

# 基于生长型设计的公差研究\*

张勇 黄克正 高常青 杨志宏

(山东大学机械工程学院 济南 250061)

摘要：当前的公差设计研究大多集中于详细设计阶段，对设计前期的公差研究较少。在设计前期的公差设计将减少设计修改并缩短设计周期。在生长型概念结构设计的基础上，将公差问题提前到概念设计阶段。首先介绍生长型设计的基本概念和模型，而后研究结构与公差并行设计的过程模型。分析在设计过程中自动生成局部尺寸链和全局尺寸链的方法，建立公差设计和反馈的整体框架。应用此方法实现了液压缸夹具的尺寸公差设计。

关键词：公差 生长型设计 功能表面 公差并行设计  
中图分类号：TH122

## 0 前言

计算机辅助公差设计是CAD与CAM集成中的关键技术之一。当前的公差研究大多集中在产品的详细设计阶段，基于详细和确定的产品结构和名义尺寸进行。在设计过程中，公差与结构设计是完全分离的，先进行概念结构设计，再进行公差设计和分析，这种设计方式不符合并行设计的思想。如果能够在设计早期进行公差设计，必将极大地减少设计修改，更好地优化产品成本。

SUDARSAN等<sup>[1]</sup>提出了面向公差的设计，并建立了功能—装配—行为模型和公差设计的过程模型。WHITNEY等<sup>[2]</sup>提出了一种自顶向下的设计方法，支持产品的装配模型。在此基础上，进行装配顺序和装配公差的研究。DANTAN等<sup>[3]</sup>为保证功能公差的可追溯性，提出了集成公差过程模型，将公差与功能(或分解的子功能)建立紧密的关联关系。

概念阶段的公差研究仍然处于初步理论研究阶段，并且没有与CAD系统进行集成。在生长型设计的基础上，研究了公差与结构的同步进化理论及其关键技术，实现了尺寸公差的并行设计。

## 1 生长型设计

### 1.1 基本理论

(1) 功能表面。功能表面是指产品设计中承担

“功能—结构”映射信息载体的表面。功能表面具有三层含义：它是产品结构中承担某一特定功能的表面，是产品功能的范畴。它是一个表面，而表面是产品结构的基本要求，因此又属于产品结构的范畴。功能表面是个信息载体，它作为功能与结构的中间媒介，在功能与结构间有效地传递信息。这样，就使得传统的“功能—结构”映射方式转化为“功能—功能表面—结构”，从而较容易实现功能与结构间的映射。因此，功能表面是实现产品功能的基本单元，同时也是产品结构的基本单位。公差信息也依存于功能表面。

(2) 广义定位。传统的六点定位原理偏重于理论和数学的概念，未考虑受力和运动因素。广义定位原理在考虑到刚体定位的受力和运动因素后，提出机械产品中任一零件，不论它在什么位置，什么时刻，运动与否，必须有足够且合适的表面与其他零件表面接触，在广义力的作用下，零件的12空间自由度(包括三对平移自由度和三对旋转自由度)全部得到限制。构成机械产品的每个零件在四维空间中都必须具有确定的位置。这就是机械产品的广义定位原理。

(3) 分解重构原理。创造发明的本质是对已有物品的分解与重新组合构造。对于机械产品来说，设计问题、设计需求、产品结构和设计过程等都是可以分解的对象。在概念结构设计中，将各独立单元的功能与结构，例如，功能表面、功能零件等在分解的基础上根据需求重新构成，从而产生新的产品。

(4) 功能模式。功能模式就是从功能和定位的

\* 国家自然科学基金资助项目(50475129)。20051027 收到初稿，20051210 收到修改稿

角度出发,从多种能实现同种功能的不同零部件中抽象出,由一组定位表面组成的,一个集功能、结构于一身的几何模型。

由于功能模式是功能表面集,无论在功能描述,还是在结构表达上,都比功能表面更具体。它解决了“功—构”映射的不确定性、多解性等计算机难以表达的问题,快速地实现概念方案表达,实现产品由功能域到结构域的自动映射。它是生长型设计的基本单元,分为执行模式、传动模式、结构模式和原动件模式四种。

