

# 解析法在增容改造工程中的运用

陈祖文

(中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院, 贵阳 550081)

**摘要:** 本文以猫跳河红林水电站增容改造工程为例,运用数学解析法对机组水头、引用流量、出力之间的关系进行了系统研究,推导出了机组出力的函数关系式。按出力最大化原则拟定了改造方案,最后通过运行稳定性分析和经济效益比较对改造方案进行了综合论证,科学的数学计算及推理论证为增容改造工程优化设计提供了借鉴。

**关键词:** 水力机械;水电站;解析法;增容改造;水头;流量

中图分类号: TK730.2

文献标识码: A

## Application of analytical method to capacity expansion of hydropower project

CHEN Zuwen

(Hydrochina Guiyang Engineering Corporation, Guiyang 550081)

**Abstract:** In this paper a mathematical analysis method is adopted to develop relationships between head, flow and output of turbine, and a function of turbine output is derived for the capacity expansion of Honglin hydropower on Maotiao river. Preliminary schemes were determined by the principle of output maximization, and then a comprehensive study on these schemes was conducted through an analysis of operation stability and an economic comparison. This work provides a reference for optimization design of capacity expansion and hydropower renovation.

**Key words:** hydraulic machinery; hydropower station; analytical method; capacity expansion; water head; flow rate

### 0 前言

解析法,是通过分析问题中各要素之间的关系,用最简练的语言或形式化的符号来表达它们的关系,得出解决问题所需的表达式,然后设计程序求解问题的方法。解析法是一种定量分析方法,它较定性分析更加科学、精确、客观和严密。

增容改造工程设计是以工程现有条件为约束,通过一个合理的设计方案使得工程后续运行能够获得最大的效益。从解析法的角度来分析,增容改造工程设计的实质就是以工程的不变部分为已知条件,以工程的可变部分为变量,求效益的最大值。本文以猫跳河红林水电站增容改造设计为例,简述解析法在工程设计中的运用。

红林水电站为贵州省猫跳河流域的第五个梯级,为一引水式电站,主引水隧洞长 5089.6m,隧洞直径 6.0m,原设计流量  $96.6\text{m}^3/\text{s}$ ,机组额定水头 142.4m。电站原安装 3 台混流式水轮发电机组,装机容量为  $34\text{MW} \times 3$  台。电站已经过 30 余年的长期运行,目前机组设备老化严重、出力不足、检修频繁、汛期弃水严重。本工程改造的主要目的是充分利用电站现有条件,增加机组出力,提高经济效益。

### 1 设计思路

首先对红林水电站改造范围进行分析研究,通过技术、经济、效益综合比较认为大坝、引水隧洞、调压井及压力钢管等水工结构不适合做大规模改动,仅对破损处进行加固和修补。工程充分利用现有的水工结构,结合水库

收稿日期: 2010-06-22

作者简介: 陈祖文(1980—),男,工程师。E-mail: chzwen@ghidri.com.cn E-mail:

特性,完全依靠机组本身性能的提高来达到增容的目的。水轮机出力由水头、流量和效率三个因素决定的,机组的效率完全取决于水轮机转轮及流道特性,因此,新选择的水轮机转轮,必须适合现有流道特性且具有较高的加权平均效率。

如果把效率认为是转轮本身属性,可以认为是已知条件,故影响水轮机出力大小的只有水头和流量。本电站改造的一个主要目的是利用汛期弃水,通过加大机组引用流量提高出力,但流量增大会导致水头损失增加,水头反而降低。由此可见,流量增加,出力并不一定增大,只有在流量和水头达到最合理的匹配时,水轮机才可能具有最大的出力。根据上述特点,本工程的设计可以模拟成一个数学模型,求解在满足水工结构强度和运行稳定性的要求下,水轮机出力最大时的流量及水头。

## 2 解析法模型

### 2.1 出力拟定的原则

在满足电站原有水工结构、流道特性及机组安全稳定运行的条件下,在一定引用流量及其相应水头下,机组能达到的最大出力确定为额定出力,将此时的水头定义为机组的额定水头。这时电站的装机容量达到最大,若电站装机大于这个出力值,则电站机组永远达不到满发,从而造成投资浪费;反之,若装机小于这个出力值,则电站水能没有被有效利用,造成资源流失。

