

陈肇和

论文选集

李其军
编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

陈肇和

论文选集

李其军
编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书从陈肇和所发表的 120 余篇论文中, 遴选了 49 篇能反映其产生的具有自主知识产权科研成果的文章, 并将其从水力发电管道通气孔的通气量计算、泄洪管道需气量、泄水建筑物的空蚀与掺气减蚀、边界拟合曲线坐标变换技术、水利水电枢纽坝区三维渗流数值模拟、洪水预报、漫坝风险分析与洪水资源化、溢洪道、双曲挑坎和其他等 10 个方面进行了归纳整理, 基本上反映了陈肇和多年工作经验和科研成果。

本书适合水利工程设计人员阅读, 也可供水利生产管理与科研单位的技术人员及有关大、中专院校的师生阅读、参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

陈肇和论文选集/李其军编. —北京: 中国水利水电出版社, 2005

ISBN 7-5084-3350-5

I. 陈... II. 李... III. ①陈肇和—文集②水利工程—文集③水力发电工程—文集 IV. TV-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 122281 号

书 名	陈肇和论文选集
作 者	李其军 编
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 34.75 印张 824 千字
版 次	2006 年 10 月第 1 版 2006 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—1500 册
定 价	90.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

随着我国水利水电工程的蓬勃发展,泄水建筑物和过水建筑物的形式越来越复杂,工程水力学研究的范围也不断扩大。特别是由于我国复杂的地理、气候等条件,高水头、大流量、窄峡谷、地质条件复杂的工程越来越多。因而,人们对工程水力学的研究不断深入,做出了大量跻身于世界水平的创新研究成果。

陈肇和教授是一位学术造诣高、治学严谨的水力学专家。他从事水力学教学与研究55年多,从引进技术到创新研究,经历了一个漫长历史时期,硕果累累。他撰写了大量的中、外文研究论文,出版了一大批著作和译著,不仅在国内外学术会议上做了广泛的交流,并且在工程实践中得到了广泛的应用。

这次出版的论文选集涵盖了他及其学术小组多年来的主要创新成果,这些成果是理论研究与实际应用经验的结晶。特别是在高速水流课题中,他提出的“水力发电管道通气管通气量的理论计算”成果,获水利电力部科技进步一等奖(1988年);随后,在泄洪管道通气量的研究方面,通过大量的原型调查,从二相流理论出发,研究提出的计算方法获水利部科技进步三等奖(1989年),并被纳入我国钢闸门设计规范,同时在边界拟合坐标变换技术的应用方面也取得了创新的发展。他将航空航天界对绕流计算用的边界拟合曲线坐标变换原理,引入用于沿固体边界内流动的流体计算中,自主开发了二维及三维边界拟合变换通用程序(BFCC系列软件),为工程水力学计算提供了极为方便的工具;他利用BFCC软件,开发的水利水电工程枢纽三维渗流数值模拟技术,对土坝和面板堆石坝坝体及坝基地下轮廓曲折复杂、地层变化多端的渗流计算,经多项工程应用,证明其能确保成果精度较高。该项技术获电力部科技进步二等奖(1994年)。随着水资源短缺的日益显现,陈肇和教授在洪水预报和如何有效地利用洪水资源方面,也提出了极有意义的研究成果。他创造性地建立了土坝对抗洪水系列和有效风系列联合作用下的漫坝风险理论。利用这一理论,能对水库漫坝作出安全评价,并在确保漫坝安全可靠度高达99.999%以上的前提下,可以通过风险分析,提出抬高水库原设计汛限水位的定量建

议，以实现洪水资源化，从而大大提高水库的兴利效益。目前已推广应用于多座水库，取得了显著的经济、社会和生态效益。他的研究成果多次获省、部级科技进步奖（1998~2004年）。在泄洪消能技术方面，他自主开发了双曲挑坎体形计算软件，实现了三维扭曲挑坎的计算机设计，大大减轻了模型试验探求体形的人力、物力并缩短试验时间，深受业界欢迎。此外，在溢洪道水力学及紊流边界层等方面，他也开创了新的研究局面，取得了一批应用价值很高的研究成果。

