

# 三维装配尺寸链的自动生成\*

王 恒 宁汝新 唐承统

(北京理工大学机械与车辆工程学院 北京 100081)

**摘要** :提出了一种基于 CAD 模型的三维装配尺寸链自动生成方法。该方法从定义装配性能特征入手,首先对 CAD 装配模型进行深层次的解析及预处理,以获取隐含在模型内部的公差分析所需信息。然后利用图论理论,通过构建特征—尺寸邻接矩阵、特征—装配约束关系邻接矩阵、装配关系传递图等,将装配体中参与装配的零件和特征以及其之间的装配约束关系、尺寸及形状等信息的传递过程以图的形式进行表达。最后将三维尺寸链分为显式和隐式两类,对于显式尺寸链,由装配关系传递图搜索连通通路可直接获取尺寸链图和方程;对于隐式尺寸链,提出了尺寸方向差异度的概念、封闭环方向优先的搜索策略以及构建过渡尺寸链的方法,最终可获取尺寸链图和方程。该方法已在自主开发的三维装配尺寸链自动生成系统中得到了验证。

**关键词** :三维装配尺寸链 装配性能特征 装配关系传递图 过渡尺寸链

**中图分类号** :TH24 TP391.7

## 0 前言

影响产品精度和可靠性的一个重要因素是产品公差,目前产品公差的确定基本沿用传统方法,即借助人工经验来确定,尽管近 20 年来计算机辅助公差设计与分析(Computer aided tolerancing, CAT)技术已经取得了一定成绩,但其距离真正实用还有一段距离,主要原因是 CAT 技术的研究热点和成绩基本集中在公差分析与综合这两个方面。

(1) 公差分析<sup>[1~4]</sup>。运用统计学方法,按照各种可能的分布情况,判断公差的累积作用结果,最终判断产品的精度。

(2) 公差综合<sup>[1,5,6]</sup>。以满足某一(些)目标为约束条件,建立公差的优化数学模型,运用各种成熟的优化方法,通过计算机的计算得到最优的公差分配。

这些研究成果中绝大多数方法的实现需要以正确的尺寸链为基础,即首先需要得到尺寸链模型和方程,然后基于尺寸链进行公差的分析与综合。但是到目前为止,尺寸链的自动生成技术还没有得到很好的解决,主要表现在目前的方法基本仅针对一维尺寸链的生成,无法自动生成二维或三维尺寸链;即使一维尺寸链的生成也需要较多的人机交互操作、过程较复杂、适应性不广等<sup>[7~14]</sup>。因此,为配合已成为主流的三维设计技术,研究三维装配尺寸链的自动生成,对计算机辅助公差设计和分析技术的实际应用,及其产品设计水平和效率的提高具有

较为重要的意义。

提出了装配性能特征、装配关系传递图和封闭环方向优先搜索策略等概念和方法,充分利用三维 CAD 装配模型及其零部件模型,深入挖掘其潜在的数据和信息,按照一定的算法,实现了三维装配尺寸链的自动搜索和生成。

## 1 装配性能特征

为提取三维装配尺寸链,首先要明确封闭环。通常装配尺寸链的封闭环是指多个相关零部件装配后自然形成的那个环,它表达了具有较高装配精度要求的零部件间相互尺寸或位置关系。目前,期望软件系统自动判断封闭环的位置是不切实际的,因此引入装配性能特征(Assembly performance feature, APF),该特征由人机交互确定,用来定义装配体的性能要求,为后续建立装配尺寸链提供封闭环信息,该特征包括如下内容。

