



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103607961 B

(45)授权公告日 2016.12.14

(21)申请号 201280028325.X

(22)申请日 2012.04.16

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 103607961 A

(43)申请公布日 2014.02.26

(30)优先权数据

61/475,384 2011.04.14 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2013.12.09

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/US2012/033791 2012.04.16

(87)PCT国际申请的公布数据

W02012/142588 EN 2012.10.18

(73)专利权人 圣犹达医疗用品卢森堡控股有限公司

地址 卢森堡卢森堡市

(72)发明人 乔瓦尼·里奥 尼古拉斯·埃比
斯图亚特·J·奥尔斯塔德

(74)专利代理机构 北京泛华伟业知识产权代理有限公司 11280

代理人 王勇 王博

(51)Int.Cl.

A61B 17/00(2006.01)

A61M 25/00(2006.01)

G01L 1/24(2006.01)

G01L 5/16(2006.01)

(56)对比文件

US 2009177095 A1, 2009.07.09,

US 2009177095 A1, 2009.07.09,

US 2007060847 A1, 2007.03.15,

US 2006133715 A1, 2006.06.22,

US 2009287092 A1, 2009.11.19,

US 2008294144 A1, 2008.11.27,

US 5423807 A, 1995.06.13,

US 2008159687 A1, 2008.07.03,

US 6470205 B2, 2002.10.22,

US 2003130615 A1, 2003.07.10,

US 2010328675 A1, 2010.12.30,

US 2008009750 A1, 2008.01.10,

US 2007060847 A1, 2007.03.15,

审查员 魏春晓

权利要求书4页 说明书15页 附图10页

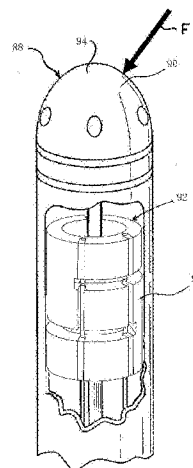
(54)发明名称

用于导管的紧凑型力传感器

(57)摘要

在远端装配有紧凑型力传感器用于检测施加于端部执行器上的接触力的消融导管系统。力传感器包括与结构构件上的反射构件可操作地连接的光纤。在一个实施方式中,光纤和反射构件与可变形的结构相配合以提供可变的间隙干涉仪来感测归因于接触力的结构构件的变形。在另一个实施方式中,检测反射光线的强度变化从而测量变形。然后测量到的变形用于计算接触力矢量。在一些实施方式中,力传感器配置成被动地补偿温度变化,否则该温度变化会导致错误的力指示。在其它实施方式中,系统通过测量结构

构件某些局部温度来主动地补偿由温度变化所引起的错误的力指示。



1. 一种用在导管远侧末端的力传感器,包括:

结构构件,其限定了纵轴线并包括:

沿所述纵轴线彼此邻接的第一段和第二段,所述第一段和所述第二段界定了位于其间的第一狭缝,所述第一狭缝通过第一柔性部分桥接,以及

沿所述纵轴线邻接所述第二段的第三段,所述第二段和所述第三段界定了位于其间的第二狭缝,所述第二狭缝通过第二柔性部分桥接;并且

多根光纤与所述结构构件可操作地连接,所述多根光纤各具有接近相对应反射构件的远端以界定出位于其间的相应间隙,所述反射构件从所述结构构件的所述第三段延伸,所述相应间隙各设置成接近所述第二狭缝,所述多根光纤各取向成发出光线横穿所述相应间隙并到所述相对应反射构件上,

其中所述结构构件配置成至少一个所述相应间隙的尺寸产生变化以响应施加于所述导管的所述远侧末端上的力。

2. 根据权利要求1所述的力传感器,其中所述多根光纤的所述远端适于收集从所述相对应反射构件反射的至少一部分所述光线。

3. 根据权利要求1所述的力传感器,其中所述结构构件是空心管。

4. 根据权利要求3所述的力传感器,其中所述空心管在与所述纵轴线正交的平面上具有圆形横截面。

5. 根据权利要求1所述的力传感器,其中所述多根光纤的数量至少是三根。

6. 根据权利要求1所述的力传感器,其中所述第一柔性部分以平行于所述纵轴线的第一挠曲轴线为中心,所述第二柔性部分以平行于所述纵轴线的第二挠曲轴线为中心,并且其中所述第一挠曲轴线、所述第二挠曲轴线和所述纵轴线基本上共面。

7. 根据权利要求1所述的力传感器,其中所述相应间隙各是法布里-珀罗共振器。

8. 根据权利要求1所述的力传感器,还包括至少两个温度传感器,各配置成检测所述结构构件的温度,所述至少两个温度传感器中的第一个大致在所述第一柔性部分和所述第二段的交界面的中心,所述至少两个温度传感器中的第二个大致在所述第二柔性部分和所述第二段的交界面的中心。

9. 根据权利要求1所述的力传感器,其中各柔性部分装配有温度传感器。

10. 根据权利要求1所述的力传感器,还包括被动地补偿由温度变化所引起的所述相应间隙的尺寸变化的装置。

11. 根据权利要求1所述的力传感器,其中所述相对应反射构件包含具有与所述光纤的热膨胀系数不同的材料。

12. 根据权利要求11所述的力传感器,其中所述相对应反射构件的所述材料是金属掺杂光纤和蓝宝石光纤中的一种。

13. 根据权利要求1所述的力传感器,其中所述多根光纤贴附至所述第一段并穿过所述第二段。

14. 根据权利要求1所述的力传感器,其中至少一根所述光纤与所述相对应反射构件拼接,所述间隙由限定在所述光纤和所述相对应反射构件之间的空腔界定。

15. 一种用在导管远侧末端的力传感器,包括:

结构构件,其限定了纵轴线并包括:

沿所述纵轴线彼此邻接的第一段和第二段,所述第一段和所述第二段界定了位于其间的第一狭缝,所述第一狭缝通过第一柔性部分桥接,以及

沿所述纵轴线邻接所述第二段的第三段,所述第二段和所述第三段界定了位于其间的第二狭缝,所述第二狭缝通过第二柔性部分桥接;

多个反射构件,各贴附至所述结构构件并从所述结构构件延伸,并且各包括反射表面;以及

多根光纤,各与所述多个反射构件中相对应的一个成对,各光纤取向并适于辐照所述多个反射构件中所述相对应的一个的所述反射表面并收集从所述相对应的反射构件的近端反射的至少一部分光线,各成对的光纤和反射构件界定了位于其间的相对应间隙,所述相对应间隙各设置成接近所述第一狭缝或所述第二狭缝中的同一个,

其中所述多个反射构件包含具有与所述多根光纤的热膨胀系数不同的材料,所述反射构件的热膨胀系数选成被动补偿由温度变化所引起的在各成对的光纤和反射构件之间的相对应间隙的变化。

16. 根据权利要求15所述的力传感器,其中所述反射构件的热膨胀系数与所述结构构件的热膨胀系数不同。

17. 根据权利要求15所述的力传感器,其中所述多根光纤贴附至所述结构构件。

18. 根据权利要求15所述的力传感器,其中由所述成对的光纤和反射构件限定的所述相对应间隙位于所述第二狭缝之内。

19. 根据权利要求15所述的力传感器,其中所述结构构件包括外表面,并且其中每个所述柔性部分界定了所述结构构件的一部分所述外表面。

20. 根据权利要求15所述的力传感器,其中所述多根光纤各适于发出光线到所述相对应的反射构件的所述近端上。

21. 根据权利要求15所述的力传感器,其中至少一根所述光纤与所述相应的反射构件拼接,所述间隙由界定在所述光纤和所述相应的反射构件之间的空腔界定。

22. 根据权利要求15所述的力传感器,其中所述多个反射构件的所述近端全都接近所述第二狭缝;并且其中所述第二狭缝位于所述第一狭缝的远侧。

23. 根据权利要求15所述的力传感器,其中所述多个反射构件的所述近端全都接近所述第一狭缝;并且其中所述第一狭缝位于所述第二狭缝的近侧。

24. 根据权利要求15所述的力传感器,其中所述多个反射构件与所述结构构件具有相同的热膨胀系数。

25. 根据权利要求15所述的力传感器,其中所述多根光纤贴附至所述第一段并延伸,使得所述成对的光纤与反射构件的所述相对应间隙接近所述第一狭缝,所述第一段位于所述第二段的近侧,并且所述第一狭缝位于所述第二狭缝的近侧。

26. 一种用在导管远侧末端的力传感器,包括:

结构构件,其限定了纵轴线并包括;

沿所述纵轴线彼此邻接的第一段和第二段,所述第一段和所述第二段界定了位于其间的第一狭缝,所述第一狭缝通过第一柔性部分桥接,以及

沿所述纵轴线邻接所述第二段的第三段,所述第二段和所述第三段界定了位于其间的第二狭缝,所述第二狭缝通过第二柔性部分桥接;

多个反射构件,各贴附至所述结构构件并从所述结构构件的所述第三段延伸,并且各包括反射表面;

多根光纤,各与所述多个反射构件中相对应的一个成对,并且各光纤取向并适于辐照所述多个反射构件中所述相对应的一个的反射表面并收集从所述相对应的反射构件的近端反射的至少一部分光线,各成对的光纤和反射构件界定了具有在其之间的尺寸的相对应间隙,所述相对应间隙各设置成接近所述第二狭缝;以及

装置,用于补偿所述相对应间隙的所述尺寸的热诱导变化。

27. 根据权利要求26所述的力传感器,其中用来补偿的所述装置是被动装置。

28. 制造用于导管的力传感器的方法,包括:

提供结构构件,所述结构构件限定了纵轴线并包括:

沿所述纵轴线彼此邻接的第一段和第二段,所述第一段和所述第二段界定了位于其间的第一狭缝,所述第一狭缝通过第一柔性部分桥接,以及

沿所述纵轴线邻接所述第二段的第三段,所述第二段和所述第三段界定了位于其间的第二狭缝,所述第二狭缝通过第二柔性部分桥接;

提供多个反射构件,各反射构件贴附至所述结构构件并从所述结构构件延伸;

提供多根光纤,各光纤与所述多个反射构件中相对应的一个成对;

将所述多根光纤中各光纤的远端布置在所述反射构件中的一个的对面,各所述光纤和所述反射构件界定了在其之间的间隙,所述间隙设置成接近所述第一狭缝或所述第二狭缝中的一个,并且所述间隙具有在预定值的范围之内并响应于施加在所述结构构件上的力的距离,

其中所述反射构件具有补偿由所述结构构件和所述反射构件的温度变化所引起的所述光纤和所述反射构件之间的所述距离的变化的热膨胀系数。

29. 一种导管系统,包括:

具有近侧部分、远侧部分以及中间部分的柔性细长导管组件;

与所述导管组件的所述远侧部分可操作地连接的端部执行器;

与所述导管组件的所述远侧部分可操作地连接的光纤力感测组件,所述光纤力感测组件包括:

结构构件,其限定了纵轴线并包括:

沿所述纵轴线彼此邻接的第一段和第二段,所述第一段和所述第二段界定了位于其间的第一狭缝,所述第一狭缝通过第一柔性部分桥接,以及

沿所述纵轴线邻接所述第二段的第三段,所述第二段和所述第三段界定了位于其间的第二狭缝,所述第二狭缝通过第二柔性部分桥接;

多根光纤以及从所述结构构件延伸的多个反射构件,各光纤与所述多个反射构件中相对应的一个成对,各成对的光纤和反射构件界定了位于其间的相对应间隙,所述相对应间隙各设置成接近所述第一狭缝或所述第二狭缝中的同一个,其中所述多个反射构件包含具有与所述光纤的热膨胀系数不同的材料,并且其中所述结构构件界定了响应于施加在所述端部执行器上的接触力的位移尺寸;以及

被动地补偿所述位移尺寸的热诱导变化的装置。

30. 根据权利要求29所述的导管系统,还包括电源、电磁源、数据采集装置以及控制系

统中的至少一个,其与所述细长导管组件可操作地连接。

31.主动补偿光纤力感测组件中热诱导误差的方法,包括:

提供结构构件,所述结构构件限定了纵轴线并包括:

沿所述纵轴线彼此邻接的第一段和第二段,所述第一段和所述第二段界定了位于其间的第一狭缝,所述第一狭缝通过第一柔性部分桥接,以及

沿所述纵轴线邻接所述第二段的第三段,所述第二段和所述第三段界定了位于其间的第二狭缝,所述第二狭缝通过第二柔性部分桥接;

