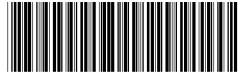


(19) 中华人民共和国国家知识产权局



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102350509 A

(43) 申请公布日 2012. 02. 15

(21) 申请号 201110239691. 7

(22) 申请日 2011. 08. 20

(71) 申请人 吉林大学

地址 130022 吉林省长春市人民大街 5988
号

(72) 发明人 周晓勤 罗丹 林洁琼

(74) 专利代理机构 吉林长春新纪元专利代理有
限责任公司 22100

代理人 魏征骥

(51) Int. Cl.

B23B 1/00 (2006. 01)

权利要求书 2 页 说明书 8 页 附图 7 页

(54) 发明名称

一种等切屑载荷车削复杂光学曲面的方法

(57) 摘要

本发明涉及一种等切屑载荷车削复杂光学曲面的方法，属于复杂光学精密制造领域，根据目标光学曲面，分别创建第一次走刀的待加工表面和期望创成的光学曲面，以“等切屑载荷”为目标生成第一次走刀的刀位路径；对第一次走刀获得的已加工表面进行在机或机下实测，分别创建第二次走刀的待加工表面和期望创成的光学曲面，以“等切屑载荷”为目标生成第二次走刀的刀位路径；在这两次走刀中生成的刀位路径皆利用两自由度快速刀具伺服的往复运动以及高精密数控车床主轴、x轴和 z轴的非往复运动同步实现。优点是：通过相继两次走刀即可消除切削力扰动所致的面形误差；不必依赖于昂贵的多轴超精密车床即可切削创成复杂光学曲面。

1. 一种等切屑载荷车削复杂光学曲面的方法,其特征在于:

(1) 根据目标光学曲面,分别创建第一次走刀的待加工表面和期望创成的光学曲面,以“等切屑载荷”为目标生成第一次走刀的刀位路径;

(2) 对第一次走刀创成的已加工表面进行在机或机下实测,分别创建第二次走刀的待加工表面和期望创成的光学曲面,以“等切屑载荷”为目标生成第二次走刀的刀位路径;

(3) 为两次走刀生成的“等切屑载荷”刀位路径皆利用两自由度快速刀具伺服的两个往复运动以及高精密数控车床的主轴、 x 轴和 z 轴的非往复运动实现。

2. 一种等切屑载荷车削复杂光学曲面的方法,其特征在于包括如下步骤:

(1) 创建第一次走刀的初始待加工表面和期望创成的表面:

根据预先设计的目标光学曲面,通过分配加工余量分别创建第一次走刀的期望创成曲面 $S_0^{(1)}$ 和第二次走刀的期望创成表面初值 $S_0^{(2)}$, 在工件的柱坐标系 $\theta_w - \rho_w z_w$ 中将 $S_0^{(1)}$ 分别沿径向和周向作等步距离散化,通过拟合生成回转对称的最适非球面,作为第一次走刀的初始待加工表面 $S_1^{(1)}$;

(2) 生成工件第 1 转的刀位路径:

令 L_0 是平均切屑载荷, ΔL 是切屑载荷的扰动幅值,根据预先设定的切屑载荷扰动范围 $L_0 \pm \Delta L$, 确定第 1 转的最大径向进给量 f_{\max} , 根据 f_{\max} 确定刀位点的径向步距 $\Delta \rho = f_{\max} / N_0$, N_0 是每一转的等角步距数,则第 1 转第 j 个刀位点的转角坐标和径向坐标分别为: $\theta_{1,j} = \theta_{1,j-1} + \Delta \theta$, $\rho_{1,j} = \rho_{1,j-1} - \Delta \rho$, $\Delta \theta = 2\pi/N_0$, 顺次遍历 $j = 1, 2, \dots, N_0$, 即可生成第 1 转的刀位路径 $(\theta_{1,j}, \rho_{1,j}, z_{1,j})_{j=1}^{N_0}$, $z_{1,j}$ 是第 1 转第 j 个刀位点的 z 坐标;

(3) 生成工件第 k 转的刀位路径:

根据预先设定的切屑载荷扰动范围 $L_0 \pm \Delta L$, 由第 k 转第 $j-1$ 个刀位点的坐标 $(\theta_{k,j-1}, \rho_{k,j-1}, z_{k,j-1})$, 以“等切屑载荷”为控制目标获得第 k 转第 j 个刀位点的坐标 $(\theta_{k,j}, \rho_{k,j}, z_{k,j})$, 遍历 $j = 1, 2, \dots, N_0$, 以生成第 k 转的刀位路径 $(\theta_{k,j}, \rho_{k,j}, z_{k,j})_{j=1}^{N_0}$, 逐转求解即可生成工件各转的刀位路径;

(4) 分别生成车床和快速刀具伺服第一次走刀的期望运动:

将工件各转的刀位路径 (θ, x, z) 分解为单调的趋势成分 (θ, x_0, z_0) 和扰动成分 $(\theta, \Delta x, \Delta z)$, 在车床的 CNC 指令驱动下沿 x 轴和 z 轴作非往复的直线运动 (θ, x_0, z_0) , 在两自由度快速刀具伺服的驱动下沿 x 轴和 z 轴作往复直线运动 $(\theta, \Delta x, \Delta z)$;

(5) 创建第二次走刀的待加工表面和期望创成曲面:

在第一次走刀之后,对所获得的已加工表面 S_1 进行在机或机下实测,通过二维小波分解及重构,或者其它多分辨率分解及重构方法,以剔除 S_1 中不重复的随机误差,分别得到一个包含确定性误差的曲面 $S_1^{(2)}$ 和一个单纯的确定性误差曲面 ΔS , 将 $S_1^{(2)}$ 作为第二次走

刀的初始待加工表面，则第二次走刀的期望创成曲面为： $S_0^{(2)} = S_0^{(1)} - \Delta S$ ；

(6) 分别生成车床和快速刀具伺服各运动轴第二次走刀的期望运动：

在步骤(5)的基础上，重复步骤(2)～(4)，得到第二次走刀的“等切屑载荷”刀位路径 $(\theta_{k,j}, \rho_{k,j}, z_{k,j})_{j=1}^{N_k}$ ， $k=1, 2, \dots$ ，通过分解以获得单调的趋势成分 (θ, x_0, z_0) 和扰动成分 $(\theta, \Delta x, \Delta z)$ ，利用所获得的各运动轴之期望运动进行第二次走刀。

3. 根据权利要求1或2所述的一种等切屑载荷车削复杂光学曲面的方法，其特征在于：生成以“等切屑载荷”为目标的刀位路径，涉及的同步操作如下：

(1) 动态修改待加工表面 S_1 ：

将初始待加工表面 S_1 在工件的笛卡尔坐标系 $\sigma_w - x_w y_w z_w$ 中分别沿x轴和y轴进行等距细分，令第 k 转第 j 个刀位点是当前的刀位点，获得在 S_1 上由第 $j-1$ 个刀位点到第 j 个刀位点之间刀尖轮廓所扫描到的网格点，根据 S_1 上的这些网格点和关联的刀尖轮廓点即可动态修改 S_1 ；

(2) 求解瞬态切屑载荷 L_{chip} ：

将初始待加工表面 S_1 在工件的笛卡尔坐标系 $\sigma_w - x_w y_w z_w$ 中分别沿 x 轴和 y 轴进行等距细分，令第 k 转第 j 个刀位点是当前的刀位点，在工件的坐标平面 $\sigma_w - x_w z_w$ 上搜索以当前刀位点为中心的邻域，获得 S_1 上与当前刀位点相邻的若干个网格点，根据这些网格点求解 S_1 与前刀面实际接触区域的边界点，根据这些接触区域的边界点求解材料去除量在刀具基面上的投影即为瞬态切屑载荷 L_{chip} ；

