

高等学校教材

中国矿业大学卓越工程师教材

Liuti Lixue Yu Liuti Jixie

流体力学与流体机械

陈更林 李嘉薇 李德玉 杨春敏 编著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

高等学校教材
中国矿业大学卓越工程师教材

流体力学与流体机械

编 著	陈更林	李嘉薇	李德玉	杨春敏
参 编	苗长新	孙盛军	许 燕	刘家祥
	周水生	韩常俊	李 强	

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书有两篇,第一篇是流体力学,介绍了流体力学的基础知识及应用,主要内容有绪论、流体基本物理属性、流体静力学、流体动力学、黏性流体流动、相似理论与量纲分析。第二篇是流体机械,介绍了泵、风机、压缩机的原理与结构、基本理论、运行、调节、选型等,主要内容有泵与风机的基本理论、泵与风机的运行与调节、煤矿通风系统与设备、煤矿排水系统与设备、煤矿空气压缩系统及设备、工程师训练。各章还有本章小结、思考题与习题、拓展阅读与写作训练,附录收录了常用的工程资料,并配有教学课件。

本书可作为采矿工程、安全工程、矿物加工工程、机械工程及自动化等专业本科教材,也可供成人教育(本科)、干部培训班使用,以及有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学与流体机械 / 陈更林等编著. —徐

州: 中国矿业大学出版社, 2017. 6

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3561 - 9

I. ①流… II. ①陈… III. ①流体力学②流体机械 IV. ①O35②TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 128576 号

书 名 流体力学与流体机械

编 著 陈更林 李嘉薇 李德玉 杨春敏

责任编辑 何晓明 褚建萍

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83884103 83885105

出版服务 (0516)83995789 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 江苏淮阴新华印务有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 22 字数 549 千字

版次印次 2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷

定 价 38.50 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

新时期教育和人才培养的研究表明:创新能力、实践能力是人才培养的薄弱环节,是全球性的;采用模块化结构,形成“厚基础、宽专业、重实践、强个性”的课程体系及相应的教学内容是提高创新能力、实践能力的有效措施。《国家中长期教育改革和规划纲要(2010—2020年)》《国家中长期人才发展规划纲要(2010—2020年)》《教育部关于实施卓越工程师教育培养计划的若干意见》《卓越工程师教育培养计划通用标准》均对创新能力、实践能力等提出了更高的要求,因此,有必要编写符合卓越计划、突出创新能力和实践能力的模块化教材。

本教材遵守通用性与针对性相结合、科学性和实用性相结合、系统性和灵活性相结合、经典性和先进性相结合的原则,由高校教师和企业工程师联合编写,能够满足采矿工程、安全工程、矿物加工工程、机械工程及自动化等专业的需要,教学时数32~48学时。

本教材采用模块化结构,有流体力学和流体机械两个一级模块,流体力学一级模块分为流体力学基础、黏性流体流动与管路计算、相似理论与量纲分析三个二级模块,流体机械一级模块分为流体机械基础、煤矿流体机械两个二级模块,二级模块进一步分为三级模块。流体力学基础和流体机械基础两个二级模块,为读者提供了本课程厚实的基础,它们的内容对需要学习流体力学与流体机械课程的专业均是适用的,满足了宽专业的要求;煤矿流体机械二级模块充分体现了本教材的个性化特色。本教材重在满足工程实际需要,使读者学有所用,有较强的实践性。同时各章还有丰富的思考题与习题、拓展阅读、科技写作,进一步培养并强化读者的创新能力和实践能力。

本教材由中国矿业大学陈更林、李嘉薇、李德玉、杨春敏编著,中国矿业大学苗长新、山东烟台教育局孙盛军、山东信力安全检测检验有限公司许燕、江苏第一工业设计院有限公司刘家祥、淮南矿业集团有限公司周水生、兖州煤业集团有限公司韩常俊、徐州矿业集团有限公司李强参加了编写工作。中国矿业大学郭楚文教授、杨胜强教授审阅了全部书稿,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢!同时感谢徐州矿一自动化科技有限公司、参考文献的作者、中国矿业大学电气与动力工程学院能源与动力工程系的各位教师的帮助,感谢中国矿业大学及中国矿业大学出版社的支持!

