

结构健康监测动力学

Structural Dynamics for Health Monitoring

〔日〕三田 彰 著
薛松涛 陈 镭 译

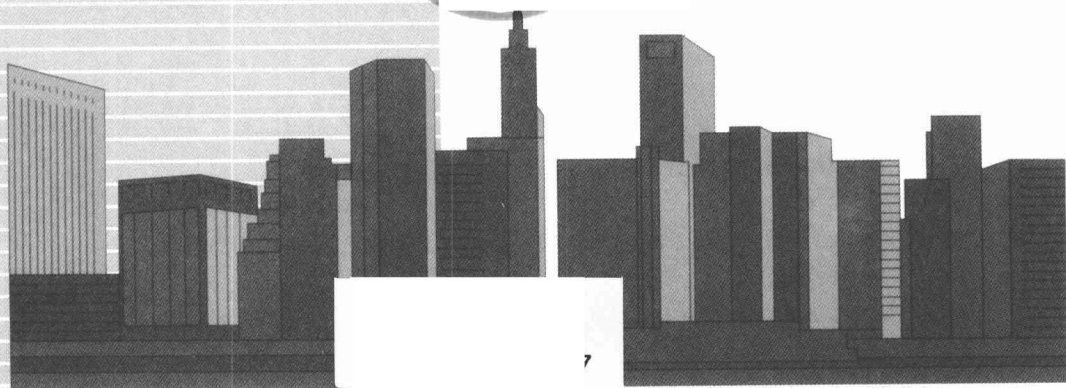


西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

结构健康监测动力学

Structural Dynamics for Health Monitoring

〔日〕三田 彰 著
薛公涛 陈 镭 译



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内容简介

结构健康监测是当前土木工程领域中的热点研究课题。本书从动力学系统上考察了结构的动力学总是以及结构的健康监测问题,深入浅出地讲解了当前尖端的,同时也是比较难的结构健康监测问题。全书分为7章;单自由度系统;动力学原理;多自由度系统;质量阻尼器的动力分析;健康监测和识别;多输入多输出系统;支持矢量机。本书可供具有振动理论基础的本科生或研究生使用,同时也可作为从事结构健康监测研究的科研人员和工程师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

结构健康监测动力学/(日)三田彰著;薛松涛,陈镭译.
—西安:西安交通大学出版社,2004.4
书名原文:Structural Dynamics for Health Monitoring
ISBN 7-5605-1823-0

I. 结… II. ①三…②薛…③陈… III. 建筑结构-监测-结构动力学 IV. TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 009845 号

陕版出图字:25-2003-131 号

书 名	结构健康监测动力学
著 者	[日]三田 彰
译 者	薛松涛 陈镭
出版发行	西安交通大学出版社
地 址	西安市兴庆南路 25 号(邮编:710049)
电 话	(029)82668357 82667874(发行部) (029)82668315 82669096(总编办)
印 刷	陕西宝石兰印务有限责任公司
字 数	110 千字
开 本	727mm×960mm 1/16
印 张	8.625
版 次	2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月第 1 次印刷
印 数	1—1030
书 号	ISBN 7-5605-1823-0/TU·23
定 价	35.00 元(平装本) 50.00 元(精装本)

版权所有 侵权必究

中文版序

结构健康监测已经成为当前土木工程领域中的热点研究课题。建筑结构和人一样,也有其寿命,即使用寿命。在其使用寿命期间,它也会“生病”。由于各种外力(即荷载)的作用,尤其在各种突发的自然灾害(如强台风、地震)作用时,结构会产生一定的损伤。随着时间的推移,损伤不断累积,再加上材料的不断老化(如钢筋锈蚀、混凝土炭化等),强度不断降低,最终使结构局部破坏,乃至整体破坏,使得结构不能再承受荷载的作用,此时,结构即完成了它的历史使命,失去了其使用价值,达到了它使用寿命的终点。

