

一种可编程电源及电子负载实验装置设计

陈 聪¹, 曲 波², 倪 峰³

(1. 江苏航空职业技术学院 航空工程学院, 江苏 镇江 212134; 2. 苏州大学 电子信息学院, 江苏 苏州 215021; 3. 苏州优利卡电子科技有限公司, 江苏 苏州 215000)

摘要: USB PD (USB power delivery) 是新一代高效 USB 充电协议, 为测试支持 USB PD 协议的车载 USB HUB 产品的有效性, 设计了一种带 1 路 5~20 V 可编程电源及 2 路 0~10 A 可编程电子负载的实验装置。可编程电源模块基于电压控制型 Buck 电路原理设计, 利用可调恒流源电路实现可编程电压输出, 并设计了环路补偿, 提升输出稳定性; 可编程电子负载模块采用 MOS 管、运放搭建, 电路结构简单灵活。特性测试及实际应用结果表明: 装置输出稳定性高, 噪声扰动误差约 2.7%; 响应速度快, 能在 10 ms 内关断输出、20 ms 内恢复输出; 实时采集测试数据, 满足车载 USB HUB 产品测试需求, 可推广应用到其他同类产品测试中。

关键词: USB PD; 可编程电源; 可编程电子负载; 环路补偿

中图分类号: TP23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-4956(2025)01-0198-07

随着技术的发展, 车载 USB Type-A 接口逐步被取代, 支持电源传输 (power delivery, PD) 协议的车载 USB Type-C 接口输出功率已高达 100 W, 并配备相应 USB HUB 设备^[1]。在不影响充电效率及可靠性的前提下, 车载 USB HUB 设备可提供动态负载共享, 智能分配多台设备的充电功率, 实现电力高效传输^[2-3]。关于开关电源环路补偿及稳定性控制的研究较多, 如文献[4—5]提出了 Buck 变换器环路补偿设计, 但针对可编程电源及相关环路设计的研究较少。对电子负载的研究多限定在特定环境, 如文献[6]设计的高压小电流电子负载、文献[7]设计的大电阻新型负载、文献[8]设计的用于 DCS 电源测试的电子负载等, 相关研究与车载应用场景不符, 不能满足相关企业需求。为验证支持 PD 协议的车载 USB Type-C HUB 设备, 本文设计了一种带 1 路 5~20 V 可编程电源和 2 路 0~10 A 可编程电子负载的实验装置。

1 总体设计

实验装置提供可调电源给待测 USB HUB 产品, 待测产品多个 USB 输出端口连接多路可编程电子负载模块, 设定不同输出电压及负载值测试待测产品性能。实验装置由核心处理器模块、可编程电源模块、可编程电子负载模块构成。为确保工作可靠性,

所有模块独立设计, 均内置处理器并分开布置电源和地信号。可编程电源模块及电子负载模块采集的电压、电流数据通过 UART 串口传输给核心处理器模块, 并通过 I/O 端口传输模块状态信息。同时, 核心处理器模块通过 UART 串口给可编程电源模块及电子负载模块发送控制指令。测试指令由上位机发送, 上位机和核心处理器模块之间通过以太网通信。Type-C 数据通信板卡用于测试产品数据传输情况, 与实验装置之间通过 CAN 总线通信。装置模块及通信框图如图 1 所示。

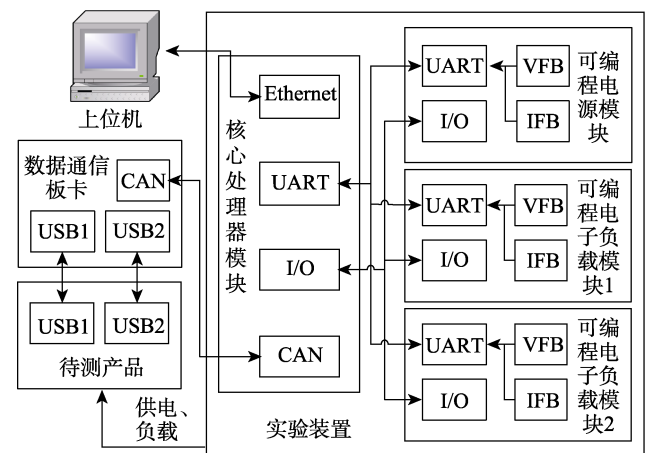


图 1 装置模块及通信框图

收稿日期: 2024-08-02 修改日期: 2024-09-16

基金项目: 江苏省高职院校教师企业实践培训项目 (2024QYSJ121); 江苏省高校哲学社会科学一般项目 (2024SJJYB1671)

作者简介: 陈聪 (1987—), 女, 江苏镇江, 硕士, 讲师, 主要研究方向为嵌入式系统应用, 307556158@qq.com。

引文格式: 陈聪, 曲波, 倪峰. 一种可编程电源及电子负载实验装置设计[J]. 实验技术与管理, 2025, 42(1): 198-204.

