

工程中的振动问题的研究进展*

李欣业^{1†} 张华彪² 郭晓强¹

(1. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300401)

(2. 天津商业大学 机械工程学院, 天津 300134)

摘要 本文试图就工程中的振动问题所涉及的传统工程领域和新兴的工程领域以及与之相关的研究领域和研究趋势进行综述,但由于工程振动问题本身的复杂性以及由于新兴工程领域的不断涌现,这实际上是一个很大的话题,用较小的篇幅恐怕很难总结得准确和到位。

关键词 工程中的振动问题, 工程领域, 研究领域, 研究趋势

中图分类号:O327

文献标志码:A

引言

虽然许多现代科学技术均源于生活,但其发展却是伴随着工程技术的发展而不断地壮大.机械振动理论也不例外,根据文献[1],早在公元前 4000 年,中国人、印度人、日本人可能也包括埃及人就开始关注乐器中的振动发声问题,但真正形成一门独立的学科却是近代工业技术发展的产物,尤其是上个世纪上半叶随着汽车工业、土木工程、航天工程的发展,工程中的振动问题也愈发凸显,因而极大地加速了振动理论的发展.虽然到目前为止,振动理论已日臻完善,但由于工程振动问题的复杂性,仍有许多工程中的振动问题并没有得到很好的解决^[2, 3].也正是由于工程中会不断涌现新的振动问题,才促进了振动理论不断发展。

2021 年十月,河北工业大学承办了第 14 届全国振动理论及应用学术会议,并遴选部分论文在《动力学与控制学报》出版专刊,重点刊发与工程领域中的振动及其控制问题相关的优秀研究成果.本文将结合当前的前沿技术和研究领域,就工程中的振动及其控制问题作一简要总结.虽然作者力图能够囊括所有工程领域中的振动问题,但由于新的工程领域也是在不断涌现,再加之不同的工程领域之

间可能会有交叉的部分,因此未必全面或准确,所以希望能起到抛砖引玉的作用。

1 几个典型的传统振动工程领域

几乎在所有的工程领域都有振动问题,正是由于人们在各种工程实践活动中,不断发现新的振动现象,并不断地解决它们,才使得振动理论不断地发展和完善.以下是振动问题涉及的几个比较典型的传统工程领域。

1.1 航空与航天工程领域

包括机翼颤振问题、飞机起落架的振动问题、航天器的姿态动力学问题以及展开机构的动力学问题、运载火箭在发射台点火时的低频抖动问题和上升过程中气动力引起的剧烈振动问题、航空发动机转子系统的振动等^[2]。

1.2 舰船工程领域

来自船舶主机、螺旋桨和波浪的激励引起的船舶整体或局部的振动不仅会使舒适性大大下降,还会严重影响整体或局部结构的疲劳寿命以及船上仪器或仪表的正常工作.军用舰艇的振动会严重影响其声隐身品质.随着现代科学技术的发展,在设计之初就考虑舰船的减振隔振问题早已成为必然^[3]。

2021-04-09 收到第 1 稿,2021-05-14 收到修改稿.

* 国家自然科学基金资助项目(11972145).

† 通信作者 E-mail:xylihubut@163.com

1.3 车辆工程领域

汽车发动机的振动、转向系统的振动、车身的振动等以及高速铁路列车和磁悬浮列车车身的振动等不仅会直接影响乘坐的舒适性,有时甚至会引起严重的运行事故,乃至危及乘员的安全.车辆的运行品质都是由其各种动态性能决定的^[4].

1.4 结构与桥梁工程领域

随着高耸结构的高度以及桥梁跨度的越来越大,其风致振动问题已非常普遍;桥梁在运动荷载作用下振动问题、海洋钻井平台在风浪载荷作用下的振动问题以及大型石油储罐的地震响应问题都是设计和施工中必须要考虑的问题^[5,6].

1.5 机械制造与装备工程领域

各种机械加工设备如机床、轧机中的振动问题,不仅会严重影响加工效率,而且也会严重影响加工质量.机床的动态性能是机床加工性能的重要指标之一.机械加工设备的振动与控制问题既可以是针对整机的,也可以是针对局部的,如刀具的颤振、传动系统的扭转振动等^[7].

1.6 能源与动力工程领域

传统的能源与动力工程领域的振动问题涉及采煤机的振动问题、油气钻井过程中钻杆的振动问题、燃气轮机转子和叶片的振动问题,覆冰高压输电线路的舞动等.采煤机和油气井钻杆的振动不仅会严重影响钻进的效率,甚至还会引起钻具的损坏.燃汽轮机的机组故障大多数跟其转子和叶片的振动有关.严重的覆冰输电线路舞动甚至可能导致杆塔结构的破坏^[8].

1.7 振动利用工程领域

工程领域振动利用的例子很多,如振动筛分、振动打桩、振动夯实、振动抛光、振动破碎、辅助振动加工等.为保证振动机械的高品质运行,必须基于对其动力学性能的理论分析、仿真或实验,对其进行优化设计.东北大学闻邦椿院士及其团队成员的专著《振动利用工程》就工程领域的振动利用问题涉及的理论与方法进行了全面的总结^[9].