### 2.2 流量与水头的关系

本电站具有长距离的引水发电系统,沿程水头损失较大,机组水头受引用流量的影响较大。机组净水头可以表示为  $H_{\text{净}} = H_{\text{毛}} - \Delta H$ ,式中  $H_{\text{毛}}$  为毛水头,等于上下游水位差,  $\Delta H$  为水头损失,其中  $\Delta H = kQ^2$ ,  $k$  为水头损失系数,  $Q$  为机组引用流量。从净水头计算公式可以得出,在引水洞径已定的情况下,随着电站引用流量加大,压力引水系统的水力损失相应增大,在电站毛水头变化不大的情况下,电站净水头随之下降,当流量增加到一定程度时,电站净水头下降幅度加剧<sup>[1]</sup>。

为了研究红林水电站一洞三机引水系统中每一台机的流量与水头之间的关系,设 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 机组的引用流量分别为  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ ,引水隧洞与压力主管水头损失系数为  $k_0$ , 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 机主支管损失系数为  $k_{23}$ ,各支管损失系数分别为  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ ,则各机组的净水头  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  可用(1)式表示。

$$\begin{aligned} H_1 &= H_{\text{毛}} - k_0(Q_1 + Q_2 + Q_3)^2 - k_1Q_1^2 \\ H_2 &= H_{\text{毛}} - k_0(Q_1 + Q_2 + Q_3)^2 - k_{23}(Q_2 + Q_3)^2 - k_2Q_2^2 \\ H_3 &= H_{\text{毛}} - k_0(Q_1 + Q_2 + Q_3)^2 - k_{23}(Q_2 + Q_3)^2 - k_3Q_3^2 \end{aligned} \quad (1)$$

本电站水库无调节性能,上游水位基本维持不变,长期在正常蓄水位 1030m 左右运行,而下游水位受流量控制,按电站下游水位流量关系规律变化。通常当流量在一定的区间内变化时,尾水位流量关系可以近似拟合为一个一次函数,即  $y = kx + b$  的型式 ( $k \neq 0$ ,  $k$  为斜率,  $b$  为截距)。设  $WL_U$ 、 $WL_D$  分别表示电站上、下游水位,则电站毛水头可用(2)式计算。

$$H_{\text{毛}} = WL_U - WL_D = WL_U - \lambda(Q_1 + Q_2 + Q_3) - B \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为比例系数,  $B$  为常数,对于红林水电站取  $WL_U$  等于 1030m。

### 2.3 出力与流量、水头之间的关系

上述(1)、(2)式表达了水头、流量之间的关系。设  $N$  为水轮机出力、 $H$  为净水头、 $Q$  为流量、 $\eta$  为水轮机效率,则水轮机出力可以用公式  $N = 9.81HQ\eta$ <sup>[2]</sup> 计算。设 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 水轮机出力分别为  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ ,为使本电站增容改造后能取得最大的发电效益,即三台水轮机出力之和最大,设  $N_{\text{总}}$  为电站水轮机总出力,则有(3)式。

$$\begin{aligned} N_{\text{总}} &= \text{MAX}(N_1 + N_2 + N_3) \\ N_1 &= 9.81H_1Q_1\eta_1 \\ N_2 &= 9.81H_2Q_2\eta_2 \\ N_3 &= 9.81H_3Q_3\eta_3 \end{aligned} \quad (3)$$

上述(1)~(3)式用流量和水头表示了每台机组的出力及电站总出力,而水头又表示为流量的函数,将求解电站最大装机容量变为求解函数  $N_{\text{总}}$  最大值时的流量值。

## 3 函数求解及方案初拟

红林水电站增容改造方案主要是研究  $N_{\text{总}}$  最大时的  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$  值,及各机组对应的流量和水头,将一个改造

工程的设计用上述(1)~(3)函数关系来表示,求解这个函数所得的结果即为最优的改造方案。

由于水头可表示为流量的函数,该解析式中的自变量只有机组的流量,即 $Q_1、Q_2、Q_3$ ,故该函数求解的实质为一个三元三次方程求极值的过程。函数计算的数学过程较为复杂,在实际工作中可以编制计算机程序来快速求解。通过仔细分析研究发现,自变量 $Q_1、Q_2、Q_3$ 其实是一个限定值,其始终在一个很小的区间内变化,故可以通过取若干组数值进行试算求解。

### 3.1 流量 Q 值分析

红林水电站机组增容改造有两个主要限制要求,一是新更换的转轮必须适应原有电站的流道,水轮机转轮直径不变,仍为 2m;二是机组增容改造后引用流量可能增加,但必须满足水力过渡过程稳定性能。这两个约束条件决定了机组流量并不能太大,而是对最大值有限定要求。