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2017年3月

目 录

第一篇 流体力学

绪论	3
第一章 流体基本物理属性	10
第一节 流体的定义与连续介质假说	10
第二节 流体的惯性	11
第三节 流体的压缩性与膨胀性	12
第四节 流体的黏性	14
本章小结	19
思考题与习题	20
拓展阅读	22
写作训练	24
第二章 流体静力学	25
第一节 作用在流体上的力	25
第二节 流体静压强的特性	26
第三节 压强的计量与单位	27
第四节 流体平衡微分方程	28
第五节 平衡流体中的压强	29
第六节 液柱式测压计	32
第七节 静止液体对平壁面的作用力	36
本章小结	39
思考题与习题	40
拓展阅读	45
写作训练	53
第三章 流体动力学	54
第一节 描述流体运动的两种方法	54
第二节 流动基本概念	56
第三节 雷诺输运方程	62
第四节 连续性方程	64
第五节 能量方程	65

第六节 动量方程	73
本章小结	75
思考题与习题	75
拓展阅读	78
写作训练	79
第四章 黏性流体流动	80
第一节 黏性流体的流动阻力与流动状态	80
第二节 圆管中的层流流动	83
第三节 圆管中的紊流运动	86
第四节 沿程与局部阻力系数	90
第五节 管路水力计算	98
第六节 液体的出流	102
本章小结	105
思考题与习题	107
拓展阅读	111
写作训练	114
第五章 相似理论与量纲分析	115
第一节 相似条件	115
第二节 动力相似准则	118
第三节 量纲分析与 π 定理	122
本章小结	126
思考题与习题	126
拓展阅读	127
写作训练	129
第二篇 流体机械	
第六章 泵与风机的基本理论	133
第一节 泵与风机及压缩机的分类与应用	133
第二节 叶片式泵与风机的工作原理与性能参数	139
第三节 离心式泵与风机的基本理论	140
第四节 轴流式泵与风机的基本理论	149
第五节 相似理论在泵与风机中的应用	153
本章小结	156
思考题与习题	157
拓展阅读	160
写作训练	165

第七章 泵与风机的运行与调节	166
第一节 管路特性	166
第二节 泵与风机的工况点	168
第三节 泵与风机的联合运行	170
第四节 泵与风机的调节	172
第五节 失速与喘振	178
本章小结	180
思考题与习题	180
拓展阅读	182
写作训练	186
第八章 煤矿通风系统与设备	187
第一节 煤矿通风系统与通风阻力	187
第二节 煤矿通风机站及设备	188
第三节 煤矿通风机的操作与经济运行	195
第四节 通风设备选型设计	197
本章小结	204
思考题与习题	204
拓展阅读	205
写作训练	209
第九章 煤矿排水系统与设备	210
第一节 矿井涌水与排水	210
第二节 煤矿常用排水设备	213
第三节 煤矿排水设备的要求与运行	219
第四节 排水设备选型设计	226
本章小结	239
思考题与习题	240
拓展阅读	241
写作训练	247
第十章 煤矿空气压缩系统及设备	248
第一节 煤矿压缩空气系统概述	248
第二节 空气压缩机的基本理论	250
第三节 煤矿压缩空气设备	262
第四节 煤矿空气压缩系统的经济运行	268
第五节 煤矿压缩空气设备选型设计	270
本章小结	276
思考题与习题	277

拓展阅读·····	278
写作训练·····	281
第十一章 工程师训练·····	282
第一节 流体机械的拆装·····	282
第二节 煤矿在用主通风机系统安全检测检验·····	294
第三节 煤矿主排水系统安全检测检验·····	306
第四节 煤矿在用空气压缩机安全检测检验·····	313
拓展阅读·····	324
参考文献·····	330
附录·····	331
附录Ⅰ 泵与风机的型号编制·····	331
附录Ⅱ 泵系列型谱与风机性能曲线·····	334
附录Ⅲ 各种钢管规格·····	339
附录Ⅳ 大气压力与水的饱和蒸汽压力·····	340

