

结构工程学的 研究现状和趋势

那向谦 沈祖炎 主编

同济大学出版社

结构工程学的研究现状和趋势

那向谦 沈祖炎 主编

同济大学出版社

(沪)新登字204号

内 容 提 要

本书选编的论文对结构工程学若干分枝的研究现状作了总结,对有关研究领域的发展趋势提出了见解,内容涉及到可靠性理论,系统分析及优化,结构抗震,振动控制,结构稳定、数值分析,高层、大跨及多种新型结构形式等。本书综述性强,介绍了较多的研究文献和最新的研究成果,对传统的结构工程学的一些问题,从新的角度提出了说明。本书可供结构理论的研究者、大学研究生参考。

责任编辑 缪临平
封面设计 王肖生

结构工程学的研究现状和趋势

那向谦 沈祖炎 主编

同济大学出版社出版发行

(上海四平路1239号)

浙江上虞科技外文印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 29.25 字数: 740千字

1995年1月第1版 1995年1月第1次印刷

印数: 1—500 定价: 60.00元

ISBN 7-5608-1553-7/TU·162

目 录

中国自然科学基金对结构工程科学的资助与青年科学基金(代序)	那向谦(1)
论工程项目的全系统全寿命优化	王光远(9)
混凝土结构的发展	丁大钧(16)
大跨空间结构的研究与发展	沈祖炎(22)
重大土木与水利工程安全性与耐久性的基础研究	刘西拉(32)
TOWARD A LIFE CYCLE ANALYSIS OF CONCRETE STRUCTURES	
	A.M.EL-SHAHHAT,W.F.CHEN(37)
用 Weibull 理论研究脆性材料构件的损伤概率	陈瑜海(76)
APPLICATION OF THE MODIFIED TWO-SURFACE MODEL TO THE	
BIAXIAL CYCLIC LOADING EXPERIMENT OF STRUCTURAL STEEL	
	C.SHEN,E.MIZUNO,T.USAMI(83)
DEVELOPMENT OF RELIABILITY THEORY: A CRITICAL REVIEW	
	C.Q.LI(95)
海洋平台结构的服役安全度评估	欧进萍 刘学东(108)
关于确定重大工程结构输入地运动的若干方法	陈清军(120)
ESTIMATION OF STRONG GROUND MOTIONS	
	D.FENG,M.HIRASAWA,Y.TAKASAKI(126)
设计用随机地震动研究	牛荻涛 欧进萍(145)
EARTHQUAKE WAVE ATTENUATION DUE TO FADING MEMORY AND	
ATTENUATING NEIGHBORHOOD	
	S.XUE,J.TOBITA,M.IZUMI(150)
地震工程基础理论研究的若干进展	李 杰(159)
结构抗震理论若干问题刍议	易伟建(162)
SEISMIC BEHAVIOR OF CONCRETE-FILLED STEEL TUBE COLUMNS	
	H.GE,T.USAMI(167)
结构抗震分析中的系统识别方法研究与应用	吕西林(182)
砌体结构抗震研究的回顾与展望	周德源 程才渊 郑颐(191)
主余震作用下钢筋混凝土结构的损伤试验与分析	吴 波 欧进萍(197)
地下管线地震反应和动力失稳研究进展	梁建文(205)
结构振动控制调谐质量阻尼控制装置研究与应用	滕 军(212)
EARTHQUAKE PROOF DESIGN OF STRUCTURES WITH AND	
WITHOUT VIBRATION CONTROL SYSTEM	
	S.KURITA,S.XUE,M.IZUMI(222)
工程振动问题的有限元线法分析	袁 驷(226)
大变形固结有限元分析程序	谢永利 潘秋元(235)

结构复杂非线性分析的样条有限条法	陈士林(241)
BRACKETING CRITICAL POINTS AND BRANCH SWITCHING IN NON LINEAR FINITE ELEMENT ANALYSIS OF STRUCTURAL STABILITY	J.SHI(246)
轨道结构动力学的研究现状及存在的问题	李成辉(263)
土石坝非平稳随机地震反应分析的总应力法	刘文廷 韩国城(268)
大跨桥梁风振抑制的气动及机械措施	顾 明(275)
SOME ASPECTS ON EVALUATION OF EXISTING BRIDGE STRUCTURES IN THE UNITED STATES	Y.ZHOU(283)
列车-桥梁振动研究概况	陈 淮 曾庆元(293)
结构的弹-塑性动力屈曲	崔世杰(298)
反复位移场中钢结构的弹塑性稳定问题	陈以一(306)
BUCKLING OF STEEL SHELLS: RECENT RESEARCH ADVANCES	J.G.TENG(312)
YIELD LINE THEORY FOR ANALYSIS OF LOCALISED FAILURE IN THIN-WALLED STRUCTURES	X.L.ZHAO(329)
现代预应力工程结构的新进展	孙宝俊(343)
DEPLOYABLE STRUCTURES	Z.YOU(348)
张拉结构及索的力学模型研究	张其林 高振锋(360)
大跨网壳合理形体研究与发展	罗永峰(366)
高层建筑与桩筏基础的耦合分析	杨 敏(370)
超高层建筑的结构分析与设计	
——广州中天广场80层办公楼的结构分析介绍	丁洁民(378)
复合板式轻型建筑的研究与发展	姚谦峰(391)
ENVIRONMENTAL FACTORS ON THE STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL TIMBER	J.P.LU,W.L.YUE(398)
RECENT RESEARCH ON THIN-WALLED CORRUGATED STEEL SILOS: LOADING, ANALYSIS, AND DESIGN	J.Q.ZHANG(409)
NUMERICAL PREDICTIONS OF WALL PRESSURES IN CYLINDRICAL SILCS	
J.F.CHEN,K.F.ZHANG,J.Y.OOI AND J.M.ROTTER	(425)
上水管路的耐久性评价方法	马智亮(446)
系统识别方法在结构工程反问题中的应用	王复明(458)

