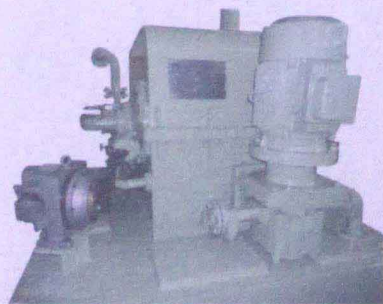


上海交通大学学术出版基金资助

泵与风机的节能技术

赵周礼 主审

穆为明 张文钢 黄刘琦 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

上海交通大学学术出版基金资助

泵与风机的节能技术

赵周礼 主审

穆为明 张文钢 黄刘琦 编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书的中心内容是泵与风机的节能技术,主要包括流体力学的基础知识、泵与风机的分类、叶片式泵与风机的基本性能参数及基本方程、相似定律、基本性能曲线、通用性能曲线、综合性能曲线、泵与风机的选型、泵或风机的联合运行与运行管理、泵与风机的节能技术概论、高效率泵与风机的研发、泵与风机的节能改造、泵与风机的调速节能原理、调速装置的选型、液力耦合器、液黏调速离合器、变频调速及其控制等。

本书可作为从事泵或风机设计和运行管理相关人员的技术参考书,也可作为大专院校相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

泵与风机的节能技术/穆为明,张文钢,黄刘琦编著.

—上海:上海交通大学出版社,2013

ISBN 978-7-313-09379-0

I. 泵... II. ①穆... ②张... ③黄... III. ①泵—
节能②鼓风机—节能 IV. ①TH3②TH44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 312906 号

泵与风机的节能技术

穆为明 张文钢 黄刘琦 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

上海景条印刷有限公司 印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×960mm 1/16 印张:22.25 字数:417 千字

2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-09379-0/TH 定价:98.00 元

版权所有 侵权必究

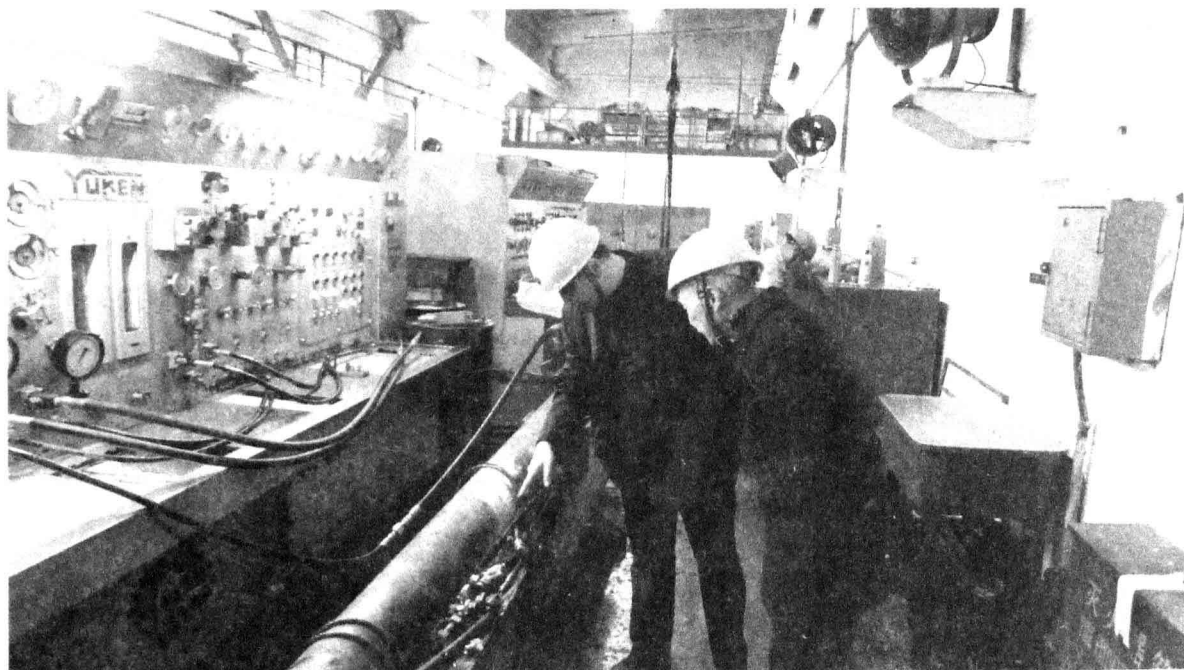
告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话:021-51002888

