

SULIGE QITIAN TIANRANQI
JISHU XINJISHU

苏里格气田 天然气集输新技术

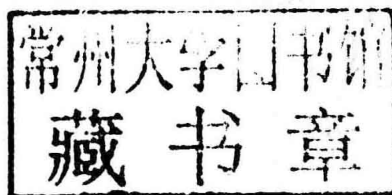
© 韩兴刚 冯朋鑫 编著



石油工业出版社

苏里格气田天然气集输新技术

韩兴刚 冯朋鑫 编著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书以介绍天然气集输新技术为主,同时对天然气田各类集输技术进行了比较系统的论述,内容包括地面集输工艺技术、油气多相计量、污水处理技术、信息系统建设和注水工艺技术等。

本书可供天然气田集输工程专业技术人员参考,亦可作为高等院校相关专业师生的学习参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

苏里格气田天然气集输新技术/韩兴刚,冯朋鑫编著.
北京:石油工业出版社,2015.7

ISBN 978-7-5183-0740-1

I. 苏…

II. ①韩…②冯…

III. 天然气-油气集输-技术

IV. TE86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 157060 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部: (010) 64523537 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 13

字数: 328 千字

定价: 50.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

截至 2014 年底，我国最大气田——苏里格气田累计产气突破 $1000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。苏里格气田天然气已覆盖包括北京、天津、西安在内的全国 40 多个大中型城市，惠及 2.5 亿人。

苏里格气田属典型的低渗、低压、低丰度气田，开发难度很大。8 年来，长庆油田通过科技和管理创新，气田规模日益扩大，气田产量逐年攀升。自 2007 年底日产气量突破 $1000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以后，平均每年以近 $1000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 速度递增，2013 年底，气田年产气量突破 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，成为我国年产气量最大的整装气田。截至 2014 年底，苏里格气田共建气井 7989 口、集气站 135 座、骨架干线 28 条，建成天然气处理厂 6 座，年集输处理能力达 $280 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

苏里格已步入现代化大气田建设的新时期。“大油田管理，大规模建设”的时代要求给原有的管理体制、建设标准等提出了严峻挑战。苏里格气田推行“标准化设计、模块化建设、数字化管理”的建设模式，这也是长庆油田在油气田建设史上进行的一场革命。

苏里格气田地质条件差，大多数区块是低渗透和超低渗透气田，这给生产带来很大的困难。为此，针对这种地质条件，大力开展科学研究，发展和引进新工艺、新技术，在低渗透气田的生产中做出了很大的成绩。

苏里格气田和大专院校、科研单位一起承担了气田集输技术研究方面的各种科研项目，这些研究成果解决了生产中的一些难题，促进了气田生产的发展，对气田开发做出了较大成绩。

本书是作者多年来从事苏里格气田工程技术研究的成果总结，也是苏里格气田和国内外气田一些地面集输工程技术最新技术的总结。

本书主要介绍苏里格气田集输新技术，内容涉及以下几个方面：天然气管道内流体流动与热力学特性，其中包含天然气管道内流体流动基本方程、天然气管线的压力降计算和热力学的焓熵概念；天然气集输系统，其中包含天然气集输系统数字化和模块化、天然气集输管网优化设计、天然气集输工艺新技术、天然气集输系统节能新技术；天然气增压新技术，其中包含井口天然气增压新

技术、双螺杆压缩机增压新技术；天然气多相流量计量技术，其中包含油气水多相流量计、新型气液两相流量计；天然气脱水，其中包含天然气脱水技术发展现状及趋势、甘醇脱水、分子筛脱水、膜脱水、天然气超音速分离脱水；天然气管线冰堵预测与冰堵位置测定，其中包含天然气水合物、天然气管线冰堵位置测定、天然气管线冰堵形成预测和预警系统；天然气管线积液预测与清管技术，其中包含天然气管线积液预测与计算、天然气管线清管、旁通清管技术等。

本书由中国石油长庆油田分公司苏里格气田研究中心韩兴刚和冯朋鑫编写。韩兴刚负责编写第一章至第四章，冯朋鑫负责编写第五章至第八章，全书由韩兴刚统稿。本书编写过程中得到苏里格气田研究中心的大力支持，长庆油田分公司采气五厂提供了一些重要的研究资料，在此一并表示感谢。

