

doi: 10.3969/j.issn.1007-855x.2009.04.012

# 调频式电感传感器电路及其在 桥梁低频振动检测中的应用

宋宇,李迅鹏,马琨,吴加权  
(昆明理工大学理学院,云南昆明 650093)

**摘要:** 为了对桥梁尤其是大跨度桥梁的低频振动进行检测,提出了一种采用西勒电容三点式振荡器的调频式驱动电路.利用 EWB 仿真软件对振荡电路的参数进行优化,并在桥梁的低频振动检测中进行了试验研究.仿真研究和试验结果表明,调频式电路具有响应较快、稳定性较好、灵敏度较好、低频振动响应较好等特点,完全可以应用于桥梁的低频振动检测中.

**关键词:** 电感式传感器; 低频振动; 驱动电路; 大跨度桥梁

**中图分类号:** TP212.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2009)04-0053-05

## FM Oscillator Circuit of Inductance Sensor and Its Application to Low Frequency Vibration Detection of Bridge

SONG Yu, LIXun-peng, MA Kun, WU Jia-quan

(Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** To detect the low-frequency vibration of bridges, a new oscillator circuit of inductance sensor is introduced by means of Selier oscillator. With the help of EWB simulation software, the parameters in this circuit are optimized. It is then tested in low-frequency vibration of the bridge. It is shown through the simulation and test that this circuit enjoys such advantages as rapid response, high sensitivity and better response to low-frequency vibration.

**Key words:** inductance sensor; low frequency vibration; driving circuit; long-span bridge

### 0 引言

随着交通事业和科学技术的发展,悬索桥、斜拉桥等大跨度桥梁不断涌现,有的桥梁跨度已超过了 1 000 m,桥梁的自振周期有的已超过 20 s.在正常情况下对人们的日常生活没有太大影响,然而一旦超过允许的极限将会对社会生产和生活造成极大的危害.虽然桥梁的位移振幅随结构自振频率阶数提高而减少,但某些高阶频率的振动加速度值有时却比基频振动大得多,尤其是特大跨度桥梁,因为特大跨度桥梁的振动,虽然基频振动有较大的位移振幅,但其加速度值常常比某些高阶频率的加速度值小得多.因此,如果用加速度计进行桥梁脉动测量,而且放大器没有足够的灵敏度和带通滤波功能,则可能因低阶振型的振动信号微弱而被遗漏.有时即使用汽车激振,也可能漏测.因此,加速度传感器不大适合桥梁,尤其是特大跨度桥梁振动测量<sup>[1]</sup>.而普通磁电式速度传感器的下限频率只有 13 Hz,已经不能满足低频振动测量的需要.所以需要研制新的传感器系统用于这种准静态的超低频测量.

电感式传感器具有灵敏度高、结构简单、抗干扰能力强、安装方便、测量线性范围大、非接触测量的特点,被广泛应用于工业生产和科学研究等领域的位移、厚度、转速、温度等物理量的测量.但传统电感式传感器中的电涡流传感器,其一般被测金属导体的高频损耗较大,而变磁阻式传感器中的衔铁部分又伴随有

收稿日期: 2008-11-22 基金项目: 云南省中青年学术技术带头人后备人才项目(项目编号: 2008PY013).

第一作者简介: 宋宇(1982-),男,在读硕士研究生.主要研究方向: 物理电子学. E-mail: song\_yu66@yahoo.com.cn

电涡流效应影响,论文利用电感式传感器针对振幅的相对位移的检测,设计一种改进型的调频式电感传感器电路,结合基于悬臂梁自由端搭载铁氧体材料的机械结构应用于桥梁的低频振动检测。

## 1 测量原理

电感式传感器是利用电磁感应把被测的物理量如位移、压力、流量等转换成线圈的自感系数或互感系数的变化,再由测量电路转换为电压或电流的变化量输出,实现非电量到电量的转换。

