

结构动力学入门

[美] A. K. 乔普拉 著

蓝贵禄 译 王孝信 校

结构动力学入门

[美] A. K. 乔普拉 著

蓝贵禄 译 王孝信 校

内 容 简 介

为了推进地震工程的科学研究与实践，解决地震工程中的实际问题，美国加州大学地震工程研究所在美国科学基金会的赞助下，在各地举办的讲习班的基础上，邀请一些知名学者从1979年开始陆续编写、出版一套题为“地震准则、结构设计和强震记录工程专著”的丛书。本书是该计划丛书的专著之一，全书共分三章：简单结构动力学，多层建筑动力学，动力分析与建筑规范。可供开始从事结构动力学，特别是抗震结构设计、研究的工程技术人员，土建工程专业师生以及抗震工作的科技管理人员参考。

DYNAMICS OF STRUCTURES A PRIMER

by ANIL K. CHOPRA

University of California, Berkeley

EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH INSTITUTE

结构动力学入门

〔美〕A. K. 乔普拉 著

蓝贵禄 译 王孝信 校

地震出版社出版

北京复兴路63号

北京丰华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

850×1168 1/32 3印张 76千字

1985年8月北京第一版 1985年8月北京第一次印刷

印数：0001—6,500

统一书号：13180·246 定价：0.90元

前 言

对城市有危害的地震，除非采取适当的工程预防措施，不然就会造成灾难。新近报道的一些地震死亡人数较高，如危地马拉 20,000 人(1976)；伊朗 19,000 人(1978)；阿尔及尔 10,000 人(1980)；意大利 4,000 人(1978)。经验证明，采取适当的抗震构造可以大大减轻地震灾害。然而，在抗震设计中要想在负担得起的造价下提供足够的安全度，要求有高水平的地震工程专家，要求他们对强震的性质和地震扰动的结构动力学问题具有广泛的知识。为此，以适当形式出版有关资料是必要的。

A. K. Chopra 写的这本结构动力学是地震工程计划丛书中的第二本专著。每本专著都由权威专家编写。而且每本专著只包含一个课题，因而处理问题比一般地震工程教科书更加透彻。

这套丛书是由地震工程研究所组织，并在洛杉矶、旧金山、华盛顿特区、西雅图、芝加哥、波多黎各、圣路易斯和休斯敦等地举办的地震工程讲习班的基础上编写的，是针对具有地震工程基础知识的工程师，建筑业的官员以及政府机构的成员而编写的。显然，为了给这些讲习班编写较详细的讨论课题才导致专著计划的产生。由 Chopra 博士主讲的讲习班首先讲授必须了解的振动理论基本原理，接着，参加讲习班的学员就可以利用这一资料表达更加高深的理论问题。要求 Chopra 博士提供一本专著来说明地震工程振动的原理（适用于在大学里没有学过地震工程或振动理论但有实践经验的工程师），并且指出地震工程动力学中的那些方面是建筑规范中有关抗震要求的基础。然而，应当说明这本地震工程振动原理的讲稿同样适用于更加高深的问题。在地震扰动下，大多数结构物都将产生弹性振动，而这些振动可以分

解为若干简正振型振动之和，其中每一个简正振型以类似于单自由度结构的方式对地震地面运动产生反应。由 D. E. Hudson 编写的本丛书的第一本专著是关于强震运动加速度图的判读与解释。该专著提供了地震时记录到的地面运动的详细数据，也为 Chopra 博士的专著提供了有关资料。

地震工程研究所的专著计划和讲习班均得到国家科学基金会的资助。地震工程研究所的 M. S. Agbabian 既是讲习班的协调人，又是专著计划的协调人。为了保持讲稿的高标准，每本专著都由专著委员会的成员 M. S. Agbabian, G. V. Berg, R. W. Clough, H. J. Degenkolb, G. W. Housner, 以及 C. W. Pinkham 等加以审定。

