

卡车的噪声与振动 及其控制策略

Truck's Noise & Vibration and
Their Control Strategies



[美]黄显利 (XianLi Huang) 著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

卡车的噪声与振动 及其控制策略

Truck's Noise & Vibration and
Their Control Strategies



[美]黄显利 (XianLi Huang) 著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



内 容 简 介

《卡车的噪声与振动及其控制策略》是一部卡车噪声与振动的百科全书，是一座包罗万象的卡车噪声与振动的历史文献资料与总结的图书馆，是一个打开总结了几代工程师攻克卡车噪声与振动问题难题的知识宝库的钥匙。该书凝结了作者二十多年国内外卡车 NVH 的设计制造以及解决 NVH 问题方面的丰富经验，提供了一站式的卡车噪声与振动问题的控制策略。既有深入浅出、通俗易懂的噪声与振动理论，又有全面完全接地气的实际工程解决方案，还有令人拍案叫绝的解决卡车噪声与振动问题的思路。无论是新入职的工程师，还是工作多年的资深老手，都可以在他们的卡车噪声与振动设计与制造过程中以及在实际卡车噪声与振动的问题解决过程中获得极其宝贵的参考，书中内容也可以用来进一步丰富与充实卡车的产品开发流程各节点中的 NVH 目标与交付物。读者能够在充分占有历史资料的基础上，用丰富的历史经验与知识武装自己，站在巨人的肩膀之上，从中获得灵感的启迪，开启智慧之门，创造出卡车 NVH 的无限可能。

版权专有 侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

卡车的噪声与振动及其控制策略 /（美）黄显利（XianLi Huang）著. —北京：北京理工大学出版社，2018.1

ISBN 978-7-5682-5292-8

I. ①卡… II. ①黄… III. ①载重汽车-汽车噪声-噪声控制-研究②载重汽车-振动控制-研究 IV. ①U469.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 022330 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2018-0443

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 /（010）68914775（总编室）

（010）82562903（教材售后服务热线）

（010）68948351（其他图书服务热线）

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 16.25

彩 插 / 4

字 数 / 289 千字

版 次 / 2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 38.00 元

责任编辑 / 杜春英

文案编辑 / 杜春英

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换

2015年,在中华大地上奔驰着1389.19万辆载货汽车,它们担负着10366.50万吨货物的运输。其中普通货车1011.87万辆,运输货物4982.50万吨;专用货车48.40万辆,运输货物503.09万吨。全国营业性货运车辆完成货运量315.00亿吨,货物周转量57955.72亿吨公里。还有83.93万辆载客汽车,将161.91亿人——相当于将12倍的中国人送到各自的目的地^①。可见,重型车辆在国民经济中起到了不可或缺的作用,是民生大计中非常重要的一环。

商用车,一般客户用来作为生产工具,相比欧洲、日本与美国等国家和地区,我国开发商用车起步较晚,而且起点也较低。20世纪与21世纪初,我国的商用车用户为了赚取最大的运输利润,通常要求每一次运输中都装载尽可能多的货物,过载需求有时甚至达到标准荷载的几倍之多。正是这种过载的市场需求,驱使生产商用车的整机厂强化了对底盘系统的车架、悬架、板弹簧、驱动轴系与承载轮系的设计强度要求。在这种优先考虑强度的设计之下,高强度的底盘设计几乎是以牺牲车辆的平顺性与NVH性能为代价的。例如,为了适应高荷载的要求,板弹簧的强度必须相应增加,而板弹簧的强度增加也使其刚度增加,从而导致板弹簧的偏频增加。非常不幸的是,这种加强型板弹簧的偏频恰好与车辆在常用速度下车轮的激振频率耦合,导致卡车驾驶室的抖动问题。

商用车的运行质量落后于乘用车及客车,有以下几个原因:

(1) 商用车相对于乘用车而言具有更广泛的空车/加载比例,这通常要求刚度更大的轮胎与悬挂系统来适应最重的货物,这些要求倾向于将更大部分道路表面输入传递到驾驶员身上。

(2) 如果使用复杂悬挂来处理这些大的荷载范围与路面输入的范围问题,其成本将是非常高的。

(3) 大功率发动机就在驾驶室下方,导致附加的振动、噪声与热输入驾驶室。

(4) 货厢或挂车要比车头重几倍,因此车头与挂车之间的相互作用可以非常大,而且很难补偿。

^① 中国道路运输协会. 2015年交通运输行业发展统计公报[EB]. 2016-05-16.

