



高等学校教材

# 流体输送

武汉水利电力学院 刘光临 编



368924

高等学校教材

# 流 体 输 送

武汉水利电力学院 刘光临 编



水利电力出版社

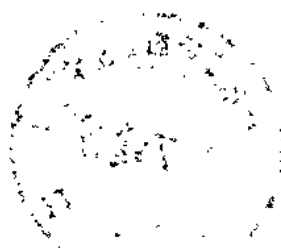
(京)新登字115号

### 内 容 提 要

本书为高等学校机电排灌工程专业通用教材。全书共分七章,第一章至第四章主要讲述流体输送的发展及其特点、流体输送的基础理论、复杂管道系统和流体过渡过程分析。第五、六章分别讲述固体物料的水力输送和气力输送,重点阐述固液、固气两相流体输送中流动的状态、管道压力损失及系统的设计方法。第七章讲述流体输送在火电厂煤灰输送中的应用。

本书也可供给水排水工程专业、水力机械工程专业、热能动力工程专业师生和有关专业工程技术人员参考。

016.61



高等学校教材

流体输送

武汉水利电力学院 刘光熙 编

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京四季青印刷厂 印刷

\*

787×1092毫米 16开本 16印张 363千字 1插图

1993年6月第一版 1993年6月北京第一次印刷

印数 001— 990 册

ISBN 7-120-01780-2/TV·637

定价4.20元

# 前 言

近三十年, 流体输送已逐渐发展成为一门新的学科。流体输送紧密地与水利电力、土木建筑、流体机械、石油化工、冶金采矿等相关联, 输送的流体种类繁多, 系统亦日趋复杂。输送的流体除水、油、空气等之外, 还采用固液两相流、固气两相流和多相流的方式输送。不少生产实践证明, 这是一种技术可靠、经济效果良好的输送方式。随着生产的发展和现代化程度的提高, 流体输送的规模愈来愈大, 功能愈来愈多, 对系统规划设计及运行管理的可靠性和技术经济方面的要求亦愈来愈高。

为了适应生产的需要, 同时为了拓宽水利水电工程专业和给水排水工程专业大学本科学生的知识面, 介绍新的科研及生产技术成果, 特编写本教材, 同时也希望本书可用作有关专业研究生及从事流体输送设计及运行管理人员的参考书籍。

本书在编写过程中, 并不企图包罗全部所有的流体输送的理论和内容, 也不图在深度和广度方面概括无遗, 所考虑的问题在某种程度上是迄今为止有关专业的水泵及水泵站课程所未涉及到的范围和领域, 即抽送的流体不仅是水, 而且拓宽到其他流体和多相流, 管道系统亦由简单管道延伸到复杂管网。由于输送的流体和管道系统的复杂化, 因而使流动的状态和系统的设计带来一些新的技术问题。本书力图研究和讨论这些具有一般性而且对工程设计非常重要的基本理论及计算方法。

本书共分七章, 前四章主要介绍单相流体的输送, 也可作为多相流体输送的基础, 后三章分别介绍固体物料的水力输送和固体物料的气力输送, 其中第七章作为专题, 介绍火力发电厂灰渣的水力输送与气力输送的有关技术问题。在各章的编写中, 既考虑了其相互的联系, 又使其各自具有一定的独立性, 避免了各章内容与概念的重复, 同时也便于读者选择自己急需的内容分章阅读。

本书承蒙李继册教授审阅, 在此谨致以衷心的感谢。同时还非常感谢张天存(水利部第十三工程局)、方蔚林(西南电力设计院)、何士杰(石家庄水泵厂)三位高级工程师的热心帮助, 为本书的编写提供了他们的经验和技术资料。