积极开展产学研活动，

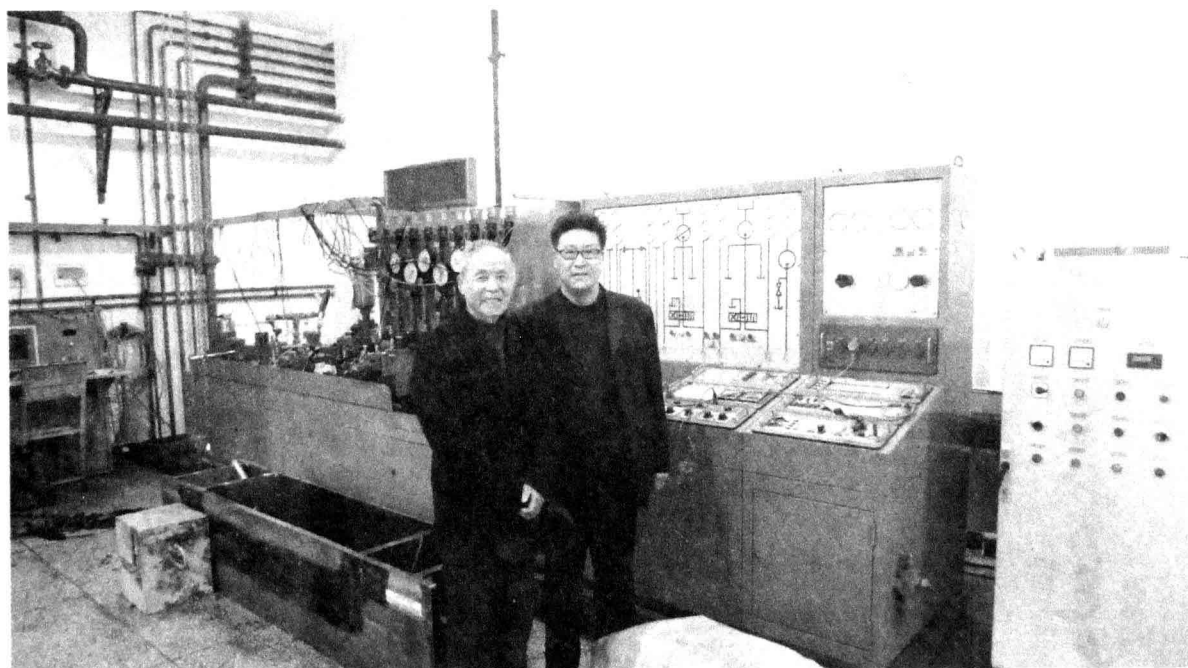
大力推进节约型技术进步。

趙周礼

二〇〇五年己未



作者穆为明(左)和黄刘琦(右)在宝钢现场观察油缸试验情况



作者穆为明(右)和黄刘琦(左)在宝钢现场仪表台前查看设备运行情况

前 言

本书是上海宝山钢铁股份有限公司和上海交通大学在泵和风机的节能技术方面长期合作的经验总结。对于定叶片泵和风机来说,其节能主要是通过调速的方式来实现的,我国在过去的三十多年中,大功率的泵和风机主要是用液力耦合器来调速,也有用液黏调速离合器的。近几年变频调速迅猛发展,有逐步替代液力耦合器和液黏调速离合器的趋势。宝钢选用过国内外所有知名品牌的液力耦合器、液黏调速离合器和变频调速电机,这为本书提供了丰富的实际资料和经验。

