

夹具定位误差分析的机构学建模方法

吴玉光 李春光

杭州电子科技大学, 杭州, 310018

摘要:将工件—夹具系统用机构模型表示。夹具是机构的机架, 夹具和工件的接触副构成了连架杆与机架连接的运动副, 定位基准到定位接触点之间的尺寸线为机构的连架杆, 工序基准与定位基准之间的联系尺寸是机构中间连杆或机构的结构杆件, 工件加工表面与工序基准之间的工序尺寸为机构的最终目标构件。通过计算目标构件的长度变化或角度变化获得工序系统的定位误差。研究建立工件和夹具定位元件接触副与机构构件之间的映射关系, 研究建立加工表面与工序基准的工序尺寸关系、工序基准和定位基准之间的联系尺寸关系转化为等价机构的转换规则。根据以上映射关系和转换规则, 实现等价机构模型的自动建立, 利用机构学的各种精度分析方法实现定位误差求解的自动化。

关键词:定位误差; 机构学建模; 等价机构; 映射关系

中图分类号: TG701

文章编号: 1004—132X(2011)13—1513—06

Approach to Mechanism Modeling of Fixture Location Error Analyses

Wu Yuguang Li Chunguang

Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, 310018

Abstract: Workpiece—fixture system was represented by mechanism model, where fixture was the frame of the mechanism, the contact pairs between workpiece and locators constructed the kinematic pairs between side links and mechanism frame. The dimensional lines between location datum and location contact point become the side links, the dimensional lines between process datum and location datum become middle links or mechanism structure, and the process dimensional lines between workpiece surface and process datum were the objective links of the mechanism. By calculating the length and angle variation of objective links, the location errors of process system were obtained. The rules mapping from contact pairs to mechanism components were established. By analyzing the position relations between machining surface and process datum and the position relations between process datum and location datum, the rules controlling the conversion from dimension relations to equivalent mechanism components were explored. According to the mapping rules mentioned above, an equivalent mechanism model was established automatically, and the automatic solution of location error can be realized by means of the accuracy analysis methods of mechanism.

Key words: location error; mechanism modeling; equivalent mechanism; mapping

0 引言

夹具定位误差是评价夹具性能的重要指标, 定位误差分析是夹具设计中的一个重要环节。全面了解工件位置偏移与定位源误差之间的关系以及掌握定位误差变化规律, 有助于提高夹具设计质量和夹具结构的合理性, 获得良好的设计方案。

目前定位误差分析方法主要包括利用尺寸链模型的极值法和微分分析方法、利用接触运动学模型的矩阵计算方法、利用几何关系的图形解析法和合成法以及概率计算方法等。许多学者对定位误差的计算方法进行了研究, 并对典型定位方案的误差进行了分析与建模。Kang^[1] 基于平面定位, 建立了定位接触点位置误差、定位元件定位表面误差与工件位置误差之间关系的数学表达

式。Cai 等^[2] 通过研究目标误差与源误差之间的关系, 提出了一种稳健设计夹具结构的微分法。康秀梅等^[3] 运用矩阵算法建立影响加工精度的三维定位误差数学模型, 并分析了三种典型定位方式下夹具加工工件的定位误差。秦国华等^[4-5] 根据工件位置偏移与定位源误差之间关系建立定位误差通用运动学模型。刘雯林等^[6] 建立了定位元件公差和工件定位误差之间的映射模型。融亦鸣等^[7-8] 利用坐标转换技术建立了工件位置误差的通用计算模型。Wang^[9] 用 6×6 对称正定矩阵刻画夹具定位精度。Xiong 等^[10] 通过建立定位元件的误差空间和工件的定位误差空间的映射关系, 并根据给定工件关键加工部位的公差要求确定定位元件的几何要求。Tsai 等^[11] 针对棱柱体类零件的二维夹具定位精度分析问题, 提出了一个夹具定位精度矩阵分析方法。

