

摘要：目前弱磁传感器应用广泛，但普遍存在动态范围小等缺点。根据软磁材料的磁化特性，提出一种反馈式自平衡大动态范围的弱磁传感器设计方法。阐述了其工作原理和制作工艺，给出了磁感应探头、振荡器、单失谐回路斜率鉴频器、积分器和驱动器电路原理图，并详述了其工作原理。通过试验验证，该型弱磁传感器性能优良稳定，线性度好，灵敏度高，动态范围大，具有独特的创新性和新颖性，开创了一种新型弱磁传感器的设计方向。

关键词：弱磁传感器；反馈；鉴频器；积分器

中图分类号：TP212.13

文献标识码：A

文章编号：1006-883X(2018)05-0018-04

收稿日期：2018-03-12

一种反馈式自平衡弱磁传感器设计

周治良 王盈 袁彦许

中国人民解放军第五七一五工厂，河南洛阳 471000

一、引言

弱磁传感器是磁场探测的核心元件，可应用于磁开关、微电流检测和无损探伤等领域，市场前景广泛。

现有弱磁传感器虽然灵敏度高，但存在动态范围小、容易饱和等缺点。鉴于此现状，以软磁材料^[1]为电感磁芯，应用其高磁导率特点，辅之自动积分式反馈补偿电路，开发出高灵敏度、大动态测量范围磁场传感器，测试灵敏度可达 40mV/Gs 以上，测量动态范围能够大至 250Gs 以上，使其在磁传感器领域独树一帜。

二、总体设计

弱磁传感器由磁感应探头、振荡器、鉴频器、积分器和驱动器组成，如图 1 所示。

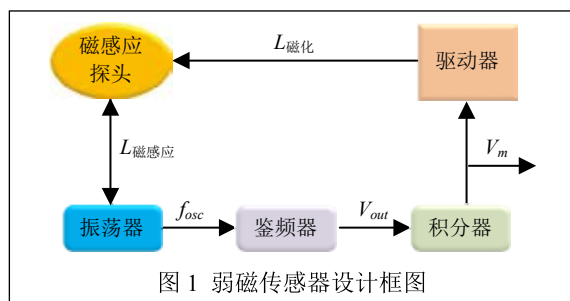


图 1 弱磁传感器设计框图

磁感应探头由双电感构成，分别接入 LC 振荡器和驱动器。传感器上电后，积分器开始正向积分驱动磁化电感并促使磁感应电感进入敏感区域，此时，振荡器开始工作，随着振荡器频率稳步升高，鉴频电压也不断上升，当积分运放正反相端电压相等时，传感器进入动态平衡，当外部磁场变化时，传感器会进入新的平衡状态，而积分器输出的电压差值 ΔU 就是变化磁场差值 ΔH 。

1、磁感应探头设计

磁感应探头中的双电感分别称为磁感应电感和磁化电感^[2]，磁感应电感能够感应外部磁场变化，其电感值随外部磁场变化而变化，探头依靠其材料的特性及相关结构来保证其对外部磁场的感应特性。

磁感应电感和磁化电感为同型结构，均由内部软磁材料磁芯和外部漆包线圈组成，结构如图 2 所示。

图 2 中，磁感应电感与磁化电感轴心平行，轴心间距 $4\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$ ，软磁材料比重为 1:70，漆包线径为 0.15mm，单位体积内漆包线圈匝数比为 1:5。此种结构既能保证磁感应电感磁芯均匀磁化，又能保证磁感应电感对磁化电感的互感影响降到可控范围之内。

