普通高等教育汽车类专业精品系列教材

汽车振动基础

黄雪涛 徐传燕◎主编



北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

普通高等教育汽车类专业精品系列教材

汽车振动基础

主　编　黄雪涛　徐传燕
副主编　周长峰　郭荣春

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书遵循循序渐进、由浅入深的原则，按照单自由度系统无阻尼自由振动、单自由度系统有阻尼自由振动、单自由度系统有阻尼强迫振动、二自由度振动系统、多自由度振动系统这种由简单的简谐激励到复杂的随机激励振系的顺序讲解。同时，本书注重理论联系实际，加入了振动理论的工程应用实例；密切关注汽车振动方面的新理论、新技术、新方法，如有限元仿真技术在汽车振动领域的应用。

本书可作为本科院校车辆工程相关专业教学用书，亦可供从事汽车设计、汽车维修等车辆工程相关领域的工程技术人员参考。

版权专有　侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

汽车振动基础 / 黄雪涛，徐传燕主编. —北京：
北京理工大学出版社，2021.6(2021.8 重印)

ISBN 978-7-5682-9986-2

Ⅰ. ①汽… Ⅱ. ①黄… ②徐… Ⅲ. ①汽车-振动理论 Ⅳ. ①U467. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 130811 号

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)68944723(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 / 涿州市新华印刷有限公司
开　　本 / 787 毫米×1092 毫米　1/16
印　　张 / 9. 25
字　　数 / 201 千字　　责任编辑 / 江　立
版　　次 / 2021 年 6 月第 1 版　2021 年 8 月第 2 次印刷　　责任校对 / 刘亚男
定　　价 / 36. 00 元　　责任印制 / 李志强

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

前　言

随着现代汽车产业朝着高速化、高效化、轻量化的方向发展，人们对汽车的乘坐舒适性、操纵稳定性、车内振动噪声等的要求越来越高，因而汽车的动态特性分析与设计也日益成为现代汽车自主研发的重要手段。作为汽车动态特性的关键指标之一，振动在汽车的设计与研发中占据着重要的地位。“汽车振动基础”已成为汽车工程中必不可少的基础理论课程之一。

本书为本科院校车辆工程相关专业的本科生提供了全面、系统的有关汽车振动理论的知识，对从事汽车设计、汽车维修等车辆工程相关领域的工程技术人员也具有较高的参考价值。在本书的编写过程中，我们遵循循序渐进、由浅入深的原则，按照单自由度系统无阻尼自由振动、单自由度系统有阻尼自由振动、单自由度系统有阻尼强迫振动、二自由度振动系统、多自由度振动系统这种由简单的简谐激励到复杂的随机激励振系的顺序讲解。同时，注重理论联系实际，在讲解过程中加入了振动理论在工程实践中应用的实例。此外，本书引入了汽车振动方面的新理论、新技术、新方法，如有限元仿真技术在汽车振动领域的应用等，保证了理论的基础性、工程的实用性及技术的先进性。

本书共分 6 章，其中：第 1 章、第 2 章、第 3 章由黄雪涛、郭荣春编写；第 4 章、第 5 章由徐传燕、周长峰编写；第 6 章由周长峰、郭荣春编写。书稿编写过程中，得到了北京理工大学顾亮、李晓雷教授及研究生董新婷、毋青松、李加坤、陈璐瑶同学的热情帮助，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏，敬请读者批评指正！

编　者

2021 年 1 月

目 录

第 1 章　绪论 …… (1)
1.1　引言 …… (1)
1.2　振动的分类 …… (2)
1.3　振动问题的研究方法 …… (4)
1.4　振动的危害与利用 …… (6)
1.5　汽车上的振动问题 …… (8)
第 2 章　单自由度系统的振动 …… (15)
2.1　单自由度振动系统 …… (16)
2.2　单自由度系统无阻尼自由振动 …… (21)
2.3　单自由度系统有阻尼自由振动 …… (30)
2.4　单自由度系统的强迫振动 …… (38)
2.5　任意激励下的强迫振动 …… (45)
2.6　单自由度振动系统的工程应用实例 …… (53)
第 3 章　二自由度系统的振动 …… (65)
3.1　二自由度振动系统的运动微分方程 …… (65)
3.2　不同坐标系下的运动微分方程 …… (68)
3.3　二自由度系统自由振动 …… (72)
3.4　二自由度系统强迫振动 …… (81)
第 4 章　多自由度系统的振动 …… (85)
4.1　多自由度系统的振动方程 …… (86)
4.2　拉格朗日方程法与影响系数法 …… (91)
4.3　固有振型的正交性、模态坐标和正则坐标 …… (96)
第 5 章　随机振动 …… (110)
5.1　随机振动概述 …… (110)
5.2　随机振动的数字特征 …… (112)
5.3　平稳过程和各态历经过程 …… (114)
5.4　相关函数 …… (117)