由于编写人员水平有限，书中难免有不妥之处，敬请各位专家、同行和广大读者批评指正。

目 录

第一章 概述	(1)
第二章 天然气管道内流体流动与热力学特性	(4)
第一节 天然气管道内流体流动基本方程	(4)
第二节 天然气管线的压力降计算	(15)
第三节 热力学的焓熵概念	(34)
第三章 天然气集输系统	(41)
第一节 天然气集输系统数字化和模块化	(41)
第二节 天然气集输管网优化设计	(57)
第三节 天然气集输工艺新技术	(71)
第四节 天然气集输系统节能新技术	(94)
第四章 天然气增压新技术	(97)
第一节 井口天然气增压新技术	(97)
第二节 双螺杆压缩机增压新技术	(100)
第五章 气液多相流量计量技术	(121)
第一节 油气水多相流量计	(121)
第二节 新型气液两相流量计	(123)
第六章 天然气脱水	(129)
第一节 天然气脱水技术发展现状及趋势	(129)
第二节 三甘醇脱水	(132)
第三节 分子筛脱水	(141)
第四节 膜脱水	(143)
第五节 天然气超音速分离脱水	(145)
第七章 天然气管线冰堵预测与冰堵位置测定	(150)
第一节 天然气水合物	(150)
第二节 天然气管线冰堵位置测定	(153)
第三节 天然气管线冰堵形成预测和预警系统	(169)
第八章 天然气管线积液预测与清管技术	(177)
第一节 天然气管线积液预测与计算	(177)
第二节 天然气管线清管技术	(186)
第三节 旁通清管技术	(191)
参考文献	(197)
附录 单位换算表	(200)

第一章 概 述

苏里格气田位于鄂尔多斯盆地,属于典型的低渗、低压、低丰度的“三低”油气藏,为典型的岩性油气藏,非均质性强,地质条件复杂,单井产量低,勘探开发难度大。在40年的开发建设中,低渗透油气资源开发的下限从50mD下降到0.3~0.5mD,成为中国低渗透油气勘探开发的代表。苏里格气田单井控制储量小;压力下降快,单井产量低;稳产期短,平均单井采出量小。开发难度极大。

天然气田地面集输工程是天然气开发系统工程中的一项主体工程,与气藏工程、钻采工程等既相对独立又紧密联系,主要涉及天然气的产出、收集、矿场处理及输送,以及与之配套的水、电、路、通信等系统和生产管理方面的建设内容。同时,也为气藏的动态分析和调整开发方案提供科学依据。

超低渗透气藏是长庆油田苏里格气田最主要的特点。采用新技术、新模式、新机制,实现超低渗透气藏的低成本、高质量开发。地面工程建设如何响应超低渗透气藏开发的总体要求,适应超低渗透油藏低成本开发、大规模建设、现代化管理的需要,是必须要重点研究的问题。

以“数字化技术”提升管理水平,保障生产的正常运行,降低安全风险,减少人员,降低综合成本,提高管理效率。数字化管理技术是工艺简化的重要技术支撑。通过数字化管理提升工艺过程的监控水平和生产管理过程的智能化水平,把人和工艺设施的效率发挥到最佳水平,有利于精简冗余的设备和功能,实现工艺流程的简化,综合成本的降低;数字化管理技术也是优化管理模式的重要技术支撑。针对超低渗透气藏开发井数多、战线广的特点,通过数字化管理减少生产前端用工,形成“电子巡井、人工巡站、远程监控、中心值守”的新的生产组织方式,优化劳动组织架构,达到增产增效不增人的目的。

标准化设计是将“统一、简化、协调、最优化”的标准化理念应用于地面工程设计和建设中,通过通用的、统一的标准化设计文件,从设计源头把各专业、部门、环节间的相互技术联系和技术特性关系统一起来,实现各方面的合理连接、配合与协调,使地面工程建设和管理的一系列活动具有简单化、系列化、通用化的特点,适应油气田的规模化建设。标准化设计体现了平稳、均衡、效率、受控、协调的工作方针,实现了质量、速度、安全、效益的统一。

模块化建设是以场站的标准化设计文件为基础,以功能区模块为生产单元,在工厂内完成模块预制,最后将预制模块、设备在建设现场进行组合装配的场站建设过程。模块化建设的主要目的是改善施工作业环境,提高建设质量和速度,利于均衡组织生产站场施工。适应了大规模建产的需要和滚动开发的需要,也提高了生产效率和建设质量,同时降低了安全风险和综合成本。

