

基于有限元法和神经网络技术的 汽车碰撞事故再现*

张晓云¹ 金先龙¹ 亓文果¹ 侯心一²

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240; 2. 上海市公安局交警总队 上海 200070)

摘要: 为充分利用事故变形信息, 提出采用有限元法和神经网络技术进行事故再现的方法。在该方法中, 首先采用数字测量技术得到事故车辆变形关键点的测量值, 采用有限元仿真技术得到此关键点的计算值。将事故发生前的车辆运动参数作为神经网络的输入数据, 关键点变形量测量值与仿真计算值的偏差作为神经网络的输出数据, 将汽车碰撞仿真结果作为网络训练样本, 对训练完成的神经网络进行优化求解得到事故发生瞬间的车辆运动参数。应用此方法对一起车-障碍物碰撞事故案例进行再现分析, 建立整车、障碍物及地面有限元模型, 选取前纵梁及挡泥板上的 11 个定位孔与螺栓孔作为变形量测量的关键点, 再现分析结果验证了该方法的有效性, 为事故责任鉴定提供了科学依据。

关键词: 有限元 神经网络 碰撞 事故再现 仿真
中图分类号: U491.3

0 前言

交通事故给社会和人民的生活带来了巨大的灾难, 已经成为很严重的社会问题。因此重现交通事故的发生过程对事故起因分析和快速、公正地裁定事故责任具有重要意义。

常用的事故再现方法在实际应用方面存在着一定的局限性^[1], 动量/能量分析方法^[2-3]主要依赖刹车印迹, 现在主流车型安装了 ABS, 因此很难得到清晰完整的刹车印迹, 驾驶员在事故发生后可能在无意识或精神紧张的情况下造成对事故现场的破坏, 如在事故发生后, 没有立即停车而是将车辆靠向道路一边或向前缓慢停车, 或者向后倒车再停, 这些行为对于刹车痕迹等关键数据的准确性将造成破坏, 从而严重影响到交通事故的调查取证和公正处理。另一方面, 事故现场将可能受到天气(雨水)、过往车辆(人员)及人为方面的破坏。

变形/能量分析方法从车身变形角度进行考虑, 但是车身变形和运动速度之间的近似线性关系仅在一定范围内有效^[4], 而且车身变形量测量主要从外部轮廓进行考虑, 由于汽车碰撞环境的复杂性, 外部轮廓的变形可能会受到很多偶然因素的影响, 例如凹凸不平的接触表面、突出的砖石等。

对于前碰撞问题, 前纵梁、挡泥板等主要吸能部件不直接和外部环境相接触, 而且存在一定数量

的定位孔及螺栓孔等便于比较碰撞前、后的变形量, 因此通过吸能零件进行变形量测量将具有更高的可靠性。这种方法称为“关键点变形量测量法”。

采用很小积分时间步长的显式有限元法不仅考虑到材料在高速运动下的应变率效应, 而且考虑到材料的弹塑性特征^[5], 因此基于有限元法的事故再现研究可以通过计算变形量达到较高的计算精度。然而, 由于有限元碰撞模型的单元规模大而导致计算时间漫长, 而且事故再现是一个多次进行碰撞有限元仿真的过程, 其计算量是碰撞有限元仿真的十几倍甚至更多, 所以如何减少事故再现需要的有限元仿真次数就尤为必要。

因此, 本文提出采用有限元法和神经网络技术相结合进行事故再现的新方法。在该方法中, 首先采用数字测量技术得到事故车辆变形关键点的测量值, 采用有限元仿真技术得到汽车碰撞事故变形关键点的计算值。以汽车碰撞事故变形关键点的测量值和有限元仿真计算值偏差为网络输出, 建立了多层前馈神经网络拟合出车辆运动参数和变形偏差值的非线性关系。最后对训练完成的神经网络进行优化求解得到事故发生瞬间的车辆运动参数。对实际交通事故案例的再现分析验证了所提出方法的有效性, 为事故责任鉴定提供了科学的依据。

