

基于 DSP 的 DC-DC 变换器及其信息化控制研究

郭年龙¹ 张利军² 刘一儒²
GUO Nianlong ZHANG Lijun LIU Yiru

摘要

为满足光伏储能等系统中对高效、智能、可通信电源转换设备的需求,文章设计了一种基于 TMS320F28335 DSP 控制器的 DC-DC 变换器智能控制系统。该系统以 Buck-Boost 拓扑为基础,利用 DSP 芯片的 ePWM 模块实现变换器主功率开关的精准驱动,实现输出电压的实时稳定控制。在此基础上,引入 RS485 通信模块和 OLED 显示模块,实现了参数配置、运行状态监控等信息化功能。为了进一步优化控制性能,在传统 PI 控制基础上尝试引入模糊 PID 算法以增强动态响应能力和稳态精度,并通过仿真与实验验证其优越性。系统在多种工况下测试结果表明,该控制方案具有良好的动态响应特性、较小的输出波动与高达 93% 以上的转换效率,适用于分布式能源、工业电源等场合。

关键词

DC-DC 变换器; DSP 控制; 信息化功能; 模糊 PID 算法

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.11.024

0 引言

在全球能源短缺的大背景下,以太阳能为代表的新能源发展迅猛。DC-DC 变换器在光伏、储能、电动车等领域应用广泛,发挥着关键作用。传统的 STM32 等控制器在高速、精度和接口能力方面存在限制,难以满足复杂需求。引入 TMS320F28335 等 DSP 控制器优势显著,其具备多通道 PWM、高精度 ADC、丰富通信接口等特性^[1]。因此,结合 DSP 与智能信息化的 DC-DC 控制系统设计目标应运而生,旨在提升太阳能路灯电源等系统的性能,加强能源供应安全,促进可持续发展。

1 系统总体设计

本文针对输入电压变化较大的应用场景,基于对 DC-DC 变换器拓扑结构的分析,选用 Buck-Boost 电路以实现灵活的升降压调节功能,为后续高效稳定的直流输出提供保障。系统采用 TMS320F28335 DSP 作为核心控制器,充分利用其强大的 ePWM 模块、多路 ADC 通道和丰富的外设接口,实现对变换器的高精度闭环控制。整体设计包含主控电路、通信与显示电路和 DC-DC 控制电路,各电路协同工作,在确保高效率能量转换的同时,实现智能化控制与信息处理。该设计参考了太阳能路灯电源的架构,并针对 DSP 控制特性进行

优化扩展,具有结构紧凑、功能完善的特点,能满足现代电子系统对绿色能源与智能控制的双重要求^[2]。通过这种模块化设计,系统兼具良好的动态性能和稳定性,为后续功能实现奠定了坚实基础。

2 系统硬件电路设计

为了应对输入电压变化较大的应用场景,设计一个高效、可靠的变换器成为关键。本文以 TMS320F28335 数字芯片为核心,结合通信与显示电路及 DC-DC 控制电路,旨在实现变换器的高精度闭环控制。该设计不仅提升了变换器对输入电压波动的适应能力,还增强了系统对实时信息的智能化控制与处理能力。通过集成先进的控制算法和多种通信接口,系统能够实现灵活地操作和监控,从而满足复杂应用需求。

2.1 DSP 主控电路设计

TMS320F28335 作为核心控制芯片,其在协调系统软硬件工作、保障系统自动控制与调整能力方面发挥关键作用。该芯片属于 TI 公司 C2000 系列,具备 150MIPS 的高性能处理能力,能满足复杂运算需求。其拥有丰富的片上资源,包括 512 kB 的 Flash 存储器与 68 kB 的 RAM 存储器,确保程序存储与数据运行的高效稳定。从外设配置来看,它集成了多个关键模块。ePWM 模块支持 16 位时基计数器,可灵活控制 PWM 输出,实现单边、双边对称或非对称操作,且具备异步覆盖控制、相位控制等功能。12 位精度的 ADC,拥有 16 个通道,能精准采集模拟信号。SCI 模块可实现异步串行通信,便于与其他设备进行数据交互。CAN 模块则提供了

1. 天水师范学院电子信息与电气工程学院 甘肃天水 741000

2. 辽宁工业大学电子与信息工程学院 辽宁锦州 121000

[基金项目] 2023 年甘肃省集成电路制造材料创新联合体项目 (23ZDGE001)

