



# 团 体 标 准

T/SCGS 305001—2024

## 信息技术 形状建模信息表示 第 5 部分：体表示

Information technology—Shape modeling information representation—  
Part 5: Volume representation

2024-04-16 发布

2024-04-17 实施

中国图学学会 发布  
中国标准出版社 出版

## 目 次

前言 .....	III
引言 .....	IV
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 CSG 体 .....	4
4.1 四面体及表示 .....	4
4.2 六面体及表示 .....	5
4.3 圆锥体及表示 .....	6
4.4 圆柱体及表示 .....	7
4.5 四棱锥体及表示 .....	7
4.6 正多棱锥体及表示 .....	8
4.7 球体及表示 .....	8
4.8 圆环体及表示 .....	9
4.9 布尔运算体及表示 .....	9
5 参数体 .....	10
5.1 NURBS 体及表示 .....	10
5.2 拉伸体及表示 .....	11
5.3 回转体及表示 .....	12
5.4 扫掠体及表示 .....	13
5.5 放样体及表示 .....	14
6 细分体 .....	15
6.1 细分曲线及表示 .....	15
6.2 细分曲面及表示 .....	15
6.3 细分体及表示 .....	16
7 离散网格体的结构表示 .....	17
8 几何体的体表示 .....	17
8.1 几何体的语义特征框架 .....	17
8.2 几何体的体表示结构 .....	18
参考文献 .....	20

## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国图学学会提出并归口。

本文件起草单位：北京大学、北京朗境创新技术有限公司、北京微视威信息科技有限公司、北京云境智仿信息技术有限公司。

本文件主要起草人：汪国平、李胜、盖孟、逢博、郑中天、朱飞、焦莹莹、姜凯瑞、谢宇俊、王森、汪汝一、蒋珂、孙永力、赖舜男、张桐源、董立龙。

## 引 言

三维模型被广泛应用于产品设计分析、工程建设、数字文娱和国防军事等众多数字化产业中,其模型表示文件格式在各个应用系统之间的数据交换与共享流转中具有重要支撑作用。目前,现有的三维模型文件表示格式,包括 3ds、maya、obj、VRML、X3D、STL、IGES、Step、IFC 等,还有各种三维建模软件的私有文件格式,林林总总有几十种三维模型文件表示格式,各种三维模型文件表示格式应用领域不同、行业需求不同,造成各种三维模型表示格式的内容侧重点有所不同。随着数字化技术快速发展,三维数字化应用日益广泛,对三维模型表示的需求也日益增长,三维模型数量和种类日趋复杂多样。

目前,不同行业乃至同一行业中的不同单位,出于对各个三维建模软件的功能特点考虑,在产品设计中经常会使用多种不同的三维建模软件,并需要在各个设计阶段使用不同的三维建模软件,各种商用三维建模系统都有三维模型表示的私有格式,各种系统的模型私有格式互不兼容,各种商用系统的模型格式转换需要借助 IGES、STEP 等中间文件格式,在文件格式转换过程中,存在模型表示精度和表示信息的缺失或者错误等不少问题,严重影响了产品设计效率,也严重影响了不同企业之间的数据流转效率。

GB/T 36341《信息技术 形状建模信息表示》旨在解决上述问题,拟由六个部分组成:

- 第 1 部分:体系结构和基础组件。目的在于确定该标准的整体框架。
- 第 2 部分:形状表示与特征约束。目的在于定义实体中具有特定语义的结构以及建模过程中特征需满足的约束条件。
- 第 3 部分:流式传输。目的在于规定形状信息建模表示中流式传输文件格式和传输过程。
- 第 4 部分:存储格式。目的在于对标准中定义的实体、形体、特征、特征约束信息数据的存储格式。
- 第 5 部分:体表示。目的在于解决三维模型体的几何和拓扑结构表示问题。
- 第 6 部分:属性扩展表示。目的在于解决三维模型中属性的层次表示结构、属性按需组织与调用机制、属性表示可扩展性等问题。