1.8 冲击与防护工程领域

为抵抗杀伤武器破坏而构筑的各种防护工程,会承受超强的冲击和爆炸载荷,此外还可能要求具有一定的防核、防化学、防生物武器和防火、防潮功能.各种复合材料、超材料、多胞轻质材料和仿生材料结构在防护工程领域的应用越来越受到人们的

关注.此外借助新的设计理念(例如功能梯度、多层次、负泊松比等)、制造技术和优化方法,使人们开始主动而有效地提高材料的能量吸收特性和结构的抗冲击能力.

2 围绕工程中的振动问题形成的若干研究领域

随着人们对工程领域中的振动问题的认识不断深入,振动理论得到了不断的发展和完善,从而形成了如下若干与工程中的振动问题相关的相对独立的专门研究领域.显然,以下所列各个研究领域之间极可能会有交叉.

2.1 多体动力学问题

多体动力学问题在航天领域、机器人领域广泛存在.传统的多体动力学问题实为多刚体动力学问题,目前已发展成为刚-柔耦合多体动力学问题,因为诸如软体机器人,航天器的展开机构等柔性体的变形是非常显著的^[10].

2.2 多场耦合动力学问题

虽然大多数工程领域的振动问题均属于传统的力载荷引起的动力学问题,但在许多工程领域,温度效应、电磁效应等对系统动力学行为的影响也是不容忽视,从而成为力-热-电耦合系统,这也正是工程领域振动问题复杂性表现之一^[11].

2.3 多尺度耦合动力学问题

以球磨机的振动问题为例,在对其整个系统进行动力学分析与设计时,筒体、颗粒、粉体等对象的几何尺度相差甚远;在讨论输电线的舞动和石油钻井系统的振动时,塔架和导线的几何尺度以及钻杆和井架的几何尺度也都相差很大.复杂工程系统中不同几何尺度的研究对象之间耦合的强弱直接决定了多尺度耦合动力学问题求解的难易.

2.4 流固耦合动力学问题

流固耦合动力学问题在工程中广泛存在,除了我们熟悉的桥梁工程和海洋工程,液压管路和空调管路的振动问题,水下航行器舵系统和风力机柔塔的振动问题,大型石油储罐的地震响应问题等也都是典型的流固耦合问题^[12].

2.5 快慢变耦合动力学问题和时滞动力学问题

快慢变耦合动力学问题是指系统的动力学模型中某些量随时间变化得较快,而另外一些量随时间变化得较慢;时滞动力学问题是指系统的控制微分方程中含有时滞,时滞动力学系统的相空间本质上是无限维的.这两类动力学问题在工程领域也会

经常出现,前者的典型代表是绳系卫星系统,后者的典型代表是主动控制系统。

2.6 非线性动力学问题

理论上说,工程领域的动力学问题本质上都是非线性的.以简单的钻削过程为例,切削力却是进给速度、钻压和旋转速度等诸多因素的复杂非线性函数.人们熟知的洛伦兹系统虽然其非线性形式并不复杂,却通过它发现了混沌现象.振动系统的非线性虽然得到了学术界的普遍认可,但在解决工程实际问题时还是会遇到很大的挑战。

2.7 随机动力学问题

工程中的许多动力学问题都具有随机性,如大气湍流引起的飞机抖振、喷气噪声引起的飞行器表面结构声疲劳及火箭推进的运载工具有效负载的可靠性等.浙江大学朱位秋院士及其团队在随机动力学与控制的理论研究方面,一直以来在国际学术界具有重要的影响,并在有些方向上起到了引领作用^[23]。

2.8 不连续系统与冲击动力学问题

工程中的许多动力学问题都具有不连续性,这种不连续性往往是由结构的不连续而引起的不同边界条件而引起的,处理这类不连续系统时由于要满足在共同边界上的连续性,所以处理起来会复杂很多,尤其是当在不同的域内系统均表现为非线性时.冲击动力学研究材料或结构在短时快速变化的冲击载荷作用下产生波动(应力波传播),并使固体材料产生运动、变形和破坏的规律.在多尺度框架下以更全面的视角研究材料-结构-性能的内在规律已成为推动冲击动力学继续发展的一个强大的新趋势。

3 若干新兴振动工程领域

随着科技的不断发展,涌现了一些新兴行业(机器人、无人驾驶等)以及对传统产品提出了更高的质量要求(空调噪声的降低等),为此,若干新兴振动工程问题随之出现,通过大量的国内研究文献调研,发现目前新兴振动工程问题的研究主要集中于以下八个方面,具体分析如下:

3.1 工程机械领域

随着我国城市立体化建设的加快布局和发展,一些新兴的工程机械设备涌现,其振动问题也引起大量学者的关注,其中作为一种功能高度集成化且智能化的大型基建工程装备,盾构机被普遍地使用

