

基于人体工程学的汽车座椅舒适性开发与评估

汤波

(诺创汽车科技(上海)有限公司 上海 201804)

摘要: 基于人体工程学相关研究,在汽车座椅开发过程中对骨架、悬架和发泡等与乘坐舒适性相关的座椅部件进行设计优化,以达到符合目标的舒适性能。最后,通过静态舒适性评估和动态舒适性评估,将较为主观的舒适性感受,转化为客观能够量化的指标,从而有效地评估汽车座椅的乘坐舒适性。

关键词: 人体工程学;静态舒适性;动态舒适性;挠度;模态

0 引言

随着智能驾驶技术的提升, L2 级和 L3 级辅助驾驶,以及未来的 L5 级智能驾驶的应用,汽车座椅的被动安全性逐渐让步于整车的主动安全性,车内乘员可以得到更有效的保护。驾驶员可以部分时间或者全部时间由车辆接管车辆的驾驶,驾驶员可以在车内进行工作或者休息,因此座椅的舒适性越发重要。此前业内专家学者已经从不同角度提出汽车座椅舒适性开发方法,主要基于人体的几何尺寸来实现座椅的舒适性。在实践中,这些方法的不足之处在于几何尺寸并没有从舒适性的机理来提供理论支撑,对设计的指导意义不够;同时由于几何尺寸基本来自 SAE 假人,与不同市场的人体尺寸相差较大,基于此开发的座椅舒适性不能得到很好的认可。本文阐述如何根据人体骨骼和肌肉等生理机能相关研究来指导座椅舒适性开发,并设计出相应的静态舒适性评估和动态舒适性评估方法,对座椅的舒适性进行全面的评估,从而可以有效地指导座椅舒适性设计,并且能够用客观与主观相结合的舒适性评价方法来评估舒适性;更进一步提出建立舒适性数据库提升企业在舒适性开发上的经验积累,指明舒适性问题改善的方向。

1 座椅舒适性开发

座椅舒适性主要包括 5 方面性能:

- 身体支撑性
- 轮廓贴合性
- 姿态保持性
- 活动便利性

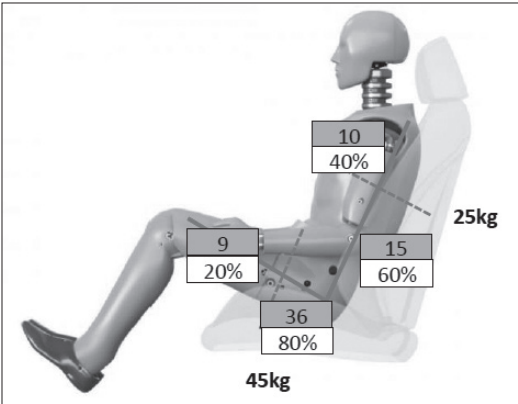


图 1 正常乘坐时坐垫和靠背的重量分配

• 振动过滤性

1.1 身体支撑性

身体支撑性指乘客在放松的乘坐位置上时,脊椎能处于自然的曲线,没有额外的受力,臀部支撑没有塌陷,没有异物感。根据我们的研究, HIII 假人在正常乘坐姿态时,座椅靠背上承载约 25kg,其中靠背上部承载 10kg,靠背下部承载 15kg;座椅坐垫上承载约 45kg,坐垫后部承载 36kg,坐垫前部承载 9kg。

在座椅总成上,主要承载和提供支撑性的部件是坐垫悬架和靠背悬架,一般用挠度来评估悬架的支撑特性。基于上文的坐垫和靠背负载研究,我们可以在坐垫悬架挠度曲线上选择 36kg(353N) 对应的变形量作为坐垫悬架的挠度标准值,在靠背悬架挠度曲线上选择 15kg (147N) 作为靠背悬架的挠度标准值。

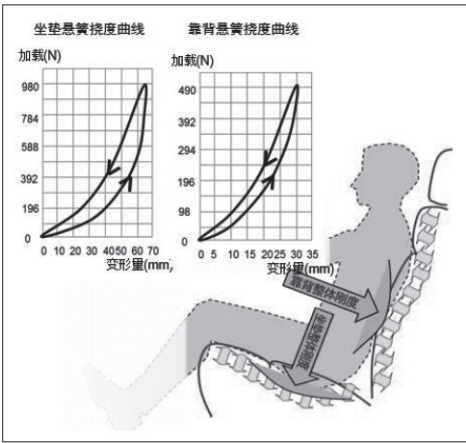


图 2 坐垫悬架和靠背悬架的挠度曲线

1.2 轮廓贴合性

人体与座椅的贴合性表现在纵向和横向两个方面。纵向主要体现在靠背上,由于人体背部主要支撑是由脊柱来实现,因此在座椅靠背的设计中需要充分考虑到人体的这个生理特点。如图 3 所示,在良好的坐姿下,脊柱的腰椎部分前凸,而至骶骨时则后凹。压力适当地分布于各椎间盘上,肌肉组织上承受均匀的静负荷。而在非自然坐姿下,椎间盘压力分布不正常,形成压力梯度,严重时会将椎间盘从腰椎中挤出来,压迫中枢神经,产生腰部酸痛、疲劳等不适的感觉。

