

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200310119687.2

[51] Int. Cl.

G06F 17/50 (2006.01)

A61F 2/30 (2006.01)

G05B 19/4097 (2006.01)

G05B 19/42 (2006.01)

[45] 授权公告日 2007 年 8 月 29 日

[11] 授权公告号 CN 100334590C

[22] 申请日 1996.2.14

[21] 申请号 200310119687.2

分案原申请号 96193047.0

[30] 优先权

[32] 1995.2.14 [33] US [31] 388580

[73] 专利权人 詹姆斯 A · ST · 维利

地址 美国亚里桑那州

[72] 发明人 詹姆斯 A · ST · 维利

[56] 参考文献

US4975262A 1990.12.4

US4936862A 1990.6.26

US5351196A 1994.9.27

US5023800A 1991.6.11

审查员 马红梅

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

代理人 陈景峻 张志醒

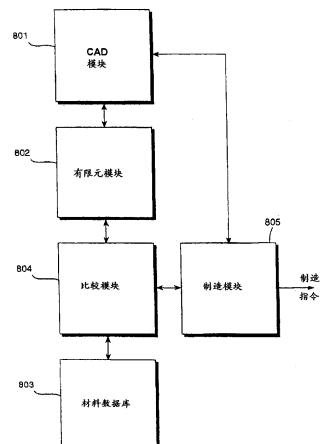
权利要求书 3 页 说明书 19 页 附图 11 页

[54] 发明名称

制造具有优化响应特性的物体的方法和设备

[57] 摘要

一种制造响应于施加在其上的场 $\{f\}$ 而生成势 $\{x\}$ 的物体的方法，包括：通过将该物体的几何模型离散化为大量有限元并给定相对于有限元的、场 $\{f\}$ 和势 $\{x\}$ 的值，以生成计算机化的数学模型；基于关系 $\{f\} = [k] \{x\}$ 计算材料特性矩阵 $[k]$ ；对该计算机化数学模型中的每一个有限元，从该材料特性矩阵 $[k]$ 求得材料特性系数；将求得的材料特性系数和已知材料的材料特性系数进行比较以使求得的材料特性系数和已知材料的材料特性系数相匹配；确定对应于材料特性系数的制造参数；和根据确定的制造参数制造物体。



1. 一种用于确定响应于施加在其上的场 $\{f\}$ 而生成势 $\{x\}$ 的制造物体的制造指示的装置，包括：

通过将该物体的几何模型离散化为大量有限元并给定相对于有限元的、场 $\{f\}$ 和势 $\{x\}$ 的值而生成计算机化的数学模型的第一生成装置；

基于关系 $\{f\} = [k] \quad \{x\}$ 计算材料特性矩阵 $[k]$ 的计算装置；

对该计算机化数学模型中的每一个有限元，从该材料特性矩阵 $[k]$ 求得材料特性系数的求得装置；

将求得的材料特性系数和已知材料的材料特性系数进行比较以使求得的材料特性系数和已知材料的材料特性系数相匹配的比较装置；

确定对应于材料特性系数的制造参数的确定装置；

根据所述制造参数生成制造指示的第二生成装置；以及

输出装置，用于将所述制造指示输出至制造设备的控制单元，所述控制单元利用制造指示控制所述制造设备，以便制造所述物体。

2. 根据权利要求 1 的装置，其中如果已匹配的材料特性系数为一种复合材料的材料特性系数，已确定的制造参数用于控制复合制造设备。

3. 根据权利要求 2 的装置，其中已确定的制造参数用于生成控制编织机的制造指示。

4. 根据权利要求 3 的装置，其中制造指示包括控制施加到用于编织机的纤维上的拉力的指示。

5. 根据权利要求 3 的装置，其中制造指示包括控制编织机座和编织机卷筒之一或两者的速度的指示。

6. 根据权利要求 3 的装置，其中制造指示包括控制用于编织机的纤维上的厚度的指示。

7. 根据权利要求 2 的装置，其中已确定的制造参数用于生

成控制压焊机的制造指示。

8. 根据权利要求 7 的装置，其中制造指示包括控制压焊机的温度和压力的指示。

9. 根据权利要求 2 的装置，其中已确定的制造参数用于生成控制加入树脂中的纤维的制造指示。

10. 根据权利要求 1 的装置，其中节点被给定在所述有限元的边界和场 $\{f\}$ 及势 $\{x\}$ 的值给定在所述的节点。

11. 根据权利要求 1 的装置，其中该物体是一个假体，用于替代一个身体部分，而场 $\{f\}$ 和势 $\{x\}$ 的给定基于当对其施加力时被施加到要替代的身体部分的在体内的力和产生在要替代的身体部分的在体内的移位。

12. 一种确定响应于施加在其上的场 $\{f\}$ 而生成势 $\{x\}$ 的制造物体的制造指示的方法，包括：

通过将该物体的几何模型离散化为大量有限元并给定相对于有限元的、场 $\{f\}$ 和势 $\{x\}$ 的值，以生成计算机化的数学模型；

基于关系 $\{f\} = [k] \quad \{x\}$ 计算材料特性矩阵 $[k]$ ；

对该计算机化数学模型中的每一个有限元，从该材料特性矩阵 $[k]$ 求得材料特性系数；

将求得的材料特性系数和已知材料的材料特性系数进行比较以使求得的材料特性系数和已知材料的材料特性系数相匹配；

确定对应于材料特性系数的制造参数；

根据所述制造参数生成制造指示；以及

将所述制造指示输出至制造设备的控制单元，所述控制单元利用制造指示控制所述制造设备，以便制造所述物体。

13. 根据权利要求 12 的方法，其中如果已匹配的材料特性系数为一种复合材料的材料特性系数，已确定的制造参数用于控制复合制造设备。

14. 根据权利要求 13 的方法，其中已确定的制造参数用于生成控制编织机的制造指示。

15. 根据权利要求 14 的方法，其中制造指示包括控制施加

到用于编织机的纤维上的拉力的指示。

16. 根据权利要求 14 的方法，其中制造指示包括控制编织机座和编织机卷筒之一或两者的速度的指示。

17. 根据权利要求 14 的方法，其中制造指示包括控制用于编织机的纤维上的厚度的指示。

18. 根据权利要求 13 的方法，其中已确定的制造参数用于生成控制压焊机的制造指示。

19. 根据权利要求 18 的方法，其中制造指示包括控制压焊机的温度和压力的指示。

20. 根据权利要求 13 的方法，其中制造参数用于生成控制加入树脂中的纤维的制造指示。

21. 根据权利要求 12 的方法，其中节点被给定在所述有限元的边界和场 {f} 及势 {x} 的值给定在所述的节点。

22. 根据权利要求 12 的方法，其中该物体是一个假体，用于替代一个身体部分，而场 {f} 和势 {x} 的给定基于当对其施加力时被施加到要替代的身体部分的在体内的力和产生在要替代的身体部分的在体内的移位。

制造具有优化响应特性的物体的方法和设备

技术领域

本发明一般涉及物体的制造，更具体，涉及制造具有被优化以适应期望的应用或使用的响应特性的物体的方法和设备。

背景技术

由一种或多种材料组成的物体，该物体为期望的应用而设计和制造，必须能够承受在使用中施加在该物体上的应力。例如，一座桥，承受小路或公路的压力或例如水体的损害，必须设计得可承受由交通（行人或车辆或二者同时），温度变化，风，由地震或地质运动等引起的地表的移动，等等产生的应力。同样，飞行器元件必须有足够的强度以承受弯曲，剪切，扭曲，和施加在其上的其它力。因此，在传统的设计过程中，要进行应力分析。应力分析要求确定在使用中施加在物体上的力（或“应力场”）。这些应力包括，例如，热力，机械力和电磁力。知道了应力场便可以确定验性设计和选择的材料是否适用于物体承受在其期望的应用过程中产生的应力。如果特定的设计和材料的组合不适用于期望的应用，可重新设计物体和/或选择新材料。

上述的传统设计过程将参照图 1 进行更为详细的描述。物体的初步设计几何形状和组成物体的材料在第 11 步中定义。几何形状包括尺寸，公差，表面光洁度，面和棱的界定，以及，在一些情况下，两个相啮合部件之间的配合。初步设计几何形状可用本领域中已知的计算机一辅助一设计 (CAD) 技术生成。在期望的使用中施加在物体上的每一个力，和各个力的作用点和方向，在第 12 步中确定。

应力分析在第 13 步中进行。进行这种应力分析的一种技术是建立物体的有限元模型并利用有限元方法来确定物体对期望的应用的适应性。有限元方法是一种用于求得大量工程问题的近似解的数值分析技术，在这种方法中，复杂的部分或物体被分解为对该部分或物体的小而简单的细小部分的分析。这种方法已被广泛地讨论，相关内容可参考 Huebner 等著的《工程师用有限元方法》，第三版，John Wiley and Sons 公司 (1995)，后面的讨论中。在连续问题中，由于场变量如压力，

温度，位移或应力是物体各点的函数，初始有许多值。有限元方法通过将问题区域划分为元并根据假设的近似函数表示各个元中的未知场变量，从而把问题简化为一个未知的有限数。近似函数根据在被称作节点的特定点上的场变量的值来定义。节点通常位于相邻元连接的元边界上。对于问题的有限元表示法，场变量的节点值成为未知量。一旦得到这些未知量，近似函数便定义了全部组合元的场变量。有限元方法的一个重要特征是具有在把分立元组合以表示整个问题之前对分立元的解进行系统表达的能力。这意味着可以得到每一个分立元的特性然后将元组合起来以得到整个结构的特性。有限元方法可被归纳为以下几个步骤。

