

普通高等教育“十三五”规划教材

能源与动力工程专业 实验指导教程

EXPERIMENTS OF ENERGY AND POWER ENGINEERING

廖丽芳 陆志艳 主编

普通高等教育“十三五”规划教材

能源与动力工程专业 实验指导教程

廖丽芳 陆志艳 主编

 华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

图书在版编目(CIP)数据

能源与动力工程专业实验指导教程 / 廖丽芳, 陆志艳主编. —上海: 华东理工大学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-5628-5142-4

I. ①能… II. ①廖… ②陆… III. ①能源-实验-高等学校-教材 ②动力工程-实验-高等学校-教材 IV. ①TK-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 194017 号

策划编辑 / 周 颖

责任编辑 / 周 颖

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地 址: 上海市梅陇路 130 号, 200237

电 话: 021-64250306

网 址: www.ecustpress.cn

邮 箱: zongbianban@ecustpress.cn

印 刷 / 江苏凤凰数码印务有限公司

开 本 / 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 / 12

字 数 / 270 千字

版 次 / 2017 年 9 月第 1 版

印 次 / 2017 年 9 月第 1 次

定 价 / 29.50 元

版权所有 侵权必究

前 言

能源化工是我校的特色学科专业之一,能源与动力工程专业多年来为国家建设培养、输送了大批能源转化和化工领域的高级工程技术人才,为清洁能源技术的进步和应用作出了重要贡献。专业实验是专业知识体系中必不可少的重要组成部分,对巩固和加深课堂教学内容、培养学生动手能力、深化学习专业知识和从事科学研究奠定了基础。为适应教学改革不断深入的需要,我们在教学实践的基础上,编写了与能源与动力工程专业课程配套的实验教材。本书围绕煤质及生物质分析及工艺性质测定、热工测试技术试验、制冷技术试验、传热学及燃烧学等相关内容设置实验,是化工特色方向能源与动力工程专业的典型教材。

本书在保持原有能源转化优势特色的基础上,新增了与能源转化新技术、新工艺相关的教学实验项目,更全面系统地关联现代能源转化技术及其发展应用,为高质量完成能源与动力工程专业的实验教学环节提供了重要保障。本书适合能源与动力工程专业的本科生、研究生使用,同时可作为实验课程设计、校内实训和创新实验的实验指导书,也可供从事能源转化行业的专业人士使用和参考。

全书内容包括三大篇,即专业基础实验、专业实验和专业综合提高实验,共计 28 个实验。全书由廖丽芳、陆志艳主编,参与编写的人员还有吴幼青、张素平、鲁锡兰、黄胜、吴诗勇、许庆利、吴亭亭、刘霞、赵辉、许建良、龚岩等人,最后由廖丽芳统稿,陆志艳校勘。

在本书的编写过程中,编者参阅并引用了许多国内外有关文献和资料,还得到了华东理工大学资源与环境工程学院的指导和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,时间仓促,书中错漏和不当之处在所难免,恳请各位专家和读者批评指正。

