

# 水文地质技术方法译文集

(模型在水文地质研究中的应用)

地质部水文地质工程地质技术方法研究队

1980年5月

Q581  
H

P641/20

## 目 录

|                              |      |
|------------------------------|------|
| 模型在地下水文学研究中的应用.....          | (1)  |
| 应用模拟装置和数字计算机制作地下水模型.....     | (13) |
| 用多元线性回归法模拟地下水位动态曲线.....      | (21) |
| 灌溉条件下地下水非稳定渗流的模拟方法.....      | (27) |
| 数学模型在伊朗地下水研究中的应用.....        | (33) |
| 土耳其乌劳瓦平原的数学模型.....           | (41) |
| 应用数学模型评价俄亥俄州西北部莫米河盆地基岩水资源... | (56) |
| 估算地下水位的数学模型的应用.....          | (69) |
| 应用电阻网络模拟装置分析抽水试验.....        | (74) |
| 抽水试验分析的计算机方法.....            | (84) |
| 借助电子计算机预测地下水质的变化.....        | (88) |

# 模型在地下水文学研究中的应用

[荷]J·H·万·奥沃凯克 D·A·泽马克

## 一、绪 言

建立在1856年达西定律基础上的地下水流的首次计算是Dupuit在1863年发表的。以后又相继发表了几千篇文章,包括德国的Thiem (1870)、俄国的Lembke (1866)和Zhukovskii (1888)、奥地利的Forchheimer (1886)、尼得兰的BadonGhijben (1899)、美国的Slichter (1898)和King (1899)以及法国的Boussinesq (1898)早期的作品。其中最主要的大致是Forchheimer, Zhukovskii, Slichter和Boussinesq的著作。从Muskat (1937)、Polubarinova-Kochina (1952)、Aravin与Numerov (1953)、Harr (1962)、Bear等 (1968)和Dewiest (1969)的较新著作可以看出,后来的作品补充了早期文献的论述。

在本世纪初叶Pennink (1905)将模型研究应用于地下水文学课题,但在大多数情况下普遍用的还是解析解法。1845年前后Kirchoff曾经想到用导电板来研究电位场。1899年Slichter指出土中水的渗流(达西单位)与导电介质中的电流(欧姆)两者的数学表达式有相似之处。1918年Pavlovsky首先使用导电锡片来作这种模拟。1930年前后Vreedenburgh与Muskat用电解液作为导电介质。在他们之前,为了其它的目的Gaugin (1862)对二维情况、Adams (1875)对三维情况都已进行过了。

Hele Shaw (1897)的粘性流模型或缝隙模型已被Dachler (1936)用来研究地下水流。该模型在研究海水入侵的淡一咸水的稳定与活动分界面是一种极好的工具。在缝隙里装满砂或玻璃珠就可用来模拟非饱和流。1956年Kruysse与Bear首先使用带贮存器的Hele Shaw模型研究地下水流。

以电阻网络来研究地下水流可能是Luthin在1936年首先开始的。然而在其它领域使用这种网络要早得多。Beuken (1936)了解到在1932年就已制出了第一个阻容(RC)网络,并用它来研究瞬变热流现象。这种类型的网络就通称为Beuken模型。

早先对这种模拟装置提出的反对意见是:电阻网络中的函数分布不是连续地沿空间变化,而是离散在网络结点之中。可以把这种电阻网络比作是数学网络,这就可以应用有限差分法。结点离散引起的误差可用泰勒级数来确定。

计算机的出现使得复杂的水文学问题能够取得数值解。当初都不愿意使用计算机,1960年以后计算机的应用发展得相当快,而在那时使用电网络比较少了。1965年前后使

用电网络的兴趣再度增长。两种方法各有它们的优点、缺点和局限，显然有必要把两者结合起来。根据这种结合的复合法尽管不常用，但提供了广阔的潜力。

以上对解算问题的各种方法的历史概述是不完全的。它还不能正确断定对较老方法的优先考虑不如对较新的方法那样。所有方法的应用归结于头脑的灵活性，同样也常常意味着对水文机理要有较深的理解。

方法的选择当然是必要的。理解几个决定性方面是正确选择方法的依据。这些方面是：

- 1) 问题的性质；
- 2) 水文系统的结构；
- 3) 模型的类型；
- 4) 一般条件。

本文论述了各种类型的模型。笔者深知它的局限性，希望附在后面的文献目录能为详细研究这一课题服务。

## 二、问题的性质

这里把经济学问题和水文学问题两者区别开来。在经济学问题中往往是确定水文系统实效的问题，也就是必须决定最佳经济条件。这种最佳条件主要取决于对系统的不利方面的机动性和敏感性，但也不能忽略社会经济因素。这里假定供选择的水文系统可以完全转译到某一模型上，该模型使它能以随机量形式或者不以随机量形式根据输入来确定输出。本文不对经济学问题作更多的讨论。

水文学问题的主要目的就是要确定诸如测压水头、降深、水力坡度、渗透系数、排泄量、补给量、越流因数、导水系数、释水系数、时间滞后和阻尼等水文参数。在这样的计算中，默认对水文系统所列的方程是已知的，并且能够转译到最广义的模型上。据Kozdoba (1969) 和Hackeschmidt (1965) 的意见，把这种研究法叫作归纳研究法而与演绎研究法相反，后者把模型看作是已知的。

