

文章编号: 1005-0523(2007)02-0127-04

自动精密压力校直工艺的校直行程计算方法

程志贤¹, 陈 慧¹, 杨 凯²

(1. 华东交通大学 机电工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 江铃股份有限公司模具厂, 江西 南昌 330001)

摘要:从弹塑性力学基本理论出发分析了压力校直过程工件弯曲的力学特性,建立了挠度与曲率、载荷之间的关系式.在此基础上,提出通过建立高精度的初始挠度(δ_0)与校直行程(δ_Σ)对应数值插值表的方法解决自动精密校直机校直行程的确定,进而编制了常见截面工件校直行程计算 MATLAB 程序.通过实例计算与有限元分析及校直实验结果的比较,验证了本文提出的方法及程序具有较高的求解精度,能满足自动精密校直工艺的要求.

关键词:自动精密压力校直;校直行程;弹塑性;有限元分析

中图分类号: TH113 **文献标识码:**

0 引言

压力校直又称三点式反弯校直,是将带有初始弯曲的金属工件支承在支距可调的两支点之间,在压点处施以压力,使工件经反向弯曲后最终回复到平直状态^[1].校直过程中工件可看作是受集中力作用的简支梁,图1为校直过程梁弯曲变形情况示意.

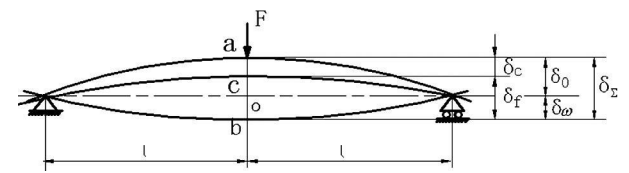


图1 压力校直过程梁弯曲变形情况示意
 δ_0 —初始挠度; δ_Σ —总压下挠度; δ_ω —反弯挠度;
 δ_f —卸载回弹挠度; δ_c —塑性残留挠度.

自动精密校直是压力校直技术发展的最高层次,目前只少数发达国家具备自动精密液压校直机的生产能力^[2].以日本ASP系列自动精校机为例,其工作过程为:由操作台向系统输入被校工件的材料、几何特性参数;系统自动对工件的弯曲变形进行检测,根据检测信息调整工件压点和两支承的位置;通过运行存储在系统中的程序对输入和检测信息进行运算,根据运算结果向控制系统发出指令,控

制压头的压下量即主驱动油缸中滑块运行的行程,完成第一次校直;然后进行二次检测、信息处理、并再次校直,如此循环下去直至工件达到要求的精度.

由上述过程可见,校直滑块行程(简称校直行程)大小的确定是自动精密压力校直机工艺制定的关键.本文在对校直过程工件弹塑性弯曲力学特性分析的基础上,提出一种适用于自动精密压力校直工艺的校直行程计算方法.

1 校直过程工件弹塑性弯曲力学特性分析

本文以常用的大韧性中低强度金属(又称理想金属)为研究对象,作如下假设:①材料是连续的、均匀的和各向同性的;②工件弯曲属于小变形且变形过程工件横截面保持为平面;③卸载过程满足简单卸载定律.

分析校直过程集中力 F 与中点挠度 δ 之间的关系^[3]:当 F 小于使梁中点上下边缘刚开始进入塑性状态时的荷载值 F_t 时, F 与 δ 之间呈线弹性关系;当 F 超过 F_t 直至最大校直力 F_m 之前,梁在受力截面附近处的上下表面进入塑性变形,其它各部分仍为弹性变形,此为梁的弹塑性变形阶段;当 F 达到 F_m (F_m 不能超过使梁中点全截面进入塑性状态

时的荷载值 F_s , 因为此时梁中点截面将变成塑性铰(导致梁的破坏)时开始卸载, 根据简单卸载定律该阶段 F 与 δ 之间关系近似平行于弹性加载直线.

