

板材成形的计算机辅助工程系统

霍同如 徐秉业

清华大学, 北京 100084

提要 板材成形同时包含大变形、(粘)塑性、接触、摩擦等多种非线性因素耦合, 利用有限元法在计算机上模拟出板材从坯件到成品的全过程并加以图形显示, 进而研究影响成形的各种因素, 可以为板材成形的设计和生產提供可靠依据。本文介绍板材成形的计算机辅助工程系统(简称 CAE 系统)的组成, 并对成形数值模拟中的有限元格式、接触与摩擦问题、拉伸筋的考虑方法以及回弹的计算方法做了简单介绍。

关键词 板材成形; 模具设计; 有限元; 非线性; 优化; 计算机辅助工程

1 引言

板材成形广泛应用于汽车工业、钢铁工业等诸多领域。加工过程的控制、模具的设计和制造直接影响到产品的质量和价格。因加工过程不当或模具形状不适, 板材加工过程中会出现断裂、起皱、颈缩或其它成形不良。为避免这些成形不良的出现, 就要修改成形加工的某些参数或修改模具形状。传统的模具设计和板材加工设计是一个反反复复的研制过程, 旷日持久而又投资巨大。随着工业化的日益发展, 产品的更新换代周期越来越短, 新材料越来越多地被采用, 传统的设计方法已明显不适应现代工业的发展要求。

随着超级计算机及各种性能优良的计算机工作站的涌现, 一个融合了 CAD(计算机辅助设计)、数值计算、CG(计算机图形学)、CAM(计算机辅助制造)等各类技术的 CAE(计算机辅助工程)正在各个工业部门逐步建立起来。在材料成形加工部门, 基于有限元法的材料成形数值模拟技术为模具的研制及成形过程的优化提供了一个强有力的工具。在各类成形数值模拟中, 尤以板材成形有限元数值模拟为工业界、学术界和政府部門所注目。特别是在日本、美国和欧洲, 这一研究特别活跃, 在美国的“三巨头”(General Motors, Ford, Chrysler), 德国的大众、奔驰, 日本的丰田、三菱、日产等大型汽车制造公司都有专门部门对板材成形数值模拟进行了长达10年以上的研究。近年来这些公司与大学、研究所、计算机公司进行了广泛的合作, 旨在建立直接能为板材成形工业所用的有限元数值模拟程序。主要因为研究经费的不足和计算机水平的限制, 中国在此方面的研究还为数不多, 还不具有 CAE 的适用程度和规模, 并且缺少研究部门与工业部门的密切合作。根据国民经济发展规划, 汽

车工业、钢铁工业将成为国民经济的支柱产业，板材成形加工技术对国民经济的发展将会越来越重要。为开发中国自己的新型汽车，各种机电产品的更新换代，中国必将越来越需要一个高效率低费用的模具设计和加工过程的优化技术。本文对板材成形 CAE 系统作一粗略介绍，以期得到中国成形加工行业和有关研究部门的重视。因板材成形 CAE 系统的研究涉及力学、材料、数值方法、计算机科学、制造技术等众多领域，研究成果极为丰富，本文所述只能挂一漏万。

建立板材成形 CAE 系统的目的在于通过在计算机系统上采用数值计算和图形显示的方法模拟出板材成形的全过程，进而指导板材成形的设计和和生产。为此目的，板材成形 CAE 系统的构成可以用图 1 来表示。下面我们着重以有限元数值模拟为中心对此 CAE 系统的各个组成部分逐一简单介绍。

