

GONG CHENG ZHEN DONG YU KONG ZHI

工程振动与控制

张荣山 著

1

中国建筑工业出版社

工程振动与控制

张荣山 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程振动与控制/张荣山著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2003

ISBN 7-112-05590-3

I. 工… II. 张… III. ①建筑结构—结构振动
②建筑结构—结构振动—振动控制 IV. TU311

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 102946 号

工程振动与控制

张荣山 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 9 $\frac{1}{4}$ 字数: 243 千字

2003 年 3 月第一版 2003 年 3 月第一次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 14.00 元

ISBN 7-112-05590-3

TU·4910 (11208)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

本书内容主要分为5部分:关于动力机器设置在楼层的楼层梁的竖向振动计算问题,重点和详细介绍简化计算方法以及如何解决实际工程振动问题;刚架(框架)横向振动计算,重点讲述简化计算方法,厂房空间振动分析方法和实际厂房“抗振”设计等;框架式动力基础考虑地基作用的整体振动计算方法;框架联合式(包括大块——框架联合式)动力基础的设计与计算,框架式基础的构造措施;最后介绍了积极隔振设计,并编制了123种隔振器弹簧的选用图表供读者方便选用。

本书可供土木、水利、交通类工程技术人员及高等院校相关专业师生参考。

* * *

责任编辑:郭 栋

前 言

在实际工程中经常发生动力机器设置在楼层上，使楼层产生不允许的振动问题，直接影响了正常的生产，也损害了人员的身体健康。随着我国改革开放的深入，经济建设迅速发展，外资企业纷纷在我国安家落户，外商的一些动力机器不断进入我国，这些动力机器对振动的要求一般相当严格，例如，我国的活塞式压缩机基础最大振动线位移不应大于 0.2mm ，而有的外资企业的国外活塞式压缩机基础要求最大振动线位移不应大于 0.01mm ，两者相差20倍，因而处理起来更感到困难。同时，随着生产力不断的发展，出现了一些新的动力基础形式，例如大块—框架联合式动力基础就是其中的一种，对于这种基础，我国动力机器基础设计规范目前还没有这方面的内容，但实际工程中又存在这种基础，需要去设计和计算，一般工程技术人员遇到这种问题时感到束手无策。存在上述问题的主要原因是：许多土建工程技术人员缺乏振动方面的理论知识，更重要的是缺乏解决实际工程振动问题的能力，遇到工程中的振动问题，例如对受力比较复杂的支承结构，如何进行振动分析，进行简化处理和设计等问题时，感到困难重重。加之目前对解决工程振动问题的书籍很少。广大工程技术人员比较迫切的需要这方面的振动书籍。于是，针对上述问题，笔者根据40多年来解决工程振动问题的实践经验和研究成果，并吸收了国内外的一些研究成果编著了本书，它的出版将对有关人员解决土建工程振动问题实际能力的提高有所帮助，并对解决工程振动技术的发展起到一定的作用。

由于振动基本理论有不少专著论述，本书不打算对振动理论做全面的阐述，而是对经常遇到且需要解决的一些工程振动问题，

从理论到实践的结合上进行较详细的介绍。

第一章关于楼层梁竖向振动计算，重点讲述了实用的简化计算方法，例如把梁上作用的复杂的分布质量如何集中到“特定点”上，如何简化为均布质量和怎样集中到任意点上等进行近似计算的方法，包括单跨梁、连续梁、不动支座和弹性支座的梁；第二章是关于刚架（框架）的横向振动计算，重点介绍了横向自由振动的简便计算方法，变断面多层框架的空间振动分析，刚架平动—扭转耦联自由振动传递矩阵法，顶层空旷多层刚架的自由振动计算，厂房“抗振”设计与计算工程实例等；第三章介绍了框架式动力基础的设计与计算，重点讲述了框架式动力基础考虑地基作用的整体水平和竖向振动计算方法；第四章讲述框架联合式动力基础设计与计算。大块—框架联合式动力基础是一种新型的联合基础，较详细地介绍了它的设计和水平与竖向振动计算方法，多框架联合式动力基础的竖向振动近似分析，同时提出了框架式动力基础（包括框架联合式基础）的构造措施；第五章是关于在建筑结构中动力基础积极隔振的问题，介绍了隔振计算原理，隔振器弹簧的计算方法，隔振器的构造，并编制了123种隔振器弹簧选用表等。全书有大量的工程实例。

