

气垫调压室电负荷涌浪计算公式

范波芹, 张 健, 华 明, 刘德有

(淮海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 基于气垫式调压室室内水位波动的周期(或频率)随时间变化不大的特点,按小参数幂的渐近展开方法求解了气垫调压室的基本方程式,得出了机组弃荷时的涌浪计算公式.

关键词 气垫调压室;电负荷;计算公式

中图分类号:TV732.5 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2000)04-0112-04

自首座气垫调压室^[1]在挪威投入使用以来,美国、前苏联等国家均相继修建了气垫调压室.我国的第一座具有气垫调压室的水电站——青海省格尔木河上的大干沟水电站目前正处于施工阶段.气垫调压室为防止气室超压及避免高压气体涌入隧洞,最高、最低涌浪计算显得更为重要,这些数据的获得往往发生在电站机组全弃负荷与全部(部分)增负荷的时候,但目前文献中尚未见理论计算公式的报道.气垫式调压室由于气垫的作用,室内水位波动有一个显著特点,即涌浪波动的周期(或频率)随时间变化不大.该特点恰好符合接近于线性的动力系统固有振动的特性.基于此,本文按小参数幂的渐近展开方法,对气垫调压室的动力方程进行合理的简化处理,导出电负荷后的室内涌浪计算公式,以便气垫调压室水力设计应用.

1 气垫调压室基本方程

对于气垫调压室,由于气垫效应的存在,导致气垫调压室动力方程较普通调压室的复杂,其中气室压力 p 为一非线性回复力,给问题求解带来了一定困难.本文对动力方程采用泰勒级数展开,保留二次方项.另外,令气垫调压室面积为

$$F = n_g F_{th} \sigma \tag{1}$$

其中,气室常数

$$\sigma = 1 + m \frac{p_0}{\gamma l_0}$$

式中: n_g ——面积系数; F_{th} ——调压室托马稳定断面面积; p_0, l_0 ——水电站正常运行的气室压力与气室高度; m ——气体多方指数,当室内气体为等温变化时取 1.0,绝热变化时取 1.4; γ ——水的容重.本文的涌浪幅值计算均以该状态下的水位为基准.

a. 动力方程:

$$Z_0 + \frac{p_a}{\gamma} + Z = \frac{p}{\gamma} + \alpha |v| v - \beta \left| \frac{dZ}{dt} \right| \frac{dZ}{dt} + \frac{L}{g} \frac{dv}{dt} \tag{2}$$

$$Z_0 = \frac{p_s}{\gamma} - \frac{p_a}{\gamma} \quad p_s = \frac{p_0 l_0^m}{(l_0 - \alpha v_0^2 / \sigma)^m}$$

式中: Z ——气垫调压室水位(坐标向下为正); p_a ——当地大气压; p ——气室压力; p_s, l_s ——电负荷波动稳定后气垫调压室的室内压力及气室高度; β ——阻抗孔口水头损失系数.设 η 为调压室阻抗水头损失与引水道水头损失之比,则 $\beta = \eta \alpha (F/f)^2$.气垫调压室的引水道较长,沿程水头损失较大,从防止水击穿室及充分发挥气垫调压室的作用出发,阻抗孔口不可能太小,故 η 值一般不超过 2.

b. 连续方程(弃荷后,电站引用流量为零)

收稿日期:1997-10-31
基金项目 水利部水利科技重点项目(SZ9812)
作者简介 范波芹(1973—),女,山东潍坊人,博士研究生,水利水电工程专业.

$$fv + F \frac{dZ}{dt} = 0 \tag{3}$$

c. 气室内的气体状态方程：

$$p_s l_s^m = p (l_s + Z)^m \tag{4}$$

其中

$$l_s = l_0 - \alpha v_0^2 / \sigma$$

2 电负荷涌浪计算

将式(1)~(4)联立,可得

$$\frac{d^2 Z}{dt^2} = \frac{gF}{Lf} \left[\frac{p_s}{\gamma} \left(\frac{1}{1 + Z/l_s} \right)^m - Z - \frac{p_s}{\gamma} \right] - \frac{\eta + 1}{2s} \left| \frac{dZ}{dt} \right| \frac{dZ}{dt} \tag{5}$$

由于

$$p_s \left[\frac{1}{1 + Z/l_s} \right]^m \approx p_s \left[1 - \frac{mZ}{l_s} + \frac{m(m+1)}{2} \left(\frac{Z}{l_s} \right)^2 \right]$$

代入式(5),可写成

$$\frac{d^2 Z}{dt^2} + \omega_s^2 Z = \sigma_1 Z^2 + \sigma_2 \left| \frac{dZ}{dt} \right| \frac{dZ}{dt} \tag{6}$$

