

面向无线快速充电应用的调压方案设计与实现*

傅桂娥^{1,2}, 徐圣楠¹, 缪瑜², 张一晋¹

(1.南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094; 2.南京睿赫电子有限公司, 江苏 南京 210094)

摘要: 随着科技的发展, 人们的生活节奏加快, 对手机等移动设备的使用频率不断提升, 使得普通的无线充电方案已经无法满足使用需求。因此, 效率高且干扰小的无线快速充电方案急需走进人们的生活。DC/DC 调压是一种能够实现电压数字可控的调压方式, 因其效率高和稳定性好等优点被广泛应用。基于 DC/DC 调压原理分别设计出两种应用于无线快速充电的定频调压方案, 并对电路参数设置进行理论推导, 最后对设计的方案进行实现。性能测试及样板充电实验验证了理论推导和方案设计的正确性和有效性, 表明其具有重要应用价值。

关键词: 无线充电; 快速充电; 定频调压; DC/DC

中图分类号: TN710

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200734

中文引用格式: 傅桂娥, 徐圣楠, 缪瑜, 等. 面向无线快速充电应用的调压方案设计与实现[J]. 电子技术应用, 2021, 47(1): 91-95.

英文引用格式: Fu Guie, Xu Shengnan, Miao Yu, et al. Design and implementation of voltage regulation scheme for wireless fast charging applications[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(1): 91-95.

Design and implementation of voltage regulation scheme for wireless fast charging applications

Fu Guie^{1,2}, Xu Shengnan¹, Miao Yu², Zhang Yijin²

(1.School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2.Nanjing Ruihe Electronics Co., Ltd., Nanjing 210094, China)

Abstract: With the development of technology, people's life rhythm is accelerating, thereby increasing the frequency of using mobile phones and making the previous wireless charging solutions unable to meet people's needs. Therefore, fast wireless charging solutions with high efficiency and low interference are desirable in people's lives. DC/DC voltage regulation can achieve digitally controllable voltage, and is widely used because of its high efficiency and good stability. Based on the principle of DC/DC voltage regulation, this paper designs two fixed frequency voltage regulation schemes for fast wireless charging, theoretically derives parameter settings in the circuits, and finally implements them according to the designed schemes. Performance tests and model experiments validate the correctness and effectiveness of the theoretical derivations and scheme designs, and indicate the proposed schemes have important application value.

Key words: wireless charging; fast charging; constant frequency voltage regulation; DC/DC

0 引言

随着手机、智能手表等移动设备的快速发展, 无线充电技术的发展已经从理论研究层面逐步走向商业化^[1]。近年来, 人们对于手机的依赖性越来越强, 手机不断耗电的同时急需快速充电, 因此催生了无线快速充电技术的研究和商业化应用。

在传统的无线传输系统中, 发射功率通常通过变频或者定频调占空比的方式进行调节。这种方式由于其不断变化的频率或占空比, 可能会对充电设备造成干扰^[2],

使得充电设备的充电效率差且充电过程不稳定。作为手机行业的佼佼者, 苹果公司采用的无线快速充电方案即为定频调压方案, 即固定工作频率, 根据动态的负载功率需求控制调压单元, 最终实现动态的功率输出^[3]。这种方案能让无线充电对手机的干扰降到最小^[4], 但要求实现多挡位的负载电压精准调整需要核心处理器 (Microcontroller Unit, MCU) 具备较高的 PWM 工作频率, 从而增加应用成本及功耗, 亦会影响产品的电磁兼容性 (Electro Magnetic Compatibility, EMC)^[3]。定频调压方案虽然具有较高的设计要求, 但能够给用户带来更好的充电稳定性、充电效率以及更安全的充电环境, 因此在苹果

* 基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(30920021127)

公司的推动下势必会成为未来主流的无线充电方式^[5]。

目前,已经有一些 DC/DC 调压方法可以为定频调压方案提供借鉴。文献[6]提出了一种通过 DAC 调节 DC/DC 输出电压的电路方案,能够实现 DC/DC 输出电压的数字可控。文献[7]探讨了基于 DC/DC 开关稳压器的数控电源设计方案,能够实现同一数控电源系统兼恒压恒流功能,且具有较高的输出精度。

