

基于 FPGA 的自调整模糊 MPPT 控制器设计

FPGA-based Self-tuning Fuzzy MPPT Controller Design

学科专业：控制理论与控制工程

研 究 生：杨鸿志

指导教师：程 泽 副教授

天津大学电气与自动化工程学院

二零一零年六月



Y1872446

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：杨鸿志 签字日期：2010 年 06 月 12 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名：杨鸿志

导师签名：程伟

签字日期：2010 年 06 月 12 日

签字日期：2010 年 6 月 12 日

中文摘要

太阳能作为一种清洁的可再生能源受到越来越多的重视。由于太阳能电池有非线性输出特性,光伏系统的输出电流和电压受到日照强度和温度的影响,当光照强度,温度等条件改变时,光伏电池的最大功率点会有很大的变化,所以研究最大功率跟踪控制问题对提高光伏电池的利用率具有重要的意义。

传统MPPT控制算法虽然能使系统工作在最大功率点处,但系统的自适应能力较差。为了提高系统的寻优速度和抗干扰能力,本文用FPGA(Field Programmable Gate Arrays)芯片实现了一种自调整模糊MPPT控制器,提高了MPPT(Maximum Power Point Tracking)控制算法在复杂外部条件下的自适应能力,改善了系统响应速度和稳定性。

论文研究了控制器中模糊控制、PWM产生模块、8位数据乘法器及自调整跟踪等功能的FPGA实现方法,并通过Modelsim仿真验证了控制器通过改变PWM占空比对DC-DC电路控制的有效性,同时还利用Matlab/Simulink对自调整模糊控制和P&O(Perturb and Observe)控制进行了对比,仿真结果表明自调整模糊控制比传统的P&O算法的鲁棒性更强,具有良好的动静态性能。

最后,用基于FPGA的自调整模糊控制器搭建了实验电路,进行了光伏电池MPPT控制实验,同时还进行了与P&O控制器的对比实验,证明了自调整模糊MPPT控制器有更好的控制效果,能在不同光照条件下使系统稳定工作在最大功率点处,为今后光伏控制系统的SoC设计奠定了基础。

关键词: 自调整模糊控制, 最大功率点跟踪, 现场可编程门阵列, 光伏系统

ABSTRACT

As a clean and renewable energy, solar energy has received more and more attention. As the output characteristic of a solar cell is non-linear, its output current and voltage value to a large extent is affected by sunlight intensity and temperature. When the light intensity, temperature or other conditions changes, the maximum power point of the photovoltaic cells changes a lot. Therefore, researching maximum power point tracking is of great significance for improving the utilization of photovoltaic cells.

Conventional MPPT (Maximum Power Point Tracking) control algorithm can make the system work at the maximum power point, but the adaptation of the system is poor. In order to improve the response speed and anti-disturbance ability of the system, this paper develops a self-adjusting fuzzy MPPT controller based on FPGA (Field Programmable Gate Arrays), which improves the adaptive capacity of MPPT control algorithm under complex external conditions, response speed and stability of the system.

This dissertation studies the FPGA implementation of fuzzy control module, PWM generated module, 8-bit data multiplier and self-adjustment tracking of the controller. The result of Modelsim simulation shows that the controller can change PWM duty cycle to control the DC-DC converter. The adaptive fuzzy algorithm is compared with P&O (Perturb and Observe) algorithm in Matlab/Simulink. The simulation results show that the adaptive fuzzy algorithm has better steady-state and dynamic-state behavior than traditional P&O algorithm and its robustness is better.

Finally, experiment circuit is constructed using FPGA-based adaptive fuzzy controller, and Photovoltaic arrays MPPT control experiment is performed. Simultaneously, experiments of self-adjusting control and P&O control are also carried out and the results are compared. The experiments prove that self-adjusting fuzzy MPPT controller has better control performance and can make the system work stably at the maximum power point under different light conditions. It also lays the foundation for SoC design of PV system.

KEY WORDS: Self-tuning Fuzzy Control, Maximum Power Point Tracking, Field Programmable Gate Arrays, Photovoltaic Systems

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 课题的研究背景.....	1
1.1.1 国外光伏发电现状和发展趋势.....	1
1.1.2 国内光伏发电现状和发展趋势.....	2
1.1.3 我国光伏发电产业发展需要解决的问题.....	3
1.2 本课题主要研究内容.....	3
第二章 光伏发电原理及MPPT算法.....	5
2.1 太阳能电池的原理.....	5
2.1.1 太阳能电池的工作原理.....	5
2.1.2 太阳能电池的数学模型.....	5
2.2 太阳能电池的工作特性分析.....	7
2.3 光伏发电系统最大功率点跟踪的原理.....	8
2.3.1 最大功率点跟踪的原理.....	8
2.3.2 最大功率点跟踪(MPPT)技术的本质.....	9
2.4 传统MPPT算法方法比较.....	11
第三章 自调整模糊控制算法在光伏系统中的仿真设计.....	16
3.1 自调整模糊控制算法在光伏系统中的应用.....	16
3.1.1 自调整模糊控制的基本原理及分类.....	16
3.1.2 光伏系统自调整模糊控制器的设计.....	18
3.2 自调整模糊MPPT算法的Matlab仿真设计.....	20
3.2.1 太阳能电池模块的Simulink建模.....	20
3.2.2 Buck-Boost电路的Simulink建模.....	22
3.2.3 PWM脉冲信号产生模块的Simulink建模.....	22
3.2.4 自调整控制的Simulink仿真.....	23
3.3 自调整模糊MPPT算法的MPPT控制系统的仿真.....	23
3.4 仿真结果与分析.....	26
第四章 自调整模糊MPPT控制算法的FPGA程序设计.....	28
4.1 控制算法各模块的程序设计.....	28
4.1.1 数据采集模块的FPGA设计.....	28

4.1.2 模糊MPPT算法的FPGA设计	30
4.1.3 PWM模块的FPGA设计	31
4.1.4 数据乘法器模块的FPGA设计	32
4.1.5 自调整模糊推理规则的FPGA设计	32
4.2 仿真实验与结果分析	34
第五章 自调整模糊MPPT系统的硬件电路设计	37
5.1 自调整模糊MPPT控制系统硬件电路总体设计	37
5.2 DC/DC变换器的设计	37
5.2.1 典型的DC/DC变换电路	38
5.2.2 Buck-boost变换器的工作原理	39
5.2.3 Buck-boost变换器的参数选择	40
5.3 控制电路模块	41
5.3.1 FPGA核心板控制电路功能介绍	41
5.3.2 电压和电流采样电路设计	42
5.3.3 MOSFET驱动电路设计	43
第六章 实验总结与结论	45
6.1 实验内容及实验步骤	45
6.2 实验数据与结论	46
第七章 工作总结与展望	50
7.1 工作总结	50
7.2 展望	50
参考文献	52
发表论文和科研情况说明	55
致 谢	56

第一章 绪论

1.1 课题的研究背景

1.1.1 国外光伏发电现状和发展趋势

目前,随着社会的进步,人类对能源的需求越来越多,经济发展和资源环境的矛盾越来越突出。能源是经济与社会发展的基础,但由于不可再生能源的有限性和分布不均匀性,造成世界上绝大多数国家的能源供应不足,不能满足经济可持续发展、人类进步的需要。从长远来看,全球已探明的石油储量只能用到 2020 年,天然气也只能延续到 2040 年左右,即使储量丰富的煤炭资源也只能维持二、三百年。而传统的化石能源所带来的环境问题也令人担忧。每年有数十万吨二氧化硫和二氧化碳等有害物质排放到我们生存的空间,使大气环境遭到严重污染,直接影响人类的身体健康和生活质量;局部地区有严重的酸雨,严重污染了水土。同时由于大量温室气体的排放而产生的温室效应,已引起全球气候恶化。

因此,发展可再生能源已成为全球性的课题。在可再生能源如风能、生物能、太阳能中,太阳能的利用前景最好,发展潜力最大。近 30 年来,太阳能应用技术在开发研究、商业化生产、开拓市场方面都获得了长足的发展,成为世界快速、稳定发展的新兴产业之一。而其中的太阳光伏发电是世界上最节约的能源、绿色电力的一种主要的新兴产业。发展太阳能光伏发电技术的应用已经成为全球各国缓解能源与经济发展、环境保护之间矛盾的最佳途径之一。

近几年,国际上光伏发电技术发展迅速,美国、欧洲及日本都制定了庞大的光伏发电产业发展计划。国际光伏市场开始由边远农村和特殊应用领域向并网光伏发电和与建筑结合供电的方向发展,光伏发电已由补充能源向未来替代性能源过渡。

美国政府最早制定光伏发电的发展规划,1997 年又提出“百万屋顶”计划,能源部和有关州政府制定了光伏发电的财政补贴政策,总光伏安装量已达到 3000MW 以上,美国连续三年光伏产业均高于 30% 的年增长率上升,其主要原因是光伏组件并网技术的应用和政策激励引起的。

日本于 1974 年开始执行“阳光计划”,投资 5 亿美元,一跃成为世界太阳能电池的生产大国,1994 年提出朝日七年计划,计划到 2000 年推广 16.2 万套太

阳能光伏屋顶,已完成。1997年又宣布7万光伏屋顶计划,到2010年将安装7600MW太阳能电池。

1993年,德国首先开始实施由政府投资支持,被电力公司认可的1000屋顶计划,继而扩展为2000屋顶计划,现在实际建成的屋顶光伏并网系统已经超过5000。德国政府并于1999年开始实施10万太阳能屋顶(每户约3kW—5kW)计划。并且1999年德国光伏上网电价为每千瓦时0.99马克,极大地刺激德国乃至世界的光伏市场。

瑞士、法国、意大利、西班牙、芬兰等国,也纷纷制定光伏发展计划,并投巨资进行技术开发和加速工业化进程。印度、马来西亚等东南亚国家,也制定了国家的光伏发展计划^[1,2,3]。

1.1.2 国内光伏发电现状和发展趋势

我国的太阳能光伏发电应用始于70年代,但直到1982年以后方真正发展起来,在1983年至1987年短短几年内先后从美国、加拿大等国引进了七条太阳能电池生产线,使我国太阳能电池的生产能力从1984年以前的年产200千瓦跃到1988年的4.5兆瓦。在应用方面,我国目前太阳能电池主要用于通信系统和边远无电地区,在1995年年销售才约1.1兆瓦。

在1995年西藏的无水力无电县中,已建成2个功率分别为10千瓦和20千瓦的光伏电站。地区而言,当前我国光伏发电的重点在青海、西藏、新疆、内蒙、甘肃等无电和严重缺电的农牧区。据不完全统计,在这些地区已建成10~100kW光伏电站40多座,推广家用光伏电源15万台,总功率达2.9MW。

2004年9月,广东首座总容量为1兆瓦的太阳能发电系统在深圳通过验收。

2004年9月,我国首座屋顶太阳能发电站近日在北京竣工投产。这套太阳能发电系统分别安装在北京市路灯管理中心的4栋办公楼和左安门宾馆的屋顶上,可以单独供电也可以并网供电,总装机容量140千瓦,年发电量约15万千瓦时,能让4万盏100瓦的路灯亮上一年。

2005年初,甘肃《敦煌8兆瓦并网光伏发电系统建设预可行性报告》也通过有关部门组织的专家评审。据悉,敦煌8兆瓦系统目前即使在全世界也是最大的,光伏发电技术领先的德国也只有5兆瓦光伏发电系统。据有关方面人士介绍,甘肃省敦煌8兆瓦光伏发电系统建设项目工程预计投资额为3.2247亿元,其中申请国家补助1.6亿元,建设投运后年均发电量可达1280万千瓦时。甘肃省敦煌8兆瓦光伏发电系统建设项目已被列入国家“十一五”规划中。

在上海,根据上海有关部门制订的《2005—2007年上海开发利用太阳能行动计划》,到2007年上海光伏发电示范项目将达到5兆瓦以上,其中首个1兆瓦光电示范工程将于今年之前落户生态岛崇明。

目前,四川也已向国家发改委申报项目,准备在攀西地区建一个目前国内最大的太阳能发电站,装机容量为 2000 千瓦。

根据国家《可再生能源中长期发展规划》,要大力推广应用小功率光伏系统,建立分散型和集中型兆瓦级联网光伏示范性电站。到 2010 年,我国光伏发电总装机容量已达 500MWP。其中,300~350MWP 装机用于解决西部无电区通电问题,其次为工业应用,包括通讯、铁路设备等,最后是提供照明部分。也就是说,从今年到 2010 年这五六年时间,光伏发电总装机容量将是 2004 年底的 7 倍多,我国国内光伏市场十分巨大^[4,5,6,7,8,9,10,11]。

1.1.3 我国光伏发电产业发展需要解决的问题

目前世界太阳能光伏发电产业处于快速上升阶段,为了保证我国太阳能光伏发电产业的健康发展,需要做好以下工作:

1. 研究新型光伏电池,研制能提高太阳能转化效率的新型材料,推广太阳能电池的普及应用,降低其生产成本;
2. 研究太阳能光伏电池的最大功率跟踪算法,开发具有适应环境变化能力强、工作稳定的太阳能 MPPT 控制器;
3. 探索光伏电池故障检测的新方法,研究能快速准确检测太阳能故障方法;防止热斑效应引起的故障;
4. 研究光伏阵列的优化排列组合,探索光伏电池的动、静态重构新技术,提高太阳能电池的转化效率;
5. 开发太阳能光伏发电的并网技术,减少光伏电能对电网的冲击;
6. 探索太阳能光伏发电与建筑物建设相结合的新方法,开发绿色智能楼宇;

1.2 本课题主要研究内容

1. 首先介绍了国内外光伏发电的现状,以及我国光伏产业发展亟需解决的问题。
2. 探讨了太阳能电池的发电原理和太阳能电池工作特性的分析,研究了最大功率跟踪控制的原理和基本算法。
3. 讨论了自调整模糊 MPPT 控制算法在光伏发电系统中的应用,自调整的模糊算法具有适应环境变化能力。在自然条件下,当环境光照和温度改变时,系统通过特性辨识自动调节量化因子大小来改变模糊输入量,从而提高了控制系统的性能。
4. 利用 Matlab/Simulink 工具箱,对自调整模糊 MPPT 算法的 MPPT 控制系统进行仿真,详细分析了太阳能电池模块、Buck-Boost 电路、PWM 脉冲信号电路、自适应模糊控制的 Simulink 建模,仿真结果验证了该算法有良好的寻优速度和抵抗扰动能力。

5. 用 Altera 公司的 FPGA 实现了自调整模糊 MPPT 控制算法, 该算法包括数据采集模块、模糊 MPPT 算法、PWM 产生模块、数据乘法器模块及模糊自调整推理规则, 通过 modelsim 仿真验证了 PWM 能随输入向最大功率点方向变化。

6. 设计了 MPPT 控制系统的硬件电路, 搭建了 Buck-Boost 变换电路及 FPGA 控制板外围采样和 MOSFET 驱动电路。在室外条件下测出实验结果, 并通过数据分析验证了控制器的有效性。

第二章 光伏发电原理及 MPPT 算法

2.1 太阳能电池的原理

2.1.1 太阳能电池的工作原理

太阳能电池发电的主要原理是半导体的光电效应。能产生光电效应的材料很多，如单晶硅，多晶硅，非晶硅，砷化镓，碲化镉等，它们的发电原理基本相同，以硅半导体为例，对太阳能光伏电池的工作原理加以说明，硅原子有 4 个电子，如果在纯硅中掺入有 5 个电子的原子如磷原子，就成为带负电的 N 型半导体；若在纯硅中掺入有 3 个电子的原子如硼原子，形成带正电的 P 型半导体。当 P 型和 N 型结合在一起时，接触面就会形成势垒电场，如图 2-1 所示。

当太阳光照射到 P-N 结时，空穴由 N 型区流向 P 型区，电子由 P 型区流向 N 型区，当接通电路后就形成电流，这就是太阳能电池光伏效应的工作原理。

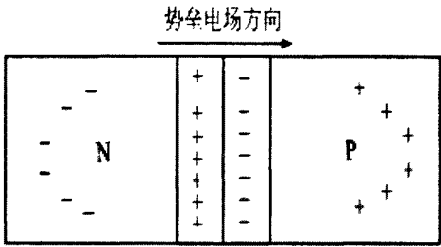


图 2-1 光伏效应原理图

2.1.2 太阳能电池的数学模型

光伏电池本质是一个 P-N 结，其基本特性与二极管类似，等效电路由光生电流源及一系列电阻（内部并联电阻 R_{sh} 和串联电阻 R_s ）组成，如图 2-2 所示。