为了确保苏里格气田大规模化生产调度、抢险指挥的高效运行和有效控制,达到提高管理水平、精简组织机构、减小劳动强度、降低操作成本的目的,开发了苏里格气田管网优化

运行系统平台。该系统具有开放的数据库管理结构、可视化图形界面、信息查询和检索、管网系统的模拟与优化以及管网运行状况的动态监测,使气田地面系统利用数字信息辅助管理和决策,提高管理工作的科学化、规范化水平,为生产指挥调度和运行管理提供科学依据,对提高气田经营管理决策水平具有重要的应用价值。

管网优化运行系统的框架设计是以苏里格气田数字化生产管理系统体系结构为基础,实现管网系统设计优化^[1-3]。

在管网的设计阶段,解决管径最优组合问题,即通过管网水力计算确定有关技术参数,寻求系统造价最低的优化设计方案^[4]。

管网最优化运行问题可以归纳为,根据压缩机状态、管道约束条件、压缩机运行的可行域和流量限定等一些限制条件,以能耗或运行成本最小为目标函数进行优化计算,给出压缩机运行的组合方式和压缩机的操作压力。

集输管网的整体增压对整个气田地面建设会产生重大影响,它既可以减少系统未来的运行费用,增加管网的利用率,还能指导其配套工程的合理设置,使天然气管网的管理和运营变得更加科学和高效。苏里格气田增压工艺技术研究是统筹考虑苏里格气田增压工艺选择,以及压缩机综合选型技术和压缩机基础优化设计技术,从而满足投资和运行成本最低的工艺技术研究。

苏里格气田的增压工艺技术和压缩机选型技术可广泛运用到低渗透气田和煤层气田的建设中,总体处于国内领先水平。形成的两地多级增压技术,是苏里格气田采用的中低压集气模式的基础。该模式被称为国内第三套集气模式,是国内针对“三低气田”创立的一种独特的集气新模式,具有国际先进水平。压缩机无固定连接基础缩短了施工周期,降低了工程投资,便于压缩机的拆迁、搬运,基础与设备之间不需要固定连接。

集约型压缩机运行技术使压缩机天然气消耗大幅度降低,节约了运行成本,使集气站能耗处于国内领先水平。进一步完善的压缩机监控系统,其可靠性和远程监控能力均得到提高,并向智能化、网络化发展。

在天然气开发后期,天然气井口压力会持续下降,需要安装单井天然气管道泵,尽可能多地生产出天然气。这种单井天然气管道泵需要满足现场生产特点,一体化的结构、橇装、快装、效率高、安全可靠和无人值守。为此,设计和研制具有自主知识产权的单井天然气管道泵对于提高气井天然气产量,对我国的能源生产和石油设备业的发展,都具有重要的意义。

天然气生产中,需要在井口安装气体流量计,以便精确了解生产情况。气体流量计有很多种,如容积式、压差式、质量式、动量式、超声波气体流量计等。但是,对于天然气生产中的带液体的流量测量,仍然是个难题。测量的困难在于天然气中带有不等量的水和凝析油,使得大多数天然气流量计的测量误差比较大。研究开发测量精度高,设备简单,价格低廉的天然气/液体多相流量计对天然气生产具有非常重要的意义,可以极大地促进天然气计量技术的提高,提高天然气生产开发管理水平。

目前已经工业化的天然气脱水方法有:溶剂吸收法、固体吸附法、直接冷冻法、膜分离法等,其中普遍采用的是溶剂吸收法和固体吸附法。近年来,出现的超音速分离技术得到广泛重视,在国内外开始工业应用,前景广阔。

超音速涡流管分离技术是将膨胀降温、涡流式气液分离、再压缩等工艺集于一个密闭紧

凑的装置系统内完成。与传统工艺相比,该系统具有密闭无泄漏、无需化学药剂、结构紧凑轻巧、简单可靠、支持无人值守等优点,该技术与常规处理工艺相比,可使投资和运行费用减少 10%~25%。

在冬季,常发生输油输气管线冰堵,这给油气生产带来严重影响。近几年来,对于管线冰堵位置检测技术主要有以下几种方法:钻孔法、敲击法、理论数值分析法、超声波法、应力应变测试法、压力波分析法等。这些方法各有特点,解决了生产中的一些具体问题。但是,大多数方法需要时间较长,工作量大,或是测定精度低,不确定性较高。研究设备简单、准确可靠、快速经济地测定管线冰堵位置的测定方法和仪器设备,对天然气稳定生产具有特别重要的意义。

输送天然气的长输管道长期运行会使管线内水和凝析油越积越多,给集输带来很大的麻烦。积液量的增多会增加管道阻力和压力脉动,增加动力消耗;水的存在还会加速硫化氢、二氧化碳对管线的腐蚀,导致水合物的生成,使管线和设备堵塞。凝析油的析出同样会增加集输管道的阻力和压力波动,影响集输过程的安全性。因此,精确预测和测量输送管道内天然气和液体流量,测量天然气中的累计水含量和液量,高效排出液体对天然气集输的安全性和经济性有着重要的意义^[5,6]。