收稿日期: 2010—09—06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875069)

虽然研究者在夹具定位误差计算模型和计算方法等方面进行了大量的探讨,但从通用化、公式化和自动化的角度看,现有的夹具定位误差分析方法和计算模型还存在以下主要问题:①仅适用于特定零件和夹具的定位方案;②不能对机床、夹具、刀具和工件的误差进行综合处理;③不完全适用于形位公差和尺寸公差的综合计算;④计算模型和计算方法缺少自动化机制。因此,夹具定位误差分析理论需要研究与夹具的类型、与工件的复杂程度无关的夹具定位误差模型,需要研究定位误差的通用和自动求解方法。

本文应用机构组成原理构建夹具—工件系统的机构模型,研究采用机构的结构和参数表达工件—夹具系统的所有参数信息及其内在联系的方法,研究工件和夹具定位元件接触副与机构构件之间的映射关系,研究尺寸及公差关系的机构构件和运动副表示方法。应用机构学理论建立定位误差计算模型实现误差求解的自动化,从而建立起适用于金属切削加工夹具的定位误差计算和分析的新方法和新理论。

1 工件—夹具系统转换为等价机构的原理

一批合格工件安装在同一个夹具上,由于误差的存在,每一个工件的工序基准(即代表工序基准上的点、线、面)的位置在公差许可范围内将产生随机变化。如果按工序基准位置变化大小顺序排列工件,则工序基准的位置变化类似于机构中的连杆平面运动,每一个工件恰好是机构的一系列“运动”位置。由此可以设想,如果能够建立夹具—工件系统的等价机构模型,利用机构的结构和参数表达工件—夹具系统的工艺信息及其内在联系,则可以将定位误差分析问题转化为机构学问题,利用现有的机构位置分析和精度分析等方法来解决夹具定位误差分析相关问题。

根据定位误差组成要素分析,工件—夹具系统与机构之间存在对应关系。假设工件—夹具系统为刚体系统并且不考虑机床和刀具的误差影响,则切削加工工序系统中与定位误差相关的只有加工表面(测量目标)、工序基准、定位基准和定位元件四个要素。根据机构组成原理可知,用机构来描述工件—夹具系统的四个要素之间的关系是可行的,夹具本体是等价机构的机架,夹具定位元件和工件定位基准的接触副构成了连架杆与机架的固定运动副,工序基准与定位基准之间的联系是机构的中间连杆或结构杆件,工件加工表面

与工序基准之间的工序尺寸为机构的最终目标构件,目标构件的长度变化量或角度变化量就是工序系统的定位误差。

虽然工件形状复杂多变,但在不考虑自由曲面作为定位面的情况下,工件与定位元件的接触表面类型只有平面和圆柱面两种,说明与接触副对应的等价机构运动副的类型是有限的。工序基准要素相对定位基准的位置变化由形位公差和尺寸公差的公差带定义,而公差带就是工序基准的变动空间,即工序基准的“运动空间”,故工序基准相对于定位基准的变动可以转化为以定位基准为机架的机构或机构杆组。工件的工序尺寸通过量具测量,由于存在误差,一批工件中量具与测量基准和加工表面的接触点位置也是随机变化的,即量具相对于测量基准和加工表面存在机构运动,故量具与测量基准和加工表面的位置关系也可以抽象成一个机构或机构杆组。因此,工件—夹具系统等价机构是定位误差四要素所对应的等价机构或构件的组合和叠加。

