

机械工程前沿著作系列 HEP
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

车辆动力学控制 与人体脊椎振动分析

郭立新 著

Vehicle Dynamics Control and Vibration Analysis of Human Spine

013040700

U461.1
22

机械工程前沿著作系列 HEP
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

车辆动力学控制 与人体脊椎振动分析

Vehicle Dynamics Control and Vibration Analysis of Human Spine

CHELIANG
DONGLIXUE KONGZHI
YU RENTI JIZHUI
ZHENDONG FENXI

郭立新 著



U461.1
22



北航

C1648388



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书介绍了车辆动力学与控制以及人体脊椎振动特性分析等内容,讨论了车辆行驶平顺性、主动悬架系统、转向系统、车辆侧翻的动力学与控制、电动汽车的动力经济性,以及车辆等振动环境对人体脊椎动态特性的影响问题,分析了振动冲击载荷及人体上身质心变化对人体脊椎动态特性、脊椎组织多孔弹性特性的影响问题。书中相关内容对提高车辆平顺性、舒适性、安全性,降低人体振动损伤,获得人体脊椎振动损伤的保护方法及指导机械产品设计均有促进作用。

本书可作为车辆工程与机械工程领域中动力学与控制、人体安全法规制定以及脊椎疾病的临床治疗和预防等方面的设计和分析研究等人员的参考用书,也可作为车辆工程、应用力学、生物力学等专业的研究生和高级本科生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

车辆动力学控制与人体脊椎振动分析 / 郭立新著. --
北京: 高等教育出版社, 2013. 2
ISBN 978-7-04-037104-8

I. ①车… II. ①郭… III. ①汽车-动力学-控制系统-影响-人体-脊柱-振动-分析 IV. ①U461.1②R322.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 060624 号

策划编辑 刘占伟 责任编辑 刘占伟 特约编辑 陈静 封面设计 杨立新
版式设计 董丹 插图绘制 尹莉 责任校对 刘娟娟 责任印制 田甜

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印刷 北京铭成印刷有限公司
开本 787mm × 1092mm 1/16
印张 13.5
字数 250千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
版次 2013年2月第1版
印次 2013年2月第1次印刷
定价 59.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 37104-00

前 言

目前,我国已成为汽车大国,巨大的消费市场和技术提升空间为我国汽车工业持续发展提供了强劲动力。我国的汽车工业相对于美、欧、日等国起步较晚,在设计制造技术方面存在一定的差距,特别是在车辆振动噪声、汽车电子智能控制及人体安全保护等方面尚处于起步阶段。因此,这些方面的研究工作对提高我国汽车设计制造技术、加快成为世界汽车制造强国具有重要意义。

汽车行驶的平顺性、舒适性、安全性及车辆振动的人体保护等问题,已成为现代高档汽车设计与制造方面的重要内容和特征标志,受到广泛重视。而车辆振动与人体振动保护则是车辆人机工程学与医学领域交叉的新研究课题,也已引起人们的关注。

汽车动力学与控制主要解决汽车行驶过程中的安全性、平顺性、舒适性问题。当汽车在行驶过程中受到路面激励产生振动时,主要通过主动和被动控制方法降低振动载荷传递到人体上的比例,使驾乘人员感到舒适和安全。虽然汽车的减振性能和舒适性不断地得到改善,但车辆振动对人体脊椎及其他组织造成的损伤仍然不可忽视。统计研究表明,振动环境对人体脊椎的损伤比较严重,特别是在工程机械、坦克、直升机等驾驶员群体中尤为突出。为此,作者开展了振动环境下人体脊椎的振动损伤机理及人体脊椎动态特性的研究,以寻找降低人体脊椎振动损伤和加速退化的保护方法。

本书的主要内容是作者在车辆行驶平顺性和减振控制,以及车辆振动引起人体脊椎振动损伤和保护方面的一些探索性尝试的阶段性结果,包括以下两大方面:一是从车辆动力学控制入手,解决车辆系统的减振性能问题;二是从人体脊椎的生物力学特性入手,寻找提高人体脊椎的自我抗振和减少损伤的方法。上述两方面的有机结合,将会获得降低车辆振动载荷对人体脊椎的振动损伤程度的更佳解决方案。