(3) 生成等切屑载荷的刀位点：

令 $\Delta\theta = 2\pi/N_0$ 是等角步距， $\Delta\rho_I$ 是径向试算步距，则第 k 转第 j 个刀位点的转角坐标为： $\theta_{k,j} = \theta_{k,j-1} + \Delta\theta$ ，第 j 个刀位点的径向坐标初值为： $\rho_{k,j} = \rho_{k,j-1} + \Delta\rho_I$ ，根据刀触点与刀位点之间的映射，获得第 j 个刀位点的 z 坐标 $z_{k,j}$ ；

根据当前刀位点的坐标初值，求解瞬态切屑载荷 L_{chip} ，若 L_{chip} 不超出 $L_0 \pm \Delta L$ ，则当前的刀位点坐标即为第 k 转第 j 个刀位点的坐标，否则需在当前的径向坐标 $\rho_{k,j}$ 的邻域内修改 $\Delta\rho_I$ ，重新求解 $z_{k,j}$ 和 L_{chip} ，直到 L_{chip} 不超出 $L_0 \pm \Delta L$ 为止；

遍历 $j=1, 2, \dots, N_0$ ，以获得第 k 转的刀位路径。

一种等切屑载荷车削复杂光学曲面的方法

技术领域

[0001] 本发明属于复杂光学精密制造领域,特别是涉及一种等切屑载荷车削复杂光学曲面的方法。

背景技术

[0002] 复杂光学曲面包括两个方面的内涵:其一是指回转对称、且轴截面曲线非单调的非球光学曲面;其二是指没有回转对称性的光学曲面。

[0003] 复杂曲面光学零件在航天航空、国防和科学仪器等许多重要的工业领域以及民用光电产品中皆有十分广泛的应用需求,如何高效、低成本地创成具有复杂几何特征和高质量要求的光学曲面已成为推动这些领域发展的关键之一。迄今为止,复杂光学曲面的创成方法主要涉及:复制成形、磨削、研抛、飞切和车削等。在这些创成方法中,利用快速刀具伺服(以下简称FTS)或慢速溜板伺服(以下简称S³)的车削被普遍认为是一种最有发展前途的复杂光学曲面创成方法。该方法的基本特征是:将工件安装在主轴前端,刀具沿车床x轴作非往复的恒径向进给,利用单自由度的FTS或S³驱动刀具相对于加工表面沿着z轴作往复直线运动,以切削创成所期望的光学曲面。为叙述方便,在后续内容中,将该方法简称为恒径向进给车削方法。

[0004] 然而,利用恒径向进给车削方法创成复杂光学曲面,不可避免地存在着非常大的切屑载荷扰动并依赖于刀触点或刀位点的坐标,这必将导致切削力的明显扰动。在复杂光学曲面车削系统中,FTS装置或S³运动轴皆是刚性较为薄弱的环节,因此在扰动切削力的作用下必将严重影响所获得的面形精度。在现有的利用FTS或S³车削中,为了消除切削力扰动所致的面形误差,往往需进行多次重复误差校正车削,这降低了切削效率,而且多次重复误差校正未必是误差收敛的。

发明内容

[0005] 本发明针对复杂光学曲面创成,提出一种等切屑载荷车削复杂光学曲面的方法。

[0006] 本发明的目的是:针对复杂光学曲面创成,提出一种利用两自由度FTS的等切屑载荷车削方法,以使在车削过程中对于所有的刀位点获得一致性的切屑载荷,从而抑制切屑载荷扰动所致的面形误差,亦即切削力扰动所致的面形误差。

[0007] 本发明的特征主要是:

(1)根据目标光学曲面,分别创建第一次走刀的待加工表面和期望创成的光学曲面,以“等切屑载荷”为目标生成第一次走刀的刀位路径;

(2)对第一次走刀创成的已加工表面进行在机或机下实测,分别创建第二次走刀的待加工表面和期望创成的光学曲面,以“等切屑载荷”为目标生成第二次走刀的刀位路径;

(3)为两次走刀生成的“等切屑载荷”刀位路径皆利用两自由度快速刀具伺服的两个往复运动以及高精密数控车床的主轴、x轴和z轴的非往复运动实现。

[0008] 本发明通过如下的步骤实施:

(1) 创建第一次走刀的初始待加工表面和期望创成的曲面：

根据预先设计的光学曲面,通过分配加工余量分别获得第一次走刀的期望创成曲面 $S_0^{(1)}$ 和第二次走刀的期望创成表面初值 $S_0^{(2)}$,在工件的柱坐标系 $\rho_w - \theta_w, \rho_w z_w$ 中将 $S_0^{(1)}$ 分别沿径向和周向作等步距离散化,通过拟合创建回转对称的最适非球面,作为第一次走刀的初始待加工表面 $S_1^{(1)}$;

(2) 生成工件第 1 转的刀位路径：

令 L_0 是平均切屑载荷, ΔL 是切屑载荷的扰动幅值,根据预先设定的切屑载荷扰动范围 $L_0 \pm \Delta L$,确定第 1 转的最大径向进给量 f_{\max} ,根据 f_{\max} 确定刀位点的径向步距 $\Delta\rho = f_{\max} / N_0$, N_0 是每一转的等角步距数,则第 1 转第 j 个刀位点的转角坐标和径向坐标分别为: $\theta_{1,j} = \theta_{1,j-1} + \Delta\theta$, $\rho_{1,j} = \rho_{1,j-1} + \Delta\rho$, $\Delta\theta = 2\pi/N_0$,遍历 $j = 1, 2, \dots, N_0$,即可生成第 1 转的刀位路径；

(3) 生成工件第 k 转的刀位路径：

根据预先设定的切屑载荷扰动范围 $L_0 \pm \Delta L$,由第 k 转第 $j-1$ 个刀位点的坐标 $(\theta_{k,j-1}, \rho_{k,j-1}, z_{k,j-1})$,以“等切屑载荷”为控制目标获得第 k 转第 j 个刀位点的坐标 $(\theta_{k,j}, \rho_{k,j}, z_{k,j})$,遍历 $j = 1, 2, \dots, N_0$,以获得第 k 转的刀位路径,逐转求解即可生成工件各转的刀位路径；

(4) 生成各运动轴第一次走刀所需的期望运动：

将工件各转的刀位路径 (θ, x, z) 分解为单调的趋势成分 (θ, x_0, z_0) 和扰动成分 $(\theta, \Delta x, \Delta z)$,在车床的 CNC 指令驱动下沿 x 轴和 z 轴实现非往复直线运动 (θ, x_0, z_0) ,在两自由度 FTS 的驱动下沿 x 轴和 z 轴作往复直线运动 $(\theta, \Delta x, \Delta z)$ ；

(5) 创建第二次走刀的待加工表面和期望创成曲面：

在第一次走刀之后,对已加工表面 S_1 进行在机或机下实测,通过二维小波分解及重构,或者其它多分辨率分解及重构方法,以剔除 S_1 中不重复的随机误差,分别得到一个包含确定性误差的曲面 $S_1^{(2)}$ 和一个单纯的确定性误差曲面 ΔS ,将 $S_1^{(2)}$ 作为第二次走刀的初始待加工表面,则第二次走刀的期望创成曲面为: $S_0^{(2)} = S_0^{(2)} - \Delta S$ ；

(6) 生成各运动轴第二次走刀的期望运动：

在步骤(5)的基础上,重复步骤(2)~(4),得到第二次走刀所需的“等切屑载荷”刀位路径 $(\theta_{k,j}, \rho_{k,j}, z_{k,j})$, $j = 1, 2, \dots, N_0$, $k = 1, 2, \dots$,分解获得单调的趋势成分 (θ, x_0, z_0) 和扰动成分 $(\theta, \Delta x, \Delta z)$,利用所生成的各运动轴之期望运动进行第二次走刀。

[0009] 本发明所述的生成以“等切屑载荷”为目标的刀位路径,主要涉及如下的同步操作:

(1) 动态修改待加工表面 S_1 :

