

16160
高等学校教学用书

水工模型試驗 及量測技术

清华大学水利系

“水工模型試驗及量測技术”編写組編著



中国工业出版社

本书系由清华大学水利系“水工模型試驗及量测技术”編写組根据該校水利系所訂“水工模型試驗及量测技术”課程教学大綱編写的。

书中較全面地介紹了水工模型試驗的原理、方法、应用及模型的制造与設計。

书中除了介紹最新量测技术外，尚介紹一些土方法，使土洋結合。对某些新的实验工作做了初步探討，而且对科学研究方法也做了較为深刻的論述，并指出如何多快好省地进行水工模型的試驗研究工作。

参加本书編写的为清华大学水利系1958年毕业同学：李邦嫻、陈汝娟、諸葛茜、林立岩、赵金城、傅祥源，四年級同学：管器、黄霖恩、李淑香、馮元愷、方洁灵、張垚山、包煜君等。此书的編写得到有关教师及产业部門的帮助和审阅。

本书可供高等工业学校水利系各专业同学做为参考书，亦可供工程技术人員和实验人員参考之用。

为了节约紙張，正文前部分作了一些变动，所以全书頁碼是从5开始的。

水工模型試驗及量测技术

清华大学水利系

“水工模型試驗及量测技术”編写組編著

*

水利电力部办公厅图书編輯部編輯(北京阜外月坛南甯房)

中国工业出版社出版(北京佟麟閣路丙10号)

(北京市书刊出版事业許可証出字第110号)

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本787×1092¹/₁₆·印張11·插頁1·字数256,000

1958年10月高等教育出版社北京第一版

1961年9月北京新一版·1962年4月北京第三次印刷

印数2,564—5,163·定价(10-6)1.40元

*

統一书号，K15165·897(水电-130)

目 录

緒論	7
§0-1. 試驗在水工建筑中的作用	7
§0-2. 課程学习的目的和方法	8
§0-3. 发展簡史	8
§0-4. 水工模型試驗在工程中的应用	9
§0-5. 模型实验的一般过程	10

第一篇 水力学模型試驗

第一章 水力学模型試驗的

基本原理	11
------------	----

§1-1. 水力学模型試驗方法概論	11
§1-2. 液流相似的基本理論	12
§1-3. 模型的设计	19

第二章 水工試驗室設備

及模型制造技术	28
---------------	----

§2-1. 水工試驗室的布置及設備	28
§2-2. 水力学模型制造的技术問題	29

第三章 水力学量測設備及仪器

§3-1. 概述	32
§3-2. 水位量測	33
§3-3. 压力量測	35
§3-4. 流速及流向量測	38
§3-5. 流量量測	43

第四章 近代科学測量技术

§4-1. 概述	45
§4-2. 非电量的电学測量的一般原理	46
§4-3. 水面波动的量測	55
§4-4. 动水压力的量測	56
§4-5. 水流速度的量測	65
§4-6. 流量的測量	70
§4-7. 照相測量及电影測量	71
§4-8. 电拟法	73

第五章 試驗的进行、試驗資料

的整理和分析	81
--------------	----

§5-1. 試驗的进行	81
-------------------	----

§5-2. 試驗資料整理和分析的

一般方法与步驟	81
---------------	----

§5-3. 模型試驗报告的編写及內容

第六章 气流模型試驗

§6-1. 气流模型試驗的性质及其意义	86
§6-2. 空气模型試驗的原理	87
§6-3. 压力空气模型制造的簡單介紹	88
§6-4. 輔助設備及觀測的仪器	88
§6-5. 气流模型試驗实例	89
§6-6. 小結	92

第七章 水力学模型試驗中的几个

特殊問題的量測	92
---------------	----

§7-1. 土坝內的渗流情况量測	92
§7-2. 高速水流的試驗問題	93
§7-3. 泥沙試驗中的量測問題	95
§7-4. 振动的量測	95
§7-5. 研究空蝕現象的方法	96

第八章 水工建筑物的

原型觀測与研究	96
---------------	----

§8-1. 原型觀測与研究的意义	96
§8-2. 原型觀測与研究的主要方法	97
§8-3. 原型研究的实例	99
§8-4. 目力觀測	103
§8-5. 原型觀測与研究工作的 要求及注意事項	103