本书内容涉及的研究工作持续地得到了国家自然科学基金、教育部新世纪优秀人才支持计划项目、高等学校博士学科点专项科研基金、中国博士后科学基金的特别资助,以及辽宁省和沈阳市基金和科学计划项目的支持,在此表示感谢!同时,感谢张丽萍博士、陈明副教授、张昊博士、李睿博士、吴铮、傅强等对作者科研工作的直接支持以及他们所做出的贡献。

限于作者学识水平，书中难免存在疏漏和欠妥之处，衷心欢迎读者批评指正，并提出宝贵建议。

郭立新

2012年12月于沈阳

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

第一篇 车辆动力学与控制

第 1 章 车辆动力学与控制研究概述	3
1.1 车辆稳定性控制系统	4
1.2 汽车行驶的平顺性	5
1.3 电动汽车的动力性和经济性	7
1.4 小结	9
第 2 章 车辆转向系统及其控制	11
2.1 轮胎转向特性	11
2.1.1 轮胎坐标轴及其受力	11
2.1.2 轮胎的侧偏力	12
2.1.3 轮胎的动态特性	12
2.2 转向盘阶跃输入下的时域响应	13
2.3 稳态转向特性	15
2.4 四轮转向系统	19
2.4.1 四轮转向动力学模型	19
2.4.2 四轮转向系统的控制方法	20
2.4.3 计算机仿真实例	23
2.5 小结	26
第 3 章 汽车行驶的平顺性与安全性	27
3.1 引言	27
3.2 路面不平度的描述	27
3.2.1 路面谱及其分类	29
3.2.2 空间频率与时间频率功率谱密度的关系	31
3.2.3 路面不平输入功率谱密度	33

3.3	车辆行驶平顺性分析	35
3.3.1	系统响应量的功率谱密度	35
3.3.2	基于虚拟激励法的单轮车辆的振动分析	36
3.3.3	基于虚拟激励法的半车模型的振动分析	43
3.4	小结	51
第 4 章	车辆被动悬架的设计与分析	53
4.1	车辆悬架及其模型	53
4.1.1	车辆悬架的力学模型	53
4.1.2	车辆悬架的功能	54
4.1.3	非独立悬架和独立悬架	55
4.2	单轮车椅悬架系统的动力学模型	57
4.3	车辆悬架模型的频率响应函数	58
4.4	车辆悬架模型的频率响应分析	59
4.4.1	悬架刚度对悬架的影响	60
4.4.2	悬架阻尼对悬架的影响	62
4.4.3	轮胎刚度对悬架的影响	64
4.5	小结	66
第 5 章	车辆主动悬架设计与分析	67
5.1	引言	67
5.2	四分之一车辆主动悬架的控制方程	67
5.3	四分之一车辆主动悬架控制器设计	68
5.3.1	传递函数	68
5.3.2	有约束控制方程的 LMI 优化	68
5.3.3	基于 LMI 优化的主动悬架的鲁棒性设计	69
5.3.4	基于 LMI 优化的主动悬架控制器参数	70
5.4	四分之一模型的主动悬架性能分析	72
5.4.1	频域分析	72
5.4.2	时域分析	73
5.4.3	鲁棒性分析	75
5.5	半车主动悬架控制方程	79
5.6	半车主动悬架控制器设计	80
5.6.1	基于 LMI 优化的主动悬架控制器参数	82

5.6.2	频域分析	84
5.6.3	时域分析	86
5.6.4	鲁棒性分析	87
5.7	小结	89
第 6 章	车辆侧翻	91
6.1	车辆侧翻指标	91
6.2	车辆侧倾平面模型	92
6.2.1	刚体车辆侧倾的准静态模型	92
6.2.2	悬挂车辆侧倾的准静态模型	94
6.2.3	侧倾瞬态响应模型	96
6.3	三自由度车辆侧翻模型	98
6.4	汽车防侧翻控制应用	100
6.5	小结	101
第 7 章	轮胎模型	103
7.1	轮胎的发展及结构	103
7.2	轮胎的受力及运动状态	105
7.2.1	侧向力和侧偏现象	105
7.2.2	回正力矩	108
7.2.3	有外倾角时轮胎的滚动	109
7.2.4	轮胎的运动状态	110
7.3	典型的轮胎模型	112
7.3.1	线性模型	112
7.3.2	Dugoff 模型	113
7.3.3	魔术公式模型	114
7.3.4	幂指数统一轮胎模型	116
7.3.5	神经网络轮胎模型及其仿真分析	118
7.4	小结	120
第 8 章	电动汽车的动力与经济性分析	121
8.1	引言	121
8.2	电动汽车动力与经济性指标模型	122
8.2.1	动力性指标计算模型	122
8.2.2	经济性指标计算模型	123