1 有限元事故再现的关键技术

1.1 汽车碰撞仿真的有限元法

有限元法的基本思想是将连续的求解区域离散

* 国家自然科学基金资助项目(60174023)。20060404 收到初稿, 20061129 收到修改稿

为一组有限个,且按一定方式相互联结在一起的单元的组合体。由于单元能按不同的联结方式进行组合,且单元本身又可以有不同形状,因此可以模型化几何形状复杂的求解域。而且当单元足够小、网格划分得足够细密时,这个由近似所产生的误差随着网格细化而逐步收敛,因此计算精度也可以得到充分的保证。

汽车碰撞是车身结构在剧烈碰撞动态载荷作用下极短时间内发生的复杂非线性过程,从力学角度而言,是一个同时包含几何非线性、材料非线性、边界非线性的复杂力学问题。对该类高度非线性问题,采用高效的算法是十分必要的,目前一般采用逐步积分法来求解,其中较成熟的方法是基于显式中心差分法的非线性有限元法^[6]。该方法具有两大优点:①采用集中质量矩阵,运动方程是非耦合的,不需要组集成总体刚度矩阵,因此大大节省存储空间和求解机时。②显式方法不需要对刚度矩阵进行多次分解和迭代。

1.2 神经网络技术

神经网络具有通过学习逼近任意非线性映射的能力。将神经网络作为辨识器和建模工具,实质上是将神经网络作为实际系统的黑箱模型,利用实际系统的输入/输出数据训练网络,使神经网络可以获得输入/输出数据之间的非线性映射关系^[7-8]。

这里采用多层前馈神经网络,其拓扑结构如图1所示。

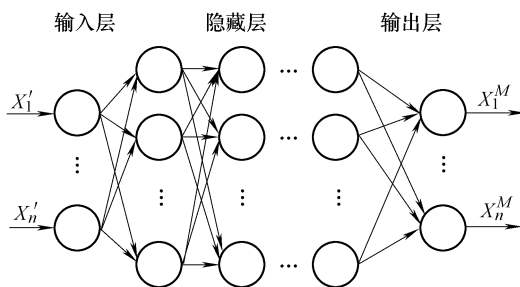


图1 多层前馈神经网络拓扑结构

设 M 是网络总层数, $n(s,i)$ 是第 s 层的第 i 个神经元, n_s 是第 s 层总神经元数,则定义 $n(s,i)$ 的运算如式(1)所示

$$I_i^s = \begin{cases} x_i^1 & s=1 \\ \sum_{k=1}^{n_{s-1}} w_{i,k}^s x_k^{s-1} & 2 \leq s \leq M \end{cases} \quad (1)$$

$$x_i^s = \begin{cases} I_i^s & s=1, M \\ f(I_i^s) & 2 \leq s \leq M-1 \end{cases}$$

式中 I_i^s —— $n(s,i)$ 的输入
 x_i^s —— $n(s,i)$ 的输出

$w_{i,k}^s$ —— $n(s-1,k)$ 与 $n(s,i)$ 的连接权

$f(\cdot)$ —— 非线性传递函数,用以表征人工神经元的输出特性

这里采用双曲正切 Sigmoid 函数

$$f(x) = \frac{1 - \exp(-x)}{1 + \exp(-x)} \quad (2)$$

网络训练方法是基于最速下降法的周期 BP 算法。网络性能评价采用方均根误差指标,即

$$Z = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (T_n - O_n)^2} \quad (3)$$

