

# 基于功能语义的尺寸模型生成及其调整

曾坚阳 陆国栋

浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室 杭州 310027

## 1. 引言

求解工程图纸的尺寸解，实际上就是求解零件的尺寸标注模型。对尺寸模型进行投影，即可得到尺寸标注模型。此外，尺寸模型容易实现在三维参数化中的尺寸驱动。因此，对尺寸模型的研究具有重要意义。

综合分析现有的尺寸模型的研究，可以归纳为如下几种：

### · 从二维的角度出发<sup>[2][3]</sup>

从二维图形的数据结构的角度出发，利用机械图样的图论与语法基础，提出有向邻接矩阵判断法。由于尺寸模型的载体是二维的图形信息，尽管此时可直接由尺寸模型得到尺寸标注模型。但不大符合尺寸标注的思维本质，由于每个二维视图只能表达三维形体的一个侧面，三维形体在多个二维视图之间的投影关系不易自动理解；而且二维图形信息无法包括一些工程语义，对于在二维视图中出现相贯，相切，截交线等特殊情况，很难判断并排除这种情况下的不合理尺寸标注。因此该尺寸模型具有很大的缺陷。

### · 从 B-Rep 结构出发<sup>[30]</sup>

从三维图形的 B-Rep 结构入手，建立了一种基于 B-Rep 表示的尺寸模型。在分析零件体的几何特征对尺寸标注影响的基础上，采用了基于人工神经网络识别的思想提取特征和基于尺寸链技术的思想优化来确定尺寸标注方案。由于 B-Rep 在几何信息组织上以面信息为中心，丧失了基本形体的信息，通过零散的几何要素得到的尺寸模型，由其得到的尺寸标注模型很难符合工程要求。

### · 从 CSG (Constructive Solid Geometry) 模型出发<sup>[1]</sup>

从 CSG (Constructive Solid Geometry) 模型出发建立尺寸模型。将尺寸分解成长度尺寸、直径尺寸和角度尺寸等，通过对零件表面的形体分析，获得零件表面的所有面环，分析所有面环之间的关系，最终自动取得所需要标注的尺寸。这种方法虽然也能够处理一些简单的截交、相贯问题，但对于稍复杂的曲面就无能为力。因为缺乏对标注尺寸间相互关系的统一考虑和尺寸精度的验算方法，这一模型未能实际应用。

本文在分析尺寸的具体功能语义的基础上，提出了基于功能语义的三维尺寸模型生成方法和技术，试图局部改进上述几种尺寸模型的缺陷。

## 2. 功能语义尺寸模型的描述

功能语义尺寸模型分为四个层次，分别为定形功能语义层、定位功能语义层、加工功能语义层和装配功能语义层，如图 1 所示。有图可知，在构造尺寸模型前，必须对零件特征体进行零件体分解及基元体识别，以便得到各个基元体独立的特征信息。本文考虑的尺寸模型主要是从尺寸的定形功能语义和定位功能语义角度出发，暂不考虑尺寸模型的加工功能语义层和装配功能语义层。

