

文章编号 1004-924X(2018)02-0344-11

## 磁悬浮分子泵用 Hartley 涡流传感器

王 坤<sup>1,2\*</sup>, 张利胜<sup>1,2</sup>, 陈少华<sup>3</sup>, 韩邦成<sup>1,2</sup>

- (1. 北京航空航天大学 惯性技术重点实验室 新型惯性仪表与导航系统技术国防重点学科实验室, 北京 100191;  
2. 北京市高速磁悬浮电机技术及应用工程技术研究中心, 北京 100191;  
3. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

**摘要:**工业领域的磁悬浮分子泵用位移传感器除了要具有良好的静态特性外,还应具有高动态响应特性,同时其体积大小还影响着磁悬浮分子泵的抽速、真空度和压缩比。针对高真空磁悬浮分子泵,提出了一种基于 Hartley 原理的电涡流位移传感器设计方法,将传感器对称探头接入同一振荡电路作为工作电感。对传感器的动态特性进行了分析,并提出了对其动态响应特性在不影响灵敏度和线性度等静态性能的情况下进行补偿的方法。实验结果表明,在 $-0.4\sim 0.4$  mm 内,传感器的线性度为 $\pm 1.17\%$ ,灵敏度为 $9.901\text{ mV}/\mu\text{m}$ ,分辨率为 $0.25\%$ ,动态响应带宽达到了 $10.2\text{ kHz}$ ,两径向四路位移信号测量集成电路板体积仅为 $\pi\times 4^2\text{ cm}^2$ ,大大减小了传感器体积,满足了磁悬浮分子泵面向更高抽速和更高真空度的发展需求。

**关键词:**磁悬浮分子泵;电涡流位移传感器;Hartley;体积;动态特性

**中图分类号:**TP212.1;TH36 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182602.0344

## Hartley eddy current sensor used in maglev molecular pump

WANG Kun<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Li-sheng<sup>1,2</sup>, CHEN Shao-hua<sup>3</sup>, HAN Bang-cheng<sup>1,2</sup>

- (1. *Science and Technology on Inertial Laboratory, Fundamental Science on Novel Inertial Instrument & Navigation System Technology Laboratory, Beihang University, Beijing 100191, China;*  
2. *Beijing Engineering Research Center of High-speed Magnetically Suspended Motor Technology and Application, Beijing 100191, China;*  
3. *School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: wangkunggg@163.com*

**Abstract:** For the displacement sensor used in maglev molecular pump in the industrial field, in addition to good static characteristic and high dynamic characteristic requirements, its volume also affects the pumping speed, the vacuum and the compression ratio of the maglev molecular pump. Aiming at the high-vacuum maglev molecular pump, a design method of the eddy current displacement sensor (ECDS) based on the Hartley oscillator was proposed. The symmetrical probes were connected into the same oscillation circuit as working inductors. Then the dynamic characteristic of the ECDS was analyzed in detail. And a method to compensate the response bandwidth without affecting the sensitiv-

收稿日期:2017-08-21;修订日期:2017-10-09.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2012YQ040235);光电信息与仪器北京市工程技术研究中心开放基金资助项目(No. GD2017008)

ity and the linearity was put forward. Experimental results indicated that in the measurement range of  $-0.4-0.4$  mm, the linearity came to  $\pm 1.17\%$  and the sensitivity achieved  $9.901$  mV/ $\mu\text{m}$ , the resolution was  $\pm 0.25\%$  and the response bandwidth was  $10.2$  kHz. The volume of the integrated circuit board of the two radial four-way displacement signal was only  $\pi \times 4^2$  cm<sup>2</sup>, which greatly reduced the sensor volume. It can satisfy the requirements of the maglev molecular pump for higher pumping speed and higher vacuum.

**Key words:** maglev molecular pump; Eddy Current Displacement Sensor (ECDS); Hartley; volume; dynamic characteristic

## 1 引 言

磁悬浮轴承从根本上消除了传统轴承的机械摩擦,具有无磨损、无需润滑、精度高、主动振动控制等优点,广泛应用于航空航天和工业领域,如卫星姿控飞轮、陀螺仪、高速鼓风机、压缩机、高真空分子泵和机床的主轴部件等<sup>[1-7]</sup>。分子泵利用磁悬浮技术可大大提高抽速和真空度,然而,真空度等性能的提高对磁悬浮分子泵的内部空间有严格的限制<sup>[8-9]</sup>。目前,磁轴承已经能够实现小型化和紧凑性的设计<sup>[10-11]</sup>,但所用位移传感器仍然在磁悬浮分子泵内占据较大的空间,会造成以下问题<sup>[12]</sup>:(1) 极限真空度降低;(2) 散热性能变差,容易导致传感器信号漂移,严重时可能造成系统失稳;(3) 冷却系统变得复杂。因此,磁悬浮分子泵位移传感器的小型化成为亟需解决的问题。同时随着转速的提升,提高位移传感器的动态响应特性也成为关键问题<sup>[13]</sup>。

电涡流位移传感器由于其结构简单、线性度高、分辨率高、频率响应范围广,被广泛应用于各种磁轴承系统<sup>[14-15]</sup>。国内外对电涡流位移传感器的研究主要集中在探头的形状和参数、特性曲线拟合、温度漂移和补偿、动态特性分析和测量电路设计等方面<sup>[16-17]</sup>。TP Dever 等提出一种轴向电涡流传感器配置方式,提高了传感器的线性度和磁轴承系统的可靠性<sup>[18]</sup>。René Larssonneur 和 Philipp Bühler 设计了一种新型轴向电涡流位移传感器,它将轴向探头集中在一块 PCB 板上,这种新型的电涡流传感器,可置于离转子较近的位置,能得到更好的线性度和灵敏度<sup>[19]</sup>。MR Nabavi 和 S Nihtianov 采用一种新颖的集成电涡流传感器接口,使传感器在分辨率、功耗和带宽等性能方面都有所改善<sup>[20]</sup>。国内北京航空航天大