专著委员会主席 G. W. 豪斯纳

1980年12月

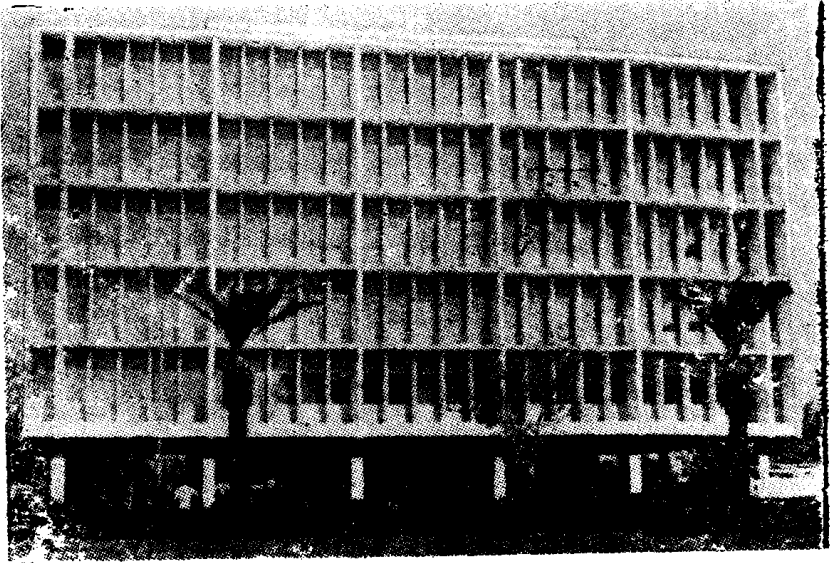
序

在很多大学，地震扰动的结构动力学研究已编入研究生的教程，有些大学甚至编入大学生的教学计划。无疑，优秀的教科书对学习这门课程的学生是有益的。通常大学教程的标准做法是在数学、力学和结构静力分析课程的基础上详细讨论结构动力学。对于想深入研究这一问题的人，没有捷径可走，唯一的途径就是花几个月时间认真研究教材的内容并实际应用于典型问题。然而，仅仅对受地震扰动的结构动力学基础感兴趣和没有充裕时间的读者，如果需要广泛了解和详细论述这一问题，那么，合适的教本可能是至关重要的。

本专著就是为这些读者而编写的。其目的在于向非结构动力学专业的人员介绍受地震扰动的结构反应所需要的基本概念和知识。本书论述的题材很多都是经典的，而且叙述简明，没有教科书那种形式主义和冗长的描述。论述是介绍性质的，主要介绍与基本概念有关的内容，而且几乎完全限于最简单的理想化建筑。然而所叙述的很多概念和分析方法可以推广应用于精确理想化建筑和其它各类结构。

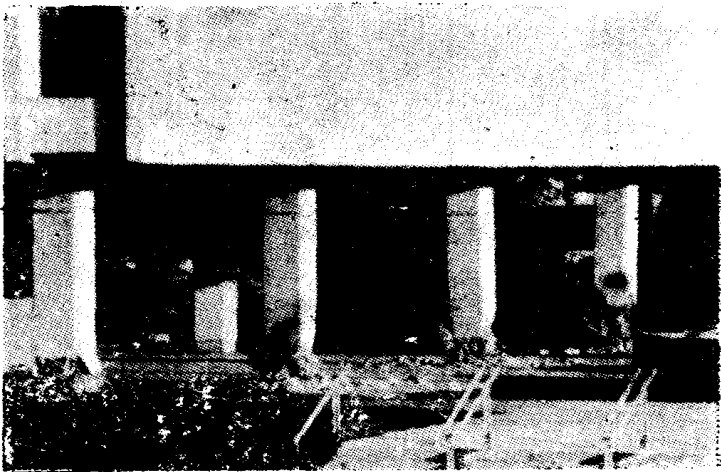
本专著作为计划专著丛书之一，其课题的选择和每个课题所涉及的范围都是根据专著丛书的计划要求确定的，并且尽量避免与其它将要出版的专著内容重复。本书共分三章：简单结构动力学，多层建筑动力学，动力分析与建筑规范设计方法的关系。

A. K. 乔普拉 1980年8月



G. W. Housner 提供

六层英皮里尔县服务大楼。因1979年10月15日英皮里尔谷地震而发生过度变形。该楼位于加利福尼亚埃尔申特罗，距这次6.5级地震发震断层9公里。该楼附近的峰值地面加速度为0.23g。第一层楼的钢筋混凝土柱上、下部发生过度变形而形成局部铰。右端四根柱子在地表被震碎，使大楼端部下降6英寸(见图片细部)



