

# 几何要素误差传递关系图的建立方法

杨灵锋, 吴玉光

(杭州电子科技大学机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘 要:** 针对三维环境下标注的检验、分析和管理的問題, 提出了基于实体模型的零件几何要素误差传递关系图的概念和建立方法。首先根据几何公差关联的几何要素之间的基准-目标关系建立误差传递关系子图; 然后根据几何要素的类型、位置关系和尺寸线的位置信息确定尺寸公差关联的几何要素之间的基准-目标关系, 从而将几何要素之间无向的尺寸关联关系转化为有向的误差传递关系, 实现增加和扩充误差传递关系子图的目的; 最终形成整个零件的几何要素误差传递关系图。基于 SolidWorks 的二次开发功能, 使用 VC++ 语言开发了原型软件, 通过实验验证了该方法的可行性。

**关 键 词:** 误差传递关系图; 几何公差; 尺寸公差; 基准-目标关系

中图分类号: TP 391.72

DOI: 10.11996/JGj.2095-302X.2020020295

文献标识码: A

文章编号: 2095-302X(2020)02-0295-09

## Construction method of error transfer graph of geometric elements

YANG Ling-feng, WU Yu-guang

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

**Abstract:** In view of the problems of inspection, analysis and management of annotation in 3D environment, the present study proposed the concept and construction method of error transfer relationship graph of part geometric elements based on solid models. First, the sub graph of error transfer relationship was established according to the datum-target relationship between geometric elements associated with geometric tolerance. Then, the datum-target relationship between geometric elements associated with dimension tolerance was determined according to the geometric elements' types, location relationships and location information of dimension lines. Thus, the directionless dimension relationship between geometric elements was transformed into the directional error transfer relationship, increasing and expanding the error transfer relationship sub graph. Finally, the error transfer graph of the whole part was constructed. Based on the secondary development function of the software SolidWorks, the prototype software was developed with VC++, and the feasibility of the method was verified through exemplification.

**Keywords:** error transfer relationship graph; geometric tolerance; dimension tolerance; datum-target relationship

收稿日期: 2019-10-10; 定稿日期: 2019-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675147)

第一作者: 杨灵锋(1994-), 男, 浙江杭州人, 硕士研究生。主要研究方向为公差分析技术。E-mail: carmenyang17@163.com

通信作者: 吴玉光(1961-), 男, 浙江兰溪人, 教授, 博士。主要研究方向为机械设计自动化, 夹具自动设计、公差分析与综合等。

E-mail: ygwu@hdu.edu.cn

几何要素误差传递关系图是反映零件上几何要素之间位置关系、位置定义方式的数据结构。通过几何要素误差传递关系图可以明确零件上几何要素之间的基准-目标关系,从而实现几何公差和位置检验的自动化;根据几何要素的基准-目标关系可以方便地判断尺寸公差和几何公差标注信息的正确性,找到缺失定位信息的几何要素,因此零件的几何要素误差传递关系图是零件实体模型中管理标注信息的重要工具。几何要素的误差传递关系图可以为三维环境下的工程设计系统的自动化提供基础,从而提高产品的设计质量和生产效率。

针对三维标注信息的管理及其正确性、合理性检查的方法,已有多位学者进行了研究。石源等<sup>[1]</sup>基于有序路径的集合搜索边界表示模型的零件表面,将表面划分为同类表面和异类表面,提出了表面之间的距离自动度量方法;文献[2-3]基于产品的信息交换标注(standard for the exchange of product information, STEP)建立了表示零件表面之间拓扑关系的数据结构图,并以图的结点和属性为索引项建立简单的图索引来管理零件的标注信息;HWAN 和 KUNWOO<sup>[4]</sup>通过将表面作为结点,用边和面表示结点之间的关系,提出了一种基于边界表示模型的尺寸自动标注方法;DESROCHERS 等<sup>[5-6]</sup>以与工艺和拓扑相关的表面(technologically and topologically related surface, TTRS)和最小几何基准要素(minimum geometric datum elements, MGDE)表示零件层的公差信息和装配层的公差拓扑关系,从而分析几何公差的正确性和合理性;JABALLI 等<sup>[7]</sup>根据 TTRS 理论,通过建立一种名为蜘蛛图(the spider graph)的数据结构,提出了分析零件上所有定位表面和功能表面的公差标注的方法;唐杰<sup>[8]</sup>基于 TTRS 理论将尺寸划分为功能尺寸、非功能尺寸、TTRS 表面之间的尺寸,从而将零件上存在标注的几何要素相互关联起来,并建立了一套三维尺寸自动标注的算法;程亚龙等<sup>[9]</sup>提出了利用轨迹相交法<sup>[10]</sup>表示几何要素的定位的方法,并通过刚性体识别来检验三维标注的完备性,此方法通过将尺寸标注和角度标注转化为几何要素的运动轨迹表示几何要素的定位,但缺少用几何公差表示几何要素定位关系的研究;刘荣来和吴玉光<sup>[11]</sup>通过几何公差和尺寸标注表示零件几何要素之间的关联关系,提出了一种基于关联关系图的三维标注管理的方法;陈

