

燃煤电厂 水务管理

Bernd Schallert Hans Duve 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

燃煤电厂 水务管理

编 著 Bernd Schallert Hans Duve
翻 译 王月明 张社蚕 尹玉霞
技术校对 汪德良 杨宝红 许 臻



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书全面介绍了德国在火电厂水务管理和节水方面的宝贵经验和先进技术,为提高我国火电厂水资源利用率、减少废(污)水排放、保护环境提供了宝贵的可借鉴经验。全书内容分为三部分:首先,介绍了火电厂的水需求及可能产生废水的生产环节;接下来,有针对性地介绍了各种废水处理技术,并作了经济性比较;最后,重点介绍了节水改造技术和避免电厂产生废水的技术,为提高电厂水务管理水平、选择最适合的水处理技术提供了详尽指导。

本书适合于从事火电厂水务管理、水处理技术工作的工程技术人员阅读,也可供从事环保工作的相关人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

燃煤电厂水务管理/(德)莎勒特(Schallert, B.),
(德)杜韦(Duve, H.)编著;王月明, 张社蚕, 尹玉霞
译. —北京: 中国电力出版社, 2008

ISBN 978-7-5083-7654-7

I. 燃… II. ①莎…②杜…③王…④张…⑤尹… III. 火
电厂—工业用水—水资源管理 IV. TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 126383 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 10 月第一版 2008 年 10 月北京第一次印刷
850 毫米×1168 毫米 32 开本 5.25 印张 136 千字
印数 0001—3000 册 定价 16.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



水是人类社会赖以生存和发展中不可缺少和替代的自然资源。近年来，我国工业经济以及城市的持续快速发展加剧了我国缺水与水污染的问题。热力发电厂一直是我国工业界的需水和耗水大户之一，由于过去相当一段时间以来，重煤耗、轻水耗造成了电厂对水资源过度使用和浪费。我国燃煤发电厂的平均发电耗水率与发达国家相比存在很大差距，同时也表明了有较大的节水潜力。随着近年火电装机的迅猛增长，节水及环境保护问题更加突出，已成为电力工业可持续发展的主要制约因素之一。

为了促进我国电力行业节水及环保技术的发展，我国政府和德国政府开展了“能源领域环境保护”技术合作项目，并由中国国家发展和改革委员会、中国电力企业联合会与德国经济合作和发展部(BMZ)委托的德国技术合作公司(GTZ)，于2005年9月1日分别代表双边政府在合作协议上签字，项目正式启动。

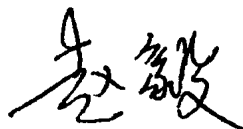
“燃煤电厂水务管理”项目是“能源领域环境保护”技术合作项目的第4子项目，西安热工研究院代表中方作为该子项目的技术负责和执行单位，德国技术合作公司(GTZ)代表德国政府作为德方项目负责和执行单位。本子项目的总体目标是：通过中德企业间节水工程技术的交流，进行火电厂节水与水处理工程技术人员的能力培训，引进德国的先进技术与设备，共同促进中国火电厂节水技术的发展；并通过在中国火电厂与其他工业部门建立节水工程示范，提高中方火电厂及工业部门的水资源利用率，减少废污水排放，保护环境。

德国是工业发达国家，拥有成熟的电厂水务管理经验和先进

的节水技术。为了传播介绍德国先进的水务管理经验和节水技术，德国技术合作公司专门聘请德国 E.ON 电力公司的资深水务专家 Bernd Schallert 博士、Infracor GmbH 公司专家 Hans Duve 先生撰写了这本技术交流教材，比较全面和系统地介绍了德国燃煤发电厂节水技术和水务管理经验。西安热工研究院王月明研究员、德国技术合作公司张社蚕先生和尹玉霞女士付出了艰辛的翻译工作，西安热工研究院汪德良研究员、杨宝红研究员、许臻高级工程师等作了大量的技术校对和整理工作，本书的出版发行是中德双方技术人员成功合作的结晶之一。在此书出版之际，谨向为这一工作付出辛勤劳动的中德双方技术人员表示衷心的感谢！

本书作为教材，在华能集团、大唐集团、中国电力投资集团公司及所属发电厂举办的多期研讨班的技术培训和交流实践中使用，收到了很好的效果。希望通过本次公开出版，能够让更多的电厂水务管理和技术人员获益，共同促进和推动我国火电厂的节水与环保技术工作，为实现我国电力工业的可持续发展发挥应有作用。

西安热工研究院有限公司副院长：
中方项目执行单位负责人：





Water is an essential element for any life on Earth and therefore a public good.

