

结构优化设计的新进展

王 全 凤

(土木工程系)

摘要 本文综述了结构优化设计的进展,着重介绍 80 年代结构优化设计的新动向,及其在土木工程中的应用.最后,展望结构优化设计的发展前景.

关键词 最优化,结构优化设计,土木工程

1 简单的回顾

结构优化设计是把数学上的最优化理论结合计算机技术应用于结构设计的一种新型的设计方法.它的出现,使设计者能从被动的分析、校核,而进入主动的设计.自古以来,人们在工程实践中已经萌发出优选的思想.慎重的能工巧匠总是要研究几个可能方案,再从中择其佳者.结构型式从梁演变到拱、桁架,就是人们在长期工程实践中搜索与寻求重量轻、材料省、受力性能好的结构型式中经验的总结.长期以来,由于缺乏高速的计算工具进行结构分析,也由于缺乏系统的方法指导和改进结构设计,结构的优化是借助于古典的微分法和变分法进行.如在材料力学中,怎样从圆木中锯出一个抗弯强度为最大的矩形截面梁?结构优化就是这样以进化速度缓慢地进行.50 年代以后,由于电子计算机的出现和迅速发展,是有限单元法解决了复杂结构的分析问题,使得工程设计者和优化研究者能够从大量繁冗的计算工作中解放出来,古老的结构优化从理论研究扩展到应用探讨,从本学科的单项研究增扩到有关学科的横向联合.数学规划法用于结构优化,把一类相当通用的结构优化问题归结为标准形式^[1],即求设计变量 $\{x\}$,使得目标函数:重量最小化 $W(x) \rightarrow \min$,并满足约束条件 $g_j(x) = 0, j=1, 2, \dots, m$.

2 结构优化设计的新进展

2.1 数学规划法和优化准则法的结合

数学规划法在 70 年代初,对设计变量多、约束条件多的结构优化问题束手无策,研究者不

本文 1990-12-01 收到.

得不回到比较现实的基础上,把优化目标和约束性质局限于较低水平,提出了理论上不那么广泛适应,而应用上比较容易实现的优化准则法,但通用性较差.到了70年代末,把同样的问题,用数学规划法和优化准则法结合起来研究,形成规划法和准则法的统一.实际上,是把力学概念和优化技术结合起来⁽²⁾.在这统一研究过程中,更显示出了作为数学规划法基础的 Kuhn-Tucker 最优性条件的重要意义⁽³⁾.

2.2 整体稳定和非线性稳定引进约束条件

N. S. Khot⁽⁴⁾考虑结构整体稳定作为对结构最小重量的约束,他把线性稳定问题定义为一个包括弹性刚度矩阵、几何矩阵和分别代表荷载因子和曲屈形状的一组特征向量的特征值问题.一个典型的优化问题,就是要寻找最小重量设计,此时临界特征值要小于或等于一组特定的值.优化设计必须具有同时坍塌模型,这种设计可能对结构几何尺寸缺陷很敏感. N. S. Khot 首先将这种方法用于塔型桁架最轻重量设计,并取得成果. M. P. Kamat, N. S. Khot 和 V. B. Venkayya⁽⁵⁾在1984年极大化已知体积的薄空间桁架的临界荷载时,建立了非线性稳定的表达式.由于需要考虑到结构变形后的平衡,使得该式子非常复杂.该成果表明了不同层次优化的存在,以及在优化过程中每个构件应变能密度是常量.

2.3 灵敏度分析

在优化过程中,使用灵敏度分析标志着当今优化技术发展的主要趋势. NASTRAN 程序具有有限元灵敏度分析的最新能力是在这个方向的一个发展⁽⁶⁾. L. A. Schmit 和 K. J. Chang⁽⁷⁾在研究问题参数对最优解影响的基础上,提出了综合近似和对偶优化方法的优化设计灵敏度.同时,讨论了基于这种灵敏度外推结果的边界. J. F. M. Barthelemy 和 J. S. Sobieski⁽⁸⁾借助灵敏度分析高度非线性夹层板来研究外推结果的闭合性.当问题参数变化引起一组主动约束变化时,用线性外推是不充分的.

2.4 可靠度引入结构优化领域

D. M. Frangopol^(9,10)提出了一个建立在可靠度基础上优化概念和方法,并用它来设计塑性杆系结构.在该设计中,荷载和强度均假设为随机变量.优化设计建立在已知结构坍塌概率的重量极小化基础上.此外, D. M. Frangopol 还专门讨论了建立在可靠度基础上优化设计的灵敏度,利用可行方向法进行灵敏度分析.

