doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.03.039

面向番茄无损抓取的磁流变智能手爪设计与试验

秦欢欢[1]　高晓洁[2]　朱浩然[2]　邱子城[1]　赖虹妃[2]　薛金林[2]　陈光明[2]
(1.南京农业大学智慧农业学院,南京 210031;2.南京农业大学工学院,南京 210031)

摘要:为实现柔软、易损球形果实的无损、快速抓取,以番茄为研究对象,基于磁流变液智能材料设计了一种新型柔性仿形智能手爪。首先根据番茄的尺寸参数设计智能手爪的结构,磁流变智能手爪由底座、电动平行驱动部件、连接件、磁流变模块 4 部分组成,其中磁流变模块采用柔性薄膜约束磁流变液,能够柔顺并紧密地贴合番茄果实表面,进而实现无损抓取。其次,通过有限元仿真验证了磁流变模块机械结构的合理性,并确定了最优的尺寸构型。为明确设定电流、位置与手爪刚度、最大抓取质量之间的关系,进行了刚度测试试验和标准球体抓取试验,结果表明电流与手爪刚度、最大抓取质量呈正相关,位置与手爪最大抓取质量呈负相关,与手爪刚度呈正相关。最后,为验证手爪抓取性能,开展了番茄抓取试验。抓取试验结果表明,所设计的柔性仿形智能手爪抓取成功率为 100%,抓取直接损伤率为 0,平均抓取时长为 5.39 s,能够快速且无损地抓取不同规格的番茄。

关键词:番茄采摘机器人;磁流变液;智能手爪;柔性仿形
中图分类号:TP241.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)03-0410-08　　**OSID**:

Design and Experiment of Magnetorheological Smart Gripper for Non-destructive Tomato Grasping

QIN Huanhuan[1]　GAO Xiaojie[2]　ZHU Haoran[2]　QIU Zicheng[1]　LAI Hongfei[2]　XUE Jinlin[2]　CHEN Guangming[2]
(1. *College of Smart Agriculture* (*College of Artificial Intelligence*), *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*
2. *College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*)

Abstract: In order to realize non-destructive and fast grasping of soft and fragile spherical fruit, tomatoes were taken as the research object, and a type of flexible contour-profiling smart gripper was designed based on magnetorheological (MR) fluid smart materials. At first, the structure of the smart gripper was designed according to the size parameters of tomato. The smart MR gripper mainly consisted of four parts: the base, the electric parallel driving part, the connecting plate and the MR module. The MR fluid was constrained by a flexible film in the MR module, which can flexibly and tightly fit the surface of the tomato fruit, thereby achieving non-destructive grasping. Then the rationality of the mechanical structure of the MR module was verified by finite element simulation, and the optimal dimensional configuration was determined. To determine how the applied current and set position affected the gripper stiffness and maximum grasping quality, the stiffness test and standard sphere grasping test were carried out. The results showed that the current was positively correlated with the gripper stiffness and maximum grasping quality, while the position was negatively correlated with the maximum grasping mass and positively correlated with the gripper stiffness. Finally, in order to verify the actual grasping performance of the gripper, the tomato grasping test was carried out. The test results showed that the success rate was 100%, the direct damage rate of grasping was 0, and the average task time was 5.39 s, indicating that the gripper could quickly and non-destructively grasp tomatoes of different sizes.

Key words: tomato hand-picking robot; magnetorheological fluid; smart gripper; flexible contour-profiling

收稿日期:2024-10-16　修回日期:2024-11-14
基金项目:江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20210408)和江苏省重点研发计划项目(BE2021016-5)
作者简介:秦欢欢(1989—),男,讲师,博士,主要从事农业智能机器人技术研究,E-mail:qhuanhuan1001@njau.edu.cn
通信作者:薛金林(1974—),男,教授,博士,主要从事农业车辆测控技术和智能化研究,E-mail:xuejinlin@njau.edu.cn

0　引言

抓取是农业机器人的重要功能之一[1]，这一动作通常由机械手爪承担。在水果抓取方面，由于水果的形态多样性和柔软易损性[2]，机械手爪作为抓取过程中与水果直接接触的关键部件[3]，其性能直接影响抓取的成功率和水果的损伤率。因此，研究能够降低抓取过程中水果损伤的机械手爪，对于提高抓取效率和保障水果品质具有十分重要的作用[4]。