提供多个反射构件,各反射构件贴附至所述结构构件并从所述结构构件延伸;

提供多根光纤,各光纤与所述多个反射构件中相对应的一个成对;

贴附所述多根光纤中各光纤的远端至所述第一段或所述第二段中的一个,所述远端取向成界定所述远端和所述反射构件之间的间隙,所述间隙设置成接近所述第一狭缝或所述第二狭缝中的一个,并且所述间隙具有从所述远端到所述反射构件界定出的间隙尺寸;以及

为所述第一柔性构件或所述第二柔性构件装配温度传感器,

其中在装配步骤中所提供的所述第一柔性构件或所述第二柔性构件与在所述贴附步骤中所贴附的各所述光纤沿直径相反。

32.根据权利要求31所述的方法,还包括:

提供与微处理器可操作地连接的温度感测模块,所述温度感测模块适于接收来自于所述温度传感器的信号,所述微处理器与计算机可读存储设备可操作地连接;

配置所述计算机可读存储设备包括用于所述微处理器的指令,所述指令包括:

接收来自于所述温度感测模块的信息,该信息基于从所述温度传感器接收到的信号;

基于所述信息判定所述第一柔性构件或所述第二柔性构件的温度变化,所述温度变化是相对于参考温度而言的;以及

基于所述第一柔性构件或所述第二柔性构件的所述温度变化推断所述间隙尺寸的变化。

33.根据权利要求32所述的方法,其中推断所述间隙尺寸的所述变化的所述指令基于方程式 $\Delta \delta = \alpha \cdot \delta \cdot \Delta T$,这里 $\Delta \delta$ 是所述间隙尺寸的所述变化, α 是所述第一柔性构件或所述第二柔性构件的热膨胀系数, δ 是在所述参考温度时的所述间隙尺寸,以及 ΔT 是所述温度变化。

34.根据权利要求32所述的方法,其中推断所述间隙尺寸的所述变化的所述指令基于方程式 $\Delta \delta = \Psi \cdot \Delta T$,这里 $\Delta \delta$ 是所述间隙尺寸的所述变化, Ψ 是校准函数,以及 ΔT 是所述温度变化。

35.根据权利要求34所述的方法,其中 Ψ 是常数。

用于导管的紧凑型力传感器

[0001] 相关申请

[0002] 本申请要求于2011年4月14日提交的美国临时专利申请第No. 61/475,384号的权益,并特此通过引用将其全部内容合并在此。

技术领域

[0003] 公开的发明总体上涉及能够分辨力矢量大小及方向的力感测装置。更具体地,本发明涉及一种力感测末端,该力感测末端用来帮助定位用于人或动物体内的导管,或用作机器人手术系统中的反馈元件。

背景技术

[0004] 许多年来,使用基于导管的诊断和治疗系统使得对各种器官或血管的探查和治疗已成为可能。这种导管通过通往待探查或治疗器官的腔的血管引入,或者可选择地直接通过在器官壁上所作的切口引入。如此,患者避免了典型地与开放式外科手术相关的创伤以及延长的复原时间。

[0005] 为了提供有效的诊断或治疗,首先以高精度标测待治疗的区域常常是必要的。例如,当要求有选择地消融心脏内的当前路径以治疗房颤时可执行这种标测。通常,由于遍及心动周期的心脏的周期性运动,标测过程因定位待治疗区域的困难而复杂化。

[0006] 例如,在美国专利号No. 6,546,271和6,226,542中描述了标测血管或器官内部的在先已知的系统。那些专利中描述的导管使用电磁的、电的、磁的或声学的传感器来标测导管远端在空间中的位置,然后构建血管或器官内部的三维可视化。

[0007] 这种在先已知的标测系统的一个缺点是它们依靠导管的手动反馈和/或阻抗测量来判定何时导管被正确地定位在血管或器官中。那些系统不测量与血管或器官壁的接触力或检测由导管施加在器官或血管壁上的接触力,该接触力可能修改真实的壁位置。相反,在先已知的标测方法耗费时间,依赖临床医师的技术,并且不能补偿因过大接触力而造成的伪像。

[0008] 一旦标测了血管或器官的局部剖析图,可使用相同或不同的导管来实现治疗。取决于要对血管或器官应用的具体治疗,导管可包含任何数量的端部执行器,诸如但不限于射频(RF)消融电极、旋转或剪切作用切割头、激光消融系统、注射或缝合针、流体输送系统、医用镊子、机械手、标测电极、内窥镜视觉系统以及诸如基因注入装置的治疗递送系统。例如,在美国专利号No. 6,120,520, 6,102,926, 5,575,787, 5,409,000和5,423,807中描述了示范的系统。

[0009] 这种端部执行器的有效性通常取决于端部执行器与器官或血管的壁组织的接触。许多在先已知的治疗系统包括可扩展的篮状体或钩状体,其用于稳固与组织接触的导管的远侧末端。然而,由于器官或血管的运动,这种装置可能是固有地不精确的。此外,在先已知的系统不提供感测因组织壁移动施加到导管远侧末端的负荷的能力。

[0010] 例如,在心脏消融系统的情况下,在一个极端情况下,治疗系统的端部执行器和组

织壁之间间隙的产生可能致使治疗无效,以及不适当地消融组织区域。在另一个极端情况下,如果导管的端部执行器以过大的力接触组织壁,可能发生因意外地穿刺组织而导致的心包填塞。

[0011] 美国专利号No.6,695,808提出几种解决方案来测量因与组织表面接触而引起的力矢量,包括机械的、电容的、电感的以及电阻压力感测装置。然而,这种装置的一个缺点是它们相对复杂并且必须密封以防止血液或其它流体干扰测量。另外,这种负荷感测装置可导致导管远侧末端的插入轮廓的增加。更进一步,那个专利中描述的类型传感器可能受到电磁干扰。

[0012] 处理医疗环境中可能的电磁干扰的一种在先已知的解决方案是使用基于光的系统而不是电测量系统。授予Bosselman的美国专利号No.6,470,205中描述了这样一种基于光的系统,该专利描述了一种用于执行外科手术的机器人系统,包括一系列通过铰接接头连接的刚性连杆。多个布拉格光栅(Bragg grating)设置在铰接接头处,以便可以例如通过使用干涉仪测量被布拉格光栅反射的光线的波长变化来光学地确定各接头的弯曲角度。

[0013] 授予Bucholtz的国际公布号No.W001/33165描述了一种可选择的空间定位系统,其中使用在三元光纤应变传感器中测量的波长变化来计算导管或其它医疗仪器的空间方位。尽管Bucholtz公开了应变传感器可以装在可变形的鞘套内,如在Bosselman中也描述的,但是弯曲角度的计算由于需要可变形的鞘套的材料性能的特征而未描述。

[0014] 导管技术的最近发展已包括当端部执行器放置成与血管或器官的内壁接触时使用光纤力传感器来检测在端部执行器远侧末端处的反作用力。例如,由Katholieke Universiteit Leuven,Belgium(比利时天主教鲁汶大学)出版J.Peirs等发表的题为“Design of an Optical Force Sensor for Force Feedback during Minimally Invasive Robotic Surgery”的文章描述了用来在机器人手术系统中产生力反馈系统的三轴力传感器。该装置包括多根光纤,其把光线引导到设置成邻近该装置远侧末端的镜状表面上。从镜状表面反射的光线的强度被测量并可向远侧末端施加预定量的弯曲所需的力相关联。该文章描述了一种柔性且紧凑的结构,其可用来产生响应于使该结构变形的接触力的光线强度变化。

[0015] 授予Leo等(Leo'139)的国际公布号No.W02007/015139公开了一种用来分辨施加于导管远端的力矢量(大小和方向)的装置和方法。Leo'139公开了把光纤应变元件用于导管中,该导管基本保持与导管不感测接触力时相同的轮廓,并且基本上不受电磁干扰的影响。授予Leo等(Leo'498)的美国专利号No.8,075,498公开了一种力感测导管系统,其利用光纤布拉格光栅应变传感器的变形来推断作用在导管末端上的力。授予Aeby等(Aeby'063)的美国专利号No.8,048,063公开了具有可变形结构的三轴力传感器,该三轴力传感器隔离由施加在导管远端上的力引起的挠曲,并且其中光纤辐射和接收来自于可变性结构的反射光线,接收到的反射光线的强度根据施加的力而变化。授予Leo等(Leo'092)的美国专利公开号No.2009/0287092公开了一种光纤接触感测导管,其包含多个温度传感器来主动补偿由温度变化引起的影响,其包括校准技术以降低热诱导误差。授予Leo等(Leo'789)的美国专利号No.8,157,789公开了一种光纤接触感测导管,其利用干涉原理检测应变感测组件的结构变形从而推断力。授予Leo等(Leo'418)的国际公开号No.W02010/079418和授予Kistler等(Kistler)的国际公开号No.W02009/114955公开了具有结构构件的基于导管的

力传感器,该力传感器绕弯曲部分旋转地偏转以增强响应于接触力的灵敏性。

[0016] 虽然Kistler提出了一种可以比Leo公开的装置做得更加紧凑的设计,但是它具有热诱导误差以及不一致的(依赖方向的)灵敏性。另外,Aeby'063的三轴力传感器倾向于涉及复杂的加工和制造以实现期望的隔离效应。

[0017] 于是,需要提供诸如导管或导丝的诊断和治疗装置,其允许感测施加于装置远侧末端的负荷,但基本上不会增加装置的插入轮廓。进一步需要提供诸如导管和导丝等诊断和治疗装置,其允许计算施加于装置远侧末端的力,并且基本上不受电磁干扰的影响。结合紧致性、高灵敏性(高分辨率)和对温度变化相对不敏感,并且相对容易制造的光纤接触感测导管在微创外科手术领域将会是受欢迎的发展。

发明内容

[0018] 本发明的各种实施方式包括在末端配置有紧凑型力传感器以检测施加于端部执行器上的接触力的导管系统。在一个实施方式中,超过了现有技术的紧凑型设计,提高了灵敏性且灵敏性变得较为一致。对于消融应用来说,力传感器的温度漂移可达到20开尔文(Kelvins)。于是,在一些实施方式中,力传感器配置成被动地补偿这些温度变化从而限制错误的力指示。在其它实施方式中,系统通过测量力传感器的某些局部温度来主动地补偿由力传感器中温度变化而引起的错误的力指示。

[0019] Leo'789公开了一种力传感器,通过使结构构件的热膨胀系数(CTE)与光纤的热膨胀系数相匹配,该力传感器基本上对温度变化不敏感。Leo'789也公开了该力传感器的配置,其机械地放大由施加在末端上的力而引起的检测到的挠曲,从而提高了力传感器的灵敏性。

[0020] Leo'418以及,特别是Kistler,公开了可比Leo'789的力传感器更加紧凑并且具有与Leo'789的力传感器大体相同的灵敏性的力传感器。紧凑性提供了在途中及在靶点处增强的可操作性。然而,由于结构的材料,Kistler和Leo'418的装置受到比Leo'789的装置更大的热诱导误差。由Kistler公开的装置还倾向于在感测元件之间不相同的灵敏性,也就是说,在一个感测元件处每单位力的位移是与另一个感测元件处不同的。这可导致灵敏性不同,以及伴随的依赖于力的方向的不确定性。

[0021] 这里公开的本发明的实施方式在降低热诱导误差的同时,提供了Kistler装置的紧凑性。一些实施方式提供了力感测元件之间更加一致的响应。

[0022] 在各种实施方式中,在结构上,力传感器包括具有轴向对齐的分段的结构构件,该分段限定出在其之间的狭缝,各狭缝通过弯曲部分桥接。为响应施加于结构构件末端的接触力,结构构件绕弯曲部分弯曲导致狭缝的尺寸变化。多根光纤安装在结构构件上以便特定光纤的远端接近特定狭缝。多个反射构件设置成与光纤远端相对,各与光纤中对应的一根相对的反射构件界定了在其之间的间隙。间隙产生了多个干涉腔,其随着响应于接触力的狭缝尺寸的变化而一致地变化。

