



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115972572 A

(43) 申请公布日 2023.04.18

(21) 申请号 202310021081.2

(22) 申请日 2023.01.06

(71) 申请人 华中科技大学

地址 430074 湖北省武汉市洪山区珞喻路  
1037号

(72) 发明人 闫春泽 欧阳震 杨磊 史玉升

(74) 专利代理机构 华中科技大学专利中心  
42201

专利代理师 彭军芬

B29C 64/393 (2017.01)

B29C 64/118 (2017.01)

B33Y 30/00 (2015.01)

B33Y 10/00 (2015.01)

B33Y 40/00 (2020.01)

B33Y 40/20 (2020.01)

B33Y 50/00 (2015.01)

B33Y 50/02 (2015.01)

(51) Int. Cl.

B29C 64/20 (2017.01)

B29C 64/268 (2017.01)

B29C 64/321 (2017.01)

B29C 64/379 (2017.01)

B29C 64/386 (2017.01)

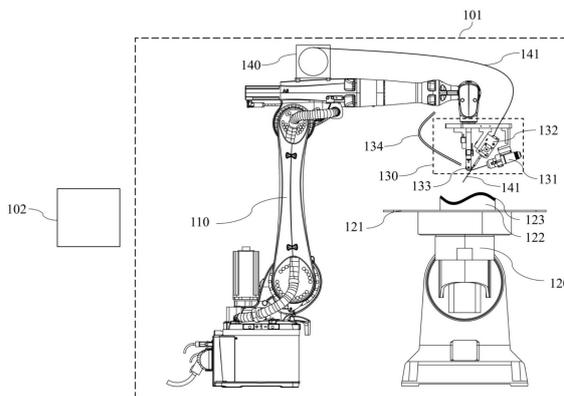
权利要求书1页 说明书6页 附图3页

(54) 发明名称

连续纤维复材层间增强的机器人辅助激光增材制造系统

(57) 摘要

本发明公开了一种连续纤维复材层间增强的机器人辅助激光增材制造系统,属于增材制造技术领域。制造系统的机械臂末端连接有打印单元,控制器精准控制打印单元的运动速度、激光单元激光功率和压辊单元产生的压力,利用激光束加热复合长丝至半熔融状态并在压辊单元作用下被压平成带状,随着打印单元的运动,已粘结的复合长丝对未熔融的丝材产生牵引力,使其从储丝盘中经送丝单元不断送出,变位机上设置的打印平台可接收成形的复合长丝,并最终逐层粘结堆叠成高致密零件。本发明提高了零件层与层之间的结合性能,且扩大了打印单元的成形自由度和工作空间。从而既可以实现连续纤维复合材料的层间增强,又能实现大尺寸复杂零件的高性能增材制造。



1. 一种连续纤维复材层间增强的机器人辅助激光增材制造系统,其特征在于,包括:控制器、机械臂、变位机和打印单元;其中,打印单元包括激光单元、送丝单元和压辊单元;

送丝单元连接于所述机械臂末端,用于送出连续纤维复合长丝,并将送出部分限制在压辊单元下方位置;

激光单元连接于所述机械臂末端,用于将送出的连续纤维复合长丝通过激光加热至高于树脂玻璃化转变温度且低于其熔点温度的半熔融状态;

压辊单元连接于所述机械臂末端,用于产生压力将经激光束加热后尚未凝固的连续纤维复合长丝压平成带状;

变位机设置于所述机械臂的下方,其表面刚性连接有打印平台,用于接收机械臂末端打印单元成形的复合长丝,并最终逐层粘结堆叠成高致密零件;

所述控制器,用于控制机械臂各关节的旋转运动、变位机各关节的旋转运动、打印单元的运动速度、激光单元的激光功率和压辊单元产生的压力;机械臂各关节旋转运动的组合能够使机械臂末端打印单元实现六自由度的运动;变位机各关节旋转运动的组合能够使得打印平台实现多自由度的运动;打印单元运动速度的大小和激光功率大小匹配。

2. 根据权利要求1所述的一种连续纤维复材层间增强的机器人辅助激光增材制造系统,其特征在于,所述系统还包括牺牲磨具;打印单元的路径遵循牺牲磨具的表面轮廓,用于成形复杂曲面零件。

3. 根据权利要求2所述的一种连续纤维复材层间增强的机器人辅助激光增材制造系统,其特征在于,压辊单元设置有自由旋转的滚轮,在成形的过程中滚轮表面始终平行于打印平台表面、牺牲磨具表面或已成型零件表面。

