



振动利用工程

闻邦椿 李以农 张义民 宋占伟 著



科学出版社
www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

振动利用工程

闻邦椿 李以农 张义民 宋占伟 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要论述作者所在科研团队长期从事振动利用工程的科学研究工作所取得的理论与实际成果,同时也吸取了国内外学者在该领域各研究分支上所取得的部分主要成果。是国内外在该科学技术领域本书的第一部内容全面而系统的专著。本书除建立了“振动利用工程”这一新学科的理论框架外,还从工艺理论的创新、振动机构的创新、非线性动力学理论的创新,以及这些技术的工程应用等出发,详细阐述了振动利用技术与设备工艺过程的理论、线性或近似于线性振动的利用、非线性振动的利用、波及波能的利用、电磁振荡器的科学与工程应用,以及相关的线性与非线性动力学理论和试验研究的结果。此外,还扼要举例说明了研究自然界与人类社会中的振动现象及振动规律利用的重要性及其意义。

本书可供从事振动工程,特别是从事振动利用工程的科技工作者及大专院校的研究生、高年级本科生阅读,还可供企业和技术部门的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

振动利用工程/闻邦椿等著. —北京:科学出版社,2005

ISBN 7-03-015209-3

I. 振… II. 闻… III. 振动—利用 IV. TB535

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第038674号

责任编辑:马长芳/责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬/封面设计:黄华斌

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年8月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2005年8月第一次印刷 印张:27 3/4

印数:1—3 000 字数:544 000

定价:59.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

“振动利用工程”是 20 世纪后半期逐渐形成和发展起来的一门新学科。目前，它正处在迅速发展过程中，由于该学科所涉及的技术与工农业生产及人类生活联系得十分密切，它能为社会创造重大的效益，能为人类生活提供极大的方便和良好的服务，已成为人类生产活动与生活过程中一种不可缺少的手段与必要的机制。

振动利用工程最近 30 多年来的发展举世瞩目。就拿振动机械来说，目前已成功应用于工矿企业中的该类机器已达到数百种之多，在许多部门，如采矿、冶金、煤炭、石油化工、机械、电力、水利、土木、建筑、建材、铁路、公路交通、轻工、食品和谷物加工、农田耕作、生物工程、信息技术等部门以及在人类日常生活过程中，数以万计的振动机器和振动仪器已成功用来完成许多不同的工艺过程。

在振动利用技术中，除利用线性振动原理和非线性振动原理外，波动与波能在许多部门也得到了广泛的应用。例如，在工程地质部门，利用振动所发生的应力波进行检测和地质勘探；在石油开采中，利用振动所引发的弹性波来提高原油产量；在海洋工程方面，海浪波动的能量可以用来发电；在医疗方面，利用超声波等诊断和治疗疾病，彩超、医用 CT 和核磁共振等，都是对振动与波动原理的实际应用；在电子和通信工程方面，电视机和收音机中的振荡电路、门铃、电话机、光导纤维通信技术、录音机、电视机、收音机、程控电话等诸多电子器件以及电子计时装置和通信系统使用的谐振器等都是通过振动才能有效地工作。

从广义的角度来看，在自然界及宇宙中到处存在着振动，月亮的圆缺、潮汐的涨落、树木的年轮等，对这些振动和波动现象进行研究，找出其内在规律，并进行有效的利用，无疑会产生重大的社会效益与经济效益，并造福于人类。

在社会与经济生活中，如人口的增长与衰减、农作物虫灾发生的周期性现象、股市的涨跌和振荡、社会经济发展过程中速度的增长与衰减等，都可以归纳为不同形式的振动。

振动按其类型大致可分为：线性振动与近似于线性的振动、非线性振动、波动（水波、应力波、声波、超声波、红外波、可见光波、紫外波、各种射线波等）及电磁振荡等。因此，可将振动利用工程技术分为线性与近似于线性的振动的利用、非线性振动的利用、波动和波能的利用、电磁振荡器在工程技术中的应用、自然界和人类社会中的振动现象与规律及其利用等。

随着我国经济建设和科学研究事业的进一步发展，新用途的振动利用技术将会不断出现，它们在各个部门中的使用也将日益增多，并将发挥越来越重要的作

用。为了使这类技术获得更有效的使用并促进其进一步的发展,对它们的工作理论与设计计算方法进行较系统和详细的叙述无疑是十分必要的。特别是随着现代科学技术,诸如非线性动力学理论与方法、现代设计理论与方法和计算机技术的迅速发展,应用最新的科学技术,构建起“振动利用工程”新学科的理论框架,并对振动利用技术和设备进行全面、系统的阐述,为该种技术与设备提供研究、设计的理论与方法,将是研究与开发出新的技术与设备,以及保证该类机械可靠和有效运行的重要措施和必要手段。