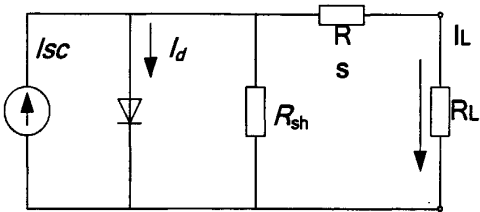


图 2-2 光伏电池的等效电路图

图中各支路电流满足如下关系:

$$I_L = I_{sc} - I_d - I_{sh} \quad (2-1)$$

在此等效电路图中, 光伏电池的 I-V 特性曲线方程如下

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \frac{q(V + IR_s)}{AKT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2-2)$$

上式中各个参数的代表意义如下:

- I_L —输出电流 (A);
- V —输出电压 (V);
- I_{sc} —光生电流 (A);
- I_0 —二极管反向饱和电流 (A);
- R_{sh} —等效并联电阻 (Ω);
- R_s —等效串联电阻 (Ω);
- q —电子电荷 ($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$);
- K —玻尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$);
- A —P-N 结理想因子;
- T —太阳能电池实际温度 (K);

式 (2-2) 是基于物理原理的基本解析表达式, 已被广泛应用于光伏电池的理论分析中, 但由于解析表达式中的 5 个参数, 包括 I_L 、 I_0 、 R_s 、 R_{sh} 和 A , 它们不仅与光伏电池温度和日射强度有关, 确定十分困难, 因此不便于工程应用, 也不能从光伏电池供应商向普通用户提供的技术参数中得到。

工程用模型强调的是实用性与精确性的结合。考虑到借助光伏阵列模拟器或其它仿真软件针对光伏电站、户用光伏系统、光伏水泵系统等各种涉及太阳能光伏利用的复合能源系统在设计、数字仿真和模拟时的动态反应速度及计算工作量, 必须尽可能在工程精度允许的条件下简化模型。工程用太阳电池模型通常要求仅采用供应商提供的几个重要技术参数, 如 I_{sc} 、 V_{oc} 、 I_m 、 V_m 、 P_m , 就能在一定的精度下复现阵列的特性, 并能便于计算机分析。

以下将在基本解析表达式 (2-2) 的基础上, 通过两点近似, 即:

- (1) 忽略 $(V + IR_s)/R_{sh}$ 项, 这是因为在通常情况下该项远小于光电流;
- (2) 设定 $I_L = I_{sc}$, 这是因为在通常情况下 R_s 远小于二极管正向导通电阻,

并定义在:

- (1) 开路状态下, $I = 0$, $V = V_{oc}$;
- (2) 最大功率点, $V = V_m$, $I = I_m$

的条件下建立硅太阳电池的工程用模型。按此, 太阳电池的 I—V 方程可简化为:

$$I = I_{sc} \left(1 - C_1 \left\{ \exp \left[V / (C_2 V_{oc}) \right] - 1 \right\} \right) \quad (2-3)$$

在最大功率点时, $V = V_m$, $I = I_m$, 可得

$$I_m = I_{sc} \left(1 - C_1 \left\{ \exp \left[V_m / (C_2 V_{oc}) \right] - 1 \right\} \right)$$

由于在常温条件下 $\exp[V_m / (C_2 V_{oc})] \gg 1$, 可忽略式中的“-1”项, 解出 C_1

$$C_1 = (1 - I_m / I_{sc}) \exp[-V_m / (C_2 V_{oc})] \quad (2-4)$$

注意到开路状态下, 当 $I=0$ 时, $V = V_{oc}$, 并把式 (2-4) 代入 (2-3) 得:

$$0 = I_{sc} \left\{ 1 - (1 - I_m / I_{sc}) \exp[-V_m / (C_2 V_{oc})] \cdot [\exp(1/C_2) - 1] \right\} \quad (2-5)$$

由于 $\exp(1/C_2) \gg 1$, 忽略式中的“-1”项, 解出 C_2

$$C_2 = (V_m / V_{oc} - 1) [\ln(1 - I_m / I_{sc})]^{-1} \quad (2-6)$$

因此, 本模型只需要输入太阳能电池通常的技术参数 I_{sc} 、 V_{oc} 、 I_m 、 V_m , 就可以根据式 (2-4)、(2-6) 得出 C_1 和 C_2 。最后的太阳能电池 I-V 特性曲线是由 (2-3) 确定^[12,13,14,15]。

2.2 太阳能电池的工作特性分析

光伏电池由于受到外界因素 (温度、日照强度、遮荫度等) 的影响, 其输出具有明显的非线性特性。当太阳能电池的日照强度增加时, 短路电流增加, 开路电压基本不变, 最大功率增加; 当光伏电池的温度增加时, 开路电压下降, 短路电流基本不变, 最大功率减小。而且, 在一定的光照和温度条件下, 光伏电池具有唯一的最大功率点。

太阳能输出特性的 I-V, P-V 特性曲线如图 2-3 所示, 它们反映了在某一光照和温度条件下的光伏电池输出电流 I 、输出功率 P 与输出电压 V 之间的关系, 其中 I_{sc} 为输出端的短路电流, V_{oc} 为输出端的开路电压, P_m 为负载变化过程中光伏电池输出的最大功率^[16,17,18,19,20,21]。

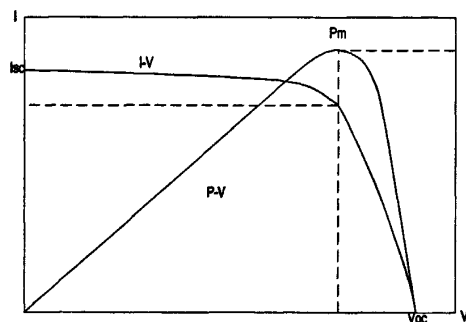


图 2-3 太阳能电池的输出特性

1、日照强度对 I-V、P-V 特性的影响

在实验中, 太阳能电池的温度受光照的影响, 为了研究日照强度对光伏电池

I-V、P-V 特性的影响，仅改变光照强度而保证温度和其它条件不变。如图 2-4 所示，开路电压 V_{oc} 随日照强度的增加变化不大，短路电流 I_{sc} 随日照强度的增加而增加，输出功率 P 也随着日照强度的增加而增加。

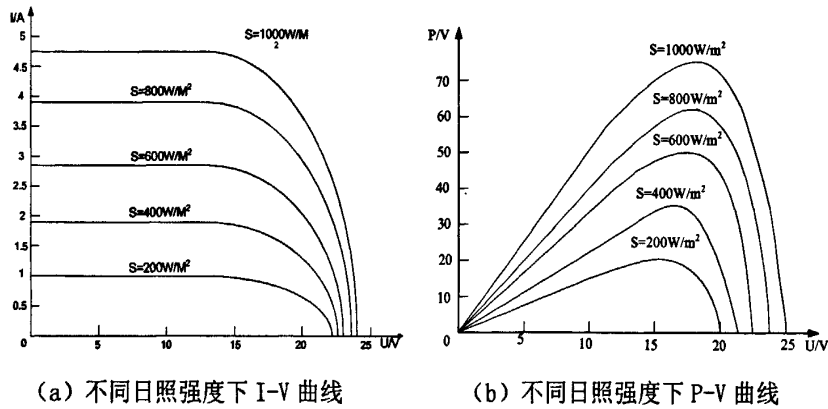


图 2-4 不同日照强度下的光伏电池特性

2、温度对 I-V、P-V 特性的影响

保持日照强度和太阳能电池串并联单体数不变，光伏电池输出的 V_{oc} 、 I_{sc} 和 P_m 与温度 T 之间的关系，如图 2-5 所示。开路电压 V_{oc} 随温度升高几乎是线性的降低，短路电流 I_{sc} 随温度升高基本不变，因而最大功率点功率 P_m 随温度有很大的变化。

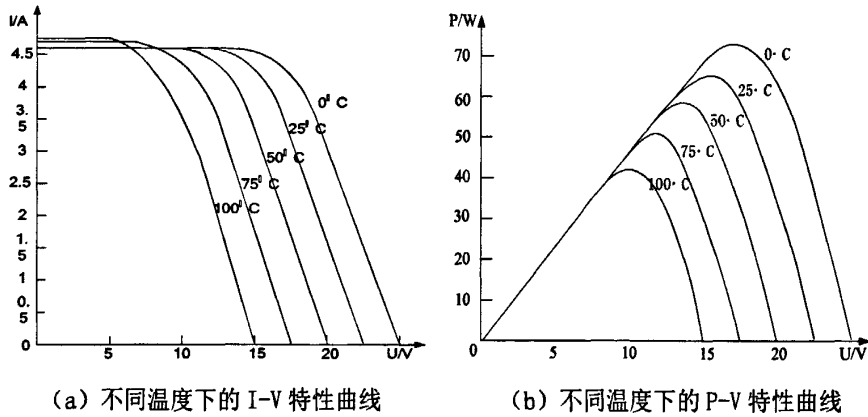


图 2-5 不同温度下的光伏电池特性

2.3 光伏发电系统最大功率点跟踪的原理

2.3.1 最大功率点跟踪的原理

最大功率点跟踪 (maximum power point tracking 缩写为 MPPT) 技术，是光

光伏发电中的一项关键技术，它是指在温度、光照等外界条件发生变化时，光伏控制系统通过控制 DC-DC 变换器的占空比改变太阳能电池阵列的输出电压和电流，从而使光伏电池始终工作在最大功率点上，从而保证光伏阵列始终保持最大功率输出。

由于太阳能电池有着非线性的输出特性，光伏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。当光照强度，温度等自然条件改变时，光伏电池阵列的输出特性和输出功率也发生改变，光伏系统的工作状态会飘忽不定，这必然导致太阳能电池的转化效率降低；即使在同一光照强度和温度下，由于负载的不同而阵列输出功率也不同，所以将太阳能电池直接与负载相连时，就不能使太阳能电池工作在最大功率点上，从而造成功率的损失。除此之外，光伏电池本身转换效率不高且价格昂贵，初期投入较大，最大程度的充分利用光伏电池所吸收的能量、提高光伏阵列的转换效率、降低光伏发电系统成本是光伏发电系统的基本要求。在实际的应用系统中，自然光的辐射强度及大气的透光率均处于动态变化中，这就给光伏发电系统的高效应用带来了困难。MPPT可吸收由于温度变化而导致系统失配造成的损失，特别是对于冬、夏及全日内温差较大的地区更具有明显的经济、同时通过采用合理的MPPT控制算法来调节控制光伏电池的输出，使得光伏阵列在任何情况（例如温度、光照强度变化等条件）下始终工作在最大功率点上，从而更加有效地利用太阳能，提高光伏电池的转换效率，降低光伏发电系统的成本，从而为太阳能光伏发电的大规模推广应用提供条件和可能。

2.3.2 最大功率点跟踪（MPPT）技术的本质

太阳能光伏发电系统之所以会出现最大功率点跟踪的问题，根本原因就在于太阳能电池阵列输出伏安特性的非线性，变化的电压电流输出比导致当太阳能电池输出端所接的负载发生变化时，其输出的电压和电流也均发生改变，从而导致输出功率发生变化，这样即使系统找到了最大的功率点，也不能稳定的工作在最大功率点上，尤其是在光照温度等外界条件变化的时候。

而在实际的情况下，外界天气是随着季节和时辰变化的。光伏电池两端的负载也总是变化的，如家庭光伏并网发电系统中家庭的用电负载是随机的，大型光伏并网系统因逆变器、蓄电池等各种设备的老化或者是工作状态不同其等效负载也是变化的。如何通过改变太阳能电池输出端的等效负载，使等效负载和太阳能电池的输出伏安特性相匹配，从而使电池输出最大的功率，是实现 MPPT 的关键。因此本文引用了无损电阻的概念，无损电阻分为两种：一种是以时变电压器和时变回转器为基础实现的二端口无损电阻，一种是以开关元件和储能元件实现的一

端口无损电阻^[22]。

如图 2-6：把太阳能电池储能系统 DC/DC 变换器后边的电路结构统一等效为变换器连接的负载。如果通过 DC/DC 变换电路（如 Buck-Boost 等）实现无损电阻，把 DC/DC 变换器和它输出端的负载等效为一个阻值可变的电阻。

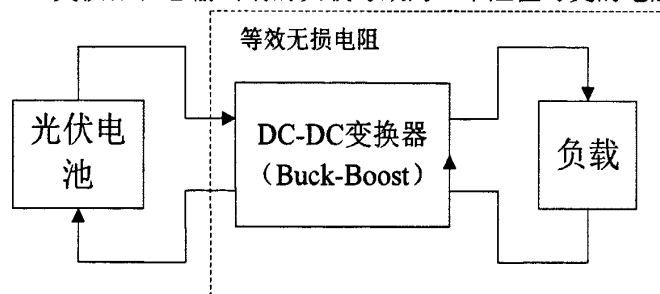


图 2-6 光伏电池储能系统结构图

无损电阻由 DC/DC 变换器和变换器输出端负载两部分组成，通过控制 DC/DC 变换器中开关管的导通比 α 就可以实现对无损电阻阻值的调节，从而可以实现光伏电池输出端阻抗值的任意配置，如图 2-7 所示： P_m 为最大功率点，该点对应的导纳 $I_m/V_m=1/R$ ，当把等效无损电阻阻值调节为 R 时，无损电阻便实现了与电池输出特性最大功率点处的阻抗匹配，电池就工作在 P_m 点上，从而实现了最大功率的输出。而无损电阻中 DC/DC 本身是无损耗的^[23]，所以光伏电池

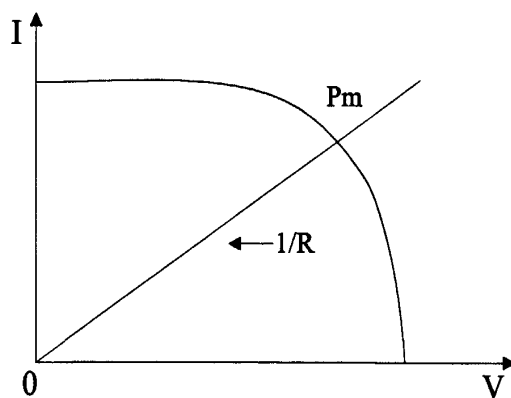


图 2-7 阻抗匹配特性示意图

发出的电功率还是全部传送给负载。无损电阻的阻值只跟导通比 α 和变换电路的元件参数有关，当 Buck-Boost 电路输出端负载发生变化时，等效的无损电阻的阻值是不发生改变的。因此，当系统达到稳定并工作在最大的功率点上后，如果系统的输出端负载发生改变，由于光伏电池两端的等效无损电阻阻值在理想条件下是不变的，因此电池阵列的输出将保持不变，从而继续稳定的工作在最大功

率点上。这一点对太阳能发电系统,尤其是家庭型太阳能发电系统是非常有意义的,因为家庭用的发电系统的负载是家用电器等,在不同时间家庭用户的用电负载和用电功率是不断改变的,相比在 DC/DC 变换器上采用一定的 MPPT 控制算法,把 DC/DC 变换器转变为二端口 DC/DC 无损电阻,就避免了当负载发生变化时带来的工作点的改变和最大功率点的不断跟踪,因而避免了包含 MPPT 控制算法的系统控制芯片的频繁动作,也减少了因工作点的改变造成的功率损失^[24,25]。

2.4 传统MPPT算法方法比较

传统光伏发电系统采用的 MPPT 控制算法有恒定电压控制法,即 CVT 法。20 世纪 80 年代中期,日本学者 Sakutarō Nonaka 提出的一种获得较好性能的电流源型光伏并网逆变器就采用的恒定电压控制方法,该方法简单易行,且基本上能跟踪最大功率点,但需额外的光伏器件获取控制所需的光伏器件开路电压或是短路电流,增加了应用的成本。进入 21 世纪以来随着电力电子及控制技术的发展,一些新的控制算法应运而生,如恒电压法、扰动观测法(又叫爬行法、爬山法、P&O 法)、三点比较法、导纳增量法(又叫电导增量法、INC 法)等。

1. 恒电压法

恒电压法是在 20 世纪 80 年代中期由日本学者 Sakutarō Nonaka 提出的一种 MPPT 控制算法。恒电压法的理论依据是,当温度不发生改变时,光伏电池在不同光照条件下的最大功率点处的输出电压相差不大,近似为恒定,约为其对应开路电压的 76%,如下图 2-8 所示, a、b、c、d、e 为负载特性与太阳能电池特性的交点,即在没有 MPPT 控制时的实际工作点; a'、b'、c'、d'、e' 为不同光照下的最大功率输出点,太阳电池的最大功率点几乎落在同一根垂直线的两侧邻近,这就有可能把最大功率点的轨迹线近似地看成电压 $U=\text{const}$ 的一根垂直线,亦即只要保持太阳电池的输出端电压为常数且等于某一日照强度下相应于最大功率点的电压,就可以大致保证在该一温度下太阳电池输出最大功率,于是我们就可以通过控制 DC/DC 变换电路来把光伏电池的输出电压保持在 U_m 恒定值,从而把最大功率点跟踪简化为恒电压跟踪(CVT)。MPPT 恒电压的优点是控制算法简单,容易实现;缺点是误差较大,光伏电池并没有工作在实际的最大功率点上,而是工作在最大功率点附近,因此是一种近似的最大功率点跟踪方法,尤其是当温度变化较大时,光伏电池的输出特性会有较大变化,最大功率点的输出电压也会有较大的变化,从而使得光伏电池的工作点会偏离最大功率点很大,进而造成更大的功率损失^[26,27]。

