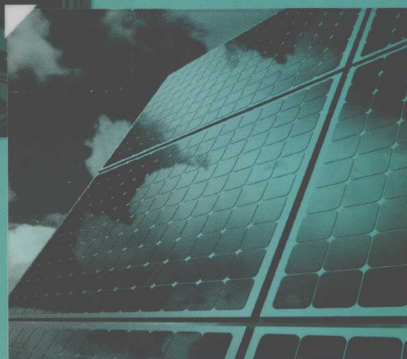
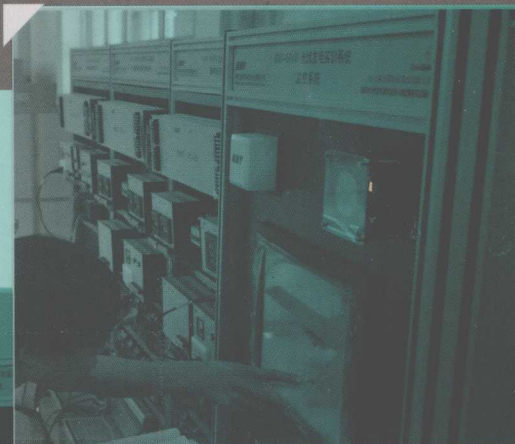


GUANGFU FADIAN XITONG ANZHUANG
YU TIAOSHI SHIXUN JIAOCHENG

光伏发电系统安装 与调试实训教程



刘 靖 主编
狄建雄 俞亚珍 副主编



化学工业出版社

GUANGFU FADIAN XITONG ANZHUANG
YU TIAOSHI SHIXUN JIAOCHENG

光伏发电系统安装 与调试实训教程

刘 靖 主编

狄建雄 俞亚珍 副主编



NLIC2970819637



化学工业出版社

北京

本书从太阳能电池的基础知识入手,与前序课程电力电子技术、单片机控制技术等紧密结合,采用以工作任务(项目)为导向的教学方法,内容包括太阳能电池光电转换的应用,太阳能电池发电与跟踪技术,太阳能存储系统与蓄电池充放电控制技术、特性及设计等。书后附有“光伏发电系统安装与调试”赛项任务书和评分标准,供职业院校备赛参考。

本书可作为高职高专院校能源类、制造类、电子信息类、自动化类及相关专业的实训教材,也可作为全国职业院校技能大赛中“光伏发电系统安装与调试”赛项的备赛指导书。

图书在版编目(CIP)数据

光伏发电系统安装与调试实训教程 / 刘靖主编. —北京:
化学工业出版社, 2012. 6
ISBN 978-7-122-14240-5

I. 光… II. 刘… III. ①太阳能发电-发电设备-设备安装-高等职业教育-教材②太阳能发电-发电设备-调试方法-高等职业教育-教材 IV. TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 095640 号

责任编辑: 刘 哲 张建茹
责任校对: 王素芹

文字编辑: 吴开亮
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张13¼ 字数341千字 2012年7月北京第1版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

序

光伏发电系统安装与调试实训教程
GUANGFU FADIAN XITONG ANZHUANG YU TIAOSHI SHIXUN JIAOCHENG

2007年以来,教育部举办了各类型高职高专职业技能大赛,这既是对职业教育质量和办学水平的检验,也是推动职业院校深化教学改革、加强校企合作、工学结合的重要手段。以技能大赛为契机,促进师生共同发展,充分发挥职业技能大赛在人才培养中的作用,实现职业技能大赛与职业院校常规教学的有机结合,是我们面临的新任务。

为此,我们制定的高职高专技能大赛的主题都是与高职学生将来的职业能力息息相关的;而且,通过各级别选拔赛,使师生广泛参与,接受大赛的锤炼,共同提高实践能力,达到提高专业技能水平的目的;最终目的是大赛与教学的有效融通,构建师生广泛参与的大赛常规化平台,推进教学内容与技能大赛的融合。

根据教育部的统一部署,教育部高职高专能源类专业教学指导委员会新能源分教学指导委员会在2011年12月的工作会议上制定了将2011年大赛内容迅速转化为教学资源《光伏发电系统安装与调试实训教程》的规划,由部分取得大赛一等奖的院校参加,成立了大赛成果转化教学资源的建设小组。

本书以大赛工作任务为导向,加入部分基础实训作为引导,较好地体现了“做中学”的指导思想,是利用大赛设备实现高水平常规教学的典范。通过完成任务方式的学习,学生可以掌握光伏发电产业全部知识和技能,有效提高学生的知识应用能力。

希望广大应用该书的高职高专师生踊跃提出自己的建议,发现问题及时与课题组联系,不断改进,共同为职业教育的发展做出更大贡献。

教育部高职高专能源类专业教学指导委员会
新能源类专业分教学指导委员会

主任委员:戴裕崴

2012年2月15日

前言

光伏发电系统安装与调试实训教程
GUANGFU FADIAN XITONG ANZHUANG YU TIAOSHI SHIXUN JIAOCHENG

本书作为教育部高职高专能源类专业教学指导委员会新能源分教学指导委员会教学资源建设任务,实现职业技能大赛引领教育教学方向的基本思想,将职业技能大赛的成果进一步转化为职业教育资源,以培养高技能型人才为目标,突出高等职业教育的特点,适合高职高专工科学生使用。

