

水电站水道建筑群参数优化 数学模型的探讨

胡晓东 鞠晓明 李崇明 陈家远

(成都科技大学)

摘 要: 迄今所进行的水力系统参数选择均建立在分散系统和恒定流的基础之上。本文以抽水蓄能电站及有压引水式水电站为典型对象对水力系统各建筑物建立了整体参数优化数学模型,其后又针对该模型的目标函数不可求导、计算量大、维数多、非线性的特点,提出了“严格单纯形”法并取得了初步成功。

关键词: 整体参数优化,非恒定流分析,衬砌结构分析,“严格单纯形法”。

中国图书分类号: TV732

就抽水蓄能电站和引水式水电站而言,一般具有复杂的水力系统,它们的造价和建设工期在整个土建工程中有时会占到很大的比重,因此有必要进行深入的研究。

本文讨论有压水力系统。

这里,定义有压水力系统由有压引水隧洞、调压室、压力管道、有压尾水隧洞(有时包括尾水调压室)组成。

定义有压引水隧洞各段的洞径、调压室的稳定断面、各段压力管道的管径,各段尾水隧洞洞径为水力系统参数。

本文研究的基本前提:

- ①水力系统各组成建筑物已选定;
- ②水力系统各建筑物的位置、路线已选定;
- ③建筑物的型式已选定;
- ④地下结构的衬砌型式已选定。

因此文中不讨论如何确定上述诸方面的问题。如在方案比较阶段,需在上述诸方面给出不同组合的情况下进行水力系统参数优选,可参见作者另外的论文。

显然,在上述基本前提已定的情况下,如何进行水力系统参数选择仍然在较大程度上影响水力系统的造价与工期及电能损失等。迄今为止,人们只对上面定义的水力系统各建筑物分别进行了研究。本文根据系统理论中局部最优之和不等于整体最优的原理,把水力系统各建筑物作为整体并综合考虑它们涉及的各种因素,建立起一个整体参数优化数学模型,而后又提出了求解该复杂模型的方法。从而,本文提出的从建模到求解的一整套理论和方法,为水电站水力系统参数选择的研究和应用开辟了新的途径。

1 水力系统参数优化数学模型

1.1 概述

众所周知,前面定义的水力系统参数一方面将影响水力系统工程的造价、工期及电能损失与容量损失,另一方面也将影响系统的非恒定流特性一如调压室涌浪、压力管道水击、机组暂态不平衡率、机组调速系统稳定性等方面。如为满足某方面因素而调整水力系统参数则可能使另外的方面不满足,如各方面都满足要求但可能得到的水力系统参数不是最佳的,因而应建立一个模型群来解决这些问题。

在前述前提下,本文提出的数学模型包括:①优化主模型—选择最佳水力系统参数;②非恒定流分析子模型—计算调压室涌浪与压力管道水击并判断是否符合要求;③小波动分析子模型—计算小波动时机组调节系统的稳定性与衰减情况;④结构分析子模型—根据非恒定流分析子模型给出的水压荷载及其它已知条件计算衬砌结构并进行调整,然后给出工程量;⑤动能经济分析子模型—计算工程投资、运行费、容量与能量损失费并折换成可比性指标,送给优化主模型供选择。

1.2 数学模型

限于篇幅,文中只能介绍上述模型群依据的主要数学方程

1.2.1 优化主模型

目标函数: $\min C = \min[R \cdot C_i + C_o + C_e]$

其中: $R = \frac{r \cdot (1+r)^{my}}{(1+r)^{my} - 1}$

约束条件: $[\sigma_a] < \sigma < [\sigma_b]$

$$[t_a] < t_{th} < [t_b]$$

$$[D_a] < D < [D_b]$$

$$[h_a] < h_{ham} < [h_b]$$

$$[\beta_a] < \beta_r < [\beta_b]$$

$$[\Psi_{at}] < [\Psi_{at}]$$

其中: C —总年费用, C_i —工程总投资, C_o —工程年运行费, C_e —由于水力系统容量与能量损失引起的年费用, R —转换系数, r —投资利率, my —工程使用年限, σ 、 $[\sigma_b]$ 、 $[\sigma_a]$ —衬砌结构应力及其上下限, t_{th} 、 $[t_b]$ 、 $[t_a]$ —衬砌结构厚度及其上下限、 D 、 $[D_b]$ 、 $[D_a]$ —水道系统直径及其上下限, h_{ham} 、 $[h_b]$ 、 $[h_a]$ —水道系统水头增量及其上下限, β_r 、 $[\beta_b]$ 、 $[\beta_a]$ —机组转速变化率及其允许值, Ψ_{at} 、 $[\Psi_{at}]$ —机组小波动波幅、衰减率及其允许值。

上列各式中的变量均为列向量。

1.2.2 水力系统非恒定流数学模型

调压室—压力隧洞基本方程:

