

论文题目：

多相 Buck-Boost 电源

Multiphase Buck-Boost Power Supply

参赛单位：中南大学

队伍名称：23elec

完成时间：2023 年 6 月 18 日

摘 要

经调查研究发现，随着电子器件的广泛应用以及对其性能要求的日益增长，对于大功率直流升降压电源的需求也在不断上升，在考察现有多相 Buck-Boost 电源构成情况以及市场上现有的通用数字电源电路构成后，提出了新型多相 Buck-Boost 电源的设计。

通过多相 Buck-Boost 交错互联的形式，可以平分电源管理电路中的电流，进而实现大电流 Buck-Boost 电路的电源管理。同时，现有的多相 Buck-Boost 电路多采用 DSP 加 FPGA 方式，成本较高，不利于产品普及，另一方面，单相电源负载能力较弱，不合适用于大功率场景。

基于以上需求，本作品设计以 STM32G474 为主控芯片，核心电路由自己设计，在实现功能的同时降低成本。本作品设计输出电源的范围为 0~30V 可调，在外接直流电源提供基础供能的情况下，可以把任意范围内的输入电压转化为想要的输出电压，且由于电路的整流作用和闭环设计，使得输出的电源稳定、整洁。

本作品基于 Buck-Boost 的电源变换器在结构上比起隔离型的双向 DC-DC 变换器要简单，没有变压器，功率开关器件的数目相对较少，能够提供良好的交互方式，操控方式较容易，通过全控型开关器件的反并联二极管最终能够实现能量双向流动，进而可以节省构建变换器的材料，并且转换效率高，因此可被应用于无需电气隔离的电池储能系统，光储、风储微电网系统以及其它需要稳定电源功能的系统等多种场景。

本作品的创新点如下：

- 1、使用多相 Buck-Boost 电路代替传统的单相电路，使得电源的负载能力大大加强；
- 2、使用 MCU 代替常见的 DSP 或 FPGA，降低电源成本，有助于推广应用。

关键词：多相 Buck-Boost、电源转换、多相交错、STM32

Abstract

Investigation and research have found that, as the widely application of electronic devices and the increasing demand for their performance, the demand for large-power DC-DC voltage regulators is growing. After considering the existing multiphase Buck-Boost power supply constitution and the current market supply of generic digital power supply circuits, a new multiphase Buck-Boost power supply design is proposed.

By adopting the multiphase Buck-Boost cross-connected form, the current can be evenly divided in the power management circuit, thereby achieving power management of large-current Buck-Boost circuits. At the same time, the existing multiphase Buck-Boost circuits usually adopt DSP and FPGA methods, with high cost, unfavorable for product popularization, and the single-phase power load capacity is weak, not suitable for large-power scenarios.

Based on the above requirements, this work designs the main control chip of STM32G474, and the core circuit is designed by themselves. While realizing the functions and reducing the costs. The output power range of this work is adjustable from 0V to 30V, and the input voltage can be converted to any desired output voltage with a basic supply power supplied by an external DC power supply. Due to the rectification and closed-loop design, the output power is stable, clean.

This work based on Buck-Boost power converter in structure is simpler than isolated type bidirectional DC-DC converters, without transformer, less power switching device number, able to provide good interaction methods, easy control methods, through the opposite of the integrated control switching device inverted diode finally can achieve the energy bidirectional flow, thus can save the construction of the transformer, and the conversion efficiency is high, therefore can be applied in

the battery energy storage systems, photovoltaic, wind storage micro-grid systems and other needs for stable power functions of systems and other scenarios.

The innovation of this work is as follows:

1. Using the multiphase Buck-Boost circuit instead of the traditional single-phase circuit, greatly strengthens the power load capacity of the power supply;
2. Using the MCU instead of the common DSP or FPGA, reduces the power cost, contributes to the popularization and application of the power supply.

Keywords: Multiphase Buck-Boost、Power Conversion、Multiphase Interleaving、STM32

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第 1 章 研究背景及应用前景	1
第 2 章 BUCK-BOOST 工作原理分析	2
2.1 双向 BUCK-BOOST 拓扑简介	2
2.2 BUCK 工作模式	3
2.3 BOOST 工作模式	5
2.4 BUCK-BOOST 工作模式（MIX 模式）	6
2.5 多相电路工作原理简介	8
第 3 章 多相 BUCK-BOOST 电源硬件设计	10
3.1 电源设计目标及电源规格	10
3.2 系统结构	10
3.3 电感计算	11
3.4 电容计算	11
3.5 MOS 管选型	12
第 4 章 电路设计	13
4.1 主功率电路设计	13
4.1.1 单相同步 BUCK-BOOST 电源	13
4.1.2 多相同步 BUCK-BOOST 电源	13
4.2 MOS 管驱动电路设计	15
4.3 信号调理电路设计	15
4.4 STM32 主控核心板引脚设计	17
第 5 章 软件设计	18

5.1 控制概述	18
5.2 上位机目标电压的输出	19
5.3 电压环的控制与电流均衡	20
第 6 章 总结	21
参考文献	22

第 1 章 研究背景及应用前景

随着现代科技的发展，各场景使用的核心运算处理器的速度要求越来越高，运算量增多，功耗增加，对电源的要求也越来越高，如何为处理器提供高品质的稳定电源、功能丰富的数字调节监控功能以及高效率越来越成为电源设计绕不开的问题。

大数据、云计算、人工智能概念的兴起，通信基站、数据中心等基础设施及汽车电动智能化催生出的自动驾驶等终端应用都需要耗电更大的 CPU，GPU 及 ASIC 来支持更为强劲的算力需求。这对供电电压调节器模块(VRM/Vcore)和负载点电源(PoL)提出了比以往更为严峻的挑战，包括更高的效率、更高的功率密度等，同时需要满足处理器 $di/dt > 1000A/us$ 的瞬态响应要求。

常用的单相 BUCK-BOOST 电路可以实现电源的升降要求，但是当负载需要的电流增大，对电流纹波要求变高时，常常会使功率电路的功率器件体积变大，增加成本的同时大电流的长期负载也会带来发热及安全隐患。为满足上述大电流、低纹波的供电要求，引入多相交错的同步 BUCK-BOOST 拓扑结构。

通过多相 BUCK-BOOST 交错互联的形式，可以平分电源管理电路中的电流，进而实现大电流 Buck-Boost 电路的电源管理。同时，现有的多相 BUCK-BOOST 电路多采用 DSP 加 FPGA 方式，成本较高，不利于产品普及，另一方面，单相电源负载能力较弱，不适用于大功率场景。

基于以上需求，本作品设计以 STM32G474 为主控芯片，核心电路由自己设计，在实现功能的同时降低成本。本作品设计输出电源的范围为 $0\sim 30V$ 可调，在外接直流电源提供基础供能下，可以把任意范围内的输入电压转化为想要的输出电压，且由于电路的整流作用和闭环设计，使得输出的电源稳定、整洁。

本作品基于 BUCK-BOOST 的电源变换器结构上比起隔离型的双向 DC-DC 变换器结构简单，没有变压器，功率开关器件数目相对较少，能够提供良好的交互方式，操控方式较容易，通过全控型开关器件的反并联二极管最终实现能量双向流动，进而可以节省构建变换器的材料，并且转换效率高，因此可被应用于无需电气隔离的电池储能系统，光储、风储微电网系统以及其它需要稳定电源功能的系统等多种场景。

第 2 章 BUCK-BOOST 工作原理分析

2.1 双向 BUCK-BOOST 拓扑简介

双向 BUCK-BOOST 电路拓扑是由同步 BUCK 电路和同步 BOOST 电路级联而成。传统的 BUCK 电路和 BOOST 电路中由二极管续流，但在低压大电流场合，由于二极管上存在导通压降，会引起较大的导通损耗。

利用 MOS 管代替传统的 BUCK 电路和 BOOST 电路中的续流二极管，由于 MOS 管开通时的管压降相对较低，能够显著降低电路中半导体的导通损耗，这种方式称为同步整流。

