

浅议汽车侧门结构设计中的 CAE 应用

郑州日产汽车有限公司技术中心 王少伟 兰天亮 李梦帆

一、引言

汽车侧门是乘员上下车的主要出入口，也是较多功能件集中的部件之一。其结构设计涉及很多性能要求，例如乘员出入的便利性、开闭车门的感知质量、玻璃的升降性等。为满足相关性能要求，在详细的结构设计中需要以相关性能要求为基点进行设计。为避免结构设计所造成的性能不足或过剩，在初版结构数据完成后，对其进行相关的 CAE 分析是很必要的。

本文以 CAE 在某车型前车门结构设计中的具体分析为例，简述 CAE 在汽车侧门结构设计中的具体应用。

二、CAE 分析在汽车侧门结构设计中的应用

本文利用 Hyperworks 软件对某车型前车门总成进行网格划分，得 36108 个有限元模型单元，有限元模型质量为 16.78Kg，与实测质量一致。其中，焊点用 CWELD 和 CONN3D2 模拟，胶体用 3D 实体单元模拟。

该前车门的有限元分析模型如图 1 所示。

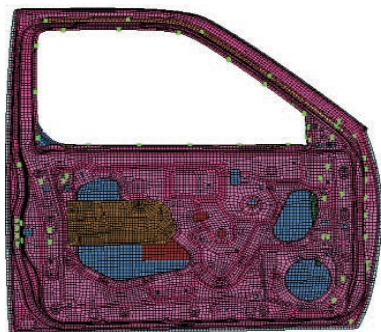


图 1 前车门有限元分析模型

前车门有限元模型中相关材料的特性如表 1 所示。

表 1 前车门有限元模型中相关材料的特性

材料	弹性模量 (N/mm ²)	泊松比	密度 (T/mm ³)	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)
mylon610	8300	0.28	1.4E-9		
glue	6	0.4	6.0E-10		
H260	208000	0.3	7.9E-9	235	383
BUFD05	208000	0.3	7.9E-9	155	250
BSUFD	208000	0.3	7.9E-9	114.3	414.4
SECD	208000	0.3	7.9E-9	240	270
BLC	208000	0.3	7.9E-9	140	405
DC54	208000	0.3	7.85E-9	170	305
BLED+Z	208000	0.3	7.9E-9	145	283
SPHD	208000	0.3	7.85E-9	240	270
SPCC	208000	0.3	7.9E-9	240	270
S20C / SAPH440	208000	0.3	7.9E-9	363	466
DC03	207000	0.28	7.83E-9	152	363.72
DC04	208000	0.3	7.9E-9	133.4	355.5
SPCE	208000	0.3	7.9E-9	149	262
SPOT	210000	0.3	7.9E-9	350	850
环氧树脂	7000	0.35	1.35E-9		

1. 前车门自由模态分析

(1) 约束和加载。

未施加约束和载荷，为自由模态。

(2) 分析结果。

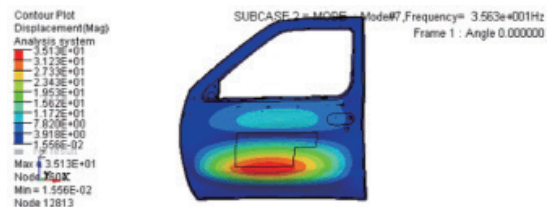
通过计算可知改前车门的扭转和弯曲模态频率大于 35Hz，满足设计要求。

具体的模态分析数值如表 2 所示，相关的分析云图如

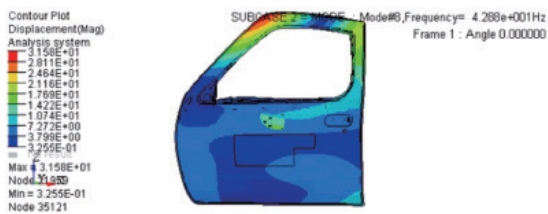
图 2 所示。

表 2 前车门前 6 阶模态分析结果

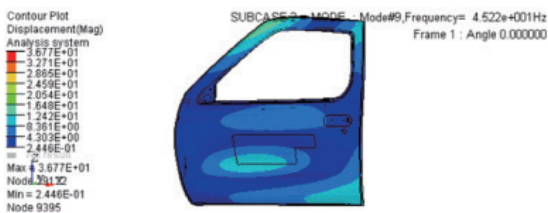
序号	模态阶数	模态频率 (Hz)	振型描述
1	1 阶	35.6	外板局部
2	2 阶	42.9	一阶扭转
3	3 阶	45.2	内板局部
4	4 阶	58.8	一阶弯曲 + 窗框局部
5	5 阶	66.2	
6	6 阶	71.4	