由于决定定位误差的要素、工件与定位元件的接触副类型、尺寸和形位公差种类等均是有限的,工件—夹具系统转化为等价机构的转化规则是确定的。

2 工件—夹具系统的等价机构相关概念

2.1 基本接触副和复合接触副

根据约束自由度能力,工件与定位元件的接触副可分为基本接触副和复合接触副两类。基本接触副是指两个表面理论上以一点或两点相接触的情况,基本接触副只能约束工件的一个或两个移动自由度,如平面支承钉与工件表面接触、短圆柱销与圆孔接触、短 V 形块和圆柱接触等。复合接触副是指两个表面理论上以一条线或两条线相接触的情况,如长圆柱销与长圆柱孔接触、长 V 形块与长圆柱面接触等。复合接触副除了可以约束工件的移动自由度外,还能够约束工件的转动自由度。复合接触副可以通过基本接触副组合得到,如长圆柱销由两个短圆柱销组成,长 V 形块由两个短 V 形块组成等。

2.2 球铰滑动副

球铰滑动副为球面副和滑动副相组合的复合运动副,具体结构为在球面副的球面上开一个通过球心的通孔,球面承担球铰功能,通孔承担滑动副功能。球铰滑动副连接的两个杆件中,第一个杆件与球面铰链座固连,第二个杆件可以沿通孔滑动。球铰滑动副的球面副和滑动副空间位置重

合,它只限制一个自由度,即它连接的两个杆件除了保持相交之外,可以做任意相对运动。球铰滑动副是最简单的基本接触副所对应的运动副。根据球铰滑动副相连接的两杆件之间的具体相对运动关系,球铰滑动副可以退化为圆柱副或者普通铰链。

2.3 工序基准许可位置空间

公差带所包围的空间即为工序基准的许可位置空间。许可位置空间是计算工序基准几何要素相对于定位基准的位置变动量的依据。常用工序基准的几何要素主要包括平面、直线、圆柱面、圆和点等,根据尺寸公差和形位公差的公差带定义,工序基准几何要素的许可位置空间可归纳为长方体、矩形、圆柱体和圆等四种。将长方体的长度和厚度、矩形的长度和宽度、圆柱体的直径和长度、圆的直径定义为许可位置空间的特征值,显然特征值可以由公差值和工序基准要素尺寸确定。四种许可位置空间的形成方法、特征值及其对应的形位公差如表 1 所示。

表 1 各种形位公差的工序基准许可位置空间

许可位置空间	形成方法	特征值	形位公差
长方体	公差带两平行平面之间的空间	高度:公差值 长度:基准要素长度 宽度:与误差求解无关	直线或平面要素的给定方向平行度、垂直度、倾斜度、位置度
矩形	公差带两平行直线之间的空间	宽度:公差值 长度:基准要素的长度	给定平面内的直线度、给定方向上直线的位置度
圆柱体	公差带为圆柱面、或两同轴圆柱面	直径:公差值(对圆柱度、全跳动为 2 倍公差值) 长度:基准要素长度	直线要素的任意方向直线度、平行度、垂直度、倾斜度、位置度;圆柱度、同轴度
圆	公差带圆	半径:公差值	点的位置度,圆的同心度、径向跳动

2.4 定位误差计算平面

定位误差计算平面是包含加工表面几何要素和工序尺寸线的平面。计算定位误差只需考虑定位误差计算平面内工序基准几何要素的全部可能位置,而不必考虑工序基准的整个许可位置空间。

2.5 工序基准有效运动区域

工序基准有效运动区域是工序基准许可位置空间与定位误差计算平面的交集区域。有效运动区域是确定等价机构类型与构件误差的依据。根据定位误差计算平面与工序基准的位置关系,四种许可位置空间与定位误差计算平面的交集区域只有长方形、圆和直线三种形状,即工序基准只存

在三种有效运动区域。三种有效运动区域的参数分别为:①长方形的宽度为长方体许可位置空间的高度或圆柱体许可位置空间的直径,长方形的长度为长方体或圆柱体许可位置空间的长度;②圆的直径为圆或圆柱体许可位置空间的直径;③直线的长度为圆许可位置空间的直径或矩形许可位置空间的宽度。