[0023] 在一个实施方式中,用在导管远侧末端的力传感器包括结构构件,其界定了纵轴线并包括沿纵轴线彼此邻接的第一段和第二段,第一段和第二段界定了位于其间通过第一柔性部分桥接的第一狭缝。第三段沿纵轴线邻接第二段,第二段和第三段界定了位于其间的第二狭缝,第二狭缝通过第二柔性部分桥接。多根光纤与结构构件操作地连接,多根光纤

各具有接近相对应反射构件以界定位于其间的相应间隙的远端。反射构件从结构构件的第三段延伸。在一个实施方式中,相应间隙中的每一个接近第二狭缝设置,多根光纤各取向成发出光线横穿相应间隙并到相对应的反射构件上。光纤可贴附至第一段并穿过第二段。结构构件可配置成产生相应间隙中至少一个的尺寸变化以响应施加于导管远侧末端上的力。多根光纤的远端可适于收集至少一部分从相对应的反射构件反射的光线。在一个实施方式中,结构构件是空心管,其可在与纵轴线正交的平面上具有圆形的横截面。多根光纤的数量至少是三根。在一个实施方式中,相应间隙的各个是法布里—珀罗共振器。

[0024] 力传感器的第一柔性部分可以平行于纵轴线的第二挠曲轴线为中心,第二弯曲部分以平行于纵轴线的第二挠曲轴线为中心。在一个实施方式中,第一挠曲轴线、第二挠曲轴线和纵轴线基本上共面。

[0025] 本发明的一些实施方式包括光纤中至少一个与相对应的反射构件拼接的光纤,间隙由界定在光纤和相应的反射构件之间的空腔界定。

[0026] 各种实施方式执行“主动的”温度补偿,其中为了确定热膨胀/收缩的影响测量结构构件的温度。这些实施方式可包括至少两个温度传感器,各配置成检测结构构件的温度。在一个实施方式中,至少两个温度传感器中的第一个在第一柔性部分和第二段的交界面上大致位于中心,至少两个温度传感器中的第二个在第二柔性部分和第二段的交界面上大致位于中心。在一个实施方式中,各柔性部分装配有温度传感器。

[0027] 其它实施方式执行“被动的”温度补偿,包括被动地补偿由温度变化所引起的各自的间隙的尺寸变化的装置,而不测量主体的温度。在一些实施方式中,被动补偿导管系统包括具有近侧部分、远侧部分和中间部分的柔性细长导管组件。端部执行器可与导管组件的远侧部分操作地连接。光纤力感测组件与导管组件的远侧部分操作地连接,光纤力感测组件包括结构构件,其界定了响应于施加在端部执行器上的接触力的位移尺寸。系统也可进一步包括动力源、电磁源、数据采集设备以及控制系统中的至少一个,与细长导管组件操作地连接。

[0028] 某些被动温度补偿的实施方式包括相对应的反射构件,其包含具有与光纤的热膨胀系数不同的材料。相应的反射构件的材料可以是掺杂金属光纤和蓝宝石光纤中的一种。

[0029] 在一个实施方式中,被动补偿力感测组件包括结构构件,多个反射构件以及多根光纤,各反射构件贴附至结构构件并从结构构件延伸,各反射构件包括反射表面,各光纤与多个反射构件中相对应的一个成对,各光纤取向并适于辐照多个反射构件中相对应的一个的反射表面且收集至少一部分从相对应的反射构件的近端反射的光线,各成对的光纤和反射构件界定了位于其间的相对应间隙。多个反射构件包含具有与多根光纤的热膨胀系数不同的材料,反射构件的热膨胀系数选成被动地补偿由温度变化所引起的在各成对的光纤和反射构件之间相对应间隙的变化。多根光纤可贴附至结构构件,并可包含具有与结构构件的热膨胀系数不同的材料。

[0030] 在各种实施方式中,结构构件限定了纵轴并包括多个沿纵轴以串联方式彼此顺序地邻接的分段,分段通过位于邻接分段之间的柔性部分桥接。多个分段限定了多个位于邻接多个分段之间的狭缝并通过多个柔性部分中相应的一个桥接。结构构件包括外表面,并且在一个实施方式中,各柔性部分界定了结构构件外表面的一部分。

[0031] 在一个实施方式中,由成对的光纤和反射构件界定的相对应间隙位于多个狭缝中

的一个之内。在各种实施方式中,多个由成对的光纤和反射构件限定的相对应间隙位于多个狭缝中同一个之内。多个反射构件可全都接近多个狭缝中的一个,多个狭缝中的所述一个是多个狭缝中最远侧的。

[0032] 或者,多个狭缝中的一个可以是多个狭缝中最近侧的,并且多个反射构件与结构构件可具有相同的热膨胀系数。多根光纤也可贴附至多个分段中的最近侧并延伸使得成对的光纤和反射构件的相对应间隙接近多个狭缝中最近侧的一个。多根光纤中的每一个可适于发出光线到相应的反射构件的近端上。

[0033] 在另一个实施方式中,制造用于导管的力传感器的方法包括设置具有反射构件的结构构件并布置光纤远端与反射构件相对。光纤和反射构件界定了位于其间的距离,距离在预定值的范围之内,并响应于施加在结构构件上的力。反射构件可具有补偿由结构构件和反射构件温度变化所引起的光纤和反射构件之间距离变化的热膨胀系数。

[0034] 在一个实施方式中,主动补偿光纤力感测组件中热诱导误差的方法包括设置包括第一段和第二段的结构构件,第一段和第二段界定了位于其间的分离,分离通过柔性构件桥接,第二段包括反射构件。具有远端的光纤贴附至第一段,远端取向以界定在远端和反射构件之间的间隙。在一个实施方式中,柔性构件与贴附的光纤沿直径相反。柔性构件可装配温度传感器。在一个实施方式中,设置与微处理器操作地连接的温度感测模块,温度感测模块适于接收来自于温度传感器的信号,微处理器与计算机可读存储设备操作地连接。配置计算机可读设备包括用于微处理器的指令,指令包括:

- [0035] • 接收来自于温度感测模块的信息,该信息基于从温度传感器接收到的信号;
- [0036] • 基于信息判定柔性部分的温度变化,温度变化相对于参考温度;以及
- [0037] • 基于柔性部分的温度变化推断间隙尺寸的变化。

附图说明

- [0038] 图1是本发明实施方式中应变感测系统的框图;
- [0039] 图2A是本发明实施方式中干涉型光纤传感器的示意图;
- [0040] 图2B是本发明实施方式中强度变化光纤传感器的示意图;
- [0041] 图3是具有本发明实施方式中光纤力感测组件的导管组件远侧部分的局部剖视图;
- [0042] 图4是本发明实施方式中光纤力感测组件的放大立体图;
- [0043] 图5是图4的光纤力感测组件的垂直投影图;
- [0044] 图6A是图5的力感测组件的干涉间隙的局部放大图;
- [0045] 图6B是本发明实施方式中光纤力感测组件的固有干涉间隙的局部放大图;
- [0046] 图6C是本发明实施方式中力感测组件的干涉间隙的局部放大图;
- [0047] 图7-10是图5的光纤力感测组件的剖面图;
- [0048] 图11是本发明实施方式中限定圆形段的挠曲部分的放大剖面图;
- [0049] 图12A和12B分别描绘图5的光纤力感测组件在轴向负荷和横向负荷下的弯曲变形;
- [0050] 图13是本发明实施方式中光纤力感测组件的放大立体图;
- [0051] 图13A和13B是图13的力感测组件的剖面图;

- [0052] 图14是本发明第三实施方式中光纤力感测组件的放大立体图；
[0053] 图14A和14B是图14的力感测组件的剖面图；以及
[0054] 图15是本发明实施方式中光纤力感测组件的剖面图。

具体实施方式

[0055] 参照图1,根据本发明描绘了位移感测系统40的实施方式。位移感测系统40可包括电磁源42、耦合器44、接收器46、与微处理器48操作地连接的操作员控制台47以及计算机可读存储设备49。电磁源42输出本质上基本是稳态的电磁辐射的传输辐射50,诸如激光或宽带光源。诸如光缆的传输线52运载传输辐射50至耦合器44,耦合器44通过传输/接收线54并通过包含在柔性、细长的导管组件57内的光纤元件53(图2A)把传输辐射50引导到光纤感测元件60。如图1中描绘的,导管组件57的光纤元件53以及传输/接收线54可通过连接器56相连接。

[0056] 导管组件57可具有适于插入到人体血管或器官中的宽度和长度。在一个实施方式中,导管组件57包括近侧部分57a、中间部分57b和远侧部分57c。远侧部分57c可包括容纳光纤感测元件60的端部执行器58。取决于应用,导管组件57可以是中空结构(即,具有内腔)或非中空结构(即,没有内腔)。在本发明的各种实施方式中,导管组件57包括间隙55,其响应于施加在端部执行器58上的接触力。

[0057] 在一个实施方式中,温度传感器62(图2A)与连接器56引出的引线64一起通过导管组件57。引导线64可通到温度感测模块66,该温度感测模块66调节从温度传感器62接收到的信号并将该信号转化为数字信号68。然后数字信号68可被发送至微处理器48来处理。

[0058] 参照图2A,干涉型光纤感测元件60a描绘成本发明实施方式中的光纤感测元件60。在这个实施方式中,传输辐射50进入干涉间隙55a,该干涉间隙55a由结构构件72界定。在一个实施方式中,温度传感器62设置成感测结构构件72的温度。进入干涉间隙55a的辐射中的一部分作为反射辐射74返回到导管组件57的光纤元件53中,该反射辐射74界定了通过例如法布里-珀罗谐振器(Fabry-Perot resonator)的多次相互反射原理产生的调制波形74a。随着下面图6A的讨论找到有关干涉原理的更多讨论。

[0059] 参照图2B,强度变化光纤感测装置60b描绘成本发明实施方式中的光纤感测元件60。在这个实施方式中,传输辐射50进入强度变化间隙55b,传输辐射50的一部分反射回到光纤元件53中。光纤元件53接收到的反射辐射74b的强度随强度变化间隙55b的尺寸相反地变化。

[0060] 反射辐射74能够通过传输/接收线54传输回接收器46。位移感测系统40可以以10Hz示范且非限制的速率查询位移感测元件60。接收器46选择用来检测反射辐射74对应于间隙55的尺寸的特征(即,调制波形74a的频率或反射光线74b的强度)。接收器46把到来的反射辐射74操作和/或转化成数字信号以便由处理器48处理。

[0061] 参照图3,包括消融头部90且包括光纤力感测组件92的端部执行器88的实施例描绘在本发明的实施方式中。光纤力感测组件92可配置成多个分段的结构构件96,其弯曲以响应施加在端部执行器88远侧末端94上的接触力F,例如,当远侧末端94接触血管或器官的壁时。

[0062] 理解到,诸如本领域中已知的用于血管或器官的诊断或治疗的不同种类的一个或

多个端部执行器58,例如标测电极或消融电极可用在本发明中。例如,导管组件57可配置成电生理学导管来执行心脏标测和消融。在其它实施方式中,导管组件57可配置成把药物或生物活性剂递送到血管或器官壁,或者执行诸如经心肌血管重建术(transmyocardial revascularization)或冷冻消融(cryo-ablation)的微创手术。

[0063] 参照图4至11,包括四段式结构构件102和多根光纤104的光纤力感测组件98a描绘在本发明的实施方式中。在这个实施方式中,四段式结构构件102限定了纵轴线110并包括外表面112。四段式结构构件102被分成四个分段116,标识为近侧段118、第一中间段120、第二中间段122以及远侧段124。分段116沿纵轴110以串联排列彼此顺序地相邻。

[0064] 在一个实施方式中,分段116通过多个分别标识为柔性部分128a、128b和128c的柔性部分128桥接,这样限定了多个分别标识为挠曲轴线130a、130b和130c的挠曲轴线130(在图7、8和9中描绘的最好)。在一个实施方式中,分段116的相邻构件界定了多个狭缝136,各狭缝136具有分离尺寸138并各限定了近侧平面139和远侧平面140(图6A)。为清楚起见,狭缝136和分离尺寸138分别标识为136a到136c以及138a到138c。分离尺寸138a、138b和138c可以是大致相同的大小(如描绘的)或不同的大小(未描绘)。各狭缝136限定了它自己的近侧平面139和远侧平面140,在图5中分别描绘为139a到139c和140a到140c。

[0065] 四段式结构构件102可包括多个在外表面112上形成的凹槽142(标识为凹槽142a、142b和142c)。凹槽142可绕纵轴线110旋转等距地隔开(例如,对于3光纤系统,以120°隔开),并可以沿着四段式结构构件102以大体轴向方向取向。

