

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 贾瑞娜/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>

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
字数:544 000 印数:1—3 000

定价:59.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

第一作者简介

闻邦椿 原籍浙江温岭, 1930年9月生于浙江省杭州市。1957年东北工学院



机械系研究生毕业。现为东北大学机械工程与自动化学院教授, 机械电子工程研究所名誉所长, IFToMM (国际机器理论与机构学联合会) 中国委员会委员, 国际转子动力学技术委员会委员, 亚太振动会议指导委员会委员, 中国振动工程学会名誉理事长, 上海交通大学“振动、冲击、噪声”国家重点实验室学术委员会名誉主任; 曾任第六、七、八、九届全国政协委员, 国务院学位委员会第二、三、四届机械工程学科评议组成员, 中国振动工程学会理事长和《振动工程学报》主编等; 现任或曾任全国20余所大学的兼职教授、顾问教授和名誉教授。

1984年被评为全国第一批有突出贡献的中青年专家, 1991年当选为中国科学院院士。

他系统地研究和发展了振动学与机器学相结合的新学科“振动利用工程”, 还研究了转子动力学、机械系统非线性振动理论及应用、机械故障的振动诊断、机电一体化以及工程机械理论的某些问题。曾发表论文700余篇, 其中SCI、EI和ISTP三大检索系统论文150余篇, 有专著和主编论文集10余部。

他曾指导了100余名研究生, 已有61名研究生取得了硕士学位, 43名研究生取得了博士学位, 还曾指导博士后5名、俄罗斯和哈萨克斯坦访问学者各一名。

他曾应邀去日本、德国、澳大利亚等国讲学, 参加过在美、英、日、澳、加、意、韩、保、匈、新、马、芬、前苏联、西班牙等20余个国家召开的国际学术会议, 宣读论文50余篇, 并多次应邀做大会报告, 还曾访问德、波、瑞士、瑞典、乌克兰、拉脱维亚、泰国、朝鲜等国。他曾主持召开国际学术会议4次, 主编国际学术会议论文集4种。

他完成了数十项国家和横向重大科研项目, 包括国家自然科学基金重大项目、面上项目和973、863项目等, 曾获国际奖两项, 国家发明奖和科技进步奖3项, 省、部、委级奖10余项, 国家专利8项。有多项成果达到国际先进水平, 取得了重大经济效益和社会效益。

本书是作者及其领导的科研团队30余年参与科学研究实践所取得的重要科研成果之一。

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及计算方法、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、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、陈予恕教授、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。

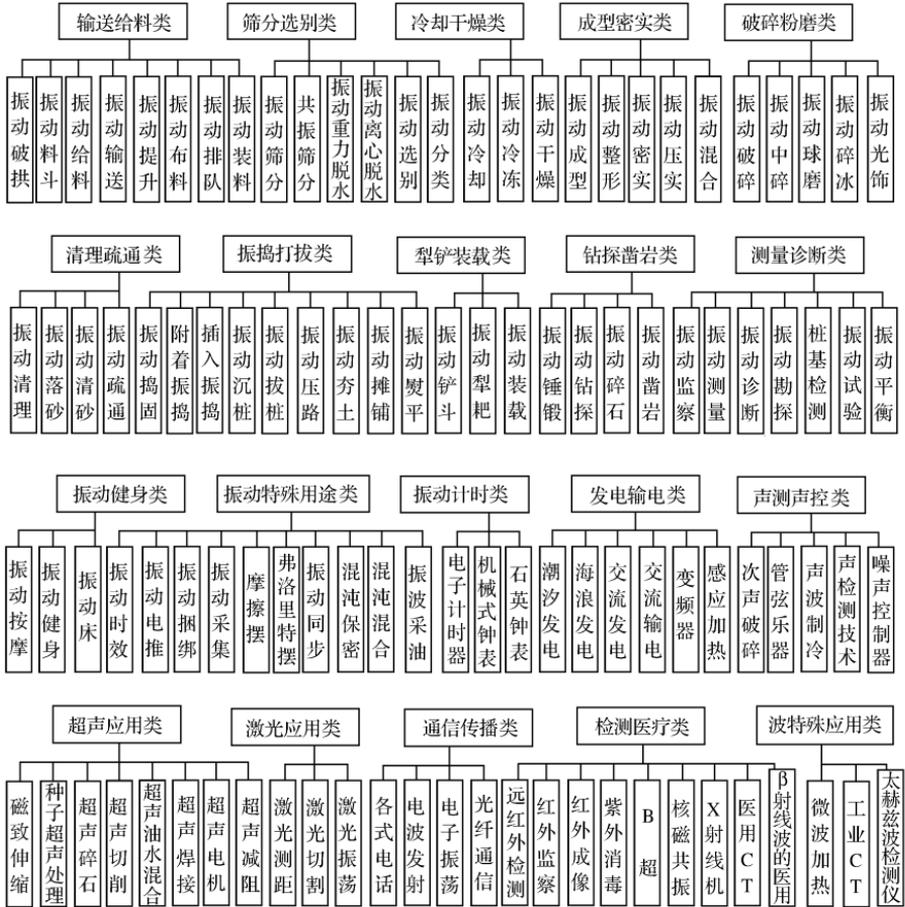


图 1.1 振动与波的各种应用及其分类

回顾以往的历史,我们可以看到振动与波的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,振动与波的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。

