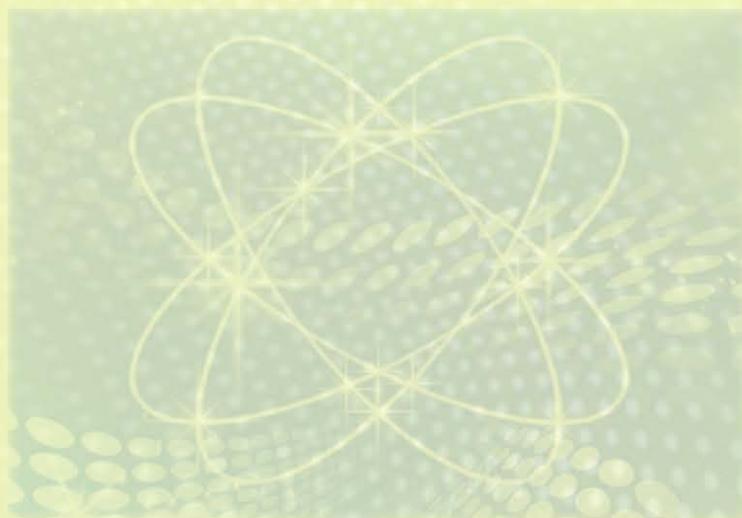


梁曾相文集



Forward

Professor Liang Xu of the Department of Civil and Environmental Engineering, University of Pittsburgh invited me to write this forward for a book that she and her brother were compiling in commemoration of their beloved father. The book would contain papers by her father and tributes by friends, colleagues and students. I felt it would be timely and should have a great contribution to the field of hydraulics and hydraulic engineering. Her invitation brought up my memories of an event that took place about twenty-five years ago.

It was early spring of 1986 when I unexpectedly received a letter from the U. S. National Academy of Sciences (NAS) in Washington D. C. The letter said that I had been invited to give a series of lectures on Stochastic Hydraulics at the Chengdu University of Science and Technology (now part of Sichuan University), Chengdu, China. My assignment was to serve as a consultant under the Chinese Universities Development Project funded by the World Bank and administered by NAS. The official representative of the host institution was going to be Professor Liang Zengxiang.

I met Professor Liang Zengxiang for the first time when our family of three (wife Fuh-Mei, son Hueiley and I) landed at the Chengdu Airport in wee hours one morning in mid-June of 1986. He impressed me as a gentleman of warm personality. Later that morning our family also met his daughter Liang Xu. She was a young graduate student. She kindly showed us around Chengdu during our stay. Nobody could even imagine then that she would become a member of the University of Pittsburgh faculty twenty years later, after her graduate study at the University of Washington and a faculty position at the University of California, Berkeley. It shows an amazing, uncanny random walk of life.

Historically, Chengdu is well known for the important water works instrumental to the production of foods and developments of the region. During my short stay in Chengdu I came to realize that Professor Liang Zengxiang was a leading expert in the area of high-speed flows, such as the rapid flows in spillways and turbulent currents in stilling basins. His published papers indicate that he was a prolific writer. His research included rigorous fluid dynamic analysis as well as well-designed experimental work. The depth of his research was impressive. Few researchers investigated this special subject more thoroughly than Professor Liang.

A requirement of being a university professor is good teaching. Professor Liang's for-

mer colleagues and students respected him as an effective, inspiring teacher. It is not surprising, therefore, that he produced many outstanding students.

Professor Liang maintained an open-minded attitude toward new developments in the field of hydraulics around the world. For example, he obtained the funding to invite me to give lectures at his institution in Chengdu, on applications of stochastic and probabilistic approaches to hydraulics. It gave me an opportunity to interact with students as well as outstanding researchers and professors from many institutions in different parts of China.

Professor Liang Zengxiang also was a good husband and good father. I am glad that wife Ju Guifang and daughter Liang Xu are now living in Pittsburgh and doing well.