第二篇 結構模型試驗

第九章 概 述

§9-1. 結構模型試驗的意义和特点	104
§9-2. 結構模型試驗的分类	104
§9-3. 結構模型試驗的基本原理	105

第十章 光彈性試驗

§10-1. 光彈性試驗在生产中的 作用及其特点	109
§10-2. 光彈性試驗的基本原理	110

§10-3. 光彈性試驗解決結構物空間應力的方法——“凍結法”的介紹	127	§12-2. 模型設計	160
§10-4. 光彈性試驗的材料	127	§12-3. 模型材料的選擇	160
§10-5. 塑料的特殊性質	130	§12-4. 模型製造	161
§10-6. 模型製造	130	§12-5. 模型的量測設備與技術	162
§10-7. 光彈性儀器設備	132	§12-6. 加載設備	162
§10-8. 試驗過程與成果分析	135	§12-7. 成果分析研究	162
附錄	137	第十三章 網格法膠體模型試驗	165
第十一章 脆性材料模型的結構應力試驗	144	§13-1. 特點	165
§11-1. 脆性材料模型的結構試驗的特點	144	§13-2. 模型材料	165
§11-2. 模型材料	145	§13-3. 模型設計與製作	167
§11-3. 模型的設計和製造	148	§13-4. 加載試驗	168
§11-4. 加壓設備	149	§13-5. 量測方法及量測設備	169
§11-5. 量測設備	150	§13-6. 成果整理及分析	172
§11-6. 量測技術	153	第十四章 結構模型試驗各種不同方法的比較	173
§11-7. 成果分析	153	§14-1. 比較的原則	173
§11-8. 實例	154	§14-2. 各種試驗方法的主要優缺點	173
§11-9. 溫度應力試驗	158	§14-3. 各種方法的應用和比較	174
第十二章 塑料模型結構應力試驗	160	第十五章 特殊問題	175
§12-1. 塑料、塑料模型試驗的特點	160	§15-1. 結構振動模型試驗概述	175
		§15-2. 結構自振頻率的測定方法與設備	175
		§15-3. 關於穩定性的試驗	177
		參考書目	179

緒 論

“水工模型試驗”是一門新的技術科學，它通過試驗來研究和改善水工建築物的布置、型式和構造。本書講述水工模型試驗的原理、方法和應用。主要內容有水力學模型試驗、結構模型試驗、原型觀測。除了介紹一般的量測技術外，還介紹了現代量測技術。

§0-1 試驗在水工建築中的作用

一切自然科學知識離開生產實踐都是不能得到的，通過實踐，人們對自然現象及其本質逐漸了解與掌握，經總結提高到理論，然後再指導實踐。

生產中提出的一系列問題，有許多是不能用計算與分析方法解決的，而必須用試驗方法解決。生產問題的進一步解決，也推動了試驗的發展。

試驗是科學研究和檢驗理論的主要途徑之一。通過試驗對自然界中所發生的各種現象進行研究，將各種試驗資料累積總結，人們就能更進一步掌握客觀規律，因而就能更完滿地用它來解決生產問題。

在進行試驗時，必須掌握量測技術。通過量測以表達自然現象，對於某些複雜問題試驗研究就必須有更高的量測技術。例如水流對結構物作用的動水壓力的脈動情況，就要用電測來測得壓力與時間的變化。

由於水工建築物的一些特點，試驗就更有其特殊意義。水工問題的複雜性在於：水工建築物在極大的水壓力下工作，水的自然力對建築物、岸邊、河床的作用因素極為複雜，另一方面，地基的地质情況對水工建築物的影響因素也很多，致使有些問題目前尚沒有較完善的分析方法，而必須借助於試驗方法加以驗證，所以現代對於一般較大規模的水工建築物，都要求通過試驗來驗證，修改設計，這樣才能保證使結構設計得最合理最經濟而又安全可靠。在某些複雜的情況下，由於無法進行較準確的計算，建築物的形狀和尺寸，主要是依靠試驗來進行的。例如溢洪道下游跳水檻消能問題，除計算跳水距離沖坑深度和沖刷範圍外，尚應通過試驗驗證和分析以採取改進措施。又如某工程通過試驗觀測溢流壩上溢洪時，水流對右岸鐵路路基、左岸航運建築物的影響，決定了改變壩軸綫的位置與方向，並決定了溢流壩的位置。在結構試驗方面，結構應力複雜的壩內厂房通常用光彈性試驗方法，來研究其應力，改善結構物剖面 and 決定配筋量。在我們，許多壩體的結構應力，都是採用模型試驗的方法來校核計算成果的。

生產不斷發展，新技術不斷出現，人們要求更進一步掌握各種規律，試驗即為科學研究提供可靠依據，例如土壩過水問題，過去因實例甚少，人們對其規律了解不夠，但在1958年以來，經過大量的試驗研究，終於修建成了高31米，單寬流量達20立方米/秒的過水土壩，為土壩溢流開拓了一新的途徑。

必須指出，模型試驗有一定的局限性，某些問題反映原型情況還不完善，例如下游河床不均勻、不等向情況的岩石或土壤如何能用試驗材料反映出來，天然氣候的影響等均較困難。但這正是需要通過不斷研究逐步深入去解決這些問題。