当前三维模型表示大多采用 BRep 表示,在三维模型文件表示标准中,模型表示格式标准还包括 TC10-SC6(侧重在机械产品表示)、TC10-SC8(侧重在建筑模型表示)、ISO 16792、ISO/TC 184(侧重在标准模型表示)等,还包括国外的 X3D、3ds、maya、obj、VRML、X3D、STL、IGES、Step、IFC 等众多标准格式,这些标准都可以表示三维模型表面的各种不同信息。但是都缺乏对体模型的几何表示,这对于三维模型在 CAD 和 CAE 一体化表示中带来困难,从 CAD 到 CAE 的数据表示中,需要进行模型内部的网格剖分等步骤,造成 CAD 和 CAE 的模型格式表示具有较大差异,不利于 CAD/CAE 一体化的发展,不利于产品设计分析效率的提升。因此,本文件需要对模型的体表示进行统一的规范定义。

# 信息技术 形状建模信息表示

## 第 5 部分：体表示

### 1 范围

本文件规定了 CSG 体、参数体、细分体的表示要求,以及离散网格体的结构表示、几何体的体表示要求。

本文件适用于 CAD、CAE、虚拟现实、物理仿真、数字孪生和元宇宙等领域的开发和应用活动。

### 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 5271.1 信息技术 词汇 第 1 部分:基本术语

GB/T 20000.1 标准化工作指南 第 1 部分:标准化和相关活动的通用术语

GB/T 36341(所有部分) 信息技术 形状建模信息表示

### 3 术语和定义

GB/T 5271.1、GB/T 20000.1、GB/T 36341(所有部分)界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

##### **参数体 parametric volume**

三维模型通过参数域定义的几何形体。

注:通过参数曲面拓展得到,通过拉伸、回转、扫掠和放样等三维建模操作和模型部件求交和布尔运算等操作形成。

#### 3.2

##### **布尔运算 bool operation**

包括形体之间的并、交、差运算。

#### 3.3

##### **构造实体几何体 constructive solid geometry; CSG**

由基本体素表示,也可以对基本体素通过布尔运算的结果来表示。

注:这里的基本体素是指典型的几何形体,包括四面体(tetrahedron)、六面体(hexahedron)、长方体(rectangular-Block)、圆锥(rightCircularCone)、圆柱(rightCircularCylinder)、四棱锥(rectangularPyramid)、球体(sphere)等。为了 CSG 体的完整表示,这里将这些典型的几何形体称为 CSG 的基本体素,基本体素也称为基本体。传统的 SCG 表示是表面表示,在本文件中,我们定义基本体素是体表示,SCG 也是体表示。基本体素数据也可以存储于 info3D 参数信息块中,为参数体的扩展。

#### 3.4

##### **细分 subdivision**

将一条离散线段,或者一个多边形网格面或一个多面网格体按照一定的几何分裂规则和拓扑连接规则分割成更小的离散线段,或者多边形网格面或多面网格体的过程,一般分别称为线细分、面细分和

体细分。这个过程通常用来增加模型的几何细节或者表面平滑度,以获得更精细的几何外观。体细分一般用于将一个体积或实体对象划分为更小的子体积或单元,通常在形状设计或者仿真分析领域中使用。

### 3.5

#### 细分体 subdivision volume

初始多面网格体通过细分格式的多次分裂形成的多面网格实体,包括实体的表面网格细分的表面细分网格和内部细分网格体表示的体。表面细分网格和内部细分网格体是一体的,但是通常情况下,体细分的表面细分网格与内部细分网格具有一定的独立性。

### 3.6

#### 细分格式 subdivision scheme

包括计算形成新顶点位置的几何规则以及连接新顶点形成新的顶点连接关系的拓扑规则组成的网格分裂计算方法<sup>1)</sup>。

注:细分格式根据其作用对象(线、面、体)的不同,可以划分为曲线细分、曲面细分和体细分。根据细分时移动顶点几何位置的规则,可以分为插值型细分(只移动新生成的顶点)、逼近型细分(移动所有顶点)。

