

即板料成形后的边界曲线，也可以初始板料通过有限元分析软件计算后获得。本文提出比例因子法的主要目的是实现图中的目标轮廓线与终了轮廓线完全重合或两轮廓线之间的误差在一定的公差允许范围内即可。

从图中可以看出，初始轮廓线上的节点 A 经有限元分析软件求解后，沿变形路径运动至终了轮廓线上的节点 a 。假设终了轮廓线上的节点 a 与目标轮廓线上相应的目标节点 a_T 之间存在一定的误差，则需要对初始轮廓线上的节点 A 进行特定的偏置，偏置后成为偏置轮廓线上的节点 A^* ，将偏置轮廓线上的节点 A^* 经有限元分析软件求解后，沿变形路径运动至偏置后的终了轮廓线上的节点 a^* ，以上即为板料轮廓线上节点运动的全过程。

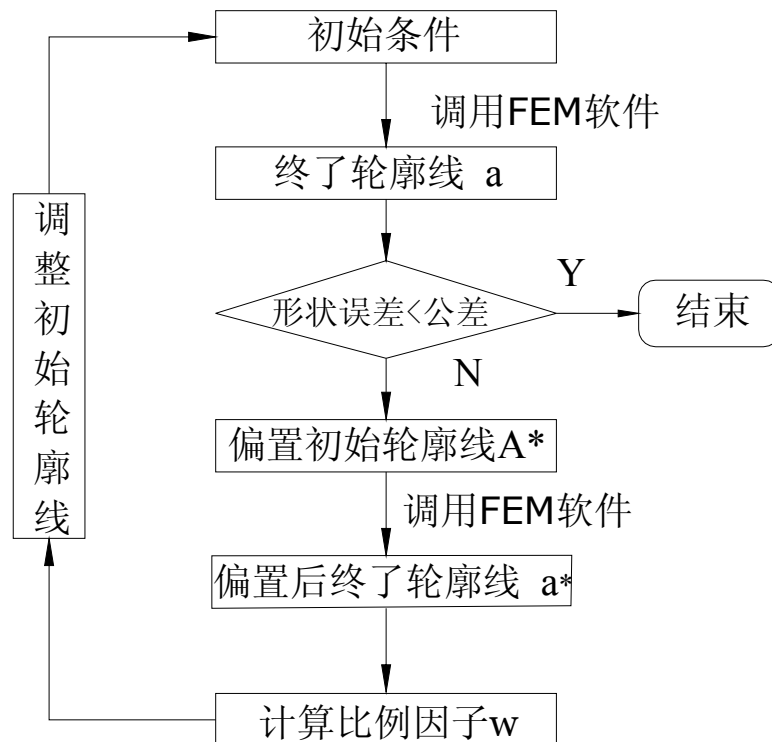


图 3.2 比例因子法流程图

整个比例因子优化法程序是采用 Fortran 语言编程实现的，其流程图如图 3.2 所示。

首先给定必要的初始条件，包括冲压件在拉延成形完成后的有限元模型、给定的初始轮廓线 A 、冲压件的目标轮廓线 a_T 、冲压件的板料力学性质和厚度、冲压条件以及摩擦系数等。通过调用有限元分析软件对给定的初始板料进行冲压过程的模拟计算，从而获得终了轮廓线 a 。

再将终了轮廓线 a 与目标轮廓线 a_T 进行比较，求得形状误差的最大值 e ，如果形状误差 e 在公差允许范围 T 之内，则结束运算，输出该初始轮廓线信息作为最佳板料展开轮廓线；反之，则给该初始轮廓线一个偏置量 Δ 进行特定的偏置，从而获得偏置后的轮廓线 A^* ；调用有限元软件对偏置后的轮廓线 A^* 进行冲压过程

的模拟计算, 获得偏置后的终了轮廓线 a^* , 再将终了轮廓线 a 与偏置后的终了轮廓线 a^* 进行比较, 得到一个终了轮廓线的偏置量 δ 。

最后依据初始轮廓线的偏置量 Δ 和终了轮廓线的偏置量 δ 计算出零件变形的比例因子 ω 。通过比例因子 ω 对初始轮廓线 A 进行修正, 再将修正后的轮廓线作为下一次迭代的初始轮廓线。这样不断循环迭代, 直至终了轮廓线与目标轮廓线上每个节点的形状误差 e 均在公差 T 允许范围之内, 结束迭代, 将最后一次迭代的初始轮廓线作为最优板料展开轮廓线输出。