学郑世强等使用辅助探头同时实现轴向电涡流传感器的温度补偿和同步误差消除<sup>[21]</sup>。虽然以上方法使电涡流位移传感器的性能在不同方面都有所提高,但是仍然没有解决传感器小型化的问题,而小型化问题主要是由振荡电路的设计方法引起的。

传统电涡流位移传感器的振荡电路设计主要有两种<sup>[22]</sup>:(1) 恒频调幅式,采用频率稳定的石英晶体振荡器为 LC 并联谐振回路提供频率稳定、幅值稳定的高频激励信号,该 LC 并联谐振回路由传感器的探头线圈 L 和与探头相匹配的谐振电容 C 组成;(2) 变频调幅式,采用电容三点式振荡电路为传感器探头线圈提供高频激励信号,传感器探头线圈接入该振荡电路作为工作电感。不过,这两种方法都有电路体积大,所用分立元器件多的缺点。本文以磁悬浮分子泵用位移传感器为研究对象,提出了一种基于 Hartley 原理的自差分电涡流位移传感器。利用对称的探头线圈作为 Hartley 振荡电路的工作电感,形成差动结构,简化测量电路,同时抑制共模干扰。首先介绍磁悬浮分子泵系统构成和传感器结构,其次对该传感器的原理进行描述并提出 Hartley 振荡电路的设计方案,并对该传感器的动态特性进行详细的分析,最后对该传感器分别进行静态特性和动态特性测试,并将其应用于磁悬浮分子泵样机系统进行悬浮测试。这些研究为磁悬浮轴承在高速电机上的应用奠定了基础,为磁悬浮分子泵的应用提供了更为广阔的平台。

## 2 磁悬浮分子泵系统构成及原理

### 2.1 磁悬浮分子泵系统构成

图 1 所示为本文所述磁悬浮分子泵的结构,它由涡轮、转子组件、上/下径向位移传感器、上/

下径向磁轴承、高速电机定子、上/下轴向磁轴承和轴向位移传感器等组成。可以看出传感器在分子泵内占据了较大的空间,其体积直接影响分子泵抽速、真空度等性能的提高。

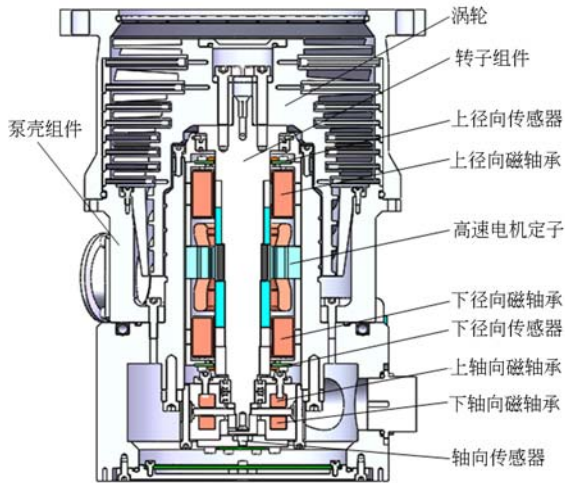


图 1 磁悬浮分子泵结构图  
Fig. 1 Structure of maglev molecular pump

图 2 所示为磁轴承控制系统的示意图。磁轴承控制系统根据位移传感器的反馈信号来调节转子的悬浮位置,传感器的检测精度直接影响转子的悬浮精度。当转子的转速超过  $2 \times 10^4$  r/min 时,位移传感器的动态响应对于磁轴承控制系统将变得至关重要。

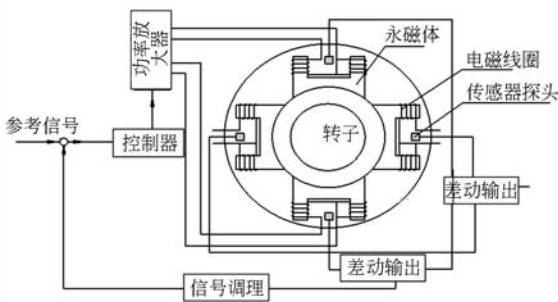
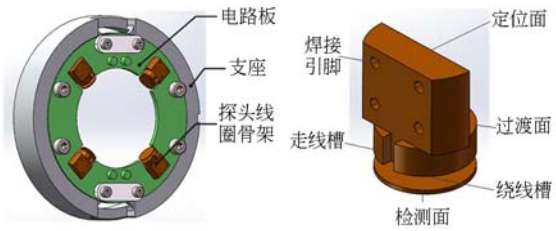


图 2 磁轴承控制系统示意图  
Fig. 2 Schematic of magnetic bearing control system

### 2.2 电涡流位移传感器结构原理

针对磁悬浮分子泵对位移传感器的特殊要求,设计了结构如图 3(a)所示的电涡流位移传感器,它包括支座、电路板和探头线圈骨架。图 3(b)所示为探头线圈骨架,它包括检测面、过渡面和定位面。该电涡流位移传感器结构具有以下优点:(1)探头的引线直接焊接在 PCB 焊盘引脚

上,结构更加紧凑可靠;(2)探头增加了定位面,使 4 个探头的检测面与磁轴承内径的同轴度达到 0.01 mm,提高了定位精度;(3)探头与 PCB 直接固定,减少了探头支撑零件,使传感器结构更加紧凑,有利于实现小型化。



(a) 整体结构 (b) 线圈骨架  
(a) Overall structure (b) Coil skeleton

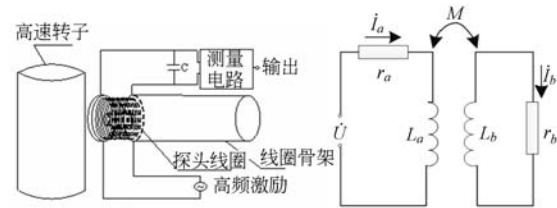
图 3 电涡流位移传感器结构

Fig. 3 Structure of eddy current displacement sensor

## 3 电涡流位移传感器分析与设计

### 3.1 工作原理分析

电涡流位移传感器的工作原理如图 4(a)所示。当通有高频交变电流的传感器探头线圈靠近高速转子时,探头线圈产生的磁场在转子表面产生交变电涡流,同时转子表面交变电涡流又产生新的磁场来阻碍探头线圈的磁场变化。因此可分别用两个单匝线圈来等效探头线圈和转子的电感,而它们之间的耦合程度可以用互感  $M$  来表示,等效电路如图 4(b)所示。



