

“ 十二五 ” 国家重点图书
船舶与海洋出版工程

海洋平台随机动力响应 分析方法及智能控制技术

嵇春艳 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

国家十二·五重点图书

海洋平台随机动力响应 分析方法及智能 控制技术

嵇春艳 著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书系统介绍随机波浪作用下,海洋平台动力响应分析方法及智能控制技术的相关理论、数值仿真方法及模型试验技术。全书包括随机波浪荷载及数值仿真方法、海洋平台随机动力响应分析、智能控制基本理论、海洋平台智能控制系统设计方法、海洋平台智能控制技术应用实例分析、海洋平台振动控制模型试验设计原理、导管架海洋平台振动控制模型试验研究、自升式海洋平台振动控制模型试验研究等内容。

本书可供从事海洋平台动力特性分析与校核、海洋平台减振设计的工作人员参考,也可作为高等院校船舶与海洋工程、海洋工程与技术、土木工程等专业高年级本科生和研究生的教学用书,对广大从事动力学、振动控制技术的科研人员也有较大的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

海洋平台随机动力响应分析方法及智能控制技术 /
嵇春艳著. —上海:上海交通大学出版社, 2013
ISBN 978-7-313-09122-2

I. ①海… II. ①嵇… III. ①海上平台—动力系统—
智能控制—研究 IV. ①TE951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 247138 号

海洋平台随机动力响应分析方法及智能控制技术

嵇春艳 著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

浙江云广印业有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787 mm×1092 mm 1/16 印张: 14.25 字数: 274 千字

2013 年 3 月第 1 版 2013 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-09122-2/TE 定价: 68.00 元

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0573-86577317

前 言

随着人类对油气资源需求的日益扩大以及陆上油气资源的逐步枯竭,海上油气资源的开发正越来越受到各国的重视。作为海洋油气资源开发的基础性设施,海洋平台的数量急剧增加。这些海洋平台体积庞大、结构复杂、造价昂贵,特别是与陆地结构相比,它们所处的海洋环境十分复杂恶劣,风、海浪、海流、海冰、潮汐和地震等灾害时时威胁着平台结构的安全,尤其在极端海况中,波浪载荷作用下海洋平台结构的大幅振动和冲击载荷作用下的结构动力放大效应更为剧烈,平台结构的安全性受到严重影响。因此,开展海洋平台结构振动控制技术的理论和试验研究,对延长平台结构的疲劳寿命,提高平台可靠性,改善平台工作人员的舒适感,有效地减轻飓风、巨浪等灾害造成的严重后果具有重要的现实意义和实用价值。在这个学科领域,我国目前还缺少专门针对海洋平台智能控制技术的专业书籍。本书的出版,希望能够对我国海洋平台智能振动控制方法研究、智能控制系统的优化设计、理论和试验研究、教学和科研等起到促进作用。

从海洋平台在环境荷载作用下发生动力响应的物理过程来看,是以环境荷载作为输入,动力响应作为输出;而对于控制系统设计过程而言,是以平台动力响应作为输入,控制系统施加控制力作为输出;从控制系统减轻平台振动幅度的过程来看,是以控制力为输入,平台动力响应为输出。因此,为了读者能更好地把握本书的系统性和逻辑性,更直观地理解和接受,本书采用从不同阶段输入—输出关系进行描述,即从环境荷载、平台动力响应、控制系统设计到控制效果理论分析和试验验证为主线进行渐近式展开。

按照上述思路,本书第1章为绪论,对结构振动控制技术的分类及各自特点、海洋平台振动控制技术研究及发展、智能控制技术研究进展及其在海洋平台中的应用、海洋平台振动控制研究中的若干关键问题作了全面的论述。

第2章介绍了线性波理论、斯托克斯高阶波浪理论、随机波浪理论,并给出

了分别基于线性波理论、斯托克斯二阶波理论随机波浪力的时域和频域的数值仿真方法,为后续计算海洋平台动力响应分析提供荷载输入的计算方法。

第3章采用有限元方法建立海洋平台的数学模型,结合第2章所建立的随机波浪力计算公式,推导出广义随机波浪力的时域计算公式及频域谱密度函数的表达形式,在此基础上,分别从时域和频域进行分析,推导出海洋平台在随机波浪荷载作用下的动力响应计算公式。分别以导管架海洋平台、自升式海洋平台为计算实例,分析在不同海况参数、不同浪向的随机波浪作用下,这两类海洋平台的振动特性,为后继的控制系统设计提供动力特性输入的计算方法。