### 3.7

#### 数组表示 array representation

被用于存储一个固定大小的相同类型元素的顺序集合的数据结构<sup>2)</sup>。

### 3.8

#### 离散网格体 discreted grid

#### 3.8.1

##### 多面体 polyhedron

多个面缝合形成的闭合体。此闭合体的体积大于零,并且体内部没有顶点之间的连接关系。

注:四面体、六面体都是多面体。

#### 3.8.2

##### 离散网格体 discrete grid

离散网格构成的几何形体。

注:一般采用离散的多面体组合而成,多面体的边一般为直线段,如果多面体的边为曲线段,如 Bezier 曲线段,则多面体为曲边多面体。

#### 3.8.3

##### 结构体网格 structured grid

##### 结构化体网格

网格区域内所有的内部点都具有相同的毗邻单元,为六面体。在拓扑结构上矩形区域内的均匀网格,其节点定义在每一层的网格线上,且每一层上节点数都相等。复杂形体进行网格剖分时通常难以生成贴体的结构体网格。

#### 3.8.4

##### 非结构体网格 unstructured grid

网格区域内的内部点不一定具有相同的毗邻单元,可以是多种形状,如可以是四面体、六面体、菱形等多面体的组合。

注:也称为混合体网格(hybrid grid)。

1) 目前常用的细分格式包括 catmull-clark 细分格式、loop 细分格式、蝶形 butterfly 细分格式、doo-sabin 细分格式和 $\sqrt{3}$ 细分格式等很多种细分格式。

2) 本文件中为了方便阅读,使用“array<int>”指代整型数组,“array<double>”指代双精度数组,“array<uint>”指代无符号整型数组,以此类推。

## 3.9

**几何体 geometric volume**

CSG 体、参数体和离散网格体及其组合的统称。

注：GSG 基本体、独立无拼接的参数体和离散网格体中的多面体，通称为单元体。

## 3.10

**几何体的体表示 volume representation (VRep) of geometric volume**

对于包含内部结构的几何体，需要有一套结构来表示，便于对几何体的分析计算，这种表示称为体表示(VRep 或者 V-Rep)。

## 3.11

**正则几何体 regular geometric volume**

称几何体表面是正则的，如果表面的每一条边有且只有两个面相邻，并且表面每一个顶点的邻域只能在该顶点邻接的一个表面上。或者，如果表面任意一点的邻域与圆盘同胚。

注：正则的几何体表面，是一个二维无边流形，每一个顶点的相邻面连接图是一个连通子图。正则体的表面可以用 B-Rep 表示。

满足以下条件的几何体，称为正则几何体或者正则体：

- a) 几何体表面是正则的；
- b) 几何体内部的每个面，有且只有一个重合面。

如果几何体是离散网格体，则可以称这个网格体是正则的，或者称为正则体网格。结构体网格是正则体网格。

## 3.12

**几何体的几何结构 geometric structures of geometric volume**

## 3.12.1

**几何体的顶点 point of geometric volume**

三维空间中的点。

## 3.12.2

**几何体的边 curve or line of geometric volume**

三维空间中的直线段或者曲线段。

注：如果是曲线段，则几何体称为曲面几何体。

## 3.12.3

**几何体的面 surface of geometric volume**

三维空间中的平面片或者曲面片。

## 3.12.4

**几何体的体 body of geometric volume**

由几何体的单元体及其组合构成。所有单元体组合构成一个几何体的体。

## 3.13

**几何体的拓扑结构 topological structures of geometric volume**

## 3.13.1

**几何体的拓扑结构 topological structures of geometric volume**

几何体的点、线、面、体之间的连接关系。

## 3.13.2

**几何体的顶点 vertex of geometric volume**

单元体的顶点。

3.13.3

**几何体的边 edge of geometric volume**

几何体中所有单元体的边。

注：如果几何体中两个单元体共边，则这条边为几何体的共边(coEdge)。

3.13.4

**几何体的面 face of geometric volume**

几何体中各单元体的面。

3.13.5

**几何体的表面区域 patch of geometric volume**

几何体表面的若干面组合构成几何体的表面区域。

3.13.6

**几何体块 block of geometric volume**

若干单元体连接构成的立体区域。

3.13.7

**几何体 volume of geometric volume**

有两两共面关系的单元体的集合。

注：相互连接的全部单元体的组合，这种组合满足几何体的正则性。如果几何体都是离散网格体，称为网格体，相应的网格成为体网格。

## 4 CSG 体

### 4.1 四面体及表示

四面体(tetrahedron)也称三棱锥，是多面体，应由不在同一平面的四点连接成的4个三角形包围构成。四面体几何结构如图1所示。正四面体中，4个三角形应都是正三角形。四面体是一个不可分割的多面体，也称三维单纯形(simplex)。