(a) 工作原理 (b) 等效电路  
(a) Operating principle (b) Equivalent circuit

图 4 电涡流位移传感器基本原理图

Fig. 4 Basic principle of eddy current displacement sensor

由基尔霍夫定律可得:

$$\begin{cases} (r_a + j\omega L_a) \dot{I}_a - j\omega M \dot{I}_b = \dot{U} \\ -j\omega M \dot{I}_a + (r_b + j\omega L_b) \dot{I}_b = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $L_a$  和  $r_a$  分别为探头线圈的等效电感和等效电阻;  $L_b$  和  $r_b$  分别为转子上电涡流等效回路的

等效电感和等效电阻;  $\omega$  为激励电流的角频率。

由式(1)可得探头线圈的等效阻抗为:

$$Z = (r_a + r_b \frac{\omega^2 M^2}{r_b^2 + \omega^2 L_b^2}) + j [\omega L_a - \omega L_b \frac{\omega^2 M^2}{r_b^2 + \omega^2 L_b^2}] \quad (2)$$

探头线圈的等效电感为:

$$L = L_a(u) - L_b \frac{\omega^2 M^2}{r_b^2 + \omega^2 L_b^2} \quad (3)$$

式中  $L_a(u)$  为不计涡流效应时探头线圈的电感。

由式(3)可知,探头线圈等效电感中第一项与静磁学效应有关,第二项为电涡流回路的反射电感。当转子位移发生变化时,探头线圈的等效电感会随之变化。因此辅以适当的测量电路,该传感器就可以检测转子的位移。

### 3.2 振荡电路设计

图 5 所示为 Hartley 振荡电路原理图。  $L_u$  和  $L_d$  为传感器对称的两个探头线圈电感,接入振荡电路中作为工作电感。电感  $L_u$  和  $L_d$  构成差动结构,搭载振荡电路外围元器件便可以输出二者差分之后的电压。与传统电涡流传感器测量电路相比,只需一路测量电路便可测得转子的一个径向位移,同时自差分结构省略了传统测量电路后续差分电路,大大减少了分立元器件的个数,使测量电路体积减小一半以上。

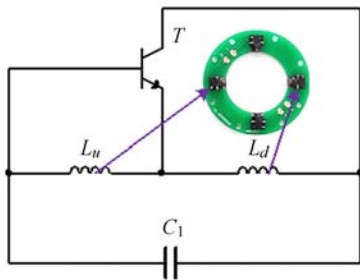


图 5 Hartley 振荡电路原理图

Fig. 5 Schematic of Hartley oscillation circuit

建立传感器探头线圈的有限元模型。图 6 所示为探头的磁力线分布图,图 7 所示为仿真计算得到的探头线圈电感随转子位移变化的曲线。可见传感器探头线圈的电感变化与转子位移近似呈线性关系。

据此,建立振荡电路的仿真电路模块,如图 8 所示。该模块由电压调节电路和振荡电路两部分构成。由于对称探头电感变化与转子位移近似线性且方向相反,故转子在移动过程中,三极管 T

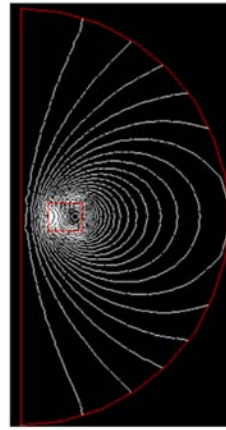


图 6 探头线圈有限元模型的磁力线分布

Fig. 6 Magnetic line distribution of finite element model of probe coil

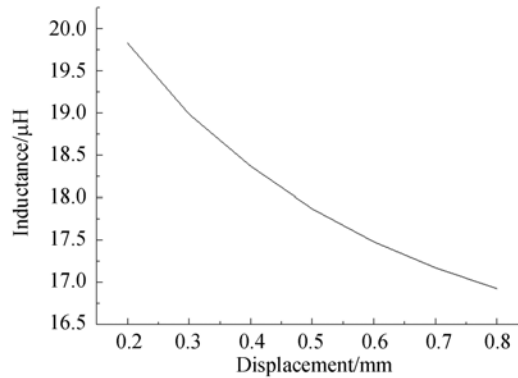


图 7 探头线圈电感随转子位移变化仿真曲线图

Fig. 7 Simulation curve of probe coil inductance varies with rotor displacement

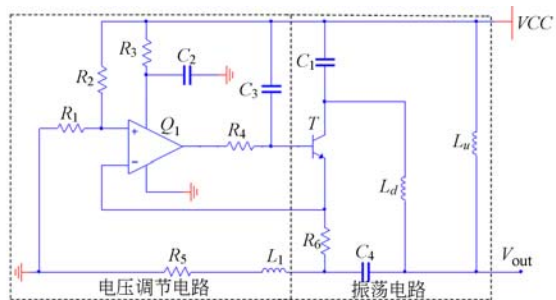


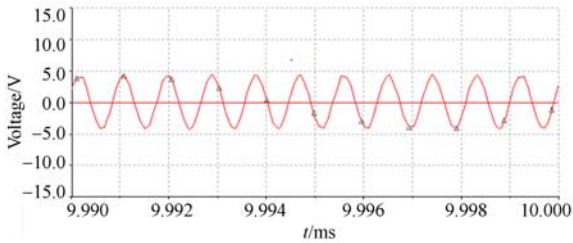
图 8 振荡电路的仿真电路模块

Fig. 8 Simulated circuit of oscillation circuit

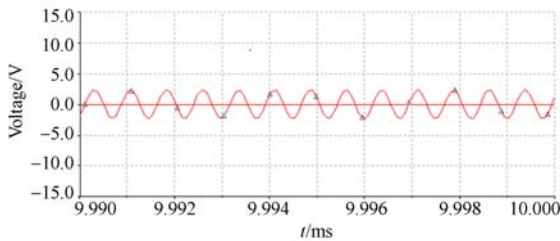
的集电极电压基本不变,振荡电路输出对称探头电压的差动值。

图 9 所示为振荡电路仿真结果,图 9(a)所示为转子在探头中心位置时的输出电压,图 9(b)所

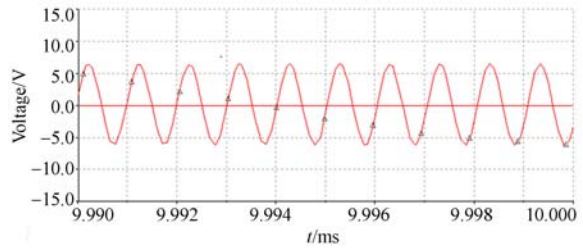
示为转子靠近探头  $L_u$  时的输出电压,图 9(c)所示为转子靠近探头  $L_d$  时的输出电压,仿真结果与理论分析相符。