晨和吴玉光<sup>[12]</sup>基于本征自由度<sup>[13]</sup>的概念,提出了一种三维几何公差标注正确性验证的算法,但缺少对尺寸标注的研究。

虽然研究者提出了一些三维标注信息处理的初步方法,但是现有的研究均未涉及如何确定线性尺寸两关联要素之间的定位与被定位关系,因此并不能准确且完整地找到定义几何要素位置及其变动的所有基准要素,也不能反映零件上所有几何要素之间的误差传递关系。本文研究零件实体模型上几何要素误差传递关系图的建立方法,通过零件表面的标注信息、几何类型和位置信息将所有的几何要素关联起来,确定尺寸标注关联的几何要素之间的基准-目标关系,从而建立包含尺寸公差、几何公差以及隐含位置信息的几何要素误差传递关系图。

## 1 误差传递关系图的相关概念

### 1.1 误差传递关系图的基本单元

在尺寸和几何公差标注中,关联要素具有明确基准-目标关系的标注是零件几何要素误差传递关系图的基本单元,其中关联要素是图的结点,图的结点之间具有明确的指向关系,故误差传递关系图是一个有向图,基本单元是该图的子图。三维实体模型上的标注信息可分为几何公差、尺寸公差和隐含位置关系 3 大类,根据这些标注信息可以建立相应的基本单元。

几何公差标注已经明确了标注对象之间的基准-目标关系,因此几何公差标注是零件几何要素误差传递关系图的一个基本单元。如图 1(a)所示,柱面 F6 和平面 F1, F2, F3 之间的位置度公差连同两个理论正确尺寸完整定义了柱面 F6 的位置及其变动范围,这个位置度公差连同两个线性尺寸所构成的基本单元可以用图 1(b)所示的图形表示,柱面 F6 为基本单元的目标要素,平面 F1, F2, F3 为基本单元的基准要素。

尺寸公差、隐含位置关系所关联的几何要素之间还没有确定基准-目标关系,故其所关联的几何要素还不是基本单元,需要对关联要素进行确定基准-目标关系的操作。尺寸公差标注所关联的两个要素之间的定位与被定位关系没有确定,两者均有可能为基准或者目标,故两个要素之间的关联关系图用双向箭头表示,如图 1(c)的图形表示的是图 1(a)中的平面 F1 和 F5 之间的线性尺寸标注。基于一定的规则,将两者之间的双向关系变

成单向关系之后,图 1(c)就转化成了误差传递关系图的基本单元。

零件的几何要素之间还存在隐含的位置关系,例如两个球面同心、两个圆柱同轴和两个平面共面等,这些位置关系在不同的应用领域中具有不同的含义,存在这些位置关系的几何要素可能作为一个要素,也可能存在基准-目标关系,程

序也需要建立相应的规则进行自动识别。隐含关系可以用不带箭头的无向图表示要素之间的关联关系,图 1(d)的图形表示的是图 1(a)中平面 F4 和平面 F5 之间的共面关系,及图 1(a)中柱面 F7 和柱面 F8 之间的同轴关系。建立误差传递关系图时,需要将这一不带箭头的直线转化成带箭头的直线或者将两端节点进行合并。

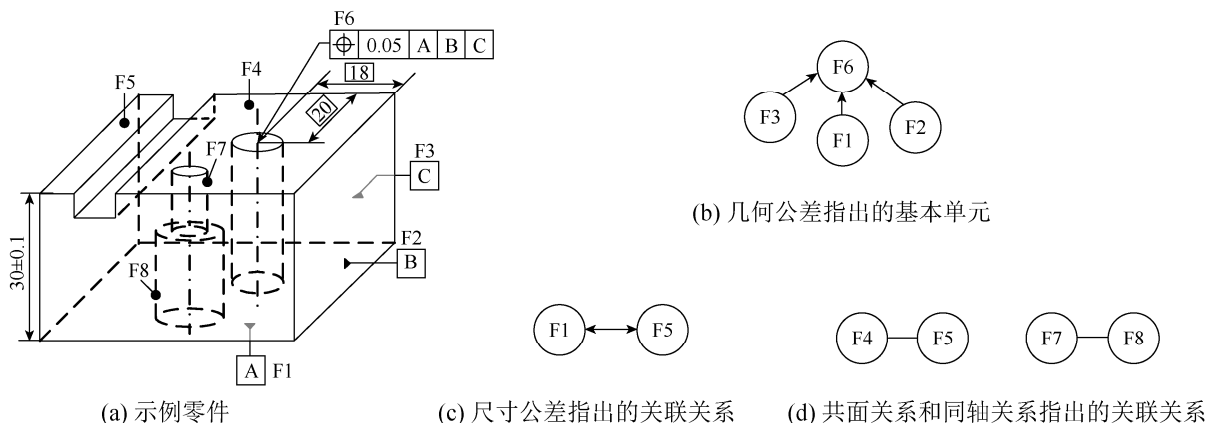


图 1 基本单元的图形表示

## 1.2 三维尺寸公差标注的隐含信息

几何要素的标注信息包括定位、定向和形状 3 个层次。线性尺寸和位置公差表示定位要求层次,角度标注和方向公差表示定向要求层次。形状公差表示形状要求层次,其不对几何要素进行定位和定向。定位层的标注信息和定向层的标注信息存在隐含的约定。例如,当一个线性尺寸标注两条空间直线的距离时,实际上还隐含约定了这两条空间直线在角度测量平面<sup>[13]</sup>上的夹角和该角度的自由公差,此时定位信息为显式信息,定向信息则为隐式信息。如图 2(a)所示,当柱面 F1 和柱面 F2 之间标注了线性尺寸时,还隐含了柱面 F1 和柱面 F2 轴线在以两者公垂线为法线的平面

