

物理实验



基于惠斯通电桥的温度计设计实验探究

王 婷 冯金山 宋 婷 薛思敏 刘禧莹 温晓东 王羿文
孙小伟 祁鹏堂

(兰州交通大学数理学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要 为了提高验证性实验的教学效果,采用开放式实验教学模式对大学物理实验中经典的电桥实验进行创新性实验扩展探究。从深度学习视角反思实验教学创新,基于惠斯通电桥的半导体温度计设计实验,采用引导法,在设计实现过程中引导学生在实验分析中明确目标、过程中互相探讨、实施中协作互助、结果中启发创新,鼓励学生要乐于学和做,尤其强调“做”的重要性,在做中明白所学知识的价值,注重与生活相联系。鼓励学生积极参加全国大学生物理实验竞赛,以培养和提高学生主动分析与独立解决问题的能力,并促进教师的专业发展。

关键词 惠斯通电桥;验证性实验;创新扩展性实验;半导体温度计

EXPERIMENTAL EXPLORATION OF THERMOMETER DESIGN BASED ON WHEATSTONE BRIDGE

WANG Ting FENG Jinshan SONG Ting XUE Simin LIU Xixuan WEN Xiaodong WANG Yiwen
SUN Xiaowei QI Pengtang

(School of Mathematics and Physics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070)

Abstract To enhance the effectiveness of verification experiments in teaching, an open-ended experimental teaching model was adopted to innovatively expand the classic Wheatstone bridge experiment in university physics laboratories. Reflecting on experimental teaching innovation from the perspective of deep learning, the paper explores the “design experiment for a semiconductor thermometer based on the Wheatstone bridge.” Through guided instruction, students are encouraged to clarify objectives during experimental analysis, engage in discussions during the process, collaborate during implementation, and draw inspiration for innovation from the results. Students are motivated to enjoy learning and doing, with a particular emphasis on the importance of “doing,” as it helps them understand the value of the knowledge meanwhile they acquire and connect it to real-life applications. Additionally, students are encouraged to actively participate in China Undergraduate Physics Experiment Competition to develop their ability to analyze and solve problems independently, while this also promoting the professional growth of teachers.

Key words Wheatstone bridge; verification experiment; innovation expansion experiment; semiconductor thermometer

收稿日期: 2024-11-20

基金项目: 教育部高等学校教学研究项目(项目号:DWJZW202119xb);甘肃省高等学校人才培养质量提高项目;甘肃省高校创新创业教育教学改革研究项目;兰州交通大学2023年教改项目(项目号:JGY202321);兰州交通大学2025年实验教改项目(项目号:2025028)。

通信作者: 王婷, wt1234222@sina.com。

引文格式: 王婷,冯金山,宋婷,等. 基于惠斯通电桥的温度计设计实验探究[J]. 物理与工程, 2025, 35(4): 133-138.

Cite this article: WANG T, FENG J S, SONG T, et al. Experimental exploration of thermometer design based on Wheatstone bridge[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(4): 133-138. (in Chinese)

在高校实验教学中,验证性实验内容必不可少。通过验证性实验的学习,不仅有利于学生理解掌握所学的物理原理和规律,提高实验的基本技能,还可以促使学生了解科学实验的主要过程和方法,实现认识上的飞跃^[1-2]。实际教学中发现验证性实验在培养学生获取新知识的能力、激发创新精神、调动学生的积极性和主动性方面较为欠缺,实验教学的效果不佳。创新扩展性实验是学生在掌握物理实验的基本知识、基本方法的基础上,为了训练学生综合运用所学知识、发现问题与寻找解决问题的途径,允许学生按照自己的兴趣,要求和特长选择设计实验内容,并依据自己的实验方式和特点开展的自命题实验^[3]。在开放式实验教学中引入以创新物理实验为主的自主式探究学习,激发学生对科学的兴趣,通过完成实验项目引导学生在实验过程中以小组为单位,学习项目相关物理知识,观察并交流讨论,以提高学生的科学探究能力。大学生创新能力培养已纳入国家创新发展战略的重要环节。以实验教学创新促进学生深度学习一直是研究热点^[4]。有效的深度学习设计必将促进教师的专业发展。教学相长,在此以“基于惠斯通电桥的温度计设计实验”为例,探讨实验教学生活化的理念下,从基础验证性实验到创新扩展设计性实验的引导实现。

