

轿车车门玻璃升降声品质设计优化

潘 坡, 郭恒如, 李 涛
(泛亚汽车技术中心有限公司, 上海 201201)

摘要:运用有限元工具对密封条结构进行优化分析,通过改善位移-形变量参数,提升密封条的弹性势能和内能,达到改善关门声品质的目的。根据六西格玛设计理论,经过参数设计和正交试验,将关门声品质改善前后的密封条置于子系统台架上进行各种工况的验证,结果表明,集成式密封条断面优化后响度明显下降,经评估玻璃升降声品质改善效果显著。

关键词:密封条;声品质;正交试验;六西格玛设计;有限元分析

中图分类号:TQ336.4⁺2;O241.82 **文献标志码:**B **文章编号:**1000-890X(2015)03-0163-06

随着汽车工业的飞速发展,轿车用户对产品的感知质量要求越来越高,声品质也成为一项重要的衡量指标。汽车工业界对汽车声品质的研究始于 20 世纪 80 年代,美国和日本的一些研究机构 and 汽车公司在该领域处于领先地位,近 5 年来,国内不少声学研究机构和汽车公司在声品质评价和门开关声品质^[1-5]以及车门玻璃升降系统^[5]方面取得了一些研究成果。

20 世纪 90 年代,六西格玛设计(DFSS)在电子行业的跨国公司中流行,在跨国汽车制造商和零部件公司有推广应用^[6]。DFSS 在提高前期设计质量方面发挥了巨大作用,被证明在汽车设计开发中应用可行^[7]。本工作将 DFSS 应用于汽车零部件设计优化中,对玻璃升降系统进行优化,以满足客户对玻璃升降系统声品质的高需求。

1 侧门玻璃升降系统构成

玻璃升降系统由玻璃、摇窗机、导槽密封条、内外水切、门钣金等组成,如图 1 所示。使用时要求通过玻璃升降能够保证乘客舱通风,升降过程顺畅,无间歇性运动,升降速度不能太快或太慢,升降过程中不能抖动,无异响,不影响乘客视野,玻璃关闭能形成良好密封等。其中导槽密封条布置在玻璃和钣金(通常由钣金

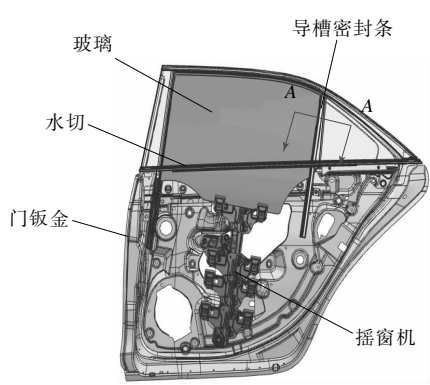


图 1 玻璃升降系统示意

形成导轨)之间的通道内,把二者连接起来,引导玻璃升降,并起密封作用。

在导槽密封条和水切引导下,由电动机提供能量驱动玻璃升降。由于玻璃造型和系统布置的限制、玻璃举升点和重心关系以及制造公差累积等因素影响,在升降过程中,玻璃前后向的旋转无法避免,旋转可能导致玻璃冲击导槽底部发出噪声,该噪声需由导槽密封条吸收。

导槽密封条与导轨的关系从形式上分为两类:一类为集成式,软质密封唇边和刚性导轨一体成型,构成玻璃升降导槽,如图 2 所示;另一类为装配式,密封条和导轨两个零件装配在一起,如图 3 所示。对比两种密封条发现:集成式密封条零件少,消除了匹配间隙,在密封性和外观上更具优势,但玻璃冲击导槽底部时会发出噪声;装配式密封条经检验声品质较好。

