

地震工程学原理

中国建筑工业出版社

地 震 工 程 学 原 理

[美] N.M.纽马克 E.罗森布卢斯 著

叶耀先 蓝隅恩 钮泽蓁 等译

中国建筑工程出版社

本书共分三篇。第一篇共六章，讲述研究与掌握地震工程学所必需的结构动力学；第二篇共七章，讲述地震地面运动和结构对地震的反应，以及材料和结构部件在地震作用下的性状；第三篇共四章，讲述实际应用，主要是抗震设计与修复加固，还介绍了一些抗震实验技术。书末附有大量参考文献。本书的特点是：取材广泛，概念新颖，论述清晰，既有基础理论，又有实际应用。

本书可供抗震设计和研究人员，有关工程技术人员，研究生及大学教师学习参考。

N.M. NEWMARK E. ROSENBLUETH
FUNDAMENTALS OF EARTHQUAKE
ENGINEERING

Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J.

1971

* * *

地 震 工 程 学 原 理

叶耀先 蓝佩恩 钮泽葵 等译

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：29 字数：698 千字

1986年10月第一版 1986年10月第一次印刷

印数：1—3,100册 定价：8.15元

统一书号：15040·4989

译者序

地震工程学是本世纪六十年代以来在结构力学、工程地震学、随机过程理论及其它相邻学科的边缘逐渐发展起来的一门新的学科。关于这门学科，国内外已有许多文章和书籍作过论述和介绍，但系统而全面地阐述这门学科的书籍却不多见。本书是作者为弥补这方面缺陷所作的一次成功的尝试。

本书共分三篇。第一篇以六章篇幅讲述了研究与掌握地震工程学所必需的结构动力学内容；第二篇共七章，讲述了地震地面运动和结构对地震的反应，包括地震学和工程地震学方面的必要部分内容，线性和非线性结构系统地震反应的分析方法，以及材料和结构部件在地震作用下的性状；第三篇共四章，侧重讲述实际应用，主要包括抗震设计的基本概念和原则，各类结构的抗震设计，抗震修复与加固，以及抗震实验技术与观测等。书末附有大量的参考文献，供有兴趣的读者作进一步深入研究之用。

本书于1971年出版。其特点是取材广泛，概念新颖，论述清晰，既有基础理论，又有实际应用。书中提出的一些新鲜的概念和值得深入探讨的问题。这些概念和问题至今仍未丧失其现实意义。所以，本书不但可作为地震工程学方面研究生用的教科书，而且也是从事地震工程研究，抗震设计和抗震防灾工作人员的一本好的参考书。

本书已由苏联科学技术副博士波道尔斯基（Г.Ш.ПОДОЛЬСКИЙ）节译成俄文，并于1980年由莫斯科建筑出版社出版。

本书作者纽马克，系美国依利诺斯大学教授，曾多年担任该校土木系主任。他是美国和国际上地震工程和结构动力学方面的著名学者，现已去世；另一作者罗森布卢斯，是五十年代初期纽马克教授的研究生，墨西哥人，曾多年任墨西哥国立自治大学教授、工程研究所所长。他是墨西哥和国际上地震工程和结构动力学方面的著名学者，曾任国际地震工程协会主席，后在墨西哥政府任教育部副部长，现又返回国立自治大学任教。

本书各章的译者是：钮泽葵（第一章至第六章，附录一至附录三），彭克中（第七章），叶耀先（目录，序言，第八、九、十、十一及十四章），蓝调恩（第十二、十三及十六章），龚永松（第十五章），以及刘锡荟（第十七章）。全书由叶耀先校订，校订时参考了俄文节译本。英汉名词对照索引系钮泽葵摘编。

中国建筑工程出版社夏英超同志对本书翻译给予诸多鼓励，谨志谢忱。

译、校时，对原书中的一些不妥之处作了订正，并加注说明，以资读者鉴别。由于译、校者水平限制，译文中不妥和谬误之处，恳请读者不吝指正。

叶 耀 先

前 言

在这本地震工程学教科书中，我们理所当然地认为，工程设计的目的是优化，而且我们要处理随机变量。过去，正统的观点主张，设计的目标是防止破坏，它把变量理想化为确定性的。这种简单的方法在用于设计时，只有在不确定性较小，以及可以把破坏的可能性设想在几乎不切实际的遥远的将来的情况下，才是富有成效的。但是，在遇到地震作用时，这种正统的观点似乎天真到没有效果的境地。在处理地震问题时，我们必须坚持以较大的破坏将发生在最近将来的概率为依据。否则，为了满足我们的要求，人类所有财富可能都是不够的：大量的一般结构将成为碉堡。我们还必然会面临大量的不确定性，因为我们的任务是设计工程系统（关于其确切性质我们了解很少）以抗御未来地震及潮浪（tidal wave）（关于它们的特性，我们了解更少）。