本书在编写过程中，徐至钧高级工程师给予了具体的指导。书中有关齐次线性方程组和矩阵的运算是由王冬工程师采用电子计算机来完成的，在此一并致谢。

由于作者水平有限，书中难免有疏误之处，敬请读者批评指正。

目 录

第一章 梁竖向振动计算及其实用简化处理方法	1
第一节 梁单自由度体系（不考虑阻尼）自由振动计算 及其简化处理方法	2
一、不动支座单跨梁的自由振动计算简述	2
二、弹性支座单跨梁的自由振动计算	4
三、把质量集中到“特定”点的方法	7
四、工程实例之一	13
五、工程实例之二	18
六、工程实例之三	22
第二节 梁单自由度体系（不考虑阻尼）在简谐荷载作 用下的强迫振动	31
一、计算振动线位移的表达式	31
二、振动幅值方程	33
三、旋转机器扰力幅值的确定方法	33
四、工程实例	35
第三节 梁单自由度体系考虑阻尼作用振动计算的 简述	39
一、黏滞阻尼理论概述	39
二、滞变阻尼理论概述	40
第四节 单跨梁多自由度和无限自由度体系振动计算 及简化处理方法	42
一、单跨梁多自由度体系振动计算	42
二、单跨梁无限自由度体系振动计算	50
三、把集中质量化为均布质量的方法	53

四、把梁上质量集中于任一点的方法	56
五、算例	57
六、工程实例	58
第五节 等跨连续梁振动计算简述	63
一、各跨刚度相同的等跨连续梁振动计算	63
二、工程实例	65
第六节 弹性支座无限自由度体系的振动计算	66
一、两端具有弹性支座均质单跨梁自由振动	67
二、仅一端为弹性支座两端为简支的均质单跨梁自由振动	70
三、算例	71
第二章 刚架横向振动计算	73
第一节 刚架横向自由振动一般实用计算方法	73
第二节 多层刚架横向自由振动的一种简便计算方法	75
一、关系表达式的建立和计算方法	76
二、算例	78
第三节 变断面多层刚架房屋空间振动分析	79
一、自由振动	80
二、在简谐荷载作用下强迫振动	84
三、工程实例	86
第四节 计算多层刚架平动—扭转耦联自由振动的 传递矩阵法	90
一、自由振动	90
二、水平刚度、扭转刚度、刚心、质心的确定	94
三、算例	95
第五节 顶层空旷多层刚架房屋的自由振动计算	98
一、自由振动计算	98
二、工程实例	104
第六节 厂房“抗振”设计实例	108
一、整体（横向）振动计算	110
二、梁竖向振动计算	116

第三章 框架式动力基础设计与计算	126
第一节 空间多自由度体系振动计算	126
一、纵横梁刚度的确定方法	128
二、顶板质量折算到纵、横梁上的方法	128
三、设备质量折算到纵、横梁上的方法	129
第二节 按两个和三个自由度体系的简化计算	129
一、两个自由度体系计算	130
二、三个自由度体系计算	133
第三节 框架式动力基础整体水平振动计算	141
一、自由振动	141
二、水平振动线位移计算	148
第四节 框架式动力基础整体竖向振动计算	149
一、竖向振动线位移计算	150
二、回转振动角位移计算	152
三、工程实例	153
第四章 框架联合式动力基础设计与计算	160
第一节 大块—框架联合式动力基础整体水平振动设计与计算	160
一、自由振动计算	161
二、振动线位移计算	169
三、工程实例	171
第二节 大块-框架联合式动力基础整体竖向振动近似计算	182
一、自由振动计算	182
二、计算竖向振动线位移和大块式基础回转角位移	185
三、工程实例	186
第三节 多框架联合式动力基础整体竖向振动近似计算	195
一、自由振动计算	196
二、竖向振动线位移和底板回转角位移计算	199