[0066] 光纤104(标识为光纤104a、104b和104c)限定了多个光传播轴线148和远端150(分别标识为148a到148c和150a到150c)。光纤104放置在凹槽142中并可由诸如环氧树脂(epoxy)的灌封胶144贴附在此使得远端150终止于接近狭缝136的近侧平面139处(图6A)。作为灌封胶144的替代或补充,光纤104可压入配合或以其它方式紧固至四段式结构构件102。光纤104可结合至邻近各狭缝136的分段116以被查询。例如,光纤104b可安装在中间段122上形成的凹槽142b的部分之内。光纤104b的剩余部分可留下以在凹槽142b的剩余部分之内自由地滑过,以便光纤104b不会在相邻的分段之间形成结构桥接,该结构桥接会抑制光纤力感测组件98a的柔性。

[0067] 再次参照图6A,光纤104a可沿凹槽142a延伸,终止于接近狭缝136a的近侧平面139处。同样,光纤104a和104b可分别沿凹槽142b和142c延伸,分别终止于接近狭缝136b和136c处。在一个实施方式中,各具有近端152(标识为近端152a、152b和152c)的反射构件151(标识为反射构件151a、151b和151c)是这样设置的,使得近端152接近特定狭缝136的远侧平面140。每个反射构件151是成对的并与多根光纤104中对应的一个的远端150相对齐。多个间隙153(标识为间隙153a、153b和153c)被界定出,间隙在各光纤104的各远端150和反射构件151的近端152之间。

[0068] 对于要求的发明的目的来说,“接近”特定平面139或140定义为比靠近其他平面更靠近那些平面中的一个,但不必与该平面齐平。例如,假如远端150a与近侧平面139a齐平、稍微凹进或稍微突出近侧平面139a(后者描绘在图6A中),并且远端150a比靠近远侧平面140a更靠近近侧平面139a,那么远端150a称作“接近”近侧平面139a。同样地,假如反射构件151a的近端152a与远侧平面140a齐平、在远侧平面140a的稍微远侧或在远侧平面140a的近侧稍微延伸(又一次,后者描绘在图6A中),并且反射构件151a的近端152a比靠近近侧平面

139a更靠近远侧平面140a,那么反射构件151a的近端152a“接近”远侧平面140a。

[0069] 间隙153可以是例如干涉型或强度变化型。这里使用的“干涉间隙”是具有诸如在迈克耳孙干涉仪或法布里-珀罗共振器中观察到的干涉共振器属性的间隙。同样地,这里使用的“间隙干涉仪”是利用干涉间隙产生干涉图样的干涉仪。“强度变化间隙”是配置成俘获随间隙尺寸相反地变化的反射强度的间隙。

[0070] 间隙153可表征为具有尺寸或操作长度 δ (间隙153a的 δ_a 描绘在图6A中), δ 定义为光纤104远端150与反射构件151各自的近端152之间的距离。操作长度 δ 可以与各自的狭缝136的尺寸不同,并且可以对于每一个狭缝136都是不同的。操作长度 δ 确定了通过光纤104返回的反射辐射的特性(即,干涉图样的频率或反射辐射的强度)。远端150可以是半反射表面或涂层155,该半反射表面或涂层155再次反射一部分来自于高反射表面或涂层154的反射光,同时将通过的反射光的剩下部分基本透射以便由位移感测系统40检测。在某些实施方式中,高反射表面154不需要涂层,但是可以由反射构件151的材料设置。

[0071] 图6A的光纤104a描绘为具有自由长度 L_{F0} ,其定义为远端150a与贴附光纤104至凹槽142a的灌封胶144之间的距离。同样地,反射构件151a描绘为具有自由长度 L_{RM} ,其定义为近端152a与贴附反射构件151a至凹槽142a的灌封胶144之间的距离。这里,灌封胶144之间的距离称作总距离 L_{TOT} 。在一些实施方式中,灌封胶144之间的总距离 L_{TOT} 会与狭缝136的尺寸大致相等。也就是说,灌封胶144会与近侧平面139和远侧平面140齐平。对于每一个光纤/反射构件对104a/151a、104b/151b和104c/151c来说,尺寸 L_{TOT} 、 L_{RM} 和 L_{F0} 可变化。

[0072] 通过上述布置,光纤104的每一个光传播轴线148与成对的反射构件151的近端152相一致。例如,如图6A中描绘的,光传播轴线148a对着反射构件151a的近端152a。反射构件151的近端152可做成高反射的。另一方面,光纤104的远端150可做成仅部分反射的以建立法布里-珀罗效应。当电磁辐射通过光纤104传输时,反射构件151的高反射近端152与光纤104的部分反射远端之间的相互作用在其间产生了相互反射,从而形成具有依赖于间隙153尺寸的频率的干涉图样。所产生的调制波形74a如随同图1和2讨论中所说明的通过光纤104传输回来。

[0073] 在另一个实施方式中,光纤104的远端150没有用半反射涂层处理,实际上用抗反射涂层(未描绘)处理。这种布置可增强或优化经由光纤53(图1)返回到接收器46的反射辐射的强度。从返回的反射光强度可推断出间隙153的大小,返回的反射光强度由接收器46检测。由特定光纤104收集的反射光的强度可随着远端150与反射构件151近端152的反射表面154之间的距离变化。

[0074] 现在参照图6B,在本发明实施方式中光纤力感测组件98c描绘为包括具有固有干涉腔158的拼接光纤157。光纤力感测组件98c包括许多与力感测组件98a相同的方面,该相同的方面由类似编号的附图标记标识。图6B的描写描绘了光纤104的纤芯104x以及包层104y。

[0075] 拼接光纤157包括光纤104和反射构件151,代替在非接触端部之间界定出的间隙,通过把端部150和152拼接在一起,在光纤104远端150和反射构件151近端152之间获得了固有干涉腔158。这样间隙153限定在空腔158的轴向端部之间。

[0076] 在拼接操作之前,空腔158在端部150和/或152中至少一个上形成(图6B的描绘是在光纤104远端150上形成的空腔的非限制描绘)。空腔158可通过例如化学溶蚀或激光消融

工艺形成,该化学溶蚀或激光消融工艺从纤芯104x中移去材料并仅有效地留下包层104y。其后,可给反射构件151和光纤104各自的端部分别涂敷高反射涂层154以及部分反射涂层155,然后把光纤104和反射构件151拼接在一起。

[0077] 固有干涉装置的拼接光纤157或任何其它变体会在各狭缝挠曲光束长度163的位置处机械地桥接狭缝136。机械桥接有效地提高了力感测组件98c的刚性。为了保持对接触力期望的灵敏性,相对的柔性部分128的抗弯能力或“刚度”可随由桥接光纤的出现而引起的增强刚度成比例的减小(见图11以及伴随面积惯性矩的讨论)。在极端情况下,组件的弹性可通过去除柔性部分128(未示出)而转移给桥接光纤。

[0078] 在各种实施方式中,结构构件由诸如钛的金属材料制成,然而光纤由在选择波长高度透明的材料制成,诸如硅石或蓝宝石。这些材料的热膨胀系数(CTE)基本上不同,硅石的热膨胀系数在 1 到 $2 \times 10^{-6} \text{ m/m-K}$ (1 到 $2 \mu\text{m/K}$)范围之间,而钛的热膨胀系数超过了 $8 \mu\text{m/K}$ 量级。各热膨胀系数的差别会导致在间隙153操作长度 δ 上相当程度的热诱导变化,若是不修正或不补偿,会导致在接触力指示上大的误差。

[0079] 如先前提到的,金属材料分段116和柔性部分128会随金属材料的热膨胀系数成比例的变化。于是,对于特定的温度变化而言,特定光纤104的灌密封胶144和与它成对的反射构件151之间的总距离会随金属材料的热膨胀系数成比例的变化。同时,自由长度 L_{F0} 和 L_{RM} 会分别随反射构件151和光纤104的热膨胀系数成比例的变化。数学上,这种关系表述为:

$$[0080] \quad (1 + \alpha_M \cdot \Delta T_M) \cdot L_{TOT} - (1 + \alpha_{F0} \cdot \Delta T_{F0}) \cdot L_{F0} - (1 + \alpha_{RM} \cdot \Delta T_{RM}) \cdot L_{RM} = \delta \quad \text{等式(1)}$$

[0081] 这里 α 是热膨胀系数, ΔT 是温度的局部变化, δ 是间隙153/空腔158的操作长度,下标M、F0和RM分别指定金属、光纤和反射构件。量 $\alpha_M \cdot \Delta T_M \cdot L_{TOT}$ 是灌密封胶144之间的长度变化,其归因于金属结构构件的温度变化,而数量 $\alpha_{F0} \cdot \Delta T_{F0} \cdot L_{F0}$ 和 $\alpha_{RM} \cdot \Delta T_{RM} \cdot L_{RM}$ 是光纤104和反射构件151延伸部分的长度变化,是由它们各自的温度变化而引起的。

[0082] 进一步简化的假设是假定对于相应的狭缝而言 ΔT_{F0} 和 ΔT_{RM} 被 ΔT_M 左右并大致等于 ΔT_M 。也就是说, $\Delta T_{F0} = \Delta T_M = \Delta T_{RM} = \Delta T$ 。然后,归因于温度变化的 δ 的变化变成:

$$[0083] \quad \partial \delta / \partial T = \alpha_M \cdot L_{TOT} - \alpha_{F0} \cdot L_{F0} - \alpha_{RM} \cdot L_{RM} \quad \text{等式(2)}$$

[0084] 这样,对于特定的总温度变化 ΔT 而言,间隙尺寸 $\Delta \delta$ 中的热诱导变化近似为

$$[0085] \quad \Delta \delta = (\alpha_M \cdot L_{TOT} - \alpha_{F0} \cdot L_{F0} - \alpha_{RM} \cdot L_{RM}) \cdot \Delta T \quad \text{等式(3)}$$

[0086] 这里 ΔT 是相对于参考温度的温度变化。知道等式3中各种 α 和 L 的值,可以通过测量 ΔT 来主动地补偿间隙尺寸 $\Delta \delta$ 中的热诱导变化。

[0087] 注意到,在整个关注的温度范围内(例如,从 0 到 40°C)量 $(\alpha_M \cdot L_{TOT} - \alpha_{F0} \cdot L_{F0} - \alpha_{RM} \cdot L_{RM})$ 可合理地近似成常数。这样,等式(3)可简化为

$$[0088] \quad \Delta \delta = \Psi \cdot \Delta T \quad \text{等式(4)}$$

[0089] 这里 $\Psi = (\alpha_M \cdot L_{TOT} - \alpha_{F0} \cdot L_{F0} - \alpha_{RM} \cdot L_{RM})$ 。在一个实施方式中, Ψ 值可通过测量在不同 ΔT 时的 $\Delta \delta$ 来校准。 Ψ 值可近似为常数,或通过对校准数据进行曲线拟合而作为与温度有关的参数。

[0090] 等式(1)的关系可用于建立热诱导尺寸变化的被动修正关系。在参考温度, ΔT_M , ΔT_{F0} 和 ΔT_{RM} 都是零,所以归因于热膨胀/收缩的长度变化 $\alpha_M \cdot \Delta T_M \cdot L_{TOT}$, $\alpha_{F0} \cdot \Delta T_{F0} \cdot L_{F0}$ 和 $\alpha_{RM} \cdot \Delta T_{RM} \cdot L_{RM}$ 都是零,于是等式(1)简化为

$$[0091] \quad L_{TOT} - L_{F0} - L_{RM} = \delta \quad \text{等式(5)}$$

[0092] 简化的假设是假定 ΔT_{F0} 和 ΔT_{RM} 被 ΔT_M 左右并等于 ΔT_M 。也就是说,

[0093] $\Delta T_M = \Delta T_{F0} = \Delta T_{RM} = \Delta T$ 。

[0094] 数学上,等式(1)和(5)可以是等同的,隔离并消除参数 δ 和 ΔT 给出

[0095] $\alpha_M \cdot L_{TOT} - \alpha_{F0} \cdot L_{F0} - \alpha_{RM} \cdot L_{RM} = 0$ 等式(6)

[0096] 通过各种参数的适当选择完成了等式(6)的物理实现,从而保持操作长度 δ 在整个温度变化 ΔT 范围内恒定。通过对等式(6)中除了一个以外的所有参数赋值,可确定剩下的参数的值。

