

○ 陆煜康 唐锂 编

水处理节能和 新能源的应用

SHUICHULI JIENENG
HE XINNENGYUAN DE YINGYONG

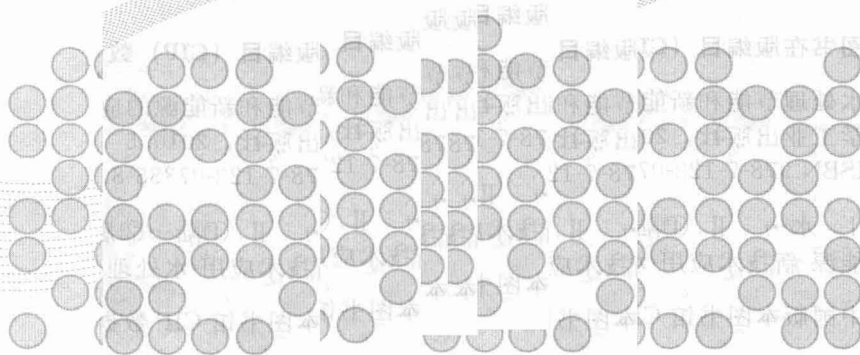


化学工业出版社

○ 陆煜康 唐锂 编

水处理节能和 新能源的应用

SHUICHULI JIENENG
HE XINMINENGYUAN DE YINGYONG



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要探讨水处理全程节能的可能性,找出节能的关键,介绍当前适用于水处理的节能技术,简述其原理和使用方法。内容主要包括:水处理工艺节能、电机拖动设备与节能、变频调速在水处理中的应用、废物利用和能源、水处理节能新技术和新工艺、水处理厂可开发应用的新能源。

本书可供水处理领域的研究人员、技术人员、管理人员阅读使用,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水处理节能和新能源的应用/陆煜康,唐锂编. —北京:
化学工业出版社, 2010. 5
ISBN 978-7-122-07885-8

I. 水… II. ①陆…②唐… III. ①水处理-节能-技术
②能源-新技术应用-水处理 IV. TU991. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 036477 号

责任编辑: 徐 娟
责任校对: 陈 静

文字编辑: 荣世芳
装帧设计: 史利平

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 北京云浩印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 15 1/2 字数 411 千字 2010 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

序

陆煜康先生一生从事给水排水专业技术信息工作，积累了大量技术信息工作经验，退休以后仍然壮心不已，继续关心和研究相关技术的发展和资料积累工作。唐锂同志则是工作在给水排水设计第一线的技术骨干，年富力强，具有丰富的实际工作经验。他们根据我国实际需要，紧紧围绕我国发展经济的战略方针——节能、减排、降耗、低碳、开发应用新能源、实现资源和环境的可持续发展问题，收集、整理了大量国内外相关实用技术资料，在此基础上结合自己的经验编辑成本书——《水处理节能和新能源的应用》。

给水和污水的提升、输配、处理、无害化、资源化和再利用的各个环节，都要消耗一定量的、各种形式的能源，因而成为城市基础设施中的耗能大户之一，构成水处理成本的主要部分。所以水处理工程长期稳定运行，成为城市发展的经济负担和重要制约因素，也是我国目前城市污水处理率还比较低、环境污染压力还比较大、能源供应还比较紧张、水质污染和供水安全故障时有发生的重要因素。要解决这些矛盾，除了加强立法、完善技术管理和加大经济投入以外，还迫切需要低能耗和生态环保型的水处理技术、提升输配技术、再生利用技术和新能源应用技术。

本书针对这种需要，对水处理的各工艺环节、主要设备及其控制方法的能源消耗做了详尽、具体分析，讲述了提高能效、节约能源、再生利用的具体方式、方法和技术参数，同时对污水、污泥处理的无害化、生态化、资源化、零排放和各种新能源的开发应用进行了介绍。书中还列举了很多国内外工程实例供读者参考。本书给读者提供了较全面、具体、翔实、实用的水处理节能和新能源应用技术方面的参考资料。

该书的及时出版发行，适应了我国的现实需要和广大水处理技术管理、设计、运行、教学等岗位工作者的迫切要求。

张延灿

2010年2月10日

前 言

国家发改委在“节能中长期专项规划”中提到，“能源是战略资源，是全面建设小康社会的重要物质基础。解决能源约束问题，一方面要开源，加大国内勘探开发力度，加快工程建设，充分利用国外资源。另一方面，必须坚持节约优先，走一条跨越式节能的道路。节能是缓解能源约束矛盾的现实选择，是解决能源环境问题的根本措施，是提高经济增长质量和效益的重要途径，是增强企业竞争力的必然要求。不下大力气节约能源，难以支持国民经济持续快速协调健康发展；不走跨越式节能的道路，新型工业化难以实现。必须从战略高度充分认识节能的重要性，树立忧患意识，增强危机感和责任感，大力节能降耗，提高能源利用的效率，加快建设节能型社会，为保障到 2020 年实现全面建设小康社会的目标作贡献。”

水处理厂是耗能大户，多年来我国水处理技术都侧重于工艺研究和技术改进方面，取得了很大的成果。对水处理能耗的研究只是根据某个具体工程的设计做一些探讨，虽然这方面的报道量少而且分散在不同的刊物上，但对水处理节能做了有益的经验介绍，而水处理全程的节能尚未见报道。水处理是一个系统工程，节能潜力巨大，水处理全程节能问题确实是一个复杂而难度较大的问题，因为水处理技术涉及的边缘学科较多，如水力学、物理学、化学、微生物学、机械、电气、仪表自动化以及近期出现的膜技术、变频技术、热泵技术等。如何将这些技术有机地结合起来，用于水处理全程的节能，是一个值得探讨的课题。编者几年前就考虑全程水处理节能的问题，苦于知识贫乏，感觉无从着手。因为水处理的能耗和能效体现在整个工艺过程中，如考虑水处理新技术新工艺的节能，离不开机械、电气、化学等技术；而考虑变频和热泵节能技术在水处理中的应用，又离不开水处理工艺和新技术、新工艺的应用。各边缘学科相互交叉、纷纭复杂又环环相扣，想要理顺很困难。最后决定先探讨水处理各个工艺的能耗表征、耗能的主要原因及节能的可能性，初步了解在水处理工艺中哪些阶段能耗最大，需要采取什么方法节能，再说明水处理中能够采用的各种节能方法，并简述这些节能技术的原理、特点，进而研究这些节能技术如何应用在水处理工艺中，最后分析水处理工艺对可再生能源生产利用的可能性和自产能源的方法。因为节能是降低成本的重要手段，但自产能源是节能的一个补充，甚至可以解决水处理厂大部分的能耗。本书只是概括地介绍节能技术原理，因为这里不是探讨节能技术本身，而是探讨这些节能技术如何用于水处理工艺，至于各种节能技术的详细原理、理论分析、设计方法等请参考有关专业书籍。