第4章主要介绍了智能控制的基本理论。包括智能控制的国内外当前研究进展、发展现状及未来发展趋势,重点介绍了当前广受关注的磁流变阻尼器、压电材料以及智能控制方法的发展及应用。在智能控制方法中详细介绍了模糊控制方法和神经网络控制方法的基本原理,为后继海洋平台智能控制系统设计奠定理论基础。

第5章重点论述了海洋平台智能控制系统设计方法。在给出海洋平台智能控制系统设计流程及工作原理基础上,分别建立了单自由度、多自由度海洋平台振动控制方程,以模糊控制方法、神经网络控制方法为智能控制方法建立了海洋平台智能控制力的最优计算方法。此外,以当前应用广泛的智能控制装置—磁流变阻尼器为研究对象,建立了控制系统的优化设计方法,给出了当控制器在出力受限情况下的设计准则,并提出了在控制系统实际应用过程中动力响应测试系统的设计原则。

第6章是海洋平台智能控制技术应用实例分析。分别以导管架平台、自升式海洋平台为应用实例,进行了模糊控制方法、神经网络控制方法对上述两种类型平台进行控制的实例分析。分别将上述两类平台简化为单自由度、多自由度进行智能控制系统的设计,比较了控制效果的区别并对智能控制系统对波浪参数、结构参数变化时的鲁邦性能进行了详尽分析和数值仿真,同时在智能控制系统控制效果的特点方面给出了一些有益结论。

第7章给出了海洋平台振动控制模型试验设计原理。介绍了相似性准则、海洋平台模型设计的相似性原理、振动控制装置设计原理。详细介绍了海洋平台模型试验中风、浪、流试验工况设计原则以及海洋平台模型试验条件模拟方法和手段,并给出了模型试验大纲编制原则。

第8章和第9章是海洋平台智能控制水池模型试验实例研究部分。分别以导管架海洋平台、自升式海洋平台为研究对象,对整个海洋平台的动力响应

水池模型试验、智能控制水池模型试验全过程进行了详细的介绍和论述。给出了模型相似性设计及模型加工制作、试验方案设计(包括试验工况设计、测试系统设计、磁流变阻尼器设计、基于模糊控制、神经网络控制方法的智能控制系统设计、控制系统安装部位设计等详尽的设计方案)。同时对海洋平台智能控制试验效果进行了时域和频域分析并与数值模拟结果进行了详细比对,给出了较多有益于工程应用和设计的建议和结论。

本书所描述的海洋平台随机动力响应分析及智能控制理论与试验研究方法的特点可以概括为:

(1) 在分析域上,分别从时域、频域系统地进行研究,给出了从环境荷载到平台动力响应再到振动控制效果的时域、频域分析方法。

(2) 在层次安排上,以荷载—响应—控制—响应为撰写主线,层次分明地介绍了在环境荷载作用下海洋平台动力响应分析方法,同时又以动力响应为智能控制系统设计的输入,给出在智能控制系统控制力输入下,海洋平台结构响应为输出的理论和数值仿真分析方法。

(3) 在分析方法上,综合了理论分析、数值仿真、试验验证等研究方法,最后以实际模型试验的结果作为对控制系统设计有效性和可行性的有力论证。

(4) 在研究对象上,重点针对当前应用广泛的导管架海洋平台和自升式海洋平台进行研究,并给出了数值仿真及试验研究的应用实例。

本书是作者十余年的研究工作总结。本书所提出的方法和结论希望对海洋工程领域相关研究人员、工程技术人员开展海洋平台振动控制的理论和试验研究工作能提供有益的指导和帮助。本书所描述的时域和频域动力响应分析方法对从事结构动力学研究、应用和开发的科研人员也有较大的参考价值。本书还可作为相关专业研究生教材。

最后感谢霍发力硕士、刘聪硕士、万乐坤硕士在攻读硕士学位期间参加本书相关内容课题所做的宝贵研究工作。感谢徐胜硕士、王朝硕士、张圆媛硕士、尹艳硕士、陶凯硕士、袁培银硕士在本书图片、公式处理等方面所做的工作。感谢国家自然科学基金(50609009)和江苏省工业支撑项目(BE2010159)等基金的支持。感谢作者所在的江苏科技大学领导和同事们对本书写作的大力支持和帮助。

