

9222/60

29798

土与基础的振动

中国建筑工程出版社

土与基础的振动

[美]F.E.小理查特 R.D.伍兹 J.R.小霍尔 编著

徐攸在 徐国彬 曾国熙 胡 定 译

钱 鸿 缙 校

中国建筑工程出版社

本书主要收集70年代以前美国有关动力基础振动的资料，共分十章，从复习振动理论开始，陆续讨论各种介质中波的传播，土在动荷载下的性能，在弹性介质中基础的振动理论，基础隔振，野外及试验室振动测试常用的仪表，以及动力基础的设计方法。本书的重点虽然放在动力基础振动上面，但其原理和许多结果仍适用于地震和爆炸所引起的振动问题。

本书可供土木建筑及机械工业方面的设计、科研、教学和勘察等有关人员参考。

F.E.Richart, Jr. R.D.Woods J.R.Hall, Jr.

**VIBRATIONS OF SOILS
AND FOUNDATIONS**

1970 by PRENTICE-HALL, INC.

Englewood Cliffs, New Jersey

* * *

土与基础的振动

徐攸在 徐国彬 曾国熙 胡定 译
钱鸿缙 校

*

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

*

开本：850×1168毫米 1/32 印张：13 1/4 字数：348 千数

1976年10月第一版 1976年10月第一次印刷

印数：1—14,380册 定价：1.15 元

统一书号：15040·3277

符 号

在选择本书所用的符号时，力图遵照国际土力学与基础工程学会在巴黎所制订和采用的“土力学推荐用符号表”（1961）以及美国土木工程师学会会刊，土力学和基础工程杂志，第88卷第3期（1962年6月）第3183号论文“土力学名词”。但是，有时也沿用其他学科惯用的符号，或为了避免混淆。每逢到用同一个符号代表两个涵义时（例如， e 代表孔隙比外，还代表自然对数的底），其区别可在书的文义中弄明白。

凡符号在书中第一次出现时都给了定义；在书中几次出现的那些符号则如下所列。当符号代表有因次的数量时，同时列出其最常用的因次和符号。如果没有注明因次，这符号表示一个纯数值。

A (呎)	位移振幅
A (呎 ²)	面积
A_x (呎)	水平振动的振幅
A_z (呎)	竖向振动的振幅
A_θ (弧度)	绕竖向对称轴旋转的角振幅
A_ψ (弧度)	绕水平轴旋转的角振幅
a_0	按式 (7-2) 确定的无因次频率
$\bar{a}_0$	按式 (2-72) 确定的单自由度体系的无因次频率因数
a_{om}	最大振幅时的无因次频率
B (磅/呎 ²)	体积模量或压缩模量
$\bar{B}$	按式 (2-73) 确定的单自由度体系的无因次质量因数
B_x	按式 (7-56) 确定的刚性圆形基础水平振动的质量比

B_z	按式(7-23)确定的弹性半空间上刚性圆形基础竖向振动的质量比
B_θ	按式(7-38)确定的刚性圆形基础绕竖向轴扭转振动的质量比
B_φ	按式(7-44)确定的刚性圆形基础围绕通过基础底面水平轴摇摆的质量比
b	按式(7-3)确定的无因次质量比
C_i	任意常数
c (呎)	矩形基础长边的一半(见图7-12)
c (磅-秒/吋)	粘滞性阻尼系数
c_c (磅-秒/吋)	按式(2-31)确定的临界阻尼
c_x (磅-秒/吋)	水平振动的阻尼常数
c_z (磅-秒/吋)	竖向振动的阻尼常数
c_ψ (磅-秒/弧度)	基础绕水平轴摇摆的阻尼常数
c' (磅/呎 ²)	有效内聚力
D	按式(2-32)确定的阻尼比
D_r	按式(6-37)确定的无粘性土的相对密度
D_x	按式(7-63)确定的刚性圆形基础水平振动的阻尼比
D_z	按式(7-62)确定的刚性圆形基础竖向振动的阻尼比
D_θ	按式(7-65)确定的刚性圆形基础扭转振动的阻尼比
D_ψ	按式(7-53)确定的刚性圆形基础绕水平轴摇摆的阻尼比
d (呎)	矩形基础宽度的一半(见图7-12)
E (磅/吋 ²)	线变形模量; 杨氏模量
e	孔隙比(孔隙体积与固体组成部分体积之比); 或自然对数之底
e (吋)	偏心距, 从转动质量的重心到旋转中心的径向