三、工程实例	200
第四节 框架联合式(包括框架式)动力基础构造措施.....	205
一、对于工作转速等于和小于 3000r/min 的汽轮机组和电机	
框架式基础构造要求	206
二、对于工作转速大于 3000r/min 的离心式透平压缩机框架式	
基础尺寸的构造要求	206
三、配筋	207
四、调频措施	209
五、基础布置和施工要求	210
六、材料	212
第五章 隔振设计.....	214
第一节 隔振计算方法.....	215
一、自由振动	216
二、强迫振动	219
第二节 隔振器弹簧的设计.....	223
一、弹簧常用的材料	224
二、弹簧设计与计算	224
三、例题	228
第三节 隔振弹簧选用表.....	230
第四节 工程实例.....	238
一、设计条件	238
二、确定钢筋混凝土台座尺寸	240
三、隔振弹簧设计	241
四、质量惯性矩计算	242
五、自振频率计算	242
六、振动线位移计算	244
七、隔振器详图及其安装	245
附录一 单跨梁振型曲线.....	248
附录二 多跨梁振型曲线.....	251
参考文献.....	279

第一章 梁竖向振动计算及其实用 简化处理方法

在石油化工、机械加工、煤炭、仪表装配等多层工业厂房，其结构形式多为钢筋混凝土刚架或钢刚架。由于生产工艺流程的需要，一些动力机器（设备）不可避免地要设置在楼层上。动力机器多种多样，如压缩机、离心机、通风机、破碎机、电动机、振动筛等，机器的运动部分多为旋转（也有往复式）的。就其转速而言，有低转速的（ $\leq 600\text{r/min}$ ）和较高转速的（ $> 600\text{r/min}$ ）。

多层工业厂房钢筋混凝土刚架的水平自振频率的基频多在 $0.6\sim 3\text{Hz}$ 之间（基本周期 $0.3\sim 1.7\text{s}$ ），而梁（主要受力梁）的竖向振动基频却多在 $7\sim 80\text{Hz}$ 之间（基本周期 $0.013\sim 0.14\text{s}$ ）。

钢刚架的水平振动基频多在 $0.5\sim 2\text{Hz}$ 之间（基本周期 $0.5\sim 2\text{s}$ ），钢梁（主要受力梁）的竖向振动基频多在 $2.5\sim 25\text{Hz}$ （基本周期 $0.04\sim 0.4\text{s}$ ）。

由此可见，钢筋混凝土刚架与钢刚架的水平振动基频范围相差较小，而两者横梁的竖向振动基频范围相关较大，主要原因是钢筋混凝土梁的竖向刚度比钢的要大。

计算房屋在动力机器动荷载作用下的振动效应，除进行承载力计算外，主要是控制房屋（或支承构件）的振动线位移不超过允许振动线位移，而减小振动线位移的一个关键因素是避开动力机器与房屋（或支承构件）的共振状态，且主要是避开动力机器与房屋（或支承构件）基频的共振状态。在实际工程中，由于种种原因经常遇到一些缺乏有关计算振动数据的情形，此时仅计算自由振动，所计算房屋（或支承构件）的基频尽量远离与机器的共振状态，这样处理虽然不够完善，但一般也能满足工程的需要。

从上面所说的刚架基频范围来看，对楼层上设有低转速的动力机器，刚架的水平振动有可能发生共振现象，而对高转速的动力机器，则楼层的横梁在竖向有可能发生共振现象，也就是说，对楼层上设有低转速动力机器的刚架，要着重计算刚架的水平振动；而对设有高转速动力机器的刚架要着重计算横梁的竖向振动；对钢刚架来说，转速低的动力机器，不但要注意计算刚架的水平振动，而且还要注意计算梁的竖向振动。