当金属导体置于变化着的磁场中,导体内就会产生感应电流,这种电流像水中的漩涡那样,在导体内形成闭合回路电流,称之为电涡流或涡流。这种现象被称为涡流效应。涡流传感器就是在涡流效应的基础上建立起来的。电涡流传感器的核心部分就是一个激励线圈。如图 1(a)所示,如果把激励线圈置于金属导体附近,并通以正弦电流  $i_1$  时,  $L_1$  周围空间就产生了正弦交变磁场  $H_1$ , 处于交变磁场中的金属导体就产生感应电涡流  $i_2$ ,  $i_2$  也将产生交变磁场  $H_2$ ,  $H_2$  的方向与  $H_1$  的方向相反,由于磁场  $H_2$  的反作用使激励线圈  $L_1$  的有效阻抗发生变化。一般来讲,线圈的有效阻抗变化与导体的电导率、几何形状、线圈的几何参数、激励电源频率以及线圈到被测导体的距离有关。如果改变上述参数中的一个参数,而其余参数恒定不变,则阻抗就成为这个变化参数的单值函数。当只有距离变化时,阻抗的变化就可以反映激励线圈到被测金属导体间距离的大小变化。我们可以把被测导体上形成的电涡流等效成一个短路环  $L_2$ , 这样就可以得到如图 1(b)所示的等效电路,其中  $R_1$  为  $L_1$  的内阻,  $R_2$  为  $L_2$  的内阻。根据等效电路列出方程组求得传感器线圈  $L_1$  的复阻抗为

$$Z = \left[ R_1 + \frac{M^2}{R_2^2 + (L_2)^2} R_2 \right] + \left[ j L_1 - \frac{M^2}{R_2^2 + (L_2)^2} L_2 \right] \quad (1)$$

线圈的等效电感为

$$L = L_1 - L_2 \frac{M^2}{R_2^2 + (L_2)^2} \quad (2)$$

由式子 (1), (2) 可以看出,激励线圈与金属导体系统的阻抗、电感都是该系统互感  $M$  平方的函数。而  $M$  随线圈与金属导体间距离  $x$  的变化而改变,从而把位移量的变化转换成电量的变化,这就是电涡流传感器进行位移测量的基本原理<sup>[2]</sup>。

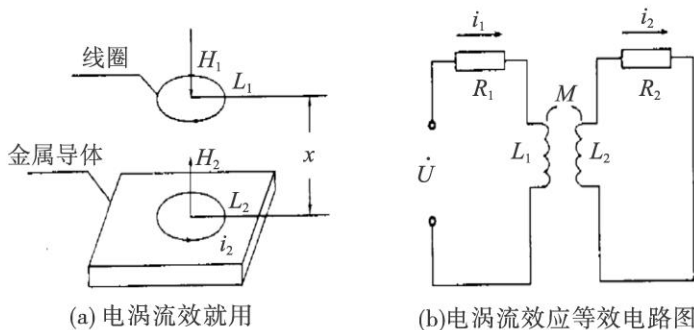


图1 电涡流作用原理  
Fig.1 Eddy current principle

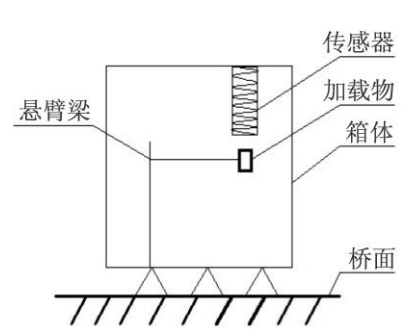


图2 检测装置示意图  
Fig.2 Detecting device sketch

而当放入交变磁场中的物体为铁氧体等非金属材料时,由于其电阻率比金属、合金磁性材料大得多,而且还有较高的介电性能,而不产生感应电涡流,所以并没有产生互感作用,但由于其磁性能表现在高频时具有较高的磁导率而有很强的顺磁性,因此其磁阻远小于与线圈之间的气隙的磁阻,因而磁路的总磁阻主要受其气隙的磁阻影响。其中空气气隙磁阻正比于其气隙厚度  $x$ ,而线圈的电感值反比于其磁路的总磁阻。

