

JIANZHU
JIEGOU
ZHENDONG
JISUAN

**建筑结构
振动计算**

中国建筑工业出版社

建筑结构振动计算

哈 尔 滨 建 筑 工 程 学 院

鞍 山 焦 化 耐 火 材 料 设 计 研 究 院

鞍 山 黑 色 冶 金 矿 山 设 计 研 究 院

鞍 钢 设 计 院

武 汉 钢 铁 设 计 院

冶 金 工 业 部 建 筑 研 究 总 院

编

郭长城 主编

中 国 建 筑 工 业 出 版 社

本书较系统地阐述了结构动力学的基本理论、机器基础的动力计算，以及建筑结构的抗震计算方法等，并结合实际列举了较多的例题。可供一般土建工程技术人员和高等院校有关专业的师生参考。

建筑结构振动计算

哈尔滨建筑工程学院

鞍山焦化耐火材料设计研究院

鞍山黑色冶金矿山设计研究院

鞍山钢铁设计院

武汉钢铁设计院

冶金工业部建筑研究总院

郭长城 主编

编

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 1/32 印张：20 字数：449 千字

1982年12月第一版 1987年12月第二次印刷

印数：14,101—21,460册 定价：3.05元

统一书号：15040·4341

前 言

哈尔滨建筑工程学院曾为鞍山结构动力学学习班编写了一本函授教材。这本教材由于取材由浅入深，结合实际，受到土建工程技术人员欢迎。先后为冶金工业部、水利电力部、化学工业部所属的一些单位翻印使用。

为了适应广大在职土建技术人员掌握结构动力学基础理论的需要，哈尔滨建筑工程学院、鞍山焦化耐火材料设计研究院、鞍山黑色冶金矿山设计研究院、鞍钢设计院、武汉钢铁设计院、冶金工业部建筑研究总院等单位，对上述函授教材进行了较大的补充和整理，改写成本书。

全书共八章。前五章阐述结构动力学的基本理论。第六章除了介绍工程中几种最实用的计算方法外，还介绍了一种较新的“矩阵传递法”，并将它推广用于连续梁。这对于计算不等跨，且各跨刚度、质量也不等的连续梁甚为方便。第七章讲述机器基础的动力计算，并对块式基础的水平回转振动进行了研究，提出了作者自己的一些见解。第八章阐述建筑结构的抗震理论和实际计算方法，提出利用反应谱计算结构的地震扭转效应。全书基本上包括了一般土建技术人员所需具备的结构振动计算方面的基础知识。书中结合实际列举了较多的例题。为便于教学，还给出了必要的习题。

本书由郭长城主编。编写工作分工如下：第一至第五章，郭长城；第六章，刘明威；第七章，钟宏久、郭长城；第八章，刘季；梁志顺、唐金凯、祁伟民、王福纯、廖斌、

刘耀府参加了第七章例题的编写工作。李友兰、张俊经参加了第八章例题的编写工作。杜秀兰绘图。

在编写过程中，承动力机器基础规范组等有关单位大力支持和协助，并由化工部组织有关人员分章进行了初步审阅，最后由华南工学院建筑研究院陈府祥同志对全书进行了校订，特此表示谢意。

书中难免有疏误之处，恳请读者提出宝贵意见。

常用符号

p —— 自振圆频率 (不考虑阻尼)

p^* —— 自振圆频率 (考虑阻尼)

m —— 质量

J —— 质量惯性矩 (转动惯量)

I —— 截面惯性矩

ω —— 扰力圆频率

P —— 集中力

M —— 力矩

Q —— 剪力

λ —— 块式基础自频

T —— 周期

A —— 振幅

v —— 速度

a —— 加速度

U —— 弹性势能

V —— 动能

ε —— 相位差

g —— 重力加速度

i —— $\sqrt{-1}$

φ —— 衰减模量

$\bar{M}_i$ —— 振型 i 折算质量

$\bar{P}_i$ —— 振型 i 折算荷载

G —— 剪切模量

α —— 地震影响系数

$[K]$ ——刚度矩阵

$[\delta]$ ——柔度矩阵

$[M]$ ——质量矩阵

$\{X\}$ ——振型向量

目 录

前 言

常用符号

第一章 绪论	1
第一节 动力计算中体系的自由度	1
第二节 振动方程的建立	7
第二章 无阻尼的单自由度体系的振动	47
第一节 单自由度体系的自由振动（不考虑阻尼）	47
第二节 简谐荷载作用下单自由度体系的受迫振动（不考 虑阻尼）	60
第三章 阻尼理论·有阻尼的单自由度体系的振动	83
第一节 阻尼·粘滞阻尼理论·单自由度体系的自由振动 （按粘滞阻尼理论）	83
第二节 简谐荷载作用下单自由度体系的振动（按粘滞阻 尼理论）	96
第三节 滞变阻尼理论·单自由度体系的自由振动（按滞 变阻尼理论）·简谐荷载作用下单自由度体系 的振动（按滞变阻尼理论）	123
第四节 随时间任意改变的荷载作用下单自由度体系的振 动	136
第四章 有限自由度体系的振动	144
第一节 有限自由度体系的自由振动	144
第二节 简谐荷载作用下有限自由度体系的受迫振动	186
第三节 用振型分解法计算有限自由度体系的受迫振动	204
第四节 用矩阵表达有限自由度体系的振动计算	218

