

## 软体技术在机器人化制造中的应用与展望

蒲萌浩<sup>1,2</sup>, 徐富康<sup>1,2</sup>, 柴治平<sup>1,2</sup>, 夏志生<sup>1,2</sup>, 丁 汉<sup>1,2</sup>, 吴志刚<sup>1,2</sup>

(1. 华中科技大学智能制造装备与技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 当前, 传统的制造方案已无法满足日益严苛的大型工件制造需求, 机器人化制造方案成为解决问题的关键, 但目前还存在诸多局限, 例如: 结构复杂、适形性低、容易对工件造成破坏、加工-检测一体化难等问题。针对上述问题, 提出了将软体技术与机器人化制造系统融合的思路, 在机器人化加工、检测和装配 3 个场景中引入软体变刚度技术、柔性传感技术和软体夹持器技术, 赋予机器人化系统轻量化、顺应化、无损化、无感化、集成化等优点, 为机器人化制造提供全新的解决方案。并且, 针对机器人化制造未来的发展趋势, 分析了软体技术巨大的应用潜力, 进一步推动机器人化制造向着共融机器人方向深入发展。

**关键词:** 制造; 软体技术; 机器人化制造; 共融机器人

中图分类号: TP24

文献标识码: A

### Application and Perspective on Soft Technologies for Robotized Manufacturing

PU Menghao<sup>1,2</sup>, XU Fukang<sup>1,2</sup>, CHAI Zhiping<sup>1,2</sup>, XIA Zhisheng<sup>1,2</sup>, DING Han<sup>1,2</sup>, WU Zhigang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In the current context, traditional manufacturing solutions are no longer able to meet the increasingly challenging manufacturing requirements of large-scale workpieces, and robotized manufacturing solutions emerge as a pivotal means of addressing these challenges. However, several limitations persist, such as complex structures, low conformability, easy damage to the workpiece, and the difficulty in integrating the processing and detection. To solve the above issues, the concept of integrating soft technology into robotized manufacturing system is proposed. The integration of soft stiffness-variable technologies, flexible sensor technologies, and soft gripper technologies into domains of robotized processing, robotized measuring, robotized assembling will endow robotized systems with advantages of lightweight, compliance, non-destructiveness, non-impact, and integration. This provides robotized manufacturing system with novel solutions. Furthermore, considering the future development of robotized manufacturing, the significant application potential of soft technology is analyzed, aiming to further develop robotized manufacturing towards tri-co robots (coexisting-cooperative-cognitive robots).

**Keywords:** manufacturing; soft technology; robotized manufacturing; tri-co robot

## 1 引言 (Introduction)

制造业是我国国民经济的主体和国家综合国力的根本体现, 是立国之本、兴国之器、强国之基<sup>[1]</sup>。习近平主席在中国共产党第二十次全国代表大会上表示: “推进新型工业化, 加快建设制造强国” “推动制造业高端化、智能化”<sup>[2]</sup>。根据科学技术与社会的发展阶段不同, 制造可分为人工制造、自动化制造、数字化制造和智能化制造, 不同发展阶段以不同制造模式满足社会日益增长的生产制造需求。

20 世纪中叶以前, 各国制造业主要以人工制

造和自动化制造为主, 在流水线上生产单一且相对简单的工业零件; 20 世纪中叶, 航空、航天、航海技术迅猛发展, 对于高精度和复杂工业零件的需求急剧增长, 在多学科理论的发展助推下, 数控技术和数控机床成为数字化制造的核心; 进入 20 世纪 90 年代, 以数控机床为主的加工模式面临重大挑战。一方面, 在制造超大尺寸构件时, 机床受到主轴行程的影响, 难以在超大工作空间内实现连续作业; 另一方面, 测量仪器也难以实现超大尺寸全场景的精确测量, 使加工精度难以达到较高的水准; 最后, 对于高性能产品, 其复杂的功能结构往往需要采用一体化成型技术制造, “零部件分散加工再

集成装配”的传统模式已经不能满足要求。

近年来,针对上述3点问题,以机器人为制造核心的机器人化制造系统受到各国的高度关注。欧盟针对多样化的零件,已连续组织了3期机器人化加工主题的重大项目(COMET、HEPHESTOS、MEGAROB)来开发机器人制造系统<sup>[3-5]</sup>。美国成立了先进机器人制造(Advanced Robotics Manufacturing)研究所,旨在推动机器人技术在先进制造领域的创新应用<sup>[6]</sup>。中国自然科学基金会启动了共融机器人(coexisting-cooperative-cognitive robot)重大研究计划,目的是设计出用于加工—检测—装配复杂部件的机器人化制造系统<sup>[7]</sup>。

机器人化制造具有集群加工、加工—检测一体化、原位在线测量等特点,这使得整个制造流程效率高、灵活度高,并已成为当前工业制造的发展方向和未来发展的必然趋势<sup>[8-12]</sup>。目前机器人化制造系统已经在工业制造中有所应用,许多企业和公司都在积极引入机器人化系统来提升生产效率和质量。如,陶波等<sup>[13]</sup>提出测量—操作—加工一体化技术,将其应用于飞机关键部位的磨削加工,配合点云数据收集加工参数,通过引入顺应性打磨头,实现了在精确的恒力条件下,对大型变曲率表面的灵活打磨。张云志等<sup>[14]</sup>设计了一种基于无人搬运车的机器人化制造系统,实现了C919大飞机翼盒机器人制孔系统的自动化、精确化作业,提高了制造效率。

然而,随着时代的发展,现有的机器人化制造系统已经显露出一些不足,特别是针对非结构化、复杂化、多样化的制造场景,传统机器人可能表现出不够灵活、过于笨重、控制复杂、检测设备繁琐和适应性有限等问题。

软体技术作为一项新兴的技术<sup>[15-18]</sup>,已经呈现出极强的应用潜力。广泛来看,软体技术是一种使用柔性材料或是柔性结构<sup>[18]</sup>使整个系统具有顺应性和可变形性的技术<sup>[19]</sup>。软体技术目前已在各个领域有所应用,比如可穿戴设备<sup>[20-21]</sup>、智能蒙皮<sup>[22]</sup>等,该技术赋予上述系统柔性感知和交互的能力;同时基于软体技术的机器人系统近年来也得到广泛研究,这类机器人通常被称为软体机器人,其具备优异的柔顺性和适应性,常被用于物体抓取<sup>[23]</sup>、环境探测<sup>[24]</sup>等场景。

针对上述机器人化制造系统面临的问题,软体技术通过引入柔性材料、柔性结构和柔性驱动模式,赋予机器人化制造系统全新的优势。如,针对复杂的曲面工件,恒力适形打磨是保证一致性和精

确性的关键,相比传统笨重、冗余的变刚度机制,在末端执行器或加工工具中引入软体变刚度机制会提高系统的轻量化程度,同时促进机器人化系统的集成化;针对超大表面的精确测量,相比难以实现原位在线检测的传统测量方法,在自身感知和交互感知模块中引入软体传感技术将会使系统更加微型化、柔顺化、无损化、便捷化,进而促进加工—检测一体化的实现;针对非结构化、定制化的工件装配,相比传统抓取策略单一、极度依赖传感设备的夹持器,通过在夹持器设计中引入软体技术可以赋予系统丰富的操作策略和更大的夹持范围,增加机器人系统对非结构、定制化工件的泛用性。

本文针对当前机器人化制造存在的问题和未来机器人化制造系统可能的发展方向,结合软体技术的巨大应用潜力,分析和展望了软体技术在机器人化制造系统中的应用,旨在推动机器人化制造系统向轻量化、适应性强、无损化和集成化的方向发展,如图1所示。

## 2 软体技术在机器人化加工中的应用 (Applications of soft technologies to robotized processing)

加工工序是整套制造流程的关键部分,其目的是通过一系列步骤将原材料转变为符合要求的工件,该过程通常涉及切削、打磨、抛光等过程。传统的加工方式主要由人工完成,这种方式依赖工人的能力和经验,并且效率处于较低的水平,同时加工时产生的噪声与粉尘对人体也有不可忽略的伤害<sup>[25]</sup>。而且,传统数控机床的刚性加工策略受限于工件的夹持模式、机床的灵活性、狭小的工作空间以及高昂的价格等问题,其在面对非结构化大型曲面工件时效果欠佳<sup>[26]</sup>。此外,高刚性的加工方案虽然能够保证较高的位置精度与材料去除率,但在直接接触模式下刚性特性也会带来一些问题,导致被加工工件表面质量较差,例如存在划痕、凹坑以及微裂纹等表面缺陷<sup>[27]</sup>。更重要的是,即使细微的位置误差在加工中也可能引起巨大的接触力,从而导致工件或者执行器的损坏。

### 2.1 传统机器人化加工方案

为了应对上述问题,以机器人为核心的机器人化加工方法已经成为研究重点。机器人化加工作为一种新型的加工策略,具有灵活性高、工作空间大、可重构性好等优势,在柔顺打磨抛光方面具有绝对的优势。机器人化加工系统由宏观和微观机器人组成,宏观机器人为负责实现位置控制与路径规

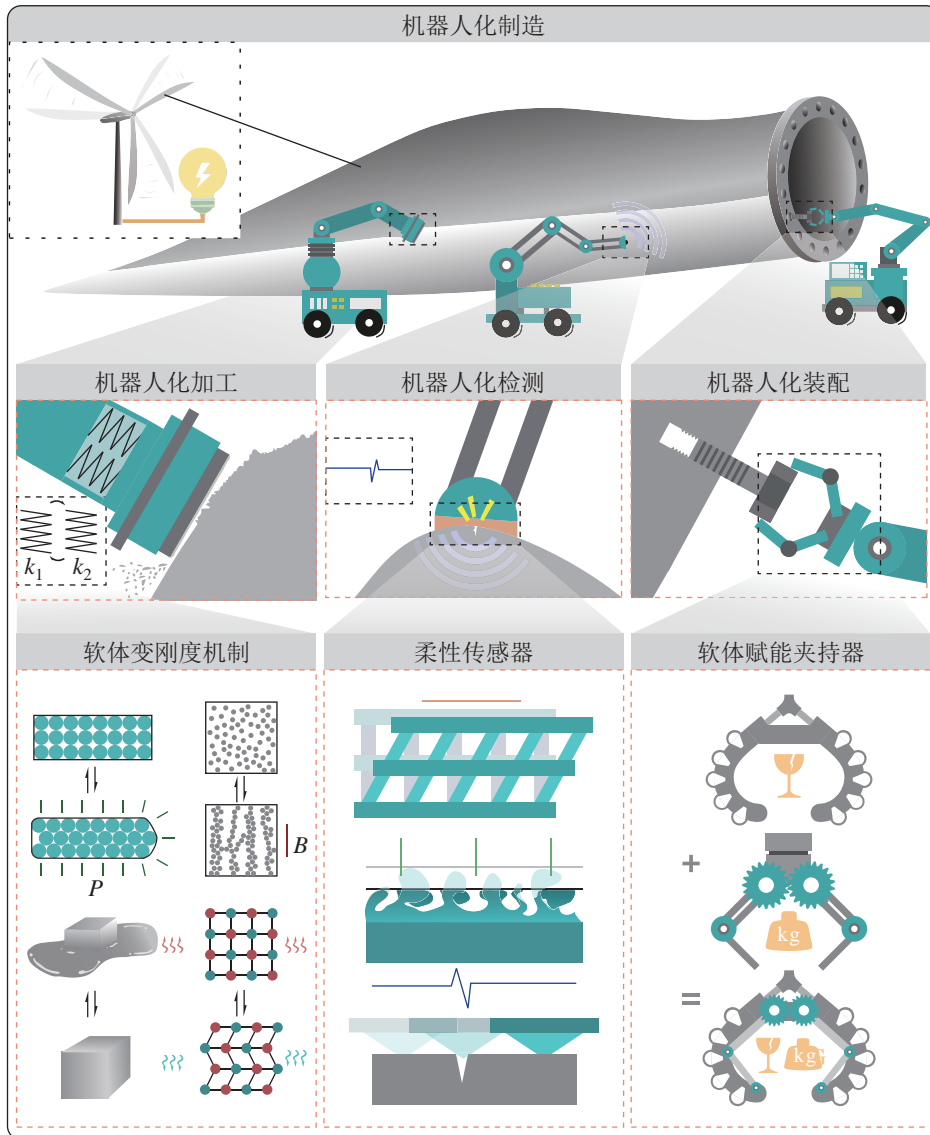


图1 机器人化制造与软体技术

Fig.1 Robotized manufacturing and soft technologies

划的移动机器人部分, 微观机器人为负责实现力控制与适形的末端执行部分<sup>[28]</sup>。在加工过程中, 宏观机器人按照预设的轨迹运行, 工件表面上的微小误差在宏观机器人高刚度环境下会转换为巨大的接触力变化, 导致加工的精度与质量降低。为了实现高精度、高效率的机器人化加工, 宏观机器人的位置控制是基本要求, 而为了避免发生较大输出力导致的过打磨现象和较小输出力导致的欠打磨现象, 微观机器人的接触力恒定控制更是关键<sup>[28]</sup>。因此, 在复杂表面适形打磨中微观机器人的恒力控制是影响加工质量的重要因素。