当设置气压式调压室,对于发电工况有:

$$\frac{dz}{dt} = A_o \cdot (Q_p - Q_{ut})$$

$$\left(\sum \frac{L_{uti}}{gA_{uti}}\right) \cdot \frac{dQ_{ut}}{dt} = Z - (P_a - P_o) - h_w - h_d$$

$$\frac{dP_a}{dt} = -\frac{m_e \cdot P_{ao} \cdot W_o^{me}}{W^{1+me}} \cdot (Q_p - Q_{ut})$$

式中: Z 、 A_a —调压室的水位和面积, t —时间, Q_p —压力管道流量, Q_{ut} —上游隧洞流量, L_{uti} 、 A_{uti} —第 i 段上游隧洞的长度和面积, h_w 、 h_d —上游隧洞及调压室阻抗孔口的水头损失, m_e —绝热指数, P_a 、 P_{ao} —调压室内的瞬时及初始气压 (m 水柱), w 、 w_0 —调压室内瞬时气体体积及初始值, P_o —大气压力 (m 水柱)。

对抽水蓄能电站的抽水工况可写出相应的方程, 对设置其它型式的调压室也可写出类似的微分方程。

上游压力管道的非恒定流可用如下特征线方程可具足够的精度—在设置气压式调压室时:

$$\begin{cases} \frac{dV_p}{dt} + \frac{g}{a_p} \cdot \frac{dH_p}{dt} + f \cdot \frac{V_p |V_p|}{2D_p} = 0 \\ \frac{dL_p}{Dt} = a_p \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dV_p}{dt} + \frac{g}{a_p} \cdot \frac{dH_p}{dt} + f \cdot \frac{V_p |V_p|}{2D_p} = 0 \\ \frac{dL_p}{Dt} = a_p \end{cases}$$

式中 g —重力加速度, a_p —水击波波速, V_p 、 H_p —压力管道流速及水头, L_p 、 D_p —压力管道长度及管径, f —达西摩擦系数, t —时间。

尾水管及下游隧洞可用类似的模型描述。

1.2.3 小波动稳定分析数学模型

对具气压式调压室的水力系统, 运用水力系统能量方程、调压室水流连续方程、调速器方程、机组运动方程可导出二阶微分方程组, 限于篇幅此处从略。对具其它型式调压室的水力系统亦可导出相应的小波动微分方程组。

1.2.4 衬砌结构分析子模型

据前述, 衬砌的结构型式选择是十分复杂的, 可由工程人员事先选择或用其它方法解决, 本文的分析早在衬砌型式已定的情况下进行。

①计算方法的选择: 隧洞及其它洞室的衬砌计算, 按各设计阶段的要求, 根据衬砌结构的特点、荷载作用形式、围岩和施工条件等, 可选用结构力学方法、弹性力学方法及有限单元方法进行分析。本文考虑暂不选用有限单元方法以节省计时。对 I 类围岩的衬砌选用弹性力学方法; 对 II、III 类围岩, 由于未涉及较大跨度和围岩很不均匀的情况, 一般选用结构力学方法, 对于 IV、V 类围岩均选用结构力学方法。

②对混凝土和钢筋混凝土衬砌的圆形有压隧洞衬砌计算方法按表 1 的分类进行, 计算机程序按所给的围岩、洞径、复盖厚度及衬砌型式选择相应的计算内容和计算公式。

园形混凝土衬砌隧洞的计算

表1

类别	条件	荷载	计算方法	衬砌型式	裂缝要求	计算内容
1.	I、II类围岩、 D<6m 复盖厚度>3·D	只计内水压力	弹性力学方法	混凝土	抗裂	厚度、混凝土应力
				双层钢筋 混凝土	抗裂	厚度、最小配筋率混凝土应力
					限裂	厚度、钢筋及其应力计算、缝宽
				单层钢筋 混凝土	抗裂	厚度、最小配筋率混凝土应力
限裂	厚度、钢筋及其应力计算、缝宽					
2.	与1.项条件不符	垂直山岩压力 衬砌自重满洞水压内水压力 弹性抗力	结构力学方法	混凝土	抗裂	厚度、混凝土应力
				双层钢筋 混凝土	抗裂	厚度、配筋计算混凝土应力
与1.项条件不符	垂直山岩压力 侧向山岩压力 衬砌自重满洞水压外水压力 内水压力	双层钢筋 混凝土			限裂	厚度、钢筋及其应力计算、缝宽
				单层钢筋 混凝土	抗裂	厚度、配筋、混凝土应力计算
限裂		厚度、配筋及其应力计算、缝宽				

③埋藏式压力钢管:可用衬砌在承压前后的变形相容条件等导出的公式计算钢衬厚度,并校核其外压稳定性。

④其它断面型式的有压洞衬砌计算:直接将衬砌结构计算化为非线性常微分方程组的边值问题,采用初参数数值解法。

⑤喷锚支护:对完整均匀、承内压的围岩,可按弹性力学方法计算喷混凝土厚度;对需控制塑性区开展的围岩可用弹塑性理论计算喷混凝土厚;对局部不稳定围岩可采用喷锚支护,可按冲切破坏计算喷混凝土厚,按平衡条件计算所需锚杆;对整体稳定性较差的围岩,可按组合拱理论计算喷混凝土厚度和所需锚杆;对构造裂隙发育的围岩可设喷锚加钢筋网衬砌。

