



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 105928449 A

(43)申请公布日 2016.09.07

(21)申请号 201610278608.X

(22)申请日 2016.04.28

(71)申请人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市碑林区咸宁西路28号

(72)发明人 邵志标 郭一欣

(74)专利代理机构 西安通大专利代理有限责任公司 61200

代理人 李宏德

(51)Int.Cl.

G01B 7/02(2006.01)

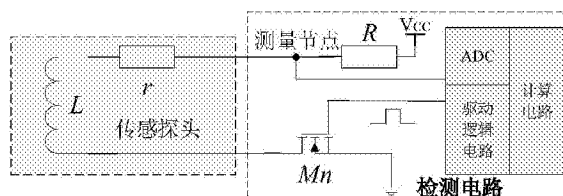
权利要求书3页 说明书10页 附图8页

(54)发明名称

一种电感式位移传感器的数据处理方法

(57)摘要

本发明提供一种电感式位移传感器的数据处理方法,能够有效降低系统的计算时间复杂度和存储空间复杂度,数据处理精确,可靠稳定。所述的电感式位移传感器由传感探头和检测电路构成;传感探头包括线圈,检测电路包括与线圈连接形成放电回路的驱动逻辑电路、开关管 Mn 和限流电阻 R ,用于采样的模数转换器,用于控制模数转换器采样获取线圈放电波形的驱动电路,以及通过对放电波形计算得到接近距离并输出的计算电路;以下内容中采用简写IPS代表电感式位移传感器,ADC代表控制模数转换器;所述方法包括如下步骤:(1)确定ADC两次采样时间常数;(2)建立高低温查找曲线;(3)建立查找表;(4)IPS在线计算接近距离。



1. 一种电感式位移传感器的数据处理方法, 所述的电感式位移传感器由传感探头和检测电路构成; 传感探头包括线圈, 检测电路包括与线圈连接形成放电回路的驱动逻辑电路、开关管Mn和限流电阻R, 用于采样的模数转换器, 用于控制模数转换器采样获取线圈放电波形的驱动电路, 以及通过对放电波形计算得到接近距离并输出的计算电路; 以下内容中采用简写IPS代表电感式位移传感器, ADC代表控制模数转换器; 其特征在于, 包括如下步骤:

(1) 确定ADC两次采样时间常数: 采用IPS数模混合测量法, 以驱动电路控制传感器线圈开始放电为 t_0 时刻, 经固定延迟到 t_1 时刻进行第一次采样, 经固定延迟到 t_2 时刻进行第二次采样; 其中 t_1 时刻为线圈放电曲线变化最显著的时刻, t_2 时刻放电电压接近放电终点电压的程度小于ADC的最小量化误差;

(2) 建立高低温查找曲线: 利用标定平台, 带动IPS在探测范围内以固定间距移动, 获取两组不同等效温度下的距离和ADC采样值的对应关系, 得到高低温查找曲线;

(3) 建立查找表: 通过高低温查找曲线计算查找表算子, 得到算子查找表, 写入IPS内;

(4) IPS在线计算接近距离: IPS工作状态中, 驱动线圈放电, 控制ADC在 t_1 时刻和 t_2 时刻进行两次采样, 获得 U_{1x} 和 U_{2x} 两个采样值; 通过采样值 U_{2x} 和内部存储的标定查找算子计算得到临时查找表; 将采样值 U_{1x} 与临时查找表进行查找和计算, 获得传感器和靶标的接近距离。

2. 如权利要求1所述的一种电感式位移传感器的数据处理方法, 其特征在于, 步骤(1)中, 使用ADC对IPS放电电路进行两次采样时, t_1 时刻和 t_2 时刻由如下优化方法得到;

根据线圈放电模型, 采样时刻测量节点电压方程如下;

$$U = \frac{V_{CC}}{R+r} \left[r + R e^{-\frac{R+r}{L}t} \right] \quad (1);$$

其中, L 是线圈电感, r 是线圈内阻, t 是放电时间, R 是限流电阻, V_{CC} 是激励电压;

将传感器线圈工作参数代入下式求出线圈放电曲线变化最显著的时刻, 即为 t_1 时刻;

$$\frac{d(U_H(t) - U_L(t))}{dt} = d \left(V_{CC} \frac{r + R e^{-\frac{R+r}{L}t}}{R+r} - V_{CC} \frac{r + R e^{-\frac{R+r}{L}t}}{R+r} \right) / dt = 0 \quad (2);$$

线圈放电至 t_2 时刻时, 放电基本结束, 即放电电压接近放电终点电压的程度小于ADC的最小量化误差; 根据下式求出 t_2 的最小值, 其中 n 是ADC的位数, 在 t_2 的最小值基础上, 留出一定工程余量, 并取整即可确定 t_2 ;

$$U(t) - U_{+\infty} = \frac{V_{CC}}{R+r} \left[r + R e^{-\frac{R+r}{L}t} \right] - \frac{V_{CC}r}{R+r} = \frac{V_{CC}R e^{-\frac{R+r}{L}t}}{R+r} < \frac{V_{CC}}{2^n} \quad (3)。$$

3. 如权利要求1所述的一种电感式位移传感器的数据处理方法, 其特征在于, 步骤(2)中, 利用标定平台, 获取两组不同等效温度下的距离和ADC采样值的对应关系, 具体步骤如下:

2.1 构建标定平台, 通过IPS支架将待标定IPS安装到标定平台上, 由标定平台控制系统通过伺服电机拖动平移台移动, 自动设定靶标与IPS之间的距离;

2.2 通过标定平台控制器, 控制平台带动IPS在探测范围内以固定间距移动, 在每个标定点上通过平台控制器, 从IPS上读取一个 U_1 的数值, 一共获得若干组标定数据; 最后记录公共的 U_2 数值, 即为一组标定曲线;

2.3在室温下保持环境温度稳定不变,通过标定平台获取低温标定曲线;在线圈放电电路中串联一个电阻,模拟温度上升,通过标定平台获取高温标定曲线;得到完整的高低温查找曲线。

4.如权利要求3所述的一种电感式位移传感器的数据处理方法,其特征在于,步骤2.1中,采用光学精密平移台,将定位误差控制在 $\pm 20\mu\text{m}$ 以内。

5.如权利要求1所述的一种电感式位移传感器的数据处理方法,其特征在于,步骤(3)中,通过高低温查找曲线计算查找表算子,并将其作为算子查找表,写入IPS内,具体步骤如下:

3.1结合标定数据,IPS工作过程中,在每个线圈放电波形上读取 U_{1x} 和 U_{2x} 两个采样值;通过下式,代入 U_{2x} 和高低温查找表,计算出对于当前温度 r 值的临时查找表:

$$U_{1Ti} = (U_{1Hi} - U_{1Li}) \frac{U_{2x} - U_{2L}}{U_{2H} - U_{2L}} + U_{1Li} \quad (4);$$

其中 $i=0,1,2,\dots,m$

3.2由如下临时查找表 U_{1Ti} 的计算公式简化上述在线计算,其中算子 A_i 和 B_i 是根据高低温查找表通过离线计算得到的常数:

$$\begin{aligned} U_{1Ti} &= U_{2x}A_i + B_i \\ A_i &= \frac{U_{1Hi} - U_{1Li}}{U_{2H} - U_{2L}} \\ B_i &= \frac{U_{2H}U_{1Li} - U_{2L}U_{1Hi}}{U_{2H} - U_{2L}} \end{aligned} \quad (5);$$

其中 $i=0,1,2,\dots,m$

3.3利用标定获取的高低温查找表,结合上式计算出算子查找表,写入IPS内。

6.如权利要求5所述的一种电感式位移传感器的数据处理方法,其特征在于,步骤(4),IPS在线计算处理的具体步骤如下:

4.1设标定点间距是 d ,一共 m 个标定点,传感器探测范围是 md ;将算子查找表和 U_{2x} 根据式(5)进行 m 次乘加,计算出临时查找表;将采样值 U_{1x} 和临时查找表进行对比,检索出接近距离的整数位 x_d mm;

4.2根据下式,利用相邻点数据进行一次插值计算,估算接近距离的小数位,获得修正后的接近距离;

$$D = d \left(x - \frac{U_{1x} - U_{1Tx}}{U_{1Tx-1} - U_{1Tx}} \right) \text{mm} \quad (6)。$$

7.如权利要求5所述的一种电感式位移传感器的数据处理方法,其特征在于,还包括对步骤(4)得到的接近距离数据进行插值误差评价和优化的步骤。

8.如权利要求7所述的一种电感式位移传感器的数据处理方法,其特征在于,采用精密电桥测量IPS在每个标定点上的电感量;通过数据处理计算该组电感量在内阻 r 为 $r_{\min}$ 和 $r_{\max}$ 时的ADC采样值,作为低温和高温标定曲线;然后选择内阻 r 为中间值时进行误差分析,计算该组电感量在内阻 r 为中间时的ADC采样值,作为理论计算值;使用式(5)求出差值计算值;将理论值和计算值求差得到插值误差曲线。

