

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802325

# 高频 Buck 变换器输出电压纹波理论分析与实验测量

张旭<sup>1</sup> 李芳<sup>2</sup>

(1.中国石油大学(华东)青岛 266580; 2.北京交通大学北京 100044)

**摘要:** Buck 变换器广泛用于服务器供电电源等场合。提高开关频率可降低变换器体积,但寄生参数对输出电压纹波的影响不可忽略,本文针对此现象展开研究。首先根据 Buck 变换器高频等效电路模型,求解输出电压数学表达式,推导输出电压纹波变化规律及相应的判定条件,提出输出电容支路上寄生参数影响输出电压纹波大小的结论。通过设计高频同步 Buck 变换器实验方案,并选用高带宽的测试设备和最小测试环路,实现了对高频电压纹波正确的实验测量,验证了理论分析的正确性。该研究为 Buck 变换器的电路设计提供理论依据,并为高频实验测量提供相关经验。

**关键词:** Buck 变换器;输出电压纹波;寄生参数;高频测量

**中图分类号:** TM93    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.1010

## Theoretical analysis and experimental measurement of the output voltage ripple of high switching frequency Buck converter

Zhang Xu<sup>1</sup> Li Fang<sup>2</sup>

(1.China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Buck converter is commonly used in computer servers and other power supplies. Increasing the switching frequency can reduce the volume of the converter, but the effect of parasitic parameters on the output voltage ripple cannot be ignored. The output voltage ripple of Buck converter is studied in this paper. According to the high frequency equivalent circuit model, the output voltage mathematical expression is solved, the output voltage ripple variations and conditions are obtained, and the conclusion that parasitic parameters affect the value of output voltage ripple is proposed. By designing the experimental prototype of high switching frequency synchronous Buck converter, selecting high bandwidth test equipment and minimum test loop, the experimental measurement of high frequency voltage ripple is actualized, and the correctness of theoretical analysis is verified. This study provides a theoretical basis for the circuit design of Buck converter, and provides relevant experience for high switching frequency experimental measurement.

**Keywords:** Buck converter; output voltage ripple; parasitic parameters; high frequency measurement

## 0 引言

在服务器、微机电源、LED 等非隔离低压大电流供电场合, Buck 变换器常用作电压调节模块(voltage regulator module, VRM)<sup>[1-3]</sup>。为了降低线路损耗、减小震荡,通常会将 Buck 变换器靠近负载放置,对体积要求较高<sup>[4]</sup>。提高开关频率可减小电感电流纹波,从而减小滤波器的体积、提高功率密度。随着技术的发展, Buck 变换器的开关频率被提高至兆赫兹以上<sup>[5-6]</sup>。然而,开关频率增加后,寄生参数对变换器的影响越来越明显。特别是输出电压纹波,不再是传统低频情况下电容充放电呈波浪式变化,而是受到等效寄生电感和等效寄生电阻的影响,出现了阶跃跳变<sup>[7]</sup>。因此,传统输出电压纹波计算公式在兆赫兹级高频工况下不

再适用,有待进一步的理论分析。

在实际应用及测量过程中,由于 Buck 变换器二极管的反向恢复和开关管的硬开关等原因,在开关管开通和关断的过程中会产生震荡现象,影响变换器的效率和开关频率的进一步提高,并影响输出电压纹波的测量<sup>[8-9]</sup>。当前 Buck 变换器研究主要围绕同步整流技术或软开关技术,快速动态响应改善以及拓扑推衍等方面展开<sup>[10-12]</sup>。软开关技术通过增加电路或者改进控制方法,使得电流在开关管开通之前降为负值,实现开关管结电容的放电,避免了硬开关产生的振荡现象<sup>[13-14]</sup>。此外,在高频电路中,合理精确的测量方式至关重要,测试设备的型号、带宽、特性等参数会对测试的准确性产生影响<sup>[15-16]</sup>。因此,在研究高频 Buck 变换器输出电压纹波的过程中,高频信号的测量是一个重要环节。

收稿日期:2018-11-23

鉴于目前对高频工况下 Buck 变换器的输出电压纹波工作机理的研究较少,本文基于 Buck 变换器高频等效电路模型,采用电路分析法进行计算,对不同开关模式时的纹波变化规律进行分类分析并讨论。在此基础上,搭建高频同步 Buck 变换器原理样机进行实验验证。通过合理设置同步 Buck 变换器的参数,实现开关管和同步管的软开关,并且合理选用测试设备及测量方法,实现高频 Buck 变换器输出电压纹波的正确实验测量。