众所周知,人体必须经常进行体格检查,以及时发现体内潜在的疾病,并予以及时的治疗,从而延长人的寿命。同样,为了延长结构的使用寿命,我们也必须对它进行不断的监测,及时发现其损伤的部位及损伤程度,以便采用适当的措施予以修复、加固,防止其损伤部位及损伤程度的加剧、积累,这一过程即称为建筑结构健康监测。现在,人们已认识到,建筑结构的健康监测是延长建筑结构使用寿命关键的一步,具有重要的社会效益和经济效益。因此,目前有不少研究者正在从事这一方面的研究,发表了不少论文。从已发表的文章看,大体上可分为理论研究及健康监测的手段两方面。理论研究主要是从各种参数对损伤的灵敏度上进行分析,以找出最灵敏的一个或几个参数,在此基础上再进行深入研究,以确定损伤的部位和损伤的程度。而健康监测的手段则是在理论分析的基础上,研究监测仪器的最优布置问题,力图以最少的仪器测得最完整的信息,从而获得最大的经济效益。

虽然已发表了大量关于健康监测的文章,但全面论述结构健康监测的专著尚未见到。现在,日本学者三田彰博士的著作《结构健康监测

动力学》已面世,可以说填补了这一空白。该著作以极其简洁的形式介绍了结构健康监测的基本理论和方法,为正在从事或将从事这方面研究的研究人员和学生提供了很好的参考或引导。

我国对结构健康监测的研究处于起步阶段,现在同济大学薛松涛教授、陈镒教授及时将三田彰博士的专著译成了中文并由西安交通大学出版社出版,这将对我国这方面研究起到促进作用,我为此感到十分欣慰。特向从事这方面研究的科技工作者推荐本书。

以上是为序。

欧进萍*

2003年9月

* 欧进萍,哈尔滨工业大学教授,中国工程院院士——译者注。

译者的话

Translator's Preface

本书作者的经历决定了本书的性质。

作者的经历十分有趣,先是毕业于日本国立东北大学工学院建筑学科,考入日本国立京都大学防灾研究所获得硕士学位以后,留学美国,在美国的加州大学圣地亚哥分校土木系获得博士学位。回到日本以后,就职于国际著名的跨国建筑公司日本清水建设和泉研究室,后升为主任研究员。三年前,日本著名的私立庆应大学开设了系统工程系,作者被聘请到该系工作。

本书的一个特点是,书的整个内容实际上是从动力学系统上考察了结构的动力学问题以及结构的健康监测问题,书中的理论基础主要是结构振动理论,可以同时服务于机械以及别的研究领域。书中的例题则比较接近于结构动力学问题,可以作为与土木工程有关的学习者的参考书。

本书的另外一个特点是,由于作者在工程研究单位服务过,本书的内容深入浅出,尽管解决的是最尖端的同时也是比较难的结构健康监测问题,但是,非常易懂,适合于实际工程应用。

结构的健康监测是国际上的一个研究热点,但是非常可惜的是译者至今为止还没有见过一本好的教科书或者参考书,从这个角度上讲,本书在国际上是填补了一个空白。

在本书的翻译过程中,研究室的学生谢丽宇、郑海涛和钱宇音做了很多的工作,在此深表谢意。

本书的读者对象为具有了振动理论基础的大学本科生或研究生，
同时也可作为从事结构健康监测的工程师的参考书。

译者 薛松涛

陈 镭

2003 年 8 月 25 日于同济大学

前 言

很多新技术,如结构控制和结构健康监测,在土木和结构工程领域中取得了长足的进展。然而,土木和结构工程专业的本科生和研究生的现有课程没有为这些新技术提供充分的理论基础。因此,本书试图用简洁的形式为这些学生充实这些理论基础。本书用经典和现代的方式涵盖了基础和高等结构动力学的内容,然后将其延伸到质量阻尼器,它们是典型的结构控制设备。在随后的章节中介绍了系统识别和模式辨认技术。