Chao-Lin Chiu

Professor Emeritus of Civil and Environmental Engineering

University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA, USA

November 22, 2011

前 言

梁曾相教授，1926年12月10日出生于北平（现北京市）。父梁仲华先生，1922年毕业于北京大学，1929年与彭锡田先生和王怡柯先生创立河南村治学院，1931年与梁瀨溟先生等赴山东创办乡村建设研究院并任院长，1934年任燕京大学教授，抗日战争期间任华西大学教授，1952年后任四川大学教授。先父梁曾相，小学就读于北平孔德学校，1937年“七·七”事变后，随家逃难到四川，1939年至1945年就读于四川金堂铭贤中学，1945年秋入武汉大学土木系学习，1948年因重病休学。1949年秋借读于四川大学土木水利系。1950年7月大学毕业，任教于四川大学。1954年院系调整后任教成都工学院，历任助教、讲师、副教授、教授。1978年至1985年任成都科技大学高速水流研究室主任。曾任中国水利学会《水利学报》第四届及第五届编委，著名水力学家，九三学社资深会员。1988年11月退休。1998年秋患白血病。2000年4月9日清晨，在成都华西医科大学第一附属医院的病床上与世长辞。

梁曾相先生一生从事高等教育和科研工作，勤勤恳恳，兢兢业业，教书育人，将自己的毕生奉献给祖国的教育事业和水利科学事业，为祖国培养了大批栋梁之材。

父亲长期讲授《水力学》、《理论力学》以及《急流水力学》等多门课程，在内容组织、教授方法等各方面都有很多独创性。他所讲授的课程，生动精彩，教学效果特别好，深受广大学生的喜爱。父亲非常重视理论与试验的结合，学校最早的水力学实验室即为父亲在50年代设计并主持建造，使用长达四十多年，为培养学生的实验技能、方法以及理论结合实践的科学态度，起到了重要作用。先父自己在实验方面更是身体力行。梁耀少时见父亲的手表表面发黄，心中纳闷，便询问父亲。原来，父亲做实验手伸进水槽中操作而忘记摘下手表，手表长时间浸泡在水中当时却一点都未察觉。

除优异的教学外，父亲在水力学、高速水流及掺气等重要前沿领域中进行了开拓性的研究，早在50年代，父亲就已在掺气等方面的研究中具有突出的成绩，发表论文《明渠高速水流掺气问题的研究》（合著，《科学技术》1959年第3期，《成都工学院学报》）。

“文化大革命”后，父亲再次为高速水力学学科的发展以及研究生教育倾注了满腔热情和心血。他主持了许多国家重要的科学研究和攻关项目，包括国家“七·五”科技攻关课题“二滩水电站泄洪消能方案优化”（该项工作获电力部科技进步二等奖），与德国专家在空化与空蚀领域的国际合作研究项目，及水利电力部科学基金项目“拱坝收缩式消能池中水跃的研究”，取得了丰硕的研究成果。在国内外发表了多篇高水平论文并数次获得优秀论文奖。为四川大学（成都科技大学）“水力学及河流动力学”学科建设成为全国重点学科，以及高速水力学国家重点实验室的创建和发展，都作出了重要的贡献。

梁曾相先生善良正直，光明磊落，淡泊名利，谦和朴实，治学严谨，深受广大学生的

爱戴和同事们的尊敬。梁曾相先生去世后，中国水利学会《水利学报》（2000年第6期19页）刊登“水力学专家梁曾相教授在蓉逝世”的消息，写道：“梁曾相教授在高速水流、空化与空蚀、掺气等重要前沿领域中进行了开拓性的研究工作，主持了国家‘七·五’科技攻关课题‘二滩水电站泄洪消能方案研究’等多项重要研究课题，发表了多篇高水平的学术论文，获得中国水利学会及四川省科学技术协会优秀论文奖数次，为我国的水利事业发展作出了重要的贡献。”

为纪念父亲，我们一直希望能够收集出版父亲的文集，但因工作繁忙，一耽搁竟是十年。该文集共收入了父亲十三篇有代表性的学术论文和著作，为文集之上篇；同时还收入了父亲两篇人文方面的文章，包括在病床上忍受着病痛的折磨所写下的《怀念母校孔德》，为文集之下篇，这也是父亲最后的文字《怀念母校孔德》的首次面世。附录一收入了父亲的一篇论文手稿的影印件。

美国匹兹堡大学（University of Pittsburgh）土木及环境工程系退休教授、国际著名随机水力学专家邱照淋（Chao-Lin Chiu）博士欣然应邀，为文集写下热情洋溢的序，我们非常感激。