由于作者水平和学识所限,书中疏漏、欠妥与谬误之处,真诚希望读者、专家和同行不吝赐教。

目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 结构振动控制技术研究与应用	001
1.2 海洋平台振动控制技术研究及发展	004
1.3 智能控制技术在海洋平台振动控制中的应用	006
1.4 海洋平台振动控制研究中的若干关键问题	009
参考文献	011
第 2 章 随机波浪荷载及数值仿真方法	019
2.1 线性波浪理论	019
2.2 斯托克斯高阶波浪理论	022
2.3 随机波浪理论	025
2.4 随机波浪力的确定	029
参考文献	035
第 3 章 海洋平台随机动力响应分析方法	036
3.1 平台振动响应时域分析	036
3.2 平台振动响应频域分析	037
3.3 导管架平台随机动力响应分析实例	038
3.4 自升式平台动力响应分析实例	049
参考文献	056
第 4 章 智能控制基本理论	057
4.1 研究现状	057
4.2 模糊控制方法	061

4.3 神经网络控制方法	065
参考文献	072
第5章 海洋平台智能控制系统设计方法	076
5.1 海洋平台智能控制系统设计流程及工作原理	076
5.2 海洋平台结构振动控制方程	078
5.3 基于智能控制方法最优控制力的计算方法	080
5.4 控制装置——磁流变阻尼器的工作原理	084
5.5 基于智能控制理论磁流变阻尼器优化设计方法	097
5.6 动力响应测试系统的设计方案	101
参考文献	102
第6章 海洋平台智能控制技术应用实例分析	106
6.1 导管架海洋平台发展概况	106
6.2 自升式海洋平台发展状况及结构特点	108
6.3 单自由度导管架平台振动控制实例仿真分析	111
6.4 单自由度自升式海洋平台振动控制实例仿真分析	115
6.5 多自由度导管架平台振动控制实例仿真分析	118
6.6 多自由度自升式海洋平台振动控制实例仿真分析	119
参考文献	121
第7章 海洋平台振动控制模型试验设计原理	123
7.1 相似基本理论	123
7.2 模型相似性设计与制作	126
7.3 平台重量、重心的调节方法	130
7.4 水池试验条件	133
7.5 风、浪、流试验工况设计原则	136
7.6 模型试验大纲的编制原则	142
参考文献	143
第8章 导管架平台振动控制模型试验实例	144
8.1 试验目的及基本原理	144
8.2 试验模型设计及制作	144

8.3 试验方案设计	147
8.4 智能控制系统控制效果的数值模拟	154
8.5 试验结果及分析	158
8.6 试验测量结果与数值模拟结果比较	175
8.7 试验结论	179
参考文献	180
第9章 自升式平台振动控制模型试验实例	181
9.1 试验目的及基本原理	181
9.2 试验模型设计及制作	182
9.3 试验方案设计	184
9.4 智能控制系统控制效果的数值模拟	188
9.5 试验结果及分析	192
9.6 试验结论	209
参考文献	210
附录	211
附录 A 导管架平台试验模型结构图	211
附录 B 自升式平台试验模型结构图	215
索引	217

第 1 章 绪 论



1.1 结构振动控制技术研究与应用

地震、飓风、海啸等自然灾害给世界人民造成了巨大的灾害,如我国 2008 年四川汶川 8.0 级大地震,1976 年河北唐山 7.6 级大地震,2003 年印度尼西亚大海啸等,给人民带来了毁灭性的灾难。灾害中上万人失去生命,大量建筑物的破坏、倒塌造成了巨大的人员伤亡和经济损失。因此,研究更加安全、可靠的控制装置来保护建筑结构,减少自然灾害带来的损失是工程结构防灾领域的主要课题,具有重要的研究意义。

在结构减振、抗灾研究中,传统方法是通过加强结构本身的性能来抵抗外界载荷的破坏,这必须要加大结构构件的尺寸,即保守设计。在采取保守设计过程中由于外载荷的随机性和不可预测性,产生的振动仍有可能超出人们估计范围而使结构发生严重破坏或倒塌,并且该方法会造成较多的材料消耗,十分不经济。随着结构控制技术的不断进步,新的控制方法在工程界得到了大量的研究和运用。通过在工程结构上设置控制装置,使结构在外界载荷作用时具有自适应能力,由控制装置与结构共同抵御、减少外界载荷对结构造成的破坏。目前结构振动控制技术已被越来越广泛地应用到工程结构的抗震、抗风、减振等领域中,取得了显著的社会效益和经济效益。

