

建筑科技资料

人和机械引起的

结构振动

H. 培契曼 W. 艾曼

季直仓 季文远译

建筑科学编辑部

1990

结构材料的动力性能，包括阻尼比。

对于所论述的有些问题，其研究结果和实践经验仍是很有局限的，特别是人产生振动的实例。因此，欢迎提出建议和批评及提供工程实例。

作者向所有提供工程实例及对本书工作提出意见和建议的同行们表示感谢。特别要感谢D. Somaimi博士对有些章节所作的实际帮助。作者还要感谢瑞士联邦技术学院结构工程研究所的一些同事们，他们为打印、校对手稿及绘图做了工作，他们是：S. Burki、R. Feusi、S. Schenkel、H. Ungricht女士及K. Baumann、R. Vogt、L. Sieger先生。对J.-M. Hohberg先生和E. G. Prater博士进行德文翻译亦在此表示感谢。

H. Bachmann, W. Ammann

于苏黎克，1987年7月

内 容 简 介

本书阐述建筑结构中由人和机械引起的结构振动问题。介绍这种结构振动的现象、分析方法、各国规范的规定及防止这种振动影响的措施。附录中还介绍了22个工程实例及振动理论知识。

本书着重于应用，内容简练，论述深入浅出，适宜于从事结构设计、施工的工程技术人员阅读和参考。

出 版 说 明

国际桥梁和结构工程协会 (IABSE) 是一个非政府的国际学术组织, 成立于1929年, 在世界75个国家里有3000多会员。该协会每年为结构工程师出版1~2本有关结构工程方面的实用书籍。“人和机械引起的结构振动”(Vibrations in Structures Induced by Man and Machines, Hugo Bachmann, Walter Ammann, 1987) 是该协会1987年出版的一本书。该书为实际工程师编写, 着重于应用。该书首次较集中地介绍了在人行结构、办公室、体育馆、舞厅等建筑中由人活动产生的结构振动问题, 以及中小机械在楼面上产生的振动问题。书中介绍了这种振动现象、分析方法、各国规范对这种振动的接受标准, 以及防止这种振动影响的措施。在附录A中介绍了工程实例, 附录B中简练地阐述了振动理论的基础知识。这是一本适宜于工程技术人员阅读和学习的书。为此, 本编辑部将其翻译出版。希望对我国的实际结构工程师有所裨益。

本书由季直仓、季文远翻译, 季直仓校对。

《建筑科学》编辑部

1990年7月

序 言

在工程实际中工程师越来越多地碰到动荷载对结构的影响问题。其主要原因是：

——现在设计和建造的结构比前几年更易受振动影响。因为采用了高质量材料，并发挥其强度，跨度越来越大，而梁高和板厚反而减小。因此，总荷载（常假定为非动荷载）中静荷载（恒载）只占小部分。刚度小、质量小的柔细结构比刚度大、质量大的结构更易受振动影响。这种现代结构，若用于承受动荷载，就可能产生振动问题。

——近年来有些动荷载的作用增加了。例如，在生产厂中在合理化过程中安装了更有效的机器。例如，有的效率增加是由较高的生产频率得来的，这就要求结构能承受更高的动荷载。

——同时使用者对结构的适用性要求亦增加了。环境应力水平普遍地较高，人们对振动更敏感了。因此，对容许振动的标准值亦较严了，振幅必须减小。从某些生产过程（例如，碾磨、纺织等）的精度出发，要求较低的机器振动水平，因而要求亦更高了。

此外，新的工程任务已提出更准确地考虑荷载的类型和某些结构的动力性质。例如，遭受巨大波动荷载作用的离岸结构，以及在地震荷载下必须保证安全的核电厂。但是，这些问题在专门的学科中都有讨论，本书不论述。

本书只限于由人或机械产生的结构振动。人产生的振动可以由行走、跑步、跳跃、跳舞等产生。主要发生在人行结构上和特殊的建筑中，例如办公楼、健身房、体育馆、舞厅、音乐厅、画廊等。现有的一些书大多孤立地谈这一问题的某些方面。本书想作系统的论述。机械产生的振动在开动各种有转动、摇摆、冲击部分的机械和工具时产生。有的书专门讨论重型机械的基础问

题。本书集中讨论放在工业建筑楼面上的中小型机械产生的振动问题。这些问题很少认真处理过。这些问题类似于人产生的振动。这一范围以外的问题，如机械产生的地面振动，作用到邻近的建筑上或影响结构的其它部分，在本书中不包括。