为了帮助读者阅读，在每篇论文（著作）前都给出了简要的导读，以介绍该文的成文过程、科研课题等背景情况。我们要特别感谢廖华胜教授和刘善钧教授，他们在百忙中抽出时间为三篇论文写引言，深情地记述了父亲工作中一些珍贵的小故事，其中有些我们也是第一次知道。其余论文的引言则根据以前父亲谈起的一些往事的记忆或我们自己的亲身经历而写成。

父亲去世后，我们陆续收到来自父亲同事和好友等怀念父亲的文字。这些真诚、深情的回忆和思念从多个侧面反映出父亲几十年的工作和生活，感人至深。我们衷心地感谢他们，感谢他们心中珍存的这份人世间最为宝贵的真情！

为纪念父亲，文集收录了九篇纪念文（附录二）。由于十余年来我们在中国和美国数次搬家，所收到的回忆文中有个别似已丢失，我们感到非常遗憾，谨向有关的作者深表歉意。

在该文集的计划出版过程中，得到了四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室和水利水电学院的热情支持，特此致谢。中国水利水电科学研究院秦大庸教授热心帮助与《水利学报》编辑部联系有关该文集收录论文的版权许可事项，在此一并致谢。美国匹兹堡大学林晋祥（Jeen-Shang Lin）教授热心帮助纠正所收入的1959年发表的论文中图5的原印刷错误，谨致谢意。最后，我们要特别感谢四川大学出版社的段悟吾编辑和办公室杨丽贤主任的辛勤工作，由于我们远在美国工作，在收集和整理父亲论文的过程中遇到许多不便，交稿也受到拖延。在段编辑和杨主任的热情和耐心帮助下，我们克服了这些困难，使文集终于与读者见面。

梁耀 梁旭
2012年6月

目 录

上篇 科学及工程

恒定急变流的能量方程及其应用·····	(4)
水 跃·····	(13)
重力拱坝收缩式消能池中水跃的研究·····	(41)
高拱坝大泄量底流消能的试验研究·····	(54)
二滩高拱坝大泄量底流消能的试验研究·····	(103)
GRAVITY-AFFECTED POTENTIAL FLOWS PAST SPILLWAY FLIP BUCKETS ·····	(115)
拱坝中孔布置的优化模型及其算法·····	(133)
Experimental Research on Cavitation Inception of Gate Pier Models in a Depression Tank ·····	(140)
溢流坝反弧水深的计算·····	(153)
矩形水平槽中水跃的跃长公式·····	(161)
明渠高速水流掺气问题的研究·····	(165)
空化与空蚀·····	(179)

泄水建筑物鼻坎段压强分布及挑流出射角的理论解····· (230)

下篇 人 文

梁仲华教授事略····· (246)

怀念母校孔德····· (249)

附录一 梁曾相论文手稿

拱坝中孔布置的优化模型及其算法····· (261)

附录二 纪念文集

怀念父亲····· 梁 耀 (277)

悼梁曾相教授····· 陆文海 (280)

忆曾相二三事····· 李国润 (281)

怀念梁曾相教授····· 陈家远 袁辅中 (283)

怀念敬爱的老师梁曾相教授····· 张道成 (285)

难忘恩师····· 廖华胜 (286)

对梁曾相先生的一点回忆····· 周建军 (289)

In Memory of Professor Liang Zengxiang····· 李曙光 (291)

怀念敬爱的导师····· 刘善钧 (292)

上篇 科学及工程

恒定急变流的能量方程及其应用

引言

这篇论文发表于《水利学报》1982年第2期（水力学专辑）。该专辑共发表九篇论文，均选自1981年6月中国水利学会水力学专业委员会成立及学术讨论会上所交流的论文。在这次会议上共收录81篇论文，来自全国36个单位的水力学专家、教授和经验丰富的中青年科技工作者分别报告了各主要领域中的研究成绩和进展。会后，由大会学术组评审出数篇高质量的优秀论文推荐给《水利学报》，于是便产生了这期水力学专辑。

曾听父亲讲，在那次会议上，父亲为介绍同一单位的另一篇论文（因其作者未参加会议），反而没有机会宣读自己的论文。

该论文获1986年四川省科学技术协会优秀学术论文奖。

梁 耀

恒定急变流的能量方程及其应用^{*}

梁曾相

(成都科学技术大学)

