

井灌水力学 基础

冯心宽 编

机井节能节水测试技术改造培训教材



水利电力出版社

机井节能节水测试改造技术培训教材

井 灌 水 力 学 基 础

冯心宽 编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书主要介绍水在井管、明渠、暗管等中的运动规律，包括单井和井灌工程的水力学基础知识及计算方法。注重实际应用，书中有大量的工程实践资料和数据，通俗易懂，便于学习和掌握。

本书共分七章。内容有绪论、水静力学原理、水动力学基础、流动形态及水头损失、压力管道的水力计算、明渠流和堰流的水力计算及单井水力学，每章均附有例题及思考题。适用于具有初中以上文化程度从事机电排灌、机井节灌节水技术改造的工程人员阅读。

机井节能节水测试改造技术培训教材

井灌水力学基础

冯心宽 编

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

北京昌平沙河建华印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 8.25印张 182千字 1插图

1987年3月第一版 1987年3月北京第一次印刷

印数 0001—6300册 定价 1.68元

书号 15143·6329

序 言

我国北方地区机井建设自1973年纳入国家计划以来，有很大发展，已成为这一地区水利建设的重要组成部分。在北方17个省、自治区、直辖市的1200多个县、旗中，有900多个县、旗打了井，共建成配套机井220多万眼，配用动力2000多万千瓦，井灌面积达1.67亿亩，约占这一地区总灌溉面积的三分之一，并改善了供水不足草原和开辟无水草原11万平方公里。由于过去大发展时期建设的机井多数没有经过严格的配套设计和选型，加上设备质量不高，供应品种不全和管理不善等原因，造成不少井、机、泵配套不合理，致使装置效率低、耗能多、运行成本高、经济效益低。

我国能源不足，尤其是电力和燃油供应紧张，这是我国国民经济发展中的一个突出的薄弱环节；我国人均水资源每年为2600立方米，仅相当世界人均水量的四分之一，尤其是北方地区，有的地方人均水资源每年只有三、四百立方米，已成为经济发展的严重制约因素。北方17省、市、自治区自发展井灌以来，由于长期开采大于补给等原因，不少地方区域地下水位逐年大幅度下降，迫切需要采取措施解决。

当前北方地区机井工作正开展以节能节水为中心的技术改造，提高机井装置效率和水的有效利用率，达到降低灌溉成本，提高经济效益的目的，这是井灌区加强科学管理做到合理开发利用地下水的首要任务。自1983年我司召开“机井节能节水技术改造经验交流会议”以来，到1985年底，北方

井灌区已改造机井27万眼。经过技术改造的机井，装置效率平均提高10%左右。据河南省浅井地区框算，技术改造后比改造前，平均一眼机井一年可节电近700千瓦小时（度）；河北省深井地区框算，平均一眼机井一年可节电约5000千瓦小时（度），*效果十分显著。

经过两年多的技术改造实践，说明机井的科学管理必须把节能节水技术改造作为主要内容和经常工作。机井的技术状态及地下水位均在运用过程中不断地变化着，要保持较高的机井装置效率，就必须经常对井、机、泵、管、传进行检修和调整，因此，基层机井管理人员的技术素质是搞好机井技术管理、提高机井装置效率的关键；同时，机井管理工作要逐步贯彻、执行水利电力部颁发的《农用机井技术规范》，使机井管理工作科学化、正规化、这也要求机井管理人员具有一定的技术水平。

为了提高机井管理人员的技术素质，加强机井管理工作，我司在“1984年机井节能节水技术改造师资培训班”教材的基础上，会同水利电力出版社，组织编写了“机井节能节水测试改造技术培训教材”，这套教材共6册，约110万字，包括《井灌水力学基础》、《农用机井设计与管理》、《井泵理论与技术》、《机井动力设备（一）柴油机》、《机井动力设备（二）电力设备及线路》、《机井装置效率的量测与节能节水技术改造》，授课时数约200学时。编写、审定这套教材的同志，付出了辛勤的劳动，在这里，向他们表示衷心的感谢。

党的十一届三中全会以来，中央多次提出要加强职工队伍的培训，提高整个职工队伍的政治素质和业务、技术、文化水平，以适应四个现代化建设的需要。水利电力部职工教育工作要求，要建立健全职务和岗位技术培训制度，要逐

