

海洋平台结构系统的优化理论

An Optimization Theory for Offshore Platform Structural Systems

董 聪

(清华大学土木工程系, 副教授、博士 北京 100084)

刘西拉

(清华大学土木工程系, 教授、博士生导师 北京 100084)

21 世纪是海洋工程飞速发展的世纪, 随着我国海洋高科技计划的实施, 作为海洋开发基础设施之一的海洋平台结构的研究和建设正在受到国内外科研机构和产业集团的高度重视。对现有平台结构(渤海系列)的分析表明, 结构布局、质量分布和细节设计对结构的动力特性、承载能力和疲劳断裂寿命有显著的影响。由于受当时技术发展水平和设计思想的制约, 我国许多早期平台结构的总体布局未能进行细致的优化设计。同时, 原始设计也没有或没有仔细考虑冰激振动、初始缺陷、腐蚀疲劳和振动疲劳等因素的作用。最终, 原始设计和制造中的一些缺陷在使用和维修中暴露出来, 结果使生命周期成本大幅增加。最近 10 年, 国际上关于复杂结构系统的设计思想和设计方法发生了很大的变化, 基于可靠性概念的结构总体极限承载能力设计方法、基于生命周期成本概念的结构耐久性设计方法、基于初始缺陷假设的结构损伤容限设计方法相继问世。同时, 伴随着面向对象的程序设计语言(如 C++ 和 Java 等)、专家决策支持系统(Expert Decision Supporting System)、计算机辅助设计系统(Computer-Aid Design)等的出现, 使得在方案设计阶段采用先进的优化技术进行结构方案的最优选择成为可能, 并在航空(Boeing 777)、航天(国际空间站)等高新技术集中的行业率先进入实用阶段。

面对国外军用技术向民用技术的渗透和新技术革命所带来的机遇和挑战, 要使我国海洋平台设计和生产部门在与国际同行的竞争中处于主动有利的地位, 就必须在设计思想和设计方法上与国际接轨, 并有所创新和发展。建立复杂环境下海洋平台结构系统优化新的理论体系, 分析其中需要解决的关键科学问题, 为新型海洋平台结构的优化设计做技术储备, 是本项研究的目的。本项研究主要针对渤海海域, 从以下 3 个方面研究海洋平台结构的设计理论。

一、海洋平台结构冰致振动机理及控制

海冰对结构物的作用方式是多种多样的, 工程上最关心的是结构所接受的冰力及给定冰力作用下结构物的响应。冰对结构物作用力的大小受许多因素的影响, 如冰本身的物理特性、几何特性、冰速、结构物的几何形状和尺寸等。对于给定冰条件, 冰力主要与结构物迎冰面的几何形状有关。当冰流与结构物垂直相撞时, 冰的破坏方式为挤压破碎, 此时冰对结构物的作用力最大; 当冰流与结构物斜撞时, 冰的破坏方式为弯曲破碎, 此时冰对结构物的作用力较小, 具体取值依赖于结构倾角和结构物的光滑程度。结构的整体布局和结构的功能有关。在不改变结构整体布局的条件下, 可通过在结构与冰作用的部位设置类似葫芦状的正倒锥体使冰产生弯曲破坏, 从而降低结构所接受的冰力。正倒锥体形状的最优选择是典型的几何优化问题。

海冰引起的结构振动, 习惯上简称冰致振动, 海冰引起结构剧烈振动的现象很早就被人们发现, 并进行过大量的研究。关于冰与结构动力相互作用的物理—力学机制, 目前比较流行的是两种理论, 即冰致振动的强迫振动理论和自激振动理论。强迫振动理论认为冰力和波浪力一样, 具有内在的周期性或频谱特性; 而自激振动理论则认为, 冰力是结构振动能量的来源, 但本身不具有周期性。事实上, 海冰对结构的作用机理非常复杂, 弄清这一问题需要大量的现场实验测试, 以获得冰力的时程模型。

