



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110340807 B

(45) 授权公告日 2021.10.26

(21) 申请号 201810300885.5

B24C 9/00 (2006.01)

(22) 申请日 2018.04.04

审查员 程飞霞

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 110340807 A

(43) 申请公布日 2019.10.18

(73) 专利权人 香港理工大学

地址 中国香港九龙红磡理工大学陈鲍雪莹
楼10楼1009室

(72) 发明人 张志辉 王春锦 刘明宇 何丽婷

(74) 专利代理机构 隆天知识产权代理有限公司
72003

代理人 李昕巍 章侃铨

(51) Int. Cl.

B24C 1/08 (2006.01)

B24C 7/00 (2006.01)

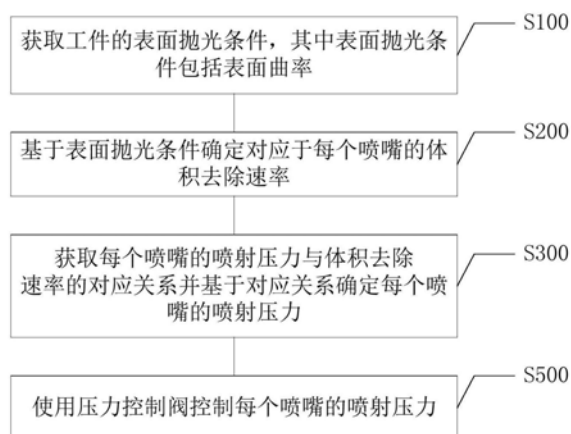
权利要求书2页 说明书11页 附图7页

(54) 发明名称

材料去除方法、控制系统、流体喷射抛光系统及存储介质

(57) 摘要

本发明提出应用于流体喷射抛光系统的材料去除方法、材料去除控制系统、以及具有材料去除控制系统的流体喷射抛光系统。该方法通过获取包括表面曲率的工件的表面抛光条件,确定对应于每个喷嘴的体积去除速率,并通过每个喷嘴的喷射压力与体积去除速率的对应关系确定喷嘴的喷射压力,另外进一步结合喷嘴的停留时间补偿计算的喷射压力。该方法克服传统的流体喷射抛光系统在每个喷射点上无法预测材料去除速率和控制抛光压力的缺陷,能够智能地适应UPFS的形状和强曲率变化并单独定制每个喷嘴的流体的抛光压力设定,以便大幅度增强抛光效率。



1. 一种材料去除方法,应用于流体喷射抛光系统,该流体喷射抛光系统包括多个用于喷射流体的喷嘴以及与所述喷嘴连接的壓力控制閥,其特征在于,所述材料去除方法包括如下步骤:

获取工件的表面拋光条件,其中所述表面拋光条件包括表面曲率;

基于所述表面拋光条件确定对应于每个喷嘴的体积去除速率;

获取每个喷嘴的喷射压力与所述体积去除速率的对应关系并基于所述对应关系确定每个喷嘴的喷射压力;

使用所述壓力控制閥控制每个喷嘴的喷射压力。

2. 根据权利要求1所述的材料去除方法,其特征在于,基于所述表面拋光条件确定对应于每个喷嘴的体积去除速率包括:

基于所述表面拋光条件生成每个喷嘴的射流去除函数;

使用高斯过程机器学习确定每个喷嘴的体积去除速率。

3. 根据权利要求2所述的材料去除方法,其特征在于,使用高斯过程机器学习确定每个喷嘴的体积去除速率进一步包括:

获取测试表面拋光条件下的测量值和体积去除速率的联合分布;

基于所述联合分布使用高斯过程机器学习模型预测新的表面拋光条件下的体积去除速率。

4. 根据权利要求3所述的材料去除方法,其特征在于,使用高斯过程机器学习确定每个喷嘴的体积去除速率还包括:

对预测的体积去除速率进行补偿。

5. 根据权利要求1所述的材料去除方法,其特征在于,获取每个喷嘴的喷射压力与所述体积去除速率的对应关系并基于所述对应关系确定每个喷嘴的喷射压力包括:

获取在不同喷射压力下的每个喷嘴的射流去除函数;

确定标准体积去除速率与在每个喷射压力下的体积去除速率之间的关系因子;

基于所述关系因子和每个喷嘴的体积去除速率确定每个喷嘴的喷射压力。

6. 根据权利要求1所述的材料去除方法,其特征在于,在使用所述壓力控制閥控制每个喷嘴的喷射压力之前,所述材料去除方法还包括:

校正每个喷嘴的喷射压力。

7. 根据权利要求6所述的材料去除方法,其特征在于,校正每个喷嘴的喷射压力进一步包括:

获取均匀拋光的每个喷嘴的喷射压力;

基于每个喷嘴的标准去除函数和工件的初始表面误差确定每个喷嘴的停留时间;

基于所述停留时间计算喷射压力的补偿值;

使用所述补偿值校正每个喷嘴的喷射压力。

8. 一种材料去除控制系统,应用于流体喷射拋光系统,该流体喷射拋光系统包括多个用于喷射流体的喷嘴以及与所述喷嘴连接的壓力控制閥,其特征在于,所述材料去除控制系统包括:

检测单元,设置为获取工件的表面拋光条件,其中所述表面拋光条件包括表面曲率;

控制器,设置为基于所述表面拋光条件确定对应于每个喷嘴的体积去除速率,获取每

个喷嘴的喷射压力与所述体积去除速率的对应关系并基于所述对应关系确定每个喷嘴的喷射压力,以及控制所述压力控制阀以控制每个喷嘴的喷射压力。

9. 根据权利要求8所述的材料去除控制系统,其特征在于,所述控制器还设置为:基于所述表面抛光条件生成每个喷嘴的射流去除函数,以及使用高斯过程机器学习确定每个喷嘴的体积去除速率。

10. 根据权利要求9所述的材料去除控制系统,其特征在于,所述控制器还设置为:获取测试表面抛光条件下的测量值和体积去除速率的联合分布,以及基于所述联合分布使用高斯过程机器学习模型预测新的表面抛光条件下的体积去除速率。

11. 根据权利要求10所述的材料去除控制系统,其特征在于,所述控制器还设置为:对预测的体积去除速率进行补偿。

12. 根据权利要求8所述的材料去除控制系统,其特征在于,所述控制器还设置为:获取在不同流体压力下的每个喷嘴的射流去除函数,确定喷射压力与在所述喷射压力下的所述体积去除速率之间的关系因子,基于所述关系因子和每个喷嘴的体积去除速率确定每个喷嘴的喷射压力。

13. 根据权利要求8所述的材料去除控制系统,其特征在于,所述控制器还设置为:在控制所述压力控制阀以控制每个喷嘴的喷射压力之前,校正每个喷嘴的喷射压力。

14. 根据权利要求13所述的材料去除控制系统,其特征在于,所述控制器还设置为:获取均匀抛光的每个喷嘴的喷射压力,基于每个喷嘴的标准去除函数和工件的初始表面误差确定每个喷嘴的停留时间,基于所述停留时间计算喷射压力的补偿值,以及使用所述补偿值校正每个喷嘴的喷射压力。

15. 一种流体喷射抛光系统,其特征在于,包括:

多个用于喷射流体的喷嘴;

与所述喷嘴连接的壓力控制阀;

控制所述壓力控制阀的壓力控制单元;

与所述喷嘴和所述壓力控制阀连接的流体管道;

连接所述壓力控制阀的流体循环系统;以及

根据权利要求8至14中任一项所述的材料去除控制系统。

16. 一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,该计算机程序包括可执行指令,当该可执行指令被处理器执行时,实施如权利要求1至7中任一项所述的材料去除方法。

17. 一种电子设备,其特征在于,包括:

处理器;以及

存储器,用于存储所述处理器的可执行指令;

其中,所述处理器设置为执行所述可执行指令以实施如权利要求1至7中任一项所述的材料去除方法。

材料去除方法、控制系统、流体喷射抛光系统及存储介质

技术领域

[0001] 本公开涉及机械加工领域,特别地,涉及应用于流体喷射抛光系统的材料去除方法、材料去除控制系统、具有材料去除控制系统的流体喷射抛光系统以及计算机存储介质。

背景技术

[0002] 超精密自由曲面(Ultra-precision freeform surfaces,UPFS)广泛应用于各种领域,如精密模具,光学,光子学,生物医学等行业。虽然UPFS可以通过超精密金刚石加工和超精密磨削来制造,但是在用于金刚石加工的工件材料的选择和磨削工艺的长期处理时间存在限制。抛光也是加工UPFS的常用方法。然而,由于传统机械抛光的工具尺寸的大小,具有强曲率的UPFS不能被抛光。与其他加工工艺相同,工件表面和工具的直接接触导致工具磨损和热量产生,这将导致对工件的表面光洁度和成形精度的不利影响。

