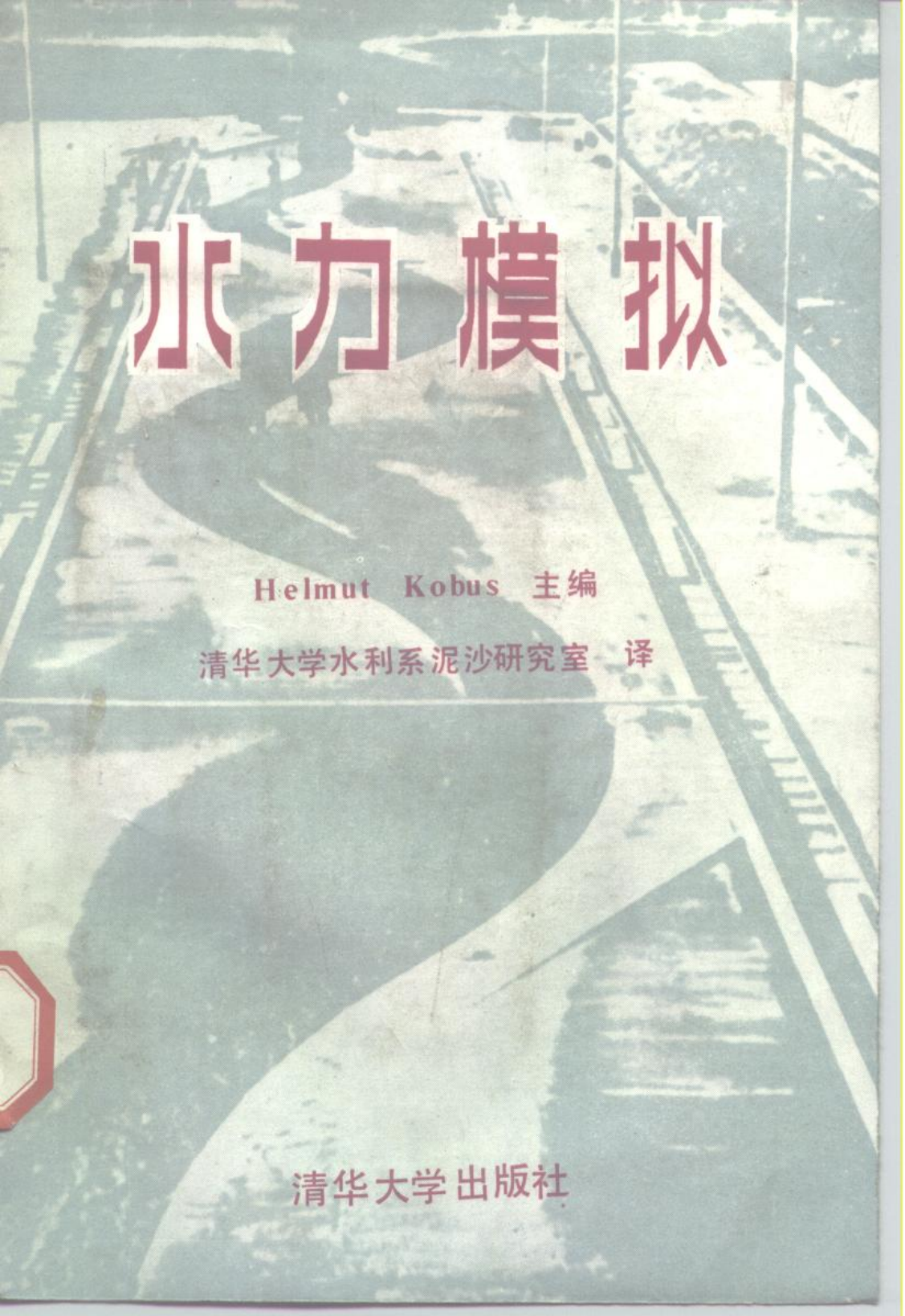


The background of the cover is a photograph of a hydraulic model in a laboratory flume. The model shows a curved channel with a central island, surrounded by various structures and flow lines. The water is a light blue color, and the channel walls are dark. The overall scene is a technical and scientific representation of fluid dynamics.

水力模拟

Helmut Kobus 主编

清华大学水利系泥沙研究室 译

A red octagonal logo is located in the bottom left corner of the cover. It has a thick red border and a white center.