基于以上设计,本文提出面向无线快速充电应用的两种定频调压方案:IDAC 方案和 PWM 方案。它们的显著特点是:(1)无需采用高主频的 MCU,只需通过 MCU 产生控制信号控制调压单元从而实现精准可靠的电压调节;(2)避免输出级直接受到输入电压的影响^[8],使得搭载无线快速充电技术的产品性能更加稳定;(3)通过固定频率调节电压控制发射功率,可以有效避免无线充电对手机的通信干扰。实验验证了这两种方案能够实现宽范围的电压调节,满足苹果手机的无线快速充电效果。

1 无线定频调压系统的整体系统设计

无线定频调压系统组成如图 1 所示。其中,调压模块是实现快速无线充电的核心部分。此外,电源模块分别给调压模块和 MCU 供电;调压模块与桥相连接,通过反馈引脚实现自动稳压;解调模块与全桥驱动器相连,将解调后的数据传给 MCU 处理;MCU 处理器控制调压模块的调压精度及调压范围,并且及时处理解调模块反馈的接收功率请求,然后根据需要输出控制信号给调压模块,从而实现多挡位的电压精准调节。

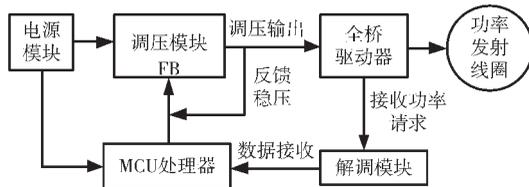


图 1 无线定频调压系统的基本系统框架

2 无线定频调压方案的设计

根据图 1 所示系统框架,本节将介绍基于 DC/DC 的调压原理,并且基于此提出两种调压方案。

2.1 基于 DC/DC 的调压原理

DC/DC 通过输出端分压反馈回路控制最终 DC 输出^[9]。Fitipower 公司的 FR9885 是一款高效、内部补偿的降压型 DC/DC 转换器^[10],如图 2 所示,通过在其外围反馈回路上添加控制信号以实现动态调节输出电压,并利用其内部补偿功能简化外部电路设计。当反馈引脚的电压达到 0.4 V 时,其最大占空比为 90%,转换效率高。这些优点有助于实现宽范围的输出电压调节。

将图 2 中 FR9885 的 FB 管脚电压表示为 V_{FB} ,稳定状态下 $V_{FB}=0.6\text{ V}$ 。将连接到 DC/DC 反馈回路上的控制电压表示为 $V_{control}$,从 FB 管脚流经 R_7 的控制电流表示为 $I_{control}$,DC/DC 电路的输出电压表示为 V_{DCDC} ,流经电阻 R_2 的电

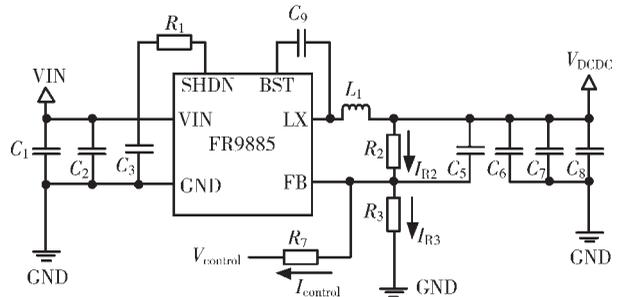


图 2 FR9885 典型应用电路

流表示为 I_{R2} ,流经电阻 R_3 的电流表示为 I_{R3} 。当 FB 管脚呈高阻态时,根据 KVL 可以得到:

$$I_{control} = \frac{V_{FB} - V_{control}}{R_7} \quad (1)$$

$$I_{R2} = \frac{V_{DCDC} - V_{FB}}{R_2} \quad (2)$$

$$I_{R3} = \frac{V_{FB}}{R_3} \quad (3)$$

根据 KCL 可以得到 $I_{R2} = I_{control} + I_{R3}$ 。最后,

$$\begin{aligned} V_{DCDC} &= I_{control} \times R_2 + \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) \times V_{FB} \\ &= \frac{V_{FB} - V_{control}}{R_7} \times R_2 + \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) \times V_{FB} \end{aligned} \quad (4)$$

