

# 车载充电机的硬件电路设计与实现

张戢, 杨思达, 侯康, 吴友宇

(武汉理工大学信息工程学院, 武汉 430070)

**摘要:** 电动汽车以车载储能电池提供动力, 零尾气排放, 成为新能源汽车发展的主流。因此, 有必要研发出一款价格较为低廉、效率较高和拥有自己知识产权的车载充电机。车载充电机硬件电路包含主回路电路和控制电路两个部分。其中主回路电路用于实现供电电源的 AC/DC、DC/AC、AC/DC 三次转换。主回路主要完成输入整流部分、全桥逆变部分和输出整流滤波部分的设计。控制电路主要用于实现 PFC 电路控制, 全桥逆变电路驱动控制, 以及与电池管理系统通信, 并对输出电流、电压进行采集。此车载充电机实现满足交流额定输入市电要求下的智能快速、高效充电, 就有良好的自保护、自诊断功能和安全性。

**关键词:** 电动汽车; 车载充电机; 全桥逆变; PFC 电路控制; 控制电路

**中图分类号:** TM 732

## Design and realization of electric vehicle on-board charger's the hardware circuit

Zhang Jian, Yang Sida, Hou Kang, Wu Youyu

(School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

**Abstract:** Powered by Vehicle energy storage battery and achieving the Zero emissions, the electric car has being become the mainstream in the development of new energy automobile .Therefore, it is necessary to develop our own intellectual proprietary car charger,which is cheaper and more efficient .The hardware circuit of the on-board charge consists of two parts of the main circuit and control circuits,Where the main circuit used for providing power supply for implementing AC/DC, DC/AC,AC/DC three conversions .The main circuit mainly complete input rectifier, full-bridge inverter output rectifier filter section and part of the design.The control circuit is mainly used for PFC control circuit, full-bridge inverter circuit drive control, and communicate with the battery management system, and the output current and voltage acquisition.This on\_board charger achieve rated AC input to meet intelligent fast, efficient charging, there is a good self-protection requirements under mains, the self-diagnostic function and safety.

**Key words:** electric vehicles;on\_board charge;full-bridge inverter;PFC circuit control; control circuit

## 0 引言

汽车自问世以来, 已逐渐成为人们生产和生活中不可缺少的工具, 成为现代社会文明的重要组成部分; 但是, 汽车在其发展过程中, 伴生了两个严重问题: 环境污染和能源危机。

自上世纪初开始的环境污染和能源危机已引起了世界各国的广泛关注, 其中对汽车的耗能所造成的污染尤为关注。目前世界范围内的汽车消耗全球大量的化石燃料, 并释放出大量的温室效应气体和其他大量污染气体<sup>[1]</sup>。能源和环境问题关系到整个世界的发展问题, 如何解决汽车的动力问题是世界各国共同认可的关键。因此, 开发电动汽车成为了世界各国的一项急切任务。

充电机是电动汽车发展不可或缺的一部分, 是电动汽车的核心设备之一<sup>[2]</sup>, 它的作用是

基金项目: 武汉理工大学国家级大学生创新创业训练计划资助 (20141049709008)

作者简介: 张戢 (1994—), 男, 本科在读, 主要研究方向: 电子信息

通信联系人: 吴友宇, 女, 教授, 主要研究方向: 电子信息类. E-mail: wuyouyu1@sina.com

将电网上的交流电压转换成能够满足电动汽车电池充电要求的直流电压,并按照电池的特性对电池的充电过程进行控制,避免由于充电不当而对电池造成不可恢复的损坏。因此,我们有必要设计一种效率更高、体积更小、成本更低的适合车载充电场合的充电机<sup>[3]</sup>。

## 1 车载充电机主要技术参数

(1) 输入电压:  $AC220V \pm 5\%$ ,  $50Hz \pm 1Hz$

(2) 直流高压输出:  $260 \sim 420V$

直流高压输出电流:  $0 \sim 5A$

直流高压最大输出功率:  $1.5kW$

高压转换效率:  $>89\%$

(3) 直流低压输出电压:  $13.5V \pm 0.25V$

直流低压最大输出电流:  $16A$

低压转换效率:  $>90\%$

## 2 车载充电机硬件电路设计的整体设计

车载充电机将 220V 市电输入经全桥整流滤波后,将 220V 交流电转换为直流电信号,PFC 控制电路对整流后的直流电压进行 DC/DC 变换<sup>[4-5]</sup>,通过 PFC 控制芯片使输入电流平均值跟随全波整流电压基准值,且为相同相位的正弦波。经全桥移相零电压 PWM 软开关电路后,直流电信号转换为交流电信号并将能量通过变压器原边传递至副边后,整流输出。同时,根据控制处理器 AD 采集输出的电流电压并结合硬件 PI 控制,改变 PWM 驱动控制信号占空比,以实现电流电压的实时调控,其结构框图如图 1 所示。