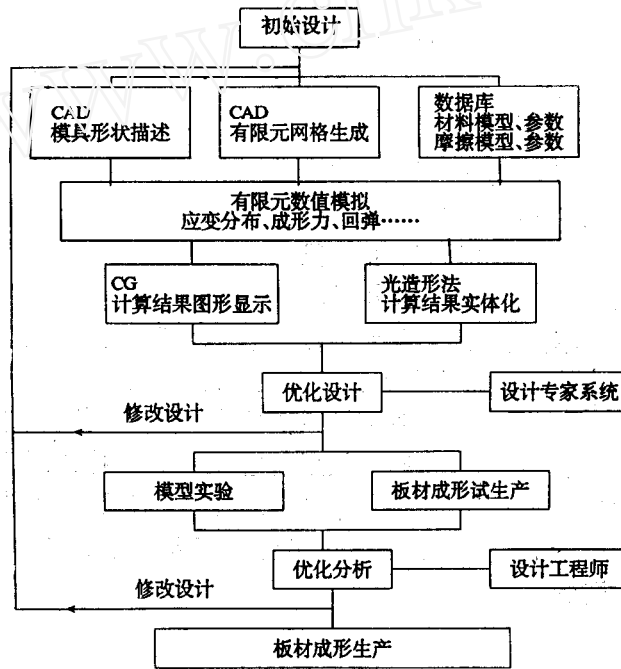


图1 板材成形 CAE 系统

2 有限元模拟前处理

2.1 模具形状描述^[14] 板材成形的模具刚度远远大于板材的刚度，因而可以将模具作为刚体处理，这样模具本身可以由其表面来代替。模具表面的形状描述直接影响到有限元数值模拟的精度和效率，因而在板材成形 CAE 系统中占重要地位。通常可以有 4 类描述方法：

- (1) 解析格式。模具表面由一些平面、球面、柱面等解析曲面组成。模具表面描述精确，板材与模具的接触判定也很简单。
- (2) 参数曲面格式。模具表面划分成一系列参数曲面，如 Bezier 曲面，Coons 曲面，B 样条曲面等，大多数 CAD 系统都采用这种曲面的表示格式。
- (3) 点列格式。模具表面由一系列空间点描述，为提高接触搜索的效率，空间点在 xy 面上的投影按规则排列。
- (4) 网格格式。模具表面由边界元网格描述。

图 2 表示了一个半球表面，采用参数曲面、点列、网格 3 种描述的方式。

不论采用何种格式，模具形状的全部数据由 CAD 系统或 CG 形成，再转换成可以直接用于有限元数值模拟的数据结构。

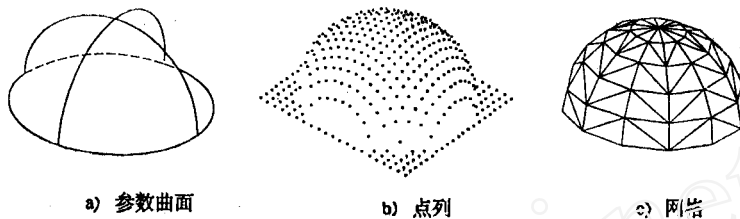


图2 模具形状描述

2.2 板材有限元网格生成 板材可以由各类体元、壳元、膜元描述。单元网格生成可以借助于众多的商业 CG 软件，如 IDEAS、AVS、KSWAD 等，在 CG 软件与有限元分析程序之间需要一个接口程序，以完成数据结构的转换。

板材的厚度一般比板材的纵、横方向尺寸小很多，所以处理成壳体结构是很自然的，特别是各类退化壳元应用最广泛，在此种单元积分中须解决有关“锁死”问题。若忽略板材的弯曲效应，采用膜单元可以节省计算工作量，但因忽略弯曲效应，不能正确模拟起皱现象。板材的厚度较大或需要考虑板材的双面接触时，则必须采用体单元离散，采用体单元时计算工作量最大。为充分利用不同单元的特性及降低工作量，可以混合使用不同单元。板材变形之后，网格变化很大，为更好反映板材变形特征，有时需要做网格重划分。

2.3 材料性能数据库 该数据库中存放各种材料本构模型、摩擦模型、各种材料常数等。板材可以由刚塑性、弹塑性、弹粘塑性等各类模型描述。采用刚塑性模型时计算量较小，但不能预测回弹。近年来也有人在板材成形模拟中尝试采用结晶塑性等细观材料模型描述板材的力学性能^[3]。板材加工过程中的摩擦现象特别复杂，其模拟现今仅能依赖于一些简单模型，主要是 Coulomb 摩擦模型。

3 有限元数值模拟

从力学角度而言，板材成形是包含了大位移、大应变、塑性变形、接触和摩擦的非线性过程。实际的成形过程还往往包含皱曲、断裂等成形不良以及复杂形状的模具和多个工序，每个工序之后板材还发生回弹。作为板材成形 CAE 系统核心部分的有限元数值模拟应能对以上复杂过程进行定量预测。以下我们对有限元格式、接触和摩擦，拉伸筋模拟、回弹这几个主要问题加以简述。