4. 根据权利要求1-4任一项所述的一种连续纤维复材层间增强的机器人辅助激光增材制造系统,其特征在于,所述系统还包括送气管;所述送气管用于提供保护气体到送丝单元附近,当连续纤维复合长丝被激光单元加热时,保护气体抑制其燃烧。

5. 根据权利要求4所述的一种连续纤维复材层间增强的机器人辅助激光增材制造系统,其特征在于,保护气体为氮气。

6. 根据权利要求1-4任一项所述的一种连续纤维复材层间增强的机器人辅助激光增材制造系统,其特征在于,所述系统还包括储丝盘,用于储存连续纤维复合长丝原料。

7. 一种基于权利要求1-6任一项所述连续纤维复材层间增强的机器人辅助激光增材制造系统的成形方法,其特征在于,包括:

S1. 将零件三维数字模型自适应的切片成多层,按照最佳的填充策略生成每一切片层的打印路径信息并导出制造系统能够读取的文本文件,再传输给机械臂、变位机使其协同运动;

S2. 制造系统通过机械臂带动末端送丝单元和压辊单元在空间上进行移动,同时控制器精准控制打印单元的运动速度、激光单元激光功率和压辊单元产生的压力,利用激光单元产生的激光束加热连续纤维复合长丝使其达到半熔融状态并在压辊单元的作用下被压平成带状;

S3. 随着打印单元的运动,已粘结的复合长丝对还未熔融的丝材产生牵引力,使其从储丝盘中经过送丝单元不断送出,打印平台、牺牲磨具和零件的表面均可用于接收机械臂末端打印单元成形的复合长丝,并最终逐层粘结堆叠成高致密零件。

## 连续纤维复材层间增强的机器人辅助激光增材制造系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于增材制造技术领域,更具体地,涉及一种连续纤维复材层间增强的机器人辅助激光增材制造系统。

### 背景技术

[0002] 增材制造技术(additive manufacturing,也称3D打印技术)是20世纪80年代后期发展起来的新型制造技术,其主要通过计算机建立三维数字模型,依靠材料逐层累积成形得到最终零件。

[0003] 连续纤维增强热塑性树脂复合材料(Continuous fiber reinforced thermoplastic composites,CFRTPCs)具有强度高、寿命长、耐腐蚀和绿色可回收等优点,广泛应用于航空航天、交通运输和高精密加工装备等领域,正逐渐发展为可能取代传统塑料和金属的替代材料。

[0004] 在CFRTPCs成形过程中实现正确的纤维取向对于零件机械性能的提升至关重要。传统CFRTPCs成型工艺如压缩成型、冲压成型、真空成型、纤维缠绕、挤出成型、气囊辅助成型等往往需要昂贵的模具,且难以生产满足纤维取向需求的复杂零件。而基于增材制造技术的可定制路径规划策略和逐层粘结成型原理,可以进一步优化CFRTPCs的纤维取向,这克服了传统成型方法的局限性。因此,为了绕过漫长、昂贵的加工过程,连续纤维增强热塑性复合材料的增材制造技术成为学术界和工业界一个热点领域。

[0005] 近年来,由于设备研发成本低且易于使用,熔融沉积建模(FDM)或称熔丝制造(FFF)已成为连续纤维增强热塑性树脂复合材料增材制造成形的主要工艺。公开号为W02016/041449A1的专利公开了一种熔融堆积3D打印机及其打印方法,在该工艺过程中,将热塑性树脂与纤维的复合丝材送入一个被加热的喷嘴,在喷嘴处树脂受到高于其玻璃化转变温度而低于其熔点温度作用而熔融,然后将具有粘附性的长丝从喷嘴中挤出,通过控制喷嘴的移动方向和速度,喷嘴挤出的长丝与基板或其他材料粘结成形,最终通过逐层粘结形成所需零件。

[0006] 但由于使用传统FDM打印的连续纤维复合材料零件在打印过程中存在孔隙,零件层间的剪切强度较低,导致其机械性能普遍低于常规成型工艺。对此,公开号为CN111633979A的专利公布了一种连续纤维复合材料增材制造Z向增强方法及制造设备;公开号为CN111497225A的专利公布了一种适用于连续纤维增强复合材料的喷头、打印机及打印方法,可以利用温度与喷头的外力提高纤维束内、层与层之间的粘结效果,减少空隙的产生;公开号为CN114683537A的专利公布了一种等离子与熔融沉积技术的碳纳米管/连续纤维增强复合材料制备方法,利用等离子技术将碳纳米管喷涂在连续纤维表面,以提高连续纤维与基体间的粘结强度,从而提升连续纤维增强复合材料产品的力学性能;公开号为CN114248437A的专利公开了一种连续纤维编织体增强纤维复合材料3D打印方法,将纺织行业的编织和针刺工艺与3D打印技术相结合,并且通过对连续纤维编织体进行预处理加强了其与热塑性树脂的结合力,同时Z向针刺使纤维也对层间结合力有增强作用,能够显著提升

