(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109476023 B
(45)授权公告日 2020.04.14

(21)申请号 201780037013.8
(22)申请日 2017.04.14
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 109476023 A
(43)申请公布日 2019.03.15
(30)优先权数据
62/322,550 2016.04.14 US
(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2018.12.13
(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2017/027575 2017.04.14
(87)PCT国际申请的公布数据
WO2017/180968 EN 2017.10.19
(73)专利权人 马凯特大学
地址 美国威斯康辛州
(72)发明人 约瑟夫·M·施米尔斯
安德鲁·伯恩哈德 雅各布·赖斯
(74)专利代理机构 北京品源专利代理有限公司 11332
代理人 王瑞朋 胡彬
(51)Int.Cl.
B25J 13/00(2006.01)
B25J 18/06(2006.01)
(56)对比文件
CN 104424962 A,2015.03.18,
CN 104995088 A,2015.10.21,
CN 104647397 A,2015.05.27,
US 5502363 A,1996.03.26,
US 2016082603 A1,2016.03.24,
审查员 卢雁

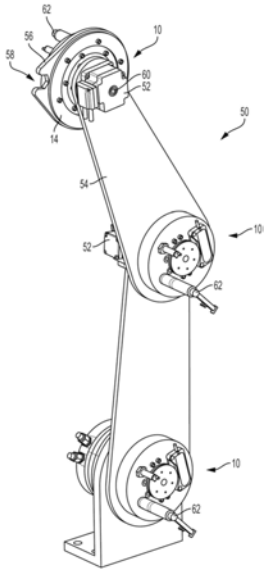
权利要求书3页 说明书6页 附图5页

(54)发明名称

可变刚度串联式弹性致动器

(57)摘要

可变刚度致动器包括挠性板，其包括从挠性板的外周边向内延伸的第一悬臂梁。壳体与挠性板可围绕共同的关节轴线旋转。第一接触器在转动关节处可枢转地固定至壳体。第一接触器在第一旋转轴线处围绕转动关节旋转。第一旋转轴线在壳体上偏离关节轴线。第一接触器以围绕旋转轴线的可变角度接合第一悬臂梁，以调节挠性板和壳体之间的机械连接的刚度。



CN 109476023 B

1.一种可变刚度致动器,包括:

挠性板,所述挠性板包括第一悬臂梁,所述第一悬臂梁从所述挠性板的外周边向内延伸;

壳体,所述壳体与所述挠性板能够围绕共同的关节轴线旋转;以及

第一接触器,所述第一接触器在转动关节处可枢转地固定至所述壳体,所述第一接触器在第一旋转轴线处围绕所述转动关节旋转,所述第一旋转轴线在所述壳体上与所述关节轴线偏置,

其中,所述第一接触器以围绕所述旋转轴线的可变角度接合所述第一悬臂梁,以调整所述挠性板与所述壳体之间的机械连接的刚度。

2.根据权利要求1所述的可变刚度致动器,进一步包括中空轴,所述中空轴固定至所述挠性板。

3.根据权利要求2所述的可变刚度致动器,其中所述中空轴固定至所述挠性板的所述外周边。

4.根据权利要求3所述的可变刚度致动器,谐波驱动马达可操作地连接至所述中空轴。

5.根据权利要求1所述的可变刚度致动器,进一步包括输出连杆,所述输出连杆固定至所述壳体。

6.根据权利要求1所述的可变刚度致动器,进一步包括:

一对接触器,该对接触器包括所述第一接触器;以及

一对悬臂梁,该对悬臂梁包括所述第一悬臂梁。

7.根据权利要求6所述的可变刚度致动器,进一步包括,接触器马达,所述接触器马达可操作地连接至所述对接触器,以使所述对接触器的各接触器被同时驱动围绕所述旋转轴线相同角度。

8.根据权利要求6所述的可变刚度致动器,其中,所述对悬臂梁的每个悬臂梁包括接合表面,所述接合表面构造成被相应接触器接合,其中所述接合表面位于距相应旋转轴线的一定径向距离处。

9.根据权利要求8所述的可变刚度致动器,其中,所述对悬臂梁的每个悬臂梁在形状上为非直线状的,使得从每个悬臂梁的尖端朝向所述挠性板的外周边移动时每个悬臂梁的横截面厚度变大。

10.根据权利要求6所述的可变刚度致动器,进一步包括:

至少四个接触器,所述至少四个接触器包括所述对接触器;以及

至少四个悬臂梁,所述至少四个悬臂梁包括所述对悬臂梁。

11.一种机器人操纵器,包括:

可变刚度致动器,包括:

挠性板,所述挠性板包括第一悬臂梁,所述第一悬臂梁从所述挠性板的外周边向内延伸;

壳体,所述壳体与所述挠性板能够围绕共同的关节轴线旋转;以及

第一接触器,所述第一接触器在转动关节处可枢转地固定至所述壳体,所述第一接触器在旋转轴线处围绕所述转动关节旋转,所述旋转轴线在所述壳体上与所述关节轴线偏置,其中,所述第一接触器以围绕所述旋转轴线的可变角度接合所述第一悬臂梁,以调整所

述挠性板与所述壳体之间的机械连接的刚度；

输入连杆，所述输入连杆可操作地连接至所述挠性板；以及

输出连杆，所述输出连杆固定至所述壳体。

12.根据权利要求11所述的机器人操纵器，进一步包括：

谐波驱动马达，所述谐波驱动马达固定至所述输入连杆；以及

中空轴，所述中空轴能够通过所述谐波驱动马达旋转，所述中空轴在所述挠性板的所述外周边处固定至所述挠性板。

13.根据权利要求12所述的机器人操纵器，其中所述可变刚度致动器为第一可变刚度致动器，并且所述机器人操纵器进一步包括第二可变刚度致动器，所述第二可变刚度致动器包括：

挠性板，所述挠性板包括第二悬臂梁，所述第二悬臂梁从所述挠性板的外周边向内延伸；

壳体，所述壳体与所述挠性板能够围绕共同的关节轴线旋转，其中所述输入连杆固定至所述第二可变刚度致动器；以及

第二接触器，所述第二接触器在转动关节处可枢转地固定至所述壳体，所述第二接触器在旋转轴线处围绕所述转动关节旋转，所述旋转轴线在所述壳体上与所述关节轴线偏置，其中，所述第二接触器以围绕所述旋转轴线的可变角度接合所述第二悬臂梁，以调整所述挠性板与所述壳体之间的机械连接的刚度。

