

基于响应面方法的乘员坐姿优化

王 娅,陶海燕,袁侠义

广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院,广州 510640

摘要 随着人机工程学的发展以及消费者对商品的舒适性要求的提高,汽车人机工程学越来越被重视。为了在设计最初阶段确定舒适的乘员乘坐姿态,首先利用 RAMSIS 软件建立人体模型,根据最初的设计参数模拟乘员乘坐姿态,分析当前姿态下的舒适性;然后利用全因子试验设计方法设计 2 因素 6 水平试验 36 次,根据试验数据,运用响应面方法(RSM)拟合出回归模型;最后将回归模型进行显著性分析,应用回归模型得到优化变量及优化目标的最优值。研究结果表明,优化后不舒适度减少 13.3%,舒适性明显提高。

关键词 舒适性;乘员坐姿;全因子试验设计;响应面方法

中图分类号 TP391.9

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.33.002

Optimization of Passenger Sitting Posture Based on RSM

WANG Ya, TAO Haiyan, YUAN Xiayi

Automotive Engineering Institute, Guangzhou Automobile Group Co. Ltd, Guangzhou 510640, China

Abstract For the modern industrial technology, people are trying to find a optimal design to reduce cost and time. Ergonomics is an essential issue to consider in design. To make sure the comfort of passenger car is preferable, it must design optimal passenger sitting posture in the concept design period. This essay provided a method about optimal design in layout passenger sitting posture. It builds a virtual prototype which includes manikin and auto body in RAMSIS to simulate actual passenger sitting posture, and then it analyzes the comfort. Based on these analyses, it chooses back angle of passenger and seat height as variable and the overall discomfort as target value. The experiment was been designed according the method of full factorial design. So the experiment includes 36 trials with two factors and six levels of each factor. And then the object function is estimated by using Response Surface Methodology (RSM). The significance analysis also was been studied. The analysis showed that the model is significant in the significance level of 1%. The optimal passenger sitting posture was got from the object function in Matlab. The discomfort of passenger has decreased 13.3%. The passenger comfort has been improved remarkably.

Keywords comfort; passenger sitting posture; full factorial design; RSM

0 引言

在现代社会中,无论是科学研究还是工程设计都把实现过程和目标的最优化作为一项重要原则,即希望高效率地找出问题在一定条件下的最优解。传统的求解全局最优的方法相对较少,且多数依赖于求局部最优。试验优化属于直接优化和全局优化,是应用数学的一个新兴分支。试验优化从不同的良性出发,合理设计试验方案,有效控制试验干扰,科学处理试验数据,全面进行优化分析,直接实现优化目标。试验设计的目的是拟合出回归模型,因此综合回归分析与试验设计的方法又称为回归分析。回归分析是数理统计学科的一个新分支,产生于 20 世纪 50 年代,它将方案设计、数据处理与

回归方程的精度统一起来进行优化,已成为现代通用的一种试验优化技术。将回归的模型拟合成响应面模型的方法称为响应面方法^[1]。

人机工程学是 20 世纪 70 年代发展起来的新学科,主要研究人与机械之间的关系,广泛应用于汽车等与人有关的工程中。机械的运动是有规律的,而人的活动及其尺寸是无规律的,对汽车的人机工程学主要应用数理统计的方法,从概率中寻求规律^[2]。

汽车的最终用户是人,因此汽车的人机工程学成为评价汽车产品的重要因素,在设计各个阶段都需要考虑人机工程学。驾驶员及乘员的坐姿是汽车产品设计的根本,坐姿设

收稿日期:2012-07-20;修回日期:2012-09-17

作者简介:王娅,工程师,研究方向为整车总布置及人机工程,电子信箱:wangya0415@126.com

计是否合理对整个产品的人机性能尤其重要。大多数汽车产品前排驾驶员与副驾驶员的座椅都是可调的,驾驶员可以根据自身尺寸调节到合适的尺寸^[2],但是后排乘员的座椅大多数是固定的,因此在设计初期确定合理的坐姿将影响整车后排乘坐的舒适性。传统的设计方法是根据整车的市场定位及相关尺寸确定坐姿,然后利用数据制作物理样机,根据不同人群的主观评价再进行修改和评价,这一过程需要耗费大量财力、物力和时间,且无法定性分析某一尺寸的合理与否。早在 20 世纪 90 年代中期,RAMSIS 软件就应用于德国的汽车工业^[3],Assmann 等提出在 RAMSIS 中应用视频测试系统对驾驶员的姿势和用户交互界面进行评估^[4]。随着汽车自主研发能力的提升,国内在 21 世纪初开始对 RAMSIS 在人体工程学中的基本应用进行研究^[5],随后,汽车工程师开始应用 RAMSIS 对汽车视野进行研究和分析^[6-8]。

