

一种经皮能量传输电路的设计方法

梁俊睿, 赵春宇

(上海交通大学 仪器科学与工程系, 上海 200240)

摘要: 给出了经皮能量传输电路的基本结构。分析了体内能量接收电路、体外能量发射电路, 重点突出了作为体外发射电路驱动的 E 类放大器的原理。结合电路分析, 提出了经皮能量传输电路的详细设计方法, 以及基于此方法的一个电路设计实例。

关键词: 经皮能量传输 E 类功率放大器 E 类开关状态

随着对电子技术在生物医学领域应用研究的不断深入, 研究者们纷纷研制出各种各样的人工器官, 用以修复甚至代替人体残疾或缺损的机能。这些人工电子脏器, 诸如人工心脏、电动人工关节、人工视网膜等, 一般都植入人体内, 故其能量供给和与外界的信号传输是一个普遍需要攻克的问题。

经皮能量传输是其中一种解决能量供给问题的方案。这种无线的能量传输方案使用交变磁场作为能量载体。体外佩带的电子装置驱动体外线圈产生交变磁场, 当与体内设备的接收线圈对齐时, 便在体内线圈产生感应电动势。感应得到的交变电压经过整流、滤波, 在体内为植入设备提供直流驱动电压。

在目前使用的体外线圈驱动方法中, 尤以使用 E 类功率放大器作为驱动最为普遍^[1]。E 类放大器具有工作频率高、结构简单、能量转换效率高等优点, 被广泛应用于无线通信、高频磁场加热、DC/DC 变换等领域。E 类放大器属于开关式谐振放大器, 其经典的电路拓扑结构仅由 6 个器件组成^[2], 但由于开关器件与谐振网络的引入, 使元件参数的设计变得困难。常用的参数设计方法包括: 使用试凑法求解^[1-2]; 用拉普拉斯变换与状态方程相结合的解法^[3]; 使用电路仿真软件调整参数^[1]; 时域稳态波形分析^[3-4]等。在设计基于 E 类放大器的经皮能量传输电路过程中, E 类放大器的参数设计是关键的一步。

本文结合经皮能量传输的实际, 分析体内接收电路和体外发射电路, 提出一种切实可行的电路设计方法。

1 电路结构与原理

经皮能量传输电路原理如图 1 所示。该电路包括两部分: 体外发射电路和体内接收电路。体外电路实为一个 E 类功率放大器, 在合适的驱动信号驱动下, 放大器以最佳的效率把直流供电电压 V_{DD} 所提供的电能转变为幅值较大的交变电流, 交变电流通过发射线圈 L_1 形成交变磁场, 把能量无线发射出去。体内电路完成谐振、整流、滤波, 以实现供给体内负载 R_{load} 两端恒定的直流电压。

1.1 体内接收电路分析

图 2 给出了电路体内部分的等效电路。ESR_{L2} 为

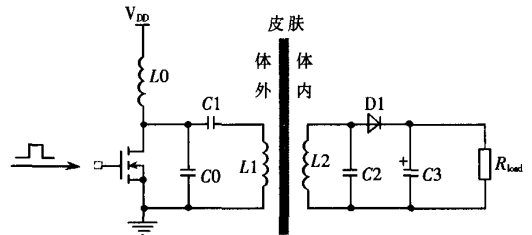


图 1 经皮能量传输电路原理图

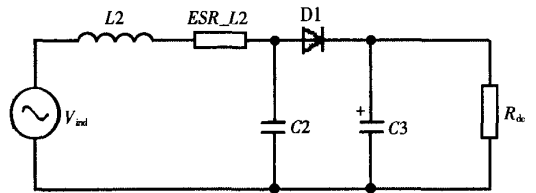


图 2 体内等效电路

L_2 的串联等效电阻。感应得到的电动势 V_{ind} 作用于 L_2 、 ESR_{L2} 和 C_2 组成的谐振回路上, 在 C_2 两端得到更大的电压供后续整流与滤波。