演绎研究法分为四类问题：直接的、间接的、反演的和逆的。下面简述这些概念。  
**直接问题**

这类问题包括与确定水文系统的测压水头或降深的分布有关的所有问题，而该系统的维数、边介条件、初始条件以及参数(导水系数、释水系数、越流因数等等)为已知的。典型的例子就是确定抽取地下水所产生的降深分布情况。其它例子还有确定通过建筑物和(或)其下面的流网或者出入于水库、渠道、河流、坑塘和水井等的渗流网。

**间接问题：**

这类问题包括有关界线的确定，而那里的条件是已知的，也就是确定水文系统没有完全被阐明的那一部分。这类的典型例子就是确定潜水面和渗出段。诸如多井系统影响边界的确定也看作是间接问题。典型的问题还有沿海含水层淡—咸水分界面的确定。作为间接问题还可举出重力排水系统的设计。

### 反演问题:

反演问题指的是那些与确定水文系统边介条件有关的问题,那里的所有其它数值是已知的。确定一个流域里降水径流量或蒸发量的分布就是一个显著的例子。确定灌溉系统为取得所需渗漏量的水位问题也属于此类。人工补给问题如果是为了确定注水井为获得所需水量所需要的压力,则也可认为属于此类。

### 逆问题:

逆问题可归结为与确定参数(诸如导水系数和释水系数)有关的问题。这种确定方法系根据地下水流的已知型式所导出的数据进行的。简单的例子就是根据已知降水量所引起的河间块段的稳定二维流的测压水头抛物线分布来确定导水系数。凡是根据抽水试验确定含水层参数以及根据测压法确定渗透系数方面的问题都可看作是逆问题。

最后,可以提出多重回归法。这是一种通过数学模型来确定参数的方法。为此目的也可用“相伴变量”来代替“回归法”。还可用极大似然准则代替最小二乘法。

## 三、水文系统的结构

水文学问题的复杂性大部分是由水文系统的结构决定的。表征水文系统的因素需要进行简化。鉴于地下水流可以看作是属于势流类,这就可以区分为下列的因素:介质、维数、参数、边介条件和时间条件。

### 介质

这里把介质理解为孔隙介质。介质的透水性能用渗透系数来表达。由于孔隙介质是地质产物,其渗透性在空间上显著不同。这种变化涉及的规模取决于研究水流的课题范围的大小。

在排水问题中不过是零点几米至几十米的事情,在渗流问题中则是十米至几百米。流域研究中范围的规模可以大到几公里。非均质的概念不能跟水文系统的大小分离开来。在大范围的情况下,非均质可认为是由于不同渗透性的岩层所造成的,虽然每一岩层可以是均质的。渗透性除了从点到点的变化外,还可按方向变化。如果是这样,它就是各向异性的介质。渗透系数其实是个张量而并不是标量。各向异性的分布也应看作是跟水文系统的大小有关。

### 维数

这里所说的维数是空间变量。问题的复杂性随着维的数目而增长。我们的目标总是要寻求最低代价的解算方法,这就需要确定维数是否能适当地减少。这样,水流的图形就要略微偏离实地存在的水流。因此关于解的精确度不能确切地知道,但往往能够估计到。估计的可靠性完全取决于水文工作者的技能。在有些情况下,维数的减少甚至是必需的,因为舍此之外问题无法解决。除了经济与必要的理由外,为了清晰而简化也可作为减少维数的理由。

下面对维数的考虑限定于能以阐明土中水的运动所需的最小维数。维数的变化介于三至零之间。按维数为零来列地下水流的方程,其中就不存在空间变量。这些数量可以规

定为不同方式，例如对某一范围用一个平均数或一个数字来表示。在大多情况下，地下水流方程是从概括为一维或二维地下水流的解析解推演出来的。最后，可以认为这种简化（即减少维数）还可通过将一个地区划分为小区而对每一小区进行减少来完成。例如按这种方式就可将通过半承压含水层的二维流简化成两个一维流。

### 参数

在本文中参数乃是地下水流微分方程中的积性因数。孔隙介质的所有与水流有关的物理性质，诸如透水性、释水性、扩散性等等都用参数来表示。物理性质的系数在参数上往往出现与地区中的特定长度相结合。例如导水系数、层间阻坑、越流因数、时间滞后等等。在大多情况下，参数值可以认为是常数。对于饱和水流转变为非饱和水流的带里，参数值可以大不相同。厚度不恒定的含水层导水系数值也就不同。如果维数是固定的，则问题的复杂性随之可变参数的数目而增长。

### 边介条件

边介条件可划分为线性条件与非线性条件。线性条件还可细分为三类：狄利克雷式、诺伊曼式和付里叶式。狄利克雷式规定用函数值表示边介，诺伊曼式用梯度值来表示，付里叶式则用函数值与梯度值的线性联系来表示。当以渠道为边介且其水位不变时就是狄利克雷条件的典型例子。用恒定抽水量的抽水试验就是诺伊曼条件。而付里叶条件则应用于越流量与降深成正比的半承压水流。倘若在狄利克雷条件的实例中渠道中的水位与渠道的排水量成正比则也出现这样的情况。非线性关系出现在考虑到蒸发对潜水面的影响的实例中。这里也可以说，问题的复杂性随之非线性边介条件的数目而增长，从而在解题中就必需减少这种数目。

