



(21) 申请号 201410543383. 7

(22) 申请日 2014. 10. 15

(30) 优先权数据

61/901, 014 2013. 11. 07 US

14/176, 492 2014. 02. 10 US

(71) 申请人 波音公司

地址 美国伊利诺伊州

(72) 发明人 J·L·柏林 S·J·伊斯利 L·徐

(74) 专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限公司 11245

代理人 赵蓉民

(51) Int. Cl.

B23C 9/00(2006. 01)

权利要求书2页 说明书11页 附图8页

(54) 发明名称

使用力反馈实时数字控制刀具路径适应

(57) 摘要

一种用于通过使用被附接至主轴 (30) 的切削刀具 (4) 加工工件 (2) 的方法。所述方法包括：
(a) 使用零件定义数据相对于工件 (2) 定义切削刀具 (4) 的初始刀具路径；(b) 导致切削刀具 (4) 相对于工件 (2) 沿着定义的初始刀具路径切削；
(c) 在沿着所述定义的初始刀具路径切削期间，接收表示加工过程条件的传感器 (18) 数据；(d) 处理传感器 (18) 数据以确定加工过程力参数的值；以及 (e) 导致切削刀具 (4) 相对于工件 (2) 沿着所改进的刀具路径切削，以便径向切削深度改变并且加工过程力参数的值不超过加工过程力约束。其中，操作 (b) 至 (e) 由计算机系统 (50) 执行。

1. 一种用于通过使用被附接至主轴 (30) 的切削刀具 (4) 加工工件 (2) 的方法, 所述方法包括:

- (a) 使用零件定义数据相对于工件 (2) 定义所述切削刀具 (4) 的初始刀具路径;
- (b) 导致所述切削刀具 (4) 相对于所述工件 (2) 沿着所定义的初始刀具路径切削;
- (c) 在沿着所述定义的初始刀具路径切削期间, 接收表示加工过程条件的传感器 (18) 数据;
- (d) 处理所述传感器 (18) 数据以确定加工过程力参数的值; 以及
- (e) 导致所述切削刀具 (4) 相对于所述工件 (2) 沿着所改进的刀具路径切削, 以便径向切削深度改变并且所述加工过程力参数的值不超过加工过程力约束,

其中, 操作 (b) 至 (e) 由计算机系统 (50) 执行。

2. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中, 所述加工过程力参数是所述切削刀具 (4) 的切削力和主轴功率中的一者或二者。

3. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中, 操作 (e) 包含导致所述切削刀具 (4) 或者所述工件 (2) 相对于彼此移动以便所述切削刀具 (4) 或者所述工件 (2) 沿正交于当前移动方向的方向移动。

4. 根据权利要求 1 所述的方法, 还包含: 探测振颤的水平并且然后确定所探测到的振颤的水平是否超过规定的稳定性约束。

5. 根据权利要求 4 所述的方法, 其中, 所述切削刀具 (4) 相对于所述工件 (2) 沿着改进的刀具路径切削, 以便响应振颤水平超过所述规定的稳定性约束的探测结果, 所述切削径向深度减小。

6. 根据权利要求 4 所述的方法, 还包含更换所述切削刀具 (4) 以响应振颤水平超过所述规定的稳定性约束的探测结果。

7. 一种铣削机床, 包含:

可旋转主轴 (30);

用于驱动所述主轴 (30) 的旋转的第一马达 (42);

被附接至所述主轴 (30) 的切削刀具 (4);

支撑台面 (36), 所述主轴 (30) 和所述支撑台面 (36) 相对于彼此可移动;

用于分别沿着第一和第二轴线使所述主轴和所述支撑台面相对于彼此移动的第二和第三马达 (44 和 46);

用于产生反馈信号的一个或更多个传感器 (18), 所述反馈信号表示一个或更多个加工过程参数的值; 以及

计算机系统 (50), 其被操作地耦接成接收来自所述一个或更多个传感器 (18) 的所述反馈信号并向所述第一至第三马达 (42, 44 和 46) 发送命令信号, 其中, 所述计算机系统 (50) 被编程以在加工已被附接至所述支撑台面 (36) 的工件 (2) 期间执行下列操作:

(a) 控制所述第二和第三马达 (44 和 46) 以便所述切削刀具 (4) 相对于所述工件 (2) 沿着定义的初始刀具路径切削;

(b) 在沿着所述定义的初始刀具路径切削期间, 接收来自所述一个或更多个传感器 (18) 的反馈信号;

(c) 处理所述反馈信号以确定加工过程力参数的值; 以及

(d) 控制所述第二和第三马达 (44 和 46) 以便所述切削刀具 (4) 相对于所述工件 (2) 沿着改进的刀具路径切削, 其中, 所述改进的刀具路径导致径向切削深度和所述加工过程力参数的值的变化, 其中所述加工过程力参数的值不超过加工过程力约束。

8. 根据权利要求 7 所述的铣削机床, 其中, 所述加工过程力参数是所述切削刀具 (4) 的切削力和主轴功率中的一者或二者。

9. 根据权利要求 7 所述的铣削机床, 其中, 所述加工过程力参数是主轴功率。

10. 根据权利要求 7 所述的铣削机床, 其中, 操作 (e) 包含导致所述切削刀具 (4) 或者所述工件 (2) 相对于彼此移动以便所述切削刀具 (4) 或者所述工件 (2) 沿正交于当前移动方向的方向移动。

11. 根据权利要求 7 所述的铣削机床, 进一步被配置为探测振颤的水平并且然后确定所探测到的振颤水平是否超过规定的稳定性约束。

12. 根据权利要求 11 所述的铣削机床, 其中, 所述切削刀具 (4) 相对于所述工件 (2) 沿着改进的刀具路径切削, 以便响应振颤水平超过所述规定的稳定性约束的探测结果, 所述切削径向深度减小。

使用力反馈实时数字控制刀具路径适应

技术领域

[0001] 本公开大致涉及由数字控制系统控制的铣床。更具体地，本公开涉及利用被计算成维持加工条件处于加工过程约束内的切削刀具路径的铣床控制系统。

背景技术

[0002] 许多零件通过加工工件以移除材料被制造。具体地，具有许多专门化的零件的工业经常通过加工零件来产生零件而不是使用其他方法承受资本性支出来产生零件，其他方法诸如通过使用模具铸造零件。在另一些情况下，加工零件（以下称“工件”）可能是必要的以根据具体规定精整表面。例如，在航空和航天工业中，所加工的零件通常必须遵守具有小范围差异的设计公差，并因而需要精密制造，这通常包括当零件由金属形成时的加工过程。工件可以由几乎可以被加工的任何材料形成，包括各种木材、金属和复合材料。

[0003] 一种具体的加工操作包含使用铣削刀具移除材料，随着铣削刀具沿着垂直于铣削刀具的接合方向的轴线旋转，该铣削刀具通过切掉工件上的接合区域来移除材料。铣削刀具（或者钻头）从工件的表面有效地移除不期望的材料以向材料的毛坯件（即，工件）切入期望的形状。

[0004] 铣床通常包括可移动台面，工件被附在该台面上。该台面能够沿着两个垂直的方向（如，沿着 X 和 Y 轴线）移动。该台面被联接至能够将一个或更多个伺服马达的轴旋转转换为台面的线性运动的一个或更多个装置（如，丝杠）。因此，通常通过控制伺服马达的轴旋转来控制台面的运动。被供应到每个伺服马达的功率通常由对应的伺服放大器调节。

[0005] 台面且因此工件相对于切削刀具以受控方式移动以使得切削刀具能够从工件移除材料以产生期望的最终产品。切削刀具通常附接至由旋转轴承支撑的旋转轴，该旋转轴通常被称为主轴。主轴的旋转由主轴马达驱动，且供向主轴马达的功率由对应的主轴放大器调节。主轴连同切削刀具也可以相对于工件移动以进一步控制从工件移除材料。例如，主轴可以相对于机床坐落的平面被上下移动。为使主轴能够相对于工件移动，主轴可以被连接至丝杠，丝杠进而连接至伺服马达。该上和下方向是 Z 轴线。虽然以上描述了使用伺服马达和丝杠的典型的三轴线（即，X、Y 和 Z）铣床，不过也存在铣床的许多其他配置。例如，铣床可以具有五个或更多个受控轴线。此外，铣床可以使用电磁线性驱动器（而不是伺服马达和丝杠）来移动台面和工件。

[0006] 所有伺服马达的旋转被精确地控制和协调以产生工件相对于切削刀具的期望的运动以产生期望的最终形状。此外，主轴且因此工件的旋转速度也可以通过控制主轴马达的旋转速度被控制。伺服和主轴马达以及放大器通常通过专用计算机被控制，该专用计算机被编程以执行计算机数字控制（CNC）。除了控制工件相对于切削刀具的轨迹之外，CNC 控制器还控制工件相对于切削刀具移动所处的速度（以下称“进给速率”）。CNC 控制器通常被编程成以规定的进给速率操作机床，该规定的进给速率被选择成使用机械的能力而不损坏切削刀具或主轴或者超过工件精度要求。

