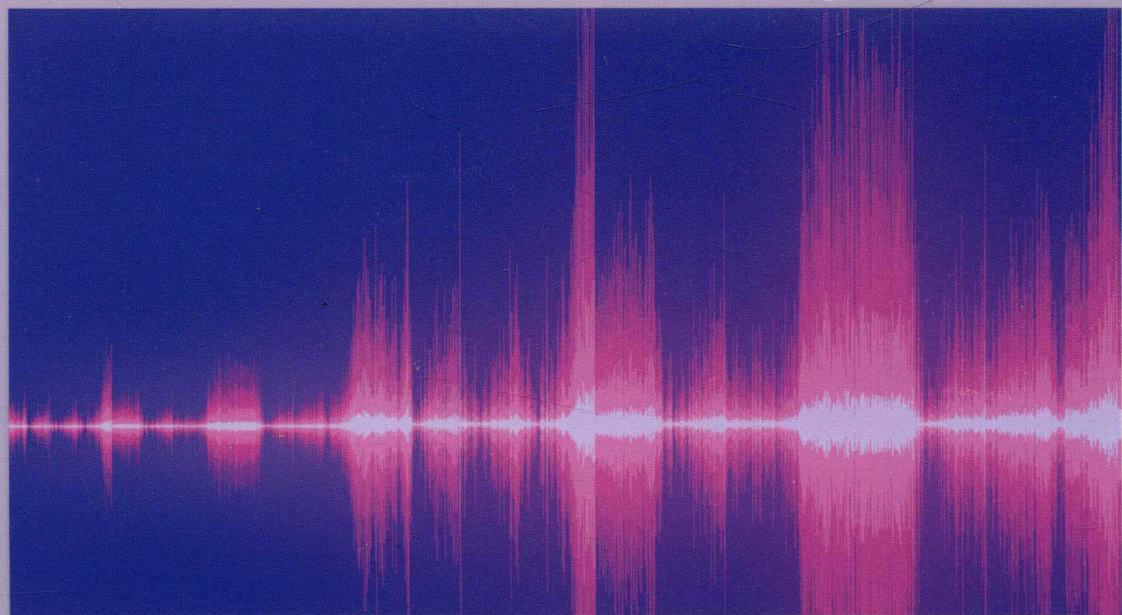


装备科技译著出版基金

 Springer

摩擦系统中的噪声与振动

*Noise and Vibration in
Friction Systems*



[白俄罗斯] Vladimir P. Sergienko Sergey N. Bukharov 著
王威远 王明明 姚建均 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

摩擦系统中的噪声与振动

Noise and Vibration in Friction Systems

[白俄罗斯] Vladimir P. Sergienko Sergey N. Bukharov 著

王威远 王明明 姚建均 译



国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2017-029号

图书在版编目(CIP)数据

摩擦系统中的噪声与振动 / (白俄) 弗拉基米尔·P. 瑟吉安科 (Vladimir P. Sergienko), (白俄) 谢尔盖·N. 布哈罗夫 (Sergey N. Bukharov) 著; 王威远, 王明明, 姚建均译. —北京: 国防工业出版社, 2018. 11
书名原文: Noise and Vibration in Friction Systems
ISBN 978-7-118-11718-9

I. ①摩… II. ①弗… ②谢… ③王… ④王… ⑤姚… III. ①摩擦-机械系统-减振降噪-研究 IV. ①TB53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 249460 号

Translation from the English language edition:

Noise and Vibration in Friction Systems

by Vladimir P. Sergienko and Sergey N. Bukharov

Copyright © Springer International Publishing Switzerland 2015

This Springer imprint is published by Springer Nature

The registered company is Springer International Publishing AG

All Rights Reserved

本书简体中文版由 Springer 授权国防工业出版社独家出版发行, 版权所有, 侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天津嘉恒印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 14 字数 247 千字

2018 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

前 言

本书分析了振动过程中的基本问题以及摩擦系统噪声与振动的理论基础。书中概括和总结了关于摩擦副振动声学领域的文献数据与研究成果,其内容涵盖了车辆制动系统与变速箱等实际工程结构。作者研究了降低并消除非平稳摩擦过程中噪声与振动现象的主要途径,其关注的焦点是材料科学在本领域中的发展,特别针对先进复合材料在改善摩擦副结构声振特性方面的应用进行了详细论述。