编者

2017 年 6 月

目 录

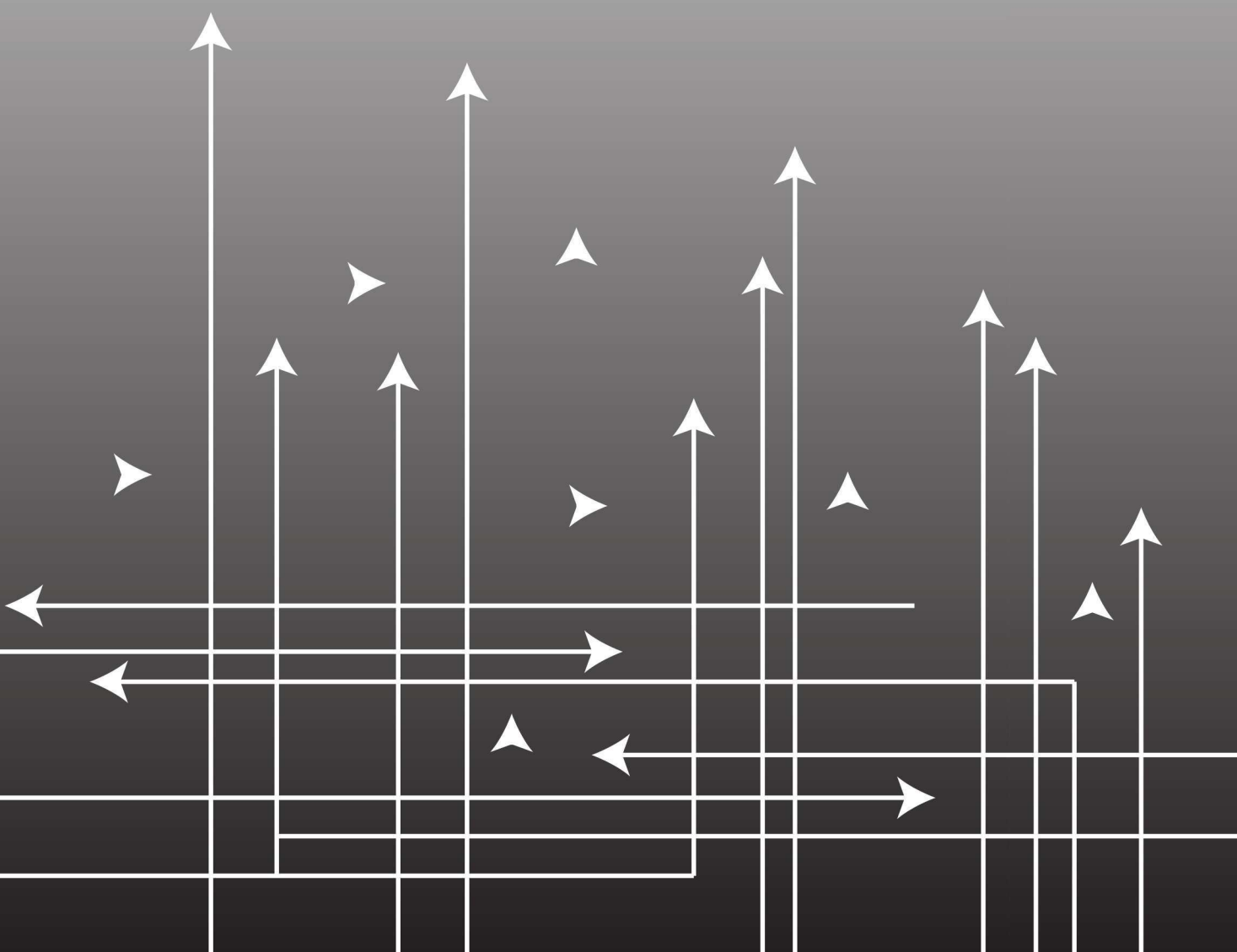
第一篇 基础实验	1
实验一 导热系数测定	3
实验二 热电偶测量及虚拟仪器的应用	7
实验三 煤的工业分析	16
实验 3.1 煤中水分的测定	16
实验 3.2 煤中灰分的测定	24
实验 3.3 煤的挥发分产率的测定及固定碳的计算	28
实验 3.4 全自动工业分析仪的使用	32
实验四 煤中全硫含量的测定	36
实验 4.1 库仑滴定法测定煤中全硫含量	36
实验 4.2 质量法(艾氏卡法)测定煤中全硫含量	39
实验五 煤的发热量测定	42
实验六 水(油)煤浆流变特性测定	50
实验七 煤的着火点的测定	56
实验八 粉体摩擦特性测试	60
第二篇 专业实验	65
实验九 燃气快速热水器燃烧特性测定	67
实验十 烟气污染物监测实验	71
实验十一 制冷压缩机性能实验	74
实验十二 煤中碳氢含量的测定(半自动碳氢法)	78
实验十三 煤中氮含量的测定	84
实验十四 固体和液体燃料的元素分析(Vario Macro Cube 元素分析仪)	89
实验十五 煤及煤焦等固体材料的孔结构测试	93
实验十六 煤灰熔融性测定	99
实验十七 燃气净化剂的吸附性能测定	106
第三篇 综合提高实验	111
实验十八 烟煤黏结指数的测定	113
实验十九 煤的可磨性指数的测定(哈德格罗夫法)	117