RAMSIS 软件将人机工程学理论应用到汽车设计中,可对人体舒适性进行分析。本文在概念设计阶段采用 RAMSIS 软件对人体的乘坐舒适性进行分析,并通过全因子试验得出多组试验数据,应用响应面方法对试验数据进行最小二乘法的回归,得出响应面模型。根据优化理论针对响应面模型进行最优计算,从而得出最优的乘员坐姿。

1 乘员模型的建立

根据市场定位,选取 2012 年国内 18—70 岁人群中的 95%分位男性作为后排乘员布置的基准,其人体尺寸见表 1,人体模型见图 1。

表 1 95%分位男性人体尺寸
Table 1 95% male dimensions

人体尺寸	数值/mm
站姿高度	1847.7
坐姿高度	1001.6
头部高度	235.79
头部宽度	166.89
头部前后长度	205.13
脖子长度	97.63
肩部宽度	516.65
上臂长度	375.79
小手臂与手长度	487.93
胸部宽度	347.67
腰围	1006.9
骨盆宽度	332.5
臀部宽度	366.85
臀部至膝盖的长度	613.03
坐姿时膝盖的高度	547.9
脚离地高度	81.82
脚的长度	273.24
脚的宽度	111.09
上臂围长	258.36
小腿围长	342.07
大腿围长	528.84

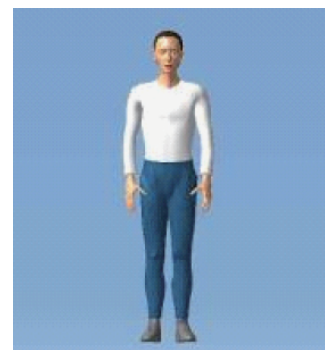


图 1 95%分位中国男性模型

Fig. 1 95% China male model

2 乘员坐姿舒适性分析

2.1 评价方法

舒适性是与一定的任务相联系的,在 RAMSIS 软件中,不舒适性是通过对其某项任务的姿态进行不舒适度分析来评价的。不舒适度的比较只能是某一项任务或姿态的单一比较,共分成 8 级。总的舒适度是对各个关节的不舒适度加权值,不舒适数值越小,对应着人的主观感觉越舒适。

2.2 仿真分析

根据相关参数(即第 2 排乘员靠背角 $A40(25^\circ)$ 和第二排座椅参考点离地板的垂直高度 $H30(380\text{mm})$),在 RAMSIS 软件中模拟乘员乘坐的姿态(图 2),对其舒适性进行分析。



图 2 乘员乘坐姿态

Fig. 2 Passenger sitting posture

在 RAMSIS 模拟中乘员坐姿不舒适度见表 2。在设计过程中,整体不舒适度低于 2.5 时是非常好的设计,低于 3.5 时是可以接受的状态。本文中整体不舒适度为 3.0,属于可接受状态,但是还需要继续优化。

3 基于响应面的优化

3.1 响应面方法

响应面方法(RSM)是数学方法和统计方法相结合的产品,用来对所感兴趣的响应受多个变量影响的问题进行建模和分析,其最终目的是优化该响应值。响应面方法在指定的设计点集合内进行连续试验,并在设计空间中构造输出变量的全局逼近。优化过程中,它仅关注系统输入与输出间的关

表 2 乘员坐姿不舒适度

Table 2 Discomfort of passenger sitting posture

项目	数值	
整体不舒适度	疲劳度	2.2
	不舒适度	3.0
身体各部分不舒适度	颈部	1.9
	肩部	1.4
	背部	1.4
	臀部	1.5
	左腿	1.3
	右腿	1.3
	左臂	2.0
	右臂	2.0
脊柱健康指数	6.4	

系,依靠目标函数本身的性质确定最优解,采用最小二乘法回归模型,拟合出精度高的响应关系,具有良好的稳健性。

对具有输入和输出的系统,响应 y 和输入 x_1, x_2, \dots, x_n 之间存在着函数关系式,即

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

由于模型较复杂,式(1)的显式表达式难以明确写出结果,通常用在自变量某个范围内的二次模型近似表示^[9],即

$$y=\beta_0+\sum_{i=1}^k \beta_i x_i+\sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2+\sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j+\varepsilon \quad i < j \quad (2)$$

