

房屋与构筑物动力 计算设计手册

〔苏〕 Б. Г. 科列涅夫 主编
И. М. 拉比诺维奇

沈聚敏 陆赐麟 高伯阳 蔡绍怀 译

科学出版社

料，特别详尽地编写了有关建筑材料动力性能、动力荷载及对动力计算结果的要求方面的资料。本书的主要部分直接涉及动力计算问题，广泛介绍杆件和杆系、平板、壳体、悬式结构的计算问题。这些篇章包括十分丰富的参考材料。同时本书有工程计算方法及其依据和说明的章节。这些章节深化了规程中介绍的材料，毫无疑问将有助于使现代工程计算方法的基本原理的本质获得正确的理解。据此书中探讨了机器荷载作用下房屋计算问题、风作用下建筑物的计算、机器基础的计算以及冲击荷载作用下建筑物的计算。

现代结构动力学对防止振动方法的研究给予了极大重视，这些问题在本手册中得到广泛反映。有关隔振线性理论的章节具有明确的工程目的性。将来可望发展的隔振非线性理论在专门章节中也得到反映。动力式和冲击式振动阻尼器的问题本书也略有涉及，虽然阻尼器应用还不普遍，但它在防振方法中的应用还是前途广阔和行之有效的。有两章谈及模型试验及振动量测方法问题，为读者提供了有关振动研究中试验方法的某些概念。

本手册主要以一般工业厂房和构筑物设计中发生的动力问题为目标，并未涉及水工结构物和交通构筑物(桥梁，高架桥等)的动力问题。关于考虑特殊动力作用的某些十分重要的动力计算问题本书也未论述。例如关于地震作用的计算，它如同在易爆性生产条件下建筑物在爆炸作用下的计算一样，是比较新的课题，还有与空防防御工事方面有关的动力问题，本书均未论及。

本手册未曾纳入那些对进行动力计算和静力计算同等需要的具有共同性质的章节。书中有“数学”一章和数据表格，但没有“理论力学”一章，虽然理论力学知识，特别是某些章节，如同微幅线性振动理论一样，对读者是完全需要的。本手册也未编进结构动力学的导论章节，这些章节实际上在本学科的所有初级课程中都有介绍。

Б. Г. 科列涅夫 И. М. 拉比诺维奇

内 容 简 介

本书内容丰富,取材新颖,涉及了工程振动问题的主要领域,总结了苏联在该领域内的最新研究成果和实践经验,着重于结构动力学理论的实际应用,提供了实用的分析方法和技术,并对苏联有关结构动力计算和隔振等方面的规程和指南作了简要的说明,具有理论和实际紧密结合的鲜明特点。主要内容有:结构振动标准的评价,动力荷载的确定,建筑材料和结构的动力特性,各类房屋和工程结构物(杆系、板壳、塔桅、悬索、桥梁等结构)的动力计算,设备基础振动,系统的隔振和消振,动力试验方法与模型相似理论等。

本书可供从事工程结构设计、施工和科研工作的技术人员以及有关高等院校师生使用。

Б. Г. Коренев И. М. Рабинович
ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ
(Справочник проектировщика)
Москва Стройиздат 1984

房屋与构筑物动力计算设计手册

[苏] Б. Г. 科列涅夫 И. М. 拉比诺维奇 主编
沈聚敏 陆赐麟 高伯阳 蔡绍怀 译
责任编辑 杨家福

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1990 年 5 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32
1990 年 5 月第一次印刷 印张: 18 3/4
印数: 0001—2 260 字数: 490 000

ISBN7-03-001570-3/TU·15

定价: 17.90 元

译 者 的 话

本手册是一本比较全面、系统、实用的结构动力学专著，具有理论和实际紧密结合的鲜明特点。它为从事土建设计的工程技术人员提供了进行建筑结构动力计算所需的方法和参考数据，对有关结构动力计算的规范、规程和一般教科书进行了补充。它不仅有助于设计工程师正确了解及合理选择计算方法，而且能使他们正确地选择计算简图。本手册主要是针对一般工业厂房和构筑物设计中所遇到的动力学问题，其内容包括动力荷载作用下各类建筑结构的计算、动力试验方法与量测技术，以及建筑物的隔振、防震方法和措施等。此外还特别详细地论述了有关动力荷载作用，材料的动力特性，振动对人体及生产工艺的影响，结构持久强度的计算等专门问题。