基于这种原理可以构成振幅检测装置,如图 2,将传感器与非金属的悬臂梁的机械结构一同置于附有配重的箱体内,将悬臂梁固定于箱体下表面内侧,在箱体上表面内侧固定传感器探头部分,使传感器探头前端正对于梁的自由端加载的被测物体,便可以将桥面的低频振动传导于梁上,再通过梁振动时产生的与传感器之间的相对位移变化检测到桥面的振动。只要测量电路谐振频率远远高于被测物的振动频率,悬臂

梁的一阶自振固有频率远高于桥面振动频率,以及被测物的振动振幅大小在传感器的感应范围内,那么测量电路就完全能够响应被测物的振动.因此,可以应用于桥梁的准静态低频振动测量中.

## 2 调频式测量电路

调频式电涡流传感器的工作原理是将电感  $L$  的变化转换为输出电压频率  $f$  的变化.把电涡流传感器作为振荡的一个主要元件,将传感器线圈与固定电容并联组成  $LC$  并联谐振回路,其振荡频率  $f = 1/2\sqrt{LC}$ <sup>[3]</sup>.当反射导磁体相对传感器线圈移动,传感器的等效电感发生变化,振荡电路的振荡频率随之变化.图 3 为采用的电路原理图.

图 3 中  $L_1$ ,  $C_2$  及  $C_4$  组成了这一电路中  $LC$  谐振回路,振荡信号被  $Q_1$  通过反馈逐渐被增大,直到达到振幅平衡条件而平衡在某一电压值处进行等幅振荡.  $L_1$  即为传感器线圈,传感器线圈形状、匝数的设计应该尽量能够提高线圈的电感量,增强发射信号强度,但同时也要考虑振荡回路中与其搭配的电容的值,即  $C_2$ ,  $C_4$  的值,以及传感器构成的振荡回路的品质因数<sup>[4]</sup>,这样才能使电路谐振频率随电感变化的变化量即灵敏度达到最好效果.  $Q_1$  处采用场效应管,可以增加波形和频率的稳定度,减小温飘.  $L_2$  及  $D_1$  也都有稳定振荡频率的作用.同时,  $D_1$ ,  $R_1$  及  $R_3$  的选取都会影响到  $Q_1$  的稳定工作点,要尽量使  $Q_1$  工作在 0 温度系数点附近,以加强电路的频率稳定度.