需要全本请访问 www.ertongbook.com

5.5 功率谱密度函数 …… (121)
第 6 章 振动噪声基础理论 …… (127)
6.1 声波的基本概念 …… (127)
6.2 理想介质中的声场波动方程 …… (130)
6.3 声波的传播特性 …… (133)
6.4 声阻抗、声压级、声强级及声功率级 …… (134)
6.5 噪声及其控制技术 …… (136)
参考文献 …… (142)

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

广义的振动指的是一个物理量在它的平均值附近所做的往复运动，而所谓的机械振动指的是机械或结构在其静平衡位置附近做的往复运动。作为机械振动的一种，汽车振动所研究的对象是整车或其零部件，在理论分析中要将实际的汽车整车或其零部件抽象为力学模型，即形成一个力学系统。

以实现一定的机械运动、输出一定的机械能，以及承受一定的机械载荷为目的的系统，称为振动系统。振动系统可以是一个零部件、一台机器或者一个完整的工程结构，等等。振动系统发生振动是由于外界对系统运动状态的影响，即外界对系统的激励或作用。**如果外界对某一个系统的作用使得该系统处于静止状态，此时系统的几何位置称为系统的静平衡位置**。根据系统势能在静平衡位置附近的性质，可将系统的静平衡分为稳定平衡、不稳定平衡和随遇平衡等。机械振动中的平衡位置即是系统的稳定平衡位置。在工程实践和日常生活中有大量的振动实例，如车辆行驶时发动机的抖动、车身的振动、乐器演奏时琴弦的抖动等。

对于工程实践中的振动问题，人们关心的是振动会不会使结构的位移、速度、加速度等发生变化。振动过程中，位移过大可能引起机械结构各个部件之间的相互干涉。例如，在汽车运行过程中，有时会由于剧烈振动导致汽车的轮轴和大梁频繁碰撞，从而造成大梁过早损坏甚至危及行车安全。又如，汽车运行过程中如果垂向振动加速度过大，会直接影响汽车的行驶平顺性，给乘员带来不适或损坏所载货物的安全。此外，振动过大也造成结构的应力过大，即振动过程中会产生过大的动载荷，该动载荷有时比静载荷要大得多，易造成结构的早期损坏；振动过大还会引起其他的副作用，如车辆运行过程中由高频振动产生的车辆噪声等，给人们的生产、生活带来了各种不便。

在车辆的行驶过程中，通常会因路面不平、车速及车辆运动方向的变化及车轮、发动机、传动系统的动不平衡等因素而造成整车或零部件的振动。汽车振动可能使得汽车的动力学特性得不到充分的发挥、经济性变坏，同时影响汽车的操纵稳定性、通过性及乘坐舒适性，也易使驾驶员产生疲劳感，影响汽车的行驶安全性。汽车作为一个复杂的振动系统，其内部各零部件具有不同的固有频率。尤其在振动载荷下，汽车零部件易产生疲劳破坏，影响零部件的使用寿命。

在机械振动中，把外界对振动系统的激励或作用称为振动系统的激励或输入，而振动系统对外界影响的反应，称为振动系统的响应或输出。图 1.1 表明了激励、响应和振动系统三者之间的关系，而振动就是研究这三者之间关系的一门课程。

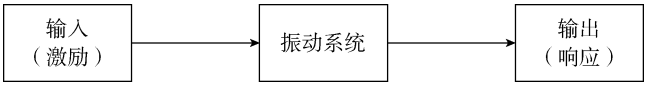


图 1.1　激励、响应和振动系统的关系

从理论上分析，激励、振动系统和响应三者之间只要知道了其中的两个，就可以求出第三个。因此常见的振动问题可以分成以下 3 种类型。

（1）振动分析问题。已知激励和振动系统的特性，求振动系统的响应，是振动的正问题。例如，为了减小汽车在不平路面上行驶时轮胎传给车身的振动激励而进行的汽车悬架设计等汽车振动隔离问题。又如，已知路面结构和车辆结构，对车辆进行的乘坐舒适性和操纵稳定性分析等车辆动态特性分析问题。

（2）环境预测问题。已知振动系统的特性和响应，求系统所受到的激励，这类问题是振动的逆问题。环境预测技术主要包括在线控制技术、工具开发等，如振源的判断、载荷识别、工况监控与故障诊断等。在汽车振动领域，基于五轮仪的路面谱测量就是环境预测技术的应用。