## 1 考虑寄生参数的高频 Buck 变换器工作原理分析

影响高频工况下 Buck 变换器输出电压纹波的因素为输出滤波电容  $C_o$ 。所在支路上的寄生参数,主要是 ESL(equivalent series inductance)和 ESR(equivalent series resistance),绘制考虑寄生参数的高频 Buck 变换器等效电路模型如图 1 所示。

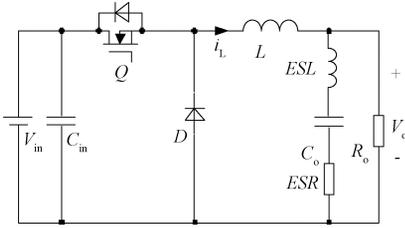


图 1 考虑寄生参数的高频 Buck 等效电路

传统 Buck 变换器包含了一个开关管和一个二极管。本文忽略开关管和二极管寄生参数对电路的影响,重点分析输出电容支路的 ESL 和 ESR 对输出电压纹波的影响。设开关周期为  $T$ ,开关管的占空比为  $D$ ,绘制电流连续模式高频情况下的电路工作波形,如图 2 所示。其中  $\Delta I$  为电感电流纹波值。输出电压波形不再是波动变化的平滑曲线,而是出现了阶跃跳变。

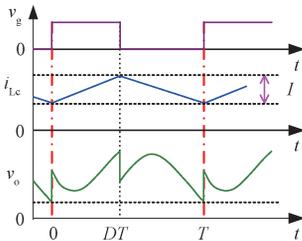


图 2 高频 Buck 变换器关键电路波形

设周期的初始时刻为 0,首先求解在开关管导通过程中  $[0, DT]$  阶段的输出电压纹波,由 ESL、ESR 和电容  $C_o$ 。上 3 部分的电压叠加而成,其中  $v_o(0)$  为 0 时刻的电压纹波值,表达式如下式所示:

$$v_o(t) = t^2 \times \frac{\Delta I}{C_o 2DT} + t \times \left( ESR \times \frac{\Delta I}{DT} - \frac{\Delta I}{2C_o} \right) + ESL \times \left( \frac{\Delta I}{DT} + \frac{\Delta I}{(1-D)T} \right) + v_o(0) \quad (1)$$

同理,可以推导出在开关管关断过程中  $[DT, T]$  的输出电压纹波表达式,其中  $v_o(DT)$  为 0 时刻电压纹波值:

$$v_o(DT+t) = -t^2 \times \frac{\Delta I}{C_o 2(1-D)T} + t \times \left( \frac{\Delta I}{2C_o} - ESR \times \frac{\Delta I}{(1-D)T} \right) - ESL \times \left( \frac{\Delta I}{DT} + \frac{\Delta I}{(1-D)T} \right) + v_o(DT) \quad (2)$$

## 2 高频 Buck 变换器输出电压纹波理论分析

根据上述分析,由图 2 及式(1)可得,在  $[0, DT]$  阶段,输出电压纹波为时间  $t$  的二次函数,并且存在一个谷值,该值可能会高于初始值  $v_o(0)$ ,也可能会低于初始值  $v_o(0)$ ,因此需要对该谷值进行分析。求解该谷值出现的时刻为:

$$t_{\text{valley}} = \frac{DT}{2} - ESR \times C_o \quad (3)$$

即谷值出现在接近开关管导通一半时刻的位置。求解该电压谷值的值为:

$$v_{o,\text{valley}} = - \frac{\left( ESR \times \frac{\Delta I}{DT} - \frac{\Delta I}{2C_o} \right)^2}{4 \frac{\Delta I}{C_o 2DT}} +$$

$$ESL \times \left( \frac{\Delta I}{DT} + \frac{\Delta I}{(1-D)T} \right) + v_o(0) \quad (4)$$

为了求解输出电压纹波的最低值,将式(4)改写为:

$$v_{o,\text{valley}} - v_o(0) = - \frac{\left( ESR \times \frac{\Delta I}{DT} - \frac{\Delta I}{2C_o} \right)^2}{4 \frac{\Delta I}{C_o 2DT}} +$$

$$ESL \times \left( \frac{\Delta I}{DT} + \frac{\Delta I}{(1-D)T} \right) \quad (5)$$

化简求解可得到判定条件:

$$\sqrt{2ESL \times C_o} \geq \left[ \frac{DT}{2} - ESR \times C_o \right] \quad (6)$$

