



全国高等院校水利水电类精品规划教材

水工与河工 模型试验

主编 黄伦超 许光祥

主审 沈小雄



黄河水利出版社

内 容 提 要

本书主要介绍水利工程中各种水流模型试验,包括模型试验理论基础、河工模型试验、水工模型试验、模型设计制作与验证、试验设备与量测技术、试验数据整理与分析等。书中除阐述一般理论和试验方法外,还尽可能结合实例进行介绍。

本书为高等学校水利类(水利水电工程、港口航道与海岸工程、农业水利工程等)专业教材,亦可供相关研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水工与河工模型试验/黄伦超,许光祥主编. —郑州:
黄河水利出版社,2008.12
全国高等院校水利水电类精品规划教材
ISBN 978-7-80734-534-3

I. 水… II. ①黄…②许… III. ①水工模型试验 -
高等学校 - 教材②河工模型试验 - 高等学校 - 教材
IV. TV131.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 199558 号

策划组稿:马广州 电话:0371-66023343 E-mail:magz@yahoo.cn

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路11号

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:16.5

字数:380千字

印数:1—3 100

版次:2008年12月第1版

印次:2008年12月第1次印刷

定价:32.00元

出版者的话

近年来,随着我国对基础设施建设投入的加大,水利水电工程建设也迎来了前所未有的黄金时间。截至2006年,全国已建成堤防28.08万公里,各类水库85 849座,2006年水利工程在建项目4 614个,在建项目投资总规模达6 121亿元(《2006年全国水利发展统计公报》)。据《可再生能源发展“十一五”规划》,到2010年,我国水电总装机容量将达到1.9亿千瓦。水利水电工程的大规模建设对设计、施工、运行管理等水利水电专业人才的需求也更为迫切,如何更好地培养适应现今水利水电事业发展的优秀人才,成为水利水电专业院校共同面临的课题。作为水利水电行业的专业性科技出版社,我社长期关注水利水电学科的建设与发展,并积极组织水利水电类专著与教材的出版。

在对水利水电类本科层次教材的深入了解中,我们发现,以应用型本科教学为主的众多水利水电类专业院校普遍缺乏一套完整构建在校本科生专业知识体系又兼顾实践工作能力的教材。在广泛调研与充分征求各课程主讲老师意见的基础上,按照高等学校水利学科专业教学指导委员会对教材建设的指导精神与要求,并结合教育部实施的多层次建设、打造精品教材的出版战略,我社组织编写了本系列“全国高等院校水利水电类精品规划教材”。

此次规划教材的特点是:

- (1) 以培养水利水电类应用型人才为目标,充分重视实践教学环节。
- (2) 在依据现有的专业规范和课程教学大纲的前提下,突出特色,力求创新。
- (3) 紧扣现行的行业规范与标准。
- (4) 基本理论与工程实例相结合,易于学生接受与理解。

本系列教材除了涵盖传统专业基础课及专业课外,还补充了多个新开课程的教材,以便于学生扩充知识与技能,填补课堂无合适教材可用的空缺。同时,部分教材由工程技术人员或有工程设计施工从业经历的老师参与编写,也是此次规划教材的创新。

本系列教材的编写与出版得到了全国21所高等院校的鼎力支持,特别是三峡大学党委书记刘德富教授和华北水利水电学院副院长刘汉东教授对系列教材的编写与出版给予了精心指导,有效保证了教材出版的整体水平与质量。在此对推进此次规划教材编写与出版的各院校领导和参编老师致以最诚挚的谢意,是他们在编审过程中的无私奉献与辛勤工作,才使得教材能够按计划出版。

“十年树木,百年树人”,人才的培养需要教育者长期坚持不懈的努力,同样,好的教材也需要经过千锤百炼才能流传百世。本系列教材的出版只是我们打造精品专业教材的开始,希望各院校在对这些教材的使用过程中,提出改进意见与建议,以便日后再版时不断改正与完善。

