

用于车载USB供电的NCV8852

NCV8852 for In-vehicle USB Power Supply

■ 安森美公司 高级应用工程师 李桢

关键词：车载USB供电 NCV8852 车载娱乐系统

前言

在目前的车载娱乐系统中，USB 接口已经成为系统的标配。随着大电池容量的便携设备的流行，做为车载充电接口的 USB 电源，需要提高电流以满足设备的需要。目前主流方案中，单个 USB 口的负载能力需要达到 2.5A。

车载 USB 系统的架构为：从汽车蓄电池取电，经过降压电路后得到 5V 的稳定电源，提供给 USB 的 VBUS。汽车蓄电池的电压并不是一个稳定的电压，其变化范围是非常大的，以小型乘用车为例，其蓄电池电压典型值为 13V，电压范围为 9V~16V，在启停等恶劣情况下，会低至 6V，甚至更低。不少整车厂对 USB 电源有着非常严苛的要求，6V 电压下要保证 5V 输出，考虑到输入端的反极性保护及线损，USB 电源的输入端电压会更低。这对车载 USB 电源的设计是个挑战。

Buck 电路是最常用的降压开关电源。图 1 所示为非同步的 Buck 电路。

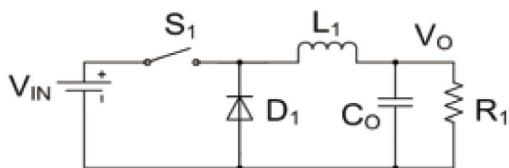


图1 非同步buck电路结构

其工作原理为，当上管 S_1 开通时，电源 V_{IN} 向负载供电，电感 L_1 储能，电感上的电压为 $V_{IN}-V_O$ 。当上管 S_1 关闭后，电感 L_1 向负载提供能量，电感上的电压为 $-V_O$ 。图 2 所示为电流连续模式下的 BUCK 电路的工作原理及波形。根据电感伏秒平衡可以得到：