[0007] 随着工件被铣削，工件相对于切削刀具的运动在切削刀具上产生了切向力和径向

力二者。扭矩由切向力乘以切削刀具半径形成,且弯矩(被叫做径向载荷)由径向力乘以切削刀具长度形成。扭矩和径向载荷优选地被保持在预定最大值以下以阻止损坏切削刀具和/或主轴。通常通过监视主轴放大器的输出功率或者电流来监视扭矩。通常使用在主轴结构上的应变仪来监视径向载荷。

[0008] 在工件被铣削的同时工件相对于切削刀具以被编程进给速率运动产生过大的扭矩和/或过大的径向载荷时,会出现情况。适应控制系统已经被研制出来以应对这些情况的发生。随着工件被铣削,适应控制系统通常重复地监视主轴功率和径向载荷。如果功率和/或径向载荷分别超过预定的最大值,则适应控制系统通常将导致进给速率降低,以便相应地降低主轴功率和/或径向载荷。适应控制系统可以是能够与 CNC 通信的独立装置,或者可以是在 CNC 内部的功能元件(如,硬件和/或软件)。

[0009] 当前的切削刀具路径由计算机辅助制造(CAM)软件根据预期的毛坯材料位置和尺寸被创建。然而,一些工件具有不一致的位置和尺寸。例如,机器上的锻造表面不匹配 CAD/CAM 环境。锻件在其表面上通常具有 ± 0.25 英寸的公差。另外,由于模具磨损,锻造质量随着时间而下降。锻件的变形由锻造过程应力造成。加工中心台面上未对准也可能是一个问题。

[0010] 对于具有不一致的毛坯材料条件的工件(诸如,在尺寸上可以变化很大的锻件),定义的切削刀具路径可能遇到变化也很大的毛坯材料深度,这对于切削刀具来说不是最佳的。毛坯材料的这种变化能够导致无法预料的超出了加工约束的切削深度,且/或导致刀具破坏。一些常规使用的加工约束包括径向切削深度(本文也被称为“切削径向深度”)、切削力、主轴功率以及主轴扭矩。在一些情况下,工艺约束(包括切削刀具磨损)的控制通过在加工过程期间改进进给速率是可以实现的。切削过程的进给速率能够被改进以增大/减小切削力来维持工艺参数在规定的约束内,但是进给速率改进会导致选择效率低的切屑厚度。

[0011] 根据一种进给速率优化方法,CNC 程序的进给速率优化能够在 CAM 系统中 CNC 编程处理期间被执行。根据该方法,使用加工仿真能够识别切削条件和切削深度,该加工仿真包括材料移除建模。进给速率的变化基于该仿真。该方法不得不在每个 CNC 程序均变化的情况下被完成。并且该方法需要在 CAM 系统中可获得准确的毛坯材料模型。该方法无法良好地用于不一致的锻件。

[0012] 根据另一种进给速率优化方法,CNC 程序的进给速率优化能够以控制环路在加工过程期间被执行。根据该方法,使用传感器以识别切削条件并调整进给速率以维持在 CNC 操作期间的工艺约束。使用该方法,进给速率能够被调整以补偿刀具磨损和锻造不一致。一种商业可获得的系统接收来自 CNC 程序的设定并监视主轴载荷。如果主轴载荷降到设定点以下,则该系统增大 CNC 的切削进给速率。如果主轴载荷增大到设定点以上,则该系统减小 CNC 的切削进给速率。另一种商业可获得的系统针对每段刀具路径基于当前切削条件(被移除的材料的体积、深度、宽度以及切削的角度)调整进给速率。

[0013] 进给速率优化方法的主要缺点是:因为刀具路径是被规定的,所以只有切削进给速率能够被改变,而不能改变刀具路径位置(以增大/减小径向切削深度)。当加工硬的材料时,有效的切屑厚度是近似 0.003–0.006 英寸。高于和低于这个范围的切削被认为是低效的。当低于该有效范围切削时,金属移除速率被降低,而获得切削刀具寿命的最小增加。

这主要是由于随着切屑厚度接近切削刃口半径而开始出现的摩擦作用。该摩擦作用导致切削刀具不均匀的和过早的磨损。当高于该有效范围切削时,施加于切削刀具上的切向切削力接近切削刀具材料的机械极限,从而导致碎屑和损坏。

[0014] 用于调整不一致或未知的毛坯材料位置的替代方法包括测量毛坯材料、数字化结果并将毛坯材料位置信息载入计算刀具路径的 CAD/CAM 系统。CAM 软件将创建用于命令切削刀具遵循所计算的刀具路径的 CNC 程序。在一种实施例中,基于数字锻件定义来控制径向切削深度。能够使用力反馈探测系统或用于扫描的逆向工程设备来定义锻造。

[0015] 所熟知的是在所有的锻件表面上假定规定的(如 1 英寸)偏距余量。切削者将该偏距认为是材料的,而导致空切。空切指的是以“切削”进给速率移动切削刀具而不切削材料。这通常相当慢,如 2-8 英寸/分钟。其他定位移动被设置得较快,如 300-800 英寸/分钟,因为此时没有碰撞或切割的可能。如果假设安全偏距余量代表未知的材料可能处于的地方,则仍会出现尽管假设材料可能在那但没有材料的情况。在这些空切出现的区域,切削进给速率被使用但是没有材料被切削。典型的钛粗加工进给速率是 2.5 英寸/分钟,且使用 3 英寸直径的切削刀具。因而绕 200 英寸锻件的一道“空切”能够用掉 190 分钟,从而导致运行时间的极大增加。

[0016] 尽管 CAD/CAM 计算过程提供了比适应进给速率方法更好的刀具寿命和更好的金属移除性能,但是 CAD/CAM 计算增加了生产操作的工程时间并且通常仅用在有限数量的零件上。

[0017] 提供一种由于上述方法的改进的铣削方法将是值得做的。

[0018] 本申请根据美国法典第 35 条 § 119(e) 主张 2013 年 11 月 7 日提交的美国临时申请 No. 61/901,014 的优先权。

发明内容

[0019] 本文所公开的主题涉及一种系统,该系统具有改进切削刀具路径的能力以便在加工过程期间实时控制径向切削深度以维持加工过程约束。因为该过程在 CNC 机床处以控制回路被执行,所以随着刀具逐渐磨损,切削力的增大能够被在机床上的传感器捕获,从而触发适当措施。适当措施的示例包括:增大或减小径向切削深度和/或更换切削刀具,然后恢复切削过程。所公开的方法在加工操作期间产生一致性的加工力并维持切屑厚度在有效值范围内,从而导致最佳的切削刀具寿命和最小的成本。

[0020] 以下详细公开的 CNC 切削刀具路径适应的方法使用 CNC 控制器和力反馈回路来维持加工条件在加工过程约束内。使用零件信息、初始路径和轨线,刀具路径被初始化且切削过程开始。在该过程期间,机床传感器被使用以识别加工条件并改进切削刀具路径以改变径向切削深度并维持加工过程力约束。该方法允许在具有不一致尺寸的毛坯材料(诸如锻件)上有效的加工操作。具体地,使刀具路径基于切削力适应排除了在所有的锻件表面上假定偏距余量的必要,因此减少了运行时间。这种加工方法具有减小加工由硬金属(诸如钛和不锈钢)制成的大部件(诸如飞机部件)的成本的潜力。

[0021] 本文所公开的主题的一个方面是使用附接至主轴的切削刀具来加工工件的方法。该方法包括:(a) 使用零件定义数据来定义切削刀具相对于工件的初始刀具路径;(b) 导致切削刀具相对于工件沿着定义的初始刀具路径来切削;(c) 在沿着定义的初始刀具路径切

削期间,接收表示加工过程条件的传感器数据;(d) 处理传感器数据以确定加工过程力参数的值;以及(e) 导致切削刀具相对于工件沿着所改进的刀具路径切削,以便径向切削深度变化且加工过程力参数的值不超过加工过程力约束。操作(b)至(e)由计算机系统执行。在替代性的实施方式中,加工过程力参数是切削刀具的切削力或者主轴功率。操作(e)可以包括导致切削刀具或者工件相对于彼此移动以便切削刀具或者工件沿正交于当前移动方向的方向移动。

[0022] 前面的段落描述的方法可以进一步包括:探测振颤水平并且然后确定所探测到的振颤水平是否超过规定的稳定性约束。根据一个实施例,切削刀具相对于工件沿着改进的刀具路径切削,以便响应振颤水平超过规定的稳定性约束的探测结果,切削径向深度减小。根据另一个实施例,该方法还包括更换切削刀具以响应振颤水平超过规定的稳定性约束的探测结果。