《光伏发电系统安装与调试实训教程》是太阳能电池及光伏系统相关专业学生学习的专业基础课程。本书从太阳能电池的基础知识入手,与前序课程电力电子技术、单片机控制技术等紧密结合,系统地学习光伏发电系统安装与调试的知识。本书遵循以工作任务(项目)为导向的教学方法,借鉴了新加坡南阳理工学院的项目教学方法的理念,比较适合我国高职学生学习,每个学习情境都有若干个具体工作任务,通过这些任务的完成,使学生对本学习情境内容有总体的了解,也使学生增强了学习兴趣。通过本教程的学习,能够对光伏技术建立清晰的认知,掌握其实用技术,具备在实践中进一步应用的能力。

《光伏发电系统安装与调试实训教程》编写组的全体成员感谢教育部高职高专能源类专业教学指导委员会新能源类专业分教学指导委员会对系列教材给予的指导和规划,感谢南京康尼科技有限公司马晶副总经理以及工程技术人员的支持,为本书编写提供大量的资料和实例,感谢中国化学物理电源协会刘彦龙秘书长及相关工作人员、中国电子科技集团第十八研究所的李文滋副总工程师和工程技术人员对编写工作的支持与指导,感谢浙江天煌科技有限公司给予的帮助,并感谢化学工业出版社对本书的出版与发行提供的鼎力支持。

本书主要作为高等院校新能源相关专业学生的教材及参考书,并可对光电子、电气自动化、机电等相关领域有一定的参考价值。

本书由天津轻工职业技术学院刘靖任主编,负责组织编写规划,统稿等工作,南京工业职业技术学院狄建雄、常州轻工职业技术学院俞亚珍任副主编。刘靖完成第1、5(部分)、6情境编写,俞亚珍、蒋正炎完成第2、3情境编写,狄建雄、李金钟完成第4情境编写,天津轻工职业技术学院沈洁完成第5情境的部分审校和修改。

编写小组期望,随着掌握光伏发电技术、尖端知识技能的毕业生逐年增加,能够为社会提供优秀的高端技能型人才,以参与并推进全球光伏工业的高速发展。

限于编者水平和时间所限,书中会有不少疏漏和不妥,恳请广大读者不吝赐教。

《光伏发电系统安装与调试实训教程》编写组

2012年2月15日

目 录

光伏发电系统安装与调试实训教程

GUANGFU FADIAN XITONG ANZHUANG YU TIAOSHI SHIXUN JIAOCHENG

学习情境一 太阳能电池光电转换的应用

工作任务一 太阳能电池板的能量转换	1
一、太阳能电池能量转换的基础知识	1
二、太阳能电池组件的定义、结构	3
三、太阳能电池板的应用特性	4
工作任务二 太阳能电池板伏安特性	5
一、太阳能电池电流-电压曲线基础知识	5
二、太阳能电池负载电流的计算	5
三、太阳能电池板伏安曲线及最大功率输出点的测试	7
工作任务三 环境对光电转换的影响	8
一、温度对太阳能电池转换的影响	8
二、照度对太阳能电池转换的影响	8
三、辐射强度对太阳能电池板性能的影响	9
四、太阳能电池转换效率的定义	9
五、影响转换效率因素实训内容	10
六、讨论题	11
工作任务四 太阳能电池直接负载设计应用	11
一、太阳能电池直接负载适应性设计	11
二、太阳电池直接负载应用	12
三、实训报告	12
工作任务五 太阳能电池转换智能控制器应用	12
一、太阳能电池转换控制器基本知识	12
二、太阳能电池转换控制器参数与设置	14
三、实训步骤	15
四、实训报告	15
工作任务六 蓄电池过充与保护应用	16
一、蓄电池充放电基础知识	16
二、蓄电池放电控制基本原理	16
三、蓄电池过充、过放保护工作原理	17
四、控制器欠压、过压检测控制电路工作原理	18

五、实训步骤	18
六、实训报告	19

学习情境二 太阳能电池发电与跟踪技术 20

工作任务一 太阳能电池板安装与调试	20
一、太阳能电池工作的基础知识	20
二、太阳能电池组件的设计、制作与工艺文件	20
三、太阳能电池板的安装与调试	31
工作任务二 追日跟踪系统的安装与调试	32
一、追日跟踪的基础知识	32
二、追日跟踪系统与 PLC 控制系统的对应关系	34
三、追日跟踪装置与系统的安装与接线	36
工作任务三 通用电气公司 PLC 的安装与调试	38
一、通用电气公司 PLC 的基础知识与软件应用	38
二、通用电气公司 PLC 的安装、接线	43
三、PLC 控制系统的接线与编程	45
四、系统上电联调试车	54