9.如权利要求8所述的一种电感式位移传感器的数据处理方法,其特征在于,当插值误差不能满足测量系统的精密或探测距离的要求时,通过增加查找表规模和计算复杂度得到更低的插值误差,以满足各种精度和距离范围的传感器需求。

10.如权利要求8所述的一种电感式位移传感器的数据处理方法,其特征在于,当插值误差不能满足工程要求时,获取除高低温以外的第三个温度的标定曲线,然后对高低温以及第三个温度进行分段插值,或将三条温度曲线数据进行三次样条插值,将插值误差降低至满足工程要求。

一种电感式位移传感器的数据处理方法

技术领域

[0001] 本发明属于传感器领域,涉及电感式位移传感器的检测方法,具体为一种电感式位移传感器的数据处理方法。

背景技术

[0002] 电感式位移传感器(Inductive Position Sensor, IPS)无需机械接触,所以具备抗污染和磨损、防爆和防水、寿命长和维护开销低、无故障工作小时数长等优点。上述优势使得IPS广泛适用于航空领域的机电系统中,包括各类航空器的起落架、客货舱门、副翼、推力反向器等。涉及的航空器类型包括大型民航客机、运输机等。

[0003] 目前航空领域使用的IPS的主要器件由两家公司提供,分别是Crane(美国)和Crouzet(法国)。他们的产品原理和内部结构相同、主要参数指标相似。传感器探头是无源线圈,其内部电路结构简单,由一组线圈绕制而成。其电感值和线圈通流能力都远小于一般工业用传感器,电感最大值不超过10mH、线圈通流不超过20mA。线圈的电感分量与其到金属靶标的间距相关。然而,由于线圈的结构和材料的影响,线圈的电阻分量随环境温度变化,制约了IPS的检测精度。所以设计IPS的驱动和检测电路,分离线圈电感分量和电阻分量,是抵消温度对测量影响,并提高测量精度的关键。

[0004] IPS的驱动和检测电路通过对传感器线圈进行激励、采样和计算,检测出IPS到目标金属物体的间距,决定了传感器性能。实现驱动和检测电路的主要方法有:模拟测量法、数字测量法和数模混合测量法。

[0005] 模拟测量法是对IPS的传感线圈施加脉冲激励后,通过对比r-L放电波形的时域特征实现对线圈电感量的测量,判别IPS附近有无目标物体接近。该方法简单可靠,是目前业界常用手段。但是由于传感器线圈电阻温漂的影响,导致测量精度低。

[0006] 数字测量法是对IPS的传感线圈施加正弦波激励,通过对电压和电流波形采样,利用傅里叶变换算法求出电压和电流相位差,通过计算分离传感线圈的电感分量和电阻分量,而电感分量直接与接近距离相关,由此抑制温漂误差。但由于数字信号处理复杂,需要微控制单元(MCU)或数字信号处理器(DSP)类过程控制部件以及大量随机存取存储器(RAM)支持,使得测量的稳定性难以提高,体积大、功耗高,在航空领域应用受限。

[0007] 数模混合测量法结合了模拟测量法和数字测量法的特点,对IPS线圈进行脉冲激励,并对其放电波形在不同时刻进行两次采样,通过模型计算,分离线圈的电感和电阻分量,抵消了温漂带来的测量误差。将两次采样值用于二维查找表检索计近距离的方法,简化了在线数据处理,无需浮点运算,无需MCU等过程控制部件。然而这种方法有如下局限性:1)查找表规模较大(通常为一万到几万个单元),需要大容量的非易失性存储器,不利于IPS的微型化。2)随着探头与靶标间距减小,IPS线圈电感量以指数级增大。导致以电感量均匀变化记录的二维查找表里有大量信息冗余,产生了存储资源浪费。3)该方法计算查找表时依赖对IPS线圈参数的精密测量,IPS里绕制线圈的生产公差通常在3%,远大于系统测量精度。生产中需要精确测量每个产品的参数,并计算该产品的专用二维查找表,不利于规模化

生产。

发明内容

[0008] 针对现有技术中存在的问题,本发明提供一种电感式位移传感器的数据处理方法,能够有效降低系统的计算时间复杂度和存储空间复杂度,数据处理精确,可靠稳定。

[0009] 本发明是通过以下技术方案来实现:

[0010] 一种电感式位移传感器的数据处理方法,所述的电感式位移传感器由传感探头和检测电路构成;传感探头包括线圈,检测电路包括与线圈连接形成放电回路的驱动逻辑电路、开关管Mn和限流电阻R,用于采样的模数转换器,用于控制模数转换器采样获取线圈放电波形的驱动电路,以及通过对放电波形计算得到接近距离并输出的计算电路;以下内容中采用简写IPS代表电感式位移传感器,ADC代表控制模数转换器;其包括如下步骤:

[0011] (1)确定ADC两次采样时间常数:采用IPS数模混合测量法,以驱动电路控制传感器线圈开始放电为 t_0 时刻,经固定延迟到 t_1 时刻进行第一次采样,经固定延迟到 t_2 时刻进行第二次采样;其中 t_1 时刻为线圈放电曲线变化最显著的时刻, t_2 时刻放电电压接近放电终点电压的程度小于ADC的最小量化误差;

[0012] (2)建立高低温查找曲线:利用标定平台,带动IPS在探测范围内以固定间距移动,获取两组不同等效温度下的距离和ADC采样值的对应关系,得到高低温查找曲线;

[0013] (3)建立查找表:通过高低温查找曲线计算查找表算子,得到算子查找表,写入IPS内;

[0014] (4)IPS在线计算接近距离:IPS工作状态中,驱动线圈放电,控制ADC在 t_1 时刻和 t_2 时刻进行两次采样,获得 U_{1x} 和 U_{2x} 两个采样值;通过采样值 U_{2x} 和内部存储的标定查找算子计算得到临时查找表;将采样值 U_{1x} 与临时查找表进行查找和计算,获得传感器和靶标的接近距离。

[0015] 优选的,步骤(1)中,使用ADC对IPS放电电路进行两次采样时, t_1 时刻和 t_2 时刻由如下优化方法得到;

[0016] 根据线圈放电模型,采样时刻测量节点电压方程如下;

$$[0017] \quad U = \frac{V_{cc}}{R+r} \left[r + R e^{-\frac{R+r}{L}t} \right] \quad (1);$$

[0018] 其中,L是线圈电感,r是线圈内阻,t是放电时间,R是限流电阻, V_{cc} 是激励电压;

[0019] 将传感器线圈工作参数代入下式求出线圈放电曲线变化最显著的时刻,即为 t_1 时刻;

$$[0020] \quad \frac{d(U_H(t) - U_L(t))}{dt} = d \left(V_{cc} \frac{r + R e^{-\frac{R+r}{L}t}}{R+r} - V_{cc} \frac{r + R e^{-\frac{R+r}{L}t}}{R+r} \right) / dt = 0 \quad (2);$$

[0021] 线圈放电至 t_2 时刻时,放电基本结束,即放电电压接近放电终点电压的程度小于ADC的最小量化误差;根据下式求出 t_2 的最小值,其中n是ADC的位数,在 t_2 的最小值基础上,留出一定工程余量,并取整即可确定 t_2 ;

$$[0022] \quad U(t)-U_{\infty} = \frac{V_{CC}}{R+r} \left[r + R e^{-\frac{R+r}{L}t} \right] - \frac{V_{CC}r}{R+r} = \frac{V_{CC}R e^{-\frac{R+r}{L}t}}{R+r} < \frac{V_{CC}}{2^n} \quad (3)。$$

[0023] 优选的,步骤(2)中,利用标定平台,获取两组不同等效温度下的距离和ADC采样值的对应关系,具体步骤如下:

[0024] 2.1构建标定平台,通过IPS支架将待标定IPS安装到标定平台上,由标定平台控制系统通过伺服电机拖动平移台移动,自动设定靶标与IPS之间的距离;

[0025] 2.2通过标定平台控制器,控制平台带动IPS在探测范围内以固定间距移动,在每个标定点上通过平台控制器,从IPS上读取一个 U_1 的数值,一共获得若干组标定数据;最后记录公共的 U_2 数值,即为一组标定曲线;

[0026] 2.3在室温下保持环境温度稳定不变,通过标定平台获取低温标定曲线;在线圈放电电路中串联一个电阻,模拟温度上升,通过标定平台获取高温标定曲线;得到完整的高低温查找曲线。

[0027] 进一步,步骤2.1中,采用光学精密平移台,将定位误差控制在 $\pm 20\mu\text{m}$ 以内。

[0028] 优选的,步骤(3)中,通过高低温查找曲线计算查找表算子,并将其作为算子查找表,写入IPS内,具体步骤如下:

