

DOI : 10.3901/JME.2014.19.199

# 工艺尺寸路径图的建立与应用\*

王晓慧 姚愿伟 王友利

(太原科技大学机械工程学院 太原 030024)

**摘要:**传统的工艺尺寸链只能描述工艺尺寸关系而未能提供零件的加工信息,不能体现零件各个要素的加工顺序及其各工序尺寸基准,这无助于工艺路线与尺寸公差的并行设计。用带下标的英文字母表示零件在加工过程中各加工要素,用有向线段表示基准至加工要素之间的工序尺寸,将各个工序尺寸按加工顺序依次用树图的形式画出,得到各要素的形成路径—工艺尺寸路径图。路径图所表达的尺寸关系更加简洁直观、完整,易于建立全相关尺寸模型;从路径图中挖掘出粗基准的一些本质特征,为毛坯尺寸的合理标注提供可靠的理论依据;通过改变路径图中某些要素的位置或顺序,可以实现对工艺路线的改进。通过实例对工艺尺寸路径图进行优化而实现对工艺路线的改进,证明了工艺尺寸路径图对工艺路线的合理制订是行之有效的。

**关键词:**尺寸模型;工艺路线优化;公差计算;毛坯尺寸基准

**中图分类号:** TG801

## Establishment and Application of the Path Diagrams of Process Dimensions

WANG Xiaohui YAO Yuanwei WANG Youli

(School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024)

**Abstract:** The relationships of process dimensions of a part can be described with the conventional method of process dimension chains, but the information of process of the part, the machining sequences and the datum of the process dimension of the elements of the part can not be reflected, which is not helpful to the concurrent design of process route and dimensional tolerance. The element of the part in machining process is marked by English letters with subscripts, the directed line segment is represented the procedure size between the reference and the process elements, then the path diagrams of process dimensions can be obtained by depicting with the tree graphic according to the machining sequences of the procedure size. The relations of dimensions are simple, visualized, and integrated in the path diagrams, it is easy to establish the full correlation of model of dimensions, The theoretical basis on reasonable labeling of the dimension of the blank can be supplied with the substantial feature of the rough datum which can be obtained from the path diagrams. The improvement of the process route can be achieved by changing the position or sequences of the elements in the path diagrams. The path diagram of process dimensions is proved to effective to the reasonable establishment of the process route with an instance by optimizing it to improve the process route.

**Key words:** model of dimension; optimization of process route; tolerance calculation; blank dimension benchmark

## 0 前言

传统描述工艺尺寸关系的方法是工艺尺寸链,但对于较复杂的机械加工工艺流程,建立工艺尺寸链时易于出错,且一个工艺尺寸链只能表达零件的某个设计尺寸或余量与工序尺寸之间的关系,缺乏全局性<sup>[1-2]</sup>,针对尺寸链的不足,研究者一直在不断地探索新的方法,在 1993 年,JI<sup>[3]</sup>把树的模型运

用到描述尺寸关系上,提出用 3 棵树来分别代表零件的设计尺寸、加工余量和工序尺寸,树的结构可较清晰地表达零件及加工过程中的全部尺寸信息;1997 年,NGOI 等<sup>[4]</sup>提出用窗口模式来表达零件的尺寸关系,在窗口中,小窗口被嵌套在大窗口中,大窗口代表基准面,小窗口代表被加工面,分层次地表达工艺尺寸关系,适合复杂工艺尺寸关系的建立;2003 年,DESROCHERS<sup>[5]</sup>采用 TTRS 模型,也用树图的形式将设计和制造过程中的尺寸联系起来;王恒等<sup>[6]</sup>基于图论理论,通过构建特征尺寸邻接矩阵,将尺寸关系以尺寸链形式表达生成尺寸模型;1984 年王晓慧<sup>[7]</sup>曾提出用工艺尺寸式描述尺寸

\* 国家自然科学基金(51175360)和国家重点基础研究发展计划(973 计划,2012CB722801)资助项目。20130722 收到初稿,20140531 收到修改稿