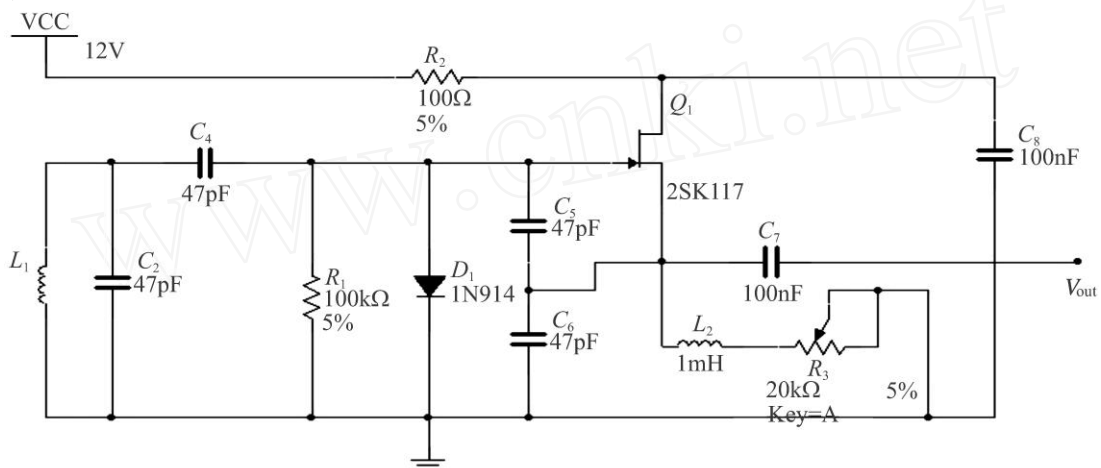


图3 调幅式驱动电路图  
Fig. 3 Oscillator circuit of eddy current sensor

## 3 利用 EWB对振荡电路的仿真分析

由于驱动电路是通过测量频率的变化来反映位移的变化,所以对频率的稳定度有较高要求,频率的稳定度直接影响到测量精度.因此振荡电路采用的是改进型的电容 3 点式西勒振荡电路.按照振荡电路起振的振幅和相位条件推算振荡电路中元器件的各个参数,并利用 EWB (Electronics Workbench 基于 Spice 内核的电路仿真软件)对振荡器部分进行仿真试验<sup>[5]</sup>,电路如图 3.

仿真结果如图 4 所示. (a)显示了电路从  $0.0 \mu s$  到  $600.0 \mu s$  内的  $V_{out}$  处的电压振荡情况. (b)显示了电路振荡稳定后从  $500.0 \mu s$  到  $506.0 \mu s$  内的  $V_{out}$  处的电压振荡情况.从仿真结果可以看出,电路在  $381.7 \mu s$  以后将以  $21.2 mV$  为中心进行等幅振荡,峰-峰值为  $1592.2 mV$ .传感器电感线圈的电感每改变  $1\%$ ,频率改变达到  $3.4\%$ .频率稳定度达到  $10^{-5}$  级别.将仿真结果与实际搭建电路中测量结果相比较,振荡产生的波形与仿真结果有较好的吻合.

在实际电路设计时,为了保证振荡电路输出信号的稳定和可靠,还应该采取相应的措施对电路加以改进.负载的变化也会影响电路的性能.为了防止负载的影响,在振荡电路与负载之间插入缓冲电路以屏蔽负载的影响.温度和磁场的变化也是影响振荡器性能的主要原因.环境温度的变化,将改变回路电容的数

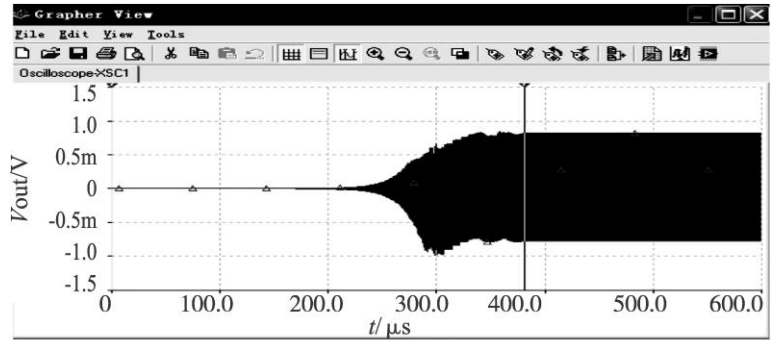
值,所以应先改用温度系数较小的元件,如云母电容等.外界磁场的变化,会引起磁性材料磁导率的变化,影响传感器线圈,所以将振荡器密封在传感器壳体内,起到屏蔽作用,可减少回路与外界发生的电磁耦合.