第一，连续体被离散化为元。可以使用许多种类的元并且在同一求解区域可使用不同种类的元。在给定的问题中，元的数量和形式通常由设计决定。例如，如果是四面体或六面体，三维元最佳。此外，最精确元具有均一纵横比。下一步是确定每一个元的节点，然后选择插值函数来表示元的场变量的变化。一旦有限元模型建立起来，表示分立元性质的矩阵方程就可确定。可使用若干不同的逼近包括直接逼近，变分逼近，或加权残数逼近。然后元的性质被组合以得到系统方程。即，联立表示元的行为的矩阵方程以形成表示整个系统行为的矩阵方程。这时，系统方程被调整以解释问题的各种边界条件。即，施加独立变量的已知节点值或节点负载然后求解所得到的方程组以得到问题的未知节点值。方程的解可被用来计算其它重要参数。例如，在结构问题中，节点未知量是位移分量。通过位移，元的张力和应力可被计算。

Huebner 教材中关于有限元方法的一个例子将被讨论以帮助理解在本说明书中使用的术语。图 2 示例了一个线性弹簧系统。对一个典型的弹簧元，表示其刚度的关系是

$$\begin{bmatrix} k_{11} & -k_{12} \\ -k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix}$$

其中 $k_{11}=k_{12}=k_{21}=k_{22}=k$ 。

在给定的负载条件下，每一个元及元的系统，必处于平衡。如果平衡条件被加在特定的节点 i 上，

$$\sum F_i^{(e)} = F_i^{(1)} + F_i^{(2)} + F_i^{(3)} + \dots = R_i \dots \quad (1)$$

这表明节点 i 上朝一个方向的节点力的和等于施加在节点 i 上的总外加负载。根据传统的张量概念，刚度矩阵的每一个系数都带有双下标，例如， $i j$ ； i 是指明由下标为 j 的位移的单位值产生的力 F_i 的下标。力 F_i 是当 $\delta_j=1$ 且其它位移固定时存在的力。位移和在该位移方向上的合力具有同样下标。因此，在图 2 中的线性弹簧系统中的各个节点求解方程 (1)，可以看到

在节点 1，

$$k_{11}^{(1)}\delta_1 + k_{12}^{(1)}\delta_2 = R_1$$

在节点 2，

$$k_{21}^{(1)}\delta_1 + \left(k_{22}^{(1)} + k_{22}^{(2)} + k_{22}^{(3)} \right) \delta_2 + \left(k_{23}^{(2)} + k_{23}^{(3)} \right) \delta_3 = 0$$

在节点 3

$$\left(k_{32}^{(2)} + k_{32}^{(3)} \right) \delta_2 + \left(k_{33}^{(2)} + k_{33}^{(3)} + k_{33}^{(4)} \right) \delta_3 + k_{34}^{(4)} \delta_4 = 0$$

在节点 4

$$k_{43}^{(4)} \delta_3 + k_{44}^{(4)} \delta_4 = F$$

利用矩阵的表示，这组平衡方程可被写为

$$\begin{bmatrix} k_{11}^{(1)} & k_{12}^{(1)} & 0 & 0 \\ k_{21}^{(1)} & \left(k_{22}^{(1)} + k_{22}^{(2)} + k_{22}^{(3)} \right) & \left(k_{23}^{(2)} + k_{23}^{(3)} \right) & 0 \\ 0 & \left(k_{32}^{(2)} + k_{32}^{(3)} \right) & \left(k_{33}^{(2)} + k_{33}^{(3)} + k_{33}^{(4)} \right) & k_{34}^{(4)} \\ 0 & 0 & k_{43}^{(4)} & k_{44}^{(4)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_1 \\ 0 \\ 0 \\ F \end{Bmatrix}$$

或

$$[K] \{\delta\} = \{F\} \dots \quad (2)$$

这些方程是整个系统的组合力一位移特征量， $[k]$ 是组合刚度矩阵。这些方程只有在被调整到能解释边界条件的情况下才能求解节点位移。

可以发现刚度矩阵 $[k]$ 是下列矩阵的和，每一矩阵表示来自一个对应元的贡献：

$$[\bar{K}]^{(1)} = \begin{bmatrix} k_{11}^{(1)} & k_{12}^{(1)} & 0 & 0 \\ k_{21}^{(1)} & k_{22}^{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [\bar{K}]^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{22}^{(2)} & k_{23}^{(2)} & 0 \\ 0 & k_{32}^{(2)} & k_{33}^{(2)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[\bar{K}]^{(3)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{22}^{(3)} & k_{23}^{(3)} & 0 \\ 0 & k_{32}^{(3)} & k_{33}^{(3)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [\bar{K}]^{(4)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{33}^{(4)} & k_{34}^{(4)} \\ 0 & 0 & k_{43}^{(4)} & k_{44}^{(4)} \end{bmatrix}$$

因此，可以发现通过把各个元的贡献相加可以简单地得到组合的或整体的刚度矩阵。同样，利用布尔分布函数或其它分布函数，每一个元的贡献也可从组合的或整体的刚度矩阵确定。

因此，为进行应力分析，由初始设计确定组成物体的材料，按第 12 步所确定的施加在物体上的力，及其它约束或边界条件要输入到有限元模型中。由于力 $\{f\}$ 和材料特性矩阵 $[k]$ 是已知的，由方程 (2) 采用有限元模型可确定相应的位移 $\{\delta\}$ 。例如，假设由第 12 步所确定的力是施加在物体上的负载。那么，由于材料特性矩阵由对材料的初始选择确定，由施加负载导致的位移便可确定。如上所述，这些位移便可用于计算应力和张力。通过利用合适的有限元软件包来执行求解由有限元方法产生的矩阵方程的计算。

进行在第 14 步示例的后处理，以确定设计是否令人满意。该后处理可能包括，例如，材料内部应力和所用材料指示的最大允许应力之间的比较。如果应力太高，流程返回到第 11 步，在那里该部分可通过增加材料而做得更坚固，材料可能被一种允许更高应力的材料所代替，或是使用重新设计的几何形状。如果第 14 步的后处理指示结果可以接受，流程向前到第 15 步，在那里物体按照在第 11 步确定的几何形状和所选材料被制造。

上述传统制造工艺的一个已知的问题是使用已知材料并预先设定制造参数，因此制成具有内在（固有）特性的结构。这导致了结构上过多的设计工作和低效率。虽然存在可以调节制造参数的制造过程，但不存在精确定制制造参数应为多少或这些参数应该执行的顺序以便