总之，相信陈肇和教授论文选集的出版，将为水利水电工程水力学的研究、教学、设计、施工与管理等单位提供重要的宝贵经验。为推动我国水利水电工程水力学研究进展和新技术推广，发挥重要的作用。

李桂芬*

2006年6月

* 李桂芬，国际水利工程与研究协会（IAHR）中国分会主席、中国水力发电工程学会理事、中国水利科学研究院教授级高级工程师。

目 录

序

第一组 水力发电管道通气孔的通气量计算

编者按	3
水力发电管道通气量的理论计算	陈肇和 叶寿忠 5
安康水电站通气孔面积的计算	叶寿忠 陈肇和 17
Theoretical Computation of Air Flow through Air Vent for Hydropower Intakes	Ye Shouzhong Li Qijun Chen Zhaohe Jia Lifang 24

第二组 泄洪管道需气量

编者按	33
泄洪管道需气量原型规律的研究	陈肇和 黄文杰 叶寿忠 35
泄洪管道需气量研究述评	陈肇和 黄文杰 叶寿忠 51
A Study of Prototype Law of Air Demand in High-Head Gated Conduit for Flood Control	Chen Zhaohe Huang Wenjie Ye Shouzhong 63
Prototype Law of Air Demand for Guan Ting Spillway Tunnel	Chen Zhaohe Huang Wenjie Ye Shouzhong 73

第三组 泄水建筑物的空蚀与掺气减蚀

编者按	81
挑坎式通气槽需气量原型规律的研究	陈肇和 韩 立 黄文杰 82
高水头溢洪道掺气槽需气量规律的研究	黄文杰 叶寿忠 陈肇和 韩 立 96
A Study of Air Entrainment of High-Head Spillways Air-Slots	Huang wenjie Ye Shouzhong Chen Zhaohe Han Li 102

第四组 边界拟合曲线坐标变换技术

编者按	111
BFCC: 边界拟合曲线坐标的数值生成通用程序	陈肇和 齐 里 113
流体绕椭圆柱有势无环量流动的精确解与边界拟合坐标变换数值解	陈肇和 齐 里 120
定边界平面势流的边界拟合坐标变换解	张 辉 齐 里 陈肇和 130
过堰溢流的边界拟合坐标变换数值解	齐 里 陈肇和 139
复杂边界二维流动方程的交错网格 与交替方向隐式差分法	唐春玲 李志群 陈肇和 146
BFCC-6 三维边界拟合坐标变换通用程序	齐 里 陈肇和 150
代数法网格生成系统及其工程应用	孙 颖 陈肇和 157

第五组 水利水电枢纽坝区三维渗流数值模拟

编者按	165
边界拟合坐标变换法在三维渗流计算中的应用	方芳欣 齐里 陈肇和 168
Numerical Modeling of 3-D Seepage Flow for Gong-Bo-Xia Hydropower Project Using BFCC Transformation and Domain Decomposition Techniques	Peng Yu Chen Zhaohe Fang Fangxin Qi Li 173
Numerical Simulation of 3-D Seepage Flow For Three Hydropower Projects Using BFCC Transformation & Domain Decomposition Techniques	Ye Shouzhong Fang Fangxin Chen Zhaohe Peng Yu 180
Three Dimensional Seepage Flow Analysis for the Upper Pond of a Large Pumped Storage Station	Chen Zhaohe Sun Yongjuan Peng Yu Jia Lifang Sun Ying 187

第六组 洪水预报

编者按	197
澧水河系洪水预报微机软件包的研制	陈肇和 张斐慕 饶芃宗 叶寿忠 199
澧水洪水自动化预报的计算参数选择 及程序——数据文件系统	张斐慕 叶寿忠 饶芃宗 陈肇和 204
Microcomputer Package for Automatic Forecasting of Floods	Chen Zhaohe Zhang Feimu Ye Shouzhong Rao Jiaozong 214