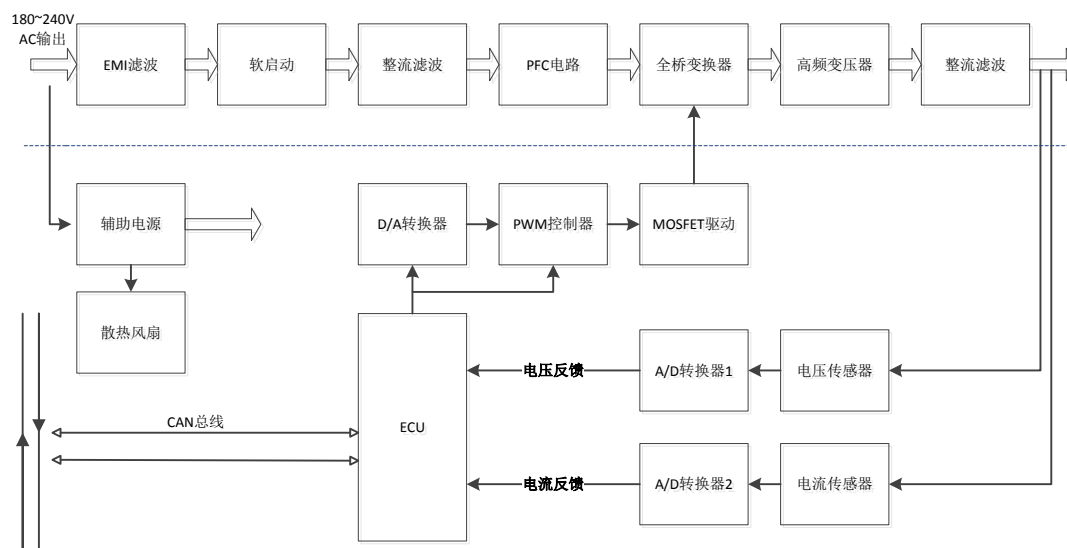


图 1 车载充电机硬件电路框图

Fig.1 The on\_board charger hardware circuit block diagram

## 3 车载充电机主回路设计

### 3.1 输入电路设计

输入电路主要包括 EMI 滤波电路和输入保护电路

### 3.1.1 EMI 滤波电路的设计

EMI 滤波电路主要由电容和电感组成，电感主要采用的是共模电感，共模电感具有抑制共模噪声的能力。一级 EMI 滤波电路如图 2 所示。图 2 中电容  $C_{y1}$  与电容  $C_{y2}$  的值相等，具有抑制差模和共模噪声能力，电容  $C_{x1}$  与电容  $C_{x2}$  的作用是用来抑制差模噪声，电感  $L$  采用共模的方式绕制，具有较好的共模噪声抑制能力，但在实际中存在不对称和漏磁等原因，在共模电感中存在漏感，漏感具有抑制差模噪声的能力。

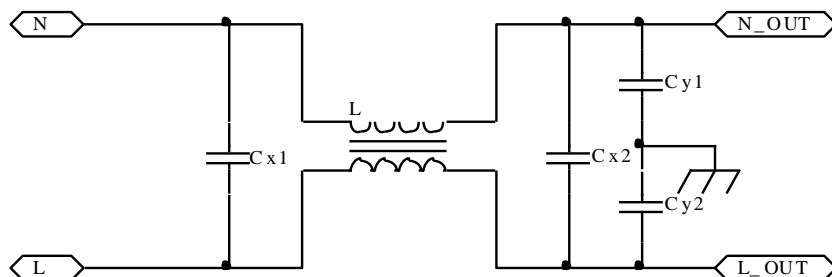


图 2 一级 EMI 滤波电路图  
Fig.2 The EMI filter circuit diagram

EMI 滤波电路在滤除差模信号时，将 EMI 滤波电路等效成差模滤波等效电路，由于电容  $C_{x2}$  远远大于电容  $C_{y1}$  和电容  $C_{y2}$  的串联，因此在差模等效电路中  $C_{y1}$  和  $C_{y2}$  的影响可以忽略， $L_d$  为共模电感中的漏感，如图 3 (a)所示。当滤波器在滤除共模噪声时， $C_{x1}$  与  $C_{x2}$  不起作用，可以不用考虑， $C_y$  的值是  $C_{y1}$  与  $C_{y2}$  的并联， $C_{y1}$  与  $C_{y2}$  相等， $C_y$  的大小是  $2C_{y1}$ ，共模等效电路如图 3(b)所示。

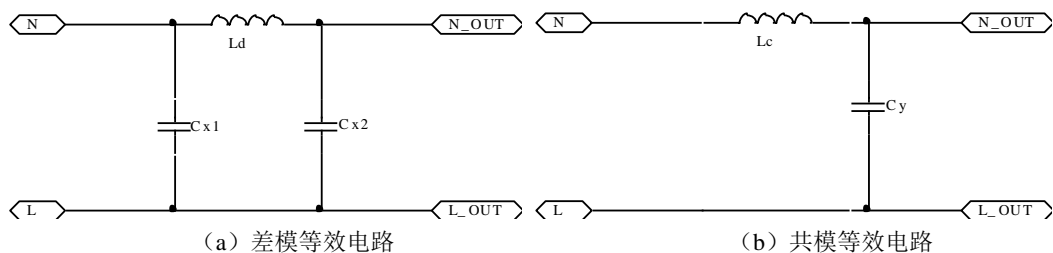


图 3 一级 EMI 滤波电路的差模与共模等效电路图  
Fig.3 The differential mode and common mode equivalent circuit diagram of an EMI filter circuit