提 要

恒定总流的 Bernoulli 方程仅适用于恒定渐变流, 而不能用来解有关恒定急变流的水力学问题。否则将会导致相当大的误差。为了分析和计算某些具有实际意义的恒定急变流问题, 本文提出了恒定急变流的能量方程, 并应用这一方程从理论上导出溢流坝反弧收缩水深、坝体泄水道流量以及侧壁孔口流速等的计算公式。为了验证, 在溢流坝水工模型上进行了反弧收缩水深的观测。公式计算结果与观测资料相当吻合。

在应用恒定总流的能量方程或 Bernoulli 方程时, 所取过水断面上各点的测压管水头 $z + \frac{p}{\gamma}$ 应等于或近似于常数。如果将这种总流称为渐变流, 而将 $z + \frac{p}{\gamma} \neq \text{const}$ 的总流称为急变流, 则恒定总流的能量方程应更确切地称为恒定渐变流的能量方程。显然, 这一重要方程是不能用来解有关急变流的问题的, 这不能不使该方程的应用受到了很大的限制。

为了分析和计算某些具有实际意义的急变流问题, 本文提出了恒定急变流的能量方程; 并通过溢流坝反弧收缩水深的计算, 坝体泄水道流量的确定以及测壁孔口流速公式的推导等问题来说明这一方程的具体应用。

一、恒定急变流的能量方程

恒定微小流束(见图 1)的能量方程为

$$z_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{u_0^2}{2g} = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{u^2}{2g} + h'_w \quad (1)$$

式中: z_0 及 z 分别为微小流束过水断面 $O-O$ 及 $S-S$ 的形心距水平基面 $G-G$ 的距离; p_0 及 p , u_0 及 u 分别为断面 $O-O$ 及 $S-S$ 形心处的动水压强和流速; h'_w 为两断面间的水头损失; γ 为水(或其它^①液体)的容重^②; g 为重力加速度。

* 本文原发表于《水利学报》1982年2月第2期, 32页~38页。

① 本书中“其它”同“其他”, 为保留作者原文原貌不作修改。

② 重度的旧称, 指单位容积内物体的重量, 本书为保留作者原文原貌不作修改。

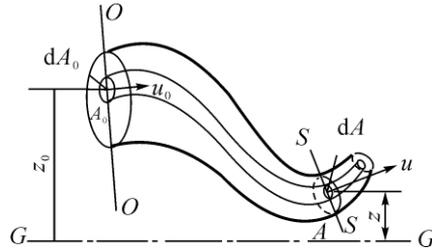


图 1

从方程(1)可以导出恒定总流的能量方程：

$$\frac{1}{Q} \int_{A_0} \left(z_0 + \frac{p_0}{\gamma} \right) u_0 dA_0 + \frac{\alpha_0 V_0^2}{2g} = \frac{1}{Q} \int_A \left(z + \frac{p}{\gamma} \right) u dA + \frac{\alpha V^2}{2g} + h_w \quad (2)$$

式中：Q 为总流的流量； A_0 及 A ， V_0 及 V ， α_0 及 α 分别为总流过水断面 $O-O$ 及 $S-S$ 的面积、平均流速和水动能修正系数； h_w 为两断面间总流的水头损失。

当过水断面 $O-O$ 处的水流为渐变流而 $S-S$ 处的为急变流时，则

$$\frac{1}{Q} \int_{A_0} \left(z_0 + \frac{p_0}{\gamma} \right) u_0 dA_0 = \left(z_0 + \frac{p_0}{\gamma} \right) \frac{\int_{A_0} u_0 dA_0}{Q} = z_0 + \frac{p_0}{\gamma} \quad (3)$$

而

$$\frac{1}{Q} \int_A \left(z + \frac{p}{\gamma} \right) u dA \cong z + \frac{p}{\gamma} \quad (4)$$

式中： $z_0 + \frac{p_0}{\gamma}$ 及 $z + \frac{p}{\gamma}$ 为测压管水头。

今令

$$\frac{1}{Q} \int_A \left(z + \frac{p}{\gamma} \right) u dA = z + \frac{p}{\gamma} \frac{\int_A u dA}{Q} = z + \frac{p}{\gamma} \quad (5)$$

并将关系式(3)及(5)代入式(2)，即得到恒定急变流的能量方程：

$$z_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{\alpha_0 V_0^2}{2g} = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g} + h_w \quad (6)$$