The availability of sufficient clean water and the protection of this natural resource is a prerequisite for sustainable development of all societies and nations. But it is also a prerequisite for harmonious and peaceful coexistence for all people from different nations within various regions in the world. Wherever water scarcity or poor quality of water becomes an issue, conflicts either between different interest groups within a country or even between countries are pre-programmed. Therefore water saving and maintaining a good water quality is not only an obligation from the perspective of environmental protection but definitely also the responsibility of all water consumers as a contribution to harmonious development of their societies.

Thermal power plants always belong to the largest water consumers wherever they play a significant role in the power supply structure of a country. In Germany for instance, thermal power plants use significantly more than half of the totally used water, though the consumption was reduced by more than 20% during the last 15 years.

Also in China thermal power plants have a large share in the power supply and constitute one of the major water consumers of the nation with high potential for reducing the specific water con-

sumption.

Environment- and resource protection as well as promoting energy efficiency to foster sustainable development is one of the main fields of technical cooperation agreed upon between the Governments of the People's Republic of China and the Federal Republic of Germany.

Within the bilateral Technical Cooperation Programme entitled "Environmental Protection in the Energy Industry", which is led by the National Development and Reform Commission on the Chinese side and the Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH on behalf of the Federal Ministry for Economic Cooperation and Development on the German side, the pressing issues related to increased resource consumption and environmental problems in the Chinese power sector are addressed.

A main goal of the programme is to develop, provide and implement solutions to improve Cleaner-Production patterns in thermal, especially coal-fired power plants. The efforts of the China Electricity Council (CEC), coordinator and in charge for all power sector related activities within the programme, to work out a Cleaner-Production guidebook covering all environment-, efficiency- and economic-related topics for power plant operators and their staff, are explicitly supported by various Chinese and German experts within the programme. Water management certainly plays a big role within an integral and comprehensive Cleaner-Production Strategy for thermal power plants.

Chinese experts from the Thermal Power Research Institute (TPRI), Xi'an and German experts from E. ON Engineering, Infracor GmbH and Evonik, who primarily contributed to this textbook, worked out concepts and technical solution on how to

reduce the specific water consumption in Chinese thermal power stations.

This book shall encourage responsible staff in Chinese thermal power plants to improve their Cleaner-Production system and procedures related to water. It was our goal not to provide only theoretical knowledge but primarily to provide concrete ideas and examples for economically viable water saving and water treatment measures.

It is therefore literature for practical persons. In this sense the publishers hope, that this book will become a constant and helpful companion for responsible and conscientious fellows in Chinese power plants on their way through daily working life.

Jörg Moczadio

Programme Director, GTZ

June 25th, 2008, Beijing

水是地球上任何一种生物都不可缺少的生命元素，是人类的共有财富。

任何一个国家和民族的可持续发展都离不开洁净的水源，都必须保护水这一自然资源。充足的洁净水同时也是世界不同地区的国家和人民和谐相处共同生存的必备条件。水资源短缺或水污染将导致一个国家不同利益群体乃至国家与国家之间的摩擦和纠纷。节约水资源和保持良好的水质不但是人类对环境保护应尽的义务，同时也是每位水资源消费者对社会的和谐发展所应尽的职责。

热力发电厂在一个国家的电力供应方面扮演着重大角色，同时也是最大的用水单位之一。比如在德国，尽管在过去的 15 年中，德国热力发电厂的用水量减少了 20%，但其用水量仍占全国用水量的一半以上。