将初始待加工表面 S_1 在工件的笛卡尔坐标系 $o_w - x_w y_w z_w$ 中分别沿 x 轴和 y 轴进行等距细分，令第 k 转第 j 个刀位点是当前的刀位点，获得在 S_1 上由第 $j-1$ 个刀位点到第 j 个刀位点之间刀尖轮廓所扫掠到的网格点，根据 S_1 上的这些网格点和关联的刀尖轮廓点即可动态修改 S_1 ；

(2) 求解瞬态切屑载荷 L_{chip} ：

将初始待加工表面 S_1 在工件的笛卡尔坐标系 $o_w - x_w y_w z_w$ 中分别沿 x 轴和 y 轴进行等距细分，令第 k 转第 j 个刀位点是当前的刀位点，在工件的坐标平面 $o_w - x_w y_w$ 上搜索以当前刀位点为中心的邻域，获得 S_1 上与当前刀位点相邻的若干个网格点，根据这些网格点求解 S_1 与前刀面实际接触区域的边界点，根据这些接触区域的边界点求解材料去除量在刀具基面上的投影即可获得瞬态切屑载荷 L_{chip} ；

(3) 获得等切屑载荷的刀位点：

令 $\Delta\theta = 2\pi/N_0$ 是等角步距， $\Delta\rho_z$ 是径向试算步距，则第 k 转第 j 个刀位点的转角坐标为： $\theta_{k,j} = \theta_{k,j-1} + \Delta\theta$ ，第 j 个刀位点的径向坐标初值为： $\rho_{k,j} = \rho_{k,j-1} + \Delta\rho_z$ ，根据刀触点与刀位点之间的映射，获得第 j 个刀位点的 z 坐标 $z_{k,j}$ ；

根据当前刀位点的坐标初值，求解瞬态切屑载荷 L_{chip} ，若 L_{chip} 不超出 $L_0 \pm \Delta L$ ，则当前的刀位点坐标即为第 k 转第 j 个刀位点的坐标，否则需在当前的径向坐标 $\rho_{k,j}$ 的邻域内修改 $\Delta\rho_z$ ，重新求解 $z_{k,j}$ 和 L_{chip} ，直到 L_{chip} 不超出 $L_0 \pm \Delta L$ 为止；

遍历 $j = 1, 2, \dots, N_0$ ，以获得第 k 转的刀位路径。

[0010] 本发明的优点主要在于：

(1) 通过两次相继走刀即可抑制切屑载荷对刀位点坐标的依赖，从而消除切削力扰动所致的面形误差；

(2) 不必依赖于昂贵的多轴超精密数控车床，仅需将一台两自由度 FTS 安装在一台两轴高精密数控车床上，通过一个高精密的主轴角编码器触发驱动各运动轴即可实施。

[0011] 本发明适用于要求高效精密低成本地创成复杂光学曲面的场合。

[0012]

附图说明

[0013] 图 1 (a) 是利用等切屑载荷车削方法，为第一次走刀所生成的三维刀位路径；

图 1 (b) 是在等切屑载荷车削的第一次走刀中，瞬态切屑载荷对工件转数的依赖特征；

图 2 (a) 是利用恒径向进给车削方法，为第一次走刀所生成的三维刀位路径；

图 2 (b) 是在恒径向进给车削的第一次走刀中，瞬态切屑载荷对工件转数的依赖特征；

图 3 (a) 是利用等切屑载荷车削方法，通过第一次走刀所获得的面形误差；

- 图 3 (b) 是利用恒径向进给车削方法, 通过第一次走刀所获得的面形误差;
 图 4 (a) 是利用等切屑载荷车削方法, 为第二次走刀所生成的三维刀位路径;
 图 4 (b) 是在等切屑载荷车削的第二次走刀中, 瞬态切屑载荷对工件转数的依赖特征;
 图 5 (a) 是利用恒径向进给车削方法, 为第二次走刀所生成的三维刀位路径;
 图 5 (b) 是在恒径向进给车削的第二次走刀中, 瞬态切屑载荷对工件转数的依赖特征;
 图 6 (a) 是利用等切屑载荷车削方法, 通过第一次走刀所获得的面形误差;
 图 6 (b) 是利用恒径向进给车削方法, 通过第一次走刀所获得的面形误差。

[0014]

具体实施方式

[0015] (1) 根据目标光学曲面, 分别创建第一次走刀的待加工表面和期望创成的光学曲面, 以“等切屑载荷”为目标生成第一次走刀的刀位路径;

(2) 对第一次走刀创成的已加工表面进行在机或机下实测, 分别创建第二次走刀的待加工表面和期望创成的光学曲面, 以“等切屑载荷”为目标生成第二次走刀的刀位路径;

(3) 为两次走刀生成的“等切屑载荷”刀位路径皆利用两自由度快速刀具伺服的两个往复运动以及高精密数控车床的主轴、 x 轴和 z 轴的非往复运动实现。

[0016] 一种等切屑载荷车削复杂光学曲面的方法, 包括如下步骤:

- (1) 创建第一次走刀的初始待加工表面和期望创成的表面:

根据预先设计的目标光学曲面, 通过分配加工余量分别创建第一次走刀的期望创成曲面 $S_0^{(1)}$ 和第二次走刀的期望创成表面初值 $S_0^{(2)}$, 在工件的柱坐标系 $\theta_w - \rho_w - z_w$ 中将 $S_0^{(1)}$ 分别沿径向和周向作等步距离散化, 通过拟合生成回转对称的最适非球面, 作为第一次走刀的初始待加工表面 $S_1^{(1)}$;

- (2) 生成工件第 1 转的刀位路径:

令 L_0 是平均切屑载荷, ΔL 是切屑载荷的扰动幅值, 根据预先设定的切屑载荷扰动范围 $L_0 \pm \Delta L$, 确定第 1 转的最大径向进给量 f_{\max} , 根据 f_{\max} 确定刀位点的径向步距 $\Delta \rho = f_{\max} / N_0$, N_0 是每一转的等角步距数, 则第 1 转第 j 个刀位点的转角坐标和径向坐标分别为: $\theta_{1,j} = \theta_{1,j-1} + \Delta \theta$, $\rho_{1,j} = \rho_{1,j-1} - \Delta \rho$, $\Delta \theta = 2\pi/N_0$, 顺次遍历 $j = 1, 2, \dots, N_0$, 即可生成第 1 转的刀位路径 $(\theta_{1,j}, \rho_{1,j}, z_{1,j})_{j=1}^{N_0}$, $z_{1,j}$ 是第 1 转第 j 个刀位点的 z 坐标;

- (3) 生成工件第 k 转的刀位路径:

根据预先设定的切屑载荷扰动范围 $L_0 \pm \Delta L$, 由第 k 转第 $j-1$ 个刀位点的坐标 $(\theta_{k,j-1}, \rho_{k,j-1}, z_{k,j-1})$, 以“等切屑载荷”为控制目标获得第 k 转第 j 个刀位点的坐标 $(\theta_{k,j}, \rho_{k,j}, z_{k,j})$, 遍历 $j = 1, 2, \dots, N_0$, 以生成第 k 转的刀位路径 $(\theta_{k,j}, \rho_{k,j}, z_{k,j})_{j=1}^{N_0}$, 逐转求解即可生成工件各转的刀位路径;

- (4) 分别生成车床和快速刀具伺服第一次走刀的期望运动:

将工件各转的刀位路径 (θ, x, z) 分解为单调的趋势成分 (θ, x_0, z_0) 和扰动成分

$(\theta, \Delta x, \Delta z)$, 在车床的 CNC 指令驱动下沿 x 轴和 z 轴作非往复的直线运动 (θ, x_0, z_0) , 在两自由度快速刀具伺服的驱动下沿 x 轴和 z 轴作往复直线运动 $(\theta, \Delta x, \Delta z)$;

(5) 创建第二次走刀的待加工表面和期望创成曲面:

在第一次走刀之后, 对所获得的已加工表面 S_2 进行在机或机下实测, 通过二维小波分解及重构, 或者其它多分辨率分解及重构方法, 以剔除 S_2 中不重复的随机误差, 分别得到一个包含确定性误差的曲面 $S_1^{(2)}$ 和一个单纯的确定性误差曲面 ΔS , 将 $S_1^{(2)}$ 作为第二次走刀的初始待加工表面, 则第二次走刀的期望创成曲面为: $S_0^{(2)} = S_1^{(2)} - \Delta S$;

(6) 分别生成车床和快速刀具伺服各运动轴第二次走刀的期望运动:

在步骤 (5) 的基础上, 重复步骤 (2) ~ (4), 得到第二次走刀的“等切屑载荷”刀位路径 $(\theta_{k,j}, \rho_{k,j}, z_{k,j})_{j=1}^{N_k}$, $k=1, 2, \dots$, 通过分解以获得单调的趋势成分 (θ, x_0, z_0) 和扰动成分 $(\theta, \Delta x, \Delta z)$, 利用所获得的各运动轴之期望运动进行第二次走刀。

[0017] 本发明生成以“等切屑载荷”为目标的刀位路径, 涉及的同步操作如下:

(1) 动态修改待加工表面 S_1 :

将初始待加工表面 S_1 在工件的笛卡尔坐标系 $o_w - x_w y_w z_w$ 中分别沿 x 轴和 y 轴进行等距细分, 令第 k 转第 j 个刀位点是当前的刀位点, 获得在 S_1 上由第 $j-1$ 个刀位点到第 j 个刀位点之间刀尖轮廓所掠到的网格点, 根据 S_1 上的这些网格点和关联的刀尖轮廓点即可动态修改 S_1 ;

(2) 求解瞬态切屑载荷 L_{chip} :

将初始待加工表面 S_1 在工件的笛卡尔坐标系 $o_w - x_w y_w z_w$ 中分别沿 x 轴和 y 轴进行等距细分, 令第 k 转第 j 个刀位点是当前的刀位点, 在工件的坐标平面 $o_w - x_w z_w$ 上搜索以当前刀位点为中心的邻域, 获得 S_1 上与当前刀位点相邻的若干个网格点, 根据这些网格点求解 S_1 与前刀面实际接触区域的边界点, 根据这些接触区域的边界点求解材料去除量在刀具基面上的投影即为瞬态切屑载荷 L_{chip} ;

(3) 生成等切屑载荷的刀位点:

令 $\Delta\theta = 2\pi/N_0$ 是等角步距, $\Delta\rho_I$ 是径向试算步距, 则第 k 转第 j 个刀位点的转角坐标为: $\theta_{k,j} = \theta_{k,j-1} + \Delta\theta$, 第 j 个刀位点的径向坐标初值为: $\rho_{k,j} = \rho_{k,j-1} + \Delta\rho_I$, 根据刀触点与刀位点之间的映射, 获得第 j 个刀位点的 z 坐标 $z_{k,j}$;

根据当前刀位点的坐标初值, 求解瞬态切屑载荷 L_{chip} , 若 L_{chip} 不超出 $L_0 \pm \Delta L$, 则当前的刀位点坐标即为第 k 转第 j 个刀位点的坐标, 否则需在当前的径向坐标 $\rho_{k,j}$ 的邻域内修改

$\Delta \rho_L$, 重新求解 $z_{k,j}$ 和 L_{tip} , 直到 L_{tip} 不超出 $L_0 \pm \Delta L$ 为止;

遍历 $j = 1, 2, \dots, N_0$, 以获得第 k 转的刀位路径。

[0018] 下面结合附图进一步说明本发明。

[0019] 将一台两自由度 FTS 安装在一台两轴高精密数控车床上。两自由度 FTS 既可以是 x 轴和 z 轴的往复直线运动, 也可以是 z 轴的往复直线运动和 B 轴的往复摆动。两轴高精密数控车床既可以是 x 轴和 z 轴的非往复直线运动, 也可以是 z 轴的非往复直线运动和 B 轴的非往复转动。工件安装在主轴前端的夹具上, 一个高精密角编码器安装在主轴尾端产生高分辨率脉冲作为驱动的基准。工件各转的刀位路径 (θ, x, z) 分解为单调的趋势成分 (θ, x_0, z_0) 和扰动成分 $(\theta, \Delta x, \Delta z)$, 以 (θ, x_0, z_0) 作为高精密数控车床的主轴、 x 轴和 z 轴的驱动指令, 以 $(\theta, \Delta x, \Delta z)$ 作为 FTS 的两个快速往复运动轴的驱动指令。

[0020] 获得工件各转刀位路径的实施步骤具体如下。

[0021] (1) 根据实际允许的面形误差, 受控切屑载荷的扰动范围设定为:

$$\Delta_{\text{CL}} = [\text{CL}_{\text{min}}, \text{CL}_{\text{max}}] = [L_0 - \Delta L, L_0 + \Delta L]$$

式中, L_0 是瞬态切屑载荷的均值, ΔL 是容许的切屑载荷扰动幅值。

[0022] (2) 求解第 1 转的刀位点集 $\{P_L^{(k,j)}, k=1\}_{j=1}^{N_0}$ 。根据恒径向进给车削方法, 第 1 转第 j 个刀位点 $P_L^{(k,j)}|_{k=1}$ 可表达为:

$$x_L^{1,j} = \rho_{L,j} \cos \theta_{L,j}, y_L^{1,j} = \rho_{L,j} \sin \theta_{L,j}, z_L^{1,j} = g(x_L^{1,j}, y_L^{1,j})$$

(1)

式中, $\rho_{L,j} = R_0 - a_f^x (j-1)/N_0$, $\theta_{L,j} = (j-1)\Delta\theta$; $\Delta\theta = 2\pi/N_0$ 是转角步距, a_f^x 是第 1 转的 x 轴进给量。 a_f^x 的选择需确保在第 1 转中切屑载荷的最大值也不超过预先设定的值。

$g(\cdot)$ 表示由刀位点的 x 和 y 坐标 $(x_L^{1,j}, y_L^{1,j})$ 到 z 坐标 $z_L^{1,j}$ 的映射。

[0023] (3) 求解第 k 转的刀位点集 $\{P_L^{(k,j)}, k \geq 2\}_{j=1}^{N_0}$ 。令 $P_L^{(k,j)}$ 表示第 k 转第 j 个刀位点, 则问题归结为给定前 $(k-1)$ 转的刀位点集 $\{P_L^{(n,j)}, 1 \leq n \leq k-1\}_{j=1}^{N_0}$ 和第 k 转第 $j-1$ 个刀位点 $P_L^{(k,j-1)}$, 以求解当前的刀位点 $P_L^{(k,j)}$ 。当 $j=1$, 第 1 个刀位点按如下方式给出:

$$P_L^{(k,j)}|_{j=1} = P_L^{(k-1,j)}|_{j=N_0}$$

(2)

当 $1 < j \leq N_0$, 按如下方式试算 $P_L^{(k,j)}$:

$$\begin{cases} \theta_L^{(k,j)} = \theta_L^{(k,j-1)} + \Delta\theta_L, \rho_L^{(k,j)} = \rho_L^{(k,j-1)} \pm \Delta\rho_L \\ x_L^{(k,j)} = \rho_L^{(k,j)} \cos \theta_L^{(k,j)}, y_L^{(k,j)} = \rho_L^{(k,j)} \sin \theta_L^{(k,j)}, z_L^{(k,j)} = g(x_L^{(k,j)}, y_L^{(k,j)}) \end{cases}$$

(3)

式中, $\Delta\phi_L$ 是一个沿极坐标半径方向的试算值。

[0024] 由式(3)得到 $P_L^{(k,j)}$, 然后求解试算刀位点的瞬态切屑载荷 $CL^{(k,j)}$ 。

[0025] 若 $CL^{(k,j)} \in \Delta_{CL}$, 则 $P_L^{(k,j)}$ 即为所求解的刀位点; 否则根据式(3)再次试算; 直到满足 $CL^{(k,j)} \in \Delta_{CL}$ 为止。

