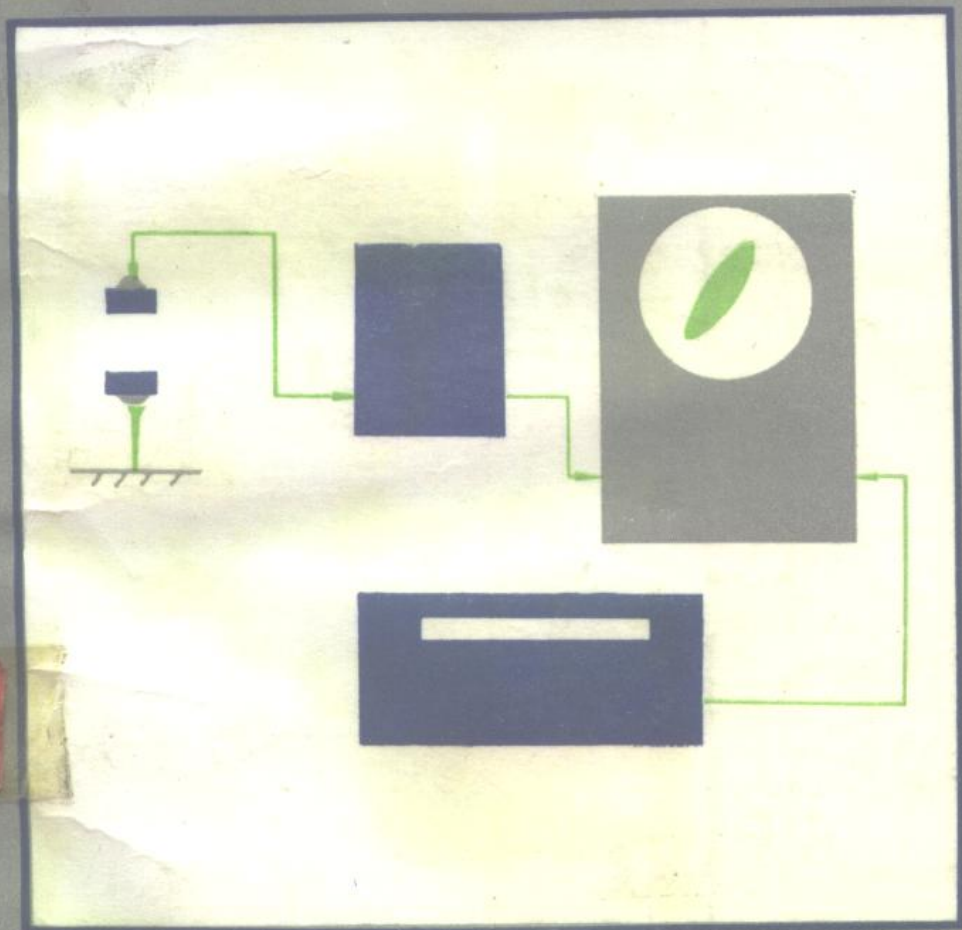


李德葆 张元润 编著

# 振动测量 与试验分析



机械工业出版社

# 振动测量与试验分析

李德葆 张元润 编著



机械工业出版社

(京)新登字054号

3

本书系统介绍机械及工程结构的振动测量技术及振动试验分析。第一章阐述振动测量的一般概念；二至四章介绍传感器、激振设备及常用的电子仪器；第五章介绍运动量及振动参量的一般测量方法；第六章介绍随机振动谱的分析；第七章为机械阻抗与模态分析；第八章为振动和冲击的隔离和控制；第九章介绍机械故障信号分析和诊断。全书由浅入深，注重基本概念和测量方法的介绍，并系统地引入现代试验和分析技术。

本书可作为力学、机械、汽车、动力、土木等专业的本科生教材，亦可作为机械、力学类专业的研究生及有关科研和工程技术人员的参考书。

## 振动测量与试验分析

李德葆 张元润 编著

责任编辑：高金生 责任校对：贾立萍  
封面设计：刘代 版式设计：冉晓华  
责任印制：王国光

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·印张12<sup>5</sup>/<sub>4</sub>·字数331千字  
1992年5月北京第1版·1992年5月北京第1次印刷  
印数0,001—3,250·定价：11.20元