两个接口，每个接口有独立 Rx 和 Tx 引脚，支持多达 32 个邮箱，可有效配置用于数据收发，满足工业通信等场景需求。系统核心控制模块电路图如图 1 所示。

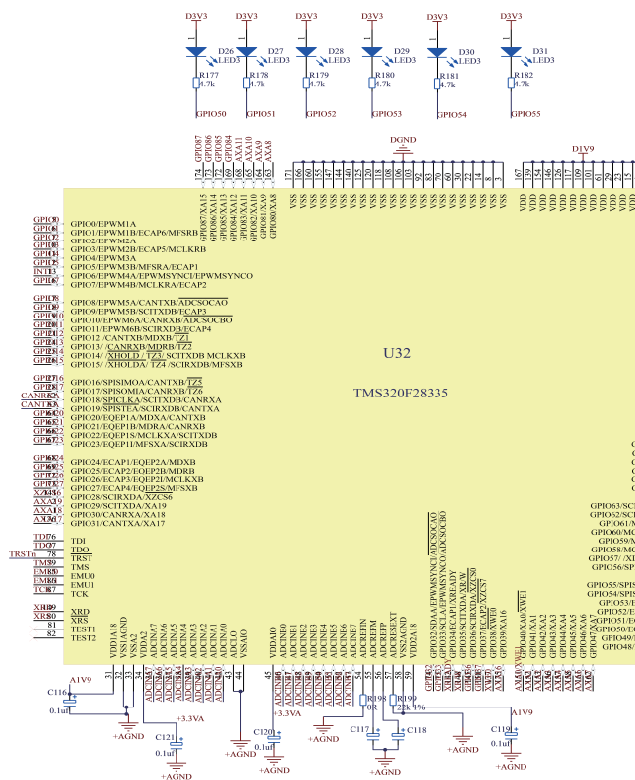


图 1 DSP 主控电路图

2.2 通信与显示电路

系统的通信电路采用 RS-485 芯片，这是一种广泛应用的串行通信标准，专门设计用于长距离和高噪声环境下的数据传输。RS-485 通过差分信号传输，有效减少了噪声干扰，确保了通信的稳定性。此外，支持多节点连接，可以在同一总线上同时连接多台设备，且具有较高的传输速率，适用于多种应用领域。选择 RS-485 芯片作为通信电路的主控芯片，主要因为其高效的传输性能和快速的数据传输能力。在信号传输过程中，确保输出阻抗与负载值的匹配是至关重要的。只有在这种匹配情况下，信号才能保持行波状态，确保正常的通信^[3]。如果不匹配，信号可能会出现反射，影响通信质量。通信电路图如图 2 所示。

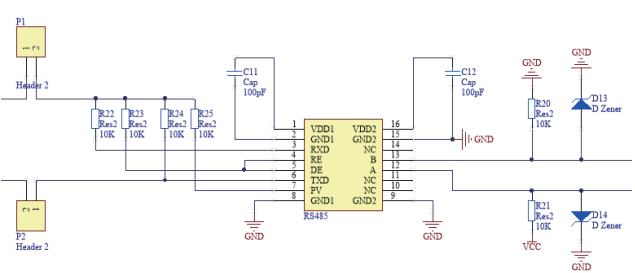


图 2 通信电路图

本系统采用 OLED 显示屏构建人机交互界面，通过 TMS320F28335 DSP 的 I²C 接口实现实时数据显示功能。该显示屏具有高对比度、宽视角的特性，其自发光特性使得在

0.1 mA 的工作电流下即可实现清晰的信息显示，完美契合太阳能供电系统的低功耗需求。系统通过 DSP 内置的 12 位 ADC 模块采集输入 / 输出电压电流参数，经数字滤波处理后，由 DSP 直接驱动 OLED 显示，实现了从数据采集到显示的完整信息化控制链路。硬件设计上，通过配置 BS0/BS2 接地、BS1 接 VCC 的方式激活 I²C 模式，同时利用 DSP 的 GPIO 口控制 RST 复位信号，确保显示模块的可靠初始化。实际测试表明，该显示系统响应时间小于 2 ms，刷新率达 60 Hz，为 DC-DC 变换器的运行状态监测提供了高效的可视化解决方案。显示电路如图 3 所示。