图 2 中 D_1 、 C_3 和 R_{load} 组成的非线性电路可等效为一线性电阻 R_{load}' ^[4]。忽略二极管压降, 根据功率关系, 有:

$$R_{load}' = R_{load} / 2 \quad (1)$$

此外, 为了使副边电路能感应到最大能量, 该接收电路需满足谐振条件:

$$L_2 = \frac{C_2 R_{load}'^2}{1 + \omega^2 C_2^2 R_{load}'^2} \quad (2)$$

1.2 体外发射电路分析

体外电路的设计与 E 类功率放大器的设计基本相似。所不同在于一般 E 类放大器的谐振回路的负载为电阻器件, 而此处用体内接收电路反映到体外发射电路的等效负载 R_{load}' 代替。体外等效电路如图 3 所示。

选择合适的线径绕制发射、接收线圈, 忽略导线损耗, 设耦合系数为 k , 则:

$$R_{load}' = k^2 \frac{L_1}{L_2} R_{load} \quad (3)$$

经过负载的变换, 体外电路可等效为经典的 E 类放大器电路。

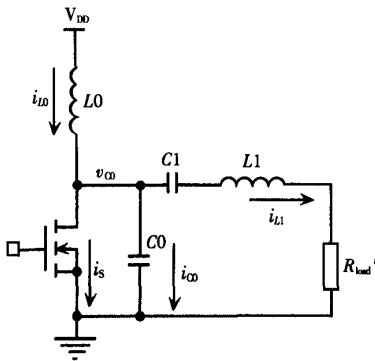


图3 体外等效电路(E类放大器原理图)

E类放大器各个电路参数之间存在复杂关系,而只有各个参数之间配合恰当,才能使放大器工作于转换效率最高的最佳状态(也称为E类开关状态)。满足以下3个条件时,称该E类放大器工作在最佳状态^[2]:

- (1)开关断开时刻,两端电压缓慢上升;
- (2)开关闭合时刻,两端电压为零,即ZVS条件(zero-voltage switching);
- (3)开关闭合时刻,电压波形的导数为零,即ZDS条件(zero-derivative switching)。

1.3 E类放大器分析

E类放大器的分析一般基于3个前提近似:

- (1)扼流电感 L_0 足够大,流经的 i_{D0} 可看作直流;
- (2)MOSFET为理想开关器件(不考虑导通电阻、寄生电容),开关动作没有延时;
- (3)负载回路的品质因数 Q 足够大,输出电流为正弦电流。

严格满足这3个要求的称为理想E类放大器。对理想E类放大器进行分析可以得出一套设计规则,实践证明,按照该规则选取合适的电路参数,可以实现E类放大器的最佳状态。

图4给出了理想E类放大器特征电压和特征电流的关系。其中 v_{COF} 表示 v_{CO} 的基频分量。

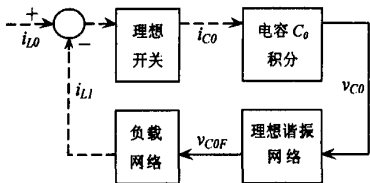


图4 特征电压与特征电流的关系框图

设开关驱动方波的角频率为 ω_0 ,占空比为 D 。由于流过扼流线圈 L_0 与发射线圈 L_1 的电流不会发生突变,恒定的 i_{D0} 与正弦电流 i_{L1} 之差在开关打开(即每周期的 $1-D$)之时流入旁路电容 C_0 ,积累得到的电压 v_{CO} 作用于理想谐振网络和负载网络,又得到 i_{L1} 。根据该循环关系,通过稳态波形分析,可推导出组成负载网络的 L_1 、 C_1 、 R_{load}' 的表达式:

$$R_{load}' = \frac{1}{2\pi\omega_0 C_0} [\sin(\theta_D - \theta_X) + \sin\theta_X]^2 \quad (4)$$

$$\omega_0 L_1 - \frac{1}{\omega_0 C_1} = \frac{1}{2\pi\omega_0 C_0} [(2\pi - \theta_D) \cos(2\theta_X) + \sin\theta_D \cos(2\theta_X - \theta_D)] \quad (5)$$

其中: $\theta_D = 2\pi D$; $\theta_X = \sin^{-1}(I_{D0}/I_{L1,p})$; I_{D0} 表示直流 i_{D0} , $I_{L1,p}$ 表示 i_{L1} 的峰值。

品质因数 Q 表示 L_1 与 R_{load}' 的关系:

$$Q = \frac{\omega_0 L_1}{R_{load}'} \quad (6)$$

而对于理想E类放大器,最佳状态下 θ_D 与 θ_X 有如下关系^[6]:

$$\theta_X = \tan^{-1} \left(\frac{1 - \cos\theta_D}{2\pi - \theta_D + \sin\theta_D} \right) \quad (7)$$