除了模型試驗外，对建筑物原型的研究与观察，也是很重要的一部分。对已经修好的工程运用情况进行观察，从中探明实际上水流的作用如何，结构物中及地基土壤中应力与应变的情况，建筑物的沉陷等。一方面给更确切地掌握规律提供资料，对建筑物进行及时的改进，一方面亦能验证模型試驗，反映实际事物的情况与精度，以便改进模型試驗技术。

§0-2 课程学习的目的和方法

前节已提到模型試驗在水利工程中的重要性，作为社会主义事业的水利建设者，必须具备有系统的理论知识和解决实际问题的本领。因此，通过本门课程的学习，较系统的了解有关模型試驗的基本理论知识，掌握試驗方法，量测技术，模型制造等技能，学习组织实验工作，应用资料分析成果，以逐步提高独立工作能力。同时，通过实际锻炼，逐步培养辩证唯物主义的观点。

在学习和以后的科学研究工作中，理论与实践应很好结合，亲自参加試驗操作，从现象事实出发，进行分析研究。工作中，要有科学分析的精神，踏实、严谨、细致的工作作风，深入钻研，以求逐步揭开自然界的规律性。

§0-3 发展简史

这门科学的发展和所有科学一样，是在生产发展的基础上发展起来的，水利工程在我国和世界上早就有了应用。但当时并没有什么試驗，建筑物并未经过試驗就修建起来了。所以在相当长一段时间中是在摸索前进的，但在实际工作中也收集到一些资料，总结出一些成果来。在十八世纪由于工商业的发展，航运事业得到了发展，所以对不同种类河道的水流阻力，壅水曲线，泥沙运动条件及船舶阻力等开始进行研究。但这些研究都没有考虑到相似问题。在1686年牛顿发现了液体内摩擦定律，同时制定了液体内摩擦阻力相似定律，然而它并未被运用；谢才在1775年在試驗基础上提出他的著名公式；达西是由于他的渗透試驗而著名；但所有这些研究都未利用相似原理，一直到十九世纪佛劳得对船只模型进行研究并从而推荐相似定律时才得到了应用，从而开始直接将原型按比例尺缩小，来做模型試驗。如雷诺进行的摩塞河模型試驗用来了解潮汐河口的水流情况，费弄-哈哥特进行了莱茵河口的模型試驗，至1898年，恩格斯创立了第一个水工模型試驗室，在这以后，水利模型試驗才开始得到发展。

苏联在十月革命后，由于巨大水利工程的建設，在全国建立了很多試驗室，进行了大规模的科学研究工作，创造性地解决了很多生产问题。1925年在塔什干建立了水利科学院研究室，主要是解决中亚细亚的灌溉问题。1926~1927年在修建第聂泊水电站时，莫斯科中央流体力学研究所也修建了水工試驗室。莫斯科运河的建設及战后所修建的伏尔加-顿通航运河，齐姆良水力枢纽以及在伏尔加河上、第聂泊河上和苏联其他河流上的水力枢纽中，在建設巨大水工建筑物的同时，在莫斯科、列宁格勒、埃里温 and 建設工地上的許多試驗室都进行了紧张的模型試驗及科学研究工作。

不仅是水力学模型試驗工作在二十世纪得到很大发展，而且结构試驗也开始发展，因为二十世纪初在资本主义国家就开始修建拱坝，其应力分析比较复杂，所以开始采用模型試驗来进行应力分析。而在第二次世界大战后，由于资本主义国家动力缺乏，要修

建水电站，薄拱坝开始发展起来了。在法国、葡萄牙、意大利的模型試驗技术都有进一步的发展，采用了石膏、硅藻土及塑料制模型，用电阻絲量測应变，大大提高了試驗效率。

苏联由于高坝的发展开始用先进的方法来研究高坝的应力問題，如布拉茨克成功地采用了二元、三元的光彈性試驗和塑料模型結構試驗。

在中国，解放前反动派是不管人民生計的，任凭河水泛滥。所以水利工程很少发展。試驗室也就更少了。据不完全统计，当时只有南京、北京、西北等地的几个試驗室，而大部分又未进行什么工作。如南京水利試驗室(現在水利科学院)在抗日戰爭中被破坏后，直到1949年还未修复。而天津第一試驗室在抗战时被破坏后就未修复。在高等学校中也只有极少数几个大学有水工試驗室做些零星的試驗工作。

解放后随着各項建設的发展，水利工程也在迅速发展。一改旧中国的落后面貌，兴建了許多大、中、小型水利工程和农村水电站。在水利建設大跃进后，很多問題都提到日程上来。这就給試驗室的工作提出了很多問題，全国許多試驗室就是在生产的要求下，建立起来的。如科学院水工研究所，它拥有一定数量的研究人員和較多的仪器設備。进行了各种水工建筑物的模型試驗，不仅有水力学方面的，也有結構应力方面的。另外，在全国各高等学校水利系中也都建立了試驗室，而且为生产进行了很多試驗工作。不仅在大城市，在水利工地上，在各省和有些县市也建立了水工試驗室。