2.3 DC-DC 控制电路

本研究针对太阳能光伏发电系统输出电压不稳定的特点，设计了一种基于 DSP 控制的 Buck-Boost 变换器。该变换器采用同步整流技术，通过低导通电阻 MOSFET 替代传统二极管，显著降低了整流损耗，并消除了二极管的死区电压问题^[3]。

系统采用全桥拓扑结构，由 TMS320F28335 DSP 产生 PWM 控制信号，实现智能化的动态升降压控制：当输入电压低于设定值时自动切换至 Boost 升压模式，通过电感储能提升电压；当输入过高时则转为 Buck 降压模式。实验结果表明，该设计具有高效率、低发热和快速动态响应等优势，能确保 12 V 锂电池在各种工况下的高效充放电。结合信息化控制系统，实现了运行参数的实时监测与远程传输，为新能源发电系统提供了可靠的电源解决方案^[5]。环境监测等低功耗物联网终端。DC-DC 控制电路如图 4 所示。

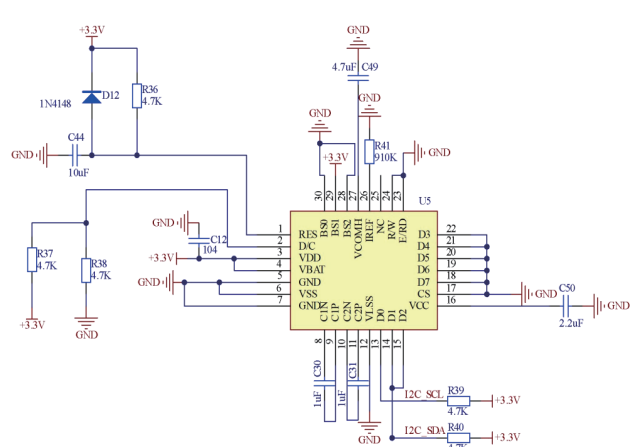


图 3 显示电路

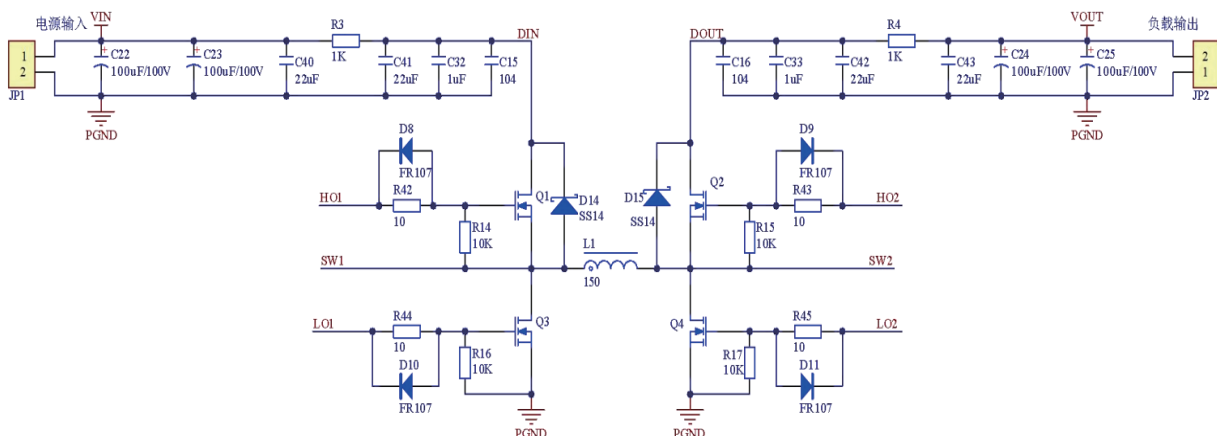


图 4 DC-DC 控制电路

3 软件设计与信息化实现

3.1 PID 算法优化

模糊 PID 算法是传统 PID 控制与模糊逻辑相结合的智能控制方法。它通过模糊推理规则动态调整 PID 参数，无需依赖精确的数学模型，能够自适应地处理非线性、时变或不确定性系统。相比传统 PID 的固定参数模式，模糊 PID 具备更强的环境适应性和抗干扰能力，特别适用于复杂工况下的精确控制需求^[6]。传统 PID 算法与模糊 PID 算法的输出电压对比结果如图 5 所示。