如果该式成立,那么  $v_{o,\text{valley}} - v_o(0) \geq 0$ ,那么纹波的最低值为  $v_o(0)$ ;反之,纹波的最低值为  $v_{o,\text{valley}}$ 。分析式(6),左侧为 ESL 与  $C_o$  的表达式,右侧为谷值的出现时刻。在开关频率较低的时候,周期  $T$  的数值较大,因此式(6)的右侧远远大于左侧,ESL 的效果并不明显,纹波的最低值为谷值。但是当开关频率较高的时候,周期  $T$  的数值减小,判定条件两侧公式数量级相接近,因此寄生参数产生的影响不可忽略。

同理,在开关管关断过程  $[DT, T]$  阶段,输出电压纹波表达式如式(2)所示,同样为时间  $t$  的二次函数,并且存在一个峰值,该值可能会高于初始值  $v_o(DT)$ ,也可能会低于初始值  $v_o(0)$ 。求解该峰值出现的时刻为:

$$t_{\text{crest}} = \frac{(1-D)T}{2} - ESR \times C_o \quad (7)$$

该峰值出现在接近开关管关断一半时刻的位置。求解

该电压峰值的值为:

$$v_{o\_crest} = \frac{\left(\frac{\Delta I}{2C_o} - ESR \times \frac{\Delta I}{(1-D)T}\right)^2}{\frac{4\Delta I}{C_o 2(1-D)T}} -$$

$$ESL \times \left(\frac{\Delta I}{DT} + \frac{\Delta I}{(1-D)T}\right) + v_o(DT) \quad (8)$$

为了求解输出电压纹波的最低值,将上式改写为:

$$v_{o\_crest} - v_o(DT) = \frac{\left(\frac{\Delta I}{2C_o} - ESR \times \frac{\Delta I}{(1-D)T}\right)^2}{\frac{4\Delta I}{C_o 2(1-D)T}} -$$

$$ESL \times \left(\frac{\Delta I}{DT} + \frac{\Delta I}{(1-D)T}\right) \quad (9)$$

化简求解可得到判定条件:

$$\sqrt{2ESL \times C_o} \geq \left[\frac{(1-D)T}{2} - ESR \times C_o\right] \quad (10)$$

如果该式成立,那么  $v_{o\_crest} - v_o(DT) \leq 0$ ,纹波的最高值为  $v_o(DT)$ ;反之,纹波的最高值为  $v_{o\_crest}$ 。

综合开关管开通和关断阶段的波形,输出电压纹波可能出现 4 种情况,最低值可能是  $v(0)$  或  $v_{o\_valley}$ ,最高值可能是  $v(DT)$  或  $v_{o\_crest}$ ,波形如图 3 所示。

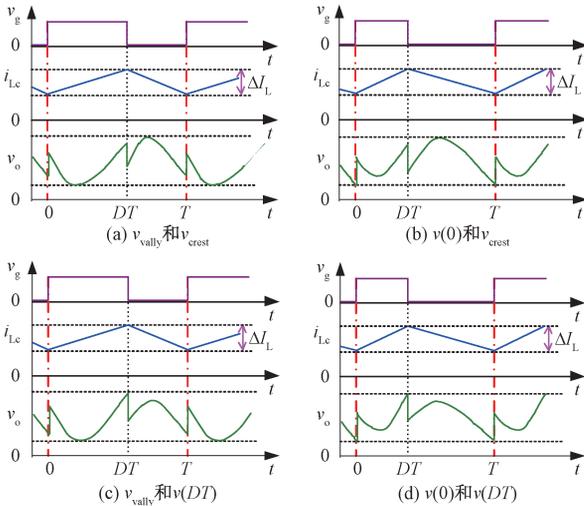


图 3 高频 Buck 变换器输出电压波形

分别列写 4 种波形应满足的条件,如式(11)所示。如果周期  $T$  很大的话,即可满足波形(a)的条件;若开关频率进一步增加, $T$  减小,根据占空比  $D$  是否高于 0.5,可能出现波形(b)或(c)的现象;当开关频率进一步增加,最终将会工作在波形(d)的情况下。

$$(a) \sqrt{2ESL \times C_o} \leq [DT/2 - ESR \times C_o];$$

$$\sqrt{2ESL \times C_o} \leq [(1-D)T/2 - ESR \times C_o]$$

$$(b) [DT/2 - ESR \times C_o] \leq \sqrt{2ESL \times C_o} \leq [(1-D)T/2 - ESR \times C_o]; D \leq 0.5$$

$$(c) [(1-D)T/2 - ESR \times C_o] \leq \sqrt{2ESL \times C_o} \leq [DT/2 - ESR \times C_o]; D \geq 0.5$$

$$(d) \sqrt{2ESL \times C_o} \geq [DT/2 - ESR \times C_o];$$

$$\sqrt{2ESL \times C_o} \geq [(1-D)T/2 - ESR \times C_o] \quad (11)$$

求解波形(a)的输出电压纹波为:

$$v_{o\_ripple} = v_{o\_crest} - v_{o\_valley} = \Delta I \times \frac{[(1-D)T - 2ESR \times C_o]^2}{8C_o(1-D)T} + ESR \times \Delta I + \Delta I \times \frac{[DT - 2ESR \times C_o]^2}{8C_oDT} - ESL \times \left(\frac{\Delta I}{DT} + \frac{\Delta I}{(1-D)T}\right) \quad (12)$$