[0003] Delft大学在1998年提出流体喷射抛光(fluid jet polishing,FJP)。根据其独特的优势,诸如其高的加工精度,对抛光各种复杂表面(特别是对于陡峭的凹面非球面)的适用性,相比其他抛光方法,FJP是用于加工UPFS的方法中最有前景的抛光方法之一。然而,FJP的低抛光效率对其在抛光大尺寸部件或由难以加工的材料制成的部件的应用中产生不利影响。此外,在流体喷射的校正抛光中存在迎合在自由曲面不同位置处的材料去除率的变化另一挑战。另外,对于加工UPFS过程中对UPFS形状的误差补偿缺乏相关的解决方案。

[0004] 因此,存在对FJP进行改进以提高抛光效率,特别是UPFS的抛光效率的需求。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于提出一种适用于曲率自适应多射流抛光(Curvature-adaptive Multi-jet Polishing,CAMJP)系统的压力相关曲率自适应(pressure-dependent curvature-adaptive,PDCA)的材料去除控制系统。通过使用该统,每个射流的喷射压力将被独立控制,以智能定制每个喷嘴的单独抛光压力设定,根据UPFS的曲率变化来控制材料去除,解决传统的FJP系统在每个喷射点上无法预测材料去除速率和控制抛光压力、仅能针对某些工件特定设计、稳定性不高并且存在机器震动,并且耗费时间并且成本大的缺陷。

[0006] 根据本发明的一方面,提出一种材料去除方法,应用于流体喷射抛光系统,该流体喷射抛光系统包括多个用于喷射流体的喷嘴以及与所述喷嘴连接的壓力控制閥,其特征在於,所述材料去除方法包括如下步骤:

[0007] 获取工件的表面抛光条件,其中所述表面抛光条件包括表面曲率;

[0008] 基于所述表面抛光条件确定对应于每个喷嘴的体积去除速率;

[0009] 获取每个喷嘴的喷射压力与所述体积去除速率的对应关系并基于所述对应关系确定每个喷嘴的喷射压力;

[0010] 使用所述压力控制阀控制每个喷嘴的喷射压力。

[0011] 根据本发明的实施例,基于所述表面抛光参数确定对应于每个喷嘴的体积去除速率包括:基于所述表面抛光条件生成每个喷嘴的射流去除函数(Tool influence

function,TIF);使用高斯过程机器学习确定每个喷嘴的体积去除速率。

[0012] 根据本发明的实施例,使用高斯过程机器学习确定每个喷嘴的体积去除速率进一步包括:获取测试表面抛光条件下的测量值和体积去除速率的联合分布;基于所述联合分布使用高斯过程机器学习模型预测新的表面抛光条件下的体积去除速率。

[0013] 根据本发明的实施例,使用高斯过程机器学习确定每个喷嘴的体积去除速率还包括:对预测的体积去除速率进行补偿。

[0014] 根据本发明的实施例,获取每个喷嘴的喷射压力与所述体积去除速率的对应关系并基于所述对应关系确定每个喷嘴的喷射压力包括:获取在不同喷射压力下的每个喷嘴的射流去除函数;确定标准体积去除速率与在每个喷射压力下的体积去除速率之间的关系因子;基于所述关系因子和每个喷嘴的体积去除速率确定每个喷嘴的喷射压力。

[0015] 根据本发明的实施例,在使用所述压力控制阀控制每个喷嘴的喷射压力之前,所述材料去除方法还包括:校正每个喷嘴的喷射压力。

[0016] 根据本发明的实施例,校正每个喷嘴的喷射压力进一步包括:获取均匀抛光的每个喷嘴的喷射压力;基于每个喷嘴的标准去除函数和工件的初始表面误差确定每个喷嘴的停留时间;基于所述停留时间计算喷射压力的补偿值;使用所述补偿值校正每个喷嘴的喷射压力。

[0017] 根据本发明的实施例,所述材料去除方法还包括:验证所述工件的表面抛光结果。

[0018] 根据本发明的另一方面,提出一种材料去除控制系统,应用于流体喷射抛光系统,该流体喷射抛光系统包括多个用于喷射流体的喷嘴以及与所述喷嘴连接的压力控制阀,所述材料去除控制系统包括:

[0019] 检测单元,设置为获取工件的表面抛光条件,其中所述表面抛光条件包括表面曲率;

[0020] 控制器,设置为基于所述表面抛光条件确定对应于每个喷嘴的体积去除速率,获取每个喷嘴的喷射压力与所述体积去除速率的对应关系并基于所述对应关系确定每个喷嘴的喷射压力,以及控制所述压力控制阀以控制每个喷嘴的喷射压力。

[0021] 根据本发明的实施例,所述控制器还设置为:基于所述表面抛光条件生成每个喷嘴的射流去除函数,以及使用高斯过程机器学习确定每个喷嘴的体积去除速率。

[0022] 根据本发明的实施例,所述控制器还设置为:获取测试表面抛光条件下的测量值和体积去除速率的联合分布,以及基于所述联合分布使用高斯过程机器学习模型预测新的表面抛光条件下的体积去除速率。

[0023] 根据本发明的实施例,所述控制器还设置为:对预测的体积去除速率进行补偿。

[0024] 根据本发明的实施例,所述控制器还设置为:获取在不同流体压力下的每个喷嘴的射流去除函数,确定喷射压力与在所述喷射压力下的所述体积去除速率之间的关系因子,基于所述关系因子和每个喷嘴的体积去除速率确定每个喷嘴的喷射压力。

[0025] 根据本发明的实施例,所述控制器还设置为:在控制所述压力控制阀以控制每个喷嘴的喷射压力之前,校正每个喷嘴的喷射压力。

[0026] 根据本发明的实施例,所述控制器还设置为:获取均匀抛光的每个喷嘴的喷射压力,基于每个喷嘴的标准去除函数和工件的初始表面误差确定每个喷嘴的停留时间,基于所述停留时间计算喷射压力的补偿值,以及使用所述补偿值校正每个喷嘴的喷射压力。

- [0027] 根据本发明的实施例,所述控制器还设置为验证所述工件的表面抛光结果。
- [0028] 根据本发明的又一方面,提出一种流体喷射抛光系统,包括:
- [0029] 多个用于喷射流体的喷嘴;
- [0030] 与所述喷嘴连接的壓力控制閥;
- [0031] 控制所述壓力控制閥的壓力控制单元;
- [0032] 与所述喷嘴和所述壓力控制閥连接的流体管道;
- [0033] 连接所述壓力控制閥的流体循环系统;以及
- [0034] 如上所述的材料去除控制系统。
- [0035] 根据本发明的再一方面,提出一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,该计算机程序包括可执行指令,当该可执行指令被处理器执行时,实施如上所述的材料去除方法。
- [0036] 根据本发明的再一方面,提出一种电子设备,包括:处理器;以及存储器,用于存储所述处理器的可执行指令;其中,所述处理器设置为执行所述可执行指令以实施如上所述的材料去除方法。
- [0037] 根据本发明的材料去除方法、材料去除控制系统、具有该材料去除控制系统的多射流抛光系统,对于工件的表面曲率,自适应地通过高斯过程机器学习预测喷嘴的体积去除速率,并结合喷嘴的喷射压力与体积去除速率的对应关系确定每个喷嘴的喷射压力,另外进一步结合喷嘴的停留时间补偿上述计算的喷射压力。由此,配备PDCA材料去除系统的CAMJP系统能够智能地适应UPFS的形状和强曲率变化并单独定制每个喷嘴的流体的抛光压力设定,以便大幅度增强抛光效率,利用抛光机的均匀运动而不是突然增加或减少工件的给进速度实现均匀抛光或校正抛光,增加误差补偿的形状精度,并且使得抛光过程可预测。

附图说明

- [0038] 通过参照附图详细描述其示例性实施例,本公开的上述和其它特征及优点将变得更加明显。
- [0039] 图1示出根据本发明实施例的曲率自适应多射流抛光(CAMJP)系统;
- [0040] 图2示出根据本发明实施例的材料去除方法的流程图;
- [0041] 图3示出根据本发明实施例的采用高斯过程(Gauss process,GP)机器学习方法进行体积去除速率(volume removal rate,VRR)预测模型参数确定的示意图;
- [0042] 图4示出根据本发明实施例的确定VRR的示例性步骤;
- [0043] 图5示出根据本发明实施例的预测新的表面抛光条件下的VRR的示例性步骤;
- [0044] 图6示出根据本发明另一实施例的确定VRR的示例性步骤;
- [0045] 图7示出根据本发明实施例的获取每个喷嘴的喷射压力与体积去除速率的对应关系的示意图;
- [0046] 图8示出根据本发明实施例的确定每个喷嘴的喷射压力分布矩阵的示意图;
- [0047] 图9示出根据本发明实施例的确定每个喷嘴的喷射压力的示例性步骤;
- [0048] 图10示出根据本发明另一实施例的材料去除方法的流程图;
- [0049] 图11示出根据本发明另一实施例的材料去除方法中校正每个喷嘴的喷射压力的流程图;