## 1.2 生长型设计模型

生长型概念设计采用 Top-Down 设计方式,在装配层次上进行产品建模。从产品设计的原始需求出发,用功能表面创成产品初始原型(即最初的功能需求),然后进行类似于生物生长过程的生长设计。功能模式作为产品生长的基本单元;存在于更底层的功能表面中的功能信息、结构信息、装配信息以及力学信息等进行生长过程控制;应用分解重构方式进行生长;满足广义定位原理的广义定位模式保证功能零件间的装配及信息传递;在设计者的宏观调控下进行。由产品初始原型中实现执行功能的功能表面“生长”出执行功能模式,并根据功能传递的需求“生长”出传动功能模式、结构功能模式,经过功能模式的多次生长,最终长成产品的概念设计方案。设计过程像生物的生长过程一样,从产品原形的创成到概念设计方案完成,方案每生长一步,设计对象的框架就详细一些,但设计对象始终保持着“生物体”一样的一个产品整体。图 1 为产品生长型设计的逻辑图,有关生长型设计的论述可见参考文献[4]。

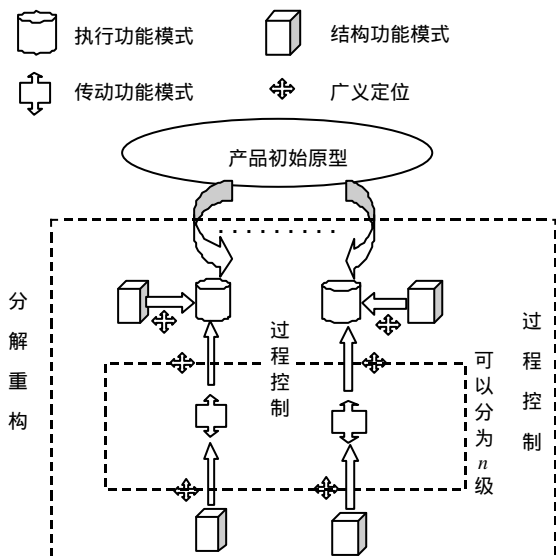


图 1 产品生长型概念设计模型

## 2 公差与结构同步设计过程模型

结合概念设计的特点,将传统的公差分配模型融入到公差同步综合设计模型中,实现了结构—公差快速、同步设计。结构与公差的同步设计模型(图 2)描述了公差进化设计的过程以及其中各部分之间的输入输出关系。

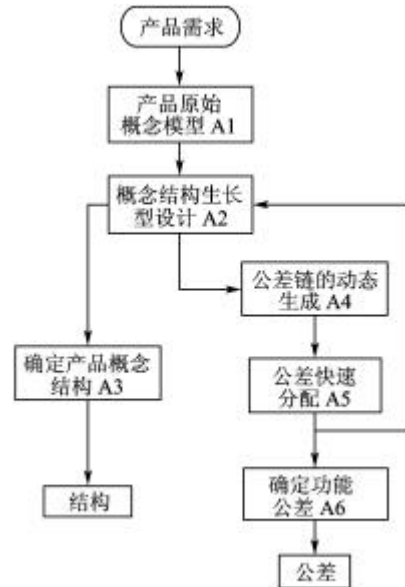


图 2 结构与公差同步进化图

(1) 定义产品原始概念模型 A1: 是以产品需求为输入实现从功能需求到功能结构的映射。此时产品原始概念模型是以一组实现产品功能需求的功能表面组成,并且这组功能表面主要记录产品的原始精度需求。

