

发电厂汽轮机设备的 热力试验

〔苏联〕С·Л·克良母金 著

柳椿生 任 曙 译

中国工业出版社

发电厂汽轮机设备的 热力试验

〔苏联〕С. И. 克良母金 著
柳椿生 任 曙 译

中国工业出版社

本书探討各种类型汽輪机設備的主要經濟指标和热力特性；介紹对这些設備組織并进行热力試驗所必备的知识，其中包括对离心泵、电动和汽动泵的試驗。

本书为实际工作中的参考书，讀者对象为电业管理部门，电厂及有关专业机构从事汽輪机設備的调整和試驗的工程技术人员；也可作为高等学校动力系学生的参考书。

С.Л.Клямкин
ТЕПЛОВОЕ ИСПЫТАНИЕ
ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ Ленинград 1961

* * *

发电厂汽輪机設備的热力試驗
柳椿生 任 曙 譯

*

水利电力部办公厅图书編輯部編輯(北京阜外月坛南大街)

中国工业出版社出版(北京东便门大街16号)

北京市书刊出版业营业登记证出字第116号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $850 \times 1168^{1/8}$ ·印张 $12^{1/8}$ ·插頁2·字数306,000

1965年6月北京第一版·1965年6月北京第一次印刷

印数0001—3,330·定价(科五)1.70元

*

統一书号: 15165·3837(水电-502)

序

电力工业的广阔发展，要求运行维护人员必须进一步提高发电厂的新装设备和原有设备的运行水平，其中包括发电厂汽机分场的设备。为此，必须定期而仔细地用试验方法来校核设备运行的技术经济指标，以便发现和消除设备运行中可能产生的缺陷，并且及时地进行检修和改进。

对新型汽轮机设备系列产品的首批产品进行试验，以评价它们是否能达到设计效率，并与类似设备的最好的现代化产品相比较，也是一项同等重要的任务。

苏联论述汽轮机设备热力试验问题的文献只有几种，其中最重要的是：1937年出版，A.B.雪格里雅叶夫和H.Γ.莫罗佐夫著的“汽轮机的试验”和1952年出版、苏联技术改进局（作者为M.A.乌好包金）编的“汽轮发电机的试验”。

所以，编著一本新的、比较完全的、有关发电厂汽轮机热力试验且具有指导意义的书籍是非常迫切需要的。其中应当阐述各型设备的相当准确和易行的试验方法和绘制热力特性曲线的方法，其中包括在上述书中未考虑到的两级调整抽汽式设备。

此外，还应考虑离心式泵（其用电量占设备自用电量的主要部分）的试验问题，以及其它在火电厂的汽机分场中进行的比较简单的试验问题。

完全的热力试验，一般是由专职机构进行的，并且只对设备的首批产品进行这样的试验，以取得热力特性曲线。所以，编写进行简化热力试验的导则，以便能够由人数不多的运行组去正确地运行维护发电厂的设备和进行调整，便显得特别必要。

上述要求即是本书的基本任务。在编写本书时，作者除参考

IV

了已有文献外，还利用了列宁格勒电力系统汽轮机试验室的试验。

调整抽汽式设备的试验方法，凝汽器真空修正值的确定方法，以及在配汽机构开度不变的条件下进行试验的方法等，都是根据苏联技术改进局的建议编写的。

考虑到本书对提出必要的导则来讲，是一良好的开端，作者对苏联技术改进局，特别是 M.A. 烏好包金同志所给的很大的帮助，表示谢意。

在编辑本书手稿时，Л.И. 屠比扬斯基工程师曾经付出很多的劳动，作者在此也表示感谢。

对本书如有任何批评性意见，请寄：列宁格勒，馬尔索夫广场，1，Л.О.41室，苏联国家动力出版社。

統一書號:
15165·3837(水電-502)