式中 T_n —— 期望输出

O_n —— 神经网络输出层的输出

N —— 训练样本个数

2 基于神经网络的事事故再现方法

根据碰撞事故的特点,提出以主要吸能零部件关键点变形量作为事故评价指标,记为 x_1, x_2, \dots, x_n , 这里 n 为关键点的数目。由事故现场调查和测量数据得到这些评价指标的测量值 $X_{1e}, X_{2e}, \dots, X_{ne}$, 而由计算机模拟可以得到相应的计算值 $X_{1c}, X_{2c}, \dots, X_{nc}$, 测量值与计算值的偏差记为 D_1, D_2, \dots, D_n , 则

$$D_i = \frac{X_{ie} - X_{ic}}{X_{ie}} \quad (4)$$

定义事故再现度 E , 则

$$E = 1 - \sum_{i=1}^n D_i^2 \quad (5)$$

式中 E 值越接近 1, 则说明事故再现结果愈接近真实情况。

以关键点变形量的测量值和仿真计算值偏差为神经网络的输出数据,以汽车碰撞事故发生前瞬时的运动参数(如运动速度,角速度等)作为神经网络的输入数据,训练神经网络,在网络训练满足精度要求后,可以得到汽车运动参数与关键点变形量偏差值的非线性映射关系。

将事故再现度作为目标函数,神经网络的输入作为优化变量,对训练完毕的神经网络进行优化,使得关键点变形量的测量值和仿真计算值偏差最小,此时 E 最大。这里就可认为事故再现度 E 最大的碰撞过程模拟结果就是真实事故的再现。

以上所提出的事故再现方法需要多次进行碰撞有限元仿真以作为神经网络的训练样本,其计算量是碰撞有限元仿真的十几倍甚至更多。随着计算机硬件性能的提高和并行计算技术的进步,采用并行计算可较好地解决计算速度和计算精度的矛盾^[9]。

事故再现流程如图 2 所示。定义初始的运动参

数区间，采用试验设计方法将运动参数进行组合，进行多次碰撞仿真。每次碰撞仿真的计算结果与测量结果进行比较，如果满足收敛条件，则认为得到了事故再现的运动参数；如果不满足收敛条件，则根据上文所述的优化策略，得到新一轮运动参数。重新进行碰撞有限元分析和结果比较，直到满足收敛条件为止。

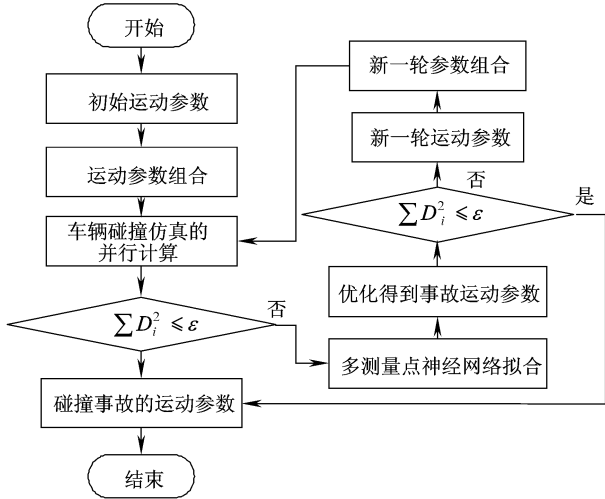


图2 事故再现流程图

3 应用实例

3.1 事故现场有限元模型的建立

采用有限元法及神经网络技术对一例真实汽车事故进行了再现分析。该事故发生于2001年12月的海南试车场，一辆小客车在进行高速运行试验后由于驾驶员操作失误而直接撞向了试车场的围墙。事故现场及车辆照片如图3所示。



(a)



(b)

图3 事故现场及车辆照片

根据事故特点，有限元网格划分时主要考虑车身零部件，包括白车身、车门总成、车轮和发动机等。最后的整车模型共由近130个零部件组成，包含了约180 000个单元。部件之间的联接方式主要是点焊联接、螺栓联接、铆接及粘合。由于车身结构主要是薄壁金属件，因此单元类型以四边形壳单元为主，还包括梁单元、杆单元、六面体单元、弹簧单元、焊点单元及刚体等。

根据事故现场测量到砖头及瓷砖的大小尺寸，建立围墙有限元模型，围墙墙体本身为碰撞发生的主体部位，因此围墙上的铁栏杆等可以用梁单元进行简化。当汽车撞击围墙时，车身会因为受到冲击而发生纵向跳动，可以通过建立地面有限元模型进行约束，事故现场地面为柏油路面，选择壳单元对路面进行模拟，材料模型为刚性材料，在车轮和地面之间加入 SINGLE SURFACE 约束。整车、围墙及路面有限元模型如图4所示。

