

影响机械加工精度的几种因素

朱政红, 张春伟

(合肥工业大学 机械制造与汽车学院, 合肥 230009)

摘要: 为了提高工件的加工精度, 通过分析传统机械加工方法、数控加工方法、特种加工方法加工精度的主要影响因素, 总结出一些常见的影响加工精度的因素, 从而可以有针对性地制定提高加工精度的措施。

关键词: 加工精度; 传统加工方法; 数控加工方法; 特种加工方法

中图分类号: TH161; TG506

文献标识码: A

The Factors Influencing the Machining Accuracy

ZHU Zheng-hong ZHANG Chun-wei

(School of Mechanical and Automotive Engineering Hefei University of Technology, Anhui 230009, China)

Abstract In order to improve the machining accuracy by analyzing the influencing factors about traditional machining methods, numerical machining methods and non-traditional machining methods. Conclusions about the influencing factors are made, thereafter measures about improving the machining accuracy are offered correspondingly.

Key words the machining accuracy; traditional machining methods; numerical machining methods; non-traditional machining methods

0 引言

在机械加工中, 把尺寸精度、宏观几何形状精度和位置精度统称为加工精度 (Δ), 即零件加工后的实际几何参数与理想几何参数的符合程度。在这个定义中理想几何参数对于尺寸而言指的是图纸中尺寸的平均值, 对于形状和位置而言, 则是绝对正确的形状和位置, 如绝对的圆和绝对的平面等。在实际的加工过程中总希望实际值愈接近理想值越好, 这样加工精度就愈高, 但是加工过程中由于多种原因理想值与实际值总会有不同程度的偏差, 这个偏差叫做加工误差 (δ)。并且从使用的角度和制造的经济性考虑, 也没有必要使零件制造的特别精确, 只要保证零件加工后的加工误差小于加工精度就可以了, 即 $\delta < \Delta$ 。

1 传统机械加工方法误差

在传统的机械加工方法中, 可以把普通机床、夹具、刀具、工件和操作者看到一个大的加工系统, 其中

机床、夹具、刀具和工件组成的一个子系统叫做工艺系统。在这个大的系统中, 每个环节在加工过程中产生误差都会对零件的加工精度产生影响。

1.1 工艺系统误差

1.1.1 机床的几何误差

工件的表面都是通过刀具与工件的合成运动形成的, 而刀具与工件都是安装在机床上的, 因此, 工件的加工精度在很大程度上取决于机床的精度。对工件的加工精度影响较大的主要有: 主轴的回转精度、导轨误差和传动链的误差, 这些影响因素随着机床的磨损其精度不断下降, 从而造成加工零件精度的下降。

主轴回转精度: 主轴回转精度是指主轴各瞬间的实际回转轴线相对于平均回转轴线的变动量。它包括主轴的径向圆跳动、轴向窜动和角度摆三种基本形式, 如图 1 所示。产生主轴径向圆跳动的主要原因有主轴几段轴颈的同轴度误差; 轴承本身的各种误差; 轴承之间的同轴度误差; 主轴挠度等。产生轴向窜动的主要

原因是主轴轴肩端面 and 轴承承载端面对主轴轴线有垂直度误差。主轴角度摆动产生的原因主要是主轴的刚度和在加工过程中产生的热变形。

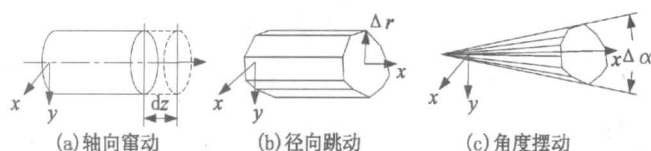


图 1 主轴的回转精度

导轨误差: 导轨是机床上确定各机床部件相对位置关系的基准, 也是机床运动的基准, 因此机床导轨的误差对机床精度的影响极大, 从而影响工件的加工精度。导轨误差主要有三个方面: 在水平面上直线度; 在垂直面内的直线度; 前后导轨的平行度。

导轨在水平面上的误差 (Δ_1) 对于卧式车床来说是误差敏感方向, 即加工表面的法向方向, 它所造成的工件在直径方向的误差为 $\delta_H = 2\Delta_1$; 而当导轨在垂直方向上有误差 (Δ_2), 如图 2 所示, 它所造成的工件在直径方向的误差却仅为 $\delta_V = 2(\sqrt{R^2 + \Delta_2^2} - R)$, 由于 Δ_2 很小, 所以 δ_V 也远远小于 δ_H 。对于铣削加工而言正好相反, 导轨在水平方向的误差要比导轨在垂直方向上的误差影响要小的多。从上面公式可以看出, 不同的加工方式导轨误差影响的程度是不同的。

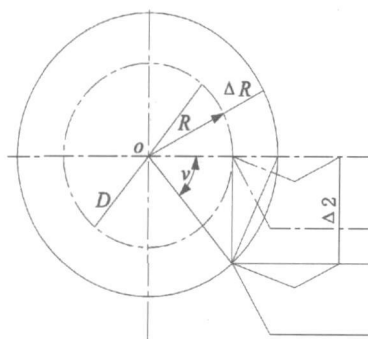


图 2 导轨垂直方向上的误差

当导轨存在平行度误差时, 在加工时刀尖的运动轨迹是一个空间曲线, 从而使工件产生形状误差。当导轨有平行度误差 Δ_3 , 工件会产生 $\delta = (H/B)\Delta_3$ 形状误差^[1]。