为清除从气田带进管线的大量凝析油和污水,进行管道内部和内壁的清扫是十分必要的。清管工艺一向是管道施工和生产管理的重要工艺措施。清管器的主要用途是清除天然气管道中的凝析油以及积液,试压前管道充水,试压后排水,管道投产时隔离甲醇氮气段,管道内涂层敷设,管道停输前液体置换。

为了解决清管作业与管线产量的矛盾,苏里格气田采取了一种新型的清管技术——旁通清管技术。通过使用旁通清管器清管,有效控制单次清管的清出液量,从而确保清管过程中管线和下游生产设施的安全,同时,通过清管作业计算管线积液情况,制定湿气输送管道合理的清管周期,有效指导现场清管作业。

第二章 天然气管道内流体 流动与热力学特性

第一节 天然气管道内流体流动基本方程

液体和气体虽同为流体,具有共性,但又各有特性。液体虽无一定的形状,但具有一定的体积,不易被压缩,在与气体的交界面上存在自由表面;气体既没有一定的形状,也没有一定的体积,易于被压缩,不存在自由表面。

在一定的外界条件下,根据组成物质的分子间距离和相互作用力强弱的不同,将物质划分为固体、液体和气体,而根据物质的受力和运动特性的不同,物质又可划分为固体和流体。流体包括液体和气体。固体既能承受法向力(包括压力和拉力),又能承受切向力,在弹性范围内作用力使固体产生有限的变形,作用力消失,变形消失,固体恢复到原来的形状;流体只能承受压力,不能承受拉力,在静止流体中只要有切向力的作用,不管它多么小,在足够大的时间内流体将产生连续不断的变形。这种变形就是我们所说的流动。因此,也称能流动的物质为流体^[7-10]。

一、流体的物理性质

流体的物理性质有流动性、黏性、压缩性、扩散性和热传导性等,下面介绍其中的流动性、黏性和压缩性。

(一) 流体的流动性

静止流体在任意小的剪切力作用下,在足够大的时间内它将产生连续不断的变形,剪切力消失,变形停止,流体的这一性质就称为流动性。如容器中的水倾斜后将发生变形,直到水面呈水平状态,这时切向力消失。流动性是流体的固有属性,是流体与固体的根本区别。

(二) 流体的黏性

当两层流体之间有相对运动(即变形)时,其间也会产生阻碍相对运动的力。运动快的流层对运动慢的流层施加拉力,运动慢的流层对运动快的流层施加阻力,这一对内力称为流体的黏性内摩擦力,流体的这种抵抗相对运动的属性称为流体的黏性。黏性内摩擦力的产生有两个原因:一是两层流体间分子的吸引力;二是两层流体间分子的动量交换。对于液体,因分子间距离较小,内摩擦力主要取决于分子的吸引力。对于气体,因分子间距离较大,内摩擦力主要取决于分子间的动量交换。

常用流体的动力黏性系数 μ 及运动黏性系数 ν 来描述。黏性系数是物性参数,对于不同的流体,它的值不同。另外,它是用来度量流体抵抗变形运动能力的物理量, μ 的值越大,表明流体抵抗变形的能力越大,即流体越黏稠。

实验证实,黏性系数随压力变化不大,随温度变化较大。液体的黏性系数随温度的升高

而减小, 气体的黏性系数随温度的升高而增大。这是因为液体的黏性主要取决于分子间的吸引力, 温度升高, 液体分子振荡速度增加, 容易克服保持它们位置的束缚, 增大流动性, 而气体的黏性主要取决于分子间的动量交换, 温度增加, 分子的热运动加剧, 气体的黏性也就增加。

(三) 流体的压缩性

流体的密度或容积随压力或温度变化而变化的性质称为流体的压缩性。真实流体都是可压缩的。

液体在通常压力或温度下的压缩变形很小。例如水的压力从 1atm 增加到 100atm 时, 容积仅缩小 0.5%, 温度从 20℃ 变化到 100℃, 容积仅降低 4%。因此, 通常把液体近似为不可压缩流体, 即认为液体的密度为常数。但在某些问题中, 例如水中爆炸、击水或研究水声的传播等问题中, 必须考虑液体的压缩性。

