

乘用车制动踏板感觉评价体系构建与分析

洪庆良¹, 崔新利¹, 刘守明², 扈国威²

1. 北京汽车研究总院有限公司 北京 101300

2. 北京汽车股份有限公司 北京 101300

摘要: 通过对乘用车制动踏板感觉的现状分析, 运用主客观相结合的分析方法, 提出制动踏板感觉的主客观评价指标项及指标值, 进而构建乘用车制动踏板感觉的主客观评价体系, 进一步对影响制动踏板感觉设计和评价的关键因素进行分析, 作为制动踏板感觉设计和评价的补充, 指出因主观评价存在的局限性, 造成主客观评价结果不一致的不可避免性。之后, 通过制动踏板人机布置对驾驶主观感觉的影响分析, 引出制动踏板人机布置的重要性。

关键词: 制动踏板感觉; 主观评价; 客观评价; 体系构建

制动踏板作为车辆驾驶最重要的人机交互接口之一, 其操纵舒适性感知项——制动踏板感觉, 受到了用户的高度关注。例如用户通常反映的“制动软硬、制动轻重、制动行程长、制动力不足、制动距离长”等现象, 就是有关制动踏板感觉方面的通俗表述。据J.D.POWER近几年的汽车市场调研数据分析, 涉及制动踏板感觉方面的问题在TOP10市场问题中位列前五位。

事实上, 汽车用户常常无法准确说明制动到底有多软、制动踏板行程到底有多长等问题, 但他们总是能够感觉出某些制动行为不是他们所期望的。因此, 建立一套科学合理的制动踏板感觉评价体系指导产品设计, 满足大部分用户的舒适性需求, 将可能产生的市场抱怨问题进行事前预防意义重大。

制动踏板感觉概述

1. 制动踏板感觉定义

制动踏板感觉通常是指在正常或良好附着条件的路面上, 对汽车实施制动过程中, 驾驶人对制动踏板的操纵感知性与车辆制动响应间的主观对应性, 属于主观评价范畴。用工程语言可简单表述为制动踏板力、制动踏板行程、制动减速度间的对应关系在主观上的预期表现, 驾驶人主观感知的优劣性表征着制动踏板感觉的良好程度。

2. 制动踏板感觉研究现状

目前行业法规没有对制动踏板感觉的优劣性进行定义和要求, 只是从安全性上规定了车辆达到规定性

能时的单一踏板力和行程最大值^[1-3]，而不对制动的过程进行约束。

国外对制动踏板感觉的研究较为全面，建立了一套完整的标准体系。比如某国外车企建立的制动踏板感觉指数法^[4-5]是一种融合了主观评价理念的客观设计规范，总体上能指导制动踏板感觉的开发及评价，因其重复性较好而具有一定的应用价值，但不足之处是减速度的指标及范围不合理，与用户感受存在较大差异。

国内的研究基本上都是应用基础理论进行建模分析，以指明某些特性参数对制动踏板感的可能影响，但没有对制动踏板感觉的接受标准或范围进行要求和实用性分析，造成主客观割裂，因此其实际意义并不大。后来，同济大学的林志轩^[6]等提出制动踏板感觉的定义并对其评价做了较为全面的分析，为后来者研究提供了基础。

还有一些专门从事底盘调校的机构，都是通过主观进行评价。如MIRA公司对汽车制动踏板感觉的评价分为13个小项目，包括轻度、中度及重度制动踏板行程及制动力、踏板的位置及操纵舒适感等。每个小项按10分制评分，5分为最小接受值。评价项目齐全且细，显得主次不分，且结果都通过专业试车员评价给出，与实际用户的评价结果差异较大，同时这也是事中评价，因此只能作为问题改进参考。

3.常用研究方法

制动踏板感觉是一种主观感知评价，研究制动踏板感觉的目的就是将这种主观感觉转化为车辆的客观要求或指标，让用户的感知与工程设计数据相对应。常用的方法或工具有QFD（质量功能展开）、主客观评价法以及相关的制动理论等。其中QFD是一种面向产品用户质量需求的设计方法，充分运用其基本工具“质量屋”，可将用户需求传递、转化并对应到产品的特性设计当中，合理确定各种技术要求^[7]。