(1) 装配性能特征的类型。确定装配精度要求的是线性长度还是圆周角度的间隙或过盈。

(2) 装配性能特征的作用对象。给出产生装配精度的几何元素特征。

(3) 装配性能特征的大小。给出装配精度的具体数值,包括其理想值和容差范围。

如图 1 所示的某曲柄滑块机构中,产品的最终性能要求是图中两个边界黑色显示的滑块侧面和底座滑槽侧面间极限位置的最小距离,因此该装配体的装配性能特征可定义如下。

(1) 装配性能特征的类型为线形长度间隙。

(2) 装配性能特征的作用对象为滑块零件中滑

\* 国家自然科学基金(50475162)和总装预先研究基金(41318.1.1)资助项目。20040728 收到初稿,20050104 收到修改稿

块侧面和底座零件中的滑槽侧面。

(3) 装配性能特征的大小为  $20\text{ mm} \pm 0.01\text{ mm}$  (极限最小距离)。

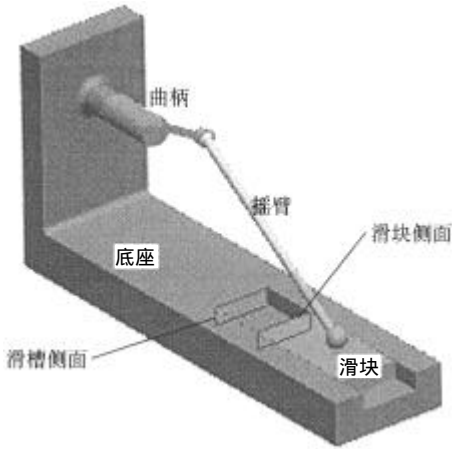


图1 装配性能特征

## 2 装配模型解析及预处理

在进行装配尺寸链的自动提取之前，需要对装配模型进行分析和处理，以提取装配模型中隐藏的信息和解决装配模型在设计时由于随意性导致的模型多样性等问题。

### 2.1 装配模型解析

目前 CAD 设计系统的装配模型大多以装配模型树来表达装配结构，如图 2 所示。装配树显式地表明了参与装配的零部件以及它们之间的隶属关系，如图中的装配层、子装配层和零件层，但没有显式地表达参与装配的特征信息以及其之间存在的装配约束关系，至于零件内部的尺寸信息等则隐含在各自的零件模型内，显然，这样的装配模型树不能直接为建立装配尺寸链提供所有必须的信息，需对其进行解析以获取底层信息。

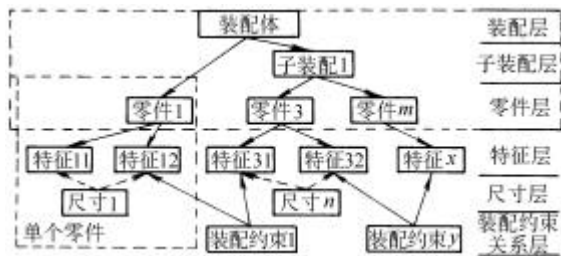


图2 装配模型树及隐含信息

装配模型的解析采用逐层解析法，从装配体顶层出发，逐层解析装配体以获得装配约束关系。然后根据装配约束关系进行零件级解析，获取特征及其草绘截面和尺寸，并进行尺寸匹配处理，即可得到特征与尺寸的对应关系，解析流程如图 3 所示，