3 接触副与等价机构的映射关系

3.1 基本接触副的等价机构

约束自由度能力和相对运动形式是建立基本接触副与等价机构及其运动副之间映射关系的依据,等价机构构件的尺寸和误差通过接触副几何元素的尺寸和公差计算。当不考虑定位元件的误差时,等价机构中的对应杆件就可以退化为固定杆件。各种常见接触副的简图和相应的等价构件与运动副如图 1 所示,表 2 列出了各种等价机构构件的长度和误差的计算方法。

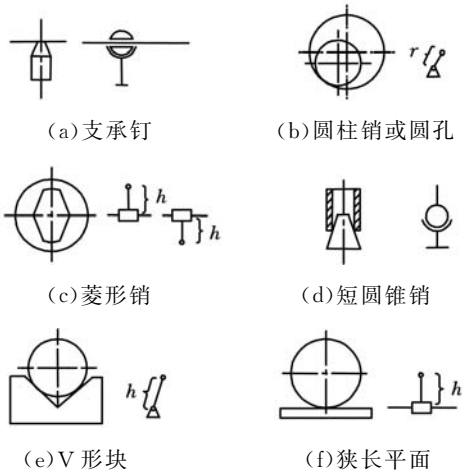


图 1 基本接触副及其等价机构运动副

表 2 基本接触副的等价机构构件长度及误差

接触副	机构/运动副	计算方法及说明
定位支承钉与平面	球铰滑动副	
短圆柱 d_1 与孔 d_2	曲柄 r	$r = d_2/2 - d_1/2,$ $\delta r = \delta d_2/2 + \delta d_1/2$
短菱形销 d_1 与孔 d_2	滑块 + 铰链 h	铰链位于滑块的上方或下方 $h = d_2/2 - d_1/2,$ $\delta h = \delta d_2/2 + \delta d_1/2$
短圆锥销与孔	球铰	
长圆锥销与孔	圆柱铰	
短 V 形块 2α 与圆柱 d_2	摆杆 h	$h = 0.5d_2/\sin\alpha,$ $\delta h = 0.5\delta d_2/\sin\alpha$
狭长平面与圆柱 d_2	滑块 + 铰链 h	$h = 0.5d_2,$ $\delta h = 0.5\delta d_2$

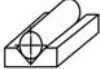
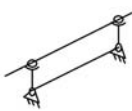
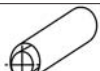
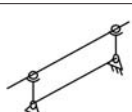
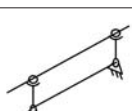
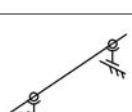
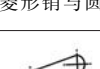
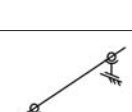
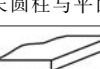
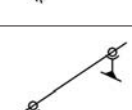
确定接触副的等价机构除了保证两者之间的运动关系以外,还必须反映接触副的限制自由度程度。图 1a 所示的支承钉只限制工件的一个自

由度,两者除保持点接触之外可以产生任意相对运动,因此两者的关系与球铰滑动副等价。图 1b 所示为工件圆孔和圆柱销接触情况,工件的圆孔中心绕圆柱销中心转动,等效机构为一个曲柄,曲柄长度等于两者之间的间隙,曲柄长度的变化取决于销孔的尺寸公差,曲柄长度反映了销孔接触副的限制移动自由度的程度。图 1e 中圆柱与 V 形块接触的等价机构构件为一个摆杆,摆杆的摆角范围等于 V 形块夹角的对称度,摆杆的长度取决于圆柱直径和 V 形块夹角,摆杆的长度变化量取决于圆柱直径和 V 形块夹角的公差。根据以上思路可以建立各种接触副的等价机构,同时建立等价机构参数和接触副的接触性能参数的对应关系。

3.2 复合接触副的等价机构

复合接触副的等价机构是两个基本接触副等价机构的组合,通过定位基准几何要素杆件以球铰滑动副将两个基本接触副等价机构相连接而得到,机构各杆件的尺寸及误差的计算方法与基本接触副等价机构相同。各种复合接触副的等价构件及其组合情况如表 3 所示。