- [0050] 图12示出根据本发明实施例的表面生成过程的示意图；
- [0051] 图13示出根据本发明又一实施例的材料去除方法的流程图；
- [0052] 图14示出根据本发明实施例的材料去除系统的示意性结构图；
- [0053] 图15示出根据本发明实施例的具有材料去除系统的CAMJP系统给的示意性结构图；以及
- [0054] 图16示出根据本发明实施例的一种电子设备的示意框图。

具体实施方式

[0055] 现在将参考附图更全面地描述示例性实施例。然而，示例性实施例能够以多种形式实施，且不应被理解为限于在此阐述的实施方式；相反，提供这些实施方式使得本公开将全面和完整，并将示例性实施例的构思全面地传达给本领域的技术人员。在图中，为了清晰，可能会夸大部分元件的尺寸或加以变形。在图中相同的附图标记表示相同或类似的结构，因而将省略它们的详细描述。

[0056] 此外，所描述的特征、结构或特性可以以任何合适的方式结合在一个或更多实施例中。在下面的描述中，提供许多具体细节从而给出对本公开的实施例的充分理解。然而，本领域技术人员将意识到，可以实践本公开的技术方案而没有所述特定细节中的一个或更多，或者可以采用其它的方法、元件等。在其它情况下，不详细示出或描述公知结构、方法或者操作以避免模糊本公开的各方面。

[0057] 当采用传统的流体喷射抛光(FJP)系统的多喷嘴工具对自由曲面进行抛光时，不同位置处各流体射流的材料去除率不同。因此FJP系统难以调整在多射流喷嘴上的每个射流的冲击角度，以适应自由曲面上的变化表面曲率。

[0058] 图1示出根据本发明实施例的曲率自适应多射流抛光(CAMJP)系统100。该系统包括多个喷嘴103，与多个喷嘴103对应并连接的多个流体管道104，与多个喷嘴103对应并经由对应流体管道104与喷嘴103连接的多个压力控制阀105，用于存储并处理喷射流体的流体循环系统106，控制压力控制阀105的压力控制单元107和控制器108。多个喷嘴103分别将诸如抛光浆液的喷射流体102喷射到工件101的表面。控制器108例如但不限于采用计算机、服务器、单片机、处理器等的形式，不仅控制压力控制阀105以调节在喷嘴103喷出的射流的实时喷射压力，还控制抛光系统100的实时移动。

[0059] 在本发明的实施例中，使用PDCA材料去除方法和材料去除控制系统的CAMJP系统在均匀抛光和修正抛光过程中均采用恒定的进给速度，并通过控制每个喷嘴的喷射压力来控制工件表面，特别是UPFS的高曲率表面的材料去除速率。由于采用了压力相关曲率自适应(PDCA)的材料去除控制方法和系统的CAMJP系统无需频繁改变抛光工具的进给速度，这将避免在传统修正抛光方法中由机器电机的加速和减速极限引起的在停留时间与进给速度之间的平移误差。

[0060] 下面将详细介绍本发明的PDCA材料去除方法和材料去除系统。

[0061] 图2示出根据本发明实施例的材料去除方法，该方法应用于CAMJP系统，包括如下步骤：

[0062] S100: 获取工件的表面抛光条件，其中表面抛光条件包括表面曲率；

[0063] S200: 基于所表面抛光条件确定对应于每个喷嘴的体积去除速率；

[0064] S300:获取每个喷嘴的喷射压力与体积去除速率的对应关系并基于该对应关系确定每个喷嘴的喷射压力;

[0065] S500:使用所压力控制阀控制每个喷嘴的喷射压力。

[0066] 本发明实施例的材料去除方法首先获取工件的表面抛光条件。抛光条件包括但不限于工件的表面曲率半径,冲击角度,流体压力,远离距离等,但是对于工件的表面曲率,特别是UPFS工件,其强变化表面曲率是最重要的抛光条件之一。

[0067] 步骤S200涉及基于高斯过程的用于抛光自由曲面的材料去除率的表征。

[0068] 在多射流抛光系统中,在抛光过程期间多喷射工具的冲击角度不变。因此,在抛光自由曲面时,每个喷射的体积去除速率VRR是不同的。在相同抛光条件下的VRR不是恒定的并且总是伴随着波动。

[0069] 因此需要建立VRR预测模型以预测在不同抛光条件下在工件的自由曲面上的各个喷嘴的喷射流体的VRR。即使VRR预测模型在初始阶段中建立,VRR预测模型中的系数仍需要精确确定。因此,为了精确确定不同抛光条件下自由曲面上各个喷嘴的喷射流体的VRR,采用高斯过程机器学习方法。

[0070] 图3则示出采用高斯过程机器学习方法进行VRR预测模型参数确定的示意图。在VRR预测模型建立之后,首先,在框301中大量生成在不同抛光条件下的单个射流去除函数作为机器学习的训练数据集,其中该抛光条件包括表面曲率半径,冲击角度,流体压力,远离距离等。然后通过框302中的高斯过程机器学习基于301中的单个射流去除函数的训练数据集计算VRR预测模型的参数。最后,框303中可在具体的抛光条件下建立VRR数据库。

[0071] 下面将详细描述采用高斯过程机器学习进行VRR预测模型建模和参数确定的过程。

[0072] 在高斯过程机器学习方法中,诸如压力,冲击角度和抛光浆料的尺寸等的抛光参数被认为具有高斯分布。因此,抛光过程被认为是高斯过程。作为过程输出的体积去除速率也是具有高斯分布的噪声。高斯过程机器学习将用于对在不同加工参数下的体积去除速率进行VRR预测模型的建模。作为输入参数的函数的体积去除速率被确定为:

$$[0073] \quad y = f(x) + \varepsilon \quad (1)$$

[0074] 其中, x 是用于训练的 $D \times n$ 阶矩阵输入, D 是输入数据的维数,意味着输入参数的类型数量, n 是数据集的数量。 ε 是体积去除速率的噪声并且被确定为具有零均值和方差 σ 的高斯分布:

$$[0075] \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma_n^2) \quad (2)$$

[0076] 由于真值 $f(x)$ 未知,因此使用高斯过程对该真值及其相关值进行最佳估计。高斯过程GP由平均函数和协方差函数定义:

$$[0077] \quad f(x) = GP(m(x), k(x, x')) \quad (3)$$

[0078] 其中, $m(x)$ 为均值函数, $k(x, x')$ 为协方差函数,并且它们分别通过如下的方式确定:

$$[0079] \quad m(x) = E[f(x)] \quad (4)$$

$$[0080] \quad k(x, x') = E[(f(x) - m(x))(f(x') - m(x')))] \quad (5)$$

[0081] 其中, E 为期望值。

[0082] 在图3的框301中生成的不同抛光条件下的单个射流去除函数,作为在该抛光条件

的测试参数下的测量值和函数值,输入到高斯过程机器学习模型,可以通过在测试参数下的测量值和函数值的联合分布得到针对新参数值 X_* 的任何预测 f_* :

$$[0083] \quad \begin{bmatrix} z \\ f_* \end{bmatrix} = N \left(0, \begin{bmatrix} k(X, X) + \sigma_n^2 I & k(X, X_*) \\ k(X_*, X) & k(X_*, X_*) \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

[0084] 其中 I 为单位矩阵, z 为测量值。

[0085] 则基于输入 X ,预测输入为 X_* 时的函数值的高斯过程回归的预测方程为:

$$[0086] \quad f_* | X, z, X_* \sim N(0, \bar{f}_*, cov(f_*)) \quad (7)$$

[0087] 其中,

$$[0088] \quad \bar{f}_* = E[f_* | X, z, X_*] = K(X_*, X)[K(X, X) + \sigma_n^2 I]^{-1} z \quad (8)$$

$$[0089] \quad cov(f_*) = K(X_*, X_*) - K(X_*, X)[K(X, X) + \sigma_n^2 I]^{-1} K(X, X_*) \quad (9)$$

[0090] 由此,可以通过高斯过程机器学习,预测与工件在任何新的表面抛光条件下的喷嘴体积去除速率VRR。

[0091] 因此,根据本发明实施例,图2中所示的步骤S200,进一步包括如图4所示的如下步骤:

[0092] S210:基于表面抛光条件生成每个喷嘴的射流去除函数;

[0093] S220:使用高斯过程机器学习确定每个喷嘴的体积去除速率。

[0094] 而根据本发明的实施例,图4中的步骤S220则进一步包括如图5所示的步骤:

[0095] S221:获取测试表面抛光条件下的测量值和体积去除速率的联合分布;