关系,用带下标的英文字母组成的文字表达式描述尺寸关系,具有不需画图,建立尺寸关系方便,便于计算机辅助设计等特点,并已被多部《机械制造工程学》教材采用<sup>[8]</sup>。

以上方法对于工艺尺寸关系的正确建立及计算机辅助公差设计有重要作用,但这些方法仅仅能够表达尺寸关系,而不能描述零件在加工过程中的加工顺序及其采用的基准,影响了工艺路线与工序尺寸的并行设计。鉴于目前方法的局限性,本文提出用工艺尺寸路径图来描述零件的各个加工要素在加工过程中的形成路径,从路径中提取出的尺寸关系更加完整、直观、简洁,此外,路径图还可为毛坯尺寸的合理标注与工艺路线的改进提供可靠的理论依据。

## 1 工艺尺寸路径图的生成

### 1.1 工序尺寸的表示方法

#### 1.1.1 要素的表示方法

构成零件几何特征的点、线、面统称几何要素,简称要素。图 1 为一轴套零件,用 A、B、C、D、... 等英文字母自左到右依次顺序地表示零件在 x 轴方向上的各要素。给字母加下标,以表示经过几次加工的要素,例如 A<sub>3</sub> 表示第 3 次加工的 A 要素, B<sub>1</sub> 表示第一次加工的 B 要素;毛坯的要素无须加下标,例如未经加工的 D 要素用 D 表示,这样 x 轴方向的各个要素都有了确定的表示符号,且能表达要素经过几次加工或未加工。

#### 1.1.2 工序尺寸的表示方法

工序尺寸用其基准要素至加工要素构成的有向线段表示。例如以毛坯要素 D 为基准第一次加工 B 要素的工序尺寸表示为 D → B<sub>1</sub>,以 B<sub>1</sub> 为基准第二次加工 A 要素时的工序尺寸表示为 B<sub>1</sub> → A<sub>2</sub> 等。

图 2 为加工图 1 零件 x 轴方向各面的工序简图,各工序内容及工序尺寸分别如下。

工序 5:粗车 A 面和 B 面,工序尺寸为 D → A<sub>1</sub>、D → B<sub>1</sub>。

工序 10:半精车 A 面和 C 面,工序尺寸为 B<sub>1</sub> → A<sub>2</sub>、A<sub>2</sub> → C<sub>1</sub>。

工序 15:磨削 A 面,工序尺寸为 D → A<sub>3</sub>。

### 1.2 工艺尺寸路径图的建立方法

零件的各要素都是在加工过程中由工序尺寸逐步形成的,将各个工序尺寸按加工顺序依次用树图的形式画出就可得到各要素形成的路径。

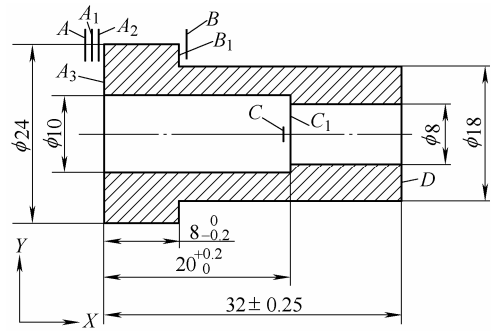


图 1 轴套零件图

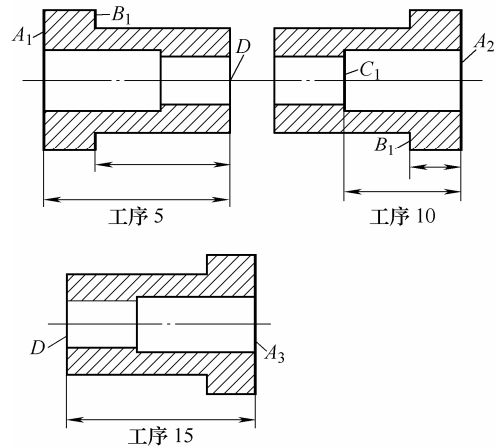


图 2 工序简图

图 3 是依据图 2 加工顺序依次画出各工序尺寸的过程。图 3a 画出了工序 5 中的两个工序尺寸,图 3b 在图 3a 基础上增添了工序 10 中的两个工序尺寸,图 3c 则是在图 3b 的基础上增添了工序 15 中的一个工序尺寸。