清华大学出版社

311581

水 力 模 拟

〔联邦德国〕H.科巴斯 主编
清华大学水利系泥沙研究室 译

清 华 大 学 出 版 社

译 者 序

本书是联邦德国水资源和土地改良协会 (DVWK) 的水力模拟和量测技术委员会组织各方面的专家集体编写的, 由科巴斯(H. Kobus) 教授主编, 并得到了国际水力学研究协会 (IAHR) 的赞许与推荐, 由德文译成英文。本书反映了德国水力模拟的理论水平和实践经验, 具有参考价值。1981年钱宁教授访欧时携回此书的英译本, 并建议译为中文。

本书共计十四章, 全面而简要地叙述了相似性力学、定床和动床河流模型、水库模型、定床和动床潮汐模型、波生现象模型、水工建筑物模型、管道模型、地下水模型以及一些特殊模型(如冰情模型、空蚀模型、数值和物理混合模型)等的基本原理, 并有大量实例说明。书后还载有多种参考文献和联邦德国水力研究机构的简况。在一定程度上, 本书代表了西欧大陆在这一学科领域的现状与学术水平。

近年来随着我国水利建设事业的发展, 特别是长江、黄河等江河水利资源的开发, 在河工、水工和港工等模型试验研究中无论是在模型设计理论、还是在试验技术方面都获得了显著的成就, 并具有自己的特点。但本书很多内容还是值得参考和借鉴的。

参加本书翻译工作的, 按各章顺序为: 惠遇甲(序言、第一、二、三、五章、附录)、王桂仙(第四、七、十二章)、杨美卿(第六、八、九章)、姚美瑞(第十、十三章)和张仁(第十一、十四章)等同志。惠遇甲组织了这项工作。夏震寰教授对全书译文进行了校阅和修改。翻译过程中还得到张书农教授、谢鉴衡教授和

华国祥教授的支持和帮助，在此表示感谢。

由于水平所限，难免有错误之处，请予批评指正。

译者

1987年春于清华园

德文版原序

近几十年来水力模拟技术已成为土木工程师解决各种水力问题的一种重要手段。但是,迄今尚无用德文出版的包括有关模拟的可能性和限制条件等现代知识、内容全面的书籍可资利用。因此,德国水利工程和水资源协会(现并入德国水资源和土地改良协会, DV-WK)的“水力模拟和量测技术”委员会计划编写本书,并聘请德意志联邦共和国著名专家为此而努力,这种首创精神得到了各方面的响应。

本书叙述各种模拟技术的可能性、限制条件以及水力模型的预报能力,为解决各种水利工程问题而可能使用模型的人提供判断模型试验效益的基础。在本书的各章中,用一些经过选择的实例来说明模型试验的必要性。借助于这些论述可以判断水力模型的预报能力,并规定它们在数值模型和数学计算方法关系中的正确用途。本书面向实际应用并且主要是针对在咨询工程公司、建筑公司、团体或国家机关工作中的规划、设计和施工工程师的。此外,这本小册子由于它的概括性质,也可以作为专门研究水力学的学生们的一本教学的参考书。

对于试验工程师来说,这本书既不想作为教科书,也不想作为手册或辅助资料。因为无论在深度还是广度方面这将需要比本书所包括的内容多很多。限于理解本书内容的需要,只简要地叙述了基本原理;对于更深入的分析,建议读者参考所列出的大量文献。同时,引用的模型技术资料也限于所需要的最小限度。

“水力模拟与量测技术”委员会自1975年成立以来,就组织本书的编写工作,并重视邀请委员会以外的专家作为各章的编写人。一开始,本书的思路和结构就由委员会加以制订,予以公布,并邀请

各有关专家积极地参予此项工作。在各章找到合格的作者之后，对各章的初稿陆续地进行讨论与修改，其中包括原稿的交流和一系列的编写人会议。此外，为了严格的评议曾将书稿公诸于众，并征询国内外的著名科学家对各章提出补充的评论和建议。

在整理各章成书和准备印刷的繁重工作过程中，曾得到西巴赫（B.Siebach）夫人、科巴斯（G.Kobus）夫人、获物理学学位的林纳特（B.Rinnert）等人的欣然而干练的支持。对此，我表示衷心的感谢。

许多人——委员会成员、编写人、讨论人或评论人，曾为本书的编写作出贡献。希望本书将能获得积极的反应，达到期望的目标，也算是对他们的感谢了。

科巴斯（Helmut Kobus）

1978年3月于斯图加特

英 译 本 序

自本书德文版发行两年以来,已得到国内外相当的重视。读者还屡次探询,希望出版一本水力模拟的英文书籍。国际水力学研究协会(IAHR)讨论认为也需要一种本课题的导论性文本。这些鼓励了作者和委员会成员进而从事英译本工作的想法。我们的努力得到了DVWK财政上的支持和IAHR的赞同。