本书是《水泵的节能技术一书》的扩充版,着力于理论和实践相结合,探索泵与风机节能的最佳效果。本书第1章是绪论,概述泵与风机节能的意义;第2章是流体力学的基础知识,这是本书的理论基础,无论是泵或风机,还是液力耦合器和液黏调速离合器都是流体机械,流体力学是其共同的理论基础;第3,4,5章是介绍泵和风机的分类、基本原理和性能;第6章是泵与风机的节能概述,一般性的论述泵与风机节能方面的概况,包括节能产品的研发、系统的优化、老设备的改造等。第7章泵与风机的调速节能原理,主要叙述运行工况的确定和调速节能的原理,并探求最佳的节能效果,以及在电力、钢铁和石化行业以及矿山坑道通风系统中的应用;第8章是叙述泵与风机的联合运行,着重论述泵的并联运行及优化调度;第9章是泵站,围绕节能阐述泵站的设计及优化运行;第10,11,12章介绍三种最常用的泵与风机调速装置:液力耦合器、液黏调速离合器和电气调速装置,其中液力耦合器和液黏调速离合器均属于液力调速装置,但两者调速的原理大不相同,而电气调速装置则主要介绍变频调速和电磁调速。本书着重介绍的各种调速装置各有其优缺点,各有其适用范围,供读者参考。

本书是作为从事泵与风机设计和运行管理相关人员的技术参考书,也可以作为大专院校相关专业的教学参考书籍。

在本书的编辑过程中,得到了宝钢相关专家和现场技术人员的大力支持和帮助,他们为本书的编写提供了大量宝贵的意见和素材,容凯参与了本书的编写工作,在此一并表示感谢。

限于作者水平和时间,书中存在的错误或不当之处,欢迎广大读者批评指正。

赵周礼

2012年11月16日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 水泵及风机在国民经济中的作用和地位	1
1.2 泵与风机节能概述	3
1.3 调速节能的意义	5
第 2 章 流体力学的基础知识	9
2.1 流体的主要物理力学性质	9
2.1.1 流体的密度和重度	9
2.1.2 流体的黏性	12
2.2 流动阻力和能量损失	16
2.2.1 流动阻力与水头损失的两种形式	18
2.2.2 黏性流体的两种流动状态	20
2.2.3 湍流运动	26
2.2.4 流动的局部损失	33
2.3 不可压缩流体的管道流动	40
2.3.1 简单管道	40
2.3.2 管网计算基础	47
2.4 气体的可压缩性及其影响	49
第 3 章 泵与风机的工作原理与基本构造	52
3.1 泵与风机的分类	52
3.2 离心泵与风机的工作原理与基本构造	56
3.2.1 离心泵的工作原理	56
3.2.2 离心风机的工作原理	57
3.2.3 离心泵的基本构造	58
3.2.4 离心泵的主要部件	62
3.2.5 离心风机的基本构造	69
3.2.6 离心风机的主要部件	72

3.3 轴流泵与风机的工作原理和基本构造	77
3.3.1 轴流泵的基本构造	77
3.3.2 轴流泵的工作原理	79
3.3.3 轴流式风机的基本构造	80
3.3.4 轴流风机的工作原理	81
3.3.5 轴流风机的性能曲线	81
3.4 混流泵	82
3.4.1 混流泵的类型	83
3.4.2 混流泵的结构	83
第4章 叶片式泵与风机的基本性能及基础理论	86
4.1 叶片泵的基本性能参数	86
4.2 风机的性能参数	92
4.3 叶片式泵与风机的基本方程	93
4.3.1 流体在叶轮中的运动	93
4.3.2 基本方程式的推导	96
4.3.3 基本方程式的讨论	98
4.4 叶片泵的吸水性能	100
4.4.1 吸水管中压力的变化及计算	101
4.4.2 泵内气穴和气蚀	103
4.4.3 水泵最大安装高度	104
4.4.4 气蚀余量	106
4.5 叶片泵和风机的相似律和比转速	109
4.5.1 相似条件	109
4.5.2 相似律公式	111
4.5.3 比例律	112
4.5.4 比转数	113
第5章 泵与风机的性能	117
5.1 叶片泵的基本性能曲线	117
5.1.1 流量-扬程曲线	118
5.1.2 流量-轴功率曲线	120
5.1.3 流量-效率曲线	120
5.1.4 流量-允许吸上真空度(气蚀余量)曲线	121
5.1.5 理论特性曲线的定性分析	121
5.2 离心风机的基本性能曲线	125