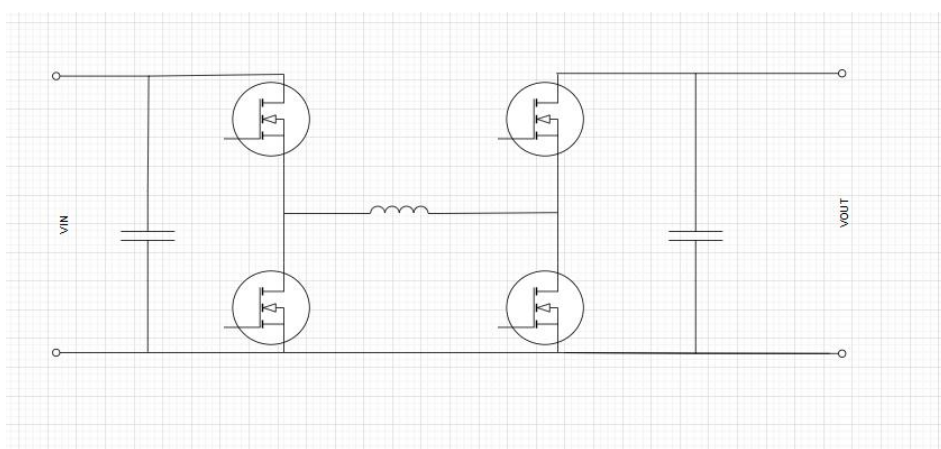


图 2-1 BUCK-BOOST 电路拓扑结构

即如上图 2-1 所示，双向同步整流 BUCK-BOOST 电路是由同步 BUCK 电路和同步 BOOST 电路构成，其中 MOS 管 Q1，Q2 和电感 L 构成同步 BUCK 降压变换器电路，MOS 管 Q3，Q4 和电感 L 构成同步 BOOST 升压变换器电路。

由于同步整流 BUCK-BOOST 拓扑左右完全对称，即 MOS 管 Q3，Q4 和电感 L 也可以构成同步 BUCK 降压变换器电路，MOS 管 Q1，Q2 和电感 L 也可以构成同步 BOOST 升压变换器电路。因此同步整流 BUCK-BOOST 电路在任何一方向上均可以实现升降压功能，即电路能量可以双向流动。

以左侧为输入，右侧为输出为例子，分析电路工作原理。当 Q4 常闭，Q3 常开，Q1 与 Q2 以特定占空比互补导通，则电路工作于 BUCK 模式，如图 2-2 所示；当 Q1 常闭，Q2 常开，Q3 和 Q4 以特定占空比互补导通，则电路工作于 BOOST 模式，如图 2-3 所示；当 Q1 和 Q2，Q3 和 Q4 均特定占空比互补导通，则电路工作于 BUCK-BOOST 模式（MIX 混合模式），如图 2-1 所示。

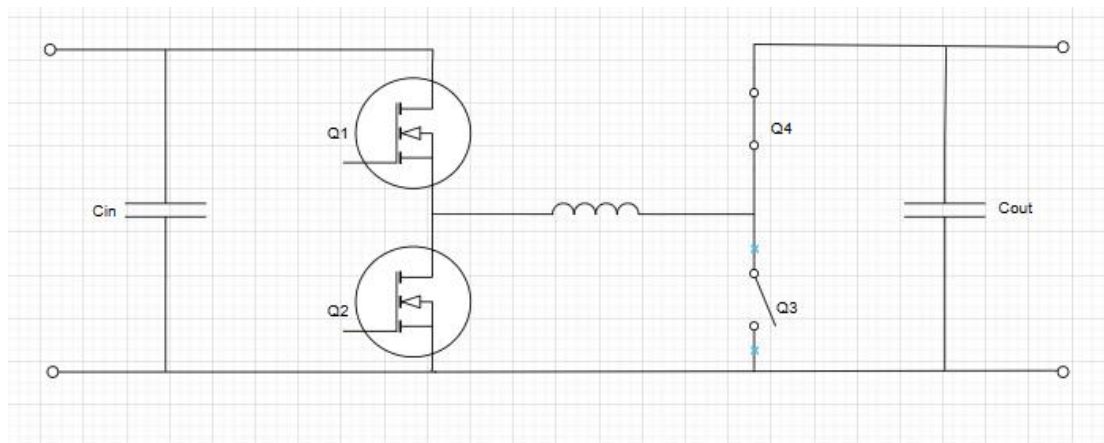


图 2-2 BUCK 模式拓扑结构

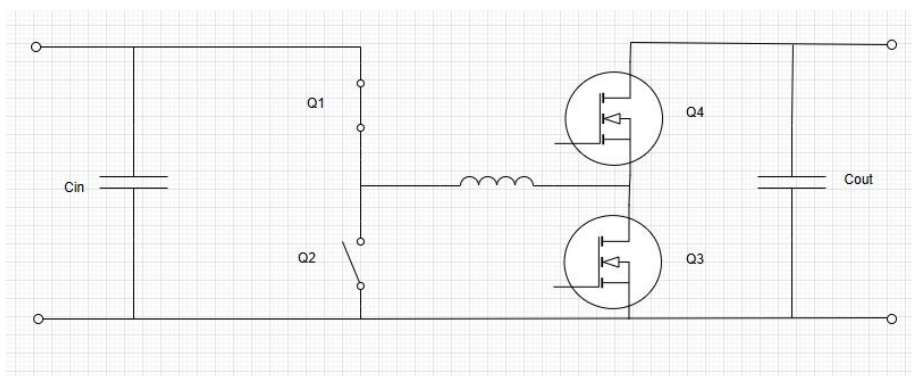


图 2-3 BOOST 模式拓扑结构

2.2 BUCK 工作模式

当输出电压显著小于输入电压时，电路工作在降压区（BUCK 模式），此时 Q1 和 Q2 以特定占空比互补导通，Q4 常闭合 Q3 常开，电路等效于同步 BUCK 电路。

在实际应用中，Q1 与 Q4 为上管，通常采用自举升压的驱动方式，即对于 Q4 而言，在一个开关周期内，Q3 需要有特定的导通时间，否则当 Q4 的自举电容能量损耗完时，Q4 将截止。

即该应用场合，可以使得 Q3 以很小的占空比导通，即 Q4 以接近满占空比导通。当 Q1 开通 Q2 关断时，其等效电路如图 2-4 所示，输入 V_{in} 通过 Q1 为电感 L1 储能并为负载供电，电感两端的电压为 $V_{in} - V_{out}$ ，电感电流线增加，电感储能，输出电容储能。

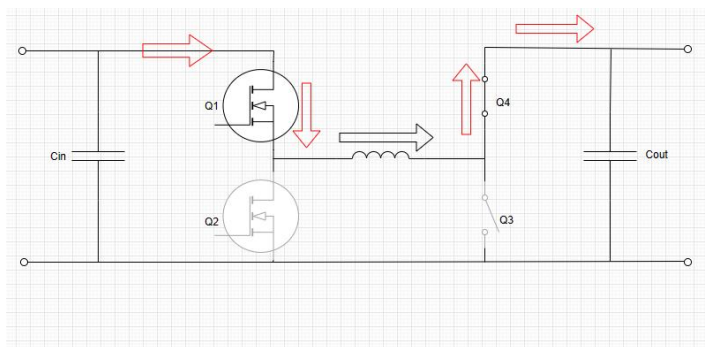


图 2-4 BUCK 模式电感储能阶段

此时，输入输出电压，电感电流的关系为：

$$V_{in} - V_{out} = L \frac{di_L}{dt} \quad (2-1)$$

当 Q1 关断 Q2 开通时，其等效电路如图 2-5，所示由于电感电流不能突变，电感电流方向不变，通过 Q2 进行续流，电感两端的电压为 $-V_{out}$ ，电感电流线性减少，电感放能。