作者简介:潘坡(1983—),男,上海人,泛亚汽车技术中心有限公司工程师,硕士,主要从事汽车门盖系统的研发工作。

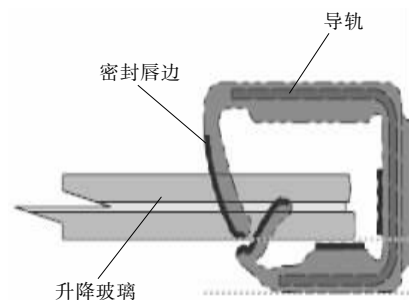


图2 集成式密封条示意

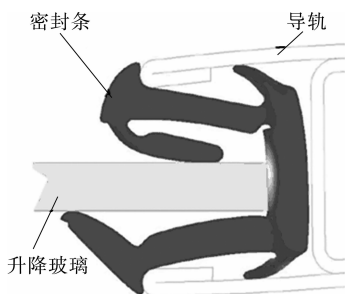


图3 装配式密封条示意

2 橡胶导槽密封条设计优化

2.1 能量转化理论

假定玻璃前后向分速度产生的动能(P)转化为橡胶的弹性势能和内能(G)、热能(F)和剩余能量(N),剩余能量转化为撞击噪声。根据能量守恒原理,结合装配式密封条噪声小的事实可知,在系统其他设计相同的情况下,装配式密封条比集成式密封条拥有更高的 G ,提高集成式密封条的 G ,可以减小 N ,从而降低撞击噪声,提高系统声品质。

根据高分子物理知识^[8],通过导槽结构形式的改变,能够改变橡胶分子的缠绕和应力-应变关系,从而改变橡胶的 G 。

2.2 有限元分析

采用 Msc. Marc 工具对集成式密封条和装配式密封条进行力和位移关系的有限元分析,以找到两者差异。该密封条属于小截面长型零件,接近于平面应变,可以简化为二维仿真。对于有限元分析的对象,两种设计导轨均为低碳钢,橡胶邵尔 A 型硬度均为 70 度,玻璃厚度均为 3.5 mm。

2.2.1 材料模型的建立

橡胶材料的变形属于非线性弹性变形,描述

橡胶形变行为的本构模型较多,相比而言,Ogden 模型[见公式(1)]不但形式简洁,描述密实橡胶形变(W)的准确性也高。

$$W = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (1)$$

式中, μ_n 为模量, α_n 为指数, λ_i 为主伸长比。

2.2.2 结构模型的建立

玻璃可以沿玻璃平面方向移动以模拟实车玻璃升降过程中与密封条之间的运动关系,玻璃与密封条之间的接触关系为 2 点或多点接触。

密封条与玻璃的几何模型如图 2 和 3 所示。为了在玻璃和密封条接触区域进行足够的网格细分,单元尺寸选取 0.3~0.6 mm。在二维分析中选用 Herrmann 单元。断面 A(见图 1)的有限元网格划分结果如图 4 所示。

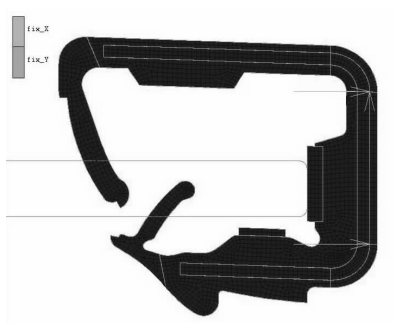


图4 断面 A 的有限元网格划分示意

2.2.3 边界条件

玻璃与密封条表面相互作用,禁止相互渗透,做以下假定:

视用来描述密封条变形行为的几何模型为截取自密封条的平面应变薄片,钢板和玻璃为刚度无限大的刚性表面;

玻璃面与密封条内外侧唇边之间用滑动摩擦来模拟,集成式密封条和装配式密封条两种设计的密封唇边对玻璃的压缩负荷和相对运动摩擦因数均相同,且模拟实车玻璃表面与密封条表面摩擦工况。

2.2.4 结果分析

根据力矩平衡模型的计算,玻璃升降系统中玻璃对导槽底部的压力不超过 30 N。有限元分析结果显示,对于集成式密封条,力在 30 N 以下时,橡胶的形变量在 7.50×10^{-4} mm 之内(见图

5);对于装配式密封条,力在 30 N 以下时,橡胶的形变量在 8.00×10^{-1} mm 之内(见图 6)。由此可知,在相同力的作用下,装配式密封条比集成式密封条具有更大的形变量。