主客观评价法是一种综合评价法，即利用主观和客观的自然关系来进行评价统一，其客观评价因素由人们长期实践和专门设置的主观评价试验来检验和确定^[8]。主客观结合评价法从20世纪80年代开始在日本车企广泛应用，并取得了非常好的效果，国内2003年上海某车企率先采用^[9]，现在已经成为汽车工程设计和开发的基本方法^[10]。

制动踏板感觉主观评价体系构建

1.评价指标项构建

QFD的首要目的，就是把用户的声音（VOC）准确地转化为工程特性，见表1。

制动减速度的初始、中度及重度共计793分，平均264分；制动踏板力的初始、中度及重度共计761分，平均253分；制动踏板行程的初始、中度及重度共计623分，平均207分。可以看出，制动踏板感觉主要体现在制动踏板力、踏板行程和制动减速度三个特性，以初始和中度特性更为重要。另外，制动反应时间207分，分值也较高，表明其重要性，但因与初始的踏板力、踏板行程及制动减速度强相关，且实际客观评价较为困难，故不列入评价项目。综合专业驾评人员和普通客户的评价结果，形成评价子项目指标项（见表2）。

其中，初始制动踏板力及行程最易感知，专业评价时也将重点关注，因此权重相对较高。0.3g减速度覆盖了约70%的低速制动工况，0.6g减速度覆盖了约25%的中速制动工况，这两种工况约占总制动工况的95%，因此将作为重点进行控制。0.9g减速度是汽车的紧急制动工况，主要在高速跟车和坏路工况使用，其实际使用频率不超过2%，但作为车辆制动系统的能力和制动信心的表现，也需要提出。

制动踏板力的线性度实际上是制动踏板感觉的综合表现，是制动踏板力、踏板行程和制动减速度三者间线性关系的综合表征，也是用户反馈较多的问题。需要说明的是，这种主观感觉与客观测试并不能完全对应，其原因在于主观感觉存在个人喜好的局限性。

2.评价指标值构建

对于制动踏板感觉的指标值设定，首先需通过主观驾评对预选制动踏板感觉表现较好的车辆，按设定的主观评分表对确定子项目进行打分，而后按照评分结果确定指标值的可接受状态，再进行客观测量对应确认。

主观评价打分按照表3进行，评分等级规定了5级，对应的分值为5~9分，同时为了识别出更小的感知差异，评价分差可细分至0.25分。对于1~4分和10分，通常不易出现，故不纳入。

表1 制动踏板感觉的评价项目

工程措施 顾客需求		重要度 K_i	制动系性能(制动踏板感觉相关)分值													
			制动减速度			制动踏板力			制动踏板行程			制动时间		制动距离		
			初始	中度	重度	初始	中度	重度	初始	中度	重度	反应	释放	初始	中度	重度
VOC	制动硬, 正常踩制动踏板力偏大	5	1	9	1	1	9	9	1	1	1	1	1	1	1	1
	制动软, 有踩空感觉	3	9	9	1	9	9	1	9	9	1	1	1	1	1	1
	正常行车制动踏板行程长	3	1	1	1	1	1	1	1	9	9	1	1	1	1	1
	制动时, 感觉车速降的较慢	3	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	制动过于灵敏, 不好操控	3	9	1	1	9	1	1	9	1	1	9	1	1	1	1
	制动距离长	5	1	1	9	1	1	1	1	1	1	7	1	1	1	9
	制动初始较硬	5	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	制动来得太快, 不舒服	4	9	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1
	轻点制动急促点头, 不舒服	3	9	1	1	9	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1
	制动踏板线性感差	4	7	9	9	7	9	9	7	9	9	1	1	1	1	1
	重踩制动效能低	4	1	1	9	1	1	5	1	1	1	1	1	1	1	5
	中度制动效能低	4	1	9	7	1	9	7	1	1	1	1	1	1	1	1
	制动力不够大	5	1	9	9	1	9	7	1	1	9	1	1	1	1	1
	制动反应不灵敏	3	9	1	1	9	1	1	9	1	1	7	1	1	1	1
	紧急制动距离长	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	制动响应太慢	4	9	1	1	9	1	1	9	1	1	7	1	1	1	1
	制动初期行程长	4	7	1	1	7	1	1	9	1	1	7	1	1	1	1
	制动空行程太长	3	7	1	1	7	1	1	1	9	1	7	1	1	1	1
工程措施重要度 h_j			295	261	237	303	237	211	285	173	165	207	69	69	69	125