（3）系统辨识问题。已知激励和响应，确定振动系统的特性，也是振动的逆问题。这类问题往往用模态试验的方法识别出振动系统，以建立振动模型或检验已有的理论模型的正确性。例如，车辆异常振动的识别问题，就是在已知路面激励和系统响应的前提下，研究车辆系统的参数识别问题。

这些振动问题在工程实际中十分常见，研究该类问题需要深入了解振动系统的性质和它与激励、响应之间的关系，这些均属于汽车振动基础课程的内容。

1.2　振动的分类

自然界中的振动现象多种多样，根据不同的情况对机械振动进行分类，有利于加深人们对振动的认识，方便分析和处理振动问题。

1. 自由振动、强迫振动、自激振动和参数振动

根据激励、响应和振动系统特性的不同，可将机械振动分为自由振动、强迫振动、自激振动和参数振动。其中，自由振动是指当振动系统受到初始干扰后（可以是力干扰也可以是位移干扰），振动系统在没有外界激励作用时的振动；强迫振动是指振动系统在外在激励作用下产生的振动，如汽车运行时汽车发动机对车身的振动即为强迫振动；自激振动是指振动系统在激励和响应之间具有反馈特性，自身能够进行能源的补充的振动，如内燃机或蒸汽机的活塞的往复振动、切削工件时引起的机床振动等；参数振动是指在振动系统中，周期或随机地改变系统的特性参数而产生的振动。参数振动由外界的激励产生，但激励不是以外力形式施加于系统，而是通过系统内参数的周期性改变间接地实现。例如，荡秋千时人要适时地作出下蹲和直立的动作：每次通过平衡位置时，人要迅速直立，使重心升高；而摆到最高位置时，人又要迅速蹲下，使重心降低。这样，秋千来回荡一次，整个系统（即人、板及绳索合在一起）的重心就呈周期性地上升和下降两次，这种由振动系统内部参数的周期性变化而实现的振动就是参数振动。

2. 线性振动和非线性振动

根据描述振动系统的微分方程的不同，机械振动可以分成线性振动和非线性振动两种。其中，线性振动是指在振动过程中，振动系统的惯性力、阻尼力、弹性力分别与绝对加速度、相对速度、相对位移呈线性关系。做线性振动的系统称为线性振动系统，而从系统振动的数学描述方法来讲，所谓的线性振动指的是振动系统的运动方程为线性微分方程。

非线性振动系统在振动过程中，系统的惯性力、阻尼力、弹性力与绝对加速度、相对速度、相对位移的关系没有线性振动那么简单。例如，系统阻尼力可能是相对速度的非线性函数，系统的刚度可能为位移的非线性函数，或者系统的激励可能为位移的函数或同时为位移和速度的函数等，故系统振动的运动方程只能用非线性方程来描述。

将一个机械系统抽象为振动模型时，究竟是采用线性系统，还是采用非线性系统，往往取决于结构振动时的运动范围或者是否便于分析和解决问题，而不是结构的固有性质。例如，研究含有橡胶件的机械系统时，若橡胶件的相对变形量在20%的范围内，就可以把橡胶件作为线性系统来分析；若考虑橡胶件的大变形，则振动系统需作为非线性系统来分析。完全的线性结构只存在于理论分析的理想状态。

3. 单自由度系统振动、多自由度系统振动、无限多自由度振动

系统的自由度数定义为描述系统运动所需要的独立坐标的数目。若振动系统用一个独立的坐标就能确定位置，则该振动系统称为单自由度振动系统；若振动系统需用多个独立坐标才能确定位置，则该振动系统称为多自由度系统，如二自由度系统、三自由度系统等；若该振动系统需用无限多个独立的坐标才能确定位置，则该振动系统称为无限多自由度振动系统。

4. 周期振动、非周期振动、随机振动

根据系统的振动规律，振动可以分为周期振动、非周期振动和随机振动。当振动量是

时间的周期函数时，该振动系统的振动为周期振动，如简谐振动；当振动量不是时间的周期函数时，该系统的振动则为非周期振动；当振动量不是时间的函数，只能通过概率统计的方法来研究系统的振动规律，且振动过程中的振幅、相位、频率等都是随机变化的，则该系统的振动属于随机振动，如汽车在不平路面上行驶时的振动。

5. 离散系统、连续系统

工程实践中的大多数振动系统，其质量和刚度都是连续分布的，通常需要无限多个自由度才能描述其振动，其振动微分方程均为偏微分方程，这样的振动系统称为连续系统。例如，等截面的梁、杆、板等，其质量和刚度均为连续分布的，其振动需简化为连续系统振动问题来解决。

在结构的质量和刚度分布很不均匀时，或者为了解决实际工程问题的需要，工程实践中常常把连续结构简化为若干个集中质量、集中刚度和集中阻尼组成的离散系统。所谓的离散系统是指系统只有有限个自由度。例如，当研究汽车垂直方向的振动问题时，通常可以将车辆简化成若干个集中质量、集中阻尼和集中刚度的离散系统来讨论。