(视图面  $yoz$ )的投影相互垂直,即柱面 F1 和柱面 F2 之间存在隐式的定向信息。假设柱面 F2 为目标、柱面 F1 为基准,则此时柱面 F2 在绕  $x$  轴转动的方向上不能再有别的基准要素对其进行定向。

定向层的标注在关联对象为直线和平面时,会同时存在显式信息和隐式信息。例如,直线和平面之间只标注一个角度时,实际存在两个定向关系,此时隐含了直线所在的角度测量平面与平面要素之间的角度为  $90^\circ$ 。如图 2(b)所示,柱面 F2 与平面 F1 之间存在  $80^\circ$  角度标注,表示柱面 F2 与平面 F1 在角度测量平面(平行于视图面  $xoz$ )上的夹角为  $80^\circ$ ,此时隐含了柱面 F2 与平面 F1 在视图面  $yoz$  上投影成直角。

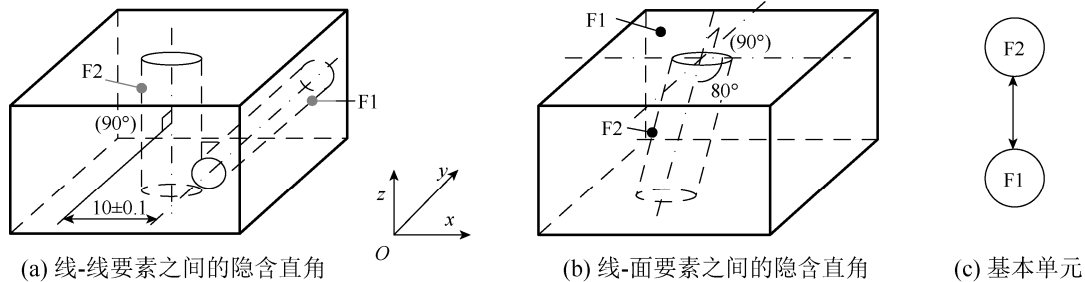


图 2 隐含约定的示例标注

当几何要素处于同心、共线、共面 3 种特殊位置时,隐含约定两者之间的距离尺寸为 0,两者之间的角度为  $0^\circ$  或  $90^\circ$ ,其公差为自由公差。

根据以上分析可知,存在显式标注信息关联的两个几何要素之间可能存在多个隐含的标注信息,这些隐含的标注信息需要结合实体模型,根

据关联要素的几何类型和位置关系来判断。如图 2(c)所示,图 2(a)的柱面 F2 与柱面 F1 的关联关系通过显式的线性尺寸查找得到,但是两者之间的双向箭头所表示关联关系同时包含显式的线性尺寸和隐式的角度标注。

## 2 关联要素的基准-目标关系确定规则

### 2.1 尺寸标注关联要素的基准-目标关系确定规则

由于零件的几何要素存在制造的先后顺序,线性尺寸或角度尺寸所关联的两个要素之间也必然存在定位与被定位的关系。以几何要素已有的标注信息和关联要素的几何类型、空间位置等信息为线索,可以归纳出以下 6 种确定关联要素之间的基准-目标关系的规则。

**规则 1.** 基础基准所在要素为尺寸公差的基准要素。基础基准是定义零件上其他要素的基础,由用户通过交互输入确定。线性尺寸和角度尺寸关联的两个要素中,如果其中一个要素为基础基准,则该要素必为基准要素,另一个要素为目标要素。

**规则 2.** 复杂几何要素为基准要素、简单几何要素为目标要素。如果线性尺寸标注的两个几何要素分别为面和边,且边要素为两个平面的交线,则面为基准要素,边为目标要素。如果线性尺寸标注的两个几何要素分别为线和点,且点要素为直线的顶点,则线要素为基准要素,点要素为目标要素。

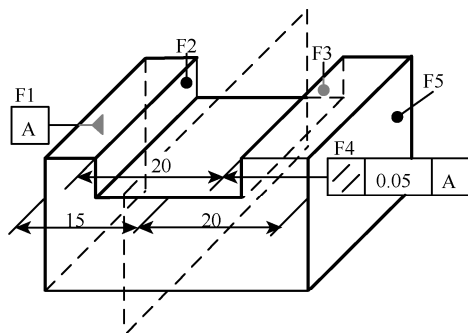
**规则 3.** 已定位的要素为基准要素、未定位的要素为目标要素。线性尺寸或者角度尺寸所关联的两个要素中,如果其中一个要素在尺寸关联方向的自由度被完全约束,则在该自由度方向上这个要素为基准要素,另一个要素为目标要素。如

图 3(a)所示,中心面 F4 与平面 F5 之间存在一个线性尺寸,而中心面 F4 是平行度标注单元的目标要素(图 3(b)),故中心面 F4 是当前尺寸标注的基准要素、平面 F5 是目标要素,两者之间的关系如图 3(c)所示。