结构的控制技术研究最初可以追溯到 1972 年 Yao 将有关的自动控制概念引入到建筑结构当中,形成了比较系统的结构控制理论^[1],在短短的 40 年中,结构振动控制得到了突飞猛进的发展,并在结构减振中显示出巨大的生命力。在我国,1980 年王光远院士首先提出高耸结构风振控制技术,从此推动了我国振动控制理论及技术在工程结构中的应用和发展^[2]。发展至今,根据振动控制装置的工作原理,振动控制技术可以分为:被动控制、主动控制、半主动控制以及智能控制。

1.1.1 被动控制

被动控制方法是最早发展起来的结构振动控制技术,已形成了较完整的体系。被动控制具有结构简单、造价低、易于维护且无需外加能源等优点,其控制力是控制装置与结构协调运动产生的,一般是在结构的某个部位附加一个子系统,或者对结构自身的某些构件做构造上的处理以改变结构体系的动力特性。

结构被动耗能减振是在结构中设置非结构构件的耗能组件(通常称为耗能器或阻尼器),结构振动使耗能组件被动地往复相对变形或者在耗能组件间产生往复运动的相对速度,从而耗散结构振动的能量、减轻结构的动力反应。结构设置耗能组件大体上可以分为三类:①速度相关型耗能组件,如线性黏滞或黏弹性阻尼器;②位移相关型耗能组件,如金属屈服型(metal yield damper, MYD)或摩擦型阻尼器^[3];③调谐吸振型耗能组件,如调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)^[4~9]和调谐液体阻尼器(tuned liquid damper, TLD)^[10]。被动耗能减振装置已在国内外建成的数百座结构中得到应用,并在一定程度上经受了地震的考验。例如,1969年建成的110层纽约世界贸易中心的两座塔楼上安装了10 000个黏弹性耗能器和360T半主动TMD,有效地减小振动;在日本Yokohama(横滨)导航塔及王子饭店都安装了TLD,较好地控制风振;中国目前也有20余座装有被动耗能减振装置的新建或加固的建筑与桥梁。

尽管被动控制装置优点明显,但由于其无外加能源驱动,主要是通过改变结构的动力特性与增加局部阻尼来实现结构控制,因此,缺乏跟踪和调节的能力,其控制效果一般依赖于外载荷的谱特性和结构的动态特性,同时振动控制的幅度也较为有限。

1.1.2 主动控制

主动控制是应用现代控制技术,对输入环境动荷载和结构响应实现联机的实时跟踪和预测,在此基础上通过主动控制算法在精确的结构模型基础上运算和决策最优控制力,通过驱动器对结构施加控制力,达到减小或抑制结构振动响应的目标。因为实时控制力可以随输入外载荷改变,其控制效果基本上不依赖于外部激励的特性,因此,控制效果明显优于被动控制。

目前主动控制就算法而言,出现了许多种控制方法,如直接应用现代控制理论的经典线性最优控制(classic linear optimal control)^[11],极点分配控制(pole assignment control)^[12],瞬时最优控制(instantaneous optimal control)^[13~15],独立模态空间控制(independent modal space control)^[16],极点配置法^[17]等。

主动控制作动器通常是液压伺服系统或电机伺服系统,一般需要较大甚至很大的能量驱动。目前已开发的主动控制装置主要有:混合质量阻尼器(hybrid

mass damper, HMD)、主动质量阻尼器(active mass damper 或 active mass driver, AMD)^[18]、主动锚索控制系统(active tender control system, ATS)、气体脉冲发生器控制系统(gas pulse generator control system, GGS)和主动斜撑系统(active brace system, ABS)等。由上述主动控制装置组成的控制系统,在高层建筑、电视塔和大型桥塔结构的风振和地震反应控制应用中取得了很大的成功。目前已有 54 座高层建筑、电视塔和大型桥塔结构应用了 HMD 或 AMD 主动控制系统。

由于主动控制需要较大的外加能源才能够提供所需的控制力,在地震等特别环境下,外加能源不能够得到保证,而且也不能够满足社会节能减排的要求,所以半主动控制等正成为国内外结构振动控制技术的研究热点。

