DOI: 10.3901/JME.2021.20.057

体外凝血动态检测传感器装调检测误差控制方法^{*}

王哲¹ 于源华¹ 孟祥凯¹ 于占江² 孙昊³ 陈启梦³

- (1. 长春理工大学吉林省生物检测工程重点实验室 长春 130022;
2. 长春理工大学精密制造及检测技术国家地方联合工程实验室 长春 130022;
3. 长春理工大学光电测控与光电信息传输技术教育部重点实验室 长春 130022)

摘要: 针对体外凝血检测传感器装调检测误差而引起传感器精度降低的关键问题, 建立一种体外凝血动态检测传感器的装调检测误差控制方法。根据体外凝血检测传感器工作原理及结构特点, 对于传感器装调及测量中所出现的关键误差进行了分析, 通过理论分析推导了存在装调误差情况下传感器核心元件弹性支撑与机械探针装调误差与控制公式, 搭建装调误差分析控制装置, 建立消除装调误差前后传感器振幅变化关系, 采用有限元数值分析法对传感器检测位置与倾角误差进行分析, 并计算存在检测误差情况下传感器的振幅变化关系。利用本方法对体外凝血动态检测传感器装调检测误差进行消除试验, 结果表明弹性支撑装调误差、探针装调偏转误差、检测对中误差对传感器振幅影响分别为 8.263 Pa、9.56 Pa、11.28 Pa, 经计算系统总装调检测误差为 16.999 Pa, 小于体外凝血检测传感器分辨率要求的 21.85 Pa, 所以本系统的精度可以保证体外凝血检测的精度, 验证建立的体外凝血动态检测传感器的装调检测误差控制方法可以满足传感器误差分析的要求, 为完善传感器生产工艺、提高产品质量方面提供技术保障, 在提升临床凝血快速检测技术中发挥重要的作用。

关键词: 凝血检测; 传感器; 弹性支撑; 装调偏差; 误差控制

中图分类号: TH165

Error Control Method for Alignment and Detection of Extracorporeal Coagulation Dynamic Detection Sensor

WANG Zhe¹ YU Yuanhua¹ MENG Xiangkai¹ YU Zhanjiang²
SUN Hao³ CHEN Qimeng³

- (1. Key Laboratory of Biological Detection Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022;
2. National and Local Joint Engineering Laboratory for Precision Manufacturing and Testing Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022;
3. Key Laboratory of Optoelectronic Measurement, Control and Optoelectronic Information Transmission Technology Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022)

Abstract: It is necessary to establish a control method to solve the problem of reduced accuracy caused by the errors in alignment and detection of extracorporeal coagulation detection sensor. Based on the working principle and structural characteristics of the sensor, the key errors in the installation and measurement are analyzed. Through theoretical analysis, the control formula for the elastic support of the core component and the alignment error of the mechanical probe is obtained, which is used to establish the error analysis control device and explore the relationship between the sensor amplitude change before and after the elimination. The finite element numerical analysis method is applied to analyze the sensor's detection position and inclination error and calculate the relationship between the amplitude change with detection error. The results of the error elimination experiment indicate that the elastic support alignment error, probe alignment deflection error, and detection centering error have effects on the sensor amplitude of 8.263 Pa, 9.56 Pa, and 11.28 Pa, respectively. The final alignment and detection error of the system is 16.999 Pa, which is less than the 21.85 Pa required for the resolution of the extracorporeal coagulation detection sensor. Therefore, this system can ensure the accuracy

^{*} 吉林省科技发展计划资助项目(20200404180YY, 20200602050ZP)。
20210131 收到初稿, 20210607 收到修改稿

of extracorporeal coagulation detection. The proposed error control method for alignment and detection of extracorporeal coagulation dynamic detection sensor is verified to meet the requirements of sensor error analysis, provide technical support for improving sensor production technology and product quality, and play an important role in improving clinical coagulation rapid detection technology.

Key words: coagulation detection; sensor; elastic support; alignment deviation; error control

0 前言

凝血检测是临床手术、免疫疾病、心血管疾病等患者非常重要的必检项目,探索凝血全过程动态检测一直是专家学者研究热点。体外凝血动态检测传感器是体外凝血动态检测系统的重要组成部分,用于检测体外凝血全过程并生成凝血动态检测曲线,其性能高低决定了体外凝血动态检测系统的整体检测精度。本文作者在前期研制成功了电磁振动体外凝血检测传感器,该传感器采用低频微振动微位移检测方法,且设计尺寸非常小,实现了较高的工作性能。但是在后期的大量装调检测试验中,由于传感器核心元件弹性支撑与机械探针等在装调过程中存在安装误差,出现传感器检测精度不稳、数据重复性差等问题,甚至无法实现体外凝血检测功能,因此探究传感器的装调检测误差控制方法成为构建健康高效的体外凝血检测系统的关键问题之一^[1]。

目前围绕各种类型传感器装调误差分析控制方法众多,由于传感器核心元件弹性支撑应用的场合一般伴随着高频或者低频的振动,所以从测试数值分析角度很难得出其产生误差的规律,只能借助于理论分析对系统进行动力学建模,得出弹性支撑的运动规律及众多力学指标对其各部分误差进行分析。但是受机械加工工艺和材料属性等多方面影响,在实际科研生产中单纯的理论分析法本身就有局限性,如何通过试验与理论分析结合的方法来研究传感器的装调检测误差控制方法成为本领域的研究热点^[2]。

