

Study on the Calculation Method of Firewall Intrusion Based on Fewer Measure Points in Front Crash Test

Xiao Feng

(Wuhan ShangShan Simulation Technology Co., Ltd WuHan 430000)

Abstract: Aiming at the shortcomings of high test cost in foreign because of drawing the firewall intrusion isolines cloud, a calculation method of the firewall intrusion based on the fewer measure points in front crash test is proposed. The method is a kind of post-processing about front crash test data, in combination with qualitative analysis and quantitative calculation, suitable for programming, by programming and running directly to the output the firewall intrusion isolines cloud. The computing derivation of the calculation method of the firewall intrusion provides for the preparation of the program's key algorithms, with the idea of simple, straightforward features. So, under the conditions of traditional test techniques and test conditions to draw the firewall intrusion isolines cloud in front crash tests, the method can reduce cost of test effectively, with great practical engineering application value.

Keywords: Front Crash Test, Firewall Intrusion, Isoline Cloud, Computer Program, Key Algorithm, Engineering Application

汽车前碰撞实验防火墙侵入量计算方法研究

肖 锋

(武汉上善仿真科技有限公司 武汉 430000)

摘要: 针对国外绘制防火墙侵入量等值线云图测试成本过高的缺点, 结合对防火墙侵入量的定性分析与定量计算, 提出了一种基于前碰撞试验少量测量点的防火墙侵入量计算方法。该方法是对测试数据的后处理, 适合编程实现, 通过编写计算机程序并运行, 直接输出防火墙侵入量等值线云图。防火墙侵入量计算推导过程则提供了编写该程序的关键算法, 具有思路简单明了的特点。在以传统测试技术和测试条件下, 要求绘制防火墙侵入量等值线云图, 该方法能有效解决技术实现和测试成本的问题, 具有极强的实际工程应用价值。

关键词: 前碰撞试验, 防火墙侵入量, 等值线云图, 计算机程序, 关键算法, 工程应用

1 引言

根据国外对交通事故的碰撞重叠率与伤害等级统计, 前碰撞试验目前主要被简化为两种类型——100%重叠刚性墙碰撞(简称“正碰”)和 40%重叠可变形壁障碰撞(简称“偏置碰”)。目前, 最严格的正碰试验为美国 US-NCAP, 碰撞速度不低于 56km/h; 最严格的偏置碰试验为欧洲 Euro-NCAP 和美国 IIHS, 碰撞速度均不低于 64km/h。中国 C-NCAP 正碰试验速度不低于 50km/h, 偏置碰试验速度不低于 56km/h。

正碰试验侧重于约束系统的考核, 主要检验车内乘员在巨大的冲击惯性力作用下, 头部、胸部以及大腿等受到的伤害, 利用座椅、安全带、安全气囊等对乘员加以保护, 使伤害降到最低, 由于车身前端全部参与碰撞, 与偏置碰相比, 乘员舱变形相对较小, 因此, 正碰试验主要评估约束系统对乘员的保护。

偏置碰试验侧重于车身结构的考核, 由于车辆前端只有一侧参与碰撞, 并吸收能量, 因此, 车身前结构变形非常大, 乘员舱侵入会造成车内乘员严重伤害, 与正碰试验相比, 偏置碰车体冲击加速度峰值较小, 从而由冲击惯性造成的乘员伤害较小, 因此, 偏置碰试验主要评价乘员舱侵入对乘员造成的伤害。

在欧洲 Euro-NCAP 星级评价体系中, 汽车前碰撞安全性能只考查偏置碰试验, 主要是由于偏置碰对车身结构安全设计比正碰提出了更高要求, 比如福特 F150, 1997 年获 US-NCAP 五星, 但 IIHS 却是 Poor 评价, 2003 年福特对该车重新进行了结构设计, IIHS 达到 Good 评价。因此, 基于对偏置碰的考虑, 车身结构安全设计方法和理念发生了重大变化, 现代车身结构安全设计基本思路是: 优先考虑偏置碰性能要求, 配合车身结构适当调整和约束系统匹配兼顾正碰性能。

2 防火墙侵入量测量技术背景

2.1 侵入量实验测量点规定

偏置碰试验主要考查乘员舱结构完整性, 评价指标是 A 柱最大后移量和防火墙侵入量。对 A 柱最大后移量, 欧洲 Euro-NCAP 规定超过 200mm 扣一分, 100mm—200mm 之间按线性插值扣分; 对防火墙侵入量, 英国 MIRA 根据前碰撞试验经验规定的防火墙侵入量测量点为六个^[1]: Point1 为制动踏板几何中心在防火墙上 X 方向的投影; Point2、Point6 分别位于与 Point1 同一纵坐标两侧 200mm 处; Point3、Point4、Point5 分别位于与 Point2、Point1、Point6 同一横坐标离前底板高度 20mm 处, 如图 1 所示, 其侵入量测试结果属于监测项。美国 IIHS 规定的防火墙侵入量测量点为五个^[2]: Point1' 为制动踏板几何中心在防火墙上 X 方向的投影; Point2'、Point4' 分别位于与 Point1' 同一纵坐标两侧 150mm 处; Point3'、