[0026] 在此以环曲面为例评价等切屑载荷车削方法。环曲面的方程可写为:

$$z = f(x, y) = R_b - \sqrt{(R_b - R_a + \sqrt{R_a^2 - y^2})^2 - x^2}$$

(4)

式中, $R_a = 6\text{mm}$; $R_b = 15\text{mm}$ 。其它计算参数如下:

刀尖圆弧半径为 $r_c = 0.5\text{mm}$; 主轴转速为 $N_0 = 6800\text{rev/min}$; 口径 $R_d = 2.5\text{mm}$ 。

[0027] 为了揭示切削力扰动所致的面形误差, 假定 FTS 是一个单自由度弱刚度的动力学系统, 所涉及的动力学参数如下:

固有频率 $f_n = 1000\text{Hz}$; 等价刚度 $k = 4.74 \times 10^3 \text{ N/mm}$; 阻尼比 $\xi = 0.1$ 。

[0028] 图 1 (a)示出了利用等切屑载荷车削方法, 为第一次走刀所生成的三维刀位路径; 图 1 (b)示出了在等切屑载荷车削的第一次走刀中, 瞬态切屑载荷对工件转数的依赖特征。图 2 (a)示出了利用恒径向进给车削方法, 为第一次走刀所生成的三维刀位路径; 图 2 (b)示出了在恒径向进给车削的第一次走刀中, 瞬态切屑载荷对工件转数的依赖特征。比较图 1 和 2 可见, 本专利所述方法, “等切屑载荷车削”, 所导致的切屑载荷最大扰动仅为“恒径向进给车削”的 7%; 而且在等切屑载荷车削中, 切屑载荷虽有扰动, 但切屑载荷的均值具有平稳性, 而在恒径向进给车削中, 切屑载荷的均值具有明显的非平稳性。这表明, 等切屑载荷车削方法大大削弱了切屑载荷对刀位点坐标的依赖性。

[0029] 图 3 (a)示出了利用等切屑载荷车削方法, 通过第一次走刀所获得的面形误差; 图 3 (b)示出了利用恒径向进给车削方法, 通过第一次走刀所获得的面形误差。比较图 3 (a)和图 3 (b)可见, 利用等切屑载荷车削方法大大削弱了面形误差对刀位点坐标的明显依赖性。

[0030] 图 4 (a)示出了利用等切屑载荷车削方法, 为第二次走刀所生成的三维刀位路径; 图 4 (b)示出了在等切屑载荷车削的第二次走刀中, 瞬态切屑载荷对工件转数的依赖特征。图 5 (a)示出了利用恒径向进给车削方法, 为第二次走刀所生成的三维刀位路径; 图 5 (b)示出了在恒径向进给车削的第二次走刀中, 瞬态切屑载荷对工件转数的依赖特征。比较图 4 和 5 可见, 在等切屑载荷车削中, 通过第二次走刀, 瞬态切屑载荷的扰动得到了进一步的抑制; 在恒径向进给车削中, 通过第二次走刀, 瞬态切屑载荷的扰动虽有减小, 但有十分明显的扰动。

[0031] 图 6 (a)示出了利用等切屑载荷车削方法, 通过第二次走刀所获得的面形误差; 图 6 (b)示出了利用恒径向进给车削方法, 通过第二次走刀所获得的面形误差。比较图 6 (a)和图 6 (b)可见, 利用等切屑载荷车削方法, 通过第二次走刀即可基本上消除切屑载荷扰

动,也就是切削力扰动所致的面形误差;但在恒径向进给车削中,即使通过第二次走刀仍然难以消除切屑载荷扰动所致的面形误差。

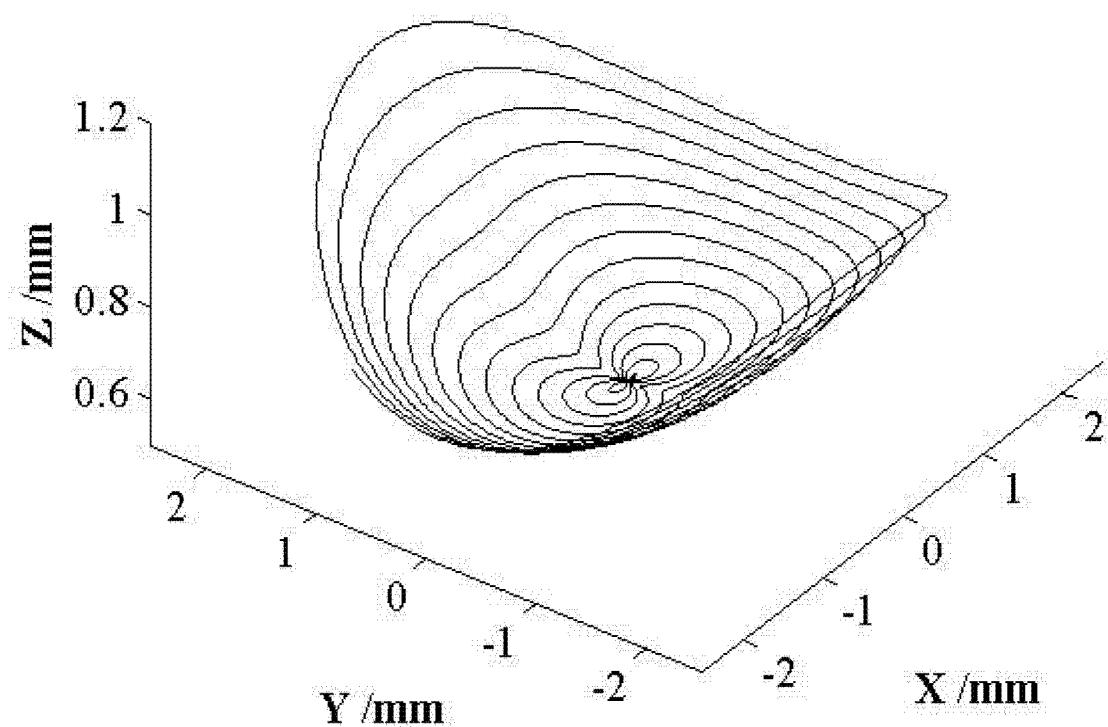


图 1(a)

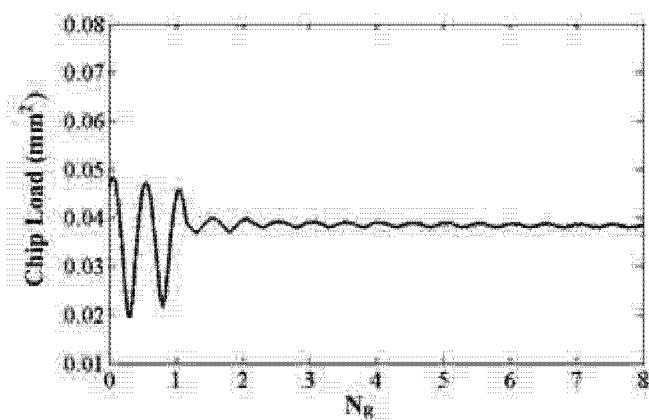


图 1(b)

