

车门开闭耐久仿真精度提升及分析应用

廖扬扬，王国峰，任新星，黄小兰，张风利
比亚迪汽车工业有限公司

【摘要】 车门作为汽车的重要部件，在用户使用过程中会经受频繁反复的开闭，可能发生疲劳破坏。当前行业内车门开闭耐久仿真普遍存在精度不足的情况，本文基于某车型的前侧门对车门开闭仿真进行了深入分析和对标，提出了一种改进的车门开闭耐久仿真方法。本文对密封条、缓冲块等超弹性材料进行材料级别的试验，利用 DOE 多目标优化进行材料本构的参数拟合。并对锁机构传力部件详细建模，通过扭簧刚度、预载及阻尼等参数匹配实现锁机构的真实运动轨迹，同时深入探索了玻璃升降器、护板等大质量附件的影响，进行车门开闭过程的瞬态动力学模拟。本文首次进行了车门关闭瞬态过程中的加速度动态响应对标，证明改进后的仿真模型能够较为准确地模拟车门关闭的瞬态过程。再通过对比车门开闭耐久实验的开裂情况与仿真结果，验证了仿真模型对于车门开闭耐久性能的分析是可靠的，能为车门的前期设计提供有效指导，节省项目开发成本。

【关键词】 车门，疲劳耐久，DOE，有限元仿真，瞬态动力学

An Improved FEM Simulation and Application of Door Opening-Closing Durability

Liao Yangyang, Wang Guofeng, Ren Xinxing, Huang Xiaolan, Zhang Fengli
BYD Auto Industry Company Limited

Abstract: As an important part of the car, the door will undergo frequent and repeated opening and closing action in daily use, which may cause fatigue damage. The current durability simulation of door opening and closing is still inaccurate. Based on the in-depth analysis of the door opening and closing simulation and experiment, this paper proposes an improved vehicle door opening and closing durability simulation model. Firstly, conduct material level tests on hyper elastic materials such as sealing strips and buffer blocks. Fitting constitutive parameters of materials using DOE parameterization optimization. Modelling the key force-transmitting components such as lock mechanisms in detail, and fully considering the influence of large-mass accessories such as glass lifters and guard boards, and conducting transient dynamic simulation and fatigue durability analysis of the door opening and closing process. This article is the first to study the acceleration during the transient process of door closure. By comparing the measured acceleration curve of the monitoring point of the door inner panel with the simulation results during a single door closing process, it is proved that the improved simulation model is more accurately simulate the transient process of door closing and obtain the dynamic response at each moment. By comparing the cracking situation of the door durability test and simulation life, it is verified that the simulation model is reliable for the analysis of the door opening and closing durability performance, which can provide effective guidance for the early design of the vehicle door and save the project development cost.

Key words: car door, fatigue, DOE, finite element method, transient dynamics

引言

车门是汽车的重要部件，作为使用频次极高的开闭件，在实际工作过程中由于反复开闭，可能会发生疲劳破坏，从而导致车门钣金开裂。我司针对车门的开闭耐久性能会在试制阶段进行车门开闭耐久试验，但耐久试验耗时长，若发现开裂问题再进行优化设计、更改样件、试验校核会进一步增加汽车的研发时间和资金成本，因此很有必要在前期的设计阶段通过仿真手段规避风险。

车门关闭过程中的能量基本在 15~35J 左右，关门能量低，鲁棒性较差，较小的结构差异或者参数变化可能都会对耐久的结果造成显著的影响。车门系统的结构和运动机理又比较复杂，既要考虑密封条、缓冲块等超弹性材料的缓冲密封作用，又要关注门锁的运动机理及其弹簧预载的影响，同时还有玻璃、内饰板、玻璃升降器等各类附件，其仿真精度

