

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2011.03.007

工程结构优化设计研究进展

蔡新^{1,2} 李洪煊^{2,3} 武颖利² 朱杰¹

(1. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;
3. 南京市市政设计研究院, 江苏 南京 210008)

摘要:对工程结构优化设计进行了综述,系统介绍了不确定性优化、形状优化、拓扑优化、多目标优化、系统优化等现代工程结构优化设计以及遗传算法、模拟退火算法、神经网络算法等现代仿生学寻优新方法及其应用,指出寻求目标函数和约束函数的高精度近似显式解析式和对最优准则法、数学规划法及仿生学算法进行改进、组合是工程结构优化算法发展的主要方向。

关键词:工程结构;优化设计;不确定性优化;形状优化;拓扑优化;多目标优化;系统优化

中图分类号: TU311.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2011)03-0269-08

最优化就是追求最好的结果或最优的目标,最优化设计是从可能设计中选择最合理的设计以达到最优目标。搜寻最优设计的方法就是最优化设计法,这种方法的数学理论就是最优化设计理论^[1]。工程结构优化设计是把力学概念和优化技术有机地结合,根据设计要求,使部分参与计算的量以变量出现,形成全部可能的结构设计方案域,再利用数学手段在域中搜索出满足预定要求的不仅可行而且最好的设计方案。实践证明,工程结构优化设计能缩短设计周期,提高设计质量和水平,较之原设计方案,优化设计方案一般可以降低工程造价 5% ~ 30%^[2]。

工程结构优化设计早期采用的是基于直觉的准则法,如满应力准则法,满应变准则法等。准则法的显著特点是单步设计变量修改幅度大,因而收敛速度快,且与结构大小及复杂程度无关。

1960 年, Schmit^[3]首先将数学规划法引入到结构优化设计中。通过数学规划法对一些典型问题的研究表明,准则法求得的解不一定是真实的最优解,其缺乏严格的理论依据。数学规划法的特点是理论依据严谨,算法的稳定性和可靠性较好,求解问题的规模受到限制且要求能显式表达,计算效率低。

实际的工程结构优化设计一般都是有约束、非线性 and 隐式的优化问题。传统寻优算法中准则法和数学规划法由于存在各自的缺陷,不能很好地解决上述复杂问题,因而新的现代寻优算法应运而生。20 世纪 70 年代,人们在分析研究自然界生物体的进化及其进化的过程中,发现了新的仿生学方法,主要有基因遗传算法(genetic algorithm, GA)、神经网络算法(artificial neural network, ANN)、免疫算法(immunity algorithm, IA)、蚁群算法(ant colony algorithm, ACA)等。在研究退火对金属晶体的发育完善过程中,产生了模拟自然界物质生成的模拟退火算法(simulated annealing, SA)。这些新的寻优方法具有能够搜索到全局最优解、程序实现方便等优点。

随着计算机软、硬件的发展,基于数学力学方法的结构优化设计的理论也有较快发展,由尺寸优化,发展到形状优化、拓扑优化、布局优化和类型优化;由单目标优化发展到多目标优化;由确定性优化发展到不确定性优化;由工程结构静力优化发展到静动力优化,优化设计的层次在不断提高。

根据实际工程特点,对现有的优化算法进行改进、重组和综合,从而产生满足实际工程结构要求的行之有效的算法将是今后优化算法的主要发展方向。借助于高效率的寻优算法、高性能并行服务器和高效率的结构重分析程序,形状优化、拓扑优化、多目标优化、不确定性优化和动力优化也将是未来发展的主要方向。本文主要介绍近年来工程结构优化设计研究的进展情况,并指出工程结构优化设计的发展方向。

1 现代工程结构优化设计

1.1 工程结构的不确定性优化设计

工程结构设计中变量存在不同程度的不确定性,基于不确定性理论的工程结构优化设计主要考虑变量

的随机性和模糊性.考虑事物的随机性,出现了基于可靠度理论的结构优化设计,研究事物的模糊性,提出了工程结构模糊优化设计.

1.1.1 基于可靠度理论的工程结构优化设计

从可靠度的观点来看,传统的确定性的结构优化设计不免存在一些缺陷:(a)传统结构优化设计不能给出结构可靠性的清晰概念和定量描述,经传统结构优化设计得出的最优结构并不能保证结构有适当的可靠性水平;(b)传统结构优化设计忽略了构件尺寸及材料性能参数的随机性,其结果不能反映其参数不确定性这一特点.因此,设计者应把结构的可靠度要求加入到工程结构优化设计数学模型中,按照工程结构功能的要求,根据所拥有的资源,在结构可靠度分析基础上进行结构优化设计,寻求合理、满意、安全的设计方案.

目前许多随机变量的概率统计特征还不明了,积极地去收集、统计、分析、研究随机变量的概率特征是基于可靠度理论的工程结构优化设计的先行条件.

