

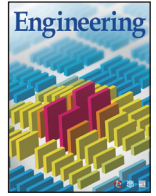


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Vehicle Engineering—Article

新型管式安全气囊设计与防护效果分析

周华健^a, 钟志华^{a,b}, 胡满江^{a,*}

^a Department of Automotive Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

^b Tongji University, Shanghai 200092, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 6 May 2017

Revised 29 December 2017

Accepted 4 January 2018

Available online 7 April 2018

关键词

新型管式安全气囊

乘员防护

多目标优化

摘要

安全气囊是有效的汽车乘员安全防护装置,但是乘员可能因为气囊点火展开时的巨大能量而受到意外伤害。本文从减少气体发生剂用量的角度对一种新型管式安全气囊进行设计;为研究新型气囊的刚度与防护效果,挑选3种类型的假人进行计算机仿真;之后,针对第50百分位假人进行多目标优化分析。结果显示,新型气囊的静态体积约为普通气囊的1/3,并且在气体发生剂用量至少减少30%的情况下,每种假人的损伤值均能够满足法规要求。优化分析后,复合损伤指标(P_{comb})概率下降22%,且充气量最优解减少32%。本文结果表明,在减少气体发生剂用量的情况下,新型管式安全气囊在乘员防护方面仍具有较大的潜力。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

近年来,被动安全技术得到蓬勃发展并趋于成熟,安全气囊在车内乘员防护方面起着重要的作用。交通事故统计分析结果表明,单独使用气囊可减少32%的死亡事故,气囊与安全带配合使用可减少67%的死亡事故[1]。然而,安全气囊气体发生器在点爆充气时会产生巨大的能量,给乘员带来很高的损伤风险。一方面,气体发生器容器壳体在高温和高压气体的作用下,极易发生变形和断裂,因此,金属碎片可能以致命的速度飞向车内乘员的头部和胸部,这也是造成高田气囊大规模召回事件的主要原因之一;另一方面,安全气囊在展开过程中内部压力很大且具有很强的冲击力,如果人体在气囊未完全展开前与其接触,可能受到气囊很大的冲击力作

用,进而导致乘员伤亡[2,3]。

为降低安全气囊展开给乘员带来的损伤风险,许多研究分别从改进气体发生剂和气体发生器作用方式两个角度,开展了积极的探索并取得了较好的效果。在改进气体发生剂方面,致力于低燃温、高稳定性气体发生剂的探索,主要集中在对于硝酸胍(GN)和硝酸铵(AN)配方的研究。Mendenhall和Taylor等[4]在以GN为燃料的发生剂中加入氢氧化氨基四唑的金属盐,使其在保证燃烧稳定和燃温低的基础上提高燃速;Halpin和Burns等[5]在AN配方中加入少量气相法白炭黑,提高了其热稳定性。在改进气体发生器作用方式方面,多集中于对双级气体发生器的研究,因为可以对发生剂能量进行分次释放。Wu [6]对双级气体发生器气囊进行了仿真研究,结论表明该气囊在乘员防护方面有较好的效果;

* Corresponding author.

E-mail address: manjiang_h@vip.163.com (M. Hu).

Zhang等[7]对双级乘员气囊进行了参数确定,并进行了台车试验,结果表明,可有效地降低女性乘员胸部的损伤风险。

本文在基于管状气囊应用于未来新型汽车内饰和约束系统的设计概念下[8,9],从减小气体发生剂用量角度设计了一种新型管式安全气囊(以下简称新型管式气囊),旨在降低气囊点爆能量,以减小气囊对人体造成的损伤风险。新型管式气囊主体采用多根气囊管道构建缓冲吸能空间,在保证有效展开体积与普通气囊接近的前提下,大幅度缩减气囊静态体积。在此基础上,利用不同体型假人进行仿真,对管式气囊的刚度和防护效果进行了探究。最后,针对第50百分位假人进行多目标优化分析,优化后气囊用气量减少且具有较好的防护效果。

2. 新型管式气囊设计

2.1. 安全气囊功能设计

管式气囊的设计理念是利用管道式结构构建缓冲吸能空间,同时依靠自身结构特点承受外力。新型气囊将具有与普通气囊相似的有效膨胀容积,使其具有较少剂量的气体发生剂和较小的点爆能量。管式气囊可以利用渗透率低的气囊材料,并在合适位置设置泄气孔,使其在保压方面比普通气囊更具鲁棒性。未来长气囊管可开发无缝一体成型的新工艺,存在大批量生产的可行性,保证管式气囊在设计制造时的高质量。本文主要聚焦于对减小气囊点爆能量可行性的初探和分析,使气囊可以在充气量较少的情况下,达到足够的有效展开体积,并具有稳定的防护效果。

