

## 摘 要

在世界各国竞相发展绿色可再生能源的今天，太阳能凭其独特的优点，受到了一致青睐，在太阳能的各种应用中，光伏应用倍受关注。随着光伏组件价格的不断降低和光伏技术的发展，太阳能光伏发电系统将逐渐由现在的补充能源向替代能源过渡。独立发电（Stand-alone）系统和并网发电（Grid-connected）系统将成为光伏应用的主流。基于此，本文就光伏发电系统中的一些关键问题——如光伏阵列的最大功率点跟踪和蓄电池的优化管理，逆变器的控制策略以及系统监控部分的设计等方面做了详细的理论分析，建立了仿真模型，提出了相应的控制策略。具体来说，本文的主要研究内容可归纳如下。

1) 阐明了不同结构的光伏发电系统的性能和特点。

2) 分析了蓄电池的工作原理和使用特性，详细描述了蓄电池充电器的充电方法对蓄电池的容量和使用寿命的影响，最后用单片机简单设计了带有温度保护和三段充电功能的蓄电池充电器。

3) 分析了太阳能电池的工作特点，分析了获得太阳能电池最大功率点的方法。较细致的阐述了定电压跟踪法，扰动观察法和滞环比较法，最后详细的说明了用模糊控制逻辑获得最大功率点的方法。

4) 分析了逆变器的工作原理和控制方法，解释了 PWM 的工作原理和工作特性，用 MATLAB 仿真了 PWM 的波形产生和逆变器的工作波形，最后用 STC 单片机制作了带有可调占空比的 PWM 波形发生器。

5) 设计了太阳能发电装置的监控系统，包括温度采集，工作时间，数据存储，设计了液晶芯片用来显示上述数据。

**关键词：**太阳能；蓄电池；MPPT；逆变器；监控系统

## ABSTRACT

At present, while most countries all over the world are developing green and renewable energy, solar energy is accepted commonly because of its unusual advantages. Photovoltaic (PV) systems are paid more attention to among its various applications. With price reduction of PV modules and development of PV technology, the role of PV generation systems is gradually changed from supplemental energy to substitute energy. And stand-alone and grid-connected PV generation systems will be the trend among PV applications. This paper deals with such key problems as true maximum power point tracking (TMPPT) of PV array and optimum management of battery, improvement of inverter output wave, islanding effect and so on by establishing related simulation models, applying novel control strategies and experiments validation. The more details about author's work are as follows:

1) Clarified the different structure of photovoltaic power generation system performance and characteristics.

2) Analysed the use and the characteristics of the battery, a detailed description of the battery charger on the battery charging method capacity and the impact of life, with the final design of a single-chip microcomputer with a simple temperature protection and three of the battery charger Chargers.

3) Analysed the work of the solar cell characteristics of a solar cell was maximum power point method. More detailed elaboration of the set voltage tracking, observation and disturbance Hysteresis comparison, the final detailed explanation of the use fuzzy logic control the maximum power point method.

4) Analysed the working principle and the control method of the inverter, explained the working principle and operating characteristics of the PWM, using MATLAB simulation of a PWM waveform generator inverter and the work of waveforms, the last produced by single-chip of STC adjustable duty cycle of the PWM waveform generator.

5) Design of a solar-powered device control system, including collecting temperature, time, data storage, the design of the LCD chips used to display the data.

**Key words:** solar energy; battery; MPPT; inverter; monitor system

# 哈尔滨工程大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：本论文的所有工作，是在导师的指导下，由作者本人独立完成的。有关观点、方法、数据和文献等的引用已在文中指出，并与参考文献相对应。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经公开发表的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者（签字）： 王任辉

日 期： 2008 年 3 月 6 日

# 第 1 章 绪论

## 1.1 光伏发电产业的现状

### 1.1.1 发展光伏发电产业的紧迫性

能源是人类社会生存和发展的动力源泉。从原始社会的钻木取火到近现代的化石能源以及核能、地热能、潮汐能、风能、太阳能等各种新能源的应用无不闪现着人类文明的智慧之光。

然而，随着人类对能源需求的日益增加，化石能源的储量正日趋枯竭。自 1973 年世界石油危机以来，常规能源频频告急。在中国，这一情况更不容乐观，据官方统计，仅去年一年，中国就进口原油约 1.5 亿吨，按目前的消耗速度，中国的现有能源储量至多可以使用 50 年。根据专家预测，到 2020 年，中国石油消费量将突破 4 亿吨，其中一半以上将依赖进口，天然气的需求量将达到 2 千亿立方米<sup>[1]</sup>。同时，化石能源在开采、运输和使用过程中都会对空气和人类生存环境造成严重的污染。根据相关资料显示，目前，人类使用化学燃料已经为人类生存环境带来了严重的后果，由于大量使用化石能源，全世界每年产生约 1 亿吨温室效应气体，已经造成极为严重的大气污染，同时使得地球表面气温逐年升高，近二千年来，全球二氧化碳排放量迅速增长，如果不加以控制，温室效应将使南、北两极的冰山融化，这可能会使海平面上升几米，四分之一的人类生活空间将由此受到极大威胁。此外，由于环境恶化造成的“黑洞”已经使人类即将面临太阳紫外线的直接照射<sup>[2]</sup>。

正是在这样的背景下，世界各国相继制定了各种政策来减缓能源危机和提倡环境保护。1972 年 6 月 5 日，联合国在瑞典首都斯德哥尔摩召开了第一次人类环境保护会议，随后，联合国设立了环境保护规划署。环境保护从此提到联合国和各国政府的议事日程上来，并规定每年的六月五日为世界环境保护日，“世界只有一个地球”，“地球是你我共同的家”，“让地球充满生机”等环保口号充分反映了全人类的共同心声<sup>[3]</sup>。

### 1.1.2 国外光伏发电产业的现状

化石能源资源的有限性和环境保护压力的增加，使世界上许多国家加强

了对绿色能源和可再生能源技术发展的大力支持。

技术方面，经过几十年的发展，澳大利亚新南威尔士人研制的单品硅光伏电池效率已达 23.7%，多晶硅电池效率突破 19.8%。同时，研究人员正在探索用切薄硅片、扩大平面面积或者使用聚光的方法，力争把硅片的成本降低到 0.8 美元/WP。据预测，在今后 15—20 年间利用这几种方法有望把硅片的成本降低到 0.5 美元/WP，这样，光伏系统的价格可以降低到接近 3 美元/WP。薄膜电池是在廉价衬底上采用低温设备技术沉积半导体薄膜的光伏器件，材料与器件设备同时完成，工艺技术简单，便于大面积连续化生产；设备能耗低，缩短了回收期。太阳能电池实现薄膜化，大大节省了昂贵的半导体材料，具有大幅度降低成本的潜力，是当前国际上研究开发的主要方向<sup>[4]</sup>。除了光伏电池以外，当前国际上最新的研发热点主要集中在低成本、高效率、高稳定性的光伏逆变器件和光伏建筑集成应用系统等方面，专用逆变设备和相关系统的最佳配置涉及到多项技术。美国、德国、荷兰、日本、澳大利亚等国家在光伏屋顶计划的激励下，许多企业和研究机构成功地推出了多种不同的高性能逆变器<sup>[5]</sup>。

产业化方面，光伏发电发展的初期主要是依靠各国政府在政策及资金方面的大力支持，现在已逐步商业化，进入了一个新的发展阶段。光伏发电的市场前景吸引了一批国际知名企业或企业财团介入光伏电池制造业。这些大公司的介入，使产业化进程大大加快。预计今后 10 年，光伏组件的生产将以每年增长 20%—30%甚至更高的递增速度发展，到 2010 年将可能达到 4600MW/年的生产量，总装机容量将可能达到 18GW。国际光伏产业在过去 10 年中的平均年增长率为 20%，1998 年世界太阳能电池组件生产量为 155MW，2000 年增长到 288MW，2002 年达到 540MW。截止到 2006 年底，世界光伏发电累计总装机容量达到了 1300MW<sup>[6]</sup>。目前全球太阳能光伏电池产业的销售收入超过 20 亿美元。预计到 2050 年左右，太阳能光伏发电将达到世界总发电量 10%—20%，成为人类的基本能源之一。同时，世界光伏市场发生了很大变化，开始由主要为边远农村地区和通信设备、气象台站、航标等特殊应用领域解决供电问题，逐步向并网发电和与建筑相结合的常规供电方向及商业化应用方向发展。从上世纪 70 年代起，许多国家掀起了太阳能光伏发电热潮，美国、日本、欧盟、印度等国家纷纷制定雄心勃勃的中长期

发展规划推动光伏技术和光伏产业的发展，推动这一新能源产业的发展。目前，世界光伏产业正以 31.2% 的平均年增长率高速发展，是全球增长率最高的产业，已成为当今世界最受关注、增长幅度最快的能源产业之一<sup>[7]</sup>。

自上个世纪 90 年代以来，国外发达国家掀起了发展“屋顶光伏发电系统”的研发高潮，屋顶光伏发电系统不单独占地，将太阳电池安装在现成的屋顶上，非常适应太阳能能量密度较低的特点，而且其灵活性和经济性都大大优于大型光伏并网发电，有利于普及，有利于战备和能源安全，所以受到了各国的重视。1993 年，德国首先开始实施由政府补贴支持的“2000 个光伏屋顶计划”，同时制定了“可再生能源电力供应法”，极大地刺激了光伏发电市场<sup>[8]</sup>。日本在光伏发电与建筑相结合的市场方面已经做出了十几年的努力，预计到 2010 年光伏屋顶发电系统总容量达到 7600MW。日本光伏屋顶发电系统的特点是：太阳电池组件和房屋建筑材料形成一体，如“太阳电池瓦”和“太阳电池玻璃幕墙”等，这样太阳电池就可以很容易地被安装在建筑物上，也很容易被建筑公司所接受。1997 年 6 月，美国前总统克林顿宣布实施“百万个太阳能屋顶计划”，计划到 2010 年安装 100 万套太阳能屋顶。许多其他发达国家也都有类似的光伏屋顶发电项目或计划，如荷兰、瑞士、芬兰、奥地利、英国、加拿大等。属于发展中国家的印度也在 1997 年 12 月宣布到 2020 年将建成，50 万套太阳能屋顶发电系统<sup>[9]</sup>。

光伏发电的行业标准方面，虽然现在还没有 IEC（国际电工委员会）标准，但各国都颁布了相应的试行标准，如美国 SANDIA 国家实验室的光伏并网发电系统标准等。

新能源是二十一世纪世界经济发展中最具决定力的五大技术领域之一。太阳能是一种清洁、高效和永不衰竭的新能源。在新世纪中，各国政府都将太阳能资源利用作为国家可持续发展战略的重要内容。据资料预测显示，到 2010 年，全世界光伏产业将累计达到 14—15GW，这表明世界光伏产业发展有着巨大的发展空间。总之，从能源利用的国际发展趋势来看，光伏发电最终将以替代能源的角色进入电力市场。全球 1992 至 2010 官方安装 PV 目标，如图 1.1 所示。预计到 2030 年，光伏发电在世界的总发电量中将占到 5%—20%。

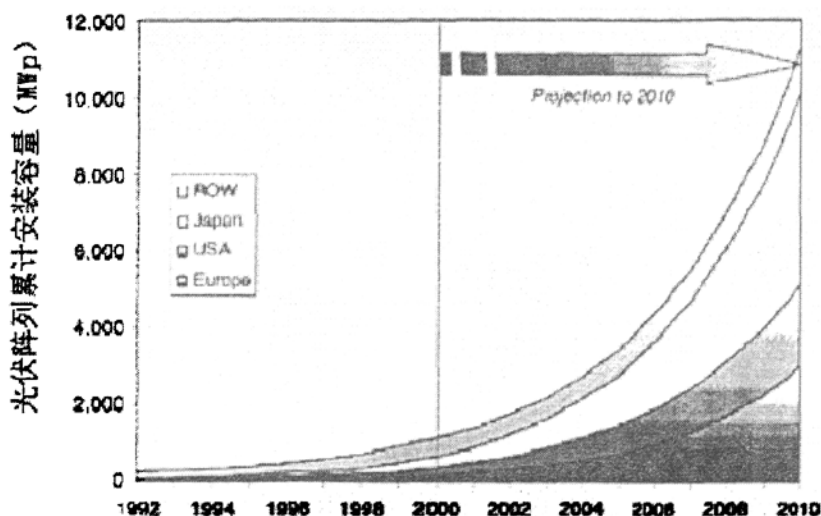


图 1.1 全球 1992—2010 年官方安装 PV 目标<sup>[10]</sup>

### 1.1.3 国外研究现状

国外并网型逆变器已经是一种比较成熟的市场产品，例如在欧洲光伏专用逆变器市场中就有 SMA，Fronius，Sputnik，Sun-Power 和西门子等众多的公司具有市场化的产品，其中 SMA 在欧洲市场中占有的 50% 的份额。除欧洲外，美国、加拿大、澳大利亚、新西兰以及亚洲的日本在并网型逆变器方面也都已经产品化。以 SMA 和西门子为例介绍目前光伏并网发电系统用逆变器的发展情况。

SMA 光伏并网逆变器目前具有三大系列产品：支路逆变器、集中逆变器和多支路逆变器，其中以 SWR 和 SB 两个系列应用最为广泛。该产品具有如下特点：高效率、高功率因数、低 THD；基于微处理器的自动功率点调节，即基于软件实现的最大功率跟踪；根据电网情况调制工作状态，工作状态自动切换；通过 LED 显示主要工作状态；故障自诊断；测量数据和工作状态通过总线传输至 PC 机；多台逆变器可以任意组合构建系统，使系统设计更加简便、扩展更加方便。多支路逆变器是 SMA 最新推出的产品，该产品采用最大功率跟踪和并网逆变两级能量变换结构，多个不同支路共用同一个逆变环节，中间设置有内部直流母线，可以使系统的灵活性大为提高，输出端无工频变压器隔离，采用最新的电网阻抗检测和交、直流剩余电流检测来实现有效保护。



与 SMA 相比较, 西门子并网光伏逆变器则采用主从式构建系统, 由主逆变器和若干个从逆变器来组建用户要求容量的并网光伏系统, 灵活性和系统扩展等均没有 SMA 的强。西门子 SITOP—Solar 主要分为隔离和非隔离两种支路逆变器, 两级能量变换, 最大功率跟踪和逆变部分集成在一个机箱内; 功率因数高; 基本数据本地集中显示; 实时发电电能显示; RS232 串口连接 PC 或者调制器; 能够外接辐射计和组件温度传感器。

除 SMA 和西门子外, 美国的 Xantrex 的 SunTieXR 系列并网逆变器也是根据光伏市场需要推出的产品, 系列覆盖了中、大功率范围, 也可将多台中功率的逆变器并联构成系统, 而且逆变器中也集成了最大功率跟踪环节<sup>[11]</sup>。

综上所述, 目前国外光伏并网逆变器产品的研发主要集中在最大功率跟踪和逆变环节集成的单级能量变换上, 功率主要为几百瓦到五千瓦的范围, 控制电路主要采用数字控制, 注重系统的安全性、可靠性和扩展性, 均具有各种完善的保护电路。

#### 1.1.4 我国光伏发电产业的现状

技术方面, 经过十多年的努力, 我国光伏发电技术有了很大的发展, 光伏电池技术不断进步, 与发达国家相比有差距, 但差距在不断缩小。光伏电池转换效率不断提高, 目前单晶硅电池实验室效率达 20%, 批量生产效率为 14%, 多晶硅实验室效率为 12%。在 2000 年之后, 多晶硅产品逐步走出实验室, 开始形成规模生产, 其效率与发达国家相比, 差距在不断缩小<sup>[12]</sup>。

产业化方面, 2000 年以后, 我国光伏产业进入快速发展期, 但整体发展水平仍然落后于国际先进水平, 参与国际竞争有一定的难度。2003 年国内光伏电池的生产能力约 20MW, 但光伏组件的封装能力约 50MW, 远大于光伏电池的生产能力。虽然到 2002 年底, 我国已有近 20MW 的光伏电池生产能力, 但实际生产量仅为 4MW 左右, 占世界光伏电池实际生产量的 1%左右。在 2002—2003 年国家实施的总装机容量 20MW 的“光明工程”项目中, 国内生产的光伏电池的应用量不足 10%, 错过了这一市场时机。近期内我国光伏发电市场仍将是为无电地区供电为主, 有一定的市场潜力, 但也有局限性。2001 年及以前, 我国光伏产品的年销售量均保持在 3—4MW, 其中单品硅产品占 80%, 非单品硅产品占 20%。2005 年, 光明工程项目使市场年销售量猛

增到 20MW，光伏系统保有量达到 40MW 左右。从市场份额上石，光伏发电在 2000 年前的主要应用领域是：通讯行业占 40%—50%，农村电气化行业（主要包括户用光伏系统和乡村级光伏发电）占 40%左右，其它领域占 10%左右。但 2007 年当年农村电气化领域的市场份额占到 85%以上。目前，国内光电池硅片的生产能力已达 4.5M 瓦，在西藏 7 个无水无电县中已全部建成了光伏发电，其中功率最大的 100KW。表 1.1 为近年来中国光伏发电的发展情况及对 2010 年前发展趋势的预测<sup>[13]</sup>。

表 1.1 太阳电池产量，产值

年代	年生产能力 (MW)	年产量 (MW)	系统年产值 (万元)	累计装机容量 (MW)
1998	4.5	2.1	16800**	13.3
1999	4.5	2.7	21000**	16.0
2000	5	3.0	24000**	19.0
2001	6.5	4.5	27000**	23.5
2002	8	6.5	39000**	30.0
2003	10	8.0	48000**	38
2004	13	10.0	60000**	48
2005	18	14.0	80000**	62.0
2006	20	18.0	72000***	80.0
2007	25	22.0	88000***	102
2008	30	28.0	110000***	130
2009	40	35.0	140000***	165
2010	50	45.0	180000***	210
2015	100	80.0	240000***	500.0

注：\*80 元 RMB/W。 \*\*60 元 RMB/W。 \*\*\*40 元 RMB/W。 \*\*\*\*30 元 RMB/W

综上所述，我国的光伏市场和光伏企业面临严峻的挑战，如果把我国光伏产业的发展放到国际光伏发展的大环境中考虑，世界光伏产业每年以 31% 的速度发展，而我国的光伏产业每年只有 15% 的增长率，光伏企业的发展靠市场，光伏市场的发展靠政策。光伏发电成本高，无法与常规能源竞争，所以更需要政府制定强有力的法规和政策支持以驱动我国光伏产业的商业化发展。然而，我国的光伏企业虽然弱小，但经过努力已经有了一定的基础，当前，对光伏企业的发展来说机遇和挑战并存。另外，我国的太阳能资源非常丰富，据统计，太阳能年辐照总量大于 502 万千焦/平方米，年日照时数在 2200

小时以上的地区约占国土面积的 2/3 以上，具体分布见表 1.2。

表 1.2 太阳能年辐射的地区分类

地区分类	全年日照时数	太阳年辐射总量 MJ/m <sup>2</sup> ·a	地 区
I	3200—3300	6700—8400	宁夏北部，甘肃北部，新疆东南部 青海西部和西藏西部
II	3000—3200	5900—6700	河北北部，山西北部，内蒙古和宁夏 南部，甘肃中部，青海东部，西藏 南部和新疆南部
III	2800—3000	5000—5900	山东，河南，河北东南部，山西南部 新疆北部，吉林，辽宁，云南，陕西 北部，甘肃东南部，广东和福建南部 北京
IV	1400—2200	4200—5000	江苏，安徽，湖北，湖南，江西，浙江 广西及广东北部，陕西南部，黑龙江
V	1000—1400	3400—4200	四川，贵州

我国《1996—2010 年新能源和可再生能源发展纲要》中明确指出，要按社会主义市场经济的要求，加快新能源和可再生能源的发展和产业化的建设，并且将可再生能源的发展计划纳入了我国的“十五”能源规划，要求采取措施调整能源结构，提高清洁能源在能源消费中所占的比重，要求通过技术进步来推动可再生能源事业的发展，鼓励发展利用太阳能；鼓励改造传统能源利用技术，提高能源利用效率，降低污染排放，并给予税收优惠等支持政策<sup>[14]</sup>。综上可知，在我国，光伏发电产业的发展前景是辉煌的；一方面，我国现在还有很多人生活在无电、缺电的西部边远地区，解决这些地区的用电问题，很大程度上依赖于太阳能及其它新能源的大规模应用；另一方面，在东部沿海经济比较发达的地区，利用太阳能发电作为补充或替代能源又将会给我国光伏产业的发展提供一个新的发展空间。

### 1.1.5 国内研究现状

由于我国光伏发电等可再生能源发电技术的研究仍然处于起步阶段，技术水平相对国外还有一定差距。就并网型光伏发电系统的核心技术并网型逆变器而言，合肥工业大学能源研究所、燕山大学、上海交通大学、中国科学院电工研究所等科研单位和大学在这一方面进行了相关的研究，并且在“九

五”、“十五”期间，国家科技部投入相当数额的经费进行开发工作。

除此之外，北京索英电气技术有限公司和合肥阳光电源有限公司也在推出了适合并网光伏系统用的逆变器。北京索英电气技术有限公司的三相光伏并网逆变器，采用日本智能功率模块 IPM 作为主回路功率器件，运用该公司先进的并网控制技术，具有结构简单、效率高、性能优良、电磁干扰小和安全可靠等优点。全新的全数字化 DSP 控制，简化控制回路，提高了系统控制性能。多项先进的并网发电控制技术，保证向电网优质送电，还能够追踪太阳能电池板的最大功率点，检测电网的状态，并实现对电网供电质量的调节。合肥阳光的正弦波并网充放电装置虽不是专门为并网光伏设计，但是也可应用在并网光伏系统中。从这两种成熟的市场产品可以看出，国内对并网光伏逆变器的研究比较多的采用最大功率跟踪和逆变部分相分离的两级能量变换结构，而且市场产品的种类还相对单一，系统构建死板<sup>[15]</sup>。