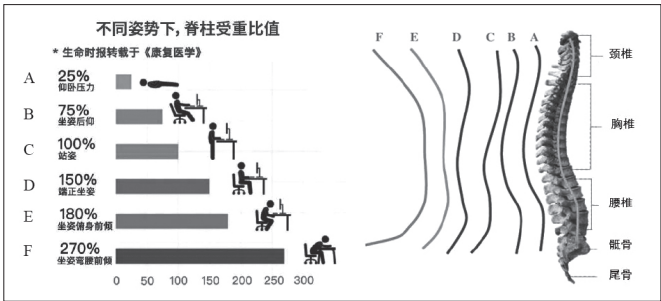


图 3 脊柱受力与乘坐姿态关系

横向贴合性需要考虑到人体的外形轮廓。如图 4 所示, 市场上绝大部分座椅都是中间略微凸起, 行业内称为 concave (凸起), 一般凸起约 3mm 左右。这个凸起是因为座椅面套主要为手工包覆, 由于工艺条件限制, 为实现包覆后座椅外观精致性而不得不做出的妥协。然而人体的轮廓横向断面正好与之相反, 中间凸起较高, 呈反弧形, 故此在这里发生了舒适性与工艺以及精致性的冲突。解决方案是通过开发新的面套包覆工艺, 使造型在这个区域 (横向截面) 即使有内凹, 面套仍然可以很好的与发泡相贴合, 降低精致性风险, 同时保证良好的人体轮廓贴合性。

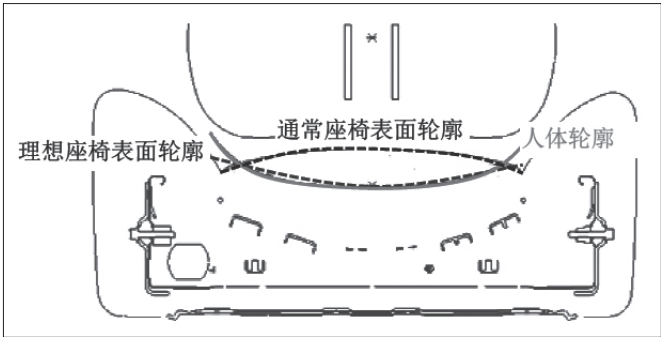


图 4 人体与座椅横向贴合关系

1.3 姿态保持性

由于汽车在行驶过程中存在很多不确定性, 如图 5 所示, 在车辆急加速、急刹车、急速转弯等操作时, 乘员特别是驾驶员会受到比较大的离心力, 这就需要汽车座椅提供良好的姿态保持性, 以保证乘客和驾驶员的姿态不产生较大的变化, 而这种变化会带来强烈的不舒适感。

其中车辆加速和减速人体产生的重心变化在 1.1 中身体

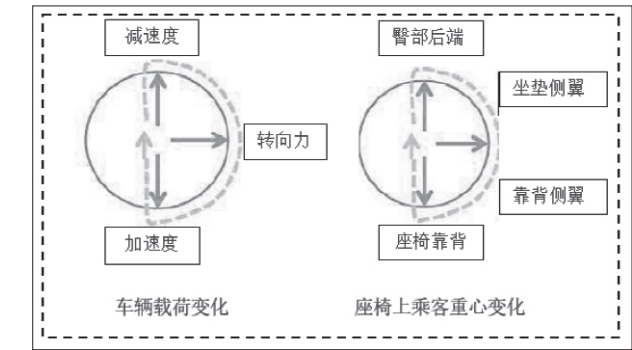


图 5 车辆运动载荷与身体动态载荷变化

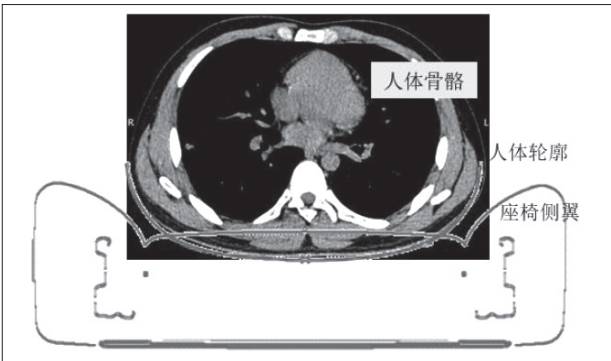


图 6 人体与座椅侧翼关系

支撑性中已经由坐垫和靠背悬簧的挠度来进行保证。车辆转向中产生转向力, 则主要如图 6 所示, 由座椅的侧翼来提供支撑。侧翼的乘客姿态保持性能由座椅景中的宽度以及侧翼的高度两个影响因素共同保证。景中过宽, 则乘客在车辆转向时会发生滑移, 导致侧翼支撑介入过迟; 景中偏窄, 则在正常乘坐时, 背部两侧有夹背感。