$$(V_{IN}-V_O) \times DT = V_O \times (1-D)T \quad (1)$$

最后可以解出

$$V_O = D \times V_{IN} \quad (2)$$

常用的 BUCK 电路，出于成本考虑，会选用 N 沟道 MOSFET。但是在车载 USB 电源的应用中，成本较高的 P

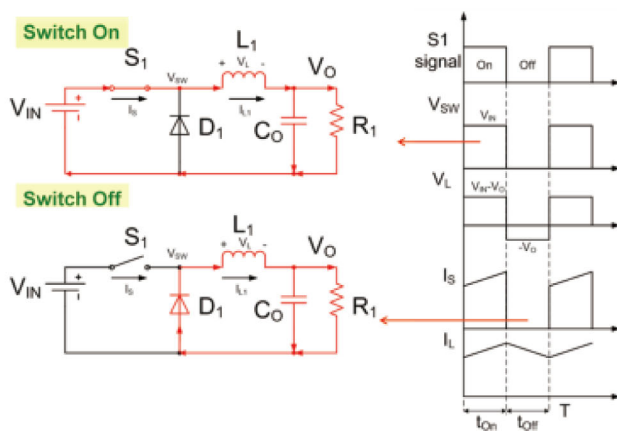


图2 电流连续模式下的非同步buck的工作原理

沟道 MOSFET 却更有优势。

根据公式 2，如果需要在 $V_{IN}=5.7V$ 下，保证 $V_O=5V$ 。那么最大占空比为：

$$D_{MAX-IDEAL} = \frac{V_O}{V_{IN}} \approx 88\%$$

88% 只是理想情况下的理论计算值。实际中，需要考虑续流二极管 D_1 的压降，开关管 S_1 的导通压降，以及电感 L_1 的直流阻抗的压降，如图 3 所示。

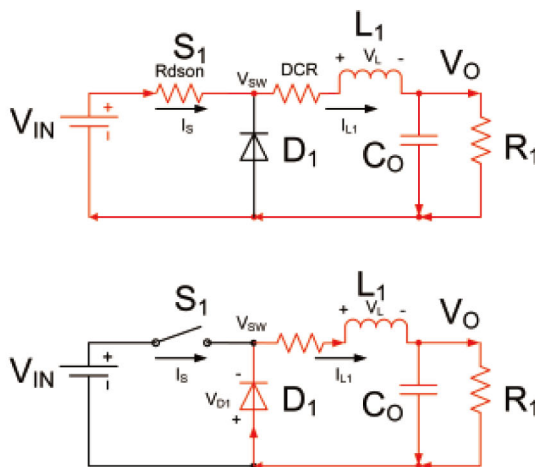


图3 考虑寄生参数的非同步Buck 电路工作原理

开关管闭合时，不考虑电流纹波，电感上的电压为：

$$V_L = V_{IN} - V_O - I_O \times (R_{dson} + D_{CR}) \quad (3)$$

其中， I_O 为输出电流， R_{dson} 为上管 MOSFET 的导通电阻， D_{CR} 为电感的直流阻抗。

开关管断开时，不考虑电流纹波，电感上的电压为：

$$V_L = -V_O - V_D - I_O \times D_{CR} \quad (4)$$

其中， V_D 为二极管的正向压降。

根据电感的伏秒平衡，可以得到实际的占空比为：

$$D_{MAX-REAL} = \frac{V_O + V_D + I_O \times D_{CR}}{V_{IN} + V_D - I_O \times R_{dson}} \quad (5)$$

取 $V_{IN} = 5.7V$ ， $V_O = 5V$ ， $I_O = 2A$ ， $V_D = 0.3V$ ， $R_{dson} = 50m\Omega$ ， $D_{CR} = 70m\Omega$ ，可以计算所需要的占空比为：

$$D_{MAX-REAL} = \frac{5 + 0.3 + 2 \times 0.07}{5.7 + 0.3 - 2 \times 0.05} \approx 92.2\%$$

如果选择 N 沟道 MOSFET 做为开关 S_1 ，驱动电压要高于 V_{IN} ，需要用自举电路，通过每个周期对自举电容充电来驱动 NMOS，这种驱动结构在如此大的占空比的应用中问题很多。而采用 P 沟道 MOSFET，通常可以做到 100% 的占空比，即常开。在常开的情况下，我们可以得到：

$$V_{IN} = V_O + I_O \times (R_{dson} + D_{CR}) \quad (6)$$

取 $V_O = 5V$ ， $I_O = 2A$ ， $V_D = 0.3V$ ， $R_{dson} = 50m\Omega$ ， $D_{CR} = 70m\Omega$ ，可以得到该情况下，输入电压最低可为：

$$V_{IN} = 5 + 2 \times (0.05 + 0.07) = 5.24V$$

基于 NCV8852 的车载 USB 电源设计

NCV8852 是一款外接 P 沟道 MOSFET 的非同步 BUCK 控制器。输入电压可高达 44V，适用于 12V 蓄电池系统。采用峰值电流控制，系统易于稳定，响应快。可通过在 ROSC 管脚外接电阻将工作频率设定在 100kHz 到 500kHz。图 4 为 NCV8852 的典型应用电路。ISNS 管脚检测上管电流，用于峰值电流控制以及过流保护。COMP 管脚为误差放大器的输出，外接 RC 电路以补偿环路。

用 NCV8852 设计 USB 电源，输入电压范围 $V_{IN} = 5.7V \sim 16V$ ，典型值 $V_{IN_TYP} = 12V$ ，输出电压 $V_O = 5V$ ，输出电流 $I_O = 2.5A$ ，工作频率 $f_s = 170kHz$ 。