为了输出恒定的力, 通常使用阻抗控制的方法, 其主要通过调节刚度、阻尼等一系列参数来实现力控制, 而刚度的调节需要采用变刚度机制。针

对加工工序的变刚度机制, 各国学者已经进行了较为广泛的研究<sup>[29-31]</sup>。Liu 等<sup>[29]</sup>设计了一种末端执行器, 通过调节 3 根轴的有效长度来调节打磨头的接触刚度, 优化了抛光过程中机器人的控制方案。Wolf 等<sup>[30]</sup>设计了一种可变扭转刚度关节, 利用固定盘与带滚轮的滑块, 将弹簧的压缩力转化为扭矩, 通过调节挠性弹簧的预压缩量来调节关节扭转刚度, 从而赋予机器人关节柔顺特性。

除了恒力控制外, 打磨工具自身的柔性也可以对提高表面加工质量起到关键作用<sup>[32-35]</sup>。Kawana 等<sup>[33]</sup>通过实验探究了不同硬度的橡胶轮在不同进给深度下对表面打磨质量的影响, 得出了高进给深度适合高硬度橡胶轮打磨而低进给深度适合低硬度橡胶轮打磨的结论, 证明了打磨装置在不同情况下

改变自身刚度的必要性。上述工作证明了针对特定加工环境，柔性打磨工具可以实现更高的表面粗糙度加工精度。

因此，为实现高表面质量的恒力加工，末端执行器在接触被加工物体时的整体刚度及加工工具的刚度，均需根据加工参数的变化实时调整。

## 2.2 软体赋能的机器人化加工方案

刚度的实时调整是实现高精度柔顺加工的关键之一，在机器人化加工场景中，现有的变刚度机制还存在一些问题或局限。当前的变刚度机制大多数依赖复杂的机械结构设计并且需要引入额外的运动部件，提高了系统的复杂度与关节的质量，限制了可变刚度机构的轻量化、小型化和集成化；与此同时，在复杂工件的加工中其环境不断变化，尽管已有文献研究发现刚性与柔性的打磨装置在不同环境下具有各自的优势，但目前还未有文献报道打磨装置实时变刚度的机制。

软体技术对解决上述的痛点问题具有很大的应用潜力。软体技术利用智能材料或者柔性结构实现刚度变化，不需要复杂的机构设计与额外的运动元件，将软体技术引入机器人化加工系统，可以促进系统的轻量化与小型化，同时创造出可变刚度打磨装置，以应对多样化、强实时性的工作环境。可应用于机器人化制造技术的软体变刚度机制按照原理可以分为以下4大类。

### 2.2.1 阻塞变刚度

阻塞变刚度机制是指将颗粒、纤维或多层单元堆积在封闭的软膜内，形成可变刚度元件，通过气压等方式调控软膜内部单元的相互作用来控制整体刚度。例如，颗粒阻塞机制是在软膜内填充颗粒单元，颗粒的总体积小于软膜容积。正常状态下，软膜内的颗粒松散堆积，整体表现出低刚度；真空状态下，受到外界大气压作用，颗粒被挤压，颗粒之间紧密贴合相互阻塞，整体表现出高刚度。其余阻塞机制的原理与之类似。这种简单的机制不仅实现了在小幅体积变化条件下的变刚度，而且具有刚度变化范围大、易于控制等优点，如将此类变刚度机制应用于机器人化加工中，则会降低系统的复杂度。目前，已有文献对该机制进行了报道并针对性地作出了优化<sup>[36-41]</sup>。

Gao等<sup>[36]</sup>设计了一种具有可变刚度的柔性臂，如图2(a)第1行所示。其中集成了3个可实现颗粒堵塞的气管，使柔性臂的刚度实时可调，提升了柔性臂的操作灵活性与稳定性。Goshtasbi等<sup>[37]</sup>设计了一种吸盘，如图2(a)第2行所示。该设计由颗粒

腔道和传统主动吸盘组成，颗粒腔道可以模拟铰链行为，并通过阻塞产生高刚度，最终拓宽了设备可变角度的范围，扩展了阻塞变刚度在机器人化加工中的应用范围。Brancadoro等<sup>[38]</sup>设计了一种管状软体机器人，如图2(a)第3行所示。其近端模块中的2个腔室中装有填充纤维，配合真空环境可以改变系统的刚度。通过实验，定向设计并选择了梳状接头配置与打蜡棉纤维，将系统的刚度上限提高了377.5%，促进了阻塞变刚度机制在机器人化加工中的应用。Wang等<sup>[41]</sup>设计了一种类似锁子甲的可变刚度织物，将中空的结构单元互锁在一起。正常状态下，结构单元之间的作用力很小，织物表现出很强的顺应性；在边界受到压力时，结构单元会相互阻塞，系统刚度提升至原来的25倍，展示了阻塞变刚度机制良好的可重构性、可调抗冲击性与刚度调整性。

综上所述，现阶段的阻塞变刚度机制研究已经较为成熟，大体上分为颗粒阻塞、纤维阻塞以及多层阻塞3种，其具体设计灵活多变，颗粒的大小、形状、材料，各个层之间的拓扑结构，以及颗粒之间的关系，都会对系统的变刚度特性产生影响。在机器人化加工领域，阻塞变刚度机制具有很强的潜力，比如替代现有柔性关节的变刚度结构，优化复杂的机械结构，减轻柔性关节的质量；同时，柔性打磨工具本体也可以利用此类机制实现变刚度，通过气压实时控制打磨工具的刚度进而调控表面打磨质量。

### 2.2.2 磁流变流体变刚度

磁性智能材料是一类能对外部磁场变化做出响应的物质，其中比较经典的如磁流变流体，其能够在外部磁场或电场的作用下改变自身的磁流变特性。根据文献报道，磁流变流体已经被广泛应用在自适应阻尼器以及振动吸收系统中<sup>[42-46]</sup>。

Sikulskyi等<sup>[42]</sup>研究了一种可变刚度与阻尼的弹簧，如图2(b)第1行所示。其使用磁流变流体填充弹簧，通过控制磁场，可以显著提高磁流变流体弹簧的刚度，证明了该技术在制造可调刚度弹簧上的可能性，为磁流变流体变刚度机制在机器人化加工系统中的应用提供了可能。Cui等<sup>[43]</sup>开发了一种可变刚度的柔性衬垫，如图2(b)第2行所示。磁流变弹性体作为其核心元件实现了在高负载条件下的刚度与阻尼变化。通过实验，该柔性衬垫静态刚度从37.9 kN/mm提高到68.4 kN/mm，阻尼性能从8 776.3 N·s/m提高到10 866.3 N·s/m。针对高负载环境下的机器人化加工，磁流变流体变刚度机制成为

可能。Majidi 等<sup>[44]</sup>提出一种具有可调刚度能力的弹性体系统,如图 2(b)第 3 行所示,将磁流变流体填充在软质聚氨酯鞘和 2 条微型凹槽之间。在不施加磁场作用时,拉伸阻力为弹性体固有刚度与流体的黏性阻力之和;当施加磁场作用时,磁流变流体中的磁性颗粒形成磁畴,拉伸弹性体需要克服额外的力,实现了等效的拉伸刚度提升。

目前,磁流变流体变刚度技术已在工业制造中得到广泛应用,针对机器人化加工中需要变刚度的场景,磁流变流体最大的优势在于其响应速度快<sup>[47]</sup>(小于 10 ms)、未使用时对原系统的影响小并且能够使用通用电接口对磁场进行控制,进而实时调控系统刚度。

### 2.2.3 低熔点合金变刚度

低熔点合金是一种具有特殊性质的金属,在较低的特定温度下会从固态转变为液态,因其优异的物理、化学和机械性能,与弹性体结合可以用于制作可变刚度的结构,在为机器人化加工系统开发各种刚度调节策略方面显示出巨大的潜力<sup>[48-53]</sup>。

Lussi 等<sup>[48]</sup>提出了一种可连续变刚度的导管机器人,如图 2(c)第 1 行所示。该机器人中集成了低熔点合金,其在不同外界刺激下显示出很高的刚度变化,可实现快速的刚柔切换。该机器人可以在柔顺状态下移动,并在刚性状态下执行操作,以在尖端施加所需的力。这种低熔点合金的变刚度方式丰富了机器人化加工的策略。Sharifi 等<sup>[49]</sup>设计了一种新型软体机器人,如图 2(c)第 2 行所示。其由低熔点合金和聚二甲基硅氧烷组成,通过热诱导低熔点合金相变来调整机器人的刚度。在室温下,合金是固体,机器人保持刚性;在加热状态下,低熔点合金转变为液态,机器人可以自由弯曲和适形。实验证明,该种机器人可以实现 1000 倍的刚度变化,提高了低熔点合金变刚度的泛用性。Tatari 等<sup>[50]</sup>设计了一种仿生可调刚度机器人,如图 2(c)第 3 行所示。其组成包括软体基底以及安装在一侧表面的仿生鳞片,仿生鳞片中可以包含单种或者多种低熔点合金,实现对机器人的连续多级变刚度,这种设计已经应用于机器人变刚度关节、末端执行器中。

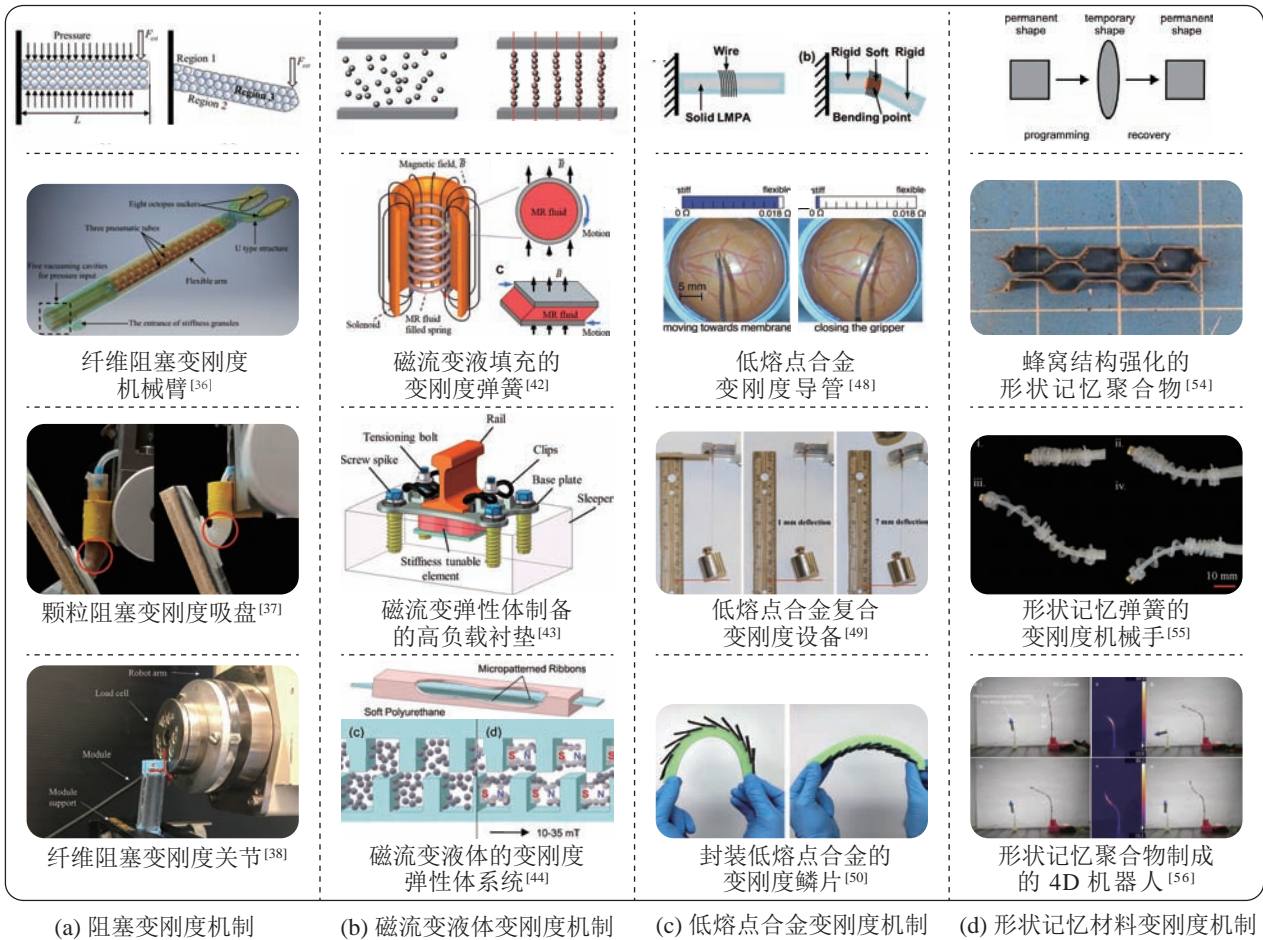


图 2 软体变刚度机制

Fig.2 Soft variable-stiffness mechanism

综上所述,低熔点合金通过相变实现超大幅度的刚度变化。通过组合多种低熔点合金,可以使机器人化加工系统的刚度跃变多级化、可控化。而且,相比于其他变刚度机制,合金材料极高的刚度上限保证了其在极端环境下应用的可能。同时,可以针对低熔点合金的热响应特点,利用打磨的热效应作为输入条件,将低熔点合金嵌入机器人化打磨工具中,实现了具有物理智能的自适应性变刚度加工。