[0029] 3.1结合标定数据,IPS工作过程中,在每个线圈放电波形上读取 U_{1x} 和 U_{2x} 两个采样值;通过下式,代入 U_{2x} 和高低温查找表,计算出对于当前温度 r 值的临时查找表;

$$[0030] \quad U_{1Ti} = (U_{1Hi} - U_{1Li}) \frac{U_{2x} - U_{2L}}{U_{2H} - U_{2L}} + U_{1Li} \quad (4);$$

[0031] 其中 $i=0,1,2,\dots,m$

[0032] 3.2由如下临时查找表 U_{1Ti} 的计算公式简化上述在线计算,其中算子 A_i 和 B_i 是根据高低温查找表通过离线计算得到的常数;

$$[0033] \quad \begin{aligned} U_{1Ti} &= U_{2x} A_i + B_i \\ A_i &= \frac{U_{1Hi} - U_{1Li}}{U_{2H} - U_{2L}} \\ B_i &= \frac{U_{2H} U_{1Li} - U_{2L} U_{1Hi}}{U_{2H} - U_{2L}} \end{aligned} \quad (5);$$

[0034] 其中 $i=0,1,2,\dots,m$

[0035] 3.3利用标定获取的高低温查找表,结合上式计算出算子查找表,写入IPS内。

[0036] 进一步,步骤(4),IPS在线计算处理的具体步骤如下:

[0037] 4.1设标定点间距是 d ,一共 m 个标定点,传感器探测范围是 md ;将算子查找表和 U_{2x} 根据式(5)进行 m 次乘加,计算出临时查找表;将采样值 U_{1x} 和临时查找表进行对比,检索出接近距离的整数位 x_d mm;

[0038] 4.2根据下式,利用相邻点数据进行一次插值计算,估算接近距离的小数位,获得修正后的接近距离;

[0039]

$$D = d \left(x - \frac{U_{1x} - U_{1Tx}}{U_{1Tx-1} - U_{1Tx}} \right) \text{mm} \quad (6)。$$

[0040] 再进一步,还包括对步骤(4)得到的接近距离数据进行插值误差评价和优化的步骤。

[0041] 再进一步,采用精密电桥测量IPS在每个标定点上的电感量;通过数据处理计算该组电感量在内阻 r 为 $r_{\min}$ 和 $r_{\max}$ 时的ADC采样值,作为低温和高温标定曲线;然后选择内阻 r 为中间值时进行误差分析,计算该组电感量在内阻 r 为中间时的ADC采样值,作为理论计算值;使用式(5)求出差值计算值;将理论值和计算值求差得到插值误差曲线。

[0042] 再进一步,当插值误差不能满足测量系统的精密或探测距离的要求时,通过增加查找表规模和计算复杂度得到更低的插值误差,以满足各种精度和距离范围的传感器需求。

[0043] 再进一步,当插值误差不能满足工程要求时,获取除高低温以外的第三个温度的标定曲线,然后对高低温以及第三个温度进行分段插值,或将三条温度曲线数据进行三次样条插值,将插值误差降低至满足工程要求。

[0044] 与现有技术相比,本发明具有以下有益的技术效果:

[0045] 本发明所述方法利用IPS线圈参数随距离的变化规律,针对电感式位移传感器的驱动和检测电路,将二维查找算法简化为一维查找表,对数据进行优化处理和计算,从而有效降低了系统的计算时间复杂度和存储空间复杂度。同时该方法结合标定平台直接生成查找表,消除了生产公差的影响,利于产品的规模化生产;尤其适用于以查表法进行 r - L 电路充放电曲线进行数据处理的空间和时间复杂度简化处理。利用本发明所述方法得到的电感式位移传感器原理样机和标定平台,通过广泛的温度试验,试验证明样机测量精度高达3%。

[0046] 进一步的,通过插值精度进行了详细的计算和分析,对数据进行插值误差评价和优化,提高该算法插值精度和适应范围,同时还证明可以满足实用要求。

附图说明

[0047] 图1为本发明实例中所述电感式位移传感器的结构框图。

[0048] 图2为图1中传感探头等效电路图。

[0049] 图3为图1中检测电路原理框图。

[0050] 图4为图3所示电路进行驱动和响应波形的测量图。

[0051] 图5为本发明实例中所述计算二维查找表的定义域范围。

[0052] 图6为本发明实例中得到的二维查找表。

[0053] 图7为本发明实例中所述的 t_i 的优化方法。

[0054] 图8为本发明实例中所述的函数 $U_r'(L_i, r)$ 的图像。

[0055] 图9为本发明实例中所述的函数 $U(L_i, r)$ 的图像。

[0056] 图10为本发明实例中所述的标定平台结构图。

[0057] 图11为本发明实例中所述的插值算法误差分析曲线。

[0058] 图12为本发明实例中所述的插值计算误差曲线。

[0059] 图13为本发明实例中所述的20℃时IPS的测量误差。

[0060] 图14为本发明实例中所述的50℃时IPS的测量误差。

[0061] 图15为本发明实例中所述的80℃时IPS的测量误差。

[0062] 图16为本发明实例中所述的110℃时IPS的测量误差。

具体实施方式

[0063] 下面结合具体的实施例对本发明做进一步的详细说明,所述是对本发明的解释而不是限定。

[0064] 1、传感器建模。

[0065] 本发明所涉及的电感式位移传感器(IPS)由传感探头和检测电路构成,如图1所示。传感探头是IPS的换能器,用于把传感探头距离金属靶标的距离量转换为可测量的电信号;检测电路驱动和检测传感探头的参数,通过计算得出传感探头距离金属靶标的距离。

[0066] 传感探头里包含一个用漆包线绕制的线圈,其等效电路模型如图2所示。 r 是线圈内阻; L 是线圈电感; C_p 是等效分布电容。其中内阻 r 随环境温度变化而变化;电感 L 几乎不随温度变化而变化,传感器外部有金属目标靠时,使其附近电磁场分布显著变化,线圈电感增大,所以 L 反映了探头距离金属靶标的距离。 C_p 虽然接近于常数,但是它的存在对等效电路的参数带来一定影响。对本发明选择了符合业界常规的传感探头,对其参数进行仪器测量得到。内阻 r 在室温下为 13.2Ω ,绕制线圈的漆包线材料的电阻温度系数约为4300ppm,则在传感器工作温度范围内,内阻变化范围为 8.7Ω (-55°C)到 18.6Ω (120°C); L 在1kHz的电桥激励下为4.9mH(距离靶标大于10mm)到10mH(紧贴靶标)。 C_p 在阻抗测试扫描下等效为262.7pF。由于 C_p 的阻抗远小于 L ,所以在计算中可以忽略不计。

[0067] 对模型参数测量分析可以发现,绕制线圈的漆包线材料温度系数过大,导致线圈内阻在传感器工作范围内的漂移大于40%,会对电感 L 的测量带来巨大影响。分离线圈内阻 r 和电感 L ,是获得高精度测量结果的关键。

[0068] 2、检测电路。

[0069] 设计的检测电路如图3所示。检测电路通过其驱动逻辑电路产生方波信号,方波信号的上升沿驱动开关管 M_n 开启,电流经过限流电阻 R 和线圈形成放电回路。计算电路控制ADC(数模转换器)采样获取线圈放电波形,通过计算得到接近距离并输出。

[0070] 对上述电路进行驱动和响应波形的测量如图4所示,当传感探头和靶标间距在0.5mm时和6.0mm时的放电响应波形在时域上有显著差异。对差异进行提取和计算可以获得接近距离数值。

[0071] 由于该IPS系统具有线圈电感 L 和线圈内阻 r 两个自由变量,对放电波形进行两次采样并计算可以还原两个自由变量。以放电开关 M_n 开启为 t_0 时刻,分别在 t_1 和 t_2 时刻进行两次采样获得 U_1 和 U_2 。

[0072] 其中 t_1 时刻为线圈放电曲线变化最显著的时刻,可以根据工程参数确定最优值。能够选取在不同接近距离时放电曲线变化率最大的时刻。

[0073] t_2 时刻是一个较大的延迟,此时,线圈放电几乎已经结束;放电电压接近放电终点电压的程度小于ADC的最小量化误差。

[0074] 根据模型得出约束关系如式(1)所示;

$$[0075] \quad \begin{cases} U_1 = \frac{V_{CC}}{R+r} [r + R e^{-\frac{R+r}{L} t_1}] \\ U_2 = \frac{V_{CC}}{R+r} [r + R e^{-\frac{R+r}{L} t_2}] \end{cases} \quad (1)。$$

