

汽车安全气囊展开过程的仿真算法

吴光强^{1,2}, 吴奕娴¹

(1 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2 东京大学生产技术研究所, 东京 153-8505)

摘要: 对气袋织物的各向异性材料模型进行研究, 将织物的拉伸和剪切仿真与试验结果对比, 以验证材料模型的准确性. 分别采用控制体积法(Control Volume, CV)与近年来新开发的粒子法(Corpuscular Method, CPM), 对平铺与折叠气囊展开进行数值模拟, 并对比气囊展开形态和压力结果对比. 结果表明, CV方法只适用于IP(In-Position)乘员与气囊作用的仿真模拟, 而CPM方法可模拟出气囊展开初期的高速气流运动, 且计算效率较高, 适用于OOP(Out-of-Position)乘员与气囊的相互作用仿真.

关键词: 安全气囊展开; 控制体积法; 粒子法

中图分类号: U463.22

文献标识码: A

Simulation Methods of Automotive Airbag Deployment

WU Guangqiang^{1,2}, WU Yixian¹

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Tokyo 153-8505, Japan)

Abstract: A study was made of the accuracy of anisotropic material model for airbag fabric. The material tensile and shear simulation results were compared with experimental results to verify the validity of material model. Then the deployment of flat and folded airbag was simulated, based on control volume (CV) method and recently developed corpuscular method (CPM) separately. And the simulation results were compared and discussed. It is concluded that CV method is only suitable for simulating the airbag and IP occupant interaction, while CPM accounts for the interaction of high speed gas flow and airbag fabric in the early phase of deployment, and it can be applied to simulating the interaction of out-of-position (OOP) occupant and airbag with high computational efficiency.

Key words: airbag deployment; control volume method; corpuscular method

经过半个多世纪的发展, 安全气囊在碰撞事故中对乘员的保护作用得到了普遍认可, 对其工作过程的仿真研究也越来越得到重视.

目前, 气囊展开仿真多采用控制体积(CV)法, 该方法基于热力学方程, 忽略气囊展开时气体的流动. 虽然对气囊与IP乘员相互作用仿真的影响并不是很大, 因为此时气囊已完全展开, 内部压力分布较均匀, 气流的作用不明显; 但在OOP情况下, 乘员可能距离气囊较近, 气囊未完全展开, 从气体发生器中产生的高速气体可能对乘员造成严重伤害, 故需要准确模拟气体的流动.

针对气囊展开过程中的气流运动, 先后出现了基于计算流体力学CFD(Computational Fluid Dynamics)的一系列方法, 其主要不足是计算成本高, 故应用有限. 本文针对近年新开发的基于气体分子动力学的粒子法(CPM)^[1], 并将其与常用的CV方法进行对比.

Krystoffer Mroz^[2]对CPM方法有效性进行验证, 一系列仿真结果与试验的对比表明, CPM能较好预测气囊展开形态, 关键点的速度、加速度和压力与试验结果较贴近, 在前处理中用时少的优势相当明显. Hirth等^[3]、Lian Wenyu等^[4]对CPM方法的精度进行了探讨. 截至目前, 国内尚无应用该方法的公开发表文献.

CPM方法将气体做粒子离散化处理, 可避免基于连续介质的方法在处理气体泄漏问题上的缺陷. 此外, 准确的材料模型是精确气囊展开仿真的必要前提, 故对气袋织物的材料模型进行研究. 并分别采用CV和CPM方法对平铺气囊和折叠气囊的展开过程进行仿真, 并对比仿真结果.

1 两种气囊展开数值分析方法

1.1 CV方法

收稿日期: 2010-11-16

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2007AA04Z132)

第一作者: 吴光强(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车设计及理论. E-mail: wuguangqiang@tongji.edu.cn

在 CV 方法中,气囊被看作是不不断扩大的控制体积,气囊模型如图 1 所示^[3].

