

火电工程调试技术手册

汽轮机卷

010 1

0101 100 01010101

河南省电力公司 编

010 1 01 1

0101 0101 01



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

火电工程调试技术手册 汽轮机卷

河南省电力公司 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

火电工程调试技术手册. 汽轮机卷/河南省电力公司
编. -北京: 中国电力出版社, 2002

ISBN 7 - 5083 - 1194 - 9

I. 火... II. 河... III. ①火力发电-发电机-机组-调试-技术手册 ②火力发电-汽轮发电机-机组-调试-技术手册 IV. TM31-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 056429 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2003 年 4 月第一版 2003 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 33.5 印张 826 千字 1 插页

印数 0001—4000 册 定价 66.00 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)

《火电工程调试技术手册》编委会

主 任 吴华斌

副 主 任 尚全忠 方志民 刘毓琦

委 员 (按姓氏笔画排列)

马淮军 石 光 白明九 刘韶林 刘遵义

刘静宇 张 强 李丙军 李庆渝 李春茂

李春林 陈守聚 时进荣 邱武斌 易绪涛

郭子仁 袁立平 崔文涛 阎留保

责任编辑 尚全忠 李庆渝 白明九

《火电工程调试技术手册》

(汽轮机卷) 编写人员

徐广喜 刘静宇 卢允谦 马建伟

黄 智 抄 勇 范伊波 胡 兵

前 言

电力工程调整试运行工作是电力基本建设不可替代的重要环节。调试工作既是一个相对独立的阶段，同时又贯穿于整个工程建设全过程。通过对整套设备的调整试运行，可使各系统单个设备形成具有活力和生产力的有机整体。

在长期的电力建设中，广大电力工程调试工作者善于学习、勇于探索、勤于实践、开拓创新，积累了丰富的调试经验，为电力建设整体水平的不断提高奠定了坚实的基础。随着现代化、大容量、高参数火电机组迅猛的发展，新设备、新技术、新工艺、新材料广泛运用，对电力工程调整试运行工作提出了更高、更新的要求。

“工欲善其事，必先利其器。”为适应调试技术不断发展的需要，提高电力调试队伍的整体素质和调试技术水平，我们组织了电力工程调试战线上的一批专家和工程技术人员，立足电力工程基本建设的实际，重视经验的总结和积累，努力跟踪国内外电力工程调试前沿新技术，从大量纷繁零散的资料中综合提炼，融会贯通，历时两年，几易其稿，终于完成了这套火电工程调试技术手册的编辑出版工作。

该《手册》详细阐释了火电工程中汽轮机、锅炉、金属、热工、化学、电气等各系统基础知识、基本原理、技术参数、经济指标以及调试的标准、方法、步骤等等。其内容既是电力工程调试工作经验的升华，又充分反映了当今国际国内调试技术的最新成果，具有较强的科学性、实用性，对指导电力建设工程调试工作、提高工程调试人员的综合素质都大有裨益。

本套技术手册能在 21 世纪的开元之际如期付梓，要感谢各位作者以科学、严谨的治学态度，满腔热情投入资料的整理和编写中，为确保手册的高质量完成，付出了辛勤的汗水。要感谢各位专家，他们的学术造诣和敬业精神令人钦佩，使本套手册既有较强的实用性，又具有较高的学术价值。同时还要感谢出版社各位编辑的辛勤劳动。在此谨向他们致以诚挚的谢意和崇高的敬意。

火电工程调试是一个复杂的系统工程。电力调试工作的技术含量之高、配

合分工之严，使我们在编辑过程中感到压力和责任。尽管经过专家和编者的认真审查和核校，百密一疏，错误和纰漏在所难免，敬请各位同仁和广大调试工作者斧正，以期在今后的修订中不断完善。

吴华斌

2002年1月3日于郑州

编写说明

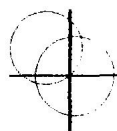
《火电工程调试技术手册》共有七卷，即：汽轮机卷、锅炉卷、电气卷、热工卷、化学卷、金属卷、综合卷。汽轮机卷共分为六篇，三十三章，主要概括了汽轮机的基础知识、汽轮机组分部试运、整套启动阶段汽轮机调试、典型机组调试实例、汽轮机调试中常见的故障与处理、汽轮机组启动验收性能考核试验等内容。