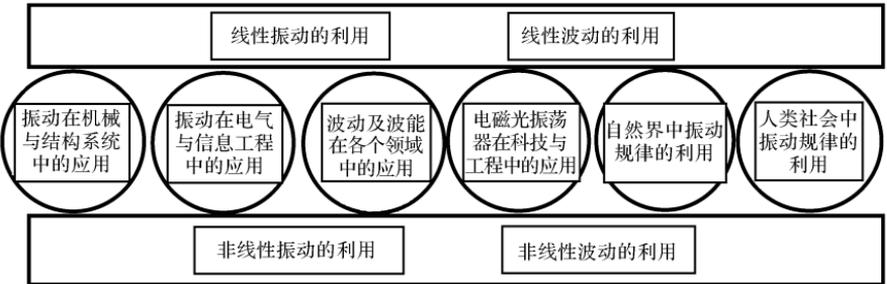


图 1.2 线性与非线性振动与波的应用领域

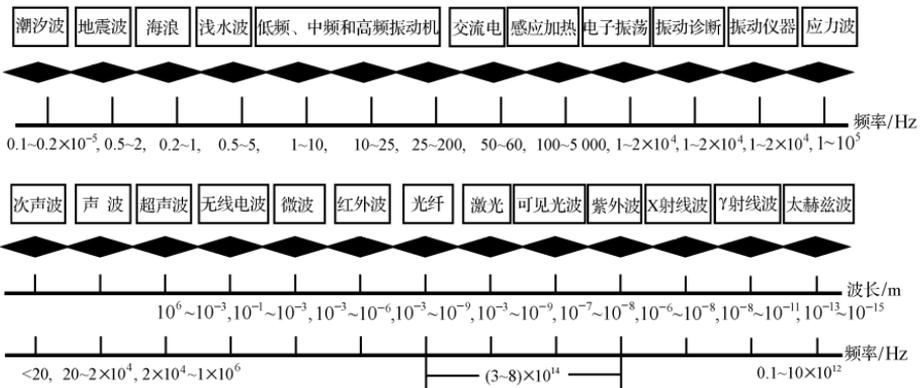


图 1.3 按频率或波长划分的振动与波的分布图

(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将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非线性(近似于线性)及非线性两大类。在非线性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 and 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,其转速分别为 962 r/min 和 940 r/min,而

当它们同时运转时,其转数同为 950 r/min,这就是所谓的频率俘获。

(9) 分岔解的利用

研究非线性系统的分岔解目前已引起科技工作者的普遍重视和广泛注意。在非线性方程式的分岔解中有一些可以被利用,而有一些不可能加以利用,因此,研究分岔解具有工程意义。例如,蛙式夯土机的有效工作区是在周期运动的冲击速度最大区域,即周期运动的分岔解。在振动输送机中物料的运动会出现多种形式的分岔解,等周期跳动、2倍周期跳动、3倍周期跳动、 n 周期跳动和非周期跳动等,从这些分岔解中选择出最为理想或者说工艺指标和其他综合评价指标最佳的运动形式,即最佳的分岔解,这是一个具有重要实际价值的研究课题。

(10) 混沌的工程应用

混沌有着广泛的用途。例如,利用冲击消振器振动空穴中钢球的混沌运动来消除镗床镗杆的振动;在振动混料机中利用多种物料的混沌运动来加速物料的混合。近来,混沌在通信保密系统工作中也获得了十分成功的应用。

此外,由于一些非线性振动系统中在工作中会出现有害的不稳定振动,在这种情况下,设法使这种不稳定的振动过渡到较为有利的混沌运动,这自然也是利用混沌运动的一种可开发途径。但是否还有比混沌运动更为有效的其他措施,这仍然是一个值得研究的问题。

1.4 波动与波能利用技术的应用和发展

波动与波能的利用是近十几年来振动利用工程领域中获得广泛发展的一个新技术,国内外在这一方面作了大量的研究,许多成果已应用于实际,但还有不少问题正处在研究与发展过程中,如表 1.3 所示。下面列举一些典型的应用实例。

(1) 海浪发电新技术

海洋占地球总面积的 71%,集中了 97%的水量,这些取之不尽、用之不竭的水是人类在 21 世纪新能源的希望。据海洋科学家推算,地球上的海洋波浪中蕴藏的能量高达 90 万亿千瓦时,是现在世界总发电量的 500 倍。科学家早在 20 年前就注意到了海浪能发电的问题。20 世纪 90 年代,美国、日本和英国等国传来捷报,他们设计的海浪发电站的效率已达到 60% 以上,从而把波能发电推向了新阶段,为在 21 世纪人类广泛利用海洋能展现了美好的应用前景。海浪发电没有污染,对生态环境没有影响,这也是人们对海浪发电寄予厚望的原因之一。