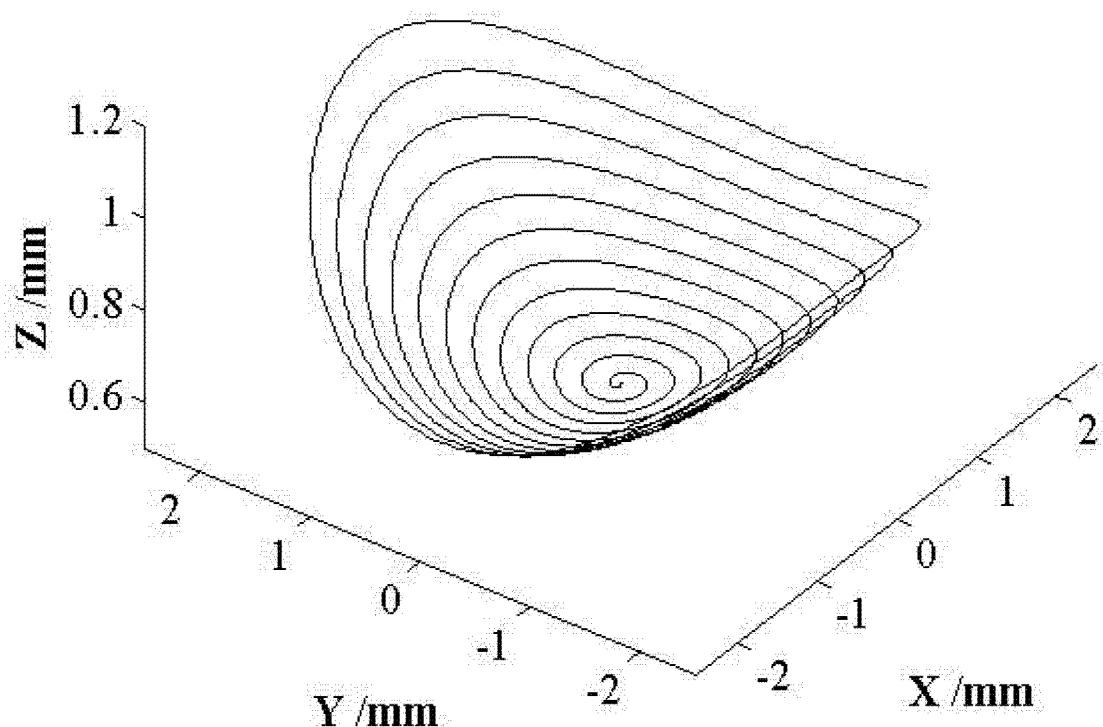


图 2(a)

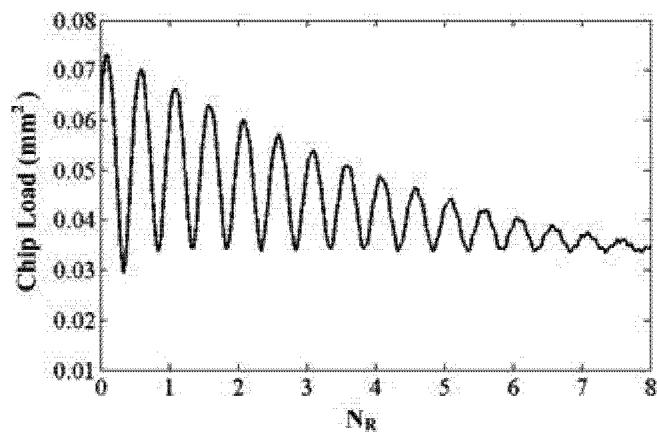


图 2(b)

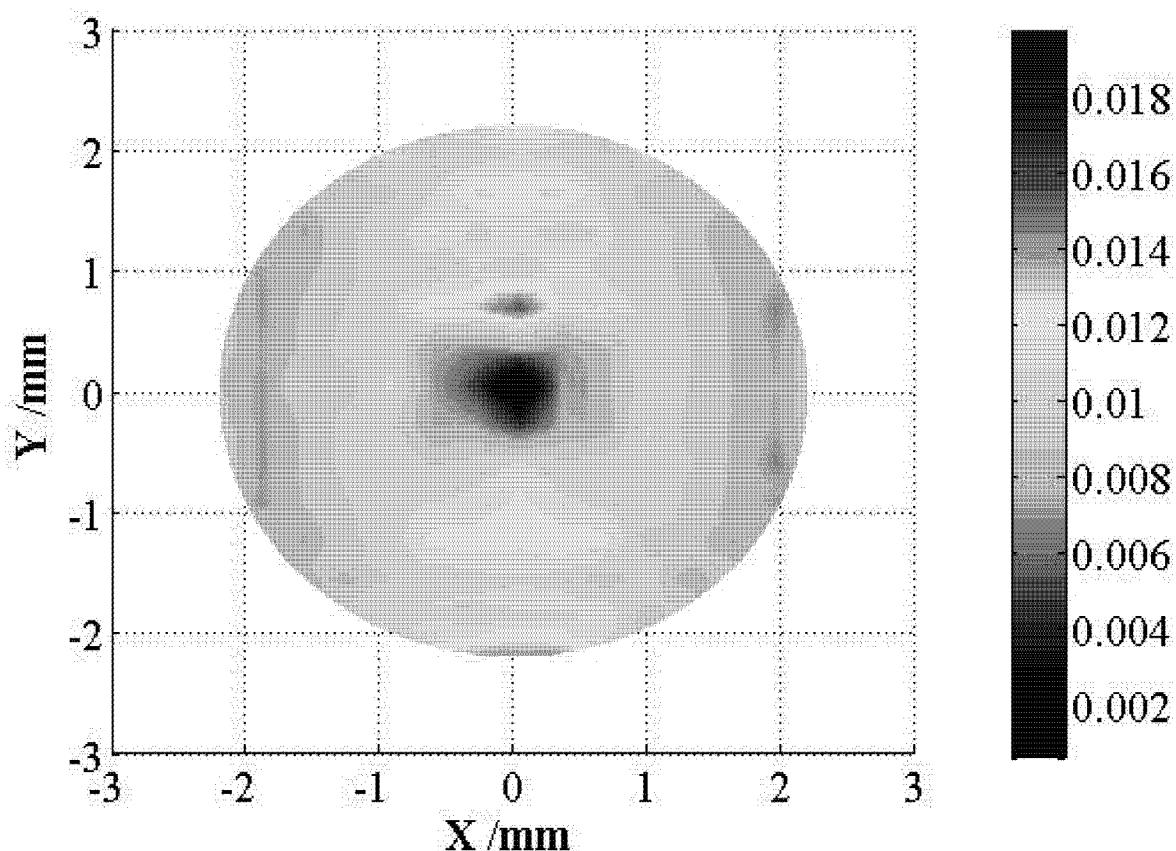


图 3(a)