从式(4)可看出, V_{DCDC} 和 $I_{control}$ (或者 $V_{control}$) 成线性比例关系。当 $I_{control}$ 为 0 时,输出电压达到最大值,为 $(1 + R_2/R_3)V_{FB}$ 。另外,电压的可调节幅度可表示为 $I_{control}R_2$ 。因此,只需将 $I_{control}$ (或者 $V_{control}$) 和 V_{DCDC} 作为设计输入,进一步确定式(4)中电阻的值或者比例关系,就能实现 DC/DC 调压功能。

2.2 IDAC 方案设计

基于以上调压原理,本小节设计一种通过抽取电流改变 DC/DC 分压反馈点的电压大小进而调整 DC/DC 输出的 IDAC 方案。

2.2.1 IDAC 方案的实现电路

以 DC/DC 芯片采用 FR9885 为例,IDAC 方案的实现电路如图 3 所示。其中,MCU 控制 IDAC 功能模块的输出电流大小以及方向;IDAC 功能模块是一个 6 位的电流舵型 DAC,由两组电流源和两组开关组成,各支路电流如图 3 标注。MCU 通过输出数字信号 $d_0 \sim d_6$ 控制开关 $S_0 \sim S_6$ 及 $S_0' \sim S_6'$ 选择流出 IDAC 功能模块的总电流,通过数字信号 d_7 控制开关 S_7 选择 DAC 输出电流方向。IDAC 输出引脚直接连接 DC/DC 的反馈端。

2.2.2 电路参数的理论推导

如图 3 所示, V_{DAC} 是连接到 DC/DC 分压反馈回路上的控制电压, I_{DAC} 是 IDAC 功能模块的输出抽电流,TRM 是 MCU 用于存储控制 I_{DAC} 电流大小的数字寄存器值。DC/DC 转换器及其外围电路与图 2 一致,不再赘述。 I_{DAC} 相当于图 2 中的 $I_{control}$, V_{DAC} 相当于图 2 中的 $V_{control}$ 。根据 IDAC 的设计原理可以得到:

$$I_{DAC} = 0.5 \times 10^{-6} \times \text{DEC}[\text{TRM}] \quad (5)$$

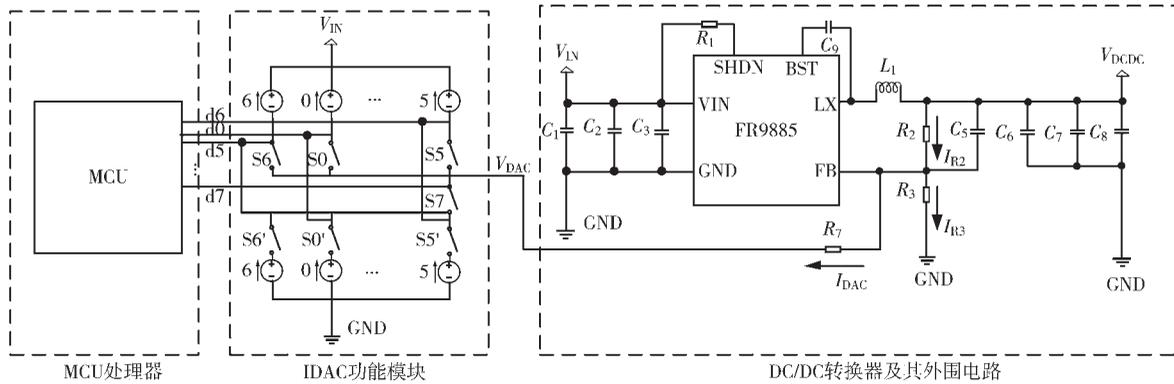


图3 IDAC调压电路

将式(5)代入式(4)中即可得到 DC/DC 输出电压与 TRM 控制字的关系式:

$$\begin{aligned} V_{\text{DCDC}} &= I_{\text{DAC}} \times R_2 + \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) \times V_{\text{FB}} \\ &= 0.5 \times 10^{-6} \times \text{DEC}[\text{TRM}] \times R_2 + \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) \times V_{\text{FB}} \end{aligned} \quad (6)$$