随着我国经济的快速发展，资源匮乏、环境污染的问题日益突出，经济发展与资源环境的矛盾日趋尖锐。近几年以电费为主的能耗费用不断上涨，许多污水处理厂因为巨额的运行费用而不能正常运转，使国家投资建设的污水处理厂没有发挥应有的作用。因此，污水处理厂除采用节能方法降低能源消耗外，还应尽力根据自身的特点寻找替代能源，因为降低水处理成本是保障污水处理厂正常运转和进一步发展的重要手段。

在本书的编写过程中张延灿、侯立安等同志做了认真的审阅，詹才英对书稿素材的整理、归类做了大量的工作，张素春绘制了部分插图，在此表示真诚的感谢。

由于节能技术涉及面较广，而编者编写时间和水平有限，书中不足和疏漏之处恳请广大读者给予批评指正。

编者

2010 年 1 月

目 录

第一章 水处理工艺节能	1	七、定时供水控制	83
第一节 给水处理工艺的能耗和能效	1	八、循环水控制	84
一、给水处理工艺中的电耗	1	九、小区变频恒压供水	85
二、生产过程的电耗	4	十、深水井变频供水	85
三、给水处理主要节能方法	4	十一、变频调速供水电控装置	85
四、给水处理节能措施	6	十二、水塔与水池循环用水控制	86
五、供水系统的节能	6	十三、消防给水的变频调速	87
六、供水系统调节方式与节能选择	9	十四、冷却水系统变频调速	88
七、预处理和常规处理节能	9	十五、加药搅拌机变频控制	89
第二节 污水处理工艺的能耗和能效	10	十六、滤池反冲洗变频	89
一、污水处理厂的节能途径	11	十七、工业锅炉给水的变频器控制	89
二、鼓风机降耗	15	十八、变频供水实例	90
三、空压机流量和工作压力的确定	18	第二节 污水处理变频控制	93
四、工业废水处理节能技术	20	一、污水处理变频控制	93
第二章 电机拖动设备与节能	21	二、排水泵变频	93
第一节 水处理中主要设备的耗能	23	三、空气压缩机变频控制	94
一、电动机负载功率	23	四、风机变频调速要点	98
二、电机节能	23	五、恒压供气控制	99
第二节 电动机的节能方法	27	六、空气压缩机的选择	100
一、异步电动机同步运行改造	27	七、风机选型的依据	100
二、改变定子绕组的形式	27	八、风机的维护	101
三、重绕定子绕组	27	九、排泥行车变频控制	101
四、改变电动机的极数	27	十、桥式吊车变频控制	101
五、使用节能材料	28	十一、其他工艺变频控制	104
六、使用电动机节电风扇风罩	28	十二、变频控制实例	104
第三节 变频调速技术	28	第三节 管路系统节能	107
一、变频调速节电	29	一、管网特性曲线	107
二、变频控制方式	30	二、管道压力降	108
第四节 电机拖动设备的节能	31	三、降低管道漏耗	110
一、水泵节能	31	四、提高管路效率的途径	110
二、泵站节能	39	五、管道检测技术	111
三、空压机节能	46	六、管道物探技术的应用实例	115
四、阀门节能	48	第四章 废物利用和能源	117
第五节 热泵节能	51	第一节 污泥沼气发电和利用	117
一、热泵的原理	52	一、污泥沼气的制备	117
二、水源热泵技术的应用	56	二、沼气发电系统	120
第三章 变频调速在水处理中的应用	75	三、混合消化气发电技术	122
第一节 变频调速在供水中的应用	75	四、污水处理小型发电	123
一、取水泵变频控制	76	五、工业污水沼气发电	123
二、变频恒压供水	77	六、日本污泥气的利用	124
三、控制系统的组成	78	七、沼气发电余热的利用	124
四、城市供水变频调速系统	78	八、太阳能沼气	126
五、变频调速水位控制	79	第二节 垃圾焚烧能源的回收利用	126
六、水位闭环控制	82	一、城市垃圾焚烧发电	127

二、污泥油化	128	(UASB)	162
三、污泥炭化	129	十六、UCT 工艺	163
四、烟道气余热的利用	133	十七、VIP 工艺	163
第三节 废弃物能源应用实例	133	十八、膨胀颗粒污泥床 (EGSB)	164
一、污泥处理及能源利用实例	133	第四节 几种组合工艺	164
二、山形县净化中心污泥消化气发电	133	一、BAF+常规处理+UF 组合工艺	164
三、海南生物质气化发电厂	135	二、UASB+CASS 组合工艺	164
四、利用污水排放落差发电	137	三、DAT-IAT 工艺	165
五、生物质生产液体燃料	138	四、PAC-SBR 组合工艺	165
六、工业废水回收利用实例	139	五、GSH 组合式高效生物法	166
第五章 水处理节能新技术新工艺		六、UASB+TF (滴滤床) 组合工艺	166
集景	140	七、BSBR (膜+SBR) 工艺	166
第一节 节能和工艺优化的活性污泥法	142	八、SHARON-ANAMMOX 组合工艺	166
一、AB 工艺	142	九、UASB+AF 组合工艺	167
二、A ² /O 工艺与节能	142	十、UASB+SBR 厌氧反应器	167
三、A/O 工艺	143	第六章 水处理厂可开发应用的	
四、OAO 工艺	143	新能源	168
五、序批式间歇活性污泥法及其衍变	143	第一节 太阳能发电方法和应用	168
六、BMS 处理系统	148	一、太阳能光伏发电系统	168
七、SPR 污水处理技术	148	二、太阳能热发电的方法	171
八、SAS 工艺	149	三、色素敏化太阳能电池的应用	174
第二节 节能型曝气法及其衍变	149	第二节 太阳能在水处理厂中的应用	175
一、氧化沟及其改进	149	一、利用有利条件发电的方法	175
二、CLR 工艺	150	二、太阳能在水处理设备中的应用	184
三、EWP 高效污水净化器	150	三、路灯照明节能	196
四、S-BF 新型高效接触氧化工艺	150	四、太阳能应用实例	197
五、WT-FG 生物法	151	第三节 太阳能热泵在水处理中的应用	198
六、VT-VD 深井曝气技术	151	一、太阳能热泵的基本原理和特点	198
七、BIOSTYR 处理技术	153	二、太阳能热泵污泥干化技术	200
八、HCR 高效好氧生物处理技术	154	三、高效节能的双热源热泵	201
九、百乐克工艺	155	第四节 风能在水处理中的应用	202
第三节 污水厌氧处理新技术	157	一、国内各地区风力资源	202
一、厌氧接触 (AC) 工艺	157	二、风机和风力发电	204
二、厌氧流化床 (AFB)	158	三、风能在污水处理工艺中的应用	208
三、内循环反应器 (IC)	158	第五节 近海水处理厂海洋能的应用	213
四、厌氧折流板反应器 (ABR)	158	一、海洋能发电的应用	213
五、厌氧膜生物反应器 (AMBR)	158	二、利用海洋的风-光发电	214
六、Bardenpho 工艺	158	三、海流和盐温差发电	215
七、Phostrip 生物除磷工艺	158	名词和缩写	218
八、Barth 脱氮工艺	159	附录	234
九、Dephanox 工艺	159	附录一 中华人民共和国国民经济和社会	
十、厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 工艺	160	发展第十一个五年规划纲要	
十一、短程硝化-反硝化 (SHARON)		(有关环境和水处理部分)	234
工艺	160	附录二 国家中长期科学和技术发展	
十二、生物膜内自养脱氮 (CANON)		规划纲要 (2006~2020 年)	
工艺	160	(有关节能和水处理部分)	235
十三、OLAND 工艺	161	参考文献	237
十四、SND 工艺	161		
十五、升流式厌氧污泥床反应器			