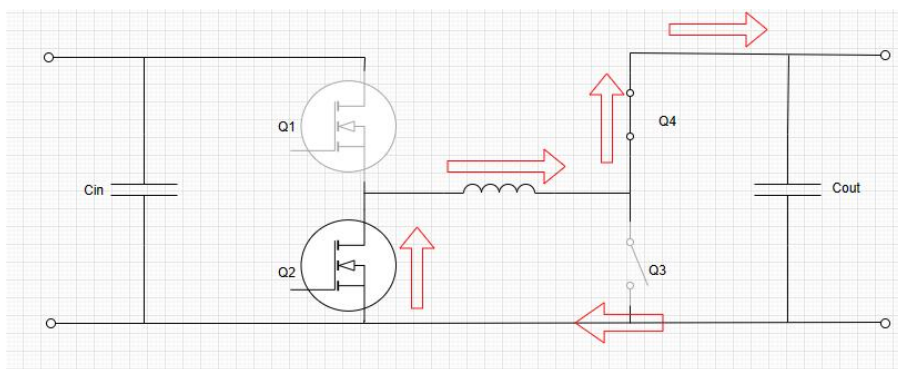


图 2-5 BUCK 模式电感失能阶段

此时，输出电压与电感的关系为：

$$-V_{out} = L \frac{di_L}{dt} \quad (2-2)$$

Q1 和 Q2 驱动和电感电流波形如图 2-6 所示。

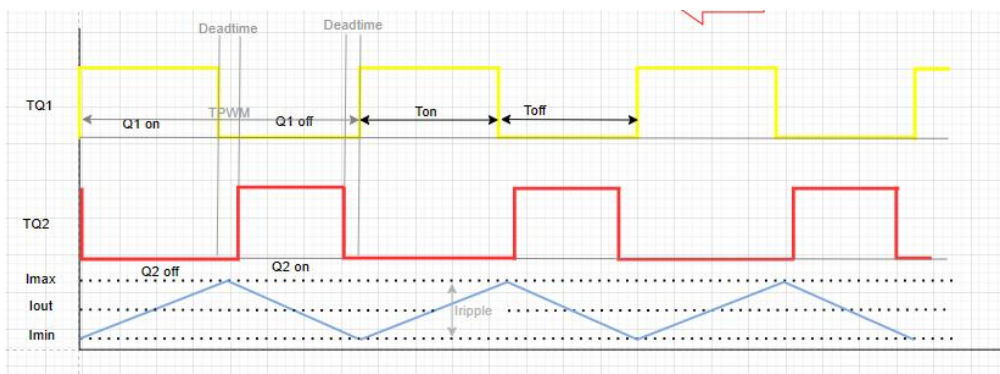


图 2-6 Q1 和 Q2 驱动和电感电流波形

在一个开关周期内，Q1 导通的时间为 t_{on} ，Q2 导通的时间为 t_{off} ，PWM 的开关周期时间为 t_{pwm} ，定义占空比为 D，则：

$$\begin{cases} t_{on} + t_{off} = t_{pwm} \\ D = \frac{t_{on}}{t_{pwm}} \\ t_{off} = (1 - D) \times t_{pwm} \end{cases} \quad (2-3)$$

根据电感能量在一个开关周期内平衡定理：

$$D \times (V_{in} - V_{out}) + (1 - D) \times (-V_{out}) = 0 \quad (2-4)$$

则可计算工作于 BUCK 模式下输入输出电压和占空比的关系：

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = D \quad (2-5)$$

2.3 BOOST 工作模式

当输出电压显著大于输入电压时，电路工作在升压区（BOOST 模式），此时 Q3 和 Q4 以特定占空比互补导通，Q1 常闭合 Q2 常开，电路等效于同步 BOOST 电路。

当 Q3 开通 Q4 关断时，其等效电路如图 2-7 所示，输入 V_{in} 通过 Q3 为电感 L 储能并为负载供电，电感两端的电压为 V_{in} ，电感电流线性增加，电感储能，输出电容为负载供电。

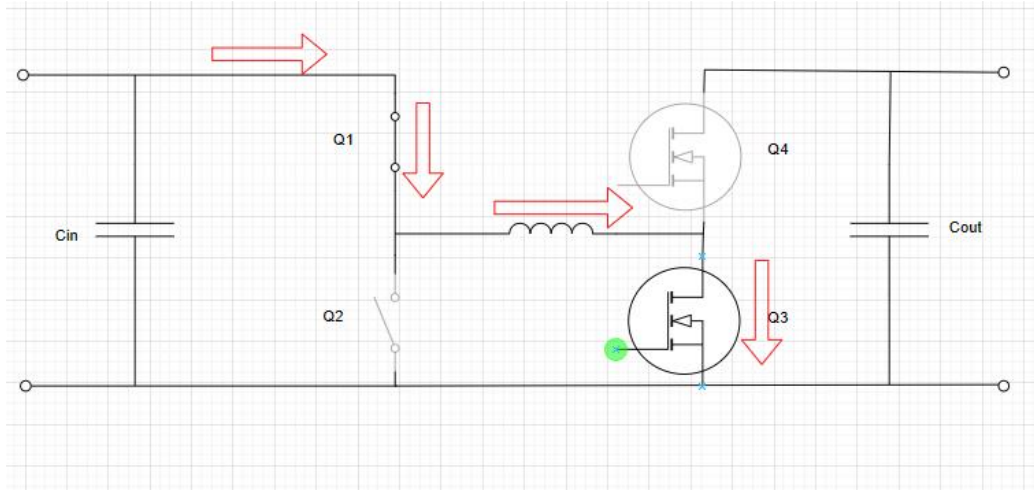


图 2-7 BOOST 模式电感储能阶段

此时：

$$V_{in} = L \frac{di_L}{dt} \quad (2-6)$$

当 Q3 关断、Q4 开通时，其等效电路如图 2-8 所示，电感两端的电压为： $V_{in} - V_{out}$ ，电感电流线性减少，电感放能，同时不断补充输出电容在上一阶段中损失的能量。

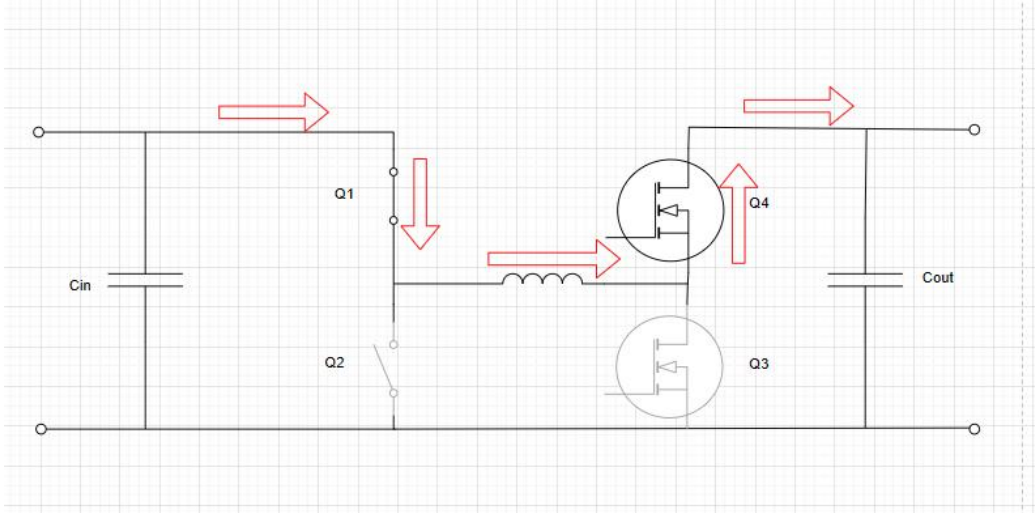


图 2-8 BOOST 模式电感失能阶段

Q3 和 Q4 驱动和电感电流波形如图 2-9 所示。

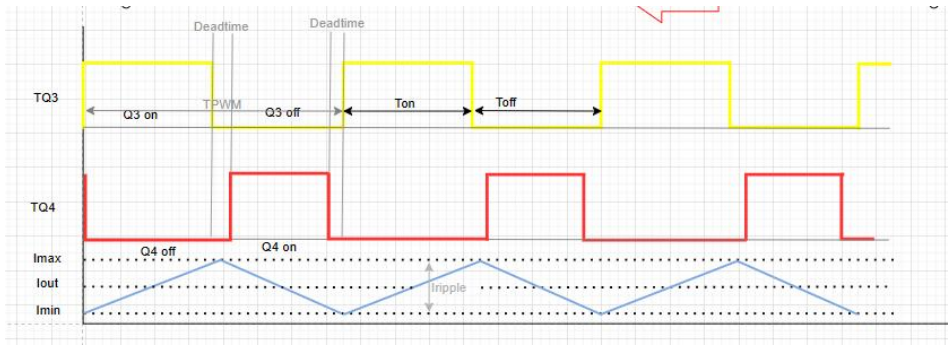


图 2-9 Q3 和 Q4 驱动和电感电流波形

在一个开关周期内，Q3 导通的时间为 t_{on} ，Q4 导通的时间为 t_{off} ，PWM 的开关周期时间为 t_{pwm} ，定义占空比为 D ，它们之间的关系与公式(2-3)相同。

根据电感能量在一个开关周期内平衡定理：

$$D \times V_{in} + (1 - D) \times (V_{in} - V_{out}) = 0 \quad (2-7)$$

则可计算工作于 BOOST 模式下输入输出电压和占空比的关系：

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (2-8)$$

2.4 BUCK-BOOST 工作模式（MIX 模式）

当输出电压和输入电压接近时，工作于 BUCK 模式和工作于 BOOST 模式均不能满足输出电压的要求。这时需要 BUCK 和 BOOST 电路同时工作，即在一个开关周期内，Q1 和 Q2 以特定占空比互补导通，Q3 与 Q4 以特定占空比互补导通。