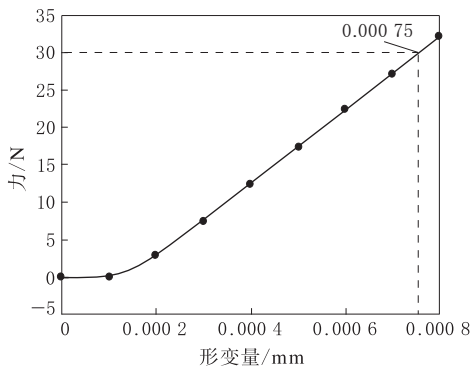


图 5 集成式密封条力与位移的关系曲线

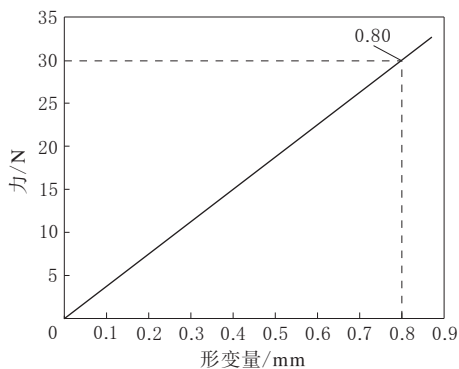


图 6 装配式密封条力与位移的关系曲线

对比两类密封条在相同力作用下的形变量发现,装配式密封条由于密封条底部与导轨之间有设计间隙的存在,受到玻璃冲击时能缓冲发生较大的形变位移,从而吸收冲击能量。因此,本研究对集成式密封条进行结构优化,以期将橡胶形变量调整到 10^{-1} 数量级,改变其 G ,达到改善声音质量的目的。

2.3 结构优化

为提高集成式密封条的形变量,设计了 3 种不同于原设计的底部结构(见图 7):其一,在原设计基础上底部加厚(结构一);其二,将加厚的底部掏空形成泡管(结构二);其三,在原设计基础上底部加唇边(结构三)。3 种设计均保证密封条与玻璃的界面关系与原设计相同,以确保其他功能正常。兼顾大形变量与可制造性的要求,对结构二

和三的泡管和唇边进行了设计优化。图 8 记录了优化后的 3 种集成式密封条力-位移关系曲线。从图 8 可以看出:30 N 时,结构一形变量为 2.90×10^{-3} mm;结构二形变量为 3.72×10^{-1} mm;结构三形变量为 3.56×10^{-1} mm。结构二和三的形变量比原设计均有较大幅度提高,且与装配式密封条形变量在同一数量级上,实现了形变量 10^{-1} 数量级的目标。结合能量推论以及装配式密封条声品质优异的情况,结构二和三优化设计理论上将改善和提升声品质。



