

火力发电厂水处理

第三版

上册

武汉水利电力大学 施燮钧 王蒙聚 肖作善

中国电力出版社

7
=3

热电厂水处理

上 册

第 三 版

武汉水利电力大学
施燮钧 王蒙聚 肖作善

中 国 电 力 出 版 社

内 容 提 要

《热力发电厂水处理》修订本仍分上、下两册出版。本册内容为水质的净化,主要包括:水的混凝、石灰软化等沉淀处理,水的离子交换软化、除氯和除盐处理。此外,对水的蒸馏、电渗析和反渗透除盐以及高参数热力发电厂中凝结水的净化处理,也作了较详细的介绍。

本书主要供新从事电厂水处理工作的专业人员学习,也可作为培训专业工人的教材,并可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热力发电厂水处理 上册/施燮钧等编著. -3版. -北京:中国电力出版社,1996(1998重印)

ISBN 7-80125-084-2

I. 热… II. 施… III. 热力发电-发电厂-工业用水-水处理 IV. TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 19162 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

实验小学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1976 年 1 月第一版 1984 年 3 月第二版

1996 年 5 月第三版 2000 年 6 月北京第 1 次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 13.25 印张 349 千字

印数 68701—71700 册 定价 17.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

《热力发电厂水处理》(上、下册)自1976年第一版和1984年修订版发行以来,受到广大读者的欢迎。今为了满足读者的需要,重新作了修订,作第三版出版。在这次修订中,采用了我国法定计量单位,增添了许多近年发展起来的新技术,并删除了一些陈旧的内容。

本书第三版仍分上下两册,上册主要讲述水质的净化,下册主要讲述热力发电厂机炉系统水处理。修订中,力求内容简明易懂,切合实际;阐述原理,尽量说明物理与化学性能,避免繁复的公式推导;对于常用的水处理方法、系统、设备和数据,以及某些实践经验,都作了必要的介绍,以供读者参考。

本书内容的选材和安排,以我国现实情况为主,适当选用了一些对我国有一定参考价值的国外资料。

本书修订工作的分工如下:上册第一、二、三和七章:施燮钧,第四、五和六章:王蒙聚,第八章:肖作善,上册由施燮钧统稿;下册第十五章:施燮钧,第十六章:王蒙聚,其余各章均由肖作善修订,并由肖作善统稿。

本书第一版部分章节是由杨炳坤同志编写的。在修订第二版的过程中,陈绍炎、钱达中、黄锦松、赵连璞等校内外诸同志曾对一些章节提出了可贵的意见。这次第三版经窦照英同志全文审阅,他提供了许多宝贵的建议。作者谨对上列同志表示衷心的感谢。

由于我们水平有限,书中一定尚有错漏和欠妥之处,诚恳希望读者批评指正。

作者写于武汉水利电力大学

1994年12月

目 录

前 言

绪论	1
第一节 水在热电厂中的作用	1
第二节 热电厂中水处理的重要性	4
第一章 水质概述	7
第一节 常用化学名词概述	7
一、溶液 (7) 二、溶液中溶质的含量 (8) 三、质量作用定律和化学平衡 (12) 四、电离 (14) 五、水的电离, pH 值 (15) 六、溶度积 (18) 七、活度 (20)	
第二节 天然水中的杂质	22
一、悬浮物 (22) 二、胶体 (23) 三、溶解物质 (23)	
第三节 水质指标	27
一、悬浮物 (28) 二、溶解盐类 (29) 三、硬度 (31) 四、碱度和酸度 (33) 五、有机物和耗氧量 (34)	
第四节 天然水中几种主要化合物	35
一、碳酸化合物 (35) 二、硅酸化合物 (38) 三、铁的化合物 (40) 四、氮的化合物 (41)	
第五节 天然水的特点	41
一、按主要水质指标分类 (42) 二、按水处理工艺学分类 (43)	
第二章 水的沉淀处理	46
第一节 胶体化学基础	46
一、胶体的稳定性 (46) 二、胶体的亲水性与憎水性 (47) 三、胶体的双电层结构 (47) 四、胶体的电位 (49) 五、胶体颗粒间的作用力 (50) 六、胶体的脱稳 (51)	
第二节 水的混凝处理	53
一、概述 (53) 二、影响混凝效果的因素 (55) 三、混	

