

汽车工程中的若干力学问题¹⁾

危银涛²⁾ 马春生 冯希金

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)



危银涛, 1971 年出生, 清华大学汽车工程系研究员, 博士生导师. 1997 年哈尔滨工业大学航天工程与力学系复合材料专业获博士学位. 1998~2001 年先后在华中科技大学力学系和清华大学汽车系进行博士后研究. 分别于 2003~2004 年和 2009 年获洪堡基金支持赴德国汉诺威大学结构力学所、亚琛工大汽车研究所和勃兰登堡大学机电研究所进行客座研究. 第 5 届全国汽车工农业机械轮标委 (SAC/TC19/SC1) 委员, 第 7 届流变学专业委员会委员, 北京市力学学会第 8 届计算力学专业委员会委员, 《轮胎工业》第 7 届编委会委员. 理论研究兴趣包括橡胶本构模型、汽车动力学与控制、轮胎动态分析与建模、非线性有限元分析与形状优化、复合材料理论和摩擦诱导振动理论与控制. 应用研究集中在汽车轮胎振动与噪声 (NVH) 与操纵稳定性、轮胎花纹噪声、大型带式输送机动力学控制、橡胶疲劳分析、橡胶摩擦与磨损、航天复合材料、风力叶片材料、微型智能汽车等. 致力于将力学理论、方法、仿真工具应用于车辆、航天、能源、橡胶等工程领域, 主持国家自然科学基金、国际合作基金和各类横向工程项目 20 余项.

摘要 汽车的设计、开发和使用离不开力学. 简述汽车的发展历史、主要组成及其性能. 介绍汽车工程中的几个关键力学问题, 包括汽车轮胎力学、行驶稳定性分析、驱动与阻力、振动与噪声、碰撞力学与车身耐撞性、撞击损伤生物力学、行人保护力学等. 展望了汽车工程中需要关注的力学问题.

关键词 汽车工程, 汽车安全, 耐撞性, 汽车轮胎力学, 振动与噪声

中图分类号: O235, U217 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2012)04-001-07

DOI: 10.6052/1000-0879-12-124

MECHANICS IN AUTOMOTIVE ENGINEERING¹⁾

WEI Yintao²⁾ MA Chunsheng FENG Xijin

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Mechanics plays a key role in automotive design, development and utilization. The requirements of safety, energy efficiency, and environment protection for modern vehicles involve all disciplines of mechanics. This paper briefly introduces the history of vehicles development and its basic structure and performances. The state of the art of the vehicle mechanics is described with emphasis on the key problems in tire mechanics, vehicle directional stability, crashworthiness, and noise and vibration. The vehicles mechanics problems in the future are summarized.

Key words automotive engineering, automotive safety, crashworthiness, tire mechanics, NVH

2012-02-15 收到第 1 稿, 2012-02-27 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目 (10872103, 51175286).

2) E-mail: weiyt@tsinghua.edu.cn

1 汽车工程发展概述

中华民族是世界上最早使用车辆的民族之一,传说 5000 年前轩辕黄帝就制造了车辆,后来出现的马车是人类历史上使用时间最长、最有影响力的陆地交通工具^[1]. 车辆前进通过车轮的滚动实现,大大提高了搬运效率和能力. 1769 年,法国工程师古诺发明了以蒸汽机为动力的三轮汽车,这是世界上第一辆能够依靠自身携带动力前进的汽车. 内燃机的发明催生了现代意义的汽车,1886 年德国人卡尔·本茨和戈特利布·戴姆勒几乎同时发明了汽油机汽车,他们二人被公认为世界第一辆现代汽车的发明者^[2]. 汽车自诞生以来,极大地促进了人类社会的经济发展,同时也提高了人们的生活质量,被称为“改变世界的机器”. 2010 年全球汽车销量为 7200 万辆,而汽车保有量则达到惊人的 10 亿辆.

汽车主要由发动机、车身、底盘和电气设备 4 大系统组成. 发动机是汽车的“心脏”,为汽车提供动力,主要有内燃机和电机两种动力形式. 车身是驾驶员的工作场所,也是装载乘客和货物的地方. 根据车身有无车架,可将车身分爲承载式和非承载式,绝大多数轿车都是承载式车身. 底盘接受发动机的动力,使汽车产生运动,一般包括传动系统、行驶系统、转向系统和制动系统. 电气设备由电源组、发动机起动系和点火系、汽车照明和信号装置、微处理

器、传感器等组成,随着科技的发展,它在汽车制造成本中所占的比例越来越大^[3].