表2 制动踏板感觉的评价项目

客观计算及测试项	对应主观驾评项
踏板预载力	踏板预先的支撑力
制动初始点踏板力	初始制动踏板力
制动初始点踏板行程	初始制动踏板行程
减速度0.3g时的踏板力	轻度制动踏板力
减速度0.3g时的踏板行程	轻度制动踏板行程
减速度0.6g时的踏板力	中度制动踏板力
减速度0.6g时的踏板行程	中度制动踏板行程
踏板力线性度	踏板力(踏板行程)-减速度线性感觉
满载减速度0.9g时的踏板力	重度制动踏板力

表3 制动踏板感觉主观评分表

分值	5	6	7	8	9
接受程度	差/不合格	接受限制	可接受/合格	良好	优秀
满意度	抱怨	不满意	可以	满意	很满意

3.评价人员构建

由于制动踏板感觉的个性差异较大，评价人员设为3类，各3名。第一类为专业评价人员，代表对汽车有足够了解的客户群体；第二类为驾龄在3年及以上的驾驶人，代表对主观感知有一定经验的客户群体；第三类为驾龄在1~2年的普通用户，代表新手群体。根据实际需要可增加评价人数，但需保证三类人员的比例不变。

4.评价结果构建

对于评分结果，要求专业驾评类人员评价结果基本一致，分差不得大于0.25分，对于分差超出0.5分（含）的项目需重新评价确认。三类人员最后结果得分权重分别为50%、30%和20%，总分加权取平均值。

制动踏板感觉客观评价体系构建

如图1和图2所示，通过对50款主流车型踏板感客观数据测试，按照制动踏板力、踏板行程和制动减速度绘制成关系曲线，并根据专业评价分值接近8分绘制出标准曲线，如图中曲线a和b所示，作为工程设计依据。同时，结合主观评价梯度，制定的客观评分规范见表4。

1) 制动踏板的预载力表征为驾驶员在踩制动踏板

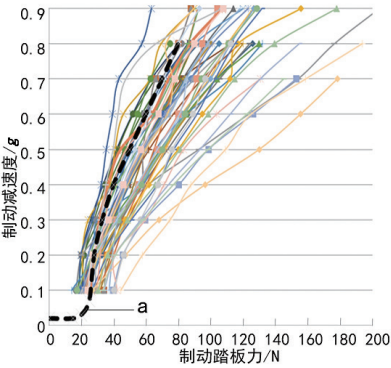


图1 制动踏板力与制动减速度曲线

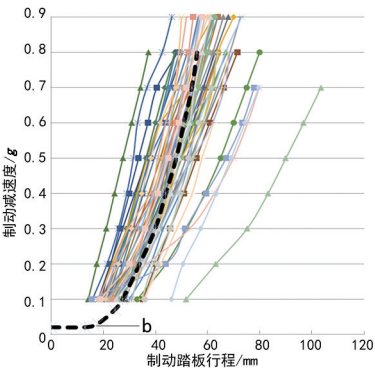


图2 制动踏板行程与制动减速度曲线

时，制动力矩尚未施加于轮端前的踏板力，即消除制动系统空行程所对应的制动踏板力，经验值不大于20N为宜。

表4 制动踏板感觉客观评价表(ΣBFI=100分)