定义 BUCK 电路的占空比为 $D1$ ，BOOST 电路的占空比为 $D2$ ，BUCK 电路

输出的电压为 V_0 ,即 BOOST 电路的输入电压为 V_0 ,其等效电路如下图 2-10 所示。

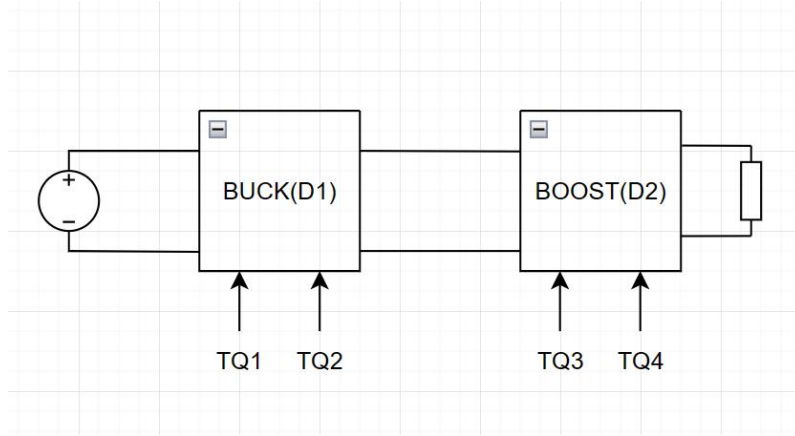


图 2-10 BUCK-BOOST 等效电路

对于 BUCK 电路输出：

$$V_0 = f_1(D_1) \times V_{in} \quad (2-9)$$

对于 BOOST 电路输出：

$$V_{out} = f_2(D_2) \times V_{out} \quad (2-10)$$

则：

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = f(D_1, D_2) = f_1(D_1) \times f_2(D_2) \quad (2-11)$$

即简化可得：

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = D_1 \times \frac{1}{1 - D_2} \quad (2-12)$$

由上述公式可知，BUCK-BOOST 工作与 MIX 模式下时，输出电压同时受 BUCK 电路占空比 D_1 和 BOOST 电路占空比 D_2 影响。

由于工作与 BUCK-BOOST 模式下的输出电压和输入电压很接近，可设置 BUCK 的占空比为固定占空比 0.8，调节 BOOST 的占空比，即可调整输出电压。

结合上述分析的 BUCK 工作模式和 BOOST 工作模式，工作于该模式下的电流波形和占空比如下图 2-11 所示。

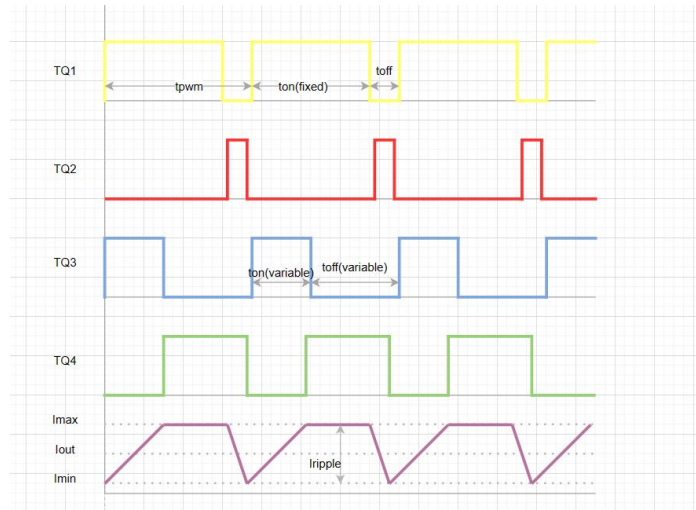


图 2-11 MIX 模式驱动波形就电流波形

综合上述三种工作模式，分别检测输入电压和输出电压幅值，当输出电压小于 0.8 倍的输入电压时，可使电路工作于 BUCK 模式；当电输出电压大于 1.2 倍的输入电压时，可使电路工作于 BOOST 模式；当输出电压在 0.8 倍和 1.2 倍输入电压范围内时，可使电路工作于 MIX 模式。

2.5 多相电路工作原理简介

随着现代科技的发展，各场景使用的核心运算处理器的速度要求越来越高，运算量增多，功耗增加，对电源的要求也越来越高，如何为处理器提供高品质的稳定电源及功能丰富的数字调节监控功能，提升效率越来越成为电源设计绕不开的问题。

大数据，云计算，人工智能概念的兴起，通信基站，数据中心等基础设施及汽车电动智能化催生出的自动驾驶等终端应用都需要耗电更大的 CPU，GPU 及 ASIC 来支持更为强劲的算力需求。这对供电电压调节器模块(VRM/Vcore)和负载点电源(PoL)提出了严峻挑战，包括：更高的效率、更高的功率密度，同时满足处理器 $di/dt > 1000A/us$ 瞬态响应要求。

常用的单相 BUCK-BOOST 电路可以实现电源的升降要求，但是当负载需要的电流增大，对电流纹波要求变高时，常常会使功率电路的功率器件体积变大，增加成本的同时大电流的长期负载也会带来发热及安全隐患。为满足上述大电流、低纹波的供电要求，引入多相交错的同步 BUCK-BOOST 拓扑结构。

其工作原理为多相 BUCK-BOOST 电路交错运行（驱动的 PWM 波形之间存在一定的相位差），每一相的电压、电流输出点并联在一起，从而使每一相之间的纹波相互抵消。

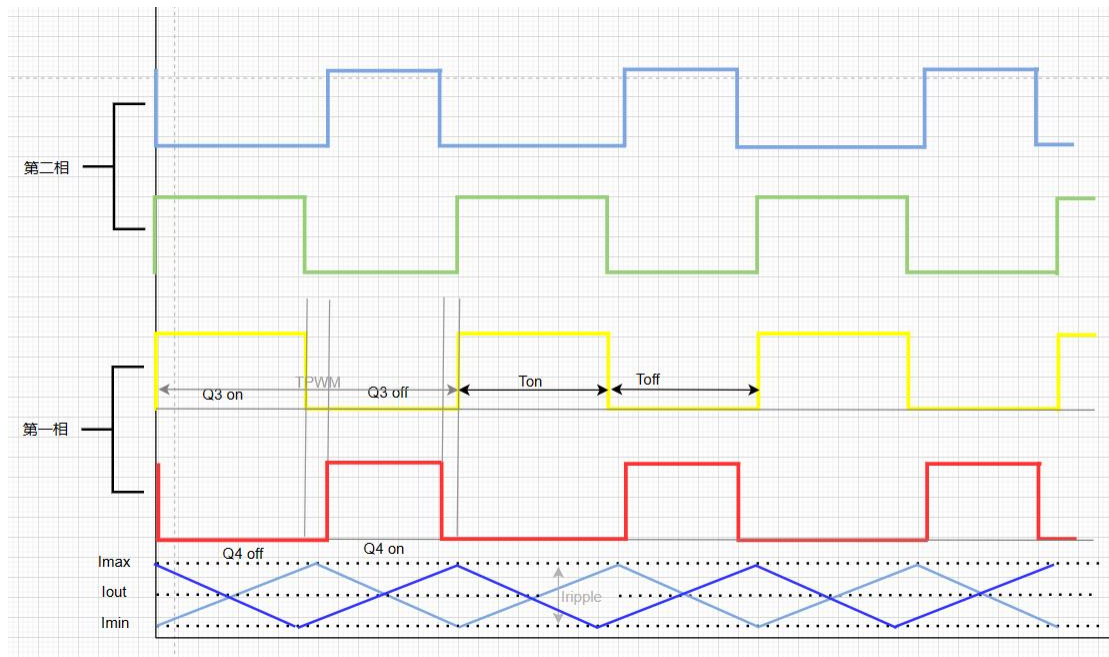


图 2-12 多相交错的 pwm 驱动波形和电流波形

简而言之，多相 BUCK-BOOST 电路的电源架构优势有：

- (1) 每一相发波相位交错，稳态电感电流的波形峰谷一定程度上相互抵消，提高等效开关频率，减小了输入和输出的电流纹波和电压纹波；
- (2) 每一相可使用更小感值和体积的电感，并联情况下通过占空比重叠，可实现更高的 di/dt ，和更快的动态响应；
- (3) 并联更多相数可方便拓展输出电流，且实现分散的热源压力，分布式散热管理；
- (4) 方便的轻载高效管理，可简单通过关闭某几相实现，即自动切相。

第3章 多相 BUCK-BOOST 电源硬件设计

3.1 电源设计目标及电源规格

表 3-1 电源设计目标及电源规格

多相 BUCK-BOOST 电源		
参数名称		参数指标
拓扑	拓扑结构	多相交错并联四开关 BUCK-BOOST 拓扑
输入输出 特性设计 目标	输入电压范围	0~30V
	输出电压范围	0~30V
	总输出电流范围	0~15A
	每相输出电流范围	0~5A
	输出电压纹波	50mV
	额定输出电压	5V
	输出最大功率	450W
其他规格	尺寸	100mm×100mm
	开关频率	500KHz
	调压调流方式	上位机通讯调整
	通讯	预留 TTL 转 USB 串口通讯 TYPE-C 接口
	烧录口	SWD 仿真烧录接口