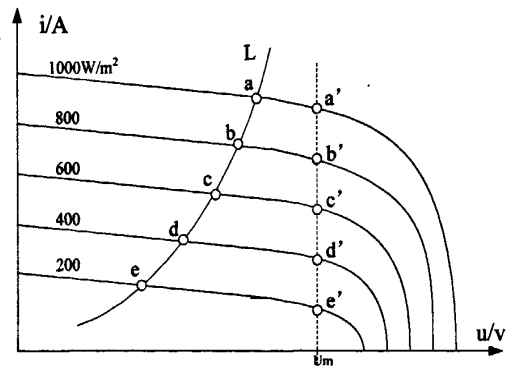


图 2-8 恒电压法原理示意图

2. 爬山法

爬山法又叫爬行法，扰动观察法，其控制原则是电压的变化始终是让光伏电池的输出功率朝更大的方向改变。爬山法的实质是一个自寻优的过程，通过检测当前光伏阵列的输出电压与输出电流，得出当前的输出功率；然后给系统一个扰动，检测出扰动后阵列的输出电压和输出电流进而得到扰动后时刻的输出功率，并与前一时刻的输出功率进行比较，如果功率增加，则继续按照刚才的扰动方式进行，如果功率减小，则按照与原来扰动方式相反的方式进行，如此周而复始的进行下去，直到光伏阵列工作在最大功率输出点附近。简要的控制流程图如图 2-9^[28,29]。

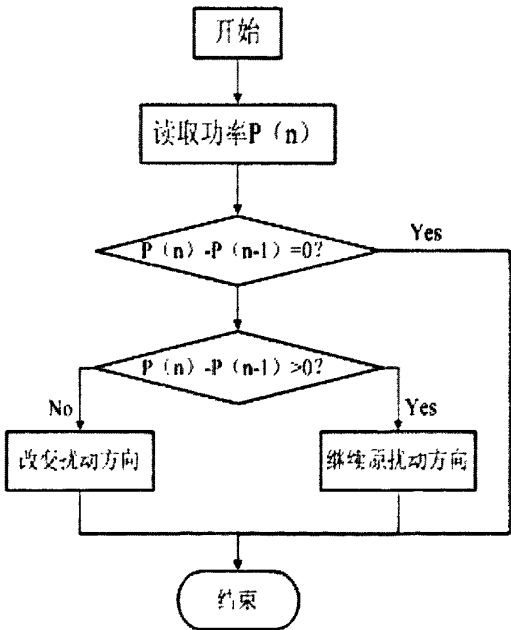


图 2-9 爬山法简要流程图

爬山法的原理示意图如图 2-10 所示，图中曲线为光伏电池阵列的 P-V 输出

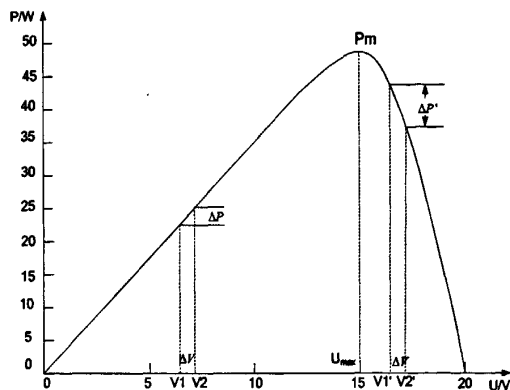


图 2-10 爬山法原理示意图

特性曲线。当 $V_2 > V_1$ 时，若 $P_2 > P_1$ ，则说明光伏电池阵列工作在上坡段，需要继续增加输出电压，从而从左侧向最大功率点 P_m 靠近；反之若 $V_2 > V_1$ 时 $P_2 < P_1$ ，则说明光伏阵列工作在下坡段，需要减小输出电压，使得光伏阵列从右侧向最大功率点 P_m 靠近，直到动态的工作在最大功率点附近。

3. 导纳增量法

导纳增量法（INC 法）是利用光伏方阵输出端的动态电导值（ dI/dV ）与同时对应的静态电导的负数（ $-I/V$ ）相比较，来判断调节光伏方阵电压方向的一种 MPPT 控制算法。它依靠改变光伏方阵的输出电压和电流来达到最大功率输出，因此需要借助逻辑判断来减少在最大功率点处的震荡，使其能够快速适应天气条件的变化。具体原理和实现过程如下：

图 2-11 是光伏阵列的 $P-V$ 特性曲线，由图可知在最大功率点 P_m 处功率 P 对

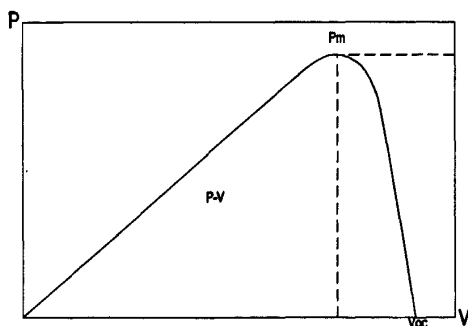


图 2-11 光伏阵列特性曲线

电压 V 的导数 dP/dV 为 0，且输出电压在 0 到开路电压 V_{oc} 之间只有一个极点即 P_m ， P 对 V 连续可导。由此可得，当系统到达最大功率点时，

$$dP/dV = 0$$

由 $P = V * I$ 得：

$$dP/dV = d(V * I)/dV = 0$$

由微分公式得:

$$dI/dV + I/V = 0$$

通过把上式作为 MPPT 实现的控制边界条件, 结合太阳能电池的输出特性, 我们可以得到如下的控制算法策略:

1. 当 $dI/dV = -I/V$ 或者 $dI = 0$, $dV = 0$ 时, 光伏电池达到最大功率点, $V = V_m$, $I = I_m$;
2. 当 $dI/dV > -I/V$ 或者 $dI > 0$, $dV = 0$ 时, 光伏电池工作在最大功率点左侧, $V < V_m$, $V = V + V_{ref}$;
3. 当 $dI/dV < -I/V$ 或者 $dI < 0$, $dV = 0$ 时, 光伏电池工作在最大功率点右侧, $V > V_m$, $V = V - V_{ref}$;

其中 V_m 是光伏电池最大功率点处的输出电压, V 是光伏电池实际输出电压, V_{ref} 是输出电压变化的步长。

4. 各种 MPPT 控制算法的比较分析

在上面介绍了最常用的几种太阳能并网发电系统的 MPPT 控制算法, 三种方法各有其特点, 但是都不同时具备低成本, 高稳定性, 快速跟踪的特性。

(1) CVT 法虽然在一定情况下能够提高光伏发电系统的输出电功率, 但是这种方法最大的缺点是没有考虑到温度和光照变化带来的对太阳能最大功率点输出电压的影响。尤其是当温度改变时, 太阳能光伏阵列的最大功率点也会产生较大变化, 因此说 CVT 法不是真正意义上的最大功率跟踪。CVT 法也有控制简单, 硬件上容易实现, 可靠性强, 达到稳定状态后输出无震荡等优点。但是由于 CVT 法控制精度差, 在环境条件改变时会有较大的功率损失, 加上光伏电池本身的转化效率就不是很高, 所以恒电压最大功率跟踪法已经逐渐的被其他更好的控制算法所淘汰。

(2) 爬山法是现在最常用的一种光伏发电系统 MPPT 控制算法, 它有着良好的跟踪效率, 而且实现简单。但是它最大的缺点是当系统达到稳定后输出功率的波动较大, 系统一直动态的工作在最大功率点附近而不是真正的最大功率点上, 从而造成了部分功率损失。尤其是当光照条件变化比较迅速时, 算法跟踪过程会有一些误动作, 从而导致波动增加。为了解决这个问题, 提出了三点比较法。三点比较法通过增加检测下一时刻的输出电压和电流, 比较连续三个时刻的输出变化方向来决定后边的扰动方式和扰动方向, 从而减少爬山法跟踪最大功率过程中的误动作, 减小动态稳定时的波动幅度, 更好的保持最大功率的跟踪与输出。另外爬山法的跟踪精度和跟踪效率与跟踪步长和设定初始值有关。跟踪步长越小, 跟踪精度也越准确, 但是跟踪效率就会降低; 反之步长越大跟踪效率越高, 但是跟踪的精度会下降。

(3) INC 法最大的优点是当光伏电池阵列上的光照强度发生改变时, 其输出电

压能够以平稳的方式跟随其变化,从而跟踪输出最大功率的幅值变化比较平稳,跟爬山法相比波动较小。但是其本质跟爬山法一样,都是通过判断当前工作点是否工作在最大功率点来决定扰动方式的调整方向,因此最终的结果是系统始终工作在最大功率点左右来回震荡。另外,与别的算法相比 INC 算法比较复杂,而且在跟踪的过程中需要花费相当多的时间去执行 A/D 数据转换,因而对微处理器要求会更高,否则会影响到跟踪效率和速度。INC 法的跟踪效果与步长的关系与爬山法类同^[30,31]。

第三章 自调整模糊控制算法在光伏系统中的仿真设计

本文讨论了自调整模糊控制算法在光伏系统中的应用原理及控制器设计，在 Matlab 中仿真比较了自调整模糊控制和爬山法（P&S）在不同光照突变情况下的跟踪特性，通过实验证明了自调整模糊控制跟踪速度快、稳态性能好，具有良好的抵抗扰动性能。

3.1 自调整模糊控制算法在光伏系统中的应用

3.1.1 自调整模糊控制的基本原理及分类

由于光伏系统存在非线性和时变特性，传统的模糊控制不能根据外界条件的改变调整模糊规则导致控制效果变差，因此本文采用了一种改进的模糊控制算法——基于量化因子的自调整模糊控制器，量化因子的自调整是自适应模糊控制应用于实时控制中最有效的手段，量化因子的自调整模糊控制是依据控制器在线辨识控制效果，依据上升时间、超调量、问题误差和震荡发散程度等对量化因子进行整定。量化因子的自调整模糊控制器的工作原理如图 3-1 所示。

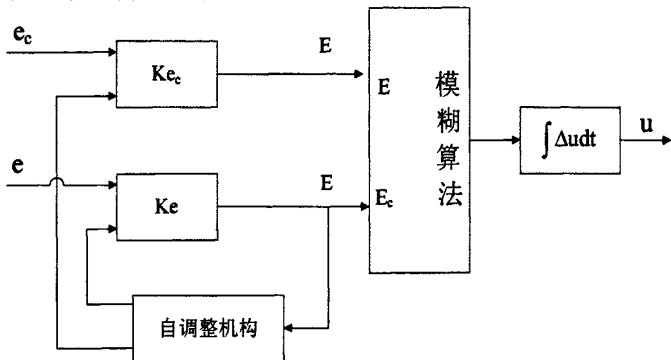


图 3-1 量化因子的自调整模糊控制器的结构图

对于一个二维模糊控制器，当输入变量偏差 E、偏差变化 CE 和输出控制量 U 的论域等级划分相同时，则其控制表可以用下列关系式近似归纳：

$$U \approx -(E+CE)/2 \tag{3-1}$$

由式（3-1）所描述的模糊控制器的控制规则关系是固定的，不可调整的。为了适应不同被控对象的要求，在式（3-1）的基础上引入一个调整因子，则可

得到一种带有调整因子的控制规则

$$U = -\{\alpha E + (1-\alpha)CE\}, \alpha \in [0,1] \quad (3-2)$$

其中 α 为调整因子, 又称加权因子。通过调整 α 值, 可以改变偏差 E 和偏差变化 CE 对控制输出量 U 的加权程度, 从而调整了控制规则。但是, 若 α 值一旦选定, 在整个控制过程中就不再改变, 即在控制规则中, 对偏差、偏差变化的加权固定不变。然而在实际控制中, 模糊控制系统在不同的状态下, 对控制规则中偏差 E 与偏差变化 CE 的加权程度会有不同的要求。

对二维模糊控制系统来说, 当偏差较大时, 控制系统的任务是消除偏差, 这时对偏差的加权应该大些; 相反, 当偏差较小时, 此时系统接近稳态, 控制系统的主要任务是使系统尽快稳定, 为减小系统超调, 这就要求在控制规则中偏差变化起的作用大些, 即对偏差变化加重大些。因此, 在不同的偏差范围是, 考虑采用不同的加权因子, 以实现控制规则的自调整。

1、两个调整因子的模糊控制器

设有两个调整因子 α_1, α_2 , 当偏差较小时, 控制规则由 α_1 来调整, 当偏差较大时, 控制规则由 α_2 来调整。如果论域等级选取为

$$\{E\} = \{CE\} = \{U\} = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\} \quad (3-3)$$

则控制规则可表示为

$$U = \begin{cases} -\{\alpha_1 E + (1-\alpha_1)CE\}, E = \pm 1 \\ -\{\alpha_2 E + (1-\alpha_2)CE\}, E = \pm 2, \pm 3 \end{cases} \quad (3-4)$$

其中 $\alpha_1, \alpha_2 \in [0,1]$ 。

2、多个调整因子的模糊控制器

如果对每一个偏差等级都分别引入一个调整因子, 就构成了带多个调整因子的控制规则。这样有利于满足控制系统在不同被控状态下对调整因子的不同要求。当偏差 E 、偏差变化 CE 及控制量 U 的论域选取式 (3-3) 所示的论域等级时, 则带多个调整因子的控制规则可表示为

$$U = \begin{cases} -\alpha_0 E + (1-\alpha_0)CE, E = U(0) \\ -\alpha_1 E + (1-\alpha_1)CE, E = \pm 1 \\ -\alpha_2 E + (1-\alpha_2)CE, E = \pm 2 \\ -\alpha_3 E + (1-\alpha_3)CE, E = \pm 3 \end{cases} \quad (3-5)$$

其中加权系数 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \in [0,1]$ 。

如果控制规则能按偏差的大小自动调整偏差对控制作用的权重, 则这种调整过程能符合人在控制决策过程中的优化思维特点^[32,33,34]。

3.1.2 光伏系统自调整模糊控制器的设计

如图 3-2 为自调整模糊 MPPT 控制的系统结构图，它主要包括模糊化、模糊推理、清晰化、特性辨识和自调整因子量化等。

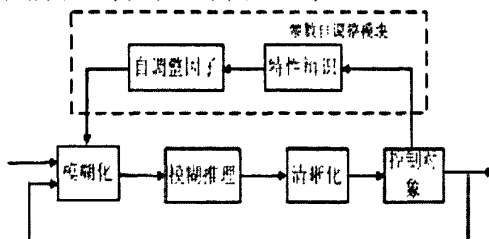


图3-2 自调整模糊MPPT控制系统图

1、参数自调整机制

自适应模糊控制带有两个量化因子，控制算法如下：

$$D = \begin{cases} f(\alpha_1 E, (1-\alpha_1)CE) \\ f(\alpha_2 E, (1-\alpha_2)CE) \end{cases} \quad \alpha \in [0,1] \quad (3-6)$$

D 为输出PWM的占空比， f 为模糊推理规则， α_1 、 α_2 分别为两种不同工作状态下的量化因子。

当 CE 大于 E 时量化因子设定为 α_1 ，当 CE 小于 E 时量化因子设定为 α_2 。当 CE 大于 E 时，表明光伏电池当前工作点距离最大功率点远，所以量化因子变为 α_1 来加快跟踪速度，当 CE 小于 E 时，表明当前工作点距离最大功率点近，所以量化因子变为 α_2 来减小跟踪速度，避免在最大功率点出产生振荡^[35,36,37,38]。

2、光伏系统模糊系统设计

本系统输入变量涉及到两个量：功率差(E)和功率差变化(CE)。变量 E 和 CE 表示为如下：

$$E(k) = P(k) - P(k-1) \quad (3-7)$$

$$CE(k) = \left| \frac{P(k+1) - P(k)}{\alpha(k+1) - \alpha(k)} \right| \quad (3-8)$$

这里 $P(k)$ 和 $\alpha(k)$ 分别是光伏阵列的功率和占空比。因为 $\alpha(k)$ 与光伏电池输出电压 $U(k)$ 成正比，所以用 $\alpha(k)$ 代替 $U(k)$ ，因此当 $E(k) = 0$ 时，光伏阵列达到最大功率点。

$E(k)$ 变量可以表示为：PB (positive big), PS(positive small), ZO(zero), NS (negative small), NB(negative big);