本书的意图是为实际结构工程师服务，主要不是为动力学专家写的。应指出，其目的不是为如何进行动力计算指出方向。本书的目的是：

- 1.说明什么地方可能产生振动问题，什么地方需要小心。
- 2.进一步理解所遇到的现象及基本的原则。
- 3.介绍评估结构或构件动力性质的基本知识。
- 4.介绍适用的措施，既介绍设计阶段使用的预防办法，亦介绍改善不合适结构的措施。

由于这些限制，本书不得不作些简化和近似，这种简化的适用性常需要验证。对于更复杂的情况需参考所列的文献或向专家请教，作细致的调查研究。

本书分下列几部分：

——第1章简要地介绍土木工程中常见的动力问题。涉及的问题较广，有些问题在本书中不包括。

——第2章是关于人产生的振动。由人活动产生的动荷载，其影响及其防止措施，深入地讨论了在人行结构、办公楼、体育馆、舞厅和音乐厅、游泳池高跳水台中的振动问题。

——第3章涉及上面所述类型的机械振动。在这个范围内的动荷载、其影响及防止措施。

——第4章介绍受动荷载影响的接受标准。根据不同的环境情况，这些数值可以在评价振动问题时作为容许值。

——附录A介绍结构中由于人或机械产生的振动而发生问题的工程实例。其中有些还讨论了改善措施。这些实例，特别是产生损坏的实例，提供了很有价值的经验。

——附录B提供了动力学的基本知识。收集了一些确定梁、板特征频率的公式，介绍设计可调频消振器的原则，评述了主要

目 录

第1章 结构动力问题概述	1
1.1 动荷载的特性	1
1.1.1 一般情况	1
1.1.2 谐波荷载	1
1.1.3 周期荷载	2
1.1.4 非周期荷载	3
1.1.5 冲击荷载	4
1.1.6 其它荷载指标	4
1.2 动荷载的影响及防止措施	5
1.2.1 影响的分类	5
1.2.2 人引起的振动	6
1.2.3 机械引起的振动	6
1.2.4 风	7
1.2.5 水波	8
1.2.6 地震	8
1.2.7 铁路和公路交通	8
1.2.8 建筑施工	9
1.2.9 冲击	9
1.2.10 冲击波和爆炸	10
1.2.11 支承破坏	10
第2章 由人产生的振动	11
2.1 概述	11
2.2 人活动的动荷载	11
2.2.1 走和跑	12
(a) 一般特征	12
(b) 垂直荷载的时间函数	14
(c) 水平荷载的时间函数	20
(d) 人数的影响	21

(e) 人为激振	23
2.2.2 跳	23
(a) 一般特征	23
(b) 荷载-时间函数	23
(c) 人数的影响	25
(d) 人为激振	27
2.2.3 跳舞	27
2.2.4 冲击运动	28
2.3 人产生振动的影响	26
2.4 防止人产生振动影响的办法	30
2.4.1 人行结构	30
(a) 频率调整	30
(b) 强迫振动计算	32
(c) 特殊措施	32
2.4.2 办公建筑	33
(a) 频率调整	33
(b) 强迫振动计算	34
(c) 特殊措施	34
2.4.3 体育馆和健身房	35
(a) 频率调整	35
(b) 强迫振动计算	36
(c) 特殊措施	37
2.4.4 舞厅和音乐厅	37
(a) 频率调整	37
(b) 强迫振动计算	38
(c) 特殊措施	38
2.4.5 高跳水台	38
第3章 机械引起的振动	41
3.1 概述	41
3.2 各种类型机械的动荷载	41
3.2.1 有旋转部件的机械	42
3.2.2 有来回摆动部件的机械	46
3.2.3 有冲击部件的机械	49

3.3 机械振动的影响	53
3.3.1 惯性振动	53
3.3.2 由结构和空气传播的声波	54
3.4 防止由机械引起振动的措施	55
3.4.1 带有旋转和摆动部件的机械	56
(a) 频率调整	56
(b) 强迫振动计算	63
(c) 特殊措施	63
3.4.2 带有冲击部件的机械	63
(a) 频率调整	63
(b) 强迫振动计算	64
第4章 接受标准	65
4.1 概述	65
4.2 结构标准	66
4.2.1 德国标准DIN4150第3部分(1983)	67
4.2.2 瑞士标准SN 640312(1978)	68
4.2.3 民主德国规定KDT046/72(1972)	69
4.2.4 国际标准草案ISO/DIS4866(1984)	70
4.3 生理标准	71
4.3.1 德国标准DIN4150第2部分(1975)	73
4.3.2 国际标准ISO2631(1980)	74
4.3.3 德国规定VDI2057(1983/1981/1979)	76
4.3.4 英国建筑研究院文摘278(1983)	77
4.3.5 英国标准BS5400第2部分(1978)	77
4.3.6 英国标准BS6472(1984)	77
4.3.7 加拿大国家规范NBC,说明A(1985)	78
4.3.8 民主德国规定SBA123(1982)	79
4.3.9 文献中的标准	79
4.4 生产质量标准	80
4.5 建议的综合接受水平	81
附录A 工程实例	83
工程实例1 频率为1.92Hz的桥	83