步做到未经培训合格，不能上岗和提升。机井管理也应如此，因此，凡具有中学文化程度、从事机井管理工作的同志，应逐步通过以本教材为基本内容的技术培训，可以单科或多科进行，由上级水利部门组织，由大、中专业学校老师或从事机井管理工作的工程师，按学时数授课，结业时进行单科考试，全部考试合格的，发给“结业合格证书”。

这套培训教材，内容上力求理论与生产实践相结合，着重于应用，文字上深入浅出，通俗易懂。我们希望各地在实际工作中，对这套教材多提补充、修改意见，使其内容不断完善。

水利电力部农田水利司

1986年7月

前 言

本书是在水利电力部农田水利司1984年举办的“机井节能节水技术改造师资培训班”讲义的基础上修改编写而成。书中比较系统地阐述了适于我国北方干旱和半干旱地区，以灌溉为主的农用机井的规划、设计和管理。本书贯彻理论联系实际方针，而又侧重于生产实际。为了便于教师参考和学员自学，内容力求由浅入深，循序渐近。理论部分尽量使概念简明和通俗易懂。算式尽量采用初等数学推导与表达。书中尽可能地吸收我国北方地区农用机井在建设和管理中的先进经验与科研成果；参考了《农用机井技术规范》（初稿）；吸取了国外的先进技术和经验。对书中重点和难点部分，多附有实例，俾使学员能加深理解和掌握解题的技能与方法。

本书由新疆八一农学院水利系张席儒副教授审阅，并对编写工作提供了很多宝贵意见。陕西机械学院水利系的领导和农田水利教研室的同志，对本书的编写，给予很多鼓励、支持和帮助，特此一并致谢。

由于编者能力和水平所限，加之任务紧急时间仓促，书中恐有不少缺点和错误，竭诚希望同行专家和读者批评指正，以供修改不断完善。

编者

1986年2月

目 录

序 言

前 言

第一章 绪论	1
第一节 井灌水力学的任务	1
第二节 水的主要物理性质	2
第三节 作用于水的力	15
思考题与习题	16
第二章 水静力学原理	18
第一节 静水压强及水静力学基本方程	18
第二节 静水压强的测量	26
思考题与习题	31
第三章 水动力学基础	33
第一节 基本定义和概念	33
第二节 液体流动的连续方程	42
第三节 能量方程	45
第四节 能量方程的意义及应用条件	51
第五节 实际液体稳定总流的动量方程	63
思考题与习题	71
第四章 流动形态及水头损失	74
第一节 流动两种形态——层流与紊流	74
第二节 层流运动和紊流运动的基本概念	79
第三节 水流阻力与水头损失	84
第四节 沿程水头损失的计算	85

第五节 局部水头损失的计算	109
第六节 长轴井泵和潜水电泵水头损失的计算	120
思考题与习题	122
第五章 压力管道的水力计算	126
第一节 概述	126
第二节 短管的水力计算	127
第三节 长管的水力计算	134
第四节 枝状管网的水力计算	144
第五节 井灌区地下输水管道的的水力计算	149
思考题与习题	154
第六章 明渠流和堰流的水力计算	156
第一节 明渠的几何特性	157
第二节 明渠均匀流的水力计算	160
第三节 薄壁堰	181
思考题与习题	189
第七章 单井水力学	191
第一节 渗流基本概念	191
第二节 渗流基本定律——达西定律	198
第三节 地下水流经滤水管时的水头损失	202
第四节 管井的水跃值	213
第五节 水井涌水量的稳定渗流计算	220
第六节 滤水管的类型与长度对涌水量的影响	241
第七节 填砾层对涌水量的影响	248
参考文献	252
附录 I 梯形(或矩形)断面棱柱形明渠正常水深 h_0 求解图	
附录 II 梯形(或矩形)断面棱柱形明渠底宽 b 求解图	

第一章 绪 论

第一节 井灌水力学的任务

一、井灌水力学的研究对象

水力学是一门应用科学，是力学的一个分支。它是研究水在平衡状态和运动状态下所具有的力学规律，并应用这些规律去解决有关的实际工程问题。

水力学的研究对象主要是水。水在外力作用下具有相对平衡和相对运动两种状态。因此常把水力学分为两个基本部分：研究水相对平衡的规律及其应用的部分称为水静力学；研究水在管道或渠道中运动规律及其应用的部分称为水动力学。后者是水力学的主要部分。