实验二十	煤的葛金低温干馏试验·····	122
实验二十一	煤、焦对二氧化碳化学反应性的测定·····	129
实验二十二	烟煤奥亚膨胀计试验·····	135
实验二十三	烟煤胶质层指数的测定·····	143
实验二十四	雾化过程粒度分布的测定·····	153
实验二十五	燃气成分分析·····	156
	实验 25.1 人工燃气主要组分的测定(化学吸收法)·····	156
	实验 25.2 生物质裂解气主要成分分析(气相色谱分析法)·····	160
实验二十六	高效液相色谱分析有机产物·····	165
实验二十七	闪点的测定·····	169
	实验 27.1 宾斯基-马丁闭口杯法·····	169
	实验 27.2 克利夫兰开口杯法·····	175
实验二十八	油品馏程的测定(自动减压蒸馏仪)·····	180

第一篇



基础实验



实验一 导热系数测定

一、实验目的

导热系数是表征物质热传导性质的物理量。测量导热系数的方法一般分为两类：一类是稳态法；一类是动态法。在稳态法中，先利用热源在待测样品内部形成一个稳定的温度分布，然后进行测量。在动态法中，待测样品温度分布是随时间变化的。本实验应用稳态法测量不良导体的导热系数。

二、基本原理

DRL-III型真空热流法导热系数测定仪以稳定导热原理为基础，在稳定状态下，单向热流垂直到过试样，通过测量试样上、下两导热杆6个点的温度，以及有效传热面积和厚度，即可计算试样的导热系数。

1. 热流值计算

$$Q_{12} = \lambda_1 \times A \times (T_1 - T_2) / d; Q_{34} = \lambda_2 \times A \times (T_3 - T_4) / d; Q = (Q_{12} + Q_{34}) / 2 \quad (1-1)$$

式中， Q_{12} 为热极热流值，W； Q_{34} 为冷极热流值，W； Q 为平均热流值，W； A 为通过热流面积， m^2 ； λ_1 、 λ_2 为热极、冷极压杆导热系数， $W/(m \cdot K)$ ； $T_1 - T_2$ 为热极温差，K； $T_3 - T_4$ 为冷极温差，K； d 为样品厚度，m。

2. 与样品接触热极表面温度计算

$$T_H = T_2 - d_B(T_1 - T_2) / d_A \quad (1-2)$$

式中， d_A 为热电偶1与热电偶2间的距离，m； d_B 为热电偶1与上热端面间的距离，m。

3. 与样品接触冷极表面温度计算

$$T_C = T_3 - d_D(T_3 - T_4) / d_C \quad (1-3)$$

式中， d_C 为热电偶3与热电偶4间的距离，m； d_D 为热电偶3与下热端面间的距离，m。

4. 总热阻计算

$$\theta = A(T_H - T_C) / Q, (km^2/W) \quad (1-4)$$

5. 导热系数计算

$$\lambda = d / (\theta - \theta_0), \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \quad (1-5)$$

式中, θ_0 为热极与冷极之间的表面接触热阻, 其值与样品、压力计面积有关, 它通过软件设置并自动校正。

三、仪器装置

根据稳态导热原理建立的导热系数实验装置是由上压杆与下压杆、加热器、温度测量系统、抽真空装置、水冷却装置、加压装置、测厚传感器和控制电脑 8 部分组成。

1. 上压杆与下压杆

由导热良好的纯铜棒组成, 上压杆上端连接加热器, 下端压紧试样; 下压杆上端顶住试样, 下端连接水冷却装置; 在上压杆与下压杆上分别固定有温度探头, 用于测量热流量。

2. 加热器

加热器直接固定在上压杆上端, 通过高温电阻丝将上压杆加热到设定温度, 并保持温度恒定。

3. 温度测量系统

温度测量由 7 块温度表和 7 支热电偶组成。其中 6 个检测上压杆与下压杆的温度, 一个检测控制加热器温度。

4. 抽真空装置

负责对容器抽真空, 使实验在真空环境下进行, 确保精度。

5. 水冷却装置

使下压杆的下端温度保持稳定。

6. 加压装置

负责给试样施加不同的预压力。

7. 测厚传感器

检测试样在施加不同的预压力情况下厚度的变化。

8. 控制电脑

负责实验数据的检测、实验控制和实验数据的计算与保存。

四、特点

测量和分析软件是基于 Windows XP 系统运行的,包含测量功能和数据显示,软件具有很友善的中文操作界面,简易的菜单操作、升温程序的设置和电炉温度的控制等全部都能在电脑上进行,温度控制精度高。配有自动加压、自动测量厚度装置,可检测不同压力下的热阻和导热系数。