四面体的几何结构应满足表1的要求，类型ID:tetr。

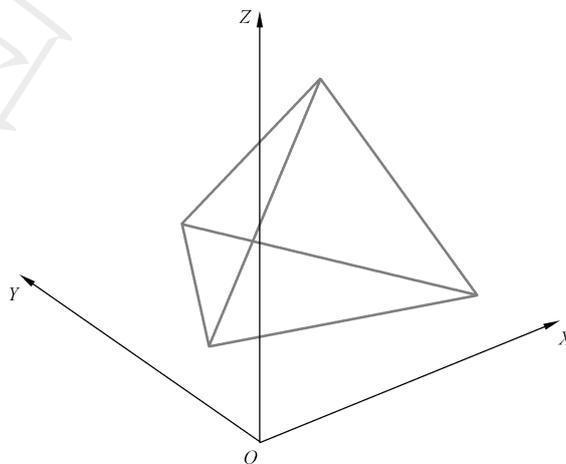


图1 四面体的几何结构

表 1 四面体的几何结构

参数	类型	说明	是否必须
vert1Coordinate	array<double>	由 3 个双精度浮点数构成,代表四面体中第一个顶点在三维空间中的坐标	是
vert2Coordinate	array<double>	由 3 个双精度浮点数构成,代表四面体中第二个顶点在三维空间中的坐标	是
vert3Coordinate	array<double>	由 3 个双精度浮点数构成,代表四面体中第三个顶点在三维空间中的坐标	是
vert4Coordinate	array<double>	由 3 个双精度浮点数构成,代表四面体中第四个顶点在三维空间中的坐标	是

## 4.2 六面体及表示

六面体(hexahedron)是多面体,应由不在同一平面的 6 个面所围成的,其中每个面的形状应是四边形。正六面体应满足每个面都是正方形。长方体应满足每个面是矩形。

六面体应通过其 8 个顶点的空间位置和连接关系表示。考虑到许多情况下用户仅需要表示长方体而非任意六面体,本部分表示增加了一个属性 isRectangular,用于指示六面体是否为长方体。若 isRectangular 为 true,则六面体的几何结构如图 2 所示。可以使用更紧凑的表达方式。六面体的几何结构应满足表 2 的要求。若 isRectangular 为 false,则六面体的几何结构如图 3 所示。

类型 ID:hexa。

长方体 blek(rectangularBlock)应通过局部坐标系和沿 3 个正交轴的长度表示。每一个长方体应由 3 个双精度浮点数分别表示该长方体沿 3 个坐标轴尺寸大小。长方体底面的中心点位于坐标原点,且长方体向 X 轴、Y 轴、Z 轴正方向延伸。