[0023] 本文所公开的主题的另一个方面是铣削机床,该铣削机床包括:可旋转主轴;用于驱动主轴的旋转的第一马达;附接至主轴的切削刀具;支撑台面,主轴和支撑台面相对于彼此可移动;用于使主轴和支撑台面分别沿着第一和第二轴线相对于彼此移动的第二和第三马达;用于产生反馈信号的一个或更多个传感器,所述反馈信号表示一个或更多个加工过程参数的值;以及可操作地被耦接以接收来自一个或更多个传感器的反馈信号并向第一至第三马达发送命令信号的计算机系统。该计算机系统被编程以在加工已被附接至支撑台面的工件期间执行下列操作:(a) 控制第二和第三马达以便切削刀具相对于工件沿着所定义的初始刀具路径切削;(b) 在沿着所定义的初始刀具路径切削期间,接收来自所述一个或更多个传感器的反馈信号;(c) 处理反馈信号以确定加工过程力参数的值;以及(d) 控制第二和第三马达以便切削刀具相对于工件沿着改进的刀具路径切削,其中,改进的刀具路径导致径向切削深度和加工过程力参数的值的变化,该加工过程力参数的值不超过加工过程力约束。

[0024] 又一个方面是用于不一致材料预成型件的 CNC 切削的方法,包括:(a) 使用零件定义数据定义相对于预成型件的初始刀具开始位置和初始刀具轨线;(b) 将切削刀具放置在初始刀具开始位置;(c) 旋转切削刀具;(d) 在切削刀具旋转的同时,使得切削刀具和预成型件中的一者相对于另一者移动,以便切削刀具沿着初始刀具轨线切削;(e) 在切削刀具和工件中的一者相对于另一者移动的同时,感测加工条件;以及(f) 在加工条件被感测的同时,调整刀具路径以便切削刀具遵循不同于初始刀具轨线的轨线并且径向切削深度变化,计算该调整以维持加工条件在加工过程力约束内。

[0025] 以下详细公布和声明本公开的其他方面。

附图说明

[0026] 图 1 是表示锻件的 CAD 模型标称表面的示意图。

[0027] 图 2 是示出 CNC 铣削机床的主轴的等距视图的示意图,该主轴承载切削刀具,该刀具被操作以在工件中形成穴。

[0028] 图 3 是示出在典型的铣削操作期间在工件和切削刀具之间的接触区域(见剖面线部分)的几何形状的示意图。

[0029] 图 4 是表示施加在切削刀具上的力的示意图,该切削刀具接合工件且切削径向深

度远小于 50%。

[0030] 图 5A 是表示其中随着切削刀具直线移动旋转的切削刀具正接合工件的状况的示意图。

[0031] 图 5B 是表示其中随着切削刀具在角落处改变 90° 方向旋转的切削刀具正接合工件的状况的示意图。

[0032] 图 6 是表示旋转的切削刀具遵循刀具路径的示意图,该刀具路径在加工工件期间作为条件的函数变化,同时维持加工过程力约束。

[0033] 图 7 是表示根据一个实施例的用于工件的适应性刀具路径铣削的系统的一些硬件和软件部件的框图。

[0034] 图 8 是表示根据另一个实施例的用于工件的适应性刀具路径铣削的系统的一些硬件部件的框图。

[0035] 图 9 是飞机生产和使用的方法的流程图。

[0036] 图 10 是示出飞机的系统的框图。

[0037] 后面将参考附图,其中,在不同的附图中类似的元件具有相同的附图标记。

具体实施方式

[0038] 平铣刀是用于加工工件的切削刀具,并且通常接合到旋转式车床,诸如铣削机床。铣削机床旋转地驱动平铣刀以成形工件。平铣刀通常被提供为细长的圆柱形的元件,并且可以包括从 2 至 20 或更多个齿或槽的任何数量,其中所述齿或槽被形成在平铣刀的外周上。区别于通常用于沿轴线方向形成孔的钻头,平铣刀能够被用于在所有方向上成形工件,这些方向包括但不限于:轴向(即,竖直的)、横向(即,侧向的)和角方向。

[0039] 平铣刀的每个槽被配置为,随着平铣刀相对于工件被旋转地驱动,移除少量的材料(本文称为“切屑”)。术语“切屑厚度”是指在切削刀具上的每个槽在某个位置移除的材料厚度。平铣刀可以在一端接合到主轴的卡盘或夹头,该主轴可以取决于铣削机床的能力(即,铣削机床是否为 2 轴线、3 轴线、5 轴线等等)沿竖直、横向和/或角取向可运动。平铣刀通常由相对坚硬的材料(诸如高速钢或碳化钨)制造以提供抗弯曲的抵抗力并且也维持载荷下切削刀具的完整性。极其硬的涂层可以被形成在切削齿上以允许平铣刀在高温、高压加工条件下操作并且增加平铣刀的寿命。

[0040] 图 1 是示出由金属制成的锻件 32 的 CAD 模型标称表面 34 的代表的示意图,该金属如钛。切削刀具(或钻)能够从工件有效地移除不需要的材料以切(即,铣)出图 1 中所示的期望形状。在工件中的各种凹槽、插槽和穴可以用各种刀头生产出。

[0041] 图 2 图示说明了携带切削刀具 4 并正在被运行以在工件 2 的材料层中形成穴 40 的 CNC 铣削机床(未示出)的主轴 30。主轴 30 绕其细长轴线旋转以便切削刀具 4 旋转,并且主轴 30 沿着刀具路径被驱动,该刀具路径与工件 2 的材料层共面以便旋转切削刀具 4 接合并切入材料(即,径向地移入材料)。不同地阐述,由于主轴 30 沿着刀具路径的移动,工件 2 的材料被送入切削刀具 4。可替代地,主轴 30 能够是静止的并且工件 2 相对于主轴 30 运动。

[0042] 切削刀具 4 上的与工件 2 的材料在铣削操作期间的任意瞬间的适时接合(即,接触)的槽确定了所谓的“接触区域”。图 3 示出在相对直线运动期间在工件 2 和切削刀具 4

之间的典型接触区域 26 (见剖面线) 的几何形状。切削的径向和 / 或轴向深度越深, 则将接合更多的槽 (未示出), 从而增加接触区域 26, 这进而增加所需的切削力。

[0043] 图 4 示出了切削刀具 4 接合工件 2 且其切削径向深度远小于 50%。接触区域 26 由粗体弧线指示, 该弧线形成代表切削刀具 4 的圆的一部分。角度 θ 被称为刀具接合角 (TEA), 该角被定义为由每个切削边缘随着其接合和离开工件 2 的材料所包的扫掠量。在刀具圆周和工件边缘之间的交叉点 28 处, 施加在切削刀具 4 上的切向和进给力由各自的箭头指示。切向力等于主轴载荷。施加在切削刀具 4 上的径向力是进给力和切向力的矢量和。随着切削径向深度 R_{DOC} 增加, 接触区域 26 增加, 并且力变大。

[0044] 图 5A 和图 5B 是示出当切削刀具 4 沿着直线前进时 (图 5A 中的箭头 A 所指示的是前进方向) 旋转切削刀具 4 接合工件 2 的代表和当切削刀具 4 在工件 2 的角落处改变 90° 方向时 (图 5B 中的箭头 B 所指示的是前进方向) 旋转切削刀具 4 接合工件 2 的代表的示意图。在每个实例中经过的刀具路径 P 在图 5A 和图 5B 中由各自的短划线指示。

[0045] 仍然参考图 5A 和图 5B, 切削径向深度 R_{DOC} 是与工件 2 的材料接合的刀具直径的百分比:

[0046]
$$R_{DOC} = (r/D) \times 100\%$$

[0047] 其中, D 是切削刀具 4 的直径, 并且 r 是随着其产生切削, 切削刀具 4 在工件 2 中的深度 (沿着其半径)。切削径向深度 R_{DOC} 决定了材料移除速率 (MRR) 并且反映切削力, 但是这仅针对直线运动。刀具接合角 θ 更好地反映切削力而无关刀具路径形状如何。对于直线运动, 在刀具接合角 θ 和切削径向深度 R_{DOC} 之间具有直接的、非线性的关系。从图 5A 和图 5B 应该显而易见的, 对于两个不同的刀具接合角 θ , 切削径向深度 R_{DOC} 可以是相同的。

[0048] 如果切削径向深度 R_{DOC} 小于 100%, 则刀具仅仅部分地接合并产生外围切削。如果切削径向深度 R_{DOC} 是 100%, 则切削刀具全部地接合并产生割缝切削。在车削和镗削操作中, 单点刀具相对于工件半径在一定深度处切削。大的切削径向深度将需要低的进给速率, 否则将导致在刀具上的高载荷并降低刀具寿命。