这样即可获取图 2 中所示的特征层、尺寸层和装配约束关系层中的信息。

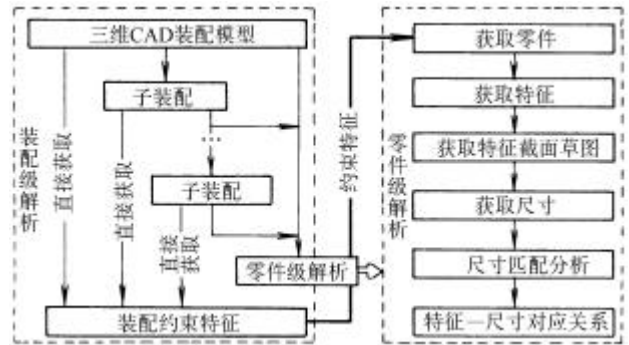


图3 装配模型解析方法

### 2.2 装配模型预处理

装配模型预处理主要是对 CAD 模型进行规范化处理，为后续尺寸链的自动搜索补充和修正搜索信息，这类问题主要包括下述三种预处理。

(1) 规范尺寸标注。在三维 CAD 软件中同样形状的特征可以有多种不同的设计方法，其截面草图也可以存在不同的绘制和尺寸标注方法，为方便尺寸链的自动搜索，需要对特征进行规范化处理。如创建拉伸长方体，绘制拉伸截面时，可有两种尺寸标注方式，如图 4a 和图 4b，虽然它们实现的效果相同，但在装配尺寸链的生成中，重点在于获取尺寸所标注的几何元素，故图 4a 有利于尺寸链信息的提取，因而要对图 4b 的标注方式进行规范化处理。

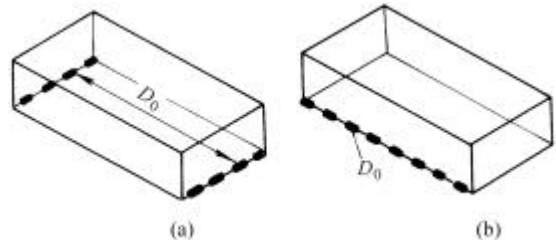


图4 不同的尺寸标注方式

(2) 添加搜索转移标记。三维参数化环境下的特征设计经常使用几何约束，例如两个同心的通孔，在设计时，第一个通孔通过定义尺寸已经完全定位，第二个通孔则采用与第一个孔同心的几何约束实现定位，若在尺寸链的搜索过程中，搜索到第二个通孔特征时，因为此特征并没有直接的定位尺寸信息，搜索过程将会认为此特征已经达到搜索终点，导致尺寸链的搜索失败，因此必须添加搜索转移标记，将搜索目标转向第一个通孔，则搜索过程会搜索第一个通孔的相关尺寸，使尺寸链的搜索得以继续。需要添加转移标记的几何约束主要有：共面、同轴、同点、点在直(曲)线上、点或线在面上等。

(3) 显化尺寸。在模型的设计中，经常通过全

等、对称和镜像等方法确定或拷贝特征，这些特征的尺寸只标注在其原始特征上，如果在尺寸链的搜索过程中遇到了这些派生出来的特征，因为该特征上没有尺寸标注，会导致搜索无法继续。因此需要对这类特征的尺寸进行显化处理。如图 5 所示，先设计好该连杆左端的凸台和连接孔，然后通过镜像方式得到右边的凸台和连接孔，则该镜像特征需要进行尺寸的显化处理，这样当生成尺寸链时搜索到该特征时，便可以获取相关的尺寸，使搜索得以继续。

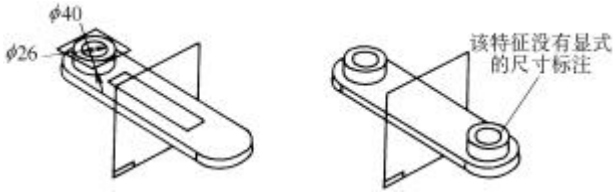


图5 拷贝所得特征

将上述模型的分析处理统称为装配尺寸链自动生成前的装配模型预处理。

### 3 装配关系传递图

基于 CAD 装配模型，利用图论，提出装配关系传递图(Assembly relation transfer graphics, ARTG)来表达装配体中参与装配的零件和特征以及其之间的装配约束关系和尺寸等信息的传递过程，其数学表达式如下

$$G = (F, D) \tag{1}$$

式中， $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$  为零件上的相关特征， $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$  为特征与特征之间的尺寸以及特征与特征之间的装配约束关系。利用该图可以形象直观地表达装配模型中装配约束的传递关系，以及零件间或零件内所有对封闭环有影响的尺寸的链接关系，且便于计算机表达和处理，因而能为尺寸链的自动生成提供基础。装配关系传递图的具体建立方法详述如下。