井灌水力学是探讨水力学在井灌工程中的应用。本书主要以井管中、明渠中、暗管中的水流为研究对象，并介绍单井即滤水管的水力学的基础知识，以求分析和解决井灌工程中有关的水力学问题。

二、水力学在井灌工程中的应用

机井是开发地下水资源最基本的途径，对于农业排灌、促进粮食和经济作物的丰产具有重要的作用。在机井的设计、施工、运行、测试、节能节水、技术改造等各项工作中，都会遇到广泛的水力学问题。例如，滤水管的水力学问题，管路的水力学问题，渠道断面的设计，暗管输水能力的计算，出水池、分水池水位高程的确定，研究提高水力参数

测试精度的方法等等。要解决好这些问题，就需要有关的工程技术人员、运行管理人员具有坚实的水力学基础知识。

三、井灌水力学的任务

井灌水力学力求密切结合井灌工程的实际，探讨水在管井滤水管、进出水管道以及输水明渠、暗管中的运动规律，以便分析和解决管井设计、运行、测试、节能节水、技术改造等工作中所遇到的水力学问题。井灌水力学是井灌工程专业中一门重要的基础课。

第二节 水的主要物理性质

一、流动性

物质是由分子组成的。分子之间是有间隙的。每个分子无时无刻都在做不规则的随机运动。水的质点是由不断运动着的若干分子构成的。这样，水的运动就包括了由于水内部分子力所引起的分子运动（即使水体处于静止状态，这种运动也不会停止）以及由外力作用所引起的水质点的运动。但在一般工程中，所研究的水的空间要比分子尺寸大得多，因此在研究水的宏观运动时，就不需要考察个别分子的随机运动，而只需要着眼于水的质点所表现出来的宏观的平均力学特征。换句话说，不必考虑水体分子间存在的空隙，而把它视为由无数连续质点所组成的连续介质。这一概念可以使我们在研究水的运动时，能够运用数学中连续函数的分析方法。水的有关参数如密度、流速、压强等量的时空分布均视为连续函数。这在应用上既方便，又具有足够的精确性。当然，连续性的假设也有其适用范围，当水的性质发生局部突变时，例如当水管或泵体内局部地区发生汽蚀和出现气穴

时，水的连续性便遭到破坏。

自然界的物质一般有三种存在形式，即固体、液体和气体。液体和气体统称为流体。流体的流动性是由于其分子间距较大，内聚力很小所决定的。它几乎不能承受拉力，几乎不能抵抗拉伸变形。因此即使在微小剪力的作用下，也容易变形或流动。液体这种很容易变形和变形后不再复原的性质，就是液体的流动性。

二、惯性、质量与密度

惯性是物体维持原有运动状态的特性。当水在外力作用下其运动状态发生改变时，水由于惯性而引起的抵抗外力的反作用力称为惯性力。设水的质量为 m ，加速度为 a ，则惯性力 F 表示为

$$F = -ma \quad (1-1)$$

式中负号表示惯性力的方向与水的加速度方向相反。水在运动过程中，外力的作用改变其运动状态，无论是加速还是减速，都必须克服惯性的影响。

惯性的大小可以用质量来量度，质量愈大，惯性也愈大。根据我国法定计量单位的规定，质量的单位用千克（公斤）表示，符号为 kg 。力的单位用牛表示，符号为 N 。当质量为1千克的物体在获得加速度为1米每平方秒时所受到的力即为一牛力，即 $1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ 。

密度是指单位体积液体所含有的质量。对于质量为 m ，体积为 V 的均质液体，密度 ρ 用下式表示：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