1.3 振动问题的研究方法

工程实践中的振动问题，其研究方法主要包括 3 种，即理论分析法、试验分析法、理论与试验结合法。理论分析与试验验证相辅相成，即在大量实践和科学实验基础上建立起来的理论，对试验起着指导作用，而从理论推导得来的结论均需通过试验来验证其准确性。

1. 理论分析法

采用理论分析法求解振动问题时，其求解步骤如图 1.2 所示。

工程实际中的振动问题往往比较复杂，为了便于分析，必须对实际的振动问题进行简化，建立其动力学模型。动力学模型的复杂程度取决于系统本身的复杂程度及对计算结果准确度的要求。例如，对于汽车这样一个复杂的振动系统，根据研究目的的不同，可以将其分为单自由度车身振动模型、车身车轮二自由度振动模型、车身车轮四自由度振动模型及车身车轮七自由度振动模型等。

根据力学基础知识，对构建的力学模型进行受力和运动分析，并运用基本力学定律构建振动系统的运动学方程。通常振动问题的数学模型可以表示为微分方程或微分方程组的形式。为得到振动系统的响应规律，须对建立的运动学方程进行求解。通常情况下，振动系统的运动学方程为位移、速度、加速度等振动响应量的时间函数，表明响应与振动系统特性、激励之间的函数关系。若研究的振动系统为单自由度振动系统，其运动微分方程的求解需要用到高等数学里的微分方程的相关知识；若研究的振动系统为多自由度振动系统，则其运动微分方程的求解则需要用到线性代数里矩阵运算的相关知识。

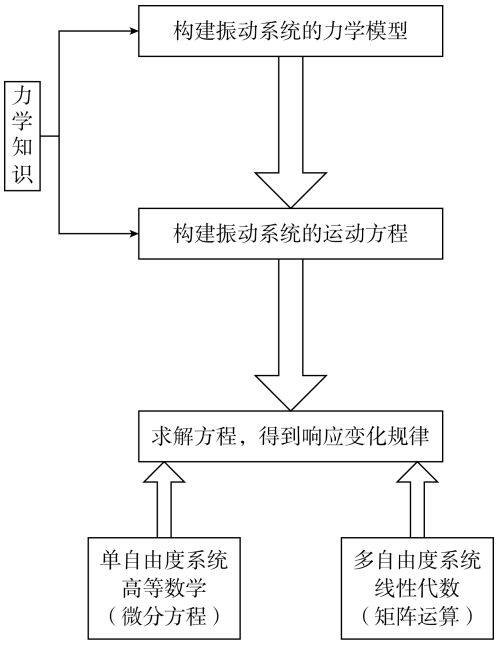


图 1.2 理论分析法求解振动问题的步骤

根据振动系统运动微分方程的解，可以分析振动系统的响应规律，并根据设计要求或工作需求，对振动系统的结构进行优化和改进，以获得满足要求的最优解。

2. 试验分析法

试验分析法是指采用试验仪器设备测量振动系统的响应信号，包括位移信号、速度信号、加速度信号等，并通过一定的信号处理得出系统的振动特性的研究方法。试验研究通常进行两方面的工作：一方面，直接测量振动系统的振动响应，并根据采集到的数据进行振动分析以了解系统的振动特性，即为通常所说的振动分析的工作；另一方面，用已知的振源去激励研究对象，并测试其响应变化规律，以分析系统特性，即通常所说的系统识别工作。具体研究步骤主要包括：

（1）选择测试工况，即选择测试源；

（2）对振动系统的结构进行分析，研究振动测点，布置传感器；

（3）采集振动信号，并进行信号的分析和处理；

（4）分析测试结果，得出有效结论。

振动试验最初是在航空航天部门发展起来的，现在已被推广到动力机械、交通运输、建筑等各个工业部门及环境保护、劳动保护方面，其应用日益广泛。振动试验包括响应测量、动态特性参量测定、载荷识别以及振动环境试验等内容。

振动试验是指为评定产品在预期使用环境中的抗振能力而对受振动的实物或模型进行的试验。根据施加的振动载荷类型的不同，可将振动试验分为正弦振动试验和随机振动试验两种。正弦振动试验包括定额振动试验和扫描正弦振动试验。扫描正弦振动试验要求振动频率按一定规律变化。振动试验设备分为加载设备和控制设备两部分。加载设备有机械

