

桁架结构拓扑和布局优化发展综述

姜冬菊 张子明

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:从优化模型的建立和求解算法的研究两个方面对桁架结构的拓扑、布局优化的发展历程和研究现状进行综合评述。按照发展的先后,将以基结构法为基础的优化模型根据设计变量的不同分为 3 类,同时描述了非基结构法的拓扑布局优化,将求解算法分为传统的数学求解和智能化的全局寻优求解两部分。对桁架结构的拓扑布局优化在实际工程中的应用进行了总结,指出了结构拓扑、布局优化在理论研究、工程应用和软件开发等方面的研究方向。

关键词:桁架结构;拓扑优化;布局优化;基结构;智能优化

中图分类号:TU323.4 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2006)02-0081-06

A review on topology and layout optimization of truss structures//JIANG Dong-ju, ZHANG Zi-ming(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The development of topology and layout optimization of truss structures was reviewed from two aspects, i. e. the establishment of the optimal models and study of algorithms. According to the development process, the optimal models based on ground structure were classified into three types in terms of design variables, and the topology and layout optimization without adoption of the ground structure method were described; relevant algorithms were sorted into conventional mathematic methods and intelligent overall optimum methods. Finally, the applications of the technique in practical projects were summarized, and the further development of the technique in theoretical study, practical application, and software development was discussed.

Key words: truss structure; topology optimization; layout optimization; ground structure; intelligent optimization

桁架结构由于具有自重轻、造价低和施工简单等特点在工程中得到广泛应用,应用领域涉及桥梁设计、施工支护、建筑结构以及水工渡槽、闸门支撑、输电网架等多方面,在工程建设中发挥着越来越重要的作用。结构拓扑和布局优化是优化领域的高层次部分,被公认为是最具挑战性的研究课题之一。桁架结构形式比较简单,其拓扑、布局变化可以通过结点的布置和其间的杆件连接关系来表示,所以常被当作结构优化研究工作的首选对象。1904 年由 Michell 提出的 Michell 桁架理论^[1]及 1977 年由 Prager 建立的经典布局理论^[2]为结构拓扑、布局优化研究奠定了理论基础,提供了最优解的下限。但真正的拓扑优化工作是从 Dorn 等提出基结构^[3]的概念后开始的。所谓基结构是指由杆件将荷载作用点、支承点和其他可能结点两两连接起来所形成的初始结构。在随后的若干年中,几乎所有的研究工作都是以基结构为基础而展开的,并且主要从设计变量、优化模型和求解算法等几个方面进行探讨和研究。

1 设计变量和优化模型

1.1 基于尺寸优化的拓扑优化

关于结构尺寸优化的研究工作已经比较成熟,因此研究者们采用了在尺寸优化的基础上进行拓扑优化的研究思想,即取杆件的截面面积为设计变量,通过杆件面积取零值来实现结构的拓扑变化。这种模型的设计变量通常可分为连续型(即在指定的范围内可以连续变化,取任意值)和离散型(即在指定的离散域内取某一离散值)两种,目标函数一般取结构重量最轻或体积最小。基于尺寸优化的拓扑优化模型为

$$\begin{cases} \text{求 } A \in E^m \\ \min W = \sum_{i=1}^m \rho_i A_i l_i & i = 1 \dots m \\ \text{s.t. } g_j(A_i) \leq 0 & j = 1 \dots J \\ 0 \leq A_i \leq A_i^u \text{ or} \\ A_i \in S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: A 为单元截面设计变量, $A = (A_1, A_2, \dots, A_m)^T$; W 为结构的质量; ρ_i 和 l_i 分别为单元的密度和长度; g_j 为约束函数; m 为杆件数; J 为约束数; A_i^u 为连续变量 A_i 的上限值; S 为离散变量的离散集; N 为离散集的元素个数。

目前已有大量的关于这类描述方式的研究,其中设计空间由 2 维发展到 3 维,设计工况由单个发展到多个,设计约束可涉及应力、位移、稳定、动荷载下的频率及体系可靠性等多个方面^[4,5]。