14.根据权利要求13所述的机器人操纵器，进一步包括：

第一接触器马达，所述第一接触器马达可操作地连接至所述第一可变刚度致动器的第一接触器，所述第一接触器马达可操作为改变所述第一接触器的可变角度，以调整所述第一可变刚度致动器的刚度；以及

第二接触器马达，所述第二接触器马达可操作地连接至所述第二可变刚度致动器的第二接触器，所述第二接触器马达可操作为改变所述第一接触器的可变角度，以调整所述第二可变刚度致动器的刚度。

15.根据权利要求14所述的机器人操纵器，其中所述第一可变刚度致动器被操作成第一刚度，并且所述第二可变刚度致动器被操作成第二刚度。

16.一种控制致动器关节的刚度的方法，所述方法包括：

提供致动器关节，所述致动器关节包括：

挠性板，所述挠性板包括第一悬臂梁，所述第一悬臂梁从所述挠性板的外周边向内延伸；

壳体，所述壳体与所述挠性板能够围绕共同的关节轴线旋转；以及

第一接触器，所述第一接触器在转动关节处可枢转地固定至所述壳体，所述第一接触器在第一旋转轴线处围绕所述转动关节旋转，所述第一旋转轴线在所述壳体上与所述关节轴线偏置；通过调节所述第一接触器的围绕所述旋转轴线的连续可变角度来调节所述第一接触器与所述第一悬臂梁之间的接合；使所述第一悬臂梁与所述第一接触器以所述第一接触器的第一角度接合，以提供所述挠性板与所述壳体之间的第一刚度机械连接；并且

使所述第一悬臂梁与所述第一接触器以所述第一接触器的第二角度接合，以提供所述挠性板与所述壳体之间的第二刚度机械连接。

17.根据权利要求16所述的方法，进一步包括：

通过固定至所述挠性板的所述周边的中空轴，在所述挠性板上提供输入扭矩；以及

通过所述第一悬臂梁与所述第一接触器之间的接合，将所述输入扭矩的至少一部分通过所述挠性板传递至所述壳体。

18.根据权利要求17所述的方法，其中所述输入扭矩为第一输入扭矩，并且所述方法进一步包括：

在所述挠性板与所述壳体之间提供所述第一刚度机械连接；

提供所述第一输入扭矩以使所述壳体移动至第一角度；

在所述挠性板与所述壳体之间提供所述第二刚度机械连接；以及

通过所述中空轴在所述挠性板上提供第二输入扭矩以使所述壳体移动至第二角度。

19.根据权利要求16所述的方法，其中所述致动器关节包括四个悬臂梁，所述悬臂梁包括所述第一悬臂梁，并且所述致动器关节包括四个接触器，所述接触器包括所述第一接触器，并且所述方法包括：

将所述四个接触器同时驱动至围绕所述接触器的相应旋转轴线的相同角度。

20.根据权利要求16所述的方法，其中所述第一角度为相对所述关节轴线的最小角度，且所述第一刚度为最小刚度，并且所述第二角度为相对关节轴线的最大角度，且所述第二刚度为最大刚度。

可变刚度串联式弹性致动器

[0001] 关于政府资助研究或开发的声明

[0002] 本发明是在由作为国家机器人计划的一部分的由NSF奖励的授权No.IIS-1427329的政府支持下完成的。被资助的具体提案:“NRI:使用以可变阻抗致动实现的任务特定通道所获得的灵巧操作”,2014-2017。美国政府对本发明享有一定的权利。

[0003] 相关申请的交叉引用

[0004] 本申请要求于2016年4月14日提交的美国临时专利申请No.62/322,550的优先权,其内容通过引用整体并入本文。

背景技术

[0005] 致动器是将存储的能量转换成运动的部件,并且以这种方式,其类似于机器人的“肌肉”。目前的传统机器人使用高刚度致动器或动力关节以提供自由空间中的绝对定位精度。例如,在机器人在受控环境中以高速度和高精确度执行繁琐和重复任务的传统制造操作中,呆板地遵循预定义的关节轨迹的位置控制机器人是最佳的。传统的位置控制致动器是通过假设刚度越大越好而设计的。这种方法提供了高带宽系统,但是容易出现接触不稳定、噪声和低功率密度的问题。

[0006] 可变刚度致动器在非结构化环境中在限制机器人的相互作用力中提供许多益处。在非结构化环境中,其中,物体在环境中的精确位置是未知,力控制关节或可变刚度致动器是理想的,因为它们允许机器人顺应其周围环境。这种机器人可以在变化的和不可预测的环境中执行动态活动,包括但不限于:类人机器人、在崎岖地形上行走的腿状机器人、与人交互的机器人臂、性能增强外骨骼、触觉界面以及其它机器人应用。

[0007] 可变刚度致动器提供的益处包括:冲击耐受、较低的反射惯量、更精确和稳定的力控制、极低阻抗、低摩擦、对环境的较少损害以及能量存储。可变刚度致动器的一些示例在申请人的共同未决的题为“具有大范围刚度的可变刚度致动器”的美国专利申请No.14/786,881中公开,其公开内容通过引用以其整体并入本文。

发明内容

[0008] 可变刚度致动器的示例性实施例包括挠性板。挠性板包括第一悬臂梁,该第一悬臂梁从挠性板的外周边向内延伸。壳体和挠性板可围绕共同的关节轴线旋转。第一接触器在转动关节处可枢转地固定至壳体。第一接触器在第一旋转轴线处绕围转动关节旋转。第一旋转轴线在壳体上与关节轴线偏置。第一接触器以围绕旋转轴线的可变角度接合第一悬臂梁,以调节挠性板与壳体之间的机械连接的刚度。

[0009] 机器人操纵器的示例性实施例包括可变刚度致动器。挠性板包括第一悬臂梁,该第一悬臂梁从挠性板的外周边向内延伸。壳体和挠性板可绕共同的关节轴线旋转。第一接触器在转动关节处可枢转地固定至壳体。第一接触器在第一旋转轴线处绕围转动关节旋转。第一旋转轴线在壳体上与关节轴线偏置。第一接触器以围绕旋转轴线的可变角度接合第一悬臂梁,以调节挠性板与壳体之间的机械连接的刚度。输入连杆可操作地连接至挠性