3.2 系统结构

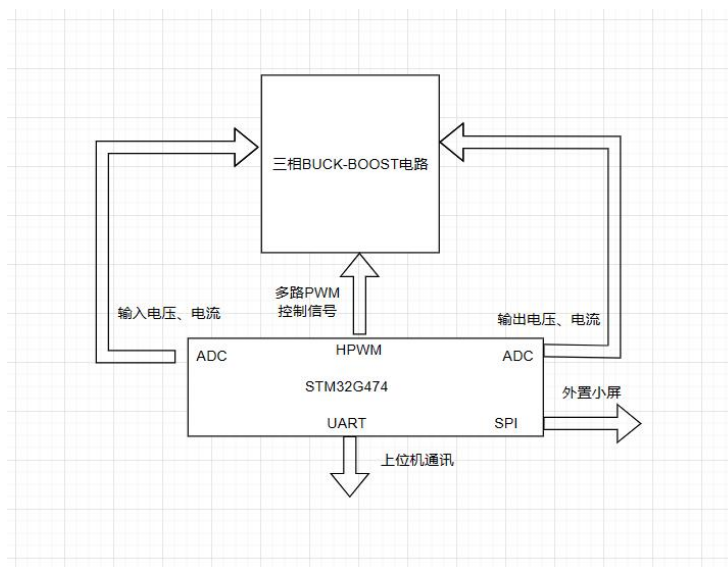


图 3-1 多相电源系统框图

上图为多相 BUCK-BOOST 电源整体硬件框架图，包含多相 BUCK-BOOST 主功率电路，MOS 驱动电路，输入输出电压电流信号调理电路，辅助电源电路，STM32F334 控制电路以及周边电路等，它们的功能如下。

多相同步 BUCK-BOOST 主功率电路：实现输入与输出之间的能量变换。

驱动电路：将来自于主控制器的驱动信号放大，用以驱动 MOS 运行。

信号调理电路：将输入输出电压电流信号变换成控制器能够读取的信号。

辅助电源电路：产生 12V 驱动电源，给驱动电路供电。

STM32F334 控制电路：实现系统输入输出信号采集，参考信号采集，输出状态汇报，BUCK-BOOST 电路 MOS 控制等功能。

显示屏：用以显示电源工作状态和输入输出参数信息。

3.3 电感计算

双向同步 BUCK-BOOST 电源输入输出电源中电感的计算基于 BUCK 工作模式和 BOOST 工作模式推导，并取两者中较大值。

当电源工作于 BUCK 模式下，输入最大输出最小，计算最小占空比：

$$D_{\min_Buck} = \frac{V_{out_min}}{V_{in_max}} = \frac{3.3}{30} = 11\% \quad (3-1)$$

定义电感电流波动量(25%的最大额定电流脉动)：

$$\Delta I_L = 25\% \times I_{L_max} = 1.25A \quad (3-2)$$

计算最小需要的 BUCK 电感：

$$L_{\min_BUCK} = \frac{V_{out_min}}{(\Delta I_L \times f_{switch})} \times (1 - D_{\min_Buck}) = 4.6992\mu H \quad (3-3)$$

当电源工作于 BOOST 模式下，以输入最小输出最大为计算点，计算占空比：

$$D_{\min_Boost} = 1 - \frac{V_{in_min}}{V_{out_max}} = 1 - \frac{3.3}{30} = 89\% \quad (3-4)$$

Boost 模式下，取 1A (I_{minb}) 时 Boost 进入连续模式计算电感：

$$L_{\min_Boost} = \frac{V_{out_max} \times D_{\min_Boost} \times (1 - D_{\min_Boost})^2}{2 \times I_{minb} \times f_{switch}} = 3.914\mu H \quad (3-5)$$

按照公式计算结果，是保证纹波电流能满足前面设定值的最小电感值，所以选择电感量高于该计算结果的电感就可以。此外，还要考虑电感的饱和电流要大于峰值电流，由于计算没有考虑效率，所以占空比和峰值电流要比实际值小，因此在选择时要留有一定的裕量，去 BUCK-BOOST 电路的电感为 10uH。

3.4 电容计算

为了获得较好的输出电压纹波，取设计的电压纹波为 50mV。分别计算工作

于 BUCK 模式下和 BOOST 模式下所需要的最小电容量：

$$C_{\min_Buck} = \frac{V_{out_min} \times (1 - \frac{V_{out_min}}{V_{in_max}})}{8 \times L_{BB} \times \Delta V_{out} \times f_{switch}^2} = 29.73\mu F \quad (3-6)$$

$$C_{\min_Boost} = \frac{I_{out_max} \times (1 - \frac{V_{in_min}}{V_{out_max}})}{\Delta V_{out} \times f_{switch}} = 66.4\mu F \quad (3-7)$$

设计留有一定余量，选的一颗 100uF 的固态电容加两颗 10uF 的贴片陶瓷电容作为总输出电容。

3.5 MOS 管选型

在额定输入输出电压范围内，计算输入 MOS 电流的有效值为：

$$I_{mos_rms} = I_{out_max} \times \sqrt{1 - D} = 3.579A \quad (3-8)$$

MOS 选型的额定电流值需按流过 MOS 最大电流的 2 倍余量以上(防止短路或故障下电流过大冲击损坏)。

$$I_{mos_rms} \times 2 = 7.158A \quad (3-9)$$

MOS 选型的额定耐压值需大于最大电压输入时的耐压值 1.5 倍余量（防止尖峰击穿）

$$V_{in_max} \times 1.5 = 45V \quad (3-10)$$

根据上述计算，正常应用可以选取额定电流大于 10A，且耐压值 45V 以上的 MOS，下管 MOS 选型和上管一样，考虑到自然冷的情况，为尽量降低导通损耗和开关损耗，应用时选择导通内阻尽量小，且 C_{oss} 电容较小的 MOS。

本应用选择的 MOS 信号为 ZXMN6A11Z，具有 60V 的耐击穿电压能力，具有较低的导通内阻为 0.076Ω ，同时输出电容 C_{oss} 典型值为 120pF，反向恢复电荷 Q_{rr} 为 10nC。较低的导通内阻保证了 MOS 导通时较低的导通损耗，较低的 C_{oss} 与 Q_{rr} 保证了开通关掉时较低的开关损耗。

第 4 章 电路设计

4.1 主功率电路设计

4.1.1 单相同步 BUCK-BOOST 电源

下图为同步 BUCK-BOOST 电源主功率电路图，以左侧输入为例，Q5、Q8 和电感组成同步 BUCK 电路，Q6、Q7 与电感组成同步 BOOST 电路。

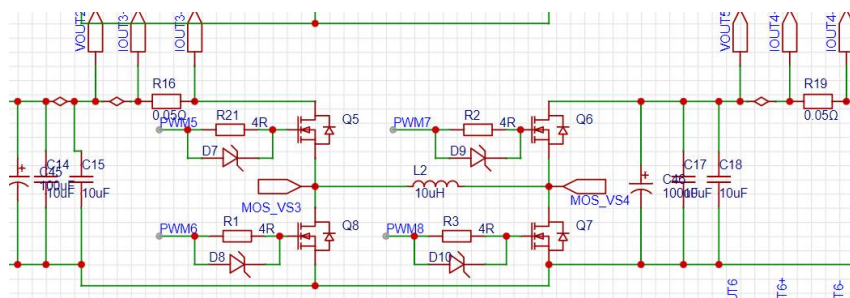


图 4-1 单相同步 BUCK-BOOST 电源主功率电路图

主功率电路整体上左右对称结构，输入输出设有两个 100uF 高频电解电容，用于输入或输出滤波，同时四个小的贴片贴片陶瓷电容 10uF/50V，用以滤除端口处的高频噪声。R16 和 R19 为 50mΩ 的电流采样电阻，后级接差分采样电路缩小输入输出电流信号。

