应用札记
ANC202410001

探析电荷泵拓扑结构

作者：赵清华
校阅：谭磊 张璐

圣邦微电子（北京）股份有限公司

2024 年 10 月 31 日

商标

SGMICRO 是圣邦微电子（北京）股份有限公司的商标。本文档中的所有商标均为其各自所有者的财产。

© 2024 圣邦微电子（北京）股份有限公司 版权所有。

未经 SGMICRO 事先书面许可，任何单位或个人不得摘抄、复制或改编本文档的部分或全部内容。欲了解更多关于 SGMICRO 的信息，请访问网站 www.sg-micro.com。

摘要

高降压比充电电荷泵能够在保持较高输出电流的同时，显著降低输入电流，减少能量在转换过程中的损失，进而降低功耗，提升充电效率。本文以提高电荷泵效率为目标，先对几种降压电荷泵拓扑结构进行梳理，分析和总结了它们的优势和特性。随后，探讨了提高电荷泵效率的有效手段，如减小死区时间和飞电容电位预建，为电荷泵的设计与应用提供新思路。

目录

1 引言 2
2 常见 3:1/4:1 电荷泵拓扑结构[1] 2
2.1 3:1 Ladder 降压电荷泵 2
2.2 4:1 Dickson 降压电荷泵 3
2.3 4:1 Fibonacci 降压电荷泵 3
2.4 4:1 Serial-parallel 降压电荷泵 4
2.5 4:1 Doubler 降压电荷泵 5
3 拓扑结构总结 5
4 效率优化手段 5
4.1 减小死区时间 6
4.2 飞电容电位预建 6
5 参考文献 6

1 引言

电荷泵（Charge Pump）变换器是一种利用电容来升高或降低电压的 DC/DC 变换器。这种变换器外围部件主要由电容组成，且没有电感，因此 PCB 占位面积较小。没有电感损耗，且通过简单的控制即可以实现零电流开启和零电压关断，开关损耗极低，效率极高，电荷泵被广泛地应用于移动设备快充领域。

在电荷泵充电应用中，受限于 Type-C 线缆的最大 5A（带 E-marker 芯片）通流能力，常见的 2:1（电荷泵电压输入输出比）降压电荷泵的最大充电电流为 8A 至 10A。为了满足更大充电功率同时更高效的需求，必须减小输入电流同时提高输入电压，高降压比充电电荷泵产品陆续被推出市场。限于篇幅，下面仅对常见 3:1/4:1 降压电荷泵拓扑结构做一个简单的介绍及评论。

2 常见 3:1/4:1 电荷泵拓扑结构[1]

2.1 3:1 Ladder 降压电荷泵

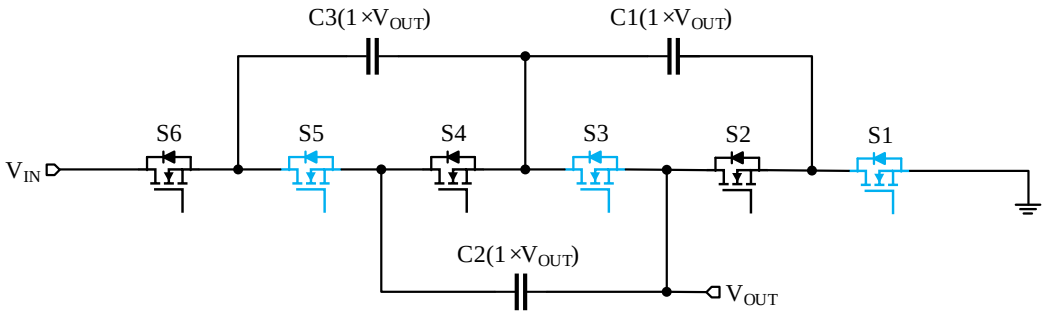

图 1 3:1 Ladder 降压电荷泵

在此拓扑中，蓝色标注的 NMOS FET（S1、S3、S5）同时开启或关闭，黑色标注的 NMOS FET（S2、S4、S6）同时开启或关闭，且前者与后者相差 180°。（该描述适用于下面提到的拓扑结构，后续不再赘述。）