这种将设计变量“挂靠”于截面面积的拓扑优化概念简单,操作方便,可以成功地利用已有的较成熟的连续或离散变量的求解算法进行求解,实现拓扑和尺寸的同步优化,使得最初“无从下手”的拓扑优化问题有了初步的进展,并取得了一定的成果。但由于对实际拓扑情况描述的差异,这类模型仍存在一定的问題,其中主要存在奇异最优解的现象,以及在尺寸优化中的求解效率很难延伸到拓扑优化的求解当中。

结构拓扑优化的奇异最优解的现象最初是由 Sved 和 Ginos 在求解三杆桁架结构时发现的,通过删除面积为零的杆件始终只能得到拓扑优化的局部最优解^[6];之后, Kirsch 等研究者也均指出这一现象,并认为奇异最优解是孤立于可行区域外的最优解^[7,8],进一步的研究指出,出现这一现象的本质是由于杆单元的应力约束函数具有不连续性,结构拓扑优化的可行域不仅可能非凸而且可能呈星形,全局最优解可能位于设计空间中非凸星形可行域的退化子区域中,而非孤立点^[9]。这一观点后来得到了 Rozvany, Bendsoe 以及 Kirsch 等研究者的广泛认可^[10,11]。为了改善传统模型中由于拓扑的出现而产生应力函数表达不确切的现象,文献^[12]提出用内力约束代替应力约束的 ϵ -放松模型,能够高效率地搜索到奇异最优解。Bendsoe 等^[13]采用以最小柔顺度为目标函数、体积和平衡条件等为约束的优化模型进行求解,在避免奇异最优解的同时,也提高了求解效率, Martin 等^[14]对该模型的建立、求解及应用等方面进行了全面的总结。其他一些学者也对优化模型进行了改进,如将杆件(或结点)删除后,相应的应力(或位移)约束随之取消这一约束直接引入到拓扑优化模型中^[15];谭中富等构造以内力为设计变量的拓扑优化模型^[16,17];Hoback 在以截面面积为设计变量的同时,引入一百分数变量作为杆件是否存在的标识,但主要缺点是设计变量过多^[18];文献^[19]从信息处理的角度提出了基于极大熵的杆系结构拓扑优化方法。另外,也有学者考虑通过形状优化解决拓扑问题,但由于难度太大而没有成功。

1.2 基于独立的拓扑变量的拓扑优化

桁架结构拓扑优化问题实际上是要解决在满足约束条件的前提下使目标函数最小的杆件的布置问题,即为确定基结构中杆件的“有”或“无”。奇异最优解和求解效率相对较低的现象正是由于以尺寸变量为基础的拓扑优化对实际拓扑本质的描述不确切而导致的。为此,一些学者开始了基于独立的拓扑变量的拓扑优化研究,其优化模型一般为

$$\begin{cases} \text{求 } t \in E^m, A \in E^m \\ \min W = \sum_{i=1}^m t_i \rho_i A_i l_i & i = 1, \dots, m \\ \text{s.t. } g_j(t_i, A_i) \leq 0 & j = 1, \dots, J \\ 0 \leq A_i \leq A_i^u \text{ or } A_i \in S \text{ (离散集)} \\ t_i = 0 \text{ or } 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: t 为结构单元的拓扑设计变量, $t = (t_1, t_2, \dots, t_m)^T$; 0 表示单元不存在, 1 表示单元存在, 其他参数含义同式(1)。

显然,根据设计变量允许取值范围的不同,这类模型是一个离散连续型混合优化问题或离散变量优化问题。虽然这类模型不能直接应用已经成熟的基于导数的求解算法,并且对于离散变量的求解存在“组合爆炸”问题,但却将拓扑优化从尺寸、形状优化中独立出来,概念更清晰,更能反映问题的实质。只要研究采用适当的求解算法,可以有效地提高求解效率并且从根本上避免奇异最优解的现象。这类模型的提出与应用,使得拓扑优化的研究工作有了突破性的进展。

