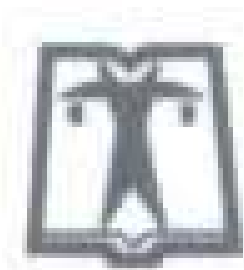
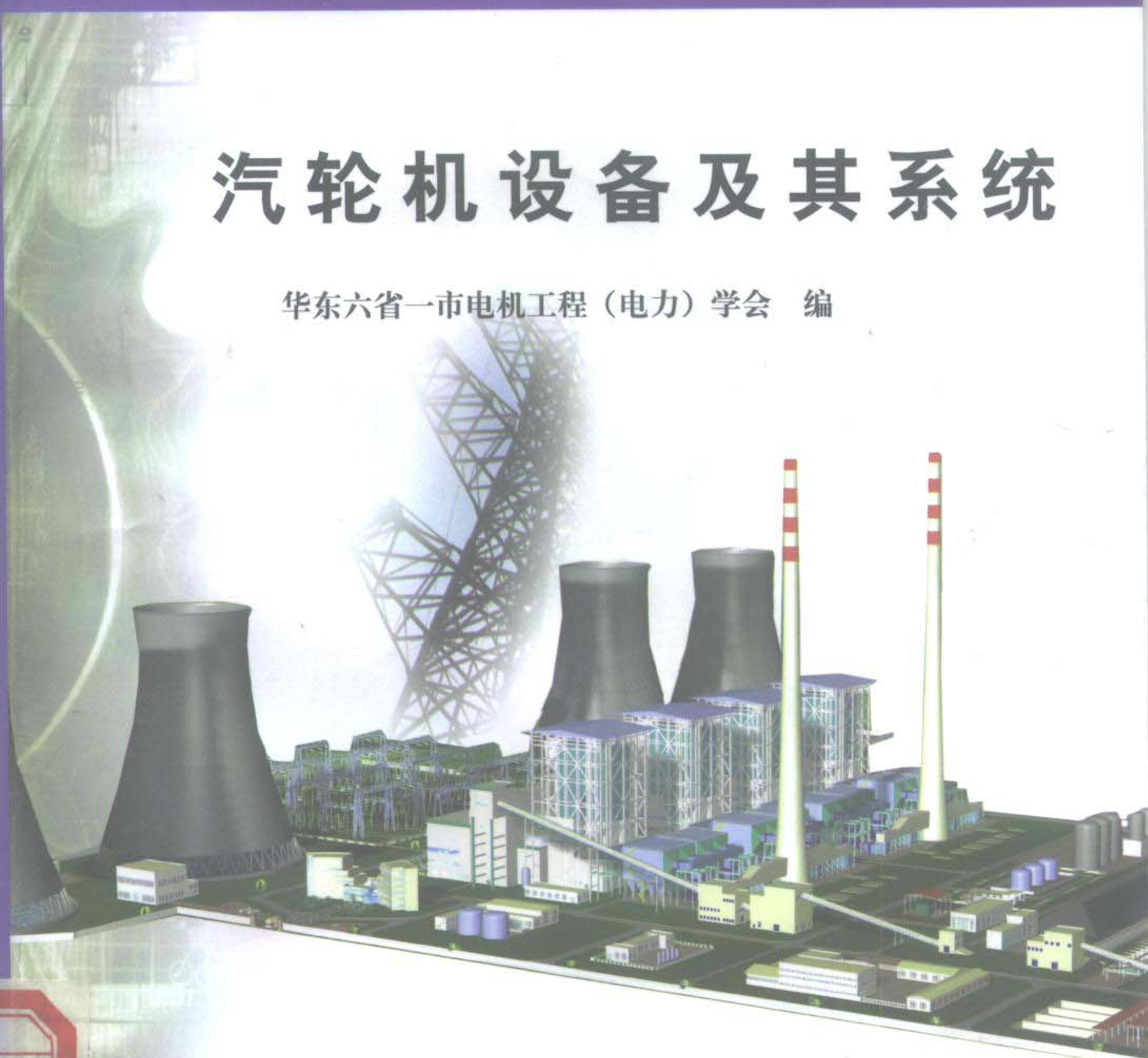


600MW 火力发电机组培训教材

600MW HUO LI FA DIAN JI ZU PEI XUN JIAO CAI

汽轮机设备及其系统

华东六省一市电机工程（电力）学会 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

74311
H 730

600MW火力发电机组培训教材

汽轮机设备及其系统

华东六省一市电机工程（电力）学会 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是以我国已采用的 600MW 汽轮机组的实践经验为基础编写的，共分十五章。第一章阐述机组的选型及主要技术参数；第二章详细阐述 600MW 汽轮机主要设备的结构和功能；第三章至第十二章详细讨论与汽轮机有关的各个系统，如蒸汽系统、真空抽气系统、凝结水系统、给水系统、小汽轮机系统、循环水系统、主机油系统、600MW 汽轮机的调节及保安系统、发电机冷却系统和密封油系统、压缩空气系统；第十三章介绍 600MW 汽轮机本体的安装；第十四章简述 600MW 汽轮机主要工作系统的调试；第十五章介绍汽轮机整套启动调试过程。

本书供从事电厂汽轮机选型、安装、调试、运行和检修的专业工程技术人员参考，也可供高等院校有关专业师生教学参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

汽轮机设备及其系统/华东六省一市电机工程学会编.-北京:中国电力出版社,1999.12

600MW 火力发电机组培训教材

ISBN 7-5083-0138-2

I. 汽… II. 华… III. 火电厂-汽轮发电机组-技术培训-教材 IV. TM311

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 43809 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)

实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2000 年 3 月第一版 2000 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 24.25 印张 595 千字 2 插页

印数 0001 - 3000 册 定价 53.00 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)

《600MW 火力发电机组培训教材》

编 委 会

组编单位：山东省电机工程学会
安徽省电机工程学会
江西省电机工程学会
浙江省电力学会
福建省电机工程学会
上海市电机工程学会
江苏省电机工程学会

联合编委会成员：

主任委员：	刘时中	江苏省电机工程学会
副主任委员：	林淦秋	上海市电机工程学会
	苏伯林	江苏省电机工程学会
委 员：	纪永遵	山东省电机工程学会
	王海秋	安徽省电机工程学会
	熊彭年	江西省电机工程学会
	陆桂婉	浙江省电力学会
	郭忠尧	福建省电机工程学会

前 言

大容量、高参数、高效率的大机组标志一个国家的技术装备水平。自改革开放以来，我国电力工业的技术装备水平得到了较大的提高，大型发电机组有了较快增长。据统计，1978年全国200MW及以上的发电机组只有18台共4.32GW，占全部装机容量的7.6%，到1997年则上升到424台共113.2GW，占全部装机容量的44.5%。目前在全国电力系统中200、300、600MW发电机组已成为主力机组，特别是人们认为最佳单机容量的600MW级的火力发电机组自1985年在我国开始出现以来，至今已有20多台投入了电网运行。

由于600MW发电机组具有容量大、参数高、能耗低、可靠性高、对环境污染小等特点，在我国《1994~2000~2010~2020年电力工业科学技术发展规划》和《电力工业技术政策》及《电力工业装备政策》中选定了在火电技术方面的发展重点包含了600MW机组的开发研究和积极推动其应用。可以预料，今后在全国电力系统内将会有更多的600MW级发电机组投入电网运行。