在稳定状态下，当 S2、S4、S6 打开时，S1、S3、S5 均处于关闭状态。输入电流从 V_{IN} 流入，依次流经 S6、C3、C1、S2，最终从 V_{OUT} 流出（假设 V_{OUT} 有对地负载，后面分析基于相同假设）；与此同时，C1、C2、S2、S4 构成回路，电流依次流经 C2、S4、C1、S2。V_{OUT} 流出的平均电流为 V_{IN} 输入平均电流的 1 倍。

当 S1、S3、S5 打开时，S2、S4、S6 均处于关闭状态。C2、C3、S3、S5 构成回路，C3 对 C2 充电；与此同时，C1、S1、S3 构成回路，电流依次流经 S1、C1、S3，最终从 V_{OUT} 流出。V_{OUT} 流出的平均电流为 V_{IN} 输入平均电流的 2 倍。

此拓扑结构优势在于 C1、C2、C3 承受的电压均为 V_{OUT}，开关数量较少。不足在于飞电容较多，驱动设计上较为复杂，流经 S1、S2、S3 管的平均电流为 2 倍 V_{IN} 输入平均电流，C2 在搬运 C3 电荷到 C1 时存在能量损失。

2.2 4:1 Dickson 降压电荷泵

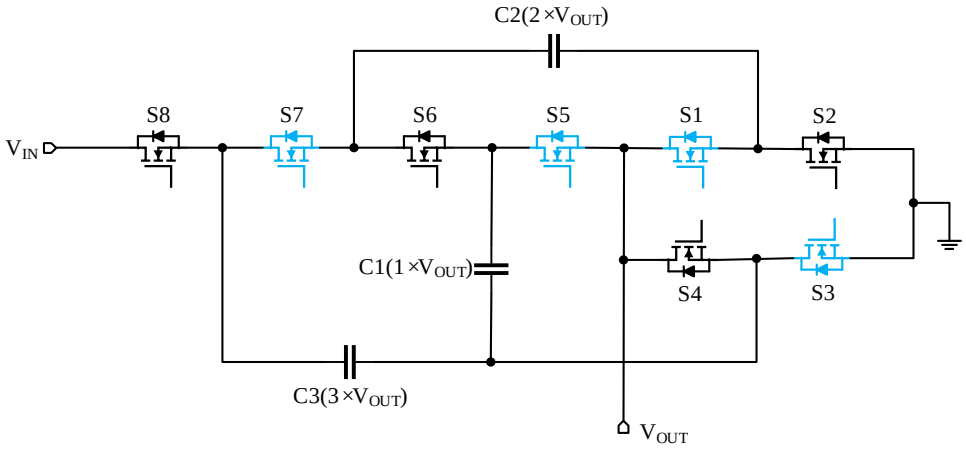

图 2 4:1 Dickson 降压电荷泵

在稳定状态下，当 S2、S4、S6、S8 打开时，S1、S3、S5、S7 均处于关闭状态。输入电流从 V_{IN} 流入，依次流经 S8、C3、S4，最终从 V_{OUT} 流出；与此同时，C1、C2、S2、S4、S6 构成回路，电流依次流经 S2、C2、S6、C1、S4，最终从 V_{OUT} 流出。V_{OUT} 流出的平均电流为 V_{IN} 输入平均电流的 2 倍。

当 S1、S3、S5、S7 打开时，S2、S4、S6、S8 均处于关闭状态，C1、S3、S5 构成回路。电流依次流经 S3、C1、S5，最终从 V_{OUT} 流出；与此同时，C2、C3、S1、S3、S7 构成回路，电流依次流经 S3、C3、S7、C2、S1，最终从 V_{OUT} 流出。V_{OUT} 流出的平均电流为 V_{IN} 输入平均电流的 2 倍。