本书是闻邦椿教授及其所领导的科研团队经过 30 多年的努力所取得的科研成果的总结,其中提出的创造性成果有:

1) 构建了“振动利用工程”新学科的理论框架,这不仅在国内,而且在国际上也是首次提出的。

2) 在工艺理论与技术创新方面,介绍了作者从事振动利用工程研究在工艺理论与实际应用方面所取得的成果。例如,提出了概率-等厚筛分的理论,各类工作面上物料滑行和抛掷运动的理论,以及筛分过程的理论等,并将其应用于振动机械的工作过程中。

3) 在机构创新方面,提出了多种新的振动机构。例如,激振器偏转式自同步振动机构、特殊形式的非线性惯性共振式振动机构等,获多项国家专利。

4) 在非线性动力学理论创新方面,总结作者长期对振动与波动利用技术及设备工作理论方面所进行的系统研究和试验,为振动利用工程学的多个分支(如振动同步与控制同步理论的应用、非线性振动的利用、波及波能的利用等分支)创建了理论基础。例如,各类振动机械的动力学理论、振动机械系统等效质量和等效阻尼的计算方法、振动机械与设备的二次隔振的理论与计算方法、双电机或多电机驱动振动机的振动同步理论和方法、非线性振动机械的动力学分析与动力学参数计算方法、振动机械及其主要零部件的动态设计方法等,书中许多内容都是国内外参考文献中未曾见到过的。

5) 在设计理论与方法的创新方面,提出了较为系统的振动机械动态设计理论与方法,特别是非线性振动机械的动态设计理论与方法,以及以动态优化、智能优化与可视优化为内容的综合设计法,为高质量的该类产品的设计,特别是新产品的研究与开发提供了理论参考及依据。

6) 在工程应用方面,30 年来作者将所取得的理论成果与应用成果推广应用用于工程实际。例如,大型激振器偏转式自同步振动筛、惯性共振式概率筛、新结构的振动破碎机、新结构的振动冷却机等,并成功应用于工业部门,取得了重大的经济效益与社会效益,获国家发明奖、国家科技进步奖及省部级奖 10 余项。

本书在总结作者所取得成果的基础上,还吸取了国内外科技工作者在这一领域所取得的部分最新重要研究成果,使本书的内容更为充实。

本书共分 8 章。第 1 章为概论,介绍振动利用工程学的形成与发展;第 2 章介绍振动与波利用工程领域的若干重要成果;第 3 章讲述振动利用技术与设备工艺过程的理论;第 4、5 章讨论线性或近似于线性的和非线性振动的利用;第 6 章讨论波及波能的利用;第 7 章介绍电磁振荡器的理论及应用;第 8 章简略介绍自然界与人类社会中的振动现象及振动规律的利用。

参加本书著述和撰写的有闻邦椿、李以农、张义民、宋占伟等教授。在编写过程中,还吸取了本科研团队其他同志长期研究工作所取得的成果,他们是关立章、张国忠、任立义、纪盛青、刘树英、文成秀、段志善、刘杰、张天侠、何勍、曾海泉、徐培民、芮延年、严世榕、袁惠群、韩清凯等教授,范俭、戚靖洋、赵春雨、王凤兰、宿苏英、李鸿光、熊万里、彭世德等副教授,林向阳、骆明飞、刘永熙、宫照民、张泓、徐天宁、孔庆华、王华君、马乃庆等高级工程师,以及李鹤、姚红良、刘子和、魏海燕博士等。在本书编写与审稿过程中,我们还得到黄文虎院士、杨叔子院士、高金吉院士、陈子恕教授、郑兆昌教授、胡海岩教授、王殿忠教授等的帮助,博士研究生陈宏、张晓伟、李小彭、宋雪萍、王黎、于涛、孙伟、马辉、毛居全等也给予了协助,此外,还得到了东北大学机械电子工程研究所、徐州工程机械集团、首都钢铁公司、洛阳矿山机械设计研究院、鞍山矿山机械股份有限公司、河南威猛振动机械股份有限公司、朝阳振动机械厂、海安振动机械厂、钟祥机电制造有限公司等有关兄弟单位同志们的大力支持和协助,在此特向他们致以衷心的感谢。

应该特别提出,本书编入的研究成果中相当一部分取自我们承担的国家自然科学基金项目(项目编号:59475005,50075015,59075175,59875010)、两项博士点基金项目,以及其他科研项目;本书的出版还得到了科技部出版基金委员会出版基金的资助;在此一并向他们表示衷心的感谢。