凝剂 (60)	四、有机高分子絮凝剂 (66)	五、混凝 试验 (68)	
第三节 水的沉淀软化	.....		71
一、沉淀软化原理 (71)	二、石灰处理 (71)	三、其他沉淀 软化处理 (81)	
第四节 沉降原理	.....		83
一、悬浮颗粒的絮凝性 (83)	二、离散沉降 (83)		
三、絮凝沉降 (84)	四、层状沉降 (84)		
第五节 沉淀处理设备	.....		85
一、平流式沉淀池 (卧式沉淀池) (85)	二、斜管和斜板式沉淀 池 (89)	三、泥渣悬浮式澄清池 (91)	四、泥渣循环式澄清 池 (97)
五、澄清池的运行 (106)	六、澄清池的改进 (112)		
第六节 沉淀处理系统和附属设备	.....		113
一、沉淀处理系统 (113)	二、加药设备 (114)	三、混 合器 (118)	四、反应器 (120)
第三章 水的过滤处理	.....		121
第一节 水的过滤过程	.....		121
一、过滤原理 (121)	二、过滤过程中的水头损失 (123)		
三、滤料 (125)	四、过滤工艺 (128)	五、滤池的维护 (133)	
第二节 过滤器	.....		135
一、普通过滤器 (135)	二、双流式过滤器 (139)	三、多 层滤料过滤器 (140)	
第三节 滤池	.....		142
一、无阀滤池 (143)	二、单阀和双阀滤池 (149)	三、虹 吸滤池 (150)	
第四节 其他过滤方式	.....		152
一、混凝过滤 (152)	二、变孔径过滤 (155)	三、纤维 过滤 (156)	四、吸附过滤 (158)
五、循环清洗高速过滤 (160)			
第四章 离子交换的基本知识	.....		162
第一节 离子交换剂的结构	.....		164
一、磺化煤 (164)	二、离子交换树脂 (165)		
第二节 离子交换树脂的命名	.....		170

一、全称 (170)	二、型号 (171)	
第三节	离子交换原理	172
第四节	离子交换树脂的性能	173
一、物理性能 (174)	二、化学性能 (178)	
第五节	离子交换平衡	181
一、平衡常数 (181)	二、选择性系数 (182)	三、平衡
计算 (183)	四、选择性顺序 (186)	
第六节	离子交换速度	187
第五章	水的阳离子交换处理	192
第一节	固定床离子交换的原理	193
一、水中阳离子只有 Ca^{2+} 和 Na^{+} 离子交换剂的交换 (193)		
二、水中含有 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^{+} 时和 H 离子交换剂的交换 (196)		
第二节	离子交换软化和除碱	197
一、软化 (197)	二、软化和除碱 (200)	
第三节	固定床离子交换	209
一、顺流式 (209)	二、逆流再生式 (219)	三、分流再生式 (225)
四、浮动床式 (226)	五、清洗床 (233)	
第四节	连续床离子交换	233
一、移动床 (233)	二、流动床 (236)	
第五节	离子交换的辅助设备	238
一、喷射器输送系统 (238)	二、泵输送系统 (238)	
第六章	水的离子交换除盐	240
第一节	阴离子交换树脂的工艺性能	240
一、强碱性阴树脂的工艺性能 (241)	二、弱碱性阴树脂的工艺性能 (245)	
第二节	一级复床除盐	246
一、原理 (247)	二、运行 (247)	三、监督 (249)
第三节	混合床除盐	251
一、原理 (252)	二、固定床式混合床 (253)	
第四节	各种离子交换除盐系统	260
一、主系统 (260)	二、再生系统 (264)	