2.2. 安全气囊结构设计

新型管式气囊呈现圆台的形状,包含上下部分圆环形气囊管、中间部分折叠气囊管和两个软垫。底部有两根圆环形的管道,顶部有3根圆环形管道,中间部分有4根折叠型的长气囊管。中间的每根管道从底部中央开始与上下管道之间连接。新型管式气囊结构示意图如图1所示。

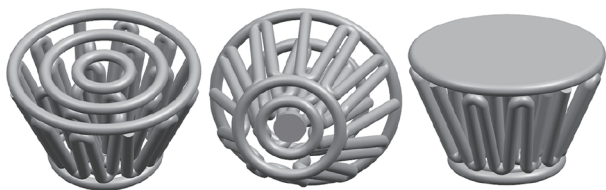


图1. 新型管式气囊结构示意图。

9条管道的管径全部为38 mm,底部气囊管轴线的直径分别为160 mm、290 mm,顶部气囊管的轴线直径分别为147 mm、325 mm、507 mm,安全气囊的整体高度为330 mm,上下部分各有一个软垫与气囊缝制在一起。

2.3. 安全气囊展开过程描述

当新型管式气囊充气时,气体发生器产生的气体进入储气室,储气室连接四根中间管道的起始端,气体从起始端进入管道,进而迅速将气囊展开,达到设计Z方向(高度方向)的厚度值,之后继续沿管道充气使安全气囊在X和Y方向膨胀展开,达到设计要求的形状。该设计可以将气体发生器产生的具有冲击效应的气体能量迅速扩散到XY平面上去,降低了安全气囊在展开过程中给人体造成的损伤风险。

3. 新型管式气囊防护性能分析

本文着重于新型管式气囊对驾驶员防护效果的初步分析,对于其他类型的乘员的防护研究将在未来的研究中体现。

3.1. 约束系统模型的建立与验证

根据丰田发布的2006款Yaris车型的约束系统各部件布置尺寸以及物理属性,利用有限元建模软件HyperMesh、Primer和LS-DYNA建立简化的驾驶员约束系统,以加快计算的效率。该模型包括座椅、三点式安全带、安全气囊、方向盘和地板等,各部件之间定义了相应的连接方式,以获得更加接近实车的物理属性。

三点式安全带模型的一维与二维单元分别采用的是*MAT_SEATBELT与*MAT_FABRIC关键字进行模拟,卷收器对安全带的卷收功能通过定义*ELEMENT_SEATBELT_RETRACTOR关键字实现[10]。此外,卷收器和安全带材料均定义加载与卸载曲线,使安全带的物理属性更加准确。

对于安全气囊有限元模型,采用*AIRBAG_HYBRID_JETTING关键字进行模拟,可以更好地模拟气囊的展开和充气特性。此外,单元类型选择Belytschko-Tsay膜单元,材料选用LS-DYNA中的MAT34号材料,安全气囊的物理参数见表1。

约束系统在建立与验证过程中,使用的是LSTC(Livermore Software Technology Corporation)公司开发的第50百分位Hybrid III假人,对假人的姿势进行调整,

使其处于正常的驾驶位置。为了获取准确的接触力，假人与其余部件之间的接触需要被准确定义[11]，所以使用*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE关键字定义假人与其他部件之间的接触，建立完成的约束系统模型如图2所示。

根据丰田Yaris车型US-NCAP实车 $56.3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 正面碰撞试验结果，经数据处理后获得的加速度试验曲线如图3所示。将加速度曲线加载到建立好的约束系统中，反复调节接触特性和摩擦因数等参数进行有限元模型的有效性验证。

3.2. 新型管式气囊有限元模型的建立与验证

本文首先在三维建模软件UG中建立新型管式气囊三维模型，之后将模型导入到Altair HyperMesh软件进行网格划分，共有37 921个节点、40 123个单元。

Liu等[12]证明采用非折叠或部分折叠的气囊仿真模型并不会从本质上影响仿真结果的有效性，所以可以被正常位置上并佩戴安全带的乘员所使用。在安全气囊折叠过程中，采用初始矩阵法（initial metric method）[13]，并对气囊进行简单缩放获得初始网格，利用关键

表1 安全气囊物理参数

Parameters	Value
Young's modulus (MPa)	300
Poisson's ratio	0.2
Density ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	780
Porous rate	0
Thickness (mm)	0.3