五、使用方法

1. 对试件的要求

试件底面与圆柱体轴的垂直度不大于 0.02mm,两个端面的不平度小于 0.02mm。

2. 试件的预处理

测量干燥条件下导热系数时,试件应根据材料本身的技术规定在不同温度条件下进行干燥处理至恒重。

3. 测量步骤

(1) 首先在试件两面涂上导热脂,打开真空罩,再将试件放置在上压杆、下压杆之间进行合轴装配。

(2) 打开电源开关和加热开关,将纽子开关打向“加载”,当压力表显示压力时,将纽子开关打向“停止”,然后盖上真空罩。

(3) 关闭仪器侧面的进气阀门(手柄为垂直方向),开启抽真空阀门(手柄为水平方向),启动真空泵抽真空,接通冷却水。

(4) 打开电脑程序,进入电脑操作,其方法如下所示。

① 软件安装完后,在安装目录内,将图标变为桌面快捷方式。

② 打开桌面快捷方式软件图标,显示“注册申请码”,输入注册码后,点击“注册”即可(如不注册,点击“继续”也可)。

③ 打开软件后,点击“基本参数”,设置有关参数。先点击“修改设置”,通信端口为“COM1”,温度表小数点位数根据实际设置为“2”,升温速度设置为“1”。根据测试精度要求,设置稳定时间为 30~60s,温度偏差为 0.2~0.5℃,最后点击“确定”。

④ 基本参数设置好后,打开软件。点击“导热系数测试”,进入测试界面,如系统没有标定,先放入 3~5mm 厚标样进行标定。标定方法为:在压力设置栏,可选择“手动加载”,然后点击“确定”即可。直接拨动纽子开关进行“加载”“卸载”,电脑显示实际压力大小。在厚度面积输入栏,可选择“手动输入厚度”和“自动测量厚度”。先点击“修改”,输入厚度后,点击“确定”。系统标定方法为:点击“设备标定”,输入标样导热系数参考值,将设备标定值改为“1”后,点击“应用”,显示提示后点击“确定”即可。在温度栏,设置好温度,电脑显示“热极温度已设置

好”后,打开“加热开关”,点击“加热启动”,开始自动升温,当达到设置温度且稳定一定时间后,点击“开始实验”,电脑自动测试3次,如3次偏差在设置的范围内,则显示结果值,这时再点击“设备标定”,输入实测的没校正的导热系数值,点击“计算”,点击“应用”,显示提示后点击“关闭”即可,标定完成后,要再测试一次,当温度稳定后,点击“开始实验”,测试完检查结果值是否和标定值相符。最后点击“数据保存”,输入名称、编号,点击“确定”,点击“生成报表”,即可保存数据。注意,每次标定前,要将标定系数改为“1”。系统标定好后,可进行样品测试,方法和标定类似,只是不要进入设备标定。

⑤ 精度调节方法为:在测试界面,点击“基本参数设置”,进入基本参数设置界面,可调整温度梯度偏差、炉温温度偏差,偏差越小,实验时间越长,但精度也相应提高。调整结果误差范围的百分比和温度稳定时间,效果也一样。

六、注意事项

1. 熟悉仪器各附件设备的使用说明。
2. 当外电源波动较大时,应进行二次稳压。
3. 定期用标样进行标定,保证测试精度。

七、思考题

应用稳态法是否可以测量良导体的导热系数?如可以,对实验样品有什么要求?实验方法与测不良导体有什么区别?

