

磁流变液可控刚度柔顺表面的研究*

钱林俊^{1,2}, 龚兴龙^{1,2}, 张培强^{1,2}

(1. 中国科学技术大学 力学和机械工程系, 安徽 合肥 230027;
2. 中科院材料力学行为与设计重点实验室, 安徽 合肥 230027)

摘要: 机器人手爪等各种特殊夹具在适应特殊夹持需求时需要用到刚度可控的柔顺表面。本文用智能材料磁流变液, 利用连通器的原理, 设计了以活塞为基本构成单元的具有可控刚度的柔顺表面。以该柔顺表面为主制成的夹具能有效地增大接触面积, 降低接触应力, 增加摩擦力, 从而可以防止夹伤或夹坏被夹持物, 并且提高夹持的稳固度。

关键词: 磁流变液; 柔顺表面; 可控刚度

中图分类号: TB381; O373

文献标识码: A

文章编号: 1001-9731(2006)07-1160-03

1 引言

在机器人工业和航空航天业上, 常常需要使用可以控制刚度的柔顺表面^[1,2]。当工业上使用的夹具和机械手需要夹持一不规则外形的物体时, 为了降低接触应力, 增大接触面积, 增加摩擦力, 需要接触表面具备一定的柔性^[3-6]。这样可以防止夹伤被夹持物和提高夹持的稳固度。目前采用的方法主要有使用弹性材料, 如橡胶、高分子聚合物包覆接触表面和使用特殊的机械结构以及使用针状触头加弹簧复位装置形成的柔性外表面等。但是现有的方法都有以下缺点无法克服: (1) 接触刚度无法根据实际要求和被夹持物的刚度做任意的调节, 因而限制了其使用范围; (2) 现有技术都是使用表面材料弹性变形来达到模拟被夹持物外形的目的, 由于被夹持物外表面所受压力并不均衡, 因此

可能出现夹坏被夹持物和夹持不稳的现象; (3) 现有技术使用的柔顺表面的变形都是受挤压作用产生的, 在到达适应所夹持物体表面外形的变形后, 如果受到外力干扰仍会改变形状, 不能非常稳固地固定被夹持物。

磁流变材料是一种流变性能可由磁场控制的新型智能材料。磁流变液中颗粒在外加磁场的作用下被磁化, 磁化后的颗粒间相互作用聚集成链状或柱状有序结构, 在宏观看来, 即由液态转变为类固态; 而一旦撤去磁场, 磁流变液又恢复为液态^[7-9]。本文利用磁流变液设计了一种刚度可控的柔顺表面, 可以将其用于制作夹具或用于智能机器人的手爪上, 以适应夹持各种不同外形物体的需要。该柔顺表面可以通过外界磁场的改变来控制柔顺表面刚度的连续变化, 可以有效地增大接触面积, 降低夹持应力, 增加摩擦力, 从而可以防止夹伤或夹坏被夹持物和提高夹持的稳固度。该柔顺表面利用连通器的原理, 并以活塞为基本构成单元, 利用磁流变液状态的磁场可控性来实现柔顺表面刚度可控的目的。

2 柔顺表面的工作原理及其优化设计

2.1 工作原理

该装置的工作原理如图 1 所示。为了说明方便, 由于使用带有柔顺表面的夹具夹持物体与将物体直接放置在该柔顺表面上在研究其工作原理方面的效果相同, 故采用以下装置来介绍该柔顺表面的工作原理。

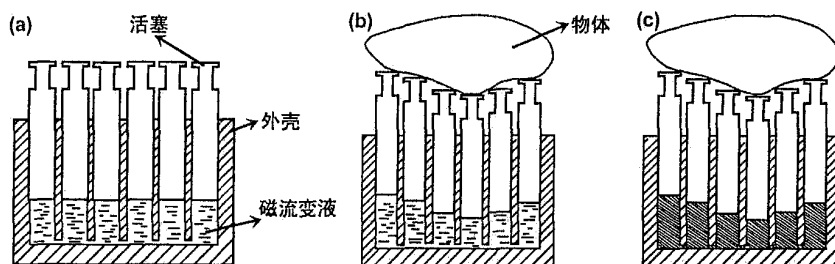


图 1 具有可控刚度柔顺表面的工作原理示意图

Fig 1 The work principle of a facile surface with controllable rigidity

该装置主要利用活塞阵列来模拟放置于其上的物体的外形, 主要由两部分组成: 活塞和外壳, 在活塞和外壳间的空间中充满磁流变液, 从而组成了一个连通器。当在该装置上放置一物体时, 如图 1(b) 所示, 由