机床传动链误差: 在普通的机床上, 主运动、进给运动变速都是通过传动链来进行。如果在传动的过程中, 传动零件有误差 (包括制造误差、装配误差、磨损等) 就会对工件加工精度产生影响, 特别是对主运动和进给运动有严格传动比零件的加工 (如螺纹、齿轮等), 这种影响更严重, 所以传动链误差也是加工精度主要

误差来源之一。在计算传动链误差时常采用计算传动链首末传动元件的相对误差来衡量, 当传动链中的一个传动零件有误差时 $\Delta\delta_i$, 假设其他各传动零件没有误差, 则通过中间传动零件传递到末端的误差为 $\Delta\delta = K\Delta\delta_i$, 其中 K 为传动比。如果在首末传动零件之间的传动零件也有误差, 则传动件对工件精度影响的总和

$$\text{为: } \Delta\delta = \sum_{i=1}^n K_j \Delta\delta_i$$

1.1.2 刀具的几何误差

刀具作为传统机加工中的重要一个组成部分, 其静态误差和动态误差会直接导致加工精度降低。静态误差指刀具的制造误差, 对于定尺寸刀具 (如麻花钻、铰刀、镗刀、拉刀等) 其尺寸及形状精度直接影响工件的大小及形状精度。如麻花钻的直径制造误差直接复映到工件上; 拉刀制造形状上的误差直接影响被加工工件的形状; 麻花钻刃磨时切削刃不对称引起的加工表面正扩切等。而对于一般刀具 (如普通车刀、刨刀) 制造误差, 由于其加工精度由机床运动精度和工人技术水平来保证的, 所以对工件加工精度没有太大的影响。

刀具动态误差主要是由于刀具在使用过程中磨损所造成的。如果刀具的耐用度较低, 它对工件的尺寸和形状精度影响很大。如在车削一些硬度大、长轴时, 就会由于刀具的磨损而使工件呈圆锥形; 麻花钻在磨损以后, 被加工工件加工表面发生的负扩切现象等。

1.1.3 夹具的几何误差

机床夹具是机械加工工艺系统的一个重要组成部分, 是机械制造中的一项重要工艺装备。其主要作用就是保证加工工件的精度和提高劳动生产率。因而夹具精度会直接影响被加工工件的精度。

定位基准与设计基准不重合时产生的误差: 在夹具设计时, 应尽量使定位基准与设计基准重合, 这样可以避免因基准不重合而引起的误差, 但是在实际加工中有些零件如果使定位基准与设计基准重合就可能造成夹具结构复杂, 工件安装不方便, 并使加工稳定性与可靠性变差等缺陷。所以有时从多方面考虑, 在满足加工要求的前提下也采用基准不重合的定位方案, 但是必须对其进行误差校验或者提高前面工序加工精度。如图 3a 所示^[2]: 平面 F/H 为已加工面, 尺寸为 $L - \Delta L$, F 面为设计基准。如图 3b 所示的加工, 采用设计基准 F 为定位基准, 遵循基准重合原则。加工时, 铣刀相对于定位面 F 预先调定, 尺寸 l 的大小受加工误差 Δ 的影响, 尺寸误差 $\Delta l = l_{\max} - l_{\min} = \Delta$ 只要加工误差不大于尺寸公差, 即 $\Delta \leq \Delta L$, 则零件就不会成为废品。而

图 3c 所示的加工, 采用 H 面作为定位基准, 与设计基准不重合, 这时铣刀相对于定位面 H 调定, 加工尺寸 l' , 同样也存在加工误差 Δ 。工件尺寸 l 的误差 $l = l_{\max} - l_{\min} = \Delta + \Delta L$, 比基准重合时多了 ΔL , 也就是说基准不重合的误差是联系定位基准与设计基准的尺寸公差。