为适应这一形势发展的需要，使广大电业人员学习和掌握600MW发电机组的技术性能和特点，1996年5月华东地区六省一市电机工程（电力）学会第十次联席会议经过认真讨论研究，决定组织编撰《600MW火力发电机组培训教材》，并落实由六省一市电机工程（电力）学会联合编委会具体主持操作，联席会议在人、财、物上给予应有的支持。联合编委会根据联席会议的决定，在中国电力出版社的积极支持和指导下，于1996年正式启动，选组编撰专家和审稿专家，着手搜集资料，制订和审查编撰大纲等；1997年书稿开始编撰；1998年书稿陆续完成和主审人分头审稿；随即送中国电力出版社编辑加工、出版。整个教材的编审工作，前后共花去了两年多的时间，现在终于正式和读者见面了。

本教材共分五个分册，即第一分册《汽轮机设备及其系统》，由浙江省电力工业局丁有宇高级工程师主编，国家电力公司电力机械局王作宾教授级高级工程师主审；第二分册《电气设备及其系统》，由东南大学刘中岳教授主编，李扬副教授和陆于平副教授参编，安徽省电力试验研究所倪安华教授级高级工程师主审；第三分册《锅炉设备及其系统》，由上海电力学院章德龙教授主编，华东电力试验研究院乐长义教授级高级工程师主审；第四分册《热工自动化》，由江苏省电力试验研究所陈厚肇教授级高级工程师主编，江苏省电力工业局霍耀光高级工程师主审；第五分册《环境保护》，由山东省电力科学研究院曹长武高级工程师主编，南京电力环保研究所丁伟高级工程师主审。全套教材共约320万字。

本教材以600MW火力发电机组的设备及其系统的结构、原理、功能及性能为编撰重点，力求突出600MW机组的技术特点，在理论阐述深度方面，以普及为基础，并适当兼顾提高，在运用语言方面则力求通俗易懂，深入浅出。本教材属于600MW火力发电机组投运上岗培训、岗位技能培训和继续工程教育类培训的教材，适合于具有中专及以上文化程度的电力生产和技术管理人员培训之用，也可供高等院校热能和电力等专业的师生参考。

在教材编撰过程中，华东地区六省一市电力工业局、有关大专院校、厂局以及有关专家学者和科技人员给予了热情的支持和帮助；安徽平圩发电厂、浙江北仑港发电厂、山东邹县

发电厂、上海华能石洞口第二发电厂、江苏扬州第二发电厂提供了 600MW 机组的有关资料，我们在此一并表示衷心感谢。我们还要感谢中国电力出版社，在历次联合编委会会议上都派出编辑参加和指导，经常关心编撰工作，协助解决疑难问题，给予了极大的支持和鼓励。

限于编审人员的水平，这套教材的疏误之处一定不少，恳请广大读者提出宝贵意见，以便今后修订，提高质量，使之能更好地为我国电力工业的建设和发展服务，起到更大的作用。

华东地区六省一市电机工程（电力）学会

1999年8月

编 者 的 话

随着社会生活的现代化，各行各业需要越来越多的电力；对电力供应的可靠性要求也越来越高。因此，建设大容量电厂是满足上述要求的必然途径。我国电力工业自 80 年代以来，兴建的电厂越来越多地采用大功率发电机组。在今后的电力建设中，优先选用的将是 600MW 或更大的发电机组。全面地掌握 600MW 机组的性能，才能建设好、管理好大型电厂。本书正是为此目的而编写。

本书是以我国已采用的 600MW 汽轮机组的实践经验为基础编写的，共分十五章。第一章阐述机组的选型及主要技术参数；第二章详细阐述 600MW 汽轮机主要设备的结构和功能；第三章至第十二章详细讨论与汽轮机有关的各个系统；第十三章介绍 600MW 汽轮机本体的安装；第十四章简述 600MW 汽轮机主要工作系统的调试；第十五章介绍汽轮机整套启动调试过程。

本书由丁有宇编写，由王作宾审阅。

编 者

1999 年 8 月于杭州

目 录

前 言

编者的话

第一章 概述	1
第一节 汽轮机及其系统的选择	1
第二节 600MW 汽轮机组的主要技术参数	2
第三节 600MW 汽轮机组的现状和发展趋势	18
第二章 600MW 汽轮机本体主要部套	23
第一节 600MW 汽轮机组的典型实例	23
第二节 600MW 汽轮机组的进汽部分	35
第三节 汽缸	55
第四节 隔板、静叶和汽封	64
第五节 转子及动叶	70
第六节 轴承和轴承座	83
第七节 盘车装置	93
第八节 滑销系统	97
第三章 蒸汽系统及其设备	100
第一节 主蒸汽、再热蒸汽系统	100
第二节 旁路系统	104
第三节 轴封蒸汽系统	113
第四节 辅助蒸汽系统	116
第五节 回热抽汽系统及其设备	118
第四章 真空抽气系统	143
第五章 凝结水系统及其设备	159
第一节 系统概述	159
第二节 主要设备的结构及技术参数	161
第六章 给水系统及其设备	173
第一节 系统概述	173
第二节 给水泵的结构及技术参数	176
第三节 给水泵组的运行与维护	192
第七章 驱动给水泵的小汽轮机及其系统	196
第一节 小汽轮机的蒸汽系统	199
第二节 小汽轮机的润滑油系统	200
第三节 小汽轮机的压力油系统	203
第四节 小汽轮机的调节—保护系统	206
第五节 给水泵小汽轮机的启动及运行	216
第八章 循环水系统	218

第一节	主机循环水系统的主要设备	219
第二节	开式循环冷却水系统	232
第三节	闭式循环冷却水系统	236
第九章	主机油系统	242
第一节	润滑油系统	242
第二节	顶轴油系统	247
第三节	润滑油净化系统	249
第四节	液压油系统	251
第十章	600MW 汽轮机的调节及保安系统	255
第一节	调节及保安系统概述	256
第二节	汽轮机的数字电液控制系统 (DEHC)	278
第十一章	发电机冷却系统和密封油系统	298
第一节	发电机氢冷系统	298
第二节	发电机密封油系统	302
第三节	发电机定子冷却水系统	305
第十二章	压缩空气系统	308
第一节	系统概述	308
第二节	空压机结构及运行	309
第三节	储气罐和干燥器	314
第十三章	600MW 汽轮机的安装	316
第一节	基础和设备的验收	316
第二节	汽轮机本体的安装	318
第三节	汽轮机本体附件安装	325
第四节	油系统冲洗	326
第五节	蒸汽管道吹扫	330
第六节	液压油系统冲洗	335
第七节	其他系统的检查、清洗	337
第十四章	600MW 汽轮机主要工作系统的调试	339
第一节	润滑油系统的调试	339
第二节	EHC 液动部分调试	342
第三节	发电机冷却水、密封油、氢冷系统调试	348
第四节	汽动给水泵的调试	354
第五节	汽轮机组真空系统的调试	355
第六节	循环水系统的调试	356
第七节	凝结水系统的调试	359
第八节	汽轮机监控系统连锁试验	360
第十五章	汽轮机整套启动调试	363
第一节	整套启动前的检查	363
第二节	暖管与暖机	364
第三节	汽轮机的启动	365
第四节	汽轮机甩负荷试验	376

第一章 概 述

第一节 汽轮机及其系统的选择

建设火力发电厂的目的是把燃料的化学能转换为电能，并由送变电设施把电能输送到各个用户。从经济角度考虑，还希望用较少的燃料，发出尽可能多的电能。这就要求电厂既要安全、可靠，又要有较高的总效率。因此，选择良好的发电设备，是建设电厂的首要任务。