	距离
F	按式 (7-21) 确定的莱斯默位移函数
F_1, F_2	莱斯默位移函数 F 的分量
f (周/秒)	频率
f_b (周/秒)	拍频
f_d (周/秒)	有阻尼固有频率
$\bar{f}_m$ (周/秒)	恒力幅激振的共振频率
f_{mr} (周/秒)	旋转质量型激振的共振频率
f_n (周/秒)	无阻尼固有频率
f_1, f_2	赖斯纳位移函数的分量
G (磅/吋 ²)	剪切变形模量或剪切模量
G_s	比重, 材料的容重与水的容重之比
g (呎/秒 ²)	重力加速度 (32.17呎/秒 ²)
H (呎)	土层厚度
I (呎-磅-秒 ²)	质量极惯性矩
I_θ (呎-磅-秒 ²)	基础绕竖向轴转动的质量惯性矩
I_ψ (呎-磅-秒 ²)	基础绕水平轴转动的质量惯性矩
i	$\sqrt{-1}$
k_0	静止土压力系数 (土体内某一已知点上作用在竖向截面上的法向应力与作用在水平截面上的法向应力之比)
k (磅/吋)	弹簧常数
k_e (磅/吋)	等效弹簧常数
k_{xs} (磅/吋)	水平位移与水平作用力 Q_0 有关的弹簧常数, 对于刚性圆形基础按式 (7-60) 确定
k_z (磅/吋)	竖向位移 z 与作用力 Q_0 有关的弹簧常数; 按式 (7-26) 确定的弹性半空间上刚性圆形基础的弹簧常数
$k_{\theta s}$ (吋-磅/弧度)	使围绕竖轴的角转动与作用的静扭矩有关并按式 (7-37) 确定的弹簧常数

k_{ψ} (吋-磅/弧度)	转动的弹簧常数
k_{ψ_e} (吋-磅/弧度)	使围绕水平轴的角转动与作用的静力矩有关并按式 (7-50) 确定的弹簧常数
k' (磅/呎 ³)	地床反力模量
L (呎)	波长
L_R (呎)	瑞利波的波长
l (呎)	梁或杆的长度
M	振幅放大系数
M_r	按式 (7-25) 确定的振幅放大系数
M_s	按式 (7-58) 确定的振幅放大系数
M_{em}	按式 (7-39) 确定的振幅放大系数
$M_{\phi r m}$	按式 (7-41) 确定的振幅放大系数
M_{ψ}	按式 (7-45) 确定的振幅放大系数
$M_{\psi r}$	按式 (7-47) 确定的振幅放大系数
m (磅-秒 ² /呎)	质量 ($m = W/g$)
m_e (磅-秒 ² /呎)	旋转质量振动器中的总偏心质量
m_1 (磅-秒 ² /呎)	多质量振动器中每一个偏心重块的质量
N	波数 ($N = 2\pi/L$)
n	孔隙率, 总孔隙体积与土的总体积之比
P (磅)	力
P_0 (磅)	作用在弹性体上周期力的力幅
p (磅/呎 ²)	流体压力
Q (磅)	作用在弹性体系上随时间而变的外力
Q_0 (磅)	作用在弹性体系上外力的力幅
R (呎)	半径
r (呎)	离座标原点的径向距离
r_0 (呎)	圆形基础的半径
$\bar{r}$ (呎)	回转半径
S	饱和度
T (秒)	周期

T (呎-磅)	扭矩
T_b (秒)	拍周期
T_n (秒)	无阻尼固有周期
T_o (呎-磅)	对竖轴的扭矩
T_w (呎-磅)	对水平轴的扭矩
t (秒)	时间
U (z)	位移 w 的空间变化
u (呎)	x 方向上的位移
$\dot{u}$ (呎/秒)	x 方向上的速度
u (磅/呎 ²)	土的孔隙水压力
V (呎 ³)	总体积
V_s (呎 ³)	固体颗粒的总体积
V_v (呎 ³)	孔隙的总体积
v (呎/秒)	波的传播速度
v_a (呎/秒)	声波在空气中的速度
v_G (呎/秒)	纵波或杆中波的速度
v_P (呎/秒)	膨胀波或初波 (P 波) 的速度
v_R (呎/秒)	瑞利波 (R 波) 的速度
v_S (呎/秒)	剪切波 (S 波) 的速度
v_w (呎/秒)	声波在水中的速度
$\bar{v}$ (呎/秒)	表观速度
W (磅)	重量
W (z)	位移 w 的空间变化
w (呎)	z 方向上的位移
x (呎)	水平距离
x_c (呎)	跨越距离, 在折射法勘探中直接波和折射波同时到达某点时, 该点离振源的距离
x_s (呎)	按式(7-59)确定的刚性圆形基础因静力 Q_0 而引起的水平位移
$\mathbf{x}$ (呎)	旋转质量振动器中不平衡重块对旋转中心的水