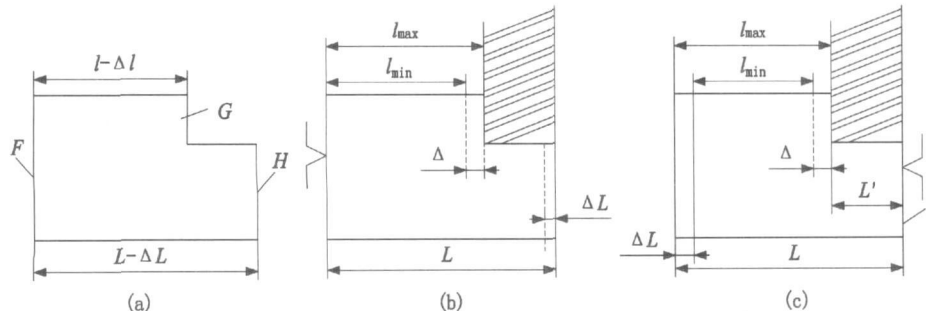


图 3 基准不重合时误差

定位副制造不准确所产生的误差: 将工件定位基准与夹具定位基准合称为定位副。则由于定位副本身的制造误差, 也会直接影响定位误差。在计算误差时, 必须考虑定位方式。如图 4 所示, 心轴采用水平放置, 工件以内孔中心 O 为定位基准, 套在心轴上 (其中心为 O_1), 铣上平面, 孔直径为 $\Phi D_0^{+\Delta D}$, 心轴直径为 $\Phi d_0^{-\Delta d}$ 。虽然理论上定位基准与设计基准重合, 但实际上由于定位副制造上的误差可能导致两者并不重合, 而是有一个偏差范围。由图可以求出其设计基准的变动范围为: $OO_{1\max} = OA - O_1A = ((D + \Delta D) - (d - \Delta d)) / 2$, $OO_{1\min} = (D - d) / 2$ 。所以由于基准发生位移而造成的误差为 $\Delta_{jv} = OO_{1\max} - OO_{1\min} = (\Delta D + \Delta d) / 2$ 。

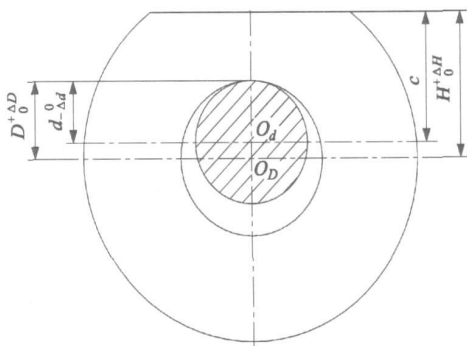


图 4 定位副制造不准确所造成的误差

如果心轴是垂直放置, 则工件与心轴可能于任意边接触, 此时的定位误差为: $\Delta_{jv} = \Delta D + \Delta d + \Delta_0$ 。夹具所引起的误差, 除上面两个主要误差原因外, 还有工件在夹具上的定位误差 (Δ_0); 因刀具相对于夹具对刀元件位置不准确而引起的加工误差, 称为对刀误差 (Δ_T); 夹具的安装误差 (Δ_A)。这些由于夹具所引起的误差从统计学的角度来看都是随机独立变量, 所以为

了保证工件的加工精度, 就应使夹具所产生的误差小于工件公差, 即 $\sum \Delta = \sqrt{\Delta_D^2 + \Delta_A^2 + \Delta_T^2 + \Delta_{jv}^2 + \Delta_i^2} < T$ 。但是考虑到实际加工要求, 如果夹具所占的误差太大, 那么留给补偿其它加工误差就小, 所以夹具总误差一般不会超过工件公差 $1/3$ 。

1.1.4 工件的误差

在机械加工的过程中, 由于工件会受到诸如切削力、夹紧力、重力等力作用和热作用而引起工件变形, 从而破坏了刀具与工件原来正确的位置, 使工件的加工精度下降。

受力变形: 工件受到力的作用会产生相应的变形来平衡这部分力, 从而使工件的形状发生了变化。如图 5 所示, 在车削细长轴时, 采用两顶尖装夹方式, 由于工件中间变形最大, 从而使中间部分背吃刀量最小, 工件加工后的形状成了圆鼓形, 造成工件圆柱度误差。

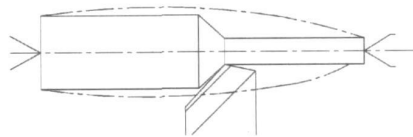


图 5 工件受力变形

切削力的变化引起的误差: 在切削的过程中, 工件受到变力, 例如切削余量的不均匀、材质的不均匀等因素影响也会引起工件变形发生变化, 从而使工件加工精度下降。如图 6 所示, 毛坯理想状态是圆的, 但是毛坯主要是由铸造、锻造、冷轧、粉末冶金等制造方法形成的, 由于这些毛坯的制造精度较低使毛坯有可能是非圆的, 这样在加工过程中, 背吃刀量就是变化的, 切削力也随着变化, 切削变形量也随着变化的。这种由于毛坯的形状误差导致加工工件的形状有误差的现象叫做毛坯误差复映现象, 用误差复映系数 $\varepsilon = \Delta_T / \Delta_{\text{毛}}$ 来衡量。一般说来 ε 是个小于 1 的数, 这就表明加工工序具有自动修复的能力。工件经过多道工序以后, 由于切削力的变化引起的误差就变得比较小了, 即总

误差复映系数 $\sum \varepsilon = \prod_{i=1}^n \varepsilon_i$ 。

热变形引起的误差: 在加工的过程中, 会伴随着热的产生, 这些切削热所引起的温度上变化对工件精度影响比较大, 特别是在精密和大型工件的加工中就显得尤为突出。当工件均匀受热时, 工件处于热平衡状态, 这时工件受热变形量可有以下式来估算: $\Delta L = \alpha L \Delta \theta$

