水沙物理模型几何变态与时间变态研究

窦希萍　高祥宇 等　著

非外借

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

需要全本请访问 www.ertongbook.com

国家重点研发计划（2017YFC0405400）和南京水利科学研究院专著出版基金资助

水沙物理模型几何变态与时间变态研究

窦希萍　高祥宇 等　著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn
·北京·

内 容 提 要

物理模型是研究和解决水动力与泥沙冲淤问题的重要手段。然而，受试验场地和模型沙选择等条件限制，物理模型并不能完全满足水流泥沙运动的相似理论，存在水平比尺与垂直比尺不同的几何变态和泥沙冲淤时间比尺与水流时间比尺不同的时间变态问题。本书在阐述水流泥沙物理模型相似理论的基础上，进行了水动力和泥沙概化物理模型设计，采用物理模型和数学模型相结合的方法，开展了不同模型变率对流速、波高、河床冲淤、局部冲刷以及不同流量、输沙量控制方式对水位、流速、动床泥沙冲淤影响的模型试验和模拟计算。

本书研究较为系统，成果具有创新性，可供从事水利、水运、水电等工程规划设计和河流、河口、海岸水动力及泥沙运动研究的科技人员与研究生参考。

图书在版编目（CIP）数据

水沙物理模型几何变态与时间变态研究 / 窦希萍等著. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2018.11
ISBN 978-7-5170-7078-8

Ⅰ. ①水… Ⅱ. ①窦… Ⅲ. ①河流－含沙水流－物理模型－研究 Ⅳ. ①TV143

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第245506号

书　　名	**水沙物理模型几何变态与时间变态研究** SHUISHA WULI MOXING JIHE BIANTAI YU SHIJIAN BIANTAI YANJIU
作　　者	窦希萍　高祥宇　等 著
出版发行	中国水利水电出版社 （北京市海淀区玉渊潭南路1号D座　100038） 网址：www.waterpub.com.cn E-mail：sales@waterpub.com.cn 电话：（010）68367658（营销中心）
经　　售	北京科水图书销售中心（零售） 电话：（010）88383994、63202643、68545874 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	北京合众伟业印刷有限公司
规　　格	184mm×260mm　16开本　14.25印张　338千字
版　　次	2018年11月第1版　2018年11月第1次印刷
印　　数	0001—1000册
定　　价	**68.00**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

前言

FOREWORD

物理模型是研究和解决河流、河口、海岸工程水流泥沙问题的重要手段。我国几乎所有的大型水利、水运、水电工程的泥沙问题都采用物理模型进行研究，如长江葛洲坝工程、三峡工程、黄河小浪底工程、长江口深水航道工程、黄骅港、杭州湾跨海大桥等。

物理模型在空间上有正态和变态之分，正态模型的水平比尺与垂直比尺相等，变态模型的水平比尺与垂直比尺不等。一般根据所研究的问题来选择正态模型或变态模型。然而由于研究水域的平面尺寸（X、Y）和垂直尺寸（Z）相比往往相差较大，受试验条件和模型沙选择所限，进行正态（即几何变率等于1）或小变率的泥沙模型试验几乎是不现实的，河口海岸地区尤其如此。目前国内外已建的河口模型水平比尺一般在600～2000，垂直比尺为60～150，几何变率（水平比尺与垂直比尺之比，简称变率）为6～15。从理论上讲，几何变态模型并不完全满足相似理论的要求，这是由于模型水平比尺与垂直比尺的不同，导致水流运动的垂线分布和河床底坡的变化，从而引起泥沙运动特性与原型的偏差。同时几何变态模型还可能造成水流的流速比尺加大、与泥沙运动有关的底摩阻流速不相似，给模型的可靠性带来影响。

物理模型在时间上也存在变态问题，为了满足相似理论要求，需采用轻质模型沙进行试验，因此泥沙冲淤时间比尺往往是水流时间比尺的数倍甚至是数十倍，如用泥沙冲淤时间比尺控制试验时间，则会带来水流运动过程的不相似，时间变态对长河段非恒定流泥沙物理模型的影响更大。