上述为比例因子优化法的基本思想, 下面将具体说明该方法中形状误差的确定、初始轮廓线的偏置以及初始轮廓线的调整。

3.2 定义形状误差

图 3.3 为定义形状误差 e 的示意图。其中 a 为初始板料经冲压变形终了轮廓线上的节点, a_T 为目标轮廓线上的节点。

首先将给定的板料初始轮廓线 A , 经有限元增量法计算获得终了状态的轮廓线 a , 再将目标轮廓线 a_T 划分单元, 在曲率大的地方划分密集些, 曲率小的地方则划分稀薄些, 若生成 m 个节点。由于终了轮廓线 a 和终了轮廓线 a_T 均为已知量, 可通过计算获得终了轮廓线上的节点 a 与目标轮廓线上每个节点 a_T 之间的距离 d_1 、 d_2 、 \dots 、 d_m 。

$$\text{令} \quad d = \min\{d_1, d_2, d_3, \dots, d_m\}$$

则最小值 d 对应的目标轮廓线上的节点即为终了轮廓线上节点 a 对应的目标节点 a_T , d 即为节点 a 的形状误差值 e 。其中终了轮廓线上的节点 a 与目标轮廓线上的节点 a_T 的对应关系不完全是一对一, 还有可能出现一对多或多对一的情况, 但这都不影响优化计算, 因为只需计算出最小距离值 d , 并将其赋予形状误差 e 即可。

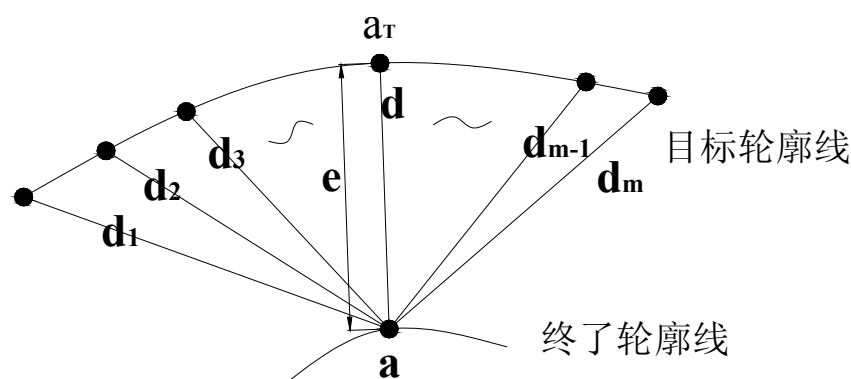


图 3.3 形状误差的定义

3.3 偏置初始轮廓线

由于薄板冲压过程中板料的变形路径是非线性的，所以终了轮廓线上节点 a 的运动方向不同与初始轮廓线上节点 A 的运动方向。只要稍稍调整初始轮廓线上节点 A 的位置，就会导致终了轮廓线上节点 a 的位置及方向都会发生很大的变化，因而如何偏置初始轮廓线显得非常重要。

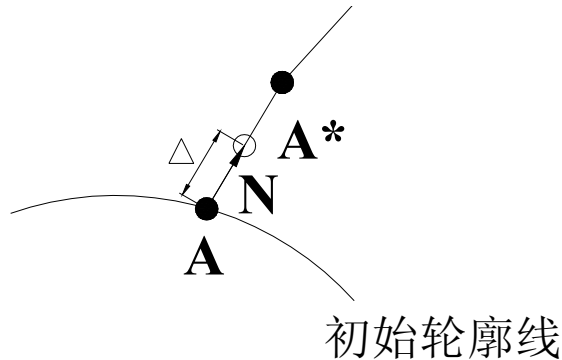


图 3.4 初始轮廓线上的节点偏置

所谓满足形状尺寸精度要求，即初始板料经冲压变形后产生的终了轮廓线上的每个节点的误差均在公差允许范围内。如果终了轮廓线 a 与目标轮廓线 a_r 之间的误差 e 不在公差允许范围内，则需要调整初始轮廓线上节点 A 的位置。

初始轮廓线上节点 A 的偏置细节如图 3.4 所示，先将初始轮廓线上的节点 A 沿原来的变形方向 N 偏置一段距离 Δ 后得到偏置后的轮廓线 A^* ，该偏置后的轮廓线 A^* 的表达式如式(3.1)所示：

$$A^* = A + \Delta N \quad (3.1)$$

其中偏置量 Δ 是由零件的尺寸大小决定的。若零件的尺寸较大，则偏置量 Δ 可以设置大一点；反之，偏置量 Δ 可以相应设置小些。

3.4 调整初始轮廓线

上一节讲述的对初始轮廓线的偏置，主要是为了引进了比例因子 ω 的概念。

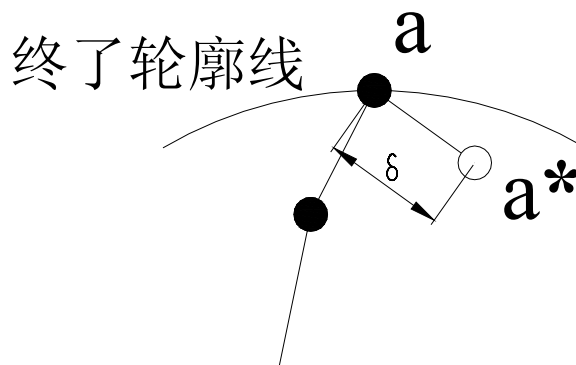


图 3.5 终了轮廓线上的节点偏置

如图 3.5 所示, 将偏置后的轮廓线 A^* 再经有限元软件计算得到偏置后的终了轮廓线 a^* 。而此, 终了轮廓线 a 和偏置后的终了轮廓线 a^* 的节点信息均可由有限元仿真后获得, 从而可以计算出终了轮廓线 a 与偏置后的终了轮廓线 a^* 之间的偏置量 δ 。