第七组 漫坝风险分析与洪水资源化

编者按	225
土坝水利枢纽工程的风险辨识与事故分析	李其军 周保廉 陈肇和 叶寿忠 230
Application of Risk Analysis in Management of Water Resources for a Large Reservoir	Li Qijun Ye Shouzhong Chen Zhaohe 238
Overtopping Risk Analysis for the Earth Dam of Qinghe Reservoir	Qijun Li Zhaohe Chen Lisha Liu 245
漫坝风险分析在朱庄水库水资源管理中的应用	李其军 叶寿忠 陈肇和 252
Applications of Overtopping Risk Analysis and Safety Evaluation for the Earth Dam of Flood-Control Reservoir	Chen Zhaohe Li Qijun 258
漫坝风险分析与安全评价在水库防洪中的应用	陈肇和 李其军 271
Overtopping Risk Analysis as a Non-Structural Measure	Ying Sun Zhaohe Chen Qijun Li 282
漫坝风险分析在水库防洪中的应用	陈肇和 李其军 289
Increasing the Economic Benefits of Taihe Reservoir by Means of Overtopping Risk Analysis	Sun Ying Chen Zhaohe Li Qijun 293

第八组 溢洪道

编者按	303
侧槽溢洪道水力设计研究	陈肇和 韩立 305
对舒以安、王仕筠同志讨论意见的答复	陈肇和 韩立 364
侧槽溢洪道首端水深计算新公式	陈肇和 韩立 374
对舒以安同志讨论意见的答复	陈肇和 韩立 381

美国低堰水力特性的新近研究	叶寿忠 陈肇和	389
矩形断面消力池的池长计算	黄文杰 陈肇和	408

第九组 双 曲 挑 坎

编者按		421
高水头双曲挑坎体形设计计算及其在龙羊峡模型试验中的验证	陈肇和 李国庆	423
Computer-Aided Design and Model Test of Double-Curvature Flip Buckets for a Large Hydropower Project	Li Guoqing Liu Lisha Chen Zhaohe	441
急流弯道双曲底板的体形设计	黄春花 孙 颖 陈肇和 冯新权	447

第十组 其 他

编者按		457
系流模型综述	陈肇和	461
Field Observations and Laboratory Tests on Turbulent Boundary Layer of Water Flow	Chen Zhaohe Han Li	475
雨水就地滞洪设施与城市防洪	孙 颖 陈肇和	485
灌区直立平板闸门测流	陈肇和	495
Numerical Simulation of Unsteady Flow in Long-Distance Water-Transfer Project with Multi-Structures	Tang Chunling Chen Dong Sun Ying Chen Zhaohe	503
论数学模型与数值模拟	孙 颖 滕莉梅 陈肇和	510
HLOCK: 高水头船闸分散输水系统水力计算 FORTRAN 程序	彭一江 陈肇和	519
Shang-Ma-Tai Reservoir—A Successful Reservoir in Plain Region	Du Jiang Hu Baoze Gao Fengming Chen Zhaohe	530

附 录

附录一 陈肇和著作统计表	539
附录二 陈肇和独自译著统计表	542
附录三 陈肇和合作译著统计表	543
附录四 陈肇和校书统计表	544
跋	545

陈肇和论文选集

水力发电管道通气 孔的通气量计算

第一组

【编者按】

在“水力发电管道通气量计算的数学模型”和“水力发电管道独立布置的通气孔通气量的理论计算”二文的基础上,本组论文进一步研究得出“水力发电管道通气量的理论计算”,及其实际工程的应用成果“安康水电站通气孔面积的计算”。成果强调指出:①建立通气量理论计算关系式时,须考虑空气运动的特性,特别是空气的可压缩性,以及空气流动的摩擦损失和压力管道中水面气压的变化所产生的影响;②该法不仅能计算通气量的最大值,而且能算出通气量的过程线,可据以查明最大风速发生的时刻及高风速的历时,进而为从噪音控制角度、研究允许风速的取值提供可靠的基础资料;③该法对连通布置和独立布置的通气孔都适用,既可校核现有通气孔的尺寸,也可用来设计新通气孔的尺寸。

本组论文成果荣获 1988 年水电部科技进步一等奖。

为了节约篇幅,仅选印下表序号为 1-3、1-4 和 1-5 的三篇文章。

水力发电管道通气量科研成果统计表

序号	科研成果名称	主要负责人	其他成员	完成日期	获奖情况		
					获奖等级	获奖时间	奖励单位
1	水力发电管道通气量的理论计算	陈肇和 叶寿忠		1984 年	科技进步一等奖	1988 年	水利电力部