以后几年，我们的不确定性无疑将会减少，甚至在地震运动特性及各种表现方面也是如此。但是，即使我们的认识有本质的变化，要避免处理随机变量也是不大可能的。

在某种意义上，地震工程学是工程学其它分支的卡通（即活动画面，cartoon）。地震对结构的效应，系统地揭示出设计和施工中所造成的错误，甚至最微小的错误。此外，还有扰动的明确的动力性质，土与结构相互作用的重要性，人对地震振动和海啸反应的考虑，以及所有这些方面的极为随机的特性。显然，地震工程学与其它工程学科的关系犹如精神病学与医学其它分支的关系：研究病态以了解正常人的精神组织。这种情况，使地震工程学大有发展前景而又引人入胜，使其教育价值超过它的直接目标。假如一位土木工程师要在短期内获得丰富的经验，就必须给他以接触地震工程学概念的机会，即使他今后不在地震区工作也没有关系。

鉴于上述理由，作者期望本书将在总的方面对土木工程师有所裨益，那怕他们并不直接对抗震设计感兴趣。

在本书中，有些问题写得比较粗略，有些问题则干脆删去未写。我们特意这样做，是因为现有资料不足，难以给出专门的规定。作者期望将来的研究将会阐明这些问题。在此期间，工程师就必须用其判断来考虑这些未知因素了。

本书设想主要作为一本参考书和研究生用的教本。假设读者具备了一般大学的力学、应用数学及结构工程的知识。考虑到这点，本书包括了以下材料：（1）阅读和应用本书的其它部分所需的全部动力学；（2）地震地面运动特性的描述（多数以概率方式），以及在受到这些扰动时材料性状的描述；（3）建议的设计概念和方法。附录则为专门问题。

熟悉高等动力学的读者可以跳过第一篇大部分章节不读。他或许会有兴趣浏览一下第一、二、五章末尾和第四章里的数值方法，以及第六章中的流体动力学的一些知识。假如读者对直接应用而不是对研究有兴趣，或者是研究专门问题，可以跳过第九、十章有关

率方面的大部分材料不读。只对城市建设有兴趣的读者，略去第六章和第十二章并无太大损失。

本书第一篇包括若干例题及习题，并给出了解答。为了熟练运用动力学及数值方法，不要放过练习。有些习题提供了特别有趣的资料和见解，带星号的习题工作量很大，性急的学生可以略去不做。

作者期望这本书将能成为从事抗震工作的人员的指南，将能提高其他工程师的水平并帮助通向研究之路。

作者对完成本书提出许多改进建议的同事们表示感谢。特别要感谢墨西哥国立自治大学的工程教授埃斯特瓦 (L. Esteva)、弗洛雷斯-维克多利亞 (A. Flores-Victoria)、拉斯康 (O. A. Rascón)、埃洛尔杜 (J. Elorduy)、桑多瓦尔 (J. Sandoval) 和门多扎 (E. Mendoza)，感谢他们建设性的批评和辛勤的工作。还要特别感谢依利诺斯大学工程教授芬维斯 (S. J. Fenves)、霍尔 (W. J. Hall) 和洪华生 (A. H. S. Ang) 以及麻省理工学院教授科内尔 (C. A. Cornell)。

目 录

译者序
前言

第1篇 动力学

第1章 简单线性系统	3
1.1 微分方程	3
1.2 自由振动	4
1.3 稳态振动	5
1.4 瞬态扰动	8
1.5 反应的数值计算	12
1.6 图解计算	15
1.7 模拟计算	17
习题	18
第2章 线性多自由度系统	20
2.1 运动方程	20
2.2 自由振动	24
2.3 稳态振动	28
2.4 瞬态扰动	31
2.5 对瞬态运动反应的数值计算	39
2.6 轴力效应	42
习题	45
第3章 带分布质量的线性系统	48
3.1 引言	48
3.2 无阻尼均匀剪切梁	49
3.3 简单波动方程	53
3.4 非均匀无阻尼剪切梁	56
3.5 有阻尼均匀剪切梁	57
3.6 挠曲梁	62
3.7 框架	64
3.8 三维波动方程	64
3.9 体波	65
3.10 球面体波	67