下面对汽轮机及其系统的选择作出简要的介绍。

汽轮机本体的安全、可靠及效率，对于定型的汽轮机，已由制造厂在设计、制造过程确定。电厂用户只能通过对比分析的方法，最后择优选用。对比分析一般从如下几方面进行：

(1) 主要部件的结构性能 包括主汽门、调节汽门、导汽管的结构性能和布置方式，喷嘴室的结构和配汽方式，高、中、低压缸的结构性能，高、中、低压转子的结构性能，末级叶片长度，轴承的结构性能，盘车装置的结构性能，轴系的连接方式以及机组的热膨胀性能等。

(2) 机组的布置方式 机组的布置方式对安装、运行、检修都有影响。如目前已投运的机组中，有的机组把主汽门和调节汽门都布置在运行层下面，运行平台上只有汽轮发电机组，运行层十分敞亮畅通，有的机组却把调节汽门和各个轴承的滤油装置都布置在平台上，结果整个平台显得拥挤不堪。

(3) 机组的控制方式 包括主机和系统的控制，都应根据用户的具体要求加以分析比较后选定。我国已投运的机组，主机采用的是数字式电液控制系统 (DEHC)，各个辅机系统采用的是分散式控制系统 (DCS)，两者相互协调，形成了具有较高水平的闭环式自动控制体系，在集控室内通过计算机桌面、屏幕就能够了解各个系统的状况，发出相应的控制指令，运行管理既集中又方便。

(4) 运行方案的确定 机组运行年限和运行方式的不同，对汽轮机的结构和材料的选用有一定的影响。因此，在选用汽轮机时，应将机组的运行规划通知汽轮机制造厂，以便制造厂在机组的结构和材料选用方面能更好地满足用户的需要。

(5) 给水回热系统的选择 给水回热系统的总体性能对机组的效率影响甚大，在加热器数量相同的情况下，抽汽点（即抽汽参数）、抽汽流量的调整，以及加热器疏水导向的不同、给水旁路的不同，都会明显地影响机组的热循环效率。

(6) 主蒸汽旁路的选择 机组启动、运行方式的不同，对主蒸汽旁路的容量和控制方式的要求也不同。因此，必须根据已规划好的启动、运行方式来选用主蒸汽旁路的容量和控制方式。应当注意的是，旁路不是越大越好。选择旁路时还应当注意旁路阀门的驱动方式，液力驱动的阀门动作较快（可以在 0.3s 以内完成动作），电动阀门的动作较慢（约在 0.5s 时间内完成动作）。

(7) 真空凝结水和循环冷却水系统的选择 我国幅员辽阔，东西南北各占数千公里，从

北方的漠河寒带到南沙群岛的热带，从西北的干旱高原到东海之滨的江南水乡，地理和气候条件千差万别。因此，要根据具体的地理气候条件来选择真空凝结水系统和循环冷却水系统。

要根据具体的水温、水质、水源条件来选用系统和设备、材料。如西北缺水地区，多选用闭式循环冷却水系统；海边电厂考虑凝汽器的材料时，则选用全钛管凝汽器；黑龙江地区在选用凝汽器的真空时，可以选取全年平均水温 15℃，在海南岛年平均水温将取 25℃或更高。

(8) 再热系统的选择 对于亚临界压力机组，只采用一次中间再热，再热的冷端主蒸汽参数为高压缸的排汽参数。对于超临界压力机组，可以一次再热，也可以二次再热。采用哪种方案，要考虑经济性，也要考虑建造费用和运行管理等因素。第一次再热蒸汽的压力已较低，体积流量较大，因此再热蒸汽管道又长又粗大；第二次再热蒸汽的压力就更低，体积流量也更大，再热蒸汽管道就更加长、更加粗大。再热管系将十分庞大复杂，对整个汽轮机岛和锅炉岛的总体布置将有较大的影响，建造费用将明显增加，运行管理也较为困难。因此，超临界压力机组多数还是采用一次中间再热，采用二次再热的只占 15%左右。

第二节 600MW 汽轮机组的主要技术参数

汽轮机组的技术参数归结为两大类：①影响机组经济性的技术参数称为经济技术参数；②影响机组安全的技术参数称为安全技术参数。

一、汽轮机组的经济技术参数

汽轮机组的经济性主要由工质参数、设备的结构性能、各辅助工作系统的配置状况所决定。为了提高汽轮机组的经济性能，必须从这三方面下功夫，使其尽量符合人们的愿望。

1. 蒸汽参数对机组效率的影响

这里指的蒸汽参数是蒸汽的压力和温度。用来驱动汽轮机的单位流量蒸汽压力和温度越高，携带的能量越大，而做功后的压力和温度越低，则带走的无用能量（焓）就越小，这样蒸汽可能的做功能量（理想焓降）就越大；在能量相同的情况下，压力和温度越高，可能用来做功的能量比例就越大，无法做功而不得被放弃的能量比例就越小（即熵值越小）。这就是蒸汽的基本热力性质。因此，为了提高单位流量蒸汽的做功能力和做功效率，应当尽可能地提高将要进入汽轮机的新蒸汽的压力和温度，同时尽量降低做功后“废蒸汽”的压力和温度。从焓熵图上蒸汽的热循环过程线可以明显地看到这种效果。

图 1-1 (a) 是最简单的蒸汽理想热循环在 $h-s$ 图上的示意图。过程线 $a-b-c-a$ 所包围的面积代表有可能做理想功（即未计及做功过程的其他能量损失）的能量， $b-c-s_2-s_3-b$ 折线所包围的面积代表无法利用的汽化潜热； $A-B-C-A$ 过程线表示提高初参数、降低背参数后的过程线。显然， $A-B-C-A$ 折线所包围的面积大于 $a-b-c-a$ 折线所包围的面积，能量转换效率 $ABCA / (ABCA + BCs_1s_3B)$ 大于 $abca / (abca + bcs_2s_3b)$ ，也就是说，提高初参数、降低背参数后的 $A-B-C-A$ 过程做功能力大，效率也高了。

此外，如果在蒸汽尚未丧失做功能力时，将其再次提高温度（即再热），也能较有效地增加蒸汽做功能量的比例，即提高循环的热效率。如图 1-1 (b) 所示，蒸汽由 a 点开始热/功转换到 b 点时，将其再次加热到 c 点，然后再由 c 点到 $d-e-a$ 点。这样，整个循环的做功能量