很难保证，针对这个问题，行业内相关从业人员也陆续开展过一些研究。

邓赛帮^[1]等人针对前门防撞梁和玻璃升降器试验开裂现象，进行了仿真对标，重点考虑了玻璃的开关状态和玻璃水切的影响，成功复现了开裂问题。龙岩^[2]等人考虑车门刚度、玻璃的厚度、内饰板质量等影响进行了车门耐久的仿真试验对标，并开展了车门轻量化优化。业青^[3]等人使用 Nastran，用惯性释放等方式进行车门 slam 仿真。调研发现，大家普遍是直接进行疲劳寿命的仿真对标，对开关过程中的瞬态响应没有进行深入分析和研究。同时，对于密封条\缓冲块等超弹性材料及门锁、内饰板、玻璃水切等结构进行了大量的简化处理。正如前文所说，关门过程能量低，鲁棒性较差，较小的结构差异或者参数变化可能都会对耐久的结果造成显著影响，所以，本文以某车型前侧门为研究对象，对车门的开闭过程中的瞬态响应进行了深入探索和动态对标，对密封条、缓冲块、锁机构等关键传力部件开展了材料级标

定和详细建模，并充分考虑玻璃升降器、护板等大质量附件的影响，通过与试验对称建立了改进的车门开闭耐久有限元仿真方法，结合实测信号及实验结果对仿真精度进行验证。

1 车门耐久仿真分析流程及理论简述

1.1 车门耐久仿真分析流程

本文首先对关门过程进行瞬态动力学分析，即按照实车状态建立仿真模型并给车门施加初始角速度完成关门过程的模拟，提取车门钣金的应力时间历程，输入耐久仿真软件中计算车门损伤及分布，预测钣金各位置耐久寿命。车门开闭耐久仿真分析流程如图 1 所示。

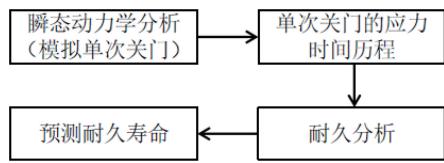


图 1 车门开闭耐久仿真分析流程

1.2 瞬态动力学有限元分析理论

有限元理论通过将研究对象离散成若干个单元，建立与原问题数学模型等效的有限元方程并求解结点未知量的方法获得问题的解答^[1]。车门开闭过程是典型的结构动力学问题，承受着本身惯性及与周围结构相互作用的动力载荷，其基于有限元的基本运动方程为

$$\ddot{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

式中， \mathbf{M} 为质量矩阵； \mathbf{C} 为阻尼矩阵； \mathbf{K} 为刚度矩阵； $\ddot{\mathbf{x}}$ 为结点加速度向量； $\dot{\mathbf{x}}$ 为结点速度向量； \mathbf{x} 为结点位移向量； $\mathbf{F}(t)$ 为结点载荷向量。

通过给定初始条件及边界条件对系统的运动方程求解，即可获得分析对象各时刻的运动状态，包括位移、速度、加速度、应力等。

1.3 疲劳分析理论

1.3.1 Miner 线性损伤准则

预测承受交变载荷结构件的疲劳损伤是一个复杂的课题，目前工程上最简单且应用最广泛的损伤模型是 Miner 线性损伤模型^[2]，该理论认为交变载荷下，构件的总损伤是各应力水平下损伤的线性累加，当损伤累计达到 1 时发生失效。

对于在某交变应力范围 S 作用下的构件，各应力水平 S_i 对应的疲劳极限记为 N_i ，构件经受该水平应力作用的循环次数即为 n_i ，则构件的总损伤为

$$D = \sum D_i = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

至疲劳失效的循环寿命 N_f 为：

$$N_f = \frac{1}{D} \quad (3)$$

1.3.2 基于应力的疲劳分析方法

由 1.3.1 中的损伤累计理论可知，疲劳损伤与循环比密切相关，循环次数 n_i 可由应力时间历程曲线计数获得，对

于车门开闭这类高周疲劳问题，其疲劳寿命 N_i 则基于应力-寿命 (S-N) 方法根据应力及损伤参数确定。

条件允许的情况下，材料的 S-N 曲线应根据大量疲劳强度试验结合统计方法获得。典型的双对数 S-N 曲线定义如图 2 所示，通过确定试样在 1、 $NC1$ 、 Nfc 次循环时的疲劳强度即可完成定义，其中， $SRI1$ 为 1 次寿命对应的强度，对于钢制试样， $NC1$ 一般定为 1×10^6 ， Nfc 次循环对应的应力水平为试样的疲劳极限，当试样所承受的载荷水平低于疲劳极限时认为不产生疲劳损伤，试样具有无限寿命。