软磁材料具有以下特点：高饱和磁感应强度、高

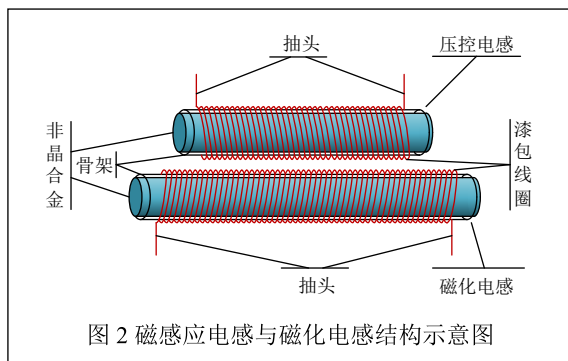
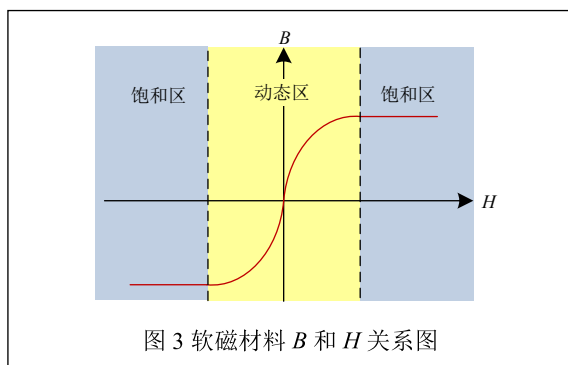


图2 磁感应电感与磁化电感结构示意图

图3 软磁材料 B 和 H 关系图

磁导率、低矫顽力、低损耗、良好的温度稳定性和时效稳定性，将其制作成电感后，其电感值为：

$$L = \mu n^2 \tau \quad (1)$$

式中， μ —软磁材料磁导率；

n —漆包线圈单位长度匝数；

τ —电感体积。

对于一个 n 和 τ 值已经确定的电感，磁导率 μ 则是影响其电感值的唯一参数。而 μ 作为一个变化量，它将受到与轴向方向一致的磁场强度控制，所以改变电感值可以通过改变软磁材料磁导率 μ 值获得，磁导率 μ 为软磁材料磁感应强度 B 和外部磁场强度 H 的比值，即：

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2)$$

磁感应强度 B 和磁场强度 H 关系图^[1]如图3所示。

图3中，软磁材料磁化曲线包含两个区域，分别为动态区和饱和区。在动态区内， B 会随着 H 变化而同向变化，在饱和区内，无论 H 如何变化， B 基本保持不变，趋于定值。磁化曲线上各点处切线斜率为该点磁导率 μ 的变化率， μ 变化显著的区域称为敏感区

域，我们就利用软磁材料在该区域的特性制作磁感应电感。

将软磁材料磁芯磁化至敏感区域是传感器工作的必要先决条件。为使其磁化稳定、均匀，这就要求外界磁场方向必须与磁感应电感轴向方向一致。为满足上述要求，故磁感应探头设计有磁化电感，以保证磁感应电感敏感特性。

2、振荡器^[3] 电路设计

振荡器电路采用 LC 振荡电路，工作在高频状态下（ $> 1\text{MHz}$ ），接入了磁感应电感的振荡器作为弱磁传感器的一部分，是感应外部磁场变化的接收组件，磁感应电感和电容一同构成 LC 振荡器的反馈网络，同时，磁感应电感担负着磁场敏感元件的角色，在外部磁场的作用下，振荡器输出振荡信号频率大小与磁感应电感轴向磁场强度同步一致。振荡器电路原理图如图4所示。

从图4看到，该振荡器为电容三点式 LC 振荡器，也叫考尔比兹振荡器。振荡器反馈电压取自 C9，故振荡器高频谐波分量小，输出波形较好，这也是选择此种结构电路的原因。

振荡器工作在最佳状态是保证弱磁传感器稳定性的关键因素之一，要求振荡器输出振荡信号幅度稳定，频带宽，线性度好，所以必须合理配置硬件参数，在设计初期，设计人员通过理论计算初步确定振荡器各元器件量值和振荡器工作参数。在调试阶段，又通过对关键器件量值进行微调整使振荡器工作在最佳状态。

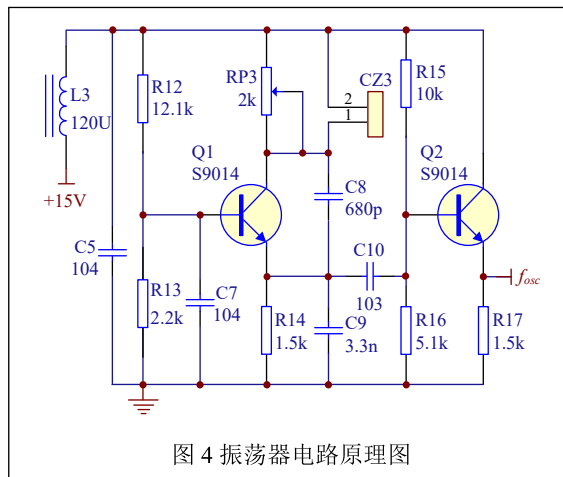


图4 振荡器电路原理图

3、鉴频电路设计

为从调频信号中解调出与磁场对应的电压信号，系统设计有单失谐回路斜率鉴频电路^[3]，该电路采用三极管共射放大、谐振选频、二极管包络检波方式实现。电路原理图如图5所示。

