

# 高频磁场检测中采样保持器的设计及其性能分析

吕富勇 周瑞卿 阮世阳 赵嘉敏 唐迎川 李鹏生

(南京信息工程大学 信息与控制学院 南京 210044)

**摘要:** 磁共振耦合无线电能传输技术是当前电能传输领域的前沿课题,该技术通过高频磁共振耦合实现电能传输,高频磁场是其实现电能无线传输的媒介。收发线圈间的互感耦合系数直接影响着系统的传输效率和传输距离。空间磁场强度同步检测是准确分析互感耦合系数最直接的方法。高速、宽频带的采样保持器是实现空间高频磁场强度同步检测的关键。从采样保持器的原理出发,详细分析了采样保持器内放大器的不同工作模式和电容的材质对采样保持电路性能的影响,探讨了空间高频磁场信号的特性及其对采样保持器的要求。在此基础上,设计了一种高速采样保持器,并通过实验对其在不同模式下的性能做了详细分析。

**关键词:** 采样保持器;跨导放大器;高频磁场

**中图分类号:** TP216 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

## Design and performance analysis of a sample holder in the detection of high-frequency magnetic field

Lv Fuyong Zhou Ruiqing Ruan Shiyang Zhao Jiamin Tang Yingchuan Li Pengsheng

(College of Information and Control, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Magnetic resonance coupling wireless transmission technology is a topic at the forefront in the field of power transmission. The technology enables power transmission by high-frequency magnetic resonance coupling. High frequency magnetic field is the media of realization of wireless power transmission. Mutual coupling coefficient between coils transceiver affects the transmission efficiency and the transmission distance of the system directly. Space field strength synchronous detection is the most direct way to accurately analyze mutual coupling coefficient. A high-speed, wide-band sample holder is the key to achieving high spatial frequency magnetic field strength synchronous detection. From the principle of the sample holder of, the paper analyses the impact of different operating modes and capacitance material within the sample holder to the performance of the sample and hold amplifier circuit in detail. Moreover, the paper discusses the spatial high-frequency magnetic field signal characteristics and requirements of the sample holder. On this basis, we designed a high-speed sample holder. In addition, we analyzed its performance under different experimental models in detail.

**Keywords:** sample & hold device; transconductance amplifier; high-frequency magnetic field detection

## 1 引言

磁共振耦合无线电能传输技术是利用两个具有相同谐振频率的谐振线圈,在相距一定的距离时,通过磁共振耦合进行电能传输,高频磁场是其实现电能无线传输的媒介。收发谐振线圈之间的互感耦合系数是决定传输效率和传输距离的关键要素之一<sup>[1-2]</sup>。现行的理论尚无法为如何提高该系数提供理论支撑。因此,通过实验手段,实测空间高频磁场强度,获取系统的互感耦合系数,分析耦合系数对系统的影响,对构建完整的磁共振耦合无线电能传输系统模型

意义重大。

空间高频磁场强度检测的关键是高频模拟信号的采集<sup>[3]</sup>。采样保持器是高频模拟信号采集中一个重要环节。采样保持器要求响应迅速、灵敏度高和通频带宽<sup>[4]</sup>。在采样保持器中,放大器和保持电容是核心元件,它们的性能直接影响采样保持器的响应速度、保持精度及成本高低。但是,目前系统地介绍放大器、保持电容等元件的选择方法及采样保持器的性能的文献很少。

本文从采样保持器的结构和工作原理出发,详细介绍了放大器与保持电容的选择方法。并利用 TI 公司的

OPA615 芯片设计了一种高速采样保持器,对其在采样模式、保持模式以及两种模式切换时的性能作了详细的理论分析。

## 2 采样保持器的工作原理及关键元件选择

### 2.1 采样保持器工作原理

典型的采样保持器结构如图 1 所示,主要由输入放大器、储能器件(保持电容)、输出缓冲级及开关元件 4 个功能部分组成。

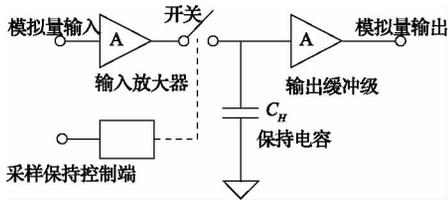


图 1 采样保持器原理

系统工作原理如下:当“采样保持控制端”为高电平时,开关闭合,电路处于采样模式。保持电容上的电压跟随输入信号变化,且输出端电压跟随  $C_H$  上的电压。当“采样保持控制端”为低电平时,开关断开,电路处于保持模式。由于输出缓冲级的输入阻抗很高,存储在  $C_H$  上的电荷不会泄漏, $C_H$  上的电压保持不变,使得输出端电压能够保持采样结束瞬时的电压值。