[0049] 用于自动地产生铣削刀具路径的方法是熟知的, 该方法没有考虑铣削过程条件。根据一个熟知的方法, CNC 控制器执行导致切削刀具遵循预处理刀具路径的软件程序, 该预处理刀具路径被配置为维持刀具接合角 θ 恒定。该熟知的方法不适合不一致的锻件 (即, 具有不一致尺寸和 / 或形状的锻件)。

[0050] 相反, 本文公开的适应性刀具路径铣削过程能够基于所感测的铣削过程条件在铣削操作期间实时地改进刀具路径。CNC 控制器“在运行中”计算刀具路径。基于来自机械传感器的力反馈来改进切削径向深度。该方法适用于不一致的锻件。

[0051] 图 6 是遵循刀具路径 P 的旋转切削刀具 4 的表示, 该刀具路径 P 在加工工件 2 期间作为条件的函数变化。短划线箭头 C_{t1} 表示在刀具路径调整之前在时间 t_1 处的刀具前进方向, 而实线箭头 C_{t2} 表示在刀具路径调整之后在时间 t_2 处的刀具前进方向。根据本文的教导, 刀具路径以导致切削径向深度变化而加工过程力参数 (如, 切削力或主轴功率) 的值被维持在加工过程力约束之下的方式被改进。以下称该过程为“适应性刀具路径铣削”。

[0052] 图 7 识别根据一个实施例的用于工件的适应性刀具路径铣削的系统的各种硬件和软件部件。硬件部件 6 包括加工中心 16 (包括用于保持切削刀具 4 的主轴和用于支撑工件 2 的支撑台面)、CNC 控制器 12 以及各种传感器 18, 其中所述 CNC 控制器 12 被编程以命

令加工中心 16,以便切削刀具 2 将相对于工件 2 遵循刀具路径,并且所述传感器 12 用于顾及加工条件而提供反馈至 CNC 控制器 12。

[0053] 通过由 CNC 控制器 12 执行的 CNC 程序来定义用于加工操作的初始刀具路径。用于初始刀具路径的 CNC 程序由计算机 10 生成,计算机 10 能够根据通过用户界面 8 接收到的命令运行软件程序 20。软件程序 20 包括计算初始刀具路径的 CAD/CAM 系统 22。后处理器 24 将产生用于初始刀具路径的 CNC 程序,该 CNC 程序被载入 CNC 控制器 12。

[0054] 根据本文的教导,CNC 控制器 12 被进一步用软件编程,该软件用作适应性刀具路径生成器 14。适应性刀具路径生成器 14 接收来自传感器 18 的反馈,并然后以改变切削径向深度并维持加工过程力参数(如,切削刀具的切削力或主轴功率)的值在规定加工过程力约束之下的方式调整刀具路径。

[0055] 在将 CNC 程序载入 CNC 控制器 12 后,在加工中心 16 的主轴(在图 7 中未示出)中安装切削刀具 4 且将工件 2 固定地附接至支撑台面(在图 7 中未示出),加工操作能够开始。CNC 控制器 12 导致切削刀具 4 相对于工件 2 沿着定义的初始刀具路径切削。适应性刀具路径生成器 14 接收来自传感器 28 的传感器数据,该传感器数据表示在沿着定义的初始刀具路径切削期间的加工过程条件。适应性刀具路径生成器 14 处理传感器数据以确定加工过程力参数的值,诸如切削刀具 4 的切削力或主轴功率。适应性刀具路径生成器 14 导致切削刀具 4 相对于工件 2 沿着改进的刀具路径切削,以便径向切削深度改变并且加工过程力参数的值不超过加工过程力约束。

[0056] 根据一种实施方式,CNC 控制器 12 和适应性刀具路径生成器 14 可以被实现为通过网络或总线通信的相应计算机或处理器,在替代性实施方式中,CNC 函数和适应性刀具路径生成函数可以是运行在同一台计算机或处理器上的相应的软件模块。通用术语“计算机系统”(以下定义的)包含这些和其他配置。

[0057] 图 8 识别根据另一实施例的用于工件的适应性刀具路径铣削的系统的一些硬件部件。在图 8 中被识别的硬件部件包括被编程以执行 CNC 和适应性刀具路径生成函数的计算机系统 50。硬件部件还包括安装在主轴 30 中的切削刀具 4,主轴 30 根据从计算机系统 50 接收的命令通过主轴马达 42 被驱动旋转;以及支撑台面 36,其通过 X 和 Y 驱动马达 44 和 46 被驱动以沿 X 和 Y 方向移位,所述马达 44 和 46 也根据从计算机系统 50 接收到的命令操作。工件 2 被牢固地安装在支撑台面 36 上并随其一起移动。尽管在图 8 中未示出,不过硬件部件可以进一步包括用于沿 Z 方向移位主轴 30 从而允许计算机系统根据情况调整切削轴向深度的器件。

[0058] 主轴 30 使用的功率由传感器 18a 测量,而支撑台面 36 的 X 和 Y 坐标位置由传感器 18b 测量。传感器数据数字地表示这些测量被反馈至计算机系统 50(经由有线或无线通信渠道)。传感器 18a 可以采取测功计的形式,该测功计测量主轴马达 42 的扭矩和旋转速度,并且然后计算主轴功率。传感器 18b 可以采用相应的测力计形式,所述测力计能够耦接至支撑台面 36 以用于测量由切削刀具 4 施加在工件 2 上的沿 X 和 Y 方向的切削力。

[0059] 计算机系统 50 被编程以执行下列操作:(a) 控制 X 和 Y 驱动马达 44/46 以便切削刀具 4 相对于工件 2 沿着定义的初始刀具路径切削;(b) 在沿着所述定义的初始刀具路径切削期间,接收来自传感器 18a 和 18b 的反馈信号;(c) 处理反馈信号以确定加工过程力参数(如,主轴功率或沿 X 和 Y 方向的切削力)的值;以及(d) 控制 X 和 Y 驱动马达 44/46 以

便切削刀具 4 相对于工件 2 沿着改进的刀具路径切削。改进的刀具路径被计算以产生径向切削深度和加工过程力参数的值的变化,其中所述加工过程力参数的值不超过加工过程力约束。

[0060] 本文公开的适应性刀具路径铣削过程允许在不一致毛坯材料条件上有效的加工操作,例如锻造。除了维持在切削过程期间的加工条件外,本文公开的适应性刀具路径铣削过程还监视过程约束以在加工坚硬材料时识别切削刀具边缘磨损。响应于切削刀具边缘磨损的实时探测,随着铣削过程的继续,切削径向深度能够被改进。更具体地,切削径向深度以产生一致的加工力的方式被改进。在替代方案中,如果切削刀具边缘磨损的程度大于规定的阈值,则切削刀具能够被更换。

[0061] 上述系统和过程在加工操作期间允许切屑厚度被维持至一个有效值,从而导致最佳的切削刀具寿命和最小的成本。另一个益处是允许加工过程维持稳定的约束。在加工过程中的一个共同的问题是关于机器刀具结构和切削刀具稳定性。当超过一定的稳定性阈值时,经历加工振颤,从而导致坏的表面精整度、低的刀具寿命以及对机器刀具或零件的潜在破坏。这是由自激励式的依赖过程的振颤所引起的。能够使用加工动态建模和切削刀具刚性的经验性测试来识别阈值。阈值限制能够被实现用于稳定(非振颤)切削的切削深度。如果超过这个阈值,则进给速率的降低不能纠正加工振颤以维持稳定的过程。阈值是切削深度的函数,对于单个切削轴向深度,通过降低切削径向深度,能够增加切削深度。因此,使用本文公开的系统 and 过程,如果切削刀具磨损产生不稳定的振颤切削,则能够减小切削径向深度。或者,能够增加切削径向深度直到找到该阈值,从而导致有成本效益的加工过程。能够通过监视机器结构颤动、切削力频率或者音频装置来识别不稳定的振颤切削。监视包含获取表示机器颤动的电信号且然后过滤掉切削频率(其可以等于切削刀具的齿通过频率)及其谐波。能够使用算法(如,快速傅立叶变换)识别在过滤的信号中的振颤频率,该算法将振幅转变为频域。该算法能够被结合到由计算机系统执行的适应性刀具路径生成软件模块中。

[0062] 上面公开的铣削设备和方法可以被应用在如图 9 所示的飞机制造和使用方法 200 中,以用于组装如图 10 中所示的飞机 202。在预生成期间,示例方法 200 可以包括飞机 202 的规格和设计 204 及材料采购 206。在生产期间,飞机 202 的部件和子组件制造 208 和系统整合 210 发生。部件制造包括但不限于本文所公开的类型铣削操作。在系统整合 210 后,飞机 202 可以经过认证和交付 212 以便投入使用 214。在客户使用中,飞行器 202 定期进行日常维护和维修 216(这也可以包括改进、重构、翻新等等)。

