

给水管网理论和计算

严煦世 赵洪宾 编著



中国建筑工业出版社

给水管网理论和计算

严煦世 赵洪宾 编著

中国建筑工业出版社

本书系统地介绍了给水管网设计计算的基本理论，着重阐述现代科学成果，并结合生产实际提出管网优化设计方法。目的是提高理论水平和解决实际生产问题。

本书主要内容有：管网分析计算数学基础，新建、改建和扩建管网的优化设计计算，输水系统的优化设计，给水管网可靠性分析和管网经济分析等。

本书供从事给水工作的工程技术人员、高等院校给水排水专业、环境工程等专业的教师、研究生和大学本科高年级学生参考。

给水管网理论和计算

严煦世 赵洪宾 编著

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本：787×1092毫米 1/16 印张：24 $\frac{1}{2}$ 字数：592千字

1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷

印数：1—6,680册 定价：7.25元

统一书号：15040·5127

前 言

我国给水工程已有百余年历史，最早的给水设施为旅顺口取用地下水源的集中给水系统，建于1879年。随后在1883年建成上海杨树浦水厂。到1949年止，全国只有沿海、长江沿岸和东北等地72个城市有自来水厂，每日供水量仅240万 m^3 ，供水管道长度约6500 km。

建国以来，给水事业得到迅速发展。据1983年底统计，全国有大、中、小不同规模的城市有给水设施，每日总供水量达3538万 m^3 ，供水管道总长度达56850 km。此外，全国有一半以上的城镇建造了水厂，供水量达每日500万 m^3 以上，工业企业自备水源的供水量每日约5083万 m^3 。

这些数字充分说明建国以来给水工程建设的巨大成就。我国幅员辽阔，工农业生产迅速发展，人民生活水平不断提高，瞻望前景，给水事业正方兴未艾，非但有许多新的工程设计有待完成，并且随着给水工程的初具规模，改建和扩建的任务必将随之而来。

给水工程由取水、水处理和管网三部分组成。在整个给水工程投资中，管网部分所占费用有时可达80%，因此合理进行管网设计，无疑是很重要的。

任何工程设计的目标总是要求以最少的人力、物力和财力取得最佳的工程效果，使有限的物质资源得到最充分利用，给水管网设计自然也不例外。

管网设计计算从手算到电算，从凭经验设计到优化设计是有过程的。七十年代期间，因近代数学和计算技术发展的结果，管网设计理论也有了进展，电子计算机开始用于管网计算，使过去用手算难以处理的问题，现在有可能解决了，人们逐步摆脱了凭经验设计的状态。进入八十年代，科学技术日新月异，各门学科相互渗透，不仅在自然科学领域中各边缘学科关系趋于密切，而且社会科学和自然科学也开始结合起来，从而使管网设计的优化理论层出不穷，作为系统工程内容之一的可靠性理论开始进入管网设计的范畴，工程经济分析的方法也有所创新。

可是，将近三十年来，我国还未出版过给水管网方面的专著。为了反映时代的特点，体现近年来给水管网方面的研究成果，我们编写了这本书。旨在总结几十年来给水管网的设计计算理论，系统地科学地阐述管网设计基础理论和优化设计方法，反映现代科学在给水管网设计中的应用，并力求理论结合实际，以供实际生产中参考。

本书共分十章。

第一章介绍管流水力学的基本原理，作为管网水力分析的基础。

鉴于优化理论现已广泛应用于社会科学和自然科学的各个领域，实践证明应用优化理论进行管网设计，可使管径合理，输水成本降低，经济效益提高。第二章主要是为应用优化理论提供相应的数学基础。

目前给水管网设计中，管径和长度越来越大，因此，经济、可靠和合理的设计更显重要。长期以来，人们沿用半经验方式进行设计。近年来稳定流管网分析方法和技术，以及管网设计的优化方面取得较大的进展，在第三章中介绍管网水力计算的各种方法。