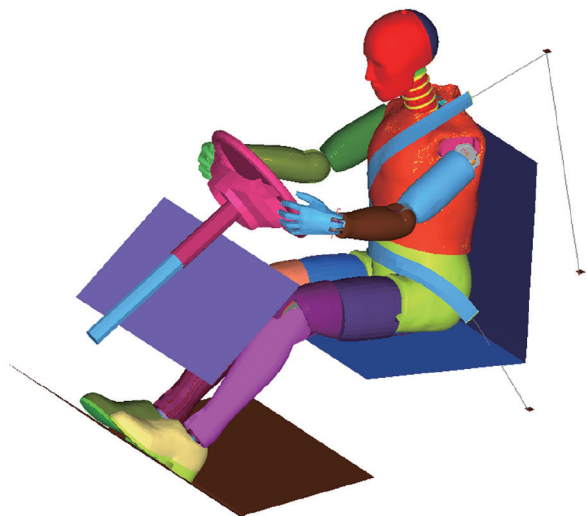


图2. 约束系统模型。

字*AIRBAG_REFERENCE_GEOMETRY定义完全展开时的网格作为参考网格。模型中使用的单元类型、材料定义和控制安全气囊展开的关键字均与建立好的约束系统模型中定义相同。此外，借助关键字*CONTACT_AIRBAG_SINGLE_SURFACE，可以在仿真过程中检测到气囊接触边界，使展开过程更加精确和稳定。

为了验证安全气囊有限元模型的准确性，试制了新型管式气囊样件，并采用高压充气泵开展了静态展开试验。高压充气泵能产生0.6 MPa压缩气体，并连接新型管式气囊的下部进气口。利用配置为1000 fps的高速摄像机记录展开过程，并与计算机仿真结果进行对比。需要强调的是，计算机仿真与试验的对应参数设置需要近似相同。

3.3. 管式气囊对驾驶员防护效果的初步探究

汽车驾驶员的体型和体重等不尽相同，当充气量少时，新型管式气囊的刚度与防护效果将是重点考虑因素。为了研究以上提到的问题，第5百分位假人、第50百分位假人和第95百分位假人（分别代表较小身材女性、中等身材男性与较大身材男性）三种假人被用来代表驾驶员的多样性，并且均加入到已经建立的约束系统中，分别利用新型管式气囊与普通气囊进行仿真并对比。设置普通气囊和管式气囊的泄气孔面积分别为 1800 mm^2 和 600 mm^2 ，并控制其他的部分物理参数均相同，以此更加准确地对比两者之间的异同。仿真对比中共用的气体质量流率曲线如图4所示。

为了评估在不同气体发生剂剂量下管式气囊的防护效果，在仿真中对管式气囊增加设置了质量流率比例系数分别为0.4和0.7的两组实验，即每种体型的假人进行

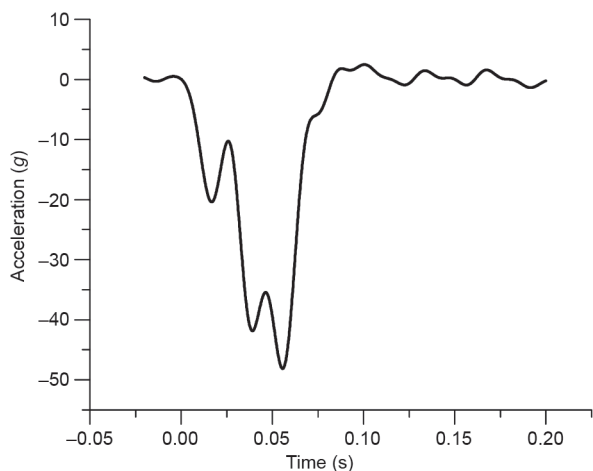


图3. 车身加速度曲线。

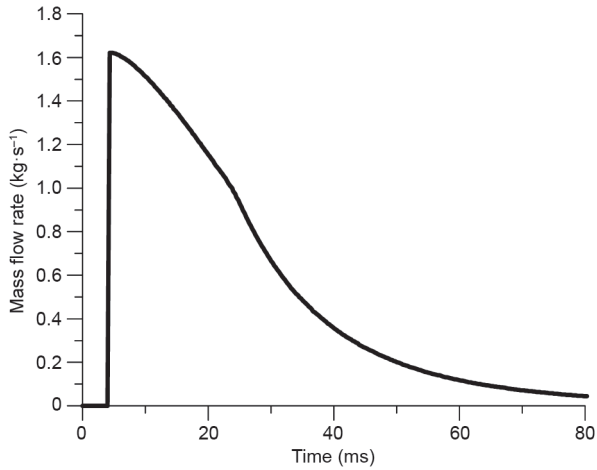


图4. 气体质量流率曲线。

4组仿真实验，并着重地探究安全气囊对防护人体头部和胸部的效果。

4. 基于第 50 百分位假人的优化分析

为了进一步探究管式气囊在驾驶员防护方面的潜力，对安装有管式气囊的约束系统进行了优化分析，得到优化结果值并与未优化前进行了比较。

4.1. 目标函数的选取

头部损伤指标（HIC）与Chest G指标（即胸部3 ms加速度值）在确定损伤程度方面至关重要。HIC值的计算方法见式（1），方程中所用的时间间隔为36 ms。胸部3 ms加速度准则的定义为人体因为约束系统作用所受到加速度载荷在持续时间超过3 ms时不能超过60g（ $g=9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ）。

$$\text{HIC}_{36} = \left\{ (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \right\}_{\max} \quad (1)$$

