

太阳能电池测试系统

摘 要

(当今世界,可持续发展已是世界人民面前的一件刻不容缓的大事,越来越受到各国政府的高度重视。在世纪之交这个科学技术突飞猛进、知识经济初现端倪的时代,作为 21 世纪的六大高新技术之一的新能源技术,特别是其中的太阳能应用技术将越来越受到各国政府和世界人民的重视。太阳能电池的产业化已经是大势所趋,随着太阳能电池工艺、技术的长足发展,对太阳能电池性能的测试和评估已成为太阳能电池研究和生产中的重要环节,人们迫切需要能够生产具有高的稳定性、重复性、全自动、功耗小且有良好光谱响应的太阳能电池测试设备。)

本文系统地阐述了太阳能电池的基本特性以及反映这些特性的参数,并对太阳能电池理想模型进行分析,探讨了太阳能电池的等效电路及其数学模型。探索建立太阳能电池测试系统的理论依据,寻求具有良好光谱响应的模拟器以及合理的数据处理模型。本文还对参数的校准进行了研究,以求能获得最优的太阳能电池测试系统。

本课题从 97 年起,和浦东昊晖新能源公司合作,经过一年多的研究、开发,已经开发出了 JD-01 型单体太阳能电池测试,JD-02 型太阳能电池组件测试两套系统,这两套系统采用奔腾 166 工控机作为主机,Microsoft 的 Visual C++ 为开发软件,运用数论方法进行数据处理,实现了测试和控制的自动化;光路采用抛物面型反光装置、运用漫反射,光源采用脉冲光源,这样提高了光的均匀性,稳定性以及光源的光谱响应;电路采用钳压式电子负载,将数据的采集电路和光源的控制电路集成到一块电路板上,使电路和计算机结合起来,提高了电路的稳定性。(经检索对比,这两套系统的性能参数已经达到国际先进水平。)

关键词: 太阳能电池 I-V 特性 脉冲太阳模拟器 光谱响应

Solar Cell Testing System

ABSTRACT

As the development of the technique and technology of solar cells, testing system with high reliability, good repeatability, auto-control, low energy cost and good spectral response simulator is needed. This is very important for the design and manufacture of solar cells. This paper stress on the research and design of solar cell test system.

In this paper, detail instruction to the fundamental knowledge of solar cell and their parameters are provided, theoretic module of solar cells is analyzed by using equivalent circuit analysis method and mathematics theory. A suitable data processing is illustrated, as well as, standard is discussed.

From 1997, we seek to optimize the solar cells testing system. After about two years' hard work, we have designed two testing systems. One is single cell tester, the other is PV module tester. In these systems, the Pentium 166 industrial microcomputer is used as control center, software design is based on Microsoft's Visual C++. These are computer-aided system and operation is very convenient; the measurement and control circuit is designed reliably and precisely; the optics system uses diffuse reflection and pulse xenon lamp as light source. All these design make these systems have many advantages.

Keywords:

solar cells, I-V characteristic, pulse solar simulator, spectral response

目 录

第一章 绪论	7
1.1 引言	7
1.2 太阳电池的发展历程及现状	7
1.3 太阳电池测试	9
第二章 光伏电池的原理, 电气特性及光电特性	11
2.1 光伏电池的结构和工作原理	14
2.1.1 光电流	14
2.1.2 光电压	15
2.1.3 结电容	16
2.1.4 等效电路	17
2.1.5 输出功率	17
2.1.6 填充因子	17
2.1.7 光电转换效率	18
2.2 光伏电池的基本特性	18
2.2.1 光照负载特性(I-V 特性曲线)	18
2.2.2 暗特性	18
2.2.3 开路电压、短路电流及输出功率与光强的关系	19
2.2.4 温度特性	21
2.2.5 串联电阻、并联电阻与 I-V 特性曲线的关系	21
第三章 光伏电池的测试原理	22
3.1 总原理	22
3.1.1 太阳电池 I-V 特性的测试	22
3.1.2 串联电阻的测量	24
3.1.3 并联电阻的测量	25
3.1.4 电性能温度系数的测试	27
3.2 光谱响应	27
3.2.1 太阳辐射光谱	27
3.2.2 地球表面的太阳能辐射光谱	28
3.2.3 太阳电池的光谱响应	28
3.3 模拟器	28
3.4 太阳电池 I-V 特性的参数处理	30
3.4.1 I-V 解析模型	30
3.4.2 拟合方法	31
3.5 标定方法及参数的校准	33
第四章 太阳能电池测试系统	35
4.1 系统工作原理及实现方法	35
4.1.1 系统方框图	35

4.1.2 光源	35
4.1.3 电子负载电路和光源控制电路	38
4.1.4 元件的选择	40
4.1.5 计算机控制与数据采集、处理及显示	41
4.2 测试结果与讨论	45
4.3 总结	48
第五章 致谢	50
第六章 参考文献	51
附录 A 标准太阳光谱辐照度分布数据	
附录 B 上海市科技成果水平检索证明	
附录 C 实测曲线	

符号说明

A	P-N 结二极管曲线理想因子
A_a	单位太阳电池有效面积
A_t	单位太阳电池总面积
$D(D_n, D_p)$	扩散系数 (电子, 空穴)
E_g	禁带宽度
$F \bullet F$	填充因子
G_L	光生载流子产生效率
H	电池总厚度 (只考虑半导体)
$I_L(J_L)$	光生电流 (电流密度)
$I_m(J_m)$	最大功率点电流 (电流密度)
$I_0(J_0)$	反向饱和电流 (电流密度)
$I_D(J_D)$	二极管暗电流 (电流密度)
$I_{sc}(J_{sc})$	短路电流 (电流密度)
k	玻尔兹曼恒量
$n(n_n, n_p)$	电子浓度 (N 区, P 区电子浓度)
P_m	最大输出功率
Q	电荷
q	单位电荷电量
$R(R_s, R_{sh})$	电阻 (串联电阻, 并联电阻)
T	温度
V_m	最大功率点电压
V_{oc}	开路电压
$U(U_n, U_p)$	复合率 (N 区, P 区复合率)
λ	波长
$\Phi(\lambda)$	光谱辐照度
η	太阳电池的光电转换效率
$u(u_n, u_p)$	载流子迁移率 (电子, 空穴)

第一章 绪 论

1.1 引言

环境是人类生存的空间，能源是人类得以生存，发展的条件。人类自出现以来，就与它们息息相关。人们在利用自然、资源的同时，又在影响环境、资源。在原始社会人类就学会了利用火，土地，森林等自然资源。但在几千年的人类发展过程中，人类利用资源的方式，利用的程度一直是简单的；直到工业文明时代的来临，揭开了人类利用资源，开发环境的新纪元。科技与工业的发展给人类带来了翻天覆地的变化，人类得到了解放，成为世界的主人，人类的生活得到极大改善。但人类在利用环境的同时，又在深刻的影响着所生存的环境。常规能源的过度开采和利用，给人类带来了沉痛的教训：一方面带来能源危机，七十年代的“石油危机”就给了人类警示，从能源资源的角度考虑，依照现在的经济发展速度，全世界的石油和天然气在有 40~50 年就要耗尽，煤也只能维持 200 多年，表 1-1 显示了世界不可再生能源情况^[4]；从另一方面造成日趋严重的环境污染问题，厄尔尼诺现象，温室效应，大气污染，化石原料带来的环境恶化已给人类生存造成了威胁，可持续发展已是世界人民面前的一件刻不容缓的大事，越来越受到各国政府的高度重视，人们迫切地需要清洁、无污染、可再生的能源。1992 年“世界可持续发展”会议制定了《21 世纪议程》。在世纪之交这个科学技术突飞猛进、知识经济初现端倪的时代，作为 21 世纪的六大高新技术之一的新能源技术，特别是其中的太阳能应用技术将越来越受到各国政府和世界人民的重视。

表 1-1 世界不可再生能源情况

种类 能源	已探明储量 (PR) 和 推测的潜在储量 (AR) (GTOE)	消耗期 (公历年)	世界能源需求 (GTOE)
煤	900 (PR) 2700 (AR)	2200 年左右	年需求: 1960 7.5 1980 7.8 2000 11 2020 15 2040 18 2060 21
石油	100 (PR) 36 (AR)	2020 年以前	
天然气	74 (PR) 69 (AR)	2040 年左右	
铀	按热反应堆计 60 (PR +AR) 按增殖反应堆计 1300 (PR) 1600 (AR)	按热反应堆计 2073 年 按增殖反应堆计 2110—2120 年	
所有不可 再生能源	1100 (PR) 3200 (AR) (按热反应堆计)	2200 年左右	累计需求: 1960~1985 140 1986~2060 1140

1.2 太阳电池的发展及现状

太阳电池，又名光伏电池，是一种半导体光电子器件，它利用半导体材料的光电特性

直接将阳光转换成电能，自 1839 年贝克勒尔 (Becquerel) 首次报道光伏效应^[2]，到 1954 年美国贝尔实验室研制出第一块转换效率为 6% 的硅太阳能电池^[1]，以及 1996 年澳大利亚新南威尔士大学的光伏实验室生产出的转换效率为 23.7% 的单晶硅太阳能电池，太阳能电池经历了从实验室研究到空间应用，最后到地面应用的过程，随着转换效率的提高、成本的降低、寿命的延长等关键因素的突破，使得人们看到了进一步利用太阳能的前景，也使得太阳能发电技术成为高新技术领域中尤为世人瞩目的最为活跃的一个分枝。在能源危机和环境问题的刺激下，美、德、日等发达国家以及印度等发展中国家纷纷投入巨资发展太阳能光伏事业，今天，太阳能发电已成为重要的补充行能源，也将是 21 世纪多能互补能源结构中的支柱性能源之一。

太阳能电池按所使用的材料分类，主要有单晶硅太阳能电池、多晶硅太阳能电池、非晶硅太阳能电池、砷化镓太阳能电池、硒钢铜太阳能电池、铋化镉太阳能电池等等，其制作工艺属半导体和光学技术。目前，市场上最常见的是前三种材料的太阳能电池，其中晶体硅（单晶、多晶）太阳能电池占整个市场份额的 80%，非晶硅约占 19%。实验室中，高效单晶硅太阳能电池在一个太阳光测试下转换效率以达 24%，高效非晶硅太阳能电池达到 14.5%；商品化单晶硅太阳能电池的水平为 11%~14%，非晶硅太阳能电池的水平为 5%~%。世界主要太阳能电池的效率如下表 1-2：

表 1-2 大气质量 1.5、辐照度 1000Wm⁻²、25℃ 太阳电池和模块效率

Classification	Effc. (%)	Area (cm ²)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA cm ⁻²)	FF (%)	Test center (and date)
Silicon cells						
Si(crystalline)	24.0	4.00(ap)	0.709	40.9	82.7	Sandia(9/94)
Si(moderate area)	23.7	22.1(da)	0.704	41.5	81.0	Sandia(8/96)
Si(multicrystalline)	18.6	1.0(ap)	0.636	36.5	80.4	NREL(12/85)
Si(large. multicrystalline)	17.2	100(t)	0.610	36.4	77.7	JQA(3/93)
Si(thin crystalline)	21.5	4.044(ap)	0.699	37.9	81.1	Sandia(8/95)
Si(supported film)	14.9	1.02(ap)	0.600	31.4	79.2	Sandia(12/88)
Si(large thin film)	14.2	100(t)	0.608	30.0	78.1	JQA(3/93)
III-V						
GaAs(crystalline cell)	25.1	3.91(t)	1.022	28.2	87.1	NREL(3/90)
GaAs(thin film cell)	23.3	4.00(ap)	1.011	27.6	83.8	NREL(4/90)
GaAs(submodule)	21.0	16(t)	4.04	6.6	80	NREL(4/90)
GaAs(multicrystalline)	18.2	4.011(t)	0.994	23.0	79.7	NREL(11/95)
InP(crystalline cell)	21.9	4.02(t)	0.878	29.3	85.4	NREL(4/90)
Polycrystalline thin film						
CdTe(cell)	15.8	1.05(ap)	0.843	25.1	74.5	NREL(6/92)
CdTe(submodule)	10.5	83.4(ap)	9.406	1.72	64.9	FhG-ISE(2/95)
CdGs(cell)	16.4	1.025(t)	0.678	32.0	75.8	NREL(11/94)
CdGs(submodule)	14.2	51.7(ap)	6.808	3.1	68.3	JQA(10/96)
Amorphous Si						
a-Si(cell)	12.7	1.0(da)	0.887	19.4	74.1	JQA(4/92)
a-Si(module)	12.0	100(ap)	12.5	1.3	73.5	JQA(12/92)
Multijunction cells						
GaInP/GaAs	30.3	4.0(t)	2.448	14.22	85.6	JQA(4/96)
GaAs/CIS (thin film)	25.8	4.00(t)	—	—	—	NREL(11/89)
a-Si/CIGS (thin film)	14.6	2.40(ap)	—	—	—	NREL(6/88)
a-Si/a-Si/a-SiGe	13.5	0.27(da)	2.375	7.72	74.4	NREL(10/96)

近年来全世界的太阳能电池的销售量以 15%~20% 的速度增长, 至 1997 年世界太阳能电池的产量已达 124 兆瓦/年, 预计 1998 年将达 200MW。欧洲、美国、日本等已在筹建 10—50 兆瓦的大规模晶体硅太阳能组件厂, 而美国能源部计划到 2000 年生产 1400 兆瓦光伏组件, 各国纷纷做出光伏开发和生产的计划, 光伏工业已大有腾飞之势, 而光伏科学与技术表现出及其强的生命力和广阔的应用前景。“光伏发电今天的地位, 可以和四十年代的电视机、五十年代的商用计算器、六十年代的集成电路和七十年代的个人计算机相比较”(《Photovoltaics Insiders Reports》(1993))

就我国而言, 从 1958 年开始研制硅太阳能电池。1971 年首次成功地用于实践 2 号卫星, 并随之开始了广泛的地面应用, 国家先后在“六·五”、“七·五”、“八·五”安排了阳光发电科技攻关, 使我国光伏事业不断进步。国家部委在“九·五”计划中把太阳能利用技术列为重点发展方向, 太阳电池技术首当其冲。1997 年, 我国有太阳能研究、生产和开发单位近 30 家。我国太阳电池生产发展迅速, 据统计, 1997 年我国太阳电池总产量为 1.8MW, 在通讯、国防及边远无电地区获得了广泛的应用, 但是我国与发达国家还有一定的距离, 总量太少, 仅为世界总产量的 1.3%, 商品太阳能电池的效率为 4~12%, 空间用太阳电池效率为 12~13%, 技术水平不高, 规模小, 配套性差, 服务体系跟不上, 还处于起步阶段。要赶上发达国家水平, 还需要大量人力、物力的投入。

1.3 太阳电池测试

太阳电池的测试是和太阳能光伏事业同步发展的, 在开发、研制和生产光伏器件的任何环节都需要对产品的性能、参数、指标进行准确的评价, 以便于了解产品质量、控制生产条件、改进工艺方法, 从而达到生产高效率、低成本、长寿命的目的。太阳电池具有很高的选择性的光谱响应, 其性能参数复杂的非线性特性、应用环境的多样性以及标准的制定等等都是测试所面临的难题。国外关于太阳能电池测试的研究、开发起步较早, 随着数据处理, 电子线路, 计算机的发展, 已经能够生产高的稳定性、重复性、全自动、功耗小且具有良好光谱响应的太阳电池测试设备。

我国还处于起步阶段, 技术方面存在着相当多的难题。我国在七十年代开始就有许多太阳电池生产和科研单位自行试制, 但往往不太理想。到八十年代北京太阳能研究所、北京有色金属研究总院、西安交通大学、长春光机所、上海科技大学、复旦大学、天津 1418 所、航天部上海 811 所做过很多工作, 其中有些单位还应太阳电池生产厂的要求出售过测试仪。但是这些仪器一般都采用稳态光源, 更多的是采用卤素灯或 ELH 灯。这类灯在高温工作时寿命都比较短, 产品的适用性, 可靠性和国外产品都有不小差距。当前国内科研、生产单位的测试设备主要从国外进口, 如云南半导体厂于八十年代从加拿大进口自动化太阳电池测试设备, 北京太阳能研究所进口稳定太阳光模拟器。宁波太阳电池厂从 Spire 公司进口太阳电池测试仪等等。但是这些设备大多是国外七十年代到八十年代初期的产品, 性能、功能已逐渐落伍, 以而且价格极其昂贵。随着我们要发展本国的太阳电池事业的迫切需求, 需要我们开发出高质量的太阳能测试设备。

太阳能测试设备有多种, 从功能上分有组件测试设备, 单体测试设备; 从光源上分有稳态光源和脉冲光源两种。它的发展主要经历了三个阶段: 最初是采用全手工的测试方法, 手工取点, 手工读点, 再绘出曲线, 然后进行分析和计算, 这种方法劳动强度大, 且易引入较大的人为误差; 后来采用了梯形发生器和 X—Y 记录仪, 在测量过程中趋于半自动化, 但仍需要手工计算参数; 随着计算机技术的高速发展, 特别是微型计算机深入到社会的各个领域, 出现计算机辅助的太阳能测试系统, 它采用 PC 机、单板机或单片机辅助测量, 能够实现全自动、高精度的测试和参数计算、曲线绘制。

我所在太阳能测试方面的研究工作已经有三年多,特别是 96 年以来在崔容强教授的带领下进行了一系列的研究、开发,并于 98 年与浦东的昊晖公司合作开发出一套太阳能单体测试仪和一套太阳能组件测试仪。这两套仪器在吸取以往测试设备的基础上,重新对系统的理论进行了大量的分析,精心设计光路,电路,采用 Pentium 166MHz 的工业控制计算机作为主机,对数据处理软件进行了重新设计。该系统具有以下特点:

1. 采用脉冲氙灯作为光源,脉冲氙灯在可见光波段与太阳光谱比较匹配,从而提高了整体光谱匹配性,且降低功耗。
2. 精心设计光路,采用漫散射的反光镜装置,采用意大利进口的反光材料作抛物面,光的均匀性、稳定性非常好。
3. 采用钳位电压式电子负载,可以实现大的范围测量,和计算机接口也相当方便。
4. 电路设计精细,加入滤波电路,增加三端稳压电路用以稳压。制作了过流、过压、限流等保护电路。电源稳定性好,测试电路可靠
5. 采用 Pentium 166MHz 的工业控制计算机作为主机,用 Visual C++作为开发平台,控制方便,界面友好。
6. 采用台湾大众公司的 16 位,12 位卡 A/D 卡、D/A 卡,精度高,测试速度快。
7. 数据处理精确,我们借鉴非线性回归的方法、非线性规划以及数值计算的有限元法拟合曲线,使得参数处理,曲线绘制准确,而获得了满意的结果。

经过检索,该系统的技术参数的以达到八十年代末国际先进水平,填补了国内空白。我所正在准备该系统的技术鉴定工作,若能将该系统产品化,将为国家节约大量的外汇。

第二章 光伏电池的原理, 电气特性及光电特性

2.1 光伏电池的结构和工作原理

太阳能电池是一种基于光生伏特效应的能量转换器。当适当波长的光照射到非均匀半导体时, 如 PN 结, 若投射到电池上的光子中, 能量大于禁带宽度 E_g 的光子均能被电池吸收, 而激发出电子—空穴对, 而形成内建电场, 在半导体内部产生光生电动势, 即光生电压, 如果将 PN 结短路, 在外电路中则会出现电流, 即光生电流, 这就是光生伏特效应。对于任何一种太阳能光电转换器, 都应具备三种基本功能:

- 1、能够对太阳光谱有良好的吸收, 电池受阳光照射时, 能产生电子—空穴对、或产生单电子;
- 2、能够实现对电子和空穴的分离;
- 3、能实现将载流子从电极中引出。这里以 PN 结太阳能电池为例, 简单地对太阳能电池的工作原理和主要参数进行描述。