Buck 电路工作的最恶劣条件为输入电压最高时，此时其电流纹波最大，峰值电流最高。

1、设定工作频率

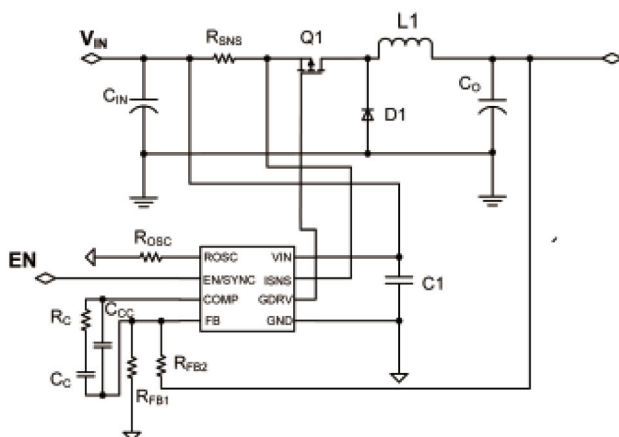


图4 NCV8852的典型应用电路

NCV8852 的工作频率，可根据如下公式设定：

$$R_{OSC} = \frac{2859}{f_s - 170} k\Omega \quad (7)$$

当设置为 170kHz 时，将 R_{OSC} 开路即可。

2、占空比

最高工作电压下，占空比最小为：

$$D_{MIN} = \frac{V_O + V_D}{V_{IN_MAX} + V_D} = 32.5\%$$

最低工作电压下，占空比最大为：

$$D_{MIN} = \frac{V_O + V_D}{V_{IN_MIN} + V_D} = 88.3\%$$

3、选择电感

电感主要有纹波电流 ΔI 决定。通常将 ΔI 设定为典型输入电压下，最大输出电流的 30%~50%，这里取为 30%。

$$\Delta I_{TYP} = 0.3 \times I_O = 0.3 \times 2.5 = 0.75A$$

电感值为：

$$L = \frac{V_O}{f_s \times \Delta I_{TYP}} \times \left(1 - \frac{V_O}{V_{IN_TYP}}\right) = \frac{5}{170 \times 1000 \times 0.75} \times \left(1 - \frac{5}{12}\right) = 22.8\mu H \quad (8)$$

实际取为 $L_1 = 22\mu H$ 。

最高输入电压上的最大纹波电流为：

$$\Delta I_{MAX} = \frac{V_O}{f_s \times L_1} \times \left(1 - \frac{V_O}{V_{IN_MAX}}\right) = \frac{5}{170 \times 1000 \times 22 \times 10^{-6}} \times \left(1 - \frac{5}{16}\right) = 0.92A \quad (9)$$

电感上的最大峰值电流为：

$$\begin{aligned} I_{L_{PEAK}} &= I_0 + \frac{\Delta I_{MAX}}{2} \\ &= 2.5 + \frac{0.92}{2} = 2.96A \end{aligned} \quad (10)$$

考虑 30% 的裕量，选取电感的直流电流大于 3.2A，饱和电流大于 3.9A。选取 WURTH 电感 744770122，感值 22μH，直流电阻 45mΩ，最大直流电流 4.1A，最大饱和电流 5A。

4、选取电流检测电阻

$$R_{SNS} = \frac{V_{CL}}{I_{CL}} \quad (11)$$

V_{CL} 是过流门限电压，为 100mV； I_{CL} 是过流保护电流值，设定限流值为最大峰值电流的 1.3~1.5 倍。

选取 25mΩ 采样电阻，过流保护值设为 4A。

5、MOSFET 选择

MOSFET 承受的最高电压为 V_{INMAX} ，考虑到抛负载保护，选取耐压 40V 以上的 MOS。MOSFET 的损耗，可由以下公式估算，

导通损耗：

$$P_{MOS_CON} = I_O^2 \times D \times R_{dson} \quad (12)$$

开关损耗：

$$P_{SW_LOSS} = 1/2 \times I_O \times V_{IN} \times (t_{ON} + t_{OFF}) \times f_s \quad (13)$$

$$t_{ON} \approx \frac{Q_{GD}}{I_{SINK}}, \quad t_{OFF} \approx \frac{Q_{GD}}{I_{SRC}} \quad (14)$$

t_{ON} 、 t_{OFF} 为 MOSFET 开通和关断时间。

I_{SINK} 为驱动下拉电流，NCV8852 的驱动下拉电流典型值为 200mA。

I_{SRC} 为驱动的输出电流，NCV8852 的驱动输出电流典型值为 200mA。

选取 ONSEMI 的 NVTFS5116PL，耐压 60V，导通电阻 $R_{dson}=52m\Omega@V_{GS}=10V$ ， $Q_{GD}=8nC$ ，封装 u8FL，参考热阻（芯片结温到环境温度）47℃/W。