图5中，“ f_{osc} ”为振荡器输出信号，“ V_{out} ”为鉴频输出信号。单失谐回路斜率鉴频器由LC谐振放大器和二极管检波电路组成。调试时，将谐振放大电路^[4]的谐振频率调试到 $f_c + \Delta f_m$ ，其中 f_c 为振荡器中心频率。

4、积分电路和驱动电路设计

磁化电感控制电路原理图如图6所示。

积分器^[4]是用来平衡外部磁场的核心组件，运放的正反相端电压相等时传感器处在动态平衡状态，当外部磁场增大时，积分器反向积分，通过三极管驱动器减小磁化电感电流，使积分器再次进入平衡状态。当外部磁场减小时，积分器正向积分，通过三极管驱动器增大磁化电感电流，使积分器再次进入平衡状态。

三、性能验证

将组装调试好的传感器探头水平放置，磁感应探头东西朝向，如图7所示。

传感器上电（ $\pm 15V$ ）后，用多用表（FLUKE17B）监测传感器输出电压，同时慢速在水平桌面上旋转传感器电路板，观测记录传感器输出电压最大值和最小值，分别为6.710V和6.387V，按照地表面磁场7Gs（通用值）进行折算，传感器灵敏度大致为 $\frac{(6.710 - 6.387)V}{7Gs} \approx 46.1mV/Gs$ 。以传感器输出电压6.71V为基准电压，使用钕铁硼强磁铁由远及近、多方向强制驱动传感器，在传感器不失调即积分器保持动态平衡状态下，传感器可输出电压在1V~13.5V之间，这就可以认为传感器动态范围为12.5V。在每一个动态平衡点，压控振荡器输出频率是固定不变的，始终与基准频率保持一致，以确保积分器正反相端电压相等，此时传感器输出电压与基准电压相差的 ΔV 永远与外部强制叠加磁场相等，方向相反，相互抵消，这是 ΔV 加载到磁化电感线圈的结果，由于磁化电感磁芯同为软磁材料，根据软磁材料 B 和 H 关系，另只要积分器能够保持动态平衡，说明磁化电感未处于饱和区域，可以认为在其动态区内 ΔV 与 B 基本是线性关系，如此一来可以推算与磁化电感同磁场方向可测量范围为 $\frac{(13.5 - 6.71)V}{46.1mV/Gs} \approx 147.3Gs$ ，相反方向为 $\frac{(6.71 - 1)V}{46.1mV/Gs} \approx 123.9Gs$ ，双向叠加可得出传感器对应