中国自然科学基金对结构工程科学的资助与 青年科学基金(代序)

国家自然科学基金委员会 那向谦

近代科学的理论方法和计算方法不断创新,近源和远源学科之间的日益交叉渗透,使得基础性科学研究和应用技术开发之间的界限趋于模糊,并由此导致了科学研究的视野与领地的空前扩大。

基于近代科学发展的规律,结构工程这个作为古老土木工程专业的主干学科面临着严峻的挑战,同时又蕴育着一个得以蓬勃发展的新的机遇。国家自然科学基金委员会成立的第二年,1987年初,我们开始着手进行学科发展战略的研究。发表了一系列研究报告。与此同时,8年来,我们在组织、审批国家自然科学基金设置的面上、重点、重大项目三个层次的资助项目中密切注视学科发展的规律,寻找和鼓励学科发展的新生点。本文作为上述工作的一个总结,也是我们抛砖引玉力图勾划出结构工程科学在下一个世纪发展的框图与规律。

一、结构工程发展的趋势

结构工程科学是与国民经济建设紧密相关的基础性科学。它服务于工程建设工作,又从工程建设中吸取值得研究的素材。我国从70年代末开始的全国范围的基本建设高潮,尤其是沿海省份对外经济开放后,城市发展,重大工程项目及道路桥梁的建设为结构工程的科学研究提出了一系列新的课题。西方和欧洲国家,在世界上国家间建立新的格局和新的关系的形势下,把用于国防和空间争霸的科学研究经费,转而用于国家的基础性工程建设和现有工程项目的改造和修复工作。同时为土木工程、结构工程学科的科学研究提供了较为充裕的研究经费。对我国结构工程界而言,抓住机遇、确立正确的战略目标,编制科学发展规划,为下个世纪初科技事业的发展打好基础,是当前十分重要的任务。

研究分析近10年来国内外学术动态,及国际国内学术会议与刊物发表的文献,结构工程学研究发展呈现三大趋势:

1. 结构物的单体或局部的强度与稳定的研究相对成熟,研究方向开始转向结构的体系化问题。例如将结构物的地基视为半无限体,基础、结构物与其耦联,利用有限元方法,将对象分隔为不同的界面,做整体的所谓“结构—基础—地基”之间共同工作的计算分析,即为典型的例子。在时域范围内,尤其是动态的灾害性载荷(风和地震力)作用下,对结构物做时域的动力响应分析,做弹性、塑性、直至破坏与倒塌分析。空域与时域的结构问题的研究构成了总体的体系性的“四维”问题研究。

2. 传统的结构物设计与结构物的力学分析过程,通常是依据知识和经验框出计算简图(假设),再用数学、力学分析进行求解,对于重要的工程还应用试验方法进行验证。容

易出现的一个偏差是结构工程师的关注点在中段的力学分析求解问题上, 忽视了结构物及外部载荷的大量的不确定因素的存在, 其结果是“粗糙的假设—精细的求解—粗糙的或不可靠的结果”。

近年提出的结构体系的总体性优化和可靠度的研究, 将结构分析概念拓宽至工程大系统的全局性优化设计。即考虑工程项目的社会与经济效益决策, 工程的可行性分析论证, 总体规划设计可靠性, 施工的可能性等。这个所谓工程大系统问题的提出, 引起学术界的争论, 问题的解决仍存在着难点, 但可以预见, 随着计算机科学的发展、人类的经验与知识的积累与建库、大系统优化和可靠性问题会进入应用阶段。

3. 随着近代科学发展, 学科之间的渗透, 电子计算机的容量与速度的飞速增加, 结构工程发展的另一大趋势是专业概念的拓宽。

应用计算机存储信息、数据, 以至人的知识和经验, 利用计算机做逻辑推理, 系统分析寻求优化解, 这一切使得大量的不确定性的一次性结构计算分析问题可以求解, 加上已经成熟的计算机辅助设计(CAD)系统, 结构设计 with 结构分析将出现革命性的变革, 结构工程将向更为宏观并更趋于客观实际的方向发展。

近年来处于上升发展的交通工程, 城市防灾工程, 均是借助于计算机与系统工程分析的发展而兴旺起来。

传统的结构方案设计、结构体系优化、结构损伤识别、施工组织设计、房地产业的决策与管理这些依靠专家的知识与经验的工作, 转向用机器做分析和决策。1937至1992年之间, 国家自然科学基金委员会, 会同8个部委联合资助的“工程建设中智能辅助决策系统的应用研究”汇集了国内20几个科学研究院与高等学校的结构工程、建筑学、环境工程与计算机等专业的科学家集中力量联合攻关, 使我国在这一处于起步阶段的研究领域进入国际先进行列。这一研究所完成的现有建筑物与城市的震害损伤与评估对策系统、工程项目的投标报价系统、铁路线改建方案决策系统等进入实用阶段。用于土木工程智能决策系统的研究仍在深入, 它将伴随着计算机硬、软件水平的提高, 数学的系统分析方法的发展而发展。