对选定的 ω_0 和 θ_D, θ_X 可从(7)确定。故(4)(5)(6)三式中共有 $C_0, L_1, C_1, R_{load}', Q$ 五个未知数。按具体应用要求选定其中2个参数,根据这3个关系式可以得出其余3个参数。

V_{D0} 只与 v_{CO} 的幅度有关,与放大器是否工作在最佳状态无关,故可以通过提高 V_{D0} 来提高放大器转换功率。扼流电感 L_0 的选取,过小则不符合理想近似条件,过大则延长电路进入稳态的时间,故需要根据实际情况进行综合考虑。

2 电路设计

根据第一部分对体内、体外电路的分析,以下给出一个模拟经皮能量传输电路的设计过程:

- (1)给定驱动方波的角频率 ω_0 ,占空比 D ,体内直流负载 R_{sk} 。
- (2)按照 L_2 约为1~1.3倍 L_1 绕制 L_1, L_2 ^[11],并且固定在一定距离的平行位置上,使用两线圈正反接法^[7]测量两耦合线圈的互感 M 。耦合系数可根据 $k = M/\sqrt{L_1 L_2}$ 计算得到。 C_2 按照式(2)求得。
- (3)根据式(1)和式(3)求得体内反映到体外的负载 R_{load}' 。
- (4)根据式(6)计算体外负载回路的 Q 值。为了满足理想E类放大器的近似条件, Q 应设计为大于10。若 Q 过小则回到步骤(2),调整耦合线圈。

(5)单独设计体外电路(V_{D0} 与扼流电感 L_0 的值按实际电路情况选取)。断开 L_2 ,使用与 R_{load}' 具有相等阻值的电阻串入负载回路,根据式(3)求出 C_0 ,从式(4)求出 C_1 。

(6)分别使用幅值范围包含计算得到的 C_0, C_1 值的可调电容,对照E类放大器最佳状态时的 v_{CO} 波形调节 C_0 和 C_1 。

(7)调整体外电路以后,撤去串入负载回路与 R_{load}' 具有相等阻值的电阻,加入体内电路,若 v_{CO} 波形发生变形,稍微调整 C_0, C_1 使其回到最佳。

(8)可通过提高 V_{D0} 来提高体内输出的直流电压。

实际电路往往包含寄生电容、线圈损耗电阻等非理想因素,还有不可避免的非理想开关情况,所以实际的电路优化往往是在上述设计步骤的基础上不断地反复

调整参数的取值,以实现尽可能高效率的能量传输。 C_0 、 C_1 使用可调电容就是这个原因。

3 实验与讨论

根据第2节给出的设计步骤,使用三菱公司的2SC1971作为开关元件,设计频率为5MHz,占空比50%, $R_d=360\Omega$ 的经皮能量传输电路。绕制的 $L_1=14.4\mu\text{H}$, $L_2=13.9\mu\text{H}$,两线圈相距约1cm,由测得互感计算得到 $k=0.376$ 。

$R_{\text{load}}'=26.4\Omega$,取为 25Ω ,根据设计步骤(5)和(6)进行调整,从示波器采得图5所示波形,三个电压由上至下依次是开关驱动方波、 v_{co} 波形和 R_{load}' 上的电压波形。

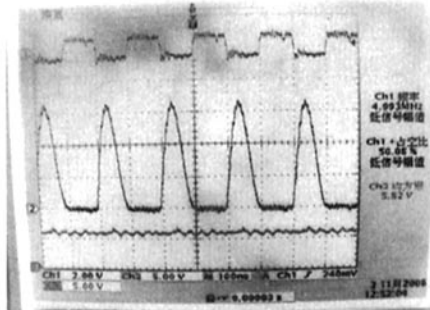


图6 加入耦合后体外电路特征波形和体内直流电压

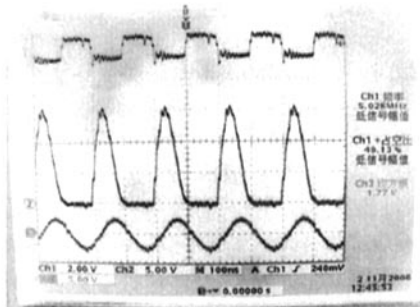


图5 单独设计的体外电路特征波形

根据设计步骤(7),撤去 R_{load}' ,加入耦合的体内电路,稍加调整得到图6显示的波形,三个电压由上至下依次是开关驱动方波、 v_{co} 波形和体内 R_d 两端的直流电压波形。