[0063] 方法 200 的每个过程可以由系统集成商、第三方和/或操作者(例如客户)完成或执行。对于本描述,系统集成商可以包括但不限于任何数量的飞行器制造者和主系统分包商;第三方可以包括但不限于任何数量的销售商、分包商和供应商;并且操作者可以是航空公司、租赁公司、军事实体、服务组织等等。

[0064] 如图 10 所示,根据示例性方法 200 生产的飞机 202 可以包括具有多个系统 220 和内部 222 的机身 228。高级系统 220 的示例包括以下的一个或多个:推进系统 224、电气系统 226、液压系统 228 以及环境控制系统 230。还可以包括任意数量的其他系统。系统 220 中的至少一些可以包括使用本文所公开类型的铣削操作加工的部件。

[0065] 一个或更多个设备实施例、方法实施例或者其组合可以在部件制造阶段 210 期间

被使用。因为用于制造飞机部件的潜在成本节约的原因,适应性刀具路径铣削的使用是值得的。最显著的成本节约将是由于用于铣削大型坚硬金属部件(诸如由钛或不锈钢制成的部件)的运行时间的降低。

[0066] 虽然参考各种实施例描述了本发明,不过本领域的技术人员应当理解可以做出的各种变化并且等价物可以替代元件,而不脱离本发明的范围。此外,许多改进可以被做出以使得本文的教导适应于具体情形而不脱离本发明的范围。因此,权利要求不局限于本文公开的具体实施例。

[0067] 如在权利要求中所使用的,术语“计算机系统”应该被宽泛地解释为包括具有至少一个计算机或处理器的系统,并且其可以具有多个计算机或处理器来通过网络或总线通信。如在之前的句子中使用的,术语“计算机”和“处理器”二者指的是具有处理单元(如,中央处理单元)和用于存储程序的一些存储器形式(即,计算机可读介质)的装置,其中所述程序可以由处理单元读取。

[0068] 此外,本公开包含根据以下条款的实施例:

[0069] 条款 1:一种使用附接至主轴的切削刀具加工工件的方法,该方法包含:

[0070] (a) 使用零件定义数据相对于工件定义所述切削刀具的初始刀具路径;

[0071] (b) 导致所述切削刀具相对于所述工件沿着所定义的初始刀具路径切削;

[0072] (c) 在沿着所述定义的初始刀具路径切削期间,接收表示加工过程条件的传感器数据;

[0073] (d) 处理所述传感器数据以确定加工过程力参数的值;以及

[0074] (e) 导致所述切削刀具相对于所述工件沿着所改进的刀具路径切削,以便径向切削深度改变并且所述加工过程力参数的值不超过加工过程力约束,

[0075] 其中,操作(b)至(e)由计算机系统执行。

[0076] 条款 2:根据条款 1 所述的方法,其中,所述加工过程力参数是所述切削刀具的切削力。

[0077] 条款 3:根据条款 1 所述的方法,其中,所述加工过程力参数是主轴功率。

[0078] 条款 4:根据条款 1 所述的方法,其中,操作(e)包含导致所述切削刀具或者所述工件相对于彼此移动以便所述切削刀具或者所述工件沿正交于当前移动方向的方向移动。

[0079] 条款 5:根据条款 1 所述的方法,还包含:探测振颤的水平并且然后确定所探测到的振颤的水平是否超过规定的稳定性约束。

[0080] 条款 6:根据条款 5 所述的方法,其中,所述切削刀具相对于所述工件沿着所改进的刀具路径切削,以便响应振颤水平超过所述规定的稳定性约束的探测结果,切削径向深度减小。

[0081] 条款 7:根据条款 5 所述的方法,还包含更换所述切削刀具以响应振颤水平超过所述规定的稳定性约束的探测结果。

[0082] 条款 8:一种铣削机床,包含:

[0083] 可旋转主轴;

[0084] 用于驱动所述主轴的旋转的第一马达;

[0085] 附接至所述主轴的切削刀具;

[0086] 支撑台面,所述主轴和所述支撑台面相对于彼此可移动;

[0087] 用于使所述主轴和所述支撑台面分别沿着第一和第二轴线相对于彼此移动的第二和第三马达；

[0088] 用于产生反馈信号的一个或更多个传感器，所述反馈信号表示一个或更多个加工过程参数的值；以及

[0089] 计算机系统，其被操作地耦接成接收来自所述一个或更多个传感器的所述反馈信号并向所述第一至第三马达发送命令信号，其中，所述计算机系统被编程以在加工已被附接至所述支撑台面的工件期间执行下列操作：

[0090] (a) 控制所述第二和第三马达以便所述切削刀具相对于所述工件沿着定义的初始刀具路径切削；

[0091] (b) 在沿着所述定义的初始刀具路径切削期间，接收来自所述一个或更多个传感器的反馈信号；

[0092] (c) 处理反馈信号以确定加工过程力参数的值；以及

[0093] (d) 控制所述第二和第三马达以便所述切削刀具相对于所述工件沿着改进的刀具路径切削，其中，所述改进的刀具路径导致所述径向切削深度和所述加工过程力参数的值的变化，其中所述加工过程力参数的值不超过加工过程力约束。

[0094] 条款 9：根据条款 8 所述的铣削机床，其中，所述加工过程力参数是所述切削刀具的切削力。

[0095] 条款 10：根据条款 8 所述的铣削机床，其中，所述加工过程力参数是主轴功率。

[0096] 条款 11：根据条款 8 所述的铣削机床，其中，操作 (e) 包含导致所述切削刀具或者所述工件相对于彼此移动以便所述切削刀具或者所述工件沿正交于当前移动方向的方向移动。

[0097] 条款 12：根据条款 8 所述的铣削机床，还包含：探测振颤的水平并且然后确定所探测到的振颤的水平是否超过规定的稳定性约束。

[0098] 条款 13：根据条款 12 所述的铣削机床，其中，所述切削刀具相对于所述工件沿着改进的刀具路径切削，以便响应振颤水平超过所述规定的稳定性约束的探测结果，切削径向深度减小。

[0099] 条款 14：一种用于不一致材料预成型件的 CNC 切削的方法，包含：

[0100] (a) 使用零件定义数据相对于预成型件定义初始刀具开始位置和初始刀具轨线；

[0101] (b) 将切削刀具放置在所述初始刀具开始位置处；

[0102] (c) 旋转所述切削刀具；

[0103] (d) 当所述切削刀具旋转时，使所述切削刀具和所述预成型中的一者相对于另一者移动，以便所述切削刀具沿着所述初始刀具轨线切削；

[0104] (e) 当所述切削刀具和所述工件中的一者相对于另一者移动时，感测加工条件；以及

[0105] (f) 当加工条件被感测时，调整所述刀具路径以便所述切削刀具遵循不同于所述初始刀具轨线的轨线并且所述径向切削深度变化，所述调整被计算成维持加工条件在加工过程力约束内。

[0106] 条款 15：根据条款 14 所述的方法，其中，所述加工条件是所述切削刀具的切削力。

[0107] 条款 16：根据条款 14 所述的方法，其中，所述加工条件是主轴功率。

[0108] 在权利要求中提出的方法权利要求不应该被解释为要求所叙述的那些步骤按字母顺序（在权利要求中使用字母顺序的目的只是为了参考之前所叙述的步骤）或者按所叙述的顺序执行。也不应该被解释为排除同时地或交替地被执行的两个或更多个步骤中的任何部分。