结构工程专业概念拓宽的另一重要工具是计算机仿真技术。本世纪60年代发展起来的这一方法, 由初始的数值模拟与计算机图形技术向与信息论、模拟论、控制论、人工智能、多媒体视景系统等现代科学方法结合的方向发展, 在土木工程中的应用领域日益展宽。工程规划与设计现场实景环境的模拟、灾害环境作用的模拟、结构物损伤破坏过程的模拟以及工程设计的模拟、房地产投资风险、利润效益预测的概率分析模拟等, 均已取得研究成果。计算机仿真技术(又称模拟技术)不仅改善了结构工程的设计分析和试验手段, 而更为深刻的是这一技术的引入和深化, 促使了结构工程专业概念和专业领域的深刻变化。智能决策与仿真系统的应用, 将结构工程师由繁杂的计算工作中解放出来, 有时间和精力去思考更为宏观的结构大系统问题。

近20年来, 传统的数理科学、地理科学、工程地质科学等争相开发新的学科领域, 它们借助坚实的专业基础理论, 应用上述的近代科学方法, 发展了“专家决策系统”、“地理信息系统”, 建立了大区域范围中的灾害性载荷在岩土介质中, 大气环境中的传递与分布模型等。这些土木工程需要而还未解决的科学问题, 由相关的其他学科领域解决了, 相比之下建筑与结构工程专业的学科发展则相对滞后。

为适应当今科学技术发展日新月异,科学试验、理论与计算方法不断创新,近源和远源学科之间日益交叉渗透这一趋势,我们从1990年开始在科学基金申请指南中,明确地把土木工程(广义结构工程)划分成三个领域:结构工程、交通工程、城市与减灾工程。岩土工程(含地基和地下结构物周边介质问题),建筑材料工程则在其他近源学科中渗透发展。八五期间,国家科委与国家自然科学基金委员会联合资助实施的“城市与工程灾减基础研究”除作为国家级的一项重大研究课题外,在学科拓宽发展的意义上,将促使城市规划、地理信息处理、计算机应用与结构、水利、力学工程相互交融,为这一新的专业研究领域的产生奠定基础。

二、国家自然科学基金在结构工程科学中近期优先资助领域的考虑

国家自然科学基金的基本任务为:依据国家发展科学技术的方针、政策和规划,遵循科学研究的自身规律,关注科学前沿问题;有效的运用科学基金,指导、协调和资助基础研究和应用基础研究工作;发现和培养人材;促进科学技术进步和经济、社会的发展。

遵照上述的基本任务所规定的原则,在结构工程领域近期优先资助的范围为:

1. 结构物总体分析、结构设计的可靠度准则研究。结构的可靠性可以作为协调结构安全适用与经济的最佳结合点。由于土木工程中大量的不确定因素,使得可靠性研究必须也应该综合合理地考虑整个结构的“生命周期”,而且也应该在一定程度上考虑整个工程系统的约束。该项研究事实上是整个设计的基础工作,它包含有结构最优可靠性风险决策的理论,考虑多目标的模糊优化的方法等。研究工作中,势必要遇到信息的缺损及处理大量的随机、模糊因素,无论是数学建模还是寻优手段都有相当难度,而这部分工作完成的质量又是关系到设计成败的最关键的部分。

2. 灾害环境下的结构物的破坏及损伤模式研究。结构计算中,常常是计算方法的精度很高而输入的荷载与各种环境因素不准,这种差距使整个计算丧失了应有的精度。尽管对风力、地震力已做了大量的工作,但由于局部环境的影响,对真正作用到结构上的灾害力的研究还不能满足设计的需要。因此,各种荷载与荷载谱的大量统计和测试工作必须引起整个学科的重视。必须考虑荷载的不确定性,研究荷载本身的随机性及其取值的主观性。

灾害性荷载作用下结构物动态响应历程,屈服后滞回模型,非线性动力失稳,三维破坏性荷载输入条件下的结构破坏准则等问题仍应深入研究。

在结构屈服后的分析中还有大量数值方法问题未解决。实际结构在灾害作用下的破损实测以及根据记录的反演也是必需的。只有对不同类别的结构系统倒塌的基本现象作出机理性的解释后才能使防止和控制破坏倒塌的相应理论方法得到解决。

3. 灾害性环境、灾害性荷载在不同介质中的传播规律与灾害预测、对策研究。与工程有关的自然灾害主要是风、地震、洪水、火、滑坡等,而其中风工程与地震工程已相继发展为独立的学科。在城市中,人为所造成的火灾(例如电火、燃火)以及恶性爆炸等已形成对人民生命财产越来越大的危害。人们不但要解决工程结构的抗御和减灾能力,还要解决修复和预测其灾害后的寿命的问题。

以地震为例,由于地面运动特性的复杂性使整个结构抗震变得非常复杂。作为这一工

作的基础与出发点,首先必须掌握我国强震地面运动的特点,此外,在局部场地条件对地震动特性的影响方面还需实测数据和可靠的计算模型。在如何考虑地面转动和地震动空间变化对结构的影响方面还是空白。在风荷载方面,我们也缺乏大量风作用荷载的实测记录。关于荷载谱,荷载与结构本身出现的耦合作用还有大量工作要做。当火灾出现时,工程材料出现的损伤以及高温下的本构关系研究,在我国还刚刚起步。目前对直接爆炸效应的研究还进行得很少。