第五节 提高离子交换除盐经济性的措施	266
一、碱液加热 (267) 二、应用强碱性浮动床时改进操作条件 (267) 三、增设弱酸、弱碱性离子交换器和采用双层床交换器 (269) 四、采用对流再生式和前置式交换器 (271) 五、提高淡化高含盐水的经济性措施 (272) 六、回收废再生液和清洗水及其处理 (275)	
第六节 新离子交换树脂的处理和贮存	280
一、新树脂的处理 (280) 二、树脂的贮存 (281) 三、树脂的鉴别和分离 (281)	
第七节 树脂的变质和污染	284
一、变质 (284) 二、污染 (286)	
第八节 设备的防腐蚀	294
一、橡胶衬里 (294) 二、环氧树脂涂料 (295) 三、玻璃钢 (296) 四、聚氯乙烯塑料 (296) 五、工程塑料 (297) 六、不锈钢 (298)	
第七章 水的其他除盐方法	300
第一节 蒸馏	300
一、蒸发器的结构 (300) 二、蒸发器出力与其级数的关系 (302) 三、蒸发器的水质和经济性 (303)	
第二节 闪蒸	304
一、闪蒸的特点 (304) 二、闪蒸装置的结构 (306) 三、闪蒸装置的水质和经济性 (307)	
第三节 电渗析	308
一、电渗析原理 (308) 二、离子交换膜 (312) 三、电极材料 (315) 四、电渗析器的结构 (316) 五、电渗析器的技术性能 (319) 六、电渗析器运行中的一些技术问题 (321)	
第四节 反渗透	328
一、反渗透原理 (328) 二、半透膜 (328) 三、反渗透水处理装置 (331) 四、应用反渗透器的注意事项 (334)	
第八章 凝结水的处理	337
第一节 凝结水的污染	337
一、凝汽器的漏水 (337) 二、沾染金属腐蚀产物 (339)	

第二节 凝结水处理系统	340
一、凝结水处理流程 (340) 二、凝结水处理设备的连接 (340)	
三、凝结水处理设备的布置 (342)	
第三节 凝结水的过滤	342
一、覆盖过滤器 (342) 二、离子交换树脂粉覆盖过滤器 (347)	
三、磁力过滤器 (349) 四、管式微孔过滤器 (353)	
五、氢型阳床 (355)	
第四节 凝结水的除盐混床	355
一、高速混床所用的离子交换树脂 (355) 二、高速混床的结构特点 (356)	
三、高速混床的运行特性 (358) 四、高速混床的体外再生工艺 (359)	
五、 $\text{NH}_4\text{-OH}$ 型混合床 (364)	
第五节 凝结水除盐的新工艺	367
附录 I 水分析结果的审核	370
一、阳离子和阴离子的含量 (370) 二、蒸发残渣 (372)	
三、灼烧残渣和有机物 (372) 四、碱度 (373) 五、硬度 (374)	
六、pH 值 (374)	
附录 II 离子交换树脂的性能试验	381
一、样品的预处理 (381) 二、全交换容量的测定 (382)	
三、密度的测定 (384) 四、酸碱性的测定 (384)	
附录 III 某些国产离子交换树脂的主要性能	388
附录 IV 电力系统水处理设备主要尺寸	396
一、澄清设备——机械搅拌澄清池 (396) 二、过滤器 (396)	
三、离子交换器 (397)	
附录 V 常用药剂的性能	399
附录 VI 常用元素的相对原子质量	403
附录 VII 某些难溶物质的溶度积和溶解度	404
附录 VIII 常用溶液的密度	405
一、碱酸溶液的密度 (20℃) (405) 二、盐酸溶液的密度 (20℃) (406)	
三、氢氧化钠溶液的密度 (20℃) (406)	
四、氯化钠溶液的密度 (20℃) (407) 五、石灰乳的密度 (20℃) (407)	
六、氢水的密度 (20℃) (408)	
七、其他一些盐类水溶液的密度 (409)	
附录 IX 有关单位的换算	410

附录 X 常用符号字母表	412
一、汉语拼音字母 (412) 二、拉丁字母 (412)	
三、希腊字母 (413)	
参考文献	414

绪 论

第一节 水在热力发电厂中的作用

热力发电就是利用热能转变为机械能进行发电。现在我国用得比较普遍的热能来自各种燃料的化学能，此种发电称为火力发电。本书以火力发电为主，对其用水质量的处理加以探讨。

在火力发电厂中，水进入锅炉后，吸收燃料（煤、油或天然气）燃烧放出的热能，转变成蒸汽，导入汽轮机；在汽轮机中，蒸汽的热能转变成机械能；汽轮机带动发电机，将机械能转变成电能。所以锅炉和汽轮机为火力发电的主要设备。为了保证它们正常运行，对锅炉用水的质量有很严的要求，而且机组中蒸汽的参数愈高，对其要求也愈严。目前我国制造的锅炉、汽轮机机组的蒸汽参数和其容量如表 0-1 所示。