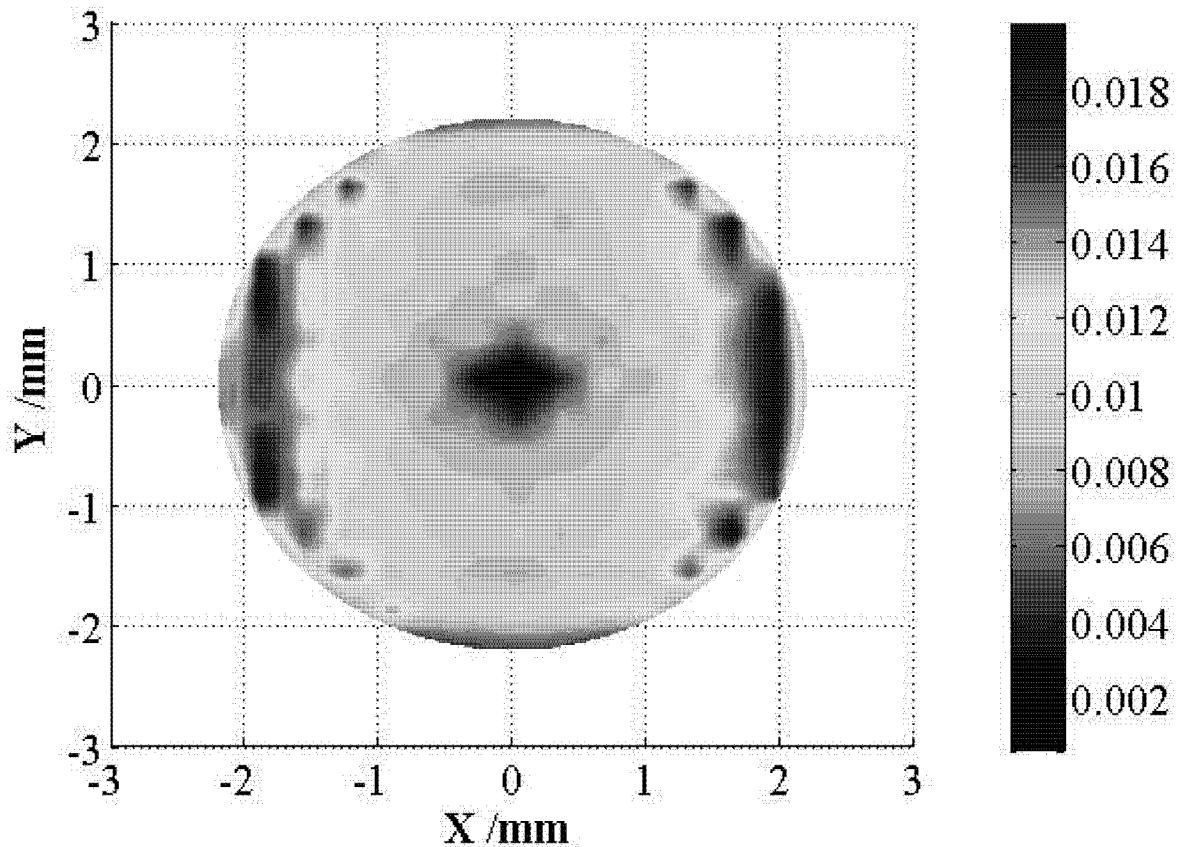


图 3(b)

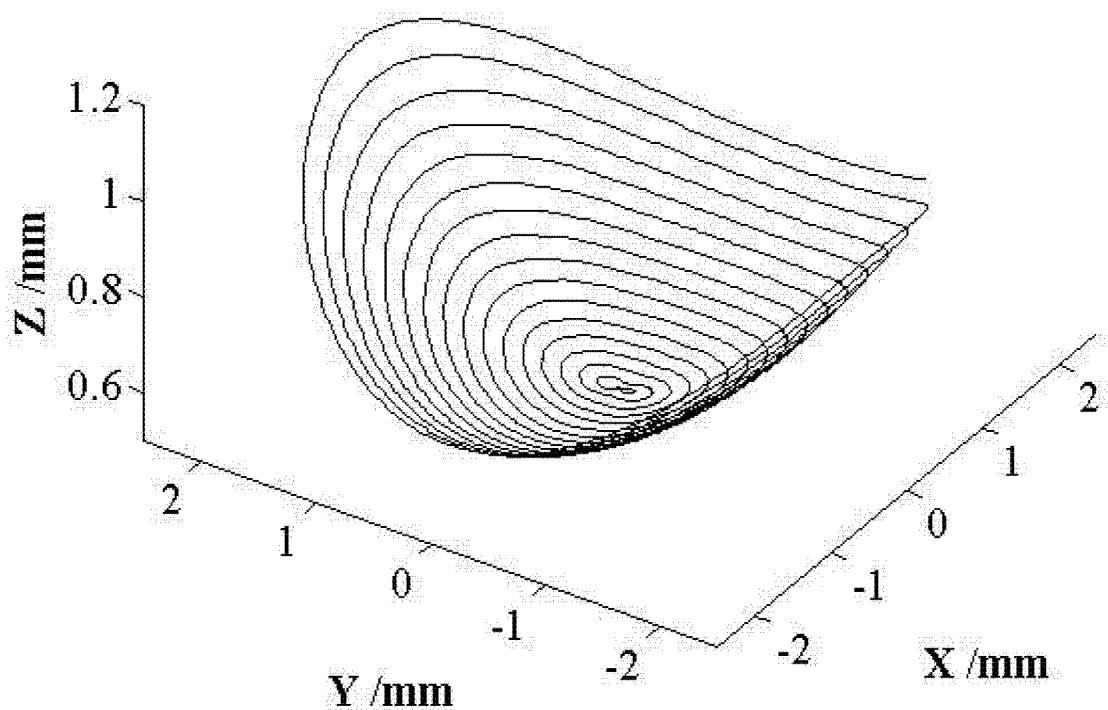


图 4(a)

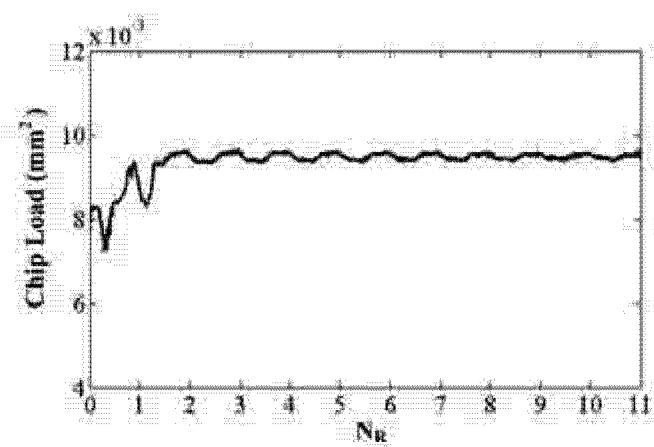


图 4(b)

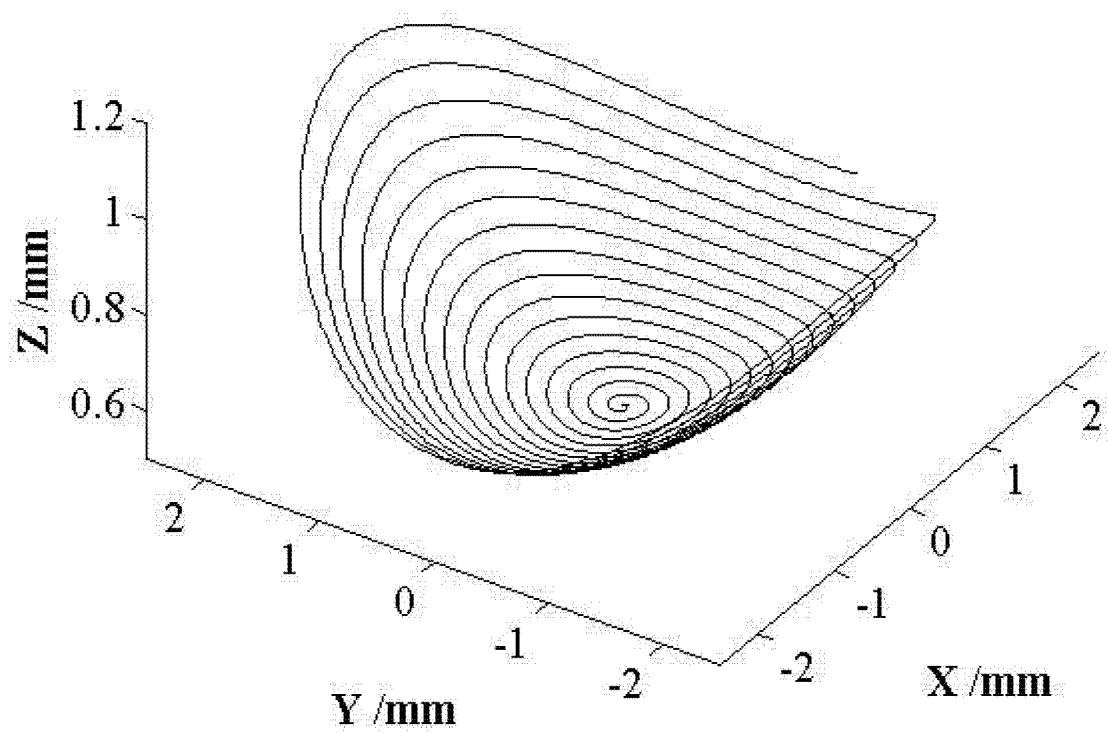


图 5(a)