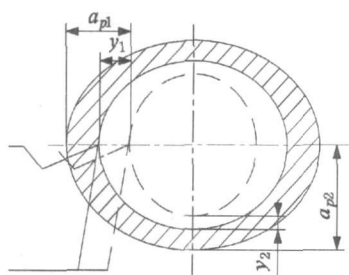


图 6 毛坯复映误差

表示工件的热膨胀系数; L 表示工件的长度; $\Delta\theta$ 表示温升。当工件受热不均匀时, 如在铣削、刨削、平面磨削加工时, 由于是单面加工, 因而上下表面之间就会形成温差 $\Delta\theta$ 导致工件向上凸起, 如图 7 所示, 加工完毕后, 当上下表面之间冷却时, 凸起部分就会形成一个凹坑, 从而形成几何误差, 对于凸起量根据图 7 可以用公式 $f = \frac{\alpha L^2 \Delta\theta}{8H}$ 来表示。由这个公式可以看出, 工件凸起量随工件的长度增长而呈平方级增长, 而已工件的厚度成反比, 一般在加工工件时, H 、 α 、 L 都是定值, 所以要减少工件误差就要设法减少上下表面的温差。

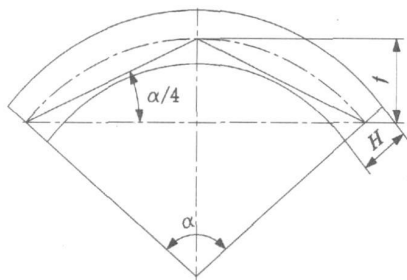


图 7 工件受热变形误差

在实际的加工中, 不仅仅工件会受力变形, 受热变形, 工艺系统的其它组成部分也会发生这种变形。如龙门铣床, 龙门刨床刀架横架, 由于主轴箱或刀架的重力而产生变形; 镗床的镗杆自重下垂变形; 摇臂钻床的摇臂在主轴箱自重下的变形等都会造成加工误差。所以在计算加工误差时, 要综合考虑机床、刀具、夹具、工件的变形情况, 这样才能得出比较符合实际情况的结果。

1.2 人的因素引起的误差

普通机床都是靠工人来操纵和控制的, 所以人在加工的重要作用是不容忽视。由于工人的技术水平不高或其它因素(如情绪、健康等)所造成的工件精度不够甚至是报废现象在实际生产也是比较常见的。

1.2.1 调整误差

在机械加工的每一个工序中, 总是要对工艺系统进行各种调整工作。由于调整不可能绝对准确, 因而

也会产生调整误差。常见的调整误差有两种基本方式: 试切法调整; 调整法调整。

试切法调整: 在单件小批生产中, 通常采用试切法调整。引起这种误差的主要因素有进给机构的位移误差和最小切削层厚度的限制。在进给机构位移误差中由于静摩擦力的存在, 特别是低速进给时, 实际进给量总小于理论进给量, 例如在 CA6140 车床中, 横向进给一小格, 刀架应向前走 0.02mm, 但是实际上刀架向前走的距离小于 0.02mm, 有经验的操作工总是边进给边用手敲击手轮, 或者快速退刀, 然后再快速进给到指定的手轮刻度值; 在精加工时, 试切的最后一刀余量往往很小, 切削刃只起到挤压作用而不起切削作用。但在正式切削时深度较大, 切削刃不打滑, 就会多切工件。因此, 工件尺寸就与试切时不同, 形成工件的尺寸误差。技术熟练的工人在精加工时总是将刀进给到试切削表面时, 根据机床丝杠的间隙和经验回退半格, 这样就会减少正式切削时深度增大的误差。

调整法调整: 影响调整法因素主要有定程机构调整; 用样件或样板调整; 抽样件数的影响。定程机构对调整精度的影响主要取决于定程机构的制造精度、刚度、灵敏度等。用样板或样件调整时的精度主要取决于样板或样件的制造、安装和对刀精度。例如, 在卧车精加工时, 为了使刀尖与工件的轴线在同一水平上, 操作工在对刀时, 根据经验会故意使刀尖点略高于轴线, 这样在加工时, 刀尖受到主切削力的作用下会下降, 从而达到刀尖与工件轴线水平的目的。

1.2.2 装夹误差

装夹误差包括刀具的装夹误差、工件的装夹误差、夹具的装夹误差等。在卧式车床的加工中, 如果操作工在对刀时, 刀尖没有对准轴线就会形成双曲线形状误差, 由于是在误差非敏感方向上有误差, 所以尺寸误差并不太大。夹具的装夹误差除了定位误差以外, 在夹紧的过程中, 如果夹紧过大, 也会使本来已经合格的工件在装夹力的作用下发生变形, 从而引起工件的形状或尺寸误差, 即使夹紧力适当, 如果夹紧力的夹紧方向选择不当也会造成误差。

1.2.3 测量误差

加工零件是否符合图样规定的要求, 需使用适当的测量工具, 按照一定检测方法进行检验后才知道。所以量具制造精度直接影响工件的加工误差, 例如, 测量磨床磨头主轴的圆跳动时, 通常用千分表(刻度值为 0.001mm), 而如果用百分表来测量(刻度值为 0.01mm)就会存在一定的误差。测量误差除了与量具