学习情境三 太阳能存储系统与蓄电池技术 55

工作任务一 蓄电池的安装与调试	55
一、蓄电池工作的基础知识	55
二、蓄电池的选型、容量匹配	56
三、蓄电池的安装与调试	57
工作任务二 智能仪表及断路器安装调试	59
一、断路器的功能、智能仪表的基础知识	59
二、断路器、智能仪表的安装与接线	61
三、智能仪表控制功能调试	63
工作任务三 人机对话、通信、CPU、控制主回路模块安装调试	65
一、人机对话、通信、CPU、控制主回路模块的基础知识	65
二、人机对话、通信、CPU、控制主回路模块的安装、接线	67
三、人机对话、通信、CPU、控制主回路模块的参数设置与调试	72
工作任务四 电压采集、电流采集、MOS 管驱动、继电器 驱动模块安装调试	72
一、MOS 管驱动、继电器驱动模块的基础知识	72
二、电压采集、电流采集、MOS 管驱动、继电器驱动模块的安装与接线	73
三、参数采集与调试运行	77
工作任务五 能量转换存储系统上电调试	78
一、能量转换存储系统的基础知识	78

二、LED 直流负载的基本工作基础知识	82
三、能量转换存储系统、直流负载的硬件安装与接线	83
四、能量转换存储系统上电调试运行	83

学习情境四 离网逆变负载系统控制技术 91

工作任务一 变压器、互感器的安装与调试	91
一、变压器、互感器的基础知识	91
二、变压器、互感器的选用	97
三、变压器的安装、接线和调试	99
四、互感器的使用注意事项	101
工作任务二 交流、直流仪表安装调试	101
一、直流仪表与智能仪表的基础知识	101
二、智能仪表的安装、接线	103
工作任务三 人机对话、通信、CPU、逆变主回路模块安装调试	112
一、逆变基础知识	112
二、各模块原理图	113
三、人机对话模块参数设置与调试	113
工作任务四 交直流电压电流采集模块、IGBT、继电器驱动模块安装调试	121
工作任务五 离网逆变负载系统上电调试	129

学习情境五 监控系统 131

工作任务一 交流负载灯、电扇的安装与调试	132
一、认识实训设备	132
二、实训过程	132
三、实训报告	134
工作任务二 工控机控制技术	134
一、认识实训设备	134
二、工控机工作的基础知识	135
三、后台主机、显示器的安装、接线	137
工作任务三 POWER 9000 软件平台支撑系统安装调试	137
一、数据库管理软件	137
二、网络管理系统	138
三、图形管理系统	138
四、报表系统	140
五、系统管理	141
工作任务四 工控机功能调试与软件安装	142
一、系统调试使系统符合 POWER 9000 软件的要求	142
二、安装 SQL Server 2000	142
工作任务五 Power 9000 监控软件应用	152
一、软件界面及登录	152

二、操作及参数设置	152
学习情境六 光伏电池实际应用	167
工作任务一 太阳能路灯应用	167
一、工作任务要求	167
二、太阳能路灯的基础知识与应用优势	167
三、太阳能路灯的应用领域	167
四、太阳能路灯安装与参数选择	168
五、工作任务步骤	168
六、实训报告	168
工作任务二 太阳能交通警示灯应用	168
一、工作任务要求	168
二、太阳能警示灯基础知识	169
三、工作任务步骤	169
四、实训报告	170
工作任务三 太阳能供电无线气象站的应用	170
一、工作任务要求	170
二、工作内容	170
三、工作任务完成步骤	170
四、实训报告	170
附录	171
附录一 2011 年北京市高职技能大赛	171
附录二 2011 年安徽省职业院校技能大赛 (高职组)	178
附录三 2011 年浙江省职业院校技能大赛 (高职组)	190
附录四 2011 年全国职业院校技能大赛 (高职组)	196
参考文献	204

学习情境 一

太阳能电池光电转换的应用

工作任务一 太阳能电池板的能量转换

一、太阳能电池能量转换的基础知识

1. 认识实训设备

THEISP-1 型太阳能电源技术及应用装置, 由电池板型材桌和主控制台两部分组成。

① 实训装置占地面积少, 节约实验室用地, 无需设置电源控制盘、电缆沟和水泥墩等辅助设施, 可减少基建的投资。试验装置只需三相四线的电源 (测量设备用电) 即可投入使用, 实验室建设周期短。

② 实训装置布局合理, 外形美观, 面板示意图明确、清晰、直观。实训连接线采用高可靠的弹性结构手枪式插头, 电路连接方式安全可靠, 迅速简便。实训台的底部安装有带自锁功能的轮子, 便于移动和固定。

③ 控制台内部供电设有漏电保护装置, 可以很好地保护操作者和试验装置的安全, 为开放性的实验室创造了安全条件。

④ 实训装置采用典型的太阳能光伏应用模型, 各个部分清晰明了。

2. 控制台技术参数

① 输入电压 三相四线制, $380\text{V} \pm 10\%$, 50Hz 。

② 工作环境 温度 $-5 \sim 40^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $< 85\%$ (25°C), 海拔 $< 4000\text{m}$ 。