城市的抗灾系统工程是一门综合性的学科,应根据科学的方法进行决策,针对实际问题划分若干领域,由有关部门进行联合研究。就城市抗灾而言,它关系到城市规划、土地利用、能源(包括水、电、煤气、热力)、交通、通讯工程、住宅、公用建筑和工业建筑抗灾对策、灾害对环境的可能污染、场地与地基的稳定性、重要设备与设施的抗灾措施、灾害的社会经济影响、灾害保险、医疗救护、救灾技术与防灾训练等等。必须在上述各方面进行分项研究,完成决策的基础工作,然后进行整个城市抗灾的综合决策。

4. 结构物的损伤积累与耐久性研究。结构在自然环境和长期使用环境的长期作用下逐渐损坏,这是一个不可逆的过程。应该指出,工程耐久性的问题在我国更为突出。由于我国人口众多、大量的老房、危房仍在使用中。据1985年国家统计局统计,我国城市中大约有46亿平方米建筑,其中已使用20年以上的占41%。就工业厂房而论,我国目前约有5亿平方米,覆盖的固定资产有5000亿元左右。

建筑与工程结构物除承受大气腐蚀外还有长期温、湿变化所造成的结构在物理化学性质方面的变化。目前以钢材锈蚀、混凝土碱骨料反应及冻融现象最为典型。这方面的研究,在我国除对沿海港口设施和寒冷低温地区做过一些实测及少量理论工作外,基本上还处于探索阶段。所谓使用环境的破坏作用主要是材料和结构的疲劳。疲劳按其周期可以分为一般疲劳、低周疲劳和脉动疲劳。一般疲劳如吊车、车辆荷载,常以百万次计,结构会因此出现较大的应力变化幅值。这种疲劳作用下的结构性能已经研究得很多。一些低周疲劳常常导致结构多次超越屈服点或极限状态,其特点是大变形,目前正在研究中。地震引起的结构反应就属于这类。脉动疲劳是以千万次甚至亿万次计,结构只产生很小的应力变化幅值。疲劳导致的破坏主要是由于构件在整个寿命过程中损伤积累超过了材料可以承受的极限,从而使构件退出工作或破坏。例如海洋工程在波浪力作用下,这个问题就十分明显。目前,对于不同的工程材料在不同疲劳周期作用下,损伤累积的机理还不清楚。人们曾经探讨用各种不同的损伤度来定义材料、构件和结构的损伤程度,以求得定量的计算。应该说,这些方法多半还是纯经验性的,关于损伤累积的理论研究和试验还进行得很少。

5. 高强与高性能结构材料的研究。结构工程学科的发展中材料是最重要的因素之一。我国具有宏大的建设规模,但目前所用的材料大多处在低质水平和数量不足的状态。这种状态使结构工程技术不能达到高效率地实现建筑结构功能要求的水平,而一些高功能或特种功能的结构则因材料的原因只能有限度地实现或难以完全实现。解决这个问题,一方面应从材料科学入手将现有工程材料改性或发展新材料;另一方面应强调材料与结构统一的设计概念,强调在结构工程中注重应用可预见的优良的改性材料或用新材料创造新结构型式。

高强与改性混凝土是在传统的水泥混合料中掺入新材料,以提高抗拉强度和减少脆性。目前国外大力研究发展这种掺入料,例如性能优异的以树脂改性水泥浆制成的无宏观

缺陷水泥(MDF)的制品(抗拉折强度提高5倍)。由石油或煤沥青制造的沥青基碳纤维,估计不久可广泛用作水泥基材料的加筋纤维,当掺入量为5%时抗拉强度可提高3倍。国外在钢纤维混凝土、耐碱玻璃纤维混凝土、合成纤维混凝土方面已有较系统的研究工作,但目前价格尚高。

6. 结构试验与工程仿真的研究。结构试验是整个结构工程科学发展的基石,如果说,许多计算理论和软件可以从国外引进,那么材料和结构的试验必须自己完成。唐山地震后的10年内,我国进行了大规模工程抗震的试验,投入的人力物力之大也是国际上罕见的。这些努力及其获取的成果使我国工程抗震的科学研究达到国际先进水平。大量的科研成果已经在我国的工程建设中应用。我们同时兴建了一批抗震试验室,引进了一批多自由度的模拟振动台、拟动力试验机等,我国在工程抗震方面的整体实力已经处在世界前列。

结构试验中的三个基础性问题尚待解决。

(1) 结构试验模型的相似理论问题 灾害模拟试验(包括地震、风、火等)以及结构耐久性的快速模拟试验都遇到许多相似理论的问题,例如重力相似、几何相似、材料相似以及时间相似等。这些相似关系多是非线性的,具有很大的难度。这些问题不解决,试验室内小比例尺的结构模型试验只能停留在提供定性依据的水平上;而在这些问题上的那怕是微小的一点突破,都可能对结构工程试验技术产生重大的影响。