同理：

$CE(k)$ 变量可以表示为：PB, PS, ZO, NS, NB;

$\Delta\alpha_{k+1}$ 变量可以表示为：PB, PS, ZO, NS, NB。

当 $E(k)$ 为正且大于 P_x 时, $E(k)$ 的隶属度函数设为PB, $E(k)$ 为正且小于 P_x 时, $E(k)$ 的隶属度函数设为PS, 同理当 $E(k)$ 为负时可得其隶属度函数。

当 $CE(k)$ 为正且大于 P_y 时, $CE(k)$ 的隶属度函数设为PB, $CE(k)$ 为正且小于 P_y 时, $CE(k)$ 的隶属度函数设为PS, 同理当 $CE(k)$ 为负时可得其隶属度函数。

$\alpha(k)$ 的隶属度由模糊推理得到, 它的清晰化值通过加权平均算出:

$$\Delta\alpha_{n+1} = \frac{\sum_{i=1}^6 W_i f_i(\alpha_n)}{\sum_{i=1}^6 W_i} = \frac{(1-\alpha_n)(W_1+2W_2+4W_3-4W_4-2W_5-W_6)}{20(W_1+W_2+W_3+W_4+W_5+W_6)}$$

(3-9)

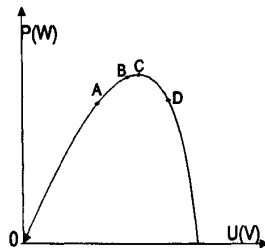


图 3-3 光伏电池 P-V 曲线

图3-3所示为光伏电池的P-V曲线, 模糊MPPT算法如下: 若太阳能电池当前的工作点为A点, 下一时刻为B点时, 则 B点与A点的 $E(k)$ 较大且 $CE(k)$ 也较大, 分别定义 $E(k)$ 、 $CE(k)$ 为PB, 可以判断当前工作点距最大功率点较远, 则定义步长变化量 $\Delta\alpha_{k+1}$ 也为PB; 同理, 当前工作点为B点, 下一个工作点为C点时, $E(k)$ 和 $CE(k)$ 都较小, 则定义 $E(k)$ 、 $CE(k)$ 为PS, 可以判断该工作点距离最大功率点很近, 因此将步长变化量 $\Delta\alpha_{k+1}$ 定义为PS。以此类推, 当前工作点为C点, 下一工作点为D点时, $E(k)$ 为负且数值较大, 定义为NB, 同时 $CE(k)$ 为负且数值也较大, 也定义为NB, 可以判断该工作点距离最大功率点很远且占空比应该减小, 因此步长改变量 $\Delta\alpha_{k+1}$ 应该定义为NB。综上所述可以得出所有模糊规则, 如表3-1所示:

表3-1 模糊规则表

$\Delta\alpha_{k+1}$ $CE(k)$ $E(k)$					
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	ZO	NB	NB
NS	NB	NS	ZO	NS	NB
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	PB	PS	ZO	PS	PB
PB	PB	PB	ZO	PB	PB

3.2 自调整模糊MPPT算法的Matlab仿真设计

自调整模糊控制在最大功率跟踪（MPPT）中有很好的性能，因为其收敛速度快，具有在线辨识自适应性。光伏电池由于受到外界因素（温度、日照强度、遮荫度等）的影响，其输出具有明显的非线性特性，传统的 MPPT 算法在这种条件下控制效果变差，因此本文把自调整模糊控制应用到光伏电池储能控制中，通过 Matlab 仿真比较了自调整模糊控制和爬山法（P&O）在不同光照突变情况下的跟踪特性，验证了自调整模糊控制跟踪速度快、稳态性能好，具有良好的抵抗扰动性能，下面分析了系统各模块的仿真设计。

3.2.1 太阳能电池模块的Simulink建模

1. 光伏阵列的模型

根据第二章的式（2-3）（2-4）（2-5）对光伏阵列建模，光伏阵列输入温度 T 设为 278 K，光照度设为 $1000 W/m^2$ ，仿真图如图 3-4 所示。

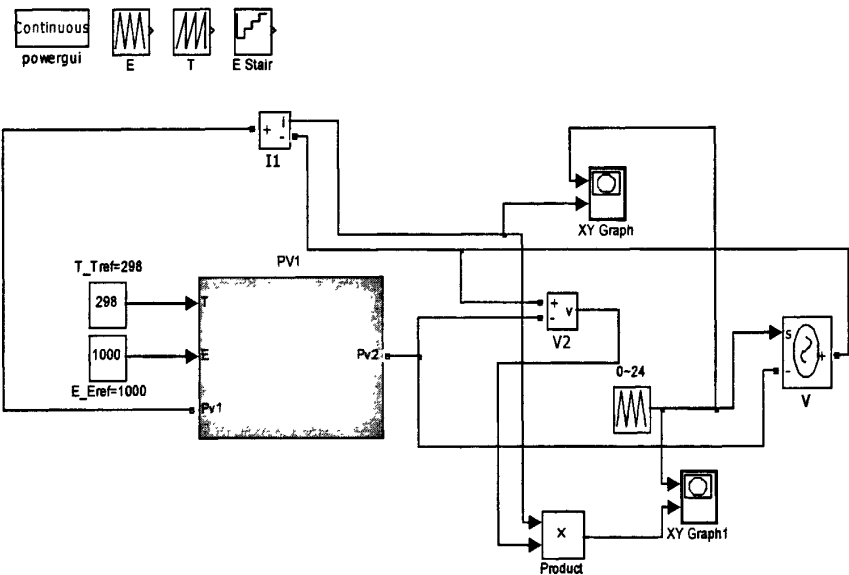
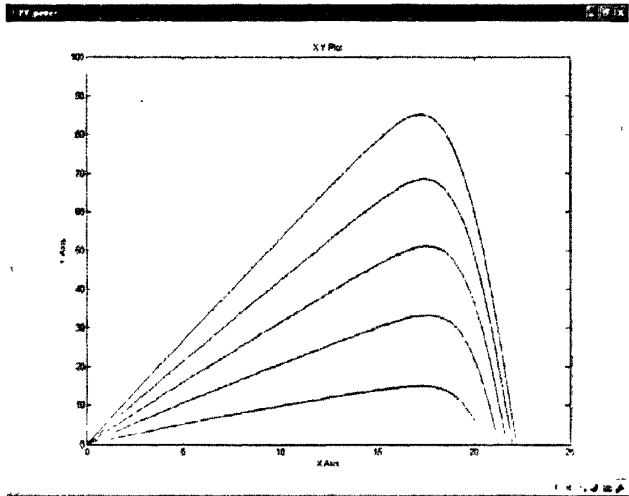
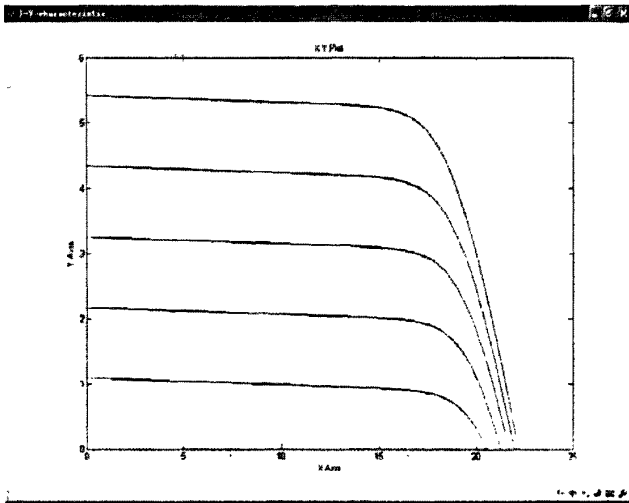


图 3-4 光伏阵列仿真图

光伏电池模块连接受控电压源，受控源输入的控制信号为连续递增量，当输出电压随控制信号变化时，光伏电池在不同光照条件下的输出功率和电流与电压的 P-V、I-V 特性曲线如图 3-5 所示。



(a) 光伏阵列 P-V 特性曲线



(b) 光伏阵列的 I-V 特性曲线

图 3-5 光伏阵列的 P-V, I-V 特性曲线

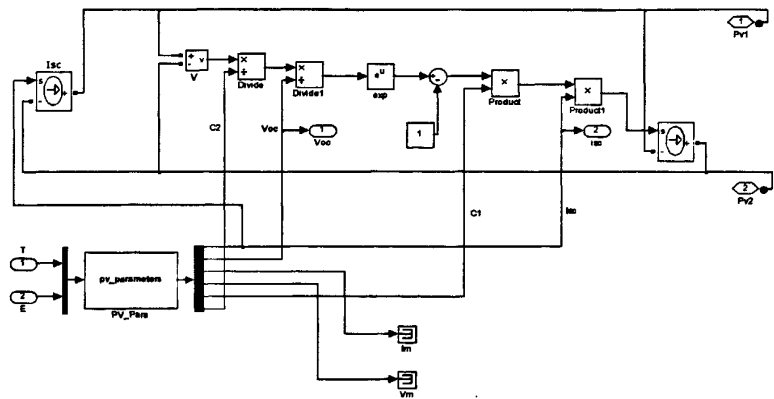


图 3-6 光伏阵列内部结构

图3-6所示为光伏阵列内部结构图，pv_parameters由式(2-3)(2-4)(2-5)得到，光伏电池的参数由供应商提供。根据实验室所用电池板的参数设定标况短路电流为6.02A，标况开路电压为17.5V，标况最大功率点电流为5.14A，标况最大功率点电压为17.5V，太阳能辐射参考值取 1000 W/m^2 ，电池温度参考值为298K。

3.2.2 Buck-Boost电路的Simulink建模

光伏系统 DC-DC 采用 Buck-Boost 电路实现了最大功率点跟踪。Buck-Boost 电路如图 3-7 所示，电感 L_1 的值为 5mH，电感 L_2 的值为 1.5mH，储能电容 C_1 的值为 0.6uF，滤波电容 C_2 的值为 10mF。MOSFET 的触发脉冲信号由 MPPT 仿真模型中输出的 PWM 驱动。图中的输入为太阳能电池模块，电阻 R1 为负载。

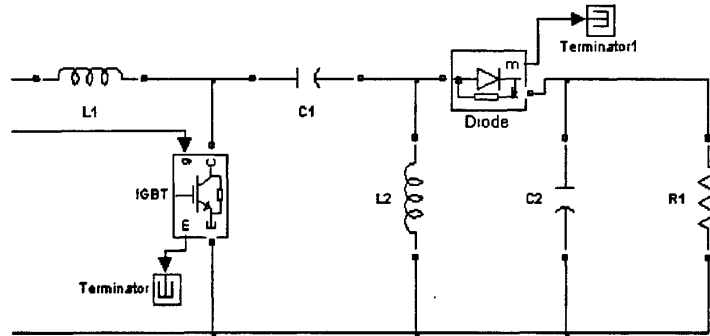


图 3-7 Buck-Boost 电路仿真图

3.2.3 PWM脉冲信号产生模块的Simulink建模

图 3-8 为 PWM 脉冲信号产生模块的仿真图，零阶保持器的输入为模糊控制模块的输出，通过与三角波信号进行比较后输出为一正负幅值不等的锯齿波，然后通过符号函数产生一个正负幅值均为 1 的 PWM 脉冲，这个脉冲信号与 1 相加后乘以 0.5 就为幅值为 1 的 PWM 脉冲信号。PWM 脉冲信号通过控制功率 MOSFET 的通断，调节负载的等效阻抗值，从而使负载电阻与太阳能电池的内阻匹配来实现最大功率的跟踪。

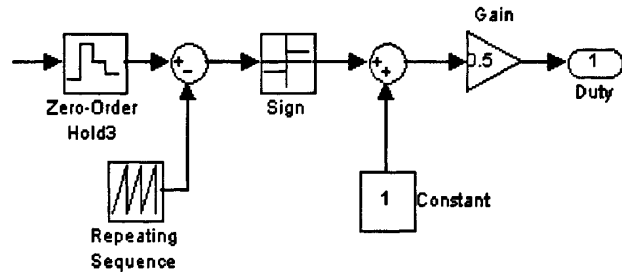


图 3-8 PWM 脉冲信号产生模块仿真图

3.2.4 自调整控制的Simulink仿真

自调整控制通过判断功率差与电压差的比值来调节量化因子的大小，当功率电压比较小时，量化因子 α_1 设为 0.3；当功率电压比较大时，量化因子 α_2 设为 0.7。图 3-9 为自调整控制的仿真图，下面部分为比较功率电压比与设定值的大小，通过判断他们之间的关系来决定量化因子的值。

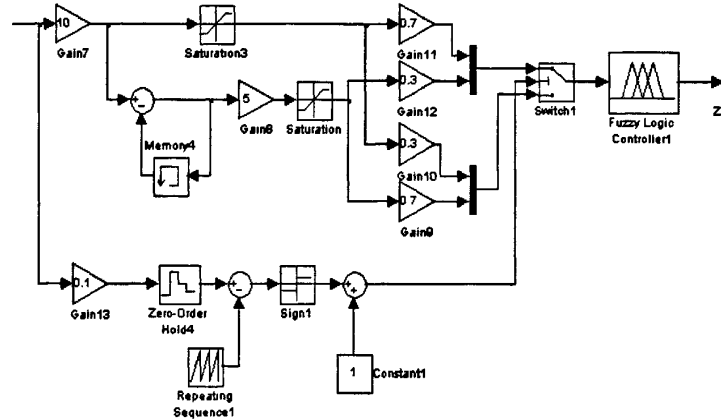
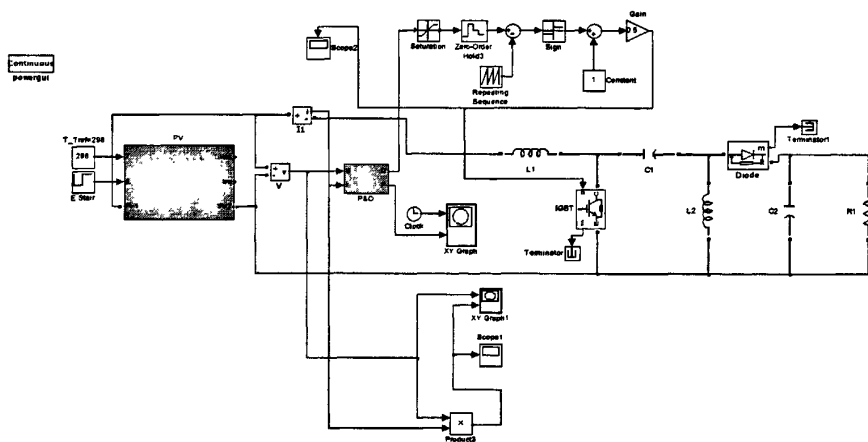


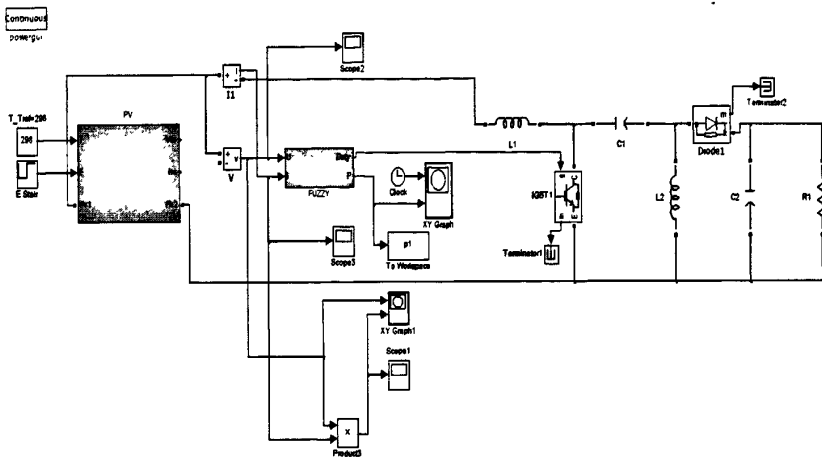
图 3-9 自调整模糊控制仿真图

3.3 自调整模糊MPPT算法的MPPT控制系统的仿真

下图 3-10 为 P&O 法与自调整模糊 MPPT 算法的 Matlab 仿真图，图（a）为 P&O 法的 Matlab 仿真图，它包括光伏电池模块、Buck-Boost 电路模块、PWM 信号产生电路和 P&O 法控制模块，前三个模块前面已经详细介绍，下面重点分析 P&O 法的 M 文件。