并网型光伏发电系统在我国还没有真正地投入商业化运行的应用，目前所建并网型光伏系统都为示范工程。并网型光伏发电系统的核心并网型逆变器还主要依赖进口或者合作研究的方式获得，导致并网型光伏系统的造价升高、依赖性强，从而制约了并网型光伏系统在国内市场的发展和推广。因此掌握并网型光伏系统的核心并网型逆变器技术对推广并网型光伏系统有着至关重要的作用。

## 1.2 太阳能发电的发展趋势

随着电力电子元器件的发展、数字信号处理技术的应用以及先进的控制方法的提出，电力电子能量变换发生了巨大的变化。首先，元器件正向着低导通损耗、快速化、智能化、封装合理化等几个方向发展。低导通损耗将有助于并网型逆变器系统提高效率；减少发热；快速化将减小开关应力；智能化将有助于提高系统可靠性；封装的改进将减少寄生参数、有效散热、保持高机械强度。其次，数字信号处理技术的应用有助于减少并网逆变器输出的直流成分；提高开关频率；减小滤波器体积；改善输出波形；改善 THD；快速响应电网瞬态变化<sup>[16]</sup>。最后，先进的控制方法将有助于改善输出波形质量，从而减小滤波环节的体积；提高系统的动态响应性能。因此，并网型逆变器的发展必将沿着数字化、高频化的方向进行。

### 1.3 本文所做的主要工作

- 1) 分析了光伏发电系统的各个组成部分。
- 2) 介绍了蓄电池的工作特性，并设计了蓄电池充电器。
- 3) 介绍了几种获得 MPPT 的方法，设计了用模糊控制方法获得 MPPT 的方法。
- 4) 分析了逆变器的工作原理，用 MATLAB 仿真出逆变器各个可控硅的驱动信号，并用单片机制作了逆变电路的驱动器。
- 5) 设计了系统的主监控设备，包括温度，数据存储，时钟，等部分，并设计了液晶显示部分。

## 第 2 章 太阳能光伏发电的系统组成

根据不同场合的需要，太阳能光伏发电系统一般分为独立供电的光伏发电系统、与电网连接的光伏并网发电系统两种，独立供电的光伏发电系统主要用于电网覆盖不到的边远山区或者是太阳光照不足，不能满足与电网互通需要的地区，主要用于满足单个用户的一天工作，生活用电，必须带有储能环节，满足黑夜或者光照不足的阴雨天的用电需要，这种供电方式设备复杂，蓄电池受环境和使用方法的影响，寿命一般不长，而且当有多余的电能或者是电能不足的情况下就会产生浪费或者影响工作和生活。光伏并网发电是太阳能发电的发展方向，把太阳能发电系统与电网联系起来，这样当电能多余的时候，可以把多余的电能输送到电网，收取电费；当电能不足时可以从电网获得电能补偿，满足工作和生活的需要，另外，并网发电系统不需要储能环节，这就大大节省了设备成本和维修率。

### 2.1 光伏系统构成

光伏发电系统构成如图 2.1 和 2.2，主要部件如下：

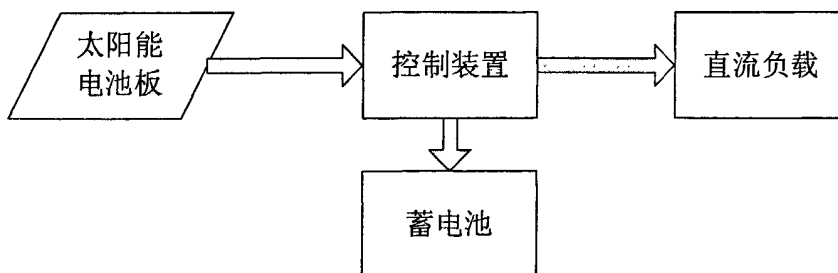


图 2.1 太阳能电池板给直流负载供电的系统框图

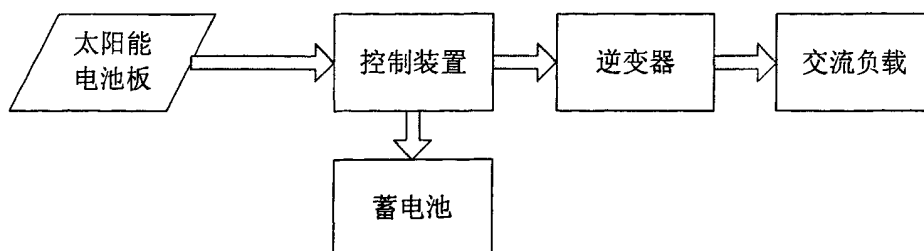


图 2.2 太阳能电池板给交流负载供电的系统框图

1) 太阳能电池板由硅半导体材料制成的方片、圆片或薄膜，在阳光照射下产生电压和电流。

2) 在超薄、透明、高强度玻璃和密封的封装底层之间。太阳能电池组件有各种各样的尺寸和形状，典型组件是矩形平板。

3) 太阳能电池方阵，简称“方阵”：在金属支架上用导线连在一起的多个光伏组件的组合物。太阳能电池方阵产生所需要的电压和电流。

4) 蓄电池组：提供存储直流电能的装置。

5) 控制器：系统控制装置，通过对系统输入输出功率的调节与分配，实现对蓄电池电压的调整，以及系统赋予的其它控制功能。

6) 逆变器：将直流电转变为交流电的电气设备。

7) 直流负载：以直流电供电的装置或设备。

8) 交流负载：以交流电供电的装置或设备。

根据太阳能独立和并网发电的不同使用方式，其设备和各方面参数都有比较大的区别，现分别叙述它们的特点。

## 2.2 独立供电的光伏发电系统

独立供电的光伏发电系统如图 2.3 所示。

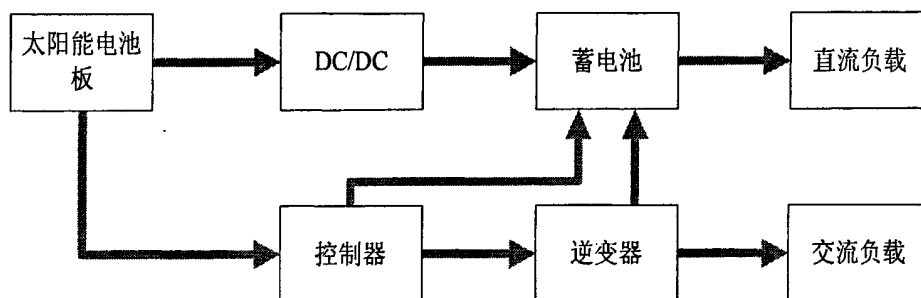


图 2.3 太阳能独立供电的系统框图

整个独立供电的光伏发电系统主要由太阳能电池板、蓄电池、控制器、逆变器组成。太阳能电池板作为系统中的核心部分，其作用是将太阳能直接转换为直流形式的电能，一般只在白天有太阳光照的情况下输出能量。根据负载的需要，系统一般选用铅酸蓄电池作为储能环节，当发电量大于负载使用需要时，太阳能电池通过充电器对蓄电池充电；当发电量不足时，太阳能

电池和蓄电池同时对负载供电。控制器一般由充电电路、放电电路和最大功率点跟踪控制组成。逆变器的作用是将直流电转换为与交流负载同相的交流电。

### 2.2.1 太阳电池

太阳电池是一种具有光生伏打效应的半导体器件（简称“光伏器件”），它直接将太阳光转换成直流电，是光伏发电的最基本单元。太阳电池由两层半导体材料组成，其厚度大约为 1/100 英寸，形成两个区域：一个正电荷区，一个负电荷区。负区位于电池的上层，在这一层强迫渗透磷并与硅粘在一起。正区置于电池表层的下面，正负界面区域称为 p-n 结。制造电池时 p-n 结被赋予了恒定的特性。当阳光投射到太阳电池内保持松散状态的电子时，这此靠近 p-n 结的电子朝向电池的表层流动。金属线将光伏组件里每个电池的前面与下一个电池的背面相连，这样使电子通过许多 p-n 结，建立起所有电池的串联电压。在每个电池 p-n 结处的电压增加大约 0.5V 的电动势，这个电池电压与电池的尺寸无关。电流受电池面积和日照强度的影响，较大面积的电池能够产生较强的电流<sup>[16]</sup>。

### 2.2.2 一体化光伏充电器

用光伏充电器来替代通常使用的蓄电池是比较经济的。一体化光伏蓄电池充电器不仅具有所需的系统部件，而且将用具都置于一个盒内。最普通的是带有可充电电池的一体化小型光伏充电器。带有光伏充电单元的照明灯、时钟和收音机已有成套装置出售。太阳能手提灯和用于收音机蓄电池的光伏充电器具有广泛的潜在市场。

### 2.2.3 白天用光伏系统

最简单、成本最低的是仅仅在白天运行的光伏系统。这些系统由导线将光伏组件与直流设备直接连在一起。太阳光照射在太阳电池上就产生电能，同时被负载利用。白天使用光伏系统发电时，较高的日照水平可使负载获得更多的运行机会。白天使用的光伏系统没有电能存储功能，因此只有当太阳正在照射时负载才能工作。简单的白天用光伏系统适合于仅仅在白天运行的负载，选择此类负载时应注意光伏系统的投资效果。



## 2.2.4 储能式直流系统

在光伏系统里，存在晚上或阴天需要运行的负载时，该系统必须包括储能单元，通常用蓄电池储存由光伏组件产生的电能。系统负载可以在白天或夜间运行，也可以连续或间歇运行，遇到阴天时负载将从蓄电池获取电能。此外，蓄电池组在短时间内有能力提供较大的冲击电流，这样系统有更好的适应性，如启动大功率的电动机或执行另外一些“大功率”任务。

使用蓄电池的简单直流光伏系统（见图 2.4），这个系统的基本部件包括一个光伏组件，一个充电控制器，储能蓄电池以及相当于系统用电负载的设备。蓄电池组由大容量蓄电池排列而成。深循环蓄电池可承受深度放电，电池放电后当太阳照射时再将蓄电池充满电。比起常规的汽车蓄电池，深循环蓄电池更适合用在光伏系统中。蓄电池组的规模和配置应取决于系统电压和夜间使用的电流。另外，当地的气候条件和特点，例如阴天情况和环境温度在蓄电池设计中必须给予考虑。光伏组件的数量必须慎重选择，以便在白天能充分的向蓄电池充电。

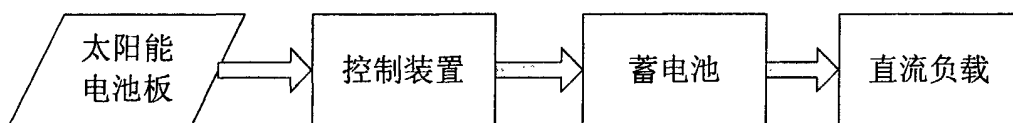


图 2.4 简单的直流光伏发电系统

## 2.2.5 交/直流两用光伏系统

光伏组件产生的是直流电（DC），许多用电设备要求交流电（AC）。逆变器可将直流电转换为交流电，向交流负载供给电能的直流系统必须使用逆变器。在光伏系统里逆变器增加了系统的适应性，为用户提供了方便，但是也增加了系统的复杂性和成本。现在大多数电气产品都是交流设备，交流设备有更多的选择余地。与直流设备相比交流设备一般具有较低的成本和较高的可靠性。高质量的逆变器已商品化，并有不同的容量范围供用户选择。交直流两用光伏系统示意图见图 2.5。

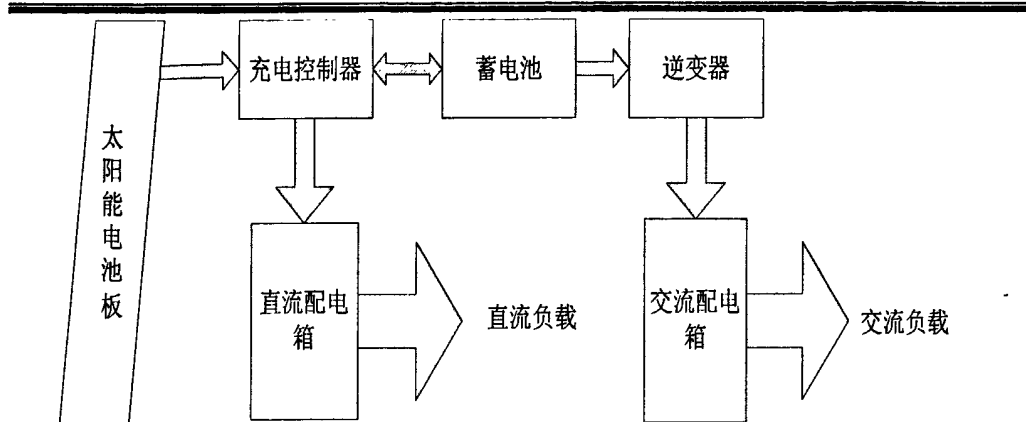


图 2.5 交一直两用光伏发电系统

## 2.3 与电网并网的光伏发电系统

### 2.3.1 并网光伏系统

在并网光伏系统的设计里，不提供蓄电池存储单元，白天不用的多余电量，用户可以通过逆变器将这此电能出售给当地的公用电力网，该逆变器是为这类光伏系统专门设计的。当光伏系统产生的电用户需要的功率。能不够用户使用，可从公共电力网补充并网光伏系统示意图见图 2.6。

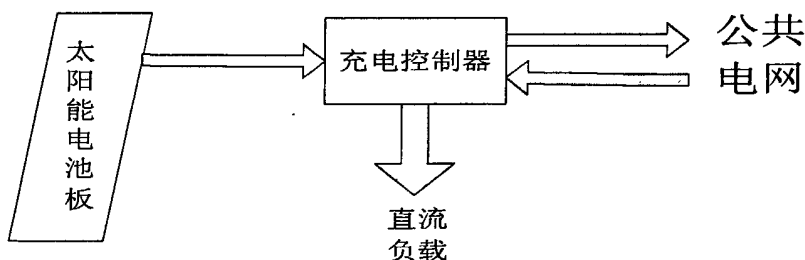


图 2.6 与电网互补的光伏发电系统

### 2.3.2 不可调度式光伏并网发电系统

不可调度式光伏发电系统如图 2.7，系统不存在储能环节，直接把太阳能电池板发出的电量传输给负载和电网，此种方式多用于专门的太阳能发电设备，只能用于白天且太阳能充足的时段。

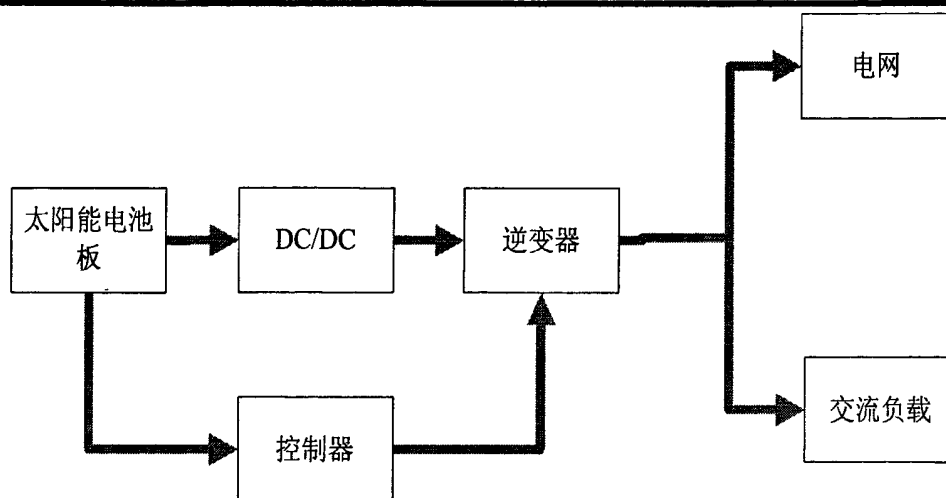


图 2.7 不可调度式光伏发电系统

### 2.3.3 可调度式光伏并网发电系统

可调度式并网光伏发电系统如图 2.8 所示，光伏发电系统直接与电网连接，其中逆变器起很重要的作用，要求具有与电网连接的功能。目前常用的并网光伏发电系统具有两种结构形式，其不同之处在于是否带有蓄电池作为储能环节。带有蓄电池环节的并网光伏发电系统称为可调度式并网光伏发电系统，由于此系统中逆变器配有主开关和重要负载开关，使得系统具有不间断电源的作用，这对于一些重要负荷甚至某些家庭用户来说具有重要意义；此外，该系统还可以充当功率调节器的作用，稳定电网电压、抵消有害的高次谐波分量从而提高电能质量。不带有蓄电池环节的并网光伏发电系统称为不可调度式并网光伏发电系统，在此系统中，并网逆变器将太阳能电池板产生的直流电能转化为和电网电压同频、同相的交流电能，当主电网断电时，系统自动停止向电网供电。当有日照照射、光伏系统所产生的交流电能超过负载所需时，多余的部分将送往电网；夜间当负载所需电能超过光伏系统产生的交流电能时，电网自动向负载补充电能。

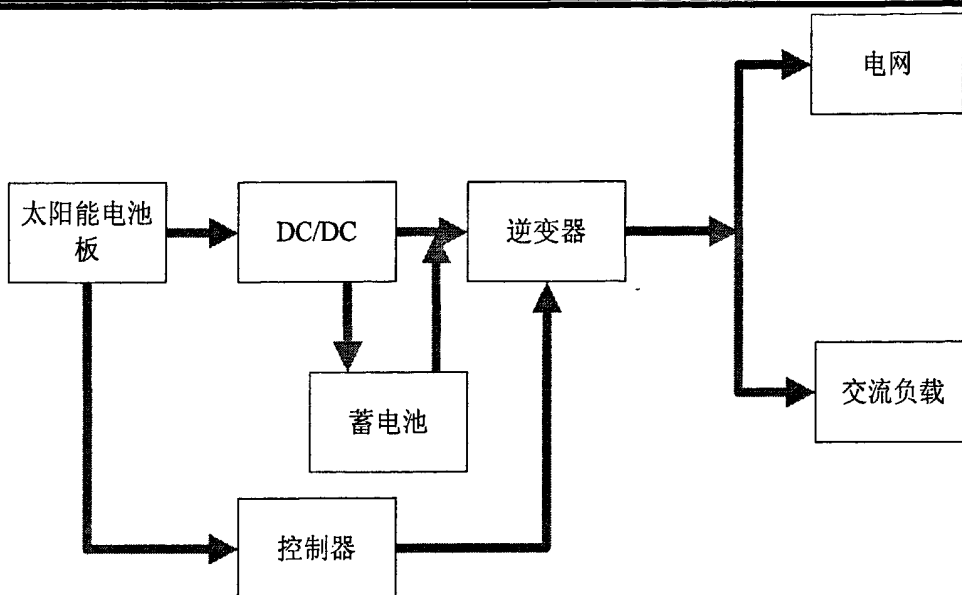


图 2.8 可调度式光伏发电系统

### 2.3.4 光伏混合发电系统

互补发电就是将另外的电源同时接入光伏发电系统，在许多场合下用户要求采用互补发电方式。多数混合发电系统使用柴油发电机，称为光伏柴油机互补发电系统。将普通发电机引入光伏系统能够大大减少系统的初始投资。完全用光伏系统来满足用电负载，意味着太阳能电池方阵和蓄电池要在最差的大气条件下也能支持负载的运行。同时蓄电池组容量要大到足以带动大功率负载，例如洗衣机、干燥机、电动工具等等。普通发电机不仅可提供阴天或比正常用电量多得多的额外功率需求，而且发电机运转时同样能向蓄电池充电。这样蓄电池有了两个独立的充电系统，因此光伏系统与发电机结合还增加了供电的可靠性。

另一个互补方法是光伏风力机互补发电系统。当没有日照时，光伏系统加入一个风力发电机，这在有风的场合是很有作用的，只要有风，连续阴天时供电也不成问题。普通发电机也可包括在光伏风电混合系统里。一个光伏风电发电机混合系统不仅具有光伏发电机互补系统的所有优越性，而且又带来第二个电源向蓄电池充电的额外好处。

光伏风力机柴油机互补发电系统如图 2.9 所示。

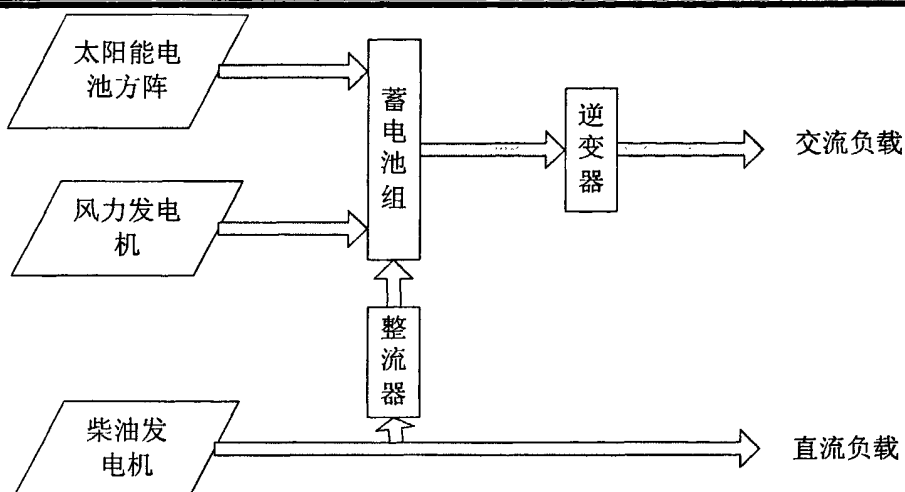


图 2.9 光伏风力机柴油机互补发电系统

## 2.4 本章小结

本章主要介绍了光伏发电系统的各个组成部分，包括太阳能电池板，蓄电池，蓄电池充电器，逆变器。分析了独立光伏发电系统和并网光伏发电系统，并对混合发电系统做了简要的分析和介绍，由于独立的光伏发电在我国西部仍然是主要的发电方式，在市场中占有很大比重，因此本文将着重介绍独立的光伏发电系统。