的制造精度有关外,还于测量方式和读取方式有关。

2 数控加工误差

上述传统加工中能产生的误差在数控加工中都会产生,但是由于数控机床的制造精度、装配精度要比普通的机床要高,并且数控机床采用和普通机床不同的结构模式,例如,在机械传动机构中采用滚珠丝杠螺母副代替滑动丝杠螺母副,它提高了进给系统的灵敏度,从而避免了进给过程的爬行现象,提高了进给的定位精度,甚至有的数控机床采用了直线进给电机,从而直接取消了从动力源到执行件之间的一切中间传动环节,将进给传动链的长度缩短为零,从而大大简化了机械结构,提高了系统的速度、加速度、刚度等动态特性和控制精度;近年来,出现了一种数控机床内装式电机主轴,即主轴与电机转子合而为一,这样就完全消除了主传动链的误差,所以总体上来说数控机床加工的零件精度要比普通机床加工的零件精度要高。但是,由于数控机床比普通机床多了程序编制、输入装置、数控装置、伺服驱动及位置检测(对于半闭环或闭环系统而言)等,所以数控机床也就具有了新的误差来源。

2.1 程序编制所产生的误差

当用户将与加工零件有关的信息编制程序,通过输入装置输入到数控装置,由数控装置经过分析处理后,发出各种与加工相关的信号来控制执行部件的动作,所以程序编制的好坏直接影响工件的加工精度。造成程序编制时的误差因素很多,一般有下面两种形式。

2.1.1 数学误差

在根据零件图纸进行程序编制的时候,需要计算各个节点的坐标值,但是经常坐标值不是一个有理数,或者即便是有理数也超过计算机所能表示的范围,所以计算机常会根据特定的算法舍去一部分,这样就会造成误差。

模型误差:从实际问题转化为数学问题,即建立数学模型时,对被描述的实际问题进行了抽象和简化,忽略了一些次要因素,这样在数学模型与实际问题之间出现的误差称为模型误差。例如,在实际生产中常要求节点通过一些特殊的点,但是仅有这些点,在数控加工中是不够的,需要对其进行加密,这样就需建立一个插值函数。不同的插值函数其精度是不同的,如果采用拉格朗日插值多项式,其插值余项为^[3] $R_n(x) =$

$$\frac{1}{(n+1)!} f^{(n+1)}(\xi) W_{n+1}(x)。$$

截断误差:在数值插值的过程中,为了提高计算机运行速度,通常是采用连续迭代的方法来计算函数的值。而迭代法的基本思想是一种逐次逼近的方法,即首先给定一个比较粗糙的值,然后用同一个迭代公式,反复校正这个初值,直到满足预先给出的精度为止,这样就会出现有限迭代过程代替无限迭代的误差,即截断误差。例如,在逐点比较法直线插补算法中,当 $F_m \geq 0$ 迭代公式为 $F_{m+1} = F_m - y_e$; 当 $F_m < 0$ 迭代公式为 $F_{m+1} = F_m + x_e$, 这样 F_{m+1} 与直线的真实值就会相差一个脉冲当量。在数字积分法进行插补时,在插补器中最后仍有余数也会造成刀尖走不到预定点的情况。

逼近算法误差:常用的数控系统一般都只有直线和圆弧插补的功能,对于非圆曲线轮廓,只有用直线或者圆弧来逼近它,这样就会产生真实轮廓与逼近直线或圆弧之间的误差。例如,用等间距直线逼近非圆曲线轮廓时,如图8所示, MN 方程^[4]: $ax + by + c = 0$ $M'N'$ 的方程为 $ax + by = c \pm \delta_e \sqrt{a^2 + b^2}$, 则会产生最大误差为 $\delta_e = \frac{ax + by - c}{\pm \sqrt{a^2 + b^2}}$

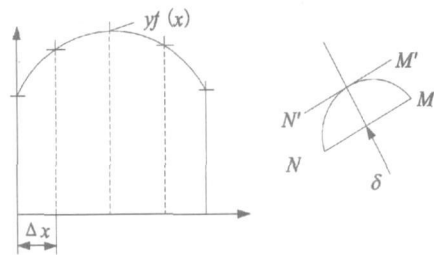


图8 等间距逼近误差

2.1.2 工艺过程误差

数控机床是通过程序来控制执行部件动作的一种高度自动化的机床,其加工工艺与加工表面形成方法上与普通机床是基本相同的,所以在程序编制的过程中加工工艺的好坏直接影响到零件的加工精度。

对图纸的尺寸标注处理不当:在尺寸标注时,尺寸公差经常不对称,如 $\Phi 60_{-0.06}^{+0.06}$, 这样在编程计算时直接用基本尺寸 $\Phi 60$ 进行计算就会发生很大的误差,必须将其处理成 $\Phi 60.03_{-0.03}^{+0.03}$, 用基本尺寸 $\Phi 60.03$ 代入进行运算才可能减少误差。

对工艺过程不太了解所造成的误差:数控机床切削过程是一个涉及面比较广的过程,它不仅牵涉到传统加工过程,而且还牵涉到 CNC 装置的硬件结构、软件结构、插补原理、补偿原理等。对任一环节不太了解都会造成加工零件的误差,甚至超差现象。例如,在数