实验二 热电偶测量及虚拟仪器的应用

一、实验目的

1. 了解热电偶测量常用的方法。
2. 掌握一般金属热电偶丝热电动势的测量方法。
3. 熟悉虚拟仪器在热电偶测量中的应用。

二、实验原理

1. 热电偶测量

比较法:在恒定的温度下,用标准器的指示值与被检热电偶的指示值进行比较来确定被检热电偶的实际值。

(1) 单极比较法

将被检热电偶丝与参考铂丝焊在一起,与标准器进行比较,测量正极对铂与铂对负极的热电动势值。其连接线路如图 2-1 所示。

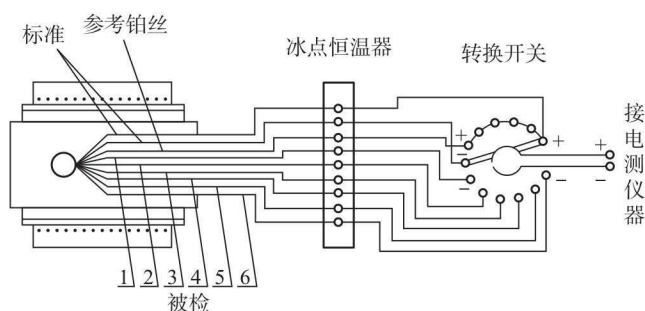


图 2-1 单级比较法测量廉金属热电偶丝示意图

(2) 双极比较法

将同分度号、同种规格的正、负极偶丝焊接成热电偶,直接测量标准器与被检热电偶热电动势,连接线路如图 2-2(a)、2-2(b)所示。

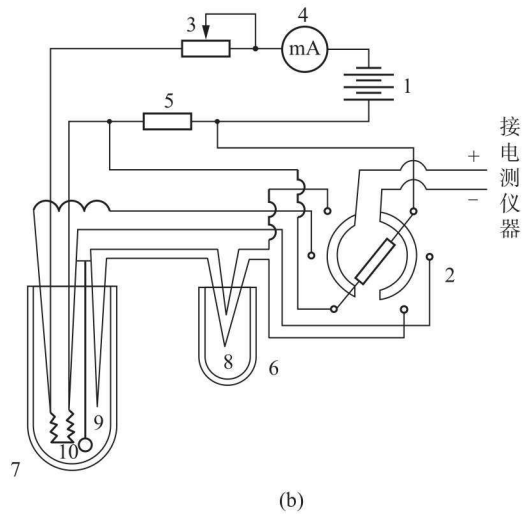
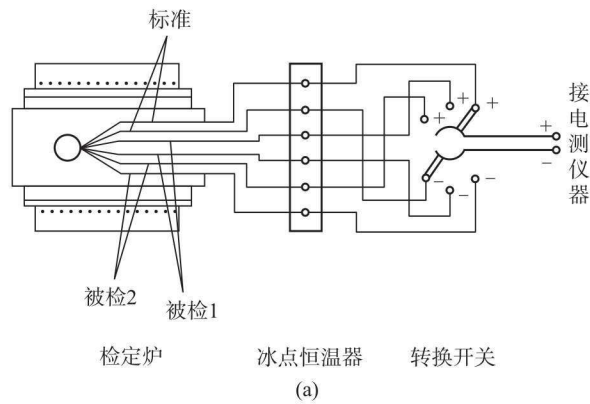


图 2-2 双级比较法测量贱金属热电偶丝示意图

1—直流电源;2—多点转换开关;3—变阻器;4—毫安表;5—标准电阻;6—冰点器;
7—酒精低温槽;8—热电偶参考端;9—热电偶测量端;10—标准电阻温度计

(3) 同名级比较法

同名级比较法的连接线路如图 2-3 所示。

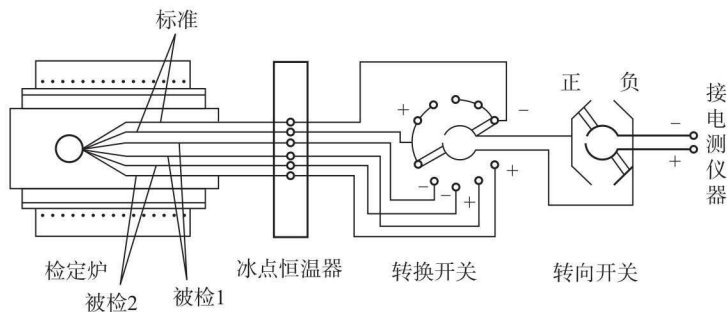


图 2-3 同名级比较法测量贵金属热电偶丝示意图

注：① 用双极比较法和同名级比较法的测量结果具有同等效力；② 同名级比较法仅适用于标准热电偶与被检热电偶为同种材料的热电偶。

2. 虚拟仪器应用

虚拟仪器进行热电偶测量，主要是根据大量标准的热电动势数据编制软件；根据系统建立的工作界面，可进行实际装置所用热电偶的精度测量。

三、实验仪器及设备

NM-01 热工仪表手动检定系统由计算机、多通道手动转换开关、数字表、三线电阻转换器/接线台、检定炉、控温装置、水(油)槽、冰点器等组成，如图 2-4 所示。

系统计算机与数字表的连接采用 RS232 串行接口，与检定炉控温装置、恒温水槽、恒温油槽的连接采用 RS485 串行接口，若计算机本身不能满足要求，可采用 PCI 接口卡进行扩展。