于地铁及各种类型隧道和隧洞的建设施工中.学者们主要在盾构机主轴承上开展了振动问题研究,建立了其运动微分方程^[13~15],探究了结构和作业参数对轴承动态特性的影响规律^[16~19],研究成果为盾构机的发展奠定了理论基础。

3.2 工业与医疗机器人领域

作为自动化生产线中必不可少的核心装备,工业机器人及其控制技术的改进与应用是推动我国智能制造发展的重要手段和关键环节.近年来,工业机器人以其成本低、灵活性强、占用空间小等优点,正在普遍应用于汽车制造、电子电器、食品、化工、航空制造等行业,具体的振动与控制研究集中于机器人焊接^[20]、机器人搬运^[21,22]、机器人分拣^[23]、机器人制孔^[24]、机器人打磨与抛光^[25]等.如何解决机器人低精度、弱刚性与高精度高效率切削加工之间的矛盾,是国内外学者们的研究热点^[26,27]。

3.3 无人驾驶领域

无人机技术是近现代航空航天先进科研技术的热点话题^[28],也是实现空中作业机械化全覆盖的起点,起初无人机技术主要服务于军方在作战区域环境监测、卫星气象监测、消防灭火、物资运送、缉毒缉私、边境线巡查等领域^[29]。“863计划”推行后,为促进科技自立自强、自主创新,国家逐步向民用开放无人机技术,工业无人机、农业无人机等迎来了井喷式增长^[30]。目前,无人机可以在日常情况下协助人类或在危险环境中代替人类完成工作:在面对新冠肺炎等疫情中,作业型旋翼无人机可以进行物资运输以大大减少人与人之间的接触频率;在突发公共安全事件中,作业型旋翼无人机可以进入危险区域进行灭火、拆爆等操作以有效降低人员伤亡.因此,作业型旋翼无人机有着非常广阔的应用前景。

3.4 新能源领域

为助力“碳达峰、碳中和”国家战略目标的早日实现,可持续能源越来越引起学者的关注,特别是海上能源,包括波浪发电和风力发电,此些能量收集的核心机理是将动能转化成电能,为此,其运动模式是学者所关注的焦点,开展了一系列研究,包括波浪能振动能量收集的振动问题^[31-33]、风力发电机的振动问题^[34-36]以及其他振动能量收集器的振动问题^[37,38],提出相应能量振动收集器的设计方法,以上研究为海洋可持续能源的收集奠定了理论

基础,促进我国能源向多方面发展。

3.5 家用电器领域

随着人们生活质量的提高,对家电的品质以及作业要求有了更高的要求,其中最主要是的家电运行中带来的噪声振动,直接影响产品的质量和人们的生活,为此,一些学者此方面开展了相应的研究,建立了波轮洗衣机刹车制动振动模型^[39]、滚筒洗衣机同步电机运行机制^[40]以及暖通空调管道振动模型^[41],提出相应的振动噪声控制方法,支撑了现代化家电品质的提升。

3.6 特种设备(装备)领域

特种设备一直支撑了我国关键行业的发展,其振动问题一直备受学者的关注,如何精准有效建立特种设备的动力学模型,分析其振动特性,提高其作业精度和效率,是国内特种行业研究人员的目标。诸如电梯振动问题的探析、索道非线性动力分析与振动控制^[42-44]、核电装备的振动问题分析^[45,46]以及粒子富集与运输过程中的振动问题分析^[47]。以上特种设备的振动问题将持续牵引了国内学者的研究方向,也是从事一些关键领域学者的重点突破对象。

3.7 微机械(机电)系统领域

微机械(机电)系统是一种对晶体材料进行微纳加工,使其具有特定的机械性能后集成到电子电路的工业技术,它的操作范围在微米尺度内。随着我国向自主创新型国家的进程进一步深化,微机械(机电)系统已经被成熟应用到通讯、消费类电子产品、交通、医疗等领域。特别是随着移动通信技术的快速发展,微机械(机电)系统在大数据时代的物联网系统中作为高灵敏传感器在实现对目标物的声、光、热、电、力学、化学、生物、位置等各种需要的信息的实时采集和监控中扮演了关键角色^[48-50]。其中,陀螺仪作为微机械(机电)系统的一种核心设备,在物体姿态控制和物体导航定位等领域有重要的作用。微机械陀螺仪具有功耗低、成本低、小尺寸、抗过载能力强、动态范围大、可集成化等优点在工业控制领域、在如此广泛的市场中,研究和发展微机械(机电)系统陀螺仪就成为了一个重要的研究方向^[51-53]。

3.8 增材制造领域

随着科学技术的发展,人们在生产制造中越来越注重运用具有优良性能的材料,同时材料的发展也逐渐成为了一个衡量社会进步的标准^[54]。然而,

增材制造技术是基于离散与堆积原理,并汇聚了计算机软件、高能束、机械、材料、控制等多门学科知识,通过“分层制造、逐层叠加”的方式,以材料“自下而上”的逐层堆积而实现的加法制造工艺,成为极具发展潜力和研究价值的增材制造技术^[55],其动力学问题也一直是学者关注的焦点^[56]。