复合材料结构的强度；公开号为W02018/157841A1专利公开了一种层间增强的连续纤维复合材料增材制造方法，采用压实机构进行打印层的压实，提高了连续纤维增强复合材料的制造效率和纤维/树脂的界面结合强度，提高了材料纤维体积分数，从而实现了连续纤维增强复合材料的高性能、高效增材制造。

[0007] 然而，上述解决方案都是使用FDM增材制造机器，其龙门架系统的成形平台尺寸是有限的，并沿单一方向进行切片和逐层制造。因此成形尺寸受限制，难以直接成形具有悬臂结构的复杂零件，且成形的零件表面具有典型的阶梯效应。

[0008] 为满足对大尺寸复杂连续纤维增强复合材料零件快速制造的需求，将多自由度工业机器人引入增材制造装备的机器人辅助增材制造技术，可实现多自由度增材制造例如公告号为CN210634127U的实用新型专利。相比于传统增材制造技术，它具有以下优势：

[0009] (1) 可实现多平面方向或曲面保形增材制造。传统的三轴增材制造系统只能沿单一方向逐层制造零件，这导致成形的零件在沿曲面或倾斜平面上具有阶梯效应，需要大量的后处理来提高表面光洁度，并且零件在沿其切片制造方向的强度较低。机器人辅助增材制造技术通过引入额外自由度，可控制材料沉积方向与制造平台方向之间的相对关系，从而根据零件加载条件的要求变更平面逐层制造的方向或沿曲面逐层制造，以避免阶梯效应。

[0010] (2) 可实现超大尺寸增材制造。传统的增材制造装备由于体积有限和安装成本高而不适合成形大尺寸零件的规模应用。多自由度机器人通过多个关节的运动可以充分利用机器人的工作空间来操纵工具，如果将一个多自由度的机器人连接到一个移动基座上，机器人就可以四处移动从而进一步扩展工作空间，并打印更大规模的产品。

[0011] 然而，使用机器人辅助增材制造技术成形连续纤维复合材料的工艺中尚未有能实现零件层间增强的技术方案，制备的连续纤维复合材料机械性能低。

[0012] 综上所述，为了促进CFRTPCs零件未来的发展和应用，亟待开发一种既能提高零件机械性能，又可以扩大成形自由度和工作空间的增材制造新工艺。

## 发明内容

[0013] 针对现有技术的以上缺陷或改进需求，本发明提供了一种连续纤维复材层间增强的机器人辅助激光增材制造系统，其目的在于提高连续纤维复合材料层与层之间的结合性能，同时实现大尺寸复杂零件的高性能增材制造。

[0014] 为实现上述目的，按照本发明的一个方面，提供了一种连续纤维复材层间增强的机器人辅助激光增材制造系统，包括：控制器、机械臂、变位机和打印单元；其中，打印单元包括激光单元、送丝单元和压辊单元；

[0015] 送丝单元连接于所述机械臂末端，用于送出连续纤维复合长丝，并将送出部分限制在压辊单元下方位置；

[0016] 激光单元连接于所述机械臂末端，用于将送出的连续纤维复合长丝通过激光加热至高于树脂玻璃化转变温度且低于其熔点温度的半熔融状态；

[0017] 压辊单元连接于所述机械臂末端，用于产生压力将经激光束加热后尚未凝固的连续纤维复合长丝压平成带状；

[0018] 变位机设置于所述机械臂的下方，其表面刚性连接有打印平台，用于接收机械臂

末端打印单元成形的复合长丝,并最终逐层粘结堆叠成高致密零件;

[0019] 所述控制器,用于控制机械臂各关节的旋转运动、变位机各关节的旋转运动、打印单元的运动速度、激光单元的激光功率和压辊单元产生的压力;机械臂各关节旋转运动的组合能够使机械臂末端打印单元实现六自由度的运动;变位机各关节旋转运动的组合能够使得打印平台实现多自由度的运动;打印单元运动速度的大小和激光功率大小匹配。