3.11 柱面体波	68
3.12 波的反射和折射	69
3.13 面波	70
3.14 群速度	71
3.15 土与基础相互作用	72
习题	78
第4章 稳态反应和固有振型的数值计算	80
4.1 引言	80
4.2 离散化	81
4.3 稳态振动的迭代法	88
4.4 求基本振型的迭代法	94
4.5 求高阶固有振型的迭代法	98
4.5.1 比例消去法	98
4.5.2 正交函数法	99
4.6 瑞利法	103
4.7 索斯韦尔的两种能量法	106
4.8 改变一个质量元或一个刚度元的影响	109
4.9 稳态振动的逐步法	109
4.10 计算固有振型的逐步法	114
习题	120
第5章 非线性系统	123
5.1 非线性的类型	123
5.2 简单系统反应的图解计算	125
5.3 数值方法	127
5.4 一维波的传播	128
习题	130
第6章 流体动力学	133
6.1 总论	133
6.2 对坝体的压力	134
6.2.1 引言	134
6.2.2 基本解	135
6.2.3 倾斜上游面	136
6.2.4 水库斜坡破坏	138
6.2.5 水体可压缩性的影响	138
6.2.6 有限水库	139
6.2.7 坝体柔性和底部转动的影响	141
6.2.8 自由表面运动的影响	141
6.2.9 水库内水体的固有振型	142
6.2.10 竖向地面运动	145
6.2.11 拱坝	146
6.3 水池内液体的振动	147
6.4 水中结构的振动	150

6.5 海啸	151
习题	157

第2篇 地震运动和结构反应

第7章 地震的特性	161
7.1 地震的成因	161
7.2 震源、震级与烈度	162
7.3 地震波的类型	164
7.4 强震地面运动的特性	168
7.5 地面运动参数与震级和震源距的关系	170
7.6 地面运动的三个平移分量	177
7.7 地震动的转动分量及其它空间导数	180
第8章 地震活动性	183
8.1 引言	183
8.2 当地(局部)地震活动性	184
8.3 区域地震活动性	192
8.4 小区划分	197
第9章 反应谱纵座标的概率分布	198
9.1 本章范围	198
9.2 随机过程	198
9.3 地震作为白噪声段的理想化	200
9.4 地震作为稳态高斯过程的理想化	204
9.5 地震作为瞬态高斯过程的理想化	210
9.6 第二类地震的谱纵座标的期望值	210
9.7 地震通过线性软地层的过滤	212
9.8 通过非线性材料的地震过滤	221
9.9 地震的计算机模拟	222
9.10 地震反应分布	224
第10章 线性多自由度系统的反应	225
10.1 引言	225
10.2 白噪声反应	228
10.3 对高斯过程和地震的反应	231
10.4 均匀剪切梁的应用	232
10.5 几个地面运动分量同时作用的反应	233
10.6 柔性管道和隧道	234
第11章 非线性系统的反应	236
11.1 引言	236
11.2 非线性破坏准则	236
11.3 具有对称非线性力-变形关系的单自由度系统	238
11.3.1 一般近似分析方法	238
11.3.2 近似上限	240

11.3.3	弹性系统	241
11.3.4	弹塑性系统	246
11.3.5	刚塑性系统	251
11.3.6	马辛型系统	253
11.3.7	刚度退化系统	255
11.3.8	一般斜撑结构	256
11.3.9	重力效应	257
11.3.10	关于对称单自由度系统反应的注记	259
11.4	具有非对称力-变位曲线的单自由度系统	259
11.5	多自由度结构	261
11.6	具有分布参数的刚塑性系统	263
第12章	水库的地震效应	267
12.1	引言	267
12.2	水坝的动水压力	267
12.3	水下结构	275
12.4	贮液池	276
第13章	材料和结构部件在地震荷载下的性状	277
13.1	引言	277
13.2	阻尼	277
13.3	加荷速率的影响	279
13.4	简单试件的高周疲劳	285
13.5	在少量次数荷载循环下简单试件的性状	286
13.6	结构部件的性状	289
13.6.1	受弯构件	289
13.6.2	节点	295
13.6.3	框架和连续梁	297
13.6.4	隔板	299
13.7	整体结构的性状	303
13.8	人对地震的反应	305
13.9	土的性状	306
13.9.1	干的非粘性土	306
13.9.2	部分饱和非粘性土	309
13.9.3	饱和非粘性土	310
13.9.4	饱和粘性土	314
13.9.5	部分饱和粘性土	314
13.9.6	岩石	314
13.9.7	土性质的野外确定	315