## 第3章 光伏发电系统中蓄电池充电器设计

### 3.1 蓄电池简介

蓄电池是一种化学电源，它将直流电能转变为化学能储存起来，需要时再把化学能转变为电能释放出来。能量转换过程是可逆的，前者称为蓄电池充电，后者称为蓄电池放电。在光伏发电系统中，蓄电池对系统产生的电能起着储存和调节作用。由于光伏系统的功率输出每天都在变化，在日照不足发电很少或需要维修光伏系统时，蓄电池也能够提供相对稳定的电能。蓄电池还可以提供较大的瞬间电流，用于起动电动机等。蓄电池的投资约占光伏发电系统总投资的15%—20%，如此高的投资比例使得蓄电池使用寿命的长短对光伏发电系统的成本影响很大。蓄电池效率的高低不仅影响到电能成本，还影响到太阳电池组件额定容量的大小，从而影响到总投资。因此，如何选择和维护好蓄电池组，是光伏系统设计和管理中不容忽视的问题。

#### 3.1.1 蓄电池分类

蓄电池有不同类型和大小。通常手电筒用的干电池，称为一次电池（原电池）。还有一类可充电电池，称为二次电池，例如：汽车起动用的铅酸电池，手电筒、收音机使用的镉镍充电电池等。

1) 铅酸蓄电池：用铅和二氧化铅作为负极和正极的活性物质（即参加化学反应的物质），以浓度为27%—37%的硫酸水溶液作为电解液的电池，称为铅蓄电池（俗称“铅酸蓄电池”）。铅蓄电池不仅具有化学能和电能转换效率较高、充放电循环次数多、端电压高，容量大（高达3000Ah）的特点，而且还具备防酸、防爆、消氢、耐腐蚀的性能。同时随着工艺技术的提高，铅蓄电池的使用寿命也在不断提高。

近年来还开发出具有免维护特点的密封式铅蓄电池。密封式铅酸电池，维护简便，运输方便，但价格较贵，一般是开口铅电池的2—3倍。密封式铅电池在高温的气候条件下，容易因过充而损坏。

2) 碱性蓄电池：碱性蓄电池按其极板材料，可分为镉镍蓄电池、铁镍蓄电池等。

碱性蓄电池与铅蓄电池相比具有体积小，可深放电，耐过充，过放电，以及使用寿命长，维护简单等优点。碱性蓄电池的缺点是内阻大，电动势较低，造价高。同低成本的铅电池比较，镉镍电池初始成本比铅电池高 4—5 倍，因此在光伏系统中较少采用<sup>[17]</sup>。

由于铅蓄电池的性能价格比仍优于镉镍电池，目前在光伏系统中铅蓄电池仍在大量使用。

## 3.2 铅蓄电池主要参数

表示铅蓄电池特性参数很多，下面仅就与光伏系统选用蓄电池有关的重要性能给予扼要说明。

### 3.2.1 蓄电池容量

蓄电池容量是蓄电池储存电能的能力，通常以蓄电池充满电后放电至规定的终止电压时，电池放出的总电量表示。当蓄电池以恒定电流放电时，它的容量（ $Q$ ）等于放电电流值（ $I$ ）和放电时间（ $T$ ）的乘积，即  $Q=IT$ 。如果放电电流不是常量，则蓄电池的容量等于不同放电电流值与相应放电时间的乘积之和。

蓄电池容量不是固定不变的常数，它与充电的程度、放电电流大小、放电时间长短、电解液比重、环境温度、蓄电池效率及新旧程度等有关。通常在使用过程中，蓄电池放电率和电解液温度是影响容量的最主要因素。

1) 放电率对蓄电池容量影响。蓄电池容量的大小随放电率不同而不同，一般规定 10 小时放电率的容量为固定型蓄电池的额定容量。若使用高于 10 小时的放电率，则可得到高于额定值的电池容量；若使用低于 10 小时的放电率，所放出的容量要比蓄电池的额定容量小。图 3.1 展示出放电率对蓄电池容量的影响，由曲线可以看出，随着  $C/20$  到  $C/1$  放电率的加大，蓄电池容量在减小。

2) 电解液对蓄电池容量影响。电解液温度的影响：电解液温度高时（在允许的温度范围内），离子运动速度加快，获得的动能增加，因此渗透力增强，从而使蓄电池内阻减小，扩散速度加快，电化反应加强，从而使电池容量增大；当电解液温度下降时，渗透力降低，因此蓄电池内阻增大，扩散速

度降低，电化反应滞缓，使电池的容量减小。图 3.1 还展示出温度对蓄电池容量的影响，由曲线可以看出，随着温度的升高，蓄电池容量呈增加趋势<sup>[18]</sup>。

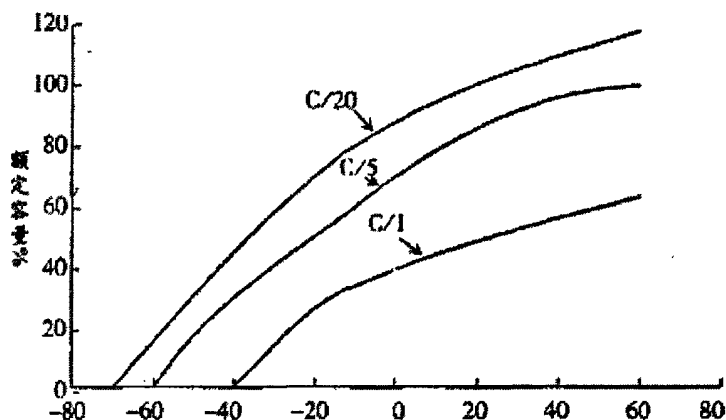


图 3.1 蓄电池温度曲线

电解液浓度的影响：电解液浓度不同，蓄电池的容量和电压也不同，尤其是极板孔眼内部的电解液浓度是决定蓄电池容量和电压的重要因素。若电解液浓度低，在放电过程中孔眼内电解液比重相应降低，不能维持足够的硫酸量，则电池的电动势随之下降，容量也因此减小。

3) 局部放电对容量影响。铅酸蓄电池无论在放电时还是静止状态下，其内部都有自放电现象，称为局部放电。产生局部放电的原因，主要是由于电池内部有杂质存在。尽管电解液是由纯净浓硫酸和纯水配制而成，但还是含有少量的杂质，而且随着蓄电池使用时间的增长，电解液中的杂质缓慢增加。这些杂质在极板上构成无数微形电池产生局部放电，因此无谓的消耗着蓄电池电能<sup>[19]</sup>。

为了减小蓄电池的局部放电作用，在安装、维护工作中应选择合格的硫酸和纯水，尽量防止有害杂质落入电池。局部放电还与蓄电池的使用温度有关，温度越高，局部放电越严重，因此要尽量避免蓄电池在过高温下运行。

### 3.2.2 蓄电池能量效率

描述蓄电池效率的物理量有二个：“安时效率”、“能量效率”和“电压效率”。当设计蓄电池储能系统时，能量效率特别有意义。如果电流保持恒定，在相等的充电和放电时间内，蓄电池放出电量和充入电量的百分比，



称为蓄电池的能量效率。铅蓄电池效率的典型值是：安时效率约为 87%—93%；能量效率约为 71%—79%，电压效率 85%左右。

此外，还有“比能量”也是评价蓄电池水平的一个重要技术指标，即单位重量或单位体积的能量，分别以 Wh/kg 和 Wh/L 表示<sup>[20]</sup>。

蓄电池效率受许多因素影响，如温度、放电率、充电率、充电终止点的判断等。影响蓄电池能量效率的电能损失主要来自以下 3 个方面：1) 充电末期产生电解作用，将水电解为氢和氧而消耗电能；2) 电池的局部放电作用（或漏电）消耗了部分电能；3) 电池的内阻产生热损耗而损失电能。

### 3.2.3 蓄电池循环寿命

蓄电池的循环寿命主要由电池工艺结构与制造质量所决定。但是使用过程和维护工作对蓄电池寿命也有很大影响，有时是重大影响。首先，放电深度对蓄电池的循环寿命影响很大，蓄电池经常深度放电，循环寿命将缩短，见图 3.2，其次，同一额定容量的蓄电池经常采用大电流充电和放电，对蓄电池寿命都产生影响。大电流充电，特别是过充时极板活性物质容易脱落，严重时使正负极板短路；大电流放电时，产生的硫酸盐颗粒大，极板活性物质不能被充分利用，长此下去电池的实际容量将逐渐减小，这样使用寿命也会受到影响。

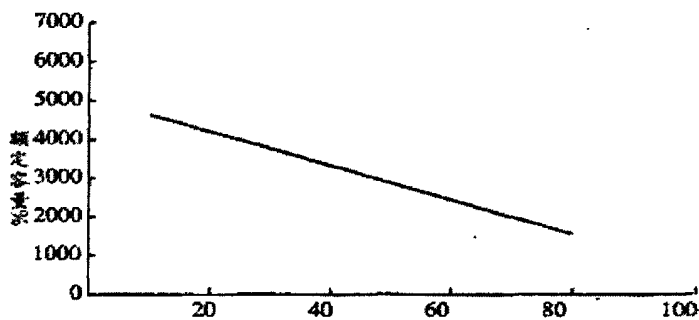


图 3.2 蓄电池放电深度曲线 (%)

最后要特别指出的是，蓄电池寿命虽然取决于蓄电池极板的工艺水平和制造质量，然而当蓄电池在现场投入运行后是否能实现制造时付与蓄电池的寿命预期，用户的运行和维护水平将起着决定性作用。

### 3.3 光伏蓄电池充电器的设计

在独立的光伏系统中，产生的电能不能一直满足用电负载的需求，需要用储能装置进行能量调节，在光伏系统中，蓄电池的主要作用是：1) 储存能量：在大部分独立光伏系统中，光伏阵列产能和负载用电不一致，在晚上或多云等情况下，光伏阵列不能提供足够的能量，而用电负载又必须工作时，蓄电池是必要的；2) 对太阳电池的工作电压的钳位作用：太阳电池的工作特性受太阳辐照度、温度等影响很大，太阳电池组件自连接负载时，负载常常不能处在最佳工作点附近，系统效率低，而蓄电池对太阳电池的工作电压具有钳位作用，能够保证光伏阵列处在最佳工作点附近；3) 提供启动电流：由于受到最大短路电流的限制，光伏阵列可能不能满足负载的启动电流要求而蓄电池能够在短时间内提供大电流给负载启动。

#### 3.3.1 光伏系统中蓄电池的使用环境

应用于光伏系统中的蓄电池与其他用途时的工作特点不同，这些特点对蓄电池性能有很大的影响，光伏系统中的蓄电池工作特点是：1) 晚上以及阴、雨天放电，有光照的白天充电，属于循环、浮充混合工作方式；2) 充电倍率低，平均充电电流一般为  $0.01-0.02C$ ，很少能达到  $0.1C$ ；3) 放电电流小，放电倍率通常为  $0.004-0.050C$ ，但放电时间长、频率高，蓄电池长时间处于放电状态，有时候甚至出现过放电；4) 相对于放电时间来讲，一次充电时间较短，即使长的时候也仅为白天，约  $10h$ ，光伏系统很少能完全、快速地给蓄电池充满电，蓄电池往往会处于欠充电状态；5) 除大型光伏电站有专门的放置蓄电池的房间，能做到较好的维护以外，其他光伏系统，如太阳能路灯、草坪灯等使用的蓄电池，工作环境都较恶劣，经常在夏季高温和冬季低温条件下工作。

#### 3.3.2 光伏系统中常用的蓄电池

##### 1) 铅酸蓄电池

广泛用于光伏系统中的铅酸蓄电池主要是固定式铅酸蓄电池，工业型阀控密封铅酸蓄电池及小型阀控密封铅酸蓄电池。

影响铅酸蓄电池寿命的因素：

作为光伏发电中的关键部件蓄电池的失效和寿命短是阻碍光伏独立发电

系统推广的原因之一，光伏发电系统中，影响铅酸蓄电池寿命的主要原因有：

a 放电深度：在蓄电池循环使用时，寿命主要决定于放电深度，蓄电池正极活性物质  $PbO_2$  在充放电过程中，将反复发生收缩和膨胀，使  $PbO_2$  粒子逐渐松弛，易于从板栅上脱落，随着放电深度的增加，收缩和膨胀的程度增大，结合力的破坏变大，使得蓄电池的循环寿命变短。

b 长期欠充电：由于太阳能资源的随机性，光伏系统应用中的蓄电池常难以得到完全的再充电，往往处于欠充电状态，导致蓄电池发生酸分层，极板上硫酸浓度的不同分布，将导致正极板腐蚀和膨胀，负极板底部硫酸盐化。

c 小电流放电：光伏系统中，蓄电池的放电电流通常较小，根据蓄电池放电时  $PbSO_2$  的结晶机理，当电池小电流放电时，形成的  $PbSO_2$  晶体颗粒数目较少、尺寸较大，再充电时会加速极板的极化，影响蓄电池的寿命。

d 温度影响：温度升高，会引起蓄电池失水干涸、热失控，影响寿命在设计太阳能光伏系统时，应保证蓄电池有良好的下作环境，下作温度控制在  $20-30^{\circ}C$ ，能延长铅酸蓄电池的寿命<sup>[21]</sup>。

## 2) Cd/Ni 电池

Cd/Ni 电池由于生产工艺的原因，镉晶粒较粗，如果电池在完全放电之前就重新充电镉晶粒容易聚集成块，使电池放电时形成次级放电平台，具有记忆效应，Cd/Ni 电池的废弃物会对环境造成污染。

## 3) MH/Ni 电池

MH/Ni 电池的比能量密度高，理论上是 Cd/Ni 电池的 1.5—2 倍，MH/Ni 电池的规格指标和 Cd/Ni 电池大体一致，在性能上也有不少相似的地方，与铅酸蓄电池相比 MH/Ni 电池和 Cd/Ni 电池的放电电压更平稳一般标称 1.2V 的 MH/Ni 电池可在 1.2V 以上释放 85% 的电量。

# 3.4 蓄电池充电规律

铅酸蓄电池的常规充电方式有两种：浮充（又称恒压充电）和循环充电。浮充时要严格掌握充电电压，如额定电压为 12V 的蓄电池，其充电电压应在 13.5—13.8V 之间。浮充电压过低，蓄电池会充不满，过高则会造成过量充电；电压的调定，应以初期充电电流不超过  $0.3C$ （ $C$  为蓄电池的额定容量）为原则。循环充电，其初期充电电流也不宜超过  $0.3C$ ，充电的安培小时数要略大

于放电安培小时数。也可先以0.1C的充电速率恒流充电数小时，当充电安培小时数达到放电安培小时数的90%时，再改用浮充电压充电，直至充满。以上为目前常用的铅酸蓄电池充电方式，但这两种方式存在着一些不足之处。在充电过程中，电池电压逐渐增高，充电电流逐渐降低。由于恒压充电不管电池电压的实际状态，充电电压总是恒定的，充电电流刚开始比较大，然后按指数规律下降；采用快速充电可能使蓄电池过量充电，易导致电池损坏；对于循环充电而言，采用较小电流充电，充电效果较好。但对于大容量的蓄电池，充电时间就会拖得很长，时效低，造成诸多不便<sup>[22]</sup>。

通过对上述两种充电方式的分析比较，综合其优点设计出具有恒流充和恒压充的智能型铅酸蓄电池充电器如图3.3。

基于STC5410单片机的蓄电池充电器，STC系列单片机具有内部技能数模转换以及看门狗功能，而且价格便宜，设计方便，在小规模电路设计中使用十分便捷。

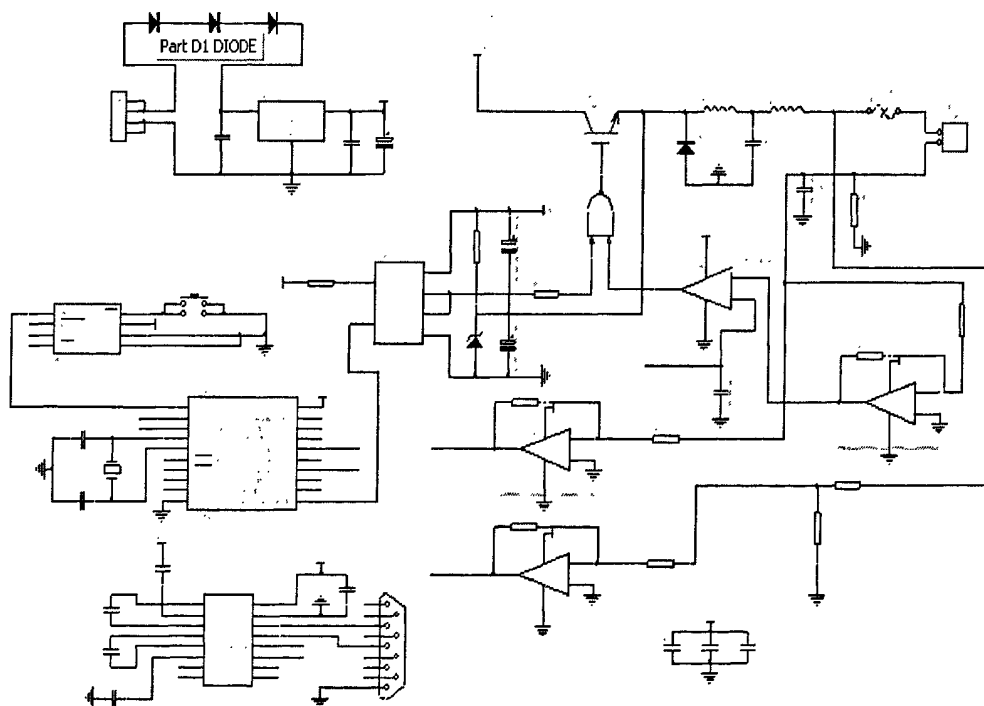


图 3.3 光伏充电器电路图

当检测到蓄电池端电压小于某个固定值后，充电器开始向蓄电池充电，充电分为三段。充电曲线如图 3.4。

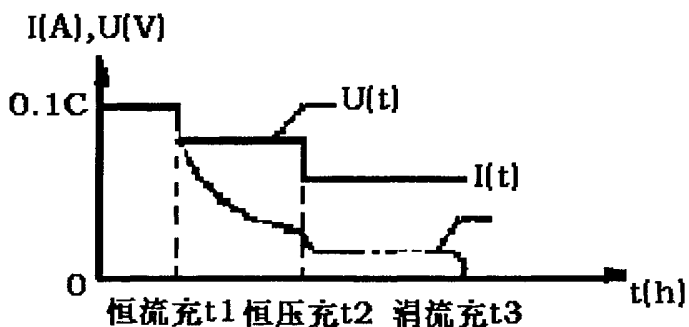


图 3.4 充电曲线

用本充电器对 12V/4A 的铅酸蓄电池充电，最大充电电流限制为 4A，最大输出电压为 18V。充电开始时，充电器以 0.4A 电流对蓄电池快速充电数小

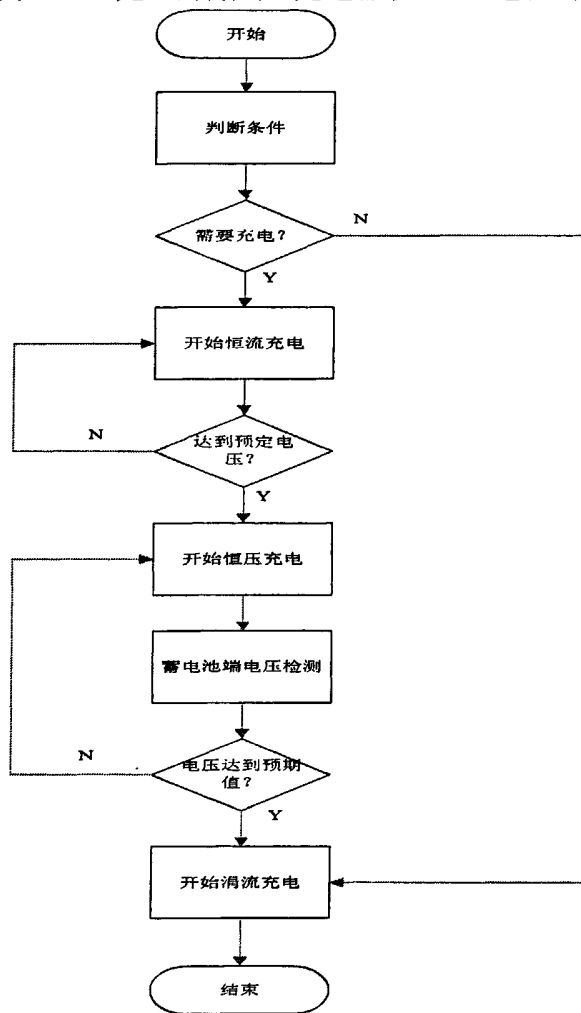


图 3.5 光伏充电器控制流程图

时，然后以 14.7V 的恒定电压对蓄电池进行慢充，直到蓄电池电压上升到 12.8V，结束慢充，最后充电器以 14.1V 对蓄电池涓流充电。该充电器对上述蓄电池充电比普通充电器缩短了约 2/5 时间。