1.1 总压下挠度计算

$$\delta_{\Sigma} = \delta_0 + \delta_{\omega} \quad (1)$$

式中反弯挠度 δ_{ω} 由图 2 挠曲线的积分求得. 在此设 C_{0x} 、 $C_{\omega x}$ 和 $C_{\Sigma x}$ 分别表示距支点 x 处的初始曲率、反弯曲率及总弯曲率^[1], 三者关系为: $C_{\omega x} = C_{\Sigma x} - C_{0x}$, 则有:

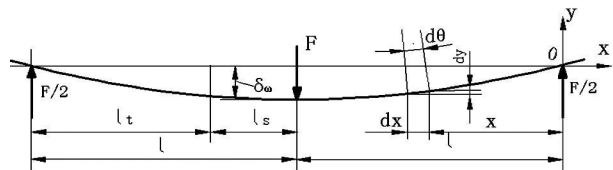


图 2 简支梁弹塑性弯曲挠曲线示意

l_s —塑性弯曲区长度; l_t —弹性弯曲区长度

$$\begin{aligned} \delta_{\omega} &= \int_0^{\delta} dy = \int_0^1 x C_{\omega x} dx = \int_0^1 x C_{\Sigma x} dx - \int_0^1 x C_{0x} dx \\ &= \int_0^{l_t} \frac{F x^2}{2EI} dx + \int_{l_t}^l C_t C_{\Sigma x} dx - \delta_0 \\ &= Fl^3/(6EI) + \int_{l_t}^l C_t C_{\Sigma x} dx - \delta_0 \end{aligned} \quad (2)$$

其中: E —弹性模量; I —工件截面对中性轴的惯性矩; F —弹塑性变形阶段集中力荷载, $F_t < F < F_s$; l — F 作用点至支点的距离; σ_t —材料的屈服极限; $C_t = \sigma_t/(EH)$ 为弹性极限曲率, 相当于工件表层纤维达到弹性极限变形时的曲率; $C_{\Sigma x} = C_{\Sigma x}/C_t$ 为总弯曲率比.

将上式代入式(1), 得总压下挠度的计算式:

$$\begin{cases} \delta_{\Sigma} = Fl^3/(6EI) + C_t \int_{l_t}^l C_{\Sigma x} dx \\ (F_t < F < F_s) \end{cases} \quad (3)$$

下面通过对工件弹塑性弯曲的应力、应变、曲率角及弯矩关系的分析建立 $C_{\Sigma x}$ 、 F 与 x 三者关系的表达式.

1) 由图 3 横截面上应力应变分布关系可列出弯矩表达式及总弯曲率比与弹性区厚度的关系式:

$$M = \iint_S z \sigma_z dA = \iint_{S_1} \frac{2z^2 \sigma_t}{H_t} dA_1 + \iint_{S_2} z \sigma_t dA_2 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} C_{\Sigma} &= C_{\Sigma}/C_t = (\tan \alpha_{\Sigma})/C_t \\ &= (2\epsilon_t/H_t)/(2\epsilon_t/H) = H/H_t \end{aligned} \quad (5)$$

2) 由工件受力情况列出另一弯矩表达式, 参看图 2 有: $M_x = F_x/2$ (6)

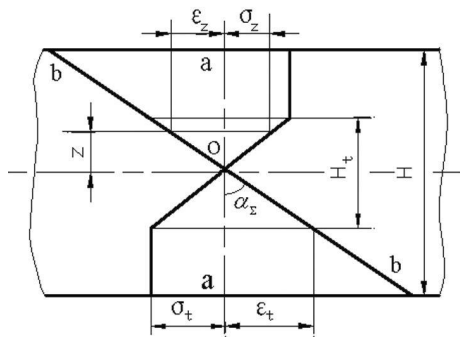


图 3 理想金属弹塑性弯曲横截面上的应力应变分布

H —工件截面高度; H_t —弹性变形区厚度; ϵ_t —弹性极限应变; σ_z 、 ϵ_z —距中性层任意厚度 z 处的应力和应变; α_{Σ} —总弯曲率角, $\alpha_{\Sigma} = \arctan C_{\Sigma}$.