式中： $z + \frac{p}{\gamma}$ 可称为急变流过水断面的平均测压管水头。由式(5)可知：

$$z + \frac{p}{\gamma} = \frac{\int_A \left(z + \frac{p}{\gamma} \right) u dA}{\int_A u dA} \quad (7)$$

式(6)可以用来分析和计算 Bernoulli 方程所不能解决的某些急变流问题。

如果过水断面 $S-S$ 处的水流也为渐变流，则 $z + \frac{p}{\gamma} = z + \frac{p}{\gamma}$ 。于是，由式(6)即可得到著名的恒定总流的 Bernoulli 方程或称为恒定渐变流的能量方程如下：

$$z_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{\alpha_0 V_0^2}{2g} = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g} + h_w \quad (8)$$

二、圆柱曲面上急变流的 $z + \frac{p}{\gamma}$ 的表达式

当应用恒定急变流的能量方程进行计算时，一般须将所取的、急变流过水断面上的 $z + \frac{p}{\gamma}$ 求出。由式(7)可知，欲求 $z + \frac{p}{\gamma}$ ，则须先确定出 $z + \frac{p}{\gamma}$ 。

现在来推导工程实践中常见的、圆柱曲面上急变流的 $z + \frac{p}{\gamma}$ 的表达式。设半径为 R 的圆柱曲面上的急变流如图 2 所示。

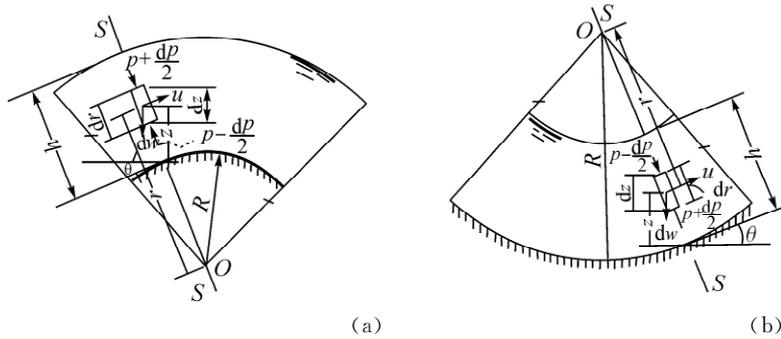


图 2

今取任一过水断面 $S-S$ ，并设该断面附近水流的流线为同心圆弧。在 $S-S$ 断面上沿法线取一长度为 dr 的微小水柱(见图 2)，沿法线可得

$$d\left(z + \frac{p}{\gamma}\right) = \frac{u^2 dr}{gr} \quad (9)$$

式中： r 为流线的曲率半径。

假设过水断面上水流质点的流速 u 等于过水断面平均流速 V ，并对上式积分，则得

$$z + \frac{p}{\gamma} = \frac{V^2}{g} \ln r + C \quad (10)$$

式中的积分常数 C 可根据水流的边界条件求得。

对于凸曲面上的水流，由图 2(a)可知：当 $r = R + h$ 时， $\frac{p}{\gamma} = 0$ 及 $z = h \cos \theta$ ，其中 h 为水深， θ 为过水断面底部切面与水平面间的夹角。于是，由式(10)得到积分常数 $C = h \cos \theta - \frac{V^2}{g} \ln(R + h)$ ，代入式(10)即得到凸曲面上水流的 $z + \frac{p}{\gamma}$ 表达式：

$$z + \frac{p}{\gamma} = h \cos \theta + \frac{V^2}{g} \ln \frac{r}{R + h} \quad (11)$$

将式(11)代入式(7)积分，得到

$$z + \frac{p}{\gamma} = h \cos \theta + 2 \left[\frac{R}{h} \ln \frac{(R/h) + 1}{R/h} - 1 \right] \frac{V^2}{2g} \quad (12)$$

或

$$z + \frac{p}{\gamma} = h \cos\theta + \frac{\kappa V^2}{2g} = h \cos\theta + \frac{\kappa q^2}{2gh^2} \quad (13)$$

式中： κ 为一系数，它反映水流相对弯曲程度 R/h 对 $z + \frac{p}{\gamma}$ 的影响，当 $R \rightarrow \infty$ 时， $\kappa \rightarrow 0$ ； q 为单宽流量。

采用类似的方法，同样可以导出凹曲面上急变流的 $z + \frac{p}{\gamma}$ 的表达式，其形式与式(13)完全相同。当然，对于不同形式的圆柱曲面(凸和凹)，系数 κ 的表达式是不同的。