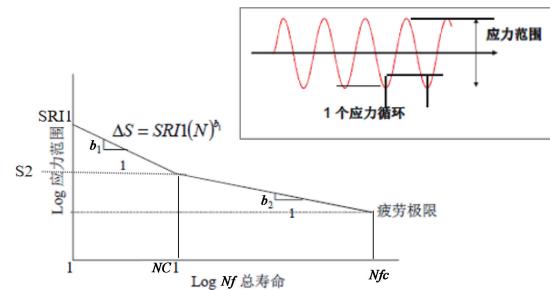


图 2 典型的双对数 S-N 曲线

通过行业内多年的经验和试验，现已开发出用于确认疲劳强度数据与极限拉伸强度之间关系的经验公式，并广泛应用于各耐久计算软件的材料库中。根据不同材料的抗拉强度，即可计算出定义该材料 S-N 曲线的各个关键点。基于材料抗拉强度的 S-N 曲线作为估算高周疲劳区域内零件疲劳寿命的简单而实用的工具，还能够考虑多种受载形式及结构状态的影响对前述的基本 S-N 曲线进行修正。

2 车门开闭耐久仿真分析

2.1 车门关闭过程的运动机理研究

车门从开启状态受到关闭力，进而获得冲击能量和绕铰链转轴旋转的角速度，从不受过多阻力的自由旋转到转至将要关闭，进入受力较大的冲击过程。该过程对车门产生冲击载荷，是车门损伤的主要来源，也是仿真研究的主要对象。结合车门某点的运动曲线，可以将该过程分为四个主要阶段如图 3 所示。①门先后触及车门端密封条、车身端密封条、锁扣缓冲块，获得反向加速度，速度减小；②门关到底，速度反向，开始回弹，反向加速度减小；③回弹受阻，锁扣锁止，锁环触及棘轮，回弹到底，即将开始反弹；④之后在棘轮与缓冲块间来回晃动，直至能量耗尽归于静止。

可以确定，准确模拟车门单次关闭的瞬态动力学过程是保证耐久仿真精度的关键，而这个过程是一个高度非线性的过程，涉及密封条、缓冲块等非线性超弹性材料的动态压缩变形以及锁机构的锁止。同时，对于结构复杂的侧门而言，玻璃、升降器、护板等大质量附件使得门板刚度相对于纯钣金模型而言更难模拟，而门板本身的刚度会直接影响其冲击过程中的动态响应，因此，这一部分的建模也是提升仿真精度的关键。

2.2 关键影响因素

2.2.1 密封条、缓冲块的模拟

密封条和缓冲块在车门关闭时起到重要的缓冲作用，其

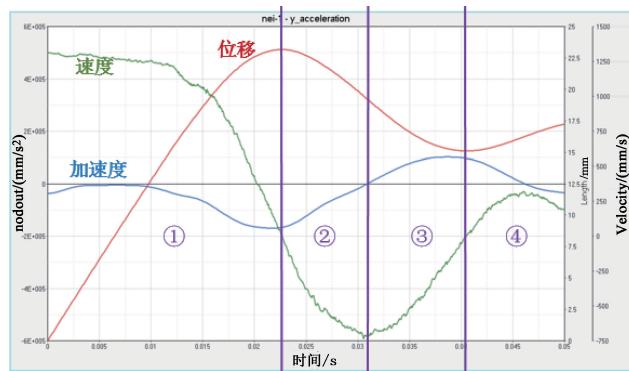


图 3 车门关闭过程的运动曲线

受压变形过程的能量消耗占整个车门冲击能量的 30% 以上^[4]，能有效降低车门钣金的冲击应力，提高车门耐久寿命。

密封条和缓冲块的主要材质为发泡和橡胶，是典型的超弹性材料，其力学特性是非线性的，简单的线性材料模拟无法复现真实的变形和吸能情况，因此需要对其进行更加复杂的非线性模拟。