由于时间仓促, 加上作者水平有限, 本书疏漏和错误之处必将难免, 请读者批评指正。

作 者

1990年10月

# 目 录

## 前言

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第一章 绪 论 .....               | 1   |
| 第一节 流体输送的定义及其发展 .....       | 1   |
| 第二节 流体输送系统的形式及特点 .....      | 3   |
| 第三节 流体输送系统的设计原则 .....       | 5   |
| 第二章 流体输送的基础理论及其应用 .....     | 8   |
| 第一节 流体沿管线流动的基本方程 .....      | 8   |
| 第二节 流体的沿程阻力损失 .....         | 13  |
| 第三节 简单管道系统的水力计算 .....       | 22  |
| 第四节 液体输送的设计计算 .....         | 27  |
| 第五节 气体输送的设计计算 .....         | 35  |
| 第六节 管道与阀门 .....             | 38  |
| 第三章 复杂管网系统 .....            | 46  |
| 第一节 管网及流量分配 .....           | 46  |
| 第二节 管网计算的基础方程及计算方法 .....    | 49  |
| 第三节 流量平差法 .....             | 52  |
| 第四节 节点压力法 .....             | 65  |
| 第四章 流体过渡过程分析 .....          | 74  |
| 第一节 基本方程及其解法 .....          | 74  |
| 第二节 特征线法 .....              | 76  |
| 第三节 事故停泵过渡过程计算 .....        | 86  |
| 第四节 液柱分离 .....              | 105 |
| 第五节 复杂管网系统流体过渡过程 .....      | 107 |
| 第六节 输油管道中的流体过渡过程 .....      | 114 |
| 第五章 固体物料的水力输送 .....         | 118 |
| 第一节 固液混合物的基础知识 .....        | 118 |
| 第二节 固液两相流的流动性质 .....        | 124 |
| 第三节 固液两相流的临界流速及水力输送流速 ..... | 134 |
| 第四节 管道水力输送的压力损失 .....       | 138 |
| 第五节 固液混合浆体输送泵 .....         | 145 |
| 第六节 泵与管道的腐蚀与磨损 .....        | 153 |
| 第七节 固体物料的水力输送系统 .....       | 158 |
| 第六章 固体物料的气力输送 .....         | 175 |
| 第一节 气力输送的理论基础 .....         | 175 |

|     |                     |     |
|-----|---------------------|-----|
| 第二节 | 固体物料在管道中的运动 .....   | 182 |
| 第三节 | 物料在管道中的压力损失 .....   | 187 |
| 第四节 | 输送功率及输送效率 .....     | 196 |
| 第五节 | 输送气流速度及料气输送比 .....  | 199 |
| 第六节 | 气力输送系统的形式及其组成 ..... | 206 |
| 第七节 | 气力输送系统的主要设备 .....   | 213 |
| 第八节 | 气力输送系统的设计 .....     | 217 |
| 第七章 | 专题——火电厂除灰系统 .....   | 227 |
| 第一节 | 火电厂除灰系统的组成 .....    | 227 |
| 第二节 | 水力除灰系统 .....        | 235 |
| 第三节 | 气力除灰系统 .....        | 242 |

# 第一章 绪 论

## 第一节 流体输送的定义及其发展

流体输送系指利用泵、风机等流体机械及管道系统进行各种流体输送的技术。除输送水、气、油等一般性流体外，还广泛应用于输送固气、固液、气液混相流体和多相流体，它通常由输送机械设备、管道及其他辅助设备、监测控制系统等组成。

提高流体压能和位能的机械为泵和风机。输送的流体是液体时叫做泵，是气体时叫风机。泵和风机是建立在流体力学基础上的，所以又称作流体机械。泵与风机是国民经济各个部门使用最广泛的通用机械。

### 一、一般流体的输送

泵和风机是人类使用最早的机械。最初人们利用水车提水灌溉农田。由于冶金业的出现，开始应用了风箱，随后又出现了风车。18世纪到19世纪中叶，由于汽轮机的发明与采矿、钢铁工业的发展，出现了比较完善的利用蒸汽作用的往复式水泵与风机，也就在这一时间，欧拉提出了离心式泵与风机的基本方程式，随后出现了离心泵与离心风机。但是，这些泵与风机由于缺乏高速转动的动力机，较长时间没有得到广泛应用。到了19世纪末，由于高速动力机的出现，以及流体力学、材料力学、机械制造工艺方面的迅速发展，为泵和风机的应用提供了良好的条件，流体输送技术也相应取得了巨大的发展。

现在，流体输送已广泛应用于水利电力、城市给排水、工业供水、石油化工、冶金、采矿、土木建筑、食品加工等国民经济各有关部门。

在城市给水排水、农业机电排灌、工业供水系统中，用泵和管道将水送至高处或远处，这类系统根据供排水的目的和要求，泵与管道系统的规模越来越大，管网系统越来越复杂。整个工程主要由泵站和管道组成。在城市给水工程中，管道工程占整个工程的投资有时可达80%。在农业灌溉中，随着各种先进灌溉技术的发展，已经在农田中逐步采用管网化的灌溉技术，由泵和管道组成节水节能、便于管理、规模庞大的合理农业用水管理系统。为了解决降水量时空分布的不均，合理利用水资源，世界各国都规划了大规模的跨流域调水系统，设计、制造并使用了大型的水泵装置。