式中， $a(t)$ 为头部加速度合成值； t_1 和 t_2 为最大化HIC值时所取的时刻， t_2-t_1 在本文中的取值为36 ms。

为了比较合理地权衡头部和胸部加速度对驾驶员损伤的贡献，采用US-NCAP新车评价指标 P_{comb} [14]概率作为目标函数，其可以较好地反映在头部和胸部损伤共同作用下乘员受简明损伤分级（abbreviated injury scale, AIS）4级以上重伤的概率，表达式如下：

$$P_{\text{comb}} = P_{\text{head}} + P_{\text{chest}} - P_{\text{head}} \times P_{\text{chest}} \quad (2)$$

式中， P_{head} 和 P_{chest} 分别为乘员头部与胸部受AIS 4级以上重伤的概率，计算方法如下：

$$P_{\text{head}} = \frac{1}{1 + \exp(5.02 - 0.00351 \times \text{HIC}_{36})} \quad (3)$$

$$P_{\text{chest}} = \frac{1}{1 + \exp(5.55 - 0.0693 \times \text{Chest G})} \quad (4)$$

4.2. 设计变量的选取

由于本文侧重于探究管式气囊在用气量减少时的刚度和防护效果，故着重选用安全气囊泄气孔面积、点火时刻和质量流率比例系数三个设计变量，设计变量及参数变化范围如表2所示。

表2 变量名称与取值范围

Design variables	Value range
Vent area, A (mm^2)	300–900
Ignition time, T (ms)	5–20
Mass flow coefficient, X	0.4–1.0

4.3. 实验设计与代理模型的构造

参照文献[15]，利用多目标优化软件modeFRONTIER对三个设计变量进行拉丁方实验设计，数据组数设为60，得到对应的实验设计矩阵，再利用LS-DYNA软件按照实验矩阵的参数进行仿真运算，输出头部和胸部的加速度伤害值。接下来，将得到的60组仿真模拟数据保存为表格文件，并将其导入到modeFRONTIER中，选用DACE-Kriging方法构建近似模型，该模型是由全局模型与使用随机过程表示的局部偏差相加得到[16]。

4.4. 优化计算与分析

本文中优化方法选用多目标遗传算法（MOGA-II）来达到同时最小化HIC与胸部3 ms加速度值的目的，遗传代数设定为100代，以头部HIC值和胸部3 ms加速度值最小为目标，该问题的数学表达数如下：

$$\begin{aligned} \min & \text{ HIC, Chest G} \\ \text{s.t.} & \max[\text{HIC}] \leq 1000 \\ & \max[\text{Chest G}] \leq 60\text{g} \\ & 300 \text{ mm}^2 \leq A \leq 900 \text{ mm}^2 \\ & 5 \text{ ms} \leq T \leq 20 \text{ ms} \\ & 0.4 \leq X \leq 1.0 \end{aligned} \quad (5)$$

5. 结果与讨论

5.1. 管式气囊的新设计

由于管式气囊采用的是管道式结构，最终的气囊静

态体积约为20 L, 有效体积可达50 L。这种设计可以在保证气囊刚度的同时, 有效地减少气体发生剂的用量。

5.2. 约束系统与管式气囊验证

针对约束系统, 仿真与试验中假人伤害指标曲线的峰值和变化趋势较为接近, 如图5所示。因此, 本文中使用的约束系统模型的有效性得到了验证。

对于管式气囊来说, 试验与仿真过程中对应时刻的形态比较如图6所示。由于计算机仿真算法具有一定局限性, 在气囊充气之前就已经向最终的展开形状靠近, 故两者在展开形态上会有一些偏差, 但两者的展开过程基本吻合, 初步验证了气囊有限元模型的有效性。

5.3. 驾驶员侧管式气囊初步探究

考虑到能够直观地观察到两种气囊和假人之间相互作用后的动态响应, 以第50百分位假人碰撞时的响应为例, 得到如图7所示的响应对比图。基于对仿真中假人

各个方向测量到的加速度数值, 将头部加速度和胸部加速度值进行合成, 可以得到不同假人间加速度曲线的异同, 如图8所示。

头部合成加速度是衡量人体伤害程度的重要指标, 能够较好地反映乘员损伤的程度[17]。对于第5百分位假人模型, 从仿真输出曲线中可以看出, 4组仿真中头部加速度曲线的走势比较接近, 但是普通气囊作用下的假人头部加速度更早一点达到峰值, 如图8(a)所示。两种气囊在质量流率比例系数均为1.0的时候, 管式气囊的加速度峰值要小。此外, 当管式气囊质量流率比例系数减小至0.7和0.4时, 头部加速度峰值也相应地减小, 这表明更少的气体发生剂用量能够降低气囊对乘员的冲击作用, 这种现象可能是因为第5百分位假人的体型和体重都比较小, 采用较小的充气量便能满足碰撞防护时的刚度要求, 在提供合适的约束力的同时, 减弱了冲击效应以获得较好的防护效率。对于第50百分位假人和第95百分位假人, 从图8(b)、(c)可以看出, 当质量流