物理模型几何变态和时间变态的影响问题一直为物理模型理论和试验研究所关注。近20年来，作者所在团队在国家重点研发项目、国家自然科学

基金、交通运输部重大专项的资助下，在长江口航道管理局的支持下，针对水沙物理模型变态问题开展了较为系统的研究工作。本书共11章，分为两篇。第1篇是物理模型几何变率影响研究，根据窦国仁河口海岸物理模型相似理论，参照长江口北槽航道的具体条件，设计了几何变率分别为2.5、4、6、8.33和12.8的五个概化模型，模型中的潮流、波浪和地形等边界条件均模拟同一原型情况；在这五个模型中分别进行了无丁坝和有丁坝情况下潮流波浪作用时定床试验、动床试验和浑水动床试验，研究各模型的潮流速变化、波高变化、航道及其边坡冲淤变化以及丁坝头局部冲刷过程等，得到模型变率的影响程度；对流速、含沙量、泥沙起动流速和推移质输沙能力公式进行了理论分析，研究了模型变率对水流和泥沙运动的影响程度；采用数学模拟的方法对模型变率影响进行了研究，分别建立变率2.5、6和12.8的三个概化数学模型，得到了无丁坝和有丁坝情况下模型变率对潮流和泥沙冲淤的影响。第2篇是物理模型时间变态影响研究，从力的作用效果和水流总流量相似性出发，阐述了河床冲淤时间比尺与水流时间比尺的关系，在泥沙物理模型试验时，为满足泥沙冲淤时间比尺，需要将每一级流量的作用时间按比例减少，而所模拟的水流过程并不按冲淤时间比尺进行压缩；进行了模型边界恒定流量级（水位级）之间过渡段不同控制时间和方式的试验研究，提出可以有效减小水流波动影响的分段处理方法；进行了不同过渡段处理方式、不同河道槽蓄量、不同河道长度对水位、流速影响的试验研究，建立了河段综合因子与非恒定流影响时间的相关关系，可以通过调整流量级和河段长度来减小流量级过渡段的影响时间；分别按照流量过程线概化、输沙量过程线概化、逐日平均流量和输沙量过程线概化进行动床泥沙冲淤试验，比较了三种控制概化方式对河床冲淤试验结果的影响。

本书第1章由李禔来撰写；第2～5章由窦希萍、王向明、娄斌撰写；第6.1～6.4节和第10章由陈黎明撰写；第6.5节由张新周撰写；第7～9章和第11章由高祥宇撰写。

希望此书能对读者研究水沙物理模型有所裨益，不足之处，敬请指正。

窦希萍

2018年9月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目录 CONTENTS

前言

第1篇 物理模型几何变率影响研究

第1章 河口物理模型与变率影响研究现状 …… 3
1.1 问题的提出 …… 3
1.2 河口模型试验研究综述 …… 4

第2章 潮流波浪泥沙模型相似理论 …… 15
2.1 潮流的相似条件 …… 15
2.2 波浪的相似条件 …… 18
2.3 悬沙的相似条件 …… 22
2.4 底沙的相似条件 …… 24

第3章 系列几何变态模型设计与验证 …… 27
3.1 系列几何变态模型设计 …… 27
3.2 系列模型验证 …… 34

第4章 无丁坝时模型变率影响试验 …… 58
4.1 变率对航道流速的影响 …… 58
4.2 变率对波高的影响 …… 62
4.3 变率对清水动床模型航道冲淤的影响 …… 66
4.4 变率对悬沙定床模型航道回淤的影响 …… 69
4.5 变率对悬沙动床模型航道回淤的影响 …… 71
4.6 变率对底沙输沙量的影响 …… 72

第5章 有丁坝时模型变率影响试验 …… 75
5.1 丁坝对航道流速的影响 …… 75

5.2 变率对航道流速的影响 …… 75
5.3 变率对清水动床模型航道冲淤的影响 …… 91
5.4 变率对悬沙定床模型航道回淤的影响 …… 96
5.5 变率对悬沙动床模型航道冲淤的影响 …… 96
5.6 变率对坝头冲刷坑的影响 …… 97