(2) 概念结构生长型设计 A2: 在原始概念模型的基础上基于功能表面分解重构实现产品从无到有、从简单到复杂的设计。

(3) 确定产品概念结构 A3: 在公差评价和其他要素考虑的基础上,确定产品的概念结构。如果不能满足,将返回到概念结构的上一步,重新进行生长。

(4) 公差链的动态生成 A4: 包括在概念结构生长型设计过程中同步生长的局部尺寸链以及通过回溯搜索形成全局尺寸链。它的输入是原始精度需求以及概念结构设计信息。

(5) 公差快速分配 A5: 在概念阶段运用传统公差设计原理建立同步设计过程中的综合计算模型,进行快速设计。

(6) 确定功能公差 A6: 公差分配的结果以经济加工精度作为评价指标,并将设计结果反馈以指导产品概念结构的生长方向。

### 3 基于功能表面的公差表示模型

为表示产品的公差，首先要建立产品的公差表示模型。通过借鉴 TTRS 理论的最小几何基准要素 (Minimum geometric datum elements, MGDE) 概念，建立四层结构的产品公差表示模型，如图 3 所示，其结构自顶向下为：产品—零件—功能表面—MGDE。

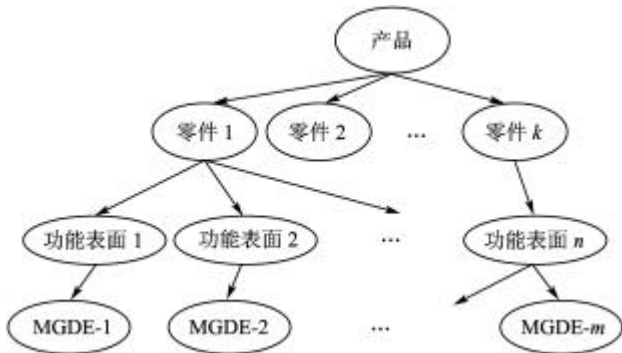


图 3 产品的层次分解图

一个功能表面的 MGDE 实质上是参考点、参考直线或参考平面的最小集合以足够确定相应的功能表面不变。例如：圆柱面的 MGDE 是圆柱的轴线。

公差的数据结构为

$$T = \{T_i, F_o, M_o, F_r, M_r, d, d_1, d_2\}$$

式中  $T_i$ ——公差类型

$F_o$ ——目标表面

$M_o$ ——目标表面的最小几何基准要素

$F_r$ ——基准表面

$M_r$ ——基准表面的最小几何基准要素

$d$ ——公差值

$d_1$ ——上偏差

$d_2$ ——下偏差

不同的公差以链表的形式存储在产品数据库中。

### 4 公差链的自动生成技术

结构进化过程中公差链的生成依赖于零件功能表面之间的配合信息和零件内部的尺寸信息的表达和存储。在所提出的方法中，这些信息都统一表达和存储在产品数据库里，它们是在设计过程中产生的。其出发点是在结构创成设计过程中，从原产品模型中取出装配体之间的装配约束信息，通过对装配约束信息的分析得到具体装配功能表面的信息，根据不同的配合约束关系从创成的结构功能表面中

取出不同的尺寸信息，并通过搜索算法搜索出封闭的装配尺寸链。在本系统中，有两种公差链生成方式：局部尺寸链和全局尺寸链。

#### 4.1 局部尺寸链

在结构进化设计过程中，只有在结构分解重构的每一步都保证分解前的精度需求，才能保证新创成的结构的精度水平满足原始精度需求。封闭环是由尺寸链其他环尺寸间接形成的最终环。在本系统中封闭环即被分解面的原始精度要求。如图 4 所示， $F_1$  是被分解面，分解之前  $F_1$  面与基准面  $D_1$  具有精度要求  $A \pm \Delta A$  ( $A$  为基本尺寸， $\Delta A$  为其尺寸公差的一半，以下类似)， $A \pm \Delta A$  即该步结构设计之后要保证的封闭环。以图 4 中的结构创成为例来说明其  $z$  向尺寸链的组成。

