

# 精密复杂零件的工艺设计过程分析

邓学忠 冉启奎

(贵州航天控制技术有限公司, 贵州 550009)



**摘要:** 针对航天控制产品精密复杂零件的工艺难点, 以该类零件的工艺设计过程为主线, 分别论述了材料定额编制、工艺路线设计以及工序设计过程中的注意事项和工艺方案设计方法, 并以实例进行了简要说明。

**关键词:** 精密复杂零件; 工艺方案设计; 工序设计

## Course Analysis of Process Design of Precision Complex Parts

Deng Xuezhong Ran Qikui

(Guizhou Aerospace Control Techology Co., Ltd., Guizhou 550009)

**Abstract:** In this paper, with regard to the difficulties to process the precision complex parts of aerospace control products, it discusses the material quota preparation, process routine design, attentions required during process design, and process scheme design method on the basis of the course of process design of those parts. And also, it takes examples to explain them.

**Key words:** precision complex part; process scheme design; process design

### 1 引言

航天控制系统相关产品所需的小型精密复杂的零件较多, 这些零件具有以下特点: 零件表面及整体结构复杂、壁薄、刚度低; 零件的制造质量要求高, 尺寸精度、粗糙度、形位公差及特种技术条件等要求十分严格; 使用的材料种类多, 难加工材料多, 并广泛采用热处理及表面处理。对于这些精密复杂零件, 工艺设计是否合理, 工艺措施是否得当, 直接决定零件的加工质量和进度。

零件形状心中有数。对于由多种表面组成的复杂零件, 应注意分析各表面之间的连接形式和相互位置关系; 对于特形表面应建立该面的数学模型, 便于数控编程; 对于刚性差的薄壁零件, 应从材料和壁厚等多方面分析由切削力和夹紧力可能引起零件变形的大小; 对于复杂零件应充分考虑每道工序的装夹定位基准; 对于精密尺寸应考虑设备能力及测量手段和测量能力, 并分析其在装配中的作用及对产品性能的影响; 对于设计图纸中的技术条件及特殊要求要做到心中有数。

### 2 设计图纸分析

在进行工艺设计之前, 必须彻底消化设计图纸, 设计图纸的每一条线所表示的面都要分析清楚, 做到

### 3 主要材料定额的编制

在精密复杂零件主要材料定额的编制过程中, 应充分考虑以下几个方面: 根据零件各加工面间的相互

作者简介: 邓学忠 (1970-), 总工艺师, 机械设计和制造专业; 研究方向: 精密数控加工技术和精密装配调试工艺。

收稿日期: 2011-03-31

关系及材料最省原则确定毛坯形状和最大规格尺寸。零件毛坯是采用棒料、板料或者型材,应根据零件形状、加工成本及材料成本综合考虑。为节省装夹料头材料,一般 $\Phi 50\text{ mm}$ 以下规格材料推荐采用加工中切断;对于热处理有磁性能要求的磁性材料和热处理后有硬度要求且不能直接在零件上测试硬度数值大小的,应考虑预留热处理样件的胚料;对于板料制件及加工中易变形零件应避免出现剪切应力;有些精密零件为保证加工精度应充分考虑是否需留装夹工艺柄;下料尺寸应考虑到生产投入量,下料尺寸能加工零件数不能超过生产投入量;材料的质量标准应符合设计图纸要求。

## 4 工艺方案设计过程

工艺方案的设计是工艺设计过程的关键步骤,常需要进行方案的论证、对比与分析。正确、合理的工艺方案,应满足以下要求:保证产品质量,符合设计图提出的全部技术要求;保证符合要求的劳动生产率;保证加工成本的经济和合理性。质量、生产效率和经济性是制定工艺过程所必须满足的技术和经济要求;另外,还必须重视改善劳动条件,保障生产安全。