#### 4 试验结果及分析

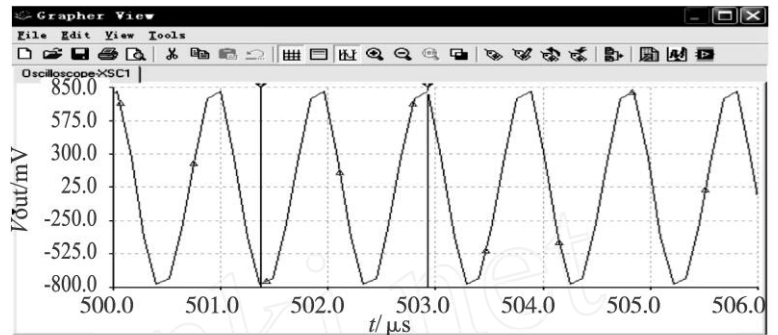
图 5~7分别为悬臂梁的自由端加载锡铅合金片、镍合金片、铁氧体 3种物体时的检测到的电路振荡频率随位移变化的曲线图.试验中,采用最小位移量为 0.01 mm 的微位移移动平台通过有机玻璃梁搭载被测物体.采用高精度频率计直接检测测量电路的输出电压的频率.从图中可以看出,锡铅合金片和镍合金片的物体,检测到的振荡电路的频率会随物体与传感器之间的位移增大而减小,并且越靠近传感器频率随位移变化的变化量越明显.其中锡铅合金片的位移响应范围要大于镍合金片.而为铁磁性材料的铁氧体的位移响应范围要更大一些,且与传感器之间的位移越小,频率随位移变化的变化量越明显,但是检测到的振荡电路的频率会随物体与传感器之间的位移增大而增大.因此,铁磁性的铁氧体材料作为加载物体的效果要更好,这些试验结果与理论相符合.这些说明测量电路对传感器处的位移变化有较好的响应,只要对曲线作分段插值拟合,便可以得到较好的频率变化随位移变化的线性关系.

图 8为每 30 s移动 0.5 mm,以 7.5 mm 位移处为中心做往复轴向移动 40 min 所得到的试验结果.以此代表周期为 10 min 的准静态低频振动.试验依然采用最小位移量为 0.01 mm 的微位移移动平台通过有机玻璃梁搭载被测物

体.被测物体采用铁磁性的铁氧体材料.(a)为位移随时间的变化曲线,(b)为测量到的测量电路输出电压的频率随时间的变化曲线.从图中可以看出,物体以 7.5 mm 处为中心做等幅振动,峰-峰值为 5.0 mm,周期为 10 min 检测到的测量电路的输出电压的频率变化接近为等幅振荡变化,峰-峰值的最大值为 15.85 kHz,周期为 10 min 这说明测量电路对悬臂梁上自由端的加载物的振动的响应与物体所做的振动状况相



(a)起振过程



(b)稳定振荡状态

图4 振荡电路仿真图

Fig. 4 Oscillating circuit simulation output

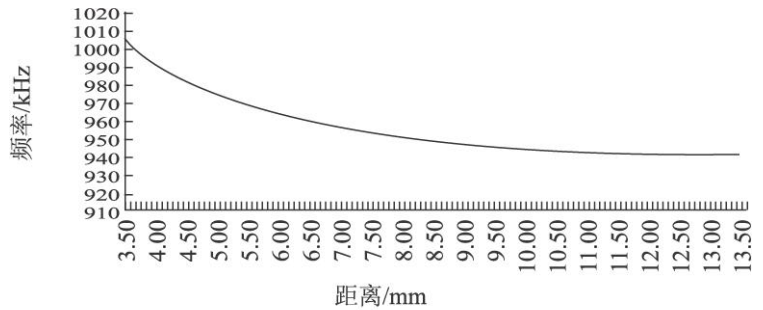


图5 锡铅合金片

Fig.5 Tin-lead alloy piece

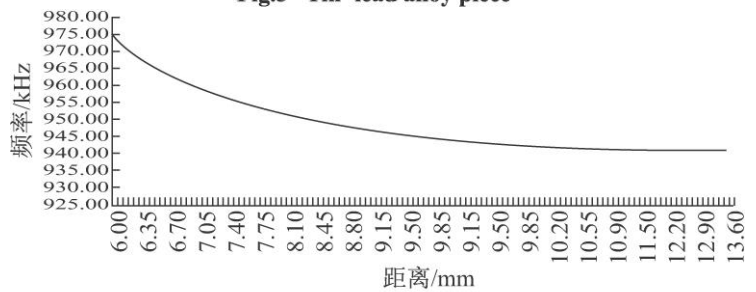
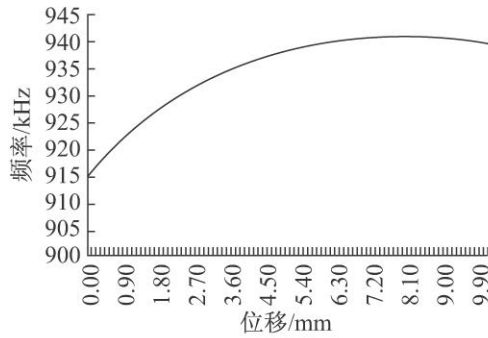