由于本文研究的体外凝血动态检测传感器各零部件是典型的孔与轴的装配形式,所以在进行装调误差分析时借鉴了光学编码器的装调误差消除方法,光学编码器是一种是由光源、光码盘和光敏元件组成通过光电转换将输出轴上的机械几何位移量转换成脉冲或数字量的传感器,以期提高传感器的装调精度。国内的张洪波等^[3]分析了安装误差对于光学编码器精度的影响,建立基准编码器与被测编码器动态标定过程中由于轴系不对中的情况下安装误差与范围的理论模型,得出安装偏角与动态检测精度的关系;于海等^[4]以光电编码器误差补偿方法

为研究对象,采用后验误差拟合算法实现了对误差模型参数的确定,提出误差补偿算法,得出采用后验误差补偿方法可以不考虑误差影响因素的大小,直接对编码器进行误差补偿。国外的 LEE 等^[5]使用谐波函数对编码器测量的误差进行建模,并使用建模的误差进行补偿,试验结果表明,误差补偿后最大误差和平均绝对误差分别减少了 1/7 和 1/12;GURAUSKIS 等^[6]基于编码器恒速测试,在不同的扫描速度下对标准光学线性编码器进行的测试误差试验,在快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)的基础上,对获得的结果进行了更详细的研究,并考虑如何提高编码器的性能;SERGIN 等^[7]采用非线性和概率扩展公式对编码器的重建误差和基于 KL 散度(Kullback-leibler, KL)的统计数进行建模,通过数值模拟研究,证明了编码器量子比特错误率低于 0.2%,通过这种方法无需对编码器进行任何有效的重新标定。

虽然上述国内外现有研究提出了不同的方法来控制各类编码器的装调检测误差,以期改善相应的测试精度,但是在本文的实际工程中,采用目前常规的编码器装调误差消除方法对于本文研究的体外凝血检测传感器仍无法准确量化其误差范围,而传感器的误差又是产品精度与稳定性不可或缺的因素,现有研究方法无法满足传感器误差分析。为此,本文根据体外凝血检测传感器工作原理及结构特点,对于传感器装调及测量中所出现的关键误差进行了分析,通过理论分析推导了存在装调误差情况下传感器核心元件弹性支撑与机械探针装调误差与控制公式,搭建装调误差分析控制装置,建立消除装调误差前后传感器振幅变化关系,采用有限元数值分析法对传感器检测位置与倾角误差进行分析,并计算存在检测误差情况下传感器的振幅变化关系。利用本方法可以在产品研发过程中有效控制体外凝血检测传感器的装调检测误差,在完善生产工艺、提高产品质量方面提供技术保障,在提升临床凝血快速检测技术中发挥重要的作用。

1 传感器技术方案及误差来源分析

1.1 凝血检测传感器技术方案

随着电磁学、传感器技术以及计算机技术的日

益进步, 体外凝血检测技术也在迅速发展, 本文研究的体外凝血检测传感器针对被测血液样本相变过程进行研究, 通过弹性支撑将通电线圈置于匀强磁场中产生测试所需的振荡运动, 考察与之相连接的机械探针元件在被测样本表面的轴向振动情况来确定被测样本的黏弹性, 通过探测血液凝固前后导致血液粘度和密度变化的动态过程, 建立电信号变化量和凝血时间的关系曲线, 评价凝血情况^[8], 具体工作原理如图 1 所示。

图 1 传感器工作原理图

本文研究的体外凝血检测传感器在外加激励信号的作用下线圈在磁极体与永磁体之间的匀强磁场中发生振荡, 驱动机械探针元件做轴向的振荡运动, 利用与之相连接的一次性探针在被测样本中做频率相同的振荡运动, 传感器对于探针的位移和速度的监测相对于线圈驱动频率都是非线性的, 并且通常在固有谐振频率处呈现明显的峰值, 该共振频率是由被测样本的黏弹性性质变化而引起的变化, 通过这种方法间接检测被测样本的粘度变化规律, 这一规律将被线圈与匀强磁场接收, 最终转换为试验所需的被测样本黏度数据。

1.2 凝血检测传感器误差来源分析及消除

分析体外凝血动态检测传感器工作原理可知, 装调检测误差对整个系统实现凝血实时动态精准测量尤为重要, 考虑凝血检测系统应用的领域为医学临床测试领域, 所以对其装调过程有很高的要求。体外凝血动态检测传感器核心部件为弹性支撑与机械探针, 且这两部分主要的配合方式为孔与轴的装配形式, 所以弹性支撑两片开槽型弹片的同轴度偏差很重要, 即弹片的配合偏差^[9]; 此外, 机械探针在装调过程中会发生不同程度的轴系不对中情况, 所以还要考虑探针装调的最大偏差角与最大装调高度差对于传感器振幅的影响; 分析整个体外凝血检测过程可知, 在进行体外凝血检测时, 传感器的探针要求侵入到检测试杯中的血液中, 所以二者的位