三、重力

地球对物体的引力称为重力（重量）。根据牛顿第二定

律，质量为 m 的液体，其重量 G 用下式表示：

$$G = mg \quad (1-3)$$

式中 G ——重力，N；

m ——质量，kg；

g ——重力加速度，一般取 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

重度是表示液体具有重量特性的物理量。单位体积液体的重量称为重度。对于重量为 G ，体积为 V 的均质液体，重度 γ （也叫容重）用下式表示：

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-4)$$

将式（1-4）除以式（1-2），并将式（1-3）代入，可以得到重度与密度关系的表达式：

$$\frac{\gamma}{\rho} = \frac{G}{m} = \frac{mg}{m} = g$$

故 $\gamma = \rho g \quad (1-5)$

严格地讲，水的密度和重度随着温度和压力的变化而变化，尤其反映在温度的变化上。在一个标准大气压下，淡水温度在 4°C 时密度最大（ $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ）。试验表明，当温度在 $0 \sim 30^\circ\text{C}$ 之间变化时，水的重度和密度的变化率只有 0.4% 。因此在常温下，水的重度和密度随温度的变化可以忽略。在进行水力计算时，一般采用 4°C 时的重度和密度值。

【例1-1】 经测试，某眼机井抽取的水的流量为 15 L/s 。问1小时抽取的水的重量和质量各为多少？

【解】 已知流量 $Q = 15 \text{ L/s} = 54 \text{ m}^3/\text{h}$ ，因此一小时抽取的水的体积 $V = 54 \text{ m}^3$ 。根据式（1-2），得水的质量为：

$$m = \rho V = 1000 \times 54 = 54000 \text{ kg}$$

根据式(1-3)，得水的重量为：

$$G = mg = 54000 \times 9.81 = 529740 \text{ N}$$

四、粘滞性与粘滞系数

(一) 牛顿内摩擦定律

如前所述，水具有易流动性。静止时它几乎不能承受拉力，即使受到微小剪力的作用，也容易变形或流动，静止状态便被破坏。但在运动状态下，水却具有抵抗剪切变形的能力。以井灌为例，电动机或柴油机带动井泵叶轮旋转，井水在叶轮作用下通过管路由低向高流动，被输送到人们需要的高程。如果在出水管的某个断面上，如图1-1中A-A断面，沿A-A测得多点流速，并绘出该横断面上的流速分布，得到图1-1(a)所示的图形。紧靠壁面的第一层极薄水层由于附着力的作用而贴附在壁面上不动。该水层影响第二水层的流速；同理，第二水层又影响第三水层……。到管轴中心时，壁面对流速的影响最小，形成了如图1-1(a)所示的流速

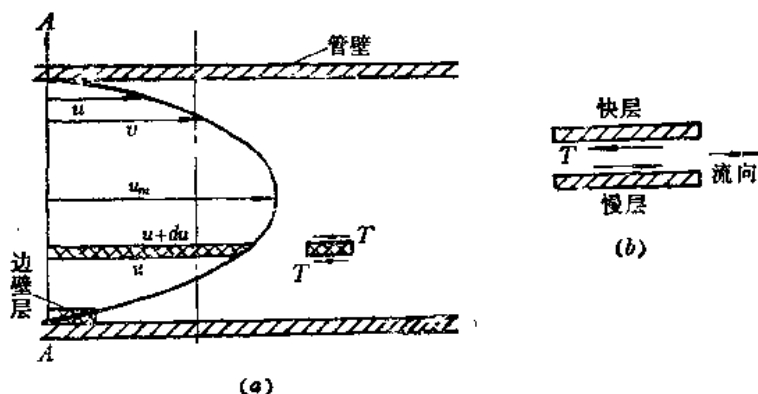


图 1-1 圆管中流速分布与内摩擦力示意图

u ——任意点流速； $\bar{v}$ ——断面平均流速； u_m ——中心点最大流速； T ——内摩擦力

分布。在外力作用下，假设质点有规则地一层一层向前运动而不互相混杂(这种液层间互不干扰的运动称为层流运动)，设距边界层为 Y 处的流速为 u ，在相邻的 $Y+dY$ 处，流速为 $u+du$ ，由于相邻两层的流速不同（即存在着相对运动），在两层之间将产生内摩擦力。速度慢的流层对速度快的流层作用一个与运动方向相反的摩擦力，以阻止快层的运动。而快层对慢层则作用一个与流向相同的摩擦力，以带动慢层运动。这一对摩擦力大小相等，方向相反，都具有抵抗相对运动的性质，如图1-1(b)所示。这种性质称为液体的粘滞性，这种力称为内摩擦力或粘滞力。从微观上讲，粘滞力是由液体内部分子之间的吸引力引起的，这是内因；产生粘滞力的外因，是液体受到外力的作用。没有剪力的作用，液体处于静止状态，虽然分子之间有吸引力，但是从宏观上表现不出粘滞性来。只有在外力作用下，液体质点相对运动的速度达到相当大时，粘滞力才能明显表现出来。液体在运动过程中必须克服内摩擦力而做功，也就是说，液体所具有的一部分机械能，为克服摩擦作用，不断转化为热能而消散。这种机械能的消耗称为能量损失或水头损失。因此粘滞性是液体运动中产生能量损失的根源。