蓄电池的型号不同，充电要求不完全相同，在设定快充时间和最大充电电流等参数时，要经过反复的测试，再能达到最佳效果，使电池寿命得到延长。

控制流程如上图 3.5 所示。

### 3.5 本章小结

本章主要介绍了各种蓄电池的原理，和工作过程，介绍了光伏蓄电池不同于其他蓄电池的特性。并介绍了蓄电池充电器的工作原理，最后设计了有三段充电功能的光伏蓄电池智能充电器。

## 第 4 章 太阳能电池最大功率点的跟踪控制研究

所有光伏系统都希望太阳电池阵列在同样日照、温度的条件下输出尽可能多的电能，这也就在理论上和实践上提出了太阳电池阵列的最大功率点跟踪（MPPT—Maximum Power Point Tracking）问题。太阳能光电应用的日益普及、太阳电池的高度非线性和价格仍相对昂贵更加速了人们对这一问题的研究。

光伏并网发电系统中由于阵列的功率等级一般较大，因此 MPPT 问题显得尤为重要。即使在可调度式光伏并网系统中，光伏阵列虽有蓄电池组进行“稳压”，但要保证系统在充电过程中一直保持高效率，在利用 DC/DC 装置实现充电时 MPPT 仍是不可或缺的环节。在不可调度式光伏并网系统中，并网逆变器更加必须通过不断调整指令电流的大小以实现 MPPT 控制。本文在讨论太阳电池模型的基础上，讨论了太阳电池阵列 MPPT 的多种实施方案并提出了作者自己的方法和观点。

### 4.1 太阳能电池的基本原理和特性

太阳电池的基本特性和二极管类似，可用简单的 PN 结来说明，图 4.1 为太阳电池的单元模型和外观。电池单元是光电转换的最小单元，一般不单独作为电源使用。将太阳电池单元进行串、并联并封装后就成为太阳电池组件，功率一般为几瓦、几十瓦甚至数百瓦，众多太阳电池组件按需要再进行串、并联后形成太阳电池阵列，就构成了“太阳能发电机（Solar Generator）”。

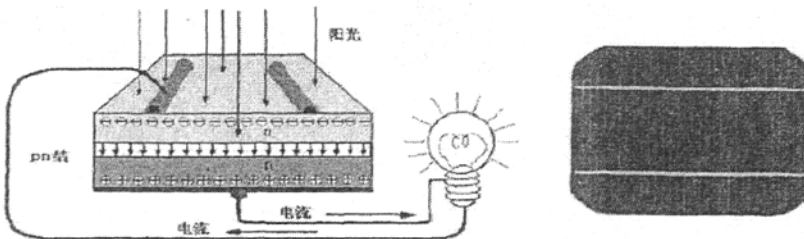


图 4.1 太阳能电池的基本单元

理想 PN 结单元太阳电池的电流—电压（ $I-V$ ）的关系如式 4-1

$$I = I_o[\exp(\frac{qV}{KT}) - 1] \quad (4-1)$$

其中  $I$  为 PN 结的电流 (A)； $I_o$  为反向饱和电流 (A)； $V$  为外加电压 (V)； $q$  是电子电荷 ( $1.6 \times 10^{-19}$  次方)； $K$  是玻耳兹曼常数 ( $1.38 \times 10^{-23}$  次方)， $T$  是绝对温度。

## 4.2 太阳能最大功率点跟踪方法

图 4.2 为任意时刻的太阳电池阵列的输出功率特性  $P-V$  曲线，由图 4.2 可知当阵列工作电压小于最大功率点电压  $U_{MAX}$  时，阵列输出功率随太阳电池端电压  $V_{PV}$  上升而增加；当阵列工作电压大于最大功率点电压  $V_{MAX}$  时，阵列输出功率随  $U_{PV}$  上升而减少。MPPT 的实现实质上是一个自寻优过程，即通过控制阵列端电压  $V_{PV}$ ，使阵列能在各种不同的日照和温度环境下智能化地输出最大功率。

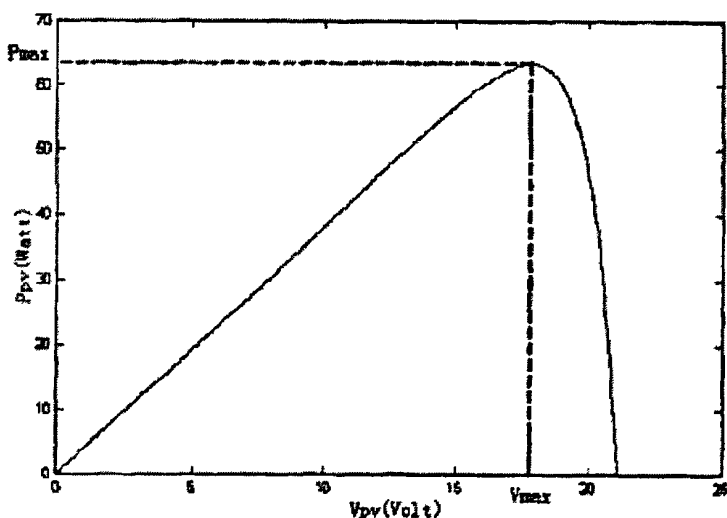


图 4.2 任意时刻太阳能电池板的  $P-V$  曲线

太阳电池阵列的开路电压和短路电流在很大程度上受日照强度和温度的影响，系统工作点也会因此飘忽不定，这必然导致系统效率的降低。为此，太阳电池阵列必须实现最大功率点跟踪控制，以便阵列在任何当前日照下不断获得最大功率输出。本文针对于常用的 MPPT 实现方法：定电压跟踪法、扰动观察法及滞环比较法进行了仔细的分析并在这基础上提出了几种改进方案：模糊逻辑控制法。



### 4.2.1 定电压跟踪法

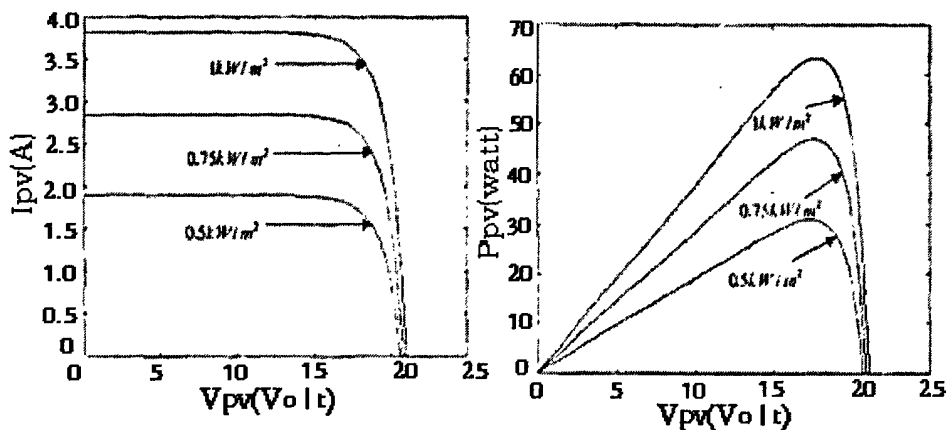


图 4.3 不同日照下的 I-V, P-V 特性曲线

仔细分析图 4.3 可以看出，在日照强度较高时，诸曲线的最大功率点几乎分布于一条垂直线的两侧，这说明阵列的最大功率输出点大致对应于某个恒定电压，这就大大简化了系统 MPPT 的控制设计，即人们仅需从生产厂商处获得  $V_{max}$ ，数据并使阵列的输出电压钳位于  $V_{max}$  值即可，实际上是把 MPPT 控制简化为稳压控制，这就构成了 CVT 式的 MPPT 控制。采用 CVT 较之不带 CVT 的直接耦合工作方式要有利得多，对于一般光伏系统可望获得多至 20% 的电能。

但是这种跟踪方式忽略了温度对阵列开路电压的影响，以单晶硅太阳能电池为例，当环境温度每升高  $1^{\circ}\text{C}$  时，其开路电压将下降  $V_{oc} * (0.35 - 0.45\%)$ 。

为克服使用场所冬夏早晚、阴晴雨雾等环境温度变化给系统带来的影响，在 CVT 的基础上可以采用以下几种折衷解决办法：

1) 手工调节方式：通过电位器手动按季节给定不同的  $U_{max}$ ，这是比较麻烦和粗糙的。

2) 微处理器查询数据表格方式：事先将不同温度下测得的  $V_{max}$  值存储于 EPROM 中，实际运行时，微处理器通过阵列上的温度传感器获取阵列温度，通过查表确定当前的  $V_{max}$  值。

CVT 控制的优点是：

- 1) 控制简单，易实现，可靠性高；
- 2) 系统不会出现振荡，有很好的稳定性；

3) 可以方便地通过硬件实现。

缺点是：

- 1) 控制精度差，特别是对于早晚和四季温差变化剧烈的地区；
- 2) 必须人工干预才能良好运行，更难于预料风、沙等影响。

采用 CVT 以实现 MPPT 控制，由于其良好的可靠性和稳定性，目前在光伏系统中仍被较多使用。随着光伏系统控制技术的计算机及微处理器化，该方法逐渐被新方法所替代。

### 4.2.2 扰动观察法

功率回授控制法的原理是通过采集太阳能电池阵列的直流电压值和直流电流值，采用硬件或软件的乘法器计算出当前的输出功率  $P$ ，藉由当前的输出功率  $P$  和上次记忆的输出功率  $P'$  来控制调整输出电压值，其控制原理框图如图 4.4 所示。

此种功率回授控制法，控制器宜先设计成单值控制模式，亦即仅以  $P-V$  曲线顶点右侧为控制范围，这是因为在同一户值下阵列电压及电流值不唯一。这种方法的优点是实现较为方便，但缺点是可靠性和稳定性均不佳，所以在实际应用中，较少采用。

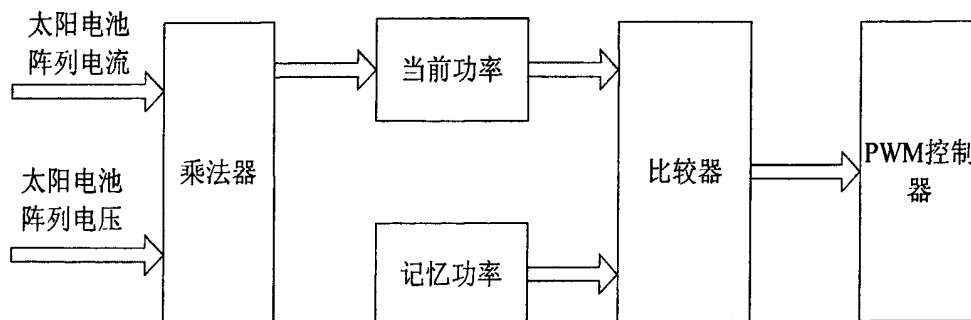


图 4.4 扰动观察法控制框图

### 4.2.3 滞环比较法

在扰动观察法基本设计思想中是两点比较，即目前的工作点与上一个扰动点比较，判断功率的变化方向从而决定上作电压的移动方向。针对太阳日照量并不会快速变化的特点，多余的扰动可能带来较多的损失。这里提出的

滞环比较法，可在日照量快速变化时并不跟随快速移动工作点（也许只是干扰或判读错误），而是在日照量较稳定时再跟踪到最大功率点，以减少扰动损失。其原理详述如下：

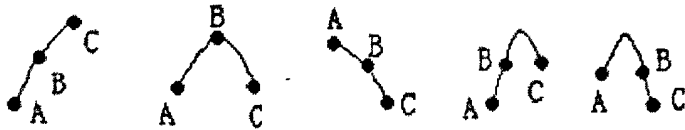


图 4.5 滞环比较法五种情况

考虑太阳能电池 P-V 特性曲线，在曲线顶点附近任意取三点不同位置，所得到的结果可分为图 4.5 所列五种情况。设定一个比较符号的运算变量 Tag，C 点与 B 点比较，若比 B 点为大或相等， $Tag=1$ ；若比 B 点小， $Tag=-1$ ；而 A 点与 B 点相比时情况略有不同，当 A 点比 B 点大或相等时， $Tag=-1$ ；A 点比 B 点小时， $Tag=1$ 。当三点比较完之后， $Tag=2$ ，工作电压扰动量 D 值应往右边移动；而  $Tag=-2$ ，D 值应往左边移动；当  $Tag=0$  即表示到达顶点，D 值将不改变。在 A, B 和 C 三点功率的检测上，先读取 B 点功率为立足点，增加一  $\Delta D$  读取 C 点功率，再减少两倍  $\Delta D$  读取功率值当作 A 点。连续检测三点功率值后再比较大小计算权位值，由权位值来判定立足点应往 C 点移动、A 点移动或不移动。但当照度正在变化时，扰动 D 值我们所得到的 A, B, C 二点的位置与 Tag 值和图 4.5 有所不同。如图 4.7 所示。

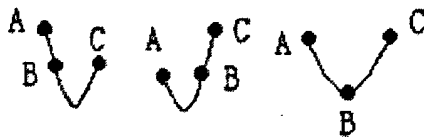


图 4.6 改进后的滞环比较法

由图 4.6 中我们知道，此三种排列方式在照度快速变化时可能会出现，但 Tag 值都为零，即工作点并不会移动。滞环比较法的算法流程如图 4.7

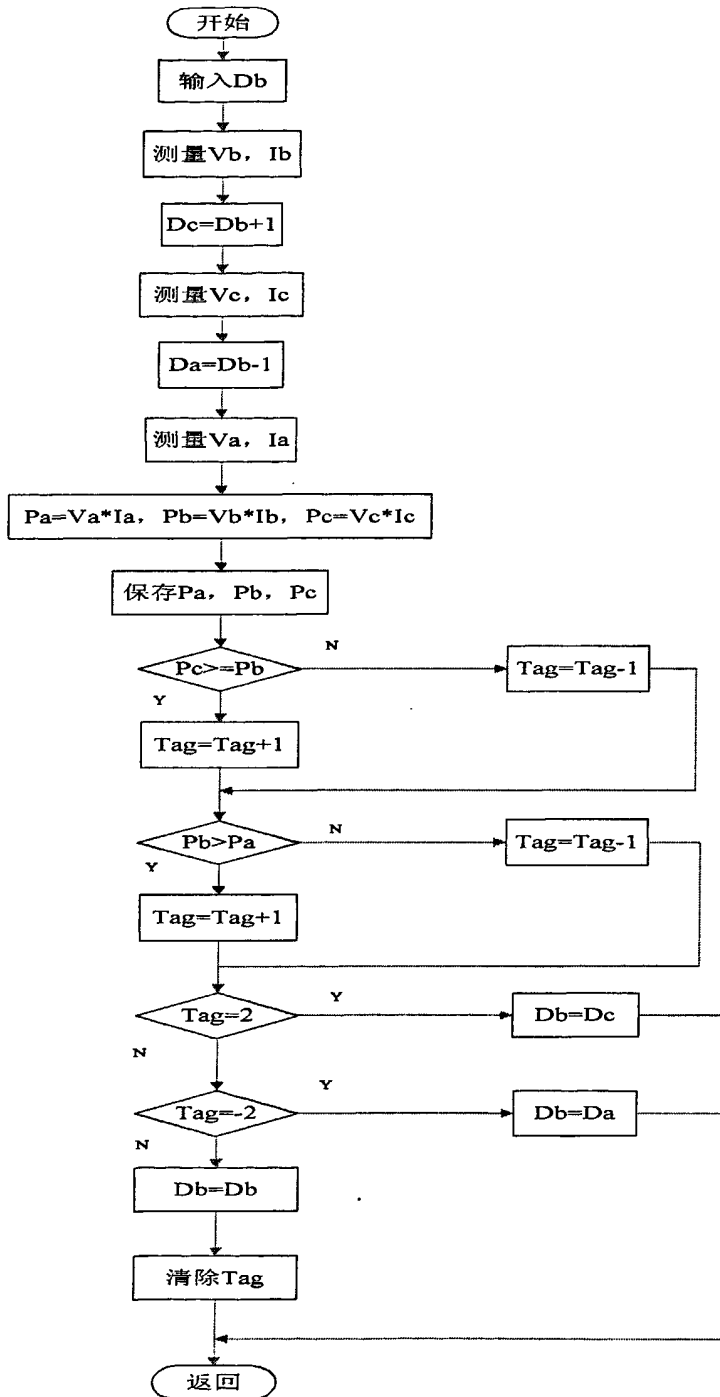


图 4.7 滞环比较法控制流程图

## 4.3 模糊逻辑控制法

### 4.3.1 选择模糊逻辑控制方案的原因

自 1965 年, 美国的伊朗裔自动控制理论专家扎德 (L.A.Zadeh) 在加州大学提出了模糊集合理论以来, 模糊逻辑控制 (FLC—Fuzzy Logic Controller) 得到了迅速的发展。FLC 在各种领域出人意料地解决了传统控制方法无法或难以解决的问题, 并取得了令人瞩目的成效。现在, 人们已经明确地知道, 模糊控制是目前在控制领域中所采用的三种智能控制方法中最具实际意义的方法。

由于日照变化的不确定性、太阳能电池阵列的温度的变化、负载的变化和太阳能电池  $U-I$  曲线的强烈非线性, 所以固定太阳能电池阵列的最大功率点是随着环境和负载的变化而时刻变化的。针对这样的非线性系统, 使用模糊逻辑控制方法进行控制, 将会获得理想的控制效果。

### 4.3.2 在光伏并网发电系统中使用模糊逻辑进行 MPPT

基于模糊集合和模糊算法的模糊理论可以得出的一系列模糊控制规则, 可以由 DSP 十分简明的执行。

模糊逻辑控制器的设计主要包括以下几项内容。

- 1) 确定模糊控制器的输入变量和输出变量;
- 2) 归纳和总结模糊控制器的控制规则;
- 3) 确定模糊化和反模糊化的方法;
- 4) 选择论域并确定有关参数。

Matlab 的模糊逻辑工具箱拓展了 MATLAB 对模糊逻辑系统的设计能力, 已经成为运用模糊手段解决工程问题的重要工具。模糊逻辑工具箱使得工程设计人员可以采用多种途径生成和编辑模糊推理系统, 如手工、通过交互式图形工具、通过命令行函数或基于模糊聚类或自适应神经模糊技术自动实现。本文结合 Matlab7.1 中的模糊逻辑工具箱进行了辅助设计。定义输入和输出变量: 通常控制总是用系统的实际输出量与设定的期望值相比较, 得到一个偏差值  $E$ , 一般还需要根据该偏差的变化率  $EC$  来进行综合判断。

在光伏系统的 MPPT 跟踪方面, 文献[23]中使用了  $dP/dI$  和其变化量

$\Delta dP/dI$  作为输入变量。P 和 I 是太阳能电池阵列的输出功率和电流。这种方法的缺点是忽略了变流器 PWM 脉宽的变化，该模糊控制方案具有较好的控制精度但动态性能较差。文献[24]中考虑到了 PWM 脉宽的变化量，但使用了 P 和  $\Delta P$  代替了  $dP/dI$  和其变化量  $\Delta dP/dI$ 。该控制方案具有较好的动态特性，但控制精度较差。

考虑在光伏并网发电系统中的应用。本文定义了以下的 FLC 的输入量： $dP/dI$  和其变化量  $\Delta dP/dI$  以及  $\Delta i_o$  输出为给定并网电流的变化值即  $\Delta i_{out}$  输入和输出量的定义如式 4-2 所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dI}(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{i(k) - i(k-1)} \\ \Delta\left(\frac{dP}{dI}(k)\right) = \frac{dP}{dI}(k) - \frac{dP}{dI}(k-1) \\ \Delta i_o(k) = \Delta i_{out}(k-1) \\ i_{out}(k) = i_{out}(k-1) + \Delta i_{out}(k) \end{array} \right. \quad (4-2)$$

通常将输入变量范围人为定义成离散的若干级，所定义级数的多少取决于所需输入量的分辨率。各个输入量和输出量的基本论域、模糊变量以及各个模糊变量的隶属函数，如图 4.8 所示。

$dP/dI$  的基本论域  $E = \{-8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ ，采用负大 (NB)，负小 (NS)，零 (Z)，正小 (PS)，正大 (PB) 5 个模拟量来描述  $dP/dI$ 。其它各个输入量和输出量可参看图 4.8，图 4.9 为采用 Matlab7.1 进行辅助设计时的模糊变量的定义界面。