### 时间条件

时间条件涉及到稳定状态与非稳定状态。这里把非稳定状态分为两种：初始条件与周期条件。对于初始条件总要制定一个表示现存条件更替的时点。这里所谓的现存条件大多理解为稳定态情况。新的条件开始生效的时点通常就当作是时间起点，并表示为“ $t=0$ ”。例如，初始条件用来阐明抽水试验时的降深。河渠水位的改变或天气条件的改变（下雨）被认为是初始条件。周期条件就没有时间起点，但函数值在时间上的分布系以固定的、规则的样式重复着。这种重复的时间段叫作短周期。可是我们总是难以遇到自然界的确切周期条件，它只能用来近似地阐明诸如受潮汐影响的地下水流。季节的更替是相互接续的，可以借助周期条件来近似表示。这时就可以应用付里叶级数。

当函数值不随时间变化时，问题的解算往往就简单些。稳定态条件虽然在自然界永远不会发生，但容许用它来近似表示周期条件的平均值。非稳定流问题通过依序改变为稳定态条件的方法也可用稳定态的解法求得近似解。如果非稳定流能够合理地简化成稳定流，那末最好就去解稳定流。

## 四、模型的类型

所有的计算方法都将实际水文机理设想成适合于定量探讨的形式。事实上这就是目

前所采用的“模型”这一术语的意思。各类的模型都可细分为两类：抽象的（概念的）模型与具体的（物理的）模型。下面就对这些模型作简略的说明。

### 抽象的（概念的）模型

凡是将水文机理用数学符号来转译或列出方程式（也就是数学模型）都认为是抽象的。抽象模型类可再分为连续模型与离散模型。连续模型系以微分方程为基础，其中采用连续分布函数值。既可用解析法（诸如直接积分、积分变换、迭加、格林函数、保形映射以及变分法）也可用模拟计算机来解算。解析法导出抽象解公式而模拟法导出图解（曲线），但只有在所有的数量全都用数值来表示之后才能够取得。离散模型用有限差分来运算，它只能应用离散（数值的）函数值。可通过图解法（例如小正方形）或逐次近似法或数字计算机来求解。这三种方法都给出各自的解；图解法以草图形式而另两种方法以表格形式可转译为一条或几条曲线。

与数字计算机相反，模拟计算机只能送入具有一个自变量的课题。这表明偏微分方程必须用分离变数或用代换法简化为常微分方程。

### 具体的（物理的）模型

实际水文机理的模拟（经常是小规模的）或者用其它物理现象模拟水文机理的规律都看作是具体模型。前者称之为同调模型或同调装置，或者所谓的砂槽，而后者称之为模拟模型或模拟装置。模拟装置可再细分为连续的与离散的两类。磁、薄膜、热、Hele-Shaw、Christiansen渗透箱、离子—运动电解液和导电板、胶料或塑料的模拟都属于连续模拟装置。水力网络和电子网络则是标准的离散模拟装置。这两类常常结合起来，就象水平Hele-Shaw模型带有离散的存储器，导电板带有少数的电容器和（或）电阻器。

并非所有的模型都适用于非稳定流问题或具有不同密度水流的研究。这就是磁模拟和薄膜模拟难以利用的主要原因。Paschkis (1959)由于他使用了一种通过自由电子进行传导（就象在金属中那样）的液体，所以电解箱也能用来解算非稳定流问题。Hele-Shaw模型对于研究咸—淡水问题是非常适用的。1969年Dagan介绍了一种近似的方法，使用电网络也能解算这类问题。

电模拟主要由于它能模拟边介条件和时间条件的巨大差异从而是优越的。而且电测装置也比其它量测装置的测试范围广。电模拟最常使用的是由电阻器（结合或者不结合电容器）和（或）半导体所组成的电网络。这种网络的结构类似于数字解法中的数学模型的结构。离散所引起的误差也能用数学网络中所采用的方法（泰勒级数）来计算。这种相似性也是能以将电网络结合到数字计算机的根据。网络与计算机的结合叫作复合计算机，是抽象网络与具体网络的综合。

## 五、一般条件

问题的解算不仅决定于前面所讨论的几个方面，某些一般条件也要予以考虑。这些条件与研究的目的是密切联系的。虽然按目的来分析会加深对解法选择方面的理解，但本文只讨论一些要素。这些要素可以归纳为四类：质量、表示方法、用途和构成。

可以看出，划分成几类要素并不意味着各类要素是互不相关的。也不能要求这一考

考虑是全面的。

## 质量

属于此类的计有：

a、精确度；

b、可靠度；

c、有效度。

计算或测定结果的精确度一方面取决于模型的主动部分（输入）的误差性，另一方面取决于模型的被动部分——已确定的参数的误差性。必须尽可能找出能以影响成果精确度的原因。提出关于成果的误差以及具有某种精确度的“权”的概念。这样的结论有时可以导致输入和（或）模型参数的简化，从而降低成本。