置误差也会对于检测结果有影响, 需要加以控制或者消除。

本文研究的体外凝血动态检测传感器测量误差指样本弹性模量测量值与真实值之间的偏差, 根据误差理论可知, 弹性模量测量时产生的测量误差, 按其性质可分为随机误差和系统误差。这里不研究随机误差, 只研究由于不满足几何条件时所产生的系统误差。

本文拟搭建的体外凝血动态检测传感系统检测与消除误差装置如图 2 所示, 主要由圆柱度仪、被检测误差工件、高精度夹具、数据采集系统、二维调整台等组成。检测装置通过高精度夹具将被测工件固定于隔振底座上, 采用圆柱度仪通过二维调整台对工件装调外形进行误差分析或者测量, 并最终经过数据采集系统计算得出结果。该装置包括 1 个轴系连结位置, 为弹性支撑与机械探针的连结, 由于二者采用环氧树脂胶进行胶粘, 所以此处刚度较大, 连结误差较小, 对于最终误差分析结果不会产生影响。为了方便分析与计算, 本文假设所有机加工件均满足加工精度要求, 只考虑装调过程中产生的误差。

图 2 系统误差检测与消除装置

2 系统装调误差分析

2.1 弹性支撑装调偏角误差分析

本文设计的弹性支撑组件是由两片开槽铍铜螺旋弹片及连接件组成, 设计方案如图 3 所示。从图 3a 传感器结构图中可以得知, 两片开槽铍铜

螺旋弹片是支撑探针的主要器件,其装调的同轴度对于系统很重要,若同轴度偏差超差将造成传感器机械探针受力不均,导致探针的运动受阻,更严重的是该偏差将导致探针的位置发生改变、倾角发生偏转,造成探针所受除血液黏弹性力以外的系统附加力,降低测试结果的准确性,同时在应力作用下传感器出现性能降低,导致精度逐渐减小,甚至无法实现体外凝血检测功能。考虑凝血检测系统应用的领域为医学临床测试领域,所以对其使用环境有很高的要求,为了避免由于测试血液间的相互污染,同时也为了传感器的整体清洁,传感器设有可更换的一次性探针,一次性探针与机械探针通过孔轴的间隙配合方式进行更换,由于其选用高分子聚合材料,本身是机械探针的延长部分,且一次性探针刚度大、长度小、内部设计有安装限位结构,所以这里不考虑一次性探针的安装偏差,理论认为一次性探针与机械探针成一体结构。

为了提高凝血检测传感器的检测精度,就必须减小弹性支撑的配合偏差,把配合偏差降到允许范围内,保证传感器的使用效率和使用寿命。根据图3b弹性支撑的结构设计结果得知,弹性支撑的配合偏差包括径向偏差、轴向偏差、轴向间距。由于轴向间距能比较直观地检测,并且轴向间距通常由加工工艺决定,所以精度要求相对较低,存在偏差的可能性很小,因此弹性支撑的同轴度误差主要以径向偏差和轴向偏差为主^[10]。

图3 传感器结构图

(1) 弹性支撑径向偏差的产生及消除。如图4所示为弹性支撑径向偏差分析图,假设A、B开槽铍铜螺旋弹片在X、Y方向上的径向偏差为 α_x 、 α_y ,在开槽铍铜螺旋弹片四个顶点1、2、3、4处的偏差定义为 α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 。由于偏差的方向是由X、Y两个方向共同决定的,所以这里定义四个顶点1、2、3、4处的偏差方向为各顶点与相应偏差点之间的连线方向。

图4 弹性支撑径向偏差分析图

由圆柱度仪测量的偏差值为 α'_1 、 α'_2 、 α'_3 、 α'_4 ,真实偏差计算值为 α'_x 、 α'_y ,由于圆柱度仪等测量仪器和测试环境都属于不确定因素,所以在测量过程中势必会产生测量附加误差值,假设系统产生的测量附加误差为 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 ,如果将测量值当真值来计算弹性支撑径向偏差时则满足

$$\begin{cases} \alpha'_y = \alpha'_1 = \alpha_1 + c_1 = \alpha_y + c_1 \\ \alpha'_x = \alpha'_2 = \alpha_2 + c_2 = \alpha_x + c_2 \end{cases} \quad (1)$$

从式(1)可以看出,通过计算得出的弹性支撑径向偏差与实际偏差之间是存在误差的,误差值为 c_1 、 c_2 。消除这个误差值的方法为将圆柱度仪保持位置不变,确保测量的误差处于定值,通过旋转圆柱度仪下方固定的高精度夹具使弹性支撑旋转过不同角度,并且依次经过高精度夹具上的 0° 、 90° 、 180° 、 270° ,与之对应的是弹性支撑的1、2、3、4处并做好标记,假设此时圆柱度仪处于A、B开槽铍铜螺旋弹片某一点上,该点处测试系统附加误差为 c ,则弹性支撑径向偏差计算数学表达式为

$$\begin{cases} \alpha'_y = \frac{\alpha'_1 - \alpha'_3}{2} = \frac{\alpha_1 + c - (\alpha_3 + c)}{2} = \frac{\alpha_1 - \alpha_3}{2} = \frac{\alpha_y - (-\alpha_y)}{2} = \alpha_y \\ \alpha'_x = \frac{\alpha'_2 - \alpha'_4}{2} = \frac{\alpha_2 + c - (\alpha_4 + c)}{2} = \frac{\alpha_2 - \alpha_4}{2} = \frac{\alpha_x - (-\alpha_x)}{2} = \alpha_x \end{cases} \quad (2)$$