### 4.1 机械加工工序安排顺序及原则

主要遵循先粗后精的原则,即粗加工→半精加工→精加工,最后安排低粗糙度表面的超精加工工序。

粗加工阶段:主要是去除各加工表面的大部分余量,并加工出后续工序用的主要定位基准。

半精加工阶段:精度要求不高的表面可加工到最终尺寸,并为精密尺寸表面再次除去余量,为精加工做准备。

精加工阶段:除个别需要超精加工或由热处理、表面处理保证的最终尺寸外,其余全部尺寸和技术要求均应满足设计图纸要求<sup>[1]</sup>。

### 4.2 热处理工序安排原则

热处理工序根据不同的技术要求安排的工序位置也不一样。

调质处理:能淬透的小规格毛坯,可在毛坯时进行调质处理,不能淬透的较大零件,一般在粗加工后安排调质处理。

淬火处理:一般安排在精加工之前进行,高频淬火等高硬度淬火应安排在磨削加工之前。

消除应力时效:易变形零件和精密零件,一般都要安排多次去应力时效,该工序对精密不易变形零件一般安排在粗加工后,对于易变形零件,在每道去除大余量工序后均应安排消除应力时效工序。铸件毛坯出炉后也应安排去应力时效工序。

稳定处理:易变形零件在精密加工定位基准面后精加工之前应安排稳定处理,精密零件在精加工之前安排稳定处理,有些零件为了稳定精加工尺寸,在精加工后还要进行稳定处理。

真空(或氢气)退火:对于有磁性能要求的零件,一般要采用真空或氢气退火,切削热会影响零件的磁性能,该工序一般安排在余量不大的精加工之前。

热处理制度很多,不可能一一举例,热处理工序位置安排总的原则是根据热处理后对机械加工性能的影响程度和技术条件要求,适当安排热处理工序的位置。

### 4.3 表面处理工序安排原则

表面处理为了改善零件表面的耐蚀、耐磨和导电、导磁、导热等物理性能而采用化学方法处理,对零件表面保护的处理方式。表面处理工序一般安排在精加工尺寸之后,有些零件要求精加工尺寸无表面保护层,则应将表面处理工序安排在精加工之前。有些低粗糙度零件表面处理后还要进行珩磨、抛光等超精加工。

## 4.4 工艺方案设计时应考虑的影响因素

### 4.4.1 工艺装备对工序安排的影响

设备性能对工序安排的影响:针对不同的设备,工序安排可能会大不一样,如可以将普通机床几道工序完成的工作量在数控机床上一道工序完成,有些普通机床不能完成的工作到这些设备上可能轻而易举。不同的机床性能,工序安排也会不一样,如三轴加工中心,仅能对一个面的多组尺寸一次装夹完成,而五轴加工中心就能实现立卧转换加工,可以实现两面以上的多组尺寸的一次装夹完成,对一些有不同面间尺寸相互位置精度要求较高的零件(如陀螺框架和惯组壳体等),五轴加工中心显得尤为重要,在工序安排过程中,应充分利用现有设备性能,在设备能力允许的前提下,尽量采用先进设备,减少工序数量,降低

工艺成本。

工装夹具对工序安排的影响：不同的工装夹具对工序安排也会有很大的影响，如采用钻模，可将原来只有铣工完成的工作量改为钳工；采用专用工装，可将铣工或镗工较难完成的不在回转中心的精密外圆或精密孔的加工改为车工加工；利用 ITS 工具系统精密定位原理，采用 EROWA 工具系统，可使普通机床完成五面加工，使普通机床完成原来不能完成的不同面间高精度尺寸或位置公差精密加工，还可根据 EROWA 工具系统高精度重复定位和多个夹具互换精度保持不变的功能，改变工序安排，可使一个零件一次装夹后，在多个机床上加工不同的加工内容，实现多工种或多道工序一次装夹完成。

#### 4.4.2 表面间位置尺寸及形位公差标注方式的影响

对于形位公差要求较小，位置尺寸精度高的不同表面，为减少安装引起的误差，应尽量安排一次装夹完成。对于不能一次装夹完成的，应先加工出基准表面，并加严公差，再以此基准表面定位或找准该基准表面再加工出其它表面。如有位置度要求的孔系加工，一般安排在位置度基准表面全部完成之后进行。

#### 4.4.3 零件材料及壁厚对工序安排的影响

零件材料性能对工序安排有一定程度的影响，如有色金属和硬度较低的钢件，一般不采用磨削加工，而如杉钻磁钢等脆性材料切削加工一般只能采取电加工和磨削，不能采用车、铣等切削加工，而不能导电的材料不能采用电加工等。对于薄壁易变形零件，应多次安排去应力时效和稳定处理工序，除此之外，在半精加工阶段和精加工阶段，不能一次直接加工到尺寸，为减少装夹及加工变形，在同一加工阶段也应安排多次反复去余量工序。