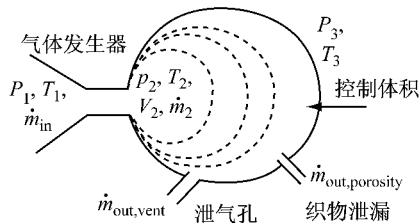


图 1 CV 方法气囊展开模型

Fig.1 Airbag model using CV method

CV 方法假设控制体积内部的气体为理想气体,压力和温度分布均匀.且无需建立气体发生器模型,通过质量流量和温度来描述气体发生器产生的气体.

在 CV 方法中,每一个时间步的控制体积 V 可通过格林积分得到,即

$$V = \iiint dxdydz = \oint_{\partial V} d\Gamma \approx \sum_{i=1}^N \bar{x}_i n_{ix} A_i \quad (1)$$

式中: \bar{x}_i 为 x 坐标平均值; n_{ix} 为单元法线与 x 轴的余弦值; A_i 为单元表面积.

基于理想气体和绝热的假设,气囊内的压力 p_2 与气体密度 ρ 和气体比内能 e 有关,即

$$p_2 = (\gamma - 1)\rho e \quad (2)$$

式中: γ 为气体比热比; $\gamma = c_p/c_v$; c_p 和 c_v 分别为气体定压比热容和定容比热容;且两相邻状态的比内能有如下关系

$$\frac{e_{i+1}}{e_i} = \left(\frac{V_i}{V_{i+1}} \right)^{\gamma-1} \quad (3)$$

式中:下标 i 和 $i+1$ 代表前后相邻的两个状态.气囊展开的压力、体积关系由式(1)~(3)确定.可以看出, CV 方法对气囊模型作了很大的简化.

1.2 CPM 方法

CPM 方法通过对气体粒子建模来模拟带有柔性边界的封闭体积膨胀问题.其中柔性边界是离散的(如以壳单元来表示),并需要定义气体流动特性(即气体质量流动率,初始温度)、喷嘴的位置和粒子大小.

CPM 方法中,对于入射气体的模拟,是通过对每个求解循环中计算新产生的粒子数并将其创建来实现的^[1].新创建粒子的平均速度由其温度和质量决定,并以任意方向进入到封闭体积中.同时,计算中监测所有粒子和边界与彼此之间的碰撞,发生碰撞后,粒子的能量转移给边界或另一粒子,这一过程以质量、动量和能量守恒原则为基础.

需要说明的是,普通展开的气囊内约有 10^{24} 个气体分子,为每个分子分别建模是不现实的.而已知理想气体的静压力是分子平动动能的函数,故只要总的平动动能不变,便可以少数大尺寸的粒子来代替气体分子,如图 2 所示^[1].

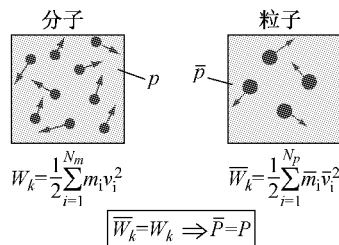


图 2 分子描述与粒子描述

Fig.2 Particles vs. molecule description

此外,考虑到数值实现中的计算效率,CPM 方法提出如下假设:

(1) 粒子为球形(加快接触处理);

(2) 对于单个粒子,存在平动动能 W_t 和旋转/振动能量 W_s 之间的平衡,该平衡由比热容 $C_v(T)$ 和 $C_p(T)$ 决定,设

$$\frac{W_s}{W_t} = \frac{5-3\gamma}{3\gamma-3} \quad (4)$$

(3) 为了获得更平滑的压力分布,不考虑粒子与织物碰撞的冲量转移,只有动能中的平动部分传递给边界.

综上,CPM 方法的主要优点有^[3]:简单,数值稳定性好,无需求解场方程;使用便捷,只需定义一个关键字;得到的压力分布更真实;计算时间相对短.

2 气囊模型建立

2.1 材料模型

为得到精确的安全气囊展开仿真结果,必须设置准确的气袋织物材料模型.气袋织物为各向异性材料,对其分别进行经向、纬向拉伸试验和画框剪切试验(Picture Frame Test),以获得织物的特性参数,试验装置如图 3 所示.