优化特定物体设计的固有特性的方法。实质上，不存在确定对特定物体的优化的基本矩阵或根据其优化基本矩阵制造物体的方法。

发明内容

根据本发明，一种制造响应于施加在其上的场 $\{f\}$ 而生成势 $\{x\}$ 的物体的方法，该方法包括步骤：

通过将该物体的几何模型离散化为大量有限元并给定相对于有限元的、场的值 $\{f\}$ 和势的值 $\{x\}$ ，以生成计算机化的数学模型；

基于关系 $\{f\} = [k] \quad \{x\}$ 计算材料特性矩阵 $[k]$ ；

对该计算机化数学模型中的每一个有限元，从该材料特性矩阵 $[k]$ 求得材料特性系数；

将求得的材料特性系数和已知材料的材料特性系数进行比较以使求得的材料特性系数和已知材料的材料特性系数相匹配；

确定对应于材料特性系数的制造参数；和

根据确定的制造参数制造物体。

根据本发明的另一个方面，具有为某一具体应用而优化的响应特性并按照上述方法制造的物体，其中该物体的不同部分具有响应于已知材料所匹配的材料特性系数的不同的材料特性。

根据本发明的另一个方面，一种用于确定响应于施加在其上的场 $\{f\}$ 而生成势 $\{x\}$ 的物体的制造参数的装置，包括：

通过将该物体的几何模型离散化为大量有限元并给定相对于有限元的、场的值 $\{f\}$ 和势的值 $\{x\}$ 而生成计算机化的数学模型的生成装置；

基于关系 $\{f\} = [k] \quad \{x\}$ 计算材料特性矩阵 $[k]$ 的计算装置；

对该计算机化数学模型中的每一个有限元，从该材料特性矩阵 $[k]$ 求得材料特性系数的求得装置；

将求得的材料特性系数和已知材料的材料特性系数进行比较以使求得的材料特性系数和已知材料的材料特性系数相匹配的比较装置；和

确定对应于材料特性系数的制造参数的确定装置。

根据本发明的另一个方面，一种确定响应于施加在其上的场 $\{f\}$ 而生成势 $\{x\}$ 的物体的材料特性的方法，该方法包括步骤：

通过将该物体的几何模型离散化为大量有限元并给定相对于有限

元的、场的值 $\{f\}$ 和势的值 $\{x\}$ ，以生成计算机化的数学模型；

基于关系 $\{f\} = [k] \quad \{x\}$ 计算材料特性矩阵 $[k]$ ；

对该计算机化数学模型中的每一个有限元，从该材料特性矩阵 $[k]$ 求得材料特性系数；和

将求得的材料特性系数和已知材料的材料特性系数进行比较以使求得的材料特性系数和已知材料的材料特性系数相匹配。

根据本发明的另一个方面，一种用于确定响应于施加在其上的场 $\{f\}$ 而生成势 $\{x\}$ 的物体的材料特性的装置，包括：

通过将该物体的几何模型离散化为大量有限元并给定相对于有限元的、场的值 $\{f\}$ 和势的值 $\{x\}$ 而生成计算机化的数学模型的生成装置；

基于关系 $\{f\} = [k] \quad \{x\}$ 计算材料特性矩阵 $[k]$ 的计算装置；

对该计算机化数学模型中的每一个有限元，从该材料特性矩阵 $[k]$ 求得材料特性系数的求得装置；和

将求得的材料特性系数和已知材料的材料特性系数进行比较以使求得的材料特性系数和已知材料的材料特性系数相匹配的比较装置。

根据本发明的另一个方面，一种确定响应于施加在其上的场 $\{f\}$ 而生成势 $\{x\}$ 的物体的制造参数的方法，包括：

通过将该物体的几何模型离散化为大量有限元并给定相对于有限元的、场的值 $\{f\}$ 和势的值 $\{x\}$ ，以生成计算机化的数学模型；

基于关系 $\{f\} = [k] \quad \{x\}$ 计算材料特性矩阵 $[k]$ ；

对该计算机化数学模型中的每一个有限元，从该材料特性矩阵 $[k]$ 求得材料特性系数；

将求得的材料特性系数和已知材料的材料特性系数进行比较以使求得的材料特性系数和已知材料的材料特性系数相匹配；和

确定对应于材料特性系数的制造参数。

通过阅读下面的带有附图的详细描述，可以很好地理解本发明的这些以及其它特征和优点。

附图说明

图 1 示例了先有技术的制造物体的方法。

图 2 示例了用于定义在本申请中使用的术语的简单机械弹簧系统。

图 3 示例了根据本发明的制造物体的方法。

图 4A 和 4B 分别示例了当一条腿站立和从椅子上抬起时施加在臀部股骨前端的力。

图 5A 和 5B 分别示例了施加在活体内的臀部上的力和产生的应力。

图 6 示例了假体臀部的有限元模型。

图 7A 和 7B 示例了材料特性数据库。

图 8 示例了在实行本发明时可能使用的功能模块。

图 9 是在实行图 8 中一个或多个功能模块时可能使用的环境方框图。

图 10 是控制制造机器的控制计算机的简图。

具体实施方式

图 3 将被用来描述根据本发明制造物体或部件的方法。从下面的描述中可清晰的知道，这里用到的物体或部件（以下称“物体”）指可通过一个其制造参数可控制以改变物体内部的结构或材料特性的过程或技术制造出的任何物体。根据本发明制造物体的方法基于下述方程的解

$$\{f\} = [k] \{x\}$$

其中 $\{f\}$ 表示物体在期望的应用中施加在其上的场， $\{x\}$ 表示对应于所施加场的势， $[k]$ 表示物体的材料特性。

本发明的方法可被与任何制造参数可变的制造技术一并使用。例如，用编织机的编织过程可用来制造纤维合成物体。纤维合成材料作为元件的结构材料正被发现有越来越多的用途例如汽车、车体控制板，飞机，假体植入物，高尔夫球杆柄，网球拍，自行车架，及钓鱼杆。这些合成材料提供等于或超过金属材料的高强度，例如重量更轻同时有其它改进功能特性。像编织机床和/或转轴的速度，纤维的粗细，和施加在纤维上的拉力等参数被控制以改变纤维合成材料的刚度特性。为控制合成材料的编织而设计的编织机床的例子被示于 Skelton 的美国专利 No. 4,909,127 中。Suto 的美国专利 No. 4,975,262 还讨论了三维纺织物。

合成材料还可通过在合适的基体中层压 Carver 等的美国专利 No. 5,023,800 中描述的结构纤维而构成。纤维玻璃是一种广泛应用的

合成系统，它是在环氧树脂基体中添加玻璃纤维形成的。为制造飞机元件，希望更多具有改进特性的新奇的合成系统。目前可用的是新奇无机材料如碳纤维，硼纤维，改进玻璃纤维，氧化铝纤维，不同材料的无机晶须和特定的有机纤维如聚胺和扩展链聚乙烯。这些纤维或晶须在合适的树脂中被制成线，织物，垫子等，例如热固环氧树脂，聚酯，聚醚，聚酰亚胺，和双顺丁烯二酰亚胺或热塑性聚酰胺，聚醚砜，聚醚酮，硫化聚苯撑和其它类似聚合材料。合成物体可用模制技术制成 - 利用具有物体互补形状的外模或是通过内部芯棒模制合成物体。用于制造或加工合成物体的模具称作耦合工具，加工在对温度和压力的精确控制下进行。

利用车床或铣床上的轮廓系统的形成轮廓过程可用来制造金属物体。形成轮廓指在工具如涡轮叶片机上连续移动材料。像部件表面，驱动表面和约束表面等参数可通过改变铣刀路径来控制并进行加工。部件表面指铣刀末端所沿的表面；驱动表面指铣刀边缘所沿的表面；约束表面指铣刀目前的运动将要停止的表面。加工系统的细节示于 Bedworth 等人计算机集成设计与制造 (*Computer-Integrated Design and Manufacturing*)，McGraw-Hill Inc. (1991) 中。

当然，本发明并不限于通过编织，模制或轮廓加工而成的物体，并且上述讨论仅仅是可以用到本发明方法的制造技术的例子。其它过程和技术包括，作为例子而不是局限，聚合物制造过程，结晶技术，陶瓷制造技术，等等。

在第 21 步，定义了当物体在期望应用中施加于其上的场 $\{f\}$ ，以及期望的对场的势或响应 $\{x\}$ 。例如，物体位于机械力场，电流场，磁场，热流场，和/或流速场。利用这些初始场可导出其它场。例如，结合机械力场和流速场可导出声场。结合流速场和磁场可导出磁流体力学场。上述各场均有对应的势。这些势响应于机械力场而变化；电势，响应于电场；磁矢量势，响应于磁场；温度，响应于热流场；流势，响应于流速场。

如上所述，在第 21 步定义的场表示物体在期望应用中施加在其上的一个或多个场。例如，在假体臀部的情形下，场可以是施加在植入人体后的假体臀部上的机械力场。例如，图 4A 和 4B 中的箭头分别表示单腿站立时（例如当步行时）和从椅子上站起时施加在股骨前端的

力（方向和大小）。力的分布和方向基于例如，Hodge 等人的对体内的臀部的研究报告，“Contact Pressures in the Human Hip Joint Measured In Vivo”，*Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 83, 2879-2883 (1986)。这些力的合力大约等于 2000 牛顿 (N)，伴随着方向从单腿站立到站起的改变。另一个例子，热传导元件的情况下，场是物体在期望应用中施加在其上的热流场。当然，物体可施加有多个场，每个场都可在第 21 步中定义。例如，电导体在其期望应用中可被施加电场，磁场，和机械力场。

第 21 步定义的势 $\{x\}$ 定义了制造者期望的当定义的场 $\{f\}$ 施加在物体上时物体的响应方式。在假体臀部的情形下，定义的势是在行走或从椅子上站起的情况下假体臀部受到示于图 4A 和 4B 的机械力时假体臀部中的期望位移（数学上相当于应力）。如果制造者期望假体臀部以和在体内臀部相同的方式响应于力，假体臀部中的“期望位移”可以，例如，对应于在自然体内的臀部行走或从椅子上站起时位移。图 5A 示例了在自然在体内的臀部被按照指示施加了 2000N 的力，图 5B 是一个表格度量了图 5A 中标为 A, B, C, D, E 和 F 各点响应于施加的力产生的位移。因此，期望制造以与体内的臀部相同方式响应于示于图 5A 的力的假体臀部的制造者将力 $\{f\}$ 定义为图 5A 所示的力并将位移 $\{x\}$ 定义为图 5B 的表格所给出的位移。同样，在施加了热流场的热传导元件的情形下，所施加了定义的响应对应于当期望热流场施加其上时在热传导元件的不同部分的期望温度。在位于电场，磁场，和机械力场作用下的电导体情形下，定义的响应分别对应于当定义的机械力场施加于其上时导体不同部分的期望位移，定义的磁场施加于其上时导体不同部分的期望磁矢量势，和当定义的电场施加于其上时导体不同部分的期望电势。

在第 22 步，利用计算机辅助设计给被制造物体几何建模。几何建模是利用算法几何定义几何物体的技术。几何建模的目的是表达物体，规定了所制造物体和其它用具的全部限定如有限元分析；设计物体，允许使用者输入并操作物体的几何规定；以及表现物体，利用几何学在计算机图形输出设备上描绘物体的真实图像。物体或部件的初步几何建模可以，例如，基于设计工程师的经验或由物体或部件的期望应用决定。例如，假体臀部的初步几何建模是根据体内的臀部。当

然，初步几何建模可进一步调节以适应具体高度和/或重量的特点。高尔夫球杆柄的初步设计几何形状是已知的，即预定长度和直径的圆柱体。然后，可调节这一初步设计几何形状以给具体身高的高尔夫选手提供球杆或提供直径变化的球杆，例如，在接近前端直径变得较窄。用来执行这一几何建模的合适的软件包有 I-EDAS（在俄亥俄州 Milford 的 SDRC 公司可得），CATIA（从纽约州 Amonk 的 IBM 可得），及 ANVIL-5000（在制造咨询服务处可得）。这些软件包可在，例如，UNIX-系统的工作站如 Sun Microsystems 或 Silicon Graphics 上面运行。当然，计算机的选择取决于计算量的要求，本发明不局限于这一方面。这些计算机辅助设计软件包的应用允许由使用者定义的物体或部件几何建模并快速调节，并可生成几何数据，该数据可转化为用于计算机辅助制造步骤的格式和/或用于有限元方法步骤的格式，这些步骤在下面详细讨论。已知初步几何建模可以通过扫描具有期望几何形状的物体产生图象数据。例如，假体臀部的初步几何建模可通过尸体臀部的 X-射线产生，例如，西门子的 Somatom DR3 或 GE 9800 CT 扫描仪。图象数据可转化为 CAD 软件包使用的格式或可直接转化为下述有限元软件包（如 PDA-PATRAN（在 PDA 工程公司可得）格式）使用的格式。