从式(2)可见,弹性支撑径向偏差的计算值和测量值相等,说明通过这种方法可以消除径向偏差。

(2) 弹性支撑轴向偏差的产生及消除。假设A、B开槽铍铜螺旋弹片安装端面存在缺陷,导致两件弹片安装后不平行,给弹性支撑轴向方向增加尺寸误差,如图5所示为弹性支撑轴向偏差分析图。

图5 弹性支撑轴向偏差分析图

从图 5 可以看出, 开槽铍铜螺旋弹片实际倾斜角偏差为 θ 、 θ_x 、 θ_y , 倾角计算值为 θ' 、 θ'_x 、 θ'_y , 四个顶点 1、2、3、4 处的实际轴向偏差定义为 b_1 、

b_2 、 b_3 、 b_4 , 测量轴向偏差值为 b'_1 、 b'_2 、 b'_3 、 b'_4 , 假设在四个顶点处存在误差 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 , 则满足

$$\begin{cases} \theta'_y = \frac{b'_1 - b'_3}{d} = \frac{b_1 + c_1 - b_3 - c_3}{d} = \frac{b_1 - b_3 + c_1 - c_3}{d} = \theta_y + \frac{c_1 - c_3}{d} \\ \theta'_x = \frac{b'_2 - b'_4}{d} = \frac{b_2 + c_2 - b_4 - c_4}{d} = \frac{b_2 - b_4 + c_2 - c_4}{d} = \theta_x + \frac{c_2 - c_4}{d} \end{cases} \quad (3)$$

从式(3)可以看出, 通过计算得出的弹性支撑轴向偏差与实际偏差之间是存在误差的, 误差值为 $\frac{c_1 - c_3}{d}$ 、 $\frac{c_2 - c_4}{d}$ 。消除这个误差值的方法为将三坐标测量仪保持位置不变, 确保测量的误差处于定值, 做好标记将弹性支撑旋转过不同角度, 并且依次经过 1、2、3、4 处, 假设此时圆柱度仪处于 A、B 开槽铍铜螺旋弹片某一点上, 该点处测试系统附加误差为 c , 则弹性支撑轴向偏差计算数学表达式为

$$\begin{cases} \theta'_y = \frac{b'_1 - b'_3}{d} = \frac{b_1 + c - b_3 - c}{d} = \frac{b_1 - b_3}{d} = \theta_y \\ \theta'_x = \frac{b'_2 - b'_4}{d} = \frac{b_2 + c - b_4 - c}{d} = \frac{b_2 - b_4}{d} = \theta_x \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \theta'_y = \frac{b_1^I - b_3^I + b_3^{\text{II}} - b_1^{\text{II}}}{2d} = \frac{b_1 + c_1 + c'_1 - (b_3 + c_1 + c'_3) + (b_3 + c_2 + c'_3) - (b_1 + c_2 + c'_1)}{2d} = \frac{b_1 - b_3 + b_1 - b_3}{2d} = \frac{b_1 - b_3}{d} = \theta_y \\ \theta'_x = \frac{b_2^I - b_4^I + b_4^{\text{II}} - b_2^{\text{II}}}{2d} = \frac{b_2 + c_2 + c'_2 - (b_4 + c_2 + c'_4) + (b_1 + c_2 + c'_4) - (b_2 + c_2 + c'_2)}{2d} = \frac{b_2 - b_4 + b_2 - b_4}{2d} = \frac{b_2 - b_4}{d} = \theta_x \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)可知, 弹性支撑轴向偏差的计算值和测量值相等, 说明通过这种方法可以消除在调整轴向偏差时产生的径向窜动误差。

采用上述的消除误差方法及计算过程, 搭建如图 6 所示弹性支撑装调误差检测装置, 将弹性支撑装调误差控制在 $\alpha_x = 0.05 \text{ mm}$, $\alpha_y = 0.05 \text{ mm}$ 时, $\theta_x = 0.5^\circ$, $\theta_y = 0.5^\circ$, 此时振幅的误差为 $0.4 \mu\text{m}$ 。

图 6 弹性支撑装调偏差测试过程图

由式(4)可知, 弹性支撑轴向偏差的计算值和测量值相等, 说明通过这种方法可以消除轴向偏差。根据误差理论可知, 弹性支撑径向窜动误差仅在调整轴向偏差过程产生, 不会对于径向偏差的计算产生影响, 但是会影响到弹性支撑轴向偏差^[11]。既然有误差, 就需要消除误差, 消除误差的方法就是固定误差, 在 A、B 开槽铍铜螺旋弹片的一侧某点处安装圆柱度仪, 记为位置 I, 在另一侧对角位置记为位置 II。用圆柱度仪以位置 I 开始测量四个顶点, 测量值为 b_1^I 、 b_2^I 、 b_3^I 、 b_4^I , 另一侧的测试结果为 b_1^{II} 、 b_2^{II} 、 b_3^{II} 、 b_4^{II} , 假设在两侧产生的系统附加误差为 c_1 、 c_2 , 因消除轴向偏差产生的径向窜动误差为 c'_1 、 c'_2 、 c'_3 、 c'_4 , 则弹性支撑轴向偏差计算数学表达式为

