

(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101505925 B

(45) 授权公告日 2012. 07. 18

(21) 申请号 200780030623. 1

代理人 赵蓉民

(22) 申请日 2007. 08. 27

(51) Int. Cl.

(30) 优先权数据

B25J 9/16 (2006. 01)

11/514, 072 2006. 08. 31 US

审查员 张丹

(85) PCT申请进入国家阶段日

2009. 02. 17

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2007/018820 2007. 08. 27

(87) PCT申请的公布数据

W02008/027334 EN 2008. 03. 06

(73) 专利权人 波音公司

地址 美国伊利诺伊州

(72) 发明人 菲利普·L·弗里曼

(74) 专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限公司

公司 11245

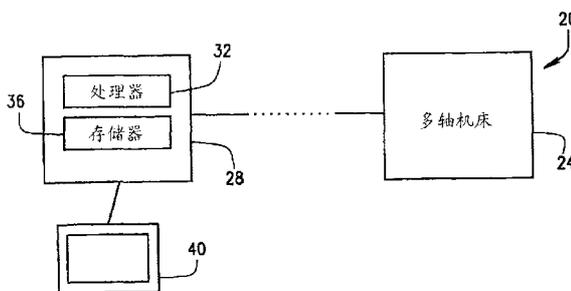
权利要求书 2 页 说明书 4 页 附图 3 页

(54) 发明名称

接近机床运动学奇点并补偿

(57) 摘要

一种操作多轴机床 (24) 的方法 (300), 该机床包括机床连杆系 (100), 所述连杆系包括多个接点 (112) 和连杆 (108)。监控所述连杆系 (100) 来检测所述连杆系的一个或多个接点 (112) 向奇点靠近。确定接近奇点的程度 n。识别接近奇点的所述一个或多个接点 (112)。在操作器矩阵 (200) 中以虚拟接点取代识别出的所述一个或多个接点, 以更改所述操作器矩阵 (200) 并提供更改后的操作器矩阵。利用所述更改后的操作器矩阵来确定所述连杆系 (100) 的连杆 (108) 位置变化。该方法 (300) 可以为广泛的机床配置提供基于软件的补偿, 而不需要知道给定机床奇异性的先验知识。



1. 一种操作多轴机床 (24) 的方法 (300), 该方法包括:  
通过奇异值分解来监控所述机床的运动学联杆系 (100), 所述联杆系包括多个接点 (112) 和联杆 (108), 监控所述联杆系来检测所述联杆系的一个或多个接点向奇点靠近, 所述监控利用操作器矩阵 (200) 实现;  
确定接近奇点的程度  $n$  ;  
识别接近奇点的所述一个或多个接点 ;  
获得  $n$  个虚拟接点 ;  
在操作器矩阵中以所述虚拟接点取代识别出的所述一个或多个接点, 以更改所述操作器矩阵并提供更改后的操作器矩阵 ; 和  
利用所述更改后的操作器矩阵来确定所述联杆系的联杆位置变化 ;  
其中识别接近奇点的所述一个或多个接点包括检测分解的  $n$  个右奇异向量每一个当中的最大元素。
2. 如权利要求 1 所述的方法, 其特征在于, 所述监控利用所述操作器矩阵的奇异值分解来实施。
3. 如权利要求 1 所述的方法, 其特征在于, 确定接近奇点的程度包括确定所述一个或多个接点接近奇点的一个或多个方向。
4. 如权利要求 1 所述的方法, 其特征在于, 所述操作器矩阵包括雅克比矩阵。
5. 如权利要求 1 所述的方法, 进一步包括:  
从所述位置变化中除去表示所述  $n$  个虚拟接点的一个或多个值, 以改动所述位置变化 ; 和  
利用改动后的位置变化来补偿所述联杆系的一个或多个非奇异接点。
6. 如权利要求 1 所述的方法, 其特征在于, 获取  $n$  个虚拟接点包括操作器矩阵分解的  $n$  个左奇异向量乘以分解的最大奇异值。
7. 一种数控 NC 处理系统, 包括:  
包括运动学联杆系 (100) 的多轴机床 (24), 所述运动学联杆系具有多个联杆 (108) 和连接所述联杆的多个接点 (112) ; 和  
处理器 (32), 其配置成:  
通过奇异值分解监控所述联杆系来检测所述联杆系的一个或多个接点向奇点接近, 所述监控利用操作器矩阵 (200) 来实现 ;  
确定接近奇点的程度  $n$  ;  
识别接近奇点的一个或多个接点 ;  
获得  $n$  个虚拟接点 ;  
在操作器矩阵中以虚拟奇点取代识别出的一个或多个接点, 以改动所述操作器矩阵 ;  
和  
利用所述改动后的操作器矩阵来确定所述联杆系的位置变化 ;  
其中识别接近奇点的所述一个或多个接点包括检测分解的  $n$  个右奇异向量每一个当中的最大元素。
8. 如权利要求 7 所述的系统, 其特征在于, 所述处理器进一步配置成分解所述操作器矩阵来进行所述监控。