第一篇 流体力学

绪 论

一、流体力学研究内容

流体力学是研究流体的平衡和运动规律,并应用这些规律去解决实际工程问题的一门科学。流体力学的研究对象是流体,包括液体和气体。大气和水是最常见的两种流体,大气包围着整个地球,地球表面的 70% 是水。由于流体介质在自然界、生命体和工程中普遍存在,流体力学与人类生活息息相关,从飞机、船舶的阻力到作用在高层建筑和桥梁上的风载,从大气、水体中污染物的扩散到发动机中空气和燃料的混合,从土壤、植被中的水分循环到人体中的血液流动,从海洋中的风生环流、热盐环流到天气、气候的预报,无不与流体力学有紧密联系。因而,流体力学也是一门基础性很强和应用性很广的学科。

流体力学是力学的基本原理在流体中的应用。力学原理包括质量守恒、能量守恒和牛顿运动定律。流体力学的研究内容可以分为流体静力学和流体动力学两部分:流体静力学主要研究流体处于受力平衡状态时的压力分布规律及其对固体壁面作用;流体动力学主要研究流动过程中流体受力与流动参数之间关系及其能量转换关系,即质量守恒、能量守恒和牛顿运动定律在流体中的具体应用。

按其研究内容侧重点的不同,流体力学可分为理论流体力学和工程流体力学。前者侧重于严密数学推理,力求准确性和严密性。后者侧重于运用流体力学基本理论解决工程实际问题。由于流体运动的复杂性,因此在一定程度上,两种方法都须借助于实验研究,得出经验或半经验的公式。

在众多实际工程领域,工程流体力学发挥着重要作用。从能源动力工程、水利工程、航空工程到化工工程、机械工程等,都在日益广泛地应用着流体力学。就某种意义而言,也正是在流体力学的研究工作不断取得成就的前提下才促进了这些技术领域的大力发展。

二、流体力学的发展概况

同其他自然科学一样,工程流体力学也是随着生产实践而发展起来的,它一方面依赖于长期的生产实践和科学检验,另一方面又受到科技的发展和社会等因素的影响与制约。其发展经历了最初的古典流体力学与实验流体力学两个体系并存但互不联系的阶段,逐步发展到理论与实验相结合的阶段。目前已经是理论分析、实验模拟与数值计算相结合的新发展阶段。按照所取得的成就,流体力学可划分为四个阶段。

第一阶段(16 世纪之前)是以经验为主的萌芽阶段。

在远古时代,人们从供水、灌溉、航行等方面开始了对流体知识的认知。人们通过观察知道了水流就下、风有方向、摩擦生热等知识,积累了丰富的经验,并在生产实践和日常生活中用来制造筏、舟、帆、风车等。古巴比伦的酒渠、古希腊阿基米德螺旋式提水机(图 0-1)、古罗马的高架引水桥(图 0-2)以及中国的都江堰水利工程(图 0-3)都是明证。其中,阿基米德于公元前 250 年提出的“浮体论”,奠定了流体静力学的基础。此后,直到 15 世纪的文艺复兴时期以前,流体力学理论系统仍未形成。15 世纪末,在城市建设、航海和机械工业发展需求的推动下,人们对流体运动规律的认识不断深入。文艺复兴时期,达·芬奇在其著作中

