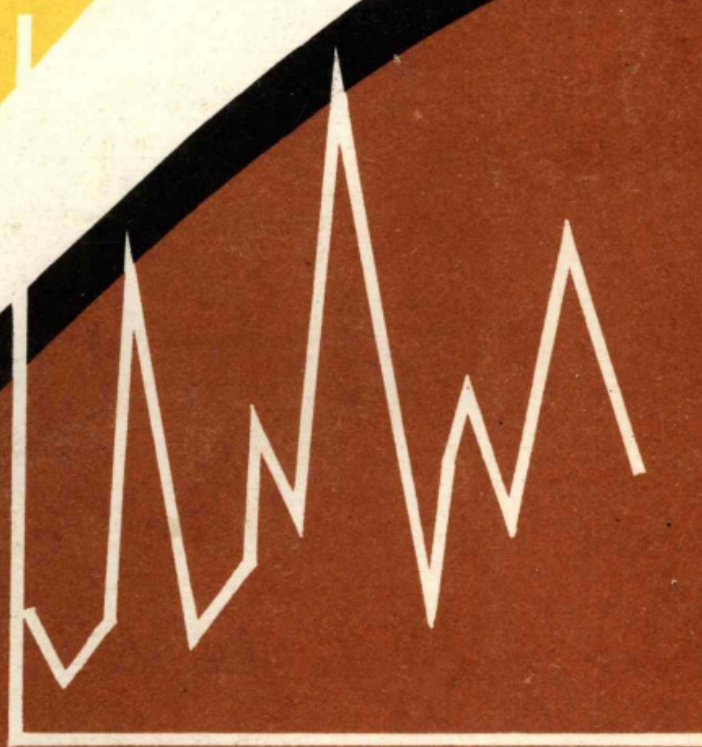


高速水力学

HYDRAULICS FOR HIGH-VELOCITY

李建中 宁利中 编著



西北工业大学出版社

责任编辑：孙华荃

封面设计：范桦

高 速 水 力 学

Hydraulics for High—Velocity

李建中 宁利中 编著

西北工业大学出版社

1994 年12 月 西安

(陕)新登字 009 号

【内容简介】 本书在系统地介绍高速水力学的基本理论及研究方法的基础上,介绍了 80 年代以来的最新研究成果和当前的研究趋势。主要内容为明流边界层理论、高速水流的脉动与建筑物振动、水流掺气与雾化、空化与空蚀、急流冲击波理论与控制、高速水流的消能和新型消能工等。本书可作为水利水电建设工程专业及相近专业研究生、高年级学生的教材,也可供从事水利水电科学研究与工程设计的工作者参考。

高速水力学

李建中 宁利中 编著

责任编辑 孙华荃

责任校对 生 力

*

© 1994 西北工业大学出版社出版发行
(710072 西安市友谊西路 127 号 4253407)

陕西省新华书店发行

西安理工大学印刷厂印装

ISBN 7-5612-0721-2/O·94

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 17.625 字数 440 千字
1994 年 12 月第 1 版 1994 年 12 月第 1 次印刷
印数 1—1 000 册 定价 16.50 元

前 言

随着高坝建设的增多,高速水力学问题日益突出。据统计,全世界已建100m以上的高坝有400余座。我国已建和在建的有31座。这些高坝枢纽泄水工程中的水流流速在50m/s左右或更高。这样大的水流流速会产生一些特殊的水流现象,如掺气、脉动、振动、空化、空蚀、冲刷、磨损、雾化等。这些特殊水流现象是一般水力学解决不了的,也难以用物理模型做到与原型流动完全相似的模拟试验。这就对解决工程实际问题带来很大困难,引起了许多水利水电工作者的极大关注,国内外不少学者对此进行了大量研究。经过半个多世纪的发展,已形成了一门专门研究高速水流特殊水力学问题的新的水力学学科分支——高速水力学。

直至目前还没有系统阐述高速水力学的著作,本书是个尝试。

本书的内容共有六大部分,即第二章至第七章。第二章主要介绍研究高速水力学问题而需要的基础知识——明流边界层理论。第三章至第七章分别介绍高速水流脉动、水流掺气、空化空蚀、急流控制、新型消能工与冲刷消能等高速水流的主要知识。

本书在撰写中除介绍一些高速水力学的基本知识外,还概括了80年代以来的最新研究成果,并指出了目前存在的问题与研究趋势。本书也是作者近年来对研究生教学讲义的总结与提高,是目前国内系统讲解高速水力学问题的唯一著作。