黄河水利出版社

全国高等院校水利水电类精品规划教材

编 审 委 员 会

主 任：	三峡大学	刘德富	华北水利水电学院	刘汉东
副主任：	西安理工大学	黄 强	郑州大学	吴泽宁
	云南农业大学	文 俊	长春工程学院	左战军
委 员：	西安理工大学	姚李孝	西北农林科技大学	辛全才
	扬州大学	程吉林	三峡大学	田 斌
	华北水利水电学院	孙明权	长沙理工大学	樊鸣放
	重庆交通大学	许光祥	河北农业大学	杨路华
	沈阳农业大学	迟道才	河北工程大学	丁光彬
	山东农业大学	刘福胜	黑龙江大学	于雪峰
	新疆农业大学	侍克斌	内蒙古农业大学	刘廷奎
	三峡大学	张京穗	华北水利水电学院	张 丽
	沈阳农业大学	杨国范	南昌工程学院	陈春柏
	长春工程学院	尹志刚	昆明理工大学	王海军
	南昌大学	刘成林	西华大学	赖喜德

前 言

随着水利工程建设的迅速发展,越来越多的工程技术问题需要人们去认识、研究和解决。从理论分析、原型观测分析到模型试验研究是一个巨大的飞跃,人们可主动地将原型缩小和将过程周期缩短,并能将过程中的某些因素孤立起来或抽出来,以便观察比较和发现因果关系。自 H·恩格斯(H. Engels)于 1898 年在德国的德累斯顿(Dresden)工科大学建立第一个河流水力学试验室以来,模型相似律不断发展和完善,而且发展到用不同物质进行模拟以求现象的相似。解决工程上的复杂问题,几乎都要借助于模型试验研究。随着科学技术的进步,虽然模型试验的某些功能可以被计算技术或其他方法所代替,但是并不能完全取代这些物理模型。水工及河工模型试验仍然是解决水利工程规划、设计、施工及运行管理等方面问题的主要手段。因此,模型试验不仅在目前仍有重要的实用意义,而且具有广阔的发展前景。

介绍模型试验理论和方法的论著多散见于期刊杂志上,国内在水工及河工模型试验方面也有一些专门著作和教科书。但随着科学技术的进步,水工及河工模型试验出现了许多新技术、新设备、新方法、新材料,也取得了许多新的经验,有关模型试验规程也相继制定或修编。这些新成果很有必要编入教材,走进课堂,为培养新世纪的专业人才服务。因此,在教学和科学试验上急需有一本内容稍全面,能反映一些新成就而又适于水利水电工程、港口航道与海岸工程、农业水利工程等专业教学的教材。

2008 年 1 月在郑州召开了“全国高等院校水利水电类精品规划教材”编审委员会会议,会议明确了整套规划教材的定位,即突出“应用型人才培养”及“应用型教材”特色,以“水利水电工程”专业为基础,兼顾“港口航道与海岸工程”、“农业水利工程”等专业需求。本教材是根据该会议确定的编写大纲组织相关院校共同编写完成的。在编写过程中,编者力求反映水工及河工模型试验的最新成果,同时注重基本理论和方法、拓宽学生知识面、提高学生综合试验能力和研究问题能力。

本教材由黄伦超教授和许光祥教授担任主编,于奎和贺晖担任副主编,由黄伦超教授负责组织协调工作和统稿。具体编写分工如下:前言、第一章及第五章的第一、三、五、八节由长沙理工大学的黄伦超教授编写,同时对第七章进行了补充编写和对第五章的第九节进行了重新编写;第二章由华北水利水电学院的宋永军老师编写;第三章由长沙理工大学的贺晖老师编写,同时完成第四章的第二轮编写;第六章及第五章的第二、六、七节由重庆交通大学的许光祥教授编写,同时编写第三章第五节的部分内容;第五章的第四、十节由黑龙江大学的于奎副教授编写,同时完成第四章及第五章的第九节的第一轮编写;第七章由长春工程学院的李宗伟老师编写;第八章由长沙理工大学的江诗群老师编写;云南农业大学的宋天文老师参加了第八章编写的前期工作。

本教材由长沙理工大学的沈小雄教授担任主审。

本教材的出版得到了黄河水利出版社的大力支持,特别是马广州主任对教材编写给予了极大的关心,在此表示诚挚的感谢!