中国的电力供应同样主要依赖热力发电厂，热力发电厂的用水量在全国用水总量中占有很大比例，中国热力发电厂的节水潜力巨大。

环境和资源保护以及提高能效和促进可持续发展是中华人民共和国与德意志联邦共和国双边技术合作的主要业务领域之一。

中德双边技术合作“能源领域环境保护”项目由中国国家发展和改革委员会及受德国经济合作和发展部(BMZ)委托的德国技术合作公司(GTZ)牵头执行实施，致力于解决中国电力领域不断增长的资源消费和环境问题。

项目的一个主要目标是开发、提交并实施热力发电厂(特别

是燃煤电厂)清洁生产方案。中国电力企业联合会(CEC)是本项目框架内电力领域所有相关活动的总协调和负责单位,中国电力企业联合会为电力企业和电厂操作人员编写的涵盖环境、能效和经济等方面内容的清洁生产指南得到了项目中、德专家的大力支持。毫无疑问,在热力发电厂的综合清洁生产战略中,水务管理占有极为重要的地位。

西安热工研究院有限公司的中方专家和来自德国 E.ON 工程公司、Infracor 化工服务有限公司和 Evonik 能源服务公司的德国专家一起合作完成了这本有关电厂水务管理的读物,同时,他们还为中国相关热力发电厂提出了节水技术方案。

希望本书有助于中国热力发电厂管理人员推动水务管理方面的清洁生产体系和进程。本书不仅介绍了热力发电厂节水的相关理论知识,而且还着重介绍了经济可行的热力发电厂节水措施和水处理成功案例。

本书是一本面向实践者的实用性读物。愿本书成为中国热力发电厂水务管理和工程技术人员日常工作的良师益友。

约克·莫扎特罗

德国技术合作公司项目主任

2008 年 6 月 25 日,北京



序

Preface

■ 1 引言——德国的能源经济及人均消耗	1
■ 2 冷却水需求	10
2.1 纯凝汽式运行	10
2.2 热电联产	28
■ 3 直流锅炉运行的水需求	30
■ 4 烟气脱硫过程的水需求	31
4.1 湿式烟气脱硫	31
4.2 喷雾吸收法脱硫	34
■ 5 冷却过程中产生的废水	36
5.1 直流冷却/直流中间冷却	36
5.2 循环冷却	36
■ 6 除盐装置产生的废水(直流锅炉)	38
6.1 离子交换器运行	38
6.2 反渗透设备和残余盐去除	40
■ 7 凝结水处理装置产生的废水	42
■ 8 烟气湿式脱硫过程产生的废水	45
■ 9 其他场合产生的废水	46
■ 10 冷却水的处理工艺	47
10.1 直流冷却	47
10.2 循环冷却(开式系统)	50
■ 11 给水处理	56

11.1	全除盐(离子交换)·····	56
11.2	原水有机物含量高时采用的处理技术·····	62
11.3	反渗透及其残盐的去除·····	68
	12 脱硫废水处理技术 ·····	78
12.1	原水质量·····	78
12.2	净水质量·····	81
12.3	脱硫废水处理装置的结构·····	81
12.4	化学药品用量·····	83
12.5	投资费用·····	84
12.6	场地需要·····	84
12.7	运行费用·····	85
	13 德国火电厂水耗和废水产生量现状(汇总) ·····	86
	14 选择优化措施的前提条件 ·····	88
	15 现有火电厂的节水改造 ·····	91
15.1	定义·····	91
15.2	德国电厂实施的节水措施·····	93
	16 缺水地区可以采用的技术 ·····	111
16.1	干式冷却塔(空冷塔) ·····	111
16.2	外来废水的处理 ·····	115
16.3	褐煤水分的利用 ·····	128
	17 避免电厂产生废水的技术 ·····	130
17.1	电渗析法除盐 ·····	130
17.2	避免离子交换再生液产生的工艺(反渗透 与电除盐装置的联合工艺)·····	135
17.3	废水蒸发浓缩——以烟气脱硫装置废水为例 ···	140
17.4	喷雾干燥(无需另外一次能源的蒸发浓缩法, 适用于很多垃圾焚烧装置)·····	144
17.5	电除尘过滤器粉尘的气动传送 ·····	145
17.6	阶梯式零排放循环冷却 ·····	149
	18 总结 ·····	154