第一章 水处理工艺节能

供水系统是城市的血脉，是不可缺少的基础设施。供水能力和供水质量与国家经济建设是紧密相连的，供水价格关系到国计民生，因此采取技术措施保证供水质量、降低供水价格是十分必要的。在提高供水质量的前提下，大力降低制水成本，有利于给排水工业的发展和满足人民生活的需要。

制约水处理工业发展的主要因素是能耗，只有解决了能耗问题才能使水处理事业有较大的发展。水处理各工艺阶段都有能源消耗，但各工艺阶段消耗的能源不同，因此，分析各阶段能耗产生的原因和可能降低能耗的关键点，以便采取技术措施降低生产成本。

常规给水处理系统由混合、反应、沉淀、过滤、消毒等阶段组成，其运行费用主要包括以下几个方面。

- ① 电费。机电设备的电耗，主要是泵站的消耗（包括系统水头损失消耗等）。
- ② 人工费、大修折旧费、消毒剂等费用。
- ③ 混凝剂费及自用水费。自用水主要用于沉淀池排泥、滤池反冲洗。
- ④ 运行费用。这与运行管理、构筑物性能等有关。

现行的污水处理技术多面临着高额资金的难题，迫切需要低能耗、高效率的经济处理方法。因此，需要在水处理各个工艺阶段采用不同的节能方法，发挥现有节能的技术优势，大幅降低污水处理能耗。但在水处理工艺各个阶段采用节能措施是一个较为复杂的难题，要解决污水处理能耗，就要了解污水处理能耗的构成，找出能耗损失的原因以及能耗过程各个环节的影响因素，以便采取可行的节能措施。

城市污水处理厂消耗的能源主要包括电、燃料及药剂等潜在能源，其中电耗占总能耗的 60%~90%，主要用于污水和污泥的提升、生物处理的供氧和混合、污泥的稳定和处理、专用机械设备的能耗、附属建筑和厂区的照明等方面。用于污水生物处理过程的电耗约占全厂用电的 70%，污泥处理约占 20%，厂区照明及办公室用电约占 10%。污泥加热及厂区供热消耗的热能约占全厂热耗的 60%，消化池加热约占 30%，厂内供热约占 10%。

由于污水处理的能耗大，成本高，近年来电费又不断上调，使污水处理厂的运转费用不断增高，不少已建成的污水处理厂往往因经费不足而时开时停甚至完全停转。因此，在污水处理厂的建设过程中应选择合理的处理工艺，尽可能地使用节能设备及装置，并在每一工艺阶段采用有效的节能措施，加强科学管理，逐步实现污水资源化，才能使污水处理技术向低能耗、高效率的方向发展。

第一节 给水处理工艺的能耗和能效

一、给水处理工艺中的电耗

在给水处理生产过程中，电耗可以分为有功电耗和无功电耗。有功电耗是将源水转化为自来水所需的能量；无功电耗是内部消耗的能量。

1. 有功电耗的确定

根据能量守恒定律，自来水生产过程消耗的有功电耗 $W(\text{kW} \cdot \text{h})$ 为

$$W = \gamma Q H_{\text{净}} T / 100 \quad (1-1)$$

式中, γ 为水的容重, kg/L ; Q 为单位时间产量, m^3/s ; $H_{\text{净}}$ 为满足服务需求的供水水位标高与源水水位标高差, m ; T 为产水时间, h 。

在自来水生产过程中, 由于受到设备、管道及构筑物内耗等的影响, 工作效率不可能达到 100%。实际生产耗电量与无功耗电量的差, 即为有功耗电量。

2. 无功电耗

无功电耗是克服各种内部损失而消耗的电能, 无功电耗值随工况变化而变化。工况越好, 其值越低, 工作效率越高, 工况差则反之。无功电耗一般包括水泵、电动机及配电设备的内耗以及管道、构筑物克服水头损失的消耗等。

(1) 管道内耗 给水生产过程中的管道内耗包括源水输水管道及处理构筑物间连接管道的内耗, 即水头损失。输水管道和连接管道较短, 水头损失较小。

$$\text{水泵输水总扬程 } H = H_{\text{净}} + \sum h = H_{\text{出}} - H_{\text{进}} + (V_2 - V_1)/(2g) + \Delta Z$$

在实际工艺中由于 $[(V_2 - V_1)/(2g) + \Delta Z]$ 数值较小, 源水输水管道的水头损失可以忽略。水泵进、出口流速水头的影响直接按水泵进、出口压力差计算, 即:

$$\sum h = H_{\text{出}} - H_{\text{进}} - H_{\text{净}} \quad (1-2)$$

式中, $\sum h$ 为输水管道总水头损失, m ; $H_{\text{出}}$ 为水泵出口压力, m ; $H_{\text{进}}$ 为水泵进口压力, m ; $H_{\text{净}}$ 为水泵的净扬程, m 。

