

Characteristic Analysis of Different Child Pedestrian Headforms with Mathematic Models

Wei Xu^{1,2}, Fan Li³

¹State Key Laboratory of Vehicle NVH and Safety Technology, Chongqing, China, 400039

²China Automotive Engineering Research Institute, Chongqing, China, 400039

³State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, China, 410082

Abstract: This paper aimed at develop the FE models of a GTR 3.5 kg child headform and an ACEA 3.5 kg child headform. Then these two models were compared through analyses of drop test certification, high speed impact and bonnet impact. The difference of both headform in specification and impact performance was discussed. The results indicated that the stiffness of the GTR headform skin is higher than the one of ACEA headform, but it has some influence to the HIC value in bonnet impact. The difference of the location of center of gravity between these two headforms will influence the angular accelerations.

Keywords: pedestrian protection; child headform; finite element method

基于数学模型的儿童行人头型特性对比研究

许伟^{1,2}, 李凡³

¹汽车 NVH 及安全控制国家重点实验室, 重庆, 中国, 400039

²中国汽车工程研究院, 重庆, 中国, 400039

³汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南大学, 长沙, 中国, 410082

摘要: 针对行人保护标准法规的变化, 本文建立了符合全球行人法规要求的GTR3.5kg儿童头型和ACEA的3.5kg儿童头型的有限元模型; 并通过跌落标定、高速冲击标定和发动机罩冲击的仿真分析, 对比讨论了GTR 3.5kg和ACEA 3.5kg儿童头型在规格性能上的差异。GTR头型皮肤硬度高于ACEA头型, 但在对发动机罩的冲击中, 对HIC指标影响不大; 而头型质心位置的差异, 对角加速度影响较大。

关键词: 行人保护; 儿童头型; 有限元方法

1 前言

全球每年有127万人死于道路交通事故, 其中46%为“弱势道路使用者”^[1], 包括行人、骑自行车和摩托车的人。在行人事故中, 儿童是一个主要的受害群体, IHRA^[2]的统计数据表明, 儿童行人(15岁以下)损伤占行人伤亡人数的比例分别为32.2% (美国)、33.4% (德国)、34.2% (日本)、25.9% (澳大利亚)。在IHRA公布的儿童行人损伤数据中, 所有AIS2~6级损伤中, 头部占31.4%。因此, 交通事故中的儿童行人头部伤害是造成其死亡的主因, 而发动机罩是头部损伤的主要致伤区域。

2003年, WG17 2.5 kg儿童头型和ACEA 3.5 kg儿童/小个体头型被用于行人保护的试验研究。2008年, 全球统一技术法规 (GTR, Global Technical Regulation) 第9号法规采用GTR 3.5 kg儿童头型取代以往的儿童头型; 中国等效GTR的行人标准 (推荐) 已经实

施; 2010年, EuroNCAP也宣布采用新的GTR 3.5 kg儿童头型进行行人保护试验。基于行人法规的发展变化, 为了适应产品开发和试验研究的需要, 本文建立并验证了符合全球统一技术法规要求的GTR 3.5 kg儿童头型有限元模型以及ACEA 3.5 kg儿童头型有限元模型, 并通过对跌落试验、皮肤压缩、车体冲击的仿真分析, 将上述两个模型进行对比, 从而探讨两种儿童头型在性能上的差异。

2 材料和方法

2.1 儿童头型的建立和验证

2.1.1 GTR 儿童头型有限元模型的建立和验证

按照有限元模型的建模过程, 进行几何逆向、几何建模、网格划分、材料定义和接触定义等步骤, 建立的GTR 3.5 kg儿童头型模型如图1所示。模型包括与发射器连接用的导磁钢板、背板、金属球体、皮肤和