由于车载充电机的主回路中存在滤波电容，APFC 电感很小，当充电机在上电的瞬间，如果没有输入保护电路，车载充电机的输入级将会有很大的电流尖峰，电流的尖峰值可达数百安，可能会损坏充电机的输入级电路。在本设计的输入保护电路中，采用的是热敏电阻加继电器的方式，电路图如图 4 所示。上电时，继电器处于开路状态，此时电流通过热敏电阻  $R_t$  流入到充电机中，当充电机正常工作后，继电器闭合，热敏电阻  $R_t$  被短路，这时电流通过继电器流入充电机中，达到保护输入级电路和提高效率的目的。

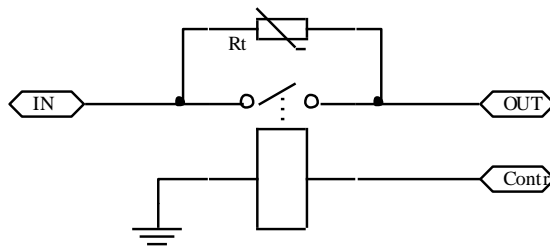


图 4 输入保护电路  
Fig.4 The input protection circuit

### 3.1.2 输入保护电路的设计

由于车载充电机的主回路中存在滤波电容，APFC 电感很小，当充电机在上电的瞬间，如果没有输入保护电路，车载充电机的输入级将会有很大的电流尖峰，电流的尖峰值可达数百安，可能会损坏充电机的输入级电路。在本设计的输入保护电路中，采用的是热敏电阻加继电器的方式，电路图如图 4 所示。上电时，继电器处于开路状态，此时电流通过热敏电阻  $R_t$  流入到充电机中，当充电机正常工作后，继电器闭合，热敏电阻  $R_t$  被短路，这时电流通过继电器流入充电机中，达到保护输入级电路和提高效率的目的。

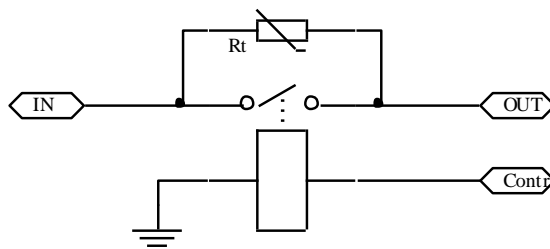


图 4 输入保护电路  
Fig.4 The input protection circuit

### 3.2 APFC 电路的设计

APFC 电路即功率因数校正电路, 由于车载充电机不是一个纯电阻负载, 输入端主要由二极管、电感和电容组成, 主要呈现为容性负载, 当输入的交流电经过一个纯容性负载时, 会引起电流失真和基波电压与基波电流之间存在一定的相移, 总谐波失真很大, 使得充电机的功率因数较低, 较低的功率因数会引起过多的供电系统和发电设备的损耗<sup>[6]</sup>。

本车载充电机中采用的有源功率因数校正电路的基本拓扑结构是 Boost 电路, 控制方法采用的是平均电流法。采用的集成电路控制芯片是美国 TI 公司生产的 UC3854, 基于 UC3854 有源功率因数校正电路图如图 5 所示。

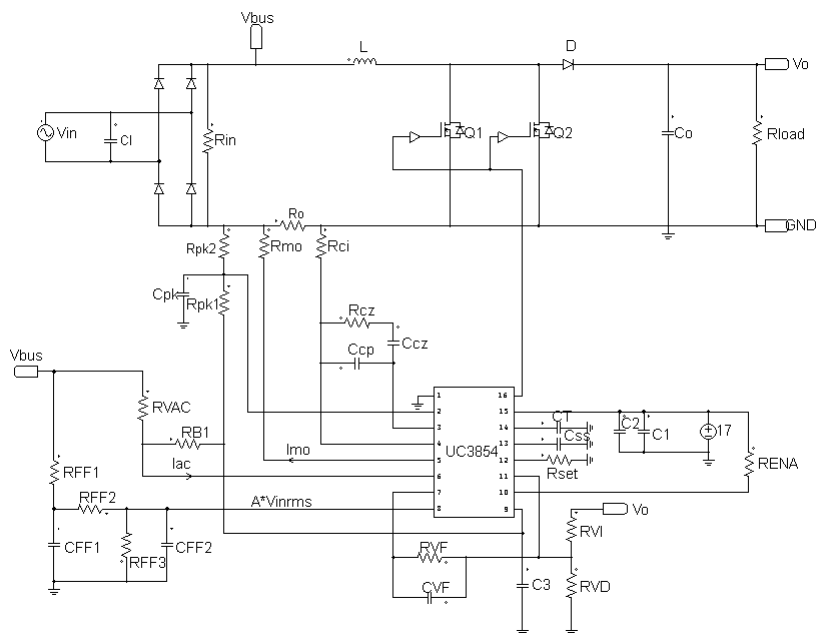


图 5 基于 UC3854 有源功率因数校正电路图  
Fig.5 The power factor correction based on UC3854 active circuit diagram

### 3.3 全桥逆变电路的设计

#### 3.3.1 逆变电路的拓扑结构选择

根据本次所研究的车载充电机的功率,电压调节以及考虑到电气隔离等因素,选用全桥变换器作为车载充电机的拓扑结构较为合适,因此本设计采用的逆变电路的拓扑结构为全桥式。全桥变压器的基本拓扑结构图如图 6 所示。