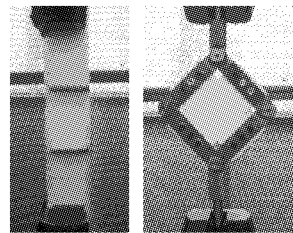


图 3 织物拉伸试验和画框剪切试验

Fig.3 Experimental set-up for fabric tension test and picture frame test

采用针对气袋织物而开发的材料模型(*MAT_FABRIC),此时会自动调用稳定的、基于Belytschko-Tsay膜单元的全积分公式^[5].分别进行织物的经向、纬向拉伸仿真,仿真与试验的应力—应变结果对比如图4所示(以气袋下片织物为例).

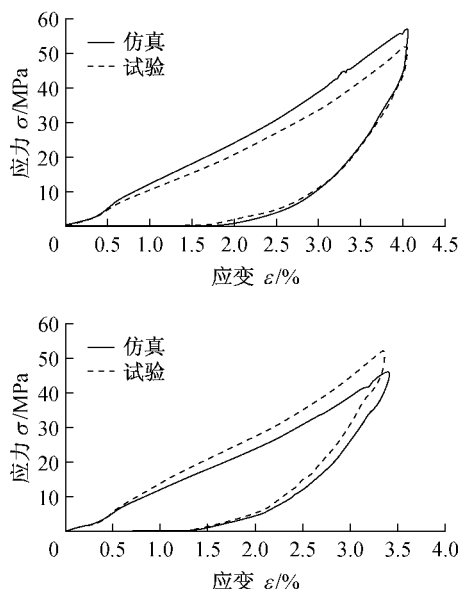


图4 下片织物经向、纬向拉伸仿真与试验结果对比

Fig.4 Comparison of simulation and test results for lower fabric warp / woof tension

进行气袋织物的画框剪切仿真,画框活动端的力和位移结果对比如图5所示.

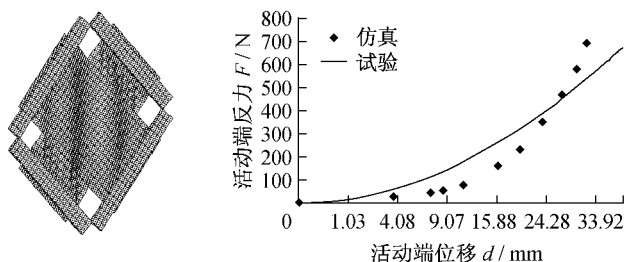


图5 织物剪切的仿真与结果对比

Fig.5 Comparison of simulation and test results for lower fabric picture frame shear test

由图4和图5可看出,经向、纬向拉伸的仿真与试验结果较为贴近,相对误差控制在5%以内;剪切的仿真与试验结果趋势较为一致,材料模型基本准确,可满足仿真的精度要求.

此外,针对织物仿真中速度设置的影响进行研究.以下片织物的纬向拉伸仿真为例,分别设置速度为 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 与 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,并将两种速度下织物的应力—应变结果进行对比(实际拉伸的速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$),如图6所示.

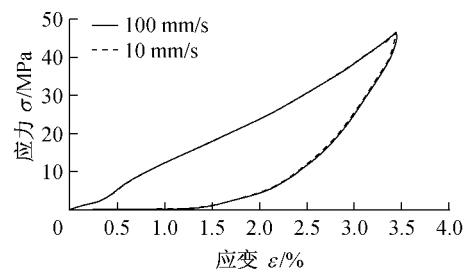


图6 两种速度下的下片织物纬向拉伸仿真结果对比

Fig.6 Comparison of simulation results for lower fabric woof tension with different tensile speeds

由图6看出,仿真拉伸速度分别设置为 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,织物材料的应力—应变曲线几乎完全重合.因此,织物仿真拉伸速度的设置对材料特性的影响可以忽略.

2.2 气体发生器模型

安全气囊展开仿真必须设置气体发生器的气体质量流量和气体温度曲线,如图7所示.