[0020] 进一步地,所述系统还包括牺牲磨具;打印单元的路径遵循牺牲磨具的表面轮廓,用于成形复杂曲面零件。

[0021] 进一步地,压辊单元设置有自由旋转的滚轮,在成形的过程中滚轮表面始终平行于打印平台表面、牺牲磨具表面或已成型零件表面。

[0022] 进一步地,所述系统还包括送气管;所述送气管用于提供保护气体到送丝单元附近,当连续纤维复合长丝被激光单元加热时,保护气体抑制其燃烧。

[0023] 进一步地,保护气体为氮气。

[0024] 进一步地,所述系统还包括储丝盘,用于储存连续纤维复合长丝原料。

[0025] 本发明还提供了一种基于上述连续纤维复材层间增强的机器人辅助激光增材制造系统的成形方法,包括:

[0026] S1.将零件三维数字模型自适应的切片成多层,然后按照最佳的填充策略生成每一切片层的打印路径信息并导出制造系统可以读取的文本文件,再传输给机械臂、变位机使其协同运动;

[0027] S2.制造系统通过机械臂带动末端送丝单元和压辊单元在空间上进行移动,同时控制器精准控制打印单元的运动速度、激光单元激光功率和压辊单元产生的压力,利用激光单元产生的激光束加热连续纤维复合长丝使其达到半熔融状态并在压辊单元的作用下被压平成带状;

[0028] S3.随着打印单元的运动,已粘结的复合长丝对还未熔融的丝材产生牵引力,使其从储丝盘中经过送丝单元不断送出,打印平台、牺牲磨具和零件的表面均可用于接收机械臂末端打印单元成形的复合长丝,并最终逐层粘结堆叠成高致密零件。

[0029] 总体而言,通过本发明所构思的以上技术方案与现有技术相比,能够取得下列有益效果。

[0030] 本发明制造系统中压辊单元产生的压力可将经激光束加热后的复合长丝压平成带状,经激光束加热后尚未凝固的热塑性树脂在压辊单元压力作用下可以渗透进层间的孔隙,将连续纤维均匀包裹,提高了复合材料层间结合性能和致密度,使得成形零件受到应力时能通过树脂基体有效地将应力传递给连续纤维,表现出更高的机械性能。

[0031] 本发明制造系统中控制器生成的打印路径信息不需要像传统的FDM打印那样是平面切片的并且在Z方向上堆叠,其路径信息可以形成三维曲面,并且可以在任何方向堆叠;引入的机器人辅助增材制造系统扩大了打印单元的自由度和工作空间,打印单元由机械臂带动和变位机的协同运动而可以在工作空间中的任何位置成形;复合丝材在沉积之前没有被压平,是直径0.2mm~1.0mm的圆柱形,相比带状材料可以很容易成形较高精度的转角,可以成形复杂路径。以上增益效果的共同作用使得成形方法可实现大尺寸复杂零件增材制造。

## 附图说明

[0032] 图1是按照本发明的优选实施例所构建的连续纤维复材层间增强的机器人辅助激光增材制造系统结构示意图；

[0033] 图2是机械臂末端打印单元结构示意图；

[0034] 图3是机器人辅助激光增材制造系统坐标系示意图；

[0035] 图4是连续纤维复材层间增强的机器人辅助激光增材制造系统成形工艺原理示意图。

## 具体实施方式

[0036] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。此外，下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

[0037] 参照图1，一种连续纤维复合6材料层间增强的机器人辅助激光增材制造系统，包括制造系统101和控制器102。

[0038] 所述制造系统101包括机械臂110、变位机120、打印单元130、储丝盘140、系统坐标系。

[0039] 所述机械臂110，优选为六轴或七轴机械臂，进一步优选为六轴机械臂，其末端安装有打印单元130；进一步的，所述机械臂110可以由控制器102传输的控制信号控制各关节的旋转运动，各关节旋转运动的组合可以使机械臂110末端打印单元130参照机械臂基坐标系201通过以下形式以任意速度运动： $\pm X$ 方向、 $\pm Y$ 方向、 $\pm Z$ 方向、绕X轴旋转的 $\pm \theta_x$ 方向、绕Y轴旋转的 $\pm \theta_y$ 方向、绕Z轴旋转的 $\pm \theta_z$ 方向以及以上的任意组合。