V. V. Bertero 提供

目 录

一、简单结构动力学	(1)
1. 可能的最简单结构.....	(1)
2. 运动方程.....	(3)
(1) 外力.....	(3)
(2) 地震地面运动	(6)
(3) 问题的提法	(7)
3. 自由振动反应.....	(8)
(1) 无阻尼结构	(8)
(2) 有阻尼结构	(10)
(3) 自由振动试验	(12)
4. 谐变扰动反应.....	(14)
(1) 恒幅值外力	(14)
(2) 由起振机产生的外力.....	(17)
(3) 受迫振动试验	(18)
5. 地震地面运动反应.....	(20)
(1) 反应时程	(20)
(2) 反应谱	(24)
二、多层建筑动力学	(32)
1. 多层建筑最简单理想化模型.....	(32)
2. 运动方程.....	(33)
(1) 外力.....	(33)
(2) 地震地面运动	(37)
(3) 问题的提法	(40)
3. 自由振动反应.....	(41)

(1)无阻尼结构	(41)
(2)有阻尼结构	(43)
(3)固有频率和振型的计算	(44)
4. 谐变扰动反应	(45)
5. 地震反应模态分析	(47)
(1)反应时程分析	(49)
(2)反应谱分析	(54)
6. 地震反应的近似分析	(60)
7. 多层建筑的精确理想化模型	(62)
(1)结点转动和柱子轴向变形	(63)
(2)侧向-扭转运动耦联	(64)
(3)附加说明	(66)
8. 建筑物的理想化与记录到的地震反应	(66)
三、动力分析与建筑规范法	(74)
1. 统一建筑规范中的地震力	(74)
2. 规范力与动力分析的比较	(75)
3. 基于非弹性设计谱的模态分析	(80)
参考文献	(81)
符号解释	(83)

一、简单结构动力学

1. 可能的最简单结构

拟从可能的最简单结构体系开始介绍结构动力学。为此，我们先讨论图 1 所示的理想化单层结构。在这一理想化模型中，假设支承屋顶的柱子是无质量的，结构的全部质量集中在屋顶，屋