此拓扑结构优势在于飞电容数量少，同时开关数量较少。不足在于 C3、C2 均为高压电容，成本略高和尺寸略大，驱动较复杂，流经 S3、S4 管的平均电流为 2 倍 V_{IN} 输入平均电流。

2.3 4:1 Fibonacci 降压电荷泵

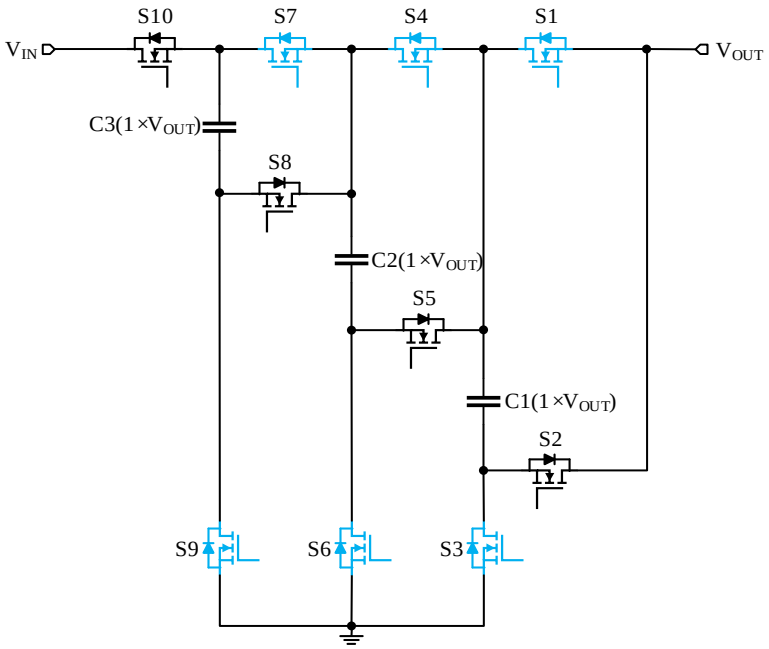

图 3 4:1 Fibonacci 降压电荷泵

在稳定状态下，当 S2、S5、S8、S10 打开时，S1、S3、S4、S6、S7、S9 均处于关闭状态。输

入电流从 V_{IN} 流入，依次流经 S10、C3、S8、C2、S5、C1、S2，最终从 V_{OUT} 流出。V_{OUT} 流出的平均电流为 V_{IN} 输入平均电流的 1 倍。

当 S1、S3、S4、S6、S7、S9 打开时，S2、S5、S8、S10 均处于关闭状态。C3、S1、S4、S7、S9 构成回路，电流依次流经 S9、C3、S7、S4、S1，最终从 V_{OUT} 流出；C2、S1、S4、S6 构成回路，电流依次流经 S6、C2、S4、S1，最终从 V_{OUT} 流出；C1、S1、S3 构成回路，电流依次流经 S3、C1、S1，最终从 V_{OUT} 流出。V_{OUT} 流出的平均电流为 V_{IN} 输入平均电流的 3 倍。

此拓扑结构优势在于电容耐压为 V_{OUT} 电压，驱动简单。不足在于开关管数量较多，放电时开关管共享路径，导致流经 S1 平均电流为 3 倍 V_{IN} 输入平均电流，S4 流过 2 倍 V_{IN} 输入平均电流。