9. 如权利要求 7 所述的系统,其特征在于,所述处理器进一步配置成利用所述操作器矩阵的奇异值分解中的最大奇异值来放大所述  $n$  个虚拟接点。

10. 如权利要求 7 所述的系统,其特征在于,所述处理器进一步配置成从所述位置变化中除去表示所述  $n$  个虚拟接点的一个或多个值,以改动所述位置变化;和  
利用所述改动后的位置变化来补偿所述联杆系的一个或多个非奇异接点。

11. 如权利要求 7 所述的系统,其特征在于,所述处理器进一步配置成分解所述操作器矩阵来确定所述操作器矩阵的条件数。

12. 如权利要求 7 所述的系统,其特征在于,所述机床包括经由所述联杆系控制的末梢(116),所述处理器进一步配置成根据  $J \cdot dq = dx$  为所述联杆系的联杆确定补偿值,其中  $J$  表示改动后的操作器矩阵, $dq$  表示联杆位置变化,而  $dx$  表示末梢位置变化。

13. 如权利要求 7 所述的系统,其特征在于,所述处理器进一步配置成利用正交自由度的一种或多种表示来获得  $n$  个虚拟接点。

## 接近机床运动学奇点并补偿

### 技术领域

[0001] 本发明涉及多轴机床,更特别涉及处理机床操作过程中的运动学奇点的系统和方法。本部分的叙述仅提供与本发明有关的背景信息,而不构成现有技术。

### 背景技术

[0002] 许多机床工具设备在数控件 (NC) 下操作,以产生高精度零件诸如飞行器部件。在这种设备中,多轴机床可以用软件来驱动,从而将一个或多个机床工具相对于工件移动。机床的多轴运动学联杆系能相对于多个预定坐标轴移动工具。具体来说,多个平动和 / 或转动接点可以单独和 / 或协同操作,来移动一件或多件联杆,从而将工具定位在希望的位置。但是,多轴联杆系偶尔可能移动到这样的位置 (即,“奇点”或“奇异点”),此时一个或多个自由度丢失。在奇异点上,一个或多个接点可能无法根据软件指令来移动工具。

### 发明内容

[0003] 本发明的一种实施方式指导一种操作多轴机床的方法。监控机床的运动学联杆系。该联杆系包括多个接点和联杆。监控联杆系来检测联杆系的一件或多件联杆向奇点接近。这种监控利用操作器矩阵来实现。确定接近奇点的程度  $n$ 。确认接近奇点的一个或多个接点。该方法包括获取  $n$  个虚拟接点,在操作器矩阵中以虚拟接点取代一个或多个识别出的接点,以改动操作器矩阵,并利用改动后的操作器矩阵来确定联杆系中的联杆位置变化。

[0004] 其他的应用领域将从文中提供的叙述中体现出来。应该理解,说明内容和具体示例仅旨在图示,而非用来限制本发明的范围。

### 附图说明

[0005] 文中所述的附图仅作为图示目的,并不以任何方式限定本发明的范围。

[0006] 图 1 是根据本发明一种实施方式的数控 (NC) 处理系统的示意图;