Point5 ‘分别位于与 Point1 ‘同一纵坐标两侧 250mm 处，如图 2 所示，其侵入量测试结果直接用于对车身结构的星级评价。

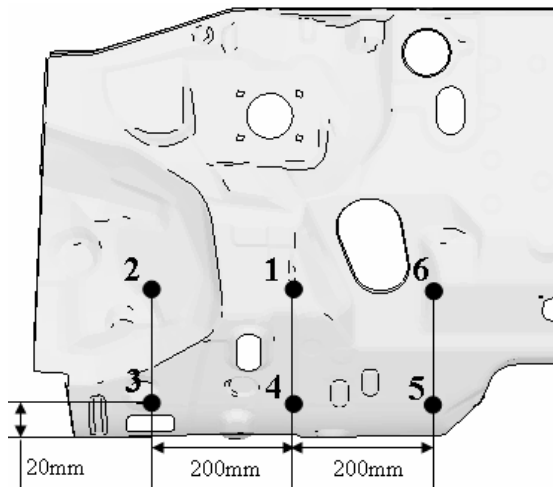


图 1 英国 MIRA 防火墙侵入量测量点

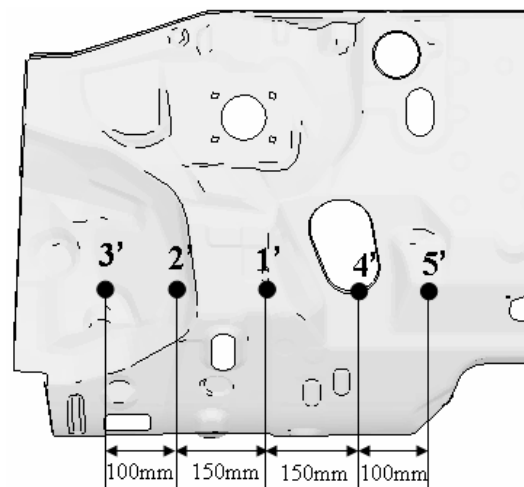


图 2 美国 IIHS 防火墙侵入量测量点

2.2 侵入量计算方法研究目的

目前，前碰撞实验防火墙测量点侵入量主要用于车身结构安全性能评价，而很少用于对车身安全结构进行具体分析，主要受两个方面因素的限制：一是，对车身结构设计而言，法规规定的几个测量点侵入量数据难以直观的进行分析与判断，使得重要的实验数据由于缺乏直观性而不能被工程师所利用；二是，由于受到测试条件、测试技术及测试成本的限制，只能对防火墙局部区域少量关键点进行测量，没有绘制防火墙侵入量等值线云图，无法准确对车身安全结构性能进行定性分析。因而，评价车身结构安全性能的关键试验数据——防火墙侵入量，难以有效发挥指导车身结构安全设计的作用。

在整车前碰撞仿真分析中，防火墙侵入量是一个关键的车身结构安全性能评价参数，利用后处理软件可直接输出防火墙侵入量等值线云图，由于受仿真分析计算时间限制，侵入量一般没有考虑车身结构回弹，其结果往往要比碰撞试验结果高，因此，如何从前碰撞试验中获取准确的防火墙侵入量等值线云图是一项非常值得研究的工作。

国外前碰撞试验依靠先进的图像分析及信息处理技术，使用高速摄像机记录防火墙测量区域各时刻的变形信息，然后使用专业的处理软件对变形信息进行分析计算，绘制出各时刻的防火墙侵入量等值线云图，将各时刻结果进行叠加，从而得到整个动态的防火墙侵入量等值线云图。该碰撞试验防火墙侵入量云图的获得是先进的图像分析及信息处理技术在汽车领域的一个具体应用，具有测试数据精度高、图像直观的特点，但也意味着高成本——测试设备昂贵、维护成本高以及前碰撞试验仪器损坏风险较大。

本文研究的目的是：在传统测试技术和测试条件下，即低测试成本限制，利用少量防火墙侵入量测量点试验数据，结合对大量的车型仿真结果的防火墙侵入量等值线云图的定性分析及防火墙侵入量的定量计算，通过编写防火墙侵入量计算程序并运行，直接输出防火墙侵入量等值线云图。本文防火墙侵入量的定量计算推导过程则提供了编写该程序的关键算法，具有思路简单、明了的特点，适合编程实现。与国外单纯的测试技术相比，该方法的优势在于：在不需要增加巨额测试成本的前提下，同样能够绘制出防火墙侵入量等值线云图。由于防火墙侵入量计算完全依赖于侵入量测量点测试数据，因此，本文防火墙侵入量计算是一种半试验、半理论的计算方法，即实验测量与理论计算紧密结合；由于侵入量测量点测试数据能够对计算侵入量起到限制与修正作用，因此，计算结果完全能够满足工程分析的精度要求，具有极强的实际工程应用价值。

3 防火墙侵入量定性分析

脚踏板区域（footwell）防火墙侵入量过大，会严重影响到假人小腿的得分情况，极易出现零分，因此，对防火墙侵入量进行定性分析，以把握防火墙侵入量影响因素及分布特征，帮助工程师正确的理解侵入量作为评价车身结构关键参数的意义，为车身结构安全设计提供有效的解决方案，同时，为防火墙侵入量进一步定量计算提供假设基础。

3.1 防火墙侵入量影响因素

影响防火墙侵入量的因素主要有两类：一是，结构设计缺陷，通过结构设计改进可以避免，比如，发动机、轮胎撞到防火墙造成的局部侵入量增加，前底板下纵梁压溃造成的防火墙整体侵入量增加；二是，前纵梁根部挤压侵入量和 Kickdown（下弯纵梁）弯曲变形侵入量，只能控制而不能完全避免，本文的基本假设是：防火墙侵入量主要由此两者组成，且该两种

因素对防火墙侵入量的影响是线性无关的, 因此, 在定量计算中对防火墙侵入量进行简单线性叠加。

3.2 防火墙侵入量分布特征

前纵梁根部挤压侵入量, 与前纵梁根部的形状密切相关, 前纵梁根部与防火墙焊接围成的区域一般是一个较狭长的长方形。在前纵梁根部区域内, 由于碰撞载荷作用均匀, 前纵梁根部区域侵入量相同; 在前纵梁根部左右两侧较大区域内, 防火墙侵入量等值线云图呈现垂直分布, 其影响范围较大, 随着离前纵梁根部左右边界距离增加, 前纵梁根部挤压侵入量逐步减少, 即侵入量的变化是连续的, 对于横坐标相同的点, 侵入量基本相同; 在前纵梁根部上下两边区域, 防火墙侵入量等值线云图呈现水平分布, 其影响范围较小, 在局部区域, 随着离前纵梁根部上下边界距离增加, 前纵梁根部挤压侵入量逐步减少, 即侵入量的变化是连续的, 对于纵坐标相同的点, 侵入量基本相同。前纵梁根部挤压对防火墙焊接边侵入量的影响则为零。

Kickdown 弯曲变形侵入量, 其侵入量等值线云图呈现水平状分布, 即纵坐标相同的点, 侵入量相同, 沿着防火墙平面由下往上, 侵入量逐渐增加。

由于以上两种因素造成的防火墙侵入量具有各自明显的分布特征, 因此, 碰撞安全工程师可以根据防火墙侵入量分布特征对仿真和实验结果进行定性分析, 以指导车身结构安全性能改进方向, 同时, 为防火墙侵入量定量计算提供假设基础。

3.3 防火墙侵入量解决方案

前纵梁根部碰撞载荷: 一方面, 是造成前纵梁根部区域侵入量直接原因; 另一方面, 是造成 Kickdown 弯曲变形而引起防火墙侵入量的间接原因。因此, 控制碰撞载荷可有效减少侵入量。经验数据分析表明: 较大的 Kickdown 弯曲变形通常伴随较大的前纵梁根部侵入, 但较大的前纵梁根部侵入不一定伴随较大的 Kickdown 弯曲变形。

针对前纵梁根部挤压侵入量, 主要采取控制碰撞载荷传递的主动方法: 一方面, 控制前纵梁的变形模式, 使前纵梁后段向外侧折弯, 将前纵梁根部载荷形成一定的偏转角度作用于防火墙, 从而减小根部区域垂直碰撞载荷, 同时, 将碰撞载荷主动向车身另一侧传递, 减少碰撞侧承载的压力, 从而达到减少防火墙侵入量的目的; 另一方面, 疏通前纵梁根部载荷传递路径, 可在前纵梁根部增加斜支撑结构件, 将作用于防火墙的碰撞载荷向 A 柱传递, 从而起到抵抗前纵梁根部侵入的目的。