为了简单, 在理想化假设下进行描述, 即在以下条件下进行简化^{[1][2]}: 光照时, 太阳能电池满足小注入条件, 即各区少数浓度远小于多数浓度, 在结区外多数浓度可认为是常量。

- 1、耗尽区宽度 $W < \text{扩散长度 } L_p$, 且满足耗尽层近似。
- 2、两边掺杂五简并, 杂质全部电离, 且沿 X 轴均匀分离。
- 3、基区少数扩散长度 L_p 大于电池厚度, 结平面为无限大, 不考虑周边的影响。

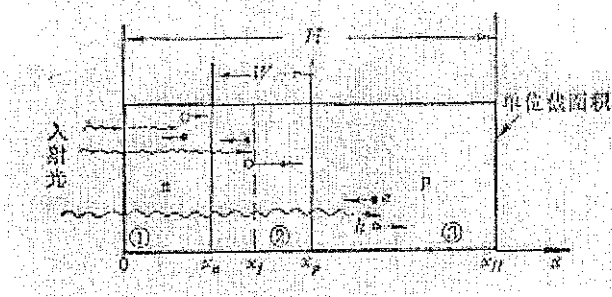


图 2-1、PN 结太阳能电池的结构原理

2.1.1 光电流

光生载流子的定向运动形成光电流, 可由以下方程来描述太阳能电池的工作状态:

对 N 区:

$$J_p = qu_p p_n E_n - qD_p \frac{dp_n}{dx} \quad (2-1)$$

$$\frac{dp_n}{dt} = G_L - U_n - \frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} \quad (2-2)$$

对 P 区:

$$J_n = qu_n p_p E_p + qD_n \frac{dn_p}{dx} \quad (2-3)$$

$$\frac{dn_p}{dt} = G_L - U_p + \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} \quad (2-4)$$

以及

$$\frac{dE}{dx} = \frac{q}{\epsilon_R \epsilon_0} (N_D - N_A + p + n) \quad (2-5)$$

对于均匀掺杂, 并假定 PN 结为突变结, 空间电荷区外不存在电场, 迁移率 u_n 、 u_p 和扩散系数 D_n 、 D_p 均和距离无关。于是, 当电池被一束光强为 $\Phi(\lambda)$ 的单色光稳定照射时, 电池中任一部分的载流子浓度不随时间变化, 于是有:

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = 0 \quad \frac{\partial p_n}{\partial t} = 0$$

这样方程 2-2、2-4 可化简为:

$$G_{Ln} - U_n - \frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} = 0 \quad (2-6)$$

$$G_{Lp} - U_p + \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} = 0 \quad (2-7)$$

对于 N 区, 将式 2-1 对 x 求导, 因 E_n 为零, 有:

$$\frac{\partial J_p}{\partial t} = qD_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} \quad (2-8)$$

可以得到光电流密度为:

$$\begin{aligned} J_L &= \int_0^\infty \int_0^H q \Phi(\lambda) Q [1 - R(\lambda)] \alpha(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)x} dx d\lambda \\ &= \int_0^H \int_0^\infty q G_L(x) dx d\lambda \end{aligned} \quad (2-9)$$

$$\text{其中 } G_L(x) = \Phi(\lambda) Q [1 - R(\lambda)] \alpha(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)x} \quad (2-10)$$

$\Phi(\lambda)$ 为投射到电池上, 波长为 λ , 带宽为 $d\lambda$ 的光子数;

Q 为量子产额, 即一个能量大于 E_g 的光子产生一对光生载流子的几率;

$R(\lambda)$ 为和波长有关的反射因子, $\alpha(\lambda)$ 为对应波长的吸收系数;

$d\lambda$ 为距电池表面 x 出, 厚度为 dx 的薄层;

$G_L(x)$ 表示在 x 处产生载流子的产生率。则 N 区中在 x 处的产生率为:

根据肖克莱—里德—萨支唐的模型, 在电子和空穴的俘获截面相等近似下 ($\delta = \delta_n$)

$= \delta_p$), 复合率为:

$$U_n = \frac{\delta_n v_{th} N_t (p_n n_n - n_i^2)}{n_n + p_n + 2n_i ch [(E_{th} - E_i) / KT]} \quad (2-11)$$

$$\approx \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}$$

将 2-8, 2-10, 2-11 代入式 2-6, 则有

$$D \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - (1-R)\Phi(\lambda) a e^{-ax} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} = 0 \quad (2-12)$$

其通解为

$$(p_n - p_{n0}) = A ch\left(\frac{x}{L_p}\right) + B sh\left(\frac{x}{L_p}\right) - \frac{a\Phi(1-R)\tau_p}{a^2 L_p^2 - 1} e^{-ax} \quad (2-13)$$

利用 N 区的两个边界条件: 在电池表面 $x=0$ 处, 复合率正比于表面复合速度 S_p , 即

$$D_p \frac{d(p_n - p_{n0})}{dx} \Big|_{x=0} = S_p (p_n - p_{n0}) \quad (2-14)$$

在靠近 PN 结空间电荷区边缘 x_n 处, 空穴浓度为零, 即

$$p_n - p_{n0} = 0 (x = x_n) \quad (2-15)$$

将 2-14, 2-15 代入 2-13, 可得

$$p_n - p_{n0} = \frac{a\Phi(1-R)\tau_p}{a^2 L_p^2 - 1} \times$$

$$\left[\frac{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} + a L_p \right) sh \frac{x_n - x}{L_p} + e \left(\frac{S_p L_p}{D_p} sh \frac{x}{L_p} + ch \frac{x}{L_p} \right)}{\frac{S_p L_p}{D_p} sh \frac{x_n}{L_p} + ch \frac{x_n}{L_p}} - e^{-ax} \right] \quad (2-16)$$

对于 P 区, 可做同样的处理, 引用边界条件 ($n_p - n_{p0} = 0$, $x = x_n + W$) 在背表面处

$$D_n \frac{d(n_p - n_{p0})}{dx} \Big|_{x=H} = S_n (n_p - n_{p0}) \quad (2-17)$$

令 $H = H - x_n - W$, 即 P 区的总厚度, 则有:

$$n_p - n_{p0} = \frac{\beta\Phi(1-R)\tau_n}{a^2 L_n^2 - 1} e^{-a(x_n=W)}$$

$$\left[ch \frac{x - x_n - W}{L_n} e^{-a(x - x_n - W)} - \frac{\frac{S_n L_n}{D_n} \left(ch \frac{H}{L_n} - e^{-aH} \right) + sh \frac{H}{L_n} + a L_n e^{-aH}}{\frac{SL}{D} sh \frac{H}{L} + ch \frac{H}{L}} sh \frac{x - x_n - W}{L_n} \right]$$

和有:

$$J_n = \frac{q\Phi(1-R)aL_n}{aL-1} e^{-a(x_n+W)} \left\{ aL_n - \left[\frac{\frac{S_n L_n}{D_n} \left(ch \frac{H}{L_n} - e^{-aH} \right) + sh \frac{H}{L_n} + a L_n e^{-aH}}{\frac{S_n L_n}{D_n} sh \frac{H}{L_n} + ch \frac{H}{L_n}} \right] \right\} \quad (2-19)$$

对于耗尽区, 因存在较强的漂移电场, 且宽度 W 又比较小, 可以认为其中产生的光生载流子均可被电场分离, 则有:

$$J_c(\lambda) = \int_0^W q\Phi(1-R)e^{-aW} dx \quad (2-20)$$

$$\approx q\Phi(1-R)e^{-ax_n} (1 - e^{-aW})$$

则总的电流密度为:

$$J = \int_0^\infty (J_n + J_p + J_c) d\lambda \quad (2-21)$$

当受照明的太阳能电池被短路时, P-N 结处于零偏压时, 短路电流密度 J_{sc} 等于光生电流密度 J_L , 而正比与入射光强, 即

$$J_{sc} = J_L \propto N_{ph} \propto \Phi$$

2. 1. 2 光电压

由于光照, 在电池两端出现的电压称为光电压, 它象加在 P-N 结的正偏压一样, 与内建电场方向相反, 这个电压减低了势垒高度, 且使耗尽区变薄, 太阳能电池在开路状态的光电压称为开路电压。有光照时, 内建电场所分离的光生载流子形成由 N 区指向 P 区的光电流 J_L , 而太阳能电池两端出现的光电压, 即太阳能电池的开路电压 V_{oc} 却产生由 P 区指向 N 区的正向电流 I_D , 稳定光照时 $J_L = J_D$, 对于 PN 结, 我们知道, 其正向 J-V 特性为:

$$J_D = J_0 (e^{-qV/KT} - 1) \quad (2-22)$$

则有:

$$J_L = J_0 (e^{-qV_{OC}/KT} - 1) \quad (2-23)$$

两边取对数后, 当 $A=1$ 时

$$V_{OC} = \frac{AKT}{q} \ln \left(\frac{J_L}{J_0} + 1 \right) \quad (2-24)$$

其中 A 为 PN 结的曲线因子; 在光照下, 设 $\frac{J_L}{J_0} \gg 1$, 则有:

$$V_{oc} = \frac{AKT}{q} \ln \left(\frac{J_L}{J_0} \right) \quad (2-25)$$

反向饱和电流为

$$J_0 = qD_n \frac{n_i^2}{N_A L_n} + qD_p \frac{n_i^2}{N_D L_p} \quad (2-26)$$

由于 $n_i^2 = N_A N_D e^{-qV_D/KD}$, 有:

$$J_0 = \left(qD_n \frac{N_D}{L_n} + qD_p \frac{N_A}{L_p} \right) e^{-qV_D/KT} = J_{00} e^{-qV_D/KT} \quad (2-27)$$

其中 $J_{00} = qD_n \frac{N_D}{L_n} + qD_p \frac{N_A}{L_p}$

V_D 为最大 P-N 结电压, 等于 P-N 结势垒高度, 将式 (2-27) 代入式 (2-25), 当 $A=1$ 时, 可得

$$V_{OC} = V_D - \frac{KT}{q} \ln \frac{J_{00}}{J_L} \quad (2-28)$$

在低温和高光强时, V_{OC} 接近 V_D , V_D 越高, V_{OC} 越大, 因 $V_D \approx \frac{KT}{q} \ln \frac{N_P N_A}{n_i^2}$, 故 P-N

结两边掺杂度越大, 开路电压也越大。

2. 1. 3 结电容

将 PN 结太阳能电池进行耗尽近似^{[2]p63}, 外加电压的变化会直接引起耗尽区边缘储存电荷的变化, 如下图

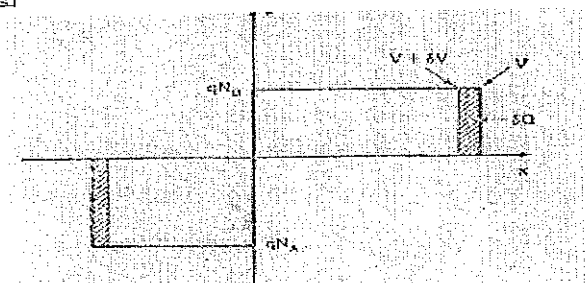


图 2-2 外加电压增加时耗尽区储存电荷的变化

这与间距为 W 的平行板电容器的情况一样, 因此, 耗尽区电容 C 是

$$C = \frac{\epsilon A}{W} \quad (2-29)$$

其中 W 由下式决定:

$$W = \left[\frac{2\epsilon}{q} (\psi_0 - V_a) \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{1/2} \quad (2-30)$$

ψ_0 为过渡区电位变化, V_a 为外加电压, N_A 为受主浓度, N_D 为施主浓度; 如果二极管的一边是重掺杂, 式 2-30 可简化为:

$$\frac{C}{A} = \left[\frac{q\epsilon N}{2(\psi_0 - V_a)} \right]^{1/2} \quad (2-31)$$

这里, N 是 N_A 和 N_D 中较小者, 反向偏置时, 耗尽区电容在二极管总电容中处于支配地位, 因此, 测量出二极管或太阳能电池的 C 随反向偏压的变化并画出 $1/C^2$ 随 V_a 的变化曲线, 就可求出二极管轻掺杂一边的掺杂浓度 N 。

2. 1. 4 等效电路

当受光照的太阳能电池结上负载时, 光生电流要流经负载, 并在负载的两端建立起端电压, 这时太阳能电池的工作情况可用图 2-3 所示的等效电路来描述。

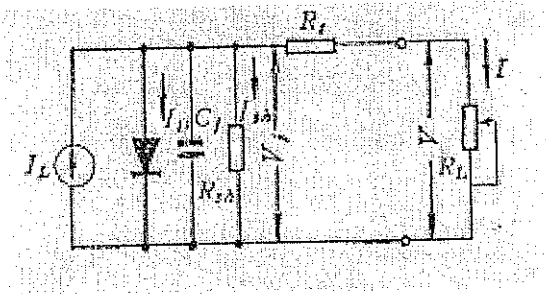


图 2-3 P-N 结太阳能电池等效电路图

图中把太阳能电池看成稳定地产生光电流 I_L 的电流源, 与之并联的一个处于正偏压下的二极管及一个并联电阻 R_{sh} 构成, 可以看出, 二极管的正向电流

$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV}{AKT}} - 1 \right)$ 和旁路电流都要靠 I_L 提供, 剩余的光电流经过一个串联电阻 R_s 流出太

阳能电池而进入负载 R_L 。对于实际的太阳能电池, 它是由一个面积很大的平面 PN 结构成, 可以将其看成有许多具有这种等效结构的电池单元组成, 因而应当把图 2-3 所示的等效电路的各个参量视为集中参量。当流经负载 R_L 的电流为 I , 负载的端电压为 V 时, 对于等效电路有:

$$I = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_0 \left(e^{q(V-IR_s)/AKT} - 1 \right) - \frac{I(R_s + R_L)}{R_{sh}}$$
$$V = IR_L \tag{2-32}$$

2. 1. 5 输出功率
由式 2-32 可得：

$$P = IV = \left(I_L - I_0 \left(e^{q(V-IR_s)/AKT} - 1 \right) - \frac{I(R_s + R_L)}{R_{sh}} \right)^2 R_L \tag{2-33}$$

式中 P 就是太阳能电池被照明时在负载 R_L 上得到的输出功率，当负载 R_L 从零变到无穷大时，即可画出如图 2-4 所示太阳能电池的负载特性曲线。

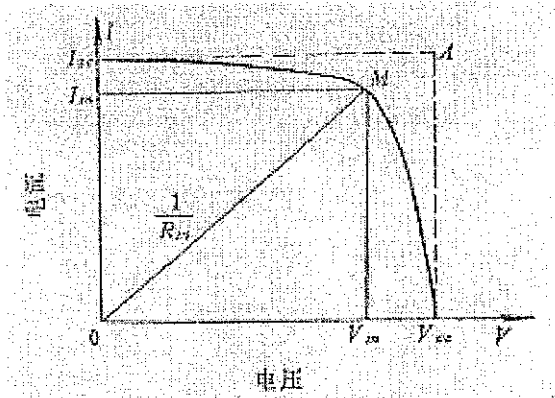


图 2-4 太阳能电池的负载特性曲线

曲线上的任一点都称为工作点，它与原点的连线称为负载线，负载线的斜率为 $1/R_L$ ，工作点对应的横、纵轴坐标分别为工作电压和工作电流。调节负载电阻 R_L 到某一值 R_m 时，在曲线上得到一点 M，对应工作电压 V_m 和工作电流 I_m 之积最大： $P_m = I_m V_m$ ；我们称 M 电为该太阳能电池的最大功率点， V_m 为最佳工作电压， I_m 为最佳工作电流， R_L 为最佳负载电阻， P_m 为最大输出功率；图 2-4 中的 V_{oc} 和 I_{sc} 分别为开路电压和短路电流。

2. 1. 6 填充因子

最大输出功率与 $(V_{oc} \times I_{sc})$ 之比称为填充因子 (F.F)，如图所示两面积之比，这是衡量太阳能电池好坏的重要指标之一：

$$F.F = \frac{P_m}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \tag{2-34}$$

在一定光强下，F.F 越大，曲线越“方”，输出功率也越高。

2. 1. 7 光电转换效率

太阳能电池受光照时，输出电功率与入射光功率之比 η 称为太阳能电池的转换效率，也称光电转换效率，如下式：

$$\eta = \frac{P_m}{A_t P_{in}} = \frac{I_m V_m}{A_t P_{in}} = \frac{(F.F) I_{sc} V_{oc}}{A_t P_{in}} \tag{2-35}$$

其中， A_t 为包括栅线图形面积在内的太阳能电池中面积，可以看出，要提高太阳能电池的效率，必须提高开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 和填充因子 (F.F)，而三个参量往往互相牵制，因此在实践中必须全盘考虑。

2. 2 光伏电池的基本特性

2. 2. 1 光照负载特性 (I-V 特性曲线)

如图 2-3 所示等效电路，我们可以获得太阳能电池的等效公式：

$$I = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_0 \left(e^{(V - IR_s)/AU_T} - 1 \right) - \frac{I(R_s + R_L)}{R_{sh}} \tag{2-36}$$

这里 $U_T = \frac{KT}{q}$ ，可以获得光伏电池的光照负载特性曲线如 2-4 所示。

2. 2. 2 暗特性

当 PN 结处于正偏状态时，忽略串联电阻的影响，在负载上得到的电流密度

$J = J_L - J_D$ ， J_D 称为光电池的暗电流，即 P-N 结正向电流。

对于均匀掺杂的 P-N 结硅太阳能电池，有^[1]：

$$J_D = \left(qD_n \frac{n_i^2}{N_A L_n} + qD_p \frac{n_i^2}{N_D L_p} \right) \left(e^{qV/KT} - 1 \right) + \frac{1}{2} q \frac{n_i}{\tau} W \left(e^{qV/2KT} - 1 \right) \tag{2-37}$$

P-N 结硅太阳能电池的光照特性及暗特性比较图如下。

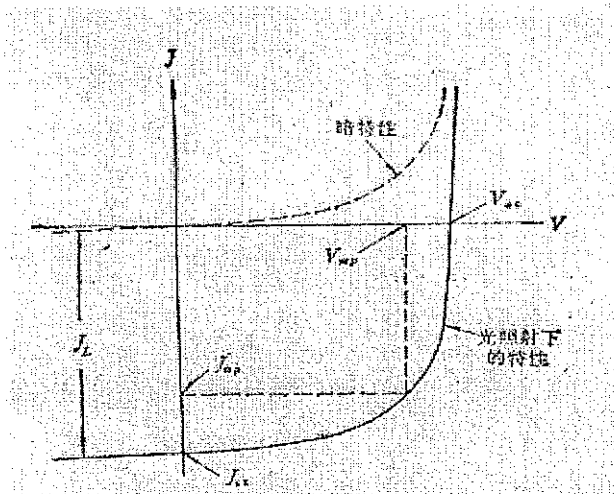


图 2-5 P-N 结硅太阳能电池的光照特性及暗特性比较图^[3]

无光照时， $I_L=0$ ，我们在太阳能电池两端外加电压 U ，其等效电路如下图所示：

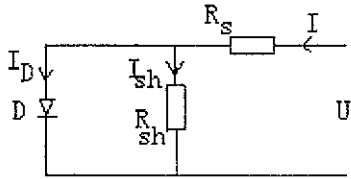


图 2—6 暗特性曲线测试电路

2. 2. 3 开路电压、短路电流及输出功率与光强的关系

一般情况下，太阳能电池的串联电阻 R_s 流很小，并联电阻 R_{sh} 很大，为了研究开路电压、短路电流及输出功率与光强的关系，忽略二者影响，式 2—32 变为：

$$I = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_0 \left(e^{q(V)/AKT} - 1 \right)$$
$$V = IR_L \tag{2-38}$$

令 $V=0$ ，得光伏电池的短路电流： $I_{sc} = I_L$ (2-39)