序号	指标项	目标值	满分值/BFI	分值计算方法
1	踏板预载力/N	≤20	7	超过目标值每4N减1.25分，最多减至0分
2	制动初始点踏板力/N	≤25	7	超过目标值每4N减1.25分，最多减至0分
3	制动初始点踏板行程/mm	≤24.5	15	超过目标值每2mm减2.5分，最多减至0分
4	减速度0.3g时踏板力/N	33	10	超过或不足目标值每4N减1.25分，最多减至0分
5	减速度0.3g时踏板行程/mm	40	13	超过或不足目标值每2.5mm减2.5分，最多减至0分
6	减速度0.6g时踏板力/N	60	10	超过或不足目标值每4N减1.25分，最多减至0分
7	减速度0.6g时踏板行程/mm	51	13	超过或不足目标值每3.5mm减2.5分，最多减至0分
8	踏板力线性相关数	≥0.95	15	超过目标范围每0.025减1.25分，最多减至0分
9	满载减速度0.9g时踏板力/N	≤140	10	超过目标值每5N减2分，最多减至0分

2) 制动初始点为排除滑行减速度及其他干扰因素，将助力装置产生输出液压时的始点定义为正常制动的实际起始点位置。

3) 踏板力线性度为减速度和踏板力曲线的表征，在减速度 $0.2g \sim 0.8g$ 区域内，用最小二乘法拟合出一个幂函数，如 $g=CF_n$ (g 减速度， C 常数， F 踏板力， n 指数)，指数 n 即为踏板力线性度指数。若该值接近1，则表明踏板的输入输出是完全线性关系，是理想的制动踏板感觉关系状态。事实上，用幂函数常常不容易拟合出符合要求的曲线，故一般可采取线性拟合即可。

综上所述，构建出的主客观评价对应关系见表5，用于综合评价。

表5 制动踏板感觉主客对应表

接受程度	接受标准
优秀	$\Sigma BFI \geq 90$ 分，且每一分项值大于该分项满分的80%
良好	$80分 \leq \Sigma BFI < 90分$ ，且每一分项值大于该分项满分的70%
可接受/合格	$70分 \leq \Sigma BFI < 80分$ ，且每一分项值大于该分项满分的70%
接受限制	$60分 \leq \Sigma BFI < 70分$
差/不合格	$\Sigma BFI < 60分$

制动踏板感觉评价体系的应用分析

1.主观评价自然局限性分析

随着人机工程技术的发展及人们感知需求的提升，主观评价的结果在不同时期的接受程度往往存在差异。即使同一个评价人员，也会在不同评价阶段或不同评价环境下得出有差异的评价结果，这将直接影响到对应项目的客观评价。另外，由于主观评价具有较大的个性化，这就要求对主观评价人员的素质及能力与主观评价的项目有很好的对应性，同时还应随时间的变化进行实时更新。

2.制动卡钳的需液量影响分析

制动卡钳的需液量对制动踏板行程影响很大，尤其是在 $0 \sim 2MPa$ 的需液量对制动初期的特性，如初始踏

板力、初始空行程及初始制动响应的影响非常明显，故初期制动踏板感觉在现代汽车制动特性评价中占比较大，近50%的问题都关乎初期制动踏板感觉。因此，如何准确合理定义制动卡钳的需液量，已成为目前制动钳总成设计的核心要素之一，随着CAE技术的成熟应用，将在这方面发挥重要作用。

3.制动踏板面位置影响分析

制动踏板是车辆制动时驾驶员和车辆的交互装置，制动踏板面在整车上的布置位置对驾驶人脚的感觉产生直接的影响，尤其是制动踏板面的倾斜角度以及制动踏板面中心点的布置高度是最为突出的两个要素，如图3所示。