文献中提到坐垫景中宽度建议值为 340 ~ 380mm, 坐垫侧翼高度 45 ~ 60mm。在实践中我们发现, 对于坐垫和靠背的姿态保持性能, 有如下更合适的推荐值。

1.4 活动便利性

活动便利性主要是因为驾驶员或者乘客在上下车或者正常驾驶过程中, 人体会有一定的活动空间要求, 如图 7 所示, 座椅设计时需要考虑的这些要求:

- 便于乘员上下车
- 驾驶员易于踩到踏板
- 驾驶员上肢自由活动
- 乘员头部自由活动

根据多款车型的统计数据, 得到以下推荐值, 用于保证活动便利性。

表 1 姿态保持性能推荐设计值				单位 mm
坐垫景中宽度	坐垫侧翼高度	靠背景中宽度	靠背侧翼高度	
320 ~ 350	25 ~ 40	285 ~ 310	40 ~ 80	

表 2 活动便利性推荐设计值					单位 mm
	便于上下车	易于踩到踏板	上肢自由活动	头部自由活动	
坐垫 H 点处侧翼高度	15 ~ 25	/	/	/	
坐垫 H 点 +300 处侧翼高度	/	0 ~ 10	/	/	
靠背 H 点 +450 处侧翼高度	/	/	0 ~ 10	/	
头枕与乘员头部距离	/	/	/	25 ~ 35	

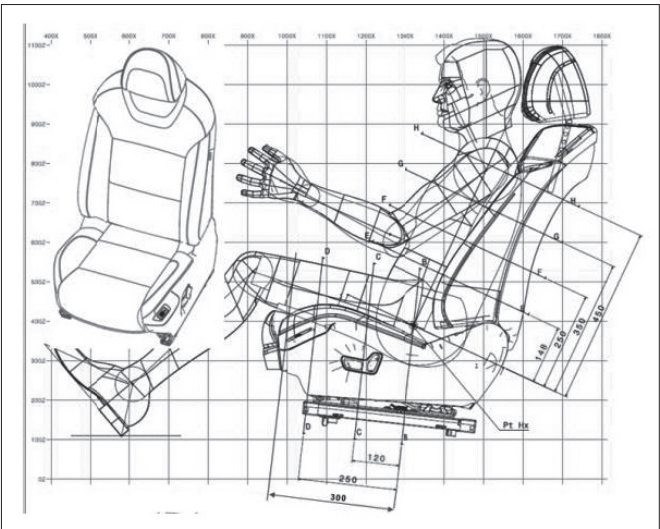


图 7 活动便利性关键截面

1.5 振动过滤性

车辆在行驶过程中，会遇到各种颠簸的路面，根据文献的研究，有 75.4% 的人发生过晕车，而在晕车因素调查中，颠簸（振动）占 46.2%。汽车座椅作为直接和人体相接触的部件，对振动过滤性有很大的贡献，主要表现为两点：抑制共振和振动吸收，如图 8。

这就需要座椅骨架有比较好的刚性，座椅骨架的刚性可以用固有频率或模态来进行评估。文献中研究结论是座椅固有频率推荐为 14 ~ 20Hz。在实践中我们一般推荐整椅模态大于 18Hz，座椅骨架的模态大于 20Hz。

2 座椅舒适性评估

对于座椅舒适性评估，文献分别从不同角度和不同评估手段对座椅舒适性评估进行了探讨。其中文献将舒适性评估分为主观评价和客观评价，文献评估座椅的振动传递特性对舒适性的影响，文献则从乘员对座椅的压力分布来对座椅的舒适性进行评估。

由于舒适性评估是一个系统性的工作，不是单次的行为，通常对每个车型的座椅做过舒适性评估后，评估结果需要保存在数据库中，方便后续的车型开发时确定舒适性目标和对比。故此我们将舒适性评估分为静态评估和动态评估。静态评估指在试验室环境下所做的评估，以客观试验为主，以主观评估为辅，评估的结果有具体的数值或者分值，便于录入数据库进行对比分析；动态评估指实车环境下的路试，以主观评价为主，用实际消费者的角度来进行评估，评估方

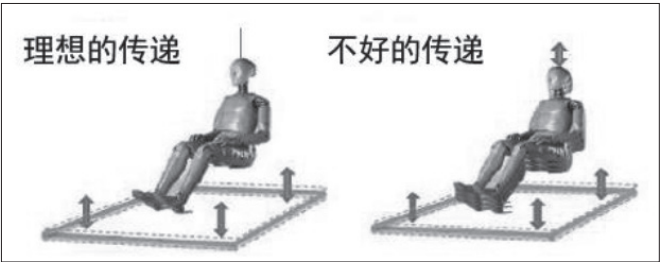


图 8 座椅对车身振动的传递模式

式为问卷或者打分表形式居多。动态评估的结果用来和静态测试的结果进行比较，进行一致性分析和后续的改进。

2.1 静态评估

2.1.1 H 点测量

H 点测量是座椅所有测试的基础，只有在 H 点合格的前提下，所做的其他测试，包括安全性能试验如碰撞等才有意义，舒适性测试也不例外。

但对于舒适性评估的 H 点测量，还需要做其他前置试验，主要有座椅轮廓度扫描和发泡硬度测量。

轮廓度扫描是为了保证评估的实物座椅在造型和尺寸上符合设计目标，如图 9 所示，考虑到累计公差，一般要求轮廓度在 ±5mm 以内方为合格。超过 ±10mm 则判定样品不合格，必须重新准备舒适性评估样椅。