[0040] 所述变位机120设置于所述机械臂110的下方，优选为二自由度或三自由度变位机，进一步优选为二自由度变位机，其表面设有打印平台121，机械臂110末端打印单元130在打印平台121或牺牲模具122表面成形零件123；进一步的，所述变位机120可以由控制器102传输的控制信号控制各关节的旋转运动，各关节旋转运动的组合可以使变位机120表面打印平台121和牺牲模具122参照变位机原点坐标系202通过以下形式以任意速度运动：绕Z轴旋转的 $\pm \theta_z$ 方向；绕Y轴旋转的 $\pm \theta_y$ 方向；根据特定应用的需要与机械臂110末端打印单元130的运动速度保持同步或静止并保持在任意角度。

[0041] 所述打印平台121与变位机120上表面刚性连接，其上固定放置牺牲磨具122，打印平台121、牺牲磨具122和零件123的表面均可用于接收机械臂110末端打印单元130成形的复合长丝141，并最终逐层粘结堆叠成高致密零件123；所述打印平台121与变位机120不能有相对运动，优选为铝合金板。

[0042] 参照图2，所述打印单元130包括激光单元131、送丝单元132、压辊单元133。

[0043] 所述激光单元131铰接于所述机械臂110，且其激光发射端相对所述送丝单元132间隙的复合长丝141出料端设置，激光单元131由控制器102调节功率大小，其激光功率与打印单元运动速度精准匹配，用于将复合长丝141通过激光加热至高于树脂玻璃化转变温度且低于其熔点温度的半熔融状态。

[0044] 所述送丝单元132连接于所述机械臂110，可将复合长丝141露出的部分限制在压

辊单元133下方位置。随着打印单元130的运动,已粘结的复合长丝141对还未熔融的丝材产生牵引力,使其从储丝盘140中经过送丝单元132不断送出。

[0045] 所述压辊单元133,连接于所述机械臂110,包括一个可以自由旋转的滚轮,根据打印路径需求,在成形的过程中滚轮表面始终平行于打印平台121表面、牺牲磨具122表面或零件123表面,压辊单元133由控制器102调节压力大小,产生的压力可将经激光束加热后尚未凝固的复合长丝141压平成带状。

[0046] 所述送气管134从气体源提供预定保护气体到送丝单元132附近,所述保护气体可以在局部范围内取代氧气,当复合长丝141被激光单元131加热时,保护气体抑制其燃烧。进一步优选的,所述送气管134中的保护气体是氮气。

[0047] 所述储丝盘140可储存有限长度的复合长丝141原料,所述复合长丝141为连续纤维复合材料丝材,由增强体和基体组成,截面为直径0.2mm~1.0mm的圆形,包括但不限于连续碳纤维浸渍热塑性树脂的圆柱形复合丝料。进一步的,所述复合长丝141中的增强体是连续纤维,其种类可以是玻璃纤维、芳纶纤维、碳纤维、碳纳米管纤维、陶瓷纤维的一种或多种,所述连续纤维的数量规格可以在1K~16K(每根丝材中包含1000~16000根连续碳纤维丝)之间,所述复合长丝141的基体可以是热塑性树脂如PA、PLA、ABS、PET、PETG、PEEK中的一种或多种,也可以是热固性树脂、水泥、金属或陶瓷。

[0048] 参考图3,系统坐标系包括机械臂基坐标系201、变位机原点坐标系202、机械臂末端坐标系203;所述机械臂基坐标系201是制造系统101的参考坐标系,变位机原点坐标系202是根据变位机120各旋转轴线交点确定的坐标系,机械臂末端坐标系203则是根据打印单元130中的压辊单元133末端附近某一点建立的坐标系;在放置机械臂110和变位机120时,所述机械臂基坐标系201的X、Y轴组成的平面须与变位机原点坐标系202的X、Y轴组成的平面平行;在打印开始的初始时刻时,变位机原点坐标系202与机械臂末端坐标系203须确保在设定的初始相对位置;进一步的,在打印开始的初始时刻时,所述机械臂基坐标系201、变位机原点坐标系202、机械臂末端坐标系203的相对位姿关系是已知的,所述牺牲模具122与变位机原点坐标系202的相对位姿是固定和已知的。

[0049] 所述控制器102包括控制制造系统101中的机械臂110、变位机120和机械臂110末端打印单元130中的激光单元131、送丝单元132、压辊单元133所需的硬件和软件,以制造零件123;所述控制器102可以精准控制打印单元130的运动速度、激光单元131激光功率和压辊单元产生的压力;所述控制器101包括计算机辅助设计/计算机辅助制造(CAD/CAM)功能,以完成模型设计、分层切片、路径规划、通讯控制、模拟仿真。进一步的,所述控制器102生成的打印路径信息不需要像传统的FDM打印那样是平面切片的并且在Z方向上堆叠,其路径信息可以形成三维曲面,并且可以在任何方向堆叠。

