



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112649130 B

(45) 授权公告日 2022.03.08

(21) 申请号 202011595912.X

US 4555955 A,1985.12.03

(22) 申请日 2020.12.29

IN 201641021502 A,2017.12.29

JP 2020202980 A,2020.12.24

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 112649130 A

高德东.柔性针穿刺软组织变形机理及动态轨迹规划方法研究.《中国优秀博硕士学位论文全文数据库(博士)医药卫生科技辑》.2017,(第06期),E060-11.

(43) 申请公布日 2021.04.13

(73) 专利权人 上海海事大学

地址 201306 上海市浦东新区海港大道1550号

Jushiddi, MG 等.Simulation of biopsy bevel-tipped needle insertion into soft-gel.《COMPUTERS IN BIOLOGY AND MEDICINE》.2019,第111卷正文第1-10页.

(72) 发明人 王尧 薛玉坤 梅潇

Wang Y等.Experimental study of the optimum puncture pattern of robot-assisted needle insertion into hyperelastic materials.《PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART H-JOURNAL OF ENGINEERING IN MEDICINE》.2020,第235卷(第1期),正文第1-16页.

(51) Int.Cl.

G01L 1/22 (2006.01)

G01L 5/00 (2006.01)

审查员 曹义军

(56) 对比文件

CN 101482436 A,2009.07.15

CN 108775981 A,2018.11.09

CN 101487748 A,2009.07.22

US 2011288405 A1,2011.11.24

US 2016030240 A1,2016.02.04

US 2019365489 A1,2019.12.05

US 2020015796 A1,2020.01.16

权利要求书4页 说明书7页 附图5页

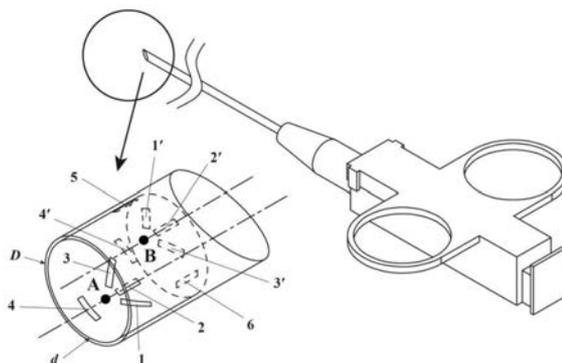
(54) 发明名称

一种医用穿刺活检针界面交互力学性能一体化测试方法

于穿刺活检针,准确全面的获取穿刺过程界面交互动态力学性能,有利于穿刺机器人核心技术突破等研究。

(57) 摘要

本发明提供了一种医用穿刺活检针界面交互力学性能一体化测试方法,包括有若干个电阻应变片的贴片位置与布片方式,其针尖端部A点和斜面端部B点分别粘贴三枚应变片构成的45°直角应变花,轴向方向应变片旁侧粘贴相应周向温度补偿片,同一横向切面沿周向方向120°均布粘贴另两枚应变片构成等边三角形;穿刺活检针穿刺过程中界面交互力学性能测试及表征方法含主应力及主方向、弯矩、扭矩、偏移量;各表征方法对应电阻应变片的接桥方式。本发明将参数表征与信号控制电路进行一体化设计,具备易于实现、临床应用价值高等优点,可灵活方便集成



1. 一种医用穿刺活检针界面交互力学性能一体化测试方法,其特征在於它包括有若干个电阻应变片的贴片位置与布片方式,穿刺活检针穿刺过程中界面交互力学性能测试及表征方法,各表征方法对应电阻应变片的接桥方式;其中:

所述若干个电阻应变片的贴片位置与布片方式指应变花I粘贴于穿刺活检针的针头针尖端部A点轴线方向的圆弧面上,其三枚应变片1、2、3构成45°直角应变花;应变花II粘贴于穿刺活检针的针头斜面端部B点轴线方向的圆弧面上,其三枚应变片3'、2'、1',与A点应变花I依次对应,也构成45°直角应变花;应变片4、4'为温度补偿片,分别沿周向粘贴在应变片2、2'的旁侧,用作消除温度变化的影响;应变片5、6与应变片2在同一横向切面上沿周向方向120°均布粘贴,三个应变片中心点在横切面上构成等边三角形,其外心法线的偏移角用作偏移量计算;

所述穿刺活检针穿刺过程中界面交互力学性能测试包括主应力及主方向、弯矩、扭矩、偏移量,其表征方法为:

i、主应力及主方向:

针头针尖端部A点处于平面应力状态,若在xy平面内,沿xy方向的应变分别为 $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ ,切应变为 $\gamma_{xy}$ ,根据应变分析,沿与x轴成 $\alpha$ 角的方向n,从x到n的逆时针的 $\alpha$ 为正,线应变 $\varepsilon_\alpha$ 为:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos(2\alpha) - \frac{1}{2} \gamma_{xy} \sin(2\alpha) \quad (1)$$

$\varepsilon_\alpha$ 随 $\alpha$ 的变化而变化,在两个相互垂直主方向上的极值为主应变 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ :

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{array} \right\} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\gamma_{xy})^2} \quad (2)$$

两个相互垂直的主方向 $\alpha_0$ 为:

$$\tan(2\alpha_0) = -\frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \quad (3)$$

应变花I的三枚应变片1、2、3分别对应角度-45°、0°、45°,穿刺活检针穿刺过程中,实测时沿三个方向的应变可直接测定,代入式(1),可得:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{0^\circ}, \varepsilon_y = \varepsilon_{45^\circ} + \varepsilon_{-45^\circ} - \varepsilon_{0^\circ}, \gamma_{xy} = \varepsilon_{-45^\circ} - \varepsilon_{45^\circ} \quad (4)$$

将式(4)代入式(2),可得:

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{array} \right\} = \frac{\varepsilon_{-45^\circ} + \varepsilon_{45^\circ}}{2} \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_{-45^\circ} - \varepsilon_{0^\circ})^2 + (\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{0^\circ})^2} \quad (5)$$

穿刺活检针的弹性模量为E、泊松比为 $\mu$ ,根据广义胡克定律,可求得A点的主应力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) \\ \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1) \end{array} \right. \quad (6)$$

将式(4)代入式(3),可得:

$$\tan(2\alpha_0) = \frac{\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{-45^\circ}}{2\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{-45^\circ} - \varepsilon_{45^\circ}} \quad (7)$$

由式(7)求解得到相差 $\pi/2$ 的两个 $\alpha_0$ ,即可确定两个相互垂直的主方向,根据应变圆可知:

当 $\varepsilon_x > \varepsilon_y$ 时,则由x轴起,绝对值较小的 $\alpha_0$ 确定主应力 $\sigma_1$ 的方向;反之,当 $\varepsilon_x < \varepsilon_y$ 时,则由x轴起,绝对值较小的 $\alpha_0$ 确定主应力 $\sigma_2$ 的方向;

ii、弯矩:

针头斜面端部B点的应变花II,与针头针尖端部A点的应变花I依次对应,两点沿x轴方向只有因弯曲引起的拉伸和压缩应变,且两者数值相等、符号相反,由应变片4、4'测定的温度应变为 $\varepsilon_T$ ,则A点应变片2与B点应变片2'的应变差值 $\varepsilon_r$ 为:

$$\varepsilon_r = (\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_T) - (-\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_T) = 2\varepsilon_{0^\circ} \quad (8)$$

根据应力应变关系,由式(8)求得最大弯曲应力 $\sigma$ 为:

$$\sigma = E\varepsilon_{0^\circ} = \frac{E\varepsilon_r}{2} \quad (9)$$

穿刺活检针的几何参数为外径D、内径d、截面惯性矩I,则在弯矩M作用下,最大弯曲应力 $\sigma$ 还可由下式求得:

$$\sigma = \frac{M \cdot D}{2I} = \frac{32M \cdot D}{\pi(D^4 - d^4)} \quad (10)$$

联立式(9)和式(10),可求得弯矩M为:

$$M = \frac{E\pi(D^4 - d^4)}{64D} \varepsilon_r \quad (11)$$

iii、扭矩:

当仅考虑穿刺活检针承受扭矩时,针头针尖端部A点的应变片1、3以及针头斜面端部B点的应变片3'、1'都沿主应力方向;又由于主应力 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 数值相等、符号相反,四枚应变片的应变绝对值相同,且应变片1、1'、应变片3、3'的应变同号,则应变差值 $\varepsilon_r$ 为:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{(1)} - \varepsilon_{(3)} + \varepsilon_{(1')} - \varepsilon_{(3')} = 4\varepsilon_1 \quad (12)$$

式(12)中的 $\varepsilon_1$ 为扭转时的主应变,根据广义胡克定律,可得主应力 $\sigma_1$ 为:

$$\sigma_1 = \frac{E}{4(1+\mu)} \varepsilon_r \quad (13)$$

此时,在扭矩T作用下,主应力 $\sigma_1$ 与切应力 $\tau$ 相等,故:

$$\sigma_1 = \tau = \frac{16T \cdot D}{\pi(D^4 - d^4)} \quad (14)$$

联立式(13)和式(14),可求得扭矩T为:

$$T = \frac{\pi E(D^4 - d^4)}{64D(1+\mu)} \varepsilon_r \quad (15)$$

式(15)虽然是仅承受扭转情况,但当在四枚应变片中增加弯曲引起的应变时,代入后将会相互抵消,仍然得出式(12),所以上述扭矩表征方法同样适用于弯扭组合的情况;

iv、偏移量:

应变片5、6与应变片2均布粘贴,分别为标记点H、N、M,构成等边三角形,穿刺手术过程中的对应测定应变分别为 $\varepsilon_{(5)}$ 、 $\varepsilon_{(6)}$ 、 $\varepsilon_{(2)}$ ,三角形外心o法线沿初始进针方向的偏移角为 $0^\circ$ ,

外心 $o$ 与各标记点的距离为半径 $r$ ,等于穿刺活检针内径 $d$ 的一半,当进针深度为 $h$ 、无偏转时,各标记点对应标注为 $H'$ 、 $N'$ 、 $M'$ ,三角形外心为 $o'$ ,仍构成等边三角形,而考虑偏转时,各标记点对应标注为 $H''$ 、 $N''$ 、 $M''$ ,三角形外心为 $o''$ ,此时,圆弧 $oo''$ 的弧长为 $h$ ,根据圆几何关系,可得圆弧 $oo''$ 所在圆半径 $R$ 为:

$$R = \frac{h}{2\theta} \quad (16)$$

穿刺过程任意时刻的外心法线偏移角 $\theta$ 与偏移量 $\delta$ 的关系为:

$$\delta = 2R \sin^2 \theta = \frac{h \sin^2 \theta}{\theta} \quad (17)$$

在初始进针点位置建立直角坐标系,进针方向为 $Z$ 轴, $X$ 轴、 $Y$ 轴满足笛卡尔坐标系,则各标记点和外心( $M$ 、 $H$ 、 $N$ 、 $o$ )坐标为:

$$\begin{cases} o & [ 0 & 0 & 0 ] \\ M & [ r & 0 & 0 ] \\ H & [ -\frac{r}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2}r & 0 ] \\ N & [ -\frac{r}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2}r & 0 ] \end{cases} \quad (18)$$

当进针深度为 $h$ 、无偏转时,各标记点和外心( $M'$ 、 $H'$ 、 $N'$ 、 $o'$ )坐标为:

$$\begin{cases} o' & [ 0 & 0 & h ] \\ M' & [ r & 0 & h ] \\ H' & [ -\frac{r}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2}r & h ] \\ N' & [ -\frac{r}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2}r & h ] \end{cases} \quad (19)$$

无论是刚性、还是半刚性、亦或是柔性穿刺活检针,其偏转时,各标记点构成的三角形外心将始终在其针轴线上,且根据对应各应变片的布片方式,在标距 $l$ 上的各应变变量可认为是沿外心法向量的变化量,则考虑偏转时,各标记点和外心( $M''$ 、 $H''$ 、 $N''$ 、 $o''$ )坐标为:

$$\begin{cases} o'' & [ \delta & 0 & \delta \cot \theta ] \\ M'' & [ \delta + r \cos \theta + \varepsilon_{(2)} l \sin 2\theta & 0 & \delta \cot \theta - r \sin \theta + \varepsilon_{(2)} l \cos 2\theta ] \\ H'' & [ \delta - \frac{r}{2} \cos \theta + \varepsilon_{(5)} l \sin 2\theta & -\frac{\sqrt{3}}{2}r & \delta \cot \theta + \frac{r}{2} \sin \theta + \varepsilon_{(5)} l \cos 2\theta ] \\ N'' & [ \delta - \frac{r}{2} \cos \theta + \varepsilon_{(6)} l \sin 2\theta & \frac{\sqrt{3}}{2}r & \delta \cot \theta + \frac{r}{2} \sin \theta + \varepsilon_{(6)} l \cos 2\theta ] \end{cases} \quad (20)$$

根据式(20)可求得 $H''N''$ 的中点 $F$ 的坐标为:

$$F [ \delta - \frac{r}{2} \cos \theta + \frac{l \sin 2\theta}{2} (\varepsilon_{(5)} + \varepsilon_{(6)}) \quad 0 \quad \delta \cot \theta + \frac{r}{2} \sin \theta + \frac{l \cos 2\theta}{2} (\varepsilon_{(5)} + \varepsilon_{(6)}) ] \quad (21)$$