生产的发展也給試驗工作提出了进一步的要求，不仅要對一般現象进行研究，而且要对一些很复杂的現象，如高速水流的脉动，掺气問題，結構物的应力分析、稳定等問題进行研究。这就要求应用最新技术，如半导体同位素等在水工試驗量測上的应用。在結構应力試驗中，不仅数量上大大增加了(过去这方面試驗做的很少)，而且还采用了多种材料，如塑料、印刷胶等，除研究結構物的应力和应变外，研究的課題也涉及到建筑物的稳定、振动諸問題。

在模型試驗中，也提出与解决了許多新問題，如“天然鋪盖”(即利用洪水挟带泥沙渗入庫区透水基础，改变基础渗透系数的办法)問題是由生产需要而提出来的，从而提供了一个解决渗漏問題的新方法，为多快好省地解决在深砂卵石复盖层上筑坝的問題提示了一个方向。

在党的领导下，我国的水利建設和水利科学已經取得了巨大的成績，但随着我国社会主义建設事业的蓬勃发展，在我們的面前提出許多新的任务，如高坝水流、結構物振动、以及新技术在水利工程中的应用等問題，这些都需要花費巨大劳动、勤勤懇懇，深入細致地进行研究，在三面紅旗的指引下，在水利建設的推动下，我国的水利科学及試驗技术必将有长足的发展。

§0-4 水工模型試驗在工程中的应用

1. 水工建筑物方面 主要研究泄水建筑物的流量系数，水流作用在建筑物上的压力(包括脉动压力)、真空等。水流的衔接形式，消能工的作用；建筑物下游河床的局部冲刷及对河岸的冲刷情况；此外还可以研究整个樞紐的布置，施工导流措施(如圍堰，导流隧洞)，建筑物下游折冲水流扩散等問題。

在船閘力学方面，研究輸水道的流量系数，灌水和泄水時間，閘室中水流情况和对过閘船只的作用，水流对航道的冲刷等問題。

2. 水能利用方面 研究調压塔的尺寸和水力特性, 水击压力, 水輪机組工作性能, 水电站及引水渠的不定流, 沉砂池的工作情况等問題。

3. 港工建筑物及潮汐方面 研究防波堤的消浪及防护作用, 波浪对港工建筑的作用, 港口泥沙問題, 潮汐对河口港的影响等問題。

4. 结构模型試驗方面 (指以上各类建筑物在结构方面的試驗)

a) 在各种靜荷載(如靜水压力、自重)作用下的结构应力、位移以及温度(稳定場)的结构应力。

b) 在各种动荷載作用下的结构应力及位移, 如地震时结构物的震动頻率应力、地震水压力作用下的结构应力、由于水流脉动所产生的结构应力、外界温度变化时(不稳定場)的结构应力等。

c) 结构物的稳定性, 它包括薄壁结构的纵向弯曲稳定性(如支墩等)及结构的滑动稳定性(如土坝边坡稳定及重力坝沿基础的滑动稳定性等)。

用試驗方法在研究上述問題时, 还可考虑到结构的各种复杂形状, 坝体材料不均匀性(如用不同标号混凝土)以及基础的不均匀性(如基础与坝体彈性模数不同, 或基础各部分的彈性模数不同, 或基础中存在局部的軟弱地带等)。

在本門課程中, 由于条件限制, 结构模型試驗部分只着重介紹靜荷載作用下产生应力的情况。

§0-5 模型实验的一般过程

1. 明确生产中提出的問題, 从而决定实验的内容及所需成果。

2. 选择模型比例尺, 主要应滿足模型与原型的相似要求, 并能足够准确地反映出原型中的各种現象。在符合多快好省的原則下, 应最大限度的提高精度。

3. 制作模型:

a) 选择模型材料, 应当保証达到模型与原型的相似性及实验成果对精确度的要求, 并重視經濟原則。如对一般重力坝进行試驗, 就在木模上抹一层水泥砂浆防水即可, 而对于特殊的曲面坝, 如拱坝, 为保証精度, 表面的光滑完整。可考虑采用塑料加工做成模板。

b) 模型制造和安装应该让同学亲自动手, 以貫徹脑力劳动与体力劳动相结合的方針。据我們的經驗, 一般同学經過短期学习后, 都可做出高质量的模型。在制作和安装过程中, 应保証模型与原形相似。