[0096] S222:基于该联合分布使用高斯过程机器学习模型预测新的表面抛光条件下的体积去除速率。

[0097] 由于系统可能存在系统误差,因此体积去除速率的预测值可能与计算值不同。在这种情况下,系统误差也将在系统中通过使用输入加工参数的误差图(error map)进行补偿。借助基于高斯过程机器学习的建模方法,真实的体积去除速率将被准确地估计并用于系统中以更好地进行UPFS形状的校正抛光。可确定在不同表面抛光条件下的自由曲面上的单个喷射流体的VRR并建立VRR数据库。

[0098] 由此,根据本发明的实施例,图4所示的步骤S220进一步包括图6所示的步骤:

[0099] S223:对预测的体积去除速率进行补偿。

[0100] 此外,还将建立在VRR和喷嘴的喷射流体的喷射压力之间的关系,并且将产生自由曲面上在喷射压力和VRR之间的关系的数据库。图7示出了如何获取每个喷嘴的喷射压力与体积去除速率的对应关系,包括:

[0101] S701:大量生成在不同喷射压力(0-20bar)下的单个射流去除函数;

[0102] S702:建立在标准VRR₀与每个喷射压力下的VRR之间的关系因子 C_{p-v} 的数据库。

[0103] 根据标准VRR₀与预测的VRR之间的关系因子,可以通过标准VRR₀所对应的喷射压力计算得出与预测的VRR对应的喷嘴的喷射压力。因此关系因子 C_{p-v} 的数据库可以确定自由曲面上的喷射压力与VRR之间的对应关系的数据库。进一步,通过结合自由曲面的VRR分布模型和压力分布矩阵 P ,可以得到喷嘴的喷射流体的喷射压力分布矩阵 P_{ij} 。

[0104] 结合上述采用高斯过程机器学习方法进行VRR预测模型参数确定的VRR数据库,以

及在标准VRR₀与每个喷射压力下的VRR之间的关系因子C_{p-v}的数据库,可以得到所预测的VRR的喷射压力分布矩阵P_{ij},其完整流程如图8所示。

[0105] 因此,根据本发明实施例的PDCA材料去除方法中,步骤S300进一步包括图9中所示的如下步骤:

[0106] S310:获取在不同喷射压力下的每个喷嘴的射流去除函数;

[0107] S320:确定标准体积去除速率与在每个喷射压力下的体积去除速率之间的关系因子;

[0108] S330:基于关系因子和每个喷嘴的体积去除速率确定每个喷嘴的喷射压力。

[0109] 采用PDCA材料去除方法进行工件的自由曲面的多射流抛光后,还需要对抛光的工件表面进行校正和补偿抛光。

[0110] 对于给定的自由曲面形式矩阵H₀(x,y),在多射流抛光(Multi-jetPolishing, MJP)喷嘴上的流体射流J_{ij}的停留点矩阵将被规划为D_{ij}(x,y)。根据去除函数数据库,MJP喷嘴上的流体射流J_{ij}的喷射压力分布矩阵将被确定为P_{ij}(x,y)。在校正抛光的情况下,将通过补偿流体喷射压力来控制每个射流的所有去除函数以在自由曲面的特定位置具有相同的材料去除速率VRR。均匀抛光的喷射压力分布矩阵P_{0ij}(x,y)也应首先确定,然后基于标准去除函数和初始表面误差矩阵E(x,y)确定流体射流J_{ij}在自由曲面上的停留时间。根据停留时间的结果,可以得到流体射流J_{ij}在自由曲面上的材料去除速率VRR分布。然后,将结合材料去除速率VRR分布以及喷射压力与材料去除速率VRR的关系来确定额外的补偿矩阵C_{ij}(x,y)。用于校正抛光的最终喷射压力分布矩阵P_{ij}表示为:

[0111]
$$P_{ij}(x,y) = C_{ij}(x,y) \cdot P_{0ij}(x,y) \quad (10)$$

[0112] 通过上述所确定的MJP喷嘴上的每个射流的最终喷射压力分布信息将被输送到压力控制单元以控制抛光过程的压力控制阀操作。抛光后,将测量工件的自由表面,以检查表面形状精度是否符合规格。如果符合,则抛光过程完成。如果不符合,则重复进行喷射压力分布计算过程以进行进一步的补偿抛光。

[0113] 因此,根据本发明的实施例的PDCA材料去除方法在步骤S500之前,还包括如图10所示的步骤:

[0114] S400:校正每个喷嘴的喷射压力。

[0115] 根据进一步实施例,步骤S400还包括如图11所示的如下步骤:

[0116] S410:获取均匀抛光的每个喷嘴的喷射压力;

[0117] S420:基于每个喷嘴的标准去除函数和工件的初始表面误差确定每个喷嘴的停留时间;

[0118] S430:基于停留时间计算喷射压力的补偿值;

[0119] S440:使用补偿值校正每个喷嘴的喷射压力。

[0120] 下文将介绍经过本发明的PDCA材料去除方法进行多射流抛光的工件自由曲面的表面生成特征。

[0121] 自由曲面的表面生成过程可能受到工具影响函数,抛光策略和表面形状的影响。去除函数影响因素也会影响自由曲面的表面生成。其中,抛光策略主要包括抛光路径及其相关参数。抛光路径可以是栅格路径,螺旋路径和其他一些随机路径。在表面生成过程中,MJP过程中的材料去除矩阵H_R(x,y)将由在工件去除函数R(x,y)和停留时间分布矩阵T(x,

y) 之间的二维卷积确定:

$$[0122] \quad H_R(x, y) = R(x, y) * T(x, y) \quad (11)$$

[0123] 因此, 抛光生成的工件表面矩阵 $H_F(x, y)$ 可以表示为:

$$[0124] \quad H_F(x, y) = H_0(x, y) - H_R(x, y) \quad (12)$$

[0125] 其中 $H_0(x, y)$ 为初始工件表面矩阵。

[0126] 基于VRR预测过程和方程(12)中建立的去除函数模型, 可以表征工件的表面生成。图12则示出采用5喷射影响功能的表面生成过程, 其中, 将工件去除函数1201与包含停留时间信息的工具路径1202进行二维卷积1203, 获得材料去除矩阵, 并通过初始工件表面矩阵与材料去除矩阵的差计算抛光生成的工件表面矩阵表征的表面形状1204。

[0127] 此外, 抛光过程将在执行过程之前针对不同的目的进行优化。因此, 在平面和自由曲面上采用不同MJP工具的表面生成将与实验验证一起进行表征。

[0128] 由上可知, 根据本发明的实施例, PDCA材料去除方法还包括如图13所示的步骤:

[0129] S600: 验证工件的表面抛光结果。

[0130] 根据本发明实施例的材料去除方法, 对于工件的表面曲率, 自适应地通过高斯过程机器学习预测喷嘴的体积去除速率, 并结合喷嘴的喷射压力与体积去除速率的对应关系确定每个喷嘴的喷射压力, 另外进一步结合喷嘴的停留时间补偿上述计算的喷射压力。由此, 配备PDCA材料去除系统的CAMJP系统能够智能地适应UPFS的形状和强曲率变化并单独定制每个喷嘴的流体的抛光压力设定, 以便大幅度增强抛光效率, 利用抛光机的均匀运动而不是突然增加或减少工件的给进速度实现均匀抛光或校正抛光, 增加误差补偿的形状精度, 并且使得抛光过程可预测。

[0131] 参照图14, 根据本发明的实施例, 应用于CAMJP系统的PDCA材料去除控制系统包括检测单元1401和控制器1402。

[0132] 其中, 检测单元1401设置为获取工件的表面抛光条件, 其中表面抛光条件包括表面曲率。控制器1402则设置为基于表面抛光条件确定对应于每个喷嘴的体积去除速率, 获取每个喷嘴的喷射压力与体积去除速率的对应关系并基于对应关系确定每个喷嘴的喷射压力, 以及控制压力控制阀以控制每个喷嘴的喷射压力。

[0133] 根据进一步实施例, 控制器1402还设置为基于表面抛光条件生成每个喷嘴的射流去除函数, 以及使用高斯过程机器学习确定每个喷嘴的体积去除速率。

[0134] 根据进一步实施例, 控制器1402还设置为获取测试表面抛光条件下的测量值和体积去除速率的联合分布, 以及基于联合分布使用高斯过程机器学习模型预测新的表面抛光条件下的体积去除速率。

[0135] 再根据进一步实施例, 控制器1402还设置为获取在不同流体压力下的每个喷嘴的射流去除函数, 确定喷射压力与在该喷射压力下的体积去除速率之间的关系因子, 基于该关系因子和每个喷嘴的体积去除速率确定每个喷嘴的喷射压力。

[0136] 再根据本发明的进一步实施例, 控制器1402还设置为基于喷嘴的停留时间补偿每个喷嘴的喷射压力。

[0137] 根据本发明的材料去除控制系统, 对于工件的表面曲率, 自适应地通过高斯过程机器学习预测喷嘴的体积去除速率, 并结合喷嘴的喷射压力与体积去除速率的对应关系确定每个喷嘴的喷射压力, 另外进一步结合喷嘴的停留时间补偿上述计算的喷射压力。由此,