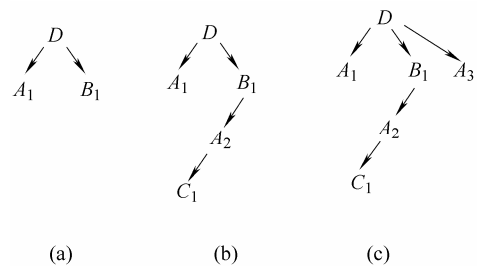


图 3 工艺尺寸路径图的建立过程

图 3c 所示的有向图是依据工件的加工顺序依次画出的工序尺寸,它描述了图 2 所示工序简图中各加工要素的形成路径(包括基准及加工顺序),称它为工艺尺寸路径图,简称路径图。路径图的建立过程就是按工件的加工顺序依次画出工序尺寸的过程。

路径图中的每一个工序尺寸均称路径图的一条边,上述路径图有 5 条边,边的大小与方向并不代表工序尺寸的大小与方向,因此它只是一个拓扑图,边的大小与方向可以任意画出。

### 1.3 工艺尺寸路径图的特征

特征 1：路径图是一个不封闭的有向图，图中的每条边都是一个工序尺寸。

特征 2：路径图中的各个要素只会出现一次，这些要素包含了粗基准及各个加工要素，也就是说，各相关加工要素一定存在于路径图中，而毛坯的各个要素中只有粗基准存在于路径图中。

## 2 从路径图中提取尺寸关系的方法

### 2.1 零件加工过程中的目标尺寸

机械加工过程中的终极目标是要确保两类尺寸，一类是零件的各个设计尺寸，另一类是工序中的各个加工余量，我们将这两类尺寸统称为加工过程中的目标尺寸，即目标尺寸包括所有设计尺寸及余量。

### 2.2 目标尺寸的路径及其与工序尺寸之间的联系

各个目标尺寸都是通过工序尺寸直接或间接保证的，因此首先必须找到目标尺寸与工序尺寸之间的联系，然后通过计算工序尺寸及公差来保证目标尺寸及公差。

各目标尺寸对应的两个要素都是在加工过程中直接或逐步形成的，其形成路径就是路径图中两要素之间的一条或多条边的连线，连线用“—”表示，如图 4a~4e 分别为设计尺寸  $A_3B_1$ 、 $A_3D$ 、 $A_3C_1$  及余量  $A_1A_2$ 、 $A_2A_3$  的路径，实际上这些路径都是在图 3c 中截取所得。在图中标出了要素的起点与终点，其中起点与终点为对应目标尺寸的两个要素，规定起点至终点的方向为图 1 中  $x$  轴的正方向。

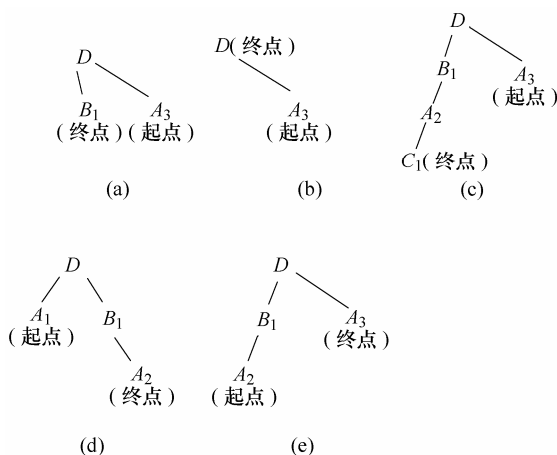


图 4 各目标尺寸的路径

要注意的是，各设计尺寸对应的两个要素一定是加工最后形成的要素，图 1 中设计尺寸  $20_0^{+0.2}$  mm 对应的两个要素为  $A_3$  (不能是  $A_2$ ) 与  $C_1$ ；余量是零件某个面相邻两次加工面之间的尺寸，其对应的两个