## 3. 尺寸模型的定形功能语义层生成

### 3.1 特征关联元素

一个复杂的零件体可分解为若干个基元体。如图 2 中的零件体，可分解成以下各个基元体：长方体 1、4；圆柱体 2、3、5、6、7、8、9、10。

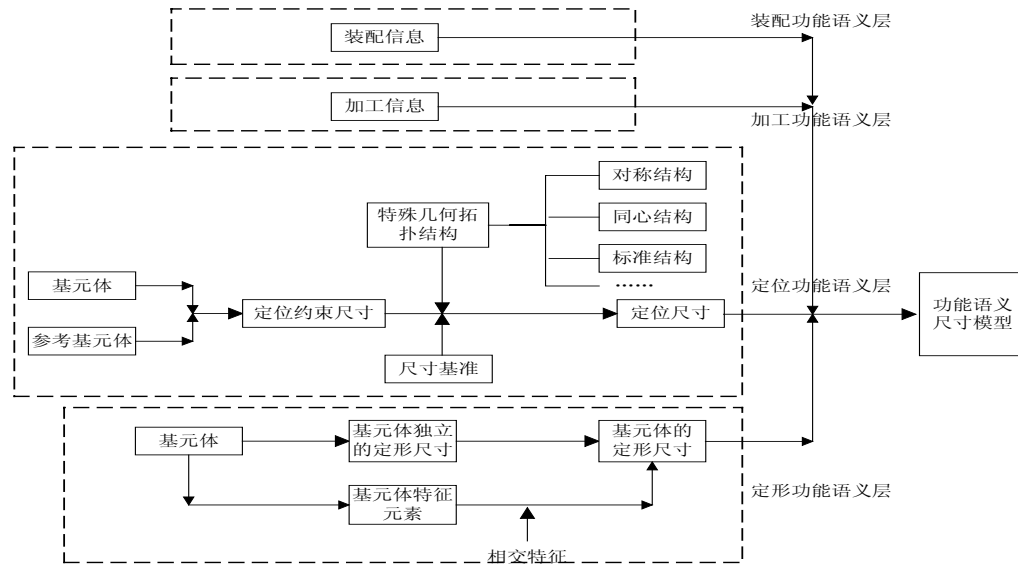


图 1 尺寸模型层次结构

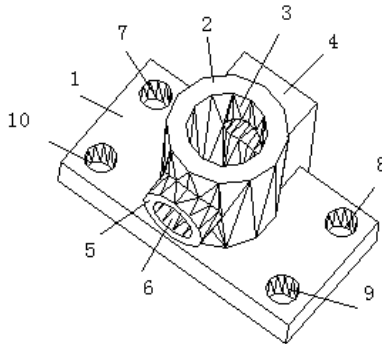


图 2 零件体

对一个基元体  $Q$  来说，本文采用基于点、线、面的简化模型，表示如下：

$$K(Q) = \{f_1, \dots, f_n, e_1, \dots, e_m, p_1, \dots, p_k\} = \{F, E, P\}$$

其中  $f$  称为基元体  $Q$  的**面特征元素**， $e$  称为基元体  $Q$  的**边特征元素**， $p$  称为基元体  $Q$  的**点特征元素**，把  $f/e/p$  统称为基元体  $Q$  的**特征元素**。

一个基元体的定形尺寸同基元体的特征元素密切相关，本文将基元体定形尺寸相关联的特征元素称为该定形尺寸的特征关联元素。当尺寸的特征关联元素的位置、大小产生变化时，对应的定形尺寸也将产生变化。用  $F(D)$  表示定形尺寸  $D$  的尺寸的特征关联元素的集合，一些常见的基元体定形尺寸的特征关联元素集如表 1 所示。

### 3.2 特征消失元素

基元体的定形尺寸在基元体的定义时就存在，所以各基元体独立的定形尺寸可从 CSG 树的叶节点—基元体的信息中得到。

当多个基元体特征通过正则布尔运算后，可能产生特征相交现象。所谓两特征相交，指它们的特征体存在部分重叠，对整个零件体而言，可能产生某个基元体的特征元素消失现象，从而引起基元体定形尺寸的变化。为了讨论这种现象对整个零件体定形尺寸生成的影响，本文引入**特征消失元素**、**尺寸的特征消失元素**和**消失尺寸**的概念。