### 2.2 输入、输出缓冲级的运放选取

输入缓冲级一方面要对前级调理电路呈现高阻抗,以减小对前级电路的影响和尽可能大的获取前级输出信号;另一方面,要对后级保持电容呈现低阻抗,以保证有足够的充放电能力,使保持电容的电压能迅速跟随输入信号的变化。跨导型运算放大器具有非常高的输入阻抗,比较适合作为输入级,目前,跨导型运放主要分为电压模式和电流模式两类,两类的输入级特性一样,区别是输出级特性不同。

电压模式的运放以恒定电压给保持电容  $C_H$  充电,可表示为下式:

$$V_{C_H} = V_{SRC}(1 - e^{-t/RC_H}) \quad (1)$$

式中: $V_{C_H}$  是保持电容上的压降, $V_{SRC}$  是输入放大器输出端的电压。经过 3 个  $RC_H$  时间常数后,保持电容上的压降  $V_{C_H}$  将会达到  $V_{SRC}$  的 90% 左右,且  $\lim_{t \rightarrow \infty} V_{C_H} = V_{SRC}$ 。

电流模式的运放以恒定的电流  $I_{SRC}$  给  $C_H$  充电,可表示为下式:

$$\frac{dV_{C_H}}{dt} = \frac{I_{SRC}}{C_H} \quad (2)$$

式中: $I_{SRC}$ 、 $C_H$  为常量,所以保持电容的电压变化率  $\frac{dV_{C_H}}{dt}$  为常数,因此  $V_{C_H}$  呈线性增长。

由上述对比分析可知:电流模式比电压模式具有更好的电容负载控制能力,对保持电容  $C_H$  的充电速度更快,适

合处理高速信号。而且电流模式运放的输出电流几乎与负载无关,用它构建的采样保持器的通频带宽、动态特性好、电压过冲小,非常适合高频磁场强度检测系统。

输出缓冲级的输入端是保持电容  $C_H$ ,为保证存储在  $C_H$  上的电荷不会泄漏, $C_H$  上的电压保持不变,该级的输入端应采用高输入阻抗的跨导型运放。输出缓冲级的输出端通常直接和 A/D 转换器相连,因此,输出端应选择具有恒压特性的电压模式。

### 2.3 保持电容的选取

保持电容是采样保持器的核心,对采样保持电路的性能影响极大。作为保持电容除了应该具备常规的低泄漏的特性外,还需要具有较低的电介质吸收效应。通常,当电容在回路中进行充电或放电后,如果断开充电或放电回路,电容具有恢复它原先储存电荷的能力。这就是电容的电介质吸收效应,电介质吸收效应会引发前一次采样对后一次采样的影响,甚至会造成上百 mV 的随机错误,因此保持电容的电介质吸收效应越低越好。

常见各种介质电容的电介质吸收效应如表 1 所示,由表 1 可知,云母、聚苯乙烯、聚丙烯电容具有最低的电介质吸收效应,是保持电容的首选。

表 1 各种材质电容的电介质吸收效应对比

电容材质类型	电介质吸收效应
云母、聚苯乙烯、聚丙烯电容	0.05%~0.1%
NPO 电容	0.3%~0.6%
陶瓷电容	0.6%~2.0%
X7R 电容	2.0%~2.5%
电解电容	2.0%~15.0%
极化电容	不可作为保持电容

## 3 空间高频磁场检测系统的采样保持电路设计

### 3.1 空间高频磁场信号特性分析

磁共振耦合无线电能传输系统的谐振频率在 10 MHz 左右时,能取得较高的传输效率和较远的传输距离。因此,空间传输的是频率高达 10 MHz 的高频正弦波磁场,空间高频磁场经过磁传感器将高频正弦磁场信号转换为高频正弦电压信号,该信号可表示为:

$$U_i = U_m \sin(2\pi ft) \quad (3)$$

信号的电压变化率为:

$$\frac{dU_i}{dt} = U_m 2\pi f \cos(2\pi ft) \quad (4)$$

电压变化率的最大值为:

$$\left. \frac{dU_i}{dt} \right|_{\max} = U_m 2\pi f \quad (5)$$

假设  $U_m = 5 \text{ V}$ ,  $f = 10 \text{ MHz}$ ,可得:

$$\left. \frac{dU_i}{dt} \right|_{\max} = 314.16 \text{ V}/\mu\text{s}。由此可知,为了不失真的反映$$