在热电厂，泵与风机象人的心脏一样，维持着电厂中各种介质的循环，烟气的排出，燃烧需要空气的供给，循环冷却水，锅炉水的供给等等都靠泵及风机进行流体输送来实现。热电厂是依靠流体介质的循环来实现热功转换的，因此流体输送在电力生产中起着重要的作用。

用管道输送石油、天然气也得到广泛应用。早在1865年，美国就兴建了世界上第一条石油输送管道系统，之后又在1880年兴建了一条输送天然气的管道，世界各国也相继进行了研究和开发，已经成为一种比较常规的输送方式，而且距离可达数千公里。

## 二、固体物料的水力输送

固体物料的水力输送是近百年开始采用，近三十年迅速发展起来的流体输送技术。早在1891年，美国在沃华斯·安得留新建了世界上第一条水力输煤管道，之后，英国开始用管道输送煤和石灰石。50年代以后，研究固体物料水力输送的国家有所增加，年输送量也有所增多，输送管径和输送距离也有所增大。例如美国、英国、苏联、法国、澳大利亚、日本、加拿大、南非等都大力开展了固体物料水力输送的研究和开发。70年代以后是管道水力输送发展的兴旺发达时期，据不完全统计，全世界已有23个国家开发了固体物料水力输送技术，输送固体物料的品种达25种之多，年输送量达5000万t以上，最大输送管径达965mm，最大输送距离增长到2200km，全世界范围内已建成并投入正常运行的长距离水力输送管道超过100条，总输送距离超过20000km，其中以美国、拉丁美洲、波兰、加拿大、南非、苏联和澳大利亚等国较多。实践证明，固体物料的水力输送技术安全可靠，经济效益显著，已经从人们的兴趣而又可能冒险的状况，迅速发展到有能力和代替常规的输送方式并以惊人的速度迅速地完善与发展。

美国水力输送系统在世界居首位，除了输送的固体物料品种多，包括煤、磷矿石、石灰石、陶瓷土、碳酸钾、灰煤、精铜矿、精铁矿、钛矿等，而且输送量大，其中1979年投入运行的埃特西输煤管道，长1640km，管径965mm，年输送能力2500万t。据统计，到了1986年，美国已建成的7条大型输煤管道系统，总运距达11000多km，年输煤量达1.46亿t。

波兰的输煤管道发展也很快，其中1979年开始兴建的卡托维兹输煤管道，输送距离长达800km。法国、苏联、南非、日本、英国都已建成大型的固体物料输送系统。

在燃煤火力发电厂中，有的直接将煤用水力输送到电厂，有的将燃烧后的灰渣，采用水力输送将灰渣送到灰场，水力输送技术也得到广泛应用。另外，在水利、航道疏浚工程中常用管道水力输送泥、砂，用于清淤、地基开挖、吹填施工，食品工业用管道水力输送各种颗粒状食品，造纸工业用管道输送纸浆等等。随着工业生产的发展，固体物料水力输送在世界各国工业建设及能源开发中，将愈来愈显示其远大的生命力。

## 三、固体物料的气力输送

固体物料的气力输送虽然很早就被采用，如用气力输送邮件、砂、棉花等，但真正作为一种输送方式，特别是气力高浓度输送还是近二三十年迅速发展起来的。1924年德国葛斯（Gasterstabt）创立了空气输送理论，使气力输送技术发展异常迅速。1962年西德葛泰（Gatitys）公司研制了低速高浓度的内重管式气力输送装置；另外日本研制了成栓器脉冲式、球式气力输送装置等，使气力输送技术日臻完善，受到世界各国的普遍重视。

近些年来，不仅在工厂车间内部及建筑、铁路、船航的运输作业中，对各种粉末状、颗粒状、纤维状和叶片状的固形物料，如面粉、水泥、谷物、煤、石灰、灰渣、化肥、型砂、棉花、羊毛、烟丝、茶叶等，越来越广泛地采用了气力输送的方式，而且已经广泛应用于各类工业系统。特别是集装化气力输送的应用及其显著的优越性，使气力输送技术又有了新的发展。苏联采用筒车气力输送系统运送矿石，管线长达50km，年运输量达200万t。美国正在设计长达640km，用来输送旅客和货物的气力输送系统。