配备PDCA材料去除系统的CAMJP系统能够智能地适应UPFS的形状和强曲率变化并单独定制每个喷嘴的流体的抛光压力设定,以便大幅度增强抛光效率,利用抛光机的均匀运动而不是突然增加或减少工件的给进速度实现均匀抛光或校正抛光,增加误差补偿的形状精度,并且使得抛光过程可预测。

[0138] 图15示出根据本发明实施例的包括PDCA材料去除控制系统的CAMJP系统。

[0139] 该CAMJP系统包括多个用于喷射流体的喷嘴1501,与喷嘴1501连接的压力控制阀1503,与喷嘴1501和压力控制阀1503连接的流体管道1502,控制压力控制阀1503的压力控制单元1505,以及连接压力控制阀1503的流体循环系统。与图14中所示类似的PDCA材料去除控制系统1400通过检测单元1401获取工件的表面抛光条件,并通过控制器1402控制压力控制阀1503以调节喷嘴1501的喷射流体的喷射压力。

[0140] 根据本发明的具有材料去除控制系统的多射流抛光系统,对于工件的表面曲率,自适应地通过高斯过程机器学习预测喷嘴的体积去除速率,并结合喷嘴的喷射压力与体积去除速率的对应关系确定每个喷嘴的喷射压力,另外进一步结合喷嘴的停留时间补偿上述计算的喷射压力。由此,配备PDCA材料去除系统的CAMJP系统能够智能地适应UPFS的形状和强曲率变化并单独定制每个喷嘴的流体的抛光压力设定,以便大幅度增强抛光效率,利用抛光机的均匀运动而不是突然增加或减少工件的给进速度实现均匀抛光或校正抛光,增加误差补偿的形状精度,并且使得抛光过程可预测。

[0141] 应当注意,尽管在上文详细描述中提及了材料去除系统的若干模块或者单元,但是这种划分并非强制性的。实际上,根据本发明的实施方式,上文描述的两个或更多模块或者单元的特征和功能可以在一个模块或者单元中具体化。反之,上文描述的一个模块或者单元的特征和功能可以进一步划分为由多个模块或者单元来具体化。作为模块或单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元,即可以位于一个地方,或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部模块来实现本发明方案的目的。本领域普通技术人员在不付出创造性劳动的情况下,即可以理解并实施。

[0142] 在本发明的示例性实施例中,还提供了一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,该程序包括可执行指令,该可执行指令被例如处理器执行时可以实现上述任意一个实施例中所述材料去除方法的步骤。在一些可能的实施方式中,本发明的各个方面还可以实现为一种程序产品的形式,其包括程序代码,当所述程序产品在终端设备上运行时,所述程序代码用于使所述终端设备执行本说明书材料去除方法中描述的根据本发明各种示例性实施例的步骤。

[0143] 根据本发明的实施例的用于实现上述方法的程序产品可以采用便携式紧凑盘只读存储器(CD-ROM)并包括程序代码,并可以在终端设备,例如个人电脑上运行。然而,本发明的程序产品不限于此,在本文件中,可读存储介质可以是任何包含或存储程序的有形介质,该程序可以被指令执行系统、装置或者器件使用或者与其结合使用。

[0144] 所述程序产品可以采用一个或多个可读介质的任意组合。可读介质可以是可读信号介质或者可读存储介质。可读存储介质例如可以为但不限于电、磁、光、电磁、红外线、或半导体的系统、装置或器件,或者任意以上的组合。可读存储介质的更具体的例子(非穷举的列表)包括:具有一个或多个导线的电连接、便携式盘、硬盘、随机存取存储器(RAM)、只读存储器(ROM)、可擦式可编程只读存储器(EPROM或闪存)、光纤、便携式紧凑盘只读存储器

(CD-ROM)、光存储器件、磁存储器件、或者上述的任意合适的组合。

[0145] 所述计算机可读存储介质可以包括在基带中或者作为载波一部分传播的数据信号,其中承载了可读程序代码。这种传播的数据信号可以采用多种形式,包括但不限于电磁信号、光信号或上述的任意合适的组合。可读存储介质还可以是可读存储介质以外的任何可读介质,该可读介质可以发送、传播或者传输用于由指令执行系统、装置或者器件使用或者与其结合使用的程序。可读存储介质上包含的程序代码可以用任何适当的介质传输,包括但不限于无线、有线、光缆、RF等等,或者上述的任意合适的组合。

[0146] 可以以一种或多种程序设计语言的任意组合来编写用于执行本公开操作的程序代码,所述程序设计语言包括面向对象的程序设计语言—诸如Java、C++等,还包括常规的过程式程序设计语言—诸如“C”语言或类似的设计语言。程序代码可以完全地在用户计算设备上执行、部分地在用户设备上执行、作为一个独立的软件包执行、部分在用户计算设备上部分在远程计算设备上执行、或者完全在远程计算设备或服务器上执行。在涉及远程计算设备的情形中,远程计算设备可以通过任意种类的网络,包括局域网(LAN)或广域网(WAN),连接到用户计算设备,或者,可以连接到外部计算设备(例如利用因特网服务提供商来通过因特网连接)。

[0147] 在本发明的示例性实施例中,还提供一种电子设备,该电子设备可以包括处理器,以及用于存储所述处理器的可执行指令的存储器。其中,所述处理器配置为经由执行所述可执行指令来执行上述任意一个实施例中的材料去除方法的步骤。

[0148] 所属技术领域的技术人员能够理解,本发明的各个方面可以实现为系统、方法或程序产品。因此,本发明的各个方面可以具体实现为以下形式,即:完全的硬件实施方式、完全的软件实施方式(包括固件、微代码等),或硬件和软件方面结合的实施方式,这里可以统称为“电路”、“模块”或“系统”。

[0149] 下面参照图16来描述根据本发明的这种实施方式的电子设备1600。图16显示的电子设备1600仅仅是一个示例,不应对本发明实施例的功能和使用范围带来任何限制。

[0150] 如图16所示,电子设备1600以通用计算设备的形式表现。电子设备1600的组件可以包括但不限于:至少一个处理单元1610、至少一个存储单元1620、连接不同系统组件(包括存储单元1620和处理单元1610)的总线1630、显示单元1640等。

[0151] 其中,所述存储单元存储有程序代码,所述程序代码可以被所述处理单元1610执行,使得所述处理单元1610执行本说明书用于材料去除方法中描述的根据本发明各种示例性实施方式的步骤。例如,所述处理单元610可以执行如图2、4-6、9-11和13中所示的步骤。

[0152] 所述存储单元1620可以包括易失性存储单元形式的可读介质,例如随机存取存储单元(RAM)16201和/或高速缓存存储单元16202,还可以进一步包括只读存储单元(ROM)16203。

[0153] 所述存储单元1620还可以包括具有一组(至少一个)程序模块16205的程序/实用工具16204,这样的程序模块16205包括但不限于:操作系统、一个或者多个应用程序、其它程序模块以及程序数据,这些示例中的每一个或某种组合中可能包括网络环境的实现。

[0154] 总线1630可以为表示几类总线结构中的一种或多种,包括存储单元总线或者存储单元控制器、外围总线、图形加速端口、处理单元或者使用多种总线结构中的任意总线结构的局域总线。

[0155] 电子设备1600也可以与一个或多个外部设备1700(例如键盘、指向设备、蓝牙设备等)通信,还可与一个或者多个使得用户能与该电子设备1600交互的设备通信,和/或与使得该电子设备1600能与一个或多个其它计算设备进行通信的任何设备(例如路由器、调制解调器等等)通信。这种通信可以通过输入/输出(I/O)接口1650进行。并且,电子设备1600还可以通过网络适配器1660与一个或者多个网络(例如局域网(LAN),广域网(WAN)和/或公共网络,例如因特网)通信。网络适配器1660可以通过总线1630与电子设备1600的其它模块通信。应当明白,尽管图中未示出,可以结合电子设备1600使用其它硬件和/或软件模块,包括但不限于:微代码、设备驱动器、冗余处理单元、外部磁盘驱动阵列、RAID系统、磁带驱动器以及数据备份存储系统等。

[0156] 通过以上的实施方式的描述,本领域的技术人员易于理解,这里描述的示例实施方式可以通过软件实现,也可以通过软件结合必要的硬件的方式来实现。因此,根据本发明实施方式的技术方案可以以软件产品的形式体现出来,该软件产品可以存储在一个非易失性存储介质(可以是CD-ROM,U盘,移动硬盘等)中或网络上,包括若干指令以使得一台计算设备(可以是个人计算机、服务器、或者网络设备等)执行根据本公开实施方式的材料去除方法。