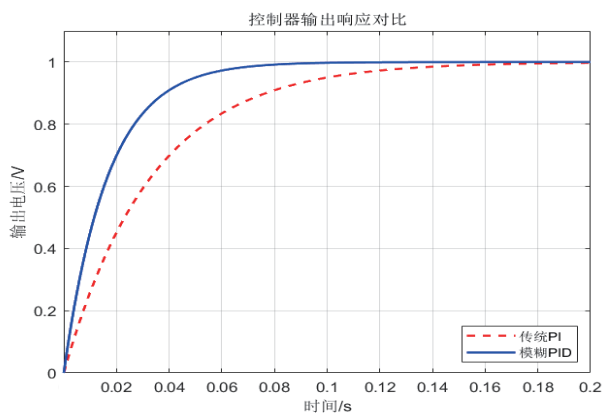


图 5 传统 PID 与模糊 PID 输出电压对比图

3.2 ePWM 程序设计

本系统采用 TI 公司 TMS320F28335 DSP 芯片作为主控制器，其内置的 ePWM 模块具备多个独立通道、双边对称计数模式、死区时间控制、触发 ADC 等功能，适合高频 DC-DC 变换器的精确控制需求。通过配置 ePWM1A/1B 通道输出互补 PWM 信号，驱动主功率 MOSFET 进行开关调制控制，从而实现升压或降压控制。ePWM 与 PWM 对比结果如表 1 所示。

表 1 ePWM 与 PWM 对比结果

功能	ePWM (DSP)	传统 PWM (STM32)
死区控制	硬件自动生成，可编程死区 (ns 级精度)	需软件计算或依赖高级定时器
同步机制	多模块硬件同步 (相位对齐)	需外部触发或主从模式配置
死区时间	支持高分辨率 (150ps 级 HRPWM)	通常受限于定时器时钟 (ns 级)
ADC 采样	硬件直接触发	需额外配置定时器触发事件
占空比调节	硬件级故障快速响应 (<100 ns)	依赖中断处理 (微秒级延迟)

3.3 信息显示与交互

为实现系统运行状态的可视化与人机交互，本文设计了基于 OLED 显示模块的信息交互系统。系统采用 I^2C 通信方式实现与 OLED 屏的数据传输，同时支持通过串口 / 按键输入进行模式切换与参数配置^[7]。显示模块可以更直观地提供准确的实时数据，便于观测和及时修改错误点，提高了使用者的使用效率。信息显示与交互系统的软件控制流程图如图 6 所示。



图 6 信息显示与交互系统控制流程图

4 仿真与实验验证

4.1 DCDC 电路测试

在本系统中，DC-DC 变换器采用 Buck-Boost 拓扑结构，控制功能由 DSP 主控芯片直接实现。TMS320F28335 的 ePWM 模块输出 PWM 波形信号，直接接入 MOS 管栅极控制端，从而实现对主功率开关器件的导通与关断控制^[8]。

测试中，输入端通过可调直流电源提供 20 V 模拟光照输入电压，经过 Buck-Boost 电路调节后，输出端电压稳定在 12 V 左右，为锂电池提供恒压充电。在充电过程中，系统对充电电压与电流进行实时采样，并通过 OLED 模块进行数值显示，为用户提供直观的运行状态反馈。同时，该采样结果也可作为判断是否进入充满、电流截止等状态的依据。此外，系统在升压状态下直接为恒阻负载供电，经调节后输出电压稳定在 29.96 V。万用表测量表明，系统输出电压与设定值偏差较小，波动范围控制在 ± 0.1 V 以内，说明控制系统具备良好的电压调节精度与稳定性。DC-DC 电路测试结果如图 7 所示。