总之，人们对于空气动力作用输送的技术有了巨大的发展，随着输送对象的范围不断扩大，装置的结构愈来愈完善，装置的形式更是层出不穷。由于近代气力输送突飞猛进的发展，促使理论研究不断深入，逐步形成了初步完整的气力输送体系，气力输送是一种正在发展的输送技术，其前景未可限量。

## 第二节 流体输送系统的形式及特点

### 一、流体输送系统的形式

流体输送的范围很广，形式多种多样，根据输送流体的种类、输送的方式、管道的形式及其压力范围可以分成以下几种类型。

#### （一）按照输送流体的种类分类

##### 1. 水、空气和一般粘性流体的输送

水、空气和一般粘性流体是指在牛顿流体范围内的各种流体，也是工业生产和人们日常生活中广泛应用泵和风机进行输送的流体，液体以水为代表，气体以空气为代表。

##### 2. 非牛顿流体的输送

高分子流体、乳浊液、悬浊液等复杂内部构造的流体，不遵循牛顿法则，从广义上称之为非牛顿流体，非牛顿流体呈现出复杂的流变特性。

##### 3. 多相流体的输送

多相流体的输送是流体输送的重要分支，最通常的是固液两相流、气液两相流和固气两相流的流体输送。如矿石粉粒体的气力输送是固体粉粒体与空气的两相流，煤的水力输送是煤的颗粒与水的两相流。

由于输送的流体种类繁多，有些内容在其他有关的专门书籍中已经介绍，本书对于一般性流体，主要研究复杂管网系统的设计及计算问题，对于多相流体，主要研究固体物料的水力输送及固体物料的气力输送问题。

#### （二）按照输送方式分类

由于液体和气体的性质、密度、压缩性的显著不同，液体输送用泵，气体输送用风机，其输送方式也各不相同。

##### 1. 液体（包括固液二相流）的输送方式

（1）重力式输送 这种输送方式，沿着自然的地形，利用液体重力落差进行输送。通常又分为无压自流和静压自流两种。

1）无压自流式。通常采用矩形槽自流输送。

2）静压自流式。采用管道输送，在管道起点设立压力井，在静水压力作用下输送。

（2）压力输送方式 液体或固液混合物借助泵的压力用管道输送。

城市给排水、工业供水、机电排灌等都采用压力输水方式。为了适应不同的压力和进行长距离、高扬程、大流量的输送，这类输送系统常采用多台泵串联或并联工作。同时为了稳定压力，防止不稳定流动形态造成事故，在输送系统中又常设置水塔，调压池等，并且构成复杂的管网。

在固液两相流的输送系统中，一般有专门的固液混合槽，其输送方式有低浓度输送和高浓度输送两种方式，相应配有浓缩或脱水设备。浓缩设备广泛使用浓缩机，可使固水混合物的浓度达40%~70%，有助于提高水力输送系统的经济性。

(3) 混合输送方式 输送系统中包括有重力输送和压力输送两种方式，或先重力输送后，再由泵加压进行长距离输送；或先由泵加压使液体达到某一高程，再由重力自流输送到目的地。

## 2. 气体（包括固气二相流）的输送方式

(1) 吸送式 引风机械装在系统的末端，当风机运转后，整个系统形成负压，这时的管道内外存在压差，空气被吸入管道，因此，习惯上又称作负压式。

固体物料气力输送时，在管道吸入口将固体物料吸入管道形成固气二相流体输送，到达输送目的地时，固气混合物输送至分离器，在分离器中，物料与空气分离，被分离的物料，由分离器底部的旋转出料器卸出。空气被送到除尘器净化，净化后的空气经风机排入大气或循环使用。

(2) 压送式 风机装置在系统的首端加压输送，习惯上又称作正压式。

这种系统用于输送固气二相流时，系统比吸送式复杂。由于风机装在系统的前端，因此物料很难自由地进入管道，必须用密闭式加料装置，当风机开动后，管道内的压力便高于大气压力，这时物料由料斗经专门的旋转加料器加入管道，随即被压缩空气压送，由管道送至分离器中，在分离器中，物料与空气分离，并由旋转出料器卸出空气再经除尘器净化后排入大气。

## (三) 按管道的形式分类

### 1. 简单管道系统

一般为一条管道直接输送的系统，长距离输送物料的水力输送系统或气力输送系统一般由一条干管沿地形铺设，用泵或风机加压输送。当距离较长时，中间应设增压设备增压，确保输送流量和压力的要求。