本手册由苏联著名学者 Б. Г. 科列涅夫教授和 И. М. 拉比诺维奇教授主编，第一版曾以“Справочник по динамике сооружений”（结构动力学手册）书名于 1972 年在莫斯科出版。后来，作者吸取了近十余年来在结构动力计算理论及其应用方面的最新进展和实践经验，对第一版中的一些章节作了重要的修改和补充，并使它的内容与苏联新颁布的有关规范、规程保持一致，以本书名作为第二版于 1984 年在莫斯科出版。

1985 年，译者参加了在莫斯科召开的国际空间与壳体结构会议。会议期间，Б. Г. 科列涅夫教授将本书的俄文版本赠与译者，并期望我们能将这本手册译成中文。我们考虑到该书确有相当参考价值，故将其翻译成中文出版，以满足广大读者的需要。

全书共分十八章。第一章为建筑结构容许振动级差的评估，第二章为机器动力荷载的确定，第三章为建筑材料和结构的动力特性，第四和第五章为周期和脉冲荷载作用下的建筑物计算，第六

章为各种类型动力基础的计算,第七、八、九和十一章论述了杆件体系、板壳结构和悬式结构的动力分析方法,第十章为高耸构筑物的风振,第十二和十三章为移动荷载和短时荷载作用下建筑物的计算,第十四至十六章为线性和非线性隔振体系及减振装置,第十七和十八章为结构动力试验方法和测量技术. 这些内容分别由有关专家、学者编写. 每一章都相当详细地叙述了必要的概念、计算方法和参考数据,并引用了大量原始文献作为补充,因而几乎都可以看成是一篇独立的专论. 但对各章之间,作者们力求保持前后呼应,尽量避免重复和矛盾,从而使全书成为统一的整体.

本书的前言及第一、二、三、四、十一章由陆赐麟译,沈聚敏校;第五、六、七、十三章由高伯阳译,蔡绍怀校;第八、九、十章由沈聚敏译,陆赐麟校;第十二、十四、十五、十六、十七、十八章由蔡绍怀译,高伯阳校. 沈聚敏负责全书的总校. 在译、校过程中,对发现的一些印刷上的错误已予更正,对一些差错和不妥之处加了附注. 为了使我国读者阅读起来更方便,对一些俄文符号作了相应的变更. 由于译者水平所限,译文中难免有不少缺点和错误,恳请读者批评指正.

第 二 版 序 言

本手册第二版与其第一版一样，致力于为工程设计人员提供建筑物动力计算所需的参考数据，并以此补充现有指南性的和教学性的文献。它以解决设计一般工业厂房和构筑物中发生的动力计算问题为目标，同时把主要注意力放在一般使用荷载上——首先是由于机器和设备引起的动力荷载及风荷载上。这里仍然没有讨论地震作用及爆炸时产生的荷载等。所有这些问题都在 1981 年出版的设计手册“Динамический расчет сооружений на специальные воздействия”(建筑物在特殊荷载作用下的动力计算)中得到论述。该书实质上是本手册第一版在结构动力学方面的续篇，可视为其第二卷。所以该手册的作用不仅在于回答其中所直接涉及的问题，而且还为前述手册的读者在一定程度上提供在特殊荷载作用下的建筑物动力计算方面的基本材料。

编订本手册第二版时对第一版一些章节从根本上用动力计算理论和实践方面的崭新资料加以改写和补充。它的内容又接近于新出版的规范规程材料，但是在整体上完全保持了原有的结构。

第十章有了最显著的变化，由于风荷载作用下建筑物计算方面出版了新的指南，所以进行了重写。对有关机器基础方面的第六章作了重大补充，其主要目的是在进行基础计算时更深入地反映被视为弹性半空间的地基中的波动现象。第十二章进行了许多变更和补充，该章叙述移动荷载作用下建筑物计算方面的材料。

第一章有根本的改变，因为在这一段时间里有许多新的振动规范付诸实施，特别是探索振动对人体器官影响方面的研究有了进展。第四章也进行了某些更动，该章涉及机器周期性荷载作用下建筑物计算的实际课题。

第一版序言已经指出未曾纳入该手册选题的有桥梁、高架桥

及其他交通构筑物、水工结构物，以及各种地下建筑物、储液库等特种建筑物的动力计算。其实这些问题在实际中必然是令人十分关切的。我们觉得，将来这些内容若能作为特种手册版本的选题，则该手册可视为结构动力学方面系列手册的第三卷。

于 1978 年逝世的苏联科学院通讯院士、教授、社会主义劳动英雄 И. М. 拉比诺维奇未能参加本序言的撰写。他是结构力学领域中最卓越的学者，他生前在很大程度上已开始了对第一版的改写工作。