目 录

前言

第一章 管流水力学	1
第一节 液体主要物理性质	1
第二节 恒定流基本方程	2
一 连续性方程	2
二 能量方程	3
三 动量方程	5
第三节 圆管内流速分布和沿程阻力系数	6
一 圆管内的流态	6
二 沿程水头损失公式	7
三 层流时圆管的沿程阻力系数	8
四 人工粗糙管的沿程阻力系数试验	10
五 光滑管的沿程阻力系数	12
六 粗糙管的沿程阻力系数	13
七 过渡区的沿程阻力系数	13
八 摩台图	16
九 管流问题的解	17
第四节 管线水头损失计算	18
一 流量和水头损失关系	18
二 常用水头损失公式	19
三 管道水头损失公式系数的导出	21
四 局部水头损失	25
五 串联和并联管线	26
第二章 管网分析计算基础	27
第一节 线性方程组解法	27
一 阶梯形线性方程组解法	27
二 还原法	29
三 高斯消去法	33
四 高斯-约当法	34
五 高斯-赛德尔法	35
第二节 非线性方程解法	36
一 迭代法	36
二 牛顿法	37
三 多元牛顿法	40
第三节 线性规划	42
一 线性规划问题的数学模式	42

二 单纯形法原理	44
三 初始基本可行解的确定	47
四 对偶问题	49
第四节 非线性规划问题解法	51
一 无条件极值法	52
二 拉格朗日未定乘数法	54
第五节 管网水力计算的数学模式	56
一 管网图的概念	57
二 管网水流分配的数学模式	63
第六节 试验设计法	65
一 单因素分析法	65
二 双因素分析法	69
第三章 管网水力计算	72
第一节 管网图形	72
第二节 树状网和环状网的关系	73
第三节 管网经济布置	76
一 管网布置和经济性	76
二 应用正交表确定管网的经济布置	78
第四节 管网图形简化	82
一 管线省略	82
二 平行管线的合并	84
三 管网分解	84
第五节 环状网流量分配	85
一 节点累计法	87
二 应用最小平方和的流量分配法	88
三 均分法分配流量	90
四 截面法分配流量	90
第六节 管网计算的基础方程	92
第七节 管网计算方法	93
一 管网计算方法分类	93
二 流量法	93
三 水压法	116
第八节 多水源管网计算	126
一 树状网	127
二 混合管网	132
三 环状网	133
第九节 串联分区给水管网计算	138
第十节 取用井水时的管网计算	140
第四章 输水系统设计和计算	145
第一节 输水系统的基本形式	145
一 无压重力流输水管渠	146

二 无压和有压交替的重力输水管渠	146
三 压力输水管渠	147
第二节 压力输水管渠	148
一 压力输水管设计计算	148
二 决定输水管条数	149
三 事故流量计算	151
四 压力输水管的效益分析	153
第三节 有压重力流输水管渠	155
一 管线高程与水压的关系	155
二 有压重力流输水管计算	156
三 水池位置选择	158
第四节 无压渠道	159
第五节 管线内的空气	160
第六节 输水能量分析	161
一 输水管能量利用情况	161
二 中途增压泵站布置	162
第七节 输水管技术经济计算	163
一 重力输水系统	164
二 水泵加压系统	167
第八节 输水管线附属设备的选用	168
一 空气阀	168
二 放水管	169
三 水锤消除器	171
第五章 管网技术经济计算	172
第一节 设计目标和约束条件	172
第二节 管网技术经济计算的基础式	173
一 目标函数	173
二 约束条件	175
三 技术经济计算中的变量关系	175
第三节 管段流量未分配的管网技术经济算法	178
一 整数解方向法	178
二 整数解随机方向法	178
三 最大坡度法	178
四 应用正交表法	179
五 拉格朗日未定乘法	181
第四节 流量已分配的管网技术经济算法	183
一 拉格朗日未定乘法	183
二 线性规划法	186
三 无条件极值法	189
四 各种方法比较	190
第五节 管网技术经济计算的课题和计算	191