#### 2.2.4 形状记忆材料变刚度

形状记忆材料是一种可以记忆临时形状并在外部刺激(如热)下恢复其永久形状的材料,包括形状记忆合金与形状记忆聚合物。其形状记忆效应分别来源于可逆马氏体转变和玻璃-橡胶态转变,这种效应同时会带来材料杨氏模量的改变。目前,已有文献对形状记忆材料的性质进行了探索<sup>[54-60]</sup>。

Thomas等<sup>[55]</sup>设计了一种基于形状记忆材料的可变刚度机器人,如图2(d)第2行所示。其内部由硅胶组成,内腔被形状记忆合金制成的螺旋形弹簧包裹,尖端连接永磁体。该机器人可基于形状记忆材料的相变特性实现形状固定,证明了利用形状记忆材料实现机器人变刚度机制的可能性。Mattmann等<sup>[56]</sup>设计了一种亚毫米级的4D机器人设备,如图2(d)第3行所示。使用热固性形状记忆聚合物实现变刚度,避免了熔融状态和对封装结构的要求,极大减小了系统尺寸,该方法可以使用同一个磁场系统分时地控制多个机器人,实现微小环境下的机器人化操作。Chenal等<sup>[58]</sup>提出了一种可变刚度的纤维。其是由形状记忆材料制成,形状记忆合金上涂有形状记忆聚合物薄膜。橡胶态和玻璃态之间的转换是通过嵌入式形状记忆合金的直接加热实现的。这种刚度变化所需的时间较短,在机器人应用中潜力巨大。Zhang等<sup>[60]</sup>通过多材料3D打印方法设计出刚度可调的机器人致动器,将形状记忆聚合物层集成在其中。在不牺牲灵活性和适应性的情况下,将其刚度提高了2个数量级。加热回路和流体冷却微通道可实现快速加热和冷却,证明了引入形状记忆材料的机器人系统具有高负载和形状适应能力。

综上所述,形状记忆材料可以作为机器人化加工重要的变刚度方法,不同于低熔点合金具有熔融状态,需要额外的工艺进行封装,形状记忆材料的封装要求较低,极大减小了系统的尺寸,促进机器人化加工系统的小型化与集成化。

#### 2.3 软体技术赋予机器人化加工的优势

机器人化加工方案中,最重要的是实现适形恒

力加工,阻抗控制法是最传统的方法,但是这种方法复杂度高,且会给机器人关节引入额外的高负载;同时,据文献报道,针对不同进给量,机器人加工工具存在最佳的使用刚度,但目前还没有文献提出实时变刚度的机器人化加工工具。

针对传统机器人化加工中存在的上述问题和局限性,面向机器人化加工的工业场景,结合软体变刚度机制具备的优势,提出将软体变刚度机制引入机器人化加工系统中的思路。

通过引入软体变刚度机制,机器人化加工系统将会获得以下优势:1)极大降低变刚度关节的复杂度。软体变刚度机制主要利用智能材料或结构本身的特性,在相应的物理激励下改变刚度,避免了复杂的传动、冗余的设计,且不必引入额外的运动部件,可实现刚度的大范围变化,减轻了系统的质量。2)极快的变刚度速度。部分软体变刚度(如磁流变流体)机制仅需要极短的时间(小于10ms)就可以完成刚度的切换,极大提升了机器人化加工系统的效率。3)无感化的加工影响。软体变刚度机制通常在未被激活时,对原工作系统的影响程度极小,保证了加工系统的精确性。4)赋予机器人化加工工具本体变刚度特性。传统的变刚度机制受限于复杂的结构与刚性的本体,难以与机器人化加工工具进行集成,但软体变刚度机制由于体积小、变刚度机理简单,可以赋予机器人化加工工具实时变刚度的能力。

但是当前,针对软体变刚度技术在工业中的现状,还没有工业应用的实际案例。原因可能是基于软体变刚度技术的设备器件难以大规模生产,无法达到工业化的需求。综上所述,软体技术中的变刚度机制在机器人化加工领域中具有巨大的应用前景,赋予机器人化加工系统更加小型、快速和精确的特性。在未来的发展中,还需要开发快速、高效、稳定的生产制备方法,使其可以大规模生产,以满足工业制造的需要。

### 3 软体技术在机器人化检测中的应用 (Applications of soft technologies to the robotized measuring)

在工业制造中,受到多方面因素的影响,加工工件会出现表面缺陷或者精度不达标等问题。及时的检测可以保证机器人化制造的质量,机器人化检测工序主要分为2种类型,即自身感知和交互感知。自身感知指对机器人自身状态的感知,例如根据机器人输出执行器受到的正压力、切向力等力学

参数可以确定制造过程中的加工精度和刀具状态等, 对于机器人化加工有着非常重要的意义; 交互感知指对加工工件表面形态的检测感知, 比如对加工表面缺陷、粗糙度等状态的检测感知, 上述参数直接反映被加工工件表面的情况, 进而反映工件需要加工的程度和已经加工的质量。自身感知和交互感知是机器人化检测中关键的信息来源, 保证了系统的闭环和稳定性。

传统工业加工中的检测方法依赖于工人或者复杂的设备, 通常会对加工设备进行改造, 或者需要将被检测工件转移到测试平台上, 这样会造成检测流程效率低、复杂程度高, 并且存在破坏工件的风险。传统检测方法显然难以满足现代化制造中原位、在线、高精度、高稳定检测的要求。

针对上述传统检测方法存在的问题, 基于软体技术的柔性传感器将提供机器人化检测的全新解决方案。柔性传感器由于其具备多种优良的性质, 如体积小<sup>[61]</sup>、重量轻<sup>[62]</sup>、柔顺性好<sup>[63]</sup>、可拉伸性好<sup>[64]</sup>、无感度强<sup>[65]</sup>、功耗低<sup>[66]</sup>、检测设备简单<sup>[20]</sup>等, 已被广泛应用在可穿戴设备<sup>[20-21]</sup>、软体机器人感知装置<sup>[67-68]</sup>、智能蒙皮<sup>[22]</sup>中。将柔性传感器与机器人化检测有机地融合在一起, 会赋予机器人系统无感式检测、顺应性检测、原位在线检测、低功耗检测等优势。

### 3.1 工业检测中的自身感知

在自身感知中, 输出力是关键感知对象, 直接反映了加工精度、加工表面完整性、刀具状态、加工质量等关键信息<sup>[69]</sup>。所以对输出力的实时检测非常必要, 在加工过程中对输出力进行实时测量, 可保证向制造系统提供闭环反馈的参数, 确保加工流程中及时完成参数修正并实现系统稳定。

#### 3.1.1 传统的自身感知方式

传统加工中输出力的测量主要包括 2 种模式: 一种是将传感器集成在工件端, 对工件受到的力进行实时监测。Totis 等<sup>[70]</sup>选用多个商用式 Kistler 9016B 压电传感器集成于一体, 通过三角形的排布方式, 使系统性能有所提升。将传感器固定在工件端的测量方式已经具备良好的精度和性能, 但由于测量时必须将测力仪固定于工作台上, 因此其表面还需通过夹具对工件进行固定, 极大限制了工件的尺寸和类型, 对于大型、非结构化、不可拆卸的工件, 这种方式难以起到良好的效果。另一种方式是将传感器集成在执行部件端, 比如刀头、刀柄等部位, 这种测量方式已被很多文献所报道<sup>[71-72]</sup>。Totis 等<sup>[72]</sup>在执行器末端集成商用的 3 维力传感器, 简

化了系统操作的流程, 但需要对系统原本的结构进行很大程度的改进。这种将传感器集成于执行部件端的模式有效解决了上述对加工工件尺寸有较大限制的问题, 但力传感器体积过大、重量较重, 将会给执行部件(刀具、磨盘等)引入更大的载荷和更加狭小的工作空间, 并且多数情况下需要对原有的加工装置进行全面改造, 需要耗费大量的时间和费用, 加工效果也很难维持在原有的水平。

#### 3.1.2 软体技术赋能的自身感知方式

在当前的机器人化检测的自身感知方案中, 无论是将传感器集成于工件端或者将其集成于执行部件端, 都存在诸多弊端, 其过大的传感设备限制了检测设备的精度和检测对象的尺寸。而具备体积小、重量轻、顺应性好、无感度强等优势柔性传感器可以解决上述的痛点问题, 将柔性传感器应用于机器人化系统的自身感知中, 会使得系统更加简洁、无感、轻量、精确。

测量压力的柔性传感器机理较多, 比较常见的为压阻式、电容式、离子式、摩擦起电式和压电式, 具体机理在本文中不作阐述。目前, 已有文献报道了将柔性传感器应用于工业加工中的例子<sup>[73-75]</sup>。

Cheng 等<sup>[73]</sup>将柔性压电传感器集成于刀片上, 如图 3(a) 所示。整个设备操作简单, 实现了即插即用的功能, 完成了对刀具主切削力的测量, 证明了柔性传感器在加工测量中的可行性。Ma 等<sup>[74]</sup>设计了一款 PVDF (聚偏二氟乙烯) 柔性压电传感器, 通过在刀具杆表面部署多个 PVDF 压电柔性传感器收集刀具杆的应变, 进而计算出铣削中的扭矩信号。该柔性传感器仅需贴附于被测物体表面即可进行测量, 克服了传统测量装置体积大、重量重、需要对原加工装置进行改装的问题, 证明了柔性传感器对于机器人化制造的便捷性、无损性。Luo 等<sup>[75]</sup>将 PVDF 柔性压电传感器嵌入到每个刀具中, 凭借柔性传感器自身的优势, 可在不降低系统刚度和特性的情况下检测作用在每个切削刃上的切削力。

为进一步结合柔性传感器的上述优势, 许多科研人员致力于结合材料和结构等方面的内容进行定向设计, 以改进和优化柔性传感器的性能, 制造体积更小、稳定性更高、精确度更好的柔性传感器<sup>[76-79]</sup>, 进而有效拓展柔性传感器在机器人化制造中的应用范围。

Mannsfeld 等<sup>[76]</sup>利用 PDMS (聚二甲基硅氧烷) 为材料, 在其表面制造微结构来改善柔性传感器的性能, 相比非结构化柔性传感器取得了更高的灵敏度和更低的响应时间。Yang 等<sup>[78]</sup>改进金字塔式微

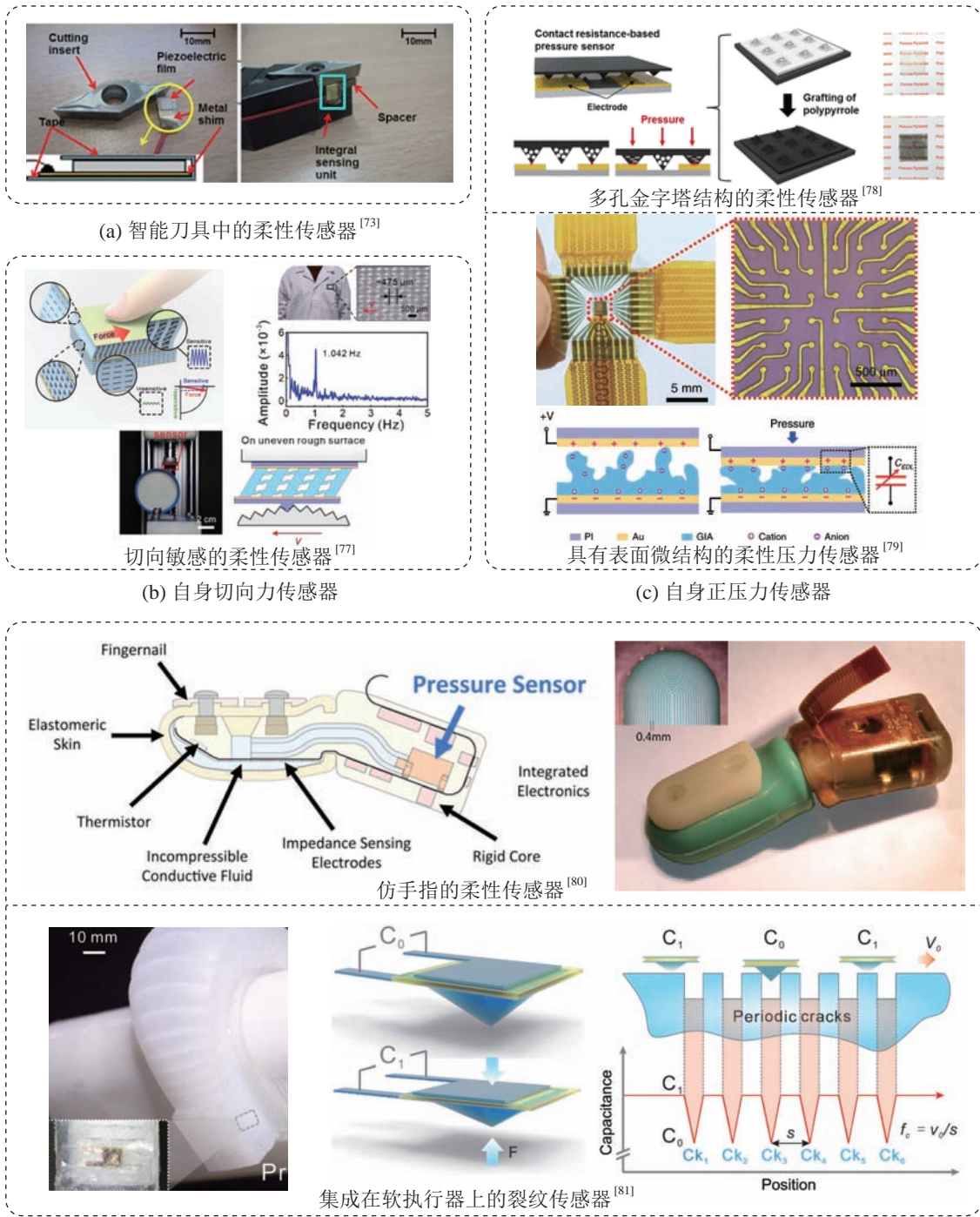


图3 柔性传感器

Fig.3 Flexible sensors

结构的柔性传感器，如图 3(c) 所示。在微结构中引入多孔的特征，进一步提高电容式柔性传感器的性能和灵敏度，为机器人化制造提供了更加有利的条件。Bai 等<sup>[79]</sup>设计了一种离子型柔性传感器，解决了微结构传感器可压缩性差的问题，这种设计有效增强了柔性传感器结构的可压缩性和压力响应范围，实现了宽压力范围下（0.08 Pa~360 kPa）的高

