文章编号：2095-4980(2018)02-0336-06

DSP 控制的交错并联 Boost PFC 控制系统实现

谭　伟，黄嵩人，申　培

(湘潭大学 物理与光电工程学院，湖南 湘潭 411100)

摘　要：提出了一种基于 DSP TMS320F2812 数字控制的平均电流型交错并联升压型功率因数校正(Boost PFC)变换器。重点提出了 150 kHz/Phase 开关频率下的控制算法与改进的采样算法，并对电压、电流双环数字控制回路进行分析与 PI 补偿设计。基于 Matlab/Simulink 对并联交错 Boost PFC 数字控制系统进行建模仿真，并制作 300 W 输出功率的样机，成功对 Boost PFC 控制系统进行了验证与实现。

关键词：平均电流控制；功率因数校正；交替不定延时平均电流采样；PI 算法

中图分类号：TP303.3　　**文献标志码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA201802.0336

System of interleaved Boost PFC under the DSP control

TAN Wei，HUANG Songren，SHEN Pei

(College of Physics and Optoelectronic Engineering，Xiangtan University，Xiangtan Hunan 411100，China)

Abstract：A digital controlled interleaved Boost Power Factor Correction(PFC) converter is presented with the method of average current control based on the DSP of TMS320F2812. The control algorithm and the improved sampling algorithm with 150 kHz/phase switching frequency are put forward. The voltage and current double closed-loop digital control circuit are analyzed and executed PI compensation design. The modeling and simulation is performed by Matlab/Simulink for interleaved Boost PFC numerical control system. A 300 W output power of the prototype of the Boost PFC control system is implemented and verified.

Keywords：average current control；power factor correction；alternating variable delay time average current sampling；PI algorithm

电子技术日新月异地发展，使得电气设备广泛用于人们生活的各个方面，与此同时，也给电力电网造成了严重的谐波污染。为满足 IEC61000-3-2 谐波电流的限值标准要求与有效改善电网电能质量，提高电力、电源系统利用率，功率因数校正(PFC)技术得到广泛研究与应用。采用 DSP 控制的数字开关电源[1–2]具有抗干扰能力强、可编程控制、可移植性高、运算速度快、精确度高等优点。

1　数字平均电流法 APFC 系统设计

基于 DSPTMS320F2812 信号处理芯片，设计采用适用于连续导通模式(Continuous Conduction Mode，CCM)下的平均电流控制算法[3–4]。电压环决定了参考电流的幅值并保证输出电压稳定，电流环使输入电流跟踪输入电压。在传统控制算法基础上引入输入前馈电压，使输出功率保持稳定，不随输入电压变化而变化，并对数字控制环路进行了 PI 控制补偿设计。本文在参考文献[5–6]的基础上，提出一种采用更高开关频率的基于 DSP 控制的并联交错 Boost PFC 数字控制方案，并采用改进后的交替不定延时平均电流采样算法，使平均电流控制算法更容易实现。图 1 为带电压前馈的平均电流法控制框图。图 2 为连续导通模式下系统状态转换，DC 等效为整流后的输入电源。对单路 Boost 型变换器取电容端电压 $U_c(t)$ 与电感电流 $i_L(t)$ 作为电路的状态变量，如图 3 所示，在开关管导通阶段[0,dT_s]状态方程为：

$$\begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ U_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\dfrac{1}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ U_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} U_g(t) \tag{1}$$