一 管网技术经济计算的课题	191
二 流量已分配时的环状网技术经济计算	195
三 管段水头损失已知时的环状网技术经济计算	198
四 不同流量分配对费用函数的影响	199
五 水泵经济扬程的确定	200
六 树状网技术经济计算	201
七 重力流管网技术经济计算	203
八 管网的近似技术经济计算	206
九 技术经济计算时用水量变化和水塔作用的考虑	208
第六节 应用电子计算机解管网问题	210
一 应用电子计算机进行管网计算的数值法	211
二 提供管网图形信息的方法	212
三 应用电子计算机确定管网的初始流量	217
第六章 管网使用期间的水力分析	218
第一节 多水源管网的管理分析	218
第二节 从管网管理角度分析各种计算方式	225
第三节 考虑漏水的管网计算	229
第四节 水压不足时的管网计算	235
第五节 配水管网水流停留时间计算和水质安全性评价	240
一 用水量变动时的停留时间计算	241
二 影响停留时间的因素	243
三 水质安全性评价	245
第七章 考虑用水量预测误差和消防流量的管网计算	249
第一节 用水量变化和预测误差	249
一 用水量变化	249
二 用水量预测的误差	249
第二节 设计水量和设计水压	251
一 水量和水压条件	251
二 流量变化对水头损失的影响	253
第三节 考虑用水量预测误差的管网计算	257
一 管网的随机流量分配法	257
二 配水能力指标	259
三 配水能力指标计算方法	261
四 按配水能力指标的管网经济设计	262
第四节 考虑消防流量的管网计算	263
第八章 给水管网的改建和扩建	266
第一节 现状资料的收集	266
一 给水构筑物现场调查方法	266
二 测定管线水力阻力	267
三 离心泵特性试验	270
四 管网测压	272

第二节 输水管渠改建和扩建	274
一 重力输水管的扩建计算	275
二 压力输水管的扩建计算	275
三 输水管之间的连接管计算	277
四 压力输水管管径选择	279
第三节 管网改建和扩建	283
一 确定计算流量	283
二 确定自由水压	284
三 新敷平行管线的管径选择	284
四 泵站和管网的水力联系	285
五 部分管网的水力计算	288
六 多环优化法	290
第四节 水泵及泵站改建和扩建	298
一 水泵分级工作图	298
二 水泵的计算流量和扬程选择	299
三 水泵选用	300
四 水泵工作情况	302
五 原有水泵工作的改进	306
六 多泵站的最优流量分配	307
第五节 调节构筑物	309
一 给水系统扩建时调节构筑物的设置问题	309
二 调节构筑物工作情况的分析	311
三 高位水池或水塔位置和最优尺寸选择	314
第六节 压气给水设备	315
第九章 管网系统可靠性	320
第一节 可靠性指标	320
一 工作不间断性指标	321
二 维修性指标	324
第二节 管网系统各组分可靠性指标的确定	325
一 串联系统	326
二 并联系统	327
三 串联和并联的组合系统	328
四 简单管网	329
五 输水管	330
第三节 管网系统备用	331
一 管网系统可靠性和备用	331
二 输水管系统(无连接管)的备用	332
三 输水管系统(有连接管)的备用	336
第四节 调节水池	338
第五节 管网各组分故障时对流量的影响	340
第六节 管网设计计算时对可靠性的考虑	343

第七节 管网最不利管段损坏时的计算	345
第十章 给水管网经济分析	348
第一节 给水管网建设的科学程序	349
一 可行性研究阶段	349
二 计划任务书阶段	349
三 设计文件的编制和审查	350
四 建设准备阶段	350
五 施工阶段	351
六 生产准备、竣工验收、交付生产阶段	351
第二节 给水管网的经济分析方法	351
一 静态法	352
二 动态法	355
第三节 给水管网的经济效果评价	364
第四节 选择给水管网建设方案的方法	366
一 方案比较顺序	366
二 建设方案的决策过程	366
三 决策的类型和方法	367
第五节 提高给水管网经济效果的途径	374
附录	375
附表1 法定计量单位和换算关系	375
附表2 压力单位换算	375
附表3 居住区生活用水量标准	376
参考文献	377

THEORY AND CALCULATIONS OF WATER DISTRIBUTION SYSTEMS

This book is the first comprehensive updated treatise in 30 years on the analysis of water distribution systems.

Contents

Preface	
Chapter 1 Pipe Flow	1
1.1 Physical Properties of Fluid	1
1.2 Basic Equations of Steady Flow	2
1.3 Velocity Distributions and Friction Factor	6
1.4 Head Loss Calculations	18
Chapter 2 Fundamentals of Network Analysis	27