空间高频磁场信号,采样保持器的运放需要有足够大的压摆率<sup>[5]</sup>。

### 3.2 采样保持电路设计

针对磁共振耦合无线电能传输系统要求,本文最终选择采用TI公司的集成芯片OPA615构建高速采样保持器。OPA615内部集成有宽带跨导运算放大器OTA以及快速精准的采样跨导运算放大器SOTA。OTA和SOTA分别具有710 MHz与730 MHz的带宽。SOTA有2个完全相同的高阻抗输入端和一个电流源输出端,具有低输入偏置电流和失调电压的特性。OTA是一个采用自偏置结构的双极性跨导运算放大器,OTA可以被看做一个具有低输入偏置电流的理想电压控制电流源。

此外,OPA615的SOTA压控电流源转换速度大于 $1\ 100\text{ V}/\mu\text{s}$ <sup>[6]</sup>,完全能满足磁共振耦合无线电能传输系统高频磁场检测的转换速度要求。基于OPA615设计的采样保持电路原理图如图2所示。图中OPA615的输入端接有 $50\ \Omega$ 的负载电阻,以使电路在采用阻抗 $50\ \Omega$ 的同轴电缆传输信号时得到较好的负载匹配<sup>[7]</sup>。输出端接有 $1\ \text{k}\Omega$ 的电阻,以使采样保持器具有较好的带负载能力。3和2管脚之间串接一个 $100\ \Omega$ 的电阻,5号管脚也串接一个 $100\ \Omega$ 的电阻,可以降低寄生电感电容的品质因数。7号管脚前的 $125\ \Omega$ 的电阻一方面可以有效降低寄生电感电容的品质因数;另一方面,它可以消除由输入偏置电流所引起的输出偏移电压。

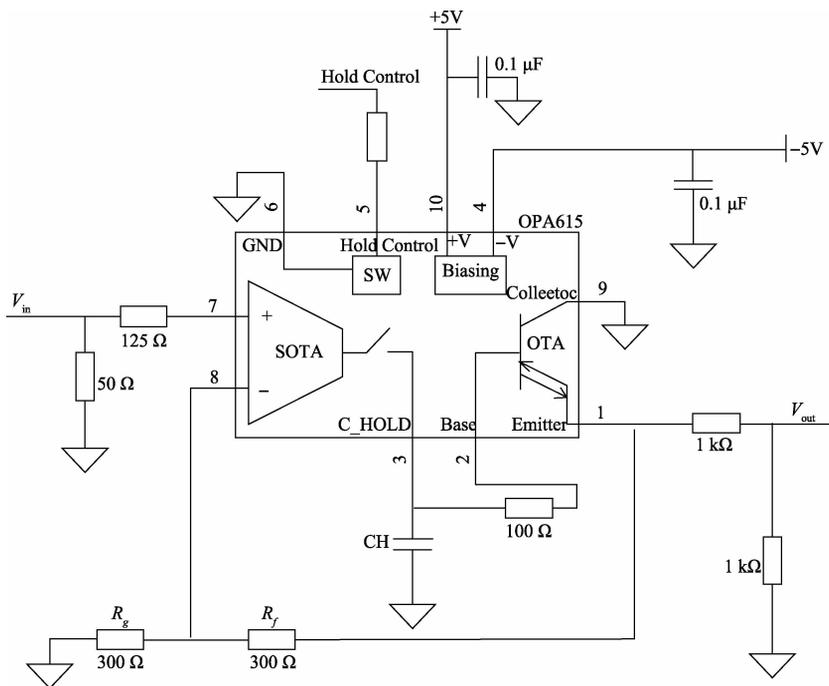


图2 采样保持电路原理

## 4 实 验

为验证本文分析的正确性,在图2所示的采样保持器电路原理图基础上,设计制作了实验验证电路。并进行了实验验证,实验验证测试系统如图3所示。

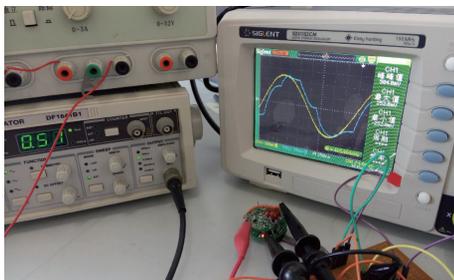


图3 采样保持电路实验验证测试系统

电路工作时,采样保持器在采样模式下主要表现为电压反馈放大器。电压反馈电路具有增益带宽积,增益的提高将会引起带宽的自动减小。需要在带宽和增益之间做出可以接受的平衡。保持电容 $C_H$ 的容值对电路带宽影响较大,其测试结果如表2所示。