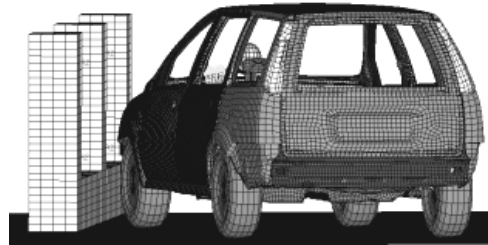
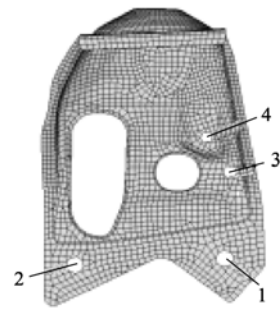


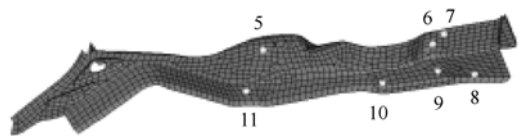
图4 事故现场环境有限元模型

3.2 事故变形关键点的选取及测量

针对本次事故的特点，选择前纵梁和挡泥板作为变形量测量对象。用三坐标测量仪测量了车身变形。首先在车身后部未发生变形的部位建立车身坐标系，选择前纵梁上的7个螺栓定位点以及挡泥板上4个圆孔的圆心作为关键点，用三坐标测量仪测量了其坐标，如图5所示。



(a)



(b)

图5 挡泥板及前纵梁上的关键点

将翼子板及车轮拆卸下来,对挡泥板进行测量;将车身抬高到适当位置,对前纵梁上关键点进行测量。关键点变形量测量现场照片如图6所示。



图6 关键点变形量测量现场照片

通过车身 CAD 模型得到车辆原型相应位置的三维坐标,比较碰撞事故发生前、后关键点的坐标可得到关键点变形量,如表1所示。

3.3 事故再现

本次事故中汽车直接撞向围墙,因此可认为对碰撞变形产生影响的因素仅为速度及汽车和围墙之

间的角度。为了保证仿真结果与真实结果取得较好的一致性,速度 v 和角度 θ 的初始值选择将处于一个比较广泛的范围内

$$30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \leq v \leq 70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$5^\circ \leq \theta \leq 25^\circ$$

在速度和角度区间内,如表2所示,每个设计变量取4个设计水平进行试验设计得到16种组合,采用有限元法对每个组合进行碰撞事故数值模拟可得到关键点变形量和事故再现度。经计算试验发现,250 ms的碰撞过程可以使车身关键点变形达到稳定状态。因此,以250 ms碰撞时间历程作为单次碰撞试验的终止时间。本次计算采用的计算平台是上海超级计算中心的“神威64P”高性能计算机,该系统是由8个双CPU计算节点和1个双CPU服务节点通过高速专用网络组成的工作站机群,计算节点为2 GHz的Intel P4 Xeon处理器,主存容量18 GB。完成一次碰撞数值模拟只需要大约6 h左右。

表1 事故发生前后关键点的坐标及变形量

| 编号 | 事故发生前坐标 | 事故发生后坐标 | 变形量 Δ/mm |
|----|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| 1 | (116, -405.09, 88) | (129.33, -404.85, 101.41) | 18.91 |
| 2 | (-132, -406.52, 73) | (-118.27, -412.76, 84.14) | 18.75 |
| 3 | (124.54, -413.64, 245) | (135.50, -411.12, 257.64) | 16.92 |
| 4 | (85, -442.34, 307.97) | (95.01, -438.28, 320.26) | 16.36 |
| 5 | (-263.36, -351.1, 106.5) | (-229.08, -346.89, 74.05) | 47.39 |
| 6 | (-606, -497.86, 174) | (-402.23, -499.92, 213.74) | 207.62 |
| 7 | (-630, -497.31, 200) | (-425.13, -512.77, 241.63) | 209.63 |
| 8 | (-681, -575, 128.8) | (-466.95, -594.62, 172.40) | 219.32 |
| 9 | (-600, -555, 138.45) | (-386.44, -571.39, 180.96) | 218.37 |
| 10 | (-462.54, -569.65, 138.44) | (-252.81, -579.84, 157.91) | 210.88 |
| 11 | (-230, -366, -0.012) | (-213.53, -383.75, 5.39) | 24.81 |