传感器单元，整个模型由10280个单元组成。整体模型质量为3.504 kg，垂直于冲击方向的转动惯量为0.00863 kgm³，尺寸符合GTR的规格要求。

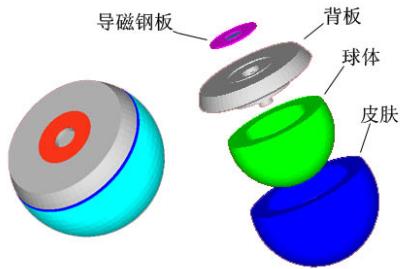


图1. GTR儿童头型模型

根据GTR头型标定程序^[3]，儿童头型采用跌落试验标定。头型冲击器由指定高度跌落到刚性平面，跌落高度为376 mm±1 mm，头型在跌落时冲击器后表面与垂直方向夹角为65° ±2°。头型须进行三次跌落到刚性平面的标定过程，每次标定应将头型冲击器沿对称轴旋转120°，本模型进行跌落标定仿真的加速度曲线如图2所示，3次标定得到的加速度范围见表2。通过分析可知，这一模型符合GTR法规规定的标定程序要求。

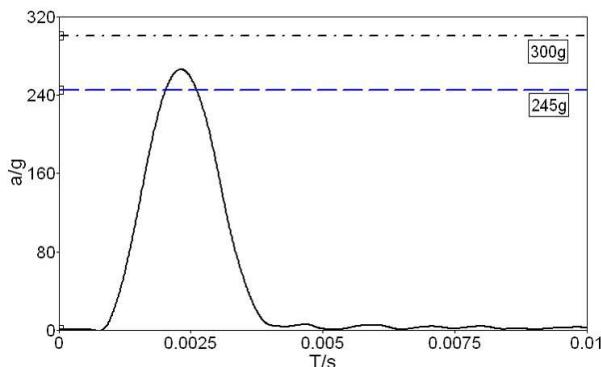


图2. 头型标定的合成加速度曲线

2.1.2 ACEA 儿童头型有限元模型的建立和验证

ACEA儿童头型有限元模型建立方法与GTR儿童头型建模方法基本一致。模型包括与发射器连接用的导磁钢板、背板、金属球体、皮肤和传感器单元，整体质量为3.504 kg，垂直于冲击方向的转动惯量为0.00863 kgm³，尺寸符合ACEA的规格要求。

ACEA儿童头型验证采用一个标定冲击器撞击头型的高速冲击试验。这一标定程序采用质量为

1.0±0.01 kg的标准冲击器以7.0±0.1 m/s的速度水平推进冲击处于静止状态的儿童头型，标准冲击器前端直径为70 mm。头型采用长度大于2.0 m的细绳悬挂，背板与水平面的夹角在25° -90° 之间，得到头型的合成加速度应在290g-350g之间。按照标定程序要求，设定背板与水平面夹角为30° 时，仿真得到的加速度峰值为335.7 g。

2.2 GTR 与 ACEA 儿童头型的对比分析

2.2.1 头型规格和标定程序对比

行人保护试验对头型冲击器的规格进行了详细的规定，主要集中在尺寸和质量的分布上，此外，对于传感器的安装位置和传感器质量块距离中心的位置也进行了规定。由于数学模型可以将传感器设定在质心位置，因此在这里仅对GTR儿童头型和原2004/90/EC指令中规定的ACEA儿童头型规格和模型进行了对比。

在2004/90/EC中采用一个标定冲击器撞击头型的高速冲击标定程序。在GTR法规中，取消了高速冲击标定，而是采用典型的头型跌落标定程序，并规定头型固有频率大于5000Hz保证高速撞击的性能。为了对比不同头型的生物力学性能，分别建立了头型跌落和高速冲击标定的仿真模型，按照跌落标定的要求，每个头型分别进行了3次仿真，而对于高速冲击试验，采用背板与水平面成30° 的悬挂姿态进行了冲击仿真。

2.2.2 汽车发动机罩冲击分析

选取美国国家碰撞分析中心（NCAC）开发的TARUS轿车模型作为头型冲击的参考模型，这一模型具有高精度的结构描述和各种碰撞工况的验证。由于本研究仅研究头型撞击发动机罩区域，因此仅保留会对碰撞效果产生影响的结构和部件，如发动机罩、翼子板、前保险杠、发动机、散热器和其他发动机罩下的结构件和刚性件，还包括A柱下段结构和防火墙之前的部分结构件。这些部件组成的车体前部结构与后方部件的连接，采用约束连接处节点的自由度来实现。