设 M_t 、 M_s 分别为弹性极限弯矩和塑性极限弯矩, 表示工件截面达到弹性极限弯曲状态或塑性极限弯曲状态时的弯矩. 实际校直时工件几何尺寸及材料已确定, 其 M_t 、 M_s 亦确定. 由前述 F_t 、 F_s 定义有: $F_t = 2 M_t/l$ (7) 及: $F_s = 2 M_s/l$ (8)

又, 在 $x = l_t$ 处截面处于弹性极限状态, 有:

$$l_t = 2 M_t/F \quad (9)$$

3) 由内外力矩平衡条件, 联立式(4)(5)(6)建立 $C_{\Sigma x}$ 、 F 与 x 三者关系式:

$$\Psi(x, f, C_{\Sigma x}) = 0 \quad (10)$$

但 $\Psi(x, f, C_{\Sigma x}) = 0$ 的表达式通常无法显式地表达为 $C_{\Sigma x} = \varphi(x, F)$ 的形式, 使式(3)不能通过直接积分求出, 而须采用数值积分的方法求解; 本文引入变量 k 以简化计算, 定义:

$$F = 2 k M_t/l, k \in [1, M_s/M_t] \quad (11)$$

将式(3)的积分区间 $l_t \rightarrow l$ 分成 n 段, 每段长度 Δx , 设 x_i 表示第 i 段的距离坐标 ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), 有:

$$x_i = l_t + i \Delta x = (l/k)[1 + i(k-1)/n] \quad (12)$$

联立式(10)(11)(12)可以解出与各 x_i 对应的总弯曲率比 $C_{\Sigma xi}$.

结合式(3)(7)(8)(9)(10)(11)(12)及上面的 $C_{\Sigma xi}$, 得总压下挠度的数值积分计算式为:

$$\begin{cases} \delta_{\Sigma} = \frac{M_t l^2}{3 k^2 EI} + \left[\frac{(k-1) l^2 C_t}{n k^2} \right] \sum_{i=0}^n C_{\Sigma xi} [1 + \frac{i(k-1)}{n}] \\ k \in (1, M_s/M_t) \end{cases} \quad (13)$$

1.2 初始挠度计算

参看图 1, 校直过程梁中点位置变化情况为 $a \rightarrow b \rightarrow c$. 若卸载后, c 点与 o 点重合则工件被校直.

此时残留挠度 δ_c 应与初始挠度 δ_0 相等,有:

$$\delta_0 = \delta_c = \delta_\Sigma - \delta_f \quad (14)$$

其中卸载回弹挠度根据材料力学弹性挠度公式计算:

$$\delta_f = l^3 F / (6EI) \quad (15)$$

将式(11)代入上式有:

$$\delta_f = kM_t l^2 / (3EI) \quad (16)$$

2 自动精密校直的校直行程计算方法及其 MATLAB 程序设计

2.1 自动精密校直的校直行程计算方法

自动精密校直的实用情况是对一批经历了相同加工过程的同种工件进行集中校直.一方面要求校直精度高,通常工件初始挠度不超过 0.5 mm,校后要求挠度小于 0.05 mm;另一方面要求校直机的生产节拍快,效率高.为满足上述要求,本文提出通过建立高精度的初始挠度与校直行程对应数值(“ $\delta_0 - \delta_\Sigma$ ”)插值表的方法解决自动精密校直机校直行程确定的问题.

“ $\delta_0 - \delta_\Sigma$ ”插值表的计算:首先,由材料屈服极限 σ_t 、弹性模量 E 值(由于手册所列 σ_t 和 E 为单向拉伸情况下的实验值,与弯曲情况的实际值有所不同,因此需要在一批工件校直前先取几根作试验,由试验数据修正 σ_t 和 E .)及工件截面尺寸参数,计算 M_t 、 M_s .其次,根据工件初测情况选定可能的几种支距.对于每一支距 l ,设定系列值 $\{k_j | 1 \leq k_j \leq M_s / M_t\}$,由式(13)计算校直行程的相应系列值 $\{\delta_{\Sigma j}\}$;再由式(16),计算卸载弹复挠度的相应系列值 $\{\delta_{fj}\}$;将 $\{\delta_{\Sigma j}\}$ 和 $\{\delta_{fj}\}$ 代入式(14)求得对应的初始挠度系列值 $\{\delta_{0j}\}$. $\{\delta_{0j}\}$ 和 $\{\delta_{\Sigma j}\}$ 的对应系列值就形成了“ $\delta_0 - \delta_\Sigma$ ”插值表.