③ 装置容量 $\leq 2000\text{W}$ 。

3. 实训前准备

① 实训开始前应详细熟悉台子的相关组成部分。

② 实训开始前应先保证实训装置电源处于断开状态。

③ 实训开始前应学习实训指导书中相关实训内容。

④ 实训组件各部分的连接要严格按照实训步骤进行。

4. 注意事项

① 严格按正确的操作给实训装置上电和断电。

② 在对太阳能的各个部分进行连线时, 应按照实训步骤的要求连接, 不能越步操作, 否则将会影响装置使用寿命。

③ 实训过程中在操作太阳能智能控制器前应先详细阅读相关使用说明。



④ 在对太阳能电池板进行相关操作时一定要注意,以免划伤表面。

⑤ 在用充电器对蓄电池进行充电时,注意必须将太阳能电池板充电回路断开,同时也必须将所有的负载开关断开,以避免充电器直接向负载供电从而损坏负载。

5. 实训的进行

(1) 建立小组,合理分工

每次实训都以小组为单位进行,每组由3~5人组成,实训进行中的接线、负载、电压或电流调节、记录数据等工作每人应有明确的分工,以保证实训操作的协调,使记录的数据准确可靠。

(2) 按要求接线

根据实训线路图及所选组件、仪表,按图接线,接线要简单明了。

(3) 运行

接线结束后,打开模拟光源,太阳能电池板因接受到光而产生电能,电能通过航空电缆线送到主控制台,经过太阳能智能控制器对蓄电池进行充电,同时也给相应的负载供电。

(4) 测取数据

将相应的电流表和电压表接入回路,测量相应的电流值和电压值,记录、绘制相关曲线。

6. 实训报告

这是实训的最后阶段,应对实训数据进行整理、绘制波形和图表、分析实训现象并撰写实训报告。每位实训参与者要独立完成一份实训报告,实训报告的编写应持严肃认真、实事求是的态度。如实训结果与理论有较大出入时,不得随意修改实训数据和结果,而应用理论知识来分析实训数据和结果,解释实训现象,找出引起较大误差的原因。

实训报告是根据实测数据和在实训中观察发现的问题,经过自己分析研究或分析讨论后写出的实训总结和心得体会,应简明扼要、图表整洁、结论明确。

实验报告应包括以下实训内容:

- ① 实训名称、实训班级、实训同组者姓名、实训室温等;
- ② 实训目的、实训线路、实训内容;
- ③ 实训仪器,仪表的型号、规格、铭牌数据及实验装置编号;
- ④ 实训数据整理、列表、计算,并列出计算所用的计算公式;
- ⑤ 画实训实验数据相对应的特性曲线及记录的波形;
- ⑥ 根据实训理论知识对实训结果进行分析总结,得出正确的结论;
- ⑦ 对实训中出现的现象、遇到的问题进行分析,写出心得体会,并对实验提出自己的建议和改进措施;

⑧ 实训报告应写在规定的实训报告纸上,保持整洁;

⑨ 每次实训每人独立完成一份报告,按时送交实训指导师批阅实训报告。

7. 安全操作规程

为了按时完成实训,确保实训与设备的安全,必须严格遵守如下规定的安全操作规程。

① 实验时,人体不可接触带电线路。

② 接线或拆线都必须在切断电源的情况下进行。

③ 学生独立完成接线或改接线路后必须由实训指导老师检查和允许,并使组内其他同学引起注意后方可接通电源。实验中如发生装置故障,应立即切断电源,经查清问题和妥善处理故障后,才能继续进行实验。