目前常用的模拟方法是将密封条和缓冲块简化为具有非线性刚度曲线的弹簧，其建模简单、计算速度快，但密封条在整个关门过程中的变形是很复杂的，不同区域密封条的受力时间、受力方向和受力形式都不一致，采用 1D 弹簧单元模拟精度难以保证。且由于不同车型的密封条设计有所不同，此法在不同车型之间的通用性也存在不足。因此，不同于其他文献的建模方法，为了准确模拟密封条和缓冲块在车门关闭过程中的变形缓冲作用，本文采用实物建模，材料的力学特性则根据单体压缩试验，选取合适的超弹本构模型进行参数逆推来获得。

本文采用实体单元模拟密封条和缓冲块，如图 4 所示，密封条和缓冲块均由超弹性材料组成，其中，橡胶材料采用 MOONEY-RIVLIN 材料模型模拟，发泡材料采用 HILL-FOAM 材料模型模拟，其材料本构模型参数均是通过 DOE 参数化优化进行仿真逆向拟合。

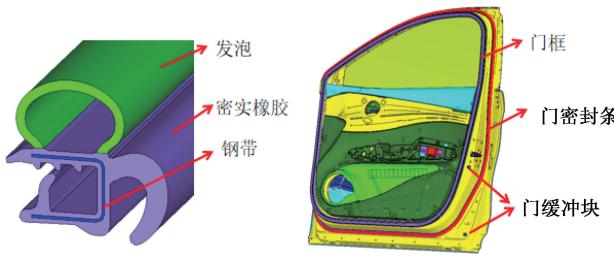


图 4 密封条、缓冲块建模

以密封条为例，在多学科优化软件 Hyperstudy 中，搭建密封条刚度仿真分析自动化流程，以 HILL-FOAM 材料参数 N 、 C_1 、 B_1 为设计变量，以仿真与试验获得的力-位移曲线偏移率最小为目标，进行基于全局响应面法的多目标迭代优化。经过 21 次优化迭代计算，获得材料本构参数。密封条静压测试及仿真建模如图 5 所示。参数优化后的试验与仿真刚度曲线对比如图 6 所示。

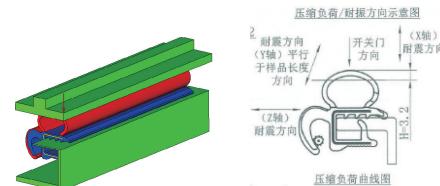


图 5 密封条静压测试及仿真建模

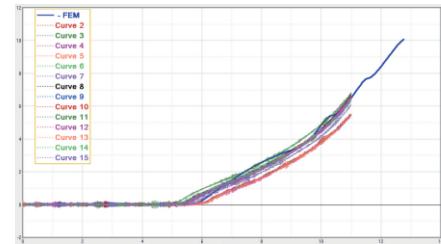


图 6 某批次密封条实测静压荷曲线及仿真对比

2.2.2 锁机构的模拟

锁机构在关门过程中的锁止对于车门关闭后的回弹有限位作用，正确模拟锁机构的锁止是保证车门运动状态准确的重要因素。同时，锁机构内结构复杂，除了棘轮棘爪的旋转与锁止，锁内的缓冲块也对车门的运动有缓冲和限位作用。

为真实模拟关门过程中的锁机构锁止行为，采用实体单元将锁机构中关键运动部件如实建出模型，如图 7 所示。棘轮棘爪安装位置的扭转弹簧用连接单元模拟，根据实际情况设置弹簧刚度及预紧力等，并附加一定的阻尼，降低棘轮棘爪在回弹过程中的晃动量，保证能准确模拟关门过程中门锁的机械锁止：车门关闭时，棘轮接触锁环发生转动，锁环接触缓冲块，门逐渐向内关至极限位置，当车门回弹时棘轮即与在弹簧作用下回位的棘爪相扣完成锁止。