[0007] 图 2 是根据本发明一种实施方式受到控制的机床多轴运动学联杆系一部分的正视透视图;

[0008] 图 3 是根据本发明一种实施方式的操作器雅克比矩阵的奇异值分解示意图;

[0009] 图 4A 和 4B 是根据本发明一种实施方式操作多轴机床的方法的流程图。

### 具体实施方式

[0010] 以下说明在本质上仅仅是示例性的,并不用来限制本发明、其应用场合和用途。应该理解,附图中对应附图标记指代类似的或相应的部件和特征。

[0011] 在题为“Kinetic Singular Point Compensation Systems and Methods”的美国专利申请公开 No. 20060271241 中,说明了各种系统和方法用于将多轴运动联杆系的末梢部分定位于奇点附近。本发明在一种实施方式中,指导一种方法,(1) 实时自动确定设备

联杆系是否正在靠近奇点且该联杆系靠近奇点的程度；(2) 联杆系的哪个节点正在靠近奇点；和 (3) 在奇点将损失哪个自由度。

[0012] 根据本发明一种实施方式的数控 (NC) 处理系统在图 1 中一般由附图标记 20 指代。系统 20 包括一个或多个多轴设备 24, 其中之一在图中示出。设备 24 例如可以配置成在工件 (未示出) 上执行多轴加工操作。此外, 或者可以选择的是, 系统 20 可以包括其他类型的能放置部件的多轴机床, 例如数控组装机器人。

[0013] 系统 20 包括一台或多台计算机 28, 其中之一在图 1 中示出。计算机 28 包括适当编程的计算机处理器 32 和存储器 36。计算机 28 可以根据本发明的一种实施方式编程, 一般监控并控制多轴机床 24 的操作。计算机 28 可以用于执行软件, 用来可调节地补偿多轴机床 24 的定位, 正如以下所述。软件补偿例如可以用来调节机床 24 的特定“固有”条件, 以使机床 24 的操作相对于理想或“完美”机床来说落入所指定的容差范围内。

[0014] 设置有使用者接口 40, 诸如包括键盘、指点设备和监视器的计算机终端, 使用者通过它可以与系统 20 通信。应该注意, 本发明可以相对于许多不同种类的设备实施, 包括但不限于美国专利申请公开 No. 20060271241 中公开的材料加工设备。本领域技术人员应该理解, 许多类型不同配置不同的多轴机床、计算机、处理器、输入输出设备、通信系统等等可以包括在根据本发明各种实施方式的 NC 处理系统中。

[0015] 机床 24 的一部分多轴运动联杆系在图 2 中一般以附图标记 100 指代。联杆系 100 包括六件移动联杆 108a 和 108f, 这六件联杆通过 6 个接点 112a-112f 相互连接。接点 112a-112e 为回转 (旋转) 接点, 且接点 112f 为棱柱接点 (即, 滑动接点)。联杆系 100 通过计算机 28 操作, 在工作工程中将末梢部分 116 沿着预定路径定位并控制。末梢部分 116 例如可以具有安装于其上的切削工具或其他类型的工具 (未示出)。应该理解, 联杆系 100 仅为示例性的。机床 24 可以具有比联杆系 100 更复杂或更简单的联杆系, 并且可以包括更多、更少和 / 或类型不同的联杆和 / 或接点和 / 或可以提供更多、更少和 / 或不同的自由度和 / 或自由度类型。

[0016] 在操作中, 联杆系 100 由计算机 28 经由驱动装置 (未示出) 驱动, 驱动装置例如一个或多个电动马达。当驱动联杆 108 时, 可能影响其他联杆 108 的定位。末梢部分 116 的定位和取向可以由向量  $X$  代表, 该向量由一组函数  $f()$  联系到联杆位置向量  $Q$ , 以使  $X = f(Q)$ 。函数组  $f()$  的雅克比矩阵, 定义为  $J(Q) = (\partial x_i / \partial q_j)$ , 表示接点 112 的不同运动各自对于末梢部分 116 的定位和操作的影响。通过线性化来逼近上述关系,  $J \Delta Q = \Delta X$ , 以使末梢部分 116 的笛卡尔位置  $X$  变化与联杆位置  $Q$  的变化关联起来。由于联杆系 100 靠近奇点, 所以雅克比矩阵  $J(Q)$  逐渐变的更为病态。当到达奇点时, 雅克比矩阵  $J(Q)$  失阶。