对于凸曲面，由式(12)及(13)可知：

$$\kappa = \kappa_{\text{凸}} = 2 \left[\frac{R}{h} \ln \frac{(R/h) + 1}{R/h} - 1 \right] \quad (14)$$

为了简化上式，对该式中的对数进行幂级数展开，得到下列的近似式：

$$\begin{aligned} \ln \frac{(R/h) + 1}{R/h} &= 2 \left\{ \frac{[(R+h)/R] - 1}{[(R+h)/R] + 1} + \frac{1}{3} \left[\frac{(R+h)/R - 1}{(R+h)/R + 1} \right]^3 + \dots \right\} \\ &\approx \frac{1}{R/h + 0.5} \end{aligned}$$

将上列近似式代入式(14)，则得到 $\kappa_{\text{凸}}$ 的简化公式如下：

$$\kappa_{\text{凸}} = \frac{-1}{R/h + 0.5} \quad (15)$$

当 R/h 与 0.5 相较其值较大时，上式可进一步简化为

$$\kappa_{\text{凸}} = -h/R \quad (16)$$

对于凹曲面，

$$\kappa = \kappa_{\text{凹}} = 2 \left[\frac{R}{h} \ln \frac{R/h}{(R/h) - 1} - 1 \right] \quad (14')$$

三、恒定急变流能量方程的应用

(一) 溢流坝反弧收缩水深的计算

溢流坝反弧收缩水深 h_c (见图 3) 一般常按下列理论公式计算^[1]，即

$$E_0 = h_c + \left(\frac{q^2}{\varphi^2 2gh_c^2} \right) \quad (17)$$

或

$$q = \varphi h_c \sqrt{2g(E_0 - h_c)} \quad (18)$$

式中： $E_0 = P + H + \left(\frac{\alpha_0 V_0^2}{2g} \right)$ ，其中 P 为反弧底距

坝顶的距离， H 为坝顶水头， $\frac{\alpha_0 V_0^2}{2g}$ 为坝前过水断面 $O-O$ 的流速水头； φ 为坝的流速系数。

上式是根据对坝前断面 $O-O$ 及收缩断面 $C-C$ (见图 3) 应用 *Bernoulli* 方程导出的。应

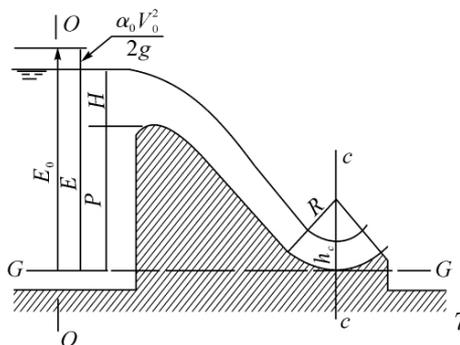


图 3

当指出,按该公式所求出的 h_c 值一般均较实测值为小,其误差随着 R/h_c 的减小而增大,当 R/h_c 较小时,其相对误差可高达 30% 以上。这主要是因为,在推导该公式时,要假设 C—C 断面处的水流为渐变流。但实际上,该处的水流却是急变流。

由此可见,在推导 h_c 的计算公式时,须应用恒定急变流能量方程(6)而非式(8)。今以过反弧底的水平面 G—G 为基面,对断面 O—O 及 C—C 应用式(6)和式(13)导出反弧收缩水深 h_c 的计算公式:

$$E_o = h_c + \left(\kappa + \frac{1}{\varphi^2} \right) q^2 / 2gh_c^2 \quad (19)$$

或

$$q = h_c \sqrt{2g(E_o - h_c)} / \sqrt{\kappa + \frac{1}{\varphi^2}} \quad (20)$$

式中的系数 κ 按式(14')计算。至于溢流坝的流速系数 φ ,一般可按式^[2]计算,即

$$\varphi = 1 - 0.0155 \left(\frac{P}{H} \right) \quad (21)$$

为了验证反弧收缩水深计算公式,即急变流收缩水深公式(19)或(20),在 50 厘米宽的水平玻璃槽中,对四种不同尺寸的溢流坝模型进行了试验^①。反弧收缩水深的诸观测值 $h_{c测}$ 和急变流收缩水深公式(19)和渐变流收缩水深公式(17)的计算值分别列在表 1 以供比较。可以看出,式(19)的计算值与观测值相当吻合。当 $\kappa \rightarrow 0$ 时,式(19)和(20)将分别变为式(17)和(18)。因此,只有当 κ 与 $1/\varphi^2$ 相较相当小时,应用公式(17)和(18)才不致产生较大的误差;否则,其误差将随着 κ 值的增大,亦即随着 R/h_c 值的减小而增大。此点已为观测资料所证实(见表 1)。