需要全本请访问 www.ertongbook.com

式振动台、电磁式振动台和电液式振动台，电磁式振动台是目前使用最广泛的一种加载设备。振动控制设备用来产生振动信号和控制振动量级的大小，应具备正弦振动控制功能和随机振动控制功能。振动试验主要是环境模拟，试验参数为频率范围、振动幅值和试验持续时间。振动对产品的影响有：结构损坏，如结构变形、出现裂纹或断裂；产品功能失效或性能超差，如接触不良、继电器误动作等（这种破坏不属于永久性破坏，因为一旦振动减小或停止，工作就能恢复正常）；工艺性破坏，如螺钉或连接件松动、脱焊。

3. 理论与试验结合法

在工程实践中，对于大多数的振动问题是采用理论与试验相结合的方法来解决的。在对振动问题进行分析时，首先，采用试验方法采集振动系统的振动信号，并对信号进行分析和处理，找出振动系统的响应规律、系统特性等；然后，借助于振动系统的理论模型，研究振动系统的响应随系统特征的变化规律，对原有的振动系统进行优化与改进；最后，对优化和改进后的振动系统再进行试验测试，以验证理论分析的结果。

振动问题的研究离不开理论分析和试验研究，理论分析的结果需要通过试验来验证；通过试验的方法识别出的系统特性，需要理论模型的分析计算。只有理论分析和试验验证相结合，才能更好地解决振动问题。

1.4 振动的危害与利用

在自然界中，振动给人类带来危害的例子比比皆是，如大家所熟知的地震。地震又称地动、地振动，是地壳在快速释放能量的过程中造成振动，并产生地震波的一种自然现象。地球上板块与板块之间相互挤压碰撞，造成板块边沿及板块内部产生错动和破裂，是引起地震的主要原因。地震时，最基本的现象是地面的连续振动，主要特征是明显的晃动。震区的人在感到大的晃动之前，有时首先感到上下跳动。因为地震波从地内向地面传来，纵波首先到达。横波接着产生大振幅的水平方向的晃动，是造成地震灾害的主要原因。1960 年智利大地震时，最大的晃动持续了 3 分钟。地震造成的灾害首先是破坏房屋和构筑物，从而造成人畜的伤亡，如 1976 年中国河北唐山地震中，70% ~80% 的建筑物倒塌，人员伤亡惨重。

车辆的振动会引起车辆的平顺性变坏，车辆的平顺性通常用坐垫处的加权加速度值进行评价。当坐垫处的加权加速度数值小于等于 0.315 m/s^2 时，人们不感觉到不舒适；当坐垫处的加权加速度值在 0.315 ~0.63 m/s^2 之间时，人们通常能感觉到有一些不舒适；当坐垫处的加权加速度值在 0.5 ~1.0 m/s^2 之间时，人们感觉比较不舒适；当坐垫

处的加权加速度值在0.8～1.6 m/s^{2}之间时，人们通常感觉到不舒适；而当坐垫处的加权加速度值在1.25～2.5 m/s^{2}之间时，人们通常感觉到很不舒适；当坐垫处的加权加速度值大于2.0 m/s^{2}时，人们感觉极不舒适。

另外，机床振动会降低机床精度，产生误操作，影响其性能；机械噪声会导致纺织厂工人耳聋耳背；钻孔机、打桩机、导振器等在工作过程中产生的噪声也都属于机械噪声；飞行中的飞机遇到气流时，气流与飞机引起的共振会导致飞机折翼；航行中的轮船遇到海浪时，海浪与轮船引起的共振会导致轮船断裂。

振动对人的影响大致有以下4种情况。

（1）人体刚能感受到振动的信息，这就是通常所说的“感觉阈”。人们对刚超过感觉阈的振动，一般并不觉得不舒适，即多数人对这种振动是可容忍的。

（2）振动的振幅加大到一定程度，人就感觉到不舒适，或者作出“讨厌”的反应，这就是“不舒适阈”。“不舒适”是一种心理反应，是大脑对振动信息的一种判断，并没有产生生理的影响。

（3）振动振幅进一步增加，达到某种程度，人对振动的感觉就由“不舒适”进入“疲劳阈”。对超过“疲劳阈”的振动，人们不仅有心理的反应，而且有生理的反应。这就是说，振动的感受器官和神经系统的功能在振动的刺激下受到影响，并通过神经系统对人体的其他功能产生影响，如注意力的转移、工作效率的降低等。对刚超过“疲劳阈”的振动来讲，振动停止以后，这些生理影响是可以恢复的。

（4）振动的强度继续增加，就进到“危险阈”（或“极限阈”）。超过“危险阈”时，振动对人不仅有心理、生理的影响，还产生病理性的损伤。这就是说，这样强的振动将使感受器官和神经系统产生永久性病变，即使振动停止也不能复原。