书中难免会有不妥甚至错误之处,恳请广大读者给予批评指正。

目 录

前言

第 1 章 振动利用工程学的形成与发展	1
1.1 引言	1
1.2 振动机械与振动仪器及其相关技术的应用与发展	4
1.3 非线性振动利用技术的应用与发展	6
1.4 波动与波能利用技术的应用和发展	9
1.5 电、磁、光的振荡器在工程技术中的应用.....	13
1.6 自然界中的振动现象与振动规律及其利用.....	14
1.7 人类社会中的振动现象与振动规律及其利用.....	15
1.8 展望.....	15
第 2 章 振动与波利用工程领域的若干重要成果	17
2.1 振动输送技术的应用.....	18
2.2 振动筛分技术的应用.....	19
2.3 振动离心脱水技术与选分技术的应用.....	22
2.4 振动破碎与磨碎技术的应用.....	24
2.5 振动压实与振动成型技术的应用.....	26
2.6 振捣技术的应用.....	28
2.7 振动夯土技术与振动沉拔桩技术的应用.....	30
2.8 振动诊断技术的应用.....	31
2.9 同步理论的应用.....	33
2.10 共振理论的应用	34
2.11 滞回系统的应用	36
2.12 冲击原理的应用	37
2.13 慢变参数系统的应用	38
2.14 混沌的应用	39
2.15 分段惯性力的应用	40
2.16 分段恢复力的应用	41
2.17 水波及风波的应用	42
2.18 应力波或弹性波的应用	42
2.19 超声理论与技术的应用	43

2.20	光导纤维技术与激光技术的利用	44
2.21	各种射线波的利用	45
2.22	振荡理论与技术的利用	46
2.23	气象领域的振动现象及振动规律的利用	48
2.24	社会经济领域的振动现象及振动规律的利用	48
2.25	生物工程及医疗设备中振动原理的利用	49
第3章	振动利用技术与设备工艺过程的理论	51
3.1	直线运动振动机械物料运动的理论及工艺参数计算	51
3.2	圆运动和椭圆运动振动机械物料运动的理论及工艺参数计算	79
3.3	非谐和振动机械物料运动的基本特征	89
3.4	振动离心脱水机物料运动的理论	92
3.5	物料筛分过程的概率理论	102
3.6	筛分方法的种类及概率厚层筛分法	112
3.7	振动机械工艺过程的动力学理论	119
第4章	线性或近似于线性的振动的利用	122
4.1	平面运动单轴惯性式非共振型振动机械的动力学	122
4.2	空间运动单轴惯性式非共振型振动机械的动力学	128
4.3	双轴惯性式非共振型振动机械的动力学	130
4.4	多轴惯性式非共振型振动机械的动力学	135
4.5	惯性式近共振型振动机械的动力学	139
4.6	单质体弹性连杆式近共振型振动机械的动力学	144
4.7	双质体弹性连杆式近共振型振动机械的动力学	146
4.8	多质体弹性连杆式近共振型振动机械的动力学	151
4.9	谐波电磁力的电磁式近共振型振动机械的动力学	154
4.10	非谐波电磁力的电磁式近共振型振动机械的动力学	159
第5章	非线性振动的利用	166
5.1	引言	166
5.2	光滑非线性振动系统的利用	171
5.3	分段线性非线性振动系统的工程应用	177
5.4	含滞回非线性作用力的振动系统的利用	187
5.5	自激振动系统的应用	194
5.6	带有冲击的非线性振动系统的工程应用	196
5.7	频率俘获原理的工业应用	199
5.8	含非线性惯性力项的非线性振动系统的利用	218
5.9	慢变参数非线性振动系统的利用	223

5.10 混沌的利用	227
第6章 波及波能的利用	237
6.1 潮汐能的利用	237
6.2 海浪能的利用	239
6.3 振动采油技术中应力波的利用	240
6.4 在结构健康诊断中应力波的利用	258
6.5 声波的利用	285
6.6 超声波的利用	292
6.7 电磁波与光波的利用	314
第7章 电磁振荡器的理论及应用	330
7.1 引言	330
7.2 电磁振荡器的结构与原理	332
7.3 电磁振荡器的理论基础	350
7.4 电磁振荡器的科学与工程应用	355
第8章 自然界与人类社会中的振动现象及振动规律的利用	369
8.1 气象学中的振动现象及振动规律的利用	370
8.2 潮汐的周期性振动及其利用	376
8.3 其他自然现象的振动规律及其利用	380
8.4 某些经济系统的振动现象及其振动规律的利用	383
8.5 股市波动规律及利用	391
8.6 人类自身的振动现象及振动规律的利用	401
8.7 展望	408
参考文献	410