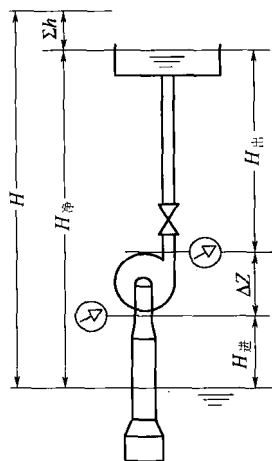


图 1-1 水泵扬程示意

水泵扬程如图 1-1 所示。

在实际生产过程中, 应以设计值或历史最小值作为控制标准, 尽量将 $\sum h$ 值控制在近于标准值。 $\sum h$ 值增大的原因主要是管内壁粗糙度增加、吸水口堵塞、阀门开启度不足、阻力增大等, 必须逐一进行检查并处理。

(2) 配水过程的管内耗 配水过程的管内耗由于配水管网较复杂, 测定及计算很困难。因此, 需定期进行管网平差, 作为新铺设管线或管网改造的参考数据。

(3) 水处理构筑物的内耗 水处理构筑物的内耗是指水处理构筑物在生产过程中的混合、絮凝、沉淀、过滤等所必需的水头。这些水头的大小较稳定, 生产过程也不需进行统计与分析, 仅在设计与技改时再进行计算与校核。

(4) 水泵、电动机的工作内耗 水泵、电动机工作所消耗的电能占整个制水工艺消耗电能的比例很大。因水泵的型号较多, 性能差别很大。电动机一般应选用 Y 系列, 因 Y 系列的电动机效率高 (达 88.263%), 平均起动转矩高, 可减少因起动转矩较低而造成的能耗损失。由于电机发热、电压波动等因素, 所选电机很难和水泵工作要求完全一致, 因此电动机容量宜比水泵要求大一些, 以电动机 80% 满载为最佳。如果因为某种原因电动机容量过大, 负载太低, 不仅会因为电动机效率低而增加电动机的能量损耗, 而且会因为电动机的功率因数 $\cos\phi$ 降低而增加输电线路和变压器的损耗。

水泵、电动机的工况会随时间的延长逐步变差, 效率逐步降低, 适时进行维护, 恢复设备的工况对节能具有相当重要的意义。因此, 必须充分了解设备的运行工况, 经常对设备的运行情况进行监测和分析, 适时进行维护。

可根据设备的设计效率参数计算出设备在设计工况下, 将 1km^3 水提高 1MPa 压力时的单位电耗。

$$N[\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{km}^3 \cdot \text{MPa})] = W/(\eta_{\text{传}} \eta_{\text{电}} \eta_{\text{泵}} HQ) \quad (1-3)$$

式中, N 为设备设计配水单位耗电量, $\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{km}^3 \cdot \text{MPa})$; W 为设备配水总耗电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $\eta_{\text{泵}}$ 为水泵设计工作效率; $\eta_{\text{电}}$ 为电动机设计工作效率; $\eta_{\text{传}}$ 为电动机、水泵机组的传动效率; H 为设计配水总扬程, MPa ; Q 为设计配水总流量, km^3 。

实际生产运行机组配水单位耗电 N' 为:

$$N' = W' / (Q' H')$$

式中, N' 为机组实际配水单位耗电量, $\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{km}^3 \cdot \text{MPa})$; Q' 为机组实际配水总抽水量, km^3 ; H' 为机组实际输水总扬程, MPa ; W' 为机组实际配水总耗电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

当 $N = N'$ 时, 工作效率达到设计要求, 机组的设备内耗值处于正常范围; 当 $N < N'$ 时, 则机组工况变差, 内耗值超出正常范围。

内耗值增大的主要因素有: 水泵机械磨损、偏离设计高效段工作; 电动机机械磨损超出控制值、电动机工作电压小于额定值、电动机负荷系数 (即电动机实际负荷与额定负荷之比) 降低、电动机功率因数降低等。

① 水泵机械磨损。水泵机械磨损包括传动机构轴承、轴封的摩擦损蚀, 叶轮圆盘在泵壳内运行时和流体的摩擦损蚀以及叶轮和减漏环间隙的摩擦损蚀。

② 水泵偏离设计高效段。水泵偏离设计高效段主要是由于水泵的输水量、工作扬程受到河床水位、管网配水流量变化的影响。

某水厂供水能力为 $5 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$, 设备配置见表 1-1。一级水泵设计扬程按最不利情况即历史最低水位 1.9m 时的扬程 $H = 33\text{m}$ 选取。设计流量按最不利情况时, 水泵机组采用 2 用 1 备的方式。

表 1-1 设备配置

设备编号及名称	型 号	规 格
B101、B103 水泵	16S-9D	$Q=900 \sim 1260 \text{m}^3/\text{h}$, $H=32 \sim 37\text{m}$, $\eta=81\% \sim 84\%$, 叶轮直径 $D=510\text{mm}$
B101、B103 电动机	JS126-6	380V , $N=155\text{kW}$
B102 水泵	12Sh-13	$Q=619 \sim 900 \text{m}^3/\text{h}$, $H=29.5 \sim 36.4\text{m}$, $\eta=80\% \sim 83.5\%$, 叶轮直径 $D=352\text{mm}$
B102 电动机	Y280M1-4	380V , $N=90\text{kW}$, $\eta=92.7\%$

当河床水位高于 3m 时, B101、B103 水泵扬程低于 32m, 处于高效段外工作; 当河床水位高于 5m, B102 水泵扬程低于 29.5m, 也处于高效段外工作。由表 1-2 可知: 河床水位低于 3m 的月份出现频率为 8.14%, 水位低于 3~5m 的月份出现频率为 38.4%。所以一级水泵在全年的大部分时间处于高效段外工作, 因而能耗较高。

在河床水位变幅较大和全年供水量变化较大的地区 (表 1-2), 应考虑拓宽水泵高效工作段。如果为多水源供水, 其中一个供水厂或单水源供水管网的净水厂, 清水池调节容积较大, 能够补充短时供水的增加水量时, 在不利情况下一级泵房可以不考虑设置备用泵。这样看起来安全性较差, 实际上多水源供水管网各水厂可以互相调节, 清水池也能补充调节水量。而且枯水位季节也是一年供水量的低谷期, 供水量较小, 达不到设计值, 如能充分利用水泵的高效段, 可提高水泵工作效率。水泵偏离高效段工作的情况仅在河床超高水位时出现, 这时仍可通过调速、更换叶轮 (叶轮切削)、闸阀节流等方法调节水泵工况点, 使之处

