

高等学校教学用书

系统动力学

——社会系统的计算机仿真方法

GAODENG

XUEXIAO

JIAOXUE

YONGSHU

冶金工业出版社

前 言

本书的目的是通过介绍DYNAMO/C语言来掌握社会大系统仿真的方法。DYNAMO (DYNAmic Model的缩称) 是系统动力学的专用语言, 而DYNAMO/C则是西安交大新研制的, 具有适用机型范围宽、功能强的特点。这里所说的社会大系统是指涉及到人类社会以及经济活动的大系统。例如, 人口系统、教育系统、资源系统、能源系统、经济管理系统、生态系统等都属于社会大系统。

系统动力学把处理工程技术反馈系统的理论和方法应用于社会系统, 形成新的学科。同时, 它又汲取了系统论、控制论、系统力学、决策论、仿真与计算机等许多学科的成果, 从而形成了自己的特色。随着社会系统的日趋复杂, 系统动力学的概念与应用也愈来愈扩展, 在处理高层决策问题上的有效性越来越明显。系统动力学方法已广泛地应用于企业的、城市的、区域的、国家的以及世界的发展战略和策略研究。

本书共分四章。第一章系统动力学概论, 概述了系统动力学的发展史与定义。第二章是系统动力学的理论基础。如果读者缺乏控制论的知识, 可不必阅读该章第二节。第三章系统动力学模型以及第四章系统动力学仿真软件——DYNAMO/C, 是本书的主要内容, 是读者必读的。本书内容由浅入深、由简到繁, 一个接一个引进DYNAMO/C的新功能, 并通过例子来说明每个功能的应用方法, 最后有综合实例, 以便读者掌握这种语言及程序设计。与其它已出版的“系统动力学”不同, 本书是作者根据多年教学与科研的经验积累编写的, 把系统动力学方法与能应用于微

机上的DYNAMO/C语言结合起来且做了一些实际研究，使读者学习本书能学以致用。

由于编者学识浅薄，可能有许多错误与不足之处，敬请读者批评指正。

编者
1994年1月

目 录

第一章 系统动力学概论	1
第一节 系统动力学的定义	1
第二节 系统动力学的发展史	2
第二章 系统动力学的理论基础	4
第一节 系统与社会系统	4
一、系统的定义及基本特征	4
二、社会系统的特征	9
第二节 系统力学与自动控制	11
一、系统力学	11
二、自动控制	17
三、社会经济系统的控制	22
第三节 传递要素及其响应特性	25
一、一阶指数延迟传递要素	25
二、二阶指数延迟传递要素	30
三、 n 阶延迟传递要素	33
四、传递延迟对控制的影响	35
第三章 系统动力学模型	36
第一节 因果关系与反馈环概念	36
一、因果关系概念	36
二、反馈环概念	36
第二节 系统动力学模型的构成	40
一、积累	41
二、流速	44
三、流	44
四、信息	45
第三节 流图设计与实例	46

一、流图的基本构造元素	46
二、从系统观测到流图设计	49
第四章 系统动力学仿真软件——DYNAMO/C	56
第一节 DYNAMO/C语言的基本构造 (一)	57
一、DYNAMO/C语言的基本规则	57
二、方程式语句	60
三、命令语句	69
第二节 DYNAMO/C语言的基本构造 (二)	71
一、数学函数	71
二、测试函数	73
三、宏函数	75
四、其它函数	85
第三节 DYNAMO/C语言程序设计	89
一、DYNAMO/C方程式的建立	89
二、程序设计中的几个问题	99
第四节 系统动力学仿真实例分析	105
一、系统动力学仿真的一般步骤	105
二、仿真实例	106
第五节 DYNAMO/C语言的使用	126
参考文献	145

第一章 系统动力学概论

第一节 系统动力学的定义

系统动力学 (System Dynamics) 是一门分析研究信息反馈系统的学科, 是一门沟通自然科学和社会科学等领域的横向学科, 它是系统科学的一个分支。

系统动力学是在总结运筹学的基础上, 为适应现代社会系统的管理 (控制) 需要而发展的, 它不象运筹学那样拘泥于最佳解, 而是以现实存在的世界为前提, 不依据抽象的假设, 而是寻求改善系统行为的机会和途径; 依据对系统实际的观测所获得的信息建立动态仿真模型, 并通过计算机上的实验来获得系统未来行为的描述。