于物体重力的作用, 使得活塞阵列发生变形, 假设物体的重量足够大(在实际夹持过程中, 可以通过带有柔顺表面的夹具对被夹持物体施力来实现), 因此活塞阵列能够充分变形, 较好的模拟出物体的外形。活塞阵列

* 基金项目: 安徽省 2005 年度重点科研资助项目(05021019)

收到初稿日期: 2005-12-15

收到修改稿日期: 2006-02-07

通讯作者: 龚兴龙

作者简介: 钱林俊 (1982-), 男, 江苏通州人, 在读硕士, 师承龚兴龙教授, 从事智能材料方面的研究工作。

越密,即单位面积内所包含的活塞根数越多,则所模拟出的物体的外形也就越精确。此时若给磁流变液施加磁场(图中未标出),则磁流变液瞬间(ms量级)变成类固态,如图1(c)所示,此时由活塞阵列所模拟出的物体的外形就被固定下来。该柔顺表面具有一定的自适应性,可以有效地模拟出物体的外部形状特征,相当于为每一个被夹持物都量身定制的一样,从而为某些特殊夹持的需要提供了可能。

2.2 磁路分析

实际的模型如图2所示,该结构主要由活塞阵列和外部结构组成,图中下方有一薄层用来盛放磁流变液。磁场的施加主要是通过电磁铁来实现。该模型中电磁铁铁芯直接跟磁流变液接触,最外层结构采用隔磁材料,而活塞采用导磁性材料,这样就能够有效的引导磁力线从磁流变液中通过,使得磁流变液的固化效果得到明显的改善。为了能够更加有效的引导磁场通过磁流变液,有效地增加磁流变液中的磁感应强度,本文另外设计了一个磁回路,即在整个装置外面包上一层由电工纯铁制做的磁回路,其底部与铁芯相连,上部与活塞导动装置相连。通过计算证明,磁流变液中的磁感应强度可以很容易的达到所需的要求,并能在一个较大的范围内固化,实现了该柔顺表面刚度的连续可调。该装置的优点在于磁流变液薄层中磁感应强度较强,可在较宽范围内连续改变磁流变液的固化程度,以达到不同的夹持目的。

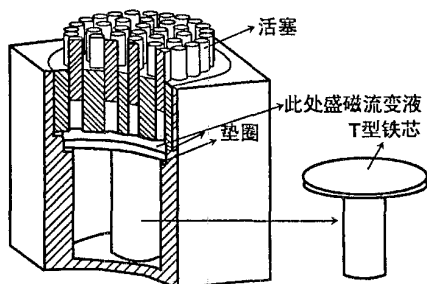


图2 模型结构示意图

Fig 2 The sketch of the surface model

本文用 ANSYS 对其磁场进行了模拟计算,计算中将该模型视为一轴对称图形进行研究,仅取其一个截面进行分析。给出磁流变液区域的磁力线走向以及磁感应强度,外加磁场为电磁场,线圈匝数为 12230 匝,电流为 80mA。计算结果如图3所示,图中左边轴为对称轴。由电磁铁产生的磁场的磁力线大部分从磁流变液中穿过,从而印证了这种设计的合理性。

取磁流变液中截面 OA(图3中标出)进行分析,得到该截面上各点的磁感应强度的曲线,如图4所示,横轴代表 OA 轴,纵轴代表 OA 轴上各点的磁感应强度。由该曲线可以看出,该截面上各点的磁感应强度绝大部分在 620~670mT 之间(电流强度为 80mA 时),可以使磁流变液达到很好的固化效果。当然该磁感应强度的数值可以通过改变通过线圈中的电流强度