图 7 集成式密封条 3 种导槽底部优化结构

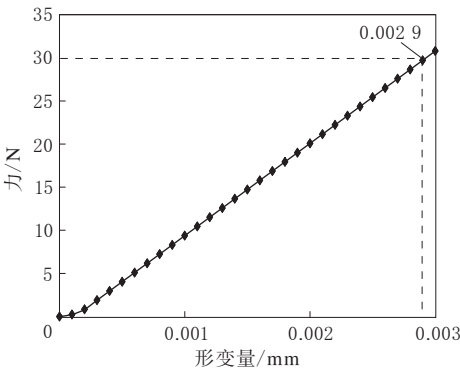
3 试验验证

3.1 控制因子和噪声因子的设定

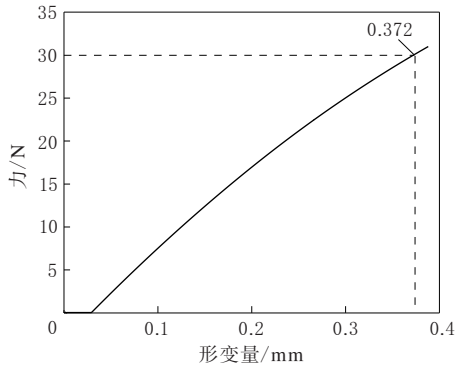
为验证理论分析的正确性,以玻璃升降系统为载体,以声品质为研究对象,进行参数设计并制定试验计划,考察优化后集成式密封条的声音表现。选择与玻璃冲击声音最相关的 4 个参数为控制因子:摇窗机导轨与滑块之间的间隙(控制因子 A,mm)、导槽底部结构(控制因子 B)、密封条压缩负荷(控制因子 C, $N \cdot dm^{-1}$)、玻璃侧边到导轨底部的间隙(控制因子 D,mm)。每个控制因子设定 3 个水平(见表 1)。把电动机电压电流水平与玻璃尺寸偏差和玻璃两侧导轨距离偏差组合作为噪声因子。玻璃尺寸偏小,玻璃两侧导轨距离偏大,则玻璃旋转冲击速度大,该组合作为噪声 N1;反之,则玻璃冲击速度小,该组合作为噪声 N2。结合电动机的 3 个水平,得到系统的 6 种噪声工况,对应关系见表 2。

3.2 正交试验

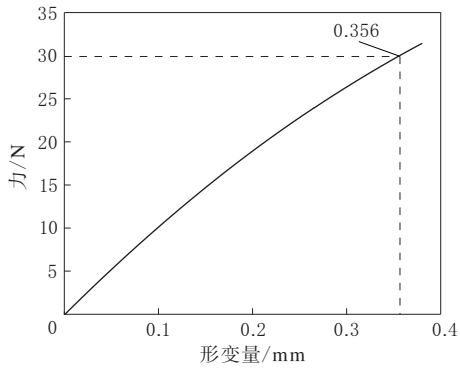
根据控制因子策略,有 4 个控制因子,每个因子 3 个水平,选择 L_9 正交设计进行正交试验(见表 3)。试验台架模拟实车状况,为电动机设置不同的电压电流水平,进行各个工况的声音响度采集,响度与客户期望负相关,为便于考虑问题,通



(a)结构一



(b)结构二



(c)结构三

图8 优化后的3种集成式密封条力-位移的关系曲线

表1 控制因子策略

水 平	控制因子			
	A	B	C	D
1	0.3	结构一	6	1.5
2	0.5	结构二	8	3
3	0.8	结构三	7	2

过数学运算(10减去声音响度)转换成正相关,该转换不影响稳健性评估,且数字“10”可用其他数

表2 噪声因子策略

电动机水平	噪声因子	噪声工况
a	N1	W1
a	N2	W2
b	N1	W3
b	N2	W4
c	N1	W5
c	N2	W6

表3 L₉(3⁴)正交试验方案

试验 编号	控制因子			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

字替换,亦不失一般性。各工况声音响度转换后的数值及计算出的信噪比(S/N)和斜率(β)如表4所示。

3.3 结果分析

根据表4数据可以算出控制因子B的3个水平的 S/N 和 β 。

结构一: $S/N=(17.5+18.6+18.4)/3=18.2$, $\beta=(7.7+8.5+8.4)/3=8.2$

结构二: $S/N=(19.2+18.8+17.6)/3=18.5$, $\beta=(9.1+8.8+8.3)/3=8.7$

结构三: $S/N=(19.1+16.8+19.3)/3=18.4$, $\beta=(9.1+7.1+9.2)/3=8.5$

其余控制因子的水平可以依此类推,计算出其 S/N 和 β 。根据DFSS理念, S/N 越大,设计越稳健, β 越大,系统效率越高。比较这些数值,可以判断出各个因素对响应特性的影响^[9]。控制因子B中导槽底部结构二的 S/N 和 β 均最大,在各种工况下最稳健,转换效率最高。在可制造性方面,唇边(结构三)不及泡管(结构二),泡管形位公差更小,且更容易控制。因此,结构二为最优设计。

