



基于自制设备的能源与动力工程测试技术 实验课程设计

幸文婷, 朱 赤, 叶晓明, 吴杰俊

(华中科技大学 能源与动力工程实验教学中心, 武汉 430074)

摘要: 能源与动力工程测试技术实验课程包含温度测量及标定, 压力及流速测量, 流量测量及标定, 转速、转矩及功率测量 4 个实验项目。该课程以自制教学设备为依托, 紧密结合教材内容和工程实际, 所设计的教学实验内容丰富, 能让学生全面掌握测试技术原理与方法, 提高工程应用和实践创新能力, 符合现阶段本科实验教学需求。

关键词: 测试技术; 自制设备; 工程应用; 实验教学

中图分类号: G642.423

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20230029](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20230029)

Course Design of Energy and Power Engineering Testing Technology Based on Self-made Equipment

XING Wenting, ZHU Chi, YE Xiaoming, WU Jiejun

(Experimental teaching center of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The experiment course of energy and power engineering testing technology includes four experiment items: temperature measurement and calibration, pressure and velocity measurement, flow measurement and calibration, and measurement of speed, torque and power. This course is based on self-made teaching attachments, closely combined with textbook content and engineering practice. The designed teaching experiments are rich in content, which can enable students to fully master the principles and methods of testing technology, and improve engineering application and practical innovation ability. It meets the current undergraduate experimental teaching demand.

Key words: testing technology; self-made teaching attachments; engineering application; experimental teaching

能源与动力工程测试技术是一门融合了能源工程、控制工程、传感技术、信息技术和应用数学等多学科交叉的综合应用型课程^[1-2]。该课程内容零碎繁多、理论抽象、实践性强、应用范围广, 只有通过试验测量的方法才能解决工程实际问题^[3-5]。实验教学对该课程至关重要, 而实验教学环节却较薄弱。为使学生更好地掌握测试原理和方法, 提高工程应用和实践创新能力, 有必要结合教材内容和课堂教学精心设计配套的实验环节。

目前市场上所购置的教学仪器相对固化单一、功能有限, 针对性差, 与理论课程脱轨严

重, 且价格昂贵^[6], 而自制仪器具有专业性、适用性、直观性、先进性、经济性等特点, 弥补了市售产品在品种和性能方面的不足, 满足了特色化教学需求^[7-8]。因此我们根据教学内容自制了几台实践教学仪器, 以期达到本科实验教学要求。

能源与动力工程测试技术实验课程教学计划为 8 学时, 包含温度测量及标定、压力及流速测量、流量测量及标定、转速及功率测量 4 个实验项目。该课程以自制教学设备为依托, 实验设置紧密结合工程实际, 内容丰富、仪表配置齐全、操作灵活, 让学生对测试技术有了更为全面的理解和掌握。

收稿日期: 2023-01-17; 修回日期: 2023-03-12

基金项目: 华中科技大学“面向国家双碳战略的能源动力类专业实践教学体系改革与实践”项目(2022006)。

作者简介: 幸文婷(1985-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事工程热物理与工程测试方向的实验教学及实验技术研究。

E-mail: 14312585@qq.com

1 温度测量及标定实验

1.1 实验台架设计

温度测量及标定实验装置包含恒温水槽(SYG-15)、冰点槽(冰水混合物)、直流电位差计(UJ33a)、数字多用表(VICTOR 86E)、温度巡检仪及各种型式的温度计等。各温度计的型号规格如下。

1) 标定用水银温度计: 量程分别为 38~42 °C、48~52 °C 及 58~62 °C, 精度 0.01 °C。3 种不同测温范围的温度计分别用来标定 3 个对应的实验工况。