#### 3.1 特征 - 尺寸邻接矩阵

三维环境下的零件尺寸，可以看作是某两个面之间或某个面自身的尺寸，也就是特征之间或者特征本身的尺寸。由前述的装配模型解析，可提取特征与尺寸的隶属关系，便可为每个零件生成特征 - 尺寸邻接矩阵  $A^k(i, j)$ ，其中  $k=1, 2, \dots, n$ ，表示零件  $1, 2, \dots, n$ 。 $A^k(i, j)$  如式(2)所示， $A^k_{ij}$  是特征  $i$  与特征  $j$  之间的尺寸，0 表示特征  $i$  与特征  $j$  之间没有尺寸。同时，将装配模型预处理中的搜索转移标记也记录到  $A^k(i, j)$  中，例如若  $A^k_{ij} = a_s$ ，表示特征  $i$

与特征  $j$  有共轴关系。

$$A(i, j) = \begin{matrix} & \text{特征 1} & \text{特征 2} & \dots & \text{特征 } n \\ \text{特征 1} & 0 & l_1 & \dots & l_2 \\ \text{特征 2} & l_1 & d_1 & \dots & a_s \\ \text{M} & \text{M} & \text{M} & & \text{M} \\ \text{特征 } n & l_2 & \dots & \dots & 0 \end{matrix} \tag{2}$$

#### 3.2 特征 - 装配约束关系邻接矩阵

提取装配体中零件的装配约束信息，生成每个零件的特征 - 装配约束关系邻接矩阵  $B^k(i)$ ，如式(3)所示， $B^k_i$  表示参与装配的零件  $k$  中特征  $i$  的装配约束关系类型，以及与其产生装配关系的零件和特征，其中  $C_i$  表示装配约束关系类型，冒号后面表示与该特征发生装配关系的零件及具体的特征， $C_1$  表示该特征是构成封闭环的元素之一，0 表示该特征上没有装配约束关系。

$$B^k(i) = \begin{matrix} & \text{装配约束} \\ \text{特征 1} & C_1: \text{零件} - \text{特征}j \\ \text{特征 2} & C_2: \text{零件}x - \text{特征}y \\ \text{M} & \text{M} \\ \text{特征 } i & C_1 \\ \text{M} & \text{M} \\ \text{特征 } n & 0 \end{matrix} \tag{3}$$

#### 3.3 生成装配关系传递图

利用前面提取的特征 - 尺寸邻接矩阵  $A^k(i, j)$  和特征 - 装配约束关系邻接矩阵  $B^k(i)$ ，可以生成装配关系传递图  $G = (F, D)$ 。生成方法如下：从封闭环的一端开始搜索，获取构成封闭环这一端的几何信息  $\{f_k^1\}$  及其所属零件信息  $P_k$ ，然后根据该零件的  $A^k(i, j)$  搜索与该特征有尺寸关联的特征，生成该零件的相关特征集合  $F_k^R = \{f_k^1, f_k^2, \dots, f_k^l\}$ ，显然  $\{f_k^1\} \in F_k^R \subset F$ 。然后利用特征 - 装配约束关系邻接矩阵  $B^k_i$  判断  $F_k^R$  中的元素对应的装配约束类型，如果  $\{f_k^i\} \in F_k^R$ ， $i \in \{1, 2, \dots, l\}$  的类型为  $C_1$ ，则表示该特征是封闭环的另一个端点元素，至此构成了一条装配通路，若  $\{f_k^i\}$  的类型是  $C_i: \text{零件}x - \text{特征}y$ ，表示该特征与另一个零件  $x$  的特征  $y$  有装配关系，通过该零件  $x$  有可能构成另一条装配通路，则将搜索位置传递到零件  $x$ ，若  $\{f_k^i\}$  的类型是 0，则表示该特征没有装配约束关系，则一定不可能组成装配通路。这样依次搜索相关零件和特征，即可绘制得到装配关系传递图，ARTG 示意图如图 6 所示。