数字表是系统中的电测设备，其测量准确度应满足检定规程对电测设备的要求。推荐采用 6.5 位以上分辨率数字表。

三线电阻转换器/接线台为前端接线台，用于连接标准热电偶(热电阻)、被检热电偶(热电阻)，可完成多通道被检、标准以及参考端传感器信号的切换功能，检定三线制热电阻的同时起到包含内引线转换作用，同时可以接收计算机的控温信号完成检定炉等恒温设备的温度控制。

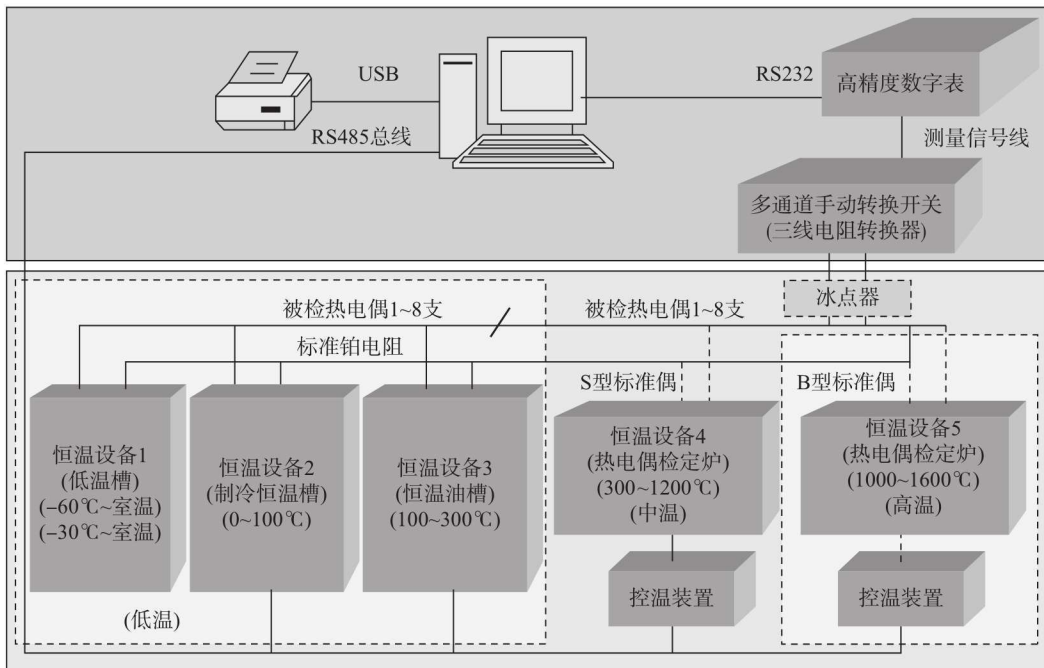


图 2-4 热电偶检定系统简图

四、实验步骤

1. 使用热电偶检定炉进行检定时,检查检定炉控制系统接线良好,炉膛内无异物。需要使用恒温槽时,需要检查恒温槽内是否注满工作介质。

2. 为保证操作安全性,恒温设备供电开关应处于关闭状态。

3. 按照检定规程要求,检定热电偶时将放置标准热电偶的护套管(石英管或刚玉管),与被检热电偶一起捆扎、装炉,检查捆扎后的标准热电偶、被检热电偶和控温电偶位置应处于炉中央位置;检定热电阻时将标准热电阻或标准热电阻的护套管和被检温度计放入恒温槽内,使标准热电阻和被检热电阻浸入液面深度一致,一般应大于等于 30cm。