ISBN 7-111-03181-4/TH·350

## 序

由于现代生产、运输、能源等行业所用机械的高速化和复杂化以及土木、水利等结构设施的高层、巨型化对强度和安全的严格要求，振动问题日益受到工程界的重视。作为振动科学的一门实用性分枝——振动测量和试验分析技术近20年来有了很大的发展。在我国，大学内许多机械类及其他工程类专业已相继开设了有关振动测量和试验分析方面的课程。但作为该课程较为系统、完整和实用的教材目前尚缺。本书作者李德葆、张元润同志在清华大学从事振动测量和试验分析方面的教学和研究工作二十余年，有相当丰富的教学和工程振动科研方面的经验。因此，该书在内容的安排、基础知识和现代技术内容的衔接、系统性、完整性和实用性及必要的数学推理和物理概念等方面都作了精心的考虑。全书由浅入深，并力求深入浅出，便于教学和自学参考。

振动试验方法和试验分析知识已经是广大科研和工程技术人员所必须具有的基本功。本书的出版无疑将为高等学校的有关专业提供一本好教材，为从事振动测量与试验分析工作的广大科研及工程技术人员提供一本很有价值的参考书。

张 维

1991年9月19日

## 前 言

我国科学技术的发展十分迅速，振动学科也随之有了很大的发展。在运输、能源、机械、结构的设计及建造乃至运行等方面，充分考虑和认识到振动问题的重要性，已为工程界所重视。因此，振动试验和分析已成为工程技术人员所必需具备的知识。

为满足高等院校有关专业的广大师生及从事振动测量与试验分析工作的科研及工程技术人员教学及工作的需要，我们在总结多年从事教学及科研成果的基础上，编写了《振动测量与试验分析》一书。

本书是在清华大学原教材《振动测试与应变电测基础》一书的基础上修订而成的。考虑到许多有关实验应力分析的教材中已有应变电测内容，因此原教材中的应变电测部分不再包括在本书之内，但新增加了振动应变模态分析内容。原振动测试部分则做了很多的补充和扩展，除增写了激振设备及常用电子仪器两章外，特别增加了试验分析和应用方面的系统内容，使本书更适应当前我国科技发展和生产建设的需要。

本书在写作过程中，参考了许多国内外作者的著作、讲义及资料，但书末所列参考文献并非全部。对于上述文献和资料的作者，无论列名与否我们都一一表示感谢。

最后我们要特别感谢中国科学院学部委员、清华大学张维教授在百忙之中为本书作“序”，这是张老对我们的鼓励和鞭策。

# 目 录

第一章 振动测试概论	1
§ 1-1 振动测试的一般意义	1
§ 1-2 振动系统的力学模型和振动参数	2
一、单自由度系统	2
二、两自由度系统	5
§ 1-3 简谐振动的表示方法	7
一、简谐振动的矢量表示法	7
二、简谐振动的复数表示法	8
三、简谐振动时间波形的参量	8
四、位移、速度和加速度之间的相位关系	9
§ 1-4 周期振动的峰值、有效值和平均值	10
一、峰值	10
二、有效值	11
三、平均绝对值	12
四、峰值、有效值和平均值之间的关系	12
§ 1-5 周期振动的频谱表示法	13
§ 1-6 关于振动测量的若干术语	15
一、振动试验系统	15
二、拾振器	15
三、相对拾振和绝对拾振	15
四、拾振器的跟随条件	16
§ 1-7 振动测量仪器的主要性能指标	17
一、灵敏度	17
二、分辨率	18
三、线性度和线性度范围	18
四、频率范围	19
五、工作范围	19
§ 1-8 对数标尺与分贝(dB)表示法	20