表 1-2 1993~2000 年 2 月水位及供水量情况调查

总月数	河床水位低于 3m				河床水位 3~5m		年平均水位 /m
	出现月数	出现频率 /%	平均时供水量 /(m ³ /h)	最大时供水量 /(m ³ /h)	出现月数	出现频率 /%	
86	7	8.14	1707	2100	35	38.4	7.75

于高效段内来解决。这样就能提高水泵的年工作效率，降低水泵的无功能耗。

③ 电动机机械磨损。电动机机械磨损包括轴承、风叶及电刷等的摩擦损耗，运行时必须加强维护管理，定期进行检测。

④ 电网电压的影响。电动机工作电压不稳定，当电压低于额定电压时，工作电流将比正常值大，各配电设备、线路的电阻产生的热损失增大。

⑤ 电动机负荷系数及功率因数降低，不仅会增加电动机输电线路、变压器线路、变压器的能耗，而且会增加发电、输电系统的附加损耗。当电动机负荷接近额定值时， $\cos\phi$ 值达最大值，必须对电流、电压及时进行记录、分析，以判断抽水量的变化，采取正确的措施，避免“大马拉小车”或“小马拉大车”而造成的能耗浪费或不安全运行现象。设备效率的测定应定期进行，因此，生产过程的电耗情况分析是系统工作状态检测的必要手段。

二、生产过程的电耗

降低自来水生产过程的电耗，即降低或消除造成系统工作效率低的无功电耗，这就必须找出这些无功电耗的种类和产生的原因，以便有的放矢地加以解决。生产耗电情况分析见表 1-3。

表 1-3 生产耗电情况分析

编号	项 目	目标值	完成值	差异率/%
1	一级总水头损失/m			
2	一级设备配水单位耗电/[kW·h/(km ³ ·MPa)]			
3	二级设备配水单位耗电/[kW·h/(km ³ ·MPa)]			

表 1-3 中各项目目标值可用作制定指标时参考。当项目完成值与目标值出现差异时，表明设备工况产生变化，必须进行检查、分析，找出原因，制定解决问题的措施。

三、给水处理主要节能方法

制水工艺是通过水泵输送水，完成电能→机械能→势能的能量转换过程，是城市的用电大户。如某水厂三年运行统计结果，电费占整个制水成本的比例分别为 24.5%、17.7% 和 21.4%，如采用节能措施，则能耗每下降一个百分点，每年就可节约成本 40 余万元。

1. 变压器节能

变压器的节能主要在于降低变压器损耗和负载损耗，即提高效率。

变压器效率 η 为输出有功功率与输入有功功率之比的百分数，即：

$$\eta = \beta S_2 N \cos\phi_2 / (\beta S_2 N \cos\phi_2 + P_0 + \beta_2 P_f) \times 100\% \tag{1-4}$$

式中， $S_2 N$ 为二次侧额定容量； $\cos\phi_2$ 为二次侧功率因数，一般取 0.8； β 为负载系数； P_0 为空载损耗； P_f 为负载损耗。

由式(1-4)可知，变压器负载运行时，空载损耗与 β 无关，为一恒定值，负载损耗与 β_2

成正比，当 $\beta = \sqrt{P_0/P_f}$ 时， η 值最大，也即为最经济运行点。以某水厂采用的 800kV·A 容量的三种变压器为例，进行节能效果比较，绘出 3 种变压器的 η - β 曲线，见图 1-2。变压器降耗为更新同负载时降低损耗的百分数，即：

$$\Delta\eta = [(\beta S_2 N \cos\phi_2 / \eta_2 - \beta S_2 N \cos\phi_2 / \eta_1) / (\beta S_2 N \cos\phi_2 / \eta_2)] \times 100\% \\ = (1 - \eta_2 / \eta_1) \times 100\% \quad (1-5)$$

式中， η_1 为新变压器效率； η_2 为旧变压器效率。

若以新变压器（S₉ 型）更新旧变压器（S₇、SL₇ 型），取年平均负荷率 $\beta = 0.5$ ，则根据式(1-1)、式(1-2) 计算，各变压器效率和降耗率见表 1-4。

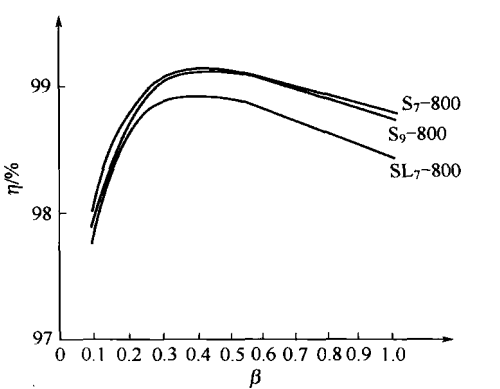


图 1-2 变压器 η - β 曲线

表 1-4 变压器效率和降耗率

型 号	$\eta/\%$	$\Delta\eta/\%$
S ₉ -800/10	99.098	
S ₇ -800/10	99.092	0.006
SL ₇ -800/10	99.892	0.208

根据图 1-2、表 1-4 可以看出，S₇、S₉ 型变压器和 SL₇ 型变压器相比节能效果较好，且负荷率越大，降耗率越大；而 S₉ 与 S₇ 型变压器之间损耗相差不大，甚至 $\beta > 0.6$ 时 S₉ 型比 S₇ 型损耗略大。经以上分析可知，变压器节能可通过采用低损耗的变压器来实现。

2. 高压电机节能

目前国内城市配电网多为 10kV 级和 6kV 级，在城市大中型水厂的设计选型或技术改造中，经技术经济分析，大中型高压电机显示出很大的优越性，所以得到了广泛的应用。

3. 无功功率补偿节能

电流通过线路及变压时产生线路电阻损耗及变压器负载损耗，其有功功率损失 ΔP 为：

$$\Delta P = 3P_2 R / (U_2 \cos\phi_2) \quad (1-6)$$

式中， P_2 为有功功率，kW； U_2 为额定电压，kV； R 为线路或变压器总电阻， Ω 。

从式(1-6) 中可知，在负载有功功率一定时 ΔP 与 $\cos\phi_2$ 成反比，如果功率因数从 $\cos\phi_1$ 上升到 $\cos\phi_2$ ，则有功功率损失下降的百分数为：

$$\Delta P\% = (1 - \cos\phi_1) / \cos\phi_2 \times 100\% \quad (1-7)$$

如果功率因数从 0.8 补偿到 0.9，根据式(1-7) 计算得 $\Delta P\% = 22\%$ ，即线路或变压器损耗下降 22%，由此可知，无功功率补偿，即通过提高功率因数降低运行电流，可以降低线路或变压器中的损耗，达到节能效果。