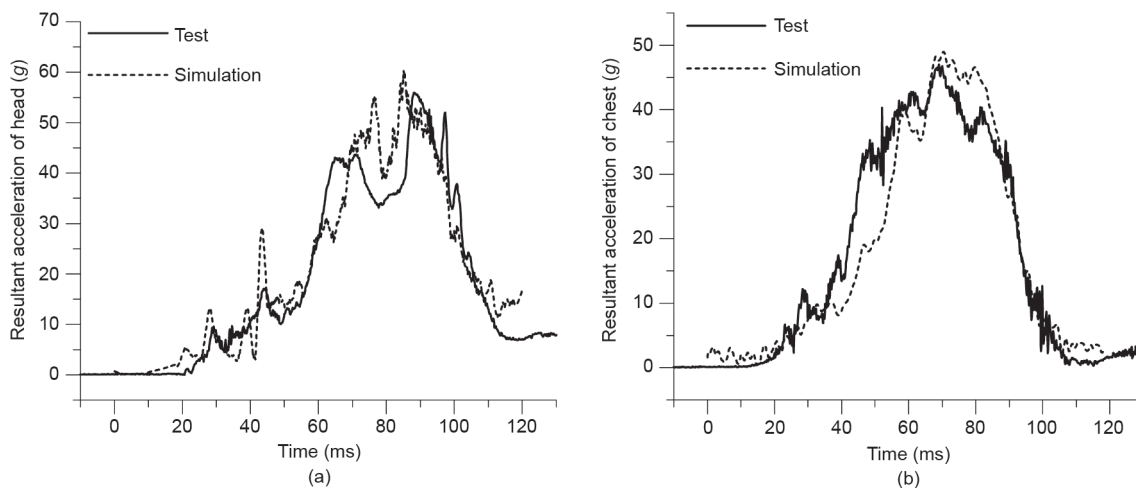


图5. 仿真与试验损伤指标曲线对比。(a) 头部加速度比较; (b) 胸部加速度比较。

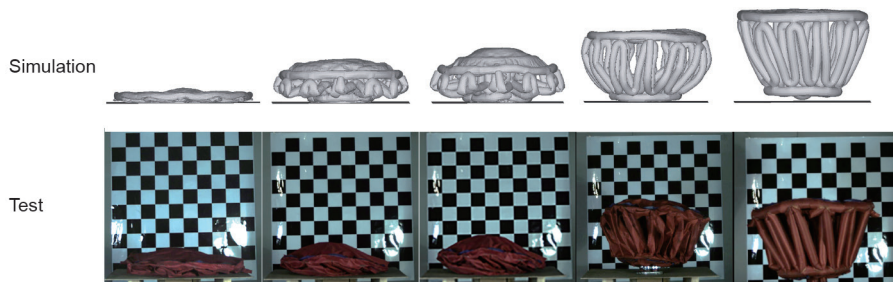


图6. 气囊静态展开仿真与试验对比图。

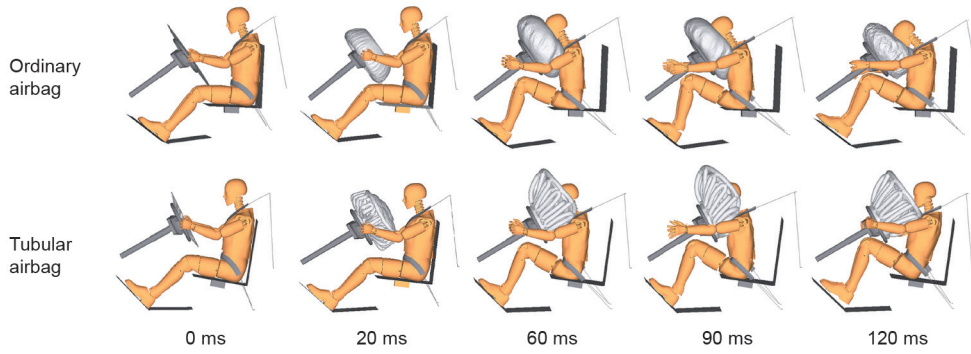


图7. 第50百分位假人动态响应。

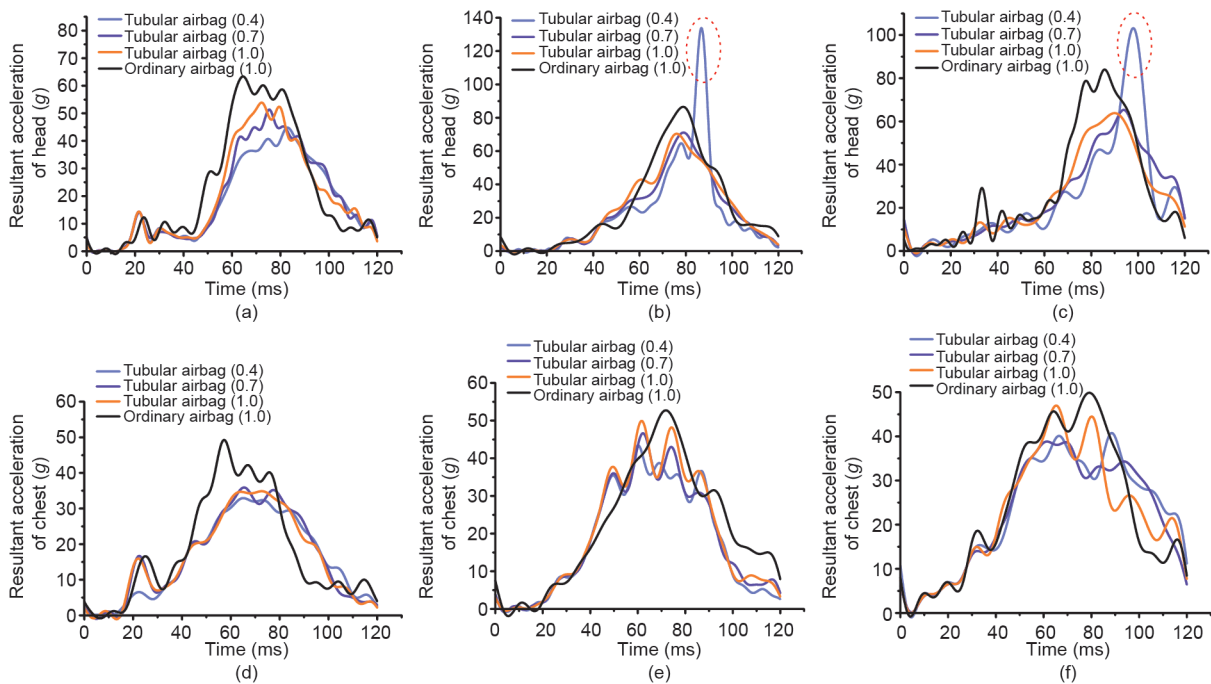


图8. 不同体型假人加速度曲线对比图。头部加速度对比: (a) 第5百分位假人; (b) 第50百分位假人; (c) 第95百分位假人。胸部加速度对比: (d) 第5百分位假人; (e) 第50百分位假人; (f) 第95百分位假人。

率比例系数分别为0.7和1.0时, 管式气囊的防护效果几乎相同, 并且两种比例系数下的加速度峰值均小于普通气囊加速度峰值。然而, 当管式气囊的质量流率比例系数为0.4时, 头部加速度曲线出现了较高的加速度峰值, 这说明此时的管式气囊刚度未能达到对这两种体型假人的理想防护效果。换言之, 将气体发生剂用量减少多达60%不能保证管式气囊提供足够的约束力。然而, 当气体发生剂的用量在合理的范围内减少时(如30%), 管式气囊仍然能够达到良好的防护效果。

胸部合成加速度是对胸部损伤评价的有效指标, 对于第5百分位假人来说, 当管式气囊的质量流率比例系数分别为1.0、0.7和0.4的时候, 曲线的差异性不大, 都