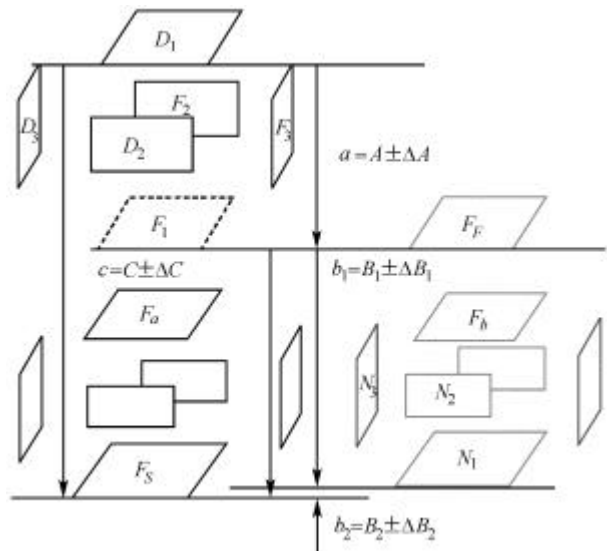


图 4 结构及其尺寸链创成

在  $z$  向， $A \pm \Delta A$  是要保证的原始功能尺寸，面  $F_1$  被分解出来形成新零件，在新零件中面  $F_F$  的  $z$  向定位尺寸为  $B_1 \pm \Delta B_1$ ，与原零件中基准面  $D_1$  相对应的零件中的使定面  $F_S$  的定位尺寸为  $C \pm \Delta C$ 。

在原零件中引入中间虚拟装配面  $F_1$ ，它与零件的使定表面  $F_S$  的距离，是原零件与新零件的装配联系尺寸。面  $F_S$  与面  $N_1$  之间的装配分为紧密贴合和间隙配合两种情况。由此  $z$  向形成两个尺寸链，将原始  $z$  向精度通过装配关系传递下来。

被分解表面  $F_1$  具有精度要求(比如  $A \pm \Delta A$ )，新生成零件中被分解来的面  $F_F$  与其基准  $N_1$  之间为一组成环( $B_1 \pm \Delta B_1$ )；在新零件中基准面  $N_1$  的使定面  $F_S$  与原零件基准面  $D_1$  形成组成环( $C \pm \Delta C$ )；如果新生成零件与原零件以面  $N_1$  以及面  $F_S$  紧密贴合装配，则形成三环尺寸链，封闭环为  $a$ ，组成环为  $b_1$  和  $c$ 。

完成尺寸链的搜索之后，就可以直接得到设计函数。生成方法是：等式的左边为封闭环，右边为组成环，在每个组成环前面加上表示其增减性的正负号。此处设计函数为  $a = c - b_1$ 。

如果新生成零件与原零件以面  $F_a$  以及面  $F_b$  装配，则形成一个新的组成环  $b_2$ ，即  $F_S$  与  $N_1$  的装配间隙，这时形成四环尺寸链。此时的设计函数为  $a = c - b_1 - b_2$ 。

### 4.2 全局尺寸链

全局尺寸链的生成也依赖于零件功能表面之间的配合信息和零件内部的尺寸信息的表达和存储，通过循环的寻找接触表面、基准表面—目标表面生成全局尺寸链。全局尺寸链的逻辑图如图 5 所示。

其中  $i$  是新零件中需要保证的第  $i$  个尺寸关系， $F_o$  为目标表面， $F_r$  为基准表面。 $F_o$  和  $F_r$  之间的关系是在设计生长过程中建立的，它们是功能表面的子类，并带有尺寸信息。

## 5 公差分配和相应反馈

在尺寸链生成之后，下一步的工作就是公差分配，并根据公差结果进行修改。采用等精度计算方法，如果公差超过经济加工精度(IT5)，则进行各种修改。由于本公差设计与结构设计是同步进行的，因而可以提供多种反馈机制：修改当前最新生成零件的名义尺寸。在不影响功能的前提下，通过修改最新生成零件的名义尺寸，希望能够达到经济加工精度。采用概率法计算代替极值法。全局尺寸链代替局部尺寸链。利用全局优化重新分配已生成零件的公差。修配法。