	平力臂
z (呎)	竖向位移, 向下为正
z_0 (呎)	弹性半空间表面上圆形荷载面积中心的竖向位移
z_s (呎)	静力 Q_0 引起的竖向位移
$\dot{z}$ (呎/秒)	竖向速度
$\ddot{z}$ (呎/秒 ²)	竖向加速度
α (1/呎)	按式 (6-27) 确定的衰减系数
α	剪切波速度和压缩波速度有关的参数:

$$\alpha = \sqrt{\frac{G}{\lambda + 2G}} = \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2 - 2\nu}}$$

γ (磅/呎 ³)	土的容重
γ_d (磅/呎 ³)	土的干容重
γ_s (磅/呎 ³)	固体颗粒的容重
γ_w (磅/呎 ³)	水的容重 (62.4磅/呎 ³)
γ' (磅/呎 ³)	土的水下浮容重
γ_{ij}	剪应变
γ_{z0}	空心圆柱形土样扭转时所产生的平均最大剪应变幅
δ	按式 (2-39) 确定的对数递减率
δ_L (弧度)	按式 (6-30) 确定的粘弹性固体内的损耗角
ε_i	i 方向的线应变
$\bar{\varepsilon}$	弹性体的体积膨胀或体积应变 ($\bar{\varepsilon} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$)
$\bar{\varepsilon}$	流体的体积膨胀或体积应变
θ	角
Θ	绕对称轴的角转动
Θ_s	由静扭矩引起的刚性圆形基础绕竖轴的角转动
λ (和 G) (磅/吋 ²)	拉梅常数

$$\left(\lambda = \frac{2\nu G}{1-2\nu} \right)$$

μ (磅-秒/吋 ²)	粘滞剪切系数
ν	泊松比
π	3.14159...
ρ (磅-秒 ² /吋 ⁴)	质量密度 ($\rho = \gamma/g$)
σ_i (磅/吋 ²)	i 方向上的总法向应力
$\bar{\sigma}_0$ (磅/吋 ²)	平均有效法向应力或有效八面体法向应力
τ_{ij} (磅/吋 ²)	剪应力
τ_0 (磅/吋 ²)	按式 (6-22) 确定的八面体剪应力
Φ	位函数
ϕ' (度)	土的有效内摩擦角
φ	相位角
ψ	绕水平轴的角转动
ψ_s	由静力矩引起的基础绕水平轴的角转动
Ψ	位函数
ω (弧度/秒)	圆频率
ω_d (弧度/秒)	有阻尼固有圆频率
ω_n (弧度/秒)	无阻尼固有圆频率
ω_z (弧度/秒)	非耦合平移的固有频率
ω_ψ (弧度/秒)	非耦合转动的固有频率
∇^2	拉普拉斯算子 (对于笛卡尔坐标, $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$)

关于脚注的说明:

x, y, z	用于笛卡尔坐标
r, θ, z	用于柱面坐标
1, 2, 3	用于主应力或主应变方向
i, j, k	表示一般的坐标方向
exp	作为自然对数的底

目 录

符号

第一章 绪论	1
1-1 设计标准	1
1-2 作用荷载与控制设计标准的一些量之间的关系	2
1-3 土的性质的确定	2
1-4 设计方法	3
第二章 基本体系的振动	4
2-1 振动	5
2-2 谐和运动的矢量表示法	9
2-3 单自由度体系	10
2-4 单自由度体系的相平面分析	31
2-5 两个自由度体系	46
2-6 连续体系的固有频率	55
第三章 波在均质各向同性弹性介质中的传播	59
3-1 有界弹性介质中的波	59
3-2 无限均质各向同性弹性介质中的波	73
3-3 弹性半空间中的波	77
第四章 成层体系中的弹性波	91
4-1 波能在边界处的分配	91
4-2 地震法的基本原理	99
4-3 稳态振动法	110
第五章 波在饱和介质中的传播	120
5-1 引言	120
5-2 理想流体中的压缩波	122
5-3 波在饱和多孔性固体中的传播	130
5-4 地下水位对波在土中传播的影响	135
5-5 小结	137