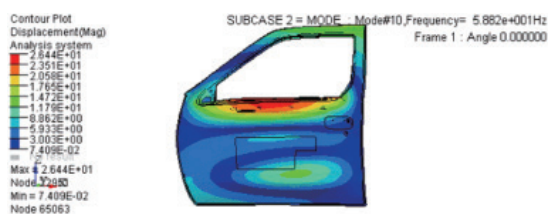
一阶振型（外板局部，35.6Hz）



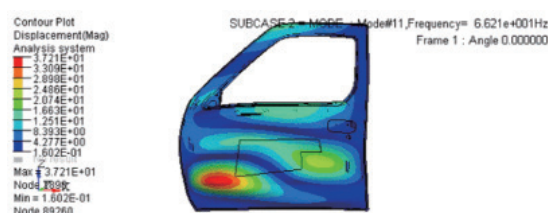
二阶振型（一阶扭转，42.9Hz）



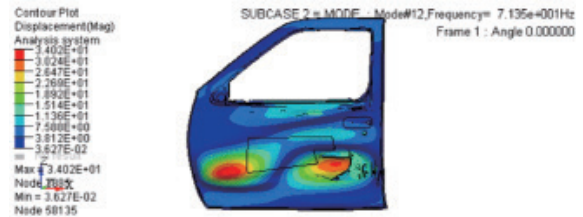
三阶振型（内板局部，45.2Hz）



四阶振型（一阶弯曲 + 窗框局部，58.8Hz）



五阶振型（66.2Hz）



六阶振型（71.4Hz）

图 2 前车门自由模态分析云图

由以上分析云图可以发现，前车门在防撞梁附近刚性稍差（如一阶振型云图上红色虚线圈注处所示），因此为改善其模态特性，在此处增加 1 片补强材。

2. 前车门扭转刚度分析

(1) 约束和加载。

约束：在前车门上下铰链轴心处施加约束，限制 123456 自由度；

在门锁处约束 2356 自由度；

加载：在锁芯处施加 270N·m 的 -X 向扭矩。

约束和加载模型如图 3 所示：

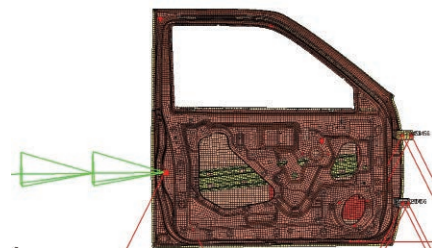


图 3 前车门扭转刚度分析约束和加载模型

(2) 分析结果。

通过计算可得，该前车门的扭转刚度为 678 N·m/°，具体如表 3 所示：

表 3 前车门扭转刚度分析结果

工况	最大扭转角 (°)	加载 (N·m)	计算值	参考值
扭转刚度 (Nm/°)	0.4	270	675	>680

通过分析可知，该车车门扭转刚度（675N·m/°）稍微低于参考值（>680N·m/°），但处于可接受范围，判断为可接受。

3. 前车门门框刚度分析

(1) 约束和加载。

约束：在前车门上下铰链轴心处施加约束，限制

123456 自由度;

在门锁处约束 2356 自由度;

加载: 在上前角和上后角施加垂直于前车门内板施加 178N 的分布力 ($20 \times 20\text{mm}$)。

约束和加载模型如图 4 所示。

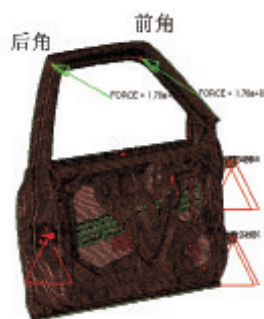


图 4 前车门门框刚度分析约束和加载模型

(2) 分析结果。

通过计算可得, 该前车门门框刚度分析结果如表 4 所示。

表 4 前车门门框刚度分析结果

工况	最大位移值 (mm)	加载 (N)	参考值
框架刚度 (前角) (N/mm)	2.3	178	<5mm
框架刚度 (后角) (N/mm)	3.5	178	<5mm