1 研究方法及实施

注重联系与构建,为推陈出新而创。创新能力指人在顺利完成以原有知识、经验为基础的创建新事物的活动过程中表现出来的潜在的心理品质^[5]。为实现创新等能力的培养,在充分利用实验教学中心的实验室资源的前提下,鼓励并引导学生积极参加各类开放实验及竞赛。

1.1 设计实验方案

对“基于惠斯通电桥的温度计设计实验”项目,如何提取相关信息呢?引导学生可从电桥测量入手,考察平衡和非平衡电桥的使用及区别,逐步深入非平衡电桥工作原理,引入微安表代替平衡电桥中的检流计,半导体热敏电阻做可变桥臂,进而用微安表的读数变化指示温度变化。学生在老师的指导下(或自行)阅读实验教材,查阅有关资料,经过分析、比较、总结后融合实验原理,设计具体实验方案,流程如图1所示。

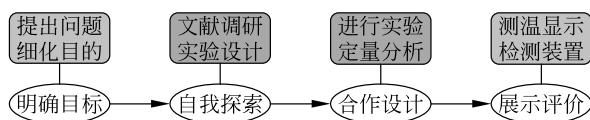


图1 实验方案流程图

1.2 数学模型

非平衡电桥是一种电路结构,在非电量参数测量中常常用到。在温度测量方面将非平衡电桥与热敏电阻测温探头相结合,形成了一个测温系统。热敏电阻接入电桥,温度变化破坏电桥平衡,输出端产生电势差。这个电势差的大小与热敏电阻的阻值变化成一定比例关系,而阻值变化又与环境温度相关。实验电路如图2所示,示意图如图3所示。

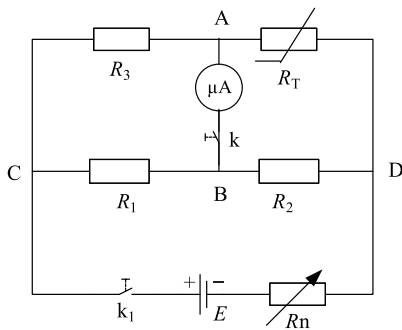


图2 半导体温度计实验电路

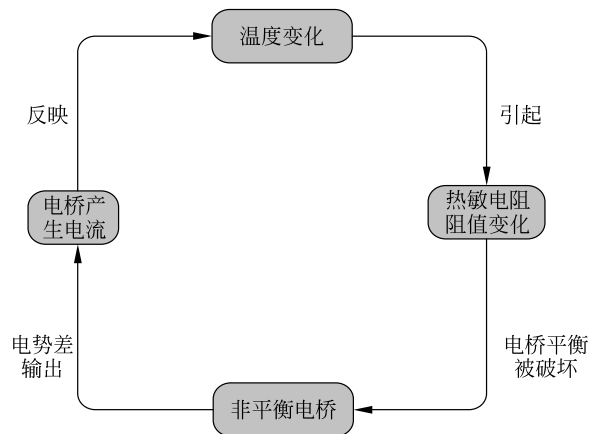


图3 非平衡电桥测量温度示意图

1.3 工作原理

为保证设计的温度计可靠稳定的运行,电桥桥臂电阻的选择很重要。假设流入半导体热敏电阻 R_T 中的电流 I_T 比流入微安表(R_G 为微安表内阻)中的电流 I_G 大得多($I_T \gg I_G$),则电桥两端输出电压为 $U_{CD} = I_T(R_3 + R_T)$ 。设计时取 $R_T =$

R_{T2} (R_{T2} 为温度在 $T_2^{\circ}\text{C}$ 时热敏电阻的阻值), 半导体热敏电阻的最大工作电流 I_T 即可决定 U_{CD} 和供电电源 E 。由电桥电路和基尔霍夫定律列方程组, 可以得到

$$I_G = \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_{T2}}{R_3 + R_{T2}}}{R_G + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_{T2}}{R_3 + R_{T2}}} U_{CD}$$

由 $R_1 = R_2, R_3 = R_{T1}$, 则得出

$$R_1 = R_2$$

$$= \frac{2U_{CD}}{I_G} \left(\frac{1}{2} - \frac{R_{T2}}{R_{T1} + R_{T2}} \right) - 2 \left(R_G + \frac{R_{T1} R_{T2}}{R_{T1} + R_{T2}} \right)$$