**特征消失元素**：现假设由基元体  $Q$  和  $M$  组合成一个零件体，设  $k$  为  $Q$  的一个特征元素，

即  $k \in K(Q)$ ，则特征元素  $k$  和基元体  $M$  的形体分类函数可写成：

$$F(k, M) = \{k \text{ in } M, k \text{ out } M, k \text{ on } M\}$$

记  $i_M$  为基元体  $M$  所有内点的集合， $b_M$  为基元体  $M$  所有边界面点的集合。式中：

$$k \text{ in } M = \{p | p \in k, p \in i_M\};$$

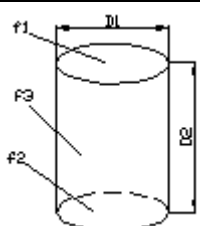
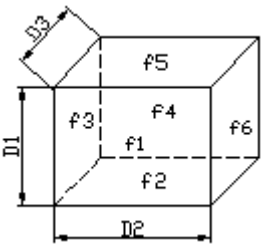
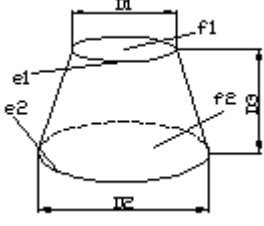
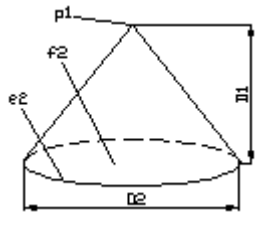
$$k \text{ out } M = \{p | p \in k, p \notin M\};$$

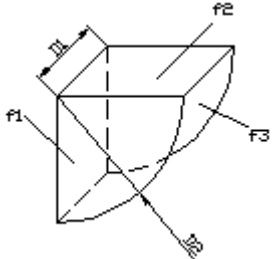
$$k \text{ on } M = \{p | p \in k, p \in b_M\}.$$

1) 若  $Q$  为实体，当  $F(k, M) = \{k \text{ in } M, k \text{ on } M\}$  时，称  $k$  为基元体  $Q$  的**特征消失元素**。  
如图 2 中，圆柱体 1 的右底面是特征消失元素。

2) 若  $Q$  为虚体，当  $F(k, M) = \{k \text{ out } M\}$  时，称  $k$  为基元体  $Q$  的**特征消失元素**。

表 2 常见基元体定形尺寸的特征关联元素

基元体特征	示意图	基元体定形尺寸的特征关联元素集	说明
圆柱体		$F(D1) = \{f1, f2\}$ $F(D2) = \{f3\}$	f1: 圆柱体的上底面 f2: 圆柱体的下底面 f3: 圆柱体的圆柱面
长方体		$F(D1) = \{f2, f5\}$ $F(D2) = \{f3, f6\}$ $F(D3) = \{f1, f4\}$	f1: 长方体的前端面 f2: 长方体的下端面 f3: 长方体的左端面 f4: 长方体的后端面 f5: 长方体的上端面 f6: 长方体的右端面
圆台体		$F(D1) = \{e1\}$ $F(D2) = \{e2\}$ $F(D3) = \{f1, f2\}$	e1: 圆台体上底面的圆周 e2: 圆台体下底面的圆周 f1: 圆台体的上底面 f2: 圆台体的下底面
圆锥体		$F(D1) = \{p1, f2\}$ $F(D2) = \{e2\}$	p1: 圆锥体的上顶点 e2: 圆锥体底面的圆周 f2: 圆锥体的底面

圆角特征体		$F(D1)=\{f1,f2\}$ $F(D2)=\{f2\}$	f1: 圆角特征体的前端面 f2: 圆角特征体的后端面 f3: 圆角特征体的圆周面
-------	---	-------------------------------------	---

### 3. 3 消失尺寸的确定

尺寸的特征消失元素和消失尺寸：对于基元体的某个定形尺寸  $D$  的特征关联元素集  $F(D)$ ，若存在一个特征关联元素  $k$ ， $k \in F(D)$ ，当  $k$  是特征消失元素时，称  $k$  是定形尺寸  $D$  的特征消失元素，尺寸  $D$  为消失尺寸。基元体组合成零件体后，在零件体的尺寸标注模型中，消失尺寸已经不存在。

如图 2 零件体中的圆柱体 2 和圆柱体 5 的组合情况，圆柱体 5 的右底面  $f$  为尺寸  $b$  的一个特征关联元素，且为特征消失元素，所以尺寸  $b$  为消失尺寸。

