

公式章 1 节 1 开关电源级联线性稳压降压系统设计

邓阳宇 郭重阳 付家祺 安羿兴 林清茹

桂林电子科技大学机电工程学院, 广西桂林, 541004;

摘要: 本文通过分析开关电源与线性稳压电源各自的特点和优势, 并将这两种电源结合起来, 设计一种开关电源级联线性稳压电源降压系统。主拓扑中开关电源与线性稳压之间采用压差控制, 是该系统的核心控制。根据实际测量数据表明, 该系统发挥了开关电源输出效率高和线性稳压电源输出稳定性强的优势。同时以 STC32 系列单片机控制电路作为控制核心, 使系统拥有数据可视化, 过温预警及保护等功能。实现对电源集成化、高效化、智能化趋势的发展, 以适应不同的应用场景。

关键词: 开关电源; STC32; 线性稳压电源; 级联压差控制

DOI: 10.69979/3060-8767.26.03.011

引言

电源作为现代电力电子设备的核心部件, 能为电子设备提供所需的电能, 在绝大多数情况下, 直接接入电源的电能并不符合电子设备或其内部模块等用电对象使用的要求, 需进行再一次变换。人们对电子设备的需求不断增加, 稳定可靠的电源是电子设备的核心, 决定了设备的质量。当前, 开关电源广为应用, 其凭借体型小型化、占用空间小和电源效率较高的优势, 被应用于大部分的电子设备中^[1]。但线性稳压电源凭借其输出电压精度和稳定性高、噪声和干扰小和负载响应速度快等自身特性, 未能被开关电源完全取代^[2]。

因此, 为兼顾效率与电能质量, 本项目开关电源级联线性稳压电源降压系统, 通过级联实现两种电源优缺点的互补。在此基础上, 引入以 STC 单片机为核心的控制系统, 实现了输出电压、电流的实时监测、过温/过流保护以及运行状态的可视化管理, 提升了电源模块的智能化水平与可维护性。

1 设计方案

本设计主要由开关电源电路、线性稳压电源电路、辅助电源电路、控制电路等部分构成, 其中开关电源级联线性稳压电路的方式如图 1。

本文所设计的级联降压系统的系统综合以上两种电源的优势, 尽可能在系统设计中实现两者优势最大化, 本系统主要完成数值指标为, 输出直流电压 0-20V 连续可调, 输出电流范围 0-1.5A, 并且在输出电压为 10V 输出电流为 10A 的时候, 开关电源级联线性稳压电源主拓扑部分电路效率>70%。并且还具备过压保护、过流保护、系统散热、手机快充等功能。

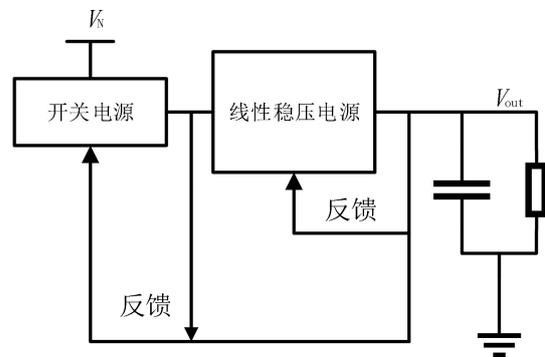


图 1 压差反馈级联结构方案

2 硬件电路设计

2.1 开关电源电路

本设计前级开关电源使用 Buck 降压型转换电源方案, 为达到减小体积的目的, 本设计前级开关电源 Buck 电路选用集成电源芯片方案。

XL4015 是一款输出效率高效的 Buck 开关转换电源芯片, 效率最高可达 96%。其内部集成了固定的频率振荡器、频率补偿电路和输出过流保护功能, 这样有利于简化外围电路设计。反馈引脚 FB 的内部参考电压为 1.25V, 通过对输出电压进行电阻分压采样, 来检测输出电压并对其进行反馈调整, 其输出电压计算公式如公式(1)。

$$V_{OUT} = V_{REF} \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) = 1.25 \times \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \quad (1)$$