表 0-1 发电厂机组的容量和蒸汽参数

名 称	额定功率 (MW)	蒸 汽 参 数			
		锅 炉		汽 轮 机	
		汽压 (MPa)	汽温 (℃)	汽压 (MPa)	汽温 (℃)
中压机组	6, 12, 25	3.9	450	3.43	435
高压机组	50, 100	9.81	540	8.82	535
超高压机组	125	13.23	555	12.23	550
	200	13.73	540	12.74	535
亚临界压力机组	300	16.68	555	16.17	550
		18.27	541	16.66	537
	600	18.27	541	16.66	537

在凝汽式发电厂中，水汽呈循环状运行。锅炉产生的蒸汽经

汽轮机后进入凝汽器，在这里它被冷却成凝结水，此凝结水经泵送到低压加热器，加热后送入除氧器，再由给水泵将已除氧的水送到高压加热器后进入锅炉。图 0-1 所示就是这类发电厂水汽系统的主要流程。

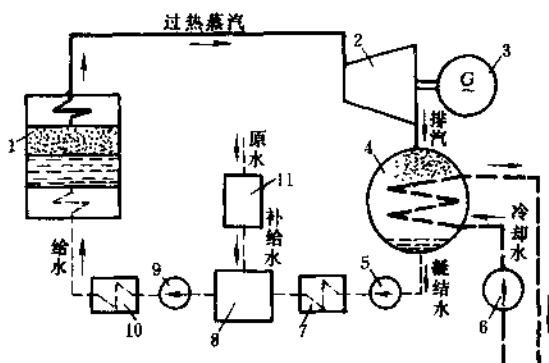


图 0-1 凝汽式发电厂水汽循环系统主要流程

- 1—锅炉；2—汽轮机；3—发电机；4—凝汽器；5—凝结水泵；6—冷却水泵；
7—低压加热器；8—除氧器；9—给水泵；10—高压加热器；11—水处理设备

在上述系统中，汽水的流动虽呈循环状，但这是主流，并非全部，在实际运行中总不免有些损失。造成汽水损失的主要原因有如下几个方面：

(1) 锅炉部分。锅炉的排污放水，锅炉安全门和过热器放汽门的向外排汽，用蒸汽推动附属机械（如气动给水泵），蒸汽吹灰和燃烧液体燃料（如油等）时采用蒸汽雾化法等，都要造成汽水损失。

(2) 汽轮机机组。汽轮机的轴封处要连续向外排汽，在抽气器和除氧器排气口处会随空气排出一些蒸汽，造成损失。

(3) 各种水箱。各种水箱（如疏水箱等）有溢流和热水的蒸发等损失。

(4) 管道系统。各管道系统法兰盘连接处不严密和阀门漏泄

等原因，也会造成汽水损失。

为了维持发电厂热力系统的水汽循环运行正常,就要用水补充这些损失,这部分水称为补给水。凝汽式发电厂在正常运行情况下,补给水量不超过锅炉额定蒸发量的 2%~4%。例如额定蒸发量每小时为 100t 蒸汽的锅炉,其补给水量每小时不超过 2~4t。

有些发电厂除发电外，还向附近的工厂和住宅区供生产用汽和取暖用热水，这种电厂称为热电厂。在热电厂中，由于用户用热方式不同和供热系统复杂等原因，送出的蒸汽大部分不能收回，汽水损失很大，因此在热电厂中补给水量经常比凝汽式电厂大得多。图 0-2 所示就是热电厂水汽循环系统的主要流程。