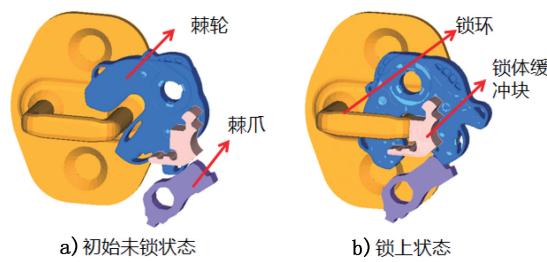


图 7 锁机构建模

2.2.3 车门内护板的处理

内护板作为车门上重要的质量组成，在大多数车门开闭耐久仿真的相关文献中，都是以质量点的形式加柔性的 RBE3 单元或刚性的 RBE2 单元与车门内板连接。但内护板对于门内板有着不可忽略的刚度贡献，直接影响关门过程中的门板响应，图 8 所示为装护板和不装护板情况下，关门过程中内板某点的加速度实测值的对比，可以看到，装有护板的情况下，该点的加速度幅值比未装护板时小，也就是说，护板可以降低车门的响应幅值，对车门耐久有正向贡献。

采用柔性 RBE3 单元配重无法为车门提供刚度，仅考虑了护板质量对车门动能的增加，忽略了护板对车门刚度的贡献，使得结果偏于严苛。采用刚性 RBE2 单元配重则是假设

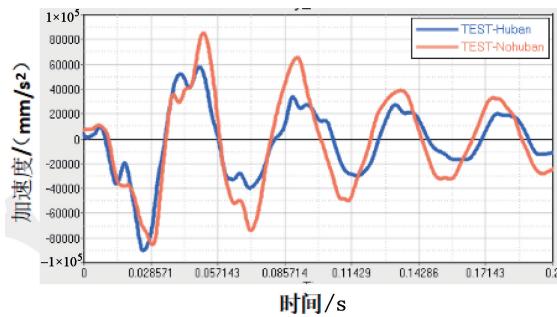


图 8 有无护板的情况下门内板实测加速度响应

护板为完全刚性，使得结果偏于乐观。为了正确模拟护板对整个车门关闭过程的影响，本文对车门内护板起主要刚度贡献的组成部分进行有限元网格划分，根据实际情况赋予材料属性，再采用小质点配重以保证内护板的质量质心与实物一致，这样既保证了内护板质量质心的准确，又充分考虑了护板对车门钣金的刚度影响，确保后续的瞬态动力学分析中得到的门板响应更准确。

2.2.4 玻璃和升降器的处理

玻璃和升降器也是车门上不可忽略的大质量附件，与内护板一样对车门刚度有重要贡献，需要根据实物情况详细建模，确保刚度和质量的准确性。但需要特别留意的是玻璃与钣金之间的连接，玻璃通过呢槽和水切固定在车门上，仿真时一般通过弹簧单元模拟这种软连接，其连接刚度对车门的动态响应影响较大。图 9 为不同连接刚度下某点加速度的仿真结果，可以看到，玻璃与钣金的连接刚度对关门过程中车门内板的晃动有较大影响。

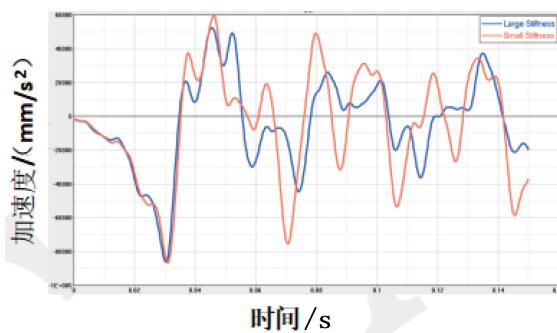


图 9 不同玻璃连接刚度下的加速度仿真结果

本文采用 1D 弹簧单元模拟玻璃与钣金之间的呢槽和水切，刚度特性以实际材料特性为基础，结合实测结果进行调整。

2.3 瞬态动力学仿真分析

2.3.1 仿真模型的建立

本节以某车型前侧门为例，根据实车状态建立车门开闭的有限元模型。车门关闭时，整个门总成获得动能，在给定关门速度的情况下，系统质量是影响初始动能的关键因素，因此，建模中应保证各模块质量如实装配。除 2.2 中所述的关键影响因素的建模外，还需结合实车状态对其他小质量点进行配重，如后视镜、扬声器、门把手等，确保仿真模型质量质心的准确性。建立完备的车门总成有限元仿真模型如