第3篇 设 计

第14章	抗震设计的基本概念	319
14.1	抗震设计的目标	319

14.1.1 引言	319
14.1.2 结构设计	322
14.1.3 荷载系数和安全系数	322
14.1.4 基于允许破坏概率的设计	324
14.1.5 抗震设计	324
14.2 带确定性参数的简单线性系统	328
14.3 带随机参数的简单线性系统	332
14.4 线性多自由度系统	335
14.5 非线性结构	339
第15章 建筑的抗震设计	342
15.1 设计谱	342
15.2 底部剪力系数	345
15.3 固有振型的计算	345
15.4 剪力分布	346
15.5 附属物	349
15.6 楼层扭矩	350
15.7 倾覆力矩	357
15.8 侧移倾角限制	362
15.9 一般结构的分析	366
15.10 重力效应	367
15.11 基础设计	368
15.12 关于结构方案的选择	369
15.13 结构综合设计法	376
第16章 抗震设计中的其它问题	377
16.1 倒摆	377
16.1.1 概述	377
16.1.2 简单倒摆	378
16.2 塔、烟囱和类似烟囱的结构	379
16.3 桥梁	382
16.4 挡土结构	384
16.5 隧道与管道	385
16.6 水池和水工结构	387
16.7 损坏结构的加固	389
16.8 海啸防护	394
16.9 城市规划与易地	395
第17章 试验与观测	397
17.1 导言	397
17.2 地震计	398
17.3 加速度仪	399
17.4 其它记录地面运动的仪器	401
17.5 结构特性的测量	401
17.6 动力模型试验	405

附录一 根据固有振型计算动力参数	407
附录二 修正的麦卡里烈度表	410
附录三 符号	412
参考文献	416
英汉名词对照	445

第**1**篇

动 力 学

第1章

简单线性系统

1.1 微分方程

我们把具有单自由度及不变参数的结构称为简单系统。简单系统的一个例子简略地示于图1.1中。

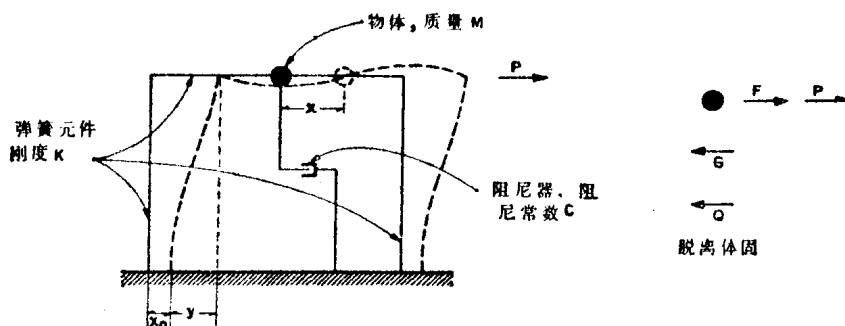


图 1.1 简单系统

令 \$M\$ 代表简单系统的质量，\$Q\$ 为弹簧元件中的力（例子所示为剪力），\$G\$ 为阻尼器中的力，\$x_0\$ 为地面位移，\$x\$ 为该质量的总位移，\$y = x - x_0\$ 为该质量相对于地面的位移，\$P\$ 为作用于该质量上的外力，而 \$F\$ 则为惯性力。我们取位移和作用在该质量上的力从左向右为正。根据达朗贝尔原理（D'Alembert's principle），可令 \$-F = G + Q + P\$，又因 \$F = -M\ddot{x}\$，故有：

$$M\ddot{x} - G - Q = P \quad (1.1)$$

现在研究阻尼力与变形速度成正比（设 \$G = -C\dot{y}\$，这里 \$C\$ 是一个常数）且弹簧力与变形成正比（设 \$Q = -Ky\$，这里 \$K\$ 也是一个常数）的情况。于是，方程 1.1 变为：

$$M\ddot{x} + C\dot{y} + Ky = P \quad (1.2)$$

在这些条件下，该系统服从一个线性微分方程。因此，我们说，我们是在研究一个简单线性系统。我们常常把这种类型的阻尼称为粘性阻尼或线性阻尼。而把量 \$C\$ 和 \$K\$ 分别称为阻尼常数和弹簧常数。