板。输出连杆固定至壳体。

[0010] 控制致动器关节中的刚度的方法的示例性实施例包括提供致动器关节。致动器关节包括挠性板。挠性板包括第一悬臂梁，该第一悬臂梁从挠性板的外周边向内延伸。壳体和挠性板可围绕共同的关节轴线旋转。第一接触器在转动关节处可枢转地固定至壳体。第一接触器在第一旋转轴线处围绕转动关节旋转。第一旋转轴线在壳体上与关节轴线偏置。通过调节第一接触器围绕旋转轴线的可变角度来调节第一接触器与第一悬臂梁之间的接合。第一接触器以第一接触器的第一角度接合第一悬臂梁，以在挠性板与壳体之间提供第一刚度机械连接。第一接触器以第一接触器的第二角度接合第一悬臂梁，以在挠性板与壳体之间提供第二刚度机械连接。

附图说明

[0011] 图1示出了具有可变刚度致动器的机器人操纵器的示例性实施例。

[0012] 图2示出了可变刚度致动器的示例性实施例。

[0013] 图3示出了处于用于最大刚度的构造中的可变刚度致动器的示例性实施例。

[0014] 图4示出了处于用于最小刚度的构造中的可变刚度致动器的示例性实施例。

[0015] 图5示出了可以与可变刚度致动器的实施例连接使用的齿轮系的示例性实施例。

[0016] 图6是在各种归一化接触器角度Θ_S下的对数关节刚度的示例性曲线图。

具体实施方式

[0017] 如下文和贯穿本申请所提出的，使用若干定义来描述本文公开的主题。

[0018] 除非另有说明，本文使用的术语应根据相关领域普通技术人员的常规用法来理解。除了下面提供的术语的定义之外，应理解，如说明书、实施例中以及权利要求中所使用的，根据使用这些术语的上下文，术语“一”，“一种”和“该”可以表示一个或更多个。

[0019] 如本文所用，本领域普通技术人员将理解“约”，“大约”，“实质上”和“显著的”，并且这些术语在某种程度上将根据它们所使用的上下文而变化。如果考虑使用这些术语的上下文而存在对于本领域普通技术人员所不明确的这些术语的使用，则“约”和“大约”将表示特定术语的加或减≤10％并且“实质上”和“显著的”将表示特定术语的加或减>10％。

[0020] 如本文所用，术语“包括(include)”和“包括有(including)”具有与术语“包含(comprise)”和“包含有(comprising)”相同的含义。术语“包括”和“包含有”应该被解释为“开放式”过渡性术语，其允许将额外的部件进一步包括在权利要求中列举的那些部件中。术语“组成”和“由……组成”应该被解释为“封闭式”过渡性术语，其不允许包含除权利要求中列举的部件之外的其它部件。术语“基本由……组成”应该被解释为是部分封闭式的，并且允许仅包含不会在根本上改变所要求保护的主题的性质的其它部件。

[0021] 图1示出了机器人操纵器50的示例性实施例，该机器人操纵器示例性地包括如本文将进一步详细描述的可变刚度致动器(VSA)10。机器人操纵器50的示例性实施例可以与存在运动学约束的环境相互作用，该运动学约束示例性地对于机器人控制器来说是不完全确定已知的或无法完全确定已知的。如本文所公开的机器人操纵器50的实施例使用可变刚度致动器10，以使得机器人操纵器50在需要顺应性时能够顺应其环境，而且还能够在致动器中提供高刚度，用于在无约束方向上的精确运动控制(包括机器人操纵器在自由空间中

操作的时候)。

[0022] 机器人操纵器50示例性地包括通过VSA10可旋转地连接的输入连杆54和输出连杆56。在示例性实施例中,输出连杆56可以包括功能元件58,例如,扳手、螺丝刀或夹持元件。本领域普通技术人员将认识到其它形式的功能元件58可以在其它实施例中使用。将进一步认识到,在机器人操纵器50的多个VSA实施例中,每个VSA 10可以执行不同的功能任务。在一个实施例中,其可以示例性地执行“肩部”、“肘部”或“手腕”功能中的每一种或者其它非拟人功能。在实施例中,VSA 10的控制以及例如刚度、刚度的范围或如本文所述的每个VSA 10的其它操作,可以通过由VSA 10执行的功能来确定。

[0023] 另外,将认识到,在包括多个VSA 10的机器人操纵器50的实施例中,相对于一个VSA 10的输出连杆可以包括后续VSA 10的输入连杆54。将进一步认识到,如本文所使用的输出连杆和输入连杆的识别可以是参照的问题,并且因此可以由本领域普通技术人员认识,并且在其它实施例中,输入连杆和输出连杆可以是相反的。

[0024] VSA 10进一步由马达52驱动。在示例性实施例中,马达52为谐波驱动致动器,然而本领域普通技术人员将认识到,其它类型的马达可以与VSA 10连接使用。马达52驱动连接至VSA 10的挠性板18(图2)的轴60。在示例性实施例中,轴60是固定至挠性板18的周边的中空轴。如本文将进一步详细描述的,VSA 10进一步包括接触器马达62。如本文进一步详细描述的,接触器马达62示例性地是DC齿轮马达。接触器马达62示例性地驱动如本文所述的接触器,以改变VSA 10中的关节的刚度。

[0025] 图2是如先前在图1中示出的VSA10的示例性实施例的详细视图。虽然未在图2中示出,但是轴60连接至壳体挠性板18。输出连杆56固定至壳体14。多个接触器12在转动关节16处可旋转地连接至壳体14。接触器12分别接合挠性板18的悬臂梁20。轴60的旋转使挠性板18旋转,并且该旋转通过悬臂梁20被传递至接触器12、转动关节16和壳体14。轴60示例性地是中空的并且在挠性板18的周边处固定至挠性板18。在示例中,挠性板18的周边中的孔28接收螺栓(未示出),以将中空轴60固定至挠性板18。输出连杆56固定至壳体14并与壳体14一起旋转。如本文进一步详细描述的,接触器12与挠性板18的悬臂梁20之间的接合选择性地控制从轴60通过挠性板18与接触器12到壳体14与输出连杆56的旋转运动的刚度。