#### 4.4.4 产品生产量对工序安排的影响

产品的生产量对工序安排和工艺装备的配备有一定的影响，在小批量试制加工阶段，工艺路线相对较短，工艺装备无特殊专用装备，一般在现有的装备条件下，自制二类工装完成产品，进入批量生产阶段，应以提高生产效率为前提编制工艺路线，一般配备专用工艺装备，工艺安排更细。

#### 4.5 辅助工序（或工步）的内容和安排

辅助工序（或工步）是指不直接加工，也不改变工件尺寸和性能的工序（或工步），这些工序对保证

质量，尤其是使用贵重材料的精密零件的质量起着相当重要的作用。

检验工序。有些关键并难以控制的工序，在每件零件加工后，均安排检验工序，然后才继续加工，有些零件根据技术条件或装配需要，还要安排无损探伤，检查气密性等特种检验工序，无损探伤工序一般安排在毛坯时进行，检查气密性等工序根据加工内容安排工序位置，一般安排在精加工后或需要检查的部位已加工出来之后<sup>[1]</sup>。

去毛刺工序。一般安排在可能产生毛刺而在设备上又不能直接去除的工序之后（如铣工之后）。

清洗。一般作为工步安排在工序之后，检验之前。

防锈。精密零件许多需要防锈，有些采用油封防锈，一般作为工步安排在检验工序之后，有些采用漆封防锈，一般作为工序安排在表面精加工之后（如定子外圆磨削后）。

其它特殊需要的内容。如退磁，称质量等特殊要求，这些一般作为工步安排在精加工之后。

### 5 工序设计过程及内容

拟定完零件的工艺路线后，只是从总体上初步确定了加工工序及其顺序和数目，工艺方案基本确定，在编制工艺规程过程中，大量的、细致的工作是填写工序卡片。工序设计就是要详细地确定每道工序的具体内容（工步的内容及次序），进行必要的分析和计算，包括确定工序加工余量；计算工序尺寸及极限偏差；选择机床设备和工艺装备，确定测量方法及加工测量环境等各项工艺参数。设计过程流程图见图 1。

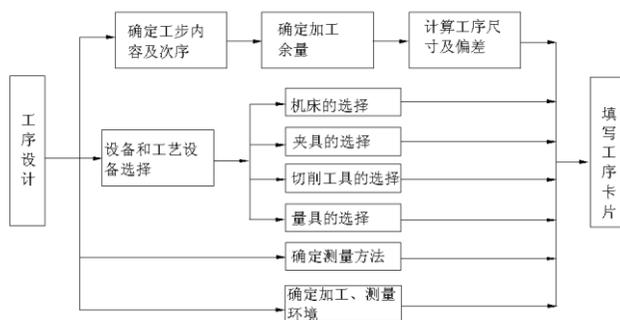


图 1 工艺设计过程流程

#### 5.1 工步内容及工步顺序的确定

工步内容就是每一工步所能加工的内容。工步顺

序的确定要注意以下原则：工步顺序的确定要有利于每一工步尺寸的保证和测量；工步顺序的确定要使加工余量逐层去除，即外形表面由外向里，内腔表面由里向外；相互位置公差要求较严的尺寸表面应要求一次装夹完成。

## 5.2 确定加工余量及工序尺寸和偏差的计算

### 5.2.1 确定加工余量

工序加工余量的大小，应当使被加工表面经过本工序加工后，不再留有上一工序的加工痕迹和缺陷。在确定加工余量时，应考虑以下几个方面因素：前工序表面质量，在前一工序加工后，表面粗糙度的最大高度和表面缺陷层的深度，应在本工序加工时切除；前工序加工的尺寸公差；前工序的位置关系误差；本工序的安装误差。

确定加工余量的方法有分析计算法、查表修正法、经验估算法三种。分析计算法是应用理论公式，分析影响加工余量的诸因素并进行计算来确定工序余量。该方法计算十分烦琐，一般只在大批量生产中某些重要工序中运用；经验估算法是依靠工艺人员的工作经验，采用类比法确定工序余量，该方法多用于单件小批量生产中。查表修正法一般是按手册资料的统计数据来初步确定工序余量，再结合实际生产中热处理变形等诸多因素的影响进行修正来确定工序余量，这种方法应用较广泛。