3.1 有限元格式 大变形问题的数值求解以增量法为主，其有限元格式的建立有两种途径^[12]。其一是采用以变形体初始构形为基准，即全 Lagrange 法；其二是采用前一时间步的变形体构形为基准，即修正的 Lagrange 法。采用这两种方法建立的有限元方程在理论上等价，但具体在程序编制、数值计算方面有所不同。若采用全 Lagrange 描述法，在计算过程中有限元网格保持不变，描述材料本构关系时，宜采用对称的第二类 Piol-Kirchhoff 应力增量，应力-应变增量关系中包含多种几何非线性项，因此在形成刚度矩阵时计算量较大。

若采用修正的 Lagrange 描述法, 在每一计算循环结束时, 有限元网格需要更新, 在步长不大的情况下, 可以采用小变形的应力-应变增量关系, 应力增量仍应采用与旋转无关的增量形式, 如 Jaumann 应力增量或第二类 Piola-Kirchhoff 应力增量, 但采用 Janmann 应力增量时将导致不对称的刚度矩阵, 而采用第二类 Piola-Kirchhoff 应力增量时其刚度矩阵是对称的。不论采用哪种方法, 所建立的有限元方程都是类似的, 所以以下我们只简单介绍一下现今板材成形数值模拟中常见的 3 种求解格式。

板材离散之后其运动方程在时刻 t 和时刻 $t + \Delta t$ 分别为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}^t + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}^t + \mathbf{f}_i^t = \mathbf{f}_e^t \quad (t \text{ 时刻}) \quad (1)$$

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}^{t+\Delta t} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}^{t+\Delta t} + \mathbf{f}_i^{t+\Delta t} = \mathbf{f}_e^{t+\Delta t} \quad (t + \Delta t \text{ 时刻}) \quad (2)$$

式中 \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 分别为质量矩阵和阻尼矩阵, \mathbf{u} 为有限元节点的位移, \mathbf{f}_i 和 \mathbf{f}_e 分别为等效节点内力和等效节点外力。

板材成形可以看成是一准静力过程, 速度和加速度影响可以忽略, 则我们只需要考虑 t 时刻和 $t + \Delta t$ 时刻的平衡方程

$$\mathbf{f}_i^t = \mathbf{f}_e^t \quad (t \text{ 时刻}) \quad (3)$$

$$\mathbf{f}_i^{t+\Delta t} = \mathbf{f}_e^{t+\Delta t} \quad (t + \Delta t \text{ 时刻}) \quad (4)$$

两式相减得到增量方程,

$$\mathbf{f}_i^{t+\Delta t} - \mathbf{f}_i^t = \mathbf{f}_e^{t+\Delta t} - \mathbf{f}_e^t = \Delta \mathbf{f}_e \quad (5)$$

式中 $\mathbf{f}_i^{t+\Delta t} - \mathbf{f}_i^t$ 近似地线性表示成

$$\mathbf{f}_i^{t+\Delta t} - \mathbf{f}_i^t \approx \left. \frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{u}^t} (\mathbf{u}^{t+\Delta t} - \mathbf{u}^t) = \mathbf{k}(\mathbf{u}^t) \Delta \mathbf{u}_1 \quad (6)$$

因而我们得到求解方程如下:

$$\Delta \mathbf{u}_1 = \mathbf{k}^{-1}(\mathbf{u}^t) \Delta \mathbf{f}_e \quad (7)$$

$$\mathbf{u}_1 = \mathbf{u}^t + \Delta \mathbf{u}_1 \quad (8)$$

$\Delta \mathbf{f}_e$ 不大时, 可认为 $\mathbf{u}^{t+\Delta t} = \mathbf{u}_1$, 此即静力显示格式 (static explicit algorithm—SE), 为保证解的收敛性, 必须严格限制增量 $\Delta \mathbf{f}_e$ 的大小, $\Delta \mathbf{f}_e$ 的选择应满足如下条件: (i) 任一单元的弹塑性状态在增量步内不发生变化。 (ii) 任一应变主值的增量须小于一给定值 $\Delta \varepsilon_{\max}$, $\Delta \varepsilon_{\max}$ 可取为 0.002。 (iii) 任一旋转增量须小于一给定值 $\Delta \theta_{\max}$, $\Delta \theta_{\max}$ 可取为 0.5° 。 (iv) 任一有限元节点与模具的接触状态在增量步内不发生变化。