给定冰力作用下海洋平台结构的动力响应分析和其它大型结构的动力响应分析没有太大的差别, 但海洋平台结构的振动控制有其独特的地方。与高层建筑和大跨桥梁不同, 海洋平台结构的振动加速度较大, 振型耦合明显, 且其主体结构是由大直径的中空钢管焊接而成。独特的结构单元形式和动力响应特性, 使得结构阻尼装置(比如调液阻尼

器 TLD 或调质阻尼器 TMD 等)可以分布的方式内置在中空的结构单元里,且控制效果明显。当采用被动控制时,结构阻尼装置的最优布点设计是典型的离散变量的拓扑优化问题;如果再考虑阻尼器本身的参数优化设计,则该问题变成典型的混合变量的拓扑优化问题。由于结构阻尼装置不仅提供阻尼,其自身质量也将对结构总体的质量分布产生一定程度的影响。因此,结构阻尼装置的最优布点设计实际上是多目标、多约束条件下关于混合变量的复合优化问题。对于周期性激励的结构控制,从控制效果讲,采用主被动控制方式都是合适的;对于非周期性的快速随机激励,主动控制不仅十分复杂,而且在系统辨识发生错误时可能出现自激现象。海洋平台的载荷环境具有明显的随机性,因此其结构控制以采用分布式的被动控制为宜。

给定冰力作用下海洋平台结构的动力响应与结构的总体布局及质量分布有关,已有的研究结果表明,优化结构的总体布局和质量分布,可显著降低结构的热点应力,也就是说,可显著改善结构的抗疲劳特性。因此,结构总体布局及质量分布的全局优化是一项十分重要、而且会产生直接经济效益的前沿课题。

综上所述,要弄清海洋平台结构的冰致振动机理并对其进行有效的控制,需要深入研究以下课题:(1)冰力的时程模型;(2)抗冰正倒锥体的形状优化设计;(3)冰载作用下结构的最优总体布局及其质量分布;(4)结构阻尼装置的最优布点设计及其参数优化。

二、海洋平台结构可靠度与寿命评估

海洋平台是典型的冗余系统,一些构件的失效并不必然导致结构总体的破坏。因此,结构总体的极限承载能力是平台结构设计中的关键控制因素之一。渤海海域的主要载荷环境有风、浪、流、冰以及海水腐蚀等。对于桩基近海平台,还需考虑地震荷载的作用。风、浪、流、冰均为循环动载,因此,循环载荷作用下结构元部件的损伤累积和裂纹扩展分析与控制是平台结构安全性和耐久性分析与评定的基本内容。循环载荷作用下结构元部件的损伤累积和裂纹扩展分析,目前国内外已进行过广泛的研究,积累了许多经验公式和大量的实验数据。以此为基础,考虑荷载的随机性、构件初始缺陷的随机分布和损伤累积、材料的腐蚀疲劳与退化、节点失效、杆端约束退化而导致的结构拓扑演化等综合因素作用下,结构系统总体疲劳断裂寿命可靠性分析与评定是一项紧迫的研究课题。对于循环载荷作用下,考虑系统失效演化历程的结构总体极限承载能力和疲劳断裂寿命可靠性分析与评定,目前国际

上研究得比较少。其主要原因是,由于非线性耦合效应的存在,对应于结构总体极限承载力的安全裕量方程不存在显式,这使得采用常规方法进行结构失效模式识别及系统可靠性计算遇到了许多前所未有的困难。平台结构通常为装配式结构,初始制造和装配缺陷不可避免,加之外物的意外撞伤和结构正常使用过程中的损伤累积,使得有损结构的动力可靠性分析与评定十分必要。海洋平台的载荷环境中,冰载、浪载、风载、流载通常会协同作用,对于桩基近海平台,还需考虑地震荷载的作用。很显然,对于不同的载荷环境,最优的结构布局形式及质量分布状况将有所不同。因此,研究多工况、多准则条件下,海洋平台结构的优化理论和设计方法是一项重要和有实际应用前景的研究课题。