(5) 高速公路的平顺性一般是从乘用车的角度来评价乘用车舒适性的,很少从商用车的角度评价乘用车舒适性。商用车的轮距、悬挂、轮胎与乘用车差别较大,因此商用车需要不同的道路平顺性评价标准。

陕重汽的《卡车司机生存现状蓝皮书》的调查结果表明,39.1%的重卡用户承认自己患有职业疾病,64.7%的重卡用户患有胃病,38.8%的重卡用户患有颈椎病。尽管现在还没有直接的证据证明这些病状是来自车辆的 NVH,但作者根据从事卡车抖动研究过程的个人体验,深深感受到车辆的 NVH 问题确实与卡车驾乘人员的健康有着密切的联系。目前,在研究卡车 NVH 对乘员健康的影响方面已有大量文献,大量的实际数据与坊间数据支持卡车 NVH 影响乘员健康这一观点。

在美国,有许多卡车驾驶员以及卡车运输公司试图将驾驶员的能力与法规的服从推到极限,使得家庭与个人处于危险境界。根据美国交通部的统计,每年有4 000多人死于重型卡车的碰撞事故,而且驾驶员的疲劳是一个重要因素。有经验的专业驾驶员的能力也不能克服睡眠的生理需要。造成驾驶员疲劳的原因有许多种,如超时驾驶,晚上工作时间过长,工作时间不规律,睡眠少或睡眠质量差,早晨起得太早,等等。卡车的道路低频噪声对驾驶员有催眠的作用,会影响驾驶员的驾驶。Lofstedt 与 Landstrom 调查了两个卡车驾驶员在比较典型的驾驶条件下的清醒状态。他们发现,当驾驶的卡车产生高声强的低频噪声时,驾驶员更容易疲劳^①。

因此,卡车的 NVH 问题越来越成为卡车设计、销售的一个重要且不可回避的问题。客户试乘试驾的第一个体验就是车辆运行的舒适性与 NVH 表现,NVH 或许不是购买的决定性因素,但却是拒绝购买的因素。因此,卡车 NVH 正在成为市场评价与竞争的一个重要指标。

卡车的噪声与振动是一个古老而复杂的问题。在卡车发展的历史长河中,天才的工程师们孜孜不倦地研究这个问题并提出了各种极富创造性的工程解决方法,积累了极其丰富的历史经验,是卡车发展历史的宝贵财富。珍惜并发掘这些宝贵的财

^① Landstrom U, Lofstedt P. Noise, Vibration and Changes in Wakefulness During Helicopter Flight [J]. Aviation Space Environment Medicine, 1987, 58: 109-118.

富对我们解决当前的卡车振动与噪声问题仍然有着非常积极的现实意义。网络的发达使作者能在浩瀚无垠的文海中非常方便地找到这些宝藏中的瑰宝（尽管这可能只是冰山一角），并呈现给读者。卡车 NVH 问题是一个非常复杂的问题，而且涉及非常高的技术科目，许多极其聪明的工程师写了大量的文章与书籍，作者希望能够奉献给读者一部关于卡车 NVH 的百科全书，使读者在寻求卡车 NVH 问题工程解时有一个一站式的图书馆。如果读者能站在巨人的肩膀之上，从中获得些许灵感，开启他们的智慧之门，创造出卡车 NVH 的无限可能，就是对作者所有努力的最大奖励。