提到了管流,他设计的水利设施、发明的流体机械和所描绘的湍流图像(图 0-4)令人惊叹。

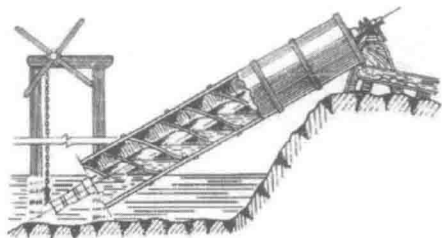


图 0-1 阿基米德螺旋式提水机

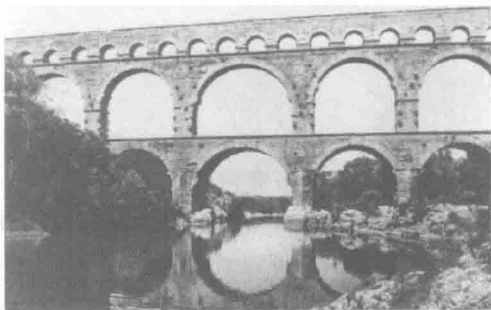


图 0-2 古罗马高架引水桥



图 0-3 中国都江堰水利工程



图 0-4 达·芬奇手稿中的湍流图像

第二阶段(16 世纪文艺复兴之后至 18 世纪中叶)以一批水力学论著出现为标志的理论基础阶段。

16 世纪初,意大利伟大的画家、天才科学家达·芬奇通过细致的观察和实验,写了《论水的流动和水的测量》一书,详述了孔口泄流和不可压缩流体定常流的质量守恒原理。

1650 年,法国数学家、物理学家帕斯卡通过现场测量,提出了流体静力学的基本关系式,即流体中压强传递的帕斯卡定律,奠定了液压传动技术理论基础。

1686 年,牛顿在理论分析和实验的基础上,在其专著《自然哲学的数学原理》中提出了著名的牛顿内摩擦定律,为建立真实黏性流体运动方程组创造了条件。

1738 年,瑞士物理学家、数学家伯努利对孔口出流和变截面管流进行了细致的观察和测量,在《流体动力学》一书中提出了用能量守恒定律解决流体的流动问题,写出了流体动力学的基本方程,后人称之为“伯努利方程”,提出了“流速增加、压强降低”的伯努利原理。

1753 年,瑞士著名数学家、力学家欧拉提出了流体连续介质假说,建立了整个流体力学理论体系的根基。1755 年,他又提出了基于“场”的观点描述流体运动的方法——欧拉方法。同时,根据理想流体运动时流体所受的力和动量变化推导出理想流体运动微分方程组,即欧拉运动微分方程。该方程描述了理想流体的运动规律,奠定了理想流体动力学基础。

第三阶段(18 世纪中叶至 19 世纪末),流体力学沿着理论与实验并重两个方向的发展阶段。

1783 年,法国数学家、力学家拉格朗日在其名著《分析力学》中,在总结历史上各种力学基本原理的基础上,发展达朗贝尔、欧拉等的研究成果,提出了另外一种描述流体运动的方法——拉格朗日法,引入了“势”和“等势面”的概念,完善了理想流体无旋流动的基本理论。

1827 年,法国工程师纳维首先提出了忽略流体压缩性的黏性流体的运动方程,泊松在 1831 年提出可压缩流体的运动方程。1845 年英国数学家、物理学家斯托克斯采用不同的假设和方法,建立了不可压缩实际流体的运动方程纳维-斯托克斯运动方程(简称 N-S 方程),提供了研究实际流体运动的基础。由于 N-S 方程是一个非线性偏微分方程,求解非常困难和复杂,在求解思路或技术没有进一步发展和突破前,只有在某些十分简单的流动问题上能求得精确解,因此该方程成为公认的世界七大数学难题之一。2000 年年初,美国克雷数学研究所的科学顾问委员会选定了七个“千年大奖问题”,克雷数学研究所的董事会决定建立七百万美元的大奖基金,每个“千年大奖问题”的解决都可获得一百万美元的奖励。

1858 年,英国物理学家亥姆霍兹提出了亥姆霍兹速度分解定律,该定律指出:流体微团的运动可以分解为平动、转动和变形三部分。该定律推广了理想流体的研究范围,对工程流体力学的发展有很大影响。