而光生电流 $I_L \propto I^*$ ，故有： $I_{sc} \propto I^*$ 或 $I_{sc} = kI^*$ (2-40)

这里 I^* 是辐照在光伏电池上的光强。由上式可知光强的测定可通过测量短路电流来获得。

令 $I=0$ ，得开路电压：

$$V_{oc} = U_T \ln \frac{I_L + I_0}{I_0} = U_T \ln \frac{kI^* + I_0}{I_0} \tag{2-41}$$

式 2—40 和 2—41 表述了光伏电池短路电流和开路电压随光强的变化关系，该关系图如下：

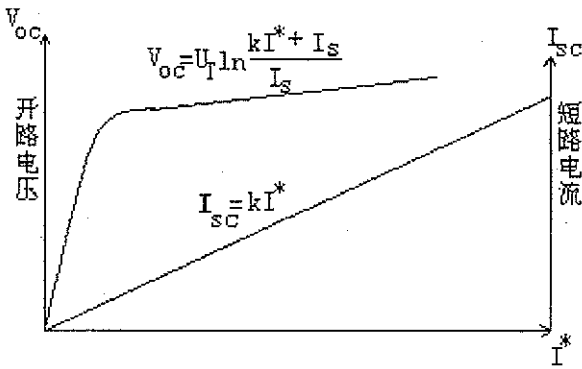


图 2—7 I_{sc} 、 $V_{oc}-I^*$ 关系图

由图可知，光强很小时，开路电压随光强增加以很大斜率上升，到达某一值后，曲线变得平滑，开路电压随光强增加缓慢。一般情况下，太阳能电池都工作在平缓区。在这个区域内，若光强变化不大，则可认为开路电压不变；但光强有较大变化时，开路电压有明显的变化，这时最佳工作点电压必然发生变化，如果不能及时调整工作电压，将得不到最佳输出。

下面讨论最佳工作电压，功率随光强变化：

由 2-38 式可得:

$$P = IV = [I_L - I_0(e^{aV} - 1)] \times V \quad \text{其中 } a = \frac{1}{U_T} = \frac{q}{kT} \quad (2-42)$$

对 V 求导, 可得:

$$\frac{\partial P}{\partial V} = I_L - I_0(e^{aV} - 1) + V[-aI_0e^{aV}] \quad (2-43)$$

最佳工作点时 $\frac{\partial P}{\partial V} = 0$, 故有:

$$(1 + aV_m)e^{aV_m} = \frac{I_L + I_0}{I_0} \quad (2-44)$$

式中 $I_L = kI^*$, $aV_m = \frac{V_m}{U_T}$; 当 $T = 300K$ 时, $U_T \approx 25mV$; 在 $V_m \approx 500mV$, 有:

$$aV_m \gg 1$$

有:
$$aV_m e^{aV_m} = \frac{kI^* + I_0}{I_0} \quad (2-45)$$

对这个超越方程, 用数值解法可得出 $V_m - I^*$ 曲线, 图 2-8 画出了 $V_{OC} - I^*$ 、

$V_m - I^*$ 关系曲线:

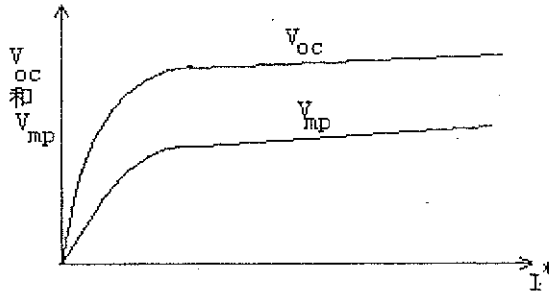


图 2-8 $V_{OC} - I^*$ 、 $V_m - I^*$ 关系曲线

对 2-45 取对数, 有:

$$\ln(aV_m) + aV_m = \ln \frac{kI^* + I_0}{I_0} \quad (2-46)$$

这里, 第二项大于第一项, 说明 V_{OC} 和 V_m 的变化相似, 所以有时测量工作点变化时, 只是测量开路电压的变化, 然后按比例就可得到工作电压的变化。

由式 2-44 知最佳工作点条件, 而由式 2-38 得:

$$P_m = I_m V_m = [I_L - I_0(e^{aV_m} - 1)] V_m \quad (2-47)$$

将式 2-44 和 2-47 联立，用数值解法可得出 $P_m \sim I_L \propto I^*$ ，从这可以看出输出功率与光强的关系。

2. 2. 4 温度特性

图 2-9 描述了硅太阳能电池的温度特性^[1]，开路电压随温度的升高而降低，短路电流随温度升高而升高，电池的输出功率随温度的升高而降低。每升高 1℃，损失率为 0.35~0.45%，也就是说，在 20℃工作的太阳能电池的输出效率要比在 70℃工作时高 20%。

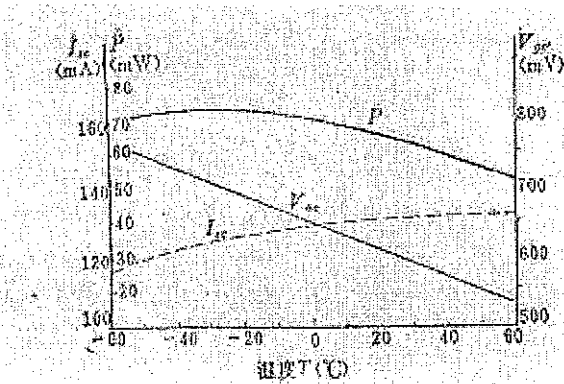


图 2-9 硅太阳能电池的温度特性

2. 2. 5 串联电阻、并联电阻与 I-V 特性曲线的关系

太阳能电池实际存在着串联电阻和并联电阻，这些因素往往不可忽略。下图分别为串联电阻，并联电阻对太阳能电池光照 I-V 特性的影响。

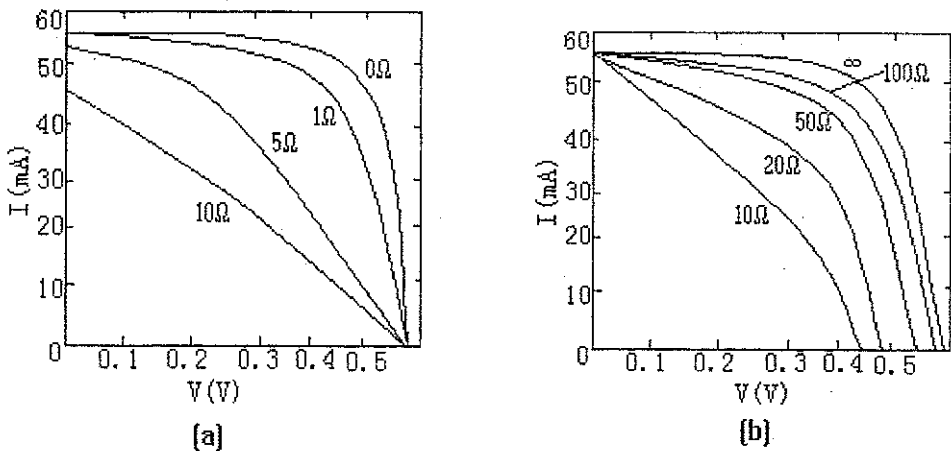


图 2-10 串联电阻 (a)，并联电阻(b)对太阳能电池光照 I-V 特性的影响

可见串联电阻减小了短路电流和填充因子。光电流在串联电阻上的电压降使器件两端产生正向偏压，这种正向偏压将引起相当大的暗电流，从而抵销了一部分光电流。并联电阻减小将降低开路电压和填充因子，它也对短路电流有影响。

第三章 光伏电池的测试原理

3.1 总原理

在太阳电池的生产过程、以及科学研究中，不仅要了解太阳电池的使用特性，更重要的是对电池优劣的原因进行分析、研究。我们知道，除了知道太阳电池的开路电压 V_{OC} 、短路电流 I_{SC} 和转换效率 η 等参数还不够，因为太阳电池的串联电阻 R_S 、并联电阻 R_{sh} 以及 P-N 结完整因子 A ，都对填充因子 $F.F$ 和转换效率 η 有重要影响。因此为了克服生产、科研过程中的盲目性，应当对太阳电池的整套参数，包括 V_{OC} 、 I_{SC} 、 A 、 η 、 R_S 、 R_{sh} 、 P_m 、 $F.F$ 、最大功率点电压、最大功率点电流等参数全部进行测量。对伏安特性、对数伏安特性、光电输出特性等各种特性曲线，以及曲线与参数之间的关系，各种参数间的相互关系，都应有定量的了解。有第二章的讨论，我们知道太阳电池的光伏伏安特性最直接的反映了太阳电池的性能，因此太阳电池测试的研究和开发基本上都是围绕太阳电池的 $I-V$ 特性的研究展开的。

3.1.1 太阳电池 $I-V$ 特性的测试

太阳电池在受光照时，通过 P-N 结的电流随负载的不同而改变。要测得这个特性就应当设法把负载从零变到无穷大，可得如图 2-4 所示的 $I-V$ 曲线因子。如果采用一个简单的可变电阻作负载，由于它不可能达到真正的零电阻和无穷大状态，所以得不到绝对的 V_{OC} 和 I_{SC} ，所画的曲线如图 3-1 所示。可以看出，曲线不能和电流、电压轴相交。

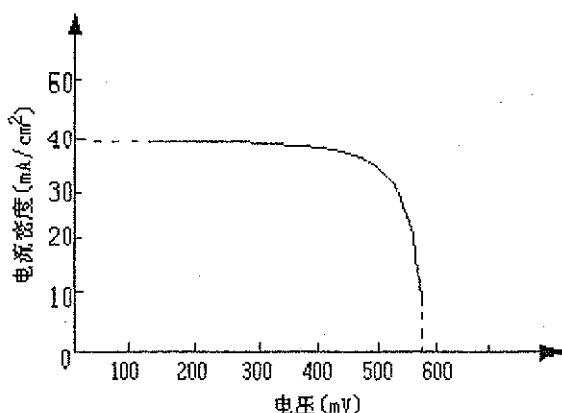


图 3-1 负载特性曲线

我们采用补偿电路，如图 3-2 所示：

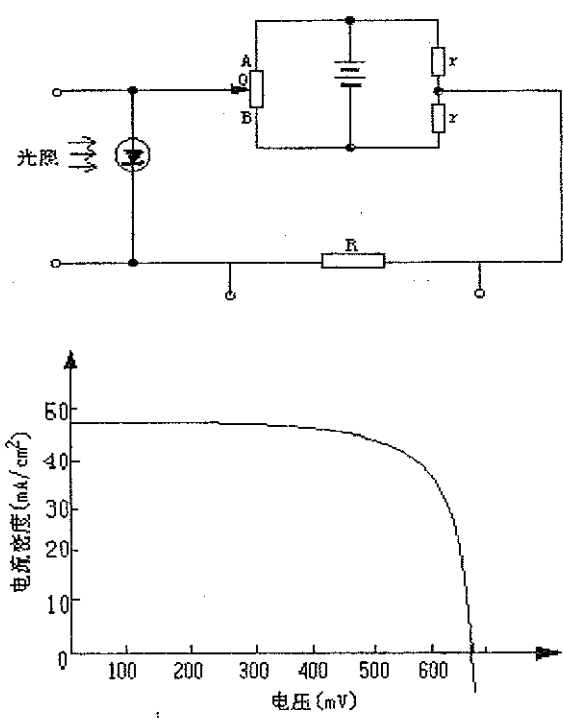


图 3-2 补偿法测负载特性曲线的线路图

由于外加电源的作用，使接触点在 A 和 B 点之间移动，可以使曲线进入第二象限和第四象限，即可使曲线和电流、电压轴相交。实际上，太阳电池的负载电阻由零向无穷大变化的过程，相当于电池 P-N 结截止到导通的过程。从这里我们可以看出，如果我们利用一个外电源，而不是可变电阻，给电池的 P-N 结施加一个由负到正的电压，使得 P-N 结由充分截止连续变化到超额导通，即可得到电池的 I-V 特性曲线。这也就是电子负载的基本原理。

我们调查国内外的测试电路，主要有以下几种方式：1.电容式电子负载；2.电桥式电子负载；3.场效应管式压控负载；4.钳位电压式电子负载；5.可调电阻负载。我们也对以上五种电路进行了比较，见表 3-1。

表 3-1. 几种电子负载特性比较

种类 分类	电路难度	测试原理	同一电路的可测范围	相同规格测试的功耗	和计算机接口的难易程度	适宜的模拟 器类型	选择元器 件难易
电容式电 子负载	容易	不确切	小	最小	最难要求高 速采样	稳态	可选择
电桥式电 子负载	较容易	不确切	很小	最大	不便控制可 变电阻	稳态和脉 冲	易选择
场效应管 式压控负 载	不易选择 合适的 MOS 管	简单	大	大	容易	稳态和脉 冲	不易选择
嵌位电压 式电子负 载	最复杂	复杂	最大	较大	容易	稳态和脉 冲	易选择
可调电阻 负载	最易	最简单 最明确	最小	小	不便控制可 调电阻	稳态和脉 冲	不易选择

3. 1. 2 串联电阻的测量

串联电阻是光伏电池的重要参数，测量串联电阻最简单的方法是在大电流情况下，从电池的伏安曲线的斜率求出。由于串联电阻是个分布函数，它的构成比较复杂，不能简单地用一个确定的欧姆电阻来等效。在负载情况下，在最佳负载附近确定串联电阻较有实际意义。下面介绍三种串联电阻的测量方法：

1、明暗特性曲线比较法

由 2.2.2 节，图 2-7 的暗特性曲线，可得太阳电池的电流：

$$I = I_D + I_{Sh} = I_0 \left(e^{\frac{U - IR_s}{U_T}} - 1 \right) + \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (3-1)$$

有 2-36，令 $I=0$ ， $V=V_{oc}$ ，则有：

$$I_L = I_0 \left(e^{\frac{V_{oc}}{U_T}} - 1 \right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (3-2)$$

对于式 3-1，令 $I=I_L$ ， $U=U^*$ ，则有：

$$I_L = I_0 \left[e^{\frac{U^* - I_L R_s}{U_T}} - 1 \right] + \frac{U^* - I_L R_s}{R_{sh}} \quad (3-3)$$

比较 3-2，3-3 式，可得： $U^* - I_L R_s = V_{oc}$ ，

$$\therefore R_s = \frac{U^* - V_{oc}}{I_L} \quad (3-4)$$

这里 V_{oc} 、 I_L 容易测出， U^* 需通过测量暗特性曲线得到。其测试原理图如下：

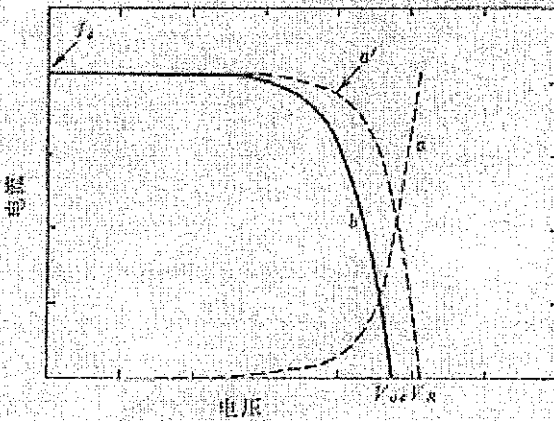


图3-2 明暗特性曲线比较法

2、三伏安特性曲线比较法^[8]

图 3-3 是不同光强下测得的三条伏安特性曲线 1、2、3，在曲线 1、2 最佳功率点附近各取一点 P、Q，使满足：

$$I_{sc1} - I_P = I_{sc2} - I_Q \quad (3-5)$$

即电池在两种光强照射时通过负载的改变，使通过 P-N 结的电流不变，两种光照和负载状况下，结电流不变，可知结电压也应不变。

$$R_{s1} I_{sc1} + U_p = R_{s1} I_{sc2} + U_Q \quad (3-6)$$

即:
$$R_{s1} = \frac{U_Q - U_p}{I_{sc1} - I_{sc2}} \quad (3-7)$$

同样, 由曲线 1 和 3、2 和 3 分别得出 R_{s2} 和 R_{s3} , 可得太阳电池的串联电阻为:

$$R_s = \frac{R_{s1} + R_{s2} + R_{s3}}{3} \quad (3-8)$$

伏安特性曲线比较法原理图如下:

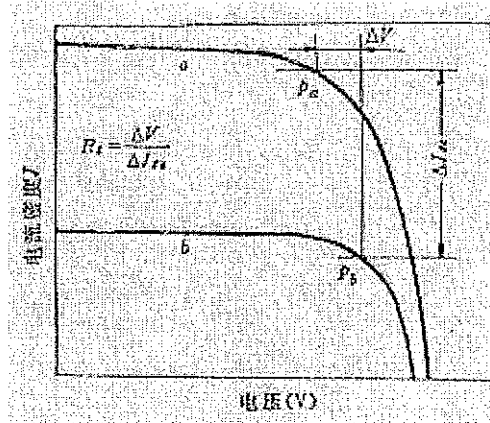


图 3-3 伏安特性曲线比较法原理图

3. 1. 3 并联电阻的测量^[6]

太阳电池的并联电阻 (旁路电阻), 可表征漏电流的大小。由于其数值一般较大, 对电池性能的影响可不予考虑。因此, 并联电阻不是一项必测的参数。随着制造电池用的晶片面积的增大, 或者为了降低成本, 利用缺陷和杂质比较多的废次单晶材料制备电池, 并联电阻的数值就会下降, 这时就得考虑它对电池性能的影响。

测量并联电阻的方法: 一种是测量暗特性, 在小于击穿电压范围, 由直线段的斜率来求得, 这种方法适用于弱光电池^[9]; 对于一般电池, 反向漏电大, 呈现软击穿特性, 故难以从特性曲线上找到一个线性区来求斜率, 下面介绍一种通过测量弱光范围电池的 V_{oc} 和 I_{sc} 数值来求并联电阻 R_{sh} 的方法。

由图 2-3 等效电路, 由 P-N 结电流方程得:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV_D}{AKT}} - 1 \right) \quad (3-9)$$

I_0 为 P-N 结反向饱和电流; $A=1-2$, 为 P-N 结理想因子, 取决于 P-N 结偏离理想的程度, $A=1$ 为理想结情况; V_D 为二极管压降, 由图 2-3:

$$V_D = IR_s + V_L \quad (3-10)$$

V_L 为负载电压, 有回路方程得:

$$I_L = I_D + I + I \frac{R_S + R_L}{R_{Sh}} \quad (3-11)$$

3-9 和 3-10 代入 3-11, 得:

$$I \left(\frac{R_S}{R_{Sh}} + 1 \right) + \frac{V_L}{R_{Sh}} = I_L - I_0 \left(e^{\frac{qV_D}{AKT}} - 1 \right) \quad (3-12)$$

当输出短路时即 $R_L = 0$ 时, $I = I_{SC}$, $V_L = 0$, 则上式变为:

$$I_{SC} \left(\frac{R_S}{R_{Sh}} + 1 \right) = I_L - I_0 \left(e^{\frac{qI_{SC}R_S}{AKT}} - 1 \right) \quad (3-13)$$

当输出开路时即 $R_L \rightarrow \infty$ 时, $I = 0$, $V_L = V_{OC}$, 则上式变为:

$$\frac{V_{OC}}{R_{Sh}} = I_L - I_0 \left(e^{\frac{qV_{OC}}{AKT}} - 1 \right) \quad (3-14)$$

由式 3-13, 3-14 得:

$$I_{SC} \left(\frac{R_S}{R_{Sh}} + 1 \right) - I_0 \left(e^{\frac{qV_{OC}}{AKT}} - e^{\frac{qI_{SC}R_S}{AKT}} \right) = \frac{V_{OC}}{R_{Sh}} \quad (3-15)$$