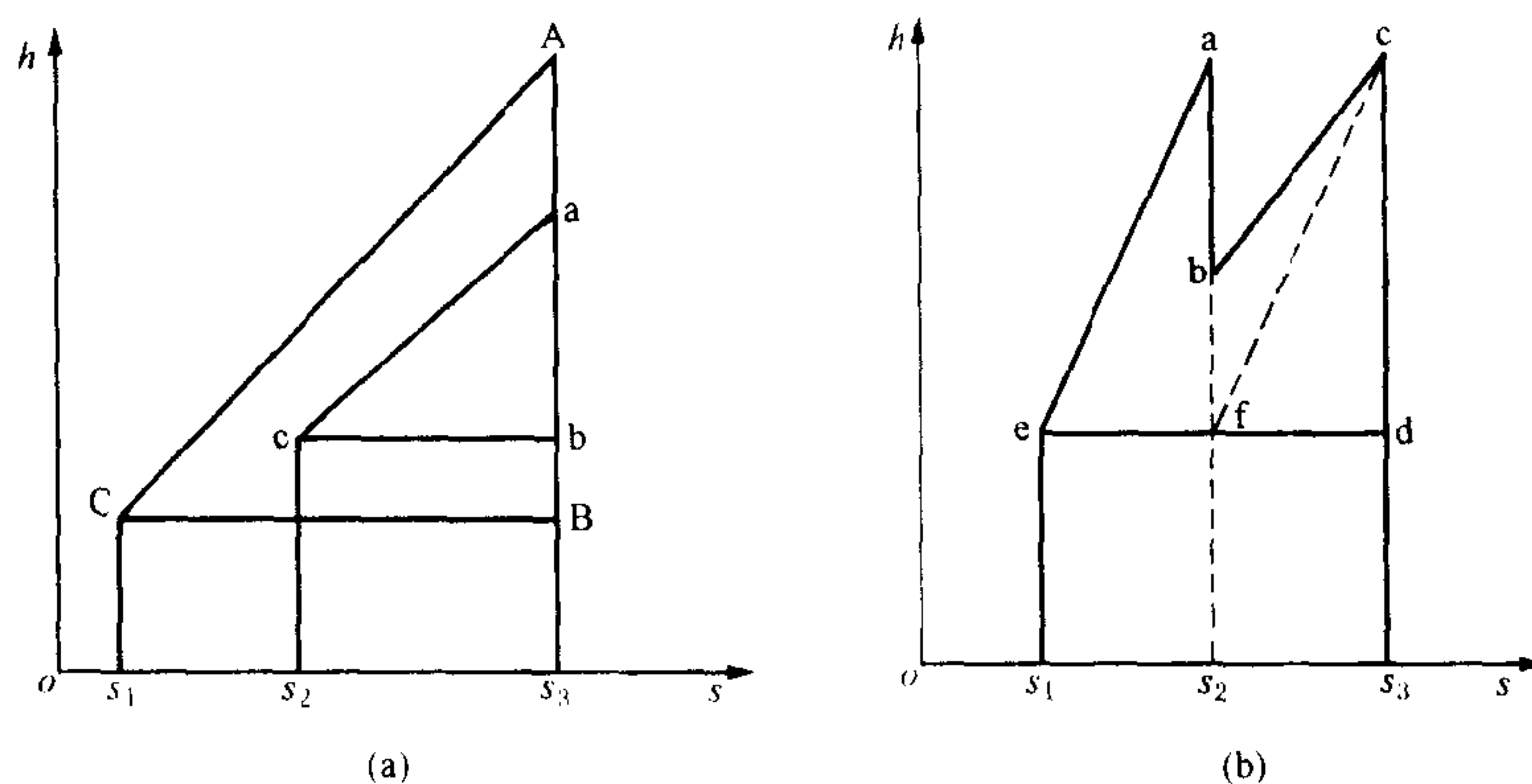


图 1-1 蒸汽热循环过程示意

(a) 提高初参数、降低背参数效果示意；(b) 中间再热效果示意

由 a—b—c—d—e—a 折线所包围的面积表示，而其中 b—c—f—b 折线包围的面积所代表的能量在热功转换过程中无熵增，它由 b—c—d—f—b 折线所包围的面积趋近于理想热循环的矩形面积（即假想的矩形 a—c—d—f—a 的面积）。这样，单位流量蒸汽的做功能力增大了，效率也提高了。这是一次再热的情况。理论上，再热次数越多则由 a—b—c—d…n 折线所包围的面积就越接近于理想热循环的矩形面积。但实际上，多次再热从技术上实现很困难，从经济技术角度考虑也不合理，通常只采用一次再热，最多两次再热。

600MW 亚临界压力汽轮机组均采用一次中间再热，超临界压力机组大多数也只采用一次中间再热，只有少数采用二次中间再热。

蒸汽参数的提高受到材料性能的限制。亚临界压力机组的初参数，压力约为 16~17.5MPa，温度约为 535~570℃；超临界压力机组的初参数，压力约为 24~26MPa，温度约为 550~570℃。如果想采用更高的初温，锅炉和汽轮机本体都要采用十分昂贵的材料，制造成本将大大提高，从经济技术角度考虑也是不合理的。压力的提高固然不受材料性能的限制，但对于超临界压力机组，是由直流锅炉供汽，“水”在锅炉中已没有液态和汽态之分，压力越高，可能溶解于“水”中的其他物质就越多。蒸汽在汽轮机的通流部分做功后压力将降低下来，原来在高压状态下溶解于“水”的物质将会释放出来，聚集于汽轮机的通流部分。初参数的压力越高，在通流部分的积垢就越快，这将使通流部分的效率明显降低。因此，在选用汽轮机组的初参数时，压力也不是越高越好。

由图 1-1 可以看出，降低背参数对提高机组热效率有显著的效果。背参数的降低，受两方面的限制：一方面受末级排汽面积的限制；另一方面还受大气温度的限制。在我国的地理条件下，背压大约为 0.0035~0.006MPa。

由图 1-1 还可以看出，不论提高初参数，还是采用中间再热，在增加理想焓降的同时，蒸汽的熵也增加了。也就是说，用提高初参数的办法，特别是用中间再热的办法来增加机组出力，在增加出力的同时，总是伴随着无用能量的增加。为了尽量减少无用能量的增加，必须采用别的办法，这就是回热抽汽。