[0017] 在根据本发明操作联杆系 100 的方法的一种实施方式中, 奇异值分解 (SVD) 用来确定 (1) 联杆系 100 是否靠近奇点和联杆系 100 靠近奇点的程度；(2) 联杆系的哪个接点 112 靠近奇点；和 (3) 哪个自由度会在奇点丢失。一般来说, 奇异值分解 (SVD) 可以用来将任意矩阵  $A$  分解为一组三个矩阵  $U$ 、 $S$  和  $V$ , 以使  $U * S * V^T = A$ , 其中  $U$  和  $V$  为标准正交矩阵, 而  $S$  为对角阵, 其元素以降序沿着对角线布置。给定矩阵  $A$ , 可以利用已知算法通过基本上有效和稳定的方式计算  $U$ 、 $S$  和  $V$ 。 $S$  的对角元素可以称为  $A$  的奇异值。 $U$  的列可以称为左奇异向量。 $V$  的列 (即  $V^T$  的行) 可以称为右奇异向量。

[0018] 根据本发明一种实施方式对于操作器雅克比矩阵  $J$  的奇异值分解示意图在图 3 中

一般以附图标记 200 表示。参照图 2 和 3, 接点 112 的差异移动借助操作器矩阵 J 各自与其对于末梢部分 116 的影响关联起来。J 的每个列 204 与对应的接点 112 关联。将矩阵 J 奇异值分解成 U、S 和 V, 在矩阵 U 中形成左奇异向量 208, 顺序为从最敏感值 216 到最不敏感值 224, 该左奇异向量表示联杆系 100 的正交自由度。在矩阵 V (矩阵  $V^T$  的转置), 获得右奇异向量 228, 其表示沿着 U 表示的方向移动联杆系 100 的接点的运动的组合。在矩阵 S 中, 获得 J 的奇异值 236, 其表示联杆系 100 的“可操作”程度。因此, 在 V 的最后一列 242 (即,  $V^T$  的最后一行) 中占主要地位的接点 112 是联杆系 100 最为奇异的接点 112, 并且 U 的最后一列 224 所表示的方向是联杆系 100 可能丢失自由度的方向。此外, 操作器矩阵 J 的条件数可以通过最大奇异值 236 除以最小奇异值 236 来计算。条件数可以从矩阵条件完美情况下的 1 变化到奇异矩阵情况下的无限大。在一些实施方式中, 对于数值稳定性而言, 使用条件数的倒数, 其可以从矩阵条件完美情况下的 1 变化到奇异矩阵情况下的 0。

[0019] 根据本发明一种实施方式操作机床 24 的方法流程图在图 4A 和 4B 中一般由附图标记 300 指代。在操作 308 中, 计算沿着预定路径移动末梢部分 116 的运动接点的位置。在操作 312 中, 计算与所得接点 112 对应的操作器雅克比矩阵 J, 然后利用 SVD 分解。在操作 316 中, 确定条件数的倒数。在操作 320 中, 将条件数的倒数与预定阈值例如 0.001 比较。如果条件数的倒数大于该阈值, 则认为联杆系 100 并未靠近任何奇点, 并且控制过程行进到操作 340。

[0020] 如果条件数的倒数小于等于该阈值, 则认为联杆系的一个或多个接点 112 正在靠近奇点。因此, 在操作 324 中, 通过以下方式确定奇点的程度 n。确定将条件数的倒数升高到阈值以上的最小奇异值 236。例如, 如果奇异值 236 为 {0.7、0.4、0.2、0.1、0.0006、0.0001}, 则将条件数的倒数升高到阈值 0.001 之上的最小奇异值为 0.1 ( $0.1/0.7 = 0.143$ , 但是  $0.0006/0.7 = 0.00086$ ) 且奇点的程度为 2 (就是说, 表示出两个奇异方向)。