2.1	Methods for Solving Systems of Linear Equations.....	27
2.2	Methods for Solving Systems of Nonlinear Equations.....	36
2.3	Linear Programming.....	42
2.4	Methods for Solving Nonlinear Programming Problems.....	51
2.5	Mathematical Models of Networks.....	56
2.6	Experimental Design.....	65
Chapter 3	Hydraulic Calculations.....	72
3.1	Network Configuration.....	72
3.2	Branch and Looped Networks.....	73
3.3	Economical Layout of Network.....	76
3.4	Network Configuration Simplification.....	82
3.5	Flow Distribution of Looped Network.....	85
3.6	Basic Equations of Network.....	92
3.7	Methods of Network Calculation.....	93
3.8	Multi-source Network.....	126
3.9	Zoning Networks in Series.....	138
3.10	Well System Network.....	140
Chapter 4	Transmission Conduits.....	145
4.1	Basic Types.....	145
4.2	Pressure Conduits.....	148
4.3	Pressure Gravity Flow.....	155
4.4	Open Channel.....	159
4.5	Air in Pipeline.....	160
4.6	Energy Analysis.....	161
4.7	Technical Economic Analysis.....	163
4.8	Appurtenances.....	168
Chapter 5	Technical Economic Analysis of Networks.....	172
5.1	Design Criteria and Constraints.....	172
5.2	Basic Equations.....	173
5.3	Methods of Calculation for Networks.....	178
5.4	Methods of Calculation for Flow-Distributed Network.....	183
5.5	Typical Problems and Calculations.....	191
5.6	Computer Methods.....	210
Chapter 6	Flow Analysis of Network in Operation.....	218
6.1	Multi-source Network.....	218
6.2	Operation Aspects.....	225
6.3	Water Leakage Effect.....	229
6.4	Under-Pressured Network.....	235
6.5	Water Residence Time and Deterioration of Water Quality.....	240
Chapter 7	Flow Forecast Errors and Fire Flow.....	249
7.1	Demand Fluctuations and Forecast Errors.....	249
7.2	Design Flow and Pressure.....	251

7.3	Network with Flow-Forecast Errors.....	257
7.4	Fire Flow Analysis.....	263
Chapter 8	Upgrading and Expanding of Water Distribution Systems.....	266
8.1	Data Collection.....	266
8.2	Transmission Conduits.....	274
8.3	Networks.....	283
8.4	Pumps and Pumping Stations.....	298
8.5	Regulating Reservoirs.....	309
8.6	Pneumatic Installations.....	315
Chapter 9	Reliability Analysis.....	320
9.1	Reliability Indices.....	320
9.2	Reliability Indices of Water Distribution System Components.....	325
9.3	Reserve Capacity of Distribution System.....	331
9.4	Regulating Reservoir.....	338
9.5	Effect of Network-Component Failure.....	340
9.6	Reliability Consideration in Network Design.....	343
9.7	Network with Critical Pipe Breakdown.....	345
Chapter 10	Economic Analysis.....	348
10.1	Rational Sequence of Construction.....	349
10.2	Methods of Economic Analysis.....	351
10.3	Benefit-Cost Analysis.....	361
10.4	Determining the Alternatives.....	366
10.5	Strengthening of Network Operation.....	374
Appendixes	375
1	SI Units and Conversion Factors.....	375
2	Conversion of Pressure Units.....	375
3	Domestic Water Consumption Rate.....	376

第一章 管流水力学

第一节 液体主要物理性质

一、密度

单位体积液体的质量，常用 ρ 表示。密度单位为 kg/m^3 。一般情况下，清水的密度受温度和压强变化的影响很小，实际上可视作常数，取为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 。

