

文章编号:1671-8879(2012)03-0101-04

# 基于 ALE 算法的汽车侧面气帘展开仿真

李恒宾

(青海交通职业技术学院 汽车工程系,青海 西宁 810028)

**摘要:**为了模拟气帘的充气展开过程,采用 LS-DYNA 软件建立了某汽车气帘基于流固耦合 ALE 算法的仿真模型,给出了主要参数的设置及耦合实现方法。通过静态起爆试验和落锤试验对仿真模型进行了验证。结果表明:气帘是在充气口位置先展开,然后逐步充满整个气帘,气帘展开的形状与静态起爆试验结果基本一致;落锤加速度试验峰值与仿真峰值误差约为 9%,证明了所建立的 ALE 模型可以用来有效模拟气帘的展开过程。

**关键词:**汽车工程;气帘;流固耦合;静态起爆试验;落锤试验

**中图分类号:**U461.91 **文献标志码:**A

## Numerical simulation of automobile curtain airbag deployment based on ALE algorithm

LI Heng-bin

(Department of Automotive Engineering, Qinghai Communications  
Technical College, Xining 810028, Qinghai, China)

**Abstract:** In order to simulate automobiles curtain airbag deployment, the software LS-DYNA were used to build the curtain airbag model based on solid-liquid coupling ALE algorithm, the sets and coupling methods of main parameters were given. The simulation model was tested by the static initiation test and the drop weight test. The results show that the curtain airbag deploys in the location of charging port firstly, then the curtain airbag is inflated. The results of simulation and tests are in coincide. The peak value of simulation has 9% error compared to the peak value of drop weight acceleration. The study shows that the ALE model can effectively present the deploying of side-air-curtatin. 5 figs, 10 refs.

**Key words:** automotive engineering; curtain airbag; solid-liquid coupling; static initiation test; drop weight test

## 0 引言

目前,汽车气帘在汽车侧面碰撞和翻滚事故中的保护作用越来越受到人们的关注。汽车气帘可以避免乘员的头部直接接触到车窗和外部物体;同时,

也可避免汽车发生翻转事故时乘员被甩出车外的危险<sup>[1]</sup>。试验研究表明,气帘可以将乘员头部 HIC 值降低 90%<sup>[2]</sup>。由于汽车侧面碰撞事故伤亡率越来越大,气帘的装车率越来越高,因此对气帘的研究具有重要的意义。但是,由于气帘折叠复杂,充气过程

展开太快,所以很多问题难以通过试验解决,例如研究气帘展开过程对安装支架及周围内饰的冲击作用,以及离位时对乘员的冲击作用等。另外,试验成本很高,并且具有破坏性和危险性,不可重复。所以,对气帘进行计算机仿真研究是了解气帘展开过程的重要手段,可以缩短开发周期,不受天气,温度等影响,大大节省产品开发成本和时间。

目前,在气帘仿真建模方面,大多采用均匀压力 CV 算法,文献[3]建立了气帘 UP 模型,假设气帘内部处处压力是相等的,这对气帘展开过程的模拟不够准确。因此,要想准确模拟气帘的展开过程,必须采用 CFD 算法;但是,目前中国对 CFD 算法的研究比较少,技术还不是很成熟,所以难度很大。文献[4]采用 MADYMO 软件建立了某气帘展开过程的 CFD 模型,但是 MADYMO 软件主要是基于多体动力学,对于有限元模型的仿真比较困难。为此,本文采用 LS-DYNA 软件,建立了某气帘基于流固耦合 ALE 算法的气帘仿真模型。该模型可以方便地建立带有气帘的整车模型,进行离位分析;而气帘展开过程对车内结构件的冲击碰撞,也可以通过该模型进行对比研究[5]。

## 1 气帘展开仿真方法

### 1.1 气帘展开过程

汽车安全气帘作为乘员约束系统的主要部件,必须准确地在极短的时间内使气袋充气,而又不伤害乘员。安全气帘的充气过程约需 20~40 ms,展开的初始阶段,会在瞬间释放出很大的能量,气帘的边缘展开速度的峰值可达 192~320 km/h,并可产生很大的冲击力。乘员如果在气帘的展开阶段接触气帘,高速气囊囊体和喷射气流会拍击乘员而造成伤害。气帘的展开是一个复杂的瞬态过程,涉及到多个变量,最主要的是气帘内压和体积变化。

