

21世纪高等学校新理念教材建设工程

车辆随机振动

张立军 何 辉 编著



东北大学出版社
Northeastern University Press



21世纪高等学校新理念教材建设工程

CAD技术基础教程
现代海关通关实务
经济法学概论
广告文化学
公共关系学
汽车检测与诊断技术
汽车造型设计
模糊数学及其应用
计算机在材料科学与工程中的应用
计算机绘图
质量管理与认证
财务管理学
车辆随机振动
非艺术类普通高等学校音乐欣赏
结构优化设计
大学物理实验
建筑设计
现代企业管理
网络广告设计实务
电视摄像简明教程
工程材料

ISBN 978-7-81102-458-6



9 787811 024586 >

定价：20.00元



21 世纪高等学校新理念教材建设工程

车辆随机振动

张立军 何 辉 编著

东北大学出版社

·沈阳·

©张立军, 何辉 2007

图书在版编目 (CIP) 数据

车辆随机振动 / 张立军, 何辉编著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2007.9
(21 世纪高等学校新理念教材建设工程)
ISBN 978-7-81102-458-6

I. 车… II. ①张…②何… III. 车辆—随机振动 IV. U270.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 144224 号

内 容 摘 要

本书系统地介绍了车辆随机振动的基础理论和实际应用, 内容包括随机变量、随机过程的数字特征、频谱特征, 系统动态特性、系统输入输出统计关系, 统计线性化方法和摄动方法, 路面随机输入的时域和频域模型, 随机疲劳可靠性及随机振动试验, 并结合实例进行了分析。

本书可作为高等学校车辆工程专业本科生教材, 也可作研究生和工程技术人员参考书。

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph@neupress.com Web: <http://www.neupress.com>

印 刷 者: 沈阳市第六印刷厂书画彩印中心

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm×228mm

印 张: 8.5

字 数: 162 千字

出版时间: 2007 年 9 月第 1 版

印刷时间: 2007 年 9 月第 1 次印刷

责任编辑: 牛连功

责任校对: 赵 娜

封面设计: 唐敏智

责任出版: 杨华宁

ISBN 978-7-81102-458-6

定 价: 20.00 元

前 言

本书由辽宁工业大学出版基金资助出版。

随着科学技术的发展,随机振动理论的应用越来越广泛。特别是随着现代汽车工业技术的发展,对汽车的性能要求越来越高,因此需要用随机振动理论来解决汽车的行驶动力学问题。车辆随机振动理论研究的是车辆在随机载荷作用下的动力响应、优化及控制问题,是研究车辆行驶平顺性、行驶安全性以及进行悬架系统设计的重要理论基础,研究内容包括车辆路面统计特性、车辆系统振动动态特性以及车辆结构部件的随机疲劳。

近年来,我国高等院校的一些车辆工程专业相继开设了车辆随机振动课程,但由于缺乏系统的、有针对性的教材,只能将力学学科的随机振动著作作为参考书,这样不易为学生所接受,为此我们编写了这本教材。

本书根据作者多年为研究生和高年级本科生讲授车辆随机振动的讲义整理而成,书中的部分内容反映了作者的研究工作。本书共分 11 章,其中第 1 章对工程振动进行了简单概述;第 2~5 章主要讲述了随机振动的基础理论——包括随机变量及随机过程的数字特征、相关特征和频率特征;第 6 章和第 7 章讲述了系统动态特性和系统输入输出统计关

系；第8章讲述了研究非线性随机振动的统计线性化方法和摄动方法（适合于研究生使用）；第9章重点介绍了路面频域和时域模型；第10章系统地讲述了车辆随机振动的具体应用——包括车辆建模，频域和时域分析方法；第11章讲述了随机疲劳和随机振动试验问题（这是为研究生增加的内容）。