[0097] 等式(3)通常可用于参数分析以便选出对于可获得的热膨胀系数的特定组合而言适当的自由长度。特别地,图6A和图6B配置中反射构件151的出现提出了一种被动补偿结构构件102尺寸中的热诱导变化以及操作长度 δ 中随之而产生的变化的方法。例如,假如热膨胀系数 α_M 、 α_{F0} 和 α_{RM} 是已知的,并且长度 L_{TOT} 和 L_{F0} 是已知或赋值的,那么可求解出反射构件的自由长度 L_{RM} :

[0098] $L_{RM} = (\alpha_M \cdot L_{TOT} - \alpha_{F0} \cdot L_{F0}) / \alpha_{RM}$ 等式(7)

[0099] 或者,例如,假如热膨胀系数 α_M 和 α_{F0} 是已知的,并且长度 L_{TOT} 、 L_{F0} 和 L_{RM} 是赋值的,那么可求解出反射构件要求的热膨胀系数 α_{RM} :

[0100] $\alpha_{RM} = (\alpha_M \cdot L_{TOT} - \alpha_{F0} \cdot L_{F0}) / L_{RM}$ 等式(8)

[0101] 参照图6C,光纤力感测组件98b描绘在本发明的实施方式中。在这个实施方式中,光纤104被安装成与狭缝136的近侧平面139大致齐平,反射构件151设置成除操作长度 δ 的余量之外大体延伸长度 L_{TOT} 。同样是在图6C的实施方式中,反射构件151由与结构构件102相同的材料,或者至少是具有与反射构件151相同的热膨胀系数的材料制成。在一个实施方式中,结构构件102由钛制造,而反射构件151包含钛棒或线,其由灌封胶144(如描绘的)或通过焊接工艺贴附至结构构件102。在另一个实施方式中(未描绘),反射构件151与结构构件102一体形成。

[0102] 功能上,对于感测组件98b的配置而言,匹配结构构件102和反射构件105的热膨胀系数基本上补偿了这些组件的温度变化。通常,由于长度 L_{RM} 仅比分离尺寸138稍短,反射构件151长度 L_{RM} 的变化接近于分离尺寸138的变化。这样,通过反射构件151中的变化极大地弥补了分离尺寸138中的变化。

[0103] 当光纤104没有延伸超过灌封胶144时,诸如图6C配置中呈现的,简化出现了。考虑感测组件98b经历了温度增加的情况。这会导致狭缝136的分离尺寸138增加,从而导致距离 L_{TOT} 也增加了。但是相同热膨胀系数且几乎相同长度的反射构件151会增加几乎相同的长度,导致在分离尺寸增加使光纤远端150朝向反射构件151近端152的同时,反射构件151朝向光纤104的远端150增长。

[0104] 当感测组件98b温度降低时,相同的补偿机理产生了。分离尺寸138减少,且反射构件151的长度 L_{RM} 减少,导致反射构件从光纤104的远端150退缩正像分离尺寸减少使光纤远端150朝向反射构件151的近端152。

[0105] 在数学术语中,简化源于把光纤104的自由长度 L_{F0} 缩小为零。对于 $L_{F0}=0$ 而言,等式(1)简化为

[0106] $(1 + \alpha_M \cdot \Delta T_M) \cdot L_{TOT} - (1 + \alpha_{RM} \cdot \Delta T_{RM}) \cdot L_{RM} = \delta$ 等式(9)

[0107] 假定 $\Delta T_M = \Delta T_{RM} = \Delta T$, 并且注意到温度 ∂T 的变化与 $\partial \Delta T$ 的变化相同,归因于温度

∂T 的变化, 间隙尺寸 δ 的变化表示为

$$[0108] \quad \partial \delta / \partial T = \alpha_M \cdot L_{TOT} - \alpha_{RM} \cdot L_{RM} \quad \text{等式(10)}$$

[0109] 对于反射构件151具有与结构构件相同的热膨胀系数(也就是, $\alpha_{RM} = \alpha_M$)的系统而言, 等式(10)进一步简化为

$$[0110] \quad \partial \delta / \partial T = \alpha_M \cdot (L_{TOT} - L_{RM}) = \alpha_M \cdot \delta \quad \text{等式(11)}$$

[0111] 对于特定的总温度变化 ΔT 而言, 间隙尺寸 $\Delta \delta$ 的变化近似为

$$[0112] \quad \Delta \delta = \alpha_M \cdot \delta \cdot \Delta T \quad \text{等式(12)}$$

[0113] 注意到, 不管长度 L_{TOT} 或 L_{RM} 是多少, 等式(12)都适用。

[0114] 归因于热效应在等式(1)中表示为 $\alpha_M \cdot \Delta T_M \cdot L_{TOT}$ 的灌封胶144之间的长度变化与灌封胶144之间的尺寸 L_{TOT} 成比例。也就是说, L_{TOT} 值越大, 归因于热变化的可能误差越大。因此, 光纤力感测组件192a的 L_{TOT} 值可基本上大于组件180的 L_{TOT} 值。

[0115] 例如, 在代表性但非限制性实施方式中, 操作长度 δ 大约是 $15 \mu\text{m}$, 力灵敏度在 0.1 到 0.25 克力(gmf)每纳米(nm)轴线位移的范围内(即, 位移灵敏度在 4 到 10nm/gmf 的范围内), 这里“克力”相当于一克质量的物体在标准重力下所受到的重力。钛的热膨胀系数大约是 $8 \mu\text{m/K}$ 。 L_{TOT} 的代表性(即, 非限制性)值在大约 0.2mm 到 1mm 的范围内。使用这些代表性但非限制性值, 对温度变化的灵敏度在 0.4 到 1gmf/K 的范围内。在许多应用中, 需要分辨出力在 $\pm 1 \text{gmf}$ 内。这样, 由于未补偿系统中(其中温度在消融操作过程中变化了几个开尔文)的热诱导误差, 力感测系统期望的分辨率可能变低。

[0116] 然而, 使用上述观点和方法可实现抵消温度变化的影响。不依赖于具有高反射近端152的反射构件151来传输光线。这样, 为了期望的热膨胀系数, 反射构件151的热膨胀系数可被修改而不考虑光传输特性。因此, 在一个实施方式中, 反射构件151可替换成具有高热膨胀系数的光纤, 例如, 假如由具有热膨胀系数大约是 $4 \mu\text{m/K}$ 的铝掺杂光纤替换。在另一个实施方式中, 也可使用具有 $12 \mu\text{m/K}$ 热膨胀系数的蓝宝石光纤。通过根据等式(6)改变蓝宝石普通光纤的相对长度可达到被动补偿的微调。

[0117] 对于图6C的配置, 再考虑结构构件102由具有 $8 \mu\text{m/K}$ 热膨胀系数(α_M)的钛制成并具有 $15 \mu\text{m}$ 操作长度 δ 的实施例。根据等式(11)所产生的间隙尺寸的变化 $\Delta \delta$ 会是 0.120nm/K 。在力灵敏度大约是 4nm/gmf 的系统中, 作为其结果误差会在 0.015gmf/K 量级上一超过未补偿系统几乎两个数量级的改进。

[0118] 于是, 这里 L_{F0} 简化为零, 选择与结构构件热膨胀系数相同的反射构件151的热膨胀系数很大程度上抵消了热膨胀或收缩的影响。在一些实施方式中, 反射构件105的材料可具有足够的反射系数以便取消涂膜的需要。近端152可被磨光以提供全反射表面, 和/或可仍然用涂层涂敷。

[0119] 注意到, 上面表示的等式(1)到(12)不但适用于开放式间隙, 而且适用于由固有干涉腔158限定的间隙。由图6B的拼接光纤157引起的桥接的影响很容易校正。

[0120] 在某些实施方式中, 各柔性部分128可装配有温度传感器来主动补偿温度变化。图4的描绘呈现出热电偶149, 其沿结构构件102的外部布设以便热电偶149的温度感测接合点与柔性部分128b的外表面接触。在其它实施方式中, 温度传感器可沿结构构件102的内部布设成与柔性部分的内表面感测接触。

[0121] 在一个实施方式中, 各柔性部分128a、128b和128c装配有各自的温度传感器(未描

绘)。通过感测各柔性部分128的温度变化,可推断出对尺寸138的热诱导变化。温度传感器可看作是 ΔT 以解决间隙尺寸的变化 $\Delta \delta$ (例如,用来计算等式(3)、(4)或(12))从而主动补偿。

[0122] 在另一个实施方式中,由温度传感器提供的值可用在诸如Leo'092中描述的校正装置中,这里局部柔性部分的温度变化 ΔT_m 看作是位移传感器的温度变化。注意到,不像Leo'092中所教导的,温度传感器149不必接近光纤104或反射构件151,但是反之温度传感器149可事实上在直径上对着光纤/反射构件对,该光纤/反射构件对正在由该温度传感器149校正。

[0123] 在本发明一个实施方式中,主动地补偿热诱导误差的方法可被编程到计算机可读存储设备49中(图1)。计算机可读存储设备49可被编程以接收来自于温度感测模块66的信息,该信息基于从温度传感器62接收到的信号。例如,在室温力感测组件无负荷的条件下可形成参考测量。例如,在结构构件102的柔性部分128可测量出相对于参考温度的力感测组件的温度变化。例如,用等式(3)、(4)或(12)中表示的关系,计算机可读存储设备49可被编程以计算归因于温度变化的间隙尺寸变化。

[0124] 狭缝136可这样形成,使它们横向延伸穿过四段式结构构件102的主要部分。而且,狭缝136可取向成基本上垂直于纵轴110(如描绘的)或关于纵轴成锐角(未描绘)延伸。在描绘出的实施方式中,结构构件包括具有狭缝136的空心柱形管156,该狭缝136形成于空心柱形管156的一侧,延伸通过那里并横穿空心柱形管156的内径160达到深度162(图7)。

[0125] 再参照图7到11,结构构件102的横剖面描绘在本发明的实施方式中。在狭缝136形成后剩余的柔性部分128大致限定了例如切去小圆弓形的大圆弓形(例如,图7到9以及11)。或者,也可限定没有切去部分的圆弓形(例如,图14B)。横贯空心柱形管156内径160的狭缝136的深度162可以是多变的以便形成柔性部分128期望的柔性。也就是说,狭缝136的深度162越大,柔性部分128越柔软。狭缝136可通过技工可用的各种工艺和方法形成,诸如但不限于锯切、激光切割或放电加工(EDM)。

[0126] 狭缝136可这样形成,使柔性部分128限定非同心的挠曲轴线130。就“非同心的”挠曲轴线,它意味着各自的挠曲轴线没有在轴向对齐。也就是说,挠曲轴线130a在空间中限定了不与挠曲轴线130b和130c重合的轴线,并且挠曲轴线130b在空间中限定了不与柔性轴线130c重合的轴线。在某些实施方式中,挠曲轴线130与终止于由挠曲轴线桥接的同一狭缝136中的光纤104的远端150的位置沿直径相反。例如,柔性部分128a可直径上地对着远端150a等。

[0127] 柔性部分128的横剖面164描绘在图11中。该横剖面的特征在于中性或挠曲轴线130穿过的面积质心C,并具有正交的惯性轴线x-x和y-y,在该横剖面上惯性轴线x-x标识了关于其面积惯性矩最小的轴线。在一些实施方式中,y-y轴线大致穿过纵轴110。圆弓形几何形状提供了远大于关于惯性轴线x-x刚性的关于惯性轴线y-y的刚性。考虑具有 $\pi/2$ 弧度的角度(90°)的圆弓形。绕惯性轴线y-y的面积惯性矩是绕惯性轴线x-x的面积惯性矩的大约二十倍。于是,引起绕惯性轴线y-y力矩的力引起的弯曲通常会远小于相对于关于惯性轴线x-x施加同样的力矩所引起的弯曲。因此,绕惯性轴线y-y的力矩倾向于以邻接部分之间扭转力的形式传递,而绕惯性轴线x-x的力矩会倾向于引起柔性部分128的变形以及随后的邻接分段116之间的挠曲。