灵敏度（ $S_{min} > 220 \text{ kPa}^{-1}$ ），极大提高了机器人化制造环境下的传感器性能。Chai 等<sup>[77]</sup>通过设计介电层中可编程的微结构，如图 3(b) 所示，可控地调整多孔传感器的各向灵敏度，进而在机器人操作过程中，准确灵敏地检测到力的方向和大小，进一步证明了柔性传感器在机器人化制造中的应用潜力。

综上所述，传统测量中自身感知的方法存在体



积大、重量重、对被测物体尺寸有较大限制、需要对原装置进行改装等问题。柔性传感器凭借其微型化、无感知性、可拉伸性等特点, 成功克服了上述限制, 通过对材料和结构的深入研究, 极大拓展了柔性传感器在自身感知方面的应用潜力。

### 3.2 工业检测中的交互感知

在传统加工生产过程中, 交互感知是必要的流程, 对工件表面形态(表面缺陷、表面粗糙度等)的感知, 反映了加工的质量和精度, 对整个系统的反馈起到至关重要的作用。

#### 3.2.1 传统交互感知方式

早些年, 由于集成电路和检测算法发展的限制, 数字化和智能化的设备还未在生产制造中普及, 当时的检测手段大部分依靠人工操作, 这些方法非常依赖工人经验, 受主观因素的影响<sup>[82]</sup>, 这些方法既耗时又低效, 造成了大量的资源浪费。更重要的是, 这种人工方法可能会导致产品或者工件的损坏变形<sup>[83]</sup>, 造成经济上的损失。

后来发展出了接触式的表面测量方法, 这类方法通常使用探针对被测物体的表面进行逐点测量<sup>[84]</sup>, 通过内置的传感器计算出物体表面的轮廓缺陷状况, 这种方法提高了检测的效率和精度。但接触式的检测方法必须使探头的尖端与被测表面进行机械式的接触, 锋利的针尖可能会对被测表面造成永久的损伤, 降低加工工件的性能<sup>[85]</sup>。

为了解决上述接触式检测的问题, 无损检测方式在生产加工检测中得到广泛的开发应用。对于工件表面缺陷的检测, 常规的无损检测方法包括: 超声波检测法<sup>[86-87]</sup>、磁粉检测法<sup>[88-89]</sup>、X射线检测法<sup>[90]</sup>、涡流检测法<sup>[91-92]</sup>等。这些方法可以在非接触的条件下对加工工件表面进行检测, 解决了上述接触式检测会损伤工件表面的问题。但是, 无损检测方法依旧存在自身的局限性。超声检测需要在检测过程中大量使用耦合剂且存在检测表面缺陷的盲区; 磁粉检测方法的探测对象只能是铁磁材料, 不能对铝合金等非铁磁性材料进行检测; X射线检测方法虽然精度比较高, 但是检测时对操作人员的损伤比较大, 同时还需要将被测部件从整体上拆装下来进行检测, 对整体型工件无法进行检测; 涡流检测法设备体积较大, 对于检测空间狭小的工况, 难以开展检测<sup>[93]</sup>。

综上所述, 目前已有3种检测方法应用于工业制造: 人工检测、接触式检测和非接触式检测。这些方法都存在各自的局限性。人工检测方式易受到人员经验和主客观因素影响, 检测效率低、一致性

差; 接触式检测在某些情况下会对被检测物体的表面造成永久性破坏; 非接触式检测方法通常需要复杂的流程和设备, 有些方法还会对人体造成伤害。而且, 上述方法的加工和检测流程相互独立, 无法实现原位在线检测的效果, 有时甚至需要将产品的局部分离出来单独进行检测。这些方法无法在加工时检测得到工件表面的粗糙度、缺陷、打磨程度, 从而降低了工件的精度和整体制造流程的效率。

#### 3.2.2 软体技术赋能的交互感知方式

在当前的机器人化检测的交互感知方案中, 仍然存在由于主观因素导致一致性差、接触式方法造成工件表面被破坏、设备复杂无法集成导致无法实现原位在线检测等痛点问题。针对这些问题, 需要一种原位在线、非破坏性、顺应性好且不影响原加工操作的检测方法, 实现加工与原位在线检测的无缝集成。

在此情况下, 柔性传感器有巨大的应用潜力, 其能够实现与被测表面的交互感知, 并具备原位在线、无感化、无损化和顺应化的特点, 能够适应多种复杂曲面, 保证机器人化检测的灵活性和高效性。目前已有很多文献报道了柔性传感器在表面粗糙度和纹理检测识别方面取得的显著成果<sup>[80,94-98]</sup>。在表面形态的检测过程中, 柔性传感器与被测表面发生相对运动, 由于不同表面形态之间的差异, 柔性传感器会发生不同程度的振动, 并生成不同信号, 通过对信号的分析, 即可对表面形态的相关参数量进行实时计算和判断。

Chun等<sup>[94]</sup>受到人手指纹微结构的启发, 提出一种由单层石墨烯制备而成的传感器, 该传感器引入微柱阵列结构对压力进行放大, 其阻值可以反映单层石墨烯的局部变形, 进而计算得出表面的粗糙度情况。该传感器的压力放大结构使其灵敏度提高了57%, 可以检测到低至24 Pa的压力, 对变形的响应时间为2 ms, 证明其柔性传感器在低压力机器人检测环境下仍具有较高的灵敏度。Jamali等<sup>[95]</sup>将应变片和PVDF嵌入到硅胶手指中, 应变片和PVDF分别对外界的拉伸和振动行为做出响应, 通过该手指对不同材料表面的摩擦, 结合贝叶斯分类器实现对7种表面形态不同材料的识别和分类, 证明了柔性传感器在表面形态测量方面具有良好能力。Chun等<sup>[96]</sup>仿照人体神经触觉感知系统, 设计了一种包括2种感知方式的传感器, 以分别对应人体触觉感知中的慢速适应感受器和快速适应感受器, 并使用机器学习技术, 对复杂纹理图案的粗糙度进行识别分类, 准确率达到了98.8%, 证明

了柔性传感器对机器人化系统中工件表面粗糙度具有良好的检测能力。Cao 等<sup>[97]</sup>提出了一种新型的柔性传感器,该传感器由单壁碳纳米管、聚乙烯和聚二甲基硅氧烷组成,具有自锁和外部微金字塔阵列结构,提高了整个系统的触觉感知和表面纹理识别能力,该传感器可以辨别  $15\ \mu\text{m}\times 15\ \mu\text{m}$  (间隔 $\times$ 宽度)的微条纹,证明了柔性传感器在机器人化系统中对于微米级表面纹理仍有优异的检测能力。Fishel 等<sup>[80]</sup>设计了一种多模态传感器,如图 3(d) 第 1 行所示。在柔性材料中充入不可压缩液体,当柔性传感器受到接触力或者振动时,传感器中的电极阻抗或者压力传感器可以检测到对应的信号,令该柔性传感器在不同粗糙度的表面进行滑动,通过滤波算法,可得到被测表面的粗糙度信息。Yi 等<sup>[98]</sup>设计和制造了一个受生物启发的柔性传感器,该柔性传感器由 PDMS、聚甲基丙烯酸甲酯棒和垂直的 PVDF 薄膜传感器组成。采用支持向量机和 K 近邻算法,对粗糙度值范围为  $0.4\sim 50\ \mu\text{m}$  的表面进行识别,最高分类精度达到  $82.6\%\pm 10.8\%$ ,为机器人化系统中表面粗糙度检测提供了一种低廉、稳定的柔性传感器方案。

针对机器人化测量表面形态(粗糙度和纹理)的工作场景,柔性传感器已具备良好的性能。在表面缺陷的检测问题上,柔性传感器仍具备很大的应用潜力。缺陷检测的原理和表面粗糙度检测的原理类似,是根据传感器与表面发生相对运动时产生的力和振动进行判断,当传感器检测到缺陷时,受到的力发生突变,会产生变化较大的信号,通过这一特征即可确定缺陷的位置信息。目前,有学者已在研究柔性传感器在表面缺陷检测中的应用,如图 3(d) 第 2 行所示,Ke 等<sup>[81]</sup>在检测机器人上集成了金字塔结构的电容传感器,在机器人经过表面缺陷时,柔性传感器受到的法向力发生变化,进而产生突变信号,定位了变曲率叶片上的裂纹位置。

综上所述,传统测量中交互感知的方法存在效率低、一致性差、需要离线操作以及对工件造成一定损伤等问题。柔性传感器凭借其无损性、顺应性、便捷性等特点,解决了传统检测方法的问题,使其更加适用于机器人化检测领域的融合应用。

### 3.3 软体技术赋予机器人化检测的优势

本节首先介绍了传统加工中的测量模式,主要包括自身感知和交互感知。列举了这 2 种感知模式中的传统检测方法,分析了其优势和劣势。针对这些问题,面向机器人化检测的工业场景,结合柔性传感器自身具备的优势,提出将柔性传感器

与机器人化检测融合的思路。

将柔性传感器应用在机器人化检测中,将会带来以下优势: 1) 无感式检测。柔性传感器主要采用低刚度材料,如: Ecoflex、Dragon Skin、PDMS 等,其尺寸和厚度都比较小,且具备很好的拉伸/压缩性能,贴附在机器人执行器表面可以在不影响机器人本身结构和刚度的同时<sup>[75]</sup>,对相应物理参数进行检测,传统检测方案无法做到这一点。2) 顺应性检测。柔性传感器所用材料的刚度小,结构是特殊设计的,这使其在面对大型曲面或者非结构化场景时仍可以对工作表面进行适形贴附传感。相比于传统检测方法,柔性传感器测量获得的物理参数更加准确。3) 原位在线检测。柔性传感器所产生的信号通常由柔性电极引出,外部仅需小型的检测电路即可对信号进行采集和分析。在机器人化制造场景下,相比于无法原位在线实时检测的传统方法,可以将柔性传感器集成于机器人中,实现边加工、边检测的效果,极大提高了加工的效率和质量。4) 低功耗检测。基于柔性传感器的工作机理,其产生信号所需的能量相比于传统方式会更低或者不需要外界的能量输入,极大降低了工业加工中的能源消耗。

除了上述功能和优点,柔性传感器还可以对多种物理信号(例如:应变、温度、湿度、压力等)进行感知和解耦,实现多模态的效果,促进了机器人化感知系统的集成化与多功能化<sup>[99-100]</sup>。

当前,柔性压电传感器已被用于刀具的力学传感器中,并且部分基于压电传感器的设备已经商业化。除了压电传感器外,其他柔性传感技术还没有大规模应用在工业检测中,可能是其使用寿命和制造工艺的复杂所导致的。综上所述,将软体技术中的柔性传感技术和机器人化检测相融合,可以充分利用柔性传感器集成化、微型化、无感化、无损化、顺应性、便捷性的特点,赋予机器人化检测更加卓越的性能,促进了机器人系统向着加工—检测一体化方向发展。在未来的发展中,还需要通过工艺、材料等技术延长柔性传感设备的寿命并降低制造的复杂度。

## 4 软体技术在机器人化装配中的应用 (Applications of soft technologies to robotized assembling)

装配工序是工业制造中至关重要的环节。装配定义了零件、子装配件之间的顺序聚集,使之成为具备功能且符合要求的产品<sup>[101]</sup>。据文献报道,在现代加工制造流程中,装配工序平均约占据了 45%

的工作量, 其需要占据整个制造流程中 40%~60% 的时间<sup>[102]</sup>。目前, 工业制造仍以人工装配为主, 人工的效率低下, 且精度和效率容易受到主观因素的影响, 进而增加了生产制造的成本<sup>[103]</sup>。

#### 4.1 传统机器人化装配方案

早些年代的装配对象较为固定, 基本为特定、规则、结构化、具备一定刚度的零件或者产品。在这种装配背景下, 所设计的机械夹爪通常通过平移或旋转对称的爪盘进行工作, 一般只有 1 个自由度, 具备结构简单、速度快、可靠性高等优势, 并且其成本低, 被广泛应用于生产制造中<sup>[104]</sup>。