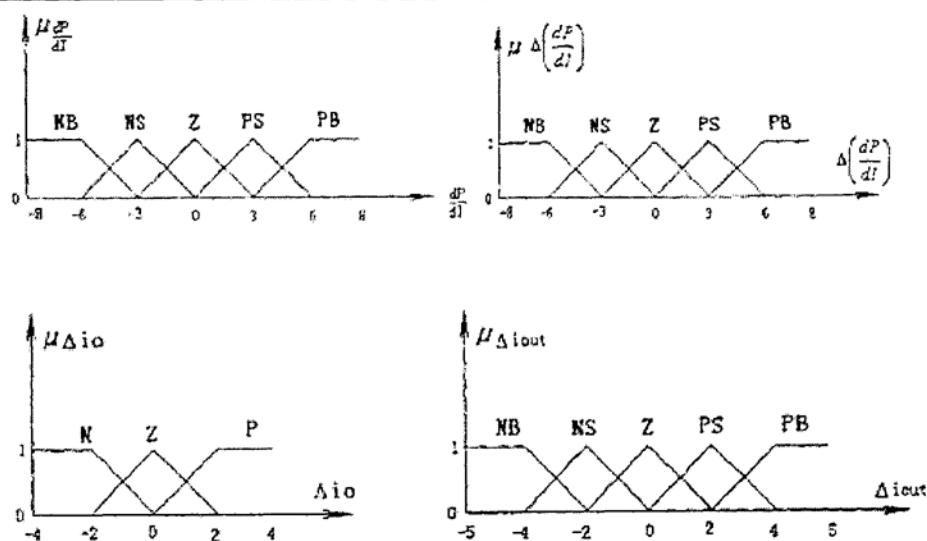


图 4.8 各输入和输出变量的隶属函数图

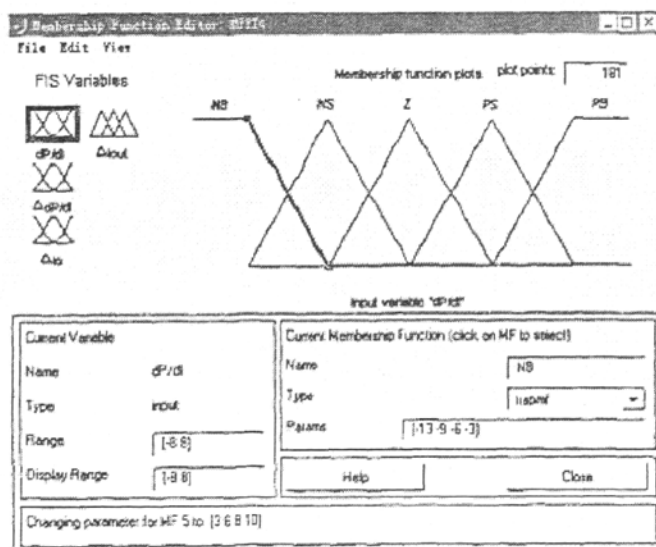


图 4.9 采用 MATLAB7.1 进行辅助设计时的模糊变量定义界面

### 4.3.3 模糊推理算法

在模糊理论中，模糊控制的推理方法有几十种不同，但是，在模糊控制中应用较多的只有四种，它们分别是 Mamdani 推理，Larsen 推理，Tsukamoto 推理，Takagi-Sugeno 推理。本文采用 Mamdani 推理。该推理的模糊推理规则采用“if.....then.....”的语句格式进行定义。

举例说明：

“if ( $dP/dI$  is PB) and ( $\Delta dP/dI$  is PB) and ( $\Delta I_{out}$  is P) then ( $\Delta I_{out}$  is PB)”

如图 4.10 所示，“ $dP/dI$  is PB”意味着目前太阳能电池阵列的工作点位于 P-I 曲线的左半部分斜率较大的部分，所以大致上 FLC 的输出  $\Delta I_{out}$  应该为正。考虑“ $\Delta I_{out}$  is P”意味着上次 FLC 的输出  $\Delta I_{out}$  为正，即并网输出功率加大；接着考虑“ $\Delta dP/dI$  is PB”，意味着的斜率变化为正，即当前的斜率比上次的斜率有较明显的加大。从 P-I 曲线可以看出，如果日照不变，在曲线左半段，P 增加，则斜率  $dP/dI$  是下降的，而目前斜率  $dP/dI$  反而上升，意味着当前的日照有较大幅度的增加。为此，FLC 的输出  $\Delta I_{out}$  也应为较大的正值。所以  $\Delta I_{out}$  is PB。

详细的模糊规则表见附录。

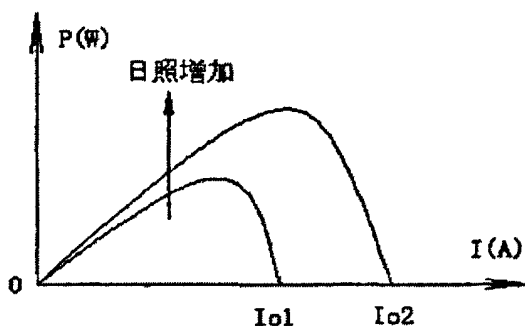


图 4.10 模糊逻辑控制规则设计例图

#### 4.3.4 精确输出量的反模糊化

在数字控制系统中，用于最终输出的控制量只能为一个精确量，而经模糊推理后得到的模糊输出量及其相应的隶属度，所有隶属度不为 0 的模糊输出量对输出都起一份贡献。反模糊化的目的就是必须求出能代表所有模糊输出量的作用的精确值。即在推理得到的模糊集合中取出最能代表这个模糊集合的单值。该计算过程又称为反模糊判决 (Defuzzification)。

对于本文来说，FLC 的输出应该是一个确定具体的  $\Delta I_{out}(k)$  提供给后级的并网电流输出控制程序。该程序根据式 (4-2) 得出给定的并网电流，和实际的并网电流进行 PI 调节，计算出实际的 PWM 脉宽提供给功率器件驱动板。

反模糊判决可以采用不同的方法，用不同的方法所得的结果也是不同的。



常用的方法有：最大隶属度法，重心法，系数加权平均法和隶属度限幅元素平均法。本文采用重心法。其计算表达式如下：

$$\Delta i_{out}(k) = \frac{\sum_{i=1}^n [\mu(D_i) \cdot D_i]}{\sum_{i=1}^n \mu(D_i)} \quad (4-3)$$

上式中： $\mu(D_i)$  为第  $i$  个模糊输出量的隶属度，即模糊推理的结果； $D_i$  为第  $i$  个模糊输出量单点位置或中心元素的位置； $n$  为所定义的系统输出模糊量的个数，本文  $n$  为 50。

图 4.11 为 Matlab7.1 在给定的输入条件下输出的反模糊化的数字结果举例，其采用的就为重心法。图 4.12 为使用 Matlab7.1 得出的输出和输入量之间关系的立体图示。

### 4.3.5 使用模糊控制方法的优点

使用模糊逻辑控制进行光伏系统的 MPPT 具有很好的动态性能和精度。有着十分广阔的应用前景，本文的实际应用系统中，还没有使用该方法。在将来的研究工作中，一方面要进行模糊控制表的离线方案的设计，节省单片机内部的存储空间，提高工作速度，实现实时控制。另一方面，需要进行长时间的对比试验，进一步确定模糊控制的可靠性、快速性、高精度等优点。

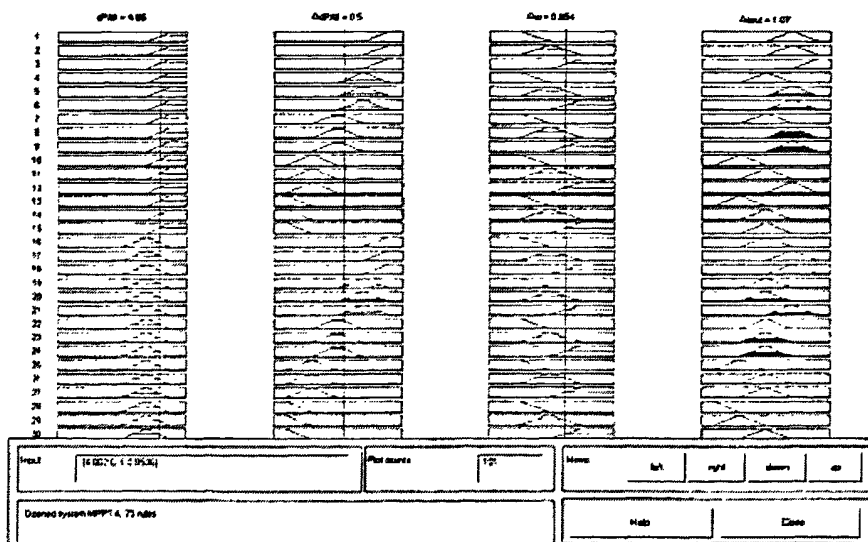


图 4.11 MATLAB7.1 在给定输入条件下输出的反模糊化数字结果举例

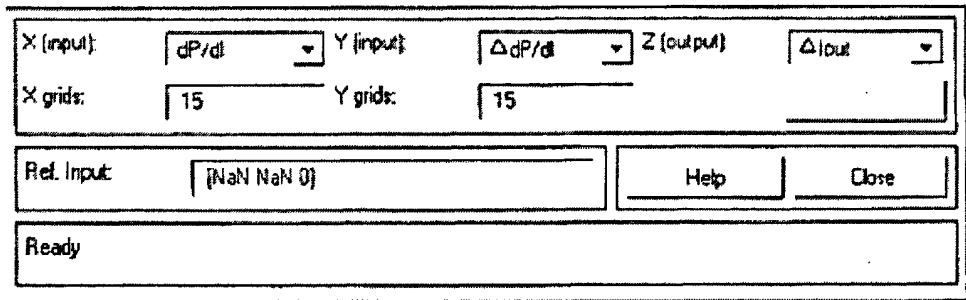
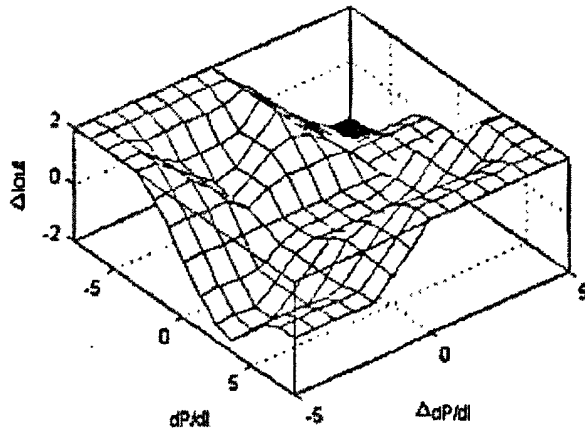


图 4.12 MATLAB7.1 中输入和输出关系的立体结构图

#### 4.4 本章小结

本章分析了光伏电池最大功率点的原理和获得方法，并分析了定电压比较法，扰动观察法，滞环比较法。提出了利用模糊控制法获得最大功率点的方法。

## 第 5 章 光伏发电系统逆变器的研究

### 5.1 逆变器的控制策略

将太阳能电池阵列产生的直流电能馈送给交流电网，这是光伏并网系统所需完成的，而光伏并网系统中的核心环节就是光伏并网逆变器。光伏并网逆变器与独立正弦波逆变器相比，主要区别在于它的负载是电网，对于电网负载它的控制方法有以下几种。

光伏并网逆变器按控制方式分类，可分为电压源电压控制、电压源电流控制、电流源电压控制和电流源电流控制四种方法。以电流源为输入的逆变器，其直流侧需要串联一大电感提供较稳定的直流电流输入，但由于这一大电感往往会导致系统动态响应差，因此当前大部分并网逆变器都采用以电压源输入的方式。

逆变器与市电并联运行的输出控制可分为电压控制和电流控制。电网可看作容量无穷大的电压源，如果光伏并网逆变器的输出采用电压控制，则实际上就是一个电压源与电压源并联运行的系统，这种情况下要保证系统稳定运行，就必须采用锁相控制技术使逆变器输出电压与电网电压相位完全一致，并且要保证两者输出频率的一致性，但由于锁相回路的响应较慢、逆变器输出电压值不易精确控制、可能出现环流等问题，这种控制方法的实现还需进一步研究。

如果逆变器的输出采用电流控制，则只需控制逆变器的输出电流跟踪市电电压，即可达到电流源与电压源并联运行的目的。由于其控制方法相对简单，因此使用比较广泛。

### 5.2 逆变器的工作方式

并网系统的逆变器主拓扑结构 5.1

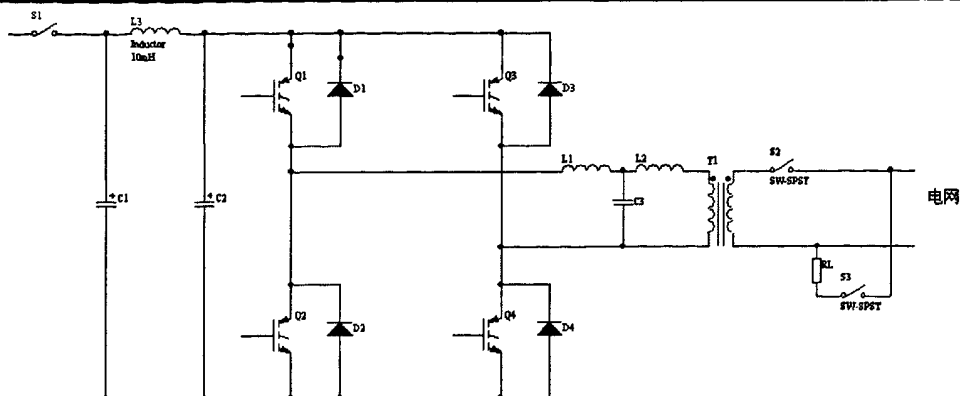


图 5.1 系统主拓扑图

并网系统采用单相桥式逆变的拓扑结构，如图 5.1 所示，Q1—Q4 是功率器件，组成逆变桥，D1—D4 是对应的反并联二极管。系统采用了工频变压器来保证逆变电压和电网电压的适配，并且使电网电压和系统相隔离。图中 C1, L3, C2 组成了直流侧的兀型滤波器用来滤除直流侧两倍于电网频率的电压纹波；L1, C3, L2 组成了交流侧的 T 型滤波器，用来滤除交流侧的电流谐波，从而保证并网电流的品质。太阳能电池输出的直流电能经过逆变后，输出和电网电压同频、同相的交流电流，从而既向负载供电，又向电网输送电能。系统根据太阳能电池输出电压和功率的大小来判断昼夜，日出而作，日落而息。在白天电网电压正常的情况下，系统首先判断太阳能电池电压是否正常，然后进行锁相，锁相完成后接通接触器 K2，系统开始软启动并向电网发电，并网功率的大小完全由太阳能电池确定。

如图 5.2 所示的单相光伏并网发电装置的功率器件共有四种开关模式，以图中所示的并网电流方向为正，给出了不同开关模式下功率器件的工作状态。对于并网电流的负半周，也可作相同的分析。

图 5.2 中的 (a) 图表示功率器件 T1, T4 导通，太阳能电池阵列直流侧能量馈入电网，并网电流增大，电感储能增加。

图 5.2 中的 (b) 图表示功率器件 T1.T3 导通，太阳能电池阵列能量对直流侧电容进行充电，交流侧电感储存能量通过 T1 及 D1 组成回路馈入电网，并网电流减小，电感储能减小。

主电路的四个工作状态：

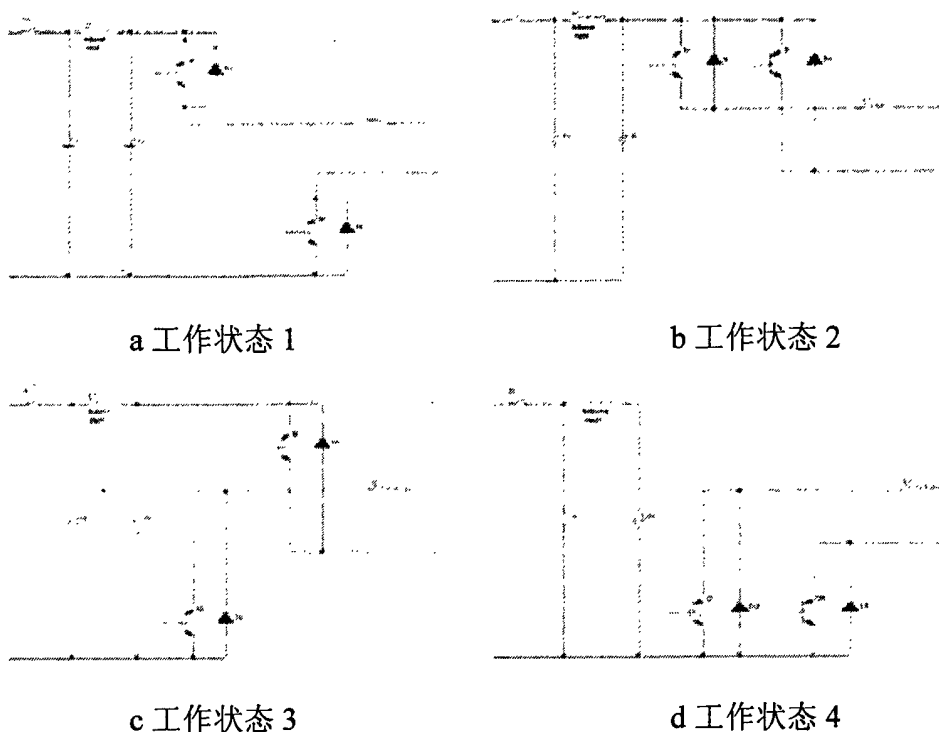


图 5.2 并网逆变器的四种工作状态

图 5.2 中的 (c) 图表示功率器件 T2, T3 导通, 电感的储能除了通过反并联二极管 D2, D3 组成的回路馈入电网外, 还通过 D2, D3 与太阳电池阵列一起对直流侧电容进行充电, 此时并网电流减小, 电感储能减小。

图 5.2 中的 (d) 图表示功率器件 T2, T4; 导通, 太阳电池阵列对直流侧电容进行充电, 电感储能通过 D4, 及 T4 组成回路馈入电网, 并网电流减小, 电感储能减小。

图 5.2 中 (c) 图的状态发生在交流电网电压过零点附近, 此刻系统输出的电流较小, 对应的脉冲宽度也较小。(a) 图、(c) 图的状态表示逆变桥输出电压  $U$  分别为正、负, (b) 图、(d) 图的状态表示逆变桥输出的电压为零。这四种开关状态经过 SPWM 调制后, 通过交流滤波器滤除载波高频分量后, 使送入电网的电流波形为正弦波。

从以上分析可知, 并网装置实际上是一个能量能双向流动的变换器, 通过控制交流电流和电网电压之间的相位, 便能实现能量的双向流动, 同时也能实现无功功率控制。可以看出, 当能量从直流侧流向交流侧时, 它是一个

Buck 变换器；当能量从交流侧流向直流侧时，它是一个 Boost 变换器。由此可以得出这样一个结论：并网系统直流侧的电压必须大于交流侧的峰值电压，否则系统不能正常工作。

### 5.2.1 瞬时值滞环比较方式

图 5.3 为采用滞环比较器的瞬时值比较方式原理图。图中将指令电流  $i_c^*$  和实际并网电流  $i_c$  进行比较，两者的偏差  $\Delta i_c$  作为滞环比较器的输入，通过滞环比较器产生控制主电路中开关通断的 PWM 信号，该 PWM 信号经驱动电路控制功率器件的通断，从而控制并网电流  $i_c$  的变化。在这种方式中，滞环的宽度  $H$  对电流的跟踪性能有较大影响，当  $H$  较大时，开关频率较低，则对开关器件的开关频率要求不高，但跟踪误差较大，输出电流中的高次谐波含量较大；而当  $H$  小时，跟踪误差小了，器件开关频率提高。所以对器件的开关频率要求较高<sup>[25]</sup>。

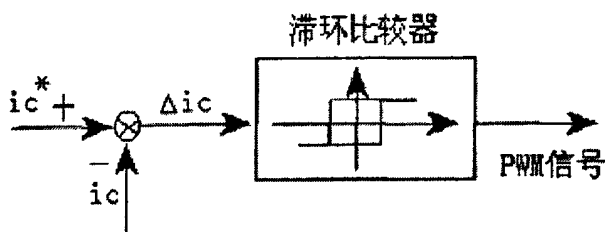


图 5.3 采用滞环比较器的瞬时值比较方式的原理图

这种控制方案具有如下特点：

- 1) 硬件电路比较简单；
- 2) 属于实时控制，电流响应快；
- 3) 没有斩波，输出电压中不含特定频率的谐波分量；
- 4) 环的宽度固定，电流跟随的误差范围是固定的，但电力半导体器件的开关频率却是变化的，这将导致电流频谱较宽，增加了滤波器设计的难度。

由于  $H$  所导致的缺点有两种方法可以解决：一种是将环宽  $H$  设计成可以随电流值的变化自动调节，另一种是采用定时控制的瞬时值比较方式，其原理图如下 5.4 所示。

它使用由时钟定时控制的比较器代替滞环比较器。每个时钟周期对  $\Delta i_c$  判断一次，使得 PWM 信号至少一个时钟周期才会变化一次。该方式可以避

免器件开关频率过高的情况发生。不足之处在于：补偿电流的跟随误差是不固定的<sup>[26]</sup>。

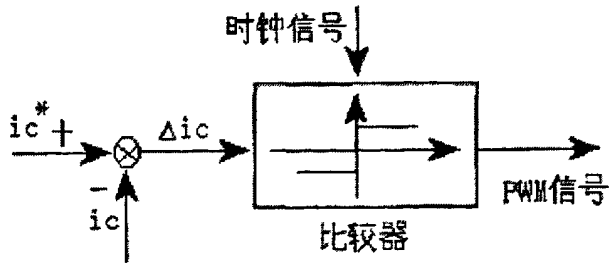


图 5.4 定时控制的电流瞬时值比较方式原理图

### 5.2.2 电流三角波比较方式

控制方式原理如图 5.5 所示，它将指令电流  $ic^*$  和并网电流  $ic$  的实时值进行比较，两者的偏差  $\Delta ic$  经放大器 A 后与三角波进行比较，以输出 PWM 信号。放大器 A 多采用比例或比例积分放大器。这种电流控制方式具有如下特点：