由于流动问题的复杂性和流体运动方程数学理论求解上的困难与解决实际流体工程问题的需求存在较大差距,为了解决生产实际问题,实验流体力学逐步发展起来。在这方面做出代表性研究成果的学者主要有毕托、文丘里、谢才和曼宁等人。他们从大量的实验和实际观测数据中总结出一系列实用的经验关系式,有效解决了大量流体工程问题。1883 年,英国工程师、物理学家雷诺在圆管中进行了一系列的流体流动实验,发现流体流动存在层流和紊流两种形态并给出了流态的无量纲参数判别准则。1895 年,雷诺又引入紊流应力的概念,建立了不可压缩实际流体的紊流运动方程,又称雷诺方程,为紊流理论研究提供了基础。

需要说明的是,流体力学发展的第二和第三阶段,不可压缩流体是主要研究对象。

第四阶段(20 世纪初至今)是流体力学飞跃发展的阶段。

这一阶段的最重要特点在于理论与生产实践的紧密联系。流体力学逐渐广泛地应用于生产实践。在生产实践的推动下,大大丰富了流体力学的内容。流体力学的研究领域不断扩大,出现了许多新的分支。

近代流体力学的发展,首先和 20 世纪航空事业的蓬勃兴起分不开。例如平面势流理论、机翼理论、螺旋桨理论和边界层理论等都是在航空事业的推动下发展起来的。

1904 年,德国工程师、力学家普朗特将实验与理论流体力学结合起来,创立了边界层理论。这一基本理论建立了理想流体研究和实际流体研究之间的内在联系,对进一步推动流体力学理论与生产实践的联系起了重大的作用。

1912 年,匈牙利工程师冯·卡门发现了卡门涡街现象,研究了卡门涡街的稳定性。

1933 年,德国工程师尼古拉兹对采用人工粗糙的管道进行了系统的测定工作,为补充边界层理论、推导紊流的半经验公式提供了可靠的依据。

20 世纪 40 年代以来,由于超高速飞行、火箭技术、原子能利用、电子计算机等尖端技术以及其他新兴工业的发展,给流体力学提出了许多新的课题,大大开拓了流体力学的研究领域,促使一些流体力学新分支的诞生,如电磁流体力学、化学流体力学、计算流体力学、非牛

顿流体力学、多相流体力学等。这些新分支都具有边缘科学的性质。流体力学正越来越多地与其他有关的科学结合,这正是人们的认识由简单到复杂、逐渐认识到物质的不同运动形式之间的相互联系和转化关系的结果。

三、流体力学研究方法

流体力学作为一门技术科学,研究方法遵循“实践—理论—实践”的基本规律。其研究过程可大致分为以下步骤:① 通过对自然界和生产实践中的流体力学现象的观察,从中抽出共性问题进行研究;② 对自然现象和实践问题进行研究、认识,从中找出主要因素,忽略次要因素,建立抽象的数学模型;③ 对数学模型进行理论分析和实验研究,总结并验证基本规律,形成理论;④ 以得到的基本理论去指导和预言实践,并在实践中检验、修正理论,使其完善。依据研究手段的不同,流体力学研究方法包括理论分析法、实验研究法和数值模拟法三种。

1. 理论分析法

理论分析法分析步骤如图 0-5 所示。根据工程实际流动特点和物质运动力学规律,首先提出合理的理论模型,建立流体运动基本方程及定解条件,然后运用各种数学方法求出方程的解。理论分析法的关键在于提出理论模型,并运用数学方法求出揭示流体运动规律的理论结果。理论分析法的优点在于能够明确给出各物理量和运动要素之间的变化关系,揭示出流动现象的物理本质,理论分析得到的解析解普适性强;缺点在于数学求解上的困难,许多实际流动问题还难以精确求解,能得出解析解的数量有限。