本书主要面向专门从事和解决机械工程、机械与运输工具维护、产品质量认证等领域中摩擦与声振问题的研究人员、技术人员、本科生及研究生。

Vladimir P. Sergienko

Sergey N. Bukharov

于戈梅利,白俄罗斯

缩写与符号

ADC	Analog-digital converter, 模 - 数转换
AFM	Atomic force microscopy, 原子力显微镜
AS	Approximate spectrum, 近似谱
BPV	Brake pressure variation, 制动压力变化
BTv	Brake torque variation, 制动转矩变化
DFT	Discrete fourier transform, 离散傅里叶变换
DTV	Disk thickness variation, (制动) 盘片厚度变化
EPSI	Electron pulse speckle interferometry, 电子脉冲散斑干涉术
FFT	Fast fourier transform, 快速傅里叶变换
FM	Friction material, 摩擦材料
FTV	Friction torque variation, 摩擦转矩变化
FS	Friction-induced self-oscillations, 摩擦自激振荡
LDV	Laser doppler vibrometer, 多普勒激光测振仪
LM	Lubricating material, 润滑材料
MDOB	Multidisc oil-cooled brake, 多盘式油冷制动器
SEM	Scanning electron microscopy, 扫描电子显微镜
VMC	Vibration-measuring converter, 振动测量转换器
A_c	Contour area, 轮廓面积
A_r	Actual contact spot, 实际接触点
D	Index of damping capacity, 阻尼能力指数
E_n	Dynamic elasticity modulus, 动弹性模量
F	Friction force, 摩擦力
I_h	Linear wear rate, 线性磨损率
L_p	Sound pressure level, 声压级
N	Normal to the friction surface force, 摩擦面法向力

(续)

P	Pressure, 压力
S	Area, 面积
T	Temperature, 温度
c	Viscosity, 黏度
f	Oscillation frequency (sound), 振荡频率(噪声)
f_p	Resonant frequency, 共振频率
g	Free fall acceleration, 自由落体加速度
h_n	n th mode attenuation factor, n 阶模态衰减因子
k	Stiffness, 刚度
m	Mass, 质量
p	Sonic pressure, 声压
t	Time, 时间
v	Velocity of relative displacement, 相对位移速度
$x, \dot{x}, \ddot{x}$	Coordinate, velocity, and acceleration, 坐标、速度、加速度
ε	Linear deformation, 线性变形
η	Loss factor, 损耗因子
λ	Wavelength, complex eigenvalue, 波长、复特征值
μ	Friction coefficient, 摩擦系数
ρ	Density of medium, 介质密度
ω	Angular oscillation frequency, 振荡角频率

目 录

第1章 绪论	1
参考文献	3
第2章 振荡过程与振动	4
2.1 机械系统振动的基本概念	4
2.1.1 振动参数	5
2.1.2 振荡过程的分类	7
2.1.3 简谐振动	7
2.1.4 非确定性振动	8
2.1.5 随机振动	10
2.2 非线性振荡	12
2.2.1 非线性机械系统	12
2.2.2 自激振动与稳定性	18
2.3 振动测量设备	26
参考文献	28
第3章 声辐射、声波和声场	30
3.1 声辐射中的常用工程量	30
3.1.1 声场规律	32
3.1.2 分贝刻度的使用	33
3.1.3 噪声的频谱特征	34
3.1.4 频率修正尺度	35
3.1.5 噪声的时间特征	36
3.2 噪声测量方法与设备	37
3.2.1 声级计	37
3.2.2 声强计	39
3.2.3 声全息法	44
参考文献	46

第4章 噪声与振动信号的分析方法	47
4.1 频率分析方法	47
4.1.1 傅里叶级数展开	47
4.1.2 傅里叶积分变换	48
4.1.3 调制信号分析	51
4.1.4 随机信号的频谱分析	54
4.1.5 两个过程的互相关函数	57
4.1.6 倒谱分析	58
4.2 通过数字设备进行频率分析	60
参考文献	67
第5章 摩擦自激振荡	68
5.1 摩擦系统中的自激振荡	68
5.2 摩擦引起的自激振荡研究	70
5.3 摩擦力的静-动力学特性	75
5.3.1 摩擦动力学特性	76
5.3.2 摩擦的静态特性	82
5.4 金属-聚合物摩擦副的自振机理	89
5.4.1 黏附机理	89
5.4.2 摩擦微振子的同步	90
5.4.3 法向和切向微振荡的相互关系	93
5.4.4 基本自由振子的振荡分析	95
5.4.5 接触阻尼	97
5.5 宏观系统中摩擦自激振荡的计算	99
参考文献	105
第6章 非平稳摩擦过程中的噪声与振动	111
6.1 非平稳摩擦连接的主要分类	111
6.1.1 制动机构	112
6.1.2 摩擦离合器	115
6.2 制动系统中的噪声和振动	116
6.2.1 影响制动时噪声和振动的因素	116
6.2.2 摩擦接触声振效应的分类及物理学特点	117
6.3 制动器噪声及振动的实验研究方法	120