红林水电站最大水头为 147m,根据对流道适应性及水轮机效率进行研究,主机厂推荐采用水科院 JF2389 转轮作为改造转轮,该模型转轮限制工况最大单位流量为  $0.8\text{ m}^3/\text{s}$ 。由公式  $Q = Q_{11} D_1^2 \sqrt{H}$  计算得,水轮机最大引用流量一定小于  $38.8\text{ m}^3/\text{s}$ ,式中  $Q_{11}$  为模型转轮单位流量,  $D_1$  为真机转轮直径。

根据机组改造前额定流量数值  $32.2\text{ m}^3/\text{s}$ ,在流量  $Q = 32.2\text{ m}^3/\text{s} \sim 38.8\text{ m}^3/\text{s}$  之间分别选取多组  $Q_1、Q_2、Q_3$  数据计算  $N_{\text{总}}$  值,以分析电站水轮机总出力随每台机组引用流量的变化规律。通过对自变量  $Q$  的取值范围研究,将一个复杂的函数解析式极值的求解变得容易许多。多组不同数值计算结果表明,3 台机组总引用流量越大,则机组总出力越大,说明流量小于  $38.8\text{ m}^3/\text{s}$  时,该函数不收敛,也就是说流量增加的速率大于水头下降的速率。通过计算机分析表明,只有在三台机总流量大于  $210\text{ m}^3/\text{s}$  时,电站出力才开始下降,理论上此时电站的装机达到最大。

### 3.2 线性内插法求解流量

根据流量  $Q$  值的分析结果,总引用流量最大时电站可获得最大装机,即每台机的引用流量应尽可能接近  $38.8\text{ m}^3/\text{s}$ ,但根据最大水头的定义<sup>[3]</sup>可知,转轮实际能达到的流量总是小于这个流量值的。为了求解电站实际出力最大时每台水轮机的流量及水头值,采用线性内插法进行计算。首先分别对每台机组在流量接近  $38.8\text{ m}^3/\text{s}$  值附近各取两个相邻的流量值  $Q_{r1}、Q_{r2}$ ,根据式(1)、式(2)计算出各自的水头  $H$ ,然后用下式(4)计算出各自对应的单位流量  $Q_{11-1}$  和  $Q_{11-2}$ 。

$$Q_{11} = Q_r / (D_1^2 \sqrt{H}) \tag{4}$$

为了进行内插法计算,必须满足  $Q_{11-1} \leq Q_{11} \leq Q_{11-2}$ ,  $Q_{11}$  为 JF2389 转轮的 95% 出力限制线处的单位流量。线性内插法计算示意图见图 1。

由图 1 可看出,所要计算的  $Q_r$  值在  $Q_{r1}、Q_{r2}$  之间,为简化计算,将  $Q_{11-1}$  和  $Q_{11-2}$  之间的曲线视为直线,通过相似三角形对应边的比例即可在  $Q_{r1}$  和  $Q_{r2}$  之间内插解出  $Q_{11}$  对应引用流量的近似值。机组引用流量内插法计算见式(5)。

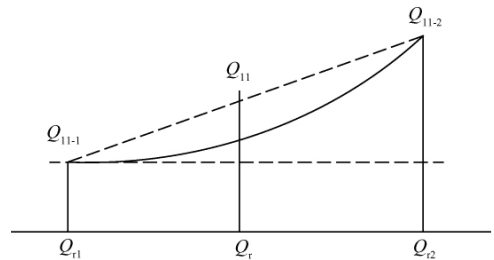


图 1 线性内插法计算示意图  
Fig.1 Schematic of linear interpolation

$$Q_r = Q_{r1} + \frac{(Q_{11} - Q_{11-1})}{(Q_{11-2} - Q_{11-1})} \times (Q_{r2} - Q_{r1}) \tag{5}$$

将计算的  $Q_r$  值再带入(1)、(2)式求解出  $H$ ,然后用(4)式计算对应单位流量  $Q_{11}$ ,判断是否等于限制单位流量。若超过或偏小,则对  $Q_r$  值做同向微调使之满足要求。通过上述方法可计算出 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 机组的最大引用流量和对应水头。

### 3.3 增容方案初拟

由上述解析法研究结果,根据电站出力拟定的原则,计算得红林水电站达到最大装机时各机组的引用流量、水头、水轮机出力等参数,见表 1。

由于红林水电站 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 机组的引水支管水力损失相差不大,计算出的水头及流量十分接近。水轮机最大出力为 44.77~45.03MW,取发电机效率为 97.5% 时,计算得发电机容量为 43.67~43.9MW,各台机发电机容量