表 1 溢流坝反弧收缩水深计算值与试验比较

模型尺寸	序号	q (平方厘米/秒)	H (厘米)	R h _{c测}	h _{c测} (厘米)	h _{c计} (厘米)			
						式(19)*	相对误差	式(17)	相对误差
P/R=2.281 R=20 厘米	1	204	4.96	25.97	0.77	0.77	0%	0.76	-1.3%
	2	394	7.49	14.39	1.39	1.41	+1.4%	1.37	-1.4%
	3	608	9.42	9.48	2.11	2.14	+1.4%	2.04	-3.3%
	4	796	11.11	7.19	2.78	2.78	0%	2.61	-6.1%
	5	998	12.61	5.75	3.48	3.49	+0.3%	3.22	-7.5%
	6	1188	13.92	4.74	4.22	4.18	-0.9%	3.79	-10.2%

① 先后参加试验和数据计算的有罗铭、杨永全和段维均,参加试验的还有唐树德。

续表1

模型尺寸	序号	q (平方厘米/秒)	H (厘米)	R h _{c测}	h _{c测} (厘米)	h _{c计} (厘米)			
						式(19)*	相对误差	式(17)	相对误差
P/R = 3.306 R = 13 厘米	7	202	4.80	16.46	0.79	0.79	0%	0.77	-2.5%
	8	296	6.04	11.71	1.11	1.12	+0.9%	1.09	-1.8%
	9	496	8.23	7.22	1.80	1.84	+2.2%	1.73	-3.9%
	10	600	9.27	5.80	2.24	2.22	-0.9%	2.06	-8.0%
	11	696	10.03	5.04	2.58	2.59	+0.4%	2.37	-8.1%
	12	794	10.93	4.38	2.97	2.96	-0.3%	2.67	-10.1%
	13	898	11.62	3.72	3.49	3.38	-3.2%	3.00	-14.0%
	14	1002	12.46	3.37	3.86	3.80	-1.6%	3.31	-14.3%
	15	1094	13.00	3.00	4.34	4.20	-3.2%	3.60	-17.1%
16	1202	13.82	2.75	4.72	4.67	-1.1%	3.92	-17.0%	
P/R = 4.000 R = 25 厘米	17	398	7.61	22.12	1.13	1.11	-1.8%	1.09	-3.5%
	18	600	9.88	15.63	1.60	1.58	-1.3%	1.54	-3.8%
	19	800	11.73	12.08	2.07	2.05	-1.0%	1.99	-3.9%
	20	1005	13.54	9.88	2.53	2.53	0%	2.43	-4.0%
	21	1194	15.12	8.45	2.96	2.98	+0.7%	2.84	-4.1%
	22	1400	16.63	7.27	3.44	3.47	+0.9%	3.28	-4.7%
	23	1600	18.06	6.38	3.92	3.95	+0.8%	3.70	-5.6%
	24	2000	20.70	5.18	4.83	4.95	+2.5%	4.53	-6.2%
	25	2180	22.10	4.78	5.22	5.39	+3.3%	4.89	-6.3%
P/R = 6.677 R = 6 厘米	26	200	4.80	7.32	0.82	0.82	0%	0.78	-4.9%
	27	398	7.24	3.59	1.67	1.64	-1.8%	1.45	-13.2%
	28	600	9.20	2.17	2.77	2.59	-6.5%	2.12	-23.5%
	29	794	10.84	1.51	3.97	3.71	-6.5%	2.74	-31.0%
	30	1002	12.45	1.10	5.44	5.56	+2.2%	3.40	-37.5%

* 公式(19)中的系数 κ 按 κ_测 = 1/(R/h - 0.5) 计算。

(二) 坝体泄水道流量的确定

坝体内的矩形泄水道如图 4 所示。欲推导泄水道的流量公式，须对坝前过水断面 O—O 及泄水道出口处的过水断面 S—S 应用能量方程。由于出口断面附近的水流位于圆柱凸曲面上，为急变流。因此，不能应用 Bernoulli 方程，而须采用恒定急变流能量方程(6)。

