



基于实验室朗肯循环装置的实验研究

李维腾, 李 季

(华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

摘要: 朗肯循环是工程热力学课程最基本且最重要的动力循环。该文通过实验室朗肯循环装置对朗肯循环进行了实验研究, 测定不同排汽压力下的循环热效率、涡轮相对内效率、循环摩擦损失等参数。实验结果表明, 实验室朗肯循环装置能够模拟朗肯循环的基本热力过程, 但是热效率较低、摩擦损失较大。论文对实验结果进行了分析, 循环热效率低的主要原因是涡轮摩擦损失大、主蒸汽参数低, 同时提出了改进实验室朗肯循环装置的措施。实验室朗肯循环将热力学理论与实验结合, 有助于学生理解和分析热力学基本理论, 提高实验动手操作能力, 提高分析和解决实际问题的能力。同时将自主实验和创新实验融入到实验教学中, 激发了学生的学习热情和基础科研能力, 为创新性实验教学提供了借鉴。

关键词: 工程热力学; 朗肯循环; 循环热效率; 相对内效率

中图分类号: TK123

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20190414

Experimental Research Based on Rankine Cycle Lab-Equipment

LI Weiteng, LI Ji

(School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Rankine Cycle is the most fundamental and important power cycle in Engineering Thermodynamics. This paper conducted Rankine Cycle experiments with Rankine Cycle Lab-Equipment, and measured thermal efficiency, turbine relative internal efficiency, cycle friction loss and other parameters. Results showed that Rankine Cycle Lab-Equipment can simulate the basic thermal processes of Rankine Cycle, but with relatively low thermal efficiency and huge cycle friction loss. The main reasons for low thermal efficiency were huge friction loss of steam turbine and low main-steam parameters. Measures to improve Rankine Cycle Lab-Equipment were proposed according to experimental results and analysis. Laboratory Rankine Cycle combined Thermodynamic theory with experiment to help students understand and analyze the fundamental theory of Thermodynamics, improve their hands-on ability to conduct experiments and problem-solving capability. At the same time, independent and innovative experiments were integrated into experimental teaching, which stimulated students' learning enthusiasm and basic scientific research ability, and provided reference for innovative experimental teaching.

Key words: engineering thermodynamics; Rankine Cycle; thermal efficiency; relative internal efficiency

理想朗肯循环是蒸汽动力装置最基本的循环, 热力发电厂各种复杂蒸汽动力循环包括再热循环和回热循环都是在朗肯循环的基础上发展而来的。目前针对朗肯循环的研究仍然受到重视, 包括卡琳娜循环^[1-4]、有机工质循环^[5-8]、超临界朗肯循环^[9-12], 都是对朗肯循环的拓展和应用。朗肯循环是各种复杂动力循环的基础, 也是工程热力学课程的重点内容, 因此本文通过实验室朗肯循环装置对朗肯循环进行实验研究, 测定了不同工况下的循环热效率、相对内效率、摩擦损失等参