限于编者的水平,本教材难免有谬误与不当之处,衷心希望读者批评指正,以便今后改进。

编 者

2008年9月

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 水工与河工模型试验的意义	(1)
第二节 水工与河工模型试验的发展状况	(2)
第三节 水工与河工模型分类	(3)
第四节 水工与河工模型试验的研究范围	(5)
复习思考题	(6)
第二章 因次分析	(7)
第一节 因次与单位	(7)
第二节 因次和谐原理	(9)
第三节 π 定理及应用	(11)
复习思考题	(16)
第三章 水工与河工模型试验理论基础	(18)
第一节 相似现象及相似概念	(18)
第二节 模型试验相似理论	(21)
第三节 水动力现象相似准数的确定方法	(23)
第四节 水工与河工模型试验中常用的相似准则	(27)
第五节 水工与河工模型设计的限制条件	(33)
复习思考题	(38)
第四章 河工模型试验	(39)
第一节 正态定床河工模型	(39)
第二节 变态定床河工模型	(42)
第三节 动床河工模型	(47)
第四节 推移质动床模型设计	(57)
第五节 悬移质动床模型设计	(60)
第六节 全沙模型简介	(65)
复习思考题	(67)
第五章 水工模型试验	(68)
第一节 水利枢纽整体模型试验	(68)
第二节 泄水建筑物及消能工模型试验	(75)
第三节 水流空化及掺气减蚀模型试验	(92)
第四节 水电站有压引水系统非恒定流模型试验	(102)
第五节 水工建筑物水流脉动和流激振动模型试验	(106)

第六节	施工截流和导流模型试验	(115)
第七节	溃坝模型试验	(123)
第八节	船闸水力模型试验	(128)
第九节	海工模型试验	(139)
第十节	地下水渗流模型试验	(155)
	复习思考题	(162)
第六章	模型设计制作与验证	(163)
第一节	模型的规划设计	(163)
第二节	模型制作与安装	(168)
第三节	模型的验证	(181)
	复习思考题	(184)
第七章	试验设备与量测技术	(185)
第一节	供水系统	(185)
第二节	固定及控制设备	(193)
第三节	水位与波面测量	(202)
第四节	流速和流量测量	(205)
第五节	含沙量与地形测量	(213)
第六节	压力测量	(216)
	复习思考题	(221)
第八章	试验数据整理与分析	(222)
第一节	概述	(222)
第二节	试验数据的整理	(223)
第三节	试验数据的误差分析	(228)
第四节	试验数据的统计检验	(236)
第五节	经验公式的拟合	(238)
第六节	随机数据处理概论	(244)
第七节	试验研究报告的撰写概要	(249)
	复习思考题	(250)
参考文献	(251)

第一章 绪论

水利工程规划、设计、施工及运行管理中涉及到的许多问题,往往均要借助于物理模型试验来研究解决,因此水工及河工模型试验已广泛应用于工程实践。本章主要介绍水工及河工模型试验的意义、发展状况、分类及研究范围等内容。

第一节 水工与河工模型试验的意义

随着水利工程建设事业的迅速发展,越来越多的工程技术问题需要人们去认识、研究和解决。诚然,通过大量实践和试验研究,人们已经认识和掌握了许多有关水工及河工的自然现象和规律,提出了不少成熟的理论和符合实际的设计计算方法。然而,由于水工及河工问题的复杂性,也有许多自然现象及其内在机理人们至今尚未充分认识和掌握。因此,我们必须采取一系列技术手段和研究方法,以确保工程方案的安全可靠和经济合理。

为此,人们对水工及河工问题的研究,主要有理论分析、原型观测和模型试验等技术手段。

理论分析是根据成熟的理论和计算方法等相关问题进行分析 and 计算,从而可以解决工程中的问题,其结果准确、可靠。但许多水工及河工问题至今还没有成熟的理论和计算方法,因此理论分析方法的应用受到一定限制。