5.3 叶片泵的试验性能曲线	126
5.3.1 叶片泵的性能试验装置与方法	126
5.3.2 离心泵特性曲线	130
5.3.3 轴流泵的特性曲线	132
5.4 叶片泵与风机的通用性能曲线	133
5.5 叶片泵与风机的综合性能图	137
5.6 风机的喘振现象	139
第6章 泵与风机的节能概述	142
6.1 泵与风机的节能现状	142
6.1.1 国内泵与风机的节能现状	142
6.1.2 国外泵与风机的高效产品简介	144
6.2 高性能泵与风机的研发和推广运用	145
6.2.1 高性能泵与风机的研发	145
6.2.2 高效率泵与风机的推广运用	147
6.3 系统设计的优化	149
6.3.1 工艺系统的优化	149
6.3.2 额定工况与管路特性曲线	149
6.3.3 管径的优化设计	150
6.3.4 管道设计的一般原则	152
6.4 泵与风机的选型	153
6.4.1 水泵的选型	153
6.4.2 风机的选型	155
6.5 泵与风机的节能改造	158
6.5.1 更换或改造叶轮	158
6.5.2 改变叶片长度法	159
6.5.3 改变动叶数量法	165
6.5.4 改变径向间隙法	165
6.6 良好科学的运行管理	166
6.6.1 水泵的运行管理	166
6.6.2 风机的运行管理	168
第7章 泵与风机的调速节能原理	170
7.1 泵与风机的定速运行	171
7.1.1 管路系统特性曲线	171
7.1.2 泵与风机工况点的求解	173

7.1.3 泵与风机的调节	179
7.2 泵与风机的调速节能原理	185
7.2.1 泵与风机的变速调节原理	185
7.2.2 泵与风机最佳调速范围的确定	188
7.2.3 调速节能原理	189
7.3 调速节能效果举例	190
7.3.1 电力行业	190
7.3.2 钢铁行业	190
7.3.3 石油化工行业	191
7.3.4 矿山坑道通风系统	192
7.3.5 楼宇中央空调系统	193
第8章 泵与风机的联合运行	194
8.1 并联运行工况	194
8.1.1 并联工作的图解法	194
8.1.2 并联工作的数值解法	200
8.1.3 并联运行水泵台数的确定	208
8.2 串联运行工况	209
8.3 运行的优化调度	211
8.3.1 基本概念	211
8.3.2 调速泵最佳台数的确定	212
8.3.3 调定混合泵站优化调度	213
第9章 泵站的设计概论和运行管理	216
9.1 泵站的分类与特点	216
9.1.1 取水泵站(也称一级泵站)	216
9.1.2 送水泵站	217
9.1.3 加压泵站	219
9.1.4 循环水泵站	220
9.2 水泵的选型	220
9.2.1 选泵的主要依据	221
9.2.2 选泵的方法与要点	223
9.2.3 选泵时尚需考虑的其他因素	234
9.2.4 选泵后的校核	234
9.3 电动机与水泵的配套	235
9.3.1 电动机类型的选择	236

9.3.2 电动机的配套功率	236
9.3.3 电动机转速	237
9.4 调速装置的选配	238
9.4.1 调速装置的概述	238
9.4.2 液力耦合器调速	239
9.4.3 液黏调速离合器调速	239
9.4.4 变频调速	240
9.4.5 无换向器电机调速	240
9.4.6 调速装置的选配要点	241
9.5 管路及其附件的配套	242
9.5.1 管路配套	242
9.5.2 管路附件配套	243
第 10 章 液力耦合器	247
10.1 液力耦合器的工作原理	247
10.2 液力耦合器的力矩方程	248
10.3 液力耦合器的特性	250
10.3.1 液力耦合器的外特性曲线	251
10.3.2 液力耦合器的原始特性曲线	252
10.4 液力耦合器的调速原理	252
10.4.1 液力耦合器调速的基本原理	252
10.4.2 液力耦合器调速方式	253
10.4.3 进口调节式调速型液力耦合器	255
10.4.4 出口调节式调速型液力耦合器	257
10.4.5 液力耦合器的调节特性	261
10.5 调速型液力耦合器的最新发展	264
10.6 液力耦合器的控制	264
10.6.1 耦合器的控制框图	265
10.6.2 耦合器的电液阀控系统	268
10.6.3 智能化控制器	269
10.6.4 放大元件	271
10.6.5 伺服油缸	273
10.6.6 高速开关阀组	273
10.6.7 传感器	278
10.6.8 电动执行机构	282
10.6.9 晶闸管的触发电路	285