3.9 兵器领域

陆军武器涉及的振动问题包括火炮发射动力学问题、与越野性能直接相关的轮式及履带式装甲战斗车辆的动力学问题等;海军武器涉及的振动问题虽然与一般舰船的动力学问题有共性之处,但像两栖战舰、航空母舰这类特殊装备显然又具有其独特的动力学性能要求;空军武器涉及的振动问题包括战斗机、直升机、加油机及其它机种的飞行动力学问题。

3.10 生物力学及仿生领域

虽然现代科学技术得到了飞速发展,但人们却发现自然界中许多昆虫和鸟类所具备的本领却是人类所不能企及的,因此各种生物力学问题和仿生技术应运而生。蜂鸟为什么能长时间停在空中,与其扇动翅膀的频率有什么关系?这是一个典型的生物力学中的振动问题。借助于仿生设计,我国的科研人员也已经取得了不少令人满意的结果。例如由上海交通大学研发的具有自主知识产权的“六爪章鱼”救援机器人2013年就进行了载人试验。人们对仿生产品的终极追求主要体现在其机动性,即当外界环境因素发生变化时,能够快速稳定地作出反应。

4 研究趋势

由于工程问题的复杂性以及新的工程领域和新的振动问题会不断涌现,所以必然会导致研究的难度越来越大。因此利用前沿的技术手段和方法解决工程中的振动问题成为必然趋势。目前研究工程领域中的复杂振动问题时,可能涉及的新技术或新概念如下。

4.1 与先进测量技术的结合

对于一些特殊的场合,如高温高压、超大型结构,很难利用传统的表面接触传感器或者近距离非接触传感器实现振动测试。利用计算机视觉图像技术、多普勒激光雷达/毫米波雷达遥测技术、光纤光栅传感技术,甚至利用无人机作为测量载体,是重要的发展趋势^[57]。

4.2 与人工智能技术的结合

近年来,在数字经济不断推进的大背景下,人工智能发展迅速,并与多种应用场景深度融合.利用人工智能技术解决工程中的各类复杂的动力学与控制问题将是其重要的应用领域之一.工程中动力学问题的复杂性在于参数的不确定性、时变性等,这正是基于实时感知并实时反馈的人工智能技术的用武之地^[58].

4.3 与大数据技术的结合

基于大数据技术的数据驱动建模和数字孪生技术已在学术界和各个工业领域得到广泛应用.在解决工程领域的复杂动力学与控制问题时,利用数据驱动和数字孪生技术对复杂的系统进行动力学建模将会吸引越来越多的关注^[59].

4.4 与先进控制技术的结合

在现代工程技术领域,复杂动力学系统(如机器人、机组编队、工业过程)的控制问题变得越来越突出,控制技术所发挥的作用越来越大.鉴于工程问题的复杂性,真实系统的准确描述并非易事,由于被动控制的局限性,先进的主动控制技术越发受到重视^[60].

4.5 与先进动态数据处理技术的结合

多普勒激光雷达/毫米波雷达遥测技术对于信号的处理提出了更好的要求,怎样把有用的信息从复杂的回波中提取出来是很重要的.对于多种传感数据的融合是非常重要的,每一种传感器和测试方式都有其特定的优势和缺点,数据融合可以实现优势互补,呈现出更完整的系统振动的信息^[61].

4.6 与先进数值计算(仿真)技术的结合

对于现代工程技术领域经常出现的多物理场耦合、刚柔耦合、多尺度耦合等复杂的动力学问题,先进的数值计算和仿真技术具有无可替代的作用.针对工程中的复杂动力学问题的实验成本高昂,一旦理论分析陷入僵局,数值计算无疑是最佳选择.

4.7 与先进材料技术的结合

经过专门设计的各种复合材料、超材料、多胞轻质材料和仿生材料,具备天然材料所没有的超常物理性质.通过人为的结构设计,调控材料的声学 and 振动激励响应特性,可以实现在不同介质或特定边界条件下的振动和噪声传播特性,从而成为符合复杂振动和低频噪声控制要求的新型材料^[62].

4.8 与先进的设计理念的结合

许多先进的设计理念已经越来越被人们接受,

并在工程上得到了应用,如准零刚度、功能梯度、负泊松比,多胞结构等.这些先进的设计理念应用于工程领域可能颠覆人们的认知,并在解决工程实际中的动力学与控制问题发挥重要作用^[84].

5 结论

本文力图就各类传统的和新兴的工程领域中的振动问题进行总结,包括所涉及的研究领域以及研究趋势,但由于工程问题的复杂性以及工程中的新问题会不断涌现,所以总结未必全面和准确.尤其是如何利用各类新技术新方法解决工程中的振动问题具有很大的挑战性.