本书第一章至第五章由李建中撰写,第六、第七章由宁利中撰写。

本书可以作为水利、土建类有关学科的研究生教材,也可作为水利水电工程建筑专业等本科生的选修教材,还可供进行科学研究与工程设计的水利水电科技工作者参考。

作 者

1993年11月于西安

目 录

第一章 绪 论	1
§ 1—1 高速水力学的定义	1
§ 1—2 高速水力学问题的提出与发展	1
§ 1—3 高速水力学研究课题	3
§ 1—4 高速水流的特点	5
第二章 明流边界层	6
§ 2—1 概 述	6
§ 2—2 明流光滑平板边界层	7
§ 2—3 光滑溢流陡坡上的紊流边界层	9
§ 2—4 粗糙溢流陡坡上的紊流边界层	11
§ 2—5 用流速对数律研究陡坡上的紊流边界层	14
§ 2—6 陡坡紊流边界层的数值计算	22
§ 2—7 曲面边界层的运动方程和连续方程	28
§ 2—8 曲面紊流边界层的运动方程和连续方程	30
§ 2—9 曲面边界层的动量方程及其求解	31
§ 2—10 反弧曲面紊流边界层的试验研究	35
§ 2—11 反弧曲面水力特性的试验研究	38
§ 2—12 反弧曲面紊流边界层的动量积分方程组及其数值解	42
§ 2—13 溢流反弧曲面的紊流数学模型	52
参考文献	60
第三章 高速水流的脉动	63
§ 3—1 概 述	63
§ 3—2 高速水流的脉动现象	64
§ 3—3 脉动压强的成因与机理	65
§ 3—4 脉动量的量测	67
§ 3—5 脉动压强的模拟	68
§ 3—6 脉动压强的分析方法	73
§ 3—7 脉动压强的数理统计分析法	73
§ 3—8 脉动压强的频谱分析法	76

§ 3—9 紊流边界层边壁的压力脉动	81
§ 3—10 强紊流区的压力脉动	84
§ 3—11 空化流与掺气流中的压力脉动	88
§ 3—12 水流诱发的泄水建筑物振动问题	89
参考文献	91

第四章 掺气水流 93

§ 4—1 概 述	93
§ 4—2 水流掺气的成因与机理	94
§ 4—3 掺气发生条件的判别	98
§ 4—4 掺气发生点的确定	99
§ 4—5 掺气浓度	100
§ 4—6 恒定掺气水流气泡悬移的基本方程式	102
§ 4—7 自掺气水流的掺气浓度分布	105
§ 4—8 自掺气水流的水深计算	111
§ 4—9 强迫掺气	113
§ 4—10 掺气对消能的影响	115
参考文献	116

第五章 空化与空蚀 118

§ 5—1 概 述	118
§ 5—2 泄水建筑物的空蚀实例	119
§ 5—3 空化现象	119
§ 5—4 空化产生的气核理论	123
§ 5—5 空泡的运动方程及空泡的发育与成长	125
§ 5—6 球形空泡溃灭的雷利理论	130
§ 5—7 空泡溃灭的实验研究	132
§ 5—8 空蚀机理	133
§ 5—9 空蚀过程及空蚀率	136
§ 5—10 研究空化与空蚀的几个无因次数	138
§ 5—11 研究空化与空蚀的试验设备与观测技术	139
§ 5—12 空化与空蚀的相似律	143
§ 5—13 影响空蚀的因素	147
§ 5—14 空化空蚀研究的一些新动态	149
§ 5—15 减免空蚀的措施	149
参考文献	151

第六章 明渠急流冲击波及其控制	155
§ 6—1 概 述.....	155
§ 6—2 急流冲击波的形成.....	155
§ 6—3 宽浅明渠急流冲击波理论.....	157
§ 6—4 冲击波的反射与干扰.....	165
§ 6—5 急流收缩段冲击波的计算.....	167
§ 6—6 窄缝收缩段急流冲击波的计算.....	169
§ 6—7 急流扩散段冲击波的计算.....	172
§ 6—8 急流弯道冲击波的计算.....	177
§ 6—9 急流冲击波的控制.....	183
§ 6—10 滚波的产生及其特征	188
§ 6—11 急流控制理论及工程应用简介	192
参考文献.....	193
第七章 高速水流的消能问题	196
§ 7—1 概 述.....	196
§ 7—2 挑流水舌挑距及影响因素.....	197
§ 7—3 挑流冲刷机理及局部冲刷的研究方法.....	206
§ 7—4 挑流局部冲刷深度的估算及其影响因素.....	208
§ 7—5 挑流冲刷估算中几种新的方法简介.....	215
§ 7—6 大差动挑流空中碰撞消能的水力特性.....	216
§ 7—7 水垫消能的水力特性.....	220
§ 7—8 窄缝挑坎收缩段水力特性与应用条件.....	225
§ 7—9 窄缝挑流水舌特性与冲刷估算.....	232
§ 7—10 低佛氏数水跃消能的水力特性	236
§ 7—11 宽尾墩消能的水力特性	246
§ 7—12 掺气分流墩与底流联合消能的水力特性	253
§ 7—13 有压洞多级孔板消能的水力特性	258
§ 7—14 台阶式溢洪道的水力特性	264
§ 7—15 其它新型消能工与联合消能问题	266
§ 7—16 挑流消能的雾化问题	267
§ 7—17 含沙水流对挑流冲刷的影响	269
参考文献.....	270