气体的压缩性比液体大得多。气体密度随压力和温度的变化关系用热力学状态方程 $\rho = f(p, T)$ 来表示。常见的气体多数服从完全气体状态方程 $p = R\rho T$, 其中 T 为绝对温度, R 为气体常数。

如果流体的密度只是压力的函数, 即 $\rho = f(p)$, 则称为正压流体。如等温过程 $p/\rho = C$ 、绝热过程 $p/\rho^k = C$ 的气体都属于正压流体, 其中 k 为气体的绝热指数, C 是常数。

因此, 在通常情况下气体作为可压缩流体处理。但是如果气体的速度远小于声速时, 气体密度相对变化很小, 可以把这种低速流动气体 (如 $u < 70\text{m/s}$) 作为不可压缩流体处理。

二、流体运动的基本概念

(一) 定常流动和非定常流动

流体在运动过程中, 若物理量不随时间变化而变化, 则称为定常流动, 否则称为非定常流动。在定常流动中, 物理量仅是空间坐标的函数。

流动是否定常与所选取的参考坐标系有关。例如, 一艘小船在平静的湖面上作等速直线滑行时, 站在船上的观察者 (坐标系取在船上) 看到船体周围的流动是定常的。而站在岸上 (坐标系在大地上) 的观察者看到的某一固定区域的流动却是非定常的, 因为船经过该区域时, 流动受扰而随时间变化。

(二) 均匀流动和非均匀流动

流体在运动过程中, 若物理量均不随空间位置变化而变化, 则称为均匀流动或均匀场, 否则称为非均匀流动或非均匀场。在均匀流动中, 物理量仅是时间的函数。

1. 迹线

流体质点的运动轨迹称为迹线, 是拉格朗日法描述流体运动的基础, 就是质点的轨迹线方程, 给定拉格朗日变数 a, b, c 就得到该质点的迹线。

2. 流线

流线是速度场的矢量线。任一时刻流体的速度在空间上是连续分布的, 如果 t 时刻空间一条曲线在该曲线上任何一点 A 上的切线和 A 点处流体质点的速度方向相同, 则称这条曲线为时刻 t 的流线。即在任意时刻 t , 它上面每一点处曲线的切向量 $d\mathbf{r} = dx\mathbf{i} + dy\mathbf{j} + dz\mathbf{k}$ 都与该点的速度向量 $\mathbf{v}(x, y, z, t)$ 相切。

其中时间 t 为参数, 积分时作常数处理, 表示 t 时刻的流场的速度分布情况。上式是由

两个一阶常微分方程构成的方程组，积分得流场的流线谱，积分常数取不同的值表示不同的流线。

流线具有如下几个性质：

(1) 对于非定常流场，不同时刻通过同一空间点的流线一般不重合，对于定常流场，任何时刻通过同一空间点的流线都是相重合的。

(2) 同一时刻，过空间一点只有一条流线，这是因为同一时刻流场中一点处的速度只有一个值。换句话说，流线不能相交（速度等于零的驻点和速度等于无限大的奇点除外）。

(3) 流线直观地描绘了流场的速度分布，流线的走向反映了流速方向，流线的疏密程度反映了流速的大小分布。

迹线和流线都是用来描述流场几何特性的，它们最基本的差别是：迹线是同一流体质点在不同时刻的位移曲线，与拉格朗日观点相对应，而流线是同一时刻、不同流体质点速度向量的包络线，与欧拉观点相对应。在定常运动中，流线与迹线重合。

(三) 其他概念

1. 流管

在流场中取任一封闭曲线（不是流线），通过该封闭曲线的每一点作流线，这些无数流线所组成的管状的假想表面叫流管。

流管不能相交，流体质点不能穿过流管表面；在定常时，流程形状和位置不随时间变化而变化；非定常时，流管形状和位置可能随时间变化而变化。

2. 流束

流管内的全部流体为流束。流束的极限是一条流线。极限近于一条流线的流束为微元流束。

3. 总流

把流管取在运动液体的边界上，则边界内整股液流的流束称为总流。

4. 过流断面

流束中处处与速度方向相垂直的横截面称为该流束的过流断面。

5. 缓变流动

如果微小流束（流线）间的夹角及流束的曲率都非常小，这种流动称为缓变流动，反之称为急变流。缓变流的过流断面可看作是平面，急变流的过流断面是曲面。

6. 流量及流速

1) 流量

流量是指单位时间内通过某一过流断面的流体量，分为体积流量（ q_v 或 Q ， m^3/s 或 m^3/h ）和质量流量（ q_m ， kg/s 或 kg/h ）。