[0157] 本领域技术人员在考虑说明书及实践这里公开的内容后,将容易想到本发明的其它实施方案。本申请旨在涵盖本发明的任何变型、用途或者适应性变化,这些变型、用途或者适应性变化遵循本公开的一般性原理并包括本公开未公开的本技术领域中的公知常识或惯用技术手段。说明书和实施例仅被视为示例性的,本发明的真正范围和精神由所附的权利要求指出。

[0158] 本公开已由上述相关实施例加以描述,然而上述实施例仅为实施本公开的范例。必需指出的是,已揭露的实施例并未限制本公开的范围。相反,在不脱离本公开的精神和范围内所作的变动与润饰,均属本公开的专利保护范围。

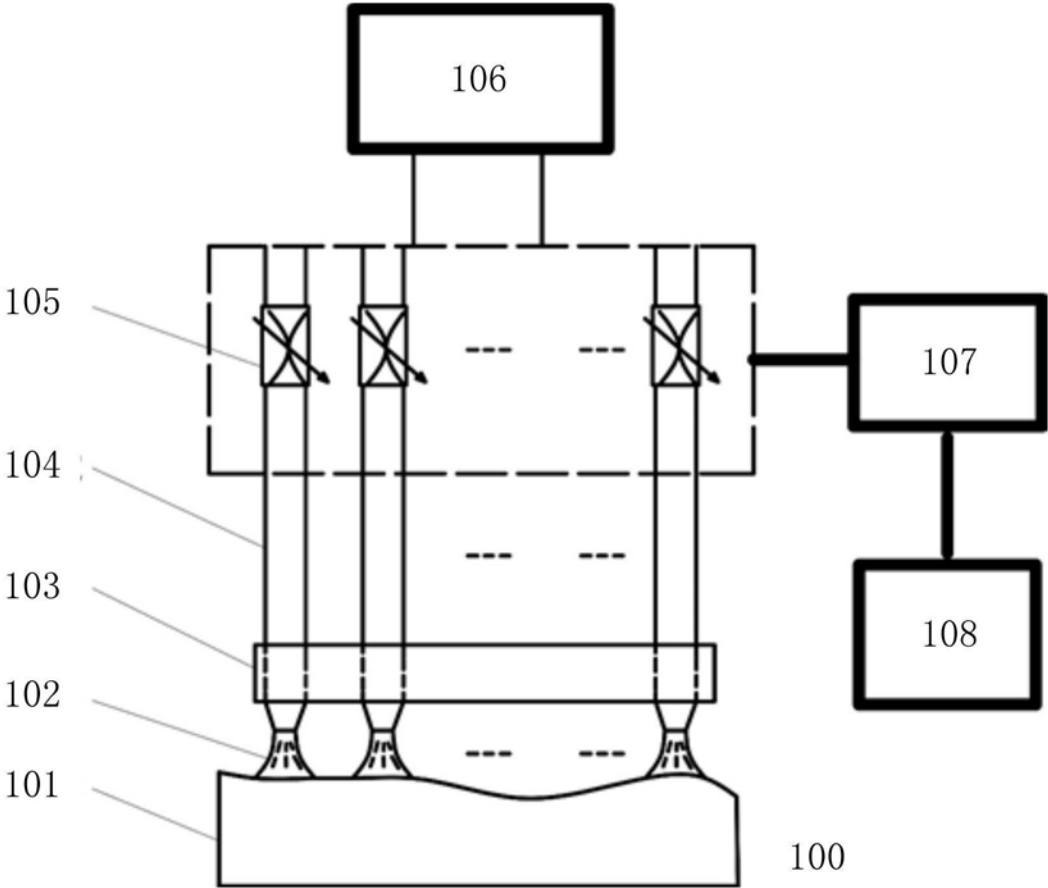


图1