收稿日期：2016-11-15；修回日期：2016-12-22

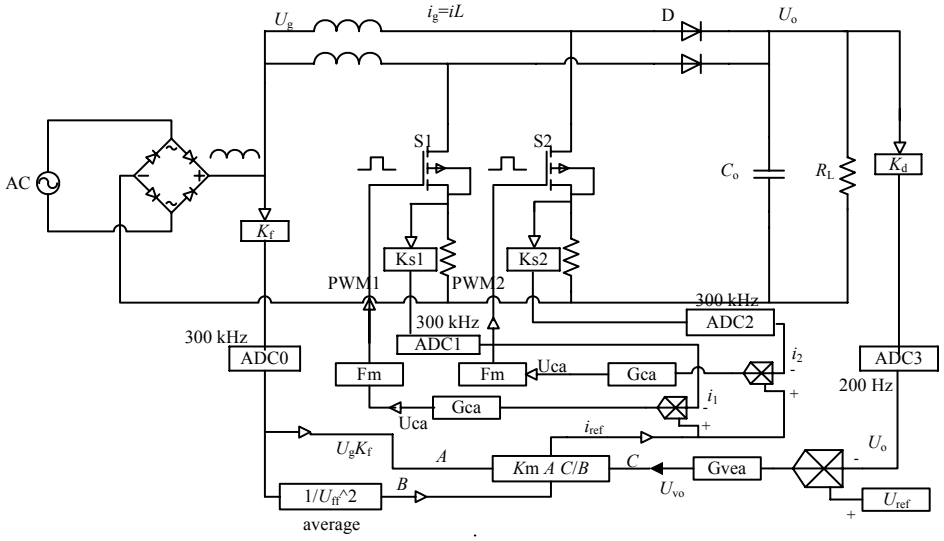

Fig.1 Controlled block diagram of average current method with feed forward voltage

图 1 带电压前馈的平均电流法控制框图

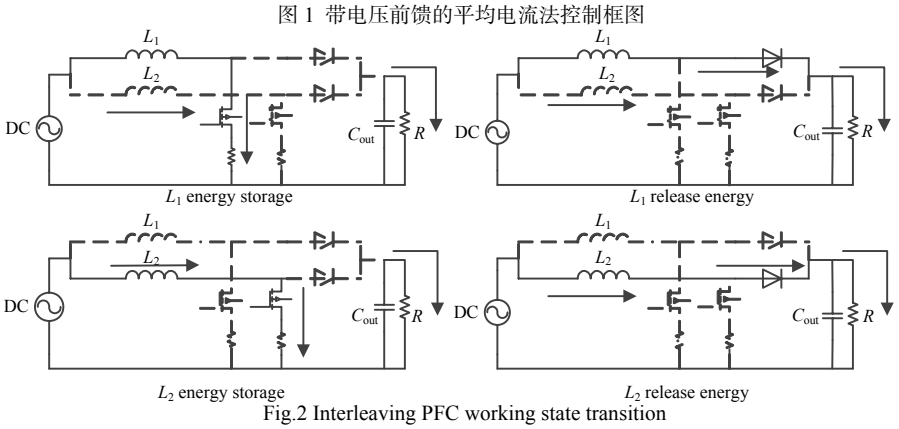

Fig.2 Interleaving PFC working state transition

图 2 交错并联 PFC 工作状态转换

在开关管关断阶段[dT_s,T_s]状态方程为：

$$\begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ U_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -\dfrac{1}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ U_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} U_g(t) \tag{2}$$

由式(1)、式(2)联立得到一个开关周期内的状态空间描述。在静态工作点附近，对输入变量 $U(t)$与占空比控制量 $d(t)$引入低频小信号扰动，并假设其交流扰动量远远小于稳态直流分量，则得到理想的 Boost 型变换器标量形式的状态方程为：

$$\begin{cases} L\dfrac{\mathrm{d}\hat{I}_L(t)}{\mathrm{d}t} = -D'\hat{U}_C(t) + \hat{U}_g(t) + \dfrac{U_g}{D'}\hat{d}(t) \\ C\dfrac{\mathrm{d}\hat{U}_C(t)}{\mathrm{d}t} = D'\hat{I}_L(t) - \dfrac{1}{R}\hat{U}_C(t) - \dfrac{U_g}{R(D')^2}\hat{d}(t) \\ \hat{I}_g(t) = \hat{I}_L(t) \end{cases} \tag{3}$$