引言——德国的能源经济及人均消耗

以烟煤和褐煤为基础的火力发电厂在很多方面依赖于水的各种特性，尤其要求有足够的水量。供给锅炉的水必须具有高品质，以便顺利地将能量输送到蒸汽轮机。水的冷却以及通过蒸发排放废热也是一项非常重要的任务。此外，大量的水还被用于烟气净化，除去烟气中的气态污染物，然后再进行处理。因此，水的需求量是选择电厂厂址的一个重要因素。

图 1-1 为德国 E. ON 能源公司所属的电厂在德国境内的分布情况，包括电厂所用的燃料、附近的城市及主要河流。从图中可以看出，所有电厂附近都有充足的水源，大部分电厂位于河流、运河沿岸或海边。

德国燃用烟煤发电的电厂装机容量约为 24GW，其中，E. ON 能源公司的电厂约为 8GW；燃用褐煤发电的电厂装机容量约为 20GW，其中，2GW 属于 E. ON 能源公司。

根据排放保护法的规定，热功率在 300MW 以上的烟煤和褐煤机组排放的 SO_2 、 NO_x 和粉尘浓度必须满足表 1-1 所列的排放标准。

表 1-1 热功率在 300MW 以上的老机组和热功率 50MW

以上的新建机组排放标准

mg/m^3

项 目	极 限 值
粉尘	20(标准,干态,6%(O_2))
SO_2	200(标准,干态,6%(O_2)), 并且 $\geq 85\%$
NO_x	200(标准,干态,6%(O_2))*