4. 选择量測设备及量測要求:

a) 对同样水流現象可采用多种量測設備。具体选用何种仪器得視精度要求、現有設備等条件而定, 但也并不能局限于此, 应尽量自己动手, 用土办法改进現有設備, 貫徹土洋結合的方針, 以滿足生产要求。

b) 在量測上也不能墨守成規, 被规范所限制, 而应在实际操作过程中, 进行技术革新, 創造性地进行工作。

5. 成果分析: 分析成果应在深入实验場地进行观测操作的基础上来进行, 而不能单凭測得的数据曲綫, 脱离实际情况地分析。

要量測那些資料及放多大流量, 都要根据設計上要求解决什么問題来决定。

第一篇 水力学模型試驗

第一章 水力学模型試驗的基本原理

§ 1-1. 水力学模型試驗方法概論

1. 水力学模型試驗的特点

在緒論中已經提到，模型試驗是解决生产問題的，是通过对模型的观察和量測，来了解和認識原型的手段。这就要求模型能够反映原型。

自然界中的現象是极端复杂的，但有些現象当其形成的因素是相似的时候，那末就发生相似的演变，水力学模型試驗就是利用了自然界的这一規律。

水力学模型試驗是在水力学的范围內，考查自然現象是由那些因素造成的，这些因素是按照什么法則对自然現象起着作用；我們在試驗室中創造与天然相近的条件，就能获得与天然相近的現象。这样就能通过人为的措施，預見到自然現象的演变。

如土坝坝頂过水时，坝上液流的运动是液体上面各种力作用的结果(图 1-1)。坝上液流是在重力作用下向下溢流，同时又受到坝頂的局部阻力和坝面的沿程阻力。又因液体有慣性，当液流运动变速时，会产生慣性力，使液流受慣性力作用。要在模型中得到相似現象。那就需明了上述現象中的各种力，应使模型和原型中有同样类型的力，并相应地符合相同的比例。这样我們把模型中觀測的結果乘上这个比例系数，就可得到天然情况下的相应数值。这就是水力学模型試驗的本质，

因此，归根結蒂，水力学模型試驗是把天然現象中一切被考虑的水力学因素、通过一定比例的縮小，将天然現象搬到試驗室中来觀測，然后再把观察到的結果用同样比例放大，又得到天然現象。

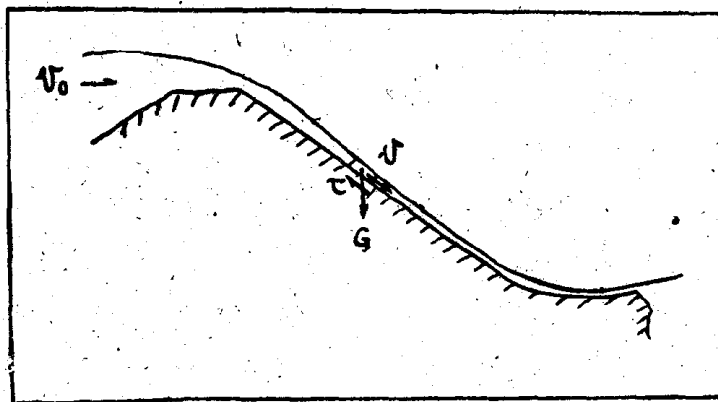


图 1-1 坝面液流受力情况

水工模型試驗的比例系数如何获得，将在下一节中系統地加以介紹。

2. 模型的种类

由于所提出試驗的任务不同。就有不同的模型来滿足这些要求。

当我们研究河道水力枢纽的总布置时，需要把研究的河段各个部分都按比例缩小，作成模型进行试验，这种模型叫**整体模型**（图 1-2）。整体模型一般用来研究空间水流问题。

有些问题往往不需要整体模型，例如在确定溢流坝坝面的压力分布时，就没有必要把整个坝做成一个模型来研究，只要沿坝轴线截取一段进行试验即可，这就是**断面模型**（图 1-3）。断面模型是研究二元问题，即研究运动要素沿竖直方向和纵向变化的问题。建筑物过水区域宽度较大的情况下亦可采用此法研究。

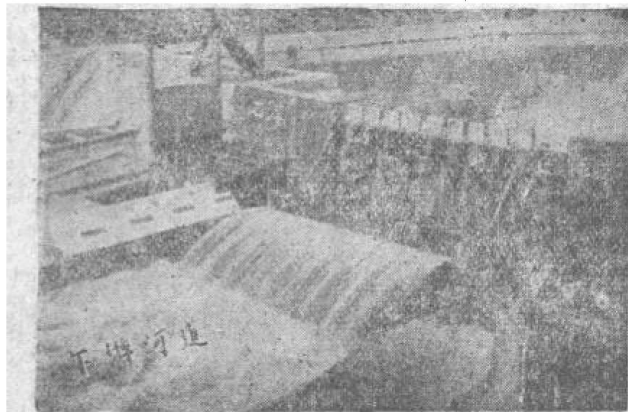


图 1-2 整体模型

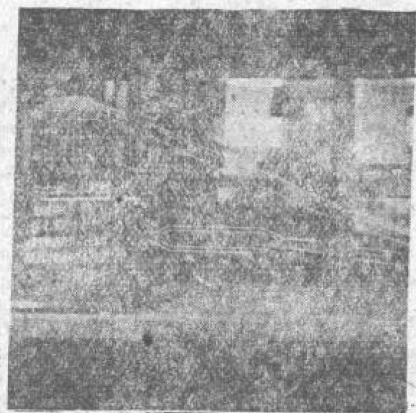


图 1-3 断面模型

另外还有些情况如构造物是对称的，我们就采用所谓**半整体模型**。因为对称，其两边水流情况将是一样的，只要研究其一边即得。例如在试验多孔闸坝的闸孔水流现象时，只要取半个闸墩和与其相连的一个孔即可。