参 考 文 献

- 1 Rao, S S,李欣业,杨理诚译.机械振动(第5版).北京:清华大学出版社,2016(Rao S S, Li X Y, Yang L C, trans. Mechanical vibrations (5th Edition). Bei Jing: Tsinghua University Press, 2016 (in Chinese))
- 2 屈美娇.航空发动机整机结构系统耦合振动及其智能优化研究.南京:南京航空航天大学,2018(QU M J. Research on coupled vibration of whole aero engine structure system and its intelligent optimization. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018(in Chinese))
- 3 欧礼坚.船舶螺旋桨及推进装置故障诊断关键技术研究与应用.广州:华南理工大学,2010(Ou L J. Research and application of marine propeller and propulsion device fault diagnosis key techniques. Guangzhou: South China University of Technology, 2010 (in Chinese))
- 4 李韶华,王伟达.车辆动力学与控制研究进展.动力学与控制学报,2021,19(3):1~4 (Li Shaohua, Wang Weida, Research advance in vehicle dynamics and control. *Journal of Dynamics and Control*, 2021, 19(3):1~4 (in Chinese))
- 5 解晴宇.桥梁自适应支座振动控制及车桥耦合系统振动控制研究.石家庄:石家庄铁道大学,2022(Xie Q Y. Research on vibration control of bridge adaptive bearing and vehicle-bridge coupling system. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022 (in Chinese))
- 6 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述·2021.中国公路学报,2021,34(02):1~97 (Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's Bridge Engineering Re-

- search; 2021. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(02): 1~97 (in Chinese))
- 7 杨志军. 机械制造系统物流驱动机理的动力学研究. 武汉: 武汉理工大学, 2018 (Yang Z J. Dynamics research on logistics driving mechanism of mechanical manufacturing system. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018 (in Chinese))
 - 8 高德利, 王宴滨. 深水钻井管柱力学与设计控制技术研究新进展. 石油科学通报, 2016, 1(01): 61~80 (Gao D L, Wang Y B. Progress in tubular mechanics and design control techniques for deep-water drilling. *Petroleum Science Bulletin*, 2016, 01: 61~80 (in Chinese))
 - 9 田强, 刘铖, 李培, 等. 多柔体系统动力学研究进展与挑战. 动力学与控制学报, 2017, 15(5): 395~405 (Tian qiang, Liu Cheng, Li Pei, et al. Advances and challenges in dynamics of flexible multibody systems. *Journal of Dynamics and Control*, 2017, 15(5): 395~405 (in Chinese))
 - 10 陈锐搏. 含间隙旋转铰机构的多体动力学研究. 昆明: 昆明理工大学, 2021 (Chen R B. Study on multi-body dynamics of revolute joint mechanism with clearance. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021 (in Chinese))
 - 11 邹学锋, 潘凯, 燕群, 郭定义, 刘小川. 多场耦合环境下高超声速飞行器结构动强度问题综述. 航空科学技术, 2020, 31(12): 3~15 (Zou X F, Pan K, Yan Q, et al. Overview of dynamic strength of hypersonic vehicle structure in multi-field coupling environment. *Aeronautical Science & Technology*, 2020, 31(12): 3~15 (in Chinese))
 - 12 苟兴宇, 马兴瑞, 黄怀德. 流固耦合动力学与航天工程中的流-固-控耦合问题. 航天器工程, 1996(04): 1~14. (Gou X Y, Ma X R, Huang H D, et al. Fluid structure coupling dynamics and fluid structure control coupling problems in aerospace engineering. *Spacecraft Engineering*, 1996(04): 1~14. (in Chinese))
 - 13 田晶, 王志, 张凤玲, 等. 中介轴承外圈故障动力学建模及仿真分析. 推进技术, 2019, 40(03): 660~666 (Tian J, Wang Z, Zhang F L, et al. Dynamic modeling and simulation analysis on outer race fault of intermediate shaft bearing. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(03): 660~666 (in Chinese))
 - 14 李志农, 李云龙, 任帅, 等. 局部点蚀故障滚动体的滚动轴承动力学模型研究. 振动工程学报, 2020, 33(03): 597~603 (Li Z N, Li Y L, Ren S, et al. Research on dynamic model of rolling bearing with local pitting fault in rolling bearing element. *Journal of Vibration Engineering*, 2020, 33(03): 597~603 (in Chinese))
 - 15 王震, 杨正伟, 何浩浩, 等. 非规则轴承故障的动力学建模与仿真. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(08): 1580~1593 (Wang Z, Yang Z W, He H H, et al. Dynamic modeling and simulation of irregular bearing failure. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(08): 1580~1593 (in Chinese))
 - 16 李同杰, 朱如鹏, 鲍和云, 等. 行星齿轮系扭转非线性振动建模与运动分岔特性研究. 机械工程学报, 2011, 47(21): 76~83 (Li T J, Zhu R P, Bao H Y, et al. Nonlinear torsional vibration modeling and bifurcation characteristic study of a planetary gear train. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(21): 76~83 (in Chinese))
 - 17 肖正明, 秦大同, 尹志宏. 多级行星齿轮系统耦合动力学分析与试验研究. 机械工程学报, 2012, 48(23): 51~58 (Xiao Z M, Qin D T, Yin Z H. Multi-stage planetary gears dynamic coupling analysis and experimental investigation. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(23): 51~58 (in Chinese))
 - 18 雷亚国, 罗希, 刘宗尧, 等. 行星轮系动力学新模型及其故障响应特性研究. 机械工程学报, 2016, 52(13): 111~122 (Lei Y G, Luo X, Liu Z L, et al. A New dynamic model of planetary gear sets and research on fault response characteristics. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(13): 111~122 (in Chinese))
 - 19 杨文广, 蒋东翔. 行星齿轮典型断齿故障的动力学仿真. 振动. 测试与诊断, 2017, 37(04): 756~762+844 (Yang W G, Jiang D X. Study of the dynamics of the planetary gear with typical tooth break faults. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017, 37(04): 756~762+844 (in Chinese))
 - 20 周泽云. 标准节主弦杆机器人焊接工作站的设计与运动仿真分析. 长沙: 中南林业科技大学, 2022 (Zhou Z Y. Design and motion simulation analysis of a robot welding workstation for main chord bar of standard section. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2022 (in Chinese))
 - 21 李想. 新型直驱式晶圆搬运机器人的关键技术研究. 上海: 东华大学, 2022 (Li X. Research on key technologies of a new direct-drive wafer handling robot. Shanghai: Donghua University, 2022 (in Chinese))
 - 22 杨轶焜. 六关节搬运机器人控制系统的研究与开发. 广州: 广东工业大学, 2021 (Yang Y X. Research and development of control system for six-joint handling robot. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021 (in Chinese))
 - 23 韦志文. 基于机器视觉的分拣机器人设计与研究. 淮南: 安徽理工大学, 2022 (Wei Z W. Design and re-