(2) 结构实验与计算机联网的混合模拟试验技术 这一技术的优点在于可以用较少的钱和较小的设备进行大型与大规模的结构试验,其原因就在于此种试验允许人们对模型的实现方法进行选择。适宜在物理上实现的就选择物理模型。而适宜在计算机上实现的就选择计算模型。以一次大规模的试验为例,其物理实现部分只是几个构件,而非一个完整的结构物,对于混合模拟动力试验目前应重点发展高精度、大吨位的加载设备,以适应大刚度构件以及估算高振型影响时加载的需要。在这方面,具有机械、液压和数字化加载器优点的混合型伺服加载装置有可能取代传统的电液伺服式加载器。这种加载器的位移精度可望达到1/100毫米,出力达到上百吨,而价格比电液式便宜得多、且易于调整。此外,利用这类装置,结构、构件、节点在多向荷载作用下,考虑多自由度特征的性能测试也正在兴起。

(3) 结构试验中的仿真技术 仿真技术的优点在于它不受空间尺寸和时间长短的限制,可以提供人们有关结构行为全过程各种完整清晰的数据和图形,省去大量的人力、物力和时间,在一定程度上减少试验量,甚至可以代替一些无法进行的现场试验。

特别应当指出的是结构工程试验仿真在学科上的价值,它有如一把伞的伞柄可以撑起结构工程学科的几个主要领域,使原来分离的课题紧密相联,真正发挥作用。成功的仿真系统必须依靠下述一些方面:1) 正确的材料本构关系和高质量的构件、节点试验数据。以混凝土为例,目前仍缺乏在复杂应力条件下包括应力与变形在内的完整试验数据,目前所采用的各种本构关系多是照搬经典的金属塑性理论,对混凝土本身由于集料、微裂和它们之间随机分布造成的本构特征缺少研究。这方面的试验研究工作是混凝土力学的基础,也是混凝土结构仿真必不可少的依据。结构试验的仿真并非不要试验,而是更科学地利用试验结果。2) 有效的数值计算。如前所述,目前考虑结构屈服后的行为(包括倒塌)在结构抗灾中已必不可少。材料与结构的软化造成总刚度矩阵非正定与(或)非对称,这将导致数值计算中判断稳定性和唯一性的困难。几何大变形使整个方程组成为非线性,从而导致解题

难度大大增加。目前这方面的工作刚刚起步。3) 成熟的数值图形显示技术与图像技术, 这方面国际上已发展得非常成熟。由上可见, 结构试验的仿真的水平实际上是反映试验、理论和计算的综合水平。

三、国家自然科学基金对青年专家的资助

国家自然科学基金会1986年成立, 第二年即正式设置了青年科学基金的专项资助。中国的经济建设需要科学技术, 更需要在科学技术战线上涌现出一批“千里马”。国家自然科学基金应能成为“伯乐”, 寻找、发现与培养人材。1987至1994年的8年期间, 在结构工程领域共资助了60余项青年专家提出的科学研究项目。青年科学工作者提出的研究项目的共同特点是, 多属前沿性的问题。这反映了他们具有坚实、广博的基础及敢于攻坚、初生牛犊不怕虎的气质。

由国家自然科学基金委员会资助并委托召开青年学者学术研讨会, 遍布自然科学领域中的60余个学科。结构工程学科青年专家的第一次研讨会是在1990年8月, 由西南交通大学在峨嵋召开的。第二次是在1992年8月委托哈尔滨建筑大学在哈尔滨召开的。参加的人数由20余人, 扩大到百余名, 提出的论文近50篇, 覆盖了结构工程的各个研究领域。

受国家自然科学基金资助过的学者中, 有的已成为高等学校中某个领域的教授、博士生导师直至学术带头人, 成为培养下一代和发展我国科学技术的栋梁之材。有的走出国门成为国际型的科技人才, 为人类科学事业的发展默默的耕耘着。“青年专家学术研讨会”受到广大的科学工作者的爱戴和支持, 老一辈科学家的爱才之心感人至深, 他们担当顾问, 亲自到会, 热心指导; 而青年科学工作者则一直把这项科学活动视为“大事”, 一届传一届争相担当会议组织的重任, 努力办好每一次的学术研讨会。1995年1月委托同济大学召开的第三次学术研讨会, 参加者已扩展到全球。成为“国际华人结构工程学科青年专家研讨会”。

从1992年开始, 国家自然科学基金委员会设立了资助青年科学工作者科技活动的专项科学基金, 目的是培养学术带头人和跨世纪型的科技接班人。

除上述科技活动外, 国家自然科学基金资助的研究项目中, 担当第一线科研任务的60%是青年人, 而以国家自然科学基金资助的项目, 做为硕士、博士和博士后研究论文的更是难以统计。中国国家自然科学基金制度, 为我国青年科学家的成长提供了阳光、土壤、空气与水。科学基金制自身也由此而成熟、完善。

**附1 “8.5”计划期间,国家科委、国家自然科学基金委在结构工程领域内
立项资助的重大、重点研究项目**

1. 国家攀登计划(B)项目:“重大土木及水利工程安全性与耐久性的基础研究”
主要学术负责人:张光斗、刘西拉、沈祖炎
2. 国家科委与国家自然科学基金委联合资助的国家自然科学基金重大项目:“城市与工程减灾基础研究”
主要学术负责人:胡律贤、谢礼立
3. 国家自然科学基金重点项目:“建筑结构物抗震与抗风振动控制研究”
主要学术负责人:范立础
4. 国家自然科学基金重点项目:“高速铁路的运行系统动力学与运行控制”
主要学术负责人:程庆国
5. 国家自然科学基金重点项目:“高强与高性能混凝土材料的结构与力学性态研究”
主要学术负责人:陈肇元
6. 国家自然科学基金重点项目:“现代预应力钢筋混凝土结构体系与计算理论”
主要学术负责人:吕志涛