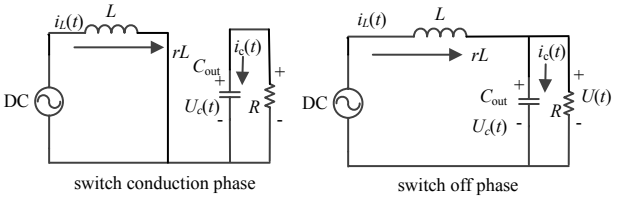

Fig.3 Small signal analysis in continuous conduction mode

图 3 连续导通模式下小信号分析

式中：$D'=1-D$，D 为稳态时的占空比；U_g 为稳态时的输入电压。对式(3)进行拉普拉斯变换可得到理想的 Boost 型变换器开环传递函数：

$$G_{Vd}(s) = \frac{\hat{U}(s)}{\hat{d}(s)}\Big|_{\hat{I}_g(s)=0} = \left(\frac{U_g}{D'^2}\right)\frac{D'^2R - Ls}{D'^2R + Ls + LCRs^2} \tag{4}$$

$$G_{id}(s) = \frac{\hat{I}_L(s)}{\hat{d}(s)}\Big|_{\hat{I}_g(s)=0} = \left(\frac{U_g}{D'}\right)\frac{2D'R + CD'Rs}{D'^2R + Ls + LCRs^2} \tag{5}$$

1.1 电流环控制器设计

电流环体现的是电感电流改变使占空比相应改变的传递关系，如式(4)和式(5)求得开环传递函数后，在未加入 PI 补偿控制[7-8]时，难以满足系统电流环的频率特性与幅值特性。不满足相位要求的闭环系统是不收敛的，但过大的相位裕度会产生过阻尼特性，导致系统响应缓慢。因此为使带负反馈的控制系统稳定，需对控制环路进行满足一定相位裕度的 PI 数字补偿设计。

加入 PI 补偿控制，使补偿与未补偿电流环在剪切频率处对数和为零。为使电流环的开环截止频率远离干扰 150 kHz 开关频率，且有较高的瞬态状况响应速度，选择 f_{BWI} 为 24 kHz。补偿后如图 4 所示，设计的相位裕量用来避免系统发生振荡。补偿设计采用 Matlab/Sisotool 工具箱对环路进行计算机辅助设计，通过对系统零点、极点以及增益等的修改，使得设计的数字补偿器实现了很好的稳态与动态性能要求。加入补偿后，电流内环闭环 Bode 图显示其剪切频率处，相位裕度为 55.7°，大于 45°，设计满足系统相位要求。