体积流量指单位时间内流经管道任意截面的流体体积：

$$q_v = \int_A \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA \quad (2-1)$$

质量流量指单位时间内流经管道任意截面的流体质量：

$$q_m = \rho \int_A \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA \quad (2-2)$$

体积流量和质量流量的关系：

$$q_m = \rho q_v$$

2) 流速

(1) 平均流速。

过流断面上各点的流速是不相同的, 所以常采用一个平均值来代替各点的实际流速, 称断面平均流速:

$$\bar{v} = \frac{q_v}{A} = \frac{\int_A v dA}{A} \quad (2-3)$$

(2) 质量流速。

单位时间内流经管道单位截面积的流体质量:

$$G = \frac{q_m}{A} = \frac{q_v \rho}{A} = u \rho \quad (2-4)$$

(四) 稳定流动与不稳定流动

稳定流动: 各截面上的温度、压力、流速等物理量仅随位置变化, 而不随时间变化的流动。

不稳定流动: 流体在各截面上的有关物理量既随位置变化, 也随时间变化的流动。

流体的流动形态分为层流、湍流和过渡流动。

(1) 层流: 流体分层流动, 相邻两层流体间只作相对滑动, 流层间没有横向混杂的流动状态。

(2) 湍流 (也称为紊流): 当流体流速超过某一数值时, 流体不再保持分层流动, 而可能向各个方向运动, 有垂直于管轴方向的分速度, 各流层将混淆起来, 并有可能出现涡旋的流动状态。流体作湍流时所消耗的能量比层流多, 湍流区别于层流的特点之一是它能发出声音。

(3) 过渡流动: 介于层流与湍流间的流动状态很不稳定。

雷诺数 $Re = \frac{\rho v r}{\eta}$ (速度 v 、密度 ρ 、黏度 η 、管子半径 r) 决定黏性流体在圆筒形管道中的流动形态。通常当 $Re \leq 2000$ 时, 为层流; 当 $2000 < Re < 4000$ 时, 为过渡流; 当 $Re \geq 4000$ 时, 为湍流。

三、工程流体力学基本方程

连续介质模型告诉我们: 流体是由无数质点组成, 而流体质点是连续的、彼此无间隙的充满空间。通常把由运动流体所充满的空间称为流场。表征流体运动的物理量, 通称为流体的流动参数。

(一) 连续性方程

对于稳定流动系统, 在管路中流体没有增加和漏失的情况下对任意截面有:

$$m_s = \rho_1 u_1 A_1 = \rho_1 u_2 A_2 = \cdots = \rho u A = \text{常数} \quad (2-5)$$

对于不可压缩性流体 (ρ 为常数) 有:

$$V_s = u_1 A_1 = u_2 A_2 = \cdots = u A = \text{常数} \quad (2-6)$$

(二) 能量方程 (伯努利方程)

1. 实际流体的伯努利方程

实际流体在定常、重力场、不可压缩条件下, 在流线上任意两点间可列出伯努利方程为:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{1}{g} \int_1^2 f ds \quad (2-7)$$

伯努利方程中各项的含义: z 代表单位重力流体的位能, 或简称位置水头; $\frac{p}{\rho g}$ 表示单位重力流体的压能, 或简称压强水头; $\frac{v^2}{2g}$ 表示单位重力流体的动能, 或简称速度水头; $\frac{1}{g} \int_1^2 f ds$ 表示单位重力流体沿流线从 1 点流到 2 点克服黏性阻力所做的功, 或损失的能量。

2. 黏性总流的伯努利方程

黏性流体在定常、重力场、不可压缩条件下, 在流线上任意两点间可列出伯努利方程为:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{1}{g} \int_1^2 f ds \quad (2-8)$$

在实际工程中, 遇到的往往是过流断面具有有限大小的流动, 称之为总流。因此应将沿流线的伯努利方程推广到沿总流上去。将式 (2-8) 乘以 $\rho g dq_v$, 然后对整个总流断面积分, 这样就获得总流的能量关系式:

$$\int_{A_1} \left(\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) \rho g dq_v = \int_{A_2} \left(\frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right) \rho g dq_v + \int_A h'_f \rho g dq_v \quad (2-9)$$

式中 $\int_A \left(\frac{p}{\rho g} + z \right) \rho g dq_v$ —— 单位时间内通过断面 A 的势能总和;

$\int_A \frac{v^2}{2g} \rho g dq_v$ —— 单位时间内通过断面 A 的动能总和;