2) 压力式温度计: 型号 WTQ-280, 量程 0~100 °C, 精度 2.5 级。

3) 双金属温度计: 型号 WSS-311, 量程 0~100 °C, 精度 1.5 级。

4) K 型铠装热电偶: 型号 WRNK-191, $\Phi 3 \times 150$ mm, 量程 0~1100 °C, 精度 0.5 级。

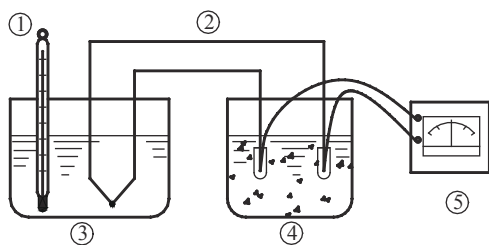
5) E 型铠装热电偶: 型号 WREK-191, $\Phi 3 \times 150$ mm, 量程 0~600 °C, 精度 0.5 级。

6) T 型铠装热电偶: 型号 WRCK-191, $\Phi 3 \times 150$ mm, 量程 -200~350 °C, 精度 0.5 级。

7) Pt_{100} 铠装热电阻: 型号 WZPK-191, $\Phi 3 \times 150$ mm, 量程 -50~450 °C, 精度 0.5 级。

8) Cu_{50} 铠装热电阻: 型号 WZC-191, $\Phi 4 \times 150$ mm, 量程 -50~150 °C, 精度 0.5 级。

实验系统连接及实验装置如图 1 所示。



(a) 温度测量及标定实验系统连接图



1—高精度标准水银温度计；2—各种型式的温度计；3—恒温水槽；4—冰点槽；5—直流电位差计；6—温度巡检仪

(b) 温度测量及标定实验装置图

图 1 温度测量及标定实验

1.2 实验教学设计

实验教学内容主要包括以下 6 个部分。

1) 实验系统搭建: 包括仪表安装、线路连接、电位差计组装等。

2) 温度计的认知实验: 熟悉各种类型测温仪表的测试原理, 了解其内部结构、应用场合及使用方法。

3) 热电偶冷端温度补偿实验: 采用冰浴法, 将清洁水制成的冰块和蒸馏水混合均匀后放入冰点槽, 然后将冷端直接置于温度为 0 °C 的冰点槽中。实验所需冰块由 Hicon 流水式制冰机制成。系统配置的纯水机和制冰机如图 2 所示。



图 2 实验用纯水机及制冰机装置图

4) 热电偶温度测量实验: 将热电偶与直流电位差计连用, 采用直流电位差计测量回路热电势 E , 通过查取相应的热电偶分度表获得测量温度^[9]。

5) 热电阻温度测量实验: 将热电阻与数字多用表连用, 测量热电阻的阻值 R , 通过查取相应的热电阻温度计分度表获得测量温度。

6) 通过变工况的温度测量及标定实验, 分析各温度计的测量误差^[10]。实验时将标准温度计和被标定温度计都置于恒温水槽中, 比较二者的温度测量指示值, 确定被标定温度计的基本误差。通过设置恒温水槽上的温度控制仪表, 可将温度设定到实验工况。本实验根据标准水银温度计的测量范围, 温度设定值分别为 40 °C、50 °C 和 60 °C。

2 压力及流速测量实验

2.1 实验台架设计

压力测量实验基于将所有压力计串联在同一管道上, 让流体分别连续通过各个压力计, 记录

压力值进行比对的设计理念;流速测量则是通过测出确定流体速度的总压与静压之差进行换算。流速计算为:

$$c = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

式中: c 为流体流速,单位 m/s ; Δp 为实验所测总压与静压差,单位 Pa ; ρ 为流体密度,单位 kg/m^3 。

该装置由储水箱、水泵、不锈钢管路、各种型式的压力计及速度探针等组成,其主要构成部件参数如下。

1) 水泵: 不锈钢离心泵 AMSm70/0.55, 额定流量 $4 \text{ m}^3/\text{h}$, 额定扬程 20 m , 额定功率 550 W 。

2) 2种液柱式压力计: U形管压力计和单管式压力计。工作液体为水, 不锈钢面板, 玻璃刻度管。

3) 3种弹性式压力计: 弹簧管压力计、膜片式压力计和膜盒式压力计。这3种压力计为指针式压力表, 测量范围为 $0\sim 0.4 \text{ MPa}$, 精度 1.6 级。