(a) P&O 法的 Matlab 仿真图



(b) 自调整模糊 MPPT 算法的 Matlab 仿真图

图 3-10 P&O 法与自调整模糊 MPPT 算法的 Matlab 仿真图

P&O 法的控制流程图如图 2-10 所示，跟踪误差允许值 e 为 0.0001，步长值为 M ，PWM 占空比的变化方向为 f ，其主程序如下：

```
function [sys,x0,str,ts] = p_o_m(t,x,u,flag)
switch flag,
case 0,
    [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes;
case 3,
    sys=mdlOutputs(t,x,u);
case { 1, 2, 4, 9 }
    sys=[];
otherwise
    DAStudio.error('Simulink:blocks:unhandledFlag', num2str(flag));
end
function [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 3;
sizes.NumInputs = 5;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1; % at least one sample time is needed
sys = simsizes(sizes);
```

```

x0 = [];
str = [];
ts = [-1 0];
function sys=mdlOutputs(t,x,u)
U=u(1);
I=u(2);
lastP=u(3);
D=u(4);
f=u(5);
e=0.0001;
M=0.1;
P=U*I;
dP=P-lastP;
if dP<0
    E=-dP;
else
    E=dP;
end
if E>e
    if dP>0
        f=f;
    else
        f=-f;
    end
    D=D+M*f;
else
    D=D;
end
sys=[P;D;f];

```

自调整模糊控制的输入值为功率差与电压差的比以及它的增量,自调整控制通过判断功率差与电压差的比来决定以上两个输入的量化因子然后进入模糊控制器,模糊控制器经过模糊推理清晰化后得到输出量,该输出量经过 PWM 脉冲信号产生模块生成 PWM 信号来控制 Buck-Boost 电路的 MOSFET。自调整模糊控制的结构图如图 3-11 所示。

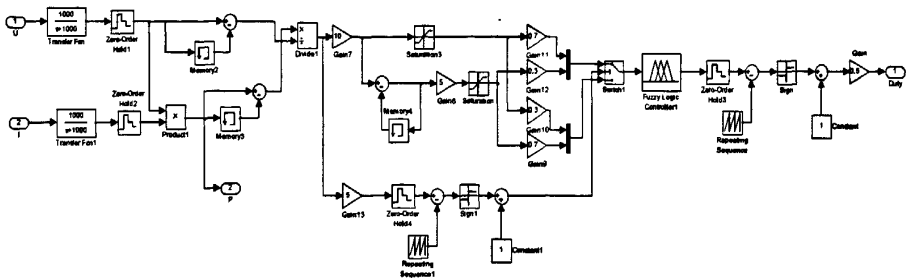


图 3-11 自调整模糊控制的结构图

3.4 仿真结果与分析

模糊控制和P&O控制的光伏电池P-V特性曲线如图3-12所示:

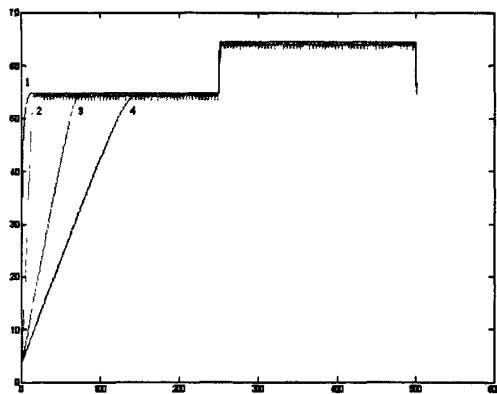


图3-12 自调整模糊控制和P&O控制的输出特性

曲线1为模糊控制的输出曲线，曲线2、3、4分别为P&O法不同步长时的输出曲线，从2到4步长值依次减小，t时刻为突加扰动的响应曲线。下面从三方面分析它们的工作特性。

1. 响应速度

从以上曲线的输出特性可以看出 P&O 法随着步长的增加响应速度加快, 而自调整模糊控制具有参数自调整功能, 响应速度比 P&O 法更快, 而且在跟踪过程中的振荡较小。

2. 最大功率点处的稳态特性

由于 P&O 法是通过扰动判断跟踪方向的, 步长值变大虽然能加快响应速度,

但在最大功率点附近的振荡反而增加,从而增加了系统的振荡损耗,而自调整模糊控制由于具有变步长功能,在最大功率附近的步长较小,因此它能稳定工作在最大功率点处。

3. 对外界环境条件变化的响应能力

当外界环境条件发生突变时响应时间能否足够的短是衡量 MPPT 算法性能的一个重要方面。本文提出的自调整模糊控制在外界环境条件突变情况下跟踪速度快而且能重新稳定工作在最大功率点,具有很好的鲁棒性。

第四章 自调整模糊 MPPT 控制算法的 FPGA 程序设计

本文在 Altera 公司的 EP2C8Q208C8 芯片上用 FPGA 实现了自调整模糊 MPPT 算法, 该算法包括了数据采集模块、模糊 MPPT 算法模块、PWM 产生模块、数据乘法器模块及模糊自调整模块。自调整模糊 MPPT 算法程序用 Quartus II 编写, 在 Modelsim 环境下通过仿真验证了 PWM 能随输入电压、电流依据自调整模糊 MPPT 算法而变化。综合后的自调整模糊 MPPT 原理图如图 4-1 所示。

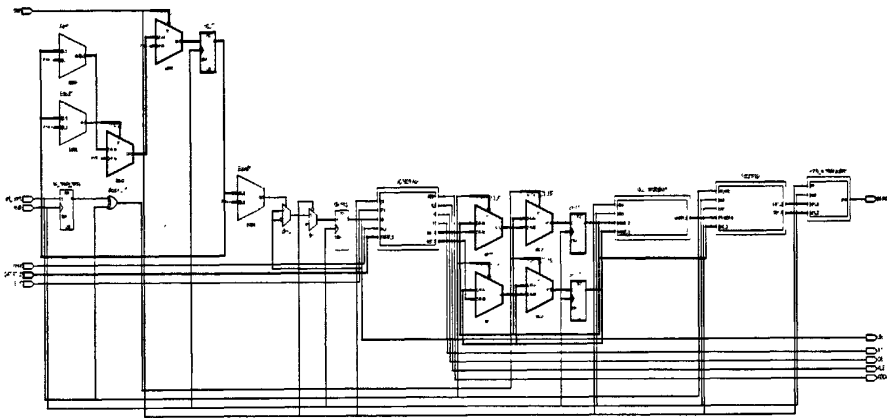


图 4-1 综合后的自调整模糊 MPPT 原理图

4.1 控制算法各模块的程序设计

4.1.1 数据采集模块的FPGA设计

本文数据采集器件采用 AD0809, 光伏电池的输出电压和电流（经霍尔传感器转换成电压量）均通过 AD0809 采样后输入 FPGA, FPGA 控制 AD0809 的采样时序, AD0809 把输入的模拟量转换为数字量后输入 FPGA。

AD0809 各管脚功能为:

1、ST 为启动转换信号。当 ST 上跳沿时, 所有内部寄存器清零; 下跳沿时, 开始进行 A/D 转换; 在转换期间, ST 应保持低电平;

2、EOC 为转换结束信号。当 EOC 为高电平时, 表明转换结束; 当 EOC 为低电平时, 表明正在进行 A/D 转换;

3、OE 为输出允许信号, 用于控制输出锁存器向 FPGA 输出转换得到的数据。OE=1, 输出转换得到的数据; OE=0, 输出数据线呈高阻状态;

- 4、D7—D0 为数字量输出线。因此对 ADC 的控制要满足下列条件：
- 1) 初始化时，使 ST 和 OE 信号全为低电平；
 - 2) 送要转换的哪一通道的地址到 A，B，C 端口上；
 - 3) 在 ST 端给出一个至少有 100ns 宽的正脉冲信号；
 - 4) 是否转换完毕，我们根据 EOC 信号来判断；
 - 5) 当 EOC 变为高电平时，这时给 OE 为高电平，转换的数据就输出给 FPGA。

ADC 控制器的 ADC 控制模块可以控制 AD 芯片分时采样光伏电池输出的电流和电压值，然后同步输入到 FPGA 的乘法器，同步信号用 ad_ready 表示，分时控制状态转移图如图 4-2 所示。

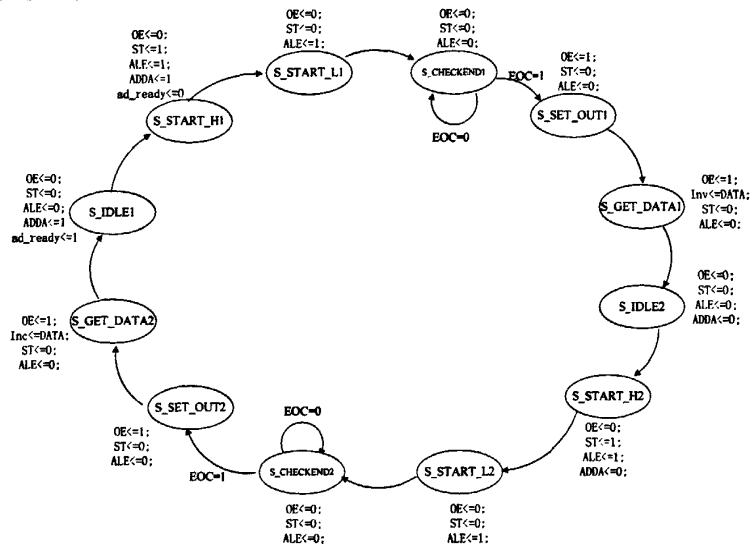
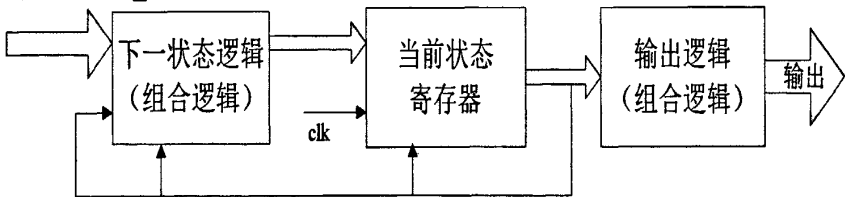


图 4-2 ADC 分时控制状态转移图

Moore 有限状态机的特点是当前的输出仅仅与当前的状态相关联，而与当前的输入无关；而 Mealy 有限状态机特点是当前的输出不仅与当前的状态有关，而且还与当前的输入有关，如图 4-3 所示。ADC 分时控制采用 moore 有限状态机，图中的 S_IDLE1 为初始态，OE、ST、ALE 置零； START_H1 为产生起动信号，选择通道口； START_L1 为起动保持，起动信号脉宽要足够长，在起动的时候 ALE 要一直有效； CHECK_END1 为等待 AD 转换； SET_OUT1 高电平打开三态缓冲器输出转换数据； GET_DATA1：高电平打开三态缓冲器输出转换数据。



(a) Mealy 有限状态机

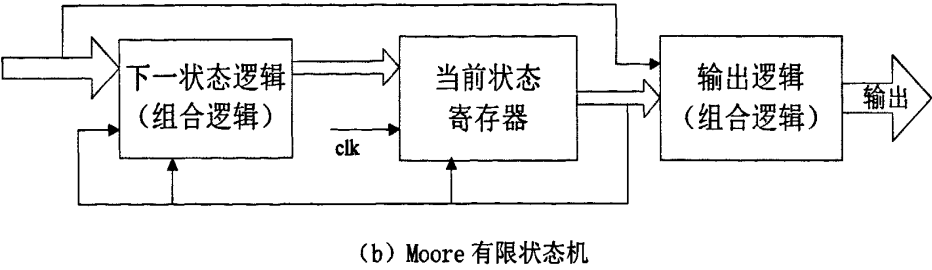


图 4-3 mealy 和 moore 有限状态机

4.1.2 模糊MPPT算法的FPGA设计

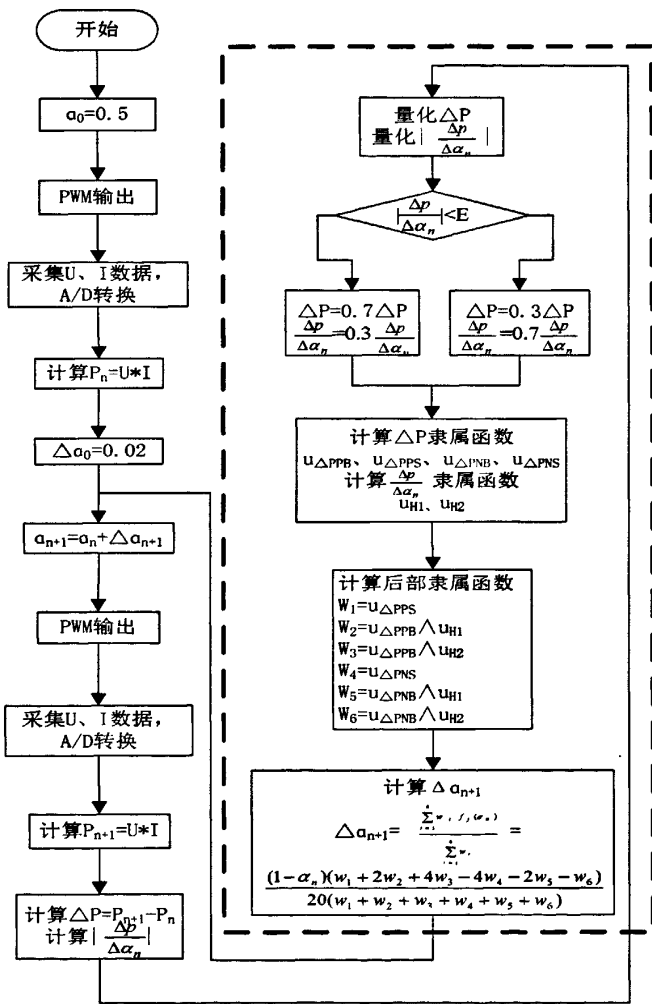


图4-4 自调整模糊控制程序图

图4-4所示为模糊MPPT算法流程图，当系统工作时，设PWM占空比为0.5，当PWM信号输出后开始采集光伏电池输出电压U和电流I计算出功率，调用自调整模

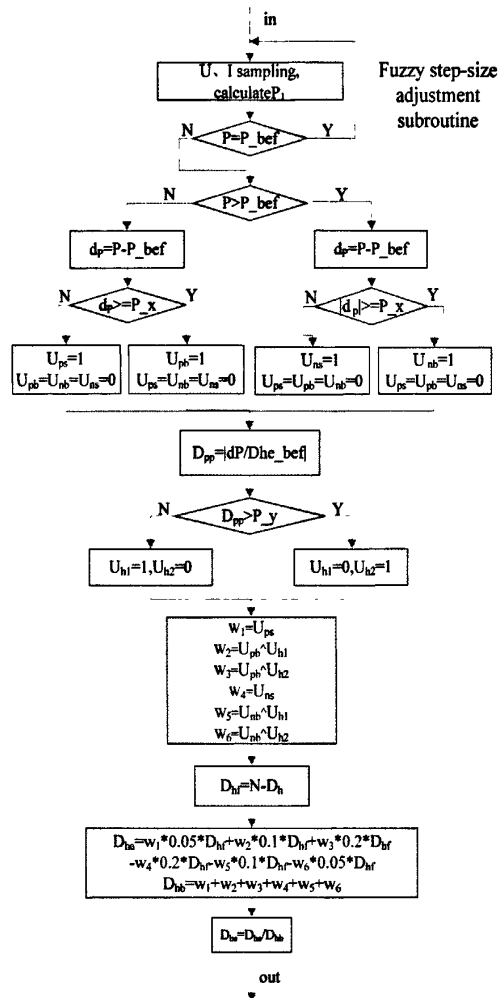


图4-5 步长自调整子程序流程图

模糊模块，计算出 PWM 占空比的变化量和变化方向，然后计算出输出 PWM 占空比，通过功率放大电路驱动 DC-DC 使光伏电池往最大功率点电压方向变化，使太阳能电池工作在最大功率点。

当 start 为 0 时，初始化 PWM 占空比（高低电平计数值 Dh、Dl），当 start 为 1 时，改变 PWM 占空比，PWM 占空比的变化量 Dhe 由模糊步长子程序得到，模糊步长自调整子程序流程图如图 4-5。

4.1.3 PWM模块的FPGA设计

PWM 生成模块的输入为高电平计数值为 Dh、时钟 mclk、使能端 EN，输出端为 psout。当使能端为 0 时，初始化计数值 count 和输出 psout；当使能端为 1 时，计数值 count 开始计数，并判断计数值 count 大小输出高低电平，其程序流程图如图 4-6：