[0076] 可以证明上述方程组中给定 (U_1, U_2) , 存在且只存在唯一解 (L, r) , 该解即为模型中线圈的电感和内阻, 其中线圈电感可以反映出传感探头到靶标的距离。式(1)虽然是超越方程组, 但可用最小二乘法求取其数值解, 如式(2)所示:

$$[0077] \quad \begin{aligned} \min: & (U_1(R+r) - V_{CC}(r + R e^{-\frac{R+r}{L} t_1}))^2 + (U_2(R+r) - V_{CC}(r + R e^{-\frac{R+r}{L} t_2}))^2 \\ \text{s.t.1:} & r > 0, L > 0 \end{aligned} \quad (2)。$$

[0078] s.t.2: t_1, t_2, R 和 V_{CC} 为常数

[0079] 3、二维查找算法。

[0080] 现有技术中有公开发表文献提出一种基于二维查找表的计算方法。

[0081] 通过式(2)求解方程的计算复杂度高, 但可通过离线计算, 建立 (U_1, U_2) 到 (L, r) 的对应关系, 获得一个二维查找表。将该表记录在IPS中, 通过查表计算求出 L 的数值, 简化了在线计算。

[0082] 根据约束关系的单调性, 使用式(3)可以求出二维查找表中 U_1 的定义域范围。

$$[0083] \quad \begin{aligned} U_{1\min} &= \frac{V_{CC}}{R+r_{\min}} [r_{\min} + R e^{-\frac{R+r_{\min}}{L_{\min}} t_1}] \\ U_{1\max} &= \frac{V_{CC}}{R+r_{\max}} [r_{\max} + R e^{-\frac{R+r_{\max}}{L_{\max}} t_1}] \end{aligned} \quad (3)$$

[0084] 可以证明对于每个采样值 U_1 , 都能确定一个 U_2 的定义域范围。根据约束关系的单调性利用式(4), 遍历 U_1 的定义域, 依次求出每个 U_1 所对应的 U_2 定义范围。最终确定 (U_1, U_2) 的定义域。

$$[0085] \quad \begin{aligned} U_{2n\min} &= V_{CC} R \frac{[\frac{U_{1n}}{V_{CC} R} (R+r_{\min}) - \frac{r_{\min}}{R}]^{t_2/t_1} + \frac{r_{\min}}{R}}{R+r_{\min}} \\ U_{2n\max} &= V_{CC} R \frac{[\frac{U_{1n}}{V_{CC} R} (R+r_{\max}) - \frac{r_{\max}}{R}]^{t_2/t_1} + \frac{r_{\max}}{R}}{R+r_{\max}} \end{aligned} \quad (4);$$

[0086] 根据仪器测量结果, 确定在温度为 -55°C 到 120°C 、接近距离为 $0\text{mm} \sim 6\text{mm}$ 时, 传感器线圈参数的工程定义域范围为 $L \in [4.5, 10.0] \text{mH}$, $r \in [8.0, 20.0] \Omega$ 。使用12位ADC采样(V_{CC} 为4095)。根据限线圈电流不大于 15mA 的限流条件确定限流电阻 R 为 300Ω 。设定 t_1 为 $11.4\mu\text{s}$ 、 t_2 为 $26.8\mu\text{s}$ 。

[0087] 结合上述常数, 计算二维查找表的定义域如图5所示, 查找表被压缩为ADC自由采样空间范围的 $1/435$, 然而仍然有38517个单元, 尺寸较大。

[0088] 将该定义域范围内的所有点, 依次代入式(2), 获得 (U_1, U_2) 关于 L 的查找表如图6所示。标定 L 与接近距离的对应关系, 将该表写入IPS, IPS在工作状态中, 进行两次采样并查找二维查找表计算接近距离。

[0089] 4、降维查找算法。

[0090] 二维查找算法降低了IPS系统的在线计算复杂度。可以使用现场可编程门阵列(FPGA)或专用集成电路(ASIC)实现系统功能,从而避免了微控制单元(MCU)的使用。然而这种方法有如下局限性:

[0091] 查找表规模较大(通常为一万到几个单元),需要大容量的非易失性存储器,不利于IPS的微型化。

[0092] 随着探头与靶标间距减小,IPS线圈电感量以指数级增大。导致以电感量均匀变化记录的二维查找表里有大量信息冗余,产生了存储资源浪费。

[0093] 该方法计算查找表时依赖对IPS线圈参数的精密测量,IPS里绕制线圈的生产公差通常在3%,远大于系统测量精度。生产中需要精确测量每个产品的参数,并计算该产品的专用二维查找表,不利于规模化生产。

[0094] 本发明所述的方法将二维查找表近似为一维查找表,并使用标定平台抵消生产公差的综合方法,能够很好的克服现有技术中存在的以上不足。

[0095] IPS线圈放电进入稳态后,测量节点的电压是个常数,且和线圈电感L无关。根据模型计算公式,将 t_2 设定为无穷大。则式(1)可以简化为式(5)。

$$[0096] \quad \begin{cases} U_1 = \frac{V_{CC}}{R+r} [r + R e^{-\frac{R+r}{L} t_1}] \\ U_2 = \frac{V_{CC} r}{R+r} \end{cases} \quad (5)$$

[0097] 进而得到

$$[0098] \quad L = - \frac{(R + \frac{U_2 R}{V_{CC} - U_2}) t_1}{\lg \left[\frac{U_1}{4095 R} (R + \frac{U_2 R}{V_{CC} - U_2}) - \frac{U_2 R}{R(V_{CC} - U_2)} \right]} \quad (6)$$

[0099] s. t: U_2 是在 $t_2 \rightarrow +\infty$ 时的采样值

[0100] 线圈放电至 t_2 时刻时,放电基本结束,即放电电压接近放电终点电压的程度小于ADC的最小量化误差。根据下式求出 t_2 的最小值,其中n是ADC的位数。在 t_2 的最小值基础上,留出一定工程余量,并取整即可确定 t_2 。

$$[0101] \quad U(t) - U_{+\infty} = \frac{V_{CC}}{R+r} [r + R e^{-\frac{R+r}{L} t}] - \frac{V_{CC} r}{R+r} = \frac{V_{CC} R e^{-\frac{R+r}{L} t}}{R+r} < \frac{V_{CC}}{2^n} \quad (7)$$

[0102] 经计算选择 t_2 时刻为250us,此时线圈放电电压与放电终点电压的插值小于0.01%(小于ADC的最小量化误差)。

[0103] 控制ADC在 t_1 和 t_2 时刻进行两次采样。可将两次采样值直接代入式(6)并计算出线圈电感量。然而计算复杂度仍然很高。可以用二维查找表简化计算。由于方程的两个变量L和r被分离,二维查找表的形式变为,每个不同的r对应的L和 U_1 的关系。如表1所示,从左到右是自由变量r的增长方向;从上到下是自由变量L的增长方向。每个r标记点,对应一个 U_2 采样值,同时对应一列 U_1 在L增长方向的采样值。

[0104] 表1:分离变量后的二维查找表结构。

		$r_{\min}$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$r_{\max}$
		$U_{2\min}$	$U_{2\min}+1$	$U_{2\min}+2$		$U_{2\max}$
[0105]	$L_{\min}$	U_{1_00}	U_{1_10}	U_{1_20}	U_{1_i0}	U_{1_y0}
	$\downarrow$	U_{1_01}	U_{1_11}	U_{1_21}	U_{1_i1}	U_{1_y1}
	$\downarrow$	U_{1_02}	U_{1_12}	U_{1_22}	U_{1_i2}	U_{1_y2}
	$\downarrow$					
	$L_{\max}$	U_{1_0x}	U_{1_1x}	U_{1_2x}	U_{1_ix}	U_{1_yx}

[0106] 由于 t_2 时刻的采样值代表放电终点电压,在放电曲线变化过程中只进行一次有效测量, t_1 可以选取在不同接近距离时放电曲线变化率最大的时刻。利用方程的单调性,满足下式的 t 是常温下线圈放电曲线变化最显著的时刻,即为 t_1 时刻。

$$[0107] \quad \frac{d(U_H(t)-U_L(t))}{dt} = d \left(V_{cc} \frac{r+Re^{\frac{R+r}{L_{\max}}t}}{R+r} - V_{cc} \frac{r+Re^{\frac{R+r}{L_{\min}}t}}{R+r} \right) / dt = 0 \quad (8)$$

[0108] 实际测量中 L 随着接近距离的减小以指数级增大,为了确保5mm间距附近的测量精度,选取 $L_{\min}$ 为4.9mH(6mm间距)、 $L_{\max}$ 为5.5mH(2mm间距)。根据限流条件 R 为300 Ω 。对应12位ADC, V_{cc} 为4095。室温下 r 为13.2 Ω 。根据以上条件求出 t_1 的优化数值为16.6 μs ,如图7所示。