$\int_A h'_f \rho g dq_v$ —— 单位时间内流体克服摩擦阻力做功而消耗的机械能, 该项不易通过积

分确定, 可令 $\int_A h'_f \rho g dq_v = \rho g h_f q_v$, 则 h_f 表示总流中单位重力流体从断面 1-1 到断面 2-2 平均消耗的能量。

那么, 断面 1-1 到断面 2-2 的伯努利方程为:

$$\left(\frac{p_1}{\rho g} + z_1 \right) \rho g q_v + \frac{\alpha v_1^2}{2g} \rho g q_v = \left(\frac{p_2}{\rho g} + z_1 \right) \rho g q_v + \frac{\alpha v_2^2}{2g} \rho g q_v + h_f \rho g q_v$$

即

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_f \quad (2-10)$$

总流能量方程 (即伯努利方程) 在推导过程中的限制条件如下:

(1) 恒定流;

- (2) 不可压缩流体;
- (3) 质量力只有重力;
- (4) 所选取的两过水断面必须是渐变流断面, 但两过流断面间可以是急变流;
- (5) 总流的流量沿程不变;
- (6) 两过水断面间除了水头损失以外, 总流没有能量的输入或输出;
- (7) 式中各项均为单位重力流体的平均能 (比能), 对流体总重的能量方程应各项乘以 $\rho g q_v$ 。

(三) 恒定流动量方程

恒定流动量方程主要作用是解决作用力问题, 特别是流体与固体之间的总作用力。

动量定律: 作用于物体的冲量, 等于物体的动量增量。即: $\sum F dt = d(mv)$ 。

恒定流动量方程式: $\sum F dt = d(mv) = \alpha_{02} \rho_2 Q_2 v_2 - \alpha_{01} \rho_1 Q_1 v_1$ 。方程是以断面平均流速模型建立的, 实际的流速是不均匀分布的, 所以用动量修正系数 α 修正。

将物质系统的动量定理应用于流体时, 动量定理的表述形式是: 对于恒定流动, 所取流段 (简称流段, 它是由流体构成的) 的动量在单位时间内的变化, 等于单位时间内流出该流段所占空间的流体动量与流进的流体动量之差; 该变化率等于流段受到的表面力与质量力之和, 即外力之和。

(四) 流体流动阻力

流动阻力的大小与流体本身的物理性质、流动状况及壁面的形状等因素有关。管路系统主要由两部分组成, 一部分是直管, 另一部分是管件、阀门等。相应流体流动阻力也分为直管阻力和局部阻力两种。

直管阻力: 流体流经一定直径的直管时由于内摩擦而产生的阻力。

局部阻力: 流体流经管件、阀门等局部地方由于流速大小及方向的改变而引起的阻力。

1. 流体在直管中的流动阻力

1) 阻力的表现形式

流体在水平等直径管中作定态流动。

伯努利方程:

$$z_1 g + \frac{1}{2} u_1^2 + \frac{p_1}{\rho} = z_1 g + \frac{1}{2} u_2^2 + \frac{p_2}{\rho} + W_f \quad (2-11)$$

因是直径相同的水平管, 则

$$u_1 = u_2; \quad z_1 = z_2$$

所以

$$W_f = \frac{p_1 - p_2}{\rho} \quad (2-12)$$

若管道为倾斜管, 则

$$W_f = \left(\frac{p_1}{\rho} + z_1 g \right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + z_2 g \right) \quad (2-13)$$

由此可见, 无论是水平安装还是倾斜安装, 流体的流动阻力均表现为静压能的减少, 仅当水平安装时, 流动阻力恰好等于两截面的静压能之差。

2) 直管阻力的通式

由压力差而产生的推动力为 $(p_1 - p_2) \frac{\pi d^2}{4}$ ，力的方向与流体流动方向相同。

流体的摩擦力为 $F = \tau A = \tau \pi dl$ ，力的方向与流体流动方向相反。

流体在管内作定态流动，在流动方向上所受合力必定为零，即：

$$(p_1 - p_2) \frac{\pi d^2}{4} = \tau \pi dl$$

整理得

$$p_1 - p_2 = \frac{4l}{d} \tau \quad (2-14)$$

$$W_f = \frac{4l}{d} \tau \quad (2-15)$$

把能量损失 W_f 表示为动能 $\frac{u^2}{2}$ 的某一倍数，有：

$$W_f = \frac{8\tau}{\rho u^2} \frac{l}{d} \frac{u^2}{2} \quad (2-16)$$

令

$$\lambda = \frac{8\tau}{\rho u^2}, \text{ 则}$$

$$W_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2} \quad (2-17)$$

式 (2-17) 为流体在直管内流动阻力的通式，称为范宁 (Fanning) 公式。式中 λ 为无量纲系数，称为摩擦系数或摩擦因数，与流体流动的 Re 及管壁状况有关。