发泡硬度测量，目前有两种方式：IDL（Indentation Hardness Index 压陷硬度，ISO 2439）和 CDL（Compression Hardness Index 压缩硬度，ISO 3386/1）。对于座椅舒适性评估，一般采用 CDL 硬度。

$$CC_{xx} = F_{xx} / A$$

CC_{xx}- 发泡 CDL 硬度 (KPa)

F_{xx}- 发泡压缩到 xx 时的力

A- 发泡的底部面积

H 点测量可以按照《GB11563-1995 汽车 H 点确定程序》或者《ISO6549:1999 Road Vehicle-Procedure for H- and

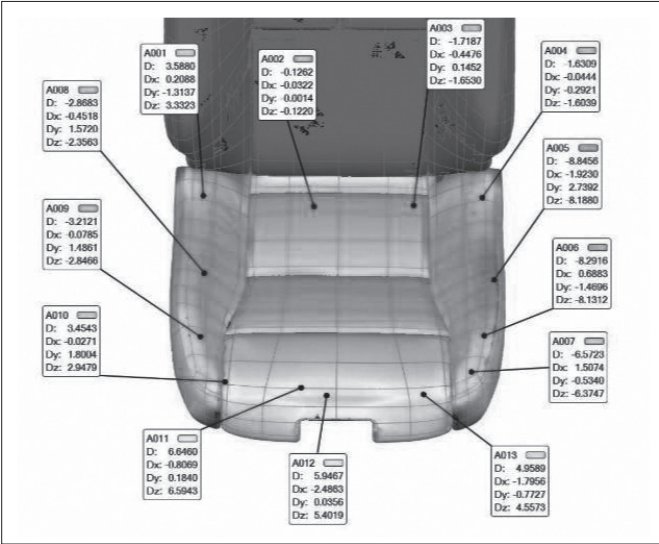


图 9 座椅轮廓度扫描

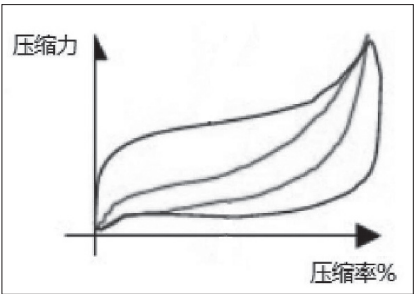


图 10 发泡 CDL 硬度曲线

R-point determination》来进行。

2.1.2 悬簧挠度测量

悬簧挠度的测量没有统一的国际标准,我们推荐用直径 300mm 的圆柱形压盘来进行测试,如图 11。

将压盘中心尽可能放置在 2.1.1 测量的实际 H 点处,先进行一次预加载,以消除间隙,然后正式加载,得到如图 12 的悬簧挠度曲线。

2.1.3 侧向支撑测量

侧向支撑测量用到 2.1.1 中测量 H 点的装置 HPM (SAE J826; ISO 6549-1999) 或 HPM-II 假人 (SAE J4002:ISO 20176-2006)。在此测量中,假人的腿应去掉,避免对结果产生影响。如图 13 所示分别在假人上身重心处和 H 点处施加正侧向的拉力。