第六章	动力荷载作用下土的性能	139
6-1	引言	139
6-2	互相接触的弹性球体的性能	140
6-3	在小应变幅振动荷载下土的性能	150
6-4	在大应变幅振动荷载下土的性能	170
第七章	弹性介质上基础的振动理论	191
7-1	引言	191
7-2	拉姆和布辛奈斯克的动力课题	192
7-3	基础在弹性半空间表面上的竖向振动	193
7-4	圆形基础在弹性半空间上的扭转振动	213
7-5	基础在弹性半空间上的摇摆振动	216
7-6	圆板在弹性半空间上的滑移振动	221
7-7	与刚性圆形基础在弹性半空间上的振动有关的几何阻尼	224
7-8	刚性圆形基础在弹性半空间上摇摆和滑动的耦合振动	226
7-9	支承在弹性层上的刚性圆形基础的振动	229
7-10	支承在桩或沉井上的刚性基础的振动	234
第八章	基础的隔振	243
8-1	利用位置隔振	243
8-2	利用障碍隔振	246
第九章	试验室和野外测量用的仪表	262
9-1	基本的电气元件	262
9-2	电测仪表	268
9-3	振动换能器及其校准	274
9-4	电缆和接插件	288
9-5	野外试验的振动测量	291
9-6	共振柱试验	300
第十章	动力基础的设计方法	308
10-1	引言	308
10-2	设计标准	308
10-3	动荷载	321
10-4	机器基础动力反应分析方法的简评	336
10-5	集总参数振动体系	344

10-6 基础竖向振动的分析和设计	353
10-7 基础摇摆振动的分析和设计	369
10-8 结束语	379
附录	381
英制公制换算关系	385
参考文献	386
中外文人名对照表	400
译后记	404

第一章 绪 论

有关承受动荷载的基础的设计问题，不论这些动荷载是来自它所支承的机器，还是来自其他外部的振源，都需要根据当地土质条件和周围环境来专门解决。这些基础必须首先满足静荷载的设计准则，然后满足动力条件。

抗动荷载的设计需要回答下列四个问题：（1）什么是所选定的设计功能的“破坏”？破坏标准的界限值是多少？（2）作用荷载与破坏标准中的一些重要的量之间有什么关系？（3）怎样确认和估算这些重要的量？（4）最后，在估算了这些量之后，应在设计中采用多大的安全系数（或在估算这些量的可靠程度时给予怎样的统计评价）？

编写本书的基本目的，是提供一些新的资料以便在设计过程中有助于回答上述四个问题。这些资料可作为诸如劳希(Rausch, 1943)、洛伦茨(Lorenz, 1960)、巴尔坎(Barkan, 1962)、梅杰(Major, 1962)以及哈里斯(Harris)和克里德(Crede) (1961)等有关著作*中已有的大量有价值的资料的补充。

1-1 设 计 标 准

设计过程中最重要的步骤就是确立设计标准。它规定了正待解决的问题，也是衡量计算结果的标尺，同时，它还可能是测量原型基础性能的标尺。对于承受动荷载的基础，它们的设计标准一般是用工作状态时的加速度、速度或位移的极限值来表示的。这些标准的极限值是根据设计功能的“破坏”来确定的。第10-2节中叙述了几个对不同要求的这些设计标准的界限值。值得注意的是，举例来说，如果设计的目的是为了“防止机器的严重

* 全部参考资料名称按作者姓名的字母顺序列在书后的参考文献中。

损坏”，那么，频率在1000周/分时0.001吋的振幅值，对于位移-频率标准来说，将是一个令人满意的数字；但是，如果设计的目的使“振动不为人所感觉”，则上述同样的频率和振幅将完全不合适了（见图10-1）。因此，在开始设计时，必须首先确定“基本规定”。