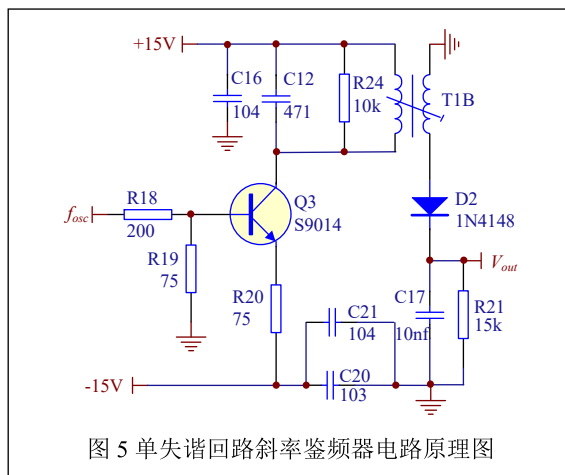


图5 单失谐回路斜率鉴频器电路原理图

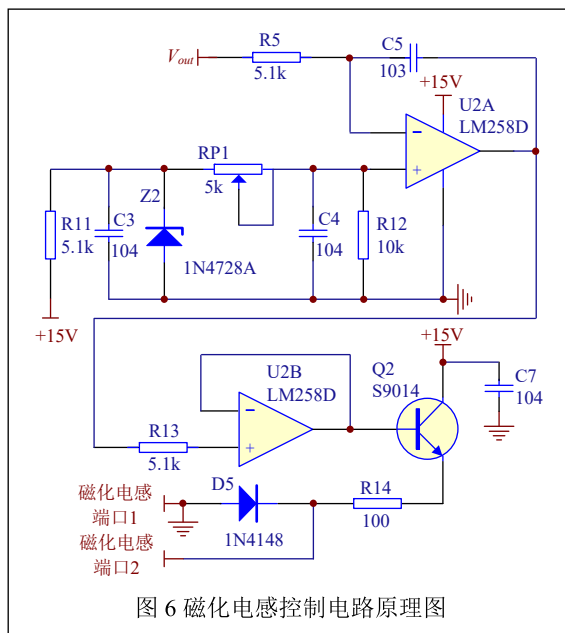


图6 磁化电感控制电路原理图

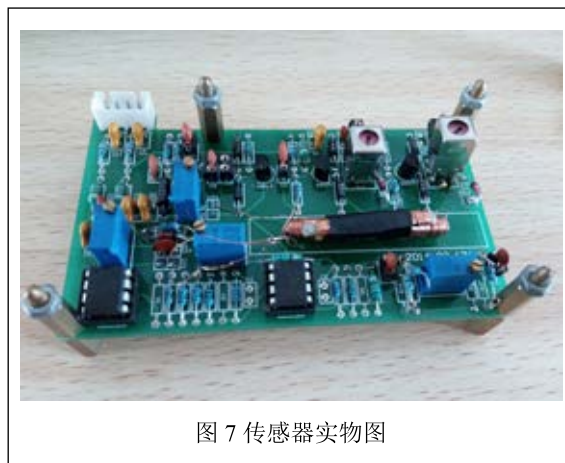


图7 传感器实物图

测量磁场强度范围约为 271.2Gs。

四、结论

应用软磁材料,设计出一种反馈式自平衡弱磁传感器,该型弱磁传感器性能可靠,线性度好,灵敏度高,最大优势是动态范围大,可批量生产应用,为新型传感器开拓了一片新的技术领域。

参考文献

- [1] 干露. 高灵敏度环形磁通门传感器的研究与设计 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008, 23-24.
- [2] 周治良, 程丰, 郑丽娜. 一种低电平调幅器设计 [J]. 电子测量技术, 2015, 38(5): 14-18.
- [3] 周治良, 郑丽娜, 王书义. 一种变感式 LC 压控振荡器设计 [J]. 自动化技术与应用, 2015, 34(5): 111-114.
- [4] 周治良, 李力厚, 王书义. 一种双向积分式电压表设计 [J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(10): 53-58.

Design of A Feedback Self-balancing Weak Magnetic Sensor

ZHOU Zhi-liang, WANG Ying, YUAN Yan-xu

(No. 5715 Factory of PLA, Luoyang 471000, China)

Abstract: Weak magnetic sensors are widely used at present, but generally there are some disadvantages such as small dynamic range. According to magnetization characteristics of soft magnetic materials, a method to design a weak magnetic sensor with feedback self-balancing and large dynamic range is proposed in this paper. The working principle and manufacturing process are described. The circuit schematic diagrams of magnetic induction probe, oscillator, single detuning loop slope frequency discriminator, integrator and voltage driver are given, and their working principles are described in detail. The experimental tests show that this type of weak magnetic sensor has good stability, good linearity, high sensitivity, wide dynamic range, unique innovation and novelty, and creates a new design direction of a new type of weak magnetic sensor.

Key words: weak magnetic sensor; feedback; frequency discriminator; integrator

作者简介

周治良: 中国人民解放军第五七一五工厂, 工学硕士, 工程师, 主要从事动态测试和智能仪器等方面的技术研究。

王盈(联系人): 中国人民解放军第五七一五工厂, 工学硕士, 助理工程师, 主要从事嵌入式硬件开发。

通讯地址: 河南省洛阳市西工区中州中路 254 号

邮编: 471000 邮箱: kslwzzl@126.com

袁彦许: 中国人民解放军第五七一五工厂, 助理工程师, 主要从事嵌入式软件开发。