英译文是由格里姆·斯特雷尔(J.Grimm-Strele,第4,13章),克斯特纳(F.Kestner,第10,14章),科巴斯(H.Kobus,第1,2,3,8章),马科夫斯基(M.Markafsky,第5,6,7,9,12章)和诺达希尔(E.Naudascher,第11章)准备的,对于他们的努力深表感谢。编者还对科巴斯(G.Kobus)夫人在绘制插图、西巴赫(B.Siebach)夫人和克罗柯尔(I.Crocoll)先生在打字译稿方面的干练的帮助,表示我衷心的感谢。

虽然本书的参考文献和实例原来是针对德国读者的,但仍希望在本书的英译本中也能同样为目的服务。

科巴斯

1980年10月于斯图加特

目 录

德文版原序

英译本序

第一章 基本原理	1
1.1 引言	1
1.2 水力模型的概念	3
1.3 相似性力学	4
1.4 模型律	11
1.5 与数值模型的区别	18
1.6 水力模型的分类	21
第二章 定床河道模型	23
2.1 概述	23
2.2 基本概念	25
2.3 实例	39
2.4 摘要与评价	46
第三章 动床河道模型	47
3.1 概述	47
3.2 基本概念	48
3.3 实例	61
3.4 摘要与评价	66
第四章 输移物质和热量的河道模型	68
4.1 概述	68
4.2 基本概念	69
4.3 实例	80
4.4 摘要与评价	87
第五章 水池和水库模型	89
5.1 水池的类型及其功能	89
5.2 基本概念	91

5.3	实例	97
5.4	摘要与评价	104
第六章	定床潮汐模型	107
6.1	潮汐运动的水流特性	107
6.2	基本概念	111
6.3	实例	118
第七章	动床潮汐模型	124
7.1	概述	124
7.2	基本概念	125
7.3	实例	132
第八章	物质和热量输移的潮汐模型	140
8.1	概述	140
8.2	基本概念	143
8.3	实例	152
第九章	波生现象的模型	161
9.1	概述	161
9.2	波浪模型的设计	162
9.3	模拟技术	166
9.4	实例	171
第十章	水工建筑物模型：泄流条件、消能、冲刷	178
10.1	概述	178
10.2	相似问题	182
10.3	实例	186
10.4	摘要	199
第十一章	水工建筑物模型：水流诱发力、振动和空蚀	200
11.1	水流诱发力	200
11.2	水流诱发的结构振动	204
11.3	空蚀	212
11.4	实例	216
第十二章	管道模型	225
12.1	概述	225
12.2	基本概念	226

12.3 实例	231
第十三章 地下水模型	240
13.1 概述	240
13.2 基本概念	241
13.3 水力模型	244
13.4 赫尔肖(Hele-Shaw)模型	248
13.5 电比拟模型	250
13.6 数值模型	257
13.7 比较与评价	257
第十四章 特殊模型	259
14.1 冰模型	259
14.2 科利奥利斯力的模型	266
14.3 空蚀试验中的比尺效应	274
14.4 水利工程的风洞模型	280
14.5 混合模型	286
参考文献(影印原书)	291
联邦德国的水力研究所一览	303
符号表	310

第一章 基本原理

科巴斯 (H.Kobus)

1.1 引言

自从利·达芬奇 (Leonarda da Vinci, 1452~1519) 把“在论述水流时, 首先要引述经验然后再讲道理”作为一个基本前提以来, 在流体力学研究中实验就一直起着领先的作用。像工程领域里其他许多学科一样, 流体力学在十八和十九世纪期间得到了迅速的发展。然而, 在一个很长时期里土木工程仍然没有受到这种发展的影响。首先应归功于本世纪初的一批德国工程科学家, 他们为了解决水利工程问题发展了实验方法, 并成功地使同行们认识到这一途径的实用性和正确性。

1898年第一个河流水力学实验室是由 H·恩格斯 (Hubert Engels, 1854~1945) 创建于德累斯顿 (Dresden) 科技大学。几乎在同时, T·雷伯克 (Theodor Rehbock, 1864~1950) 1901年在卡尔斯鲁厄 (Karlsruhe) 科技大学建立了一座河流水力学实验室, 并在 1921 年加以扩建。由于恩格斯和雷伯克的影响, 水力模型的应用在德国受到高度的重视。继而于 1903 年, 在 H·D·克雷 (Hans-Deflef Krey, 1866~1928) 的领导下, 建立了第三个实验室, 即柏林的普鲁士皇家水工和造船实验室。