机械手爪通常可以分为刚性和柔性两种[5]。传统的刚性手爪因其固有的高刚度特质，存在结构复杂[6]、柔顺性差[7]、环境适应能力弱等问题[8-9]。柔性手爪由于具备柔顺性好、环境适应能力强等优势成为当下研究热点。根据驱动方式，常见的柔性手爪可分为气动手爪、电动手爪和磁性手爪[10]。气动手爪通过气动系统来驱动和控制其运动。陈子文等[11]针对番茄抓取设计了全气动吸-夹一体的三指手爪，并搭建了基于夹持压力反馈的气动伺服调节系统。姬江涛等[12]针对双孢菇抓取，基于颗粒堵塞原理设计了一种气动柔性仿形吸盘手爪，并进行了双孢菇抓取试验，试验表明采摘成功率为 98.5%，损伤率为 2.5%。气动手爪柔顺性较高、形变能力较强，但夹持力通常较弱，无法适用于大负载场景[13]。电动手爪是指由电机直接或间接驱动的手爪。姚兴田等[8]设计了一种基于滑块摇杆机构的三指手爪，舵机带动弹簧驱动指跟，指跟上的滑块可带动指中节和指尖，指尖驱动较软的弹簧实现柔性接触。魏博等[14]设计了一款三指欠驱动式柑橘采摘手爪，提出基于电流反馈的主动柔顺控制策略，指跟能够与柑橘表面紧密贴合，使其能对不同椭圆度的柑橘进行采摘。龙奕琳等[15]设计了一种变刚度三指柔性手爪，电机驱动两个可旋转手指调整位姿，基于差动轮系的变刚度执行器驱动手爪关节将目标包络起来，完成夹持任务。电动手爪能够实现精确抓取，但控制复杂[16]。磁性手爪是指由磁场驱动致使磁性材料特性发生变化进而实现柔顺抓取的手爪。NISHIDA 等[17]基于磁流变(Magenetorheological，MR)流体开发了一种 MRα 流体，并设计了一款基于 MRα 流体的末端执行器，可夹持各种形状的物体，最大夹持力为 50.67 N。TSUGAMI 等[18]利用改进型磁流变液(Magenetorheological fluid，MRF)开发了一款平行夹爪，包裹 MRF 的弹性膜能够贴合目标物体的形状，可抓取各种形状的易碎柔软物体。CHOI 等[19]开发了一种基于 MRF 的带有可磁化磁流变弹性体膜的通用夹具，试验表明，与不可磁化硅胶膜相比，可磁化磁流变弹性体膜的夹持力更大，能够实现更可靠的夹持。虽然磁性手爪能够在实现柔性接触的同时提供较大的夹持力，但目前所研究的磁流变手爪多用于工业，尚未应用于农业尤其是柔软水果的抓取。因此，需要进一步开展磁性手爪的构型优化，实现该手爪对柔软水果的抓取作业。

本文以番茄为典型柔软、易损球形果实，针对其柔顺抓取问题，采用 MRF 智能材料设计一种柔性仿形智能手爪。该手爪末端安装有磁流变模块，能够柔性接触番茄并对其进行仿形，从而实现无损抓取。利用 Maxwell 软件对磁流变模块进行静磁场仿真及优化，得出该模块的最优尺寸构型。此外，为验证手爪的性能和抓取效果，开展刚度测试试验、标准球体抓取试验以及番茄果实抓取试验。

1　磁流变智能手爪设计

1.1　手爪机械结构

MRF 通常是含有微米级铁颗粒的矿物油或硅油[20]，其具有良好的流变效应。在不施加外部磁场的情况下，MRF 呈现为低粘度的牛顿流体特性，在施加外部磁场后，铁颗粒沿着磁通线排列，形成链式结构，MRF 从液态变成类固态[21]。MRF 这种状态的转换被称为磁流变效应[22]，并且具有连续性、可逆性、可控性以及响应时间短(毫秒级)等特点[23-24]，因此本文基于 MRF 智能流体设计了一款柔性仿形智能手爪。

本文以柔软易损的番茄果实为研究对象开展机械手爪的设计，因此磁流变智能手爪需要有足够的柔性。由于番茄的直径范围在 50 ~ 100 mm，质量范围为 100 ~ 320 g，在磁流变智能手爪的设计中应当考虑番茄的尺寸，并通过调控磁场来控制 MRF 的流变特性，使其能够灵活地适应不同尺寸和形状的番茄，从而实现稳定可靠、柔软无损的抓取操作。

磁流变智能手爪机械结构如图 1 所示，主要由底座、电动平行驱动部件、连接件、磁流变模块 4 部分组成。底座由两层部件构成，下层与机械臂相连接，使夹爪能够配合在机械臂末端，上层与电动平行驱动部件相连接。连接件由多孔行程板、固定板组成，固定板上端连接磁流变模块，下端与行程板连接。行程板与电动平行驱动部件(大寰机器人 PGE - 50)相连，电动平行驱动部件可驱动连接件的移动，进而控制两个磁流变模块的张开和闭合。