要素为同一字母，只是下标的数字差 1，例如  $A$  面的第二次加工余量是  $A_1$  与  $A_2$  之间的尺寸。

决定目标尺寸路径起点时有以下的规律，对于设计尺寸，起点一定是英文字母排序靠前的那个要素，上例中的 3 个设计尺寸路径的起点均为  $A_3$ ；对于余量，若某面向零件图中的  $x$  轴正方向加工，则下标数字小的那个要素是起点，图 1 中  $A$  面是向  $x$  轴正方向加工的， $A$  面第二次的加工余量路径的起点为  $A_1$  (终点为  $A_2$ )。若某面向零件图中的  $x$  轴反方向加工，则数字大的那个要素是起点，图 18 中  $B$  面是向  $x$  轴反方向加工的， $B$  面第二次的加工余量路径的起点为  $B_2$  (终点为  $B_1$ )。

目标尺寸的起点至终点之间的各个工序尺寸都与该目标尺寸相关，称它们为该目标尺寸的相关尺寸，并且这些相关尺寸的矢量之和等于目标尺寸，例如由图 4c 可得到

$$A_3C_1 = A_3D + DB_1 + B_1A_2 + A_2C_1$$

等号左端为设计尺寸  $A_3C_1$ ，等号右端为相关的工序尺寸，若右端两个要素排序与英文字母顺序相同，则该矢量与设计尺寸方向相同，即它与设计尺寸正相关，若其两个要素排序与英文字母顺序相反，则它与设计尺寸负相关，因此上式可写成

$$A_3C_1 = A_3D - DB_1 - B_1A_2 + A_2C_1$$

这样就得到了设计尺寸  $A_3C_1$  与工序尺寸之间的关系，可以看出，设计(目标)尺寸等于其路径中工序尺寸的代数和，从起点开始的工序尺寸，若工序尺寸排序同英文字母顺序，则该工序尺寸为正值，若工序尺寸排序逆英文字母顺序，则该工序尺寸为负值。假设等号的右端出现了余量(工序直接保证余量)，同样要看余量的方向是否与目标尺寸的方向相同，相同则为正值，相反则为负值。因此在搞清楚目标尺寸起点与终点的情况下，并不需要画出图 4 中各目标尺寸路径，而可从图 3c 路径图中直接提取出所有目标尺寸与工序尺寸之间的联系，上例中余量  $A_1A_2$  的尺寸关系为

$$A_1A_2 = A_1D - DB_1 - B_1A_2$$

## 3 路径图的应用实例

现利用路径图对图 1 的轴套零件的加工工艺进行改进，在此基础上对工序尺寸及公差进行计算，然后提出毛坯尺寸的合理标注的原则。

### 3.1 工艺路线的改进

由于路径图直观地描述了各个工序尺寸基准及加工顺序，并且包含了全部尺寸关系，因此通过改变某个要素的位置或顺序就能够实现工艺路线的

改进。

在图 3c 路径图中可以看出,设计尺寸  $A_3C_1$ (公差为 0.2 mm)与 4 个工序尺寸相关,平均每个工序尺寸公差为 0.05 mm,较难保证,且 A 面在工序 15 中的磨削余量  $A_2A_3$  也与 3 个工序尺寸相关,这样会导致余量公差增大。若将该路径图中的  $A_3$  与  $D$  断开而与  $A_2$  连接,将得到改进后的路径图,见图 5,该路径图对应的工序图只需要将图 2 中的工序 15 改为靠火花磨削 A 面,其工序简图见图 6,而这样的改进使得影响设计尺寸  $A_3C_1$  的工序尺寸由四个变为两个,可放大工序尺寸公差,同时靠火花磨削即减小了余量误差又提高了生产效率。