向量 $o''F$ 的坐标为:

$$o''F = [ -\frac{r}{2} \cos \theta + \frac{l \sin 2\theta}{2} (\varepsilon_{(5)} + \varepsilon_{(6)}) \quad 0 \quad \frac{r}{2} \sin \theta + \frac{l \cos 2\theta}{2} (\varepsilon_{(5)} + \varepsilon_{(6)}) ] \quad (22)$$

向量 $o''M''$ 的坐标为:

$$o''M'' = [r \cos \theta + \varepsilon_{(2)} l \sin 2\theta \quad 0 \quad -r \sin \theta + \varepsilon_{(2)} l \cos 2\theta] \quad (23)$$

实际临床活体或体外穿刺试验表明,穿刺活检针的偏转角度不超过 $5^\circ$ ,故 $\tan \theta \approx \sin \theta \approx \theta$ ,且偏转后的三角形 $H''M''N''$ 仍为等腰三角形,即向量 $o''F$ 与向量 $o''M''$ 为共线向量,两向量对应坐标成比例关系:

$$\frac{-r \cos \theta + l \sin 2\theta(\varepsilon_{(5)} + \varepsilon_{(6)})}{r \cos \theta + \varepsilon_{(2)} l \sin 2\theta} = \frac{r \sin \theta + l \cos 2\theta(\varepsilon_{(5)} + \varepsilon_{(6)})}{-r \sin \theta + \varepsilon_{(2)} l \cos 2\theta} \quad (24)$$

根据三角函数的二倍角公式,化简式(24)可得:

$$\frac{2l\theta(\varepsilon_{(5)} + \varepsilon_{(6)}) - r}{r + 2\varepsilon_{(2)}l\theta} = \frac{r\theta + l(1 - 2\theta^2)(\varepsilon_{(5)} + \varepsilon_{(6)})}{-r\theta + \varepsilon_{(2)}l(1 - 2\theta^2)} \quad (25)$$

式(25)理论上没有表达式解,借助MATLAB求解可得:

$$\begin{aligned} & \text{root}(4l\varepsilon_{(2)}\varepsilon_{(6)}m^3 + 4l\varepsilon_{(2)}\varepsilon_{(5)}m^3 + 4\varepsilon_{(2)}rm^2 - \varepsilon_{(2)}r + \varepsilon_{(6)}r + \varepsilon_{(5)}r, m, 1), \\ & \text{root}(4l\varepsilon_{(2)}\varepsilon_{(6)}m^3 + 4l\varepsilon_{(2)}\varepsilon_{(5)}m^3 + 4\varepsilon_{(2)}rm^2 - \varepsilon_{(2)}r + \varepsilon_{(6)}r + \varepsilon_{(5)}r, m, 2), \\ & \text{root}(4l\varepsilon_{(2)}\varepsilon_{(6)}m^3 + 4l\varepsilon_{(2)}\varepsilon_{(5)}m^3 + 4\varepsilon_{(2)}rm^2 - \varepsilon_{(2)}r + \varepsilon_{(6)}r + \varepsilon_{(5)}r, m, 3), \end{aligned}$$

式(25)方程的根,即偏移角 $\theta$ 就是root函数里 $m=1, 2, 3$ 的根,代入式(17),即可计算得到穿刺过程任意时刻穿刺针针头偏移量 $\delta$ ;

所述各表征方法对应电阻应变片的接桥方式是:主应力和主方向测试表征时将应变花的三个应变片分别接在应变参数测试仪的三个不同通道端子上,且每个通道上各个接桥点所对应的端口与桥路电压节点相同,桥路为半桥连接,温度补偿片为公共补偿方式;弯矩测试表征时将A点和B点沿轴线x向的两个应变片按半桥双臂组成接桥方式;扭矩测试表征时将A点和B点沿轴线呈 $45^\circ$ 的四个应变片按全桥相邻臂组成接桥方式;偏移量测试表征时将 $120^\circ$ 均布的三个应变片分别接在应变参数测试仪的三个不同通道端子上,且每个通道上各个接桥点所对应的端口与桥路电压节点相同,桥路为半桥连接,温度补偿片为公共补偿方式。

## 一种医用穿刺活检针界面交互力学性能一体化测试方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于医工交叉技术领域,涉及传感器设计及应用,具体地,涉及一种医用穿刺活检针界面交互力学性能一体化测试方法。

### 背景技术

[0002] 甲状腺结节、肺结节等是近年来危害人体健康且病变发生率持续走高的疾病,其中恶性甲状腺结节,即甲状腺癌,已成为发病率第三的恶性肿瘤疾病,且在女性中已成为头号杀手;恶性肺结节,即肺癌,已成为世界上发病率和死亡率最高的癌症之一。随着体检知识的普及以及低剂量CT的广泛应用,使得人们对健康的要求与日俱增,甲状腺或肺结节的早期诊断、筛查和临床治疗具有重要意义。到目前为止,由于影像学、生物学标志物等检查很难确定甲状腺或肺结节性质,穿刺活检仍是临床应用上确诊结节良恶性或肿瘤病理组织的金标准。由于肺或甲状腺器官含有丰富的神经、血管,以及毗邻一些关键组织、其它器官等,人工穿刺不仅精度难以保证,对医生经验的依赖性也较强,而且并发症发生率、严重程度均较高,这使得机器人辅助穿刺技术成为国内外迫切需要解决的研究热点之一。

[0003] 虽然机器人辅助穿刺技术在甲状腺、前列腺、肺、肝、肾和脊髓等病灶生物组织上进行取样活检、局部麻醉、药物放置、消融治疗等方面已取得了重大的进步,但并不成熟,高/超高穿刺精度与高效低成本仍是机器人辅助穿刺技术走向完全成熟所追求的目标。追本溯源,机器人辅助穿刺介入手术过程蕴含着复杂的生物力学规律,准确解释其界面交互力学机理是该技术成为一项完全成熟技术的关键与难点。与此同时,穿刺过程中的界面交互力学性能分析能够提供反馈信息,是实现穿刺路径精准闭环控制的基础。因此实时准确获取穿刺过程中生物组织与穿刺活检针的界面交互动态力学性能,对于提高穿刺精确度、增加手术安全性和可靠性、探索全自动控制等,具有重要的科学价值与实际意义。

[0004] 通常配置夹具的穿刺活检针,安装在穿刺手术机器人的末端,中间连接有力传感器。经检索,目前对穿刺过程界面交互力学性能的测试,主要包括穿刺力和针尖偏移量2个参数。其中穿刺力测试可通过力传感器获得;而对针尖偏移量的测试,大多是特定对象、有条件、有限,如Y.Wang等在2020年《Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine》期刊发表的题为《Experimental study of the optimum puncture pattern of robot-assisted needle insertion into hyperelastic materials》论文中,涉及针尖偏移量的测试,通过制备临床整形手术用的高透明人造皮肤试样,基于数字图像处理方法开发了一个MATLAB程序来分析捕获视频图像,用于测试每个实验过程中的针尖偏移量;P.Li等在2015年《Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials》期刊发表的题为《Biomaterial characteristics and application of silicone rubber and PVA hydrogels mimicked in organ groups for prostate brachytherapy》论文中,涉及人造组织位移量的测试,通过制备透明PVA水凝胶和硅胶来分别代替人的前列腺组织和肌肉,采用CCD相机和标记参考点,对人造组织各参考点的位移量进行了分析,间接研究了针尖偏移量。