测量时,逐渐增加侧向拉力到 200N,记录拉力和对应的侧向位移量,形成如图 14 的侧向支撑曲线。

2.1.4 触感测量

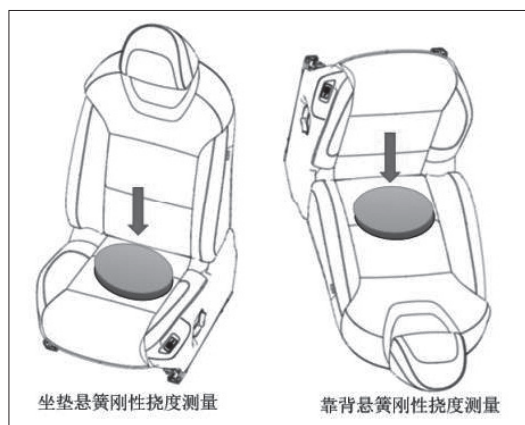


图 11 悬簧挠度测量设置

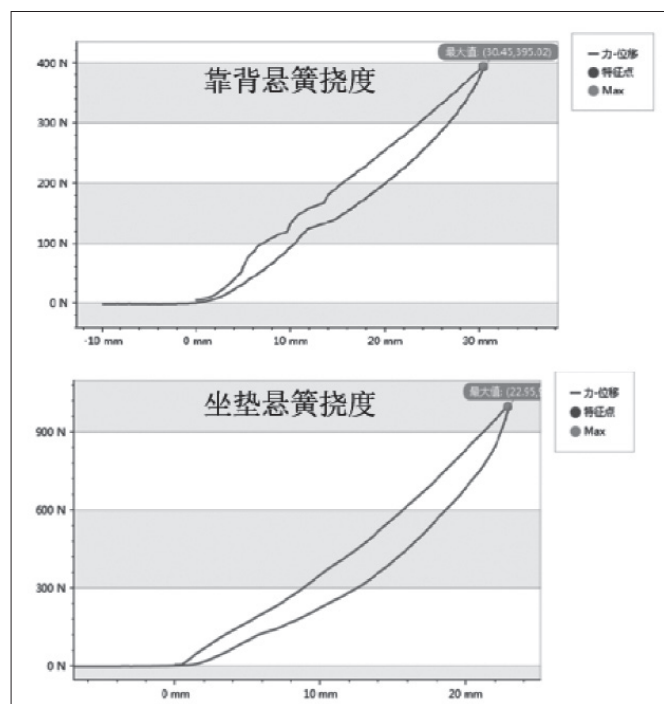


图 12 悬簧挠度测量曲线

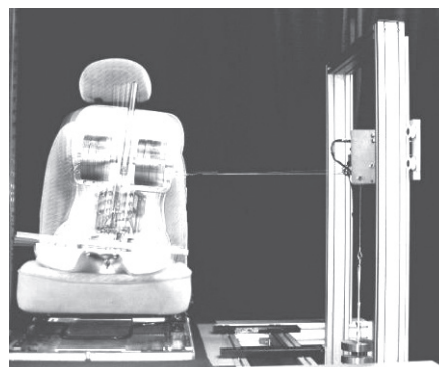


图 13 侧翼支撑测量

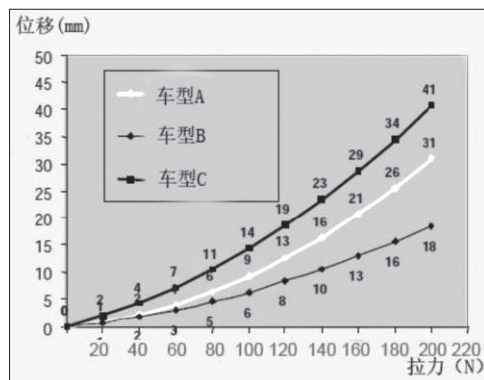


图 14 侧翼支撑曲线

触感测量是模拟乘客触摸座椅表面的手感以及乘坐上座椅后的第一感觉。手感柔软的座椅会有豪华感以及舒适感。触感测量用一个直径 25mm 的半球形压头,在座椅景中规定区域测量力和位移的关系,施加力最大为 20N,如图 15 所示。

触感测量得到的力 - 位移曲线,即触感特性曲线。如图 16 所示,红色曲线代表触感更柔软。

2.1.5 压力分布测量

压力分布测量虽然在十年前已经有国际性的一流座椅

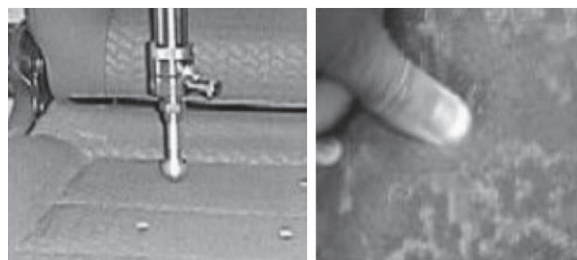


图 15 触感测量

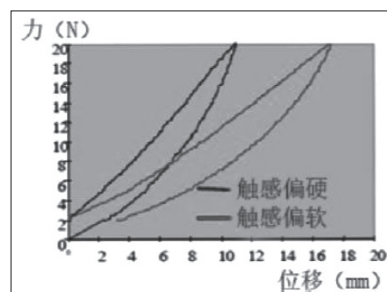


图 16 触感特性曲线

供应商开始研究，但目前还没有完全在行业里得到广泛应用。主要的障碍在于对于压力分布图的解读。

压力分布的测量如图 17 所示，对于进行压力分布测量，推荐用 BioRID-II 假人 (Standard ATD ARA-001) 来进行测量，也可以用 Hybrid III 50 % 假人。有时也会用真人来进行测量，但由于真人难以保持一致性，测得的数据不容易形成数据库以进行比较。

当毛细血管承受 32mmHg (4.256kPa) 以上的压迫时，血液循环会中断。当压力在 70mmHg (9.310kPa) 维持 2 小时，骨骼凸出位置的组织开始坏死。

皮下组织和肌肉的压力分配：臀下体压限值范围：54%； $X \times 0.54 < 4.256\text{kPa}$ ； $X < 7.88\text{kPa}$ ；环腰部位置体压限值范围：80%； $Y \times 0.80 < 4.256\text{kPa}$ ； $Y < 5.32\text{kPa}$