另外，振动对机械结构的影响还包括：风吹桥塌、降低零部件的加工精度、影响汽车的驾驶稳定性、影响射击的瞄准精度、降低机械结构的疲劳寿命等。当然，振动对人类社会的危害还远不止这些。这就需要我们能够正视振动给人类带来的危害，同时明晰振动的产生机理，掌握振动的变化规律，并能够利用振动的变化规律为人类的生产、生活服务。

在现实生活中，人们利用振动规律为人类生产、生活服务的例子也有很多。早在19世纪，瑞士人就利用振动固有频率不变的性质进行计时，钟表的发明为人类的生活带来了极大的便利。在工业领域，利用振动学的基本原理发明了振动压路机、混凝土导振器等器械，减轻了工人的劳动强度，提高了工作效率。在矿业生产中，人们利用振动学的基本原理发明了振动筛对不同的金属矿物质进行筛选、分离，完成矿物质的分类处理。在通信领域，人们利用振动的基本规律设置了手机的振动模式，为手机的推广应用奠定了基础。另外，人们还利用振动来消除机械结构中的残余应力、利用振动来进行疾病的治疗等。当

然，这些只是人类利用振动的一部分实例，随着人类对振动知识更加深入的研究，对振动应用的进一步挖掘，振动相关的应用能够更好地造福人类社会。

1.5 汽车上的振动问题

不同领域中的振动现象虽然表现形式各异，但其数学和力学描述基本是一致的。基于这个共性，有可能建立某种统一的理论来处理各种振动问题。借助高等数学、线性代数、概率论与数理统计、物理、力学、实验及数值计算技术，可探索各种振动问题的表象特征，明晰振动变化的基本规律，从而克服振动的消极因素，利用振动的积极因素，为合理解决人类生产、生活中的各种振动问题提供理论基础。

在现代工业设计及汽车研发生产过程中，掌握振动学的基础理论和方法，以确定和限制振动对工程结构及机械产品性能、寿命、安全的有害影响，是当今动态设计和分析的需要，也是汽车振动基础研究的主要问题之一。振动理论在工程实践中的应用主要包括振动隔离、在线控制、振动设备和工具开发及振动响应分析。其中，振动隔离是指在振源不可能完全消除的情况下，研究如何减少振动对结构的影响。根据激振源的不同，可持振动隔离分为 2 类：对于本身是振源的设备，为了减少它对周围机器、仪器和建筑物的影响，将它与支承隔离开，以减小传给支承的不平衡惯性力，称为积极隔振，又称主动隔振，水泵、发动机、锻锤机械等的振动隔离就属此类；对于振源是支承的情况，为了减少外界振动传到系统中来，把系统安装在一个隔振的台座上，使之与地基隔离，这种措施称为消极隔振，又称被动隔振，车辆的乘坐、精密仪器的安装、环境运输的包装、舰艇上导弹发射架的振动隔离就属此类。在线控制又称联机控制，是指利用振动信号监测设备工作状态，诊断故障，自动控制装置（控制计算机、控制器）通过检测仪表和执行机构与生产过程设备直接相连，进行实时控制和操作，而不必通过其他中间记录介质来间接对过程进行输入、输出及决策。由于自动控制发生故障时，需要生产线停止工作，因此自动控制装置要具有相应的保护措施或备用控制装置。振动设备和工具开发是指利用振动原理，研究和开发新型的振动源和振动工具，如工业中的振动筛就是利用振动学的基本原理区分不同的矿物成分，从而达到分离矿物质的目的。振动响应分析是指对系统的振动响应进行分析，研究其动态性能，如振动的时域响应分析就是研究系统在施加一定形式的输入信号后，系统的输出量随时间的变化规律。控制系统的时域响应由动态过程和稳态过程两部分组成，其中动态过程是指系统从初始状态经历了一段时间的变化，达到最终状态的响应过程；稳态过程是指动态过程结束后系统的稳定输出状态。系统受到外加作用的激励后，从初始状态