与此同时, 在实验流体力学、空气动力学和流体机械领域中也取得了迅速的发展。L·普朗特 (Ludwig Prandtl, 1875~1953) 1904年到哥廷根 (Göttingen) 大学任职。由他建立了威廉皇帝流

体力学实验室，并迅速地在全世界范围内获得了声誉。H·弗廷格尔 (Hermann Föttinger, 1877~1945) 在柏林，D·托马 (Dietrich Thoma, 1881~1943) 在慕尼黑，V·卡普兰 (Victor Kaplan, 1876—1934) 在布伦 (Brünn) 也分别建立了流体机械实验室。

第一批德国河流水力学实验室的成功，立即得到了国外的重视与模仿，相继建立了许多类似的实验室：如1907年在列宁格勒由V·E·蒂莫诺夫 (V.E. Timonoff) 领导的、1908年在图卢兹 (Toulouse) 由C·卡米席尔 (C. Camichel) 领导的、1910年在帕多瓦 (Padua) 由E·西米尼 (E. Scimeni) 领导的、1912年在维也纳由F·沙菲尔内克 (F. Schaffernak) 领导的、1919年在斯德哥尔摩由W·费里尼阿斯 (W. Fellenius) 领导的、1927年在代尔夫特由J·Th·西捷斯 (J. Th. Thijssse) 领导的以及1928年在苏黎世由E·梅叶-彼得 (E. Meyer-Peter) 领导的各个实验室。在美国也建立了一些水力学实验室，对于它们的发展，J·R·夫瑞曼 (John R. Freeman) 作出了重要的贡献 (Rouse and Ince, 1957)。

水力模拟迅速地得到发展，并成为解决各种水利工程问题的普遍公认的一种工具。因此自然要求成立一个水力学实验室的国际组织。由于雷伯克和费里尼阿斯的努力，在1935年由65位科学家发起成立了“国际水力学研究协会 (IAHR)”。发起者中18人来自德国，于1937年在柏林举行了协会的第一次会议。迄今四十余年来，协会已发展为一个拥有近300个研究单位和约2000名科学家为会员的世界性组织。仅在联邦德国，现在就有16个水力实验室和研究所从事于各种实际问题和科研问题的研究。

目前，在许多领域里采用水力模型以解决工程问题已成为公认的标准方法。除了典型的水力问题外，又提出了一些新领域的问题，这些新领域需要近代化的量测技术和对于模型相似进行更为复杂深入的考虑。本书的目的是想起到水力模拟方法的导论的作用，并向从事实际工作的工程技术人员传播当今水力模拟技术的情况。

1.2 水力模型的概念

从广义上讲模型是一种研究题目、状态或过程的简化表述（例如概念模型，系统模型等）。可区分为以下种类：

相似模型——所有的模型参数都与原型的相应参数存在着一定的关系，这些参数是由一个或几个模型比尺所决定的。

非相似模型——不能满足上述要求或仅能部分满足的模型（描述性或定性模型）。

对于“水力模型”可作如下的定义：水力模型是模拟水利工程、一般工程、或工程流体力学中的流动过程、流动状态和流动现象的物理模型。

水力模型的范围包括水利工程或工程流体力学的领域。一般说来，水力模型是在实验室中用小比尺的模型来重现天然现象。在某些情况下，也可以采用1:1比尺的模型。这时是在实验室中建造天然实物的典型部分，在可控制边界条件的情况下来研究水流过程及其影响。由于把模型结果转化为原型的情况常常是有争议的，所以做1:1比尺的模型就显得很有意义了。

关于模型的涵义必须做出某些限制。因为从广义上讲，所有的流体力学的实验研究都能够算作水力模拟。但是，我们将把那些在实验室中进行的但与水利工程问题没有直接关系的基础性研究排除在外。因此，水力模拟的范围是：和水利工程问题有直接的相似关系、从小比尺模型的观测结果可以转换到原型的模拟研究。当然它与流体力学的实验研究并无明确的界限。

水力模型试验多采用水作为模型流体，因为它是现成的，费用低而且更换简单。与其他流体比较起来，具有相当的经济上和操作上的优点。当然，根据相似的要求有时需要使用其他的流体。例如，在有泥沙输移的小比尺模型中，为了满足泥沙运动的相似，可用甘油输移煤粉来模拟。