6.3.1	制动系统的行驶测试	120
6.3.2	开发测试	121
6.3.3	振动声学分析的实验设备	123
6.4	低频受迫振动	127
6.4.1	受迫振动机理	127
6.4.2	制动器受迫振动的研究方法	134
6.4.3	制动转矩及接触压力的变化	136
6.4.4	受迫振动仿真	139
6.4.5	降低制动器受迫振动的方法	142
6.5	低频制动噪声(颤鸣)	143
6.5.1	制动中低频颤鸣的实验研究	143
6.5.2	制动颤鸣噪声的理论研究	146
6.6	制动器高频声辐射现象(尖叫)	151
6.6.1	结构动力学分析方法	151
6.6.2	设计方法的有效性	157
	参考文献	160
第7章	降低非平稳摩擦过程中噪声与振动的材料科学方法	169
7.1	摩擦材料的分类及技术特性	170
7.2	具有改善声振特性的摩擦材料	174
7.3	基于摩擦静态动力学特性的摩擦材料成分优化	176
7.3.1	纤维填料的作用	177
7.3.2	基质和有机填料的作用	179
7.3.3	摩擦改性剂的作用	180
7.3.4	优化结果	181
7.4	摩擦材料的组成和动态力学特性优化	185
7.4.1	摩擦学测试	186
7.4.2	材料动态特性	186
7.4.3	摩擦接头噪声和振动测量程序	188
7.4.4	结构和组成对摩擦材料动态特性的影响	189
7.4.5	摩擦材料的摩擦学和振动声学测试结果	193
7.5	制动器受迫振动消除方法	197
7.5.1	最小化热变形	198

7.5.2 摩擦材料性能优化 199

参考文献..... 201

第 8 章 噪声和振动对人类生理方面的影响及其标准 205

8.1 噪声对人体的影响 205

8.2 振动对人体的影响 208

8.3 噪声与振动的标准化 209

参考文献..... 212

第 9 章 结论 213

第1章 绪 论

世界上致力于高科技产品设计与制造的一流企业与研究中心都在积极解决机械耗散系统中的声振问题,这些系统包括各种车辆、飞行器、复杂家用电器以及其他应用目标等^[1]。该领域研究之所以获得广泛关注,一定程度上是缘于生态方面的要求,机械系统噪声已经被欧盟经济委员会认定为一个重要的生态学参数^[2-4]。

由于车辆中存在非平稳摩擦副,因此,在交通运输领域,降低实体零件间因摩擦而产生的不良噪声与振动显得尤为重要。

非平稳摩擦副的主要特征包括时变的摩擦参数、载荷、速度、温度以及摩擦材料参数等。如果上述任意一个表征摩擦接触的参数为变量,则该摩擦过程可以认为是非平稳摩擦过程。制动器和摩擦离合器被认为是应用最为广泛的非平稳摩擦副结构,其运行过程往往伴随着显著的噪声与振动等级,而这些现象会降低机器结构的安全性、可靠性和适用性,并对产品的质量及竞争力造成严重影响。

制动器和摩擦离合器中摩擦单元的声振耦合行为一方面会造成机器使用者对噪声与振动环境的不适,同时,也会显著降低单个零件乃至机器整体的耐用性。不仅如此,上述问题通常难以预测^[5-7]。虽然与该课题相关的学术论文数量众多,但是在设计与试验方法方面如何能够满足现行规范与标准并提高上述产品的舒适性和竞争力仍然进展缓慢。

有趣的是,近些年来,开发摩擦材料与制动器系统的专业公司已经直接或间接地提高了50%的预算总额用于支撑噪声与振动领域的试验与理论研究^[8]。一般而言,振动与噪声问题在设计阶段末尾甚至定型后准备生产前才得以考量,这是因为在设计调试过程中试图降低噪声与振动通常需要额外的成本。因此,考虑到后期维修及相关费用,制造商正努力开发在设计阶段就具有良好声振特性的制动器系统。