[0109] 求出函数 $U(L, r)$ 关于自变量 r 的偏导数,如下式所示。在定义域范围内, t_1 为16.6 μs 时,从图8中可以看出,函数 $U_r'(L_i, r)$ 的图像接近于常数,最大累计偏差小于0.1个ADC的最小量化误差。所以函数 $U(r)$ 高度接近于直线。

$$[0110] \quad U_r'(L_i, r) = \frac{\partial U(L, r)}{\partial r} = \frac{V_{cc}(1 - \frac{Rt}{L} e^{\frac{R+r}{L}t})}{R+r} - \frac{V_{cc}(r + Re^{\frac{R+r}{L}t})}{(R+r)^2} \quad (9)$$

[0111] 结合函数 $U(L_i, r)$ 的图像可以认为,给定 L 就获得关于函数 $U(r)$ 的曲线,在定义域范围内,它近似为直线。记录直线上的两个点即可用插值算法得到直线上的其它点(如果精度不够,可扩展至三次样条插值)。如图9所示,记录 r 为8 Ω 时 L 在定义域范围内变化所对应的低温标定曲线;以及记录 r 为20 Ω 时 L 在定义域范围内变化所对应的高温标定曲线。即可用插值算法获得 r 为任意数值时 L 在定义域范围内变化所对应的临时查找表。由此,二维查找表被简化成了两个一维查找表。

[0112] 使用标定平台进行标定,可以同时排除生产公差对测量的影响。如图10所示,通过IPS支架将待标定传感器安装到标定平台上。由平台控制系统通过伺服电机拖动平台移动,自动设定靶标与IPS之间的距离。采用光学精密平移台,容易将定位误差控制在 $\pm 20\mu m$ 以内。

[0113] 为了提高生产便利性,可不通过高低温箱控制线圈内阻 r 达到两个极限状态。在室温下(r 约13.2 Ω)获取低温标定曲线;在线圈放电电路中串联一个5.1 Ω 电阻(5%精度即可)获取高温标定曲线。标定过程中环境温度要足够稳定。

[0114] 获取标定曲线的过程是,通过标定平台控制器,控制平台带动IPS在距离靶标0~6mm范围内以间距0.1mm移动。在每个标定点上通过平台控制器,从IPS上读取一个 U_1 的数值,一共获得61组标定数据。最后记录公共的 U_2 数值。得到完整的高低温查找曲线如下表所示。

[0115] 表2:高低温查找曲线表。

	U_{2L}	U_{2H}
0.0 mm	U_{1L0}	U_{1H0}
0.1 mm	U_{1L1}	U_{1H1}
0.2 mm	U_{1L2}	U_{1H2}
.....		
6.0 mm	U_{1L60}	U_{1H60}

[0117] 结合标定数据,IPS工作过程中,在每个线圈放电波形上读取 U_{1x} 和 U_{2x} 两个采样值。用下式,代入 U_{2x} 和高低温查找表,计算出对于当前温度(r 值)的临时查找表。

$$[0118] \quad U_{1Ti} = (U_{1Hi} - U_{1Li}) \frac{U_{2x} - U_{2L}}{U_{2H} - U_{2L}} + U_{1Li} \quad (10)$$

[0119] 其中 $i=0,1,2,\dots,60$

[0120] 上述计算为在线计算,可以进行简化处理。经推导得到临时查找表 U_{1Ti} 的计算公式如下,其中算子 A_i 和 B_i 是根据高低温查找表通过离线计算得到的常数。

$$[0121] \quad \begin{aligned} U_{1Ti} &= U_{2x} A_i + B_i \\ A_i &= \frac{U_{1Hi} - U_{1Li}}{U_{2H} - U_{2L}} \\ B_i &= \frac{U_{2H} U_{1Li} - U_{2L} U_{1Hi}}{U_{2H} - U_{2L}} \end{aligned} \quad (11)$$

[0122] 其中 $i=0,1,2,\dots,60$

[0123] 标定获取IPS的高低温查找表后,在标定平台系统上离线计算算子 A_i 和 B_i ,并将其作为算子查找表写入IPS内。IPS工作状态中,驱动线圈放电,控制ADC进行两次采样,获得 U_{1x} 和 U_{2x} 两个采样值。将算子查找表和 U_{2x} 根据式(11)进行61次乘加,计算出临时查找表。将采样值 U_{1x} 和临时查找表进行对比,检索出接近距离的整数位 $x \times 0.1\text{mm}$ 。如表3所示。

[0124] 表3:查找表存储、计算和检索过程。

	查找表 算子	查找表 算子	临时 查找表	U_{1x}
0.0 mm	A_0	B_0	U_{1T0}	小于 U_{1T0}
0.1 mm	A_1	B_1	U_{1T1}	小于 U_{1T1}
0.2 mm	A_2	B_2	U_{1T2}	小于 U_{1T2}
.....				小于.....
$x \times 0.1\text{ mm}$	A_x	A_x	U_{1Tx}	大于 U_{1Tx}
.....				大于.....
6.0 mm	A_{60}	B_{60}	U_{1T60}	大于 U_{1T60}

[0126] 最后根据下式,利用相邻点数据进行一次插值计算,估算接近距离的小数位,获得修正后的接近距离。

$$[0127] \quad D = 0.1 \left(x - \frac{U_{1x} - U_{1Tx}}{U_{1Tx-1} - U_{1Tx}} \right) \text{mm} \quad (12)$$

[0128] 本方法需要在IPS中记录两组61个点的一维查找表,每个检测周期进行61次乘加运算。显著降低了对硬件资源的需求。通过标定,消除了生产公差的影响。

[0129] 5、插值误差分析。

[0130] 插值误差评价分析,使用两个一维查找表代替二维查找表进行计算,是一种线性

插值的逼近算法。需要评价该算法的误差是否可以满足工程测量精度要求。

[0131] 通过标定平台带动IPS在距离靶标0~6mm范围内以间距0.1mm移动,并用精密电桥测量IPS在每个标定点上的电感量。通过数据处理计算该组电感量在内阻 r 为8 Ω 和20 Ω 时的ADC采样值,作为低温和高温标定曲线。由于插值点的误差距离标定点越远越大,选择内阻 r 为14 Ω 时进行误差分析。计算该组电感量在内阻 r 为14 Ω 时的ADC采样值,作为理论计算值。使用式(11)求出差值计算值。如图11所示,理论计算值和插值计算值曲线是重合的。从图12的插值误差曲线里可以看出,插值误差随距离变大而变大,6mm处小于20 μm 。

[0132] 6、插值误差优化。

[0133] 插值误差评价后进行差值误差优化,在差值误差无法满足工程需要的情况下对建立高低温查找曲线的步骤,建立查找表的步骤,IPS在线计算接近距离的步骤进行优化,以增加查找表规模和计算复杂度为代价换取更低的插值误差,以满足更高精度和更远距离范围的传感器需求。本例中的最大插值误差为小于20 μm ,小于IPS的标定步进0.1mm。插值误差不能随着提高ADC位数或提高标定步进而减小。对于更精密的测量系统,或者更长的探测距离,20 μm 的插值误差可能无法满足需求。可以以增加查找表规模和计算复杂度为代价换取更低的插值误差,以满足各种精度和距离范围的传感器需求。

[0134] 为了确保本方法的适应性,当插值误差不能满足工程要求候,可以进行第三条温度标定曲线,进行分段插值,从而降低插值误差。也可以将三条温度曲线数据进行三次样条插值,由此插值误差可无限降低。

[0135] 7、实验数据。

[0136] 将基于本结构和方法的IPS工程样机实施标定后,在20 $^{\circ}\text{C}$ 、50 $^{\circ}\text{C}$ 、80 $^{\circ}\text{C}$ 和110 $^{\circ}\text{C}$ 环境下分别进行精度检测。图13~16分别表示了不同温度下传感器的测量误差。试验数据说明测量误差随着环境温度的提高而变大;测量误差随着接近距离的变大而变大。该温度范围内的最大测量误差为0.18mm,达到3%的精度。

[0137] 本发明用于各类航空、航天器的起落架、客货舱门、副翼、推力反向器等系统。随着民航和军用市场的逐步开放,本发明应用广泛,具备较大的经济效益和社会效益。相比现有技术和产品,本发明具有技术优势,提高平均无故障工作小时数,可以提高非接触式位移传感器类产品及其二次开发产品的市场占有率。同时,优化查找算法,可有效降低相关控制检测系统的规模 and 成本,提高系统稳定性,有利于产品批量生产。应用前景广泛,经济效益和社会效益大。

[0138] 以上所述,仅是本发明的较佳实施例而已,并非对本发明作任何形式上的限制,虽然本发明已以较佳实施例揭露如上,然而并非用以限定本发明,任何熟悉本专业的技术人员,在不脱离本发明技术方案范围内,当可利用上述揭示的方法及技术内容作出些许的更动或修饰为等同变化的等效实施例,但凡是未脱离本发明技术方案的内容,依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与修饰,仍属于本发明技术方案的范围。