针对 Kickdown 弯曲变形侵入量, 主要采取提高 Kickdown 抗弯刚度的被动方法, 以控制防火墙侵入量在理想的范围内, 结构上可从以下几个方面考虑: 第一, 提高 Kickdown 截面抗弯高度, 建议不低于 60mm, 该截面高度在早期整布置时就要充分考虑, 否则, 到了结构设计后期, 由于受人机工程和转向拉杆运动空间限制, 设计变更难度非常大; 第二, 在前底板上增加抗弯加强板, 可有效提高 Kickdown 抗弯能力, 为满足 Euro-NCAP, 国外许多车型采用此结构; 第三, 为了提高整体的抗弯刚度, 增大中通道前端开口宽度及结构连接件, 对提高整体抗弯能力效果十分显著, 国外中通道设计大部分采用大开口设计, 而国内中通道设计大部分采用小开口设计, 满足国内 C-NCAP 要求难度不大, 但要满足 Euro-NCAP 要求则有较大难度。此外, 可提高相关结构件材料强度与厚度。

防火墙侵入量主要取决于 Kickdown 抗弯刚度, 比如 Kickdown 截面高度不够、中通道开口区域较小等不利因素, 都会引起较大的防火墙侵入量。

4 防火墙侵入量定量计算

防火墙侵入量定量计算的基本思路是: 根据基本假设——防火墙侵入量主要由 Kickdown 弯曲变形侵入量和前纵梁根部挤压侵入量组成, 且线性无关, 前者可以直接计算, 后者在前者基础上结合测试数据间接计算, 因此, 本文从单纯计算 Kickdown 弯曲变形对其自身造成的侵入量分析开始, 然后将其计算方法逐步扩展到驾驶员与乘员两侧防火墙侵入量计算, 具体计算以驾驶员侧防火墙区域为例说明, 乘员侧与驾驶员侧计算方法完全一致。

4.1 防火墙侵入量计算定义

4.1.1 计算区域划分

防火墙计算区域划分考虑了美国 IIHS 防火墙侵入量测量范围、前纵梁根部投影区域以及防火墙本身结构特点。以防火墙曲面下部倾斜角度变化为界, 分为上下侵入量测量点内插计算区域, 即以 A、B 为主的下部区域和以 C、D、E 为主的上部区域, 如图 3 所示。A、B 区域对应图 7 中防火墙侧视图 l_3 , A 区域由于离前纵梁根部较远, 其侵入量受前纵梁根部挤压的影响较小, 其上边界距离前地板平面的距离是 20mm; B 区域由于离前纵梁根部较近, 其局部区域侵入量受前纵梁根部挤压的影响较大; C、D、E 区域对应图 7 中防火墙侧视图 l_2 , 是两种因素造成的防火墙侵入量的主要叠加区域。D 为前纵梁根部区域在防火墙上的投影 (示例中近似为长方形), 由于类似于均布载荷的作用以及大量仿真分析数据支持, 在该区域假设前纵梁根部挤压侵入量均相同; C、E 区域随着离 D 区域距离的增加, 受前纵梁根部挤压的影响逐渐减少。其它区域为侵

入量测量点外插计算区域，与内插区域相连的左右外插区域其宽度是 50mm，与内插区域相连的上部外插区域其高度至防火墙曲面上部倾斜角度变化边界。

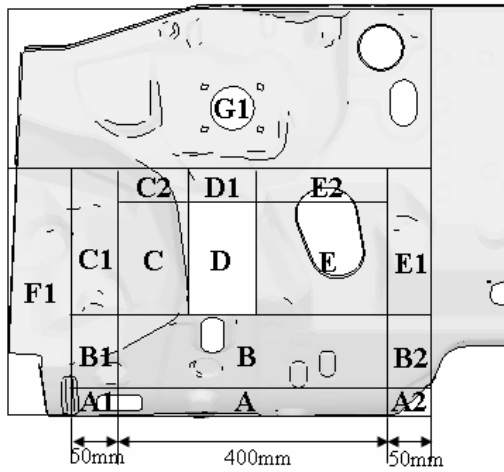


图3 防火墙计算区域划分

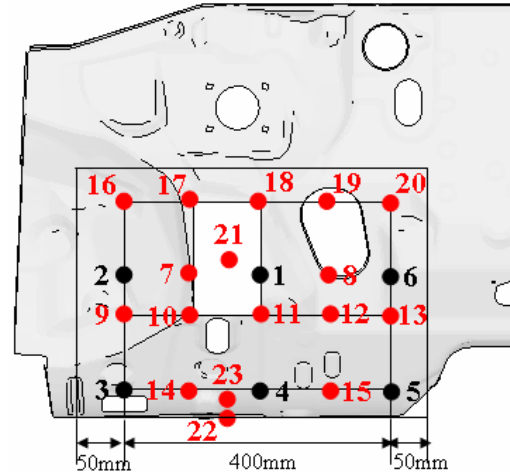


图4 前碰撞试验侵入量测量点布置

4.1.2 侵入量测量点布置

防火墙侵入量实验测量点布置考虑了英国 MIRA 碰撞试验侵入量测量点、内插计算区域边界以及防火墙结构特点，防火墙侵入量测量点布置如图 4 所示。Point1、Point2、Point3、Point4、Point5、Point6 按英国 MIRA 碰撞实验测量要求布置测量点；Point7、Point8、Point14、Point15 分别是在前面相应的两点正中间布置测量点；Point9、Point10、Point11、Point12、Point13 是在防火墙上部、下部区域交接处布置测量点，其位置分别与 Point2、Point7、Point1、Point8、Point6 具有相同的横坐标（整车 X 轴坐标）；Point16、Point17、Point18、Point19、Point20 与前纵梁根部上部边界具有相同纵坐标（整车 Y 轴坐标），布置位置分别与 Point2、Point7、Point1、Point8、Point6 具有相同的横坐标；Point21 布置在前纵梁根部的正中心，作为确定前纵梁根部区域侵入量的计算参考点；Point22 布置在防火墙与前底板焊接区域，与 Point21 具有相同的横坐标，监测防火墙的整体后移量，以对防火墙侵入量计算公式进行修正；Point23 布置在受前纵梁根部侵入影响可忽略区域，与 Point21 具有相同的横坐标，目的是计算 Kickdown 弯曲系数。以上测量点个数为完成侵入量计算需要的基本布置数目，在此基础上增加测量点数量有利于提高防火墙侵入量的计算精度。

