

# 开关电源传导 EMI 分析及抑制方法研究

陈宝祥<sup>1</sup>, 祝志博<sup>2</sup>, 黄俊硕<sup>2</sup>, 王永安<sup>2</sup>

(1.江苏省医疗器械检验所, 江苏 南京 210012)

(2.南京师范大学江苏省电气装备电磁兼容工程实验室, 江苏 南京 210023)

**[摘要]** 以开关电源中的 CRM Boost PFC 变换器为研究对象, 研究了 CRM 下整流桥产生的电压变化率, 阐述了交流电正负半周的差模、共模传导噪声的产生机理, 分析了由于驱动电压过冲导致的传导电磁干扰问题, 通过建立等效电路, 提出了在整流桥电路加差模电容的电磁干扰抑制方法, 该方法可有效降低传导电磁骚扰, 为工程提供了实用的技术方案。

**[关键词]** 开关电源, CRM Boost PFC 变换器, 传导电磁干扰, 传导噪声抑制

**[中图分类号]** TM933 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2019)04-0070-05

## Research on Power Conducted EMI Analysis and Suppression Methods

Chen Baoxiang<sup>1</sup>, Zhu Zhibo<sup>2</sup>, Huang Junshuo<sup>2</sup>, Wang Yongan<sup>2</sup>

(1.Jiangsu Medical Device Inspection Institute, Nanjing 210012, China)

(2.Jiangsu Engineering Laboratory of Electrical Equipment Electromagnetic Compatibility, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** In this paper, the CRM (Critical Conduction Mode) Boost PFC converter in power supply is taken as the research object, the voltage change rates of rectifier bridge under CRM are studied, the generation mechanism of differential mode and common mode conducted noise in positive and negative half cycle of AC is expounded, and the conducted electromagnetic interference caused by driving voltage overshoot is analyzed. By establishing equivalent circuit, a method of EMI suppression with capacitor in rectifier bridge circuit is proposed. This method can effectively reduce the conducted EMI and provide a practical technical scheme for engineering application.

**Key words:** power supply, CRM Boost PFC converter, conducted EMI noise, conducted noise suppression

当开关电源中变换器工作时, 由于开关工作频率高, 会产生快速变化的瞬态电流和瞬态电压, 从而引起严重的电磁干扰, 这些电磁干扰会严重影响开关电源的安全运行<sup>[1-4]</sup>。我国制定了相关标准, 限制功率变换器的谐波电流和功率因数, 为降低变换器的电磁干扰对其他设备的影响, 相关科研人员开始了对功率因数校正 (Power Factor Correction, PFC) 技术的研究<sup>[5-6]</sup>。

Boost PFC 变换器的临界连续模式 (CRM 模式) 是一种过渡模式, 这种工作模式具有很多优点, 电感量小且输入的功率因数高, 电感电流的峰值以及有效值介于连续和不连续两种模式之间, 且 CRM 型功率变换器成本低, 因此受到了很多厂商的青睐, 从而得到了广泛的应用。Boost PFC 变换器工作时, 输入电压或者负载发生变化时, 开关频率也会变化, 这给电磁抗干扰以及电感的设计带来了一定的困难<sup>[7-9]</sup>。

传导电磁干扰通过线路传播, 噪声类型包括共模噪声和差模噪声。前者在开关电源线和地之间传播, 后者在开关电源线和开关电源线之间传播。本文所研究的功率变换器的开关频率基于传导骚扰的测试频率, 差模电磁干扰由输入电感电流引起, 共模电磁干扰主要由 Boost PFC 电路中的寄生参数引起<sup>[10-12]</sup>。本文研究了 PFC 变换器传导 EMI 机理与传导 EMI 噪声抑制方法, 可以有效地降低传导电磁干扰。

## 1 CRM Boost PFC 电路工作原理

Boost PFC 是常见的有源 PFC 之一, 如图 1 所示,  $L_s$  为电感,  $C_s$  为滤波电容。该电路是一种结构简单

且成本低廉的电路,除线性 AC-DC 转换器之外所需的额外组件是开关(通常是 FET)、二极管和电感器。输出电压存在脉动的现象,为了方便对 PFC 电路进行分析,假设元器件为理想型输出且电压看作是恒定不变的,而且频率远小于开关频率。