当若干个基元体组合成零件体时，设基元体  $Q$  独立的一个定形尺寸为  $S_i$ ，基元体应该标注的定形尺寸集  $D_s$  为：

$$D_s = \Sigma S_i - \Sigma S_i'$$

其中  $\Sigma S_i$  为所有基元体独立的定形尺寸集合， $\Sigma S_i'$  为基元体组合后产生的消失尺寸集合。

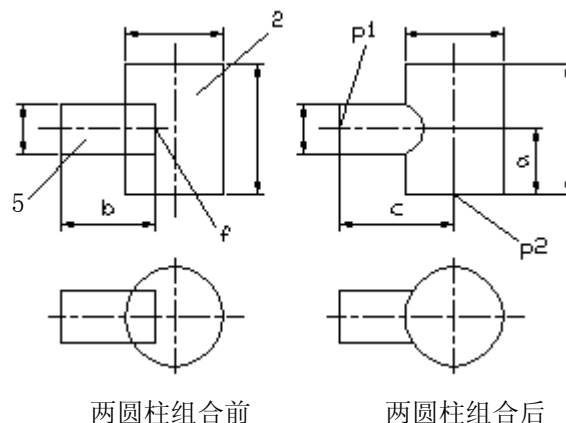


图 3 两个圆柱体组合前后的尺寸变化

## 4. 尺寸模型的定位功能语义层生成

### 4. 1 父基元体的确定

对一个基元体来说，为了求解其定位约束尺寸，必须先确定其参考基元体，本文称之为父基元体。最早确定的基元体称之为基准体，如图 1 零件体中的长方体 1。

对父基元体  $B_p$  具有以下几点要求：

1. 三维空间中，父基元体的自由度已确定，在 X、Y、Z 方向上都不能移动。
2. 对整个零件体来说，只有一个基准体，基准体没有父基元体。

3. 在特征实体造型过程中，基元体和其父基元体  $B_p$  必须有布尔操作运算，在几何关系上表现为出现特征相交现象。

4. 父基元体只能是实体，不能为虚体。

如果一个基元体同时和几个基元体出现特征相交现象，则父基元体的选择优先考虑基准体，其次是自由度已经确定的基元体。如图 1 零件体中的圆柱体 2，同基元体 1、4、5 等都发生特征相交现象，由于基元体 1 是基准体，故优先考虑基元体 1 为其父基元体。

#### 4. 2 尺寸引出点的确定

对于一个基元体来说，可以从基元体上多个点中选择一点作为尺寸引出点，一般是选择基元体对称轴上的一点，常见基元体的尺寸引出点选择如表 2 所示：

表 2 定位尺寸的引出点的选择

父子特征体	圆柱体	长方体	圆台体	圆锥体	复杂特征形体
定位尺寸引出点	对称轴上，上下两个底面的圆心	其中一个顶点	对称轴上，上下两个底面的圆心	对称轴上，底面的圆心	用户交互选择

根据表 2 选择尺寸引出点后得到的定位约束尺寸的标注可能有多种标注模式，为了使定位约束尺寸的标注更加符合工程的需要，提出以下的尺寸引出点确定原则：

1. 定位约束尺寸的两个尺寸引出点在所约束方向上的投影应尽量不重合。
2. 定位约束尺寸在 XYZ 三个方向上的投影应尽量不和定形尺寸重合。
3. 如果在父基元体上有设计基准或工艺基准，则定位约束尺寸的基准点应该从此基准引出。
4. 定位约束尺寸在同一父基元体上的尺寸引出点应尽量保持统一。

#### 4. 3 新生尺寸的确定

由各基元体布尔操作形成的组合体，其必然会有新的尺寸产生，如图 3 中的尺寸 a、c 就是由两圆柱体布尔组合后形成的。本文将这些基元体组成后新产生的尺寸，称之为新生尺寸。

新生尺寸的确定可按以下步骤进行：

- (1)。 确定各基元体的父基元体。
- (2)。 选定基元体及其父基元体的尺寸引出点。
- (3)。 对尺寸进行尺寸调整，去除冗余的尺寸。

### 5. 功能语义尺寸模型的调整

#### 5. 1 尺寸冲突的原因分析

本文三维尺寸模型是按尺寸的定形功能语义和定位功能语义分治的方法生成的，先根据尺寸模型的定形功能语义生成定形尺寸，再根据尺寸模型的定位功能语义生成定位尺寸。这种方法暂时没考虑到尺寸模型的定形功能语义和定位功能语义之间的关系，但在实际的尺寸模型中，尺寸模型的定形功能语义和定位功能语义是有联系的。故此方法必然产生尺寸冲突，本文将该尺寸模型的尺寸冲突的原因归结为以下三种：