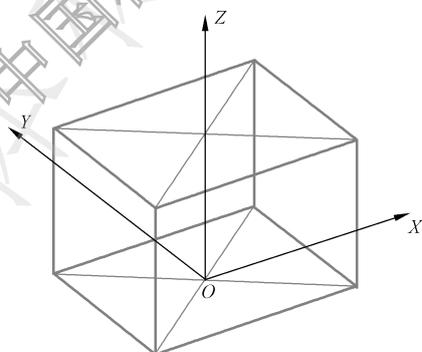


图 2 isRectangular 为 true 时六面体的几何结构

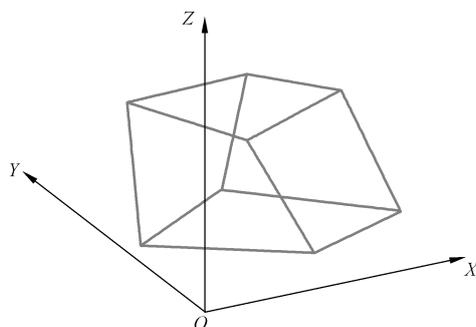


图 3 isRectangular 为 false 时六面体的几何结构

表 2 六面体的几何结构

参数	类型	说明	是否必须
isRectangular	bool	用于表示此六面体是否是长方体的属性。若为 true,则认为该六面体是长方体。此时,不再读取 vertsCoordinate 和 faces,而是使用更紧凑的 xLength,yLength,zLength 表示该长方体	是
vertsCoordinate	array<double>	由 24 个双精度浮点数构成,代表六面体中所有顶点的空间坐标。每三个双精度浮点数为的一组(X,Y,Z),共 8 组	否
faces	array<uint>	由 24 个无符号整数构成,代表六面体中 6 个面的顶点的索引值。每四个整数为一组,代表了六面体中一个面的顶点的索引,共 6 组	否
xLength	double	沿 X 轴长	否
yLength	double	沿 Y 轴长	否
zLength	double	沿 Z 轴长	否

### 4.3 圆锥体及表示

类型 ID: cCon。

圆锥体 cCon(circularCone)是一个实体,应由圆形底面和称为顶点的点作为顶部构成,其几何结构如图 4 所示。Z 轴提供中心轴。从底部到顶部逐渐变细。从圆形底面中心到顶点的轴线垂直于底面。使用局部坐标系、半径和角度在三维空间中表示。每一个圆锥体应由 3 个双精度浮点数表示。其中,前两个浮点数表示底部半径和从底部圆心点到顶点的高度;最后一个为可选项,表示从 X 轴顺时针转过的角度,默认为  $360^\circ$ ,即整个圆锥体。圆锥体下底面圆心位于坐标原点。

圆锥体的几何结构应满足表 3 的要求。

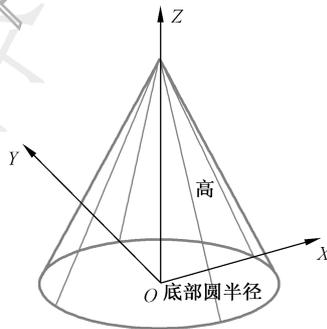


图 4 圆锥体的几何结构

表 3 圆锥体的几何结构

参数	类型	说明	是否必须
radius	double	底部圆半径	是
height	double	从底部圆心点到顶点的高度	是
angle	double	从 X 轴顺时针转过的角度,默认为 $360^\circ$ ,即整个圆锥体	否

#### 4.4 圆柱体及表示

类型 ID:cCyl。

圆柱体 cCyl(circularCylinder)是一个实体,应由圆形底部、顶部和距圆柱体轴线固定距离的点形成的圆柱面共同构成,其中 Z 轴提供中心轴。圆柱体的几何结构如图 5 所示。通过局部坐标系与半径在三维空间中表示。每一个圆柱体应由 4 个双精度浮点数表示,其中前两个浮点数表示底部圆半径和从底部圆心点到顶部圆心点的高度;后两个浮点数为可选项,分别代表从 X 轴顺时针转过的角度及圆柱上部圆半径。圆柱体下底面圆心位于坐标原点。

圆柱体的几何结构应满足表 4 的要求。

表 4 圆柱体的几何结构

参数	类型	说明	是否必须
radius	double	底部圆半径	是
height	double	从底部圆心点到顶点的高度	是
angle	double	从 X 轴顺时针转过的角度,默认为 360°,即整个圆柱体	否

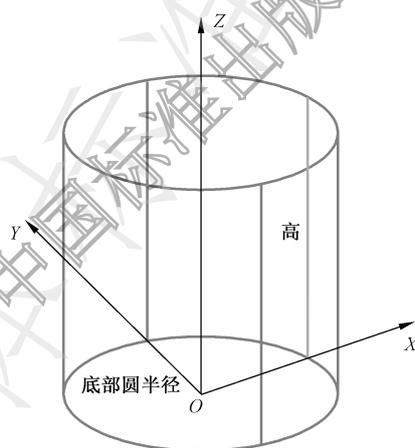


图 5 圆柱体的几何结构

#### 4.5 四棱锥体及表示

类型 ID:rPyr。

四棱锥体 rPyr(rectangularPyramid)是一个实体,应由矩形底面和称为顶点的点作为顶部构成。四棱锥体的几何结构如图 6 所示。从底部到顶部逐渐变细。从底面中心到顶点的轴线垂直于底面。Z 轴提供中心轴。四棱锥体通过底面矩形的边长和底面中心到顶点的高度来表示。