本书的主要特点是密切结合车辆系统的具体应用。本书可作为高等学校车辆工程专业本科生教材，也可供研究生和工程技术人员参考。

本书第1~4章由何辉编写；第5~11章由张立军编写。全书由张立军统稿。

由于作者的学识和水平有限，书中的错误和不妥之处，欢迎读者指正。

编著者

2007年6月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 振动的描述	1
1.1.1 振动(vibration)	1
1.1.2 随机振动(random vibration)	2
1.2 振动系统的模型	3
1.3 振动分析中常见的信号及处理方法	3
1.3.1 信号分类	3
1.3.2 随机信号处理方法	4
1.4 振动研究问题	5
1.4.1 振动分析与设计(design and analysis)	5
1.4.2 参数识别(parameters identification)	5
1.4.3 环境识别(environment identification)	5
第 2 章 随机变量的分布及数字特征	6
2.1 随机变量及其分布	6
2.1.1 随机变量	6
2.1.2 随机变量的概率分布函数 $F(x)$	6
2.1.3 概率分布函数 $F(x)$ 的性质	8
2.2 随机变量概率密度函数	8
2.2.1 概率密度函数	8
2.2.2 概率密度函数 $p(x)$ 的性质	8
2.3 随机变量数字特征	10
2.3.1 根据概率密度计算数字特征	10
2.3.2 根据时间样本函数计算数字特征	11

2.4 正态分布及其数字特征	12
2.4.1 正态分布	12
2.4.2 正态分布的数字特征	12
第3章 随机过程及数字特征	14
3.1 随机过程的基本概念	14
3.2 随机过程的概率分布和概率密度	15
3.2.1 一维随机变量	15
3.2.2 二维随机变量	15
3.2.3 n 维随机变量	15
3.3 随机过程的数字特征	16
3.3.1 集合平均	16
3.3.2 时间平均	16
3.4 平稳随机过程和各态历经过程	17
3.4.1 平稳随机过程	17
3.4.2 各态历经随机过程	17
第4章 随机变量的相关分析	19
4.1 相关系数(协方差)	19
4.1.1 相关系数	19
4.1.2 相关系数的意义	20
4.2 自相关函数	21
4.2.1 自相关函数的性质	21
4.2.2 自相关函数的应用	22
4.3 互相关函数	23
4.3.1 互相关函数表达式	23
4.3.2 互相关函数的性质	23
第5章 随机振动的频率特征	24
5.1 傅氏级数及频谱分析	24
5.1.1 傅氏级数的实数形式	24

5.1.2 傅氏级数的复数形式	25
5.1.3 频谱分析	26
5.2 傅立叶变换及其性质	28
5.2.1 傅氏变换	28
5.2.2 傅立叶变换性质	29
5.3 δ 函数及其性质	31
5.3.1 δ 函数	31
5.3.2 用函数序列表示 δ 函数	31
5.3.3 δ 函数性质	31
5.4 常用函数的傅氏变换	31
5.5 功率谱密度函数(PSD)	32
5.5.1 自相关函数及其傅氏变换	32
5.5.2 功率谱密度函数性质	33
5.6 窄带与宽带随机过程	33
5.6.1 窄带过程与宽带过程	34
5.6.2 几种典型的随机过程	34
5.7 互功率谱密度与相干函数	36
5.7.1 互功率谱密度	36
5.7.2 相干函数	36
第 6 章 线性系统动态特性	37
6.1 随机振动的分类	37
6.2 频率响应函数	37
6.3 脉冲响应函数及其与频率响应函数关系	38
6.3.1 脉冲响应函数	38
6.3.2 单自由度有阻尼系统的脉冲响应函数	39
6.3.3 脉冲响应函数与频率响应函数的关系	40
6.4 系统在任意输入下的响应	40
第 7 章 系统输入、输出统计关系	41
7.1 单自由度系统	41