1.1.3 半主动控制

半主动控制一般以被动控制为主体,其控制原理与结构主动控制基本相同,是一种振动系统的参数控制技术,它根据系统输入的变化和对系统输出的要求,实时调节系统中某些环节的刚度、惯性以及阻尼特性,从而使系统能获得优良的振动特性。半主动控制中,实施控制力的作动器巧妙地利用结构振动的往复相对变形或相对速度,因此仅需少量的能量便能实现接近主动控制的最优控制效果。因此,半主动控制作动器通常是被动的刚度或阻尼装置与机械式主动调节系统复合而成的控制系统。

目前代表性的半主动控制装置主要有:主动变刚度系统(active variable stiffness system, AVS)^[19~21]、主动变阻尼系统(active variable damping 或 active variable damper system, AVD)^[22]和主动变刚度阻尼系统(active variable stiffness/ damper system, AVSD)^[21, 23, 24]。由于半主动控制系统力求尽可能地实现主动最优控制力,因此主动控制理论(算法)是结构半主动控制的基础;同时半主动控制系统能够实现的控制力形式和方向是有限制的,因此需要建立反映半主动控制力特点的控制算法(通常称为半主动控制算法)来驱动半主动控制装置尽可能地实现主动最优控制力。1990 年日本 Kajiman 研究所的三层建筑钢结构办公楼首次应用了主动变刚度控制系统,经受了实际发生的中小地震的检验并显示了很好的控制效果。1997 年美国首次应用主动变阻尼控制装置控制高速公路连续梁钢桥重载车辆引起的振动,显示了很好的控制效果。此外,美国学者还为 CH-47C 直升机研制了可调惯性动力吸振器,使座舱的垂直加速度在非常宽的旋翼转速区内降到 0.1 g 以内。目前日本已建成和即将竣工的结构主动变阻尼控制建筑已有 10 座。

1.1.4 智能控制

结构智能控制包括采用智能控制算法和采用智能驱动或智能阻尼装置的两类

智能控制。采用诸如模糊控制、神经网络控制和遗传算法等智能控制算法为标志的结构智能控制,它与主动控制的区别主要表现在不需要结构模型非常精确,仅通过智能控制算法确定输入或输出反馈与控制增益的关系,从而实现具有很好鲁棒性能的控制效果,但所需控制力较大,需要较大的外部能量来驱动作动器实现控制力的输出。当前智能控制方法中预测实时控制(predictive control)^[25],滑移模态控制^[26]、模糊控制^[27](fuzzy control),神经网络控制^[28](neuro control),遗传算法^[29](genetic arithmetic),鲁棒控制^[30](robust control), H_2 控制^[31], H_∞ ^[32]控制方法是智能控制中的主流控制方法。当受控系统比较复杂并含有不确定性、非线性以及及时变环节时,其精确数学模型往往难以建立或虽然可建立模型,但精度差,由这类模型得到主动控制律的效果往往达不到要求或主动控制律的求解非常困难,对于这类系统,模糊控制、神经网络和遗传算法等智能控制方法颇具生命力。1995年日本 Nakajima 桥梁施工中的桥塔 AMD 控制装置应用了模糊控制算法。

另一类采用诸如电/磁流变液体、压电材料、电/磁致伸缩材料和形状记忆材料等智能驱动材料和器件为标志的结构智能控制,其控制原理与主动控制基本相同,只是实施控制力的作动器是由智能材料制作的智能驱动器或智能阻尼器。智能阻尼器通常需要比液压或电机式作动器需要更少的外部输入能量并完全实现主动最优控制力。智能阻尼器与半主动控制装置类似,仅需要少量的能量调节便可方便实现或接近实现主动最优控制力。目前代表性的智能阻尼器主要有:磁流变液阻尼器(magnetorheological fluid dampers, MRFD)^[33~35]和压电摩擦阻尼器^[36~38]。磁流变液阻尼器已被应用于日本的一座博物馆建筑和 Keio 大学的一栋隔震居住建筑,主要用于地震控制。我国的岳阳洞庭湖大桥多塔斜拉桥的拉索也采用了磁流变阻尼器进行风振控制。