[0005] 进一步对公开文献分析,发现存在以下问题,1. 穿刺力的测试仅表征了穿刺活检针夹具端部的受力,并不能完全等同于穿刺活检针本身的力学行为;2. 针尖偏移量的测试,首先依赖制备人造组织的物理力学性能是否等同于人体组织,其次是需要借助数字图像处理方法或帧对比才能获得特定对象的穿刺过程针尖偏移量;3. 人体组织器官是不透明的,完全依靠医学影像技术不现实,也不提倡,且鲜有文献关注穿刺过程的实时界面交互力学性能测试;4. 从实践和伦理意义上可知实际临床实验所遇到的困难是显而易见的,离体实验多大程度上可以替代活体实验是值得商榷的,当然,使用动物组织替代人类组织亦是如此。

[0006] 此外,穿刺手术机器人的核心技术,如机器人定位精度、稳定性、故障率等指标,主要集中在美欧日等发达国家,我国虽在相应产品的研发方面取得了一些阶段性研究成果,但与国外的研究差距仍然较大,基本处于跟跑阶段,仅有少数产品处于并跑或领跑阶段。

### 发明内容

[0007] 针对现有技术中的缺陷,本发明的目的是提供一种医用穿刺活检针界面交互力学性能一体化测试方法,适合于开展经皮穿刺介入手术过程中穿刺活检针实时界面交互力学性能表征,便于对界面交互力学机理及穿刺精度、主动控制、全自动控制等进行研究,既有助于提升我国穿刺手术机器人的产品质量,又可增加手术安全性和可靠性,提高经皮穿刺介入手术的临床普及度。

[0008] 本发明是这样实现的:如图1所示,其特征在于包括有若干个电阻应变片的贴片位置与布片方式,穿刺活检针穿刺过程中界面交互力学性能测试及表征方法,各表征方法对应电阻应变片的接桥方式。

[0009] 所述若干个电阻应变片的贴片位置与布片方式,如图2、3、4、5所示,指应变花(I)粘贴于穿刺活检针的针头针尖端部A点轴线方向的圆弧面上,其三枚应变片(1、2、3)构成45°直角应变花;应变花(II)粘贴于穿刺活检针的针头斜面端部B点轴线方向的圆弧面上,其三枚应变片(3'、2'、1'),与A点应变花(I)依次对应,也构成45°直角应变花;应变片(4、4')为温度补偿片,分别沿周向粘贴在应变片(2、2')的旁侧,用作消除温度变化的影响;应变片(5、6)与应变片(2)在同一横向切面上沿周向方向120°均布粘贴,三个应变片中心点在横切面上构成等边三角形,其外心法线的偏移角用作偏移量计算。

[0010] 所述穿刺活检针穿刺过程中界面交互力学性能测试包括主应力及主方向、弯矩、扭矩、偏移量等,其表征方法为:

[0011] i、主应力及主方向:

[0012] 针头针尖端部A点处于平面应力状态,若在xy平面内,如图3所示,沿xy方向的应变分别为 $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ ,切应变为 $\gamma_{xy}$ ,根据应变分析,沿与x轴成 $\alpha$ 角的方向n(从x到n的逆时针的 $\alpha$ 为正)线应变 $\varepsilon_\alpha$ 为:

$$[0013] \quad \varepsilon_\alpha = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos(2\alpha) - \frac{1}{2} \gamma_{xy} \sin(2\alpha) \quad (1)$$

[0014]  $\varepsilon_\alpha$ 随 $\alpha$ 的变化而变化,在两个相互垂直主方向上的极值为主应变( $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ ):

$$[0015] \quad \left. \begin{array}{l} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{array} \right\} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\gamma_{xy})^2} \quad (2)$$

[0016] 两个相互垂直的主方向 $\alpha_0$ 为:

$$[0017] \quad \tan(2\alpha_0) = -\frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \quad (3)$$

[0018] 应变花(I)的三枚应变片(1、2、3)分别对应角度 $-45^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ , 穿刺活检针穿刺过程中, 实测时沿三个方向的应变可直接测定, 代入式(1), 可得:

$$[0019] \quad \varepsilon_x = \varepsilon_{0^\circ}, \varepsilon_y = \varepsilon_{45^\circ} + \varepsilon_{-45^\circ} - \varepsilon_{0^\circ}, \gamma_{xy} = \varepsilon_{-45^\circ} - \varepsilon_{45^\circ} \quad (4)$$

[0020] 将式(4)代入式(2), 可得:

$$[0021] \quad \left. \begin{array}{l} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{array} \right\} = \frac{\varepsilon_{-45^\circ} + \varepsilon_{45^\circ}}{2} \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_{-45^\circ} - \varepsilon_{0^\circ})^2 + (\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{0^\circ})^2} \quad (5)$$

[0022] 穿刺活检针的弹性模量为 $E$ 、泊松比为 $\mu$ , 根据广义胡克定律, 可求得A点的主应力 $(\sigma_1, \sigma_2)$ :

$$[0023] \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) \\ \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1) \end{array} \right. \quad (6)$$

[0024] 将式(4)代入式(3), 可得:

$$[0025] \quad \tan(2\alpha_0) = \frac{\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{-45^\circ}}{2\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{-45^\circ} - \varepsilon_{45^\circ}} \quad (7)$$

[0026] 由式(7)求解得到相差 $\pi/2$ 的两个 $\alpha_0$ , 即可确定两个相互垂直的主方向, 根据应变圆可知: 当 $\varepsilon_x > \varepsilon_y$ 时, 则由x轴起, 绝对值较小的 $\alpha_0$ 确定主应力 $\sigma_1$ 的方向; 反之, 当 $\varepsilon_x < \varepsilon_y$ 时, 则由x轴起, 绝对值较小的 $\alpha_0$ 确定主应力 $\sigma_2$ 的方向。

[0027] ii、弯矩:

[0028] 针头斜面端部B点的应变花(II), 如图4所示, 与针头针尖端部A点的应变花(I)依次对应, 如图3所示, 两点沿x轴方向只有因弯曲引起的拉伸和压缩应变, 且两者数值相等、符号相反, 由应变片(4、4')测定的温度应变为 $\varepsilon_T$ , 则A点应变片(2)与B点应变片(2')的应变差值 $\varepsilon_r$ 为:

$$[0029] \quad \varepsilon_r = (\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_T) - (-\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_T) = 2\varepsilon_{0^\circ} \quad (8)$$