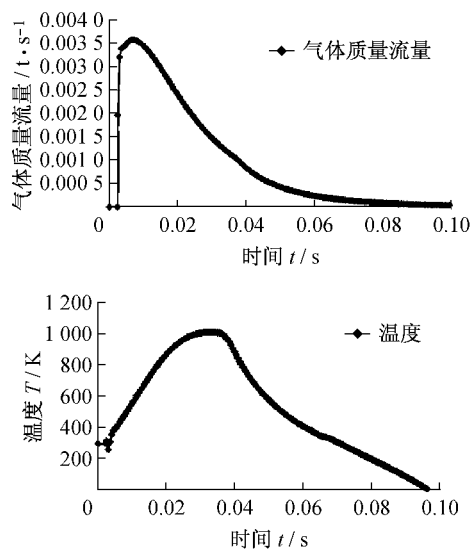


图7 气体发生器的质量流量曲线和温度曲线

Fig.7 Curves of mass flow rate and temperature for inflator

分别进行CV方法和CPM方法的容器试验(Tank test)仿真,容器体积为60 L,底部半径为206 mm,高度为450 mm.两种方法的压力结果对比如图8所示.

由图8可看出,CV和CPM方法的压力曲线在前40 ms吻合很好,之后略有偏差,结果基本一致.

2.3 气囊有限元模型

首先,对平铺气囊进行研究.分别建立气袋和气体发生器的有限元模型,并将气体发生器模型置于气袋中,平铺气囊整体模型如图9所示.

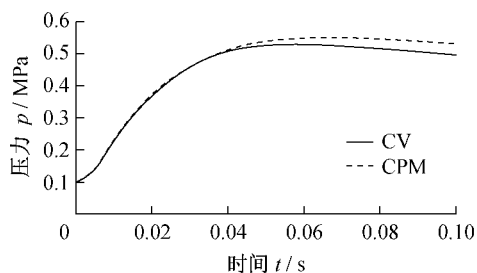


图 8 气体发生器容器试验仿真结果对比

Fig. 8 Pressure comparison of inflator tank test simulation

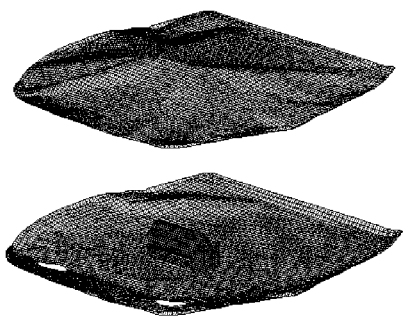


图 9 气囊和气体发生器有限元模型

Fig. 9 Finite element models of airbag and inflator

其次,对折叠气囊模型进行研究,并考虑去除由于折叠初始几何所带来的非物理应力. 折叠气囊有限元模型如图 10 所示.

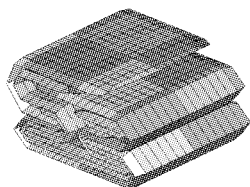


图 10 折叠气囊有限元模型

Fig. 10 Finite element model of folded airbag

3 气囊展开模拟及仿真结果对比

分别采用 CV 方法和 CPM 方法进行平铺气囊和折叠气囊展开仿真模拟.

CV 方法和 CPM 方法的设置比较简便,分别只需一个关键字. 对于 CPM 方法,需要设置的关键参数包括:气体粒子数、入射气体的质量流量和温度曲线、气体摩尔质量及比热容、气体喷口位置和气流入射方向等.

分别采用 CV 方法和 CPM 方法,对平铺气囊进行展开仿真,气囊在各时刻的展开形态对比如图 11 所示.