通过分析可知, 该车车门门框刚度 ($2.3\text{mm}/3.5\text{mm}$) 满足设计要求 ($<5\text{mm}$), 判断可行。

4. 前车门腰线刚度分析

(1) 约束和加载。

约束: 在前车门上下铰链轴心处施加约束, 限制 123456 自由度;

在门锁处约束 2356 自由度;

加载: 在车门腰线位置的内外向同时施加 Y 向各为 178N 的均布力 ($20 \times 20\text{mm}$)。

约束和加载模型如图 5 所示。

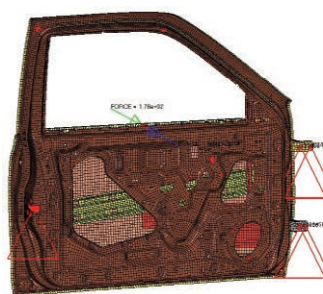


图 5 前车门腰线刚度分析约束和加载模型

(2) 分析结果。

通过计算可得, 该前车门腰线刚度分析结果如表 5 所示。

表 5 前车门腰线刚度分析结果

工况	最大位移值 (mm)	加载 (N)	参考值
腰线刚度 (外) (N/mm)	1.3	178	<3mm
腰线刚度 (内) (N/mm)	1.6	178	<3mm

通过分析可知, 该车车门腰线刚度 ($1.3\text{mm}/1.6\text{mm}$) 满足设计要求 ($<3\text{mm}$)。

5. 前车门钥匙孔安装点刚度分析

(1) 约束和加载。

约束: 约束门内板与密封条配合面自由度 123456;

加载: 在钥匙锁孔处 Y 向施加 200N。

约束和加载模型如图 6 所示。

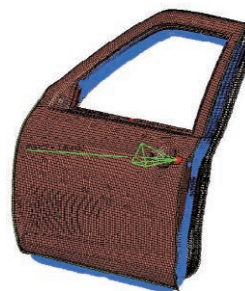


图 6 前车门钥匙孔安装点刚度分析的约束和加载模型

(2) 分析结果。

通过计算可得, 该前车门钥匙孔安装点刚度分析结果如表 6 所示。

表 6 前车门钥匙孔安装点刚度分析结果

工况	最大位移值 (mm)	加载 (N)	计算值	参考值
钥匙孔安装点刚度 (N/mm)	0.2	200	1000	> 680

通过分析可知, 该车前车门钥匙孔安装点刚度 ($1000\text{N}/\text{mm}$) 满足设计要求 ($> 680\text{ N/mm}$)。

6. 前车门扬声器安装点刚度分析

(1) 约束和加载。

约束: 约束门内板与密封条配合面自由度 123456;

加载: 在扬声器安装点位置 Y 向施加 100N。

约束和加载模型如图 7 所示。

(2) 分析结果。

通过计算可得, 该前车门扬声器安装点刚度分析结果

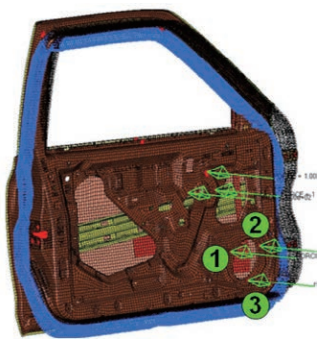


图7 前车门扬声器安装点刚度分析的约束和加载模型
如表7所示。

表7 前车门扬声器安装点刚度分析结果

工况	最大位移值 (mm)	加载 (N)	刚度计算值	参考值
扬声器安装点刚度 (1) (N/mm)	2.92	100	34.2	>75
扬声器安装点刚度 (2) (N/mm)	0.45	100	222.2	>75
扬声器安装点刚度 (3) (N/mm)	0.61	100	163.9	>75

通过分析可知，该车前车门扬声器安装点1处刚度稍差，需要通过在安装点位置附近设置加强筋或加高扬声器安装处车门内板的凸台高度进行改进，具体结合周边系统和整车布置进行抉择。安装点2、3处刚度满足设计要求（大于75N/mm），判断可行。