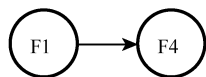
**规则 4.** 中心要素为成组要素的基准要素,成员要素为目标要素。成组要素的成员要素之间的尺寸标注是内部尺寸,表示了中心要素对成员要素的定位,成组要素内部通过“中心要素→成员要素”进行误差传递,在误差传递关系图通过中心要素进行误差传递。宽度要素是最简单的成组要素,如图 3(a)所示,宽度要素由平面 F2 和 F3 组成,F2 和 F3 之间的尺寸标注形成两个基本单元,中心面 F4 作为 2 个基本单元的基准要素,成员要素 F2 和 F3 分别作为 2 个基本单元的目标要素,结点之间的关系如图 3(d)所示。

**规则 5.** 基线所在要素为基准要素。基线标注是指具有多个平行的尺寸线的标注方式,在这种标注方式中,所有尺寸线共用一个关联要素,其余要素位于该公共要素的同一侧,此时公共要素作为所有尺寸标注的基准要素,其余关联要素都作为目标要素。如图 4(a)中,平面 F1 为基准要素,其余关联要素 F2, F3, F4, F5 都作为目标要素。

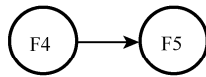
**规则 6.** 连续标注的两端要素分别作为基准和目标要素。连续标注是指尺寸线共线的多个线性尺寸标注。这种标注方式中,除了两端的关联要素以外,其余关联要素会相继出现在两个连续的尺寸标注中,此时只要确定连续标注最外边两端的对象之间的基准-目标关系,则其余标注对象的“基准-目标”关系便可以随之确定。图 4(b)所示标注为连续标注,此时只要确定平面 F1 和平面 F5 的基准-目标关系,其余平面 F2, F3 和 F4 之间的基准-目标关系即可确定。



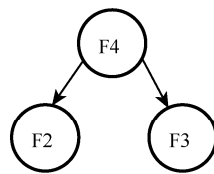
(a) 示例零件



(b) 已知的基本单元



(c) 新的基本单元



(d) 宽度要素的基本单元

图 3 已定位要素为基准要素的示例

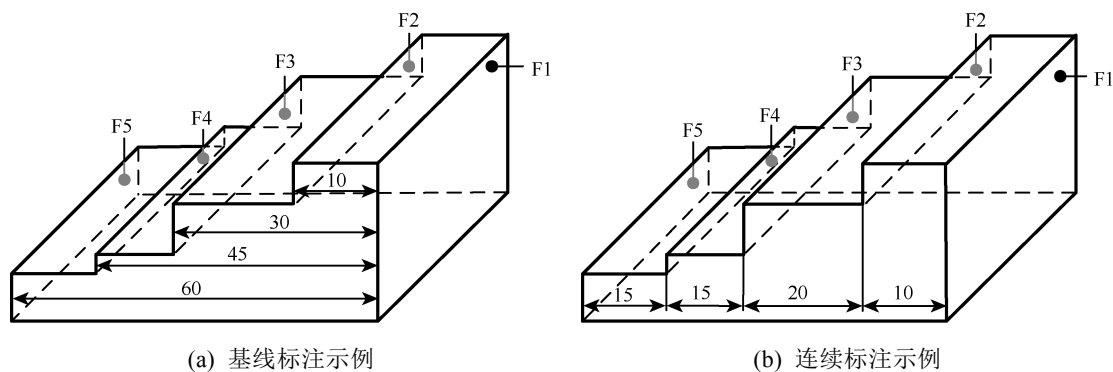


图4 基线标注和连续标注的示例图

## 2.2 隐含关系的判断规则及其关联要素的基准-目标关系确定规则

当尺寸标注显示在二维图纸上时, 三维尺寸标注的隐含关系通过视图投影就已经明确了, 但在三维实体模型中, 计算机并不能直接获得隐含关系, 所以需要制定相应的规则, 才能在建立误差传递关系图的过程中使程序可以自动识别隐含关系。为此, 需要对几何要素之间存在的同轴、共线、共面等特殊的位置关系建立相应的判断规则。

这些判断规则包括: ①两球面同心的判断规则(两个球面的球心位置相同); ②点在直线上的判断规则(点位于直线的两个端点之间); ③两轴线共线的判断规则(两轴线存在重合的线段、两条轴线存在相同端点且方程相同、两轴线为复合孔特征中的两条轴线); ④球面在平面上的判断规则(球心在面的边界内或边界上); ⑤轴线在平面上的判断规则(轴线与平面的法线垂直且轴线至少有一个端点在面的边界内或边界上); ⑥两平面共面的判断规则(两个平面的方程相同且都是中心要素、或者两平面为复合平面特征中的两个面)。

隐含关联关系可以转化为距离为 0、角度为  $90^\circ$  或  $0^\circ$  的尺寸标注, 其关联要素之间的基准-目标关系判断规则与显式尺寸标注关联要素之间的基准-目标关系判断规则相同。

## 3 建立误差传递关系图的算法

零件的几何要素误差传递关系图的建立过程为: ①人机交互输入零件的基础基准和目标要素; ②根据几何公差提取已确定基准-目标关系的标注基本单元, 并建立其集合, 提取尺寸和角度标注的关联要素, 提取存在隐含位置关系的关联要素; ③确定线性尺寸、角度标注和存在隐含位置关系的关联要素的基准-目标关系, 并将其添加到已确