**附2 国家自然科学基金1992至1994年度在结构工程领域内
立项资助的青年科学基金项目一览表**

1992年度 项目名称	负责人姓名	负责人单位
凸分析在结构破坏性载荷分析与安全设计的应用	卜小明	天津大学
张拉结构系统在风载作用下的非线性动力反应分析	张其林	同济大学
索网及薄膜结构的随机风振反应	赵 臣	哈尔滨建筑大学
大跨结构减振与主动控制的基础研究	孙 宁	铁道部科学研究院
结构中地震能量的集中与消耗	田志昌	包头钢铁学院
地震作用下钢筋混凝土结构的随机响应及损伤状态	李贤兴	西南交通大学
不同地基和基础下框筒结构次生应力问题研究	杨 敏	同济大学
城市商业区停车场决策规划系统	缪立新	清华大学
1993年度 项目名称	负责人姓名	负责人单位
无粘结预应力混凝土超静定结构非弹性阶段性研究	陈晓宝	合肥工业大学
工程图自动生成网络计划及索赔管理的智能系统	王守涛	清华大学
建筑设计的形式化框架	曾 勇	中国人民解放军后勤工程学院
混凝土结构尺寸效应的分形理论研究	周克荣	同济大学
钢筋纤维混凝土薄板的非线性分析	郑建军	哈尔滨建筑大学
高等级公路交通流理论研究	罗 霞	西南交通大学
平动与转动惯量吸振结构控制研究	滕 军	同济大学
地下管网防灾规划与修复决策支持系统	梁建文	天津大学
块荷载下混凝土材料的疲劳损伤	吴戈慧	铁道部科学研究院
混凝土断裂韧性与断裂能关系的研究	钱觉时	重庆建筑大学
1994年度 项目名称	负责人姓名	负责人单位
面向对象技术在集成化建筑施工CAD系统中的应用研究	马智亮	清华大学
城市间道路交通与沿线土地利用及运输需求的关系研究	田志立	清华大学
网壳非线性稳定理论及工程软件	陈 昕	哈尔滨建筑大学
旋转地震动及其在结构抗震安全评价中的重要意义	王君杰	大连理工大学
交通事故中人的失误机理及其可靠性模型的研究	王武宏	西南交通大学
公路主枢纽基础设施总体布局与协调发展规划理论、方法	晏启鹏	西南交通大学
高层高耸结构物TLD和AMD混合振动控制体系研究	李爱群	东南大学
材料与结构损伤探测的新型光纤阵列传感技术及方法研究	涂亚庆	中国人民解放军后勤工程学院
全张力网架的结构理论研究	夏绍华	河海大学

参 考 文 献

- [1] 张存浩 “学科前沿与国家自然科学基金优先资助领域战略国际研讨会”开幕词 1984年8月 北京
- [2] 国家自然科学基金资助项目指南(1994年版) 科学出版社 1993年10月
- [3] 刘西拉 结构工程学科发展战略研究报告 1992年8月 北京
- [4] 谢礼立等 工程防灾科学战略研究报告 1992年4月 北京
- [5] 王光远 工程软设计理论 科学出版社 1992年
- [6] 江见鲸等 结构分析中的计算机仿真技术 三届全国结构工程学术会论文集 1993年

论工程项目的全系统全寿命优化*

哈尔滨建筑大学 王光远

提 要

目前的工程优化只限于对单个结构设计方案的优化,本文提出了工程项目全局优化和全寿命优化的概念。全局优化即全系统优化,就是将该项工程项目中包括的所有结构作为一个系统进行整体优化。全寿命优化就是对工程项目的规划、设计、建造、使用全过程进行优化,也就是对工程项目的可行性论证、总体布置、结构、选型、设计、施工、控制、维修、直至报废的各个环节分别进行优化。

一、土建工程的特点

土建工程项目具有以下特点:

1. 土建工程所从事的各个环节,从可行性论证开始直到工程报废为止,充满着规划、综合、安排和决策等技术活动。这些技术问题具有强烈的软科学性质^[1,2]。
2. 土建工程解决各种技术问题的可用方案都不是唯一的,因而都存在优选(即优化)的问题^[1,3]。
3. 土建工程的决策和设计工作,都是根据现有的信息利用某些手段(分析、计算、试验