系统动力学的一个突出优点是, 它能处理高阶次、非线性、多重反馈复杂时变系统的问题。它还能定量地分析各类复杂系统的结构与功能的内在联系, 定量地确定系统的各种特性。

我们对系统动力学可以简单定义为: “系统动力学是研究社会系统动态行为的计算机仿真方法。” 进一步说, 它包括以下几个方面:

(1) 系统动力学把有生命系统和无生命系统都做为信息反馈系统来研究, 并且认为, 在每个系统之中都存在着信息反馈机构。这是维纳 (Wiener) 控制论的重要观点, 所以, 系统动力学是以控制论为其理论基础的。

(2) 系统动力学把被研究对象分为若干子系统, 并且建立各子系统之间的因果关系。

(3) 建立被研究系统的计算机仿真模型——流图和构造方程式。

(4) 实行计算机仿真 (通过模型做实验)。

(5) 验证模型的有效性。

(6) 为战略与决策的制定提供依据。

也可以说，(2)~(6)是系统动力学的全过程。

总之，系统动力学是研究社会大系统的计算机仿真方法。由于系统动力学是用计算机实验的方法来研究战略与策略的，因此，被誉为“战略与策略实验室”。

第二节 系统动力学的发展史

系统动力学的创始过程，需要从控制论说起。在本世纪40年代，美国麻省理工学院维纳教授创立了“控制论”(Cybernetics)，其中阐述了两个重要的论点：世间一切系统（有生命系统或无生命系统）都是信息反馈系统，在所有系统内部都有反馈机构。在这些科学概念的基础上经过扩充、实用及发展，形成了系统工程这样一种方法论。到了本世纪40年代中期，世界上第一台电子数字计算机ENIAC问世，这样，在计算工具方面为系统动力学的诞生创造了条件。

系统动力学的创始过程，还需要从麻省理工学院的史隆管理学院谈起。这个学院明确地朝着技术管理新方向发展，50年代中期，进行了全美国的调查，以了解做为管理科学核心的运筹学方法在产业中应用的情况。这个调查结果表明，运筹学做为定量研究方法是管理科学的核心和基本方法。但是，高级管理所遇到的问题常常表现出非线性，运筹学难以处理。为此，解决高级管理问题的定量研究方法，不应该沿用运筹学的数学解析方法，而应该另辟新路。在这种背景下，逐步产生了系统动力学。

系统动力学的出现始于50年代中期，创始人是美国麻省理工学院福瑞斯特(Jay.W.Forrester)教授。最初几年，他主要对系统动力学的概念和有关模型进行研究，并于1958年发表了著名论文“工业动力学”。随后，他着手研究系统动力学的实验手段与计算机程序，解决了一些典型实例。与此同时，开设了有关系系统动力学课程，为普及系统动力学作出了贡献。在此期间，他于

1961年发表了《工业动力学》(Industrial Dynamics)一书,这本书是本学科的经典著作,它阐述了系统动力学的原理与典型应用,创立了原型DYNAMO语言。

系统动力学早期的研究对象主要是以工业企业管理为中心,处理诸如生产与雇员情况的波动,市场股票与市场增长的不稳定性等问题。因此,此学科早期称为“工业动力学”。尔后,此学科的研究范围日益扩大,从以企业为中心,后来发展到工程设计、医学、管理学、心理学及经济学等领域,研究对象扩大到城市开发、人口问题、公害问题等社会系统。显然此学科的应用已远远超越“工业动力学”的范畴,于是自1966年以后改名为“系统动力学”。在这个时期改进了DYNAMO语言。福瑞斯特教授于1968年还发表了《系统原理》(Principles of Systems)一书,侧重介绍系统的基本结构;于1969年发表《城市动力学》(Urban Dynamics)一书,总结了美国城市兴衰问题的理论与应用研究的成果;于1971年发表了《世界动力学》(World Dynamics)。接着他指导下的小组先后发表了《增长的极限》(The Limits to Growth, Donella Meadows et.al., 1972),及《趋向全球的均衡》(Toward Global Equilibrium, Dennis Meadows et.al., 1974)等著作。他们研究了世界范围内,人口、自然资源、工业、农业和污染诸因素的相互联系、制约和作用以及其产生的后果的各种可能性,到了80年代,他们开始进行全国模型与西方经济长波理论研究的总结工作,使系统动力学这一门新兴学科在理论与应用研究两方面都取得了飞跃性进展并趋于更加成熟。目前,国内外系统动力学正在向着由复杂的非线性多重反馈环组成的社会系统伸展,它将给解决社会系统问题的研究带来帮助。