材料弹塑性状态变化和接触状态变化在下一个积分步开始时加以考虑。

当步长 $\Delta \mathbf{f}_e$ 较大时, 由于我们采用了线性近似式 (6), 由式 (8) 确定的 \mathbf{u}_1 不满足平衡方程 (5), 此不平衡力记为 $\Delta \mathbf{R}$,

$$\mathbf{f}_i(\mathbf{u}^{t+\Delta t}) - \mathbf{f}_i(\mathbf{u}_1) = \Delta \mathbf{R} \quad (9)$$

在 \mathbf{u}_1 处 $\mathbf{f}_i(\mathbf{u}^{t+\Delta t}) - \mathbf{f}_i(\mathbf{u}_1)$ 近似地线性表示成

$$\mathbf{f}_i(\mathbf{u}^{t+\Delta t}) - \mathbf{f}_i(\mathbf{u}_1) \approx \left. \frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{u}_1} (\mathbf{u}^{t+\Delta t} - \mathbf{u}_1) = \mathbf{k}(\mathbf{u}_1) \Delta \mathbf{u}_2 \quad (10)$$

从而得到新的近似解

$$\Delta \mathbf{u}_2 = \mathbf{k}^{-1}(\mathbf{u}_1) \Delta \mathbf{R} \quad (11)$$

$$\mathbf{u}_2 = \mathbf{u}_1 + \Delta \mathbf{u}_2 \quad (12)$$

重复以上步骤, 直至 ΔR 足够小, 则得到 $t + \Delta t$ 时刻的解答 $u^{t+\Delta t}$, 此即静力隐式格式 (static implicit algorithm—SI). $\Delta R \rightarrow 0$ 是此格式收敛的判据, 由于板材成形的复杂性, 收敛性是这一格式的严重问题.

在式 (1) 中, 也可以考虑速度和加速度的影响. 把板材成形过程当成一个动载荷作用下的响应过程. 考虑 t 时刻的运动方程, M 和 C 均采用对角矩阵, 由中心差分格式可得到在 $t + \Delta t$ 时刻每个有限元节点沿每个自由度方向的位移 $u^{t+\Delta t}$,

$$\left(\frac{m}{\Delta t^2} + \frac{c}{2\Delta t}\right)u^{t+\Delta t} = f_e - f_i + \frac{m}{\Delta t^2}(2u^t - u^{t-\Delta t}) + \frac{c}{2\Delta t}u^{t-\Delta t} \quad (13)$$

此即动力显示格式 (dynamic explicit algorithm—DE). 每个自由度的位移由式 (13) 独立求解. 因为中心差分法是有条件稳定的积分算法, 所以为保证式 (13) 的计算稳定性, 时间步长 Δt 应满足

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} = \frac{T_{min}}{\pi} \quad (14)$$

式中 T_{min} 是有限元系统的最小固有振动周期. 由式 (14) 确定的 Δt 具有很小的量级, 因此动力显示积分格式特别适合于撞击这类快速过程. 对于板材成形这类准静力过程的模拟将要求上百万、千万的积分步. 为大量降低计算时间, 在实际计算中我们可以有两种途径, 其一是采用虚假的质量, 计算中采用的质量如果提高 n 倍, 由式 (14) 确定的 Δt_{cr} 可以提高 \sqrt{n} 倍, 则计算时间可以降低 \sqrt{n} 倍; 其二是采用虚假的冲压速度, 计算中冲头速度如果提高 n 倍, 则计算时间可以降低 n 倍. 采用这两种方法无非都是人为地提高每一积分步内冲头的行程, 这样会加大速度和加速度的影响. 也会引起积分结果的漂移, 在非线性很强时, 这样的处理会导致错误的结果. 但幸好众多的计算表明, 采用这两种方法得到的很多成形模拟还是合理的 [4,5,13].

只要单元尺寸和积分步长控制得足够小, 皱曲的发生和演化可以得到正确模拟. 在采用静力求解格式 (特别是静力隐式格式) 时, 因为要形成整体刚度矩阵和求解联立方程, 密网格和小步长受到一定限制, 而动力显示格式则比较有利. 板材的断裂预测依赖于其成形极限性质, 上述 3 种格式都可以正确预测断裂发生的位置和方位, 断裂之后板材的变形模拟要求有网格重划分, 但已没有什么实际意义.