表2  $C_H$ 与增益以及带宽的关系

$C_H/\mu\text{F}$	增益/v/v	带宽/MHz	$R_f/\Omega$	$R_g/\Omega$
22	2	148.6	300	300
47	2	47.7	300	300
100	2	17.3	300	300
470	2	4.9	300	300
1 000	2	2.2	300	300

如果想要电路无条件稳定并且具有平坦的频率响应,保持电容不应选择太小。此外,除了保持电容的容值,还需要考虑 SOTA 输出端和 OTA 输入端的寄生电容以及寄生分布电容<sup>[8]</sup>。这些额外的电容大约为 6.7 pF(SOTA 输出端 1.2 pF,OTA 输入端 1.7 pF,寄生分布电容 3.8 pF)。

当采样保持器的控制端 5 脚变为低电平时,系统将转入保持模式,在此模式下, $C_H$  与输入缓冲级分离,理论上, $V_{C_n}$  应保持开关断开前的电压值。但实际实验中发现,由于存在泄漏电流流入或者流出  $C_H$ ,会对电容进行缓慢的充放电, $C_H$  上电压以  $\text{mV}/\mu\text{s}$  级的速度改变<sup>[9]</sup>。分析可知,导致  $C_H$  上电压变化的可能因素主要由如下几点:

- 1)OTA 的输入偏置电流;
- 2)SOTA 的输出阻抗上的 RC 放电现象;
- 3)PCB 上的泄漏电流<sup>[10]</sup>;

4)泄漏电容的存在;通过实验分析发现,在这些因素中,OTA 的输入偏置电流是导致  $C_H$  上电压下降的主要原因。假设该电流是一个恒定的电流, $C_H$  上的电压下降率可表示为下式:

$$\frac{dV_{C_n}}{dt} = \frac{I_b}{C_H} \quad (6)$$

由于该电流是由厂家设定,用户无法调节,因此,减小电压降的主要方法是通过选择合适的保持电容的容量来满足测试要求。

由式(6)可知,减小  $C_H$  值会使  $C_H$  的电压下降速率增大。通过对表 2 中给定的不同电容值进行实验发现为满足工作频率 10 MHz 的高频磁场测量需要,采样保持电容  $C_H$  大于 47 pF 时,保持电容的压降能满足系统测量精度要求,但保持电容过大将导致系统的带宽无法满足要求,因此,保持电容选择 47 pF 时,采样保持器可同时满足系统保持精度和带宽要求。

## 5 结 论

为检测磁共振耦合无线电能传输系统中的高频磁场强度,设计了一种高速、宽频带的采样保持器。详细分析了高频磁场信号特性,采样保持器内置放大器和保持电容对采样保持器性能的影响,给出了主要元件的选择依据,它们的合理选择是设计采样保持器的关键。并通过实验

分析得出频率 10 MHz 的磁共振耦合无线电能传输系统,保持电容选择 47 pF 时,采用保持器能取得最佳性能。

## 参考文献

- [1] 杨国明. 电磁谐振耦合无线电能传输技术的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2013.
- [2] 张青. 谐振耦合式无线输电多载系统建模及特性研究[D]. 广州:华南理工大学, 2011.
- [3] 岳喜海,杨进,文玉梅,等. 多方向宽频磁电式振动能量采集器[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(9): 1962-1966.
- [4] 石岩,侯其立,刘翠,等. 基于 DSP 的直管式科氏质量流量变送器研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10):1130-1139.
- [5] 付在明,师奕兵,王厚军. 数字合成高速脉冲的一种非线性调理技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(4):74-78.
- [6] 陈国杰,曹辉,周有平. 脉冲峰值保持器的设计与元件选择[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31(12): 1378-1385.
- [7] 陈勇,李延国,吴枚. 新型高性能脉冲峰值保持电路[J]. 核电子学与探测技术, 1997, 17(4): 241-245.
- [8] BUCKENS P F, VEATCH M S. A high performance peak detect & hold circuit for pulse height analysis[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1992, 39(4): 753-757.
- [9] 颜思淼,万晓东. 浅谈数据采集系统的同步[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(8): 5-6.
- [10] 朱菲菲,马云飞,秦飞. 基于脉冲频率合成超宽带信号的无线实时定位系统[J]. 电子测量技术, 2014, 37(3): 128-133.

## 作者简介

吕富勇,1974 年出生,工学博士。主要研究方向为无线电能传输、智能测控、功率逆变技术。

E-mail:lvfuyong@nuist.edu.cn

周瑞卿,在读研究生。主要研究方向为智能测控。

阮世阳,在读本科生。主要研究方向为智能测控。