数, 并将实验结果与理想朗肯循环进行了对比和分析, 提出提高实际朗肯循环热效率的方法和改进实验室朗肯循环装置的措施。

1 朗肯循环

1.1 定义

朗肯循环是最简单、最基本的动力装置循环, 朗肯循环主要设备包括锅炉、汽轮机、凝汽器和给水泵。理想朗肯循环的 $T-s$ 图和设备图如图 1 和图 2 所示。

收稿日期: 2019-11-01; 修回日期: 2019-12-05

基金项目: 华北电力大学“双一流”建设项目(XM1906807)。

作者简介: 李维腾(1999-), 男, 本科生, 能源与动力工程专业。

通信作者: 李季(1973-), 男, 博士, 副教授, 主要从事节能理论与技术, 废弃物制能技术和资源化利用方面的研究。

E-mail: jli@ncepu.edu.cn

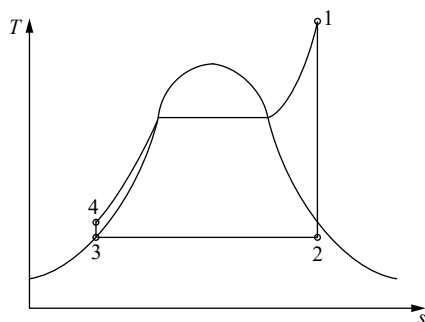


图1 朗肯循环 T-s 图

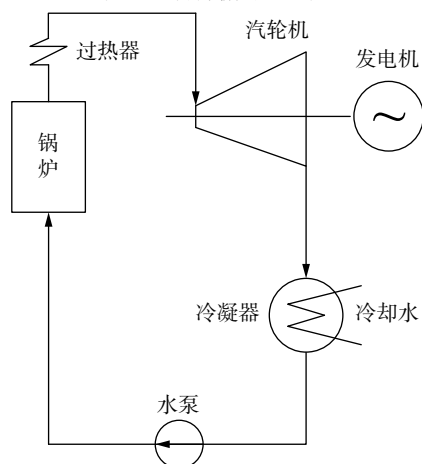


图2 朗肯循环设备图

根据 T-s 图, 朗肯循环各设备中的基本热力过程是: 1→2 为水蒸气在汽轮机内等熵膨胀做功过

程, 2→3 为乏汽在凝汽器内等压放热过程, 3→4 为水在水泵中的等熵压缩过程, 4→1 为给水在锅炉内等压加热汽化过程^[13-14]。

1.2 实验室朗肯循环装置

实验室朗肯循环装置如图3所示, 实验装置主要由储水器、给水泵、电加热锅炉、涡轮(汽轮机)、凝汽器等设备组成。

通过该实验装置测定了不同工况下朗肯循环热效率, 同时测定了不同工况下涡轮相对内效率, 为研究实验室朗肯循环热效率低的原因, 测定了不同背压下涡轮的摩擦损失。

朗肯循环实验装置主要操作步骤如下。

- 1) 水泵给水: 打开进水阀门, 水泵向锅炉加水。
- 2) 到合适水位时水泵自动关闭。
- 3) 锅炉加热: 水泵加水后电加热锅炉自动启动并加热, 压力到达设定压力时自动停止加热。
- 4) 涡轮启动: 调整凝汽器背压至设定压力, 开启主蒸汽阀门, 蒸汽进入涡轮, 涡轮自行启动。
- 5) 涡轮运行: 可通过调整主蒸汽压力以及凝汽器背压调整涡轮转速, 等待涡轮转速达到稳定值。
- 6) 关闭设备: 依次关闭蒸汽开关、涡轮控制开关, 关闭锅炉控制开关, 关闭冷却水和各管道阀门。



①储水器; ②给水泵; ③电加热锅炉; ④涡轮(汽轮机); ⑤凝汽器。

图3 实验室朗肯循环实验装置

2 朗肯循环实验及分析计算

2.1 测定不同背压下朗肯循环的热效率

1) 实验原理

朗肯循环热效率计算公式如下:

$$\text{循环热效率 } \eta_t = \frac{\text{实际输出功率}}{\text{输入功率}}$$

实验中输出功率为输出到电负载的功率, 输

入功率理论上为电锅炉加热的功率(忽略泵功)。但由于锅炉的加热过程为间歇加热, 锅炉电功率并不等于输入功率, 因此实验分析中利用蒸汽流量与蒸汽焓来计算输入功率, 蒸汽流量根据冷凝水流量进行测量, 如表1所示。

2) 实验数据

实验中记录生成 100 mL 凝结水所需时间, 并由此计算蒸汽流量, 实验数据如表2所示。

表 1 朗肯循环热效率实验数据

工况	排汽压 力/kPa	锅炉进水 温度/℃	出口蒸汽 温度/℃	锅炉表压 /kPa	电压表 示数/V	电流表 示数/A
1	68	30.7	161.5	515.2	5.1	0.5
2	55	31.2	159.2	518.1	5.2	0.52
3	28	31.4	159.6	518.9	5.15	0.52