2.3 PWM 方案设计

由于 IDAC 方案需要通过 MCU 外接 IDAC 功能模块才能实现,电路较复杂且精度有限。因此,本节另外设计一种 PWM 方案,直接利用 MCU 内集成的 PWM 功能模块控制 DC/DC 的输出端分压反馈回路。

2.3.1 应用 PWM 改变 DC/DC 反馈电压的原理

PWM 波是一种占空比可调的脉冲波形,其波形的高电平和低电平在实际应用中都是一个常量^[11]。以如图 4 所示的 PWM 波形为例,假设该波形的高电平为 V_H ,低电平为 V_L ,则可以将其电平函数表示为:

$$V(t) = \begin{cases} V_H, & kT \leq t < \alpha T + kT \\ V_L, & \alpha T + kT \leq t < T + kT \end{cases} \quad (7)$$

其中, T 为 MCU 计数脉冲的基本周期, k 为 PWM 波的周期计数个数, α 是 PWM 波的占空比, t 是电平函数的时间变量。根据傅里叶级数展开式可以得到:

$$\begin{aligned} V(t) &= [\alpha(V_H - V_L) + V_L] + \\ & 2 \frac{V_H - V_L}{\pi} \left[\sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + \sin\left(2\pi\alpha - \frac{2\pi t}{T}\right) \right] + \\ & \sum_{n=2}^{\infty} 2 \frac{V_H - V_L}{\pi} \left[\sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + \sin\left(2\pi n \alpha - \frac{2\pi n t}{T}\right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

从式(8)可以看出,第一项表达式为直流分量,第二项为一次谐波分量,第三项为高次谐波分量。根据 FR9885 数据手册,其反馈电压只能稳定在 0.584 V ~ 0.615 V 之间,因此需要将式(8)中的谐波分量滤除后得到随占空比 α 变化的直流分量。由于一次谐波分量在所有谐波分量中的影响最大,因此可以根据其谐振频率设计一个低通滤波器将 PWM 方波整形形成直流信号。

2.3.2 PWM 方案的实现电路

以 DC/DC 仍然采用 FR9885 为例, PWM 方案的实现电路如图 5 所示。其中, MCU 通过调节其 PWM 模块产

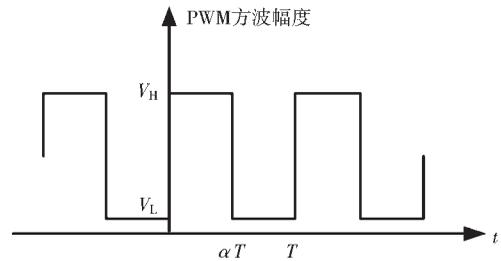


图4 PWM方波

生占空比可变的 PWM 波;滤波电路由简单的电阻和电容组成,电阻值和电容值的选择取决于 PWM 波的一次谐波分量。为了及时响应接收功率请求, MCU 需要相应地调整 PWM 波的占空比以便及时增加或减少接收功率。因此, MCU 处理器的 PWM 输出引脚需要经过滤波器电路后连接至 DC/DC 反馈引脚。

2.3.3 电路参数的理论推导

如图 5 所示, I_{PWM} 是流向滤波器的电流,相当于图 2 中的 I_{control} 。 V_{PWM} 是 PWM 方波信号经过滤波器平滑后的输出电压,相当于图 2 中的 V_{control} 。 DC/DC 转换器及其外围电路与图 2 一致,不再赘述。 PWM 方波由 MCU 中的 PWM 功能模块产生。将 PWM 波的占空比表示为 D (取值范围为 20% ~ 50%), MCU 的 PWM 引脚的电源电压表示为 V_{CC} 。根据 PWM 经过一级滤波器处理的原理可得到:

$$V_{\text{PWM}} = V_{\text{CC}} \times D \quad (9)$$

将式(9)代入式(4)即可得到输出电压与占空比的关系式:

$$\begin{aligned} V_{\text{DCDC}} &= \left(1 + \frac{R_2}{R_3} + \frac{R_2}{R_7}\right) \times V_{\text{FB}} - \frac{R_2}{R_7} \times V_{\text{PWM}} \\ &= \left(1 + \frac{R_2}{R_3} + \frac{R_2}{R_7}\right) \times V_{\text{FB}} - \frac{R_2}{R_7} \times V_{\text{CC}} \times D \end{aligned} \quad (10)$$