⑥关于荷载及其组合:本文按设计阶段要求计及如下荷载:山岩压力、衬砌自重与水重、满洞水压力、内水压力、外水压力、灌浆压力、地震力、地层弹性抗力;按完建期、运行期和特殊时期进行组合。

1.2.5 动能经济分析子模型

整个水力系统的水头损失具如下形式:

$$\Delta H = Q^2 \cdot f_{\Delta H}(D_{ut}, D_p, D_{dt})$$

其中 Q —流量, D_{ut} 、 D_p 、 D_{dt} —分别为上游隧洞、压力管道、尾水隧洞的直径。

再根据电站的流量历时曲线可算得典型年均容量与能量损失, 如考虑用燃煤电站作替代电站, 可算得其容量投资、年运行费和年燃料费。

2 数学模型的求解与程序

2.1 求解原理

2.1.1 调压室涌浪与小波动分析微分方程组均可用四阶龙格—库塔法求解; 压力管道非恒定流特征线方程可用差分法求解。

2.1.2 优化主模型的求解

上面建立的整体优化模型是一带不等式约束的高维非线性数学优化问题。该模型的求解和计算机实现存在如下困难: 目标函数需求数值解、计算量大、耗机时, 无法利用目标函数导数, 变量数目多。因此我们希望在求解本问题时: ①计算目标函数的次数少; ②仅需利用目标函数值的信息; ③循环次数少, 收敛速度快; ④求解方法简明有效, 易于编制程序和调试。实际上, 这也是一类典型的复杂工程优化问题的一般要求, 而目前的各类求解方法均难满足上述要求, 这就是我们提出“严格单纯形法”的出发点, 此外限于篇幅不能作详细介绍。经与具有类似功能的“复合形法”比较, 计算机时节约达 56%, 目标函数精度仅比“复合形法”大 2% (千分之二)。

2.2 计算机程序设计

上述模型均由计算机实现, 介绍从略。

3 算例

某抽水蓄能电站装机 2×30 万千瓦, 最大水头 625m, 引、尾水道总长为 6100m, 调压室方案之一为气压式。调压室与机组间的压力管道设两根, 各长 600m。两台机尾水管延伸 80m 后汇入一条尾水隧洞, 尾水隧洞长 220m。引水隧洞和压力管道的衬砌与分段情况是 (已由设计人员先确定): $L_{u1} = 1400$ m, 钢筋混凝土衬砌; $L_{u2} = 1600$ m, 喷锚支护; $L_{u3} = 1700$ m, 钢筋混凝土衬砌; $L_{u4} = 500$ m, 钢衬; 压力管道分为三段: $L_{p1} = L_{p2} = L_{p3} = 200$ m, 钢衬; 尾水洞为钢筋混凝土衬砌。电站在典型年冬季口抽水 5 小时、发电 5 小时 (未全部满发), 其余节口抽发各 4 小时 (未全部满发), 各洞径的上下限见表 2。算例中未加入小波动稳定分析子模型。

表 2 各洞径的上、下限

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dmin(m)	4.60	4.60	4.60	4.60	3.00	3.00	3.00	3.30	4.60
Dmax(m)	7.20	7.20	7.20	7.20	4.40	4.40	4.40	5.00	7.20

用严格单纯形法算得的水力系统参数为:

洞径: $D^* = \{5.55, 7.11, 5.53, 5.81, 3.99, 3.72, 3.92, 4.25, 6.56\}$

调压室初始容积: 8348M^3 (气室高度不同则有所不同),

调压室初始气压: 575M 水柱;

调压室稳定断面: 当气室高 5 米, 则为 1670M^2

当气室高 10 米, 则为 839M^2

当气室高 15 米, 则为 563M^2

当气室高 20 米, 则为 425M^3

当气室高 30 米, 则为 286M^3

当气室高 40 米, 则为 217M^3

设计人员可根据地质情况和是否有施工洞室可利用的情况, 选择气室高度和相应的面积。

4 结 语

4.1 本文将整个水力系统作为一个整体考虑, 综合各方面的因素, 提出了水电工程优化设计的新课题并进行了有效的尝试。

4.2 作者亦对一类复杂工程优化问题提出了“严格单纯形”的算法, 大大加快了收敛速度, 此法的完善将给最优化计算方法的研究注入新内容。

本课题还有待继续深入探索。

参考文献 (略)

Exploration of the Optimal Model of the Parameters of the Water waystructures

Hu Xiaoding Ju Xiaoming

Li Chongming Chen Jiayuan

(Chengdu University of Science and Technology)

Abstract: Up to now, the aetermination of the parameters of hydraulic system is based on the discrete system and steady flow. This paper take pumped storage station and diversion type power station as typical objects of study and gives out a global optimal model of the parameters of the water way structures. As far as the charachteristic of that the model can not be derivated, takes lots of computation time, is multidimensional and is non-linear, this article also advances the “Strictly Simplex Method” to solve the model has received success.

Key Words: Global optimization of parameters, Non-steady flow analysis, Lining structure analysis, Strictly simplex Method.