求解基于可靠度的工程结构优化设计的直观解法是把可靠度和优化的各自算法组合成一两层嵌套迭代,该法计算效率较低.为了改善其收敛性,提高其计算效率,人们提出单层次算法、功能测度法、半无限规划法等.蔡迎建等^[4]给出了离散变量框架结构可靠性优化的相对差商方法及迭代格式.程耿东等^[5]提出了基于可靠度的工程结构优化的序列近似规划算法,该算法系对经典序列近似规划法进行改造和扩展.

Dimou等^[6]将粒子群优化方法引入到基于可靠度的桁架结构优化设计中,可靠指标采用 Ditlevsen 界限法求解.高亚强等^[7]建立基于可靠度,以刚架重量为目标函数的平面刚架优化模型,可靠指标采用 JC 法求解,优化算法采用约束变尺度法.结果表明该方法是有效的.王福来等^[8-9]阐述了基于可靠度的桥梁结构优化设计一般方法及其基本思想,讨论了基于可靠度的桥梁结构优化设计模型的建立,提出了该模型重点研究的内容和需要解决的问题.

1.1.2 工程结构模糊优化设计

模糊性是指客观事物差异的中间过渡中的“不明性”^[1],是由于问题过于复杂,不能给事物以明确的定义或评价标准而形成的不确定性.具有模糊性信息的系统称为模糊系统,也称软系统.

与工程结构设计有关的一些因素如:设计优劣标准、结构响应的允许范围、地震烈度的划分、建筑场地的分类、结构经济性的衡量、计算模型和设计参数等都具有模糊性.

20 世纪 70 年代, Bellman 等^[10]给出了模糊决策的定义,并构建了模糊环境下的决策模型^[11].随后,模糊线性规划、模糊非线性规划、模糊整数规划、模糊多目标规划及模糊动态规划等模型得到积极的研究.王光远在文献^[11]中详细论述了工程结构的模糊优化设计,并将其应用于抗震结构的模糊优化中.

叶万军等^[12]根据影响黄土路堑边坡断面设计的经济性、安全可靠、抗冲刷性、施工技术的成熟性及环保性等 5 个指标,建立了边坡断面设计各指标的模糊判断矩阵,将定性指标转换为模糊值,有效组合主、客观权重,建立了基于主客观权重综合模糊识别的边坡断面优化决策模型.刘剑等^[13]运用模糊集合论理论,提出了重力式挡土墙稳定性分析的模糊优化设计方法,从而使挡土墙的稳定性分析更加接近客观实际.

1.2 形状优化与拓扑优化

1.2.1 形状优化

形状优化是指通过调整工程结构内外边界形状来改善结构性能和降低工程结构造价,其主要用来发掘工程系统构件的合理内外边界形状.形状优化主要包括桁架、刚架类的离散变量和块体、板、壳类的连续变量.

a. 离散变量形状优化.离散变量形状优化一般以节点坐标等几何变量为设计变量,且通常需要同时考虑尺寸优化和形状优化.其主要方法有两种:一是将两类变量统一处理,采用无量纲化,构造近似问题求解.该法的优点是可以同时考虑两类变量的耦合效应,缺点是计算工作量大.另一种方法是把尺寸优化与形状优化分成两个优化层次,分别对两类优化交替进行,即每步固定一类优化变量只对另一类优化变量进行寻优,两类优化层次间通过迭代协调.该法的优点是求解问题规模较大,缺点是两类优化的耦合性较弱,一般仅能求出局部最优解.

b. 连续变量形状优化.连续型结构的边界形状常采用参数化的曲线或曲面方程等来描述.其优化设计方法可归纳为两类:数值法和解析法.数值法可以应用较成熟的约束非线性规划法,如 GRG 法(general reduced gradient)、SQP 法(sequential quadratic programming)等^[14-15].解析法通过泛函分析,得到优化设计函数的变分形式,进而导出形状函数对设计变量灵敏度的解析式及最优解满足的条件.亦可用解析法将结构优化

设计函数简单化,再用数值法寻优。

与尺寸优化相比,形状优化发展缓慢,其主要原因是(a)自编结构优化程序网格自适应划分存在一定难度(b)形状优化的敏度分析计算量大,程序收敛性差,综合解决上述问题需要数学、力学、计算机以及工程人员的共同努力。

刘齐茂等^[16]提出一种求解桁架形状优化设计问题的改进模拟退火算法,算例表明该方法能获得较高质量的解。易少华等^[17]利用遗传算法(GA)对桁架结构分别进行杆件截面和节点坐标的优化设计,并通过25杆输电塔架算例的优化设计,验证了此方法的实际应用是可行的。曹天捷^[18]针对集中载荷、均布载荷以及填料重量载荷同时作用下的三铰拱结构,以高次抛物线为拱轴线方程,提出了合理拱轴线的方法。王栋等^[19]对空间桁架结构的形状进行优化设计,使结构重量达到最小。