根据国外有的国家对有关动力机器上楼的计算规定，对刚架楼层上设有旋转运动机器（离心式）的支承结构，当动力机器重量 $<2.5t$ 时，仅对支承结构进行自由振动计算（即避开共振）即可；当重量 $\geq 2.5t$ 时，要进行自由振动和强迫振动计算。

振动理论的书早已有不少，在本章中不打算对梁的振动理论做系统和详细论述，而是除简要介绍梁竖向振动计算的有关基本原理外，着重介绍一些简化计算方法及如何考虑处理实际工程中的振动问题。关于刚架的水平振动分析问题将在第二章介绍。

第一节 梁单自由度体系(不考虑阻尼)

自由振动计算及其简化处理方法

在楼层上的动力机器大都置放在横梁上，当动力机器重量较大时，通常把梁上的其他荷载（包括梁自重）原则上按照振动时能量等的关系集中到机器作用位置处。当动力机器重量不是很大时，也可以按能量关系对所有的竖向荷载集中到合适的一点，近似地按单自由度计算。

一、不动支座单跨梁的自由振动计算简述

图 1-1 所示为一不动支座单跨梁， m 为集中质量，包括动力机器及其他质量的集中质量之和； K 为集中质量

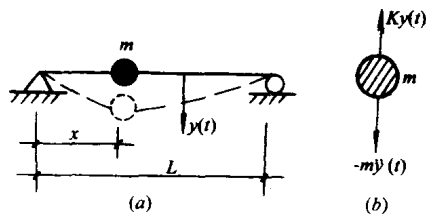


图 1-1

m 处梁的刚度, 即沿 y 方向发生单位位移所需要的力。 $K=1/\delta$, δ 为柔度, 即在 m 处单位力作用下的位移。

由图 1-1 (b) 所示的自由振动动力平衡方程为

$$m \ddot{y}(t) + Ky(t) = 0 \quad (1-1)$$

或
$$\ddot{y}(t) + \frac{K}{m}y(t) = 0 \quad (1-2)$$

令
$$\omega^2 = \frac{K}{m} = \frac{1}{\delta m} \quad (1-3)$$

则式(1-2)变为

$$\ddot{y}(t) + \omega^2 y(t) = 0 \quad (1-4)$$

式(1-4)是具有常系数的二阶微分方程, 其通解为

$$y(t) = B\cos\omega t + C\sin\omega t \quad (1-5)$$

B 、 C 为积分常数

已知动位移 y_0 和动速度 v_0 时

$$y(t) = y_0\cos\omega t + \frac{v_0}{\omega}\sin\omega t \quad (1-6)$$

或
$$y(t) = A\sin(\omega t + \varphi)$$

式中
$$A = \sqrt{y_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}}$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{y_0\omega}{v_0}$$

ω 为单自由度体系的自由振动圆频率, 或称为频率, 即质点在 2π 秒时间内的振动次数, 单位弧度/秒 (rad/s)。体系的自振频率 $f = \omega/2\pi$, 单位为次/秒, 称为赫兹 (Hz)。 φ 为初相位角。

式(1-3)是计算频率的基本公式。在实际工程振动计算中, 为了避开动力机器扰力频率与梁自振频率的共振, 或者为了减小振动位移, 常常考虑改变梁的自振频率, 一旦梁的结构形式、材质和作用荷载确定后, 由式(1-3)可以明显的看出, 主要是改变梁的刚度 K , 例如增大(减小)梁断面, 加长(缩短)梁的跨度以及改变支座条件等等。

在这里需要指出的是, 放置动力机器的钢筋混凝土刚架多为

现浇或装配整体式刚架，梁截面惯性矩的计算方法直接影响到梁刚度 K 值的大小，欲精确地计算出 K 的大小是很困难的，一般在实际工程中可做如下近似的处理，即当楼板开孔很小（例如孔边长或直径小于 300mm）且数量稀少时，计算梁截面惯性矩，可取两倍矩形截面的惯性矩。对边梁可取 1.5 倍矩形截面的惯性矩。当楼板开孔较多或者开孔较大时，则梁截面惯性矩宜按矩形截面计算。另外，对上面焊有钢盖板的钢梁，截面惯性矩仍按梁截面确定，不考虑钢盖板的作用。