实际生产应用中, 图 2 所示电桥两端的电压 U_{CD} 通常低于电源电动势 E , 在电源电路中串接可调电阻器 R_n 实现分压, 可保证电桥两端所需的工作电压 U_{CD} 。这种基于非平衡电桥和热敏电阻的测温方法具有灵敏度高、响应速度快等优点, 因此在许多需要精确测量温度的场合得到了广泛应用。

2 选择仪器及实验实施

2.1 选择仪器和测量方法

分析与综合是辩证统一的关系。分析是综合的基础, 没有分析就谈不上综合; 综合是对后续分析的指导^[5]。本实验的测量电路采用电桥电路^[6-8]。惠斯通电桥是利用比较法测量中值电阻的仪器, 具有操作简便、测量精度高的特点, 被广泛地应用于科学研究^[7-12]。实验中搭建惠斯通电桥电路, 平衡法测量不同温度下热敏电阻的对应电阻值并与标称值对比并分析。平衡后的电桥, 当热敏电阻制成的测温探头置于被测环境中时, 其电阻值会随着环境温度的变化而变化, 电桥平衡被打破, 微安表中将有电流通过。热敏电阻是阻值随温度变化的一种半导体元件。设计半导体温度计, 就是研究热敏电阻的温度特性。对非平衡电桥, 桥臂电阻值的确定关系到测温的准确性。为提高学生综合应用知识的能力, 引导学生用替代法或半偏法, 测出指示装置微安表的表头内阻 R_G 。

2.2 搭建实验电路与测量

实践是创新的源泉。不动手、不善于实践, 就不容易发现问题^[13]。学生自己选取实验器材, 动手搭建半导体温度计实验电路进行测试, 如图 2

所示。学生在已经掌握惠斯通电桥的基础上, 通过以下步骤进行。首先自己查阅资料, 了解半导体热敏电阻的伏安特性、非平衡电桥的组成部分, 掌握非平衡电桥的工作原理及其使用方法, 设计微安表内阻的测定方案。其次, 要根据实际情况用热敏电阻温度传感器自制测温探头, 根据实验室条件确定被测环境温度。如果是用温度变化的水代替被测环境温度, 就必须考虑探头的防水性, 从而减小测量误差; 如果用温度传感实验装置, 就需考虑保温桶的密封性及保温桶内腔的温度变化。最后, 在搭建测量电路时还须考虑选用仪器的准确度级别及正确的操作方法。搭建与测量过程中, 学生通过仔细观察现象、理论分析、发现并排除实验故障, 提高训练实际动脑动手的能力, 做到理论联系实际。

2.3 温度计定标刻盘

将电桥输出端的电势差转换为可读的温度值, 就是对微安表进行定标。定标的过程是通过在已知温度条件下测量微安表的示数, 并记录下对应的温度值, 从而建立起微安表示数与温度之间的对应关系。为了对半导体温度计进行标定, 用非平衡电桥测量热敏电阻阻值与温度的对应关系, 就是把热敏电阻阻值随温度的变化量转换成微安表的偏转格数来量度。以微安表的“0”点作为被测温度的下限, 微安表的满度电流作为被测温度的上限, 上下限温度所对应的电阻值要运用实验测量、电路理论分析与数据处理等多种方法才能得到。此过程是学生在实验数据处理方面的一个重点训练, 可提高学生在观察、思维、想象、实际操作、信息收集与加工等综合应用知识的能力。标注流程如图 4 所示。

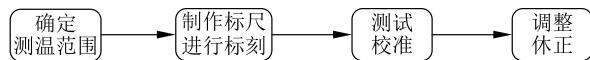


图 4 温度计读数盘刻度标定流程图

3 具体实施方案

课题组针对全国大学生物理实验竞赛对大学物理实验课程进行改革初探, 以惠斯通电桥实验为例, 在完成基础性验证实验的基础上, 进行创新性综合性设计实验, 具体方案见表 1 所示。