(a) 转子在探头中心位置  
(a) Rotor at center position



(b) 转子靠近探头  $L_u$   
(b) Rotor approaches to probe  $L_u$



(c) 转子靠近探头  $L_d$   
(c) Rotor approaches to probe  $L_d$

图 9 振荡电路仿真结果

Fig. 9 Simulation results of oscillation circuit

### 4 动态特性分析与补偿

图 10 所示为该电涡流位移传感器的测量电路,它主要包括电压调节电路、振荡电路、检波电路和放大及偏置调节电路 4 个模块。传感器对称的探头线圈接入振荡电路中,当转子位移变化时,由于探头线圈电感值的变化,振荡电路的输出电压会随之变化。通过检波电路提取振荡电路输出电压的峰峰值,再经放大及偏置调节电路后输出与转子位移成比例的直流电压。

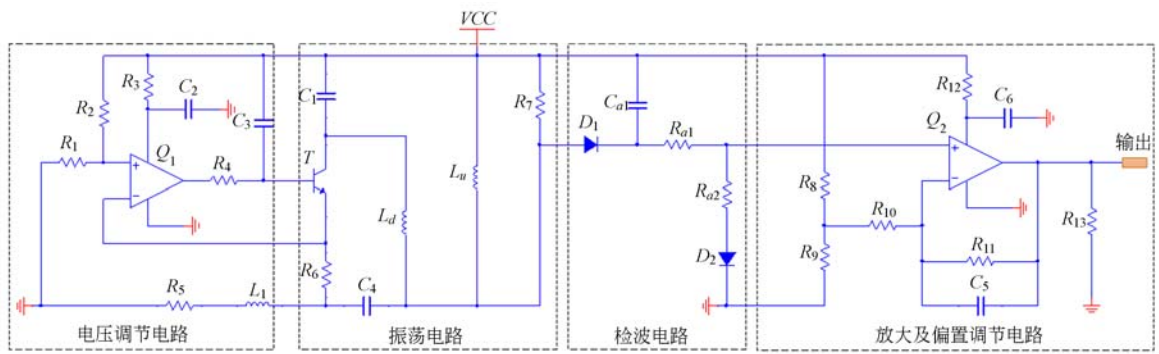


图 10 电涡流位移传感器测量电路图

Fig. 10 Measurement circuit of eddy current displacement sensor

#### 4.1 动态特性分析

在传感器测量电路中,电压调节电路和放大及偏置调节电路均是由集成运放搭建起来的电阻电路,可通过选择高频元器件来减小或消除其对整个测量电路动态响应的影响。故影响传感器动态响应特性的环节包括振荡电路、探头线圈和转子构成的涡流环和检波电路。由于探头线圈直接耦合在振荡电路中,探头线圈与转子耦合,高频电

流产生的涡流环与探头线圈耦合,对传感器动态响应特性的影响很小,可以忽略不计<sup>[23]</sup>。因此影响传感器动态响应特性的环节主要是振荡电路和检波电路。

图 11 所示为振荡电路工作时的电路模型,其中  $R_p$  为探头线圈的等效电阻,  $L_p$  为探头线圈的等效电感,  $C_p$  为并联谐振电容,  $R_0$  为分压电阻,  $U_0$  为高频激励信号电压,  $U_1$  为电路输出电压。

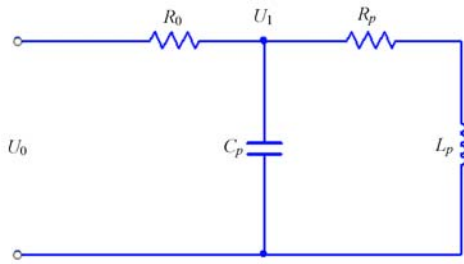


图 11 振荡电路工作模型

Fig. 11 Model of oscillation circuit

由基尔霍夫电压定律可得：

$$L_p C_p \frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} + R_p C_p \frac{\partial U_1}{\partial t} + U_1 = 0. \quad (4)$$

设  $U_1 = Ae^{at}$ ，则特征方程为：

$$L_p C_p a^2 + R_p C_p a + 1 = 0. \quad (5)$$

特征根为：

$$a_{1,2} = -\frac{R_p}{2L_p} \pm \sqrt{\left(\frac{R_p}{2L_p}\right)^2 - \frac{1}{L_p C_p}}. \quad (6)$$

所以：

$$U_1 = A_1 e^{a_1 t} + A_2 e^{a_2 t}. \quad (7)$$

显然， $a_1$  和  $a_2$  取决于振荡电路参数，而  $A_1$  和  $A_2$  取决于振荡电路的初始条件。假设在  $t=0$  时刻，回路中没有电流，令  $U_1 = U$ ，则：

$$\begin{cases} A_1 = \frac{a_2 U}{a_2 - a_1} \\ A_2 = \frac{a_1 U}{a_2 - a_1} \end{cases}. \quad (8)$$

由于传感器在工作时处于谐振状态，所以  $a_1$  和  $a_2$  是一对共轭复根，若定义： $\delta = R_p / 2L_p$ ， $\omega_0^2 = 1 / L_p C_p$ ，则：

$$U_1 = \frac{\omega_0}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} U e^{-\delta t} \sin(\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \cdot t + \beta), \quad (9)$$