$U_{in}$  是交流电压的有效值,经过变换,输出电压  $U_{in}$  为

$$u_{in} = \sqrt{2} U_{in} |\sin(\omega t)|. \quad (1)$$

式中,  $\omega = 2\pi f_{line}$  为角频率,  $f_{line}$  为输入电压频率。

在临界连续模式下,功率因数校正变换器中电感的电流变化,在周期内是线性变化的,如图 2 所示。

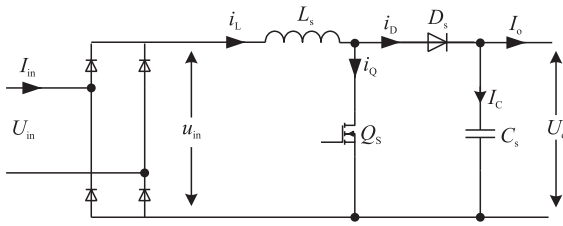


图 1 升压电路电路图

Fig. 1 Circuit diagram of boost circuit

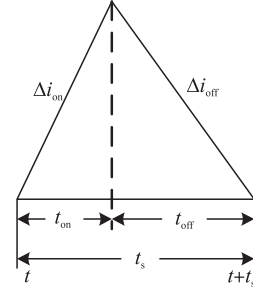
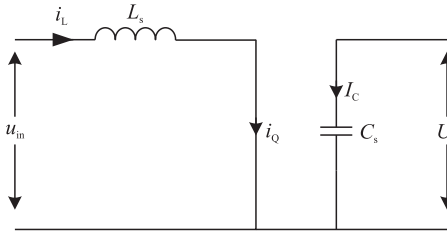


图 2 电感电流波形图(一个周期)

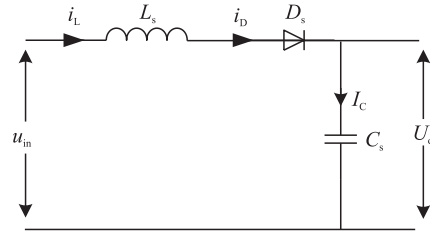
Fig. 2 Inductance current waveform(one cycle)

图 3(a) 为简化电路,  $Q_s$  为开关管,  $D_s$  为二极管, 在  $T_{on}$  内,  $Q_s$  导通,  $D_s$  截止, 得电感电流的变化率,

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\sqrt{2} U_{in} |\sin(\omega t)|}{L_s} = \frac{u_{in}}{L_s}. \quad (2)$$



(a)  $T_{on}$  时间内工作状态电路图



(b)  $T_{off}$  时间内工作状态电路图

图 3 一个开关周期内工作状态图

Fig. 3 Working state diagram of a switching cycle

如图 3(b) 所示, 在  $T_{off}$  时间内,  $Q_s$  关闭,  $D_s$  导通, 电感电流的变化率为

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\sqrt{2} U_{in} |\sin(\omega t)| - U_o}{L_s} = \frac{u_{in} - U_o}{L_s}. \quad (3)$$

在一个开关周期  $t_s$  内有:

$$\Delta i_{on} = i_{L-pk} = \frac{1}{L_s} \int_t^{t+t_{on}} u_{in} d\tau = \frac{u_{in} \cdot t_{on}}{L_s}. \quad (4)$$

$$\Delta i_{off} = \frac{1}{L_s} \int_{t+t_{on}}^{t+t_s} (U_o - u_{in}) d\tau = \frac{(U_o - u_{in}) \cdot (t_s - t_{on})}{L_s}. \quad (5)$$

## 2 开关电源变换器 Boost PFC 传导 EMI 噪声机理

根据传导噪声传输通道不同,可分为共模干扰、差模干扰。本节分析了临界连续模式的升压功率因数校正电路的共模干扰和差模干扰的传播路径,并且给出了加上线路阻抗稳定网络(LISN)后的 CRM Boost PFC 电路图,如图 4 所示。

### 2.1 共模传导 EMI 机理分析

图 5 给出了共模传导路径图,图中开关管漏源极电压  $V_{DS}$  为共模传导噪声源,  $i_p$  为流经寄生电容的电

流,用两个  $50\ \Omega$  电阻构成等效线路阻抗稳定网络. 如图 5(a) 所示,  $C_p$  是 MOS 管漏极的对地寄生电容, 二极管  $D_1$ 、 $D_4$  导通时, 输入电压在正半周, 此时  $V_{DS}$  产生噪声, 寄生电容  $C_p$  由于频繁充放电, 形成共模电流  $i_p$ , 然后经过测试电阻和二二极管形成回路. 同理, 如图 5(b) 所示,  $D_2$  和  $D_3$  导通时, 输入电压在负半周,  $i_p$  流经测试电阻和二二极管  $D_3$  形成回路.