对于汽车制动盘等单元而言,现有规程能够支持预选摩擦零件,表1.1中给出了制动器摩擦副选择的不同标准。这些标准已经被世界知名汽车制造厂商所采用,并符合国家及国际规则与法律文件,如SAE、ISO、DIN、EN、JASO、Euro

Spec 等,这些标准对于汽车质量的影响能够通过十分制方法进行评估^[8]。从表中可以看出,振动与噪声是汽车质量评估过程中的重要标准。若要降低制动器以及传动系统中的振动与噪声,主要方法是改变连接结构的形式,如提高摩擦副的几何精度或加入新的结构单元如阻尼器等。需要指出的是,科学文献中鲜有提及摩擦体的组成与结构对系统整体振动与噪声等级的影响。就当前而言,利用摩擦学和材料科学的最新成果,通过优化摩擦材料的组成结构探究降低摩擦连接中声振现象的可行途径具有非常重要的现实意义。

表 1.1 摩擦副选择标准

被估参数		准则	单位	评分
摩擦系数	磨合阶段	μ 与 μ_{av} 之间的绝对偏差	—	8
	平均值	μ_{av} 与 μ_n 之间的绝对偏差	%	7
	稳定平均值	μ_{av} 与 μ_{min} 或 μ_{max} 的差值	%	9
	热致衰减	μ 与 μ_{av} 之间的绝对偏差	%	6
	压力灵敏度	μ 与 μ_{av} 之间的绝对偏差	%	7
	温度灵敏度	μ 与 μ_{av} 之间的绝对偏差	%	8
	速度灵敏度	μ 与 μ_{av} 之间的绝对偏差	%	7
噪声	台架试验	噪声等级	dBA	8
	行驶试验	噪声等级	dBA	7
振动	振动(冷/热)	振动等级	db/1 m/s	8
	盘片厚度变化(DTV)所致振动	盘片厚度变化	μm	9
磨损	衬套	衬套磨损	mm/GJ	7
	盘片	盘片磨损	mm/GJ	8
衬套材料物理参数	可压缩性(冷)	衬套厚度变化	μm	7
	可压缩性(热)	衬套厚度变化	μm	5
	热传导率	热传导系数	W/(m·K)	4
	膨胀性	尺寸变化	μm	6
	剪切强度	最大外力值	N	6
衬套材料生物安全性	铅	含量	质量百分数	4
	镉	含量	质量百分数	2
	致癌纤维	含量	质量百分数	7
	其余	含量	质量百分数	7
磨损产物	盘面及衬套表面积聚性	主观评估	—	8

参考文献

1. N.K. Myshkin, M.I. Petrokovets, *Friction, Lubrication, and Wear. Physical Foundations and Technical Applications of Tribology* (Fizmatizdat, Moscow, 2007), p. 367
2. Regulations of EC UNO, Uniform Provisions Concerning the Approval of Motor Vehicles of Categories M, N and O with Regard to Their Braking, vol. 13 (09)
3. Regulations EC UNO, *Uniform Provisions Concerning the Approval of Motor Vehicles Having at Least Four Wheels with Regard to Their Noise Emission*, vol. 51 (02)
4. Tractors and Machines Agricultural Self-Propelled, General Safety Specification. State Standard GOST 12.2.019 (2006). Introduction 09.12.05, (Belarus Institute of Standardization and Certification, Minsk, 2005), p. 15
5. H. Abendroth, Worldwide Brake—Friction Material Testing Standards, Challenges, Trends. Proc. 7th Int. Symp. Yarofri, Friction products and materials, Yaroslavl, 9–11 Sept 2008, pp. 140–150
6. H. Abendroth, B. Wernitz, The integrated test concept: Dyno-vehicle, performance-noise, B. *SAE Paper*, 2000-01-2774, 2000
7. V. Vadari, M. Albright, D. Edgar, An introduction to brake noise engineering. *Sound and Vibration* [Electronic resource], (2006), <http://www.roushind.com>. Accessed: 15 Sept 2006
8. R. Mowka, Structured development process in stages of OE-projects involving with Western European car manufacturer. Proc. 5th Int. Symp. of Friction Products and Materials Yarofri, (Yaroslavl, 2003), pp. 228–232
9. Y. Pleskachevskii, V.P. Sergienko, Friction materials with polymeric matrix: promises in research, state of the art and market. *Sci. Innov.* **5**, 47–53 (2005)