一、对数标尺 .....	20
二、分贝 (dB) .....	22
<b>第二章 振动信号传感器 .....</b>	<b>26</b>
§ 2-1 惯性式传感器的力学原理 .....	26
§ 2-2 位移计型惯性式拾振器的构成特点 .....	29
一、构成位移计的条件 .....	29
二、相对阻尼系数 $\zeta$ 对拾振器性能的影响 .....	30
§ 2-3 动圈型磁电式速度拾振器 .....	31
§ 2-4 加速度计的构成特点 .....	34
一、构成加速度计的条件 .....	34
二、相对阻尼系数对加速度计性能的影响 .....	35
§ 2-5 压电式加速度计及其应用问题 .....	37
一、结构与工作原理 .....	37
二、灵敏度与频响特性 .....	39
三、横向灵敏度与方向特性 .....	41
四、压电式加速度计的质量影响与动态范围 .....	42
五、瞬态响应问题 .....	43
六、放大器的选择 .....	44
七、压电式加速度计使用中的其它注意事项 .....	47
§ 2-6 伺服式加速度传感器 .....	49
§ 2-7 关于周期信号测量中波形畸变的讨论 .....	54
一、产生畸变的原因 .....	54
二、限制位移计式 (包括加速度计) 传感器测量信号畸变的条件 .....	55
三、限制加速度计信号畸变的条件 .....	56
§ 2-8 振动传感器的标定 .....	58
一、比较标定法 .....	59
二、绝对标定法 .....	61
§ 2-9 电涡流传感器 .....	65
一、基本原理 .....	65
二、电涡流传感器的使用 .....	69
三、电涡流传感器的标定 .....	70
§ 2-10 其它常用传感器和测量方法 .....	71

一、振动幅尺 .....	71
二、闪光测频法 .....	72
三、力传感器 .....	72
四、阻抗头 .....	74
<b>第三章 激振设备及激振方法 .....</b>	<b>75</b>
§ 3-1 电动力式振动台 .....	75
一、电动力式振动台的原理 .....	75
二、电动力式振动台的监控系统 .....	76
三、电动力式振动台的工作特性 .....	78
§ 3-2 液压振动台 .....	82
§ 3-3 机械式振动台 .....	84
一、直接驱动式机械振动台 .....	84
二、离心式机械振动台 .....	85
三、冲击振动台 .....	87
§ 3-4 电动力式激振器及其应用 .....	89
一、电动力式激振器的结构原理 .....	89
二、电动力式激振器的安装方式 .....	91
§ 3-5 机械式激振器 .....	93
§ 3-6 其它激振方法 .....	94
一、磁动式激振器 .....	94
二、压电晶体片激振 .....	95
三、声波激振 .....	96
四、力锤及应用 .....	96
§ 3-7 振动控制系统 .....	97
一、正弦扫描振动控制系统-反馈压缩技术 .....	99
二、数字振动控制系统 .....	101
三、HP5427A数字振动控制系统简介 .....	111
<b>第四章 常用的电子设备 .....</b>	<b>114</b>
§ 4-1 交流电压表 .....	114
§ 4-2 数字式闪光测速仪 .....	119
§ 4-3 相位计 .....	122
§ 4-4 电荷放大器 .....	124
一、电荷放大器的原理 .....	124



二、电荷放大器的使用 .....	12 <sup>6</sup>
§ 4-5 频率分析仪 .....	128
一、并联滤波器频率分析仪 .....	129
二、外差式频率分析仪 .....	130
§ 4-6 光线示波器 .....	133
一、光线示波器的结构原理 .....	133
二、振动物子 .....	134
三、光线示波器的使用 .....	138
§ 4-7 磁带记录仪 .....	139
一、磁带记录仪的结构 .....	139
二、磁带记录仪的工作原理 .....	141
三、磁带记录仪的记录方式 .....	143
四、磁带记录仪的使用 .....	145
第五章 机械振动的运动量和动特性参数的 常用测量方法 .....	147
§ 5-1 概述 .....	147
§ 5-2 简谐振动频率的测量 .....	149
一、里沙茹图形法 .....	149
二、电子计数器测频法 .....	151
§ 5-3 两同频简谐振动相位差的测量 .....	153
一、示波器测示法 .....	153
二、相位计的应用 .....	158
§ 5-4 振动系统固有频率的测量 .....	160
一、固有频率和共振频率的概念 .....	160
二、速度共振的相位判别法 .....	164
三、若干其它测频方法 .....	166
§ 5-5 衰减系数及相对阻尼系数的测量 .....	171
一、自由振动衰减法 .....	172
二、半功率点法 .....	175
三、共振法 .....	177
§ 5-6 质量或刚度的测量 .....	179
§ 5-7 周期振动总振级的测量 .....	181
§ 5-8 周期振动的频谱分析 .....	183