1. 尺寸模型的定形功能语义和定位功能语义在尺寸表示上产生重合。如图 6 (a) 所示。
2. 尺寸模型的各功能语义层对应的尺寸形成尺寸闭合回路。如图 6 (b) 所示。
3. 零件体中基元体的拓扑结构发生变异。如图 6 (c) 所示。

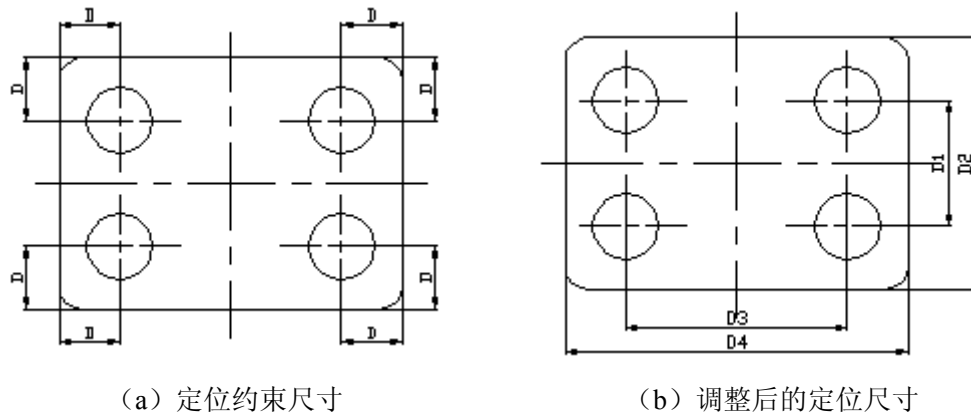


图 5 对称结构的定位尺寸调整

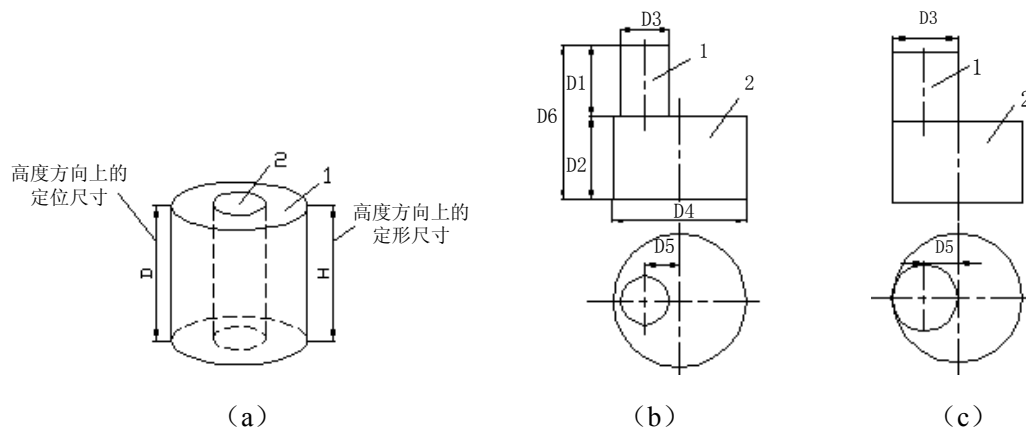


图 6 尺寸冲突产生的原因

## 5.2 尺寸的优先机制

当某个方向上的尺寸链产生尺寸冲突时，如何判断哪些尺寸应该去掉或保留，是一个重要的问题。为此，本文引入尺寸的优先机制。对各种尺寸进行排序，排序规则如下：

**规则 1** 从基准出发的尺寸 > 其它尺寸。

**规则 2** 一个尺寸 > 被其包容的尺寸（尺寸的包容性判别参考文献[39]）。

**规则 3** 定位尺寸 > 定形尺寸。

上述规则也是有优先级的，即规则 1 > 规则 2 > 规则 3。

## 5.3 定位尺寸的调整

### 5.3.1. 根据尺寸基准进行调整

基准的选择与零件的结构特点、作用、以及设计中对该零件各方面的要求有关。常用机件基准的选择一般遵循以下准则：1) 对称体通常选择对称面为主要基准面；2) 轴套类及轮盘类零件的主回转体轴线通常为主基准；3) 在不满足 1)、2) 的情况下，对于箱体类或其它类型的组合体通常选用支撑面和底面为基准。当存在辅助基准时，主要基准和辅助基准之间的定位尺寸也必须标出。