对于硅太阳能电池, R_S 很小, $R_S \ll 1\Omega$, 故对不同的光强, 总有 $V_{OC} \gg I_{SC}R_S$, 考虑

到 $R_S \ll R_{Sh}$, 式 3-15 可简化为:

$$I_{SC} = \frac{V_{OC}}{R_{Sh}} + I_0 \left(e^{\frac{qV_{OC}}{AKT}} \right) \quad (3-16)$$

上式表示考虑并联电阻 R_{Sh} 后, 不同光强下的 V_{oc} 和 I_{sc} 之间的关系; 考虑两种情况:

1、强光条件

此时, $V_{OC} \gg \frac{AKT}{q}$, 式 3-16 右边第一项较之第二项指数可略, 有:

$$I_{SC} = I_0 \left(e^{\frac{qV_{OC}}{AKT}} \right) \quad (3-17)$$

2、弱光条件

此时, $V_{OC} \gg \frac{AKT}{q}$, 则式 3-16 变为:

$$I_{SC} = \frac{V_{OC}}{R_{Sh}} \quad (3-18)$$

这就是测量 R_{sh} 的依据。

3. 1. 4 电性能温度系数的测试

实际测量时，光源的光强和电池的温度，都有可能变化。为了将电池的电性能统一到同一状态下必须用相应的温度系数进行折算。控制光强，使不同的光强对太阳电池进行照射，这样可求得各个光强时电池的电流密度或电压与温度函数的关系曲线。而不同光强和不同温度范围内电流密度或电压对温度的变化速率是不同的，一般是在标准测试状态附近测试的。如果规定的标准状态是 AM1.5 光谱，光强为 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ ，电池温度为 27°C ，先在标准温度下 T_0 下，测量电流密度 J_{sc0} 和电压 V_{oc0} ，然后提高温度约 10°C ，设为 T_1 ，测电流密度 J_{sc1} 和电压 V_{oc1} ；然后提高温度约 10°C ，设为 T_2 ，电流密度 J_{sc2} 和电压 V_{oc2} ，则电流密度或电压与温度系数分别为：

$$a = \frac{1}{2} \left[\frac{J_{sc1} - J_{sc0}}{T_1 - T_0} + \frac{J_{sc2} - J_{sc1}}{T_2 - T_1} \right] \quad (3-19)$$

$$b = \frac{1}{2} \left[\frac{V_{sc1} - V_{sc0}}{T_1 - T_0} + \frac{V_{sc2} - V_{sc1}}{T_2 - T_1} \right] \quad (3-20)$$

3. 2 光谱响应

太阳电池是一种将光转换为电能的半导体器件，它的功能与特性往往与光的特性联系在一起。因此，要评价太阳电池的特性参数，就有必要了解太阳光的特性以及太阳光对太阳电池的影响。

3. 2. 1 太阳辐射光谱

地球和太阳的距离是周期性变化的，太阳与地球的平均距离为 $1.495 \times 10^8 \text{ km}$ 。在大气层外这个平均距离处，垂直照射到单位面积上的太阳辐射功率基本是个常数，太阳的这个辐射强度称为太阳常数，即太阳的辐射通量。太阳常数可以在人造卫星上或其他高空飞行器上进行测量，目前公认的太阳常数 $S = 135.3 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 。因为没有经过空气吸收，所以太阳常数 S_0 又称为大气质量零辐射，记作：AM0。

如图 3-3 所示，AM0 辐射的光谱分布不同与理想的黑体辐射，这是由于太阳表面层以外的太阳大气对不同波长的光影响不同的缘故。

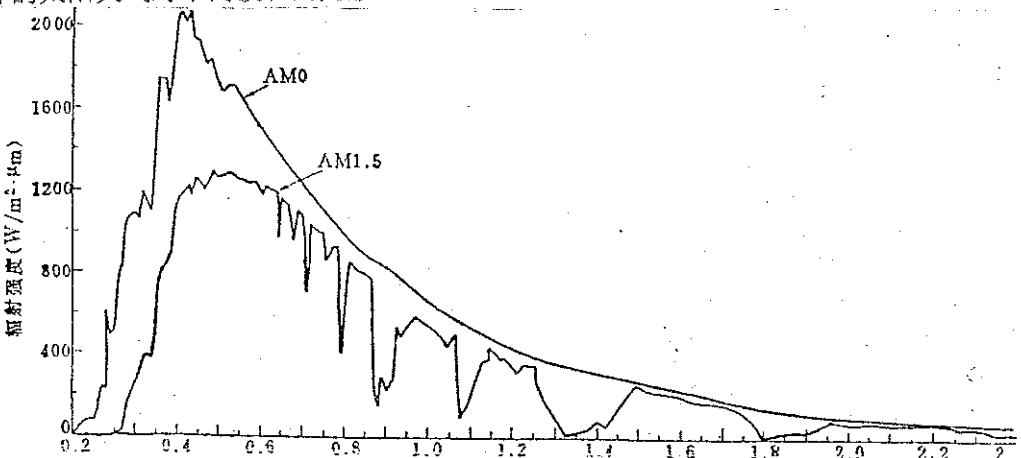


图 3-4，太阳辐射光谱分布

3. 2. 2 地球表面的太阳能辐射光谱

太阳辐射穿过地球大气时，由于瑞利（Rayleigh）散射、大气微粒以及灰尘粒子的散射和大气的吸收等作用，减少至 30%左右。在晴朗的天气，太阳辐射到达地面的衰减程度主要取决于穿过大气的光程长度。把太阳当顶时垂直于海平面的太阳辐射穿过的大气高度规定为一个大气质量，这时穿过大气的厚度最小。通常大气质量以“一个大气质量”的若干倍来表示，太阳正当头时大气质量是 1，计作 AM1，把这时的辐射称为大气质量 1（AM1）的辐射。当太阳光以天顶角 θ 斜入射时，大气质量由下式给出：

大气质量 = $\frac{1}{\cos \theta}$ (3-21)

其中，当太阳以天顶角 48.2° 斜入射时，辐射是 AM1.5；以天顶角 60° 斜入射时，辐射是 AM2。与大气外层空间不同，地球表面上太阳光的强度和光谱分布都有很大变化。为了便于进行地球表面不同位置上所测试的太阳电池特性之间的有意义的比较，规定了地面上的测试标准。国标所采用的标准太阳太阳光谱辐照度分布是总辐射太阳光，相应于 AM1.5 光谱分布。

3. 2. 3 太阳电池的光谱响应

太阳电池的光生电流的大小决定于光源的光谱辐照度和电池对各种光谱辐照度的响应。响应是指一定能量的单色光照在太阳电池上，产生的光生载流子被收集后形成的光生电流的大小。因此，它不仅取决于光量子的产额，而且取决于收集效率。为了描述光谱响应，引用等量子光谱响应和等能量光谱响应。工程上用等能量光谱响应，其数学表达式为：

$C(\lambda) = \frac{d j(\lambda)}{d \Phi(\lambda)} \Big|_{\lambda}$ (3-22)

如果把测出的光谱响应的峰值取为 1，这种分布称为相对分布。

3. 3 模拟器

从 3.3 节的论述我们知道太阳电池的测试必须在规定的标准太阳光下进行才有参考意义。因此从测试的角度来考虑，需要规定一个标准的地面太阳光谱分布。目前国内外的标准都规定，在晴朗的气候条件下，AM1.5 的光谱为标准地面光谱，原因是这种情况在地面上比较有代表性。而这样的标准阳光在室外能找到的机会很少，因此需要人造光源来模拟太阳光，即太阳光模拟器。

目前太阳能模拟器主要有稳态光模拟器和脉冲光模拟器两种：稳态太阳模拟器是在工作时输出辐照度稳定不变的连续光；脉冲光模拟器在工作时并不连续发光，只是在短时间内（通常毫秒量级以下）以脉冲形式发光。两者比较如下表 2 所示：

表 2.太阳模拟器特性比较

比较项目	稳态模拟器	脉冲模拟器
模拟太阳光特性	稳态	暂态脉冲式
对测试板温度影响	影响大，需温控系统	影响小，不需温控系统
对光源要求	功率要大，寿命长	瞬时功率大寿命长
光源电路	简单，只要功率电路	复杂，要有脉冲控制电路
光谱失配误差	不容易选择光谱失配误差小的光源灯	容易选择光谱失配误差小的光源灯
耗电量	大	小
光谱与电流关系	不密切	密切
成本	一般高	一般低

对太阳能模拟器的主要技术指标有以下四项：辐照度、辐照不均匀度、辐照不稳定性及光谱分布来评价。

辐照度：辐射度是入射到单位表面面积上的辐射功率 ($W \cdot m^{-2}$)，公式为：

$$M_e = \Phi_e / S \quad (3-23)$$

Φ_e 为总辐射通量， S 为发光面^[11]。

辐照度不均匀度检测：辐照度不均匀度是测试平面上不同点的辐照度来所。当辐照度不随时间改变时，辐照不均匀度按下式计算：

$$\text{辐照度不均匀度} = \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\% \quad (3-24)$$

式中： $E_{\max}$ — 有效辐照面全部范围内测得的最大辐照度， W/m^2

$E_{\min}$ — 有效辐照面全部范围内测得的最小辐照度， W/m^2

辐照不稳定性：

有效辐照面全部范围内任意给定位置上，在规定的时间内，辐照度随时间变化的最大相对偏差，用辐照不稳定性表示。可用下式计算：

$$\text{辐照度不稳定性} = \pm \frac{E'_{\max} - E'_{\min}}{E'_{\max} + E'_{\min}} \times 100\% \quad (3-25)$$

式中：

$E'_{\max}$ — 有效辐照面全部范围内，在规定时间间隔内测得的最大辐照度， W/m^2

$E'_{\min}$ — 有效辐照面全部范围内，在规定时间间隔内测得的最小辐照度， W/m^2

光谱失配误差：

光谱失配误差是模拟器光谱响应的量度，由下式计算：

$$\text{光谱失配误差} = \int \left(\frac{S_T \cdot E_O}{S_T \cdot E_O d\lambda} - \frac{S_S \cdot E_C}{S_S \cdot E_O d\lambda} \right) \left(\frac{E_S}{E_O} - 1 \right) d\lambda \quad (3-26)$$

式中：

S_T ：被测电池的光谱响应

S_S ：标准电池的光谱响应

E_O ：标准太阳光谱

E_S ：太阳模拟器的光谱

有上可以看出，在两种特殊情况下光谱失配误差消失：一种是太阳模拟器的光谱与标准太阳光谱完全一致；另一种是被测电池的光谱响应与标准电池的光谱响应完全一致。两种情况后一种更难实现，因为不可能每一片待测电池都配上和它光谱响应一致的标准太阳电池。因此，最好的方法是设计光谱分布和标准太阳光谱非常接近的太阳模拟器。

3.4 太阳能电池 I-V 特性的参数处理

要对太阳能电池的特性进行评价, 须对 I-V 数据进行分析处理, 计算出被测电池的太阳能电池的整套参数, 包括开路电压 V_{OC} 、短路电流 I_{SC} 、曲线因子 A 、转换效率 η 、串联电阻 R_S 、并联电阻 R_{sh} 、最佳工作点功率 P_m 、填充因子 $F.F$ 、最大功率点电压、最大功率点电流等。还要求给出 I-V 曲线, 需要对伏安特性的实验数据进行拟合。

3.4.1 I-V 解析模型^{[12][13][15]}

采用一定的模型拟合太阳能电池 I-V 特性的实验数据, 从而获得其拟合曲线及相应的数学模型, 这不仅是研制和生产太阳能电池时分析和改造其数据的重要依据, 而且是太阳能电池计算机仿真的需要。太阳能电池的理论模型包含着丰富的物理信息, 用它去拟合实验数据, 不仅可以获得拟合曲线的表达式, 而且可以获得理论模型中许多有明确物理意义的待定参数。下面介绍两种常用的解析模型。

一、单指数模型

理想的太阳能电池模型如下式:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right] \quad (3-27)$$

用上述简化的理论模型取拟合实验数据比较粗糙。下式为比较周全的模型如 2-32 所示:

$$I = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_0 \left(e^{q(V-IR_S)/AKT} - 1 \right) - \frac{I(R_S + R_L)}{R_{sh}} \quad (3-28)$$

其中:

I_L	光生电流
I_0	等效二极管的反向饱和电流
R_S	串联电阻
R_{sh}	并联电阻
A	曲线因子
K	普朗克常量
T	温度
Q	单位电荷
I	输出电流
V	输出电压

该式不仅考虑了 R_S 和 R_{sh} 对太阳能电池的影响, 而且用单指数形式概括地表示了不同机制产生的暗电流。高电压时: 式 3-28 中的 $A \rightarrow 1, I_0 \rightarrow I_{01}$, 暗电流 I_D 主要由电中性区的注入电流决定, I_{01} 就是该区的饱和电流; 低电压时:

式 3-28 中的 $A \rightarrow 2, I_0 \rightarrow I_{02}$, 暗电流 I_D 主要由空间电荷区的复合电流决定, I_{01} 就是该区的饱和电流; 在中等电压范围内, $1 < A < 2$, I_0 随 V 而变化, 没有固定的数值。

由于 3-28 已经很好地反应了太阳能电池的物理特性, 人们经常采用这个模型来处理 I-V 特性实验数据。

二、双指数模型

双指数模型是一种精度更高的模型, 将暗电流 I_0 直接表示成双指数的形式:

$$I = I_L - I_{01} \left\{ \exp \left[\frac{q(V + I \cdot R_s)}{A_1 K T} \right] - 1 \right\} - I_{02} \left\{ \exp \left[\frac{q(V + I \cdot R_s)}{A_2 K T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (3-29)$$

式中: I_{01} 和 A_1 是电中性区饱和电流和完整性因子, I_{02} 和 A_2 是空间电荷区饱和电流和完整性因子。在要求不太高的情况下, 直接采用理论分析的结果, 假定 $A_1 = 1, A_2 = 2$, 则可以比较快的获得拟合精度比较高的结果。

然而, 如文献^[14]所述, 对于实际获得的 I-V 曲线, A_1 和 A_2 并不恰好地等于 1 和 2, 特别是 A_2 偏离 2 比较大。为了进一步提高拟合精度, 在改进的双指数拟合模型中只固定 $A_1 = 1, A_2$ 作为待定参数。

3. 4. 2 拟合方法^{[18][23][24]}

方程 3-28 和 3-29 都是隐含的非线性方程, 我们不可能获得它们的解析解, 只有寻求近似的数值解法。对于非线性回归模型参数估计, Nash 和 Walker-Smith^[18]介绍了各种算法, 包括直接搜索法、Hooke-Jeeve 法、Nelder-mead 法、梯度法、截尾牛顿法、变尺度法等。目前, 国内外普遍采用的方法是 Gauss-Newton 法 (又称 Newdon-Raphson 法)。这些算法都是针对非线性回归模型提出, 但对超越非线性回归模型有很大局限性。

以 3-28 式为例: 我们不能得到 $I = f(V)$ 的方程形式, 只能写成 $I = f(V, I)$ 的形式, 是一个超越式。将需要获得的参数以一个矩阵表示: $\theta(I_L, I_0, A, R_s, R_{sh})$, 定义 $\theta_1 = I_L, \theta_2 = I_0, \theta_3 = A, \theta_4 = R_s, \theta_5 = R_{sh}$; 采用以下目标函数:

$$\phi(\theta) = \sum_{i=1}^n [I'_i - I_i]^2 = \sum_{i=1}^n [I'_i - f(V_i, I_i)]^2 \quad (3-30)$$

式中:

I'_i 为第 i 次测量电流值

V_i 为第 i 次测量电压值

I_i 为据模型方程由 V_i 计算的电流值

我们的最终目标是找到一个 θ^* 使 $\phi(\theta^*)$ 在 θ 可取值的范围内最小, 而后确定五个参数。

经典的非线性回归算法需要求解 $\frac{\partial \phi}{\partial \theta}$ 向量和黑尔矩阵 $H = \left[\frac{\partial \phi}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right]_{ij}$, 但 3-28

式是超越方程, 无法根据 3-30 求 $\frac{\partial \phi}{\partial \theta}$ 向量。因此, 我们采用数论方法给出求 θ 的最小二乘估计的一个序贯算法。

在介绍这个算法之前, 先说明一下使用的符号:

$[a, b] = \times_{i=1}^p [a_i, b_i]$, 表示 R^p 中的矩形

$\max[a] = \max_{1 \leq i \leq p} a_i$, 表示最大值

其算法如下:

1、找 θ 的初始估计 $\hat{\theta}_0 = (I_L, I_0, A, \lg R_S, \lg R_{Sh})$ 。确定初始矩形的半边长 d_0 ,

以 $\hat{\theta}_0$ 为中心, 以 d_0 为半径, 作初始矩形:

$$D_0 = [\hat{\theta}_0 - d_0, \hat{\theta}_0 + d_0] \quad (3-31)$$

$\hat{\theta}_0$ 的确定可根据当前测试的电池特性和经验, 可如下:

I_L , 可以取实测的短路电流作为初始值;

I_0 , 可以取 I_L 的 5% 作为初始值;

A , 由于在 1-2 之间, 我们取 $A = 1.5$;

$\lg R_S$, 我们取 1, 即 $R_S = 0.1\Omega$;

$\lg R_{Sh}$, 我们取 3, 即 $R_{Sh} = 1k\Omega$ 。

再确定向量 $d_0(d_{I_L(0)}, d_{I_0(0)}, d_{A_0}, d_{R_S(0)}, d_{R_{Sh}(0)})$, 其值分别如下:

$$d_{I_L(0)} = I_{SC} * 1\%, d_{I_0(0)} = I_0 * 10\%, d_{A(0)} = 0.5, d_{R_S(0)} = 2, d_{R_{Sh}(0)} = 2$$

2、在 D_t 上均匀散布 N_t 个点 $\{\theta_K^{(t)}\}_{K=1}^{N_t}$ 找 $K_0^{(t)}$ 使得:

$$\phi(\theta_{K_0^{(t)}}^{(t)}) = \min_{1 \leq K \leq N_t} S(\theta_K^{(t)}) \quad (3-32)$$

其中: $\theta_0^{(t)} = \theta_{K_0^{(t-1)}}^{(t-1)}, t \geq 1$

3、令 ε 为预先给定的适当小的正数。例如取 $\varepsilon = 10^{-5}$, 若 $\max\left(\frac{d_t}{\theta_t}\right) < \varepsilon$ 。

则取 θ 的最小二乘估计的近似值为 $\hat{\theta} = \theta_{K_0^{(i)}}^{(i)}$ 。否则, 令:

$$t = t + 1, d_t = d_{(t-1)} / 2, \hat{\theta}_t = \theta_{K_0^{(t-1)}}^{(t-1)}$$

$$\text{且使: } D = \left[\hat{\theta}_t - d_t, \hat{\theta}_t + d_t \right] \cap D_0 \quad (3-33)$$

返回公式 3-30

3. 5 标定方法及参数的校准

由前面的讨论, 我们知道太阳电池的测试和所处的环境关系紧密。因此要获得有意义的测试结果, 就需要有一个统一的标准。将非标准状态下的测试结果转变为标准状态就是太阳电池的标定过程^{[14][19][20]}。

为了确定太阳电池的测试标准, 美国和欧洲开展了很多工作, 并提出以 AM1.5 为地面阳光辐照度的标准状态。参数的校准是通过参考电池进行的, 而参考电池的标定主要有两种方法:

- 1、直射法, 也称 NIP 法。在晴朗的天气状态, 用直射辐射计 (NIP) 测量太阳的直射辐射度, 并同时测量被标定电池在相同视角内的短路电流, 计算出所测量的短路电流和直射辐照度的比, 然后校准到标准大气状态, 最后得到被标定电池在标准阳光状态下的短路电流值。
- 2、总辐射法。将被标定电池和总辐射能量测量装置放在同一水平面上, 测量被标定电池的短路电流 I_m 和阳光的总辐射能量 E_m 。为了容易校准到标准阳光状态, 在测量 I_m 和 E_m 的同时, 还必须测量地面阳光相对光谱分布 $E_r(\lambda)$ 和电池的相对光谱分布 $Q_r(\lambda)$ 。假定标准状态阳光光谱分布 $E_s(\lambda)$ 为已知, 则