磁流变模块剖视图如图 2 所示，主要由电纯铁外壳、线圈、密封圈、上端盖、柔性薄膜和 MRF 组成。外壳使用电纯铁(牌号为 DT4C)材料，具有较好的

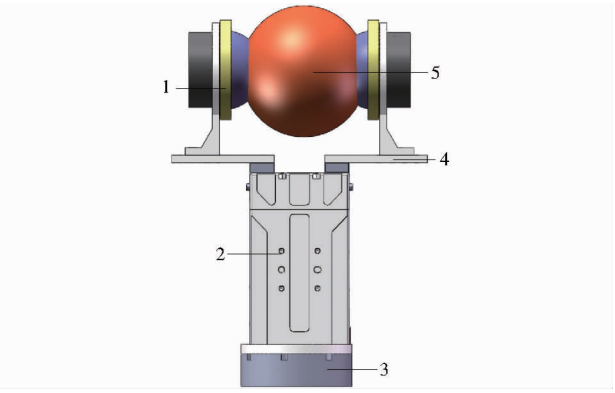

图 1 手爪机械结构图

Fig. 1 Mechanical structure diagram of gripper

1. 磁流变模块 2. 电动平行驱动部件 3. 底座 4. 连接件 5. 球果

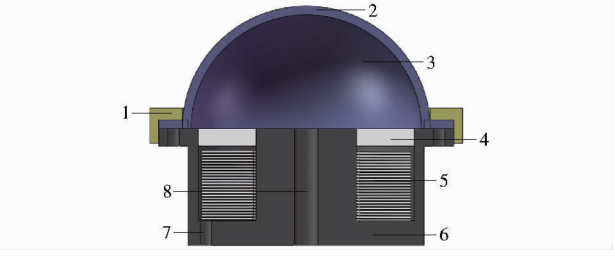

图 2 磁流变模块剖视图

Fig. 2 MR module section view

1. 上端盖 2. 柔性薄膜 3. MRF 4. 密封圈 5. 线圈 6. DT4C 外壳 7. 线圈孔 8. 注液孔

导磁性能,并做成“山”字形状,可以固定线圈的位置。线圈放置于 DT4C 外壳的内部,当线圈通电时,线圈会产生穿越 MRF 区域的磁场。电流大小影响磁场的强弱,同时磁场的强弱又对 MRF 的状态产生影响。因此通过给线圈添加合适的电流,可以产生磁场从而控制 MRF 完成由柔到刚的转变。线圈上方放置有密封圈,可以防止 MRF 流入到线圈中。柔性薄膜是与球果接触的末端部件,由邵氏硬度为 15 的硅胶利用注模法制备而成,并通过上端盖旋拧固定在 DT4C 外壳上。利用注射器将 MRF 通过注液孔注入到柔性薄膜内部,注入体积约为腔室容量的 80%,之后排除多余空气,再使用螺钉堵塞注液孔。MRF 注入体积的考量和柔性薄膜良好的形变能力,可以有效避免因 MRF 膨胀效应而导致的漏液问题。

1.2 手爪工作原理

磁流变智能手爪抓取过程可分为 3 个阶段:接触阶段、形变阶段、固化阶段(如图 3 所示)。当需要进行抓取作业时,磁流变智能手爪先根据目标球果的规格调整夹持尺寸,再接近球果,电动平行驱动部件通过施加夹持力形成力封闭约束住球果。此时并未给线圈添加激励电流,MRF 呈现流体状,在与球果接触时,柔性薄膜会自适应球果的尺寸和形状,

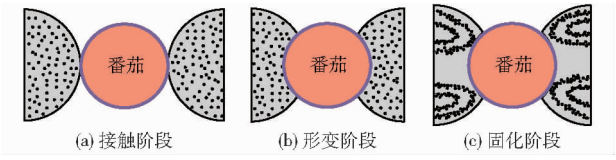

图 3 手爪抓取番茄流程

Fig. 3 Grasping tomato process of gripper

完成球果表面的仿形工作。之后给线圈添加激励电流,线圈会产生穿越 MRF 区域的磁场,随着磁场强度的增加,MRF 的屈服应力发生改变,此时表现为类固态的特性,从而固定住球果,完成柔顺抓取作业。由于所注入 MRF 体积有限(约为 12 mL),加之在施加外部磁场时磁流变液中铁磁粒子会克服重力形成链式结构,因此,MRF 自身重力对抓取效果的影响可以忽略。

2 有限元仿真优化

2.1 有限元仿真模型建立

MRF 和 DT4C 作为磁性材料,磁感应强度与外加磁场呈非线性关系。当外加磁场高于材料饱和点时,磁感应强度不能无限增加,当外加磁场低于材料饱和点时,磁感应强度与外加磁场呈线性关系。MRF 在抓取作业中需要完成由液态到类固态的转变,但只有在合适的磁感应强度范围下 MRF 才能完成这一转变。线圈作为产生磁场的关键部件,在匝数较多、电流较大的条件下,会产生更强的磁场。然而有限的体积限制了线圈尺寸,同时考虑到散热问题,所施加的电流不能太大。此外,DT4C 外壳的设计尺寸也影响线圈尺寸和磁场的强弱及分布。借助有限元仿真分析得出磁流变模块的最优尺寸,从而使 MRF 区域和 DT4C 外壳区域的磁感应强度能够在饱和点内得到最大化。ANSYS Electronics Desktop 是用于电磁、电路和系统仿真的高级集成平台,本次仿真基于 Electronics Desktop 中的 Maxwell 2D 仿真系统对磁流变模块进行电磁学仿真及优化分析。

静磁场仿真及优化分析步骤如图 4 所示。首先进行求解器的设置,本次仿真采用二维求解器,将模型求解设置为气球边界条件的轴对称二维静磁场仿真,仿真模型简化图如图 5 所示。其中 MRF 区域采用 MRF-140CG 材料,B-H 曲线如图 6a 所示。外壳采用 DT4C 材料,最大磁导率约为 0.015 1 H/m、矫顽力约为 32 A/m、抗拉强度为 265 MPa,B-H 曲线如图 6b 所示。包裹磁流变液的膜采用硅胶材料,线圈部分为铜材料,孔部分为空腔,故材料设置为真空。