在发动机罩上选择三个撞击点，分别采用GTR头型和ACEA头型进行冲击，冲击方向与水平面夹角为50°，冲击速度为9.7 m/s。根据GTR的头型区域的划分，WAD1000-WAD1700区域基本覆盖了发动机罩中后部，选择的三个试验点在图3中分别标出，均位于WAD1000-WAD1700区域，且均为该区域可能的硬点，点A下方接近发动机罩左边缘，且下方有加强板；点B位于前部中间偏右，下方有加强板；点C位于右上

角，下方有加强板和发动机罩铰链。将头型撞击发动机罩的合成加速度峰值、HIC值和角加速度峰值作为结果输出，进行对比分析。

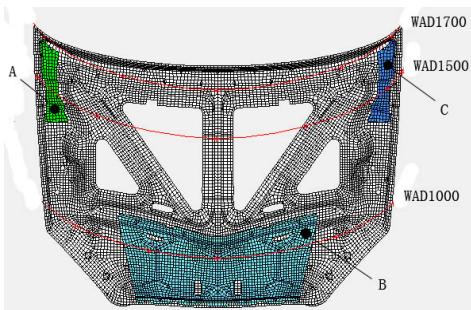


图3. 透视模式下的发动机罩板和下部结构

3 结果与讨论

GTR和ACEA各自规定的3.5 kg头型的规格如表1所示，用于对比的模型参数也在表中列出，可以看出，两者的差异表现在质心和球体型心距离的要求上，GTR头型对这一距离的要求高于ACEA头型，另外，在垂直于冲击轴的转动惯量上也存在微小差异。

表1. GTR行人法规成人规格和模型参数对比

参数	GTR 法规要求	GTR 头型模型	原 EC 指令规格要求	ACEA 头型模型
质量(kg)	3.5kg±0.07	3.504	3.5kg±0.07	3.500
直径(mm)	165±1	165	165±1	165
转动惯量 (kgm ²)	0.008~0.012	0.00863	0.008~0.012	0.00857
质心和球 体形心 距离(mm)	±2 以内	1.54	±5 以内	3.81

GTR和ACEA头型分别按照跌落试验标定和高速冲击标定程序进行仿真得到的加速度峰值见表2。可见开发的GTR儿童头型模型的跌落试验标定分析的峰值能够落在规定的范围内，而无法满足高速冲击的要求，而ACEA头型能满足高速冲击要求。同样的试验条件下，GTR头型得到的加速度峰值要高接近25%。由于两个头型在尺寸、质心位置和转动惯量上的差异很小，这一现象说明GTR头型的皮肤明显比ACEA头型的皮肤硬度更高。因此在单纯考察冲击器特性的分析中，GTR头型的峰值会更高。从标准对头型规格的要求和标定程序指标来看，ACEA头型无法满足GTR法规的要求。

表2. 标定程序仿真分析加速度峰值对比

头型	跌落标定程序	高速冲击标定程序
	245g-300g	290g-350g
GTR 儿童头型	266.5g±0.9g	435.2g
ACEA 儿童头型	198.3g±0.3g	335.7g

在头型对汽车发动机罩的冲击试验中，GTR和ACEA头型以相同的入射角度和速度分别对三个冲击点进行冲击，得到的典型头型加速度曲线如图4所示。所有仿真得到的加速度峰值和HIC值见表。由图可知，头型对发动机罩的冲击过程中，在接近罩板边缘的硬点C，头型的撞击首先由于外板的变形出现第一个峰值，然后与下部加强件的接触导致第二个高峰值的出现，但是整个过程在接触开始后15 ms左右就基本完成，以后都是头型自由飞行旋转的过程。而对于位于中部的点B，虽然罩板下方有加强板，但是由于整个罩板的弹性作用，因此加速度的峰值都不太高，而且作用了较长的时间。