10.6.10 前置放大器	285
第 11 章 液黏调速离合器	288
11.1 液黏传动的工作原理	288
11.2 液黏传动的摩擦状态	289
11.3 摩擦片和对偶片间的传动力矩	291
11.4 油膜压力和流量分析	293
11.5 带油槽的摩擦片	294
11.6 液黏调速离合器	297
11.6.1 液黏调速离合器的概况	297
11.6.2 液黏调速离合器的结构	297
第 12 章 电气调速装置	313
12.1 交流电机调速基本原理及主要类型	313
12.2 鼠笼式异步电动机的变极调速	315
12.2.1 变极调速的原理	315
12.2.2 变极调速的优缺点及其在水泵调速节能中的应用	317
12.3 鼠笼式异步电动机的变频调速	318
12.3.1 变频调速的基本原理	318
12.3.2 变频器的基本构成	323
12.3.3 变频调速的优缺点及其在水泵调速节能中的应用	324
12.4 自控式同步电机变频调速	327
12.4.1 系统组成	327
12.4.2 自控式同步电机变频调速原理	330
12.4.3 自控式同步电机的工作特性	332
12.4.4 自控式同步电机在泵调速节能中的应用	333
12.5 绕线式异步电动机转子串电阻调速	334
12.6 变频调速节能改造实例	335
12.6.1 华能某电厂引风机变频调速节能改造实例分析	335
12.6.2 华能某电厂锅炉给水泵变频调速节能改造实例分析	337
12.6.3 对电厂采用高压变频调速技术的建议	338
附录 常用计量单位换算表	339
参考文献	341

第 1 章 绪 论

1.1 水泵及风机在国民经济中的作用和地位

水泵是一种面大量广的通用型机械设备,它广泛地应用于石油、化工、电力、冶金、矿山、造船、轻工、农业、建筑、民用和国防各部门,在国民经济中占有重要的地位。据统计,我国每年泵产量达 525.6 万台。泵的电能消耗占全国电能消耗的 21% 以上。因此大力降低泵的能源消耗,对节约能源具有十分重大的意义。

泵站是由若干个不同型号的泵为主体组成的设备组合,随着现代工业的蓬勃发展,采矿、冶金、电力、石油、化工、市政以及农林等部门中,各种形式的泵站很多,其规模和投资越来越大,功能分类也越分越细。水泵的节能是单个水泵与其系统的匹配问题,使其效率达到最佳值。泵站的节能是指若干个泵及其传动装置所组成的设备组合群体的整体节能效果,涉及的技术问题更多,这在第 9 章作详细介绍。

以采矿工业而言,矿山中竖井的井底排水,大型矿床的地表疏干以及掘进斜井的初期排水等技术设施,都需要建造一系列相应的泵站来满足整个采矿工程的需求。在电力部门中,无论是火力或核能发电系统,从高压锅炉给水泵站起,一直到冷热水的循环泵站、水力清渣除灰的高压泵站以及冷却水的补给泵站等都是必不可少的。它们在整个系统中,常常是规模大,投资大,地位重要的工程项目。

在市政建设中,水泵站也是城市给水和排水工程中必要的组成部分。它们通常是整个给水排水系统正常运转的枢纽。图 1-1 为城市给水排水系统工艺的基本流程。由图可知,城市中水的循环都是借一系列不同功能的水泵站的正常运行来完成的。原水由取水泵站从水源地抽送至水厂,净化后的清水由送水泵站输送到城市管网中去,其流程如图 1-1 中实线所示。

在我国许多大型的城市给水工程中,水泵站起了非常重要的作用。如“引滦入津”工程,该工程是一项较大规模的跨流域引水工程,该工程全长 234km,全年引水量约达 10 亿 m^3 。全部工程中修建了 4 座大型泵站,分别采用了多台叶片可调