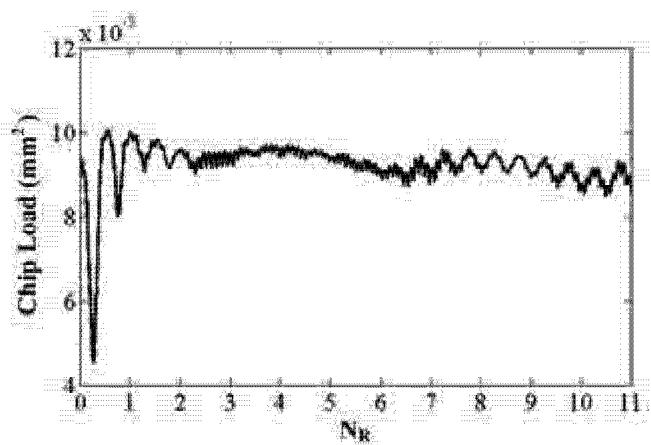


图 5(b)

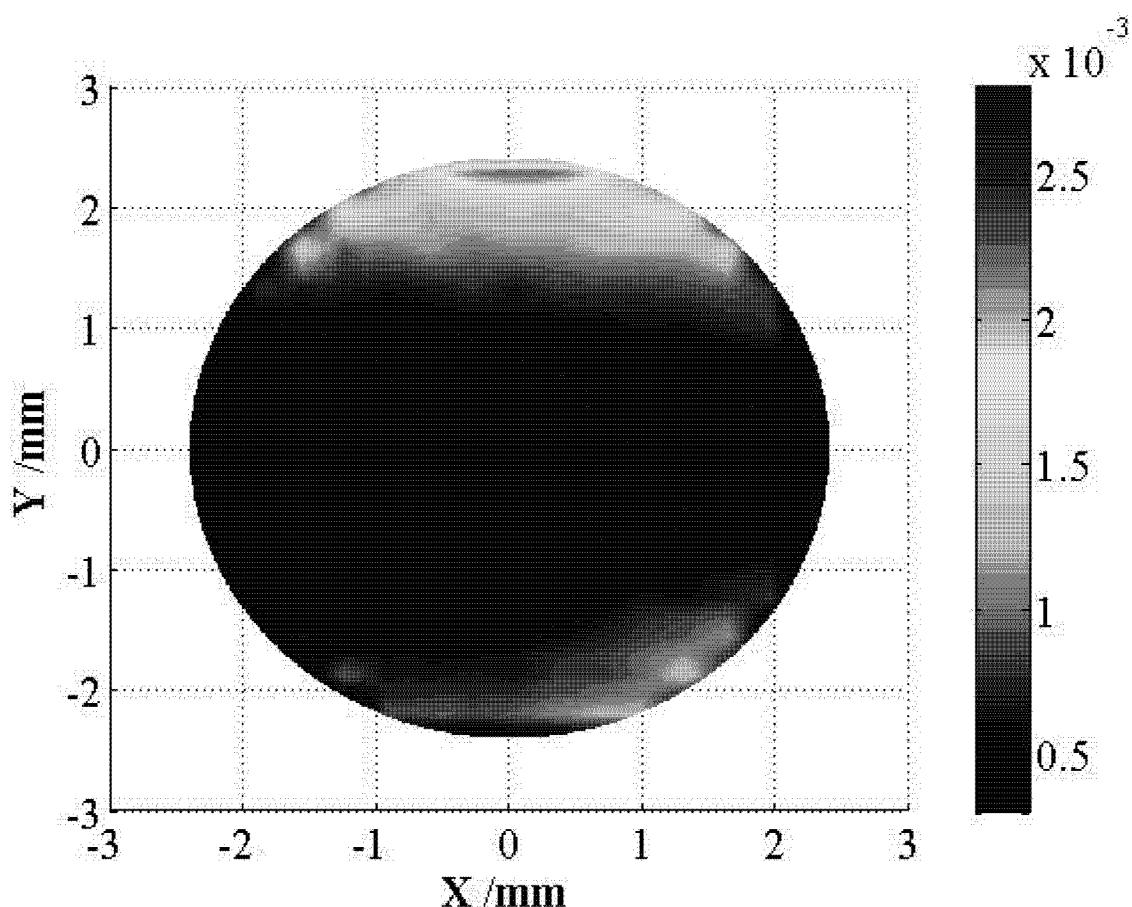


图 6(a)

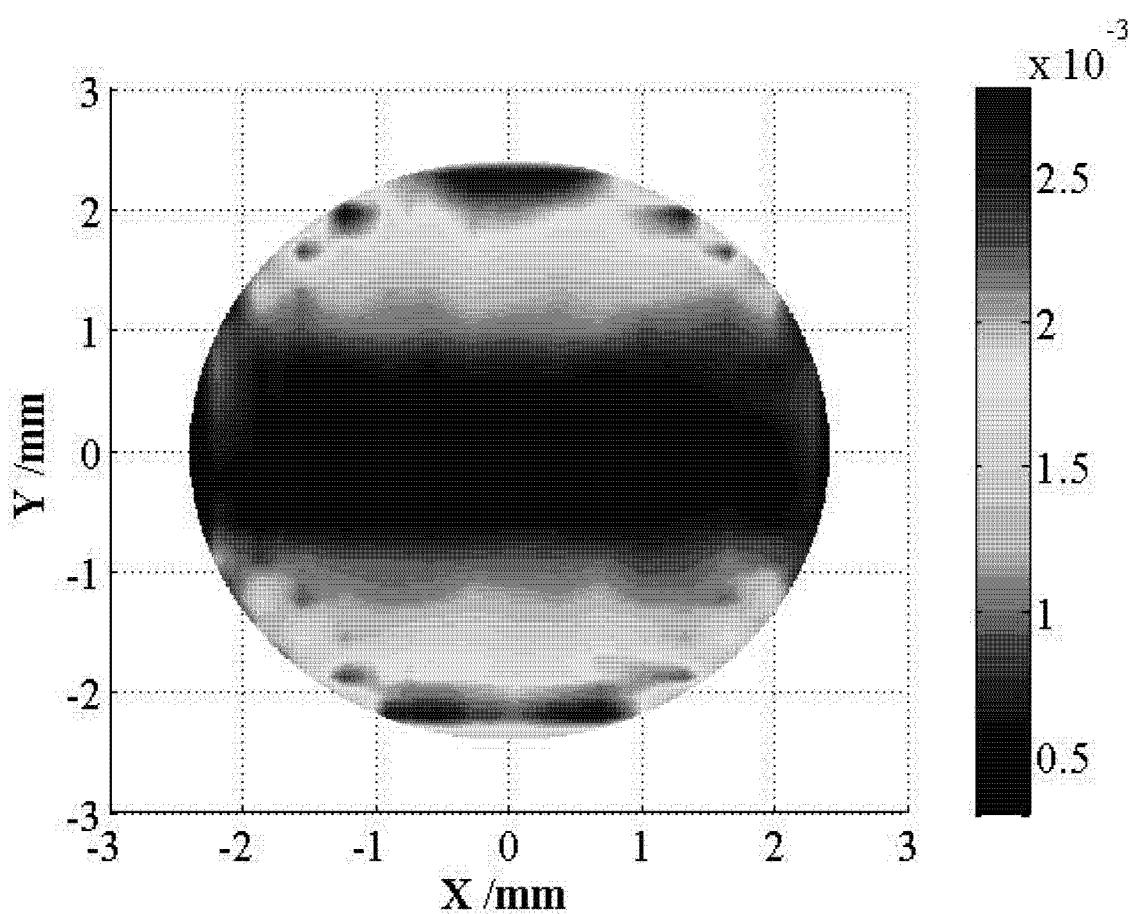


图 6 (b)