4) 7种压力传感器: 应变式、压电式、电感式、电容式、压阻式、压磁式及霍尔效应压力传感器。量程为 $0\sim 0.4 \text{ MPa}$, 精度 0.5 级。

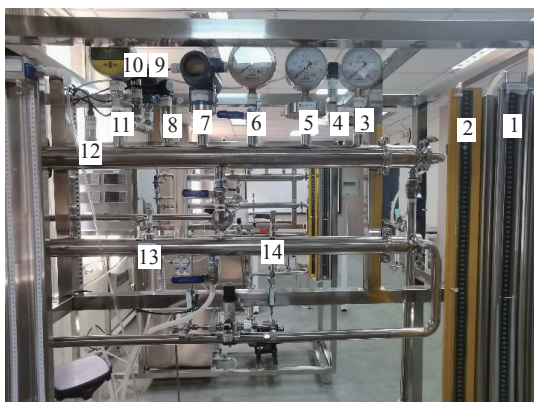
5) 2种速度探针: L形速度探针(毕托管 $\Phi 3\times 60 \text{ mm}$)和笛形管探针(管径 $\Phi 3 \text{ mm}$, 正对水流方向上中下位置各开设一个 $\Phi 1.5 \text{ mm}$ 小孔)。

6) 系统管路: 不锈钢管道, 管道内径为 40 mm 。

7) 差压变送器: $0\sim 2.5 \text{ MPa}$ 。

8) 储水箱: 容积 100 L 。

装置详图如图3所示。



1—U形管压力计; 2—单管式压力计; 3—弹簧管压力计;
4—压电式压力传感器; 5—膜片式压力计; 6—膜盒式压力计;
7—电容式压力传感器; 8—电感式压力传感器; 9—压磁式压力传感器;
10—压阻式压力传感器; 11—霍尔效应压力传感器;
12—应变式压力传感器; 13—L形速度探针; 14—笛形管探针

图3 压力及流速测量实验装置图

2.2 实验教学设计

实验教学内容主要包括以下部分。

1) 压力计、压力传感器及速度探针的认知实验: 熟悉各种类型压力计及速度探针的测试原理, 了解其内部结构、应用场合及使用方法。

2) 压力测量实验: 进行多工况的压力测量实验, 通过测试系统管路上同一测量点的压力值, 对比分析各压力计及压力传感器的测量误差^[1]。

3) 水头损失实验: 通过测试系统管路上不同测量点的压力值, 计算并分析沿程损失水头和局部损失水头。

其中沿程损失水头是流体与管壁间的粘性摩擦运动形成的阻力而造成的水头损失, 可表示为:

$$h_f = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} \quad (2)$$

式中: h_f 为沿程损失水头, 单位 m ; p_1 、 p_2 分别为直管上不同点的压力测量值, 单位 Pa ; ρ 为流体密度; 单位 kg/m^3 ; g 为重力加速度, 单位 m/s^2 。

由于沿程损失与管道的长度成正比, 与管道的直径成反比, 根据沿程损失的计算公式可算出沿程损失系数为:

$$\lambda = 2 \frac{p_1 - p_2 d}{\rho c^2 l} \quad (3)$$

式中: λ 为沿程损失系数; c 为流体流速, 单位 m/s ; l 为管道长度, 单位 m ; d 为管道直径, 单位 m 。

局部损失水头是流体遇到局部障碍(如阀门、管道弯头、粗细管接口等)时流线发生局部变形, 并由于流动分离、二次流等原因产生旋涡运动而造成的水头损失, 可表示为:

$$h_j = \zeta \frac{c^2}{2g} \quad (4)$$

式中: h_j 为局部损失水头, 单位 m ; ζ 为局部损失系数, 学生根据机械工程手册或水力学手册查询相应形式的局部损失系数值。

4) 流速测量实验: 用L形速度探针和笛形管探针测量流体的总压和静压差, 计算流体的流速, 分析并比较两种速度探针的测量差异。

5) 水泵特性实验: 调节电机转速, 绘制水泵压力-转速曲线图, 掌握常用机电设备的控制方法。

6) 液位测量和控制实验: 储水箱的液位由进出水流量的差值确定。通过控制水泵电机转速实现进水调节, 通过控制水箱出口调节阀开度实现出水调节。

3 流量测量及标定实验

3.1 实验台架设计

流量测量及标定实验基于将所有流量计串联在同一管道上,让流体分别连续通过各个流量计,记录流量值进行比对的设计理念。该装置由储水箱、计量水箱、水泵、不锈钢管路及各种形式的流量计等组成,其主要构成部件参数如下。

1) 水泵: 不锈钢离心泵 AMSm120/0.55, 额定流量 $7 \text{ m}^3/\text{h}$, 额定扬程 13 m, 额定功率 550 W。

2) 浮子流量计(转子流量计): LZT-2530G, 流量范围 3~30 GPM/12~120 LPM, 精度等级 0.5 级。

3) 罗茨流量计(齿轮流量计): NKGF25, DN20, 4~20 mA 信号输出, 24 V 供电, 量程 $0.6\sim 8 \text{ m}^3/\text{h}$, 精度等级 0.5 级。

4) 涡轮流量计: LWGB-20, DN20, 4~20 mA 信号输出, 24 V 供电, 量程 $0.7\sim 8 \text{ m}^3/\text{h}$, 精度等级 0.5 级。

5) 涡街流量计: 2022F193-37, DN20, 4~20 mA 信号输出, 24 V 供电, 量程 $0.5\sim 10 \text{ m}^3/\text{h}$, 精度等级 0.5 级。

6) 电磁流量计^[12]: DN20, 4~20 mA 信号输出, 24 V 供电, 量程 $0.5\sim 10 \text{ m}^3/\text{h}$, 精度等级 0.5 级。

7) 节流压差式流量计(节流孔板): 孔径 13 mm。

8) 系统管路: 不锈钢管道内径 21 mm。

9) 压差变送器: 0~180 kPa。

10) 计量水箱: 长 300 mm, 宽 350 mm, 容积 30 L。

11) 储水箱: 容积 100 L。

装置详图如图 4 所示。



1—浮子流量计; 2—电磁流量计; 3—罗茨流量计;
4—涡轮流量计; 5—节流孔板; 6—涡街流量计。

图 4 流量测量及标定实验装置图

3.2 实验教学设计

实验教学内容主要包括以下部分。

1) 流量计的认知实验: 熟悉各种类型流量计的测试原理, 了解其内部结构、应用场合、安装要求及使用方法。

2) 流量测量实验: 进行多工况的流量测量实验, 测量流体经过各流量计的流量值, 通过对比计算, 分析各种型式流量计的测量误差。

3) 流量标定实验: 采用容积法进行标定^[13]。用秒表计量 10~20 s 时间内流过计量水箱的容积, 计算出平均流量。将各流量计所测流量值与标准流量进行比较, 计算并分析标准误差。

4) 水泵特性实验: 调节电机转速, 绘制水泵流量-转速关系曲线, 掌握常用机电设备的控制方法。

5) 液位测量和控制实验: 储水箱的液位由进出水流量的差值确定。通过控制水泵电机转速实现进水调节, 通过控制水箱出口调节阀开度实现出水调节。

4 转速、转矩及功率测量实验

4.1 实验台架设计

转速、转矩及功率测量实验装置由电动机、离心风机、转速传感器、转矩传感器、功率变送器、PLC 控制器及触摸屏等组成, 其主要部件规格参数如下。

1) 电动机: 卧式交流异步电动机, YS8012 型。电压 AC220 V, 功率 750 W, 转速 0~2800 r/min, 轴径 $\Phi 19 \text{ mm}$ 。