Б. Г. 科列涅夫

第 一 版 序 言

现在进行房屋和建筑物设计必须考虑动力作用，这是由于多种原因所决定的。最显而易见的原因是：机器、吊车和其他设备产生的动力荷载增大；广泛应用的振动、冲击和生产性爆炸已成为工艺流程中的组成部分；建造必须考虑风的动力作用的柔性悬式建筑物等等。同时，还由于动力学涉及为完善精密工艺技术的流程，需要减小振动级差，进行科学研究工作时需用精密测量仪表及特殊实验设备，所以它日益受到重视。另外，十分重要的技术问题之一是保证振动的级差为卫生保健方面所允许。

因此设计建筑物时，除静力作用外，还需考虑动力作用及其荷载。只限于静力计算并以某种臆断的动力系数来考虑动力作用的企图早就被认为是毫无根据的。

基于房屋动力计算理论基础上的结构动力学已获得广泛的发展。大量的著作介绍了结构力学的这一领域，但它们只是在综述的文献中以最一般的形式来反映。当然，各种各样研究成果用于实际是有困难的。显然，其原因之一就是著作本身十分浩瀚。因此十分需要编写一些材料，以帮助设计工程师进行动力计算，并使其不仅能正确和合理地选择计算方法，而且也能正确地选择计算图形——其重要性绝不亚于前者。由于以 В. А. Кучеренко 命名的中央建筑结构科学研究院编制了一系列建筑物动力计算方面的规程和指南，上述问题在很大程度上已获解决。这些规程大大简化了动力计算。然而它们远不能阐明在设计中遇到的所有问题。此外，没有大量的参考数据进行计算也是十分困难的。

本书的目的在于为工程设计人员提供进行建筑物动力计算时所需的参考数据，以补充规程和教科书中的不足。

本手册中编入有关建筑物动力计算及防止振动方法各类材

目 录

译者的话	i
第二版序言	iii
第一版序言	v
第一章 建筑结构容许振动级差的评估	1
1.1 概况	1
1.2 振动对人体生理影响特性的评估	5
1.3 有关振动标准定额	9
1.4 根据劳动安全系统标准 ГОСТ 12.1.012-78 数据的工作场所生产性振动的容许级差	17
1.5 动力计算时按卫生规范确定结构振动的容许级差	17
1.6 极限容许动挠度对振动的限制	23
第二章 机器动力荷载	24
2.1 确定动力荷载的一般原则	24
2.2 具有构造不均衡运动部分的机器荷载	27
2.3 具有公称均衡运动部分的机器荷载	39
2.4 被加工材料运动所产生的动力荷载	40
第三章 建筑材料和结构的动力特性	46
3.1 动力刚度	46
3.2 内摩擦力	48
3.3 持久强度	61
第四章 机器和设备周期荷载作用下的建筑物计算	78
4.1 房屋和构筑物承重结构上的动力作用	8
4.2 基本计算原则	85
4.3 计算参数的确定	95
第五章 使用脉冲荷载作用下建筑物的计算	114
5.1 基本计算原理	114

5.2	单自由度体系	119
5.3	多自由度体系	133
5.4	梁和板	140
第六章	动力基础计算	149
6.1	概述	149
6.2	块式基础的计算	151
6.3	框架式基础的计算	164
6.4	地基动力特征的确定	170
第七章	杆件及杆件体系的振动	178
7.1	概论	178
7.2	具有离散的质量分布的体系	179
7.3	具有分布质量的梁的横向振动	206
7.4	平面框架的振动	227
第八章	板的振动	232
8.1	实用的弯曲理论和弹性板的微幅振动	233
8.2	各向异性板	239
8.3	柔韧板	243
8.4	板振动微分方程的一般解法	245
8.5	矩形板的自由振动	248
8.6	圆形板和环形板的自由振动	255
8.7	其他形状板的自由振动	260
8.8	连续板和无梁板	264
8.9	板的强迫振动	268
第九章	弹性壳体动力学	276
9.1	弹性薄壳的基本动力方程	276
9.2	关于壳体自由和强迫振动问题的求解方法	282
9.3	等厚度闭合圆柱壳的振动	284
9.4	等厚度椭圆截面闭合柱壳的振动	299
9.5	波纹圆柱壳的振动	301
9.6	具有纵向和环向加劲肋的闭合圆柱壳的振动	303
9.7	锥壳的振动	304
9.8	球壳的振动	311