[0128] 描绘在图9和14B中的挠曲光束长度163定义为在相对应的光纤104远端150处挠曲轴线130与传播轴线148之间的距离,该距离垂直于惯性轴线x-x。例如,通过把远端150c与狭缝136c的挠曲轴线130c定位成沿直径相对,挠曲光束长度163被最大化,并且随之而来的光纤104远端150与反射构件151近端152之间的间隙153的操作长度 δ 的变化也被最大化。

[0129] 参照图12A和12B,分别响应于轴向力FA和横向力FL的光纤力感测组件98a的操作描绘在本发明的实施方式中。轴向力FA导致分段116以基本上纯弯曲的动作绕不同的柔性部分128的惯性轴线x-x弯曲,从而导致接近光纤104远端150的狭缝136的尺寸减小(图12A)。依次,这导致间隙153的操作长度 δ 减小,从而导致光纤104接收到的反射辐射的特性改变(即,持续横过间隙153的干涉图样的频率,或反射辐射的强度)。

[0130] 横向力FL通常会导致四段式结构构件102更复杂的变形。在图10B的描绘中,横向力FL基本上平行于柔性部分128a的惯性轴线y-y施加。这导致在引起间隙153a尺寸 δ_a 可以忽略的变化的同时,柔性部分128a转化远侧段124与第二中间段122之间的力矩。转化的力矩导致柔性部分128b和128c绕它们各自的惯性轴线x-x弯曲,这依次导致狭缝136b在接近光纤104b远端150b处靠拢,并使狭缝136c在接近光纤104c远端150c处展开。注意到在图12B的描绘中,由于横向力FL不是垂直于各自的惯性轴线x-x作用,柔性部分128b或128c都不是纯弯曲的。因此,绕惯性轴线x-x弯曲的程度大体上会与垂直于惯性轴线x-x作用的横向力FL的分量成比例。

[0131] 理解到,图12A和12B分别示出纯轴向和纯横向的力,但是在三维空间中具有轴向和横向分量的组合力矢量会通过叠加来组合描述的总效果。于是,通过校准光纤力感测组件在这些纯负荷情况下的响应并叠加各种响应以推断轴向和横向分量,可确定在三维空间中的力矢量。

[0132] 前述的实施方式可提供操作长度 δ 相对于柔性部分128所经受的应变的变化的机械放大。分段116在垂直于各自一个弯曲部分128的惯性轴线x-x位置处的挠曲与惯性轴线x-x和各自光纤104远端150的各自位置之间的挠曲光束长度163成比例。于是,狭缝136尺寸138的变化在与挠曲轴线130沿直径相对的位置处最大。这样,对于光纤104远端150与挠曲轴线130沿直径相对(如图9中描绘的)的实施方式而言,光纤104处于最大灵敏度的位置。

[0133] 结构构件102可由除空心柱形管之外的其它形式制造,包括但不限于限定了方形、矩形或十字形横截面的管或杆。结构构件102可包括诸如钛或铂/铱的金属材料,或者诸如聚合物或陶瓷的非金属材料。

[0134] 灌封胶144可包含胶或环氧树脂,并可选择成紧密地匹配结构构件102和/或光纤104的热膨胀系数(CTE),或者提供介于结构构件102和光纤104之间的热膨胀系数以便提供在两者之间的过渡。也可作为柔性的目的来选择灌封胶144使得粘合膜的热生长不会在光纤104上施加实质的应变。在有些情况下,使用灌封胶144很薄的膜减轻了光纤104和结构构件102之间差异热膨胀的应变诱导影响。

[0135] 参照图13、13A和13B,具有三段式结构构件182的光纤力感测组件180描绘在本发明的实施方式中。光纤力感测组件180包括许多与组件98a相同的方面,这些相同的方面由相同编号的附图标记标识。三段式结构构件182与四段式结构构件102之间的差别在于三段式结构构件182仅包括位于近侧段118和远侧段124之间单个的中间段184。而且,三段式结构构件的特征在于由两个柔性部分186a和186b把中间段184分别与近侧段118和远侧段124

分开,从而分别限定了远侧或“最远侧”狭缝188a与近侧狭缝188b。

[0136] 光纤104与反射构件151之间的布置可以与涉及图6中描述和讨论的各种结构相同。反射构件可被配置从而被动地补偿热膨胀/收缩,或者反射构件装配有温度传感器从而主动地补偿。被动地和主动地补偿都在上面描述了。

[0137] 在描绘的实施方式中,柔性部分186a和186b限定了各自的挠曲轴线190a和190b,挠曲轴线190a和190b旋转地隔开 180° (即,沿直径上相对)使得它们与纵轴线110基本上共面。同样对于这个实施方式,柔性部分186a和186b的惯性轴线y-y基本上共面。光纤104a和104c以及光纤力感测组件180相对应的反射构件151a和151c延伸进入同一个远侧狭缝188a中,并且与惯性轴线y-y旋转地等距隔开 γ 角但分别位于相反的方向 $+\gamma$ 和 $-\gamma$ 。

[0138] 在操作中,三段式结构构件182通常会以与图12A和12B中描绘相同的方式响应轴向和横向力分量FA和FL。也考虑对横向力分量FLx和FLy的具体响应,描绘在图13B中,这里FLx是垂直于惯性轴线x-x作用的横向力分量,而FLy是垂直于惯性轴线y-y作用的横向力分量。横向力分量FLx会导致绕惯性轴线x-x的纯弯曲,并导致分别类似于狭缝136c和136b中尺寸138c和138b变化的远侧狭缝188a和近侧狭缝188b中的尺寸变化,其描绘在图12B中。各种间隙153的操作长度 δ 变化与远侧狭缝188a和近侧狭缝188b的尺寸变化相一致。

[0139] 然而,横向力分量FLy的检测依赖于关于弯曲部分186a惯性轴线y-y的挠曲,该挠曲通过间隙153a和153c操作长度 δ 的变化来感测。由于柔性部分186关于惯性轴线y-y的刚性远大于关于惯性轴线x-x的刚性,因此对力分量FLy的灵敏性(每单位力测量到的位移)不像对力分量FLx的灵敏性一样高。

[0140] 参照图14、14A和14B,利用三段式结构构件182的光纤力感测组件192a描绘在本发明的实施方式中。光纤力感测组件192a包括许多与组件180相同的方面,这些相同的方面由相同编号的附图标记标识。组件180和192a之间的差别在于,对于光纤力感测组件192a而言,所有光纤104锚固至近侧段118,穿过近侧狭缝188b和单一中间段184,然后终止于接近远侧狭缝188a的地方。光纤力感测组件192a的另一个差别是,光纤104与配对反射构件151的角度分布是不均匀的,并且光纤104/反射构件151位于距惯性轴线y-y比图13中光纤力感测组件180更远的位置处。于是,相对于惯性轴线y-y的旋转位移 γ 不是全部相等的,而是可表征为唯一值 γ_A 、 γ_B 和 γ_C 。在描绘的实施方式中, γ_A 和 γ_B 大致相等。

[0141] 由于几个原因,图14中描绘的光纤力感测组件192a的布置对横向力分量FLy比组件180的布置对横向力分量FLy更加灵敏。第一,感测到的位移是关于柔性部分186a和186b两个部分位移的累加。第二,由中间段184所提供的狭缝188a和188b之间的距离提供了关于柔性部分186b惯性轴线y-y的弯曲位移的机械放大。第三,比起三根光纤104隔开 120° 成均匀的角分布,光纤104和成对反射构件151相对于惯性轴线y-y的平面的旋转位移 γ 不是 90° (γ_C)就是接近 90° (γ_A , γ_B)。

[0142] 相对于均匀分布通过增加角位移 γ_A 和 γ_B ,相对应间隙153a和153b对FLy分量的灵敏性增加了,在 $\gamma=90^\circ$ 时对FLy分量的灵敏性最大。同样注意到,随着 γ 增加,对FLx分量的灵敏性减小了。这里,通过对FLx分量灵敏性有益的折衷部分实现了对FLy分量灵敏性的增强。

[0143] 因此,图14中描绘的光纤力感测组件192a对横向力的灵敏性比图13中光纤力感测组件180的灵敏性更加均衡(更少的方向依赖性)。像上面伴随着图6A和6B的讨论一样,在图

13和14配置中都可执行对归因于温度变化的变化相同的被动补偿。通过给柔性部分186a和186b装配温度传感器,也可使图13和14中光纤力感测组件180或192a的主动补偿成为可能。

[0144] 参照图15,光纤力感测组件192b描绘在本发明的实施方式中。光纤力感测组件192b具有许多与光纤力感测组件192a相同的方面。组件192a和192b之间的主要差别在于,反射构件151延伸穿过远侧狭缝188a并与光纤104在近侧狭缝188b附近光耦合。在描绘的实施方式中,反射构件151也由与三段式结构构件182相同的材料制成。或者,反射构件151由不同材料制成,但具有与三段式结构构件182相同的热膨胀系数。

[0145] 功能上,光纤力感测组件192b提供了与光纤力感测组件192a相同的力灵敏性优势。然而,由于光纤104基本上不延伸超过灌密封胶144,于是实现了上面说明的涉及图6的相同的益处。见等式(9)到(12)以及伴随的讨论。

[0146] 除了包含在此的明确限定外,特此通过引用把包括上面的下述参考文献的全部内容合并在此:授予Leo等的国际公开号No.W02007/015139、授予Leo等的国际公开号No.W02010/079418、授予Kistler等的国际公开号No.W02009/114955;授予Leo等的美国专利号No.8,157,789、授予Leo等的美国专利号No.8,075,498、授予Aeby等的美国专利号No.8,048,063,以及授予Leo等的美国专利申请公开号No.2009/0287092。

[0147] 提及诸如上下、前后、左右等术语是为了描述的便利性,而不是旨在把本发明或它的组成部分限制到任何特定的方向。图中描绘的所有尺寸可随本发明具体实施方式的可能的设计及预期的用途改变,而不会脱离本发明的范围。

[0148] 这里公开的附加的图和方法中的每一个可以分开使用或与其它特征或方法联合使用以提供改进的设备、系统和方法用于制造和使用相同的设备、系统和方法。因此,这里公开的特征和方法的组合可以不必以最广泛的意义实施本发明,而是仅仅公开的用以特别描述本发明代表性的实施方式。

[0149] 为了解释本发明权利要求的目的,明确指出不援引U.S.C第35篇第6段,第112款的规定,除非在主权利要求中叙述了“用于…的装置”或“用于…的步骤”的特定术语。