在第 23 步，利用有限元方法生成物体的有限元模型。有限元方法基于不规则形状的物体可分为较小的有规则的有限元的理论。每一元可被分别处理，其集和效果就是物体中全部有限元效果的总和。使用者利用在第 22 步几何建模中发展的合适的软件包生成有限元模型。因此，有限元软件包通常访问包含在第 21 步中发展的物体几何形状的数据文件。一些综合软件包，如 SDRC 公司的 I-DEAS，将几何建模模块和有限元分析模块结合起来，使用者无需重新为有限元分析特别定义几何形状。其它生成有限元模型的合适的软件包包括 MSC/NASTRAN（可从 MacNeal-Schwendler 公司得到），ABAQUS（可从 MacNeal-Schwendler 公司得到）和 ANSYS（可从 Swanson 制造公司得到）。

因此，通过将物体的集合模型划分为大量元并在元的边界定义节点可生成有限元模型。假体臀部的有限元模型的一个例子示于图 6。物体的有限元模型可用到不同类型的元。选定元的数量和类型基于场的类型和物体的几何形状。上述不同有限元软件包通常包括元库和元

簇，以使具有特定形状的区域能够在用户指定的精确程度上制模。因此，可以使用尺寸为预定数值的元或大小为预定数值的元簇。如果使用元簇，元簇可在整个有限元模型中重复。元簇可包括不同形状的元。例如，如果制造的物体会受到剪切力，形状适合对剪切力的类型的元可被使用并被恰当地排列。当这些元被结为组，它们可定义可重复的簇，例如，在具有相似几何形状的区域和/或被施加相同的力。此外，不同尺寸的元可被用于对物体的临界公差部分建模。所谓的超-元可用于非临界公差的地方。如下所述，由于本发明的方法是典型的重复过程，如果，例如，在第一次重复时就已确定物体有一个或多个部分节点值改变得不多，出于计算目的，稍后的第二次重复可生成在这些区域包括一个或多个超-元的物体的有限元模型以便简化随后的计算。

通过指定离散化的物体节点处的上述场 $\{f\}$ 和势 $\{x\}$ 的值和/或方向，完成有限元模型。此外，要加上任何恰当的边界条件。

在第 24 步，运行有限元软件包以利用关系 $\{f\} = [k] \{x\}$ 来编程求解材料特性矩阵 $[x]$ 。即，

$$[k] \{x\} = \{f\}$$

$$[k] \{x\} \{x\}^{-1} = \{x\}^{-1} \{f\}$$

$$[k] = \{x\}^{-1} \{f\}$$

由于在第 21 步中定义了场 $\{f\}$ 和势 $\{x\}$ ，因此可以计算材料特性矩阵 $[x]$ 。当 $\{f\}$ 是机械力场且 $\{x\}$ 是位移时， $[k]$ 是刚度矩阵。当 $\{f\}$ 是热流场且 $\{x\}$ 是温度时， $[k]$ 是热导率。当 $\{f\}$ 是磁场且 $\{x\}$ 是磁矢量势时， $[k]$ 是磁阻率。当 $\{f\}$ 是电流场且 $\{x\}$ 是电势时， $[k]$ 是电导率。当在第 21 步如上所述定义了场和势时，第 24 步矩阵 $[k]$ 的计算决定了使制造者能够制造对具体应用，即力的具体应用，具有期望响应的物体的最佳或近-最佳的材料特性矩阵。

在第 25 步，有限元软件包用于从材料特性矩阵 $[k]$ 中为有限元模型中的每一个元得到材料特性系数。明确地说，在第 24 步计算的材料特性矩阵 $[k]$ 是整体的或组合的材料特性矩阵 $[k]$ 。如前所述，有限元模型的具体元的材料特性系数可利用布尔定位函数或其它定位函数从该整体或组合矩阵得到。例如，参照图 6，求得元 601 的材料特性系数，接着求得元 602 的材料特性系数，等等。对模型中的每一个元重复这

一过程以便生成表示以小体积增加的假体臂部的材料特性的数据序列。

在第 26 步，在材料特性数据库中，将求得的材料特性系数与材料特性数据库或数据库集中的已知材料特性系数进行比较。图 7A 示例了材料特性数据库 700 的组成。材料特性数据库 700 根据刚度特性值如杨氏模量 (E) 和泊松比 (σ)，把大量材料 M1-1, M1-2, ..., M1-n 分类。例如，材料 M1-1 可以是杨氏模量为 7.2×10^{10} Pa 且泊松比为 0.32 的铝。材料 M1-2 可以是杨氏模量为 6.9×10^{10} Pa 且泊松比为 0.35 的铝。材料 M1-n 可以是杨氏模量为 8.8×10^{10} Pa 且泊松比为 0.30 的铸铁。当然本发明并不局限于这些具体材料。与这些材料 M1-1, M1-2, ..., M1-n 分别相关的是制造过程和这一过程的具体参数（如温度，压力等），它们将使材料具有相应的刚度特征。类似地，参照图 7B 所示，材料特性数据库 701 根据电导率 (σ^{-1}) 的值，把大量材料 M2-1, M2-2, ..., M2-n 分类。而且，与这些材料 M2-1, M2-2, ..., M2-n 分别相关的是制造过程和这一过程的具体参数，它们将生产具有相应电导率的材料。类似材料数据库可用于根据热导率或磁阻率把材料分类并确认与每一材料相关联的制造方法和制造参数。

因此，材料特性数据库是材料特性系数和相应的制造过程和制造过程控制参数的档案。这些数据库由工业制造商，政府机构，和研究所生成并维护。例如，当材料如金属，塑料，或合成材料被用一种特殊制造过程制造出来时，其特性可通过标准测试方法如 ASTM 测试法确定。当这些特性确定后，一组用于制造具有这些特性的制造参数如温度，压力等与该种材料联系起来以便将来能够重复制造该种材料。

在第 26 步将求得的材料特性系数和材料数据库比较，以确定数据库中哪种材料具有与求得材料特性系数相匹配或接近匹配的材料特性。因此，参照图 6，该比较确定了制造对应于期望刚度特性的元 601 的假体臂部部件的第一组制造参数；制造对应于期望刚度特性的元 602 的假体臂部部件的第二组制造参数的确定；等等。利用具有事件库的知识库存储求得的每一元（如，图 6 中的元 601, 602 等）的材料特性系数数据和材料数据库的材料特性数据，并利用包含对材料特性数据库中材料特性数据与求得的每一元的材料特性数据进行比较和匹配的规则的规则库，可实现上述比较。比较的精度（如完全匹配，近似匹

配)视具体应用,特别是,与允许多大公差相关。如果被制造的物体是关键元件,则期望非常近似或完全匹配。如果被制造的物体是非关键元件,匹配标准则可放松。其它标准如费用和可用的制造设备也决定了匹配标准。因此,通过执行第26步,可确定物体每一部件的几组制造过程控制参数。

在第27步,被确定的几组制造过程控制参数被整理或排序以定义制造物体所必须的制造过程控制。制造控制参数可被用于实现对制造物体的制造设备的数字控制。数字控制指在制造设备的自动控制中使用编码数字信息。对机床,它可指刀具的运动或用来阻止旋转工具的部分的运动。通过利用数字控制还可实现用制造轻质替代物的合成材料替代加工的金属部件。然后,利用通用的数字控制语言产生制造控制数据,可设计制造物体所需的几何形状和运动状态。这种语言之一是APT-AC数字控制处理装置程序(从纽约Armonk的IBM公司可得)。APT-AC处理装置是一个计算机应用程序,它作为输入接收用户确定的描述了被执行的数字控制操作的语言陈述。后处理装置可进一步处理制造控制数据以整理具体操作过程的信息。在第28步,经后处理的数据被用于计算机化制造装置,该装置利用所提供的数据控制物体的制造。提供给计算机化制造装置的数据控制制造装置以合成物体,该物体具有期望的具体计算出的材料特性。例如,假设制造过程的执行是利用编织机生产合成材料。在合成材料的编织过程中,通过允许计算机控制机器不同部分的速度,织物的致密程度被控制。织物越致密,刚度越高(低柔性)。例如,在假体臀部的情形,高刚度和低刚度的区域都是需要的。利用几何模型和求得的材料特性系数,制造过程和具体地,织物的致密程度可被控制,以提供高刚度区域(如图6中由元601定义的区域)和低刚度的区域(如图6中由元603定义的区域)。根据本发明方法,通过恰当地控制制造过程,可制造假体臀部,它以基本上和人体臀部对所施加的相同负载所响应的方式一样的方式响应所施加的负载。这种假肢可随着具体个人的响应特性发展出来。

上述方法典型地作为重复过程来执行。例如,初始循环的结果通常可表明利用编织机制造的纤维合成物提供了在期望应用中与求得的材料特性系数最好的匹配。因此,在接下来的第二循环,可调整有限元模型以考虑利用计算机-控制编织机能够控制编织的最小增量体

积。优选地，有限元模型中的每一个元对应于不小于利用用来制造物体的制造技术所能控制制造的最小增量体积。例如，对利用编织机的编织过程，可控制编织的最小体积近似为一立方毫米。换句话说，控制变化编制花样以制造具有按立方毫米量级变化的材料的或本质的特性的物体是可能的。当然最小增量体积将根据所选的制造过程或技术变化，并可能还依赖于可用的制造设备。因此，虽然工艺领先的编织机所能编织的最小增量体积是一立方毫米，但不一定所有编织机都能如此操作。因此，在这种情况下，最小增量体积取决于可用编织机的能力。希望随着制造技术的改进，能够可控地制造更小的增量体积，本发明可以供重新划分大小或不同形状的元使用。

本发明方法的数学对除合成材料如铁，塑料，和陶瓷的制造以外的其它种类的制造过程是有效的。本发明的方法对制造基于所期望的对热流和电流的响应的物体也是有效的。总之，本发明的方法可被用于任何期望精确的体积控制制造的计算机控制制造过程。