第 1 章 振动利用工程学的形成与发展

1.1 引 言

振动与波的利用技术是 20 世纪后半叶发展起来的一种具有广泛应用价值的技术,目前正处在迅速发展过程中。由于该种技术与工农业生产及人类生活联系十分密切,能为社会创造重大的经济效益和社会效益,为人类生活提供良好的服务,目前已成为人类生产与生活过程中不可缺少的手段与必要的机制。国内外科技工作者一直以极大的精力从事这一领域的研究^[1~547],作者所在的科研团队也在近 30 多年的时间里进行了大量的研究工作,在振动利用工程这一学科的多个领域取得了一系列的研究成果^[1~394],促进了该学科的形成与再发展。

振动与波的利用技术最近 30 多年来的发展举世瞩目。就拿利用振动原理的设备来说,目前成功应用于工矿企业中的该类机器已发展到百余种。在许多部门,如采矿、冶金、煤炭、石油化工、机械、电力、水利、土木、建筑、建材、铁路、公路交通、轻工、食品和谷物加工、农田耕作,以及在人类日常生活过程中,数以万计的振动机器和振动仪器已用来完成许多不同的工艺过程,如给料、上料、输送、筛分、布料、烘干、冷却、脱水、选分、破碎、粉磨、光饰、落砂、成型、整形、振捣、夯土、压路、摊铺、钻挖、装载、振仓、犁土、沉桩、拔桩、清理、捆绑、采油、时效、切削、检桩、检测、勘探、测试、诊断等。这些机器包括振动给料机、振动输送机、振动整形机、振动筛、振动离心脱水机、振动干燥机、振动冷却机、振动冷冻机、振动破碎机、振动球磨机、振动光饰机、振动压路机、振动摊铺机、振动夯土机、振动沉拔桩机以及各种形式的振捣器和激振器等。

振动与波的利用技术的内涵十分广泛。除利用线性振动原理和非线性振动原理外,线性与非线性波也得到了广泛的应用。例如,在工程地质部门,利用振动所发生的应力波进行检测和地质勘探;在石油开采中,利用振动所引发的弹性波提高原油产量;在海洋工程方面,海浪波动的能量可以用来发电;在医疗方面,利用超声波等诊断和治疗疾病,彩超、医用 CT 和核磁共振等,都是对振动与波动原理的实际应用;超声还在其他许多行业具有广泛的用途;光导纤维和激光的应用是光波工程应用的范例,具有十分重大的理论意义与实际价值。

在电子和通信工程方面,电视机和收音机中的振荡电路、门铃、电话机、光导纤维通信技术、录音机、电视机、收音机、程控电话等诸多电子器件,以及电子计时装置和通信系统使用的谐振器等都是由于振动才能有效地工作。