表2 设计变量及设计水平

| 设计变量 | 设计水平 | | | |
|---|------|------|------|----|
| 汽车的速度 $v/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ | 30 | 43.3 | 56.6 | 70 |
| 汽车与围墙之间的角度 $\theta(^{\circ})$ | 5 | 11.7 | 18.4 | 25 |

根据设计变量的个数和所选取的关键点个数,神经网络结构设计为3层前向结构,由输入层、隐含层和输出层组成,对应的神经元数目分别为2、30和1个。选取速度、角度和事故再现度 E 作为训练样本,隐含层和输出层的传递函数为双曲线切线函数和线性传递函数,训练方法采用周期BP算法,训练终止误差为0.01,经过4 890次迭代达到了训练收敛精度,其训练过程曲线如图7所示,其中横坐标 n 代表训练次数,纵坐标为收敛精度 ε 。

在设计变量区间内,随机选择4组速度和角度组合,分别采用有限元仿真和神经网络预测得到关键测点的变形,从而得到事故再现度 E ,从表3的数据可知,神经网络预测的 E_2 与有限元仿真计算得到的 E_1 误差在4%。可以看出:经过训练的神经网络能够正确预测出不同速度和角度组合的事故再

现度。

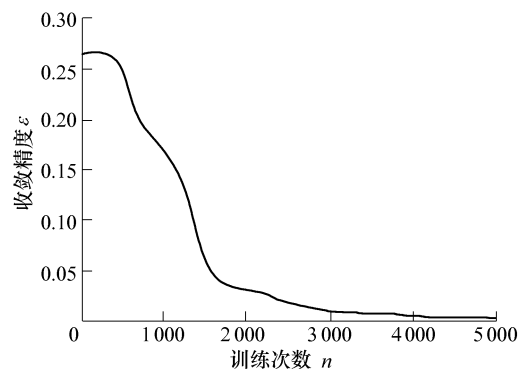


图7 神经网络的训练曲线

表3 两种方法得到的事故再现度比较

| 验证编号 | 汽车速度 $v/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ | 汽车与围墙之间的角度 $\theta(^{\circ})$ | 事故再现度 E_1 | 事故再现度 E_2 |
|------|--|-------------------------------|-------------|-------------|
| 1 | 46 | 11 | 0.53 | 0.51 |
| 2 | 58 | 13 | 0.84 | 0.83 |
| 3 | 40 | 21 | 0.61 | 0.60 |
| 4 | 62 | 19 | 0.70 | 0.68 |

根据事故再现流程,将训练完成的神经网络作为目标函数进行优化,此时优化收敛精度 ε 取0.1,

优化得到的速度和角度分别为 $49.94 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 16.22° 。利用优化得到的速度和角度进行碰撞仿真, 整车变形的仿真结果如图 8 所示。数值模拟结果与事故现场记录照片接近。

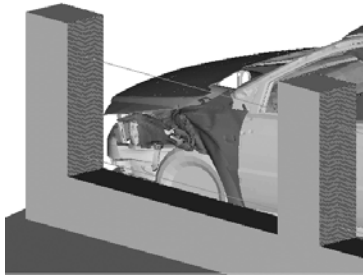


图 8 整车变形的仿真结果($v=50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $\theta=16^\circ$)