8.3 电动汽车动力与经济性的参数灵敏度	124
8.3.1 动力性的参数灵敏度	124
8.3.2 经济性的参数灵敏度	127
8.4 实例计算分析	128
8.5 小结	133

第二篇 人体脊椎振动特性分析

第 9 章 人体脊椎振动分析研究概述	137
9.1 车辆振动对人体的影响	137
9.2 受振人体的舒适性	139
9.3 人体脊椎动态特性研究进展	141
9.4 人体脊椎组织结构	143
9.5 脊椎生物力学基础	146
9.6 小结	148
第 10 章 人体脊椎有限元模型建模	151
10.1 建模方法	151
10.2 模型的材料属性	154
10.3 模型静态特性的有效性验证	155
10.4 小结	156
第 11 章 人体脊椎的动态特性分析	157
11.1 正常人体脊椎的频率特性	157
11.2 正常人体脊椎的模态振型	158
11.3 损伤人体脊椎的频率特性分析	159
11.4 损伤人体脊椎的模态振型分析	160
11.5 小结	162
第 12 章 振动载荷下损伤脊椎的动力响应分析	163
12.1 引言	163
12.2 损伤模型的建立与仿真分析	164
12.3 无阻尼的动态特性	167
12.4 有阻尼的动态特性	168

12.5 小结	168
第 13 章 人体脊椎组织材料特性的动态敏感性分析	171
13.1 研究意义	171
13.2 材料属性及建模方法	171
13.3 仿真分析	175
13.4 结果分析	177
13.5 小结	179
第 14 章 人体上身重心位置变化对脊椎动态特性的影响分析	181
14.1 研究意义	181
14.2 建模方法及人体上身质心位置设定	182
14.3 结果分析	182
14.4 小结	185
第 15 章 振动载荷下椎间盘的多孔弹性响应分析	187
15.1 模型建立与网格划分	188
15.2 材料特性	188
15.3 边界条件与载荷	189
15.4 模型有效性验证	190
15.5 仿真结果	190
15.6 结果分析	194
15.7 小结	195
参考文献	197
索引	203

第一篇 车辆动力学与控制

第 1 章 车辆动力学与控制研究概述

随着我国经济建设和道路运输的飞速发展，汽车工业经历了从无到有、从小到大的发展历程，在品种、规模以及国产化方面都取得了长足的进步，逐步形成了自己的研发能力。中国汽车年产量从 2001 年的 234 万辆发展到 2009 年的 1 379 万辆，而到 2011 年中国汽车的产量已经飙升到 1 841 万辆，如图 1.1 所示。据统计，早在 2009 年中国汽车年产量已经超过日本、美国，跃居世界第一位，真正成为了世界汽车生产大国。高速增长的汽车工业为我国经济发展作出了巨大贡献，为我国人民生活质量的稳步提高奠定了坚实的基础。