$$\delta = |a - a^*| \quad (3.2)$$

比例因子 ω 就是由初始轮廓线与偏置轮廓线经有限元软件计算结果导出的, 即变形前的轮廓线偏置量 Δ 与变形后轮廓线的偏置量 δ 之比:

$$\omega = \frac{|A - A^*|}{|a - a^*|} = \frac{\Delta}{\delta} \quad (3.3)$$

上式计算所得的 ω 即为板料变形的比例因子, 该比例因子可以反应出, 在考虑板料的真实流动情况下, 当给初始轮廓线一定的改变量, 会造成终了轮廓线产生相应的改变量。通过比例因子 ω 能够对初始轮廓线 A 进行明确地调整, 这样能更加有效地控制形状误差 e 。只有当终了轮廓线上的每个节点与目标轮廓线上相应节点间的误差 e 都在误差允许范围 T 内, 否则, 初始轮廓线 A 上不满足要求的节点需做以下调整:

$$A^{(i)} = A^{(i-1)} + e\omega N \quad (3.4)$$

其中 i 为迭代次数。直到终了轮廓线上每个节点的误差都在公差范围 T 内, 迭代停止, 从而获得最优轮廓线。

3.5 程序实现

该比例因子法可以通过 FORTRAN 语言编程以及调用有限元软件 (LS-DYNA) 实现对冲压件的板料展开优化, 为了保证系统的结构合理、运行稳定可靠, 在系统开发中必须遵循软件工程方法。

软件工程采用的生命周期方法, 从时间角度对软件开发和维护的复杂问题进行分解, 把软件生命的漫长周期依次划分为若干个阶段, 每个阶段有相对独立的任务。对于结构化方法而言, 软件的生命周期可划分为问题定义、可行性研究、需求分析、总体设计、详细设计、编码和单元测试、综合测试以及软件维护八个阶段。

(1) 问题定义: 提出关于问题性质、工程目标和规模的书面报告。

(2) 可行性研究: 从技术可行性、经济可行性以及操作可行性等方面对问题进行研究, 作为是否继续进行该项工程的依据。

(3) 需求分析: 确定系统发布完成哪些工作, 对目标系统提出完整、准确、清晰、具体的要求。需求分析的结果是系统开发的基础, 关系到工程的成败和软件产品的质量。因此, 必须用行之有效的方法对软件需求进行严格的审查验证。

(4) 总体设计: 用比较抽象概括的方式确定系统如何完成预订的任务, 确定程

序结构。在进行软件结构设计时应当遵循的最主要的原理是模块独立原理，也就是说，软件应该同一组完成相对独立的子功能的模块组成，这些模块彼此之间的接口关系应该尽量简单。

(5) 详细设计：确定怎样具体地实现所要求的目标系统。除了应该保证程序的可靠性之外，使将来编写出来的程序可读性好，容易理解，容易测试，容易修改和维护是详细设计阶段最重要的目标。

(6) 编码和单元测试：用某种程序设计语言书写程序，并保证每个模块作为一个单元能正确运行。

(7) 综合测试：对软件系统进行各种综合测试，验证系统确实能够达到需求说明书中指定的功能，而且系统的动态特性也符合预订要求。

(8) 软件维护：包括改正性维护、适应性维护、完善性维护、预防性维护四类活动。

基于结构化的软件工程方法，依图 3.2 所示的比例因子法流程图，在系统设计时将比例因子法程序分为以下几个模块：

(1) 数据输入：包括初始轮廓线的输入、偏置量 Δ 的设定、形状公差值 T 的设定。

(2) 形状误差的计算：包括终了轮廓线与目标轮廓线之间的偏差值 e 、终了轮廓线与偏置的终了轮廓线之间的偏差值 δ 。

(3) 初始轮廓线的偏置：对初始轮廓线上不满足误差要求的节点进行偏置。

(4) 比例因子 ω 的计算：计算初始轮廓线上不满足误差要求的节点的变形比例因子 ω 。

(5) 初始轮廓线的调整：对初始轮廓线上不满足误差要求的节点进行调整。

3.6 比例因子法的优点

作者提出的比例因子优化方法，其基本思想如前所述。那么该方法相对于现有的其他板料展开方法而言，其优势在哪儿呢？主要表现在以下两个方面：

(1) 由于该方法通过调用有限元分析软件进行冲压过程的模拟，因而具有采用有限元分析方法计算的一切优点，主要包括：

- ① 不受制件形状的限制，适合任何复杂形状的冲压件；
- ② 能够考虑多工步的冲压工艺，包括拉延、修边、冲孔、翻边等工序对板料变形的影响都能通过有限元软件真实地反映出；
- ③ 符合实际冲压情况，包括压边力的大小、润滑条件、拉延筋的作用等等。

而对于经验法、滑移线场法、势场模拟法等非有限元方法则不能满足上述要求。