拥有较小的加速度峰值, 如图8(d)所示, 而普通气囊造成的胸部加速度峰值较大, 防护效果也相应差一些。对于第50百分位假人和第95百分位假人, 管式气囊和普通气囊作用下胸部加速度曲线的走势基本相同, 在质量流率比例系数均为1.0的时候曲线相差很小, 防护效果都较好, 当管式气囊质量流率比例系数减小到0.7和0.4时, 加速度峰值较低且要低于普通气囊, 如图8(e)、(f)所示。

为了定量表示出普通气囊与管式气囊在防护乘员方面的差异, 使用HIC和胸部3 ms加速度值作为衡量标准。将图8所示的加速度曲线进行处理, 得到表3中的损伤数据值。针对头部损伤, 当管式气囊的质量流率比

表3 不同质量流率比例系数下的假人损伤值

Dummy type	Airbag type	Mass flow coefficient	HIC	Chest G (g)		
5th percentile	Tubular airbag	0.4	322.92	33.16		
		0.7	418.55	37.92		
		1.0	484.14	34.07		
	Ordinary airbag	1.0	764.40	45.32		
		50th percentile	Tubular airbag	0.4	1026.07	43.11
				0.7	675.48	45.68
1.0	695.03			48.47		
Ordinary airbag	1.0		1167.02	50.49		
	95th percentile		Tubular airbag	0.4	924.81	44.94
				0.7	767.44	45.32
1.0		726.34		44.58		
Ordinary airbag		1.0	1310.10	48.50		