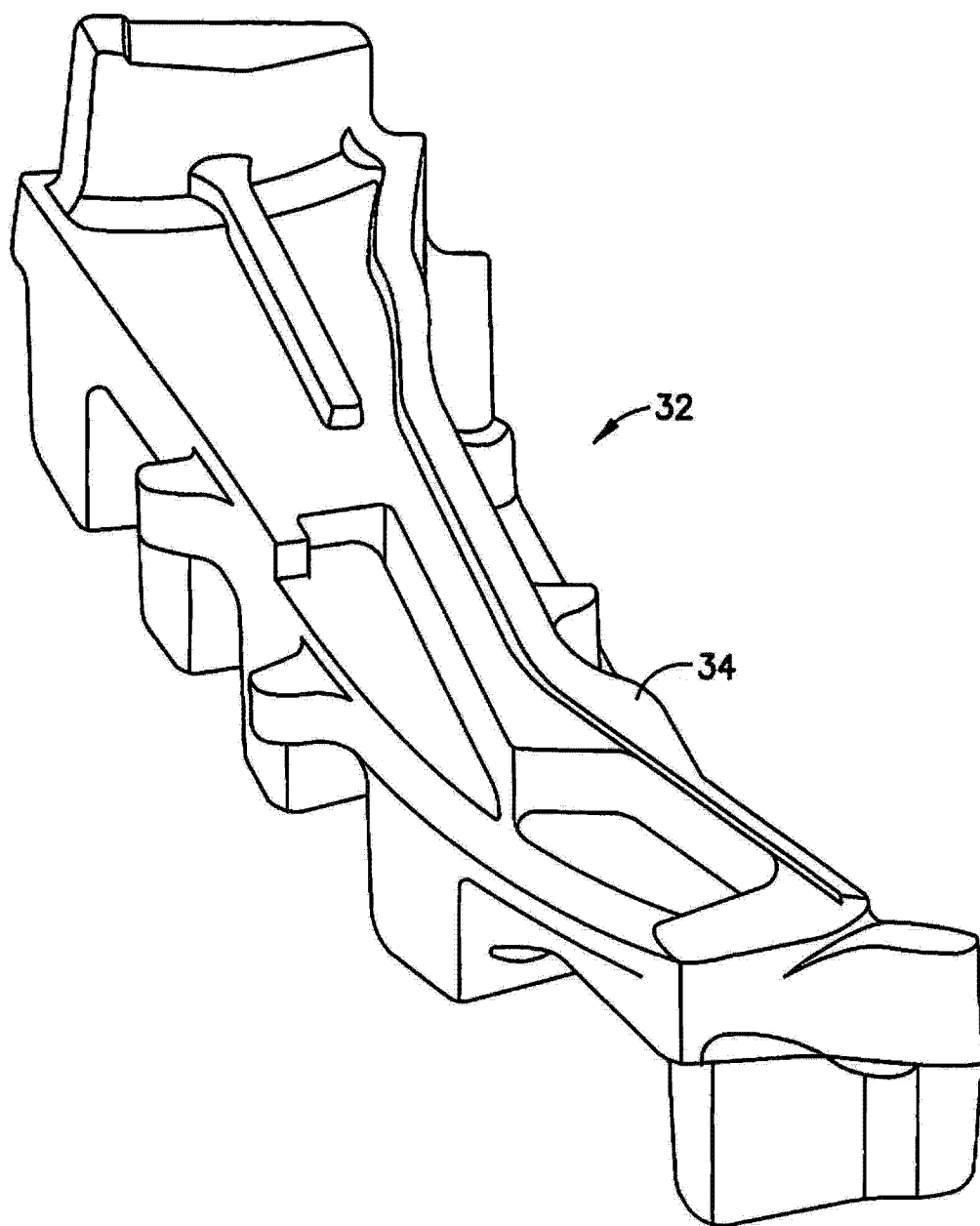


图 1

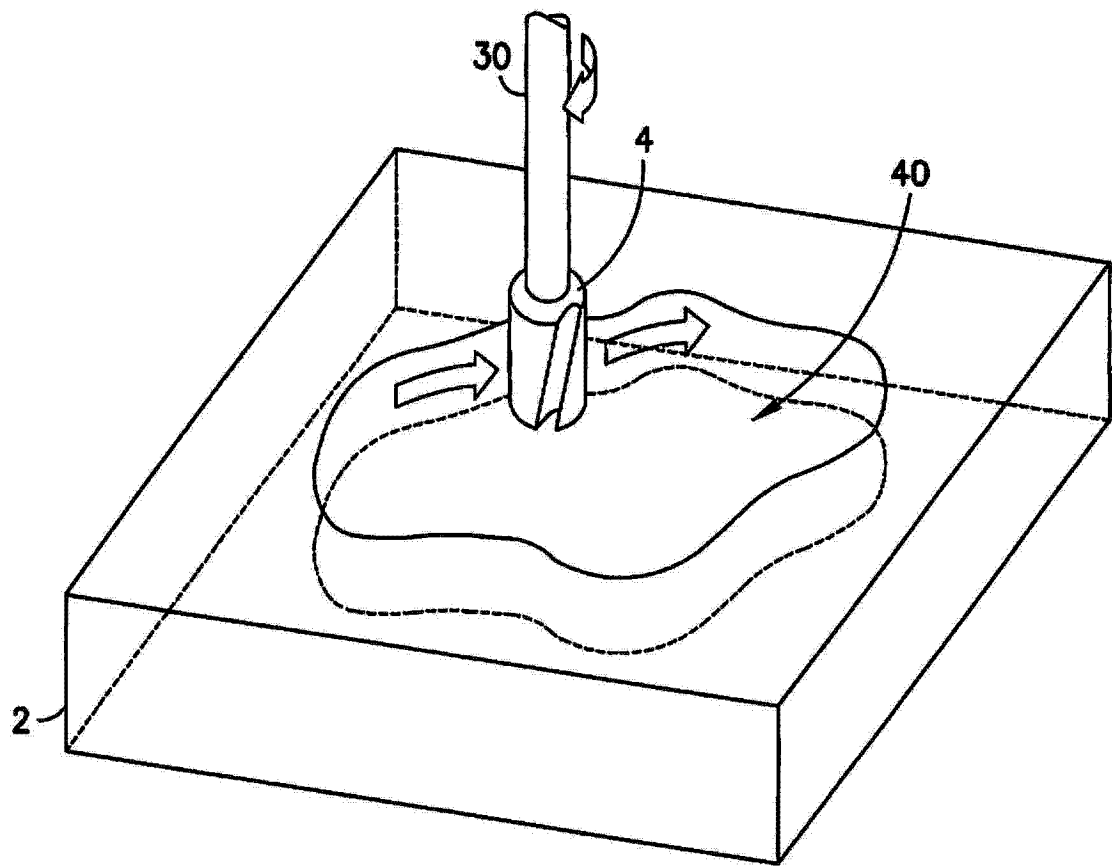


图 2

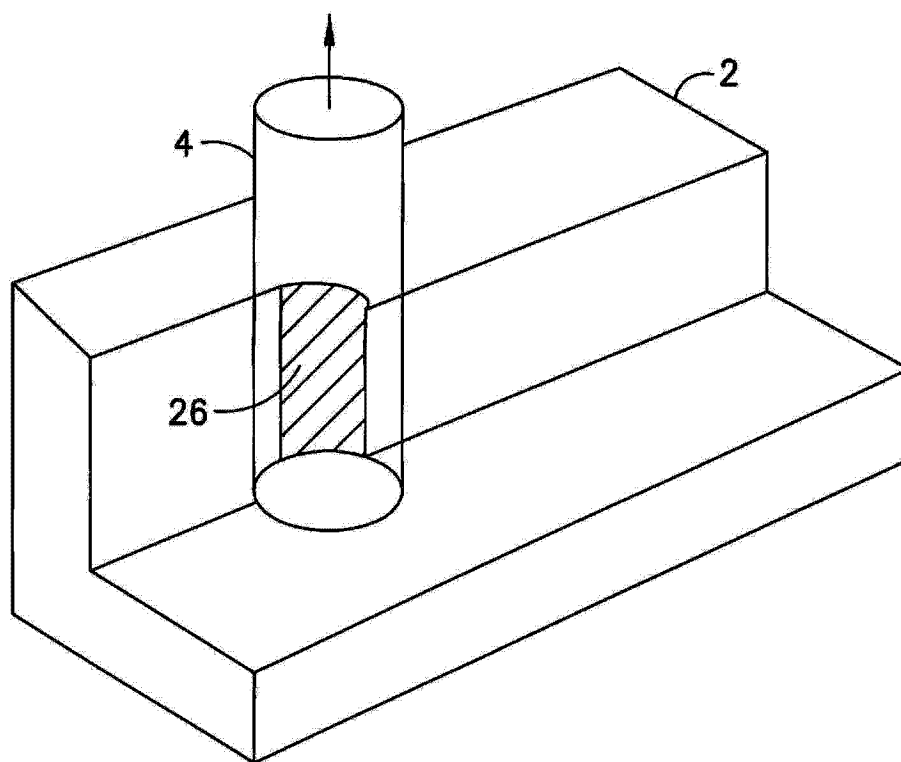


图 3

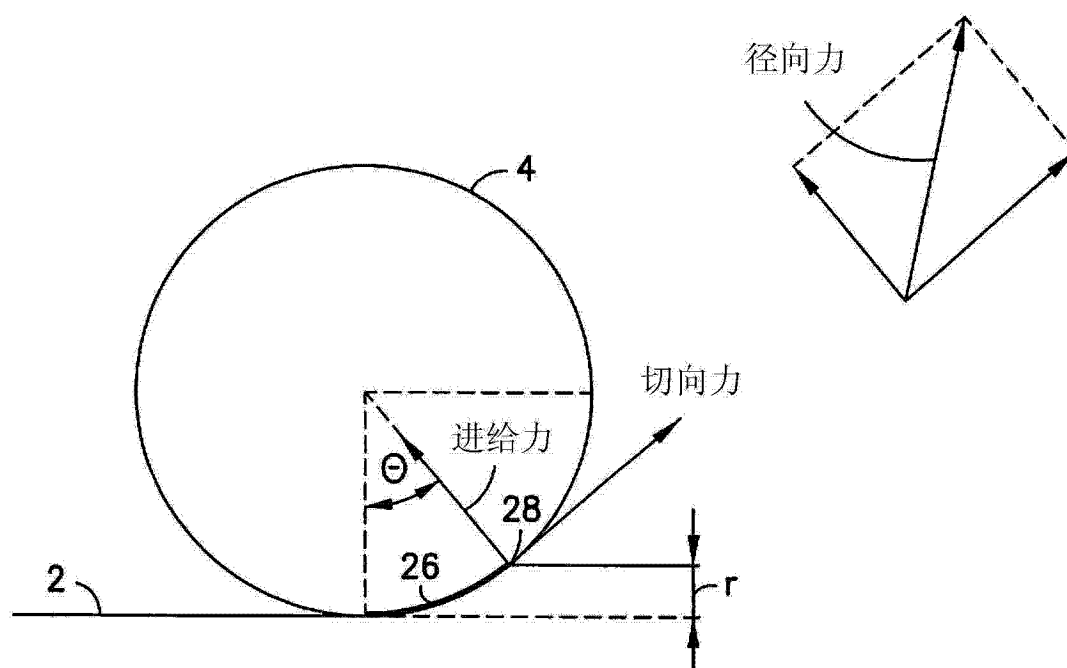