[0026] 在机器人与其环境相互作用的机器人应用(例如,制造任务)中,操纵任务涉及与机器人环境的物理交互。如本文所公开的可变刚度致动能够使机器人像传统操纵器一样在关节刚度很高时在自由空间中提供高精度定位。每个关节的可变刚度还能够使每个关节独立地调节,以使得机器人能够具有高刚度的方向和低刚度的方向,以执行有用的工作而不会破坏机器人或工作环境或者周围环境。

[0027] 约束操纵的示例是使用机器人来拧紧螺栓。机器人必须在与使螺栓在螺纹孔中前进相关的方向上是刚性的,但是在通过扳手/螺栓相互作用受约束的、不使螺栓在孔中前进的方向上是顺应性的。

[0028] 本文公开的实施例将允许机器人被动地顺应任务约束以实现可靠的高速操纵。

[0029] 目前商业上可获得的串联式弹性致动器(SEA)不具有可变刚度。几种机器人使用SEA。Rethink Robotics(Baxter和Sawyer)的商用机器人具有串联式弹性致动器。NASA Robonaut有2个臂,每个臂有7个关节,其中,每个臂的4个关节包含串联式弹性致动器。

[0030] (在研究实验室中构建的)目前可用的VSA中没有一个具有通过本文公开的实施例

所获得的刚度范围。目前可用的VSA设计在理论上能够得到的最高被动刚度与最低被动刚度的比值约为10。本文所公开的设计的实施例理论上能够得到远超于此的比值(理论上该比值是无穷大的,因为任何有限数除以零(对于小偏转)是无穷大的)。对于保持接触器12与悬臂梁20之间的接触的有限偏转,该比值可以是约10000。

[0031] 相对于使用串联式弹性致动器,本文所公开的实施例的益处在于:致动器的被动刚度是可实时选择的。这将能够使机器人执行如下所述的交互任务。

[0032] 如上所述,图2示出了可以与机器人操纵器50连接使用的可变刚度致动器(VSA)10的示例性实施例的详细视图。VSA 10示例性地包括四个接触器12,每个接触器通过转动关节16连接至VSA壳体14。每个转动关节16相对于壳体14限定相应的接触器12围绕其旋转的旋转轴线22。接触器12与挠性板18接触,该挠性板通过轴60连接至输入连杆54上的谐波驱动致动器52(图1)。接触器12因此是可旋转控制的凸轮,其造成在选择性的可变位置处接合挠性件18。挠性板18包括多个非直线状悬臂梁20。每个悬臂梁的一侧具有圆形轮廓,使得在整个接触器运动范围内保持挠性件与接触器之间的接触。悬臂梁的另一侧具有设计成在梁/接触器接触位置朝向梁支撑件(挠性件周边)移动时实现刚度呈指数增加的轮廓。在实施例中,在VSA 10中设有对应数量的接触器12和悬臂梁20。示例性地,四个接触器12中的每一个在四个相应的悬臂梁20处与挠性件18接触。悬臂梁20朝向挠性板18的中心点向内延伸。然而,悬臂梁20包含非直线状的形状,在悬臂梁20逐渐变细至端点26时,其远离挠性板18的中心点64呈弧形。因此,相应的悬臂梁20的接合表面24示例性地距相应的旋转轴线22为半径距离R。旋转轴22与挠性板18的中心偏置,并且悬臂梁20展现远离挠性板18的中心弯曲的效果。

[0033] 四个接触器12的取向(每个接触器12相对于指向VSA轴线64成角度Θ_S)确定关节的有效刚度。用于每个接触器12的相应的转动关节16示例性地由至少一个接触器马达62驱动(图1)。在示例性实施例中,通过齿轮传动为同时驱动所有接触器12的单个DC马达使接触器12被驱动为围绕转动关节16。在另一个实施例中,接触器12围绕转动关节16的旋转位置可以由单独的马达独立地控制。

[0034] 在示例性实施例中,壳体14可围绕VSA轴线64(与60同轴)旋转。接触器12独立于壳体14、接触器12和转动关节16围绕VSA轴线64的旋转操作为围绕相应的旋转轴线22旋转。通过谐波驱动马达将挠性件18驱动至围绕VSA轴线64的角位置Θ_P(图1)。挠性板18的旋转被传递到壳体14,并由此传递到固定至壳体14的输出连杆56。以这种方式,当VSA刚度非常大时(即,当悬臂梁20与接触器12之间的接触点靠近周边时),输出连杆56也被驱动至相同的角度Θ_P。

[0035] 应当理解,在示例性实施例中,谐波驱动马达可以定尺寸为用于特定的关节和各关节的工作负荷。挠性件向挠性悬臂梁的被驱动的弯曲长度施加扭矩,使关节具有其整体弹性特性。在示例性实施例中,示例性地与壳体相关联的编码器(未示出)测量VSA内的关节弹性偏转。

[0036] 可用的串联式弹性致动器(SEA)包括具有扭转弹簧的马达,该扭转弹簧与从动部件(通常是机器人中的连杆或假体部件)串联连接。如所描述的,可变刚度致动器(VSA)类似于SEA,但是该实施例中的VSA具有通过控制接触器12接触挠性件的悬臂梁的位置来实时改变致动器的刚度的额外能力。

[0037] 当前公开的设计的实施例与在先前的几个领域中的VSA设计不同。在该实施例中，谐波驱动轴是中空的。在该实施例中，在轴的周边处而不是在挠性件的中心处驱动挠性件18。如本文所述的实施例中，当接触器12与挠性件18(例如悬臂梁20)之间的接触点靠近挠性件的周边时，如图3所示，刚度高。当接触器指向驱动轴中心时，如图4所示，刚度低。

[0038] 挠性件横截面积和约束力的方向被设计成，增加可通过VSA 10的操作选择的有效刚度的范围。具有悬臂梁20的挠性板18也设计为使得，尽管在整个刚度值范围内接触器位置不确定，但实际的刚度将接近所要求的刚度。