9.9	环形圆曲面壳体的振动	316
9.10	矩形平面扁壳的振动	319
第十章	风荷载作用下高耸构筑物的动力计算	322
10.1	风湍流的构成	322
10.2	紊动参数(强度、比尺)	323
10.3	标准的和计算的速度风压	330
10.4	地表下垫面的不同条件下风速和速度风压的竖向剖面图	331
10.5	作用于房屋和构筑物上的风荷载	334
10.6	作用在高耸构筑物和高层房屋上的风效应	344
第十一章	悬式结构的动力计算	376
11.1	具有不动支座的弹性杆件线性横向自振	376
11.2	非线性横向自由振动	385
11.3	简谐振动时的非线性横向强迫振动	391
第十二章	移动荷载作用下建筑物的计算	395
12.1	求解导向结构与移动荷载相互作用的方法	395
12.2	与运动荷载相互作用的梁的横向振动	396
12.3	梁在等速和变速移动荷载下的动力挠度和弯矩	404
12.4	移动荷载对无限长弹性地基梁的动力作用	406
第十三章	建筑物在高强度短时荷载作用下的计算	408
13.1	短时荷载的形式	408
13.2	变形速度对材料的力学特征的影响	409
13.3	材料及结构的计算变形图	410
13.4	极限状态	412
13.5	受短时荷载作用的结构及建筑物在塑性阶段的主要计算方 法	413
13.6	单自由度体系	415
13.7	梁式结构	420
13.8	四边支承的弹塑性薄板	431
13.9	弹塑性圆拱	435
13.10	钢筋混凝土壳	440
第十四章	隔振	445

14.1	隔振对象的基本参数	446
14.2	隔振对象的自振频率	450
14.3	隔振对象在动力荷载作用下的位移	453
14.4	经隔振器传于基座的动力荷载	465
14.5	机动法隔振	467
14.6	弹簧型、橡胶型和混合型隔振器的计算	470
14.7	隔振的实用计算	477
14.8	隔振计算举例	480
第十五章 非线性隔振体系		493
15.1	简谐线性化	493
15.2	对于某些类型非线性函数简谐线性化的系数	494
15.3	单自由度非线性体系在单简谐激励下的基本共振	498
15.4	隔振体系的次谐波振动	500
15.5	非线性隔振体系受随机作用的计算	505
15.6	统计线性化的系数	510
15.7	隔振体系的自参量振动	512
15.8	具有极低自振频率的弹性悬挂的计算	513
第十六章 减振装置		516
16.1	动力减振器	517
16.2	撞击减振器	520
16.3	阻尼器	526
16.4	限振器	529
第十七章 研究结构振动的实验方法		532
17.1	振动量测的机械仪表	533
17.2	振动量测的电子仪表	534
17.3	结构振动的量测方法	539
17.4	构筑物 and 结构的特殊动力荷载试验	542
第十八章 模拟试验		545
18.1	物理模拟的一般原则、相似原理、量纲原理	546
18.2	具有集中参数的力学振动体系	558
18.3	杆系结构和拱	560
18.4	薄板和扁壳	566

18.5 可变形固体	568
18.6 模型试验技术	572
参考文献	574

第一章 建筑结构容许振动级差的评估

A. M. СИЗОВ

1.1 概 况

承受动力荷载建筑物的容许振动级差取决于：(a) 振动对人体的生理影响；(b) 振动结构物的承载能力(强度、稳定性及耐久性)；(c) 振动对生产过程(技术条件)的影响。

除此三个条件外有时补充第四条，即按容许的极限动力挠度或变形来限制振动。

振动容许级差的规范标准工作是复杂的课题。许多规范标准的问题在有关文献中论述得仍不够完备。有些情况缺少有关容许振动的数据，而且已有的却又带有定性的或预估的性质。根据卫生保健条件确定的数据不大可信，因为这些数据取决于振动对人影响的特征，并与人们所能承受的个性有关。问题不仅在于建立不致引起人们罹病的安全振动级差，而且也要寻求保证人们不致降低劳动生产率，能有正常的卫生保健工作条件的振动级差，并考虑到劳动职业特点。毫无疑问，不同工作方式的生产企业、设计院和科学研究院、医院和学校的容许振动级差不可能是一样的。有关居住的、观演性的和行政管理性的建筑物容许振动级差的问题完全是另一回事。