第一章 绪 论

§ 1—1 高速水力学的定义

大家知道,水力学是研究液体运动规律及其应用的科学。高速水力学是研究水流在高速流动情况下的运动规律及应用这些规律解决工程实际问题的科学。即是说高速水力学包括两大部分内容:一部分是水流高速运动规律的研究;另一部分是应用这些规律解决工程实际问题研究。

什么叫“高速”,多大的速度属于高速的范畴,这一点到目前为止还没有严格的数字界限。过去有人说 $7\sim 8\text{ m/s}$ 以上的流速就属高速了,因为当明槽水流达到这个速度时,水流就开始掺气了。但也有人说是 5 m/s 以上的流速就为高速,因为水流达到 5 m/s 的速度时,其脉动与紊动已较强烈,局部地区已开始掺气。还有人说,明槽急流就是高速水流,因为急流会发生一些特殊的水流现象,如冲击波等。

根据近30多年来对高速水力学研究与认识,看来 20 m/s 以下的流速,虽然有掺气、空化、脉动、冲击波等高速水力学问题,但不是很严重,对确定水工建筑物的体型影响不大,所以一般可不作为高速水力学问题处理,按一般水力学问题计算就可以了,而把流速达到 $20\sim 50\text{ m/s}$ 的水流作为高速水力学研究的主要范畴。也就是说,高速水力学主要指研究流速为 $20\sim 50\text{ m/s}$ 的水流的运动规律的学科。

§ 1—2 高速水力学问题的提出与发展

高速水力学问题是随高水头泄水建筑物的出现而出现的,是高坝建设的关键技术之一。世界各国对此都很重视,我国近30年来已建成许多高坝,据统计,我国已建和在建的 100 m 以上的高坝已达31座,最高的是1988年完建的龙羊峡重力拱坝,坝高达 178 m ,居世界重力拱坝的第6位。还有大量的高坝正在规划、勘测、设计或施工中,如正建的二滩水电站,最大坝高达 240 m 居世界双曲拱坝第3位。设计中的龙滩(坝高 210 m),拉西瓦(坝高 252 m),小湾(坝高 290 m),锦屏一级(坝高 300 m)等工程的坝高都在 200 m 以上,这些高坝建设中的高速水力学问题难度之大,是世界所罕见的,急待我们去研究和解决。

我国高速水力学问题的研究是从50年代后期开始的,由于第一个五年计划的成功,已完建了的大坝,最高的已达 84 m (梅山水库连拱坝),当时正在执行中的第二个五年计划已规划了不少的高水头水电站,并且提出了兴建长江三峡水利枢纽的问题。为此全国组织了“研究三峡高速水流问题”的大协作,西安理工大学水电学院也是参加单位之一,现在该校高速水流实验室,就是从那时筹建的。当时高速水力学研究与发展很快,为了交流经验先

后于1960年及1965年召开了两次全国高速水力学学术讨论会,总结与促进了高速水力学的研究。《高速水流论文译丛》就是在这个时期出版的,这本译丛收集了1958年以前世界各国关于高速水力学研究的主要成果,是一本很有参考价值的书。

60年代我国的高坝建设已突破100 m,如1960年完成的三门峡水电站,坝高106 m,1968年完建的刘家峡水电站,重力坝坝高147 m。70年代,乌江渡水电站的拱形重力坝(坝高165 m)开始修建,刘家峡泄洪洞发生空蚀破坏等又一次促进了我国的高速水力学研究,于1977年成立了全国高速水流科学研究协作组,协调并促进高速水力学研究的进展,协作组在完成了它的历史使命后,于1982年改组为现在的高速水流情报网。协作组存在的5年间,召开了三次高速水力学科研报告会并出版了《高速水流译文集》,这是我国出版的第二本介绍国外高速水力学研究现状的好书。

1982年成立的高速水流情报网,积极开展了活动,已召开了三次全网大会,出版了《高速水流》杂志及《高速水流研究通讯》以及第三本译文集——《高速水流译文选集》与《中国泄水工程高速水流实验设备和仪器》等书。