### 1.2 均匀压力模型 CV

目前,大多数气帘模拟采用均匀压力算法,该算法忽略了气帘内气体的流动,并假设每个时间步气帘中温度和压力是均匀的[6]。该方法主要是通过质量流量和温度 2 个参数来描述气体发生器产生的气体。CV 模型可以很好地描述气帘在展开后期与周围结构的相互作用,每一时间步的控制体积  $V$  可通过积分得到。

$$V = \iiint dx dy dz = \iint_S x n_x dS \approx \sum_i^N \bar{x}_i n_{ix} A_i \quad (1)$$

式中: $dx$ 、 $dy$ 、 $dz$  分别为矩形六面体的边长; $n_x$  为表

面法线与  $x$  轴夹角的余弦; $S$  为面积分单元; $\bar{x}_i$  为平均  $x$  坐标; $n_{ix}$  为单元法线与  $x$  轴的余弦值; $A_i$  为单元表面积。

### 1.3 流固耦合模型 ALE

为了更好地模拟气帘在展开初期与车体气帘周围结构以及车内乘员的接触过程,用 CV 模型模拟就不准确了,必须采用 CFD 算法。因此,本文采用 LS-DYNA 软件,开发了任意欧拉-拉格朗日(ALE)算法。ALE 算法能够避免单元的过分扭曲,能更真实地模拟安全气帘在展开初期与周围环境的相互作用[7]。ALE 算法主要是通过质量、动量、能量和内能守恒定律,控制气帘的每个时刻的展开[8]。

质量守恒方程为

$$\rho + \nabla \rho(v - \dot{x}) + \rho \operatorname{div} v = 0 \quad (2)$$

动量守恒方程为

$$\rho \dot{x} + \rho \nabla x(v - \dot{x}) = \rho b + \operatorname{div} \sigma \quad (3)$$

能量守恒方程为

$$\rho \dot{u} + \rho \nabla u(v - \dot{x}) = \sigma D + \rho r - \nabla q \quad (4)$$

式中: $\rho$  为材料密度; $v$  为物质速度; $\sigma$  为柯西应力张量; $b$  为外部体积力; $u$  为材料内能; $D$  为材料应变率; $\dot{x}$  为网格节点速度; $r$  为单位质量的热生成率; $q$  为热流密度。

## 2 侧面气帘 ALE 仿真模型的建立

### 2.1 侧面气帘模型的建立

气帘采用直角三角形膜单元,且每个单元的两个直角边都平行于折叠线,这样就可以保证在下一步进行气囊折叠时,折叠线不会从任何一个网格单元中间穿过。气帘模型如图 1 所示。

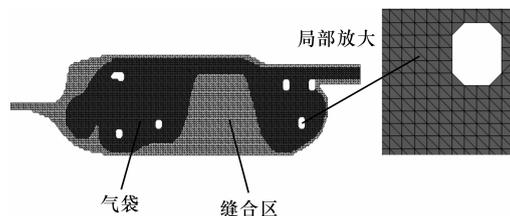


图 1 折叠前气帘模型

在 ALE 算法中,有 2 种方法来模拟气体的泄漏:一种是用预留漏气孔的方法;另一种方法是利用纤维的多孔性,定义泄漏的流速。本文采用第 1 种方法,在气帘的模型上创建了 5 个 20 mm×25 mm 的漏气孔。

### 2.2 侧面气帘模型的折叠

气帘的折叠主要有 2 种方法:一种是直接折叠方式;另一种是初始矩阵法。本文采用 LS-DYNA

软件自带的后处理中的 ABFOLD 模块,按照折叠线和折叠流程,通过平面直接折叠方式进行折叠。为减少网格单元的变形程度,采用 thin fold 即薄折叠方式。为了使折叠后发生变形的网格单元恢复到原来的形状,对折叠后的气帘进行动态松弛。折叠气帘最后的模型如图 2 所示。



图2 侧面气帘折叠模型

在折叠时应注意以下几点:①首先要明确指出要折叠的部分,折叠部分必须在同一平面上;②折叠线如果出现孔,必须对孔进行特殊处理,对孔采用多边形单元模拟;③折叠线及其左右两边的节点,必须各成一条直线;④折叠时要尽量避免穿透,如果出现穿透,必须调整网格质量。