每一个参数四棱锥体应由 3 个双精度浮点数表达,分别表示底部沿 X 轴长和沿 Y 轴长,以及顶点到矩形面的高度。四棱锥体的一个顶点位于坐标原点,四棱锥体向 X 轴、Y 轴、Z 轴正方向延伸。

四棱锥体的几何结构应满足表 5 的要求。

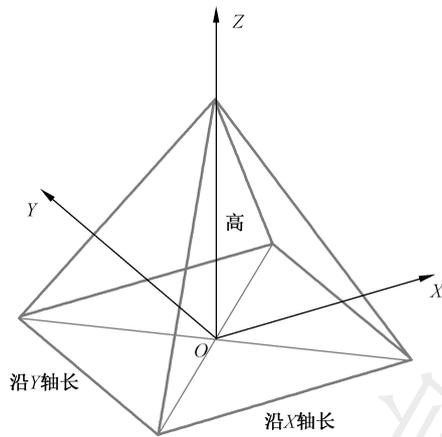


图 6 四棱锥体几何结构

表 5 四棱锥体的几何结构

参数	类型	说明	是否必须
xLength	double	沿 X 轴长	是
yLength	double	沿 Y 轴长	是
height	double	高度	是

#### 4.6 正多棱锥体及表示

类型 ID: gPyr。

对于一般的正多棱锥体,由下述格式来进行表示。正棱锥体 gPyr(generalPyramid)是一个实体,应由正多边形底面和称为顶点的点作为顶部构成。从底部到顶部逐渐变细,棱锥的各侧棱都相等,各侧面都是等腰三角形。从底面中心到顶点的轴线垂直于底面,底面被定义在 X、Y 平面上。正多棱锥体通过底面正多边形的边长、边的数量和底面中心到顶点的高度来表示。

一个正棱锥的表示应由 2 个双精度浮点数和 1 个整型表示,其中两个浮点数分别是正多边形的边长以及顶点到底面的高度;最后一个整数表示该正棱锥的底面正多边形有多少条边。默认正棱锥的底面的中心点位于坐标原点,且正棱锥与 Y 轴负方向相交的一条边与 X 轴平行。

一般正多棱锥体的几何结构应满足表 6 的要求。

表 6 正多棱锥体的几何结构

参数	类型	说明	是否必须
edgeLength	double	正多边形边长	是
height	double	高度	是
numEdges	int	该多棱锥的底面有几条边,为大于或等于 3 的整数	是

#### 4.7 球体及表示

类型 ID: sphV。

球体 sphV(sphereVolume)是一个实体,满足表面上的所有点到中心点的距离都相同。球体通过局部坐标系和半径在三维空间中表示,球体的几何结构如图 7 所示。

每一个球体的表示应由 3 个双精度浮点数表示。其中第一个浮点数表示球的半径,最后两个参数分别表示形成球体的两个旋转角度,可以分别形成球体的一部分。

球体的几何结构应满足表 7 的要求。

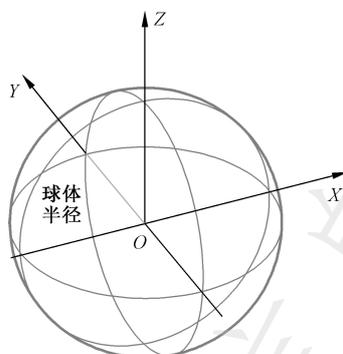


图 7 球体的几何结构

表 7 球体的几何结构

参数	类型	说明	是否必须
radius	double	球体半径	是
xAngle	double	在 X 轴、Y 轴平面旋转形成的夹角差	否
zAngle	double	与 Z 轴形成的夹角差	否

#### 4.8 圆环体及表示

类型 ID:rinV。

圆环 rinV(ringVolume)表示一个空间内的圆环。

每一个圆环体应由 3 个双精度浮点数表示。其中前两个浮点数分别表示圆环的内径与外径,最后一个参数表示从 X 轴顺时针转过的角度,可以用来形成部分圆环。

圆环的几何结构应满足表 8 的要求。

表 8 圆环的几何结构

参数	类型	说明	是否必须
innerRadius	double	圆环的内径	是
outerRadius	double	圆环的外径	否
angle	double	从 X 轴顺时针转过的角度,默认为 360°,即整个圆环	否