定 价: 1.70 元

目 录

序	
前 言	1
第一章 理論基础	3
1-1 蒸汽在汽輪机中工作过程的簡述	3
1-2 汽輪机的效率	9
1-3 汽輪机设备的最重要部件的經濟性指标和热力特性	12
1-4 汽輪机设备的綜合經濟性指标和热力特性	39
第二章 热工測量	80
2-1 緒論	80
2-2 測量范围和精确度	84
2-3 介质压力的測量	85
2-4 两个介质的压力差的測量	95
2-5 介质溫度的測量	98
2-6 汽輪机设备試驗时压力和溫度測量的特点	130
2-7 蒸汽和水的流量的測量	112
2-8 汽輪机设备試驗时流量測量的特点	132
2-9 水和蒸汽的重度和热焓的确定	140
2-10 容器中水位的測量	140
2-11 汽輪机轉速和調節系統元件位移的測量	141
2-12 电气功率的測量	141
第三章 試驗的准备工作	144
3-1 緒論	144
3-2 熟悉設備	144
3-3 制訂試驗大綱	146
3-4 設備試驗前的准备工作	154
3-5 試驗准备工作的技术組織部分	156
第三章 附录	158
第四章 試驗的实际操作部分	195
4-1 实际操作部分的内容	195
4-2 試驗主持人的职责	196
第五章 試驗报告的編制	201
5-1 試驗結果的精确度	201
5-2 測量結果的整理	212

5-3	將試驗值換算為特性條件	227
5-4	汽輪機設備熱力特性曲線的繪制	245
5-5	繪制調整抽汽式汽輪機設備 (BΠT-25型及BT-25型) 汽耗量及熱耗量工况圖的圖解法	246
5-6	編寫試驗報告	264
第五章	附 錄	269
第六章	汽輪機調節系統的試驗	306
6-1	緒 論	306
6-2	測取調節系統靜態特性	307
6-3	甩負荷試驗	313
第六章	附 錄	316
第七章	离心泵的試驗	321
7-1	緒 論	321
7-2	离心泵的試驗大綱	323
7-3	凝結水泵、疏水泵和循環水泵試驗的特點	326
7-4	汽動泵的試驗	327
7-5	試驗數據的整理	328
7-6	試驗報告	328
第七章	附 錄	333
第八章	真空 (排汽壓力) 修正值的確定	343
8-1	緒 論	343
8-2	試驗條件和工况	345
8-3	測 量	345
8-4	試驗數據的整理	346
第九章	經濟真空的確定	349
9-1	緒 論	349
9-2	試驗條件和工况	349
9-3	測 量	350
9-4	試驗數據的整理	351
第十章	汽輪機組熱力試驗的簡化方法	355
10-1	緒 論	355
10-2	簡化熱力試驗大綱舉例	358
10-3	試驗報告	361
附 錄		371
參考文獻		381

前 言

苏联电业管理法規（参考文献19，§354）規定，在下列情况下需要进行汽輪机設備的热力試驗：

1) 在安装后的保証期限以內——当缺少热力特性时〔参考文献25，第641頁〕；

2) 在长时期运行以后——运行50,000小时以后；

3) 在汽輪机設備的结构、状态或运行条件有显著的改变以后。

試驗的目的是为了取得設備在完好状态和給定运行条件下的热力特性，亦即技术經濟特性。

根据热力試驗的結果，可以：

1) 校驗制造厂的保証数值；

2) 保証設備正常运行，必要时，改进設備；

3) 制訂設備的运行技术經濟指标，并进行运行监督和分析。

在热力試驗时，与一般运行不同，需要做到：

1) 試驗是在設備一定的运行条件下并且在各种不同的稳定負荷工况下进行；

2) 測量范围扩大，并且精确度較高；

3) 对所測取的数值要进行細致的整理和評价。

試驗包括三个步驟：

1) 試驗前的准备工作；

2) 試驗的实际操作部分；

3) 編制試驗报告。

根据試驗的任务和目的，本书将介紹下述几个部分：

1) 为了了解热力特性的規律并对其进行分析，簡要介紹了蒸汽在汽輪机內的工作过程，設備的經濟指标和热力特性；

2) 正确的热工測量的方法；

3) 上述三个試驗步驟用于各种类型設備时的一些实际問題。

本书的第六、第七、第八和第九各章以及附录，是本书主要内容的补充。在这些章节内，介绍了在汽轮机设备实际运行中要进行的一些比较简单的试验的方法：

- 1) 调节系统的试验；
- 2) 离心泵试验；
- 3) 真空（排汽压力）修正值的确定；
- 4) 经济真空的确定。

第十章介绍了汽轮机设备热力试验的简化方法。

为了评价汽轮机设备供电的经济性，以及为了选择其最经济的运行工况，水泵试验是汽轮机设备热力试验的必不可少的一个部分。

由于关于调节系统（调节系统试验通常与汽轮机设备的热力试验同时进行）试验这一章节篇幅的限制，在本书中，对于与设备经济性无关的问题，未加叙述。

本书最复杂的部分是第五章，在这一章中介绍了两级调整抽汽式汽轮机设备运行工况的计算方法和工况图表的绘制方法。由于该类型设备已得到日益广泛的应用，而在一般文献中又很少介绍这些问题，在第五章中，虽然叙述得比较简单扼要，但还是十分重要的。