4. 水泵节能

水泵是水厂的主要设备，水泵的节能方法主要有以下两种。

(1) 水泵更新节能 随着城市发展和管网使用年久，管路阻力特性曲线会不断下移，供水量不断增加。在水厂水泵不能同步改造时，会使水厂水泵工作段远离高效区，扬程下降，效率降低，造成大量的电能浪费。通过对水泵的及时更新改型，可提高水泵效率，达到节能的目的。

(2) 水泵调速节能 传统的供水都采用阀门调节，近年来，供水站的设计大都采用变频调速控制，实现自动、恒压运行，达到无人值守，最大限度地满足系统的要求。

全自动恒压供水控制装置主要由压力传感器、指示调节仪、电子调节器、可编程控制

器、变频器及动力控制柜等部分组成。

压力传感器将管网压力信号转换成电信号, 该压力信号经过显示与设定值进行比较, 其差值经 PID 运算后输出 $0\sim 10\text{mA}$ 标准信号来调节变频调速控制器, 改变电机转速以满足供水需要。

多台泵控制时, 当变频器控制的电机全速而水压低于设定值时, 指示调节仪发出信号, 可编程序控制器自动启动第 2 台水泵、第 3 台水泵……直至达到水压设定值, 再由变频器调节保持恒压供水。当用水量下降, 逐步向用水低谷过渡时, 水压超过设定值, 靠变频器控制的电机已是最低转速, 这时 PC 程控器又能自动关闭最后启动的 1 台水泵, 直至只留下 1 台水泵电机调节供水压力。

四、给水处理节能措施

城市供水节能主要表现在两个方面: 一方面是做好规划设计, 选择出最佳系统方案; 另一方面是搞好管理, 不断提高技术水平, 加强维护保养, 进行必要的技术改造。

1. 减少水处理工艺能量消耗

一般在水厂设计中的节能考虑主要有以下两个方面。

(1) 选择水处理工艺时, 要考虑能量消耗 尽量采用节省能耗的装置, 如泵前混合、跌水混合或管道混合。

在沉淀工艺中, 采用平流式沉淀池或斜管沉淀。

水厂中主要自用水量之一是反冲洗水。从节能目的考虑, 要尽可能地减少反冲洗水量和减少反冲洗水头, 一般反冲洗强度采用 $15\text{L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 。如果考虑气水反冲洗, 则反冲洗强度可减至 $8\text{L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$, 同时应考虑反冲洗水的回收。

(2) 水厂布置中的能耗 在布置中减少能量消耗的措施包括: ①工艺间平面布置要尽可能集中; ②必要时设置超越管。

2. 合理选择供水设备

供水工艺系统包括取水、净水及输配水三个部分, 在供水系统中, 一般取水和输配水部分的能耗占整个系统能耗的 $70\%\sim 80\%$ 。

供水系统的能量消耗是取水泵房和送水泵房的流量及其扬程乘积之和, 直接反映了耗能的大小。在选择给水系统中, 往往遇到是一次加压还是二次加压、泵站与水厂位置、泵站与水厂内的能量消耗等问题, 这些问题都可以用能量分析的手段进行方案比较, 以选出最佳的供水系统方案。

3. 提高泵房综合效率

水泵电机耗能大约占 97% 。理论上输送 $1\text{kt}/\text{m}$ 耗电为 $2.72\text{kW}\cdot\text{h}$ 。但实际上由于电机、水泵的效率是随水泵运转过程、管路流量的大小即水头损失的变化而改变的, 实际上电耗约为 $2.96\sim 4.45\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

五、供水系统的节能

在日常生活中, 离不开供水系统, 但如果提高供水的质量, 保证供水的恒定压力, 可节省大量的电能, 也可延长水泵的寿命。

1. 供水系统的主要参数

(1) 流量 Q 流量是单位时间内流过管道内某一截面的水量。在管道截面不变的情况下, 其大小取决于水流的速度, 符号为 Q , 单位为 m^3/min 。

(2) 扬程 H 扬程 H 是供水系统中把水从一个位置提升到另一位置时水位的变化量, 数值上等于对应的水位差, 单位为 m 。

(3) 实际扬程 H_B 供水系统中, 实际最高水位 h_2 与最低水位 h_1 之间的水位差, 即供

水系统实际提高的水位，称为实际扬程。

(4) 管阻 R 管阻 R 为阀门和管道系统对水流的阻力，因为不是常数，难以简单地用公式来定量计算，常用扬程与流量之间的关系曲线来描述。

(5) 压力 P 压力 P 指供水系统中某个位置（某一点）水的压强物理量。其大小在静态时主要取决于管路结构和所处的位置；在动态时则与流量与扬程之间的平衡情况有关。

2. 供水系统的特性和工作点

(1) 扬程特性 阀门开度不变，在某一转速下，全扬程与流量之间的关系曲线 $H_1 = f(Q)$ ，称为扬程特性曲线，如图 1-3 中曲线 1 所示。

扬程特性可以看成是“水源特性”或是“水源”（即水泵）的外特性，也就是用户用水越多（流量越大），管道中的摩擦损耗也就越大，供水系统的全扬程就越小。

因此，扬程特性反映用户的用水状况对全扬程的影响，流量大小取决于用户用水量，用 Q_1 表示。

(2) 管阻特性 若水泵转速不变，阀门在某一开度下，全扬程与流量间的曲线 $H_1 = f(Q)$ ，称为管阻特性曲线，如图 1-3 中曲线 2 所示。

流量的大小取决于阀门的开度（即管阻的大小），由供水侧来决定，故管阻特性的流量可以看成是供水流量，用 Q_2 表示。

当供水流量 Q_2 接近于 0 时，所需的扬程等于实际扬程（ $H_1 = H_2$ ），即全扬程小于实际扬程时，将不能供水。因此，实际扬程也是供水的基本扬程。

(3) 供水系统的工作点 扬程特性曲线和管阻特性曲线的交点称为供水系统的工作点，如图 1-3 中的 N 点。在这一点上，供水系统既能满足扬程特性，也符合管阻特性，供水系统处于平衡状态，系统就能稳定地运行。