然而, 随着工业生产的综合化和加工需求的多样化, 装配的要求和对象也发生了变化。装配对象从结构化的工业轴孔装配<sup>[105]</sup>到复杂几何零件的拼接<sup>[106]</sup>、车辆组装<sup>[107]</sup>、电子设备安装<sup>[108]</sup>等都有所涉及。而且, 装配对象的形状多样, 包括规则或不规则的几何图形, 其材料涉及柔性表面<sup>[104]</sup>。上述机械夹爪的自由度有限、对不同形状物体的适应能力低, 在非结构化的夹持任务中可能会因无法适形导致接触力过大, 对工件造成一定程度的损坏<sup>[109]</sup>。大量、复杂的零件和频繁的产品切换是现代工业装配中的一些特征, 这就对机器人化装配提出了新的要求, 要求参与装配的机器人具备灵活性和适应性, 以应对复杂、多样化的零件和需求<sup>[101]</sup>。

为了应对上述问题, 研究人员设计了更大自由度的灵巧手<sup>[110-112]</sup>。这些灵巧手具有较多关节, 可以适应对多样化、复杂化、非结构工件的夹持。但是, 丰富的自由度需要引入更多的驱动设备、传感设备, 也需要重新设计算法, 而且复杂的结构设计会导致灵巧手的可靠性低、载荷小和成本高等问题, 使其很难大规模应用在机器人化制造中<sup>[113]</sup>。

#### 4.2 软体夹持器方案

根据上文, 在机器人化装配场景中, 刚性夹持器还存在许多问题, 比如适应性差、容易对工件产生破坏、灵活性低、对算法和传感器设备要求高等问题。

与刚性夹持器相比, 软体夹持器可以解决上述场景下的痛点问题。软体夹持器由柔性材料或结构构成, 通常可以夹持和操纵更多种类的物体, 其自身材料的柔顺性在很大程度上降低了控制要求, 利用软体夹持器可以在不借助传感器的情况下对复杂曲面或者非结构化的工件进行适形夹持, 同时其驱动方式也较为简单, 无需额外引入驱动设备。

目前已有文献对软体夹持器进行报道<sup>[23,114-120]</sup>。软体夹持器的夹持方式可以分为 3 种: 柔性适形夹

持、变刚度夹持、吸附式夹持<sup>[56]</sup>。

##### 4.2.1 柔性适形夹持

柔性适形夹持是指利用柔顺结构或柔顺驱动, 触发软体夹持器的适形变形, 从而实现稳定的夹持。柔性结构夹持: 软体夹持器与物体的先导接触会触发柔顺结构的整体变形, 这种变形使软体夹持器适形于物体。柔顺驱动夹持: 驱动方式多为仿肌腱的欠驱动方式, 这赋予软体夹持器更大的自由度, 结合被抓物体的物理约束, 使软体夹持器适形于物体。

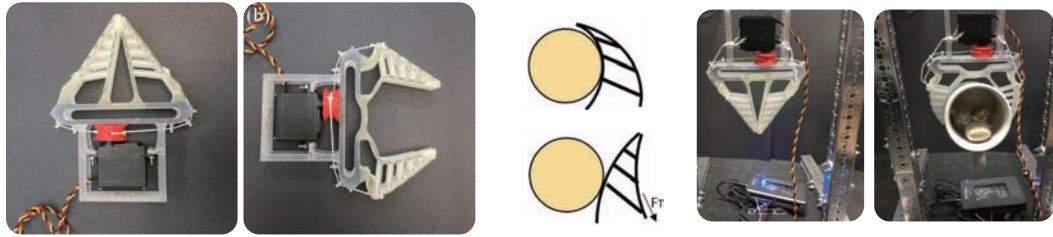
Crooks 等<sup>[114]</sup>受鱼翅的鳍条效应的启发, 设计了一种软体夹持器, 其由柔软的三角形框架与横梁组成, 这种结构会在受力时发生反向弯曲, 使该软体夹持器能够在与被夹持物发生相互作用时产生额外的适形效果, 从而降低夹持所需的力并提高夹持稳定性, 这种方式在不引入传感器的情况下, 使夹持器对物体进行了稳定适形夹持, 极大降低了机器人化装配系统的复杂度, 如图 4(a) 所示。Petković 等<sup>[115]</sup>设计了一种硅橡胶材质的自适应软体夹持器, 结合相关算法, 得到夹持器的最优拓扑结构。在夹持对象上, 它可夹持凸形和凹形两种典型物体, 并确保柔顺接触, 证明了软体夹持器针对微小、脆弱、精密的物体具有良好的操作性。Ma 等<sup>[116]</sup>设计了一种线驱动的软体夹持器, 手指内侧为聚氨酯弹性体。欠驱动的形式保证了更大的接触面积, 具有高度的适应性。并且, 该软体夹持器采用模块化设计方法, 可以根据被抓物体的属性进行调整切换。

通过柔性适形夹持, 可以降低机器人化装配系统的复杂度, 在不引入传感器的情况下, 可以通过开环控制顺应物体几何形状。

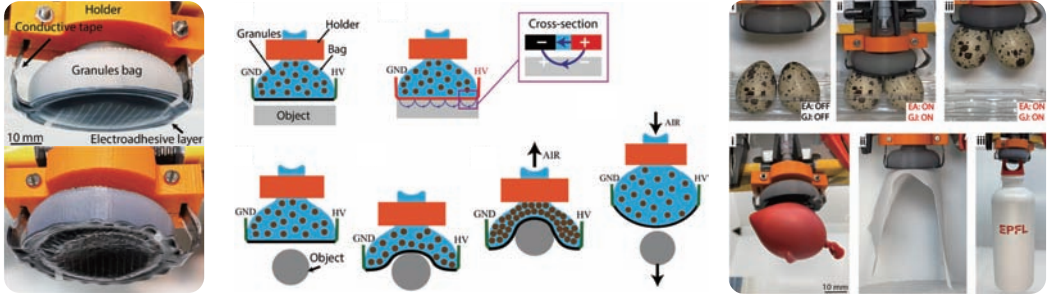
##### 4.2.2 变刚度夹持

基于可变刚度材料和结构的软体夹持器, 可以在工作中切换不同的刚度模式进行夹持。一般夹持器将结构切换为软体模式来接近、包裹并适形被夹持物, 使得夹持器表面与零件充分贴合, 然后切换为刚性模式提高夹持力, 对物体进行操作, 并减小因应力集中造成的物体破坏。

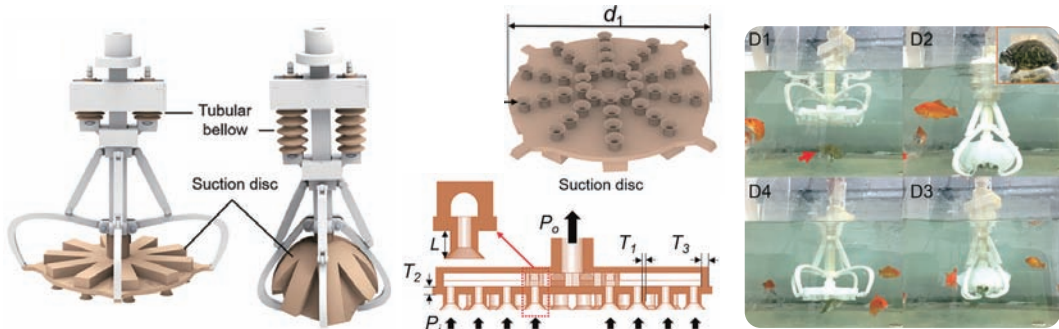
Piskarev 等<sup>[117]</sup>提出一种软体夹持器, 结合颗粒阻塞, 能够夹持不同表面特征的物体, 并通过系统给予正压从而释放被夹持物, 如图 4(b) 所示。Harada 等<sup>[23]</sup>设计了一种自适应软体夹持器, 它由颗粒阻塞装置与 4 根手指组成, 颗粒阻塞装置压在零件上后, 内部压力降低, 使颗粒阻塞袋刚度提高, 从而抓住零件实现公母零件的装配。



(a) 柔性适形夹持：仿鱼鳍被动顺形软体夹持器 [114]



(b) 变刚度夹持：颗粒阻塞变刚度软体夹持器 [117]



(c) 吸附式夹持：海星状吸附夹持软体夹持器 [120]

图 4 软体夹持器  
Fig.4 Soft grippers

机器人化装配中，软体变刚度夹持方式对于工件的适应性非常强，通过多种刚度模式的切换，拓展了软体技术在机器人化装配中的应用范围。

### 4.2.3 吸附式夹持

黏附力是 2 个表面之间的吸引力，采用吸附式夹持原理的软体夹持器无需通过高正应力进行物体的夹持，而是通过提高吸附力进而产生高剪切摩擦力进行操作，这种方式有利于夹持非常脆弱的物体。

Shintake 等 [118] 开发了一种结合电吸附的软体夹持器。其产生的机械夹持力很低，仅为 1 mN，但高吸附力带来的高剪切摩擦可以高达 5.1 N/cm<sup>2</sup>，提高了针对脆弱物体时的夹持能力。Suresh 等 [119] 设计了一种软体夹持器，其表面带有黏性薄膜，薄膜的黏性来源于其表面的微结构，在受到特定方向切向力时，薄膜上的微结构与被夹持物上的微结构啮合，宏观上表现出吸附力，该软体夹持器在产生

极小正压力的情况下，可以夹持大曲率轮廓物体。Wu 等 [120] 设计了一种伞形吸附式夹持器，可以吸附和夹持多种形状和尺寸的物体、零散分布的多个物体、运动的物体和超出夹持范围的物体，并且该软夹持器可以在水下作业，为软体技术在极端环境下作业提供了思路，如图 4(c) 所示。

吸附式夹持方法利用较高的剪切摩擦力对物体进行操作，对于极其脆弱的物体具有良好的适应性。

### 4.3 软体赋能的刚柔机器人化装配方案

根据上文，针对刚性夹爪或是灵巧手存在的问题，软体夹持器由于自身的材料属性，在适形操作脆弱物体时具有巨大的优势。软体夹持器主要以柔性适形夹持、变刚度夹持以及吸附式夹持 3 种方式进行工作。同时，这些方案无需传感器的介入，降低了对控制算法的依赖。但是，纯软的柔性夹持器也存在输入力不足、控制不精确等问题。

所以, 将软体技术赋能至现有装配技术或者将软体技术与刚性技术融合, 是机器人化装配的理想方向。

将软体技术赋能于刚性系统中, 可以使二者的优势在最大程度得到体现。赋能后的机器人化装配系统将具备以下优势: 丰富的操作策略、极宽的夹持范围、多样化的具身感知方式、更快的驱动速度。

#### 4.3.1 丰富的操作策略

软体技术赋能的装配系统, 兼具刚体和软体的优点, 这种系统在操作策略上摆脱了传统刚性夹持模式的限制, 实现了多种操作策略的共存, 相关研究提供了一些具有创新性的设计和思路。Ruotolo 等<sup>[121]</sup>提出了一个仿生末端执行器, 将受壁虎启发的粘合剂、软体结构与多关节手指结合起来, 实现了负载的均匀分布以及与表面的适形, 工作模式也从单一的夹持拓展为丰富的操纵方式, 这种设计使得系统能够操作不同大小和重量的物体, 为操作提供了更多的可选择性。Wang 等<sup>[122]</sup>提出了一种采用拮抗机制的刚柔耦合抓手, 如图 5(a) 所示。每根手指都可通过选择性地对弹簧施加预紧力来改变其关节刚度, 以适形表面。该夹持器能够实现各种位姿, 面对不同物体可以选用多种策略实现夹持。这种设计提高了夹持器的灵活性, 丰富了操作策略。Fu 等<sup>[123]</sup>提出了一种基于鳍条效应的新型变刚度夹持器, 将软体技术中的顺应性结构与可旋转肋板进行集成, 提供了多种夹持模式。该夹持器主要有 4 种模式: 1) 所有肋板关闭 (柔性) 模式; 2) 上层肋板打开、下层肋板关闭 (保持) 模式; 3) 上层肋板关闭、下层肋板打开 (夹持) 模式; 4) 所有肋板打开 (夹持) 模式。该设计为自适应夹持提供了一个全新的思路, 通过软体技术赋能, 使夹持系统能应对更复杂的任务。

#### 4.3.2 极宽的夹持范围

传统的刚性夹持器的输出力较大, 适合对大体积、大重量物体进行操作, 但很难操作轻质、易碎、复杂曲面的物体。将软体技术赋能于传统的刚性夹持器, 可以极大拓展装配系统的夹持范围。如图 5(b) 所示, 受人类手指的启发, Zhu 等<sup>[124]</sup>提出了一种具有多种模式和姿态的夹持器, 将软体技术与传统的刚性致动器相结合, 可夹持物体的范围极其宽泛 (从 1 g 的薯片到 27 kg 的哑铃)。Nishimura 等<sup>[125]</sup>提出了一种具有高输出力的新型机器人夹持器, 可以通过与环境的接触来切换夹持模式, 包括平行夹持、捏取和包覆模式等。为了实现灵活的

夹持, 将软流体指尖集成于夹持器中, 配合 3 种夹持模式, 该抓手实现了对各种物体的夹持, 包括柔性、硬质、可变形、易碎、小的 (边界长度小于 30 mm)、大的 (长度超过 80 mm)、薄的 (厚度小于 0.5 mm) 和重的 (超过 3 kg) 物体。