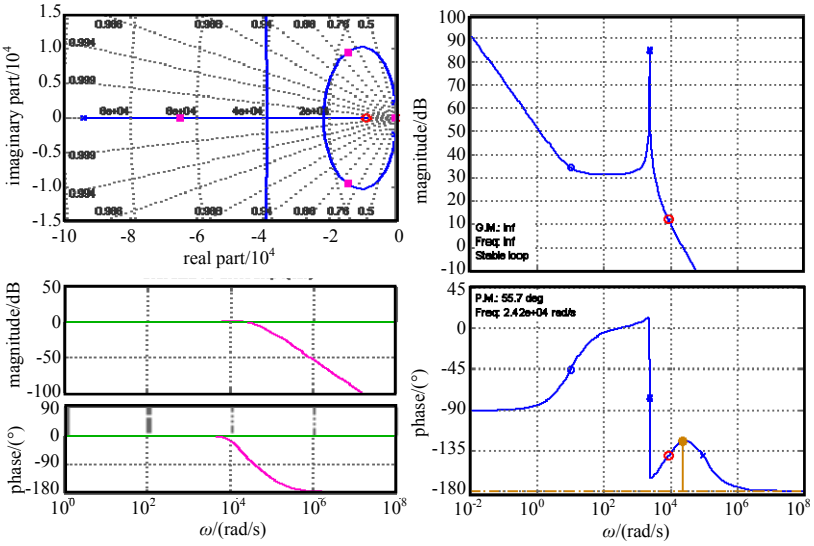

Fig.4 Bode diagram of current loop compensation
图 4 电流环路补偿后 Bode 图

1.2 电压环控制器设计

电压外环在确保系统输出稳定的同时，为滤除输出电压上的 100 Hz 低频纹波，减小输出电容纹波对输入电流的调制作用，电压环截止频率应远离纹波频率，且电压环带宽要求足够低，否则将会影响输入电流波形。输入电流产生严重畸变，将导致谐波增大，因此选择环路带宽 f_{BWV} 为 15 Hz，同时设计其剪切频率也在 15 Hz 处。图 5 为加入 PI 控制补偿后的电压外环闭环 Bode 图，在 f=15.2 Hz 的剪切频率处，电压环路的相位裕度为 82.3°，大于 45°，环路可能会出现过阻尼现象，但满足系统相位要求。

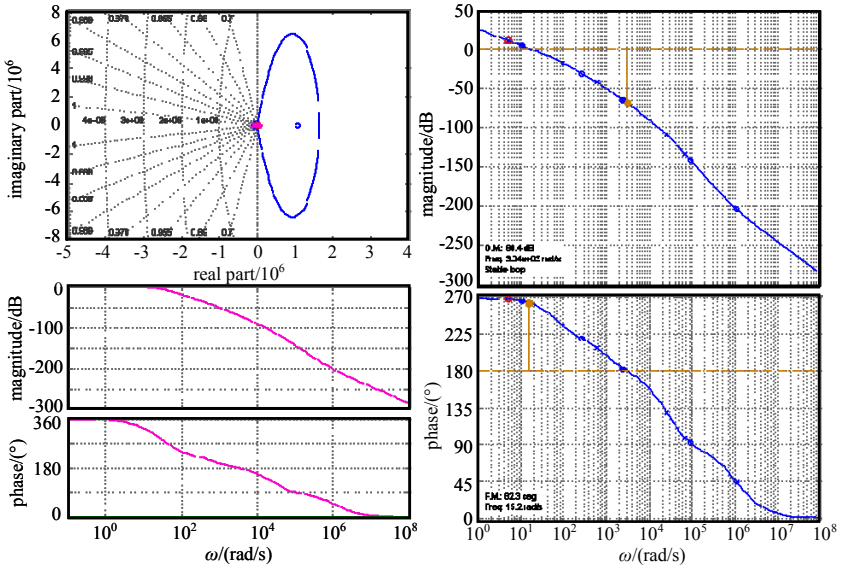

Fig.5 Bode diagram of voltage loop compensation
图 5 电压环路补偿后 Bode 图

2 程序控制时序及电流采样分析

基于 DSP 控制的平均电流控制的 PFC 需要对输入电压 U_{in}、输出电压 U_o、电感电流 I_L 模拟量进行采集，对采样算法的研究主要集中在对电感电流采样点的选取，不恰当采样点的选取会加重输出电流的波形畸变，导致系统不稳定。文献中多采用的是一种固定延时采样算法，即在每个开关周期的起始延迟一固定时间后，进行电流采样。本文在固定延时采样算法上进行改进，提出交替不定延时平均电流采样算法，即交替对每一路开关管在开关导通起始延时二分之一开关导通时间后进行电流采样，其采样值为电感平均电流，既避开了开关导通处尖峰脉冲电流的干扰，又成功实现了平均电流的采样，使得基于平均电流型控制算法更容易实现。改进的采样算法实现了平均电流的采样，如图 6 所示。