在一般问题的试验时，对原型的三个尺度都用相同的比例尺来缩小成模型，这样的模型叫**正态模型**。但有些情况（以后将讨论）因受一些条件的限制，如粗糙度、水流状态等，正态模型不能满足试验要求，而采用**变态模型**。这样的模型在竖直和水平方向长度的缩小倍数是不相同的，在研究有泥沙运动时多用之。

另外还有所谓**定床模型**与**动床模型**之分。定床是指模型底床在试验过程中固定不变；动床则是与前面相反，在研究河床的冲刷现象时用之。

除了水的模型之外，还有空气模型等，这些模型还在进一步研究中，目前多用于一些现象的定性分析。

§ 1-2. 液流相似的基本理论

1. 水力学现象的模型试验相似律

在 § 1-1 中已指出为了能把模型中测得的结果换算到原型的相应数值，就必须建立原型和模型各物理量之间固定的比例关系，也只有在确定了固定的比例关系之后，才能使各种水力要素换算得正确。为此我们来研究液流的相似理论。

水力学模型相似性依据了液体的力学相似理论。

我们知道，水力学是力学的一部分，它研究在各种力作用下液体的平衡和运动的规律。水的运动规律是由运动要素（流速、压力、阻力和几何尺度等）来表示的。在液流中若相同的运动要素之间存在着固定比例关系，叫作液流的**力学相似**；这样的液流就叫作

力学相似液流。

力学上相似的两个液流必须具有下面几个条件：

a) 几何相似；

b) 运动相似；

c) 动力相似；

d) 边界条件相似(指模型与原型有相同的边界条件，如两者有相似的出口段；原型为有压流，模型也为有压流等等。在以下的讨论中将都认为二者是满足这一条件的)。

现在来讨论前三个条件。在讨论中对原型与模型各个运动要素皆分别加一不同的下标“H”与“M”来表示；对原型各运动要素与模型各运动要素数值之间的比值，我们称之为比例尺。

如果两个液流的綫性度量之间存在着固定的比例关系，那末它们就是几何相似的。

以 l_H 和 l_M 表示两液流中(原型和模型)相应的綫性长度；

Ω_H 和 Ω_M 表示两液流中相应的面积；

W_H 和 W_M 表示两液流中相应的体积。

$$\text{则长度比例尺} \quad \delta_l = \frac{l_H}{l_M}; \quad (1-1)$$

$$\text{面积比例尺} \quad \delta_\omega = \frac{\Omega_H}{\Omega_M} = \delta_l^2; \quad (1-2)$$

$$\text{体积比例尺} \quad \delta_W = \frac{W_H}{W_M} = \delta_l^3. \quad (1-3)$$

如果两个液流中相应液体质点迹綫是几何相似，而且液体质点流过相应綫段其所需时间又是具有固定的比例，那末它们就是运动相似的。

以 s_H 和 s_M 表示两液流中相应质点所经过迹綫长度；

t_H 和 t_M 表示两液流中相应质点经过迹綫所需之时间；

u_H 和 u_M 表示两液流中相应质点的流速；

a_H 和 a_M 表示两液流中相应质点的加速度。

$$\text{则} \quad \delta_t = \frac{t_H}{t_M}; \quad (1-4)$$

$$\delta_u = \frac{u_H}{u_M} = \frac{\frac{ds_H}{dt_H}}{\frac{ds_M}{dt_M}} = \frac{\delta_l}{\delta_t}; \quad (1-5)$$

$$\delta_a = \frac{a_H}{a_M} = \frac{\frac{d^2s_H}{dt_H^2}}{\frac{d^2s_M}{dt_M^2}} = \frac{\delta_l}{\delta_t^2}. \quad (1-6)$$

在这里应指出，不只是上述各种比例尺是常数，并且在不同液流中其相应的运动方向也应该是相同的。

如果两个液流中对相应质点所作用性质相同的力，存在着固定比例，那末它们就是

动力相似的。

以 P_n 和 P_m 表示两液流中相应质点所受性质相同的力，则

$$\delta_P = \frac{P_n}{P_m}. \quad (1-7)$$

根据牛顿运动定律

$$P = Ma, \quad (1-8)$$

式中 M 为液体质点之质量；

又

$$M = \rho W \quad (1-9)$$

式中 ρ 表示液体的密度。

所以

$$\delta_P = \frac{\rho_n W_n a_n}{\rho_m W_m a_m} = \delta_\rho \delta_l^3 \cdot \frac{\delta_l}{\delta_t^2} = \delta_\rho \delta_l^2 \delta_u^2, \quad (1-10)$$