综上所述,要进行海洋平台结构可靠度与寿命评估,以下问题需认真研究:(1)考虑失效演化历程的结构总体极限承载能力可靠性分析与评定方法;(2)考虑损伤累积和材料腐蚀退化条件下,结构系统总体疲劳断裂寿命可靠性分析与评定方法;(3)有损结构系统动力可靠性分析与评定方法;(4)多工况、多准则条件下,考虑系统失效演化历程的结构总体可靠性分析与评定方法。

三、海洋平台结构系统优化理论

结构优化涉及 3 个由浅入深的层次:剖面尺寸优化、剖面形状优化和系统拓扑结构优化。对于给定拓扑结构,且假定结构系统的拓扑结构在优化过程中不发生演化(允许退化)的限定条件下,关于结构系统中单元剖面尺寸的优化,经过国内外学者和工程技术人员几十年的努力与探索,相关问题目前已基本解决;作为对比,相同限定条件下单元剖面形状的优化,目前虽然也取得了一些进展,但有关问题并没有完全解决,关于结构系统的拓扑优化,目前国内外研究得比较多的实际上是结构的拓扑退化问题。即在结构单元剖面尺寸优化的过程中,由于某些单元尺寸退化为零而导致的结构拓扑变化,真正意义上的结构拓扑优化,即通过一种自适应的内部机制推动结构的拓扑形状向最优或近优方向演化的拓扑优化机制或算法,并没有真正建立起来。从数学角度讲,剖面尺寸优化是可行域为单连通域条件下的优化问题。在假定结构系统的拓扑结构在优化过程中不发生演化(允许退化)的限定条件下,由于目标函数为系统参数的光滑连续函数,因此,基于敏度分析的各类常规优化算法适合于处理这类问题;而剖面形状优化和系统拓扑结构优化是可行域为非连通的若干个有限子区域条件下的结构优化问题。已有的研究表明,基于敏度分析的常规优化算法不适合处理这类问题。因此,要

有效地解决结构剖面形状优化和系统拓扑结构优化问题,就必须发展新的优化原理和优化机制。

海洋平台结构系统的优化所面临的问题比通常用作优化考题的桁架结构系统的优化所面临的问题要复杂得多。计算规模大是一个方面,但不是最根本的问题,最根本的问题在于5个方面。(1)对于实际工程结构,优化通常涉及到最优选型。也就是说,要求优化程序能够创生新的方案,而不仅仅只能在现有方案基础上进行局部修改。结构系统的最优选型是典型的多目标、多约束条件下的复合优化(同时涉及拓扑优化、形状优化和尺寸优化)问题,对于这类问题,目前没有成熟的处理方法。(2)优化目标必须是设计者或业主最关心的问题。在给定建造和维护成本下,海洋平台结构的总体极限承载能力、疲劳断裂寿命、初始可靠度及可靠度随时间的演化规律无疑是设计者或业主最关心的问题之一。但以这些对象(比如以平台结构的总体极限承载能力或系统可靠度)为优化目标,即使是仅对系统中有关单元尺寸进行优化(相对简单的情况),也由于优化过程通常会改变结构拓扑形式的逐步演化(节点破坏、杆端约束退化、构件失效等)路径,致使目标函数在系统参数空间中非连续。因此,以敏度分析为基础的常规优化方法很难处理这类问题。(3)由于工艺要求和结构件批量生产的缘故,可提供的结构单元剖面尺寸选择通常是离散的。对于由离散型变量或混合型变量构成的系统的优化,已有的研究工作表明,基于敏度分析的常规优化方法是不适合的。(4)海洋平台所经历的载荷环境十分复杂,以辽东湾为例,平台的主要载荷就涉及风载、浪载、冰撞、冰激振动、腐蚀疲劳及其协同作用等,换句话说,多工况随机多点加载是平台载荷环境的主要特征。(5)对于实际工程结构,初始材料缺陷,制造、装配误差,意外损伤和正常使用条件下的损伤累计不可避免,因此,实用型的结构优化程序应当具有对有损结构进行分析的功能。