3.2 接触和摩擦

在每一积分步或每一步迭代中, 每一有限元节点的接触状态都必须重新判断, 我们称之为接触搜索. 这通过比较节点与模具表面的位置来确定. 如图 3, t 时刻节点 A 的计算位置在模具表面 “以内”, 即 “穿透值” 不为零, 这说明节点 A 与模具接触. 在 $[t, t + \Delta t]$ 时间内节点 A 移动 Δu . 模具移动 ΔU , 则节点与模具的相对位移增量为

$$\Delta v = \Delta u - \Delta U \quad (15)$$

在节点 A , 我们建立一个以有限元网格法向、切向

组成的坐标系, 其切向记为 1, 2, 法向记为 3. 我们在此坐标系内引入接触和摩擦的条件, 假设摩擦满足 Coulomb 摩擦理论. 我们可以采用两种方法引入接触和摩擦的条件, 其一是数

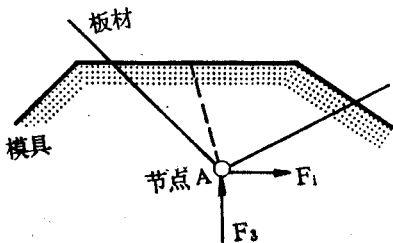


图 3 有限元节点与模具接触示意图

学处理, 我们称之为罚函数法; 其二是根据摩擦的物理特性, 我们称之为边界条件修正法。

3.2.1 罚函数法 参照 Michalowski 和 Mroz 的摩擦理论^[15], 我们将接触和摩擦简化为一个塑性流动问题。将 Δv 沿切向、法向分解, 并假设 Δv 可分解为一粘着部分 Δv^c 和一滑动部分 Δv^p , 即

$$\Delta v = \Delta v^c + \Delta v^p, \quad \Delta v_i = \Delta v_i^c + \Delta v_i^p \quad (16)$$

另外假设接触力增量 ΔF 与 Δv^c 之间满足

$$\Delta F_i = P_{ij} \Delta v_j^c, \quad [p] = \begin{bmatrix} p_1 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中 p_1 、 p_2 为切向的罚函数, p_3 为法向的罚函数, Δv_i^c 和 Δv_i^p 满足以下关系,

$$\begin{cases} \Delta v_1^c = \Delta v_2^c = 0 & f = F_1^2 + F_2^2 - \mu F_3^2 < 0 \text{ 时} \\ \Delta v_1^p = \lambda \frac{\partial G}{\partial F_1}, \quad \Delta v_2^p = \lambda \frac{\partial G}{\partial F_2}, \quad G = F_1^2 + F_2^2, \quad f = F_1^2 + F_2^2 - \mu^2 F_3^2 = 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (18)$$

式中 μ 为摩擦系数, $f < 0$ 表示节点 A 处于粘着状态, $f = 0$ 表示其处于滑动状态, f 本身类似于塑性力学中的屈服条件, λ 由条件 $f = 0$ 和 $\Delta f = 0$ 确定, 最后我们可以得到如下本构关系,

$$\Delta F_i = (P_{ij} - p_{ij}) \Delta v_j, \quad [p] = \frac{1}{F_1^2 + F_2^2} \begin{bmatrix} p_1 F_1^2 & p_1 F_1 F_2 & -\mu^2 p_3 F_1 F_3 \\ p_1 F_1 F_2 & p_2 F_2^2 & -\mu^2 p_3 F_2 F_3 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

3.2.2 边界条件修正法 固体力学的边值问题其边界条件可以是位移边界条件、力的边界条件或混合边界条件。当边界条件包含接触摩擦条件时, 这部分条件本身也依赖于整个边值问题, 因而求解接触摩擦需要若干次迭代求解。任一有限元节点有 3 种可能状态: 脱离、粘着、滑动。每种状态的边界条件各异, 状态之间的变化亦满足一定条件。根据每种状态的边界条件, 由平衡方程或运动方程求解出未知接触力或未知板材位置, 再根据新的解答校核接触和摩擦的条件, 对边界条件进行修正。参见图 4。