4.1.2 多相同步 BUCK-BOOST 电源

下图为多相交错并联同步 BUCK-BOOST 电源主功率回路，以左侧输入为例，输入电压进入电路后被并联的三相电路分流，确保每一相电路过流较小。

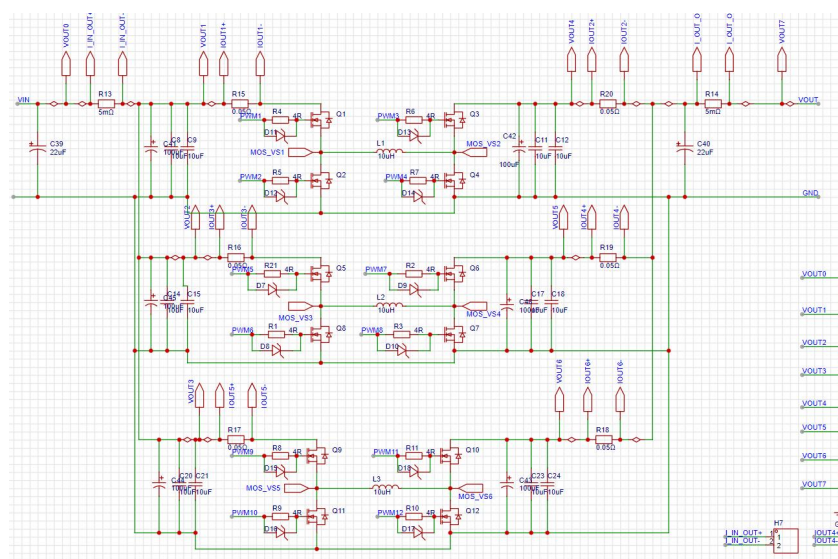


图 4-2 多相同步 BUCK-BOOST 电源主功率电路图

除每一相固有的输入输出电容外，额外在总输入端口和总输出端口放置了一

个 22 μ F 的电解电容，确保进入电路和输出的电压纹波足够下。电压的输入输出接 XT30 端口，确保端口过流能力与电路设计匹配。同时为方便后续开发，每相电流、电压输出采样通过排针接出，后续连接采用叠板方式进行。

主功率电路 PCB 如下：

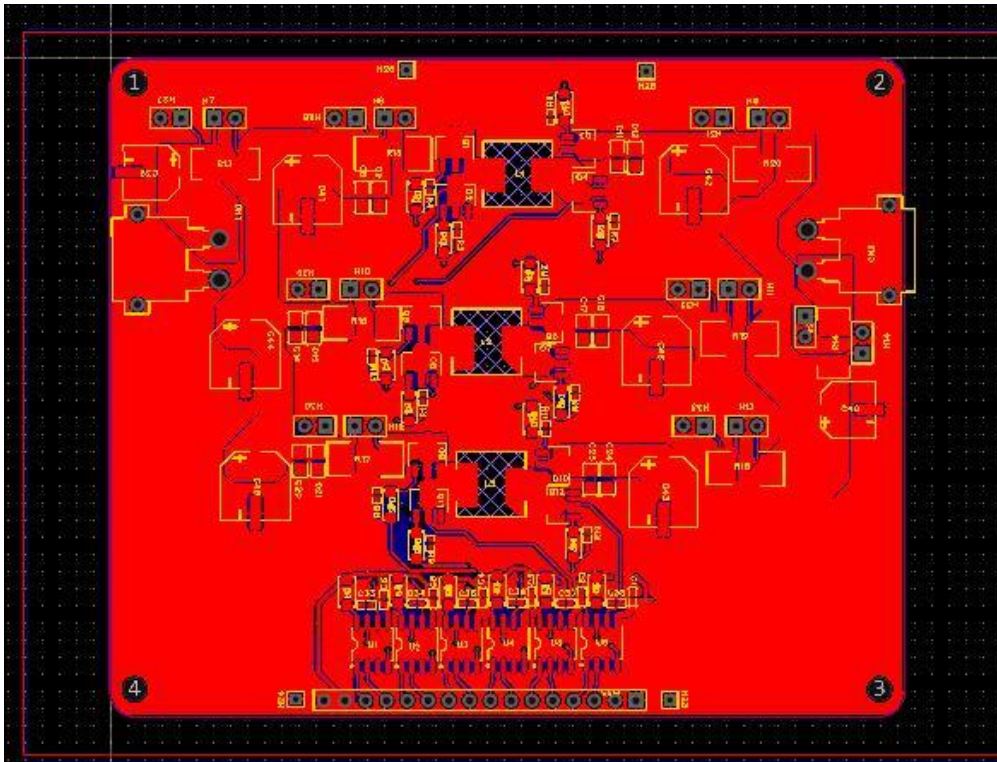


图 4-3 主功率电路图 1

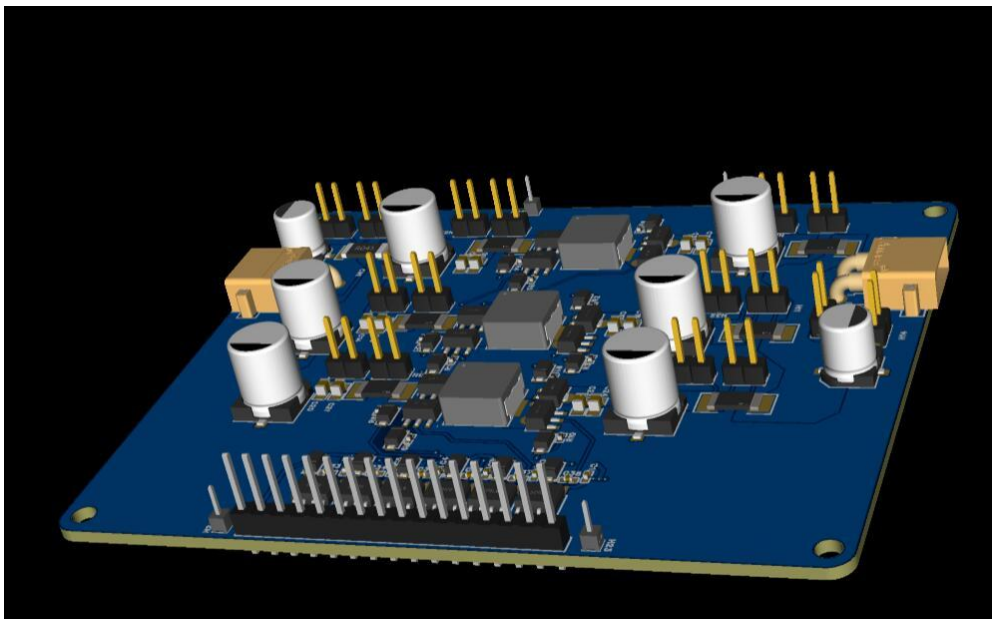


图 4-4 主功率电路图 2

4.2 MOS 管驱动电路设计

双向同步BUCK-BOOST电源中的BUCK电路和BOOST电路存在高位MOS管，传统对于高位MOS管的驱动采用变压器隔离驱动，但线路复杂，增加设计复杂度和板子尺寸。

本设计选用两颗自带 Boost-Strap 功能的驱动 IC:IR2181SPBF 用以驱动BUCK电路和BOOST电路的同步MOS。IR2181SPBF 为高压、高速互补双通道MOS管及IGBT驱动IC，1.4A的输出驱动电流能力保证MOS能够快速导通。具体电路如图4-3所示。

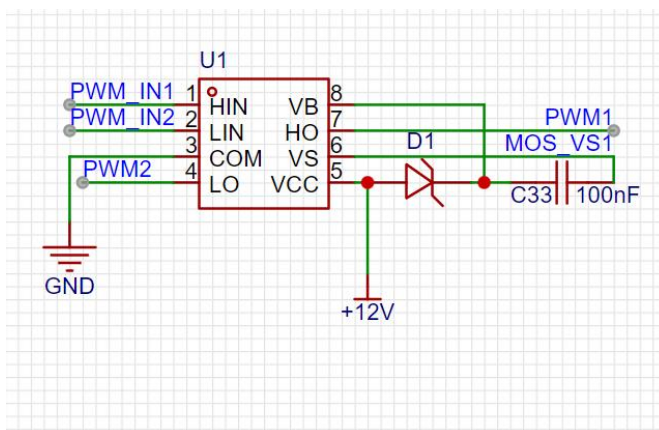


图 4-5 MOS 管驱动电路

4.3 信号调理电路设计

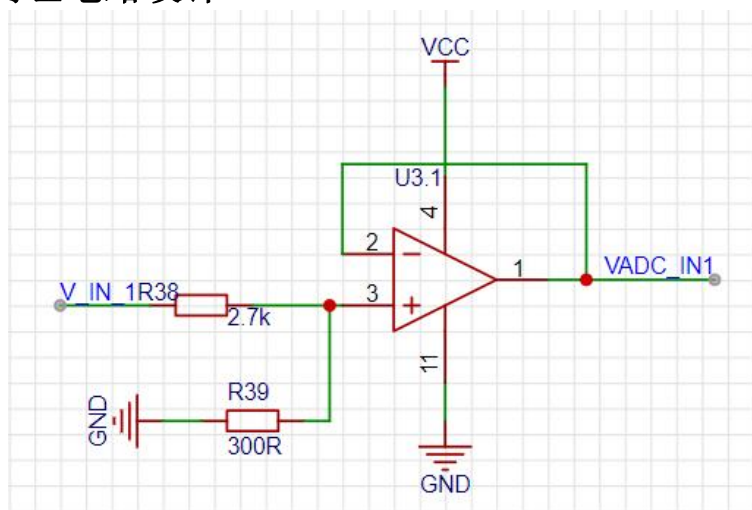


图 4-6 电压调理电路

输出电压的范围为 0~30V，STM32AD 引脚输入电压范围为 0~3.3V，为确保器件安全，先将输出电压按比例缩小 10 倍后，接入构成电压跟随器的运算放大器中。使用低零偏 GS8554-TR 运放提高电压转换的精确度，其电压调理电路如图 4-4 所示。