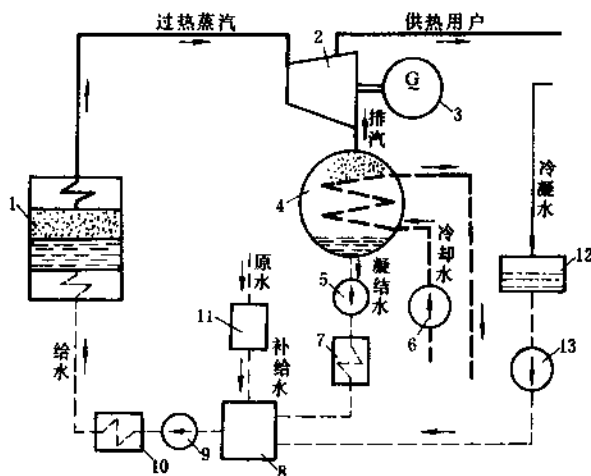


图 0-2 热电厂水汽循环系统主要流程

- 1—锅炉; 2—汽轮机; 3—发电机; 4—凝汽器; 5—凝结水泵; 6—冷却水泵;
7—低压加热器; 8—除氧器; 9—给水泵; 10—高压加热器; 11—水处理设备;
12—返回凝结水箱; 13—返回水泵

由于水在热力发电厂水汽循环系统中所经历的过程不同，水质常有较大的差别。因此，根据实用的需要，我们常给予这些水以不同的名称，现简述如下：

(1) 原水。原水是指未经任何处理的天然水（如江河、湖、地下水，等等），它是热力发电厂中各种用水的来源。

(2) 锅炉补给水。原水经过各种方法净化处理后，用来补充热力发电厂汽水损失的水，称为锅炉补给水。锅炉补给水按其净化处理方法的不同，又可分为软化水、蒸馏水和除盐水等。

(3) 凝结水。在汽轮机中做功后的蒸汽经冷凝成的水，称为凝结水。

(4) 疏水。各种蒸汽管道和用汽设备中的蒸汽冷凝水，称为疏水。它经疏水器汇集到疏水箱或并入凝结水系统中。热力发电厂中疏水系统往往比较复杂，在图 0-1 和图 0-2 中为了说明水汽循环的主要系统，所以未把它表示出来。

(5) 返回水。热电厂向热用户供热后，回收的蒸汽冷凝水，称为返回水。返回水又有热网加热器冷凝水和生产返回冷凝水之分。

(6) 给水。送进锅炉的水称为给水。凝汽式发电厂的给水，主要由凝结水、补给水和各种疏水组成。热电厂的给水组成中，还包括返回水。

(7) 锅炉水。在锅炉本体的蒸发系统中流动着的水，称为锅炉水，习惯上简称炉水。

(8) 冷却水。用作冷却介质的水称为冷却水。在电厂中，它主要是指通过凝汽器用以冷却汽轮机排汽的水。

第二节 热力发电厂中水处理的重要性

长期的实践使人们认识到，热力系统中水的品质，是影响发电厂热力设备（锅炉、汽轮机等）安全、经济运行的重要因素之一。没有经过净化处理的天然水含有许多杂质，这种水如进入水汽循环系统，将会造成各种危害。为了保证热力系统中有良好的水质，必须对水进行适当的净化处理和严格地监督汽水质量。

现将热力发电厂中，由于汽品质不良而引起的危害，简述如下：

(1) 热力设备的结垢。如果进入锅炉或其他热交换器的水质不良，则经过一段时间运行后，在水接触的受热面上，会生成一些固体附着物，这种现象称为结垢，这些固体附着物称为水垢。因为金属的导热性比水垢的高几百倍，而这些水垢又极易在热负荷很高的锅炉炉管中生成，所以结垢对锅炉（或热交换器）的危害性很大。它可使结垢部位的金属管壁温度过高，引起金属强度下降，这样在管内压力的作用下，就会发生管道局部变形、产生鼓包，甚至引起爆管等严重事故。结垢不仅危害安全运行，而且还会大大降低发电厂的经济性。例如，热力发电厂锅炉的省煤器中，结有1mm厚的水垢时，其燃料用量就比原来的多消耗1.5%~2.0%。由于发电厂锅炉的容量一般都很大，每年使用的燃料量也很大，所以燃料的消耗率虽只有微小的增加，却会给国家造成巨额的经济损失。另外，在汽轮机凝汽器内结垢会导致凝汽器真空度降低，从而使得汽轮机的热效率和出力下降。加热器的结垢会使水的加热温度达不到设计值，使整个热力系统的经济性降低。而且，热力设备结垢以后，必须及时清洗，这就停止运行，减少了设备的年利用小时数，此外，还要增加检修工作量和费用等。