1.2.2 拓扑优化

拓扑优化是指寻求结构刚度在设计空间最佳的分布形式或结构最佳的传力形式,其主要用于求解工程结构受力、位移等的最合理形式,有助于发掘目前还未知的最优结构拓扑。

与尺寸优化和形状优化相比,拓扑优化能够在工程结构设计的初始阶段搜索出结构的最优布局方案,进而产生可观的经济效益,且容易被工程设计人员所接受。拓扑优化变量亦包括离散型和连续型。

a. 离散变量拓扑优化。1964年,Dom等^[20]以结构节点、支座点及荷载作用点为节点集合,集合中所有节点之间采用杆件单元连接的基结构,并以内力为设计变量,以应力为约束函数,建立了单工况线性规划优化设计模型。该法计算效率较高,但不能应用于多工况和有位移约束的优化设计问题上。Dobbs等^[21]以截面面积为设计变量,采用最速下降法(steepest descent method,SDM)成功地解决了多工况应力约束下桁架结构的拓扑优化问题。Kirsch等^[22]提出了两阶段算法,第一阶段以杆件截面积和赘余内力为设计变量,不考虑位移约束和变形协调条件,将离散变量拓扑优化转化为线性规划优化设计;第二阶段考虑所有约束,在已有的拓扑结构上,将离散变量拓扑优化转化为非线性规划优化设计。Lipson等^[23]建议在多工况下以杆件内力为准则来判断应删除的杆件。

b. 连续变量拓扑优化。连续变量拓扑优化设计是一种0-1离散变量的组合优化问题,其基本思想是将设计区域离散为有限网格,根据相应的准则,删除某些网格。其主要方法有:均匀化法、变密度法和变厚度法。

均匀化法以微结构的单胞尺寸为设计变量,以单胞尺寸的增减实现微结构的增删和复合。其特点是:数学理论推导严密,可获得宏观的弹性常数和局部应力应变,容易收敛到局部最优解,计算量大,求解的问题类型有限,容易引起棋盘效应。

变密度法假设优化设计对象的材料密度是可变的,且假定材料物理参数与密度间存在某种数学关系,以材料密度为优化设计变量,以材料的最优分布为目标函数。通常单元密度与弹性模量之间的关系采用人为给出的幂函数规律。目前主要采用SIMP(solid isotropic microstructure with penalization)法。其特点是:与采用尺寸变量相比,更能反映拓扑优化的本质特征,程序实现简单,计算效率高,但解的精度较差。

变厚度法以基结构中单元厚度为优化设计变量,以结构中厚度的最优分布为目标函数。其特点是:方法简单,应用范围狭窄。

姜冬菊等^[24-25]将相对差商法和混沌优化结合起来,导出求解离散变量桁架结构拓扑优化设计的混合算法,该算法具有差商法的离散变量快速寻优以及混沌法的全局遍历性特点。穆春燕等^[26]利用均匀化拓扑优化方法,根据拱坝特点,以体积最小为目标,对拱坝的体形优化进行了探讨分析,得到了较为满意的结果。张莉等^[27]以各向异性连续体为基结构,采用类桁架连续体材料模型进行结构拓扑优化,以材料在节点位置的密度和方向作为优化设计变量,使材料在设计域内得到最优分布。

1.3 多目标优化

多目标优化是指优化过程中所考虑的优化目标不是单一的。一般情况下各目标函数之间往往相互矛盾,比如要取得好的安全性,就要求结构的截面面积要大,而为了取得最少重量,又要求截面面积较小,因此不存在使所有目标都达到最优的“绝对最优解”,只能求得“满意解集”,由决策者最终选定某一个满意解作为最后定解。

实际工程中,多目标优化一般用于工程系统决策,即在工程决策方面先采用多目标优化进行方案确定,再优化各个分目标。

不同的优化设计数学模型有不同的求解方法,主要有以下几种方法^[14-15](a)约束法,在多个分目标中

选择一个为主目标,对其余分目标给出希望值,进而转化为单目标优化问题求解。(b)功效系数法,将各分目标的“坏”价值用统一的功效系数表达,而后采用几何平均构成评价函数,进而转化成单目标优化问题求解。(c)评价函数法,采用线性加权、平方和加权等方法将分目标函数综合成一个总函数进而转化为单目标优化问题求解。(d)目的规划法,希望值与真实值之间的差值称为约束偏差,以约束偏差和目标偏差的某种组合作为总函数进而转化为单目标优化问题求解。(e)多属性效用函数法,实际多目标优化时往往得到的不是某一个最优解,而是最优解的一个集合,再在这个集合中选出需要的最优解,为此可应用效用理论建立决策者的效用函数(曲线),按此曲线从有限解集中选出最终的合适方案。