可靠度仅仅由随机性的数量来决定。置信区间可用统计学方法确定。

有效度用来推定计算机理与实际机理两者的相似程度，使它成为一致性的度量标准。一致性只能通过检验来判断。有效度还可用变量变化的范围来判断。当将非线性机理转变为线性机理时，根据变量容纳于小范围也就可以得到容许的相似程度。为取得水文系统性能方面的见解具有一定有效度的模型往往就能满足了。

## 表示方法

表示方法指的是成果或输出的表示形式。共分为下列三种形式：

a、公式；

b、曲线；

c、表格。

要求提出公式形式的成果是不常遇到的。水文系统的转译系根据机理特性的相似而不是根据机理公式（微分方程）的相似，所以成果很难用公式形式提出。

通过所研究的微分方程或者维量方程包含的维数就可找到经验公式。指数系用回归法确定出来的。在解析解的情况下完全可以要求提出公式形式的成果。虽然这种方法特别是在苏联已发展得十分快，但它的应用仍然有限。不含数组的公式的主要优点在于能够迅速识别出各种因数的趋势，对系统的性能提供较好的理解。

计算或测定成果用曲线形式的表示法是审定研究成果并提出结论的必要手段。这种直观的表现法只要一看就可了解到诸如中值、最大值和最小值、梯度、周期性、衰减、滞后以及不规则性等方面。用模拟计算机和电模拟能立即获得曲线形式的输出。

当使用数字计算时必须要有输出端接合面；既可用一个带DA变换器的指示器也可用一个标绘器或栅极屏与该接合面连接。并非每一个研究所的计算机本身都有这样的装置，如果一定要用曲线形式来表示，势必要造成难以容忍的耽误。

以表格形式的表示法通常用于使用数字计算机的时候。如果使用其它类型的模型则输出端线上须有打字机。表格很恰当地记录下诸如中值、最大值和最小值、相关系数、频率等的定量数据。表格对定性数据的显示不如曲线好。表格中的数据精确度比起曲线来确实要高得多，后者的最小误差也要达到0.5%。在数量级上这种误差相当于模拟所产生的最小误差。所要求的精确度对模型的选择和成果的表示法有相当大的影响。

## 用途

这一项包括有关模型应用的灵活性和频率方面的要求。“用途”可细分为：

A、灵活性：

- a、通用的（综合的）；
- b、专用的。

B、频率：

- a、一次的；
- b、重复数次的；
- c、连续的（论证或成果）。

关于“通用的”的概念是很难下定义的。倘若一个模型其水文系统的组态不变而只有边介条件和时间条件以及参数的值是变量，那它就不是通用的而是专用的模型。当不仅上列的数值而且其组态与边介条件的意义也可变化的情况下，该模型就解释为“通用的”。

在通用的模拟模型中，由于它的灵活性，所以误差源的数目要比专用的模型多一些。而且组件的校准不那么容易。一些滑动或断续连接可以影响模型的稳定性。在通用的电模拟的三维流模拟中，一些长的连接线往往造成故障。通常，使用通用模型的优点并不超过其缺点。当使用数字计算机时就没有这些缺点。如果计算机本身是个通用的模型，它的程序就符合于其它类型模型所确认的惯例。

借助模拟语言用计算机来读数就相当简单了。可能性的数目往往是个极限因数，特别是关于结点的数目。计算机对数的性质同模拟装置物理的性质之间的差异使之在模拟物理现象方面保留一个差距。这种差距只有使用复合计算机才能够弥补，那里用模拟装置模拟物理现象而用计算机管理输入并处理输出。予期通用的解法将要向复合计算机的方向发展。

当选择通用的模型（数字计算机）或专用的模型（模拟装置）来解算同一类型的问题时，频率就占有重要的地位。对于较小的频率和解算极简单的问题最好使用模拟装置。大规模的问题（大量的结点）仍然是用模拟装置解算较好。对于少量的或不太多的结点多次或连续的解算方法最好是用数字计算机。模拟装置用于论证是非常适合的。在上述之外的其它所有情况下，方法的选择在很大程度上受其它因素的影响。

构成

构成包括多种要素，其中有：

- a、知识；
- b、装置的适用性；
- c、实现的可能性；
- d、实现的时间；
- e、人员的训练；
- f、成本；
- g、寿命；
- h、功用。

为解决水文学问题而选择模型时，以往取得的经验当然是很重要的。就按那样来购

买装置。由于一旦形成了一批使用优良装置的专家,就很难指望用他们一向所用之外的另一方法来解决水文学问题。再培训人员、获得其它领域知识以及购买新装置的困难往往阻碍了既定方法的改变。因此,尽可能采用另外解法的进展是很有限的。此外,解法的选择还取决于求解水文学问题所花费的时间。这一段时间包括推导、编程序、执行和成果处理的时间。这里的重要方面是,这段时间的工作是由一个还是由几个专家完成的。这往往还意味着一个专家的工作人员是由另一个专家具体培训的。于是解法的选择就不光取决于实现的时间,而且还取决于其它构成要素呈现的特点。