方程 1.2 可以写成下列更方便的形式：

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = P - M\ddot{x}_0 \quad (1.3)$$

将上式遍除以 \$M\$ 得：

$$\ddot{y} + 2\zeta\omega_1\dot{y} + \omega_1^2 y = \omega_1^2 y_0 - \ddot{x}_0 \quad (1.4)$$

式中 \$\zeta\omega_1 = C/2M\$，\$\omega_1^2 = K/M\$，\$y_0 = P/K\$。这就是说，\$y_0\$ 表示相对于底部的静位移；或者表示，若以无限慢的速度施加荷载 \$P\$ 时，该质点的相对位移；或者表示，若该系统为无阻尼，且无质量，仅由弹簧元件组成时，该质点的相对位移。\$\zeta\$ 的意义将在以后讨论。

根据初始条件和我们所选择的这些方程的右端, 就可以研究我们所感兴趣的简单线性系统的自由振动和强迫振动以及瞬态扰动等问题的各种情况。

1.2 自由振动

当结构底部保持不动, 而且不受外力时, 就说这个结构在作自由振动。此时, 方程1.1~1.4的右端等于零, 且有 $x = y$ 。可以证明, 在这些条件下, 方程1.4的通解为:

$$y(t) = R\{B_1 \exp[(-\xi\omega_1 + i\omega'_1)t] + B_2 \exp[(-\xi\omega_1 - i\omega'_1)t]\} \quad (1.5)$$

(den Hartog, 1956, 第37~40页)。式中, t 表示时间, R 表示“取实部”, B_1 和 B_2 是任意复常数, $i^2 = -1$, 并且

$$(\omega'_1)^2 = \frac{K}{M} - \left(\frac{C}{2M}\right)^2 \quad (1.6)$$

根据 $(\omega'_1)^2$ 是正数、零或负数(此时 ω'_1 相应地为实数、零或虚数), 并用 $(\omega'_1)^2 = -(\omega''_1)^2$, 方程1.5常可分别写成下列更常用的形式:

$$y(t) = [\exp(-\xi\omega_1 t)][a_1 \sin \omega'_1 t + a_2 \cos \omega'_1 t]$$

$$y(t) = a \exp(-\xi\omega_1 t)$$

或

$$y(t) = [\exp(-\xi\omega_1 t)][a_1 \sinh \omega''_1 t + a_2 \cosh \omega''_1 t]$$

在这些公式中, a 、 a_1 和 a_2 为具有长度单位的任意实常数。

在一般情况下, ω'_1 是实数, 并且可把公式1.5写成下列形式:

$$y(t) = a \exp[-\xi\omega_1(t-t_1)] \sin[\omega'_1(t-t_1)] \quad (1.7)$$

式中, a 为一个具有长度单位的任意实常数, 而 t_1 为 t 的某一任意值。对于保守系统($C = 0$), 公式1.5和1.7描述简单的谐和运动; 对于耗散系统($C > 0$), 它们描述有阻尼的谐和运动。

$C_{cr} = 2\sqrt{KM}$ 就是众所周知的临界阻尼。对于阻尼常数 C 等于或大于 C_{cr} 的情况, 当给系统某一位移或速度, 而且允许自由运动时, 系统并不振动, 而是慢慢地经过很长时间后回到其未变形状态。对于阻尼常数小于 C_{cr} 的情况, 系统通过方程1.7所描述的振荡运动趋向于其未变形状态。实际上, 一般我们所关心的是 C 小于 C_{cr} , 而且通常是小得很多的情况。