在叙述的安排方面，为了能对实际工作有指导意义，在试验的最重要的步骤上，作者尽量做到重点突出完备和简单扼要，同时并考虑到实际执行操作的顺序。

在本书中列了一些计算和曲线图表的格式，作为示例，这些计算和图表格式主要是按两级调整抽汽式最复杂类型设备（BHT-25）编制的。但是由于方法是一致的，所以这些示例对其他类型的设备也是适用的，在大多数情况下，把那些不必要的部分去掉，这些示例的特点就可以完全应用。

采用预先准备好的带有一定符号系统的表格，可以简化试验的组织工作和试验结果的整理工作、缩短计算的工作量，并且能一目了然和相当完整地表达出试验结果来。

第一章 理論基础

1-1 蒸汽在汽輪机中工作过程的簡述

整个汽輪机设备的經濟性决定于向热用戶每供应 1 大卡热量 (当无凝汽器时) 或设备每消耗 1 大卡热量 (当有凝汽器时) 所发出的电能值 (或功率) η (度/大卡)。

凝汽式汽輪机經濟性的特性指标是上述数值的倒数, 即每发 1 度电能的热耗率: q (大卡/度),

当水蒸汽在汽輪机內工作时, 其热能的一部分轉換为机械能 (按照热能动力学的第一定律), 然后又轉換为电能, 此数值等于,

$$N = 427 h_u \text{ [公斤} \cdot \text{米/公斤]},$$

或

$$N = \frac{h_u}{860} \text{ (度/公斤)}, \quad (1-1)$$

式中 N — 由每公斤蒸汽所获得的机械能或电能;

$h_u = i_1 - i_2$ — 可利用热降, 等于主蒸汽和排汽的热焓之差, 大卡/公斤 (图 1-1)。

因此, 由 1 公斤蒸汽所获得的电能数量仅仅决定于可利用热降, 而后者又由蒸汽参数和汽輪机的热力过程特性所决定 (不包括电气机械损失——见后)。

在汽輪机內, 蒸汽进行膨胀。蒸汽的压力 p , 温度 t 和热焓 i 都随之减小, 而比容 v 和熵 s 则增加。

利用水蒸汽的 $i-s$ 图, 可以将热力过程很明显地表示出来。

$i-s$ 图上的任一点都可决定蒸汽的状态。如果知道两个参数,例如 p_1 和 t_1 , 就可以从相应的等参数线 $p_1 = \text{常数}$ 和 $t_1 = \text{常数}$ 的交点, 或者从水蒸汽特性表中求出其它各参数[参考文献24]。

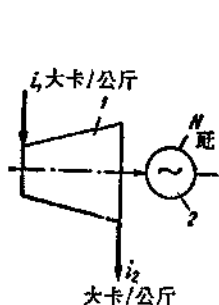


图 1-1 从 1 公斤蒸汽
获得电能示意图
1—汽轮机; 2—发电机

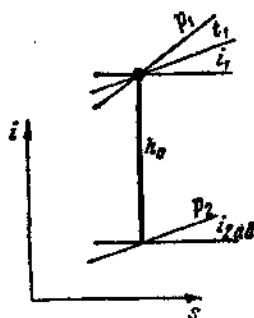


图 1-2 $i-s$ 图上蒸汽的
理想热降 h_0

实际上, 在现场也只有 p 和 t 值可以测量。

对于湿蒸汽, 参数 p 和 t 是相互对应的 (也就是在 $i-s$ 图上 $p = \text{常数}$ 和 $t = \text{常数}$ 的曲线是重合的), 所以只知道参数 p 和 t 还不足以确定湿蒸汽的状态。为了确定湿蒸汽的状态, 除了参数 p 和 t 外, 还必须知道另一数值, 例如干度 x 或热焓 i , 但直接测量这些数值是很困难的或根本不可能进行。