最后,不能忽视成本方面。实现或者还有培训的成本,模型寿命(特别是频繁使用的)都是关于模型功用的必要要素。遗憾的是在成本方面可用的资料很少。

## 六、结 论

决定解法选择的各个方面示于表1。每个方面的意义在本文上述章节里已作了说明。在表中分为两大项。第一项指的是问题的公式化,第二项则是方法的选择。

这种分项系根据这样一种想法进行的,即所提出的问题如果表明其解法过分基于理论上的可能性则不予以解答。实际上使用者已制定了关于解算方法的某些条件;这些条件当然是与解算的目的密切相关的。如果目的纯粹是学术上的,自然要制定另外一些条件。大半发生只在一些要求下来求解。必须对使用者提出折衷的建议。这不排除同意另一个解算方法。提出的解法数目愈多磋商的结果也就更好一些。

另一方面,效率要求解法的数目有限。最佳的解法数目必须依靠行情和竞争来选择。遗憾的是,进行选择所必需的资料目前还是不足的,还不可能阐述明确的准则。可以不基于一般条件提出一些方向性意见。

在归纳的问题中模型是未知的,而且未知数比采用的方程数还要多些。不足的方程可以通过系论来探索。最后要使用数字计算机和模拟计算机。例如在洪水演算和径流计算中成果是非常理想的。

在演绎的问题中假定模型的公式化是已知的。实际上,当真实水流的模型为未知时,归纳性问题往往优于演绎性问题的解算。有些情况下甚至边介条件和时间条件也是未知的。这样的情况就存在着不同种类问题的结合。当把各种问题分别开来就可取得更好的理解。

在逆问题中必须确定参数的数值。这往往就要通过钻探和抽水试验来完成。抽水试验产生人为的干扰,其影响可用数学来阐明。于是参数就可通过不同方法计算出来。另一种方法是使用可变参数模型进行水流模拟。模型的反应相当于真实的反应。改变模型中的参数,使模型的反应与真实的反应达到最好的拟合。这就要采用通用的模型。当使用电(阻容)网络时,拟合要据根目视来判断,它是一种主观的判据。当使用数字计算机和最佳化技术时这种判据就变成客观的了。即使结点中的渗透性在不同方向上不是同一数值,结点的数目也是有限的。而且结点(例如潜水面周围)中的释水性必须加到与渗透性有关的未知参数的数目中。在客观法中的结点数最多达几十个。这个数目一般是不大的,如果有大量的结点,判据就又变成主观的了。在这种情况下,结点的数目随之水流

表1 在地下水文学研究中问题的公式化和方法的选择

解 =

| 问题的公式化 |       | +           | 选择解法   |
|--------|-------|-------------|--------|
| 问题     | 水文系统  | 模型          | 一般条件   |
| 演绎的    | 介质    | 抽象的（概念的）    | 质量     |
| 直接的    | 均质的   | 连续的         | 精确度    |
| 间接的    | 非均质的  | 解析          | 可靠度    |
| 反演的    | 各向同性的 | 模拟计算机       | 有效度    |
| 逆的     | 各向异性的 | 离散的         | 表示方法   |
| 归纳的    | 参数    | 图解          | 公式     |
|        | 常数    | 逐次近似        | 曲线     |
|        | 变数    | 数字计算机       | 表格     |
|        | 维数    | 具体的（物理的）    | 用途     |
|        | 三维    | 连续的         | 灵活性    |
|        | 二维    | 砂槽          | 通用的    |
|        | 一维    | 热模拟         | 专用的    |
|        | 零维    | 薄膜模拟        | 频率     |
|        | 边介条件  | 粘性模拟        | 一次的    |
|        | 狄利克雷式 | 离子运动模拟      | 重复数次的  |
|        | 诺伊曼式  | 电模拟         | 连续的    |
|        | 富里叶式  | 导电板         | 构成     |
|        | 非线性的  | 电解液         | 知识     |
|        | 时间条件  | 胶料          | 装置     |
|        | 稳定态   | 塑料          | 实现的可能性 |
|        | 非稳定态  | 离散的         | 实现的时间  |
|        | 初始的   | 水力模拟        | 训练     |
|        | 周期的   | 存储粘性模拟      | 成本     |
|        |       | 电网络模拟       | 寿命     |
|        |       | 复合的         | 利用     |
|        |       | 模拟计算机+数字计算机 |        |
|        |       | 电网络+数字计算机   |        |

的复杂性对数字计算机来说约达几百,而对电网络来说约达几千。然而,电网络给出所需的信息比数字计算机来得较快并且操作也较简单。如果参数是电位等等的函数,那么参数值的确定就变得更复杂了。在这种情况下就最好使用数字计算机。可以看出这两种方法不一定完全知道水流的真实性质。成果总要在有限有效度的背影上来评价并就其物理意义来检验。

在反演问题中必须确定时间条件和边介条件。对于稳定态或周期条件,可将边介条件理解为不属于非线性条件来加以确定。将周期条件的数值当作是平均值,问题就能简化成稳定态的。在反演问题中模型和边介中的函数可以假定为已知的。

在简单情况下,边介条件可以借助于等势线来确定。在较复杂的情况下,可以根据外推法或者用动量方程和连续方程来计算。试凑法(逐次逼近法)是不系统的。在解反演问题中,无论是抽象模型或者是具体模型都不怎么优越。