即

$$\frac{\delta_P}{\delta_\rho \delta_l^2 \delta_u^2} = 1, \quad (1-11)$$

或

$$\frac{P_n \rho_n l_n^2 u_n^2}{P_m \rho_m l_m^2 u_m^2} = 1. \quad (1-12)$$

可以看出，在动力相似的情况下，各种比例尺的选择不是任意的，他们相互间存在着一定关系，这个关系是由相似液流的作用力、密度、特性长度平方和速度平方的比例尺来表示的。

按下标不同分开，得：

$$\frac{P_n}{\rho_n u_n^2 l_n^2} = \frac{P_m}{\rho_m u_m^2 l_m^2} = \text{常数}.$$

令

$$\frac{P}{\rho u^2 l^2} = Ne.$$

式中 Ne 称为牛顿数。

如果我们取液流的一段作为液体质点，则牛顿数可写成下列形式：

$$\frac{P}{\rho v^2 l^2} = Ne.$$

则式(1-11)也变为

$$\frac{\delta_P}{\delta_\rho \delta_v^2 \delta_l^2} = 1, \quad (1-13)$$

式中 v 为所论液流段过水断面上的平均流速；

l 为液流的特性长度，通常总是取与过水断面有关的一个数值。

这样，我们得到了液流的力学相似的一般准则，即：如果液流的牛顿数相同，那末它们将是力学上相似的，或者，如果液流在力学上是相似的，其牛顿数就必然相同，即

$$Ne_n = Ne_m.$$

这一准则对所有作用在液流中的各种不同性质的力都是共同的。

2. 相似准则

在自然界液流中，其所受的力是各式各样的，按其性质不同可以分为重力，阻力

(粘滯力)、表面張力和彈性力。作用在相似液流中的這些力除必須遵守上述的牛頓相似律之外，各種性質不同的力也都還有自己的準則。在依據不同性質的力來設計模型時，各個運動要素間的比例尺的關係，也將是不同的。在水力學模型試驗中應用最廣的為重力和阻力(粘滯力)兩種，下面我們就以這兩種作用力討論之。

a) 在重力作用顯著情況下液流的相似。

設在相似液流中起主要作用的是重力，作用在原型和模型研究的相應段落上的重力以 G_H 和 G_M 表示。

因為所討論的液流是力學相似的，那麼就應滿足牛頓準則

$$Ne_H = Ne_M.$$

同時重力的比例尺

$$\delta_G = \delta_P.$$

由式(1-13)

$$\delta_G = \delta_\rho \delta_v^2 \delta_l^2. \quad (1-14)$$

如上所說，這種比例尺關係是力學相似的共同條件的結果。此外，重力還有自己的附加條件，這種附加條件是由重力的物理性質所提出的，也必須得到滿足。

我們知道重力可用 γ 與 W 的乘積來表示，即

$$G = \gamma \cdot W, \quad (1-15)$$

式中 γ 為重率，可寫作 $\gamma = \rho \cdot g$ 。

所以重力的比例尺可寫為

$$\delta_G = \frac{\gamma_H W_H}{\gamma_M W_M} = \frac{\rho_H g_H W_H}{\rho_M g_M W_M} = \delta_\rho \delta_g \delta_l^3, \quad (1-16)$$

式中 δ_g 為重力加速度的比例尺。

將式(1-14)與式(1-16)比較，得

$$\delta_\rho \delta_g \delta_l^3 = \delta_\rho \delta_v^2 \delta_l^2,$$

即

$$\frac{\delta_v^2}{\delta_g \delta_l} = 1, \quad (1-17)$$

或者

$$\frac{v_H^2 g_M l_M}{v_M^2 g_H l_H} = 1. \quad (1-18)$$

按下標不同分開，得：

$$\frac{v_H^2}{g_H l_H} = \frac{v_M^2}{g_M l_M} = \text{常數}。$$

令

$$\frac{v^2}{gl} = Fr,$$

Fr 稱為佛汝德數。

這樣，我們就得到了液流在重力作用下的力學相似準則，即：如果液流的佛汝德數相同時，那末它們對重力的作用來說將是力學相似的，或者，如果液流在重力作用下是力學相似的，其佛汝德數就必須相同，即