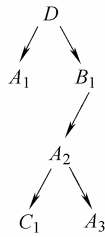


图 5 改进后的路径图

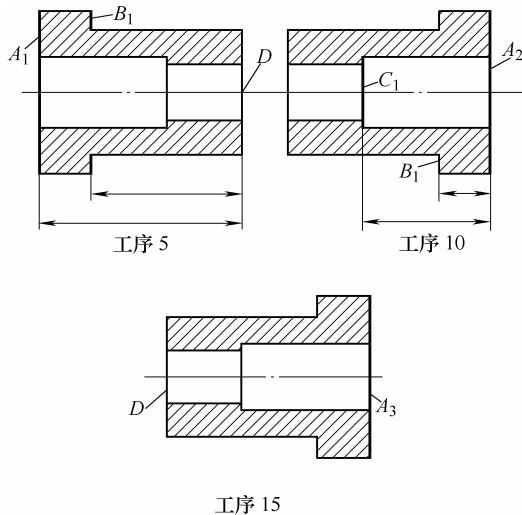


图 6 改进后的工序简图

从图 5 可以看出,经过改进后的工艺,影响设计尺寸  $A_3B_1$  的工序尺寸仍为两个,而影响目标尺寸  $A_3D$  的工序尺寸由 1 个变为 3 个,但由于  $A_3D$  公差为 0.5 mm,比  $A_3C_1$  的公差 0.2 mm 大得多,完全能够经济地保证其精度,因此从总体上讲,改进后的工艺路线比原工艺路线要经济合理。

### 3.2 工序尺寸及公差的综合计算

现在计算改进后的工艺(图 6)中的工序尺寸及公差,其中该轴套零件有三个设计尺寸  $A_3B_1$ 、 $A_3C_1$ 、 $A_3D$ (图 1),图 6 中的 5 个工序尺寸对应 5 个加工余量,其中 A、B、C 这 3 个毛坯面没有出现在图 5 的路径图中,说明这些面的粗加工余量不仅与工序

尺寸相关,还有毛坯尺寸相关,两个精加工余量  $A_1A_2$ 、 $A_2A_3$  仅与工序尺寸有关,根据图 5 所示的路径图,可以列出关于这 5 个目标尺寸的公式

$$A_3B_1 = -A_3A_2 + A_2B_1 \quad (1)$$

$$A_3C_1 = -A_3A_2 + A_2C_1 \quad (2)$$

$$A_3D = -A_3A_2 + A_2B_1 + B_1D \quad (3)$$

$$A_1A_2 = A_1D - DB_1 - B_1A_2 \quad (4)$$

$$A_2A_3 = A_2A_3 \quad (5)$$

根据上面的公式、三个设计尺寸及公差  $8_{-0.2}^0$  mm =  $(7.9 \pm 0.1)$  mm;  $20_0^{+0.2}$  mm =  $(20.1 \pm 0.1)$  mm;  $(32 \pm 0.25)$  mm 及两个余量及公差(工艺要求  $A_1A_2 = (0.3 \pm 0.23)$  mm;  $A_2A_3 = (0.1 \pm 0.04)$  mm)就可以求解出 5 个工序尺寸及公差。

(1) 确定工序尺寸及公差。一般来讲,目标尺寸公差越小,而其相关的工序尺寸又较多时,该目标尺寸最难保证,我们应该优先确定与这些难保证的目标尺寸相关的工序尺寸公差,然后由难到易,依次确定出全部工序尺寸公差。

在上面 5 个公式中,式(5)中  $A_2A_3$  是一个余量,其公差已在工艺要求中确定,其余 4 个公式中,式(1)与式(2)中目标尺寸公差为 0.2 mm,其值最小,根据这两个公式可以求得工序尺寸  $A_2C_1$  的公差及  $A_2B_1$  的公差  $\delta_{A_2C_1}$

$$\delta_{A_2B_1} = \delta_{A_3B_1} - \delta_{A_3A_2} = 0.2 \text{ mm} - 0.08 \text{ mm} = 0.12 \text{ mm}$$

$$\delta_{A_2C_1} = \delta_{A_3C_1} - \delta_{A_3A_2} = 0.2 \text{ mm} - 0.08 \text{ mm} = 0.12 \text{ mm}$$

由式(4)得:先确定  $\delta_{B_1D} = 0.14$  mm;  $\delta_{A_1D} = 0.2$  mm,到此工序尺寸及公差已经确定完。