- 1) 跟踪误差较大；
- 2) 硬件相对复杂；
- 3) 逆变器的输出的谐波量较少，但含有与三角载波相同频率的谐波；
- 4) 放大器的增益有限；
- 5) 功率器件的开关频率固定地等于三角载波的频率；
- 6) 电流响应相对于瞬时值比较方式比较慢<sup>[27]</sup>。

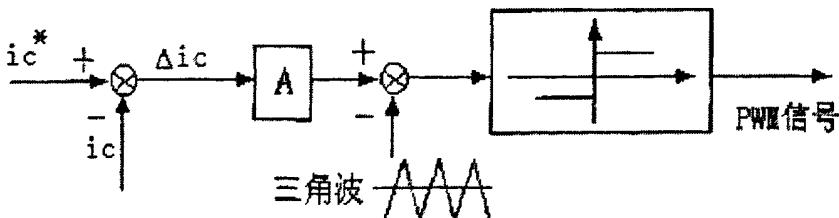


图 5.5 电流三角波比较方式的原理图。

### 5.2.3 PWM 逆变电路的基本原理

正弦脉宽调制的控制思想，是利用逆变器的开关元件，由控制线路按一定的规律控制开关元件的通断，从而在逆变器的输出端获得一组等幅，等

距，而不等宽的脉冲序列。其脉宽基本上按正弦分布，以此脉冲列来等效正弦电压波。把正弦波  $N$  等份，就可以得到  $N$  个宽度相等，但幅值不等，且脉冲顶部是曲线，各冒充的幅值按正弦规律变化。如果将每一等份的正弦曲线与横轴包围的面积用一个与此面积相等的等高矩形脉冲代替，就可以得到一系列的脉冲序列。这样，由  $N$  个等幅而不等宽的矩形脉冲所组成的波形与正弦波的正半周等效，正弦波的负半周也可用相同的方法等效。

在理论上可以严格的计算出各分段矩形脉冲的宽度，作为控制逆变电路开关元件通断的依据，但计算过程十分烦琐，较为实用的方法是采用调制的方法，即把希望得到的波形作为调制信号，把接受调制的信号作为载波，通过对载波的调制得到期望的 PWM 波形。这里借用了通信电路中对信号进行调制—解调的概念，也是电力电子电路中应用弱电技术的一个例证。

实用的 PWM 逆变装置由三部分组成，即直流电流，中间滤波环节和逆变电路。其中支流电源是不可控的整流电路，没有调压功能，中间滤波环节通常都是采用电容（或电感）滤波。而逆变电路采用脉宽调制的方法就可在把直流变成交流的同时，既能调压又能调频。PWM 逆变电路的实质是依靠调节脉冲宽度改变输出电压，通过改变调制周期达到改变输出频率的目的。

脉宽调制的方法很多，分类方法也没有统一，较常见的分类法有：1) 根据调制脉冲的极性可分为单极性和双极性调制两种；2) 根据载频信号和基准信号的频率之间的关系，可分为同步式和异步式两种；3) 根据基准信号的不同可分为矩形波脉宽调制和正弦波脉宽调制等。矩形波脉宽调制法的特点是输出脉冲列是等宽的，只能控制一定次数的谐波。正弦波脉宽调制法的特点是输出脉冲列是不等宽的，宽度按正弦规律变化，故输出电压的波形接近正弦波。

正弦波脉宽调制也叫 SPWM，是采用一个正弦波与三角波相交的方案确定各分段矩形脉冲的宽度。通常采用等腰三角形作为载波，因为等腰三角波上下宽度与高度成线性关系且左右对称。当它与任何一个平缓变化的调制信号波相交时，如在交点时刻控制电路中开关器件的通断，就可以得到宽度正比与信号波幅值的脉冲。这正好符合 PWM 控制的要求。当调制信号波为正弦波时，所得到的就是 SPWM 波形<sup>[28]</sup>。



## 5.3 利用 MATLAB7.1 进行逆变电路的仿真

### 5.3.1 MATLAB 的仿真工具 SIMULINK

MATLAB 的 SIMULINK 子库是一个建模、分析各种物理和数学系统的软件。由于在 WINDOWS 界面下工作，所以对控制系统的方块图编辑、绘制很方便，它用框图表示系统的各个环节，用带方向的连线表示各环节的输入输出关系。启动 SIMULINK 十分容易，只需在 MATLAB 的命令窗口键入“SIMULINK”命令，此时出现一个 SIMULINK 窗口，包含七个模型库，分别是信号源库、输出库、离散系统库、线性系统库、非线性系统库及扩展系统库。

### 5.3.2 利用 MATLAB 产生 PWM 信号

PWM 波形仿真产生

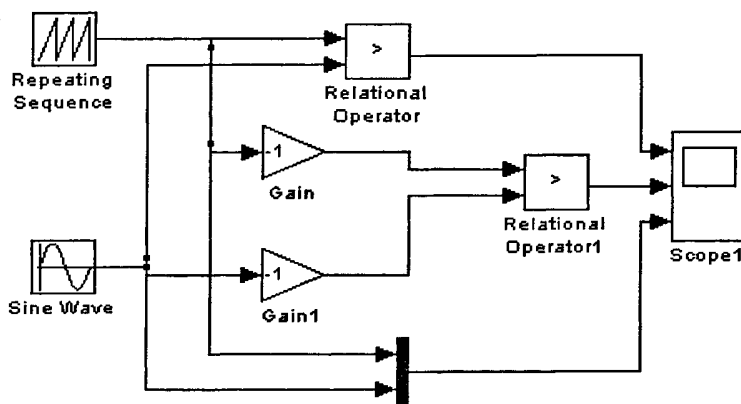


图 5.6 利用 MATLAB 产生 PWM 信号

如图 5.6 所示，由一锯齿波发生器和一个正弦波发生器通过比较器产生 PWM 波形，先将锯齿波和正弦波中比较，如果锯齿波大于正弦波，则输出高电平，如图 5.7。如果正弦波大于锯齿波，则输出低电平，如图 5-8，组合波形如图 5.9 所示。

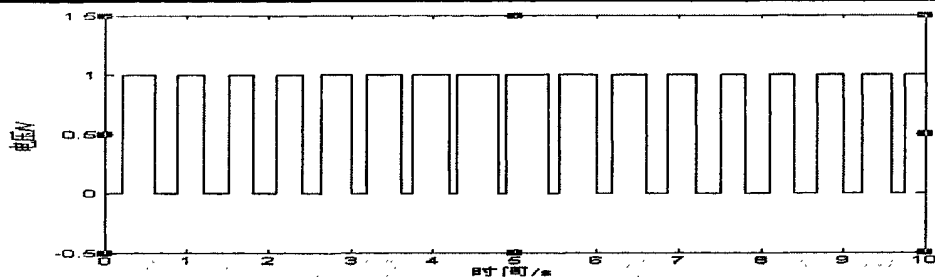


图 5.7 正弦波大于锯齿波时的波形

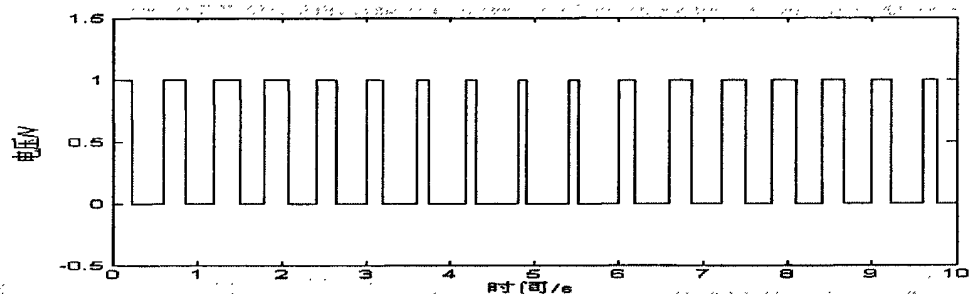


图 5.8 锯齿波大于正弦波时的波形

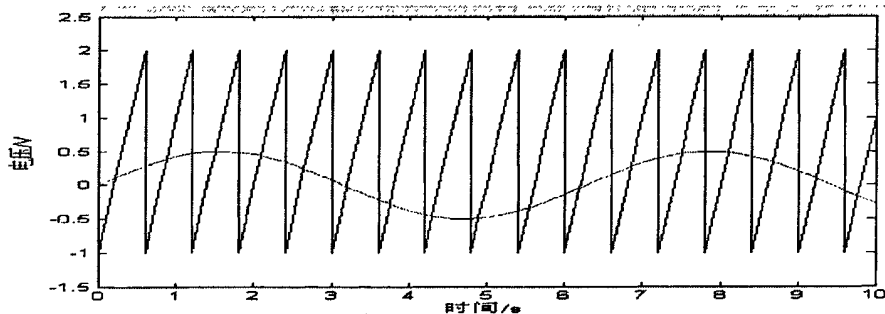


图 5.9 正弦波与锯齿波的组合波形

然后将上述过程倒过来，如果锯齿波值大于正弦波，则输出低电平，如果锯齿波值小于正弦波，则输出高电平，图 5.9 为将正弦波和锯齿波显示在一起的波形图。

#### 5.4 使用上述 PWM 波形的单相逆变仿真

在 DC/DC 电路中，控制信号虽然也有幅值和极性的变化，但它仍然是个直流信号，是非周期信号，但是如果控制信号一旦变成幅值和极性均可变化的周期信号时，主电路输出电压便成为幅值和基频均可调的交流电压，从而实现了 DC/AC 变换，由此可见，逆变用 PWM 技术是斩控和频控相结合的产

物,是调制信号周期性的 PWM 技术。技术发展证明,调制信号正弦化的 PWM 技术具有很多优点。

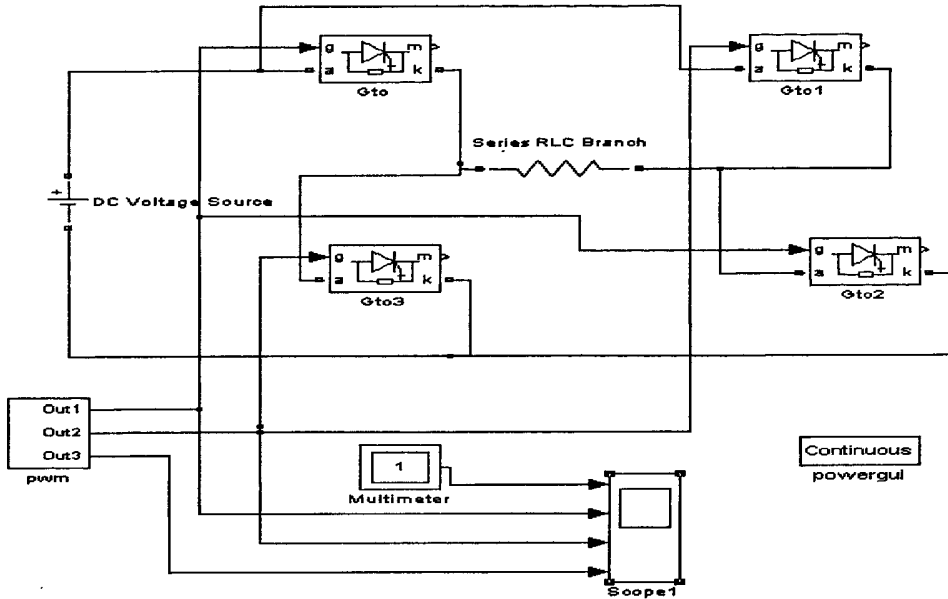


图 5.10 逆变电路仿真

将上述 SPWM 波形产生器应用于逆变电路,逆变电路由四个可控硅组成,如图 5.10,每个可控硅每周周期固定时间通断,通断时刻由 PWM 产生器给予,按照一定的出发脉冲给信号。负载端就可得到一系列基与一定频率正弦波的 PWM 波形。波形如图 5.11 所示

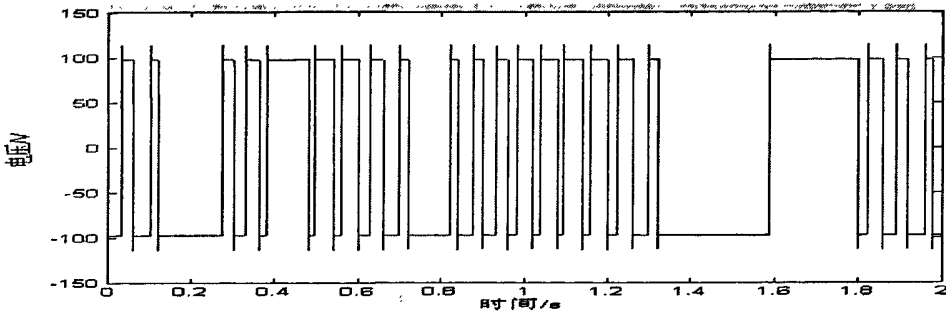


图 5.11 负载电压波形

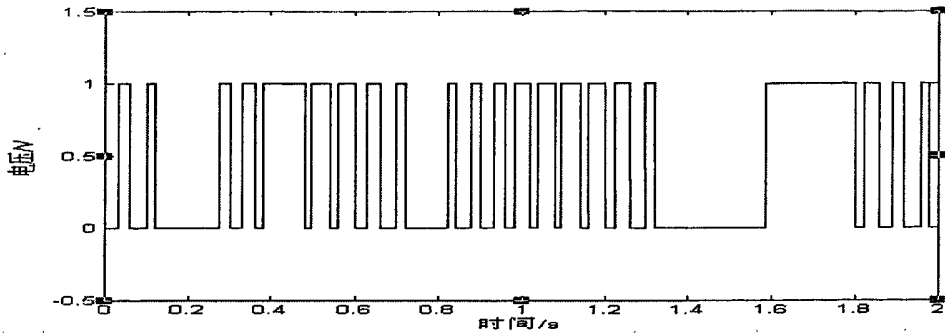


图 5.12 可控硅 1, 3 驱动波形

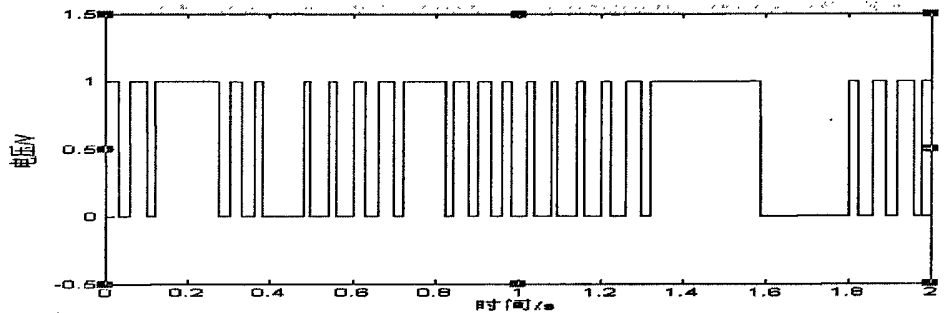


图 5.13 可控硅 2, 4 驱动波形

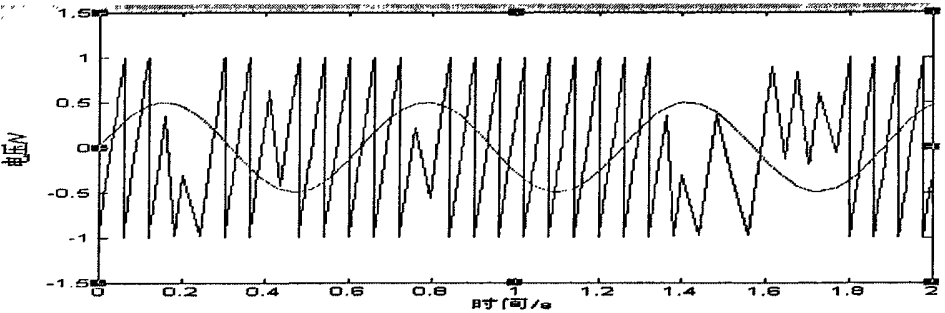


图 5.14 载波和调制波

从图 5.11 出，负载上电压波形为经过正弦波调制的 PWM 波形。5.12 和 5.13 为驱动信号波形，波形中三角波稍微有些错乱，但整体效果可以。

### 5.5 三相 PWM 逆变电路

三相逆变电路可拥有多个基本单元电路并功过输出变压器在输出端串联连接，凡输出端相电压诸分量为同相位时称为单重结构；相反凡输出相电压由不同相位和幅值分量合成时称为多重结构，后者除扩大输出容量之外尚能消除某些谐波，可有效抑制输出谐波含量。