2. 回热抽汽系统的作用

在汽轮机组中设置回热抽汽系统的目的，就是为了尽量减少进入凝汽器的无用能量。下面分析回热抽汽系统是怎样减少进入凝汽器的无用能量的。

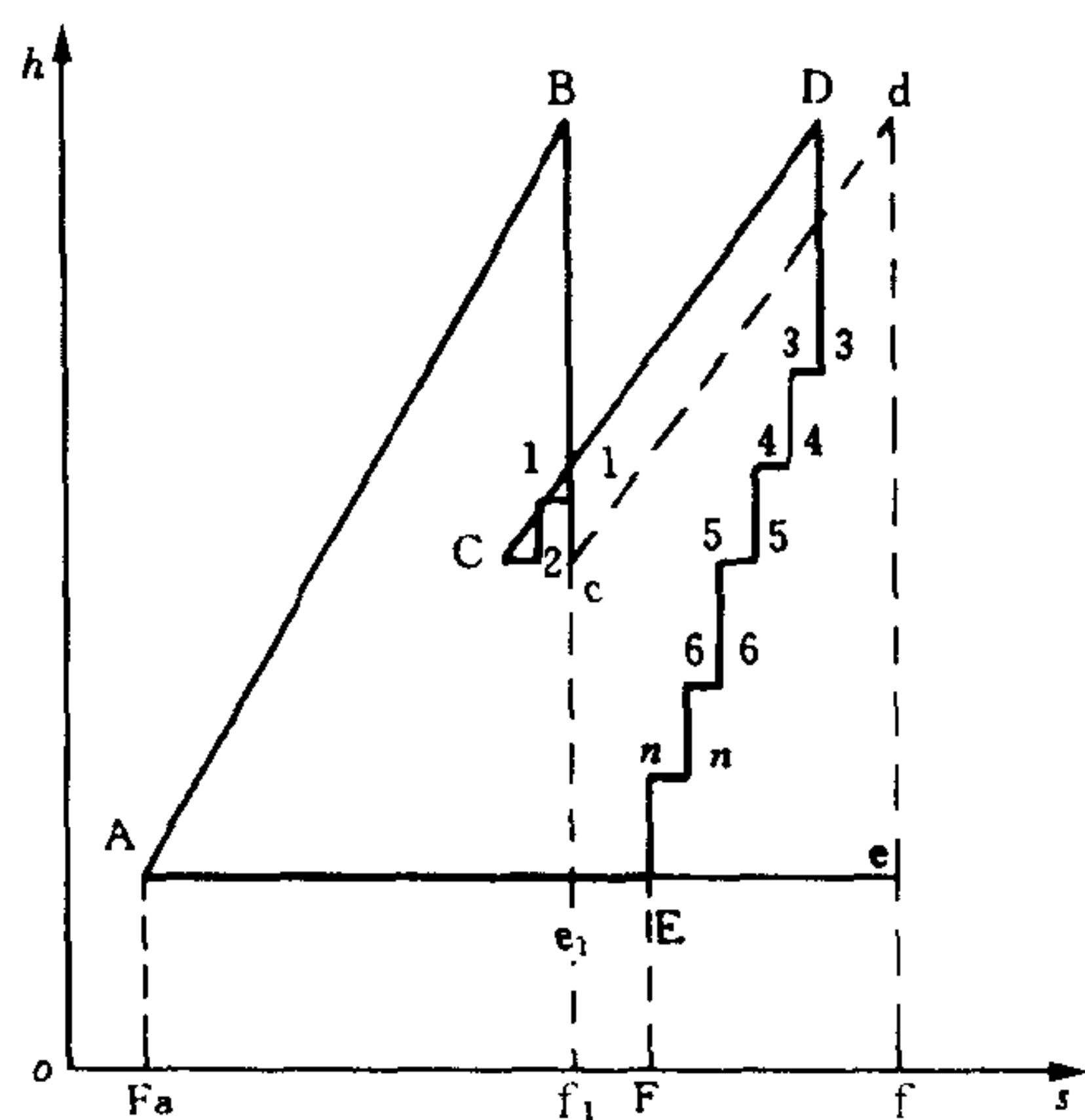


图 1-2 回热抽汽效果示意

在图 1-2 上给出了单位流量蒸汽一次水—汽—做功—汽—水的循环过程线。这是一个有一次中间再热的蒸汽热循环过程示意图。从过程线 A—B—c—d—e—A 可以看出,未采用回热抽汽情况下,中间再热单位流量蒸汽做功能力的增加量是折线 c—d—e—e₁—c 所包围的面积,而同时增加的无用能量是折线 e—f—f₁—e₁—e 所包围的面积。采用回热抽汽之后,过程线是 A—B—1—2—C—D—3—4—5—6—…—n—E—A,无用能量的增量由折线 e—f—f₁—e₁—e 所包围的面积缩小成由折线 E—F—f₁—e₁—E 所包围的面积。可见,回热抽汽对减少进入凝汽器的无用能量(也即提高热循环的效率)有十分明显的效果。

上面只是对在理想条件下(即循环过程中,蒸汽释放的内能完全用于做功),简单地比较了无回热抽汽与有回热抽汽两者之间的差别。实际上,在同样有回热抽汽的循环中,回热系统抽汽点的不同,以及各抽汽点抽汽量的不同,都会造成循环效率的不同。

回热抽汽的安排应当是:高品位(即处于高热焓、低熵值蒸汽状态)处不抽汽或少抽汽,低品位处则尽可能地多抽汽。这是提高回热抽汽系统节能效果的重要原则。

此外,抽出的蒸汽在把热能传给锅炉给水(凝结水)之后,它本身也冷却下来变成凝结水,这些凝结水通常称为加热器的疏水。这些疏水的不同导向,也会造成不同的结果。因此,这些疏水的导向,应经过对整个热循环系统进行详细的热平衡计算后予以确定。

3. 真空系统的作用

真空系统由抽真空系统和密封系统两部分组成。它的作用是用来建立汽轮机组的低背压,也即用来建立凝汽器的高真空,使蒸汽能够最大限度地吧热焓转变为汽轮机的动能。对于凝汽式汽轮机,蒸汽到了最后几级,已进入饱和区,蒸汽的饱和压力和饱和温度一一对应;压力越低,温度也就越低。凝汽器中的高真空,使蒸汽能够工作到很低的压力和温度,最后被冷却水带走的能量也就减少了,汽轮机效率提高了。

应当注意,抽真空系统所建立的真空,只是建立凝汽器真空的一个必要条件。在汽轮机组尚未投入运行时,凝汽器中的真空取决于抽真空系统所建立的真空;在汽轮机组投入运行后,抽真空系统的作用只是把泄漏到汽轮机内部的空气及时地抽走,是确保凝汽器真空的一个必要条件。在汽轮机组投入运行后,凝汽器内的真空还(甚至是主要)取决于进入凝汽器内的蒸汽与循环冷却水的热交换状况。蒸汽与循环冷却水的热交换状况主要取决于凝汽器的换热面积和循环冷却水的温度 t_w (t_w 取决于环境温度)、水量。由此可见,在具体的电厂环境条件下(也就是说,在具体的环境温度条件下),要确保凝汽器内具有良好的真空,必须保证抽真空系统性能良好,有足够大的凝汽器换热面积和足够的循环冷却水量。通常,要求循环水冷却倍率(在相同的单位时间内,进入凝汽器的循环水与蒸汽的质量比)不小于 60。

在某些特殊的运行工况下,如低负荷运行时,蒸汽到了末几级已不能够继续膨胀做功,汽轮机的这几级变成了鼓风机,蒸汽可能被加热、升温,导致凝汽器内的真空变坏。此时,应当调整运行方式,使汽轮机末几级有足够的冷却流量。如果无法调整运行方式,则必须向凝

汽器内喷注冷却水，以确保凝汽器和汽轮机末几级的安全。凝汽器的喷水冷却装置是保证凝汽器真空的后备设施。

4. 轴封系统的作用

轴端汽封系统的功能有两个方面。在汽轮机组的压力区段，它防止蒸汽向汽轮机外泄漏，确保进入汽轮机的全部蒸汽量都沿着汽轮机的叶栅通道前进、做功。它是保证汽轮机效率的重要手段之一。在真空区段，它防止汽轮机外侧的空气向汽轮机内泄漏，保证汽轮机真空系统有良好的真空，从而保证汽轮机组有尽可能低的背参数，即保证了汽轮机效率。

通常，汽轮机组的每一个汽缸两端各有一组轴封，每组轴封由多段组成，如图 1-3 所示。对于低压区段，送汽 0.101MPa 压力的目的是使外部的空气不能进入汽轮机内部，抽汽 0.096MPa 压力的目的是使蒸汽不至泄漏到大气中；对于高压区段，省去了 0.101MPa 压力的送汽。