表 3 复合接触副的等价机构

复合接触副	等价机构	组合情况
 圆柱与长 V 形块		两个摆杆组合
 圆柱与长圆孔		两个曲柄组合
 圆柱与长圆柱		两个曲柄组合,两个曲柄转角相同、长度独立变化
 长菱形销与圆孔		两个偏心滑块组合,球铰可位于滑块上方或下方,因此该机构具有四种装配形式
 长圆柱与平面		两个偏心滑块组合
 狭长定位面与平面		两个球铰滑动副组合

复合接触副的等价机构还需要根据组合情况进行处理。例如,由于表 3 中的机构是两个基本接触副等价机构通过一个杆件联系在一起的,两

个球铰滑动副的球铰将失去一个转动自由度,即球铰脱变为圆柱铰链。此外,根据接触副的性质,两个基本接触副等价机构的杆件运动参数也存在相互关系,有些参数不再独立,如两个圆柱相切定位的等价机构中,两个曲柄的转角相同,但曲柄长度变化则仍然相互独立。

4 尺寸关系的等价机构转换规则

工件一夹具系统的尺寸关系包括加工表面与工序基准之间的工序尺寸关系和工序基准与定位基准之间的联系尺寸关系。工序尺寸关系的等价机构以加工表面杆件为机架,联系尺寸关系的等价机构以定位基准杆件为机架。

4.1 工序尺寸的等价机构

尽管加工表面几何类型各式各样,但在定位误差计算平面内,用于表示定位误差的加工表面和工序基准的几何要素只有点和直线两种,因此工序尺寸的测量基准和测量目标存在四种情况:①加工表面和工序基准的几何要素均由直线组成;②加工表面和工序基准的几何要素均由点组成;③加工表面几何要素为直线、工序基准的几何要素为点;④加工表面几何要素为点、工序基准的几何要素为直线。四种情况的等价机构杆组如图 2 所示,尺寸线杆件 B、B₁、B₂ 一端与工序基准通过滑动副相连,另一端固定在加工表面杆件上。通过计算尺寸线杆件上运动副相对于加工表面的距离变化量获得工序尺寸误差同时换算出几何误差。

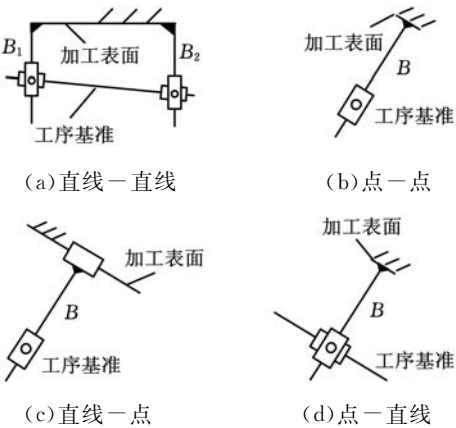


图 2 各种工序尺寸的等价机构杆件

4.2 工序基准与定位基准之间联系尺寸的等价机构

工序基准有效运动区域形状是确定联系尺寸的等价机构的依据,有效运动区域的尺寸是等价机构相应构件的长度误差。如果不考虑工序基准与定位基准之间的位置误差,则工序基准与定位