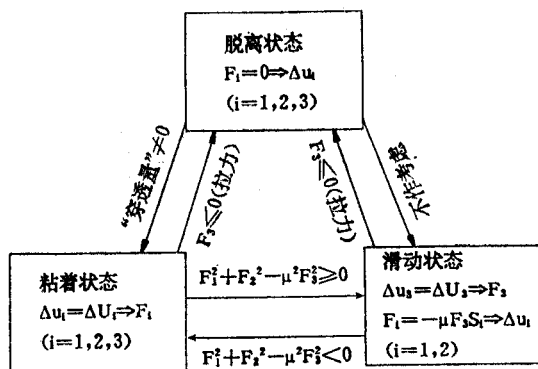


图 4 接触状态及其变化

图中 S_1 、 S_2 表示节点的滑动方向。开始迭代时, 可以以前一时间步节点的位移增量在现时切向的分量来近似, 以后在迭代中逐步修正。

3.3 拉伸筋的模拟 在板材成形中,常在压边圈和凹模表面制作若干条能相互啮合的棒形凹槽和凸起,称为拉伸筋或拉延筋.其目的是促使板材能传递足够大的拉力;其次可以改善板材各处的变形状态,使之趋于均匀;另外可以降低压边圈的压力,提高板材成形的表面质量.因而拉伸筋在板材成形中起到很重要的作用.但直至今日,在板材成形中精确模拟拉伸筋的行为仍然具有很大困难,这主要是因为拉伸筋的尺寸很小,形状也比较复杂,要精确考虑板材与拉伸筋的接触,势必要求很细的有限元网格,这在计算中会引起很大困难.因而为提高计算效率,通常将拉伸筋简化为模具表面的一条线,如图5,假设拉伸筋线固结于模具表面的切平面以内, n_T 为模具表面的法线方向, n 、 t 分别为拉伸筋线的法线和切线.记 t 、 n 、 n_T 为1、2、3.拉伸筋对板材的作用可以采用两种方式考虑.

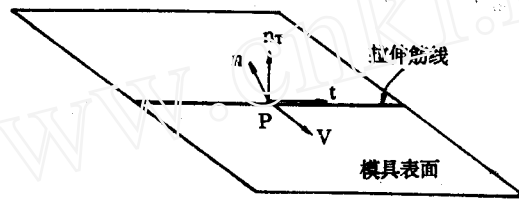


图5 模具表面的拉伸筋线

其一,参照图5,板材开始变形时,假设拉伸筋线附近的有限元节点受到拉伸筋的约束不能有垂直于拉伸筋线的移动,由此我们可以计算出拉伸筋对板材的拉力,拉力的方向垂直于拉伸筋.当此拉力的大小达到拉伸筋的承载能力时,拉力的大小保持不变,这些节点将容许有垂直于拉伸筋线的移动.拉伸筋的承载能力取决于其大小、形状,可以由二维有限元模拟确定,也可以直接由实验确定.

其二,类似于 Michalowski 和 Mroz 摩擦理论^[15],将拉伸筋对板材的作用简化为一塑性流动问题.当板材相对于拉伸筋线以速度 v_i 流过时,也可以认为拉伸筋线发生了塑性流动,其相对于板材速度为 $-v_i$,类似于塑性流动理论,我们引入以下假设,

$$\begin{cases} -v_i = -v_i^e - v_i^p \\ -v_i^p = \lambda \frac{\partial f}{\partial Q_i} \\ f = Q_i Q_i - F^2(\bar{v}^p) = 0 \\ \dot{Q}_i = E_{ij} v_j^e \end{cases} \quad (20)$$

式中 $-v_i^e$ 、 $-v_i^p$ 分别是拉伸筋流动的“弹性”部分和“塑性”部分, Q_i 是拉伸筋力, F 是拉伸筋的承载能力, E_{ij} 是拉伸筋的“弹性”系数矩阵, λ 是一标量函数, $\bar{v}^p = (v_i^p v_i^p)^{1/2}$ 称为拉伸筋的等效“塑性”速度.由式(20)可以得出,

$$\dot{Q}_i = (E_{ij} - E_{ij}^p) v_j = E_{ij}^e v_j \quad (21)$$

$$E_{ij}^p = \frac{E_{im} \frac{\partial f}{\partial Q_m} \frac{\partial f}{\partial Q_i} E_{ij}}{4F^2 H' + \frac{\partial f}{\partial Q_r} E_{rs} \frac{\partial f}{\partial Q_s}} \quad (22)$$

式中 $H' = \frac{dF}{d\bar{v}^p}$ 表示拉伸筋硬化或软化的参数.