4.1.3 参考坐标系确定

针对上部区域和下部区域侵入量影响因素的不同特点建立不同参考坐标系。对于下部区域，以平行于整车坐标系 Y 轴、对应图 7 中 O_1 处位置为 X 轴，Y 轴沿防火墙表面垂直向上，其纵坐标与前纵梁根部中心位置 Point21 纵坐标一致，建立坐标系 $S_{X_1O_1Y}$ ，该坐标系用于计算下部区域 Kickdown 弯曲变形侵入量，如图 5 所示。对于上部区域，以上、下区域交接线即对应图 3 中 O_2 处位置为 X 轴，Y 轴与坐标系 $S_{X_1O_1Y}$ 的 Y 轴重合，建立坐标系 $S_{X_2O_2Y}$ ，该坐标系用于计算上部区域 Kickdown 弯曲变形侵入量以及前纵梁根部挤压侵入量，如图 6 所示。

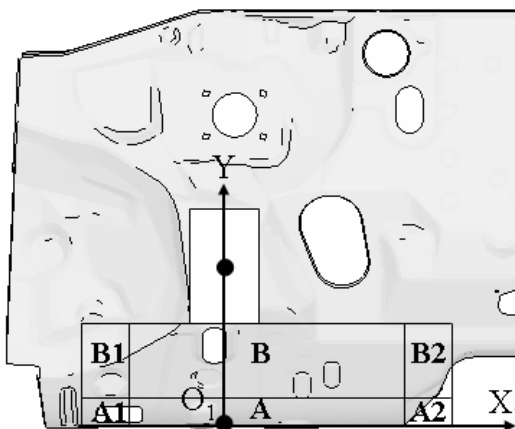


图5 防火墙下部区域坐标系

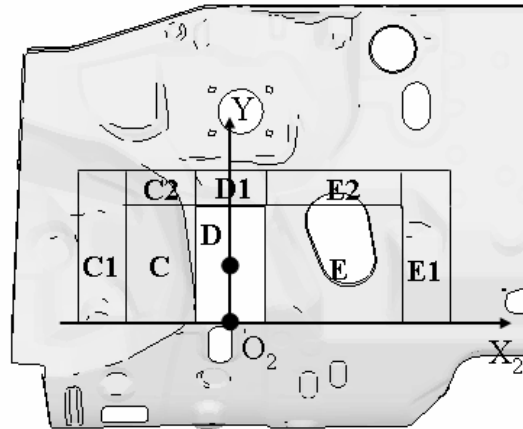


图6 防火墙上部区域坐标系

4.2 Kickdown 自身弯曲变形侵入量

本文以 Camry (凯美瑞) 前纵梁和防火墙为例, 前纵梁如图 7 所示, l_1 、 l_5 分别是前纵梁后端中轴线, l_2 、 l_3 是 Kickdown 与防火墙搭接面侧视图, 或是防火墙的侧视图, l_4 为前纵梁与前底板的搭接面侧视图。前纵梁受到碰撞载荷后, 相对于 O 产生较大力矩, 使得 l_1 绕 O 转动到 l_1' , 如图 8 所示。Kickdown 弯曲变形导致防火墙各区域随之一起发生类似的运动, l_3 绕 O_1 转动到 l_3' , l_2 先绕 O_2 转动后相对于 O_1 整体移动, 运动到 l_2' 。

在对 Kickdown 弯曲变形侵入量分析中, 假设 O 、 O_1 位移为零, 同时, 基于基本假设——Kickdown 弯曲变形侵入量与前纵梁根部挤压侵入量之间是线性无关的, 因此, 只考虑 Kickdown 弯曲变形对其本身侵入量的影响, 不考虑前纵梁根部挤压对其侵入量的影响。

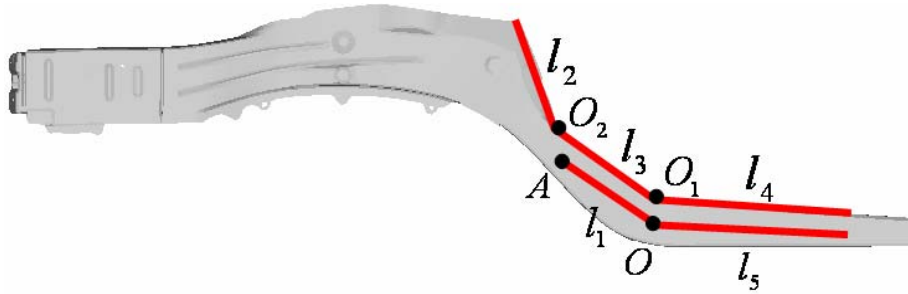


图 7 Camry 前纵梁结构

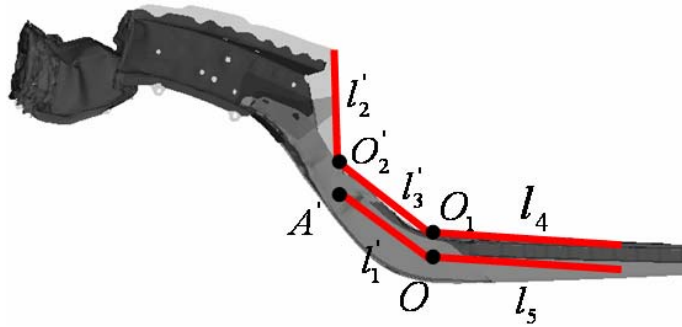


图 8 Camry 前纵梁 C-NCAP 偏置碰仿真分析变形

以下推导前纵梁 Kickdown 中轴线 l_1 上任意一点 A 的侵入量, 在图 8 中 A 点运动到了 A' 点, 为了便于分析, 简化成图 9 所示的计算示意图。其中 A 点运动到了 A' 点的距离为 a , A 点和 A' 点到 O 的距离均为 L , 形成一个等腰三角形; α_1 为 Kickdown 相对于前底板平面的设计弯曲角度, α_2 为 Kickdown 弯曲变形后相对于前底板平面的变形弯曲角度, 其大小由 Kickdown 结构特征、零件材料和厚度决定, x 为 A 点由 Kickdown 弯曲变形造成的侵入量, 以下推导其计算公式。