表 2 蒸汽流量测定实验数据

工况	100 mL 冷凝水所需时间/s	流量/mL·s ⁻¹
1	60.0	1.667
2	59.9	1.669
3	60.9	1.642

同时记录主蒸汽温度, 查阅水蒸气焓熵图获得锅炉出口主蒸汽的焓值。

锅炉给水焓值计算公式为:

$$H_w = t_w \times 4.1868$$

输入功率计算公式为:

$$W_{\text{输入}} = (H_1 - H_w) \times q_m$$

式中, H_1 为主蒸汽焓, H_w 为给水焓, t_w 为给水温度, q_m 为蒸汽流量。对以上计算进行汇总, 获得朗肯循环热效率实验数据, 如表 3 所示。

从实验数据可看出, 随着排汽压力的降低, 朗肯循环热效率会略微提高, 主要原因是排汽温度降低, 循环平均放热温度降低, 因此朗肯循环的热效率提高。

2.2 测定不同背压下涡轮的相对内效率

1) 实验原理

涡轮(汽轮机)相对内效率的测定可根据涡轮

实际输出功率与理论输出功率的比值获得。

对于涡轮理想做功过程, 可近似看作等熵过程, 因此理论功率等于蒸汽做功前后的焓降与蒸汽流量的乘积。

涡轮理论输出功率:

$$W_{\text{输出}} = (H_1 - H_s) \times q_m$$

式中, H_1 为主蒸汽焓, H_s 为乏汽焓, q_m 为蒸汽流量。

相对内效率计算公式为:

$$\eta_{ri} = \frac{\text{实际输出功率}}{\text{理论输出功率}}$$

2) 实验结果分析

如表 4 所示, 涡轮的相对内效率很低, 仅为 0.3% 左右, 远低于电厂汽轮机相对内效率。对涡轮相对内效率低的原因进行了理论分析, 实验中的涡轮是单级轴流式脉冲型, 其能量损失包括节流损失、排汽压力损失、级内损失、外部损失等。节流损失是由于涡轮入口带有一个单级收缩扩张喷嘴, 由于喷嘴内的摩擦造成蒸汽节流损失; 排汽压力损失是由于蒸汽在排汽管道中流动时, 存在摩擦、撞击和涡流等各项损失, 使蒸汽压力降低, 造成排汽压力损失; 涡轮级内损失主要包括喷嘴损失、余速损失、叶高损失、扇形损失、部分进汽损失、摩擦鼓风损失、漏汽损失、湿汽损失。外部损失是指涡轮因与外部接触, 向外界环境散热, 进而造成热损失。在涡轮所有损失中, 尤其以级内损失较严重, 是造成涡轮相对内效率较低的主要原因。

表 3 朗肯循环热效率实验数据表

工况	排汽压力/kPa	进水温度/℃	蒸汽温度/℃	进水焓值kJ/kg	蒸汽焓值kJ/kg	蒸汽流量 g/s	输入功率/W	输出功率/W	热效率/%
1	68	30.7	161.5	128.53	2761.42	0.001667	4389.03	2.55	0.0581
2	55	31.2	159.2	130.63	2758.04	0.001669	4385.15	2.704	0.0617
3	28	31.4	159.6	131.47	2758.1	0.001642	4312.93	2.678	0.0621

表 4 相对内效率实验数据表

工况	蒸汽温度/℃	蒸汽压力/kPa	蒸汽焓值kJ/kg	乏汽压力/kPa	乏汽焓值kJ/kg	蒸汽流量g/s	输出功率/W	相对内效率/%
1	161.5	616.5	2761.42	28.5	2270	1.667	2.550	0.3113
2	159.2	619.4	2758.04	26.1	2258	1.669	2.704	0.3240
3	159.6	620.3	2758.10	26.0	2254	1.642	2.678	0.3235

2.3 测定不同背压下的摩擦损失

由涡轮相对内效率实验可知朗肯循环装置在涡轮处有较大的能量损失, 其中, 涡轮旋转所造成的摩擦损失(属于级内损失)是造成损失的主要

因素。通过测定在不同工况下涡轮的摩擦损失, 考察涡轮的摩擦损失总体情况。本实验中, 可通过移除用电载荷, 通过涡轮在不同背压下的自减速实验测量计算摩擦损失。

查阅设备操作指导手册可得^[15]:

旋转部件的惯性矩 $I = 49.7 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

摩擦力矩 $T_f = I \times \alpha_f$

摩擦功率 $P_f = T_f \times \omega$

式中, α_f 为角减速度, ω 为线速度。

通过涡轮转速表求出给定转速变化的时间间隔,

可计算出角减速度 α_f , 进而求出摩擦功率 P_f 。

不同背压下不同转速时的角减速度、摩擦力矩、摩擦功率如表5所示。

由此可见涡轮摩擦功率远大于输出功率, 并且随着转速的降低而降低。由此可得出结论, 涡轮处的摩擦损失在涡轮总的损失中占了很大的比重。

表5 不同背压下涡轮摩擦功率

转速 n/min	排汽压力 20 kPa			排汽压力 50 kPa			排汽压力 60 kPa		
	角减速度 α_f	摩擦力矩 T_f	摩擦功率 P_f	角减速度 α_f	摩擦力矩 T_f	摩擦功率 P_f	角减速度 α_f	摩擦力矩 T_f	摩擦功率 P_f
30000	54	0.002684	8.42776	86	0.004274	13.42098	54	0.002684	8.427132
20000	63	0.003131	6.55444	89	0.004423	9.259441	77	0.003827	8.010977
10000	46	0.002286	2.392889	70	0.003479	3.641353	53	0.002634	2.757025

3 实验室朗肯循环与理想朗肯循环对比

通过实验室朗肯循环实验装置, 模拟了实际朗肯循环的主要过程, 虽然和实际朗肯循环有所不同, 例如实验锅炉是电加热锅炉, 锅炉中的加热过程并不是等压过程, 并且锅炉供水是间歇进行的, 但是该实验装置模拟了电厂热能转化为机械能进而转化为电能的过程, 证实了理想朗肯循环理论的可行性。但相比于电厂实际朗肯循环, 实验室朗肯循环的效率相对很低, 主要原因有如下5个:

- 1) 涡轮摩擦损失大, 相对内效率很低;
- 2) 主蒸汽参数包括温度和压力较低;
- 3) 设备由于无法实现绝热密封而产生一定热损失;
- 4) 冷凝水返回锅炉时由于过冷而造成温度过低;
- 5) 锅炉和涡轮进口存在压力损失, 管道蒸汽阀门对蒸汽节流造成压力损失。

4 实验室朗肯循环装置改进

根据实验结果和分析, 本文提出了实验室朗肯循环装置相应的改进措施。

- 1) 采用拥有较高效率的多级涡轮机, 同时降低转速, 减小摩擦损失。
- 2) 提高实验室朗肯循环设备的蒸汽初参数, 提高蒸汽压力和过热度。
- 3) 定期维护涡轮加涂润滑油, 清理灰尘, 定期清理管道结垢。
- 4) 增加绝热保温措施, 优化蒸汽管道设计, 减小实验装置的散热损失。

5) 适当提高冷凝水温度, 减小由于冷凝水过冷而造成的热损失。

6) 对电锅炉反馈和控制系统进行调整和改进, 实现锅炉的连续运行, 产生的蒸汽也可实现稳定的参数。

5 实验教学应用

实验室朗肯循环装置在实验室中重现了基本朗肯循环, 加深了学生对朗肯循环的理解, 同时本实验装置可实现多个实验, 都与工程热力学课程的知识点有关。同时通过实验锻炼了学生的自主实验能力和独立动手操作能力。实验教学主要为以下6个方面展开。