在优化分析之前,可以先确定以下参数:①柔性

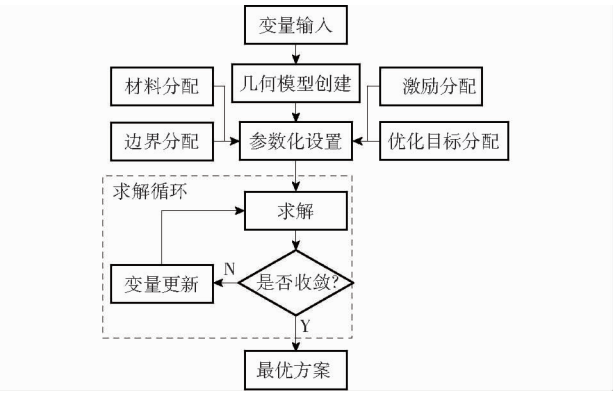

图 4　磁场仿真优化流程图

Fig. 4　Diagram of steps for magnetic field simulation optimization

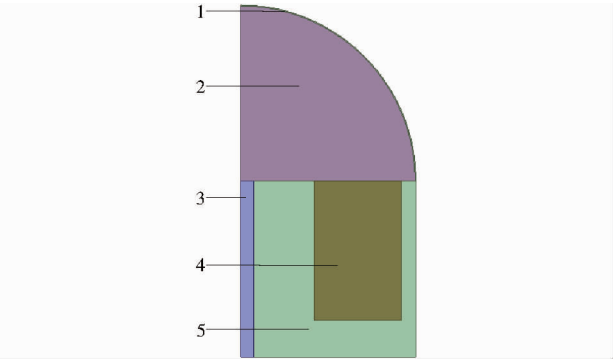

图 5　仿真模型简化图

Fig. 5　Simplified diagram of simulation model

1. 柔性薄膜　2. MRF　3. 空腔　4. 线圈　5. DT4C 外壳

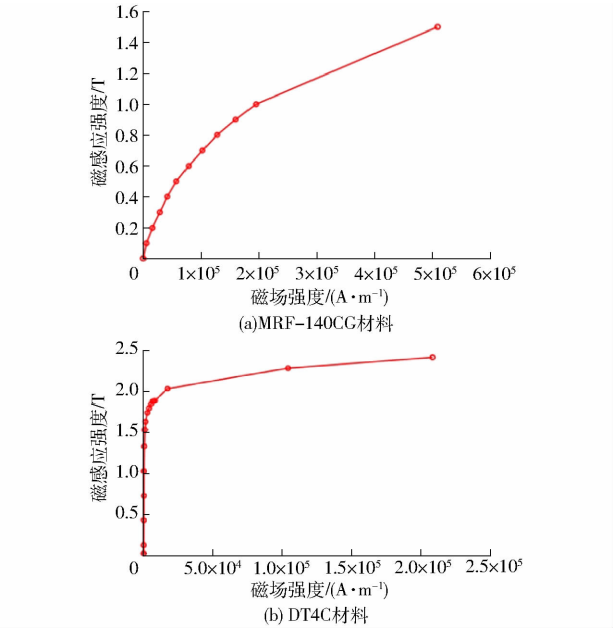

图 6　B－H 曲线

Fig. 6　B－H curves

薄膜需要和球果接触，需要足够薄以实现柔性抓取，同时考虑到柔性薄膜要重复使用，需要有一定的厚度，设置柔性薄膜厚度为 1.5 mm，高度为 20 mm。②综合考虑番茄等小型球果的尺寸以及手爪的灵活性，设置 MRF 夹持机构直径和总高均为 40 mm。③虽然线圈尺寸有限，但为了产生足够强的磁场，设置线圈参数为 1 000 AT。

2.2　有限元仿真优化分析

在构建有限元模型时，设定模型尺寸为对应参数，如图 7 所示，并界定各参数的最大值和最小值，随后选取一组参数值作为初始量输入到软件中，计算出这组参数值下 DT4C 区域和 MRF 区域的磁感应强度。接着，调整参数值，开启优化求解循环。当 DT4C 区域的最大磁感应强度达到 1.5 T，且 MRF 区域的最大磁感应强度达到 0.7 T 时，优化循环停止，此时各参数对应的数值就是最优尺寸值。

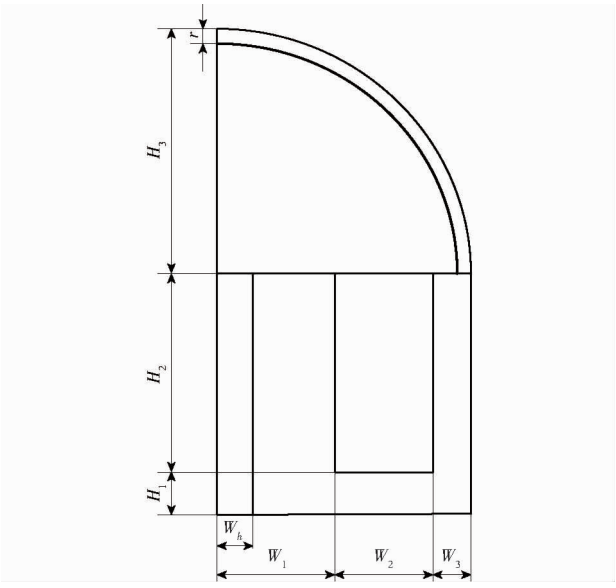

图 7　仿真模型参数分配图

Fig. 7　Parameter assignment diagram of simulation model

有限元仿真优化分析结果如图 8 所示，DT4C 区域磁感应强度分布较为均匀，但 MRF 区域磁感应强度随着 y 轴距离的增加而减小，因此在 DT4C 和 MRF 区域分别设置了 4 条路径来定量检测磁感应强度的大小，分别是 D_1（$A \rightarrow B$）、D_2（$A \rightarrow C$）、