1.2 海洋平台振动控制技术研究及发展

1.2.1 海洋平台结构振动控制研究的意义

随着人类对油气资源的需求日益扩大以及陆上油气资源的逐步枯竭,海上油气资源的开发正越来越受到各国的重视。作为海洋油气资源开发的基础性设施,海洋平台的数量急剧增加。目前国内外在役的海洋平台有 8 000 余座,其中固定式平台 7 000 余座,浮式平台接近 1 000 座。这些海洋平台体积庞大、结构复杂、造价昂贵,特别是与陆地结构相比,它们所处的海洋环境十分复杂恶劣,风、海浪、海流、海冰、潮汐和地震等灾害时时威胁着平台结构的安全,尤其在极端海况中,波浪载荷作用下海洋平台结构的大幅振动和冲击载荷作用下结构动力放大效应更为剧

烈,结构的安全性受到严重影响。在国内外海洋油气资源开发过程中,曾出现过多次严重的海洋平台事故,造成了重大的生命和财产损失^[39]。例如,1968年“Rowlandhorn”号钻井平台事故;1969年我国渤海2号平台被海冰推倒,造成直接经济损失2000多万元;1979年墨西哥堪佩切湾的一座海上采油平台倒塌,酿成历史上最大的一次海底油井泄漏事件;1980年北海 Ekofisk 油田的 Alexander L

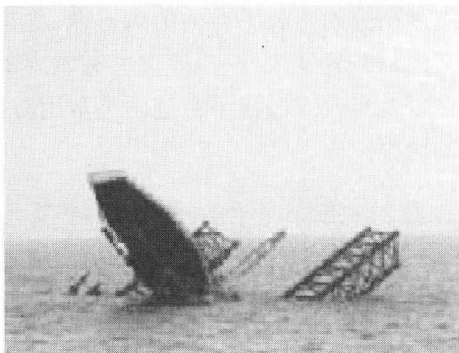


图1-1 Ranger I号自升式平台损毁事故

Kielland 号钻井平台发生倾覆,导致122人死亡;1976年在美国墨西哥湾,Ranger I号自升式钻井平台后腿柱破坏失效,致使平台失去平衡,甲板倾斜坠落,并使前腿弯折屈曲而导致整座平台最终完全破坏,如图1-1所示。由此可见,研究更加安全、经济、可靠的振动技术来提高平台的安全性、结构可靠性,延长使用年限,改善平台作业者舒适感等问题已成当务之急。

海洋平台结构形式多样而且各类型平台之间结构差异较大,目前主要分为固定式海洋平台和移动式海洋平台。固定式平台主要有导管架平台、重力混凝土平台、牵索塔平台和座底式海洋平台;移动式平台主要有半潜式海洋平台、自升式海洋平台、张力腿海洋平台以及 spar 平台、FPSO 等类型。对于应用于深水的浮式海洋平台,其运动幅度的控制主要依靠系泊系统和动力定位系统,对于工作过程中通过桩腿等结构固定于海底的平台,如,导管架平台、自升式海洋平台,其振动幅度的控制主要依靠振动控制系统。传统的导管架平台应用水深小于100 m以及自升式海洋平台在应用水深小于60 m时,其振动幅度较小,基本能够满足作业需要。近年来随着平台应用水深的增加,如导管架平台应用水深已超过400 m,自升式海洋平台的应用水深已超过120 m,此时往往需要在平台上设置振动控制装置来降低平台的振动幅度,保证平台作业及安全性需求。

已有研究表明:当导管架平台水深超过300 m时,在距海面19.5 m高处风速为22.86 m/s引起的随机波浪作用下平台振动响应幅值将超过68 cm^[40]。而自升式平台结构柔性更大,平台结构在极端海况下动力响应很大,因此,由于动力效应的影响,平台结构更易发生疲劳等问题,而导致严重的基础或者结构整体破坏。已有研究表明:工作水深90 m的自升式平台在波浪周期10 s,有义波高12 m的随机波浪作用下其结构最大振动幅度可达1.5 m^[41]。此外,过度的振动也会严重影响平台结构的正常作业和作业人员的舒适感。海洋平台的振动控制技术可以完善地解决这一问题。通过在海洋平台上设置控制机构,使平台具有自动调节的功能,对外界载荷具有灵敏的自适应能力,从而使其免受破坏。因此海洋平台的振动控制