Cite this article: CHEN C, QU B, NI F. Design of a programmable power supply and electronic load experimental device[J]. Experimental Technology and Management, 2025, 42(1): 198-204. (in Chinese)

2 模块设计

2.1 核心处理器模块

实验装置采用 24 V 直流电源供电, 每个模块均独立设计电源电路, 在此以核心处理器模块为例说明。TPMP2359 芯片完成+24 V 至+5 V 电压转换, B0505 芯片隔离电源输入端与处理器端电源信号, XC6206 线性稳压器完成+5 V 电压至+3.3 V 电压的转换(图 2), 输入核心处理器模块。

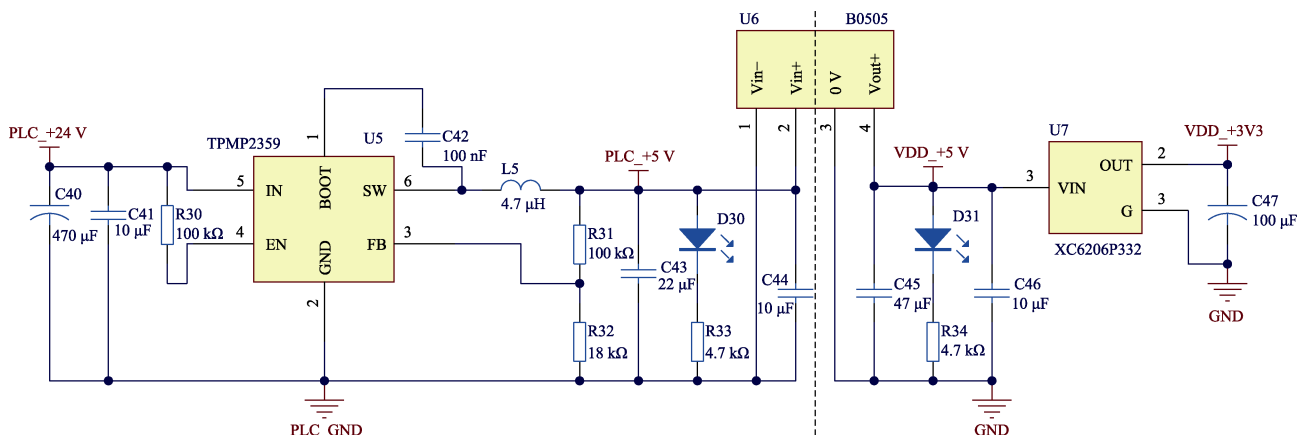


图 2 核心处理器模块电源电路

2.2 可编程电源模块

2.2.1 处理器及电源电路

可编程电源电路处理器选用国民技术 N32G032F8S7 芯片, 该芯片内核为 32 位 ARM Cortex-M0、最高工作主频 48 MHz, 集成了 64 KB Flash、16 KB SRAM 和多

路串行通信接口, 支持可编程互补 PWM 输出, 能满足实验设计需求。因 USB PD 模式下输出功率较大, 为防止电路损坏, 选用数字隔离器 CA-IS3642 芯片, 隔离可编程电源模块与核心处理器模块的电源、通信信号。REF3033 芯片完成+5 V 至 3.3 V 电压转换(图 3)。

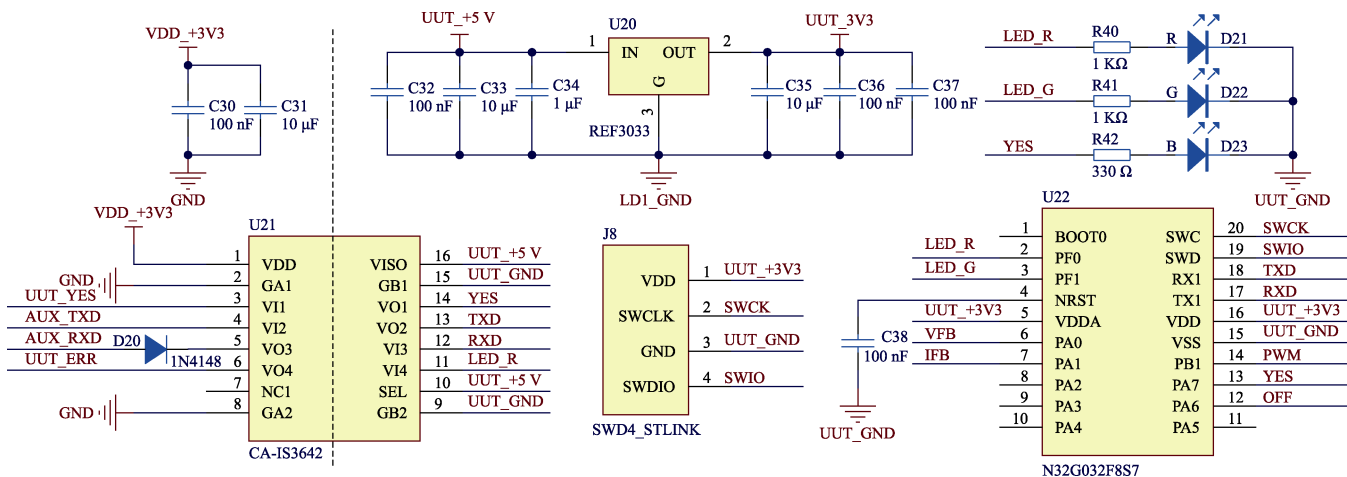


图 3 可编程电源模块处理器及电源电路

2.2.2 主体电路

为保证负载波动条件下输出电压的稳定性, 主体稳压电路基于电压控制型 Buck 电路原理设计。在 Buck 变换器中, 输入电源使用宽输入同步降压控制器芯片 TPS4005XPWP 搭建, 该芯片为可编程的电压模