动力性、燃油经济性、制动性、操纵稳定性、行驶平顺性、通过性、安全性是现代汽车设计需要考虑的主要性能^[4]. 安全、节能、环保是现代汽车发展的 3 大主题. 实现交通事故“零死亡”是汽车安全设计的最终目标,为此大量先进技术已经或将陆续应用,如车道保持技术、刹车辅助系统、主动避撞系统、疲劳监测与报警系统、自适应乘员约束系统等. 面对能源危机,汽车的节能性日益重要,未来的汽车必须进一步提高发动机燃油经济性、实现车身轻量化. 在温室气体排放中,机动车排放占了相当大的比重,改善排放污染成为汽车发动机重点发展技术. 混合动力、电动汽车、新能源汽车的迅速发展也适应了汽车节能和环保的未来趋势.

2 汽车工程中的主要力学问题

2.1 汽车运动之源——轮胎力学

轮胎是汽车重要的部件,轮胎和道路相互作用形成的界面提供了汽车运动和操纵所需要的所有力和力矩(见图 1),在轮胎接地区域内产生的六分力是使汽车产生驱动、制动和转向等运动的根本原因(见图 2). 六分力作为轮胎重要的外特性直接影响车辆的操纵稳定性、乘坐舒适性以及制动驱动等性能.

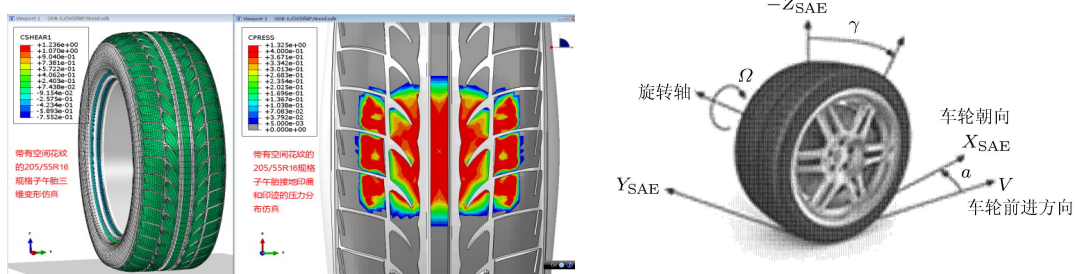


图 1 轮胎道路相互作用界面

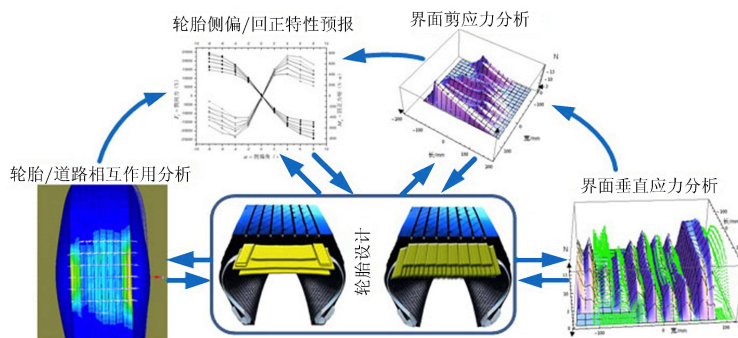


图 2 轮胎和道路界面三维受力与六分力形成

对整车多体动力学分析而言, 轮胎六分力是系统仿真中的重要输入, 得到精确的轮胎六分力数值是保证车辆动力学分析可靠的前提. 轮胎力学对车辆就像空气动力学对航空一样重要.

对于轮胎六分力的描述一般在标准坐标系下进行, 图 3 所示为常用的 SAE 轮胎坐标系. 由于轮胎六分力来源于地面, 因此坐标系中的原点取为车轮

平面与地面交线的中心处. 以车轮平面与道路平面的交线为 X 轴, 规定轮胎滚动朝向的方向为正. Y 轴定义为轮轴在道路平面上的投影线, 规定后视镜胎时向右为正. Z 轴为道路平面的垂线, 规定指向道路平面内为正, 从而保证坐标系符合右手坐标系原则.