目 录

第1章	卡车 NVH 问题 / 1
1.1	卡车的噪声问题 / 2
1.2	卡车的振动问题 / 3
1.3	卡车的冲击问题 / 7
1.4	货物的完整性 / 7
	参考文献 / 8
第2章	卡车的噪声源及控制策略 / 10
2.1	发动机各部件的噪声贡献 / 13
2.2	发动机的噪声 / 15
2.2.1	燃烧噪声 / 15
2.2.2	活塞敲击噪声 / 19
2.2.3	配气机构噪声 / 21
2.2.4	曲轴扭振 / 22
2.2.5	齿轮和轴承噪声 / 24
2.2.6	进气系统噪声 / 28
2.2.7	排气系统噪声 / 34
2.2.8	风扇系统噪声 / 37
2.2.9	发动机机体辐射噪声 / 39
2.3	卡车的轮胎与路噪声 / 51
2.3.1	轮胎/路噪声的特点 / 51
2.3.2	欧盟的轮胎类型批准 / 56
2.4	制动噪声 / 57
2.4.1	制动啸叫噪声 / 57
2.4.2	制动颤振噪声 / 61
2.5	噪声与音乐 / 63
2.5.1	齿轮比与音阶比 / 64
2.5.2	音色与频率谱 / 68
	参考文献 / 70
第3章	卡车的振动源及控制策略 / 75
3.1	发动机激励 / 76
3.1.1	活塞激励 / 76
3.1.2	发动机燃烧振动激励 / 78
3.1.3	发动机主轴承的振动激励 / 82

3.1.4 发动机的模态分离表 / 83

3.2 车轮的激励 / 85

3.2.1 轮胎激励 / 86

3.2.2 轮毂制动鼓的振动激励 / 89

3.3 传动轴系的振动激励 / 90

3.4 车桥的激励 / 95

3.4.1 转向车轮跃摆振动 / 95

3.4.2 转向轮的绕转 / 98

3.4.3 车轮跳动 / 98

3.4.4 桥的交替跳动 / 101

3.5 制动系统的激励 / 102

3.5.1 制动颤振(抖动) / 103

参考文献 / 108

第4章 卡车的减噪 / 111

4.1 噪声的传递 / 111

4.2 声学包 / 112

4.3 吸声作用 / 114

4.4 密封 / 115

4.5 声学包的评价与设计应用 / 116

4.6 整车噪声目标的实现 / 118

参考文献 / 118

第5章 卡车的减振 / 120

5.1 卡车振动的传递路径与减振硬件 / 120

5.2 减振原理 / 121

5.2.1 减振器的设计原理 / 121

5.2.2 调谐质量阻尼器 / 123

5.2.3 调谐质量阻尼器的应用 / 126

5.2.4 天棚阻尼减振器 / 127

5.2.5 准零刚度减振器 / 128

5.2.6 自适应负刚度减振器 / 131

5.2.7 准零刚度减振器及其应用 / 133

5.3 卡车的车架 / 135

5.3.1 车架的几何参数 / 138

5.3.2 车架的弯曲刚度 / 141

5.3.3 车架的扭转刚度 / 144

5.3.4	车架的基本频率 / 146
5.3.5	车架弯曲抖振 / 149
5.3.6	底盘的平动 / 150
5.3.7	超级卡车的车架改进及对卡车 NVH 的影响 / 153
5.3.8	车架对车辆 NVH 的影响 / 156
5.4	卡车悬挂系统的隔振 / 157
5.4.1	板弹簧悬挂 / 157
5.4.2	空气弹簧悬挂 / 161
5.4.3	空气弹簧悬挂的隔振率 / 164
5.5	卡车的驾驶室隔振系统 / 164
5.5.1	重卡驾驶室的几何特征 / 164
5.5.2	重卡驾驶室的模态特征 / 166
5.5.3	重卡驾驶室悬置的偏频 / 167
5.6	座椅的减振功能 / 169
5.6.1	座椅的减振能力 / 169
5.6.2	座椅的振动减振 / 171
5.6.3	座椅的模态分离 / 173
5.7	人体的振动特性及振动对人的影响 / 174
5.7.1	人体振动频率 / 174
5.7.2	振动对人的影响 / 177
5.8	发动机悬置的减振 / 179
5.8.1	发动机悬置的功能 / 179
5.8.2	刚体模态与解耦 / 179
5.8.3	隔振率 / 181
5.8.4	阻尼性能 / 181
5.8.5	发动机悬置模态分离策略 / 182
5.8.6	发动机悬置对车辆 NVH 的影响 / 186
	参考文献 / 188
第 6 章	卡车的模态分离策略 / 194
6.1	激励频率 / 195
6.2	卡车整车与系统模态 / 197
6.3	模态分离的基本原则 / 199
6.4	与发动机激励相关的模态分离原则 / 200
6.5	车轮激励的模态分离原则 / 200