本发明的方法在增加期望物体的效率方面特别有用。在传统的制造中，重点在于制造物体几何形状的精确性，并不过多地控制（如果有的话）组成该几何形状的内部结构。根据本发明的方法，材料矩阵是未知的且在保持几何形状固定的情况下可执行重复过程，以优化材料特性矩阵。

因此，根据本发明，任何过程的输入参数可精确变化以产生具有精确定义的材料特性矩阵的物体。随着制造的持续改进，上述方法甚至可用于在尺寸上不断缩小的可控制制造的最小增量体积。

图 8 示例了可用于实现本发明方法的不同功能模块。计算机辅助设计 (CAD) 模块 801 是一个用于生成几何模型定义的三维绘图软件程序。该几何模型定义包括在三维坐标系统中精确定位物体设计的坐标点。这可由绘图软件包利用例如，X，Y，Z 坐标点和所需的位置矢量来提供。三维绘图软件包利用恰当的数据结构在绘图程序的数据 库中定义具体的点。通过利用绘图程序中的算法，物体的其它点可被 定义和生成。绘图程序优选地利用恰当的矢量和矩阵子程序，据此物 体可被旋转或在计算机内存中移动并被标定尺寸，据此任何一点相对 于其它点的坐标都可知。如上所述，合适的 CAD 软件包包括 I-DEAS (从俄亥俄州 Milford 的 SDRC 公司可得)，CATIA(从 IBM 公司可得)，

及 ANVIL-5000 (从 Manufaetvrng consulting service 可得)。

有限元模块 802 用于从储存在绘图程序数据库中的数据生成物体的有限元模型。有限元模块 802 是一个软件包，用来把利用计算机-辅助-设计模块 801 设计的物体划分为大量的元并在每一个元中根据假定近似函数表达一个或多个未知场变量。有限元模块 802 按上述方法为每一个元计算最佳材料特性。有限元模块 802 的合适软件包包括 MSC/NASTRAN (从 MacNeal-Schwendler 公司可得)，ABAQUS (从 MacNeal-Schwendler 公司可得)，和 ANSYS (从 Swanson 制造公司可得)。

材料数据库模块 803 是材料特性参数及其对应的制造过程和制造过程控制参数的档案或档案集。这些档案因此将材料特性与用于产生材料的制造过程和制造过程参数联系起来。

比较模块 804 将利用有限元模块 802 确定的材料特性与材料数据库模块 803 中的材料数据相比较，以便确定 (1) 哪一种材料具有和利用有限元模块 802 确定的材料特性相匹配或非常接近匹配的材料特性及 (2) 与这一匹配材料相关联的制造过程和制造过程参数。比较模块 804 可由，例如，具有用来存储来自有限元模块 802 的材料特性数据和来自材料数据库模块 803 的材料特性数据的事件库的知识库及包含用来将来自有限元模块 802 的材料特性数据和材料数据库模块 803 的材料特性数据相比较和匹配的规则的规则库所执行。

制造模块 805 对由比较模块 804 产生的制造参数进行编译和排序，以便对用来制造具有利用计算机辅助设计模块 801 定义的几何形状的物体的制造机器提供制造指令。物体的制造可由适合具体材料的机器来执行。例如，金属可通过重复表面几何形状 (空间表面点) 来制造，合成材料可通过控制编织的构造和纤维的选择来制造，聚合物可通过化学选择、温度和压力来制造。计算机在制造中的帮助允许机器快速调整以便从一个物体到另一个物体或单一物体的不同区域间改变制造过程。

图 9 是可用于执行上述不同功能模块的环境 900 的配置框图。该环境的例子包括 (但并不局限于) IBM-PC 兼容个人电脑和基于 UNIX 的工作站，例如那些来自 Micorsystems 或 Silicon Graphics 的电脑和工作站。需要理解的是本发明的环境并不局限于任何型号或牌子的

计算机，因此可考虑从微机到超级计算机。此外，虽然图 9 示例了单一环境的细节，但图 8 中的模块可能在多个环境中运行。例如，第一个环境可被用于执行 CAD 模块 801，同时第二个不同的环境可被用于执行有限元模块 802。利用软盘或标准通讯包，信息可在各环境间传递。另一方面，可用单一环境来执行 CAD 模块 801 和有限元模块 802。环境 900 包括中心处理单元 (CPU) 901，例如插入总线 903 的基于 RISC 或 IBM-PC 兼容 CPU。图 8 的一个或多个模块在执行时加载于内存 905 中通过 I/O 装置 907 接收输入，然后输入通过缓存 909 再通过总线 903 进入内存 905。需要理解的是 I/O 设备可是标准输入设备，如磁盘，磁带，键盘，鼠标，触摸屏，或任何用于手动或自动输入信息或命令的兼容或等价的设备。为使用户随着信息输入本发明和程序的执行观察结果，优选实施方案还考虑使用一个视觉显示设备 911 作为输出设备的一个例子。其它输出设备包括打印机，磁盘或光盘，磁带等。ROM 913 可存储对环境 900 实行全部控制的程序。

图 10 是利用控制计算机 950 的通风控制计算机的控制计算机简图。控制计算机随着图 8 中制造模块 805 产生的制造指令被下载。编织机床的速度，纤维松紧程度，温度，压力等信息从制造机器的探测器 952 以数字格式（合/断关，开/关）或模拟格式（电压）获得。通过控制计算机 950 的模-数转换器 953 将模拟输入转换为数字表示。控制计算机 950 包括用来分析来自探测器 952 的信息和生成用于传动器 954 以根据下载的制造指令调节制造机器的设置的信号的处理器 960。除了模拟和数字输出，脉冲输出可供用来驱动常常与机床和其它设备一同使用的步进电机。当然，控制计算机 950 的细节将依赖于所使用的制造机器。在具体制造过程中有用的控制计算机的细节可见于，例如，上面提到的 Bedworth 教材。

下面的例子用来示例本发明的方法的应用。

例 I

描述根据本发明的合成纤维高尔夫球杆柄。在高尔夫球杆柄的情形，基本方程是

$$\{f\} = [k] \{x\}$$

生成高尔夫球杆柄的有限元模型。高尔夫球杆制造商维护柄在不同球杆头部速度时具体受力（扭曲，压缩，拉伸，等等）的数据库。

这些力被用来定义有限元模型节点处的力。

高尔夫球选手通常期望高尔夫球杆柄以特定方式响应这些不同的力。例如，职业高尔夫球选手通常希望9号铁头和8号铁头的铁高尔夫球杆的柄在接近柄头部有一个拐点（即刚度相对较低的点）；7号铁头、6号铁头和5号铁头的柄的拐点在接近柄中点；4号、3号和2号铁头的柄正好在柄中点；driver在握杆处下边有一个弯曲点。在这四种情形，柄各有一套不同的期望偏转度 $\{x\}$ 。这些期望偏转度 $\{x\}$ 因此定义了有限元模型节点处的位移。因此，执行四种不同的有限元分析。

定义了有限元模型的力和位移后，四种情形的每一种的总刚度矩阵便可求出。利用布尔定位函数，单个元的刚度系数被确定。这些确定的刚度系数被与工业数据库中的刚度系数相匹配。对于匹配的系数的制造参数被恰当地编译和排序以生成制造指令。然后这些制造指令被用于合成物编织机，编织机床速度及纤维松紧程度被恰当地控制以制造高尔夫球杆柄。例如，如果确定碳纤维是所确定的刚度系数的最佳匹配，则把碳纤维置于恰当的编织机上。随着编织的进行，编织机床的速度和纤维的松紧程度随着产生的制造指令变化，这样高尔夫球杆柄的一些部分编织得紧些而另一部分编织得松些。编织紧的部分比编织松的部分刚度大。

例 II

描述根据本发明的碳纤维填充的合成臂部假肢的制造。在合成臂部假肢的情形，基本方程仍为

$$\{f\} = [k] \{x\}$$

首先，生成普通骨头的几何形状（皮层和海棉层）的有限元模型。然后确定每一层的刚度特性。这些刚度特性是杨氏模量和泊松比的函数。这些刚度特性用于定义有限元模型在节点处的刚度。然后，定义步行，从椅子上站起，爬上椅子等的负载。这些负载用于定义有限元模型在节点处的力。这些刚度特性和负载的数据已已知，并出版在一些刊物上，如，Hodge等人的*Contact Pressures in the Human Hip Joint Measured In Vivo*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 83 2879-2883 (1986); Fung的, *Biomechanics, Mechanical Properties of Human Tissue*, Springer-Verlag, NY (1981)。

当有限元模型的力 $\{f\}$ 和刚度 $[k]$ 被定义以后，位移 $\{x\}$ （数学上与

应力相关)可被确定。利用布尔定位函数,分析总矩阵数据以确定有限元模型的元的应力。

当有限元模型的元的应力被确定后,它可被看作已知量并表示期望获得的合成臀部假肢的理想应力分布。因此,现在材料刚度矩阵 [k] 可被看作未知。

再次生成有限元模型,但这次包括另一层,即,植入海棉骨骼区的人工臀部。例如,如 St. Ville 等人在“*The Anatomy of Midhigh Pain After Total Hip Arthroplasty*”中讨论的那样,利用图 6 中包括 5207 个节点和 5040 个等参数的同质元的精细网格模型可进行有限元分析。图 6 中的网格使用了六面体和五面体元以确保满足精确的形状。前面计算的位移数据硬定每一个有限元模型节点的位移。

需要定义期望的施加在合成臀部假肢上的负载。因此,使用例如行走,单腿站立等的负载。负载的选择依赖于设计的合成臀部假肢的性质。如上所述,这些负载的量通常是已知的,例如,考虑到 Hodge 等人的“*Contact Pressures in the Human Hip Joint Measured In Vivo*”, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 83, 2879-2883 (1986)。这些负载定义了的力 { f } 有限元模型的节点处。