书中的内容曾在日本庆应大学、东京都立大学和中国香港科技大学的研究生课程中教授过。本书的读者需要具备一定的物理学和数学的基本知识。

作者要特别感谢:加利福尼亚州立大学圣地亚哥分校的 J. Enrique Lucio 教授,我在 1987 年听他开设的研究生课程“结构动力学”是这本书的主干内容;我以前的导师、京都大学的 Takuji Kobori 教授(现在是荣誉教授)和 Yuzo Shinozaki 教授(现在是东京理科大学的教授),他们启示我从不同的数学角度解决结构工程中的动力学难题;庆应大学的研究生 Reiki Yoshimoto 先生,他在他的研究中帮助我准备了本书第 6 章的内容;另外,也是庆应大学研究生的 Hiromi Hagiwara 小姐,她做了第 7 章中的数值模拟的工作。

目 录

中文版序

译者的话

前 言

第 1 章 单自由度系统	1
1.1 自由振动	1
1.2 强迫振动	6
1.3 对移动支承的响应	11
1.4 阻尼的计算	17
1.5 状态空间表示法	19
第 2 章 动力学原理	23
2.1 广义坐标	23
2.2 哈密顿原理	25
2.3 拉格朗日方程	26
2.4 拉格朗日方程的线性化	30
第 3 章 多自由度系统	34
3.1 自由振动和特征值问题	34
3.2 无阻尼振动问题的解	39
3.3 有阻尼振动问题的解	44
第 4 章 质量阻尼器的动力分析	52
4.1 能量方程	52
4.2 优化处理	56

4.3	优化处理后质量阻尼器的特性·····	63
4.4	被动质量阻尼器的变异形式·····	65
4.5	质量阻尼器应用于多自由度系统·····	66
4.6	主动质量阻尼器·····	70
第 5 章	健康监测与识别 ·····	75
5.1	健康监测的概念·····	75
5.2	非参数识别·····	76
5.3	参数识别 ·····	82
第 6 章	多输入多输出模型 ·····	94
6.1	模型·····	94
6.2	基于 MIMO 识别方法的公式 ·····	95
6.3	解析验证 ·····	101
6.4	实验验证 ·····	106
6.5	应用于基础隔振建筑 ·····	109
第 7 章	支持矢量机 ·····	112
7.1	用模式识别进行诊断 ·····	112
7.2	固有频率对损伤的灵敏度 ·····	113
7.3	利用支持矢量机进行损伤诊断 ·····	114
7.4	基于 SVM 诊断的概括 ·····	124
参考文献 ·····		126

第 1 章

单自由度系统

1.1 自由振动

单自由度(single degree-of-freedom, 简称 SDOF) 系统是只能沿单一
路径运动的系统, 可以理想化成一个简单的线性弹簧-质量-阻尼器的系
统, 如图 1.1 所示。