图 4

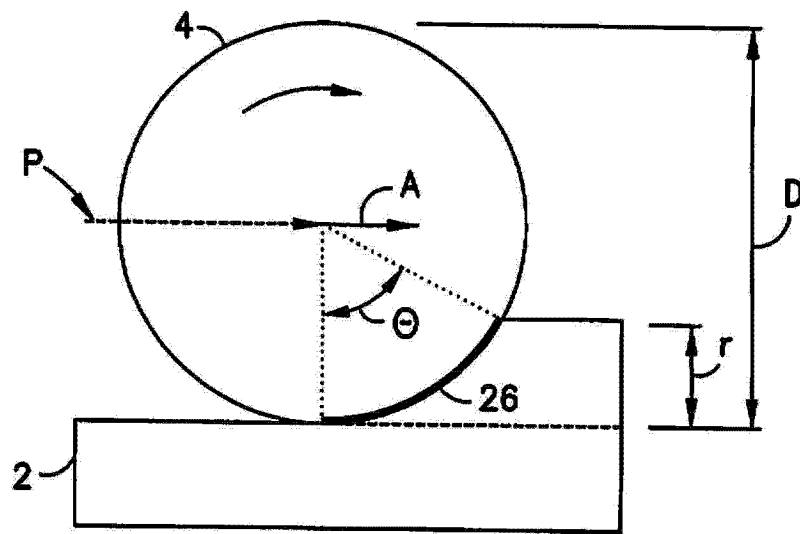


图 5A

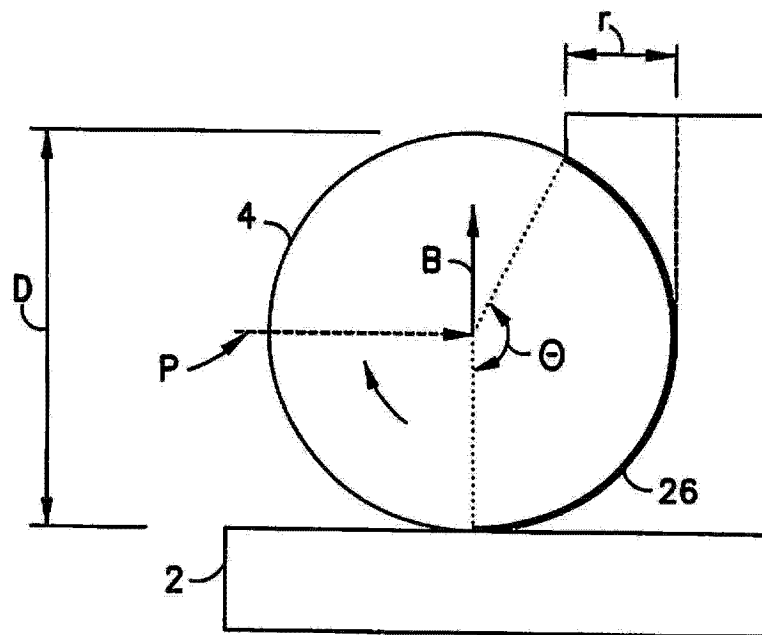


图 5B

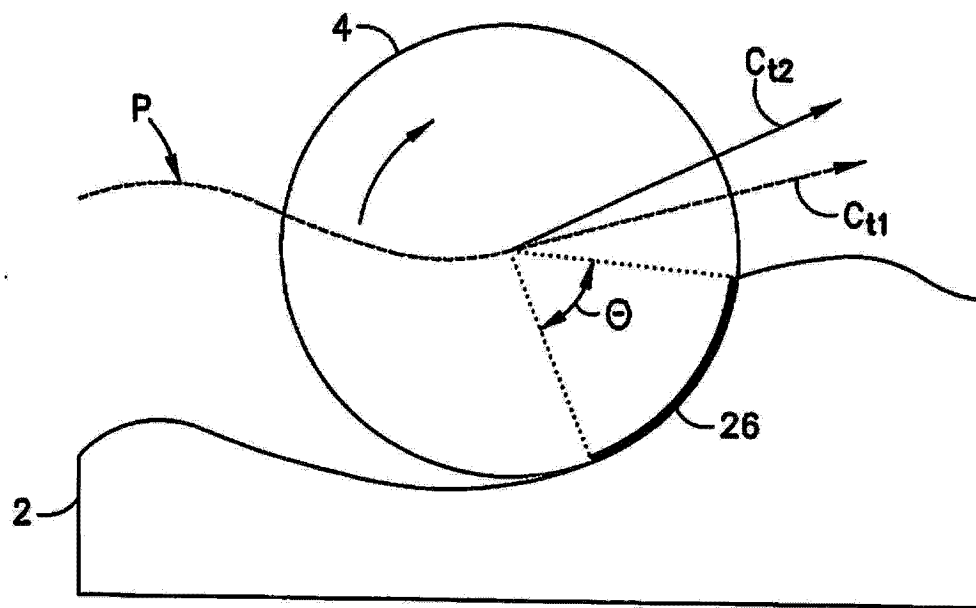


图 6