装配关系传递图是自动生成尺寸链的依据，但在实际应用中还需要根据尺寸链的类型，采用不同的处理方法。

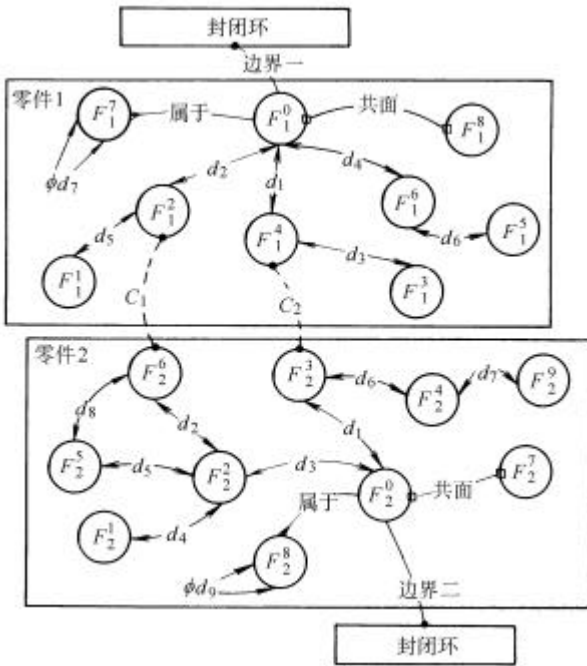


图6 装配关系传递图

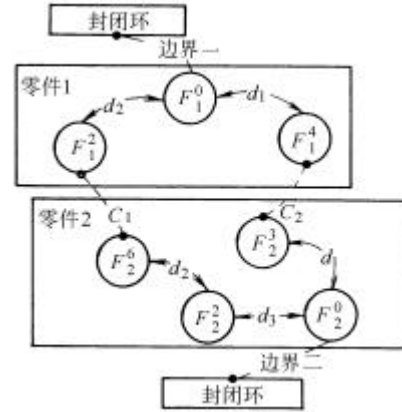


图7 装配通路

### 4 尺寸链的自动生成方法

根据封闭环的方向性，将三维装配尺寸链分为以下两类。

(1) 显式三维装配尺寸链。又称为第一类装配尺寸链，指其封闭环本身具有三维空间方向的装配尺寸链，即封闭环在装配体坐标系的三个方向上均有投影分量。

(2) 隐式三维装配尺寸链。又称为第二类装配尺寸链，指在一些较复杂的装配体中，封闭环具有单向性(即封闭环仅在装配体坐标系的某单一方向上有投影分量)，但它构成的尺寸链却是空间三维的装配尺寸链。

#### 4.1 显式三维装配尺寸链的自动生成

对于显式三维装配尺寸链，因为此类尺寸链的封闭环通常情况下是点与点之间的距离，其零部件的相关尺寸一般在三个方向内分别标注，故可直接使用 ARTG 搜索得到其尺寸链。

首先直接生成装配体的装配关系传递图，然后抽取装配关系传递通路，即在不考虑自回路的情况下，逐次删除图中的悬点，例如图 6 零件 1 中的悬点  $F_1^5$  删除掉之后， $F_1^6$  变为悬点，则继续删除，然后取图中最短通路，如零件 2 中的  $F_2^6 \xrightarrow{d_8} F_2^5 \xrightarrow{d_5} F_2^2$  和  $F_2^6 \xrightarrow{d_2} F_2^2$ ，按照尺寸链最短原则，删除前者取后者，最终得到如图 7 所示的装配通路。