6.6 整车模态分离 / 202

6.7 模态振型分布 / 203

6.8 模态分离实例 / 203

参考文献 / 205

第 7 章 客车的振动与噪声及控制策略 / 206

7.1 客车的噪声源 / 207

7.2 客车的空腔共振频率 / 208

7.3 客车钣金的临界频率 / 211

7.4 客车车内噪声与振动 / 213

7.5 客车模态分离表 / 219

参考文献 / 220

第 8 章 军车的 NVH 问题 / 223

8.1 噪声对乘员的听力危害 / 223

8.2 听力保护 / 225

8.3 军车的振动 / 228

8.4 军车的噪声 / 232

8.5 舰船的噪声问题 / 236

8.6 飞机的噪声与振动问题 / 238

参考文献 / 244

索引 / 247

■ 第 1 章

卡车 NVH 问题

卡车作为一种商品，必须是客户想要的，而且能够为客户带来价值。卡车除了要把货物或旅客从一个地点运输到另一个地点外，还要保证在运输途中乘员有一个安静、舒服的环境，货物在一个相对平稳的情况下没有任何被损坏的风险。卡车的 NVH（Noise Vibration Harshness）问题不仅仅是一种工程设计问题，更重要的是通过解决卡车 NVH 问题可以为卡车客户创造价值。因此，卡车 NVH 问题必须以客户的需求为中心点，为客户着想，解决客户所关心的问题。在这种意义下，NVH 是一种产品竞争的经典模式，这也是 NVH 的商业价值所在。

NVH 是卡车强劲的动力总成系统、道路运行的不平性、气体在车辆外表面高速流动以及车上辅助系统运行的自然副产品，是无法避免的，是我们必须面对的问题。卡车 NVH 可以严重到影响乘员的舒适性，使乘员疲劳，通信受到干扰，敏感电子设备失效，或机械设备遭到疲劳破坏。

卡车的特点是以一个基础底盘为基础车型，根据客户与运输的要求改变部分车辆的系统（轴距、驱动形式、驾驶室形式、发动机、变速箱、悬挂、轮系等），形成成千上万种变体。这些变体的 NVH 性能与基础车型的 NVH 性能可能存在差别，也需要进行设计验证。

在车辆设计的逆向工程中，车辆与系统、部件的结构形状和尺寸模仿是没有问题的，但是所用的材料与安装工艺是难以通过逆向工程来确定的。一般来

讲,在车辆逆向工程设计中,部件与系统的强度比较容易满足,即使可以确定材料的化学成分,也可能因为加工、价格、供应商等因素的影响而采用比较类似的材料,这种替代材料容易出现车辆的 NVH 问题。车辆 NVH 设计中的模态分离理论是 NVH 设计中最重要原则,但是由于各种设计因素的影响,系统之间的模态分离有时是很小的,如 0.5 Hz。材料的偏差,安装工艺的不同,都可能使模态分离原则得不到满足,从而引起车辆的 NVH 问题。逆向工程设计的结果能够得到形状与结构尺寸的一致性与重现性,但不能保证原车 NVH 性能的重现性。

现在的运输业出现了高效、标载的运输模式,以获取最大的运输利润。即一台标载的运输车辆,有两个或三个驾驶员,施行“人休车不停”的方式,进行不间断的运行。在这种操作环境下,为了避免驾驶疲劳,对驾驶的舒适性与乘员的舒适性提出了更高的要求,也就是对卡车的 NVH 性能提出了更高的要求。