式控制器(输入电压 8~40 V、固定频率最高 1 MHz)。外围电路由双 MOS 管、肖特基二极管、电感及滤波电容构成, MOS 管选用 N 沟道中压 MOS 管 NCEP60T12A。输出电压通过 10 kΩ 电阻连接到降压控制器 VFB 引脚, 该引脚为芯片内部误差放大器反相

输入端,正常操作时等于内部参考电压 0.7 V。两个 MOS 管 G 极分别连接降压控制器 LDRV 和 HDRV 引脚。引脚 LDRV 为 N 沟道同步整流管的 G 极驱动电压: MOS 管导通时,该引脚为 BP10 引脚电压; MOS 管截止时,电压为 0。引脚 HDRV 用于驱动功率管: MOS 管导通时,该引脚为 BOOST 引脚电压; MOS 管截止时,为 SW 引脚电压^[9]。SW 引脚为主管与同步整流管连接点,用于连接外围电路,并用于过流检测。通过国民技术处理器 I/O 端口驱动 MOS 管连接至引脚 COMP,控制电源输出。

可调恒流源电路将电压控制转换成电流控制,从而实现可编程可调稳压电源输出。恒流源电路由运算放大器和 MOS 管组成。运算放大器选用零漂移、低功耗的芯片 GS8551, MOS 管选用适用于低电流驱动、电源管理的 N 沟道中压 MOS 管 2N7002,数模转换器(DAC)可以控制运算放大器正输入端电压(U_1)。为简化电路设计,采用处理器生成 PWM 波后通过低

通滤波器(RC)模拟 DAC 功能,设计的 PWM 波频率应是 RC 截止频率的 10 倍以上,将 PWM 波频率调整为合适数值,通过国民技术处理器控制占空比,就能得到可调电源模块^[10-12]。因 USB PD 3.0 规范中电源主要配置为 5、9、15、20V,因此控制软件程序,设定可调电压范围为 5~20 V。

输出电压(U_0)经电阻(R92和R93)分压后送至处理器 ADC 输入端口,用于实时测量可调电源数值,INA199A1DCK 芯片检测输出电源电流大小(图 4)。引脚 IN+、IN-分别连接到分流电阻器电源一侧和负载一侧,分流电阻选用耐冲击电流采样电阻(5 m Ω)。引脚 O 为输出电压,通过 1 k Ω 电阻连接至处理器 ADC 输入引脚,用于检测电压,从而计算电流。INA199A1 系列增益为 50 dB,装置设计电子负载最大电流为 10 A,因此电流检测放大器最大输出电压为 2.5 V,满足设计需求。可编程电源模块主体电路如图 4 所示。