④ 接通实训装置前应先检查实训回路是否存在短路,以免损坏实训仪表或电源。



⑤ 实验室总电源或实验台控制屏上的电源应由实验指导教师来控制, 其他人员只能经指导教师允许后方可操作, 不得自行合闸。

二、太阳能电池组件的定义、结构

太阳能是一种辐射能, 它必须借助能量转换器才能转换成电能, 把太阳能(或其他光能)转换成电能的能量转换器, 叫做太阳能电池板。

1. 太阳能电池板结构

图 1-1 所示是一个 p 型硅材料制成的 n^+/p 型常规太阳能电池的结构示意图。

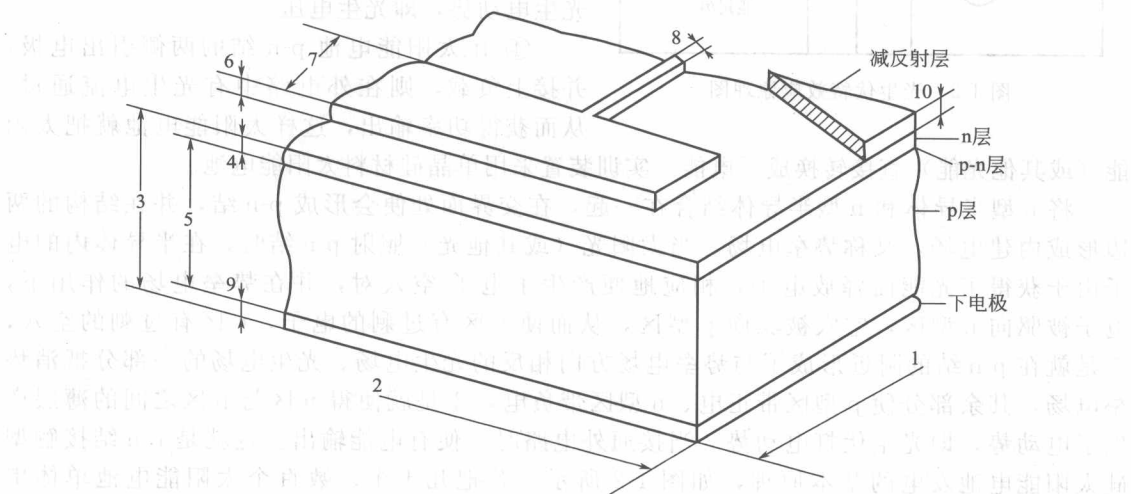


图 1-1 n^+/p 型太阳能电池基本结构示意图

1—电池长度; 2—电池宽度; 3—电池厚度; 4—扩散层厚度; 5—基体厚度; 6—上电极母线厚度;
7—上电极母线宽度; 8—上电极栅线宽度; 9—下电极厚度; 10—减反射层厚度

① p 层为基体, 基体材料称为基区层, 简称基区。

② p 层上面是 n 层, 它又称为顶区层, 有时也称为发射区层, 简称顶层。它是在同一块材料的表面层用高温掺杂扩散方法制得的, 因而又称为扩散层。由于它通常是重掺杂的, 故常标记为 n^+ 。扩散层处于电池的正面。所谓正面就是光照的表面, 所以也称为光照面。

③ p 层和 n 层的界面处是 p-n 结。

④ 扩散层上有与它形成欧姆接触的上电极, 它由母线和若干条栅线组成。栅线是通过母线连接起来的。

⑤ 基体下面有与它形成欧姆接触的下电极。

⑥ 上、下电极均由金属材料制作, 其功能是将由电池产生的电能引出。

⑦ 在电池的光照面有一层减反射膜, 其功能是减少光的反射, 使电池接受更多的光。

如果用 n 型硅材料做基体, 即可制成 p^+/n 型硅太阳能电池。其结构与上述的 n^+/p 型硅太阳能电池相同, 只不过基体的硅材料是 n 型, 而扩散层材料是 p 型。

2. 太阳电池能量转换基础

太阳能电池工作原理的基础, 是半导体 p-n 结的光生伏特效应。光生伏打效应就是当物体受到光照时, 其体内的电荷分布状态发生变化而产生电动势和电流的一种效应。

将半导体太阳能电池的发电过程概括成如下 4 点。

① 首先是收集太阳光和其他光使之照射到太阳能电池表面上。

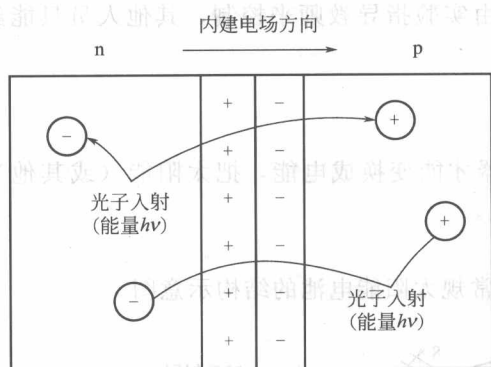


图 1-2 光生伏特效应原理图

② 太阳能电池吸收具有一定能量的光子，激发出非平衡载流子（光生载流子）——电子-空穴对。这些电子和空穴应有足够的寿命，在它们被分离之前不会复合消失。

③ 这些电性符号相反的光生载流子在太阳能电池 p-n 结内建电场的作用下，电子-空穴对被分离，电子集中在一边，空穴集中在另一边，在 p-n 结两边产生异性电荷的积累，从而产生光生电动势，即光生电压。

④ 在太阳能电池 p-n 结的两侧引出电极，并接上负载，则在外电路中有光生电流通过，从而获得功率输出，这样太阳能电池就把太阳

能（或其他光能）直接转换成了电能。实训装置采用单晶硅材料太阳能电池。

将 p 型半导体和 n 型半导体结合在一起，在交界面处便会形成 p-n 结，并在结构的两边形成内建电场，又称势垒电场。当太阳光（或其他光）照射 p-n 结时，在半导体内的电子由于获得了光能而释放电子，相应地便产生了电子-空穴对，并在势垒电场的作用下，电子被驱向 n 型区，空穴被驱向 p 型区，从而使 n 区有过剩的电子，p 区有过剩的空穴；于是就在 p-n 结的附近形成了与势垒电场方向相反的光生电场。光生电场的一部分抵消势垒电场，其余部分使 p 型区带正电、n 型区带负电，于是就使得 n 区与 p 区之间的薄层产生了电动势，即光生伏打电动势。当接通外电路时，便有电能输出。这就是 p-n 结接触型硅太阳能电池发电的基本原理，如图 1-2 所示。若把几十个、数百个太阳能电池单体串联、并联起来封装成为太阳能电池组件，在太阳光（或其他光）的照射下，便可获得具有一定功率输出的电能。