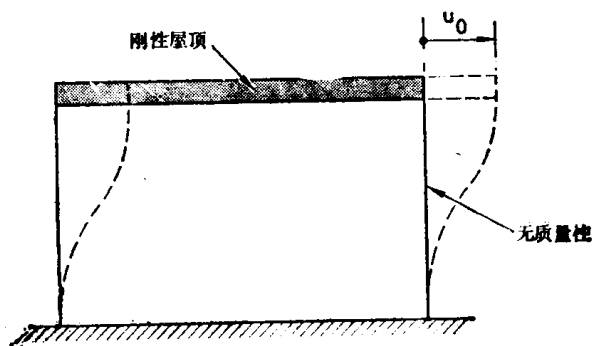


图 1 理想化无阻尼单层结构

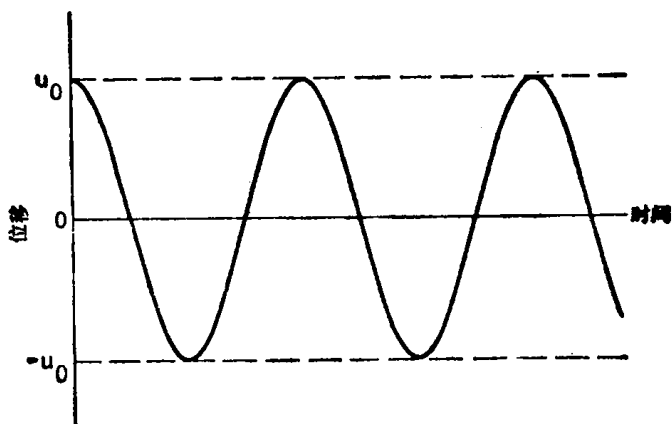


图 2 理想化无阻尼单层结构的自由振动

顶是刚性的，而柱子对于侧向变形是柔性的，但竖直方向是刚性的。假设结构支承在刚性地面上。

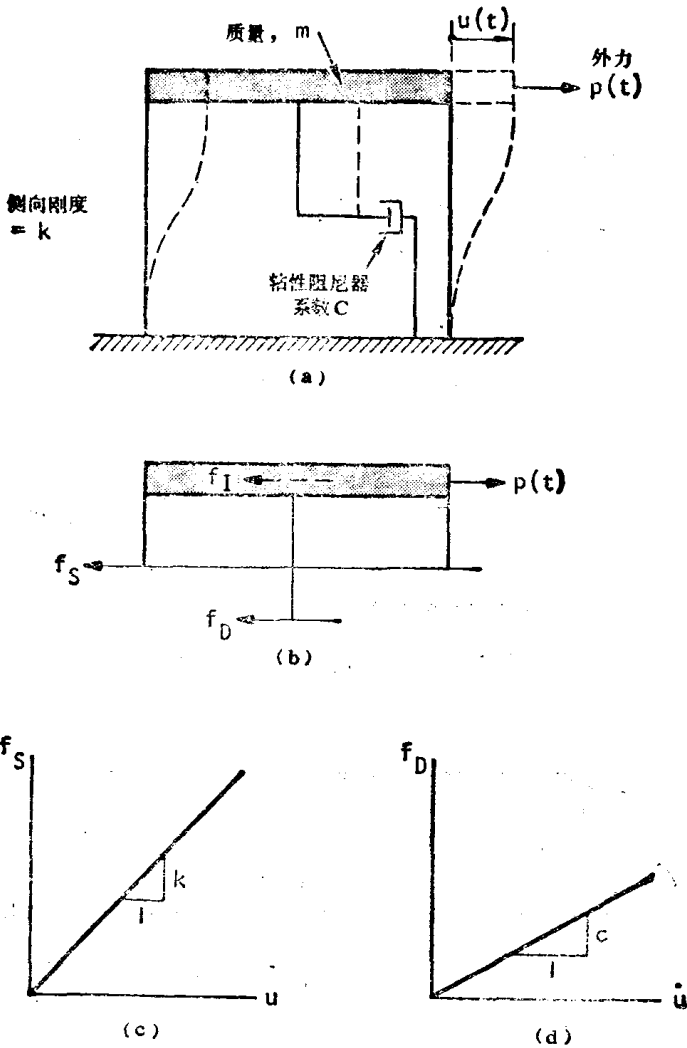


图 3
 (a) 理想化单层结构 (b) 隔离体图
 (c) 弹性力-变形关系 (d) 阻尼力-速度关系

后面将要谈到，如果使这一结构的顶部产生侧向位移，距离为 u_0 ，然后突然释放，让它作自由振动，则结构将围绕其初始平衡位置振动，而且以相同振幅 u_0 持续进行，永不休止（图 2）。当然，这是不真实的。直观表明，一个实际结构在作自由振动时振幅将不断减小，最后静止下来。为了把这一特性纳入结构动力学，就应该引入一个能量吸收元件。图 3 所示结构中的粘性阻尼器是最常使用的这类元件。

2. 运 动 方 程

理想化单层结构在动力扰动下的运动受一常微分方程控制。下面推导在外力和地震地面运动两种形式的动力扰动下的控制方程或运动方程。

(1) 外力

图 3 a 表示一质量为 m 、侧向刚度为 k 、粘性阻尼为 c 的线性结构，承受外部作用动力 $p(t)$ 。符号 $p(t)$ 表示力随时间 t 的变化。在该力的影响下，结构顶部的侧向位移量为 $u(t)$ ，这也是结构中的变形（屋顶相对于基底的位移）。因为力 p 随时间变化，所以位移 u 也随时间变化。

在某一瞬间，作用在质量上的各种力用质量的隔离体图表示（图 3 b）。这些力包括外力 $p(t)$ 、弹性抗力 f_s 、阻尼力 f_D 以及惯性力 f_I 。弹性力和阻尼力向左作用，因为它们分别阻止变形和速度，变形和速度向右为正。惯性力也向左作用，与正加速度方向相反。每一瞬间在这些力的作用下，质量处于平衡状态。根据隔离体图，其动力平衡条件为