表 1.3 波及波能的分类与用途

波的类型	用 途	仪 器 设 备 名 称
海浪与潮汐(水的波动)的利用	海浪发电、潮汐发电、潮汐运输等	海浪发电设备、潮汐发电站、潮汐运输装置与船舶等
弹性波(应力波)的利用	振动采油、振动勘探、桩基检测、结构健康诊断等	振动采油设备、地质勘探机或勘探车、桩基检测用激振器及附属设备等
次声波与声波的利用	设备与结构的诊断等	次声波发生器
超声波的利用	超声电机、超声油水混合、超声医疗(彩超、超声粉碎结石)、超声诊断	超声电机、超声油水混合装置、超声医疗仪器、彩超、超声粉碎结石仪、超声清洗机等
紫外波与微波的利用	紫外波杀菌、微波加热、微波通信等	紫外波发生器、微波炉、微波通信设备
可见光波的利用	加热、激光技术、光导纤维技术等	热水器、激光加工、光导纤维通信等
红外波的利用	加热、成像、医疗、军事监察等	加热器、热成像技术、红外医疗仪器、红外军事监察设备等
X 射线波、 γ 射线波与 β 射线波的利用	医疗、诊断等	X 射线机、医用 CT、工业 CT、 β 射线治疗仪及其他检测与诊断设备

海浪电站利用气动涡轮机,把进入一个狭窄岩洞的波浪所产生的能转换成电能。电站采用了高效能收集和转换装置,无需人员管理,从波能进入水轮机到发电、送入供电系统,全部采用电子计算机控制。我国在珠江口建造了第一座岸式波力电站,电站气室面积 $3\text{m} \times 4\text{m}$,安装了 3kW 、 5kW 发电机组各一台。电站为侧开口带喇叭口前港的岸式结构,发电的基本原理是气室将海浪的波能转换成空气往复运动,利用这一气流带动发电机发电。

(2) 超低频可控振源振动采油新技术及新工艺

在进行地震预报前兆的探索中,关于天然地震和人为地表振动对油气产量的影响引起了科研人员的注意。在美国伊里诺依州有个油藏深达 1 500 英尺^①,当火车通过地面时,油储内压力就会产生波动,对产量有一定影响;加州德哈比-培克费尔地震后,附近的油井、油藏产量提高一倍达数周之久;前苏联的格罗兹内油田,在天然地震影响下,平均日产量增加 45%。我国地震工作者也发现,在 1975 年海城地震和 1976 年唐山地震前后,在胜利、大港、辽河油田中油气产量明显增加。上述种种事例,使科技工作者认识到:地表振动的压缩和膨胀波,是油层附加微压力的

^① 注:1 英尺 = 0.304 8 米。

源泉,可增加驱油排替压力,改善原油流动性。理论分析和室内模拟试验,都表明振动可以提高原油的采收率。

前苏联是最早将可控振源技术应用于振动采油的国家,在20世纪80年代初期就研制出了世界上第一台大功率超低频可控振源并应用于振动采油。我国近几年也进行了这方面的研究,并取得了可喜的成绩。几年前我研究组曾参与了该种技术的研究,已取得了良好的效果。可控振源是利用人工方法控制地面振动的装置,是大功率双转子偏心离心式激振器。该装置由交流滑差式调速电机、变速箱、两组相对旋转的偏心轮及机架组成。通过配电和控制装置,改变振动频率和激振力,利用结构的对称性,使水平方向的离心力相互抵消,而垂直方向的离心力叠加。离心力大小一般在100kN以上,基础的质量与离心力合力大小相当。通过调速电机,可以改变振源频率(4~40Hz)。将振源置于油井附近的地面上,振动时,整个振源像一把巨大的锤敲击地面,于是地层产生强大的弹性波。由于这个弹性波的频率低、波长长,对地层有较强的穿透能力,把振动能量传播到深几百至上千米的油层,在这个区域内形成一个波动场,对油层进行扰动。油层在波动场不断作用下产生振动效应:原油的黏度、凝固点降低,渗流加速,含水量降低,从而增加了油产量。

振动采油与其他增产增注工艺技术相比具有许多独特的优点。振动采油在油井附近地面上激振,不需井上或井下作业,因此可免掉因钻井作业所造成的产量损失;一点振动,可使多口油井受益;振动对油井及地面环境不造成任何污染;与其他采油工艺相比,振动采油节省人力物力,投资少,见效快,效率高,设备简单易操作,便于推广。

(3) 燃油掺水超声乳化燃烧节油技术

燃油掺水超声乳化燃烧节油技术是特有的高效节能措施之一,特别是当前能源紧张的条件下更具现实意义。它不需任何添加剂,采用流体动力超声乳化器进行燃油掺水乳化,并配有射流乳化器、监测仪器、超声波声级计、含水分测定仪等仪器仪表,形成一套完整的工艺流程系统。燃烧系统因雾化良好而加快了乳化油燃烧速度,所以有利于完全燃烧和提高火焰温度以及火焰的稳定性、均衡性,提高了燃烧效率,增强了传热效果;同时,烟气中的有害气体和有害毒物的含量均能降低,大大减少了对环境的污染。该项技术已应用于冶金、化工、食品、农业及交通运输业等方面,产生了明显的经济效益和社会效益。

(4) 超声波振动切削工艺

超声波振动切削是近几年来发展较快的一种新技术,在很多应用领域取得了许多令人意想不到的效果。超声波振动切削是超声频率的脉冲切削方式,镗杆水平方向受力由普通切削的切削力变为高频脉冲切削力。

超声振动切削每一个周期 T 内只有 t_c 时间在切削,有 $(T - t_c)$ 时间脱离工件,使切削液能充分地进入到切削区,冷却润滑充分,刀具散热条件改善,切削温度大

幅度降低。超声切削刀具和工件材料是非连续接触,刀具和工件亲和机会减少,温度低,切削液润滑充分,加上超声振动的刀具会带动其周围切削液超声振动,切削液对刀具和工件材料不会发生副黏结。由刀具材料和工件材料不同而引起的加工表面粗糙度差异在超声切削时可以减少到最低限度。超声波振动加工为特殊零件的精加工开辟了一种新的有效途径。