工程实例 2	频率为 2.3Hz 的人行桥	83
工程实例 3	频率为 4.0Hz 的人行桥	85
工程实例 4	侧向频率为 1.1Hz 的人行桥	85
工程实例 5	办公建筑	85
工程实例 6	展览馆	88
工程实例 7	体育馆建筑	88
工程实例 8	与看台相连的体育馆	91
工程实例 9	健身房	92
工程实例 10	演唱流行音乐的音乐厅	93
工程实例 11	露天剧场	94
工程实例 12	10m 高的跳水台	94
工程实例 13	5 m 高跳水台	95
工程实例 14	10m 高室内跳水台	96
工程实例 15	纺织厂建筑	96
工程实例 16	有塑料成型机械的厂房建筑	98
工程实例 17	有金属模压机的厂房	99
工程实例 18	有自动镗床的厂房	100
工程实例 19	有黄油加工机械的牛奶房	101
工程实例 20	有冲压机械的厂房	101
工程实例 21	有碾磨机械的生产建筑	102
工程实例 22	有热水泵的学校建筑	102
附录B 振动理论基础知识		104
B1	单自由度体系	104
B1.1	自由振动	104
B1.2	强迫振动	108
B2	多自由度体系	117
B2.1	自由振动	118
B2.2	强迫振动	119
B3	均匀分布质量体系	123
B3.1	简支梁	124
B3.2	连续梁	127
B3.3	框架	127

B3.4 拱	127
B3.5 板	131
B3.6 等代单自由度体系	131
B4 简谐分析	135
B5 频率调整	139
B5.1 频率低调	140
B5.2 频率高调	144
B6 冲击荷载下的结构性能	144
B6.1 单个冲击荷载	144
B6.2 周期性冲击荷载	147
B7 消振器	148
B7.1 定义	148
B7.2 分类	148
B7.3 线性消振器	148
B7.4 撞击消振器	151
B8 动力材料的性能	151
B8.1 强度和延性	151
B8.2 开裂钢筋混凝土构件的弯曲刚度	152
B8.3 阻尼	154
参考文献	157
符号	165

第 1 章 结构动力问题概述

在这一章中，将讨论不同类型的动荷载、其可能的影响及现有的限制影响的方法。

1.1 动荷载的特性

1.1.1 一般情况

从广义来说，在土木工程中遇见的大部分荷载都可称为动荷载，因为它们随时间变化。但是在实际中，变化慢的荷载可以按准静力处理，因为惯性力和阻尼力可以忽略。事实上惯性力和阻尼力的存在是动载与静载之间的重要差别。这些力是由于在结构构件中存在速度和加速度引起的，并且必须包括在应力和反力的计算中。这些力的大小及其随时间的函数取决于外部振动荷载的种类以及结构构件本身固有的动力特性。

按照荷载的时间函数，动荷载可分为：

- 谐波荷载；
- 周期荷载；
- 非周期荷载；
- 冲击荷载。

荷载还有一些其它方面的指标：荷载循环次数，加荷速度或应变速度，荷载发生的概率或可能达到的峰值（见 1.1.6 节表 1.1）。

1.1.2 谐波荷载

谐波荷载按正弦函数变化，有一定的相位或没有相位。这种荷载在结构上作用一定时间后可产生一个稳态的振动反应（如图 1.2（a），亦可参阅附录 B1）。谐波荷载可由带有稍微不平衡