原型观测是对现场自然条件、对已建成或在建工程原型进行现场观测,藉此更好地认识自然和检验设计计算理论、方法和成果的可靠性。近年来,国内外对于原型观测研究越来越重视,有些观测研究规模十分庞大。原型观测避免了试验室研究中因比尺效应而影响精度等问题,因而可以获取较为可靠的观测数据。但是原型观测不仅消耗巨大的人力和物力,而且还存在着观测上的种种限制和困难。例如,某些特殊工况条件下就较难进行原型观测和取得可靠的数据,而这些数据可能恰恰是人们最期望取得的。此外,原型观测中各种因素掺和在一起,十分复杂,不容易把人们感兴趣的因素分离出来。所以,尽管某些原型观测已经取得重大进展,但目前仍有许多原型观测无论在观测手段和还是在数据处理方面都不够成熟,根据观测资料得出的成果差异也较大。

模型试验就是仿照原体实物,按照相似准则将原型缩制成模型进行试验研究。如想了解原体的实际现象和性质,或检查其水力安全性,就可以用模型重演与原体相似的自然情况进行观测和分析研究,然后按照一定的相似准则引伸到原型,从而作出判断,这就是水工及河工模型试验的基本任务。因此,运用水工及河工模型试验的方法,不仅可以论证工程设计的安全性和合理性,而且还可以预见原型可能发生的现象,同时,对设计时所依据的理论和前提进行验证。因此,在现阶段,人们仍不得不凭借模型试验手段来解决某些实际工程问题,特别是在重大工程中,模型试验研究更被认为是不可缺少的环节。例如我国的长江三峡工程,单就泥沙淤积问题就投入了大量人力、物力,在不同的研究单位

进行了不同类型、不同比尺的模型试验,获得了丰硕的研究成果。

第二节 水工与河工模型试验的发展状况

相似理论和其他学科一样,都是随着社会生产需要、基础科学、相关学科理论以及观测、试验、量测技术的前进而发展起来的。

在理论上,关于相似现象的学说,早在 1686 年牛顿(I. Newton)的著作中已有阐述,牛顿在理论上对其三定律就是用两个物体做相似运动来表述和论证的,后来又提出了被称为牛顿数的相似准数。但直到 1848 年,别尔特兰(J. Bertrand)才首先确定了相似现象的基本性质,并提出尺度分析的方法。1872 年左右,弗劳德(W. Froude)进行船舶模型试验,提出了著名的弗劳德数,奠定了重力相似律的理论基础。1882 年,法国 J·B·傅里叶提出了物理方程必须是齐次的。

模型相似重要的理论基础和方法手段之一就是因次分析,而因次分析的意义和作用又远远超出模型试验的范围,是整个物理科学体系中的重要一环。没有因次分析就不能揭示品类繁多的各种物理量之间的关系,就不能建立严格的单位系统,也不能正确建立和检验各种数学物理方程。相似概念不仅是试验模型的基本特性,也是一切物理试验数据处理的基础和某些物理方程求解的手段。因次分析就是以最普遍的函数形式描述所研究的物理现象的方程分析。对因次分析的研究成果,主要集中在 1900 年前后约 30 年的许多物理学家发表的大量论文和争议中。如瑞利在 1891 年和 1915 年,傅里叶在 1888 年,雷包钦斯基在 1919 年,瓦谢在 1892 年,普朗克在 1916 年,费斯特-阿芳纳赛瓦在 1916 年,勃利基曼在 1922 年等。而 1915 年白金汉把它普及到一般工程界。在这段时间以后的论著甚多,几乎都是建立在以上讨论的基础上的。实际上,就这方面的问题而论,也没有多少全新的内容了,而 20 世纪初遗留下的问题,有的迄今也未得到解决,如热和温度作为基准物理量的因次关系究竟应如何处理, π 定理究竟如何证明才算严格完整等。

整个 20 世纪是“相似”这一普通的概念和词语逐步成为专门特殊学科的过程,其理论和应用日益发展扩大,进入各个领域,由广而专,又由专而更广。20 世纪 30 年代形成了各种理论体系和各种应用科学的模型试验方法。20 世纪 70 年代,由于计算机的应用,“模型”和“相似”的概念突破了原来的范围,成为仿真技术的基础。近一二十年,国内外又出现了把“相似论”作为思维科学和认知哲学来进行研究的学术分支。