1.3 集尺寸、形状和拓扑为一体的布局优化

纵观已取得的研究成果,可以发现尺寸优化是基础,隐含于形状、拓扑优化中,而形状优化和拓扑优化相互关联、相互耦合,不可能各自完全独立。因此,要想获得真正的既具有最佳性能又能满足经济等实用要求的结构形式,必须进行布局优化,即将尺寸、形状与拓扑优化统筹起来综合考虑,其一般模型为

$$\begin{cases} \text{求 } t \in E^m, A \in E^m, C \in E^n \\ \min W = \sum_{i=1}^m t_i \rho_i A_i l_i(C_k) & i = 1, \dots, m \\ \text{s.t. } g_j(t_i, A_i, C_k) \leq 0 & j = 1, \dots, J \\ 0 \leq A_i \leq A_i^u \text{ or } A_i \in S \text{ (离散集)} \\ t_i = 0 \text{ or } 1 \\ 0 \leq C_k \leq C_k^u \text{ or } C_k \in D \text{ (离散集)} \\ k = 1, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

式中: C 为形状设计变量,通常取结点坐标, $C = (C_1, C_2, \dots, C_n)^T$; n 为形状变量数; C_k^u 为形状变量

的上限值 ; D 为形状变量的可取离散集 ;其他参数含义同前。

根据设计变量取值范围的不同 ,该模型也可分为离散型或连续离散混合型。可见 ,布局优化考虑了尺寸、形状和拓扑优化三者之间的耦合关系 ,对优化实质的描述更贴切 ,但问题的维数和非线性程度更高 ,求解也更加困难。

1.4 非基结构法的智能拓扑、布局优化

基于基结构法的拓扑、布局优化 ,其最优解实际上是给定布局集中的一个子集。也就是说 ,基结构的采用从优化一开始就限定了了解的范围 ,真正的最优解有可能没有被包含在内 ,从而最优解被遗失或只得到近似最优解 ,除非基结构中包含所有可能的布局构型而趋于无限 ,而这是不可能的。所以真正意义上的拓扑、布局优化应该摆脱基结构的影响 ,在任意给定的区域内寻优。

目前基于进化、模糊和神经网络等理论的智能优化模型正尝试被引用到拓扑和布局优化中 ,并且有着巨大的潜力和良好的发展前景。如 Mroz 等借鉴了生物的生长模式 ,由简单的结构出发 ,通过不断增添杆件来拓扑地生成最优结构^[20] ;Azid 等采用遗传算法的基本思想 ,在给定荷载作用点和支承位置的前提下进行桁架结构的布局优化设计^[21-22] ;李昊等则从人工智能的概念出发 ,集模糊、混沌、神经网络等当前比较先进的理论为一体 ,建立了桁架结构的智能布局优化系统^[23]。这些方法突破了传统的数学优化模式 ,摆脱了基结构的束缚 ,解决了奇异最优解的问题 ,为实现结构的智能优化设计进行了初步的探索。

进一步地将拓扑、布局优化研究与材料、物理和控制等研究结合起来进行最优控制的自适应结构研究也已经开始^[24-25] ,结构在运行期间随着外界环境的变化自动调整其适用性的主动控制功能也将随着这方面研究工作的深入而得以实现。

2 求解算法

按照发展历程 ,拓扑和布局优化的求解方法主要可分为两大类 ,即以数学规划等为代表的传统类方法和以遗传算法等为代表的智能类方法。

2.1 传统的数学优化求解算法

在早期的拓扑和布局优化工作中 ,对于变量连续的模型 ,大多数都采用传统的数学优化方法进行求解。根据优化模型建立和处理方式的不同 ,这类方法主要可以分为准则法和数学规划法两大类。对于离散变量 ,有的采用将其处理成连续变量再求解的策略 ,也有的构造针对离散变量的启发式算法等