第2章 振荡过程与振动

振荡代表了一类最为广泛的重复性运动,即周期运动。机械振荡(振动)广泛存在于各个工程领域、日常生活以及自然界中,事实上,振荡并不能存在于一个独立域中。在设计工程对象时,超出预期的振动被认为是不满足要求和不安全的。因此,了解振动的激励原因、行为状态以及预期过程对于尽量减轻或消除其影响就显得尤为重要。本章阐述了机械系统振动过程的基础知识,其中包含了具有摩擦行为的对象在内。本章的核心概念及重点内容是非线性过程的基本理论,该理论对于理解摩擦单元中所发生的物理现象不可或缺。

2.1 机械系统振动的基本概念

若一个过程中,某个(某些)特定物理量在由增到减继而由减到增之间进行交替转换,则该过程称为振荡过程。此过程通常具有时变特征^[1]。

振荡的一个重要特征是转换过程的重复性,但在某些情况下,物理量由增到减或由减到增的转换只会出现一次。这种现象可能会发生在诸如冲击过程中。

通常,振荡过程可能只由一部分物理量所表征,而该过程中的其他物理量并不发生振荡。因此,振荡现象是否显现取决于我们对该过程研究的侧重以及阐释试验与理论现象所采用的仪器设备和数学工具。

可能产生振荡过程的物理系统称为振荡系统。该系统形式可能是机械的、声学的、电气的、电磁的、机电的或其他形式(取决于发生在该系统中的物理现象)。

无论是声学、电气还是机械系统,只要具有显著的振荡特性均是振动理论的研究对象。本节主要针对声学及机械振动系统进行详细论述。

机械系统中的振荡过程,特别是弹性扰动通过结构与固体零部件(如金属、陶瓷、塑料等)进行传播的过程称为振动。振动的标准定义是:振动代表了一种运动,在该运动过程中某一点或机械系统的标量产生了振荡扰动^[1]。通常情况下,振荡与振动往往具有相同的含义。设备内部通过设计基元进行传播的振动也称为结构噪声。

除纵波(唯一可以在气体和液体中传播的波形)外,固体介质还能够传递横波、表面波、弯曲波以及其他受结构单元尺寸限制的波形。这些波形可以表征为本征速度及其他特征(如弯曲波速取决于板的固有频率及尺寸)。在传播过程中,波形能够进行相互转换从而将结构振动中的复杂特征信息通过时间与空间上的频率以及不稳定性(对外界因素的响应)加以呈现。

振动首先会在固体单元中产生,继而激励周围环境产生振荡,如空气或液体。然而,也会存在相反的情况,此时,流体在所接触的对象间引发强烈的振动。振动作为一类振荡过程能够用周期性的标准分为周期性、准周期性以及非周期性(摆动量)。当所有表征过程的振荡值以相同的顺序及时间间隔 T 重复出现时,就会观察到周期性振动。最小的 T 值则称为振荡(振动)周期。

数值 $f=1/T$ 表示以赫(每秒振荡数)为单位的振动频率。对于圆周运动的情况,采用角(圆)频率较为方便,其数值等于 $2\pi s$ 时间间隔内的循环数(振荡,整周运动)。角速度则是以每秒转过的角度进行衡量的。

振动过程往往与线性加速度现象同时发生,此时,总的影响可以描述为瞬时振动与线性加速度值的叠加。周期性振动可能是单一简谐运动,也可能是多重简谐运动的叠加。

准周期性振动包括了由一系列频率不可通约的简谐振荡相叠加所表征的振荡运动。准周期性振动也许具有一个最终的时间间隔,经过该间隔时刻,振荡值会重复出现。该间隔称为准周期^[2]。

2.1.1 振动参数

用随时间的变化来表征振荡过程的物理量称为振荡量,它们可以是真实量或虚拟量、标量或向量、确定量或随机量。

所研究的振荡量 x 在某一时刻 t 的值称为瞬时值,即

$$x = x(t)$$

在振动过程中,用以标示选定点位置的任意坐标值称为振动位移,记为 $s(t)$ 。

振荡量的平均模数可以定义为在给定时间间隔 T 内振荡量绝对值的算数平均值或积分平均值,即

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |x(t)| dt \quad (2.1)$$

对于 n 个离散振荡量值 x ,其平均模数为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i| \quad (2.1a)$$