谢能刚等^[28-29]提出了基于博弈理论、无私合作博弈理论和模糊理论,考虑坝体体积、最大主拉应力、整体应变能、高应力区范围为目标函数的拱坝体型多目标优化设计。曹洪涛等^[30]以 Matlab 多目标优化函数为工具,研究了不同截面钢与混凝土组合梁有效发挥抗弯承载力和降低截面尺寸的多目标优化问题。黄炜等^[31]研究了密肋复合墙体多目标优化设计方法,提出了综合考虑墙体的安全性(墙体斜截面抗剪承载力)与经济性(墙体造价)的多目标优化设计数学模型,并用序列二次规划法(sequential quadratic programming, SQP)求解。

1.4 工程系统优化

实际工程项目大多是由若干个建筑物或构筑物组成,它们构成一个结构系列,把结构系列中那些主要的、投资较大的结构所构成的集合称为“工程结构系统”或简称“工程系统”^[32],对“工程系统”进行全局优化称为系统优化。

工程系统可以分为串联、并联、复合的并串联系统,土木、建筑、水利工程项目主要简化为串联工程系统。针对不同的工程系统有不同的全局优化方法。王光远在文献^[32]中,以工程系统的总造价和总损失期望为目标函数,详细阐述了简单工程系统全局优化的直接解法、串联和并联工程系统的的全局优化、简单复合工程系统的全局优化、表决系统的全局优化以及网络工程系统的全局优化。仿照文献^[32]中相关理论和方法将基于最优设防水平下的工程系统优化推广到基于最大可靠指标下的工程系统优化,将是未来发展的一个主要方向。

朱靖华等在文献^[33-36]中阐述了多级递阶工程系统的整体优化和全局优化,提出了全局优化计算的混合法,该方法具有耦合法与分解法的优点,能灵活地处理系统结构边界条件,使优化空间达到高度降维,对于大规模、分布复杂的多级递阶系统具有很高的优化效率。

2 寻优算法的新思路

优化设计方法大致可以分为三类:最优准则法、数学规划法和现代优化算法^[14-15]。最优准则法考虑的问题比较局限,对不同性质的约束要采用不同的准则,所得的解不一定是最优解;数学规划法计算量大,收敛慢,因而新的现代寻优算法应运而生。随着人们对自然界认识的加深,将自然界的结构和过程抽象出来,形成许多仿生学算法,如遗传算法、模拟退火算法、神经网络算法。

2.1 遗传算法(GA)

遗传算法是模拟 Darwin 和 Mendel 的遗传选择和自然淘汰的生物进化过程的计算方法,是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法。

1975 年, Holland 教授用二进制位串来表示染色体,根据遗传法则,由父代二进制位串经过再生、变异和交叉等操作后产生下代二进制位串来模拟生物群体的进化历程^[14-15],并出版了颇有影响的专著 *Adaptation in Natural and Artificial Systems*^[37]。1998 年, Michalewicz 出版了 *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*^[38],推动了遗传算法应用于最优化问题。

遗传算法的主要优点是:解题能力较强,适应性较广,平行性良好,全局优化性能较强^[14-15]。其缺点是:算法操作随机性较大,计算工作量大,通过引入模式理论、积木块假设,良好的编码方式、并行遗传算法及算法控制参数(群体大小、变异概率、交叉概率)的智能调整等,遗传算法的寻优效率得到较大提高。

工程结构中,遗传算法主要用于桁架结构、框架结构、网络结构以及振动控制结构的优化。柳春光等^[39]将遗传算法引入桥梁的震害预测中,并与传统的单独 BP 神经网络相比较,结果表明该方法能够有效、准确地对桥梁结构进行震害预测。汪大洋等^[40]以结构优化中的遗传算法理论为基础,建立 6 种不同的遗传算法目标函数,研究表明遗传算法优化方法能依据结构的具体动力响应在结构层间合理分配阻尼系数。陈文英等^[41]采用免疫遗传算法解决同时含有离散和连续变量的优化设计问题。杨海霞等^[42]提出了一种可以任意

控制离散度的改进实数编码遗传算法,该算法的优点是可以任意选择变量的精度,适合复杂结构的优化设计。赵同彬等^[43]等将遗传算法引入到挡土墙库仑土压力求解分析中,计算结果表明遗传算法在计算挡土墙库仑主动土压力的过程中,收敛速度快,具有较高的计算精度。

2.2 模拟退火算法(SA)

退火是将固体升温到一定温度,再让其慢慢冷却,升温时,固体内部粒子随温升变为无序状,内能增大,而慢慢冷却时固体内部粒子渐渐趋于有序状。固体内部粒子在每个温度都达到平衡态,最后在常温时达到基态,内能减为最小。

1953年,Metropolis等提出了模拟退火算法。1983年,Kirkpatrick等将此法加以改进后用于大规模集成电路优化问题。1987年,Laarhoven等出版了 *Simulated Annealing: Theory and Applications*^[44]一书,对模拟退火算法作了比较系统的总结,促进了模拟退火算法的理论研究和实际应用的发展。

模拟退火算法的主要优点:适用于离散型、连续型及混合型变量;鲁棒性、全局收敛性、隐含并行性较强,适应性较广。其主要缺点:效率不高;参数、试探数的控制上限选取准则性较弱。通过与遗传算法、混沌理论、粒子群算法和直接搜索法进行组合,可以大大提高模拟退火算法的寻优效率。