在实践上,有资料表明英国在 1741 年前就已进行过大量炮舰的水池拖曳试验;法格的动床模型试验约在 1875 年;雷诺(O. Reynold)层流和紊流试验在 1883 年;1885 年雷诺第一个应用弗劳德数进行摩塞(Mersey)河模型试验,研究潮汐河口的水流现象;1886 年费弄-哈哥特(Veron-Harcourt)又进行了莱茵河河口模型试验;1898 年 H·恩格思(H. Engels)在德国的德累斯顿(Dresden)工科大学首创河工试验室,从事天然河流的模型试验。不久,费礼门(J. R. Freeman)创设美国标准局水工试验室,从事水工建筑物的模型试验。此后,欧美各国水工及河工模型试验室的兴建蔚然成风。

我国进行水工及河工模型试验,始于 1933 年天津第一水工试验所。随后,1935 年在南京筹建中央水工试验所,即现在南京水利科学研究院的前身。新中国成立以来,由于大

规模水利工程建设需要,水工及河工模型试验机构得到很大的发展,也取得了大量举世瞩目的研究成果。

从一般试验到相似模型试验是一个飞跃,科学的发展大大地推进了模型试验。目前,模型试验已普及到各行各业,尤其是造船、航空、水利、化工、建筑、热工、电工等方面。从此,“模型”一词被赋予了新的含义。

第三节 水工与河工模型分类

由于试验研究任务的不同,采用不同类型的模型,以满足不同的要求。为此,水工及河工模型通常有以下分类方法和类型。

一、按照研究对象的侧重点分

(一) 水工模型

水工模型是指主要针对水工建筑物的工程水力学及工程设计等问题进行研究的模型,包括水工常规模型和水工专题模型。

(二) 河工模型

河工模型主要是用以研究河道的水流和泥沙运动状态、河道冲淤变化规律及河道治理工程效果等方面的模型。

二、按照模拟原型的完整性分

(一) 整体模型

整体模型是指为模拟研究对象整体而建立的模型,模型范围一般包括研究对象及其上下游和左右边界的一定范围。例如,当研究河道中水利枢纽工程的总体布置时,就需要将所研究的枢纽建筑物及上下游一定河段,按一定的比例缩制成模型进行试验,这就叫做整体模型。

(二) 半整体模型

如一些水工建筑物两边对称,水流情况也对称,可以研究一半来代替整体,这时可采用半整体模型。

(三) 局部模型

局部模型是指为模拟研究对象的某个局部而建立的模型。

(四) 概化模型

当主要要求研究某些水工及河工的水流泥沙运动特性,或仅为数学模型提供相关参数时,可将研究对象进行概化,然后进行研究,称为概化模型。

(五) 断面模型

当研究的问题可以简化为二维时,可以建立以原型断面为研究对象的模型,即断面模型。断面模型一般在水槽中进行试验,如研究泄水建筑物堰面压力分布、上下游水流衔接、消能工作及下游局部冲刷等,一般截取枢纽坝轴线的一段制成模型,安装在玻璃水槽中进行试验研究。

三、按照模型结构组成成分

(一) 定床模型

定床模型是指模型地形在水流等动力条件作用下不发生变形的模型。

(二) 动床模型

动床模型是指模型床面铺有适当厚度的模型沙,其地形在波浪、潮流、水流等动力条件作用下发生冲淤变化的模型。如研究河床演变、水工建筑物下游局部冲刷等,需按照相似条件将模型床面做成活动河床进行研究。

动床模型根据动床的范围又分为全动床和局部动床;根据模拟原型泥沙运动情况又可分为推移质泥沙模型、悬移质泥沙模型和全沙模型。推移质泥沙模型是指模拟原型推移质(底沙)泥沙运动的模型;悬移质泥沙模型是指模拟原型悬移质(悬沙)泥沙运动的模型;全沙模型是指同时模拟原型推移质和悬移质泥沙运动的模型。

四、按照模型比尺关系分

(一) 正态模型

正态模型是指将原型的长、宽、高三个方向尺度按照同一比例缩制的模型。水工模型一般要求采用正态模型。

(二) 变态模型

有时因受各种条件的限制,如粗糙度、水流流态、场地条件等限制,采用垂直几何比尺与平面几何比尺不同来缩放模型,即变态模型。水工模型一般不能采用变态模型,而河工模型一般可采用变态模型。

