

水电站调压室设置必要性判式的分析研究

王治中,王建林,赵毅力

(杨凌职业技术学院,陕西 杨凌 712100)

[摘要]【目的】探寻一个更为直接、细化的考虑多因素的水电站调压室设置的必要性判式。【方法】在分析和理解传统的水电站调压室设置判式的基础上,阐述了其在实际应用过程中需反复调整参数及未直接考虑材料强度的不足,依据设备允许的承压要求提出新判式,并对新判式的实用性进行了验证。【结果】利用新判式计算结果更为符合工程实际,达到了预期的研究目的。【结论】新判式可提供一个较为客观准确的“数量值”,作为调压室设置与否的判据。

[关键词] 水电站;调压室设置;必要性判式

[中图分类号] TV732.5

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2008)08-0218-05

Analysis on the necessary formula of setting up surge tank for hydropower station

WANG Zhi-zhong, WANG Jian-lin, ZHAO Yi-li

(Yangling Vocational and Technical College, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 The study probed into a more direct and detailed formula of setting up surge tank of hydropower station. 【Method】 On the basis of analysing traditional formula, which didn't take account of repeatedly adjusting parameters and the strength of material, a new formula was put forward according to the equipments' pressure-tolerance. 【Result】 The new formula agrees with reality, achieving the aim of the study. 【Conclusion】 The new formula can provide an objective and correct value, and can be regarded as the discriminant for setting up surge tank.

Key words: hydropower station; setting up surge tank; necessity formula

调压室一般是建筑在水电站压力引水道与高压管道相接处的一个能造成水击波反射的平压建筑物,其可防止水击波传播到压力引水道中去,减少高压管道中的水击值,当水电站负荷变化时,可改善机组的运行条件^[1-3]。因此,调压室是水电站建设中一个不容忽视的建筑物。然而,调压室又是一个拥有较大体积、施工技术要求较高、造价较大的建筑物,其几乎占引水系统投资的 $1/4 \sim 1/5$ ^[4-7],是否需要设置调压室是水电站建设中应当认真分析解决的一个问题。迄今为止,相关规范对要否设置调压室提

出过多种近似估计的判式^[8]。这些判式随着时间的推移、科学技术的发展及材料强度和机组制造水平的提高,越来越凸显出其粗略性、影响因素的单一性和局限性,而且在具体调保计算过程中需反复修正输水系统的布置及相关参数,试算工作量很大。可见,建立一种简便、实用的判式在实际工程设计中有非常重要的实际意义。为此,本研究在对已有调压室设置的判别准则分析理解的基础上,探寻出一个相对细化、多参数同时考虑、更为直接、避免重复核算的判式,以为相关设计人员提供参考。

* [收稿日期] 2007-09-14

[基金项目] 国家冻土工程重点实验室项目(9901)

[作者简介] 王治中(1952-),男,陕西洋县人,副教授,主要从事水电站规划设计研究。

1 对已有调压室设置判式的分析与理解

1.1 调压室设置判式的演变

1) 20世纪60年代前苏联水电站建设规范^[9]需要设置调压室的判式为:

$$K = \frac{\sum LV}{H} \geq 5 \text{ m/s.} \quad (1)$$

式中: K 为调压室设置的限制范围; L 为压力引水道的长度(m); V 为相应引水道各管段的流速(m/s); H 为机组相应的工作水头(m)。

2) П. П. 阿尔贡诺夫判式:

$$K = \sum LV > 5.6 N^{0.2} H^{0.75}. \quad (2)$$

式中: N 为机组弃荷前的出力(kW)。

3) J. G 布朗判式。当机组丢弃全部负荷时, 压力引水系统考虑设置调压室的判式为:

$$K = \frac{\sum LV}{H} \geq 15 \sim 18 \text{ m/s.} \quad (3)$$

4) 法国和日本水电站建设规范中规定考虑设置

调压室的判式^[9]为:

$$K = \frac{\sum LV}{H} \geq 45 \text{ m/s.} \quad (4)$$

5) 进入20世纪70年代后, 世界各国都用水流惯性时间常数和机组速率作为设置调压室的判式^[10]。

$$T_w = \frac{\sum LV}{gH} \geq 1.8 \sim 6.0 \text{ s.} \quad (5)$$

式中: T_w 为水流惯性时间常数(s); g 为重力加速度(m/s²)。

$$\beta_m = \sqrt{1 + \frac{365 N_0 T_s' f}{GD^2 n_0^2}} - 1. \quad (6)$$

式中: β_m 为机组速率升高值; N_0 为机组的额定出力(kW); T_s' 为机组由全开至全关的关闭时间(s); f 为水锤影响系数; GD^2 为飞轮力矩(N·m²); n_0 为机组的额定转速(r/min)。式(5)或式(6)成立时, 可考虑设置调压室。