如图 7 所示为消除弹性支撑装调误差前后传感器振幅变化关系图, 从图 7 中可以看出消除误差前后对比振动误差明显降低, 数值仿真分析后得 $\Delta E = 8.263 \text{ Pa}$ 。

(a) 存在装调误差时振幅变化关系

图 7 消除弹性支撑装调误差前后振幅变化关系图

2.2 机械探针装调误差分析

根据体外凝血动态检测传感器工作原理可知, 探针的功能有两个, 一个是侵入血液中感知凝血信号的变化, 另外一个保证电磁感应线圈处于匀强磁场中, 所以探针是传递凝血信号的唯一路径, 也是将电磁信号和凝血信号联系的桥梁, 因此探针的装调是非常重要的。根据精密机械设计理论可知, 探针的安装可以简化为轴系的安装过程, 即在安装过程中探针会发生不同程度的轴系不对中情况, 如图 8 所示。

图 8 传感器机械探针装调不对中情况

由于本文研究的凝血检测传感内部机械探针与弹性支撑是通过环氧树脂胶胶粘而成, 所以在装调中会出现机械探针平行不对中、机械探针角度不对中以及机械探针综合不对中这三种情况, 虽然探针不对中带来的探针侵入血液高度偏差对于检测没有影响, 但是对于信号传递、探针运动、传感器寿命等方面影响很大, 所以需要消除这种误差。根据课题组前期研究基础得知, 以上三种不对中的情形均可以用角度不对中来代替^[12-15], 所以本文主要分析机械探针装调角度不对中的情况。

假设圆柱度测量仪标准中轴方向为 Axe_1 , 凝血检测传感器探针的方向为 Axe_2 , 偏差角度为 α , 凝血检测传感器外壳外径为 D , 外壳边缘到圆柱度测量仪的最大距离和最小距离分别为 $d_{\max}$ 和 $d_{\min}$, 图 9 为机械探针装调示意图。

图 9 凝血检测传感器机械探针安装示意图

圆柱度测量仪标准中轴方向与凝血检测传感器探针的方向的偏差角度 α 为

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{d_{\max} - d_{\min}}{D}\right) = \arcsin\left(\frac{d}{D}\right) \quad (6)$$

式中, d 为机械探针装调的高度差。

由于本文研究的凝血检测传感器分辨力为 $0.01 \mu\text{m}$, 记为 ξ , 为了保证机械探针的垂直度误差, 需要将装调过程中的误差控制在传感器分辨力 $1/2$ 以下, 即 $\xi/2$, 则有

$$\alpha_{\max} = \arccos\left(\frac{1 - \tan\left(\frac{\xi}{2}\right)}{1 + \tan\left(\frac{\xi}{2}\right)}\right) \quad (7)$$

联立式(6)、(7)可得

$$d_{\max} = D \sin\left(\arccos\left(\frac{1 - \tan\left(\frac{\xi}{2}\right)}{1 + \tan\left(\frac{\xi}{2}\right)}\right)\right) \quad (8)$$

由式(7)和式(8)就可以计算出在凝血检测传感器分辨力为 ξ 下装调机械探针系统所允许的最大偏差角和最大装调高度差^[16-18]。消除方法采用圆柱度仪对于探针倾角进行校正, 图 10 为凝血检测传感器机械探针安装过程图, 凝血检测传感器机械探针在装调过程中需要安装在圆柱度测

量仪中。

图 10 凝血检测传感器机械探针安装过程图

经过计算, 探针装调的最大偏差角为 0.2° , 最大装调高度差为 0.5 mm 。图 11 为经过上述

图 11 消除机械探针装调偏差前后传感器振幅变化关系图

方法消除机械探针装调偏差前后传感器振幅变化关系图。经过消除误差及计算过程后, 将探针偏转误差控制在 $\alpha = 0.2^\circ$ 时, 此时振幅的误差为 $0.07 \mu\text{m}$, 对比 0.6° 时的 $0.17 \mu\text{m}$ 明显降低, 数值仿真分析后得 $\Delta E = 9.56 \text{ Pa}$ 。

3 系统检测误差分析

根据传感器的工作原理可知, 在进行体外凝血检测时, 传感器上的探针要求侵入到试杯中的血液中, 所以传感器与试杯的相对位置将会直接影响试杯内的血液分布以及探针的振动方向, 图 12 为传感器与试杯的位置误差示意图。从图 12 中可以得知, 位置误差包括对中误差 δ 和倾角误差 β , 产生这两种误差的原因主要是由于机械装调的尺寸链误差造成的^[19-22]。

