

优化设计方法在三峡工程船闸人字门设计中的应用

①
34-36

张宇力

(华南建设学院西院土木系 广州 510405)

U641.2

U641.33

摘要 综合运用罚函数法与DFP法,构成“混成法”。先利用可变容差法可行域宽松的特点,提供一种“近乎可行点”作为初值,然后人为地中断迭代过程,在初值结果的基础上,用DFP法将方程组线性化,使得迭代过程趋于稳定,当迭代进一步逼近最优解时,固定迭代步长,跳过柯西阵的修正,最后用罚函数判敛准则结束收敛。该法应用于三峡工程人字门船闸中,取得了很好的效果。

关键词 最优设计 三峡工程 船闸设计 罚函数法 DFP法

人字门

1 优化方法的选择

从优化问题的性质看,由工程设计变量的轨迹,可划分为动态规划与静态规划两大类。本文不考虑水的流体动力学的性态,只作静态规划的讨论。同时,水工结构问题中一般都存在各种限制条件,如强度、刚度、整体稳定、局部稳定、几何约束条件等,属于有约束的优化问题。故水工结构在静力荷载下的优化问题性质为包含待定系数的非线性静态约束优化。本文算例中三峡工程大船闸人字门的设计变量为主梁高度、面板厚度、主梁最小间距等均为单纯自变量,因函数表达式为非线性,故为非线性规划问题。解决这类问题的优化方法有:典范方向法、梯度法、二次规划法、罚函数法、DFP法、可变容差法等。

从优化方法的性态看,对于同属解决非线性约束优化的问题,当以直接搜索,试探—改善一再试探的方法向速度下降最快的方向靠拢时,对试算点的取法要求较严,收敛速度也较慢,只是当条件极值点靠近约束的边界时,收敛过程才加快。而水工结构问题中,出

于安全考虑,希望在约束条件留有一定的储备,如强度条件,不要靠近极限强度,而应留有一定的强度储备,也就是说,在可行域点不靠近约束的边界时,迭代过程也能稳定、迅速地进行。此时,可供选择的方法有Rosen法、罚函数法、DFP法、可变容差法等。本文将讨论比较罚函数法、DFP法、可变容差法。

a. 罚函数法。罚函数法分内点罚函数法与外点罚函数法。外点罚函数法允许极小点序列 $x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(k)}, \dots$ 从可行域外开始,初始条件比较宽松,但不能严格保证约束条件 $g_i(x) \leq 0$ 。从水工结构的观点看,这相当于某些设计值(例如闸门的挠度)有可能超出允许值,是不可取的。内点罚函数法初值必须从可行域内开始,约束能在罚因子逐渐下降时保证极小序列均位于可行域内。缺点是不能处理等式约束问题。由于水工结构问题多为不等式约束,故可以选用内点罚函数法。

b. DFP法。DFP法又称变尺度法,其实质是一种拟牛顿法,可以将多维问题化为一维问题进行处理,将非线性方程组在最优点的第 i 次近似值 x_i 处线性化,使得迭代过程

作者简介:张宇力,男,硕士,从事水工钢结构研究。

非常稳定,适用范围很广。缺点是需要反复修正迭代步长,其修正矩阵(柯西阵)的正定性取决于迭代的拟合精度和最大拟合次数。

c. 可变容差法。可变容差法利用可变多面体为“靶区”进行搜索迭代。在导函数表达式非常复杂,甚至无法用显式表达时,用该法可以避免求导。同时,可变容差法可以考虑等式约束条件。由于引入“近乎可行域”的概念,只要泛函数(目标函数的函数)小于容许误差准则值,则该法的可行性定义比之罚函数法、DFP法等都要松活得多。缺点是初始多面体的大小对收敛性影响较大,可调参数选择较困难,判敛精度要求高,源程序较冗长。但水工设计中初值的选取要求范围较宽,其“近乎可行域”的概念还是很有吸引力的。

2 “混成法”的引入及运用

“混成法”是在比较了上述各方法的优缺点之后,扬长避短,综合运用上述方法的一种尝试。

由于罚函数法的序贯过程使得问题的处理分段进行,故起步较慢,将大部分计算时间花在满足相当严格的可行性要求上。这时,可以先由别的起步迅速的优化方法,提供一种“近乎可行点”作为初值。当初值远离最优解时,罚函数法迭代速度较慢,而当迭代逼近最优解时,罚函数法收敛速度显著加快。因此,利用可变容差法“可行域”宽松的特点,先用该法准备初值并“初步逼近最优点”;由于该法迭代次数开始大大增加,收敛时间延长,为保证搜索方向的共轭性,其可调参数的选择要求趋于严格,此时,可人为地中断迭代过程,在初步结果的基础上,再用 DFP 法将方程组线性化,以修正的柯西阵的收敛形式来保证共轭性,这样,就避免了因可调参数的选择而带来的误差积累,使得迭代过程趋于稳定。而当迭代“进一步逼近最优解”时,固定迭代步长(既不再反复拟合),跳过柯西阵的修正,令: $H_{i+1} = H_i$,按下式进行迭代:

$$S_{i+1} = -H_{i+1} \nabla f_{i+1} \quad (1)$$

其中 H_i 为第 i 步时的近似柯西逆阵; ∇f_i 为目标函数的微分(第 i 步); S_i 为自变量差分 $x_{i+1} - x_i$ 。

罚函数的判敛准则为

$$\left| \frac{f(x_{k+1}^*) - f(x_k^*)}{f(x_k^*)} \right| \leq \epsilon \quad (2)$$