### 2. 复杂管道系统

城市供水、工业供水、供气管道经常是复杂的管道系统。根据管道的组合方式又分成树枝状管网和环状管网。

树枝状管网的干管与支管依次相连，流体由干管沿支管流到末端，从配流源向下游按一定的方向流动。

环状管网的管道连成环状，干管分支成支管，支管与支管又互相连接，流体根据压力变化可沿管道正反两个方向流动。

## (四) 按管道的压力分类

### 1. 高压管道输送系统

根据管道的压力，通常将管道中最大静压超过 $7 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的称为高压管道，在高压输送系统中，泵、风机、管道附件的强度及承受能力都有较高的要求。

### 2. 中低压管道输送系统

管道中最大静压小于 $7 \times 10^5 \text{ Pa}$ 称作中低压管道系统。

## 二、固体物料水力输送和气力输送的特点

### 1. 输送能力大、适应范围广

固体物料的水力输送和气力输送都有很大的输送能力。水力输送更适应于远距离的固体颗粒状物料的输送,而气力输送特别适用于工厂内部输送,可将输送过程与工艺过程相结合,简化工艺过程和设备。

固体物料的流体输送是使空气(或其他气体)或水在管道内的流动,将固体物料沿着指定的路线进行输送,因此更适合于交通不便,客观条件用其他方式输送不便的条件和环境,管道可以越过高山、洼地,允许坡度大,对复杂的地形适用性强,而且对气候不敏感,受风沙雷雨的影响小。

### 2. 输送成本低,工程投资省

流体输送与机械输送相比,生产效率高,设备构造简单,节约人力、物力,经济效益明显。

据国外有关文献提供的资料,水力运输成本是年运输量和运送距离的函数,大直径长距离的水力管道运煤的成本与航运相当,比铁路运输低得多,而且运距也短。以年运煤2500万t计,输送相同的距离,每1600km的管线运输,铁路运输要比管道运输的距离长580km左右,铁路需要的劳力相当于管道运输的7.5倍;30年运行期的钢材需要量,铁路运输相当于管道水力输送的1.8倍,相对的一次性能源费用,铁路为管道的1.5倍。

气力输送的设备构造与水力输送相比较为简单,它不需要消耗水,无末端的排水处理问题,输送后的物料无需脱水处理,因此一些不宜采用水力输送的物料均可采用气力输送。其缺点是消耗的动力较大。

### 3. 占地面积小,无环境污染

许多工业矿石、灰渣及化工原料,都含有污染物质,采用机械输送,装卸、运输过程等都容易造成环境污染,对周围的环境带来危害,而流体的管道输送,占地面积小,无环境污染。

### 4. 技术安全可靠,便于自动化管理

固体物料的水力或气力输送,可采用仪表自动监测控制实现无人操作和自动化。

已建成的水力输送和气力输送系统的运行实践表明,设计合理的系统,年工作保证率一般都高于设计保证率95%,例如美国黑密萨水力输煤管道系统,全长440km,年输送能力4800万t,自1970年建成以来,年工作保证率达到99%以上。

## 第三节 流体输送系统的设计原则

### 一、设计基本原则

流体输送系统的设计必须充分对系统的目的、输送流体的特性以及现场条件,技术要求等充分调查后,根据经济性,安全性的要求进行合理设计。

一般应考虑以下基本原则:

- 1) 充分保证输送流体的流量和压力的要求。对于水、空气和一般性流体的输送,应

根据输送流体的种类、特性以及流量和压力要求，合理地选择泵和风机，选配合适的管道系统和确定管道直径。

对于固液、固气两相流体的输送，由于固体物粒的粒径、浓度、比重等对输送系统的影响极大，还应通过试验和计算分析，选定合适的浓度，配套相应的输送设备，以确保系统的安全。

2) 系统的工程建设费及运行费的经济性。要求设备和土建工程费用省，长年运行费用少，工程经济合理。

系统的经济性应对整体进行全面的动态分析，如输送设备及管道工程的费用，应结合确定经济管径，并由此计算管道的损失压头，从而选择合适的泵与风机。泵与风机应长期工作在最高效率点的附近，并满足各种运行条件的要求。