图 12 传感器与试杯的位置误差示意图

由于存在血液等流体作为试验品, 无法用仪器或者技术进行位置误差确定, 所以采用有限元数值分析法进行误差分析。由于凝血是一个血液黏弹性时刻发生变化的过程, 且该过程是非线性的, 为了研究方便, 本文近似假设认为某一时刻的凝血受力情况是线性的, 正常血液弹性模量范围为 $145 \sim 850 \text{ Pa}$, 所以选取 $E=850 \text{ Pa}$ 的血液弹性峰值作为数值仿真参数。

(1) 对中误差对测量结果的影响。当弹性模量 $E=850 \text{ Pa}$ 时, 探针振幅误差与对中误差的关系曲线如图 13 所示, 回归方程可以表示为 $\Delta x = 10.58 \delta^2 + 0.36 \delta$, $R^2 = 1$, $\sigma = 2.06 \times 10^{-4}$, 从分析结果可以看出, 随着对中误差的增大探针的振幅误差也在增大, 这是由于“近壁效应”的存在, 最终弹性模量的误差也会增大。

选取 $\delta = 0.2 \text{ mm}$ 时的对中误差研究弹性模量与探针振幅的关系, 图 14 为此时的弹性模量与振幅的关系曲线。回归方程可以表示为 $E = 941.28x/(4-x)$, 与本文前期推导公式

图 13 探针振幅误差与对中误差的关系

$E = 952.38x/(4-x)$ 比较得测量误差 $E = 19.1x/(4-x)$, 误差相差 5.1%, 表明对中误差对于测量结果影响很大, 需要消除这部分误差。采用探针的装调方法, 将对中误差控制在 $\delta = 0.1 \text{ mm}$ 时, 此时振幅的误差为 $0.06 \mu\text{m}$, 对比 0.2 mm 时的 $0.14 \mu\text{m}$ 明显降低, 数值仿真分析后得 $\Delta E = 11.28 \text{ Pa}$ 。

图 14 弹性模量与探针振幅的关系 ($\delta = 0.2 \text{ mm}$)

(2) 倾角误差对测量结果的影响。当弹性模量 $E = 850 \text{ Pa}$ 时, 本文研究的凝血检测传感器探针振幅误差与倾角偏差的关系曲线如图 15 所示, 回归方程可以表示为 $\Delta x = 0.39\theta^2 - 0.15\theta$, $R^2 = 0.9979$, $\sigma = 1.03 \times 10^{-3}$, 从分析结果可以看出, 随着倾角误差的增大探针的振幅误差也在增大, 这是由于血液阻力分布不均导致的, 最终弹性模量的误差也会增大^[23-26]。

图 15 探针振幅误差与倾角误差的关系

选取 $\theta = 0.8^\circ$ 时的倾角误差研究弹性模量与探针振幅的关系, 图 16 为此时的弹性模量与振幅的关系曲线。回归方程可以表示为 $E = 951.87x/(4-x)$, 与本文前期推导公式 $E = 952.38x/(4-x)$ 比较得测量误差 $E = 0.51x/(4-x)$, 误差相差 0.012%, 表明对中误差对于测量结果影响很小, 当 $E = 850 \text{ Pa}$ 时, 数值仿真分析后得 $\Delta E = 0.008 \text{ Pa}$, 可以忽略不计。

图 16 弹性模量与探针振幅的关系 ($\theta = 0.8^\circ$)

4 系统误差合成

一般情况下, 系统误差的变化规律是明确的, 从目前的研究情况看, 按照对于系统误差的掌握情况可以将系统误差分为已定系统误差和未定系统误差。本文研究的体外凝血检测传感系统属于未定系统误差, 通常此类问题可以利用标准差等方法合成^[27-29], 表 1 给出本文各单项误差的分析结果, 本

文对于系统误差合成拟采用极限误差的合成。

表 1 凝血检测传感系统误差来源

序号	误差来源	测量误差 $\Delta E / \text{Pa}$
1	弹性支撑 x 方向径向误差	3.983
2	弹性支撑 y 方向径向误差	4.032
3	弹性支撑 x 轴向倾角误差	4.11
4	弹性支撑 y 轴向倾角误差	4.15
5	传感器机械探针倾角误差	9.56
6	传感器装调对中误差	11.28
7	传感器装调倾角误差	0.008

根据仪器精度理论, 本文研究的传感系统各单项误差大多服从正态分布或近似服从正态分布, 所以系统合成误差按照极限误差合成可以表达为

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^q (\alpha_i \delta_i)^2 + \sum_{i \leq j} \rho_{ij} \alpha_i \alpha_j \delta_i \delta_j} \quad (9)$$

式中, q 为项数; α_i 为误差传递系数; ρ_{ij} 为相关系数; $\delta_{i,j}$ 为单项误差。一般情况各个误差之间是相互独立的, 所以 $\rho_{ij} = 0$, $\alpha_i = 1$, 则式(9)可以表示为

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^q \delta_i^2} \quad (10)$$

由表 1 中数据与式(10)计算系统的总误差为 16.999 Pa。根据本文前期研究得知, 凝血检测传感系统的弹性模量与分辨力之间的数学换算公式为 $E = 694.39\sigma / (\sigma - 4)$, 其中 σ 表示传感系统的分辨力, 当血液弹性模量 $E = 850 \text{ Pa}$ 时, 代入计算得分辨力为 21.85 Pa, 经过比较本文的分析结果小于计算的分辨力, 本系统的精度可以保证体外凝血检测的精度要求。