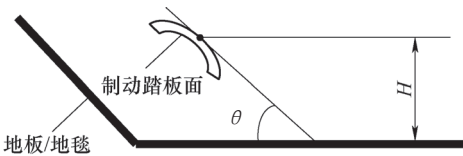


图3 制动踏板面布置影响因素

如果踏板面倾角 θ 较大，则驾驶人脚掌会向后勾，脚掌因向前的预施力大而感到不适；如果踏板面倾角过小，则驾驶人脚掌会向前伸，脚掌因初始位置太前延而感觉不适，并在同样空行程下，驾驶人会明显地感觉到踏板倾角小的车辆制动初始行程偏大、初期制动减速度小，甚至会产生总行程偏大的感觉，导致制动信心不足。

如果踏板面中心点布置偏高，即踏板面中心点距离地毯高度 H 偏大，使得驾驶人脚掌的中心点偏下，相当于脚尖踩踏制动踏板面，这样会造成脚使不上力而感觉初始制动踏板力偏大。如果踏板面中心点布置偏低，即踏板面中心点距离地毯的高度偏小，使得驾驶人脚掌的中心点偏上，相当于脚心踩踏制动踏板面，这样会造成脚施力不稳而感到不适，甚至脚尖会触及制动踏板臂等情形。

公开的论文^[11]及资料关于踏板面倾角及高度的研究较多，认为比较合理的踏板倾角为 $45^\circ \sim 60^\circ$ ，踏板高度为 $155 \sim 170mm$ 。

结语

汽车制动踏板感觉的好坏，已经成为整车使用的

一项重要品质。优良的制动踏板感觉也已经成为汽车用户满意度的一项重要评价指标，而汽车制动踏板感觉设计及测评标准，为汽车制动系统工程设计提供了重要的技术支持，可节省开发资源，缩短开发周期，并达成用户需求，实施效果明显。

另外，主客观评价其本质上虽然是一致的，但实际使用过程很难做到完全统一，这就是主客观评价中一致性与不一致性存在的必然性^[12]。因此制动踏板感觉的好坏最终将以主观评价为准，而客观评价只能作为辅助，同时主观评价自然存在的局限性必然影响评价的结果，也使得制动踏板感觉评价体系需要不断的更新迭代。

参考文献：

[1] 全国汽车标准化技术委员会.GB 21670—2008 乘用车制动系统要求及试验方法[S].北京：中国标准出版社，2008.

[2] 公安部道路交通安全管理标准化委员会. GB 7258—2012 机动车安全运行技术条件[S].北京：中国标准出版社，2012.

[3] ECE. REGULATION No.13-H-2011 UNIFORM PROVISIONS CONCERNING THE APPROVAL OF PASSENGER[S].2011.

[4] Erich L.Leonard. Brake Feel Index Version2.GM Evaluation Report#P00916, 2003.

[5] Ebert D G,Kaatz R A. Objective characterization of vehicle brake feel [C]. SAE Technical Paper Series. USA: SAE Publication Group: 940311

[6] 林志轩，高晓杰. 制动踏板感觉研究现状[J]. 农业装备与车辆工程，2007，196（6）：4-7.

[7] Lai-Kow Chan, Ming-Lu Wu. A Systematic approach to quality function deployment with a full illustrative example[J]. Omega, 2005.

[8] 余志生.汽车理论[M].5版. 北京：机械工业出版社，2009.

[9] 苑吉友，闵磊.主观评价法在汽车开发中的应用现状和发展[J]. 机电信息，2010（10）：164-165.

[10] 管欣，宗长富，王化吉.汽车底盘动力学性能主观评价研究现状与展望[J].汽车工程学报，2011（7）：159-168.

[11]张焕平.浅谈汽车制动踏板的型面设计[J]. 汽车实用技术，2019（17）：132-134.

[12]陈陌，顾洪建，赵威. 基于不一致性的汽车主客观评价方法[J].重庆理工大学学报（自然科学），2016（4）：1501-1506. **AUTO1950**

汽车工艺师 2023年 第1-2期 广告目次 Advertisement Catalogue

单位名称	查询编号	位置
汽车工艺师		封面
SMALLEY钢圈有限公司	8086	封二
金粉商城	8000	封三
公益广告	8000	封底
2022新能源汽车先进制造技术高峰论坛	8000	1
《汽车工艺师》杂志订阅	0001	2