图 10 所示。

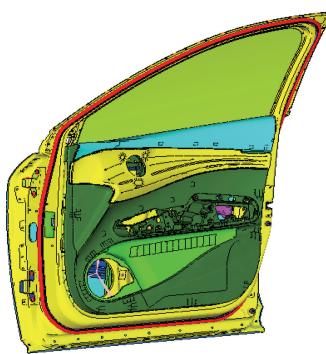


图 10 车门总成有限元仿真模型

为提高计算效率，需要截取部分车身，但不同的车身截取范围会导致不同的车身约束刚度，对车门关闭过程的车门响应有较大影响，因此，需要结合车门仿真结果对车身截取范围进行收敛性检查，确保截取车身的结果与整车状态下的结果相差较小。

车门与车身通过铰链连接，仿真时采用铰链单元模拟铰链运动。至此，车门关闭过程的瞬态动力学有限元仿真模型建立完成，分析模型及铰链如图 11 所示。

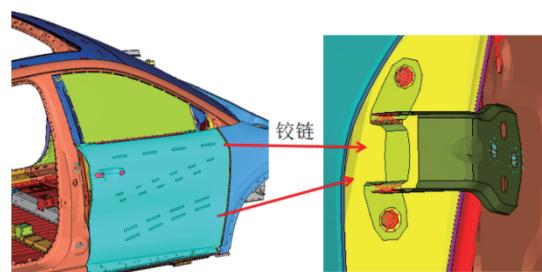


图 11 瞬态动力学仿真模型及铰链建模

2.3.2 边界条件设置及仿真软件计算

本文根据零部件试验部车门耐久试验时实际采用的关门速度 $v = 1.5 \text{ m/s}$ 为初始条件，以门把手附近的速度测量点到铰链转轴的距离 L 为半径，计算出仿真时应施加给门系统的角速度 $\omega = 1.42 \text{ rad/s}$ ，按照实际情况设置各零部件间的接触关系，约束车身截取位置的 6 个自由度。

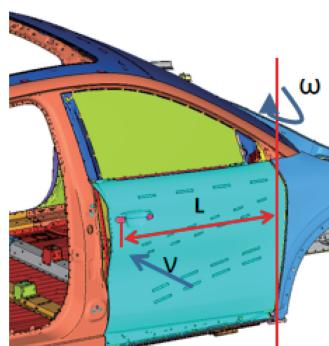


图 12 仿真边界条件示意图

仿真模型初始状态为车门开启 1° ，棘轮将要接触车身锁环时，此时车门即将关闭动能大幅衰减。采用 Dyna 仿真

软件进行车门关闭过程的瞬态动力学求解分析，结合实际关门过程中门从运动到基本静止的时间及有限元仿真的效率，取 0.15s 为计算时间。计算完成后检查车门运动状态是否合理，锁机构是否正常锁止，系统能量平衡状态是否满足工程应用要求，检查无误后即最终得到车门一次关闭过程中各位置的运动及受力状态，包括各时刻的位移、加速度和应力等。

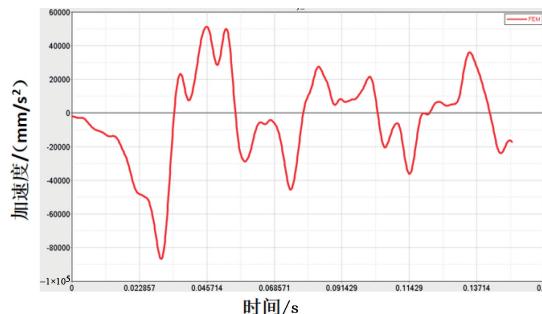


图 13 某点加速度时间历程曲线

通常，门钣金的开裂都出现在车门内板上，图 13 为门内板上某点关门方向的加速度时间历程曲线，可以看到，0.03s 时加速度即达到第一个峰值，此时门关到底，之后由于锁扣锁止而在棘轮与锁体缓冲块之间来回晃动，随着动能耗散加速度峰值逐渐减小，最终系统将趋于稳定。图 14 为 0.03s 时车门内板的应力云图，可以发现应力较大的位置主要分布在主要受力点门锁附件以及护板、升降器安装点附近，这些位置也是可能出现钣金开裂应该重点关注的位置。