- search of sorting robot based on machine vision. *Huainan*; Anhui University of Science and Technology, 2022(in Chinese))
- 24 董松, 郑侃, 孟丹, 廖文和, 孙连军. 大型复杂构件机器人制孔技术研究进展. *航空学报*, 2022, 43(05):31~48+2(Dong S, Zheng K, Meng D, et al. Robotic drilling of large complex components: A review. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(05):31~48+2(in Chinese))
- 25 周子杰. 磨抛机器人末端执行器结构与柔顺控制技术的研究. 广州:广州大学, 2022(Zhou Z J. Research on structure design and compliance control technology of end effector of polishing robot. Guangzhou: Guangzhou University, 2022)
- 26 陈齐志. 工业机器人铣削系统颤振分析与加工精度提升方法研究. 济南:山东大学, 2022(Chen Q Z. Research on chatter analysis and machining accuracy improvement method of industrial robotic milling system. Jinan: Shandong University, 2022(in Chinese))
- 27 李琳, 古智超, 张铁. 结合机器人柔体动力学和关节力矩反馈的振动控制. *振动与冲击*, 2022, 41(11):235~244(Li L, Gu Z C, Zhang T. Vibration control of robot to combine flexible body dynamics and joint torque feedback. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(11):235~244(in Chinese))
- 28 Idrissi M, Salami M, Annaz F. A review of quadrotor unmanned aerial vehicles; applications, architectural design and control algorithms. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2022, 104(2): 22
- 29 杨斌, 何玉庆, 韩建达, 等. 作业型飞行机器人研究现状与展望. *机器人*, 2015, 37(5):628~640(Yang B, He Y Q, Han J D, et al. Survey on aerial manipulator systems. *Robot*, 2015, 37(5):628~640(in Chinese))
- 30 李垚. 重载四旋翼无人机机架结构设计及稳定性分析. 沈阳:沈阳工业大学, 2022(Li Y. Structural design and stability analysis of heavy duty four rotor UAV frame. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022(in Chinese))
- 31 焦冲, 邓华夏, 马孟超, 钟翔. 针对波浪能收集的多模态振动能量收集器. *实验力学*, 2022, 37(02):152~160(Jiao C, Deng H X, Ma M C, Zhong X. Multi-modal vibration energy harvester for wave energy harvesting. *Journal of Experimental Mechanics*, 2022, 37(02):152~160(in Chinese))
- 32 亓有超, 赵俊青, 张弛. 微纳振动能量收集器研究现状与展望. *机械工程学报*, 2020, 56(13):1~15(Qi Y C, Zhao J Q, Zhang C. Review and prospect of micro-nano vibration energy harvesters. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(13):1~15(in Chinese))
- 33 冯武卫, 郭磊. 波浪能压电式宽频振动能量采集装置的优化研究. *机械设计与制造工程*, 2020, 49(11):96~100(Feng W W, Guo L. The optimization design of vibration energy acquisition device with ocean wave energy piezoelectric broadband. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2020, 49(11):96~100(in Chinese))
- 34 张存, 沈意平, 阳雪兵, 杨波, 时或. 气隙偏心下永磁风力发电机定子电磁振动特性分析. *电机与控制应用*, 2022, 49(04):53~59(Zhang C, Shen Y P, Yang X B, et al. Electromagnetic vibration characteristics analysis of permanent magnet wind generator under air gap eccentricity. *Electric Machines and Control Application*, 2022, 49(04):53~59(in Chinese))
- 35 关新, 牛阔, 赵建, 陈国一. 风力机舱体启停过程中的振动特性研究. *沈阳工程学院学报(自然科学版)*, 2021, 17(03):8~12(Guan X, Niu K, Zhao J, et al. Study on vibration characteristics of wind turbine cabinet during start and stop. *Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science)*, 2021, 17(03):8~12(in Chinese))
- 36 易园园, 轩亮, 谭昕, 鲁迪, 刘长钊. 风力发电机传动系统固有振动特性研究. *机电产品开发与创新*, 2020, 33(04):64~67(Yi Y Y, Xuan L, Tan X, et al. Natural vibration properties of a wind turbine drivetrain. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2020, 33(04):64~67(in Chinese))
- 37 郭奇雨. 面向海洋浮标的波浪能收集器研究. 苏州:苏州大学, 2019(Guo Q Y. Study on the blue wave energy harvester towards the ocean buoy applications. Suzhou: Suzhou University, 2019(in Chinese))
- 38 张树青. 固定方位式海洋监测浮标能量收集装置的设计与研究. 杭州:浙江大学, 2018(Zhang Shuqing. Design and research on energy collecting device of directional marine monitoring buoys. Hangzhou: Zhejiang University, 2018(in Chinese))
- 39 江黎, 吴云贵, 凌志东. 波轮洗衣机刹车制动振动性能研究. *日用电器*, 2022(08):105~108(Jiang L, Wu Y G, Ling Z D. The brake vibration performance research of top loading washing machine. *Electrical Appliances*, 2022(08):105~108(in Chinese))
- 40 顾超林, 周福昌, 项红荧. 滚筒洗衣机振动噪声问题解析 // 2014年中国家用电器技术大会论文集. 2014:411~416(Gu C L, Zhou F C, Xiang H Y. Analysis of drum washing machine vibration and noise problem // Proceedings of 2014 China Home Appliance Technology Conference, 2014:411~416(in Chinese))
- 41 解宇辰. 建筑暖通设计中噪声与振动通病的防治研究. *房地产世界*, 2022(11):43~45(Xie Y C. Study on