根据与零件加工精度、与量测控制仪表工作和生产工艺流程的影响等因素有关的生产条件来论证其容许振动级差是最复杂的。

对结构没有卫生保健和工艺条件方面限制振动的要求时，所用结构在振动时必须保证具有足够的刚度，以极限容许动挠度来确定振动的限制条件。

在静力和动力荷载共同作用下，以结构的强度和耐久性来确定保证其承载能力的容许振动级差。当进行强度和稳定性计算时，容许振动值由作用于结构上的静力和动力计算荷载算出；而当进行耐久性和变形性(卫生保健条件)的计算时，则由静力的标准荷载和动力的计算荷载算出。

必须保证卫生保健和工艺条件的容许振动级差以及极限容许动挠度，都由 $a_{dyn} \leq [a]$ 公式确定； $[a]$ ——容许振幅，其值根据上述条件定。

对正在使用的厂房和构筑物进行大量的振动观测以及对建筑结构振动时的强度进行计算表明，在大多数情况下必须减小在其上有人的结构振动级差，这是根据振动对人体的生理影响而确定的，而并非由于振动对结构强度的影响^[1]。

由于上述理由，本章的主要注意力将放到根据卫生保健条件对振动限定的资料和有关极限容许动挠度的数据上。同时将从对人体机能影响的角度而不是从对听觉影响的角度讨论低频振动(100Hz 以下)的影响。本手册的第四章将更详尽地给出有关根据结构承载力和工艺条件的振动容许度的资料。

由卫生保健条件制约的建筑物容许振动级差是根据振动对人体影响的性质和强度而定。超出容许振动级差可能容易引起疲惫，降低劳动生产率，甚至导致振动疾病。

振动对人的影响有两种不同方式：(1)直接的——当人体全身或某些个别部位处于振动情况下；(2)间接的(视觉的)——当视野范围内某些个别物体处于振动情况下。

直接的振动影响可能有三种情况。此时振动被称为：(a)全面的——当人体位于振动的基座之上时(在楼层、工作平台之上，在运动的列车车厢和汽车之内，在自动扶梯上等等)。此时通过支承表面振动传播至全身；(b)局部的——振动影响到身体的某些部位(使用振动工具和移动式振捣器的部位，与机器的振动部件接触的部位等)；(c)空间的——当人体处于振动的(脉冲的)介质(空气和水)之中。振动通过介质传给身体的整个表面。

间接的(视觉的)振动对人产生心理上的影响。例如屋盖桁架间支撑,悬挂于各种结构上的通风管道、照明电线、枝形吊灯、探照灯、透明灯以及诸如此类物体的可见颤动,虽然仅是对视觉的影响,但一般都令人不愉快。为了限制悬挂在振动结构物(屋盖桁架,楼层梁等)上物体的颤动,必须规定建筑结构物振动的极限容许动挠度。

近年来机械振动对人体的影响按类似于声响影响的方法,以所谓分贝标度来评估。这是因为现代技术所接触到各种参数量的变化具有宽广的频域之故。例如在声学中音量变化可有几百万倍之差——从低声细语到火箭发动机的轰鸣,其频段从 10Hz 至 15—20kHz。对这类数量用线性坐标来表示各种关系的图表实际上已不可能应用,因为其表达方式已失去直观性,所以,在这种情况下通常采用对数坐标。这类对数坐标之一就是分贝标度,即沿其一轴线刻印所谓分贝的标度(俄文符号为 μB , 国际符号为 dB)。这种标度的特点是,其值的读数是从某一初始级别开始,即从通常称之为界限值开始。

分贝不是物理量,而是表征两个独立同名量关系的无量纲数学概念,它们根本上十分相异,与本质无关。

卫生规范^[9,10]中规定结构物的容许力学振动级差按位移($S_{m,sq}$)、速度($V_{m,sq}$)和加速度($W_{m,sq}$)均方值的分贝数按下列公式确定:

$$\text{位移级差 } L_s = 20 \lg \frac{S_{m,sq}}{S_0} \quad (1.1)$$

$$\text{速度级差 } L_v = 20 \lg \frac{V_{m,sq}}{V_0} \quad (1.2)$$

$$\text{加速度级差 } L_w = 20 \lg \frac{W_{m,sq}}{W_0} \quad (1.3)$$

式中 $S_0 = 8 \cdot 10^{-9}$ ——振动时的界限位移值(mm); $V_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ ——振动时的界限速度值 (mm/s); $W_0 = 3 \cdot 10^{-1}$ ——振动界限加速度值(mm/s²)。各数取自规范^[10]。