[0030] 根据应力应变关系, 由式(8)求得最大弯曲应力 $\sigma$ 为:

$$[0031] \quad \sigma = E\varepsilon_{0^\circ} = \frac{E\varepsilon_r}{2} \quad (9)$$

[0032] 穿刺活检针的几何参数为外径 $D$ 、内径 $d$ 、截面惯性矩 $I$ , 则在弯矩 $M$ 作用下, 最大弯曲应力 $\sigma$ 还可由下式求得:

$$[0033] \quad \sigma = \frac{M \cdot D}{2I} = \frac{32M \cdot D}{\pi(D^4 - d^4)} \quad (10)$$

[0034] 联立式(9)和式(10), 可求得弯矩 $M$ 为:

$$[0035] \quad M = \frac{E\pi(D^4 - d^4)}{64D} \varepsilon_r \quad (11)$$

[0036] iii、扭矩:

[0037] 当仅考虑穿刺活检针承受扭矩时,针头针尖端部A点的应变片(1、3)以及针头斜面端部B点的应变片(3'、1')都沿主应力方向;又由于主应力 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 数值相等、符号相反,四枚应变片的应变绝对值相同,且应变片(1、1')、应变片(3、3')的应变同号,则应变差值 $\varepsilon_r$ 为:

$$[0038] \quad \varepsilon_r = \varepsilon_{(1)} - \varepsilon_{(3)} + \varepsilon_{(1')} - \varepsilon_{(3')} = 4\varepsilon_1 \quad (12)$$

[0039] 式(12)中的 $\varepsilon_1$ 为扭转时的主应变,根据广义胡克定律,可得主应力 $\sigma_1$ 为:

$$[0040] \quad \sigma_1 = \frac{E}{4(1+\mu)} \varepsilon_r \quad (13)$$

[0041] 此时,在扭矩T作用下,主应力 $\sigma_1$ 与切应力 $\tau$ 相等,故:

$$[0042] \quad \sigma_1 = \tau = \frac{16T \cdot D}{\pi(D^4 - d^4)} \quad (14)$$

[0043] 联立式(13)和式(14),可求得扭矩T为:

$$[0044] \quad T = \frac{\pi E(D^4 - d^4)}{64D(1+\mu)} \varepsilon_r \quad (15)$$

[0045] 式(15)虽然是仅承受扭转情况,但当在四枚应变片中增加弯曲引起的应变时,代入后将会相互抵消,仍然得出式(12),所以上述扭矩表征方法同样适用于弯扭组合的情况;

[0046] iv、偏移量:

[0047] 应变片(5、6)与应变片(2)均布粘贴,如图5所示,分别为标记点H、N、M,构成等边三角形,穿刺手术过程中的对应测定应变分别为 $\varepsilon_{(5)}$ 、 $\varepsilon_{(6)}$ 、 $\varepsilon_{(2)}$ ,三角形外心o法线沿初始进针方向的偏移角为 $0^\circ$ ,外心o与各标记点的距离为半径r,等于穿刺活检针内径d的一半,当进针深度为h、无偏转时,各标记点对应标注为H'、N'、M',三角形外心为o',仍构成等边三角形,而考虑偏转时,各标记点对应标注为H''、N''、M'',三角形外心为o'',此时,圆弧oo''的弧长为h。

[0048] 如图6所示,根据圆几何关系,可得圆弧oo''所在圆半径R为:

$$[0049] \quad R = \frac{h}{2\theta} \quad (16)$$

[0050] 穿刺过程任意时刻的外心法线偏移角 $\theta$ 与偏移量 $\delta$ 的关系为:

$$[0051] \quad \delta = 2R \sin^2 \theta = \frac{h \sin^2 \theta}{\theta} \quad (17)$$

[0052] 在初始进针点位置建立直角坐标系,进针方向为Z轴,X轴、Y轴满足笛卡尔坐标系,则各标记点和外心(M、H、N、o)坐标为:

$$[0053] \quad \begin{cases} o & [ & 0 & 0 & 0 & ] \\ M & [ & r & 0 & 0 & ] \\ H & [ & -\frac{r}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2}r & 0 & ] \\ N & [ & -\frac{r}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2}r & 0 & ] \end{cases} \quad (18)$$

[0054] 当进针深度为h、无偏转时,各标记点和外心(M'、H'、N'、o')坐标为:

$$[0055] \quad \begin{cases} o' & [ & 0 & 0 & h & ] \\ M' & [ & r & 0 & h & ] \\ H' & [ & -\frac{r}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2}r & h & ] \\ N' & [ & -\frac{r}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2}r & h & ] \end{cases} \quad (19)$$

[0056] 无论是刚性、还是半刚性、亦或是柔性穿刺活检针，其偏转时，各标记点构成的三角形外心将始终在其针轴线上，且根据对应各应变片的布片方式，在标距 $l$ 上的各应变片可认为是沿外心法向量的变化量，则考虑偏转时，各标记点和外心 ( $M''$ 、 $H''$ 、 $N''$ 、 $o''$ ) 坐标为：

$$[0057] \quad \begin{cases} o'' & [ & \delta & 0 & \delta \cot \theta & ] \\ M'' & [ & \delta + r \cos \theta + \varepsilon_{(2)} l \sin 2\theta & 0 & \delta \cot \theta - r \sin \theta + \varepsilon_{(2)} l \cos 2\theta & ] \\ H'' & [ & \delta - \frac{r}{2} \cos \theta + \varepsilon_{(5)} l \sin 2\theta & -\frac{\sqrt{3}}{2}r & \delta \cot \theta + \frac{r}{2} \sin \theta + \varepsilon_{(5)} l \cos 2\theta & ] \\ N'' & [ & \delta - \frac{r}{2} \cos \theta + \varepsilon_{(6)} l \sin 2\theta & \frac{\sqrt{3}}{2}r & \delta \cot \theta + \frac{r}{2} \sin \theta + \varepsilon_{(6)} l \cos 2\theta & ] \end{cases} \quad (20)$$

[0058] 根据式 (20) 可求得  $H''N''$  的中点  $F$  的坐标为：

$$[0059] \quad F \left[ \delta - \frac{r}{2} \cos \theta + \frac{l \sin 2\theta}{2} (\varepsilon_{(5)} + \varepsilon_{(6)}) \quad 0 \quad \delta \cot \theta + \frac{r}{2} \sin \theta + \frac{l \cos 2\theta}{2} (\varepsilon_{(5)} + \varepsilon_{(6)}) \right] \quad (21)$$

[0060] 向量  $o''F$  的坐标为：

$$[0061] \quad o''F = \left[ -\frac{r}{2} \cos \theta + \frac{l \sin 2\theta}{2} (\varepsilon_{(5)} + \varepsilon_{(6)}) \quad 0 \quad \frac{r}{2} \sin \theta + \frac{l \cos 2\theta}{2} (\varepsilon_{(5)} + \varepsilon_{(6)}) \right] \quad (22)$$