2.5 结构形状优化

随着优化手段的发展,优化目标也在不断变化,从最轻重量、最低造价到最佳结构构件布置、最优结构形状和最好受力状态等.在这里重点介绍近些年来非常活跃的结构形状优化研究.结构优化设计对于给定结构的几何拓扑和材料的条件下,只有构件截面可变的优化已经比较成熟了.如果考虑到结构的构件布置和结点连接,让结构的几何形状也参加优化,这就是所谓形状优化问题.形状优化的研究有史已久,可以追溯到1904年 A. G. M. Michell⁽¹¹⁾对于离散结构(桁架)的优化设计. K. Svanberg⁽¹²⁾除了把截面积作为设计变量外,把结点坐标也当作设计变量.这样,把满足应力、位移和曲屈约束条件的重量极小化问题看成一系列具有线性约束的、可分的和凸的非线性子问题.在每次迭代中,该子问题的导出是利用 Taylor 级数线性逼近最初的非线性规划和利用凸规划对偶方法求解.对于平面应力问题的形状优化, W. R. Spillers 和 S. Singh⁽¹³⁾采用等应力三角形单元进行.在迭代时,首先假设单元的大小,计算其厚度;然后,利用算出的厚度,再计算结点坐标的变化. M. E. Botkin⁽¹⁴⁾等人在通用汽车公司,利用一种耦合有限

元和数学规划法的通用计算机程序(ODYSSEY)对结构部件进行优化.通过改变板的边界条件等,就可以使已知厚度板的重量得以减少.J. P. Queau 和 P. H. Trompetee⁽¹⁵⁾利用有限元和扩展罚函数来进行使沿边界的应力集中降至最低的轴对称结构形状优化.

3 结构优化的工程应用

A. B. Templeman⁽¹⁶⁾认为,到了80年代,结构优化技术已经能够作为一种实用的设计方法提供给设计者.他敦促研究者应该致力于实用软件的研究,并号召设计者在设计实践中应用优化设计.即在发展优化新技术的同时,更多的注意力应该集中在优化技术的工程应用上.(1) M. Z. Cohn 和 A. J. Macrae⁽¹⁷⁾在现行规范基础上,把任意截面的钢筋混凝土梁、预应力混凝土梁和部分预应力钢筋混凝土梁的单位长度最低造价、最轻重量、最少钢筋和最小预应力等设计归结为优化设计的非线性规划问题.(2)在此期间,对框架结构开发出许多优化设计,其中比较新颖的是 M. P. Saka⁽¹⁸⁾利用具有动约束的单纯形法来避免迭代过程中的重分析.理由是一个线性化的逆刚度矩阵包括在等式约束中.(3) B. O. Kuzmanovic 和 N. Willems⁽¹⁹⁾利用塑性分析得到框架的破坏机构,迭代由于把该问题表达为已知精确和的几何级数得以避免.

4 结构优化设计的展望

4.1 概念改变——从最优解到满意解

任何学科的最重要进展仍将是概念性的突破与创造性劳动相结合的结果.在错综复杂的客观世界中,优化的意义是相对的,实际上并不存在最优解,最优解只有数学意义.原因之一,是评定最优解的标准有模糊性和主观性,以及随时间和条件而变的随机性;其次,是由于作为优化基础的各种信息具有不确定性.这样建立的优化数学模型不可能完全表达实际结构.比如,目前普遍认为在满足现行规范要求下,造价最低的方案就是最优的.显然,这个方案不是最优的,而是相对优的方案.即使单纯从经济观点来看,它也不是最经济的,因为没有考虑到长远的经济效益(维修费用和遇到自然灾害时的损失期望值).美国著名学者、各种国际最高奖获得者,赫尔伯·西蒙从心里学、经济学和计算机技术的角度,对此进行大量的研究后指出:从实际出发,我们追求的应该是“满意解”,而不是最优解⁽²⁰⁾.对于一个解是满意解或者是最优解,优化研究者不必象数学工作者那样去关心.因为很多实际结构,满意解常常是处在一个平坦的高原上,得满意解容易,得最优解难.这个观念的变化具有极为重要的实际意义.

4.2 工程应用——优化技术生命力

工程学科必须面向经济建设.优化设计作为工程设计的最终目标现在是毫无疑问.结构优化设计的研究应该服务于工程建设.一个结构优化设计问题可以用一定的数学模型来表达,这是一个重大的突破.如何求解,设计者一般是从经济、简单和现实可行的角度去关心它.他们采取各种近似手段,只要这种近似有益于他们所关心的结果.因为他们很清楚,数学模型总是在一定程度上代表实际结构.有时,解法虽然很巧妙,解的数学精度也很高,但是如果在数学模型中忽视了某条设计规范要求,这样的解也是不可以接受的.所以研究者应该从使用者(工程设计者)的观点和要求去考虑问题.这样,工程应用促进了优化技术的发展.