解算间接问题需要具有机动边介的模型。数字计算机和电网络两者的边介形式受着网络形式的影响。规则的边介同具有圆滑曲面的边介相反,所受的影响较小。在简单的模型中——电解箱和由汞组成其电极的导电板最合乎机动性的要求。

以公式来表达水流(解析模型)是理想的解法。Hooghoudt公式是最简单的例子。在这个公式里排水管之间的距离可以连续变化,不透水层深度和排水管直径也可那样变化。对于间接问题任何专用模型都不优越。只能据根水流的类型和边介的形式来加以选择。

与上述问题相反,对直接问题可使用不同的解答方法。提出每一类模型的可能性和局限性就较易于比较各类模型的优点。

a. 解析解法用于通过均质各向同性介质的较简单的三维稳定流。对于非稳定流也能得到适当的近似解,这大多要通过减少维数来求解。在二维流和均质介质条件下,各向异性也不十分困难。有些情况下参数不是常数时也可以求解。特别是在俄国的文献中叙述了很多解析解法。

b. 模拟计算机成功地用于模拟具有非线性关系的以及具有依存于时间关系的各种水文系统的相互影响。空间变数的影响通过将水文系统划分为小系统来转译。电信号的输出即可用模拟也可用数字记录下来。其精确度低于数字计算机但显著高于模拟装置。解算的问题必须写成数学形式的式子。这种计算机在美国使用最广,而欧洲也使用。

c. 图解解法全都可以简化成小正方形法,这种方法最适用于通过均质层的二维稳定流。然而不能排斥用试凑法取得的成果的误差小于1%。这种方法不需要数学知识。它常常用来建立为解算或校正水文问题所必需的设想。

d. 逐次近似法系基于内插法。在网格结点中函数值借助微分方程通过试凑来计算。虽然逐次近似法可以用于三维流,但这种方法主要还是用于解算二维稳定态问题。非均质性和各向异性也可以考虑。这种解法需要一些数学知识。误差的数量级可以依据网格的大小和形式以及函数的分布用泰勒级数来确定。误差可以降低到小于1%。通过划等值线取得水流图形。

e. 数字计算机可以看成是对数方法的程序执行器。虽然使用模拟语言使得数字计算机的操作简化,但必需经过专门训练。这种计算机的潜力看来是极大的,但其对数的性

质限制了结点的数目。指定的限度是几千个结点。所要解算的问题的复杂性对结点数目的影响极微。在大多情况下,这一限度是无可非议的。可适用于表1第二栏所列的各个方面的组合。数字计算机所具有的优点不仅在于能够解算上列的一些问题,而且还能进行所有其它种类的运算。特别是在计算频率和最佳化程序以及确定用于管理目的的水文系统的效率方面,数字计算机呈现重大的优越性。误差与其说是决定于计算机不如说是决定于作为空间和时间变量判断结果来使用的增量数值的选择。

水文工作者之间缺乏充分的接触和通过计算机来模拟物理现象,常常看作是缺点。例如不能进行参数连续变化的影响的直观判断。计算机对每一个参数值进行计算而只有在运算之末才能记入一个新的参数值。这种限制在研究物理系统的特性时将成为缺陷。这往往是不管数字计算机具有许多优点而宁愿使用模拟装置的理由。

f. 砂槽实际上是真实系统的小比例尺(均质的)仿制品。它是最老式的模型。这种模型的难处主要在于孔隙介质的特性很难以仿制。此外,介质的毛细作用将对所研究的现象产生干扰影响。使用表面张力小的液体能够大大抵制这种影响。孔隙介质模型的固定是一种摆脱低仿制能力的办法。任何时候都要注意防止空气进入到孔隙介质中。必须始终使用没有空气的液体。现象的量测和模拟也是困难的。用玻璃珠代替砂可以消除一些孔隙介质的困难。为了在模型里面取得水流型式的图形,孔隙介质必须是透明的。这可以通过使用Christansen渗透箱来实现。它的原理系根据液体与固体折射率的平衡。那就要用碾碎的玻璃或玻璃珠作为介质而用油或水溶液作为渗液。这样的装置仍有缺乏机动性的缺点。砂槽在现今很少使用就因为它的优点极少。

g. 模拟装置有各种类型(表1)。热、薄膜、离子运动、胶料、塑料和水力模拟的应用范围极小,我们不去讨论它。前已述及,粘性模拟非常适用于淡一咸水问题和具有自由面的水流。只能用来模拟二维流。具有不同渗透性的岩层通过选用不同密度的缝隙来达成。它也适用于研究非稳定流。它是分界面和自由水面自动调节的唯一模拟装置。该模型的缺点是缺乏机动性以及难以进行量测。在制造模型中就需设计好测压计的孔道。该模型是很直观的,所以常常用于论证。该模型可按铅直的和水平的两种安置法来使用。在水平安置时释水性可以用连接在上盘的竖管网络来模拟。这些竖管也就作为测压管。