在标准状态阳光下的短路电流 I_s , 可有下式得到:

$$I_s = I_m \cdot \frac{\int E_r(\lambda) d\lambda}{E_m} \cdot \frac{\int E_s(\lambda) \cdot Q_r(\lambda) d\lambda}{\int E_m(\lambda) \cdot Q_r(\lambda) d\lambda} \quad (3-34)$$

式中, 标定值 I_s 和实测值 I_m 之间相差一个修正项 C:

$$C = \frac{\int E_r(\lambda) d\lambda}{E_m} \cdot \frac{\int E_s(\lambda) \cdot Q_r(\lambda) d\lambda}{\int E_m(\lambda) \cdot Q_r(\lambda) d\lambda}$$

可以看出, 这个方法实际上就是光谱标定法, 只有确定了地面的标准状态阳光光谱分布, 被标定电池在地面标准状态下的标定值便可以唯一确定。

由以上两种方法可以实现对标准电池的校准, 测试的时候以这些电池为标准, 将被测电池在一定的光源和标准电池相比, 这样才可获得和标准状态较符合的值, 这一过程称为复现。把标准电池标定的数据复现到被测电池上有两种方法, 光源法和办绝对响应法^[22], 其中重点是光源法, 在 3-3 节进行了较详尽的论述。

尽管人工可以模拟出较为接近标准的环境,但为了更方便于各种条件下的测试,人们终结了一些经验公式,以便将非标准状态下的测试结果转变到标准状态下,这些公式都能很方便地在软件上得到实现。对于电压和电流的转换通常用以下两个公式:

$$I_2 = I_1 + I_{SC} \left[\frac{I_{SR}}{I_{MR}} - 1 \right] + \alpha(T_2 - T_1) \quad (3-35)$$

$$V_2 = V_1 - R_s(I_2 - I_1) - KI_2(T_2 - T_1) + \beta(T_2 - T_1) \quad (3-36)$$

式中:

I_1 , V_1 —待校正的特性曲线上,点的坐标;

I_2 , V_2 —校正后的特性曲线上,点的坐标;

I_{SC} —待测电池的短路电流;

I_{MR} —标准电池在实测条件下的短路电流;

I_{SR} —标准电池在标准条件或所需条件下的短路电流;

T_1 —测试温度;

T_2 —标准测试温度;

R_s —所测电池的内部串联电阻;

K —曲线校正因子;

α —所测电池在标准辐照度下,以及在所需的温度范围内(在 α 可视为常数的温度范围内)的短路电流温度系数;

β —和上述短路电流温度系数相对应的开路电压温度系数。

对于曲线校正因子 K 可以通过将试探值代入公式 3-35, 3-36 后和实测曲线相比较进行逼近。对于单晶硅和多晶硅电池,推荐取试探值 $K=1.25 \times 10^{-3} \Omega/^{\circ}\text{C}$ 。

第四章 太阳能电池测试系统

4. 1 系统工作原理及实现方法。

4. 1. 1 系统方框图

由前面的论述我们可知, 太阳能电池 I-V 测试系统主要包括光源、测试电路和计算机测试控制与处理三个部分。其框图如图 4-1 所示:

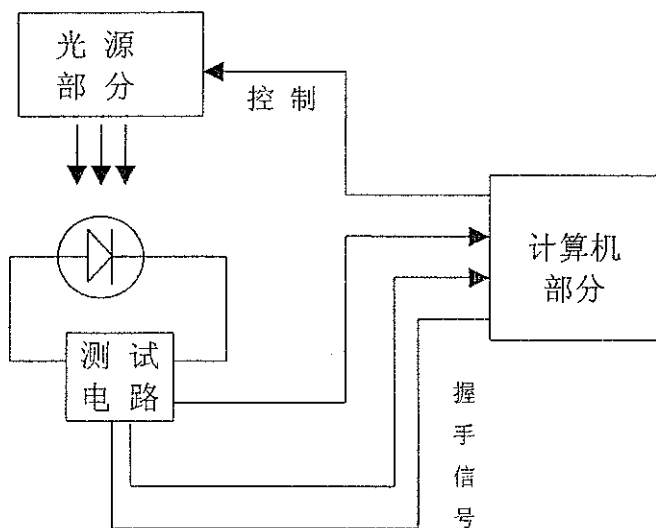


图 4-1. 单体太阳能电池测试仪总框图

4. 1. 2 光源

卤钨灯光源主要包括电光源电路、光路机械装置和滤光装置三个部分。光源分为稳定模拟器和脉冲模拟器两种。可采用的电光源有: 卤钨灯、冷光灯、氙灯、脉冲氙灯等。下面分别加以介绍:

- 1、卤钨灯, 卤钨灯的色温值为 2300K 左右, 它的光谱与日光相差很远, 红外线含量多, 紫外线含量太少; 它只能用于粗略的测量。
- 2、冷光灯, 冷光灯是卤钨灯和一种介质膜反射镜构成的组合装置。这种反射镜对红外线几乎是透明的, 而对其他光线起反射作用。因此, 它的光谱有了很大改善。它的色温可以达到 3400K, 但寿命很短。它只能用于简易测试。
- 3、氙灯, 氙灯的光谱分布比较接近日光, 但在 $0.8\mu\sim 1.0\mu$ 之间有一尖峰, 需用滤光片。由于氙灯的光谱比较接近日光, 现代的精密太阳模拟器几乎都用的是氙灯作光源; 但氙灯存在着装置复杂、有效面积很难做大等缺点。
- 4、脉冲氙灯, 脉冲氙灯发出的是脉冲光。它的光强大, 且光谱更接近于日光。这种光源可以获得更好的辐照均匀性; 同样, 它的缺点是装置复杂。

选用太阳模拟器光源的原则是选择的光源有尽量接近太阳光辐照的特性, 包括光谱能量分布和光脉冲的重复性等; 同时, 还要考虑光路设计满足测试所需的均匀性和准直角特征尺寸等。

由 3-2 节, 我们知道由于太阳能电池对不同波长的太阳辐射输出响应不同, 因此在相

同的辐照度下, 光谱能量分布不同, 太阳电池的输出特性和效率也不同。例如: 同一片硅太阳电池在空间应用 AM0 太阳辐射下与地面的太阳辐射下效率不同。地面的太阳辐照光谱在一天中变化很大, 而且不同地理位置太阳光谱也不尽相同。要使太阳电池的测试有实际意义, 就需要有一个标准。国际上规定 AM1.5 太阳光谱分布作为地面用的测量标准, 在 3.5 节讨论了标定的方法。在室内测试系统所用的太阳模拟器, 目前还没有一种能准确地完全复现地面太阳辐射的光谱分布, 常用比较接近 AM1.5 光谱的是氙灯、卤钨灯、ELH 灯等, 其论述如前述。

由前所述, 模拟光源的光谱分布和标准太阳光谱之间的失配是造成太阳电池伏安特性测量误差的主要因素之一。由第三章^{[1][10]}得被测电池在标准条件下的短路电流 I_{TO} 与它在模拟器光源下的短路电流 I_{TL} 之间的关系为:

$$I_{TO} = F \cdot I_{TL} \quad (4-1)$$

被测电池的光谱修正因子:

$$F = \frac{\int E_0(\lambda) R_T(\lambda) d\lambda \cdot \int L(\lambda) R_S(\lambda) d\lambda}{\int E_0(\lambda) R_S(\lambda) d\lambda \cdot \int L(\lambda) R_T(\lambda) d\lambda} \quad (4-2)$$

式中:

$E_0(\lambda)$ 为标准太阳光谱能量分布 (AM1.5);

$L(\lambda)$ 为灯光的光谱能量分布;

$R_S(\lambda)$ 为确定光强所采用的标准电池的光谱响应;

$R_T(\lambda)$ 为待测电池的光谱响应

由此可见, 太阳模拟器对太阳光谱模拟的失谐所造成的测量误差不仅和模拟器的光谱响应有关, 又和标准电池与被测电池的光谱失谐有关。减少误差因素的办法有两种: 一是选用光谱匹配较好的灯, 并加以适当的滤光装置, 使其光谱响应和日光尽量接近; 二是使用与被测电池的光谱相应曲线相同的标准电池来标定光谱的光强。国际上规定, 如果被测电池和标准电池的材料一样, 对模拟器的光谱要求可以不十分严格。

基于此, 我们在选择光源灯的时候, 一定要综合考虑。一方面考虑到拟合太阳光的要求, 另一方面, 尽量采用已经商品化的光源灯, 以减少用户的使用成本和更换灯管的困难。这里建议选用脉冲氙灯: 在理论上脉冲氙灯有较高的色温, 可见光波段与太阳光匹配较好。虽然近红外部分往往有较强的线谱, 但其所占能量比例不大; 总体上脉冲氙灯的光谱分布比钨灯和 ELH 灯等都要更接近太阳; 脉冲氙灯经过自配的光谱测试系统的测试, 其模拟太阳光的性能较好; 这种脉冲氙灯寿命长, 市面上容易购买; 更重要的是, 采用脉冲氙灯可以大大地减少温度效应对电池的影响, 这样整个测试系统就免掉了恒温控制系统, 降低了仪器成本, 提高了测试精度, 简化了操作程序。氙灯光谱如图 4-2 所示:

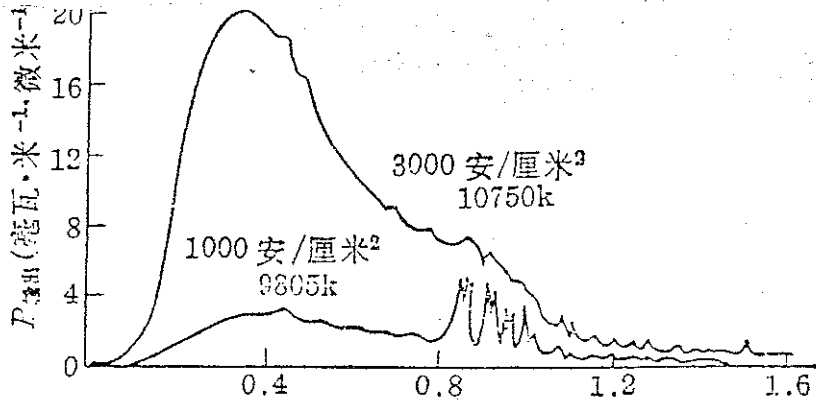


图 4-2. 汞灯光谱

光源选定以后的任务是设计光路，光路的设计是模拟器的一项重要内容。这里不仅要考虑光的均匀性、稳定性，控制电路的简易性，还要考虑调试的简单性等等因素。可设计为如图 4-3 形式：

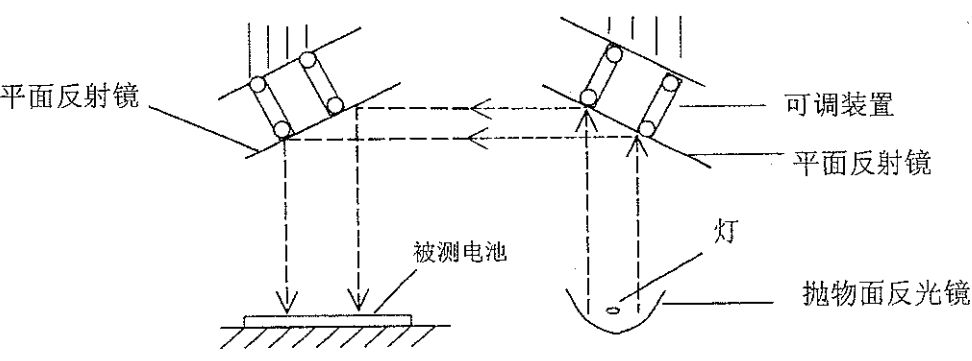


图 4-3：模拟器的光路示意图

光的均匀性：光的均匀性直接影响测量结果的准确性。光的均匀性和光路关系紧密。国际标准把模拟器按均匀性定为 A、B、C 三级。我们对光路作了许多次试验和改进，反光面采用抛物面型，采用意大利进口的 Art 230 漫反射铝板做成抛物面，可产生很好均匀性的脉冲光。脉冲汞灯发射光进行漫反射后再经过两次 45°角平面镜反射，然后经过光径 $\varnothing 200$ 左右的光孔投射到被测台面上。为了获得均匀性 $< \pm 5\%$ 的 $\varnothing 150\text{ mm}$ 的光斑，作为被测电池的模拟光源，我们把 45°角平面反射镜做成可调试装置，并且保证调整好之后能固定。

光强及稳定性：一般普通稳态模拟器的太阳电池测试仪在时域范围内不仅要考虑光源对被测电池温升的影响的同时，还要不断校正光强并增加其时间的稳定性。为了解决光源稳定性问题，我们采用钳位电压式电子负载作为测试电路，就降低了对光强稳定性的要求。这是因为我们采用钳位电压式电子负载，它的测试原理是：

让参考电池和被测电池同时被光照射，参考电池把光信号转换成电流信号，再经电流检测转换成电压信号。参考电池产生的电压信号将与光强成正比。同时被测电池也产生与参考电池相类似的电流信号，同样也被转换成电压信号。由于光是脉冲的，光强对时间的函数是一个脉冲（如图 4-4）这样参考电池和被测电池产生的光电流信号也是一个对时间的函数脉冲，并且两者同相。如果我们设定一个与参考电池的电流信号（转换为电压信号）作比较的电压信号，当参考电池的电流信号达到某一个值时（并没有到光脉冲的顶峰时），我们就通过采样保持电路把被测电流信号保持起来。只要我们设定的参考电压所对应的光强正好是标准光强，电路中保持的电流信号也就是标准光强下产生的被测电池的电流信号。

流值。只要测试电路反应的时间足够快，就能在 t_0 时刻锁定被测电池的电流信号。我们在电路中做了许多改进，已完全达到这个要求。综上所述，本系统中光源的脉冲光强虽然是一个时间不稳定的量，但我们只在标准光强的时刻锁定被测电流信号，只要光源给出的脉冲光强使参考电池所产生的光电流的峰值超过参考电压（标准光强的参考点），测试电路就可工作，而不要求脉冲光源的光强对时间有特别的稳定性。这是本测试系统的一大特点，这样我们就为了解决光源稳定性问题。

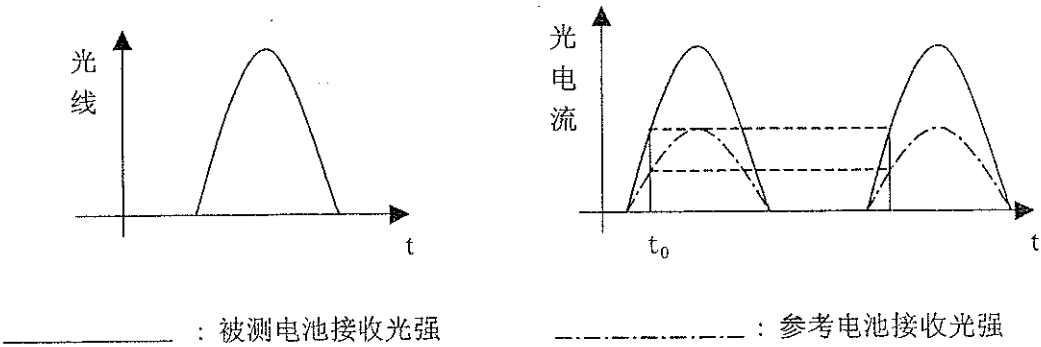


图 4-4. 光强和光电流波形示意图

这样，我们就可得到模拟器的方框图，如图 4-5 所示：

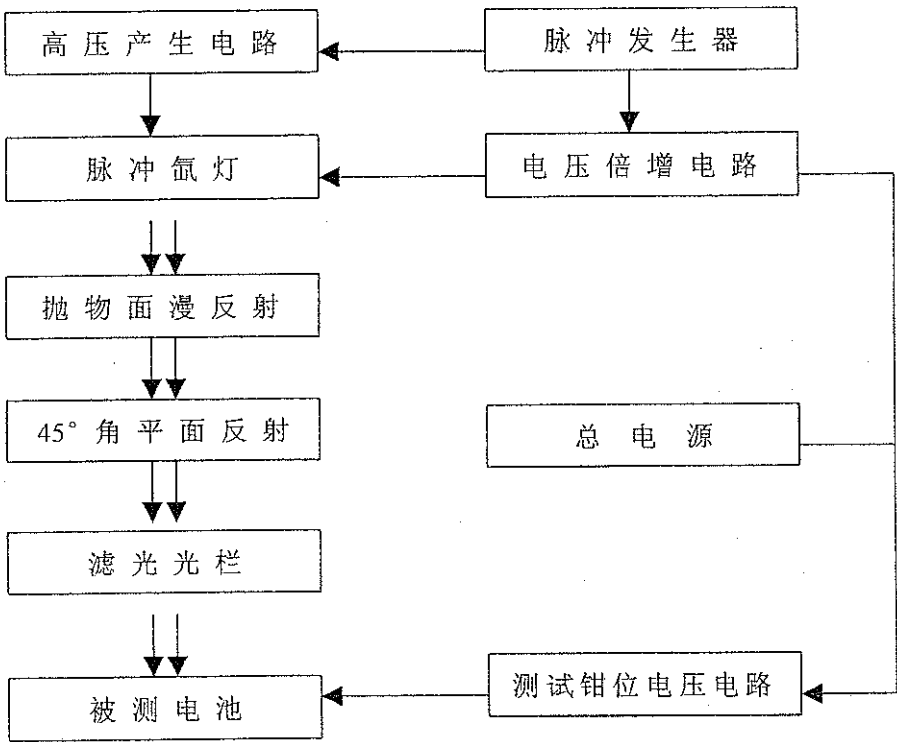


图 4-5 单体太阳电池测试仪光源部分方框图

4. 1.3 电子负载电路和光源控制电路

在第三章里我们讨论了光伏电池 I-V 特性的测试原理，我们了解到电子负载在测试中的重要性，而模拟器一直是太阳电池测试中最关键的部分。因此，电子负载电路和光源

控制电路是测试系统电路部分中最重要的部分。我们可采用如下方框图来设计电路：

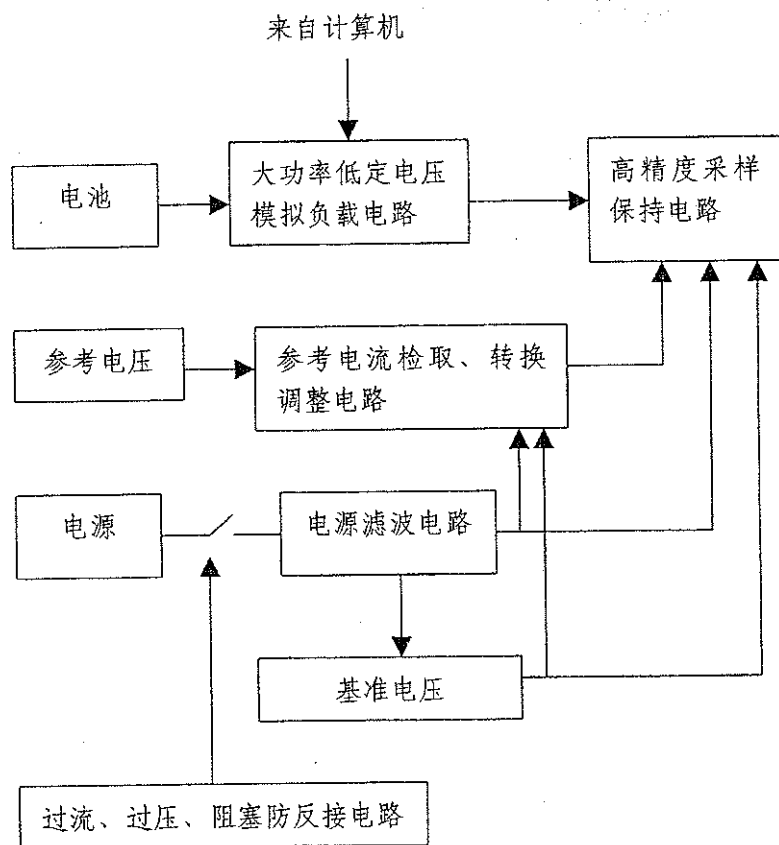


图 4-6 单体太阳电池测试仪测试电路方框图

系统测试电路主要由五部分组成：

- 1、高精度采样保持电路，高精度采样保持电路实现电池输出电流的检取、保持。
- 2、大功率低电压模拟负载电路，大功率低定电压模拟负载电流电路是一个电压一定的电子负载，其电压加在太阳电池两端，并接受计算机控制。
- 3、高信噪比的参考电池电流检取、转换、调整电路等三大部分构成。高信噪比的参考电池电流检取电路将与光强成比例的光电流信号转换为电压作为参考电压，再用此参考电压去控制采样保持器锁定电流信号。
- 4、基准电压电路，基准电压电路主要是为手工分拣时提供 $0 \sim 0.7$ 左右的基准电压。
- 5、电源信号滤波电路、过流过压、阻塞、防反接等电路等。电源信号滤波电路保证电源提供的电压纯净稳定。