第五章 无限自由度体系的振动	258
第一节 无限自由度体系的自由振动	258
第二节 简谐荷载作用下无限自由度体系的受迫振动	279
第六章 实用计算方法	315
第一节 能量法(瑞利法)	315
第二节 邓克利(Dunkerley)公式	331
第三节 用迭代法求基频和基本振型	340
第四节 用迭代法求高频和高阶振型	352
第五节 矩阵传递法	362
第六节 受迫振动的近似计算	372
附录 K、k 数值表	381
第七章 机器基础的动力计算	392
第一节 带有曲柄连杆机构的机器的扰力计算	392
第二节 用振型分解法计算块式机器基础的水平回转振动	400
第三节 锻锤基础的动力计算	432
第四节 弹性半空间计算理论简介	448
第五节 带旋转部分的机器基础的振动计算	465
第八章 建筑结构的抗震计算	495
第一节 地震荷载与地震荷载理论概述	495
第二节 单自由度体系地震荷载的动力学分析	498
第三节 地震反应谱	501
第四节 多自由度体系地震荷载的动力学分析	512
第五节 建筑结构的地震扭转反应	520
第六节 建筑结构弹塑性地震反应	544
第七节 地震反应的直接动力分析法	552
第八节 抗震设计与抗震设计规范	567
第九节 建筑结构抗震设计规范中的地震荷载	569
第十节 单层工业厂房的抗震计算	574
第十一节 多层框架建筑的抗震计算	588
参考文献	627

第一章 绪 论

动荷载是随时间迅速改变的荷载，在它的作用下结构上各质点的加速度不容忽视，即惯性力不容忽视。如果荷载变化缓慢，其所产生的惯性力可以忽略不计，就属于静荷载。

在动荷载作用下，结构围绕其静力平衡位置发生振动，其内力和位移不仅是位置的函数，而且是时间的函数；亦即：同一位置的内力和位移在不同时刻是不同的。

我们必须会计算最大的动内力。在最大的动内力和静内力的共同作用下结构应满足强度和稳定的要求。我们还必须会计算最大的动位移、速度、加速度，并在设计中使之不超过允许值。

建筑结构振动计算的目的就在于掌握动内力和动位移的计算原理和计算方法，以便作出合理的动力设计。

在工业与民用建筑中常见的结构振动计算问题有：动力基础的振动，楼板的振动，结构的抗震、隔振等。

常见的荷载有：简谐荷载，例如机器运转时由于转子质量的偏心而产生的荷载；冲击荷载，例如锻锤基础所受的荷载；随时间任意改变的荷载，例如地震荷载等。

第一节 动力计算中体系的自由度

在一切可能变形中，确定体系所有质点位置所需独立参变数的数目叫体系的自由度。体系有几个自由度就有几个参

变数，从而在动力计算中就有几个独立的未知量。

体系的自由度可以这样来确定：如果加上 n 个刚性联系之后，各个质点均不能运动时，则体系的自由度等于 n 。因为去掉这 n 个联系之后（即在原来状态）必定可能发生 n 个独立位移。

下面举例说明自由度的确定。

【例 1-1】 质点的自由度

一个自由质点（图1-1， a ），在平面内有两个自由度，因为加上两个刚性支杆后便不动了（图1-1， b ），所以，它在计算中具有两个独立未知量 $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ ，如图1-1， c 。