[0039] 挠性板18的悬臂梁20具有特定的非直线状横截面。接触器侧横截面对应于圆弧。通过使用圆弧，接触器12不沿着梁平移以改变接触点；相反，接触器12远离相应的悬臂梁20围绕相应的旋转点22旋转以改变接触器12与悬臂梁20之间的接触表面24上的接触点。与平移或平移移动相反，通过使用接触器12的旋转运动以沿着悬臂梁20产生接触点的旋转变化，接触器的移动调节悬臂梁20的有效弯曲横截面和悬臂梁20上的约束力的方向。当接触器12指向VSA轴线64时，由接触器12施加在悬臂梁20上的力不能阻止围绕VSA轴线64的旋转。当接触器12指向为垂直于朝向VSA轴线的方向时，接触力直接抵抗围绕VSA轴线的旋转。

[0040] 图3和图4示出了可变刚度致动器的示例性实施例，其示例性地构造成用于最大刚度(图3)和最小刚度(图4)。通过移动一组接触器12来控制关节刚度，该接触器示例性地包括沿着挠性板18的悬臂梁20的圆弧的辊子66。在示例性实施例中，单个DC齿轮马达62通过多个齿轮68进行齿轮传动，以同时驱动所有示例性的四个接触器12，如图5中示例性示出的。在示例性实施例中，位于每个接触器12的端部处的至少一个端部齿轮70与相对于壳体14固定的齿板74的齿72啮合。端部齿轮70与齿板74之间的接合进一步促进了接触器12相对于悬臂梁20的受控运动。这导致接触器12的协调移动，以遍及所有接触器12/梁20对来均衡挠性板18和壳体14之间的连接的刚度。

[0041] 参考图2-4，在最小刚度构造中，例如，如图4中示例性示出的，相对于指向壳体14/挠性板18的中心点64的参考位置的接触器角度Θ_S是被最小化的。示例性地，该接触器角度Θ_S是0°，意味着接触器12的中心线30指向中心点64。在该取向中，沿着接触器12的中心线30的线截取的悬臂梁20的横截面被最小化为系统的有效最小值。

[0042] 当谐波驱动马达向挠性板18施加扭矩时，悬臂梁20上的约束力被最小化，这是因为围绕VSA轴线64的旋转不受这种构造中的接触器12的约束。因此，尽管梁具有非常低的刚度，但悬臂梁20经受非常小的偏转。无法使用这种构造中的接触器通过VSA传递扭矩。

[0043] 当接触器12围绕相应的旋转轴线22旋转以增加角度Θ_S时，VSA的刚度增加。刚度增加的一个原因是因为悬臂梁20的横截面积增加。刚度增加的另一个原因是因为接触器现在在悬臂梁20与接触器12之间的接触点处直接抵抗挠性件的运动。这也增加了在挠性板18与壳体14之间传递的扭矩，并且提高了VSA10中的动力传递的效率以及响应于谐波驱动马达的输出臂56的定位的精度。随着角度Θ_S增加，每个接触器12与相应的悬臂梁20之间的接触点朝向挠性板18的周边旋转地移动。随着角度Θ_S增加，沿接触器中心线30截取的悬臂梁20的横截面也增加。响应于角度Θ_S的增加的这两个相应的变化增加了VSA10的刚度和从挠性板18到壳体14的扭矩的传递。图3示例性地示出了处于最大刚度的位置的接触器12，其中接触器中心线30指向为远离系统内的中心点64(最大化Θ_S)，并且在系统内接触器12与悬臂梁20之间的接触点最大化地靠近挠性板18的周边。

[0044] 挠性件设计的示例性实施例展现出可以示例性地跨越四个数量级的可变刚度。这示例性地表现在图7所呈现的曲线图中。图7的曲线图示例性地呈现了作为归一化接触器位置Θ_S的函数的对数关节刚度。当接触器12保持与悬臂梁20接触时，接触器位置与关节刚度之间存在指数关系。在一个特定实施例中，当保持与悬臂梁的接触时，VSA刚度可以设定为更大的机器人连接刚度，或者设定为具有基本零刚度(具有无穷小运动)或用于有限连杆偏转的非常小的刚度(如图7所示)。当接触器旋转以断开与悬臂梁20的接触时(当选择Θ_S的负值时)，VSA也可设定为具有有限运动的零刚度。

[0045] 在前面的描述中，对于本领域技术人员来说显而易见的是，在不脱离本发明的范围和精神的情况下，可以对本文公开的发明进行各种替换和修改。本文说明性地描述的本发明可适当地在缺少本文未具体公开的任何元件或元素、限制或限定的情况下实施。已经使用的术语和表达用作描述的术语而非限制，并且无意使用排除所示和所描述的特征的任何等同物或其部分的这种术语和表达，但是认识到在本发明的范围内可以进行各种修改。因此，应该理解，尽管已经通过具体实施例和可选特征说明了本发明，但是本领域技术人员可以采用本文公开的概念的修改和/或变型，并且应该理解这些修改和变型被认为在本发明的范围之内。

[0046] 本文引用了许多参考文献。所引用的参考文献通过引用整体并入本文。如果说明书中术语的定义与引用的参考文献中的术语的定义相比其之间存在不一致，则该术语应基于说明书中的定义来解释。

[0047] 在以上描述中，为了简洁、清楚和理解，使用了某些术语。除了现有技术的要求之外，不应从中推断出不必要的限制，因为这些术语用于描述性目的并且旨在广泛地解释。上文所述的不同制品和方法可单独使用或与其它制品和方法组合使用。