图 0-5 理论分析法步骤

2. 实验研究法

实验研究法是通过在具体流动现象的观察和测量,得到流体运动的规律。实验研究在工程流体力学中占有极为重要的地位。实验研究法的优点在于能够直接解决实际当中的复杂问题,并能发现新现象和新问题,它的结果可以作为检验其他研究方法所得结果是否正确的依据;缺点在于对于不同情况,需要做不同的实验,结果的普遍适用性差。实验研究法基本步骤如图 0-6 所示。



图 0-6 实验研究法步骤

3. 数值模拟法

数值模拟法是在计算机应用技术基础上,采用各种离散化方法(有限差分法、有限单元法、有限分析法、边界元法等)将流体力学中一些难以用解析方法求解的理论模型离散为各种数值模型,通过计算机进行数值计算,得到流体运动规律定量描述的数值解。数值模拟法基本步骤如图 0-7 所示。



图 0-7 数值模拟法步骤

数值模拟法的优点在于许多采用分析法无法求解的问题,通过数值模拟法可以得出数

值解。近几十年来,这一方法得到快速发展,已经形成流体力学的一门新学科——计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,简称 CFD)。

从 20 世纪 60 年代起,在飞行器和其他涉及流体运动的课题中,经常采用电子计算机做数值模拟研究。数值模拟和实验研究相互配合,使科学技术的研究和工程设计的速度加快,并节省了开支。数值算法近些年发展很快,其重要性与日俱增。数值算法作为一种与理论解析、实验观测并列的研究方法,在解决诸如飞机外形、发动机喷嘴设计、气象预报、环境污染预报、油田开发的动态模拟以及水利工程中的各种水流问题等方面,已经取得了显著成效。当今很多飞机设计公司都用 CFD 手段来验证、修改设计成果,不但大量减少风洞次数和实验费用,还能缩短每次新设计风洞实验周期。美国洛克希德公司在设计 F-35 战斗机时,很多风洞实验都用 CFD 代替。虽然最终的成品还是要靠风洞来验证,而且对超音速的模拟 CFD 的精度不如亚音速,不过波音这类公司在设计小型运动飞机的时候已经完全用 CFD 手段替代风洞实验,计算出来的结果和风洞实验数据相差无几。

解决实际流体力学问题时,以上三种方法往往同时使用,彼此之间相辅相成、互为补充。实验研究有了理论的指导,才能从零散的、表面上貌似无联系的流动现象和实验数据中得出规律性的结论。反之,理论分析和数值计算也要依靠现场观测和实验研究给出物理图案或数据,以建立流动的力学和数学模式;为验证计算程序的可靠性,数值模拟的结果应与实验结果或理论分析解析解进行比较,同时还必须依靠实验来检验这些计算模型是否完善及其适用性。此外,实际流动往往异常复杂(如湍流),理论分析和数值计算会遇到巨大的数学和计算方面的困难,得不到具体结果,只能通过现场观测和实验室模拟进行研究。

四、流体力学工程应用举例

1. 西气东输工程

我国西部地区的塔里木盆地、柴达木盆地、陕甘宁和四川盆地蕴藏着 26 万亿 m^3 的天然气资源和丰富的石油资源,约占全国陆上天然气资源的 87%。特别是新疆塔里木盆地,天然气资源量有 8 万多亿 m^3 , 占全国天然气资源总量的 22%。塔里木北部的库车地区的天然气资源量有 2 万多亿 m^3 , 是塔里木盆地中天然气资源最富集的地区,具有形成世界级大气区的开发潜力。塔里木盆地天然气的发现,使我国成为继俄罗斯、卡塔尔、沙特阿拉伯等国之后的天然气大国。

2000 年 2 月,国务院批准启动西气东输工程,这是仅次于长江三峡工程的又一重大投资项目,是拉开“西部大开发”序幕的标志性建设工程。

西气东输工程是我国距离最长、口径最大的输气管道建设工程,西起塔里木盆地的轮南,东至上海;全线采用自动化控制,供气范围覆盖中原、华东、长江三角洲地区;沿途穿越戈壁沙漠、黄土高原以及吕梁山、太行山、太岳山,并跨越黄河、长江、淮河等江河,全长 4 000 多千米;工程总投资超过 2 900 亿元,输送量最终达到 200 亿 m^3/a 。