7. 前车门升降器安装点刚度分析

(1) 约束和加载。

约束：约束门内板与密封条配合面自由度 123456；

加载：在升降器安装点位置 Y 向施加 100N。

约束和加载模型如图8所示。

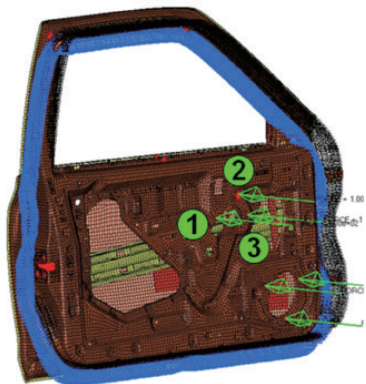


图8 前车门升降器安装点刚度分析的约束和加载模型

(2) 分析结果。

通过计算可得，该车前车门升降器安装点刚度分析结果如表8所示。

表8 前车门升降器安装点刚度分析结果

工况	最大位移值 (mm)	加载 (N)	刚度计算值	参考值
升降器安装点刚度 (1) (N/mm)	2.67 (1)	100	37.5	>100
升降器安装点刚度 (2) (N/mm)	1.78 (2)	100	56.2	>100
升降器安装点刚度 (3) (N/mm)	1.88 (3)	100	53.2	>100

通过分析可知，该车前车门升降器安装点处刚度稍差，判断NG。需要通过在安装点位置附近设置加强筋或加高升降器安装处车门内板的凸台高度进行改进，具体结合周边系统和整车布置进行抉择。

8. 前车门密封条安装处车门内板刚度分析

(1) 约束和加载。

约束：约束门内板与密封条配合面自由度 123456。

加载：门内板密封条处施加作用力：5.8N/100mm。

约束和加载模型如图9所示。

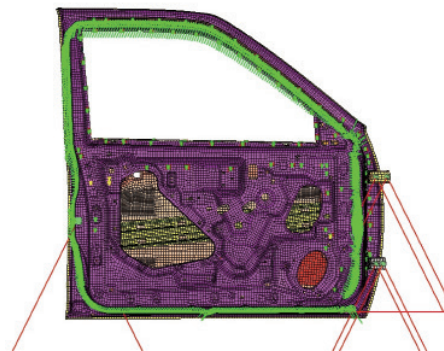


图9 前车门密封条安装处车门内板刚度分析的约束和加载模型

(2) 分析结果。

通过计算可得，该车前车门密封条安装处车门内板刚度分析结果如表9所示。

表9 前车门密封条安装处车门内板刚度分析结果

工况	最大位移 (mm)	加载	参考值 (mm)
车前车门密封条安装处车门内板刚度分析	1.0	5.8N/100mm	<1.8

通过分析可知,该车前车门密封条安装处车门内板刚度满足设计要求。

9. 前车门门把手安装孔强度分析

(1) 约束和加载。

约束:约束门内板与密封条配合面自由度 123456;

加载:在外开手柄开启到极限位置上施加法向 750N 的力。

约束和加载模型如图 10 所示。

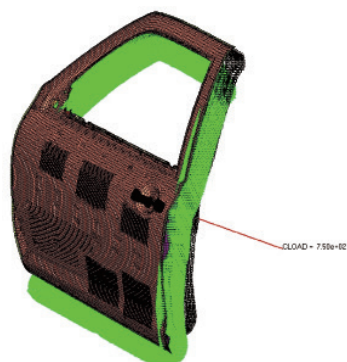


图 10 前车门门把手安装孔强度分析的约束和加载模型

(2) 分析结果。

通过计算可得,该前车门门把手安装孔强度分析结果如表 10 所示,相关的应力云图如图 11 所示。

表 10 前车门门把手安装孔强度分析结果

零件	最大应力	材料	抗拉强度
车门外板	138MPa	BUFD	<364 MPa

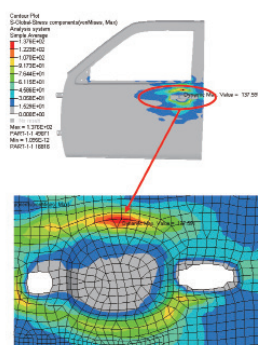


图 11 前车门门把手安装孔强度分析云图

通过分析可知,该车前车门门把手安装处的最大应力出现在门把手安装座上,车门外板门把手安装孔周边也有较大应力分布。但最大应力(138MPa)小于材料的抗拉强度(364 MPa)。为改善该处应力,可以在车门外板上粘贴适当面积

的止振材。

10. 前车门铰链强度分析

(1) 约束和加载。

约束:约束与车身链接的铰链板自由度 123456;