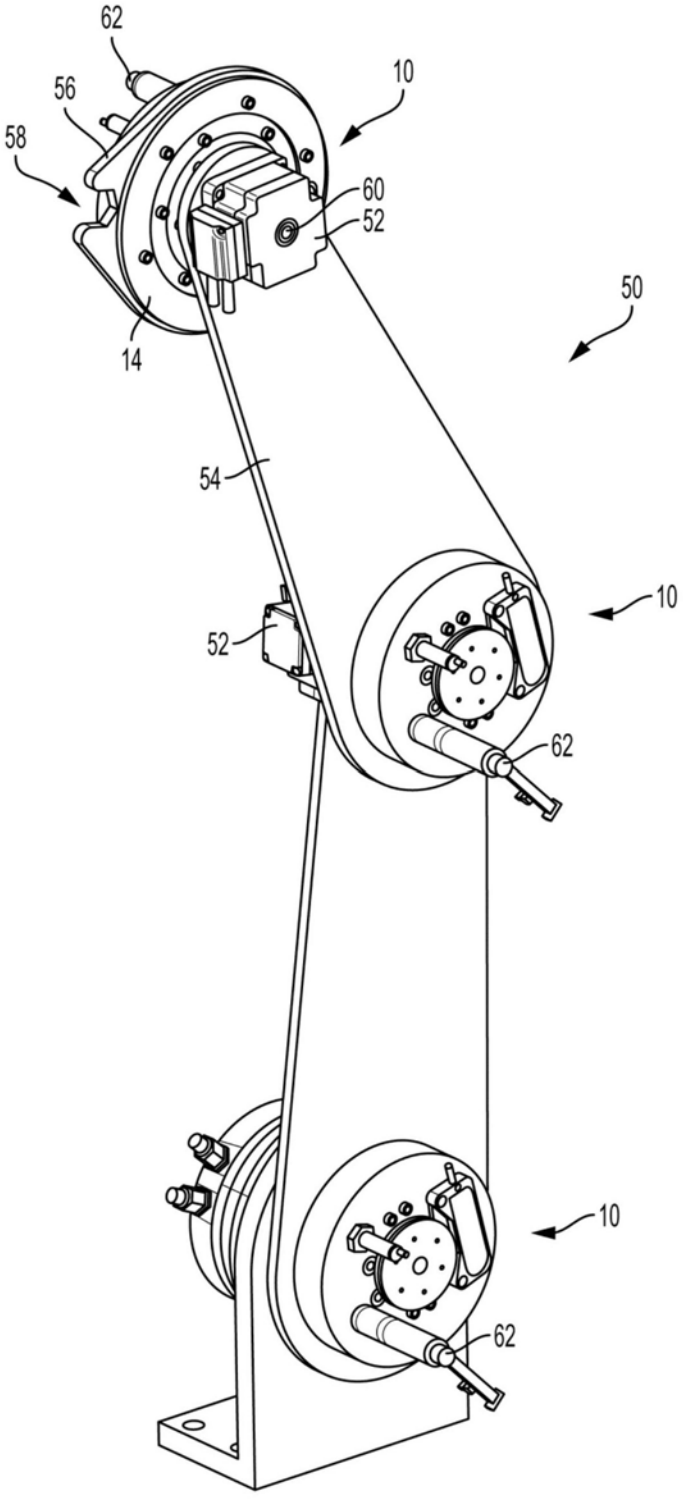


图1

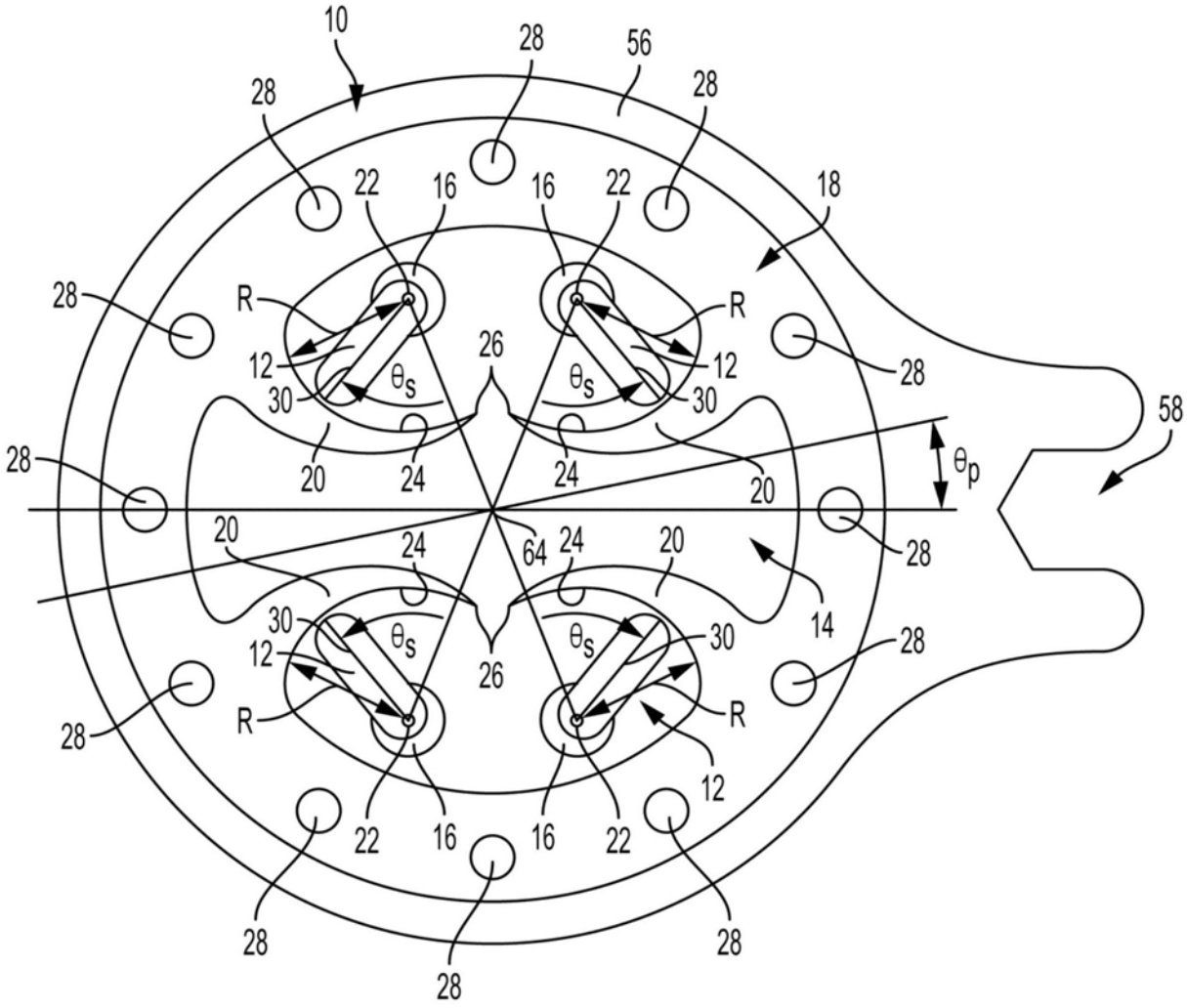

10
28
56
28
28
22
16
16
22
18
28
R
R
12
12
26
θs
θs
30
30
28
58
20
24
24
20
θp
28
20
24
64
24
20
14
30
θs
θs
30
12
26
28
R
R
12
28
22
16
16
22
28
28
28