当有限元模型节点处的位移 { x } 和力 { f } 定义以后,总刚度矩阵 [k] 可被计算。利用布尔定位函数或其它类型的定位函数,每一节点处的刚度系数被确定。利用重复优化技术计算有限元模型的元的理想刚度特性。

这些确定的刚度系数与从矩阵特性数据库中的刚度系数相匹配。对于匹配的系数的制造参数被恰当地编译和排序以生成制造指令。然后这些制造指令被用于合成物编织机,编织机速度和纤维松紧程度被恰当地控制以制造合成臀部假肢。

当然,需要理解的是本发明考虑了其它模块的设置,并不局限于上面提到的特定装置。

这里提到的任何申请,专利,技术文件,教材,或其它出版物都应被认为是本公开所必须的主题事件的参考文献。

虽然上面描述了本发明的不同实施方案,但应该理解的是只是以举例的方式表达,而并不局限于此。因此,本发明的精神和范围不应受上述任何示例的实施方案的限制,而应根据下述权利要求及其相当

描述所定义。

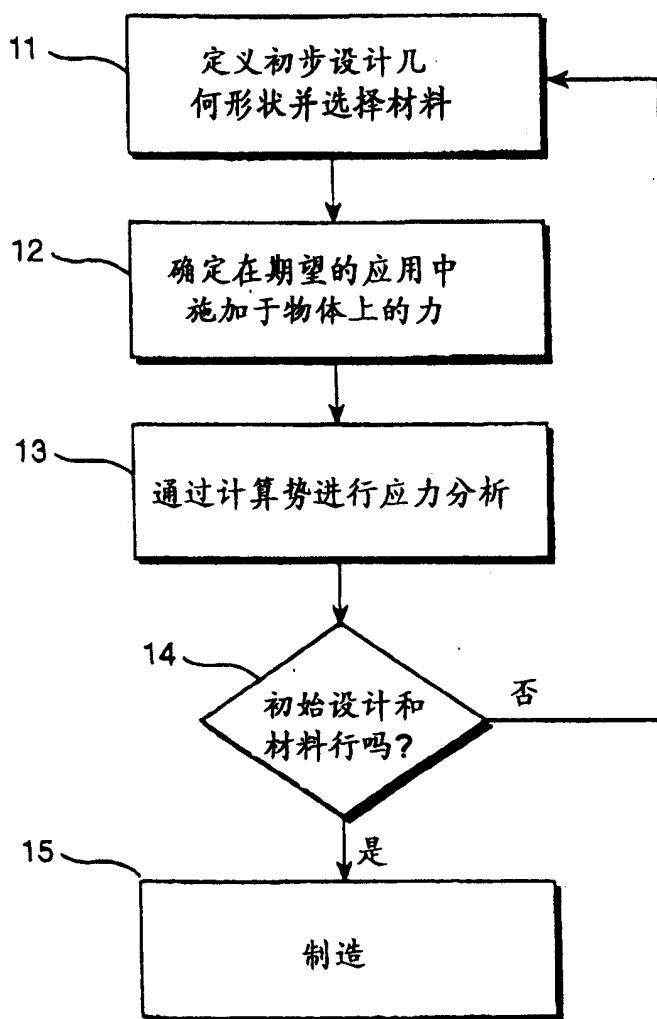


图 1

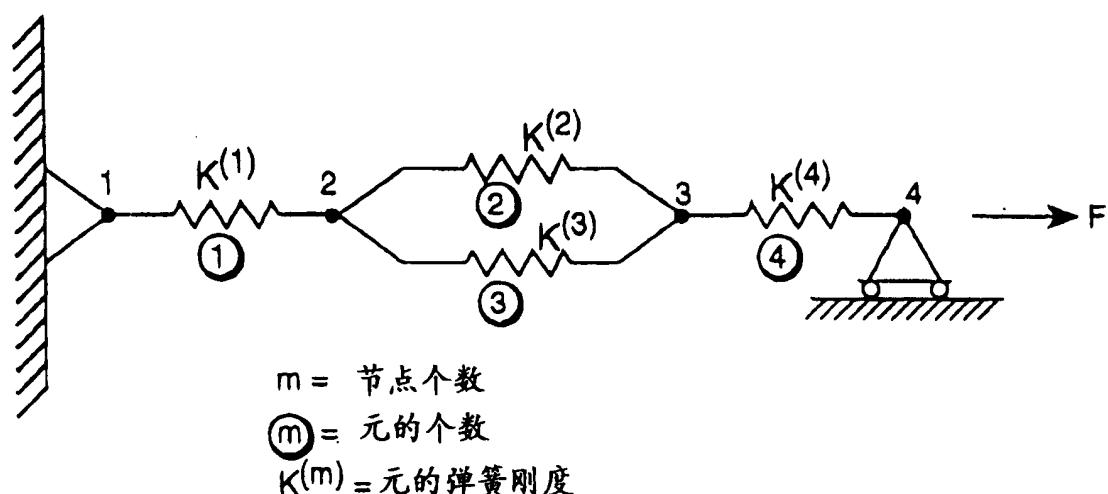


图 2

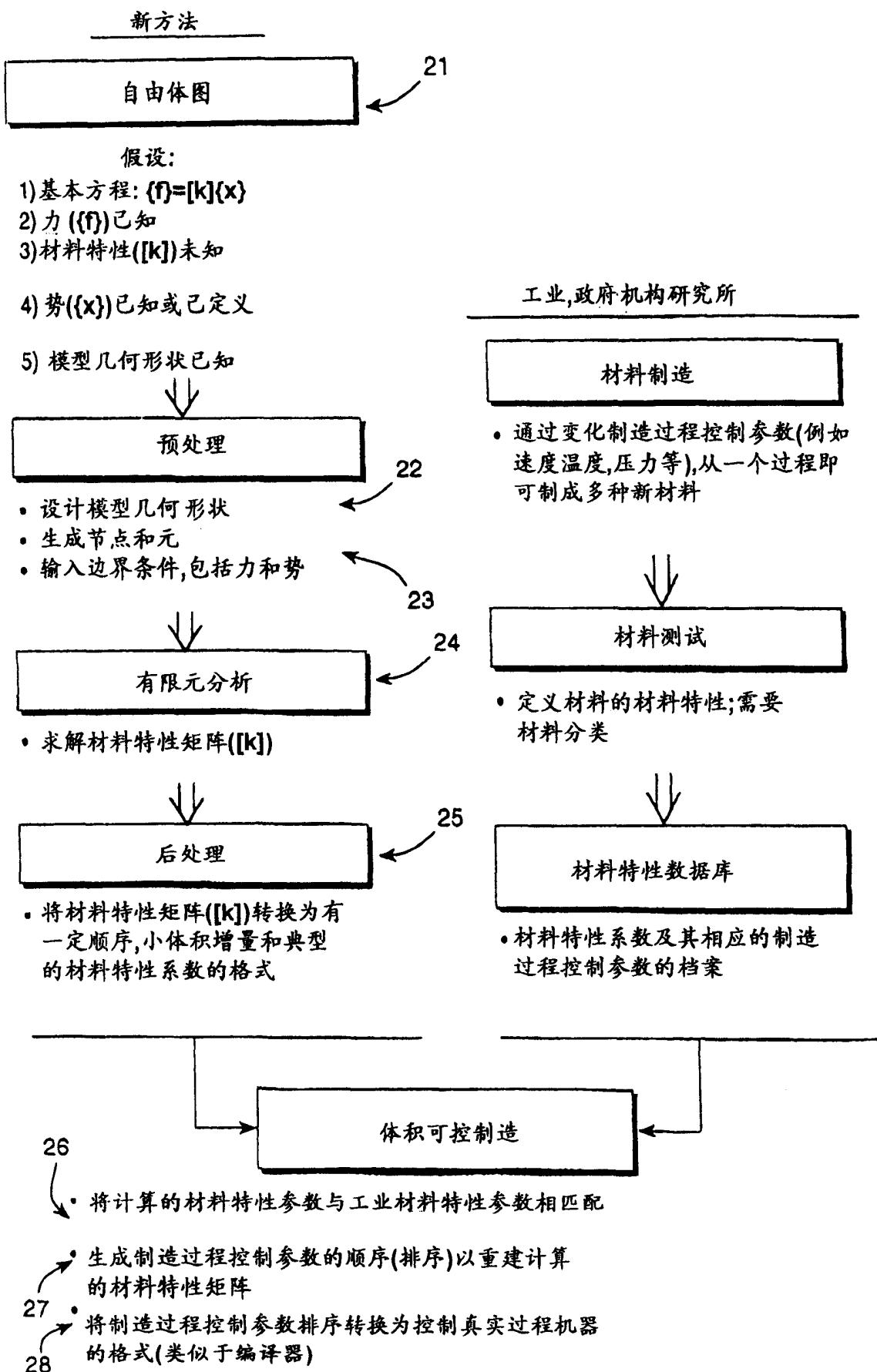