### 5.2.2 工序尺寸和公差计算

一般情况下，加工某表面的最终工序尺寸及公差可直接按零件图的要求来确定，中间工序的尺寸则是下道工序尺寸加上或减去工序余量确定的。关于工序尺寸的公差，通常最终工序尺寸的公差就是设计图规定的公差，中间工序尺寸的公差，一般可选定为该加工方法的经济加工精度，但在确定中间工序尺寸公差时，应注意以下几点：作为后续工序定位基准的表面，为保证工件有较高定位精度，一般要加严公差在 IT9 以内；对于有镀层或渗碳、渗氮等表面在处理前的工序尺寸公差，要同处理部门技术人员共同确定；超精加工余量往往很小，有时可利用前道工序公差上下差增大或减小留余量。

某些设计图上的位置尺寸及公差，不能直接保证，只能通过保证其它尺寸间接保证该尺寸，为保证该尺寸，就涉及到尺寸链的换算问题。在复杂零件工

艺设计时，工艺尺寸链的计算用得较多，为准确换算，应注意以下几个问题：准确确定封闭环。封闭环是指在加工过程中按零件加工顺序“自然得到的”，是间接保证的尺寸。环的公差等于所有组成环的公差之和，由于封闭环有此特性，当设计图中有几个尺寸可作为间接保证的封闭环时，应以公差最大的尺寸作为封闭环。按设计图中工艺确定的封闭环公差与某组成环公差差距不大时，为保证封闭环，该组成环不能完全按设计图公差要求，应加严公差。准确判定增环、减环。若增环、减环判定不正确，工艺尺寸链的计算必然错误。

### 5.2.3 工艺尺寸链的计算示例

以某产品多工序间长度尺寸链计算为例，简要说明工艺设计过程中保证 10 工序 ( $15 \pm 0.01$ ) mm 尺寸。06 工序该长度尺寸为 ( $15.1 \pm 0.01$ ) mm，在保证 ( $15 \pm 0.01$ ) mm 尺寸的同时，保证最终尺寸  $13.8^{+0.1}_0$  mm 和  $15.4^{+0.1}_0$  mm，分别为 05 和 06 工序计算另一长度尺寸公差进行的尺寸链计算，具体如下：

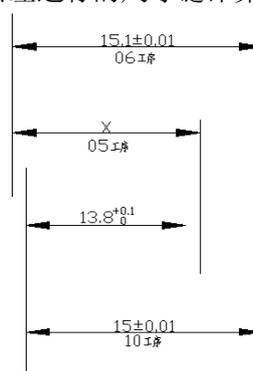


图 2 05 工序尺寸链的计算

05 工序尺寸链的计算见图 2。在此尺寸链中， $13.8^{+0.1}_0$  mm 为间接保证尺寸，故  $13.8^{+0.1}_0$  mm 为封闭环， $X$  及 ( $15 \pm 0.01$ ) mm 为增环，( $15.1 \pm 0.01$ ) mm 为减环。由尺寸链计算方法可得出：基本尺寸： $13.8 = X + 15 - 15.1$ ，则  $X = 13.9$  mm，上偏差： $0.1 = X_{上} + 0.01 - (-0.01)$ ，则  $X_{上} = +0.08$  mm，下偏差： $0 = X_{下} + (-0.01) - 0.01$ ，则  $X_{下} = +0.02$  mm，由此得出  $X$  尺寸及公差为  $13.9^{+0.08}_{+0.02}$  mm。

06 工序尺寸链的计算见图 3。在此尺寸链中， $15.4^{+0.1}_0$  mm 为间接保证尺寸，故  $15.4^{+0.1}_0$  mm 为封闭环， $X$  及 ( $15 \pm 0.01$ ) mm 为增环，( $15.1 \pm 0.01$ ) mm 为减环，由尺寸链计算方法可得出：基本尺寸：

$15.4=X+15-15.1$ , 则  $X=15.5\text{mm}$ 。上偏差:  $0=X_{上}+0.01-(-0.01)$ , 则  $X_{上}=-0.02\text{mm}$ 。下偏差:  $-0.1=X_{下}+(-0.01)-0.01$ , 则  $X_{下}=-0.08\text{mm}$ 。