由 QGD 可先计算出 MOSFET 的开通关断时间为：

$$T_{ON} \approx \frac{Q_{GD}}{I_{SINK}} = \frac{8}{0.2} ns = 40ns$$

$$t_{OFF} \approx \frac{Q_{GD}}{I_{SRC}} = \frac{8}{0.2} ns = 40ns$$

计算 MOSFET 功耗：

在最高输入电压下，

$$P_{MOS_CON_VINMAX} = I_O^2 \times D_{MIN} \times R_{dson} \approx 106mW \quad (15)$$

$$P_{SW_LOSS_VINMAX} = 1/2 \times I_O \times V_{IN_MAX} \times (t_{ON} + t_{OFF}) \times f_s = 272mW \quad (16)$$

MOSFET 的结温为：

$$\begin{aligned} T_{J_VINMAX} &= T_{A_MAX} + P_{LOSS_VINMAX} \times R_{\theta JA} \\ &= 85 + (0.272 + 0.106) \times 47 = 103^\circ C < 150^\circ C \end{aligned} \quad (17)$$

T_{A_MAX} 为最大环境温度，车载 USB 电源一般要求为 85℃。150℃ 为最大结温。

在最低输入电压下，

$$P_{MOS_CON_VINMIN} = I_O^2 \times D_{MAX} \times R_{dson} \approx 287mW$$

$$P_{SW_LOSS_VINMIN} = 1/2 \times I_O \times V_{IN_MIN} \times (t_{ON} + t_{OFF}) \times f_s = 97mW$$

MOSFET 的结温为：

$$\begin{aligned} T_{J_VINMIN} &= T_{A_MAX} + P_{LOSS_VINMIN} \times R_{\theta JA} \\ &= 85 + (0.287 + 0.097) \times 47 = 103^\circ C < 150^\circ C \end{aligned}$$

6、续流二极管的选择

续流二极管上的最大反向压降为 V_{INMAX} ，流过二极管的最大峰值电流为 2.96A，流过二极管的最大平均电流为：

$$I_{D_AVG_MAX} = I_O \times (1 - D_{MIN}) \approx 1.7A \quad (18)$$

建议二极管正向电流为流过二极管的平均电流的 1.5 倍。这里选取 ONSEMI 的 MBRA340，最大正向平均电流为 3A，反向耐压 40V，SMA 封装，参考热阻为 81℃/W。2.5A，100℃ 结温时的正向导通压降约为 0.32V。

二极管损耗（忽略寄生电容产生的损耗）为：

$$P_{D_LOSS_MAX} = I_{D_AVG_MAX} \times V_D \approx 0.54W \quad (19)$$

最高结温为：

$$T_{J_D} = T_{A_MAX} + P_{D_LOSS} \times R_{\theta JA_D} = 129^\circ C < 150^\circ C \quad (20)$$

7、输出电容的选择

输出电容纹波主要由两部分组成，一部分为电容 ESR 产生的纹波，另一部分为电容产生的纹波。

由电容产生的纹波为：

$$\Delta V_{Co_CAP} = \frac{V_O}{8 \times f_s^2 \times L \times C_O} \times (1 - D) \quad (21)$$

由 ESR 产生的纹波为：

$$\Delta V_{Co_ESR} = \frac{V_O}{f_s \times L} \times (1 - D) \times ESR \quad (22)$$

为了简化计算，将输出纹波近视为 ESR 纹波与电容纹波相加：

$$\Delta V_O = \Delta V_{C_{O_CAP}} + \Delta V_{C_{O_ESR}} \quad (23)$$

输出电容电流的有效值为：

$$I_{C_O(RMS)} = \frac{\Delta I}{12} \quad (24)$$

如果选取电解电容，需要保证输出电容电流的有效值要小于电解电容允许的最大纹波电流。

选取 22μF 的瓷片电容，ESR 产生的纹波可忽略，则输出纹波为：

$$\Delta V_{C_{O_CAP}} = \frac{V_O}{8 \times f_s^2 \times L \times C_O} \times (1 - D_{MIN}) = 30mV$$