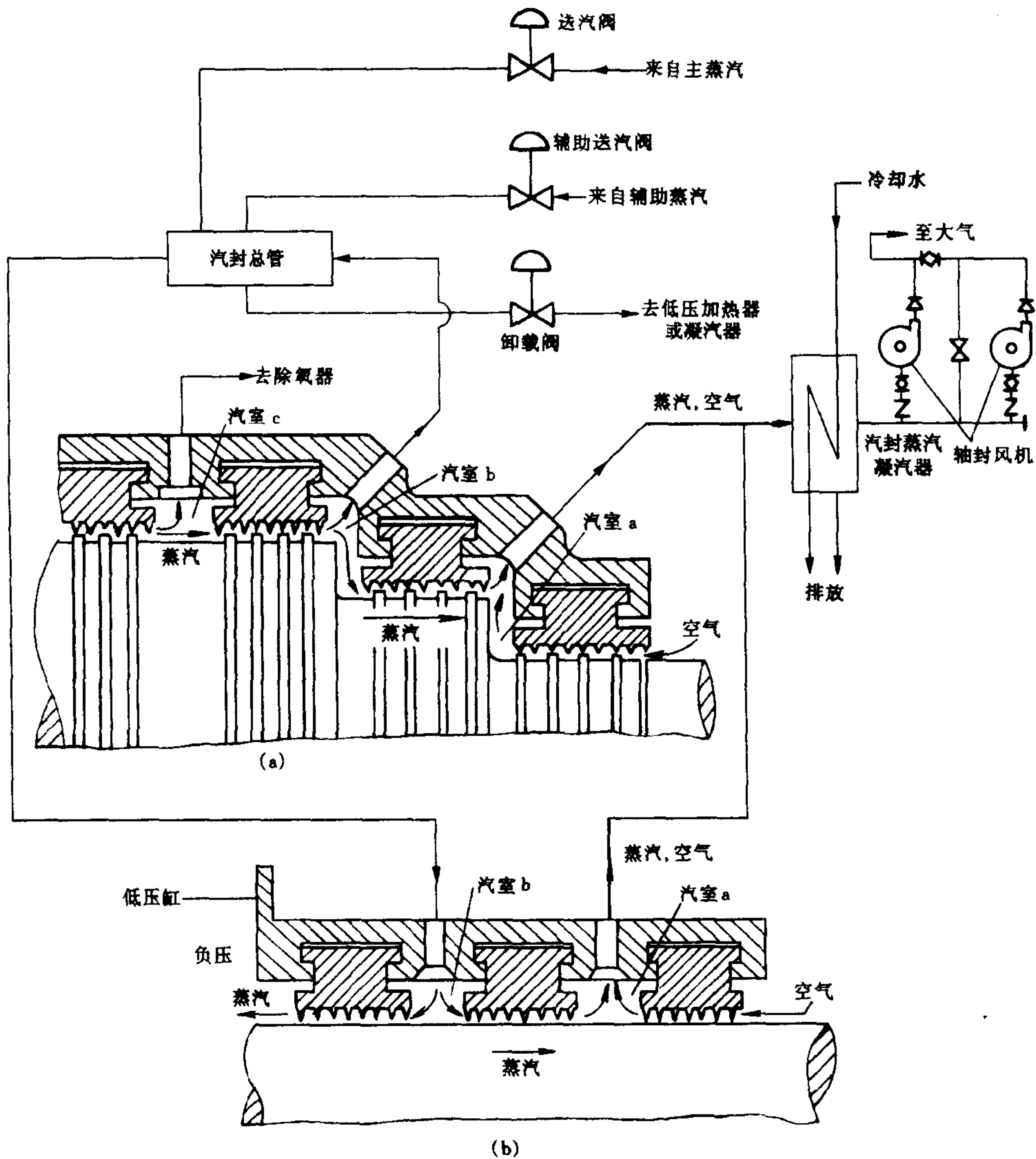


图 1-3 汽轮机轴封系统示意
(a) 高压轴封；(b) 低压轴封

汽封和转子之间的径向间隙通常为 $0.4\sim 0.6\text{mm}$ 。目前，已发明了“自动调整汽封”，可以将汽封的径向间隙自动调整到使转子磨损接近于零，汽轮机组的运行效率相应提高。

5. 汽封系统的作用

这里是指汽轮机通流部分的汽封。设置它的目的是尽量减少蒸汽从高压区段通过非做功通道泄漏到低压区段，以保证尽可能多的蒸汽在做功通道做功，这样才能保证汽轮机通流部分有较高的效率。

汽轮机通流部分的汽封分径向汽封和轴向汽封，如图 1-4 所示。

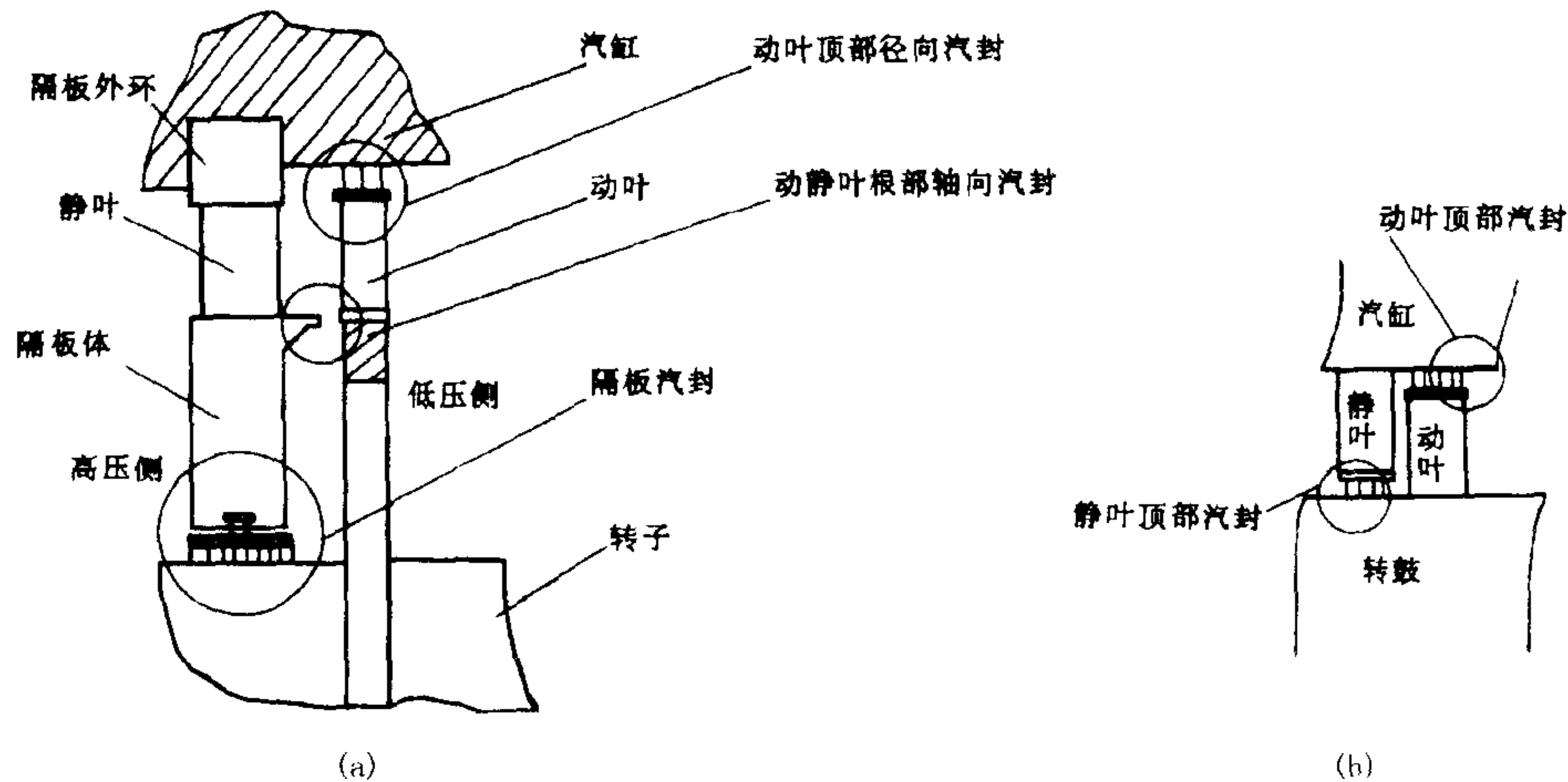


图 1-4 汽轮机通流部分汽封示意

(a) 动叶顶部、动静叶根部汽封；(b) 转鼓式汽轮机动静叶顶部汽封

对于冲动式汽轮机，隔板汽封起主要作用；隔板汽封只用于有隔板的通流部分。对于反动式汽轮机，如果静叶叶栅做成隔板式，那么隔板汽封和叶顶汽封同样重要。对于转鼓反动式汽轮机，静叶顶部和动叶顶部汽封同样重要。轴向汽封只起辅助作用。600MW 汽轮机组的轴向总长度较大，运行时汽缸、转子的相对膨胀较大，设置动静叶叶根轴向汽封已失去实际意义，有的制造厂将冲动式汽轮机的动、静叶叶根轴向汽封改为径向汽封，这样既保证了轴向的膨胀不受影响，又起到了汽封的作用。