若工作在低频工况,即周期  $T$  很大,假设  $ESL$  和  $ESR$  均为 0,可由式(12)求解输出电压纹波为:

$$v_{o\_ripple} = \frac{\Delta I \times T}{8C_o} \quad (13)$$

该计算公式与普通 Buck 变换器的理想输出电压纹波计算公式一致,波形类似于图 3(a)。

分别根据式(1)和(2)求解波形(d)的输出电压纹波,结果相同:

$$v_{o\_ripple} = ESL \times \left(\frac{\Delta I}{DT} + \frac{\Delta I}{(1-D)T}\right) + ESR \times \Delta I \quad (14)$$

由分析可得,在高频 Buck 变换器中,当开关频率高于一定数值之后,输出滤波电容  $C_o$  的数值对输出电压纹波的影响并不大,在设计电路及选用器件的过程中,应当尽量减小输出电容支路上  $ESL$  和  $ESR$  的大小,从而减小输出电压纹波的大小。

### 3 高频 Buck 变换器输出电压纹波实验测量

搭建高频同步 Buck 变换器原理样机进行实验验证,器件选型及参数如表 1 所示。通过合理设置开关频率和负载的值以确保开关管开通前电流为负值,满足实现主开关管及同步开关管的零电压开通的电流条件,因此可有效避免传统 Buck 变换器开关管硬开关及二极管反向恢复产生的震荡等现象,有助于清晰地观测输出电压纹波及变化规律。

表 1 原理样机参数

器件	选型及参数
闭环控制芯片	TI 公司 LM2737
开关管	TI 公司 CSD16414Q5
同步整流管	TI 公司 CSD16414Q5
电感	TDK 公司 VLB12065HT-R36 360 nH Murata 公司 GRM32ER71H106MA12
输出电容	20 $\mu$ F(两颗 10 $\mu$ F 并联)
输入电压	5 V
负载电阻	5 $\Omega$
输出电压	2 V, 3 V
开关频率	0.88 MHz, 1.02 MHz, 1.2 MHz

为获得精确的测试结果,建议测量设备带宽为待测信号等效频率的 10 倍或 15 倍以上。实验中采用泰克 DPO4054B 数字示波器,带宽 500 MHz,采样频率 2.5 GS/s。示波器探头型号为:泰克 TPP0500,带宽 500 MHz,3.9 pF/10 M $\Omega$ 。两者均远高于开关频率,能够满足测试需求。此外,为避免引入高频干扰,示波器探头测试回路应当尽可能缩短。图 4 所示为采用长地线引线的探头照片和采用弹簧线圈的探头照片,明显可见后者大幅缩小了测试环路,减小电磁干扰对测试产生的影响。

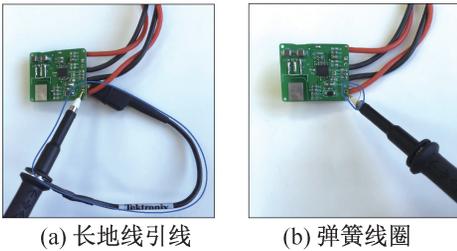


图 4 示波器探头测试环路对比

通过上述实验平台和测量设备,对高频 Buck 变换器在不同开关频率下的输出电压纹波进行测量,实验结果如图 5 和图 6 所示。为了清晰的显示输出电压纹波的变化规律,本文设置示波器滤波带宽为 20 MHz,进一步滤除高频信号的影响。