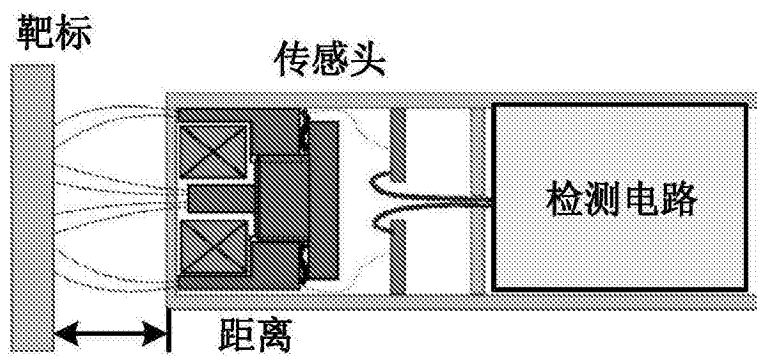


图1

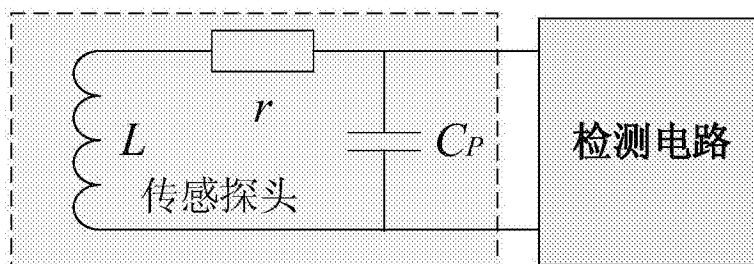


图2

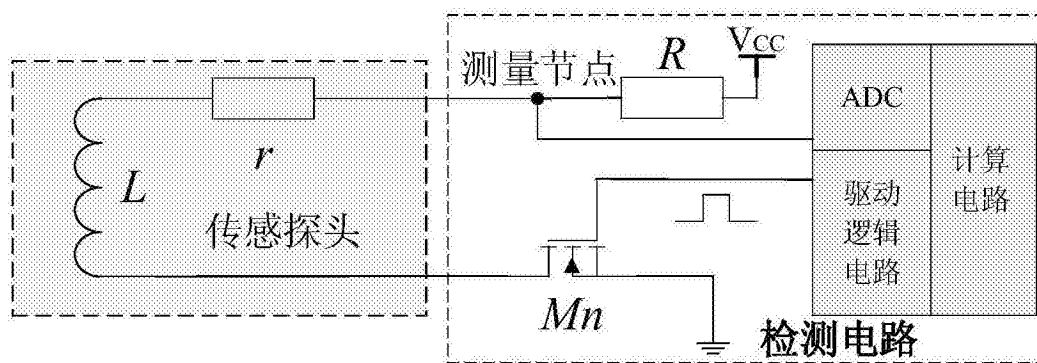


图3

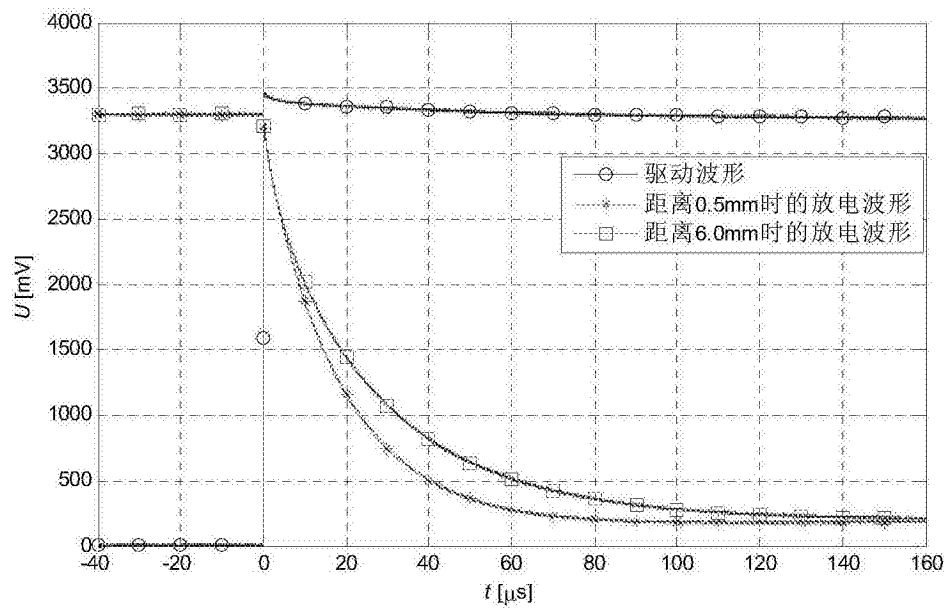


图4

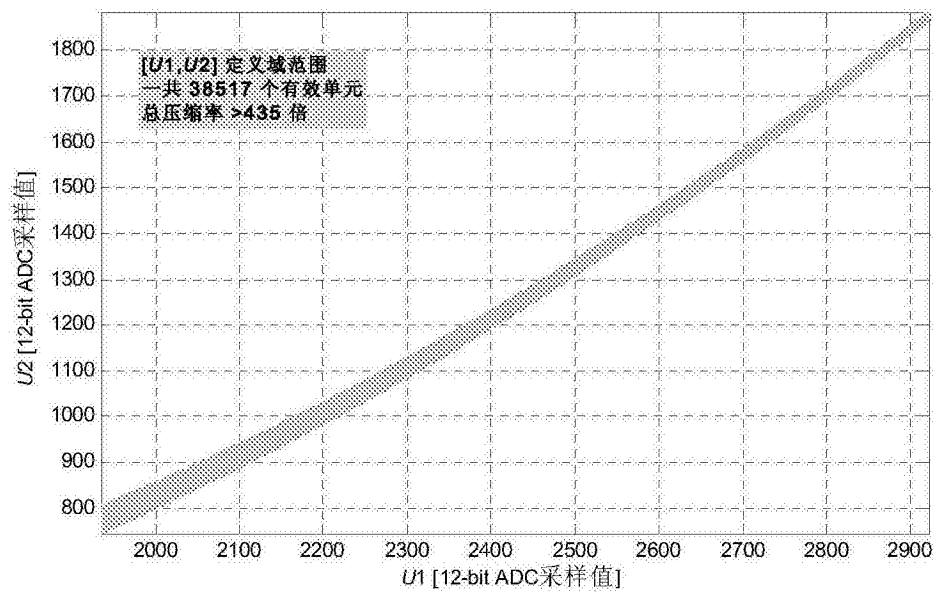


图5