二、重度

单位体积液体的重力，或称容重，用 γ 表示，以 N/m^3 计。液体的重度与密度的关系如下：

$$\gamma = \rho g \quad (1-1)$$

重力加速度 g 值，一般可看作是常数，例如采用 $9.8\text{m}/\text{s}^2$ ，所以水的重度为：

$$\gamma = 9.8 \times 1000 = 9800 \text{ N}/\text{m}^3$$

三、粘滞性

流动液体抵抗剪切变形的性质。由于粘滞性，使液体流动时因克服内摩擦力而做功，所以是液体产生机械能量损失的原因。

根据牛顿内摩擦定律，相邻液层之间的单位面积内摩擦力（或称切应力）与速度梯度

$\frac{du}{dy}$ 成正比，即

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-2)$$

式中 μ ——比例系数，称为动力粘度。

动力粘度的单位是 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

大多数液体的粘度可用式1-2来定义，这种液体称为牛顿液体。如油漆和淤泥之类，不符合该式的关系，称为非牛顿液体。

水的动力粘度 μ 和运动粘度 ν 值

表 1-1

温度($^{\circ}\text{C}$)	μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	温度($^{\circ}\text{C}$)	μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)
0	1.79	1.79	18	1.06	1.06
2	1.67	1.67	20	1.01	1.01
4	1.56	1.57	22	0.96	0.96
6	1.47	1.47	24	0.91	0.92
8	1.39	1.39	26	0.88	0.88
10	1.31	1.31	28	0.84	0.84
12	1.24	1.24	30	0.80	0.80
14	1.17	1.18	40	0.66	0.66
16	1.11	1.12			

液体粘滞性还可用运动粘度 ν 表示:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-3)$$

ν 的单位是 m^2/s 。

不同温度下, 水的动力粘度 μ 和运动粘度 ν 值见表1-1。

第二节 恒定流基本方程

水力学的许多分析计算均以自然界物质运动的普遍规律为依据, 其中最主要的是牛顿运动定律以及质量、能量和动量守恒定律。质量既不能产生也不会消失; 能量(指机械能量)只能从一种形式转化为另一种形式; 动量也只能随作用力和时间而变化。水力学中, 质量守恒关系用液流的连续性方程表示; 能量守恒方程具体表现为伯努利(D. Bernoulli)方程, 在水力学上简称能量方程; 确定水流动量变化和作用力之间的关系时, 动量守恒原理特别有用。连续性方程、能量方程和动量方程三者是解决管流问题的最基本方程。

一、连续性方程

一般, 描述水流的物理量为空间和时间的函数。所有空间点上的流速、压强等不随时间变化的液流叫做恒定流。以下只涉及不可压缩流体的一元恒定流。

连续性方程表示通过水流断面的质量通量。质量通量的含义是质量流量 Q_m 或单位时间通过的质量, 以 kg/s 计:

$$Q_m = \rho A v = \rho Q \quad (1-4)$$

式中 ρ ——液体的密度(kg/m^3);

A ——垂直于水流方向的断面积(m^2);

v ——断面平均流速(m/s);

$Q = Av$ ——体积流量(m^3/s)。

根据质量守恒定律, 恒定流时, 经过水管任何两断面1, 2的质量通量应相等, 即:

$$Q_{m,1} = Q_{m,2}$$

或

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (1-5)$$

对于不可压缩的流体, 即压力增大但密度仍可认为不变的流体, 由于 $\rho_1 = \rho_2$, 故可简化为:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \text{ 或 } Q_1 = Q_2 \quad (1-6)$$

式1-6是不可压缩流体恒定流的连续性方程, 公式尽管很简单, 但是各种液流必须遵循这一基本定律。可以看出, 流量恒定时, 断面平均流速和过水断面积成反比, 如果沿流程的过水断面增大, 流速必然相应减小, 反之亦然。

有时也用重量流量 Q_w :

$$Q_w = \rho g A v = \gamma A v \quad (1-7)$$

管网的节点连接两条或多条水管时, 连续性方程是指进入节点 i 的水的质量流量等于从节点流出的质量流量, 即:

$$\sum Q_{m,i} = \sum \rho Q_i = 0 \quad (1-8)$$

上式包括连接在节点 i 上的全部管段流量以及节点流量。这时须规定 Q_m 的符号，例如流入该节点的流量为负，流离时为正。

二、能量方程

流动的液体具有三种能量：因液体流动而具有动能，由于流体的高程和压力而分别具有位能和压能。

能量可理解为做功的能力，而功等于力与距离的乘积，所以能量的单位是 $N \cdot m$ 。纵使单位时间内通过某一断面的流速和压力不随时间变化，但能量将随时间增加，因为有更多的液体流过该断面，所以用单位质量液体所具有的能量来表示。由高程产生的单位质量液体的能量为 zg ， z 是在某一基准面以上的高程， g 为重力加速度。压力 p 产生的能量为 p/ρ 。单位质量液体的动能为 $\frac{v^2}{2}$ 。因此总能量等于：

$$E = zg + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (1-9)$$

1. 因高程产生的单位质量液体的位能

如液体的质量中心在基准面以上 z 处，这时，位能相当于液体从高度 z 处落下时所做的功。功等于重量（质量 \times 加速度）和距离 z 的乘积，或 mgz ，因此单位质量液体的能量等于 mgz 除以质量 m ，得 gz ，即为式1-9右边第一项。