由于控制信号分布时序不同，和单相逆变电路相仿，三相电路也可分为方波和 PWM 两类，在实际应用中，方波电路已逐渐被 PWM 电路所取代。

必须指出，和单相电路一样，不论是方波电路还是 PWM 电路。其区别仅是控制极信号的时序分布，而主电路结构则完全相同。

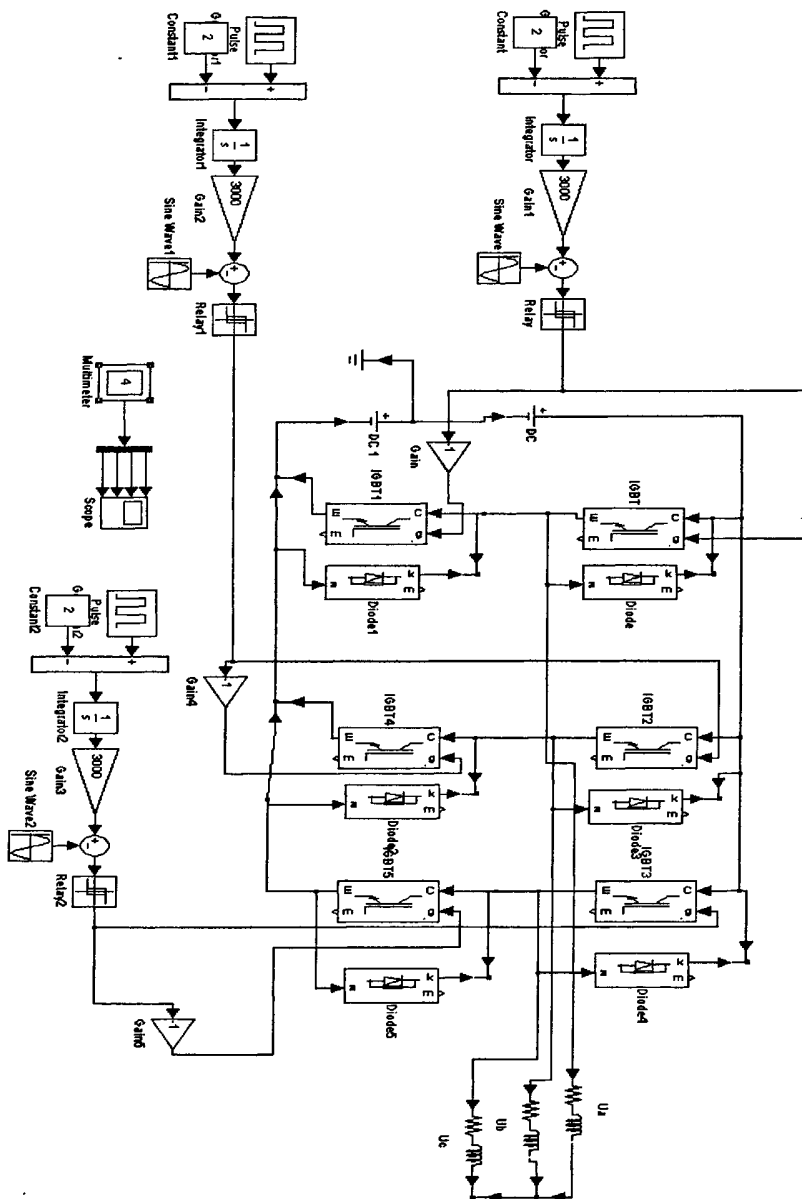


图 5.15 三相 PWM 逆变电路

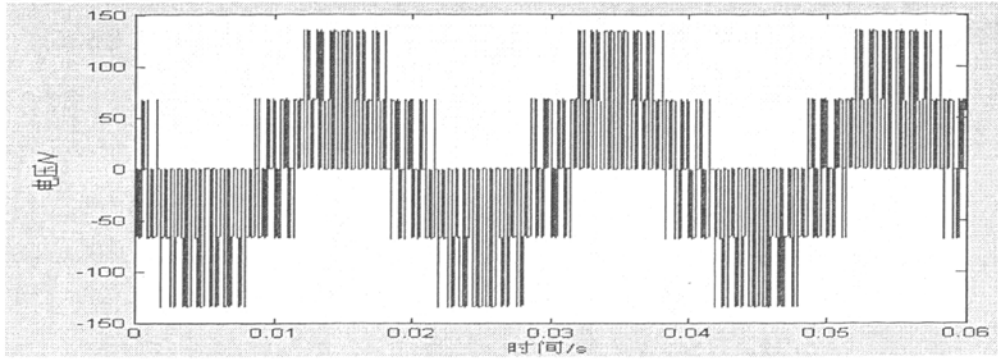


图 5.16 负载  $U_a$  相电压波形

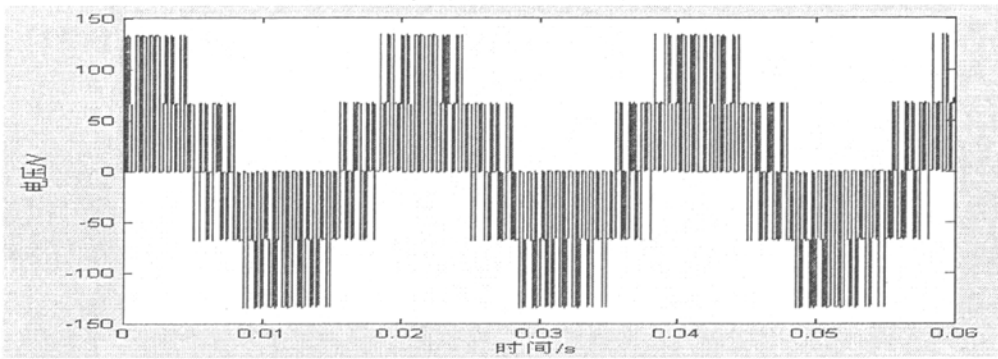


图 5.17 负载  $U_b$  相电压波形

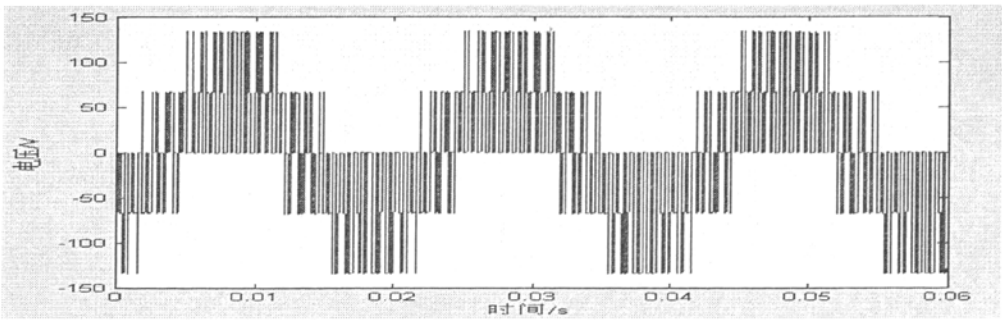


图 5.18 负载  $U_c$  相电压波形

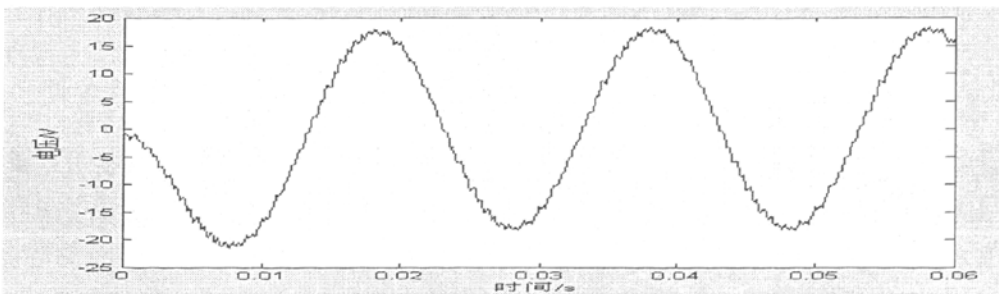


图 5.19 负载  $U_a$  相电流波形

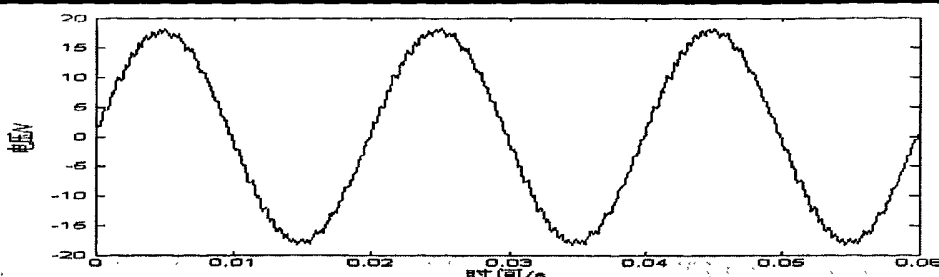


图 5.20 负载  $U_b$  相电流波形

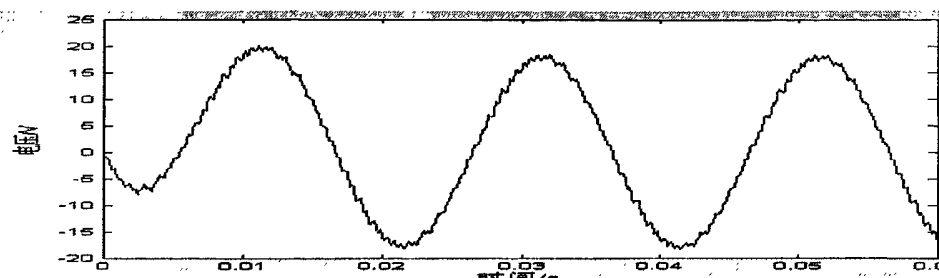


图 5.21 负载  $U_c$  相电流波形

如图 5.16—5.21 为三相逆变器仿真波形，从波形中可以看出，负载端得到了良好的 PWM 电压波形，和非常正规的正弦电流波形，仿真较成功。

## 5.6 利用 STC5410 单片机产生 PWM 波形

因为 STC 单片机内部集成了数模转换器，可以方便的进行数据采集，因此利用 STC 单片机制作逆变器触发器是很好的选择。

如图 5.21, 5.22 示，为利用 STC 单片机产生 1—500ms 可控的 PWM 波形发生器的电路图和 PCB 图。共有 6 个按键：1) 电平时间+键；2) 电平时间—键；3) 光标移动键；4) 设置键；5) 启动键；6) 停止键

四位 LED 数码管，用来显示状态，高低电平时间，和设备工作时间（倒计时）。数码管驱动采用 74HC595。第一个数码管用 H, L, T 来显示高电平工作时间，低电平工作时间和设备工作时间。通过+, —和光标移动键来设置值。设完后按启动键，就可以得到 1—500ms 可调高电平（12V）和 1—500ms 可调低电平的 PWM 波形。

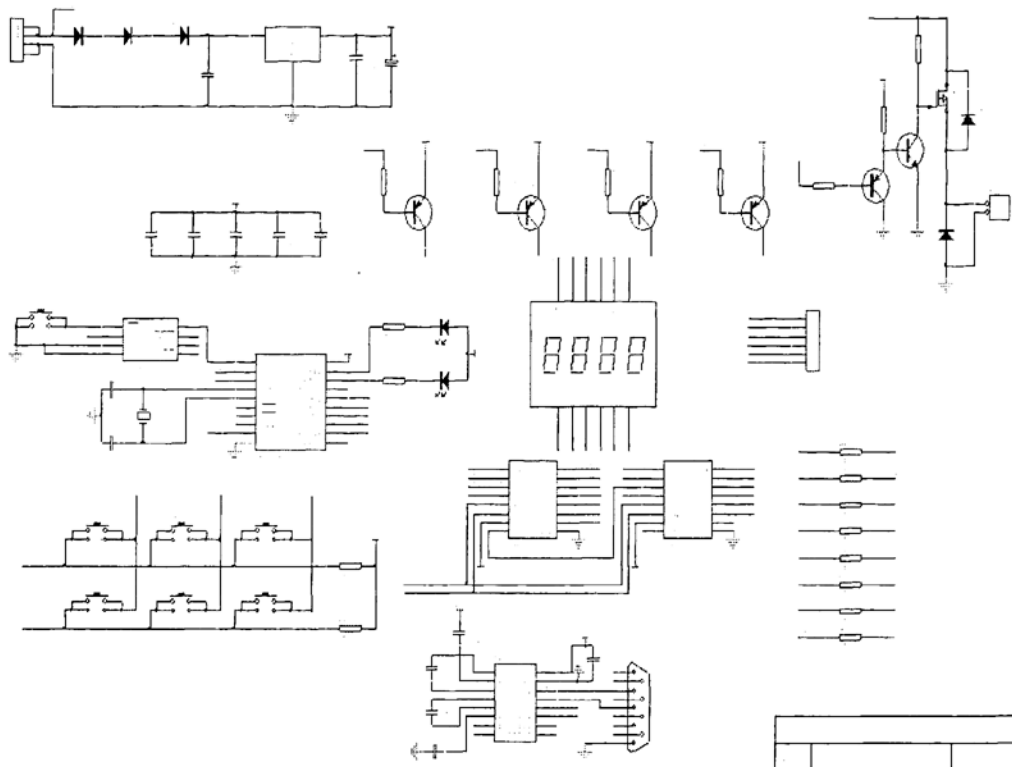


图 5.21 用 STC5410 单片机产生 1—500ms 可控矩形波的原理图

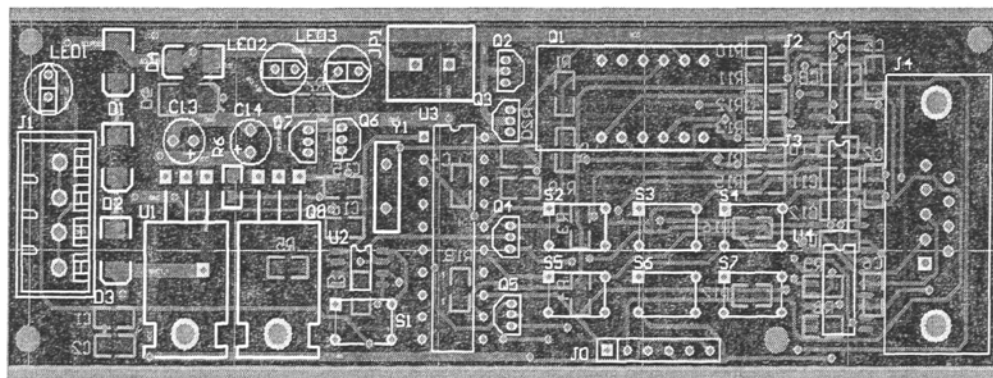


图 5.22 利用 STC5410 单片机产生 1—500ms 可控矩形波的 PCB 图

## 5.7 本章小结

本章研究了光伏逆变器的工作原理和驱动方法，并用 MATLAB 进行了单相和三相逆变器的仿真，得到了比较好的波形，最后用 STC 单片机硬件设计了可控占空比的单相逆变器驱动器。



## 第 6 章 监控系统设计

光伏并网系统的控制是十分复杂的，它不仅要保证系统能可靠、安全地工作，而且还必须做到可以方便地监控系统的工作状态。系统应当具有能设置工作命令、查询运行状态和历史数据等功能，使光伏并网系统成为一个“傻瓜”型机器。此外，对于大多数的“光伏屋顶工程”和很多并网示范点，由于它们的安装位置距离较远，工程技术人员不可能经常到当地去了解系统运行状况，所以有必要开发出具有远程数据采集、显示、分析、系统维护等功能的网络型监控系统。

本系统采用了嵌入式技术来实现系统的操作、显示和通信，提供了远程维护所需要的本地功能。具体地说就是设计了一个独立的、由单片机 89C52 为核心构成的监控子系统，负责对并网逆变系统的运行状态、运行数据进行实时和定时的检测，能够记录和随时显示这些信息，能够对系统的运行参数进行设置，能够将接收来自远程控制中心的命令以及将记录数据传输给远程控制中心。

### 6.1 功能设计

监控子系统主要提供键盘操作、数据采集、数据记录、信息显示、与上位机通信等功能。

由于光伏并网系统是一种功能较为单一的系统，再考虑到它将以安装在家庭为主，操作要尽可能地简便，只需要实现一些简单的操作，所以仅提供了由 4 个按键组成的小键盘，用于实现系统的参数设置、显示信息的选择。

监控子系统需要检测的状态量有：电网电压幅值是否异常、电网频率是否异常、锁相是否完成、直流电压幅值是否异常、系统温度是否异常、驱动电流是否过流、直流电流是否过流、驱动电源是否欠压、控制电源是否欠压等。当这些状态量都正常时，才满足启动要求，系统才能正常工作。

光伏并网系统需要采集的数据有：太阳电池瞬时输出电压、太阳电池瞬时输出电流、电网电压、并网电流、系统温度、电网频率、并网系统累计发电量，这些数据中有些通过检测获得的原始量，有些是通过原始量计算出来的。

监控子系统和逆变控制系统一样，在每天夜晚无需工作，从节电角度来考虑应当关机停止运行，所以所有采集的数据必须被保存在非易失的存储器中。为了降低对远程计算机联机时间的要求，即允许远程计算机可以间隔较长的时间访问本系统，所以需要的存储器容量就要大一些<sup>[29]</sup>。

本地信息显示一般是通过液晶完成的。显示内容主要有汉字名称、汉字提示符、字母和数字等，因此需要图形点阵显示器。每屏显示汉字数确定在 8x4 个，即使用一个 128x64 的 LCD 点阵显示器。由于是一个专用系统，需要的汉字数不多，所以只需一个小型的专用的点阵字库就够了，放在程序存储器中。包括汉字库在内，预计程序存储器的容量在 10KB 之内足够了。

由以上分析可以看出监控子系统的实时性要求不高，但是键盘操作、信号检测、滤波处理、历史数据存储和查询、串行通信都是耗时较多的工 I/O 操作，所以这些工作不适合由 DSP 来完成，因此本系统使用另外一个单片机系统来承担系统监控的功能。由于 DSP 在控制过程中需要用到太阳电池电压、太阳电池输出电流、电网电压、并网电流等数据，所以信号监测和模拟量的输入均由 DSP 承担，单片机监控子系统所采集的数据均由 DSP 传送给它。

对于多处理器系统，处理器之间信息交换的方式决定了系统的复杂程度。交换信息的方式有共享总线方式、共享存储器方式、并行接口方式、串行接口方式。在本系统中，两个处理器之间只需交换由 DSP 采集、用作显示和记录所用的数据以及一些简单的控制命令，数据量不大、交换频度不高，所以 DSP 与单片机之间采用占用资源最少、实现最为简单的串行数据通信方式。监控子系统的结构如图 6.1 所示。

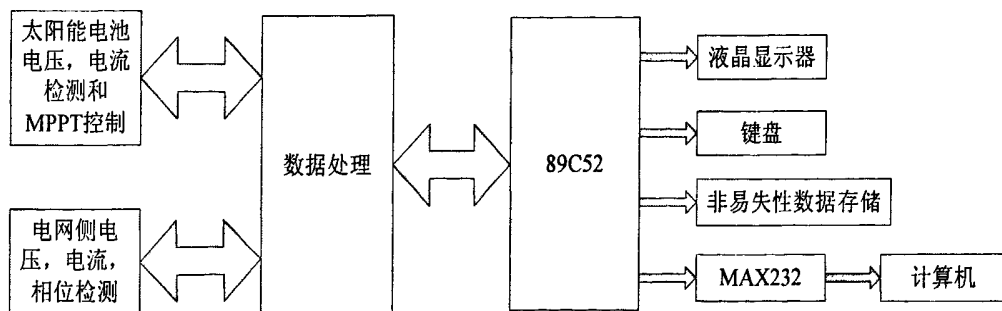


图 6.1 监控系统框图

由于本系统需要的程序存储器和数据存储器容量都不大，不需要对其进行外部扩充，所以采用总线不扩展方式，这样简化了系统的布线，并且系统的可靠性会大大提高。从图 6-1 可以看出，单片机外围还要做一些扩充，主要是连接小键盘、LCD 显示器、RS-232 串行口、用于历史数据存储的非易失存储器等等。

小键盘只有 4 个按键组成，最多只需 4 个通用 I/O 口就可以解决了；LCD 显示器采用串行接口连接，占用的 I/O 口较少；RS-232 接口需要单片机具有串行通讯口；历史数据一定要保存在断电后内容不会丢失的存储器中，作为小型的嵌入式系统，由于历史数据的保存可以按照页面或者块访问方式进行，访问频率不会很大，所以若采用串行总线的非易失存储器，只需占用单片机 2-3 个（视采用 2 线还是 3 线器件）I/O 口就可以了，当然，所选的单片机最好具有 I2C 总线接口，这样可以大大简化用软件实现的位流操作，节省 CPU 的开销。

由以上分析可以看出，对单片机的基本要求是片内有 10KB 左右的程序存储器、几百个字节的随机读写存储器、20 个左右的通用 I/O 口，另外要不少于 3 个的定时器（应用系统时钟及串行口用）。

本系统选用了 ATMAL 公司的 89C52 来实现对系统的监控，它是低功耗的 8 位 CMOS 单片机，采用先进的 RISC 结构，最高可用到 20MHz 的系统时钟，由于 CPU 内部的 Harvard 总线和一级流水线结构，多数指令都是单时钟周期执行的。40 脚 DIP 封装的 89C52 单片机能提供 16K 片内 FLASH，512 字节的 EEPROM 和 1K 字节的 SRAM；它具有 32 个通用 I/O 口，有 3 个定时器，还具有可以方便调试的 JTAG 接口；另外，它还提供多种复位方式，可以用内部的 RESET 功能省去外部的复位电路；提供多种时钟方式，可以用内部的振荡器从而省去外接晶体或振荡器。89C52 单片机支持 C 语言和汇编语言编程，方便用户使用，为本系统提供了灵活而低成本方案。

## 6.2 外部电路设计

监控子系统的外部电路主要包括键盘操作电路、液晶显示驱动电路、历史数据存储器连接电路、RS-232 接口电路、运行状态指示灯驱动电路等等。

### 6.2.1 键盘操作电路

光伏并网系统中需要的操作很少，主要是显示页面的选择和少量参数的设定，而且参数一经设定后，在使用中基本上无需再作调整。因此键盘采用嵌入式控制装置中常用的简洁操作方式，只用 4 个键，分别用于显示页面上翻、下翻，菜单行的移动、参数的增减操作。

键盘访问电路如图 6.2 所示，单片机的四个 I/O 口用作通用输入口连接到按键，输入为低电平时说明有按键按下。本系统采用定时中断方法进行软件去抖动。因为按键的触点抖动频率在毫秒级，人按键操作的切换时间在数百毫秒，所以用几十毫秒访问一次的方法可以很简单的滤除按键的抖动，再加上滤除重键的功能就可以实现完整的按键输入操作。

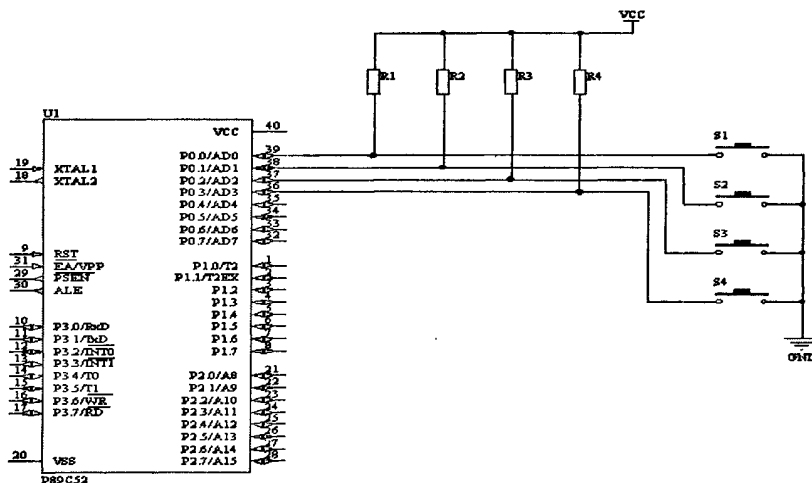


图 6.2 按键电路

按键处理程序在主循环程序中，每当有按键标志时读一次键盘，按键标志在实时时钟处理程序中产生。

### 6.2.2 时钟电路和数据存储电路

PCF8563 是低功耗 CMOS 实时时钟/日历芯片，它提供一个可编程时钟输出，一个中断输出和掉电检测器，所有的地址和数据通过 I2C 总线接口串行传递。最大总线速度为 400Kbits/s，每次读写数据后，内嵌的字地址寄存器会自动产生增量。

管脚配置见图 6.3:

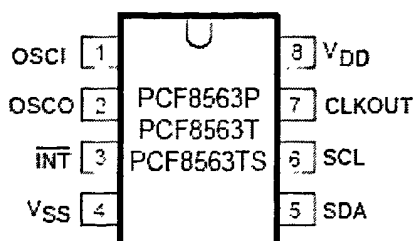


图 6.3 PCF8563 外形

管脚描述见表 6.1。

表 6.1 PCF8563 管脚

符号	管脚号	描 述
OSCI	1	振荡器输入
OSCO	2	振荡器输出
/INT	3	中断输出（开漏：低电平有效）
Vss	4	地
SDA	5	串行数据 I/O
SCL	6	串行时钟输入
CLKOUT	7	时钟输出（开漏）
VDD	8	正电源

功能描述：

PCF8563 有 16 个 8 位寄存器：一个可自动增量的地址寄存器，一个内置 32.768KHz 的震荡器，一个分频器，一个可编程时钟输出，一个定时器，一个报警器，一个掉电检测器和一个 400KHz 的 I2C 总线接口。

所有 16 个寄存器设计成可寻址的 8 位并行寄存器，但不是所有位都有用，前两个寄存器（内存地址 00H, 01H）用于控制寄存器和状态寄存器，内存地址 02H—08H 用于时钟计数器（秒—年计数器），地址 09H—0CH 用于报警寄存器（定义报警条件），地址 0DH 控制 CLKOUT 管脚的输出频率，地址 0EH 和 0FH 分别用于定时器控制寄存器和定时器寄存器。秒，分钟，小时，日，月，年，分钟报警，小时报警，日报警寄存器，编码格式为 BCD 码，星期和星期报警器不以 BCD 格式编码。