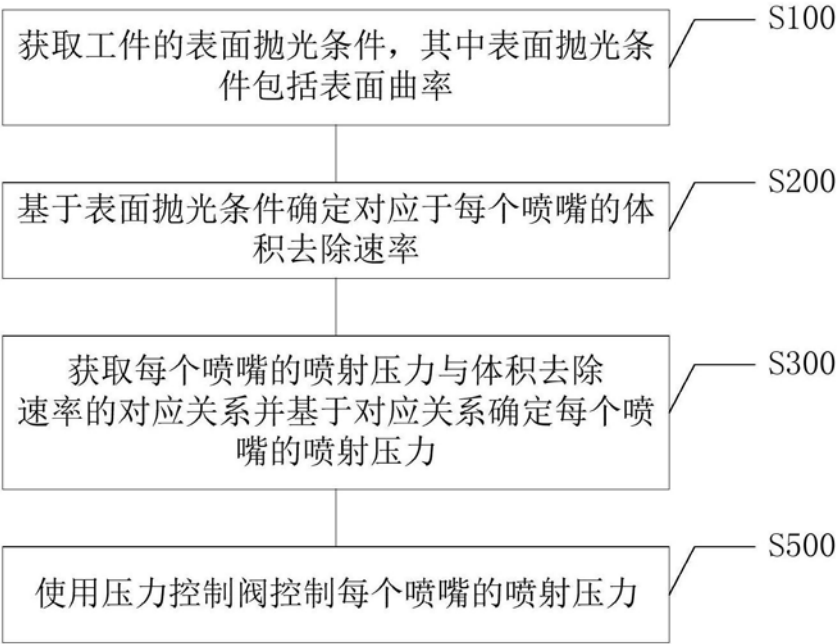


图2

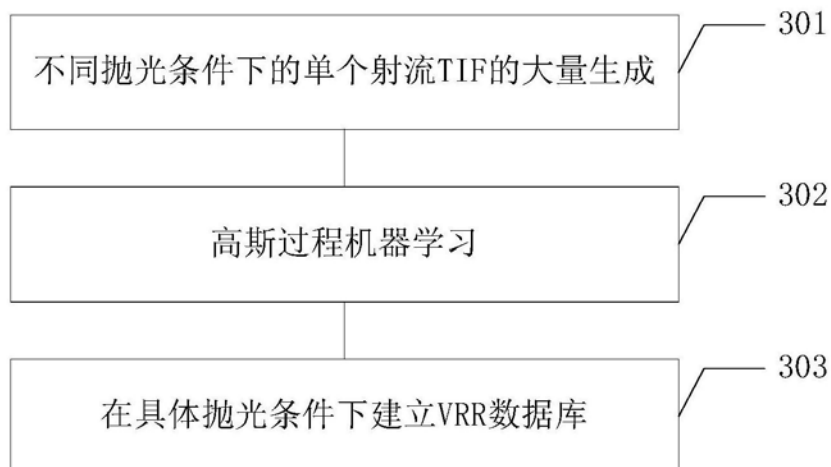


图3

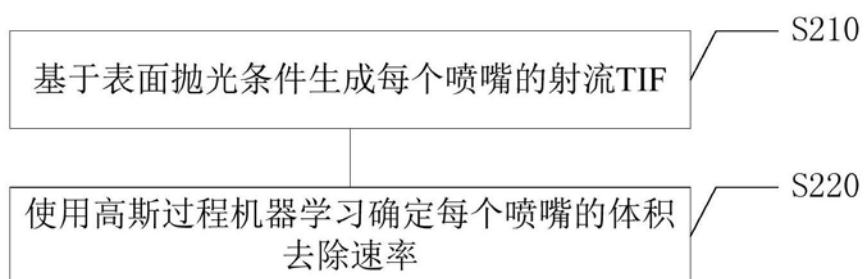


图4

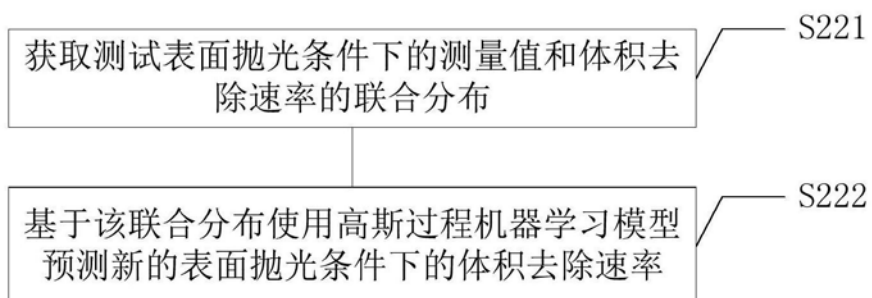


图5

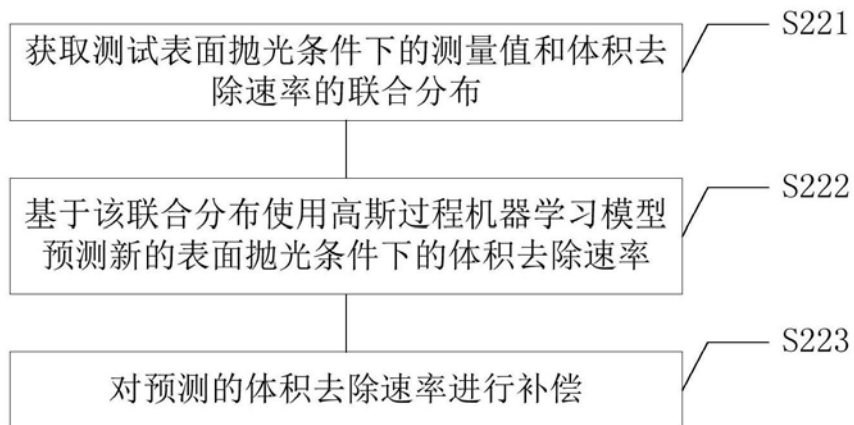


图6

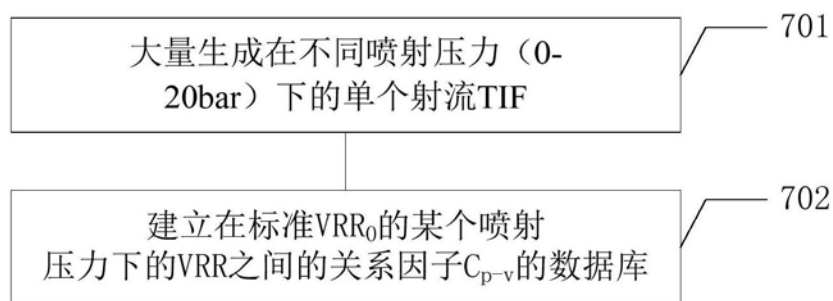


图7

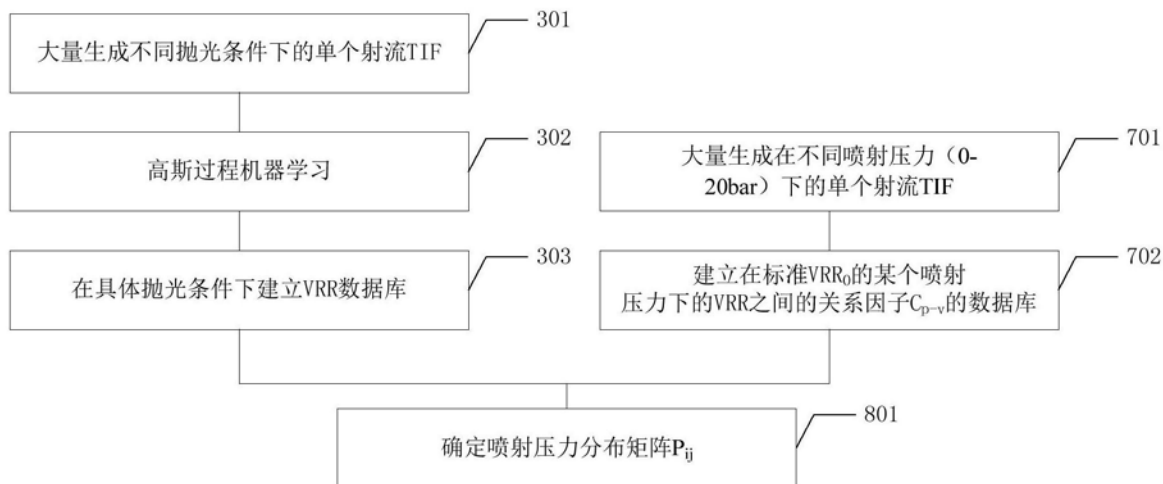


图8

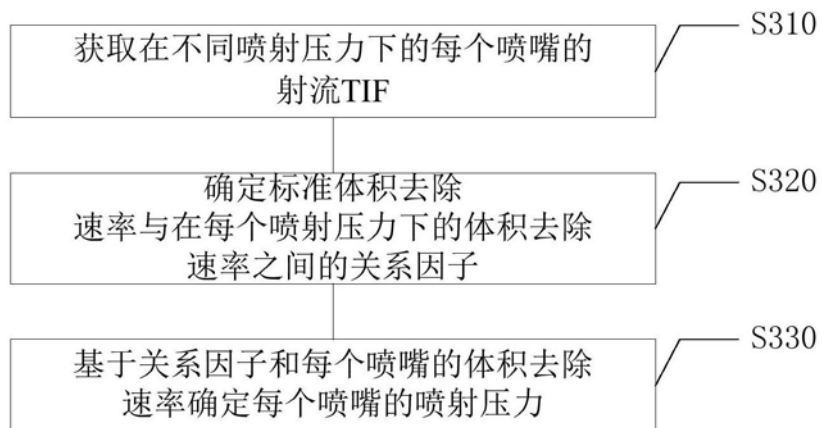