由于轮胎与路面接触区域内的变形与受力情况

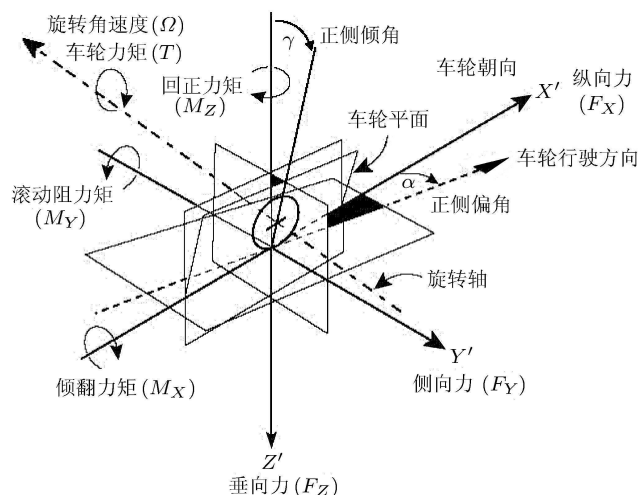


图 3 SAE 轮胎坐标系

复杂, 一般情况下路面对轮胎作用力的精确有效位置未知. 因此要定义路面对轮胎的作用力, 必须引入沿上述 SAE 坐标系 3 个轴的力 (F_X, F_Y, F_Z) 与绕 3 个轴的力矩 (M_X, M_Y, M_Z), 统称为轮胎六分力 [5]. 纵向力 F_X 是指路面对轮胎作用力在道路平面内沿 X 轴方向的分量. 其作用是对车辆进行驱动与制动. F_X 为正时为驱动力, F_X 为负时为制动力. 侧向力 F_Y 是指路面对轮胎作用力在道路平面内沿 Y 轴方向的分量. 根据轮胎转向或外倾的方向, 侧向力使得轮胎向相应的方向运动. 垂向力 F_Z 是指路面对轮胎作用力垂直于道路平面沿 Z 轴方向的分量. 根据定义, 该垂向反作用力为负值, 因此垂直载荷的符号与垂向反作用力相反, 为正值. 倾翻力矩 M_X , 是指路面对轮胎作用力矩绕 X 轴旋转的分量. 其说明了垂向力作用点相对于接触中心左右移动的现象, 影响轮胎的外倾性能. 滚动阻力矩 M_Y , 是指路面对轮胎作用力矩绕 Y 轴旋转的分量. 其说明了垂向力作用点相对于接触中心前后移动的现象. 回正力矩 M_Z , 是指路面对轮胎作用力矩绕 Z 轴旋转的分量. 其说明了纵向力 F_X 与侧向力 F_Y 在道路平面内的作用点.

在对轮胎六分力进行建模的时候, 经常将轮胎

的侧偏力、回正力矩、纵向力和倾翻力矩表示成 4 个变量即垂直负荷、侧偏角、滑移率 (滑转率)、侧倾角的函数. 滑移率这个概念经常给人以误导, 以为在轮胎和道路的界面上有真实的滑移, 其实滑移率代表的应该是弹性轮胎的蠕滑率, 其定义为

$$S_x = \frac{V_x - \Omega R_e}{V_x} \quad (1)$$

其中, Ω 是轮胎转速, R_e 是轮胎有效滚动半径, V_x 是车轮前进的速度, 滑移率代表的是轮胎的蠕滑率, 并不代表轮胎和道路界面发生了整体的滑移, 在轮胎自由滚动情况下, 界面上大部分接触点处于粘结状态.

2.2 汽车行驶的稳定性的

图 4(a) 所示为四轮车辆的运动学描述, 其中 V 是纵向速度, $\dot{V}$ 是纵向加速度, a_y 是侧向加速度, β 为质心侧偏角, ψ 是横摆角, ν 是航向角, $\dot{\psi}$ 是横摆率. 如果忽略悬架作用、车身俯仰角和侧倾角为 0、忽略转向系统的影响、汽车沿 X 轴的前进速度 V 视为不变、侧向加速度限定在 $0.4g$ 以下、侧偏特性处于线性范围、没有空气动力作用, 忽略左右车轮轮胎由于载荷变化而引起轮胎特性变化以及轮胎回正力

的作用并认为车辆坐标系的原点与汽车质心重合, 则可以直接以前轮转角为输入, 用线性二自由度模型 (见图 4(b)) 描述汽车的运动. 其中 δ 是转向角,

$F_{\alpha f}$, $F_{\alpha r}$ 分别是前后轴侧向力, l_f , l_r 分别是质心离前轴和后轴的距离.