[0050] 参照图4,一种连续纤维复合材料层间增强的机器人辅助激光增材制造成形方法,步骤如下:

[0051] (1) 控制器102将零件三维数字模型(如STL模型文件)自适应的切片成多层,然后按照最佳的填充策略生成每一切片层的打印路径信息并导出制造系统101可以读取的文本文件,再传输给机械臂110、变位机120使其协同运动;

[0052] (2) 制造系统101通过机械臂110带动末端连续纤维送丝单元132和压辊单元133在空间上进行移动,控制器102精准控制打印单元130的运动速度、激光单元131激光功率和压

辊单元133产生的压力,利用激光单元131产生的激光束加热复合长丝141使其达到半熔融状态并在压辊单元133的作用下被压平成带状。随着打印单元130的运动,已粘结的复合长丝141对还未熔融的丝材产生牵引力,使其从储丝盘140中不断送出,打印平台121、牺牲磨具122和零件123的表面均可用于接收机械臂110末端打印单元130成形的复合长丝141,并最终逐层粘结堆叠成高致密零件123。

[0053] 在该成形方法中,经激光束加热后尚未凝固的热塑性树脂在压辊单元133压力作用下可以渗透进层间的孔隙,将连续纤维均匀包裹,提高了复合材料层间结合性能和致密度,使得成形零件受到应力时能通过树脂基体有效地将应力传递给连续纤维,表现出更高的机械性能;所述控制器生成的打印路径信息不需要像传统的FDM打印那样是平面切片的并且在Z方向上堆叠,其路径信息可以形成三维曲面,并且可以在任何方向堆叠;引入的机器人辅助增材制造系统扩大了打印单元的自由度和工作空间,打印单元130由机械臂110带动和变位机120的协同运动而可以在工作空间中的任何位置成形;所述复合丝材141在沉积之前没有被压平,是直径0.2mm~1.0mm的圆柱形,相比带状材料可以很容易成形较高精度的转角,可以成形复杂路径。以上效果的共同影响使得所述成形方法既可以实现连续纤维复合材料的层间增强,又能实现大尺寸复杂零件的高性能增材制造。