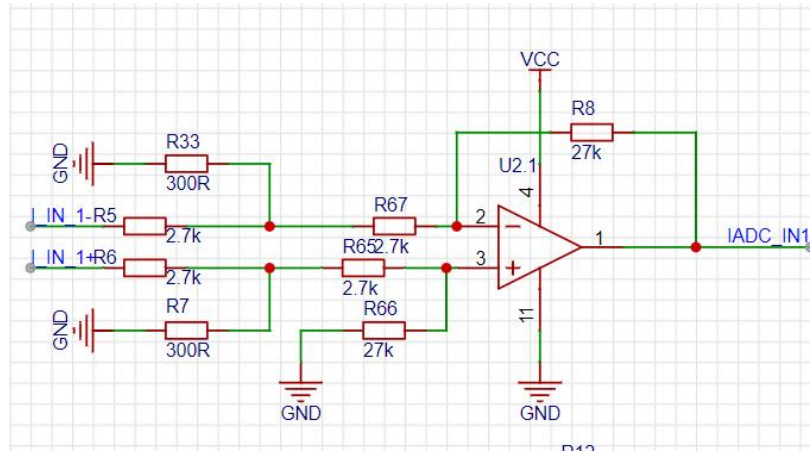


图 4-7 电流调理电路

为确保电流采集准确性，本次设计采取高侧采样，因此要考虑高侧大电压的影响，在接入运算放大器构成差分采样电路前，需要将两个通道的电压缩小至器件可耐受范围内，在两个通道前增加分压电路，设计电阻值将电压缩小 10 倍，使其在 0-3V 内变化，再接入 GS8554-TR 形成放大倍数为 10 倍的差分采集电路。

信号调理电路 PCB 如下：

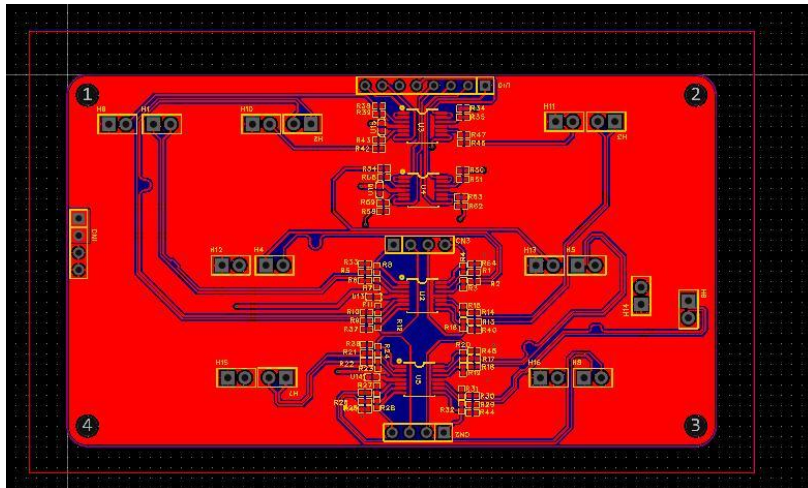


图 4-8 信号调理电路图 1

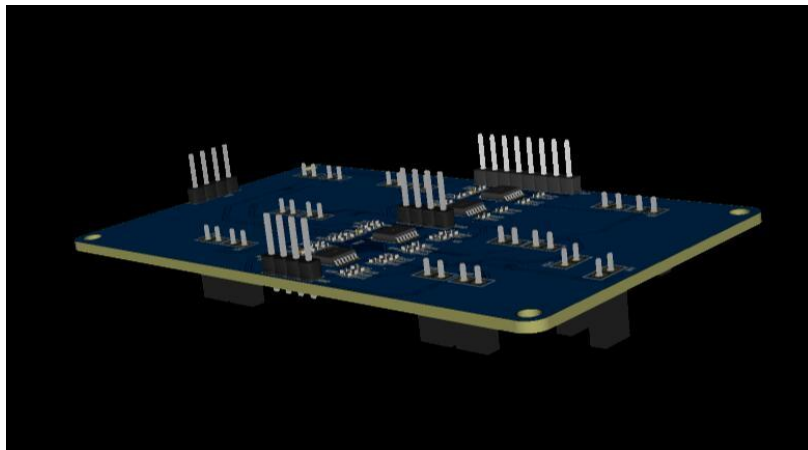


图 4-9 信号调理电路图 2

4.4 STM32 主控核心板引脚设计

本次电源设计采用 STM32G474 作为主控，具有电路外围线路简单，控制模式灵活，可扩展性强等优点。为简化设计工作，本次控制部分采用 ST 公司出品的 G474-Nucleo 核心板,仅介绍本次设计过程中使用到的引脚。

表 4-1：STM32 引脚分配

分类	引脚名称	对应信号	说明
PWM 信号 1	PB12	PWM1H	第一相 BUCK 上桥臂驱动
	PB13	PWM1L	第一相 BUCK 下桥臂驱动
	PB14	PWM2H	第一相 BOOST 上桥臂驱动
	PB15	PWM2L	第一相 BOOST 下桥臂驱动
PWM 信号 2	PC8	PWM3H	第二相 BUCK 上桥臂驱动
	PC9	PWM3L	第二相 BUCK 下桥臂驱动
	PC6	PWM4H	第二相 BOOST 上桥臂驱动
	PC7	PWM4L	第二相 BOOST 下桥臂驱动
ADC 信号	PA4	All_V_IN	总输入电压
	PB1	V1_IN	第一相输入电压
	PA0	V1_OUT	第一相输出电压
	PA6	V2_IN	第二相输入电压
	PC0	V2_OUT	第二相输出电压
	PB2	ALL_V_OUT	总输出电压
	PA1	I1_OUT	第一相输出电流
	PC1	I2_OUT	第二相输出电流
串口通讯	PA2	TX	串口发送
	PA3	RX	串口接收

第 5 章 软件设计

5.1 控制概述

本作品工作在四个模式下，分别是同步 Buck 模式、降压 Buck-Boost 模式、升压 Buck-Boost 模式以及同步 Boost 模式。对于不同的输入电源和目标输出电源，则作品自适应于不同的模式。

控制方案会实时侦测输入电压、用户目标输出电压、实际输出电压、各相的输出电流和输出电压，并根据这些电气数据进行闭环处理，使得输出稳定、响应及时、各相负载均衡。

得益于 STM32G474 的高分辨率时钟（HRTIM），主控可输出 4 对频率为 500KHz 带死区的互补 PWM 信号，且 PWM 受到一个 Master 时钟的控制以实现信号同步。

对处于不同工作模式下的各相进行分别的闭环控制，以单相为例，周期性采集该相的实际输出电压与目标输出电压做偏差计算，使用 PID 控制器做闭环，输出修正信号。且各相之间由均衡算法平衡其功率输出。

程序初始时，初始化各个外设，包括 ADC、HRTIM、屏幕等。之后程序会使用中值滤波进行采集各个 ADC 的通道，实现电压或电流的采集。

在主程序的 Loop 中，会持续的进行状态的切换，切换的标志就是输入电压和目标输出电压的相互关系，因为上位机或外部可能有更改目标输出电压的需要，所以会不断判断是否要进行相应的运行模式的切换。

然后，根据二者的相互关系可以判断使用 4 个模式中哪个模式。而对于每个模式来说，有三种调用方式，分别是第一次进入时、正常进入时和退出此模式。

第一次进入一个模式时，会根据该模式的特点进行 HRPWM 的相关配置，然后下次或以后的正常进入情况下就可以根据 PID 算法去自动调整此模式下的 PWM 输出了。当主 Loop 判断为需要进行模式切换时，则先退出上一个模式，对相关的 HRPWM 配置进行重置，同时，开启新模式的 HRPWM 的相关配置。