定基准-目标关系的标注基本单元集合中; ④根据已确定基准-目标关系的标注基本单元集合建立误差传递关系图。具体的算法流程如图 5 所示。

存在两种程序无法自动判断的情况: ①基础基准要素是定义零件中其余几何要素位置的基础, 不能自动识别, 需要人机交互输入; ②当规则 1、规则 2 和规则 4 判断的尺寸标注的关联要素之间的基准-目标关系以及几何公差的关联要素之间的基准-目标关系发生冲突时, 即 A 要素既作为 B 要素的基准又作为 B 要素的目标时, 需要根据零件具体的功能要求才能判断是几何公差标注不合理, 基础基准选择不合理还是成组要素中的成员要素定义不合理, 这些问题无法通过程序自动识别, 所以直接提示当前尺寸存在矛盾, 无法生成误差传递关系图。

## 4 实例验证

本文建立的几何要素误差传递关系图的思想已在我们编制的标注正确性验证原型软件中得以实现, 该原型软件基于 SolidWorks 的 API 函数、利用 C++ 语言开发。该软件通过判断误差传递关系图中目标要素的定位完整性来判断是否存在遗漏标注情况, 并通过对比由误差传递关系图计算出的几何要素的理想位置和零件实体模型中该要素的理论位置, 判断尺寸标注的正确性。

图 6 为二级减速箱的箱体零件图, 通过运行程序, 将该零件所需定位的几何要素进行编号, 编号的顺序为程序访问该几何要素的内存地址的顺序。

该二级减速箱参与装配的表面包括定位自身的底面 F18, 与转轴配合的柱面 F11, F33, F24, F25, F26, F27, 与端盖配合的平面 F36, F39, F46, F50, 以及与箱盖配合的平面 F23。零件在装

配中定位自身的基础基准包括, 底面 F18, 侧面 F14 和 F16 所体现的中心面 F54, 以及侧面 F15 和 F17 所体现的中心面 F62。由于该减速箱的功能体现在传动的输入和输出, 所以主要关注与转轴装配的柱面的误差受到哪些几何要素的影响, 即目标要素集合为柱面 F11, F33, F24, F25, F26, F27。其中 F33, F25 和 F27 与其他表面之间不存在尺寸标注, 为了简化生成的误差传递关系图,