西气东输要解决的关键问题是输送管网设计、防腐、安全、环保等,与流体力学紧密相关(图 0-8、图 0-9)。

2. 南水北调工程

南水北调工程是一项战略性工程,是指把长江流域水资源自其上游、中游、下游,结合我国疆土地域特点,分东、中、西三线抽调部分送至华北与淮海平原和西北地区水资源短缺地区;工程规划区涉及人口 4.38 亿人,调水规模 448 亿 m^3 ;工程规划的东、中、西线干线总长

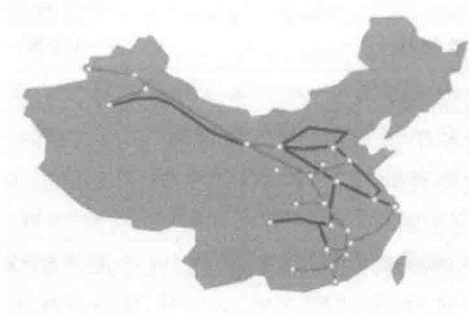


图 0-8 西气东输工程

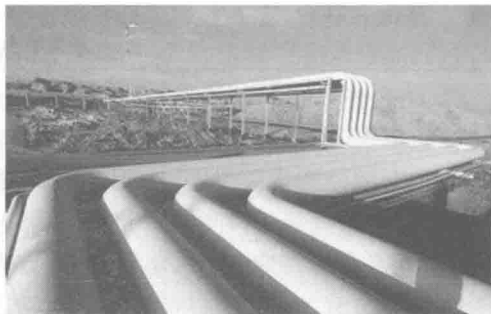


图 0-9 输气管路

度达 4 350 km,东、中线一期工程干线总长为 2 899 km,沿线六省市一级配套支渠约 2 700 km。

南水北调东线工程创造了世界上规模最大的泵站群——东线泵站群工程,工程实施分三期,第一期工程共计增建泵站 21 座,工期 6 年;第二期工程在第一期工程基础上增建泵站 13 座,工期 3 年;第三期工程在第二期工程基础上增建泵站 17 座,工期 5 年。南水北调东线第一、二、三期主体工程共计投资 420 亿元。南水北调东线工程是在现有江水北调工程、京杭运河航道工程和治淮工程的基础上,结合治淮计划兴建一些有关工程规划布置的。东线主体工程由输水工程、蓄水工程、供电工程三部分组成(图 0-10、图 0-11)。



图 0-10 南水北调干渠某泵站



图 0-11 丹江口大坝

3. 国产大飞机项目

国产大飞机项目是指我国在《国家中长期科技发展规划纲要》中确立的研制大型飞机重大科技专项,是我国提升自主创新能力的战略重点,总体投入将达 2 000 亿元。

大飞机采用“主制造商-供应商”研制模式。中国商飞作为大飞机主制造商,定位于设计集成、管理体系、总装制造、市场营销、客户服务、适航取证等方面,发动机、机载设备、材料等主要外包。所谓大飞机,一般是指起飞总重超过 100 t 的运输类飞机,包括军用、民用大型运输机,也包括 150 座以上的干线客机。经济合作与发展组织将大飞机制造业列于知识经济产业的首位,在此之前世界上只有美国、俄罗斯、欧盟能够制造大飞机。2007 年,中国大飞机项目正式立项。2008 年 5 月,中国商用飞机有限责任公司在上海揭牌成立,标志着中国的“大飞机”研制工作开始实质性启动。国产大飞机的首个型号已正式命名为 C919。2015 年 11 月,C919 正式下线,其最大载客量 190 人,航程最大达 5 555 km(图 0-12)。



图 0-12 国产大飞机 C919 下线

拓展阅读

流体力学发展前沿专题, 参见中国科学院编写的《中国学科发展战略: 流体动力学》。