目前, 各国采用的速率升高值如表1所示:

表1 世界各国采用的 β_m 升高值

Table 1 Elevated value adopted by nations worldwide

国名 Nation	β_m	国名 Nation	β_m	国名 Nation	β_m	国名 Nation	β_m
美国 The United States	0.65	日本 Japan	0.50	奥地利 Austria	0.45	加拿大 Canada	0.70
前苏联 Former Soviet Union	0.60	法国 France	0.60	中国 China	0.45		

1.2 已有调压室设置判式的分析

从上述调压室设置判式的演变可以看出, 传统判式仅仅从水力学的条件出发, 考虑如何免除水击对压力管道的影响, 没有充分考虑到材料强度、机组的制造工艺等因素, 也就是说没有将设备能承受的水压纳入到调压室设置的判式中。但是人们已经逐渐注意到, 随着时间的推移, 判式条件愈来愈“宽松”, 判式的限制范围 K 的取值愈来愈大, 由15增大到45, 甚至达到50。目前, 采用水流惯性时间常数和机组速率升高值联合作为调压室设置判式更趋全面合理, 因为该判式一方面考虑了稳定运行时机组的调节性能与有限波动调节, 保证计算的相互补充; 另一方面可促使水工人员与机电人员共同协作, 保证调压室功用的充分实现。众所周知, 设置调压室目的的充分实现不是单靠水工建筑物所能凑效的, 其与机电设备及保护装置密切相关^[11-13]。上述(1)~(4)判式均是极其粗略的估计, 判式中的基本表达式 $\sum LV/H$ 的推导均是在许多理论假设的基础上得出的, 考虑影响的因素极其有限。

以下为已有判式的推导过程^[14]。

首先, 假定水电站水头 $H < 300$ m; 假定压力水管的特性常数 $\delta < 0.5$; 假定在前述2个假定的前提下认为一定发生末相水击。在上述假定的基础上按照末相水击的简化公式^[6], 导出另一等价形式的 K 值计算式, 即:

$$\xi_m = \frac{2\delta}{2-\delta}. \quad (7)$$

式中: ξ_m 为末相水击的相对升高值; δ 为水管的特性常数, 有:

$$\delta = \frac{\sum LV}{gH_0 T_s}. \quad (8)$$

式中: H_0 为水电站的静水头(m); T_s 为阀门关闭的时间(s)。

将(8)式代入(7)式整理, 可推出 K 值计算的另一种等价形式, 即:

$$\frac{\sum LV}{H} = \frac{2gT_s \xi_m}{2 + \xi_m}. \quad (9)$$

令: $K = \frac{2gT_s \xi_m}{2 + \xi_m}$, 并赋予 T_s, ξ_m 不同值, 便可得

到不同的 K 值(表 2)。

表 2 不同 T_s 、 ξ_m 时的 K 值

Table 2 K value at different time of T_s , ξ_m

水电站水头 H/m Waterhead of Hydropower station H	水击允许值 $\xi_m/\%$ Permission value of water- striking ξ_m	$\Sigma LV/H=K$			
		$T_s=3$ s	$T_s=5$ s	$T_s=8$ s	$T_s=10$ s
$H>100$	0.15~0.30	4.1~7.7	6.8~12.8	10.9~20.5	13.7~25.6
$40\leq H\leq 100$	0.30~0.50	7.1~11.8	12.8~19.6	20.5~31.4	25.6~39.2
$H<40$	0.50~0.70	11.8~15.3	19.6~25.4	31.4~40.7	39.2~51.8

从表 2 可以看出,压力引水系统的动能和 ΣLV 与水头 H 之比的 K 值是 $K=f(T_s, \xi_m)$ 的函数,且决定于运行情况。当 T_s 一定时,随水头降低设置调压室条件 $\frac{\Sigma LV}{H}$ 增大,当允许水击值 ξ_m 一定(或水头一定)时,随 T_s 的增加设置调压室的条件 $\frac{\Sigma LV}{H}$ 也增大;在 $K=\frac{2gT_s\xi_m}{2+\xi_m}$ 中只考虑了 T_s 和 ξ_m 2 个因素;传统判式推导的前提假定参数在运行过程中都是变化的,由此可知,传统判式限制条件的弹性很大。