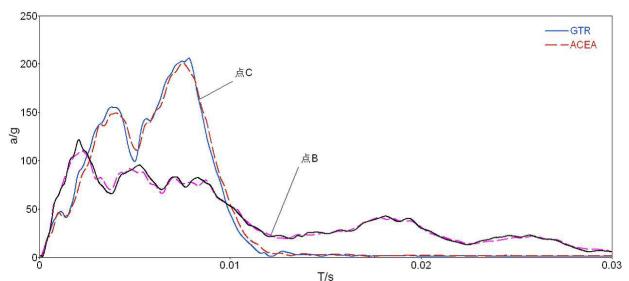


图4. 冲击点C的头型加速度曲线

由表3对比不同头型对同一点冲击得到的加速度峰值和HIC可知，除了B点的加速度以外，ACEA头型和GTR头型其他的加速度峰值和HIC指标的差异均在3%上下，这表明在发动机罩板等金属薄壁件的变形过程，冲击中不同头型皮肤硬度差异的影响明显降低，因此不同头型得到的HIC指标差异不大。由于GTR头型具有较硬的皮肤，因此得到的HIC指标略大于ACEA头型。总体而言，在对发动机罩的冲击过程中，两种头型由于质量、质心位置和转动惯量的差异不大，因此在线性加速度和HIC指标的差异并不大。但是数学模型中，加速度传感器设置在中心位置，而在实际的物理头型中，三个单轴向传感器的安装距离中心存在一定的距离，IHRA的研究报告^[4]表明，传感器质量块距离中心的距离越远，HIC会有所降低，这需要进一步的试验来进行检验。

表3. 发动机罩冲击加速度峰值和HIC指标

冲击点	头型	加速度峰值 (g)	HIC	角加速度 (rad/s ²)
A	GTR	154.9	1276.3	18381.0
	ACEA	158.9	1236.9	16038.7
B	GTR	121.6	547.5	18917.7
	ACEA	109.9	532.0	15773.7
C	GTR	205.7	1889.1	22403.1
	ACEA	200.6	1835.5	19605.5

不同头型冲击发动机罩，合成角加速度的波形较为接近，没有相位差异，但角加速度峰值的差异较大，ACEA头型在三个点的角加速度相对于GTR头型峰值降低在12.5%~16.6%以上。由此可以说明，虽然质量和尺寸上，两种头型差异不大，但是质心位置相对于形心位置的差异，对角加速度还是影响显著。因此，如果将来的评价指标中引入角加速度，则两种头型得到的结果可能差异更大。

4 结论

本文建立了符合GTR法规要求的3.5 kg儿童头型的有限元模型，并通过跌落标定、高速冲击标定和发动机罩冲击的仿真分析，对比了GTR和ACEA的儿童

头型冲击特性的差异：

(1) 开发的GTR儿童头型参数满足GTR法规对头型规格和标定程序的指标要求，可以用于GTR行人保护研究；

(2) 动态标定和发动机罩冲击的仿真分析表明，GTR头型具有较硬的皮肤，因此在对刚性部件的冲击，会产生比ACEA头型更高的加速度；但是在对发动机罩等薄壁件的冲击中，由于GTR和ACEA头型质量、尺寸和转动惯量差异很小，因此HIC指标差异不大；

(3) 由于两种头型质心位置相对于形心位置的距离有一定差异，因此对角加速度的影响显著。

References (参考文献)

- [1] WHO.Global status report on road safety.Geneva WHO, 2009.
WHO. 道路安全全球现状报告.日内瓦:WHO, 2009.
- [2] IIHRA/PS-WG Pedestrian Traffic Accident Data, 5th meeting of Informal Group on Pedestrian Safety (WP29), Tokyo, Japan, 2003
- [3] United Nations. Global Technical Regulation No.9 –Pedestrian Safety.U.S.A,2008
- [4] Y. Matsui, M. Takabayashi, M Tanahashi. Characteristics of 3.5 kg pedestrian headform impactor prototypes developed by JAMA-JARI and ACEA-TNO. International Journal of Crash-worthiness, 10(2),2005