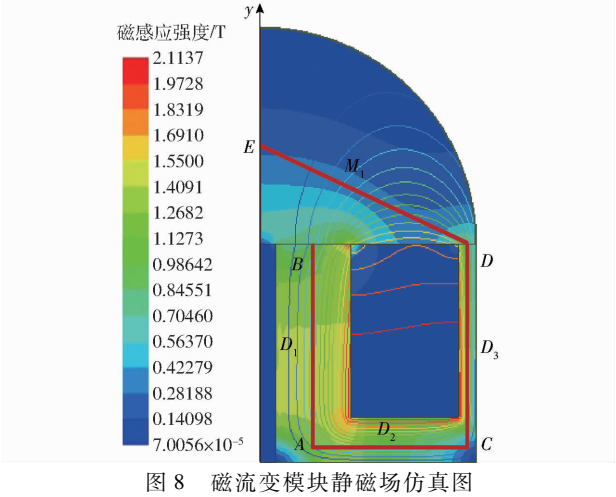

图 8　磁流变模块静磁场仿真图

Fig. 8　Static magnetic field simulation diagram of MR module

D_3(C→D)、M_1(D→E),路径检测结果如图 9 所示。在 1 000 AT 的激励下,D_1、D_2、D_3 3 条路径上的磁感应强度最大值均在 1.5 T 左右(图 9a),在 DT4C 饱和点附近,M_1 路径上的磁感应强度最大值在 0.7 T 左右(图 9b),足够使 MRF 完成由液态到类固态的转换。

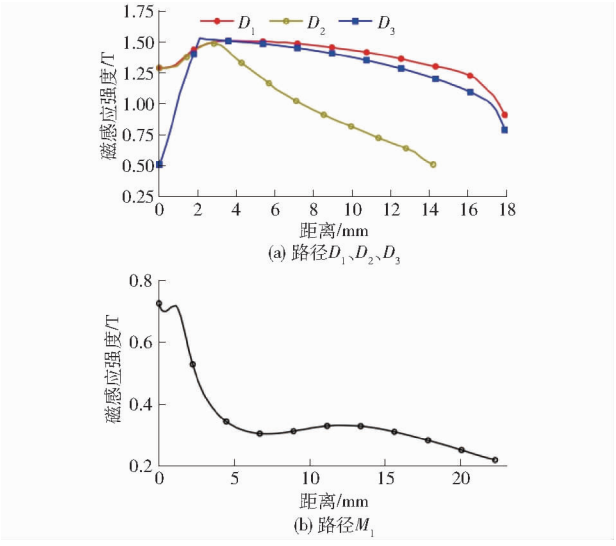

图 9 路径上探测的磁感应强度曲线

Fig. 9 Magnetic flux density curves detected on paths

经过多次迭代计算的最优结果为:DT4C 外壳底厚为 4.2 mm,壁厚为 1.7 mm,中心柱半径为 8.4 mm,由此可以确定线圈尺寸,线圈由直径为 0.3 mm 的漆包铜线缠绕 1 000 匝而成。根据实际加工和设计要求,调整参数如表 1 所示。磁流变模块除柔性薄膜外的零件基本都通过 3D 打印制成,最终手爪实物图如图 10 所示。

表 1 磁流变模块参数

Tab. 1 MR module parameters mm

参数	W_1	W_2	W_3	H_1	H_2	H_3	W_h	r
数值	8.5	9.8	1.7	4.2	15.8	20.0	2.0	1.5

注:W_h 为中心柱半径,W_1 为线圈内径一半,W_2 为线圈厚度,W_3 为 DT4C 外壳壁厚,H_1 为 DT4C 外壳底厚,H_2 为线圈高度,H_3 为 MRF 区域的高度(包含柔性薄膜厚度),r 为柔性薄膜厚度。



图 10 手爪实物图

Fig. 10 Gripper prototype

3 试验

3.1 刚度测试试验

在磁流变智能手爪工作过程中,给线圈施加不同的电流会产生不同强弱的磁场,进而使得 MRF 实现刚柔状态之间的转换。刚度是衡量材料或结构抵抗单位变形所需力的大小,通过分析力在不同位移下的斜率可以得到刚度的变化情况。为了进一步明确电流与 MRF 刚度之间的关系,对所制备的磁流变模块进行了刚度测试试验。

试验使用艾德堡 HLD 螺旋机架对磁流变模块进行挤压,测力计可显示力值,如图 11 所示。在试验中,首先将测力计与磁流变模块接触,并记录测力计在力为 0 时的位置作为参考位置,记为 0 mm,接着在 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 A 的电流下分别记录测力计在 2、4、6、8、10 mm 位置下的力值。测力计最大量程为 50 N,因此超过量程的数据均处理为 50 N。通过这些数据,可以分析不同电流条件下磁流变模块的刚度特性。

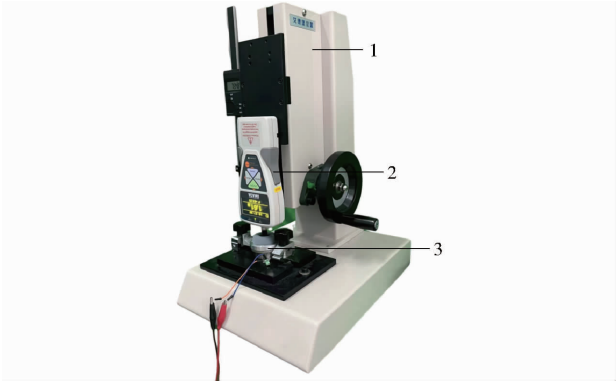

图 11 刚度试验平台

Fig. 11 Stiffness test platform

1. 艾德堡 HLD 螺旋机架 2. 测力计 3. MRF 模块

由图 12 可知,磁流变模块受挤压的位置相同即形变相同时,当通过磁流变模块的电流增强时,所需施加力显著增加,即电流越大,MRF 刚度越高,抵抗变形能力越强。除此之外,挤压位置也对刚度产生影响。当磁流变模块被挤压的越严重,对应的单位位移所产生的力变化较大,即位置越大,MRF 刚度越高。磁流变模块可根据外加电流大小及挤压位置灵活调整其刚度,从而可以抓取不同规格的番茄。