上述分析表明,已有判式存在 2 个方面的不足:第一,判式中没有直接表现出材料耐压强度的影响;第二,判式均是建立在假设多参数一定的基础上,如果在某一水电站设计上要得出一个较为准确合理的结果,那么在具体调保计算中要反复修正设定的引水系统的布置或基本参数,试算工作量较大。

2 新调压室设置判式的推导

为弥补上述判式的不足,本文提出一个新思路,即根据蜗壳允许的承压水头限制条件,将设定采用的机组机型及其相关技术参数、调保计算的控制指标、特征水头、蜗壳和尾水管的主要轮廓尺寸一并考虑,推导出新的调压室设置的必要性判式。

2.1 新判式推导的理论根据

众所周知,当水轮发电机组满载正常运行时,突然丢弃全部负荷而迅速关机,必然会在引水管道和蜗壳内发生压力升高的水锤现象。前人研究发现,这种现象引出的最大水击压力可能发生在调节过程的第一相末了或第 m 相末了^[14]。大量工程实践也证明,对于水头不是很高的大中型水电站所发生的水击几乎都属于末相水击。因此,本研究以末相水击作为本判式推导的理论根据之一。

阿列也维的研究表明^[14],正常运行的机组突然弃荷时,机组由全开到全关时发生的水击若满足(10)式的条件,则一定会发生末相水击。

$$\delta \leq \frac{4\rho\tau_0(1-\rho\tau_0)}{1-2\rho\tau_0} \quad (10)$$

式中: τ_0 为弃荷前的导叶相对开度; ρ 为水管的另一个特性常数。

$$\rho = \frac{\alpha V}{2gH} \quad (11)$$

末相水击的压力升高计算公式为:

$$\xi_m = \frac{\delta}{2}(\delta + \sqrt{4 + \delta^2}) \quad (12)$$

式中: $\sqrt{4 + \delta^2}$ 项中的 $\frac{\delta^2}{4} \ll 1$, 利用 $\sqrt{4 + \delta^2}$ 的级数展开,并对(12)式计算整理,取前 2 项得:

$$\xi_m = \delta + \frac{\delta^2}{2} + \frac{\delta^3}{8} \quad (13)$$

忽略(13)式的 3 次项得:

$$\xi_m = \delta + \frac{\delta^2}{2} \quad (14)$$

理论研究证明,末相水击一般是按直线规律沿引水系统分布的,因此在引水系统中,任意点 c 的水击压强为:

$$\xi_m^c = \frac{l}{L}\xi_m \quad (15)$$

式中: ξ_m^c 为压力引水系统任意计算点的末相水击压强; l 为压力引水系统进口到计算点 c 的长度(m); L 为压力引水系统的总长度(m)。

(15)式是推导建立新判式的又一理论根据。

2.2 新判式的推导过程

在某一控制工况下,蜗壳末端的内压水头^[15-16]按照(15)式可表示为:

$$P_v = H_0 + FH\xi_m \frac{\Sigma LV - (\Sigma LV)_v}{\Sigma LV} \quad (16)$$

式中: P_v 为蜗壳末端的内压水头(m); H_0 为蜗壳末端中心处的静水头(m); F 为导叶线性关闭规律的影响系数,一般大于 1.0; $(\Sigma LV)_v$ 为尾水系统的 ΣLV 值(m^2/s)。

将(14)式代入(16)式,同时代换 δ 可得:

$$P_v = H_0 + FH(6 + \frac{6^2}{2}) \frac{\sum LV - (\sum LV)_v}{\sum LV} = H_0 + FH \left[\frac{\sum LV}{gHT_s} + \frac{1}{2} \left(\frac{\sum LV}{gHT_s} \right)^2 \right] \cdot \left[1 - \frac{(\sum LV)_v}{\sum LV} \right] = H_0 + \frac{FH}{2g^2 T_s^2} \left[\left(\frac{\sum LV}{H} \right)^2 + (2gT_s - gT_s) \frac{(\sum LV)_v}{H} \frac{\sum LV}{H} - 2gT_s \frac{(\sum LV)_v}{H} \right]. \quad (17)$$