加载:在过铰链旋转中心的铰链中间位置建立参考点,在参考点上分别施加纵向力 $F=11110\text{N}$, 横向 $F=8900\text{N}$ 。

约束和加载模型如图 12 所示。

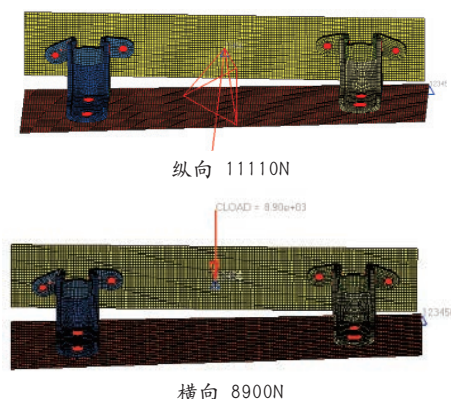


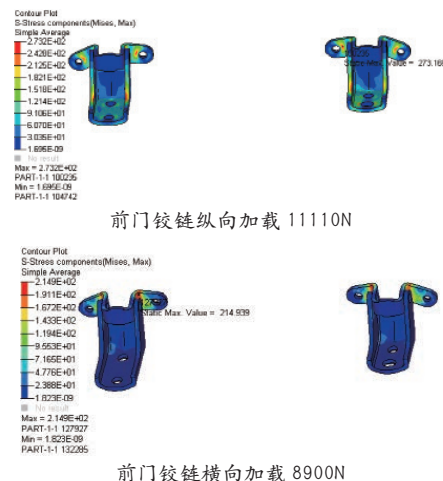
图 12 前车门铰链强度分析的约束和加载模型

(2) 分析结果。

通过计算可得,该前车门铰链强度分析结果如表 11 所示,相关的应力云图如图 13 所示。

表 11 前车门铰链强度分析结果

工况	方向	最大应力 (MPa)	加载 (N)	抗拉强度
前门铰链	纵向	273.2	11110	581MPa
	横向	215.0	8900	581MPa



前门铰链纵向加载 11110N

前门铰链横向加载 8900N

图 13 前车门铰链强度分析云图

通过分析可知,该车前车门铰链最大应力(纵向

273.2MPa，横向 215.0MPa) 小于材料的抗拉强度 (581 MPa)，判断可行。

11. 前车门保持件强度分析

(1) 约束和加载。

约束：约束截取处自由度 123456；

加载：在门锁位置上分别施加纵向力 $F=11110\text{N}$ ，横向 $F=8900\text{N}$ 。

约束和加载模型如图 14 所示。

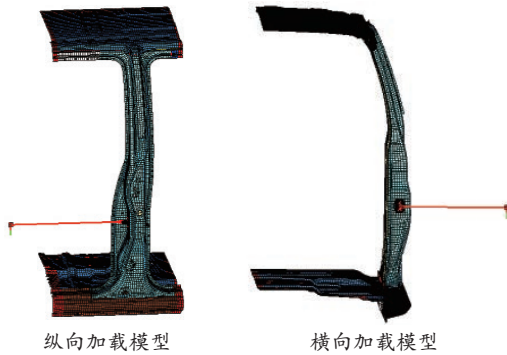


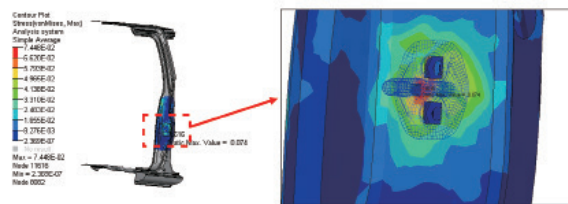
图 14 前车门保持件强度分析的约束和加载模型

(2) 分析结果。

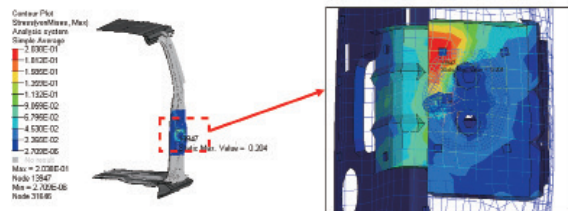
通过计算可得，该前车门保持件强度分析结果如表 12 所示，相关的应力云图如图 15 所示。