水力发电管道通气量论文统计表

序号	论文名称	作者	发表或出版时间	发表刊物名称及刊号	获奖情况		
					获奖等级	获奖时间	奖励单位
1-1	水力发电管道通气量计算的数学模型	陈肇和	1980, No. 1	《华北水利水电学院学报》			
1-2	水力发电管道独立布置的通气孔通气量的理论计算	陈肇和 叶寿忠	1983, No. 4	《人民长江》			

续表

序号	论文名称	作者	发表或 出版时间	发表刊物 名称及刊号	获 奖 情 况		
					获奖等级	获奖时间	奖励单位
1-3	水力发电管道通气量的理论计算	陈肇和 叶寿忠	1984, 创刊号	《北京水利电力经济管理学院学报》	优秀论文 一等奖	1989年8月30日	北京水利电力经济管理学院
1-4	安康水电站通气孔面积的计算	陈肇和 叶寿忠	1987, No. 11	《人民长江》		1989年8月30日	北京水利电力经济管理学院
1-5	Theoretical Computation of Air Flow through Air Vent for Hydropower Intakes	Ye Shouzhong Li Qijiun Chen Zhaohe Jia Lifang	1996. 10. 28~ 11. 2	Proceeding of The International Conference Hydropowe'96	优秀论文 一等奖	1997年4月28日	北京水利水电管理干部学院

水力发电管道通气量的理论计算^{***}

陈肇和 叶寿忠

(北京水利电力经济管理学院)

【提要】本文根据水力学、空气动力学、热力学的基本原理,考虑了水流运动的特性,气流运动的特性,特别是空气的可压缩性,针对水力发电管道连通布置和独立布置的通气孔,建立其通气量的理论计算关系式,提出求解通气量过程线的数值方法,并编制计算程序,以期代替目前使用的经验法则,比较准确地计算通气孔的通气量及风速过程线,为经济合理地确定通气孔的尺寸提供理论基础。

本文提出的理论计算关系式采用柘溪电站4号通气孔的资料进行验证计算,所得结果与实测结果吻合较好。验算表明,考虑空气流动特性计及空气可压缩性,对通气量的计算来说是完全必要的。

一、引言

水电站高压输水管道进口通常设置快速事故闸门,以便在机组甩负荷且保护机组安全的其他装置失灵的情况下,迅速关闭闸门,切断水流,保护机组的安全。

在快速事故闸门关闭期间,由于压力管道中水流泄空,闸后将产生负压。工程上通常设置通气孔,以便通入空气,降低闸后负压。

通气孔的布置一般分两类:①通气孔与闸门井彼此连通(见图1);②通气孔与闸门井彼此独立(见图2)。

通气孔中通气量的计算比较复杂,工程上多采用经验法计算^[1~4]。20世纪70年代以后,国内有人做过通气量解析计算的尝试,但都没有考虑空气流动的特性^{[5][6]}。但是通气孔的通气量既决定于通气孔的尺寸,决定于水流运动的特性,也决定于气流运动的特性以及空气的可压缩性。因而简单的经验法则往往不能反映复杂的水、气运动状况,难以经济合理地确定通气孔的尺寸。实践表明,按照文献^[4]那样,通气孔面积遵循了规范中的规定,而实测最大风速却不再能遵守规范中的另一规定。例如,柘溪电站4号通气孔,面积为压力管道面积的6.9%,在1976年8月21日的观测试验中,实测最大风速却达到91m/s。生产实践要求我们从理论上进行研究,探索新的计算方法。