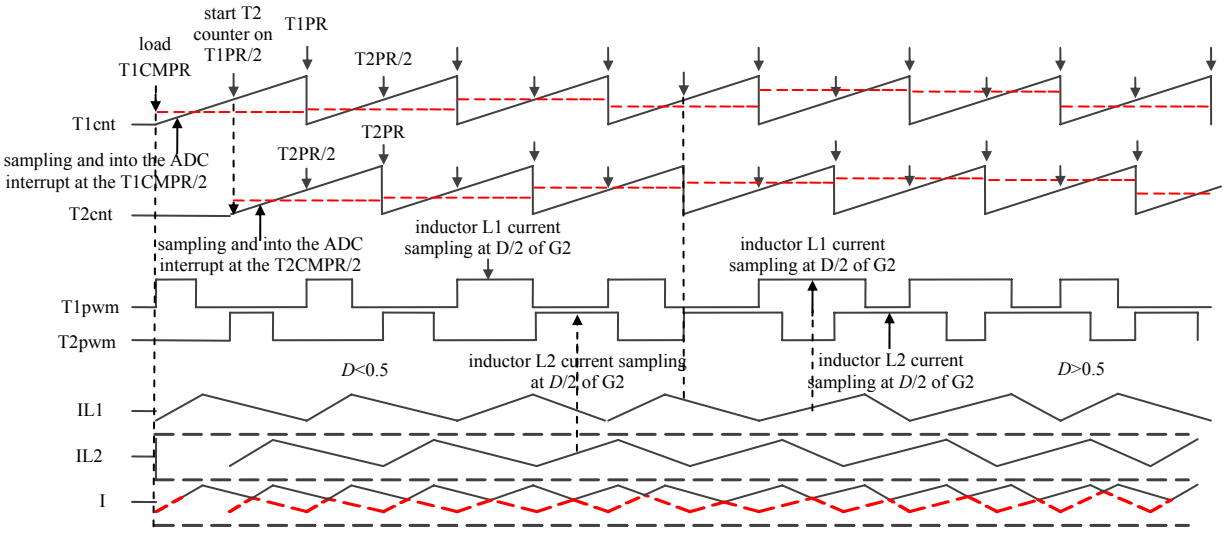

Fig.6 PFC control and current sampling timing
图 6 PFC 控制及电流采样时序

图 7 为加入了软启动的程序控制框图，采用使 Start_U_{ref}参考电压缓慢上升到额定输出参考 U_{ref}的方式，减少了 PFC 在上电升压过程中对后级电路造成的冲击与损坏，降低了后级电路器件对电流电压的应力要求。