的大小加以改变。

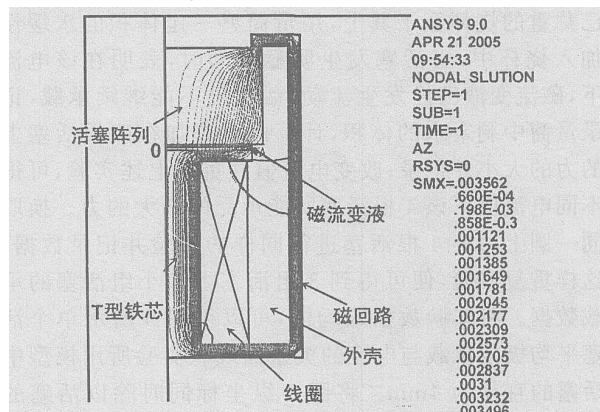


图3 磁流变液中磁力线分布图

Fig 3 The distribution of the magnetic lines in the MRF

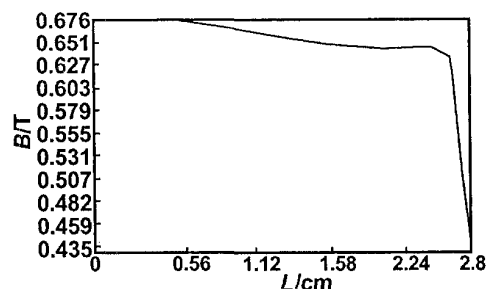


图4 磁流变液中截面磁感应强度分布图

Fig 4 The distribution of magnetic induction intensity in MRF

3 柔顺表面承载能力的实验研究

根据上述结构的磁路分析,实际研制了一刚度可控的柔顺表面,并对其进行了实验研究。

用夹具夹持一特定物体的时候,需要给夹具施加的力的大小是不一样的,这与所夹持的物体的外形以及质量等参数相关。既然夹持不同的物体所需要的力的大小不同,那么夹持一特定物体时,就可以根据被夹持物自身的特性来选择施加的力的大小。对于柔顺表面而言,就是选择通入线圈的电流的大小。为了能够既节省能源又稳固的夹持物体,我们需要研究其结构的极限屈服强度与外加电流之间的关系。所谓结构的极限屈服强度即该柔顺表面结构在一定的电流下,活塞阵列能够很好地模拟出物体的外形并保持该外形,且外界的干扰不足以破坏该外形,其单位面积上所能承受的力的最大值。

根据结构的对称性,我们将活塞阵列分成3组进行实验,每一个同心圆上的活塞作为一组,每次实验取其中的4根活塞进行。由于结构为连通器,从广义上来讲,每一根活塞在该连通器中所处的地位是相同的。图5为实验装置示意图,柔顺表面、电流表和直流电源串联连接。选取一同心圆上处于该圆内接正方形四角点上的4根活塞进行实验,调整该4根活塞至同一水平面,接通电路,调整电流至某一特定值并记录,将一

已称重的烧杯至于其上,用量筒盛一定体积的水缓慢加入烧杯中,当活塞发生明显移动时,表明在该电流下,磁流变液已经发生流动,活塞已不能继续承载,记录量筒中剩余水的体积,计算此时施加在四根活塞上的力的大小并记录;改变电流值并重复上述实验,可得不同电流值下该4根活塞所能承受的最大的力。换取同一圆上另外4根活塞进行同样的实验并记录数据。这样重复实验,便可得到3组活塞上各小组活塞的承载数据。将实验数据取均值,可以得到图6所示单个活塞平均极限承载与电流的关系曲线。实验所用模型中活塞的直径为4mm。将图6纵坐标同时除以活塞的横截面积,便可得到单个活塞的结构极限屈服强度与电流的关系。当用具有该柔顺表面的夹具夹持物体时,每根活塞上的夹持应力可以近似看成是均匀的,故而该单个活塞的结构极限屈服强度与电流的关系即为该模型的结构极限屈服强度与电流的关系,图6纵坐标乘上一个系数,便可得到结构屈服强度与电流的关系曲线,屈服强度可达22.5kPa。