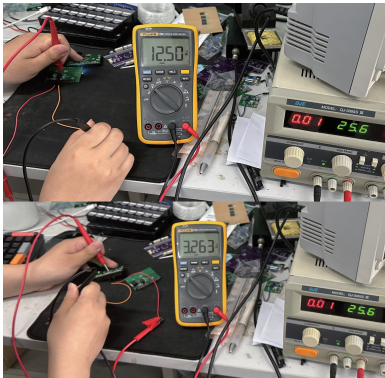


图 7 DC-DC 电路测试图

4.2 ePWM 输出测试

为验证系统对负载突变的适应性，在 1 ms 时将负载从 10 Ω 跳变至 5 Ω ，模拟突发性负载增大场景。ePWM 驱动波形如图 8 所示。

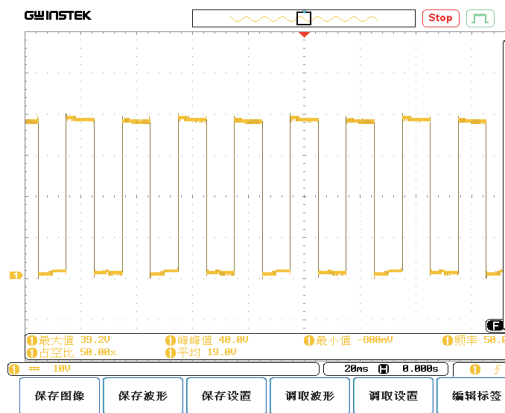


图 8 ePWM 驱动波形图

4.3 通信与显示测试

本系统采用 TMS320F28335 DSP 作为主控芯片，通过测试，我们可以看到 OLED 显示板上实时显示了输出电压 30.09 V、输入电流 3.041 A 和输入电压 11.52 V 等数值。这些数据通过通信电路中的 RS-485 芯片进行传输，经过显示电路芯片接收后，再由主控芯片处理并返回数据，最终呈现在 OLED 显示屏上。这表明系统能够实现数据采集的及时显示，从而实现智能信息化功能。OLED 显示测试如图 9 所示。

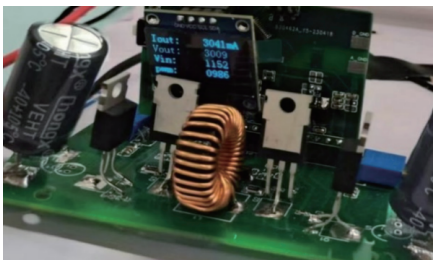


图 9 OLED 显示图

5 结论

本文设计的是基于 DSP 的 DC-DC 变换器，采用 DSP 控制是由于其具有丰富的片上资源，更方便于工业通信；DC-DC 变换部分采用 Buck-Boost 拓扑降低了整流损耗，消除了二极管死区电压问题；软件部分采用 ePWM 和模糊 PID 控制，使电路具备更高的环境适应能力和抗干扰能力。通过测试可以看出当输入 12 V 电压时，输出电压稳定在 30 V，输出电流在 5 A，可以证明系统效率高。通信与显示电路也可以及时获取并显示信息，实现了智能信息化的控制。验证了实验具有可靠性和优越性，证明系统适用于分布式能源、工业电源等场合。

参考文献：

- [1] 沈朝阳,于灵芝,戚志东,等.基于二次型结构的耦合电感 DC/DC 变换器 [J]. 电力电子技术,2025,59(3):104-106.
- [2] 魏丽君,李小霞.基于 STM32 的锂电池充放电系统的研究与设计 [J]. 计算机测量与控制,2020,28(11): 222-226.
- [3] 程红丽,贾龙飞.Buck 变换器的数字电流滞环控制策略的改进 [J]. 电子科技大学学报,2017,46(6):812-818.
- [4] 罗进,徐笑娟,沐扣晓,等.蓄电池充放电用大功率 PWM 变流器的研制 [J]. 电力电子技术,2018,52(1):8-10.
- [5] 刘嘉宜.基于动力电池生产过程中储能装置的恒流充放电系统研究 [D]. 西安:长安大学,2023.
- [6] 高梦真.峰值电流模 Buck DC/DC 研究与设计 [D]. 沈阳:沈阳工业大学,2024.
- [7] 王晶,王泉策,柴媛,等.混合动力机车双向 DCDC 充放电装置研究 [J]. 电子制作,2023,31(6):44-48.
- [8] 吴彤.基于 DSP 控制的移相全桥 ZVS 变换器研究与设计 [D]. 南京:南京理工大学,2014.

【作者简介】

郭年龙(2000—)，男，辽宁鞍山人，硕士，研究方向：电力电子技术及其应用。

张利军(1978—)，男，甘肃陇南人，硕士，研究方向：电力电子技术及其应用。

刘一儒(2000—)，女，辽宁辽阳人，硕士，研究方向：电子与通信技术及其应用。

(收稿日期：2025-05-23 修回日期：2025-11-14)