控机床上车削螺纹时,在螺纹开始切削和切削结束部分,刀具有一个加速和一个减速过程,这样就会造成在螺纹的开始部分螺距增大,而在切削结束时螺距减小。为了避免这种螺距的误差,就要求在编制程序时,指令中螺纹的长度要比实际螺纹长度要长,即指令中螺纹的长度 = 实际螺纹长度 + 刀具导入长度 + 刀具切出长度。所以一个优秀的程序员不仅要求熟练地根据零件加工规程编制出简洁的程序,而且还应对整个切削过程有很深的了解。

2.2 伺服驱动及位置检测所产生的误差

数控进给伺服系统是一个位置控制系统,有开环进给伺服系统、闭环进给伺服系统和半闭环进给伺服系统。开环伺服系统的位移精度主要取决于步进电机的角位移精度、齿轮丝杠等传动元件的导程或节距精度以及系统的磨擦阻尼特性。由于开环进给伺服系统的位移精度较低,进给速度较低,现在已很少采用。目前比较多得采用闭环或半闭环进给伺服系统,这种进给系统的位移精度主要取决于检测装置分辨率和精度。对于比较精密的数控机床,机械传动部件的运动特性不能够忽视,特别是进给系统中低速爬行现象对数控机床的定位精度影响比较大。其机械传动进给模型简化如图 9 所示^[5] β 为传动部件的阻尼系数, K 为传动刚度, B 为执行部件, m 为执行部件的质量。设驱动件 A 以等速 $+v_1$ 运动,经时间 t 后,从动件的位移为 x , 速度为 \dot{x} 加速度为 \ddot{x} 则运动方程为:

$$m\ddot{x} + \beta(\dot{x} - v_1) - k(v_1 - x) + (F - \alpha x) = 0 - \alpha x$$

$F - \alpha x$ 为摩擦力,它由弹簧力 F 和随 B 的速度而变化的分量 $-\alpha x$ 所组成, α 为比例系数。方程的解为:

$$x = \frac{\beta v_1}{k} + v_1 t - \frac{F}{k} + e^{-\xi \omega t} (c_1 \sin \omega t + c_2 \cos \omega t)$$

其中 $\xi = \frac{\beta - \alpha}{\sqrt{km}}$ 为阻尼比, $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 为角频率, c_1, c_2 可以根据 $t = 0$ 时, $x = 0$ 来求得。这样

$$x = \frac{\beta v_1}{k} + v_1 t - \frac{F}{k} + \frac{v_1}{\omega} e^{\xi \omega t} [(2\xi - a) \cos \omega t - (1 + a\xi) \sin \omega t]$$

$$x = \frac{\Delta F}{S_1 \sqrt{km}} \quad \Delta F = F_0 - F_v$$

其中, S_1 为动、静柔度修正系数, 取为 1。将上式对时间求导, 得速度公式为:

$$\dot{x} = v_1 \{ 1 - e^{\xi \omega t} [\cos \omega t - (\xi - A) \sin \omega t] \}$$

从上式可以看出, 执行部件的运动速度包括两部分: 恒量 v_1 和振动量 $v_1 e^{\xi \omega t} [\cos \omega t - (\xi - A) \sin \omega t]$ 。振动分量小于恒定分量, x 不会为零, 如果阻尼足大, 则随着时

间的延续, 振动分量将衰减到零, 这时振动表现为过渡过程, 一段时间以后, 执行部件将按主动件的速度作匀速运动; 当振动分量不一定小于恒定分量, 则执行部件速度将会时快时慢, 甚至会出现停顿, 这便是所谓的爬行现象。从上述可以看出进给部件出现爬行现象有一个临界速度, 高于这个速度不会出现爬行现象, 低于这个速度会出现爬行现象, 这个临界速度为 $v_1 = \frac{\Delta F}{\sqrt{4\pi \xi g m}}$, 进给执行部件定位运动在接近定位点时, 要进行降速, 这时速度可能低于临界速度 v_b , 由于爬行现象将使部件不能准确地停在定位点, 因而出现定位误差。

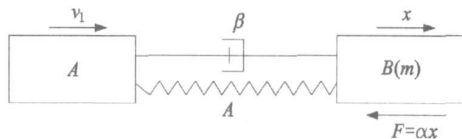


图 9 机械传动进给模型

3 特种加工误差

特种加工与上述两种加工不同, 它主要依靠电能与其它形式能的组合来加工零件。例如电能与热能的组合成电火花加工、电子束加工、离子束加工工艺; 电能、与化学能、机械能组合成电解加工、电解磨削、电铸、涂镀等; 甚至光、声能与电能组合起来形成激光加工或超声加工。由于特种加工没有传统意义上的刀具, 所以它没有明显的切削力, 因而影响其加工精度因素和传统加工方式与数控加工方式除了有一部分共性之外, 还有很大的不同。

3.1 工具电极所产生的误差

对于在加工中需要工具电极的加工, 如电火花加工、电解加工, 工件的形状是工具电极的复制, 所图 10 所示, 所以工具电极制造过程的误差或者加工过程的损耗都可对工件的尺寸精度、形状精度产生直接影响。