这样在一批工件校直前可以计算得到其“ $\delta_0 - \delta_\Sigma$ ”插值表,开始校直后,对于具体工件由测得的实际挠度对应于插值表中的初始挠度进行插值得所需的校直行程,按此值控制压头行程进行校直.

上述校直行程计算方法其主要计算集在校直操作之前完成,具体工件校直时只需根据测得的初始挠度按插值表进行插值就可得到所需的校直行程,大大缩短了每次校直的时间,因而适合于自动精密校机的高生产节拍要求.

当然,校直效率与计算精度紧密联系,只有“ $\delta_0 - \delta_\Sigma$ ”插值表的精度高才能实现以最少的反弯次数(甚至只需一次)达到要求的校直精度.本文将通过

对实例的有限元模拟及校直实验研究验证上述计算公式的精度.

2.2 校直行程计算的 MATLAB 程序设计

基于上述计算方法本文运用 MATLAB 语言^[4]编制了用于圆形、矩形、菱形和六角形四种常见截面工件的校直行程计算程序.

当用户按提示输入工件的截面形式及相应的材料、尺寸参数,并按需要的数据密度输入力参量矩阵后,程序自动完成所有的运算并最终输出校直行程和初始挠度的对应系列值 $\{\delta_{\Sigma j}\}$ 、 $\{\delta_{0j}\}$ 及直观的“ $\delta_0 - \delta_\Sigma$ ”关系曲线.

本程序由校直计算主程序 JZJS.m 和数值积分函数子程序 SZJFfun.m 组成.主程序在运行过程中调用函数子程序,用于计算与每一 k_j (由前述 $1 \leq k_j \leq M_s / M_t$) 对应的式(13)中的数值积分部分,函数的输出 $u_j = (1/n) \sum_{i=0}^n C_{\Sigma xi} [1 + i(k_j - 1)/n]$. 本程序经调试其计算精度达到 0.01%.

3 实例计算与有限元模拟分析及校直实验结果的比较及结论

对某矩形截面试件开展了校直实验研究,同时运用上述校直压下量计算的 MATLAB 程序进行了计算并运用 ANSYS 有限元软件进行了模拟分析^[5].研究对象为:矩形截面试件若干,尺寸 $28 \times 28 \times 500$ mm,材料 45# 钢正火,初始单弧度弯曲且其最大弯曲位于中点附近,两支承间距 600 mm,压点位于两支点正中.其中校直计算程序和有限元模拟分析采用的材料参数:弹性模量 $E = 1.95 \times 10^{11}$ Pa,屈服极限 $\sigma_{t3.85} \times 10^8$ Pa(注:由于工件校直是在集中力作用下发生弯曲,其实际 E 、 σ_t 值与手册给出的单向拉伸情况下的数值有所不同,本文采用的数值是经弯曲实验测定的).其实验与程序计算和有限元分析的结果列于表 1,并根据表 1 的数据作出如图 4 所示的三条曲线,以便更直观地进行比较和分析.

表 1 及图 4 中各符号的含义: δ_0 —实验校直量,亦为 MATLAB 程序计算和 ANSYS 有限元计算时的工件初始挠度值; $\delta_{\Sigma 1}$ —与 δ_0 对应的实验校直行程; $\delta_{\Sigma 2}$ —与 δ_0 对应的 MATLAB 程序计算的校直行程; $\delta_{\Sigma 3}$ —与 δ_0 对应的 ANSYS 有限元分析结果的校直行程.