今以过泄水道出口底部的水平面 G—G 为基面(见图 4)，对断面 O—O 和 S—S 应用方程(6)，得到

$$H_0 = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g} + h_w \quad (22)$$

式中：H₀ = H + (α₀V₀²/2g)，其中 H 为上游水面至泄水道出口底部的距离；h_w 为泄水道沿程

水头损失 h_f 与诸局部水头损失 $\sum h_j$ 之和, 即

$$h_w = h_f + \sum h_j = \left[(2gL/C^2R) + \sum \zeta \right] \frac{V^2}{2g}$$

式中: L 为泄水道长度; C 为 Chézy 系数; R 为泄水道的水力半径; $\sum \zeta$ 为泄水道诸局部阻力系数之和。又由式(13) 得知:

$$z + \frac{p}{\gamma} = h \cos\theta + \kappa \frac{V^2}{2g}$$

将以上诸关系式代入式(22), 即得到

$$H_0 = h \cos\theta + \left(\kappa + \alpha + \frac{2gL}{C^2R} + \sum \zeta \right) \frac{V^2}{2g}$$

由上式即可导出坝体泄水道的流速和流量公式如下:

$$V = \frac{[2g(H_0 - h \cos\theta)]^{\frac{1}{2}}}{\left[\kappa + \alpha + \frac{2gL}{C^2R} + \sum \zeta \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (23)$$

$$Q = bh \frac{[2g(H_0 - h \cos\theta)]^{\frac{1}{2}}}{\left[\kappa + \alpha + \frac{2gL}{C^2R} + \sum \zeta \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (24)$$

式中: b 为泄水道的宽度; h 为泄水道出口断面处的水深, 亦即泄水道出口处的高度; 至于系数 κ , 则按式(14)或(15)计算。

(三)侧壁孔口流速公式的推导

水头 H 恒定的侧壁孔口的自由出流如图 5 所示。在推导此侧壁孔口的流速公式时, 一般水力学书上均对孔前过水断面 $O-O$ 及收缩断面 $C-C$ (见图 5) 应用式(8)。从理论上来看, 这是不够恰当的。因为, 在收缩断面 $C-C$ 上各点的动水压强 $p_c \approx 0$, 从而 $(z + \frac{p}{\gamma})_c \neq \text{const.}$

比较合理的推导是, 以过孔口中心的水平面 $G-G$ 为基面, 对断面 $O-O$ 及 $C-C$ 应用恒定急变流能量方程(6), 于是得到

$$H_0 = \left(z + \frac{p}{\gamma} \right)_c + \frac{\alpha_c V_c^2}{2g} + h_w$$

因为 $p_c \approx 0$, 从而 $(z + \frac{p}{\gamma})_c \approx z_c = 0$, 又因 $h_w = \zeta V_c^2 / 2g$, 于是由上式得到侧壁孔口的平均流速公式如下:

$$V_c = \frac{\sqrt{2gH_0}}{\sqrt{\alpha_c + \zeta}} = \varphi \sqrt{2gH_0} \quad (25)$$

同样, 可以应用恒定急变流的能量方程来推导侧壁管嘴的流速公式。

此外, 应用恒定急变流能量方程(6)还可以导出适用于各种堰流流量计算的堰流基本

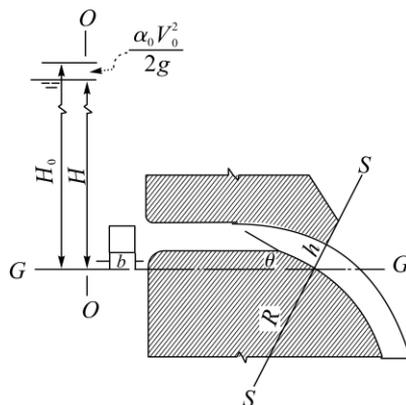


图 4

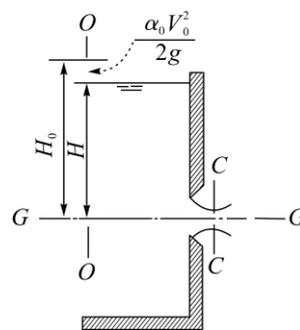


图 5