第 6 章 模型变率影响分析和数学模型研究 …… 102
6.1 模型变率影响分析 …… 102
6.2 数学模型的建立 …… 106
6.3 变率对潮流的影响 …… 109
6.4 变率对航道冲淤的影响 …… 114
6.5 变率对丁坝坝头局部冲刷的影响 …… 116

参考文献 …… 122

第 2 篇 物理模型时间变态影响研究

第 7 章 河流物理模型与时间变态影响研究现状 …… 131
7.1 问题的提出 …… 131
7.2 泥沙物理模型试验研究 …… 132

第 8 章 时间变态问题分析 …… 140
8.1 水流运动相似条件 …… 140
8.2 泥沙运动相似条件 …… 144
8.3 时间变态产生原因及影响分析 …… 149
8.4 时间变态的处理 …… 151
8.5 梯级概化方式分析 …… 156

第 9 章 水流梯级概化影响物理模型试验研究 …… 157
9.1 典型河段基本概况 …… 157
9.2 模型设计 …… 160
9.3 模型测控系统 …… 161
9.4 模型验证 …… 162
9.5 不同控制方式试验研究 …… 169
9.6 减小过渡段影响措施 …… 178

第 10 章 槽蓄量对梯级过渡段影响数学模型研究 …… 180
10.1 平面二维水流数学模型 …… 180
10.2 模型建立与验证 …… 182
10.3 槽蓄量对水流的影响 …… 191
10.4 槽蓄量、梯级流量和非恒定流时间关系分析 …… 198

第 11 章　水沙过程概化方式对河床冲淤影响试验 …… 200
11.1　泥沙物理模型设计…… 200
11.2　泥沙物理模型制作…… 203
11.3　水沙边界选取与概化…… 204
11.4　水沙控制方式对河床冲淤的影响…… 206

参考文献 …… 214

第 1 篇

物理模型几何变率影响研究

第1章

河口物理模型与变率影响研究现状

1.1 问题的提出

我国海岸线长18000多km，有平原入海河流150余条。在河口治理和港口航道建设中，水动力及泥沙问题研究是工程建设的关键问题。目前主要研究手段有：水文泥沙、地形等现场资料测验和分析，水流泥沙数学模型计算，物理模型试验等。

水流泥沙数学模型是根据水流、泥沙运动规律，建立基本数学方程式，用数值方法求解这些方程式，得出水位（潮位）、流速和河床冲淤厚度的近似解，分析和预测工程实施前后水动力和河床变化情况。根据研究要求和条件，数学模型可采用一维、二维、三维模型。目前一维和二维水流、泥沙数学模型已较广泛应用于实际工程的研究中；三维水流和泥沙数学模型的研究日趋深入，已用于解决桥墩局部冲刷等问题。但是，由于水流（紊流）与泥沙之间的相互作用机理还不十分清楚，泥沙的运动规律还有待完善，因此，三维泥沙数学模型在工程应用上还需加强。

水流泥沙物理模型是将河道地形和水流、泥沙运动特征及冲淤时间等按相似原理缩小成模型，模拟特定时段内的水流泥沙运动，得出河床演变的相似情况，用来分析和预测河床的变化。

虽然数学模型具有节省人力、物力和时间等优点，但物理模型试验比较直观，特别涉及工程泥沙冲淤等复杂问题时，仍不失为研究河口治理问题的重要工具。

物理模型的理论基础是相似理论。根据相似理论的要求[1-5]，物理模型以正态为宜。然而由于河口海岸地区水域很大，进行正态或小变率（即模型水平比尺与垂直比尺接近）的泥沙模型试验几乎都不现实。目前国内已建的河口模型水平比尺一般在600～2000，垂直比尺为60～150，变率（水平比尺与垂直比尺之比）为6～15。能否在这些变率的模型上开展泥沙研究，几何变态模型的适用范围和变率的限制，特别是何种比尺下才能进行波浪潮流共同作用下的泥沙物理模型试验，也就成为需要研究的重要课题。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