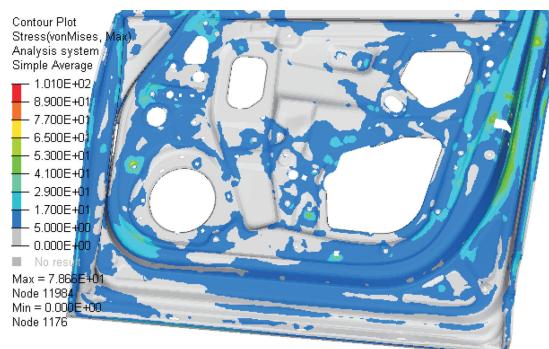


图 14 某时刻 (0.03s) 门内板应力云图

2.4 耐久仿真分析

耐久仿真分析是对承受交变载荷的构件进行损伤计算，预测正常使用至失效的循环次数。常用的耐久分析软件为 Ncode 软件，其基于常用的疲劳理论和大量的材料试验，已经能够较为精确地实现不同载荷条件下金属构件耐久寿命的计算评估。由 2.3 中所述瞬态动力学仿真，已经得到了单次关门过程中的各时刻应力分布，将车门钣金的应力时间历程结果输入 Ncode 中，结合门钣金的材料曲线即可进行耐久计算。图 15 为车门内板的耐久仿真结果，最低寿命为 52 万次，位于门锁安装板附近，超过我司 10 万次的侧门耐久目标。

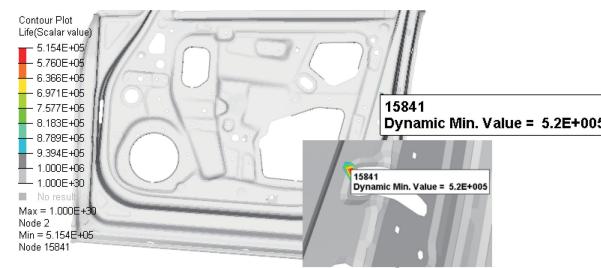


图 15 门内板开闭寿命结果云图

3 车门开关试验对标及耐久结果验证

3.1 瞬态动力学仿真结果对标

车门开闭的瞬态动力学分析结果是耐久计算的输入，其准确性直接决定耐久结果的精度。为了验证瞬态仿真的准确性，本文对实际试验中单次关门过程中的加速度进行监测，并与仿真结果对比。加速度传感器布置如图 16 所示。



图 16 加速度传感器测量关门过程中的加速度响应

图 17 为单次关门过程中门内板两测点的加速度仿真值曲线与试验曲线的对标结果。可以看到仿真结果与试验结果的加速度曲线整体趋势相仿，各加速度幅值基本一致，验证了本文所述车门开闭动力学有限元仿真方法的可靠性。基于这套方法基本可以较好地模拟车门关闭的整个动态冲击过程。