图 1.1 列出了振动与波的 100 余种用途,并对其进行了分类。这只是振动与波

利用技术的一部分。

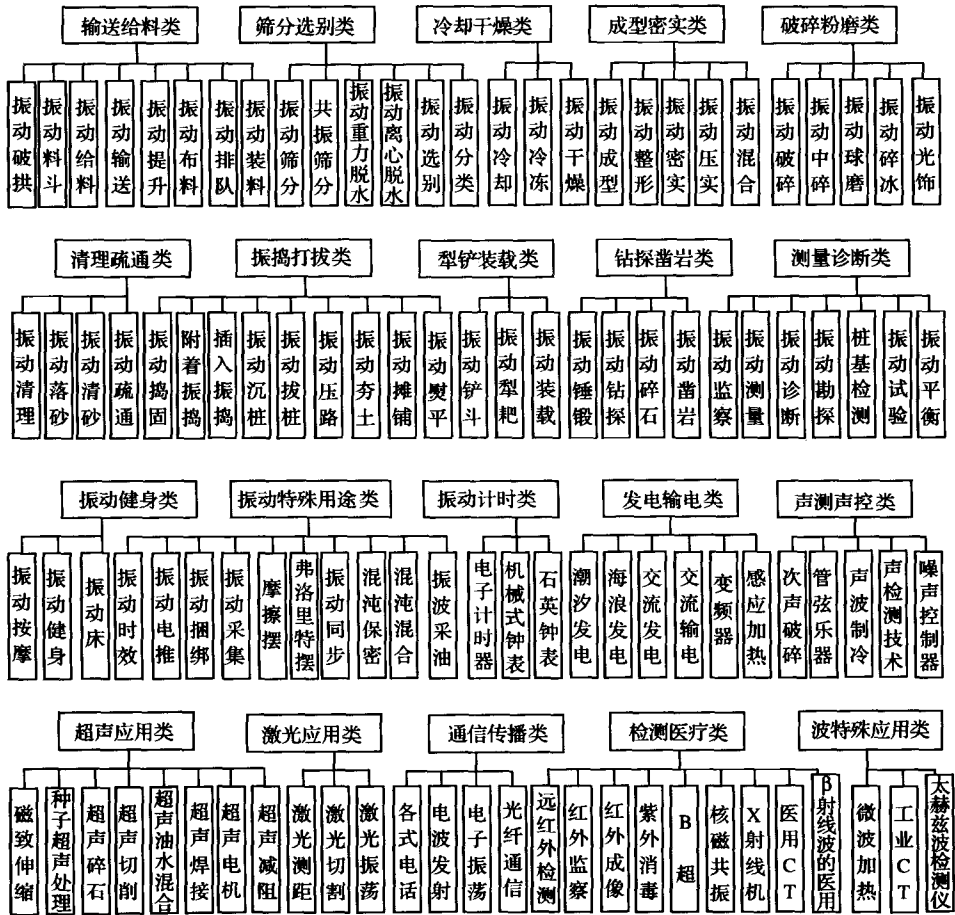


图 1.1 振动与波的各种应用及其分类

回顾以往的历史，我们可以看到振动与波の利用曾促使一些科学技术领域与产业部门发生重大的变革，甚至引发某一领域或产业部门产生新的革命，如自同步理论的提出与研究成功地促进了惯性振动机结构与相应的制造产业的重大变化；可控电磁振动给料设备的成功应用促使某些工业企业自动化程度明显提高；振动压路机和具有振动机构的摊铺机的成功应用，使高速公路的修建质量及使用寿命得到保证与提高；石英振荡器的研究成功引发了钟表工业的革命；超声电机的研制成功使小尺寸、小功率、低转速电机的产业产生重大的变革；彩超与医用 CT 的研究成功使医疗检测与诊断技术产生了革命性的变化；光导纤维的研究成功促进了通信技术的革命。由此可见，振动与波の利用技术对于人类的生产活动与生活有多

么重要的影响!

从广义的角度来看,在社会与经济生活中,例如,人口的增长与衰减、农作物虫灾发生的周期性现象、股市的涨跌和振荡、社会经济发展过程中速度的增长与衰减等,都可以归纳为不同形式的振动。在自然界及宇宙中也到处存在着振动,月亮的圆缺、潮汐的涨落、树木的年轮等,对这些振动和波动现象进行研究,找出其内在规律,并进行有效的利用,无疑会产生重大的社会效益与经济效益,并造福于人类。

振动与波存在于各个领域,按其类型大致可分为:线性和非线性系统的振动、线性与非线性波动(声波、光波等)以及电磁振荡等。因此,我们可将振动与波の利用分为线性振动的利用、非线性振动的利用、波动和波能的利用以及电和磁振荡器在工程技术中的应用、自然界和人类社会中的振动现象与规律及其利用等(图 1.2)。振动与波从很低频率(如潮汐波)直至很高的频率(如太赫兹波等),都可以得到有效的利用。图 1.3 列出了振动或波利用的各种情况。

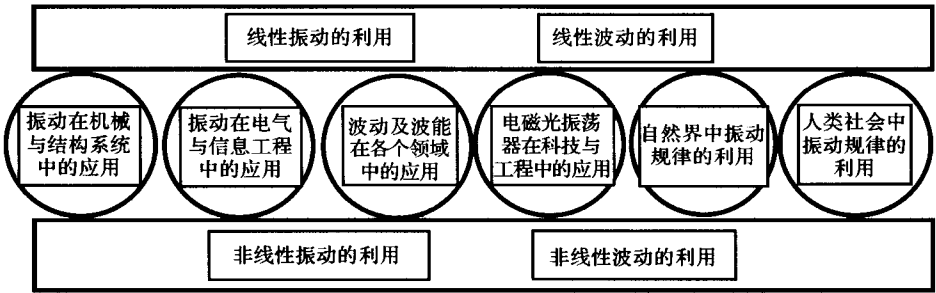


图 1.2 线性与非线性振动与波的应用领域

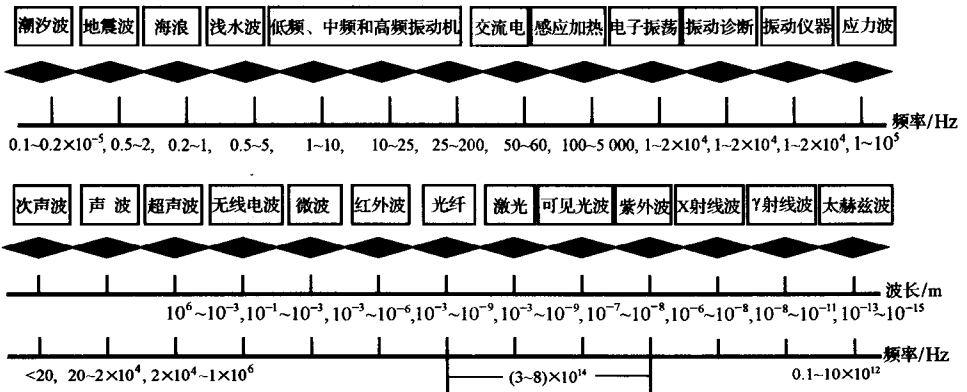


图 1.3 按频率或波长划分的振动与波的分布图

(图中各种振动或波并非完全按照频率或波长的大小由左向右排列)