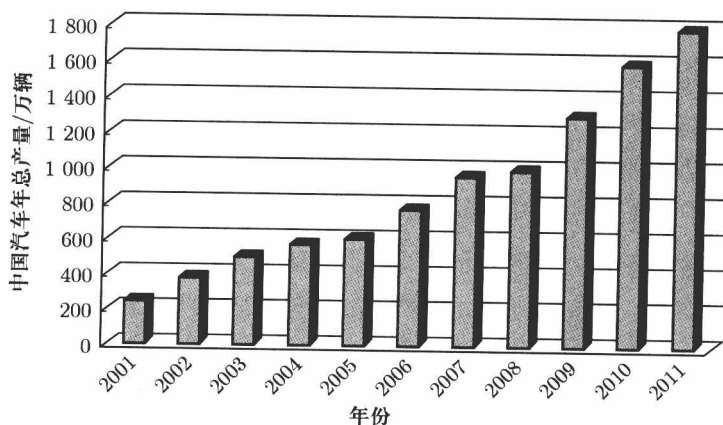


图 1.1 近 10 年中国汽车产量

如今，在汽车的设计和制造技术不断进步的同时，人们对汽车各方面性能的要求也越来越高，尤其是汽车乘坐的舒适性更是人们追求高品质生活的重要体现。

1.1 车辆稳定性控制系统

随着道路交通条件的改善以及汽车设计与制造技术的不断进步，现代汽车的行驶车速得到极大提高。但是由于车辆高速行驶所产生的侧向失稳，往往造成恶性交通事故。因此，如何提高汽车行驶的安全性是现代汽车设计研究的重要课题之一。一般汽车的安全性问题分为主动安全性和被动安全性两个方面。主动安全性是指车辆所具有的某些机构或控制系统，可以尽量减少或避免交通事故的发生；被动安全性是指车辆所具有的某些机构或控制系统，可以使车辆在发生事故时尽量减少对乘员的伤害程度。近年来，在汽车主动安全技术领域中的汽车行驶稳定性控制技术日益受到重视，并且逐步发展为汽车主动安全控制技术中的研究热点。

汽车为什么会横向失去稳定，汽车的什么运动状态可以表征汽车横向失去了稳定，这是进行汽车稳定性分析和控制时首先要分析的问题。根据汽车动力学原理可知，汽车的运动是由地面对轮胎的作用力来实现的，而这些作用力不仅与汽车的运动状态有关，而且可以通过特定装置来控制，如改变轮胎的转向角、制动力以及垂直反作用力等。

汽车的转向运动是驾驶员在方向盘上施加转角后使前轮产生侧偏角，进而产生侧向力，引起汽车产生横摆运动。汽车的横摆运动又导致后轮也产生侧偏角，进而产生侧向力。正是由于前、后轮侧偏角产生的侧向力提供了汽车转向的向心力。可见，汽车横摆运动决定于地面作用力的大小，而地面作用力也是维持汽车横摆运动的关键因素。当轮胎进入非线性区域时，地面作用力小于维持汽车横摆运动所需要的地面作用力，因此汽车横向运动发生改变。当汽车在小曲率路径下以一定车速行驶时，轮胎产生的侧向力与侧偏角之间近似为线性关系，这时汽车的质心侧偏角是很小的，接近于零，汽车运动稳定。然而，如果轮胎产生的侧向力与侧偏角之间是非线性关系，此时汽车运行轨迹无法维持在指定的路径上而开始偏离。如果这种情况得不到补偿，汽车会偏离正常运行轨迹而失稳。

一般认为，转向特性是由前、后轴产生的等效侧偏角决定的。对于一般的车辆，前轴产生的侧偏角略大于后轴，即车辆具有适当的不足转向特性。具有不足转向的车辆具有较好的高速稳定性，在转向的线性区比较容易操控。反之，如果车辆前轴产生的侧偏角小于后轴，则车辆具有过度转向特性，而具有过度转向的车辆即使在线性区内，当超过某个车速时也会发生稳定性问题。

车辆转向系统是用来保持或改变汽车行驶方向的机构，可在汽车转向行驶时协调各转向轮之间的转角关系。车辆转向系统要求具有良好的操纵性和稳定性，并能

能够在各种工况下,根据不同的车辆行驶速度和路面状况,提供良好的路感。汽车转向系统的设计及其转向轮的定位参数直接影响汽车行驶的平顺性、操纵稳定性、安全性和车轮的耐久性。

由于侧翻事故是车辆最危险的事故之一,而且在侧翻事故发生时,几乎所有的驾驶员都无法事先察觉到侧翻的发生。据美国密歇根大学交通研究中心(UMTRI)统计,2002—2006年,美国每年各类重型商用车的侧翻事故平均有5 200起;同时每年死于重型商用车侧翻事故的人数,也从2002年的5 314人增加到2006年的5 537人。汽车侧翻事故已经成为破坏生命财产和交通安全的重要问题之一。因此,重型车辆(包括重型卡车、重型半挂车)的行驶安全性,尤其是侧翻稳定性等研究问题一直备受国内外学者的关注。

汽车侧翻是指汽车在行驶过程中绕其纵轴线转动 90° 或更大的角度,以至车身与地面产生接触的一种危险的侧向运动。通常,汽车的结构参数因素和随机因素是引发汽车侧翻的主要原因。随着高速公路的飞速发展以及重型车辆制造开发技术的进步,重型车辆的行驶车速也得到了不断提高。车辆在高速行驶时因受转向或外界干扰的影响,侧向附着力容易达到附着极限,使车辆丧失横摆和侧倾的动力学稳定性,从而导致侧翻,继而发生严重的交通事故。如何提高车辆行驶安全性和稳定性控制,是现代汽车设计研究中的重要课题之一。