振荡量的均方根可以定义为在给定时间间隔 T 内振荡量平方的算数平均值或平方积分均值的平方根,即

$$\tilde{x} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt} \quad (2.2)$$

对于 n 个离散振荡量值 x , 其均方根为

$$\tilde{x} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (2.2a)$$

在工程领域,经常采用位移对时间的一阶及二阶导数对振动进行估计,其中一阶导数称为振动速度,即

$$v = \frac{ds(t)}{dt} = \dot{s} \quad (2.3)$$

二阶导数称为振动加速度,即

$$a = \frac{d^2s(t)}{dt^2} = \ddot{s} \quad (2.4)$$

在实践中,研究人员常采用对数级以使结果的比较变得简单。以 dB 为单位的振动速度 L_v 的对数表达式为

$$L_v = 20 \lg \left(\frac{v}{v_0} \right) \quad (2.5)$$

式中: v 为振动速度的均方值估计, m/s ; v_0 为振动速度初始值(限值)。

振动加速度 L_a 也有类似的对数单位 dB 表示方法,其对应的给定阈值水平为 a_0 (单位为 m/s^2)

$$L_a = 20 \lg \left(\frac{a}{a_0} \right) \quad (2.6)$$

振动速度及加速度阈值水平对于每一具体情况也有所不同。噪声的可听阈值可设为零分贝(参见第3章),与之相比,振动分贝的经验值通常取振动速度等于 $5 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 以及振动加速度等于 $3 \times 10^{-4} \text{m/s}^2$ 。振动灵敏度阈值则可以达到 70dB。

需要指出的是,ISO 2631-1-1997 中要求采用振动加速度作为基础测量参数。即便是在振动速度更好测量的低频工况中,该标准也规定需要将振动速度转化为振动加速度。

振动(振荡)能量 N 可以通过作用力 F 与振动速度 v 的乘积得到,即

$$N = Fv \cos \varphi \quad (2.7)$$

式中: φ 为力的作用方向与振动速度之间的夹角。

2.1.2 振荡过程的分类

振荡过程可以通过振荡量随时间的变化确定,其瞬时值则能够通过以下方
式表达出来:

- (1) 数学关系;
- (2) 数表值;
- (3) 图片或曲线。

在给定时间间隔内,一系列振荡量瞬时值的组合构成了时间模态振型。正
如我们所了解的一样,空间模态振型是周期振动系统中的点集在某时刻的构型,
在该时刻各点相对平衡位置的偏移量不能全部为零。“空间”一词通常可以省
略。所有偏移量均方值与均值的比称为形状因子,即

$$K_{\varphi} = \frac{\tilde{x}}{\bar{x}} \quad (2.8)$$

要描述给定时刻的振荡过程也需要介绍相位的概念。相位采用角度或弧度
进行衡量。相位可以预先给定,例如,通过振荡量瞬时值及其时间导数的集合能
够明确定义振荡过程。

在相平面内将 x 与 dx/dt 之间的关系表示出来有助于对复杂振荡过程的理
解。因此,我们在横轴上列出函数 $x(t)$ 的值,相同时刻的一阶导数值 dx/dt 则在
纵轴上标出。

根据振荡过程的相角变化,相平面内图像点的有序运动构成了相轨迹。在
相轨迹上加入箭头可以明确地表示出相位状态变化的方向。相轨迹的特殊规律
能够使我们获得所研究的振荡过程在特征方面的重要结论。

振荡量在每个给定时间间隔内的极值包括最大值和最小值,它们之间的差
异构成了峰-峰值。极值的绝对值称为峰值 $x_p = |x_{\max}|$ 。峰值与均方差值的
比称为峰值系数,该系数用作衡量振动载荷作用于弹性系统所产生振动速度或
加速度大小的标准,即

$$K_a = \frac{x_p}{\tilde{x}} \quad (2.9)$$

需要指出的是,实际物理量随时间变化的函数多种多样但并不复杂。振荡
量特征随时间的明显变化可能是由于本身数值的变化,也可能是在给定时间间
隔内其导数的变化。我们将通过实例对某些最为典型的振荡过程加以讨论。

2.1.3 简谐振动

当周期性振动的瞬时值与线性时间函数的正弦或余弦成正比时称为简谐振