求解方法。

对式(1)所示的连续变量的拓扑优化模型 ,Dorn 等在基结构的基础上利用满应力法求解^[3] ,Zhou 等利用变分原理推导出优化准则用于拓扑优化的求解^[26] ,由 Xie 等提出的渐进结构进化法也采取了满应力求解准则^[27]。为了求解的方便 ,一些学者将式(1)中设计变量处理成内力 ,利用线性规划类方法求解 ,如 Ringertz ,Kirsch 和段宝岩等人的工作^[28-30] ;另外程耿东等考虑应力和局部稳定时采用单纯形法求解^[31] ,谭中富等先采用二次规划的对偶逼近求解^[16] ,后又利用 K-T 条件构造线性互补问题 ,利用修正的单纯形法求解^[17]。对于多工况及位移约束条件等复杂的情况 ,许多研究者将拓扑优化问题造成非线性规划求解 ,如 Sved 和 Ginos^[6] ,程耿东和蒋诤^[9] ,Kirsch 等^[32]。以上各种求解算法都是针对连续变量问题的求解 ,要求目标函数具有连续、可微等性质 ,对于设计变量是离散型的优化模型的求解则显得无能为力。因此 ,相对于连续变量的研究 ,早期的离散变量的拓扑优化由于求解困难而研究较少。针对模型(1) ,王跃方等构造了基于内力评价的启发式算法用于求解离散变量的桁架结构的拓扑优化问题^[33] ,Makoto 采用随机搜索法求解离散变量拓扑优化问题^[34]等。由于独立拓扑变量的提出 ,使离散变量成为拓扑优化模型中必不可少的部分 ,同时又基于拓扑优化工作的研究深入 ,关于离散变量问题的研究广泛开展 ,并取得了一系列的成果。

对于连续离散型设计变量的优化问题 ,可以通过适当的变换将其处理成同一类型进行求解。如隋允康和杨德庆^[35]利用 RMI 原则重新构建式(2) ,通过磨光函数和过滤函数等实现离散与连续之间的变换 ,隋允康和于新^[36]建立有无复合体模型求解 ,均具有较高的求解效率和精度 ,但对于某些参数的确定需要试算 ,存在一定经验性。柴山等^[37]则基于连续变量求解的启发 ,采用相对差商法直接进行式(2)的离散型问题求解 ,但也存在可能陷于局部最优解的缺点。这些算法的提出和成功应用 ,都对拓扑优化的研究工作起到了积极的推动作用。

布局优化设计的思想在很早以前就被提出 ,但由于设计的难度而发展缓慢。1977 年 Lipson 和 Gwin 研究了离散截面变量的空间桁架布局优化问题 ,利用复形法求解 ,但杆件删除后不能恢复 ,容易丢失最优解^[38]。Rozvany 等^[39]和 Birker^[40]研究了平面桁架的布局优化理论 ,并主要以两杆桁架为例进行了理论和数值计算 ,得出了一些有意义的结论。王跃方等采用形状-截面优化和拓扑优化交替进行的序列两级算法求解离散变量的布局优化问题^[41] ,谭中富分别采用

线性规划和非线性规划模型进行了先拓扑后形状和尺寸的布局优化理论和方法的探讨^[42]。这种分级求解的策略缩小了问题的规模,降低了求解的难度,但可能得到的不是全局最优解。

2.2 基于全局随机搜索的智能求解算法

全局随机搜索类算法能够克服传统优化算法在求解拓扑布局优化时的困难,是目前极具活力的研究方向。代表方法之一是遗传算法(Genetic Algorithm,简称GA)^[15 43-48]。这类方法主要依据自然界中生存进化的原则,利用对设计变量编码模拟染色体,采用再生、交叉及变异等手段达到全局搜索的目的。另外一种用得较多的算法是模拟退火法(Simulated Annealing,简称SA),它主要通过对固体物理中退火现象的模拟来求解组合优化问题,也具有从局部最优解中摆脱出来的能力^[49-51]。相比较而言,GA算法具有较强的大范围搜索和并行计算的能力,而SA算法的局部搜索能力较强,所以有的学者将两种算法联合起来应用。另外,为了减少计算量,加快求解速度,也有将GA或SA算法与其他求解算法联合起来的应用^[24 52 53]。文献[24]将数学规划、GA算法、SA算法及它们的联合应用进行了综合比较,并指出GA算法的求解效果较好,而SA算法与序列线性规划结合的混合算法求解效率最高。较一般的算法而言,这类全局算法对于搜索复杂区域(如具有退化低维子域、不连通、不可微或是离散的区域)具有较高的求解效率,一般都能够得到全局最优解或近似全局最优解,克服了奇异最优解的求解困难,在很大程度上缓解了离散或组合问题的求解难度,开辟了新的求解途径。但算法中一些参数的确定还缺少一定的指导规则,对于某些问题,如编、解码之间的映射还存在一定的困难,同时对于规模较大的问题都存在计算量过大的缺点,尤其是对于结构设计问题,反复的重分析过程往往是令人难以接受的。设法减少重分析的次数,或构建简便有效的重分析技术,或采用与并行技术等联合应用的手段,是这种全局搜索算法应用于结构拓扑优化的一个具有较好发展前景的研究方向。