由式(3)验算:  $\delta_{A_3D} = 0.2 \text{ mm} + 0.14 \text{ mm} + 0.12 \text{ mm} = 0.46 \text{ mm}$ ,能够满足设计要求。

(2) 计算工序平均尺寸。将以上 5 个目标尺寸平均值代入式(1)~(5)可以求得 5 个工序尺寸的平均值:  $DA_1 = 32.4$  mm;  $DB_1 = 24.1$  mm;  $B_1A_2 = 8$  mm;  $A_2C_1 = 20.2$  mm;  $A_2A_3 = 0.1$  mm。

### (3) 确定工序尺寸及公差

$$DA_1 = (32.4 \pm 0.1) \text{ mm} = 32.5_{-0.2}^0 \text{ mm}$$

$$DB_1 = (24.1 \pm 0.07) \text{ mm} = 24.03_0^{+0.14} \text{ mm}$$

$$B_1A_2 = (8 \pm 0.06) \text{ mm} = 8.06_{-0.12}^0 \text{ mm}$$

$$A_2C_1 = (20.2 \pm 0.06) \text{ mm} = 20.14_0^{+0.12} \text{ mm}$$

$$A_2A_3 = (0.1 \pm 0.04) \text{ mm}$$

### 3.3 毛坯尺寸标注基准的确定

传统的毛坯图是以零件图生根的，也就是说，毛坯尺寸在零件图尺寸的基础上加减余量而得到，假设图 1 零件的毛坯为精密铸造件，其轴向各面的总加工余量均为 1 mm，则传统毛坯的尺寸标注如图 7a 所示，将这些毛坯尺寸添加在图 5 的路径图中得到图 8a 路径图，根据该路径图可以看出 B 面与 C 面的粗加工余量  $B_1B$  与  $CC_1$  都与两个毛坯尺寸相关，其余量及公差为

$$B_1B = B_1D - DA + AB = (24.1 \pm 0.07) \text{ mm} - (33 \pm 0.5) \text{ mm} + (10 \pm 0.5) \text{ mm} = (1.1 \pm 1.07) \text{ mm}$$

$$CC_1 = -CA + AD - DB_1 - B_1A_2 + A_2C_1 = -(20 \pm 0.5) \text{ mm} + (33 \pm 0.5) \text{ mm} - (24.1 \pm 0.07) \text{ mm} - (8 \pm 0.06) \text{ mm} + (20.2 \pm 0.06) \text{ mm} = (1.1 \pm 1.19) \text{ mm}$$

若将图 8a 中的 B 与 C 直接与 D 连接，见图 8b，其对应的毛坯图标见图 7b，该标注情况下，B 面与 C 面的粗加工余量只与一个毛坯尺寸相关

$$CC_1 = CD - DB_1 - B_1A_2 + A_2C_1 = (13 \pm 0.5) \text{ mm} - (24.1 \pm 0.07) \text{ mm} - (8 \pm 0.06) \text{ mm} + (20.2 \pm 0.06) \text{ mm} = (1.1 \pm 0.69) \text{ mm}$$

$$B_1B = B_1D - DB = (24.1 \pm 0.07) \text{ mm} - (23 \pm 0.5) \text{ mm} = (1.1 \pm 0.57) \text{ mm}$$