#### 4.3.3 多样化的具身感知方式

传统的刚性夹持器结构和传感单元是独立的, 在进行集成时会增加系统的复杂度和成本, 一定程度上会影响系统的性能。将软体技术应用于机器人化装配中, 可以实现夹持器结构与传感单元的融合, 在不改变系统性能的情况下对外界进行感知。Yang 等<sup>[126]</sup>提出了一种夹持器, 如图 5(c) 所示, 将软体自传感技术与夹持器相结合, 实现了自传感功能。该夹持器可以感知其持有物体的重量, 而不需要额外的传感器。除了检测物体的重量外, 该夹持器可以在没有视觉反馈的情况下识别物体的形状。在生物启发下, Gong 等<sup>[127]</sup>将软体技术结合在刚性致动器中, 设计了一种刚柔耦合的夹持器, 该夹持器中集成了分布式柔性微结构力传感器, 实现了对物体大小、重量和刚度的感知, 为机器人化装配提供了多样化的具身感知方式。

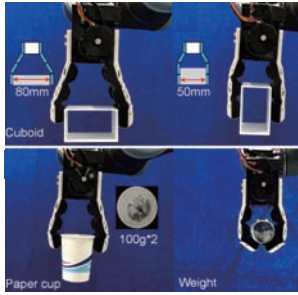
#### 4.3.4 更快的驱动速度

由流体或者电磁驱动的软体夹持器通常具备极快的驱动速度, 如果将其应用于机器人化装配系统中, 则可以提高系统的工作效率。Park 等<sup>[128]</sup>提出了一种刚柔耦合夹持器, 如图 5(d) 所示, 在不牺牲软材料固有顺应性的情况下, 将软质材料和刚性元件结合起来, 受益于软体气动执行器的固有特性, 夹持系统的驱动速度得到了显著提高。Wang 等<sup>[129]</sup>利用软体技术中的介电弹性体制作了一个双稳态的夹持器, 其灵感来自于捕蝇草。该夹持器通过简易的驱动系统成功地夹持各种物体, 仅需 0.04 s 的脉冲电压, 就可以从一个稳定的状态转变为另一个稳定的状态, 对物体进行夹持。有源软部件的快速反应能力可以提高系统的快速夹持性能。

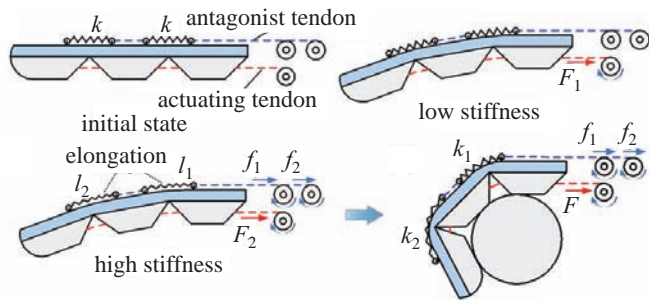
### 4.4 软体技术赋予机器人化装配的优势

本节首先介绍了传统加工中的装配方法, 主要包括 3 种方式, 即人工操作、机械夹爪操作和灵巧手操作, 分析了其优势和劣势。针对这些方法存在的问题, 根据机器人化装配的工业场景, 结合软体技术中软体夹持器的优势和劣势, 提出将软体技术赋能机器人化装配的思路。

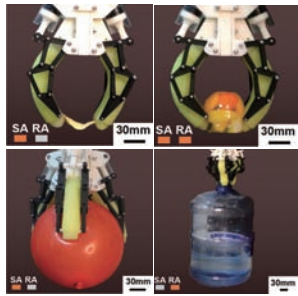
将软体技术应用在机器人化装配中, 将会带来以下优势: 1) 丰富的操作策略。软体执行器的驱动方式和操作模式与传统刚性执行器有显著差异, 引



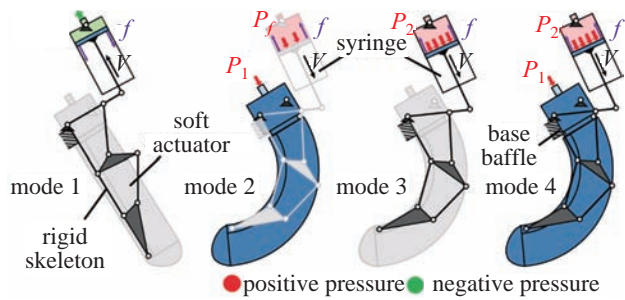
线驱动拮抗多姿态夹持器<sup>[122]</sup>



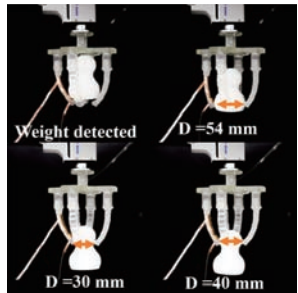
(a) 丰富的操作策略



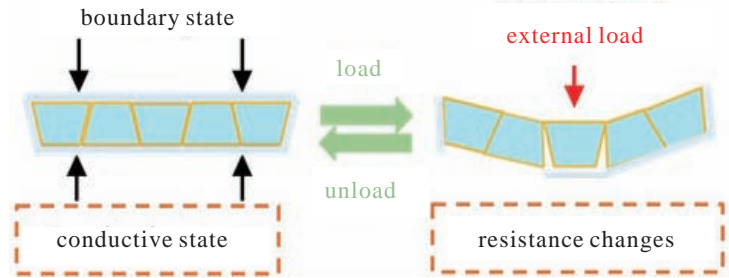
具有外骨骼与柔性手指的夹持器<sup>[124]</sup>



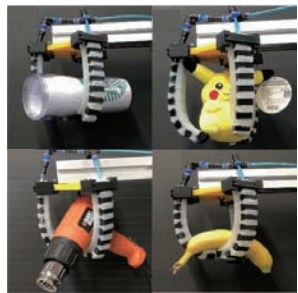
(b) 极宽的夹持范围



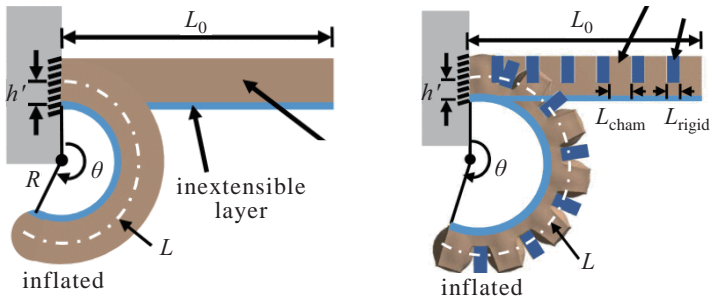
可感知物体质量的夹持器<sup>[126]</sup>



(c) 多样化的具身感知方式



具有刚性夹层的快速夹持器<sup>[127]</sup>



(d) 更快的驱动速度

图5 软体赋能的刚柔夹持器

Fig.5 Soft-enabled rigid-soft coupled grippers

入软体技术的装配系统能够提供多种夹持和操作策略，使得整个装配系统具备应对非结构化物体的能力。2) 极宽的夹持范围。传统的刚性夹持器的夹持下限高，不能应对轻质、易碎、异形的物体。机

器人化装配系统可以利用软体技术的优势，针对更多形状各异、材质不同、重量差异大的物体进行装配和操作。3) 多样化的具身感知方式。传统刚性装配系统与传感器是独立设计和制造的，在集成时系

统的复杂度和性能会受到影响。利用软体技术将驱动/感知一体化集成于机器人化装配系统中, 在不影响系统性能的前提下, 降低了系统的复杂程度, 并且提供了多样化的感知方式。4) 更快的驱动速度。由流体或者电磁驱动的软体执行器通常会有远高于传统刚性装配系统的驱动速度。引入软体驱动技术的机器人化装配系统, 将会大幅提高系统的速度和效率。

当前, 软体夹持器已发展得较为成熟, 出现了商用的软体夹持设备, 但目前还没有在工业制造装配领域大规模地应用, 其原因可能是其使用寿命相比刚性夹持器较短。

综上所述, 将软体技术与机器人化装配相融合, 可以充分发挥软体技术与刚性技术各自的优势, 并实现两者之间的互补, 赋予机器人化装配系统更优异的性能, 同时在未来的发展中, 要提升软体夹持器的耐用性, 以更符合工业生产的需要

## 5 总结与展望 (Conclusion and perspective)

机器人化制造已经成为工业制造必然的发展方向, 面对日益严苛和多样化的加工制造需求, 传统的机器人化制造方法已经显露出局限性。软体技术作为一种新兴的技术, 呈现出巨大的应用潜力。软体技术通过引入柔性材料、柔性结构或者柔性驱动模式, 赋予传统机器人化制造系统全新的特点, 为机器人化制造带来全新的解决方案。

本文针对软体技术在机器人化制造系统中的应用, 按照不同流程进行分类:

1) 软体技术在机器人化加工中的应用。目前机器人化加工主要涉及适形打磨和抛光过程, 传统机器人化加工系统通常利用工业弹性元件或者引入额外的运动机构来实现变刚度适形和恒力打磨, 但这种方式极大提高了系统的质量和复杂程度, 使得机器人化制造系统稳定性低, 小型化、集成化难。针对上述问题, 软体技术通常利用智能材料或者智能结构来调节系统的刚度, 进而达到恒力打磨、顺应形状的目的。本文按照软体技术变刚度的机理进行阐述, 其中包括阻塞变刚度、磁流变流体变刚度、低熔点合金变刚度、形状记忆合金/聚合物变刚度, 分别论述了各种软体变刚度机理及其应用潜力, 并提出基于软体技术的变刚度打磨设备, 以解决传统打磨装置的顺应性问题。通过引入软体技术, 机器人化加工系统可以具备更灵活、轻量、快速、无感、顺应的特点, 为机器人化加工系统提供新的可

能。

2) 软体技术在机器人化检测中的应用。传统的检测方法存在效率低、一致性差、需要离线操作以及对工件造成一定损伤等问题, 已无法满足机器人化检测的需求。基于软体技术设计的柔性传感器凭借自身无损性、顺应性、便捷性等特点, 成为了机器人化检测的全新解决方案。本文从机器人化检测中的自身感知和交互感知的角度, 分别论述软体技术的应用, 总结出软体技术在机器人化检测中的4点优势: 无感式检测、顺应性检测、原位在线检测和低功耗检测, 促进了加工-检测一体化的机器人系统的发展。

3) 软体技术在机器人化装配中的应用。传统的装配技术针对的是结构化、标准化的工件, 面对日益非结构化、复杂化的工件, 已经难以发挥很好的效果, 引入纯软体执行器可以解决上述问题, 但是又会带来输出力不足的问题。本文针对上述问题, 提出将软体技术赋能于传统机器人化装配系统的观点, 分别论述了引入软体技术后系统具备的新优势, 其中包括: 丰富的操作策略、极宽的夹持范围、多样化的具身感知方式和更快的驱动速度。

根据上述3个流程, 表1汇总了软体技术在机器人化制造中的优势及实例。上述具有柔顺性、高可集成性、轻量化和无感化等特点的软体技术还可用于机器人化制造系统的各个部分, 使得机器人化制造系统能够适应更加复杂化、非结构化、微型化和曲面化的加工场景, 具备更加良好的顺应性和适应性。除此之外, 上述软体技术之间的相互融合也将使得机器人化制造系统更智能。

本文重点提及的软体变刚度技术、柔性传感器技术和软体夹持器技术还未大规模地应用于机器人化制造的工业场景中, 是因为软体技术与机器人化制造的融合还存在一些问题和局限性: 1) 基于软体技术制作的器件寿命有限, 一般难以达到刚性元件的使用寿命。2) 基于软体技术的柔性器件大多难以大规模生产, 难以满足工业化的需求。3) 基于软体技术的器件由于自身材料结构的多样化, 目前还未在学术界和工业界形成一套统一的标准, 导致软体技术在机器人化制造中的应用受到限制。

所以, 在机器人化制造领域应用的软体技术应向着解决上述问题和局限性的方向发展。针对寿命有限问题, 可通过优化材料的选择、改进制备的工艺和设定特殊的结构来延长柔性器件的使用寿命; 针对柔性器件难以大规模生产的问题, 需要加大对柔性制造的研究, 开发新型工艺和制造技术, 提高

表 1 软体技术在机器人化制造中的优势及实例

Tab.1 Advantages and examples of soft technologies in robotized manufacturing

应用场景	软体技术	具体方法	主要优势	典型示例	在工业场景中的成熟度
机器人化加工	软体变刚度技术	阻塞机制, 磁流变流体, 低熔点合金, 形状记忆材料	降低系统复杂度, 提高变刚度速度, 加工无感化, 赋予打磨设备本体变刚度特性	阻塞式变刚度吸盘 <sup>[37]</sup> , 变刚度磁流变弹性系统 <sup>[44]</sup> , 仿生变刚度机器人鳞片 <sup>[50]</sup> , 磁控变刚度机器人 <sup>[56]</sup>	成熟度较低, 软体变刚度技术在加工中暂无实际商用, 仍具有较大的发展空间
机器人化检测	柔性传感器技术	自身感知, 交互感知	无感式检测, 顺应性检测, 原位在线检测, 低功耗检测	基于柔性压电传感器的智能刀具 <sup>[73]</sup> , 可编程微结构的多孔传感器 <sup>[77]</sup> , 柔性缺陷传感机器人 <sup>[81]</sup>	成熟度适中, 特别是柔性压电传感器在刀具力学传感中的应用较为广泛
机器人化装配	软体夹持器技术	柔性适形夹持, 变刚度夹持, 吸附式夹持	丰富的操作策略, 极宽的夹持范围, 多样化的具身感知, 更快的驱动速度	仿生多策略夹持器 <sup>[121]</sup> , 极宽夹持范围刚柔夹持器 <sup>[124]</sup> , 自感知夹持器 <sup>[126]</sup> , 仿生双稳态夹持器 <sup>[129]</sup>	成熟度适中, 软体夹持器发展较为成熟, 但在工业场景中大规模应用