(5) 超声在医疗中的应用

自 20 世纪 40 年代发现超声可以用来诊断检查后,短短几十年,其发展非常迅速,目前超声已被广泛应用于诊断人体多种器官的疾病。人体各种正常和有疾病的组织、器官对超声的吸收不同,所产生的反射规律也不同,超声诊断正是利用了这一原理。超声诊断仪产生超声并发射到人体内在组织中传播,遇到正常与有疾病的组织时,便会产生反射与散射,仪器接到这种信号后,加以处理,显示为波形、曲线或图像等,就可以供医生作判断组织或器官健康与否的依据。B 超就是利用超声原理的一种医疗仪器设备。

(6) 超声电机

压电超声电机也简称超声电机,它是利用压电材料的逆压电效应,使弹性体(定子)产生微观的机械振动,通过定子和转子(或动子)之间的摩擦作用,将定子的微观振动转换成转子(或动子)的宏观的单方向转动(或直线运动)。由于定子的振动频率在 20kHz 以上,故将这种电机称为压电超声电机。

超声电机的运动机制、结构特征以及使用经验表明,超声电机具有以下特点:

- 1) 结构简单、紧凑、转矩/质量比大(是传统电机的 3~ 10 倍)。
- 2) 低速大转矩,无需齿轮减速机构,可实现直接驱动。
- 3) 运动部件(转子)的惯性小,响应快(毫秒级)。
- 4) 能断电自锁,且能就地停止不动。
- 5) 速度和位置控制好,精度高。
- 6) 不产生磁场,亦不受外界磁场干扰,电磁兼容性好。
- 7) 可低噪声运行。
- 8) 可在较苛刻的环境条件下工作。
- 9) 容易做成直线型超声电机。
- 10) 形状可以多样化,如圆的、方的、空心的、杆状的等。

由于超声电机具有许多特点,它已在照相机、手表、机器人、汽车、航空航天、精密定位仪、微型机械等领域里得到成功的应用。

可以预计在 21 世纪,为了发展我国人造卫星、导弹、火箭、飞机、机器人、微型机械、汽车、磁悬浮列车以及其他精密仪器,将需要大量高性能的超声电机。超声电机技术的发展必将对我国国防和其他国民经济部门起到重大作用。

因为超声电机技术是一门非常年轻的技术,只有 20 年的历史,在理论、设计、制造工艺以及材料制备方面都很不完善。解决这些问题将是全世界超声电机技术的研究者们在 21 世纪所面临的任务。

(7) 光导纤维中光连续反射与折射形成的振动

利用光导纤维对信息进行传输是通信领域的一次革命,光在光导纤维中的连续反射过程是一种典型的振动过程,它的研究成功将人类通信事业的发展推进了一大步。

(8) 振动热成像技术

在红外热成像无损检测方法中,已成功地利用振动热成像技术进行复合材料的无损检测。振动热成像技术的基本原理是探测受到机械振动激励的材料结构。

1.5 电、磁、光的振荡器在工程技术中的应用

随着科学技术的发展,特别是近几年来大信息容量的卫星系统(SLC)、卫星直播电视等系统的迅速发展与应用,利用振动原理制成的光、电器件和仪表也越来越多。例如,钟表中的小石英振荡器、测试用的光纤振动传感器、电子计时装置、通信系统和超声器件中使用的谐振器等,如表 1.4 所示。

表 1.4 振荡器的分类与用途

振荡器的类型	用途	仪器设备名称
电子振荡器	电子表、电子挂钟、电子音乐等	电子表、电子挂钟、电子乐器、收音机、电视机、布话机、信号发生器
电磁振荡器	电话、压电陶瓷振荡电路等	电话机、振铃、磁致伸缩超声发生器、压电陶瓷振荡电路等
激光振荡器	激光振荡电路等	激光振荡器等

(1) 电子振荡器

电子振荡器应用于钟表产业,使钟表产业产生了一次重大的革命,到目前为止,机械手表已大部分被电子手表所代替。

(2) 振铃电路与电子音乐

随着电子技术不断在电话机中的应用,话机中大都采用体积小、重量轻、铃声悦耳的电子振铃电路。电子振铃电路的核心元件是一块专用集成电路,是由整流电路和振荡电路构成的。输入的铃流信号经整流电路整流得到一个十几伏的直流电压输入振荡电路,振荡器发出两种频率的信号,经超低频振荡器调制,输入给放大器,再输出给压电陶瓷片,也可经变压器进行阻抗匹配后用电动扬声器放音。电子音乐是利用不同频率振荡器发出的声音经过计算机程序有节奏按不同频率输出而

得的一种音乐。

(3) 压电陶瓷式电磁振荡器

美国研制出了一种结构简单、具有良好谐振特性的谐振器。它的基本结构及原理是在双面被覆电极并沿厚度方向极化的压电陶瓷片上,将其中一面的电极分割成两部分,则具有分割电极的压电陶瓷片将以 180° 相差进行斜对称模厚度伸缩振动,这种振动方式可以使多余振动的寄生信号互相抵消,从而获得较高的谐振品质因数。