一、模拟滤波器原理 .....	183
二、实时频率分析仪 .....	186
三、跟踪滤波器和扫频频谱分析仪 .....	187
<b>第六章 随机振动的基本概念和测量分析 .....</b>	<b>190</b>
§ 6-1 随机振动的统计特性 .....	193
一、数字特征 .....	193
二、概率分布函数和概率密度函数 .....	195
三、高斯分布和瑞莱分布 .....	196
§ 6-2 相关分析 .....	200
一、定义及其物理意义 .....	200
二、自相关函数 .....	201
三、互相关函数 .....	204
§ 6-3 傅氏变换 (FT) .....	206
一、傅氏级数、傅氏积分和傅氏变换 .....	206
二、若干典型函数的傅氏变换 .....	212
§ 6-4 功率谱密度分析 .....	217
一、功率谱与功率谱密度 .....	217
二、功率谱密度函数与自相关函数 .....	220
三、互功率谱密度函数 .....	223
§ 6-5 离散傅氏变换、快速傅氏变换和功率谱估计 .....	225
一、周期函数的离散傅氏分析 .....	225
二、非周期函数的离散傅氏变换 .....	230
三、离散傅氏变换的频混和泄漏问题 .....	231
四、快速傅氏变换 (FFT) .....	235
五、运用离散傅氏变换来进行功率谱密度估计 .....	237
§ 6-6 选带傅氏分析 (ZOOM-FFT) .....	240
§ 6-7 线性系统的输入与输出的关系 .....	243
一、系统动特性的时域和频域描述 .....	244
二、传递函数 .....	245
三、响应的均方值与频响函数及输入功率谱密度的关系 .....	246
<b>第七章 机械阻抗法及模态分析 .....</b>	<b>251</b>
§ 7-1 振动系统的机械阻抗和导纳的基本概念 .....	253
一、定义 .....	253

二、集中参数元件的阻抗 .....	256
三、机械阻抗网络图 .....	258
四、机械阻抗的并联和串联 .....	259
§ 7-2 单自由度系统的机械阻抗和导纳 .....	261
一、无阻尼系统 .....	261
二、有阻尼系统 .....	264
三、具有结构阻尼的情况 .....	268
四、机械阻抗的测量 .....	270
§ 7-3 单自由度约束系统导纳曲线及参数识别 .....	272
一、幅频曲线和相频曲线 .....	273
二、实频曲线和虚频曲线 .....	274
三、单自由度有阻尼的约束系统的导纳的矢端轨迹图 .....	277
§ 7-4 有阻尼的单自由度约束系统的五种类型的导纳曲线的比较 .....	282
§ 7-5 多自由度系统模态分析的理论根据 .....	286
§ 7-6 频域传递函数(频响函数, FRF) .....	292
一、传递函数和传递函数矩阵的定义 .....	292
二、传递函数的图像 .....	293
三、高频段模态及低频段模态对测量频段传递函数的影响 .....	297
四、传递函数的留数表示法 .....	299
五、复模态问题 .....	305
§ 7-7 模态试验与传递函数的估计 .....	306
一、关于试件的支承条件的考虑 .....	307
二、测点与测量方向的安排 .....	308
三、试验频段的选择 .....	308
四、激励方法的选择 .....	309
五、关于测试信号的记录和采样问题 .....	312
六、传递函数的估计 .....	313
§ 7-8 模态参数识别 .....	318
一、各模态分离识别法(实模态情况) .....	318
二、复模态传递函数的导纳圆拟合法 .....	324
三、模态振型的标准化 .....	326
四、多个模态同时识别法 .....	328
§ 7-9 应变模态分析及参数识别 .....	332

一、基本公式的推导 .....	332
二、应变传递函数矩阵及其测量方法 .....	337
三、模态参数识别 .....	338
<b>第八章 振动和冲击控制的基本概念和方法 .....</b>	<b>342</b>
§ 8-1 振源的隔离 (主动隔振) .....	342
一、传递率 $T$ .....	342
二、隔振元件的参数选择 .....	345
§ 8-2 被动隔振 (设备隔振) .....	347
§ 8-3 振动隔离的设计步骤 .....	349
§ 8-4 动力消振器 .....	349
一、动力消振器原理 .....	350
二、无阻尼动力消振器 .....	352
三、阻尼动力消振器 .....	354
四、动力消振器的使用 .....	354
§ 8-5 阻尼处理 .....	355
一、交界面阻尼法 .....	356
二、喷涂阻尼层法 .....	356
三、采用夹芯结构 .....	357
§ 8-6 冲击隔离 .....	361
一、冲击振动的基本概念 .....	361
二、冲击隔离 .....	365
三、阻尼对冲击隔离的影响 .....	368
<b>第九章 机械故障信号的测量分析 .....</b>	<b>370</b>
§ 9-1 故障信号测量中通常应考虑的问题 .....	370
一、关于测点、测量信号类型以及传感器的选择 .....	370
二、关于测量仪器的频率范围、动态范围以及测量参量的选取 .....	372
三、信号数据的图形表示 .....	373
§ 9-2 信号调制现象及边频分析 .....	375
一、调幅现象 .....	375
二、调频现象 .....	375
三、频率和差形成的边频 .....	378
§ 9-3 倒频谱分析 .....	379
一、关于倒频谱的各种定义 .....	379