在确定输送方案、选定输送管线时，还应结合对地形、地质以及其他社会条件进行总体的规划与布置，进行多种方案的经济比较。

对于固液、固气两相流体的输送，应根据输送的目的确定最佳输送浓度与输送流速。

3) 系统的安全可靠性及合理性。流体输送系统的设计，应确保系统运行的安全可靠，运行稳定。特别对于由于泵与风机的启动、停机、阀门启闭等引起流速急骤变化的瞬变流体过渡过程，应进行计算分析，采用相应的措施。应防止系统中可能出现的汽蚀、腐蚀和磨损现象。为了确保运行的安全，还应考虑配备适量的备用机组。

对于固气、固液两相流体输送系统还必须严格控制流体的粒度和浓度，以确保系统稳定，防止管道阻塞。

4) 保护周围环境，防止噪音、尘埃与其他环境污染。根据输送的流体性质，应采用相应的技术措施，在工程设计时，应对泵和风机的噪音进行预测，根据国家规定采取相应的技术措施，另外，固液、气液两相流体输送的首末端应防止流体中的固体物料对环境的污染。

## 二、设计的步骤

大中型流体输送工程的设计，一般应按以下步骤进行。

### 1. 流体输送系统的规划

根据流体或固体物料的输送目的和要求，在对地理、地质、资源、水文、气象以及其他社会条件充分调查的基础上，进行可行性论证，提出规划报告，包括以下内容：

- ①建设项目的必要性及其依据；
- ②拟建的规模及流体输送方案的初步设想；
- ③建设条件的初步分析；
- ④投资估算及技术性经济性分析；
- ⑤经济效果和社会效益的估计。

在进行上述可行性分析后，应对各种方案比较后选择最佳方案。

### 2. 流体输送系统的初步设计

在可行性论证得到有关主管部门批准后，应提出设计任务书，进行系统的初步设计，提出流体输送系统的设计说明书和主要设计图纸。

初步设计应包括以下主要内容:

- ①流体输送系统方案的比较及其相应的技术经济指标, 工程规模的确定;
- ②选定方案的设计计算, 包括管道系统的流体及压力分布计算, 泵与风机的选择, 非定常流的计算等计算书;
- ③主要工艺流程的主要构筑物的选择及辅助设备, 供配电系统、自动控制仪表的选择;
- ④工程总体布置图, 枢纽工程布置图及主要工艺流程图, 管道控制纵断面图, 配电系统图等主要技术图纸;
- ⑤建设工程量及经费的概算;
- ⑥环境保护及与周围环境协调的技术措施;
- ⑦建设工程的进度计划;
- ⑧经济效益和社会效益。

### 3. 流体输送系统的技术设计

技术设计应根据批准的初步设计进行, 应满足施工安装的要求。

技术设计应在对初步设计的计算以及提出的设计图纸、工程概算进一步校核和论证的基础上, 进行必要的充实、修改和补充, 然后提出技术设计阶段的设计图纸、设计说明书和预算, 作为工程施工的依据。

## 第二章 流体输送的基础理论及其应用

本章主要介绍与流体输送有关的管道流体力学的基础理论及一些重要的设计计算。流体力学是一门具有广泛而深邃研究领域的学科。这里不可能对流体力学的理论及有关管道流动方面的研究作全面的介绍, 仅就工程设计密切相关的内容进行论述。希望读者通过学习能熟悉和掌握一些基础知识, 同时对物理意义有清晰的了解, 能够进行一般流体的有关设计计算。关于固液、固气两相流的有关问题, 将在第五章和第六章进一步研究。

### 第一节 流体沿管线流动的基本方程

水、空气和一般性流体沿管线的流动, 主要着眼于速度、压力和密度的平均值, 可看作一维流动, 其流动的特性, 遵循连续性方程和运动方程。

#### 一、连续性方程

根据质量守恒原理和定常流的假定, 由流管的某一断面①流入的流体的质量, 应等于另一断面②流出的流体质量。应该注意的是在两断面间的流管内如有集蓄引起质量的增减, 则不符合定常流的假定。

设管道断面为  $A$ , 平均流速为  $u$ , 则通过断面的流量为:

$$\text{体积流量} \quad Q = Au$$

$$\text{质量流量} \quad \dot{m} = \rho Q = \rho Au$$

因此, 根据质量守恒原理, 对于断面①和断面②, 有以下关系成立

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (2-1)$$

$$\text{或} \quad \rho_1 A_1 u_1 = \rho_2 A_2 u_2 \quad (2-2)$$

$$\text{即} \quad \dot{m} = \rho Au = \text{const} \quad (2-3)$$

式中,  $\dot{m}$  表示质量流量,  $Q$  表示体积流量,  $\rho$  表示流体的密度。

式(2-2)和式(2-3)称作流体的连续性方程。

对于水及其他液流, 可视作不可压缩流体, 其密度的变化可忽略不计, 连续性方程可写作:

$$A_1 u_1 = A_2 u_2 \quad (2-4)$$

$$\text{或} \quad \dot{m} = Au = \text{const} \quad (2-5)$$

#### 二、能量方程

采用能量守恒原理, 可推导出适合于管流的运动方程。设选定管道前后两断面①与②之间的管道与外界没有任何形式的能量交换, 而且流动是稳定的, 根据能量守恒原理, 单位