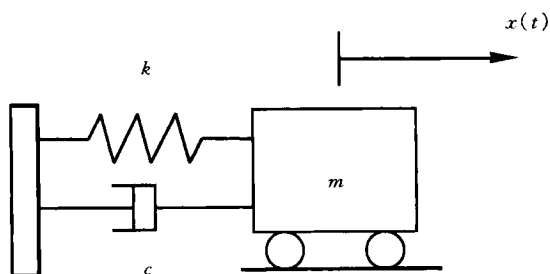


图 1.1 单自由度系统

考虑惯性力、阻尼力和弹簧力, 可以得到单自由度系统的运动方程为

$$m\ddot{x} = -c\dot{x} - kx \quad (1.1)$$

或者

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (1.2)$$

其中

m ——质量；

c ——阻尼器；

k ——线性弹簧。

公式中圆点表示对时间的导数。

这里介绍的是没有任何外力的自由振动的情况。从数学的角度考虑，该自由振动解被认为是一个补充解。将式(1.2)两边同除以质量 m ，运动方程变成

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = 0 \quad (1.3)$$

这里

$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ —— 振子的无阻尼固有频率；

$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$ —— 阻尼比。

上式中出现的量

$$c_c = 2\sqrt{mk} \quad (1.4)$$

称为临界阻尼。将 $Ce^{\lambda t}$ 形式的解代入式(1.3)，得到如下形式的一个特征方程

$$\lambda^2 + 2\zeta\omega_0\lambda + \omega_0^2 = 0 \quad (1.5)$$

解此方程可以得到如下的补充解

$$\begin{aligned} x(t) &= C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} && \text{若 } \zeta \neq 1 \\ x(t) &= (C_1 + C_2 t) e^{-\omega_0 t} && \text{若 } \zeta = 1 \end{aligned} \quad (1.6)$$

这里

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= -\zeta\omega_0 + \omega_0\sqrt{\zeta^2 - 1} \\ \lambda_2 &= -\zeta\omega_0 - \omega_0\sqrt{\zeta^2 - 1}\end{aligned}\quad (1.7)$$

当阻尼比小于 1 时,上面给出的解变为复数,这就意味着该系统会出现振荡。当阻尼比恰等于 1 时,则上面的值不再为复数,而是实数。系统在 $\zeta = 1$ 时不会出现振荡。因此,系统是否出现振荡的特性是由阻尼比控制的。而且,阻尼比还决定着能量从系统中释放的速度。

下面讨论系统在不同阻尼比时的响应。

(1) 低阻尼情况 $0 \leq \zeta < 1$

一个低阻尼系统的解是

$$\begin{aligned}x(t) &= [C_1 e^{\omega_d t} + C_2 e^{-\omega_d t}] e^{-\zeta\omega_0 t} \\ &= [C'_1 \cos(\omega_d t) + C'_2 \sin(\omega_d t)] e^{-\zeta\omega_0 t} \\ &= \rho \cos(\omega_d t - \theta) e^{-\zeta\omega_0 t}\end{aligned}\quad (1.8)$$

这里

$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$ —— 有阻尼固有频率;

$\rho = \sqrt{C_1'^2 + C_2'^2}$ —— 响应幅值;

$\theta = \arctan(C'_2/C'_1)$ —— 初始相位。

对于无阻尼系统 $\zeta = 0$ 的情况,其响应如图 1.2 所示。对于有阻尼系统 $0 < \zeta < 1$ 的情况,系统在阻尼比 $\zeta = 0.05$ 时的响应如图 1.3 所示。

(2) 临界阻尼情况 $\zeta = 1$

临界阻尼情况下的解由式(1.9)给出,如图 1.4 所示。

$$x(t) = (C_1 + C_2 t) e^{-\omega_0 t} \quad (1.9)$$

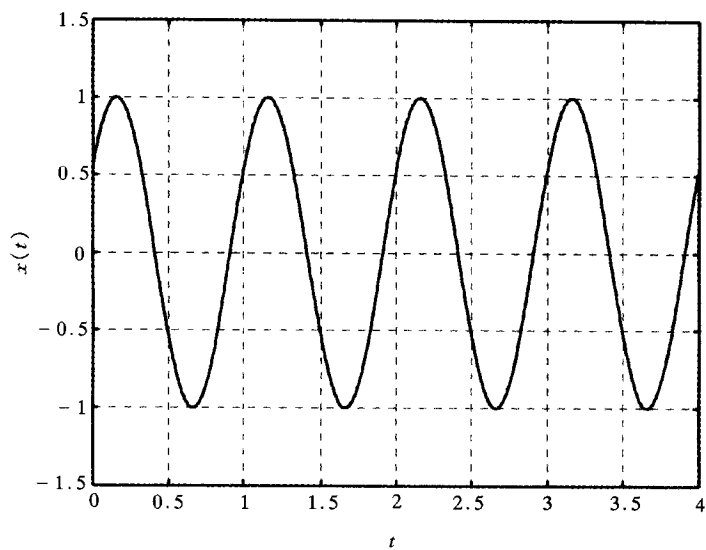
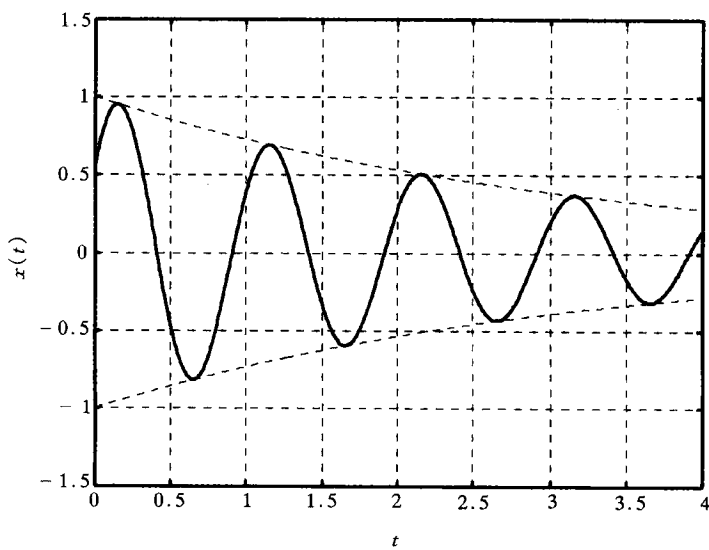