[0021] 在操作 328 中, 通过定位最后 n 个右奇异向量 228 中最大的元素, 确定哪个接点 112 为奇异点和 / 或靠近奇异点。在操作 332 中, 使最后 n 个左奇异向量 208 乘以最大的奇异值 236, 获得 n 个“虚拟接点”。在操作 336 中, 与操作 328 中确定的接点 112 相关的 J 的列 204 由在操作 332 中获得的“虚拟接点”代替。

[0022] 在操作 340 到 360 中, 为联杆系 100 计算补偿量, 例如系统  $J \cdot dq = dx$  迭代方案到收敛, 如美国专利申请公开 No. 20060271241 所述, 具体来说, 例如, 在操作 340 中, 使用名义反向运动学算法获得初始联杆位置向量  $Q_i$ 。在操作 344 中, 使用固有前向运动学算法和联杆位置向量  $Q_i$  得到实际末梢位置向量 X。在操作 348 中, 计算  $\Delta X$  向量, 表示希望末梢位置向量和实际末梢位置向量之间的差异。在操作 352 中, 利用操作 312 中获得的雅克比矩阵 (并且雅克比矩阵可能在操作 336 中发生改动) 计算  $\Delta Q$  向量。在操作 356 中, 在操作 352 中计算的  $\Delta Q$  向量以及联杆位置向量  $Q_i$  用来获得新的联杆位置向量  $Q_{i+1}$ 。在操作 360 中, 通过比较向量  $Q_{i+1}$  和  $Q_i$  之差与预定收敛标准  $\epsilon$ , 来检测收敛性。如果尚未收敛, 则利用向量  $Q_{i+1}$  来更新向量  $Q_i$ , 并且控制程序返回操作 344。如果在操作 360 中发生收敛, 则在操作 364 中确定条件数的倒数是否小于所述阈值, 即联杆是否靠近奇点。如是, 则在操作 368 中, 从向量  $|Q_{i+1} - Q_i|$  中除去表示“虚拟接点”的值, 在操作 372 中利用该值来补偿非奇异接点 112。由于 SVD 对于每个点仅执行一次且并不作为迭代处理的一部分, 所以前述方法和系统较之线性二次型调节 (LQR) 或阻尼最小二乘法来说, 计算方面更简单。

[0023] 前述方法和系统具有许多优势。例如，左奇异向量提供理想“虚拟接点”，它们将连杆精确沿着奇异方向移动，而不考虑机床的位置和复杂性。另一项优势在于，通过最大奇异值来缩放“虚拟接点”，产生的新操作器雅克比矩阵的条件得以优化，从而保证方案稳定且快速收敛，例如在前述方法 300 的操作 340 到 360 中。此外，前述方法的实施不需要知道机床奇点位置的先验知识，所以同样的算法可以用在各种机床上，不需要改变。

[0024] 本发明的实施方式提供了一种装置来改善运行于奇点附近的自动设备的定位精度。如果能提高精度，则新固定设备的购置成本以及现有设备的维护成本可以降低。此外，本发明的各种实施方式可以提供适用于不同机床几何外形的单一方法，从而减少软件开发需求以及处理新机床几何外形的维护工作。

[0025] 可以设置经校准的机床工具，它们能完成更精确的工作。因此，可以在浪费更少的材料的前提下制作精度更高的部件。在飞行器生产过程中实施时，可以在降低飞行器重量并改善其性能的前提下，生产精度更高的部件。本发明的实施可以减少设置时间，使得机床工具的生产力更高，从而降低加工成本。

[0026] 前述方法和系统的各种实施方式可以利用软件来补偿存在复杂奇点配置的机床（例如，具有旋转接点的六轴回转机器人）。对于广泛的机床配置来说，可以在“现场”提供补偿，甚至不需要知道有关给定机床全部奇点的位置和性质的先验知识。相同的核心补偿软件可以用在广泛的机床配置上，而不需要根据机床几何外形重写软件。