电模拟越来越多地用于水文学研究。二维流几乎都用导电板来进行研究。一薄层的碳就是导电介质。电路用银涂料来制作。另一可能性是使用汞接头,它能在碳层面上移动来模拟机动的边介。西欧所用的模板10~15%是非均质和各向异性的。东欧的模板差不多都是均质和各向同性的。后者是难以达到目的的。导电板可以通过人工穿孔制成非均质的。穿孔的规则分布能使渗透性至多减少到四分之一。将导电板迭置起来渗透性原则上可以增加到无限。但实际上这种限度约为10至20层。渗透性的变化还能通过制作带有溶液的导电板来取得,不过这样做的仿制能力有时同所要求的相差很多。水位不是常数的边介可用电阻涂料来模拟。通过变换水流与电位间介就能容易地测出流线。释水性的模拟通过将带有绝缘层的薄板粘在金属板上来完成。这就使它也能解非稳定问题。误差依输出的种类可减到百分之几,不管模型本来是非均质和各向异性的。这种模拟装置虽然有它的局限性但很容易制作,它适于解具有不规则边介的二维流。有源器件(电源、函数发生器等)和量测装置(电压表、示波器、记录器等)是最贵钱的项目。

三维流可用电解箱来模拟，因其传导介质是液体。如果用盐的水溶液则必须使用交流电以避免极化。这使得它不可能用来研究使用直流组件的非稳定流。Pashkis曾经介绍过使用液体可能遇到的缺点。由于接触电位的缘故，如果要求误差小于1%，模型电压就要在100伏以上。具有不同渗透性（不同盐浓度或不同色深度）的各带可以用锡钉或销钉区分开来制作。边介条件用金属电极来模拟。如果边介是等势面则可用金属板代替电极。制作电解液模型是相当费时的。该模型最适于研究通过均质各向同性介质的三维流，即使边介的形式可以是极不规则的。误差主要取决于电极的清洁度。如果认真实施误差可以小于1%。

在电网络中传导介质由电阻器网络组成。加上电容器就可研究三维流现象。如果使用不可变电阻器和电容器，一万多结点的网络可以用比较简单的器件制成。当然非均质和各向异性介质两者都能以极简单的方法来计算。如果使用半导体，还能模拟某种程度的非线性条件。这种模型也是有源器件最费钱。对于必须考虑各向异性和非均质性的三维非稳定地下水流问题的研究，如果结点数多于5000个，那末电网络具有最广阔的余地甚至是唯一可行的。在这种网络中的误差数量也能用泰勒级数来确定。可以看出网络可以同导电板或电解箱结合使用；误差的计算就变得困难多了。只有在可能误差对其最终成果几乎不发生任何影响的一部分模拟中才推荐这种结合法。淡—咸水问题可以用Dagan的近似方法来求解。

译自Geologie en Mijnbouw, Vol.51(1), 1972.

方鸿慈译

# 应用模拟装置和数字计算机 制作地下水模型

〔英〕K·R·拉什顿

J·E·阿什

## 摘 要

应用以小型数字计算机操纵的阻容模型，能有效地模拟一个含水层的长时间动态，这里举出英国东部的一个部分承压、部分非承压的典型含水层作为例子，考虑了补给量、基流量和抽水量的表示方法。模拟了100年的时间。典型结果中包括含水层多年的长期动态和几天的短期动态。

## 一、引 言

近年来，用于分析含水层中地下水流的数字和模拟方法都取得了重要进展。数字计算机方法解决了离散时段中的固有困难，获得了可靠的结果(Thomas, 1973, Rushton, 1974a, 1974b)。同样，缓时模拟方法的发展与量测仪器的改进，表明阻容模拟计算机是模拟含水层动态的一种方便手段(Rushton与Bannister, 1970)。

现有的方法即可用来验证拥有大量可利用资料的模拟多年的含水层模型的可靠性，又可用于预测含水层的未来动态。已研究了非承压含水层十年期间的动态，但当含水层作为综合利用方案中的一部分时，还需考虑其长达百年时间的动态。应用数值解法模拟如此之长的时间过于昂贵，而复杂抽水和补给型式的模拟已超出现有模拟方法的范围。一种能克服这些困难的方法是应用以小型数字计算机操纵的阻容模拟计算机。

**这种模拟**——数字方法与通常的联合计算机方法不同，后者是用一种对空间量进行积分而将时间分为离散级的模拟装置。这里提出的装置的优点是阻容网络所模拟的时间是连续函数，而用数字计算机控制复杂型式的输入与输出，并记录与变水头相应的电压。

为了说明这一方法，举出一个特殊的含水层即英国东部的林肯州(Lincolnshire)灰岩含水层作为例子。介绍阻容网络的梗概，特别是关于输入、输出和初始条件的模拟方法。借助流程图，讨论了数字计算机及其模(拟)数(字)转模器和数(字)模(拟)转换器的应用。例举林肯州灰岩含水层的典型结果以阐明该方法的应用。