二、弹性支座单跨梁的自由振动计算

当钢梁支承在钢筋混凝土柱（或钢柱）上，或钢筋混凝土梁支承在钢筋混凝土柱上时，一般柱子的竖向刚度比梁的竖向刚度大得多，此时，梁的动力计算可以忽略柱子竖向刚度的影响。当次梁支承在主梁上，主梁在次梁作用点处的竖向刚度比次梁竖向刚度大的多时，也可以忽略主梁刚度的影响。上述情况，做梁的动力计算时，两端可按不动支座来考虑。

但是，当主梁在次梁支承点处的竖向刚度和次梁竖向刚度相差不大，甚至次梁刚度比支承点处主梁刚度还要大时，也有时柱子竖向刚度较弱的情形（例如支承钢筋混凝土梁的钢柱），此时梁的动力计算必须考虑主梁（或柱）刚度的作用，即按弹性支座来进行计算，否则将产生较大的误差。下面将介绍单自由度体系弹性支座单跨梁的自由振动计算。

1. 集中质量在跨中时

如图 1-2 所示为两端简支等截面弹性支座梁。图中 r_a 和 r_b 分别为单跨梁支座 a 和 b 的弹性刚度， m 为集中质量。

弹性支座梁跨中在单位力作用下的变形由两部分组成，即在梁跨中单位力作用下，假定为两端不动支座的跨中变形和假定梁刚度为无

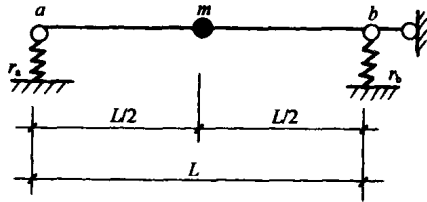


图 1-2

限大时的弹性支座跨中变形之和。

假定梁两端为不动支座，在跨中单位力作用下的跨中位移 δ_1 ：

$$\delta_1 = \frac{L^3}{48EI}$$

式中 δ_1 ——跨中单位力作用下的跨中位移；

E ——为梁的弹性模量；

I ——为梁横截面惯性矩；

L ——为梁支座间距（梁跨度），m。

假定梁的刚度为无限大时，在跨中单位力作用下弹性支座 a 和 b 处的位移分别 $\frac{1}{2r_a}$ 和 $\frac{1}{2r_b}$ 。由于弹性支座位移引起的跨中位移 δ_2 ：

$$\delta_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2r_a} + \frac{1}{2r_b} \right) = \frac{r_a + r_b}{4r_a r_b}$$

跨中总位移 δ ：

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \frac{L^3}{48EI} + \frac{r_a + r_b}{4r_a r_b}$$

则

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{L^3}{48EI} + \frac{r_a + r_b}{4r_a r_b} \right) m}} \quad (1-7)$$

当 $r_a = r_b = r$ 时

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{L^3}{48EI} + \frac{2r}{4r^2} \right) m}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{L^3}{48EI} + \frac{1}{2r} \right) m}} \quad (1-8)$$

2. 集中质量不在跨中时

图 1-3 所示为一两端简支集中质量不在跨中的弹性支座梁。

同样，假定梁两端为不动支座（图 1-3a），在集中质量 m 处单位力作用下 m 处的位移 δ_1 ：

$$\delta_1 = \frac{A^2 B^2}{3EIL}$$

假定梁的刚度为无限大时，在集中质量 m 处单位力作用下弹

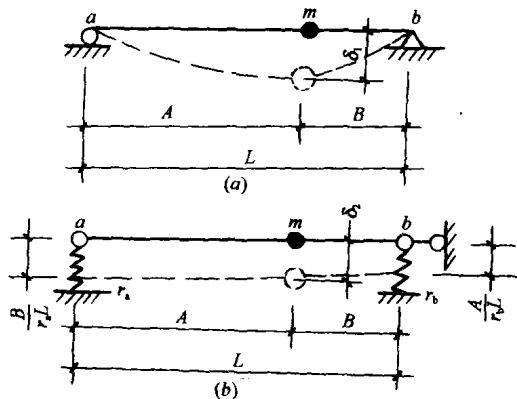


图 1-3

性支座 a 和 b 的弹性位移分别为 $\frac{B}{r_a L}$ 和 $\frac{A}{r_b L}$ 。由于支座弹性位移在 m 处引起的位移 (图 1-3b) δ_2 :