在台架(见图9)上,对集成式原设计和最优设计分别进行声音响度测试,优化设计声音响

表 4 各工况声音响度转换后的数值及计算出的 S/N 和 β

项 目	试验编号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
控制因子									
A	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	0.8
B	结构一	结构二	结构三	结构一	结构二	结构三	结构一	结构二	结构三
C	6	8	7	8	7	6	7	6	8
D	1.5	3	2	2	1.5	3	3	2	1.5
噪声工况/sone									
W1	1.989	0.799	1.399	1.663	0.988	2.679	1.638	2.124	0.814
W2	1.954	0.646	0.834	1.346	1.196	2.218	1.626	0.917	0.940
W3	1.376	1.036	0.297	1.846	2.087	3.493	1.882	0.648	0.876
W4	2.292	0.965	1.279	0.825	1.182	2.908	1.343	0.289	0.453
W5	4.235	1.599	0.524	1.846	0.079	4.258	1.853	5.042	0.880
W6	1.722	0.176	1.291	1.407	1.627	2.068	1.525	0.984	0.731
S/N	17.5	19.2	19.1	18.6	18.8	16.8	18.4	17.6	19.3
β	7.7	9.1	9.1	8.5	8.8	7.1	8.4	8.3	9.2

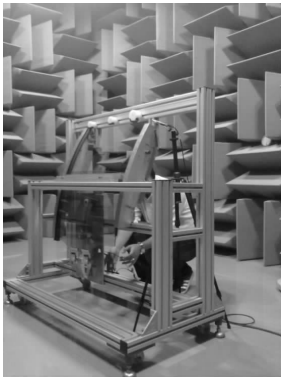


图 9 台架试验示意

度比原设计小 1.019 sone。响度越小,客户满意度越高。由于声音感知的复杂性和主观性,目前业内没有统一的声品质评估标准^[10-12],为了进一步确定优化设计能够满足客户期望,采用通用汽车体系 GMUTS(General Motors’ Uniform Testing Specifications)试验规范再次评价设计优化对声品质的改进效果。声品质专家小组用 GMUTS 评估,原设计平均分为 5.05 分,优化设计为 8.45 分,优化设计的声音表现与装配式密封条在同一水平上,能够满足客户对声品质的高要求。

综上所述,试验证明集成式密封条采用结构二可有效提升玻璃升降声音品质,满足顾客期望,同时也证明通过密封条形变量和势能提升可有效改善声品质。

4 结论

在玻璃旋转不可避免的情况下,运用有限元工具对导槽集成式密封条结构进行优化分析,通过改善位移-形变量参数,提升密封条的弹性势能和内能,达到改善关门声品质的目的。根据六西格玛设计理论,经过参数设计和正交试验,将关门声品质改善前后的密封条置于子系统台架上进行各种工况的验证,结果表明,集成式密封条断面优化后响度明显下降,经评估玻璃升降声品质改善效果显著。

参考文献:

[1] 毛东兴. 声品质研究与应用进展[J]. 声学技术,2007,26(1): 159-163.

[2] 宋恩栋,陈剑. 基于某车的主客观声品质评价[J]. 噪声与振动控制,2009,29(3):92-95.

[3] 乌静,陈剑. 车门关闭声品质偏好性评价与客观分析研究[J]. 噪声与振动控制,2010,30(4):119-122.

[4] 蔺磊,顾彦,蔺玉辉,等. 车辆关门声品质评价方法的研究[J]. 汽车工程学报,2012,2(2):129-133.

[5] 韩国华,许雪莹,侯艳芳. 摇窗机声品质研究[J]. 汽车工程学报,2011,1(z1):13.

[6] 郭峰. 6 Sigma 设计在汽车设计中的应用[J]. 汽车工程, 2006,28(10):892-896.

[7] 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.

[8] 何曼君,陈维孝,董西侠. 高分子物理[M]. 上海:复旦大学出版社,2005:295-370.

- [9] 黄金陵. 汽车车身设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 315-320.
- [10] Otto N A. Subjective Evaluation and Analysis of Automotive Starter Sounds[J]. Noise Control Engineering Journal, 1993, 41(3): 377-382.
- [11] Hamilton D. Sound Quality of Impulsive Noises: An Applied

Study of Automotive Door Closing Sounds[C]. SAE Paper, 1999-01-1684.