最终用上述判敛准则结束收敛。

三峡工程船闸人字门的优化设计,用罚函数法将主梁、次梁、面板等的约束条件转化为无约束条件,用 DFP 法将多变量问题转化为单变量问题。这实际上是将罚函数法与 DFP 法混合起来使用,而在此过程中,首先用 Powell 法进行直接搜索,得到迭代初值,然后,由“混成法”去最终逼近最优解。将最终结果与可变容差法的结果进行比较,证明这种方法是完全可靠的。

闸门优化设计采用的目标函数为

$$O_{bj} = (ALn + HLd + Hht)\rho \quad (3)$$

式中 O_{bj} 为闸门自重,目标函数; A 为主梁横截面面积的函数; L 为闸门计算宽度,已知; h 为主梁高度,未知数; n 为主梁根数,系主梁最小间距 b 的函数; H 为闸门高度,已知; d 为闸门面板厚度,未知数; t 为隔板厚度,未知数; ρ 为钢材密度,已知。

约束函数为

主梁强度

$$g(1) = \frac{N}{A} + \frac{M\rho}{I} \leq [\sigma] \quad (4)$$

主梁刚度

$$g(2) = \frac{5}{384} \times \frac{9L^4}{EI} - \frac{ML^2}{8EI} \leq \frac{L}{750} \quad (5)$$

面板厚度

$$g(3) = a\sqrt{\frac{kP}{0.9a[\sigma]}} - d \leq 0 \quad (6)$$

主、次梁联合工作

$$g(4) = \frac{M_2 - \frac{M_1 I_2}{I_1 + n_2 I_2 / n_1}}{W} \leq [\sigma] \quad (7)$$

式中 $[\sigma]$ 为材料允许应力; M_1 为主梁弯矩; M_2 为主、次梁联合工作时在次梁上的弯矩; W 为次梁截面抵抗矩; I_1, I_2 分别为主、次梁截面

惯性矩; n_1, n_2 分别为主、次梁根数。

将上述公式规范化以后,在门宽 20.2 m, 门高 39.75 m, 上下游最大水位差 37 m 的三峡工程大船闸实际工作条件下(系指五级船闸中的第一级),用前述优化方法进行闸门主梁、次梁、面板、横隔板的综合最优设计,并向长江流域规划办公室提供了优化结果。

从三峡闸门的实例计算来看,“混成法”所得出的最优解,最后两组数据的相对误差不超过 1/100 000,主梁最小间距、主梁高度、面板厚度、隔板厚度等自变量在迭代中的波动范围(即波峰数据与波谷数据之差)比之单纯的可变容差法或罚函数法都要小得多。计算时间缩短 1.0~1.5 倍。

用“混成法”计算闸门总重 324.4 t,用其它方法计算闸门总重量为 325~327 t。而按

常规设计(非优化方法)计算的闸门总重量达 594 t。

3 结 语

a. 通过各种方法比较及实例计算可以认为:将罚函数法与 DFP 法综合起来运用,是一种高效率的优化方法。特别对于目标函数和规范化之后的约束函数(仍具有显式表达,且变量个数比较少的情况),其迭代速度快,准备工作量少,可调参数很容易确定。

b. 通过对闸门的优化设计与常规设计的对比可知,船闸人字门的自重,很大程度上取决于闸门主梁的自重,主梁根数不宜过多,减少主梁根数或适当增加面板厚度或次梁根数是经济的。

(收稿日期:1996-11-26 编辑:许宇鹏)

·简讯·

21 世纪新能源——天然气水合物

本世纪 60 年代,一种新的烃类能源——天然气水合物为人类所发现。它的发现,给人们展示了新能源的曙光。

科学家的研究表明,天然气水合物是由气体分子和水分子组成的类冰固态物质。该物质具有高浓度、高储量的特点。单位体积的甲烷水合物在标准状态下可释放出 164 倍单位体积的甲烷气体。据科学家评估,陆地天然气水合物资源量为 $3.4 \times 10^{16} \text{ m}^3$;海洋天然气水合物资源量为 $7.6 \times 10^{16} \text{ m}^3$ 。天然气水合物的可产储量比煤、天然气、石油三者总和还多 1.658 万亿 t,其最大地质储量是常规可燃矿物资源的 2.84 倍。

天然气水合物是在高压和低温条件下形成的。科学家估算,地球上 27% 的陆地面积(主要在多年冻土区)和 90% 的海域中都具备天然气水合物生成的温度和压力条件。但是,天然气水合物的性质不稳定,一旦失控,会给人类带来灾害。

早在 1810 年,伦敦皇家研究院已经在室内合成了氯气水合物,但直到本世纪 60 年代,人们才认识到天然气水合物对能源和人类生存环境的巨大影响,许多国家才予以高度重视。1969 年,原苏联已开始开发麦索亚哈气田,近期美国准备开发阿拉斯加,日本准备开发海底天然气水合物。至今,国外已走过了天然气水合物的基本性质研究、勘探、储量评估阶段,正在研究集中开发手段。

国内,中国科学院的科学家于 1990 年与俄罗斯学者合作在室内成功地合成了甲烷气水合物,并于 1993 年发表了甲烷气水合物,并于 1993 年发表了甲烷气水合物的形成和分解温压条件的论文。

(摘自 1998 年 6 月 5 日《水信息》)