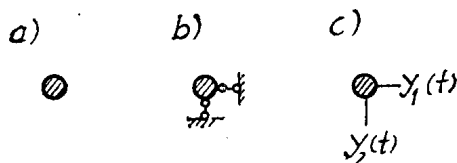


图 1-1

在空间内，一个自由质点有 3 个自由度。

质点上有弹性联系时自由度不变；质点上有刚性联系时自由度减少（图1-2）。



图 1-2

计算侧向振动时，通常不考虑杆件的轴向变形和轴向位移。图1-3， a ， b 中所示体系的自由度等于 1。图1-4 中所示体系的自由度等于 3。

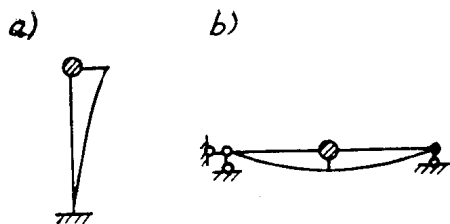


图 1-3

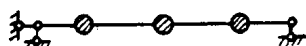


图 1-4

【例 1-2】 求图 1-5, a 体系和图 1-6, a 体系的自由度。

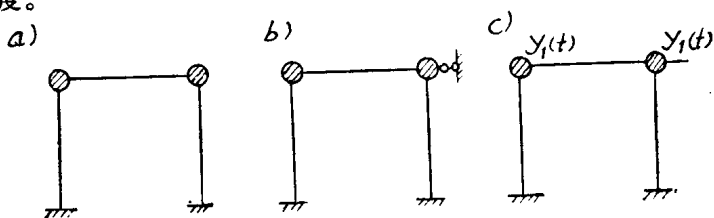


图 1-5

图 1-5, a 两个质点体系的自由度等于 1, 因为两个质点的位移相同, 故只有一个独立的未知位移。

图 1-6, a 单质点体系自由度等于 2。

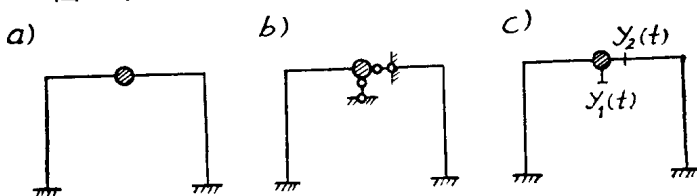


图 1-6

不能说有几个质点就有几个自由度。

【例 1-3】 求质量杆（具有分布质量的杆）的自由度。

杆件都是有重量的，因而都是质量杆，或称有重杆。图 1-7, *a* 示一简支梁。它的质量是分布的，在 x 处的分布集度（单位长度上的质量）为 $m(x)$ 。

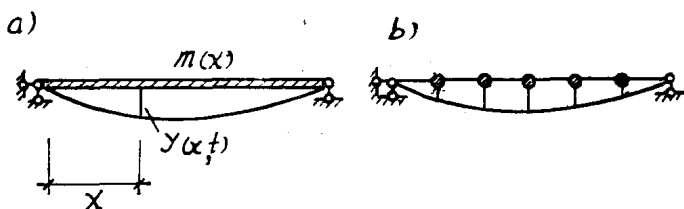


图 1-7

它是图 1-7, *b* 多质点体系的极限情况。它有无限多个质点，有无限多个点的未知位移。这些点的位移形成一条连续的位移曲线 $y(x, t)$ 。这种体系叫作“无限自由度体系”。它的未知量 $y(x, t)$ 不仅是时间 t 的函数，而且是座标 x 的函数。

具有有限个自由度的体系叫“有限自由度体系”，其中自由度等于 1 的体系叫“单自由度体系”。严格说来，结构都是无限自由度体系，因为质量都是分布的，而且都是可变形的。

有时把分布质量体系转化为有限自由度体系来计算较为方便。有时把有一系列集中质量的体系转化为分布质量体系反而方便。

【例 1-4】 质量块的自由度

质量块是考虑质量不考虑变形的块体。质量块在平面内有 3 个自由度（图 1-8），为了计算简便，通常采用质心 c 的

两个位移分量 $X(t)$ 、 $Z(t)$ ，和绕质心 c 的转角 $\varphi(t)$ 作为未知量。

转动对质点来说是没有意义的，因为质点的含义是有质量而无大小。只有不考虑转动的质量块才能视为质点。

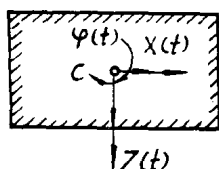


图 1-8

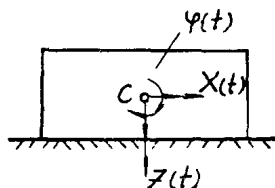


图 1-9

图 1-9 为块式基础。基础和土体一起振动，形成“基础土体体系”。简称为基础。基础和土体都有质量。基础是块体，有 3 个自由度。土体是可变形的物体，具有分布质量。所以，基础土体体系是无限自由度体系。通常以基础为考察对象，土体对基础的影响，则通过反力来考虑。这样，基础土体体系在平面内按 3 个自由度体系来计算。取基础质心 c 的水平位移 $X(t)$ 、竖向位移 $Z(t)$ 和绕质心 c 的转角 $\varphi(t)$ 为未知量。

质量块在空间有 6 个自由度：沿 3 个方向的平动和绕 3 个轴的转动。

习题 1-1 求图 1-10, a , b 体系的自由度，指出未知位移。图 1-10 a 仅考虑支承结构的弹性支承作用情况。图 1-10, b 又考虑支承结构质量的情况。