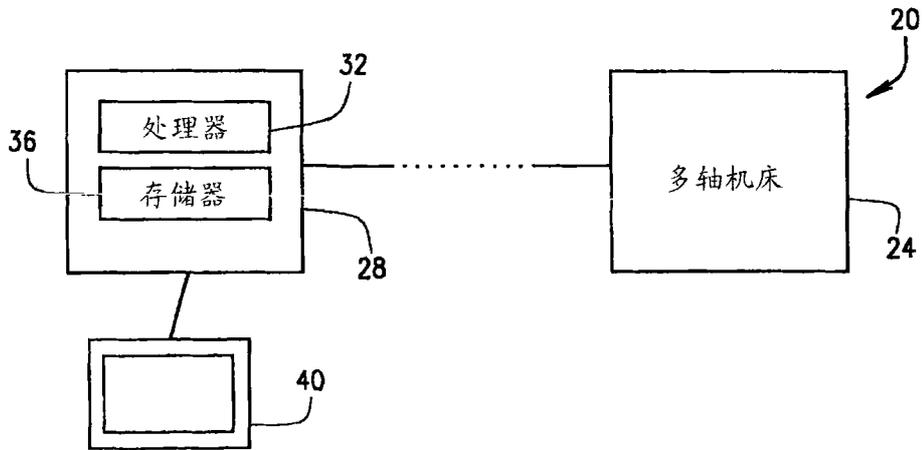


图 1

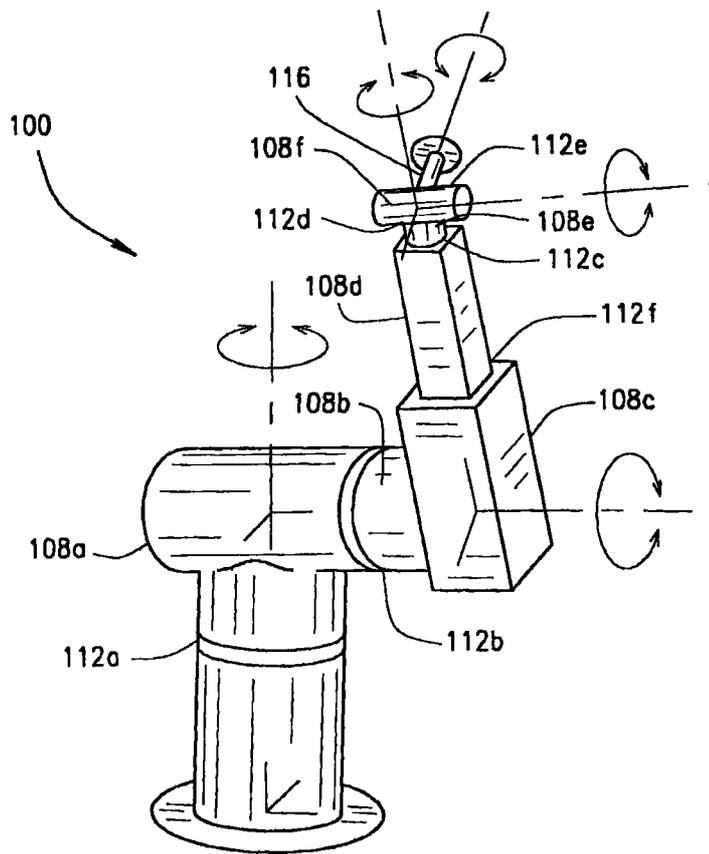