进入80年代以来,由于学会的恢复与发展,学术活动更加活跃,于1981年中国水利学会在宜昌成立了水力学专业委员会,每两年都要召开一次全国性的水力学学术讨论会,其主要内容是高速水力学。该会还与国际水利学研究协会(IAHR)于1988年11月在北京联合召开了“国际高坝水力学会议”,将我国近年来的研究成果,与世界各国进行了交流。

中国水力发电工程学会也于1986年成立了水工水力学专业委员会,为推动我国水电建设中高速水力学研究做出了贡献。

由于我国还有大量的水力资源有待开发,据统计我国河流可开发的装机容量为 $3.78 \times 10^8 \text{ kW}$,而到1988年我国已开发的仅为 $0.33 \times 10^8 \text{ kW}$,即约为可开发的1/10。所以还有大量的高坝等待着我们去修建,高速水力学研究将会有有一个大的发展,其前景极其广阔。

在发达的国家中,由于水力资源开发程度较高,较好的坝址基本上都已建成电站,从70年代以来,这些国家中的水力工程师主要是为亚、非、拉地区承包工程,所以他们现在对于高坝水力学研究,投入的人力少,成果亦少,而我国由于经济发展的需要,这方面研究投入的人力多,成果亦多,目前我国这方面的研究已达到了国际水平。

国际上进行水力学研究的组织有:

(1) 国际水利学研究协会(IAHR),1937年成立,距今已有50多年的历史,现在的协会秘书处在荷兰Delft。出版有会刊——Journal of Hydraulic Research (JHR),每两年举行一次学术讨论会。它下设环境流体力学与水资源,实验流体力学和数学流体力学,工业流体力学和水工建筑物流体力学等三个技术学部,每个学部还下设一些技术学组,各大洲及地区都有分会,亚太地区分会(APD—IAHR)第七次会议于1990年11月在我国北京举行。

(2) 国际大坝委员会(ICOLD)成立于1928年,每3年举行一次学术报告会,每次会议讨论4个专题,70年代以来的每届大会上,都列入了水力学的专题,例如:

第11届大会(1973年),施工期和完建后泄流与消能(41专题)。

第12届大会(1976年),环境因素对坝和水库的影响(47专题)。

第13届大会(1979年),大流量的泄水孔和溢洪道(50专题)。

第14届大会(1982年),水库淤积,岸坡稳定及其技术和环境的影响(54专题),这届大会前,主办国巴西召开了“峡谷枢纽布置及泄洪消能国际学术讨论会”。

第15届大会(1985年6月,瑞士洛桑),为保证大坝安全的加固工作(泄洪能力扩大,50专题)。

第16届(1988年6月,美国,旧金山),设计洪水和运行期防洪(溢洪道及底孔的选择,修理时溢洪道及底孔的运行,63专题)。

第17届(1991年6月,奥地利,维也纳),土石坝和土石坝围堰技术新进展(漫顶和坝体过水的保护设计,窄狭河谷中土石坝的特殊问题,67专题)。

§ 1—3 高速水力学的研究课题

一般来说,高速水力学包括以下六个研究课题:

1. 水流脉动与水工建筑物的振动

人们发现水流在运动中有脉动现象是本世纪30年代的事,距今只有50年。我国在50年代开始研究,特别是在50年代后期这方面的研究有较大的发展,后因观测手段跟不上,数据处理与分析手段落后,很长一段时间进展不大。到80年代,由于实验与测试技术的改进,数据处理分析中计算机的应用,水流脉动的研究有了更多的进展与提高。

研究脉动的基础应是紊流理论,近年来借助随机理论推动了这个课题的发展。

国内外都对这个课题的研究非常重视,但这个课题能否有进展,主要与观测及分析技术有关,与紊流理论的发展和应用有关。

2. 掺气水流

高水头泄水建筑物中的水流,由于水头高,流速大,在一定条件下常会掺入大量空气,形成掺气水流。掺气水流是高速水力学中发现最早的一种现象,本世纪20年代就已开始了室内外研究,但主要研究的是自掺气水流,本世纪60年代以来人们的注意力,更着眼于强迫掺气水流,利用掺气减免空蚀推动了强迫掺气水流的研究。

3. 空化与空蚀

空化与空蚀最早是在航海界发现的,到本世纪30年代才在水工建筑物上发现。由于与水流运动接触的固壁上都可能有空化与空蚀,所以这个课题的研究人力多,领域广,成果也多。

水工建筑物的空化与空蚀,从30年代开始,很长时间内,侧重于过水建筑物合理体型的设计,抗空蚀材料的研究以及在施工中控制不平整度。但问题一直未得到解决,到60年代美国首先用掺气减蚀获得成功,以后其它不少国家都相继采用,效果良好。我国从70年代开始在工程中采用掺气减蚀措施。

