

具有电源密集开关电容转换器的超高速 USB 电池充电

引言

自 1996 年起，USB 一直被用作连接器及其相关信号和电力传输的标准。适用于电源设计的最新发展包括 USB Type-C® (USB-C) 连接器和 USB Power Delivery (USB PD) 规范，以及 USB 可编程电源 (PPS) 规范。得益于这些增强功能，USB 非常适用于提供高于 100W 的电源。

与较为传统的基于降压或升压转换器的电源集成电路 (IC) 相比，开关电容器转换器已成为 USB Type-C 生态系统中优先选择的电源解决方案。开关电容器转换器的转换效率超过 98%，而非 90%，可实现能够充分利用最新的 USB Type-C PD PPS 标准且具有成本效益的高效解决方案。

随着便携式设备供应商竞相将快速充电解决方案推向市场，开关电容器转换器也已成为优先选择的新型充电解决方案。例如，在短短几年内，手机充电功率从 18W 提高到了 120W。新的高效 (98.6%) 2:1 开关电容器快速充电解决方案可通过 USB PPS 电源在 15 分钟内以 120W 功率为 4Ah 电池充电。

使用 USB PD 提供 100W 以上的功率

USB PD 是一种能够实现更快充电、更灵活电源的新协议。USB Implementers Forum 开发出了与 USB-C 物理连接并行的 USB PD，它是新 USB 3.1 标准的一个子集。

表 1 显示了 USB 标准的发展历程。随着 USB PD 和 USB-C 连接器的发展，电源能够提供高达 100W 的功率 [1]。

USB 标准	USB 端口输出电压	USB 端口电流限值	USB 端口最大功率输出
USB 2.0	5V	500mA	2.5W
USB 3.1	5V	900 mA	4.5W
USB BC1.2	5V	1.5A	7.5W
支持高压下行充电端口 (HVDCP) 的 USB BC1.2	5V、9V、12V	1.5A	18W

USB 标准	USB 端口输出电压	USB 端口电流限值	USB 端口最大功率输出
USB PD	5V、9V、12V、20V	5A	100W
支持 PPS 的 USB PD	3.3V 至 21V 可调电压，阶跃为 20mV	高达 5A 的可调电流，阶跃为 50mA	100W

表 1. USB 快速充电标准的发展历程。

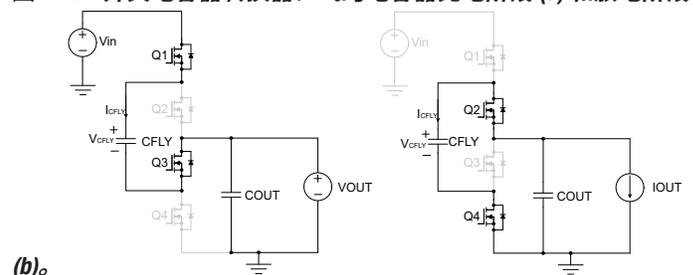
遗憾的是，传统稳压降压、升压或降压/升压集成电路由于相对低效，无法充分利用 100W 功率。随着 USB PPS 的发展，非稳压开关电容器转换器在系统中变得可行 [2]。开关电容器转换器具有超高效率，可以充分利用最新的 USB Type-C PD PPS 标准。

高效开关电容器直流/直流转换器

开关电容器直流/直流转换器是仅使用飞跨电容器和开关在输入和输出之间转移电荷的开关稳压器。与基于电感器的直流/直流转换器相比，开关电容器转换器具有更高的功率密度（电容器单位容积储存的能量是电感器的 10 到 100 倍）、低电磁干扰 (EMI) 和更低的成本。

2:1 开关电容器直流/直流转换器使用四个开关交替对飞跨电容器进行充电和放电，从而提供电源。图 1 显示了一个简化的开关电容器电路和飞跨电容器的充电/放电阶段。输出电压为输入电压的一半，输出电流为输入电流的两倍。