图2

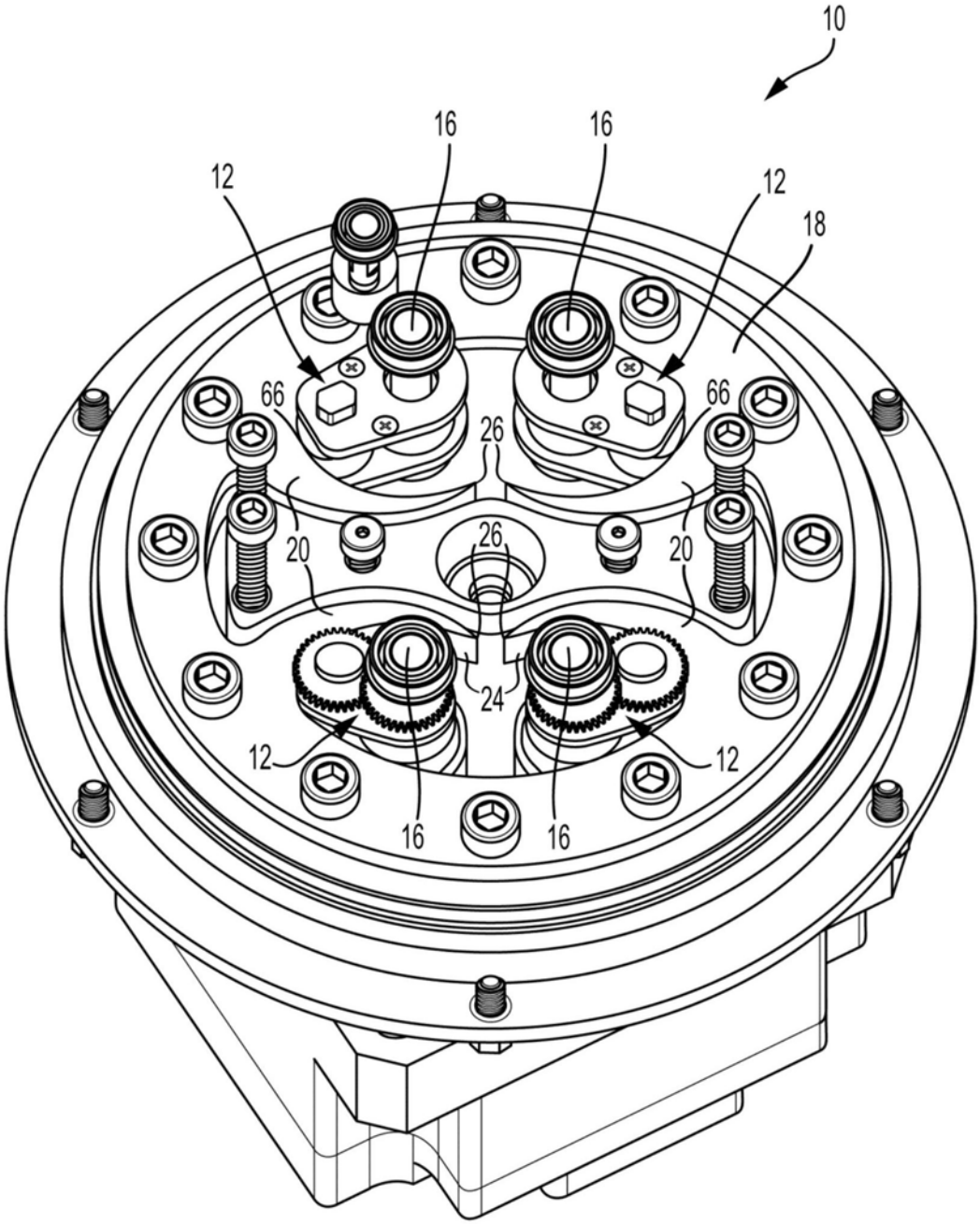


图3

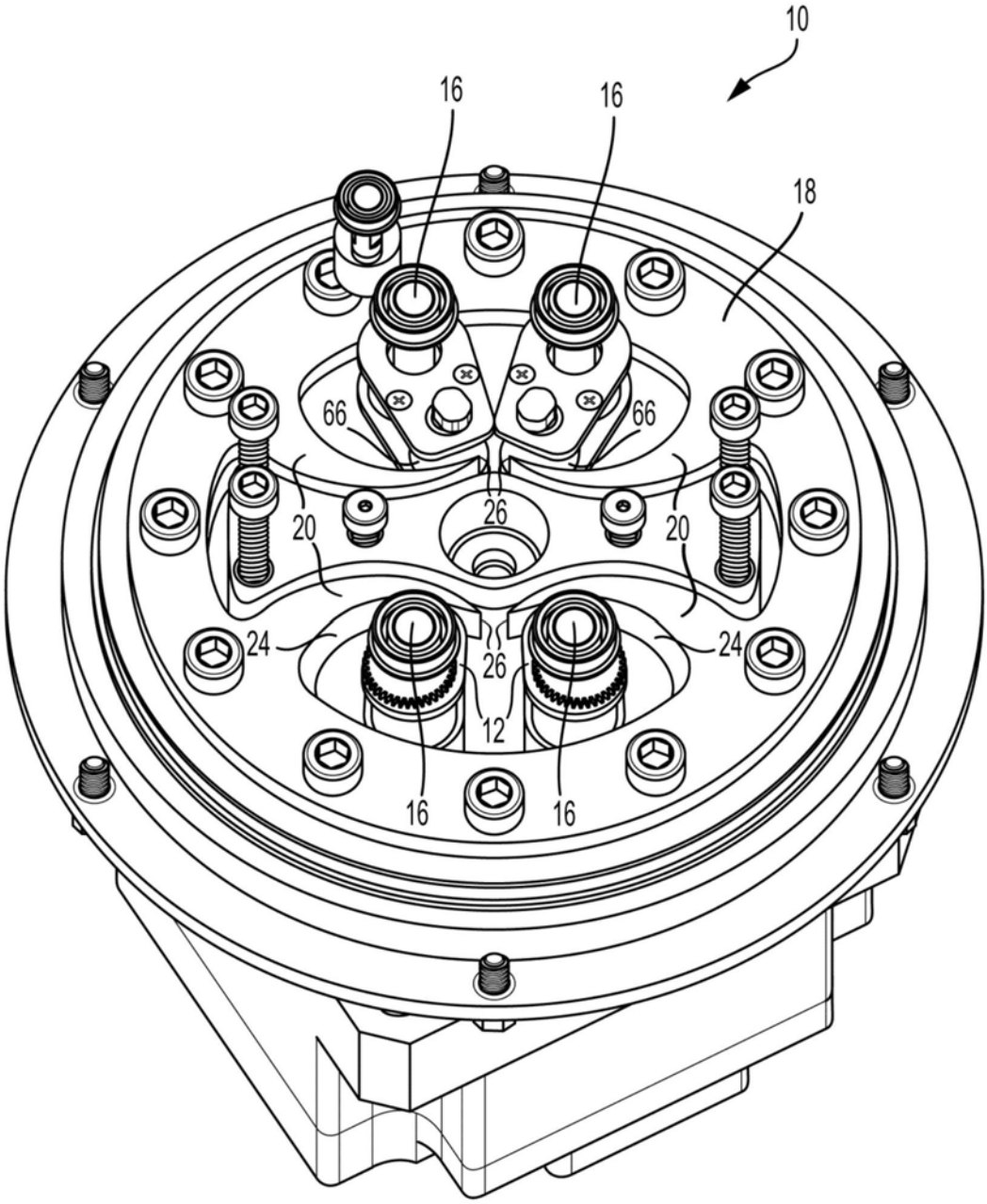


图4

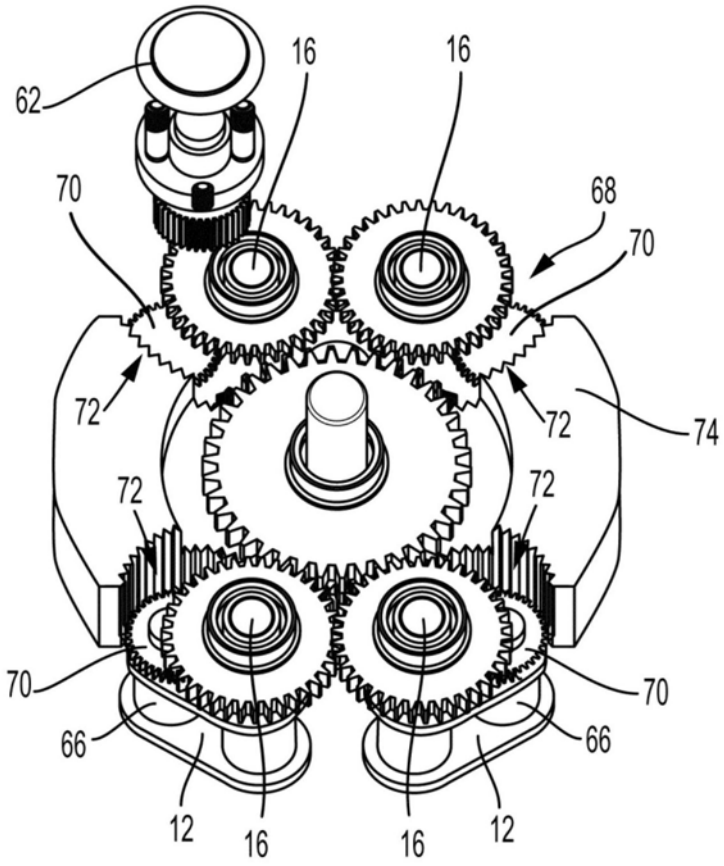

62
16
16
70
68
70
72
72
74
72
72
70
70
66
66