图 3

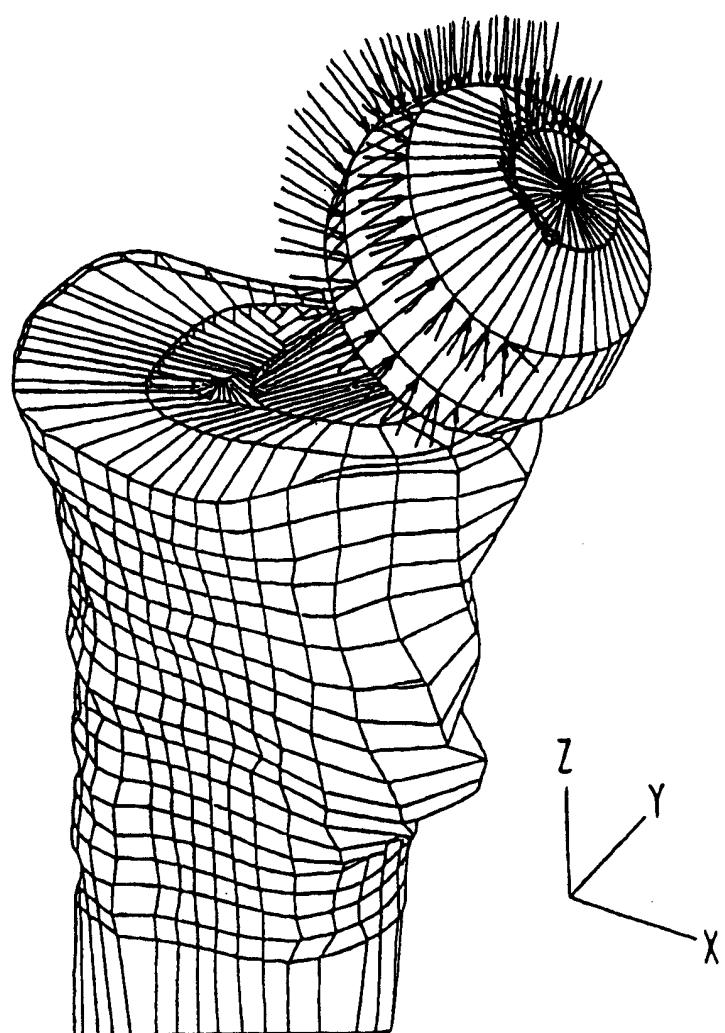


图 4 A

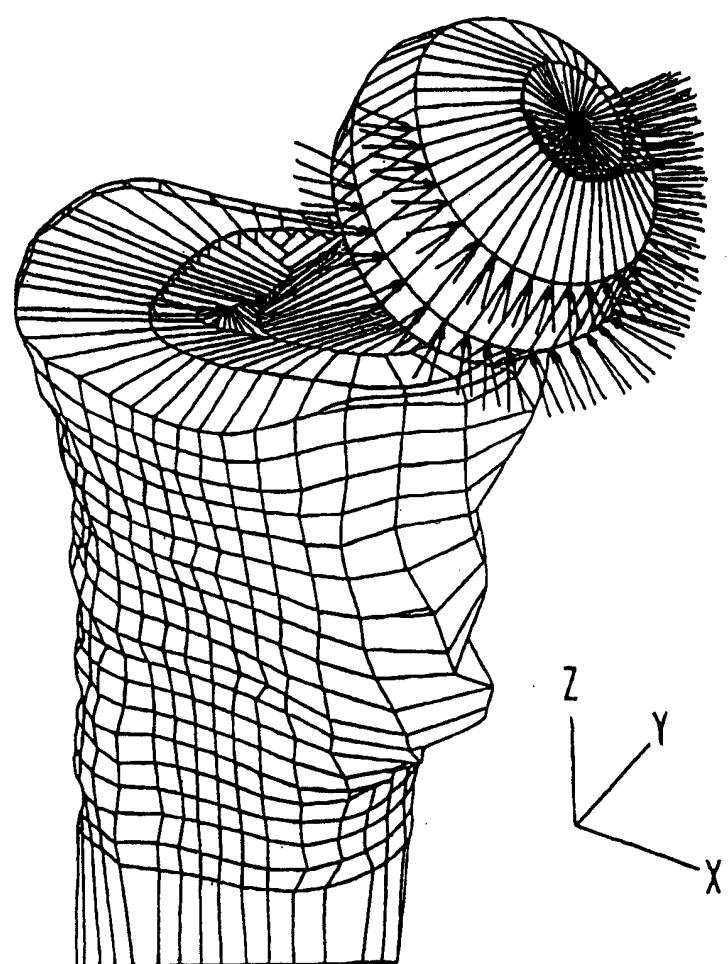


图 4B

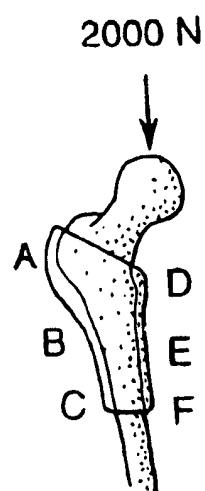


图 5 A

未受损伤 的大腿骨	
A	0.221 ± 0.057
B	0.875 ± 0.119
C	0.698 ± 0.122
D	1.217 ± 0.150
E	1.315 ± 0.131
F	1.208 ± 0.131

图 5 B

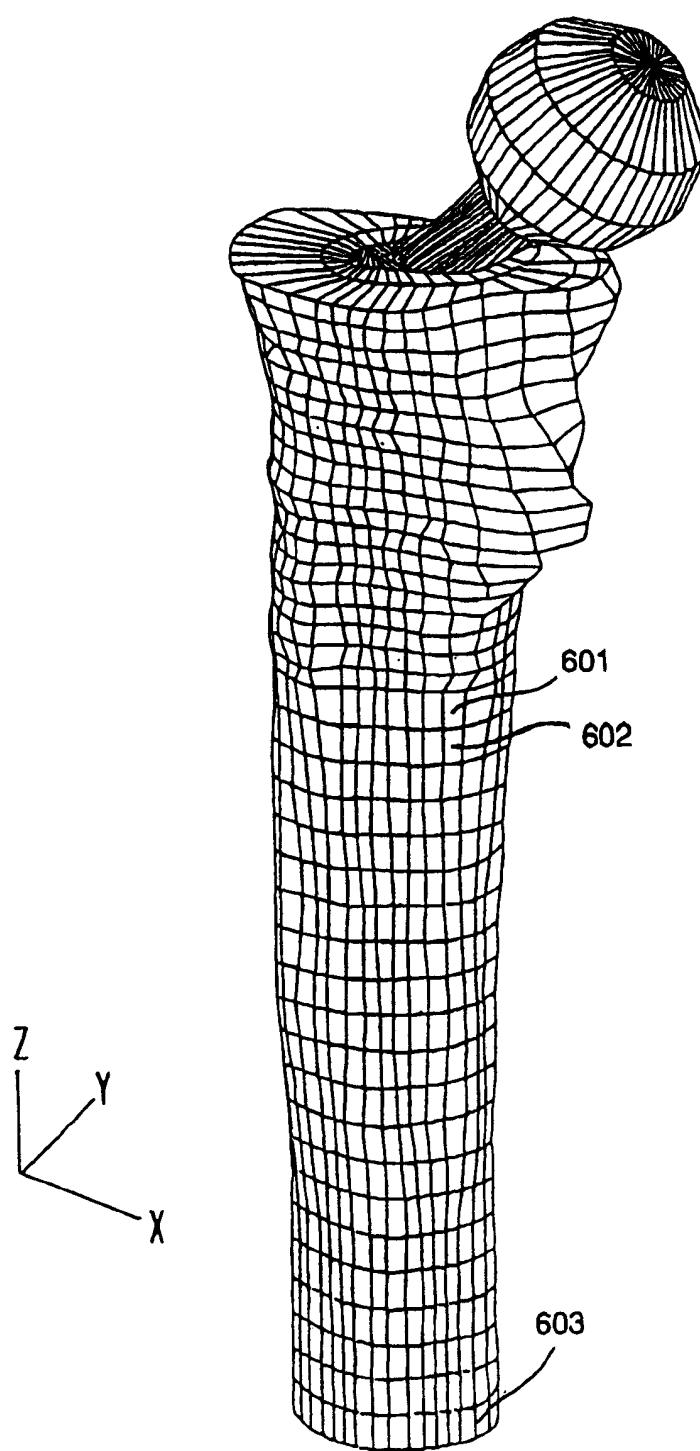


图 6

M1-1	E1-1	σ_1-1	过程	过程参数
M1-2	E1-2	σ_1-2	过程	过程参数
:	:	:	:	:
M1-n	E1-n	σ_1-n	过程	过程参数

700
↑

图 7 A

M2-1	$\sigma'2-1$	过程	过程参数
M2-2	$\sigma'2-2$	过程	过程参数
:	:	:	:
M2-n	$\sigma'2-n$	过程	过程参数