图 1. 2:1 开关电容器转换器：飞跨电容器充电阶段 (a) 和放电阶段



可将理想变压器与输出阻抗 (R_{OUT}) 串联在一起，以对开关电容器转换器效率进行建模 [3]，包括飞跨电容器的电荷

共享损耗和电阻元件的导通损耗。但是，该模型中不包括开关损耗，需要对其进行单独分析。

输出阻抗

输出阻抗存在两个渐近限值：慢速开关限值和快速开关限值。假设转换器中的电阻为零，慢速开关限值取决于电容器中的充电共享损耗。假设电容无穷大且电容器上的电压恒定，则快速开关限值取决于导通损耗 [3]。

[3] 中得出的一种电荷流矢量法可以计算慢速及快速开关限值。方程式 1 和方程式 2 表示电容器和开关中输出电荷和电流的电荷流：

$$q_c^j = a_c^j q_{out} = a_c^j \frac{I_{out}}{f_{SW}} \quad (1)$$

$$q_r^j = a_r^j q_{out} = a_r^j \frac{I_{out}}{f_{SW}} \quad (2)$$

其中， q_c^j 和 q_r^j 是 j 相位中的电容器和开关电荷流矢量，而 a_c 和 a_r 是电荷倍增矢量。

图 2 展示了 2:1 开关电容器转换器的飞跨电容器和开关 Q1 到 Q4 中的电荷流。充电和放电两个阶段的占空比均固定为 50%。

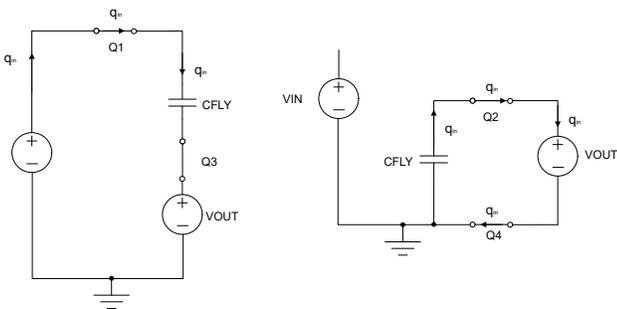


图 2. 电容器和开关电荷流：充电，阶段 1 (a)；放电，阶段 2 (b)。

基于图 2，输入电荷为输出电荷的一半。方程式 3 表示电容器电荷的倍增数， a_c ：

$$a_c = [a_{CFLY_1}] = -[a_{CFLY_2}] = \left[\frac{1}{2}\right] \quad (3)$$

方程式 4 表示开关电荷的倍增数， a_r ：

$$a_r = [a_{Q1}, a_{Q2}, a_{Q3}, a_{Q4}]^T = \left[\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right]^T \quad (4)$$

在得出电荷倍增数之后，方程式 5 和方程式 6 可计算慢速及快速开关限值。有关分析的详细信息，请参阅 [3]。

$$R_{SSL} = -\frac{v_{out}}{i_{out}} = \sum \frac{(a_{c,i})^2}{C_i f_{SW}} \quad (5)$$

$$R_{FSL} = 2 \sum R_i (a_{r,i})^2 \quad (6)$$

实际的开关电容器转换器同时包含电荷共享损耗和导通损耗。方程式 7 可近似计算出用于转换器设计的输出电阻 [4]，其中 RSSL 是按照给定的转换器开关频率计算出的慢速开关限值。

$$R_{out} \approx \sqrt{R_{SSL}^2 + R_{FSL}^2} \quad (7)$$

图 3 是基于 2:1 开关电容器转换器在开关频率下的输出阻抗的功率损耗。将快速开关限值的功率损耗标准化为 1。快速开关限值与开关频率成反比，因此，随着频率的增加，功率损耗会不断下降。但是在实际应用中，您选择开关频率时需要考虑开关损耗。