#### 4.9 布尔运算体及表示

类型 ID:bolV。

简单体素经布尔运算的结果是将并、交、差布尔运算符应用于两个实体操作数的结果。布尔运算中

的实体也可以是之前布尔运算的结果。

例如,两个同心球体  $V_1, V_2$ , 其球体半径分别是  $R_1$  和  $R_2$ , 其中  $R_1 < R_2$ , 在半径相差不大的情况下进行布尔差运算, 即  $V_2 - V_1$  形成的 CSG 就是一个球壳体。

布尔运算体在 info3D 中应存储在参数模型块中, 类型 ID: bolV (BooleanResultVolume)。

布尔运算体表示应满足表 9 的要求。

表 9 布尔运算体表

参数	类型	说明	是否必须
operator	int	布尔运算符, 为 1: union 并, 为 2: difference 差, 为 3: intersection 交	是
firstVolume	uint	第一个实体 ID	是
secondVolume	uint	第二个实体 ID	是

## 5 参数体

### 5.1 NURBS 体及表示

类型 ID: nbsV。

NURBS 体 (NurbsVolume) 的表示数据应满足下述要求: 3 个无符号整数类型数据表示的 NURBS 体的阶数 (order, 阶数为次数加 1); 3 个无符号整数类型数据表示 NURBS 体在 X 轴、Y 轴、Z 轴 3 个方向上的控制顶点数; 表示控制顶点的双精度浮点数类型列表, 每个数表示一个控制点; 作用在每个控制点上的权因子, 权因子的数据类型用单精度浮点数表示。

在 3 个坐标方向构成的长方体区域内定义  $s \times t \times r$  阶 NURBS 体的表示形式应满足式(1):

$$V(u, v, w) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^l \omega_{ijk} P_{ijk} B_{i,s}(u) B_{j,t}(v) B_{k,r}(w)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^l \omega_{ijk} B_{i,s}(u) B_{j,t}(v) B_{k,r}(w)} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- $\omega_{ijk}$  ——作用在控制顶点上的权因子;
- $P_{ijk}$  ——控制顶点坐标;
- $B_{i,s}(u)$  —— $s$  阶 B 样条基函数;
- $B_{j,t}(v)$  —— $t$  阶 B 样条基函数;
- $B_{k,r}(w)$  —— $r$  阶 B 样条基函数;
- $n+1$  ——X 轴方向控制顶点数;
- $m+1$  ——Y 轴方向控制顶点数;
- $l+1$  ——Z 轴方向控制顶点数。

NURBS 体参数域上的节点向量为 3 个单调递增的实数序列构成的节点向量  $U = \{u_0, \dots, u_{n+s}\}, V = \{v_0, \dots, v_{m+t}\}, W = \{w_0, \dots, w_{l+r}\}$ 。图 8 为三元 NURBS 体及其控制体网络的示意图。



图 8 NURBS 体及其控制体网格的示意图

由于 NURBS 体是张量积表示形式,其中的控制体网格可以表示成 3 个方向控制顶点的顺序排列形式进行存储,简化了离散网格体的存储结构。

B 样条体也是一种 NURBS 体,但是对于所有的  $i, j, k$ , 应满足  $\omega_{ijk} = 1$ 。

有理贝齐尔(Rational Bezier)体也是一种特殊的 NURBS 体,但是应满足  $n = s - 1, m = t - 1, l = r - 1$ 。