根据牛顿研究的结果，液体运动时液层间的内摩擦力 T 的大小与沿接触面法线方向的流速梯度 du/dY 成正比，与接触面的面积 A 成反比，与液体的物理性质有关，而与接触面上的压力无关。这个关系称为牛顿内摩擦定律。它的数学表达式为：

$$T = \mu A \frac{du}{dY} \quad (1-6)$$

式中 μ 为比例系数，随液体种类的不同而不同，称为动力粘

滞系数。

将式(1-6)两端同用面积 A 除之,得到:

$$\tau = \mu \frac{du}{dY} \quad (1-7)$$

式(1-7)称为内摩擦应力定理。由于内摩擦力与切应力平行,故常称 τ 为切应力。

(二)粘滞性的表示方法

液体粘滞性的大小是通过粘度来表示的。粘度通常有三种表示方法:动力粘度、运动粘度和相对粘度。

1. 动力粘度 系数 μ 称为动力粘度,也叫动力粘滞系数。它的物理意义是当流速梯度等于1的情况下,两液层间的切应力。动力粘度又称绝对粘度。 μ 的法定单位为帕[斯卡]秒($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。

液体性质对摩擦力的影响,通过系数 μ 反映出来。粘性大的液体 μ 值大,粘性小的液体 μ 值小。

2. 运动粘度 在一个标准大气压下,当温度相同,液体动力粘滞系数 μ 与密度 ρ 的比值 ν 叫做运动粘度,也称为液体运动粘滞系数,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-8)$$

运动粘滞系数 ν 无特殊物理意义。它的法定计量单位为 m^2/s 。

同一种液体, μ 和 ν 随温度和压力的变化而变化,但随压力的变化甚微,一般可忽略不计。随温度的变化关系,对纯淡水有如下经验公式:

$$\nu = \frac{0.0178}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-9)$$

$$\mu = \frac{0.00178}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-10)$$

式中 t ——温度, $^{\circ}\text{C}$;

ν ——运动粘滞系数, m^2/s ;

μ ——动力粘滞系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

3. 相对粘度 直接测定系数 μ 和 ν 是很困难的, 一般只能间接测定。对于液体, 实际上都用粘度计测定。用粘度计测得的液体粘度叫相对粘度, 用 $^{\circ}\text{E}$ 表示。由 $^{\circ}\text{E}$ 可以换算为运动粘滞系数 ν 。

需要指出的是, 根据牛顿内摩擦定律, 液体的切应力 τ 与剪切变形速度 u/dY 呈线性关系, 即液体种类和温度不变时, 比例系数 μ 为常数。符合这一规律的液体称为牛顿液体, 例如水、机器油等。反之, 称为非牛顿液体, 例如泥浆、血浆、油漆、浓淀粉糊等等。牛顿内摩擦定律只能适用于牛顿流体, 而且也仅仅在做层流运动时才适用。

液体粘性的大小, 从内因方面分析, 取决于分子间相互作用的大小。因此压力和温度对粘性的影响也反映在液体分子间相互作用的变化上。当压力增大, 体积变小时, 分子间的距离减小, 相互作用力增大, 因而粘性增大。但在数十个大气压以下时, 粘性随压力的变化很小, 一般可忽略不计。而液体粘性随温度变化而变化的现象要明显得多。温度升高时, 液体分子之间距离增大, 分子吸引力减小, 粘性随着减小。

【例1-2】 有一平板在水面上以 $u = 2 \text{ m/s}$ 的速度作水平运动, 已知水深 $h = 0.01 \text{ m}$, 水温为 20°C , 由平板带动水的流速按直线分布 (图1-2)。求水作用于平板底面的切应力。