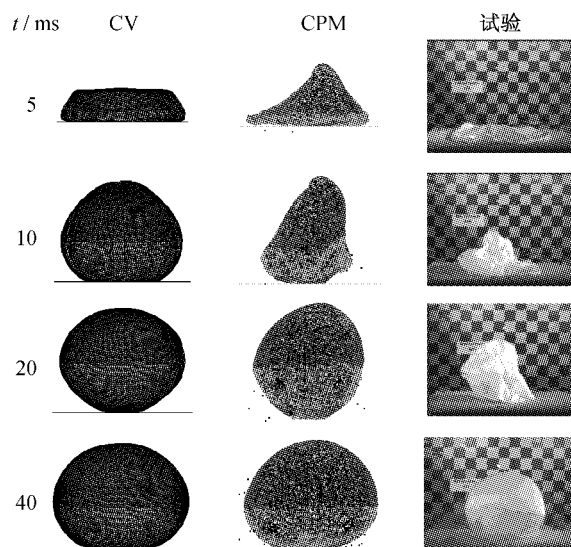


图 11 平铺气囊在各时刻的展开形态对比

Fig. 11 Comparison of different stages of flat airbag deployment using CV and CPM

从图 11 可看出,采用 CV 方法的气囊始终均匀展开,无法表现出气囊展开初期高速气流与气囊的作用,这在 5~10 ms 内非常明显;而采用 CPM 方法的气囊展开反映出了展开初期高速气流与气囊的相互作用,从试验结果中也可看出这一点,这在模拟 OOP 乘员与气囊接触时尤为重要. 此外,采用 CPM 方法可以清楚观察到气体粒子的运动状况,这是其它气囊展开仿真方法无法实现的.

对于折叠气囊,分别采用 CV 方法和 CPM 方法进行展开仿真. 气囊在各时刻的展开形态对比如图 12 所示.

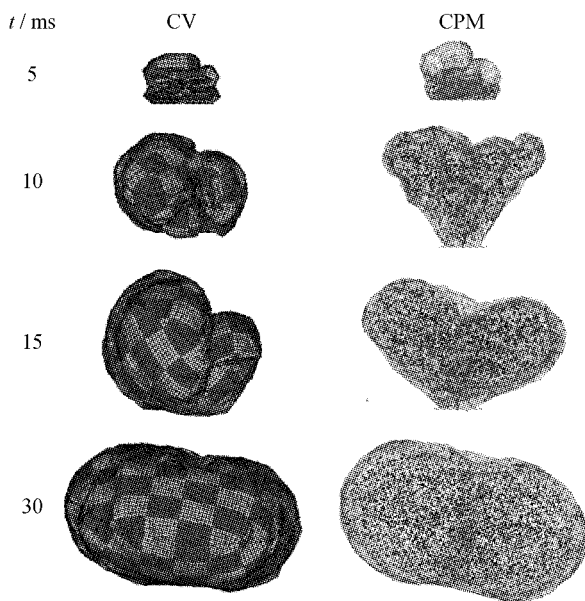


图 12 折叠气囊在各时刻展开形态

Fig. 12 Comparison of different stages of folded airbag deployment using CV and CPM

由图 12 也可得到与平铺气囊类似的结论. 且对于折叠气囊, CV 方法和 CPM 方法的差别体现得更为明显, 尤其是在展开初期的 15ms 内, 由于高速、高压气流的作用, 气袋展开形态差异较大.

折叠气囊展开仿真的压力结果比较如图 13 所示. 采用 CV 方法时, 气囊内部的压力在每一时刻都是处处相等的; 而采用 CPM 方法时, 气囊内部的压力是时刻变化且处处不相等的, 这里选择折叠气囊的气袋底部作为压力考察点. 并考虑到对于 CPM 方法, 粒子数的设置可能带来的影响, 分别设置粒子数为 $n=10\ 000$ 与 $n=100\ 000$, 进行对比研究.