表 12 前车门保持件强度分析结果

方向	最大应力 (MPa)	加载 (N)	抗拉强度 (MPa)	抗拉强度
前门保持件	纵向	74	11110	<405
	横向	204	8900	<405



前门保持件纵向加载 11110N



前门保持件横向加载 8900N

图 15 前车门保持件强度分析云图

通过分析可知，该车前车门保持件最大应力 (纵向 74MPa，横向 204MPa) 小于材料的抗拉强度 (405 MPa)。

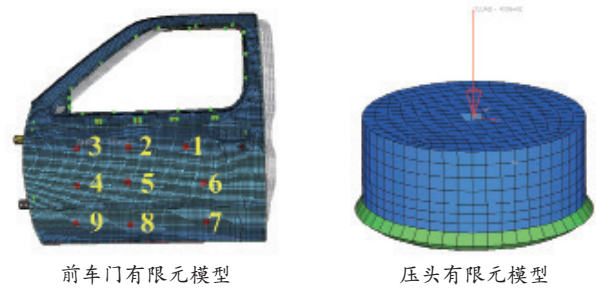
12. 前车门抗凹性分析

(1) 约束和加载。

约束：约束门内板与密封条配合面自由度 123456；

加载：在外板选择 9 个相对薄弱区域，0 ~ 400N 的力加载在直径为 80mm 的圆盘上，圆盘底面法向垂直于加载面。在压头上建立局部坐标系，局部坐标系的 Z 向平行于压头与外板接触面的法向，压头相关点约束 DOF=12456。

约束和加载模型如图 16 所示。



前车门有限元模型

压头有限元模型

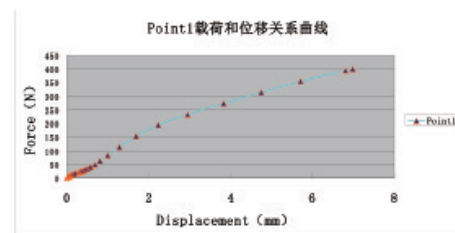
图 16 前车门抗凹性分析的约束和加载模型

(2) 分析结果。

通过计算可得，该前车门抗凹性分析结果如表 13 所示。各点载荷与位移关系曲线图如图 17 所示。

表 13 前车门抗凹性分析结果

压头编号	150N 位移值 (mm)	400N 位移值 (mm)
判断标准	<4	<8
1	1.6	7.0
2	1.6	6.1
3	1.7	7.5
4	6.7	12.9
5	3.6	9.5
6	7.0	13.1
7	1.8	5.2
8	2.1	6.3
9	1.4	4.4



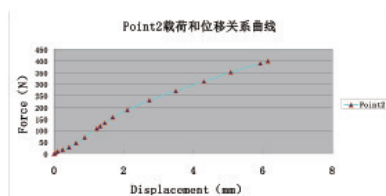
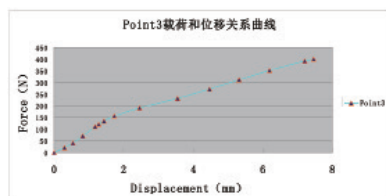
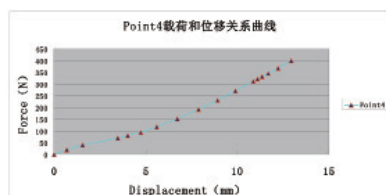
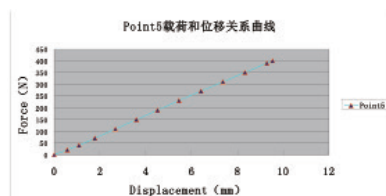
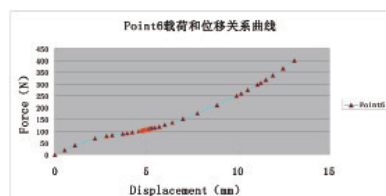
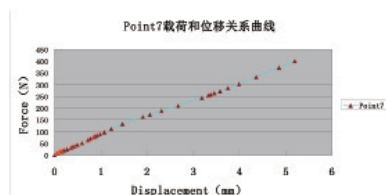
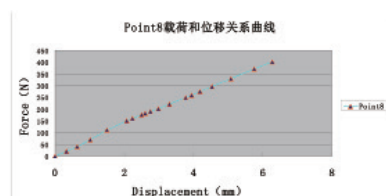
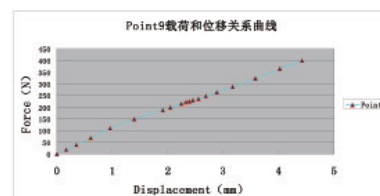