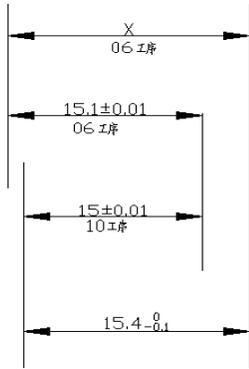


图3 06 工序尺寸链的计算

由此得出 X 尺寸及公差为  $15.5^{+0.02}_{-0.08}\text{mm}$ 。

### 5.3 设备和工艺装备的选择

#### 5.3.1 机床设备的选择应考虑的因素

- a. 机床的性能应能加工所有的工步内容;
- b. 机床的工作精度应适应或高于工序要求尺寸精度;
- c. 机床工作区的尺寸应和工件的轮廓尺寸相适应, 机床的功率与刚度和工序的性质相适应;
- d. 充分利用本单位现有设备, 并考虑每台设备任务的均衡及生产能力的大小。

#### 5.3.2 夹具的选择

在精密加工中, 必须尽量减少装夹误差, 为减少装夹误差, 一般将夹具的精加工留在本工序机床上进行, 或在机床上找正工装定位面, 以消除或减少工装的装夹误差。为减少精密加工中夹具的定位误差和不同夹具相对于同一基准的重复定位误差, 采用先进的 ITS 标准工具系统, 使夹具的定位更准确、更方便。

#### 5.3.3 切削工具的选择

切削工具的类型、构造、尺寸和材料的选择, 主要取决于工序所采用的加工方法, 被加工表面的形状、尺寸和精度, 以及工件的材料等因素。如磨削的切削工具选用砂轮, 但外圆磨、内孔磨、平面磨、工具磨等又选用不同的砂轮; 如车削、铣削等也都有不同的选择切削工具的原则。数控机床对切削工具的选择提出了更高的要求, 如在高速铣加工中心上, 甚至要求刀具、刀柄都应进行动平衡。

#### 5.3.4 量具的选择

选择测量工具时, 首先考虑应符合所检测尺寸的精度。在批量生产中, 有些尺寸可采用专用量具进行测量。

### 5.4 测量方法的确定

在精密复杂零件工序设计中, 尺寸精度要求很高, 零件从机床上取下后, 尺寸就没法再修正, 为此在线测量技术在精密加工中尤其重要。工艺设计应考虑每一尺寸在机床上或生产现场如何准确测量, 以便于以合格零件交检。在确定测量方法时, 应优先考虑选用通用或标准的测量工具进行测量, 有些不能直接测量的尺寸, 可考虑采用间接测量或采用专用量具测量, 有时也可为测量做些辅助工装, 再结合通用量具进行测量。

### 5.5 加工和测量环境的确定

精密零件精加工或超精加工工序设计时, 为保证尺寸的稳定性, 往往要对加工环境(如温度等)进行定量规定。精密尺寸一般按装配时的环境温度范围( $20 \pm 5$ ) $^{\circ}\text{C}$ 定为加工和测量的环境温度范围。对尺寸公差在  $0.002\text{mm}$  以内的超精加工及膨胀系数较大的材料的精加工, 加工环境温度和测量环境温度误差不能大于  $2^{\circ}\text{C}$ , 整批零件加工时环境温度的变化量也不超过  $2^{\circ}\text{C}$ [2]。

## 6 结束语

如上所述, 简要论述了精密复杂零件的主要工艺设计过程及应考虑的一些因素。由于各类零件千差万别, 特别是航天产品的零件更是复杂多样, 在工艺设计过程中, 必须根据零件的具体形状、精度情况及工艺装备状况, 通过多次摸索才能编制出合理的工艺规程, 而且工艺设计是不断改进的过程, 不但在编制过程中要不断改进, 在实际加工过程中还要根据新情况、新装备不断改进, 只有通过不断改进, 工艺技术才能持续提高。

### 参考文献

- 1 张耀宸, 马占永, 等. 机械加工工艺设计实用手册. 航空工业出版社, 1993
- 2 高育如, 富大欣, 等. 航天工艺基础知识培训教材(下). 中国宇航出版社, 2005