式中  $\beta = \arccos(\delta / \omega_0)$ ， $0 < \beta < 90^\circ$ 。

由式(9)可知，该振荡电路模型的零输入响应为衰减的正弦振荡，衰减时间常数即为振荡器在高频激励信号下的滞后时间常数，该振荡电路模型的等效时间常数  $\tau_0 = 1 / \delta = 2L_p / R_p$  决定了  $U_1$  的响应时间。由于传感器品质因数  $Q = \omega L_p / R_p$ ，其中  $\omega$  为振荡回路角频率，可知提高传感器动态响应带宽也就是要减小品质因数  $Q$ 。振荡电路可以等效为一阶惯性环节，其传递函数为：

$$G_1(s) = \frac{1}{\tau_0 s + 1}. \quad (10)$$

如图 12 所示，检波电路由充电回路和放电回

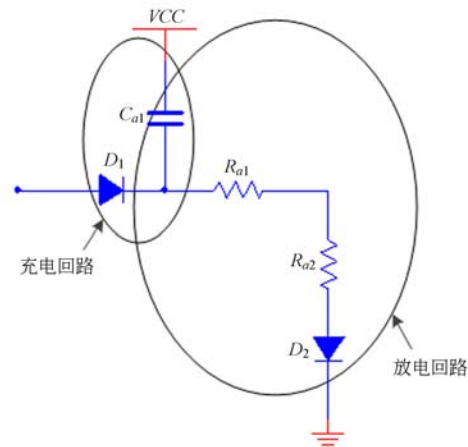


图 12 传感器检波电路图

Fig. 12 Detection circuit of sensor

路组成。充电回路由振荡电路内阻  $r$ 、检波二极管  $D_1$  的正向导通电阻  $R_{d1}$  和检波电容  $C_{d1}$  组成，放电回路由检波负载电阻  $R_{a1}$ 、 $R_{a2}$  和检波电容  $C_{d1}$  组成。检波电路靠快速充电和缓慢放电对交流信号的电压峰值进行检波，充电时间常数  $\tau_1$  和放电时间常数  $\tau_2$  可以表示为：

$$\begin{cases} \tau_1 = (R_{d1} + r) C_{d1} \\ \tau_2 = (R_{a1} + R_{a2}) C_{d1} \end{cases}. \quad (11)$$

检波电路的模型可以等效为两个串联的惯性环节，其传递函数为：

$$G_2(s) = \frac{1}{(\tau_1 s + 1)} \frac{1}{(\tau_2 s + 1)}. \quad (12)$$

将检波电路的实际参数代入式(11)中可得： $\tau_1 = 150 \text{ ns}$ ， $\tau_2 = 0.06 \text{ ms}$ 。显然， $\tau_2 \gg \tau_1$ 。由图 13 所示的检波电路频率特性曲线可知，检波电路的动态特性主要取决于放电回路的时间常数  $\tau_2$ ，即  $\tau_2$  对传感器的动态响应特性有较大影响。

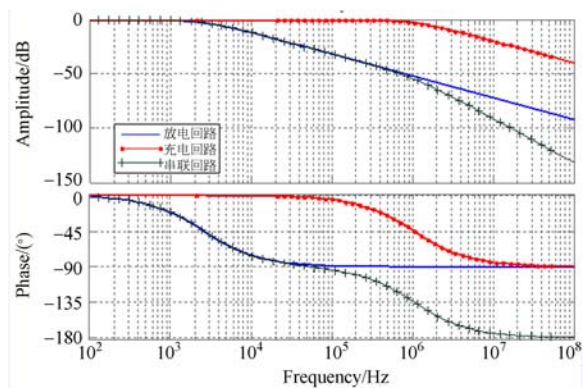


图 13 检波电路频率特性曲线

Fig. 13 Frequency characteristics of detection circuit

综上所述,该电涡流位移传感器的动态响应特性主要由振荡电路和检波电路的放电回路频率特性决定。可以用以上环节的串联来表示该电涡流位移传感器的等效传递函数:

$$G_3(s) = \frac{1}{\tau_0 s + 1} \frac{1}{\tau_2 s + 1} \quad (13)$$

### 4.2 动态特性补偿

要提高电涡流位移传感器的动态响应特性,就要降低振荡电路的品质因数或减小检波电路放电回路的时间常数。但降低振荡电路的品质因数,不仅会降低传感器的灵敏度,还会使传感器的温度稳定性变差。减小检波电路放电回路的时间常数,就要减小检波电容和检波负载电阻,这会加大传感器的纹波噪声,降低信噪比。所以这里采用超前校正的方法,使校正环节的零点位置与检波电路放电回路的传递函数极点位置相近,减小相位滞后角,有效增加传感器带宽,从而提高其动态响应带宽。校正环节的传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{T_s + 1}{\alpha T_s + 1} \quad (14)$$

式中:  $\alpha < 1$ ;  $\omega_1 = 1/T$  和  $\omega_2 = 1/(\alpha T)$  为转折频率。

由式(14)可得:

$$\angle G_c(j\omega) = \arctan \omega T - \arctan \alpha \omega T \quad (15)$$

在转折频率  $\omega_1$  和  $\omega_2$  之间存在最大超前角  $\varphi_m$ , 当  $\omega = \omega_m = 1/(\alpha^{1/2} T)$  时有:

$$\alpha = \frac{1 - \sin \varphi_m}{1 + \sin \varphi_m} \quad (16)$$

由式(16)可以看出,当  $\alpha$  很小时,  $\varphi_m$  趋近于  $90^\circ$ , 也就是说超前校正最大能提供的超前相位为  $90^\circ$ 。但超前校正使得系统高频段的幅频特性上移,如果  $\alpha$  值过小,会削弱系统抗高频干扰的能力。因此在高频干扰比较严重的情况下,  $\alpha$  不宜取得过小,还要考虑到电路物理实现的困难,最大超前角取  $40^\circ \sim 50^\circ$  为宜。取最大超前角  $\varphi_m = 50^\circ$ , 可以得到  $\alpha = 0.1325$ ,  $T = 0.00006868$  (最大相位超前角出现在  $4 \text{ kHz}$  频率点)。则可以得到所设计的超前校正环节的传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{0.00006868s + 1}{0.0000091s + 1} \quad (17)$$