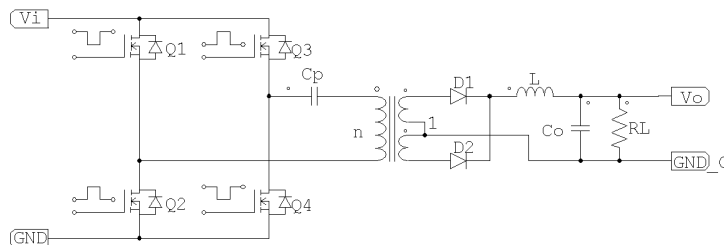


图 6 全桥变换器基本拓扑结构图  
Fig.6 The basic full-bridge converter topology

本车载充电机设计中的 DC-DC 具有较高的输入电压<sup>[7]</sup>,而且功率较大,开关管的工作频率为 40kHz 左右,故选择 IGBT 作为本文的开关元件比较合适,在此选择 infineon 公司的 F4-100R06KL4 作为逆变电路的开关器件。

#### 3.3.2 高频变压器的设计

高频变压器的设计通常有两种方法:第一种为 AP 法;第二种为 KG 法。在此采用 AP 法设计变压器的计算如下<sup>[8]</sup>:

本设计的输出功率  $P_{OUT}$  为 1.5kW,变压器的效率  $\eta$  为 0.98。则变压器的视在功率  $P_T$  为:

$$P_T = P_{OUT} \left(1 + \frac{1}{\eta}\right) = 1500 \cdot \left(1 + \frac{1}{0.98}\right) \approx 3030(W) \quad (1)$$

窗口使用系数  $K_0$  一般典型值为 0.4;波形系数  $K_f$  为有效值与平均值之比,波形为方波时  $K_f$  为 4;开关频率  $f$  为 40kHz;工作磁通密度  $B_W$  为 0.16T;电流密度  $J$  为 4A/mm<sup>2</sup>。则变压器磁芯的 AP 值为:

$$AP = \frac{P_T}{K_0 K_f f B_W J} = \frac{3030 \times 10^4}{0.4 \times 4 \times 40 \times 10^3 \times 0.16 \times 400} \approx 7.40(cm^4) \quad (2)$$

表 1 EE 磁芯表  
Table 1 EE core table

型号	材质	尺寸 (mm) A*B*C	AP(cm <sup>4</sup> )	A <sub>e</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>w</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>L</sub> (nH/N <sup>2</sup> )
EE47	PC40	47.12*19.63*15.62	4.7529	243.00	196.40	6660.00
EE50	PC40	50*21.3*14.6	5.7343	226.00	253.73	6110.00
EE55	PC40	55.15*27.5*20.7	13.6764	354.00	386.34	7100.00
EE57	PC40	56.57*23.6*18.8	9.7132	344.00	283.36	8530.00
EE60	PC40	60*23.3*15.6	9.8558	247.00	399.02	5670.00

由表 1 可以根据 AP 值选出合适的磁芯型号,在表 1 中,EE55 的 AP 值为 13.6764 cm<sup>4</sup>,EE57 的 AP 值为 9.7132 cm<sup>4</sup>,EE60 的 AP 值为 9.8558 cm<sup>4</sup>,均大于计算所得的 AP 值,考虑到变压器的体积、可能过载以及温升等因数,在此选用 EE55 磁芯比较适合。

### 3.4 全桥驱动电路的设计

本设计采用了 MITSUBISHI 公司的 M57959L 专用 MOSFET/IGBT 驱动器。该驱动器内

置光耦隔离器, PWM 控制信号无需外部隔离, 具有错误输出和系统监测功能。由于 M57959L 采用图腾柱输出, 因此可以采用浮地电路同时驱动 IGBT 的高低半桥, 同时该驱动器可以采用正负电源供电, 故可提供负压关断功能, 具体的 IGBT 驱动电路原理图如图 7 所示:

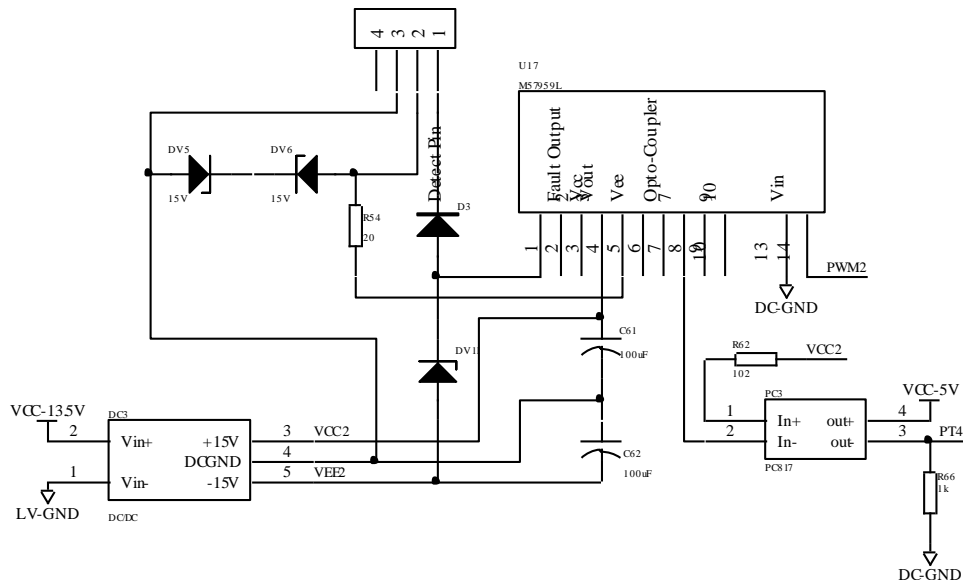


图 7 IGBT 驱动电路原理图  
Fig.7 The IGBT drive circuit schematics

### 3.5 整流滤波电路的设计

输出电路的主要功能是将变压器副边的高频交流电通过整流滤波后变成直流电输出。常用的整流电路主要有半波整流、全波整流、全桥整流。

半波整流电路电压利用率较低, 多用在低功率的情况下, 全桥整流电路与中心抽头的全波整流电路相比, 前者的每个二极管承受的反向电压只有后者的一半, 而且前者的变压器次级匝数是后者的一半。因此, 在此选择全桥整流电路作为本设计的输出整流电路。

电源的输出滤波电路通常采用无源低通滤波电路, 主要采用的是 LC 滤波电路, 二阶 LC 滤波电路如图 8 所示。

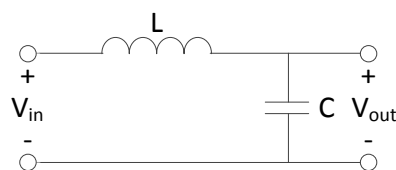


图 8 输出二阶 LC 滤波电路图  
Fig.8 The output of the second order LC filter circuit diagram

## 4 控制回路的设计

载充电机控制回路主要包括主控电路 (MCU)、PWM 控制电路、IGBT 驱动电路及输出信号反馈电路。车载充电机的原理框图如图 9 所示, 图中虚线框中的内容即为车载充电机控制回路的主要模块。

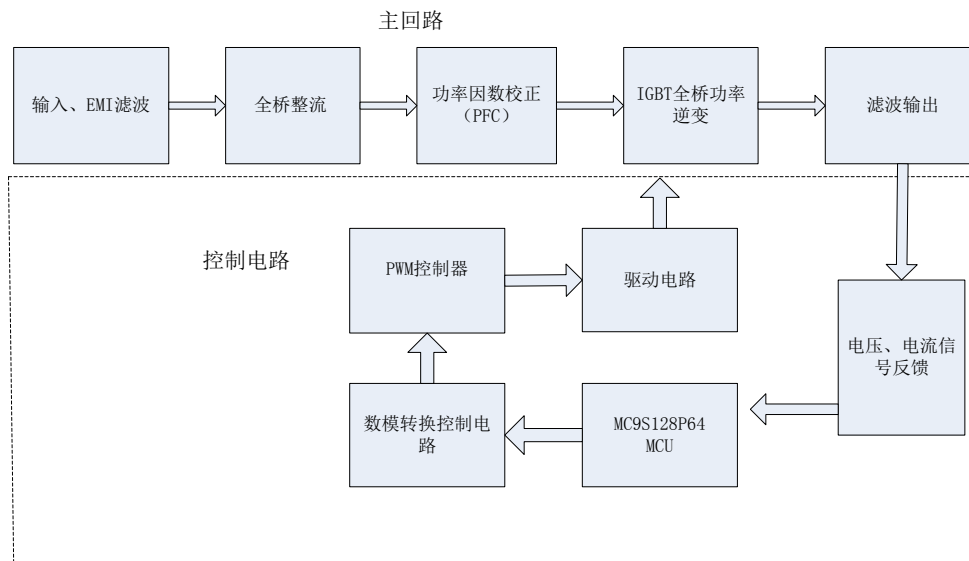


图9 车载充电机设计原理框图

Fig.9 The block diagram of car charger design

#### 4.1 主控 MCU

本设计中采用了 Freescale 公司的 MC9S12XS 系列车用单片机作为车载充电机的主控 MCU。该单片机集成了定时器、AD 转换器、CAN 通信模块、SCI 通信模块以及丰富的 GPIO。