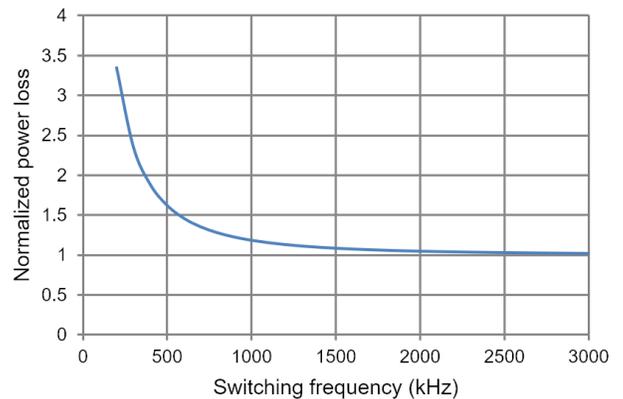


图 3. 2:1 开关电容器转换器的输出阻抗功率损耗。

开关损耗

开关电容器转换器的一个主要优点是可以降低开关损耗，如公式 8 所示，开关损耗包括 IV 重叠损耗 (PIV)、栅极驱动损耗 (PGATE)、输出结电容损耗 (POSS)、死区时间损耗 (PDT) 和反向恢复损耗 (PQRR)。开关电容器转换器可以消除 IV 损耗、死区时间损耗和反向恢复损耗。

$$P_{SW} = P_{IV} + P_{GATE} + P_{OSS} + P_{DT} + P_{QRR} \quad (8)$$

开通开关损耗

占空比固定为 50%，因此有可能将飞跨电容器的电压和输出电压控制在接近输入电压的一半。在开关完全开通之前，流过器件的电流非常小，开关可以实现近零电流开通。开通过程中几乎可消除 IV 重叠损耗。

开关漏源结电容中储存的能量会在开通过程中出现损耗，因此出现了结电容损耗，如**方程式 9** 中所示：

$$P_{DS} = \frac{1}{2} C_{DS} V_{OUT}^2 f_{sw} \quad (9)$$

其中， C_{DS} 是漏源结电容， V_{OUT} 是输出电压，而 f_{sw} 是开关频率。

关断开关损耗

在关断过程中，当开关全部关闭时，转换器中的电流变为零。无电流对结电容进行充电，因此开关上的电压保持为零。开关会实现零电压关断，并消除 IV 重叠损耗。死区时间内没有电流，因此也会消除死区时间损耗和反向恢复损耗。

栅极驱动损耗

栅极驱动损耗也是开关损耗的一部分（请参阅**方程式 10**）：

$$P_{GATE} = \frac{1}{2} Q_{GS} V_{GATE} f_{sw} \quad (10)$$

其中， Q_{GS} 是开关的栅源电荷， V_{GATE} 是栅极导通电压，而 f_{sw} 是开关频率。

方程式 11 用于计算开关电容器转换器的总体功率损耗（也可参阅**图 4**）：

$$P_{SC} = P_{OUT} + \sum P_{GATE} + \sum P_{DS} \quad (11)$$

慢速开关阻抗与开关频率成反比，而开关损耗与开关频率成正比。在确定拓扑和电容器后，开关电容器转换器会存在一个优化的开关频率。

图 4. 2:1 开关电容器转换器的总体功率损耗

双相交错式开关电容器转换器

由于连接两个不同电压电容器时会出现电流尖峰，开关中会以额外导通损耗的形式消耗部分慢速开关功率损耗。电

流尖峰会增加电流均方根 (RMS) 值并导致额外的导通损耗。提高开关频率是降低 RMS 电流的一种方法，但是，开关损耗将会增加。

双相交错拓扑是一种在不增加开关损耗的情况下降低 RMS 电流的方法。双相拓扑可从输入源实现连续电流；因此，能够减少输入电压纹波。**图 5** 在仿真中使用相同的总飞跨电容器，比较了单相和双相交错开关场效应晶体管 (FET) 电流波形。为了提供相同的电流和输出功率，单相电流纹波明显大于双相；因此，在相同的器件尺寸下，双相、交错式开关电容器转换器中的导通损耗要小得多。