隔板汽封和静叶栅顶部汽封的径向间隙约为 $0.4\sim 0.6\text{mm}$ ，动叶顶部汽封的径向间隙则与动叶长度有关。

以上只是简要地说明了汽轮机组主要工作系统对机组效率的影响，以及如何改进系统的性能，确保汽轮机组的效率如愿以偿。对汽轮机组的效率影响最大的是蒸汽在汽轮机内通流部分的工作效率，以及相应的管道、阀门内的工作效率。

6. 通流部分的性能

汽轮机有成千上万的零部件，对每一个零部件的结构、材料、工艺性能要求都很高，目的是使蒸汽在汽轮机内安全地、高效率地把内能转变为转子的动能。蒸汽的内能转变为转子动能的过程是在通流部分内进行的。对于大功率汽轮机来说，是在许多级（静叶栅和动叶栅构成了汽轮机通流部分的“级”）的静叶栅和动叶栅所构成的通道内进行的。确保蒸汽在每一级内高效率地把内能转变为转子的动能，也就是保证了通流部分的高效率。先来简单了解通流部分单独一级的工作情况，参看图 1-5。

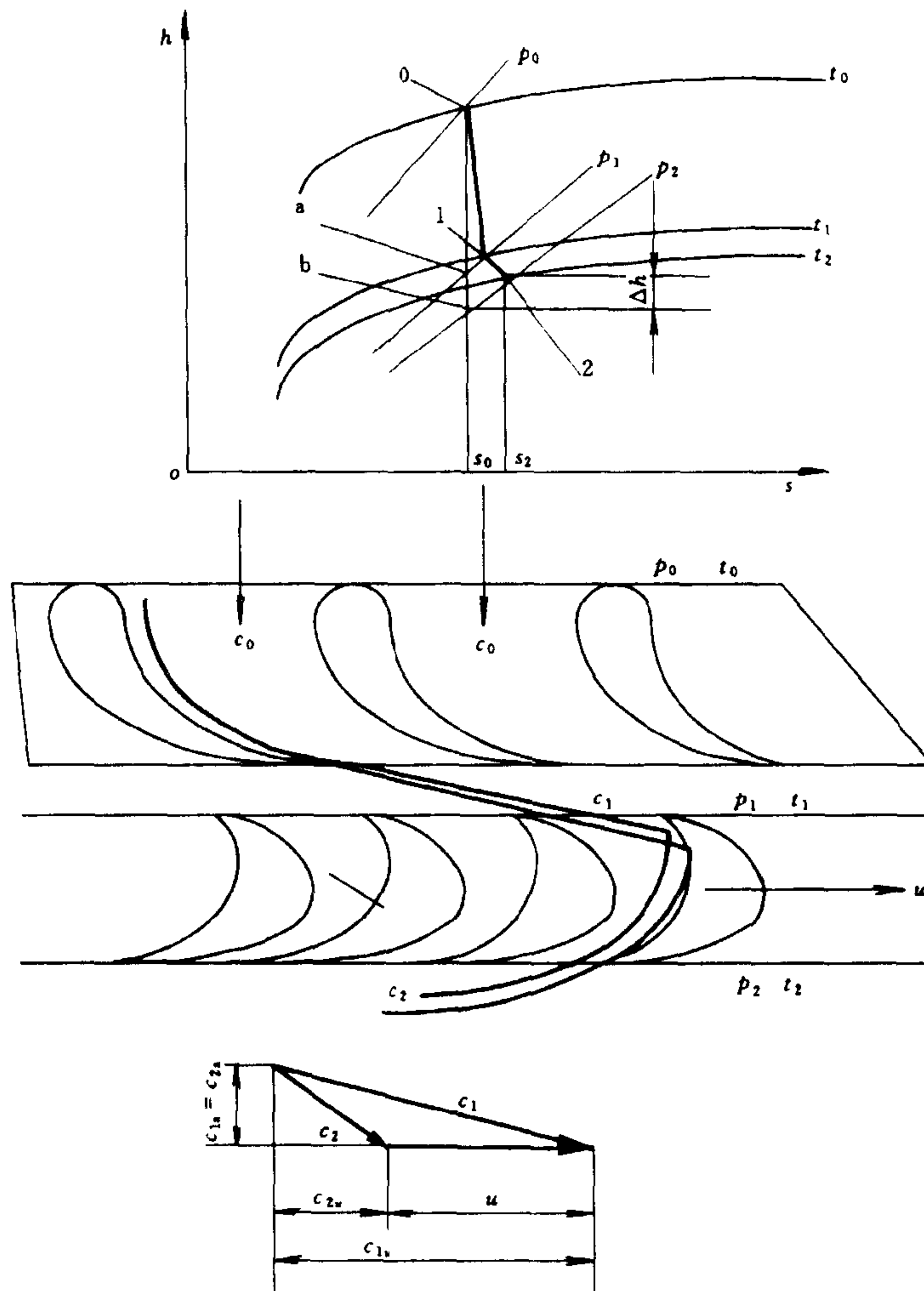


图 1-5 蒸汽在汽轮机一级内的能量转换示意

u —叶片的圆周速度； c_1 —静叶出口速度； c_2 —动叶出口速度

蒸汽在进入静叶栅通道时，其 $h-s$ 图上的状态点是 $0 (p_0, t_0)$ ，从 0 点开始，由 p_0 膨胀至 p_2 ，理论上的过程线是 $0-a-b$ 。但实际上，蒸汽在膨胀和流动过程中，由于叶片型面和叶片端部的涡流损失，消耗了一部分能量。这一部分消耗了的能量，又变成热能，使蒸汽的温度升高了一些，在 p_1 和 p_2 情况下等压加热，即在不做功的情况下，使蒸汽的熵值由 s_0 增大到 s_2 。因此，从 0 点开始，由 p_0 膨胀至 p_2 ，蒸汽膨胀做功的过程线是 $0-1-2$ 。由于上述汽流通道内的损失，实际过程比理论过程少做功 (Δh)。为了尽量减少这种损失，叶片不仅要求做得很光滑，而且型线要求也很严格。其中按三元流动原理设计的可控涡流型的级效率较为理想。