三、太阳能电池板的应用特性

1. 实训步骤

① 合上主控制屏空气开关，启动控制屏。

② 在主控制屏上“模拟光源控制部分”合上开关“SD1、SD2、SD3”，将三盏模拟光源灯打开，之后再闭合开关“SF1、SF2、SF3”，将所有的冷却风扇打开。

③ 由上分析可知，此时太阳能电池板由于接收到“光”而将产生“电”。

④ 断开 K1、K2，在 V1 端口接入直流电压表，测量此时太阳能电池板产生的电压，记录数值。

⑤ 断开 K1、K2，将 V1 端口用实验导线短接，用电流测量导线将直流电流表接入 A1，测量电流，记录数值。

⑥ 移动太阳能电池板，改变光源与太阳能电池板的距离，重复步骤④、⑤，记录电压值和电流值。

2. 实训报告

① 按照实训要求写出实训报告，填写表 1-1。

② 试述实训过程中测量电压和电流值时，应将电流表和电压表置于哪个挡位，可以保证测量精度最高？

③ 叙述太阳能电池板的发电过程。



表 1-1 实训报告表

PV 板-光源之间距离/cm		开路电压/V		短路电流/A	
100					
50					
0					
分工情况	接线	负载	电压调节	电流调节	记录数据

工作任务二 太阳能电池板伏安特性

一、太阳能电池电流-电压曲线基础知识

硅太阳能电池是利用半导体光生伏特效应做成的半导体器件。光照射到电池上可呈现多种不同的情形,为了尽可能将太阳能电池的能量转换效率最大化,必须设计使之得到最大的吸收以及反射后的吸收。

而当太阳光照射到电池上时,电池的电压与电流的关系(即伏安特性)可以简单用图 1-3 所示的特性曲线来表示,图中: U_{OC} 为开路电压; I_{SC} 为短路电流; U_{mp} 为最佳工作电压; I_{mp} 为最佳工作电流。

最佳工作点对应电池的最大出力 P_m ,其最大值由最佳工作电压与最佳工作电流的乘积得到。实际使用时,电池的工作受负载条件、日照条件的影响,工作点会偏离最佳工作点。

1. 开路电压 U_{OC}

光伏电池电路将负荷断开测出两端电压,即 $I=0$,此时的电压称为开路电压。

2. 短路电流 I_{SC}

光伏电池的两端是短路状态时测定的电流,即 $U=0$,此时的电流称为短路电流。

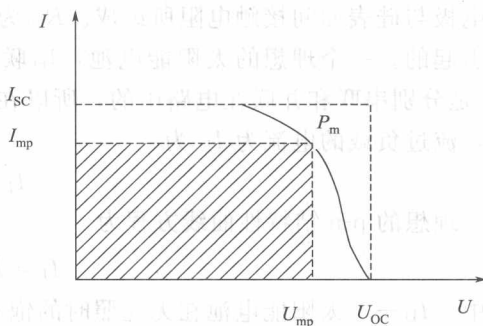


图 1-3 电池的伏安特性曲线

太阳能电池(组件)的电压上升时,例如

通过增加负载的电阻值或电池(组件)的电压从 0(短路条件下)开始增加时,电池(组件)的输出功率亦从 0 开始增加;当电压达到一定值时,功率可达到最大,这时当阻值继续增加时,功率将越过最大点,并逐渐减少至 0,即电压达到开路电压 U_{OC} 。电池(组件)输出功率达到最大的点,称为最大功率点;该点所对应的电压,称为最大功率点电压 U_{mp} ,又称为最大工作电压;该点所对应的电流,称为最大功率点电流,又称为最大工作电流 I_{mp} ;该点的功率,则称为最大功率 P_m 。

二、太阳能电池负载电流的计算

太阳能电池的电路及等效电路如图 1-4 所示,其中 R_L 为电池的外负载电阻。当 $R_L=0$ 时,所测得的电流为电池的短路电流。所谓短路电流 I_{SC} ,就是将太阳能电池置于标准光源的照射下,在输出端短路时,流过太阳能电池两端的电流。测量短路电流的方法,是用内阻小于 1Ω 的电流表接在太阳能电池的两端。 I_{SC} 值与太阳能电池的面积大小有关,面积越大,