当一个 RTC 寄存器被读时，所有计数器的内容被锁存，因此，在传送条件下，可以禁止对时钟/日历芯片的错读。

由于系统的历史数据存储器的容量要求较大，并且必须是不挥发的，所



### 6.2.3 液晶显示电路和温度采集电路的设计

ZY12864D 是一种图形点阵液晶显示器，它主要由行驱动器/列驱动器及 128×64 全点阵液晶显示器组成。可完成图形显示，也可以显示 8×4 个 (16×16 点阵) 汉字，EL 背光源 100VAC，400Hz。

主要技术参数和性能：

- 电源：VDD 为+5V；模块自带-10V 负压，用于 LCD 的驱动电压。
- 显示内容：128（列）×64（行）点
- 全屏幕点阵
- 七种指令
- 与 CPU 接口采用 8 位数据总线并行输入输出和 8 条控制线
- 占空比 1/64
- 工作温度：-10℃-50℃，存储温度：-20℃-70℃

外形尺寸图：

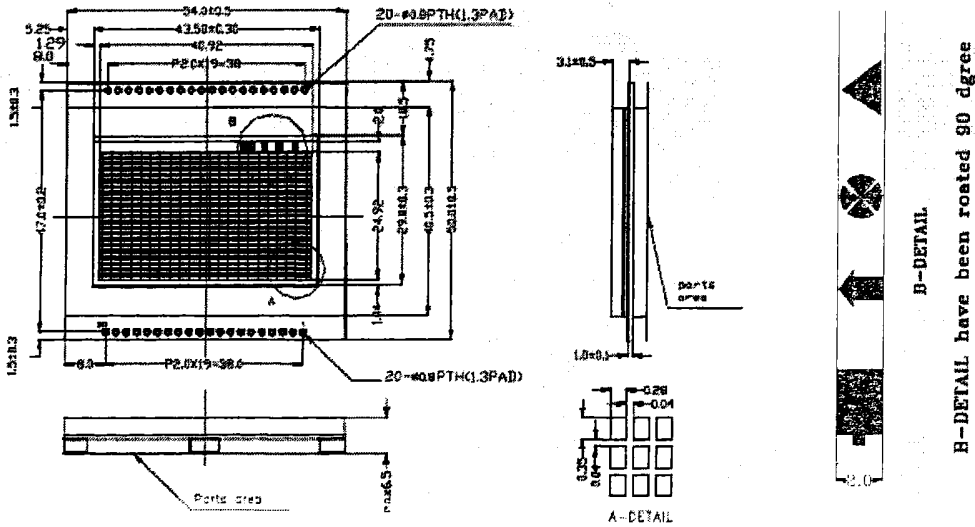
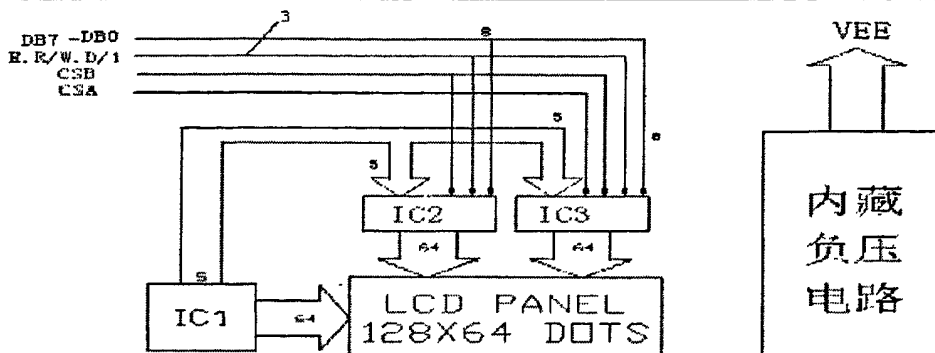


图 6.5 ZY12864 外形尺寸图

模块主要硬件构成说明：



注：CSA 控制模块的左半屏，CSB 控制模块的右半屏。

图 6.6 ZY12864 主要硬件构成

### 1) 结构图说明

IC1 为行驱动线。IC2, IC3 为列驱动器，外部的 CPU 通过 13 根线对模块进行控制，其中 DB7-DB0 为 8 位并行数据总线，E, R/W, D 均为控制信号线，CSA, CSB 为选屏信号，分别控制左, 右半屏。

### 2) 电源部分

模块及其 LED 背光源均由外部提供+5V 电源。通过调节外接的电位器 VR 的阻值，用户可以控制 LCD 模块显示图形的清晰度。J1, J2 为控制 LED 背光源工作状态的两个跳线。当 J1, J2 接通时，LED 背光源处于发光状态，当 J1, J2 接通时，LED 背光源处于不发光状态。

由于一个专用的光伏并网系统需要显示的内容并不多，所以系统选用 128x64 的点阵液晶显示器，它可以显示 8x4 个汉字、或 16x8 个 ASCII 码字符，当然也可以汉字和西文（数字）混合显示。

虽然本系统要求显示的汉字只有几十个，但是点阵字库是少不了的。PC 机上有现成的 16x16 点阵字库，可以直接抽取需要的汉字点阵做成本系统的字库，但是这样就需要在显示驱动程序中加上一个点阵转置模块，花费额外的时间。因为 12864 显示数据与点阵位置是按照列对应的，而 PC 机上的点阵字模是按照行排列的。为此我们在 PC 机上编写了一个 12864 的汉字点阵生成程序，由它生成本系统需要的点阵字库，这样在 89C52 的驱动程序中就无需转换、可以直接输出汉字点阵了。

温度采集芯片 DS18B20 采用单总线结构，数据线，控制线，电源线都由



一条线完成，当需要采集温度数据时，在单片机对应引脚上发出高电平，然后 2 秒种后读这个引脚即可读到温度值。

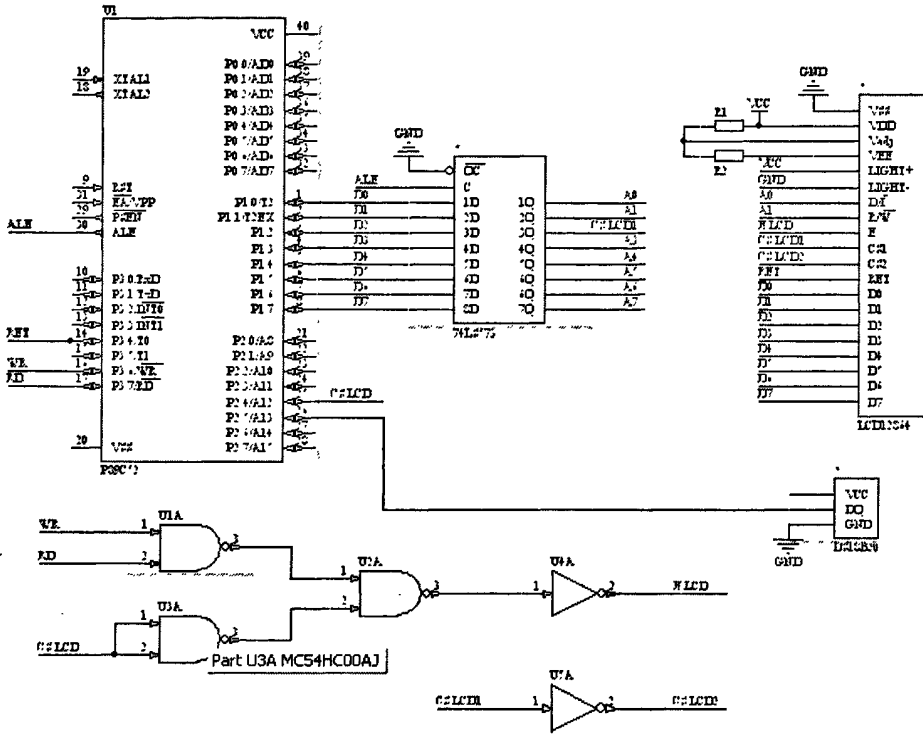


图 6.7 液晶显示和温度电路

### 6.3 本章小结

本章设计了光伏发电的主监控部分，分别对系统的温度，时钟，储存设备进行了监控，并把上述几部分的数值用液晶屏显示了出来。

## 结 论

近几年，能源问题越来越严重，全世界开始了对新能源的利用。太阳能作为一种新型的绿色可再生能源，具有储量大、寿命长、无污染的优点，因而成为最具前途的一种新能源。将太阳能应用于发电更是成为人们普遍关注的焦点，一旦成功，利益无穷。目前，太阳能光伏发电仍存在着一些缺点，如成本高、能量转换效率低。本文就太阳能发电的各个组成部分的研究，着重研究了蓄电池充电器，最大功率点的获得，逆变器驱动器和主监控设备。

- 1) 分析了蓄电池的工作原理和工作特性，在充分考虑蓄电池工作寿命的前提下，设计了带有三段式充电曲线的蓄电池充电器，缩短了充电时间。
- 2) 为使太阳能光伏阵列输出功率最大化，对最大功率点跟踪原理进行了详细地分析，并比较了几种常用的最大功率点跟踪方法，在此基础上提出了一种利用模糊控制方法获得最大功率点的方法。
- 3) 详细的分析了逆变器的工作原理的工作方式，利用 MATLAB 仿真了 PWM 驱动信号的获得方法。并制作了 1—500ms 可调的方波产生器。波形很好。
- 4) 设计了光伏发电的主监控部分，分别对系统的温度，工作时间，储存设备进行了设计，并把上述几部分的数值用液晶屏显示出来。

太阳能光伏发电是可在生能源的一个重要组成部分，但是因为太阳光变化的随即性和气候的复杂性，很难成为稳定的电源，在今后的工作中，要逐步完善光伏蓄电池充电器的性能，使其可以达到少人工维护，增加蓄电池寿命；在实际中验证获得太阳能最大功率点的方案，找到最理想的方法。

## 参考文献

- [1] 刘和平,严利平,张学峰等.TMS320LF240XDSP 结构、原理及应用[M].北京航空航天大学出版社,2002,9
- [2] 8-Bit Microcontroller—W77E58. WINBOND electronics core, 2001.7
- [3] 刘慧文.具有组合功能的智能化通用正弦逆变电源的研制.合肥工业大学,2003,6
- [4] 金成日.多功能智能化高性能正弦波逆变电源的研究.合肥工业大学,2003,6
- [5] 姜晓铭,刘晨主编.Visual Basic 6.0.中文版程序开发宝典[M].冶金工业出版社,1999,10
- [6] 赵为.太阳能光伏并网发电系统的研究[D].合肥工业大学,2003,4
- [7] 侯延风,徐俊峰,谈雯.多任务、全双工串口通信的 Visual Basic 实现.武汉水利电力大学学报.2000,12
- [8] 彭怡婷,张胜,申艳光.Visual Basic 6.0 中定时器控件的运用.电脑开发与应用.2001,7
- [9] 王志宏.单片机与 PC 机的串口通讯.现代电子技术.2000,12
- [10] 王成国,何勇.用 VB 编写串口通讯程序实现应用程序与扫描器通讯.微型电脑应用.2001,5
- [11] 张俊安.用 VB 实现 Windows 9X 环境下的串口通信.山东煤炭科技.2000 年增刊
- [12] 冯力,郝迎吉,张斌.基于 VB 数据库的单片机主从式串口通讯.现代电子技术.2000,11
- [13] 黄森云,张学忠,王福成编著.Windows 2000 编程利器 Visual Basic 控件高手[M].希望电子出版社,2001,8
- [14] 刘恩涛,赵耀峰编著.Visual Basic 6.0 编程技巧与实例分析[M].中国水利水电出版社,1999,6
- [15] Mummadi Veerachary, Tomonobu Senjyu, Katsumi Uezato, Voltage Based Maximum Power Point Tracking Control of PV System, IEEE Trans on

- Aerospace and Elec Systems, 2002, 38(1):262-270.P
- [16] N.Kasa, T.Iida, H.Iwamoto, Maximum power point tracking with capacitor identify for photovoltaic, power system, IEE Proc—Electr. Power Appl. 2000,147(6):497-502P
- [17] Nobuyuki Kasa, Takahiko Iida, Gourab Majumdar, Robust Control for Maximum PowerTracking in Photovoltaic Power System, Power Conversion Conference, 2002 PCC-Osaka, 2,877-832P
- [18] 郡婉娟.一种实现太阳阵峰值功率跟踪的智能控制方法.中国空间科学技术.1997.4:52-59 页
- [19] 薛定宇.反馈控制系统设计与分析—MATLAB 语言应用[M].北京:清华大学出版社,2000.4
- [20] MathWorks, Simulink—Dynamic system simulation software: User's Guide, 1992
- [21] 姚俊,马松辉.Simulink 建模与仿真[M].西安电子科技大学出版社,2002,4
- [22] 楼顺天,于卫.基于 MATLAB 的系统分析与设计[M].西安电子科技大学出版社,1998,6
- [23] 吴守祿,减英杰.电气传动的脉宽调制技术.北京:机械工业出版社,1997
- [24] 刘凤君.正弦波逆变器.北京科学出版社,2002
- [25] 汪海宁等.光伏并网发电系统中的最大功率跟踪控制.电工技术. 2004.9:15-24 页
- [26] 汪海宁等.双向 SPWM 蓄电池充放电维护装置.电源技术应用.2004.7:2-3 页
- [27] 汪海宁等.30KVA 光伏并网逆变器的设计及控制研究.太阳能学报. 2003, 增刊
- [28] 沈玉梁等.单输入单相 SPWM 调制的光伏并网发电系统控制规律的研究
- [29] 沈玉梁,苏建徽,赵为等.不可调度式单相光伏并网装置的平波电容容量的选择.太阳能学报.2003.5
- [30] 金成日.多功能智能化高性能正弦波逆变电源的研究.合肥工业大学, 2003.6
- [31] 李涛.高品质、高性能光伏逆变电源的研究.合肥工业大学研究生部.

2001.5

- [32] 汪进进.光伏并网控制方法和系统的研究.合肥工业大学研究生部.2002.4
- [33] 郑诗程.光伏发电系统及其控制的研究.合肥工业大学研究生部.2005.4
- [34] 苏建徽.光伏水泵系统及其控制的研究.合肥工业大学,2003.

## 攻读硕士学位期间发表的论文和取得的科研成果

- [1] 王传辉,罗耀华.太阳能电池最大功率点的模糊控制方法.应用科技.已录用

## 致 谢

三年的研究生生活即将过去，在此特向所有热忱关心和帮助我的领导和老师、向始终给予我莫大支持的家人和朋友们致以我最真挚的感谢！

感谢罗老师三年来在课题选向及设计研究方面对我的悉心指导，在生活方面给予我的有力帮助。罗老师广博的学识，丰富的经验，真诚的处世态度，也将对我今后的生活产生潜移默化的影响。

感谢实验室孟繁荣老师在课题研究过程中给予我的倾力帮助，感谢他对我指导及无私地提供宝贵的研究思路。同时也要真诚的感谢实验室的同学们对我的课题提出宝贵的意见。

再一次对所有关心，支持，帮助过我的人们，表示最衷心的感谢。

## 附 录

### 模糊控制规则表

- (1) if (dP/dI is PB) and ( $\Delta$ dP/dI is PB) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (2) if (dP/dI is PB) and ( $\Delta$ dP/dI is PB) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (3) if (dP/dI is PB) and ( $\Delta$ dP/dI is PB) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is PB)
- (4) if (dP/dI is PB) and ( $\Delta$ dP/dI is PS) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (5) if (dP/dI is PB) and ( $\Delta$ dP/dI is PS) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (6) if (dP/dI is PB) and ( $\Delta$ dP/dI is PS) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (7) if (dP/dI is PB) and ( $\Delta$ dP/dI is Z) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (8) if (dP/dI is PB) and ( $\Delta$ dP/dI is Z) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (9) if (dP/dI is PB) and ( $\Delta$ dP/dI is Z) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (10) if (dP/dI is PB) and ( $\Delta$ dP/dI is NS) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is NS)
- (11) if (dP/dI is PB) and ( $\Delta$ dP/dI is NS) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (12) if (dP/dI is PB) and ( $\Delta$ dP/dI is NS) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (13) if (dP/dI is PB) and ( $\Delta$ dP/dI is NB) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is NS)
- (14) if (dP/dI is PB) and ( $\Delta$ dP/dI is NB) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (15) if (dP/dI is PB) and ( $\Delta$ dP/dI is NB) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (16) if (dP/dI is PS) and ( $\Delta$ dP/dI is PB) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (17) if (dP/dI is PS) and ( $\Delta$ dP/dI is PB) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (18) if (dP/dI is PS) and ( $\Delta$ dP/dI is PB) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (19) if (dP/dI is PS) and ( $\Delta$ dP/dI is PS) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (20) if (dP/dI is PS) and ( $\Delta$ dP/dI is PS) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (21) if (dP/dI is PS) and ( $\Delta$ dP/dI is PS) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (22) if (dP/dI is PS) and ( $\Delta$ dP/dI is Z) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (23) if (dP/dI is PS) and ( $\Delta$ dP/dI is Z) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is Z)



- (24) if (dP/dI is PS) and ( $\Delta$ dP/dI is Z) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (25) if (dP/dI is PS) and ( $\Delta$ dP/dI is NS) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is NS)
- (26) if (dP/dI is PS) and ( $\Delta$ dP/dI is NS) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (27) if (dP/dI is PS) and ( $\Delta$ dP/dI is NS) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (28) if (dP/dI is PS) and ( $\Delta$ dP/dI is NB) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is NB)
- (29) if (dP/dI is PS) and ( $\Delta$ dP/dI is NB) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is NS)
- (30) if (dP/dI is PS) and ( $\Delta$ dP/dI is NB) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (31) if (dP/dI is Z) and ( $\Delta$ dP/dI is PB) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is NS)
- (32) if (dP/dI is Z) and ( $\Delta$ dP/dI is PB) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (33) if (dP/dI is Z) and ( $\Delta$ dP/dI is PB) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (34) if (dP/dI is Z) and ( $\Delta$ dP/dI is PS) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (35) if (dP/dI is Z) and ( $\Delta$ dP/dI is PS) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (36) if (dP/dI is Z) and ( $\Delta$ dP/dI is PS) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (37) if (dP/dI is Z) and ( $\Delta$ dP/dI is Z) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (38) if (dP/dI is Z) and ( $\Delta$ dP/dI is Z) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (39) if (dP/dI is Z) and ( $\Delta$ dP/dI is Z) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (40) if (dP/dI is Z) and ( $\Delta$ dP/dI is NS) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (41) if (dP/dI is Z) and ( $\Delta$ dP/dI is NS) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (42) if (dP/dI is Z) and ( $\Delta$ dP/dI is NS) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (43) if (dP/dI is Z) and ( $\Delta$ dP/dI is NB) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (44) if (dP/dI is Z) and ( $\Delta$ dP/dI is NB) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (45) if (dP/dI is Z) and ( $\Delta$ dP/dI is NB) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is NS)
- (46) if (dP/dI is NS) and ( $\Delta$ dP/dI is PB) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is NS)
- (47) if (dP/dI is NS) and ( $\Delta$ dP/dI is PB) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (48) if (dP/dI is NS) and ( $\Delta$ dP/dI is PB) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (49) if (dP/dI is NS) and ( $\Delta$ dP/dI is PS) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is NS)

- (50) if (dP/dI is NS) and ( $\Delta$ dP/dI is PS) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (51) if (dP/dI is NS) and ( $\Delta$ dP/dI is PS) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (52) if (dP/dI is NS) and ( $\Delta$ dP/dI is Z) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (53) if (dP/dI is NS) and ( $\Delta$ dP/dI is Z) and ( $\Delta$ io is X) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (54) if (dP/dI is NS) and ( $\Delta$ dP/dI is Z) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (55) if (dP/dI is NS) and ( $\Delta$ dP/dI is NS) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (56) if (dP/dI is NS) and ( $\Delta$ dP/dI is NS) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (57) if (dP/dI is NS) and ( $\Delta$ dP/dI is NS) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (58) if (dP/dI is NS) and ( $\Delta$ dP/dI is NB) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (59) if (dP/dI is NS) and ( $\Delta$ dP/dI is NB) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (60) if (dP/dI is NS) and ( $\Delta$ dP/dI is NB) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (61) if (dP/dI is NB) and ( $\Delta$ dP/dI is PB) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is NB)
- (62) if (dP/dI is NB) and ( $\Delta$ dP/dI is PB) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is NS)
- (63) if (dP/dI is NB) and ( $\Delta$ dP/dI is PB) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (64) if (dP/dI is NB) and ( $\Delta$ dP/dI is PS) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is NS)
- (65) if (dP/dI is NB) and ( $\Delta$ dP/dI is PS) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (66) if (dP/dI is NB) and ( $\Delta$ dP/dI is PS) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (67) if (dP/dI is NB) and ( $\Delta$ dP/dI is Z) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (68) if (dP/dI is NB) and ( $\Delta$ dP/dI is Z) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (69) if (dP/dI is NB) and ( $\Delta$ dP/dI is Z) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (70) if (dP/dI is NB) and ( $\Delta$ dP/dI is NS) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (71) if (dP/dI is NB) and ( $\Delta$ dP/dI is NS) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (72) if (dP/dI is NB) and ( $\Delta$ dP/dI is NS) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (73) if (dP/dI is NB) and ( $\Delta$ dP/dI is NB) and ( $\Delta$ io is N) then ( $\Delta$ lout is Z)
- (74) if (dP/dI is NB) and ( $\Delta$ dP/dI is NB) and ( $\Delta$ io is Z) then ( $\Delta$ lout is PS)
- (75) if (dP/dI is NB) and ( $\Delta$ dP/dI is NB) and ( $\Delta$ io is P) then ( $\Delta$ lout is PB)