蒸汽在静叶通道内膨胀，压力从 p_0 降到 p_1 的同时，其速度也从静叶进口处的 c_0 增加到出口处的 c_1 ，然后进入动叶。从动叶出口速度三角形可以看出， c_1 越大， c_{2u} 也即余速 c_2 就越大。这就是说，对于一定的 u 值，加大 c_1 的结果，蒸汽所做的功并没有增大，而是增大了动叶出口处的余速。能够做功的是 u 所代表的动能，即单位流量蒸汽做功的能力为

$$w = \frac{u^2}{2}$$

其中： u 是叶片在蒸汽沿圆周方向（也称切向）动能推动下形成的圆周速度， $u=c_{1u}-c_{2u}$ ，m/s。

从动叶出口速度三角形还可以看出，汽流速度的轴向分量 $c_{1a}=c_{2a}$ ，它们代表汽流在单位面积内的通流能力。

人们的目的是蒸汽要能够尽可能多做功，又不会形成太大的余速。这就要选择最佳速比 u/c 。在通流部分静（动）叶平均直径上，通常选择 $u/c \approx 0.5$ 。在这种条件下，余速 c_2 最小， $c_{1u} \approx u$ ， $c_{2u} \approx 0$ 。此时余速 c_2 的方向近似垂直于 u ，与汽轮机的轴向基本相同。这就是说，蒸汽由初参数膨胀到背参数，其总焓降应当合理分配。在高压缸，蒸汽的体积流量变化不很大，叶片高度的变化也较缓慢，焓降的分配差别也较小；中压缸的前几级，焓降差别也不很大，到了中压缸后几级，特别到了低压缸，各级焓降的差别就很大。其目的就是为了使通流部分有合理的焓降分配，提高通流部分的效率。此外，还应注意，圆周速度 u 是沿着叶片高度变化的，静动叶片的截面型线要相应地变化，以适应汽流流线的变化。正如上面所说的，用三元流动的理论来设计和选用叶片。

600MW 汽轮机的通流部分是由许多级组成的，而且还分为高压、中压、低压汽缸。在高压缸的调节级后和每个汽缸的最后一级，余速 c_2 无法利用或无法大部分利用来作为下一级的 c_0 ；在有抽汽口处，余速 c_2 也无法大部分利用来作为下一级的 c_0 ；其他中间各级的余速，如果动静叶的型线匹配得当，余速能够大部分利用来作为下一级的 c_0 。

根据各级焓降应合理分配和尽可能利用余速 c_2 的要求，同一个汽缸内的通流部分应当是一个平滑完整的汽流通道。它从高压缸第 2 级至高压缸最后一级、中低压缸各自的第一级到最后一级，其汽流通道应当是平滑地逐渐扩展的流线型通道。

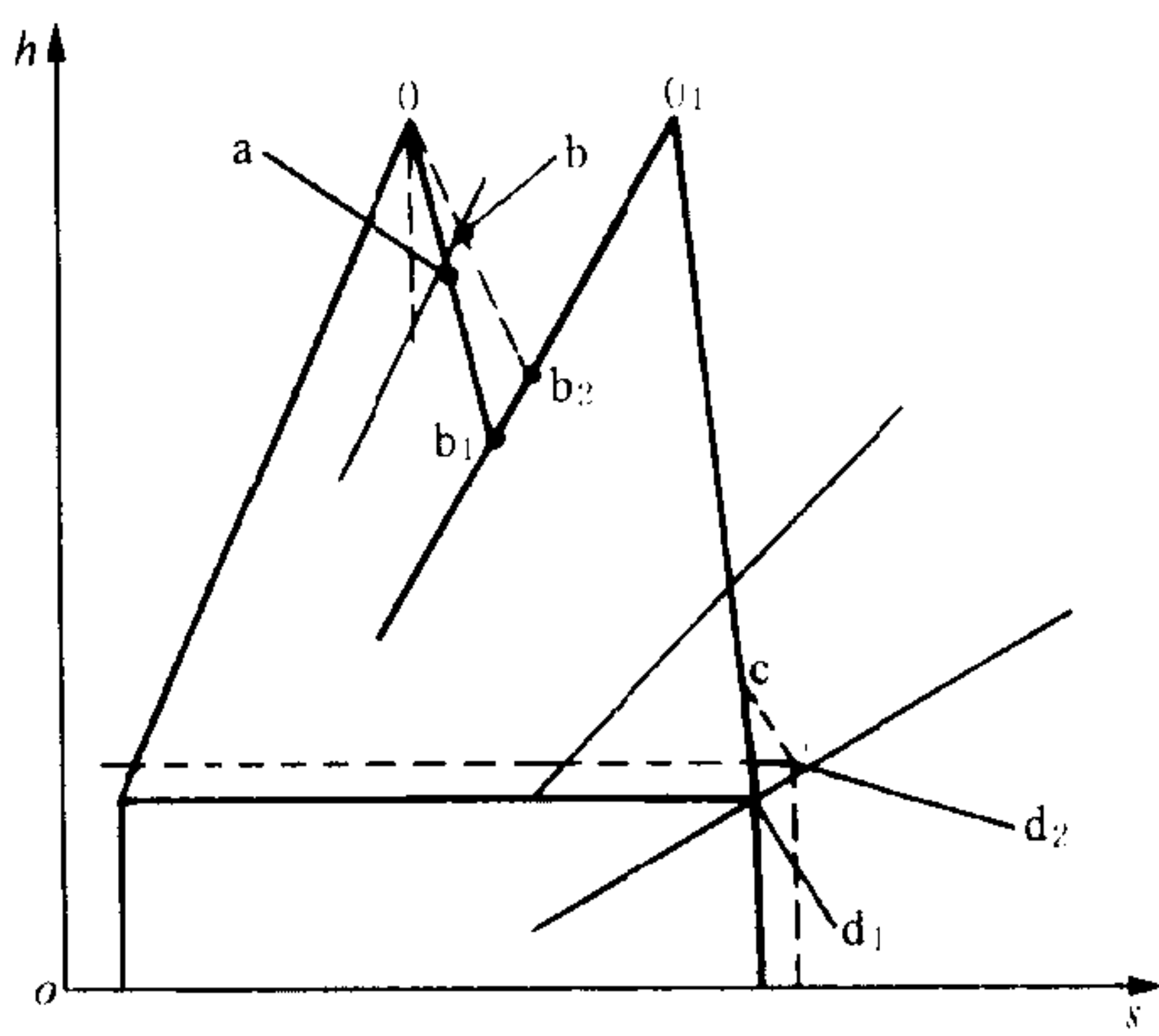


图 1-6 调节级和末级性能对机组性能的影响示意

在汽轮机的通流部分中，第一级（即调节级）和最后一级（末级）的性能对通流部分性能的影响最大。先来看看调节级，参看图 1-6。

对于正常设计的调节级，蒸汽在调节级中的膨胀过程线是从 0 到 a ；如果调节级的性能不好，蒸汽在调节级中的膨胀过程线是从 0 到 b ，而蒸汽在整个高压缸中的膨胀过程线将由 $0-a-b_1$ 移至 $0-b-b_2$ 。蒸汽的品位降低了，蒸汽在整个高压缸中的做功能力也降低了。当然，整个高压缸的效率也降低了。通常调节级的焓降比高压缸中压力级的焓降大，尤其是在部分负荷时，影响更大。为了使调节级有良好的性能，应当选用最佳的 u/c ，尽量完善动叶和静叶（喷嘴）的型线；调节级的性能还与喷嘴组的布置方法及运行方式有关。因此，无论是在设计时，还是在选用和运行时，都要经过详细分析、综合比较之后，作出最佳选择。

通流部分最后一级即末级的性能，对汽轮机的效率影响也很大。

对于正常设计的末级，蒸汽的膨胀过程线是从 c 到 d_1 ；如果末级的性能不好，蒸汽在末级中的膨胀过程线变成从 c 到 d_2 。这样，不仅末级的效率降低了，而且整个蒸汽热循环过程的背参数也被提高了。这不仅影响机组效率，严重时还可能影响汽轮机通流部分的通流能力，从而影响机组的总功率。