彩色电视机的液晶显示器背光电源上采用的压电陶瓷变压器是振动在电子工程方面应用的又一典型实例。这种压电变压器是采用在单板状的陶瓷元件上,形成初级和次级电极,对电极进行极化处理。其中一半是沿厚度方向极化,另一半沿长度方向极化。在如此做成的压电变压器的初级电极上,当施加保持元件谐振频率的电压时,则在长度方向产生强烈机械振动,在次级电极上输出电压,其输出电压大小取决于其升压比。通常在无负载时,升压比由机电耦合系数、机械品质因数和元件形状来决定。当负载阻抗小时,谐振频率向低频方向移动,升压比减小;当负载阻抗增大时,升压比亦增大,升压比和谐振频率主要由元件形状和机电耦合系统来决定。

(4) 激光振荡器

在光电元器件方面,振动也得到了广泛的应用。日本冲绳电气工业公司研制出了一种用半导体芯片排列成的短波长激光器系统,把半导体激光器元件和波长减少 $1/2$ 的二次谐波元件(SHG)做成一体,得到稳定的振荡特性。这种新系统是在激光元件和二次谐波元件之间制作了使光反复共振的沟槽结构,在激光附近的振动状态中少量漏掉的光用二次谐波元件的凹凸反射返回到激光元件上,用该光振荡放大的激光,把通过二次谐波元件的激光波长减少 $1/2$ 。因为激光的振荡波长由二次谐波元件的凹凸间距来决定,可用与外部温度变化无关的同一波长来振荡。

1.6 自然界中的振动现象与振动规律及其利用

人们可以根据逐年雨量的统计得出的周期性规律,也就是雨量的振动规律,预估某一年度雨量的多少。

潮汐是一种周期性振动,它的涨落与大小不仅依赖于月亮的位置,而且与太阳对月亮的相对位置有关系。人们可以根据月亮的圆缺来预估潮汐的涨落,同时根据月亮与太阳的相对位置可估算出太阳的引力对潮汐大小的影响,这对航海及船舶进出港的时间安排十分有用。

树木的年轮中的一疏一密是由气候的周期性变化而引起的,从广义角度来看,也是一种振动现象,这一振动特征在考古学与地质学的研究中也有应用。向日葵随着日落与日出日复一日地向西和向东摆动,这也是一种特殊形式的振动,

这种振动在适当场合也有用途。

1.7 人类社会中的振动现象与振动规律及其利用

人们可以根据外部及内部影响因素来推测某一种股票的涨跌,即掌握股票涨跌过程的振动规律,从而做到运用自如。

很自然地,经济学家可以根据国内外的经济与社会因素推断某一社会或国家经济增长或衰退情况,即经济发展过程中的振动规律,进而可提出应采取的有效措施,以减少由于某种原因给国家经济带来的损失。

经济危机与金融危机的发生,也是振动现象的一种表现形式,延长经济金融的高增长周期以及缩短经济危机与金融危机延续时间,是处理这种振动现象的有效措施之一。

从生态学的角度来看,人类繁殖过程中的速度时高时低,这种振动现象也可以用相应的振动理论加以描述,在现今情况下适当减少人口的增长速度是对这种振动规律的有效利用。

在生命科学领域,特别是人类本身的许多器官和医疗技术与设备对振动和波的利用随处可见,人体器官,如肺部的张缩和呼吸、心脏的跳动、声带和耳膜的振动、脉搏的搏动、血液的循环等都是对振动的有效利用;医疗器械和仪器中的心电图和脑电图的测量仪、B超、医用CT、X射线机、心脏起搏器、人造心脏、耳聋用助听器等都是对振动原理的利用。

1.8 展 望

振动在国民经济中的应用越来越广泛,涉及面很广,并日益受到人们的重视。振动利用的实例很多,这里不再一一列举。振动利用的发展充实了振动利用工程学科的内涵,说明人们已经从认识振动进展到利用振动来改造世界、改善生活、创造价值,这是一个非常重要的转变,它将给振动利用工程带来一个美好的前景。

为了今后更好地促进这一学科的发展,以便使它能更好地造福人类,应从以下几个方面开展进一步的研究:

(1) 从系统工程角度出发开展振动利用工程学的宏观和微观的研究

由于振动与波的利用技术分散在不同领域和不同科学技术部门,作为一位科学技术工作者很难对这样一个内容十分广泛的科学技术问题进行较系统和全面的研究。作者所在团队经过30余年对该学科一些分支进行了较深入地研究,对另外一些分支进行了总结和归纳,已初步建立了振动利用工程学科的理论框架。但为了进一步促进这一学科的发展,有必要从系统工程角度,对该学科的基础理论、该领

域有关技术的开发和应用,开展深入的研究,并通过学科交融等方式,进一步提高相关技术的理论水平及技术水平,使其成为人类生产活动和生活过程中不可缺少的手段和必要的机制,并造福于人类。

(2) 大力开展振动利用工程实际应用的研究与开发工作

应该大力开展振动利用工程实际应用的研究与开发工作,扩大振动技术的应用领域与范围,将振动技术广泛应用于各种工艺过程。其研究范围不应只限于工程技术领域,还应扩展到人民生活和社会经济等各个领域之中。

(3) 在研究振动技术应用的基础上,开展振动利用工程基础理论与工作机制的研究

在研究振动技术实际应用的基础上,深入开展振动利用工程基础理论与工作机制的研究,为此,必须加强非线性振动与波动理论,其中包括非线性理论的解析方法与数值方法、非线性振动的稳定性以及非线性振动系统的分岔与混沌,研究分形理论与突变论在振动利用工程中的应用等。