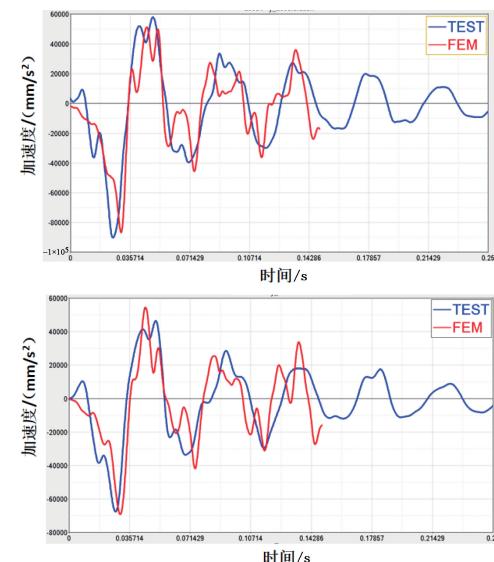


图 17 某两个测点的加速度对标结果

3.2 车门开关耐久试验验证

3.1 节验证了瞬态动力学仿真分析结果的准确性，这为耐久结果的精度提供了保证。本节对公司两个车型的不同车门进行耐久试验验证，除了前述项目一的前侧门，还同时采

用相同的建模方法对项目二的后背门进行耐久试验及开闭寿命对标。耐久试验结果及仿真结果对比见表1。

项目一前侧门结构强度耐久试验结果满足企标要求的10万次。为验证仿真结果，协调资源继续进行该车门的开闭耐久试验，至30万次开闭仍未发生开裂。由于试验部试验资源有限，未能继续试验至车门开裂，试验终止。但目前的试验结果未与仿真结果有冲突，证明仿真结果一定程度上可以反映实际情况。

表 1 车门耐久仿真结果与试验结果对比

耐久对标	仿真寿命/次	试验结果/次	评价标准/次
前侧门	520000	>300000	100000
后背门	14866	≤ 20000	30000

项目二后背门试验至2万次左右时发现内板切边处开裂，仿真结果与试验结果对比如图18所示。可以看到仿真显示的风险位置与试验开裂位置一致，最低寿命值1.5万次与试验的2万次误差在25%以内，且实际开裂寿命应该是小于等于2万次。进一步验证了有限元仿真模型的准确性以及用于前期风险识别的可靠性。

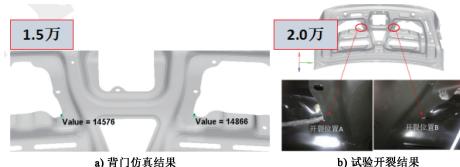


图 18 背门仿真结果与试验开裂结果对比

4 结论

本文对车门的开闭过程进行了深入分析，建立了改进的车门耐久仿真方法，该方法能有效提升仿真精度，较为准确地模拟车门关闭的瞬态冲击过程并预测车门钣金的开闭耐久寿命，为汽车车门的前期开发优化提供有效手段，节省项目开发成本。

1) 本文对车门开闭仿真中的关键影响因素进行了梳理和深入探索，对密封条和缓冲块等超弹性材料利用实验设计(DOE)参数优化进行材料本构的逆向拟合，通过扭簧刚度、预载及阻尼等参数匹配实现锁机构的锁止功能，同时对内护板、玻璃和升降器、玻璃水切等关键部分进行了研究，并提出了改进的建模方法。

2) 本文首次进行了车门关闭瞬态过程中的加速度动态响应对标，实测关门过程中的门内板加速度响应并与仿真结果对比，二者加速度时间历程曲线峰值及相位均吻合较好，证明改进后的仿真模型能够较为准确地模拟车门关闭的瞬态过程。

3) 对侧前门及不同车型后背门进行开闭耐久试验，侧前门试验至30万次未开裂，与仿真结果预测的寿命大于30万次是一致的。后背门试验至2万次发现开裂，与仿真结果的开裂位置及开闭寿命相吻合。耐久试验结果验证了本文车门开闭耐久仿真分析方法的准确性，并证明了该方法在其他车型及前舱盖和后背门的相似运动模型中同样适用。

参 考 文 献

- [1] 邓赛帮, 谭东升, 刘向征, 等. 基于有限元理论的车门疲劳分析及优化 [J]. 现代制造工程, 2019, (6): 50-54, 22.
- [2] 龙岩, 蒋凌山, 刘雪强, 等. 某轿车车门轻量化与疲劳寿命多目标综合优化 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2019, 50 (11): 2732-2742.
- [3] 叶青, 洪光辉, 王得天, 等. 惯性释放在汽车车门 slam 分析中的应用 [J]. 计算机辅助工程, 2011, 20 (2): 136-137.
- [4] 高云凯, 高大威, 徐瑞充, 等. 车门密封条消耗能量计算 [J]. 同济大学学报, 2010, 38 (7): 1069-1073.