注 基准氧量：干式除灰炉 6%，液态排渣炉 5%。

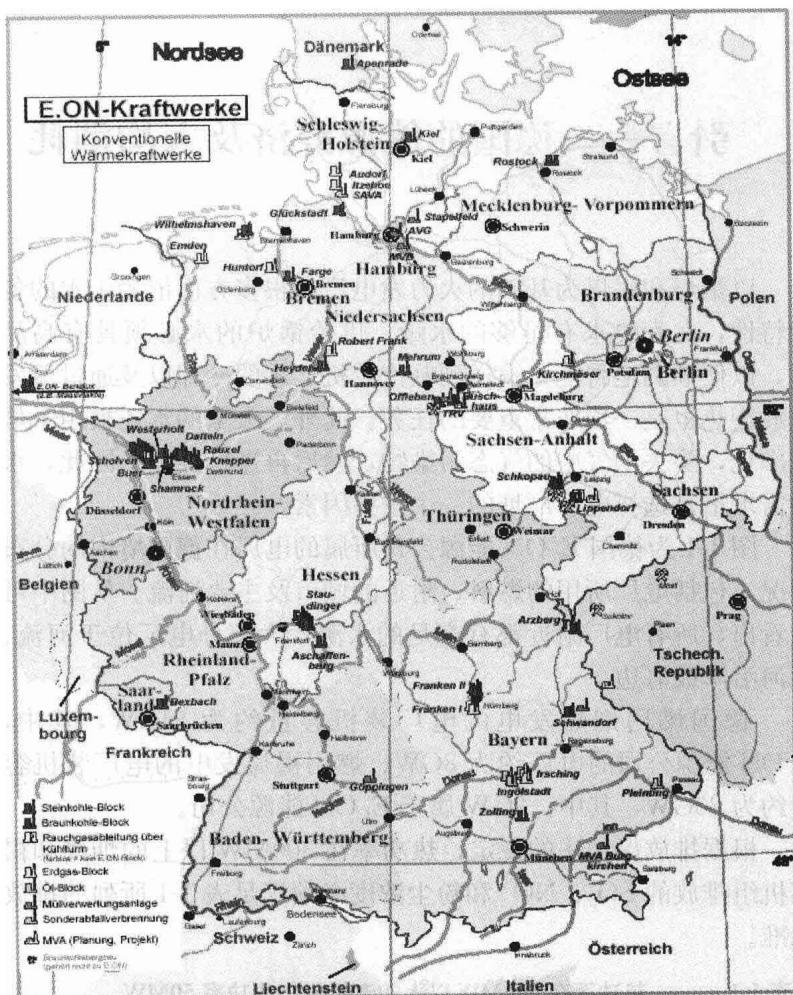


图 1-1 E.ON 能源公司所属电厂的分布

对于燃烧褐煤的锅炉，只需通过低 NO_x 燃烧措施(一次措施)，即可满足 NO_x 的排放标准。而对于燃烧烟煤(烟煤、无烟煤)的锅炉，要满足 NO_x 排放标准，除了采取低 NO_x 燃烧措施(一次措施)外，还必须采用二次措施。所有新建的大型燃用烟煤的锅炉均配置烟气脱硝装置，利用喷入烟气中的氨在催化剂表面

将 NO_x 转化成氮气分子和水。烟煤锅炉中的 SO_2 必须采取二次措施即烟气脱硫装置才能满足排放要求，常用的脱硫工艺有湿法和半干法两种。

典型的烟气净化系统包括：布置在高尘侧即空气预热器前的烟气脱硝装置、空气预热器后的静电除尘器和以石灰作为碱化剂的湿法烟气脱硫装置，如图 1-2 所示。

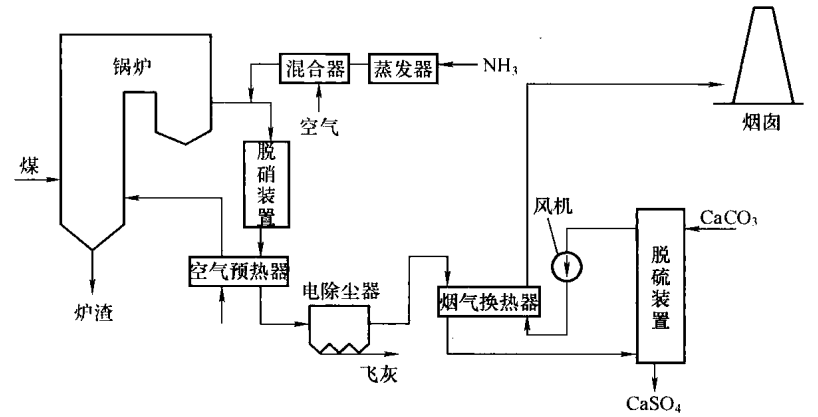


图 1-2 配置烟气脱硫装置的燃煤电厂流程

150MW 以下的机组可采用半干法脱硫工艺。这种脱硫工艺尽管也需消耗少量的水，但不产生废水，而且产生的副产品便于处理。对于湿法烟气脱硫工艺，应尽可能将从烟气中脱除的二氧化硫转化成石膏，并将其再利用。在此脱硫过程中将产生一定量的废水，废水需经过处理满足相应的环保标准(见表 1-2)后才允许排放。

表 1-2 德国烟气脱硫装置废水排放标准				mg/L	
项 目		排放值	项 目		排放值
可过滤物		30	汞		0.03
化学需氧量 (COD)	使用石灰时	80	铬		0.5
	使用石灰石时	150	镍		0.5
硫酸盐		2000	铜		0.5
亚硫酸盐		20	铅		0.1
氟化物		30	锌		1.0
镉		0.05	硫化物		0.2

注 2 小时混合样浓度或合格样品。

2005 年, 德国近 50% 的电力来自烟煤和褐煤发电, 分别占 26% 和 21%; 可再生能源发电占 11%, 天然气发电占 10%, 核能发电占 29%, 如图 1-3^[1] 所示。