卡车市场的需求变化使得卡车的设计也发生了变革。卡车标载化的强制执行,运输方式的高效性,以及卡车经济性能的提升、排放的高标准化和设计的轻量化,每一种特性都可能意味着新的总体结构以及新的部件,对卡车的 NVH 工程师提出了极大的挑战。他们将面临指数性增长的复杂性,以及影响 NVH 特性的新的多学科特性。除了成本价格的竞争、多拉快跑的性能之外,客户对驾驶舒适性,具有驾驶乐趣和品牌声学特性的需求也必须同时满足。

因此,需要为客户解决卡车的 NVH 问题。在解决卡车 NVH 问题之前,需要对卡车 NVH 问题进行描述,以此作为解决卡车 NVH 问题的第一步。

1.1 卡车的噪声问题

卡车的噪声源有发动机噪声、路噪声和风噪声等多种激励源。对于卡车的发动机噪声,我国的卡车受 GB 1589 关于车长的限制,车辆驾驶室的主要以平头车为主。美国的卡车以长头车为主。平头车的驾驶室一般设计安装在发动机之上,而长头车的驾驶室则放在发动机的后面。平头车的发动机,其围绕空间基本上受到驾驶室、底盘、操作系统和冷却系统的限制,留给声学包的空间与面积并不大。而长头车的发动机舱是一个相对独立的封闭空间,用于声学包的面积比较大,对发动机舱的声学衰减起到很大作用。平头车的换挡系统坐落在驾驶室地板上,转向系统采用比较简易的系统。目前,我国的卡车手动换挡系统一般安装在中控台上,也正好在发动机之上。如果在换挡杆与地板连接处没有进行 NVH 设计,发动机的噪声很容易通过这些连接机构的噪声传递路径进入驾驶室。对于转向机构,大多数卡车采用相对简单的连接方式,与地板

之间是没有 NVH 设计的, 导致发动机与路噪声在没有更多吸声与隔声措施的情况下通过转向机构进入驾驶室。因此, 目前我国平头车的驾驶室发动机噪声一般要比长头车驾驶室的发动机噪声大一些。

发动机的噪声是通过三种路径进入驾驶室的, 即空气噪声路径、结构噪声路径和非直接噪声路径。空气噪声路径是噪声从空气介质中传播到驾驶室钣金件等封闭件后, 通过折射方式进入驾驶室的。结构噪声路径是发动机等振动源激励驾驶室的钣金件等封闭部件而使这些封闭件产生振动, 这些钣金件在驾驶室侧的表面激励了空气而产生噪声。非直接噪声路径是非常重要的, 但常常被忽略的就是泄漏路径或间接性路径。这些路径包括电线过孔、管路过孔、工艺孔、车窗和车门密封等。

卡车的路噪声是车轮在行驶过程中与路面接触、运动所产生的噪声, 其产生机理极其复杂。

通常情况下, 一般定义车辆在 130 km/h 速度下的车内噪声为风噪声。因为速度低时发动机噪声和路噪声都很高, 风噪声很难在这些噪声中占据主导地位而成为主要成分。目前卡车在公路上的最高限速为 70 km/h, 所以卡车的风噪声并不明显。但是, 如果车门的刚度与车窗的密封设计不好或安装不好, 在低于 70 km/h 时也可能出现风噪声问题。

1.2 卡车的振动问题

在设计与运行中考虑卡车的振动是基于卡车的振动特点, 即卡车有相当大的惯性质量与高动能。从传统上讲, 卡车要承受稳定的纵向振动, 需要最小化纵向以及横向的线性振动。通过采取若干特殊的减振与隔振措施, 可以减少水平面上底盘自发的转动^[1]。除了遵循正规设计标准外, 需要有特殊的 NVH 设计过程, 在整个设计开发流程中的每一个里程碑加入对 NVH 设计问题的交付物^[2]。

引起卡车振动的振动源有很多, 主要是发动机与道路振动。发动机是使燃油燃烧产生的往复运动转变成旋转运动的装置。这些往复运动与旋转运动部件不平衡的周期性动力构成了发动机的振动。发动机振动通过发动机悬置及其他与车架连接的部件传递到车架上, 然后通过驾驶室悬置传递到驾驶室, 通过地板与座椅传递给乘员。路面的不平以及车轮旋转产生的不平衡动力通过悬挂系统传递到车架上, 再通过驾驶室悬置与座椅传递给驾驶室的乘员。