- prevention of common noise and vibration problems in building hvac design. *Real Estate World*, 2022(11):43~45(in Chinese))
- 42 薛浩. 车辆—柔性索道桥非线性动力分析与振动控制研究. 武汉: 武汉理工大学, 2019(Xue H. Nonlinear dynamic analysis and vibration control research of vehicle-flexible cableway bridge. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019(in Chinese))
- 43 蓝丽珊. 架空吊运索道作业过程的振动建模研究. 福州: 福建农林大学, 2017(Lan L S. Study on vibration modeling of aerial ropeway operation. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017(in Chinese))
- 44 顾晓龙. 脱挂索道线路结构布置优化设计. 重庆: 重庆大学, 2014(Gu X L. The optimization design for circuit layout of detachable ropeway. Chongqing: Chongqing University, 2014(in Chinese))
- 45 付江永, 魏文斌, 刘明利, 王岳辉. 核电厂立式泵电机多故障耦合振动问题的处理. *核动力工程*, 2020, 41(03):217~220(Fu J Y, Wei W B, Liu M L, Wang Y H. Vibration fault diagnosis and treatment of vertical long shaft pump motor in nuclear power plants. *Nuclear Power Engineering*, 2020, 41(03):217~220(in Chinese))
- 46 严颖第, 王小信. 百万千瓦级核电厂汽水分离再热器疏水管线振动问题分析. *中国核电*, 2019, 12(02):191~194(Yan Y D, Wang X X. Analysis on vibration of steam water separator and reheating drain pipe in a 1000 MW nuclear power plant. *China Nuclear Power*, 2019, 12(02):191~194(in Chinese))
- 47 阮慧敏. 基于银纳米粒子和超顺磁性氧化铁纳米粒子的 CTCs 捕获、富集、检测和释放. 宁波: 中国科学院大学(中国科学院宁波材料技术与工程研究所), 2018(Ruan H M. Silver nanop articles and super-par amagnetic iron oxide nanoparticles for capture, enrichment, detection and release of CTCs. Ningbo: University of Chinese Academy of Sciences(Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences), 2018(in Chinese))
- 48 罗雯耀. 微机械谐振器的模态耦合及非线性行为研究. 济南: 山东大学, 2021(Luo W Y. Mode coupling and nonlinear behaviors of micromechanical resonators. Jinan: Shandong University, 2021(in Chinese))
- 49 张文豪. 基于面向微机械电子技术的自动化测量传感器设计研究. *电子测试*, 2022, 36(02):121~122(Zhang W H. Research on the design of automatic measurement sensor based on oriented micro-mechanical and electronic technology. *Electronic Testing*, 2022, 36(02):121~122(in Chinese))
- 50 杨立光, 马文锁, 高飞, 李继锋, 邓明, 刘昭林, 马磊, 孟鸿超. 表面凹槽织构微机械加工及其摩擦学性能研究. *工具技术*, 2021, 55(12):73~76(Yang L G, Ma W S, Gao F, Li J F, et al. Study on tribological properties of groove texture in surface micromachining. *Tool Engineering*, 2021, 55(12):73~76(in Chinese))
- 51 姜珊, 张伟. 载体驱动微机械陀螺仪结构优化及性能仿真. *传感器世界*, 2022, 28(08):10~16(Jiang S, Zhang W. Structural optimization and performance simulation of carrier-driven micromachined gyroscope. *Sensor World*, 2022, 28(08):10~16(in Chinese))
- 52 杜晓辉, 刘帅, 朱敏杰, 刘丹, 孙克, 王凌云, 占瞻, 路文一. 微机械陀螺仪零偏稳定性的温度响应测试评价. *仪表技术与传感器*, 2022(06):12~17+22(Du X H, Liu S, Zhu M J, et al. Temperature response test and evaluation of zero-bias stability for MEMS gyroscope. *Instrument Technique and Sensor*, 2022(06):12~17+22(in Chinese))
- 53 邢博文. 硅微机械陀螺仪高过载动态响应研究. 上海: 东南大学, 2019.(Xing B W. Overload dynamic response of silicon micro-machined gyroscope. Shanghai: South-east University, 2019(in Chinese))
- 54 陈辉, 闫文韬. 激光选区熔化增材制造中的粉体热动力学行为. *力学学报*, 2021, 53(12):3206~3216(Chen H, Yan W T. Dynamic behaviours of powder particles in selective laser melting additive manufacturing. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(12):3206~3216(in Chinese))
- 55 南文光, 顾益青, Mojtaba Ghadiri. 增材制造中金属粉末卡塞动力学离散元模拟研究. *工程热物理学报*, 2022, 43(05):1260~1266(Nan W G, Gu Y Q, Mojtaba G. Discrete element simulation of metal powder spreading in additive manufacturing. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2022, 43(05):1260~1266(in Chinese))
- 56 顾冬冬, 马成龙, 夏木建, 戴冬华, 石齐民. 激光增材制造的热力学和动力学多尺度理解. *Engineering*, 2017, 3(05):220~239(Gu D D, Ma C L, Xia M J, et al. A Multiscale understanding of the thermodynamic and kinetic mechanisms of laser additive manufacturing. *Engineering*, 2017, 3(05):220~239(in Chinese))
- 57 陶宇峰. 基于激光自混合的微纳米振动测量关键技术研究. 南京: 南京师范大学, 2017(Tao Y F. Research on key technology of micro/nano vibration measurement based on laser self-mixing. Nanjing: Nanjing Normal University, 2017(in Chinese))
- 58 汤化明, 王玲, 杨国华, 贾蓝波, 熊雨婷, 夏亮亮, 王龙, 刘胜昌, 聂轶苗, 刘淑贤. 人工智能在矿物加工技术中