3 无线快充调压方案的实现

本节将两种无线快充的调压方案同时应用于双线圈无线充电器中。双线圈无线充电器即分别采用两路驱动电路和线圈进行功率发射的无线充电系统,实现的样品图和 PCB 图分别见图 6 和图 7。如图 7 所示,左边电路采用 IDAC 方案实现无线快充,右边电路采用 PWM 方

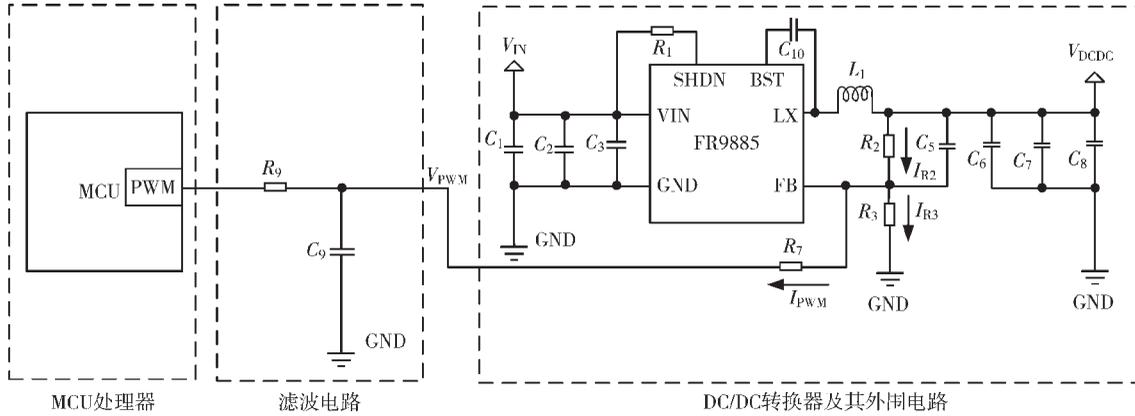


图 5 PWM 调压电路

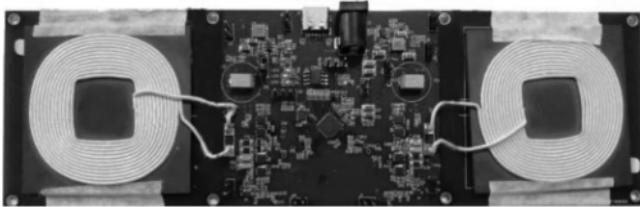


图 6 双线圈无线充电器样品图

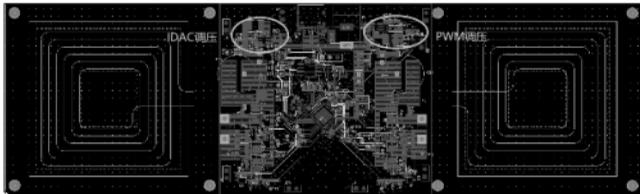


图 7 双线圈无线充电器 PCB 图

案实现无线快充。该系统支持在左右两个线圈上分别放置手机同时进行定频调压式充电。

4 性能验证

本节对提出的两种调压方案进行性能验证,采用 12 V 直流稳压电源作为系统电源,使用万用表在 DC/DC 输出端测量得到实验结果。

4.1 IDAC 调压性能测试

在 IDAC 调压性能测试中,以 I_{DAC} 电流的流动方向、可调节范围(TRM 变化范围为 0~63)以及 V_{DCDC} 的目标调节范围(4 V~11 V)作为设计输入,根据式(6)推导并选择电阻值为: $R_2=220\text{ k}\Omega$, $R_3=12\text{ k}\Omega$ 。如图 8 所示,对比实测值与理论值可见:当 I_{DAC} 输出电流是抽电流时, IDAC 方案可以实现较宽的调节范围,但实测值相对理论值偏低。当 TRM 为 0 至 7 时,DC/DC 输出电压无明显波动,稳定在 10.53 V 左右。这是因为 FR9885 的最大输出占空比为 90%,当输入电压为 12 V 时,最大输出电压只能达到 10.8 V。尽管如此,4 V~10.53 V 的电压范围已经能够满足苹果无线快充的调压需求。当 TRM 为 8~63 时,DC/DC 输出电压随着 TRM 变大而线性减小。