其中

$$\begin{aligned} \omega_s &= \frac{2\pi}{T_s} & T_s &= 2\pi \sqrt{\frac{LF}{gf}} / \sqrt{\sigma_s} & s &= \frac{Lf}{2\alpha gF} \\ \sigma_1 &= \frac{m(m+1)p_s g f}{2l_s^2 L F \gamma} & \sigma_2 &= -\alpha \frac{gF}{Lf} (\eta + 1) & \sigma_s &= 1 + m \frac{p_s}{\gamma l_s} \end{aligned}$$

将式(6)按小参数幂的渐近展开,并参见文献[2,3,4]的结果与方法,易得

$$Z = a \cos \varphi + \frac{1}{4} \frac{m(m+1)p_s}{l_s^2 \sigma_0} a^2 - \frac{1}{12} \frac{m(m+1)p_s}{l_s^2 \sigma_0} a^2 \cos 2\varphi + \frac{\mu a^2}{15\pi} (\sin 3\varphi + \cdots) \tag{7}$$

$$a = a_0 / \left[1 + \frac{4\mu\omega_0 a_0}{3\pi} t \right] \qquad \mu = \frac{\eta + 1}{2s} \tag{8}$$

不难看出,电负荷时气垫调压室涌浪振幅近似地与时间成反比而衰减. 由于气垫调压室的涌浪波动周期(或频率)随时间变化均不显著,近似认为气垫调压室第一、二涌浪幅值发生在 $\varphi = \pi, 2\pi$ 处,则式(7)末项为零. 然后将式(8)代入式(7)可得到第一、二涌浪幅值的表达式：

$$Z_{\max 1} = a_1 - \frac{1}{6} \frac{m(m+1)p_s}{\gamma l_s^2 \sigma_s} a_1^2 + \frac{h_{w0}}{\sigma} \tag{9}$$

$$Z_{\max 2} = a_2 + \frac{1}{6} \frac{m(m+1)p_s}{\gamma l_s^2 \sigma_s} a_2^2 - \frac{h_{w0}}{\sigma} \tag{10}$$

其中

$$\begin{aligned} a_i &= \frac{a_0}{1 + \frac{2a_0(\eta+1)}{3\pi s} (i\pi - \varphi_0)} \qquad (i = 1, 2) \\ a_0 &= \sqrt{\left(\frac{h_{w0}}{\sigma} \right)^2 + \left(\frac{v_0 f}{F \omega_s} \right)^2} \qquad \varphi_0 = \arccos \left(\frac{h_{w0}}{\sigma a_0} \right) \end{aligned}$$

式(9)(10)便是气垫调压室电负荷后第一、第二涌浪幅值的近似计算式,其中的最后一项是考虑到电负荷后的稳定水位而加上的.

3 算例及成果分析

某建有气垫调压室的电站参数如下 冰头 200 m,引水道长 3 970.1 m,直径 5.0 m,糙率 0.013,引用流量 68.73 m³/s,气垫调压室室内气压及气室高度分别为 $p_0/\gamma = 185$ m 与 $l_0 = 10$ m,拟采用带阻抗与无阻抗两种方

案进行比较,采用本文导出的计算公式(9)(10)计算气垫调压室甩负荷后第一、二涌浪幅值并与四阶龙格-库塔法数值计算结果进行对比,见表1和表2.

表 1 气垫调压室弃荷涌浪计算结果

Table 1 Surge calculation of air-cushioned tank following load rejection

n_g 和 m 值	阻抗值 η	第一涌浪幅值 /m	数值解 /m	误差 /%	n_g 和 m 值	阻抗值 η	第二涌浪幅值 /m	数值解 /m	误差 /%
$n_g = 1.0$ $m = 1.0$	0.0	2.082	2.124	2.00	$n_g = 1.0$ $m = 1.0$	0.0	1.377	1.409	2.12
	0.5	2.006	2.044	1.84		0.5	1.195	1.219	2.00
	1.0	1.937	1.971	1.74		1.0	1.048	1.068	1.81
	1.5	1.873	1.905	1.70		1.5	0.928	0.943	1.66
	2.0	1.814	1.845	1.69		2.0	0.827	0.839	1.54
$n_g = 1.0$ $m = 1.4$	0.0	1.753	1.788	1.99	$n_g = 1.0$ $m = 1.4$	0.0	1.270	1.299	2.24
	0.5	1.697	1.729	1.89		0.5	1.126	1.149	2.05
	1.0	1.645	1.676	1.84		1.0	1.007	1.027	1.92
	1.5	1.597	1.626	1.83		1.5	0.908	0.925	1.84
	2.0	1.551	1.581	1.85		2.0	0.823	0.837	1.77
$n_g = 1.2$ $m = 1.0$	0.0	1.925	1.960	1.80	$n_g = 1.2$ $m = 1.0$	0.0	1.190	1.215	2.08
	0.5	1.849	1.879	1.59		0.5	1.018	1.036	1.75
	1.0	1.780	1.807	1.46		1.0	0.881	0.895	1.49
	1.5	1.717	1.741	1.39		1.5	0.770	0.780	1.29
	2.0	1.660	1.682	1.36		2.0	0.678	0.685	1.11
$n_g = 1.2$ $m = 1.4$	0.0	1.619	1.649	1.82	$n_g = 1.2$ $m = 1.4$	0.0	1.107	1.131	2.09
	0.5	1.563	1.590	1.69		0.5	0.970	0.988	1.86
	1.0	1.511	1.536	1.61		1.0	0.859	0.874	1.69
	1.5	1.464	1.487	1.59		1.5	0.767	0.779	1.57
	2.0	1.419	1.442	1.59		2.0	0.689	0.699	1.47