3 工程应用

由于结构的拓扑和布局优化在理论上尚处于探索完善阶段,所以在实际工程中的应用尚不多。对于桁架结构,已有一些初步的应用,如由管状桁架构筑的海洋平台智能化拓扑优化设计^[54],起重机的桁式臂架布局优化^[55],钢桁屋顶架的优化设计^[56],汽车发动机支撑构架的拓扑布局优化^[57],可展开天线的形面布局优化^[58],以及输电铁架、桥梁设计的拓扑布局

优化等。尽管拓扑布局优化的实际应用还很少,甚至有些应用仍属于概念性的,但对于探索新的结构形式,以及在保障安全的同时节约成本、降低工程造价有着重要的意义。随着这方面理论研究的逐渐深入和完善,以及全球资源的日益短缺、人们对生活质量水平要求的日益提高等客观事实的存在,作为改善结构功能、提高经济效益的拓扑和布局优化必将会受到更多的关注,实际应用也必将会更加广泛。

4 研究方向

a. 桁架结构的拓扑和布局优化研究目前主要集中在理论和方法上的探索,并且已经取得了一定的成果,而在实际应用方面的研究工作相对较少,这也是结构(包括框架和连续体结构等)拓扑和布局优化研究工作中有待深化的主要方向。

b. 吕大刚等^[59]指出结构优化设计的实际应用远远落后于理论研究的一个重要原因是传统的数学模型描述能力和求解方法具有相当的局限性。作为当前极具活力的人工智能科学将会给结构拓扑、布局优化的发展带来巨大影响,因此结合神经网络、模糊系统和进化计算、混沌等领域的研究进行结构的优化设计,特别是高层次的优化设计将是一个具有很大潜力的研究方向。

c. 结构优化在实际工程中的应用推广,一方面依赖于理论的发展,另一方面则有赖于相应软件的开发利用。针对实际工程设计,研制一批具有友好界面的、开放式的、模块可视化的专用应用软件也是一个不可缺少的研究课题。

d. 研究表明,许多连续体结构的拓扑优化构型都近似于桁架结构,如何将连续体和桁架结构的优化联合起来统筹考虑,即进行结构的选型优化,以及进一步同结构的功能优化结合起来等,不断拓展和延伸优化的研究范围和深度,将是优化研究工作的必然发展方向。

参考文献:

- [1] MICHELL A G M. The limits of economy of materials in frame structures[J]. Philosophical Magazine, 1904, 3(47): 589-597.
- [2] PRAGER W, ROZVANY G I N. Optimal layout of grillages[J]. J Struct Mech, 1977, 3(3): 265-294.
- [3] DORN W, GOMORY R, GREENBERG H. Automatic design of optimal structures[J]. J de Mechanique, 1964, 3(1): 25-52.
- [4] 陈建军, 曹一波, 孙怀安. 多工况下具有体系可靠性约束的桁架结构拓扑优化设计[J]. 固体力学学报, 2000, 21(1): 11-18.
- [5] XU Bin, JIANG Jie-sheng, TONG Wei-hua, et al. Topology