$$f_I + f_D + f_s = p(t). \quad (1)$$

惯性力、阻尼力和弹性力下面用 $u(t)$ 及其相关的量表示。对于线性结构，弹性力为

$$f_s = ku, \quad (2a)$$

式中 k 为结构的侧向刚度， u 为层间（或相对）位移；阻尼力为

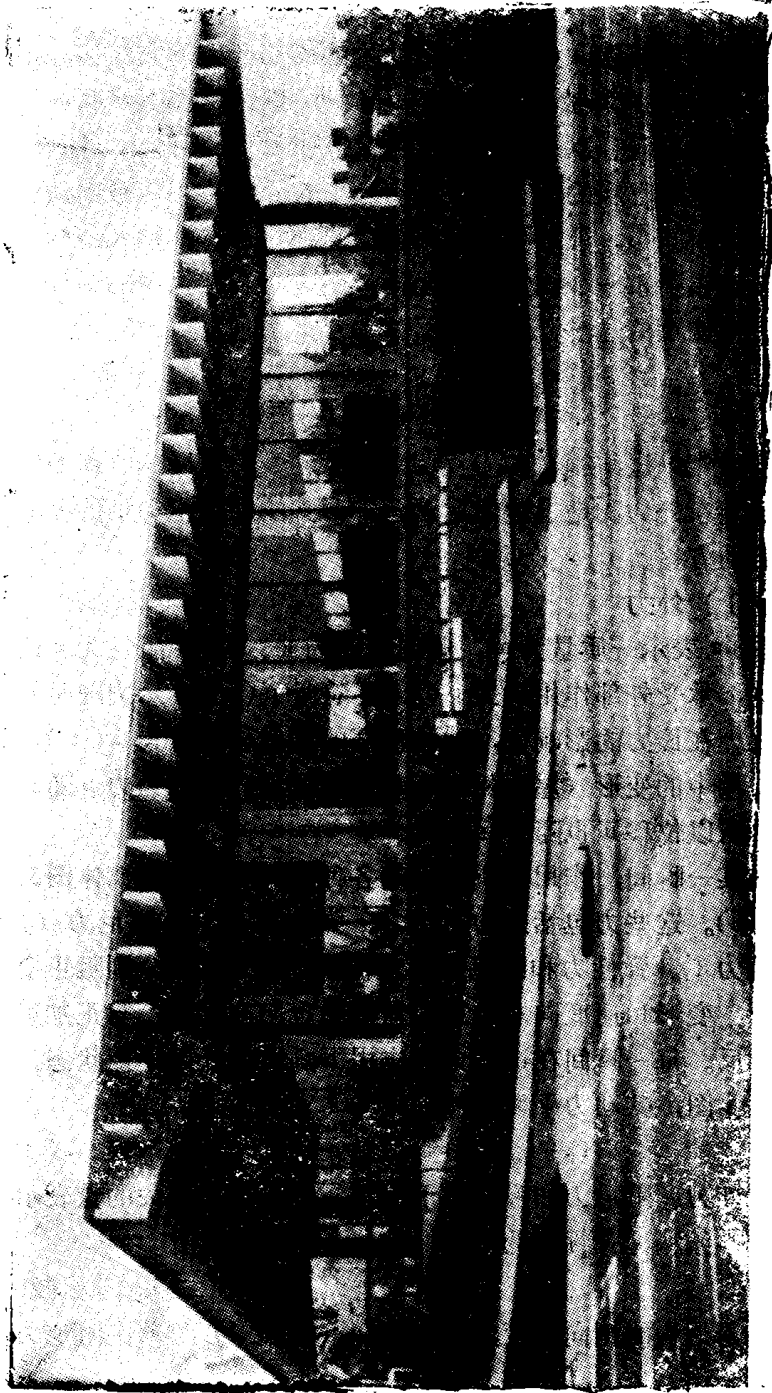


图4 一单层建筑，大部分质量集中在屋顶上，而且与抵抗侧向力体系相比，屋顶基本上是刚性的

G. W. Housner 提供

$$f_D = c\dot{u}, \quad (2b)$$

式中 c 为结构的阻尼系数, \dot{u} 为层间(或相对)速度。如图3 o 和3 d 所示, 弹性力与相对位移成正比, 而阻尼力与相对速度成正比。惯性力与承受加速度 \ddot{u} 的质量 m 联系在一起,