暂不考虑这些表面。

根据图上标注的尺寸, 几何公差和隐含的位置关系分别获取单向链表、双向链表和无向链表, 链表包含的结点见表 1。此时已有的误差传递关系图子图如图 7(a)所示。

零件的基础基准有 F18, F54, F62, 根据规则 1 可以将双向链表的部分结点转化为单向链表的成员。

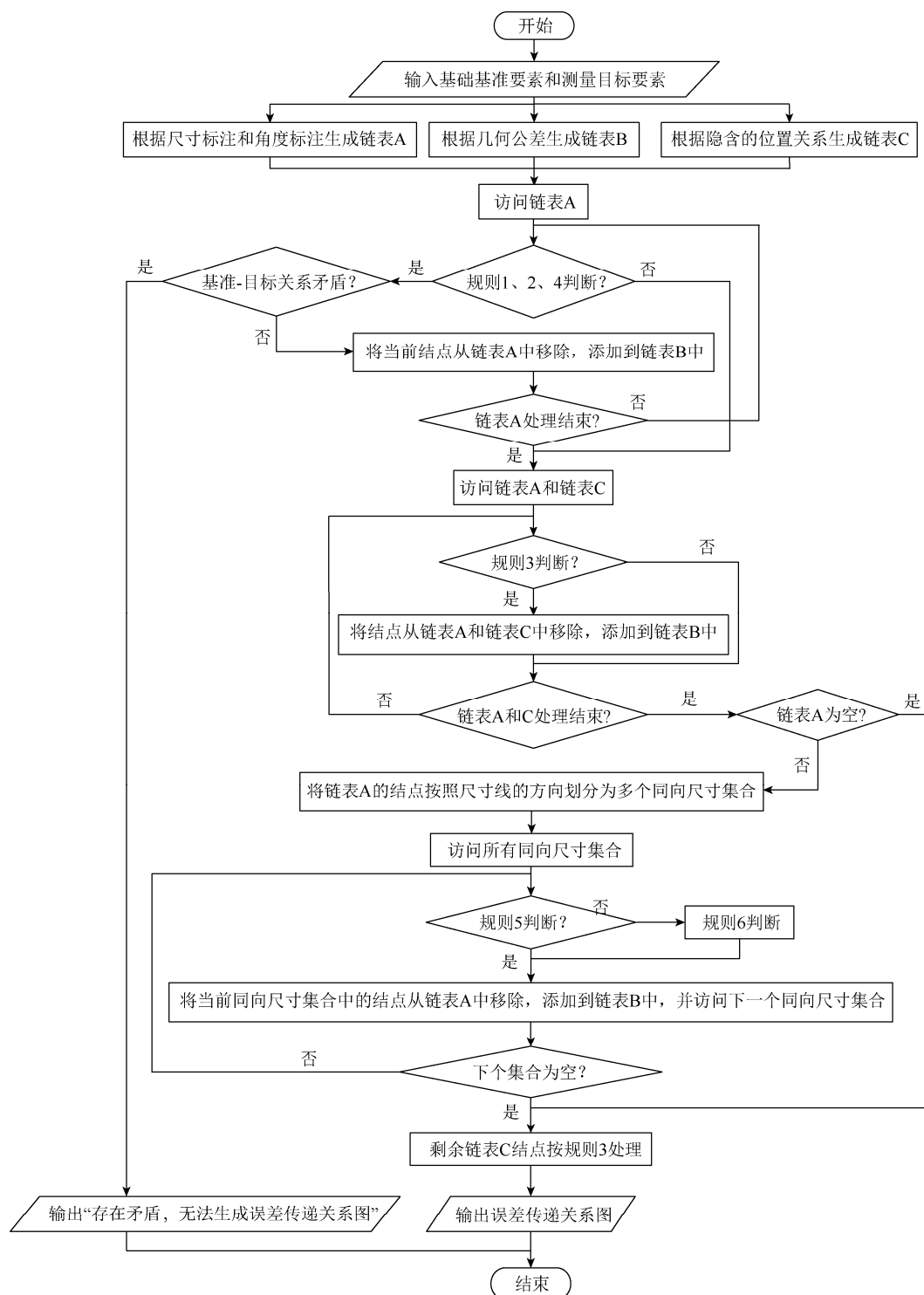


图 5 算法流程图

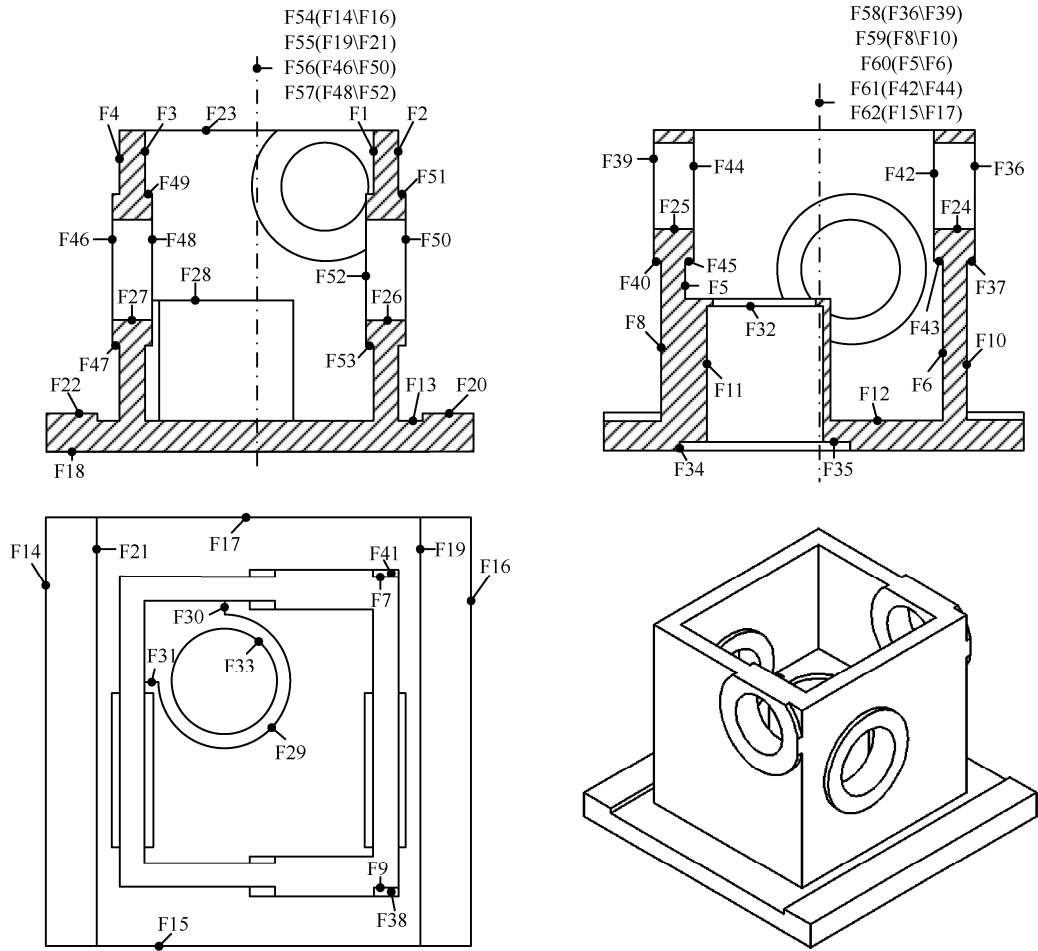


图 6 二级减速箱几何要素编号情况

表 1 3 个链表的结点汇总表

| 链表   | 结点汇总                                                                                                                                                                                                      |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 单向链表 | F18→F11,F11→F26,F26→F24                                                                                                                                                                                   |
| 双向链表 | F18↔F12,F18↔F20,F18↔F23,F18↔F24,F18↔F26,F18↔F28,F18↔F32,F18↔F35,F62↔F11,F62↔F31,<br>F54↔F11,F54↔F30,F14↔F16,F19↔F21, F48↔F52,F36↔F39, F8↔F10, F5↔F6,F42↔F44,F15↔F17,<br>F46↔F50,F50↔F2,F46↔F4,F2↔F1,F4↔F3 |
| 无向链表 | F54-F55-F56-F57, F62-F58-F59-F60-F61                                                                                                                                                                      |