质量流体的总比能应当相等。

通过断面①的单位质量流体所具有的能量如下所示：

①单位质量流体的动能  $\frac{u_1^2}{2}$ ；

②单位质量流体的位能  $gz_1$ ， $z_1$ 表示断面①的高程；

③单位质量流体的压能  $P_1/\rho_1$ ；

④单位质量流体的内能  $U_1$ 。

单位质量流体的内能 $U_1$ 表示与速度和几何高度无关的液体本身具有的能量，仅仅取决于温度和压力的状态。

由管道的连续性原理，流管的质量流量 $\dot{m}=\rho Au$ 等于常数，即由断面①流入的质量流量等于断面②流出的质量流量。

实际上，由于流体的粘性作用，流体内部将产生摩擦损失，设其比能为 $h$ ，则由能量守恒定律，可写出以下形式的能量守恒方程

$$\dot{m}\left(\frac{u_1^2}{2}+gz_1+\frac{P_1}{\rho_1}+U_1\right)-\dot{m}hg=\dot{m}\left(\frac{u_2^2}{2}+gz_2+\frac{P_2}{\rho_2}+U_2\right) \quad (2-6)$$

因此得到以下形式的能量方程

$$\frac{u_1^2}{2}+gz_1+\frac{P_1}{\rho_1}+U_1=\frac{u_2^2}{2}+gz_2+\frac{P_2}{\rho_2}+U_2+hg \quad (2-7)$$

式(2-7)是在满足定常流条件下，对于压缩性流体和不可压缩性流体都普遍成立的能量方程的一般形式。

### 1. 液流的能量方程

液体在稳定流动状态中可视为不可压缩流体。对于不可压缩流体，在外力作用下体积变化可忽略不计，没有保持体积弹性的能力，因此其内部能量与压力无关。在管道流动中温度的变化也很小，因此比内能 $U$ 的变化可忽略不计，式(2-7)可以改写成：

$$\frac{u_1^2}{2}+\frac{P_1}{\rho}+gz_1=\frac{u_2^2}{2}+\frac{P_2}{\rho}+gz_2+hg \quad (2-8)$$

式(2-8)表示液流的能量方程，习惯上称作伯努利方程，也可写作

$$\frac{u_1^2}{2g}+\frac{P_1}{\gamma}+z_1=\frac{u_2^2}{2g}+\frac{P_2}{\gamma}+z_2+h \quad (2-9)$$

式中， $\gamma=\rho g$ 为液体的重度。

下面讨论能量方程的实际意义。

1) 流体力学意义。流体能量方程中的各项从流体力学的角度来看都可以用相应的能头高度来表示，其中 $z$ 项，表示液体质点在基准面以上的位置高度，通常称作位置能头。 $P/\gamma$ 项是用液柱高度表示的液体动压力，称作压力能头，相当于测压管在液体压力 $P$ 作用下沿测压管液体上升的高度。 $u^2/2g$ 项为速度能头。

压力能头与位置能头之和叫测压管能头，用 $H_p$ 表示，即

$$H_p = \frac{P}{\gamma} + z$$

测压管能头与速度能头之和叫液流的总能头，用 $H$ 表示，即

$$H = \frac{u^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} + z$$

因此对于理想液体，任何过流断面上的总能头皆为常数。

对于实际液体而言，液流某一过流断面的总能头等于下游另一过流断面总能头加上这两个断面之间的阻力损失。

2) 几何意义。由以上分析可以看出，能量方程中各项的单位都是长度单位。因此方程中的总能头可以用几何图形清晰地表示出来。

由式(2-9)等式两边除以管道断面①与②之间的几何长度 $L$ ，可得：

$$i = \frac{\left(\frac{u_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1\right) - \left(\frac{u_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2\right)}{L} = \frac{h_w}{L} \quad (2-10)$$