3.2 标准球体抓取试验

为了测量磁流变智能手爪在不同电流及夹持位置下所能抓取的最大球体质量,试验选用直径为 80 mm 的标准塑料球体搭配不同质量的砝码进行抓取作业。

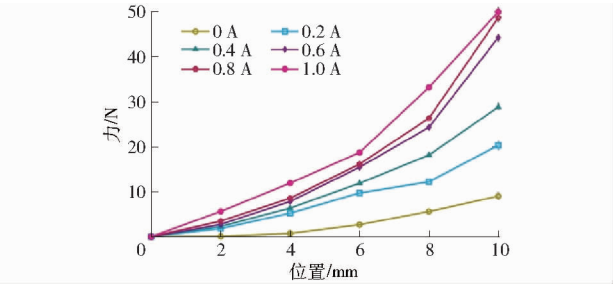

图 12　不同电流下位置与力的关系曲线

Fig. 12　Relationship between position and force of different currents

试验将磁流变智能手爪安装在宇树 Z1 型机械臂上对标准球体进行抓取，如图 13 所示。抓取时，机械臂首先运动到初始位置；接下来，机械臂运动到球体上方，手爪张开对标准球体进行抓取；然后机械臂抓取球体并向上移动一段距离到中间位置；最后，手爪张开释放球体，机械臂回到初始位置，为下一次抓取做准备。在抓取过程中，球体质量以 10 g 为步长进行递增，如果球体能顺利离开桌面并保持 1 min 不掉落，则记为抓取成功，否则记为失败。抓取失败时，会再进行两次抓取，若全部失败，则前一个数据即为此条件下的最大抓取质量。设置磁流变智能手爪抓取力为 20 N，记磁流变模块与球体刚接触时的凹陷位置为 0 mm，因此分别测量在磁流变模块凹陷位置 −2、−4、−6、−8 mm 以及在 0.2、0.4、0.6、0.8 A 电流下，磁流变智能手爪所能抓取的最大标准球体质量，试验结果如图 14 所示。

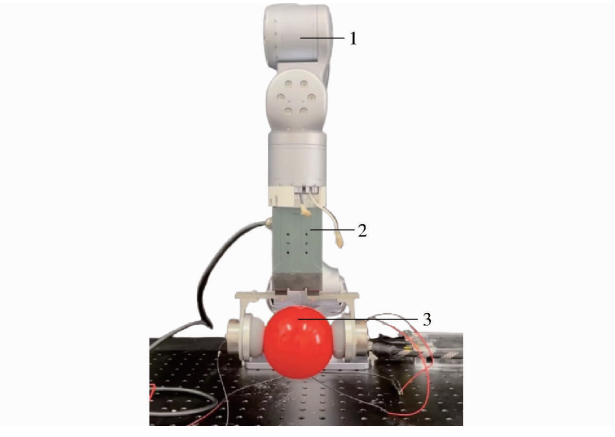

图 13　抓取标准球体试验平台

Fig. 13　Grasping standard ball test platform

1. 宇树 Z1 型机械臂　2. 磁流变智能手爪　3. 标准球体

由图 14 可知，当电流为 0.8 A，位置为 −8 mm 时，抓取的球体质量最大，接近 600 g；当电流为 0.2 A，位置为 −2 mm 时，抓取的球体质量最小，约为 120 g。在相同的电流下，随着手爪位置的减小，可抓取的最大质量逐渐增大，可知手爪位置与最大抓取质量呈负相关。但位置为 −8 mm 时，相对于 −6 mm，手爪位置对质量影响不大，是因为位置为

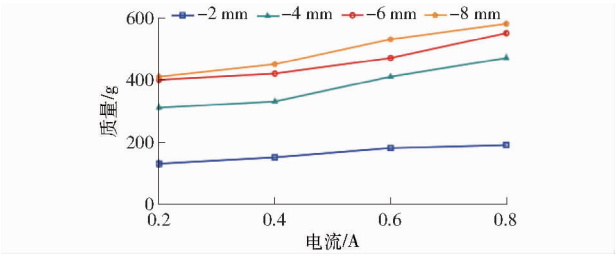

图 14　电流和位置与抓取质量的关系曲线

Fig. 14　Curves of current and position in relation to grasping quality

−8 mm 时手爪的两个磁流变模块之间距离过小，已经小于球体尺寸，所以抓取球体后的实际位置并不是 −8 mm，而是与 −6 mm 相近。电流与抓取质量呈近似线性关系，在相同的位置下，随着电流的增大，可抓取的最大质量逐渐增大。当位置减小时，线段在电流为 0.4 A 后出现斜率变大的现象，可能是因为在大电流作用下，MRF 刚度更大，同时较小的位置使得磁流变模块中的柔性薄膜能够与球体有更大的接触面积，对抓取质量产生了影响。虽然较大的电流可以抓取更大质量的球体，但是电流过大时，线圈会发热，进而影响磁流变智能手爪的正常工作。调查得知番茄最大质量在 320 g 左右，以 80 mm 标准球体为例，在电流为 0.4 A、距离为 −6 mm 以及电流为 0.6 A、距离为 −4 mm 时，就能抓取 400 g 左右的球体。虽然较大的电流可以抓取更大质量的球体，但是电流过大时，线圈会发热，进而影响磁流变智能手爪的正常工作，因此，抓取球果的最优位置设置为 −6 mm。