图9

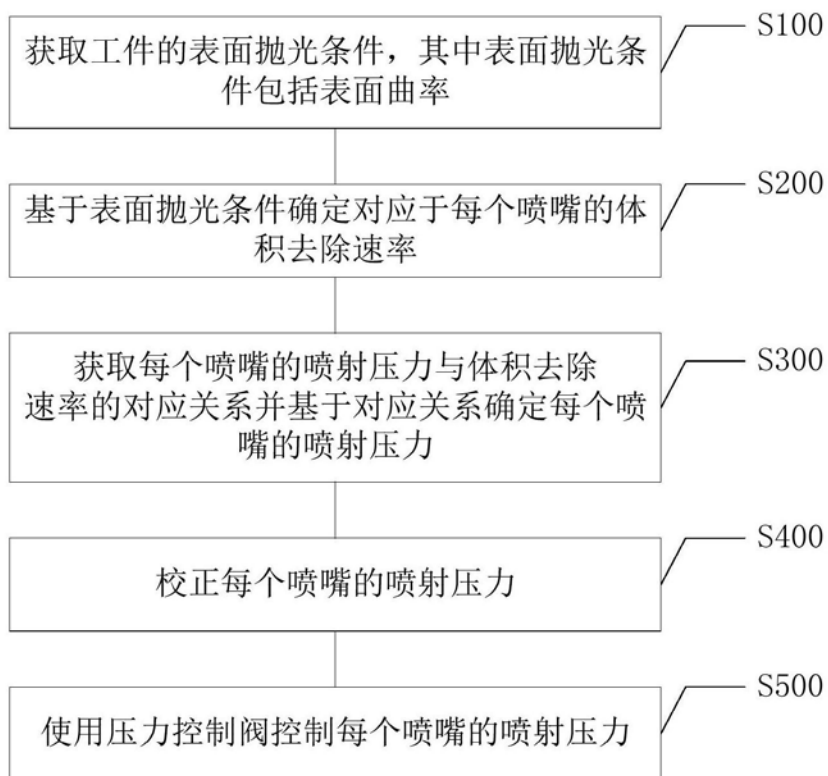


图10

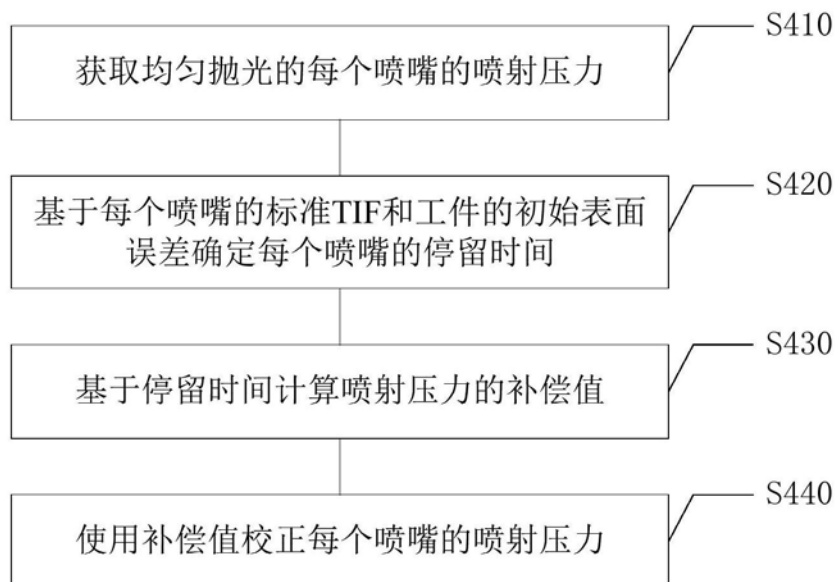


图11

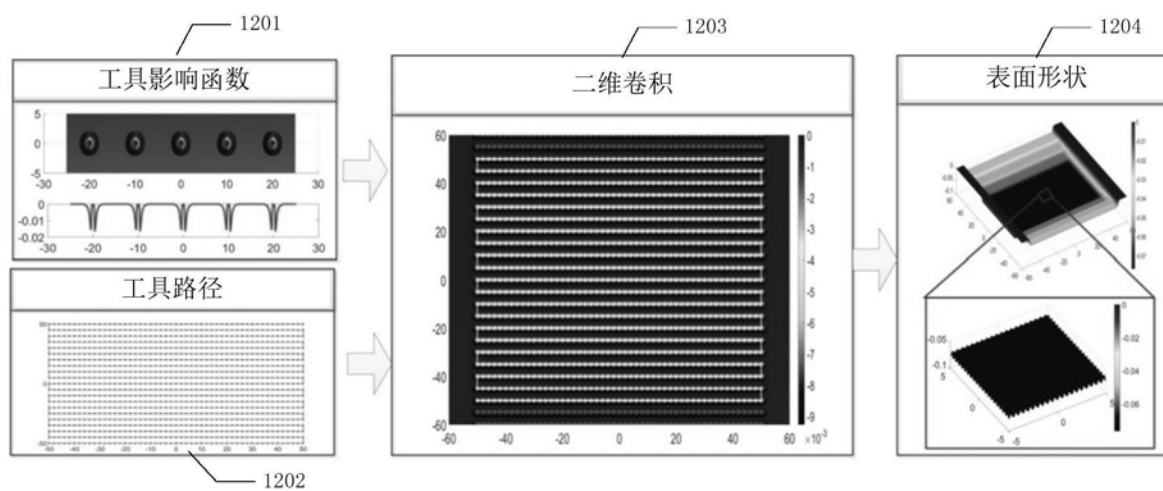


图12

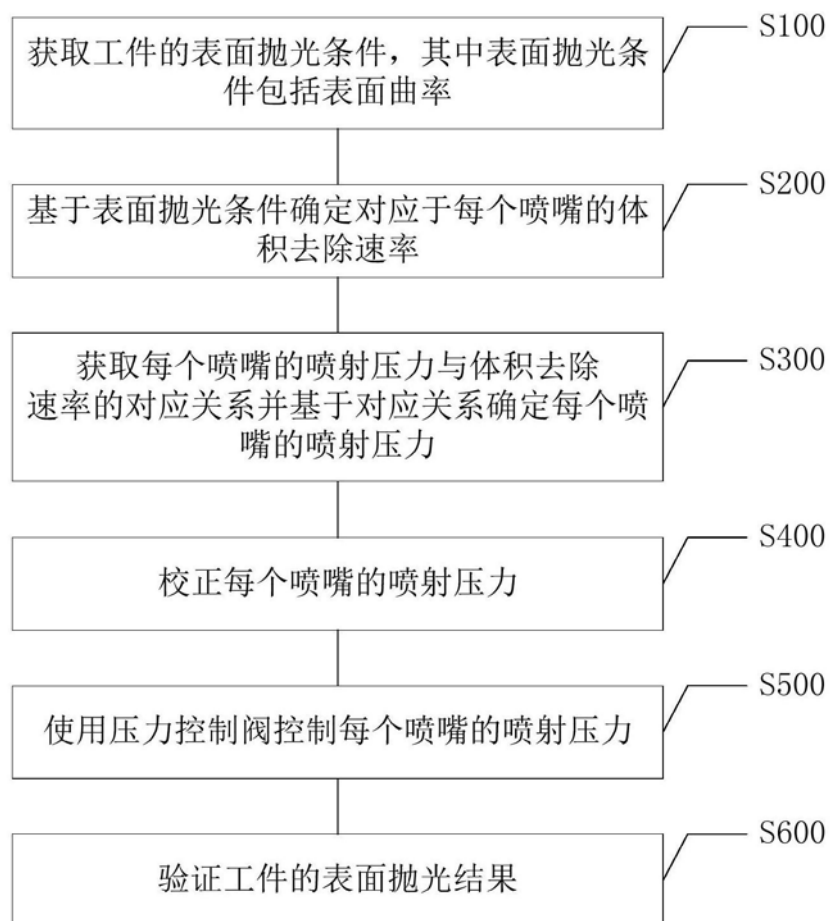


图13

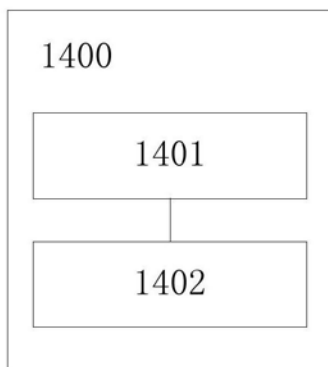


图14

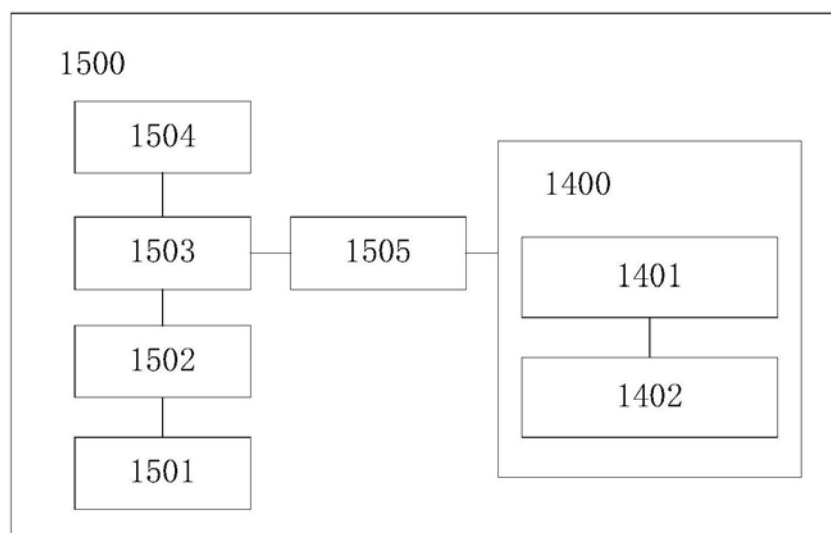


图15

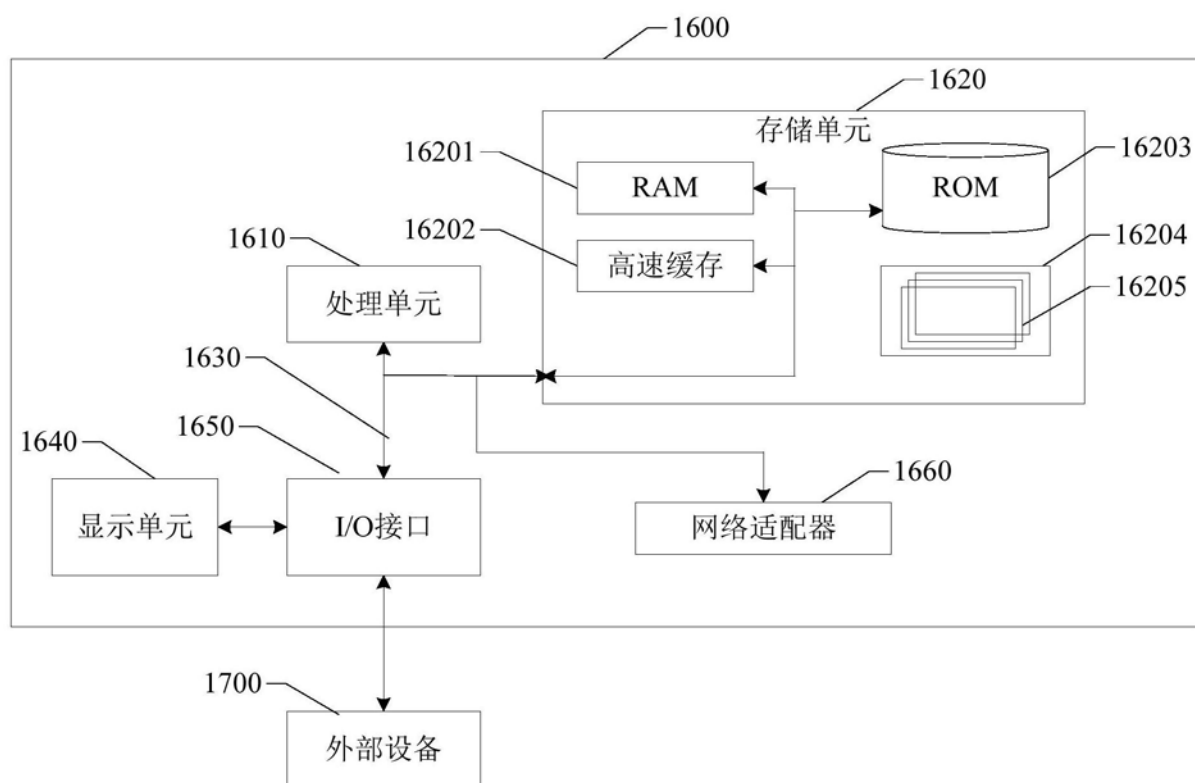


图16