习题 1-2 求图 1-11 不等高排架在水平振动中的自由度。指出未知位移。柱的质量已集中于梁上。

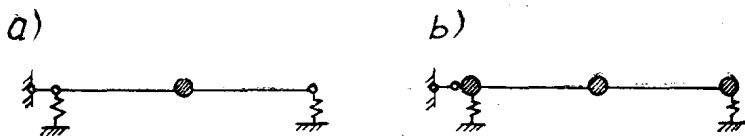


图 1-10

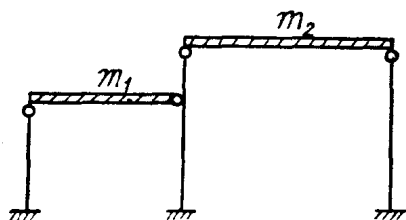


图 1-11

习题 1-3 图1-12为构架式基础竖向振动的一种计算简图。求该体系在对称振动中的自由度，指出未知位移（考虑柱子轴向变形）。

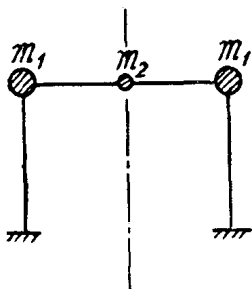


图 1-12

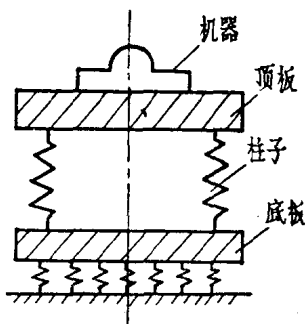


图 1-13

习题 1-4 图1-13为考虑底板参加振动时构架式基础竖向振动的一种计算简图。求自由度，并指出未知位移。

习题 1-5 图1-14 为屋 盖竖 向振 动的计算简图。屋盖质量及屋架杆件质量集中于上弦节点，不考虑各质点的水平振动。求自由度，指出未知位移。

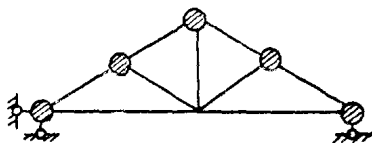


图 1-14

第二节 振动方程的建立

解算静力问题时要列出并求解平衡方程。与此类似，解算动力问题时要列出并求解运动方程。在研究振动问题时运动方程也称为振动方程。

振动方程的列法有两种：一是按牛顿第二定律来列，二是应用达伦贝尔原理，在质点上假想地加上惯性力，当作静力平衡问题来列，叫作“动静法”或“惯性力法”。由于大家对静力平衡方程的列法比较熟悉，后一种方法经常是方便的。

用惯性力法列振动方程的具体作法有两种。一种是列位移方程，将位移写成力的函数，类似于用力法解算静不定问题时写的变形方程。另一种是列动力平衡方程，将力写成位移的函数，类似于用位移法解算静不定问题时写的平衡方程。

下面举例说明。

【例 1-5】 写出图1-15， α 单自由度体系的振动方程。

位移方程

将位移写成力的函数。位移 $y_1(t)$ 是在外力 $P(t)$ 和惯性力 $[-m\ddot{y}_1(t)]$ 共同作用下引起的,故有

$$y_1(t) = \delta_{11}\{P(t) + [-m\ddot{y}_1(t)]\} \quad (1-1)$$

其中 δ_{11} 是沿位移方向的单位力引起的位移(图1-15c)。

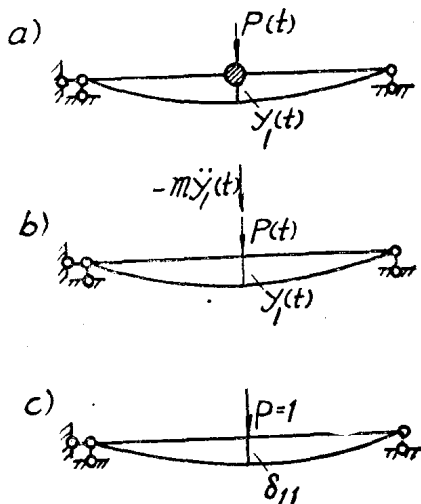


图 1-15

整理后得

$$\ddot{y}_1(t) + \frac{1}{m\delta_{11}}y_1(t) = P(t)/m \quad (1-2)$$

式(1-2)就是所要建立的振动方程。它是未知函数 $y_1(t)$ 对自变量时间 t 的二阶微分方程。这种写法叫写位移方程。

动力平衡方程

体系既然在位移 $y_1(t)$ 上处于动力平衡,则作用力必然等于 $k_{11}y_1(t)$ (图1-16, a)。其中 k_{11} 为发生单位位移所需