近年来，相当广泛地采用了空气模型和低于临界流的风洞代替

水力模型。只要压缩性影响可以忽略，即风速小于50米/秒时，许多水流情态（空蚀现象除外）可以在风洞中进行研究。它允许使用简单轻便的建筑物，也能使用先进的量测技术。采用空气模型时的主要局限性在于不可能重演水体的自由表面。对于不变形的平面水面，或者可以建造水流横断面在水面线处发生反射的“二重模型”（double model），亦或可以根据其它考虑求得水面高程，然后在该处采用一种假顶板的办法来处理。这些近似方法在解决一些实际问题时已被采用，如第十四章第4节所述。

有一种特殊类型的水力模型是以流体力学定律和其他物理定律之间的比拟为基础的。最常见的比拟方法是关于地下水流动与其他领域中的势流理论（达西定律、热传导方程、欧姆定律和薄膜理论等）所进行的比拟，因此而提出许多比拟的方法（见第十三章）。重力波和弹性（弗劳德波和马赫波）之间的比拟，比地下水流动的比拟更令人感兴趣，可用来在有自由水面的明流中模拟超音速流动。

水力模拟属于实验流体力学的一部分，但更侧重于应用研究，着重研究土木工程中的水力问题。但是，对于土木工程的另一分支，即用气流和水槽实验来研究房屋的空气动力学，则不算在水力模型之中。虽然这一分支对现代结构工程的发展日趋重要，可以解决诸如房屋的风荷载、风力产生的振动、烟囱排气的影、建筑物和隧洞的换气、以及城市气候等问题。即便如此也应指出，水力模拟的原理和实验方法，也可以直接应用于房屋实验空气动力学的研究。

1.3 相似性力学

原型和模型的“相似”意味着几何的、运动的和动力的相似。

假如原型中所有的几何长度 L_n 与模型中相应的各长度 L_m 存在有某一常数比例关系，则达到了几何相似。这个比值称为模型的长

度比尺 $L_r \left(L_r = \frac{L_n}{L_m} \right)$ 。

运动相似要求在模型中与时间相关现象的过程总是使模型和原型相应的时间具有一个常数比值（时间比尺 $t_r = \frac{t_n}{t_m}$ ）。

动力相似意味着在原型和模型中各种相应的力必须具有一个常数比值（力的比尺 $F_r = \frac{F_n}{F_m}$ ）。

为了确保在几何相似的模型中与时间有关的过程能够做到运动相似，动力相似是必需的*。动力相似是各作用力和流场中运动方程式所反映的力的相互关系的相似所要求的。因此，几何相似的水力模型的关键性要求是确保动力相似，即模型中所有的作用力能与原型的相应作用力保持一个常数比例关系。因而能重演原型现象，达到相似要求。即

$$F_r = \frac{F_{n1}}{F_{m1}} = \frac{F_{n2}}{F_{m2}} = \dots = \frac{F_{ni}}{F_{mi}} \quad (1.1)$$

据此，模型与原型中各种不同的作用力间的相应比值必须是同一的。从 $F_r = \text{常数}$ ，可以得到

$$\frac{F_{m1}}{F_{m2}} = \left(\frac{F_r}{F_r} \right) \frac{F_{n1}}{F_{n2}} = \frac{F_{n1}}{F_{n2}} \quad (1.2)$$

所有的流体力学的相似律均可从方程（1-2）的要求导出。流体力学中通用的准则数是用作用在流体单元中各种类型的作用力的比值来定义的。

例如，考虑边长为 L 和密度为 ρ 的流体单元的简单情况，其上作用有微小压强差 Δp ，并以速度 V 运动。单元的惯性反力（质量乘加速度）可以写为

$$F_i = \left(\frac{V^2}{2L} \right) \cdot (\rho L^3) = \frac{\rho}{2} V^2 L^2 \quad (1.3)$$

* 校译者注：这个提法是值得讨论的。因为有些作用于流体的力与流体的运动状况息息相关，无法把力和运动分割开来。如粘滞力就取决于运动状况，惯性反力也是如此。何况压力的相似虽属于动力相似，但不是相似的条件而是相似的结果。有关相似条件的讨论可参阅 кирличев, М.В., Теория подобия, 1963 或李之光, 相似与模拟（理论及应用）, 国防工业出版社, 1982。