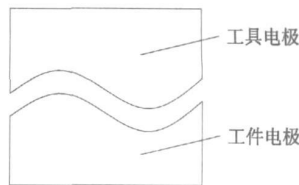


图 10 工具电极与工件电极

3.2 电解液所产生的误差

电解液的主要作用有: 与工件、工具电极组成电极体系; 控制极化, 使工件能顺利溶解; 带走热量。所以电解液一些特性的好坏, 如导电率、溶解度、粘度等, 可以直接决定加工过程能否顺利进行, 从而影响工件的

加工精度。例如,在电解加工有一种重要的现象,就是金属的钝化,不同的电解液活化钝化层的能力不同从而导致产生形状误差。如图 11 所示^[6]:图 a 中由于阴极侧面不绝缘,侧壁被杂散腐蚀成抛物线形,内芯也被腐蚀,剩下一个小锥体;而图 b 是用 NaNO_3 电解液,这样在加工时,虽然阴极表面也没有绝缘,但工件侧壁被钝化,不再扩大,所以孔壁锥度很小而内芯也被保留下来。

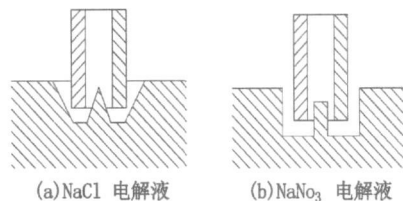


图 11 杂散腐蚀能力比较

电解液的流速及流向对加工精度的影响:电解液可以把电解过程中的电解产物冲走,如果电解液流速及流向不合理也可以使加工精度降低。如图 12 所示^[6],正向流动时电解液从阴极中心流入,经加工间隙后,从四周流出,这样在加工型孔时,电解液经侧面间隙时已含有大量氢气及氢氧化物,并且还会出现死水区,这时工件的溶解速度将低于其它部位,加工时就容易产生火花或短路,从而加工精度较低;而反向流动从型孔四周流入,从阴极中心流出,作用恰恰相反。

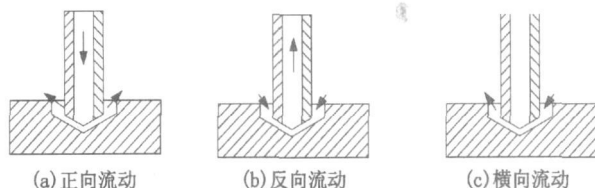


图 12 电解液的流向

电解液对加工精度的影响除了以上的主要因素外,浓度、温度、粘度、PH 值也是影响工件加工精度的重要因素。例如,浓度越高,温度越低,电解液的粘度会下降,电解液的流动性会下降,从而使加工的精度有明显的下降。

3.3 极间间隙引起误差

在电火花或电化学加工中,工具电极和工件之间存在着间隙,间隙的大小及其稳定性也会对加工精度产生影响,尤其是对于形状比较复杂的加工表面。一般来说,间隙越小,加工时仿形精度就越高,但更容易出现短路现象,有时反而会降低生产率和精度。所以不同的电解液、不同的工件所要求的最佳间隙有一个合理值,在加工中可以参照加工手册进行调整。例如在图 13 中,由于加工部位有棱角,所以棱角部位的电场强度分布不均匀,在加工的过程中工件只能加工出

以尖角顶点为圆心,放电间隙为一个半径的圆弧。

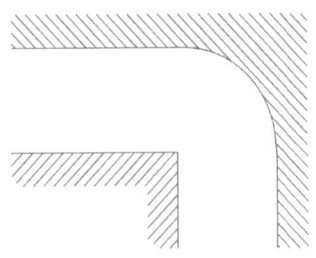


图 13 尖角变圆

3.4 电参数引起误差

影响加工精度的电参数主要包括脉冲宽度、脉冲间隔、电压、电流、电流密度等。

电压或电流是通过其类型和大小来影响加工精度的。当采用脉冲电压或电流时,一方面可以消除加工间隙内电解液导电率的不均匀化,在加工时,在阴极附近有一层氢气气泡的电解液层,由于电解液的流动,氢气气泡在电解液内的分布是不均匀的,其结果将对电解液流动的速度、压力、温度和密度的特性产生很大影响,这些特性又集中地反映在电解液电导率的变化上,造成阳极蚀除速度的不均匀,从而形成加工误差。而采用脉冲电源时,在两次加工间隙,有足够的时间使电解液混合均匀。另一方面脉冲电流加工时使阴极产生的氢气是断续的,它可以起到搅拌作用,有利于电解产物的去除。所以脉冲电流无论是从理论上还是实践上都已为国内外证实是提高加工精度行之有效的方法^[7]。

电流或电压大小对加工精度的影响是通过极间间隙来产生影响的。例如在电解加工型孔时,影响加工精度最大的是侧面间隙,如图 14 所示^[6],当采用 NaCl 作为电解液时,不容易形成钝化膜,所以工件的侧壁随着时间也不断地被溶解,从而形成一种“喇叭口”的双曲线形。其误差可计算如下:在某一状态下,进给深度为 h 时,侧壁产生的间隙为 $\Delta s = x$,在侧壁 x 外的蚀除速度为 $\eta \omega \sigma U_R / \Delta s$,对其进行积分可得, $\int dx = \int \eta \omega \sigma U_R dt$ 当 $t \rightarrow 0$ 时, $x \approx x_0$ 可得积分常数为 $C = x^2 / 2$ 这样 $\frac{x^2}{2} = \eta \omega \sigma U_R t + \frac{x_0^2}{2}$, $h = v_c t$ 代入上式可得 $\Delta s = x = \sqrt{x_0^2 + h \frac{\eta \omega \sigma U_R}{v_c}}$ 其中 $U_R = IR$ 上式中, U_R 为电解液欧姆电压降, σ 为电导率, ω 为被电解物质的电化学当量, η 为电流效率, v_c 为工具电极的进给速度。从上式可以看出电流的大小可以直接影响工件的形状精度。