7.2 多自由度系统统计量及其关系	42
7.2.1 输入、输出及统计量	42
7.2.2 频率响应函数矩阵和脉冲响应函数矩阵	44
7.2.3 激励和响应的关系	44
7.3 多自由度系统频率响应矩阵求解	44
7.4 多自由度系统脉冲响应矩阵求解	48
7.5 多自由度系统的时域方法	48
第8章 车辆非线性随机振动	50
8.1 车辆非线性弹性、阻尼特性	50
8.1.1 弹性元件的非线性	50
8.1.2 阻尼元件的非线性	50
8.2 单自由度系统的统计线性化	52
8.3 多自由度系统的统计线性化	53
8.3 摄动法	55
8.5 多自由度非线性系统的时域方法	57
第9章 路面随机输入的时频模型	58
9.1 路面不平度的频域统计特性	58
9.1.1 路面不平度的功率谱密度	58
9.1.2 时间频率功率谱密度	59
9.1.3 路面对两轮的输入功率谱密度	60
9.1.4 路面对四轮输入的功率谱密度	61
9.1.5 四轮相关随机输入通用频域模型	62
9.2 路面不平度的时域模型	63
9.2.1 单轮输入建模	64
9.2.2 前后两轮输入的路面模型	64
9.2.3 左右轮相关的时域模型	65
9.2.4 右后轮的路面时域输入方程	65
9.2.5 四轮相关路面随机输入的状态方程	65
9.3 路面随机输入模拟实例与分析	66

第 10 章 车辆随机振动分析	69
10.1 车辆振动系统的简化	69
10.1.1 空间车辆模型	69
10.1.2 平面模型	70
10.1.3 车身与车轮两个自由度模型	70
10.1.4 单自由度车辆模型	71
10.2 车身与车轮双质量系统的振动	71
10.2.1 振动微分方程、振动偏频与主频	71
10.2.2 双质量系统的传递特性	72
10.2.3 系统振动响应均方根值	73
10.2.4 系统参数对振动响应的影响	74
10.3 双轴汽车振动及前后悬架固有频率的匹配	76
10.3.1 无阻尼自由振动运动方程	77
10.3.2 前后悬架固有频率匹配	78
10.4 汽车悬架系统参数的优化	80
10.4.1 线性参数频域优化	80
10.4.2 非线性参数时域优化	85
10.5 整车 8 自由度(DOF)振动时频分析	91
10.5.1 整车振动模型的建立	91
10.5.2 四轮相关路面输入模型	92
10.5.3 系统响应的求解方法	93
10.5.4 实例分析	93
10.6 非线性统计线性化	97
10.6.1 整车非线性模型	97
10.6.2 悬架非线性特性	98
10.6.3 整车振动微分方程	99
10.6.4 统计线性化分析实例及与时域方法比较	101
10.7 汽车主动、半主动悬架控制分析	102
10.7.1 主动、半主动悬架	102
10.7.2 主动悬架模型建立	102

10.7.3 控制方法	103
10.7.4 仿真结果分析	104
第 11 章 随机疲劳可靠性及随机振动试验	108
11.1 随机疲劳可靠性	108
11.1.1 可靠性与失效	108
11.1.2 一次寿命的可靠性分析	111
11.1.3 材料的随机疲劳破坏	115
11.2 随机振动试验	117
11.3 随机振动的室内实验	121
11.3.1 随机振动复现的目的与方法	121
11.3.2 复现的等价条件	122
参考文献	124

令 $\omega_0^2 = \frac{K}{m}$, $\zeta = \frac{C}{2\omega_0 m}$, 则式(1-1)可写成

$$\ddot{y}(t) + 2\zeta\omega_0\dot{y}(t) + \omega_0^2 y(t) = \frac{x(t)}{m} \quad (1-2)$$

特征方程为

$$\ddot{s}(t) + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2 s = 0 \quad (1-3)$$

特征根为

$$S_{1,2} = -\zeta\omega_0 \pm j\omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (1-4)$$

由于特征根为共轭复根, 因此解的形式为

$$y(t) = A e^{-\zeta\omega_0 t} \sin(\omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} t) \quad (1-5)$$

振动规律如图 1-2 所示, 是有阻尼衰减振动。

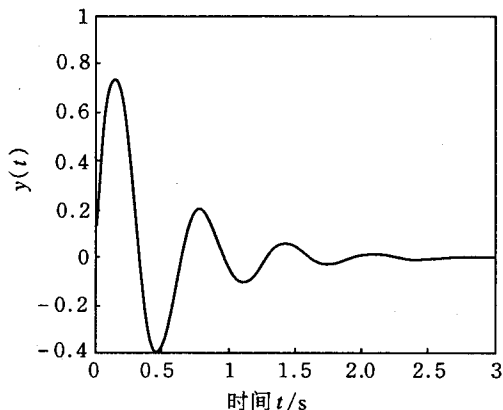


图 1-2 单自由度有阻尼系统响应

1.1.2 随机振动(random vibration)