从图5和图6可以看出, v_{co} 的波形满足对E类放大器最佳状态开关器件两端电压特征的要求;体内接收部分负载电阻 R_d 两端可以得到幅值为6V的直流电压。故电路符合设计要求。但耦合以后流入扼流电感的电流为41.5mA,故计算得到该无线能量传输的效率只有50%左右。未来工作需要从结构上或者等效模型解释方面做进一步研究,以提高能量传输的效率。

参考文献

- [1] 赵春宇,陈大跃,谢国权等.基于射频感应控制的掌指人工关节研究.中国生物医学工程学报,2003,22(5).
- [2] SOKAL N O, SOKAL A D. Class E—A new class of high-efficiency tuned single-ended switching power amplifiers. IEEE J. Solid-State Circuits, 1975, 10(3):168-176.
- [3] 曲明,沈红宇,王豪行.E类调谐功率放大器的计算机辅助分析.上海交通大学学报,1994,28(1):71-81.
- [4] KENDIR G A, LIU W, WANG G, et al. An optimal design methodology for inductive power link with class-E amplifier. IEEE Trans. Circuits Syst. Reg. Papers, 2005, 52(5):857-866.
- [5] TROYK P R, SCHWAN M A. Closed-loop class E transcutaneous power and data link for MicroImplants. IEEE Trans. Biomed. Eng, 1992: 589-599.
- [6] KESSLER D J, KAZIMIERCZUK M K. Power losses and efficiency of class-E power amplifier at any duty ratio. IEEE Trans. Circuits Syst. Reg. Papers, 2004, 51(9):1675-1689.
- [7] 吴锡珑.大学物理教程.北京:高等教育出版社,1999.

(收稿日期:2006-11-03)

行业聚焦

Focus on industry

赛灵思推出 90nm 非易失性 FPGA 解决方案

——SPARTAN™-3AN 新平台

可编程逻辑解决方案世界领先提供商赛灵思公司日前宣布推出新的 Spartan™-3AN FPGA 平台,进一步拓展其多平台战略。Spartan™-3AN FPGA 平台是目前业界领先的非易失性现场可编程门阵列(FPGA)解决方案。基于成熟的 90nm Spartan-3 系列产品的低成本 FPGA 架构,新平台在单芯片解决方案中融合了 SRAM 技术以及可靠的非易失性闪存技术的性能和功能优势。这一新平台提供了超大的用户闪存容量和增强的安全性,专门针对提高系统集成度或与安全性密切相关的非易失性应用而优化。与最强的竞争对手的产品相比,该平台提供的用户可用片上闪存容量提高了 1000 多倍,提供了极强的系统灵活性,性能极具竞争力。

灵活的低成本设计安全性

Spartan-3AN 平台提供的一系列器件安全性功能可以保护设计免受反向工程设计、克隆以及非授权重构等行为所带来的危害。基于赛灵思公司的 Device DNA 技术,为合法设计认证和保证灵活的设计级别安全性提供了低成本的有效机制。设计人员拥有完全的灵活性,可以定制认证以及认证失败响应方面的算法。利用其嵌入式闪存资源,Spartan-3AN 平台还可以将所有配置通信都隐藏在器件内部,使得破解 FPGA 中所包含的设计变得极为困难,从而进一步提高了设计的安全性。

Spartan-3AN 平台的先进闪存技术将 DeviceDNA 技术发展到了一个新的高度,提供了工厂预设的闪存 ID 和闪存用户字段。工厂预设闪存 ID 与 Device DNA 串行码极为相似,每片闪存器件的工厂预设 ID 都不同,64 字节长的预设 ID 可以读取并添加到认证算法中。闪存用户字段是一次性可编程的 64 字节闪存字段,用来存储认证结果。用户字段还可用于存储版本跟踪序列号或系统中永远不会改变的用户数据常数。

(赛灵思公司供稿)