宽度要素和对称要素需要通过用户定义的特征来获得，即通过查找零件上的宽度特征、凹槽特征和凹口特征获得。该箱体零件具有 8 个宽度要素，1 个对称要素。对于宽度要素和对称要素，采取中心面作为基准要素，两个实际表面作为中心面的目标要素来进行定位。这些宽度要素和对称要素的中心面分别为 F54，F55，F57，F58，F59，F60，F61，F62，根据规则 4 可以将这些结点转化为单向链表的成员，其组成要素以及定位关系的汇总见表 2。

此时 3 个链表的结点见表 3，为了简单表示零件的误差传递关系图，误差传递关系图的表示图中不显示宽度要素的成员要素以及不参与误差传递的共面 and 同轴要素，此时生成的子图如图 7(b)

所示。

根据规则 3 对零件将剩余的双向链表结点转化为单向链表结点。由于平面 F46 和 F50 被中心平面 F56 完全定位，中心平面 F56 由基础基准 F54 完全定位，此时 F46 和 F50 在双向链表的结点中只作为基准出现。根据规则 3，F50↔F2，F46↔F4 这两个双向链表结点可以转化为单向链表结点 F50→F2，F46→F4。

由于单向链表出现新的结点，对新的结点进行分析，平面 F4 被平面 F46 完全定位，平面 F2 被平面 F50 完全定位，此时 F2 和 F4 在双向链表的结点中只作为基准出现。根据规则 3，将 F2↔F1，F4↔F3 转化为 F2→F1，F4→F3。此时误差传递关系图如图 7(c)所示。

程序运行到此步, 由于双向链表的结点和无向链表的结点全都转化为了单向链表的结点, 所以程序结束运行, 输出误差传递关系图(图 7(c)), 运行结果如图 8 所示, 弹出窗口中的内容为误差传递关系图的列表表示形式, 窗口中的编号与零件表面和中心表面的内存地址一一对应。由图 7(c)

可知基础基准 F18 到目标要素 F11, F26, F24 的误差传递关系, 箱体底面 F18、箱体中心面 F54 和中心面 F62 共同定位传动输入端的柱面 F11; 箱体的底面 F18 和柱面 F11 共同定位传动中间轴的安装柱面 F26; 箱体的底面 F18 和柱面 F26 共同定位传动输出轴的安装孔柱面 F24。

表 2 几何要素内部定位汇总表

| 几何要素 | 定位汇总                                                                                         |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 宽度要素 | F14←F54→F16,F19←F55→F21,F48←F57→F52,F36←F58→F39,F8←F59→F10,F5←F60→F6,F42←F61→F44,F15←F62→F17 |
| 对称要素 | F46←F56→F50                                                                                  |

表 3 转化后的 3 个链表结点汇总表

| 链表   | 来源   | 结点汇总                                                                                                                                                    |
|------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 几何公差 |      | F18→F11,F11→F26,F26→F24                                                                                                                                 |
| 单向链表 | 规则 1 | F18→F12,F18→F20,F18→F23,F18→F24,F18→F26,F18→F28,F18→F32,F18→F35,F62→F11,F62→F31,F54→F11,F54→F30,F54→F55,F54→F56,F54→F57,F62→F58,F62→F59,F62→F60,F62→F61 |
|      | 规则 4 | F14←F54→F16,F19←F55→F21,F48←F57→F52,F36←F58→F39,F8←F59→F10,F5←F60→F6,F42←F61→F44,F15←F62→F17,F46←F56→F50                                                |
| 双向链表 | 尺寸标注 | F50←→F2,F46←→F4,F2←→F1,F4←→F3                                                                                                                           |