表 1 惠斯通电桥实验扩展探究

项目		内容
传统实验项目	实验类型	基础性验证型实验
	实验项目	惠斯通电桥测电阻
	实验目的	1. 掌握惠斯通电桥测电阻的方法； 2. 了解惠斯通电桥的工作原理及应用。
创新实验项目	实验类型	创新扩展性综合探究型实验
	实验项目	基于惠斯通电桥的半导体温度计设计
	实验目的	1. 研究 NTC 热敏电阻随温度变化的关系； 2. 学习并掌握非平衡电桥的工作原理及其在“非电学量”电测量中的应用； 3. 学习继电器的工作原理，并掌握其使用方法；
		4. 了解半导体温度计测温原理，设计制作半导体温度计，用非平衡电桥对半导体温度计进行定标；
		5. 设计出测量范围在 30℃ 至 80℃ 的半导体温度计，并在温度达到 50℃ 及以上时进行报警。
	实验过程设计	1. 学生从拟定的创新实验中选择感兴趣的实验项目，如“基于惠斯通电桥的半导体温度计”设计，4~5 人组成实验小组； 2. 老师给出实验项目，学生在老师的指导下首先进行文献调研； 3. 老师和学生共同讨论文献调研结果，设计实验方案； 4. 学生在老师的指导下进行实验操作，优化实验条件； 5. 制作曲线，完成温度计的定标、定量分析； 6. 拓展实验，完成温度计在实际生产生活中的应用。
	教学效果	1. 学生通过基础性验证实验，已经基本掌握仪器原理和操作，为综合探究性实验的开展打下了基础，通过综合探究性实验，加强了学生对仪器操作能力及理论知识再巩固，提高了动手能力和理论分析能力；
		2. 通过由学生自主选择设计实验，提高了学生的积极性，在查阅文献设计实验方案的过程中，培养了学生的科研习惯；
		3. 在老师的指导下借助继电装置、发光二极管、蜂鸣器等，完成温度计在自动控制电路中的应用——声光报警。建立了探究型的学习模式，使实验教学生活化，让学生真正从理论及内部构造上掌握半导体温度计测量实际温度的方法。

具体实施中主要对教学方案过程进行观察，实验报告进行对比，实验结束与学生面对面进行交流，并反思教学方案的优劣。对普通组（给排水科学与工程 03 班）与课后开放组（应用物理学 01 班）使用不同教学方法（每组 30 人）。普通组用传统的教学方法由老师介绍实验的背景、目的、原理、方法及实验内容后，学生在老师的指导下进行操作，观察实验现象、记录数据，完成实验报告；课后开放组使用上述新的教学方法独立进行。

3.1 实验过程观察分析

具体实验期间，老师随堂跟踪实验学生。两个

组别的同学实验都非常认真，按时出勤、实验、观察现象、记录和处理实验数据。普通组学生大多按照老师预设的步骤进行，达到实验的结果就可以。课后开放组则在实验期间各抒己见，讨论为什么这么设置，参数的选择是否可以改变，用其他方法是不是也可以达到同样的实验结果。说明普通班的学生对实验过程及节点把握较差，需要当面指导的比较多；课后开放组的学生通过提前准备实验方案，讨论，对实验的原理、过程及节点都比较清楚。

3.2 实验报告成绩分析

实验结束后要求学生实验记录数据及现象

整理得到实验结果,进行分析写出实验报告。两组实验报告得分汇总如图5所示。由图5可见,课后开放组实验报告得分明显高于普通组学生,说明课后开放组对实验结果的整理与分析及实验报告的书写方面都显示出了一定的优势,教学方法的改进可能起到了一定的作用。

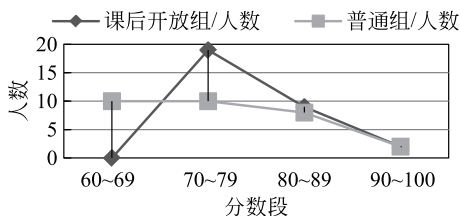


图5 两组实验报告成绩分布

4 教学研究成效

4.1 加强创新意识和创新能力

提升学生对同类产品性能的认识。对制成的温度计进行校准,任意环境温度检测并与标准温度计测温对比,对其误差及原因进行分析、讨论。

提升学生的扩散思维。实验成果用之于生活。将实验进行拓展,增加更多的变量。引导学生加入继电器,发光二极管等电子元件,借助半导体热敏电阻的温度特性设计实现温控电路,应用于需要温度控制的实际场景,如温控报警器等。