发动机与传动系统是通过齿轮的传动比将曲轴的转速传递到车轮上的, 所以它们的频率一般高于车轮的频率。车轮与轮胎一般是不均匀的。车辆不同轴上的车轮的相位关系是不一样的, 不同的相位关系在不同的时间会产生跳动、

横摇、纵摇激励，使车架产生相应的振动模式。

当不均匀的车轮在运行时产生共振时，车轮旋转的角速度就是它的共振频率：

$$f_w = \frac{v \times 10^6}{2\pi r \times 3600}$$

式中， v 为车辆行驶速度 (km/h)； r 为轮胎的半径 (mm)； f_w 为车轮在这个速度下的旋转共振频率 (Hz)。

对于重型卡车，车轮直径在 1.2 m 左右，行驶速度在 70 km/h 时对应的激励频率为 5 Hz 左右。

一般来讲，尽管车轮与轮胎对所有车辆在所有时间里都是作为振动激励机制，但它们对于车辆振动谱的影响在平滑道路上是最明显的。而在粗糙路面上，因为板弹簧悬挂有更大的位移，其阻尼就更大，而且乘员在粗糙路面上本来就期望车辆的振动。一般的规则是，因为悬挂系统阻尼的低效率与车轮的 1 阶和更高阶的旋转激励相对于路面激励更突出，卡车的振动在平滑道路上比粗糙路面上更倾向于展示振动的周期性。一般来讲，车轮激励的振动是导致驾驶员与乘员不满意的一个主要原因。但是这个现象在现场很难控制，因为振动还可能来自轮胎的保养问题或轮胎因为制动滑动而磨平了^[3]。

道路的不平度主要来自反映建筑与维修道路表面精度实际极限的随机偏差，还有道路的局部路面错位与失效。当卡车在道路上运行时，左右轮因为道路的不平而在垂直方向产生的位移是不一样的，它们产生垂直方向的位移与纵摇响应，而左右轴距在高度上的差异是横摇与其他横向运动的主要激励。尽管道路没有给车辆施以横向加速度，但是两个轮距的高度差构成了一个横摇输入，驾驶员可能把这个输入感觉成一个横向加速度。

卡车是一个复杂的动力系统，根据道路与车辆的输入产生动力响应。卡车的动力响应包括两个方面：一个是车辆系统内在铰接的结构；另一个是卡车的具体设计或运行条件。在低频域中，车辆系统作为一个刚体，卡车由悬挂系统和轮系与地面分离，就是一个简单的二自由度振动系统。这个简化的振动模型至少反映了垂直运动。实际上，卡车的车轮在不同的点上与路面接触，卡车的动力响应除了纵向跳动外还有横摇与纵摇。沿着一侧的道路输入对于每个轮子都是一样的，但是根据卡车的运行速度会有一个时间上的迟滞^[4]。垂直振动的频率范围在 1~4 Hz，主要取决于悬挂系统的设计与运行条件前后振动模式，主要是由横摇引起的。横摇的激励是由道路的隆起引起的，前轮先通过这些隆起，然后后轮通过这些隆起，车辆对这些隆起激励的动力响应的频率取决于轴距对车速的比例。一般来讲，横摇激励的频率在 3~5 Hz。如果沿着每一侧的

道路输入对于每个轮子都不一样,那么卡车的振动模式呈现多样性。车轮的激励模式有跃振、平行跃振、交替跃振以及它们的组合。在某些特殊情况下,只存在一种振动模式:当车辆的轴距与道路的两个隆起的距离一样时,只有上下跳动模式。

除了这些刚体模态外,还有弯曲模态出现。底盘的弯曲振动是非常重要的模式,它的频率范围在 $6\sim 9\text{ Hz}$ 。还有其他数十种不同的共振频率,其范围在 20 Hz 左右。这些共振模式对总的车辆动力响应做贡献。这些共振频率的出现及其对总的车辆振动谱的贡献及影响取决于具体的卡车设计与结构。这些结构既要满足国家与地方的法规要求,同时也要满足购买者的具体要求。