由计算结果可以看出，按图 7b 标注形式比图 7a 标注形式余量公差要小得多，使粗加工余量更加均匀。

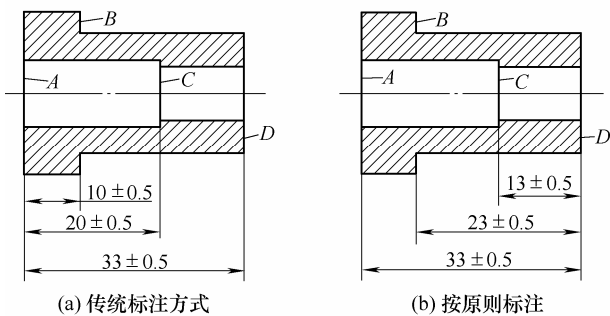


图 7 两种毛坯尺寸的标注方式

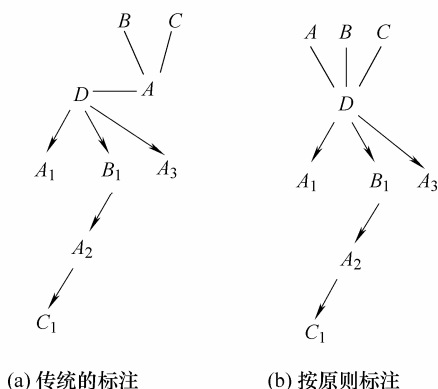


图 8 含毛坯尺寸的路径图比较

在不含有毛坯尺寸的路径图中，只有粗基准一个要素存在(因为粗基准在一个方向上只能使用一次)，其他毛坯要素都不在该路径图中，这样只有将毛坯的其他要素的标注基准都选用粗基准，才有一个毛坯尺寸影响粗加工余量，否则将会有两个或两个以上的毛坯尺寸影响各个加工面的粗加工余量；对于加工面与非加工面之间的尺寸也同样存在该问题，因此从减小粗加工余量公差与提高加工面与非加工面之间的尺寸精度考虑，毛坯各面的标注基准原则上都应该尽量采用加工该毛坯时选用的粗基准，将该原则称为毛坯尺寸标注原则。

以前我们只重视设计基准与工序基准的选择问题，而忽略了毛坯尺寸基准，实际上，毛坯尺寸基准的合理选择对于减小加工余量及提高加工面与非加工面之间的尺寸及位置精度有重要的意义。

## 4 结论

(1) 路径图是一个不封闭的有向图，可表达一个零件在加工过程中的加工顺序及其采用的基准，通过改变路径图中相关要素的位置或顺序，即可实现对工艺路线的改进。

(2) 路径图所表达的尺寸关系简洁、直观、完整，适合复杂尺寸关系的建立，是建立全相关尺寸模型的有效方法，适合计算机辅助设计，也适合教学。

(3) 从路径图中挖掘出的毛坯尺寸标注原则，使毛坯尺寸标注更加合理，为减少加工余量、提高加工面与非加工面之间的尺寸及位置精度提供了一条新途径。

## 参 考 文 献

- [1] 方红芳, 吴昭同. 并行公差设计与工艺路线技术经济评价方法[J]. 机械工程学报, 2000, 36(4): 74-77.  
FANG Hongfang, WU Zhaotong. Concurrent tolerance design and methods of technology economy assessment in process route[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(4): 74-77.
- [2] LEHTIHET E, RANADE S, DEWAN P. Comparative evaluation of tolerance control chart models[J]. International Journal of Production Research, 2000, 38(7): 1539-1556.
- [3] JI P. A tree approach for tolerance charting[J]. International Journal of Production Research, 1993, 31(5): 1023-1033.

- [4] NGOI B , TAN C. Graphical approach to tolerance charting—A “ Maze Chart ” Method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology , 1997 , 13(4) : 282-289.
- [5] DESROCHERS A. A CAD/CAM representation model applied to tolerance transfer methods[J]. Journal of Mechanical Design , 2003 , 125(1) : 14-22.
- [6] 王恒, 宁汝新. 三维装配尺寸链的自动生成[J]. 机械工程学报, 2005 , 41(6) : 181-187.  
WANG Heng , NING Ruxin. Automatic generation of 3D assembly dimension chains[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering , 2005 , 41(6) : 181-187.
- [7] 王晓慧. 工艺尺寸关系的尺寸式表达[J]. 机械工艺师 , 1984(11) : 74-77.  
WANG Xiaohui. Expression of dimension formula on relation of process dimension[J]. Machinery Manufacturing Engineer , 1984(11) : 74-77.
- [8] 王先逵, 张平宽. 机械制造工程学[M]. 北京 : 国防工业出版社 , 2012.  
WANG Xiankui , ZHANG Pingkuan. Mechanical manufacturing engineering foundation[M]. Beijing : National Defence Industry Press , 2012.

---

作者简介: 王晓慧(通信作者), 男, 1959 年出生, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为尺寸工程、精度设计理论及应用。

E-mail : houmawxh@sina.com