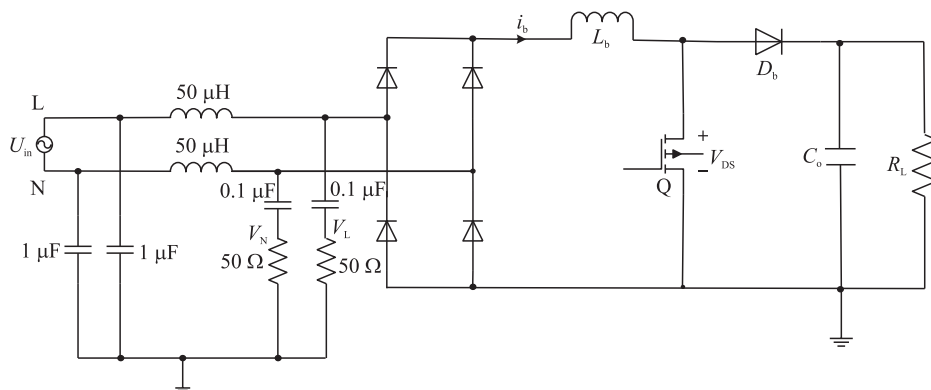


图 4 临界 Boost PFC 变换器电路

Fig. 4 Critical Boost PFC converter circuit

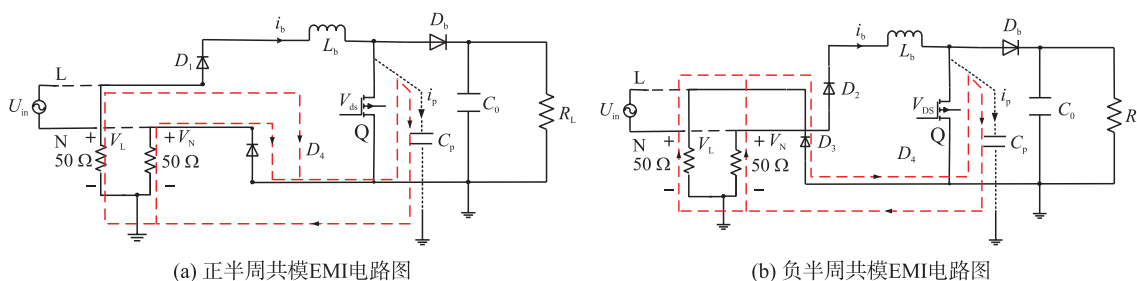


图 5 共模 EMI 路径分析图

Fig. 5 Common mode EMI path analysis chart

由上图可知, 噪声源  $V_{DS}$  通过对寄生电容  $C_p$  施加电压产生了共模电流,  $C_p$  取值的范围从  $50\ \text{pF}$  到  $500\ \text{pF}$ . 寄生电容的大小直接影响 LISN 电压的变化, 从电路中得出 LISN 两端的共模电压  $V_{CM}$  计算公式,

$$V_{CM} = 100V_p C_p F_0. \quad (6)$$

由上式可知, 我们可以通过调节寄生电容  $C_p$  以及开关电源线电压的  $V_p$  的大小, 降低共模传导干扰, 若减缓开关管的上升时间, 则转折点移向更低的频率, 达到降低高频发射的目的, 不足之处是晶体管的功率损耗会增加.

## 2.2 差模传导 EMI 机理分析

差模噪声干扰主要是由电路中的高频电流引起, 对于 PFC 变换器而言, 通常是由电感电流纹波造成的. 如图 6 所示, 差模传导噪声路径分析也正负半周, 路径都是由开关管、整流桥以及 LISN 的测试电阻构成.