1.2 河口模型试验研究综述

1.2.1 河口物理模型发展

1885年雷诺首先利用潮汐河口模型试验，研究英国默尔西的潮汐水流[6]。早期的潮汐河口模型试验设备比较简陋，考虑的相似条件也比较简单。

20世纪20年代，随着航运业的兴旺，各国相继通过模型试验来研究潮汐河口的治理问题[6]。其中比较著名的如法国费里哈哥特的塞纳河口模型试验[8]和英国吉普生教授的塞汶河口模型试验。但这些模型比尺都比较小，变率较大，虽可连续运转，但精度却较差。通过模型试验对河口水流情况的认识有所提高，对整治规划起到了一定的作用。

第二次世界大战后，随着电子工业的发展，模型试验中潮汐的发生装置已由简单的机械装置发展成为运用光电原理而设计的半自动控制装置，模型试验也由清水试验发展到浑水试验。无论在试验技术和相似条件的考虑方面都前进了一大步，同时现场测验技术也有显著的改进，因而自20世纪50年代以来各国河口的治理取得显著的进展，航道水深有了较大幅度的增加。各国河口拦门沙的自然水深一般都不足6m，经治理后，都已达到12.5m以上，5万t级海轮可随时进出。

目前的潮汐河口模型可以复演河床的冲淤演变，例如德国易北河口的动床模型已成功地复演了整治河床的演变过程。在物理模型中研究泥沙问题，模型变率不能大，因而，模型尺寸有向大发展的趋势，如已建的长江口模型[7-8]、珠江口模型[9]、杭州湾模型[10]以及在建的黄河口模型[11]。模型中潮汐的发生及潮位、流速、表面流场、地形等数据的量测均可全部实现自动化。在模型中可研究的问题也逐渐拓宽，除一般水力学问题外，物理模型试验已经成为河口海岸治理、航道整治、核（火）电厂温排水、污染扩散和泥沙冲淤等问题的重要研究手段。

1.2.2 国外河口研究概况

自19世纪中叶法国塞纳河口第一个开始整治以后，各国的河口都相继进行了治理，如美国哥伦比亚河口的整治工程始于1882年，法国卢瓦尔河口的整治始于1834年[12]。受当时研究水平的限制，对于一些河口都采用疏浚方法取得所需的水深，以易北河口为例[13-14]，1936年直通汉堡的航道深度为10m，1961年浚深至11m，1969年浚深至12m，1978年疏浚达到13.5m。拦门沙河段航道走向对航道的疏浚量影响很大，西德威悉河口口外的西支航道[15]，由于定线合理，经整治后航道中形成了有利的水流条件，从浅滩来的均匀侧向流在航道中造成落潮量的优势，运行半个世纪以来航道一直稳定。

随着船只吃水深度的不断增加，单靠疏浚难以增加较大的水深，故在20世纪初已对不少河口采取疏浚与整治相结合的治理原则。但制订整治工程的规划主要依靠经验，缺乏科学根据。自20世纪20年代，河工模型试验被广泛应用，对制订河口整治规划起了积极的作用。

1930年荷兰公共工程部要求德尔夫特水工研究所进行莱茵河口物理模型试验。该

所通过动床模拟，证实延长南导堤可以改变口外沙洲的部位、调整新水道口门流态和底沙输移路径。1965 年该所又建造了新模型用以研究鹿特丹新水道及哈林弗赖河口盐淡水异重流问题。

1940 年，美国陆军工程师兵团水道试验站建立了治理密西西比河口的物理模型，进行了西南水道航道水深规划研究。通过 21 个方案的比较，并考虑到各种洪水流量与潮汐组合情况下的航道淤积，最后确定了双导堤和丁坝整治方案，该方案于 1982 年完成，取得 12.2m 水深的预期效果，而航道维护费用与 10.67m 水深下的维护费用相当[16]。