若不考虑拉伸筋的硬化或软化，并限制板材通过拉伸筋时只有 n 方向的速度，我们可以得到描述拉伸筋的“理想弹塑性”模型，

$$\begin{cases} \dot{Q}_n = -E_{nn}v_n, & \dot{Q}_t = \dot{Q}_{nT} = 0 & Q_n < F \text{ 时} \\ \dot{Q}_n = \dot{Q}_t = \dot{Q}_{nT} = 0, & & Q_n = F \text{ 时} \end{cases} \quad (23)$$

3.4 回弹 回弹的模拟有两种基本方法，如图 6 所示。无模具法就是一般的无接触的弹塑性问题，采用增量法求解。当所有等效节点力趋于零时，即是回弹的解答。有模具法能模拟实际的回弹过程，回弹的计算类似于成形的计算，但模具移动方向相反，用增量法求解。当所有节点不与模具接触时，即是回弹的解答。采用有模具法时，因为仍然有接触计算，计算时间比采用无模具法的要长。计算表明由这两种方法得到的回弹大小几乎完全一样^[14]。

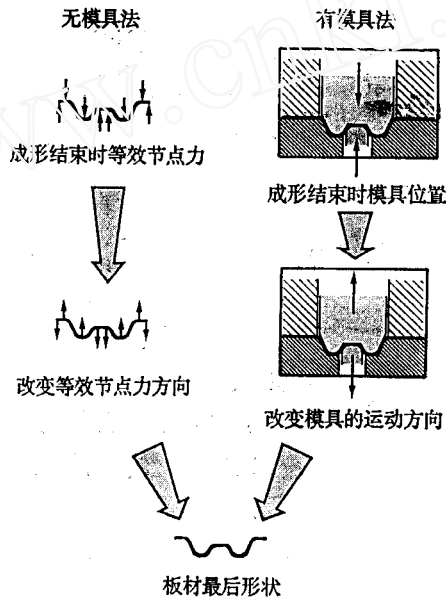


图 6 板材回弹的求解

4 有限元模拟后处理——图形显示和光造形法

图形显示对于板材成形的数值模拟是一必不可少的内容。很多商业软件，如 IDEAS, AVS, KSWAD 等都有有限元前后处理的功能。借助于图形显示，板材成形的各个细节得以在电视屏幕上重现，同时可以显示出应力、应变的分布。还可以将计算结果制成录像磁带，由通常的录像机显示。

光造形法 (laser stereo lithography) 可以根据有限元模拟的数值结果直接生成一个真正的三维实体，从而使我们更直观地了解成形的过程和有关细节。有关这一方法的原理可参阅[17]。

5 优化设计、模型实验、板材成形试生产

概括而言，板材成形设计其目的是通过合理选择坯料尺寸、加工工艺及模具设计，高效率地生产出高质量、低成本的合格产品，设计过程可以简化为一个有约束的单目标或多目标

的(模糊)优化问题。优化的目标函数可以是坯料尺寸,工艺参数、模具形状,某项成形指标等。约束条件常常包括成形缺陷(如皱曲、断裂)的防止。板材的成形缺陷是与其可成形性能(formability)联系在一起的,这一性能与成形过程的多种因素有关,这些因素也正是成形设计所要确定的。但将优化设计融入板材成形 CAE 系统仍处于萌芽状态,现今人们可以初步做到的仍然只是在某些不太复杂情况下,用有限元数值模拟在一定程度上代替模型实验或板材成形试生产,根据有限元模拟发现的成形缺陷,反过来再修改模具的形状及一些成形参数,目的是避免成形缺陷的发生。在此过程中,包含了多次人机对话,并且设计人员的经验也是必要的。可以预计,在板材成形设计中,计算机将代替人工做越来越多的工作。设计人员的经验可以做成专家系统而作为板材成形 CAE 系统的一部分,更高级的专家系统还应具有智能功能。

模型实验和板材成形试生产是传统的板材成形设计方法。在有限元数值模拟尚不能完全代替传统方法的今天,它们仍是板材成形设计所依赖的工具。即使有限元数值模拟的手段达到相当成熟时,我们相信它们仍然是板材成形 CAE 系统的一个不可缺少的组成部分。

6 结束语

以上我们对板材成形 CAE 系统的各个组成部分做了简要评述。作为一门正处于发展的研究领域,板材成形 CAE 系统为众多学科如有限元法、材料科学、力学(接触、摩擦、本构关系)、计算机科学等等,提供了广阔的应用领域。也正因如此,试图给出一个板材成形 CAE 系统的一个包罗万象的概括是困难的。譬如,本文所述的 3 种有限元格式(SE,SI,DE)只是众多的有限元格式中的一部分,其它类型的有限元格式也未尝不可以采用^[16];同样,本文介绍的接触和摩擦也是很多可能性中的两种。到目前为止,我们尚不能确认那种方法最有效。