1) 实验预习: 复习朗肯循环及相关知识点, 阅读朗肯循环设备指导手册, 明确设备操作顺序及注意事项。

2) 实验操作: 实验老师演示实验设备, 讲解实验操作, 随后在实验老师的指导下操作实验设备, 完成由启动到关闭的实验过程。

3) 小组汇报: 了解实验装置和基本操作后, 各实验小组进行讨论, 并进行实验工况设计。随后在课堂中分组进行汇报和讨论。

4) 正式实验: 各实验小组独立操作实验设备(实验老师负责安全), 自主完成实验, 记录相应的实验数据。

5) 实验报告: 对实验数据进行处理, 分析实验结果并思考总结。

6) 实验论文: 搜集朗肯循环相关资料, 根据实验结果和分析, 提交朗肯循环实验的小论文。

本实验已为本科生开设两个学期, 学生能自

主完成实验,实验动手能力和小组协作能力都有所增强,同时撰写实验相关的小论文也提高了论文写作能力,其中不乏有学生在实验过程中积极的思考,提出创新问题并与指导老师一同思考和解决问题。

6 结束语

本文中利用实验室朗肯循环装置对实际朗肯循环进行模拟实验,通过实验测量与计算,该朗肯循环装置的热效率为 0.06% 左右,同时测定了不同排汽压力下热效率的数值,得到了随着排汽压力的降低而热效率升高的结论。同时测定了涡轮的相对内效率和循环的摩擦损失,发现涡轮处的摩擦损失过大其是造成朗肯循环热效率的主要原因。实验室朗肯循环实验装置是对工程热力学课程理论教学的补充,使学生能够在实验室了解实际电厂循环情况,将理论与实验紧密结合,有助于学生理解和分析热力学基本理论,提高实验动手操作能力,提高分析和解决实际问题的能力。同时将自主实验和创新实验融入到实验教学中,激发了学生的学习热情和基础科研能力,为创新性实验教学提供了借鉴。

参考文献

- [1] ZHANG X X, HE M G, ZHANG Y. A review of research on the kalina cycle[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(7): 5309–5318.
- [2] GHAEBI H, PARIKHANI T, ROSTAMZADEH H, FARHANG B. Thermodynamic and thermoeconomic analysis and optimization of a novel combined cooling and power (CCP) cycle by integrating of ejector refrigeration and kalina cycles[J]. *Energy*, 2017, 139(15): 262–276.
- [3] GHORBANIA B, MEHRPOOYAB M, SADEGHZADEHB M. Developing a tri-generation system of power, heating, and freshwater by using solar flat plate collectors, multi-stage desalination unit, and kalina power generation cycle[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 165(1): 113–126.
- [4] 孟金英. 中低温热源的卡琳娜循环系统分析及优化设计[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [5] SUN W Q, YUE X Y, WANG Y H. Exergy efficiency analysis of ORC (Organic Rankine Cycle) and ORC based combined cycles driven by low-temperature waste heat[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 135(1): 63–73.
- [6] MOHAMMADI A, KASAEIAN A, POURFAYAZ F, AHMADI M H. Thermodynamic analysis of a combined gas turbine, ORC cycle and absorption refrigeration for a CCHP system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 111(25): 397–406.
- [7] YANG S C, HUNG T C, FENG Y Q, WU C J, WONG K W, HUANG K C. Experimental investigation on a 3kW organic Rankine cycle for low grade waste heat under different operation parameters[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 113(25): 756–764.
- [8] 郑浩等. 有机朗肯循环工质研究进展[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [9] BRAIMAKIS K, PREIBINGER M, BRUGGEMANN D, KARELLAS S, PANOPOULOS K. Low grade waste heat recovery with subcritical and supercritical organic rankine cycle based on natural refrigerants and their binary mixtures[J]. *Energy*, 2015, 88(S): 80–92.
- [10] PADILLA R V, Yen C S, BENITO R, STEIN W. Exergetic analysis of supercritical CO₂ Brayton cycles integrated with solar central receivers[J]. *Applied Energy*, 2015, 148(15): 348–365.
- [11] SARKAR J. Review and future trends of supercritical CO₂ Rankine cycle for low-grade heat conversion[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 48(8): 434–451.
- [12] 张鑫. 超临界朗肯循环热力性能研究[J]. *热能动力工程*, 2015, 32(2): 228–232.
- [13] 王修彦. 工程热力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [14] 沈维道. 工程热力学[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [15] 袁艳平. 工程热力学与传热学实验原理与指导[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

编辑 钟晓