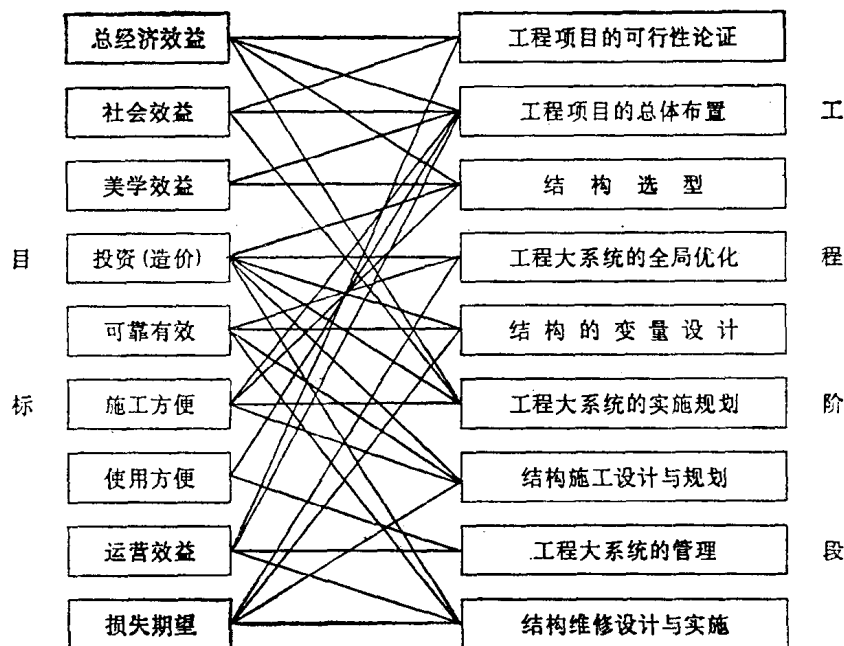


图1 工程各阶段的目标

* 国家自然科学基金资助项目

等)预测各种方案执行后可能出现的后果,因而具有强烈的随机性。又由于不可能给某些事物(如地震烈度、场地等级等)以明确的定义和严格的评定标准而带来模糊性。此外,决策者纯粹由于条件的限制,所掌握的信息有时具有未确知性,也就是说这类信息尚不足以说明事物的真实状态和数量关系。只有正确处理随机性、模糊性和未确知性这三种不确定性因素和信息,才能得出比较合理和符合实际的决策^[1]。

4. 工程优化的目标是多种多样的,包括工程项目和结构的经济效益、社会效益、美学要求、投资(造价)、安全、施工和使用方便、以及长远经济效益等等。这些目标只能在工程的规划、设计、施工和管理等不同阶段分别考虑,大体上如图1所示。

5. 过去由于决定论的科学模式长期统治人们的头脑,常常用贬义来看待人类经验的运用。实际上,人类的一切成就莫不依赖于人们的经验,经验是最可宝贵的东西。此外,也只有充分利用最新的多领域的科学成就才能更有效地利用人的经验。过去靠拍脑袋决定的一些软问题的程序化和科学化,比解一个“硬”的力学和数学问题要困难得多。正是为了能充分地发挥专家经验在解决各种问题中的作用,近年来开发了各种相应的专家系统。

二、工程项目的可行性论证

对一个工程项目来说,第一个关键的战略性决策就是整个工程的可行性论证,它的成败优劣决定着这项工程的全部社会影响和经济效益。它也是把该工程项目与社会耦联起来进行优化的一种手段。

在工程项目的可行性分析中必须认真考虑和研究以下问题:

1. 国家政治经济政策,当前的建设方针和这项工程对国家和国计民生的重要性。
2. 工程选址及其附近自然资源、气象情况、地理位置、地形地质构造等因素。
3. 该工程与影响它的和受它影响的其他工程和企业是否配套,交通运输、原材料、动力供应以及劳动力来源等条件是否适合。
4. 工程建成后对人类社会和生态环境的影响。
5. 工程项目的技术经济分析和论证,对投资能力、基建费用、生产成本、达到设计能力的时间、投资的最终效果等都要作出详细的分析。

工程可行性分析的结果将决定该工程是否兴建和规模大小,这样重大的决策自然要求全面的搜集资料信息,进行调查、测试、科学试验,创立正确的决策方法和制定正确的适合国情的方针和策略。虽然国内外对重要的工程都进行可行性论证,但尚无系统的理论和方法。这是一门亟待大力研究的重大的综合性学科。

三、工程系统的形成和结构选型

在确定兴建该项工程并决定其规模后,就需要研究它的总体布置,包括工程项目的各个子系统以及这些子系统所包含的各个结构的选型。我们定义这样得到的以结构为基元的系统为“工程系统”或“工程大系统”。

为了建立工程系统,就需要从功能的从属关系来分析工程项目的任务。一般来讲,实现

工程系统总的功能往往要通过实现它的若干子功能才能达到;要实现这些子功能,常常还需要通过实现更小的子功能,如此递阶分析,直到所需的那些小的子功能被我们直接掌握为止,实现这些最小子功能的设施就是基元系统。这样,从系统模型的观点看,很多工程系统都具有递阶系统的特点,即工程系统的总功能位于该系统模型的最顶层,直接隶属于它的各子功能位于第二层,那些我们直接掌握的子功能位于该系统模型的最下层。不同层次子系统上的功能有如下关系:低层子系统的功能是高层子系统功能的一部分,并且只有低层子系统的所有功能均实现时,高层子系统的功能才能实现,或者在概率的意义上说,实现高层子系统功能的可靠度等于实现低层子系统所有功能的可靠度。这意味着不存在多余子系统。对大型工程系统来说,这个要求是合理的,这样,它就形成递阶串联系统。