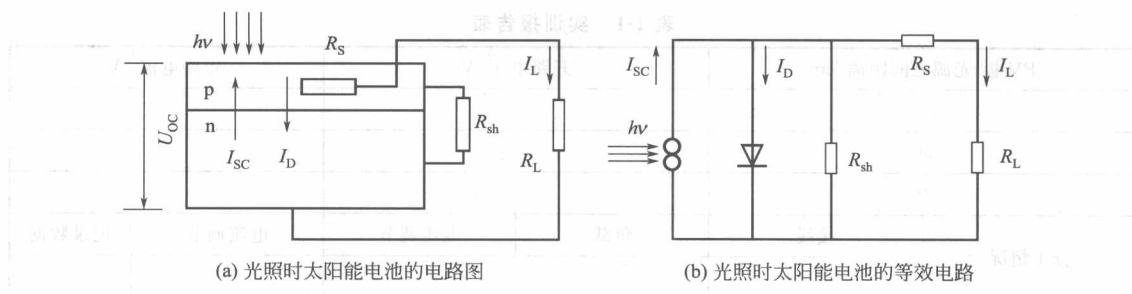


图 1-4 太阳能电池的电路及等效电路

电流越大。一般来说, 1cm^2 硅太阳能电池的 I_{SC} 值约 $16\sim 30\text{mA}$ 。同一块太阳能电池, 其 I_{SC} 与入射光的辐照度成正比; 当环境温度升高时, I_{SC} 值略有上升, 一般温度每升高 10°C , I_{SC} 值约上升 $78\mu\text{A}$ 。当 $R_{\text{L}} \rightarrow \infty$ 时, 所测得的电压为电池的开路电压。所谓开路电压 U_{OC} , 就是将太阳能电池置于 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 的光源照度下, 在两端开路时太阳能电池的输出电压值。可用高内阻的直流毫伏计测量电池的开路电压。太阳能电池的开路电压, 与光谱辐照度有关, 与电池面积的大小无关。在 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 的光谱辐射照度下, 硅太阳能电池的开路电压为 $450\sim 600\text{mV}$, 最高可达 690mV 。当入射光谱辐照度变化时, 太阳能电池的开路电压与入射光谱辐照度的对数成正比, 当环境温度升高时, 太阳能电池的开路电压值将下降, 一般温度每上升 10°C , U_{OC} 值约下降 $2\sim 3\text{mV}$ 。 I_{D} (二极管电流) 为通过 p-n 结的总扩散电流, 其方向与 I_{SC} 相反。 R_{S} 为串联电阻, 它主要由电池的体电阻、表面电阻、电极导体电阻和电极与硅表面间接触电阻所组成。 R_{sh} 为旁漏电阻, 它是由硅片的边缘不清洁或体内的缺陷引起的。一个理想的太阳能电池, 串联电阻 R_{S} 很小, 而并联电阻 R_{sh} 很大。由于 R_{S} 和 R_{sh} 是分别串联和并联在电路中的, 所以在进行理想的电路计算时, 它们可以忽略不计。此时, 流过负载的电流为 I_{L} 为

$$I_{\text{L}} = I_{\text{SC}} - I_{\text{D}}$$

理想的 p-n 结特性曲线方程为

$$I_{\text{L}} = I_{\text{SC}} - I_{\text{D}} e^{\frac{qU}{AKT}-1}$$

式中 I_{D} ——太阳能电池在无光照时的饱和电流, A;

q ——电子电荷, C ;

U ——电压, V;

K ——玻尔兹曼常数;

T ——热力学温度, K;

A ——常数因子 (正偏电压大时 A 值为 1, 正偏电压小时 A 值为 2);

e ——自然对数的底。

当 $I_{\text{L}} = 0$ 时, 电压 U 即为 U_{OC} , 可用下式表示:

$$U_{\text{OC}} = \frac{AKT}{q} \ln \left(\frac{I_{\text{SC}}}{I_{\text{D}}} + 1 \right)$$

根据以上两式作图, 可得到太阳能电池的电流-电压关系曲线, 如图 1-5 所示。这个曲线可简称为 I - U 曲线或伏安曲线。

图 1-5 中, 曲线 1 是二极管的暗伏-安关系曲线, 即无光照时太阳能电池的 I - U 曲线; 曲线 2 是电池接受光照后的 I - U 曲线, 它可由无光照时 I - U 曲线向第四象限位移 I_{SC} 得到。经过坐标交换, 最后可得到常用的光照太阳能电池的电流-电压特性曲线, 如图 1-6 所示。

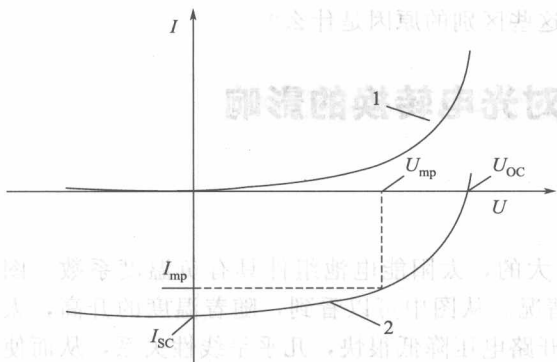


图 1-5 太阳能电池的电流-电压关系曲线

1—未受光照；2—受光照

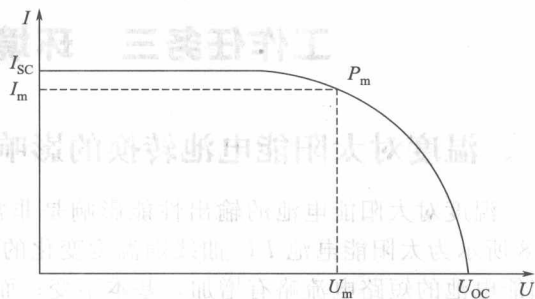


图 1-6 常用的太阳能电池电流-电压特性曲线

I —电流； I_{sc} —短路电流； I_m —最大工作电流；
 U —电压； U_{oc} —开路电压； U_m —最大工作电压；
 P_m —最大功率

太阳能电池的电流-电压特性曲线显示了通过太阳能电池（组件）传送的电流 I_m 与电压 U_m 在特定的太阳辐照度下的关系。

如果太阳能电池（组件）电路短路，即 $U=0$ ，此时的电流为短路电流 I_{sc} ；如果电路开路，即 $I=0$ ，此时的电压为开路电压 U_{oc} 。太阳能电池（组件）的输出功率等于流经该电池（组件）的电流与电压的乘积，即 $P=UI$ 。因太阳能电池板伏安特性测试受太阳辐照度、太阳光谱分布和太阳能电池（组件）的工作温度影响，其标准条件是：光谱辐照度 $1000\text{W}/\text{m}^2$ ，光谱 AM1.5，电池温度 25°C 。因受条件限制，实训设备测试出的伏安特性曲线可能和标准的有差异。