五、按照模拟方法分

按照水工及河工模型模拟的方法可分为物理模型、数学模型和复合模型等,本教材仅介绍物理模型,其他模拟方法见其他文献。

(一) 物理模型

物理模型是指将研究对象按照一定的相似条件或相似准则缩制的实体模型。物理模型具有直观性强,对工程结构近区模拟的准确性高,并能准确反映复杂几何边界、复杂流态等方面的优点,但它受模型比尺等的限制。

(二) 数学模型

数学模型是指针对研究对象和需要研究的问题,建立基本方程式,按定解条件进行数值计算研究的模型。数学模型在模拟非恒定流场随时间变化时有较好的效果,宏观上能给出计算域中的整体流态特征。但是,如模拟水域的形态比较复杂,特别是一些复杂的水工建筑物,形态各异,尺寸相差悬殊,数学模型对建筑物的形态逼近受到离散网格的制约,往往影响模拟的精度。

(三) 复合模型

复合模型是指将物理模型和数学模型相结合。物理模型和数学模型是模拟水工及河工的主要手段,它们有各自的优点但也存在着局限性。有些问题的研究需要综合

物理模型和数学模型的优点来模拟研究,复合模型正是在这种情况下出现的。

六、按照模型试验采用的试验流体分

(一) 水流模型

用水作为介质来研究相关问题的模型称为水流模型。水工及河工模型绝大多数情况下为水流模型。

(二) 气流模型

用空气作为介质来研究问题的模型称为气流模型,其成果一般供规划比较方案之用。

(三) 其他液体或介质模型

当模型采用与原型相同的介质进行试验,测量困难或难以掌握某些物理现象的演变过程,甚至还会歪曲所研究的现象时,可用其他介质所产生的物理现象来模拟所要研究的水力现象。如地下水渗流模型,就经常采用黏滞流模型、水力网模型和电模型(导电液和电网络)等。

第四节 水工与河工模型试验的研究范围

随着相似理论的完善及试验和量测技术的发展,模型试验已普及到各行各业。水工及河工模型试验研究范围已覆盖了与水工及河工有关的各个方面。

一、水工模型试验研究范围

水工模型试验研究范围主要包括水工建筑物的工程水力学及工程设计等问题,包括水工常规模型试验和水工专题模型试验。

(一) 水工常规模型试验

水工常规模型试验的研究范围主要包括水利枢纽布置和各种工程水力学问题,如泄水建筑物的体型优化、泄流能力、水流作用于建筑物上的压力和脉动荷载、上下游水流衔接、消能工的作用以及下游局部冲刷和防冲措施等。

(二) 水工专题模型试验

水工专题模型试验的研究主要包括水工建筑物的水流空化模型试验、掺气减蚀模型试验、水流压力脉动与流激振动模型试验、闸门与阀门水力模型试验、航道水力模型试验、通航建筑物水力模型试验、水电站有压引水系统模型试验、施工导流截流模型试验、溃坝模型试验、滑坡涌浪模型试验、波浪模型试验、泄洪洞水力学模型试验、紊流边界层模型试验、地下水渗流及环境流体力学模型试验等方面。

二、河工模型试验研究范围

河工模型试验主要用以研究河道的水流和泥沙运动状态、河道冲淤变化规律及河道治理工程效果等方面。包括河流、湖泊冲淤演变规律及发展趋势试验研究;河道治理规划及岸线利用选址等试验研究;治河、航道整治工程方案试验研究、工程效果预报;人类活动(修建水利枢纽、裁弯取直、护岸工程等)对防洪、通航的影响试验研究;河道取(引)水、桥

渡等模型试验研究;海岸与河口潮流泥沙试验研究等。

复习思考题

1. 水工及河工问题的研究方法有哪些? 各有何优缺点?
2. 水工及河工模型试验对水利工程建设的意义是什么?
3. 简述水工及河工模型试验的发展状况。
4. 水工及河工模型试验的一般分类方法有哪些?
5. 试述水工模型与河工模型的联系和区别。