从图 3 可见, 在事故现场留下了比较清晰的刹车痕迹, 因此可以利用摄影测量方法对事故现场进行三维重构^[10], 事故现场的三维重构如图 9 所示。可以得到近似的碰撞角度为 16.89° 和制动拖痕长度为 7.068 m 。将制动拖痕作为基于轨迹优化的 PC-CRASH 软件(PC-CRASH 是奥地利的 STEFFAN H 博士以 KUDLICH-Slibar 模型为基础开发的软件系统, 其应用的碰撞模型属于动量模型)的初始信息^[11], 可以得到碰撞接触时刻速度为 $51 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

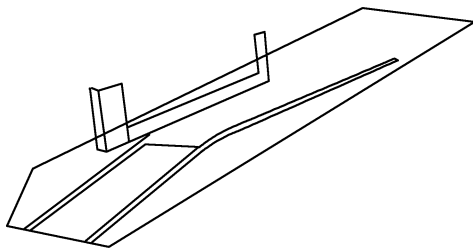


图 9 事故现场的三维重构

4 结论

本文提出一种采用有限元法和神经网络技术进行事故再现的新方法, 该方法具有如下特点。

(1) 考虑到制动拖痕等事故现场信息很容易遭到人为破坏, 这里所提出的事故再现方法利用车身三维变形信息, 选择关键点所在位置较少受外界偶然因素的影响。

(2) 利用文中的方法进行事故再现研究, 仿真结果可以非常方便地采用三维动画的形式再现事故全过程, 这有利于更准确地鉴定交通事故。

(3) 在该方法中, 车辆中可以加入假人或行人有限元模型, 从而实现了对驾驶员、乘客及行人的运动模拟和分析, 对人体所受伤害给出量化评价, 真正做到“以人为本”进行事故再现研究。

(4) 采用该方法进行事故再现研究可以对关键

零部件的变形情况进行考察, 将具体事故中零部件的变形形态信息反馈回汽车设计部门, 从而对汽车结构、材料及制造工艺设计等进行针对性的安全性改进。

参 考 文 献

- [1] 张晓云, 金先龙, 张淑敏. 有限元方法在汽车碰撞事故再现中的应用展望[J]. 农业机械学报, 2004, 35 (6): 206-210.
- [2] APARICIO F, SAN R J, DIAZ V. Theoretical model to analysis the collision of an automobile vehicle[J]. International Journal of Vehicle Design, 1998, 19(2): 415-429.
- [3] ZHANG X Y, JIN X L, SHEN J. Virtual reconstruction of two types of traffic accidents by the tire marks[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2006, 4282: 1 128-1 135.
- [4] 张晓云, 金先龙, 陆玉凯, 等. 面向事故分析的车身关键参数数值模拟计算[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40 (6): 958-962.
- [5] HAUG E, CLINCKEMAILLIE J, NI X M. 汽车碰撞仿真与设计的最新进展和发展趋势[J]. 机械工程学报, 1998, 34(1): 93-99.
- [6] 钟志华. 汽车耐撞性分析的有限元法[J]. 汽车工程, 1994, 16(1): 1-6.
- [7] OMAR T, ESKANDARIAN A, BEDEWI N. Vehicle crash modeling using recurrent neural networks[J]. Mathematical and Computer Modeling, 1998, 28(9): 31-42.
- [8] LUCA L, CHIARA B, SERGIO R. Neural networks systems to reproduce crash behavior of structural components[J]. Computers & Structures, 2004, 82: 93-108.
- [9] 张晓云. 基于车身三维变形的汽车碰撞事故再现研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2004.
- [10] 陆玉凯. 摄影测量方法和有限元方法在汽车碰撞事故再现中的应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2005.
- [11] 黄靖. 汽车碰撞事故再现中车辆运动与乘员损伤的数值模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2005.

VEHICLE CRASH ACCIDENT RECONSTRUCTION BASED ON FEM AND NEURAL NETWORKS

ZHANG Xiaoyun¹ JIN Xianlong¹
QI Wenguo¹ HOU Xinyi²

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai
Jiaotong University, Shanghai 200240;
2. Traffic and Police Office of Shanghai,
Shanghai 200070)

(下转第 153 页)