如果以上步骤仍不能满足要求，则放弃该步结构生长，选择其他功能模式。程序整体流程如图 6 所示。

## 6 结论

应用本方法，实现了液压缸夹具和箱体组合夹具的尺寸公差设计。在生长型设计的基础上分析了公差与结构同步进化的各种关键技术，包括基于功能表面的公差表示模型，同步设计过程模型，尺寸链技术等。这种公差设计思路符合并行设计的要求，在设计早期进行公差研究，减少和避免后期的设计修改，保证了设计的可行性。同时，不同方案的公差结果也可以作为多个概念设计方案的评价指标。

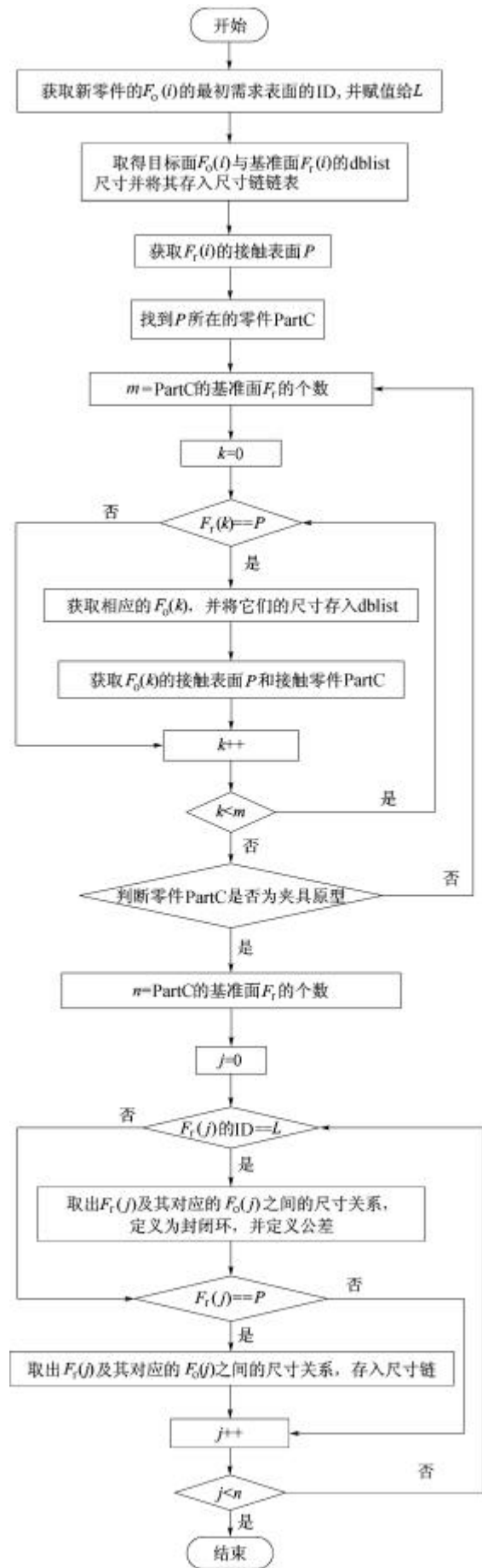


图 5 全局尺寸链生成图

参 考 文 献

- [1] SUDARSAN R , NARAHARI Y , LYONS K W , et al . Design for toeracne of electro-mechanical assemblies[C]// International Conference on Robotics & Automation, Lenven, Belgium, 1998 , 5 : 1 490-1 497.
- [2] MANTRIPRAGAD A R, WHITNEY D E. Datum flow chain : A systematic approach to assembly design and modeling[J]. Research in Engineering Design, 1998, 10(3) : 150-165.
- [3] DANTAN J Y, ANWER N , MATHIEU L. Integreted tolerancing process for conceptual design[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2003, 52(1) : 135-138.
- [4] 曹树坤 . 机械产品概念结构生长型设计力学综合技术研究[D] . 济南 : 山东大学 , 2002 .
- [5] 杨志宏 , 黄克正 , 吕良敏 . 产品概念结构设计中的公差进化模型和算法[J]. 中国机械工程 , 2004 , 15(8) : 693-697.
- [6] 吴昭同 , 杨将新. 计算机辅助公差优化设计[M]. 杭州 : 浙江大学出版社 , 1999 .