根据线性二自由度模型, 车辆稳态转向时方向

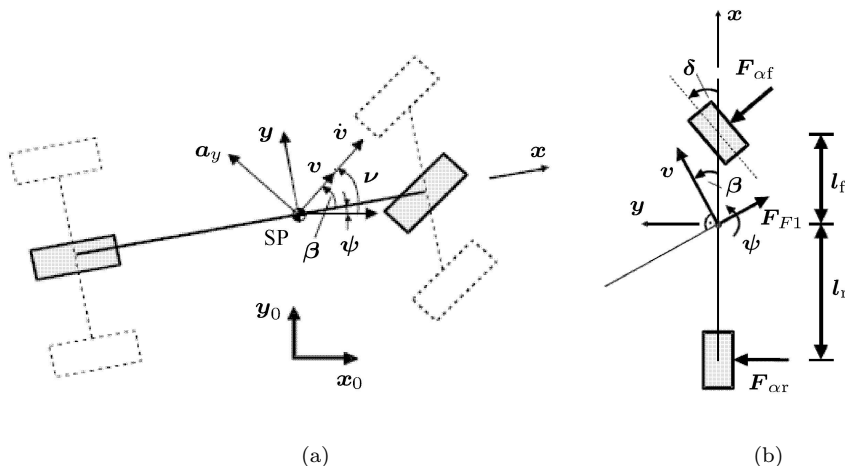


图 4 汽车线性二自由度模型

盘转角可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \delta &= \frac{1}{R} + \frac{m}{l} \left(\frac{l_r}{C_{\alpha f}} - \frac{l_f}{C_{\alpha r}} \right) a_y \\ \frac{d\delta}{da_y} &= \frac{m}{l} \left(\frac{l_r}{C_{\alpha f}} - \frac{l_f}{C_{\alpha r}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中, R 是转弯半径, m 为车辆质量, l 为车辆轴距, $C_{\alpha f}$, $C_{\alpha r}$ 分别是前后轴轮胎的侧偏刚度. 根据式 (2) 可以得到车辆的稳定性因子

$$k = \frac{l_r}{C_{\alpha f}} - \frac{l_f}{C_{\alpha r}} \quad (3)$$

式中, $k = 0$, $k > 0$, $k < 0$ 分别对应着汽车的中性转向、不足转向与过度转向 [6-9]. 一般汽车设计成有一定的不足转向以保证转向安全.

汽车行驶稳定性分析的主要内容就是研究汽车的设计及使用因素对汽车稳定性的影响, 现代汽车电控系统 (ABS, ESP, TCS 等) 都基于汽车行驶稳定性的基本规律.

2.3 汽车的驱动和阻力分析

汽车能够加速和保持运动, 必须具备驱动和附着条件. 汽车驱动力由发动机产生, 发动机发出的转矩经传动系传至驱动轮, 该转矩 T_t 产生对地面的等效圆周力 F_0 . 于此同时, 地面对驱动轮施加一个与 F_0 大小相等、方向相反的反作用力 F_t , 如图 5 所示, F_t 即是汽车的驱动力, 该力的值为 [4]

$$F_t = F_0 = \frac{T_t}{r} \quad (4)$$

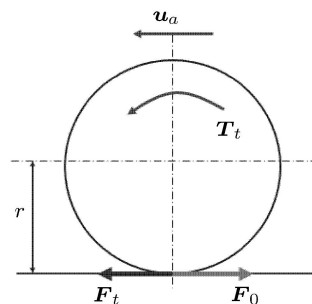


图 5 汽车驱动力

值得注意的是, 驱动力并非只由发动机转矩和车轮半径决定, 同时受到轮胎与地面附着条件的限制. 地面对轮胎切向反作用力的极限值称为附着力 F_φ , 汽车驱动力不能大于附着力, 否则将发生驱动轮打滑. 在硬路面上附着力与驱动轮法向反作用力 F_Z 成正比 [4]

$$F_{t \max} = F_\varphi = F_Z \varphi \quad (5)$$

其中, φ 为附着系数, 在良好的混凝土或沥青路面上, 路面干燥时 φ 值约为 0.7~1.0, 路面潮湿时 φ 值约为 0.3~0.6.