VIN 与 VC 引脚之间需要连接 1 个 1uF 的电容, 作为内部电压调节器的旁路电容。所需的续流二极管要考虑 XL4015 的电压电流数值, 选用反向耐压 40V 整流电流 5A 的肖特基二极管 SS54, 其正向压降 $V_d=0.55V$ 。电感计算公式如公式(2)

$$L = \frac{V_o + V_d}{f \times (0.2 \sim 0.4) \times I_o} \times \frac{V_i - V_o}{V_i + V_d} \quad (2)$$

代入数据计算得 $L=52.6\mu\text{H}$ ，考虑余量并且根据实际有的电感值，取 $L=68\mu\text{H}$ 。输入、输出电容根据手册的大功率应用推荐值均选取 $470\mu\text{F}$ 。XL4015 设计的前级 Buck 电源电路如图 2 所示。

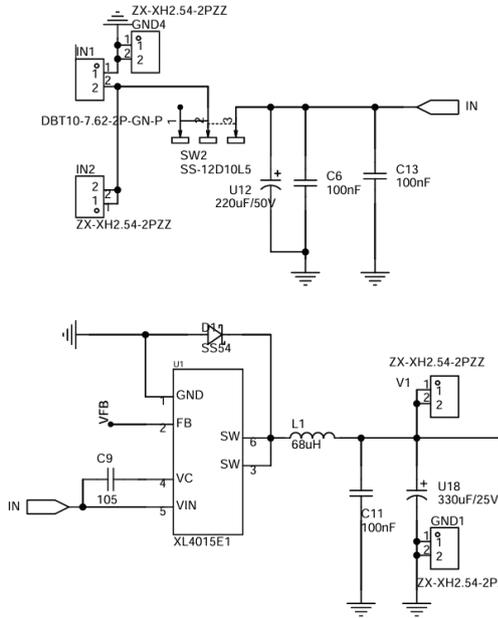


图 2 XL4015 设计的前级 Buck

2.2 线性稳压电源电路

线性稳压电源是通过调节自身的阻值来实现稳定输出电压的一种稳压器，这种调节自身阻值的方式是通过反馈控制来完成的。线性稳压电源电路可分为基准电压源、误差放大器、功率调整管和反馈网络四个基本模块，其基本结构如图 3。

低压差线性电压源(LDO)是线性稳压电源的一种优化形式，也称为低压差线性稳压器，其的工作原理与普通的线性稳压电源基本相同^[3]。

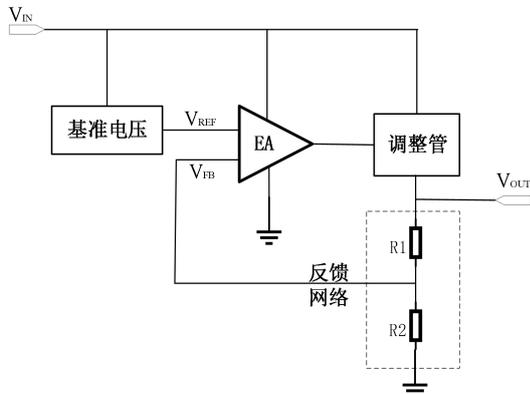


图 3 线性稳压电源结构框图

2.2.1 基准电压源

基准电压源设计选用 TL431，其可以通过外接电阻将输出基准电压灵活地设置为介于 $2.5\text{V}\sim 36\text{V}$ 之间的任意值。在外电源供电，提供电流 $1\sim 100\text{mA}$ 的条件下，基准引脚对地结点电压强制为 $V_{\text{ref}}=2.5\text{V}$ 。根据式(3)可以计算出所需 10V 基准电压时两电阻的比值为 $3:1$ ，结合手册推荐阻值取 $R_2=10\text{k}\Omega$ 。

$$V_o = (1 + \frac{R_1}{R_2})V_{\text{ref}} \quad (3)$$

得到 10V 基准电压源后，再将其采用固定电阻和电位器串联进行电阻分压，取电位器与电阻连接的节点为新的基准电压源，便可得到可从 0V 起始的可调基准电压源，如图 3-5 所示。其中 R_4 与 R_5 分别对应式(3)中 R_1 与 R_2 。