《火电工程调试技术手册汽轮机卷》第一篇为基础知识篇，主要介绍了汽轮机的分类、火电厂热力基础知识及机组的经济性指标、汽轮机的结构、调节保安系统、辅助系统等。第二篇为汽轮机的分部试运篇，主要介绍了分部试运前的准备工作、分部试运过程、调节系统试验。第三篇为整套启动篇，主要介绍了汽轮机空负荷、带负荷、满负荷调试的基本内容、汽轮机启动导则、汽轮机启动方式分类、热态启动、参数监测、典型事故预防措施、标准及规定。第四篇主要介绍了国内外典型机组调试实例。第五篇为调试中常见的故障与处理，主要介绍了故障处理的原则、一般方法和故障实例。第六篇为汽轮机组性能考核试验，主要介绍了机组热耗试验、汽轮机最大出力试验（VWO 工况）、汽轮机额定出力试验、汽轮机组供电煤耗试验和汽轮机机组轴系振动试验等。

《火电工程调试技术手册汽轮机卷》的编写得到了华北电力试验研究所教授级高工孙天行、河南电力试验研究所教授级高工姚新杰、西北电力建设调试所高工张宗绎等同志的大力支持和悉心指导、帮助，在此表示衷心的感谢。

《火电工程调试技术手册汽轮机卷》由河南电力试验研究所和河南电力建设调试所徐广喜、刘静宇、卢允谦、马建伟、黄智、抄勇、范伊波、胡兵编写，由徐广喜同志组织编写并负责全面统稿工作。参与本手册编写的工作人员均是具体从事汽轮发电机组安装调试的专业技术人员，对汽轮机设备及其附属系统的安装、结构、工作原理、启动调试运行方式、性能特点、性能试验较为熟悉。为适应火力发电建设需要，手册编写用了两年的时间，收集整理了大量的技术文献与相关资料，重点是与 300MW 以上汽轮发电机组有关的技术规程、标准、文献与资料。由于编写人员的水平有限，特别是编写时间仓促，难免有不少疏漏、不妥之处，敬请广大读者指正。

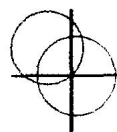
前言
编写说明



第一篇

基础知识

第一章 汽轮机的分类和型号	3
第一节 汽轮机的分类	3
第二节 汽轮机型号的表示方法	4
第二章 火电厂热力循环与热经济性	6
第一节 卡诺循环和朗肯循环	6
第二节 提高火电厂热力循环热经济性的途径	7
第三节 汽轮发电机组的效率和热经济性指标	8
第三章 发电厂的热力系统	13
第一节 原则性热力系统	13
第二节 全面性热力系统	16
第四章 汽轮发电机组的辅助系统	19
第五章 汽轮机调节保安系统	21
第一节 汽轮机调节、保安系统的任务	21
第二节 汽轮机的调节系统	21
第六章 国内外大型汽轮机的主要类型介绍	27
第一节 300MW 汽轮机介绍	27
第二节 600MW 汽轮机介绍	52
第三节 俄罗斯大型供热汽轮机介绍	70



第二篇

汽轮机组分部试运

第七章 概述	81
第八章 分部试运	84
第一节 阀门调整与真空系统严密性检查	84
第二节 主要附属机械装置	85

第三节	汽水管道的吹扫和冲洗	102
第四节	汽轮机主要辅助设备试运行	103
第五节	油系统试运和油循环	118
第九章	调节保安系统试验	121
第一节	调节系统和自动保护装置试验	121
第二节	典型调节系统简介	123
第三节	液压调节系统部套的调整	129
第四节	汽轮机调节保安系统的调整实例	140
第五节	分部试运的验收	175

第三篇

整套启动

第十章	总则	181
第十一章	汽轮机启动导则	183
第一节	汽轮机寿命管理	183
第二节	汽轮机的启动	188
第三节	汽轮机的运行	191
第四节	汽轮机的停机	193
第五节	汽轮机的热控及试验	196
第六节	汽轮机的主要辅机	198
第七节	汽轮机的主要保护、监测参数及控制装置	199
第十二章	汽轮机启动方式	201
第一节	汽轮机启动方式分类	201
第二节	国内外汽轮机技术特点	205
第三节	汽轮机启动方式举例	209
第十三章	整套启动的准备工作	226
第一节	整套启动工作的基本要求	226
第二节	整套启动方案编写要求	226
第三节	整套启动试运前应具备的条件	227
第十四章	整套启动调试工作程序	230
第一节	国内机组整套启动工作程序	230
第二节	国外机组整套启动工作程序	237
第三节	引进型 300MW 汽轮机组启动工作程序	247
第十五章	整套启动调试	250
第一节	空负荷调试	250
第二节	带负荷调试	254
第三节	满负荷试运	259
第四节	汽轮机组参数监测	262
第十六章	整套启动过程有关试验方法	267
第一节	空负荷阶段试验	267