(4) 要加强振动技术与信息技术的结合

要加强振动技术与信息技术,即多媒体技术、集成电路技术、光导纤维技术、网络技术和人工智能技术的结合,使振动利用工程成为一种以智力为依托的高新技术,并促使振动利用工程有关产业成为一种高新技术产业,在不断创新思想的指导下促进其不断发展。

在目前知识经济的时代中,应使振动利用工程这一技术在提高人民的物质与文化生活水平过程中发挥其应有的积极作用。

第 2 章 振动与波利用工程领域的若干重要成果

人们对有害的振动往往有比较深刻的体会和认识,因为它给人们带来了危害和不良的影响。例如,地震使人民生命财产遭受巨大损失;共振及次谐波共振会引起机械设备、桥梁结构及飞机的破坏;运载工具的振动会使乘客感到不舒适;环境噪声使人烦躁不安等。但对于有用的振动,人们已经习以为常,如果不去仔细地分析和了解,就很难深刻地体会振动利用工程的重要性,以及它对人们的重大贡献。

振动利用工程历史上所取得的重大成就已经为人类社会的发展作出了重大的贡献,在历史上引起了一次又一次科学技术和产业部门的重大变革,甚至可以说引发了多个领域的科技革命和产业革命,我们不妨举出几个典型的事例加以说明。同步理论的应用,使振动利用工程领域出现了许多自同步振动机,同时还增加了专门生产振动电机的产业部门;在高速公路的施工中,振动压路机的应用,使每公里建设费用高达 2 000~ 4 000 万元人民币的高速公路路面所要求的密实度得到了保证,提高了路面的质量,这一技术具有十分重大的经济意义和社会价值;众所周知,石英振荡器的研制成功,促进了钟表工业的革命,结构复杂和价格昂贵的机械表被电子表取而代之;超声的应用(B 超)和医用 CT 使医疗检测技术发生了革命性的变化,正因为其意义的重大,核磁共振医疗检测技术荣获 2003 年诺贝尔医学奖;光导纤维的研制成功,也可以说是通信技术的一次重大革命。

下面从几个方面来介绍振动利用工程的理论与技术的研究方面所取得的重要成果。

1) 从振动利用的工艺过程来看,有振动输送技术、振动筛分技术、振动脱水技术、振动破碎技术、振动压实技术、振捣技术、振动沉拔桩技术、振动诊断技术的应用等。

2) 从振动原理的应用方面来看,有同步理论的应用、共振的利用、滞回振动系统的利用、冲击的利用、慢变过程的利用、混沌的利用、分段惯性力的利用、分段恢复力的利用等。

3) 从波动与波能利用方面来看,有水波与风波的利用、声波与超声波的利用、光导纤维和激光技术的应用、各种射线波的利用等。

4) 从振荡原理的利用来看,有石英振荡器、电磁振荡器、激光振荡器等。

5) 在自然界和社会经济中及生物工程领域,振动规律的利用有着重要意义。

研究这些领域振动的内在规律,并加以有效的利用,是从事振动利用工程研究工作的科技工作者义不容辞的责任。

总之,研究振动利用工程的理论与技术的目的应该是为科学技术和国民经济的发展提供理论和技术上的支撑,为人类和社会造福。

2.1 振动输送技术的应用

振动输送技术是将松散物料通过振动机体从一个位置转移到另一位置的技术。散状物料在输送的过程中,往往会使粉尘飞扬,进而危害操作工人的身体健康。其他输送机,不论是带式输送机,还是刮板输送机,其工作机体很难实现完全封闭,因此,在输送松散物料时,粉尘飞扬是不可避免的。振动输送机可以将工作机体封闭起来,进而达到防尘的目的。为了实现清洁生产,保证工人身体健康,采用工作机体封闭式振动输送机是十分合理的。这一措施已经在工业部门中得到了十分广泛的应用。

振动给料是振动输送工程的一种特殊形式,利用可控硅对电磁振动给料机进行振幅调节和给料量的自动控制,过程十分简单,这在自动化的生产流程中是一项必不可少的要求。电磁振动给料机的质量轻、体积小、制造成本低,便于调节产量,并可在生产流程中实现自动控制,这是一种十分理想的振动设备。电磁振动给料机的应用,淘汰了结构笨重、体积庞大的老式板式给料机,可以说是给料设备的一次重大革命。

图 2.1 是作者所在科研组为北京铁矿研制的一种弹簧隔振平衡式长度为 20m 的振动输送机,该机器已成功地应用于该矿的生产中,并取得了良好的经济效益和社会效益。图 2.1 中所示的工作部分为上槽体和下槽体,上、下槽体间安放有沿振动方向安装的主共振弹簧,槽体间安装着弹性连杆式激振器,使上下槽体沿着倾斜方向连续相对振动,并促使槽体中的物料不断向前运动,从而完成输送物料的任务。在两槽体间有摆杆连接,摆杆的中支点用装有橡胶铰链的支承架支承,支承架固定于下部支架上。为了提高隔振效果,在 20m 长的底架支承架下方安装有隔振弹簧。这种长距离振动输送机隔振效果好,槽体为封闭式,故防尘效果好。