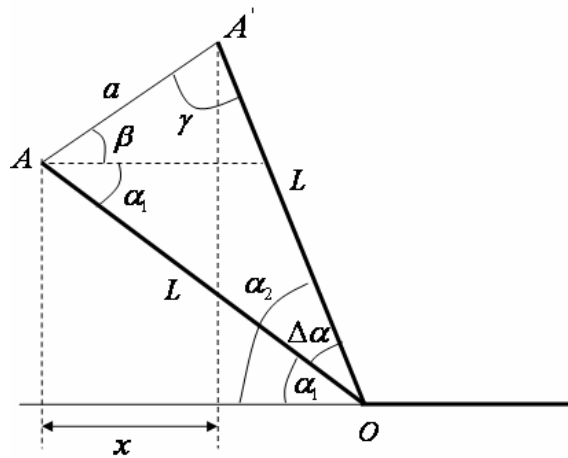


图 9 Kickdown 中轴线 l_1 上任意一点侵入量计算

由图 9 可知:

$$\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1 \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{180 - \Delta\alpha}{2} \quad (2)$$

$$\beta = \gamma - \alpha_1 \quad (3)$$

由以上三式得到:

$$\beta = 90 - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \quad (4)$$

由正弦定理可得:

$$a = 2L \cdot \sin \frac{\Delta\alpha}{2} \quad (5)$$

$$x = a \cos \beta \quad (6)$$

将(5)式代入(6)式得到:

$$x = 2L \cdot \sin \frac{\Delta\alpha}{2} \cdot \cos \beta \quad (7)$$

将(1)、(4)式代入(7)式得到:

$$x = 2L \cdot \sin \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \cdot \cos(90 - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}) \quad (8)$$

令:

$$k = 2 \cdot \sin \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \cdot \cos(90 - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}) \quad (9)$$

则有:

$$x = kL \quad (10)$$

其中 k 为描述 Kickdown 相对于 O 弯曲变形程度的弯曲系数, 其大小主要由 α_2 、 α_1 之差决定, $\Delta\alpha$ 越大, 即 Kickdown 弯曲变形越严重, 弯曲系数越大, 侵入量越大, 反之, 侵入量越小, 当 $\Delta\alpha$ 等于零时, 弯曲系数 k 等于零, 即 Kickdown 弯曲变形侵入量等于零, α_1 一般在 $[30^\circ, 45^\circ]$ 之间, α_2 一般在 $(30^\circ, 90^\circ]$ 之间, 根据(9)式, 可得到弯曲系数 k 的数值范围是 $[0, 0.866]$, 从弯曲系数的定义可以看出, 对某车型某次前碰撞实验, k 为常数, 以 Camry 为例, α_1 等于 32° , 仿真分析结果 α_2 约等于 42° , 则 k 等于 0.105。

前面假设 O 、 O_1 位移为零, 现在考虑 O 、 O_1 在 x 方向位移为 d , 其一般由前底板下纵梁压溃变形产生, 其影响是造成前纵梁及防火墙整体前移, 直接对(10)式进行简单的修正得到 Kickdown 自身弯曲变形侵入量计算公式:

$$x = kL + d \quad (11)$$

4.3 防火墙侵入量计算

防火墙侵入量计算采用“化整为零, 各个击破”的基本策略及“爬楼梯”的方法, 针对不同划分区域及各区域侵入量等值线云图的不同特点依次采用基本相同但有区别的计算方法。

下面推导上部区域、下部区域以及外插区域 F1 和 G1 的侵入量计算公式 (以下公式中各变量下标均表示 Point 编号), 对于其它外插各区域侵入量计算, 采用分别与其靠近的内插各区域相同的计算方法得到。通过编写计算机程序计算出某个时刻整个区域任意一点防火墙侵入量之后, 直接输出实验防火墙侵入量等值线云图, 将各时刻云图进行叠加, 则可得到整个碰撞过程中防火墙侵入量的动态结果显示, 从而将试验数据直观化, 用于对车身结构安全性能的定性分析。

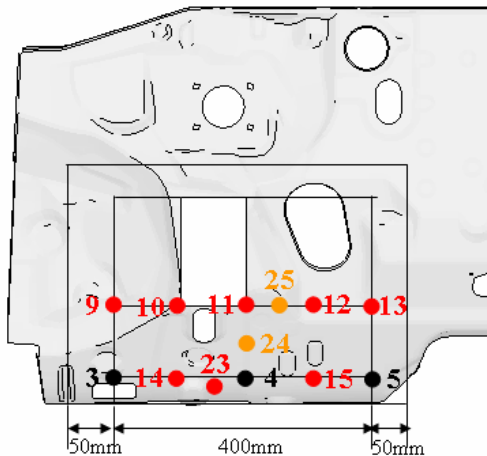


图 10 防火墙下部区域待求点布置示例

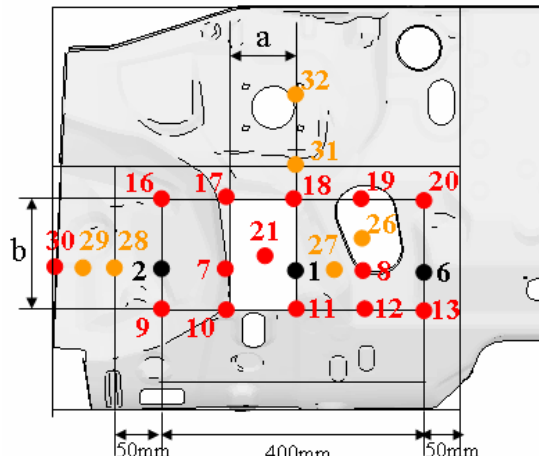


图 11 防火墙上部区域及外插区域待求点布置示例

4.3.1 下部区域侵入量计算

下部区域任意一点侵入量计算主要根据 Kickdown 自身弯曲变形侵入量计算公式 (11) 和侵入量测量点测试数据。以 B 区域为例, 基本思路是: 由具有相同横坐标的侵入量测量点 (如 Point4 和 Point11) 计算与其具有相同横坐标的任意待求点 (如 Point24), 由具有相同纵坐标的侵入量测量点 (如 Point11 和 Point12) 计算与其具有相同纵坐标的任意待求点 (如 Point25), 其布置方法如图 10 所示。除基本假设外, 根据防火墙侵入量定性分析, 对下部区域任意待求点侵入量计算作进一步假设:

假设 1: 内插区域 A 任意一点前纵梁根部挤压侵入量等于零。

根据对防火墙侵入量的定性分析, 防火墙任意一点侵入量主要由两部分组成: Kickdown 弯曲变形侵入量和前纵梁根部挤压侵入量, 由于防火墙与 Kickdown 焊接为一整体, Kickdown 弯曲变形导致防火墙随之产生相同的运动, 因此, 防火墙的 Kickdown 弯曲变形侵入量计算公式与 Kickdown 本身弯曲变形侵入量计算公式一致, 由此, 在 (11) 式的基础上, 根据基本假设, 可以得出下部区域任意一点侵入量计算公式:

$$X = k' L + D + d \quad (12)$$

其中 k' 为各横坐标处的防火墙弯曲系数, 由于前面推导 Kickdown 自身弯曲变形侵入量时, A 点是前纵梁 Kickdown 中轴线 l_1 上任意一点, 而 l_1 所有点在整车坐标系下具有相同横坐标, 因此, 对于横坐标相同的点具有相同的弯曲系数, 这一推论同样适合于防火墙各计算区域横坐标相同的点。根据假设 1, 由此可得到侵入量测量点 Point23、Point4、Point15、Point11、Point12 侵入量表达式:

$$X_{23} = k'_{23} L_{23} + d \quad (13)$$

$$X_4 = k'_4 L_4 + d \quad (14)$$

$$X_{15} = k'_{15} L_{15} + d \quad (15)$$

$$X_{11} = k'_4 L_{11} + D_{11} + d \quad (16)$$

$$X_{12} = k'_{15} L_{12} + D_{12} + d \quad (17)$$

由 (13) 式可直接求出反应 Kickdown 变形程度的弯曲系数 k'_{23} :

$$k'_{23} = \frac{X_{23} - d}{L_{23}} \quad (18)$$

将 k'_{23} 计算结果代入 (9) 式, 则可求出 Kickdown 弯曲变形后相对于前底板平面的弯曲角 α_2 。同样, 由 (14)、(15) 式可直接求出弯曲系数 k'_4 和 k'_{15} , 然后由 (16) 和 (17) 式可求出侵入量测量点 Point11 和 Point12 前纵梁根部挤压侵入量:

$$D_{11} = X_{11} - k'_4 L_{11} - d \quad (19)$$

$$D_{12} = X_{12} - k'_{15} L_{12} - d \quad (20)$$

同样, 由下部区域任意一点侵入量计算公式 (12), 可以直接得到待求点 Point24 和 Point25 侵入量表达式:

$$X_{24} = k'_4 L_{24} + D_{24} + d \quad (21)$$

$$X_{25} = k'_{25} L_{25} + D_{25} + d \quad (22)$$

其中前纵梁根部挤压侵入量 D_{24} 和 D_{25} 以及 Point25 横坐标位置弯曲系数 k'_{25} 分别由相应侵入量测量点线性插值方法计算得到:

$$D_{24} = \frac{L_{24}}{L_{11}} D_{11} \quad (23)$$

$$\frac{D_{12} - D_{25}}{L'_{12} - L'_{25}} = \frac{D_{12} - D_{11}}{L'_{12} - L'_{11}} \quad (24)$$

$$\frac{k'_{25} - k'_4}{L'_{25} - L'_4} = \frac{k'_{15} - k'_4}{L'_{15} - L'_4} \quad (25)$$

其中 L_{11} 、 L_{24} 分别是指各点到坐标系 $S_{x_1O_1Y}$ 的 X 轴距离; L'_4 、 L'_{11} 、 L'_{12} 、 L'_{15} 、 L'_{25} 分别是指各点到坐标系 $S_{x_1O_1Y}$ 的 Y 轴距离。

下部区域任意一点侵入量计算方法与 Point24、Point25 相同, 通过其它侵入量测量点可得到与 Point24、Point25 位置类似点的侵入量, 将计算得到的侵入量作为已知结果, 可求出具有同一横坐标或纵坐标点的侵入量, 依此类推, 从而求出整个

下部区域的防火墙侵入量。

4.3.2 上部区域侵入量计算

上部区域任意一点侵入量计算主要根据下部区域侵入量计算公式 (12) 和侵入量测量点测试数据, 同时, 除基本假设外, 根据防火墙侵入量定性分析, 对上部区域任意待求点侵入量进一步假设:

假设 2: 具有相同横坐标的点前纵梁根部挤压侵入量相同。

4.3.2.1 上部区域弯曲系数计算

由于上部区域与下部区域不在同一平面内, 而是有一定夹角, 如图 7 所示。在实际碰撞过程中, 上部区域先绕 O_2 转动, 后相对于 O_1 主要产生整体移动, 上部区域各相同横坐标位置整体移动量等于上部区域与下部区域相交线上各点的 Kickdown 弯曲变形侵入量 d' , 由下式得到:

$$d' = k' L'' \quad (26)$$

其中 L'' 表示上部区域与下部区域相交线与坐标系 $S_{X_1O_1Y}$ 的 X 轴之间距离, 为定值。

上部区域侵入量计算方法与下部区域相同, 上部区域相对于 O_1 各横坐标位置产生的整体移动侵入量 d' 对自身侵入量的影响与前底板纵梁压溃变形侵入量 d 的影响类似, 因此, 根据同样的处理方式及下部区域任意一点侵入量计算公式 (12), 可以得到上部区域任意一点侵入量计算公式:

$$X = k'' L + D + d + d' \quad (27)$$

其中 L 为各点相对于坐标系 $S_{X_2O_2Y}$ 到其 X 轴的距离。

下面计算上部区域某一横坐标位置两侵入量测量点之间区域的弯曲系数, 以具有相同横坐标的侵入量测量点 Point1 和 Point11 为例, 由 (27) 可得其侵入量计算表达式:

$$X_1 = k''_{11} L_1 + D_1 + d + d'_{11} \quad (28)$$

$$X_{11} = D_{11} + d + d'_{11} \quad (29)$$

根据假设 2:

$$D_1 = D_{11} \quad (30)$$

由 (28) 式减去 (29) 式, 可得:

$$k''_{11} = \frac{X_1 - X_{11}}{L_1} \quad (31)$$

同样, 可得到侵入量测量点 Point12 和 Point8 横坐标位置之间区域弯曲系数 k''_{12} 。

对于上部区域某一待求点横坐标位置弯曲系数, 和下部区域一样, 由两点之间线性插值方法计算得到, 比如求 Point27 横坐标位置弯曲系数 k''_{27} :

$$\frac{k''_{27} - k''_{11}}{L'_{27} - L'_1} = \frac{k''_{12} - k''_{11}}{L'_8 - L'_1} \quad (32)$$

其中 L'_1 、 L'_8 、 L'_{27} 分别是相对于坐标系 $S_{X_2O_2Y}$ 到其 Y 轴距离。

根据上部区域弯曲系数的计算方法, 下面重新计算下部区域弯曲系数 k' , 取与 Point23 具有相同横坐标, 到坐标系 $S_{X_1O_1Y}$ 的 X 轴距离 $L_0 = 0$ 的虚拟点 Point0, 由下部区域任意一点侵入量计算公式 (12), 得到待求点 Point0 侵入量表达式:

$$X_0 = k'_{23} L_0 + D_0 + d \quad (33)$$

其中 $D_0 = 0$, $L_0 = 0$ 由 (13) 式减去 (32) 式可得:

$$k'_{23} = \frac{X_{23} - X_0}{L_{23}} \quad (34)$$

由于上部与下部区域弯曲系数计算方法一致, 因而具有相同意义的计算表达式。当 $X_0 = d$ 时, (34) 式即为 (18) 式。

由于前纵梁变形模式的影响, 前纵梁根部两侧区域防火墙侵入量有较大差异, 一般是左边侵入量要大于右边侵入量, 反应在弯曲系数上则是左边区域弯曲系数大于右边区域弯曲系数, 并从左到右逐步减小, 因此, 对各计算区域取各相邻且横坐标相同的实验测量点分别计算各自横坐标位置的弯曲系数能够很好的反应出弯曲系数的变化特征, 从而, 提高防火墙侵入量的计算精度。