3.3　番茄抓取试验

为了验证所设计的磁流变智能手爪的实际抓取效果，进行了番茄抓取试验。试验选取直径为 60 ~ 70 mm、70 ~ 80 mm 的成熟番茄果实各 15 个，共 30 个番茄作为抓取对象。抓取过程与标准球果抓取试验一致，如图 15 所示。在抓取过程中，若磁流变智能手爪夹取番茄成功离开桌面并保持 1 min 不掉

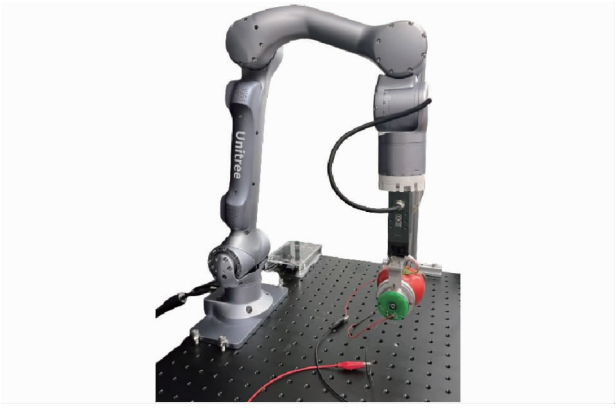

图 15　番茄抓取试验平台

Fig. 15　Tomato grasping test platform

落,则视为抓取成功,记为 1;番茄未离开桌面或在 1 min 内掉落则视为抓取失败,记为 0。在每次抓取后,检查番茄表面有无明显的凹陷、破损、划痕,如果有则视为番茄损伤,记为 1,反之为无损,记为 0。除此之外,在每次抓取时,记机械臂从初始位置到中间位置所需要的时间为抓取时间。在抓取结束后需要计算磁流变智能手爪抓取的成功率、直接损伤率以及平均抓取时间。

试验统计结果如表 2 所示,磁流变智能手爪抓取成功率为 100%,番茄直接损伤率为 0,单果平均抓取时间为 5.39 s。试验结果表明,所设计的磁流变智能手爪对不同尺寸、形状、质量的番茄都能够实现无损抓取,并且抓取成功率高,抓取时间短。

表 2 番茄抓取试验结果

Tab. 2 Tomato grab test results

尺寸/mm	数量/个	抓取成功率/%	直接损伤率/%	平均抓取时间/s
60 ~ 70	15	100	0	5.41
70 ~ 80	15	100	0	5.37
平均值		100	0	5.39

4 结论

(1)设计了一种磁流变智能手爪,该手爪由底座、电动平行驱动部件、连接件、磁流变模块组成。磁流变模块使用柔性薄膜包裹磁流变液,使得手爪在与果实接触时能够进行柔性仿形,进而实现无损抓取。

(2)对磁流变模块进行了静磁场有限元仿真,通过分析磁感应强度云图以及 4 条路径上的磁感应强度曲线图,进而确定磁流变模块最优尺寸,验证所设计结构的合理性,并为试验样机的制备提供尺寸数据。

(3)为明确电流、位置与手爪刚度和最大抓取质量之间的关系,针对磁流变智能手爪进行了刚度测试试验和标准球体抓取试验,结果表明电流与刚度、最大抓取质量呈正相关,位置与最大抓取质量呈负相关,与刚度呈正相关。为验证手爪抓取性能,对番茄开展了抓取试验,试验表明磁流变智能手爪平均抓取成功率为 100%,平均抓取直接损伤率为 0,平均抓取时长为 5.39 s。结果表明,所设计的磁流变智能手爪能够无损、快速、稳定地抓取不同规格的番茄。

参 考 文 献

[1] 刘文海,胡洁,王伟明,等. 基于完备抓取构型和多阶段网络的软体手抓取[J]. 上海交通大学学报,2020,54(5):507 - 514.
LIU Wenhai, HU Jie, WANG Weiming, et al. Soft gripper grasping based on complete grasp configuration and multi-stage network[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2020,54(5):507 - 514. (in Chinese)

[2] 李秦川, 胡挺, 武传宇, 等. 果蔬采摘机器人末端执行器研究综述[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 175 - 179,186.
LI Qinchuan, HU Ting, WU Chuanyu, et al. Review of end-effectors in fruit and vegetable harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 175 - 179,186. (in Chinese)

[3] 童以, 张华, 钟金鹏, 等. 番茄采摘柔性末端执行器设计[J]. 黑龙江工业学院学报(综合版), 2023, 23(10): 141 - 149.
TONG Yi, ZHANG Hua, ZHONG Jinpeng, et al. Design of flexible end-effector for tomato picking[J]. Journal of Heilongjiang University of Technology(Comprehensive Edition), 2023, 23(10): 141 - 149. (in Chinese)

[4] 贾江鸣, 叶玉泽, 程培林, 等. 细长果蔬采摘软体气动抓手设计与参数优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 26 - 34.
JIA Jiangming, YE Yuze, CHENG Peilin, et al. Design and parameter optimization of soft pneumatic gripper for slender fruits and vegetables picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 26 - 34. (in Chinese)

[5] 赵云伟, 黄浩然, 刘晓敏,等. 无系留气动自适应球果采摘软体手爪设计与实验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 74 - 84.
ZHAO Yunwei, HUANG Haoran, LIU Xiaomin, et al. Design and experiment of untethered pneumatic adaptive cone picking soft gripper for cone[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 74 - 84. (in Chinese)

[6] 仲天赐, 陆明月, 吴言言. 软体末端执行器的研究现状[J]. 机械管理开发, 2023, 38(10): 50 - 51,54.
ZHONG Tianci, LU Mingyue, WU Yanyan, et al. Research status of soft end-effector[J]. Mechanical Management and Development, 2023, 38(10): 50 - 51,54. (in Chinese)