图 17 各点载荷与位移关系曲线图

通过分析可知，该车前车门在点 4、5、6 处抗凹性稍差，建议增加防撞梁与车门外板链接胶点数或在 X 方向延长补强材。

13. 前车门下垂分析

模型截取：A 柱沿 X 向 $\pm 500\text{mm}$ ，A 柱沿 Y 向 500mm 。

(1) 约束和加载。

约束：

车门转 15° 角：约束侧围断面自由度 123，门锁点自由度 2；

车门转 65° 角：约束侧围断面自由度 123，门锁点自由度 1。

加载：

自重工况：在车门旋转 15 和 65 度角时，-Z 向 $1g$ 加速度施加到车门质心位置；

加载工况：在车门旋转 15 和 65 度角时，在门锁位置垂直向下加载 1000N 的力。

车门转 15° 和 65° 有限元模型如图 18 所示。

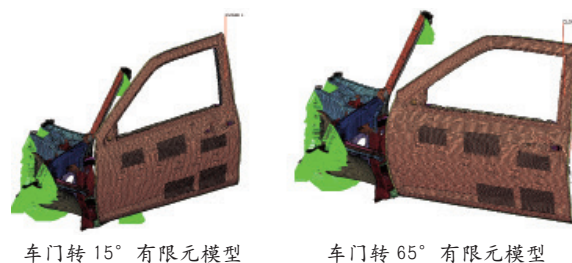


图 18 前车门下垂分析的约束和加载模型

(2) 分析结果。

通过计算可得，该车前车门在打开 15° 和 65° 时的下垂量如表 14 所示，详见图 19。各角度下加载时的塑形变形分析结果及云图如表 15 和图 20 所示。

通过分析可知， 15° 和 65° 开启工况下，最大位移和最大残余变形量有略大于参考值的工况，建议增大两铰链的

表 14 前车门打开 15° 和 65° 时的下垂量分析结果

工况		最大位移 (mm)	残余变形 (mm)	最大位移 (mm) (参考值)	残余变形 (mm) 参考值
15° 角	自重 工况	0.78	/	<0.7	/
	加载 工况	9.3	1.12	<9	<1
65° 角	自重 工况	0.85	/	<0.7	/
	加载 工况	9.35	0.86	<9	<1

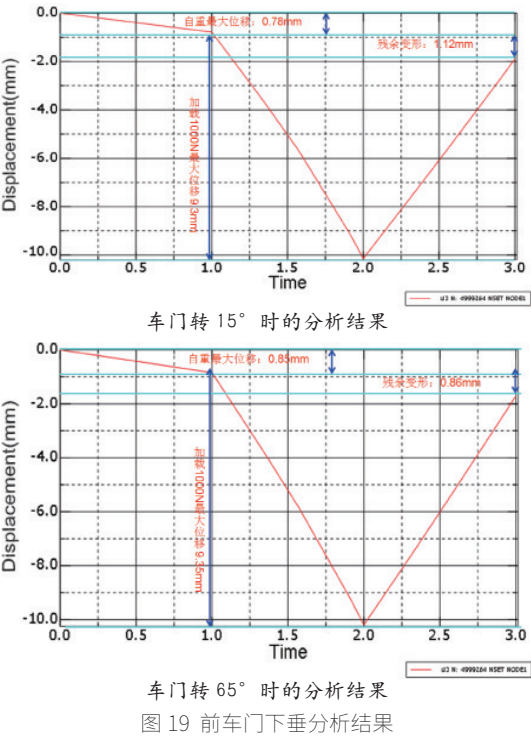
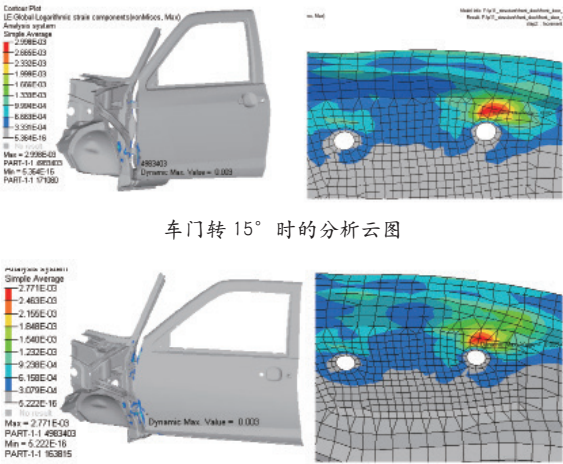