### 2.3 空气 Euler 域及注射气体

环境空气 Euler 域一般采用网格大小为 20 mm 的六面体单元。需要注意的是,空气欧拉域的空间要足够大,能够覆盖整个气帘的展开区域,否则会出现计算无穷大等问题<sup>[9]</sup>。环境空气在 LS-DYNA 软件中通过关键字 \* MAT\_NULL & \* EOS\_IDEAL\_GAS & \* SECTION\_SOLID\_ALE 来定义,需要注意热容和热压的单位要统一。但是,以上关键字只能用来定义空气有初始网格单元的 Euler 结构,注射气体由于没有初始网格,因此在 LS-DYNA 软件中采用关键字 \* MAT\_GAS\_MIXTURE & \* INITIAL\_GAS\_MIXTURE & \* SECTION\_POINT\_SOURCE\_MIXTURE 来定义。注射气体的质量流量、温度曲线、充气点位置、面积及充气方向等都是通过关键字 \* SECTION\_POINT\_SOURCE\_MIXTURE 来定义的。其中,流体速度一般为 500 m/s,注射喷嘴设在气帘的上端,一端与气体发生器连接,另一端开口,直径为 30 mm。注射气体通过定义多物质材料参数,可以在后处理中观察气体的流动情况,用来简单验证注射气体是否全部充入气帘。

气帘是通过导气管进行充气的,由于导气管上下两层间距很小,即使充满气体后上下两层之间的距离一般也少于 20 mm,为了保证导气管处在充气开始时就能够与欧拉域发生耦合,因此对环境空气欧拉域的建模进行改进,采用网格尺寸中间小、两头大的建模方式。

## 3 算法实现

对于均匀压力 CV 法的气帘模型,本文采用的是比较简单的关键字 \* AIRBAG\_SIMPLE\_AIRBAG\_MODEL\_ID 实现的。其中,注射气体的质量流动曲线和温度等都是在这个关键字实现的,而且还可以定义泄气口面积等,比较方便。

流固耦合 ALE 模型,是通过关键字 \* CONSTRAINED\_LAGRANGE IN SOLID 实现耦合的。拉格朗日结构记为气帘膜单元,欧拉单元用来模拟环境空气。在该关键字中,需要注意参数 NQUAD 拉格朗日结构段上耦合积分点个数,取值依赖于流体和固体的网格密度,建议使用较密的流体网格,一般设为 3 或 4;法线 NORM 的设置如图 3 所示。气帘在建模时要注意各个单元的法线方向,要保证气帘上下两层的法线方向同时向内或者向外。

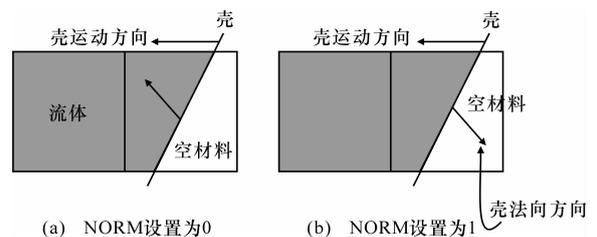


图3 NORM 设置

此外,参数 CTYPE 耦合方式设置,一般选择 4 或者 5。耦合开始时,首先在结构积分耦合点找到相应的流体材料点,并跟踪它们的相对位移;然后根据相对位移的大小,分别给结构和流体施加节点力。

## 4 模型验证及比较

气帘的实际充气过程是一种流体的湍流过程,而气帘的仿真计算实质上是利用数学方程来近似计算流体的运动过程。由于气帘仿真研究的基础理论在不断发展,并且数学方程近似求解也存在一定的误差,所以需要进一步对气帘的仿真模型进行试验验证。

### 4.1 静态起爆试验

气帘静态起爆试验是气帘模块开发过程中比较常用的一种试验方法,可以用来进行气帘模块性能的考察,并以此为基础,在产品开发设计过程中对气帘模块进行优化设计<sup>[10]</sup>。气帘静态起爆试验也越来越多的用来对气帘仿真模型进行验证,通过静态起爆试验,可以查看气帘起爆充气成功与否、是否有局部压力过大而导致织物撕裂的情况以及气帘的展

开过程等。气帘展开过程的验证是其模型验证中最难验证的一个环节,仿真模型中气帘的折叠方式、喷嘴的位置和尺寸等对其展开过程都有很大的影响。

为了验证所建立侧面气帘 ALE 模型的有效性,将静态起爆试验、ALE 模型与 CV 模型的气帘展开形状进行了比较。通过对比得出, CV 模型的气帘在充气过程中是同时展开的,气帘完全展开之后的形状与静态起爆试验结果吻合很好;而 ALE 模型的气帘是在充气口位置先展开,气帘展开过程的形状与气帘静态起爆试验展开形状基本吻合。从而说明了所建立的侧面气帘 ALE 模型的准确性。