基准之间的联系尺寸构成机构的固定结构。三种工序基准有效运动区域的等价机构如图 3 所示。

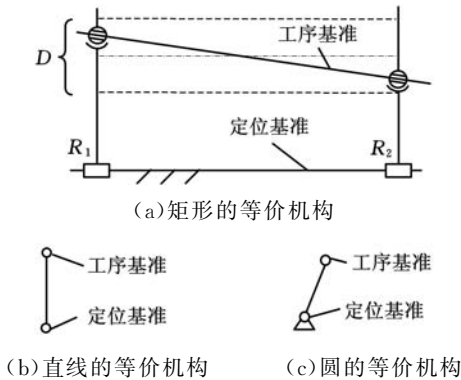


图 3 联系尺寸关系的等价机构杆件

图 3a 所示为矩形有效运动区域的等价四杆机构,两个连杆杆 R_1 和 R_2 的长度独立变化,其公称长度为工序基准直线端到定位基准的公称距离,其长度变化量均为工序基准要素有效运动空间长方形的宽度。图 3b 所示为直线有效运动区域对应的等价连杆,连杆的长度为工序基准到定位基准的公称距离,杆件长度误差为直线有效运动空间的长度。图 3c 所示为圆有效运动区域对应的等价曲柄,曲柄的两个铰链分别连接工序基准和定位基准,曲柄的长度为零,长度误差为圆有效运动空间的半径。

4.3 尺寸公差和形位公差的相互作用

工序基准相对于定位基准的位置由尺寸及公差和形位公差共同确定,并且形位公差与尺寸公差存在制约关系。根据公差设计原则,尺寸公差带完全包含形位公差带,形位公差的公差带位置受尺寸公差带影响。因此,长方形投影区域的等效机构杆件两个支架杆件的长度误差存在制约关系而非完全独立,需要根据尺寸公差和形位公差的设计要求建立相互关系。

5 实例

5.1 实例一

如图 4a 所示定位方案,阶梯轴在两个 V 形块上定位,进行钻削孔 M 及铣削半月形键槽的加工。已知: $d_1 = \phi 30_{-0.017}^0 \text{ mm}$, $d_2 = \phi 40_{-0.050}^{-0.025} \text{ mm}$, $L_1 = 30 \text{ mm}$, $L_2 = 80 \text{ mm}$, $L_3 = 120 \text{ mm}$, V 形块夹角为 90° , d_1 与 d_2 的同轴度公差为 0.015 mm 。若不考虑 V 形块的制造误差 f , 计算加工尺寸 A_1 、 A_2 的定位误差。

阶梯轴—V 形块系统的等价机构如图 4b 所示。阶梯轴—V 形块的接触副的等价机构为两个摆杆球铰机构的组合,在不考虑 V 形块误差的情

况下,摆杆变为球铰的固定支架。阶梯轴的轴线为定位基准,对应为等价机构的连杆,该连杆与两个球铰滑动复合副配合。工序尺寸 A_1 和 A_2 的定位误差计算平面为 V 形块的对称面, d_1 与 d_2 的同轴度公差所对应的机构为图中的四杆机构 $p-q-t-s$, 其中 p 、 q 处为球铰滑动复合副, s 、 t 为固定在 d_1 轴线杆件上的铰链(s 处的铰链图中未画出)。整个机构的可变结构参数有三个,即 r_1 、 r_2 、 r_3 , 建立坐标系 oxy 如图 4b 所示,设孔 D 的中心和半月形键槽底部到 x 轴的距离分别为 y_1 和 y_2 , 根据图中的机构形式,列出计算 A_1 和 A_2 的公式如下:

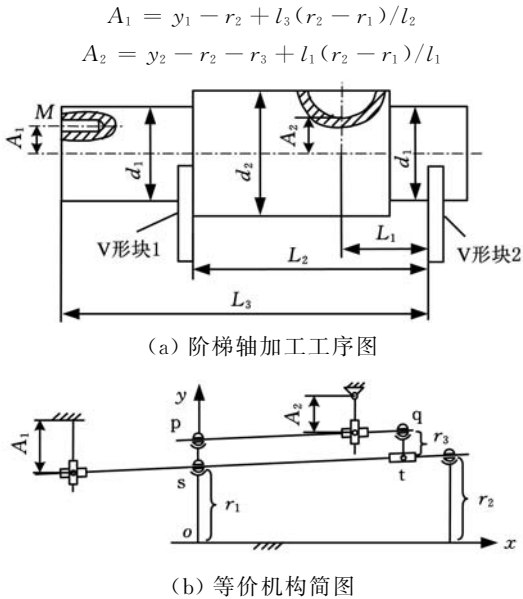


图 4 阶梯轴加工工序图及其机构学模型

该机构具有三个独立的结构参数,即 r_1 、 r_2 、 r_3 , 由于 y_1 和 y_2 由机床和刀具确定,在不考虑机床和刀具误差的前提下, y_1 、 y_2 为常数。利用微分法求出 A_1 、 A_2 的误差公式:

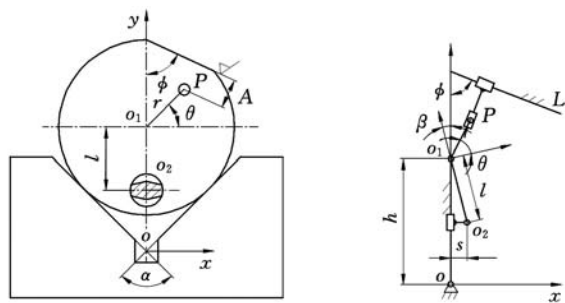
$$\begin{aligned} \Delta A_1 &= \left| \frac{\partial A_1}{\partial r_1} \right| \Delta r_1 + \left| \frac{\partial A_1}{\partial r_2} \right| \Delta r_2 = \\ &= \left| -\frac{l_3}{l_2} \right| \Delta r_1 + \left| -1 + \frac{l_3}{l_2} \right| \Delta r_2 \\ \Delta A_2 &= \left| \frac{\partial A_2}{\partial r_1} \right| \Delta r_1 + \left| \frac{\partial A_2}{\partial r_2} \right| \Delta r_2 + \left| \frac{\partial A_2}{\partial r_3} \right| \Delta r_3 = \\ &= \left| -\frac{l_1}{l_2} \right| \Delta r_1 + \left| -1 + \frac{l_1}{l_2} \right| \Delta r_2 + \left| -1 \right| \Delta r_3 \end{aligned}$$

其中, r_1 和 r_2 的公称数值为两滑块中心到 x 轴的距离,其值为 $0.5 \times 29.9915 / \sin 45^\circ \text{ mm}$, 两滑块的行程误差写成对称形式为 $\pm 0.00425 / \sqrt{2} \text{ mm}$ 。 r_3 的公称数值为 0, 其误差为 $\pm 0.0075 \text{ mm}$ 。由此可求得 $\Delta A_1 = \pm 0.006 \text{ mm}$, $\Delta A_2 = \pm 0.0105 \text{ mm}$ 。

5.2 实例二

轴在 V 形块上定位铣斜面的工序如图 5 所示, 已知工件轴径 $D(\pm \delta D)$ 、定位孔 O_2 的直径

$d(\pm\delta d)$ 、削边销直径 $d'(\pm\delta d')$, 削边销用于限制工件绕轴线 O_1 的转动, 建立求任意点 $P(r, \theta)$ 为工序基准的定位误差等价机构。



(a) V 形块定位加工工序图 (b) 等价机构简图

图 5 轴在 V 形块上定位铣斜面

图 5b 所示为加工斜面的工艺系统对应的等价机构。圆柱轴在 V 形块上定位的等效机构为摆杆机构, 摆杆的摆动中心 V 形块两定位边的交点, 在不考虑 V 形块夹角误差时, 摆杆退化为固定的机架, 其位置与 V 形块对称线重合。摆杆端点 O_1 的位置由圆柱中心到 x 轴的距离 h 表示, $h = 0.5D/\sin\alpha$, 摆杆的长度误差 δh 取决于圆柱轴的直径误差, $\delta h = 0.5\delta D/\sin\alpha$ 。工序尺寸 A 的等效机构为移动导杆机构, 斜面 L 是刀具形成面, 故为移动导杆机构的固定导轨。削边销与定位孔接触副的等价机构为滑块 + 连杆铰链机构, 滑块导轨与 y 轴重合, 连杆铰链存在两种装配形式, 即铰链中心 O_2 可以安装在滑块导轨的两侧, 位置由 s 值确定, $s = -(d/2 - d'/2)$ 和 $s = d/2 - d'/2$, 无论哪个位置, s 的误差均为 $\delta s = \pm(\delta d/2 + \delta d'/2)$ 。根据图 5b 所示的等价机构, 不难建立工序尺寸 A 的关系表达式, 从而可以利用各种误差计算方法计算工序尺寸 A 的误差。