- [12] 杨穿, 于德介. 基于伪 WIGNER, VILLE 分布的汽车关门声品质评价参数研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(24): 91-96.

收稿日期: 2014-09-19

首届汽车-轮胎跨界发展高峰论坛在京召开

中图分类号: U469; U463. 341 文献标志码: D

2015年1月23日, 由中国汽车工程学会汽车经济发展研究分会主办, 轮胎世界网承办的“汽车-轮胎跨界发展高峰论坛——2015年汽车市场对轮胎市场影响分析”在京召开。与会各界专家针对国家宏观政策对汽车和零部件市场的影响、2015—2016年国内汽车市场发展趋势、自主品牌汽车市场前景、商用车市场对全钢轮胎需求、乘用车市场对半钢轮胎需求、后市场对替换胎需求、工程机械市场对轮胎需求、轮胎电商的发展趋势等问题, 进行了权威分析和展望。

中国汽车工程学会理事长付于武指出, 中国汽车市场过去十几年呈爆发式增长, 汽车与轮胎两个产业的发展均得益于这一阶段。汽车产业作为典型的拉动市场快速发展的产业, 其年增长率达到20%。然而, 2014年国内汽车产销量分别仅为2 372. 29万和2 349. 19万辆, 同比增长7. 26%和6. 86%, 增速重回一位数。目前的中国汽车业已经进入低于GDP增速的“新常态”, 且由速度增长型转到追求品质、增强核心竞争力的轨道上来。在“新常态”下, 轮胎与汽车行业只有相互依赖, 实现产业链互相合作, 即跨行业、跨学科合作, 才能享受协同创新的红利。

中国汽车工业经济技术研究所所长李京生表示, 汽车业是传统产业, 也是新兴产业, 是新兴技术应用的基础, 配件、新兴技术应用于汽车, 就可以获得大发展, 但是如何发展, 需要界共同努力。2014年汽车年产量仍然达到2 370多万辆, 仅新车对轮胎的需求量就将近1亿条, 因此汽车配件和汽车上下游产业仍有巨大的发展空间。但是对于某个具体企业, 其市场份额及技术发展方

向需另作分析。

国家信息中心信息资源部主任徐长明分析了汽车市场大趋势与2015年市场形势。他指出, 乘用车市场超高速增长的时代已经结束, 中高速增长的新常态还将持续10年左右, 增长率基本维持在10%。同时, 乘用车市场增速还受到限购政策的影响, 恐慌性购买是个不确定因素, 而该因素对汽车市场短期趋势起着决定性作用。

贝卡尔特管理(上海)有限公司战略合作与发展总经理张毓滨介绍了轮胎钢丝帘线的发展趋势。绿色轮胎成为未来发展趋势, 贝卡尔特根据轮胎产品性能的发展需求, 致力于开发高强度、超高强度钢丝帘线, 以实现减小轮胎中钢丝帘线的用量, 从而减小轮胎质量, 降低生产成本和能耗, 实现节能减排。与普通强度钢丝帘线相比, 超高强钢丝帘线应用于载重轮胎能够实现减重3~4 kg; 与高强度钢丝帘线相比, 超高强钢丝帘线应用于轿车轮胎带束层能够实现减重0. 3~0. 4 kg, 滚动阻力降低3%~7%。

三角轮胎股份有限公司商用车配套执行总裁丛勇表示, 2014年以来国内轮胎行业严峻的市场形势以及美国等国家对中国轮胎实施“双反”(反补贴反倾销), 警醒业界应重视品牌建设和质量建设, 同时加强有效的行业管理和市场监管。他建议零部件厂商与整车厂建立战略合作关系, 在轮胎等配套环节建立联动机制, 实现稳定发展。

此次汽车业和轮胎业人士共同探讨行业的市场发展和未来趋势, 携手应对市场危机, 为两个行业之间的发展、融合奠定了良好的基础。

(本刊编辑部 冯 涛)