图 2.2 为 20 世纪七八十年代作者曾参与研制的电磁振动给料机的示意图,它是由电磁激振器来激发振动的,利用可控硅调节的脉动电流通过电磁铁线圈,来改变电磁铁产生周期变化的电磁吸力,使与槽体固定在一起的连接叉与电磁铁之间产生相对振动。由于槽体(包括连接叉)与电磁铁之间安装有使系统处在近共振工况下工作的共振板弹簧,工作机体产生振幅大小一定的近共振的相对振动,并进而用来改变电磁振动给料机的给料量。

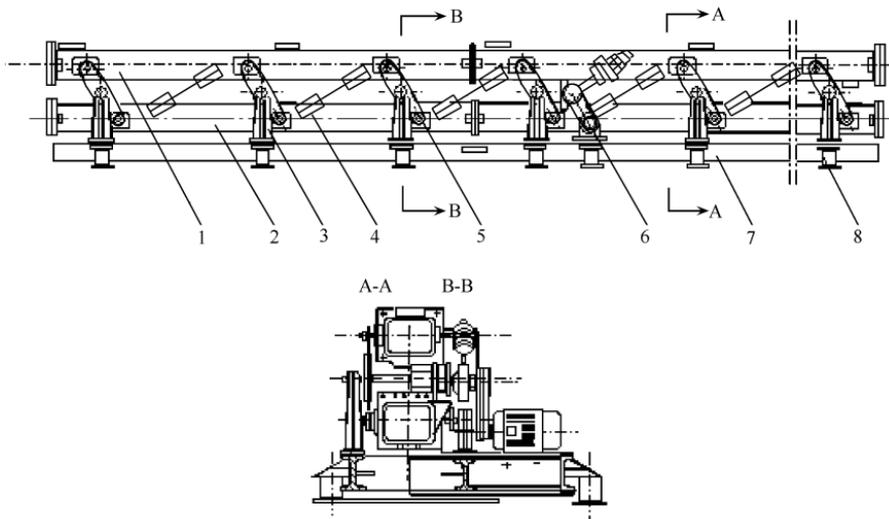
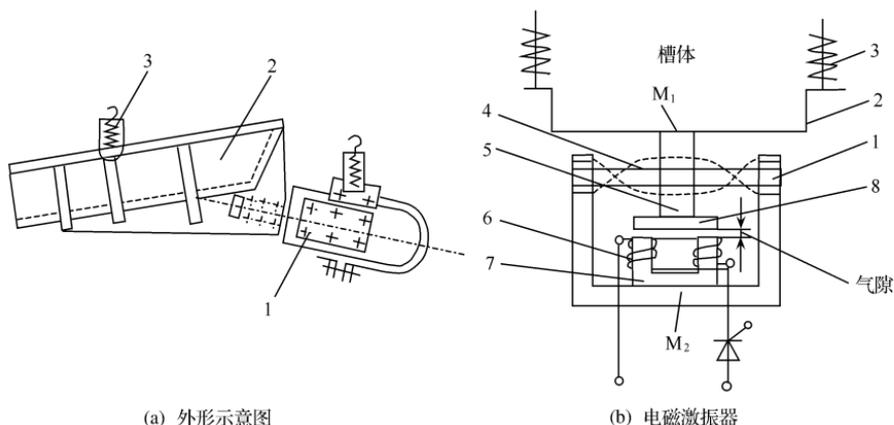


图 2.1 弹簧隔振平衡式长距离振动输送机

1. 上槽体; 2. 下槽体; 3. 铰链支承架; 4. 剪切橡胶弹簧; 5. 铰链; 6. 弹性连杆式激振器;
7. 支承架底架; 8. 隔振弹簧



(a) 外形示意图

(b) 电磁激振器

图 2.2 电磁振动给料机

1. 激振器; 2. 工作机体; 3. 弹性元件; 4. 板弹簧; 5. 连接叉; 6. 线圈; 7. 铁芯; 8. 衔铁

2.2 振动筛分技术的应用

振动筛分广泛应用于冶金、煤炭、化工、电力、机械、食品加工、农业等部门,对各种各样的松散物料进行筛分。松散物料的筛分是为了对物料达到按粒度或块度

大小进行分级的目的。对物料进行分级加工的工作量是十分巨大的,因此各类振动筛的需要量也十分可观。我国每年从地下开采出来的煤炭和矿石多达数十亿吨,而这些松散物料多数都需要进行分级,进行分级的目的有:

1) 对不同粒度大小的物料进行分别使用。例如,分级后的煤炭的使用效率会显著提高,它的价格也会相应增加。

2) 由于工艺上的要求,必须将物料进行分级。例如,在高炉冶炼时,送入高炉的原料及燃料必须事先进行筛分,将粉末状的细料从混合物料中分出,避免因粉状物料过多而影响高炉熔炼过程中的透气性,从而可以避免高炉出现严重事故。为了对物料进行筛分,科技工作者研制出各种各样的振动筛和共振筛,提出了多种有效的筛分方法:普通筛分法、薄层筛分法、概率筛分法、厚层筛分法和概率等厚筛分法等。图 2.3 是我科研组设计研制的大型自同步冷烧结矿振动筛,目前应用于全国多家钢铁企业。为了提高高炉的冶炼效果,必须对冷烧结矿进行筛分,以除去其中粉状或粒度很小的物料,避免这些细物料进入高炉。该类大型振动筛的规格有多种:2 500mm×7 500mm,2 500mm×8 500mm,3 000mm×9 000mm 等,其质量为 30~50t。