TOLERANCE STUDY BASED ON GROWTH DESIGN

ZHANG Yong HUANG Kezheng GAO Changqing  
 YANG Zhihong  
 (College of Mechanical Engineering,  
 Shandong University, Jinan 250061)

**Abstract :** Most researches of tolerance design focus on the detailed design. Tolerance design during early stages of design will lessen design modifications and shorten its period. A new method is presented to study the tolerance in the conceptual design based on the growth design. First, the basic concepts and the principles of the growth design are explained. Then the process model of tolerance synchronous synthesis is built. The local dimension chain and overall dimension chain are set up automatically. The whole frame of tolerance design and relevant feeding back is established. The tolerance design of piston clamp is carried out by the application of this methodology.

**Key words :** Tolerance Growth design Functional surface Tolerance synchronous design

作者简介:张勇,男,1978年出生,博士研究生。主要研究方向为计算机辅助设计、公差设计。

E-mail : javazycn@hotmail.com

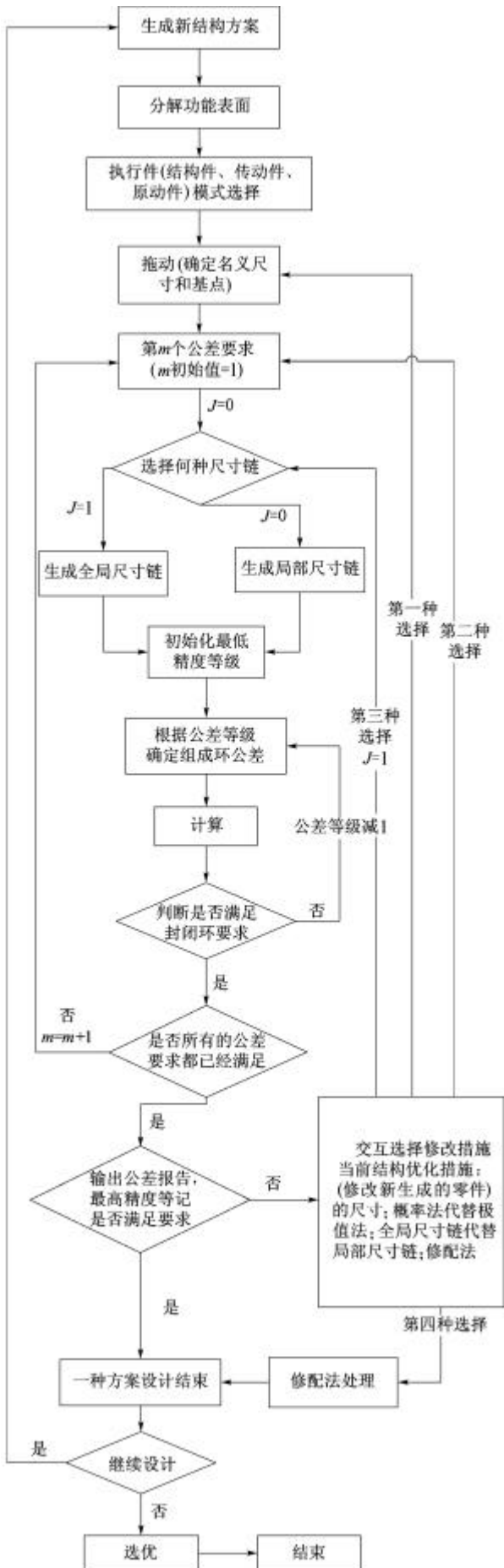


图6 公差设计与反馈整体框架