综观国外的研究状况,板材成形 CAE 系统的建立与工业界(特别是汽车厂家)的密切协作是分不开的,来自工业界的工程师也参与到板材成形 CAE 系统的建立中来,这样,板材成形 CAE 系统的研究和应用同步进行,应用中发现的问题可以迅速地反馈到研究人员处得以解决。国内在这方面的研究还只刚刚起步,比国外落后 10 年左右,在我们建立自己的板材成形 CAE 系统时可以考虑采取以上方针。

计算机模拟技术有可能成为人们认识世界的一种新方法。以往人们认识世界有两种基本手段,即观察和试验,由观察和试验提出假设,再建立理论。虽然计算机模拟仍然是建立在已有的理论基础之上,但是计算机模拟却可以演示出一系列我们尚未观察到的“现实”,这个“现实”比现实更为丰富,我们可以随意地、经济地改变各种条件,以创造出我们满意的“现实”。板材成形 CAE 系统可以说是这一思想的具体体现。

参 考 文 献

- 1 Maltiasson K, Samuelsson A, Wood R D, Zienkiewicz O C (eds). NUMIFORM'86, Rotterdam, Netherlands (1986)
- 2 Thompson E G, Wood R D, Zienkiewicz O C, Samuelsson A (eds). NUMIFORM'89, Rotterdam, Netherlands (1989)
- 3 Chenot J L, Wood R D, Zienkiewicz O C (eds). NUMIFORM'92, Rotterdam, Netherland (1992)

- 4 Reissner J (ed) . FE-simulation of 3-D sheet metal forming processes in automotive industry, Zurich, Switzerland, VDI-Verlag (1991)
- 5 Makinouchi A, Nakamachi E, Onate E, Wagoner R H. (eds). NUMISHEET'93. Isehara, Japan (1993)
- 6 Wagoner R H, Zhou D J. Recent advances in 3-D numerical simulation of sheet forming operations. In: Wang Z R, He Y X (eds). Advanced technology of plasticity 1993, Beijing, China, IAP (1993): 1747—1755
- 7 Makinouchi A. Development of an integrated CAE system for sheet stamping die design. In: Xu B Y, Yang W (eds). Advances in engineering plasticity and its applications. Beijing, China, IAP (1994) : 407—412
- 8 王祖唐, 关廷栋, 肖景容, 霍文灿. 金属塑性成形理论, 机械工业出版社, 北京 (1989)
- 9 邓陟, 王先进, 陈鹤峰. 金属薄板成形技术. 兵器工业出版社, 北京 (1993)
- 10 余同希, 常亮焜. 塑性弯曲理论及其应用. 科学出版社, 北京 (1993)
- 11 王勖成, 邵敏. 有限元法的基本原理和数值方法. 清华大学出版社, 北京 (1987)
- 12 匡震邦. 非线性连续介质力学基础. 西安交通大学出版社, 西安 (1999)
- 13 霍同如, 仲町英治. Development of dynamic-explicit/elasto-viscoplastic finite element method for sheet forming simulation. 大阪大学科研报告 (1993)
- 14 Abel Santos. Tool description and contact strategies in static explicit FEM for simulation of 3-D sheet metal forming processes, Doctorate dissertation, The university of Tokyo (1993)
- 15 Michalowski R, Mraz Z. Associated and non-associated sliding rules in contact friction problems. *Archives of Mechanics*, **30** (1978) : 250—276
- 16 Choudhry S, Lee J K. Dynamic plane-strain finite element simulation of industrial sheet-metal forming processes, *Int. J. Mech. Sci.* **30**, 2 (1994) : 189—209
- 17 Nakagawa T, Makinouchi A, Wei J. Proceeding of 3-D plotting of finite element sheet metal forming simulation results by laser stereo lithography, CIRP Annals (1992)

CAE SYSTEM FOR SHEET FORMING

Huo Tongru Xu Bingye

Tsinghua University, Beijing 100084

Abstract The sheet forming is complicated due to the simultaneous existence of high order nonlinearities of geometry, materials, contact and friction. A CAE system composed of the finite element simulation and computer graphics can be established to investigate this complicated processes of sheet forming. Useful information can be obtained for the design and manufacturing of the sheet forming. The components of the CAE system, the finite element algorithms and the methods for the simulation of contact, friction, draw bead and springback are discussed in this paper.

Keywords *sheet forming, tool design, numerical simulation, finite element method, nonlinearity, optimization, CAE*