4.2 PWM 调压性能测试

在 PWM 调压性能测试中,以 PWM 波的占空比调节

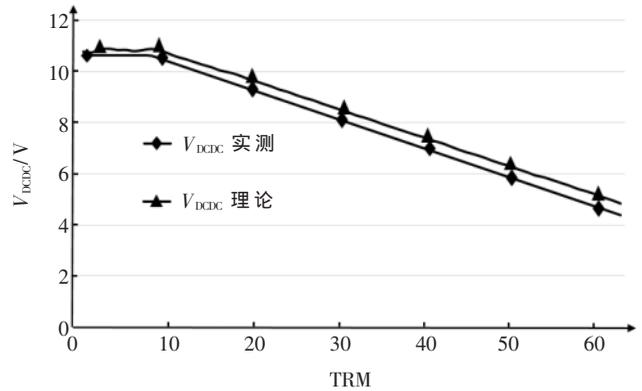


图 8 IDAC 调压测试数据

范围(20%~50%)及 V_{DCDC} 的目标调节范围(4 V~11 V)作为设计输入,根据式(10)推导并选择电阻值为: $R_2=680\text{ k}\Omega$, $R_3=39\text{ k}\Omega$, $R_7=100\text{ k}\Omega$ 。如图 9 所示,对比实测值与理论值可见:实测值相对理论值偏高,但也能实现宽范围的电压调节。当 D 为 20%~21%时,DC/DC 输出电压无明显波动,稳定在 10.51 V 左右。当 D 为 21.5%~50%时,DC/DC 输出电压随着 D 变大而线性变小。

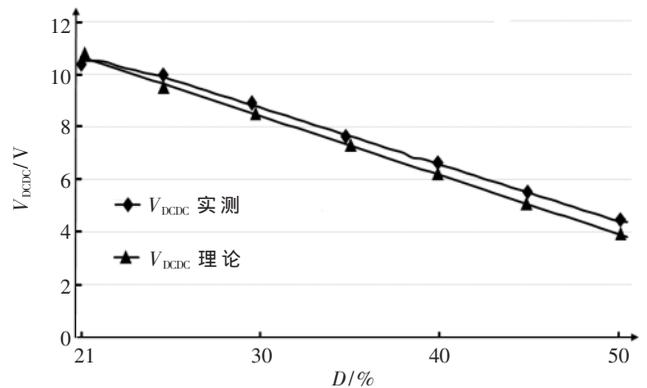


图 9 PWM 调压测试数据

4.3 两种调压方案的性能对比

以上测试结果表明两种调压方案均能实现 4 V~10.5 V 的宽范围 DC/DC 输出电压。PWM 方案是通过调节占空比来改变 DC/DC 的输出电压,调节精度达