[0054] 本领域的技术人员容易理解,以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

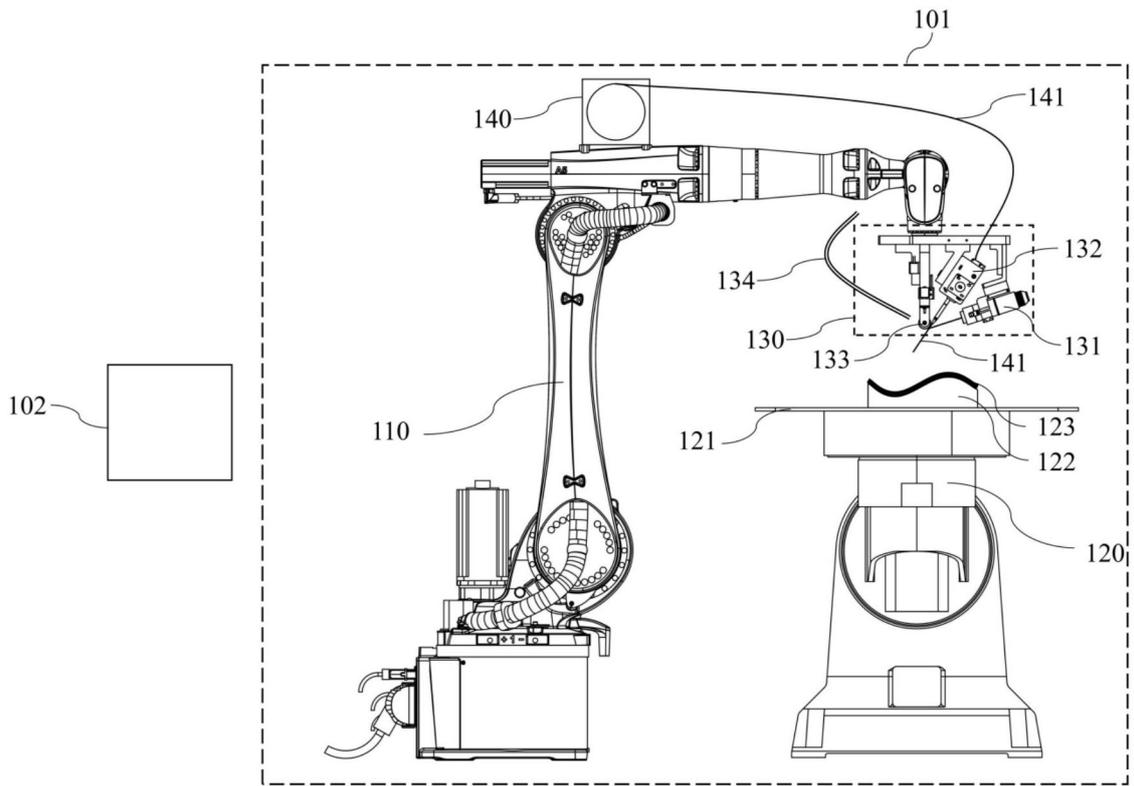


图1