另一方面,结构优化设计集专业设计理论、数学上最优化方法和计算机技术于一体.大多数工程设计者不太熟悉.从发展的观点来看,使优化手段能为他们所接受,就必须建立一个现成的、实用的优化设计程序系统.即使这个程序只是接近于最优解(满意解),但花费少,也会受欢迎.

4.3 精确-模糊-精确

20多年来,是电子计算机产生了现代化的优化技术,但优化设计不能全靠计算机.在优化设计这个创造性的劳动中,是人使用计算机,而计算机不能代替人.优化技术越向前发展,人的决策越为重要,况且优化技术也不可能灵活处理人的问题.事实上,问题复杂程度越高,精确化的意义反而降低,也就是说,过分的精确反而模糊.既然人们不可能对全部因素都进行精确地考察研究,那么在一个压缩了的低维空间内利用模糊概念来处理问题往往反而能辨清真相.至今,在结构优化设计中的一个重要分支(结构模糊优化设计)正在异军突起.这是因为人们研究的对象是一个非常复杂的、难以用精确数字表达的研究对象.通过人的干涉、利用模糊语言变量,依靠计算机的图象显示,进行人机对话,模拟有经验的专家活动,往往会收到满意的结果.在结构模糊优化设计中,由于考虑了设计变量在允许范围内的模糊性,从而使约束条件由“硬”变“软”.这样得到就不再是一个所谓的“最优解”,而是一系列的“满意解”,这就为更好地解决多目标优化问题提供了条件.

参 考 文 献

- [1] Schmit, L. A., *Structural Design by Systematic Synthesis*, Proc. of ASCE 2nd Conf. on Electronic Computation, Pittsburgh, Pa., (1960), 105—122.
- [2] 钱令希, 工程结构优化设计, 水利电力出版社, (1983), 1—8.
- [3] Sander, G., Fleury, C., *A Mixed Method in Structural Optimization*, ASME Energy Tech. Conf., Structural Optim. Meth. session, (1977), 79—93.
- [4] Khot, N. S., *Optimal Design of a Structure for System Stability for a Specified Eigenvalue Distribution*, Internat. Symposium on Optimum Structural Design, Tucson, Ariz., (1981).
- [5] Kamat, M. P., Khot, N. S. and Venkayya, V. B., *AIAA J.* 22, 3(1984), 403—408.
- [6] Lahey, R. S., *Implementing Design Sensitivity Analysis in MCS/NASTRAN*, Presented at the 18th Midwestern Mechanics Conf. Univ. of Iowa, Iowa City, (1984), 349—351.
- [7] Schmit, L. A., Chang, K. J., *Internat. J. for Numerical Methods in Engng.*, 20, (1984), 39—75.
- [8] Barthelemy, J. — F. M., Sobieszczanski — Sobieski, J., *AIAA J.*, (1983), 797—799.
- [9] Frangopol, D. M., *Computer Methods in Applied Mechanics and Engng.*, 44, (1984), 105—117.
- [10] Frangopol, D. M., *Computers and Structures*, 19, 4(1984), 559—563.
- [11] Michell, A. G. M., *Phys. Magazine*, 8, 47(1904), 589—595.
- [12] Svanberg, K., *Computer Methods in Applied Mechanics and Engng.*, 28, (1981), 63—80.
- [13] Spillers, W. R., Singh, S., *J. of the Struc. Division, ASCE*, 107, 10(1981).
- [14] Bennet, J. A., Botkin, M. E., *J. of Mechanics Design*, 104, (1982).
- [15] Queau, J. P., Trompette, P. H., *Internat. J. for Numerical Methods in Engng.*, 15, (1980), 1603—1612.
- [16] Tempelman, A. B., *J. of Struc. Engng., ASCE*, 109, 10(1983).
- [17] Cohn, M. Z., Macrae, A. J., *J. of Struc. Engng., ASCE*, 110, 7(1984).

- [18] Saka, M. P. , *Computers and Structures*, 11, (1980), 411—419.
- [19] Kuzmanovic, B. O. , Willem, N. , *J. of the Struc. Division, ASCE*, 107, 9(1981).
- [20] 王光远, 工程系统设计展望, 结构工程科学的未来论文集, 清华大学出版社, (1988), 3—9.

The Past, Present, and Future of Optimum Structural Design

Wang Quanfeng

(*Department of Civil Engineering*)

Abstract In this paper, the advances in the area of optimum structural design is reviewed, laying emphasis on its new trends in 1980s as well as its application in civil engineering. The rest of the paper is given up to its prospects.

Key words optimum, structural design, civil engineering