- group concept for truss topology optimization with frequency constraints[J]. Journal of Sound and Vibration 2003 ,261 :911-925.
- [6] SVED G ,GINOS Z. Structural optimization under multiple loadings[J]. Int J Mech Sci ,1968 ,10(10) :803-805.
- [7] KIRSCH U. Optimal topologies of truss structur[J]. Comp Meth Appl Mech Eng ,1989 ,72(1) :15-28.
- [8] KIRSCH U. On singular topologies in optimum structural design [J]. Struct Opt ,1990 ,2(1) :133-142.
- [9] CHENG Geng-dong ,JIANG Zheng. Study on topology optimization with stress constrains[J]. Eng Opt ,1992 ,20(2) :129-148.
- [10] ROZVANY G I N ,BIRBER T. On singular topologies in exact layout optimization[J]. Struct Optim ,1994 ,8(4) :228-235.
- [11] ROZVANY G I N ,BENDSOE M P ,KIRSCH U. Layout optimization of structure[J]. Appl Mech Rev ,1995 ,48 :41-117.
- [12] CHENG Geng-dong ,GUO Xu. ϵ -relaxed approach in structural topology optimization[J]. Structural Optimization ,1997 ,13(4) :258-266.
- [13] BENDSOE M P , BEN-TAL A , ZOWE J. Optimization methods for truss geometry and topology design[J]. Structural Optimization ,1994 ,7(1) :141-159.
- [14] MARTIN P ,BENDOE M P. Optimization of structural topology ,shape ,and material[M]. Berlin :Produserv Produktions-Gesellschaft ,1995 :139-171.
- [15] 许素强 ,夏人伟. 桁架结构拓扑优化与遗传算法[J]. 计算结构力学及其应用 ,1994 ,11(4) :436-446.
- [16] 谭中富 ,孙焕纯. 多工况作用下空间桁架结构拓扑优化的修正单纯形方法[J]. 力学学报 ,1994 ,26(1) :90-97.
- [17] 谭中富 ,张作泉 ,冯恩民. 桁架结构拓扑优化的对偶逼近方法[J]. 科技通报 ,1994 ,10(5) :288-291.
- [18] HOBACK A S. Optimization of singular problems[J]. Struct Opt ,1996 ,12 :93-97.
- [19] DUAN Bao-yan ,TEMPLEMAN A B ,CHEN Jian-jun. Entropy-based method for topological optimization of truss structures [J]. Computer & Structures 2000 ,75 :539-550.
- [20] MROZ Z ,BOJCZUK D. Finite topology variations in optimal design of structures[J]. Struct Multidisc Optim 2003 ,25 :153-173.
- [21] AZID I A ,KWAN A S K ,SEETHARAMU K N. A GA-based technique for layout optimization of truss with stress and displacement constrains[J]. Int J Num Meth Eng 2002 ,53 :1641-1674.
- [22] AZID I A ,KWAN A S K ,SEETHARAMU K N. An evolutionary approach for layout optimization of a three-dimensional truss[J]. Struct Multidisc Optim 2002 ,24 :333-337.
- [23] 李昊 ,胡云昌 ,曹宏铎. 桁架结构智能布局优化系统[J]. 中国工程科学 2003 ,5(2) :75-79.
- [24] DAVID W B ,LIU Xiao-jian. On simultaneous optimization of smart structures :Part II :Algorithms and examples[J]. Comput Methods Appl Mech Engrg 2000 ,184 :25-37.
- [25] 武青海 ,金晓琼 ,石素琴 ,等. 基于机电耦合的自适应桁架结构最优拓扑控制[J]. 大连铁道学院学报 ,2002 ,23(1) :8-11.
- [26] ZHOU M ,ROZVANY G I N. The DCOC algorithm :part II :Topological ,geometrical and generalized shape optimization [J]. Comp Meth Appl Mech Engrg ,1991 ,89(1/3) :309-336.
- [27] 荣见华 ,郑健龙 ,徐飞鸿. 结构动力修改及优化设计 [M]. 北京 :人民交通出版社 2002 :249-336.
- [28] RINGERTZ U T. On topology optimization of trusses[J]. Eng Opt ,1985 ,9(3) :209-218.
- [29] KIRSCH U. On the relationship between optimum structural topologies and geometries[J]. Struct Opt ,1990 ,2 :39-45.
- [30] 段宝岩 ,叶尚辉. 考虑性态约束时多工况桁架结构拓扑优化设计[J]. 力学学报 ,1992 ,24(1) :59-69.
- [31] 程耿东 ,郭旭. 考虑局部稳定性约束的桁架拓扑优化设计[J]. 大连理工大学学报 ,1995 ,35(6) :770-775.
- [32] KIRSCH U ,TOPPING B H V. Minimum weight design of structural topologies[J]. J Struct Engrg ,1992 ,118(7) :1770-1785.
- [33] 王跃方 ,孙焕纯 ,黄丽华. 离散变量结构拓扑优化设计研究[J]. 固体力学学报 ,1998 ,19(1) :59-63.
- [34] MAKOTO O. Random search method based on exact reanalysis for topology optimization of trusses with discrete cross-sectional area[J]. Computer and Structures 2001(79) :673-679.
- [35] 杨德庆. 连续变量化的结构形状及拓扑优化设计理论和方法研究[D]. 大连 :大连理工大学 ,1997.
- [36] 于新. 结构拓扑优化设计的“有无反合体”方法及程序实现[D]. 大连 :大连理工大学 ,1999.
- [37] 柴山 ,石连栓 ,孙焕纯. 包含两类变量的离散变量桁架结构拓扑优化设计[J]. 力学学报 ,1999 ,31(5) :574-584.
- [38] LIPSON S L ,GWIN L B. Discrete sizing of trusses for optimal geometry[J]. ASCE J Struct Div ,1977 ,103(5) :1031-1046.
- [39] ROZVANY G I N ,BIRKER T. Generalized Michell structures :exact least-weight truss layouts for combined stress and displacement constraints :Part 1 :general theory for plane trusses [J]. Structural Optimization ,1994 ,9(2) :178-188.
- [40] BIRKER T. Generalized Michell structures :exact least-weight truss layouts for combined stress and displacement constraints :Part 2 :analytical solutions within a two-bar topology[J]. Structural Optimization ,1995 ,9 :214-219.
- [41] 王跃方 ,孙焕纯. 离散变量桁架结构的布局优化设计 [J]. 大连理工大学学报 ,1995 ,35(5) :458-462.
- [42] 谭中富 ,张作泉. 关于桁架结构布局优化理论和方法的探讨[J]. 科技通报 ,1995 ,11(3) :167-170.
- [43] KALYANMOY D ,SURENDRA G. Design of truss :structures for minimum weight using genetic algorithms[J]. Finite Elements in Analysis and Design 2001 ,37 :447-465.
- [44] KALYANMOY D ,SURENDRA G. Design of truss :structures