1.2 振动机械与振动仪器及其相关技术的应用与发展

线性和非线性振动利用技术多数是通过能产生振动的机械设备或仪器,即振动机械或振动仪器来完成的。振动机械或振动仪器作为一种特殊的设备或装置已在工农业生产中得到广泛的应用。

振动机械或仪器有着广泛的用途,如给料和输送、筛分和烘干、破碎和清理、成型和压实、振捣和打拔、试验和测试、监测和诊断以及其他用途等。据初步统计,振动机械和仪器的用途和种类已达百余种,它们在工业、农业、国防以及人类生活的各个方面发挥着重要的作用。表 1.1 中列举了振动机械和仪器的主要用途。

表 1.1 振动机械和仪器按用途分类

类 型	用 途	机 械 或 设 备 名 称
输送给料类	输送、给料、上料、布料、工件排队、破拱等	各种仓壁振动器、电磁振动给料机、惯性共振给料机、振动料斗、振动输送机、电磁振动输送机、惯性共振式输送机、弹性连杆式振动输送机
选分烘干类	筛分、选别、烘干、冷却、脱水等	电磁振动筛、惯性振动筛、共振筛、旋振筛、概率筛、振动烘干机、振动离心脱水机、脱水筛、振动选矿机、摇床
破碎清理类	粉磨、破碎、落砂、碎冰、光饰、清理、疏通、除灰等	振动磨机、粗碎机、惯性振动破碎机、振动落砂机、振动装载机、振动铲斗、风铲、凿岩机
成型密实类	成型、整形、密实、轧制等	振动成型机、振动整形机、振动密实机
振捣打拔类	压路、摊铺、沉拔桩、捣固、夯实、挖掘、装载、凿岩等	振动压路机、振荡压路机、摊铺机、振动沉拔桩机、附着式振捣器、插入式振捣器、夯土机
试验测试类	激振、试验、测试等	各种类型的激振器、测试振动台、模拟振动台、动平衡试验机、疲劳试验机、机械式测振仪、各种振动电机
监测诊断类	监测、诊断等	各种监测与诊断仪器和设备
其 他	时效、切削、按摩、捆绑、固井等	各种用途的激振器等

随着科学技术的发展,各种利用振动的新工艺不断涌现,下面举出若干应用实例。

(1) 振动干燥工艺

干燥是工业生产中一个复杂的工艺过程,该工艺是近十几年来振动利用工程发展的一项新技术。振动流化床是在普通流化床基础上发展起来的,床层除受干燥气流作用外,再附加以振动作用,使之处于流化状态下进行干燥,在流化床上施加振幅和频率一定的振动,使得机内物料处于悬浮沸腾的流化状态的床层结构,利用对流、传导或辐射加热即可进行振动流化干燥作业。振动流化干燥机有多种形式,惯性式振动干燥机在实际应用中最为普遍。

(2) 振动破碎机的应用

物料的破碎是工矿企业应用较广的一种工艺过程,大部分开采出的矿物原料都需要进行破碎和磨碎。传统破碎机的破碎方法存在很大的局限性。例如,物料的抗压强度极限达 $2 \times 10^8 \text{Pa}$ 时,破碎过程耗能较高,或难以破碎,或使物料过磨,所用设备也很复杂。振动破碎工艺的发展则可克服传统工艺的缺点,惯性振动圆锥破碎机利用偏心块产生的离心力来破碎矿石或其他物料,利用挤压和冲击技术使物料破碎。惯性振动圆锥破碎机的破碎比远大于普通圆锥破碎机,而且可在很大范围内调节,在中细碎作业中有广泛的应用前景。

(3) 振动摊铺及振动压路

振动摊铺机和振动压路机是筑路作业中的关键设备,是振动技术在筑路工程中的典型应用实例。振动摊铺机在工作过程中先将物料撒布在整个宽度上,再利用熨平机构的激振器对被摊铺物料进行熨平和压实。振动系统决定了对物料摊铺的工作效率和密实效果,是决定摊铺质量的关键系统之一。

振动压路机依靠高速旋转的偏心块产生离心力,使振动碾作受迫振动压实路面。装在连接板上的振动马达带动偏心轴高速旋转,产生离心力使振动碾振动。装在偏心轴上的调幅装置用于改变振动的振幅,振动碾由装在梅花板上的驱动马达来驱动。由于在压路机中引入振动,使路面的密实度由 90% 提高到 95% 以上,进而显著提高了其工作质量与使用寿命,这在筑路作业中具有十分重要的意义。