2. 因压力产生的单位质量液体的位能

在压力圆管内放一活塞，因管内的水压使活塞移动某一距离。设作用在活塞上的平均压力为 p ，则活塞上的总压力为 pA ， A 为活塞面积。液体做功使活塞移动 l 距离所需能量等于 pAl ，做功液体的质量就是圆管中活塞移动距离内的液体质量，即 $m = \rho Al$ 。因此，由于压力产生的单位质量液体的位能为 $pAl/\rho Al = p/\rho$ ，即式1-9右边的第二项。

3. 单位质量液体的动能

任何运动物体的动能为 $\frac{1}{2}mv^2$ ， m 为物体质量， v 为速度。因此单位质量液体的动能为 $\frac{1}{2}v^2$ ，即为式1-9右边的第三项。

4. 单位质量液体的总能量

以上说明了圆管的某一断面上流过的单位质量液体的三种能量。应用到能量守恒方程中时，必须考虑流程中或管线中任意两过水断面之间的能量差。因液流有粘滞性，当液流通过固定壁或边界时，由于阻力而使液流的部分能量转化为热能，从水力学观点，后者是不能恢复的，这部分损失的能量用 E_i 表示。

管线上可能安装增压水泵，以供给能量于单位质量液体，所增加的单位质量机械能用 E_m 表示。

式1-9加上能量损失和输入的机械能以后，管流任意两个断面的能量守恒关系为：

$$E_1 + E_m = E_2 + E_i \quad (1-10)$$

如图1-1所示的管线，取断面1和2，据式1-9的关系，得：

$$gz_1 + p_1/\rho + \frac{v_1^2}{2} + E_m = gz_2 + p_2/\rho + \frac{v_2^2}{2} + E_i \quad (1-11)$$

在计算不可压缩的液流时，能量方程常和连续性方程结合使用。

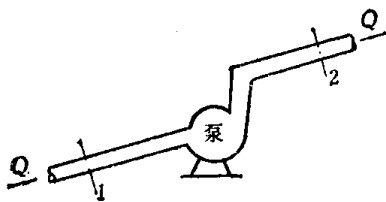


图 1-1 管线能量关系

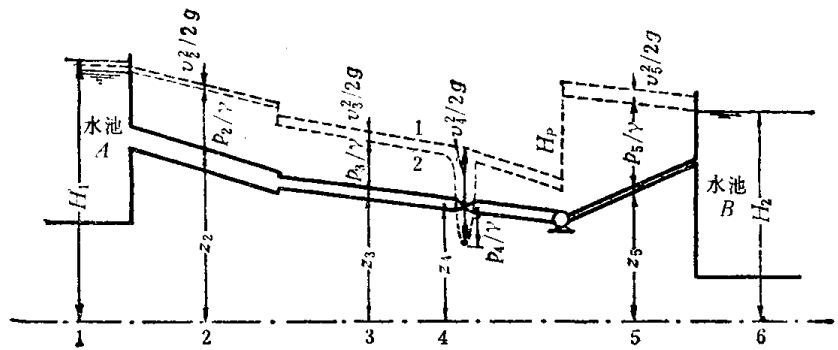


图 1-2 总水头线和测压管水头线示例

1—总水头线；2—测压管水头线

5. 单位重量液体的能量

式1-11的各项，其因次都是 FL/M ($N \cdot m/kg$)。应用质量和力的关系： $F = ma$ (ML/T^2) 代入式1-11后，每项的因次成为 L^2/T^2 (m^2/s^2)。

如将式1-11的各项除以 $g(L/T^2)$ ，则每项的因次为长度 L 。此时，式1-11可写成：

$$z_1 + p_1/\gamma + v_1^2/2g + H_p = z_2 + p_2/\gamma + v_2^2/2g + \Sigma h_f \quad (1-12)$$

式中 $H_p = E_m/g$ ——单位重量液体通过水泵后增加的能量；

Σh_f ——管线总水头损失。

上式各项的因次为长度 L ，故称为水头。 z 是单位重量液体在基准面以上的高程，称为位头； p/γ 表示测压管高度，称为压头； $v^2/2g$ 称为速头；都表示单位重量液体具有的机械能量。