图 14 所示为补偿前后传感器频率特性的对比。补偿后传感器的截止频率由  $2.49 \text{ kHz}$  增加到  $10.2 \text{ kHz}$ ;  $2.49 \text{ kHz}$  频率处滞后相角由  $56.4^\circ$  降低至  $17.5^\circ$ 。超前校正环节有效地增加了传感器的带宽,提高了传感器的动态响应特性。

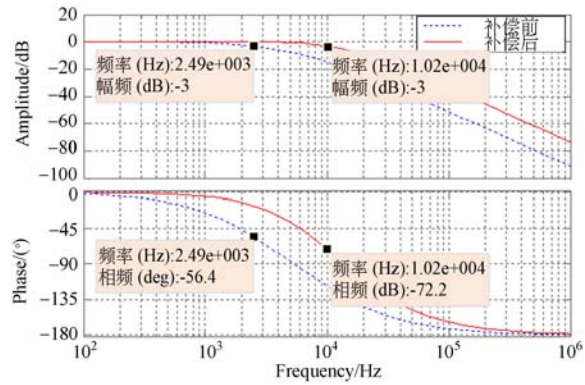


图 14 补偿前后传感器频率特性对比

Fig. 14 Comparison of frequency characteristic of sensor before and after compensation

## 5 实验研究

### 5.1 对称探头电感测试

对称探头电感测试系统如图 15 所示,该系统主要包括千分尺、基座、探头和电感测试仪。千分尺的精度为  $2 \mu\text{m}$ , 电感测试仪采用 Agilent

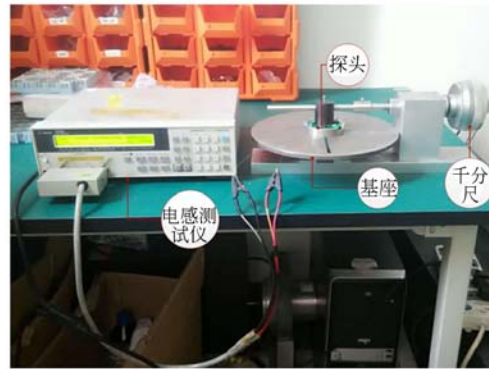


图 15 探头电感变化测试装置

Fig. 15 Experimental setup for probe inductance variation test

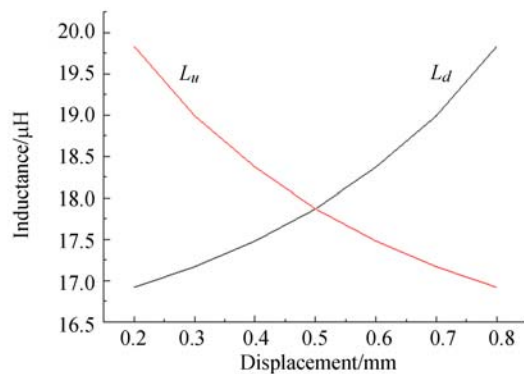


图 16 电感  $L_u$  和  $L_d$  随转子位移的变化曲线

Fig. 16  $L_u$  and  $L_d$  versus rotor displacement

4263B,测得传感器对称探头电感  $L_u$  和  $L_d$  随转子位移的变化曲线,如图 16 所示。可见  $L_u$  和  $L_d$  的变化与转子位移近似呈线性关系,并且二者的变化方向相反,与仿真结果和理论相符。

5.2 静态特性测试

静态特性测试系统如图 17 所示,该系统主要包括千分尺、基座、示波器和  $\pm 15\text{ V}$  直流电源等。千分尺的精度为  $2\ \mu\text{m}$ 。表 1 所示为利用该系统测得的传感器动态特性补偿前后在不同测量范围内的静态性能指标。可以看出,动态特性补偿电路对传感器各项静态性能指标的影响很小,且传感器各项静态性能指标均满足磁悬浮分子泵用位移传感器的要求。

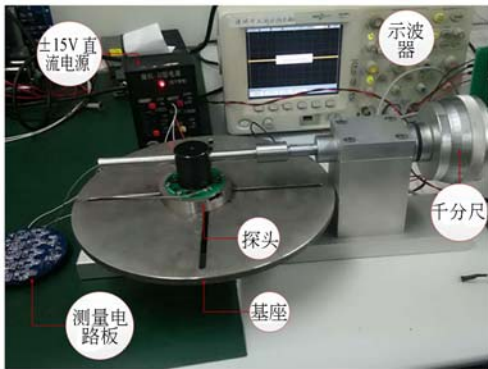


图 17 静态特性测试装置

Fig. 17 Experimental setup for static characteristic test

表 1 涡流位移传感器的静态性能指标

Tab. 1 Static performance indexes of eddy current displacement sensor

	测量范围 /mm	线性度 /%	灵敏度 /(mV · $\mu\text{m}^{-1}$ )	迟滞 /%	重复性 /%
补	-0.2~0.2	±1.02	9.920	±30	±43
偿	-0.3~0.3	±1.07	9.925	±21	±29
前	-0.4~0.4	±1.16	9.899	±18	±21
补	-0.2~0.2	±1.01	9.918	±31	±42
偿	-0.3~0.3	±1.09	9.926	±22	±29
后	-0.4~0.4	±1.17	9.901	±18	±23

5.3 动态特性测试

动态特性测试系统如图 18 所示,该系统主要由车床、动态标定盘、探头固定支架、示波器和  $\pm 15\text{ V}$  直流电源等组成。标定盘与车床相互位置的固定精度约为  $1\ \mu\text{m}$ ,车床的径向跳动量为  $0.008\ \text{mm}$ ,探头固定支架将传感器探头固定在距