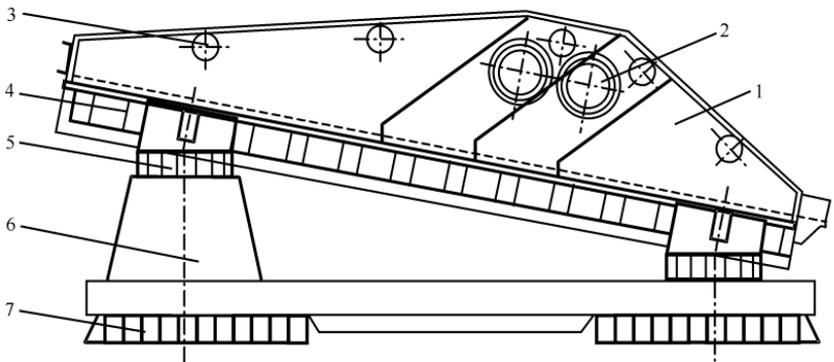


图 2.3 激振器偏转式冷烧结矿振动筛

1. 振动机体;2. 偏转式自同步激振器;3. 筛框上部圆形连接梁;4. 筛框下部矩形连接梁;
5. 一次隔振复合弹簧;6. 隔振底架;7. 二次隔振复合弹簧

该种大型振动筛由于采用了国际上首创的激振器偏转式安装的自同步振动机构(图 2.3),使其高度显著降低,质量较轻且结构紧凑;嵌入式激振器装于振动机体上部,使机体的刚度与强度均较优越;由于采用了二次隔振系统,该机具有良好的隔振性能,并可以安装于建筑物的上层,而不会引起建筑物的振动。

图 2.4 是我科研组研制成功的惯性共振式概率筛。该种振动机采用了由惯性激振器 1 激励的,由筛箱及平衡质体组成的双质体工作在近共振工况下的一种新的振动机构。在筛箱 3 与平衡质体间装有共振剪切橡胶弹簧,以使系统工作在接近

共振的工况下。筛箱内装有三层带有筛孔的筛面4,在该筛上由于实现了概率筛分,使筛机具有较高的产量。整个筛箱悬挂于隔振弹簧2上。该筛的优点是工作平稳、无噪声、隔振效果好,筛分效率与产量均较高,产量是普通振筛的3~5倍。

图2.5为另一种采用间隙橡胶弹簧的非线性惯性式共振筛。它是由筛箱1、激振器的偏心块5、平衡质体4、带间隙的主振非线性弹簧2、板弹簧6和隔振弹簧7等组成。平衡质体用板弹簧支承于筛箱上,筛箱、平衡质体和非线性橡胶弹簧组成了非线性主共振系统,而筛箱、平衡质体和隔振弹簧组成了隔振系统。

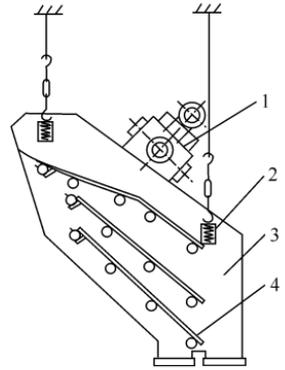


图 2.4 惯性共振式概率筛
1. 惯性共振式激振器; 2. 隔振弹簧; 3. 筛箱; 4. 筛面

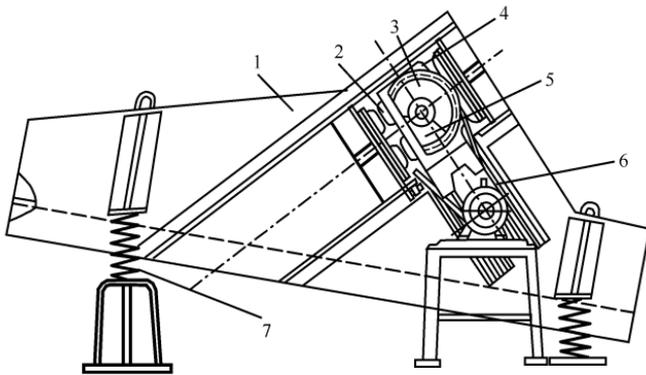


图 2.5 非线性惯性式共振筛的结构图

1. 筛箱; 2. 主振非线性弹簧; 3. 皮带轮; 4. 平衡质体; 5. 偏心块; 6. 板弹簧; 7. 隔振弹簧

由于在相对振动方向上主振动系统的固有频率与工作频率相接近,所以在主振方向上的振幅较大,而与其相垂直的方向远离共振工作状态,在这一方向机体的振幅很小。因此,机体的运动轨迹是接近于直线的长椭圆形,这种运动轨迹对筛分过程是很有利的。

我国每年都要生产大量的各种类型的振动筛和共振筛,以满足数量相当巨大的各类物料的筛分要求。新型振动筛分技术的研究和开发的目的是,为了研制和生产出产量大、筛分效率高的各类振动筛机,近年来振动筛分机械向大型化方向发展,其尺寸越来越大。筛分技术的难点是对于那些潮湿和细物料的筛分,在处理这些物料时,产量与筛分效率会显著降低。

图2.6为双向半螺旋振动细筛的外形图。这是一种非共振类振动筛,安装于下部的双激振电机使机体作垂直方向的振动,在筛体中有8个半螺旋,物料从左上方