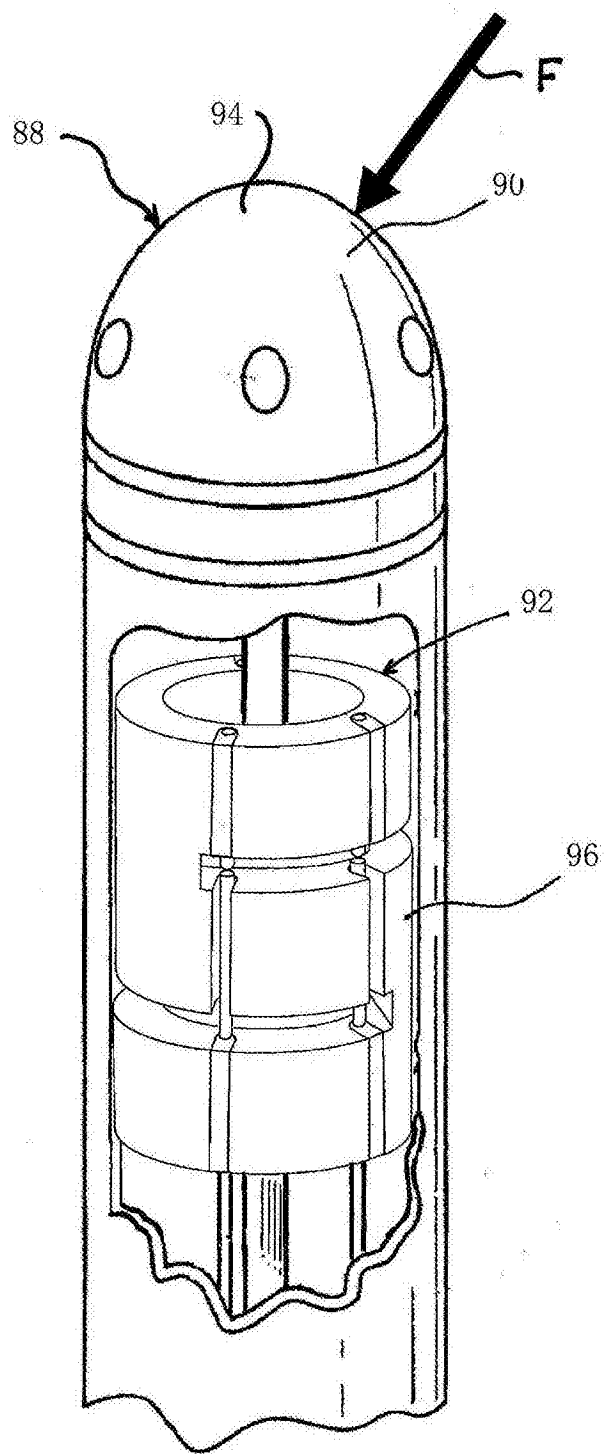


图3

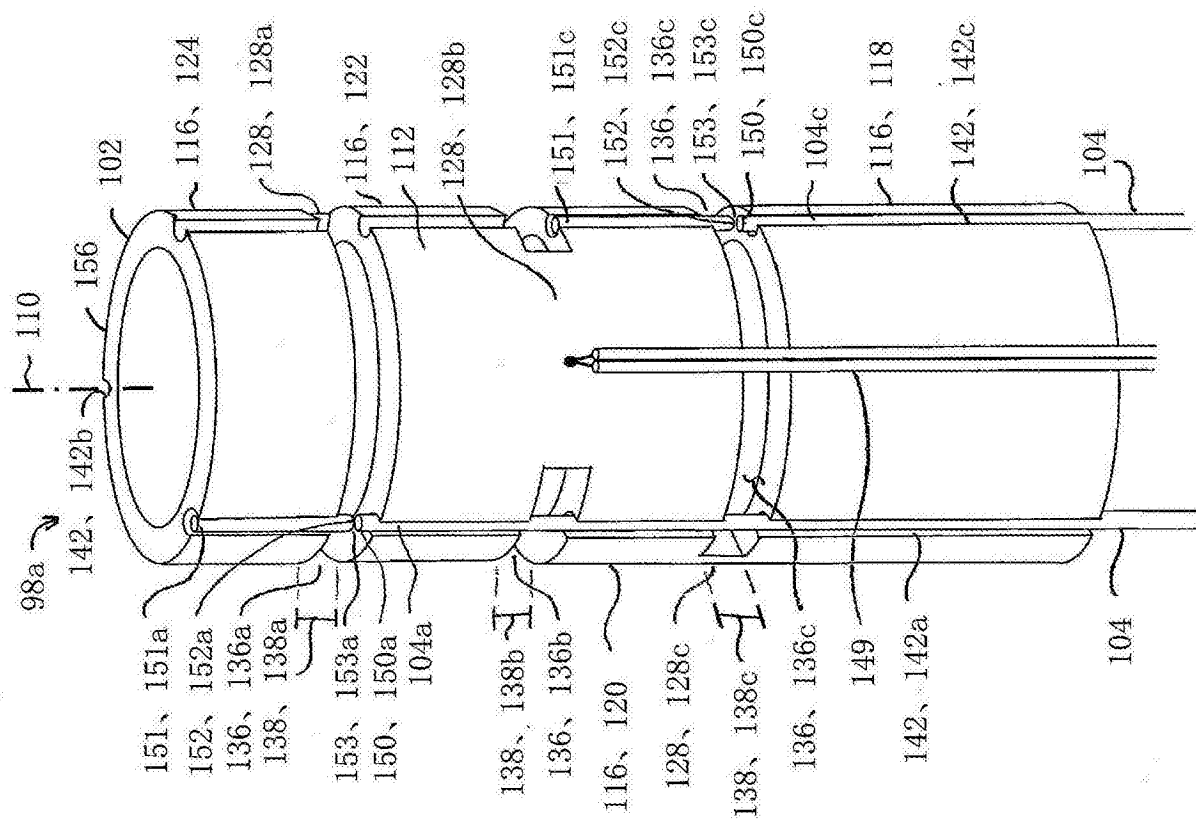


图4

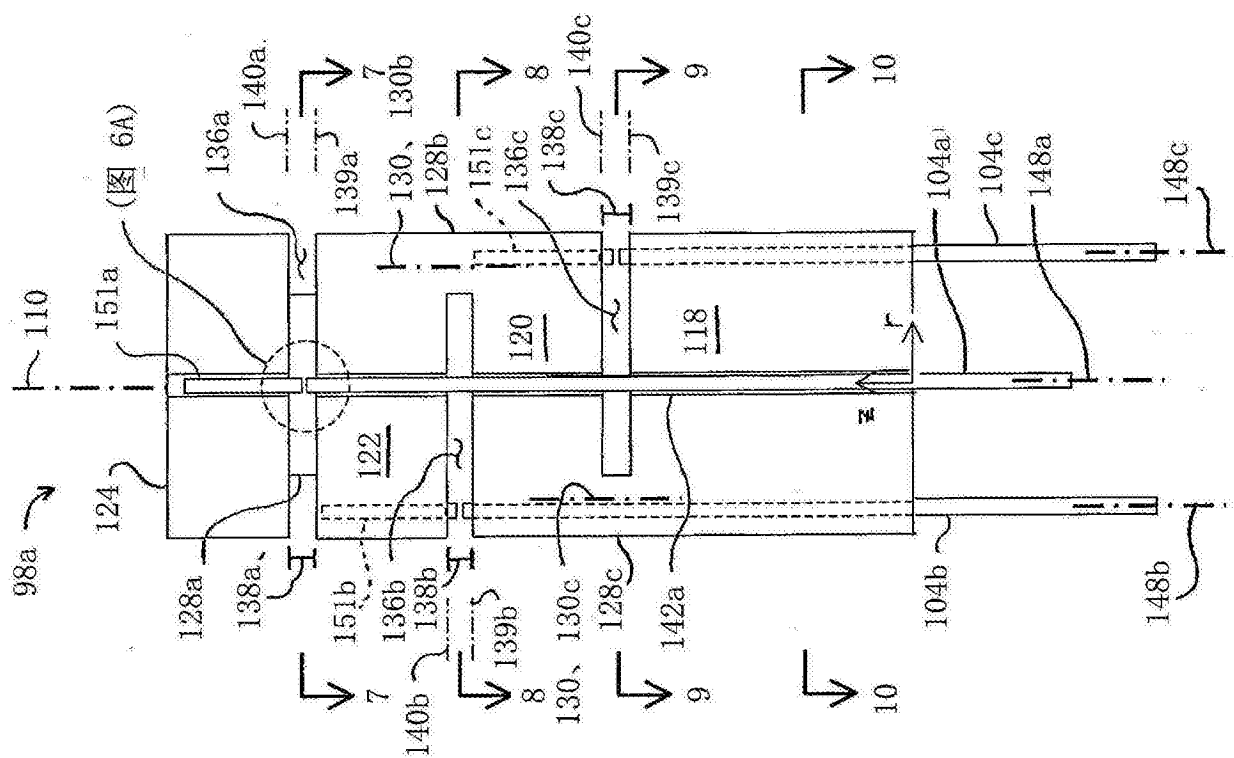


图5

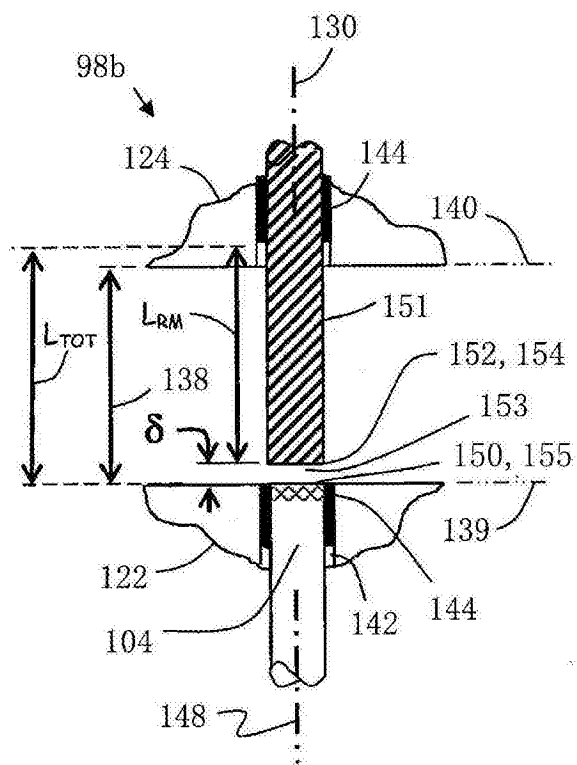


图6C

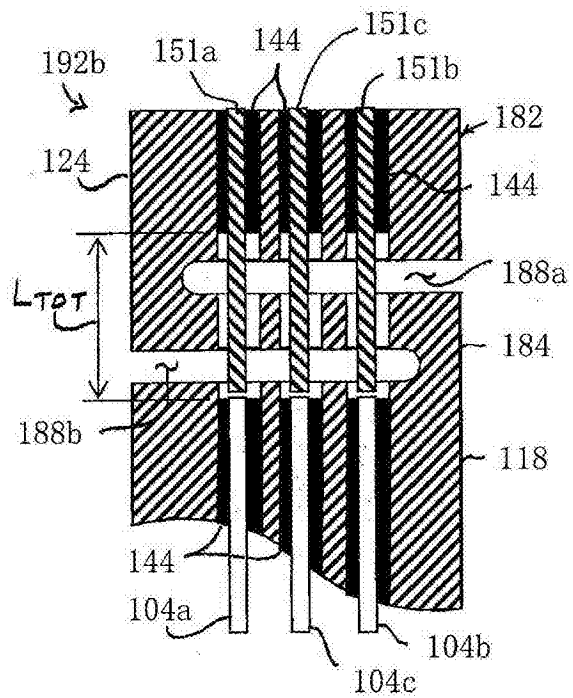


图15

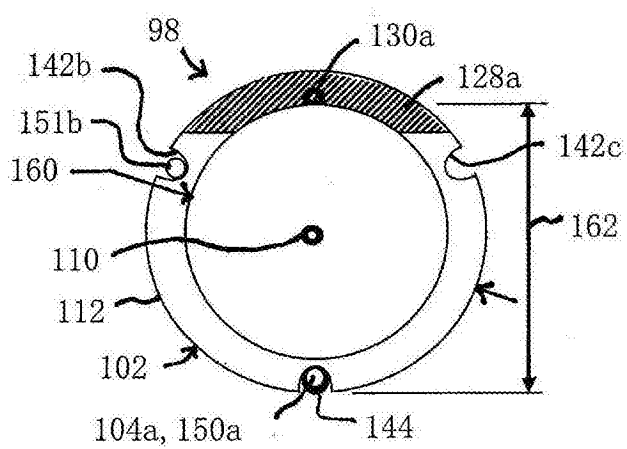


图7

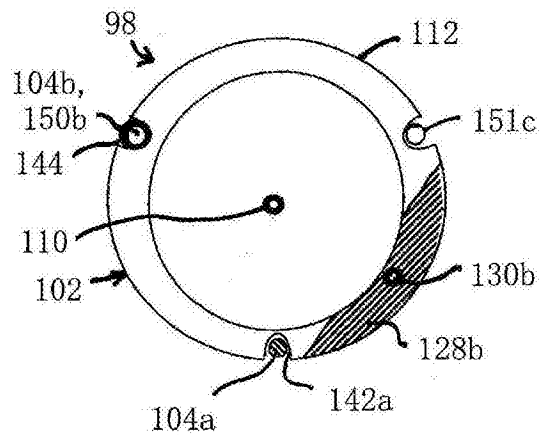


图8

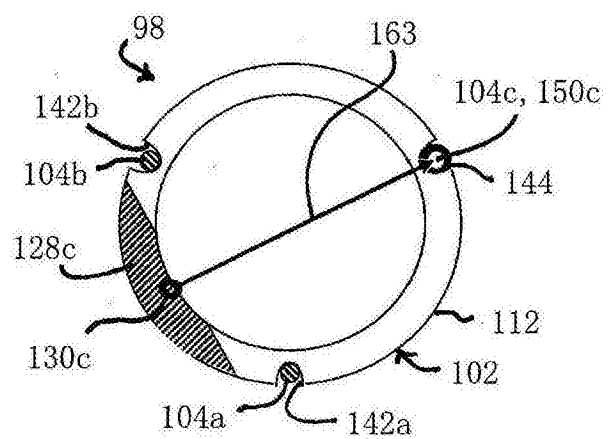