式中 x 为自然因素, β 为自然因素的回归系数, ε 为随机误差,服从正态分布,均值为 0,方差为 σ^2 。

二次函数在设计空间内是二次曲面,也就是响应面逼近系统的输入和输出之间的函数关系。响应面方法以拟合面的方式进行,如果拟合面与 f 充分近似,则拟合面的分析近似等于实际系统的分析。如果选用适当的试验数据,可有效估计模型参数^[9]。

3.2 目标函数

在 RAMSIS 中不舒适度值越小,舒适性越好,因此选取不舒适度 (d) 为目标函数,即目标值越小,舒适性越好,可表示为 $\min(d)$ 。

3.3 优化变量选取及约束条件

影响目标函数值的因素为乘员胯点到车身地板的垂直距离 $H30$ 及乘员的靠背角 $A40$,因此选择这 2 个参数作为优化变量。根据设计经验及整车结构的限制,确定优化变量的约束条件为 $20 \leq A40 \leq 30, 250 \leq H30 \leq 405$ 。

为了便于矩阵计算,把优化变量表示为变量 X_1, X_2 ,其最小值均为 -1,最大值为 1,即 $-1 \leq X_1 = \frac{A40-25}{5} \leq 1, -1 \leq X_2 = \frac{H30-327.5}{77.5} \leq 1$ 。

3.4 全因子试验设计

对 2 个因子,每个因子设 6 个水平,共进行 36 次试验,试

验设计见表 3。

表 3 全因子试验设计

Table 3 Design of full factorial experiment

序号	X_1	X_2	序号	X_1	X_2
1	-1	-1	19	0.2	-1
2	-1	-0.6	20	0.2	-0.6
3	-1	-0.2	21	0.2	-0.2
4	-1	0.2	22	0.2	0.2
5	-1	0.6	23	0.2	0.6
6	-1	1	24	0.2	1
7	-0.6	-1	25	0.6	-1
8	-0.6	-0.6	26	0.6	-0.6
9	-0.6	-0.2	27	0.6	-0.2
10	-0.6	0.2	28	0.6	0.2
11	-0.6	0.6	29	0.6	0.6
12	-0.6	1	30	0.6	1
13	-0.2	-1	31	1	-1
14	-0.2	-0.6	32	1	-0.6
15	-0.2	-0.2	33	1	-0.2
16	-0.2	0.2	34	1	0.2
17	-0.2	0.6	35	1	0.6
18	-0.2	1	36	1	1

3.5 模型拟合与检验

3.5.1 模型拟合

本文的设计变量为 2 个,近似模型为

$$Y=\beta_0+\beta_1 X_1+\beta_2 X_2+\beta_3 X_1^2+\beta_4 X_2^2+\beta_5 X_1 X_2+\varepsilon \quad (3)$$

根据试验结果,获得不同变量 x_i 的水平值组合下的系统响应值 y_i ,用二次多项式模拟作为输入和输出的实际函数 $f(x)$ 的近似模型,根据最小二乘法原理对这些数据进行拟合。

二阶响应面的回归系数 β 的最小二乘估计值为

$$\hat{\beta}=(X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4)$$

得到回归模型为

$$Y=2.9087-0.15 X_1-0.1310 X_2-0.0577 X_1^2+0.0986 X_2^2-0.0398 X_1 X_2 \quad (5)$$

3.5.2 显著性水平

通过二阶统计模型的显著性检验该模型参数假设的正确性,计算可得此回归模型的回归平方和、误差平方和以及检验统计量等。显著性方差分析见表 4。

表 4 显著性方差分析

Table 4 Significance variance analysis

来源	平方和	自由度	均方	F
回归	0.753	5	0.151	25.3
误差	0.179	30	0.00596	
总和	0.932	35		

查表可得 $F_{0.001(5,30)}=5.53$,由于 $F_{0.001(5,30)} < F$,因此该统计模型在显著性水平为 1% 时是显著的,即该模型能较好地拟合