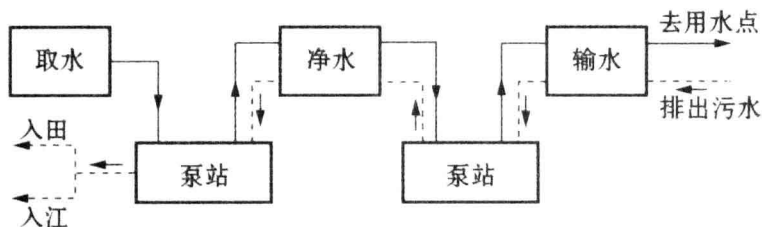


图 1-1 城市给水排水系统工艺基本流程

型的大型轴流泵和高压离心泵进行抽升工作。此外,对于城市中排泄的生活污水和工业废水,经排水管渠系统汇集后,也必须由排水泵站将污水抽送至污水处理厂。经过处理后的污水再由另一个排水泵站(或用重力自流)排放入江河湖海中去,或者排入农田作为灌溉之用,其流程如图 1-1 中虚线所示。实际上,在排水渠系统中使用泵站的场合是相当多的。除抽送污水和工业废水的泵站外,还有专门抽送雨水的泵站、用来抽送整个城市排水的总泵站和仅用来抽送地势低洼区排水的区域性泵站。在污水处理厂内,需要从沉淀池把新鲜污泥抽送到污泥消化池、从沉砂池中排除沉渣、从二次沉淀池中提送回流活性污泥等等,这些都要用各种不同类型的泵和泵站来保证运行。

除此以外,在农田灌溉、防洪排涝等方面,水泵站经常作为一个独立的构筑物而服务于各项事业的。特别是随着社会主义农业的现代化,在农田基本建设、提升黄河水引向西北高原的大型灌溉工程中都需建造很多大型、巨大型的泵站。在这方面有大流量、低扬程的轴流泵站,也有大流量、高扬程的离心泵站。至今,我国已拥有大型泵站三百余座,在我国大型泵站比较集中的湖北、江苏、安徽、湖南、广东等省份,已初步形成了以大型泵站为骨干的防洪排涝以及跨流域调水工程体系、以重点中型泵站为主体的流域性调水、排灌工程体系和以中小型泵站为主导地位的地区性排涝、灌溉工程网络。

从经济性的角度来看,城市供水企业一般都是用电大户,而在整个给水工程的用电量中,95%~98%的电量是用来维持水泵的运转,其他 2%~5%用在制水过程中的辅助设备上(如电动阀、排污泵、真空泵、机修及照明等)。以一般城镇水厂而言,泵站消耗的电费,通常占自来水制水成本的 40%~70%,甚至更多。就全国水泵机组的电能消耗而言,它占全国电能总耗的 21%以上。据有关资料报道,我国风机、水泵、空气压缩机总量约 4 200 万台,装机容量约 1.1 亿 kW。但系统实际运行效率仅为 30%~40%,其电能损耗占总发电量的 38%以上。由此可见泵与风机的节能对国民经济是何等的重要。

风机是我国工业领域最主要的耗能设备之一,广泛应用于冶金、电力、采矿、煤炭、石油、化工、城建和楼宇建筑等领域,据国家统计局的资料显示,风机的电

力消耗占全国发电总量的 10%，另外根据原冶金工业部 1988 年的资料显示，金属矿山中风机的用电量占其用电总量的 30%；钢铁工业中风机的用电量占其总用电量的 20%；煤炭工业中风机的用电量是煤炭工业总用电量的 17%；冶金工业中风机的耗电量是其总耗电量的 25%。因此，做好风机的节能工作对全国的节能具有重要的意义。另据统计 2005 年全国风机的生产总量是 850 770 台，其中鼓风机为 34 711 台，占总量的 4.08%；通风机为 573 759 台，占总量的 67.44%；其他为 242 044 台，占总量的 28.45%。由此可见，通风机量大面广，所以通风机的节能尤为重要。

通过科学优化调度，提高风机和水泵的运行效率；采用调速水泵与风机的机组，扩大水泵和风机的高效工作范围；对役龄过长、设备陈旧的风机和水泵，及时采取更新改造等措施，都是合理降低泵站和风机的电耗，提高经济性的重要途径。例如，上海市吴淞水厂，自 1981 年将一台 55kW 电机采用可控硅串级调速运行以来，一直运行良好，每年节约 90 万 kW·h；北京市水源九厂一期工程中二台取水泵和二台配水泵均采用了德国引进的变频式电机调速装置，这是国内水厂首先采用变频调速的机组，每年的节电效果是十分可观的。除此以外，泵站中还有多种形式的节电措施，例如采用液压自控蝶阀，各种微阻缓闭止回阀，取消止回阀等等方式均能达到良好的节电效果。