第二节	带负荷阶段试验	269
第三节	满负荷阶段试验	270
第十七章	主要设备及系统投入要点	277
第十八章	相关专业试验	282
第十九章	典型事故预防措施	285
第一节	事故预防的基本要求	285
第二节	防止汽轮机超速	285
第三节	防止汽轮发电机组轴瓦损坏	286
第四节	防止汽轮机大轴弯曲	288
第五节	防止汽轮机水冲击	289
第六节	防止机组轴承出现过大振动	290
第七节	防止汽轮机真空下降	292
第八节	防止通流部分动静磨损	293
第九节	防止汽轮机叶片损坏	294
第十节	防止调节控制系统异常	297
第十一节	防止厂用电中断	298
第十二节	防止给水泵故障	300
第十三节	防止汽管道故障	303
第十四节	防止油系统着火	304
第十五节	防止主、再热蒸汽参数异常	305
第十六节	防止负荷骤变	306
第十七节	防止发电机甩负荷	306
第十八节	防止轴向位移增大	307
第二十章	标准及规定	308
第一节	轴承及轴振动标准	308
第二节	发电机氢系统严密性试验标准	309
第三节	常用油脂品种及适用范围	311
第四节	汽轮机油及抗燃油清洁规范	312
第五节	火电工程调整试运质量检验及评定标准	313
第六节	《火电机组达标投产考核标准》(原国家电力公司电源建设部 2001 年版)	316
第七节	《火电优质工程评选办法》(1998 年版) 原国家电力公司	323
第八节	《火电建设精品工程考核评选暂行办法》华中电力集团公司 2000 年 6 号文	324

第四篇

典型机组调试实例

第二十一章	国产 300MW 机组	329
第一节	东方汽轮机厂生产的 300MW 机组调试	329
第二节	哈尔滨和上海汽轮机厂生产的引进型 300MW 机组调试	334
第三节	北京重型电动机厂生产的 300MW 机组调试	342
第二十二章	进口 300MW (350MW) 机组	346

第一节	瑞士 ABB-350MW 机组调试	346
第二节	日本日立 300MW 机组调试	352
第三节	美国西屋公司生产的 350MW 机组调试	367
第二十三章	供热汽轮机组	376
第二十四章	600MW 机组	381
第一节	超临界压力 600MW 机组调试	381
第二节	亚临界压力 600MW 机组调试	402

第五篇

调试中常见的故障与处理

第二十五章	事故处理原则和预防对策	419
第二十六章	故障与处理实例	421
第一节	机组振动故障	421
第二节	主机存在的故障	426
第三节	调节系统及油系统出现的故障	428
第四节	给水泵及系统出现的故障	434
第五节	加热器出现的故障	441
第六节	给水泵汽轮机出现的故障	444
第七节	汽轮机叶片出现的故障	445
第八节	辅助设备及系统出现的故障	450
第九节	其他故障与预防	452