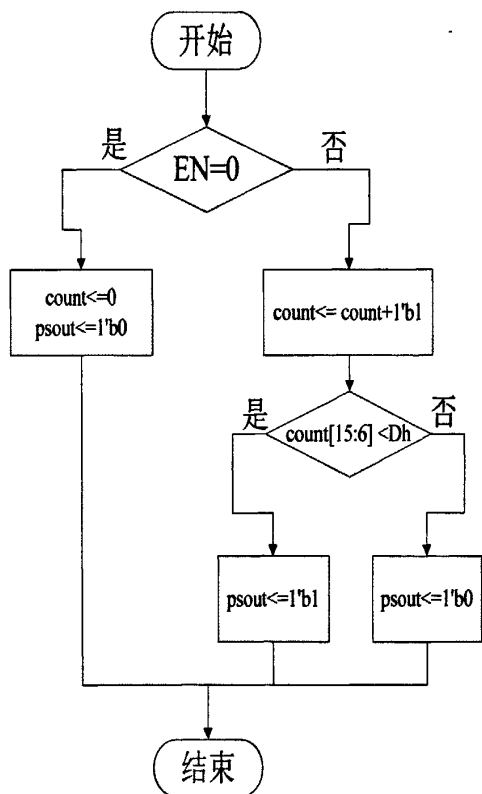


图4-6 PWM模块流程图

4.1.4 数据乘法器模块的FPGA设计

数据乘法器模块由 Quartus 自带的 IP 核生成，如图 4-7。由于我们采集的电压、电流值均为八位的数据，因此我们生成一个 8x8 的乘法器，带有时钟使能 clken，两个输入为 dataa、datab，时钟为 clock，result 为乘法器的输出结果。

4.1.5 自调整模糊推理规则的FPGA设计

模糊自调整推自调整模块设定 CE(k)小于给定值 E 时，量化因子 α 设为 0.3，CE (k) 大于给定值 E 时，量化因子 α 设定为 0.7，核心程序如下。

```
always @(posedge mclk)
begin
    if(Dpp<E)
        begin
            dp_adp<=dp3;
            Dpp_adp<=Dpp7;
        end
end
```

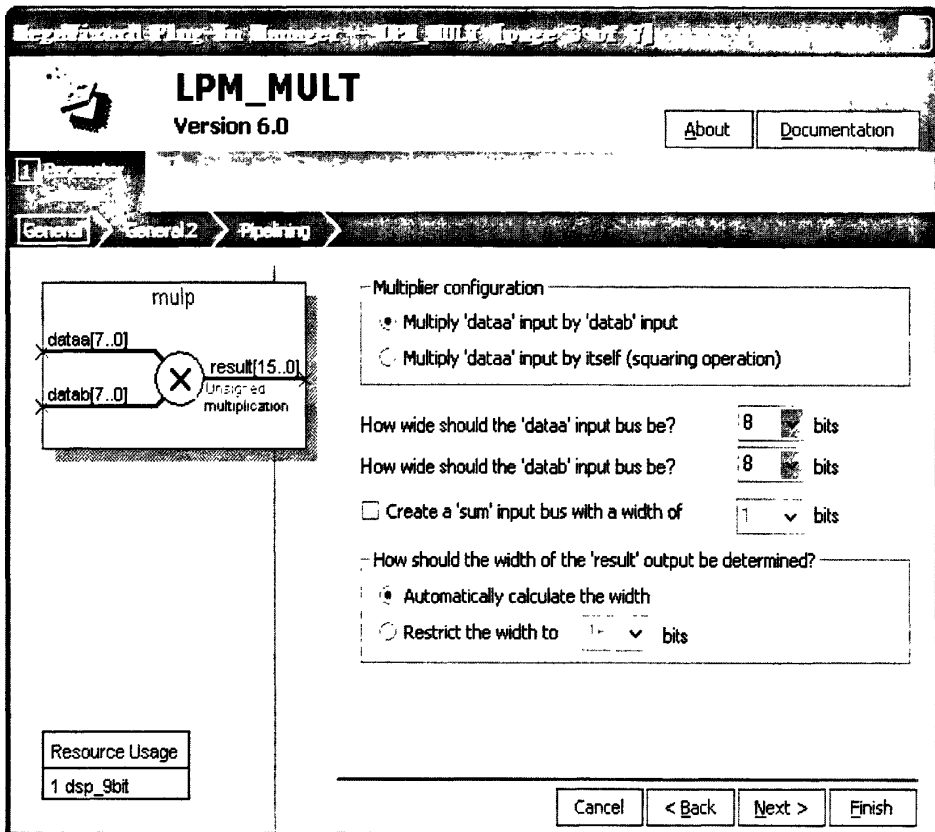


图 4-7 数据乘法器生成向导图

```

else
    begin
        dp_adp<=dp7;
        Dpp_adp<=Dpp3;
    end
end

MUL multiplier7 (.clken(start),.clock(mclk),.dataa(Dpp_tep),
                 .datab(R1),.result(Dpp3));

MUL multiplier8 (.clken(start),.clock(mclk),.dataa(Dpp_tep),
                 .datab(R2),.result(Dpp7));

MUL multiplier9 (.clken(start),.clock(mclk),.dataa(dp_tep),
                 .datab(R1),.result(dp3));

MUL multiplier10(.clken(start),.clock(mclk),.dataa(dp_tep),
                 .datab(R2),.result(dp7));

```

4.2 仿真实验与结果分析

根据以上设计，我们用 Questasim 仿真验证了自调整模糊 MPPT 算法，仿真文件包括 test 文件和 AD 测试模块。

AD 测试模块主要功能为 ad 数据的提取，他通过读 adc.dat 文件中的数据给 data 赋值，通过判断 oe、ale、start 的高低电平变化判断其延迟时间。其核心程序如下：

```

always@(posedge oe)
begin
    if(adda==0)
        link_bus1=1'b1;
    end
always@(negedge oe)
begin
    if(adda==0)
        link_bus1=1'b0;
    end
always@(posedge oe)
begin
    if(adda==1)
        link_bus2=1'b1;
    end
always@(negedge oe)
begin
    if(adda==1)
        link_bus2=1'b0;
    end
always@(posedge start)
begin
    width=$time;
    @(negedge start)
        width=$time-width;
    $display("start pulse width =%d",width);
    if(width<100)

```



```

begin
    $display("warning! the start pulse width is too narrow!");
end

end

always@(posedge ale)
begin
    width1=$time;
    @(negedge ale)
        width1=$time-width1;
    $display("ale pulse width =%d",width1);
    if(width1<100)
        begin
            $display("warning! the ale pulse width is too narrow!");
        end
    end

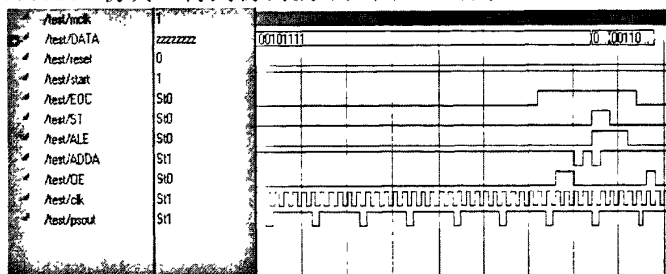
end

always@(posedge oe)
begin
    width2=$time;
    @(negedge oe)
        width2=$time-width2;
    $display("oe pulse width =%d",width2);
    if(width2<100)
        begin
            $display("warning! the oe pulse width is too narrow!");
        end
    end

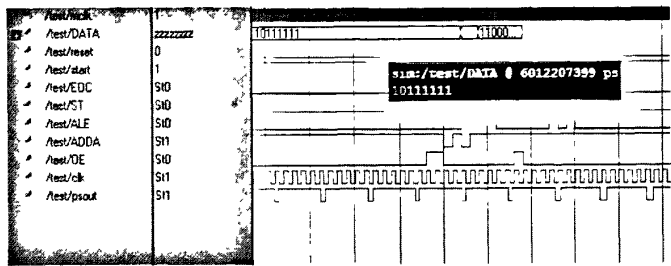
end

```

通过 Modelsim 仿真，得到仿真波形如图 4-8 所示。



(a)



(b)

图 4-8 QuestaSim 仿真波形图

从图中的仿真波形图可知：当电压增加功率减小时，表明当前工作点电压高于最大功率点电压，因此应该减小太阳能电池板的工作点电压，所以 PWM 占空比增加，如图（a）所示；反之，当电压增加功率增加时，表明当前工作点电压低于最大功率点电压，因此应该增加太阳能电池板的工作点电压，所以 PWM 占空比减小，见图（b）。

第五章 自调整模糊 MPPT 系统的硬件电路设计

5.1 自调整模糊MPPT控制系统硬件电路总体设计

为了验证上述算法的可行性,本文搭建了模块化结构的光伏阵列的分布式最大功率跟踪控制的一套实验系统,该系统由一个太阳能电池板、Buck-Boost 型变换器、FPGA 控制模块、数据采集模块组成。硬件电路原理框图如图 5-1 所示。

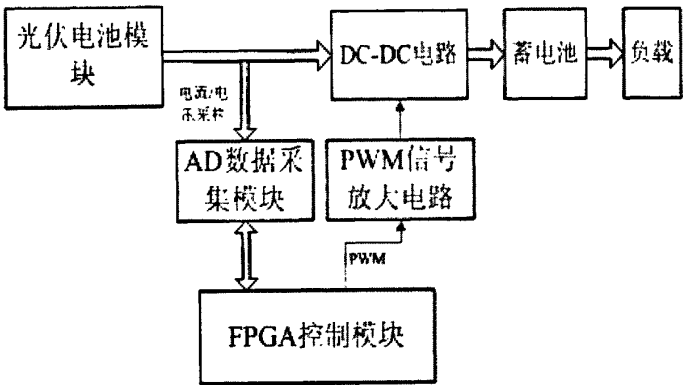


图 5-1 硬件电路原理框图

光伏电池模块通过 DC-DC 连接蓄电池和负载,光伏电池的输出电压由 DC-DC 的 PWM 占空比控制,FPGA 控制模块实现最大功率跟踪算法,它通过 AD 数据采集模块采集光伏电池的输出电压和电流由自调整模糊 MPPT 算法输出 PWM,然后通过 PWM 信号放大电路驱动 DC-DC 的功率 MOSFET 来调节光伏电池的输出电压使光伏电池输出的功率最大。

5.2 DC/DC变换器的设计

光伏发电系统的 MPPT 是运用一定的控制算法通过 DC/DC 变换电路部分实现的,因此把 DC/DC 变换电路作为实现 MPPT 的主电路模块。DC/DC 变换电路,亦称直流斩波器,其工作原理是通过调节控制开关,将一种持续的直流电压变换成另一种(固定或可调的)直流电压。

目前常用的 DC/DC 电路有 Boost 变换电路, Buck 变换电路, Buck-Boost 变换电路, Cuk 变换电路, sepic 变换电路等。下面介绍几种典型的 DC/DC 变换电路。

5.2.1 典型的 DC/DC 变换电路

本节主要介绍应用于光伏发电系统中的降压式(Buck)、升压式(Boost)、升降压式(Buck-Boost)、库克式(Cuk)四种基本斩波变换电路,下面阐述其基本电路特点和在光伏发电系统中的应用,同时为方便电路设计,给出了在电流连续模式下电路的主要关系式。

图 5-2 为四种基本斩波电路拓扑结构。光伏发电系统中,这四种基本电路广泛应用于太阳能电池的最大功率点跟踪、蓄电池充电和光伏直流电机控制的水泵系统、光伏直流输电系统等。其具有结构简单、效率高、控制易实现等优点。

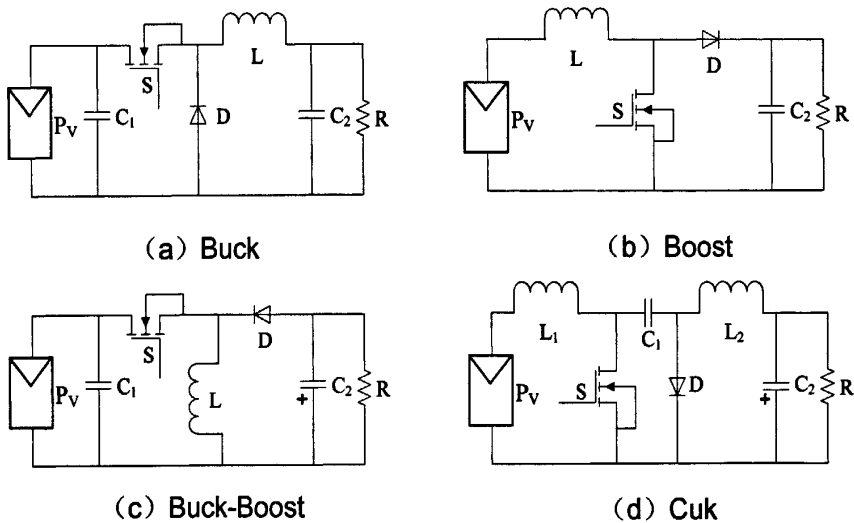


图 5-2 四种基本斩波电路拓扑结构

Buck 变换电路是 PWM 型变换电路中最简单最基本的一种。其优点是电路简单,动态性能好。但是其输入电流的脉动会引起对输入电源的电磁干扰,所以常常在电源和电路之间加一个滤波电容, Buck 电路只能局限于降压输出的场合。

Boost 变换电路的优点是输入电流连续,对电源的电磁干扰相对小。缺点是输出端二极管的电流是脉动的,输出纹波较大,所以通常要在输出端并联一个电容滤波,同时需要有合适的开关控制以免使输出电压升压过高。

Buck-Boost 变换电路是以上两种变换电路的结合体,具有电路形式简单,既可以升压又可降压的优点。缺点是输入输出电流皆有脉动,两端都需要加电容或电感进行滤波,虽然此电路可以得到较宽的输出电压范围,但增加了开关管电压应力。

Cuk 变换电路具有输入输出皆无脉动和既能升压又能降压的特点,用最少的元器件获得最佳的稳态性能,但是 Cuk 电路同样增加了开关管的电压应力,同

时由于其采用电容传送能量，增大了电容本身的纹波电流而降低了系统的可靠性。

5.2.2 Buck-boost 变换器的工作原理

本文 DC/DC 环节采用 Buck-Boost 直流变换电路实现太阳能电池板最大功率点跟踪，其电路结构如图 5-3 所示，它由功率开关管 MOSFET、二极管、电感和电容组成。

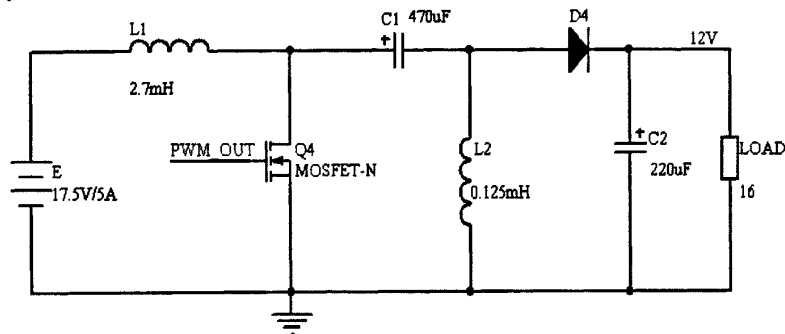


图 5-3 Boost 直流变换电路

当 MOSFET 处于通态时，E—L₁—Q₄ 回路和 C₁—Q₄—L₂ 回路同时导电，L₁ 和 L₂ 贮能。当 MOSFET 处于断态时，E—L₁—C₁—D₄—负载回路及 L₂—D₄—负载回路同时导电，此时 E 和 L₁ 既向负载供电，同时也向 L₁ 充电（C₁ 贮存的能量在 MOSFET 处于通态时向 L₂ 转移）。输入输出关系：

$$U_o = \frac{t_{on}}{t_{off}} E = \frac{t_{on}}{T - t_{on}} E = \frac{\alpha}{1 - \alpha} E, \quad 0 < \alpha < 1 \tag{5-1}$$

Buck-Boost 变换器实现 MPPT 的原理如下：

太阳能光伏发电系统之所以会出现最大功率点跟踪的问题，根本原因是在光照温度等外界条件变化的情况下，太阳能电池阵列输出伏安特性随着光照和温度的变化而不同，并且光伏电池两端的负载也总是变化的，如家庭光伏并网发电系统中家庭的用电负载是随机的，大型光伏并网系统因逆变器、蓄电池等各种设备的老化或者是工作状态不同其等效负载也是变化的。

MPPT 的本质就是通过改变太阳能电池输出端的等效负载，使得等效负载和太阳能电池的输出伏安特性相匹配，也就实现了阻抗匹配，从而使得电池输出最大的功率。把光伏发电系统 DC/DC 变换器和它输出端的负载等效为一个阻值可变的阻值。通过调节 Buck-Boost 变换器的占空比，可以调节等效电阻的阻值，也就是可以调节太阳能阵列的输出电压，也就实现了最大功率跟踪控制。

5.2.3 Buck-boost 变换器的参数选择

1. 储能电感的选择

设计 DC-DC 变换电路工作在 CCM(Continuous Conduction Mode) 模式下输入电压额定值 U_{in} 为 20V, 输出电压额定值 U_o 为 40V, 输出功率 P_o 为 100W, 开关频率 f_s 为 20kHz, 功率因数高于 95%。