单片机具体外围电路设计如图 10 所示。

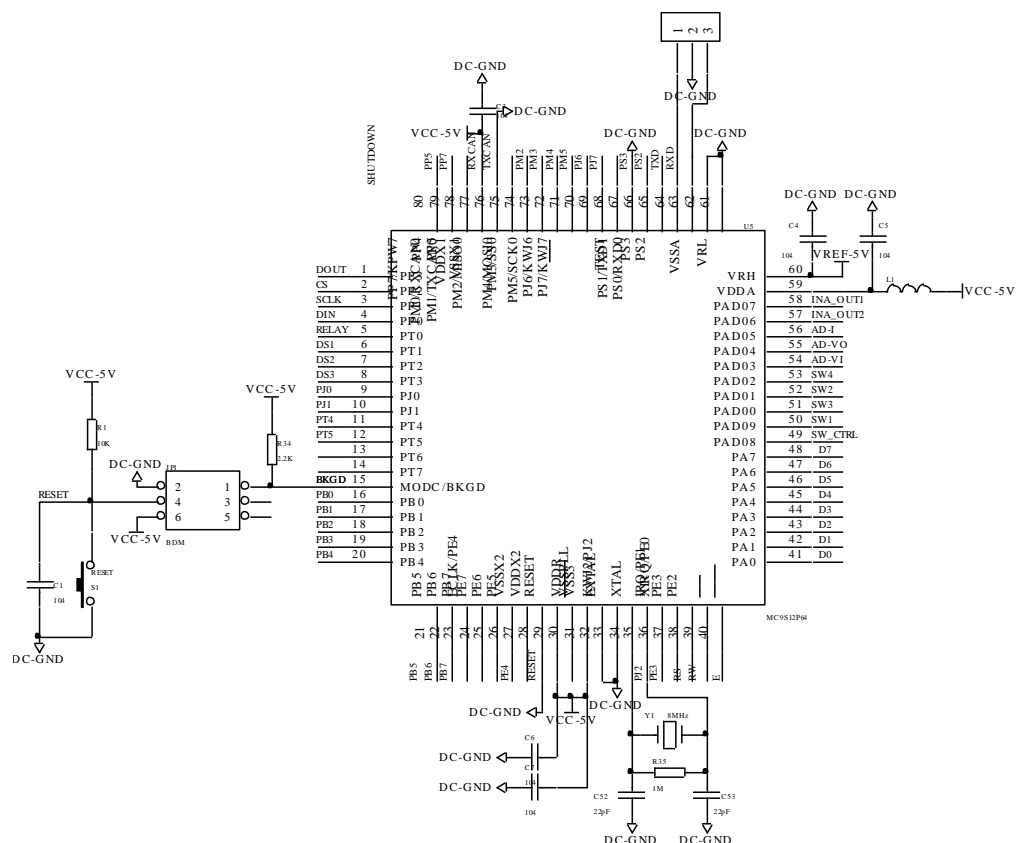


图 10 车载充电机主控 MCU 电路图

Fig.10 The car charger circuit diagram master MCU

主控 MCU 采用的是 5V 供电，外部 8M 晶振，低电平有效复位电路。设计了 BDM 口，对 MCU 进行程序的烧写或者在线仿真。本设计中使用 MC9S12XS64 自带的支持 CAN2.0A/B



协议的 CAN 通信模块, 以及 4 路 12 位的 ADC 转换器以及一定数量的 GPIO 口。

## 4.2 PWM 控制电路的设计

PWM 控制电路由 UC3846 构成, UC3846 是 TI 公司推出的改进型电流模式 PWM 控制器, 具有自动反馈补偿, 脉冲式电路限制, 快速的负载调整率等特点, 广泛应用于高端大功率开关电源中。

基于 UC3846 的硬反馈控制系统分为电压环和电流环两部分, 其工作原理类似, 下面分别介绍恒流恒压工作原理。

输出车载充电机恒压恒流控制策略是硬件 PI 控制, 主要靠轨到轨输入双运放 LM6482 的一个运放以及一些反馈电容电阻实现, 如图 11 所示。通过 DA 控制器 TLV5638 的通道 A 设定参考电压输入运放的同相输入端, 调节输出电压。反馈信号通过电压传感器采样滤波处理后作为负反馈输入运放的反相输入端, 稳定输出电压。

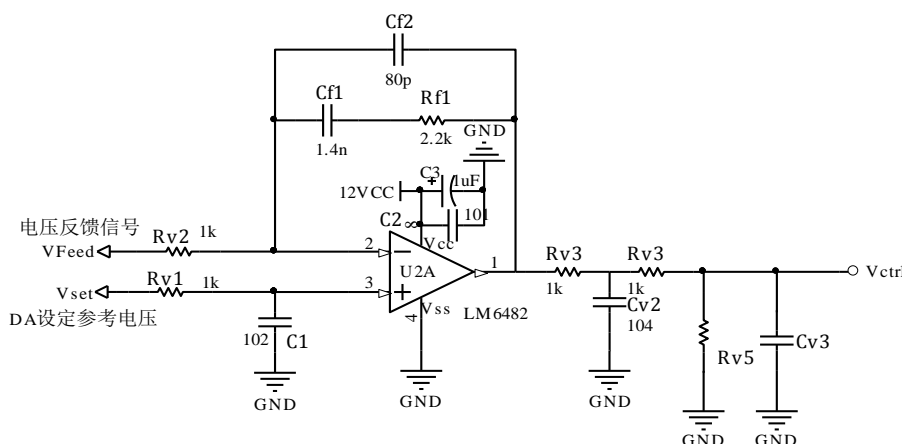


图 11 恒压 PI 控制电路

Fig.11 The constant PI control circuit

恒流控制策略和恒压控制策略类似, 也是用 PI 控制器实现。通过轨到轨运放 LM6482 的另一个运放实现 PI 调节控制。利用双 DA 控制器 TLV5638 的通道 B 设定电流参考值输入运放同相输入端, 充电机输出电流经过电流传感器采样滤波后输入送入运放的反相输入端, 实时调节控制输出电流, 达到输出电流的稳定, 如图 12 所示。