- 的应用与发展. 金属矿山, 2022(02):1~9 (Tang H M, Wang L, Yang G H, et al. Application and development of artificial intelligence in mineral processing technology. *Metal Mine*, 2022(02):1~9 (in Chinese))
- 59 刘肃平, 谭志平. 基于大数据的辅机设备振动噪声监测分析平台. 计算机工程与应用, 2018, 54(22):258~264 (Liu S P, Tan Z P. Vibration and noise monitoring and analysis platform of auxiliary equipment based on big data. *Computer Engineering and Applications*, 2018, 54(22):258~264(in Chinese))
- 60 廖芳芳. DCS 系统设计及先进控制在 DCS 系统中应用探讨. 成都:西南交通大学, 2005 (Liao F F. The design of DCS and research on the application of DCS based on advanced process control. Chengdou: South-west Jiaotong University, 2005(in Chinese))
- 61 张峻宾, 许晓斌, 王雄, 蒋万秋, 舒海峰, 孙鹏. 基于小波重构的天平动态特性数据处理技术. 北京航空航天大学学报, DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0441:1~14 (Zhang J B, Xu X B, Wang X, et al. Data processing technology of balance dynamic characteristics based on wavelet reconstruction. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0441:1~14(in Chinese))
- 62 黄时进, 林绍梁, 庄启昕. 先进材料领域关键技术预见性的研究. 今日科苑, 2020(12):13~22 (Huang S J, Lin S L, Zhuang Q X. The research on the key technology foresight in the fields of advanced materials. *Modern Science*, 2020(12):13~22(in Chinese))

RESEARCH PROGRESS OF VIBRATION PROBLEMS IN ENGINEERING*

Li Xinye^{1†} Zhang Huabiao² Guo Xiaoqiang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

(2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract This paper attempts to summarize the traditional engineering fields and emerging engineering fields involved in the vibration problem in engineering, as well as the related research fields and research trends. However, due to the complexity of the vibration problem itself and continuous emergence of emerging engineering fields, this is a big topic, and it may be difficult to summarize accurately and in place in a small space.

Key words Vibration Problems in Engineering, Engineering Fields, Research Fields, Research Trends

Received 9 April 2021, revised 14 May 2022.

* The project supported by the Natural Science Foundation of China(11972145)

† Corresponding author E-mail: xylhubut@163.com