2.4 4:1 Serial-parallel 降压电荷泵

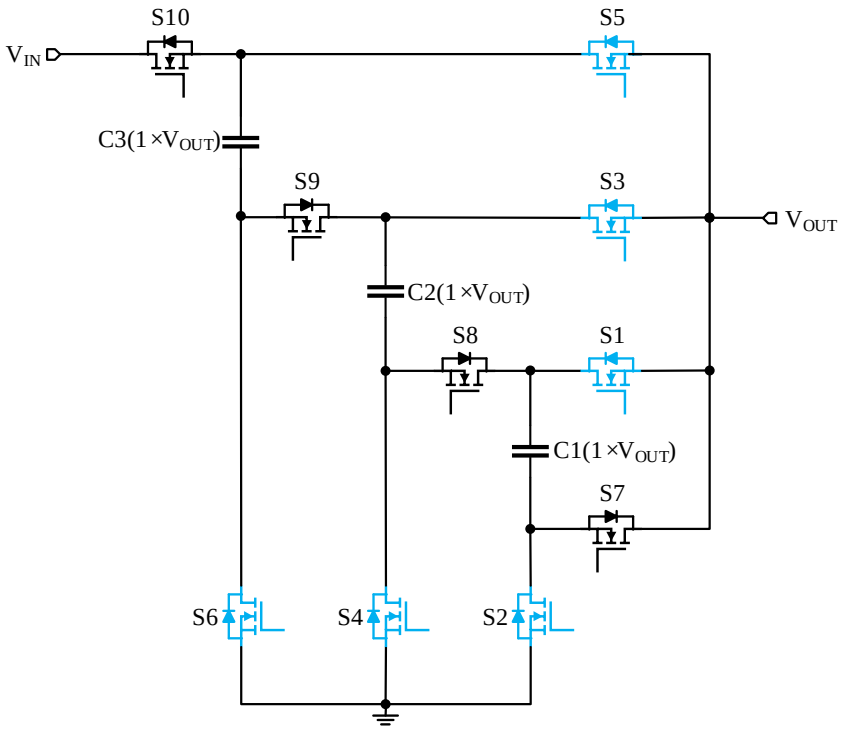

图 4 4:1 Serial-parallel 降压电荷泵

在稳定状态下，当 S7、S8、S9、S10 打开时，S1、S2、S3、S4、S5、S6 均处于关闭状态。输入电流从 V_{IN} 流入，依次流经 S10、C3、S9、C2、S8、C1、S7，最终从 V_{OUT} 流出。V_{OUT} 流出的平均电流为 V_{IN} 输入平均电流的 1 倍。

当 S1、S2、S3、S4、S5、S6 打开时，S7、S8、S9、S10 均处于关闭状态。C3、S5、S6 构成回路，电流依次流经 S6、C3、S5，最终从 V_{OUT} 流出；C2、S3、S4 构成回路，电流依次流经 S4、C2、S3，最终从 V_{OUT} 流出；C1、S1、S2 构成回路，电流依次流经 S2、C1、S1，最终从 V_{OUT} 流出。V_{OUT} 流出的平均电流为 V_{IN} 输入平均电流的 3 倍。