第二章 因次分析

对于自然界中很多复杂的物理现象,人们很难直观地发现各个物理量或影响因素之间的规律,例如有压管中水流、高含沙水流的流动现象,目前还不能单纯用理论分析方法对其进行研究,但从定性或定量的角度出发,获得规律性的结果。随着自然科学的发展以及研究的深入,利用因次分析的方法解决问题就逐渐成熟起来,它体现了试验成果验证理论的特性,并且在模型试验的规划、设计等方面起到了指导性作用,并在流体力学理论和模型试验理论之间架起了沟通的桥梁。

第一节 因次与单位

因次,亦称量纲(dimension),表征物理量的性质和类别,例如质量、长度、时间或其一种组合,可以视其为一种基本的测量值或一种物理量的一组基本的测量数据之一。而单位(unit)则表征度量物理量的基准,例如米(m)、千克(kg)、秒(s)和牛顿(N)分别是度量长度、质量、时间和力的单位。因次和单位是表征物理量性质的两个相关的概念。单位是物理量的因次在某种单位制下的具体形式,一种因次可以用多种单位表示,比如长度可以用米(m)、分米(dm)、厘米(cm)等单位表示,而因次是物理量属性的抽象与概括。

因次可以分为两类:基本因次与导出因次。基本因次具有独立性,即任何一个基本因次都不能由其他的基本因次推导得到;而导出因次则可以由其他基本因次推导出来,一旦基本因次确定后,其他因次都可以用基本因次的幂指数乘积形式表达出来。在水力学中通常采用长度[L]、时间[T]、质量[M]或者长度[L]、时间[T]、力[F]作为一组基本因次,速度[U]、压强[P]用以上两组基本因次可分别表示为[LT^{-1}]、[$ML^{-1}T^{-2}$]和[LT^{-1}]、[FL^{-2}]。

如果某一物理量可用基本因次表达,且其表达式中各基本因次的指数均为零,例如[X] = [$M^0L^0T^0$] = [1],即把该物理量 X 称为无因次数、无因次量或者因次为1的数。无因次数可以由基本因次和导出因次组合表达。无因次数具有如下特点:

- (1) 因次表达式的指数均为零;
- (2) 没有单位;
- (3) 量值与所采用的单位制无关。

根据基本因次彼此之间相互独立、不能由其他基本因次表达的性质,则可推知基本因次的判定条件。根据 GB3101—93,在物理量代表符号前面加“dim”表示因次,例如质量的因次表示为 dim m 。任一物理量 X 的因次可以表达为 dim $X = L^aM^bT^c$ 。假设 A 、 B 、 C 为三个基本因次,其成立的条件是幂乘积不是无因次数,即式(2-1)的非零解不存在。

$$(\dim A)^x (\dim B)^y (\dim C)^z = M^0 L^0 T^0 = 1 \quad (2-1)$$

则 A 、 B 、 C 的因次可以分别表示为:

$$\left. \begin{aligned} \dim A &= L^{a_1} M^{b_1} T^{c_1} \\ \dim B &= L^{a_2} M^{b_2} T^{c_2} \\ \dim C &= L^{a_3} M^{b_3} T^{c_3} \end{aligned} \right\}$$

将其代入式(2-1),则关于幂指数的关系式为:

$$\left. \begin{aligned} a_1 x + a_2 y + a_3 z &= 0 \\ b_1 x + b_2 y + b_3 z &= 0 \\ c_1 x + c_2 y + c_3 z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

方程(2-1)若无零解,则:

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{vmatrix} \neq 0$$

即可认为变量 A, B, C 相互独立,可以作为基本因次。

既然任一因次都可以由一组既定的基本因次表达出来,而在一组多个因次中如何确定基本因次?根据经验,可以把物理量分为三类:几何学物理量、运动学物理量和动力学物理量。只要所选取的一组三个基本因次中分别含有几何学物理量、运动学物理量和动力学物理量,则可认为所选取的基本物理量正确。如何区分这三类物理量?一般来讲,若物理量的因次仅是长度 $[L]$,则表示该物理量为几何学物理量;若物理量因次表达式中含有时间 $[T]$ 而不含质量 $[M]$ (或力 $[F]$),则表示该物理量为运动学物理量;若物理量的因次含有质量 $[M]$ (或力 $[F]$),则表示该物理量为动力学物理量。水力学中常见的三类物理量见表 2-1。