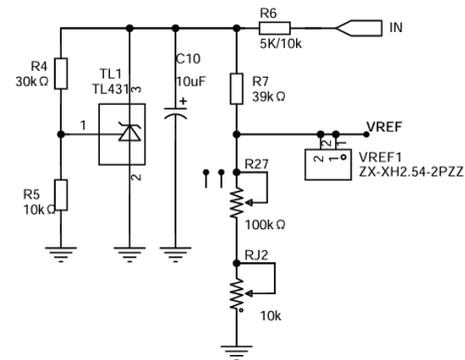


图 4 可从 0V 起调的可调基准电压源原理图

2.2.2 误差放大器

误差放大器用于放大系统的误差信号，将放大的误差信号来调节输出值，使输出达到所期望的目标值。本设计的误差放大器选用常用的 LM358 运算放大器实现，并且加之极零点补偿，以实现更高的增益和更高的带宽，从而提高线性稳压电源的性能指标，具有极零点补偿的误差放大器原理图如图 5 所示。

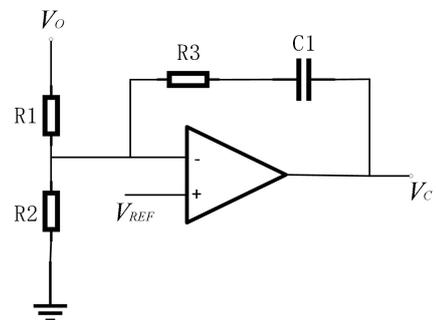


图 5 极零点补偿误差放大器电路原理图

2.2.3 电阻反馈网络

电阻反馈网络的分压电阻根据输出电压的最大范围和基准电源的调节范围来选择，原理图如图 6 所示。一般反馈电阻选取几十千欧为佳。反馈电压可以由电阻

分压原理得出, 见式(4), 本系统设计输出最大电压值为 20V, 而基准电压范围在 10V 以内, 因此可以选取分压电阻 $R_1=30k\Omega$, $R_2=10k\Omega$, 把反馈电压 V_{FB} 限制在 5V 及以内。

$$V_{FB} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)V_O \quad (4)$$

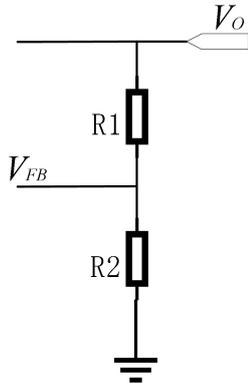


图 6 电阻反馈网络原理图

2.2.4 功率调整管

功率调整管选用 NMOS 型场效应管, 同时在多种 NMOS 型场效应管中选择导通电阻和耗散功率更低的 IRFB4110。

综上, 设计的线性稳压负反馈环路如图 7, 其与可调基准电源一起构成可调输出线性稳压电源, 作为主级联拓扑的后级输出。

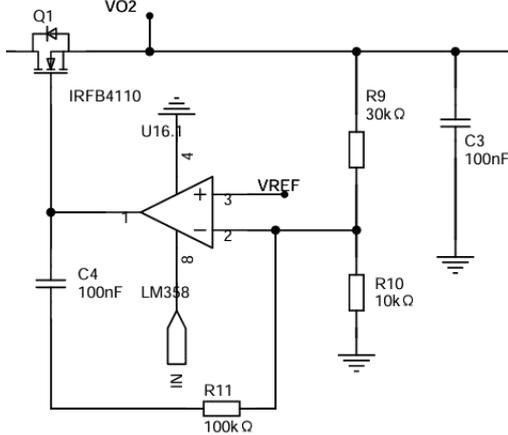


图 7 线性稳压负反馈环路设计

2.3 辅助电源电路

2.3.1 整流桥电路

系统的输入采用的是 220V 交流电源, 而本设计的系统主拓扑的前级为 DCDC 开关电源 Buck, 需要将市电降压并进行整流得到直流后才能输入级联主拓扑。在本设计中采用变压器降压与整流桥整流的方案对输入的交流电进行处理。其中整流桥电路原理图如图 8, 根