根据装配通路，将每个零件作为一个结点，提取零件级装配通路  $G^P = \{P, D\}$ ，其中  $P = \{p_1, p_2, \dots,$

$p_w\}$ 表示图中的零件，如图 8 所示。计算每个图中零件的度数  $d(p_i)$ ，若  $\max(d(p_i)) - 1 = 1$ ，则该装配尺寸链为一维尺寸链；若  $\max(d(p_i)) - 1 = 2$ ，则该装配尺寸链可能为二维或一维尺寸链；若  $\max(d(p_i)) - 1 \geq 3$ ，则该装配尺寸链可能为三维、二维、或一维尺寸链。对于可能为非一维装配尺寸链的情况，还需要进一步判断每条通路的方向，若所有的通路方向均可以分解到一个平面内的两个垂直坐标轴方向上，则该装配尺寸链可确定为二维尺寸链，若所有的通路方向可分解到三个互相垂直的坐标轴上，则该尺寸链可确定为三维尺寸链。

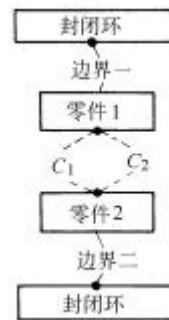


图8 零件级装配通路

最后按照尺寸链的维数，将装配通路中的尺寸分别向三维坐标系投影即可生成相应的尺寸链分量，这些分量的合成即为装配尺寸链。

#### 4.2 隐式三维装配尺寸链的自动生成

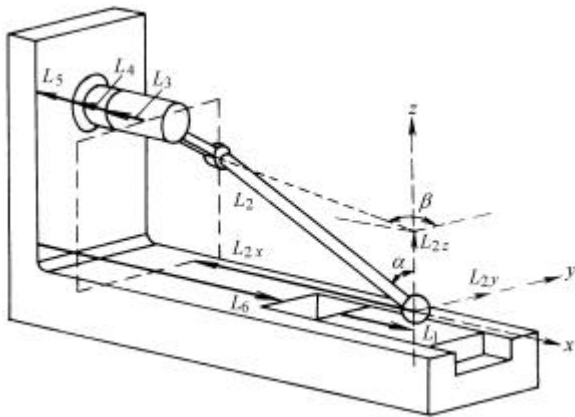
对于隐式三维装配尺寸链，仅简单地使用 ARTG 无法成功获取尺寸链，因此需要基于 ARTG，研究智能化的搜索策略。

##### 4.2.1 封闭环方向优先搜索策略

首先引入尺寸方向差异度的概念，即在使用 ARTG 搜索尺寸链时，每搜索到一个尺寸，需要判断当前尺寸方向  $D$  和封闭环方向  $F$  的差异度  $n$ ，即两个方向矢量在三维坐标系中方向差异的程度，方向相同差异度为 0，方向不同但在同一平面(或平行平面)内差异度为 1，方向不同且不再同一平面(或平

行平面)内, 差异度为 2。因此封闭环方向优先搜索策略就是在生成 ARTG 时, 当某尺寸的差异度大于 0, 即具有不同于封闭环方向的尺寸分量时, 先搜索和记录封闭环方向的尺寸分量, 并将其作为尺寸链中的一个组成环, 而不同方向的尺寸分量则作为新的封闭环或组成环用于构建过渡尺寸链, 以辅助三维尺寸链的求解。后续的论述中可以看到尺寸链的维数就是  $n+1$  维。

这样以封闭环为起点进行一次 ARTG 搜索, 即可得到与封闭环方向相同的尺寸链分量, 如图 9 所示, 当尺寸链的搜索进行到倾斜的摇臂零件后, 判断可知该零件的方向与封闭环方向不同, 且可向三个方向投影得到三个投影分量, 这时仅记录与封闭环方向相同的  $L_{2x}$ , 同时保留其他两个分量  $L_{2y}$ 、 $L_{2z}$  为后续构建过渡尺寸链提供信息。



$$A(i, j) = \begin{matrix} & 3 & 4 & 5 & 6 & 9 & 10 & 11 & 12 & 14 \\ \begin{matrix} 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \\ 14 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{25} & 0 & 0 & 0 & d_{10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{26} & d_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{27} & 0 & 0 & d_{28} \\ d_{25} & 0 & 0 & 0 & d_8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{26} & d_{27} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_{28} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

