板感觉优化[J]. 汽车工程学报,2017,7(1):52-60.
- [3] 吴运明. 制动踏板感觉试验分析与评价[D]. 上海:同济大学,2012.
- [4] 刘苑. 乘用车制动力仿真研究[D]. 锦州:辽宁工业大学,2014.
- [5] 林志轩,高晓杰. 制动踏板感觉研究现状[J]. 农业装备与汽车工程,2007(6):4-7.
- [6] 王天利,刘苑,海超,等. 乘用车制动力仿真研究[J]. 农业装备与汽车工程,2013,51(11):32-35.
- [7] 黄健,扈静,蒋增强,等. 汽车制动踏板操纵力与行程分析系统研究[J]. 机械工程师,2009(5):51-53.
- [8] 郭峰. 6Sigma 设计在汽车设计中的应用[J]. 汽车工程,2006,28(10):891-896.
- [9] 朱正礼,杜建福,兰志波. DFSS 在新能源汽车电子产品开发中的应用[J]. 机械设计与制造,2012(2):253-255.
- [10] 冯楚胜. 六西格玛理论与实施[J]. 舰船科学技术,2007,29(3):140-142.
- [11] 宝祥. DFSS 项目选择方法研究[J]. 上海质量,2005(6):24-27.
- [12] 马彦辉,何桢. 基于 QFD、TRIZ 和 DOE 的 DFSS 集成模式研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2007(1):17-20.
- [13] 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.

## Automobile Brake Pedal Feel Optimization Based on DFSS

Xie Minsong

(Pan Asia Technical Automotive Center Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

**Abstract:** Based on the method of the design for six sigma (DFSS), the brake pedal force and brake pedal travel was optimized in the condition of the brake deceleration speed below 0.3 g, to solve the softness of the brake pedal feel in the vehicle development. Firstly, the survey data of users' new cars performance and the voice of customer (VOC) were used to obtain the customer concerning performance index. Secondly, the relationship between the above index and the brake deceleration was acquired by means of brake performance tests. The experimental result was analyzed to ensure target values. Thirdly, the optimal plan for brake system was determined by development experience as well as the Pugh concept selection. Finally, the control factors and noise factors were analyzed and identified. The optimal values of the brake pedal force and brake pedal travel were obtained by orthogonal experiment. The result showed that the optimal values were well consistent with the target values, which may provide an economical and effective way to optimize brake pedal feel further.

**Key words:** DFSS; brake pedal feel; pedal force; pedal travel; optimization