根据上面参数, 由公式 (5-1) 得到额定占空比 D 为 0.667, 为满足设计指标对功率因数的要求, 设定输入电流纹波率 $\overline{\Delta I_i} = 2.5\%$, 所以根据式

$$L_1 = \frac{U_i^2 D}{2 \overline{\Delta I_i} P_o f_s} \quad (5-2)$$

计算得电感 L_1 为 2.67mH, 所以 L_1 取 2.7 mH。

在 $D=0.667$ 时, $\overline{I_o} \approx 2.5$ 。为保证电路工作于 CCM 模式下, 采用负载电流值的 6 倍进行计算, 根据式

$$L_2 = \frac{U_i U_o \overline{I_o}}{8 f_s P_o} \quad (5-3)$$

计算得到 L_2 为 0.125 mH。

2. 滤波电容的选择

在计算电容时, 考虑电压波动为 1%, 分别根据下式:

$$C_1 = \frac{D^2 P_o}{\Delta U (1-D) U_o^2 f_s} \quad (5-4)$$

$$C_2 = \frac{D^2 U_i P_o}{\Delta U (1-D) U_o^3 f_s} \quad (5-5)$$

计算得到 $C_1 = 427 \mu F$, $C_2 = 210 \mu F$ 。所以 C_1 取 $470 \mu F$, 耐压值 450V; C_2 取 $220 \mu F$ 耐压值 450V。

3. 二极管的选择

二极管 D 的选择主要是对正向压降、反向压降及开关速度等几个参数因素综合考虑: 正向压降越高功率损耗越大; 关断时间太长则影响转换器的转换效率及可能产生瞬间高压, 损坏元器件; 最后要求二极管必须具有较高的反向电压。根据本文设计要求, 选择 MBR7515 型二极管, 其反向电压为 45V, 工作电流为 7.5A, 正向压降 0.57V。

4. 功率开关管的选择

DC/DC 变换电路通过改变开关管 MOSFET 的占空比来跟踪太阳能电池的最大功率点。对于 MOSFET 开关频率的选取须考虑系统效率、造价及重量等因素。MOSFET 开关频率高时, 电感量就小, 但是开关管的损耗会增加; MOSFET 开关频率低时, 选取电感量大, 增加了系统的体积和重量, 但开关管损耗会减小。

本文 Boost 电路中的开关管选用 N 沟道增强型 MOSFET 功率管 IRFP264。它适用于高频 DC/DC 变换电路,高频状态下最大工作电压和电流分别为 250V 和 38A。IRFP264 导通阻抗为 $0.075\ \Omega$, 功率损耗低。

5.3 控制电路模块

控制电路模块主要实现数据采集、最大功率跟踪算法的实现和 MOSFET 驱动等。根据实验室现有条件及实验要求,本实验的控制器采用了 Altera 公司的 CycloneII EP2C8Q208C8 芯片,该芯片具有 8256 个逻辑单元 (LE)、570 个 registers、138 个 pins、2 个锁相环 (PLLs)。

5.3.1 FPGA 核心板控制电路功能介绍

图 5-4 所示为 FPGA 控制板原理图,JP2 为 FPGA 核心板接口,JP1 为 AD 转换器接口,JP3 为输入和电源接口,SW 为系统复位置位开关。

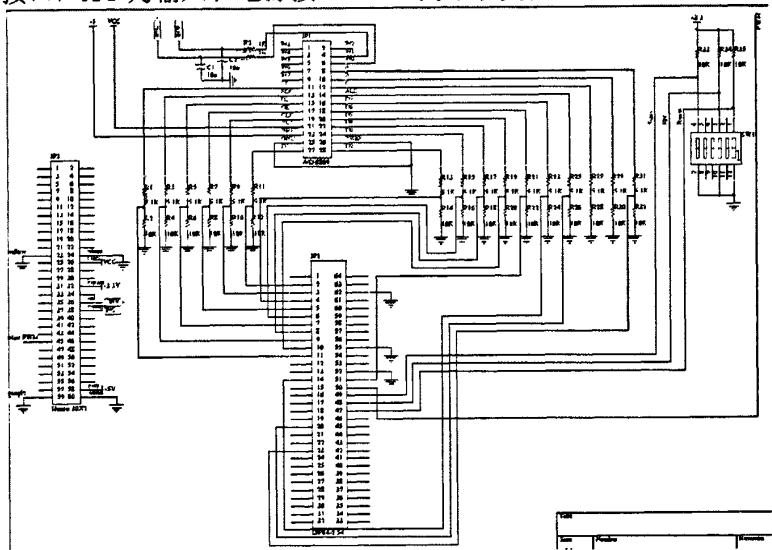


图 5-4 FPGA 控制板原理图

1. A/D 转换电路

由于 ADC0809 的工作电平是 5V, FPGA 的工作电平是 3.3V, 所以 AD 通过分压电阻接 FPGA, ADC0809 是 8 位逐次逼近型 A/D 转换器。它由一个 8 路模拟开关、一个地址锁存译码器、一个 A/D 转换器和一个三态输出锁存器组成 (见图 5-5)。

2. 复位置位电路

图 5-6 所示为复位置位电路,控制信号通过拨码开关输入 FPGA,当拨码开关打开时输入高电平,当拨码开关闭合时输入低电平,Start 为启动信号,Reset 为复位信号,EN 为 AD 控制器单步采样控制信号。

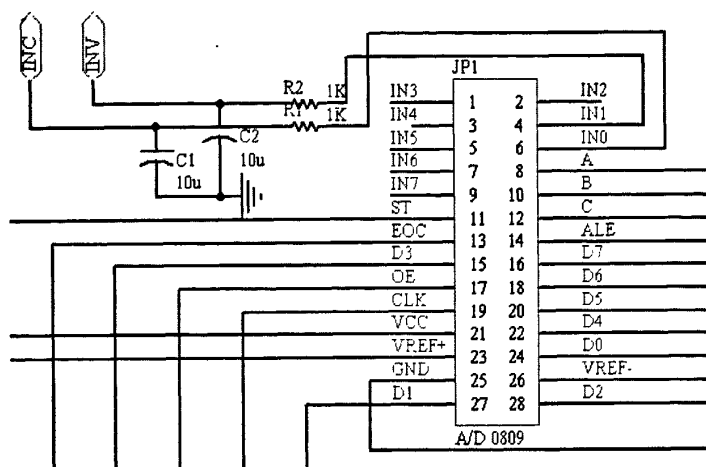


图 5-5 A/D 转换电路原理图

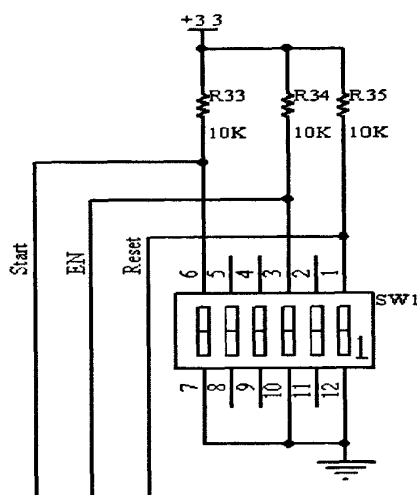


图 5-6 复位置位电路

3. 外围接口电路

图 5-7 所示为外围接线端子。VCC 为 ADC0809 的参考电压输入，+5V 为 ADC0809 的电源电压，+3.3V 为复位置位电路的输入电平，INV 和 INC 为采样的输入电压和电流，PWM 为 FPGA 输出的 PWM 控制信号。

5.3.2 电压和电流采样电路设计

1. 电压采样

本系统的电压采样电路定期采集光伏阵列的工作电压，经 A/D 转换后，送入 FPGA 中供跟踪算法调用。电压采样电路采用大电阻分压，具体电路如图 5-8 所示。

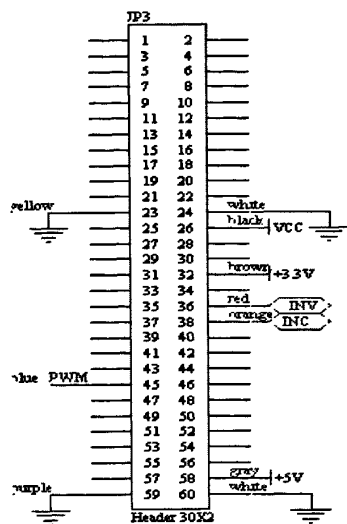


图 5-7 外围接线端子

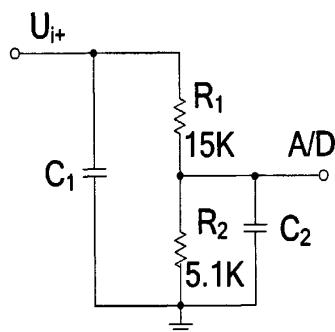


图 5-8 电压采样电路

2. 电流采样

本实验采用的电流传感器为北京某电子公司的 LA-100P 霍尔电流传感器，其输入电压为+12V、-12V，由于传感器的匝数比为 1:2000，所以测量电阻选 2k 欧姆。

5.3.3 MOSFET 驱动电路设计

由于FPGA输出的PWM信号功率和电压均不能满足MOSFET的驱动条件，所以PWM需接功放电路驱动MOSFET。本实验的驱动电路选用带电源的互补对称电路作为功放电路，前面一级为共射极放大电路，它的作用是升压。12V电源由太阳能电池板提供，由于太阳能电池板的电压为动态不稳定电压，所以本实验采用LM2576稳压后给功放电路供电，功放驱动电路如图5-9所示。

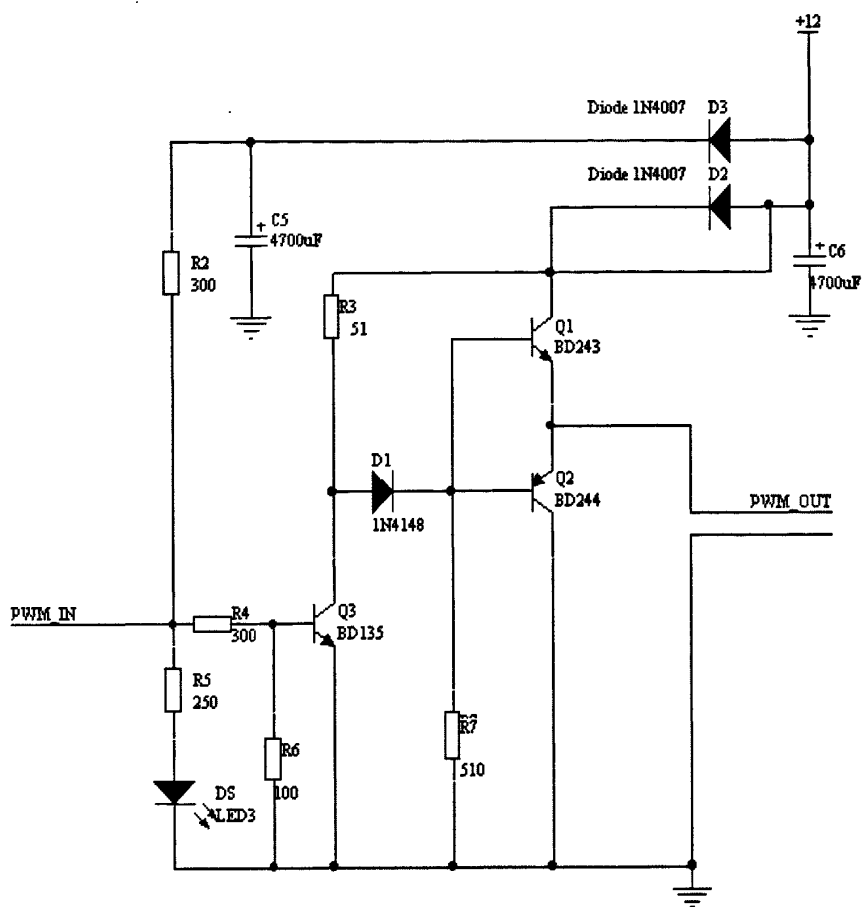


图 5-9 MOSFET 功放驱动电路

第六章 实验总结与结论

6.1 实验内容及实验步骤

本实验是在室外条件下,实验时间是在上午 11 点,天气晴,光照 900lux,室外温度 28° C 左右。

1. 本文采用了天津德普太阳能的单晶硅电池板,电池板的参数如下:

电池板容量:90W,开路电压:22V,短路电流: 6.02A,最大功率点输出电压:17.5V,最大功率点输出电流: 5.4A。

2. 整个实验电路包括Buck-Boost型电路和MOSFET驱动电路,以及电压电流采样电路、FPGA核心控制板,负载选用大功率的电阻器,配合使用示波器的波形进行观测。

3. 实验步骤如下:

1) 图6-1和图6-2为实验电路图。用不同薄厚程度的纸覆盖太阳能电池板,在不同遮阴条件下(900lux、850lux、750lux、650lux)通过自调整模糊MPPT控制系统对光伏电池控制,测量其稳定在最大功率点处时的PWM占空比。光伏控制系统通过AD0809对电压、电流进行采样,然后输入FPGA中,经过FPGA的MPPT控制程序输出PWM波,PWM信号通过信号驱动放大电路控制Buck-Boost电路的MOSFET的开关动作,对其工作电压调节,使光伏电池工作在在最大功率点。

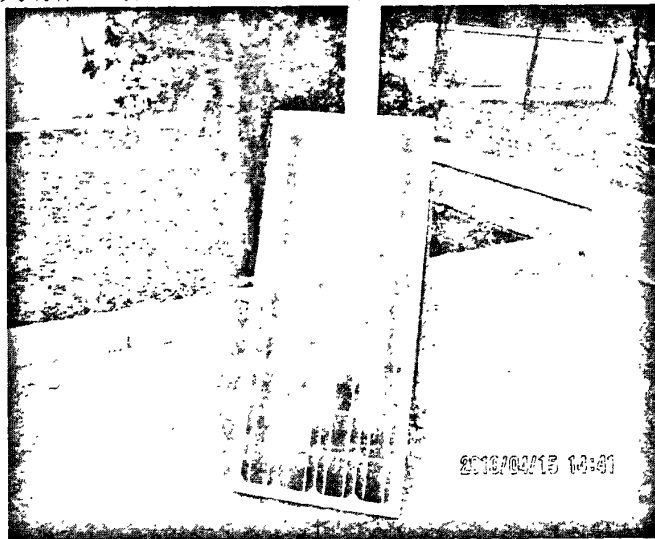


图 6-1 太阳能电池板

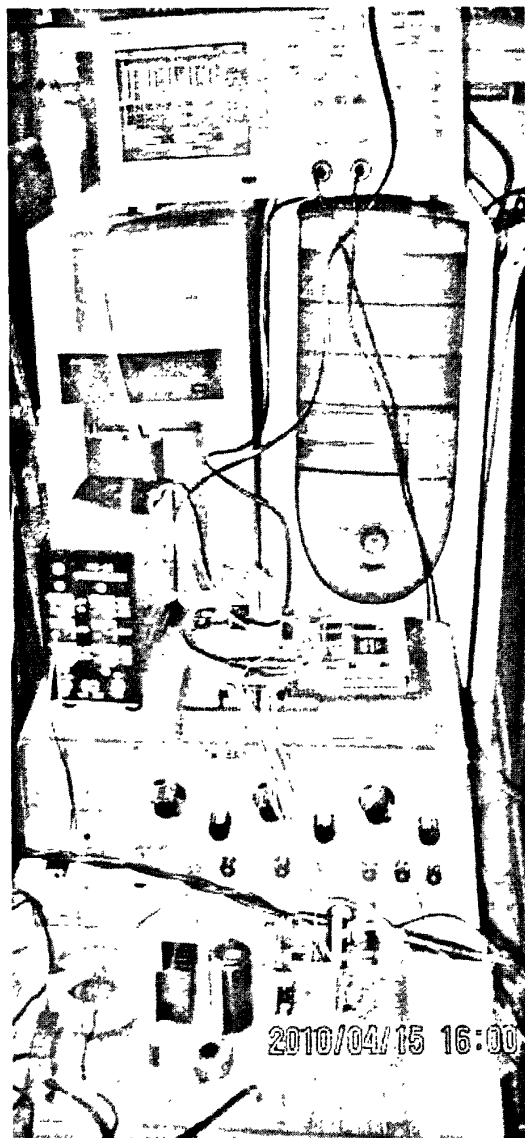


图 6-2 自调整模糊 MPPT 控制系统

2) 在全光照情况 (900lux) 下分别采用自调整模糊控制算法和扰动观察法对太阳能板进行实验, 测量在不同控制算法下的工作电流和电压, 计算太阳能电池的输出功率。