表 2 糙率变化条件下的气垫调压室弃荷涌浪计算结果

Table 2 Surge calculation under the change of roughness factor

糙率 n	第一涌浪幅值 /m	数值解 /m	误差 /%	糙率 n	第二涌浪幅值 /m	数值解 /m	误差 /%
0.013	1.937	1.971	1.73	0.013	1.048	1.067	1.77
0.014	2.071	2.111	1.92	0.014	1.056	1.077	2.00
0.015	2.203	2.251	2.11	0.015	1.055	1.079	2.24
0.016	2.344	2.388	2.29	0.016	1.045	1.072	2.50

表1和表2分别列出了气体多方指数、气垫调压室面积、底部阻抗以及引水道糙率等因素对公式(9)和(10)的影响,并反映了当水电站弃荷时,此二式与数值计算结果的比较.从中不难看到,如果调压室底部阻抗在合理的范围内变化,则阻抗越大,误差越小;气垫调压室面积越大,误差亦越小;气体多方指数 $m = 1.4$ 时比 m 取 1.0 时的误差大.糙率对公式的影响较大(见表2),但即使如此,当糙率达到 0.016 时,误差仍没有超过 3% .

4 结 论

本文在认为气垫调压室水位涌浪波动的周期(或频率)随时间变化均不大的前提下,按小参数幂的渐近展开方法,推导了气垫调压室在甩负荷情况下的涌浪计算公式.计算所得的气垫调压室涌浪幅值绝对误差仅几厘米,最大相对误差只在 3% 左右.该组公式均为显式表达.公式(9)和(10)的精度均可满足工程要求,便于工程应用.

参考文献：

[1] GU Zhao-qi,LI Xing-xing,GUO Jun. Experiences in norwegian hydropower[M]. Norway :Tapir Publisher,1985.56 ~ 82.
[2] 张健.气垫调压室水力性能研究[D]:[学位论文]. 南京 河海大学,1998.
[3] 张健,索丽生. 调压室涌浪电负荷涌浪计算显式公式[J]. 水力发电学报,1999(2) :70 ~ 74.
[4] 包戈留夫 H H, 米特罗波尔斯基 IO A. 非线性振动理论中的渐近方法[M]. 上海 :上海科学出版社, 1958.39 ~ 134.

Formulae for Calculating Surges Following Load Rejection
in Air-Cushioned Surge Tanks

FAN Bo-qin, ZHANG Jian, HUA Ming, LIU De-you

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ. ,Nanjing 210098, China)

Abstract The formulae for calculating surges in an air-cushioned surge tank following load rejection are derived from the solution of the basic equations of the surge tank by use of the asymptotic expansion of infinitesimal parameters. These formulae,simple in form and good in accuracy,are easy to be applied in engineering practice.

Key words air-cushioned surge tank ;load rejection ;formulae



会议消息

“中国工程科技论坛——智能化测控技术在土木工程中的应用”将在河海大学召开

由中国工程院主办、河海大学承办的“中国工程科技论坛——智能化测控技术在土木工程中的应用”将于2000年10月30日至11月1日在河海大学召开.会议旨在促进土木工程领域方向性和前沿性的重大科技问题的研究,促进高新技术在土木、水利水电、建筑、交通工程中的应用.论坛通过中心报告、发言与讨论,推动各学科之间的交流,促进新兴、边缘与交叉学科的发展,为土木工程技术界的专家特别是青年科技人才提供讲台,激励优秀人才的成长.会议议题有:①智能化测控技术在土木工程中的应用;②智能传感高新技术开发和研制;③RS,GIS,GPS的应用;④远程网络通讯技术应用;⑤自动化监测系统应用;⑥信息管理新技术应用;⑦在线实时监控开发和研制;⑧信息反馈技术的应用;⑨计算机高新技术在土木工程中的应用;⑩数字技术在土木工程中的应用;⑪无损检测技术在土木工程中的应用;⑫防灾减灾工程中的新技术;⑬智能诊断和专家系统.

联系电话:(025)3717749 传真:(025)3717749 电子信箱:estt@ hhu.edu.cn 网址:http://estt.hhu.edu.cn

(河海大学科技处供稿)