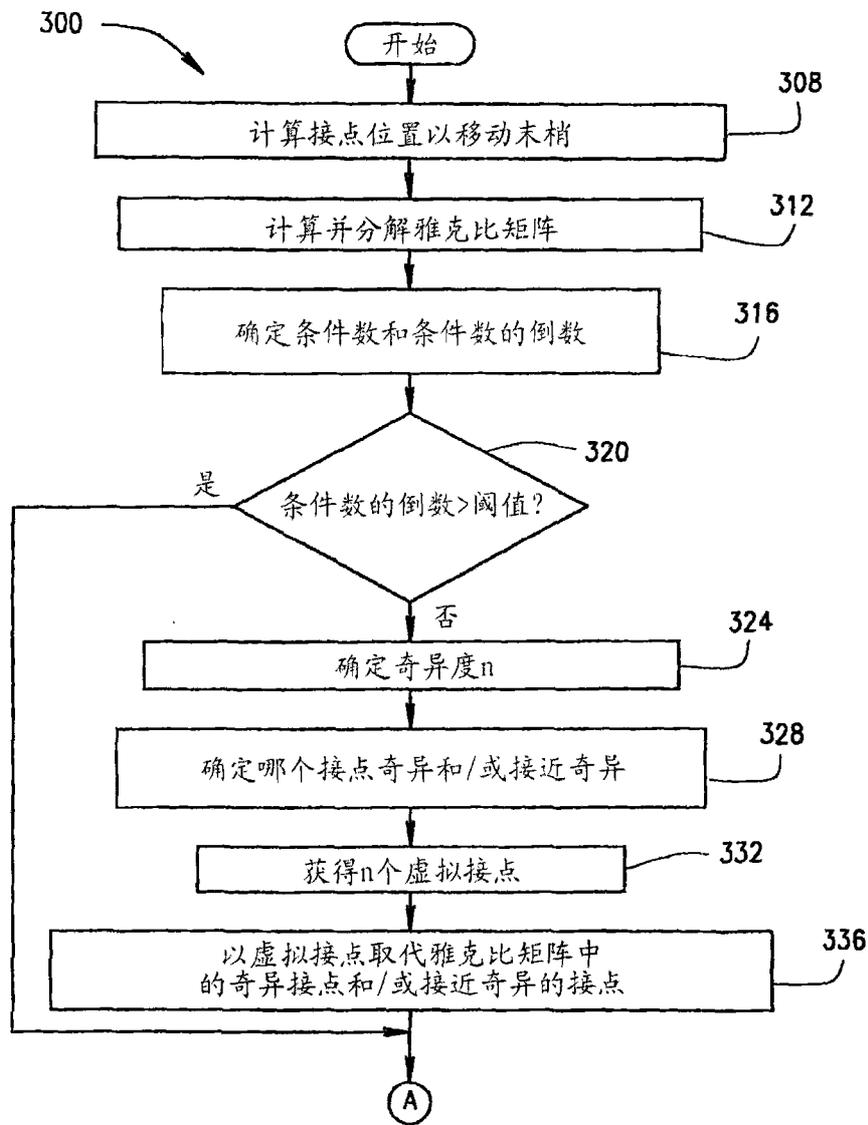
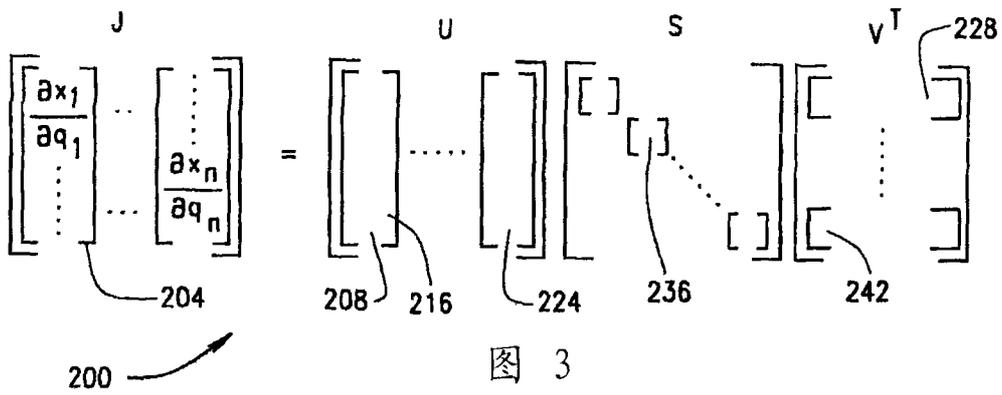