技术研究对延长平台的疲劳寿命、提高平台可靠性、改善平台工作人员的舒适感、有效地减轻飓风、巨浪等灾害有重要的现实意义。本书主要针对导管架式海洋平台以及自升式海洋平台这两类常用海洋平台进行动力响应的分析及振动控制技术的研究。

1.2.2 海洋平台结构振动控制技术现状及发展趋势

随着陆上结构物振动控制技术的相对成熟,大型海洋平台结构物的振动控制技术正引起国内外学术界和工程界的重视。目前海洋平台的振动控制技术仍处于理论探索、试验研究及个别试验应用阶段,当前国内外的研究工作主要集中在被动控制、主动控制、半主动控制以及智能控制等方面。海洋平台的被动控制技术研究主要是利用各种被动控制装置对平台结构进行减振效果研究,如调谐质量阻尼器(TMD)^[42]、摩擦式阻尼器^[43]、调谐液体阻尼器(TLD)^[44]等。海洋平台的主动控制技术研究主要集中在对不同控制方法振动控制效果的数值模拟及模型试验方面^[45~52]。在海洋平台结构振动的智能控制、半主动控制技术中,磁流变阻尼器、电流变阻尼器是当前的研究热点,吸引了较多学者的研究兴趣,如,孙树民采用磁流变阻尼器对独桩平台的地震响应控制进行了研究^[53];嵇春艳、万乐坤、霍发力、刘聪等人采用模糊控制原理设计了磁流变阻尼器,并进行了随机波浪载荷作用下减振效果的数值仿真^[54~65];张纪刚等采用半主动控制方法对海洋平台结构冰激振动进行了控制研究^[66];刘剑林等人采用遗传算法对磁流变阻尼器进行了优化设计研究^[67]。在振动控制的试验研究方面,杨颢、欧进萍等针对渤海某导管架式海洋平台结构设计了磁流变阻尼隔震方案,并进行了1:10比例模型的振动台试验^[68];Zhang、Deng等人对冲击载荷作用下海洋结构磁流变阻尼器减振效果进行了试验研究,试验中采用MTS系统进行动力加载^[69],嵇春艳等人研究了导管架平台和自升式海洋平台的磁流变阻尼器水池模型试验,并得到了一些有益结论^[70,71]。综上所述,当前海洋平台结构振动控制技术的研究成果主要集中在针对一般海况下平台结构的振动控制理论、控制装置的理论和模型试验研究等。

1.3 智能控制技术在海洋平台振动控制中的应用

1.3.1 智能控制技术的研究进展

智能控制思想是由美国普渡大学的傅京逊(K. S. Fu)教授于20世纪60年代中期提出的。1966年门德尔(J. M. Mendel)教授首先提出将人工智能应用于飞船

控制系统的设计。萨里迪斯(G. N. Saridis)于1977年出版的《随机系统自组织控制》一书以及1979年发表的综述文章“朝向智能控制的实现”反映了智能控制的早期思想。20世纪80年代是智能控制研究的迅速发展时期,1984年奥斯特洛姆(k. J. Astron)提出专家系统的概念,同期Rumelhart提出BP(back propagation)算法。1985年8月,IEEE在美国纽约召开了第一届智能控制学术讨论会,这标志着智能控制这一新体系的形成。现代控制理论虽然从理论上解决了系统的可控性、可观测性、稳定性及很多复杂的控制问题,但各种控制方法都是以控制对象具有精确的数学模型为基础的,而现实工程中结构多为非线性的复杂系统,因此研究如何不依赖于受控结构精确模型的控制策略成为研究热点。目前,智能控制在结构领域的应用研究主要集中在模糊控制、神经网络控制、进化算法及三者的相互结合。

1) 模糊控制

1965年英国扎德教授(L. A. zadeh)首先提出了模糊集合的概念,他是模糊控制理论的创始人。1990年Lee对模糊控制器FLC(fuzzy logic control)的研究和应用作了全面的总结,并描述了FLC的本质特点,提出了模糊化和去模糊化的方案以及知识库和控制准则的建立方法,并对模糊机制进行了分析。模糊控制的核心为模糊推理,主要依赖模糊规则和模糊变量的隶属度函数,其推理过程也是基于规则形式表示的人类经验。其主要特点是:①它是一种非线性控制方法,不依赖于对象的数学模型;②具有内在的并行处理机制,并表现出极强的鲁棒性;③算法简单、执行快、容易实现。模糊控制已在一些领域取得了很好的研究成果,展示了其处理精确数学模型,非线性,时变和时滞系统的强大功能。Ushida (1994)和Pourzeynali (2007)分别对建筑结构的模糊控制进行系统的研究^[72,73]。1998年Fujitani和Midorikawa等进行了建筑结构模糊逻辑控制地震反应的振动台实验和仿真分析^[74]。1999年Symans和Kelly研究了使用智能半主动隔震耗能系统来减小桥梁的振动反应等^[75]。