到最终状态的响应过程称为瞬态响应；时间趋于无穷大时，系统的输出状态为其稳态响应。

汽车振动基础研究的另一个基础问题是汽车的 NVH（Noise、Vibration、Harshness）问题。当今社会，汽车技术的发展方向主要包括：安全性、环保性、信息化、低成本和舒适性，如图 1.3 所示。汽车的安全性一般分为主动安全性、被动安全性、事故后安全性和生态安全性。其中，主动安全性是指汽车防止或减少道路交通事故发生的性能；被动安全性是指交通事故发生后，汽车减轻人员伤害程度或货物损失的能力；事故后安全性是指汽车能减轻事故后果的性能，主要包括能否迅速消除事故后果，同时避免新的事故发生；生态安全性是指发动机排气污染、汽车行驶噪声和电磁波等对环境的影响程度。汽车的环保性是指尾气中的污染物浓度。随着国家环保标准的提高，尾气中各污染物的限制越低，汽车对环境的污染越小，实现的技术难度也越大。目前，主要是通过采用清洁能源、车身轻量化及采用可回收能源的方法来实现的。汽车信息化的建设为无人驾驶和汽车智能化的发展提供了重要的支撑和载体，是当今汽车领域研究的一个热点。汽车的低成本化是当今汽车生产厂商竞争的主要领域之一，借助于轻量化技术和大批量生产工艺，成为车企增加市场竞争力的主要方式之一。汽车的舒适性主要包括低噪声、低振动及驾驶平顺性 3 个方面，汽车舒适性的提高主要依赖于 NVH 技术的发展和支持。

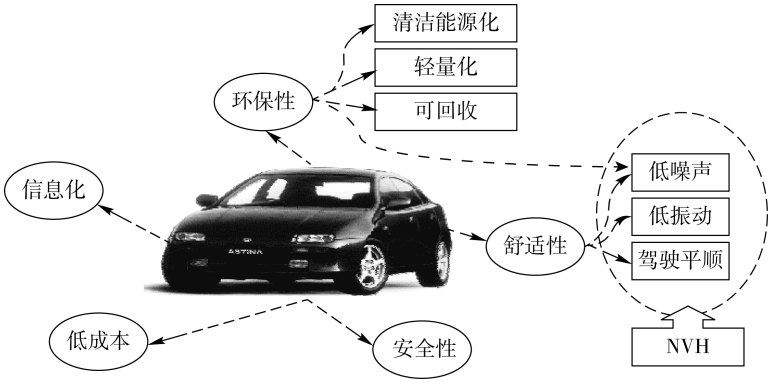


图 1.3 当今汽车技术的主要发展方向

汽车 NVH 问题即汽车的噪声、振动、舒适性（又称冲击）问题，是衡量汽车制造水平的一个综合性指标。车辆的 NVH 水平给汽车用户的感受是最直接和最明显的。统计资料表明，整车约有 1/3 的故障问题与车辆的 NVH 问题有关，而国际上各大汽车公司有近 20% 的研发费用消耗在解决车辆的 NVH 问题上。

NVH 特性的研究不仅仅适用于整个汽车新产品的开发，而且适用于现有车型乘坐舒适性的改进。具体来说，就是针对汽车的某一个系统或总成进行建模分析，找出对乘坐舒适性影响最大的因素，通过改善激励源振动状况（降幅或移频）或控制激励源振动噪声向车室内的传递来提高汽车的乘坐舒适性。

汽车动力总成悬置系统的隔振研究以及发动机进、排气噪声的研究是改善整车舒适性的重要内容，动力总成液压悬置系统的发展与完善使这一问题得到了较好的解决。悬架系统和转向系统对路面不平度激励的传递和响应对驾驶员及乘客的乘坐舒适性有很大影响，分析悬架系统的动力学特性可以改善它的传递特性，减少振动和噪声；通过对转向操纵机构和仪表板进行有限元分析，可以使转向柱管、方向盘的固有频率移出激励频率范围并保证仪表板的响应振幅最小。汽车制动时产生的噪声会严重影响车室内乘员的舒适性，实验证明，制动噪声主要是由于制动器摩擦元件磨损不均匀造成的，通过对制动盘等元件进行有限元分析以及它的磨损特性对产生噪声的影响等问题的研究，可以改善制动工况下的整车 NVH 特性。另外，随着车速的不断提高，高速流动的空气与车身摩擦产生的振动噪声已经成为车室噪声的重要来源。

汽车在使用一段时间之后，一些元件（如传动系的齿轮、联轴节、悬架中的橡胶衬套、制动器中的制动盘等）的磨损将对整车的 NVH 特性产生重要影响，它们的强度、可靠性和灵敏度分析是研究整车特性的重要工作，这也就是所谓高行驶里程下汽车 NVH 特性的研究问题。

汽车振动学就是把汽车作为研究对象，研究其质量、弹簧、阻尼相互关系的一门科学。汽车本身就包括质量元件（各零部件）、弹性元件（减振器、轮胎、发动机垫块等）和阻尼元件（轮胎、减振器中的阻尼部分、橡胶垫块等），故其本身就是一个振动系统。以汽车作为振动系统，其外部激励主要包括路面不平度引起的路面激励；车速和运动方向变化引起的冲击激励；车轮、发动机和传动系统动不平衡引起的冲击激励；齿轮的冲击激励等。汽车振动系统的响应则主要包括汽车动力性发挥不充分；汽车的燃油经济性变差；车辆的通过性、操纵稳定性和平顺性变差；汽车零部件和所载货物的损坏；汽车整车及其零部件使用寿命的缩短等。