表 15 前车门打开 15° 和 65° 时的塑性变形分析结果

工况	加载(N)	最大塑性 应变	材料	参考值
前门 15° 角下垂分析	1000	0.003	BSUFDE	<0.005
前门 65° 角下垂分析	1000	0.003	BSUFDE	<0.005

间距或添加纵向加强板，以改善。最大塑性应变（0.003）均出现在车门内板上的下铰链安装孔附近，满足设计要求（< 0.005）。



三、结语

通过以上具体项目的分析可以得出以下结果。

表 15 分析结果汇总

序号	项目		CAE 分析 结果	判断 标准	判断 结果	NG 对策
1	自由模态分析 (Hz)		35.6	≥ 35	OK	——
2	扭转刚度 (N·m/°)		675	≥ 680	OK	——
3	门框刚 度 (mm)	前角	2.3	< 5	OK	——
		后角	3.5	< 5	OK	——
4	腰线刚 度 (mm)	外部	1.3	< 3	OK	——
		内部	1.6	< 3	OK	——
5	钥匙孔安装点刚度 (N/mm)		1000	> 680	OK	——
6	扬声器 安装点 刚度 (N/mm)	安装点 1	34.2	> 75	NG	在其附近设置加强筋或加高凸台高度
		安装点 2	222.2	> 75	OK	——
		安装点 3	163.9	> 75	OK	——
7	升降器 安装点 刚度 (N/mm)	安装点 1	37.5	> 100	NG	在安装点位置附近设置加强筋或加高升降器安装处车门内板的凸台高度
		安装点 2	56.2	> 100	NG	
		安装点 3	53.2	> 100	NG	

8	密封条安装处内板刚度 (mm)	1.0	< 1.8	OK	
9	门把手安装孔强度 (MPa)	138	< 364	OK	
10	铰链强度 (MPa)	纵向	273.2	< 581	OK
		横向	215	< 581	OK
11	保持件强度 (MPa)	纵向	74	< 405	OK
		横向	204	< 405	OK
12	抗凹性	150N 位移值 (mm)	1.6/1.6/1.7/6.7/3.6/7.0/1.8/2.1/1.4	< 4	NG
		400N 位移值 (mm)	7.0/6.1/7.5/12.9/9.5/13.1/5.2/6.3/4.4	< 8	NG
13	下垂分析	15° 自重工况最大位移 (mm)	0.78	< 0.7	NG
		15° 加载工况最大位移 (mm)	9.3	< 9	NG
		15° 加载工况残余变形 (mm)	1.12	< 1	NG
		15° 最大塑性应变	0.003	< 0.005	OK
		60° 自重工况最大位移 (mm)	0.85	< 0.7	NG
		60° 加载工况最大位移 (mm)	9.35	< 9	NG
		60° 加载工况残余变形 (mm)	0.86	< 1	OK
		60° 最大塑性应变	0.003	< 0.005	OK

以上通过自由模态、扭转刚度、前车门门框刚度、前车门腰线刚度、前车门钥匙孔安装点刚度、前车门扬声器安装点刚度、前车门升降器安装点刚度、前车门密封条安装处车门内板刚度、前车门门把手安装孔强度、前车门铰链强度、前车门保持件强度、前车门抗凹性以及前车门下垂等 13 个项目的 CAE 分析, 对汽车侧门结构设计中的 CAE 应用进行了详细说明, 并针对不符合设计要求的项目提出了合理的改善建议。相关的改善方案在后期的样车试制、评价和耐久试验阶段得到了充分的验证, 验证结果符合设计要求。

在汽车侧门结构设计中, 通过所述项目的 CAE 分析, 可以为侧门的结构设计、改进和优化提供量化的依据和指导。从而避免设计阶段因方案验证不足而造成后期试装、评价和耐久试验时问题再现所产生的对应周期长、费用高等问题。

本文详细的介绍了汽车侧门结构设计时需要作的 CAE 分析项目, 为广大的汽车侧门设计开发人员提供了一个很好的参照。