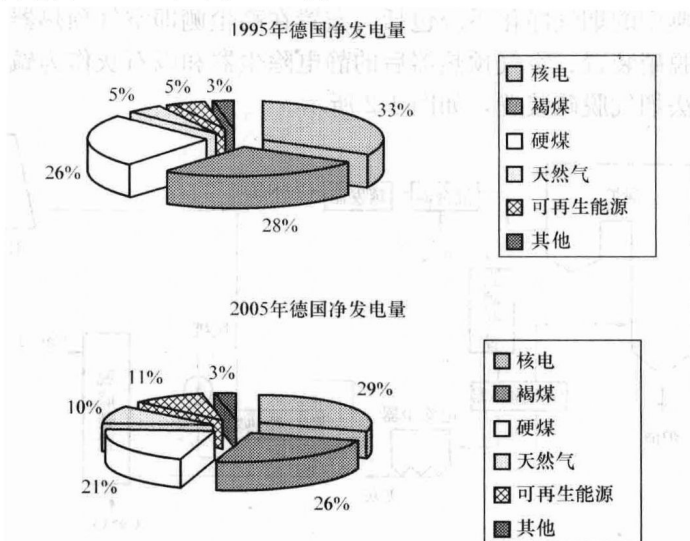


图 1-3 1995 年和 2005 年德国净发电量(含自备电厂上网部分)^[1]

2002 年, 德国人均电力消耗约为 $6538 \text{ kW} \cdot \text{h/a}$ (见图 1-4^[1])。这个数字包括了所有的工业用电、商业用电和公共用电量。

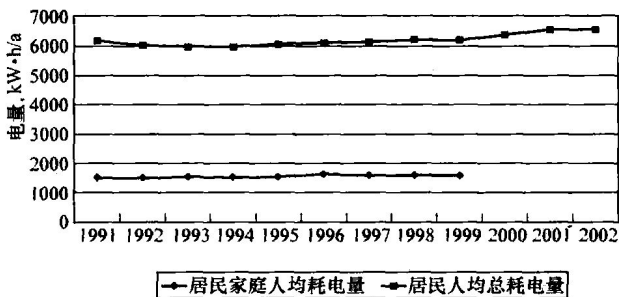


图 1-4 1991~2002 年德国人均电力消耗^[1]

2002 年，德国居民人均年用电约 $1600\text{kW}\cdot\text{h}$ ，并且在过去的几年中没有上升趋势。从国际上电力消耗水平看，工业国要远高于国际平均水平（见图 1-5^[2]）。2002 年中国人均电力消耗为 $1276\text{kW}\cdot\text{h}$ （据 2002 年中国电力年鉴），而德国达 $6538\text{kW}\cdot\text{h/a}$ 。

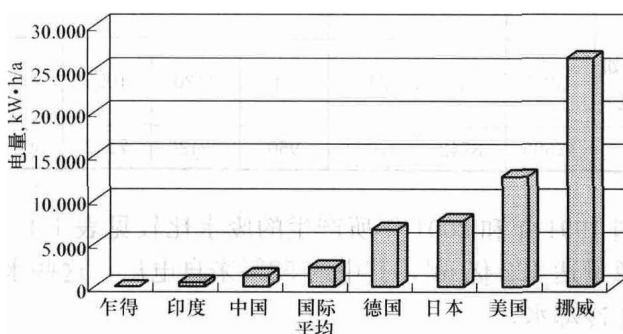


图 1-5 各国人均电力消耗^[2]

德国国土面积为 35.7 万 km^2 ，年降水量为 770mm ，年降水累积达 2750 亿 m^3 。这些降水大部分通过沟渠和河流流入海洋，部分降水渗入地下。

2001 年德国取水量约 395 亿 m^3 （见表 1-3^[3]），其中约有 248 亿 m^3 的水供给了公用电厂，这部分水几乎都取自地表水源；约 54 亿 m^3 水用于自来水供应，主要取自地下水和泉水。从表 1-3 不难看出，德国在过去的十年中，取水量约降低了 17.2% 。

表 1-3 德国 1991 年和 2001 年采水量比较 10^6m^3

经济领域	1991 年采水量				2001 年采水量			
	总采水	地下水/ 泉水	地表水	堤岸 渗滤	总采水	地下水/ 泉水	地表水	堤岸 渗滤
公共供水	6516	4693	1430	393	5409	4010	691	708
采矿及加 工业供水	10981	3026	7412	543	7760	2150	5077	465