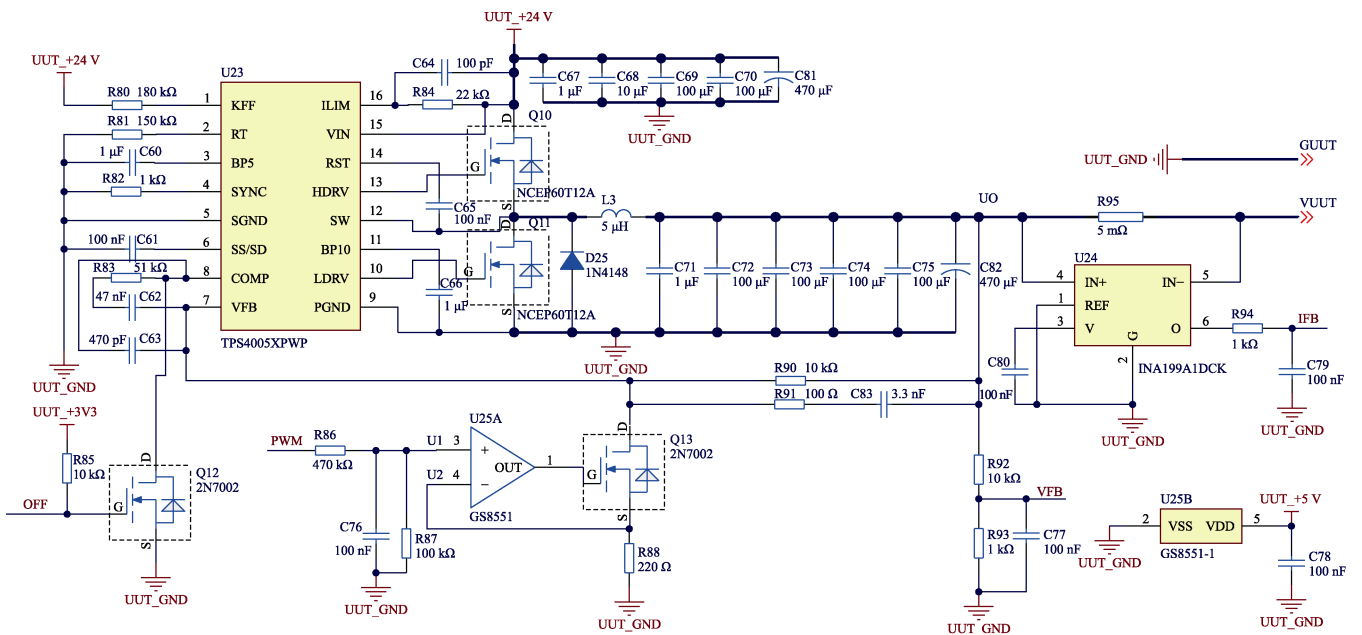


图 4 可编程电源模块主体电路

2.2.3 环路补偿设计

为增加输出电压稳定性,对主体电路进行环路补偿设计,电压模式 BUCK 变换器通常使用 III 型网络进行补偿。通过调整电阻、电容大小,结合 MATLAB 仿真伯德图,确定反馈回路较为合适的电阻、电容选型^[13]。当电阻 R83、R90、R91 分别为 51 k Ω 、10 k Ω 、100 Ω ,电容 C62、C63、C83 分别为 47 nF、470 pF、3.3 nF 时(图 4),系统相位裕度及频宽较为理想,反馈环路伯德图如图 5 所示。

2.3 可编程电子负载电路模块

可编程电子负载处理器与电源电路的设计与 2.2

节可编程电源类似,不再赘述。当栅源电压(U_{GS})大于阈值时,增强型 MOS 管漏源极电流由 U_{GS} 决定,因此,控制 U_{GS} 即能控制输出电流,模拟可变电子负载。MOS 管选用 UF640L,最大漏电流达 18A。主体电路基于误差放大器原理设计。运算放大器选用零漂移、低功耗的芯片 GS8554,芯片内含 4 个运算放大器(图 6)。运算放大器 1 (U10A) 用于构建误差放大器,正端输入参考电压,由处理器生成 PWM 波后通过 RC 低通滤波器模拟实现 DAC 功能,产生参考电压^[14]。通过修改 PWM 波占空比从而修改输入参考电压大小,改变输出电压大小。运算放大器 1 (U10A) 负端通过电阻 R62、

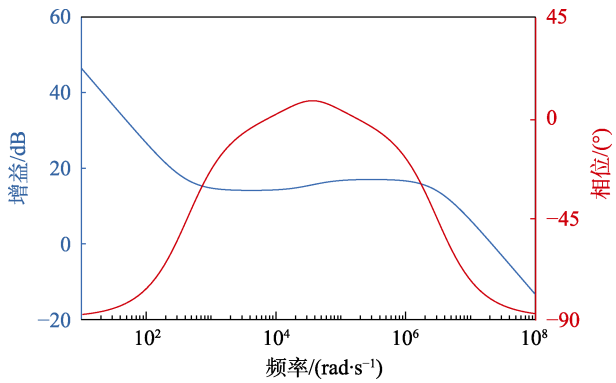


图 5 反馈环路伯德图

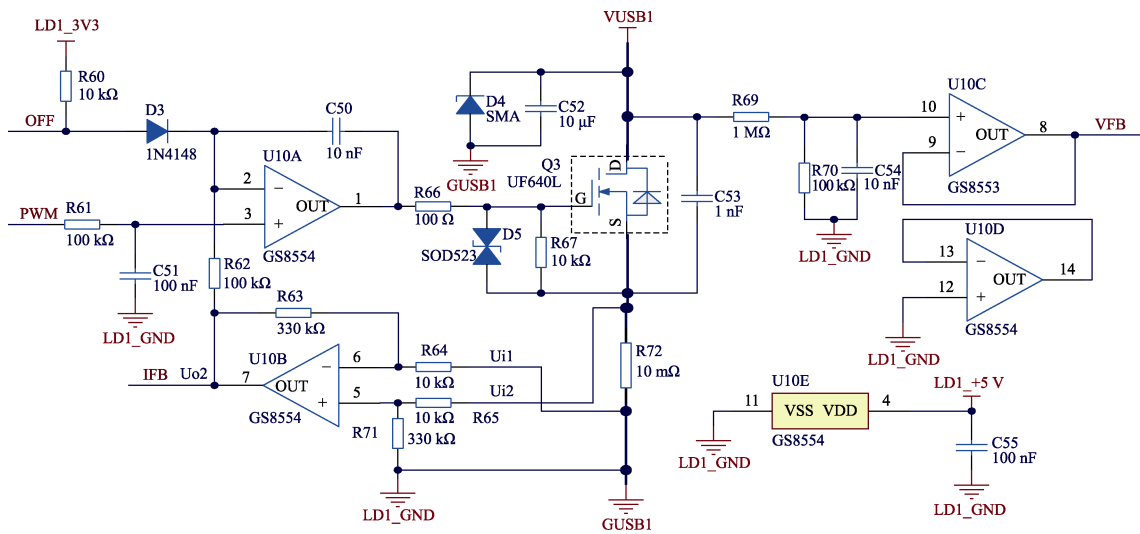


图 6 可编程电子负载模块主体电路

3 特性测试

采用稳压电源、示波器、高精度万用表、可编程直流电子负载对实验装置进行测试。

3.1 稳定特性测试

稳定特性测试是待测产品输入端连接输入电源、输出端连接电子负载,检测输出端电子负载侧电压(VLD)和电流(ILD)。测试时,控制可编程电源输出稳定电压值、可编程电子负载输出稳定电流值,由高精度万用表实时测量。图7为可编程电源输出5V、可编程电子负载输出1A时测量的数值,由图可知负载端能够保持较高的电压、电流稳定度,VLD噪声扰动误差约0.2%,ILD噪声扰动误差约2.7%。