8、输入电容的选择

忽略电感电流纹波，输入电容电流的有效值为：

$$I_{C_{in}(RMS)} = I_O \times \sqrt{D \times (1 - D)} \quad (25)$$

如果选择电解电容，需要保证输出电容电流的有效值要小于电解电容允许的最大纹波电流。

9、反馈电阻

根据公式：

$$V_{FB} = \frac{R_{FB1}}{R_{FB1} + R_{FB2}} \times V_O \quad (26)$$

$V_{FB}=0.8V$ ，选取 $R_{FB1}=10K\Omega$ ，则 $R_{FB2}=52.5K\Omega$

10、补偿电路的设定

NCV8852 采用峰值电流模式控制。考虑简化的峰值电流模型（不考虑斜坡补偿），如图 5 所示。

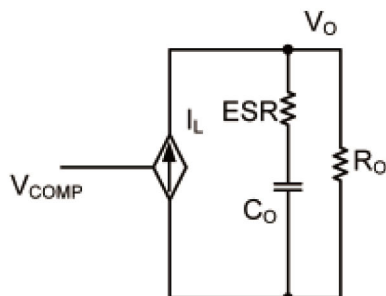


图5 简化的峰值电流模型

R_O 为等效的负载电阻。

不考虑电感电流纹波有：

$$V_{COMP} = I_L \times R_{SNS} \times A_{CSA} \quad (27)$$

A_{CSA} 为 NCV8852 电流检测运放的增益。 V_{COMP} 到 V_O 的传递函数为：

$$\frac{V_O(s)}{V_{COMP}(s)} = \frac{R_O}{R_{SNS} \times A_{CSA}} \times \frac{1+sESR C_O}{1+sR_O C_O} \quad (28)$$

系统有一个极点和一个零点。如果用瓷片电容，则可以忽略由 ESR 产生的零点。

NCV8852 采用的电压型运放，其反馈电路如图 6 所示。

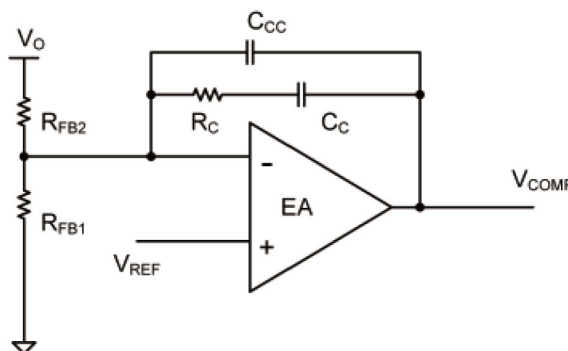


图6 NCV8852输出电压误差放大器

写出 V_O 到 V_{COMP} 的传递函数：

$$\frac{V_{COMP}(s)}{V_O(s)} = \frac{1}{s(C_{CC} + C_C)R_{FB2}} \times \frac{1+sC_C R_C}{1+sR_C \frac{C_C C_{CC}}{C_C + C_{CC}}} \quad (29)$$

除去零点处的极点，还有一个零点和一个极点，如果不接 C_{CC} ，则只有一个零点。

通常当系统的增益曲线，能够以 -1 斜率 (-20db/dec) 穿越 0db 线时，可以获得较好的相位裕度。为此需要满足：

$$20\log F_C - 20\log F_{RC} = 20\log A_{P0} + 20\log A_{EM} \quad (30)$$

F_C 为系统开环传递函数的穿越频率，通常取为开关频率的 1/6 以下， F_{RC} 为主电路传递函数的极点的频率， A_{P0} 为主电路传递函数的低频增益， A_{EM} 为反馈电路传递函数的中频增益。

$$A_{P0} = \frac{R_O}{R_{SNS} \times A_{CSA}} \quad (31)$$

$$A_{EM} = \frac{R_C}{R_{FB2}} \quad (32)$$

由此可以得到 R_C ，

$$R_C = F_C \times 2\pi \times C_O \times R_{SNS} \times A_{CSA} \times R_{FB2} \quad (33)$$

取 $F_C=17kHz$ 。已知 $C_O=22\mu F$ ， $R_{SNS}=25m\Omega$ ， $A_{CSA}=2V/V$ ，

$R_{FB2}=52.5k\Omega$ 。

可以求得 $R_C=6.2k\Omega$ 。

反馈电路的零点要放在主电路的极点附近，所以有：

$$F_{Z_EA} = \frac{1}{2\pi \times R_C \times C_C} = F_{RC} = \frac{1}{2\pi \times R_O \times C_O} \quad (34)$$