据需求, 以 2.6A 输出电流, 最大容许 6V 纹波电压, 计算得设计所需最小电容值为 4333uF, 根据实际有的电容器电容值, 本设计选取了 4700uF 的电容, 并且以两个并联实现更好的滤波效果。同时整流桥的输出作为整个系统供电电源, 为了防止某个模块电路短路造成整个系统崩溃, 在整流桥的输出串联了 3A 的保险丝。

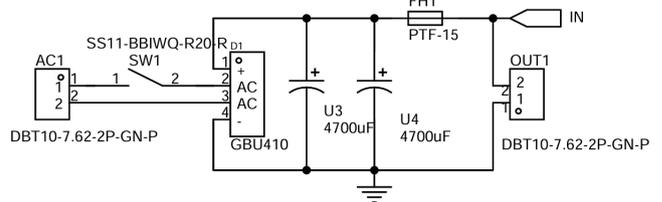


图 8 整流桥电路原理图

2.3.2 辅助供电电源电路

在整个开关电源级联线性稳压系统中, 除了级联主拓扑需要 21.6~33.94V 直流输入外, 其他一些有源器件或者控制电路仍需要其他等级的电压。这就需要辅助电源电路将整流桥电路的输出电压转换为其他等级的电压, 为了提高系统整体效率, 减小辅助电源电路的损耗, 本设计采用 SY8303 同步 Buck 降压开关电源集成芯片, 实现将整流桥输出电压高效转换为控制电路所需的 5V 供电电压。

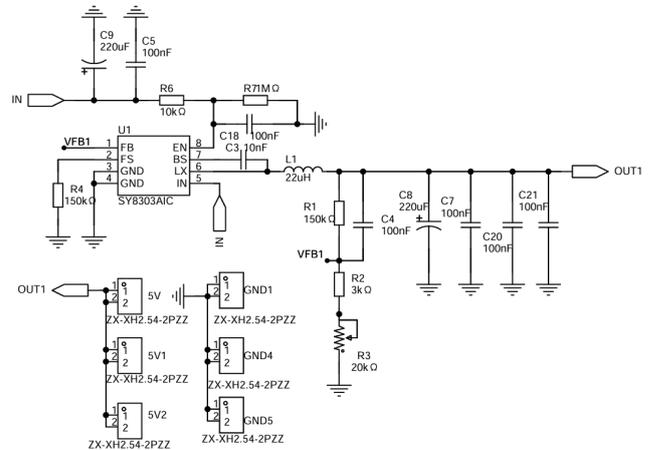


图 9 SY8303 辅助供电电路

2.3.3 手机快充电源电路

为了让本设计的系统应用范围及功能更广泛, 本设计还增加了手机快充接口, 为当代人们生活离不开手机, 手机不能没有电源的现状提供便利, 电路设计如图 10 所示。本设计的手机快充使用 IP6535 快充协议芯片实现, IP6535 其实是一款同步 Buck 集成芯片, 但它还集成了多种快充协议, 最大输出功率可达 36W。此外它还集成了过压欠压保护、过流保护等功能, 极大地减少了外围器件, 设计起来极其方便。根据芯片手册推荐, 输出电感使用 22uH, 输入输出电容均采用 100uF。