(4) 供水功率 供水时所消耗的功率 P_1 (kW) 称为供水功率，供水功率与流量和扬程的乘积成正比：

$$P_1 = C_p H_1 Q \quad (1-8)$$

式中， C_p 为比例常数。

供水系统的额定功率与面积 $0ANG$ 成正比。

3. 调节流量的方法

在供水系统中，主要的控制对象是流量。因此，流量调节的方法有阀门控制法和转速控制法两种。

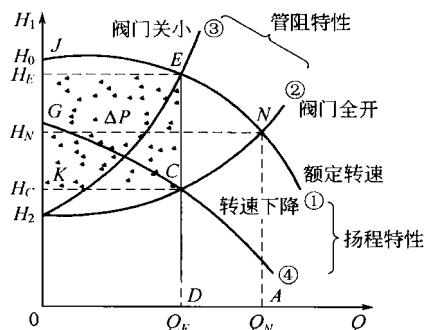


图 1-4 流量特性

(1) 阀门控制法 阀门控制法是通过开启阀门的大小来调节流量，而水泵转速不变（通常为额定转速），即水泵本身的供水能力不变，通过改变水路中的阻力大小来强行改变流量，以适应用户对流量的要求。这时，管阻特性将随阀门开度的改变而改变，但扬程特性不变。

如图 1-4 所示，设用户所需的流量 Q_x 为额定流量的 60%（即 $Q_x = 60\% Q_N$ ），当通过关小阀门来实现时，管阻特性将改变为曲线 ③，而扬程特性则仍为曲线 ①，故供水系统的工作点移至 E 点。这时，

流量减小为 $Q_E (=Q_x)$, 扬程为 H_E , 供水功率 P_1 与面积 $ODEJ$ 成正比。

(2) 转速控制法 转速控制法是通过改变水泵的转速来调节流量, 而阀门开度不变 (通常为最大开度)。当水泵转速改变时, 扬程特性将随之改变, 而管阻特性则不变。

如用户所需流量等于 $60\% Q_N$ 时, 通过降低水泵转速使 $Q_x = 60\% Q_N$, 扬程特性为曲线④, 管阻特性仍为曲线②, 故工作点移至 C 点。这时, 流量减小到 $Q_E (=Q_x)$, 扬程减小为 H_C , 供水功率 P_C 与面积 $ODCK$ 成正比。

(3) 两种方法的比较 从上述两种调节流量的方法可以看出, 流量小于额定流量 ($Q_x < 100\% Q_N$) 时, 水泵转速控制的扬程比阀门控制时要小得多, 所以转速控制方式所需的供水功率也比阀门控制方式小得多, 两者之差 ΔP 便是转速控制方式节约的供水功率, 其节约的能量与面积 $KCEJ$ 成正比。

(4) 水泵效率与节能

① 工作效率。水泵的供水功率 P_1 与轴功率 P_2 之比, 即为水泵的工作效率 η :

$$\eta = P_1 / P_2$$

轴功率 P_2 是指水泵轴上输入的功率 (电动机的输出功率), 而水泵的供水功率 P_1 是根据实际供水的扬程和流量计算得到的功率, 是供水系统的输出功率。

因此, 工作效率实际上包含了水泵本身的效率和供水系统的效率。

② 水泵工作效率的相对值 η 的近似值为:

$$\eta = C_1 (Q/n) - C_2 (Q/n)^2 \quad (1-9)$$

式中, η 、 Q 、 n 分别为效率、流量和转速的相对值; C_1 、 C_2 为常数, 由生产厂家提供, C_1 与 C_2 之间通常有如下规律: $C_1 - C_2 = 1$ 。

③ 不同控制方式时的工作效率。如通过关小阀门来减小流量时, 由于转速不变, $n=1$, 比值 $Q/n=Q_0$, 可见, 随着流量的减小, 水泵工作的效率显著降低。

由于采用转速控制时, 阀门开度不变, 流量 Q 和转速 n 成正比, 比值 Q/n 不变。所以, 转速控制方式与阀门控制方式相比水泵的工作效率大得多, 这是变频调速供水系统具有节能效果的因素之一。

④ 电动机效率与节能。在设计供水系统时, 由于对管路情况无法预测、管阻特性难以准确计算又必须留有足够的余地, 因此, 在决定额定扬程和额定流量时, 通常裕量较大。所以在实际运行过程中, 即使在用水流量的高峰期, 电动机也常常处于轻载状态, 其效率和功率因数都较低。采用转速控制以后, 可将排水阀完全打开而适当地降低转速。如果电动机在低频运行时, 变频器能够根据负荷调整输入电压, 从而提高了电动机的工作效率。

4. 水锤效应和水泵的寿命

(1) 水锤效应 异步电动机在全电压启动时, 从静止状态加速到额定转速所需时间只有 $0.25s$, 在这个短时间内水的流量从零猛增到额定流量。由于流体具有动量和一定的可压缩性, 因此, 在极短的时间内流量的巨大变化对管道有很大的冲击并产生空化现象, 因压力冲击使管壁受力而产生噪声, 犹如锤子敲击管子一样, 故称为水锤效应。

水锤效应具有极大的破坏性, 压强过高将引起管道爆裂, 也可能损坏阀门和固定件。

(2) 水锤效应的消除 采用变频调速后, 可以通过对升速时间的预置来延长启动过程, 使动态转矩减小。

(3) 延长水泵寿命的其他因素 消除水锤效应, 可大大延长水泵和管道系统的寿命。此外, 由于水泵平均转速下降, 平均转矩减小, 使叶片承受的应力和轴承的磨损减小。

5. 恒压供水系统

流量是供水系统对用户需求的最基本的控制对象, 而流量的大小取决于扬程, 但扬程难以进行具体测量和控制。考虑到在动态情况下, 管道中水压的大小与供水能力 (用 Q_1 表

示)和需水能力(用 Q_2 表示)之间的平衡情况有关。如:供水能力 $Q_1 > \text{需水能力 } Q_2$,则压力上升;供水能力 $Q_1 < \text{需水能力 } Q_2$,则压力下降;供水能力 $Q_1 = \text{需水能力 } Q_2$,则压力不变。

可见,供水能力与用水需求之间的矛盾具体地反映在流体压力的变化上,所以用压力作为控制流量大小的变量。就是说,保持供水系统中某处压力恒定,也就保证了该处的供水能力和需水能力处于平衡状态,满足用户对用水流量的要求。

六、供水系统调节方式与节能选择

1. 系统的调节方式

(1) 关闸调节和变速调节 在管网中无水塔和高位水池的情况下,在每段时间内二级泵站的供水量应等于用水量。由于管网用水量时刻在变化,而水泵的搭配和分级是有限的,因此,需对管道或水泵进行调节以满足用户水量、水压的要求。关闸调节和水泵变速调节是两种有效的调节方式。关闸调节能量浪费在闸门上,由于送水泵房运行费占水厂制水成本的50%以上,能量的浪费很大。一般来说,水泵变速调节和关闸调节相比,能量可节约14.1%。