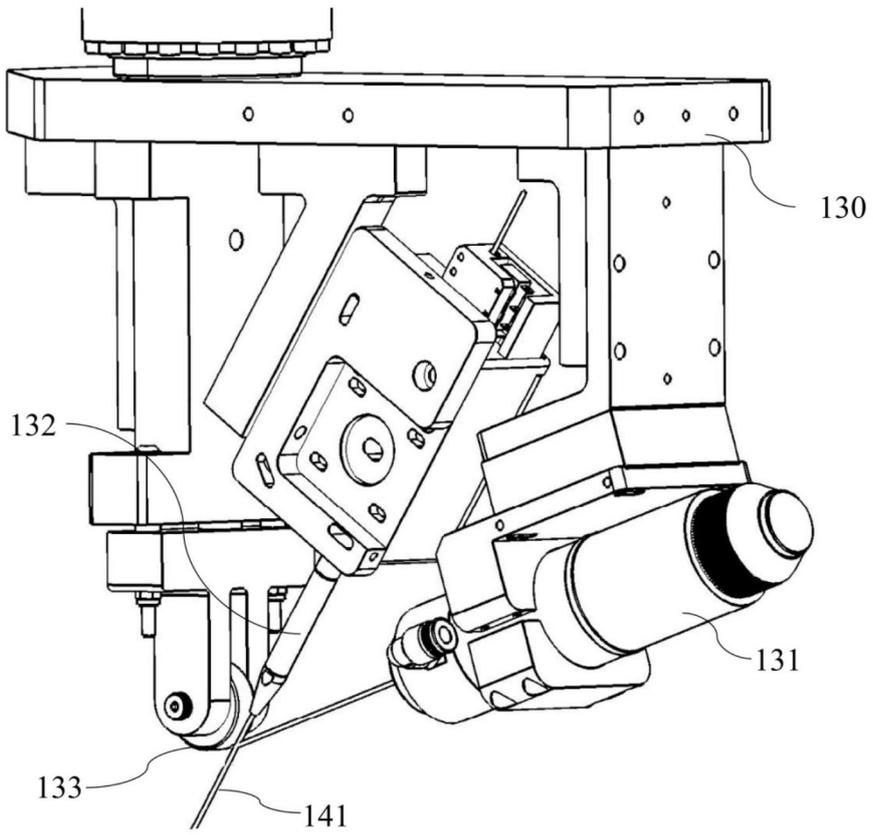


图2

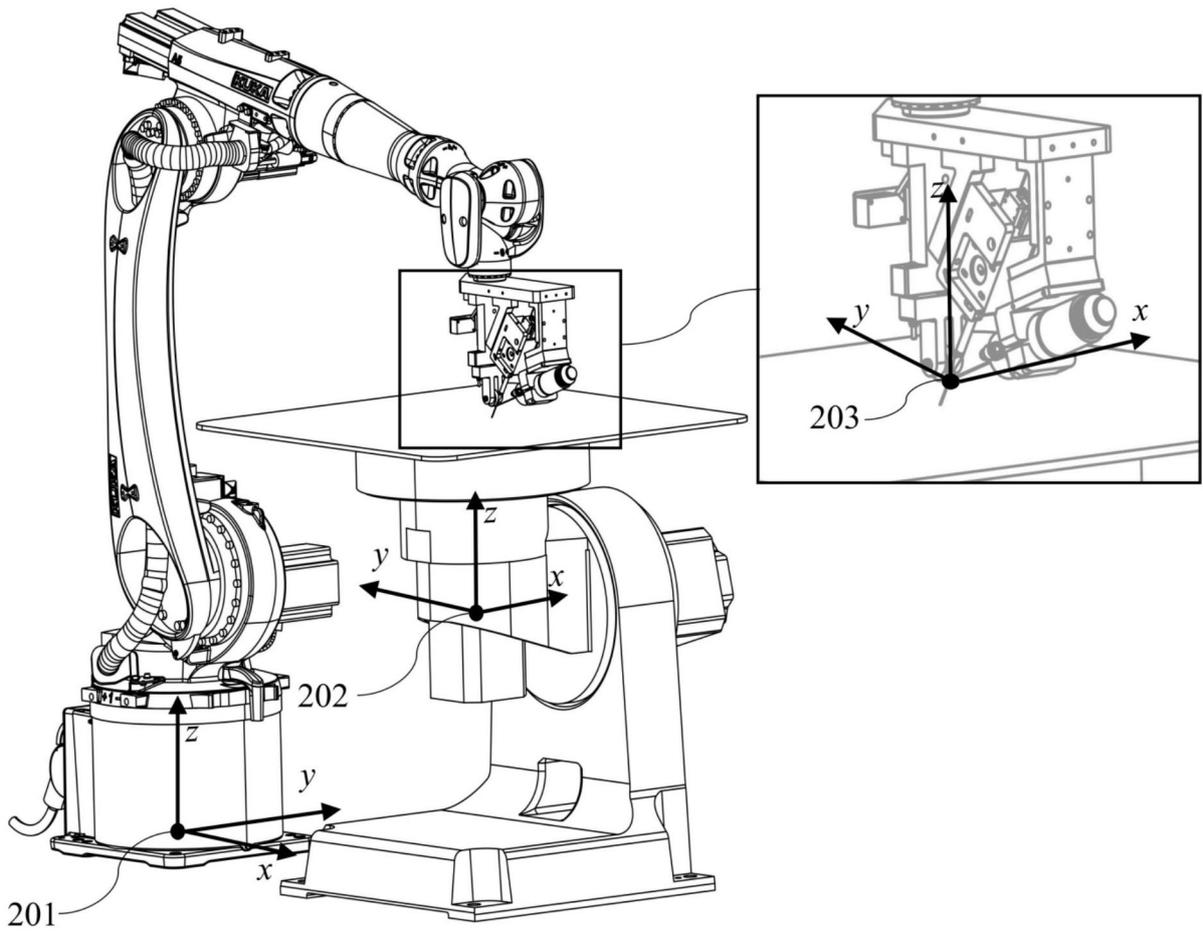


图3

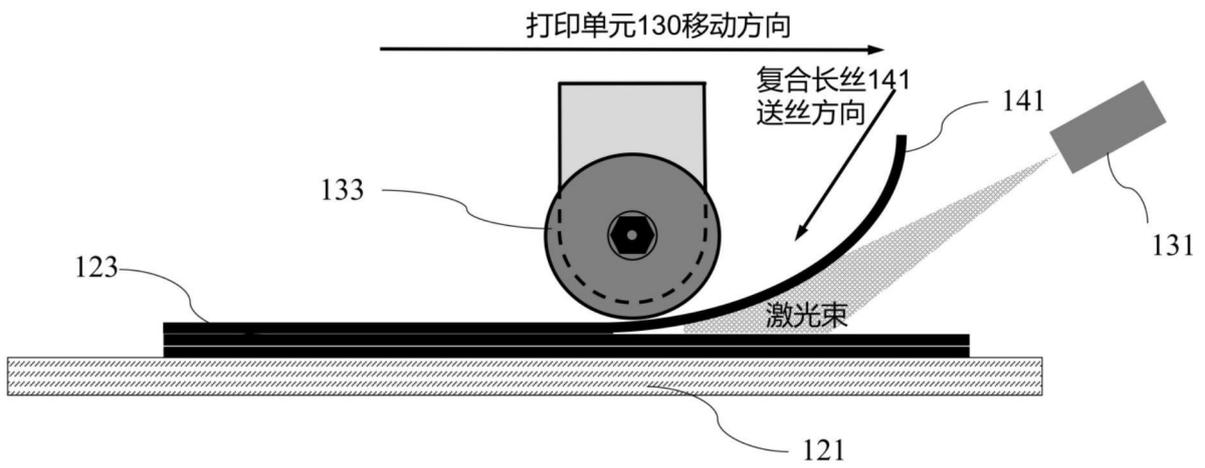


图4