此拓扑结构优势在于电容耐压为 V_{OUT} 电压，流过所有管子平均电流为 1 倍 V_{IN} 输入平均电流，驱动简单。不足在于开关管数量较多。

2.5 4:1 Doubler 降压电荷泵

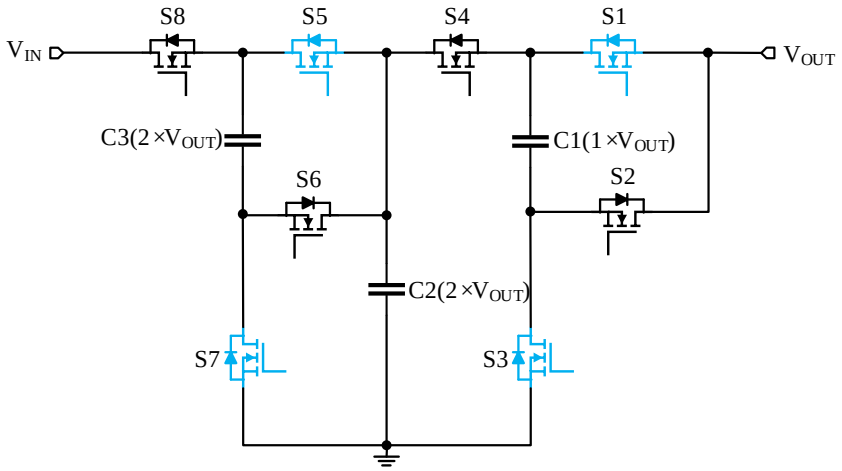

图 5 4:1 Doubler 降压电荷泵

此拓扑结构可认为是两级 2:1 电荷泵的串联。在稳定状态下，当 S2、S4、S6、S8 打开时，S1、S3、S5、S7 均处于关闭状态。输入电流从 V_{IN} 流入，依次流经 S8、C3、S6、S4、C1、S2，最终从 V_{OUT} 流出；C1、C2、S2、S4 构成回路，电流依次流经 C2、S4、C1、S2，最终从 V_{OUT} 流出。V_{OUT} 流出的平均电流为 V_{IN} 输入平均电流的 2 倍。

当 S1、S3、S5、S7 打开时，S2、S4、S6、S8 均处于关闭状态。C2、C3、S5、S7 构成回路，电流依次流经 S7、C3、S5、C2；与此同时，C1、S1、S3 构成回路，电流依次流经 S3、C1、S1，最终从 V_{OUT} 流出。V_{OUT} 流出的平均电流为 V_{IN} 输入平均电流的 2 倍。

此拓扑结构优势在于开关管数量较少。不足在于 C2、C3 为高压电容，成本略高和尺寸略大，驱动较复杂，流过 S1、S2、S3、S4 管的平均电流为 2 倍输入电流。

3 拓扑结构总结

从电路驱动结构复杂度、所需功率管数量、是否需要高压电容、所需最小电容数量这几个维度出发，各种拓扑结构总结如下表 1 所示。

表 1 各种拓扑结构总结

拓扑结构	驱动结构	功率管数量	高压电容	最小电容数量
Ladder (3:1)	复杂	6	不需要	3
Dickson (4:1)	复杂	8	需要	3
Fibonacci (4:1)	简单	10	不需要	3
Serial-parallel (4:1)	简单	10	不需要	3
Doubler (4:1)	复杂	8	需要	3

4 效率优化手段

在实际电荷泵产品中，往往会集成两相，两相之间相差 180° 交错工作，可以在大负载下取得较高的效率。以下是两种可行的手段。

4.1 减小死区时间

死区时间可以认为是所有功率管均处于关断状态下的时间。在此时间里，V_{OUT} 没有来自输入 V_{IN} 或者飞电容的能量补给。输出负载或者死区时间越大，V_{OUT} 的电压跌落幅值越大。较大的 V_{OUT} 电压跌落幅值不利于效率的提升，仿真和实践均验证了这一点。

4.2 飞电容电位预建

互补双相电荷泵的飞电容交替连接在上下两个电压段。每次切换前，需要先断开与当前连接段的开关，再接通到下次连接的电压段。与当前电压段的连接被断开后，受开关节点寄生电容储存电荷的影响，飞电容仍浮空在该段电压，直到下一个接通过程将飞电容拉到新的电压段。飞电容电压在两个段间飞行的过程伴随着寄生电容的充放电。如不采用电感-电容储能交换，则无法充分消除与寄生电容及其电压变化相关的损失。

引用文献[2]提出了通过接通处于两个电压段的互补飞电容开关节点，并在下次接通前预先建立飞电容电压的一种方案，以提高电路的效率。如图 6[2]所示，该方案利用背靠背功率管短接 CFLA、CFLB 节点，使得处于不同电压段的寄生电容向中间电位拉平，从而实现无损电荷搬移，而无需使用电感。这种方法通过让处于不同电压段的寄生电容互充、减少了最多不超过 1/4 的损失。与利用主开关通道建立新的寄生电容电压相比，该方案在预建电压的同时，也对栅-漏电容充电，从而减少了主开关导通建立时间，实现了比寄生电容充分损失减小更多的效率提升。这种以增加一对开关为代价换取效率改善的方案，已经在一些产品设计中以不同形式得到实现，验证了其效率改善效果。