3.2 上升特性测试

上升特性测试是待测产品输入端连接可编程电源,输出端连接可编程电子负载,检测电子负载电流上升到设定值的时间,从而检测装置响应效率。测试时用高精度万用表实时测量电子负载侧电压(VLD)和电流(ILD)(图8),同时用示波器观察变化趋势(图9),示波器中蓝色为待测产品侧输出电压,黄色

运算放大器2(U10B)、电阻R72构成反馈回路,输入参考电压最大为3.3V,因此输出电流最大为10A。通过控制运算放大器1正端参考电压可控制运算放大器2输出端电压(U_{O2}),从而实现对电子负载电流的控制。

运算放大器设置控制信号为“OFF”,当“OFF”为高电平时,运算放大器1(U10A)输出低电平,MOS管关断,电子负载无输出。运算放大器2(U10B)用于检测模块输出电流,输出信号送至处理器的ADC输入端口。运算放大器3(U10C)构建电压跟随器,用于检测输出电压,同样送至处理器的ADC输入端口(图6)。

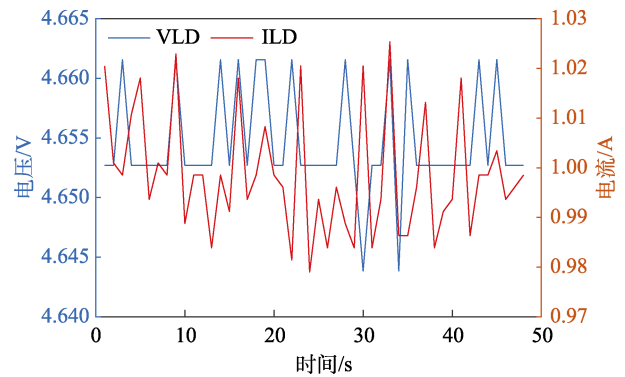


图 7 稳定特性实测值

为电子负载侧电压,在设定输出后,实验装置在20ms内达到稳定的预设值,响应速度较快。

3.3 关断特性测试

关断特性测试是指待测产品进入保护状态时,装置关断和恢复输出的响应特性。当外接负载电流过大时,待测产品会进入过流保护状态。待测产品进入保护状态后,系统应切断输出电压及电子负载输出;待测产品离开保护状态后,系统应恢复输出电压及电子负载输出。测试时用高精度万用表实时测量VLD和

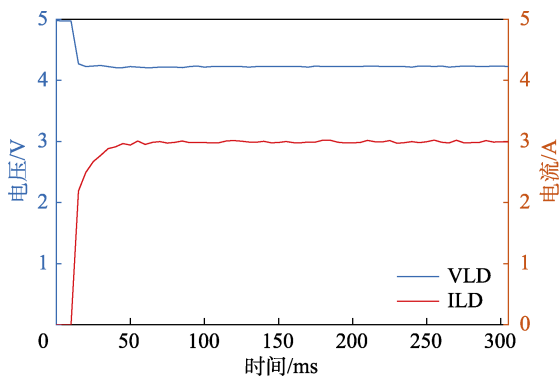


图8 上升特性实测值

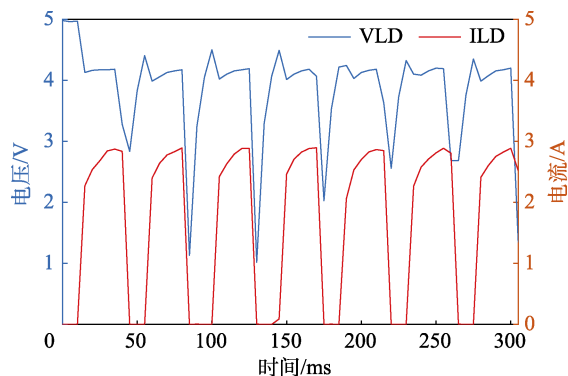


图10 关断特性实测值

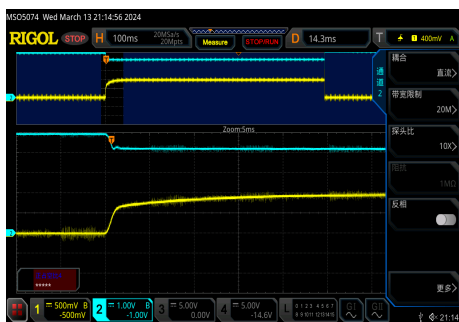


图9 上升特性示波器测试图

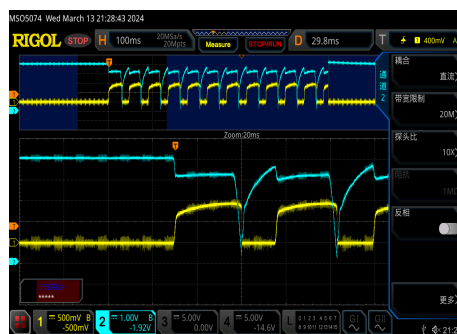


图11 关断特性示波器测试图

ILD 参数, 测量数据如图 10 所示。用示波器观察电压变化趋势, 示波器中蓝色为待测产品侧输出电压, 黄色为电子负载侧电压 (图 11)。实验装置关断时能在 10 ms 内响应关断, 20 ms 内恢复输出, 响应速度快。