2) 离心风机: 型号 DF-6。

3) 功率变送器: 导轨单相功率变送器, AC220 V, 功率测量范围 0~1500 W。

4) 转速/转矩传感器 1: JN-DN2 型, 由电阻应变式转矩传感器和直射式光电测速传感器集成, 采用 RS485 通信接口, MODBUS 协议, 可同时测量转速和转矩。转速测量范围为 0~5000 r/min, 转矩测量范围为 0~100 N·m, 轴径 $\Phi 28 \text{ mm}$ 。

5) 转速/转矩传感器 2: WTQ-2052 型, 由相位差转矩传感器和直射式光电测速传感器集成, 采用 RS485 通信接口, MODBUS 协议, 可同时测量转速和转矩。转速测量范围为 0~10000 r/min, 转矩测量范围为 0~200 N·m, 轴径 $\Phi 28 \text{ mm}$ 。

6) 磁电式测速传感器: NJK-5002C 型, 带霍

尔开关。

7) 激光转速仪(手持式): 型号 DT-6234C, 测试范围 0~99999 r/min, 测量准确度 $\pm(0.05\%+1$ 个), 6 MHz 石英晶体振荡器。

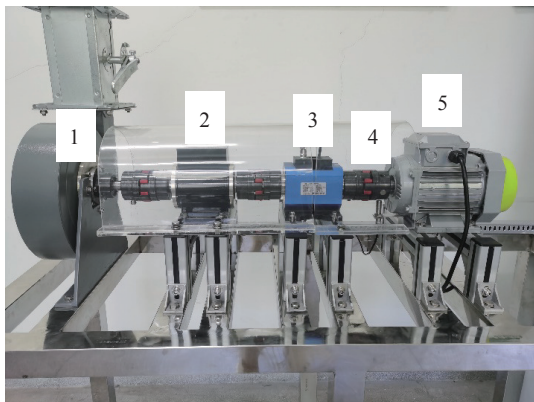
8) 触摸屏: 12 寸工业级触摸电容屏, 嵌入面板式一体机触控平板电脑, 分辨率 1024×600, 主板 J11800, CPU 赛扬双核 2.41 G, 硬盘 32 G, 前置 USB 接口。

9) 电机变频器: 1.5 kW 单相 220 V 变频器, 带 RS485 通讯功能。

10) PLC 控制器: 信捷 PLC, 继电器型, AC220V 供电, 支持 RS232、RS485 通讯功能。

11) 软件: MCGS 组态软件, 包括组态环境和运行环境两部分。组态环境在基于 Microsoft 的各种 32 位 Windows 平台上运行, 运行环境则在实时多任务嵌入式操作系统 WindowsCE 中运行, 可实时采集转速、转矩和功率数据。

装置详图如图 5 所示, 数据采集界面如图 6 所示。



1—风机; 2—转速/转矩传感器 1; 3—转速/转矩传感器 2; 4—磁电式测速传感器; 5—电动机。

图 5 转速、转矩及功率测量实验装置图



图 6 转速、转矩及功率数据采集界面

4.2 实验教学设计

实验教学内容主要包括以下部分。

1) 转速及转矩传感器的认知实验: 熟悉各种类型传感器的测试原理, 了解其内部结构及使用方法。

2) 实验系统搭建: 包括测试硬件系统和软件系统的搭建、应变片及反射带的粘贴、采集参数和通道设置、信号测试等。

3) 转速测量实验: 通过信号采集计算出不同传感器的转速值, 分析不同传感器的转速测量差异以及测量精度随转速变化的趋势。

4) 转矩测量实验: 通过信号采集计算出不同传感器的转矩值, 分析不同传感器转矩值的测量差异以及转矩随转速变化的趋势^[14]。

5) 功率测量实验: 测出转矩和转速, 轴的功率为:

$$N_e = 1.047 \times 10^{-4} M_n \quad (5)$$

式中: N_e 为轴功率, 单位 kW; M 为转矩, 单位 N·m; n 为转速, 单位 r/min。

5 实验误差分析

学生在进行完系统测试后, 需要对各测量仪表进行误差分析。本课程中误差按式(6)计算。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X)^2}{N}} \quad (6)$$