综上所述,适用于海洋平台结构系统的优化理论应当至少具备以下5个条件;(1)具备产生新方案的内在机制;(2)不依赖于敏度分析结果;(3)能够方便地处理多目标、多约束条件下的复合优化问题;(4)具备对有损结构的有关特性进行系统分析的功能;(5)随着结构规模的增大,计算复杂性的增长方式为非指数型,也就是说不会出现组合爆炸式激增现象。

四、系统的结构和集成方案

拟建立的系统是一个以 Windows95 为工作平台,可处理可行域为非连通域、考虑多目标、多约束条件下,具有结构方案自动生成、评价和进化功能

的集成式优化设计系统。该系统采用开放型的体系结构,通过模块化设计,使系统的集成、修改和维护变得简单易行;采用可视化的交互式图形图像界面,使用户的使用变得更加方便,原型系统以平台结构总体可靠性和生命周期成本为优化目标,以冰载作用下结构总体的动力特性、极限承载力、疲劳断裂寿命等为约束条件进行规划设计。

采用的研究方法和技术路线:

1. 采用自组织特征映射人工神经网络和基于案例的推理技术相结合,解决初始结构方案的生成问题。

2. 对于剖面尺寸优化和拓扑位置优化,采用自然编码方式;对于剖面形状优化,采用相关自组织编码方式,利用自组织特征映射人工神经网络,建立编码形式和剖面形状及尺寸间的内在联系。

3. 在结构物上安放传感器,通过动力反演的方式确定冰力时程模型。

4. 采用广义遗传算法对抗冰正倒锥体进行形状优化设计。

5. 采用广义遗传算法确定冰载作用下结构的最优总体布局及其质量分布。

6. 采用广义遗传算法进行结构阻尼装置的最优布点设计和参数优化。

7. 采用全局分枝—约界算法和人工神经网络相结合,解决考虑损伤累积、材料耐久性下降和存在系统失效演化历程的动态大型非线性结构系统疲劳断裂寿命可靠性分析与评定问题,并采用基于子波变换的并行递推算法,加速大型非线性结构系统可靠性模拟实验的计算效率。

8. 采用基于多层前向人工神经网络的响应面重构技术,解决多工况、多准则条件下,考虑系统失效演化历程的结构总体动态可靠性分析与评定问题。

9. 采用基于案例的推理技术,借助于交互式的图形、图像界面,解决基于知识、案例和计算(仿真)数据的混合型折衷决策问题。

10. 利用广义遗传算法的单调收敛性和全局最优化特性,确保优化进程的收敛性和实现全局最优化的功能。

本项研究不像目前流行的做法那样,在商业软件的基础上通过加入敏度分析功能来发展新的结构优化软件,而是另辟蹊径,选择广义遗传算法(Generalized Genetic Algorithm)作为建立可行域为非连通域条件下复杂结构系统优化的理论基础。其基本原因是:近10年来从事大型结构系统可靠性理论与优化技术的经历和对这一问题的长期思考与探索使我们清楚地意识到,优化方法多年来不为工程部门看好的原因是形形色色的优化程序没

(下转第17页)

流失、沙漠化等)或明显不会造成不良环境影响的项目进行。项目规模应根据资金情况确定,确保开发质量。垦荒开发要借鉴小流域治理项目管理方法,拨出专款有组织地进行,执行过程中,要严格履行论证、规划、设计、施工、验收等一整套程序。这样我国土地开发工作才能搞好。