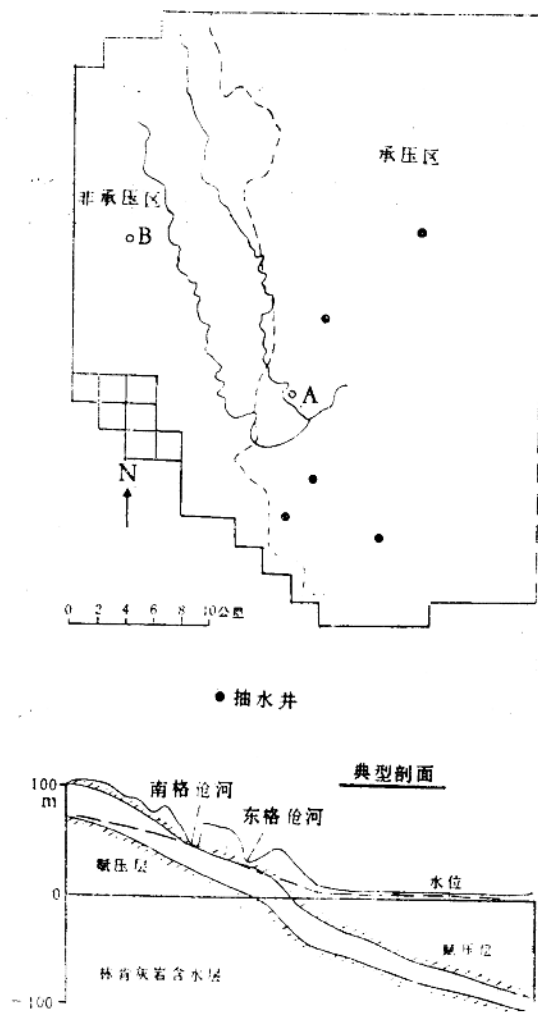


图 1 林肯州灰岩含水层的平面图与典型剖面图

## 二、典型问题

针对特殊问题来讨论这种新方法是有益的。所举例子是林肯州灰岩含水层的一部分，西部为非承压而东部承压。含水层承压部分的水头不到一天所产生的显著变化，却相当于非承压区含水层约需一百年的全部反应。

图 1 为含水层的平面图和典型剖面图。在西部的非承压区中，灰岩出露于河谷附近，而其余大部分地区为泥砾和其他不透水岩层所覆盖，看来主要是通过浅落水洞向灰岩渗入的。露头以东是一承压含水层，被相对不透水的粉土和粘土层所盖，含水层之下为一套砂、粉土和粘土。含水层平均厚度约 20 米，已知的最大厚度为 40 米。

向含水层的平均渗入量为100000立方米/日，而每月的渗入量由零至500000立方米/日。估计自含水层流入东、西格伦 (glon) 河的水量通常年平均为23000立方米/日，目前抽水量为70000立方米/日，剩约7000立方米/日流向与海洋相接的东部。预计某些年份的抽水量会增加，结果使年消耗量超过年补给量，因而动用了含水层的储存量。试图预测这种情况的效果是主要的。可将问题归纳如下，已知：

- (a) 含水层的分布范围、导水系数、储水系数和边界条件；
- (b) 在100年期间以月为单位表示的预计补给量，及其在整个含水层的分布情况；
- (c) 补给河流的基流量；
- (d) 计划的抽水量变化。

预测100年期间含水层的动态，特别是估计最低水位及咸水自东侵入的危险。进行这一分析时，应注意在作出预测之前必须达到相当于含水层目前条件的动力平衡状态，这要通过连续循环近似含水层先前动态的输入和输出直到每年水头重现的办法来达到。

### 三、阻容模拟装置

Rushton与Bannister (1970) 对缓时阻容模拟装置作了详细的描述。表1列出了具有三个换算系数 $F(1)$ 、 $F(2)$ 和 $F(3)$ 的模拟关系式以及物理量和电量的典型值。 $T_x$ 项表示X方向的导水系数， $\Delta X$ 和 $\Delta g$ 为网格间距。

| 物 理 量      | 典型值  | 单 位   | 关 系 式                                | 模 拟 量  | 典型值   | 单 位 |
|------------|------|-------|--------------------------------------|--------|-------|-----|
| 水头h        | 9.5  | 米     | $V = F(1)h$                          | 电压V    | 9.5   | 伏   |
| 导水系数 $T_x$ | 12.5 | 平方米/日 | $R_x^2 F(2) \Delta X / T_x \Delta y$ | 电阻R    | 640   | 千欧姆 |
| 储水系数S      | 0.05 | —     | $C = F(3) \Delta x \Delta y s$       | 电容C    | 2.5   | 微法拉 |
| 时间t        | 7    | 日     | $te = F(2) F(3) t$                   | 电模拟时间起 | 0.07  | 秒   |
| 水量Q        | 9000 | 立方米/日 | $I = F(1) Q / F(2)$                  | 电流I    | 1.125 | 微安培 |

换算系数大小的选择使得满足下列标准：

- (i) 网络电压的范围为+10伏，使电噪音产生的误差不大；
- (ii) 在承压区，水头变化迅速，因此需要在一天之内进行几次读数。另一方面，还需模拟100年的时间可以1秒的电模拟时间代表100天的实际时间，每0.4天读一次是可能的，因而100年相当于持续6分钟的实验；

(Ⅲ) 低泄漏电容器的最大值的范围为1—10UF。当用这些电容电容器模拟非承压含水层的储水量时，测模拟导水系数的电阻器范围为0.1—1MΩ。

上述系数一经选定，则代表9000立方米/日的电流为1.125微安，在典型补给结点上所送入的电流一般为0.125微安而对许多月份降低到零。虽然可采用精度达0.005微安的恒定电流装置，但对提供130个单独装置是不经济的。