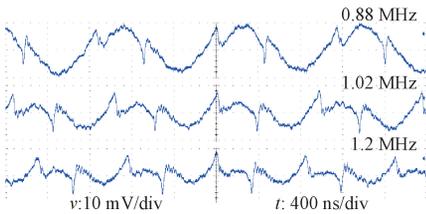


图 5 输出电压为 2 V 时实验波形

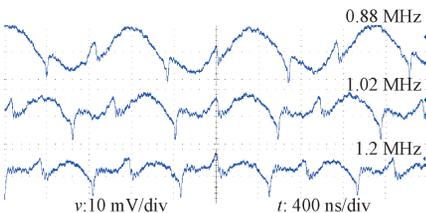


图 6 输出电压为 3 V 时实验波形

当输出电压为 2 V 时,对应占空比为 0.4,随着开关频率的增加,纹波波形由图 3(a)变为图 3(b)再变为图 3(d);当输出电压为 3 V 时,对应占空比为 0.6,随着开关频率的增加,纹波波形由图 3(a)变为图 3(c)再变为图 3(d)。输出电压的最低值由  $v_{\text{crest}}$  变为  $v(DT)$ ;最高值由  $v_{\text{valley}}$  变为  $v(0)$ 。通过变换占空比和开关频率两个参数,实验验证了理论分析的正确性,因此可得出结论,当开关频率高于一定

值之后,输出电压纹波由  $v(0)$  和  $v(DT)$  决定。

## 4 结 论

本文对高频 Buck 变换器的输出电压纹波进行研究,数值求解并推导输出电压纹波变化规律及相应判定条件,提出了输出电容支路的寄生参数决定高频工况下输出电压纹波值的结论。实验中利用同步 Buck 变换器开关管和同步管的软开关,有效解决了震荡对测量产生影响的难题。为了避免高频干扰,选用高带宽测试设备并减小测试环路,实现了对高频输出电压纹波的正确测量。在此基础上,通过变换占空比和开关频率两个参数分别进行实验,验证了理论分析的正确性。

本文的分析和测试为基于 Buck 变换器高频降压电源的电路设计和实验测量提供了参考和依据。文中仅针对关键寄生参数对输出电压纹波的影响展开分析,下一步研究可面向全部高频寄生参数的提取以及对各个性能指标的影响进行分析。

## 参考文献

- [1] CHENG K Y, TIAN S, YU F, et al. Digital hybrid ripple-based constant on-time control for voltage regulator modules [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(6):3132-3144.
- [2] REN Y. High frequency, high efficiency two-stage approach for future microprocessors [D]. Virginia, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [3] DEEKSHITHA C; LATHA S K. Design and simulation of synchronous buck converter for LED application [C]. 2017 2nd IEEE RTEICT, 2017: 142-146.
- [4] 刘喜梅,梁逊.一种基于完全集成 Buck 型 DC-DC 转换器开关桥选择的迅捷方法[J].电子测量技术,2016, 39(2):33-37.
- [5] 杜荣权,陈乐柱,穆瑜.基于数字控制的 MHz 频率单脉冲电源设计[J].电源学报,2014,12(2):101-105.
- [6] ZHAO X N, YE H C S, CHEN CH W, et al. A comprehensive comparison of MHz GaN-Based ZVS step-down converters for low power integrated on-chip applications [C]. 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2018:5271-5275.
- [7] ALEX L, JOHAN S, MICHAEL R, et al Transistors for Efficient Power Conversion[M]. 2nd edition. EPC corporation, Wiley; 2014.
- [8] 羊志强,徐大伟,李新昌,等.基于 GaN HEMT 同步整流 Buck 变换器研究[J].电力电子技术,2017,51(9): 20-23.
- [9] 程松,张颖超,代绪强,等.一种适用于混合储能系统的

- 双向软开关同步 Buck 电路研究[J].电源学报,2014,12(4):62-67.
- [10] 章伟,周国华,刘啸天,等.具有快速负载瞬态响应的开关变换器数字均值电压控制方法[J].电工技术学报,2018,33(4):856-864.
- [11] 张强,林维明.一种最小应力的无源无损软开关方案[J].中国电机工程学报,2016,36(18):4999-5008,5125.
- [12] 杨玉岗,祁麟,李龙华.交错并联磁集成 Buck 变换器本质安全性输出纹波电压的分析[J].电工技术学报,2014,29(6):181-188.
- [13] ZHANG Y, SEN P C. A new soft-switching technique for buck, boost, and buck-boost converters[J], IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(6): 1775-1782.
- [14] 杨欢,孔林婷,武琦,等.电流超临界连续 DC/DC 软开关变换器的控制策略研究[J].国外电子测量技术,2018,37(4):91-96.
- [15] 梁美.碳化硅功率器件高速应用关键技术研究[D].北京:北京交通大学,2017.
- [16] 王路.高压大功率 GaN 器件开关过程振荡问题分析及应用设计研究[D].北京:北京交通大学,2017.

### 作者简介

张旭,硕士、实验师,主要研究方向为电力电子变换器控制技术、信号检测与处理、实验设备研制等。

E-mail:upczhx@163.com