第二章 系统动力学的理论基础

第一节 系统与社会系统

一、系统的定义及基本特征

系统这个词来源于古希腊语，有“共同”和“给以位置”的含义。根据《辞海》的解释，“系统”是“自成体系的组织”。今天，我们是这样定义系统的：“由两个以上相互区别又相互作用的单元有机地结合起来，完成某一功能的整体。”一个工厂、一个部门、一项工程、一个组织、一套制度、乃至一个城市、一个国家都可以看成一个系统。

大系统中存在的种种问题一般是多因素的，而且各因素之间形成多重反馈环，各因素间的相互作用也是动态的，因而使系统呈现非常复杂的非线性特性。如果仅仅凭借直观经验来判断大系统的问题并按这种判断采取行动，可能造成很大失误，而系统动力学则提供了解决问题的途径和方法。

系统的几个基本特征是：

1. 流

系统内部有实体在流动。例如，生产企业内部有产品。由外部输入原料，通过加工处理之后，成为产品而输出，在企业中，自始至终有物料以连续的或断续的形式流动。除此之外，还有许多流动着的实体，如职工、资金、设备等都随时间的变化在流动，都是生产企业内部的流。以上统称为物质流，物质流是单向的。

另一种是信息流，信息流就是对记录在图纸、帐单、订货单、计划表上各种数据的变换和流动。它记录着物质流的状况，同时又反过来控制物质流，所以信息流是双向的。任何生产过程不仅都有物质流，而且伴随有信息流，两者相互依存，缺一不

可。物质在生产过程中不断改变状态，信息也在生产过程中不断变换形式。管理部门的责任就是不断地通过信息流来控制物质流。根据实际系统的不同作业，流有并联流、串联流及串联并联混合流，还有来自其它支路的流的合流或从中途流向其它支路的分流。图2-1表示串联流，图2-2表示并联流，图2-3表示串联并联混合流，图2-4表示的也是串联并联混合流，但它还包括着来自别的系统的流。



图 2-1

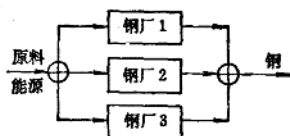


图 2-2

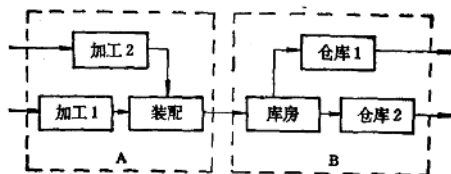


图 2-3

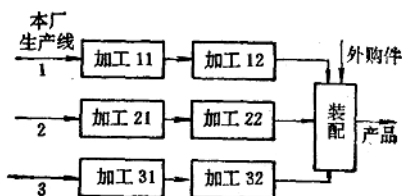


图 2-4

流的基本型是串联与并联，但实际系统是串联、并联的复杂组合。系统必然有输入和输出，系统流动的实质就是把输入变换为输出。

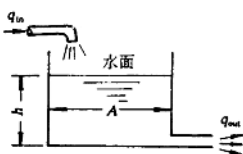


图 2-5 水流系统

这里还要解释一个伴随流而产生的现象——积累 (Level)。我们从图 2-5 所示的水流系统来说明这个概念。

这个系统的输入流量是 q_{in} ，输出流量是 q_{out} ，随着输入管不断向池内注水，液面不断上升，输出流量 q_{out} ，也会不断增加，输出流量的产生是池内积蓄了水的缘故。设水池的截面积为 A ，水深为 h ，则池中积蓄的水量为

$$v = h \cdot A$$

当池的横截面积 A 不变时，池中的积水量与水深 h 成正比。所以，通常称 h 为水位。水位是这个水流系统的状态变量。水位 h 是受控于流入流速和流出流速的。当输入流量与输出流量相等时，水位 h 为常数，系统处于稳定状态。当输入流量与输出流量不等时，水位 h 是变量，系统成为动态系统。