1. 随机振动的概念

随机振动是振动的一种特殊形式, 振动规律虽然不能用时间的确定函数来描述, 却存在着一定的统计规律性, 可用概率统计方法来描述。车辆在(随机)不平路面上行驶时的振动, 建筑结构在风的激励下的振动, 都属于随机振动。随机振动的波形有概率的含义, 而不是复杂的含义, 所以不能以波形的复杂还是简单来区别它是随机振动还是非随机振动。

2. 随机振动的特点

(1) 随机振动没有固定的周期, 即不能用简单函数的线性组合来表述其运动规律。

(2) 对于确定的时间 t , 振动的三要素(振幅、频率、相位角)不可能事先

知道, 且它们本身也是随机的。

(3) 在相同条件下, 进行一系列的测试, 各次记录结果不可能一样。

1.2 振动系统的模型

将系统进行简化(力学、电学), 用数学关系式把输入和输出表示出来。振动模型的自由度(Degree of Freedom)可根据具体研究问题确定。例如图 1-3 所示的车身、车轮 2 自由度 1/4 车辆振动模型, 其系统振动微分方程为

$$\left. \begin{aligned} m_2 \ddot{z}_2 + C(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + K(z_2 - z_1) &= 0 \\ m_1 \ddot{z}_1 - C(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) - K(z_2 - z_1) + K_t(z_1 - q) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

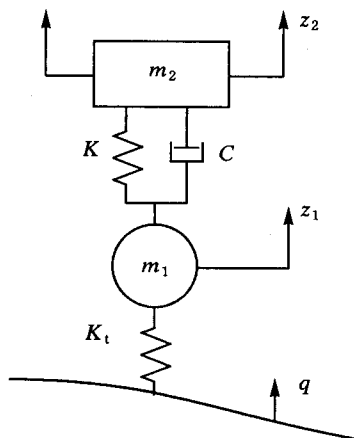


图 1-3 2 自由度 1/4 车辆振动模型

1.3 振动分析中常见的信号及处理方法

在车辆随机振动的研究中, 常常以确定性信号为基础分析随机振动特性, 因此了解确定性信号的类别是十分必要的。

1.3.1 信号分类

1. 周期信号(periodic signals)

- (1) 简谐波。波形如图 1-4(a)所示。
- (2) 三角波。波形如图 1-4(b)所示。
- (3) 方波。波形如图 1-4(c)所示。

2. 非周期信号(non-periodic signals)

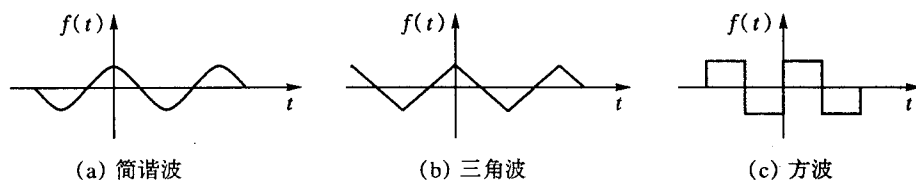


图 1-4 典型周期信号

(1) 脉冲信号。波形如图 1-5(a)所示。

(2) 阶跃信号。波形如图 1-5(b)所示。

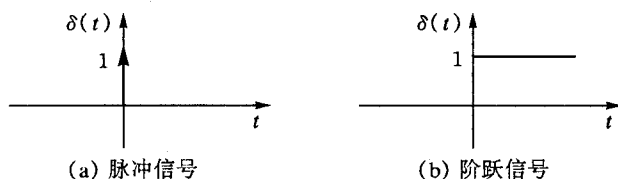


图 1-5 典型非周期信号

3. 随机信号 (random signal)