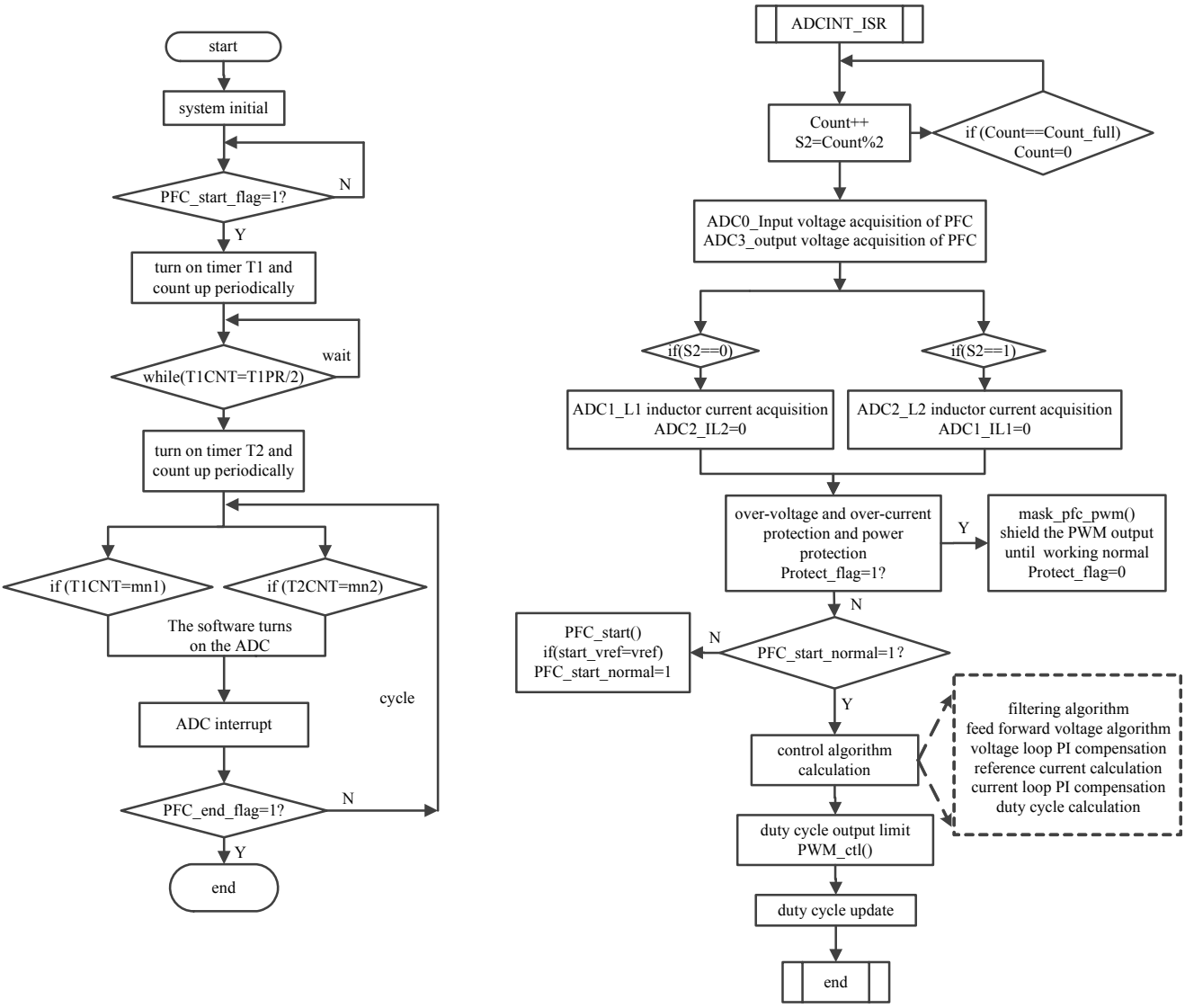

Fig.7 PFC control program and ADC interrupt
图 7 PFC 主控制程序和 ADC 中断框图

3 Matlab/Simulink 建模及试验结果分析

采用平均电流算法控制的并联交错 Boost PFC 的 Matlab/Simulink 仿真模型由多个功能子模块构成，包含了输入输出电流电压 AD 采集、电流与电压双环 PI 补偿控制、占空比计算、脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation，PWM)产生等控制算法模块。图 8 为基于平均电流算法控制的并联交错 Boost PFC Matlab/Simulink 模型仿真结果，仿真波形显示，输出电压很好地稳定在设计指标 400 V 左右，且输出电流稳定，输入电流很好跟随了输入电压相位，在一定程度上抑制了电流谐波分量，增加了电源系统的有功功率，降低了无功功率分量，从而实现了系统的功率因数校正功能。