5 结论

本文提出一种体外凝血动态检测传感器的装调检测误差控制方法。根据体外凝血检测传感器工作原理及结构特点, 对于传感器装调及测量中所出现的关键误差进行了分析, 通过理论分析推导了存在装调误差情况下传感器核心元件弹性支撑与机械探针装调误差与控制公式, 搭建装调误差分析控制装置, 建立消除装调误差前后传感器振幅变化关系, 采用有限元数值分析法对传感器检测位置与倾角误差进行分析, 并计算存在检测误差情况下传感器的振幅变化关系, 有如下结论。

(1) 将弹性支撑装调误差控制在 $\alpha_x = 0.05 \text{ mm}$, $\alpha_y = 0.05 \text{ mm}$ 时, $\theta_x = 0.5^\circ$, $\theta_y = 0.5^\circ$ 此时振幅的误差为 $0.4 \mu\text{m}$ 。从结果分析可以看出, 消除误差前后对比振动误差明显降低, 数值仿真分析后得 $\Delta E = 8.263 \text{ Pa}$ 。

(2) 将探针偏转误差控制在 $\alpha = 0.2^\circ$ 时, 此时振幅的误差为 $0.07 \mu\text{m}$, 对比 0.6° 时的 $0.17 \mu\text{m}$ 明显降低, 数值仿真分析后得 $\Delta E = 9.56 \text{ Pa}$ 。

(3) 将对中误差控制在 $\delta = 0.1 \text{ mm}$ 时, 此时振幅的误差为 $0.06 \mu\text{m}$, 对比 0.2 mm 时的 $0.14 \mu\text{m}$ 明显降低, 数值仿真分析后得 $\Delta E = 11.28 \text{ Pa}$ 。合成系统的总误差为 16.999 Pa, 小于体外凝血检测传感器分辨力要求的 21.85 Pa。

综上所述, 本系统的精度可以保证体外凝血检测的精度, 分析的数据也验证了建立的体外凝血动态检测传感器的装调检测误差控制方法可以满足传感器误差分析的要求, 同时也为提升此类传感器的研制工艺提供核心技术。此外, 本文提出的误差控制方法还可以应用于其他精密仪器中关于孔与轴的装调及优化设计。

参 考 文 献

- [1] RASHID M F A, TIWARI A, HUTABARAT W. Integrated optimization of mixed-model assembly sequence planning and line balancing using multi-objective discrete particle swarm optimization[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing, 2019, 33(3): 1-14.
- [2] HADDOCK C, CRAWFORD B, FOX W, et al. Slotted rotatable target assembly and systematic error analysis for a search for long range spin dependent interactions from exotic vector boson exchange using neutron spin rotation[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A, 2018, 885(21): 105-113.
- [3] 张洪波, 万秋华, 王树洁, 等. 小型编码器动态精度检测的安装误差控制[J]. 光学精密工程, 2016, 24(7): 1655-1660.
ZHANG Hongbo, WAN Qiuhua, WANG Shujie, et al. Installation error control for dynamic accuracy detection of small encoders[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(7): 1655-1660.
- [4] 于海, 万秋华, 赵长海, 等. 图像式光电编码器高分辨力细分算法及误差分析[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 205-214.
YU Hai, WAN Qiuhua, ZHAO Changhai, et al.