[0062] 向量  $o''M''$  的坐标为：

$$[0063] \quad o''M'' = [r \cos \theta + \varepsilon_{(2)} l \sin 2\theta \quad 0 \quad -r \sin \theta + \varepsilon_{(2)} l \cos 2\theta] \quad (23)$$

[0064] 实际临床活体或体外穿刺试验表明，穿刺活检针的偏转角度不超过  $5^\circ$ ，故  $\tan \theta \approx \sin \theta \approx \theta$ ，且偏转后的三角形  $H''M''N''$  仍为等腰三角形，即向量  $o''F$  与向量  $o''M''$  为共线向量，两向量对应坐标成比例关系：

$$[0065] \quad \frac{-r \cos \theta + l \sin 2\theta (\varepsilon_{(5)} + \varepsilon_{(6)})}{r \cos \theta + \varepsilon_{(2)} l \sin 2\theta} = \frac{r \sin \theta + l \cos 2\theta (\varepsilon_{(5)} + \varepsilon_{(6)})}{-r \sin \theta + \varepsilon_{(2)} l \cos 2\theta} \quad (24)$$

[0066] 根据三角函数的二倍角公式，化简式 (24) 可得：

$$[0067] \quad \frac{2l\theta (\varepsilon_{(5)} + \varepsilon_{(6)}) - r}{r + 2\varepsilon_{(2)} l\theta} = \frac{r\theta + l(1 - 2\theta^2) (\varepsilon_{(5)} + \varepsilon_{(6)})}{-r\theta + \varepsilon_{(2)} l(1 - 2\theta^2)} \quad (25)$$

[0068] 式 (25) 理论上没有表达式解，借助 MATLAB 求解可得：

$$[0069] \quad \text{root} (4l\varepsilon_{(2)}\varepsilon_{(6)}m^3 + 4l\varepsilon_{(2)}\varepsilon_{(5)}m^3 + 4\varepsilon_{(2)}rm^2 - \varepsilon_{(2)}r + \varepsilon_{(6)}r + \varepsilon_{(5)}r), m, 1),$$

$$[0070] \quad \text{root} (4l\varepsilon_{(2)}\varepsilon_{(6)}m^3 + 4l\varepsilon_{(2)}\varepsilon_{(5)}m^3 + 4\varepsilon_{(2)}rm^2 - \varepsilon_{(2)}r + \varepsilon_{(6)}r + \varepsilon_{(5)}r), m, 2),$$

$$[0071] \quad \text{root} (4l\varepsilon_{(2)}\varepsilon_{(6)}m^3 + 4l\varepsilon_{(2)}\varepsilon_{(5)}m^3 + 4\varepsilon_{(2)}rm^2 - \varepsilon_{(2)}r + \varepsilon_{(6)}r + \varepsilon_{(5)}r), m, 3),$$

[0072] 式 (25) 方程的根，即偏移角  $\theta$  就是 root 函数里  $m=1, 2, 3$  的根，代入式 (17)，即可计算得到穿刺过程任意时刻穿刺针针头偏移量  $\delta$ 。

[0073] 所述各表征方法对应电阻应变片的接桥方式是：

[0074] 如图 7 所示，主应力和主方向测试表征时将应变花的三个应变片分别接在应变参

数测试仪的三个不同通道端子上,且每个通道上各个接桥点所对应的端口与桥路电压节点相同,桥路选择为半桥连接,温度补偿片为公共补偿方式;

[0075] 如图8所示,弯矩测试表征时将A点和B点沿轴线x向的两个应变片按半桥双臂组成接桥方式;扭矩测试表征时将A点和B点沿轴线呈 $45^\circ$ 的四个应变片按全桥相邻臂组成接桥方式;

[0076] 如图9所示,偏移量测试表征时将 $120^\circ$ 均布的三个应变片分别接在应变参数测试仪的三个不同通道端子上,且每个通道上各个接桥点所对应的端口与桥路电压节点相同,桥路选择为半桥连接,温度补偿片为公共补偿方式。

[0077] 本发明优点及积极效果是:

[0078] 1、本发明上述测试方法中,电阻应变片的贴片位置与布片方式易于实现、成本低廉,且传感器维间的耦合小、测试灵敏度高;

[0079] 2、本发明上述测试方法中,界面交互力学性能参数测试及表征方法较为全面客观,能够准确获取穿刺过程界面交互动态力学性能,有利于开展穿刺手术机器人核心技术突破等研究;

[0080] 3、进一步,本发明将参数表征与信号控制电路进行了一体化设计,能够灵活方便的集成于穿刺活检针,临床应用价值高;

[0081] 4、进一步,本发明设计的偏移量测试及表征方法,克服了人体或动物组织器官非透明性带来的试验难度,对复杂生物力学规律的探讨增添了新的研究手段,将对准确解释其界面交互力学机理的研究大有裨益,且通过实时反馈的偏移量信息,能够实现穿刺路径的精准闭环主动控制,增加手术安全性和可靠性、提高穿刺精确度及经皮穿刺介入手术的临床普及度。

## 附图说明

[0082] 通过阅读参照以下附图对非限制性实施例所作的详细描述,本发明的其它特征、目的和优点将会变得更明显;

[0083] 图1为本发明穿刺过程界面交互力学性能一体化测试方法框图;

[0084] 图2为本发明若干电阻应变片的贴片位置与布片方式总体示意图;

[0085] 图3为本发明应变花(I)局部放大示意图;

[0086] 图4为本发明应变花(II)局部放大示意图;

[0087] 图5为本发明横切面等边三角形布片局部放大示意图;

[0088] 图6为本发明偏移量测试表征方法解析说明图;

[0089] 图7为本发明主应力和主方向测试表征的接桥方式示意图;

[0090] 图8为本发明弯矩、扭矩测试表征的接桥方式示意图;

[0091] 图9为本发明偏移量测试表征的接桥方式示意图;

[0092] 图中标号:1、1'、2、2'、3、3'、4、4'、5、6-电阻应变片,I、II-直角应变花,A-应变花(I)安装位置,B-应变花(II)安装位置,H、H'、H''-应变片(5)中心点,N、N'、N''-应变片(6)中心点,M、M'、M''-应变片(2)中心点,o、o'、o''-外心,D-外径,d-内径,h-进针深度,R-圆弧oo''所在圆半径, $\theta$ -偏移角, $\delta$ -偏移量,R1、R1'、R2、R2'、R3、R3'、R4、R4'、R5、R6-各应变片对应电阻,R7、R8-应变参数测试仪内部标准电阻,a、c-惠斯通电桥输入电压节点,b、d-惠斯通电桥