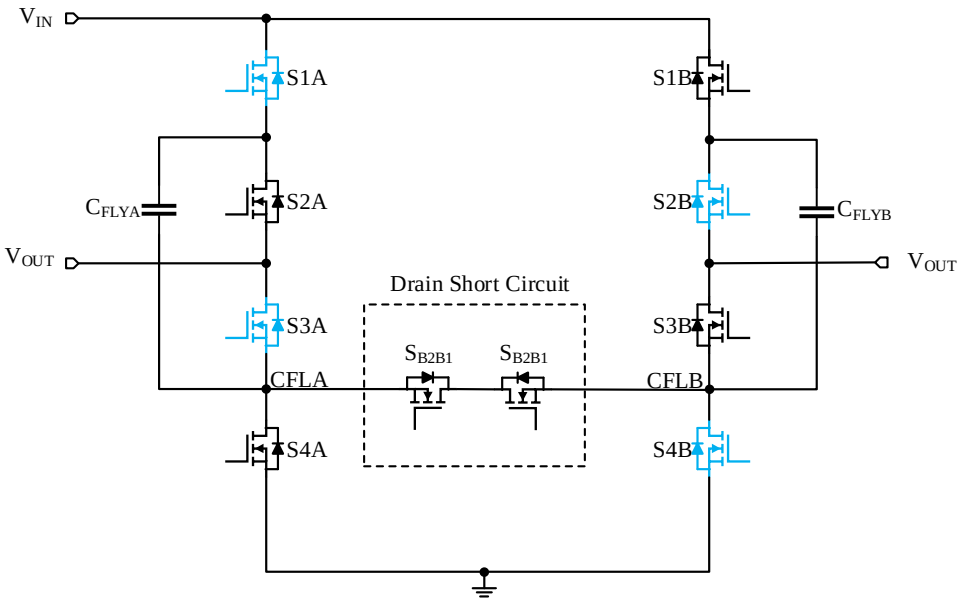

图 6 飞电容电位预建示意图

5 参考文献

[1] Michael Douglas Seeman. A Design Methodology for Switched-Capacitor DC-DC Converters: Technical Report No. UCB/EECS-2009-78 [R/OL]. (2009-05-21): 52. http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2009/EECS-2009-78.html

[2] Michael Douglas Seeman. A Design Methodology for Switched-Capacitor DC-DC Converters: Technical Report No. UCB/EECS-2009-78 [R/OL]. (2009-05-21): 155-158. http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2009/EECS-2009-78.html

修订记录

注意:历史版本的页码可能与当前版本的页码不同。

日期	版本	描述
2024-10-31	REV.A	首次发布

重要声明

本文档中如涉及本公司具体产品型号，SGMICRO 保留其更改电路设计、产品规格和产品描述的权利，恕不另行通知。本文档内容仅供参考。本文档中的所有陈述、信息和建议不构成任何承诺。对于本文档中可能出现的错误，以及因本文档提供的信息和使用本文档而造成的任何附带或间接损失，本公司不作任何明示或暗示的陈述和保证。

此文档未授予任何知识产权许可。除了 SGMICRO 在其产品的销售条款和条件中声明的责任外，本公司概不承担任何其他责任。

www.sg-micro.com

联系方式

圣邦微电子(北京)股份有限公司

地址：北京市海淀区西三环北路 87 号国际财经中心 D 座 11 层

邮编：100089

电话：010-88825716/17

深圳办事处

地址：深圳市南山区科技园高新南六道 6 号迈科龙大厦 15 层

邮编：518063

电话：0755-26715323

上海办事处

地址：上海市徐汇区漕溪北路 88 号圣爱大厦 1706 室

邮编：200030

电话：021-64396434