式中: σ 为标准误差; X_i 为每种测量仪表的单个测量值, 如单次温度计、流量计、压力计等的读数; X 为真值, 取各系统的最终标定值; N 为测量次数。

经测量、计算、分析和总结, 各仪表的测量误差主要表现在以下几个方面。

1) 系统误差: 仪表制造、安装、使用不正确或实验方法不完善等原因造成。

2) 仪表精度: 实验台架中选用的各温度计、流量计、压力计等的仪表精度不同, 仪表精度越高, 测量误差越小。

3) 仪表量程: 测量值在仪表量程之内, 相同精度的仪表, 量程越小, 测量误差越小。

4) 设计工况: 本实验设置了几组不同的实验工况, 当采用一定量程的仪表时, 测量小示值的相对误差比测量大示值的相对误差大, 因此在工

况设计时要尽量让测量值落在 2/3 量程附近。

5) 随机误差: 为提高测量精度, 需进行多次测量, 多次测量后的算术平均值更接近真值。但受上课时间限制, 每组工况测量次数为 5 次, 随机误差较大。

6) 过失误差: 通常由于学生粗心大意、读错、记错、算错或错误操作造成的, 如在用镍铬-镍硅热电偶时, 错误地使用铜-康铜热电偶分度表; 或者在同一管道截面上测量出来的静压值大于总压值。过失误差应剔除。

6 结束语

基于自制设备的工程测试技术实验课程, 通过温度、压力、流量、流速、转速、转矩及功率测试实验, 可以让学生全面掌握工程测试技术技能、锻炼学生分析和解决复杂测试问题的能力, 培养学生的工程实践能力, 实现了课程理论、实验环节和工程实践的有机结合^[15]。

参考文献

- [1] 孙红春, 叶大勇. 以测试系统为线索的工程测试技术教学方法的研究[J]. 机械设计, 2018, 35(S2): 144-146.
- [2] 黄瑞, 俞小莉. 研究生热能与动力工程测试实验教学改革[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(5): 210-213.
- [3] 张师帅. 能源与动力工程测试技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2018.
- [4] 张静, 单光坤. 基于测试技术的三阶梯式实验方案探究[J]. 化工时刊, 2021, 35(12): 51-53.
- [5] 曹修全, 陈艳. 新工科背景下“传感器与工程测试技术基础”课程教学改革探索[J]. 黑龙江教育(理论与实践), 2022(2): 90-92.
- [6] 管新蕾, 高云鹏, 王维, 等. 创新流体实验仪器, 探索创新型人才培养[J]. 力学与实践, 2021, 43(1): 135-138.
- [7] 徐敏虹, 陈海峰, 郭玉华, 等. 自制实验教学设备促进学生实践创新能力培养[J]. 化学教育(中英文), 2021, 42(20): 58-62.
- [8] 郭美荣, 孙淑凤. 自制实验仪器在制冷专业教学中的应用[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(5): 205-207.
- [9] 王乐群, 文丰, 张凯华. 基于FPGA的高精度S型热电偶温度测量系统设计[J]. 测控技术与仪器仪表, 2022, 48(2): 41-45.
- [10] 白杰, 陈昭, 王伟. 热电偶温度测量的误差及影响因素分析[J]. 机床与液压, 2017, 45(22): 138-141.
- [11] 王昊利, 汪兵. 微小通道沿程压力测量方法研究[J]. 实验流体力学, 2017, 31(6): 56-141.
- [12] 陈定, 罗刚, 赵春峰, 等. 电磁流量计在疏浚管道流速测量中的误差及修正[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(4): 71-76.
- [13] 董相文, 孙启迪, 苏玉磊, 等. 低温流量测量与标定系统的研制[J]. 低温/制冷技术, 2022, 50(2): 78-83.
- [14] 杨志坚, 张雨国, 喻桂华. 一种永磁电机齿槽转矩测量方法[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(5): 76-85.
- [15] 杨立娟, 陈花玲, 王保健, 等. 基于NI ELVIS II+和LabVIEW的转速测量实验平台开发[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(10): 88-91.

编辑 钟晓