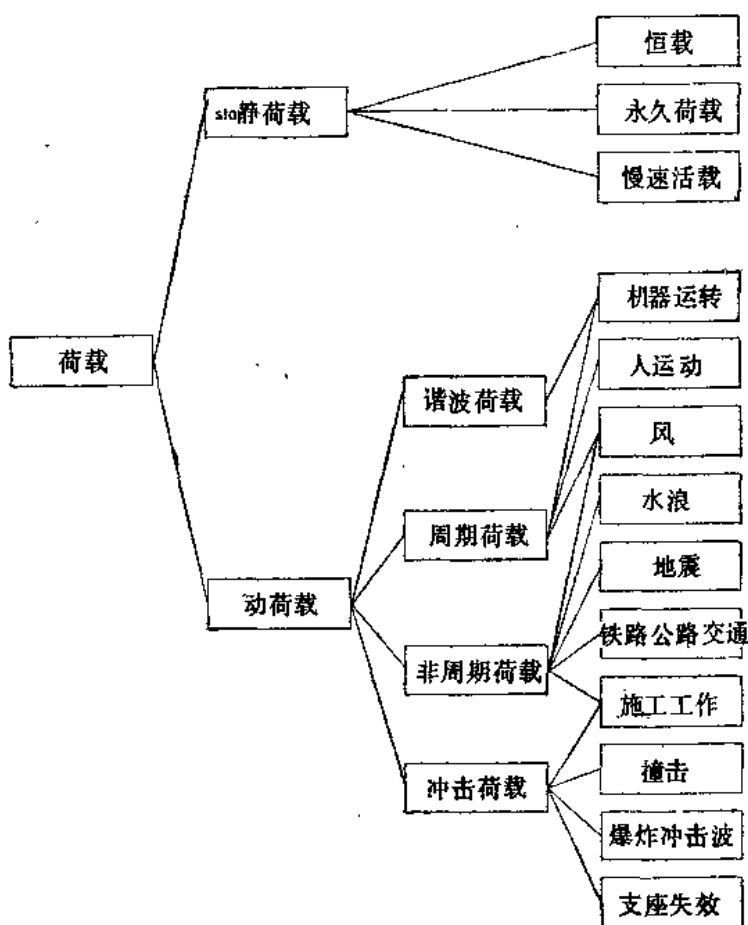


图 1.1 土木工程中的荷载类型

同步转动质量的机器（如发电机）引起，也可由机器中故意设置的不平衡力引起（如振动机械）。

1.1.3 周期荷载

周期荷载随时间变化，按规则的间隔即所谓周期重复。虽然在一个周期内函数是任意的（如图1.2b），但其重复性可以通过傅里叶变换分解成一系列的谐波荷载（见附录 B4简谐分析）。此外，这种荷载的持续时间长度足以产生稳态的振动反应。

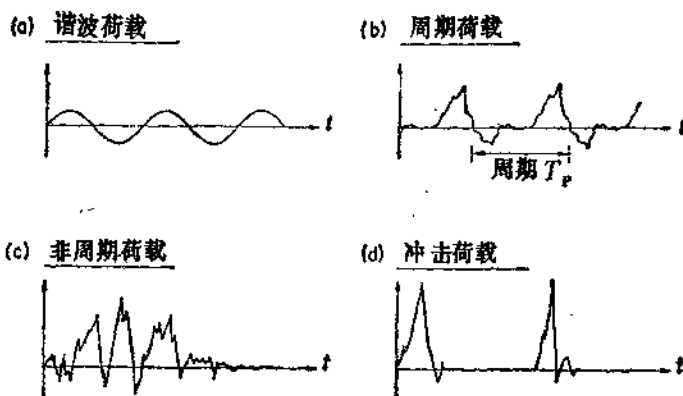


图 1.2 典型动荷载的时间函数

周期荷载可由下列因素产生:

- 人的运动, 如走路、跳跃、跳舞、故意的激振等;
- 带有一个以上不平衡质量的机器 (如旋转压力机、离心泵、鼓风机、离心分离机、振动机械等);
- 带有往复运动部件的机器 (如内燃机、往复式压缩机、纺织机械、框架锯、钟等);
- 带有周期冲击部件的机器 (如冲床、压力机等);

周期荷载也可以由风引起, 如由旋涡风引起, 虽然风的一般特性是非周期的。

1.1.4 非周期荷载

非周期荷载随时间任意变化, 没有任何周期。而且荷载的持续时间也是任意的 (如图1.2c)。这种荷载可以由下列因素引起:

- 风, 正面风及侧面涡流;
- 水波浪;
- 地震;
- 铁路和公路运输, 有的直接作用于结构, 有的通过地面相互作用 (地面振动);

——施工工作(如用夯或钻机打桩,使用振动碾、鼓风机等)。

1.1.5 冲击荷载

冲击荷载也是非周期性的。但是其作用时间十分短促,因而对结构构件影响的结果十分不同(图1.2d)。这种类型的荷载可以由下列因素引起:

- 以单向撞击工作的机器(如锻锤);
- 施工工程(如在靠近鼓风机操作的地方);
- 冲击(如车辆、飞机、船只碰撞,炮弹击中建筑物,火箭坠落在有防护的坑道上等);
- 爆炸波;
- 支承构件突然倒塌(如楼房柱子或桥墩的倒塌)。

1.1.6 其它荷载指标

除了荷载——时间函数外,其它一些参数也是重要的(见表1.1)它们是:

- 在给定的时间内或结构整个寿命期间荷载的循环次数(在表1.1中用 N 表示);
- 应变速度(在表1.1中用 $\dot{\epsilon}$ 表示)或加荷速度;
- 动荷载的峰值和增荷时间;
- 在结构整个寿命期间异常荷载出现的可能性,如地震、爆炸冲击波等。

表1.1 静荷载和动荷载的特性

N ——荷载循环次数 $\dot{\epsilon}$ ——应变速度(s^{-1})

静载和准静载		动 荷 载		
短 期	长 期	疲 劳 极 限	低周疲劳极限	冲 击
		$10^3 < N < 10^7 \sim 10^8$	$10 < N < 10^3$	$1 < N < 20$
$\dot{\epsilon} < 10^{-3}$	$\dot{\epsilon} < 10^{-3}$	$10^{-3} < \dot{\epsilon} < 10^{-1}$	$10^{-3} < \dot{\epsilon} < 10^{-1}$	$10^{-3} < \dot{\epsilon} < 10 \sim 10^3$
	• 蠕变和松弛 • 温度	• 交 通 • 机 械	• 地 震	• 冲 击 • 冲击波 • 支承倒塌

1.2 动荷载的影响及防止措施

1.2.1 影响的分类

动荷载的影响可分成三种类型:

——对结构的影响;

——对人的影响;

——对机械和设备的影响。

对结构的影响

结构可能在承载能力和使用可靠性方面受到影响。

承载能力的削弱有下列几种形式:

——疲劳:

动荷载产生的应力波动,在经过一定的循环次数后,能够明显地降低材料的强度。应力变化幅度越大,这种降低就越大。所谓抗疲劳设计就是不仅要考虑荷载的类型,而且也要考虑结构的计划寿命或预期寿命。若应力变化幅度很大,循环次数少也足以引起结构破坏,这种疲劳叫低周疲劳。

——局部产生塑性:

为了经济地设计结构构件,在发生概率很小的极大荷载作用下(如车辆撞到柱子上)常常允许某些构件发生有限的或局部的塑性变形。

——在高速荷载作用下材料性质的变化:

增荷时间很短的荷载会在各个构件中引起很高的应变速度(见表1.1),大多数材料的强度特性和刚度特性对应变速度变化敏感(见[1.1]、[1.2])。对土木工程中常用的钢和混凝土材料,应变速度对结构承载能力常常是有益的。

对使用可靠性的削弱主要表现在对建筑非承重构件的损坏,例如隔墙上的裂缝,建筑饰面的脱落等。

对人的影响

动荷载产生的建筑振动使居住者受到干扰和不舒服,这影响

了建筑的使用性。

对机器和设备的影响

通过结构传来的振动对生产过程的适用性有损害。设备的二次振动会妨碍生产过程进行，影响机器的性能，产生一些材料技术方面的问题。

1.2.2 人引起的振动

人的活动可以产生各种动荷载。动荷载可以是周期性的（如走、跑、跳跃、跳舞等）；也可以是非周期性的（如从高的跳水台上跳下）。人产生的振动一般在下列场合产生：

- 人行结构；
- 健身房或体育馆；
- 游泳池中的跳台。

振动结果可产生下列危害：

- 结构超应力，严重时造成结构破坏；
- 损坏非结构构件（如体育馆中的装饰）；
- 无法忍受的振动速度和加速度，使受影响者感到烦躁和不舒服；

- 过度的噪音（如由于设备回响引起）。

在所有可能的防止措施中，最重要的是避免共振现象产生。

可以采用下述防止方法：

- 增加结构刚度或增加特殊结构构件；
- 安装调频消振器；
- 按规定使用，避免产生临界荷载。

1.2.3 机械引起的振动

机械对建筑或结构构件可产生几种十分不同的荷载方式，这取决于临界力是来自机器零件的转动、摆动还是间歇运动。因此机器可以产生谐波荷载、周期荷载或非周期荷载（图1.1）。

结构中的振动可引起：

- 结构构件疲劳破坏；
- 非结构构件损坏（如使隔墙损坏）；