表 2-1 常用物理量的因次和单位

物理量		因次		单位(SI制)
		(L, M, T)	(L, F, T)	
几何学量	长度 l	L	L	m
	水头损失 h	L	L	m
	面积 A	L^2	L^2	m^2
	体积 V	L^3	L^3	m^3
	面积矩 I	L^4	L^4	m^4
运动学量	时间 t	T	T	s
	流速 u	LT^{-1}	LT^{-1}	m/s
	流量 Q	$L^3 T^{-1}$	$L^3 T^{-1}$	m^3/s
	单宽流量 q	$L^2 T^{-1}$	$L^2 T^{-1}$	m^2/s
	重力加速度 g	LT^{-2}	LT^{-2}	m/s^2
	运动黏滞系数 ν	$L^2 T^{-1}$	$L^2 T^{-1}$	m^2/s

续表 2-1

物理量		因次		单位(SI制)
		(<i>L, M, T</i>)	(<i>L, F, T</i>)	
动力学量	质量 <i>m</i>	<i>M</i>	<i>FL⁻¹T²</i>	kg
	力 <i>F</i>	<i>MLT⁻²</i>	<i>F</i>	N
	密度 ρ	<i>ML⁻³</i>	<i>FL⁻⁴T²</i>	kg/m ³
	容重 γ	<i>ML⁻²T⁻²</i>	<i>FL⁻³</i>	N/m ³
	压强 <i>p</i>	<i>ML⁻¹T⁻²</i>	<i>FL⁻²</i>	N/m ²
	动量 <i>K</i>	<i>MLT⁻¹</i>	<i>FT</i>	kg · m/s
	功、能量 <i>K'</i>	<i>ML²T⁻²</i>	<i>FL</i>	J
	功率 <i>N</i>	<i>ML²T⁻³</i>	<i>FLT⁻¹</i>	J/s
	剪切应力 τ	<i>ML⁻¹T⁻²</i>	<i>FL⁻²</i>	N/m ²
	弹性模量 <i>E</i>	<i>ML⁻¹T⁻²</i>	<i>FL⁻²</i>	N/m ²
	动力黏滞系数 μ	<i>ML⁻¹T⁻¹</i>	<i>FL⁻²T</i>	N · s/m ²
表面张力系数 σ	<i>MT⁻²</i>	<i>FL⁻¹</i>	N/m	

在描述物理规律时,物理量的数值会随所选用单位的不同而改变,如1m和100cm。所以,采用有因次的物理量作为自变量所表达的客观规律,其关系式中的函数会随着所选取的单位的改变而改变数值。如果要正确表示反映客观规律的关系式,则需将其中物理量表示为由无因次数构成的关系式,这样就避免了由于所选择单位的不同而引起的数值变化。因次分析就是确定出无因次函数关系式,进而揭示物理量之间的客观规律。

第二节 因次和谐原理

对于自然界中的一切物理过程,原则上都可以采用一定的物理方程表达,该物理方程可以是单项式或多项式,且同一方程各项可以由不同物理量组成,不同因次的项显然不能进行加减等代数运算。因此,任一物理方程中的各个项的因次必须相同。换言之,所有的物理方程都必定是齐次的,即因次和谐,这就是因次和谐原理。

如果一个物理方程经过变化后,方程中各项都变为无因次数,则该物理方程称为无因次方程,亦即无量纲方程。显然,无因次方程也是齐次方程,且无因次方程所表达的物理含义与原方程相同。由于无因次量与所用单位制无关,所以无因次方程也与所选用的单位制无关,这在具体问题的运算中甚为简便。例如,牛顿第二运动定律可用下式表示:

$$F = ma \quad (2-3)$$

式(2-3)左右两边同时除以 F ,则牛顿第二运动定律变为无因次方程:

$$1 = \frac{ma}{F}$$