提升学生创新能力的训练。实验结束后,学生结合实验过程及心得体会,以小组为单位进行分析、总结、归纳、整理等,写出完整实验报告,制作简短PPT及视频,提交上传。

评价学生学习的成果。鼓励学生积极参加全国大学生物理实验竞赛,获得三等奖。

4.2 扩展创新性实验结果

完成实验平台搭建。具体实验中杜绝“黑匣子”式的仪器,采用可视的自组电桥及水浴温度控制装置,分立的继电器、发光二极管和蜂鸣器等元件实现。真正体现了学生通过需求和目的来主动分析解决问题的思路 and 不断尝试改进实际的解决方案,极大地促进了学生探索的兴趣,提高了学生的实际实践动手能力。

实现多功能测试。创新有原创性与改进性创新,改进性创新具有一定的基础,是在一定基础上进行的再创造。“基于惠斯通电桥的半导体温度计设计实验”项目是在熟知电桥实验原理的基

础上进行的改进性创新。不仅实现测温功能,还可对不同材料的传感器特性进行分析测量。

自由学习。此类设计实验不受时间和课堂规则的限制,学生在过程中对于遇到的问题和新的想法都可以随时交流和探讨。在实验设计和实现中,不再有具体和明确的步骤^[14]。在基本原理和原则不变的情况下,学生从自己的理解和思路出发,可以用简单的仪器、元件最简化的展示基本效果;也可以在基本原理的基础之上进行进一步的改善和优化,呈现基本效果以外的其他现象和用途,如在本实验中在测温的基础之上加入温控报警的功能。这样既增加了实验的趣味性,同时也极大地激发了学生的想象力和创造性。这样学生一方面可以借鉴他人经验,另一方面提高了学生的协作能力和团队意识。

5 实践意义与推广价值

大学物理实验是一门实践性很强的课程,是培育和提高学生科学素质和能力的重要课程之一。通过“基于惠斯通电桥的温度计设计实验”项目的实施,可以将其应用于实践教学。回顾实验教学研究过程,具体实践意义与价值如下:

逐步达到学习目标。了解惠斯通电桥在生产生活中的实际应用,并利用惠斯通电桥、温度传感器及检测装置微安表搭建温度测量装置。通过项目内容的训练,学生逐步实现主动分析与独立解决问题的能力。

充实实验项目内容。在基础实验-惠斯通电桥测电阻上拓展了综合设计创新的内容-基于惠斯通电桥的温度计设计,打破了力、热、光、电实验各自独立的架构。惠斯通电桥实现温度计实验是基础到综合设计性实验的过渡,实现过程中将多个知识点及多个简单实验结合,在教学上有一定推广意义和创新意义。几乎所有的物理实验项目都可以按照设计性、研究性实验来完成。

实践教学应用。通过实验项目,引导学生探讨最佳实验方案、组装实验装置、分析操作步骤、注意实验条件。可以应用于物理专业创新实验教学和全校的开放实验教学中,也可以应用于物理专业本科生的毕业设计。对指导学生积极参加各类物理学科竞赛和创新训练项目都有很大的帮助。

教学相长。实验教学创新能够促进教师专业深度发展。在培养学生的动手能力、提高学生创

新思维和意识的同时也可以促进教师的专业发展。教师要学会将课堂的宽度从一节课延伸到一系列课程,将课堂的深度从单纯地测量数据变成学生养成受益一生的核心素养。

实验教学生活化。大学物理实验教学中引导学生学习生活相联系,实验教学生活化,将大学物理实验课堂的格局放大,让学习真实地发生,将课堂的广度从实验室走向社会生活的方方面面。

6 结语

通过对基于惠斯通电桥的半导体温度计设计实验探究,可以发现设计创新扩展性实验综合性较强,适用于有一定实验基础的学生,适宜大三阶段学生推广;适合于课外时间进行,且应具备一定专业基础;在学习过程中更强化实验过程的引导;实际执行过程中在教师的引导下需具备自学的能力。