我国减免空蚀的研究,在70年代有较大的发展,很多研究单位相继建设了研究设备。这方面的研究能否取得进展主要与空化研究设备、测试技术、空化机理有关,对我国还应研究含沙水流对空化的影响。

4. 泄水建筑物的消能防冲

我国的水利水电建设工程主要是两大类，一类是高水头、大流量，窄峡河谷的大中型工程，另一类是面广量大的中小型工程。两类工程中都有不同的高速水力学问题，特别是消能防冲问题在两类工程中普遍的存在着。

近年来我国已突破了传统的底、面、挑三种消能方式，而大量的采用了落水点前后错开，挑坎高程不同的大差动泄洪，各种异形挑坎，窄缝挑坎等收缩式的新型消能工，还有掺气分流墩，宽尾墩等辅助消能工及其多者结合的综合消能措施，解决了我国许多布置复杂，地形地质条件不利的工程的消能与防冲问题。例如东江、龙羊峡水电站的消能工使下游冲刷减小40%，宽尾墩，掺气分流墩的出现给深尾水，低佛氏数的泄洪消能防冲工程带来了广阔的前景，安康、五强溪等工程采用宽尾墩后，使消力池长度缩短了 $1/3 \sim 1/2$ 。

5. 明槽急流控制的研究

在不少大、中型水利枢纽工程中，岸边溢洪道是主要的泄水建筑物，为利用其地形，往往溢洪道有转弯，变底坡断面的收缩与扩大等情况。溢洪道或明流泄洪洞中的水流一般为急流，遇到上述情况，将产生冲击波等问题，对溢洪道及泄洪洞的正常运用是不利的，所以人们一直在想法对急流进行控制，对急流怎么控制，需要采取那些措施，这也是高速水力学研究的课题之一。

6. 泄水建筑物紊流边界层的研究

我国对泄水建筑物紊流边界层的研究，在国际上可以说是领先的，但我国过去的研究是以试验研究为主的，理论方面的深度还不够，特别是在紊流理论与边界层理论方面。近年来由于测试技术的提高及计算机的应用，这方面的情况有所改观，边界层的数值计算有较大的发展。

紊流边界层是搞清上述五大问题(课题)的基本理论，因此亦是高速水力学研究课题之一。

所有上述高速水力学研究课题，由于其复杂性，通常都是通过以下三个途径进行研究的，即：

- A. 理论研究。
- B. 试验研究与原型观测。
- C. 数学模型。

过去，主要是前两个途径，近年来才发展了数学模型。目前仍然是通过这三个途径进行研究的。

高速水力学的这些课题，目前的研究成果很多，我们这本书要讲的，主要的是那些比较成熟的一些理论研究成果、试验研究与原型观测以及数值模拟成果。大量的其他成果与资料，有待学习者自己阅读。

本节讲这些课题的目的，是为了开阔眼界，了解高速水力学的重要性，以引起学生学习与研究的兴趣。

§ 1—4 高速水流的特点

(1) 高速水流的各種作用力中，常常是慣性力起主導作用，而粘滯力的作用往往較小。因此試驗研究時往往是用重力相似準則，但對摻氣、空化等問題還有其特殊相似準則。

(2) 在高速水流的情況下，邊壁與水流的相互作用比較明顯，並且發生了質的變化，例如在邊壁上的脈動作用增加，有固壁振動與空蝕等問題。

(3) 高速水流可變為二相流動或三相流動，例如，摻氣水流與空化流動都是水、氣二相流，含沙摻氣水流則屬於三相流問題。在多相流情況下，水流的連續性遭到破壞，不再符合一般均質連續的假定條件，而具有本身特殊的運動規律。

(4) 明槽中的高速水流，受邊界變化的影響，將出現衝擊波等特殊現象。

第二章 明流边界层

§ 2-1 概 述

明流是水利水电工程中常见的一种流动，它的显著特点之一是在流动过程中具有自由水面。明流边界层由于存在一个自由水面，因此当边界层厚度发展到全部水深时，成为充分发展的紊流。这一点与管流相似，但管流的半径是固定的。而明流的自由水面却可以任意变动而不受限制。即使在同一流速情况下，它可以由于边界层位移厚度的增大而抬高。

明流边界层与前一章所讲的绕流边界层是不同的。绕流边界层通常指的是一无限流场中流体绕过固体结构物壁面时所产生的，而明流边界层则是在具有自由水面的有限水深的水流流经固体壁面时所产生的，其厚度有可能发展至全部水深。经典的绕流边界层，通常都是忽略质量力的作用；而明流边界层由于存在着自由水面，质量力的作用不容忽视。例如陡槽紊流边界层中，重力的影响是重要的；当水流流经具有曲率的固体壁面时，例如溢流坝顶或反弧段上的水流边界层，离心力具有显著的作用。