3.4 产品性能测试

3.4.1 大功率测试

上位机发送测试命令, 控制可编程电源模块输出 15 V 电压、可编程电子负载模块 2 输出 2 A 电流, 数据通信板卡协定待测产品 USB2 输出 15 V 电压^[15-16]。

通过可编程电源模块 ADC 的电压和电流采集端口分别读取加载到待测产品端输入端的电压 (VBAT) 和电流 (IBAT) 数值, 通过可编程电子负载模块 ADC 的电压和电流采集端口分别读取待测产品输出到单端口 USB2 的电压 (VLD2) 和电流 (ILD2) 数值, 同时用高精度万用表直接测量待测产品输出单端口电压, 因线路有损耗, 实际到达电子负载的电压会略小于直接测量值。测量数据传至上位机并输出测试图 (图 12)。

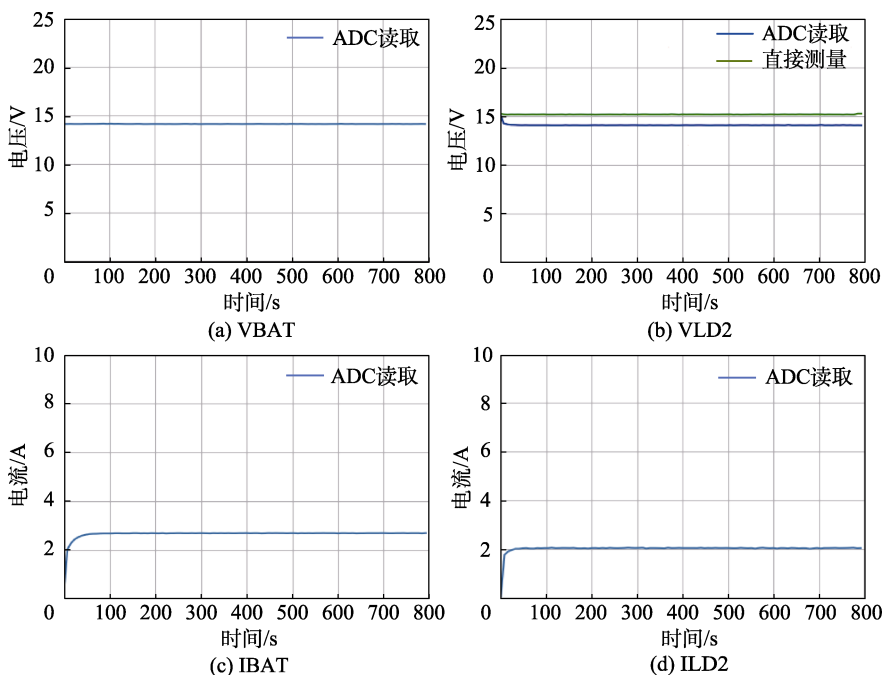


图12 大功率测试

在测试过程中, 产品输出端口电压稳定在 15 V, 负载上的电流稳定在 2 A, 因此实验装置能为待测产品提供稳定的电源、模拟稳定的电子负载。

3.4.2 小功率及保护特性测试

上位机发送测试命令, 控制可编程电源模块输出 15 V 电压、可编程电子负载模块 1 输出 5 A 电流、可编程电子负载模块 2 输出 3 A 电流, 数据通

信板卡协定待测产品双端口输出 5 V 电压。数据测量和测试图绘制和大功率测试一致, 从图 13 可知, 测试过程中, 由于电子负载模块 1 电流过大, 端口 USB1 进入保护状态, 负载上无法获得充电电流, 电子负载模块 2 上能获得稳定的 5 V 电压和 3 A 电流, 实验装置能较好满足产品小功率及保护特性测试。