$$\delta_2 = \frac{A}{r_b L} + \left(\frac{B}{r_a L} - \frac{A}{r_b L} \right) \frac{B}{L}$$

m 处的总位移 δ :

$$\delta = \frac{A^2 B^2}{3EIL} + \frac{A}{r_b L} + \left(\frac{B}{r_a L} - \frac{A}{r_b L} \right) \frac{B}{L}$$

则
$$\omega = \sqrt{\frac{1}{\left[\frac{A^2 B^2}{3EIL} + \frac{A}{r_b L} + \left(\frac{B}{r_a L} - \frac{A}{r_b L} \right) \frac{B}{L} \right] m}} \quad (1-9)$$

当 $r_a = r_b = r$ 时

$$\delta = \frac{A^2 B^2}{3EIL} + \frac{A}{rL} + \left(\frac{B}{rL} - \frac{A}{rL} \right) \frac{B}{L} = \frac{A^2 B^2}{3EIL} + \frac{A}{rL} + \frac{B-A}{rL} \cdot \frac{B}{L}$$

则
$$\omega = \sqrt{\frac{1}{\left[\frac{A^2 B^2}{3EIL} + \frac{A}{rL} + \frac{B-A}{rL} \cdot \frac{B}{L} \right] m}} \quad (1-10)$$

顺便指出, 当 $A = B = \frac{L}{2}$ 时, 式 (1-10) 就变为式 (1-8)。

三、把质量集中到“特定”点的方法

在工业厂房的工程中，楼层梁的布置首先要满足工艺设备布置的要求。因此，在一根主梁上经常布置数台设备和支承着几根次梁，还支承着楼板传递的荷载等等。也就是说，梁上作用的静荷载和动荷载比较复杂。同时作用荷载的取值与实际情况不完全相符，有的具有相当的不确定性。另外，梁的支座条件不完全是理论上的铰接或刚接。所以，如果想精确地计算它的自振频率和振型是非常复杂的，而且即使所谓精确的计算也难以完全反应它的实际振动状态。因此在实际工程中，根据具体情况，对梁上作用的各种荷载进行简化处理，使其计算简单化是很必要的。其简化的方法，一是可以把梁上的质量（包括集中和均布质量）近似地集中到“特定”的一点或任意一点处作为单自由度体系（或者集中到几点作为多自由度体系）计算，另一种方法是把梁上的质量近似地化为均布质量来分析。以下首先介绍把质量集中到“特定”一点的近似集中方法。而把质量化为均布质量和集中到任一点的方法将在以后介绍。

把质量集中到“特定”点方法按不动支座和弹性支座来分别介绍。

1. 不动支座单跨梁

把梁上分布复杂的质量集中到一点，作为单自由度体系计算第一频率，主要问题在于如何确定这个集中质量及其作用位置，使得按单自由度求得的自振频率与原分布复杂质量体系的第一频率相接近。如果集中质量 m_s 放在体系上的位置一经确定，则对应的 m_s 之值也随之而定， m_s 值也称为代替质量，采用这种方法求体系的第一频率通常称为代替质量法。

该方法是运用能量原理来进行的。根据能量守恒定理，体系在振动过程中，如果不计阻尼的影响，则任何时刻位能与动能之和始终为一常数。如果体系在平衡位置时的位能为零，而动能为最大 U_{\max} ，体系在极限位置（位移最大）时的动能为零，而位能为最大 W_{\max} ，所以