把 ξ 定义为比值 C/C_{cr} , 并用其作为度量阻尼的一种尺度是比较方便的。这个 ξ 就是众所周知的阻尼系数或阻尼比。据此, 可把公式1.6写成:

$$\omega'_1 = \omega_1 \sqrt{1 - \xi^2} \quad (1.8)$$

并称 ω_1 为无阻尼固有圆频率(就是具有与所考虑的系统相同的质量和刚度, 但没有阻尼的系统的固有圆频率), 而 ω'_1 则为有阻尼固有圆频率。 ω_1 和 ω'_1 一般相差很小。例如, 如果 ξ 小于20%, 则 ω'_1 与 ω_1 相差还不到2%。

如果阻尼常数 C 大于临界值 $2\sqrt{KM}$, 则阻尼比大于1。此时, ω'_1 成为虚数, 即该系统没有实数的有阻尼固有频率, 并且在自由振动时不振荡。在这种情况下, 自由振动的

解中的正弦函数应当代之以双曲线函数，而且，必须用 $\omega_1' = \sqrt{-(\omega_1')^2}$ 来代替 ω_1' 。

从固有圆频率可以算出固有频率或自振频率，即无阻尼时为 $\omega_1/2\pi$ ，有阻尼时为 $\omega_1'/2\pi$ 。从固有圆频率还可以算出无阻尼和有阻尼时的固有振动周期，其值分别为： $T_1 = 2\pi/\omega_1$ 和 $T_1' = 2\pi/\omega_1'$ 。固有周期的意义示于图1.2中，该图表示简单系统的典型自由振动，固有频率以赫芝为单位计量， ω_1 以每秒弧度来度量，而 T_1 则以秒为单位。

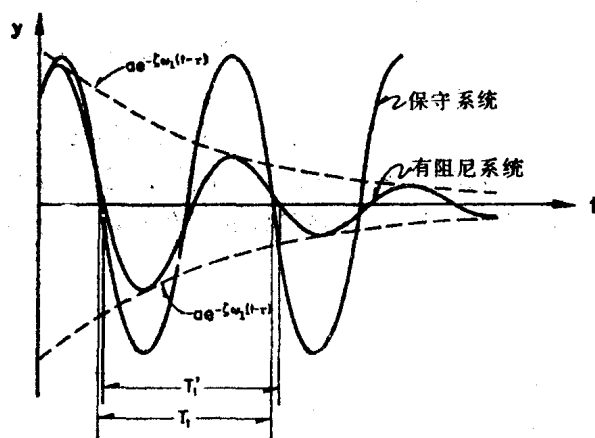


图 1.2 简单系统的自由振动

$\xi\omega_1 T_1' = 2\pi\xi(1-\xi^2)^{-1/2}$ 。有时也用公式(1.9)中的比值来度量阻尼；这样，当其对数衰减为 $\ln 3$ 时，就说振子具有阻尼3:1。

比值 $y(t)/y(t+T_1')$ 与相邻两次循环的振幅比是一样的。从公式(1.7)可推得表达式：

$$\frac{y(t)}{y(t+T_1')} = \exp(\xi\omega_1 T_1') \quad (1.9)$$

这个公式在 $\xi \leq 1$ 时有意义。这个比值的自然对数叫做对数衰减，它等于

1.3 稳态振动

我们感兴趣的是结构动力试验时强迫振动所引起的稳态运动。考虑地面保持不动，而外力按谐和规律变化的情形，即 $\ddot{x}_0 = 0$ ， $y_0 = a \sin \omega t$ 。此时，相应齐次方程的通解可由公式(1.7)确定，而特解则为：

$$\frac{y}{a} = B_d \sin(\omega t - \varphi) \quad (1.10)$$

式中

$$B_d = \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_1^2} \right)^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (1.11)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{2\xi\omega/\omega_1}{1 - \omega^2/\omega_1^2} \quad (1.12)$$

(引自Blake, 1961)。这里 B_d 是无量纲反应系数，其值等于动力和静力位移反应幅值之比， φ 是角相移。

如果没有外力，则类似的解也适用于地面按 $x_0 = a \sin \omega t$ 作谐和运动所引起的稳态振动。在这种情况下， $\ddot{x}_0 = -a\omega^2 \sin \omega t$ ，故有：

$$-\frac{M}{K} \ddot{x}_0 = a \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 \sin \omega t$$

可见，除了系数 $(\omega/\omega_1)^2$ 以外，公式(1.4)的右端与 $y_0 = a \sin \omega t$ 的情形完全一样。因此，在这种情况下有：