在理想的蒸汽热能转换为机械能的过程中, 热降 h_0 称为理想等熵热降或绝热焓降。

在 $i-s$ 图上, 数值 h_0 以从蒸汽起始状态 p_1 、 t_1 点所画垂线到其与最终等压线 p_2 的交点之间的线段表示 (图 1-2):

$$h_0 = i_1 - i_{2a_0}.$$

理想热降 h_0 是 1 公斤蒸汽的机械能或作功能力的度量。它随着初蒸汽参数 p_1 和 t_1 的升高以及最终压力 p_2 的降低而增加, 并且只与这些数值有关 (见图 1-3 中的 h_{01} , h_{02} , h_{03} 和 h'_{01})。

当初压力 p_1 升高时, 热降 h_0 的增加有一极限, 这一极限值与初蒸汽温度 t_1 有关, 然后它又减小——见图 1-4 [参考文献 30,

式中 $A = \frac{1}{427}$ 大卡/公斤·米;

k ——絕热指数, 对于过热蒸汽, $k \approx 1.31$;

p_1 和 p_2 ——蒸汽的初压力和最终压力, 公斤/米²;

v_1 ——蒸汽的初比容, 米³/公斤。

从公式(1-2), 可以看出:

1) 假使 $\frac{p_2}{p_1} = \text{常数}$ 和 $pv = \text{常数}$ (或 $i_1 = \text{常数}$), 則 $h_0 = \text{常数}$ (见图1-5);

2) 假使 $\frac{p_2}{p_1} \rightarrow 1$, 則 $h_0 \rightarrow 0$;

3) h_0 随着 $p_1 v_1$ (或 i_1) 的增加而增加。

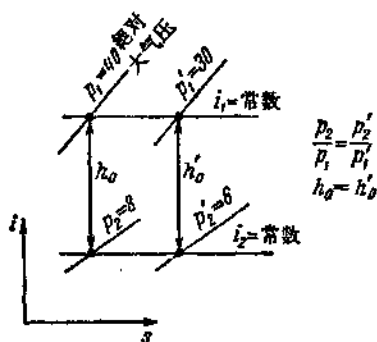


图 1-5 在相等的 $\frac{p_2}{p_1}$ 的关系下,

理想热降的均等情况

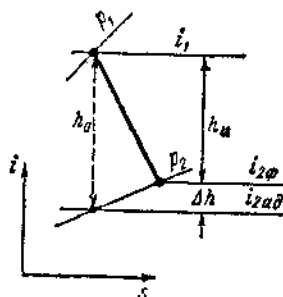


图 1-6 $i-s$ 图上理想的和可利用的热降

对于水蒸汽, $k \approx \text{常数}$, 所以应用公式(1-2)只能求出近似值。

由于蒸汽在汽轮机内的摩擦、涡流和漏泄等损失, 实际上, 可利用的热降小于理想热降: $h_u < h_0$ (图1-6), 而实际的排汽的热焓则大于理想过程的数值, $i_{2\phi} > i_{2ad}$ 。

数值 $\Delta h_0 = h_0 - h_u$ 为与汽轮机本身有关的 1 公斤蒸汽可利用

的能量相对于理想过程的损失。

此外，当终压力降低时，只在达到最后一級叶片斜面的极限膨胀能力以前，可利用的热降才会增加；这时出口速度损失也增加。

终压力的进一步降低，将随之造成超过叶片装置极限的蒸汽的无效膨胀（参考文献23）。

汽轮机的功率或发电量（度/小时）按下式确定：

$$N = \frac{D h_u}{860},$$

式中 $\frac{h_u}{860}$ —— 1 公斤蒸汽所发出的电能，度/公斤；

D —— 进入汽轮机的蒸汽流量，公斤/小时。

抽汽式汽轮机的功率等于各股汽流功率的总和。例如，对于图1-7所示的示意图，

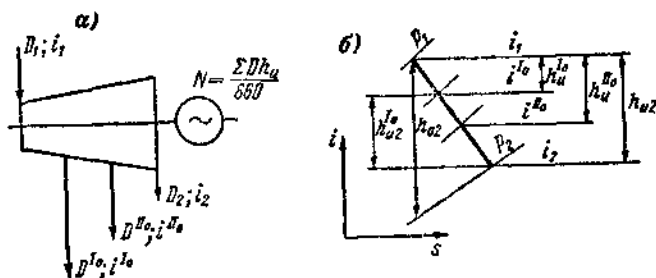


图 1-7 抽汽式汽轮机的功率

a—汽流示意图；b— $p-i$ 图上的膨胀过程线

$$N = \frac{D_1 h_{u1} + D_2 h_{u2} + D_3 h_{u3}}{860}.$$

对于任一台汽轮机：

$$N = \frac{\sum D h_u}{860}. \quad (1-3)$$

从图1-76, 可以看出:

$$h_{u1}^{1.0} < h_{u1}^{2.0} < h_{u2};$$

因此,

$$h_{ucp} < h_{u2},$$

式中

$$h_{ucp} = \frac{\sum D h_u}{\sum D} = \frac{\sum D h_u}{D_1},$$

$$D_1 = D^{1.0} + D^{2.0} + D_2 = \sum D.$$

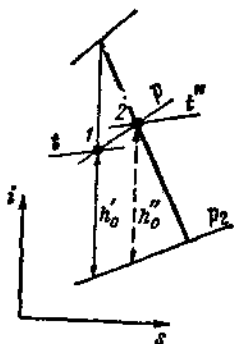


图 1-8 相邻级内热力的回收
—— $h''_0 > h'_0$

所以, 抽汽式汽轮机内 1 公斤主蒸汽平均可利用的热降与抽汽的相对数值和热降有关; 当初参数和终压力相同时, 抽汽式汽轮机的平均可利用的热降比无抽汽的汽轮机可利用的热降为小。

抽汽的动能价值 (热力价值) 决定于抽汽到排汽口间的热降与主蒸汽到排汽口间的热降之比, 或叫价值系数 ξ 。

例如, 在图 1-7 中, 对于第一级抽汽,

$$\xi = \frac{h_{u2}^{1.0}}{h_{u2}} = \frac{h_{u2} - h_{u1}^{1.0}}{h_{u2}}. \quad (1)$$

在图 1-8 中, 表示了二个相邻级内的热力过程。由于在第一级内已开始有损失, 在 $i-s$ 图中, 第二级的膨胀过程就从点 1 移到点 2, 这里既然 $\frac{p_2}{p_1} = \text{常数}$ 时, $t'' > t'$, 所以 $h''_0 > h'_0$ 。

数值 $a = \frac{h''_0 - h'_0}{h'_0}$ 称为热力回收系数。

对于所有汽轮机, 热力回收系数 $a = 1 \sim 1.08$, 它随着级数的

● 比较准确的含义见 68 页中的*。

增加和效率的减小而增长，也就是随着 $i-s$ 图上膨胀过程向右位移程度的增加而增长。

最后，应当指出，按照 $i-s$ 图，当蒸汽终压力接近0.05绝对大气压时，终湿度每增加1%，相当于终热焓减少或可利用的热降 h_{u2} 增加约6大卡/公斤。对于参数为90绝对大气压，500°C的汽轮机，这一数值约为热降 h_{u2} 的2.5%。从此可以看出，根据误差为1%的功率平衡方程式（ $860 N = \Sigma D h_u$ ——见5-2节）确定这种类型汽轮机的可利用的热降时，所得到的蒸汽终湿度的误差约为0.4%。在凝汽式汽轮机内，当终压力约为0.05绝对大气压时，在热焓不变的情况下，初压力每降低10%（节流），与在压力不变的情况下，初温度每降低10°C一样，将使理想热降减少约3大卡/公斤。

1-2 汽轮机的效率

为了评价汽轮机设备的经济性，采用下述各效率。

1. 循环的热效率

$$\eta_r = \frac{h_0}{i_1 - i_{nuT}} = \frac{h_0}{h_0 + (i_{2ad} - i_{nuT})}, \quad (1-4)$$

式中 h_0 ——1公斤主蒸汽从汽轮机的主汽门前到汽轮机出口处的平均理想热降，大卡/公斤；

$i_1 - i_{nuT}$ ——1公斤主蒸汽在设备内所消耗的热量，大卡/公斤；

i_1 ——主蒸汽的热焓，大卡/公斤；

i_{nuT} ——从设备回收的主蒸汽凝结水的平均热焓，大卡/公斤（图1-9）；

$i_{2ad} - i_{nuT}$ ——蒸汽凝结时，理想循环的损失。

采用凝汽器和回热加热器可以相应地增加热降 h_0 和回收的凝结水的温度，也就是增加了机械功和减少了1公斤蒸汽的热耗，因而可以提高循环的热效率 η_r 。

2. 节流系数（调节或配汽机构的效率）