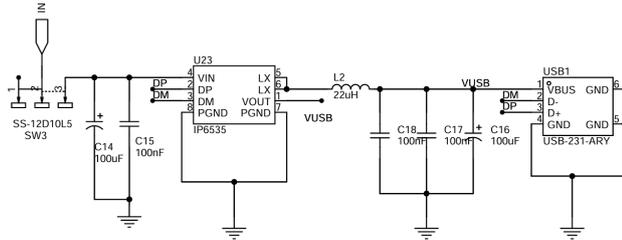


图 10 手机快充电源电路原理图

3 软件设计

通过对 STC32 单片机进行编程，单片机执行相应的功能，主程序流程图如 11 所示。软件主要完成 A/D 转换与数据处理、通信协议实现、保护设计和主电路控制等功能。主控芯片完成数据采集后，需要进行 A/D 转换才方便后续的数据处理，以执行相应的程序控制程序。实时监控系统的运行状态，当功率或温度超过温控设定值时，启动风扇为系统降温，若输出电压或电流超过负载需求时，执行保护程序切断电源，并发出报警等待复位。执行复位程序后，系统恢复初始设置，能够继续正常运行；若复位后仍继续启动保护，则需要停机检查系统是否存在元器件损坏等故障。

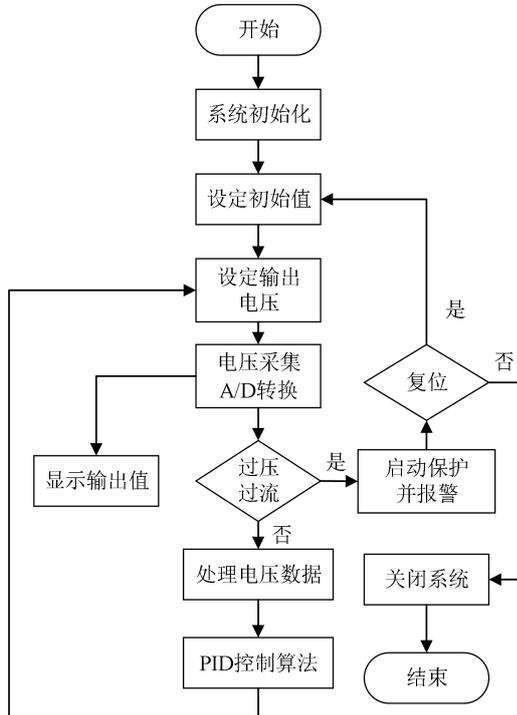


图 11 主程序流程图

4 实验结果

以输出电压 10V 电流 1.5A 为例。前级开关电源 XL4015 的输出电压波形如图 12 所示，其输出高频噪声高达 2.08Vpp，噪声影响比较大，如果给噪声要求高的负载供电，极可能造成负载运行性能下降。再看后级线

性稳压电源的输出波形如图 13 所示，此时后级线性稳压的输出噪声只有 80mVpp，极大减小了前级开关电源噪声的影响，为负载提供优质的电能。

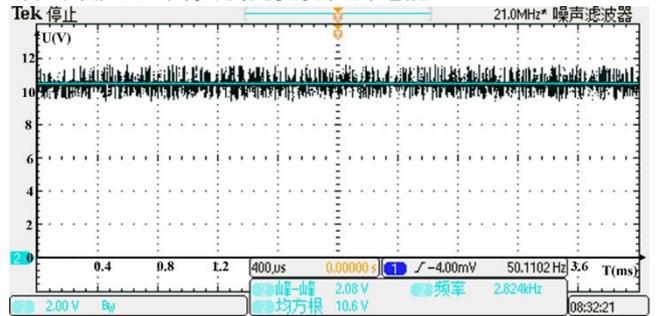


图 12 输出电压 10V 电流 1.5A 时前级开关电源输出波形

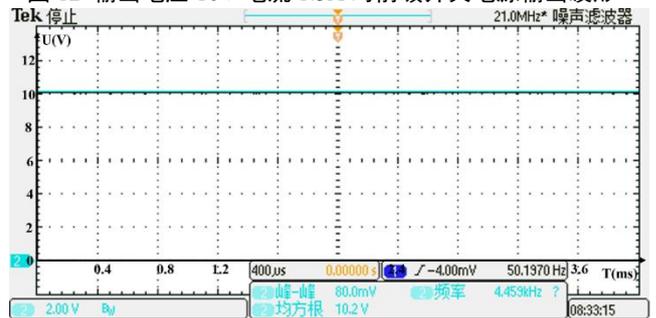


图 13 输出电压 10V 电流 1.5A 时后级线性稳压电源输出波形

本设计要求的输出效率指标：在输出电压 10V，输出电流 1A 时开关电源级线性稳压主电路的效率大于 70%。在这个条件下测量得样机的输出效率过程如下所示，根据测量结果计算，

$$\eta = \frac{10.036 \times 1.003}{31.43 \times 0.369} = \frac{10.07}{11.6} = 86.82\% \quad (5)$$