输出电压节点。

### 具体实施方式

[0093] 下面结合具体实施例对本发明进行详细说明。以下实施例将有助于本领域的工程技术人员进一步理解本发明,但不以任何形式限制本发明。应当指出的是,对本领域的技术人员来说,在不脱离本发明构思的前提下,还可以做出若干变形和改进,这些都属于本发明的保护范围。

[0094] 参照图1所示,为本发明一实施例中穿刺过程界面交互力学性能一体化测试方法框图。

[0095] 参照图2、图3、图4、图5所示,该医用穿刺活检针界面交互力学性能一体化测试方法包括:若干个电阻应变片的贴片位置与布片方式,穿刺活检针穿刺过程中界面交互力学性能测试及表征方法,各表征方法对应电阻应变片的接桥方式;其中,应变花(I)粘贴于穿刺活检针的针头针尖端部A点轴线方向的圆弧面上,其三枚应变片(1、2、3)构成 $45^\circ$ 直角应变花;应变花(II)粘贴于穿刺活检针的针头斜面端部B点轴线方向的圆弧面上,其三枚应变片(3'、2'、1'),与A点应变花(I)依次对应,也构成 $45^\circ$ 直角应变花;应变片(4、4')为温度补偿片,分别沿周向粘贴在应变片(2、2')的旁侧,用作消除温度变化的影响;应变片(5、6)与应变片(2)在同一横向切面上沿周向方向 $120^\circ$ 均布粘贴,三个应变片中心点在横切面上构成等边三角形,其外心法线的偏移角用作偏移量计算。

[0096] 参照图7所示,主应力及主方向测试时,应变花(I)的三枚应变片(1、2、3)分别对应角度 $-45^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ ,R2、R4、R7、R8形成测定应变 $\varepsilon(0^\circ)$ 的半桥电路,R1、R4、R7、R8形成测定应变 $\varepsilon(-45^\circ)$ 的半桥电路,R3、R4、R7、R8形成测定应变 $\varepsilon(45^\circ)$ 的半桥电路;代入式(5)、式(6)可求得A点的主应力 $(\sigma_1、\sigma_2)$ ,代入式(7)可求得相差 $\pi/2$ 的两个 $\alpha_0$ ,即可确定两个相互垂直的主方向,根据应变圆可知:当 $\varepsilon_x > \varepsilon_y$ 时,则由x轴起,绝对值较小的 $\alpha_0$ 确定主应力 $\sigma_1$ 的方向;反之,当 $\varepsilon_x < \varepsilon_y$ 时,则由x轴起,绝对值较小的 $\alpha_0$ 确定主应力 $\sigma_2$ 的方向。

[0097] 参照图8所示,A点应变片(2)与B点应变片(2')用于弯矩测试,R2、R2'、R7、R8按半桥双臂组成接桥方式;测定 $\varepsilon_r$ 后,代入式(11)求得弯矩M。

[0098] 参照图8所示,A点的应变片(1、3)与B点的应变片(3'、1')用于扭矩测试,R1、R3、R1'、R3'按全桥相邻臂组成接桥方式;测定 $\varepsilon_r$ 后,代入式(15)求得扭矩T。

[0099] 参照图9所示,应变片(5、6)与应变片(2)在同一横向切面上沿周向方向 $120^\circ$ 均布粘贴,三个应变片中心点在横切面上构成等边三角形,偏移量测试时,R2、R4'、R7、R8形成测定应变 $\varepsilon(2)$ 的半桥电路,R5、R4'、R7、R8形成测定应变 $\varepsilon(5)$ 的半桥电路,R6、R4'、R7、R8形成测定应变 $\varepsilon(6)$ 的半桥电路;代入式(25),借助MATLAB求解偏移角 $\theta$ ,再代入式(17),即可计算得到穿刺过程任意时刻穿刺针针头偏移量 $\delta$ 。

[0100] 本发明通过上述医用穿刺活检针界面交互力学性能的贴片位置、布片方式、测试与表征方法、接桥方式等优化与一体化设计,具有易于实现、成本低廉、维间耦合小、灵敏度高、便于集成、临床应用价值高、适用性强等特点。

[0101] 以上对本发明的具体实施进行了描述。需要理解的是,本发明并不局限于某一特定实施方式,本领域技术人员可以在权利要求的范围内做出各种变形或修改,但这并不影响本发明的实质内容。