对于 ALE 模型,可以通过 LS-DYNA 软件自带的后处理 LS-Prepost 中观察注射气体在侧面气帘中的流动情况,如图 4 所示。从图 4 中可以明显看出,注射气体是从气体发生器附近开始流动,然后逐步充满整个侧面气帘。这也是符合实际侧面气帘展开过程中注射气体的流动情况。

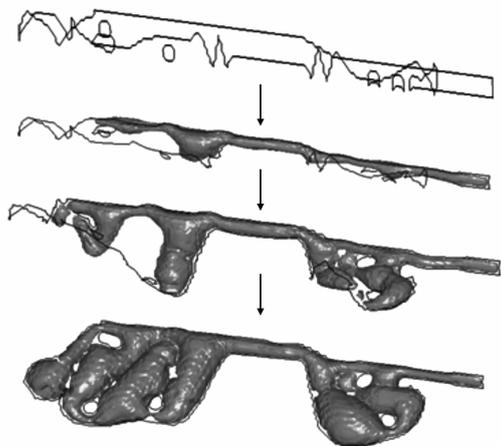


图 4 注射气体的流动

## 4.2 落锤试验

落锤试验的目的是,进一步验证侧面气帘在展开时对冲击物加速度的影响。同时,落锤试验通过比较仿真计算和物理试验测得的落锤或摆锤的加速度曲线的一致性,验证模型中的质量流和温度流曲线是否能反映真实的气体发生器的质量流和温度流。本文建立了气帘的落锤试验模型,并将仿真计算结果与落锤试验进行对比验证。落锤加速度的试验曲线与仿真曲线如图 5 所示。

从试验录像以及落锤试验输出的落锤加速度曲线可以看出,落锤在 80 ms 左右与侧面气帘发生接触,并于 98 ms 左右砸透侧面气帘;落锤加速度达到最大值  $1\,904\text{ m/s}^2$ ,之后于 103 ms 左右落锤上升;由于落锤砸透气袋与试验台撞击后受到震动,所以

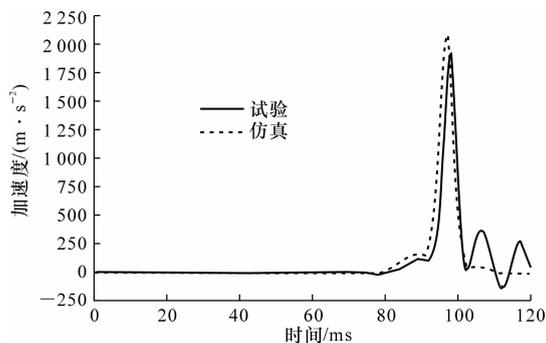


图 5 落锤加速度曲线试验与仿真对比

在其离开后其  $z$  方向的试验加速度曲线出现振荡。

在落锤的仿真模型中,落锤在 80 ms 左右与气帘接触,在 96 ms 达到最大峰值  $2\,083\text{ m/s}^2$ ,比试验提早 2 ms,峰值误差约为 9%,在可以接受的试验范围内。最后,在 103 ms 左右落锤离开气帘,说明仿真模型与试验结果一致。

## 5 结语

(1) 采用 LS-DYNA 软件,建立了侧面气帘 ALE 仿真模型,并对相关参数做了简单说明;进行了侧面气帘静态起爆试验和落锤试验,验证了所建立模型的准确性和可靠性。

(2) 侧面气帘 ALE 仿真模型可以用来有效模拟侧面气帘的展开过程,用来验证计算侧面气帘展开过程与车体机构和乘客之间的相互作用,用于离位工况的分析研究;在研究中发现, ALE 模型计算时间较长,对计算机要求较高,而且该模型对网格尺寸精度及各个参数要求都比较高,因此侧面气帘 ALE 仿真模型的建立需要花费大量的时间。

## 参考文献:

### References:

- [1] Narayanasamy N. An integrated testing and CAE application methodology for curtain airbag development[J]. SAE Transactions, 2005, 114(6): 43-50.
  - [2] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报[R]. 北京:公安部交通管理局, 2006.
  - [3] 裴洋, 乌秀春, 赵洪波. 帘式气囊的计算机仿真建模研究[J]. 辽宁工业大学学报:自然科学版, 2008, 28(4): 254-255.
- PEI Yang, WU Xiu-chun, ZHAO Hong-bo. Study of building of simulating model on curtain airbag[J]. Journal of Liaoning University of Technology: Natural Science Edition, 2008, 28(4): 254-255.