法国塞纳河口为强潮河口，径流量终年变化不大，主要靠雨水与地下水补给。河口中的 3/4 淤泥来自海洋，在大风和强潮的作用下进入河口，造成严重淤积，影响法国第二大港哈佛尔港的发展。1848 年开始第一期治理工程。1950 年在进行塞纳河口治理的第三期工程时，通过模型试验研究了修建 10.5km 长南导堤以后航道增深的可能性。20 世纪 70 年代，法国纪龙德河口完成了口外航道的加深工程，使航道水深增加了 6m，达到 19.5m。该航道线路是根据夏都水工研究所的模型试验成果确定的，航道稳定，维护疏浚量小[17]。

英国默尔西河口潮差较大，径流不大，河口大片浅滩的泥沙由潮流从利物浦港湾带入。1890 年开始开挖航道，1923 年在修建第一期导堤工程前进行了模型试验，确定了导堤的布置形式和堤顶高程。1932 年又修建了第二期导堤工程。1945 年又进行了淡水和盐水试验，探明了修筑导堤后上河口造成严重淤积的原因[18]。

泰晤士河口为典型的钟型河口，口外浅滩罗列。为了整治航道的浅滩段，1909 年通过物理模型试验论证了采用人工导堤不能达到预期的效果，因而，决定采取全线疏浚的方案，开挖了 54km 长的深水航道[19]。模型试验还表明，抛到口外的疏浚土随潮流进入航道，造成回淤量增加；当改为抛泥上岸后，航道的疏浚量显著减少[20]。

1962 年美国在进行哥伦比亚河口航道整治前建立了哥伦比亚河口下游段模型，研究将航道由 121.9m 拓宽至 182.9m、由 10.7m 加深至 12.2m 的工程措施。模型水平比尺 500，垂直比尺 100，采用 0.35mm 的塑料沙，模拟了河口长 83.7km 的区域。河口南堤是顺堤，北堤是丁坝，采取整治工程与疏浚相结合的方针，改善了哥伦比亚河口的航行条件。

20 世纪 80 年代，德国进行了易北河口潮流动床物理模型，模型水平比尺 800，垂直比尺 100，模型沙采用聚苯乙烯，平均粒径 2mm。研究了航道由 12m 增深至 13.5m、宽度由 350m 拓宽至 500m 的工程措施，将已有导堤延长 3.2km。工程建设后的实测资料表明，基本可以不加维护疏浚就可保持 13.5m 航道水深[21-22]。

在河口航道治理方面，欧美国家和日本较多采用的措施是修建导堤。导堤一直延伸到所需的深水区。美国 58 个口门[23-24]，除封闭的 8 个口门外，建有双导堤的 26 个，建有单导堤的 5 个，共占总数的 62%。日本 139 个河口[25]，建有导堤的 72 个，约占总数的 52%。20 世纪 70 年代以来，陆续有一些河口在建设导堤，如荷兰鹿特丹港进入北海的河口[26]，原来只有北导堤，1974 年将北导堤延伸 3km，又新建 10.5km 长的南导堤，一直伸到－18m 水深处。西德易北河口的疏浚工作始于 1834 年，1968 年建成一条长 9.25km 的单导堤[27]，后将其延长到 12.4km。表 1.1 列举了国外部分河口海港物理模

型的情况。

表 1.1　　国外部分河口物理模型概况[28]

序号	名　称	单　位	水平比尺	垂直比尺	变率
1	东京湾模型	日本	2000	100	20
2	濑户内海	日本	2000	160	12.5
3	大村湾模型	日本	5000	292	17
4	圣劳伦斯河口魁北克河段模型	加拿大	10000	500	20
5	缅因—芬地湾模型	加拿大	2500	125	20
6	卡迪夫湾模型[28]	英国	1500	75	20
7	弗雷塞河口三叉工程模型	加拿大	600	70	8.57
8	查尔斯顿港入海航道模型	美国	200	100	2
9	哥伦比亚河口模型	美国	500	100	5
10	切萨皮克湾模型	美国	1000	100	10
11	塞纳河口模型	法国	1000	100	10
12	纪龙德河口口门地区模型	法国	1250	100	12.5
13	纪龙德河口整体模型	法国	2000	200	10
14	易北河口航道整治定床模型	西德水工研究所	500	100	5
15	易北河口航道整治动床模型	西德水工研究所	800	100	8
16	易北河口深水港定床模型	西德方修士研究所	500	100	5
17	泰晤士河口马普林深水港模型	英国	1000	100	10
18	湄南河口模型	泰国	500	100	5