陈昌富等^[45]将复合形模拟退火算法引入到水泥土墙支护结构参数优化设计中,结果表明了该方法的可行性和可靠性。王永德等^[46]首次将模拟退火算法应用于电力网架优化设计中,同时提出网架优化的模拟退火算法。高占远等^[47]将模拟退火算法引入到网架结构优化设计中,并对模拟退火算法中参数的选择进行了探讨。项宝卫等^[48]针对桁架形状优化问题,提出了一种改进的模拟退火算法,计算结果表明该法计算精度高、通用性强。顾元宪等^[49]将模拟退火算法应用于桁架结构截面尺寸优化设计,结果表明,改进模拟退火算法具有很高的优化求解精度,计算效率显著提高且优于遗传算法。

2.3 人工神经网络算法(ANN)

人工神经网络是由大量简单的神经元按某种方式连接形成的智能仿生动态网络,它以简单非线性神经元作为处理单元,通过广泛连接构成大规模分布式并行处理非线性动力学系统,主要由输入层、隐含层和输出层组成。

1943年,法国心理学家 W. S. McCulloch 和 W. Pitts 在分析、综合神经元基本特征的基础上提出了第一个神经元数学模型(M-P模型),开创了人工神经网络算法的研究。1982年 Hopfield^[50]提出了人工神经网络模型。Hopfield 开始主要针对线性规划和 0-1 离散规划问题,随后,将其推广到非线性优化问题上。1985年 Rumelhart 等提出了多层网络的反向传播学系算法(back propagation, BP),该算法能够较大幅度提高神经网络的学习与知识表达能力。

人工神经网络算法主要优点:运算能力、自学习、自适应能力及非线性映射能力较强,容错性较好。其主要缺点:容易陷入局部最优解,计算工作量大。通过提高网络的泛化性能、与遗传算法和粒子群算法相结合,可以大大提高人工神经网络算法的寻优效率。

姚宏等^[51]利用进化人工神经网络算法预测结构抗震可靠度,克服了 BP 网络输入层节点数、隐含层数和隐含层节点数确定的盲目性,其适应性更强,精度更高。任远等^[52]以提高网络的泛化性能为主旨,提出了 GA-BP 贝叶斯算法,并应用于方形扁平封装器中,该算法克服了现有网络训练算法对初始权值敏感、建模精度不高的缺点。

2.4 其他新寻优算法

新的现代寻优算法还有 1989 年 F. Glover 提出的禁忌搜索算法(tabu search)^[53],Toyoo Fukuda 等提出的一种基于信息熵概念的免疫算法,该法全局收敛性良好。蚁群算法(ant colony optimization, ACO)是通过模拟自然界中真实蚁群的觅食行为而产生的。粒子群优化算法(partical swarm optimization, PSO)是近年来发展起来的一种新的进化算法,源于对鸟群捕食的行为研究。粒子群优化算法和遗传算法相似,它均从随机解出发,通过迭代寻找最优解,采用适应度来评价解的品质,但是比遗传算法规则更为简单,没有遗传算法的“交叉”和“变异”操作。

3 结 语

a. 工程结构优化设计从尺寸优化到形状优化、拓扑优化,从单目标优化到多目标优化,从确定性优化到不确定性优化,从静力优化到静动力优化,其优化设计的层次向更高方向发展。优化算法从传统的准则法、数

学规划法,发展到仿生学算法,优化的理论和方法都得到长足发展。

b. 寻求目标函数和约束函数的高精度近似显式解析式仍然是结构重分析算法发展的一个重要方向。

c. 最优准则法、数学规划法及现代的仿生学算法都有其自身局限性,针对实际工程,对上述各寻优算法进行改进、组合,产生新的优化算法,是工程结构优化算法发展的主要方向。

d. 工程结构优化设计中尺寸优化已相对完善,形状优化逐渐走向成熟,拓扑优化及布局优化呈现加速发展的态势。

参考文献:

- [1] 蔡新,郭兴文,张旭明.工程结构优化设计[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
- [2] 张炳华,侯昶.土建结构优化设计[M].2版.上海:同济大学出版社,1998.
- [3] SCHMIT L A. Structural design by systematic synthesis[C]//Proceeding of the second Conference on Electronic Computation. New York: ASCE,1960:105-132.
- [4] 蔡迎建,孙焕纯.框架结构的可靠性优化[J].计算力学学报,1999,16(3):288-294.(CAI Ying-jian,SUN Huan-chu. Reliability based on optimization for frame structu[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,1999,16(3):288-294.(in Chinese))
- [5] 程耿东,许林.基于可靠度的结构优化的序列近似规划算法[J].计算力学学报,2006,23(6):641-646.(CHENG Geng-dong,XU Lin. Sequential approximate programming approach to reliability based structural optimization[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,2006,23(6):641-646.(in Chinese))
- [6] DIMOU C K, KOUMOUSIS V K. Reliability-based optimal design of truss structures using particle swarm optimization[J]. Journal of Computing in Civil Engineering,2009,23(2):100-109.
- [7] 高亚强,王兴国.基于可靠性的结构优化设计[J].河北理工大学学报:自然科学版,2008,30(1):120-123.(GAO Ya-qiang,WANG Xing-guo. A Study on reliability-based structural optimization and design[J]. Journal of Hebei Polytechnic University:Natural Science Edition,2008,30(1):120-123.(in Chinese))
- [8] 王福来,叶少有.基于可靠度理论的桥梁结构优化设计[J].山西建筑,2008,34(2):89-90.(WANG Fu-lai,YE Shao-you. Optimal design of bridge structures based on reliability[J]. Shanxi Architecture,2008,34(2):89-90.(in Chinese))
- [9] 张鹏飞.浅谈可靠度在桥梁结构优化设计中的应用[J].山西建筑,2007,33(20):78-79.(ZHANG Peng-fei. Application of the reliability in bridge structural optimum design[J]. Shanxi Architecture,2007,33(20):78-79.(in Chinese))
- [10] BELLMAN R E,ZADEH L A. Decision-making in a fuzzy environmen[R]. Berkeley:University of California Berkeley,1970.
- [11] 王光远.工程软设计理论[M].北京:科学出版社,1992.
- [12] 叶万军,彭小云,折学森.综合模糊识别下的黄土边坡断面优化[J].西安科技大学学报,2007,27(4):584-589.(YE Wan-jun,PENG Xiao-yun,SHE Xue-sen. Loess slope section optimization based on comprehensive fuzzy recognitior[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technoidgy,2007,27(4):584-589.(in Chinese))
- [13] 刘剑,汪志勇,肖盛璧.挡土墙稳定性分析中的模糊优化设计[J].中南公路工程,2006,31(3):102-104.(LIU Jian,WANG Zhi-yong,XIAO Sheng-xie. Fuzzy optimization design in the stability of retaining wall analyse[J]. Central South Highway Engineering,2006,31(3):102-104.(in Chinese))
- [14] 汪树玉,刘国华,包志仁.结构优化设计的现状与进展(续)[J].基建优化,1999,20(5):3-7.(WANG Shu-yu,LIU Guo-hua,BAO Zhi-ren. Present situation and development of structural optimization method(continuation)[J]. Optimizqtion of Capital Construction,1999,20(5):3-7.(in Chinese))
- [15] 汪树玉,刘国华,包志仁.结构优化设计的现状与进展[J].基建优化,1999,20(4):3-14.(WANG Shu-yu,LIU Guo-hua,BAO Zhi-ren. Present situation and development of structural optimization method[J]. Optimizqtion of Capital Construction,1999,20(4):3-14.(in Chinese))
- [16] 刘齐茂,燕柳斌,邓朗妮.桁架形状优化的一种改进模拟退火算法研究[J].计算机工程与应用,2007,43(23):218-221.(LIU Qi-mao,YAN Liu-bin,DENG Lang-ni. Improved simulated annealing algorithm study on truss shape optimal design[J]. Computer Engineering and Applications,2007,43(23):218-221.(in Chinese))
- [17] 易少华,刘树堂.BP遗传算法在结构形状优化设计中的应用[J].广州大学学报:自然科学版,2007,6(3):82-86.(YI Shao-hua,LIU Shu-tang. Application of BP genetic algorithms on shape optimization design of truss structure[J]. Journal of Guangzhou University:Natural Science Edition,2007,6(3):82-86.(in Chinese))
- [18] 曹天捷.几种载荷同时作用下三铰拱轴线的形状优化[J].中国民航大学学报,2007,25(2):33-35.(CAO Tian-jie. Optimization of axial curve of three-hinged arch under action of few kind of load[J]. Journal of Civil Aviation University of China,2007,25(2):33-35.(in Chinese))
- [19] 王栋,李晶.空间桁架结构动力学形状优化设计[J].工程力学,2007,24(4):129-134.(WANG Dong,LI Jing. Shape optimization