程序的控制流程图如下图所示：

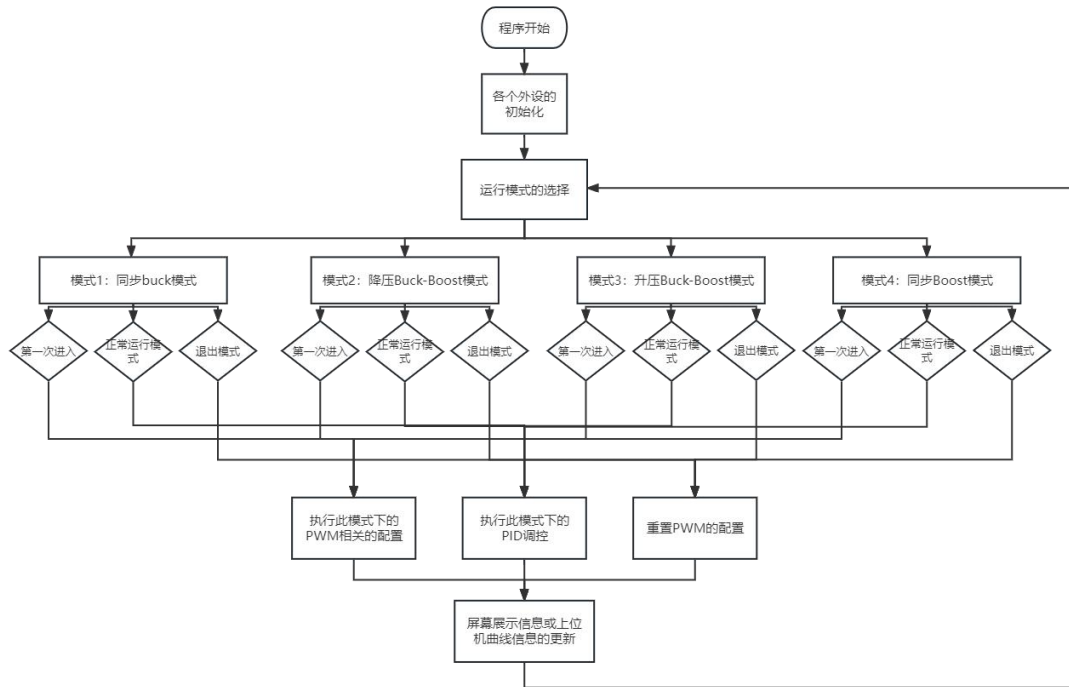


图 5-1 程序的控制流程图

5.2 上位机目标电压的输出

上位机使用 VOFA+串口软件，使用如下图所示的图形控件，左侧的表盘指示输入电压的大小，右侧的滚动条可以调控目标电压的输出大小。



图 5-2 图形控件

同时，会有输出电压的实时监控，下图中紫色线是目标输出电压，绿色线是实际输出电压。

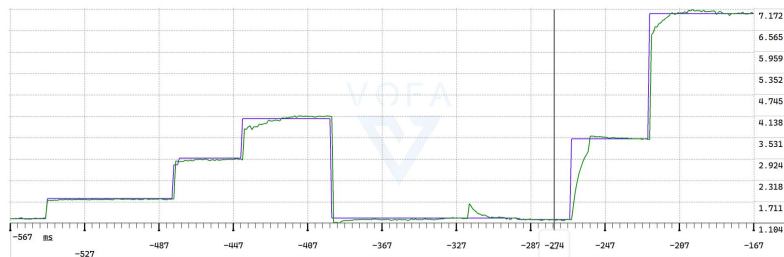


图 5-3 输出电压的实时监控

5.3 电压环的控制与电流均衡

在过程控制当中，依据偏差比例(P)、积分(I)和微分(D)实现控制的 PID 控制器，属于一种应用最广泛的自动控制器。PID 控制器在工业控制当中属于经典控制算法，其原理较为简单，参数相互独立且容易调整，控制操作简便，适用面也很广。控制效果突出，在工业控制多个领域都有广泛应用。PID 控制器具有原理简单、使用方便和鲁棒性好等一系列优点，它适用于存在反馈的系统，而本作品在设计之初便考虑到了电流的均衡作用和电压的闭环，对比闭环部分，使用每一相的实际电压输出与目标电压输出做 PID 闭环可以构成一个闭环系统，应用 PID 算法，可以提高其响应速度和准确度。

PID 控制器是一种线性控制器，它根据目标值与实际输出值构成偏差，将偏差的比例、积分和微分通过线性组合构成控制量，对受控对象进行控制。控制规律为：

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (5-1)$$

式中， $e(t)$ 为偏差值， $u(t)$ 为输出值， K_p 为比例系数， T_i 为积分时间常数， T_d 为微分时间常数。

在计算机控制过程中，需要对 PID 公式进行离散化，离散化的 PID 公式如下所示：

$$PWM = K_p * e(k) + K_i * \sum e(k) + K_d * [e(k) - e(k-1)] \quad (5-2)$$

其中 $e(k)$ 代表本次偏差， $e(k-1)$ 代表上一次的偏差， $\sum e(k)$ 代表 $e(k)$ 以及之前的偏差的累积和，根据 PID 控制得到输出的 PWM 信号值，最后通过电机驱动芯片作用于电机本身。

在调整过程中，每一相都会与总的目标输出电压做 PID 计算，当然，每一相的 PID 参数和累计 PID 误差都是不同的，在每次调整完输出电压后，还会有一个电流的计算，采集 1、2 相的输出电流进行均衡比较，如若超出阈值，则需要适当的进行微调，使两相的输出电流近似相等。调整示意图如下图所示：



图 5-4 调整示意图

第 6 章 总结

为实现电源大功率直流升降压提供简单高效的解决方案，本作品基于 Buck-Boost 电路结构，设计了多相 Buck-Boost 电源。

多相 Buck-Boost 电源以 STM32G474 为主控芯片，核心电路自主设计。基于 Buck-Boost 的电源变换器结构上比起隔离型的双向 DC-DC 变换器结构简单，没有变压器，功率开关器件数目相对较少，能够提供良好的交互方式，操控方式较容易，通过全控型开关器件的反并联二极管最终实现能量双向流动，进而可以节省构建变换器的材料，并且转换效率高在实现功能的同时降低成本。

作品设计的输出电源范围为 0~30V 可调，在外接直流电源提供基础供能下，可以把任意范围内的输入电压转化为想要的输出电压，且由于电路的整流作用和闭环设计，使得输出的电源稳定、整洁。

经实验测试，本多相 Buck-Boost 电源的调整速度能达到较快水平，平均在 15ms 以内完成调整，且两相的电流相差不超过 10%。

多相 Buck-Boost 电源预计可被应用于无需电气隔离的电池储能系统，光储、风储微电网系统以及其它需要稳定电源功能的系统等多种场景。

参考文献

- [1] 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. DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.233727.
- [2] 殷佳琳. 新型开关稳压电源的优化设计与应用[J]. 科技通报,2012,28(02):140-142.DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2012.02.042.
- [3] 叶昌,王晨,刘斌,查海涛.三相降压/升压/升降压型多功能并网逆变电路[J].电力电子技术,2021,55(11):25-29.
- [4] 章勇高,孔令韬,许莹莹. 一种基于 Buck/Boost 电路的新型微逆变器功率解耦电路 [J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(4):29-34. DOI:10.19635/j.cnki.csu-epsa.000270.
- [5] 王召杰. 高性能双向升降压 DC/DC 变换器的研究[D].广西科技大学,2020.DOI:10.27759/d.cnki.ggxgx.2020.000060.
- [6] 张德超,杨艳,朱智富.多相交错双向 Buck-Boost 变换器的研究[J].电子设计工程,2020,28(09):32-36.DOI:10.14022/j.issn1674-6236.2020.09.007.
- [7] 黄林森. 三相交错并联 BUCK-BOOST 双向 DC/DC 变换器的研究[D].湖南工业大学,2015.
- [8] 储若辰. 交错并联双管 Buck-Boost 变换器的预测控制研究[D].哈尔滨工业大学,2021.DOI:10.27061/d.cnki.ghgdu.2021.001679.
- [9] 王喜升,侯钰慧,郭波超,崔振宇,田子建,王文清.无线电能传输系统基于 Buck-Boost 拓扑的最大功率传输研究 [J]. 电子技术应用,2022,48(10):129-134.DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.222578.
- [10] 张婷,刘亚强,王祖良,张善文.Buck-Boost 变换器工作模式及控制策略的研究[J].宇航计测技术,2022,42(02):85-89+94.