生产效率并降低成本; 最重要的是, 要针对软体技术建立一套标准和规范, 这需要工业界和学术界加强合作, 按照实际需求, 共同制定软体技术的规范和标准。

未来, 机器人化制造必然取代传统的制造模式。针对日益复杂的制造需求和多样化的工作环境, 机器人化制造也向着共融机器人 (tri-co robot) 方向发展, 能够实现与作业环境、人和其他机器人自然交互, 自主适应复杂动态环境并协同作业<sup>[1]</sup>。机器人化制造模式将具备“人一机一环境”交互共融的能力。为了实现这一目标, 提升人与机器之间的感知交互能力、机器与环境之间的感知交互能力、机器与机器之间的感知交互能力是主要的发展方向。而软体技术势必进一步与机器人化制造系统共融: 在“人一机”共融方面, 软体技术亲和性、无感性、安全性的特点成为“人一机”系统最理想的交互感知媒介, 电子皮肤、人工肌肉将会广泛应用于“人一机”系统中, 使人类的意图更容易被机器理解, 机器人系统更加人格化, 交互更加类人化; 在“机一环境”共融方面, 软体技术将会给机器人制造系统引入强大的顺应性和适应性, 柔性传感器、柔性末端执行器都将成为新一代“机一环境”共融系统的关键, 使机器人与环境进行更精确、稳定、无损的交互感知; 在“机一机”共融方面, 软体技术将提供全新的设计思路和策略, 利用仿生学的原理和策略为“机一机”共融提供全新的交互模式和集群策略。

综合上述内容, 软体技术在机器人化制造中的应用已初具雏形, 并且结合当前以及未来的制造环境和需求, 软体技术在机器人化制造中还有巨大的

应用潜力, 软体技术也促进了机器人制造系统向着“人一机一环境”交互的共融机器人系统发展。

#### 参考文献 (References)

- [1] 赖一楠, 叶鑫, 丁汉. 共融机器人重大研究计划研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(23): 1-11,20. Lai Y N, Ye X, Ding H. Research progress of major research plan on tri-co robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(23): 1-11,20.
- [2] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[EB/OL]. [2023-07-05]. [https://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content\\_5721685.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm).
- [3] COMET Project – Plug-and-produce components and methods for adaptive control of industrial robots enabling cost effective, high precision manufacturing in factories of the future[EB/OL]. [2023-07-05]. <https://cordis.europa.eu/project/id/258769/reporting>.
- [4] Schreck G, Surdilovic D, Krueger J. HEPHESTOS: Hard material small-batch industrial machining robot[C]//41st International Symposium on Robotics. Berlin, Germany: VDE, 2014.
- [5] MEGAROB Project[EB/OL]. [2023-07-05]. <https://www.megarob.eu/>.
- [6] The ARM Institute: The nation's leading collaborative in robotics and workforce innovation[EB/OL]. [2023-07-05]. <https://arminstitute.org/>.
- [7] Ding H, Yang X J, Zheng N N, et al. Tri-co robot: A Chinese robotic research initiative for enhanced robot interaction capabilities[J]. National Science Review, 2018, 5(6): 799-801.
- [8] Guo Y J, Dong H Y, Wang G F, et al. A robotic boring system for intersection holes in aircraft assembly[J]. Industrial Robot, 2018, 45(3): 328-336.
- [9] 丰飞, 严思杰, 丁汉. 大型风电叶片多机器人协同磨抛系统的设计与研究[J]. 机器人技术与应用, 2018(5): 16-24. Feng F, Yan S J, Ding H. Design and research of multi robot collaborative grinding and polishing system for large wind turbine blades[J]. Robot Technique and Application, 2018(5): 16-24.



- [10] Xu P, Li B, Cheung C F, et al. Stiffness modeling and optimization of a 3-DOF parallel robot in a serial-parallel polishing machine[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2017, 18(4): 497-507.
- [11] Chen D D, Yuan P J, Wang T M, et al. A compensation method for enhancing aviation drilling robot accuracy based on co-kriging[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2018, 19(8): 1133-1142.
- [12] Burghardt A, Szybicki D, Kurc K, et al. Experimental study of Inconel 718 surface treatment by edge robotic deburring with force control[J]. *Strength of Materials*, 2017, 49(4): 594-604.
- [13] 陶波, 赵兴炜, 李汝鹏, 等. 机器人测量—操作—加工一体化技术研究及其应用[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(1): 49-56.
- Tao B, Zhao X W, Li R P, et al. Research on robotic measurement-operation-machining technology and its application[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(1): 49-56.
- [14] 张云志, 蒋倩. 大飞机翼盒机器人制孔系统集成技术研究[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(7): 16-23.
- Zhang Y Z, Jiang Q. Research on integration technology of wing box robot drilling system for large aircraft[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(7): 16-23.
- [15] Cianchetti M, Calisti M, Margheri L, et al. Bioinspired locomotion and grasping in water: The soft eight-arm OCTOPUS robot[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, 10(3). DOI: 10.1088/1748-3190/10/3/035003.
- [16] Trivedi D, Rahn C D, Kier W M, et al. Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research[J]. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2008, 5(3): 99-117.
- [17] Laschi C, Cianchetti M. Soft robotics: New perspectives for robot bodyware and control[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2014, 2. DOI: 10.3389/fbioe.2014.00003.
- [18] Trivedi D, Lotfi A, Rahn C D. Geometrically exact models for soft robotic manipulators[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(4): 773-780.
- [19] Laschi C, Mazzolai B, Cianchetti M. Soft robotics: Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities [J]. *Science Robotics*, 2016, 1(1). DOI: 10.1126/scirobotics.aah3690.
- [20] Zhou Z H, Chen K, Li X S, et al. Sign-to-speech translation using machine-learning-assisted stretchable sensor arrays[J]. *Nature Electronics*, 2020, 3(9): 571-578.
- [21] Wen F, Sun Z D, He T Y Y, et al. Machine learning glove using self-powered conductive superhydrophobic triboelectric textile for gesture recognition in VR/AR applications[J]. *Advanced Science*, 2020, 7(14). DOI: 10.1002/advs.202000261.
- [22] O'Neill J, Lu J, Dockter R, et al. Stretchable, flexible, scalable smart skin sensors for robotic position and force estimation[J]. *Sensors*, 2018, 18(4). DOI: 10.3390/s18040953.
- [23] Harada K, Nagata K, Rojas J, et al. Proposal of a shape adaptive gripper for robotic assembly tasks[J]. *Advanced Robotics*, 2016, 30(17-18): 1186-1198.
- [24] Naclerio N D, Karsai A, Murray-Cooper M, et al. Controlling subterranean forces enables a fast, steerable, burrowing soft robot[J]. *Science Robotics*, 2021, 6(55). DOI: 10.1126/scirobotics.abe2922.
- [25] El Khalick Mohammad A, Wang D. Electrochemical mechanical polishing technology: Recent developments and future research and industrial needs[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(5-8): 1909-1924.
- [26] El Khalick Mohammad A, Wang D. A novel mechatronics design of an electrochemical mechanical end-effector for robotic-based surface polishing[C]//*IEEE/SICE International Symposium on System Integration*. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 127-133.
- [27] Cho S S, Ryu Y K, Lee S Y. Curved surface finishing with flexible abrasive tool[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, 42(2): 229-236.
- [28] Li J, Zhang T, Liu X, et al. A survey of robotic polishing [C]//*IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Piscataway, USA: IEEE, 2018: 2125-2132.
- [29] Liu H, Zhu D, Xiao J. Conceptual design and parameter optimization of a variable stiffness mechanism for producing constant output forces[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, 154. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104033.
- [30] Wolf S, Hirzinger G. A new variable stiffness design: Matching requirements of the next robot generation[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2008: 1741-1746.
- [31] Awad M I, Hussain I, Gan D, et al. Passive discrete variable stiffness joint (pDVSJ-II) : Modeling, design, characterization, and testing toward passive haptic interface[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2019, 11(1). DOI: 10.1115/1.4041640.
- [32] Kim D W, Burge J H. Rigid conformal polishing tool using non-linear visco-elastic effect[J]. *Optics Express*, 2010, 18(3): 2242-2257.
- [33] Kawana Y, Sekiguchi R, Mizumoto Y, et al. Basic study on ductile-mode grinding of optical glass lenses with rubber bonded diamond wheels[J]. *Materials Science Forum*, 2016, 874: 241-246.
- [34] Beaucamp A, Namba Y, Charlton P. Corrective finishing of extreme ultraviolet photomask blanks by precessed bonnet polisher[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(14): 3075-3080.
- [35] Huai W B, Shi Y Y, Tang H, et al. An adaptive flexible polishing path programming method of the blisk blade using elastic grinding tools[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, 33(7): 3487-3495.
- [36] Gao L K, He Y L, Zhu H W, et al. Stiffness modelling and performance evaluation of a soft cardiac fixator flexible arm with granular jamming[J]. *Machines*, 2021, 9(12). DOI: 10.3390/machines9120303.
- [37] Goshtasbi A, Sadeghi A. A bioinspired stiffness tunable sucker for passive adaptation and firm attachment to angular substrates[J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2023, 10. DOI: 10.3389/frobt.2023.1080015.
- [38] Brancadoro M, Manti M, Grani F, et al. Toward a variable stiffness surgical manipulator based on fiber jamming transition [J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2019, 6. DOI: 10.3389/frobt.2019.00012.
- [39] Jiang A, Xynogalas G, Dasgupta P, et al. Design of a variable stiffness flexible manipulator with composite granular jamming and membrane coupling[C]//*IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 2922-2927.

- [40] Liu T, Xia H, Lee D Y, et al. A positive pressure jamming based variable stiffness structure and its application on wearable robots[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(4): 8078-8085.
- [41] Wang Y F, Li L C, Hofmann D, et al. Structured fabrics with tunable mechanical properties[J]. *Nature*, 2021, 596(7871): 238-243.
- [42] Sikulskiy S, Malik A, Kim D. Magnetorheological fluid filled spring for variable stiffness and damping: Current and potential performance[J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 9. DOI: 10.3389/fmats.2022.856945.
- [43] Cui S K, Liu B T, Zhou Y, et al. Development of magnetorheological elastomer railway pads with a tunable stiffness/damping property for railway fastening systems[J]. *Frontiers in Materials*, 2023, 9. DOI: 10.3389/fmats.2022.1107193.
- [44] Majidi C, Wood R J. Tunable elastic stiffness with microconfined magnetorheological domains at low magnetic field [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(16). DOI: 10.1063/1.3503969.
- [45] Kallio M, Lindroos T, Aalto S, et al. Dynamic compression testing of a tunable spring element consisting of a magnetorheological elastomer[J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(2): 506-514.
- [46] Li Y C, Li J C, Tian T F, et al. A highly adjustable magnetorheological elastomer base isolator for applications of real-time adaptive control[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(9). DOI: 10.1088/0964-1726/22/9/095020.
- [47] Zhu J Q, Lyu L X, Xu Y, et al. Intelligent soft surgical robots for next-generation minimally invasive surgery[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2021, 3(5). DOI: 10.1002/aisy.202100011.
- [48] Lussi J, Mattmann M, Sevim S, et al. A submillimeter continuous variable stiffness catheter for compliance control[J]. *Advanced Science*, 2021, 8(18). DOI: 10.1002/advs.202101290.
- [49] Sharifi S, Mohammadi Nasab A, Chen P E, et al. Robust bicontinuous elastomer-metal foam composites with highly tunable stiffness[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2022, 24(8). DOI: 10.1002/adem.202101533.
- [50] Tatarı M, Kamrava S, Ghosh R, et al. Bending behavior of biomimetic scale covered beam with tunable stiffness scales [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1). DOI: 10.1038/s41598-020-74147-0.
- [51] Shintake J, Cacucciolo V, Floreano D, et al. Soft robotic grippers[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(29). DOI: 10.1002/adma.201707035.
- [52] Guo R, Wang H M, Chen G Z, et al. Smart semiliquid metal fibers with designed mechanical properties for room temperature stimulus response and liquid welding[J]. *Applied Materials Today*, 2020, 20. DOI: 10.1016/j.apmt.2020.100738.
- [53] Shan W L, Lu T, Majidi C. Soft-matter composites with electrically tunable elastic rigidity[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(8). DOI: 10.1088/0964-1726/22/8/085005.
- [54] Squibb C, Philen M. Sizing optimization and experimental characterization of a variable stiffness shape memory polymer filled honeycomb composite[J]. *Smart Materials and Structures*, 2023, 32(4). DOI: 10.1088/1361-665X/acbd77.
- [55] Thomas T L, Bos J, Huaroto J J, et al. A magnetically actuated variable stiffness manipulator based on deployable shape memory polymer springs[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2023. DOI: 10.1002/aisy.202200465.
- [56] Mattmann M, de Marco C, Briatico F, et al. Thermoset shape memory polymer variable stiffness 4D robotic catheters[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(1). DOI: 10.1002/advs.202103277.
- [57] Gandhi F, Kang S G. Beams with controllable flexural stiffness [J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(4): 1179-1184.
- [58] Chenal T P, Case J C, Paik J, et al. Variable stiffness fabrics with embedded shape memory materials for wearable applications[C]//*IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 2827-2831.
- [59] Yuen M C, Bilodeau R A, Kramer R K. Active variable stiffness fibers for multifunctional robotic fabrics[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2016, 1(2): 708-715.
- [60] Zhang Y F, Zhang N B, Hingorani H, et al. Fast-response, stiffness-tunable soft actuator by hybrid multimaterial 3D printing[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(15). DOI: 10.1002/adfm.201806698.
- [61] Liu H X, Wang L, Lin G M, et al. Recent progress in the fabrication of flexible materials for wearable sensors[J]. *Biomaterials Science*, 2022, 10(3): 614-632.
- [62] Ma Z L, Wei A J, Li Y, et al. Lightweight, flexible and highly sensitive segregated microcellular nanocomposite piezoresistive sensors for human motion detection[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 203. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108571.
- [63] Xu F L, Li X Y, Shi Y, et al. Recent developments for flexible pressure sensors: A review[J]. *Micromachines*, 2018, 9(11). DOI: 10.3390/mi9110580.
- [64] Trung T Q, Lee N E. Flexible and stretchable physical sensor integrated platforms for wearable human-activity monitoring and personal healthcare[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(22): 4338-4372.
- [65] Lee S, Franklin S, Hassani F A, et al. Nanomesh pressure sensor for monitoring finger manipulation without sensory interference[J]. *Science*, 2020, 370(6519): 966-970.
- [66] Hu B, Chen W, Zhou J. High performance flexible sensor based on inorganic nanomaterials[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 176: 522-533.
- [67] Shu S, Wang Z M, Chen P F, et al. Machine-learning assisted electronic skins capable of proprioception and exteroception in soft robotics[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(18). DOI: 10.1002/adma.202211385.
- [68] Thuruthel T G, Shih B, Laschi C, et al. Soft robot perception using embedded soft sensors and recurrent neural networks [J]. *Science Robotics*, 2019, 4(26). DOI: 10.1126/scirobotics.aav1488.
- [69] Ma J W, Wang F J, Jia Z Y, et al. Study of machining parameter optimization in high speed milling of Inconel 718 curved surface based on cutting force[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 75: 269-277.
- [70] Totis G, Adams O, Sortino M, et al. Development of an innovative plate dynamometer for advanced milling and drilling applications[J]. *Measurement*, 2014, 49: 164-181.
- [71] Panzera T H, Souza P R, Rubio J C C, et al. Development of a three-component dynamometer to measure turning force[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 62(9-12): 913-922.