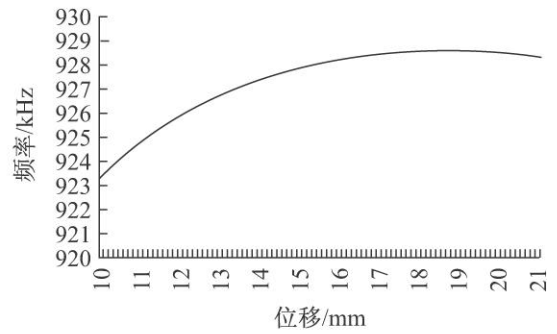
图6 镍合金片

Fig.6 Nickel alloy piece

一致.



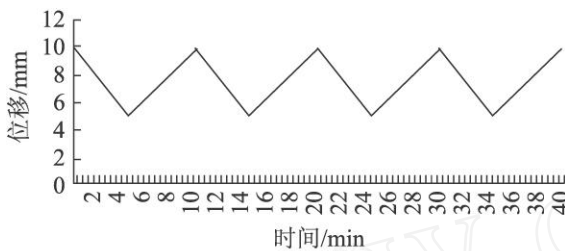
(a)径向位移曲线



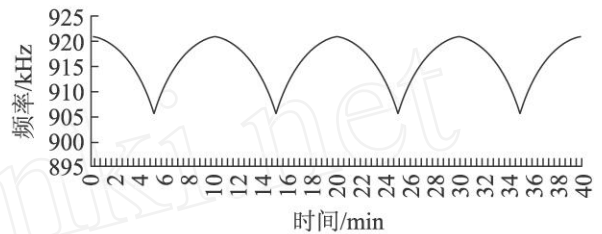
(a)轴向位移曲线

图7 铁氧体

Fig.7 Ferrimagnetism



(a)位移-时间曲线



(b)频率-时间曲线

图8 位移及时间曲线的变化

Fig.8 Displacement and frequency curves of time

### 5 结论

综上所述,调频式电感传感器对于位移检测有较好的灵敏度和线性度,并且能够响应最低至少周期是 10 min 的准静态低频振动,而且能够较一致地反映被测物体的振动状况.因此,调频式电感传感器可以应用于桥梁的低频振动检测中.

应用于桥梁的准静态低频振动检测时,悬臂梁部分的优化直接影响到测量范围及测量精度,特别是梁的材料、密度、弹性模量、截面形状、长度等以及自由端加载的物体的材质、形状、磁导率等所造成的影响.测量电路部分,主要优化电路的频率稳定度、频率测量的精度和速度以及电路板的对干扰噪声的屏蔽技术.

### 参考文献:

[1] 林超. 钢筋混凝土桥梁的振动测量 [J]. 华南地震, 2003. 3(1): 82 - 86  
 [2] 顾金凤,唐炜. 高精度电涡流测微系统的研究 [J]. 江苏科技大学学报:自然科学版, 2006. 2(1): 73 - 77.  
 [3] 范希鲁. 模拟集成电路系统 [M]. 北京:中国铁道出版社, 1998: 112 - 126  
 [4] 马东丽,赵辉. 用于调频式电涡流传感器的高稳定性 LC 振荡电路 [J]. 计算机测量与控制, 2004. 12(3): 298 - 300  
 [5] 周凯. EWB 虚拟电子实验室——Multisim 7 & Ultiboard 7 电子电路设计与应用 [M]. 北京:电子工业出版社, 2005: 20 - 120.