图 5. 单相开关电容器 (a)、双相开关电容器 (b) 中的 Q1/Q3 电流仿真开关 FET 电流波形比较。

高功率密度开关电容器转换器

表 2 比较了具有类似输入和输出电压范围的传统两级降压转换器 [5] 和开关电容器 IC 的功率密度。

转换器的额定功率受限于 1.4W 的总体功率损耗。DSBGA IC 封装用于所有拓扑。除了 IC 和储能元件的尺寸外，总解决方案尺寸还假设电路板布局额外占用 20%。开关电容器转换器的功率密度是两级降压转换器的四倍，功率密度比三级降压转换器高 90%。

拓扑	1.4W 损耗下的额定功率	IC 芯片尺寸	电感器或电容器尺寸	解决方案总尺寸	最大高度	功率密度
两级降压 [6]	15W	7mm ²	17.6mm ²	30mm ²	1.2 mm	0.42W/m ³
三级降压 [5]	20W	6.1mm ²	5mm ²	14mm ²	1.2 mm	1.19W/m ³
开关电容器	40W	9.6mm ²	7.7mm ²	22mm ²	0.8 mm	2.26W/m ³

表 2. 功率密度比较。

开关电容器转换器应用：便携式设备的快速充电

开关电容器转换器的一个应用是便携式设备的电池充电器。利用 USB PPS 的可定制功能，非稳压开关电容器转换器能够以 50% 的固定占空比为电池充电。便携式设备的功率损耗受限于热剖面；有时温升限制为低至 10°C。电池充电器需要较小的占用空间。与基于电感器的稳压转换器相比，开关电容器转换器的高效率和高功率密度可以大幅提高充电功率。

BQ25980 [10] 是一种基于开关电容器的两芯电池快速充电器，有助于在 2A 和 8A 电流范围内实现 98% 以上的效率（如图 6 中所示）。两个 **BQ25980** 器件并联放置可实现 120W 功率以及 2.4W/mm³ 功率密度。电池能够在 15 分钟内从 0% 充电到 100% [11]。

图 6. BQ25980 开关电容器转换器效率。

结论

与基于电感器的转换器相比，开关电容器转换器具有更高的效率和功率密度。借助 USB PPS 适配器和 USB Type-C 连接器，在电池充电系统中使用两个峰值效率为 98.6% 的开关电容器，可实现 120W 快速充电且充电时间仅为 15 分钟，从而大大改善了用户体验。

相关网站

1. [USB Charger \(USB Power Delivery\)](#)
2. <https://www.usb.org/sites/default/files/D2T2-1%20-%20USB%20Power%20Delivery.pdf>
3. Michael D. Seeman, “[A Design Methodology for Switched-Capacitor DC-DC Converters,](#)” 2009
4. D. Maksimovic and S. Dhar, “Switched-capacitor dc-dc converters for low-power on-chip applications,” IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 54-59, June 1999.
5. Jeff Falin, Alvaro Aguilar, “Maximize power density with three-level buck-switching chargers,” Analog design journal, Q1, 2021.
6. [BQ25898](#)
7. [BQ25970](#)
8. [TPS25750](#)
9. [HUAWEI Mate40 Pro | 5G](#)
10. [BQ25980](#)
11. <https://www.vivo.com.cn/vivo/iqoo5pro/>
12. D. Maksimovic and S. Dhar. Switched-capacitor DC-DC converters for low-power on-chip applications. In "Power Electronics Specialists Conference", 1999, PESC 99.30th Annual IEEE, volume 1, pages 54-59, Charleston, SC, June/July 1999.

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

USB Type-C® is a registered trademark of USB Implementers Forum.
所有商标均为其各自所有者的财产。

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司