在社会系统中，到处可以看到流动着的物质，象积水池那样的流的堆积现象到处也可以看到。例如，人口是人流的积累、企业的库存是物品流的堆积等等，所不同的是社会系统远比水流系统要复杂的多。系统动力学将详细研究这种堆积现象的描述。

2. 时间

由输入流进系统直到从系统内部输出，需要一定的时间，这个是在系统内部被处理所需要的时间。若用 t 表示这个时间，则有

$$t = t_{out} - t_{in}$$

式中 t_{out} ——输入流变为输出，并由系统输出的时刻；

t_{in} ——输入流入系统的时刻。

这里的 t 在自动控制理论中叫做输出延迟，或者称为死时间。假如输入为 Q_{in} ，在系统之中，输入变为输出之前，存在于系统之中待处理的量，用 $Q \times t$ 表示。

我们不妨先考虑流体，在管中流动的情形，假设管长为 L ，截面积为 A ，输入流量为 q_{in} ，输出流量为 q_{out} 时，因为 $q_{in} = q_{out} = q$ ，那么，在管中的流体数量为

$$q \times t = L \times A$$

流体通过管中的时间为

$$t = L/v$$

式中 v ——管中流体的速度。

显然，如果管中流体的速度 v 增加，单位时间的流量就要增加。但是无论流速怎样增加，任一时刻管中的液体总量是不变的。

我们用同样的方法来分析社会系统。系统动力学所研究的时间概念是整体时间概念，是整体的速度，是全局的效率。我们不能简单地追求局部的高速度和局部的高效率，因为对于全局而言，局部的高速度可能反而是有害的。

系统中的时间 (t) 概念，除了前面所说的传输延迟时间之外，另外还有一个时间要素，称做时间常数，它给系统的活动的影响是相当重要的。例如，由工厂向分布较广的各销售店供应商品的情形。假如过去每天有 Q 个产品从工厂运到销售店，现在打算改为每日运送 $2Q$ 个产品，那么，到达销售店的产品应如何变

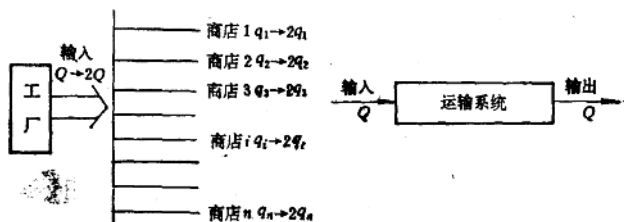


图 2-6 运输系统

化？由工厂每天输送出 Q 个产品，对商店 i 来说，每天接到 q_i 个产品，在稳定状态时，输入与输出相等： $Q = \sum_1^n q_i$ 。由于销售店分

布较广，由工厂发到*i*商店需要 t_i 时间。当输入由 $Q \rightarrow 2Q$ 变化后，其稳态的到货量为 $q_i \rightarrow 2q_i$ 。现在我们来研究由输入 Q/d 突变到 $2Q/d$ 时，输出是如何由原来的稳态变到新的稳态。

如图2-7所示，在时间 t 以前，输入量是 Q ，输出量之和 $\sum_1^n q_i = Q$ ，输出的水平线与输入水平线一致，系统呈现稳定状

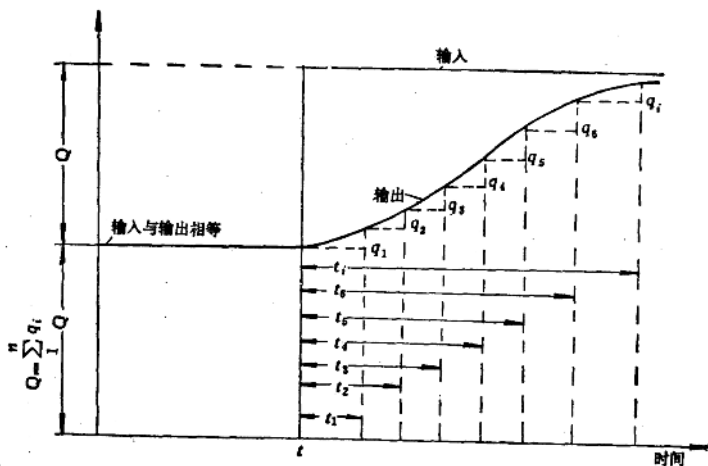


图 2-7 运输系统的响应

态。从 t 时刻起输入量突变到 $2Q$ ，但输出的总和一下子还达不到 $2Q$ ，因为，产品从工厂运到第 i 店需时间 t_i 。在 t 时刻，输入量虽然从 $Q \rightarrow 2Q$ ，但由于运输延迟，经过 t_i 时间，输出不会有很大变化，到达 t_i 以后输出才增加到 q_i 。从图中显然可看出， t_1 时刻输出为 $Q + q_1$ ， t_2 时刻输出为 $Q + q_1 + q_2$ ， t_i 时刻输出为 $Q + \sum_1^n q_i$ ，