三、太阳能电池板伏安曲线及最大功率输出点的测试

1. 实训步骤

- ① 合上主控制屏空气开关，启动控制屏。
- ② 在主控制屏上“模拟光源控制部分”合上开关“SD1、SD2、SD3”，将三盏模拟光源灯打开，同时合上“SF1、SF2、SF3”，将冷却用风扇打开。将太阳能电池板固定于某一位置（固定辐照度）。
- ③ 断开 K1、K2，按图 1-7 连接实训线路。
- ④ 测量太阳能电池板端电压随负载电阻变化情况，当负载电阻为 0 时，测得短路电流，负载电阻为无穷大时，测得开路电压。

具体可通过增加负载的电阻或电池（组件）的电压，使电压从 0（短路条件下，即 $R_L \rightarrow 0$ ）开始缓慢增加（增大电阻阻值），随着负载电阻的增大，电路中的电流将逐渐减小，太阳能电池板的端电压逐渐增大。电流与电压初时呈线性关系。记录不同 R_L 值时的 A_1 和 V_1 值，绘制伏安特性曲线。

2. 实训报告

- ① 按实训原理要求绘制太阳能电池板的伏安特性曲线。

- ② 查找相关资料，对比实训设备所测试的伏安特

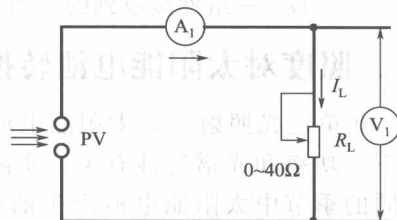


图 1-7 实训接线图

性曲线与标准的伏安特性曲线有何区别?产生这些区别的原因是什么?

工作任务三 环境对光电转换的影响

一、温度对太阳能电池转换的影响

温度对太阳能电池的输出性能影响是非常大的,太阳能电池组件具有负温度系数。图1-8所示为太阳能电池 $I-U$ 曲线随温度变化的情况。从图中可以看到,随着温度的升高,太阳能电池的短路电流略有增加,基本不变;而开路电压降低很快,几乎呈线性关系,从而使得太阳能电池的转换效率降低,输出功率下降。一般来讲,晶体硅太阳能电池组件温度每升高 1°C , I_{sc} 增加 0.04% , U_{oc} 减小 0.4% , PMPP 减小 0.4% 。

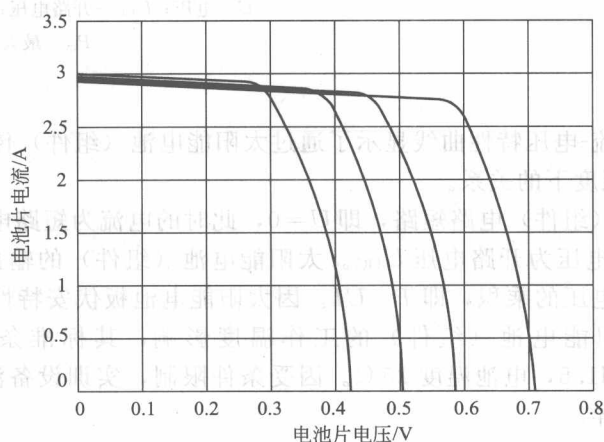


图 1-8 不同温度下太阳能电池的 $I-U$ 特性曲线

由以上分析可知,环境温度对太阳能电池板的短路电流和开路电压值影响很大,当环境温度升高时,短路电流 I_{sc} 值将上升而开路电压值将下降,一般情况下温度每升高 10°C , 短路电流 I_{sc} 值约上升 0.078mA , 开路电压 U_{oc} 值约下降 $2\sim 3\text{mV}$ 。

测量太阳能电池组件的温度比较困难。对于玻璃-玻璃封装的太阳能电池组件,可以根据下面的经验计算式,通过测量环境温度而估算出组件的温度:

$$T_{\text{mod}} = T_{\text{amd}} + 30 \times \frac{G}{1000}$$

式中 T_{amd} ——环境温度;

T_{mod} ——组件温度;

G ——组件接收到的太阳辐射值。

二、照度对太阳能电池转换的影响

在单色光照射下,太阳能电池的功率和入射光的波长或频率有关。在非单色光的照射下,功率和光谱特性有关,实际环境中,一年内光谱变化很大,在相同辐照强度下,不同的季节中太阳能电池产生的电量就不同。对非晶硅太阳能电池,光谱的显著变化恰好在其光谱响应范围内,这就使得非晶硅太阳能电池受光谱的影响比晶体硅太阳能电池更大。