其电路方框图如图 4—7 所示：

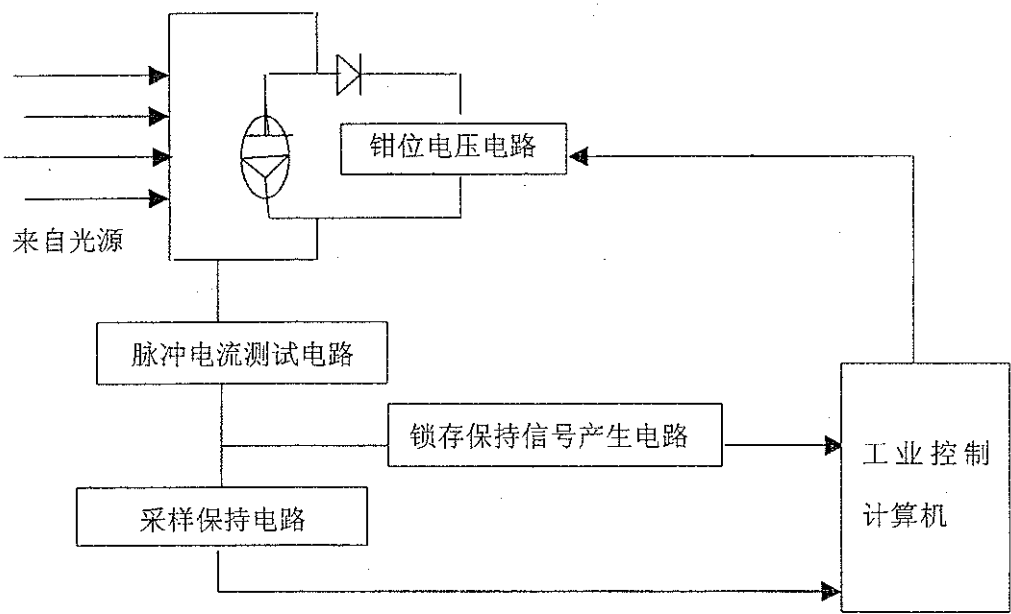


图 4—7 单体太阳能电池测试仪测量电路原理框图

本系统的光源控制电路主要由以下部分组成：

- 1、电容充放电电路，电容放电中压电路主要完成供给氙灯发光的电能准备，并且保证给电灯一定的电压。
- 2、起辉高压电路，起辉高压电路在高压启动脉冲信号的作用下产生上万伏的电压，使气体电离、氙灯放电发光。
- 3、高压启动脉冲信号电路高压启动脉冲信号电路由定时电路、方波产生电路组成，产生可以调整的信号方波。
- 4、光电耦合电路及过流保护电路等电路。

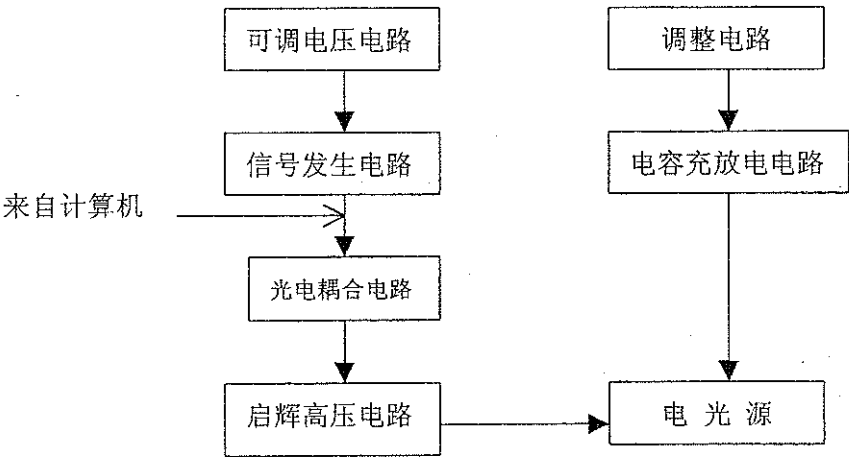


图 4-8 电源控制电路框图

4. 1. 4 元件的选择^[26]

测量电路的元件选择非常重要。光源我们选择脉冲光源，所以测量电路测量的电池输出电流是一个脉动信号；要获得一个稳定、准确的电流信号，电路必须具有快速响应能力，而且还要实现防止振荡的功能。因此在选择元件时，要尽量考虑这些重要因素。运算放大器最好采用快速翻转的电压比较器、负反馈电路最好采用电容进行频率补偿、功率管最好采用快速元件。另外，为了减少温度漂移，电阻、电容都采用高精度低泄漏的器件，采用优质基准电压电路，电路设计最好采用可靠的最新器件，所有电路尽可能采用模拟集成电路，使本测量电路结构简单、可靠、精确、稳定。

4. 1. 5 计算机控制与数据采集、处理及显示

随着计算机技术的高速发展，特别是微型计算机深入到社会的各个领域，出现计算机辅助的太阳能测试系统，它采用 PC 机、单板机或单片机辅助测量，能够实现全自动、高精度的测试和参数计算、曲线绘制。这样不仅使太阳电池的测试效率大大提高，也提高了测试的准确程度。测试系统的计算机部分主要由 A/D、D/A、工业控制机和测试软件组成，主要完成对电光源电路的闪光脉冲的控制、I-V 数据的采集、自动处理、显示等功能，从而实现对太阳电池的测试。

在我们设计的系统中，我们对硬件和软件要同等对待，不可轻视任何一方：

- 1、硬件部分除了功能上满足要求以外，一般还要求可靠性高、抗干扰能力强。对 A/D、D/A 卡，我们选用 LEO（台湾大众）的 LEO-8216GP 接口、工控机选用的是 LEO-Pentium 166 计算机。下表是几种 AD/DA 卡特性比较：

表 4-1.几种 AD/DA 卡特性比较

品名	品牌	分辨率和有效数字	0~10 范围时分度	有无程控增益	有无自带基准源	价格	性能价格
A/D 卡	LEO 台湾 16 位卡	16 位 (65535) 4 位半	10/65535	有	有	高	高
	P133 上海 12 位卡	12 位 (4096) 3 位半	10/4096	无	无	低	较低
D/A 卡	LEO 台湾 12 位卡	12 位 (4096) 3 位半	10/4096	无	有	高	高
	P130 上海 12 位	12 位 (4096) 3 位半	10/4096	无	无	低	较低

- 2、软件编制要求容错性好、界面良好，具有智能的特点。，如表 4-2 所示。

表 4-2.几种软件开发环境比较

类型	熟悉程度	开发 Windows 程序难度	面向硬件难易	能否直接加入汇编	是否基于面向对象式编程方式
C 语言	最熟悉	难繁	方便、中断可用	能	不是
VB	不熟悉	易	不方便、中断不可用	不能	不是
VC++	不熟悉	易	方便、中断不易用	能	是

最后测控软件的编制我们运用 Windows 95 作为平台，选用 Microsoft 公司的 Visual C++

5.0 面向对象编程方式编程^[27], 这样可以保证本系统对软件的容错性好、界面良好的要求, 这也是本系统的另一大特点。
于是可以得到其测控部分框图, 如图 4-9 所示:

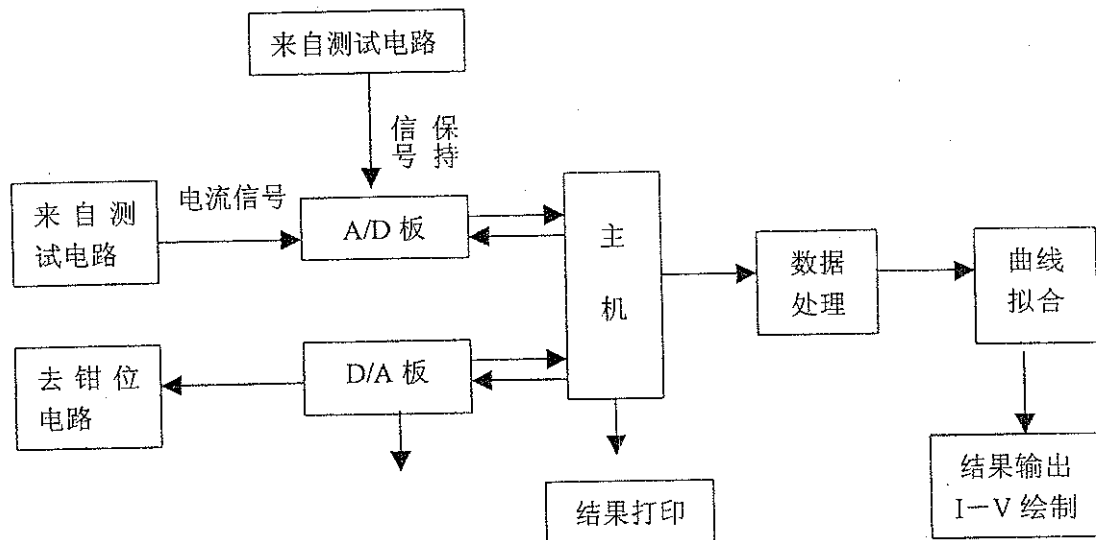


图 4-9. 太阳能电池测试仪计算机部分方框图

下面进一步讨论 A/D、D/A 转换卡的选择以及软件的设计:

- 1、A/D 转换卡。A/D 卡的功能, 一方面检测测量电流, 完成数据的采集。另一方面, 还要作为握手信号的检测通道、以判断电流信号是否锁存好。在 A/D 卡的 37 芯 D 型接口中我们把 A/D 卡的其他通道都接近, 以免其他通道对测量通道的影响。首先应考虑 A/D 的转换精度, 这是本系统选择的一个重点。12 位 A/D 卡具有 3 位半的转换精度(4096), 16 位转换卡具有 4 位半的转换精度(65535)。本系统要求分辨率到 mA 以下。理论上讲, 在最大测量范围是 4A 的前提下电流测量精确到 1mA, 则要求 A/D 卡的最大数字值为 $4/1 \times 10^{-3} = 4000$, 12 位卡 A/D 能达到此要求 ($4096 > 4000$), 但是由于 A/D 卡本身具有一定的误差, 要想获得 0~4A 范围分辨到 1mA 还必须使用 16 位的 A/D 转换卡。若把测量范围定为 0~10A, 则 16 位 A/D 的理论分辨率是 $10/65535 \approx 1/6 \times 10^{-3} A = 1/6 mA$ 。如果再加上 16 A/D 卡的误差, 其最小分辨率也应在 1/2mA 左右。因此 16 A/D 卡完全满足要求。
- 2、D/A 转换卡。D/A 转换卡的作用, 一方面要给测试电路一个箝位电压, 另一方面要给一个启动脉冲信号, 使光源闪光。D/A 转换卡的选择要考虑电压范围, 分辨率等因素。本系统的电压要求范围是 0~0.7V 分辨率要求至少 1mA, 选择 12 位 D/A 测分辨率能到 $0.7/4096 \approx 0.7/4 \times 10^{-3} V = 0.2mV$ 。如果除却因 12 位 D/A 的本身的误差, 则分辨率也在 0.5mV 以内。因此, 本系统的 D/A 转换卡的分辨率是满足的。
- 3、测控软件。测控软件主要完成光电流信号的检取、采样, 保持好信号的检取和控制光源的输出、界面的操作和数据处理以及结果显示等功能。其程序框图如图 4-10 (见下页) 所示, 下面详细讨论:

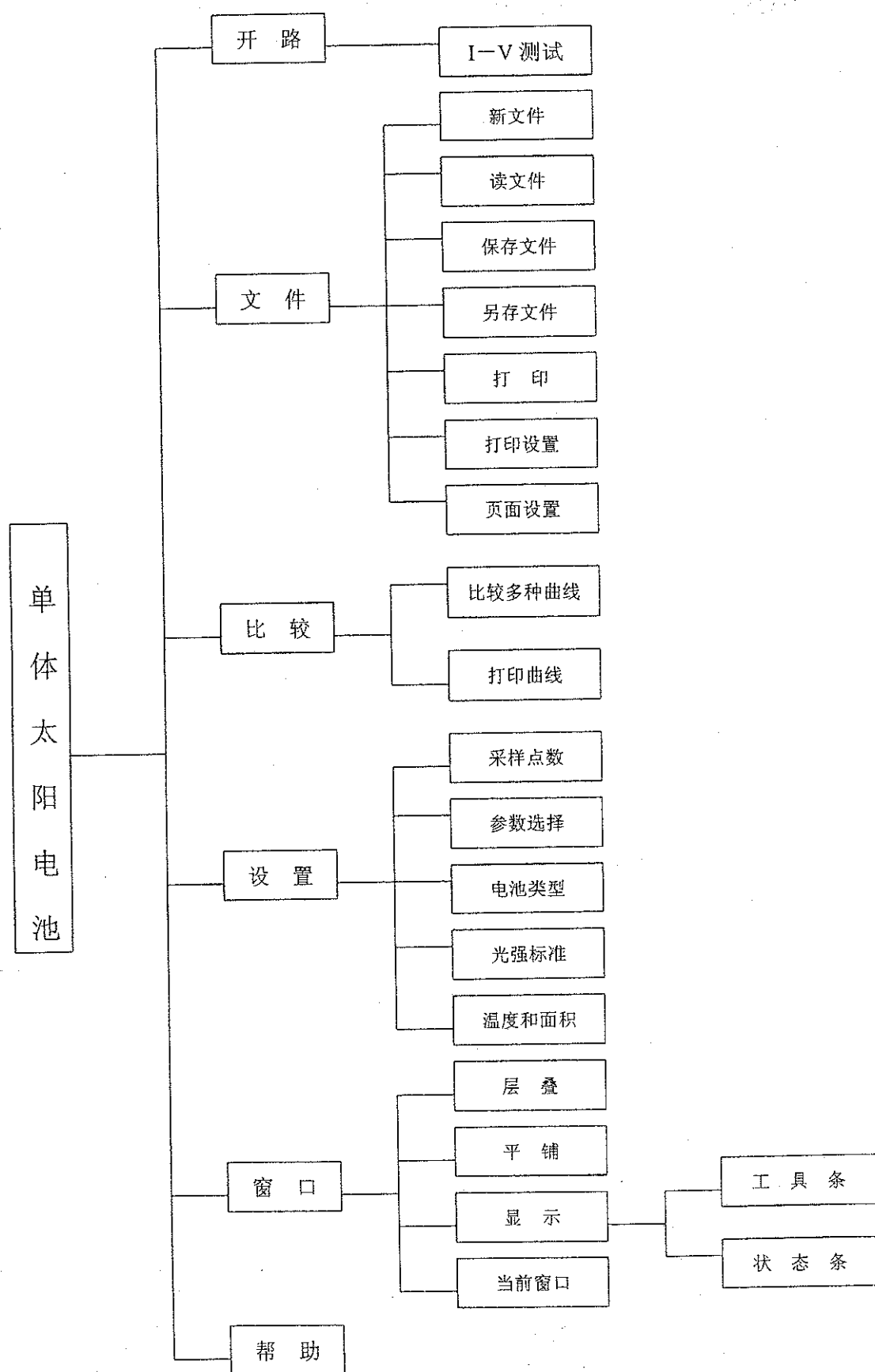


图 4-10. 单体太阳电池测试系统菜单结构图

下面给出一些测试实例中的操作画面：

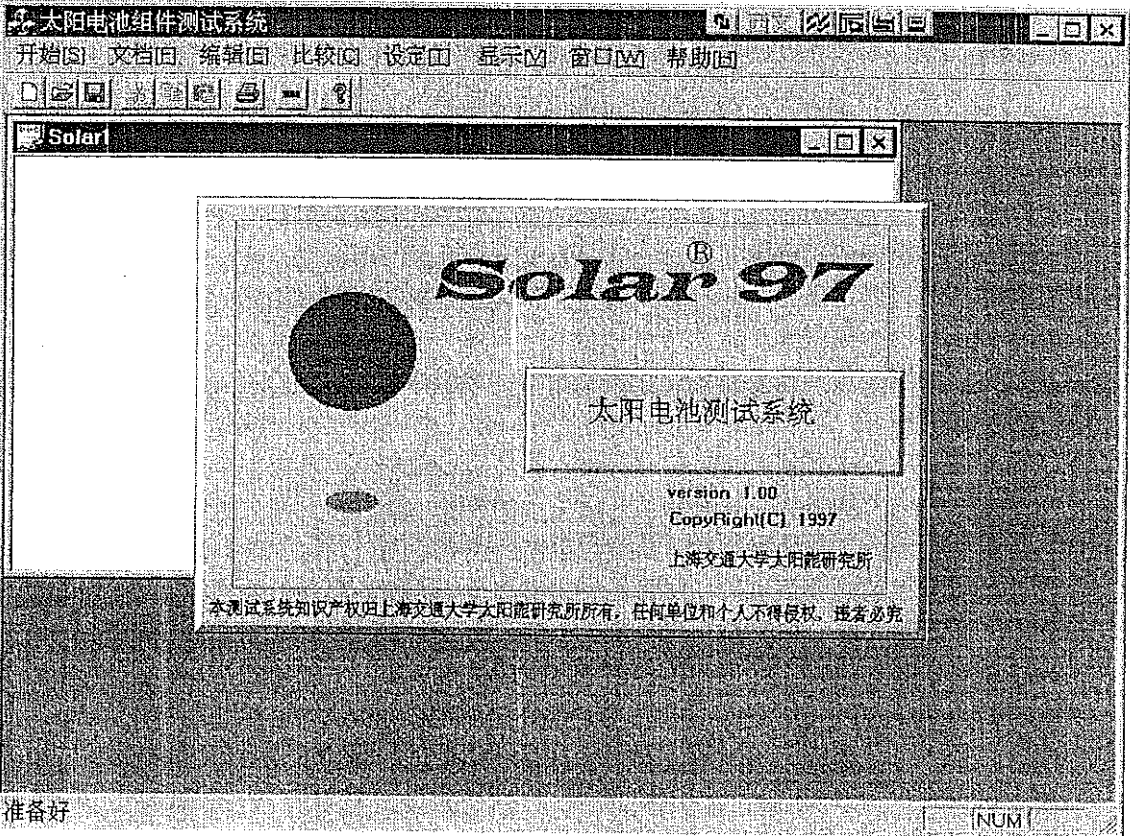


图 4-11、测试系统软件界面

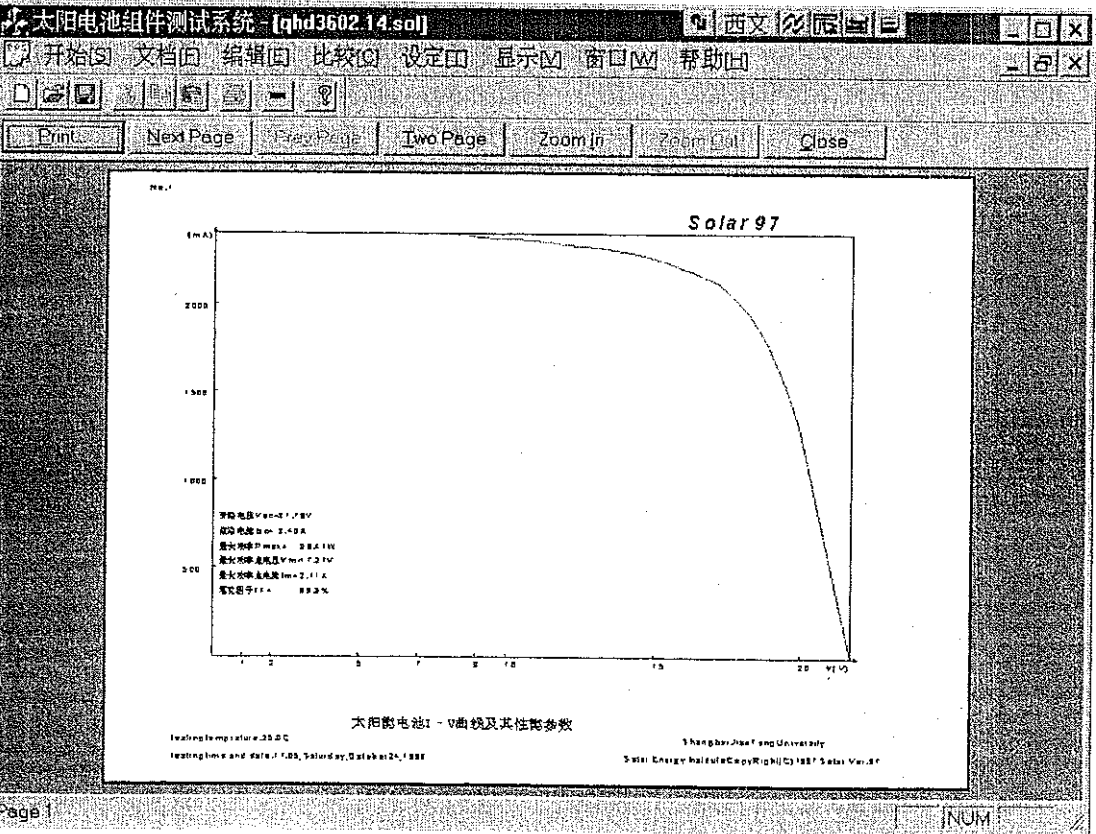


图 4-12、I-V 曲线图

A、面向对象程序设计

本系统的测控程序完全按照面向对象的程序设计的方法设计的,把程序分成文档、视窗、采样点数对话框、参数选择对话框、电池类型对话框、光强标准对话框、温度面积对话框、采样进程对话框等一系列对象。分别对每个对象进行编程。在编程时,只需考虑当前对象,而不用考虑总体程序的执行进程,只要保证所要获得的数据能按照各个对象的转递方式进行传递,就可以获得想要获得的输入参数。Visual C++ 为我们提供了大量可以派生的基类和派生类。我们根据这些类分别派生出应用类,也就是应用对象。我们知道:子类对象具有分类的一切特性。因此,我们类生出来的对象都具有各自分类的特点和功能。其中派生的视对象具有数据结果输出显示的功能,主框架对象(Main Frame)是本程序的 Windows 框架,它主要构成本测试程序的主界面画面,文档对象的父类是 CD 类,该父类具有文档格式完成并存储、读取的功能,这样应用文档对象也就具有这样特点。另外,我们在应用文档对象中添加了数据系列化的功能,保证实现数据的存储。各种对话框除了具有其父类显示对话框,为输出输入数据作编辑准备等功能外,还有完成对话框内变量和文档类变量之间的数据交换。面向对象编程的特点之一就是不用考虑程序指针的流向,只用考虑你所要处理的对象还需要哪些功能,然后在该对象的某一位置或多个位置添加完成此功能所需要的代码。这两个问题回答清楚了,面向对象的编制就迎刃而解了。

B、数据的分析处理和显示

计算机通过 A/D 卡采集来的 I-V 数据,被我们存储 CArray 类的一个点数组对象中。以方便后续的处理和显示,系统软件对 I-V 数据进行分析处理,计算出被测电池的开路电压、短路电流、最佳工作点功率、最佳工作点电压、最佳工作点电流、填充因子、转换效率、串联电阻、并联电阻。另外,还给出 I-V 曲线。由 3.4.1 和 3.4.2 我们知此系统对数据的处理采用一元线性回归的方法,解决了回归过程中 $I = f(v)$ 模型不解析和寻优过程不收敛的难题,实现电池的特性参数计算和 I-V 曲线绘制合二为一。

4. 2 测试结果与讨论:

由于脉冲太阳模拟器 IEC (国际标准) 和 GB (国标) 都没有,所以只能本系统是参照稳态太阳模拟器的特点,确定光辐射和电测系统综合测试的方法。

太阳能电池测试系统的测试评估一般是从以下三个方面进行的:

- 1、脉冲太阳模拟器,测试的内容包括:光辐照度可调范围、有效辐照面积、辐照不均匀度、辐照不稳定性及光脉冲宽度等;
- 2、电性能参数,测试的内容包括:可测电压范围、可测电流范围、开路电压测量的精度、短路电流测量的精度、最佳工作点电压测量的精度、最佳工作点电流测量的精度、最佳工作点功率测量的精度、填充因子测量精度、转换效率测量精度、所测电压分辨率、所测电流分辨率、所测功率分辨率等。
- 3、整机特性,测试的内容包括:整机温度特性、本机峰值特性等。

下面分别列出单体太阳能电池测试系统和组件测试系统的结果,如表 4-1 和 4-2 所示:

表 4—1 JD01 型单体太阳能电池测试仪测试表格

脉冲太阳模拟器	测试内容	测试方法简述及来源	测试结果详述
	光辐照度可调范围	参考太阳电池	0~200mw/cm ²
	有效辐照面积	毫米分辨率米尺测量	Φ 150mm
	辐照不均匀度	光电探测器等	±4%
	辐照不稳定性	太阳电池	±2%
	光脉冲宽度	记忆示波器等	5ms
电性能参数	可测电压范围	五位半数字电压表	0~0.7V
	可测电流范围	三位半万用表	0~4A
	开路电压测量的精度		≤1%
	短路电流测量的精度		≤1%
	最佳工作点电压测量的精度		≤1%
	最佳工作点电流测量的精度		≤1%
	最佳工作点功率测量的精度		≤1.4%
	填充因子测量精度		≤2%
	转换效率测量精度		≤2%
	所测电压分辨率		0.01V
	所测电流分辨率		0.01A
	所测功率分辨率		0.01W
	测试用标准电池特性等级		一级
整机特性	整机温度特性测试		0.5%/℃
	本机峰值特性		1.5Kw
	尺寸		0.6m×0.5m×0.4m
	重量		25kg
	工作环境要求		25±1℃
	电源要求		220V±10%,50HZ
	辐射光束的视角		10°
	辐射光束的准直部分		30°

测试用到的主要仪器有：

- A、米尺；
- B、光电探测器；
- C、数字记忆示波器；
- D、数字电压表；
- E、标准太阳电池；
- F、测试用太阳电池；
- G、数字万用表；
- I、信号发生器；
- J、功率计；
- K、光谱测试仪；
- L、相位测试仪；
- M、分光仪器；
- N、斩波器；
- O、称重器；
- P、湿度计；
- Q、温度计；

下图是 JD—02 型太阳能电池组件测试台测试报告：

表 4-2 JD-02 型太阳电池组件测试台测试表格

脉冲太阳模拟器	测试内容	测试方法简述及来源	测试结果详述
	光辐照度可调范围	参考太阳电池	$0 \sim 200 \text{mw/cm}^2$
	有效辐照面积	毫米分辨率米尺测量	$1.3 \times 0.6 \text{m}$
	辐照不均匀度	光电探测器等	$\pm 4\%$
	辐照不稳定性	太阳电池	$\pm 2\%$
	光脉冲宽度	记忆示波器等	5ms
电性能参数	可测电压范围	五位半数字电压表	$0 \sim 24 \text{V}$
	可测电流范围	三位半万用表	$0.1 \sim 5 \text{A}$
	可测组件尺寸范围	毫米分辨率米尺测量	宽 $\leq 0.6 \text{m}$, 长 $\leq 1.2 \text{m}$
	开路电压测量的精度		$\leq 1\%$
	短路电流测量的精度		$\leq 1\%$
	最佳工作点电压测量的精度		$\leq 1\%$
	最佳工作点电流测量的精度		$\leq 1\%$
	最佳工作点功率测量的精度		$\leq 1.4\%$
	填充因子测量精度		$\leq 2\%$
	所测电压分辨率		0.01V
	所测电流分辨率		0.01A
	所测功率分辨率		0.01W
	测试用标准电池特性等级		二级
整机特性	整机温度特性测试		$0.5\%/^{\circ}\text{C}$
	本机峰值特性		4Kw
	尺寸		$2.5 \text{m} \times 1.5 \text{m} \times 0.8 \text{m}$
	重量		250kg
	工作环境要求		$25 \pm 1^{\circ}\text{C}$
	电源要求		$220 \text{V} \pm 10\%, 50 \text{HZ}$

JD-02 型太阳电池组件测试台测试所使用的仪器和单体电池的基本相同, 要注意这里选用的标准电池组件是二级。下面将本课题研制的单体电池测试仪和太阳电池组件测试仪与几家国外主要厂商生产的产品加以比较, 见表 4-3 和 4-4。国外生产太阳电池测试设备的厂商主要有美国的 Spire 公司、EETS 公司和 ESTI 中心等, 其中 Spire 公司是世界最大的太阳电池设备设计和生产厂商, 目前世界 90% 的光电池产品生产企业是使用 Spire 公司的设备和生产线。

表 4—3 JD01 型单体太阳电池测试仪与国外产品比较

主要技术指标	Spire 公司 SPI-CELL TEST150	Spire 公司 SPI-CELL TEST150	上海交大太阳能所 JD01 型单体太阳 电池测试仪
有效辐射面积	15cm×15cm	18cm×18cm	φ 15cm
光 源	氙弧灯	脉冲氙灯	脉冲氙灯
	光谱 AM1.5	光谱 AM1.5	光谱 AM1.5
	光强 70~110mw/cm ²	—	光强 0~200mw/cm ²
	灯寿命 1 千小时	灯寿命 1 千小时	灯寿命 10 万次以上
模拟光不 均匀度	2%	3%	≤±4%
测试范围	电压 0~5V	电压 1.25,2.5,5,10V	电压 0~0.7V
	电流 0~4A	电流 0~10A	电流 0.1~4A
分辨率	电压 5ppm (满刻度)	电压 12bit (满刻度)	电压 0.01V (12bit)
	电流 5ppm (满刻度)	电流 12bit (满刻度)	电流 0.01A (16bit)

表 4—4 JD02 型太阳电池组件测试仪与国外产品比较

主要技术指标	Spire 公司 SPI-SUN SIMULATOR 4601	EETS 公司 PV Module Testers	上海交大太阳能所 JD02 型太阳电池 组件测试仪
有效辐射面积	200cm×137cm	150cm×150cm	120cm×60cm
光 源	氙弧灯	脉冲氙灯	脉冲氙灯
	光谱 AM1.5	光谱 AM1.5	光谱 AM1.5
	光强 70~110mw/cm ²	70~100mw/cm ²	光强 0~200mw/cm ²
	灯寿命 50 万次	灯寿命 1 千小时	灯寿命 10 万次以上
模拟光不 均匀度	≤±3%	≤±2%	≤±4%
测试范围	电压 0~100V	电压 0~600Vdc	电压 0~24V
	电流 0~20A	电流 0~75A	电流 0.1~5A
分辨率	电压 0.0005V 在最敏感范围	电压±1% (满刻度)	电压 0.01V (12bit)
	电流 5ppm 在最敏感范围	电流±1% (满刻度)	电流 0.01A (16bit)

4. 3 总结

经过一年多的努力我们克服多种困难，研制和开发了太阳电池的单体、组件测试系统。这不仅提高了我们对太阳电池测试理论的进一步认识，更重要的是我们在设计、制作、调试等诸多方面积累了丰富的经验。现在我们已具备生产高的稳定性、重复性、全自动、功耗小且具有良好光谱响应的太阳电池测试设备的基础。

最后，我想以上海科学技术情报研究所一九九八年十一月二十四日完成的 980907 和

980907 两份“上海市科技成果水平检索证明”中的两段话结束这篇论文：

1、“经分析对比上海交通大学太阳能研究所研制开发的‘JD01 型单体太阳电池测试仪’采用了钳位式电子负载，在电路上保证测量数据的重复性不受光脉冲大小和波形的影响。大大提高了仪器的可靠性和抗干扰性。确保了本机的重复性 $<\pm 2\%$ 。因此认为该成果达到国际先进水平”。

2、“经分析对比上海交通大学太阳能研究所研制开发的‘JD02 型太阳电池组件测试仪’特别设计了带有漫反射反光罩和 3 自由度可调节灯具座，保证光源在目标待测面上的光辐射不均匀度 $<\pm 4\%$ 。研制成功了钳位式电子负载，在电路上保证测量数据的重复性不受光脉冲大小和波形的影响。大大提高了仪器的可靠性和抗干扰性。确保了本机的重复性 $<\pm 2\%$ 。因此认为该成果达到国际先进水平”。

致 谢

首先,我向我的两位导师郭里辉教授和崔容强教授表示衷心的感谢。感谢两位教授给了我这个机会,从事这项非常有意义的工作。不仅让我接触到一个全新的领域,学到了很多知识;更重要的是导师严谨的治学态度,积极进取的敬业精神,宽厚的胸怀给了我良好的启迪,这必将使我终身收益。我特别感谢崔容强教授在我论文期间的指导,使我能顺利完成论文。

我还要感谢徐林老师和丁正明老师,感谢丁老师在电路方面的指导;特别感谢徐林老师在方方面面的照顾,一年多的愉快合作,使我获益非浅,徐林老师认真负责的作风给了我深刻的影响。感谢黄燕老师,徐秀琴老师,孙铁国博士,王永东博士在各方面的帮助。感谢周之斌博士,曾为民硕士,肖威兵硕士,万刚硕士;工作人员程平芳、陈东对我的热情帮助。

特别感谢刘鉴民教授,北京太阳能所的周率先教授,天津十八所的于培诺教授的指导。向我的老师、同学、朋友和亲人表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]赵富鑫 魏彦章主编 《太阳能电池及其应用》国防工业出版社 1985
- [2]M. A. Green 《Solar Cells: Operating principles, Technology and Applications》
(Prentice Hall, Englewood cliffs, NJ, 1982)
- [3]刘恩科 等著 《光电池及其应用》科学出版社 1989
- [4]林安中 著 “中国光伏发电专题研究”
- [5]Martin A. Green, Solar “Cell Efficiency Table (Version 9)”, 《Progress in Photovoltaics Research And Application》 VOL. 5, 51-54(1997)
- [6]洪垣 著 “硅太阳能电池旁路电阻的简便测量”, 《太阳能学报》 VOL. 9, No. 2 P211
- [7]崔容强、姚宗熙著, “一种适合工业应用的太阳能电池参数测试装置”, 《太阳能学报》, Vol. 9, No. 2, 1988
- [8]国标 (GB6495-86), “地面用太阳能电池电性能测试方法” 1986
- [9]H. Fischer, and, W. Pschunder, Conf. Rec. IEEE Photo. Spec. Conf. 11th, Scottsdale, Ariz-ona, p. 25 (1975)
- [10]李大群 姚凡 “硅太阳能电池光谱响应自动测试系统” 《太阳能学报》Vol. 12, No. 3 1991
- [11] 复旦大学电光源实验室 《电光源原理》上海人民出版社 1977
- [12]N. Enebish “Numerical analysis of solar cell current-voltage characteristic”
《Solar Energy Materials and Solar Cells》 29(1993), P201-208
- [13]卢景霄 “用解析模型拟合太阳能电池 I-V 特性的实验数据”, 《太阳能学报》Vol. 17, No. 1 Jan. 1996 P 45-49
- [14]于培诺 高汝金 李春燕 “关于太阳能电池效率的测定” 《太阳能学报》Vol. 2, No. 4 Oct., 1981 P425-P431
- [15]方开泰、张金延, 非线性回归模型参数估计的一个新算法, 应用数学学报, 第 16 卷第 3 期 1993 年
- [16]Hovel H J. “Semiconductors.” Vol. 11, Solar Cells. New York: ACADEMIC PRESS, 1975
- [17] K. A. EMEDY, Solar Simulates and I - V measurement methods, solar cell, 18(1996)
- [18] Nash John. C and Walker-Smith, Nonlinear Parameter Estimation. Morcel Deker

INC. New York and Basal, 1987

[19]陈汉华 “多功能光伏电池测试仪的设计研究及其在光电特性测试中的应用” 西安交通大学硕士论文

[20]国标 GB 6495—86 “地面用太阳电池电性能测试方法”

[21]雷勤生 宗耀堂等 “地面用太阳电池的标定” 《太阳能学报》Vol.2, No.4 Oct.,1981 P433-P441

[22]P.N. Yu, “The procedure to generate secondary standard solar cells with semi-absolute spectral response”, PV Solar Energy Conference, Proceedings of International Conference, 1980(Cannes)

[23]Samprit chatterjee, Bertram price, Regression Analysis by Example, John Wiley Sc Sons. Inc 1987.