为了保证在水击压力下蜗壳能安全可靠地工作,蜗壳末端的内压水头 P_v 必须小于或等于蜗壳材料本身所允许的最大内压水头 H^* , 即 $P_v \leq H^*$, 于是有:

$$H_0 + \frac{FH}{2g^2 T_s^2} \left[\left(\frac{\sum LV}{H} \right)^2 + (2gT_s - \frac{(\sum LV)_v}{H}) \frac{\sum LV}{H} - 2gT_s \frac{(\sum LV)_v}{H} \right] \leq H^*. \quad (18)$$

亦即:

$$\left(\frac{\sum LV}{H} \right)^2 + (2gT_s - \frac{(\sum LV)_v}{H}) \frac{\sum LV}{H} - 2g \left[\frac{(\sum LV)_v}{H} + \frac{(H^* - H_0)}{FH} gT_s \right] T_s \leq 0. \quad (19)$$

显然(19)式是一个关于 $\frac{\sum LV}{H}$ 的一元二次不等

$$\frac{\sum LV}{H} \leq \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\left(2gT_s - \frac{(\sum LV)_v}{H} \right)^2 + 8g \left[\frac{(\sum LV)_v}{H} + \frac{gT_s(H^* - H_0)}{FH} \right] T_s} - \left[2gT_s - \frac{(\sum LV)_v}{H} \right] \right\}. \quad (20)$$

(20)式即是在蜗壳允许最大内压水头条件下,调压室设置与否的新判式,即蜗壳允许内压水头满足 $P_v \leq H^*$, 则说明压力引水系统不需要设置调压室,否则则需要设置调压室,蜗壳允许内压水头 H^* 由制造厂家提供。

3 算 例

红水河某梯级水电站的最大水头 $H_m = 175.0$ m,设计水头 $H_p = 146.5$ m,蜗壳中心处的静水头 $H_0 = 166.5$ m,单机出力 $N_p = 50$ 万 kW,单机流量

$$\frac{3\ 387.3 + 927.5}{146.5} \leq$$

$$\frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\left[2 \times 9.8 \times 10 - \frac{927.5}{146.5} \right]^2 + 8 \times 9.8 \left[\frac{927.5}{146.5} + \frac{9.8 \times 10 (229 - 166.5)}{1.2 \times 146.5} \right] \times 10} - \left[2 \times 9.8 \times 10 - \frac{927.5}{146.5} \right] \right\},$$

即得 $29.45 < 32.6$ 。满足不等式条件,说明该电站完全可以不设置调压室,与工程实际未设置调压室情况一致。

4 结 语

本文所提出的判据与以往规范提出的准则相比,考虑了更多的影响因素,将水轮机运行条件、导叶关闭规律及时间、材料耐压强度等均纳入了影响因素之中,使其判断精度更为细化,判定结果更加符合工程实际。

需要说明的是,本文推导的判式仍然只是从技术层面上得出的一个结果,尚有许多不全面之处,例如没有考虑调压室设置的技术经济问题,未明确界定长引水系统在什么条件下必须设置调压室,这些问题均有待进一步研究。

式。由二次函数性质可知^[17],要保证第3项一定为负值,则式中 $H^* - H_0 > 0$,同时不管第2项系数是正是负,其相应的方程式都只有1个正实根,此正实根即为应取的根值。故有:

$Q_p = 381.0$ m³/s,压力引水系统的各段总长度 $L_{引} = 565.50$ m,钢管直径 $D = 9.0$ m,平均流速 $V = 5.99$ m/s,尾水长度 $L_{尾} = 662.50$ m,尾水断面为 16 m \times 17.5 m,流速为 1.4 m/s;采用辐轴流式水轮机,线性规律关闭,从全开至全关 $T_s = 10$ s,其关闭影响系数 $F = 1.2$,蜗壳允许的承压水头 $H^* = 229.0$ m。以上述设计工况为控制条件,试确定是否需要设置调压室。

将上述参数作简单计算代入(20)式,有:

[参考文献]

- [1] 李万年,李光旭,李环.水力发电引水系统水体共振的数值模拟[J].水利发电学报,2008,39(1):109-114.
Li W N, Li G X, Li H. Numerical simulation of water body resonance in penstock of hydropower station [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(1): 109-114. (in Chinese)
- [2] 傅宗甫,张李萍,吕家才.分流式调压室水力特性研究[J].水利水电技术,2005,36(11):96-99.
Fu Z F, Zhang L P, Lv J C. Research on hydraulic characteristics of distributary surge tank [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(11): 96-99. (in Chinese)
- [3] 张芹芬,索丽生.调压室涌浪分析的随机模型[J].河海大学学报,1997,25(5):41-45.
Zhang Q F, Suo L S. Stochastic analysis of surge at hydropower station [J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(5): 41-45. (in Chinese)