- [72] Totis G, Sortino M. Development of a modular dynamometer for triaxial cutting force measurement in turning[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51(1): 34-42.
- [73] Cheng K, Niu Z C, Wang R C, et al. Smart cutting tools and smart machining: Development approaches, and their implementation and application perspectives[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 30(5): 1162-1176.
- [74] Ma L, Melkote S N, Castle J B. PVDF sensor-based monitoring of milling torque[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70: 1603-1614.
- [75] Luo M, Luo H, Axinte D, et al. A wireless instrumented milling cutter system with embedded PVDF sensors[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 110: 556-568.
- [76] Mannsfeld S C B, Tee B C K, Stoltenberg R M, et al. Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers[J]. *Nature Materials*, 2010, 9(10): 859-864.
- [77] Chai Z P, Ke X X, Chen H, et al. Anisotropic shear-sensitive tactile sensors with programmable elastomers for robotic manipulations[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(43): 51426-51435.
- [78] Yang J C, Kim J O, Oh J, et al. Microstructured porous pyramid-based ultrahigh sensitive pressure sensor insensitive to strain and temperature[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(21): 19472-19480.
- [79] Bai N, Wang L, Wang Q, et al. Graded intrafillable architecture-based iontronic pressure sensor with ultra-broad-range high sensitivity[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1). DOI: 10.1038/s41467-019-14054-9.
- [80] Fishel J A, Loeb G E. Bayesian exploration for intelligent identification of textures[J]. *Frontiers in Neurorobotics*, 2012, 6. DOI: 10.3389/fnbot.2012.00004.
- [81] Ke X X, Jang J J, Chai Z P, et al. Stiffness preprogrammable soft bending pneumatic actuators for high-efficient, conformal operation[J]. *Soft Robotics*, 2022, 9(3): 613-624.
- [82] Chen C X, Abdullah A, Kok S H, et al. Review of industry workpiece classification and defect detection using deep learning[J]. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2022, 13(4): 329-340.
- [83] Huang H X, Hu C, Wang T, et al. Surface defects detection for mobilephone panel workpieces based on machine vision and machine learning[C]//*IEEE International Conference on Information and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2017: 370-375.
- [84] Wozniak A, Dobosz M. Factors influencing probing accuracy of a coordinate measuring machine[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2005, 54(6): 2540-2548.
- [85] Abidin Z F Z, Jing Hung T, Zahid M N O. Portable non-contact surface roughness measuring device[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 469. DOI: 10.1088/1757-899X/469/1/012074.
- [86] Jen C K, Legoux J G, Parent L. Experimental evaluation of clad metallic buffer rods for high temperature ultrasonic measurements[J]. *NDT & E International*, 2000, 33(3): 145-153.
- [87] Staszewski W J, Lee B C, Traynor R. Fatigue crack detection in metallic structures with Lamb waves and 3D laser vibrometry[J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18(3): 727-739.
- [88] Kathirmani S, Tangirala A K, Saha S, et al. Online data compression of MFL signals for pipeline inspection[J]. *NDT & E International*, 2012, 50: 1-9.
- [89] Liu S W, Sun Y H, He L S, et al. Quantitative MFL characterization study in hard magnetic material surface topography measurement[J]. *Measurement*, 2019, 135: 503-519.
- [90] Luggar R D, Gilboy W B. Recent developments in industrial applications of elastic scatter X-ray inspection[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 1999, 56(1-2): 213-227.
- [91] Zenzinger G, Bamberg J, Satzger W, et al. Thermographic crack detection by eddy current excitation[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2007, 22(2-3): 101-111.
- [92] Ma Q P, Gao B, Tian G Y, et al. High sensitivity flexible double square winding eddy current array for surface micro-defects inspection[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 309. DOI: 10.1016/j.sna.2020.111844.
- [93] Fan X H, He Y T, Chen T, et al. Research on crack monitoring technology of flexible eddy current array sensor based on TMR sensors[J]. *Measurement*, 2022, 192. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.110926.
- [94] Chun S, Choi Y, Suh D I, et al. A tactile sensor using single layer graphene for surface texture recognition[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(29): 10248-10255.
- [95] Jamali N, Sammut C. Material classification by tactile sensing using surface textures[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 2336-2341.
- [96] Chun S, Kim J S, Yoo Y, et al. An artificial neural tactile sensing system[J]. *Nature Electronics*, 2021, 4(6): 429-438.
- [97] Cao Y D, Li T, Gu Y, et al. Fingerprint-inspired flexible tactile sensor for accurately discerning surface texture[J]. *Small*, 2018, 14(16). DOI: 10.1002/sml.201703902.
- [98] Yi Z K, Zhang Y L, Peters J. Bioinspired tactile sensor for surface roughness discrimination[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 255: 46-53.
- [99] Liu H B, Xiang H C, Wang Y, et al. A flexible multimodal sensor that detects strain, humidity, temperature, and pressure with carbon black and reduced graphene oxide hierarchical composite on paper[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(43): 40613-40619.
- [100] You I, Mackanic D G, Matsuhisa N, et al. Artificial multimodal receptors based on ion relaxation dynamics[J]. *Science*, 2020, 370(6519): 961-965.
- [101] Malik A A, Bilberg A. Collaborative robots in assembly: A practical approach for tasks distribution[J]. *Procedia CIRP*, 2019, 81: 665-670.
- [102] 刘检华, 孙清超, 程晖, 等. 产品装配技术的研究现状、技术内涵及发展趋势[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(11): 2-28.
- Liu J H, Sun Q C, Cheng H, et al. The state-of-the-art, connotation and developing trends of the products assembly technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(11): 2-28.
- [103] 计时鸣, 黄希欢. 工业机器人技术的发展与应用综述[J]. *机电工程*, 2015, 32(1): 1-13.
- Ji S M, Huang X H. Review of development and application of industrial robot technology[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(1): 1-13.

- [104] Chen F, Cannella F, Canali C, et al. In-hand precise twisting and positioning by a novel dexterous robotic gripper for industrial high-speed assembly[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 270-275.
- [105] Song J, Chen Q, Li Z. A peg-in-hole robot assembly system based on Gauss mixture model[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, 67. DOI: 10.1016/j.rcim.2020.101996.
- [106] Song H C, Kim Y L, Song J B. Guidance algorithm for complex-shape peg-in-hole strategy based on geometrical information and force control[J]. *Advanced Robotics*, 2016, 30(8): 552-563.
- [107] Bartoš M, Bulej V, Bohušik M, et al. An overview of robot applications in automotive industry[J]. *Transportation Research Procedia*, 2021, 55: 837-844.
- [108] Song R, Li F M, Fu T Y, et al. A robotic automatic assembly system based on vision[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(3). DOI: 10.3390/app10031157.
- [109] Dollar A M, Howe R D. Simple, robust autonomous grasping in unstructured environments[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2007: 4693-4700.
- [110] Bridgwater L B, Ihrke C A, Diftler M A, et al. The Robonaut 2 hand – Designed to do work with tools[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 3425-3430.
- [111] Ren Z Y, Zhou C X, Xin S Y, et al. HERI hand: A quasi dexterous and powerful hand with asymmetrical finger dimensions and under actuation[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2017: 322-328.
- [112] Tieck J C V, Weber S, Stewart T C, et al. A spiking network classifies human sEMG signals and triggers finger reflexes on a robotic hand[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2020, 131. DOI: 10.1016/j.robot.2020.103566.
- [113] Xu W F, Zhang H, Yuan H, et al. A compliant adaptive gripper and its intrinsic force sensing method[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 37(5): 1584-1603.
- [114] Crooks W, Rozen-Levy S, Trimmer B, et al. Passive gripper inspired by *Manduca sexta* and the Fin Ray<sup>®</sup> Effect[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2017, 14(4). DOI: 10.1177/1729881417721155.
- [115] Petković D, D. Pavlović N, Shamshirband S, et al. Development of a new type of passively adaptive compliant gripper[J]. *Industrial Robot*, 2013, 40(6): 610-623.
- [116] Ma R, Dollar A. Yale OpenHand Project: Optimizing open-source hand designs for ease of fabrication and adoption[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2017, 24(1): 32-40.
- [117] Piskarev Y, Devincenti A, Ramachandran V, et al. A soft gripper with granular jamming and electroadhesive properties[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2023, 5(6). DOI: 10.1002/aisy.202200409.
- [118] Shintake J, Rosset S, Schubert B, et al. Versatile soft grippers with intrinsic electroadhesion based on multifunctional polymer actuators[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(2): 231-238.
- [119] Suresh S A, Christensen D L, Hawkes E W, et al. Surface and shape deposition manufacturing for the fabrication of a curved surface gripper[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2015, 7(2). DOI: 10.1115/1.4029492.
- [120] Wu M X, Zheng X W, Liu R S, et al. Glowing sucker octopus (*Stauroteuthis syrtensis*) -inspired soft robotic gripper for underwater self-adaptive grasping and sensing[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(17). DOI: 10.1002/adv.202104382.
- [121] Ruotolo W, Brouwer D, Cutkosky M R. From grasping to manipulation with gecko-inspired adhesives on a multifinger gripper[J]. *Science Robotics*, 2021, 6(61). DOI: 10.1126/scirobotics.abi9773.
- [122] Wang T H, Jin T, Zhang Q, et al. A bioinspired gripper with sequential motion and mutable posture enabled by antagonistic mechanism[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2023, 5(3). DOI: 10.1002/aisy.202200304.
- [123] Fu J M, Lin H, Prathyush I V S, et al. A novel discrete variable stiffness gripper based on the fin ray effect[C]//International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Cham, Switzerland: Springer, 2022: 791-802.
- [124] Zhu J Q, Chai Z P, Yong H C, et al. Bioinspired multimodal multipose hybrid fingers for wide-range force, compliant, and stable grasping[J]. *Soft Robotics*, 2023, 10(1): 30-39.
- [125] Nishimura T, Mizushima K, Suzuki Y, et al. Variable-grasping-mode underactuated soft gripper with environmental contact-based operation[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, 2(2): 1164-1171.
- [126] Yang X D, Wang Z Z, Zhang B J, et al. Self-sensing robotic structures from architected particle assemblies[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2023, 5(1). DOI: 10.1002/aisy.202200250.
- [127] Gong S L, Ding Q F, Wu J H, et al. Bioinspired multifunctional mechanoreception of soft-rigid hybrid actuator fingers [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2022, 4(5). DOI: 10.1002/aisy.202100242.
- [128] Park W, Seo S, Bae J. A hybrid gripper with soft material and rigid structures[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(1): 65-72.
- [129] Wang Y Z, Gupta U, Parulekar N, et al. A soft gripper of fast speed and low energy consumption[J]. *Science China: Technological Sciences*, 2019, 62(1): 31-38.

### 作者简介:

- 蒲萌浩 (1999 –), 男, 博士生。研究领域: 软体机器人与人工智能。
- 徐富康 (2000 –), 男, 硕士生。研究领域: 软体机器人与微型机器人。
- 柴治平 (1997 –), 男, 博士生。研究领域: 智能传感器与人工智能。