此时周期为 T 的某个连续周期函数 $A(t)$ 的值可用均方值来表示,即

$$A_{m.s.g} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [A(t)]^2 dt} \tag{1.4}$$

谐波函数的均方值 $A_{m.s.g} = A_{\max}/\sqrt{2}$, 式中 $A_{\max}$ 为函数的振幅值。

分贝系统的优点是: (a) 通用性;即评估各种不同参数和现象时都可使用;(b)可以用参数量变动剧烈现象中的前一百个数字

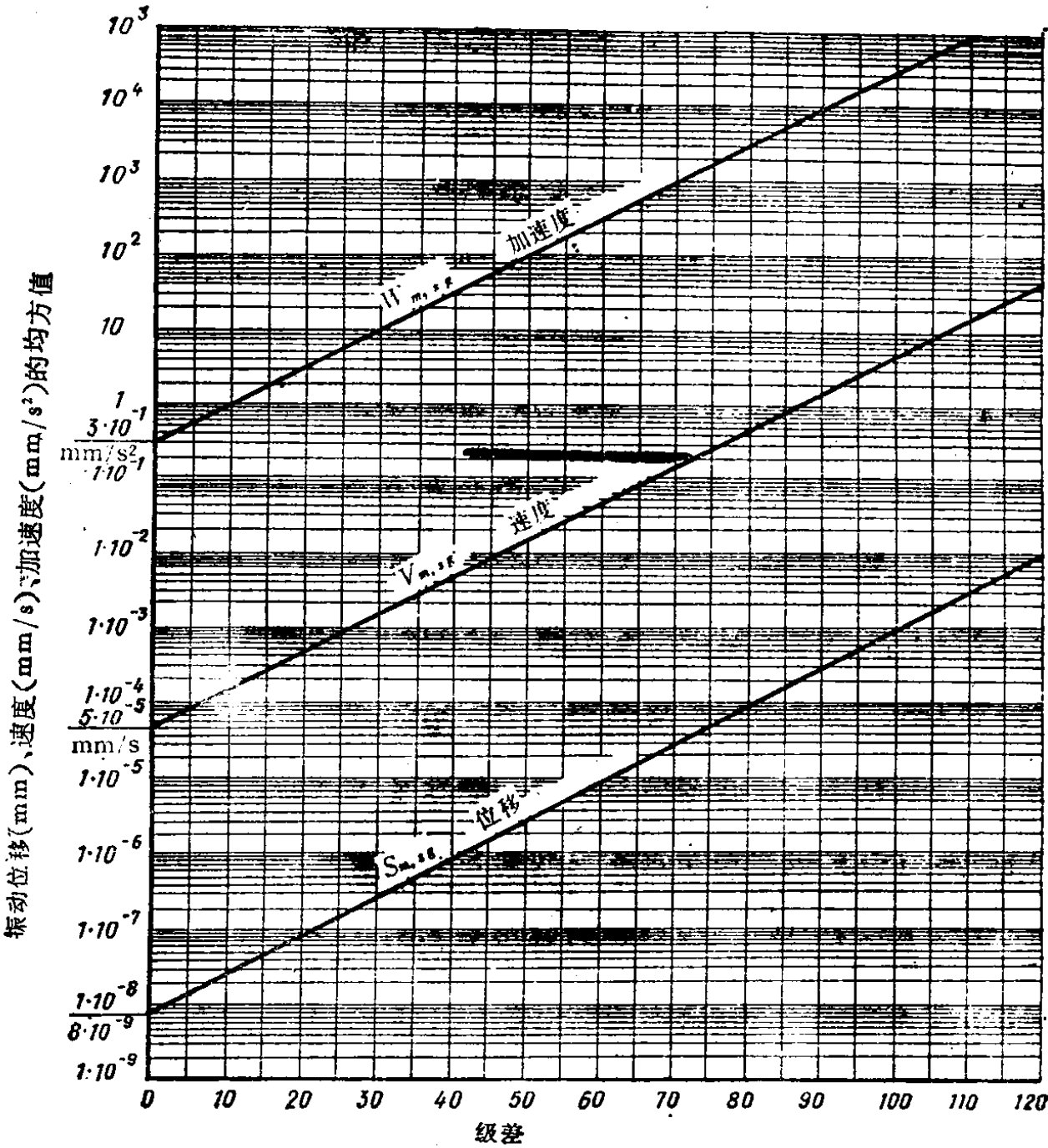


图 1.1 位移、速度和加速度均方值的分贝转换图。界限值按参考文献[10]取值