根据伯努利方程的其他形式，也可写出相应的范宁公式表示式。

压头损失：

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2g} \quad (2-18)$$

压力损失：

$$\Delta p_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho u^2}{2} \quad (2-19)$$

值得注意的是，压力损失 Δp_f 是流体流动能量损失的一种表示形式，与两截面间的压力差 $\Delta p = (p_1 - p_2)$ 意义不同，只有当管路为水平时，二者才相等。

应当指出，范宁公式对层流与湍流均适用，只是两种情况下摩擦系数 λ 不同。以下对层流与湍流时摩擦系数 λ 分别讨论。

3) 层流时的摩擦系数

流体在直管中作层流流动时，将平均速度 $u = \frac{1}{2} u_{\max}$ 及 $R = \frac{d}{2}$ 代入式 (2-19) 中，可得：

$$\Delta p_f = \frac{32\mu l u}{d^2} \quad (2-20)$$

式(2-20)称为哈根—泊谟叶(Hagen-Poiseuille)方程,是流体在直管内作层流流动时压力损失的计算式。

流体在直管内层流流动时能量损失或阻力的计算式为:

$$W_f = \frac{32\mu l u}{\rho d^2} \quad (2-21)$$

表明层流时阻力与速度的一次方成正比。

式(2-21)也可改写为:

$$W_f = \frac{32\mu l u}{\rho d^2} = \frac{64\mu}{\rho d u} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2} = \frac{64}{Re} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2} \quad (2-22)$$

将式(2-21)与式(2-22)比较,可得层流时摩擦系数的计算式:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (2-23)$$

即层流时摩擦系数 λ 是雷诺数 Re 的函数。

4) 湍流时的摩擦系数

湍流时摩擦系数 λ 是 Re 和相对粗糙度 $\frac{\varepsilon}{d}$ 函数,如图2-1所示,称为莫狄(Moody)摩擦系数图。

根据 Re 不同,图2-1可分为4个区域:

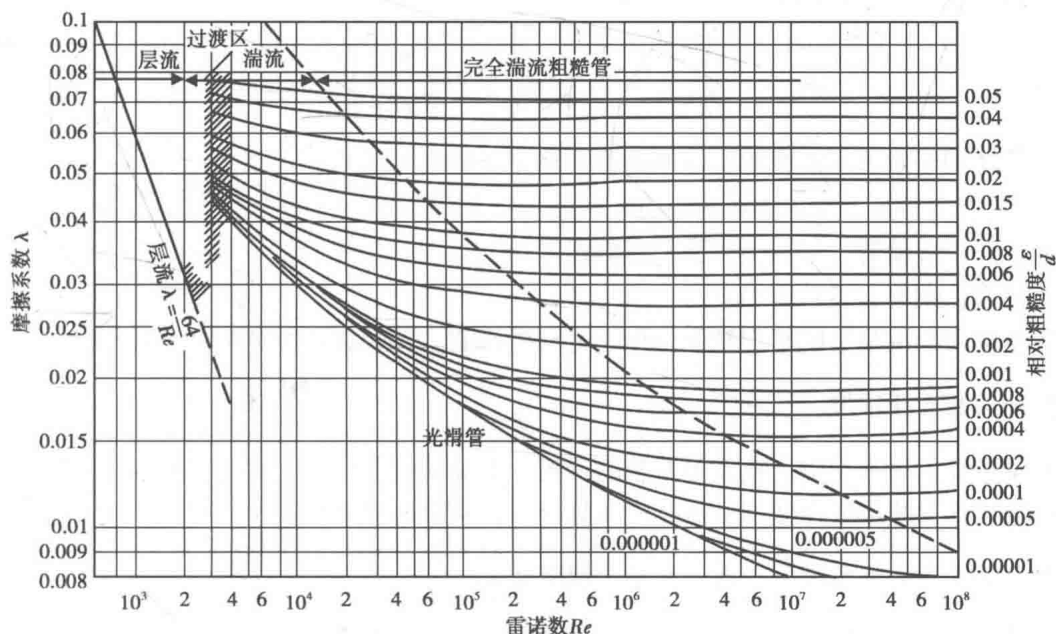


图2-1 摩擦系数 λ 与雷诺数 Re 及相对粗糙度 $\frac{\varepsilon}{d}$ 的关系