二、倒谱变换的特点 .....	380
§ 9-4 旋转机械的故障信号分析 .....	383
一、旋转机械的故障特征 .....	383
二、故障信号的识别 .....	386
§ 9-5 齿轮箱故障信号分析 .....	389
一、齿轮箱振动信号的分解 .....	389
二、故障信号分析 .....	389
主要参考文献 .....	393

# 第一章 振动测试概论

## § 1-1 振动测试的一般意义

狭意地说，振动测试在于通过传感器、放大仪器以及显示或记录仪表，测量运动机械或工程结构在外界激励(包括环境激励)或运行工况中其重要部位的位移、速度、加速度等运动量，从而了解机械或结构的工作状态。广意地说，通过运动量的测量，我们希望了解机械或结构的动特性，如固有频率、固有振型、阻尼以及动刚度等特性参数，为机械或工程结构的动力设计服务。

因此，振动测试包括运动量的测量和动特性试验两个方面。后者常用所谓动特性参数来表达，因而动特性试验归结为动特性参数的试验识别。

无论是生产机械、运输机械或工程结构，均日益向高速、高效、高精度和大型化发展。在许多情况下，限制其振动效应或提高其抗振性能成为设计成功与否的关键。在这种情况下，振动测试和设计计算是相辅相成的两种手段。在设计过程中，往往要通过模型试验或对已有相近设备的试验来考验计算方法的可靠性或改进计算方法。某些参数，如阻抗则只能通过测试来提供。在新设备建成后，则要通过测试来鉴定其性能，必要时则可直接用试验的方法建立其动力响应模型，进行结构修改模拟分析，为结构修改提供依据。

在多数情况下，振动常常是伴随着正常运行而产生的一种消极的甚至是有利的现象，振动测试分析着眼于尽量降低或消除其影响。然而，在有些情况下，振动和冲击是可以利用的。典型的例子如振动传输、振动筛、机械锤、振动搅拌器等。在这种情况下，振动试验的目的在于如何产生我们所需要的振动和冲击效应。

运动机械在运行中必然会产生振动。即使是那些我们视为不运动的工程结构，在环境激励等外界激励的影响下，也会发生振动。振动信号可以反映机械的运行状态和结构的损伤。近年来，利用振动测试对运行机械的故障进行诊断和工程结构的损伤进行检测已为众多工程师和科研工作者所重视。运行监测和故障诊断已逐渐成为由振动理论、振动测试和信号分析相结合而生长出来的一门重要的学科。在这里，振动测量和试验分析仍然起着关键的作用。

如上所说，振动测量和振动试验分析在机械工程和工程结构部门有着广泛的应用。它综合了传感器、电子学、信号分析以及现代结构振动理论等多方面的学术成果，形成了自身的理论、方法、实践技术和学科体系。特别是60年代快速傅里叶变换(FFT)的应用及以后的电子技术和计算机技术的飞速发展，对振动测量和振动试验分析起了相当大的推动作用。从这个意义上说，振动测试和分析不仅是一门应用性学科，而且也应属于与当代新技术紧密相连的高技术学科范畴。

§ 1-2 振动系统的力学模型和振动参数

一个实际机械或工程结构，在研究其振动特性或振动状态时，总要把它作某种简化，抽象出其主要本质，形成一个理想化的力学模型。模型的特点又往往以若干重要参数来表达。

一、单自由度系统

一个无质量的弹簧支持着一个无弹性的质量，就形成了单自由度系统的力学模型，如图1-1所示。这一模型的参数便是质量  $m$  和刚度  $k$ 。该系统受到外界的一个初始干扰之后，便产生振动。在一个相当的短期内来研究它的振动状态时，可以认为它是一种无阻尼的自由振动。其质量块的运动方程为