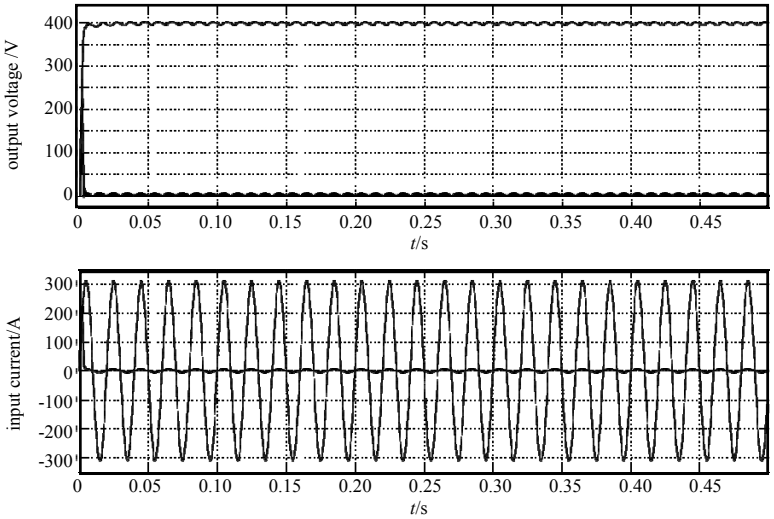

Fig.8 Simulation waveform for output voltage and input current
图 8 输出电压和输入电流仿真波形

为验证理论的正确性，采用并联交错 Boost PFC，基于 TMS320F2812 型 DSP 设计样机进行试验。设计输出功率 P_o 为 300 W，输出电压 U_o 为 400 V，输入电压 U_{in} 范围在 85~270 V，输入频率 f_{in} 范围为 45~65 Hz，单路开关频率 f_s 为 150 kHz，开关管选用承压 500 V、最大过电流 10 A 的 STP12NM50fp 型 MOS 管，整流桥选用 GBU808，其他电路参数为：L_1，L_2 相等，为 300 μH，输出滤波电容 C_{out} 为 360 μF。

图 9 为试验样机、输入电压电流波形和 DSP 开发板输出 PFC 控制 PWM 波形。可见，电流很好地跟踪了输入端电压波形，提高了输入侧的功率因数。此外采用较高的开关频率与交错并联结构，减小了输入电流高频纹波，降低了电感元器件尺寸与功率开关管的电流应力，从而降低了成本需求，具有很好的应用价值。试验结果与理论分析吻合，成功地将 DSP 控制的交错并联 Boost PFC 控制系统实现。

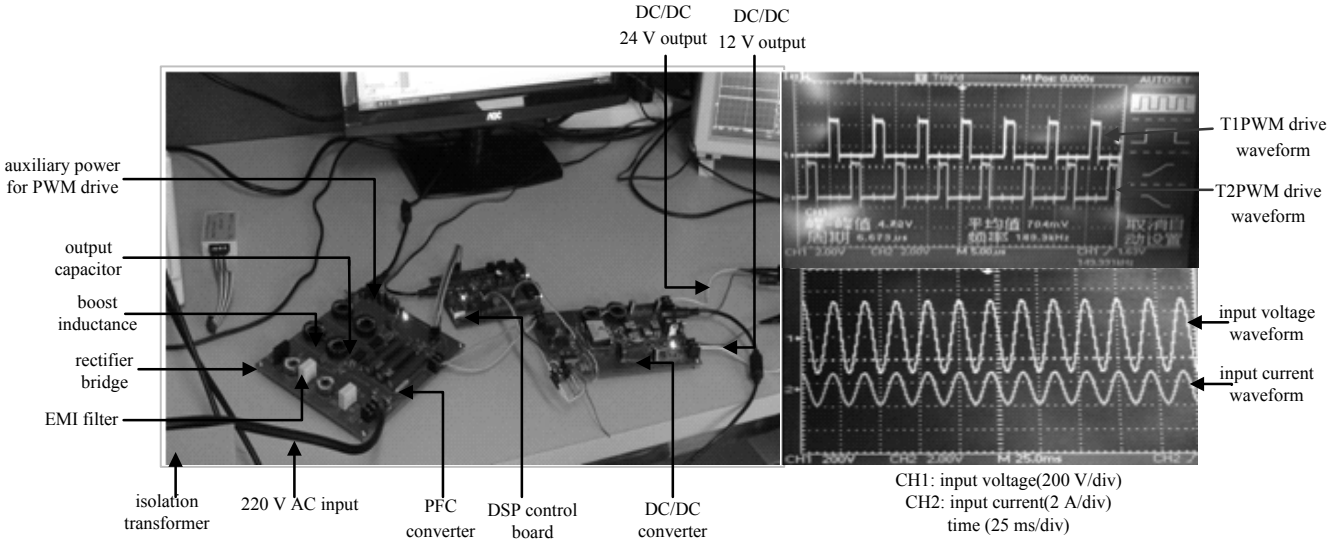

Fig.9 Prototype and the test results
图 9 样机测试平台和市电 220 V 输入时测试结果波形

4 结论

基于 Matlab/Simulink 建模，成功验证了控制系统控制算法的可行性。对 PFC 变换器的系统软件设计、数字环路补偿设计、PWM 产生策略、电感电流采集策略等进行了介绍，从而系统构成基于 DSP TMS320F2812 数字控制的平均电流型交错并联 Boost PFC 变换器的完整设计与系统实现。