卡车振动以不同的方式影响乘员的身体与心理,而乘员对振动暴露的反应主要取决于振动的频率、幅度与暴露的持续时间。其他因素可能包括振动输入的方向与位置,不同身体部位的质量,疲劳的水平与外部支持的出现。人体对振动的响应可以是机械的,也可以是心理的。机械的会对人体组织造成破坏,这是由各种人体器官系统内的共振所引起的。从暴露的观点来讲,振动的低频范围是研究者最感兴趣的。暴露在 $5\sim 10\text{ Hz}$ 的垂直振动范围一般会引起胸腹系统的共振,头-颈部-肩系统在 $20\sim 30\text{ Hz}$,眼球在 $60\sim 90\text{ Hz}$ 。当振动在人体内衰减时,它的能量被人体的组织与器官所吸收。在这些方面,肌肉就显得特别重要。振动导致自愿的与非自愿的肌肉收缩,特别是当共振时会引起局部肌肉疲劳。进一步,共振还可能引起反射性收缩,从而降低驾驶员对车辆操控的能力。

根据振动对卡车乘员的影响的文献回顾,可以总结如下:

(1) 许多学者对卡车驾驶员的全身振动暴露对健康的影响做了大量研究,这些研究表明,卡车驾驶员的全身振动对健康的有害影响是确定的。试验结果表明,卡车驾驶员许多影响健康的症状都与全身振动暴露相关。

(2) 一般重卡驾驶员全身振动暴露水平是:在垂直方向(Z 轴) $0.4\sim 2.0\text{ m/s}^2$ 的范围内,其均值在 0.7 m/s^2 。垂直方向振动在 $2\sim 4\text{ Hz}$ 频率范围内是最大的。

(3) 有实验室以及现场研究的数据表明,低频振动(3 Hz)与日益增加的疲劳之间有直接的关系。对于那些通常经历在这些频率附近的振动水平的重卡驾驶员来说,非常容易产生疲劳。

(4) 间歇的与随机的振动有刺激或使人保持清醒的效果。这是卡车振动少有的正面效果。

(5) 振动暴露会引起导致人们身体疲劳效果的新陈代谢和化学变化。有证据表明,卡车驾驶员对后背疼痛的抱怨的可能原因是全身振动暴露。

(6) 许多典型的振动暴露将达到可能的国际标准的健康风险区域内。根据这些标准,许多重卡驾驶员都处于来自延长的对振动暴露中的负面健康影响的风险之中。

(7) 绝大多数车辆运行都超过国际标准的舒服限值。

尽管这些事件中涉及疲劳与瞌睡的精确原因还不确定,但卡车驾驶员的疲劳与瞌睡是造成车辆碰撞与人员伤亡的一个非常重要的因素。根据美国国家高速公路与运输安全局(National Highway and Transportation Safety Administration, NHTSA) 2012年的统计,重型卡车的碰撞事故导致3 944人死亡,其中80%是路人。因此,卡车驾驶员的疲劳与瞌睡不仅是驾驶员安全的关键问题,也是一个公共安全问题^[5]。

美国运输部的联邦汽车运输安全管理局(Federal Motor Carrier Safety Administration, FMCSA)与美国运输部的NHTSA共同进行了大型卡车碰撞原因的研究,来检验大型卡车(自重大于4.5 t)严重碰撞事故的原因。从2001年4月到2003年12月间的12万例大型卡车碰撞事故中,选择具有国家代表性的样本。每一个在这个研究中的样本至少有一辆大型卡车而且出现了死亡或受伤。在整个样本中的963例碰撞事故中,涉及1 123辆大型卡车与959辆非大型卡车。这963例碰撞事故导致249人死亡,1 654人受伤。1 123辆大型卡车中,其中77%拖挂有一个半挂拖车的牵引车^[6]。在我国的高速公路上,这种运输方式是非常普遍的,也是非常经典的,因此本书以牵引车的NVH问题为重点进行分析。这些卡车碰撞事故的关键原因中,87%是驾驶员的过错,而且在确定的19种卡车事故的关键因素中,驾驶员的疲劳因素占13%。