离动态标定盘  $0.5\ \text{mm}$  处。车床以不同的转速旋转,输入给传感器探头不同频率的矩形波。利用该系统可获得电涡流位移传感器补偿前后的动态特性曲线,如图 19 所示。可以看出,补偿前传感器的输出电压在频率为  $6\ \text{kHz}$  时已经下降到  $2\ \text{V}$  以下,而补偿后传感器的输出电压在频率为  $6\ \text{kHz}$  时仅仅下降  $0.5\ \text{V}$ 。实验表明,采用超前校正方法有效地提高了电涡流位移传感器的动态响应。



图 18 动态特性测试装置

Fig. 18 Experimental setup for dynamic characteristic test

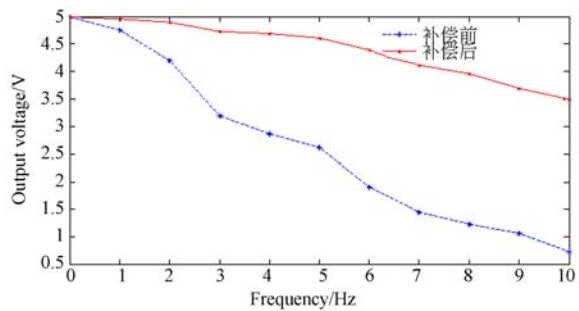


图 19 补偿前后涡流位移传感器的动态特性曲线

Fig. 19 Dynamic characteristic curve of eddy current displacement sensor before and after compensation

5.4 磁悬浮分子泵样机试验

将传感器安装在磁悬浮分子泵样机系统内进行悬浮实验,实验系统如图 20 所示。该系统主要包括示波器、 $48\ \text{V}$  直流电源、控制器、仿真器、固定台和磁悬浮分子泵等。

传感器安装在磁悬浮分子泵内部(如图 1 所示,额定转速为  $36\ 000\ \text{r/min}$ ,额定抽速为  $700\ \text{L/s}$ ),悬浮测试结果如图 21 所示。传感器 4 路径向满量程输出均为  $12.5\ \text{V/mm}$ ,4 路径向测得的转子跳动量峰峰值分别为  $120, 150, 220$  和

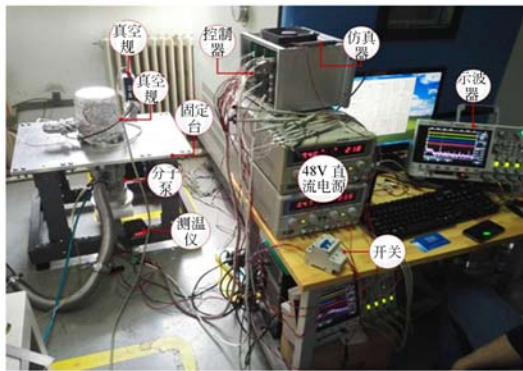


图 20 磁悬浮分子泵样机实验系统

Fig. 20 Experimental setup of maglev molecular pump

200 mV。实验结果表明,应用该电涡流位移传感器,使磁悬浮分子泵转子进行动平衡前的悬浮精度达到了  $9.6 \mu\text{m}$ ,满足磁悬浮分子泵的要求。

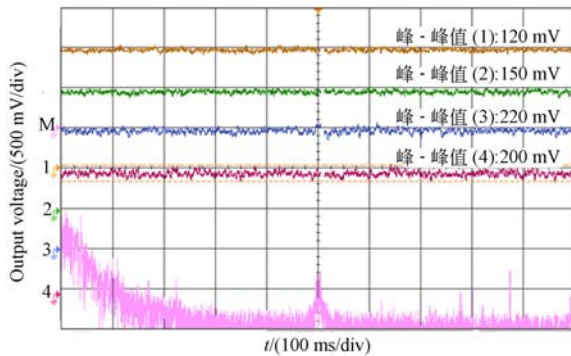


图 21 悬浮测试实验结果

Fig. 21 Experimental result of suspension test

表 2 列出了该电涡流位移传感器的关键性能参数,并与相关电涡流位移传感器进行了比较。

由表 2 可见,该传感器具有高带宽和小型化的特点,能够满足磁悬浮分子泵的要求。由于探头线圈绕线误差和线圈电感随转子位移变化的不完全线性,传感器的线性度稍差,有待于进一步改进,但该线性度已能够满足磁轴承系统的控制要求。采用该电涡流位移传感器,可使分子泵涡轮转子实现更高转速的稳定悬浮控制,进而提高磁悬浮分子泵的抽速和真空度,同时改善了磁悬浮

## 参考文献:

- [1] 韩邦成,王凯,郑世强,等. 磁悬浮高速离心式鼓风机的喘振检测[J]. 光学精密工程, 2017, 25(4): 910-918.

分子泵的热性能。

表 2 电涡流位移传感器的性能参数与比较

Tab. 2 Performance of eddy current displacement sensor and its comparison with reference sensors

性能	文献. [22]	文献. [22]	文献. [24]	文献. [20]	本文
电路板面积/ $\text{cm}^2$	$16 \times 16$	$\pi \times 8^2$			$\pi \times 4^2$
测量范围/ $\text{mm}$	0.5	0.5	3	1.5	0.8
线性度/%	$\pm 0.48$	$\pm 0.62$			$\pm 1.17$
灵敏度/ $(\text{mV} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	4.15	9.998			9.901
分辨率/%	0.6	0.4	0.1	$\sim 0.08$	0.25
带宽/ $\text{kHz}$	2.5	2.49	10	1	10.2
实现技术	恒频调幅	变频调幅	$0.6 \mu\text{m}$ CMOS	$0.35 \mu\text{m}$ BICMOS	Hartley

## 6 结 论

本文提出并分析了一种用于磁悬浮分子泵系统的自差分电涡流位移传感器。基于 Hartley 方法的振荡电路可以实现电涡流位移传感器的小型化,实验和仿真结果证明了其可行性和有效性。采用超前校正方法可在不影响传感器灵敏度和线性度等静态特性的情况下增大传感器带宽,提高传感器的动态响应特性。实验结果表明,本文所提出的电涡流位移传感器具有高带宽和小型化的特点。动态响应带宽达到了  $10.2 \text{ kHz}$ ,两径向 4 路位移信号测量集成电路板体积仅为  $\pi \times 4^2 \text{ cm}^2$ ,满足磁悬浮分子泵面向更高转速、更高抽速和更高真空度的发展需求。不过该传感器的温度稳定性和抗干扰能力有待于进一步研究。

本文提出的基于 Hartley 方法的电涡流位移传感器在高速磁悬浮旋转机械的应用领域具有可行性和有效性,对工业发展具有重要意义。

HAN B CH, WANG K, ZHENG SH Q, *et al.*.