4. 根据系统使用说明书要求,接好被检温度传感器的引线。然后放入标准器(放置在护套管内),接好标准器的引线。

5. 打开扫描器、数字表、恒温设备电源,当恒温设备采用手动控温时,手动设定恒温设备的设定温度,启动恒温设备升温过程。

6. 启动计算机系统,通过桌面快捷方式启动“热电偶或热电阻检定程序”,选择“新检定项目”,进行“检定信息设置”。确认检定信息设置无误后,点击“确定”,进入检定界面。点击检定界面的“启动检定过程”按钮启动检定过程,系统进行设备检测、参考端测量,进入升温过程。

7. 检定恒温设备温度达到规定温度时,进入控温保温过程。在升温 and 保温过程中,可以通过点击程序界面“测量通道扫描”按钮进行各被检通道传感器的测量扫描,检查接线是否正确。

8. 当标准温度偏差(热电偶系统偏差要求不大于 5°C ,热电阻系统偏差要求不大于 2°C)、每分钟控温稳定性(热电偶系统要求小于 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$,热电阻系统要求小于 $0.04^{\circ}\text{C}/\text{min}$)满足要求,并且满足恒温设备设置中的 n 分钟温度稳定性要求后,即开始扫描测量,进入扫描测量过程。

9. 扫描测量完成,若扫描测量过程温度变化或被检结果超出规程允许,则根据设置提示是否重检。若选择重检,则程序重新进入保温控温过程。否则,进入下一温度点升温控温过程,同时在数据库中增加或更新相应数据库记录,并按当前日期形成项目组编号。项目组编号格式为“年+月+日+当日检定组序号”,如“2015030201”为 2015 年 3 月 2 日第一次检定记录。

10. 所有温度点检定完成,自动导出检定数据到 Excel 进行数据记录、检定证书显示,根据需要打印检定数据记录表和检定证书。

11. 关闭扫描器、数字表、恒温设备的电源。

12. 退出检定程序,关闭计算机。

13. 待恒温设备内温度降为规定温度时(检定炉炉温降至 300°C 以下),先将标准器从恒温设备中取出,然后取出被检传感器。检定过程结束。

五、数据处理

双级比较法和单级比较法测量,采用下式将热电偶的热电动势修正到各检测点的热电动势。

$$E_{t_{\text{被}}} = E'_{t_{\text{被}}} + \frac{E_{t_{\text{标}}} - E'_{t_{\text{标}}}}{S_{t_{\text{标}}}} \cdot S_{t_{\text{被}}} \quad (2-1)$$

式中, $E_{t_{\text{被}}}$ 为修正到检验温度点 t 时的热电动势值, mV; $E'_{t_{\text{被}}}$ 为被检热电偶在检验温度点 t 时测得的热电动势值, mV; $E_{t_{\text{标}}}$ 为标准热电偶证书上检验温度点 t 时测得的热电动势值, mV; $E'_{t_{\text{标}}}$ 为标准热电偶在检验温度点 t 时测得的热电动势值, mV; $S_{t_{\text{标}}}$ 为标准热电偶在检验温度点 t 时测得的热电动势率(塞贝克系数 μ), V/°C; $S_{t_{\text{被}}}$ 为被检热电偶在检验温度点 t 时测得的热电动势率(塞贝克系数 μ), V/°C。

若 $S_{t_{\text{标}}} = S_{t_{\text{被}}}$, 即为同种型号热电偶, 则

$$E_{t_{\text{被}}} = E'_{t_{\text{被}}} + (E_{t_{\text{标}}} - E'_{t_{\text{标}}}) \quad (2-2)$$

被检热电偶热电动势 $E_{t_{\text{被}}}$ 与通用热电偶分度表 $E_{t_{\text{分}}}$ 的偏差值换算成的温差, 即误差温度 Δt 可用下式计算:

$$\Delta t = \frac{E_{t_{\text{被}}} - E_{t_{\text{分}}}}{S_t} \quad (2-3)$$

式中, S_t 为热电偶在此温度下的热电势率。由 Δt 可知被测热电偶是否合格。

铂铑 10-铂、铂铑 13-铂热电偶允许误差可参考表 2-1。

表 2-1 铂铑 10-铂、铂铑 13-铂热电偶允许误差

级别	温度范围/°C	示值允许误差/°C
I	0~1100	±1
	1100~1600	±[1+(t-1100)×0.003]
II	0~600	±1
	600~1600	±0.0025t

实验测试数据请记录于表 2-2。