此时的输出效率可达 86.82%，满足设计指标的需求。

同时为了测试开关电源级线性稳压电源的输出效率特性，对样机分别设定输出电压 10V 和 20V 时，输出电流从 0A 到 1.5A 调节的输出效率曲线，如图 14 所示。从测量结果可以看出输出电压设定为 10V 时，在轻负载 0.104A 时输出效率较低，只有 61.72%，这主要是由于此时输入功率 1.68W，而样机空载时两级电源系统的静态损耗有 0.36W，约占了输入功率的五分之一，使得两级电源系统在轻负载时的输出效率比较低。根据测量结果得到，在设定输出电压为 10V 时，当负载电流大于 0.3A，输出效率均在 80% 以上。

设定输出电压为 20V，在轻负载 0.1A 时输出效率也有 77.79%，此时静态功耗也有一定影响，但由于初始功率输出功率相较静态功耗大了至少五倍，其影响已经没有 10V 轻负载时的影响大了，当输出电流为 0.4A 时，输出效率已经达到 91.12%。本设计的开关电源级线性稳压电源的效率输出特性与 Buck 的效率输出特

性相似,输出电压越高效率越高,这是由于输出电压变高后,在相同的输出电流下,输出功率随电压增大而增大,但是系统的损耗不是等比例提升的,当输出功率越大时,损耗的占比会越小。

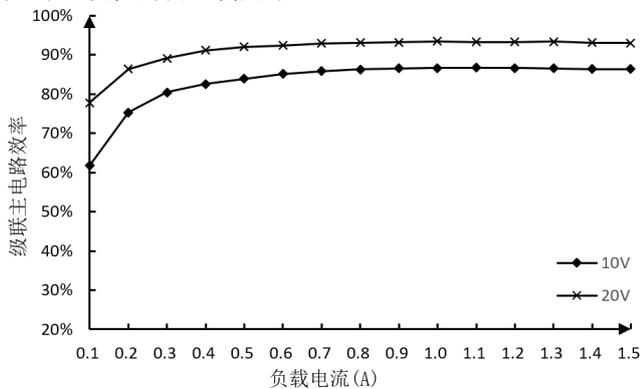


图 14 样机级联主电路输出效率曲线

5 结论

本设计通过结合了开关电源的高转换效率、宽输入电压范围和快速动态响应,以及线性稳压电源的输出电压稳定性强和噪声低特性,克服了单一电源类型在应用场景中的局限性。

通过部分仿真及样机调试分析,验证了本设计的开关电源级联线性稳压电源降压系统的性能满足设计需

求。样机测试结果表明,该系统在提高线性稳压电源整体输出效率的同时,也有效降低了开关电源产生的纹波和噪声,各项技术指标均达到了设计要求。本设计成果为电源设计领域提供了一种新的解决方案,为这两种电源的相关研究提供了有益的参考。

参考文献

- [1] 宋翔宇,司银,关春喜.高性能开关电源的设计与仿真研究[C]//广东省电机工程学会,广东电网有限责任公司,广东省能源集团有限公司,南方电网科学研究院有限责任公司,南方电网储能股份有限公司.2024年岭南电力论坛论文集.广州新华学院;2024:52-57.
- [2] 李飞宇,陈君涛,周爵,等.一种低噪声和快速响应的低压差线性稳压器[J].半导体技术,2025,50(03):282-288.
- [3] 李亮,黄思仪,宋惠安,等.高稳定性LDO集成电路设计[J].中国集成电路,2025,34(Z1):59-64.

项目基金:创新训练项目,面向变电站继电保护的高效级联直流稳压电源设计,项目编号:S202510595274,自治区级。