(4) 振动成型与整形工艺

利用振动对金属材料或松散物料进行成型(包括塑性加工)较之静力情况下成型可显著降低能耗并提高成型工件的质量。试验指出,在金属材料塑性加工过程中引入振动,可以降低能耗,提高工效与工件质量,是一个值得研究的方向。

振动整形就是通过振动的方式强制性地使料袋形成规整的形状,以利于存放或装运。振动整形机广泛应用于化工、食品等工业部门。其工作原理是:当输送机将料袋送入整形机梯形槽体,整形机槽体在激振器作用下发生振动,槽体上方装有一固定的整形板,料袋随槽体不断振动,冲击整形板,从而达到使料袋平整的目的。

(5) 振动时效工艺及应用

用振动时效可在一定程度上消除金属构件的内部残余应力,稳定工件加工后的尺寸和形状,目前已被国内外广泛采用。振动时效就是通过对工件施加周期性应力,迫使工件在其共振频率范围内产生振动。这种周期性动应力反复推动金属内部结构中的金属原子错位和晶格滑移,使内应力松弛和均化。振动时效设备一般包括激振装置、测振装置和动应力控制装置。和热时效相比,振动时效具有易于操作、减少运输、缩短生产周期和节约能源等优点,是一项值得推广应用的节能新工艺。

(6) 振动诊断技术与振动测试工艺

利用振动信号的不同特征对机械和结构的故障进行诊断是近十多年发展起来的一种新技术。利用模糊理论、灰色理论或神经网络方法对振动信号进行分析与诊断，在工业企业中得到了广泛应用。利用振动原理对机械系统的振动位移、速度和加速度进行测试是一种简便和有效的方法。

(7) 以振动原理进行体育与健身活动的仪器和设备

机械式振动按摩器可归为这一类。机械式振动按摩器等不同形式的健身与体育设备也利用了振动技术，目前已成为人们生活中不可缺少的运动器具。

(8) 机械式医疗仪器、设备与器具

人造心脏与心脏起搏器都是利用振动原理研制成功的医疗器具。

1.3 非线性振动利用技术的应用与发展

在前面列举的振动机械与仪器中，按其线性和非线性的特性可分为线性或拟线性(近似于线性)及非线性两大类。在非线性的振动机械和仪器设备中，有一部分是为了获得良好的工效有意识地采用系统的非线性特性，另一部分则不是有意识地，而是在工作过程中自然地存在非线性的性质。

目前非线性振动系统或非线性振动特性的利用技术得到了迅猛的发展，其具体内容见表 1.2。

表 1.2 非线性振动特性的利用

序号	1	2	3	4	5	6
非线性振动特性的种类	分段惯性力系统的利用	光滑非线性系统的利用	分段线性非线性系统的利用	非线性滞回系统的利用	自激振动系统的利用	带冲击的非线性振动的利用
应用实例	振动输送机、振动离心机等	摩擦摆、弗洛特摆、电磁振动给料机	振动输送机、振动离心脱水机、惯性共振筛等	振动压路机、摊铺机、沉拔桩机等	气动或液压凿岩机、气动冲击器、振荡器等	夯土机、惯性振动冲击器、振动成型机
序号	7	8	9	10	11	
非线性振动特性的种类	慢变参数系统的利用	频率俘获原理的利用	非线性弹性体系统的利用	分岔解的应用	混沌的利用	
应用实例	许多振动机的工作过程	各种形式的自同步振动机	纵向或横向弹性振动系统的利用	蛙式夯土机抛掷运动状态的应用	混沌保密系统、混沌混料机	

(1) 具有分段摩擦或冲击的分段惯性力振动系统的利用

在振动机械中，为了使机体中的物料对机体产生相对运动，即产生相对滑动或跳动，就必须使振动机的系统中产生分段摩擦力和分段质量的惯性力(滑行运

动)或冲击力和分段质量的惯性力(抛掷运动),这是保证振动机械实现正常工作的必要条件。这类振动机械有振动给料机、振动输送机、振动筛、振动离心脱水机和振动冷却机等。

(2) 光滑非线性振动系统的利用

摩擦摆在正常工作区间,属于光滑非线性的振动系统。利用摩擦摆可以测定轴套与轴销间的摩擦系数,常用的有两种方法:第一种方法直接利用复摆摆角每一振动周期的衰减值算出摩擦系数的大小;第二种方法利用 Flode 摆的工作原理对摩擦系数进行测量与计算。后一种方法更为准确。

对于一些在共振情况下工作的振动机械,往往存在振幅不稳定的缺点,如电磁振动给料机、近共振型振动输送机和共振筛等。振幅不稳定会给机械的工作性能带来不良影响,为了消除前述缺点,可以采用具有光滑硬式非线性恢复力的振动系统。