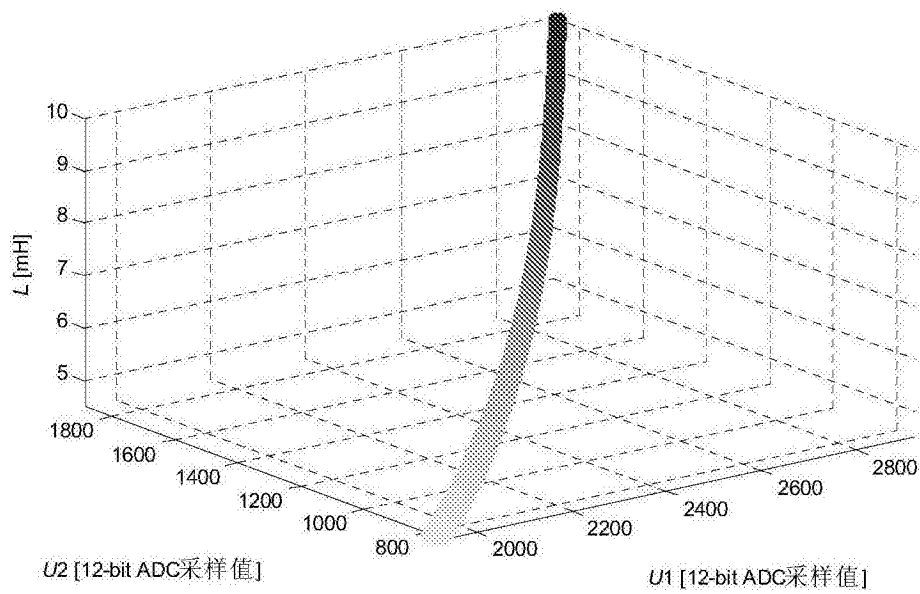


图6

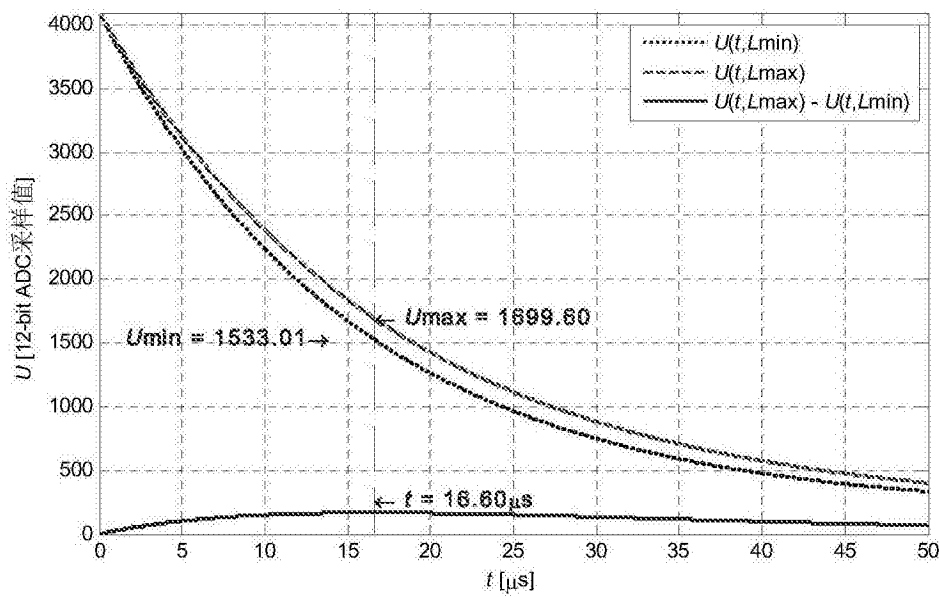


图7

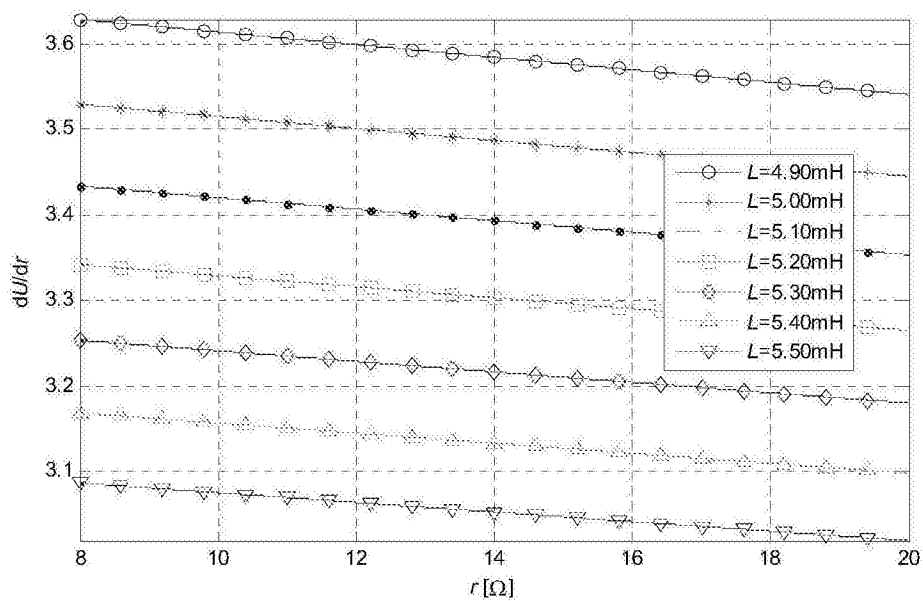


图8

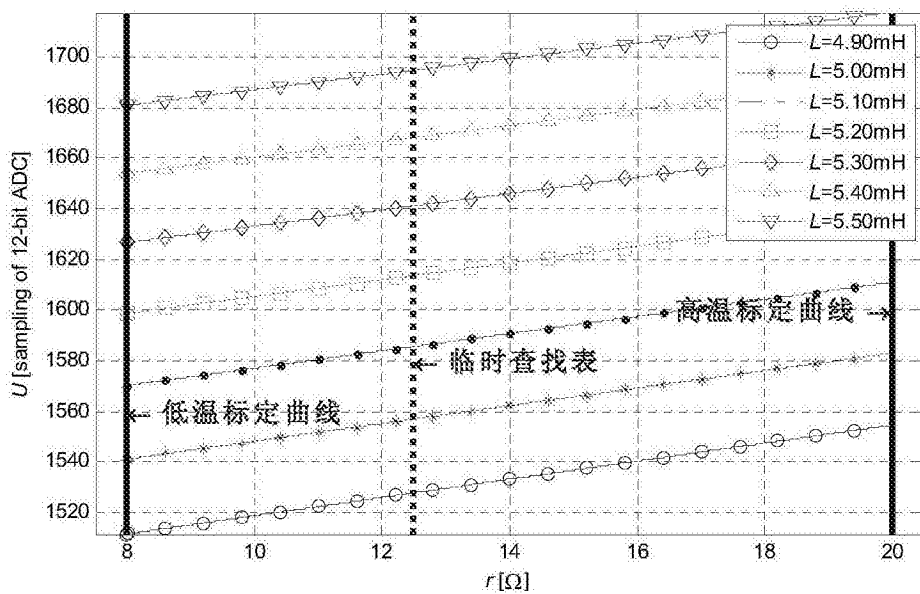


图9

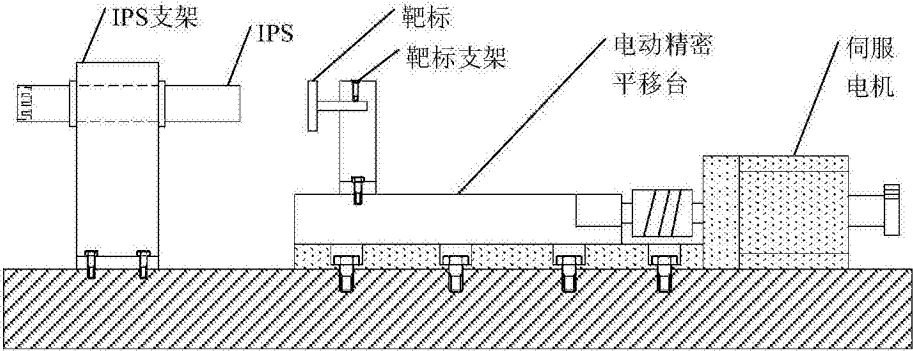


图10

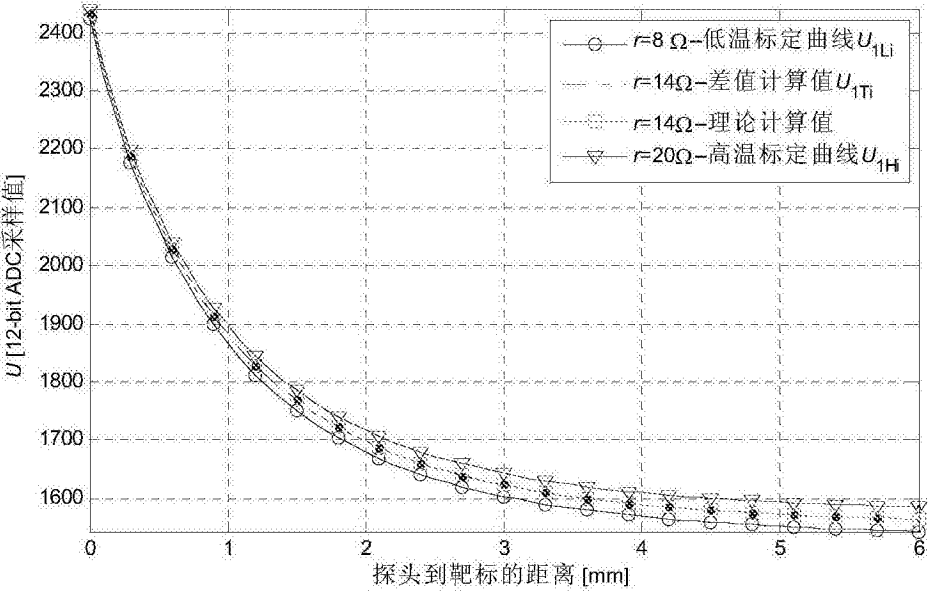