装配约束

$$B(i) = \begin{matrix} 9 & C_1: \text{曲柄}-10 \\ 10 & C_2: \text{曲柄}-11 \\ 11 & C_1: \text{滑块}-5 \\ 12 & C_1 \\ 14 & C_1: \text{滑块}-4 \end{matrix} \quad (5)$$

(3) 以封闭环方向优先搜索得到封闭环方向的尺寸链分量,如图 12 所示。

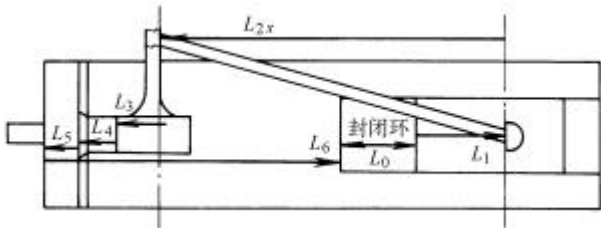


图12 封闭环方向(x向)尺寸链分量

得到封闭环尺寸链的方程式为

$$L_0 = L_{2x} + L_3 + L_4 + L_5 - L_6 - L_1 \quad (6)$$

式中

$$L_{2x} = L_2 \sin a \cos b \quad (7)$$

(4) 构建过渡尺寸链,得到如图 13 所示的两个过渡尺寸链。

$$L_{2y} = W_1 + W_2 - W_3 - W_4 \quad (8)$$

$$L_{2z} = H_2 + H_3 - H_4 - H_1 \quad (9)$$

式中

$$L_{2y} = L_2 \sin a \sin b \quad L_{2z} = L_2 \cos a \quad (10)$$

$$W_1 = D_9 \cos g \quad (11)$$

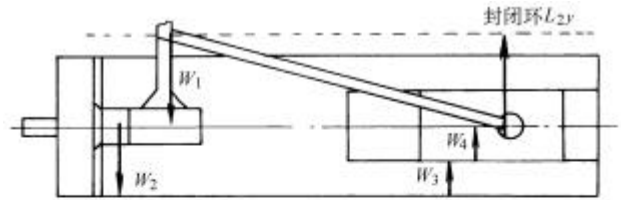
$$H_1 = D_9 \sin g \quad (12)$$

$g$  为已知装配尺寸,联立式(6)~(12)可解得封闭环尺寸链方程。

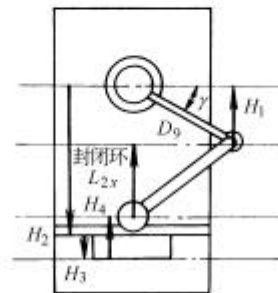
## 6 系统开发

基于上述理论,在 Pro/E 野火版上利用 Pro/Toolkit 和 VC6.0 开发了三维装配尺寸链的自动生成系

统 APPA。系统采用文档—视结构,以动态连接库与 Pro/E 紧密集成。系统启动后自动调整窗口布局,用户可在本系统中交互操作,完成尺寸链的自动生成。



(a) y 向



(b) z 向

图13 过渡尺寸链

生成的尺寸链方程以 XML 格式输出,为后续的公差分析和综合所用。

## 7 结论

三维装配尺寸链的自动生成对计算机辅助公差设计与分析的实用化具有重要意义,也是近年来的研究热点。所提出的方法以图论为理论基础,可以最大限度地利用 CAD 装配模型,提取建立装配尺寸链所需的信息,并针对不同类型的装配尺寸链,采取不同的算法进行自动搜索。在 Pro/E 上二次开发的三维装配尺寸链自动生成系统,证明该方法对一维、二维和三维尺寸链均适用,且使用简便、搜索正确、无需太多的人机交互,为计算机辅助公差设计和分析的进一步开展和实际应用提供了基础工具。