为了消除一般电磁振动给料机振幅不稳定的缺点,有的科技工作者提出,将主共振板弹簧的两端固接处做成带有曲线的形式,随着振幅的增大,板弹簧的工作长度将变短,因此弹簧刚度将随振幅的增大而增加,从而可以增大该类振动机械振幅的稳定性。

此外,硬式光滑非线性振动系统也可以用于车辆的隔振。由于车辆的负载时常变化,为了使车辆在负载变化情况下其固有频率不发生明显的改变,可以将隔振弹簧做成硬式光滑非线性的形式。

此外,光滑非线性还有其他一些应用。

(3) 分段线性非线性振动系统的利用

分段线性非线性系统在工程中得到了十分广泛的应用,在振动机械中这种形式的非线性系统应用也十分普遍,如分段线性的非线性振动输送机、非线性共振筛、非线性振动离心脱水机、振动摇床和振动离心摇床等。分段线性非线性振动系统通常包括以下三种形式:

- 1) 对称与不对称的硬式分段线性非线性振动系统。
- 2) 对称与不对称的软式分段线性非线性系统。
- 3) 复合或复杂形式的分段线性非线性系统。

由于该种非线性振动系统具有若干优点,目前在工程中仍处在不断的推广之中,预计今后还会得到进一步的发展。

(4) 非线性滞回系统的利用

具有弹塑性变形的振动系统属于这一振动系统。例如,振动成型机、振动压路机、振动夯土机、振动沉拔桩机等一些振动机械,其振动系统都属于带有滞回恢复力的非线性振动系统。为了使振动成型或振动压实过程能有效地进行,塑性变形是不可缺少的,而且应尽可能地加大滞回曲线中的面积。在工程中这种振动系统普遍

存在。

在该类振动系统中,大体可有以下几种形式:

- 1) 含对称平行四边形滞回恢复力的非线性振动系统。
- 2) 含光滑封闭曲线滞回恢复力的非线性振动系统。
- 3) 不对称滞回恢复力的振动系统。
- 4) 带有间隙滞回恢复力的振动系统。

在我们的研究中,已对多种形式的该类非线性振动系统进行过深入研究。

(5) 非线性自激振动系统的利用

在工程中,自激振动得到了广泛的应用。例如,采矿工业中应用的气动式与液压式凿岩机和碎石机、采煤用的风镐、铸造车间清理铸件的风铲、锻造车间使用的蒸汽锤、选煤厂应用的气动无活塞淘汰机、蒸汽机、由液压阀控制的往复油缸或由活塞驱动的各种机件所组成的系统等。在通信技术部门有无线电收音机和电视机中的电子振荡器,各种仪器、仪表中广泛采用的振荡器和不同形状的波形发生器,各种恒温容器中采用的开关型温度调节器等。此外,人们日常生活中所必需的手表和挂钟,依赖琴弦演奏的各种乐器等,以及人体内心脏的跳动也是一种自激振动。

(6) 冲击非线性振动系统的利用

利用冲击来完成工艺过程的振动机械有蛙式夯土机、振动锤锻机、冲击桩机、带有冲击的振动落砂机和振动钻探机等。冲击式振动机械是非线性振动机的一个特例。理论计算与试验都可以证明,冲击情况下物体瞬间所产生的加速度较一般线性振动机的最大加速度大几倍、几十倍,甚至几百倍。利用冲击可以产生很大的冲击力,这对压实土壤,沉桩,使物体产生塑性变形,岩石发生破坏或碎裂,促使铸件上的型砂剥落都是十分重要的。

(7) 慢变参数振动系统的利用

在工程中,许许多多的工作过程都属于慢变参数系统。例如,对旋转机械的振动进行控制,其工作过程是慢变的。慢变过程的速度会直接影响所控制的振幅,所以,可以利用控制过程慢变的速度来达到最优的控制效果。例如,对具有慢变参数的转子系统在启动和制动过程中,激励频率慢变使系统共振曲线产生波动并影响其稳定性,转子刚度慢变会使不平稳的共振曲线产生偏移。对于慢变支承刚度的转子系统,适当选择刚度慢变速度,可以有效地抑制通过共振区时的振幅。因此,慢变参数系统可以在工程中获得应用。

(8) 频率俘获原理的应用

在工程中,频率俘获现象已得到了广泛的应用。由两台感应电动机分别驱动的并装于同一振动系统中的两个偏心转子激振器,就是利用这一原理而进行工作的。目前在工业部门中应用的数以万计的自同步振动机均基于这一原理。试验曾指出,当两台激振电动机单独运转时,其转数分别为 962 r/min 和 940 r/min,而