实际测量卡车振动对驾驶员的影响是非常困难的,涉及驾驶员的开车时间、道路情况、环境情况、工作班次、身体及心理,等等。另外,振动环境对健康的影响并不是一两天的事,而可能是长时间的数据累积造成的,因此卡车振动对驾驶员健康影响的实际评价是非常难的。Azizan与Fard用开创式的脑电图实验室方法模拟卡车不同频率的振动对乘员疲劳的影响^[7],他们把卡车激励振动频率域分为4个部分,即Beta: 4~20 Hz; Alpha: 8~13 Hz; Theta: 4~7 Hz; Delta: 0.5~4.0 Hz。Beta波与警觉性和清醒性相关,Theta波与瞌睡状态相关,Alpha波与放松条件但意识清醒状态相关,而Delta波与深度睡眠条件相关。在这些激励下,用14个频道的脑电波探头测量参与实验的人员的头部不同部位的脑电波图,分析在不同激励下头部不同部位的脑电图的Beta、Alpha、Theta和Delta脑电波行为。他们的实验结果支持这样的假设:低频振动可以引起驾驶员的瞌睡并降低驾驶员的警觉性,正弦振动比随机振动对驾驶员的瞌睡影响更大。

当卡车运行在高速公路的不规则表面上时,车轮会受到激励。卡车的悬挂

系统将其传到底盘系统，同时卡车的运动部件也会产生振动激励。振动耐久性在部件选择中发挥着非常重要的作用。那些承受振动荷载的错误集成的部件与系统会导致生命周期的大幅度减少，或通过疲劳裂纹的扩展出现灾难性的结构失效。

部件的疲劳是材料在承受交变荷载时出现的局部结构破坏，而疲劳裂纹是车辆部件最常见的失效机制之一。部件的疲劳破坏有静力破坏和共振破坏^[8]。疲劳寿命是在一个特定的特性失效出现之前，一个试件所承受的应力循环次数。这个应力是交变的，而交变应力是由交变荷载产生的。疲劳寿命与应力虽然不是呈线性关系，但会随着应力的增长而减少。疲劳极限的定义为：在疲劳试验中，应力交变循环大至无限次而试样仍然不破损时的最大应力^[9]。根据这些定义，卡车部件疲劳破坏的主要原因是部件固有频率与车辆的激振频率有耦合而产生共振。在共振时，共振的幅值比较高，有时会在部件内产生大于疲劳极限的应力，使得部件的疲劳寿命减少，有时可能大到足以产生超过疲劳极限的应力而导致部件的破坏，或者使得部件的裂纹加速扩展，最终导致部件破坏。没有交变应力就没有疲劳破坏，将交变最小化可以增加疲劳寿命。

1.3 卡车的冲击问题

当卡车行驶在不光滑的路面上或通过减速带这样的障碍物时，车轮会产生振动力，这些振动力通过悬挂系统传递到车架上。这些激励是冲击型的，有突然、短促的特点。这种激励的突然性使得卡车的动力响应包含所有频率的分量。

运载的敏感货物，如精密仪器、核燃料等都对卡车的振动与冲击提出很高的要求。对于卡车来讲，冲击是在卡车通过火车道、路面的坑与减速带等时产生的。它的特点是迟滞的瞬态脉冲，它与振动相叠加并与振动相互混合。虽然冲击发生的频率比振动低得多，但是其振动幅度是非常大的，一个普通牵引车的底盘在 0~5 Hz 垂直方向的振动最高幅值可以达到 10g，横行与纵向加速度可以达到 5g。对于卡车，它的地板在垂直方向的加速度可以达到 2g^[10]。

1.4 货物的完整性

在交付任何货物时，人们最担心的问题是货物能否毫发无损地交付到目的地。然而在运输过程中会受到各种因素影响而使货物受损，其中一个重要因素是车辆的振动与冲击。车辆的振动与冲击通过底盘车架与包装传到货物上，振动与冲击导致包装松散。货物损坏还有其他原因，而车辆振动是一个很难界定的原因。但可以肯定的是，如果能把车辆的振动降低，对货物的完整性是有帮助的。