- of space trusses subject to frequency constrain[J]. Engineering Mechanics 2007 24(4):129-134.(in Chinese))
- [20] DORN W S, GEMORY R E, GREENBERG H J. Automatic design of optimal structures[J]. J Mech, 1964 3(1):25-52.
- [21] DOBBS M W, FELTON L P. Optimization of truss geometry[J]. J Struct Div Proc ASCE, 1969 95(ST10):2105-2118.
- [22] KIRSCH U, TOPPING B H V. Minimum weight design of structural topologies[J]. J Struc Eng, 1992, 118(7):1770-1785.
- [23] LIPSON S L, GWIN L B. The complex method applied to optimal truss configuration[J]. Computers & Structures, 1977 7(3):461-468.
- [24] 姜冬菊, 王德信. 离散变量桁架结构拓扑优化设计的混合算法[J]. 工程力学, 2007 24(1):112-116.(JIANG Dong-ju, WANG De-xin. A hybrid algorithm for topology optimization of truss structures with discrete variables[J]. Engineering Mechanics, 2007 24(1):112-116.(in Chinese))
- [25] 姜冬菊. 结构拓扑和布局优化及工程应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [26] 穆春燕, 苏超, 丛赛飞. 拱坝二维水平拱圈的拓扑优化研究[J]. 黑龙江水专学报, 2007 34(4):1-3.(MU Chun-yan, SU Chao, CONG Sai-fei. Study on the topology optimization of 2-d horizontal arch ring[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 2007 34(4):1-3.(in Chinese))
- [27] 张莉, 周克民. 基于类桁架连续体的结构拓扑优化方法与应用[J]. 应用力学学报, 2007 24(3):412-415.(ZHANG Li, ZHOU Ke-min. Topological optimization based on truss-like continuum with applications[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2007, 24(3):412-415.(in Chinese))
- [28] 谢能刚, 孙林松, 包家汉, 等. 基于无私合作博弈模型的拱坝体型多目标优化设计[J]. 水利学报, 2007 38(9):1109-1114.(XIE Neng-gang, SUN Lin-song, BAO Jia-han, et al. Multi-objective optimization design of arch dam shape based on unselfish cooperation game mode[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007 38(9):1109-1114.(in Chinese))
- [29] 孙林松, 张伟华, 谢能刚, 等. 基于博弈理论的拱坝坝体多目标优化设计[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2006 34(4):392-396.(SUN Lin-song, ZHANG Wei-hua, XIE Neng-gang, et al. Multi-objective optimization for shape design of arch dams based on game theory[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006 34(4):392-396.(in Chinese))
- [30] 曹洪涛, 董军, 居雅楠. 基于 MATLAB 的钢-混凝土组合梁截面多目标优化设计[J]. 四川建筑科学研究, 2008 34(1):5-8.(CAO Hong-tao, DONG Jun, JU Ya-nan. Multi-objective optimal section design of steel-concrete composite beams based on the MATLAB[J]. Sichuan Building Science, 2008 34(1):5-8.(in Chinese))
- [31] 黄炜, 侯莉娜, 姚谦峰, 等. 密肋复合墙体多目标优化设计方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2007 39(5):641-645.(HUANG Wei, HOU Li-na, YAO Qian-feng, et al. Research on multi-objective optimization design method of multi-ribbed composite wall[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2007 39(5):641-645.(in Chinese))
- [32] 王光远. 工程结构与系统抗震优化设计的实用方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [33] 朱靖华, 王光远. 多级递阶工程结构系统抗地震设计的全局优化[J]. 工程力学, 2002 19(6):171-180.(ZHU Jing-hua, WANG Guangyuan. Global optimization of anti-seismic design for multilevel hierarchical engineering structure systems[J]. Engineering Mechanics, 2002 19(6):171-180.(in Chinese))
- [34] 朱靖华, 王光远. 多级递阶工程系统全局优化抗震设计的混合法[J]. 土木工程学报, 2005 38(4):18-24 52.(ZHU Jing-hua, WANG Guang-yuan. Global optimization of anti-seismic design for multilevel hierarchical engineering systems by using a mixed method[J]. China Civil Engineering Journal, 2005 38(4):18-24 52.(in Chinese))
- [35] 朱靖华, 王光远. 多级递阶工程系统抗地震设计全局优化的对偶分解法[J]. 建筑结构学报, 2002 23(6):33-40.(ZHU Jing-hua, WANG Guang-yuan. Global optimization of anti-seismic design for multilevel hierarchical engineering systems by a dual-decomposition method[J]. Journal of Building Structures, 2002 23(6):33-40.(in Chinese))
- [36] 朱靖华, 王光远. 多级递阶工程系统抗地震设计整体优化的计算实现[J]. 计算力学学报, 2002 19(4):384-392.(ZHU Jing-hua, WANG Guang-yuan. Computational implementation of global optimization of anti-seismic design for multilevel hierarchical engineering system[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2002 19(4):384-392.(in Chinese))
- [37] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems[M]. Cambridge: MIT Press, 1992.
- [38] MICHALEWICZ Z. Genetic algorithms + data structures = evolution programs[M]. Berlin: Springer, 1998.
- [39] 柳春光, 张利华. 遗传优化神经网络方法在桥梁震害预测中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 2008 28(1):139-145.(LIU Chun-guang, ZHANG Li-hua. The application of genetic algorithms and BP neural network to seismic damage prediction of bridges[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008 28(1):139-145.(in Chinese))
- [40] 汪大洋, 周云. 基于 GA 优化理论的高层结构风振控制研究[J]. 土木工程学报, 2008 41(1):42-47.(WANG Da-yang, ZHOU Yun. Control of wind-induced vibration of high-rise bulidings based on GA optimum theory[J]. China Civil Engineering Journal, 2008 41(1):42-47.(in Chinese))
- [41] 陈文英, 阎绍泽, 褚福磊. 免疫遗传算法在智能桁架结构振动主动控制系统优化设计中的应用[J]. 机械工程学报, 2008 44(2):196-200.(CHEN Wen-ying, YAN Shao-ze, CHU Fu-lei. Immune genetic algorithm used to integrated optimal design of active