如图 18 测量结果，靠背的压力峰值 0.246N/cm²(2.46KPa)，远小于体压限制 5.42KPa 所以靠背的压力分布较好。坐垫的压力峰值 0.70N/cm² (7KPa)，比较接近上限 7.88KPa，需要进一步做优化。

2.1.6 振动传递特性测量

座椅的振动传递特性是一个综合评价座椅骨架、悬架、发泡和面套等组合在一起的总成对来自车身的振动过滤的性能指标。测量示意图如图 19 所示。传感器 r2 放置在滑轨上，传感器 r1 放置在座椅的表面，在座椅上放置 BioRID-II 假人或 Hybrid III 50 % 假人。

测量的结果如图 20 所示。文献的研究表明，座椅在 Z 方向的减振能力比 X 方向和 Y 方向要强。通过测量得到振动传递特性，我们可以了解座椅总成的在对应频率的振动过



图 17 压力分布测量试验

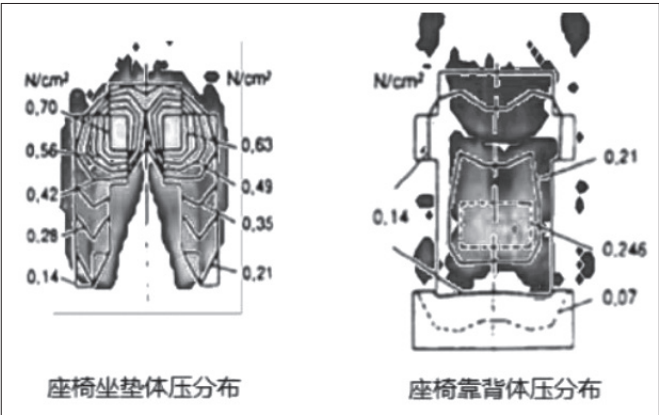


图 18 压力分布测量结果

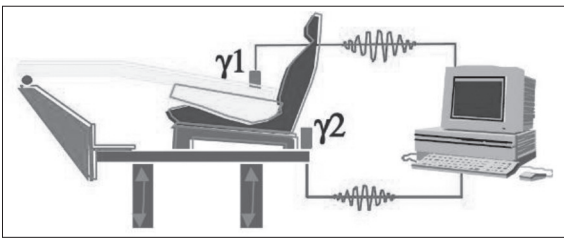


图 19 振动传递特性测量设置

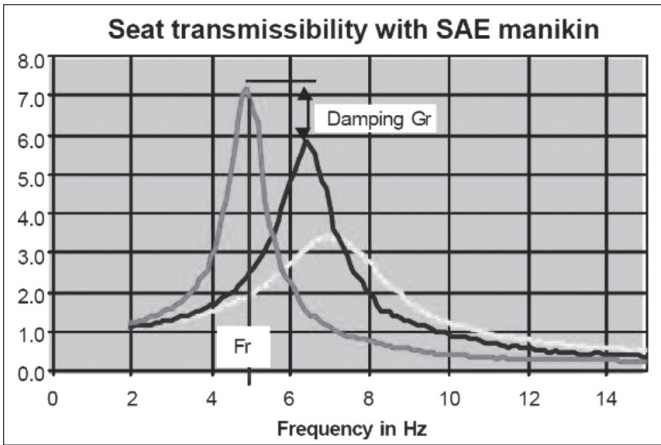


图 20 振动传递特性特性曲线

滤性能。

2.2 动态评估

静态评估是基础，是客观的；而动态评估是主观的，但更接近真实的使用场景，因此动态评估必不可少。通过动态评估的结果，和静态评估的报告进行比对，可以进一步改进静态评估的测试方法和评价指标，使动态评估结果和静态评估结果趋于一致。

动态评估需要把座椅安装进整车，在选定的典型路段上进行试驾（如图 21）。

试驾小组成员一般由经过舒适性相关培训，清楚评估的主要关注点以及评分的标准，评估小组由舒适性专家牵头。

动态舒适性评估表单可以参考表 3。原则是要涵盖舒适性的各个大类，打分的原则是尽可能既有区别，又不要太细，



图 21 典型舒适性试驾路线

表 3 动态舒适性评估表（示例）

项目	排座椅	路段	左椅	右椅
座垫				
评价项目		-3 -2 -1 适中	1 2 3	
触感	太软	○ ○ ○	○ ○ ○	太硬
上下车方便性	不易	○ ○ ○	○ ○ ○	容易
各机构调节便利性		○ ○ ○	○ ○ ○	
臀部支撑性	太软	○ ○ ○	○ ○ ○	太硬
大腿支撑性	太短	○ ○ ○	○ ○ ○	太长
侧翼支撑性		○ ○ ○	○ ○ ○	
座椅包裹性		○ ○ ○	○ ○ ○	
振动颠簸感		○ ○ ○	○ ○ ○	
硬点异物感		○ ○ ○	○ ○ ○	
.....		○ ○ ○	○ ○ ○	
靠背				
.....		○ ○ ○	○ ○ ○	
.....		○ ○ ○	○ ○ ○	
.....				
.....				
综合（将坐垫和靠背下面的子评估项目得分合并成下面 8 个大类）				
	得分	权重	折算得分 (满分 10 分)	
触感				
调节感知				
支撑性能				
轮廓贴合性				
姿态保持性				
活动便利性				
振动过滤性				
体压分布				