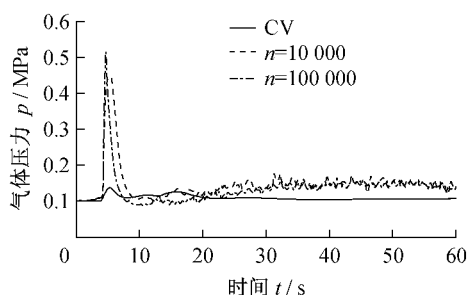


图 13 折叠气囊压力结果对比

Fig. 13 Comparison of pressure results for folded airbag deployment

由图 13 可看出, 采用 CPM 方法的折叠气囊在起爆后, 气袋底部有一压力峰值, 这样的趋势更为贴近真实情况; 采用 CV 方法的折叠气囊内的压力波动则相当平缓. 同时, 采用 CPM 方法的展开仿真后期的压力值有波动, 这可能是由于在 CPM 方法中, 压力是由离散粒子与气袋和粒子之间的碰撞构成的. 此外, 粒子数的设置不同, 压力峰值和后期的波动也会有一些差异, 根据图 13, 粒子数分别为 $n=10\ 000$ 和 $n=100\ 000$ 时的峰值压力分别为 0.447 MPa 和 0.516 MPa.

值得注意的是, 在 CPM 方法中, 必须保证粒子数不会过少, 具体的粒子数量取决于填充体积大小, 但并非具有简单的比例关系^[1], 目前多依靠经验. 因此, 粒子数的设定尚需进一步研究.

此外, 采用 CPM 方法进行气囊展开仿真, 还可以考察每一时刻气袋内的压力分布. 以折叠气囊展开研究为例, 20 ms 时的气袋内压力分布如图 14 所示 (单位 $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-2}$, $n=10\ 000$, 粒子显示系数为 2).

由图 14 可看出, 在 20 ms 时, 气袋内的压力峰值位于气袋底部附近, 压力值约为 0.6 MPa; 靠近气袋处的气压值高于中心处的压力值, 气袋在内部气

体压力作用下展开.

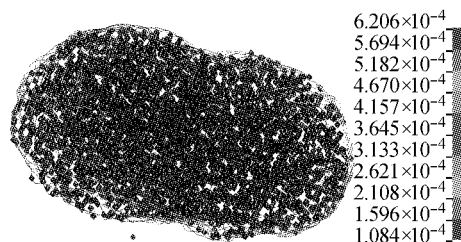


图 14 20 ms 时折叠气囊内部压力分布

Fig. 14 Pressure distribution contour of folded airbag deployment at 20 ms

4 结论

(1) CPM 方法可以模拟气囊展开初期的高速气流喷射现象, 以及气体的粒子状态, 这一点对模拟 OOP 乘员与气囊的相互作用非常重要. 而 CV 方法则无法反映出展开初期的气体喷射状态, 因此仅适用于 IP 乘员与气囊作用仿真.

(2) 通常情况下, CV 方法的显著优点是计算时间短, 占用计算机资源少. 但在本文研究中发现, CV 方法与 CPM 方法的计算耗时大致相当.

(3) CPM 方法的计算耗时与粒子数的设置有直接关系, 基本上, 粒子数越大, 计算越耗时; 而另一方面, 粒子数过少则会得到有噪声的数据结果. 作为一种较新的气囊展开仿真方法, CPM 方法的精确性尚需更深入的研究.

参考文献:

- [1] Lars Olovsson. Corpuscular method for airbag deployment simulations [C] // 6th European LS - DYNA Users' Conference, Gothenburg, [S. n.], 2007: 4. 61-4. 70.
- [2] Krystoffer Mroz, Bengt Pipkorn. Mathematical modelling of the early phase deployment of a passenger airbag - folding using origami theory and inflation using LS - DYNA particle method [C] // 6th European LS - DYNA Users' Conference, Gothenburg, [S. n.], 2007: 4. 71-4. 86.
- [3] Hirth A, Haufe A, Olovsson L. Airbag simulation with LS - DYNA past—present—future [C] // 6th European LS - DYNA Users' Conference, Gothenburg, [S. n.], 2007: 6. 24-6. 46.
- [4] Lian Wenyu, Bhalsod Dilip, Olovsson Lars. Benchmark study on the AIRBAG_PARTICLE method for out - of - position applications [C] // 10th International LS - DYNA Users' Conference, Detroit, [S. n.], 2008: 11. 11-11. 22.
- [5] Livermore Software Technology Company. LS - DYNA keyword user's manual volume I [M]. [S. l.]: Livermore Software Technology Company, 2009.