本文根据水力学、空气动力学和热力学的基本原理,考虑了水流运动、气流运动的特性,特别是空气的可压缩性,建立了计算通气量的数学关系式,提出求解通气量过程线的

* 本文经杜镇福、郭子中、梁在潮和高又生同志审阅并提出宝贵意见,谨此一并致谢。

** 本文于1984年8月21日收到。

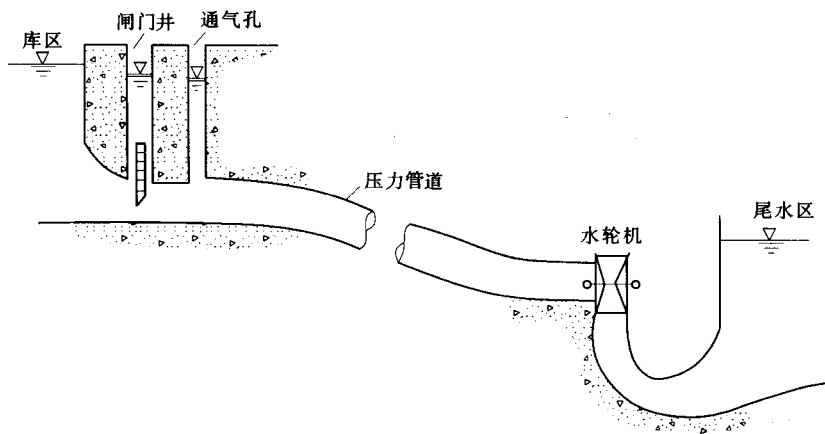


图1 通气孔连通布置的压力管道示意图

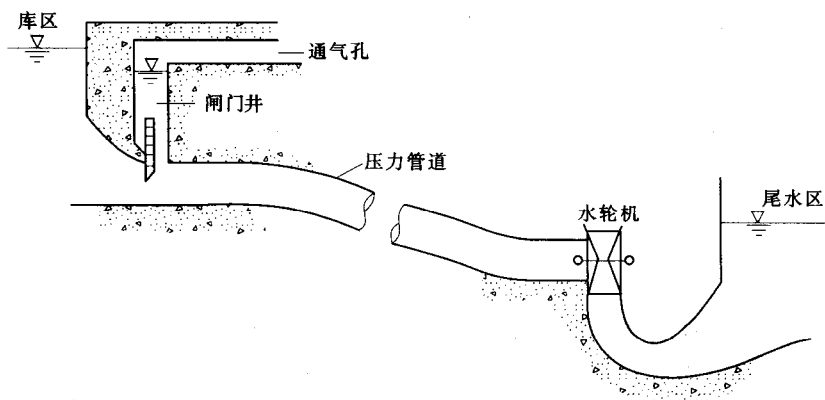


图2 通气孔独立布置的压力管道示意图

数值方法, 并编制计算机程序, 为通气孔尺寸的校核和设计提供一种较为实用的方法。

二、通气量理论计算关系式的建立

通气孔的通气过程是由三个环节组成的: ①压力管道中水流泄空; ②空气进入通气孔; ③空气在泄空空间膨胀。因此, 通气量计算须由水流运动、气流运动和气体膨胀三个部分组成。

(一) 水流运动部分的计算关系式

在闸门下降过程中, 压力管道中水流运动是非恒定流。当自由水面高于压力管道管顶高程时, 压力管道中水流为满流, 闸后出流可假设为淹没出流; 当自由水面低于压力管道管顶高程时, 压力管道中水流转为明满流, 过闸出流可假设为自由出流。因此, 水流运动部分应包括满流与明满流两种情况。但是, 由于通气孔类型的不同, 水流运动(满流与明满流)的规律也有所不同, 须分述如下。

1. 连通布置的通气孔^[7]

(1) 满流时, 根据水力学的基本原理, 考虑过闸流动, 闸门井中水流运动、压力管道中水流运动及闸门井与压力管道接头处的能量关系, 导得如下方程:

1) 过闸流量方程。根据淹没出流流量方程, 得

$$Q = \mu A_e \sqrt{2g \left(H_0 - Z - \frac{p_{\text{库侧}}}{\gamma} + \frac{p_a}{\gamma} \right)} \quad (1)$$

式中: $p_{\text{库侧}}$ 为闸门井处水库侧的绝对压强。

2) 闸门井中水流的动量方程。闸门可简化如图 3 所示。

设 h 为闸门井中水体高, 则当 $h \geq H_2$ 时,

$$\begin{aligned} & \frac{p_{\text{气}}}{\gamma} - \frac{p_3}{\gamma} + (h_1 + H_2) \\ & - \frac{1}{2g} \left[\left(1 + \frac{\lambda_2 H_2}{D_2} + K_e \right) \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right] \left(\frac{dh_1}{dt} \right)^2 \\ & = - \frac{1}{g} \left[h_1 + H_2 \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \right] \frac{d^2 h_1}{dt^2} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $p_{\text{气}}$ 为自由水面气压。