- [4] [奥地利]B. 彼里坎. 小水电工程的未来 [J]. 水利水电快报, 2005, 26(24): 6-8.
[Austria] B. Poliken. The future of small hydraulic engineering [J]. Water Resources and Hydropower Engineering Letter, 2005, 26(24): 6-8. (in Chinese)
- [5] 刘 强, 张光科, 杨中华, 等. 调压井衬砌结构计算方法探讨 [J]. 水电站设计, 2005, 21(1): 20-23.
Liu Q, Zhang G K, Yang Z H, et al. Calculation of lining structure of surge tank [J]. Hydropower Station Design, 2005, 21(1): 20-23. (in Chinese)
- [6] 吕贵生. 西沟水电站调压室设计简介 [J]. 水利水电技术, 1995, 257(3): 12-18.
Lv G S. Introduction to the design of surger tank of Xigou hydropower station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1995, 257(3): 12-18. (in Chinese)
- [7] 张光斗, 王光纶. 水工建筑物(下) [M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
Zhang G D, Wang G L. Hydraulic engineerings(II) [M]. Beijing: Water Power Press, 1994. (in Chinese)
- [8] 崔清溪. 试论取消水电站调压室的可行性与合理性 [J]. 江西水利科技, 1993, 19(4): 227-285.
Cui Q X. Discussion on the feasibility and rationality of canceling surge tank of hydropower station [J]. Jiangxi Sci-tech of Water Power, 1993, 19(4): 227-285. (in Chinese)
- [9] 华东水利水电学院, 成都科技大学, 合肥工业大学. 水电站 [M]. 北京: 水利出版社, 1980.
East China Institute of Water Resources and Hydropower, Chengdu University of Science and Technology, Hefei University of Technology. Hydropower station [M]. Beijing: Water Resources Press, 1980. (in Chinese)
- [10] 大连工学院, 武汉水利水电学院, 天津大学. 水电站建筑物 [M]. 北京: 水利出版社, 1982.
Dalian College of Technology, Wuhan School of Water Resource and Hydropower, Tianjin university. The hydropower station engineering [M]. Beijing: Water Resources Press, 1982. (in Chinese)
- [11] 李佛炎. 水电站输水系统设置调压井必要性判据 [J]. 中南水电, 1986, 9(4): 11-22.
Li F Y. The necessary formula of setting up surge tank for conveying water of hydropower station [J]. Hydropower of Middle-south China, 1986, 9(4): 11-22. (in Chinese)
- [12] 陈祖文, 谢民峰. 思林水电站长尾水隧洞取消尾调水力过渡过程分析 [J]. 水利水电技术, 2005, 36(9): 84-88.
Chen Z W, Xie M F. Analysis on hydraulic transient of long trailrace tunnel without tailrace surge tank for Silin hydropower station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(9): 84-88. (in Chinese)
- [13] 索丽生, 刘宇敏, 张 健. 气垫调压室的体型优化计算 [J]. 河海大学学报, 1998, 26(6): 11-15.
Suo L S, Liu Y M, Zhang J. Optimized size calculation of air-cushion surge tank [J]. Journal of Hohai University, 1998, 26(6): 11-15. (in Chinese)
- [14] 王树人, 董毓新. 水电站建筑物 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1984.
Wang S R, Dong Y X. Hydraulic engineerings [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1984. (in Chinese)
- [15] 郑 源, 李贤庆, 张新珊, 等. 利用蜗壳压差测流做原型水轮机效率实验 [J]. 河海大学学报, 1997, 25(3): 101-104.
Zheng Y, Li X Q, Zhang X S, et al. Experiment of turbine units with the volute pressure difference method [J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(3): 101-104. (in Chinese)
- [16] м. д 切尔陀乌索夫. 水力学专门教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1958.
м. д Chertosof. Hydraulic Science [M]. Beijing: Higher Educational Press, 1958. (in Chinese)
- [17] 四川矿业学院. 数学手册 [M]. 北京: 科技出版社, 1978.
Sichuan Mining College. Mathematics manual [M]. Beijing: Science and Technology Press, 1978. (in Chinese)