尺寸基准的确定可以根据特征识别得到，也可以采用用户交互的手段而得到。前面得到的定位约束尺寸解是基元体跟另一基元体的尺寸约束关系，引入尺寸基准后，必须根据尺寸基准对定位约束尺寸进行调整，使之符合实际工程的尺寸标注要求。如图 1 零件体中基元体 4 和基元体 6 在高度方向上的定位约束尺寸是  $D_1$ ，当选定基元体 1 的底面为尺寸基准时，则必须根据此基准进行调整，如图 4 (a) 中尺寸  $D_1$  调整为 (b) 中的  $D_1'$ 。

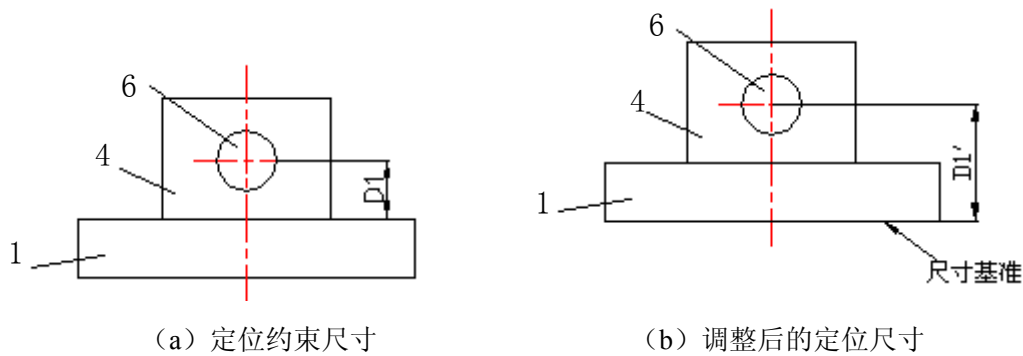


图 4 根据尺寸基准进行定位尺寸调整

### 5.3.2. 根据特殊几何拓扑结构进行调整

对前一节生成的定位约束尺寸，必须对其结构判断是不是特殊几何拓扑结构，如对称结构、同心结构等。由于这些特殊的结构具有特别的尺寸标注模型，所以有必要在尺寸模型中对这些尺寸进行调整。

如在图 1 零件体中的基元体 1 上开四个圆孔，该结构为对称结构，根据前一节得到的定位约束尺寸如图 5 (a) 所示。根据实际工程尺寸标注的需要，将定位约束尺寸调整成图 5 图 5 (b) 中的定位尺寸。

### 5.4 尺寸模型调整的实现

尺寸模型调整的实现步骤如下：

1. 对三维尺寸模型的调整首先要对各种非线性尺寸进行虚拟分解，将空间上的尺寸链投影成 X、Y、Z 三个方向上的单向尺寸链（尺寸的虚拟分解技术参考文献[1]）。
2. 根据尺寸冗余判断算法对各单向尺寸链进行尺寸封闭检查。（）
3. 根据尺寸的优先机制，对冲突的尺寸进行调整，使最终生成的尺寸模型满足尺寸完整性和合理性条件。

其中单向尺寸链的尺寸冲突判断算法实现如下：

Step1. 对单向链表的尺寸按尺寸的优先级别从大到小排序。

Step2. 取出单向线性尺寸链的第一个尺寸，将其两个尺寸线点的标志位设为 1，即  $Fg(P_{1i})=Fg(P_{2i})=1$ 。

Step3. 按顺序取出线性尺寸链的尺寸，假设  $D_i$  为取出的第  $i$  个尺寸，判断尺寸  $D_i$  的尺寸线点的标志位值。

· 若  $Fg(P_{1i})=Fg(P_{2i})=0$ ，则设置  $Fg(P_{1i})=Fg(P_{2i})=i$ ；

· 若  $Fg(P_{1i})=Fg(P_{2i})=j$ ，且  $0 < j < i$ ，则出现尺寸冲突，将所有单向尺寸链表中相同尺寸 ID 的尺寸的显示标志设置为 false。