到 t_i 时刻以后，输入与输出相等，总运送量为 $2Q$ ，达到了新的稳定状态。我们把 t 时刻以后的输出量描成曲线，就是这个系统对于输入由 Q 到 $2Q$ 跳变的响应。图2-7的跳变响应是三阶指数延

迟。系统的机理不同，跳变响应也不同，我们用时间常数描述这些响应曲线随时间的变化特性，这个特性表示由一种稳态到达另一种稳态时过渡现象的延迟过程，是系统动态行为的重要概念。根据这个响应曲线的形态不同，有一阶、二阶、 \dots n 阶， \dots ， ∞ 阶延迟，究竟是几阶延迟，根据不同系统的机理而定。

传输延迟与时间常数是系统的两个重要的时刻概念，在实际研究系统动态特性时是不可缺少的。

3. 作业

所谓作业是系统本身把输入变为输出的一种功能。在前面所研究的水流系统中（图2-5），作业是水池中积蓄的水位产生的压力。在机械零件加工过程中的车削加工、流体加热工程中的加热器产生的加热作用等，由于变换的机理不同而产生的变换功能不同。在社会系统中，积累量也会产生压力的，这种压力将成为社会系统的作业。比如说，人口的增长会给社会造成压力。这个压力作用于决策者，从而产生调节人口的策略，所以压力（包括社会因素的压力）也是一种作业。

总之，对于系统来说，有五个共同的基本特征：它们是输入与输出、流、积累、时间和作业。我们要把握住系统活动的这些基本要素，用这些统一的概念来描述系统，探讨控制系统的策略。

二、社会系统的特征

系统动力学的一个重要应用领域是社会系统。社会系统范围包括得很广，凡涉及到人类的社会活动（包括经济活动）的系统都属于社会系统。两个以上的人集聚起来就构成集团。如果集团有明确的目的就形成组织。组织是社会系统的一种形态。例如，企业、学校、研究院、宗教团体等都是社会系统。环境系统、人口系统、教育系统、资源系统、能源系统、经济管理系统等显然都属于社会系统范围。另外，生态系统也属于社会系统，因为人类活动（诸如城市建设、海洋捕捞、森林开发、工业污染、化肥农药等）影响到自然界的生态平衡。总之，社会系统是涉及到人类社会以及经济活动的大系统。

在这里，我们首先研究社会系统的特征：

(1) 具有系统边界

系统与外界环境之间有明确的界限，并通过界限进行物质或者信息的交流。划清系统边界是解决问题（要解决的问题是指系统的现在状态与期望状态的差距）的第一步。如果问题本身含糊不清，就不可能建立明确的模型，解决问题也就更谈不上。

(2) 系统的构造以因果关系环为基础

社会系统是符合因果关系的。所谓因果关系，就是说，假如有原因就必然有结果，或者说，结果与现象是由原因产生的。我们将在第三章中详细分析因果关系环。对于简单的系统，人们通过大脑的思索可以很容易地找到现象产生的真正原因，因为人的直观和经验是建立在很简单的因果关系的基础之上的。然而对于像企业、城市、国家那样的非常复杂的社会系统来说，由于系统边界大，而且在系统内部存在着非常复杂的因果关系环，它们互相发生动态作用，使系统呈现出极其复杂的非线性特性，具有直观不可知性。因此，仅凭借人的直观与经验不能有效地对社会系统进行跟踪。

(3) 原因与结果在时间上与空间上的关系往往不明显

对于社会系统，产生现象的真正原因可能距现象发生的地点很远，或者，原因距结果的时间很长。因此，用人的直观与经验很难找到引起现象的真正原因。在处理复杂的社会系统时，如果仅凭人的直观与经验选择无用甚至是有害的策略，其结果可能使事情越办越坏。