(2) 水塔或高位水池调节 水塔或高位水池调节是传统而有效的调节方式。当管网中建有水塔或高位水池时,二级泵站小时供水量不等于用水量,但每天总供水量仍等于用水量。此时,水泵工作分为二级到三级,只要选泵合理,可使水泵一直在节能状态下工作。因而,水塔或高位水池调节不会引起水泵能量的浪费。

2. 水泵调速节能

水泵装置的工况点是指水泵供水的总比能与管道所要求的总比能相等的那个点(图1-5),也就是水泵特性曲线(曲线①)与管道特性曲线(曲线②)的交点A。若水泵特性曲线和管道特性曲线改变时,工况点也随之偏移。

对定速泵来说,当流量由 Q_A 变为 Q_B 时,水泵特性曲线①不变,管道特性曲线变为曲线③,工况点因此成为C点,相应的扬程为 H_C 。在变速情况下,如要求流量由 Q_A 变为 Q_B ,可通过改变水泵转速,使曲线①变为曲线④,此时管道特性曲线仍为②,工况点则变为B点,对应扬程为 H_B 。因此,变速泵节约的扬程为 $(H_C - H_B)$ 。当然,选择水泵时应校核水泵的调速范围是否合理。用水量的变化曲线如图1-6所示。

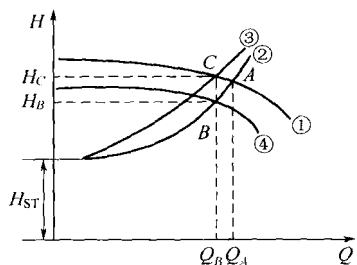


图 1-5 调速泵工作曲线

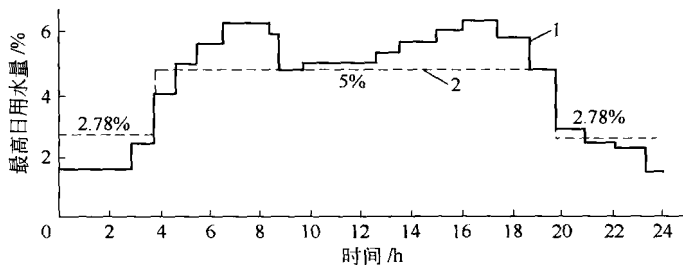


图 1-6 用水量变化曲线

1—用水量变化曲线; 2—二级泵站设计供水线

七、预处理和常规处理节能

长期以来,给水工艺仍然是混合、絮凝、沉淀、过滤和消毒几个阶段,理论上尚无重大突破。然而在微观上,净化工艺在不断地改进,理论研究也在不断地深入,促进了给水工艺的发展。传统工艺的理论主要是建立在以黏土胶体微粒和致病细菌为主的基础上,随着污染

程度的日益加剧、污染源的逐渐增多和污染物品种的多样化，为给水处理带来新的课题。

1. 预处理

预处理是在传统处理工艺之前的各种处理措施，包括格栅、预氯投加、原水的 pH 值调整、投加粉末活性炭或生物过滤等各种工艺措施。我国的预处理工艺主要是格栅、预氯投加，即在长距离输水管的起点小剂量加氯，或在预沉池前加氯，以保证充分的消毒效果。粉末活性炭的投加多为季节性的，是当水质污染严重时为了去除臭味和有机物而采用的临时性措施。因投加粉末活性炭对制水成本影响较大，故采用不多，仅在污染严重时季节性投加。

从国外情况来看，原水的调质已被普遍采用。如日本东京朝霞水厂由利根川取水，年平均 pH 值为 7.1，最高为 7.3，最低为 6.8；当选用聚合氯化铝作混凝剂时，其最佳混凝 pH 值为 7~8；为了提高药效，使用氢氧化钠来调节 pH 值，其投加量为 1.7~3.0mg/L。当原水碱度不足而影响混凝剂药效时，必须投加碱来提高碱度，常用的碱剂有消石灰和碳酸钠。日本水道协会还制定了相应的计算公式：

$$W = [(A_2 + KR) - A_1] F \quad (1-10)$$

式中，W 为碱剂投加量，mg/L； A_1 为原水碱度； A_2 为净水中剩余碱度；K 为投加 1mg/L 混凝剂药剂的碱度下降量；R 为混凝剂投加量，mg/L；F 为提高 1mg/L 碱度所需投加碱剂的量，mg/L。

日本札幌市白川水厂年平均投加消石灰 3.8mg/L，大阪市柴乌水厂消石灰最高投加量为 47mg/L。

去除有机物质是给水工艺中的重要课题。当前国际上去除有机物采用两种方法。一种是改变消毒方式，在水处理过程中避免使用氯气，常规是待有机物降到安全线以下后再加入少量氯，以控制管网中细菌的复苏。另一种办法则是在预处理中将有机物去除，达到饮用安全的目的。

2. 常规处理

(1) 混合技术 混合是絮凝的基础，要求快速剧烈地混合以促进混凝剂的扩散速度和压缩水中胶体的双电层，使胶体脱稳，因而陆续出现了多种混合设备，有水力隔板混合、水泵混合、机械混合、混合池、槽等以及近几年应用的静态混合器。由于混合设备对水力条件、输入能量、混合方式要求比较严格，设备、构造上的差异往往造成混合效果相差较大。

(2) 絮凝反应 传统的絮凝反应多为隔板反应，是建立在“近壁紊流”理论基础上的。从能量耗散的角度出发提出“自由紊流”的微旋涡理论，我国在此理论上研制出多种反应设备并投入生产运行。

(3) 沉淀池 平流沉淀池是给水行业最古老的一种池型，大型水厂应用较多。国外停留的时间较长，一般为 2~4h，在我国停留时间多为 1~2h。停留时间长可以节约药剂，提高沉淀后的水质。停留时间短可以节省投资，减少用地面积。

(4) 澄清池 澄清池在我国使用的普及程度仅次于平流沉淀池和斜管沉淀池。当前对澄清池做了一些改进，现在建造的澄清池多为机械加速澄清池，用于中小型水厂的一级处理。

(5) 气浮法 气浮处理工艺是净水一级处理的另一种形式。

(6) 过滤 过滤处理即二级处理，通常设于沉淀、澄清、气浮等一级设备之后，用来进一步降低水中的浊度。

第二节 污水处理工艺的能耗和能效

目前我国城市污水处理率较低、环境污染压力大，迫切需要低能耗、生态型的污水处理技术。随着人民生活水平的提高和城市化的加快，如何经济有效地解决污水的处理已成为一