- High-resolution subdivision algorithm and error analysis of image-based photoelectric encoder[J]. *Acta Optics*, 2017, 37(3): 205-214.
- [5] LEE Kyungmin, GU Taehyeong, BANG Youngbong. Measurement and compensation of errors in absolute encoder using dual absolute encoder system[J]. *Microsystem Technologies*, 2020, 26: 1-15.
- [6] GURAUSKIS D, ARTURAS K, BORODINAS S. Experimental investigation of linear encoder's subdivisional errors under different scanning speeds[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(5): 234-240.
- [7] SERGIN N, YAN H. High-dimensional nonlinear profile monitoring based on deep probabilistic autoencoders[J]. 2019, 15(1): 1233-1240.
- [8] 王哲, 于源华, 于占江, 等. 电磁振动式凝血过程动态测试传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(1): 127-135. WANG Zhe, YU Yuanhua, YU Zhanjiang, et al. Electromagnetic vibration type dynamic test sensor for coagulation process[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(1): 127-135.
- [9] WU Yanquan, ZHANG Chunbo, ZHOU Jun, et al. Analysis of the microstructure and mechanical properties during Inertia friction welding of the near- α TA19 titanium alloy[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 33(6): 215-227.
- [10] 肖鑫, 汤宝平, 邓蕾, 等. 机械振动无线传感器网络跨层同步采集累积误差控制方法[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(15): 202-207. XIAO Xin, TANG Baoping, DENG Lei, et al. Cross-layer synchronous acquisition cumulative error control method for mechanical vibration wireless sensor network[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(15): 202-207.
- [11] ALSHAHBOUNI T, ALI G. Designing and modeling u-notch fatigue sensor to predict the fatigue life of structural components science direct[J]. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019, 22(2): 405-415.
- [12] 张磊, 黄传辉, 朱恩旭, 等. 基于数据驱动建模的钣金装配过程误差分析[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(10): 34-41. ZHANG Lei, HUANG Chuanhui, ZHU Enxu, et al. Error analysis of sheet metal assembly process based on data-driven modeling[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(10): 34-41.
- [13] 贾康, 洪军, 张银行. 一种拉刀螺旋容屑槽前刀面磨削砂轮安装位姿计算方法[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(11): 205-214. JIA Kang, HONG Jun, ZHANG Yinhang. A method for calculating the installation position of the grinding wheel of the broach spiral chip flute rake face[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(11): 205-214.
- [14] 王哲, 陈启梦, 孟祥凯, 等. 基于弹性支撑式体外凝血检测传感器疲劳极限寿命评估方法[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 15(1): 1-10. WANG Zhe, CHEN Qimeng, MENG Xiangkai, et al. Fatigue limit life assessment method based on elastically supported extracorporeal coagulation detection sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 15(1): 1-10.
- [15] LI Qianqian, LI Shiyang, WU Peng, et al. Investigation on reduction of pressure fluctuation for a double-suction centrifugal pump[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 34(1): 192-209.
- [16] GAO Jie, XIAO Mi, ZHANG Yan, et al. A comprehensive review of isogeometric topology optimization: Methods, applications and prospects[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 33(6): 34-47.
- [17] 郭红壮, 宫平, 王哲, 等. 尿白蛋白与尿肌酐比值的检测关键技术的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(2): 155-161. GUO Hongzhuang, GONG Ping, WANG Zhe, et al. Research on the key technology of detecting the ratio of urine albumin to urine creatinine[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(2): 155-161.
- [18] LIU Jinguo, LIU Yuwang, HAO Guangbo. Special issue on reconfigurable robots[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 33(5): 11-13.
- [19] 冯明, 杜德渝, 王新杰, 等. 精密主轴回转误差和刚度测试技术研究[J]. *机械工程学报*, 2021, 10(4): 1-8. FENG Ming, DU Deyu, WANG Xinjie, et al. Research on measurement technology of precision spindle rotation error and stiffness[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 10(4): 1-8.
- [20] ZHAO Pengyuan, LIU Jinguo, WU Chenchen, et al. Novel surface design of deployable reflector antenna based on polar scissor structures[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 33(5): 14-28.
- [21] 席翔, 肖定邦, 李微, 等. 微半球振动陀螺的装配误差

- 分析与精密微调机构设计[J]. 机械工程学报, 2020, 56(13): 77-83.
- XI Xiang, XIAO Dingbang, LI Wei, et al. Assembly error analysis and precision fine-tuning mechanism design of micro-hemispheric vibrating gyroscope[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(13): 77-83.
- [22] VARZHITSKII L A, CHERTYKOVTSOVA N V, TARASOV E M. Improvement and possibilities of application of calibration methods for optoelectronic vibration displacement sensor[J]. Measurement Techniques, 2021, 63(9): 1-9.
- [23] SHAHBAZTABAR A, ARTESHYAR K. Buckling analysis of functionally graded plates partially resting on elastic foundation using the differential quadrature element method[J]. Acta Mechanica Sonica, 2019, 35(1): 174-189.
- [24] DING H, LU Z Q, CHEN L Q. Nonlinear isolation of transverse vibration of pre-pressure beams[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 442: 738-751.
- [25] MICHAELS T C T, KUSTERS R, DEAR A J, et al. Geometric localization in supported elastic struts[J]. Proceedings of Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2019, 475: 2229.
- [26] 刘骥, 刘书田, 高仁璟, 等. 基于压电悬臂梁的驱动器与传感器性能分析的精确解析模型[J]. 光学精密工程, 2018, 26(2): 380-387.
- LIU Ji, LIU Shutian, GAO Renjing, et al. An accurate analytical model for performance analysis of actuators and sensors based on piezoelectric cantilever beams[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(2): 380-387.
- [27] 苏于东, 魏勇, 吴萍, 等. 阶跃折射率多模光纤包层等离子体共振传感器[J]. 光学精密工程, 2019, 27(12): 2525-2533.
- SU Yudong, WEI Yong, WU Ping, et al. Step index multimode fiber cladding plasmon resonance sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(12): 2525-2533.
- [28] 周畅祎, 胡海峰, 杨拥民, 等. 无参考传感器叶端定时叶片同步振动参数辨识方法研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(13): 64-71.
- ZHOU Changyi, HU Haifeng, YANG Yongmin, et al. Research on identification method of synchronous vibration parameters of blade tip timing without reference sensor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(13): 64-71.
- [29] ALSHAHBOUNI T, ALI G. Designing and modeling U-notch fatigue sensor to predict the fatigue life of structural components ScienceDirect[J]. Engineering Science and Technology, 2019, 22(2): 405-415.
-
- 作者简介: 王哲, 男, 1988 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为光机电一体化产品仿真与优化设计、生物医学传感技术。
E-mail: wz@cust.edu.cn
- 于源华, 女, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为光机电一体化医疗仪器研究与开发。
E-mail: yuyuanhua8888@126.com
- 陈启梦(通信作者), 女, 1989 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为精密仪器结构设计。
E-mail: qmchen1989@163.com