[7] 赵云伟, 耿德旭, 刘晓敏, 等. 气动柔性果蔬采摘机械手运动学分析与实验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 31 - 42.
ZHAO Yunwei, GENG Dexu, LIU Xiaomin, et al. Kinematics analysis and experiment on pneumatic flexible fruit and vegetable picking manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 31 - 42. (in Chinese)

[8] 姚兴田, 王旭光, 张磊, 等. 基于滑块摇杆机构的柔性三指机器人手爪研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 396 -

405.
YAO Xingtian, WANG Xuguang, ZHANG Lei, et al. Flexible robot hand based on slider and rocker mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 396 - 405. (in Chinese)

[9] 傅隆生, 张发年, 槐岛芳德, 等. 猕猴桃采摘机器人末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 1 - 8.
FU Longsheng, ZHANG Fanian, GEJIMA Yoshinori, et al. Development and experiment of end-effector for kiwifruit harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 1 - 8. (in Chinese)

[10] 陈青, 殷程凯, 郭自良, 等. 苹果采摘机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2023, 39(4): 1 - 15.
CHEN Qing, YIN Chengkai, GUO Ziliang, et al. Current status and future development of the key technologies for apple picking robots[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(4): 1 - 15. (in Chinese)

[11] 陈子文, 杨明金, 李云伍, 等. 基于气动无损夹持控制的番茄采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 27 - 35.
CHEN Ziwen, YANG Mingjin, LI Yunwu, et al. Design and experiment of tomato picking end-effector based on non-destructive pneumatic clamping control[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(2): 27 - 35. (in Chinese)

[12] 姬江涛, 李梦松, 赵凯旋, 等. 双孢菇柔性仿形采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 104 - 115.
JI Jiangtao, LI Mengsong, ZHAO Kaixuan, et al. Design and experiment of flexible profiling picking end-effector for *Agaricus bisporus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 104 - 115. (in Chinese)

[13] 胡皓若, 张跃跃, 周佳良, 等. 果蔬采摘机器人末端执行器研究现状[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(4): 231 - 236.
HU Haoruo, ZHANG Yueyue, ZHOU Jialiang, et al. Research status and analysis of end-effector of fruit and vegetable picking robot[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(4): 231 - 236. (in Chinese)

[14] 魏博, 何金银, 石阳, 等. 欠驱动式柑橘采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 120 - 128.
WEI Bo, HE Jinyin, SHI Yang, et al. Design and experiment of underactuated end-effector for citrus picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 120 - 128. (in Chinese)

[15] 龙奕琳, 王彬峦, 金弘哲, 等. 基于差动轮系的变刚度执行器及变刚度柔性手爪[J]. 机械工程学报,2023, 59(1): 91 - 102.
LONG Yilin, WANG Binluan, JIN Hongzhe, et al. Variable stiffness actuator and variable stiffness flexible gripper based on differential gear train[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(1): 91 - 102. (in Chinese)

[16] 张军诗, 张凡, 刘磊, 等. 可变刚度柔性手指的仿真与优化[J]. 中国科学:物理学·力学·天文学, 2024, 54(6): 1 - 11.
ZHANG Junshi, ZHANG Fan, LIU Lei, et al. Simulation and optimization of variable stiffness flexible fingers[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2024, 54(6): 1 - 11. (in Chinese)

[17] NISHIDA T, OKATANI Y, TADAKUMA K. Development of universal robot gripper using MRα fluid[J]. International Journal of Humanoid Robotics, 2016,13(4): 1 - 13.

[18] TSUGAMI Y, BARBIE T, TADAKUMA K, et al. Development of universal parallel gripper using reformed magnetorheological fluid[C]//2017 11th Asian Control Conference (ASCC). IEEE, 2017:778 - 783.

[19] CHOI Y T, HARTZELL C M, LEPS T, et al. Gripping characteristics of an electromagnetically activated magnetorheological fluid-based gripper[J]. AIP Advances, 2018, 8(5): 1 - 6.

[20] KANG S S, CHOI K, NAM J D, et al. Magnetorheological elastomers: fabrication, characteristics, and applications[J]. Materials, 2020, 13(20): 1 - 24.

[21] PETTERSSON A, DAVIS S, GRAY J O, et al. Design of a magnetorheological robot gripper for handling of delicate food products with varying shapes[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 98(3): 332 - 338.

[22] 江泽琦, 刘坪, 方建华. 磁流变液的研究综述[J]. 合成润滑材料, 2018, 45(2): 27 - 30.
JIANG Zeqi, LIU Ping, FANG Jianhua. Research review on magnetorheological fluids[J]. Synthetic Lubricants, 2018, 45(2): 27 - 30. (in Chinese)

[23] 李玉青, 罗一平, 王莹, 等. 磁流变液沉降稳定性研究综述[J]. 轻工机械, 2020, 38(6): 1 - 4,10.
LI Yuqing, LUO Yiping, WANG Ying, et al. Reasearch in sedimentation stability of magnetorheological fluids[J]. Light Industry Machinery, 2020, 38(6): 1 - 4,10. (in Chinese)

[24] 李国全, 黄子齐, 陈俊杰. 磁流变液制备及其流动特性有限元仿真[J]. 机电工程技术, 2023, 52(9): 84 - 88.
LI Guoquan, HUANG Ziqi, CHEN Junjie. Magnetorheological fluid preparation and finite element simulation of flow characteristic[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 52(9): 84 - 88. (in Chinese)