由上述表 1 及图 4,有如下结论:

表 1 试件校直实验与 MATLAB 程序计算和 ANSYS 有限元模拟分析结果列表

序号 项目	I	II	III	IV	V	VI
$\delta_0(\text{mm})$	0.09	0.16	0.28	0.41	0.73	0.93
$\delta_{\Sigma 1}(\text{mm})$	2.67	2.93	3.05	3.41	3.97	4.42
$\delta_{\Sigma 2}(\text{mm})$	2.537	2.701	2.91	3.11	3.505	3.74
$\delta_{\Sigma 3}(\text{mm})$	2.618	2.723	2.902	3.067	3.472	3.72

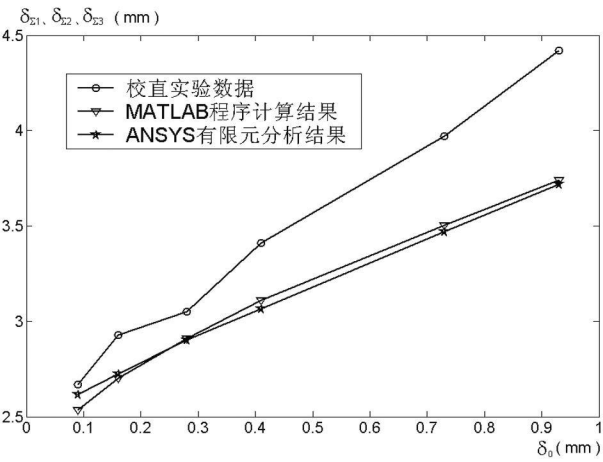


图 4 试件 MATLAB 程序计算、ANSYS 有限元模拟分析及校直实验结果的比较图线

•对于相同的校直量, MATLAB 程序计算的校直行程小于其实验数值;且随着所需校直量的增大,计算值与实验数值的误差也有增大的趋势. 其原因

是理论分析时所做的各假设严格来说只与初始为直梁的情况符合,用于初始具有较大弯曲变形的梁则会带来较大误差.

•校直行程计算 MATLAB 程序的计算结果与 ANSYS 有限元模拟的分析结果之差仅在 1% 左右,说明本程序的求解精度完全不输于有限元计算的精度.同时本程序与有限元分析相比具有输入简单,操作方便灵活、计算速度快等优点,因而更适合于自动精密校直工艺要求.

•该 MATLAB 程序计算的校直行程数值与实验结果的误差不大,尤其对于自动精密校直要求的小校直量(小初始挠度),其误差在 10% 以内.可见该方法及程序能有效地用于工件的高精度压力校直.

参考文献:

[1]崔甫.校直原理与校直机械[M].北京:冶金工业出版社,2002.

[2]B John. Modern straightening machines for pipe, tubes, bars and sections[J]. Iron and Steel Engineer, 1997, (11): 38—45.

[3]朱伯馥.弹塑性力学[M].北京:科学出版社,1990.

[4]清源计算机工作室, MATLAB6.0 基础及应用[M].北京:机械工业出版社,2001.

[5]易日.使用 ANSYS6.0 进行静力学分析[M].北京:北京大学出版社,2002.

A Method of the Caculation of Straightening Stroke for Automatic Precise Pressure Straightening

CHEN Zhi-xian¹, CHEN Hui¹, YANG Kai²

(1. School of Mechanical and Electrical Eng., East China Jiaotong Univ., Nanchang 330013;
2. Moud Factory, JiangLing Motors Corporaxion, Ltd., Nanchang 330001, China)

Abstract: The flexural mechanical feature of metal workpiece during the straightening process are analysed and a relation among deflection, load and curvature is established by the application of the elastic—plastic mechanics. Based on that, a method of establishing a high precise interpolation table between the initial deflection (δ_0) and straightening stroke (δ_{Σ}) is put forward for the determine of the straightening stroke of a automatic precise straightener, and a MATLAB program for the straighten—ing stroke's calculating of common section workpieces is designed. By compairing the results of the MATLAB program with those of the FEA and with those of the st'ighthening experiments of some examples, it is validated that the precise of this method is high and so the method proposed in this paper can meet the demands of the automatic precise pressure straightening technology.

Key words: automatic precise pressure straightening; straightening stroke; elasticity & plasticity; finite element analysis