1-2 作用荷载与控制设计 标准的一些量之间的关系

作用荷载有时是很难定量计算的。由地震、风或波浪等自然力以及由爆炸、交通、建筑施工或邻近机器等人为力所产生的动荷载，通过结构体系或地基土而传给基础。在大多数情况下，必须在类似于拟定的设计条件下进行野外测量，并假定这些荷载将会在原型中遇到。因此，必需具备有关能量在土中传播和被拦截的资料（第三、四、八章）以及有关野外测定振动和振动力方法的一些知识（第九章）。某些简单机器产生的动力在第十章中讨论。

作用荷载与破坏标准之间的关系是通过分析方法建立起来的。因为动力机器基础破坏标准的振动极限值通常只有千分之几吋，破坏机理是在地基土的弹性变形范围以内。因而，按弹性支承体系来考虑所得到的解，常能提供作用荷载与基础的动态反应之间令人满意的关系。第七章讨论了一些主要是根据弹性理论得出的有关基础动态反应的解。这些弹性理论解要求确定弹性材料的泊松比和剪切模量；对动力机器基础设计来说，也意味着上述第（2）和第（3）个问题中所谓重要的量就是指土的剪切模量和泊松比。

1-3 土的性质的确定

获得精确的关于土性的代表性数据的过程或许是设计中最困

难的部分。土样必须从拟建的建筑场地中取得，并按预计能代表工作环境的条件进行试验。由于影响基础动态反应的土的性质，证实了它与土的静力性质所涉及的变形在数量上为不同的量级，主要在过去的十年里，已经发展了一套新的室内和野外试验方法。第六章包括了对于设计所需要的土动力性质的讨论以及关于试验条件对这些性质的影响的一些资料。有关试验设备的进一步讨论见第九章。

1-4 设计方法

对于某一个具体的设备，有好几种方法可以满足设计标准，其中几种方法将在第十章中讨论，但重点将放在集总参数法上。对于集总参数体系的解，已经有大量的文献可资参考，但总是有一个怎样确定集总质量、弹簧和阻尼器的代表性数值的问题。对于直接支承在土上的动力基础，用弹性半空间体上基础的振动理论求解给定的地基基础体系的阻尼常数和弹簧常数，可得到满意的结果。集总质量代表基础和它所支承的设备的重量。在第十章中附有一些例题，说明根据弹性半空间理论求出阻尼常数和弹簧常数的集总参数法的应用。

把土作为弹性半无限体，更有利于将地球物理学中的解应用到土中波的传播和基础的隔振等问题上来，也就是把理论研究扩展到由于几何的不连续性而产生土中波的反射和绕射等问题上来。

本书的内容主要是针对机器基础的分析和设计的问题，同时包括波的能量在地基土中的传播。

有关这些问题的资料是从地震学、弹性理论、土动力学、仪器学和机械设计等学科领域中搜集来的。每一门学科都有它专门的一套术语和符号，本书尽可能采用。应当承认，读者要熟悉自己专业以外学科领域中的术语是会有些困难的。为了便于参考，在本书前面列出了符号表。

第二章 基本体系的振动

在许多场合下，为了预示或分析一个振动体系的反应，可以满意地把它简化为一个集总参数的理想体系。最简单的体系是典型的具有粘滞阻尼的单自由度体系，它由质量、弹簧和阻尼器所组成。因为这个体系便于用数学式来表示，它的解可在所有振动学教科书和微分方程的数学书籍中找到。此外，虽然这样一个体系似乎是任何实际体系的粗略简化，但在很多情况下，它提供了一个十分满意的作为动力分析的模型，即使这个实际体系不可能物理地来比拟一个数学模型。例如，将如第七章中所指出的一个位在弹性介质上的基础，就可以用一个与单自由度体系有关的若干元件数学地来表示，这些物理常数可由基础和弹性介质的尺寸和性质来确定。一旦一个体系被简化成为一个模型时，下一步就是分析的工作，根据问题的类型可以用解析法或图解法。有时，模型中还应该包括非线性特性以便使前者与实际体系更加接近。虽然，这些情况时常导致复杂的数学式，但用图解法通常可以容易地获得解答。

对于有些体系用一个单自由度模型不能精确地表示它的动态反应。在这种情况下，就须采取两个或多自由度模型。这样，分析就变得相当复杂，以致必须使用数字或模拟计算机。对于不能用弹簧、质量和阻尼器等几个集总部分来表示的连续体系，手算通常只能用于确定这个体系的固有频率或稳态振动的反应特性。

以下各节将介绍解析法、图解法和数值计算法，它们成为基础、主要的机械部件和结构部件的振动设计和分析所必需的基本工具。