1.2.3　国内河口研究概况

我国最早的河口治理为黄浦江的治理[29]。为了海运的需要，1876 年开始研究黄浦江的整治计划，1905 年起陆续修建了顺坝、丁坝和黄浦江口导堤等一系列建筑物，使整治前不足 5m 水深的航道逐步加深到 9m（低潮位下）。当时上海港入海航道为长江口南槽，其主要障碍是铜沙浅滩，滩顶最小水深仅 6m 左右，1935—1937 年曾对这段航道进行试挖，但以失败告终[30-31]。1916 年开始在辽河口修筑东西双导堤，以加大水深，导堤建成后虽对增加水深和改善航运条件起了一定作用，但后因年久失修而逐渐失效。1919—1929 年在闽江口北港修筑了 8 条顺坝和 16 条丁坝用以增加航道水深，但未达到预期效果。20 世纪 30 年代对海河口进行了疏浚和裁弯工程，并修建了丁坝，但收效不大。这些工程的进行，往往是凭着经验，有成功，也有失败。

我国第一个河口模型是 1953 年在天津大学进行的海河口模型试验，同年在南京水利科学研究所制造了钱塘江模型，试验了我国第一台潮汐控制仪的性能。1958 年进行海河口动床模型试验。1972 年南京水利科学研究所与华东水利学院合作，首次进行了长江口海门江心沙北泓的浑水淤积试验[32]。20 世纪 70 年代中期，南京水利科学研究所做了射阳河裁弯悬沙淤积局部冲淤试验[33]，将潮汐河口悬沙模型试验技术向前推进了一步。

近几十年来，随着波浪潮流作用下的泥沙运动基本规律的深入研究[34-58]，采用变态河工物理模型研究和解决了许多河流、河口、海岸治理以及港口航道开发建设中的泥沙问题，不但进行了潮流悬沙动床试验，而且进行了潮流波浪共同作用下的浑水动床模型试验，在模型的相似理论和试验技术方面取得了重要进展[59-65]。表 1.2 是国内部分河口海港物理模型的情况。

表 1.2　　国内部分河口海港物理模型概况

序号	名　　称	单　位	水平比尺	垂直比尺	变率
1	射阳河闸模型（1954 年）	南京水利科学研究院	800	80	10
2	鸭绿江下游潮区模型（1955 年）	南京水利科学研究院	1200	150	8
3	长江口整体模型（1956 年）	南京水利科学研究院	2600	120	21.67
4	黄浦江河口整治（1957 年）	南京水利科学研究院	700	70	10
5	钱塘江河口模型（1960 年）	钱塘江工程局	1000	100	10
6	瓯江河口模型（1969 年）	南京水利科学研究院	1000	100	10
7	钱塘江河口整体模型（1972 年）	钱塘江工程局	3000	100	30
8	长江口航道整治模型（1975 年）	南京水利科学研究院	1600	120	13.33
9	闽江口航道整治（1975 年）	杭州大学	600	60	10
10	甬江口（1976）	天津水运工程科学研究所	350	50	7
11	黄埔新港区（1977 年）	广州水科所	400	80	5
12	镇海港区（1979 年）	天津水运工程科学研究所	350	50	7
13	长江口航道治理模型（1982 年）	南京水利科学研究院	2000	150	13.3
14	黄埔新沙港（1985 年）	珠江水利委员会	600	80	7.5
15	珠江口磨刀门河口（1989 年）	珠江水利委员会	500	50	10
16	汕头港河口拦门沙整治模型（1990 年）	南京水利科学研究院	500	80	6.25
17	洋山深水港（1993 年）	南京水利科学研究院	700	120	5.83
18	瓯江龙湾港航道整治（1993）	南京水利科学研究院	1000	100	10
19	温州浅滩围涂工程（1995 年）	南京水利科学研究院	1000	100	10
20	长江口近口段模型（1996 年）	南京水利科学研究院	900	120	7.5
21	黄骅港（1996 年）	南京水利科学研究院	625	100	6.25
22	长江口航道治理模型（1998 年）	上海河口海岸科学研究中心	1000	125	8
23	永定新河河口（2001）	南京水利科学研究院	640	80	8
24	厦门湾（2002 年）	南京水利科学研究院	550	60	9.17
25	宁波北仑港（2002 年）	南京水利科学研究院	750	125	6
26	吕泗港（2003 年）	南京水利科学研究院	900	100	9
27	厦门西海域整治工程（2003 年）	南京水利科学研究院	500	70	7.14
28	韩国光阳港（2003 年）	南京水利科学研究院	480	100	4.8
29	珠江三角洲模型（2005 年）	珠江水利委员会	700	70	10
30	洋山深水港（2009 年）	天津水运工程科学研究所	850	135	6.3
31	深圳大铲湾港区（2012）	南京水利科学研究院	540	81	6.67