汽车的悬架系统如图 1.4 所示，它是汽车上主要的减振部件，主要功能是：缓和由不平路面传给车身的冲击载荷，衰减由冲击载荷引起的承载系统的振动。悬架振动主要用来研究汽车的平顺性。汽车悬架包括弹性元件、减振器和传力装置，这三部分分别起缓冲、减振和传递力的作用。其中，螺旋弹簧是现代汽车上用得最多的弹簧，其优点是吸收冲击的能力强，使汽车的乘坐舒适性好；缺点是长度较大，占用空间多，安装位置的接触面也较大，使得悬架系统的布置难以做到很紧凑。此外，由于螺旋弹簧本身不能承受横向力，所以在独立悬架中不得不采用四连杆螺旋弹簧等复杂的组合机构。出于乘坐舒适性的考虑，希望对于频率高且振幅小的地面冲击，弹簧能表现得柔软一点；当冲击力大时，又能表现出较大的刚性，减小冲击行程。因此，需要弹簧同时具有 2 种甚至 2 种以上的刚度，可采用钢丝直径不等或螺距不等的弹簧，它们的刚度随负载的增加而增加。钢板弹簧多用于厢式车及卡车，它由若干片长度不同的细长弹簧片组合而成，比螺旋弹簧结构更简单，

成本更低，可紧凑地装配于车身底部，工作时各片间产生摩擦，具有衰减效果，但如果产生严重的干摩擦，就会影响吸收冲击的能力。扭杆弹簧是利用具有扭曲刚性的弹簧钢制成的长杆，一端固定于车身，另一端与悬架上臂相连，车轮上下运动时，扭杆发生扭转变形，起到弹簧的作用。气体弹簧利用气体的可压缩性代替金属弹簧，它最大的优点就是具有可变的刚度（随气体的不断压缩刚度渐渐增加，且这种增加是一个连续的渐变过程），而不像金属弹簧是分级变化的，它的另一个优点是具有可调整性，即弹簧的刚度和车身的高度是可以主动调节的。

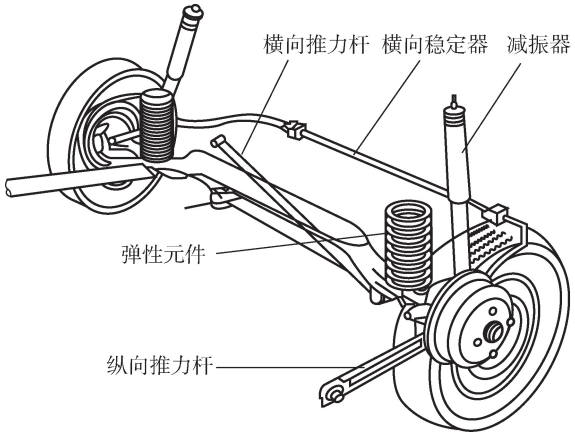


图 1.4 汽车的悬架系统

汽车的制动性是指汽车行驶时在较短的距离内停车且维持行驶方向稳定性的能力及在下长坡时维持一定的速度的能力。由车辆的制动引起的汽车颤振也是汽车振动基础研究的一个主要问题。自从汽车诞生之日起，汽车的制动性就显得至关重要；随着汽车技术的发展和汽车行驶速度的提高，其重要性也显得越来越明显，直接关系到交通安全。由于重大交通事故往往与制动距离太长、紧急制动时发生侧滑等情况有关，因此汽车的制动性是汽车行驶的重要保障。

汽车的操纵稳定性是指在驾驶员不感到过分紧张、疲劳的情况下，汽车能遵循驾驶员通过转向系及转向车轮给定的方向行驶；当遭遇外界干扰时，汽车能抵抗干扰而保持稳定行驶的能力。操纵稳定性是结合了汽车操纵性和稳定性的综合特性。操纵性是汽车及时而准确地执行驾驶员转向指令的能力；稳定性是汽车在行驶过程中，受到外界干扰后维持或迅速恢复原来运动状态的能力。操纵稳定性既反映汽车的实际行迹与驾驶员主观意图在时间上和空间上的吻合程度，又反映汽车运行的稳定程度。可以说，稳定性是操纵性的保证，稳定性丧失便导致操纵性失控，两者性质不同而相互依存。驾驶员依据环境条件及汽车行驶状态，通过方向盘等操纵机构对汽车发出调整行迹的指令，又通过感官的主观感觉将汽车实际行迹的变化与原意图进行比较后，再发出修正指令，直到满意为止。

汽车的车身及车架作为汽车系统的骨架，一般情况下均为连续体，具有无限多个自由

需要全本请访问 www.ertongbook.com