4.3.2.2 前纵梁根部区域侵入量计算

前纵梁根部区域侵入量有其显著的特点, 其在防火墙上的投影形成一个宽 a 、高 b 的长方形区域, 如图 3 中 D 区域, 前

纵梁根部碰撞载荷通过焊接边传递到防火墙，即长方形边界区域。对长方形区域可以看成是施加均布载荷，因此，在前纵梁根部区域进一步假设：

假设 3：前纵梁根部区域挤压侵入量均相等，相对于 O_1 产生的整体移动量均相等，且整个区域弯曲系数等于 Point21 横坐标位置弯曲系数。

由此可得：

$$D = D_{21} \quad (35)$$

$$k'' = k_{21}'' \quad (36)$$

其中 D_{21} 为侵入量测量点 Point21 前纵梁根部挤压侵入量， k_{21}'' 取靠近前纵梁根部两侧，如侵入量测量点 Point10 和 Point11 各自横坐标位置的弯曲系数平均值。

根据上部区域任意一点侵入量计算公式 (27)，Point21 侵入量表达式如下：

$$X_{21} = k_{21}'' L_{21} + D_{21} + d + d' \quad (37)$$

其中 d' 取靠近前纵梁根部两侧，如侵入量测量点 Point10 和 Point11 各自横坐标位置的 Kickdown 弯曲变形侵入量平均值。

根据 (35) 式和 (37) 式，可求得前纵梁根部区域任意一点挤压侵入量：

$$D = X_{21} - k_{21}'' L_{21} - d - d' \quad (38)$$

将其代入 (27) 式，根据 (36) 式，得到前纵梁根部区域任意一点侵入量计算公式：

$$X = k_{21}'' (L - L_{21}) + X_{21} \quad (39)$$

该侵入量计算公式具有明确的物理意义：在前纵梁根部区域，以其几何中心 Point21 为计算参考点，表明了待求点与参考点侵入量差别的唯一原因是：由于距离坐标系 $S_{x_2 O_2 Y}$ 的 X 轴距离不同，从而导致待求点与参考点相对于 O_2 转动产生的侵入量的差别，而其它侵入量影响因素对该区域影响效果均相同。

4.3.2.3 前纵梁根部两侧区域侵入量计算

以前纵梁根部右侧区域 E 为例，基本思路是：由具有相同横坐标的侵入量测量点（如 Point8 和 Point19）计算与其相同横坐标的任意待求点（如 Point26），由具有相同纵坐标的侵入量测量点（如 Point1 和 Point8）计算与其相同纵坐标的任意待求点（如 Point27），其布置方法如图 11 所示，与 Point1、Point27、Point8 具有相同横坐标位置的弯曲系数分别是 k_{11}'' 、 k_{27}'' 、 k_{12}'' 。

由上部区域任意一点侵入量计算公式 (27)，可以得到侵入量测量点 Point1、Point8、Point19 侵入量表达式：

$$X_1 = k_{11}'' L_1 + D_1 + d + d'_{11} \quad (40)$$

$$X_8 = k_{12}'' L_8 + D_8 + d + d'_{12} \quad (41)$$

$$X_{19} = k_{12}'' L_{19} + D_{19} + d + d'_{12} \quad (42)$$

从而，可得到各侵入量测量点前纵梁根部挤压侵入量：

$$D_1 = X_1 - k_{11}'' L_1 - d - d'_{11} \quad (43)$$

$$D_8 = X_8 - k_{12}'' L_8 - d - d'_{12} \quad (44)$$

$$D_{19} = X_{19} - k_{12}'' L_{19} - d - d'_{12} \quad (45)$$

同样，由上部区域任意一点侵入量计算公式 (27)，可以得到待求点 Point26、Point27 的侵入量表达式：

$$X_{26} = k_{12}'' L_{26} + D_{26} + d + d'_{12} \quad (46)$$

$$X_{27} = k_{27}'' L_{27} + D_{27} + d + d'_{27} \quad (47)$$

以下分别计算待求点前纵梁根部挤压侵入量 D_{26} 和 D_{27} 。

通过具有相同横坐标的侵入量测量点（如 Point8 和 Point19），计算与其相同横坐标的任意待求点（如 Point26）前纵梁根部挤压侵入量，根据假设 2：对具有相同横坐标的点，前纵梁根部挤压侵入量均相同，即：

$$D_{26} = D_8 = D_{19} \quad (48)$$

为提高计算精度，取两侵入量测量点平均值：

$$D_{26} = \frac{D_8 + D_{19}}{2} = \frac{X_8 + X_{19} - k_{12}'' (L_8 + L_{19})}{2} - d - d'_{12} \quad (49)$$

将 (49) 式代入 (46) 式, 可得到待求点 Point26 侵入量表达式:

$$X_{26} = \frac{X_8 + X_{19} + k_{12}''(2L_{26} - L_8 - L_{19})}{2} \quad (50)$$

该式和 (39) 式具有相同的物理意义: 在前纵梁根部两侧区域, 对某待求点 Point26 以与其具有相同横坐标的两侵入量测量点 Point8 和 Point19 为计算参考点, 表明了待求点与两参考点侵入量差别的唯一原因是: 由于距离坐标系 $S_{X_2O_2Y}$ 的 X 轴距离不同, 从而导致待求点分别与两参考点相对于 O_2 转动产生的侵入量之差, 总差值等于两差值和的一半, 而其它侵入量影响因素对待求点与两参考点影响均相同。

通过具有相同纵坐标的侵入量测量点 (如 Point1 和 Point8), 计算与其相同纵坐标的任意待求点 (如 Point27) 前纵梁根部挤压侵入量, 可由两点之间线性插值方法计算得到:

$$\frac{D_1 - D_{27}}{L_1' - L_{27}'} = \frac{D_1 - D_8}{L_1' - L_8'} \quad (51)$$

其中 L_1' 、 L_{27}' 、 L_8' 分别是相对于坐标系 $S_{X_2O_2Y}$ 到其 Y 轴距离。

前纵梁根部两侧区域任意一点侵入量计算方法与 Point26、Point27 相同, 通过其它侵入量测量点可得到与 Point26、Point27 位置类似点的侵入量, 将计算得到的侵入量作为已知结果, 可求出具有同一横坐标或纵坐标点的侵入量, 依此类推, 从而求出前纵梁根部两侧区域防火墙侵入量。