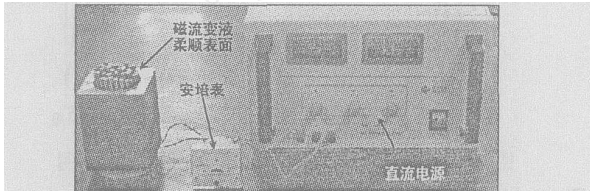


图5 实验装置示意图

Fig 5 The sketch of experimental devices

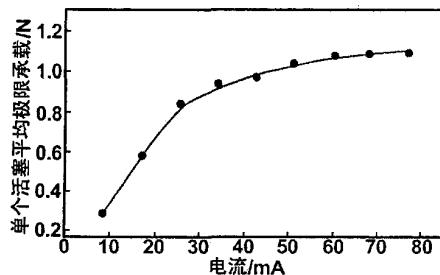


图6 电流强度与单个活塞平均极限载荷的关系

Fig 6 The relation between the current intensity and the average utmost load of one piston

由此便可以根据不同的需要来决定所施加的电流强度的大小,从而达到节省能源的目的。

4 结论

本文利用连通器的原理,以活塞为基本构成单元,用智能材料磁流变液初步研制了一种刚度可控的柔顺表面,并对其结构进行了磁路分析,从直观上印证了设计的合理性。在计算的基础上,本文还进行了初步的实验研究,得到自制柔顺表面的结构极限屈服强度与外加电流大小之间的关系曲线,得出自制结构的最大极限屈服强度为22.5kPa(线圈为12230匝,电流为80mA时)。计算和实验结果表明,该种柔顺表面能够很好地适应所夹持物体的外形,将在机器人手爪等器械中得到广泛应用。今后将继续对该结构进行进一步的优化和小型化研究,使其能够适应各种复杂环境的需要。

致谢:感谢中国科学院“百人计划”项目的大力支持!

参考文献:

- [1] Hirzinger G, Brunner B, Dietrich J, et al. ROTEX-The First Remotely Controlled Robot in Space [C]. San Diego: Proc IEEE Int Conf Robot, Automation, 1994. 2604-2611.
- [2] Hirzinger G, Brunner B, Dietrich J, et al. Sensor-based Space Robotics-ROTEX and its Telerobotic Features [C]. IEEE Trans Robot and Automation (Special Issue on Space Robotics), 1993. 9:649-663.
- [3] 刘璇,王小北. [J]. 机械设计与制造工程, 2000, 29(5): 53-56.
- [4] 方和平. [J]. 现代制造工程, 2002, 1:55-57.
- [5] 张先舟,王琪民,张培强. [J]. 实验力学, 2003, 18(2): 185-192.
- [6] 牟岩君. [J]. 信息技术, 2000, 10:14-22.
- [7] Bossis G, Lacis S, Meunier A, et al. [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 252:224-228.
- [8] Li W H, Du H, Chen G, et al. [J]. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2002, 333(1-2):368-376.
- [9] Phulé P. [J]. Smart Materials Bulletin, 2001, (2):7-10.

Research on surface with controllable rigidity

QIAN Lin-jun^{1,2}, GONG Xing-long^{1,2}, ZHANG Pei-qiang^{1,2}

(1. Department of Mechanics and Mechanical Engineering,

University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Hefei 230027, China)

Abstract: When using some special clamp like the robot's claw to clamp something special, facile surface with controllable rigidity is needed. Based on the mechanism of connected vessels, this paper presents a kind of surface with controllable rigidity by using the smart material-magnetorheological fluids. A clamp using this kind of surface can effectively increase the touch area, reduce the touch stress and increase the friction. Thus it can prevent the clamped object from being damaged and the stability is also reliable.

Key words: magnetorheological fluid; facile surface; controllable rigidity