如图 1-6 所示。

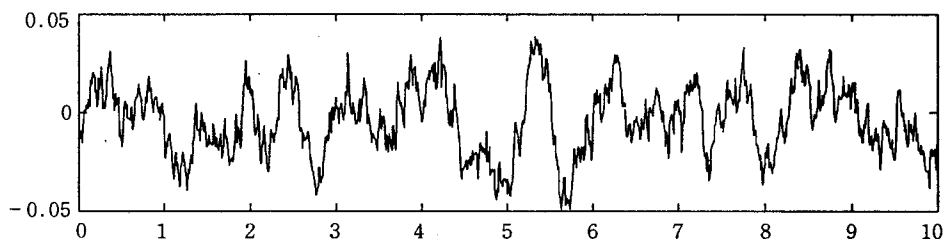


图 1-6 随机信号

1.3.2 随机信号处理方法 (signals processing)

由于随机振动规律不能用确定性函数描述, 因此需要用统计特性描述。根据研究问题需要, 可分为以下三种处理方法。

1. 幅值分析 (amplitude analysis)

根据概率密度或时间样本计算均值 μ_x 和方差 σ_x^2 等数字特征。

2. 频域分析 (frequency domain analysis)

通过应用傅立叶变换工具, 得到傅氏变换 $X(\omega)$ 及功率谱 $S_x(\omega)$, 分析振动的频率特征。

3. 相关分析 (correlation analysis)

用自相关函数 $R_x(\tau)$ 分析两个物理量之间的关系。

1.4 振动研究问题

1.4.1 振动分析与设计(design and analysis)

已知系统输入和系统特性, 确定输出特性。工程上还可以通过优化方法选择适合的结构参数 m , k , c , 使响应最佳。例如, 合理确定汽车悬架系统的刚度和阻尼可使汽车有良好的平顺性。振动系统框图如图 1-7 所示。

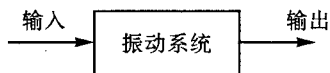


图 1-7 系统框图

1.4.2 参数识别(parameters identification)

已知系统输入和输出, 确定系统参数。对于复杂结构(如汽车车架), 如果将其看成刚体, 则不能反映结构的振动, 因此需要通过参数识别确定连续体结构参数, 进而分析结构振动的影响。

1.4.3 环境识别(environment identification)

已知系统参数和输出, 确定输入。例如车辆室内道路模拟振动试验, 首先在道路上测得车轴处振动加速度(相当于已知系统输出), 然后初步选定路面激励, 在道路模拟机上进行振动试验, 通过循环迭代使响应与道路实测值相等, 最后确定路面激励, 即获得系统输入。

第2章 随机变量的分布及数字特征

随机振动的研究内容是分析系统受到随机激励时系统响应的统计特性,为此,要掌握随机振动的统计特性——首先,需要用数学工具对其进行描述,即用随机过程描述随机振动。由于随机过程是随机变量的集合,因此本章首先学习随机变量及其数字特征。

2.1 随机变量及其分布

2.1.1 随机变量

自然界所发生的现象,归纳起来可分为两大类:确定性现象和随机现象。

1. 确定性现象

确定性现象是指在一定条件下必然发生和必然不发生的现象。例如:一质点做简谐运动时,其运动规律为 $x(t) = A_0 \sin \omega t_0$ 。在任意给定瞬时刻,都可以得到确定的物理量 x 。这类现象就称为确定性现象。

2. 随机现象

随机现象是指在一定条件下可能发生和也可能不发生的现象。它在事前是不可能确定的。在一次试验中,它具有随机性;但在大量的重复试验中,它又具有统计规律。例如抛硬币试验,它就有两个可能结果:“出现正面”和“出现反面”。由于出现正面和出现反面是随机的,故它是随机性现象。

3. 随机变量

为了便于研究这种随机现象,我们将一次试验每一个可能出现的结果用一个实数来代表,一般用字母 X 来表示。由于这个变量是随机的,故称为随机变量。随机变量是随机实验结果中取得的数值。

4. 随机变量类型

根据取值情况,随机变量分为离散型随机变量和连续型随机变量。

2.1.2 随机变量的概率分布函数 $F(x)$

概率分布函数 $F(x)$: 随机变量 X 取值小于、等于某个实数值 x 的概率分布。分布函数 $F(x)$ 不仅可以用来描述连续型随机变量的统计特性,也可用