汽车行驶过程中, 受到各种阻力的作用, 汽车行驶总阻力 ($\sum F$) 包括滚动阻力 (F_f)、空气阻力 (F_w) 和上坡阻力 (F_i).

$$\sum F = F_f + F_w + F_i \quad (6)$$

滚动阻力主要由于车轮滚动时轮胎材料的滞后损失而产生, 空气阻力是由于汽车行驶时与周围的空气相互作用而产生, 上坡阻力则是汽车重力沿坡道的分力.

汽车的行驶过程是驱动力和各种阻力的交替变化过程: 当 $F_i = \sum F$ 时, 汽车匀速前进; 当 $F_t > \sum F$ 时, 汽车加速行驶; 当 $F_t < \sum F$ 时, 汽车减速直至停止.

2.4 汽车振动与噪声 (平顺性)

汽车的平顺性越来越受到关注, 成为新产品竞争力最重要的特性之一. 汽车的振动源主要来源于发动机、传动系统、底盘等; 汽车噪声源有发动机辐射噪声、排气噪声、轮胎噪声、风噪等. 动力系统的隔振技术主要通过优化隔振弹性元件的刚度和阻尼匹配达到阻隔振动传递路径的目的. 除了动力系统的振动, 另外一个主要的振动源来自于道路和轮胎

的相互作用, 路面本身的不平度也会引起轮胎的振动.

在汽车速度超过 50 km/h 以后, 轮胎的噪声成为汽车噪声的主要成分, 轮胎噪声的产生机理有: 空气泵浦噪声, 即轮胎在地面上滚动时由于花纹沟的压缩变形造成的空气在花纹沟内部的流动, 从而引起泵浦噪声 (见图 6); 花纹块的撞击噪声, 即由于轮胎进入接地区时花纹块撞击地面而引起的撞击噪声; 胎体振动噪声, 即由于胎体的往复循环变形而引起周围空气的振动而产生的噪声; 腔体共振噪声, 轮胎内部充满了气体, 这些气体形成了一个共振腔, 由此而引起低频共振噪声. 我国轮胎一个主要的出口市场是欧盟, 欧盟最近制定了轮胎标签法限制轮胎的噪声, 因此轮胎工业面临的降低轮胎噪声任务是非常严峻, 急需产、学、研各界协同攻关, 探索出低噪声轮胎的设计方法, 为轮胎工业降低轮胎振动和噪声提供理论指导.

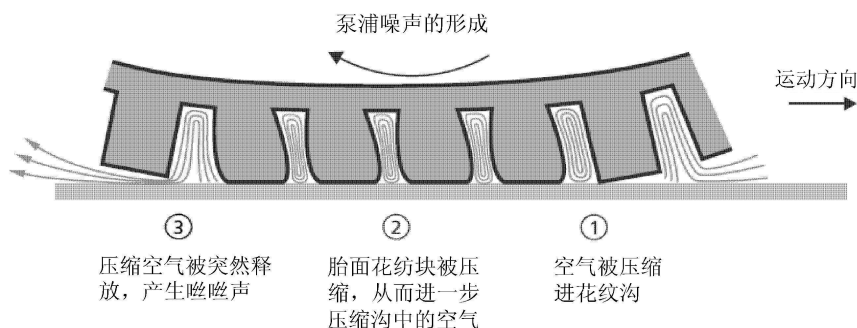


图 6 泵浦噪声机理

2.5 汽车的碰撞力学与车身耐撞性

汽车碰撞过程时间很短, 以正面碰撞为例, 整个历程约 150 ms, 且碰撞力远大于轮胎与地面摩擦力、风阻等非碰撞力, 所以可以认为碰撞系统没有受到外力作用, 碰撞前后能量守恒. 将两车碰撞简化为一维碰撞, 假设两车质量分别为 m_1 和 m_2 , 碰撞前车体速度为 v_{10} 和 v_{20} , 碰撞后速度为 v_1 和 v_2 , 则有^[10]

$$m_1 v_{10} + m_2 v_{20} = m_1 v_1 + m_2 v_2 \quad (7)$$

$$\left| \frac{\Delta V_1}{\Delta V_2} \right| = \frac{v_1 - v_{10}}{v_{20} - v_2} = \frac{m_2}{m_1} \quad (8)$$