(2) 热力设备的腐蚀。发电厂热力设备的金属经常和水接触，若水质不良，则会引起金属腐蚀。热力发电厂的给水管道、各种加热器、锅炉省煤器、水冷壁、过热器和汽轮机凝汽器等，都会因水质不良而腐蚀。腐蚀不仅要缩短设备本身的使用期限，造成经济损失，而且金属腐蚀产物转入水中，使给水中杂质增多，从而加剧在高热负荷受热面上的结垢过程，结成的垢又会加速锅炉炉管腐蚀。此种恶性循环，会迅速导致爆管事故。此外，金属的腐蚀产物被蒸汽带到汽轮机中沉积下来后，也会严重地影响汽轮机的安全、经济运行。

(3) 过热器和汽轮机的积盐。水质不良会使锅炉不能产生高纯度的蒸汽，随蒸汽带出的杂质就会沉积在蒸汽通过的各个部位，如过热器和汽轮机，这种现象称为积盐。过热器管内积盐会引起

金属管壁过热甚至爆管；汽轮机内积盐会大大降低汽轮机的出力和效率，特别是高温高压大容量汽轮机，它的高压部分蒸汽流通的截面积很小，所以少量的积盐也会大大增加蒸汽流通的阻力，使汽轮机的出力下降。当汽轮机积盐严重时，还会使推力轴承负荷增大，隔板弯曲，造成事故停机。

热力发电厂水处理工作就是为了保证热力系统各部分有良好的水汽品质，以防止热力设备的结垢、积盐和腐蚀。因此，在热力发电厂中，水处理工作对保证发电厂的安全、经济运行具有十分重要的意义。

热力发电厂的水处理工作者，应主持或参与以下这些工作：

(1) 净化原水，制备热力系统所需质量的补给水。它包括除去天然水中的悬浮物和胶体状态杂质的澄清、过滤等处理；除去水中溶解的钙、镁离子的软化处理；或除去水中全部溶解盐类的除盐处理。这些制备补给水的处理，通常称为炉外水处理。

(2) 对给水进行除氧、加药等处理。

(3) 对汽包锅炉进行锅炉水的加药处理和排污，这些工作称为锅内水处理。

(4) 对直流锅炉机组或某些亚临界压力、汽包锅炉机组进行凝结水的净化处理。

(5) 在热电厂中，对生产返回水进行除油、除铁等净化处理。

(6) 对冷却水进行防垢、防腐和防止有机附着物等处理。

(7) 对热力系统各部分的汽水质量进行监督。

此外，化学清洗热力设备以及机炉停运期间的保养工作，与水处理有直接关系，也应列入水处理工作。

第一章 水质概述

水是地面上分布最广的物质,几乎占据着地球表面的 3/4,构成了洋、海、江、湖;此外在高山上和地球南北两极还常年有积雪和冰,地层中存有大量的地下水,大气中也有相当数量的水蒸气。

水分子(H_2O)是由两个氢原子和一个氧原子构成的。可是大自然中很纯的水是没有的,因为水是一种溶解能力很强的溶剂,能溶解大气中、地表面和地下岩层里的许多物质,此外还有一些不溶于水的物质和水混杂在一起。天然水中的杂质虽然种类很多,但在它们的组成中,一般不外乎常见的 20 种左右的元素(参见附录 VI)。这些元素除了少数呈单质外,大都形成酸、碱、盐之类的化合物或其他复杂化合物,分散在水中。

水在各种工业部门的生产过程中,常常是不可缺少的物质。各种工业对水质都有一定要求,所以在大多数的情况下,天然水必须经净化处理后才能使用,热力发电厂对它的要求很严格。

热力发电厂中采用的水净化方法,是依据热力设备对水质的要求和天然水中杂质的含量来决定的。所以在研究水处理工艺时,首先溶要了解天然水中含有杂质的概况,这就是本章所要讨论的内容。

第一节 常用化学名词概述

为了便于学习本书内容,现将水处理工作中常用的几个化学名词作简要叙述。

一、溶液

溶液在工农业生产、科学实验以及日常生活中起着十分重要的作用,它在水处理工作中,也应用得相当广泛。