### 参 考 文 献

- 1 吴昭同,杨将新. 计算机辅助公差优化设计. 杭州:浙江大学出版社,1999
- 2 Lin Z C, Chang D Y. Cost-tolerance analysis model based on a neural networks method. International Journal of Production Research, 2002, 40(6): 1 429 ~ 1 452
- 3 Mu C C. Tolerance synthesis by neural learning and nonlinear programming. International Journal of Production Economics, 2001, 70: 55 ~ 65
- 4 Swami D N, Joshua U T. Review of statistical approaches

- to tolerance analysis. *Computer Aided Design*, 1995, 27(1) : 6 ~ 15
- 5 Ji S, Li X, Ma Y, et al. Optimal tolerance allocation based on fuzzy comprehensive evaluation and genetic algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2000, 16 : 4614 ~ 68
  - 6 Yang C C, Naikan V N A. Optimum design of component tolerances of assemblies using constraint networks. *International Journal of Production Economics*, 2003, 84 : 149 ~ 163
  - 7 田立中, 马玉林, 姬舒平. 装配尺寸链自动生成的研究. *工程设计*, 2000, 7(4) : 21 ~ 24
  - 8 侯永涛, 顾寄南, 黄娟. Pro/Engineer 平台下装配尺寸链生成的研究. *中国制造业信息化*, 2003, 32(7) : 127 ~ 129
  - 9 王洋, 王春河, 高峰, 等. 基于特征的装配尺寸链自动生成及分析的研究. *计算机辅助设计与图形学学报*, 1998, 10(2) : 138 ~ 144
  - 10 王克武. 查找和解算尺寸链的一种算法. *连云港职业技术学院学报*, 2000, 13(3) : 35 ~ 37
  - 11 肖迪, 张根保, 王旭初. 一种公差建模方法及其在尺寸链自动生成中的应用. *机床与液压*, 2001, 29(6) : 156 ~ 157
  - 12 刘琦. 基于 MDT 的装配尺寸链生成与公差分析系统的研究 : [硕士学位论文]. 杭州 : 浙江大学, 2002
  - 13 周恺. 面向装配的计算机辅助公差设计及选择装配 : [硕士学位论文]. 北京 : 北京理工大学, 2003
  - 14 柴国柱. 面向装配的尺寸链及其链节模型的自动生成 : [博士学位论文]. 哈尔滨 : 哈尔滨工业大学, 2000

## AUTOMATIC GENERATION OF 3D

## ASSEMBLY DIMENSION CHAINS

*Wang Heng Ning Ruxin Tang Chengtong*  
(*School of Mechanical and Vehicular Engineering,*  
*Beijing Institute of Technology, Beijing 100081*)

**Abstract :** An automatic generation method of 3D assembly dimension chains is proposed based on 3D CAD models. Starting with the definition of assembly performance feature (APF), CAD models are deeply analyzed and pre-treated to get the data hiding in the models needed by tolerance analysis. Then based on graph theory, feature-dimension adjacent matrixes, feature-assembly constraint type adjacent matrixes and assembly relation transfer graphics (ARTG) are built, which can express the information transfer process of parts, features, assembly constraints and dimensions in an assembly. Finally, 3D assembly dimension chains are classified into two types, explicit and implicit chains. For explicit chains, tolerance chain graphs and equations can be directly got from ARTG through searching connected routes. For implicit chains, the conception of degree of dimension direction unlikeness and the searching policy which gives priority to closing-loop-direction are proposed, and finally tolerance chain graphs and equations can be achieved by the method of building transition tolerance chain. The method is validated by our own-developed 3D assembly dimension chain automatic generation system.

**Key words :** 3D assembly dimension chains

Assembly performance feature

Assembly relation transfer graphics

Transition dimension chain

作者简介：王恒，男，1975 年出生，博士研究生。主要研究方向为 CAD/CAM 集成技术、虚拟制造技术，发表论文 20 余篇。

E-mail : wangheng@bit.edu.cn