$z + \frac{p}{\gamma}$ 称为测压管水头， $z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$ 称为总水头。与此相应，管线上各点的测压管水头和总水头的连线，分别称为测压管水头线和总水头线。沿流程任意两断面的总水头差值即为两断面间的水头损失。总水头线的斜率称为水力坡度，用 I 表示

$$I = \frac{dh}{dl} \quad (1-13)$$

式中 l ——流程长度 (m)；

h ——该流程中的水头损失 (m)。

知道了水力坡度，不仅可掌握水流情况，而且有助于理解和分析问题。有增压水泵的管线系统，其测压管水头线和总水头线如图1-2所示。

在水池A中，流速很小，可假设为零，水面上的相对压力为零（即大气压），因此总水头线位于水池的水面处。由于水管进口处的水头损失，管段起端的总水头线略低于水池的水面，但是下游水池B进口处的总水头线比水面高出 $\frac{v_5^2}{2g}$ ，这意味着速头 $\frac{v_5^2}{2g}$ 转化为水管出口的水头损失。

在压力管中，动水压力一般大于零，但如水管位置较高或管中流速过大，就可能出现负压，负压过大时，可使管壁因气蚀作用而受损。所以须绘出测压管水头线，以了解管线中压力的沿程变化情况。因测压管水头等于该断面的总水头减去速头，故须先绘出总水头线。因沿程水头损失，使总水头线逐渐下降，而在局部损失之处则总水头线突然下降。从

总水头线高程减去相应断面的速头，即得测压管水头线。自由出流时，测压管水头线通过出口管线的中心，淹没出流时则与下游水面相衔接。由于管线任一断面的中心与测压管线的垂直距离等于该断面的测压管高度，当断面中心高于测压管水头线时，管中即出现负压，两者的高差表示负压的大小。

图1-2的管线上任意两点的总水头线高程差，等于该段的水头损失。水泵增加的能量为 H_p 。总水头线和测压管水头线的高差表示速头。根据连续性方程，在管线断面缩小处，流速增大，速头相应增大，压头 p/γ 可能减小到负值。水力坡线下降到水管以下而出现负压。经过水泵加压后压力升高。位头 z 为任选基准面与水管中心线的高差。

在图1-2中，选出若干断面以说明伯努利方程的应用。

断面1~2之间：

$$H_1 = z_2 + p_2/\gamma + \frac{v_2^2}{2g} + h_{1-2}$$

断面3~4之间：

$$z_3 + \frac{p_3}{\gamma} + \frac{v_3^2}{2g} = z_4 - \frac{p_4}{\gamma} + \frac{v_4^2}{2g} + h_{3-4}$$

断面4~6之间：

$$z_4 - \frac{p_4}{\gamma} + \frac{v_4^2}{2g} - h_{4-6} + H_p = H_2$$

6. 单位重量液体的能量和功率关系

单位时间内电动机对水泵所作的功称为水泵轴功率。水泵给予单位重量液体的能量为 H_p ，而每秒钟通过水泵的液体重量为 γQ ，所以总能量为 $\gamma Q H_p$ 。由于液体通过水泵时有各种损失，所以水泵所做的功大于液体实际得到的总能量，用水泵效率 η 表示这一关系时，则电动机对水泵所做的功或水泵轴功率为：

$$N = \frac{\gamma Q H_p}{\eta} \quad (1-14)$$

轴功率 N 的单位是 W 。

三、动量方程

动量方程表示水流动量变化和作用力之间的关系。在工程实践中，可用来计算水流对弯管的作用力，以便求出支墩的尺寸。

动量是物体质量 m 和速度 v 的乘积。单位时间内液流在某一方向动量的变化，等于同一方向作用在液流上外力的合力。因此可表示为：

$$\Sigma \vec{F} = \frac{m \vec{v}_2 - m \vec{v}_1}{t} \quad (1-15)$$

式中 $\Sigma \vec{F}$ ——作用在物体上的外力总和；

t ——时间。

恒定流的动量方程为：

$$\Sigma \vec{F} = \rho Q (\alpha_2 \vec{v}_2 - \alpha_1 \vec{v}_1) \quad (1-16)$$

式中 α ——动量校正系数，一般取 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ 。

上式说明，只要知道某一恒定液流的流量、流入和流出的流速，就可算出作用的外力。