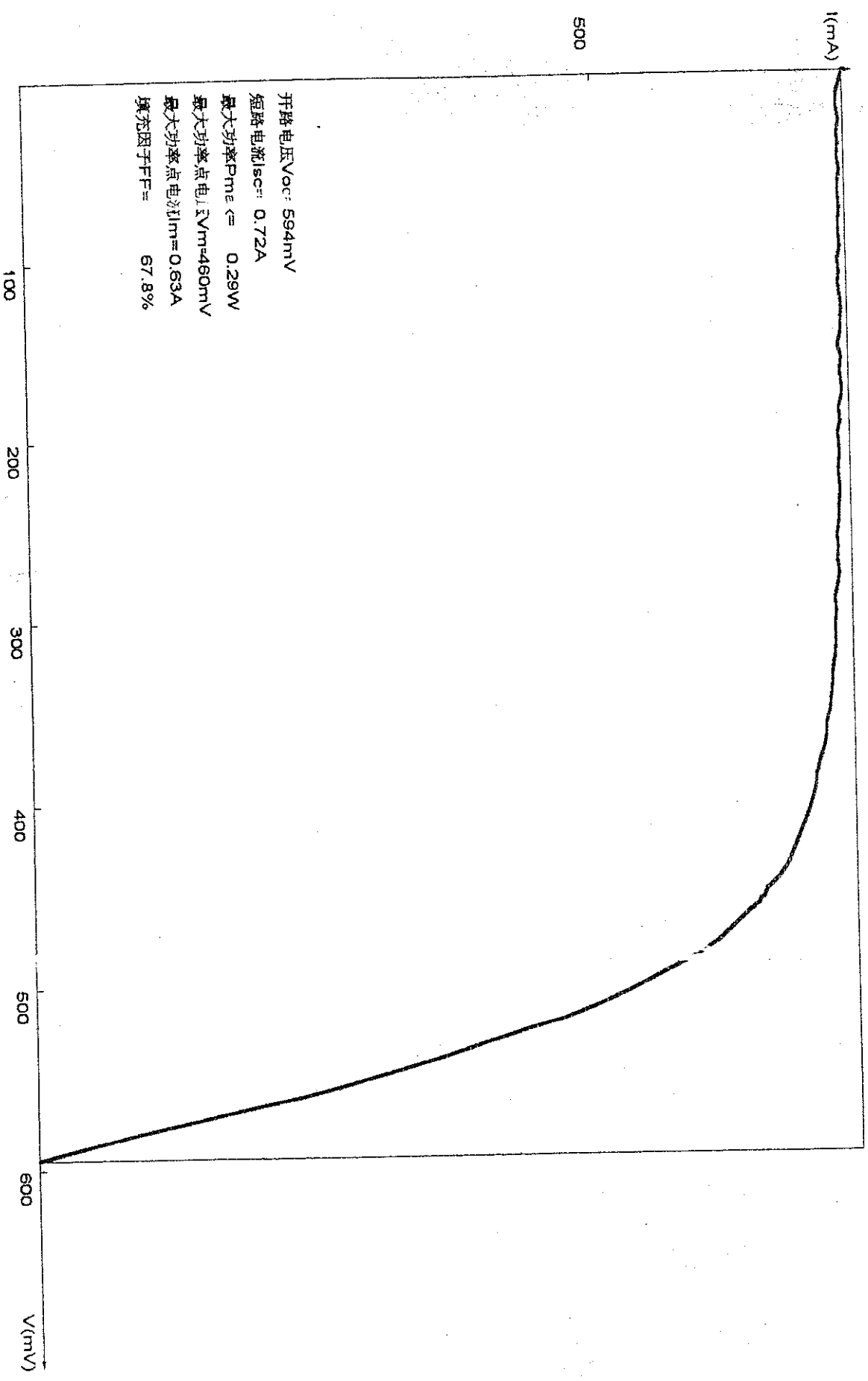
[24]Yonathan BarD, Nonlinear parameter Estimation, Academic press, Inc. 1998

[25]J、马库期著 林佰华等译 现代电子电路参考手册, 机械工业出版社, 1990 年

[26]赵保经、崔忠勤编, 简明集成运放应用手册, 科学出版社, 1989 年

[27]Microsoft Corporation 著 张军等译 Visual C++ for win32 大全 (三) Microsoft 基本类库参考手册, 清华大学出版社, 1996 年

Solar 97



编号: 980906

上海市科技成果水平检索证明

成果名称: JD01 型单体太阳能电池测试仪

委托单位: 上海交通大学太阳能研究所

查新单位: 上海科学技术情报研究所

(国家一级科技查新咨询单位)

委托日期: 一九九八年十月廿二日

完成日期: 一九九八年十一月廿四日

计 算 机 联 机 检 索

检索系统及文档	年 限	检 索 策 略
---------	-----	---------

国际联机:

File 2	1969 ~ 1998	(solar or sun) (s) (cell? ? or batter?) (s) (test??? ?
INSPEC		
File 6	1964 ~ 1998	or measur? or examin?)/ti
NTIS		
File 8	1970 ~ 1998	
EI		
File 92	1998	
IHS		
File 94	1985 ~ 1998	
JICST		
File 99	1983 ~ 1998	
WILSON APPLIED SCIENCE & TECHNOLOGY		
File 144	1977 ~ 1998	
PASCAL		
File 340	1950 ~ 1998	
CLAIMS US PATENTS		
File 347	1976 ~ 1998	
JAPIO		
File 351	1963 ~ 1998	
WPI		
INTERNET		

检 索 结 论

经上述范围手工、光盘和计算机国际联机检索表明：国际上目前生产太阳电池测试设备的厂家主要有 Spire 公司、EETS 公司和 ESTI 中心等，其中 Spire 公司是世界上最大的太阳电池设备设计和生产厂商，该公司的 141 家生产厂遍布 38 个国家，目前世界 90% 的光电压产品生产企业是使用 Spire 公司的设备和生产线（详见附件①）。下面将 Spire 公司产品和本案产品进行比较。

主要技术指标	Spire 公司 SPI-CELL TEST 150	Spire 公司 SPI-CELL TEST 1000	上海交大太阳能所 JD01 单体太阳电池测试仪
有效辐射面积	15cm × 15cm	18cm × 18cm	Φ15cm
光源	氙弧灯	脉冲氙灯	脉冲氙灯
	光谱 AM1.5	光谱 AM1.5	光谱 AM1.5
	光强 70 ~ 110mw/cm ²	-	光强 0 ~ 200mw/cm ²
	灯寿命 1 千小时	灯寿命 1 千小时	灯寿命 10 万次以上
模拟光不均度	2%	3%	≤ ± 4%
测试范围	电压 0 ~ 5V	电压 1.25, 2.5, 5, 10V	电压 0 ~ 0.7V
	电流 0 ~ 4A	电流 0 ~ 10A	电流 0.1 ~ 4A
分辨率	电压 5ppm (满刻度)	电压 12bit (满刻度)	电压 0.01V (12bit)
	电流 5ppm (满刻度)	电流 12bit (满刻度)	电流 0.01A (16bit)

上述的 Spire 公司太阳电池测试仪的整个操作过程均实现了计算机控制（详见附件②、③）。

经分析对比上海交通大学太阳能研究所研制开发的“JD01 型单体太阳电池测试仪”采用了钳位式电子负载，在电路上保证测量数据的重复性不受光脉冲大小和波形的影响。大大提高了仪器的可靠性和抗干扰性。确保了本机的重复性 < ± 2%。因此认为该成果达到国际先进水平。

检 索 附 件

编 号	附 件 原 文 标 题	附 件 原 文 出 处
1.	Spire 公司介绍	Internet
2.	Spire 公司 SPI-CELL TEST 150	SPIRE 公司产品样本
3.	Spire 公司 SPI-CELL TEST 1000	SPIRE 公司产品样本
4.	EETS 公司介绍	Internet
5.	ESTI 中心介绍	Internet
6.	计算机国际联机检索单	DIALOG
上海科学技术情报研究所编印 上海市科学技术委员会成果处监制		

编号: 980907

上海市科技成果水平检索证明

成果名称: JD02 型太阳能电池组件测试台

委托单位: 上海交通大学太阳能研究所

查新单位: 上海科学技术情报研究所

(国家一级科技查新咨询单位)

委托日期: 一九九八年十月廿二日

完成日期: 一九九八年十一月廿四日

计 算 机 联 机 检 索

检索系统及文档	年 限	检 索 策 略
---------	-----	---------

国际联机:

File 2	1969 ~ 1998	(solar or sun) (s) (cell? ? or batter?) (s) (test??? ?
INSPEC		
File 6	1964 ~ 1998	or measur? or examin?)/ti
NTIS		
File 8	1970 ~ 1998	
EI		
File 92	1998	
IHS		
File 94	1985 ~ 1998	
JICST		
File 99	1983 ~ 1998	
WILSON APPLIED SCIENCE & TECHNOLOGY		
File 144	1977 ~ 1998	
PASCAL		
File 340	1950 ~ 1998	
CLAIMS US PATENTS		
File 347	1976 ~ 1998	
JAPIO		
File 351	1963 ~ 1998	
WPI		
INTERNET		

检 索 结 论

经上述范围手工、光盘和计算机国际联机检索表明：国际上目前生产太阳能电池测试设备的厂家主要有 Spire 公司、EETS 公司和 ESTI 中心等，其中 Spire 公司是世界上最大的太阳能电池设备设计和生产厂商，该公司的 141 家生产厂遍布 38 个国家，目前世界上 90% 的光电压产品生产企业是使用 Spire 公司的设备和生产线（详见附件①）。下面将 Spire 公司、EETS 公司产品 and 该产品进行比较。

主要技术指标	Spire 公司 SPI-SUN SIMULATOR 460i	EETS 公司 PV Module Testers	上海交大太阳能所 JD02 太阳能电池组件测试台
有效辐照面积	200cm × 137cm	150cm × 150cm	120cm × 60cm
光源	氙弧灯	脉冲氙灯	脉冲氙灯
	光谱 AM1.5	光谱 AM1.5	光谱 AM1.5
	光强 70 ~ 110mw/cm ²	光强 70 ~ 100mw/cm ²	光强 0 ~ 200mw/cm ²
	灯寿命 50 万次	灯寿命 1 千小时	灯寿命 10 万次以上
模拟光不均度	≤ ± 3%	≤ ± 2%	≤ ± 4%
测试范围	电压 0 ~ 100V	电压 0 ~ 600Vdc	电压 0 ~ 24V
	电流 0 ~ 20A	电流 0 ~ 75Adc	电流 0.1 ~ 5A
分辨率	电压 0.0005V 在最敏感范围	电压 ± 1% (满刻度)	电压 0.01V (12bit)
	电流 0.0005A 在最敏感范围	电流 ± 1% (满刻度)	电流 0.01A (16bit)

上述的 Spire 公司和 EEST 公司的太阳能电池组件测试仪的整个操作过程均实现了计算机控制（详见附件②、③）。

经分析对比上海交通大学太阳能研究所为研制开发“JD02 型太阳能电池组件测试台”特别设计了带有漫射反光罩和 3 自由度可调节灯具座，保证光源在目标待测面上的光辐射不均匀度 < ± 4%。研制成功了钳位式电子负载，保证测量数据的重复性不受光脉冲大小和波形的影响。提高了仪器的可靠性和抗干扰性。确保了本机的重复性 < ± 2%。因此认为该成果达到国际先进水平。

检 索 附 件

编 号	附 件 原 文 标 题	附 件 原 文 出 处
1.	Spire 公司介绍	Internet
2.	Spire 公司 SPI-SUN SIMULATOR 460i	SPIRE 公司产品样本
3.	EETS 公司 PV Module Testers	EETS 公司产品样本
4.	EETS 公司介绍	Internet
5.	ESTI 中心介绍	Internet
6.	计算机国际联机检索单	DIALOG

个标准太阳电池的短路电流已经在具有标准太阳光谱分布的光源下标定好,其标定值是每单位辐照度所产生的短路电流($\text{A} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2$)。

标准太阳电池能自动地把光谱分布改变的影响考虑在内。因此,采用标准太阳电池来测量辐照度的方法,用于在户外测量太阳电池的电性能时,对地理位置和气象条件就不必严格要求,而在室内测量时,对所用太阳模拟器的类别要求不高,此外,由于标准太阳电池和被测样品的时间常数接近,太阳辐照度的不稳定,只要不发生在测量过程中,是允许的。

如果把太阳电池或组件的性能与已知的光谱辐照度联系起来,用户或方阵设计师就可能在合理的公差范围内,用太阳电池的光谱响应来计算太阳电池或组件置于任何已知光谱辐照度分布的光源下的电性能。

4 标准太阳光谱辐照度分布

本标准所采用的标准太阳光谱辐照度分布的数据和曲线分别在表1和图1中给出。它是总辐射太阳光[直射和散射],相应于AM1.5光谱分布,在与水平面成 37° 的倾斜面上辐照度为 $1\,000\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,地面的反射率为0.2,气象条件如下:

- 大气中水含量:1.42 cm
- 大气中臭氧含量:0.34 cm
- 混浊度:0.27 ($0.5\text{ }\mu\text{m}$ 处)

表1—标准太阳光谱辐照度分布

波长 μm	光谱辐照度 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	光谱光子辐照度 $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	累计积分辐照度 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
0.305 0	9.5	$1.459\text{E}+015$	0.06
0.310 0	42.3	$6.602\text{E}+015$	0.19
0.315 0	107.8	$1.710\text{E}+016$	0.57
0.320 0	181.0	$2.916\text{E}+016$	1.29
0.325 0	246.8	$4.038\text{E}+016$	2.36
0.330 0	395.3	$6.567\text{E}+016$	3.97
0.335 0	390.1	$6.579\text{E}+016$	5.93
0.340 0	435.3	$7.451\text{E}+016$	7.99
0.345 0	438.9	$7.623\text{E}+016$	10.18
0.350 0	483.7	$8.523\text{E}+016$	12.49
0.360 0	520.3	$9.430\text{E}+016$	17.51
0.370 0	666.2	$1.241\text{E}+017$	23.44
0.380 0	712.5	$1.363\text{E}+017$	30.33
0.390 0	720.7	$1.415\text{E}+017$	37.50
0.400 0	1 013.1	$2.040\text{E}+017$	46.17
0.410 0	1 158.2	$2.391\text{E}+017$	57.02
0.420 0	1 184.0	$2.504\text{E}+017$	68.74
0.430 0	1 071.9	$2.320\text{E}+017$	80.01

表 1(续)

波长 μm	光谱辐照度 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	光谱光子辐照度 $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	累积积分辐照度 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
0.440 0	1 302.0	$2.884\text{E}+017$	91.88
0.450 0	1 526.0	$3.457\text{E}+017$	106.02
0.460 0	1 599.6	$3.704\text{E}+017$	121.65
0.470 0	1 581.0	$3.741\text{E}+017$	137.55
0.480 0	1 628.3	$3.935\text{E}+017$	153.60
0.490 0	1 539.2	$3.797\text{E}+017$	169.44
0.500 0	1 548.7	$3.898\text{E}+017$	184.88
0.510 0	1 586.5	$4.074\text{E}+017$	200.55
0.520 0	1 484.9	$3.887\text{E}+017$	215.91
0.530 0	1 572.4	$4.196\text{E}+017$	231.20
0.540 0	1 550.7	$4.216\text{E}+017$	246.81
0.550 0	1 561.5	$4.324\text{E}+017$	262.38
0.570 0	1 501.5	$4.309\text{E}+017$	293.01
0.590 0	1 395.5	$4.145\text{E}+017$	321.08
0.610 0	1 485.3	$4.561\text{E}+017$	350.78
0.630 0	1 434.1	$4.549\text{E}+017$	379.98
0.650 0	1 419.9	$4.647\text{E}+017$	408.52
0.670 0	1 392.3	$4.696\text{E}+017$	436.64
0.690 0	1 130.0	$3.925\text{E}+017$	461.86
0.710 0	1 316.7	$4.707\text{E}+017$	486.33
0.718 0	1 010.3	$3.652\text{E}+017$	495.64
0.724 4	1 043.2	$3.805\text{E}+017$	502.21
0.740 0	1 211.2	$4.512\text{E}+017$	519.79
0.752 5	1 193.9	$4.523\text{E}+017$	534.82
0.757 5	1 175.5	$4.483\text{E}+017$	540.75
0.762 5	643.1	$2.469\text{E}+017$	545.29
0.767 5	1 030.7	$3.983\text{E}+017$	549.48
0.780 0	1 131.1	$4.442\text{E}+017$	562.99
0.800 0	1 081.6	$4.356\text{E}+017$	585.12
0.816 0	849.2	$3.489\text{E}+017$	600.56
0.823 7	785.0	$3.255\text{E}+017$	606.85
0.831 5	916.4	$3.836\text{E}+017$	613.49
0.840 0	959.9	$4.059\text{E}+017$	621.46
0.860 0	978.9	$4.238\text{E}+017$	640.85
0.880 0	933.2	$4.134\text{E}+017$	659.97
0.905 0	748.5	$3.410\text{E}+017$	680.99

表 1(续)

波长 μm	光谱辐照度 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	光谱光子辐照度 $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	累计积分辐照度 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
0.915 0	667.5	$3.075\text{E}+017$	688.07
0.925 0	690.3	$3.215\text{E}+017$	694.86
0.930 0	403.6	$1.890\text{E}+017$	697.60
0.937 0	258.3	$1.218\text{E}+017$	699.91
0.948 0	313.6	$1.497\text{E}+017$	703.06
0.965 0	526.8	$2.559\text{E}+017$	710.20
0.980 0	646.4	$3.189\text{E}+017$	719.00
0.993 5	746.8	$3.735\text{E}+017$	728.41
1.040 0	690.5	$3.615\text{E}+017$	761.82
1.070 0	637.5	$3.434\text{E}+017$	781.74
1.100 0	412.6	$2.285\text{E}+017$	797.49
1.120 0	108.9	$6.140\text{E}+016$	802.71
1.130 0	189.1	$1.076\text{E}+017$	804.20
1.137 0	132.2	$7.567\text{E}+016$	805.32
1.161 0	339.0	$1.981\text{E}+017$	810.98
1.180 0	460.0	$2.733\text{E}+017$	818.57
1.200 0	423.6	$2.559\text{E}+017$	827.40
1.255 0	480.5	$2.988\text{E}+017$	843.22
1.290 0	413.1	$2.683\text{E}+017$	867.80
1.320 0	250.2	$1.663\text{E}+017$	877.75
1.350 0	32.5	$2.209\text{E}+016$	881.99
1.395 0	1.6	$1.124\text{E}+015$	882.75
1.442 5	55.7	$4.045\text{E}+016$	884.11
1.462 5	105.1	$7.738\text{E}+016$	885.72
1.477 0	105.5	$7.845\text{E}+016$	887.25
1.497 0	182.1	$1.372\text{E}+017$	890.12
1.520 0	262.6	$2.010\text{E}+017$	895.24
1.539 0	274.2	$2.125\text{E}+017$	900.34
1.558 0	275.0	$2.157\text{E}+017$	905.56
1.578 0	244.6	$1.943\text{E}+017$	910.75
1.592 0	247.4	$1.983\text{E}+017$	914.19
1.610 0	228.7	$1.854\text{E}+017$	918.48
1.630 0	244.5	$2.006\text{E}+017$	923.21
1.646 0	234.8	$1.946\text{E}+017$	927.05
1.678 0	220.5	$1.863\text{E}+017$	934.33
1.740 0	171.5	$1.502\text{E}+017$	946.48

表 1(完)

波长 μm	光谱辐照度 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	光谱光子辐照度 $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	累计积分辐照度 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
1.800 0	30.7	$2.782\text{E}+016$	952.55
1.860 0	2.0	$1.873\text{E}+015$	953.53
1.920 0	1.2	$1.160\text{E}+015$	953.63
1.960 0	21.2	$2.092\text{E}+016$	954.07
1.985 0	91.1	$9.104\text{E}+016$	955.48
2.005 0	26.8	$2.705\text{E}+016$	956.66
2.035 0	99.5	$1.019\text{E}+017$	958.55
2.065 0	60.4	$6.279\text{E}+016$	960.95
2.100 0	89.1	$9.420\text{E}+016$	963.57
2.148 0	82.2	$8.889\text{E}+016$	967.68
2.198 0	71.5	$7.912\text{E}+016$	971.52
2.270 0	70.2	$8.023\text{E}+016$	976.62
2.360 0	62.0	$7.367\text{E}+016$	982.57
2.450 0	21.2	$2.615\text{E}+016$	986.32
2.494 0	18.5	$2.323\text{E}+016$	987.19
2.537 0	3.2	$4.087\text{E}+015$	987.66
2.941 0	4.4	$6.515\text{E}+015$	989.19
2.973 0	7.6	$1.138\text{E}+016$	989.38
3.005 0	6.5	$9.834\text{E}+015$	989.60
3.056 0	3.2	$4.923\text{E}+015$	989.85
3.132 0	5.4	$8.515\text{E}+015$	990.18
3.156 0	19.4	$3.082\text{E}+016$	990.48
3.204 0	1.3	$2.097\text{E}+015$	990.98
3.245 0	3.2	$5.228\text{E}+015$	991.07
3.317 0	13.1	$2.188\text{E}+016$	991.66
3.344 0	3.2	$5.387\text{E}+015$	991.88
3.450 0	13.3	$2.310\text{E}+016$	992.75
3.573 0	11.9	$2.141\text{E}+016$	994.30
3.765 0	9.8	$1.858\text{E}+016$	996.38
4.045 0	7.5	$1.527\text{E}+016$	998.79
∞			1 000.00

注：累计积分辐照度值系采用改良的梯形积分技术求得。