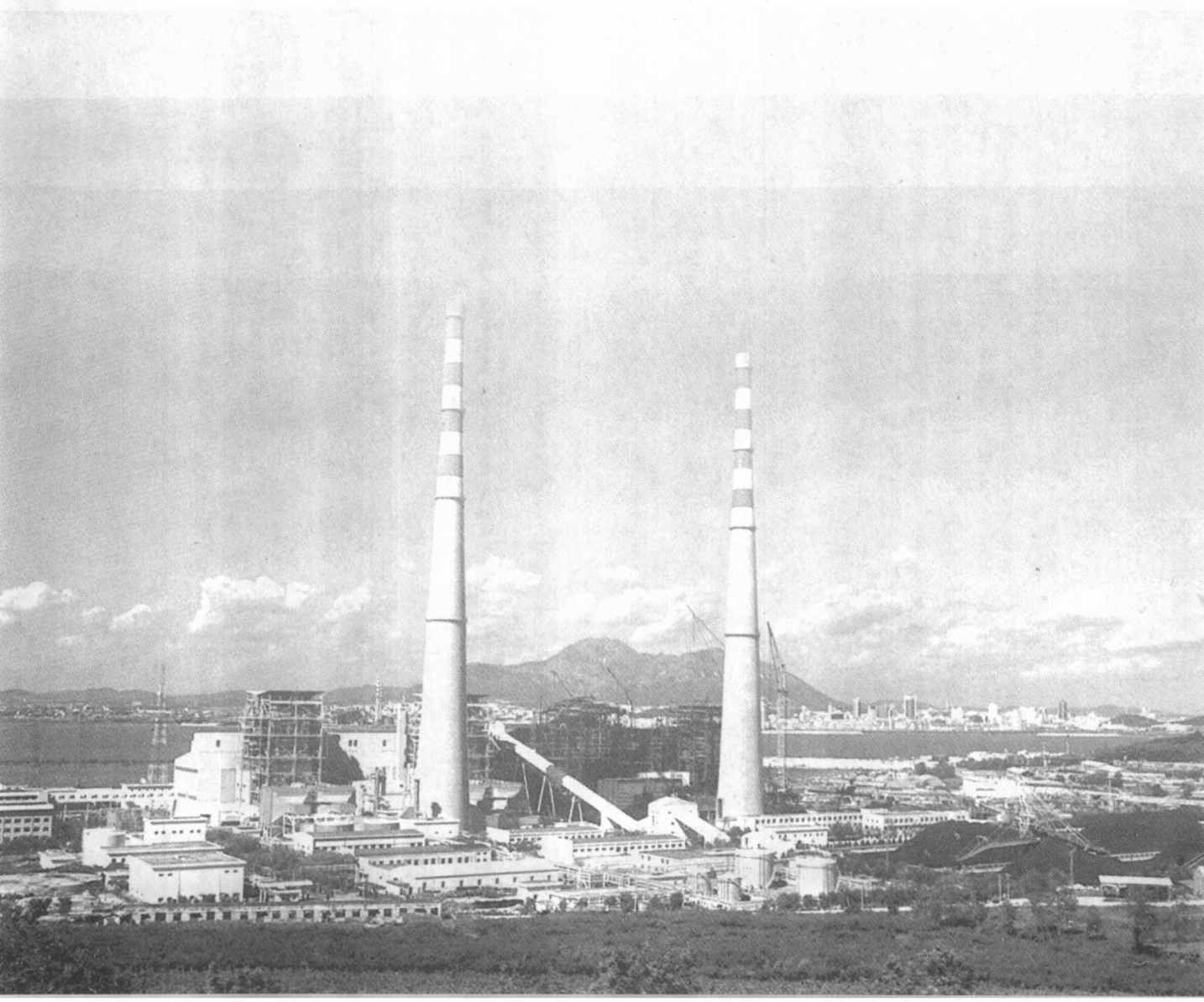
第六篇

汽轮机组启动验收性能试验

第二十七章	总则	459
第二十八章	机组热耗试验	460
第一节	机组热耗试验概述	460
第二节	我国国家标准 (GB 8117—1987) 介绍	463
第三节	美国国家标准 (ASME PTC6—1996) 介绍	480
第二十九章	汽轮机最大出力试验	492
第三十章	汽轮机额定出力试验	494
第三十一章	机组供电煤耗测试	496
第三十二章	机组轴系振动试验	498
第三十三章	典型机组试验实例	500
第一节	300MW 凝汽式汽轮机组的试验介绍	500
第二节	165MW 双抽供热机组试验介绍	509
参考文献		526

第一篇

基础知识



第一章 汽轮机的分类和型号

第一节 汽轮机的分类

自从 1883 年瑞典工程师拉瓦尔发明出第一台实用的单级汽轮机以来，汽轮机已经走过了一百多年的发展历史。如今汽轮机已经拥有众多的种类，在工业领域获得了广泛的应用。如表 1-1 所示，根据不同的分类方法可以对它们进行不同的分类。