即碰撞速度的变化量与质量成反比, 质量大的一方在碰撞过程中受到的冲击较小. 对于正面碰撞而言, 汽车耐撞结构设计的原则为: (1) 保证乘员舱在碰撞后能够起到足够的支撑作用, 使乘员免受直接

伤害; (2) 在保证乘员舱完整的前提下, 汽车结构应发生尽可能大的变形, 从而以尽可能低的冲击加速度吸收碰撞能量, 为乘员以及乘员约束系统提供平缓的加速度环境. 汽车的许可变形量决定了碰撞过程中的平均加速度. 假设在一种理想情况下, 汽车以初速度 V 与刚性墙发生碰撞, 碰撞过程中汽车以加速度 a_m 做匀减速运动, 碰撞后速度降为零, 纵向压缩变形量为 C . 那么理论上, 汽车平均加速度与纵向变形量的关系为^[11]

$$a_m = \frac{V^2}{2C} \quad (9)$$

对给定的初速度而言, 平均加速度 a_m 只与汽车碰撞变形量有关, 为了得到足够低的碰撞加速度, 应保留足够长的许可变形区.

目前, 在车身耐撞性研究中, 不同车型之间的碰撞兼容性设计、采用高强钢或铝镁合金等材料提供

吸能效率实现车身轻量化、自适应碰撞结构车身等成为研究热点。

目前,采用高性能计算对整车的耐撞性进行分析与优化已经是一种必备的技术(见图7)。

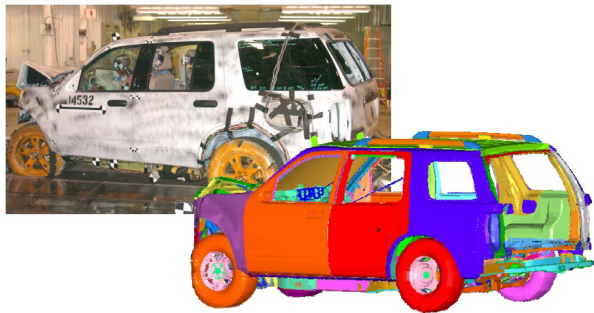


图7 汽车碰撞耐撞性实验与仿真

2.6 撞击损伤生物力学

撞击损伤生物力学是研究冲击过程中人体组织或器官损伤机理及其防护的一门边缘交叉学科,是汽车被动安全研究的基础^[12]。撞击损伤生物力学的研究内容主要包括人体损伤机理、生物力学响应(见图8)、人体损伤限值、试验假人开发和人体防护。撞击损伤生物力学研究途径有碰撞事故调查与重建、临床研究、志愿者实验、人尸体实验、假人实验、动物实验和数学模型^[13]。损伤机理主要研究撞击过程中人体组织或器官是如何损伤的。从微观层面看,撞击损伤的原因是组织的变形或应变程度超过了其可恢复限值^[14]。由于实际的人体伤害试验评估采用机械假人来进行,需要找到对应的宏观物理量来表征其伤害机理,如加速度、力、力矩等。颅脑损伤的主要形式是颅骨骨折和脑震荡,颅骨骨折一般是头部和周围物体的直接碰撞引起,脑震荡则主要由于线性加速度和旋转加速度引起,头部损伤的评价也通过这两个指标来进行^[15]。弯曲和压缩复合载荷作用是颈部损伤的机理,对颈部损伤的评价一般有颈部力、力矩和头部相对躯干的旋转角度。胸、腹部损伤主要是因为胸廓及腹部压缩,造成胸部骨折或内脏破裂,因为内脏组织具有黏弹性,所以胸部损伤的评价通过变形量和黏性指标来进行。损伤等级和人体耐受值一般通过根据损伤机理得到的主要宏观物理量来表征,一般都是通过多次试验得到的伤害概率,如对于胸部损伤限值的定义为:遭受严重伤害概率超过25%时的胸部压缩量(75mm)和VC值(1.0m/s)^[16]。