水利水电工程中的大部分泄水建筑物上的流动都是明流边界层，例如陡槽、溢流坝、溢洪道、明流隧洞等泄水建筑物上的边界层。明流的自由水面的形状和变化、明流水深、不同几何形状的固体壁面等都影响着边界层流动；同时，边界层特性，如位移厚度的发展，也影响着自由水面的变动。

明流边界层流动，由于几何尺度大，流速高，其雷诺数较高（通常 $Re_x > 3.6 \times 10^6$ ），所以多为紊流边界层。因此，本章将主要研究明流的紊流边界层。

随着水利水电工程建设的发展，世界上的高坝日益增多，通过泄水建筑物水流的流速有的高达40 m/s以上。水流的空化与建筑物壁面的空蚀、明流水面的掺气、水流作用于建筑物壁面的脉动压强、消能与冲刷等一系列高速水力学问题日益突出。近年来，在对高速水力学问题的研究中，人们逐渐发现应用边界层理论对深入理解和处理高速水力学问题有着重要的意义。边界层内的流速分布特性决定着压强和切应力分布。紊流边界层内的流速脉动引起压强脉动，从而影响着空化和空蚀特性及水流作用在建筑物上的瞬时荷载。明槽水流的表面掺气也和紊流边界层特性有关。研究这些高速水力学现象与边界层特性之间的关系是水利水电工程界研究边界层问题的一个重要内容。

本世纪50年代。美国的Bauer, W. J. 在题为《陡坡上的紊流边界层》⁽¹⁾一文中，首先利用边界层理论来分析泄水建筑物的明流边界层。60年代，国内外在这方面进行了大量的研究，取得了不少的成果，例如溢流坝面水流掺气发生点的确定⁽²⁾，应用边界层能量厚度的概念确定溢流坝流速系数⁽³⁾，坝面不平整度对空化与空蚀的影响⁽⁴⁾，紊流边界层中流速脉动与水流脉动压强的关系等。近20年来，我国在水利水电建设的推动下，随着激光测速技术和

计算技术的发展与应用, 明流边界层的研究工作取得了显著的进展, 例如对明流平板边界层特性的研究^[5], 溢流坝陡坡段与反弧段的紊流边界层发展与特性的研究(参见文献 [6]、[7]、[8]、[9]、[10])。

§ 2—2 明流光滑平板边界层

本节将主要介绍文献[5]的研究成果。文献[5]的试验研究应用的是激光测速系统, 试验是在宽10 cm、高34 cm、长340 cm 的钢架玻璃水槽中进行的, 在槽中高出槽底5 cm 顺流放置试验用平板。平板为铝制, 全长120 cm、厚5 mm, 前端加工成闸墩头形, 平板上下均有水流通过, 平板自前至后具有1.5%的坡度。平板表面粗糙度 $\Delta \leq 10 \mu\text{m}$ 。

一、平板壁面的水流切应力

图2—1 为壁面切应力系数 C_f 与雷诺数 Re_x 的关系。可以看出, 当 $Re_x \leq 3 \times 10^4$ 时, 各断面上 C_f 和 Re_x 的关系为

$$C_f = 0.664 Re_x^{-1/2}$$

与布拉修斯光滑平板绕流边界层的公式所表示的斜线一致, 是层流边界层部分。

当 $3 \times 10^4 < Re_x \leq 1 \times 10^5$ 时, C_f 值呈现逐渐升高的趋势, 为过渡区。

在 $Re_x > 1 \times 10^5$ 以后, C_f 值逐渐略有减小而趋于常数, 这个规律与无限边界绕流平板紊流边界层的情况是相同的。但从数值看, 它较之光滑平板绕流紊流边界层的公式^[11]

$$C_f = (2 \log Re_x - 0.65)^{-2.3} \tag{2-1}$$

所表示的 $C_f \sim Re_x$ 关系曲线有所抬高, 由于平板为水力光滑, 因此 C_f 值的抬高, 显然不是壁面粗糙的原因。在明渠中由于各断面势流流速是变化的(文献[5]的试验情况下是逐渐增加), 这一点与无限边界中平板绕流边界层是不同的。切应力系数 C_f 是以 $\tau_0 / (\frac{1}{2} \rho U_\infty^2)$ 为定义的, 来流的流速 U_∞ 均比 U 为小, 所以使 C_f 值增大。