仿真方法对研究社会系统具有特殊意义。社会系统边界大，内部构造又存在着多重反馈环，而且相互以动态关系发生作用，使得系统呈现出复杂的非线性性质，很难构造数学解析模型来描述系统，即使勉强地构造了，所得的最优解也不是实际被研究对象的最优解。仿真方法则是以现实存在的系统为前提，依据可能的信息，不是强求最优解，而是在计算机上作实验，追求改善系统行为，逐步获得改善系统的答案。

仿真过程实际上是人机协作的过程。人们可以对系统进行观察建立仿真模型以及对结果进行分析，而动态仿真由计算机来完成。为了实现人机联系，除了必要的硬设备外，更需要人机联系的工具——计算机语言。用于社会系统仿真的语言种类很多，高级语言如FORTRAN、COBOL、BASIC、C等都可以用来构造仿真模型进行系统仿真，但是采用这些语言在程序设计上花费的精力与时间很多。随着仿真技术的发展及计算机软件的进步，发展了许多仿真语言。当前用于社会系统的仿真语言主要是DYNAMO，另外CSMP、CSSL等仿真语言也有应用。使用仿真语言编制仿真程序效率高、易于掌握，这样用户可以把主要精力用于建立仿真模型上，不必在程序设计上花费更多的精力与时间。

第二节 系统力学与自动控制

一、系统力学

前面我们提到系统有五个共同的基本特征：它们是输入与输出、流、积累、时间和作业。流是根本的因素。系统中有了流动着的物质，才可能产生积累。为了定量分析流的性质，可以借助于流体力学。我们可以把系统中的流做为力学概念来理解，可以整理成为一门系统力学。

1. 流系统的流体静力学

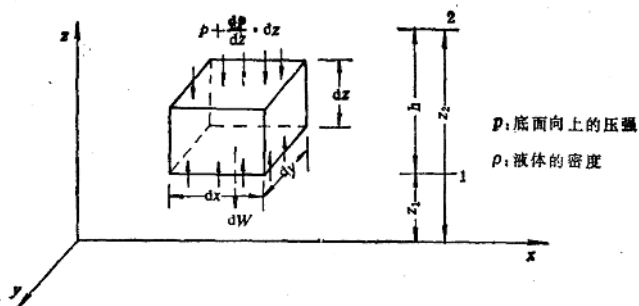


图 2-8 压力、密度与高度的关系

在流体静力学中，压力、密度与流体中的垂直距离有直接关系。如图2-8所示，我们来看流体中一个微小立方体在垂直方向的平衡情况。设这个微小立方体的各边长为 dx , dy , dz , 并设它在流体中所处的密度都一样。假设微小立方体受底面向上的压强为 p , 如果沿 z 的方向上压力增加, 那么作用微小立方体上面向下的压强是 $p + \frac{dp}{dz} \cdot dz$ 。这个压强所产生的作用于微小立方体上面向下的力为 $(p + \frac{dp}{dz} \cdot dz) dx dy$ 。微小立方体本身的重力 $dW = \rho dx dy dz$ 。如果微小立方体在 z 方向是处于平衡的情况, 则如下关系式应成立:

$$\Sigma F_z = 0$$

$$\text{即} \quad \left(p + \frac{dp}{dz} \cdot dz \right) dx dy + \rho dx dy dz - p dx dy = 0$$

对上式加以整理可得:

$$dp dx dy + \rho dx dy dz = 0$$

$$dp + \rho dz = 0$$

$$\frac{dp}{\rho} = -dz$$

对上式进行积分

$$\int_{p_2}^{p_1} \frac{dp}{\rho} = - \int_{z_2}^{z_1} dz = z_2 - z_1 = h$$

$$\text{即} \quad \int_{p_2}^{p_1} \frac{dp}{\rho} = \frac{(p_1 - p_2)}{\rho} = h$$

式中 p_1 —— 下位置1的压力;

p_2 —— 上位置2的压力, 显然有 $p_1 > p_2$;

h —— 位置1与位置2的垂直距离。

$$\text{此式} \quad \frac{p_1 - p_2}{\rho} = h \text{ 或 } p_1 - p_2 = \rho h \text{ (密度 } \rho \text{ 为常数)}$$

表明, 在流体之中压强的增加与深度成正比。这个深度 h 就是水的