避免评估员在细节分数上犹豫，影响评估的效率。

3 综合评价

根据 1 和 2，我们可以得到一个比较可靠的舒适性得分，但单个项目的舒适性得分并没有多大的意义。我们最终的目的是要形成一个可以进行对比的舒适性评价系统。通过对比，才能指导当前开发项目的舒适性是好还是不够好，在哪些方面还需要改进，以及标杆是什么。只有这样，才能推动舒适性的不断改善。

舒适性得分最终以两种形式进行输出，一种是如图 22 所示的雷达图；另一种是如图 23 所示舒适性对比堆积图。雷达图可以很直观地对比出当前开发的座椅和标杆座椅的舒适性各维度的差异，从而可以有针对性地进行优化。堆积图则可以直观地看到当前开发的座椅的总体舒适性得分和排名情况。

4 结语

舒适性开发和评估是一个综合性课题，虽然行业内对此越来越重视，但离真正标准化和流程化还相差甚远。较多论文往往也都是从某一个角度切入进行了探讨，缺乏整

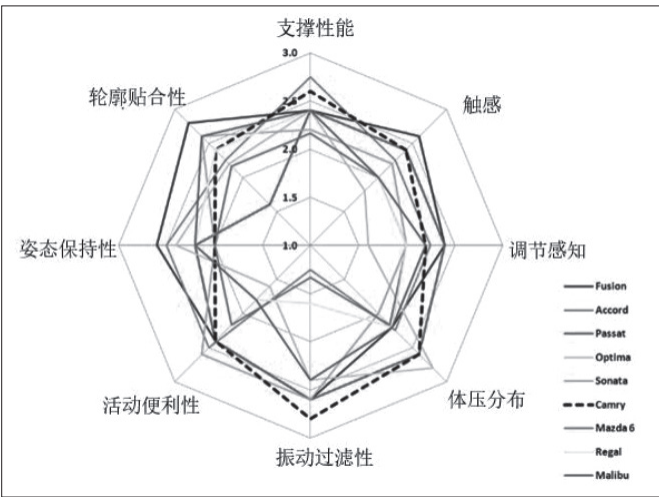


图 22 舒适性对标雷达图

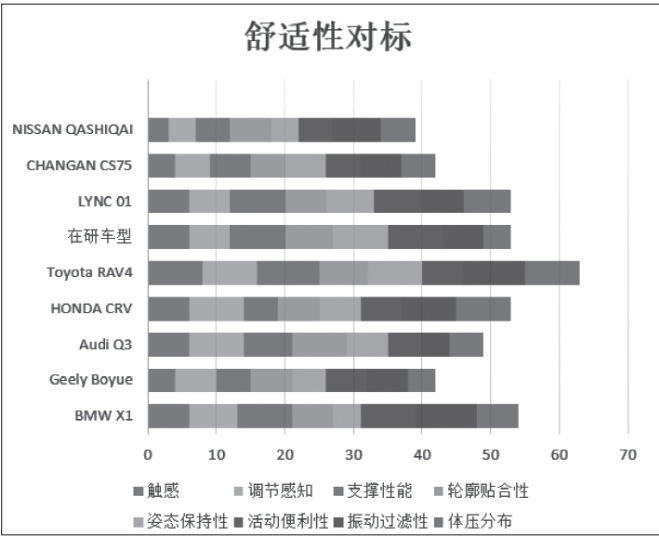


图 23 舒适性对标堆积图

体性的研究。本文通过实际项目上的舒适性开发和研究，整理归纳出一套较为完善的舒适性开发要求以及评估手段，为国内自主品牌的主机厂和座椅供应商的工程师在舒适性开发方面提供较好的参考价值，以冀推动整个行业在座椅舒适性领域的进步和发展。

参考文献：

[1] 张敬伟. 汽车座椅舒适性开发分析[J]. 汽车工程师. 2020 (3): 25-28

[2] 张程. 汽车座椅系统舒适性设计及评价方法[J]. 汽车与配件. 2020 No.23:53-55

[3] 王艳飞, 邢立峰, 黄玉强, 等. 基于人体 17 位压力分布的汽车座椅靠背舒适性研究[J]. 汽车工程学报. 2020 (3), Vol.10 No.2: 142-147

[4] Ikeda Keig, Endo Ayato, Minowa Ryosuke, etc. A basic study on influence of jerk on riding comfort using active seat suspension for ultra-compact mobility. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. Volume 64, Issue 1-4. 2020. PP 1505-1513