表 1-1 汽轮机的分类

分类标准	类 型	简 要 描 述
工作原理	冲动式汽轮机	主要由冲动级组成，蒸汽主要在喷嘴叶栅中膨胀，在动叶栅中只有少量膨胀
	反动式汽轮机	主要由反动级组成，蒸汽在喷嘴叶栅和动叶栅中膨胀程度相同。由于反动级不能做成部分进汽，故调节级常采用单列冲动级或复速级
热力特性	凝汽式汽轮机	蒸汽在汽轮机中膨胀做功后，在高度真空状态下进入凝汽器凝结成水。有些给水泵汽轮机没有回热系统，称为纯凝汽式汽轮机
	背压式汽轮机	蒸汽在汽轮机中膨胀做功后，排汽直接用于供热，不设凝汽器。当排汽作为其他中低压汽轮机的工作蒸汽时，称为前置式汽轮机
	调节抽汽式汽轮机	从汽轮机某级后抽出一定压力的部分蒸汽对外供热，其余排汽仍进入凝汽器。由于热用户对供热蒸汽压力有一定要求，需要对抽汽供热压力进行自动调节，故称为调节抽汽。根据供热需要，有一次调节抽汽和两次调节抽汽之分
	抽汽背压式汽轮机	具有调节抽汽的背压式汽轮机
	中间再热式汽轮机	进入汽轮机的蒸汽膨胀到某一压力后，被送往锅炉的再热器进行再热，再热后返回汽轮机继续膨胀做功
	混压式汽轮机	利用其他来源的蒸汽引入汽轮机相应的中间级，与原来的蒸汽一起工作。通常用于工业生产的流程中，用来综合利用蒸汽的热能
	电站汽轮机	用于拖动发电机，汽轮机发电机组需按供电频率定转速运行，也称为定转速汽轮机，主要采用凝汽式汽轮机，也采用同时供热供电的（调节抽汽式、背压式）汽轮机，通常称它们为热电汽轮机或供热汽轮机
用 途	工业汽轮机	用于拖动风机、水泵等转动机械，其运行速度经常是变动的，也称为变转速汽轮机
	船用汽轮机	用于船舶推进动力装置，驱动螺旋桨。为适应倒车的需要，其转动方向是可变的
	凝汽式供暖汽轮机	在中低压缸连通管上加装蝶阀来调节供暖抽汽量，抽汽压力不像调节抽汽式汽轮机那样维持规定的数值，而是随流量大小，基本上按直线规律变化的

续表

分类标准	类 型	简 要 描 述
进汽参数	低压汽轮机	新蒸汽压力小于 1.5MPa
	中压汽轮机	新蒸汽压力为 2 ~ 4MPa
	高压汽轮机	新蒸汽压力为 6 ~ 10MPa
	超高压汽轮机	新蒸汽压力为 12 ~ 14MPa
	亚临界汽轮机	新蒸汽压力为 16 ~ 18MPa
	超临界汽轮机	新蒸汽压力超过 22.2MPa

除了以上的分类方法以外，还可以按汽轮机的汽流方向、功率、汽缸数等进行分类。实际的汽轮机往往是几种类型的组合，比如我国火力发电厂目前运行的许多 300MW 汽轮机就是亚临界、凝汽式、中间再热、冲动式汽轮机。