图 1.2 无阻尼 SDOF 系统的响应

图 1.3 有阻尼 SDOF 系统的响应($\zeta = 0.05$)

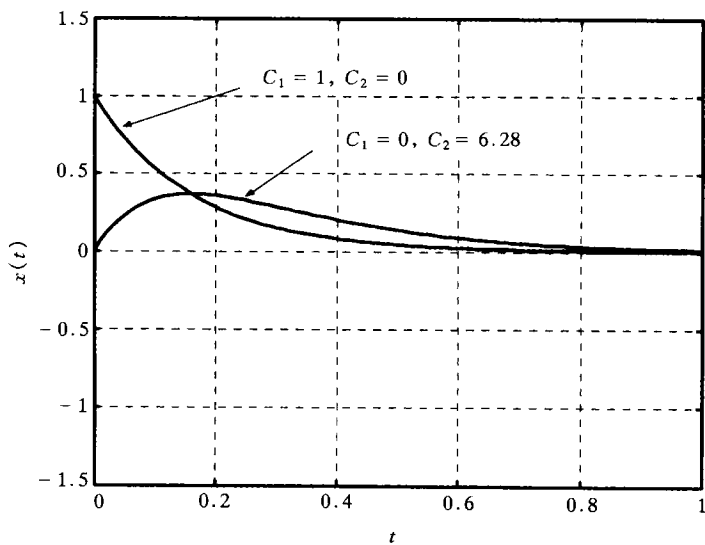


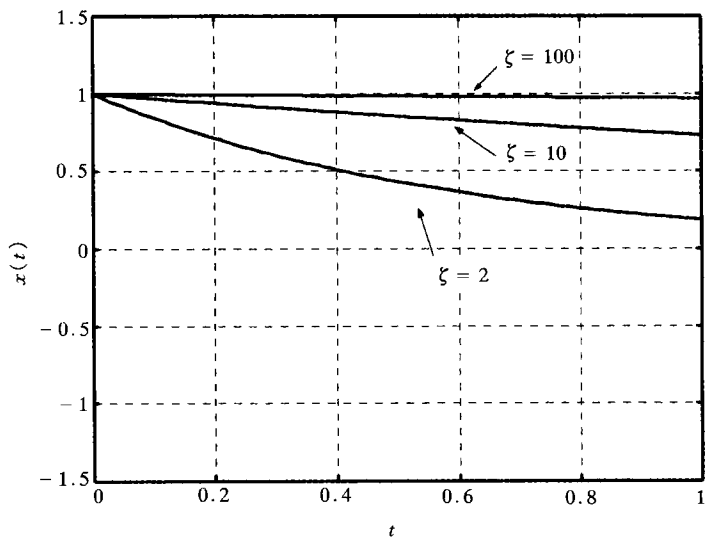
图 1.4 临界阻尼 SDOF 系统的响应

(3) 过阻尼情况 $\zeta > 1$

一个过阻尼系统的解为

$$x(t) = [C_1 \exp(\omega_0 t \sqrt{\zeta^2 - 1}) + C_2 \exp(-\omega_0 t \sqrt{\zeta^2 - 1})] e^{-\zeta \omega_0 t} \quad (1.10)$$