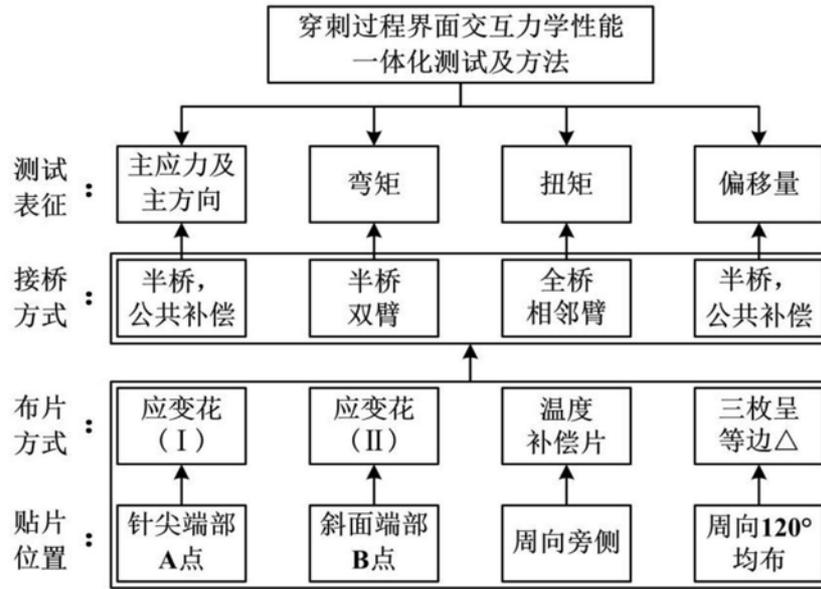


图1

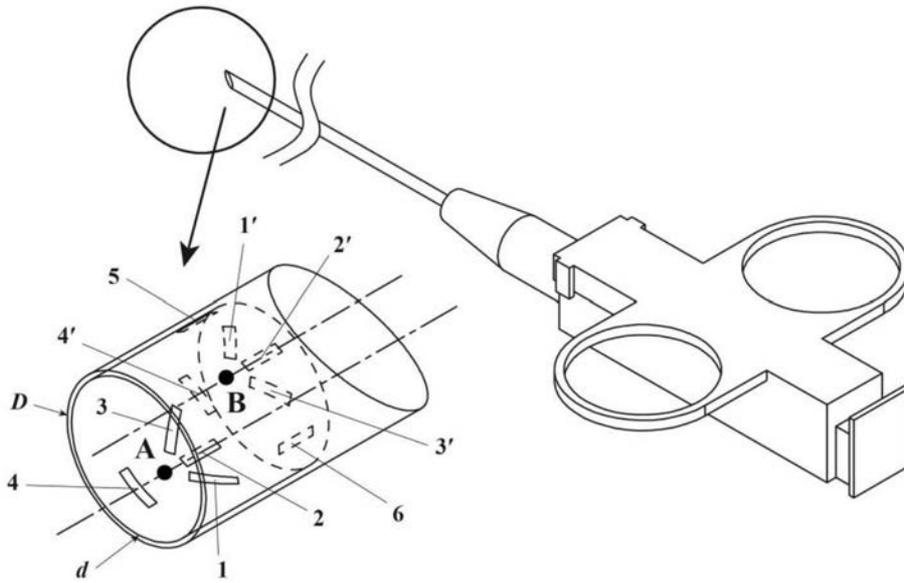


图2

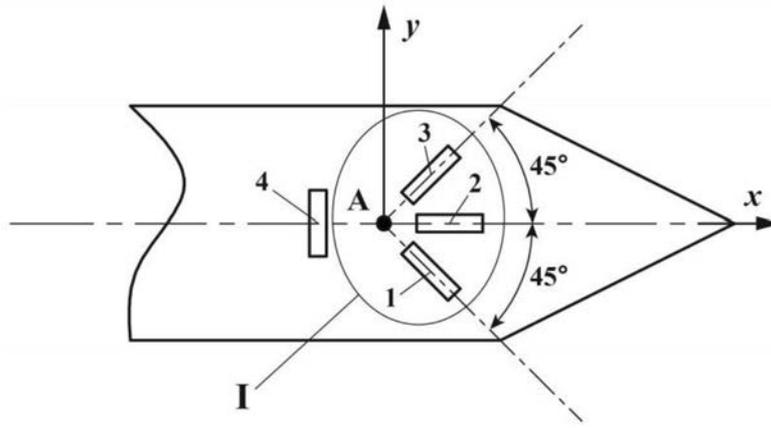


图3

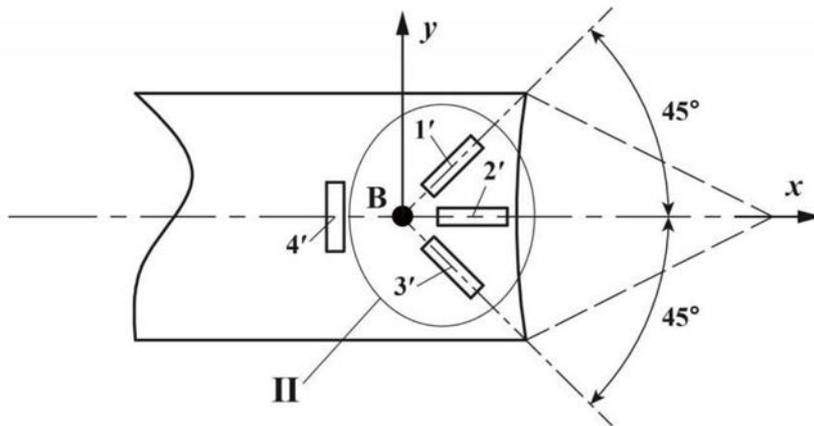


图4

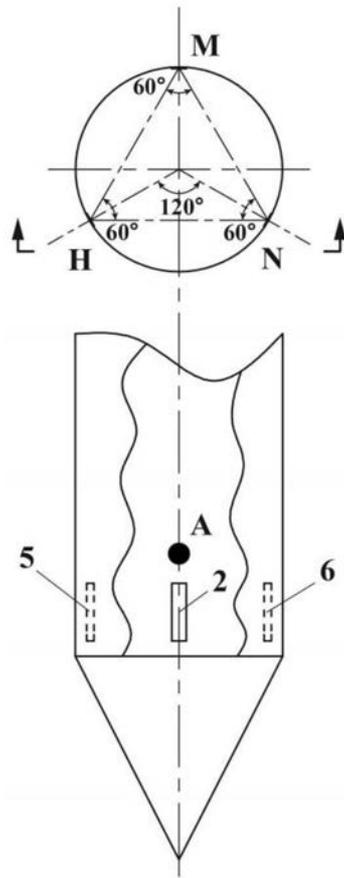


图5



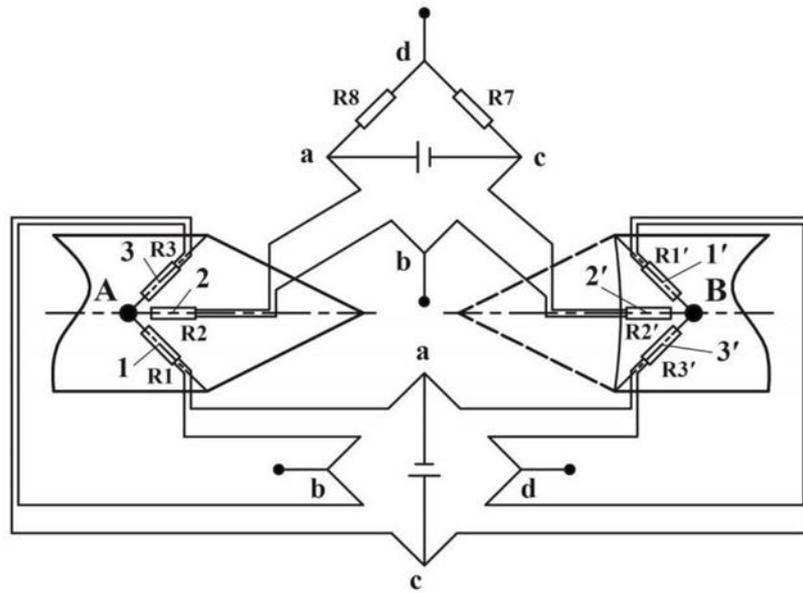


图8

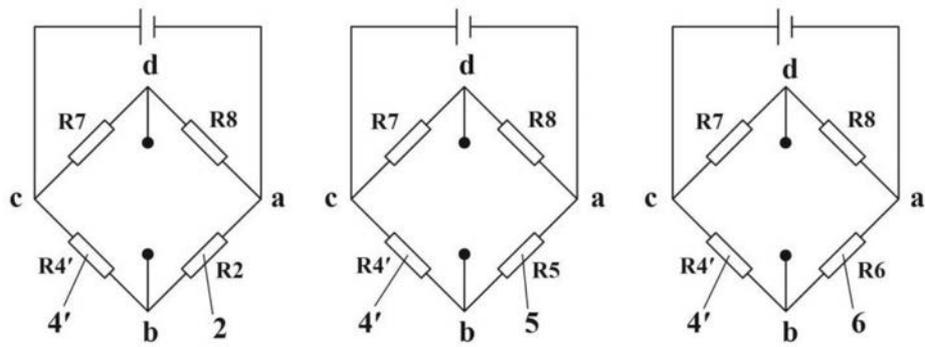


图9