- vibration control system for piezoelectric intelligent truss structures[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(2):196-200.(in Chinese))
- [42] 杨海霞, 谢铁鹏. 一种改进的遗传算法及其在结构优化设计中的应用[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2007, 35(6):659-663.(YANG Hai-xia, XIE Yi-peng. An improved genetic algorithm and its application to structural design optimization[J]. Journal of Hohai University Natural Sciences, 2007, 35(6):659-663.(in Chinese))
- [43] 赵同彬, 谭云亮, 王虹, 等. 挡土墙库仑土压力的遗传算法求解分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4):1170-1174.(ZHAO Tong-bin, TAN Yun-liang, WANG Hong, et al. Analytical solution of Coulomb earth pressure on retaining wall by genetic algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4):1170-1174.(in Chinese))
- [44] VAN LAARHOVEN P J M, AARTS E H L. Simulated annealing theory and application[M]. Berlin: Springer, 1987.
- [45] 陈昌富, 吴子儒, 龚晓南. 复合形模拟退火算法及其在水泥土墙优化设计中的应用[J]. 岩土力学, 2007, 28(12):2543-2548.(CHEN Chang-fu, WU Zi-ru, Gong Xiao-nan. Complex simulated annealing and its application to optimization design of cement-soil retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(12):2543-2548.(in Chinese))
- [46] 王永德, 李兰, 赵宏才, 等. 电力网网架结构优化设计的模拟退火算法[J]. 青岛理工大学学报, 2007, 28(3):108-110, 117.(WANG Yong-de, LI Lan, ZHAO Hong-cai, et al. Simulated annealing algorithm for the optimal design of the electric power grid structure[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2007, 28(3):108-110, 117.(in Chinese))
- [47] 高占远, 鹿晓阳, 陈世英, 等. 基于单纯形模拟退火算法的网架结构优化设计[J]. 山东建筑大学学报, 2007, 22(1):21-23, 40.(GAO Zhan-yuan, LU Xiao-yang, CHEN Shi-ying, et al. Optimal design of lattice grid structure based on simulated simplex-annealing method[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2007, 22(1):21-23.(in Chinese))
- [48] 项宝卫, 胡永良, 凌斐勇. 桁架形状优化设计的模拟退火算法[J]. 力学与实践, 2006, 28(6):46-50.(XIANG Bao-wei, HU Yong-liang, LING Su-yong. Shape optimization of trusses using simulated annealing[J]. Mechanics in Engineering, 2006, 28(6):46-50.(in Chinese))
- [49] 顾元宪, 项宝卫, 赵国忠. 桁架结构截面优化设计的改进模拟退火算法[J]. 计算力学学报, 2006, 23(5):546-552.(GU Yuan-xian, XIANG Bao-wei, ZHAO Guo-zhong. Improved simulated annealing algorithm for cross-section design optimization of truss structures[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2006, 23(5):546-552.(in Chinese))
- [50] HOPFIELD J J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1982, 79(8):2554-2558.
- [51] 姚宏, 刘小文. 基于神经网络的结构抗震可靠度预测及优化[J]. 南昌工程学院学报, 2007, 26(6):22-25.(YAO Hong, LIU Xiao-wen. Prediction and optimization of reliability of seismic structures based on neural network[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2007, 26(6):22-25.(in Chinese))
- [52] 任远, 白广忱. 新型 NN 训练算法及其在优化设计中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(8):5-8.(REN Yuan, BAI Guang-chen. New NN training algorithm and its application in optimization design[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(8):5-8.(in Chinese))
- [53] GLOVER F. Tabu search Part I[J]. ORSA Journal on Computing, 1989, 1(3):190-206.

Research progress of optimal design for engineering structures

CAI Xin^{1, 2}, LI Hong-xuan^{2, 3}, WU Ying-li², ZHU Jie¹

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Nanjing Municipal Design and Research Institute, Nanjing 210008, China)

Abstract: The optimal design of engineering structures was reviewed. Some frontier optimal design methods such as uncertainty optimization, shape optimization, topological optimization, multi-objective optimization, system optimization and some bionics algorithm methods like genetic algorithm, simulated annealing and neural network algorithm as well as their application were introduced. The searching of high-precision approximate explicit analytic expression for objective functions and constraint functions and the improvement and combination of optimal criteria, mathematical programming approaches and bionics algorithms were suggested to be the main development direction of the optimal algorithms for engineering structures.

Key words: engineering structure; optimal design; uncertainty optimization; shape optimization; topological optimization; multi-objective optimization; system optimization