6.2 实验数据与结论

通过自调整模糊 MPPT 控制器控制太阳能电池板在不同光照强度下的工作, 从示波器可以看出光伏电池在不同光照强度下工作在最大功率点时, PWM 的占空比不同, 如图 6-3 所示。图 (a) 为光照强度为 900lux 时的 PWM 波形, 图 (b)

为光照强度为 750lux 时的 PWM 波形。

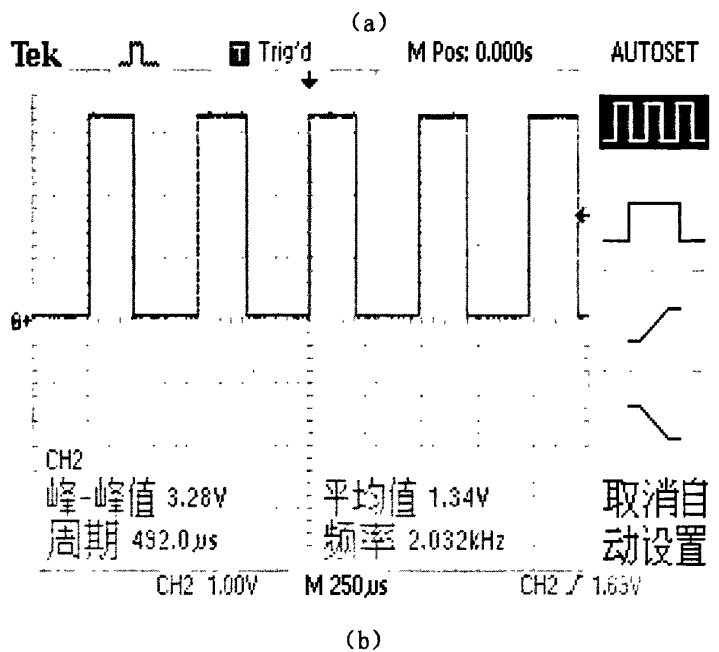
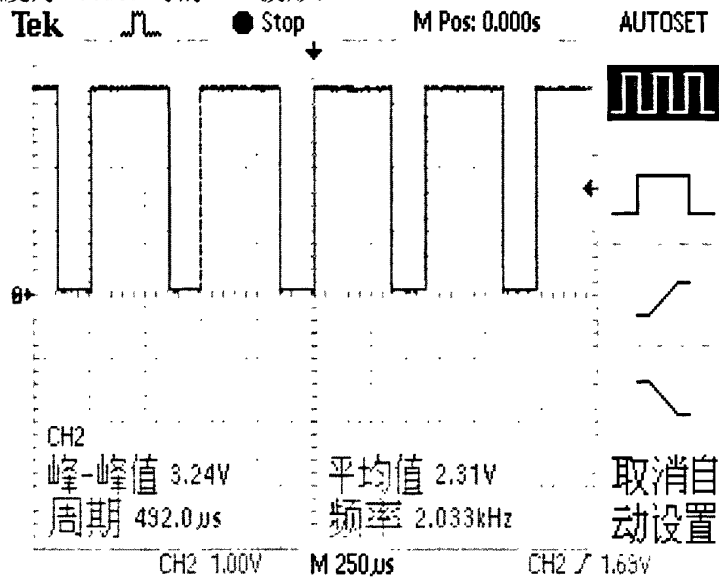
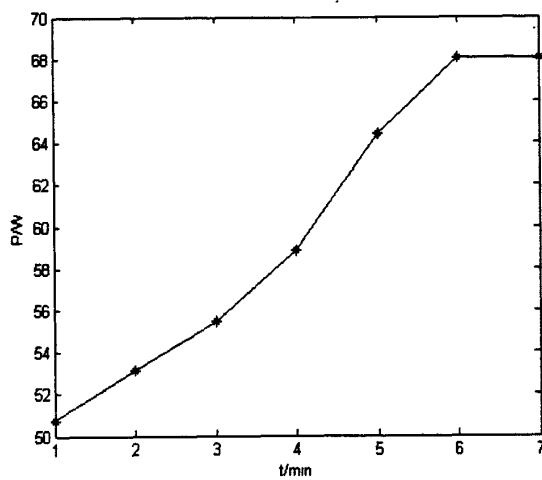
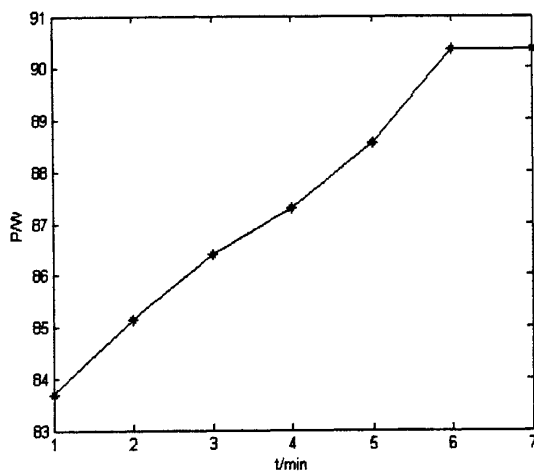


图 6-3 实测示波器波形图

图 6-4 所示为光伏电池输出的功率曲线，纵坐标为输出功率，横坐标为采样时间，图 (a) 为光照强度为 750lux 时的输出功率，图 (b) 为光照强度为 900lux 时的输出功率。从图中可以看出，太阳能电池输出功率在最大功率跟踪过程中不断上升，最后稳定在一个较大功率点，表明控制电路根据采样电流和电压值对太阳能系统进行了控制，使光伏电池在不同光照强度下达到最大功率点。



(a)



(b)

图 6-4 光伏电池输出功率曲线

在同样光照温度条件下，采用两种控制方法 P&O 法和自调整模糊 MPPT 控制法，通过实验比较我们得出以下数据如表 6-1 所示：

表 6-1 实验数据

光 照 强 度 (lux)	用 P&O 法输出 电流 (A)	自调整模糊 MPPT 电流 (A)	提高效率
650	2.44	3.02	19.2%
750	3.16	3.78	16.4%
850	3.98	4.56	12.7%
900	4.67	5.12	8.79%

从以上数据我们可以看出：在光照强度和温度条件一定时，自调整模糊 MPPT 控制算法比 P&O 法的输出电流大，输出电压基本不变，提高了太阳能电池的发电效率，而且在光照强度较弱时自适应模糊 MPPT 算法提高效率越高，因此用这种方法实现的控制器对环境条件的要求不高，这极大的提高了它的应用范围。

第七章 工作总结与展望

7.1 工作总结

本文主要研究内容是用 FPGA 实现了一种自调整模糊 MPPT 算法,主要解决了光伏太阳能电池由于光照和温度的影响呈现非线性特性,在环境变化时传统的控制方法适应环境变化能力差、控制失效等问题。本文用 FPGA 实现的算法具有跟踪速度快适应环境变化能力强等优点,而且结合了 FPGA 速度快,可综合等优点,为光伏太阳能控制系统的 SoC 设计奠定了基础。

全文的主要内容有:

1. 通过查阅书籍和论文,了解了太阳能光伏发电系统的国内外发展现状,以及光伏发电产业面临的问题,学习了太阳能电池的原理和光伏发电系统的分类和应用,以及MPPT的原理和基本算法。展望了国内外光伏发电系统的发展趋势,我国光伏产业亟需解决的问题。
2. 本文主要对太阳能电池发电原理进行了介绍,引入了光伏电池的最大功率点跟踪概念,对光照温度变化时光伏电池的特性进行了详细全面的分析,并且比较了国内外关于传统MPPT的算法的优缺点。
3. 分析了现有算法存在的问题和一些不足。从而引入了一种改进的模糊算法——自调整模糊算法,分析了算法特点、和其他算法相比具有的优势,以及该算法的应用特点,在Matlab/Simulink中搭建了光伏发电系统的仿真模型,包括太阳能电池模块、DC-DC变换器模块、P&O法控制模块及自调整模糊算法模块。实验证明自调整模糊控制较P&O法具有良好的动态和静态性能。
4. 针对 FPGA 的特点研究了算法在实现过程中的困难并提出了相应的解决方案,编写了完整的控制系统设计程序。用实验构建了太阳能储能控制系统,控制系统包括太阳能电池板、MPPT 核心控制板、PWM 功放电路、Buck-Boost 变换器、大功率负载电位器。用实验验证了自调整模糊控制模块比 P&O 法能更好的使太阳能电池工作在最大功率点,极大的提高了太阳能电池板的转化效率。

7.2 展望

本论文研究的模糊自调整最大功率点跟踪控制,以及如何在FPGA上实现其

算法的应用。

但是,本文还有许多内容未达到完善之处,未来还有很多方面需要继续深入研究:

1. 控制系统的SoC设计

SoC设计是系统级设计的发展趋势,本文用FPGA实现了自调整模糊控制算法,是SoC设计的前端设计,并没有实现后端的版图设计及流片,因此要实现后端的设计还需要逻辑综合、门级验证及布局布线等后端设计方法。

2. 自调整模糊控制改进方法的研究

由于本文研究的自调整模糊控制算法是一种简单的自适应模糊控制算法,也属于偏差滞后控制,这样在调整过程中存在功率损耗,模型参考自适应控制能较好的解决这种问题,因为模型是通过经验数据用神经网络预测出的最大功率点,这样就能在偏差出现之前提前使太阳能电池板工作在最大功率点处,防患于未然。

3. 硬件DC-DC电路的完善

由于实验室条件及时间有限,DC-DC电路的负载并不是在任意条件下都能等效为无损电阻,开关电路也不是软开关电路,这样就加大了DC-DC电路上的功率损耗,因此要尽可能减小硬件电路上的功率损耗还有很多的工作要做。

参考文献

- [1] 张耀明, 中国太阳能光伏发电产业的现状与前景, 能源研究与利用, 2007, (1): 1~6
- [2] 李申生, 世界范围的常规能源危机, 太阳能学报, 2003, 53 (2): 15~19
- [3] 钱伯章, 国际可再生能源最新动态, 中国建设动态, 2007, 67 (4): 59~66
- [4] 常边疆, 世界各国重视推广太阳能利用技术, 广西节能, 2006, 34 (2): 17~18
- [5] 郭廷杰, 吕应运, 依法促进可再生能源加速发展的探讨, 能源政策研究, 2006, 23 (5): 44~48
- [6] 黄亚平, 太阳能光伏发电研究现状与发展前景探讨, 广东白云学院学报, 2007, 14 (2): 113~118
- [7] 黄宝圣, 太阳能电池的新进展, 化学教育, 2002, (7,8): 7~9
- [8] 汪建军, 刘金霞, 太阳能电池及材料研究和发展现状, 浙江万里学院学报, 2006, 19 (5): 73~74
- [9] 梁宗存, 沈辉, 李骖洪, 太阳能电池研究进展, 能源工程, 2000, (4): 8~11
- [10] 陆维德, 太阳能利用技术发展趋势评述, 世界科技研究与发展, 2007, 29 (1): 95~99
- [11] 邵翠平, 我国太阳能光伏发电现状及发展趋势, 科技信息, 2008, (23): 41~42
- [12] 苏建徽, 余世杰, 赵为等, 硅太阳电池工程用数学模型, 太阳能学报, 2001, 22 (4): 9~12
- [13] 吴忠军, 刘国海, 廖志凌, 硅太阳电池用数学模型参数的优化设计, 电源技术, 2007, 31 (11): 897~901
- [14] 翟载腾, 程晓舫, 杨臧健等, 太阳电池一般电流模型参数的解析解, 太阳能学报, 2009, 30 (8): 1078~1082
- [15] 孙园园, 肖华锋, 谢少军, 太阳能电池工程简化模型的参数求取和验证, 电力电子技术, 2009, 43 (6): 43~46

- [16] 孙韵琳, 并网光伏发电系统的计算机辅助设计, 硕士学位论文, 中山大学, 2009
- [17] 曹伟, 基于 DSP 的数字光伏模拟器的研究, 硕士学位论文, 合肥工业大学, 2009
- [18] 项若轩, 智能光伏充电控制系统的研究, 硕士学位论文, 合肥工业大学, 2009
- [19] 瞿晓丽, 光伏阵列 I-V 特性曲线测试设备研究, 硕士学位论文, 合肥工业大学, 2009
- [20] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽, 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型, 系统仿真学报, 2005, 17 (5): 1248~1251
- [21] 赵颖, 独立运行光伏发电系统的研究, 硕士学位论文, 大连理工大学, 2009
- [22] 石季英, 杨亮, 吴俊昭等, 软开关 Boost 变换器的精确数学建模与混沌仿真, 计算机仿真, 2003, 20 (11): 35~38
- [23] 石季英, 杨亮, 许光全等, 基于 Z 变换的 PWM Boost 变换器离散建模与混沌仿真, 计算机仿真, 2005, 22 (4): 40~42
- [24] 石季英, 陈宝瓷, 许光全, 小波网络应用于软开关 Buck 电路的研究, 计算机仿真, 2005, 22 (11): 303~306
- [25] 钱平, 金皓, 陈寄炎, 无损耗电阻器的设计方法, 上海应用技术学院学报, 2003, 3 (3): 149~152
- [26] 葛丽芳, 基于固定电压法的太阳能电池 MPPT 控制芯片, 硕士学位论文, 浙江大学, 2008
- [27] 葛丽芳, 吴晓波, 赵梦恋, 基于固定电压法的太阳电池 MPPT 系统, 微电子学, 2008, 38 (5): 703~707
- [28] 龙腾飞, 丁宣浩, 蔡如华, MPPT 的三点比较法与登山法比较分析, 大众科技, 2007, (96): 48~51
- [29] 万军, 胡长生, 基于 AVR 单片机的光伏系统变步长 MPPT 控制, 机械与电子, 2008, (4): 20~22
- [30] 叶满园, 官二勇, 宋平岗, 以电导增量法实现 MPPT 的单级光伏并网逆变器, 电力电子技术, 2006, 40 (2): 30~32
- [31] 叶满园, 电导增量法实现 MPPT 单级并网逆变器的仿真研究, 防爆电机, 2006, 41 (2): 32~35

- [32] 巩长忠, 基于 T-S 模糊模型的控制方法及稳定型分析, 博士学位论文, 大连理工大学, 2003
- [33] 佟绍成, 非线性系统的自适应模糊控制, 北京: 科学出版社, 2006, 1~249
- [34] 佟绍成, 王涛, 王艳平等, 模糊控制系统的设计及稳定性分析, 北京: 科学出版社, 2004, 1~312
- [35] 武立军, 带调整因子的模糊控制器的仿真研究, 硕士学位论文, 辽宁工程技术大学, 2003
- [36] Tsai-Fu Wu, Chien-Hsuan Chang, Yu-Kai Chen, A Fuzzy-Logic-Controlled Single-Stage Converter for PV-Powered Lighting System Applications, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2000, 47(2): 287~296
- [37] N.Patcharaprakiti, S.Premrudeepreechacharn, Maximum Power Point Tracking Using Adaptive Fuzzy Logic Control for Grid-Connected Photovoltaic System, IEEE, 2002: 372~377
- [38] Guang Feng, Wangfeng Zhang, Yan-Fei Liu, A New Adaptive Fuzzy Control Method for DC-to-DC Converter, IEEE, 2002: 1208~1213

发表论文和科研情况说明

已完成的论文:

[1] Ze Cheng, Hongzhi Yang, Ying Sun, FPGA-based PV systems fuzzy MPPT control algorithm, the 7th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2010 (已录用)

[2] The FPGA design of Self-adjusting Fuzzy MPPT PV system control (已投稿)

参与的科研项目:

天津市科技支撑重点项目 (09ZCGYGX01100), 本文属该项目的前端设计部分

致 谢

本论文的工作是在我的导师程泽副教授的悉心指导下完成的,程泽老师不仅在专业技术和工作方法上教会我很多,而且在做人做事以及为人处事方面更是教会了我很多东西,这些经验让我受益终生。不仅如此,老师还细心地关注我生活上遇到的困难以及在未来工作上给予了精心的指导,每天和老师的讨论和交流观点的过程也使我受益匪浅。正是在程泽老师的信任、教导和关心下,我顺利的完成了两年的研究生学习生活,在此衷心感谢两年来程泽老师对我的关心和指导。

同时,栗昭师兄对于我的 FPGA 学习和科研工作都给与了很多指导,提出了许多的宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

在实验室工作及撰写论文期间,钟丹师妹、孙颖师妹和张广朋师弟给与了我很大的帮助,对于课题的完成做了大量的工作。在科研工作中遇到了很多的问题,但是我们每天都会对这些问题进行讨论、思考、查阅资料,每天都有新的进展,渐渐的科研的过程成为了一种快乐,也积累了深厚的友谊,在此向他们表达我的感激之情。还要感谢实验室的闫法彬、庞志超、李兵峰等人对我的帮助。

另外也感谢父母,他们的无私的奉献和生活上的呵护,使我能够在学校专心完成我的学业。