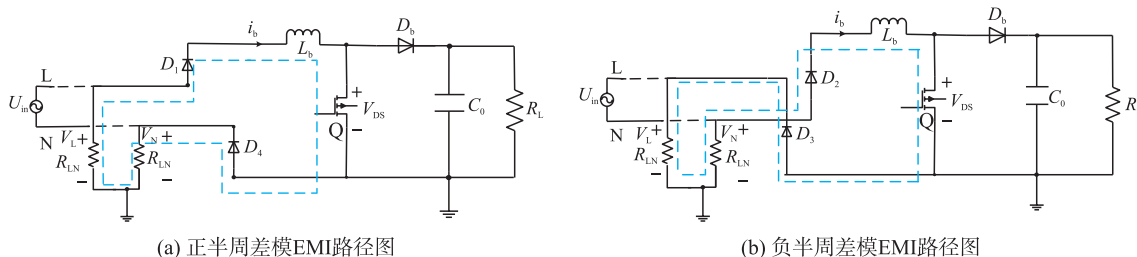


图 6 差模 EMI 路径分析图

Fig. 6 Differential mode EMI path analysis chart

差模传导噪声推导公式类比于共模传导噪声, 用方波近似等效于开关电流  $I(f)$ , 得到差模噪声电

流  $I_{DM}$ ,

$$I_{DM} = \frac{j2\pi f L_b I(f)}{100 + j2\pi f L_b}. \quad (7)$$

差模电压  $V_{DM} = 50I_{DM}$ , 得线路阻抗稳定网络的测试电阻电压为:

$$V_{DM} = \pi f L_b I(f). \quad (8)$$

### 3 开关电源变换器 Boost PFC 传导 EMI 噪声的抑制

PFC 变换器工作在连续模式时,桥式二极管电流一直导通,所以其两端压降为 0. 但工作在断续模式/临界连续模式时,二极管有可能反向偏置,变成严重的差模噪声源. 本节研究差模电容对临界连续模式下的升压功率因数校正电路中整流桥产生的电磁干扰噪声的抑制作用. 输入电流为 0 时,CRM Boost PFC 的简化电路如图 7 所示,在整流桥电路中添加电容  $C_{DM}$  和  $C_{AB}$ . 为了使二极管上的谐振电压较小,就要使得  $C_{AB}$  要尽可能的大,当  $C_{AB}$  很大的时候,桥式二极管可以视为短路,但  $C_{AB}$  的值受功率因数和谐波要求的约束.

未加电容  $C_{AB}$  时,桥式二极管在共振时产生很高的  $dv/dt$ ,从而产生较高的差模噪声,如图 8(a) 所示. 在整流桥后加差模电容  $C_{AB}$  后,由图 8(b) 可以看到  $V_{AB}$  的尖峰消失,验证了添加差模电容后对电压的毛刺具有抑制作用. 差模电容  $C_{AB}$  的取值需要远远大于二极管与开关管的结电容,从而使得  $C_{AB}$  两端的电压在谐振时保持恒定.

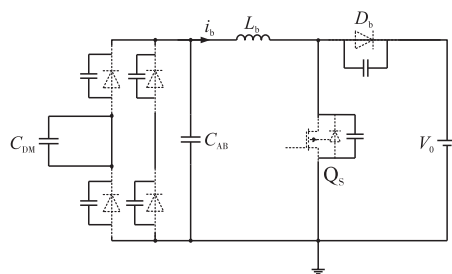


图 7 零输入电流时等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit at zero input current