仿真试验数据。

3.6 优化结果

通过拟合得出二次目标函数,运用最小二乘法对目标函数在可行域内进行优化,使该函数取得最小值。优化目标和优化变量优化前后的数值见表5。从仿真结果可以看出,本文所采用的优化方法切实可行,乘员坐姿的不舒服度由优化前的3.0降到2.6,使舒适性提高了13.3%。

表5 优化前后目标函数值和变量值
Table 5 Object function and variable values before and after optimization

项目	优化前	优化后	优化量/%	
疲劳度	2.2	2.1	4.5	
整体不舒服度	3	2.6	13.3	
颈部不舒服度	1.9	1.6	15.8	
肩部不舒服度	1.4	1.4	0	
背部不舒服度	1.4	1.2	14.3	
目标函数	臀部不舒服度	1.5	1.2	20
	左腿不舒服度	1.3	1.3	0
	右腿不舒服度	1.3	1.3	0
	左臂不舒服度	2	1.6	20
	右臂不舒服度	2	1.6	20
	脊柱健康指数	6.4	6.5	1.6
优化变量	A 40/(°)	25	30	20
	H 30/mm	380	395	3.9

4 试验验证

根据相关设计数据制作物理样机,选择5%分位女性,50%分位男性以及95%分位男性分别对优化前后座椅的舒适性进行主观评价(图3),一致认为优化后较优化前舒适,验证



图3 优化结果试验验证

Fig. 3 Experimental verification of optimization results

了仿真的正确性。

5 结论

本文利用RAMSIS软件建立了乘员坐姿模型,运用全因子试验设计方法设计6水平试验,结合响应面方法拟合了二次响应面模型,使乘员坐姿的不舒适度由优化前的3.0降到2.6,坐姿舒适性提高了13.3%。本文中所涉及变量的选择和优化方法对其他类型车辆的设计同样具有一定的参考价值。

参考文献 (References)

- [1] 王娅,谷正气,李伟平,等.基于响应面方法的某智能SUV平顺性优化[J].机械科学与技术,2010,29(3):373-378.
Wang Ya, Gu Zhengqi, Li Weiping, et al. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(3): 373-378.
- [2] 谷正气.汽车车身现代技术[M].北京:机械工业出版社,2009.
Gu Zhengqi. Modern technology of vehicle body[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2009.
- [3] Seidl A, Speyer H, Kruger W, et al. RAMSIS—A new CAD-tool for ergonomic analysis of vehicles developed by order of the German automotive industry[C]//Andreas Seidl-Tecmath GmbH. Vehicle Comfort and Ergonomics. Bologna: Andreas Seidl-Tecmath GmbH, 1995: 247-255.
- [4] Assmann E, Kolling J. A video-based measuring system within RAMSIS for evaluating driver's posture and user interface[C]//Andreas Seidl-Tecmath GmbH. Vehicle Comfort and Ergonomics. Bologna: Andreas Seidl-Tecmath GmbH, 1995: 281-290.
- [5] 吕景华.轿车人体工程设计一般方法的研究[J].汽车技术,2002(10):1-5.
Lu Jinghua. Automobile Technology, 2002(10): 1-5.
- [6] 周昊. Ramsis 眼点在汽车设计中的应用[J].汽车技术,2004(9):8-11.
Zhou Hao. Automobile Technology, 2004(9): 8-11.
- [7] 杜子学,伍毅.乘用车A柱盲区的校核方法[J].汽车工程师,2012(1):34-38.
Du Zixue, Wu Yi. Auto Engineer, 2012(1): 34-38.
- [8] 卢齐,苏楚奇,周权,等.基于RAMSIS的轿跑车视野分析[J].汽车科技,2011(4):28-32.
Lu Qi, Su Chuqi, Zhou Quan, et al. Automobile Science & Technology, 2011(4): 28-32.
- [9] 陈魁.试验设计与分析[M].北京:清华大学出版社,1996.
Chen Kui. Experiments design and analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.

(责任编辑 孙秀云,马骁骁)

《科技导报》“书评”栏目征稿

“书评”栏目发表图书评论文章,被评论的图书以高级科普、学术专著及科学文化图书为主,兼顾科学精神、科学方法、科技哲学、科学人文、科学家传记、经典科学著作、科学通俗读物、科学道德等内容。欢迎投稿,择优刊登。每篇书评以2100字左右为宜,需配书影,并含书名、作者、出版单位、出版年份、定价等信息。栏目责任编辑:陈广仁,投稿邮箱:chenguangren@cast.org.cn。