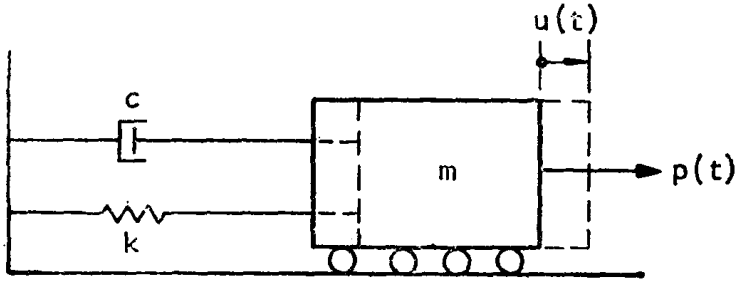
$$f_I = m\ddot{u}. \quad (2c)$$

将式(2)代入式(1)得

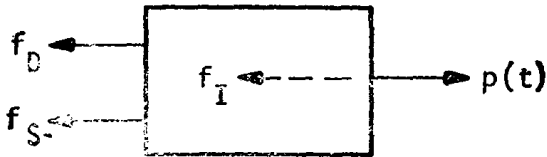
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t). \quad (3)$$

这就是图3 a 理想化结构承受外动力 $p(t)$ 时控制变形 $u(t)$ 的运动方程。

图5 a 所示体系的动力学问题在机械振动教科书中研究(见



(a)



(b)

图 5

(a) 质量-弹簧-阻尼器体系 (b) 隔离体图

Thomson, 1965)。该体系包含一个质量 m 和两个平行元件 (刚度为 k 的弹簧和阻尼系数为 c 的粘性阻尼器) 联结在固定支承上。在任一瞬间, 作用在质量上的诸力 (图 5 b) 满足式 (1)。因此前面为图 3 a 理想化单层结构所推导的运动方程对图 5 a 质量、弹簧、阻尼器相联系的体系同样也是有效的。

(2) 地震地面运动

图 6 a 所示为一理想化单层结构, 顶部没有外力作用。在此情况下, 扰动是地震诱发的结构基底运动。假设该运动仅有一个水平地面运动分量, 其位移为 $u_g(t)$, 速度为 $\dot{u}_g(t)$, 加速度为 $\ddot{u}_g(t)$ 。在这种扰动的影响下, 假设地面是刚性的, 则结构基底的位移量即为 $u_g(t)$, 而结构承受的变形 (顶部相对于基底的位移) 为 $u(t)$ 。结构顶部的总位移为

$$u'(t) = u_g(t) + u(t). \quad (4)$$

根据图 6 b 所示质量的隔离体图, 其动力平衡方程为

$$f_1 + f_D + f_S = 0. \quad (5)$$

式 (2a) 和 (2b) 仍然可用, 因为弹性力和阻尼力只依赖于相对位移和相对速度, 而与总的 u' 和 \dot{u}' 量无关。然而, 在此情况下质量承受加速度 u' , 因此惯性力为

$$f_1 = m\dot{u}',$$

借助于式 (4), 上式可表示为

$$f_1 = m(\ddot{u}_g + \ddot{u}). \quad (6)$$

代入式 (2a)、(2b) 和 (6) 之后, 式 (5) 可表示为

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t). \quad (7)$$

这就是图 6 a 理想化结构体系承受地震地面加速度 $\ddot{u}_g(t)$ 时控制变形 $u(t)$ 的运动方程。

比较方程 (3) 和 (7) 可知, 承受地面加速度 $\ddot{u}_g(t)$ 和外力 $= -m\ddot{u}_g(t)$, 这两种扰动的结构运动方程是完全相同的。结构对地面加速度 $\ddot{u}_g(t)$ 的变形反应将与在固定基底上的结构承受外力作用的反应相同, 此外力等于质量乘以地面加速度, 其作用方向