创新扩展性实验与验证性实验相比,对培养学生学习,锻炼动手能力,开发学生智力,具有一定的综合应用及促进作用。学生通过实验中的合作,不仅是对扩展实验和物理实验竞赛内容的完成,还展示了实验中以能力为本的价值取向;不仅是成员之间自评与互评表达能力的锻炼,同时也体现了良好的团队氛围和合作精神,对后期毕业设计、社会岗位就业等都有更大的适应性。

参 考 文 献

- [1] 方心葵,葛海燕,陈鲁勇. 验证性实验教学改革的实践与探索[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(3): 212-216.
FANG X K, GE H Y, CHEN L Y. Practice and exploration of verification experiment teaching[J]. Research and Exploration in laboratory, 2022, 41(3): 212-216. (in Chinese)
- [2] 蔡鹰,李思东,吴湛霞,等. 高校验证性实验教学质量的控制[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(8): 14-17.
CAI Y, LI S D, WU Z X, et al. Quality control of confirmatory experimental teaching in colleges and universities[J]. Experimental Technology and Management, 2016, 33(8): 14-17. (in Chinese)
- [3] 熊蕊. 用创新理念引领实践,用实践探究激励创新[J]. 中国科教创新导刊, 2007(427): 131-133.
XIONG R. Leading practice with innovative ideas, stimulating innovation with practical inquiry[J]. China Education Innovation Herald, 2007(427): 131-133. (in Chinese)
- [4] 何玲,黎加厚. 促进学生深度学习[J]. 现代教育, 2005(5): 29-30.
HE L, LI J H. Promoting deep learning[J]. Modern Education, 2005(5): 29-30. (in Chinese)
- [5] 杨昌权. 大学生物理实验创新设计[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2013.
YANG C Q. College physical experiment and creation design[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2013. (in Chinese)
- [6] 余雪里,张昱. 大学物理实验[M]. 北京: 北京大学出版社, 2022.
YU X L, ZHANG Y. College physical experiment[M]. Beijing: Peking University Press, 2022. (in Chinese)
- [7] 杨玲珍,王云才. 大学物理实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
YANG L Z, WANG Y C. University physics experiment course[M]. Beijing: Science Press, 2023. (in Chinese)
- [8] 杨述武,孙迎春等. 普通物理实验-电磁学部分[M]. 北京: 高等教育出版社, 2022.
YANG S W, SUN Y C, et al. General physics experiment-electromagnetism part [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese)
- [9] 林丽梅,郭维熊. 惠斯通电桥实验中桥臂电阻的确定[J]. 大学物理实验, 2016, 29(6): 36-39.
LIN L M, GUO W X. Determine the bridge arm resistance of the Wheatstone bridge[J]. Physical Experiment of College, 2016, 29(6): 36-39. (in Chinese)
- [10] 罗钊,翁存程,蒋丽钦. 惠斯通电桥实验的分析[J]. 大学物理实验, 2023, 36(2): 66-68.
LUO Y, WENG C C, JIANG L Q. Analysis of Wheatstone bridge experiment[J]. Physical Experiment of College, 2023, 36(2): 66-68. (in Chinese)
- [11] 宋伟,高永祥. 从“半导体温度计的研制”看设计性实验的优越性[J]. 物理通报, 1998(12): 25-26.
SONG W, GAO Y X. The superiority of designed experiments from the “development of semiconductor thermometers”[J]. Physics Bulletin, 1998(12): 25-26. (in Chinese)
- [12] 张俊玲. 开尔文电桥的灵敏度研究[J]. 实验室科学, 2012(3): 101-103.
ZHANG J L. Study on the sensitivity of Kelvin bridge[J]. Laboratory Science, 2012(3): 101-103. (in Chinese)
- [13] 胡德敬,谢嘉祥,曹正东. 设计性物理实践集锦: 创新教育之实践[M]. 上海: 上海教育出版社, 2002.
HU D J, XIE J X, CAO Z D. A collection of design physics practices: Practice in innovative education[M]. Shanghai: Shanghai Education Publishing House, 2002. (in Chinese)
- [14] 王伟,颜学义,彭细华. “电子温度计的设计和制作”教学项目设计[J]. 岳阳职业技术学院学报, 2011, 26(4): 18-22, 39.
WANG W, YAN X Y, PENG X H. Teaching project design of “The Design and Production of Electronic Thermometer”[J]. Journal of Yueyang Vocational and Technical College, 2011, 26(4): 18-22, 39. (in Chinese)