for minimum weight using genetic algorithms[J]. Finite Elements in Analysis and Design 2001 37 447-465.

[45] 唐文艳 , 顾元宪 , 李云鹏 . 遗传算法求解可行域分离的结构优化问题[J]. 力学学报 2003 35(3) 361-366.

[46] 唐文艳 , 顾元宪 , 郭旭 . 求解具有奇异性的桁架拓扑优化的遗传算法[J]. 计算力学学报 2004 21(2) :191-196.

[47] KAVEH A , KALATJARI V . Topology optimization of trusses using genetic algorithm , force method and graph theory[J]. Int J Numer Meth Engng 2003 58 :771-791.

[48] RYOO J , HAJELA P . Handling variable string lengths in GA-based structural topology optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization , 2004 , 26(5) 318-325.

[49] TOPPING B H V , KHAN A I , De BARROS L J P . Topological design of truss structures using simulated annealing[J]. Structural Engineering Review 1996 8(2/3) 301-314.

[50] 蔡文学 , 程耿东 . 桁架结构拓扑优化设计的模拟退火算法[J]. 华南理工大学学报 , 1998 26(9) 78-84.

[51] OĞUZHAN H , FUAT E . Layout optimization of trusses using simulated annealing[J]. Advances in Engineering Softwaer , 2002 33 681-696.

[52] 朱朝艳 , 刘斌 , 李艺 , 等 . 离散变量桁架结构拓扑优化的杂交算法[J]. 东北大学学报 2004 25(8) 800-803.