式中， $i$ 称作能量坡度，表示液流单位长度上能头降落量，如图2-1所示。

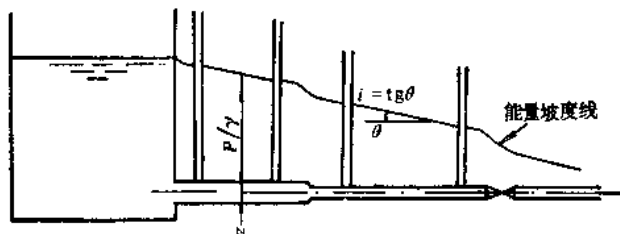


图 2-1 能量坡度线

实际液流的总能头线总是顺着流动方向下降倾斜的，总能头线和水平线相差的高度即为两断面间管道的阻力损失 $h_w$ 。

## 2. 不可压缩气体流动的能量方程

对气体来说，温度和压力的变化对密度影响较大，故气体是可压缩和可膨胀的，但在某种条件下，当气体处于压力和温度不变或变化很小的状态时，气体的密度不发生变化或变化很小，因而可将气体看作不可压缩流体。在工程上，一般认为压力差在 $5 \times 10^4 \text{Pa}$ 以下，可以看作是不可压缩的气体，即输送过程中密度恒定不变。

不可压缩气体流动的能量方程与液流的能量方程式(2-9)具有相同的形式。通常用下式表示：

$$\left(\rho g z_2 + P_2 + \frac{\rho}{2} u_2^2\right) = \left(\rho g z_1 + P_1 + \frac{\rho}{2} u_1^2\right) + \Delta P_s$$

式中， $\Delta P_s$ 为管道断面②与断面①之间的压力损失。

### 3. 可压缩气体的能量方程

研究气体在管道中流动的能量方程时, 假定管道是不传热的, 并且流动是稳定的。因此在选定的控制体1-1与2-2之间的流体所具有的能量不随时间变化, 于是按照能量守恒定律, 单位质量的流体从断面1-1流入所具有的能量应等于同一时间内单位质量的流体从断面2-2流出所具有的能量。

单位质量流体所具有的能量, 除了包括液体运动时具有的各项机械能, 即动能、位能和压力能外, 还必须包括流体的内能。在液体的流动中, 内能的变化是极小的, 所以在前面液体的能量方程式中没有计及内能的改变。但由工程热力学中知道, 在流体的流动过程中, 流体的内能变化是很大的, 所以不能不加以考虑, 因此单位质量流体所具有的总比能  $e$  为:

$$e = \frac{u^2}{2} + \frac{P}{\rho} + gz + U \quad (2-11)$$

式中, 右边前三项分别为单位质量流体所具有的单位动能、单位压能及单位位能, 最后一项  $U$  为流体的单位内能。

现在来讨论内能的计算。在管流中, 流体的容积不变, 由工程热力学可知, 单位质量定容流体所具有的内能  $U$  与流体温度  $T$  的关系为:

$$U = C_v T \quad (2-12)$$

式中,  $C_v$  为流体的定容比热, 随温度和压力而定, 通常可近似看作常数。

根据流体状态方程 ( $P/\rho = RT$ ), 可得:

$$T = \frac{P}{\rho R} \quad (2-13)$$

将式 (2-13) 代入式 (2-12), 则得:

$$U = \frac{C_v}{R} \times \frac{P}{\rho} \quad (2-14)$$

由热力学可知,  $R = C_p - C_v$ , 代入上式, 则得:

$$U = \frac{C_v}{C_p - C_v} \times \frac{P}{\rho}$$

因为绝热指数  $k = \frac{C_p}{C_v}$ , 所以

$$U = \frac{1}{k-1} \times \frac{P}{\rho} \quad (2-15)$$

以上各式中,  $C_p$  为定压比热,  $R$  为气体常数,  $k$  为绝热指数。

将式 (2-15) 代入流体运动的能量方程式 (2-7) 中, 得到:

$$\frac{u_1^2}{2} + gz_1 + \frac{k}{k-1} \times \frac{P_1}{\rho_1} = \frac{u_2^2}{2} + gz_2 + \frac{k}{k-1} \times \frac{P_2}{\rho_2} \quad (2-16)$$

式 (2-16) 表示了流体绝热运动时的能量平衡方程式。它表明, 在流体的绝热稳定流动中, 任何两个过流断面上单位质量的流体所具有的总能量不变。流体的能量方程式不仅