假如此惯性反力与作用在单元上的压力 ($\Delta p \cdot L^2$) 建立关系, 则可得几何准则数 Eu (也叫做欧拉 (Euler) 数) 的平方:

$$Eu^2 = \frac{v^2}{2\Delta p / \rho} = \frac{\text{惯性反力}}{\text{压力}} \quad (1.4)$$

几何流动参数 Eu 是一个无量纲比值, 它表征流体惯性反力和作用的压力间的关系。因此, 在这个意义上来说, 它是流体力学的一个准则数。在不可压缩流体中和在没有其他的力 (如粘性力、重力等) 的情况下, Eu 仅仅是流动边界的几何形态的函数。

这里需要注意的是几何流动数只包含压差 ($\Delta p = p - p_0$) 作为流动的驱动力, 因而与参考压强 p_0 无关。参考压强 p_0 可以选用大气压, 绝对压强的基准点, 或者被研究的系统中的任意参考值。所以, 欧拉数直接描述作用压差和流速场之间的关系, 相应的压强场的计算则需要知道所选用的参考压强。

依此类推, 可以导出所有其他流体力学的准则数。每一种情况都是由流体单元上的典型力 (粘滞力, 重力等) 与相应的惯性反力建立联系。然而, 同样的准则数可以不依赖于直觉和物理的解释而借助于量纲分析直接推导出来。

量纲分析在实验流体力学中是最有用的工具, 它允许以一种简单而直接的方式, 得出动力相似准则。因所有由量纲分析导出的关系式是与绝对尺寸无关的, 它们必然都能应用于小比尺模型和原型。关于土木工程的试验研究中量纲分析的基础及其应用科巴斯 (Kobus, 1974) 曾有过阐述。对于简单问题的量纲分析正如下面所阐述与讨论的那样, 可以导出传统的著名流体力学准则数和模型律。对于复杂的流动问题, 例如多相流、气水混合物、泥沙输移问题等, 量纲分析可建立唯一有希望的参考体系, 借助于它可以描述各种复杂的相似关系, 进行必要的简化, 有选择的进行试验工作, 做到用最少的试验工作量获得最多的试验成果。

对于上述的例子, 量纲分析可以同样导致欧拉数或几何流动数。假如在以参考长度 L 和参考流速 V 为特征的给定流场中, 只作用有惯性力和压力 (Δp), 则只可能存在一个由各种相应参数集合而成的

无量纲数：几何流动数Eu（或是它的任何乘方）

$$f(\rho, v, L, \Delta p) = 0$$

所以
$$Eu = \frac{v}{\sqrt{2\Delta p/\rho}} = \text{const} \quad (1.5)$$

这个常数的实际数值决定于水流边界的型式。在水力工程中几何流动数有很多具体的应用。例如，管咀、孔口的流量系数 C_o ，根据

$$v = \frac{Q}{A}, \text{ 可以得到}$$

$$C_o = \frac{Q}{A\sqrt{2\Delta p/\rho}} = Eu \quad (1.6)$$

根据 $\Delta p = \frac{F}{A}$ ，阻力系数 C_w 可以定义为

$$C_w = \frac{F}{A \cdot \rho v^2/2} = \frac{1}{Eu^2} \quad (1.7)$$

管流和明槽流的摩阻损失系数也可以解释如下：

$$\lambda = \frac{4r_{hy}}{L} \cdot \frac{h_v}{v^2/2g} = \frac{4r_{hy}}{L} \cdot \frac{\Delta p}{\rho v^2/2} = \frac{\text{const}}{Eu^2} \quad (1.8)$$

如果考虑一种密度为 ρ ，具有参数长度为 L 和参数流速为 v 的流体单元，受到粘滞力的作用，则可以根据量纲分析得到另一种流体力学准则数或力的比值

$$(\rho, v, L, \eta) \longrightarrow Re = \frac{\rho v L}{\eta} = \frac{\text{惯性反力}}{\text{粘滞力}} \quad (1.9)$$

上述定义的雷诺 (Reynolds) 数 Re 在流体力学中是一个最重要的参数。具有很小雷诺数水流的特征是粘滞力占主导地位而惯性反力可以忽略，例如，适用达西 (Darcy) 定律的渗流，或适用斯托克斯 (Stokes) 定律的球体绕流 (雷诺数小于1) 就属于这一类流动。另一方面，以很大雷诺数为特征的水流，相对于惯性力而言，粘滞力小到可以忽略，像在紊动充分发展的管流或明槽流动就是这样