(下转第 85 页)

表 3 切削不锈钢时的切削用量

工件直径范围 mm	车外圆				镗孔		切断	
	精车		粗车					
	主轴转数	进给量	主轴转数	进给量	主轴转数	进给量	主轴转数	进给量
≤ 10	1200－955	0.19－0.60	1200－955	0.07－0.2	1200－955	0.07－0.3	1200－955	
10－20	955－765		955－765		955－600		955－765	
20－40	765－480	0.27－0.81	765－480	0.1－0.3	600－480	0.1－0.5	765－600	0.1－0.25
40－60	480－380		480－380		480－380		600－480	
60－80	380－305		380－305		380－230		480－305	
80－100	305－230		305－230		305－185		380－230	0.08－0.2
100－150	230－185		230－185		230－150		305－150	
≥ 150	185－120		185－120		185－120		≤ 150	

注: 主轴转数 n (r/min) 进给量 f (mm/r)

合理选择刀具材料、车刀几何参数和切削用量至关重要, 直接影响不锈钢件的表面切削质量。不锈钢件的表面粗糙度与车刀角度、切削用量的参考关系如表 4 (硬质合金和高速钢车刀):

表 4 不锈钢件的表面粗糙度与车刀角度、切削用量的参考用量

表面粗糙度	切削速度 v /(m/s)	进给量 f /(mm/r)	刀尖圆弧半径 r /mm
$\frac{3.2}{\sqrt{}}$	<0.833	$0.1 \sim 0.15$	$0.35 \sim 0.5$
$\frac{6.3}{\sqrt{}}$	$0.833 \sim 1.67$	$0.15 \sim 0.25$	$0.5 \sim 0.85$
$\frac{12.5}{\sqrt{}}$	>1.67	$0.25 \sim 0.35$	$0.5 \sim 1$
$\frac{25}{\sqrt{}}$	>1.67	$0.3 \sim 0.5$	$1 \sim 1.5$

(上接第 82页)

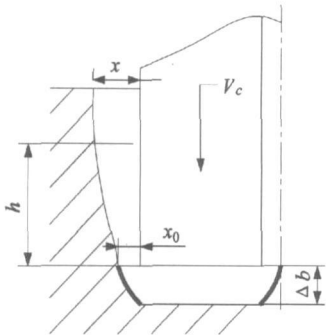


图 14 电参数对间隙影响

脉冲宽度与脉冲间隔也会对加工精度加工影响, 因而对于不同的加工要求也要采用适当的宽度和间隔。例如在线切割时, 脉冲宽度增大时, 单个脉冲能量增多, 切割速度提高, 表面粗糙度数值变大, 放电间隙增大, 加工精度有所下降。因而粗加工时取较大的的脉宽, 精加工时取较小的脉宽, 切割厚大工件时取较大的脉宽; 脉冲间隔增大时, 单个脉冲能量降低, 切割速度下降, 加工精度也有所下降。

除了以上主要的电参数外还有放电峰值电流、开路电压等也会对加工精度产生影响。

4 结论

针对不锈钢材料的特点, 通过选择合适的刀具材料, 刃磨适当的刀具几何角度, 加工中采用适合于不锈钢材料切削的切削用量可以提高切削效率; 减少刀具磨损, 降低刀具消耗费用; 同时保证良好的表面切削质量; 提高生产中的安全系数, 较好地完成不锈钢产品的

机械加工。

[参考文献]

[1] 顾崇街, 等. 机械制造工艺学 (第三版) [M]. 陕西: 陕西科学技术出版社, 1996
[2] 金福昌, 朱燕青. 袖珍车工手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005
[3] 陈宏均, 马素敏. 车工操作技能手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004
(编辑 赵蓉)

4 结论

实际在加工的过程中, 影响精度的因素很复杂, 可能几种因素交叉在一起, 就需要工艺设计人员运用一些数学的方法, 例如数学统计方法, 找出影响加工精度主要的因素, 通过调整一些工艺参数使工件的精度符合图纸的精度要求。

[参考文献]

[1] 卢秉恒. 机械制造技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005
[2] 张亮峰, 赵建树. 机械加工工艺基础与实习 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999
[3] 孙志忠, 袁慰平. 数值分析 (第 2 版) [M]. 南京: 东南大学出版社, 2002
[4] 廖效果, 刘又午. 数控技术 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2000
[5] 席子杰. 数控机床加工工艺编程与维修 [M]. 吉林: 吉林电子出版社, 2003
[6] 刘晋春, 赵家齐. 特种加工第四版 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004
[7] 丁立铭. 航空制造工程手册 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1993
(编辑 李秀敏)