[53] 朱朝艳 , 刘斌 , 张延年 , 等 . 复合形遗传算法在离散变量

桁架结构拓扑优化设计中的应用[J]. 四川大学学报 , 2004 36(5) 6-10.

[54] RULE W K . Offshore structural topology synthesis by optimal growth[C]//ASME Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering-OMAE : Offshore Technology . New York :Academic Press ,1993 :339-343.

[55] 秦义校 , 唐风 . 桁架式臂架布局优化设计[J]. 港口装卸 , 1996(5) :1-5.

[56] Xu L , MIN H , SCHUSTER R M . Optimization design of cold formed steel residential roof trusses[C]//American Iron and Steel Institute . Fifteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures :Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction . MO :University of Missouri-Rolla Press 2000 393-410.

[57] ZHOU M , SHYY Y K , THOMAS H L . Checkerboard and minimum member size control in topology optimization[J]. Struct Multidisc Optim 2001 21(2) :152-158.

[58] 狄杰建 , 段宝岩 , 仇原鹰 , 等 . 周边式桁架可展开天线的形面调整[J]. 宇航学报 2004 25(5) 583-586.

[59] 吕大刚 , 王光远 . 结构智能优化设计 :一个新的研究方向[J]. 哈尔滨建筑大学学报 , 1999 33(4) :7-12.

(收稿日期 2004-12-16 编辑 骆超)

(上接第 39 页)

频率 , 对于尾水管涡带引起的压力脉动采样频率一般取 200 Hz 左右 ; 而对于转轮与导叶之间的测点及蜗壳进口处的测点 , 建议其采样频率至少应大于 1 000 Hz。

d. 压力脉动试验特别是验收试验时 , 应根据电站的水头变幅 , 推算出水轮机实际运行的空化系数 , 对于重要的运行工况 , 增加不同空化系数下的压力脉动试验。这不仅能为原型机组空化安全系数的选取提供更为科学、更切合实际的依据 , 也可为机组重要部件、建筑物等固有频率的计算提供有用的参考 , 以避免共振的发生。

参考文献 :

[1] 田锋社 . 混流式水轮机尾水管压力脉动验收考核浅析[J]. 水利水电技术 , 1999(10) 34-41.

[2] 徐珍懋 . 混流式水轮机高水头大负荷区域振动的分析[J]. 水电站机电技术 2003(4) 27-30.

[3] 覃延春 , 罗兴昧 , 郑小波 . 基于 CFD 技术的水轮机性能预估[J]. 水利水电科技进展 2004 24(7) 21-23.

(收稿日期 2004-12-30 编辑 骆超)

(上接第 75 页)

[15] 余天堂 , 姜弘道 . 基于 PVM 的网络并行子结构共轭梯度法[J]. 工程力学 2001 18(5) 29-35.

[16] 余天堂 , 姜弘道 . 多波前并行处理的弹塑性子结构并行有限元[J]. 计算力学学报 , 1999 16(4) 493-496.

[17] 刘耀儒 , 周维垣 , 杨强 , 等 . 三维有限元并行计算及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报 , 2005 24(14) :2434-2438.

[18] 张健飞 , 姜弘道 . 大型边界元方程组的并行直接分块求解算法[J]. 应用力学学报 2003 20(4) :129-132.

[19] 张健飞 , 姜弘道 . 适合求解边界元法方程组的 GMRES 算法的实用化和并行化研究[J]. 计算力学学报 , 2004 21(5) 620-624.

[20] FOSTER I , KESSELMAN C . 网格计算[M]. 2 版 . 金海 , 袁平鹏 , 石柯 , 译 . 北京 : 电子工业出版社 2004.

[21] 都志辉 , 陈渝 , 刘鹏 . 网格计算[M]. 北京 : 清华大学出版社 2002.

[22] 河海大学网格及高性能计算研究所 , 解放军理工大学网络研究中心 . 河海校园网格概要设计报告[R]. 南京 : 河海大学 2005.

[23] 河海大学网格及高性能计算研究所 . 河海校园网格建设任务书[R]. 南京 : 河海大学 2005.

(收稿日期 2005-11-07 编辑 骆超)