例系数为0.4与0.7时，第5百分位假人的HIC损伤值分别为322.92与418.55，均低于当两种类型气囊的质量流率比例系数为1.0时的HIC值。对于第50百分位假人与第95百分位假人而言，当质量流率比例系数为0.4时，由于较高的头部加速度峰值的存在，HIC值分别达到了1026.07和924.81。针对胸部损伤，在管式气囊作用下，对于每种类型的假人，当质量流率比例系数取3种系数时，假人的Chest G值差别不大，且均低于普通气囊。因此，定量与定性分析的结果是一致的。

从定性和定量分析的结果可以看出，对于第5百分位假人，在满足法规对HIC与胸部3 ms加速度值的要求下，可以将气体发生剂的用量减小60%。对于第50百分位假人与第95百分位假人，在达到期望的防护效果的约束下，至少可以将气体发生剂的用量减少30%。

5.4. 优化分析

针对代理模型而言，头部HIC值与胸部3 ms加速度值代理模型的平均标准误差为 1.5×10^{-13} 与 3×10^{-14} ，两模型的 R^2 值均等于1，表明代理模型与样本数据拟合程度高。基于以上分析，构建的近似模型可以准确地预测设计空间内的响应值，并可代替LS-DYNA作为优化的基础。

经过软件计算，得到在设计域内目标函数的Pareto解集，如图9所示。对于多目标优化问题，不能够保证各目标均取得较好的结果[18]，而Pareto前沿上的许多点可以作为问题的解，需要人为地进行选择。因此，本文采用目标函数 P_{comb} 概率对得到的Pareto解集非劣解集进行筛选。优化结果显示 P_{comb} 值最小约为0.12，对应的头部HIC

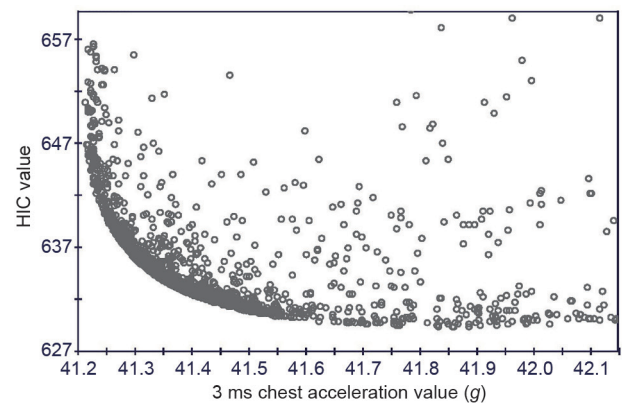


图9. 新型管式气囊优化Pareto解集。

值为632.8，胸部3 ms加速度值为41.4。将各最优参数值带入到LS-DYNA中进行计算，结果显示 P_{comb} 值为0.13，误差为8.5%，头部HIC值为671.1，误差为5.7%，胸部3 ms加速度值为42.33，误差为2.2%。在以上数据的基础上，各误差均在合理的范围内，进一步证实了近似模型的准确性。将优化后的结果同优化之前进行对比，结果如表4所示。从对比结果可以看出， P_{comb} 概率减小了22%，优化之后相比优化前，对驾驶员的防护效果提升明显。另外，在设计空间内最优值的质量流率比例系数为0.68，说明可以减少气体发生剂用量，获得较好的驾驶员防护效果的同时，减小气囊的静态体积。通过扩展设计空间，还可以进一步寻找最优的参数取值。上述结果显示管式气囊在乘员防护方面具有较大的潜力。

5.5. 局限性与未来研究方向

本研究还存在一些局限性。首先，本文只利用商业

表4 管式气囊优化前后对比

	Vent area, A	Ignition time, T	Mass flow coefficient, X	HIC	Chest G	P_{comb}
Before	600.0 mm ²	10.0 ms	1.00	695.03	48.47g	0.16
After	816.6 mm ²	8.5 ms	0.68	671.10	42.33g	0.13
Reduction	–	–	–	3.5%	13%	22%

软件来研究气囊的防护效果，未来的研究中将聚焦于利用试验方法研究管式气囊产品在安全方面的性能。其次，新型管式气囊的折叠方式在本文中并没有考虑，静态展开试验没有与法规要求保持一致，未来的工作将着眼于改善气囊的折叠方式和形状优化。再次，本文只关注对驾驶员防护，未来的研究中，有必要研究管式气囊对于其他车内乘员的安全防护性能。最后，普通安全气囊设计的一个要求是平衡小体型与大体型乘员之间的防护性能，因此，对于小体型乘员来说，我们假定减少普通气囊气体发生剂用量对于乘员防护的潜力不如管式气囊大，在未来的工作中需要证明我们的假设。