701
↑

图 7 B

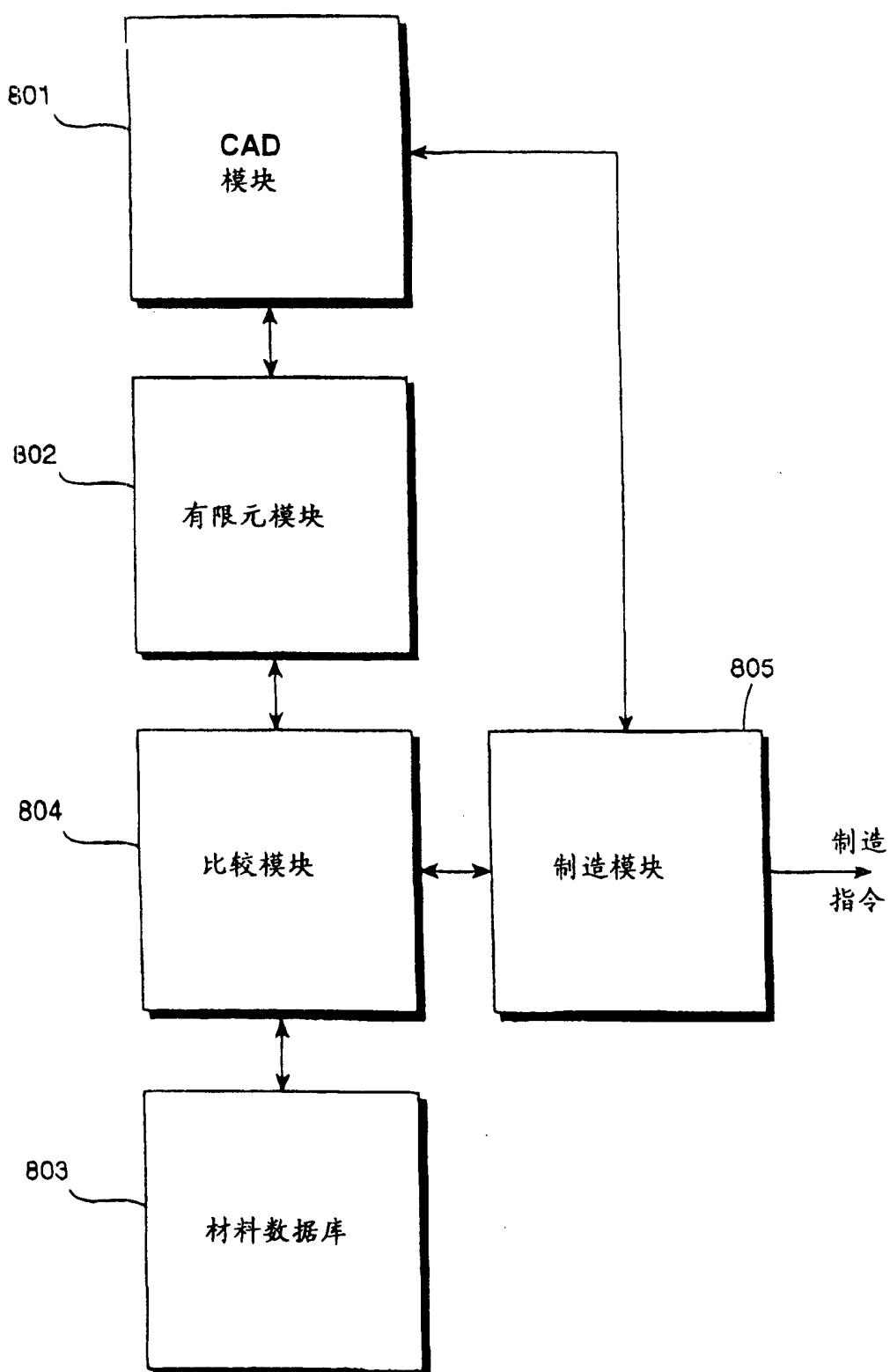


图 8

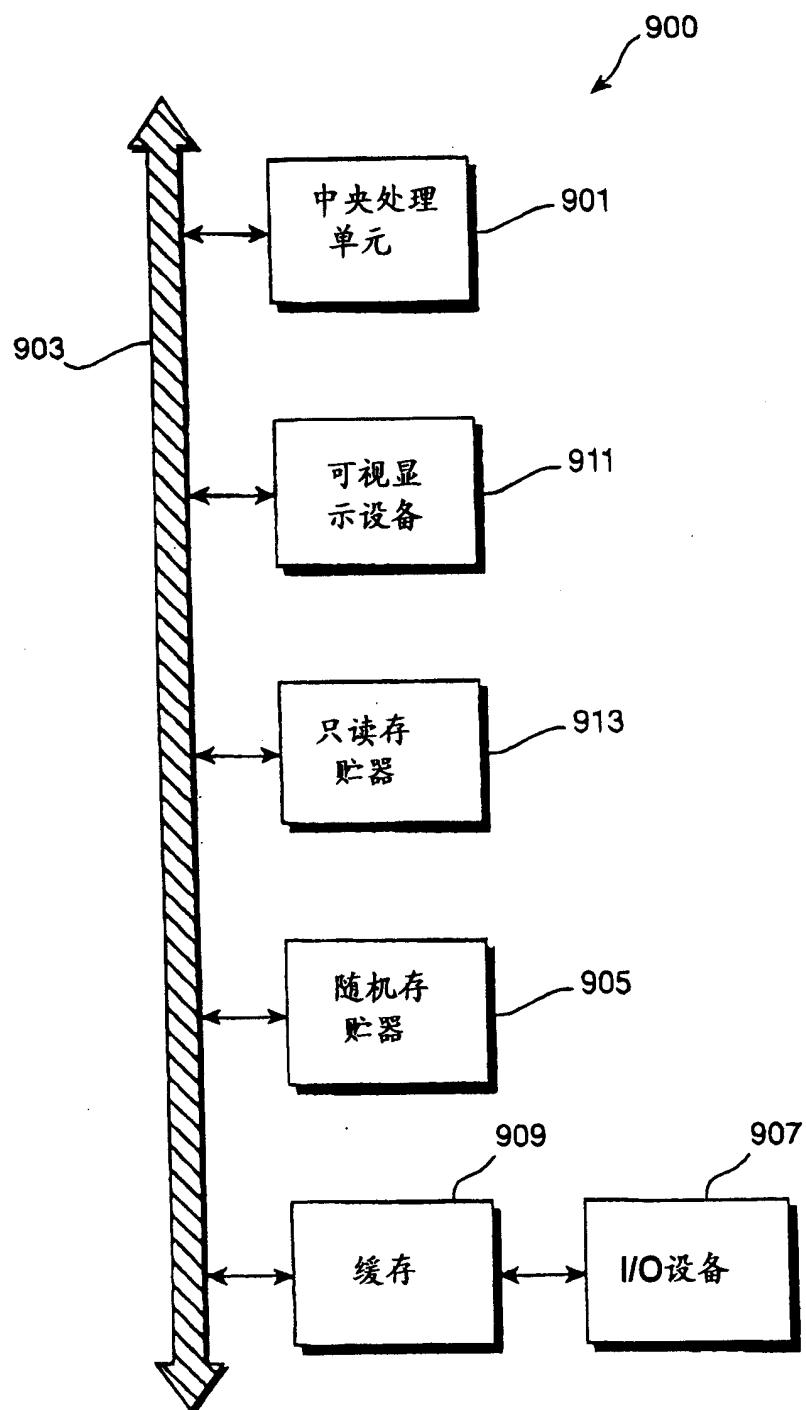


图 9

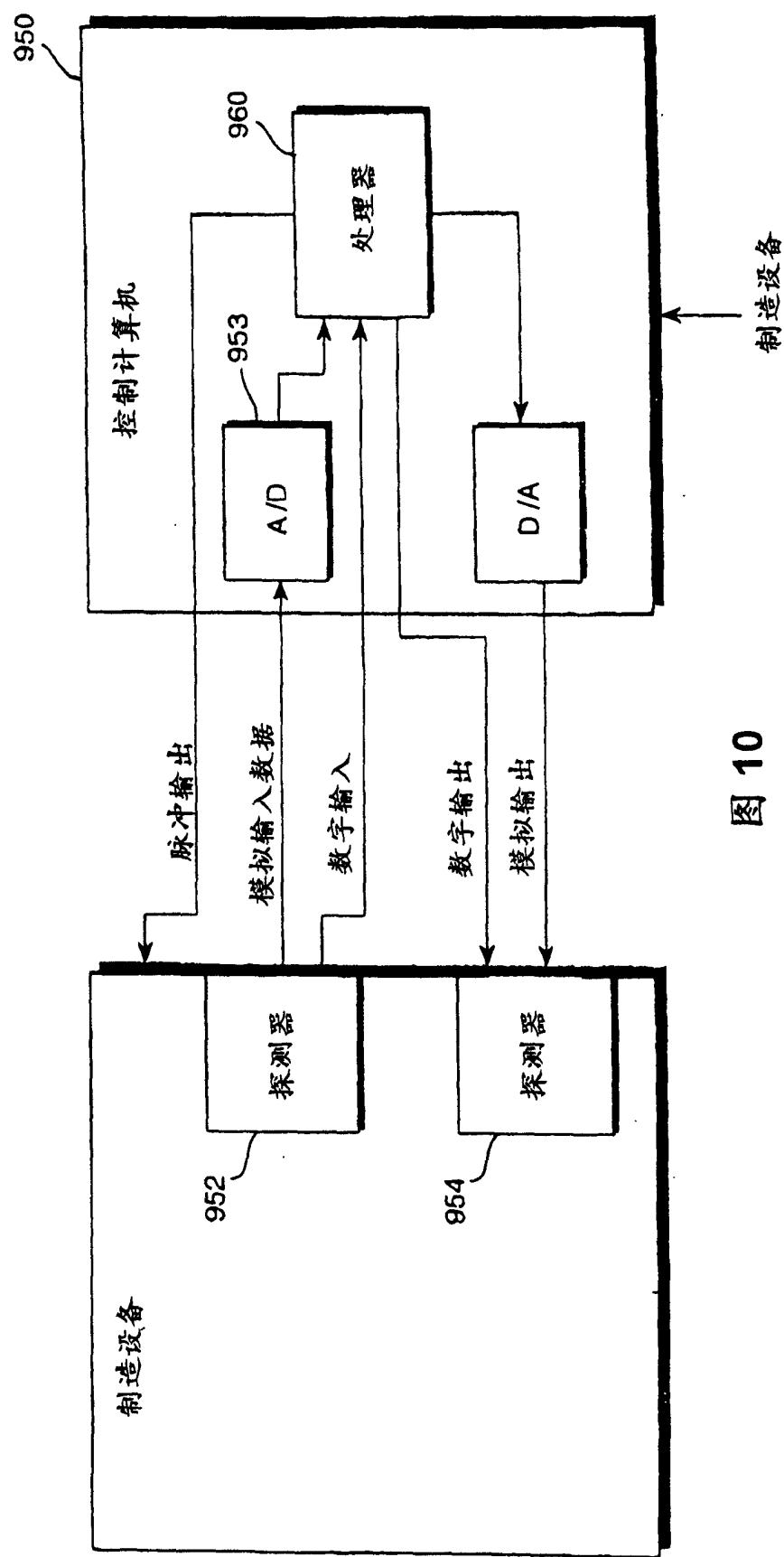


图 10