1.2 泵与风机节能概述

首先，节能是保障国家经济安全，实现可持续发展的必然选择。我国正处于经济高速发展的工业阶段，一方面能源资源相对不足，另一方面能耗高、浪费大、效率低下。我国要在 21 世纪中叶达到中等发达国家的水平，必须两条腿走路，一靠开发，二靠节约。

其次，节能是治理污染改善环境的最有效的途径。我们不仅要解决现实污染问题，还要解决经济发展对能源需求的增长给环境带来的潜在的巨大压力。

第三，节能降耗是提高企业经济效益，增强企业竞争力的重要措施。加入世贸组织后，我国国际贸易的迅速发展，节能对产品进出口乃至国际贸易的影响日益增加，能效标准、标识已成为国际贸易中的“绿色通行证”。我国作为机电产品出口大国，对市场的这种变化必须高度重视，及早研究和采取措施。

在新形势下全面推进节能工作，大力宣传党和国家关于节能的方针，“资源开发和节约并重，把节约放在首位”；依法保护和合理使用资源，保护环境，提高资源的利用效率，实现可持续发展。

我国“十一五”规划建议中唯一的两个量化指标：“实现 2010 年人均国内生

产总值比 2000 年翻一番”与“单位国内生产总值能源消耗比‘十五’期末降低 20% 左右”,给人的感受是截然不同的。习惯在 GDP 翻番指标面前为之一振的人们,面对后一个指标,或多或少地会为之一惊。将节能降耗目标与经济增长目标放在同等重要的位置,并列摆在全国的社会经济发展总目标中,尚属首次。20% 的节能目标是根据 2004 年制定的国家《节能中长期专项规划》提出的。国家发改委能源研究所所长周大地说:“《规划》提出要争取 2020 年 GDP 翻两番,而能源消耗只能翻一番。如果能在‘十一五’和下两个五年计划都实现 20% 的降耗目标,每单位 GDP 就可以降耗 50% 左右,实现用增一番的能源消耗支持翻两番的经济增长。”预计“十二五”我国节能目标为单位 GDP 能耗降低 16%。国家发改委能源研究所能源效率中心主任郁聪更详细地解析 20% 的来由:“‘十一五’期间,按降低 20% 的规划,平均下来,每年要降耗 4.4%,比原来《节能规划》拟定的 3% 略有提高。”她分析说,1980 年到 2000 年的 20 年里,我国 GDP 增长与能源消耗增长之比,平均为 1 比 0.5 左右,也就是用一番的能源消费保证了两番的经济增长。事实上,中国在节能降耗上有着很大潜力。这从数字比较上可以看出,我国生产 1 美元国内生产总值的单位能源消耗,是日本的 11.5 倍,是法国和德国的 7.7 倍,是英国的 5.3 倍,是美国的 4 倍以上。周大地说:“20% 是‘十一五’的死任务,绝不是没有根据,更不是玩数字游戏”。“十一五”规划特别凸显了节能和环保目标,节能目标首次作为国家目标,这充分说明了节能的任务的重要性和艰巨性。

节能问题首先是一个意识和责任问题,每个人都要从保护人类生存环境和造福子孙后代的角度来认识节能的重大意义,并成为每个人的行动准则,贯穿到日常生活和工作中来,再加上一定的技术科学知识,将会产生巨大的节能效果。

目前造成国内泵与风机能耗过大的主要因素有:泵与风机的内效率低、设备陈旧;泵与风机系列型号不全;泵与风机选型不合理;与系统不匹配;管路系统设计不合理增加了阻力;泵与风机的调节机构落后能耗大效率低;系统及其设备老旧效率低阻力大泄漏严重;管理不善等等。

实现泵与风机的最大节能效果所要做的工作很多,概括起来有几个方面:先进科学的工艺系统是节能技术中最为重要的,只有系统设计合理,泵与风机的选型和数量配置科学合理,才能使节能取得最大的效果;高效率、高性能泵与风机的研发和应用也是十分重要的,这是提高系统效率的根本;对于工况变化的系统应合理地选用调速装置,调速节能是本书介绍的重点;管道系统的科学合理布置,使管道系统的阻力最小;老旧设备的改造,在线运行的大量设备中为数相当多的设备是陈旧不堪、效率低下的机泵,对这些设备进行改造是投资最少、效果最显著的节能措施,本书第 6 章将作详细介绍;科学严格的管理;人们的节能意