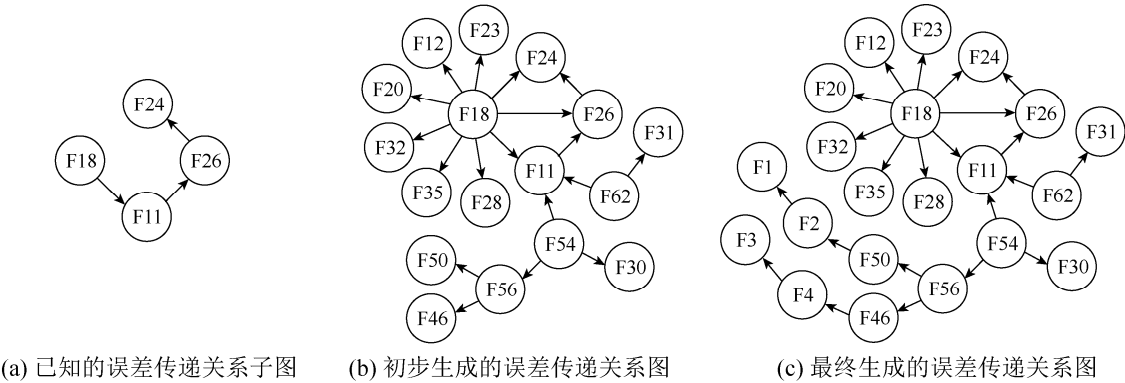


图 7 误差传递关系图的生成过程

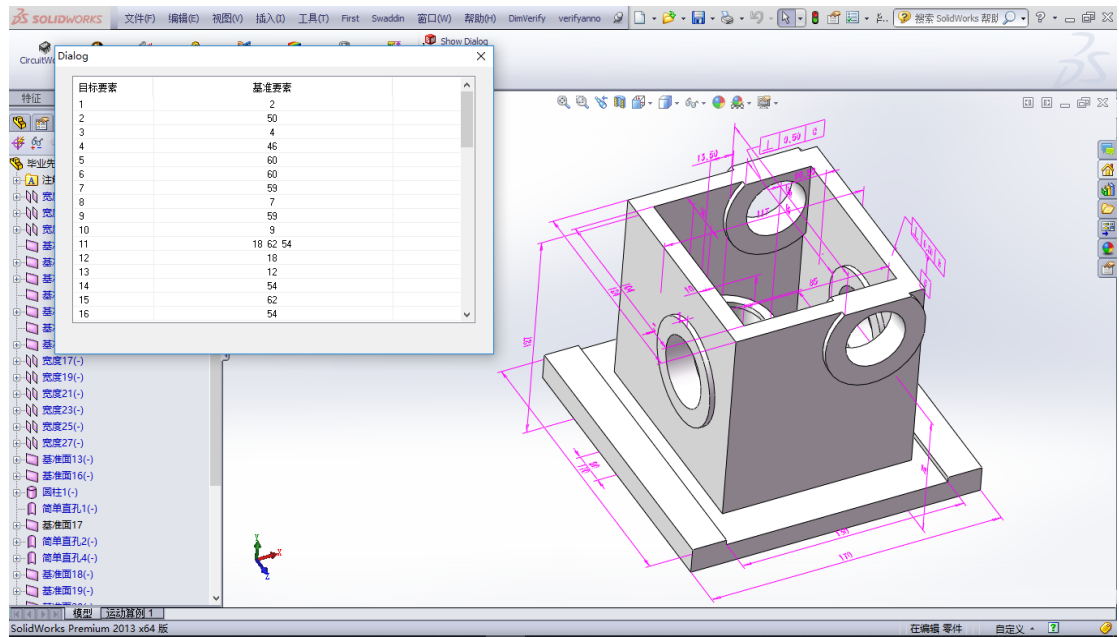


图 8 程序运行结果

## 5 结束语

几何要素误差传递关系图是进行零件的尺寸公差和几何公差标注管理、标注正确性检查等应用的重要工具,自动建立几何要素误差传递关系图对基于实体模型的CAD具有非常重要的意义。本文提出一种几何要素误差传递关系图的自动建立方法。首先以几何公差标注作为误差传递关系图的基础,然后判断尺寸标注和隐含关系所关联的几何要素之间的基准-目标关系,并将其添加到误差传递关系图中,最后形成一个完整的误差传递关系图。本文原型程序基于C++和SolidWorks的API进行开发,经过实例零件测试,验证了本文的设计思想。

### 参考文献

- [1] 石源,莫蓉,常智勇,等.基于有序路径集的边界表示模型搜索方法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2011,23(7):1238-1248.
- [2] EL-MEHALAWI M, MILLER R. A database system of mechanical components based on geometric and topological similarity. Part I: representation[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(1): 83-94.
- [3] EL-MEHALAWI M, ALLEN MILLER R. A database system of mechanical components based on geometric and topological similarity. Part II: indexing, retrieval, matching, and similarity assessment[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(1): 95-105.
- [4] HWAN O, KUNWOO L. Automatic dimensioning from 3D solid model with feature extraction[J]. American Society of Mechanical Engineers, 1990, 23(1): 115-119.
- [5] DESROCHERS A, CLÉMENT A. A dimensioning and tolerancing assistance model for CAD/CAM systems[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1994, 9(6): 352-361.
- [6] DESROCHERS A, RIVIÈRE A. A matrix approach to the representation of tolerance zones and clearances[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997, 13(9): 630-636.
- [7] JABALLI K, BELLACICCO A, LOUATI J, et al. Rational method for 3D manufacturing tolerancing synthesis based on the TTRS approach "R3DMTSyn"[J]. Computers in Industry, 2011, 62(5): 541-554.
- [8] 唐杰. 三维尺寸自动标注及尺寸链提取关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [9] 程亚龙, 刘晓军, 刘金锋, 等. 利用刚性体识别的三维尺寸标注完备性检查[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(2): 351-361.
- [10] 程亚龙, 刘晓军, 刘金锋. 基于轨迹相交的三维顺序尺寸标注完备性检查[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(8): 1799-1806.
- [11] 刘荣来, 吴玉光. 三维标注信息的管理方法研究[J]. 图学学报, 2014, 35(2): 313-318.
- [12] 陈晨, 吴玉光. 三维几何公差标注正确性验证技术及软件实现[J]. 杭州电子科技大学学报: 自然科学版, 2018, 38(3): 70-77.
- [13] 吴玉光, 刘玉生. 面向公差技术的几何要素自由度表示与操作及其应用[J]. 中国机械工程, 2015, 26(11): 1509-1515.