2) 神经网络控制

1943年心理学家W. McCulloch和数理逻辑学家W. Wits合作提出了兴奋与抑制型神经元模型^[76]。1949年D. O. Hebb提出了一种调整神经网络连接权的规则,通常称为Hebb学习规则^[77]。20世纪五六十年代的研究成果主要是F. Rosenblatt的感知机理论。20世纪80年代D. E. Rumelhart和J. L. McClelland关于B-P网络的研究使神经网络控制达到了一个新的研究阶段^[78]。该控制方法是从机理上对人脑生理系统进行结构模拟的一种控制和辨识方法,是介于符号推理与数值计算之间的一种数学工具,具有较好的学习和适应能力。它的特点:①能充分逼近任意非线性特性;②分布式并行处理机制以及自学习和自适应能力;③数据融合能力,适合于多变量系统,多变量处理以及可硬件实现。这些特点使神经网络成为非线性系统建模与控制的一种重要方法,因此神经网络成为实现

非线性预测控制的关键技术之一。

3) 专家控制系统

这是一种将人的感知经验(浅层知识)与定理算法(深层知识)相结合的传统智能控制方法。主要优点是在层次结构上、控制方法上和知识表达上有灵活性、启发性和透明性,既可以采用符号推理也允许数值计算;既可以精确推理也可以模糊决策。由于专家系统控制不需要被控对象的数学模型,因此它是目前解决不确定性系统的一种有效方法,应用较为广泛。但具有灵活性的同时也带来了设计上的随意性和不规范性,而且知识的获取、表达和学习以及推理的有效性和实时性也难以保证。

由于这三者都具有解决人工智能中知识表达与不确定性推理的信息表达和处理能力,人们近来普遍认为以下几种途径是智能控制最具吸引力的选择:① 基于知识和经验的专家系统控制;② 基于模糊逻辑推理与计算的模糊控制;③ 基于人工神经网络的神经网络控制;④ 以上途径的交叉与结合。由于专家系统控制、模糊控制和神经网络控制各有特点,因此目前有些研究者集成这些方法,形成了模糊神经网络控制和专家模糊控制(ENNC)等多个方向。

虽然智能控制已有 20 多年的发展历史,但仍然处于开创性研究阶段。就目前智能控制系统的研究和发展来看,智能控制还有许多问题有待解决,主要有:① 智能控制理论与应用的研究。充分运用仿真、模糊等科学的基本理论,深入研究人类解决、分析、思考问题的技巧、策略等;② 建立切实可行的智能控制体系结构;③ 研究适合智能控制系统的并行处理机、信号处理器、传感器和智能开发工具软件,使智能控制得到广泛的应用;④ 开发具有智能功能的复合材料,将具有智能属性的材料嵌入平台的局部结构,或者利用智能特性复合材料制作结构的某些容易损伤的部件,从而使结构具有感知、自适应和自修复功能。

智能控制已广泛地应用于工业、农业、军事等多个领域,解决了大量传统控制无法解决的实际控制应用问题,呈现出强大的生命力和发展前景。随着基础理论研究和实际应用的不断深入扩展,智能控制将会产生新的飞跃。

1.3.2 智能控制在海洋平台减振中的应用

随着近几年智能材料科学和技术的进步,海洋平台等海工结构物智能振动控制技术取得了一些进展,掀起了采用压电陶瓷、形状记忆合金(SMA)、电流变液(ER)、磁流变液(MR)等研制可控阻尼器的研究热潮^[79]。目前 MR/ER 已经进行了较多的研究工作,并且成功地应用于近海简易平台的减振设计中^[34]。压电材料和记忆合金,尤其是后者在海洋工程结构中的应用研究刚刚起步。所以采用电流变液(ER)、磁流变液(MR)的智能控制器成为新的研究热点,它不仅具有一般半主动控制器的优点,同时还具有耗能低、出力大、响应速度快、结构简单、阻尼力连续