第二节 汽轮机型号表示方法

目前，国产汽轮机采用汉语拼音加数字的表示方法来表示汽轮机的型号，表示方法如图 1-1 所示。

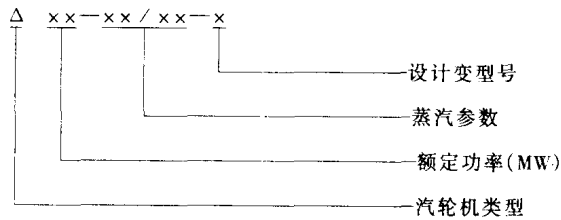


图 1-1 汽轮机型号表示方法

其中，汽轮机型号用汉语拼音字母表示，如表 1-2 所示，额定功率、蒸汽参数和设计变型序号用数字表示。

表 1-2 国产汽轮机类型的代号

代 号	类 型	代 号	类 型
N	凝汽式	CB	抽汽背压式
B	背压式	H	船 用
C	一次调节抽汽式	Y	移动式
CC	两次调节抽汽式		

表 1-3 给出了几种汽轮机型号表示的示例。

表 1-3 汽轮机型号中参数/表示方法

汽轮机类型	蒸汽参数表示方法	示 例
凝汽式	- 主蒸汽压力/主蒸汽温度 -	N50-8.82/535
中间再热式	- 主蒸汽压力/主蒸汽温度/中间再热温度 -	N300-16.7/537/537
一次调节抽汽式	- 主蒸汽压力/调节抽汽压力 -	C50-8.82/0.118
两次调节抽汽式	- 主蒸汽压力/高压抽汽压力/低压抽汽压力 -	CC25-8.82/0.98/0.118
背压式	- 主蒸汽压力/背压 -	B50-8.82/0.98
抽汽背压式	- 主蒸汽压力/抽汽压力/背压 -	CB25-8.82/0.98/0.118

国外汽轮机型号的编制方法随各制造厂而异。例如日本三菱公司的 TC2F-33.5 型汽轮机型号中：T 表示单轴；C 表示双缸；2F 表示双排汽；33.5 表示末级叶片长度为 33.5in (851mm)。法国阿尔斯通公司的 T2A330-30-2F1044 型汽轮机型号中：T 表示汽轮机；2 表示两次过热；A 表示对称布置；330 表示额定功率为 330MW；30 表示转速为 3000r/min；2F 表示双排汽；1044 表示末级叶片长为 1044mm。

第二章 火电厂热力循环与热经济性

第一节 卡诺循环和朗肯循环

1. 卡诺循环

卡诺循环由两个可逆的定温过程和两个可逆的绝热过程组成，根据卡诺定理可知：卡诺循环的热效率是所有热机循环中最高的。

卡诺热机循环的效率为

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_0} \quad (2-1)$$

式中 T_1 ——卡诺循环的冷源温度，k；
 T_0 ——卡诺循环的热源温度，k。

2. 朗肯循环

朗肯循环是最简单的蒸汽动力理想循环，其 T - S 图如图 2-1 所示。图中循环 1-2-3-4-1 为饱和蒸汽朗肯循环，饱和蒸汽从状态 1 进入汽轮机，过绝热膨胀到达状态 2；过程 2-3 为湿蒸汽在凝汽器中的定温放热过程；过程 3-4 为水在给水泵中的绝热可逆压缩；4-4'-1 为蒸汽在锅炉中的定压吸热过程。

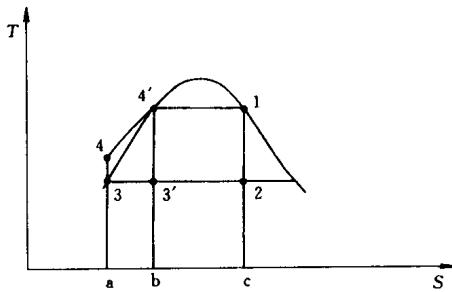


图 2-1 饱和蒸汽朗肯循环

朗肯循环的吸热量 q_H 、放热量 q_L 和循环净功 W_{net} 可以用 T - S 图上相应的面积表示，在图 2-1 中， q_H 为面积 1ca44'1， q_L 为面积 2ca32， W_{net} 为 q_H 与 q_L 的差，可以用面积 12344'1 表示，循环的热效率为

$$\eta_t = \frac{W_{net}}{q_H} = \frac{q_H - q_L}{q_H} = 1 - \frac{q_L}{q_H} \quad (2-2)$$

循环的热效率还可以表示为

$$\eta_t = 1 - \frac{q_L}{q_H} = 1 - \frac{T_{m,L} \Delta S_{ac}}{T_{m,H} \Delta S_{ac}} = 1 - \frac{T_{m,L}}{T_{m,H}} \quad (2-3)$$

式中， $T_{m,L} = \frac{q_L}{\Delta S_{ac}}$ 为平均放热温度， $T_{m,H} = \frac{q_H}{\Delta S_{ac}}$ 为平均吸热温度。

ΔS_{ac} 为过程 2-3，过程 3-4-4'-1 的熵变绝对值，显然， $T_{m,L} = T_2$ ，而 $T_{m,H} < T_1$ 。根据卡诺循环的定义可知图 2-1 中，循环 1-2-3'-4'-1 为一个卡诺循环，其高温热源温度为 T_1 ，低温热源温度为 T_2 ，则卡诺循环的效率为

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (2-4)$$