当 $h < H_2$ 时,

$$\frac{p_{\text{气}}}{\gamma} - \frac{p_3}{\gamma} + h_2 - \frac{\lambda_2 h_2}{D_2} \frac{1}{2g} \left(\frac{dh_2}{dt} \right)^2 = - \frac{h_2}{g} \frac{d^2 h_2}{dt^2} \quad (3)$$

3) 压力管道中水流的动量方程。对压力管道中水流写动量方程

$$\frac{p_{\text{管}}}{\gamma} + Z - H_{\text{尾}} - \frac{p_a}{\gamma} - \left(\frac{\lambda_{\text{管}} L_{\text{管}}}{D_{\text{管}}} + K_{\text{局}} + K_{\text{总}} - 1 \right) \frac{U_{\text{管}}^2}{2g} = \frac{L_{\text{管}}}{g} \frac{dU_{\text{管}}}{dt} \quad (4)$$

式中: $K_{\text{局}}$ 为局部损失系数 (包括弯道损失系数); $K_{\text{总}}$ 为水轮机总水头损失系数。

4) 闸门井与压力管道接头处能量方程^[7~9]。

$$\frac{p_{\text{库侧}}}{\gamma} = \frac{U_{\text{管}}^2}{2g} + \frac{p_{\text{管}}}{\gamma} - \frac{U_{\text{库侧}}^2}{2g} + h_{w1} \quad (5)$$

损头

$$h_{w1} = \left[1 - \left(\frac{Q_{\text{库侧}}}{Q_{\text{管}}} \right)^2 \right] \frac{U_{\text{管}}^2}{2g} \quad (6)$$

$$\frac{p_3}{\gamma} = \frac{p_{\text{管}}}{\gamma} + \frac{U_{\text{管}}^2}{2g} - \frac{U_3^2}{2g} - D_{\text{管}} + h_{w2} \quad (7)$$

损头

$$h_{w2} = \left[4 \frac{Q_3}{Q_{\text{管}}} - 1 - \left(2 - \frac{A_{\text{管}}^2}{A_3^2} \right) \left(\frac{Q_3}{Q_{\text{管}}} \right)^2 \right] \frac{U_{\text{管}}^2}{2g} \quad (8)$$

式中: $U_{\text{库侧}}$ 为闸门井处水库侧流速; $Q_{\text{库侧}}$ 为闸门井处水库侧流量。

(2) 明满流时, 考虑过闸流动及压力管道中水流运动, 导得下列方程:

1) 过闸流量方程。根据自由出流的流量方程, 得

$$Q = \mu A_e \sqrt{2g \left(H_0 - Z + \frac{p_a}{\gamma} - \frac{p_{\text{闸井}}}{\gamma} \right)} \quad (9)$$

式中: $p_{\text{闸井}}$ 为闸门处绝对压强 (包括水深)。

2) 压力管道中水流的动量方程。考虑压力管道中满流段的水体, 根据按控制体理论得出的系统内流体动量变化关系式

$$\Sigma \vec{F} = \frac{d}{dt} \int_V \rho \vec{U} dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \vec{U} dV + \int_{\sigma} \rho \vec{U} U_n dA \quad (10)$$

导得压力管道中水流的动量方程为

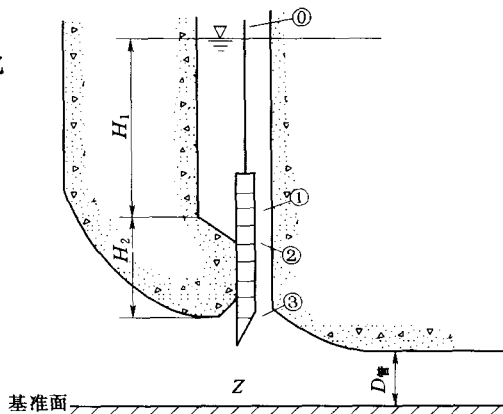


图 3 连通布置的通气孔

$$\frac{p_{\text{管}}}{\gamma} + Z - H_{\text{尾}} - \frac{p_a}{\gamma} + \frac{A_c}{A} \frac{U_c^2}{g} - \left(\frac{\lambda_{\text{管}} L_{\text{管}}}{D_{\text{管}}} + K_{\text{局}} + K_{\text{总}} + 1 \right) \frac{1}{2g} \left(\frac{dL_{\text{管}}}{dt} \right)^2 = - \frac{L_{\text{管}}}{g} \left(\frac{d^2 L_{\text{管}}}{dt^2} \right) \quad (11)$$