得到 C_C :

$$C_C = \frac{R_O \times C_O}{R_C}$$

$$\text{其中: } R_O = \frac{V_O}{I_O} = \frac{5V}{2.5A} = 2\Omega$$

计算得 $C_C=7.1nF$, 选取 $C_C=8.2nF$ 。

因为电路采取用瓷片电容, 所以不用去消除由 ESR 造成的零点。 C_{CC} 不接。如果采用的是电解电容则需要把反馈电路的极点放到主电路 ESR 零点附近。可根据下式计算 C_{CC} :

$$F_{P_EA} = \frac{1}{2\pi \times R_C \times \frac{C_C \times C_{CC}}{C_{CC} + C_C}} = F_{Z_ESR} = \frac{1}{2\pi \times ESR \times C_O} \quad (35)$$

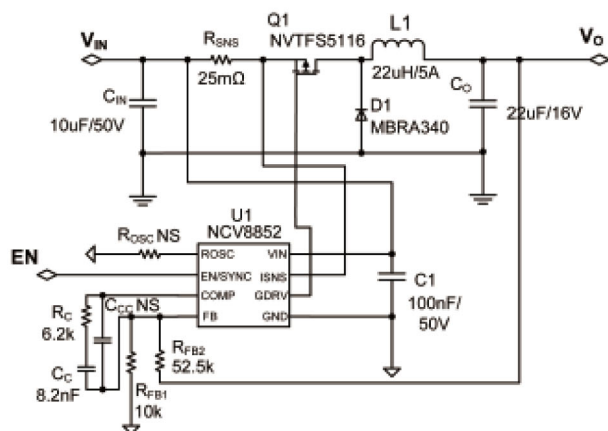


图7 NCV8852 5V 2.5A车载USB电源设计实例电路图

表1: 图7设计实例的主要元件清单

元件	描述	封装	厂家	型号
L1	22uH, DCR(typ)=45mΩ, IR=4.1A, ISAT=5A	SMD	Wurth	744770122
Q1	MOSFET, 60V, Rds(on)=52mΩ@VGS=10V	u8FL	Onsemi	NVTFS5116PL
D1	肖特基二极管, 3A, 40V	SMA	Onsemi	MBRA340
U1	PMOS BUCK 控制器	SO8	Onsemi	NCV8852
CIN	陶瓷电容, 10uF, 50V	1210		
CO	陶瓷电容, 22uF, 16V	1210		
C1	陶瓷电容, 100nF, 50V	0603		
CC	陶瓷电容, 8.2nF, 16V	0603		
CCC	不焊	0603		
RSNS	电流检测电阻, 25mΩ, 0.5W	2010		
RC	电阻, 精度 1%, 6.2k	0603		
RFB1	电阻, 精度 1%, 10k	0603		
RFB2	电阻, 精度 1%, 52.5k	0603		
ROSC	不焊	0603		

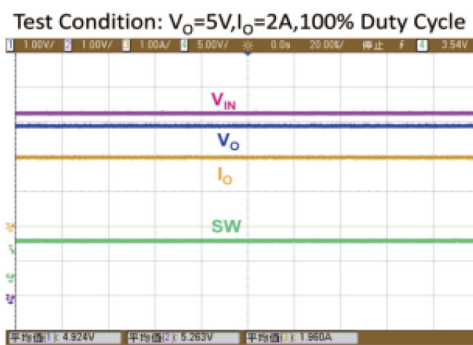
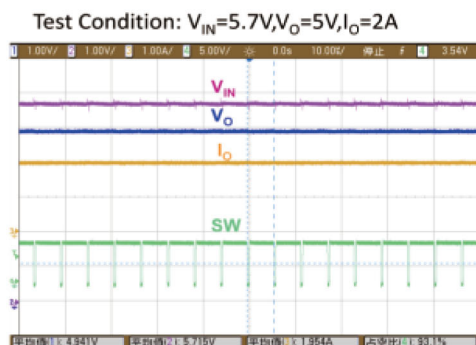


图8 NCV8852电路实测工作波形