6 结论

工件—夹具系统等价机构由三个子机构的组合和叠加而成, 这三个子机构就是加工表面与工序基准之间工序尺寸的等价机构、工序基准与定位基准之间联系尺寸的等价机构、定位基准与定位元件之间接触副的等价构件和运动副。三个子机构的类型总数是一定的, 而且子机构之间互相的连接点运动轨迹也是确定的, 因此根据连接点处两者的相对运动轨迹就可以确定机构的连接运动副的结构形式, 从而组合成一个机构整体。

利用机构模型表示工件—夹具系统的意义在于为定位误差分析自动建模提供了一个自动化机制。等价机构模型具有工艺系统制造任务相关的几何含义, 可以表示工件—夹具系统的全部工艺

信息。利用机构学中的各种机构位置求解、机构精度分析方法容易建立夹具定位误差通用分析和求解的计算机程序, 实现定位误差计算的自动化。

采用相同的转换规则, 等价机构模型还可以进一步扩充到整个工艺系统, 以包括机床、刀具在内的工艺系统全部误差信息, 实现工艺系统加工精度的自动预测。

参考文献:

- [1] Kang Y Z. Computer Aided Fixture Design Verification[D]. Worcester, MA: Worcester Polytechnic Institute, 2001.
- [2] Cai W, Hu S J, Yuan J X. A Variational Method of Robust Fixture Configuration Design for 3-D Workpieces[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997, 119(11): 593-602.
- [3] 康秀梅, 朱耀祥. 夹具三维定位误差的计算机辅助分析[J]. 制造技术与机床, 2003(11): 59-64.
- [4] 秦国华, 张卫红. 基于运动学方法的线性尺寸定位误差通用建模与分析[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(11): 1317-1320.
- [5] 秦国华, 吴竹溪, 张卫红. 夹具定位方案的数学建模及其优化设计[J]. 中国机械工程, 2006, 17(23): 2425-2429.
- [6] 刘雯林, 熊蔡华. 夹具的定位误差模型[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(7): 72-74.
- [7] 融亦鸣, 朱耀祥, 罗振璧. 计算机辅助夹具设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [8] Rong Y, Hu W, Kang Y, et al. Locating Error Analysis and Tolerance Assignment for Computer-aided Fixture Design[J]. International Journal of Production Research, 2001, 39(15): 3529-3545.
- [9] Wang Y. Characterizations of Localization Accuracy of Fixtures[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(6): 976-981.
- [10] Xiong C H, Rong Y, Tang Y, et al. Fixturing Model and Analysis[J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2007, 28(1): 34-45.
- [11] Tsai Y H, Lu S S. Localization Accuracy Matrix Analysis for Localization Accuracy Consideration in 2D Precision Fixture System[C]//2007 Mediterranean Conference on Control and Automation. Athens, Greece, 2007: 1-6.

(编辑 郭伟)

作者简介: 吴玉光, 男, 1961 年生。杭州电子科技大学机械工程学院教授。主要研究方向为机械 CAD/CAM 技术, 加工工艺自动规划, 夹具自动设计、多指抓取自动规划等。发表论文 40 余篇。
李春光, 男, 1971 年生。杭州电子科技大学机械工程学院工程师。