1.2.4 已有几何变率影响研究

根据物理模型相似理论的要求[66-73]，物理模型以正态为宜。然而由于河口海岸地区水域很大，进行正态或小变率的泥沙模型试验几乎都不现实。从理论上讲，变态模型并不完全满足相似理论的要求，在流场和泥沙运动方面均会产生不同程度的误差[74-80]。以往有不少学者[81-86]从理论上研究模型变率对试验成果的影响，但通过系列模型试验研究变率影响的并不多，而且主要是研究恒定水流条件下顺直段和弯道段变率对水流和泥沙冲淤相似性的影响，尚未见通过系列模型研究潮流作用下变率对流场和泥沙场的影响。

佛里斯[87]指出当原型及模型内同类物理量的比值不是常数而随空间或时间变化时，则此模型有比尺影响存在。对于河口模型比尺问题，美国陆军工程兵团水道试验站[88]的经验是河口定床水工模型最适合的垂直比尺是100，大于150的比尺很少采用，很浅的河口则用80或60。这是因为模型水深太小时，现有流速仪不能应用，而且也不能保证在大部分潮汐周期中水流为紊流状态。德国方修士研究所[89]也认为，垂直比尺100较适当，这样模型上流速与潮位的测量精度大致与原体的测量误差相一致。英国环境局在介绍泰晤士河口口外部分模型试验[90]资料中认为，研究较小范围的问题时，用动床小比尺模型预测河口体系的泥沙运动可得出合理的成果。日本学者[91]则认为，河口是三维问题，条件复杂，最好采用动床试验。

1.2.4.1 理论分析研究

一般认为[92]，研究一维水流问题即只研究水位和平均流速的相似问题，这类模型的变率可取得大一些，这里控制模型变率大小的条件主要是模型的糙率，而不是水流的相似条件。至于平面二维水流的相似性还包含某种程度的二维流场相似问题，因此变率受到更多的限制。但究竟多大变率才能使平面二维水流的相似性不致受到过大的影响，目前尚无可靠的研究成果。以往文献往往根据在水槽试验中获得的平面二维水流的宽深关系来确定对变率的限制。