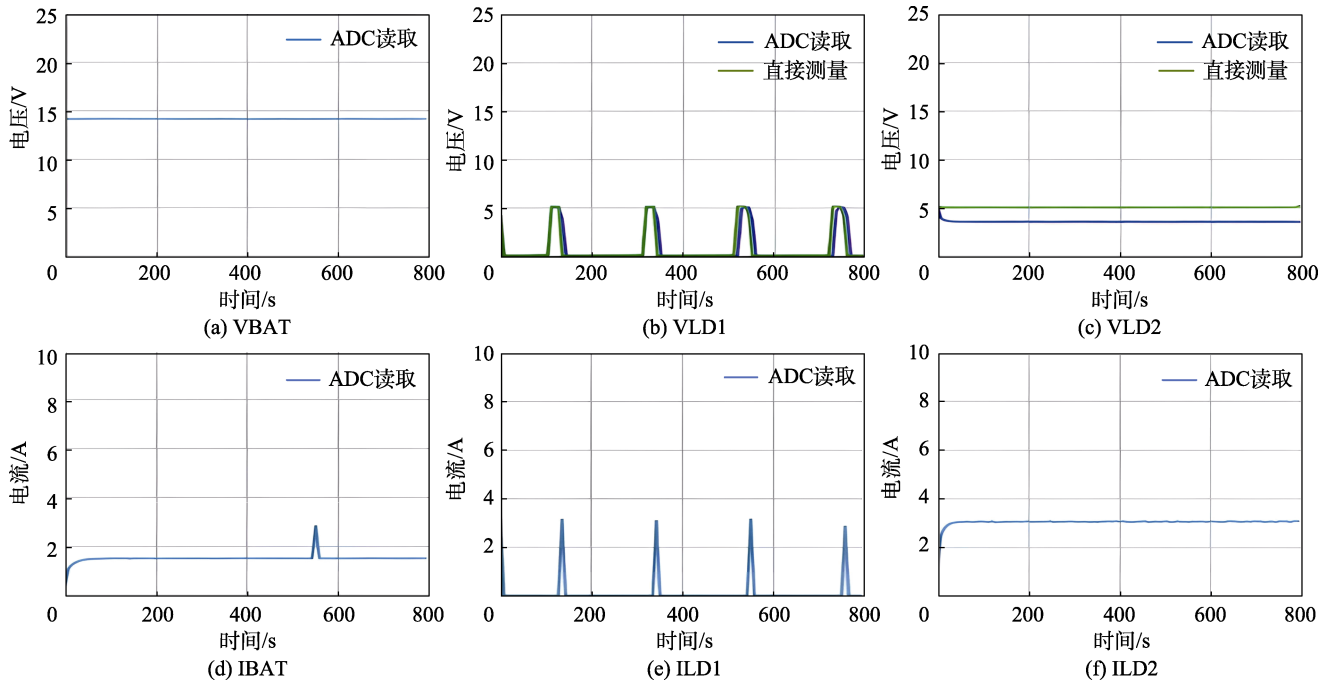


图 13 小功率及保护特性测试

4 结语

本文设计的可编程电源及电子负载实验装置安全稳定性高、响应速度快, 经特性测试, 能较好支持 PD 协议的车载 USB Type-C HUB 产品测试, 且已应用到实际生产中。同时, 实验装置中的 2 路可编程电子负载可拓展成多路, 通过修改相应软件程序, 该装置可进一步应用于其他领域 PD 协议的 USB Type-C 接口及相关 HUB 设备测试, 具有较高的实际应用价值。

参考文献 (References)

- [1] 闵睿. 基于 USB PD 协议的快充控制器的设计与实现[D]. 南京: 东南大学, 2022.
MIN R. Design and implementation of fast-charging controller based on USB PD[D]. Nanjing: Southeast University, 2022. (in Chinese)
- [2] 朱超成. 基于 TYPE_C 的 USB_PD 协议物理层设计[D]. 南京: 东南大学, 2021.
ZHU C C. Design of USB_PD protocol physical layer base on TYPE_C[D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)
- [3] 牛雨萌, 焦继业, 李晨. 基于 FPGA 的 USB PD 控制器的设计与实现[J]. 计算机与数字工程, 2020, 48(5): 1238–1242.
NIU Y M, JIAO J Y, LI C. Design and implementation of USB PD controller based on FPGA[J]. Computer & Digital Engineering, 2020, 48(5): 1238–1242. (in Chinese)
- [4] 韩振宇, 张有涛, 李亚军, 等. 一种 Buck-Boost 开关电源环路补偿电路设计[J]. 电子技术应用, 2023, 49(5): 124–128.
HAN Z Y, ZHANG Y T, LI Y J, et al. Design of loop compensation circuit for Buck-Boost switching power supply[J]. Application of Electronic Technique, 2023, 49(5): 124–128. (in Chinese)
- [5] 王重, 周克亮, 吴琼, 等. 非线性环路补偿的交错并联 BUCK 变换器数字控制策略研究[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2024, 36(2): 27–32, 44.
WANG Z, ZHOU K L, WU Q, et al. Research on digital control strategy of interleaved parallel BUCK converter with nonlinear loop compensation[J]. Journal of Hunan University of Arts and Science (Science and Technology), 2024, 36(2): 27–32, 44. (in Chinese)
- [6] 颜敏. 一种基于单片机的高压小电流电子负载[J]. 电子制作, 2023, 31(24): 91–94.
YAN M. A high-voltage low current electronic load based on a microcontroller[J]. Practical Electronics, 2023, 31(24): 91–94. (in Chinese)
- [7] 轩克辉, 李金方, 李远. 基于单片机的新型电子负载控制研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(10): 122–123, 156.
XUAN K H, LI J F, LI Y. Research on new electronic load control based on microcontroller[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2023, 13(10): 122–123, 156. (in Chinese)
- [8] 王刚. 可编程电子负载技术在 DCS 电源测试中的应用[J]. 仪器仪表用户, 2022, 29(11): 81–84.
WANG G. The application of programmable electronic load technology in DCS power supply testing[J]. Instrumentation