1.2 汽车行驶的平顺性

汽车行驶平顺性是影响汽车乘坐舒适性的重要原因,改善车辆的行驶平顺性成为现代汽车设计者重点关注的一大问题。行驶中的汽车是一个复杂的振动系统,评价车辆行驶平顺性的关键是要建立车辆系统的振动力学模型。汽车在行驶过程中,如果行驶平顺性很差,强烈振动产生的冲击会加速零部件的磨损,降低零部件的疲劳寿命,同时也会降低汽车的操纵稳定性和制动性能。另外,车辆产生的强烈振动也会造成车上乘员的人体伤害,如加速人体脊椎组织损伤退化和疾病的产生。车辆具有较好的行驶平顺性能让人心情愉快,充分享受驾驶带来的快乐。如果汽车的行驶平顺性差而又不停地颠簸,会使驾驶员疲惫、注意力不集中,易引发交通事故,造成生命和财产的损失。

汽车平顺性所研究的对象是“人-车-道路”构成的振动系统。车辆行驶时,随机不平的路面是引起汽车振动的主要原因。路面不平度作为车辆振动系统的输入,经过轮胎、悬架、悬挂质量、减振器和座椅所构成的振动系统,传递到车体和人体上,最终影响人的生理、心理反应。一般采用人体对车辆振动的速度和加速度

的主观反应作为评价车辆行驶平顺性好坏的依据。车辆振动系统框图如图 1.2 所示。

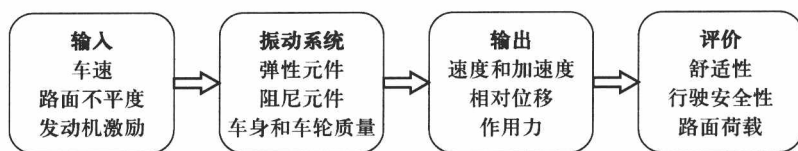


图 1.2 车辆振动系统框图

本文所开展的车辆非平稳行驶的平顺性分析，主要研究车辆非匀速行驶时，整车的动力学响应特性、控制及评价问题。由于汽车在实际行驶过程中往往处于非匀速状态，如车辆的起步、加速超车、减速制动等。尽管路面激励在空间域内是平稳的，但由于车速的变化使得车辆的随机响应在时间域内是非平稳的，因此进行车辆的非平稳行驶平顺性研究更符合车辆的实际运行情况。进行车辆非平稳动力学响应的求解方法和响应特性分析的研究、路面非平稳激励研究是车辆非平稳动力学研究的重要内容。目前国内外对车辆的平稳动力学特性已进行了许多的研究工作，但有关车辆非平稳行驶状态下动力学响应问题的研究还非常少见，因此，车辆非平稳行驶状态下的随机振动控制和评价研究是车辆行驶平顺性研究的一个新的研究方向。

悬架系统作为汽车的重要组成部分，对汽车平顺性以及操纵稳定性有重要影响。因为它可以支承车身及承载物的静止重量；通过有效地隔离并吸收路面对车身的激励，抑制车身和车轮的振动，并在制动、转向、加减速等操作过程中提供姿态控制，保证足够的平顺性；使车轮尽可能地跟随路面状况，保证车轮稳定的力学动态特性，避免车轮 - 路面间附着力的损失，从而提供良好的操纵稳定性，保证行车安全，同时也抑制轮胎动载，减轻对路面的破坏程度。随着车辆参数及行驶工况的变化，对悬架系统特性的要求是不同的。要提高车辆行驶的平顺性，希望悬架系统的刚度较小，从而采用较软的悬架。为了提高车辆行驶的安全性和方向的控制，则要求悬架系统的阻尼和刚度都比较大，就应采用较硬的悬架，以减小车轮与车身间的相对行程，获得良好的路面附着与支承。可见，对悬架系统的设计要求往往是相互矛盾的。

汽车悬架除了用于传递车轮和承载系统之间的力和力矩以外，还应具有较好的缓冲和减振作用。它能够缓冲因不平路面对车辆造成的冲击，并衰减由此引起的振动，减少振动对车辆零部件、货物和人体的损坏或损伤程度。此外，悬架系统还起到保持轮胎与地面附着效果的作用，从而使车辆能够安全、平顺地行驶。因此，性能优良的悬架系统，对提高车辆的乘坐舒适性和操纵稳定性有着极其重要的意义。主动悬架系统的提出成为车辆工程理论与实践中的重大革命，利用它可以同时改善