式中: A_c 为收缩面积; U_c 为收缩处水流速。

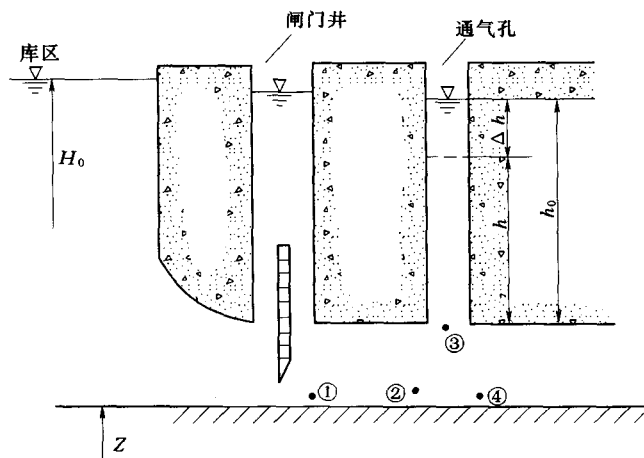


图4 独立布置的通气孔

2. 独立布置的通气孔^[10] (见图4)

(1) 满流时, 考虑过闸流动、通气孔中水流运动、压力管道中水流运动、通气孔与压力管道接头处(三通管) 能量关系及质量守恒原理, 导得如下方程:

1) 过闸流量方程。

$$Q = C \sqrt{2g \left(H_0 + \frac{p_a}{\gamma} - Z - \frac{p_2}{\gamma} \right)} \quad (12)$$

$$\frac{1}{C^2} = \frac{1}{\mu^2 A_c^2} + \frac{2}{A_{\text{管}}^2} - \frac{2}{\epsilon A_c A_{\text{管}}} \quad (13)$$

2) 通气孔中水流的动量方程。

假设通气孔断面面积不变, 对通气孔中水体列动量方程

$$\frac{p_{\text{气}}}{\gamma} - \frac{p_3}{\gamma} + h - \frac{\lambda_{\text{孔}}}{2g} \frac{h}{D_{\text{孔}}} U_{\text{孔}}^2 = \frac{h}{g} \frac{dU_{\text{孔}}}{dt} \quad (14)$$

$$\frac{dh}{dt} = -U_{\text{孔}} \quad (15)$$

3) 压力管道中水流的动量方程。考虑通气孔下游侧水体, 列动量方程, 仍得式(4)

$$\frac{p_{\text{管}}}{\gamma} + Z - \frac{p_a}{\gamma} - H_{\text{尾}} - \left(\frac{\lambda_{\text{管}} L_{\text{管}}}{D_{\text{管}}} + K_{\text{局}} + K_{\text{总}} - 1 \right) \frac{U_{\text{管}}^2}{2g} = \frac{L_{\text{管}}}{g} \frac{dU_{\text{管}}}{dt}$$

4) 压力管道与通气孔接头处(三通管) 能量方程。将压力管道与通气孔的接头处视为三通管, 根据三通能量关系式^[10], 可得

$$\frac{p_{\text{管}}}{\gamma} = \frac{p_2}{\gamma} + f_{w1} \frac{U_{\text{管}}^2}{2g} \quad (16)$$

$$\frac{p_3}{\gamma} = \frac{p_2}{\gamma} + f_{w2} \frac{U_{\text{管}}^2}{2g} \quad (17)$$

式中: f_{w1} 、 f_{w2} 分别为三通处损头系数, 它是通气孔中水流量 $Q_{\text{孔}}$ 、压力管道中流量 $Q_{\text{管}}$ 及过闸流量 Q 的函数。