参考文献：

[1] AGARWAL Nitin. Digital control algorithm for power factor correction[C]// Proceedings of the 9th International PCIM China Conference. Shanghai,China:Mesago PCIM GmbH, 2010:131-136.

[2] YE M Y,LI S. Simulation study of PFC boost converter based on predicted average current control[J]. Advanced Materials Research, 2012(462):738-742.

[3] 王菁. 基于 Boost 的单相数字平均电流法 PFC 的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008. (WANG Jing. Average current method of single-phase digital boost PFC[D]. Harbin,China:Harbin Institute of Technology, 2008.)

[4] ZHANG H S. Design of a single phase power factor corrector[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010,29-32:2473-2478.

[5] 郎芸萍. Boost-PFC 电路拓扑和控制算法的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006. (LANG Yunping. Study for circuit topology and control algorithm of Boost-PFC[D]. Hanzhou,China:Zhejiang University, 2006.)

[6] 王斌泽. 多通道交错并联 Boost 功率因数校正技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012. (WANG Binze. Interleaved multichannel technology of boost power factor correction[D]. Harbin,China:Harbin Institute of Technology, 2012.)

[7] 杨潮晖. Boost-PFC 电路拓扑和数字控制的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010. (YANG Chaohui. Study for circuit topology and digital control of Boost-PFC[D]. Harbin,China:Harbin Institute of Technology, 2010.)

[8] 谢小珊. 基于 Boost 型数字 PFC 控制器的研究与设计[D]. 上海:复旦大学, 2012. (XIE Xiaoshan. Research and design of Boost PFC digital controller[D]. Shanghai,China:Fudan University, 2012.)

作者简介：

谭　伟(1990-)，男，湖南省益阳市人，硕士，工程师，主要研究方向为数字开关电源. email:tanwei5226@126.com.

黄嵩人(1972-)，男，江苏省无锡市人，博士，研究员，主要研究方向为 DSP 架构设计、高性能 DSP 集成电路设计与应用.

申　培(1990-)，男，湖南省邵阳市人，硕士，工程师，主要研究方向为数字开关电源设计.

(上接第 335 页)

[7] 杨古月. PCB 板的电磁协同设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2013. (YANG Guyue. Electromagnetic collaborative design of PCB[D]. Harbin,China:Harbin Engineering University, 2013.)

[8] 杨成. 能量选择表面防护机理与分析[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011. (YANG Cheng. Energy selective surface protection mechanism and analysis[D]. Changsha,China:National University of Defense Technology, 2011.)

[9] 陈建华. PCB 传输线信号完整性及电磁兼容特性研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010. (CHEN Jianhua. Study on signal integrity and EMC characteristics of PCB transmission line[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2010.)

[10] 杨洪潺,聂在平,宗显政,等. 电小线圈近场分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(4):567-573. (YANG Hongchan,NIE Zaiping,ZONG Xianzheng,et al. Near field analysis of electrically small loop[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(4):567-573.)

作者简介：

李照荣(1991-)，男，重庆市人，在读硕士研究生，主要研究方向为射频微波、SiP 技术和 EMC 技术.email:704226820@qq.com.

吕立明(1980-)，男，河北省肃宁县人，硕士，副研究员，主要研究方向为射频微波毫米波、SiP 技术、EMC 技术.

万里兮(1955-)，男，成都市人，博士，教授，主要研究方向为电磁场、SiP 技术.

曾　荣(1985-)，男，四川省资中县人，硕士，主要研究方向为射频微波系统设计、小型化技术.