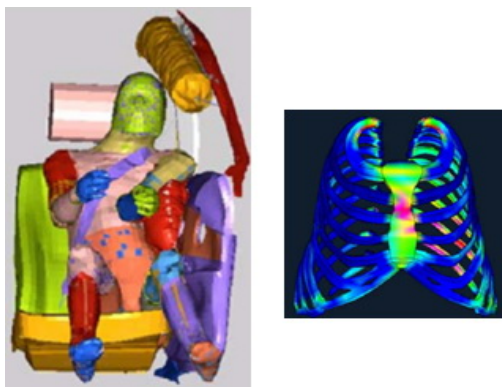


图8 侧面碰撞中假人动力学响应和胸部应力

为了能够在实际的碰撞试验中评估人体伤害,各种替代人体的假人被设计开发出来,这些假人具有和真实人体接近的基本结构和质量分布,生物力学影响和人体尽量一致。目前,比较常用的假人有航空使用的ADAM、汽车碰撞用的HybridIII假人和Euro-Sid假人等。近年来,各种人体数值模型得到了快速发展,包括多刚体模型、有限元模型,最为精细的有限元模型已经具有非常细致的人体解剖学特征。

经过多年的研究,人们对人体主要部位的冲击损伤机理有了一定的认识,目前的研究热点包括:更为精细的人体数值模型、高仿真度假人开发、人体组织材料的力学参数测定等。

2.7 行人保护问题

汽车设计不仅要关注车内乘员的安全,同时也要考虑汽车对车外人(行人、骑自行车人等)的安全问题。由于人车混行的道路大量存在,中国是行人事故高发的国家,所有交通事故死亡人数中行人约占1/4^[17]。行人与汽车碰撞的典型过程如图9所示,行人与汽车最初的接触点发生在保险杠和腿或者膝关节之间,之后是大腿或骨盆与发动机罩前缘的碰撞,再之后上身倒向车辆前方、头部会撞上发动机罩或者风挡玻璃下边缘。在行人和车辆的碰撞中,行人的下肢和头部是最容易受到伤害的部位^[18]。

改善保险杠的吸能特性是提供行人下肢保护的重要手段。汽车安全工程师和学者通过设计新的吸能结构和采用新的吸能材料来提高保险杠的吸能特性,如三明治式夹心保险杠吸能结构、高密度STRAND泡沫等^[18-19]。大腿的伤害情况主要受到车辆前端造型的影响,其影响参数包括罩盖前沿高度、保险杠上基准线高度、罩盖的曲率半径以及保险杠前伸量。

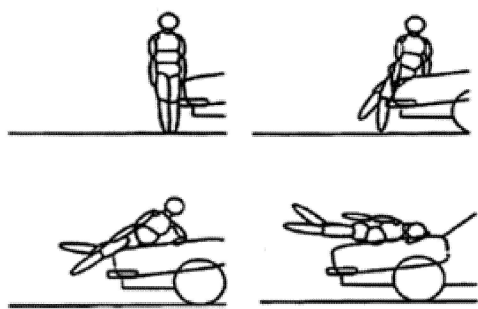


图 9 行人与汽车的碰撞过程示意图

造成行人头部的伤害的车体结构主要是罩盖和风挡玻璃, 对于罩盖和风挡处的设计成为行人保护的重点, 主要方法是充分利用罩盖和发动机之间空间进行吸能、将铰链连接等坚硬部位设计为可压溃式等。最近, 主动式发动机罩盖也被采用 (见图 10), 通过气囊或者机械式举升系统实现碰撞时罩盖的抬升, 从而形成缓冲区, 加大对碰撞能量的吸收^[20-21]。

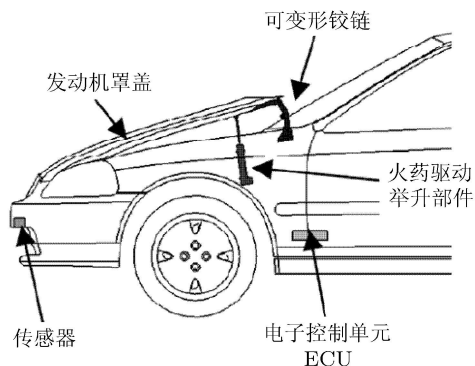


图 10 主动提升式发动机罩盖

3 车辆工程中的其他力学问题

上面提到的轮胎力学、操纵稳定性与平顺性、碰撞性以及生物力学等问题对汽车性能至关重要。在车辆的开发和使用过程中还有很多重要的力学问题需要考虑, 其重要性并不逊色, 这些力学问题值得进一步研究:

(1) 新型轻量化材料, 包括复合材料, 铝镁合金, 高强度钢动态力学性能的测定, 本构关系研究, 和材料的疲劳断裂力学;

(2) 汽车刚度-强度分析与轻量化设计, 轻量化设计往往和安全性设计和平顺性要求矛盾, 需要发展高效, 可靠的多目标优化设计方法;

(3) 轻量化材料成型制造中的力学问题;

(4) 汽车的空气动力学;

(5) 发动机燃烧流体力学;

(6) 刚-柔混合结构动力学分析方法, 需要实现

有限元-多体动力学的无缝集成;

(7) 轮胎滑水安全问题;

(8) 新能源汽车中的力学问题, 包括力电耦合疲劳, 机电耦合振动等;

(9) 车辆多柔体动力学与控制问题。

当前, 我国正在从汽车大国向汽车强国、从中国制造向中国创造的伟大征途迈进, 汽车的设计和制造中许多关键问题的解决离不开力学工作者的智慧。

参考文献

- 1 帅石金. 汽车文化. 北京: 清华大学出版社, 2007
- 2 Thoma D Gillespie 著. 赵六奇, 金达锋译. 车辆动力学基础. 北京: 清华大学出版社, 2006
- 3 陈家瑞主编. 汽车构造 (上册). 北京: 人民交通出版社, 2009
- 4 余志生主编. 汽车理论. 北京: 机械工业出版社, 2010
- 5 Gent AN. The Pneumatic Tire. Washington DC: NHSTA, 2005. 286-363
- 6 Gillespie TD. 车辆动力学基础. 北京: 清华大学出版社, 2006. 225-253
- 7 余志生. 汽车理论. 北京: 机械工业出版社, 2006. 135-144
- 8 郭孔辉. 汽车操纵动力学. 长春: 吉林科学技术出版社, 1991. 164-182
- 9 安部正人著. 陈新波译. 汽车的运动和操纵. 北京: 机械工业出版社, 1998. 9-29
- 10 黄世霖, 张金换, 王晓冬等. 汽车碰撞与安全. 北京: 清华大学出版社, 2000
- 11 张金换, 杜汇良, 马春生. 汽车碰撞安全性设计. 北京: 清华大学出版社, 2010
- 12 刘炳坤. 冲击损伤生物力学研究进展. 航天医学与医学工程, 1999, 12(1): 62-65
- 13 刘子建, 张建华, 杨济匡. 碰撞生物力学基础及应用. 中华创伤杂志, 2001, 17(5): 261-263
- 14 Viano DC, King AI, Melvin JW, et al. Injury biomechanics research: an essential element in the prevention of trauma. *Journal of Biomechanics*, 1989, 22(5): 403-417
- 15 Zhang LY. Computational biomechanics of traumatic brain injury: an investigation of head impact response and american football head injury. [PhD Thesis]. Detroit, USA: Wayne State University, 2001
- 16 Viano DC, Lau VK. Role of impact velocity and chest compression in thoracic injury. *Aviat Space Environ Med*, 1983, 54: 16-21
- 17 公安部交通管理局. 全国道路交通事故统计资料汇编. 北京: 群众出版社, 2003
- 18 崔宇硕. 行人-车辆碰撞下肢及头部保护研究. [硕士论文]. 北京: 清华大学, 2011
- 19 Gibson LJ, Ashby MF. Cellular Solids: Structure and Properties. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 203-208
- 20 肖雪飞, 赵苏阳, 李立. 行人保护要求的汽车前端系统设计. 上海汽车, 2008, (06): 18-21
- 21 Nagatomi K, Hanayama K, Ishizaki T, et al. Development and full-scale dummy tests of a pop-up hood system for pedestrian protection. In: Proceedings of the 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Washington DC, 2005

(责任编辑: 刘俊丽)