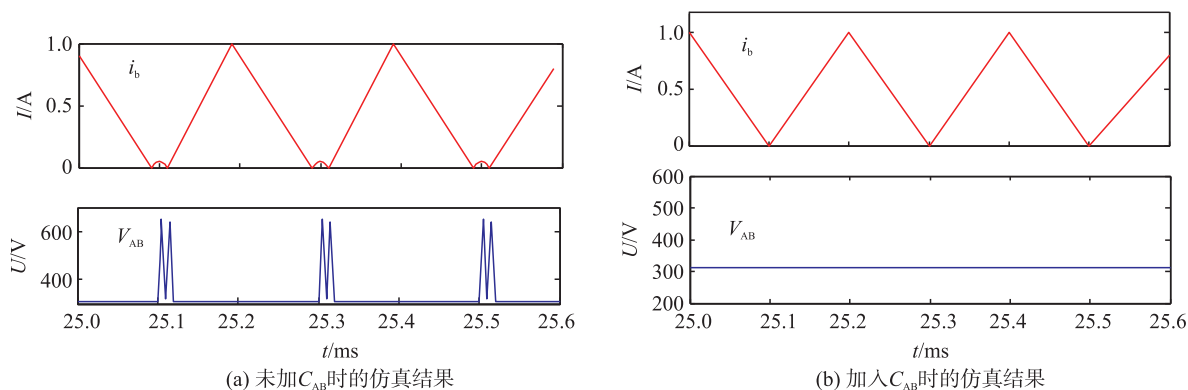


图 8 电压  $V_{AB}$  仿真结果

Fig. 8 Voltage  $V_{AB}$  simulation result

### 4 结语

本文分析了开关电源中 CRM Boost PFC 变换器的传导 EMI 噪声机理,研究了 MOS 开关漏源级电压 VDS 和桥式二极管等元件产生的传导噪声的噪声源,探究了开关电源变换器分别在交流电正负半周的共模和差模干扰路径,提出整流桥后加差模电容来抑制整流桥导通期间的混合干扰的方法,仿真结果表明,采取添加差模电容的方式可以有效降低传导 EMI 噪声,为后续的实验验证提供了理论基础.

#### [参考文献] (References)

- [1] 赵阳,封志明,黄学军. 电磁兼容测试方法与工程应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010:1-12.  
ZHAO Y, FENG Z M, HUANG X J. EMC test methods and engineering applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 1-12. (in Chinese)
- [2] ZHAO Y, SEE K Y. Fundamental of electromagnetic compatibility and application[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 1-20.

- [3] 孟进,马伟明,张磊,等. 开关电源变换器传导干扰分析及建模方法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(5):49-54.  
MENG J,MA W M,ZHANG L,et al. Method for analysis and modeling of conducted EMI in switching power converters[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(5):49-54.(in Chinese)
- [4] 和军平,姜建国. 离线式 PWM 开关电源传导电磁干扰的分析研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(6):91-95.  
HE J P,JIANG J G. Research on conducted EMI of an off-line PWM switched mode power supply[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(6):91-95.(in Chinese)
- [5] FU D B,KONG P J,FRED C L,et al. Novel techniques to suppress the common-mode EMI noise caused by transformer parasitic capacitances in DC-DC converters[J]. IEEE transactions on industrial electronics,2013,60(11):4968-4977.
- [6] LIU Y T,KYE Y S,KING J T. Conducted EMI prediction of the PFC converter including nonlinear behavior of boost inductor[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility,2013,55(6):1107-1114.
- [7] MENG J,MA W M. Power converter EMI analysis including IGBT nonlinear switching transient model[J]. IEEE transactions on industrial electronics,2006,54(5):1577-1583.
- [8] MENG J,MA W M,PAN Q J,et al. Identification of essential coupling path models for conducted EMI prediction in switching power converters[J]. IEEE transactions on industrial electronics,2006,21(6):1795-1803.
- [9] MENG J,MA W M. A new technique for modeling and analysis of mixed-mode conducted EMI noise[J]. IEEE transactions on industrial electronics,2004,19(6):1679-1687.
- [10] 和军平,陈为,姜建国. 开关电源共模传导干扰模型的研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(8):50-55.  
HE J P,CHEN W,JIANG J G. Research on common mode conducted interference model of switching power supply[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(8):50-55.(in Chinese)
- [11] HENRY W O. Electromagnetic compatibility engineering[M]. Hoboken:John Wiley & Sons,2009,1(2):273-278.
- [12] 赵阳,罗永超,颜伟,等. 高频电路辐射干扰快速分析与预估方法[J]. 电波科学学报,2010,25(3):466-471.  
ZHAO Y,LUO Y C,YAN W,et al. Fast analysis and estimation approach applied in radiated EMI for high-frequency circuit[J]. Chinese Journal of radio science,2010,25(3):466-471.(in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]