- [5] R Deepak Suresh Kumar, S Ravi, A Vignesh, etc. Ergonomic Evaluation of Passenger Car Vehicle Seat Design. 2020,988(1): 012086 (7pp)
- [6] <https://humanetics.humaneticsgroup.com/products/anthropomorphic-test-devices/frontal-impact/hybrid-ii-50th-male>
- [7] 钟广亮, 金秋菊 2, 张艺炫. 晕车影响因素及对策探讨 [J]. 汽车实用技术. 2020 (5) : 170-176
- [8] 李雪城, 谭继锦, 孙剑. 基于模态匹配的汽车座椅骨架模态分析与优化 [J]. 2018 (2) : 47-55
- [9] 杜长江. 汽车座椅感知舒适性评价体系研究 [J]. 杜长江, 马秀英, 从云鹏, 等. 上海汽车. 2020 (7) : 13-18
- [10] 魏娇, 刘娜. 汽车座椅系统动态舒适性的研究综述 [J]. 内燃机与配件: 227-228
- [11] 陈良松, 宋俊, 牛喜渊, 等. 人体乘坐振动舒适性评价及其试验研究 [C]. 2020 中国汽车工程学会年会论文集 :1223-1227
- [12] 徐伟, 刘伟, 冯钊, 等. 层次分析法在汽车座椅静态舒适性主观评价中的应用 [J]. 研究与开发. 2020 (9) :16-20
- [13] 黄迪青, 徐霖, 陈诚. 基于神经网络的汽车座椅舒适性研究 [J]. 研究与开发. 2020 (7) :15-18
- [14] 徐霖, 黄迪青, 陈诚. 基于体压分布与道路模拟振动的座椅乘坐舒适性研究 [J]. 北京汽车. 2020.No.3: 22-27
- [15] 裴丹宁, 李苑漠, 黄晓光, 等. 基于压力分布测量系统的座面材质舒适性优化研究 [J]. 2020 (10) Vol 33 No.5: 432-439
- [16] 康路路, 罗一平, 王兆强, 等. 三自由度汽车座椅及其振动特性研究 [J]. 轻工机械 2017 (4) Vol 35 No.2: 20-25
- [17] 张清雨, 张筱璐, 李跃娟, 等. 垂向激励下聚氨酯泡沫对座椅振动特性的影响规律研究 [J]. 噪声与振动控制. 2020 (10) Vol 40 No.5: 217-222,247.

(上接第 107 页)

以排除公差带轮廓监控 MD36400 及轴加速度 MD32300 的设定值设定不当的可能。由于是启动时发生报警, 所以可排除伺服增益系数 Kv 值设定不当的可能。那么可能的原因有两种: 一是测量元件及光栅故障。二是机械部位故障。检查读数头、光栅尺, 安装固定良好, 拆下读数头, 清洗读数头和光栅尺并进行检查, 发现并未损坏, 安装后重新启动 X 轴报警依旧发生。在排除测量元件故障后, 可基本确定报警故障由机械原因引起。打开 840D 机床操作面板, 进入诊断——驱动调整菜单, 启动 X 轴, 观察此时电机的实际电流值达到 85%, 并立即报警。这样我们就可以确定是由于 X 轴启动时负载过大造成的床身不能立即跟随电机运动, 从而引起的 X 轴轮廓监控报警。根据此机床的结构进行分析, 造成 X 轴负载过大的可能原因有以下三种: ①电机与丝杠联接的皮带太紧, 致使电机负载太大。②在 X 轴启动时, 夹紧装置没有立即松开。③ X 轴导轨润滑不够充足, 致使负载过大。依次检查调整皮带松紧程度, 使皮带松紧合适; 检查 X 轴夹紧/放松装置液压系统电磁换向阀均正常, 夹紧装置动作正常; 检查集中润滑系统发现润滑泵压力、流量较小。因此, 可初步判定是由于润滑泵压力流量不足造成的 X 轴润滑不良从而引发此报警。由于 X 轴负载最大, 润滑点最多, 需要的润滑

油也最多, 所以报警只发生在 X 轴, 解决的方法唯有加大 X 轴润滑量。由于润滑泵暂无备件更换, 所以只能在 PLC 润滑程序中将原有的润滑循环间隔时间由 10 分钟改为 5 分钟, 将润滑时间由 5 秒增加至 10 秒, 以此来加大润滑量, 保证 X 轴润滑充足。完成后重新启动 X 轴, 观察电机启动时最大实际电流值为 18% 左右, 且未发生“X 轴轮廓监控”, 反复来回开动 X 轴, 未发生报警, 故障解决。

4 结语

本文以意大利进口三轴数控深孔钻床为例, 结合设备实际状况和日常维修经验, 综合论述了“轴 %1 静止误差监控”和“轴 %1 轮廓监控”两个较复杂的数控报警故障产生的原因及解决方法, 对于数控机床此类故障的维修具有较大的指导意义。

参考文献:

- [1] 黄敏高. 西门子 840D 数控系统故障诊断与维修 [J]. 设备管理与维修, 2012, (05) .
- [2] 姚丹. 西门子 840D 系统实用诊断与维修技术 [J]. 橡胶技术与装备, 2018, (12) .

作者简介: 张勃 (1986.12-), 男, 汉族, 陕西西安人, 工程师, 研究方向: 设备维修及管理、智能制造等方面工作。