当然,在较低层次的子系统中不排除存在并联系统或候选表决系统的可能性,除了递阶系统之外,还有其它类型的工程系统如网络系统等。

子系统和结构的功能要求确定以后,即可进行结构拓扑的研究。例如对房屋结构而言,就是要决策结构所需要覆盖的空间,以及各个子空间的联接方式。

在结构拓扑设计的基础上即可进行结构的选型,例如要求覆盖一个大跨空间,我们可以考虑拱型结构、悬索结构、薄壳结构、薄膜结构、充气结构等方案,再如要兴建一个高层建筑,在选型上可考虑框架结构、承重墙结构、剪力墙结构、框架-剪力墙结构,筒形结构、筒中筒结构等,在用材上可考虑钢结构、钢筋混凝土结构、钢-钢筋混凝土组合结构等。

在为结构选型时,需要考虑多方面的因素,例如国家的基建政策,结构型式的适应性和可用性,施工条件和能力,结构造价,材料和能源的供应,结构对自然灾害和环境侵蚀的抵抗能力,施工期限的限制等,因此,结构选型可利用多因素综合评判方法。

四、工程系统的全局优化

按目前的工程设计过程,在进行了工程项目的可行性论证和总体布置之后,即开始对它的各个结构进行具体设计,并对它们分别进行优化。这里漏掉了一个极为重要的环节,那就是“工程系统的全局优化”。

工程设计的理论和方法的最终目的,都是为了寻求一个特别令人满意的设计方案。优化的目标就是使设计方案在具有良好的使用功能的条件下获得最好的近期和长远的经济和社会效益。目前的工程优化设计都是针对各个具体结构分别进行的。实际上,各结构独立优化后组成的工程系统并不一定优化,正像各个构件独立优化后组成的结构并不一定优化一样。概括起来说,就是必须从大系统全局进行优化。才能真正收到优化的效果,这就是工程系统全局优化设计的概念。不同的工程系统有不同的数学模式,各种模式(例如递阶系统、网络系统等)的优化方法当然不同。这是一个十分复杂和难以解决的问题。目前,也只是在文献[1]中提出了递阶串联工程大系统全局优化的初步理论和方法,这个领域亟待进一步作比较全面的研究。

由于工程系统的全局优化尚处于结构的概念设计阶段,不可能以构件尺寸作为优化的决策向量。为此,我们以各个结构的可靠度作为工程系统全局优化的决策向量。结构的最优可靠度既是安全指标又是经济指标,而且可以更好地描述工程设计的随机性,因而可以较较好地考虑工程的长远效益。可以证明^[1],后者可以用系统失效的损失期望来表征。

按照上述解决问题的途径,我们用可靠度来描述各功能的状态,用造价和损失期望来描述各目标的状态。这样,工程系统的全局优化就转化为工程系统可靠度的最优分布问题,优化的结果将为各个结构确定其最优可靠度,然后即可按此最优可靠度进行结构的优化设计。

五、考虑长远效益的结构不确定性优化设计

在考虑长远效益时,结构优化设计的目标函数不仅包括近期投资(主要是工程造价),还应包括长远的经济和社会效益,后者包括服役期间使用单位企事业运营的直接经济效益和遇到灾害时工程失效带来的损失。可以证明^[1]：“运营效益的期望值最大”可以转化为“停业所带来的损失期望值最小”，因而可以和损失期望合并考虑。

这样,在工程系统优化和结构变量设计中的优化目标可简化为使造价 C 和损失期望 L 之和最小,这就形成了一个单目标优化,使问题得到极大的简化。

早在1972年,文献^[4]就首次建议在结构优化设计中采用目标函数

$$W(\bar{X}) = C(\bar{X}) + L(\bar{X}) \rightarrow \min \quad (1)$$

但是将工程结构使用期间的损失期望直接表为设计方案 $\bar{X}$ 的函数 $L(\bar{X})$,是十分困难的。故此文献发表虽已二十余年,这个目标函数还未得到实际应用。

最近我们利用抗灾结构的特点,初步解决了这个问题^[5]。这里我们还考虑了抗灾结构失效准则的多重性,如抗震结构的设计准则:小震不坏,中震可修,大震不倒。

在进行了工程系统全局优化之后,对结构的优化设计产生了两个有利条件:一是在工程系统的全局优化中已为各个结构选定了它们的最优可靠度 ψ^* ;二是在工程系统优化时已经考虑了长远经济效益,因而在结构设计中只须考虑以最低造价实现为结构选定的最优可靠度 ψ^* 即可。

因此,在工程系统全局优化为各个结构选定最优可靠度 ψ^* 之后,结构优化的数学模型为:

求结构设计方案 $\bar{X}$, 使造价

$$C(\bar{X}) \rightarrow \min$$

并满足可靠度约束

$$\psi(\bar{X}) = \psi^*$$

(2)

这个计算理论非常合理,概念非常清楚,形式非常简单,但求解这种数学规划有很大的实际困难。因为当结构稍复杂时,由于结构的主要失效模式的搜索方法和各失效模式间的失效相关性问题难以解决,求 $\psi(\bar{X})$ 本身就是很困难,解该规划就更为困难了。

结构设计中的不确定性信息主要来源于:

1. 结构未来工作期间所遇到的外界干扰(荷载)的随机性和某些荷载的模糊性(如地震烈度,建筑场地的特性和分类等)。

2. 结构反应允许范围和失效准则的模糊性。

3. 结构设计目标(即设计方案好坏标准)的模糊性。

结构模糊优化设计的普遍型模糊规划的数学模型为

求决策向量(设计向量)