12
16
16
12

图5

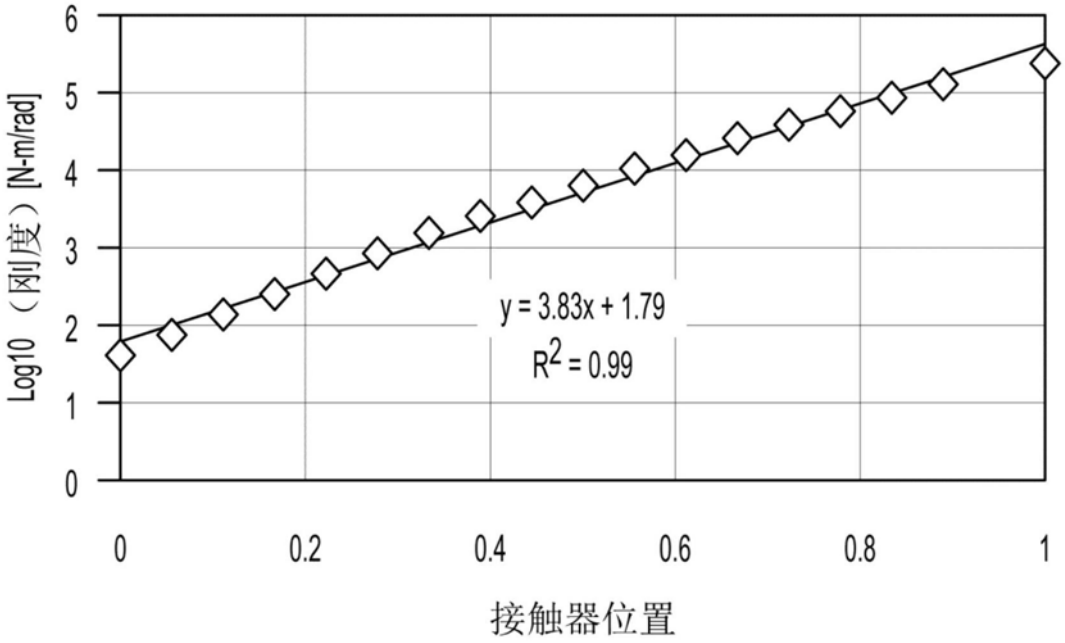

Log10 （刚度） [N-m/rad]
6
5
4
3
2
1
0
y = 3.83x + 1.79
R2 = 0.99
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
接触器位置

图6