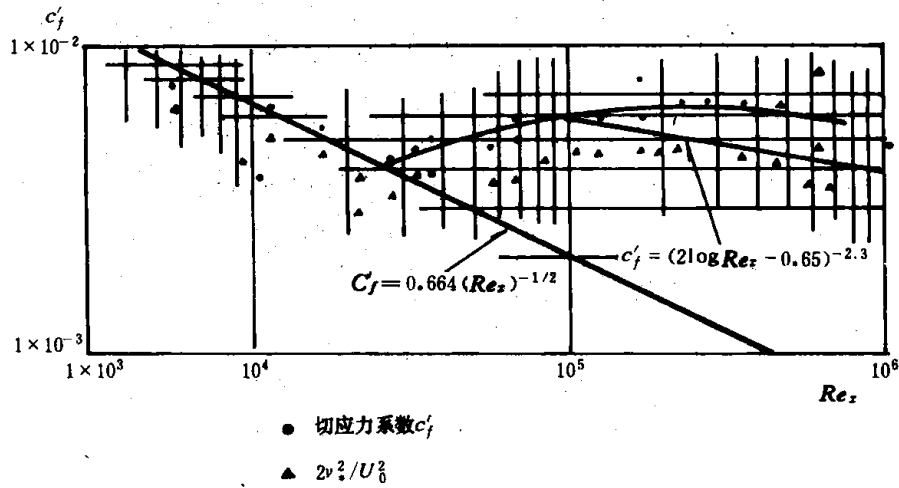


图 2—1

二、边界层中的流速分布

水流进入铝板与两侧玻璃所形成的明渠后, 首先为层流边界层流动。此时时均流速在

断面上的分布可分为两部分：边界层内的流速分布基本符合布拉修斯平板层流边界层理论解；边界层外流速均匀分布为势流区。随着流程增加，边界层逐渐增厚，边界层内的流速分布逐渐偏离布拉修斯解，流动进入过渡区。流程继续增加，流动由过渡区进入紊流边界层流动区，图2-2为层流边界层、过渡区、紊流边界层三个区域的典型流速分布与布拉修斯解的对照。

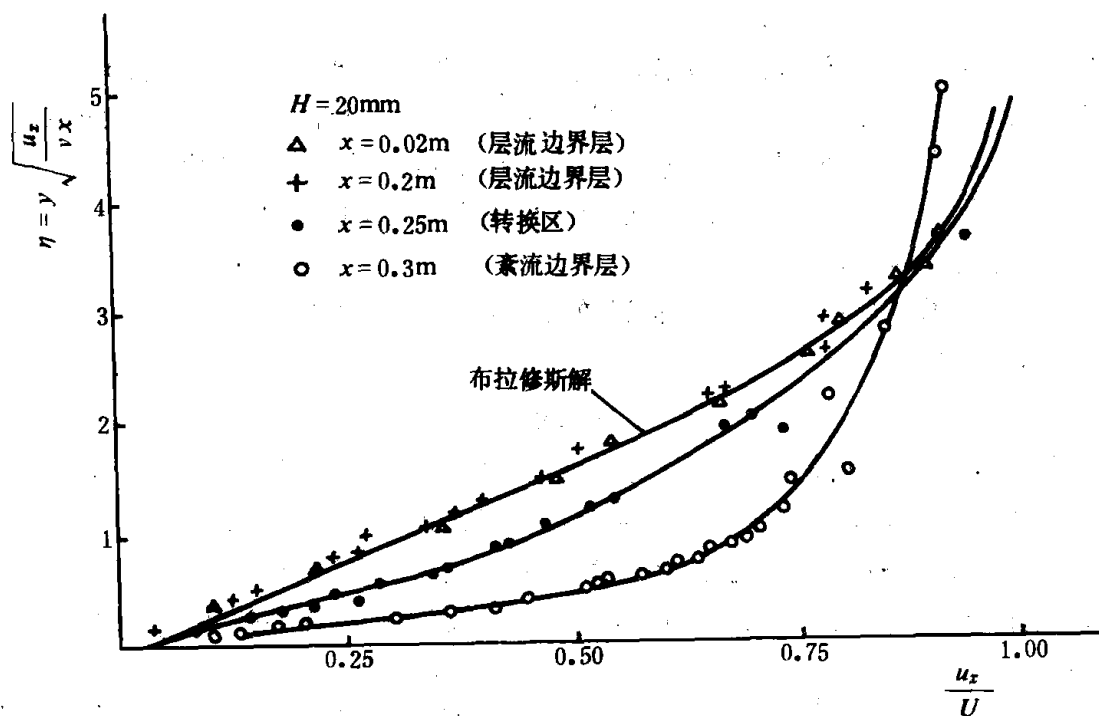


图 2-2

明流平板紊流边界层中的流速分布较为复杂，沿高度 y 可分为三个区域，即粘性底层、过渡区和紊流区，各区具有不同的流速分布规律。

(1) 粘性底层中，流速为线性分布，即 $u_x^+ = y^+$ 。式中 $u_x^+ = \frac{u_x}{u_*}$ ， $y^+ = \frac{u_* y}{\nu}$ 。