亚林将断面划分为具代表性的中间区和受边壁影响的两个岸边区。设河流的水面宽为B，平均水深为H，代表中间区的水面宽为C_2，受边壁影响的左右两个岸边区水面宽为C_1。假设中间区保持足够的宽度，无论在原型和模型中均能代表全断面的水力特性，则模型的允许变率η具有如下关系：

$$\eta \leqslant \frac{1-C_2}{2C_1}\left(\frac{B}{H}\right)$$

如两岸边壁区共有3～5倍水深的宽度即$2C_1=(3\sim5)H$，并要求中间区达到水面宽2/3或至少1/2即$C_2=(0.67\sim0.5)B$，则可得模型允许变率限制的近似式为

$$\eta \leqslant \frac{1}{10}\left(\frac{B}{H}\right)$$

洛西耶夫斯基根据水槽试验，当水槽宽深关系小于一定程度（如8）之后，断面内的环流方向和数目都可能发生变化。据此，认为保证变态模型断面内环流方向和数目不发生变化的限制条件[4]为

$$\eta \leqslant \frac{1}{8}\left(\frac{B}{H}\right)$$

根据沙巴涅夫和岗恰洛夫的研究，当水深宽深比大于 10 时，水流基本属于二维水流[2]。因此，宽深比的限制可规定为

$$\eta \leqslant \frac{1}{10}\left(\frac{B}{H}\right)$$

张瑞瑾等[75]提出凡是二度性（指纵剖面）及均匀性愈强烈的河道水流，所允许考虑的变率可以大些；反之，凡是三度性非均匀性强烈的河流，模型不宜做成变态，或者对它的变率必须严格控制。一般经验，限制变率在 3 以下[93]。张瑞瑾等还认为，以变态模型水力半径与正态模型水力半径的比值作为变率对水流影响的指标。朱鹏程[82]认为在变态动床河工模型中，还应考虑断面湿周对水流内部结构的影响。

张红武[94]认为，模型变率大小主要取决于原型河道的宽深比和河床糙率。宽深比越大和糙率越小，变率就可大一些，否则，变率就应小一些。由大量试验资料看出，只要适当选取变率，模型变态对流速分布的影响是有限的。同时也发现，即使是正态模型，当河床减糙后，其流速沿垂线的分布与原型也有明显出入。

吕秀贞[85]通过对变态模型有关相似比尺的分析，研究了模型变态对坡面上推移质泥沙输移相似性所造成的偏离，指出几何变态模型导致水流方向正坡床面的模型沙起动流速小于正确值，从而使模型沙趋于容易起动，模型输沙率大于原型应有值；同时几何变态又使水流方向负坡床面上模型沙的起动流速大于正确值，使泥沙在负坡床面难以起动，床面输沙率偏小。坡面上起动流速和输沙率相似性偏离的误差大小与模型的几何变率、床面坡度的正负和大小有关，也与泥沙粒径的粗细和模型沙水下休止角的相似性等因素有关[95-96]。

1.2.4.2 系列模型试验研究

早在 1955 年阿汉墨德将萨特莱河的一段塑造出比尺不同的 7 个变态模型，以研究模型变率对冲刷深度的影响。近 40 年来，通过系列模型试验进行变率影响研究的主要有窦国仁、张红武、颜国红、梁宾、毛世民、胡小保、廖志丹、虞邦义[97-103]等，他们分别研究了变率对恒定水流条件下丁坝回流、顺直河段、弯道段、汊道、单边突扩河道、凹入式港池水流形态和结构的影响，其中胡小保在单边突扩概化系列模型中、廖志丹在凹入式港池概化系列模型中研究了变率对悬沙淤积的影响。在进行三峡工程泥沙问题研究中，姚仕明对模型变率的影响做了较多的试验研究，除了研究变率对水流的影响外，还研究了变率对泥沙冲淤变化的影响。此外，还有些学者针对局部冲刷问题进行过系列模型试验[104-107]，其目的在于推求相当于正态模型时的试验值。现将已有的系列模型变率影响研究综述如下。

（1）模型变态对流场相似性的影响。

为了探讨变态模型的回流相似问题，窦国仁等设计了变率为 2.5 和 5 的 2 个模型与变率为 1 的原型进行对比。在模型与原型的对比组次中，有的同时满足重力相似和阻力相似，有的只满足阻力相似偏离重力相似，有的只满足重力相似偏离阻力相似。试验表明：如同时满足重力相似和阻力相似，当变率为 2.5 和 5 时，模型回流长度及宽度与正

需要全本请访问 www.ertongbook.com