$$m\ddot{x} + kx = 0 \tag{1-1}$$

解上述方程时，可令  $x = X_m \sin \Omega t$ ，代入原方程得

$$(k - m\Omega^2)X_m \sin \Omega t = 0$$

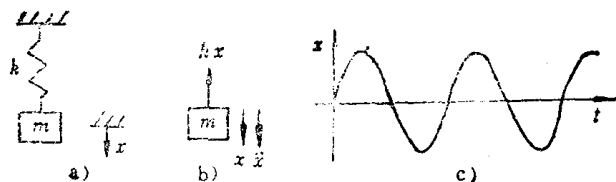


图1-1 无阻尼单自由度系统

上式  $X_m \neq 0$ 。则应要求

$$k - m\Omega^2 = 0 \quad (1-2)$$

由此解得

$$\Omega = \sqrt{k/m} \quad (1-3)$$

$\Omega$  称为单自由度系统的无阻尼自由振动的固有频率。 $\Omega$  是该振动系统的又一个重要参数。但它是由  $k$  和  $m$  所决定的，是一种导出参数。

无阻尼系统一旦开始振动，就将永远振动下去。事实上，一切实际振动系统在开始作自由振动之后，由于摩擦等原因，振动幅度必将随着时间的增长而逐渐衰减。为了反映这种衰减特性，引进了阻尼的概念。这样，系统的力学模型便如图1-2 a 所示，相应地引进了阻尼系数，定义为阻尼力和运动速度之比。于是，质量块的运动微分方程变为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$

或改写作

$$\begin{aligned} \ddot{x} + 2\left(\frac{c}{2m}\right)\dot{x} + \frac{k}{m}x &= 0 \\ \ddot{x} + 2n\dot{x} + \Omega^2x &= 0 \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中

$$n = \frac{c}{2m} \quad (1-5)$$

称为衰减系数，它由  $m$  及  $c$  所确定。

为解上述微分方程，可令

$$x = Xe^{st}$$



代入方程后可得

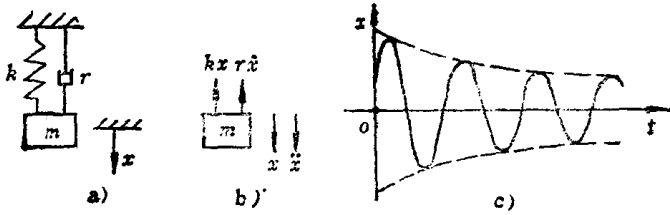


图1-2 有阻尼的单自由度系统

$$(s^2 + 2ns + \Omega^2)Xe^{st} = 0$$

该式有解的条件是

$$s^2 + 2ns + \Omega^2 = 0 \quad (1-6)$$

上式称为该振动系统的特征方程。该式的根  $s$  称为特征根。根据式 (1-6) 可得

$$\begin{aligned} s &= -n \pm \sqrt{n^2 - \Omega^2} \\ &= -n \pm \Omega \sqrt{\zeta^2 - 1} \end{aligned} \quad (1-7)$$

$$\text{式中} \quad \zeta = \frac{n}{\Omega} = \frac{c/2m}{\sqrt{k/m}} = \frac{c}{2\sqrt{mk}} = \frac{c}{c_0} \quad (1-8)$$

我们把  $c_0 = 2\sqrt{mk}$  称为临界阻尼系数，它的意义将在下面加以讨论。 $\zeta$  是  $c$  和  $c_0$  之比，因而称之为相对阻尼系数。

由式 (1-7) 可见，当  $m$  和  $k$  一定之后， $s$  值取决于  $\zeta$ ，即取决于  $c$ 。

当  $c < c_0$  时， $\zeta < 1$ ，式 (1-7) 变为

$$s_{1,2} = -n \pm j\Omega\sqrt{1 - \zeta^2}$$

由此可得微分方程的解为

$$x = e^{-nt} (X_1 e^{j\sqrt{1-\zeta^2}\Omega t} + X_2 e^{-j\sqrt{1-\zeta^2}\Omega t}) \quad (1-9)$$

利用欧拉 (Euler) 公式

$$e^{\pm j\sqrt{1-\zeta^2}\Omega t} = \cos\sqrt{1-\zeta^2}\Omega t \pm j \sin\sqrt{1-\zeta^2}\Omega t$$

最后，可将式 (1-9) 化为

$$x = Xe^{-nt} \sin(\sqrt{1-\zeta^2}\Omega t + \alpha) \quad (1-10)$$