· 若  $Fg(P_{1i}) \neq Fg(P_{2i})$ ，且其中一个为 0，设  $Fg(P_{1i})=0$ ， $Fg(P_{2i})=j$ ， $0 < j < i$ ，则设置  $Fg(P_{1i})=Fg(P_{2i})=j$ 。

· 若  $Fg(P_{1i}) \neq Fg(P_{2i})$ ，且都不为 0，设  $Fg(P_{1i})=j$ ， $Fg(P_{2i})=k$ ，且  $0 < j < k < i$ ，则设置  $Fg(P_{1i})=Fg(P_{2i})=\min(j,k)=j$ ，找到所有标志位= $k$  的尺寸点，将其标志位设置为  $j$ 。

Step4: 最后若尺寸链中的所有的尺寸线点的标志位都为 1，则得到的尺寸为合理的尺寸链，否则出现缺尺寸现象。

根据上述尺寸模型的调整算法，最后得到调整好的尺寸模型如图 7 所示。

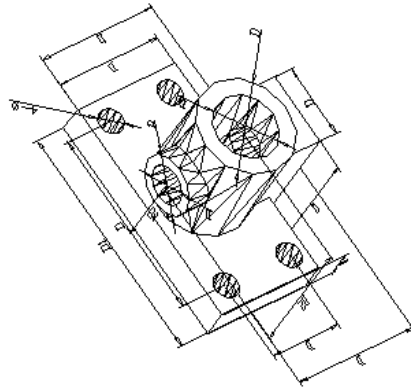


图 7 调整后的尺寸模型

## 6. 小结

本文在 Visual C++ 6.0 + ObjectARX 2.0 + MCAD API 开发平台上实现了一个尺寸模型生成系统，生成的尺寸模型能够满足尺寸的合理性、完整性要求。

对生成的尺寸模型进行投影，可方便地得到尺寸标注模型，如对图 7 的尺寸模型进行投影，可得到图 8 中的尺寸标注模型。

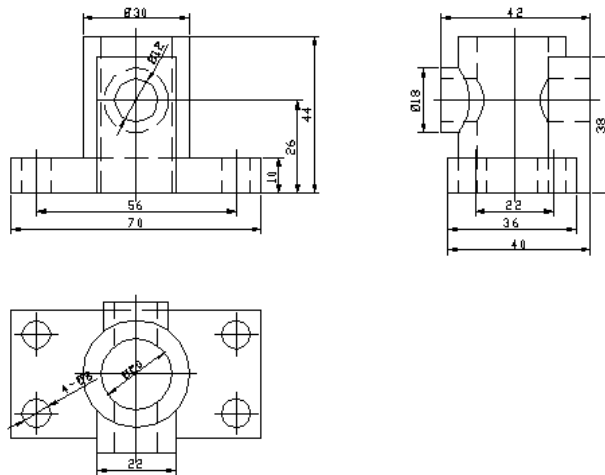


图 8 投影后的尺寸标注模型

本文介绍了一种新的自底向上尺寸模型生成方法。首先解决所有的两两基元体的尺寸问题，然后去除冗余的尺寸，进而投影得到完整的、合理的尺寸标注模型。本文的尺寸模型的特点可归纳如下：

1. 为尺寸标注提供了分层次策略，对三维尺寸模型进行投影，即可生成二维尺寸，尺寸的调整可大部分在三维环境下完成，减少了过去在二维环境中进行尺寸调整的工作量。
2. 将功能语义引入到尺寸模型中，可包含丰富的工程语义和支持一定的设计过程理论。
3. 保证了尺寸表达和尺寸约束的一致性，为三维参数化提供了新的思路。功能语义尺寸模型更注重设计意图的表现规律，能更好地满足尺寸驱动设计的需要。