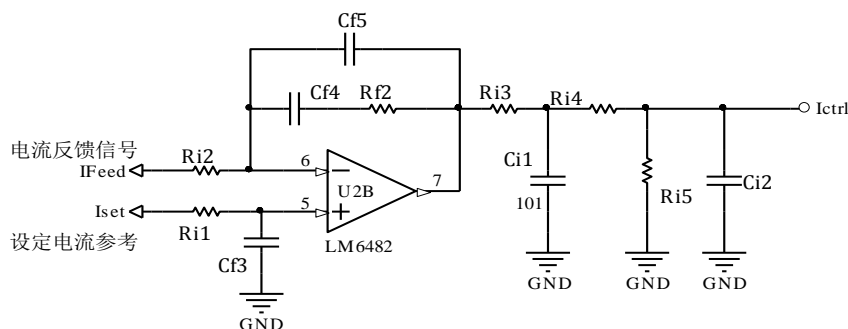


图 12 恒流 PI 控制器

Fig.12 The constant PI controller

电流电压采样反馈信号经过滤波处理后通过 PI 控制器, 然后将电压 PI 控制器输入信号控制 UC3846 的 5 脚, 实现 PWM 占空比的调节控制。将电流 PI 控制器的输出信号输入 UC3846 的 1 脚进行恒流控制。如图 13 所示为充电机恒压恒流控制电路图。



UC3846 硬件反馈PWM 控制

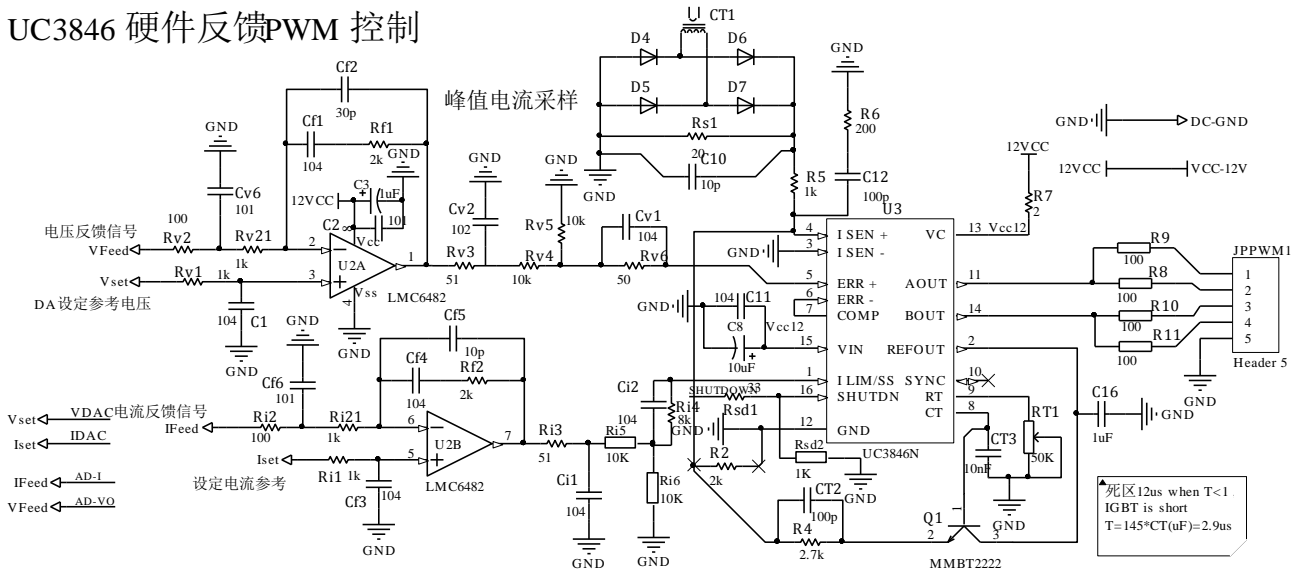


图 13 恒压恒流控制电路  
Fig.13 The constant current control circuit

车载充电机整机控制回路还包括 CAN 网络通信模块，电源模块，MUC 控制模块，DA 和反馈采样滤波模块等。CAN 通信模块实现整个充电机与电池管理系统或上位机的通信。MCU 采用 Freescale 公司的 MC9S12XS 系列车用单片机。该单片机集成了定时器、AD 转换器、CAN 通信模块、SCI 通信模块以及丰富的 GPIO。

5 测试结果及数据分析

5.1 实验数据记录实验数据记录

5.1.1 高压输出电压测试

试验点选择：输入额定交流电压 220V，设定输出电压范围 260V~420V，每隔 20V 取一个测试点，分别测试负载为 110Ω 和 150Ω 时的输出电压。

表 2 高压输出电压误差数据  
Table 2 The high output voltage error data

输出电压设定值（V）	负载电阻值（Ω）	实际输出电压测量值（V）	输出电压误差值
260	110	260.7	0.27%
280	110	280.9	0.32%
300	110	300.8	0.27%
320	110	320.9	0.28%
340	110	340.8	0.24%
360	110	360.6	0.17%
380	110	380.5	0.13%
400	110	400.3	0.08%
420	110	417.3	0.64%
260	150	260.7	0.27%
280	150	280.8	0.29%
300	150	300.6	0.20%
320	150	320.7	0.22%
340	150	340.4	0.12%
360	150	360.5	0.14%
380	150	380.5	0.13%
400	150	400.2	0.05%
420	150	420.2	0.05%