图 2



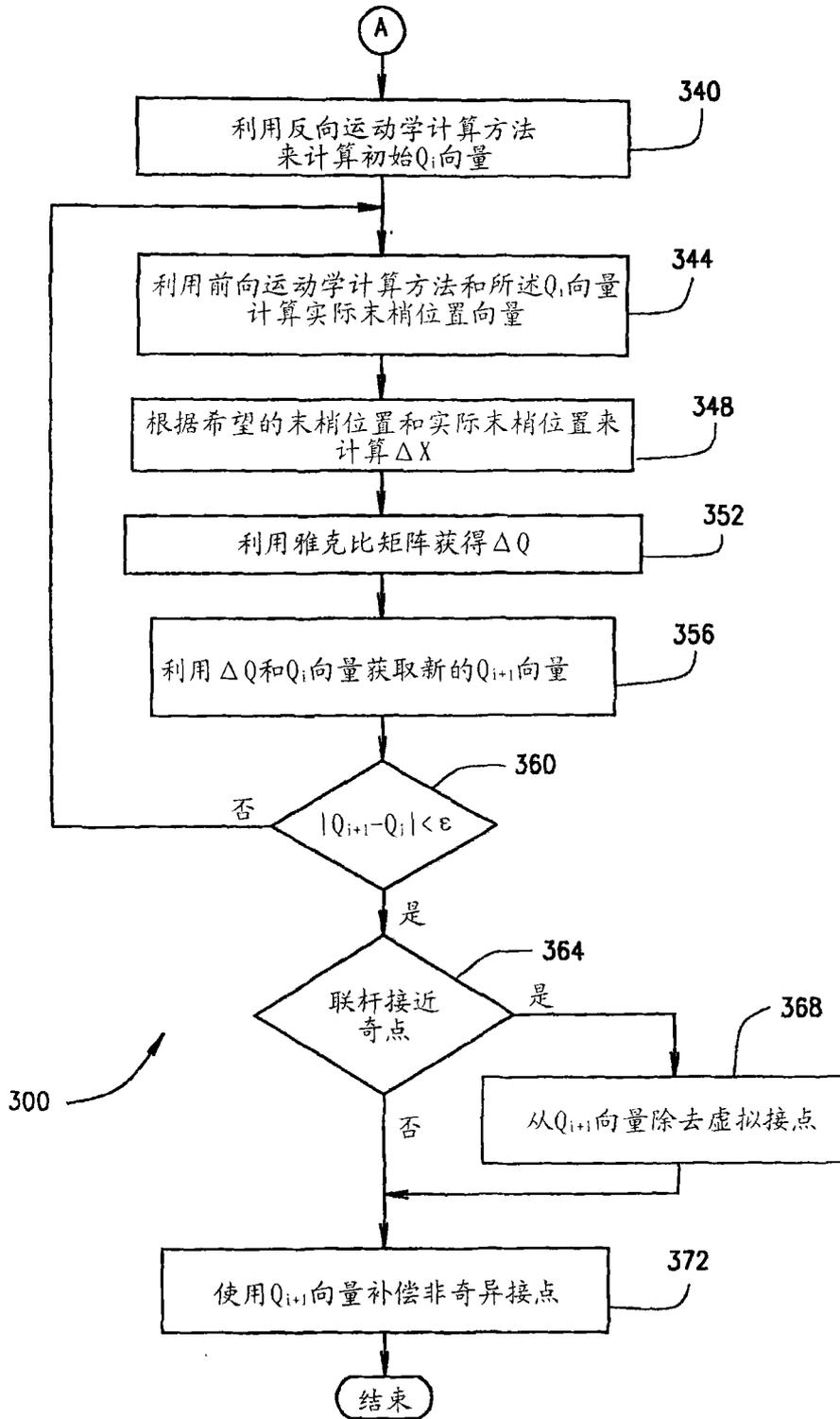


图 4B