4.3.3 外插区域侵入量计算

在前碰撞实验中, Kickdown 弯曲变形对 A 柱后移量有着直接的影响, Kickdown 弯曲变形越严重, A 柱后移量越大, 反之, 则越小, 而防火墙左、右边界与 A 柱焊接为一个整体, A 柱后移直接引起左右边界一起后移, 因此, 防火墙左、右边界上各点的后移量即为 A 柱上对应点的后移量, 而 A 柱上各点后移量则可直接实验测量得到。基于此假设, 将外插区域 F1 和 G1 的 Kickdown 弯曲变形侵入量计算直接由 A 柱各点后移量代替, 则外插区域 F1 和 G1 侵入量由两部分组成——A 柱各点后移量和前纵梁根部挤压侵入量, 由此, 得到防火墙外插区域侵入量计算公式:

$$X = D + d'' \quad (52)$$

并进一步假设:

假设 4: 前纵梁根部挤压对外插区域远离前纵梁根部的外边界侵入量的影响等于零。

4.3.3.1 外插区域 F1 侵入量计算

防火墙外插区域 F1 左边界上各点对应 A 柱上各点后移量, 其左边界上任意一点后移量 (如 Point30) 根据 A 柱上实验测量点测试结果或插值方法计算得到, 并假设外插区域 F1 相同纵坐标位置后移量均相同。F1 右边界上任意一点 (如 Point28) 前纵梁根部挤压侵入量采用与各自对应的内插区域相同的计算方法得到。以计算外插区域 F1 某纵坐标位置 Point29 侵入量计算为例, 如图 11, 由防火墙外插区域侵入量计算公式 (52) 式:

$$X_{29} = D_{29} + d_{29}'' \quad (53)$$

其中 D_{29} 由两点之间线性插值方法计算得到, 并根据假设 4:

$$D_{29} = \frac{L_{29}''}{L_{28}''} D_{28} \quad (54)$$

其中 D_{28} 由 (51) 式中相同的计算方法得到, L_{28}'' 、 L_{29}'' 分别是 Point28 和 Point29 到外插区域 F1 左边界的距离。

4.3.3.2 外插区域 G1 侵入量计算

防火墙外插区域 G1 结构上的特点是垂直于水平面, 与上部区域存在一定夹角, A 柱变形对其影响是产生整体移动, 即对该区域每点影响均相同, 其大小等于碰撞实验测量的 A 柱最大后移量 d_A'' , 即 A 柱上具有与 G1 上边界纵坐标十分接近区域测量点的后移量, 因此, 只需要计算各点前纵梁根部挤压侵入量即可。

以计算外插区域 G1 某横坐标位置前纵梁根部挤压侵入量为例, 如通过具有相同横坐标的侵入量待求点 (如 Point31, 外插区域 F1 下边界上的点), 计算与其相同纵坐标的任意待求点 (如 Point32) 前纵梁根部挤压侵入量, 如图 11, 由防火墙外插区域侵入量计算公式 (52) 式, 可知:

$$X_{32} = D_{32} + d_A'' \quad (55)$$

其中 D_{32} 由两点之间线性插值方法计算得到, 并根据假设 4:

$$D_{32} = \frac{L_{32}''}{L_{31}''} D_{31} \quad (56)$$

其中 D_{31} 由 (49) 式中相同的计算方法得到, L_{31}'' 、 L_{32}'' 分别是 Point31 和 Point32 到外插区域 G1 上边界的距离。

5 防火墙侵入量评估方法

利用本文研究思路和方法,可对防火墙侵入量进行正确评估,主要包含两方面内容——碰撞仿真分析防火墙侵入量等值线图评估和前碰撞实验防火墙侵入量等值线图评估。根据防火墙侵入量等值线图分布特征,如果整体呈现水平分布,只有前纵梁根部局部区域呈现垂直分布,则 Kickdown 弯曲变形是主要因素;如果整体呈现垂直分布,只有防火墙下部局部区域呈现水平分布,则前纵梁根部载荷挤压是主要因素,只有针对主要因素的车身结构安全改进方案才能对减少防火墙侵入量起到立竿见影的效果。

针对碰撞仿真分析防火墙侵入量等值线图,定性分析主要是分析判断引起防火墙侵入量的主要因素,从而确定车身结构安全性能提升方向,并为定量计算提供假设基础。基于仿真分析结果的定量计算则可用于验证本文防火墙侵入量计算方法的有效性,在构建防火墙网格模型时,需要按本文区域划分建立对应的网格区域,并在相应位置布置节点,同时,方便仿真结果与试验测量数据作对比分析。因此,基于仿真分析结果的定性分析目的是进行定量计算。

针对前碰撞实验防火墙侵入量等值线图,定量计算主要是计算防火墙任意一点侵入量,从而绘制出防火墙侵入量等值线图,该计算方法将关键测量点测试数据直观化,提高了试验数据的可读性,同时,更加有效的指导仿真分析。定性分析则根据前碰撞实验绘制的防火墙侵入量等值线图,从试验角度分析判断引起防火墙侵入量的主要因素,从而确定车身结构安全性能提升方向。因此,基于实验侵入量测量结果的定量计算目的是进行定性分析。

防火墙侵入量数据评估经历了由定性分析到定量计算,再到定性分析的一个完整的循环过程,但前后两个定性分析的对象和目的有着本质的区别但却紧密联系。

6 总结

本文系统的论述了前碰撞试验防火墙侵入量计算方法,具有三个显著特点:第一,定性分析提供的假设来自对大量车型碰撞仿真分析防火墙侵入量等值线图对比、归纳与总结,并有效的指导了工程设计;第二,基于定性分析的假设,定量计算从理论上推导了防火墙各区域的侵入量计算表达式;第三,侵入量计算表达式中各计算参数的确定,完全依赖于前碰撞试验侵入量测量点测试数据。本文从碰撞仿真分析出发,然后基于试验测量结果,进行定量计算,需要编写计算机程序直接输出前碰撞试验防火墙侵入量等值线图,达到更加可靠且有效的指导车身结构安全性能提升的目的。因此,本文研究方法实际上是将仿真分析、理论计算和试验测量三者巧妙的结合成了一个整体。

7 致谢

本文最初思考出现于笔者离开奇瑞所作的总结报告——《前碰撞从“现象”到“本质”》,是基于笔者在奇瑞工作期间,针对奇瑞碰撞安全团队撰写的近千份、几十款车型碰撞分析报告,在对其做全面、系统的对比分析基础上总结出来的研究成果,没有奇瑞碰撞安全部同事辛苦的工作是不可能本文的,因此,对奇瑞碰撞安全部同事辛苦的工作表示感谢!特别是对奇瑞吴沈荣先生、徐有忠博士对笔者长期的支持、鼓励与帮助表示衷心的感谢!

参考文献

- [1] Euro-NCAP frontal crash test specification .MINA.
- [2] Crashworthiness Evaluation Offset Barrier Crash Test Protocol .Version XI December 2004.