$$Fr_H = Fr_M.$$

在地面上作試驗时，总是 $\delta_\rho = 1$ ，則由式(1-17)得

$$\delta_v = \delta_l^{0.5},$$

即速度比例尺为长度比例尺的平方根。

流量比例尺

表 1-1

各 量 名 称	符 号	相 似 准 则	
		Fr	Re
长度	δ_l	δ_l	δ_l
速度	δ_v	$\delta_l^{0.5}$	δ_l^{-1}
流量	δ_Q	$\delta_l^{2.5}$	δ_l
單寬流量	δ_q	$\delta_l^{1.5}$	$\delta_l^0 (=1)$
時間	δ_t	$\delta_l^{0.5}$	δ_l^2
力	δ_G 或 δ_T	δ_l^3	$\delta_l^0 (=1)$
压力	δ_p	δ_l	δ_l^{-2}
功、能	δ_s	δ_l^4	δ_l
功率	δ_N	$\delta_l^{3.5}$	δ_l^{-1}

$$\delta_Q = \frac{Q_H}{Q_M} = \frac{v_H Q_H}{v_M Q_M} = \delta_v \delta_l^2 = \delta_l^{2.5},$$

就是說在长度較原型縮小 δ_l 倍的模型中，其流量是要較天然流量小 $\delta_l^{2.5}$ 倍。

至于時間比例尺，

$$\delta_t = \frac{\delta_l}{\delta_u} = \delta_l^{0.5}.$$

其他如力、压力、以及功等等的比例尺，也可用长度比例尺来表示。其数值見表 1-1。

按照佛汝德准則来設計的試驗模型有：堰流，孔口管嘴出流以及其他重力起主要作用的水流。

例 1-1. 一高 $P=12$ 米之流溢坝，坝上水头 $H=4$ 米，坝的断面曲綫是按克里格尔-奧菲采洛夫座标設計的，流量系数設計为 $m=0.49$ ，要求通过模型試驗驗證其流量系数。

在这种情况下是重力起主要作用，可以不考虑粘滯力的影响，因而可按佛汝德准則設計模型。

由設計得原型單寬流量(不考虑趋近流速令 $H=H_0$)

$$qH = m\sqrt{2g} H^{3/2} = 0.49\sqrt{2 \times 9.81} \cdot 4^{3/2} = 17.4 \text{ 立方米/秒} \cdot \text{米}.$$

这里我們采用断面模型。

若取 $\delta_l = 20$ ，則模型坝高 $P_M = 0.6$ 米。

由 $\delta_q = \delta_l^{1.5} = 90$ ，得

$$q_M = \frac{17.4}{90} = 0.193 \text{ 立方米/秒} \cdot \text{米} = 1.93 \text{ 公升/秒} \cdot \text{厘米}.$$

我們可以按 $q = 1.93$ 升/秒·厘米放水，測量填上水深以計算流量系数。

b) 在粘滯力作用显著情况下的液流相似。

設在所研究的液流中起主要作用的是粘滯力，由牛頓定律，粘滯力为

$$T = -\mu s \frac{du}{dn}, \quad (1-19)$$

式中 s 为两层液流的接触面积；

$\frac{du}{dn}$ 为法綫方向上的流速梯度；

μ 为液体的动力粘滯系数。

若液流对粘滯力是力学相似的，那么应有 $Ne_H = Ne_M$ ，因而粘滯力的比例尺可表示为：

$$\delta_T = \delta_\rho \delta_v^2 \delta_l^2. \quad (1-20)$$

同样，这一关系是力学相似的共同条件的結果。

但粘滯力还有自己的附加条件，这种附加条件是由粘滯力的物理性質所提出的，也必須得到滿足，即：

$$\delta_T = \frac{T_n}{T_M} = \frac{\mu_n s_n \frac{du_n}{dn_n}}{\mu_M s_M \frac{du_M}{dn_M}} = \frac{\rho_n v_n s_n \frac{du_n}{dn_n}}{\rho_M v_M s_M \frac{du_M}{dn_M}} = \delta_\rho \delta_v \delta_l \delta_v, \quad (1-21)$$

式中 δ_v 为运动粘滯系数的比例尺。

同时，已考虑 $\delta_v = \delta_\nu$ ，由式(1-20)与式(1-21)，得：

$$\delta_\rho \delta_T^2 \delta_l^2 = \delta_\rho \delta_v \delta_l \delta_v, \quad (1-22)$$

即

$$\frac{\delta_v \delta_l}{\delta_v} = 1, \quad (1-23)$$

或

$$\frac{v_n l_n v_M}{v_M l_M v_n} = 1. \quad (1-24)$$

把下标不同的分开，得：

$$\frac{v_n l_n}{v_M} = \frac{v_M l_M}{v_n} = \text{常数}。$$

令

$$\frac{vl}{\nu} = Re,$$

Re 称为雷諾数。

这样，我們就得到了液流在粘滯力作用下的力学相似准則，即：如果液流的雷諾数相同，那末它們对粘滯力的作用来說是力学相似的，或者，如果液流在粘滯力作用下是力学相似的，則其雷諾数必須相同，即：

$$Re_n = Re_M.$$