图9

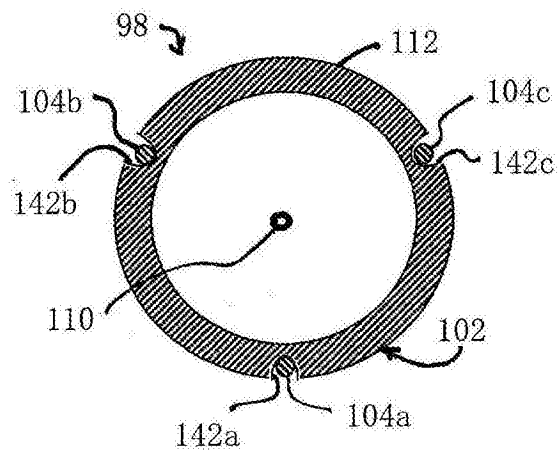


图10

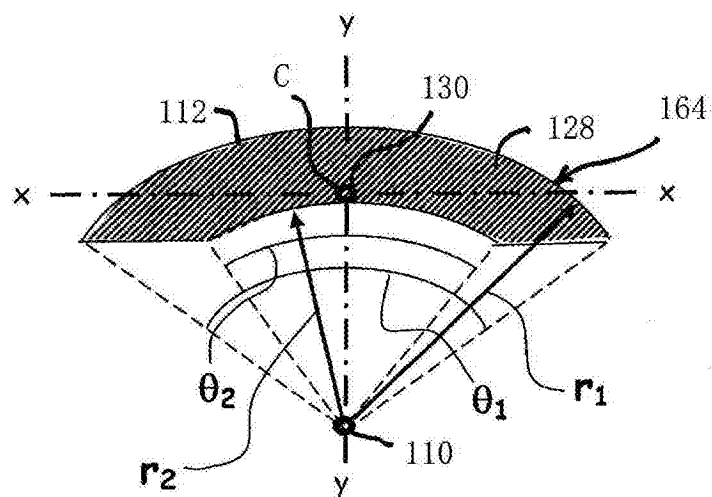


图11

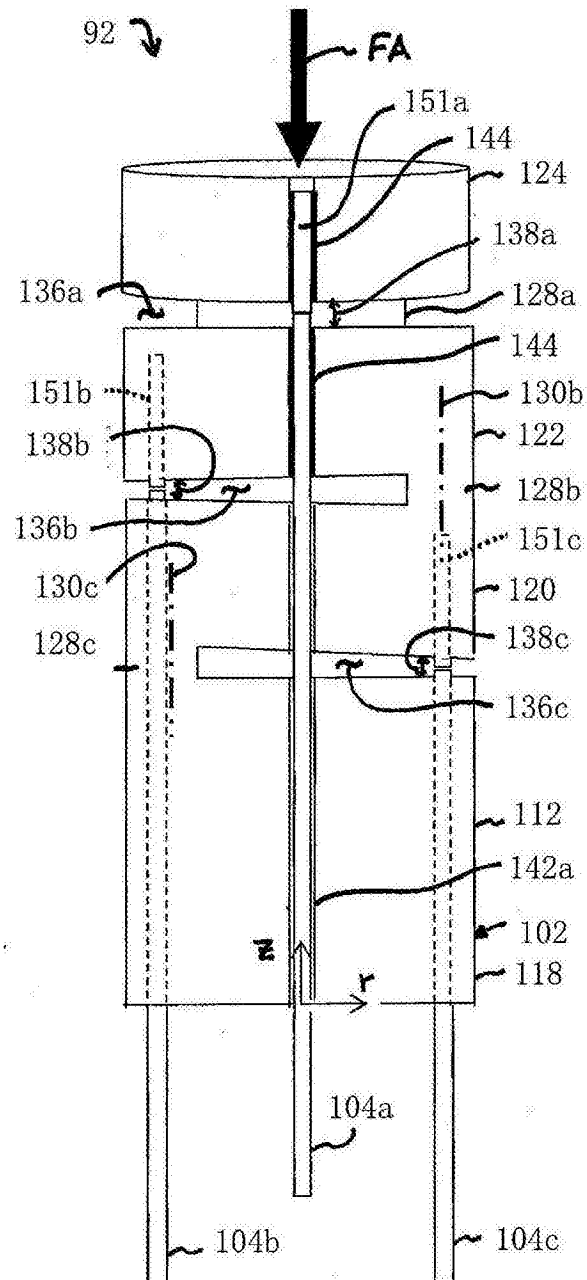


图12A

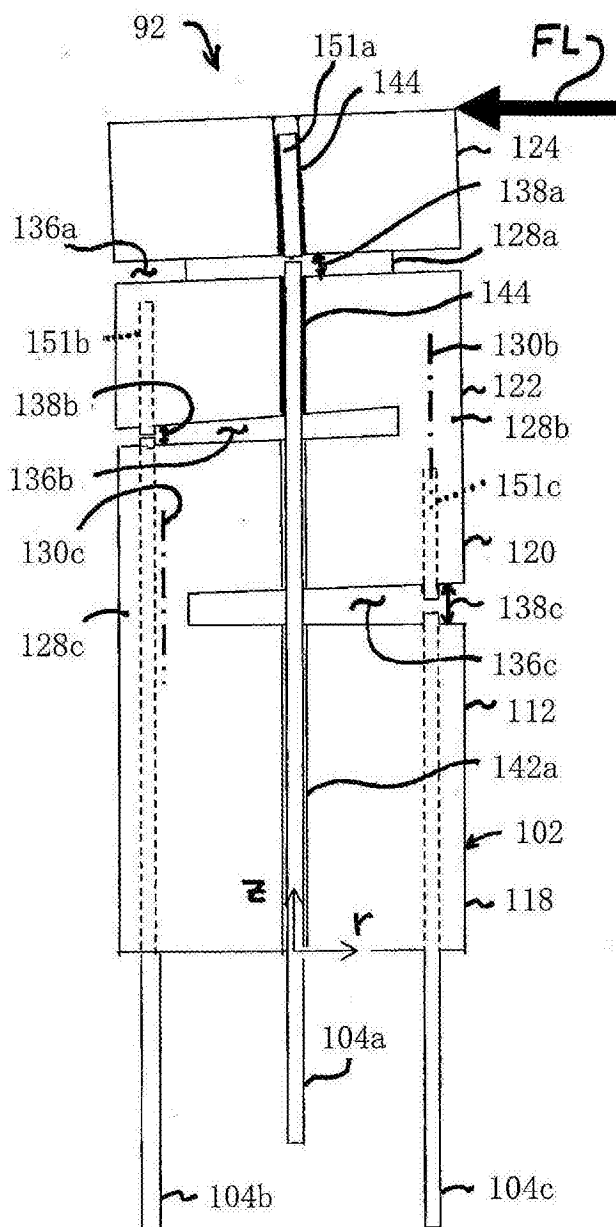


图 12B

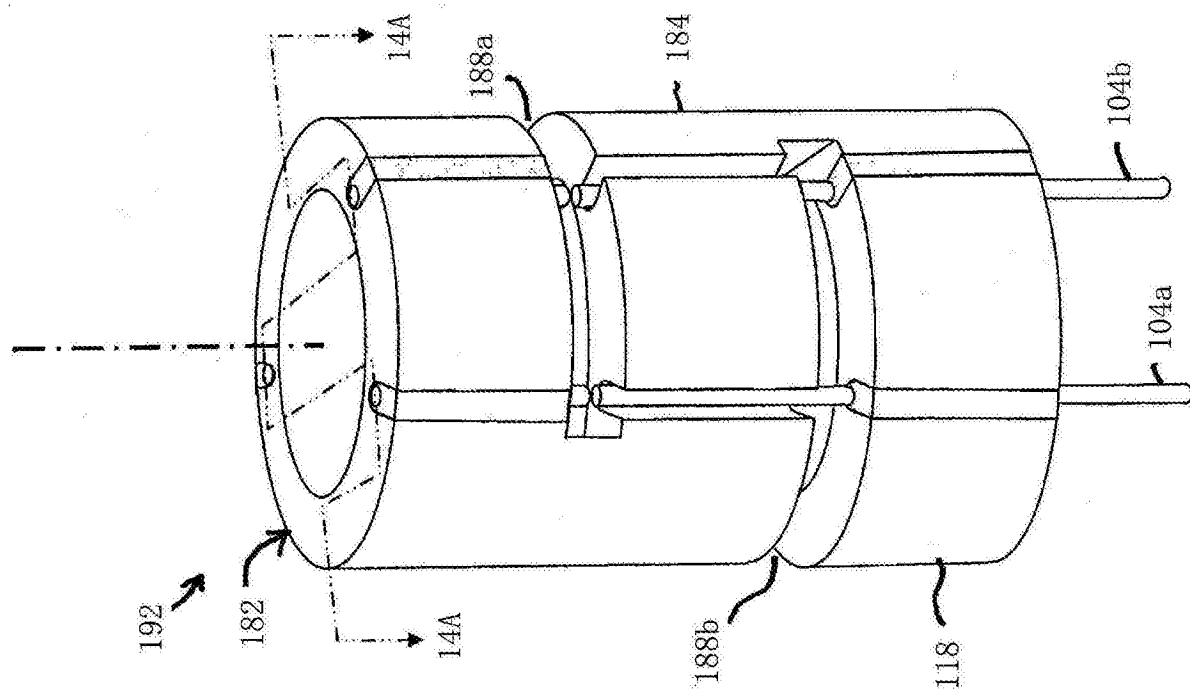


图 14

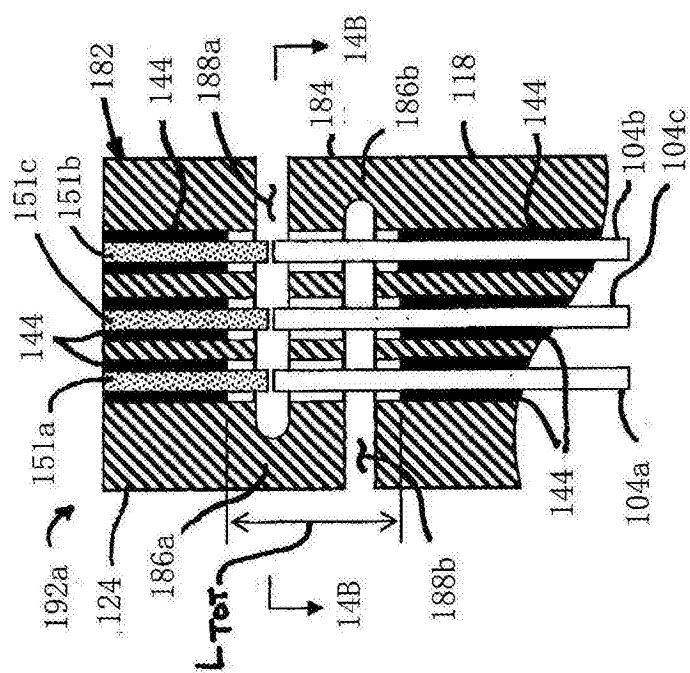


图14A

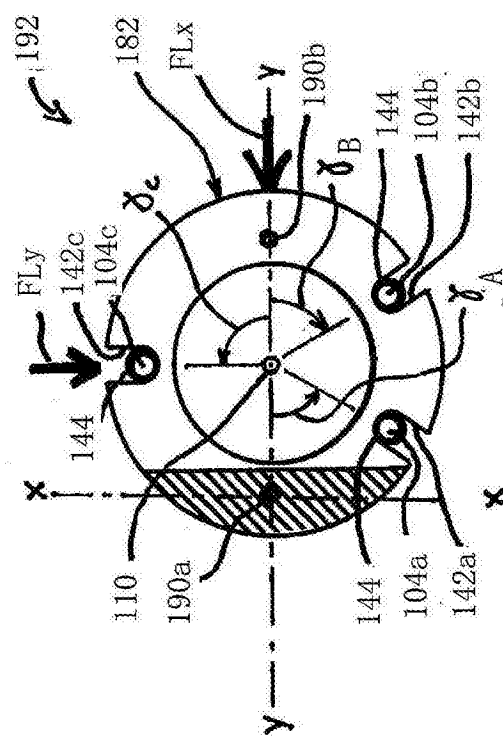


图14B