图11

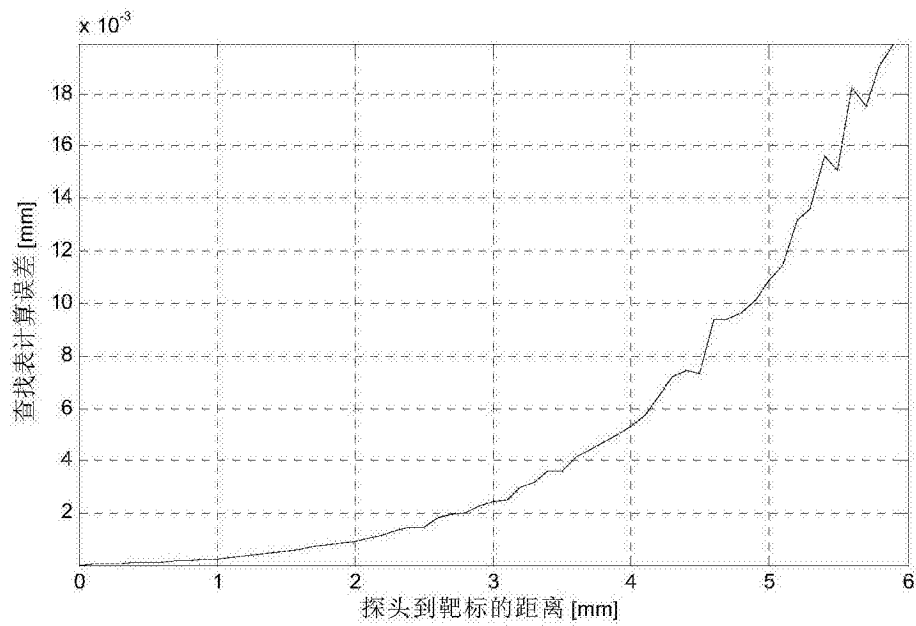


图12

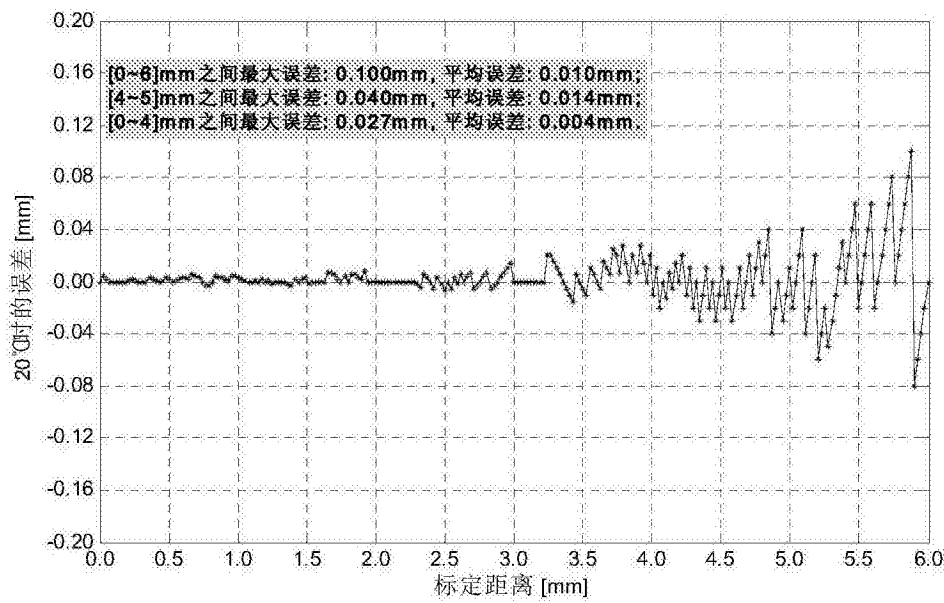


图13

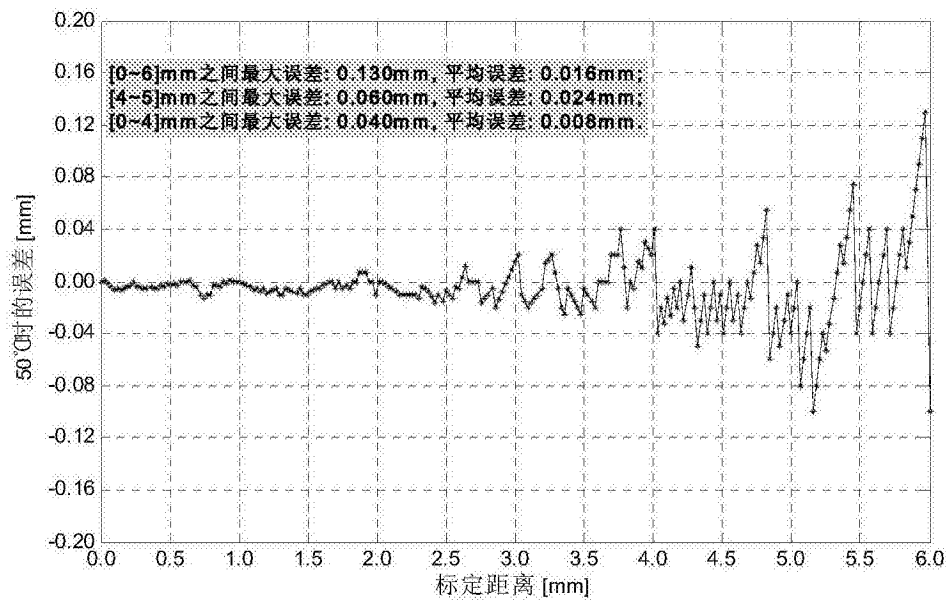


图14

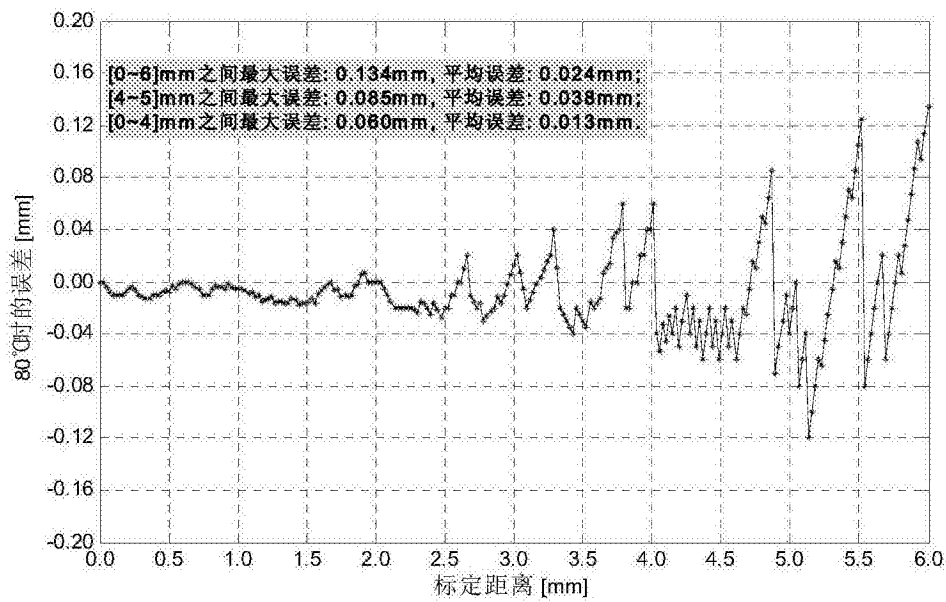


图15

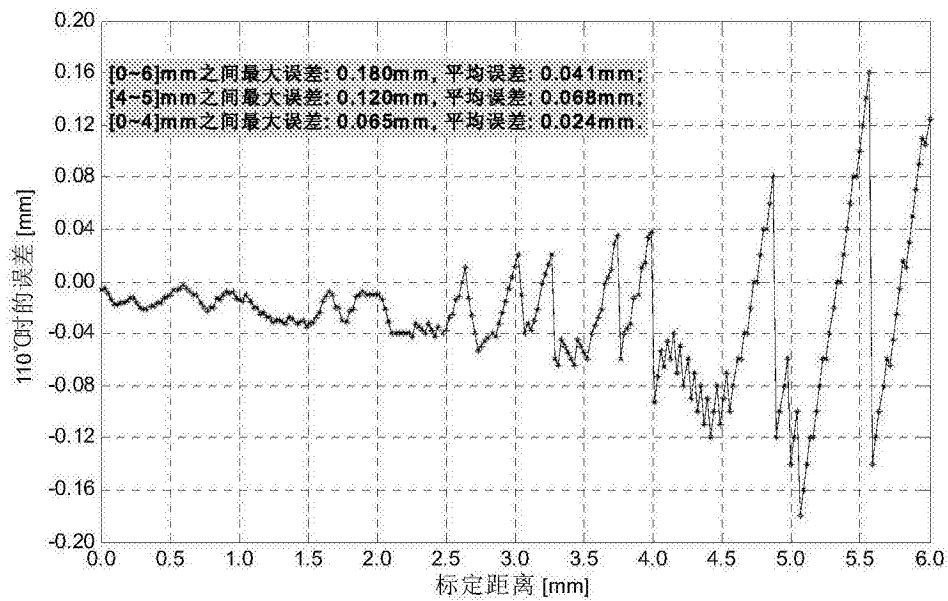


图16