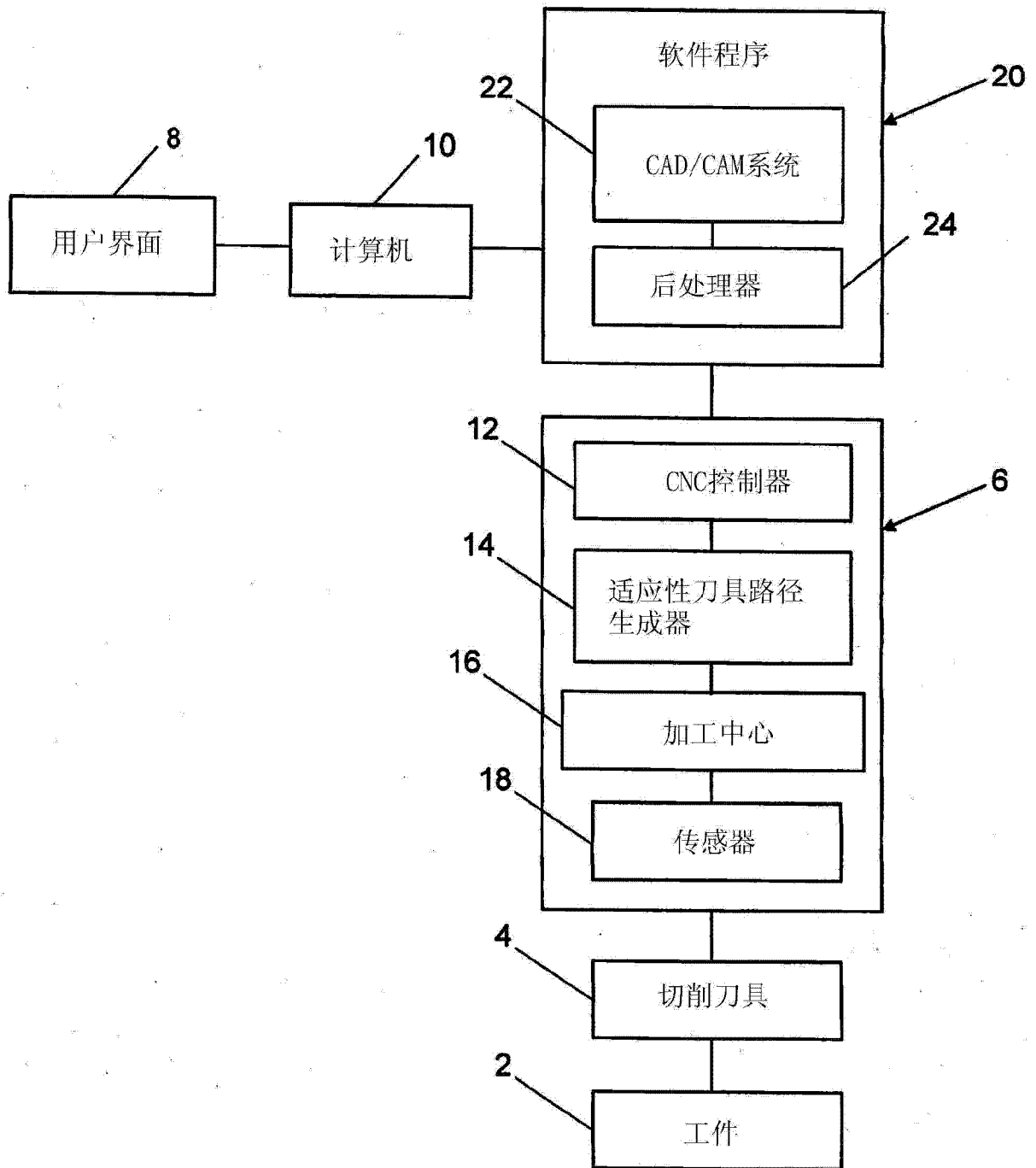


图 7

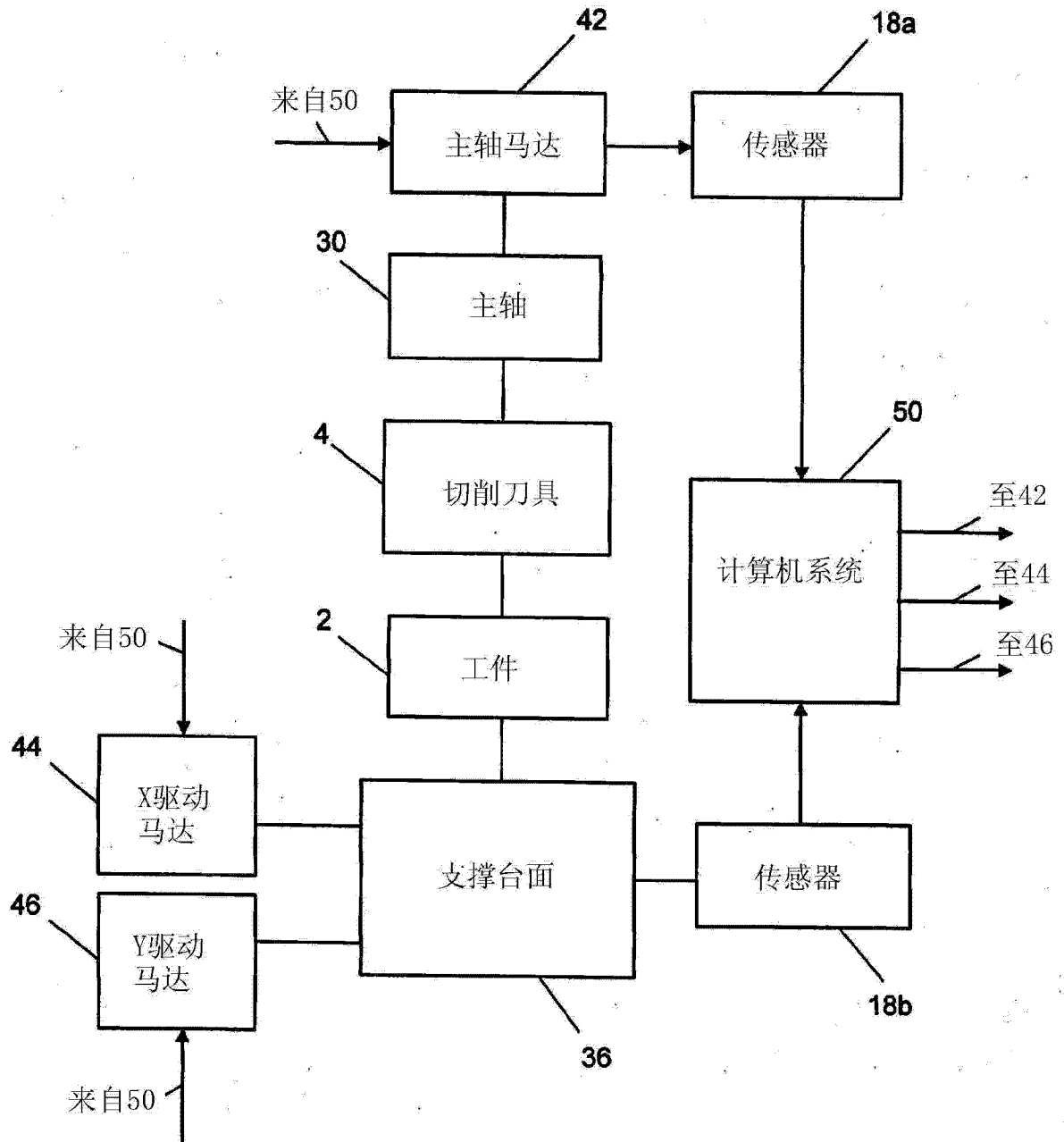


图 8

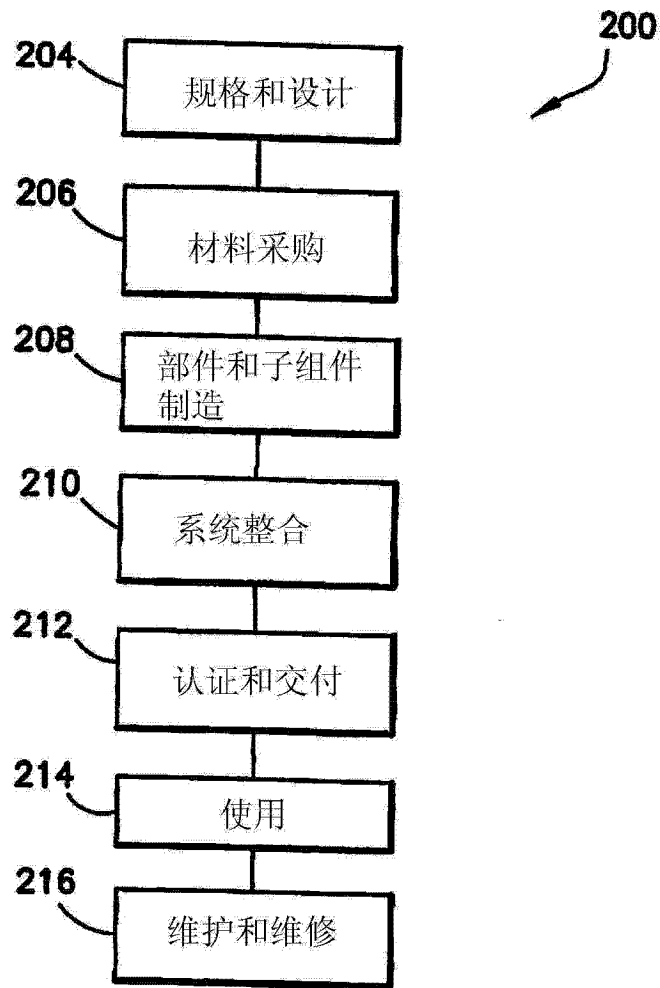


图 9

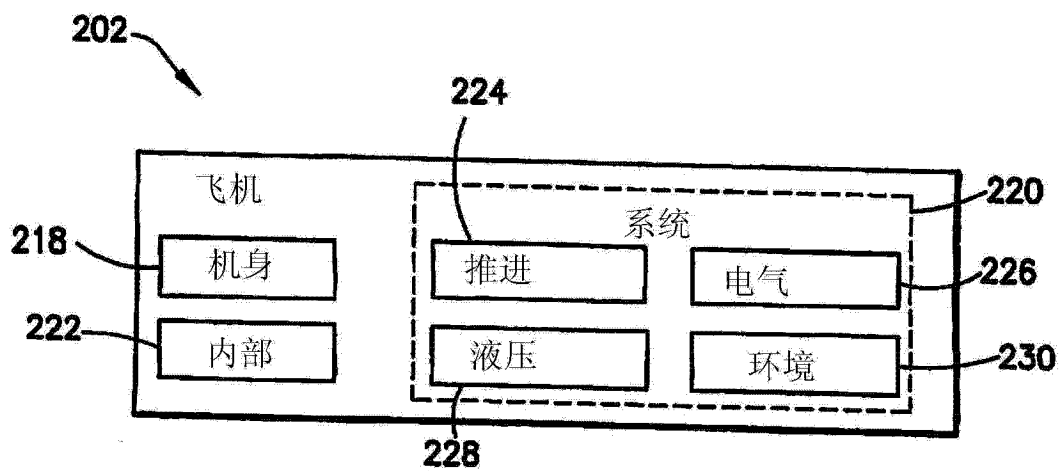


图 10