在目前资金有限的情况下,盲目压规模是最忌讳的。谈到切忌盲目压规模,不能不谈谈国家有关管理部门应正确阐释、正确定义动态平衡的问题。对于动态平衡,不应过分强调“占一亩,垦一亩”。值得指出的是,近年来有关土地占用情况的预测,看来低估了今后我国城镇化过程的占地趋势,结果造成近年我国下达的土地占用计划指标,不符合实际需要,根据国家土地局有关报告及有关资料计算,近年我国占地计划数与实际占用数约为1:3,部分地区高达1:4~6。建国以来,我国占用耕地达7~8亿亩,而城镇化水平仅提高约20个百分点。今后在现代化过程中,我国城镇化水平在更大的人口基数上还要增长40~60个百分点。在后备资源所剩无几的情况下,从中长期看,怎么可能数量平衡呢?因此解释“耕地动态平衡”这一口号,应抓住问题的实质。主要应从人地粮关系动态平衡,从各地区食物供给动态平衡(包括与需求增长相平衡)角度加以定义和阐释。要引导地方一方面搞好人口控制,严控非农占地,另一方面把首要精力和资金优先放在中、低产田改造上来。这样我国土地利用战略才能与我国农业与粮食发展战略有机地结合,与整治生态环境的战略有机地结合。避免因误导而再次造成对我国后备土地资源以及整个生态环境产生不利的甚至破坏性的影响。

其他几点建议

1. 从保障粮食供给战略与整治生态环境战略

(上接第34页)

有和行业规范相结合,没能真正解决工程中实际面临的问题。考虑到行业规范和结构件批量生产等问题,以及冗余系统和多目标多准则设计思想的广泛应用,不难发现基于连续变量优化的敏度关系在实际工程中无法利用。而广义遗传算法作为一种新的优化思想和优化策略,不仅克服了经典遗传算法存在的许多问题,而且可方便地处理混合变量的复合优化问题,并具有实现全局最优化的能力。因此,基于广义遗传算法的结构优化技术不仅在理论上有所创新,在工程上也有很大的发展潜力。另外,我们近期采用广义遗传算法解决香港青马桥传感器群的最优布点设计获得了成功,这表明基于广义遗传算法的优化技术在大型工程上是完全可以实现的。

全局出发确定我国宜农荒地开发战略。

目前我国宜农荒地开发战略缺乏从保障粮食供给战略与整治生态环境战略全局出发的深层论证,致使有关举措比较轻率,这种局面应较快扭转。我国各主要类型后备资源开垦难度、环境影响等各有差异,应明确各主要类别成片宜农荒地开发的轻重缓急,以及依据类别确立优先开发的重点项目。

2. 土地开发应严格按“以资金定规模”的方式进行

为保证开发质量,今后各地上报开发计划,都应同时上报并落实相应的财政计划。

3. 中央应对各地土地开发加强宏观调控,尽力避免不利的环境影响

可以结合土地出让金上交中央,研究由中央财政通过金融手段等加强宜农荒地开发的宏观调控。对有重点项目及在土地开发中兼顾经济效益、生态效益的省份或地区给以资金倾斜。对存在大量违规垦荒,环境影响恶劣,又查处不利的省份、地区应采取少返回,甚至追加罚款的措施,督导地方改变目前急功近利的短期行为,以及明知下边违规,上级部门却调控不力的现象,引导我国资源开发稳妥、有序地进行。

4. 设立破坏后备资源罪

法律是进行资源保护的有力手段。目前的破坏耕地罪可自然演绎出破坏后备资源罪,以用于对包括政府官员在内的不负责任的开发政策与开发行为的威慑与惩处。

参考文献

- [1]国家土地局保护耕地专题调研组,“保护耕地必须实行治本之策”,中国土地,1997(3)
- [2]李元,“落实中央精神,推进土地整理工作”,中国土地,1997(7)
- [3]刘文军,“实现耕地动态平衡”,中国土地,1997(7)

(责任编辑 刘先曙)

本文提出的理论除了在近海工程领域有广阔的应用前景之外,也可推广应用于航空、航天、船舶、机械工程等其它领域。

参考文献

- [1]茹继平,大型复杂结构体系的关键科学问题及研究,《二十一世纪土木工程学科的发展趋势》,北京科学出版社,1997,46-53
- [2]大型复杂结构体系的关键科学问题及设计理论研究,国家自然科学基金“九五”重大项目申请指南(二),1997年4月
- [3]刘西拉,《结构工程学科的现状与展望》,北京:人民交通出版社,1997

(编者注:以下删去7篇以董聪为第一作者的参考文献,需者请与作者联系)

(责任编辑 王宏章)