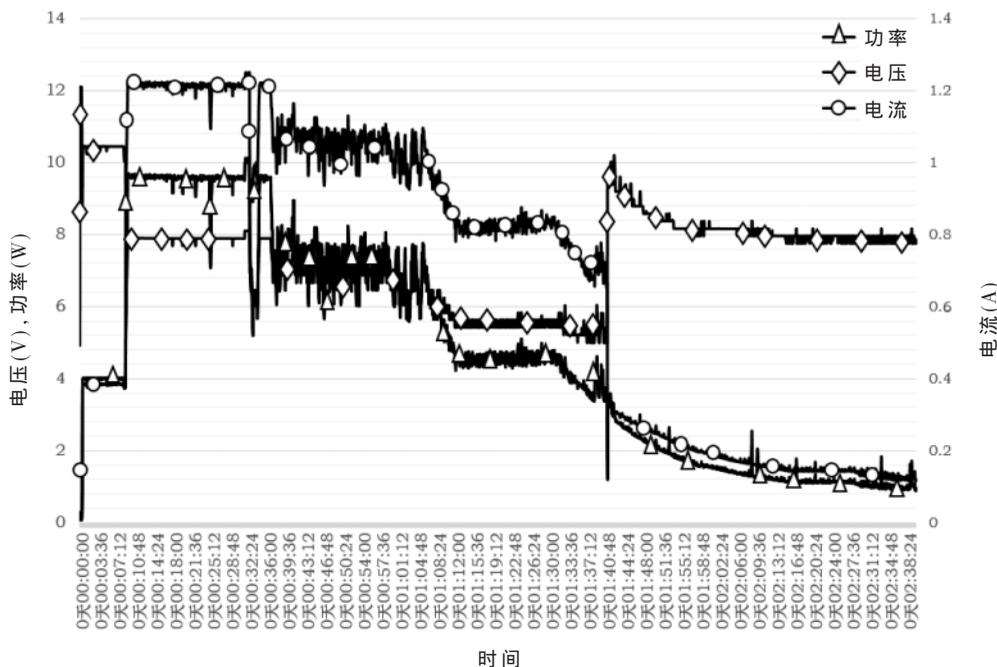


图 10 iPhone8 完整充电曲线

到每调节 0.1% 的占空比就能实现 0.02 V 的输出电压变化。IDAC 方案的精度取决于 IDAC 功能模块本身的精度,其每调节 1 比特的 TRM 实现 0.1 V 的输出电压变化。因此,PWM 方案相对 IDAC 方案更为灵活可控。

在无线充电的实际应用中,几乎所有 MCU 处理器都提供定时器或者 PWM 输出功能。因此,当采用 PWM 方案时,只需在 MCU 处理器的基础上经过简单的滤波电路就能实现定频调压,将有效降低成本并控制其调压的精度。然而,并非所有的 MCU 处理器都会包含 DAC 功能,即使有些 MCU 处理器内部集成了 DAC,限于 DAC 实现电路的复杂度及占用较大空间,DAC 的精度也往往不高,需要通过外接 DAC 功能模块^[10]。因此,PWM 方案相对 IDAC 方案成本更低且更易实现。

4.4 无线快充性能测试

图 10 显示了基于 PWM 方案的双充无线充电器给 iPhone8 充电的电压、电流及功率曲线,表明输入功率最大可达到 9 W 且持续时间长达 20 min,充电过程无断连,最后于 2 小时 40 分左右充满电量。

5 结论

本文基于 DC/DC 调压原理设计并实现了两种面向无线快充应用的定频调压方案。性能及充电测试验证了两种方案的正确性及有效性,表明其灵活可控、性能稳定且实现成本较低,具有重要的应用价值。

参考文献

- [1] 张波,疏许健,吴理豪,等.无线电能传输技术亟待解决的问题及对策[J].电力系统自动化,2019,43(18):1-20.
- [2] 孙凯.低功率无线充电系统的驱动芯片的设计研究[D].深圳:深圳大学,2018.

- [3] 唐啸.一种定频调压式无线充电器:CN201721552607.6[P].2018-05-29.
- [4] 陈炜峰,朱美杰,郭海军,等.电磁屏蔽对无线充电系统的影响分析[J].南京信息工程大学学报:自然科学版,2013(2):163-166.
- [5] 薛永旭.苹果公司无线充电领域专利申请分析[J].中国发明与专利,2014(5):30-34.
- [6] 李冈宇,曹燕亮.一种通过 DAC 调节 DCDC 输出电压的电路方案[J].科技资讯,2016,14(8):40-41.
- [7] 屈彪,张文超.基于 DC/DC 开关稳压器的数控电源设计[J].电子设计工程,2016,24(21):170-173.
- [8] 杨智.低功耗的电流模式同步开关降压型稳压器的设计研究[D].深圳:深圳大学,2016.
- [9] 郑晓庆,杨日杰,杨立永,等.多路输出 DC-DC 电路设计[J].国外电子测量技术,2012,31(9):31-33.
- [10] Fitipower Integrated Technology Inc.FR9885 datasheet[Z].2014.
- [11] 秦健.一种基于 PWM 的电压输出 DAC 电路设计[J].现代电子技术,2004,27(14):81-83.

(收稿日期:2020-07-12)

作者简介:

傅桂娥(1994-),女,硕士研究生,主要研究方向:无线电能传输。

徐圣楠(1992-),女,硕士研究生,主要研究方向:无线电能传输。

缪瑜(1979-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:无线电能传输。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所