表 1 红林水电站增容改造方案计算结果

Table 1 Calculations of Honglin hydropower capacity expansion scheme

项 目	1 <sup>#</sup> 机	2 <sup>#</sup> 机	3 <sup>#</sup> 机
流量 $Q_r / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	37.06	37.09	37.02
水头 $H / (\text{m})$	134.15	134.37	133.85
额定转速 $n_r / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	428.6	428.6	428.6
单位转速 $n_{11} / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	74.01	73.95	74.09
单位流量 $Q_{11} / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.799	0.799	0.8
模型效率 $\eta_m / (\%)$	92.0	92.0	92.0
水轮机出力 $N / (\text{MW})$	44.92	45.03	44.77

相差不大,考虑一定裕度本电站发电机额定容量均定为44MW。

## 4 改造方案确定

由上述第3节分析结果,红林水电站1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>机组水轮机最大出力分别为44.92 MW、45.03 MW、44.77 MW,此时电站的装机容量达到最大。现需要对该增容改造方案的技术可行性和经济合理性进行判断。

### 4.1 技术可行性

3台机全部增至最大容量后,每台水轮机的引用流量较改造前增加了约 $4.9\text{ m}^3/\text{s}$ ,增幅约为15%,技术可行性主要分析机组增容改造后能否满足整个水力系统的稳定性。根据水力过渡过程仿真计算结果,调压井最高涌浪、最低涌浪、机组调节保证计算值均能满足规范要求<sup>[3]</sup>,但机组在孤网大负荷运行时系统小波动不稳定,在上游低水位时第三台机增负荷和死水位下3台机组同时甩负荷时引水道顶部最低水压力裕度偏低,不满足规范不小于 $2\text{ m}\cdot\text{H}_2\text{O}$ 的要求。考虑不稳定工况出现的几率及特点,在不增加工程投资、对发电效益影响很小的情况下,采取一定控制措施能够保证电站稳定运行,如限定第三台机增负荷的速率及投入的初始条件,限制上游死水位时电站机组投运的台数等。通过本电站稳定性分析研究、参考类似工程实际运行经验,该增容改造方案在技术上是完全可行的。

### 4.2 经济合理性

经济合理性主要通过横向比较,与其他增容改造方案从投资和经济效益角度进行对比,即互斥型方案选择。本电站除上述拟定的3台机均增至最大容量方案外,还可有下述两种方案可供选择。

1. 只对其中1~2台机组进行增容,另外机组容量保持不变;
2. 每台机组均适当幅度增容。

对于方案1,根据解析法研究结果,为提高电站装机,增容机组引用流量尽可能接近 $38.8\text{ m}^3/\text{s}$ ,对于不增容机组容量保持不变,取流量值进行试算,以得到每台机组的流量、水头和水轮机出力。部分机组增容改造方案计算结果见表2。

表2 部分机组增容改造方案计算结果  
Table 2 Typical calculations of units capacity expansion scheme

项目	仅1台机增容改造			仅2台机增容改造		
	1 <sup>#</sup> 机	2 <sup>#</sup> 机	3 <sup>#</sup> 机	1 <sup>#</sup> 机	2 <sup>#</sup> 机	3 <sup>#</sup> 机
流量 $Q_i / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	27.82	27.83	37.5	28.12	37.32	37.24
水头 $H / (\text{m})$	138.02	138.12	137.16	136.33	135.98	135.46
额定转速 $n_i / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	375	375	428.6	375	428.6	428.6
单位转速 $n_{11} / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	63.84	63.82	73.19	64.23	73.51	73.65
单位流量 $Q_{11} / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.592	0.592	0.8	0.602	0.8	0.8
模型效率 $\eta_M / (\%)$	94.7	94.7	92.0	94.8	92.0	92.0
水轮机出力 $N / (\text{MW})$	35.71	35.75	46.44	35.69	45.85	45.58

对于方案2,由于需要对每台机均进行增容改造,但机组总容量与方案1相当,机组投资较方案1高,效益明显较差。通过各方案经济效益综合比较表明,改造工程总投资随装机容量的增加依次增加,多年发电量也依次增多,单位千瓦投资随装机容量增加而减小。由于3台机同时增至最大容量时,年发电量最大,保证出力最高,费用效益比最小,在限定部分运行工况后,电站能够安全稳定运行。故推荐红林水电站三台机全部增容改造,发电机额定容量为44MW。