下图绘出了在系数相同: $C_1 = 1$, $C_2 = 0$, 以及三种不同的阻尼比: $\zeta = 2, 10, 100$ 情况下的系统响应。可以清楚地看到: 阻尼比越大, 响应的衰减越慢。

图 1.5 超阻尼 SDOF 系统的响应($\zeta = 2, 10, 100$)

1.2 强迫振动

假设图 1.1 所示的单自由度系统承受一个作用在质量块上的不变周期激励力 $F_0 e^{i\omega t}$ 的作用。强迫振动的运动方程变为

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m} e^{i\omega t} \quad (1.11)$$

这个方程的特解为

$$\begin{aligned} x_p(t) &= \frac{F_0/k}{1 - (\omega/\omega_0)^2 + 2i\zeta(\omega/\omega_0)} e^{i\omega t} \\ &= \frac{F_0/k}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_0)^2]^2 + 4\zeta^2(\omega/\omega_0)^2}} e^{i(\omega t - \phi)} \end{aligned} \quad (1.12)$$

这里

$$\phi = \arctan \left[\frac{2\zeta(\omega/\omega_0)}{1 - (\omega/\omega_0)^2} \right] \quad (1.13)$$

是相对激励力滞后的相位。式(1.12)表示的特解通常写成如下形式

$$x_p(t) = \frac{F_0}{k} D(\omega/\omega_0, \zeta) e^{i(\omega t - \phi)} \quad (1.14)$$

这里 D 定义为动力放大系数

$$D(\omega/\omega_0, \zeta) = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_0)^2]^2 + 4\zeta^2(\omega/\omega_0)^2}} \quad (1.15)$$

在不同阻尼比情况下的动力放大系数 D 如图 1.6 所示。需要注意的是：当 ζ 大于或等于 $1/\sqrt{2}$ 时，动力放大系数 D 都不超过 1。

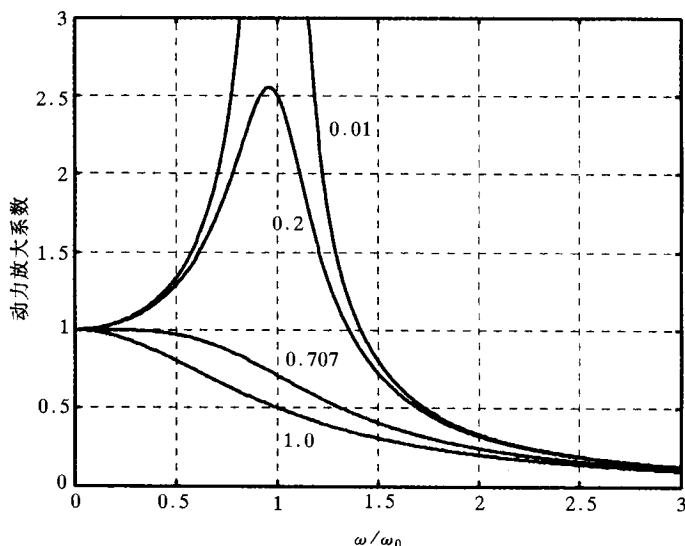


图 1.6 $\zeta = 0.01, 0.2, 0.707, 1.0$ 时的动力放大系数

要得到总解，不仅要考虑特解，还要考虑式(1.8)给出的补充解，补充解决定了与初始条件有关的响应，即瞬态响应。例如，一个无阻尼单自由度系统承受的外力及其初始条件如下