- Users, 2022, 29(11): 81–84. (in Chinese)
- [9] 杭静宇, 周振军, 邹晓渔. 基于 TPS40057 的 BUCK 变换器[J]. 电子设计工程, 2014, 22(12): 117–120.
HANG J Y, ZHOU Z J, ZOU X Y, et al. BUCK controller based on TPS40057[J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22(12): 117–120. (in Chinese)
- [10] MÁRQUEZ H E, FRANCISCO C P, CASTILLO H E, et al. Design of a switching strategy for output voltage tracking control in a DC-DC Buck power converter[J]. Electronics, 2024, 13(12): 2252–2252.
- [11] 刘桂正, 陈为, 李振伟. 基于模型化编程的双向 DC/DC 变换器创新实验平台[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(8): 183–189.
LIU G Z, CHEN W, LI Z W. Innovative experimental platform for bidirectional DC/DC converters based on modeled programming[J]. Experimental Technology and Management, 2023, 40(8): 183–189. (in Chinese)
- [12] 陈龙, 卢旺. 基于滑模变结构控制的 Buck 型 DC/DC 变换器实验研究[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(11): 65–70.
CHEN L, LU W. Research on experiment of Buck type DC/DC converter based on sliding mode variable structure control[J]. Experimental Technology and Management, 2017, 34(11): 65–70. (in Chinese)
- [13] 王攀攀, 童志刚, 徐泽涵, 等. 一种高变比零纹波双向 DC/DC 变换器及其仿真实验分析[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(4): 150–155, 160.
WANG P P, TONG Z G, XU Z H, et al. High conversion ratio zero ripple bidirectional DC/DC converter and its simulation analysis[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(4): 150–155, 160. (in Chinese)
- [14] 蒋利伟, 何可人, 陈航. 基于 PSO 改进 BP 算法的直流电子负载 PID 控制仿真[J]. 计算机仿真, 2024, 41(1): 306–310.
JIANG L W, HE K Y, CHEN H. Simulation of PID control for DC electronic load based on PSO improved BP algorithm[J]. Computer Simulation, 2024, 41(1): 306–310. (in Chinese)
- [15] 史轶男, 赵宏亮, 尹飞飞. 基于 USB PD 3.0 协议的新型双相标记解码电路设计与验证[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2024, 47(3): 354–359.
SHI Y N, ZHAO H L, YIN F F. Design and verification of new bi-phase mark coding decoding circuit for USB PD 3.0 protocol[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2024, 47(3): 354–359. (in Chinese)
- [16] 柏殷实, 常昌远, 陈远明. 一种迟滞结构的高精度 USB-PD 驱动芯片[J]. 微电子学, 2021, 51(4): 539–545.
BAI Y S, CHANG C Y, CHEN Y M. A high precision and hysteresis structure USB-PD driver chip[J]. Microelectronics, 2021, 51(4): 539–545. (in Chinese)

Design of a programmable power supply and electronic load experimental device

CHEN Cong¹, QU Bo², NI Feng³

(1. School of Aviation Engineering, Jiangsu Aviation Technical College, Zhenjiang 212134, China;

2. School of Electronic Information, Soochow University, Suzhou 215021, China;

3. Suzhou Ulicar Technology Limited Company, Suzhou 215000, China)

Abstract: [Objective] With the continuous advancement of technology, the traditional on-board USB Type-A interface will be gradually replaced by the new generation of on-board USB Type-C interface, which supports Power Delivery (PD) protocol and offers output power of up to 100 W. This interface is equipped with a corresponding USB HUB device. For efficient power transmission, the on-board USB HUB device can provide dynamic load sharing without compromising charging efficiency and reliability. However, currently, few on-board USB Type-C HUB devices exist that support the PD protocol, and their operational effectiveness requires further validation. To evaluate these on-board USB HUB devices, an experimental setup was designed comprising a 1-channel programmable power supply with 5~20 V and a 2-channel programmable electronic load with 0~10 A. [Methods] The experimental device independently designs the programmable power module and electronic load module, considering the isolation of the power supply and various signals. A core processor module is used to connect each submodule to ensure the safety and stability of each module. The main circuit of the programmable power module follows the voltage control Buck circuit principle, achieving programmable voltage output using an adjustable constant current source circuit. Loop compensation is incorporated to improve output voltage stability. The programmable electronic load module mainly uses MOSFETs and zero-drift operational amplifiers, leading to a simple circuit structure that effectively meets the application requirements. In addition, the programmable power supply and electronic load modules are equipped with voltage and current measurement feedback circuits, enabling real-time acquisition of test data. [Results] The test and practical application results demonstrate that the experimental device can provide a flexible and adjustable 5~20 V DC power supply and a 0~10 A electronic load. The device effectively characterizes the high power, low power, and protection features of the USB HUB product under test. The experimental device offers several advantages, including high output stability, minimal error, and a noise disturbance error of approximately 2.7%. In addition, it exhibits a fast response time, with the ability to turn off the output within 10 ms and resume it within 20 ms. Furthermore, the experimental device features real-time data collection, enabling the voltage and current values to be read using an ADC acquisition port and uploaded to the upper computer for real-time monitoring, ensuring good intuitiveness. [Conclusions] The experimental device designed in this study demonstrates high safety, stability, and corresponding speed. In addition, the device can successfully complete the product testing of vehicle USB Type-C HUBs supporting the PD protocol and is applied in actual product testing. Simultaneously, based on the design principles outlined, the 2-channel programmable electronic load in the experimental device can be expanded to multiple channels. Through the modification of the corresponding software, the device can be further adapted for use in other fields to support PD protocol USB Type-C interface and related HUB device testing, offering substantial practical application potential and value.

Key words: USB PD; programmable power supply; programmable electronic load; loop compensation

(编辑: 孙浩)