## 5 结语

增容改造是在电站现有条件下充分挖掘其潜力,设计思路与传统工程正好相反,红林水电站利用数学解析法分析论证了增容改造方案,从定性分析变为定量计算,计算结果更加精确,设计思路更加清晰,充分体现了设计方案的科学性。通过技术可行性和经济合理性分析,从众多设计方案中遴选出较优方案,保证了效益费用比的最大化,使得增容改造电站能够获得较大的经济效益。

(下转至第240页)

- [2] 唐智明,侯渡舟. 国际工程承包企业核心竞争力形成与发展研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2007.  
TANG Zhiming, HOU Duzhou. the research on the formation and development of the core competitiveness of International engineering contractors[D]. Xi-an: Xian University of Architecture and Technology, 2007. (in Chinese)
- [3] 王建华,王方华. 企业竞争力评价系统及应用研究[J]. 管理科学与工程,2003,(2):47~53.  
WANG Jianhua, WANG Fanghua. the study of the enterprise competitiveness evaluation system and application [J]. Management Science and Engineering, 2003,(2):47~53. (in Chinese)
- [4] 许正良,王利政. 企业竞争优势本源的探析[J]. 吉林大学社会科学学报,2003,(5):99~106.  
XU Zhengliang, WANG Lizheng. the original analysis of the origin of the competitive advantage [J]. Social Science Journal of Jilin University, 2003,(5):99~106. (in Chinese)
- [5] 李显君. 国富之源—企业竞争力[M]. 北京:企业管理出版社,2002.1.  
LI Xianjun. the origin of the wealth of nations—the competitiveness of enterprises [M]. Beijing: Enterprise Management Press, 2002.1. (in Chinese)
- [6] 王毅. 企业核心能力与技术创新战略[M]. 北京:中国金融出版社,2004.8.  
WANG Yi. the core competence and the strategy of the technical innovation [M]. Beijing: China Finance Press, 2004.8. (in Chinese)
- [7] 金碚. 论企业竞争力的性质[J]. 中国工业经济,2001,(10):5~10.  
JIN Bei. the study of the nature of the competitiveness of enterprises [J]. China Industrial Economy, 2001,(10):5~10. (in Chinese)
- [8] 申立银,谭永涛,李启明. 中国建筑企业竞争力参数模型[J]. 建筑经济,2002,(3):8~11.  
SHEN Liyin, TAN Yongtao, LI Qiming. the parameter model of the competitiveness of Chinese construction enterprises [J]. Construction Economy, 2002,(3):8~11. (in Chinese)
- [9] 关柯,张德群,张兴野. 建筑业经济新论[M]. 重庆:重庆大学出版社,2007.1.  
GUAN Ke, ZHANG Dequn, ZHANG Xingye. the new economic theory of the construction industry [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2007.1. (in Chinese)
- [10] 李小冬,关柯,赖熹. 大型承包商国际竞争力的综合评价及其模拟分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2004,(10):1354~1357.  
LI Xiaodong, GUAN Ke, LAI Xi. the comprehensive evaluation and simulation analysis of international competitiveness of top contractors [M]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004,(10):1354~1357. (in Chinese)
- [11] 王建华,王方华. 企业竞争力评价的指标体系研究[J]. 软科学,2002,(3):63~66.  
WANG Jianhua, WANG Fanghua. the research on the index system of enterprise competence evaluation [J]. Soft Science, 2002,(3):63~66. (in Chinese)
- [12] 王秀丽. 企业核心竞争力的评价方法体系研究[M]. 北京:中国财政经济出版社,2007.6.  
WANG Xiuli. the study of the evaluation methodology of enterprise's core competitiveness [M]. Beijing: China Financial and Economic Publishing House, 2007.6. (in Chinese)
- [13] 田金信. 建筑企业管理学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.  
TIAN Jinxin. the management of construction enterprises [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1998. (in Chinese)

(上接第225页)

#### 参考文献:

- [1] 王立志,罗宏图. 长距离引水式电站无法达到额定装机的现象研究[J]. 黑龙江水利科技,2008,36(1):14~15.  
WANG Lizhi, LUO Hongtu. Study on Long-distance and diversion power station unable to reach the installed capacity [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2008,36(1):14~15. (in Chinese)
- [2] 刘大凯. 水轮机[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997.  
LIU Dakai. Turbine [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1997. (in Chinese)
- [3] DL/T 5186-2004. 水力发电厂机电设计规范[S].  
DL/T 5186-2004. Electrical mechanical design code of Hydropower Plant[S]. (in Chinese)