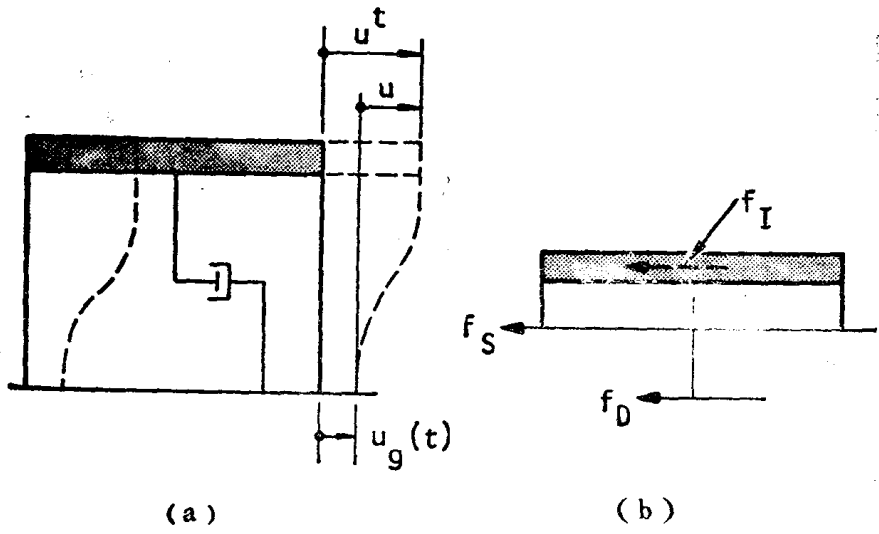


图 6
 (a) 承受地震地面运动的单层结构 (b) 隔离体图

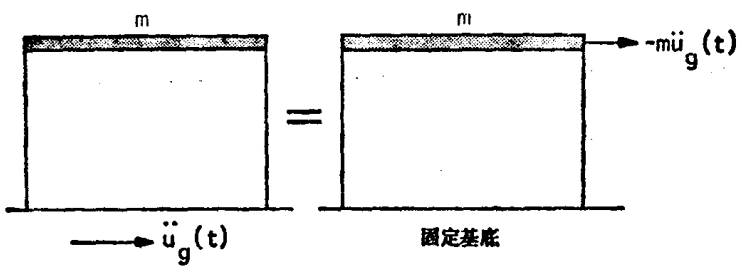


图 7 等效地震力

与加速度方向相反，如图 7 所示。因此地面运动可以用等效力 $-m\ddot{u}_g(t)$ 代替。

(3) 问题的提法

给定了质量 m 、刚度 k 、阻尼 c 以及扰动力 $P(t)$ 或地面加速度 $\ddot{u}_g(t)$ 之后，结构动力学中的一个基本问题就是确定理想化单层结构的变形反应 $u(t)$ 。其它有意义的反应量，如基底剪力

可从变形反应加以确定。

我们将用自由振动来检验体系对谐变力和对地震地面运动的反应。理想化的单层结构是一个单自由度(SDF)体系，因为它的运动受只包含一个未知量 $u(t)$ 的微分方程控制〔方程(3)或(7)〕。

3. 自由振动反应

当结构在体系本身固有力作用下振动而不存在外力或地面运动时，就发生自由振动。

(1) 无阻尼结构

首先讨论图3没有任何阻尼的理想单层结构。如果给质量以某一位移 $u(0)$ 和(或)速度 $\dot{u}(0)$ 使它受扰动而离开其平衡位置，则体系象图8所示，将围绕其平衡位置而振动(或振荡)。这就是式

$$u(t) = \frac{\dot{u}(0)}{\omega} \sin \omega t + u(0) \cos \omega t \quad (8)$$

的图象表达。式(8)可以从解没有阻尼项和没有任何扰动，即

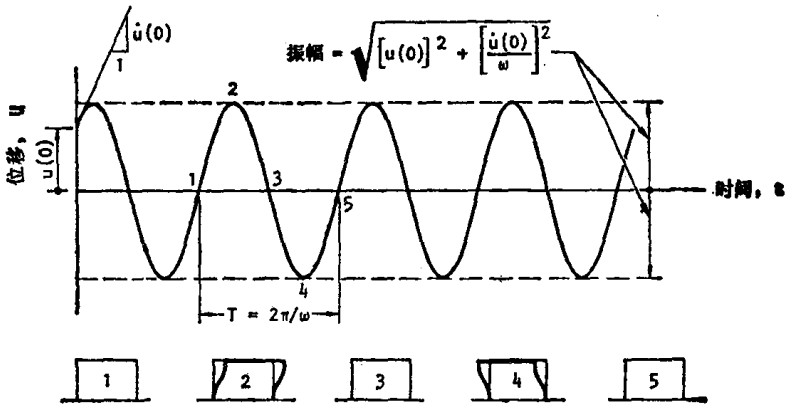


图8 无阻尼结构的自由振动

由1, 2, 3, 4, 5标明的变形框图分别表示反应图上1, 2, 3, 4, 5位置上结构的变形状态