(2) 紊流区的流速分布可用对数式 $u_x^+ = \frac{1}{k} \ln y^+ + C$ 或指数式 $\frac{u_x}{U} = (\frac{y}{\delta})^{\frac{1}{n}}$ 表示。根据文献[5]的试验得到的 $k=0.39$, $C=5.48$ ，指数律中指数 n 随雷诺数的变化公式为

$$n = 1.17 Re_x^{0.135} \quad (2-2)$$

(3) 过渡区的流速分布可以表示为

$$\frac{u_x}{U} = F(\frac{y}{\delta})^{\frac{1}{m}} \quad (2-3)$$

式中 m 值一般在2~3之间，其平均值为2.35，较紊流区 n 值小得多， F 值一般在1.3~2.5之间，变幅较大。

紊流边界层中各区的分界为

粘性底层： $y^+ \leq 10$

过渡区： $10 < y^+ \leq 25$

紊流区: $y^+ > 25$

三、边界层发展

根据平板沿程各断面流速分布的特点和边界层发展的规律,文献[5]将沿整个平板的水流边界层分为五个区域:

(1) 受平板首端影响的区域 ($x \leq 3 \text{ cm}$, $Re_x \leq 1.54 \times 10^4$), 其流速分布与布拉修斯解不同。

(2) 平板层流边界层区域 ($3 \text{ cm} < x \leq 6 \text{ cm}$, $Re_x = (1.54 \sim 3.0) \times 10^4$), 流速分布符合布拉修斯解。边界层厚度计算公式为

$$\delta = 5x/Re_x^{\frac{1}{2}} \quad (2-4)$$

其它如 δ_1 、 δ_2 等自然也可以同样用布拉修斯得到的相应公式进行计算。

(3) 过渡区 ($6 \text{ cm} < x \leq 18 \text{ cm}$, $3 \times 10^4 < Re_x \leq 1 \times 10^5$)。

(4) 平板紊流边界层区 ($18 \text{ cm} < x \leq 65 \text{ cm}$, $1 \times 10^5 < Re_x \leq 3.6 \times 10^5$)。此层中, 流速分布在距壁面很近处迅速增长, 上部流速分布趋向均匀化, 整个流速图型更为丰满, 边界层厚度 δ 的计算公式可采用由指数公式推得的下式计算

$$\delta = 0.37x/Re_x^{\frac{1}{5}} \quad (2-5)$$

(5) 受平板尾部跌水影响的区域 ($x > 65 \text{ cm}$, $Re_x > 3.6 \times 10^5$)。此区中由于平板尾部跌水的影响, 自由水面逐渐下降, $\frac{dp}{dx} < 0$, 势流流速逐渐增加, 边界层厚度 δ 虽然继续增加, 但其增长的速率却大为降低。

判断边界层的过渡区或判断紊流边界层的起始位置须综合研究以下因素:

(1) 流速分布图形偏离布拉修斯解, 开始变得更为丰满, 是过渡区的开始。

(2) 边界层的流速分布若按对数式表示, 在过渡区, K 、 C 值均呈增大趋势, 进入紊流边界层后, 则 K 、 C 趋于稳定。

(3) 流速分布的形状参数 $H_{12} = \delta_1/\delta_2$, 在层流边界层中, 约为 2.6, 进入过渡区后 H_{12} 明显下降, 至紊流边界层由于流速分布图形更加丰满, H_{12} 下降至 1.4 左右并趋于稳定。

(4) 在过渡区边界层厚度 δ 随 Re_x 的变化规律尚不明确, 但在层流边界层及紊流边界层中 δ 随 Re_x 的变化规律为式(2-4)及式(2-5)所示。

§ 2-3 光滑溢流陡坡上的紊流边界层

本节将主要介绍文献[7]的研究成果。

根据文献[8]对于光滑溢流坝面的仔细量测, 在坝顶部边界层为层流边界层, 边界层转变段(过渡段)发生在陡坡段不长的距离内, 其后则为紊流边界层。整个来看, 层流边界层在陡坡段很短。况且实际的溢流坝均比文献[8]所示的模型溢流坝高得多, 所以研究将限于紊流边界层, 即认为从坝顶前缘处开始就是紊流边界层, 而忽略了前部很短的层流边界层段。

当陡坡上的水流在紊流的光滑区工作时, 这样的陡坡称为光滑陡坡。文献[7]利用动量