Surge detection of magnetically suspended high-speed centrifugal blower[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4): 910-918. (in Chinese)

[2] 谢进进,刘刚,文通. 双框架磁悬浮控制力矩陀螺

- 磁轴承负载力矩复合补偿的控制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2211-2219.
- XIE J J, LIU G, WEN T. Composite compensation for load torque of active magnetic bearing in DGM-SCMG[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2211-2219. (in Chinese)
- [3] ZHENG SH Q, LI H T, HAN B CH, *et al.*. Power consumption reduction for magnetic bearing systems during torque output of control moment gyros[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(7): 5752-5759.
- [4] ZHENG SH Q, HAN B CH, GUO L. Composite hierarchical antidisturbance control for magnetic bearing system subject to multiple external disturbances[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(12): 7004-7012.
- [5] 崔培玲, 盖玉欢, 房建成, 等. 主被动磁悬浮转子的不平衡振动自适应控制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 122-131.
- CUI P L, GE Y H, FANG J CH, *et al.*. Adaptive control for unbalance vibration of active-passive hybrid magnetically suspended rotor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 122-131. (in Chinese)
- [6] 韩邦成, 薛庆昊, 刘旭. 高速磁悬浮永磁电机多物理场分析及转子损耗优化[J]. 光学精密工程, 2017, 25(3): 680-688.
- HAN B CH, XUE Q H, LIU X. Multi-physics analysis and rotor loss optimization of high-speed magnetic suspension PM machine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(3): 680-688. (in Chinese)
- [7] ZHOU L, LI L CH. Modeling and identification of a solid-core active magnetic bearing including eddy currents[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(6): 2784-2792.
- [8] MORIYA T, SUGAWARA E, MATSUI H. Observation and elimination of recoil particles from turbo molecular pumps[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2015, 28(3): 253-259.
- [9] KOBAYASHI H, MAEDA K, IZAWA M. Behavior of particles reflected by turbo molecular pump in plasma etching apparatus[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2009, 22(4): 462-467.
- [10] SUN J J, WANG CH E, LE Y. Designing and experimental verification of the axial hybrid magnetic bearing to stabilization of a magnetically suspended inertially stabilized platform [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(6): 2881-2891.
- [11] FANG J CH, ZHENG SH Q, HAN B CH. AMB vibration control for structural resonance of double-gimbal control moment gyro with high-speed magnetically suspended rotor[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(1): 32-43.
- [12] 周红海. 分子泵磁悬浮轴承结构及功率放大器设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- ZHOU H H. *Design of Magnetic Bearing Structure and Power Amplifier for Molecular Pump* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [13] CHATURVEDI V, NABAVI M R, VOGEL J, *et al.*. Demodulation techniques for self-oscillating eddy-current displacement sensor interfaces: A review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(9): 2617-2624.
- [14] NABAVI M R, NIHTIANOV S N. Design strategies for eddy-current displacement sensor systems: Review and recommendations[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(12): 3346-3355.
- [15] 刘强, 房建成, 韩邦成. 磁悬浮飞轮锁紧保护效果的检测[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 157-164.
- LIU Q, FANG J CH, HAN B CH. Detection of locking protection effect for magnetic bearing flywheel[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 157-164. (in Chinese)
- [16] VYROUBAL D. Eddy-current displacement transducer with extended linear range and automatic tuning[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(9): 3221-3231.
- [17] NABAVI M R, PERTIJS M A P, NIHTIANOV S. An interface for eddy-current displacement sensors with 15-bit resolution and 20 MHz excitation [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2013, 48(11): 2868-2881.
- [18] DEVER T P, PALAZZOLO A B, THOMAS III E M, *et al.*. Evaluation and improvement of eddy current position sensors in magnetically suspended flywheel system[C]. *36th Intersociety Conversion Engineering Conference*, NASA, 2001.
- [19] LARSONNEUR R, BÜHLER P. New radial sensor for active magnetic bearings[C]. *Proceedings of the Ninth International Symposium on Magnetic Bearings*, Lexington, Kentucky, 2004.

- [20] NABAVI M R, NIHTIANOV S. Eddy-current sensor interface for advanced industrial applications [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(9): 4414-4423.
- [21] ZHENG SH Q, WANG Y G, REN H L. Simultaneous temperature compensation and synchronous error elimination for axial displacement sensors using an auxiliary probe[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(5): 3179-3186.
- [22] 张倩. 磁悬浮飞轮用电涡流位移传感器特性分析与研究[D]. 北京: 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 2007.  
ZHANG Q. *Characteristics Study on Eddy Current Displacement Sensor for Magnetically Suspended Flywheel*[D]. Beijing: School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [23] 樊树江, 李璐, 吴峻, 等. 新型电涡流传感器的动态响应分析[J]. *传感器技术*, 2004, 23(3): 21-24.  
FAN SH J, LI L, WU J, *et al.*. Analysis on dynamic response of new eddy current sensor[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2004, 23(3): 21-24. (in Chinese)
- [24] OBERLE M, REUTEMANN R, HERTLE R, *et al.*. A 10-mW two-channel fully integrated system-on-chip for eddy-current position sensing[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2002, 37(7): 916-925.

#### 作者简介:



王 坤(1982—),男,黑龙江伊春人,博士,硕士生导师,2007年、2011年于北京航空航天大学分别获得硕士、博士学位,主要从事精密仪器与机械设计、主动磁悬浮轴承设计、高速电机设计与仿生爬壁机器人的研究。E-mail: wangkunggg@163.com



张利胜(1993—),男,河北石家庄人,硕士研究生,2015年于燕山大学获得学士学位,主要从事磁悬浮轴承控制与磁悬浮轴承用位移传感器的研究。E-mail: guitarprozls@163.com