5) 质量守恒原理。设通气孔中水位下降时, $Q_{\text{孔}}$ 为正, 则由连续性方程可得

$$U_{\text{管}} A_{\text{管}} = U_{\text{孔}} A_{\text{孔}} + Q \quad (18)$$

(2) 明满流时, 水流只在压力管道中流动。考虑过闸流动、压力管道中水流运动及质量守恒原理, 可得:

1) 过闸流量方程。根据自由出流流量方程, 得:

$$Q = \mu A_c \sqrt{2g \left(H_0 - Z + \frac{p_a}{\gamma} - \frac{p_{\text{气}}}{\gamma} - h_c \right)} \quad (19)$$

式中: h_c 为收缩断面处水深。

2) 压力管道中水流的动量方程。考虑压力管道中满流段水体, 由式 (10) 导得动量方程

$$\frac{p_{\text{管}}}{\gamma} - \frac{p_a}{\gamma} + Z - H_{\text{尾}} + \frac{A_c}{A} \frac{U_c^2}{g} - \left(\frac{\lambda_{\text{管}} L_{\text{管}}}{D_{\text{管}}} + K_{\text{局}} + K_{\text{总}} + 1 \right) \frac{U_{\text{管}}^2}{2g} = \frac{L_{\text{管}}}{g} \frac{dU_{\text{管}}}{dt} \quad (20)$$

式中: $L_{\text{管}}$ 为压力管道中水体的长度, 是变量; Z 为压力管道高程, 是变量, 且为 $L_{\text{管}}$ 的函数。

式 (20) 中 $p_{\text{管}}$ 是满流段前的绝对压强。由于满流段前是急流, 压力分布可假设为静压分布, $p_{\text{管}}$ 可满足下列等式

$$\frac{p_{\text{管}}}{\gamma} = \frac{p_a}{\gamma} + h \quad (21)$$

3) 连续性方程。

$$U_{\text{管}} = \frac{Q}{A_{\text{管}}} - \frac{dL_{\text{管}}}{dt} \quad (22)$$

至此, 水流运动部分的计算关系式已经建立完毕。通过这些方程式可以分别解出通气孔连通布置时和独立布置时压力管道中水力要素。

(二) 气流运动部分计算关系式^[7,10,12]

通气孔中气流运动是非定常流, 但计算时取很小的时段 Δt , 便可近似按定常流计算。根据 Newman 观点, 通气孔中气流运动可分为进口段 (见图 5, 0—1 段) 和管道流段 (见图 5, 1—2 段) 计算, 且由于时间不长, 管道较短, 可假设气体流动为绝热过程。

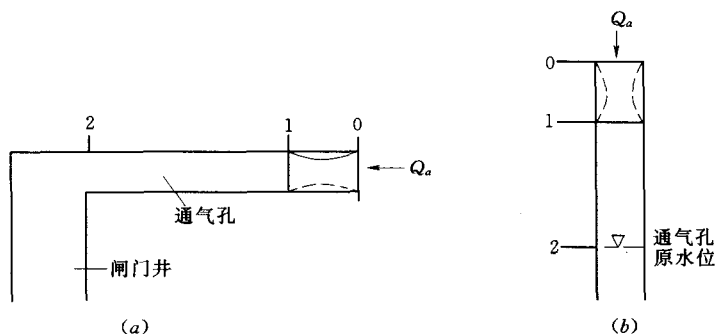


图 5 通气孔中气流运动

(a) 连通布置的通气孔; (b) 独立布置的通气孔

1. 进口段

如图 5 所示, 0—1 段为进口段。空气在进口段内发生收缩现象。略去进口段的摩擦损失而只考虑其收缩损失 (因前者比后者要小得多)。根据空气动力学知

$$\frac{p_1}{p_1^0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M_1^2 \right)^{-\frac{k}{k-1}} \quad (23)$$

式中: M_1 为进口段 1 处的气体马赫数; p_1 为进口段 1 处的压强; p_1^0 为进口段 1 处的滞止压强。

对理想气体, 进口段的气体流动为绝热等熵流动, 滞止压强不变, 等于 0 处的滞止压