225

表 3 输出电压波形峰-峰值

Table 3 The waveform of the output voltage peak to peak value

负载电阻值 ( $\Omega$ )	输出电压设定值 (V)	输出电压纹波峰-峰值 (V)	纹波占输出电压比率
110	260	3	1.15%
110	360	2	0.55%
110	420	1	0.24%
150	260	3	1.15%
150	360	2	0.55%
150	420	1	0.24%

5.1.2 高压输出电流测试

试验点选择: 输入额定交流电压 220V, 充电机上位机发送设定输出电流值, 分别测试负载为 75 $\Omega$  和 60 $\Omega$  时的输出电流值, 输出电流波形峰-峰值。

230

表 4 高压输出电流误差数据

Table 4 The high output current error data

输出电流设定值 (A)	负载电阻值 ( $\Omega$ )	实际输出电流测量值 (A)	输出电流误差值
1	75	0.99	1.00%
2	75	1.99	0.50%
3	75	2.99	0.33%
4	75	3.99	0.25%
5	75	4.99	0.2%
1	60	0.99	1.00%
2	60	1.99	0.50%
3	60	3.01	0.33%
4	60	4.02	0.50%
5	60	5.01	0.2%

表 5 输出电流波形峰-峰值

Table 5 The peak to peak output current waveform

负载电阻值 ( $\Omega$ )	输出电流设定值 (A)	输出电流纹波峰-峰值 (A)	纹波占输出电流比率
75	2	0.14	7.0%
75	3	0.16	5.3%
75	4	0.18	4.5%
60	2	0.16	8.0%
60	3	0.12	4.0%
60	4	0.18	4.5%

235

5.2 数据分析与结果评估

由表 1 数据知, 恒压充电模式, 负载电阻  $R=110\Omega$  时, 设定输出电压在 260V~400V 间, 实际输出电压最大误差为 0.64%, 最小误差为 0.08%; 负载电阻  $R=150\Omega$  时, 设定输出电压在 260V~400V 间, 实际输出电压最大误差为 0.29%, 最小误差为 0.05%。达到设计要求。

240

由表 2 可知, 负载为 110  $\Omega$ , 输出电压为 260 V 时, 输出电压纹波较大, 纹波峰峰值接近 3V, 输出电压为 420V 时, 纹波较小, 纹波峰峰值达到 1V。负载为 150  $\Omega$ , 输出电压为 260V 时, 输出电压纹波较大, 纹波峰峰值接近 3V, 输出电压为 420V 时, 纹波较小, 纹波峰峰值为 1V, 与负载为 110  $\Omega$  时的情况类似。达到设计要求。

6 结论

245

本文主要针对车载充电机的硬件回路的设计与实现, 分别对主回路的输入电路、APFC 电路、全桥滤波电路进行了深入的研究与分析, 不仅提高了充电时的输出电压精度, 而且降低了输出电压的纹波并提高了输出功率。该充电机主回路可进一步实现通过建立输出电压采

样信号与 APFC 控制变量占空比的关联数学模型, 输出电流和输出电压信号反馈值与 DCDC 逆变网络控制占空比的关联数学模型的设想。获得系统较高的功率因数、输出的稳定性和鲁棒性。

250 [参考文献] (References)

[1] 章桐, 贾永轩. 电动汽车革命技术[M]. 北京: 机械工业出版社. 2010: 142-175.

Zhang Tong, Jia Yongxuan. Electric car revolution in technology[M]. Beijing: China Machine Press. 2010: 142-175.

255 [2] 陈清泉, 孙立清. 电动汽车的现状和发展趋势[J]. 科技导报. 2005 (4): 24-28.

Chen Qingquan, Sun Liqing. Present Status And Future Trends Of Electric Vehicles, Science Technology Review. 2005 (4): 24-28.

260 [3] Chan M S W, Chau K T, Chan C C. Modeling of Electric Vehicle Chargers [C]. Industrial Electronics Society, 1998. IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE, 1998: 433-438.

[4] SHIEH J J. Peak-current-mode based single-wire current-share multi-module paralleling DC / DC power supplies[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2003, 20(12): 1564-1568.

265 [5] Al-Mothafar MRD. Small signal modelling of current programmed N connected parallel input/ series-output bridge-based buck dc-dc converters [J]. Journal of the Franklin Institute-Engineering and Applied Mathematics. 2012, 349(1): 260-83

[6] 王兆军, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿. 北京: 机械工业出版社. 1998.

270 Wang Zhaojun, Yang Jun, Liu JinJun. Harmonic suppression and reactive power compensation. Beijing: China Machine Press. 1998

[7] AYYANAR R GIRI R, MOHAN N. Active input-voltage and load-current-sharing in input-series and output-parallel connected modular dc-dc converters using dynamic input-voltage reference Scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(6): 1462-1473.

275 [8] 李宏. 电力电子设备用器件与集成电路应用指南, 第二册, 控制用集成电路. 北京: 机械工业出版社. 2001: 91-94

Li Hong. Power electronic equipment with devices and integrated circuit application guide, With the integrated circuit, the second volume, control. Beijing: China Machine Press. 2001: 91-94

280