6. 结论

本文所做的研究工作是为了解决安全气囊点火过程中释放能量过大的问题。探讨了一种新型管式气囊的设计，对其刚度与防护性能进行评估，并进行了优化分析，主要的结论如下：

(1) 设计的管式气囊呈现圆台状，主体采用多根气囊管道构建缓冲吸能空间，静态体积减少到普通气囊静态体积的1/3，但有效展开体积与普通气囊的接近，可以缩减气体发生剂的用量并产生较少的点爆能量，从而降低气囊展开过程中对人体造成的损伤风险。

(2) 选取了3种不同百分位的假人分别利用管式气囊和普通气囊进行仿真，从仿真结果看，在满足法规对HIC值和胸部3 ms加速度值要求的前提下，小体型的乘员可以减少近60%的气体发生剂用量，中等和大体型的乘员也至少可以减少30%的气体发生剂用量，并达到理想的防护效果。

(3) 根据对第50百分位假人的优化结果， P_{comb} 概率下降了22%，并且充气量最优解减少32%，说明管式气囊在提高对乘员的防护性能方面具有较大的潜力。

Compliance with ethics guidelines

Huajian Zhou, Zhihua Zhong, and Manjiang Hu declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Cummins JS, Koval KJ, Cantu RV, Spratt KF. Do seat belts and air bags reduce mortality and injury severity after car accidents? *Am J Orthop (Belle Mead NJ)* 2011;40(3):E26–9.
- [2] Liu ZJ, Huang TZ, Zhang JH, Yang JK. Survey of research on airbag for occupant injury prevention from vehicle impacts. *J Mech Eng* 2001;37(5):12–7. Chinese.
- [3] Zhong ZH, Zhang WG, Cao LB, He W. *Automotive crash safety technology*. Beijing: China Machine Press; 2003. Chinese.
- [4] Mendenhall IV, Taylor RD, inventors. Burn rate enhancement via metal aminotetrazole hydroxides. United States patent US 20050098246. 2005 May 12.
- [5] Halpin JW, Burns SP, inventors; Automotive Systems Laboratory Inc, assignee. Gas generant. United States patent US 20070084531A1. 2007 Apr 12.
- [6] Wu XL. Simulation research on dual stage inflator airbag [dissertation]. Jinzhou: Liaoning University of Technology; 2015. Chinese.
- [7] Zhang TT, Wang DZ, Zhuo P, Liu JY, Zhuang X. Experiment research on passenger airbag test to front row female occupant based on Euro NCAP full width frontal impact case. *J Automot Saf Energy* 2016;7(4):403–11. Chinese.
- [8] Zhong ZH, He W, inventors; Hunan University State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, assignee. Sandwiched tubular airbags. United States patent US 7448644. 2008 Nov 11.
- [9] Huang J, He W, Yang JK, Zhong ZH. Numerical and experimental investigations on the behavior of the sandwiched tube-type airbag. *Int J Crashworthines* 2009;14(5):437–47.
- [10] Hu YZ, Liang YF, Jiang CY, Liu X, Liao GJ, Feng QF, et al. Application of the occupant injury investigation in frontal crash based on THUMS model. *J Automot Saf Energy* 2015;6(4):379–83. Chinese.
- [11] He W, Zhong ZH, Yang JK. Research on experimental validation of computer simulation of working performance of automobile airbag. *J Mech Eng* 2002;38(4):126–9. Chinese.
- [12] Liu DH, He W, Gao H, Zhong ZH. A simulation on the performance of tube-type airbag and neck protection device for the occupant protection system under special conditions. *Automot Eng* 2007;29(6):465–9. Chinese.
- [13] Tanavde AS, Khandelwal H, Lasry D, Ni X, Haug E, Schlosser J, et al. Airbag modeling using initial metric methodology. *SAE Int J Passeng Cars* 1995;104(6):1576–89.
- [14] Lee SB, Hong SG. Parametric study on mid-mounted passenger airbag cushion using design of experiments. *SAE Int J Passeng Cars* 2003;112(6):604–8.
- [15] Li L, Duan DW, Liu SL, Xiao L, Liu YB. A research on the optimization of restraint system for the protection of occupants with different statures. *Automot Eng* 2016;38(11):1312–8. Chinese.
- [16] Jeong S, Murayama M, Yamamoto K. Efficient optimization design method using kriging model. *J Aircr* 2005;42(2):413–20.
- [17] Viano DC, Arepally S. Assessing the safety performance of occupant restraint systems. *SAE Int J Passeng Cars* 1990;99(6):1913–39.
- [18] Cao LB, Ouyang ZG, Xu Z, Zhang GJ. Research on the optimization of reversible restraint systems. *J Mech Eng* 2016;52(10):133–41. Chinese.