NURBS 体的几何结构应满足表 10 的要求。

表 10 NURBS 体的几何结构

参数	类型	说明	是否必须
ControlPoints	array<double>	3 个坐标方向的控制体网格的控制顶点的 X、Y、Z 坐标表示,每个坐标的数据类型为 double	是
Weight	array<float>	作用在每个控制顶点上的权因子,数据类型为 float	是
KnotVectu	array<float>	参数域 $u$ 方向的节点矢量 $U$ , 矢量中每个数的数据类型为 float。当节点矢量的节点取自然数时,这个数的数据类型为 uint	是
KnotVectv	array<float>	参数域 $v$ 方向节点矢量 $V$ , 矢量中每个数的数据类型为 float。当节点矢量的节点取自然数时,这个数的数据类型为 uint	是
KnotVectw	array<float>	参数域 $w$ 方向节点矢量 $W$ , 矢量中每个数的数据类型为 float。当节点矢量的节点取自然数时,这个数的数据类型为 uint	是
CtrlPntNum	array<uint>	三元 NURBS 体控制顶点的数组,数组中每个数表示控制体网格每个方向上的控制顶点个数,顶点数的数据类型为无符号整数	是
Order	array<uint>	NURBS 体 X、Y、Z 3 个方向上阶数的数组。数组中每个数表示一个方向上的阶数,数据类型为无符号整数	是

## 5.2 拉伸体及表示

类型 ID: extV。

拉伸体 extV(extrudedVolume)是几何体,应通过拉伸二维横截面形成。拉伸方向由 extrudedDirection 属性指定,拉伸长度由 depth 属性指定。图 9 为拉伸体的几何结构。如果平面区域具有内部边界(定义的孔),则这些孔也一并拉伸为实体的孔。每一个拉伸体应由 1 个整型变量、1 个不定长数组和

4 个双精度浮点数表示。其中整型变量是 1 个 ID, 指向 X、Y 平面内的有界曲线; 不定长数组指向该有界曲线内的内部边界; 前 3 个浮点数表示拉伸方向向量, 后 1 个浮点数表示拉伸长度。

拉伸体的几何结构应满足表 11 的要求。

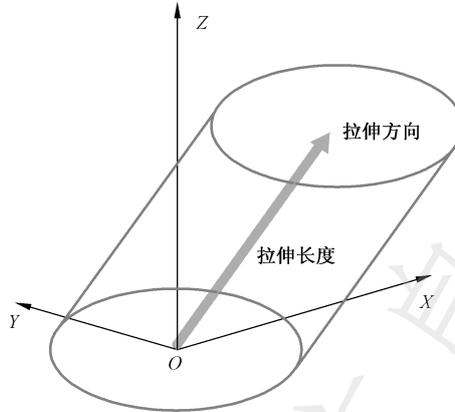


图 9 拉伸体的几何结构

表 11 拉伸体的几何结构

参数	类型	说明	是否必须
extrudedCurve	uint	X、Y 平面内的有界曲线 ID	是
holes	array<int>	SweptAreaCurve 内部的有界曲线 ID 列表	否
extrudedDirection	array<double>	拉伸方向。该向量为单位向量, 仅表示方向	是
depth	double	拉伸长度	是

### 5.3 回转体及表示

类型 ID: revV。

回转体 revV (revolvedVolume) 是一个几何体, 是通过绕轴旋转横截面形成。设定一个直角坐标系, 回转截面应位于过旋转轴的平面内。对于正则体而言, 回转截面或者是与轴线不相交的闭合曲线 (无自交) 围成的平面区域, 或者是两个端点都在轴线上的有界无自交曲线与轴线围成的平面区域。图 10 为回转体的几何结构。若回转截面由内环和外环的曲线组成, 则生成的回转体亏格不为零。

回转体的回转截面绕轴旋转, 缺省情形下旋转方向为顺时针方向, 旋转方向和旋转角度应方便自主设定。

每 1 个回转体应包含 1 个整型变量、1 个不定长数组、4 个双精度浮点数。其中整型变量作为 ID 指向合围成旋转截面外边界的有界曲线, 不定长数组指向该有界曲线内的内部边界; 之后是前 3 个浮点数表示旋转轴方向向量, 后 1 个浮点数表示旋转角度。

回转体的几何结构应满足表 12 的要求。

表 12 回转体的几何结构

参数	类型	说明	是否必须
revolvedAreaCurve	int	合围成旋转截面外边界的有界曲线 ID	是
holes	array<int>	RevolveAreaCurve 内部有界曲线 ID 列表	否

表 12 回转体的几何结构 (续)

参数	类型	说明	是否必须
axis	array<double>	旋转轴,前三个浮点数表示轴原点, 后三个浮点数表示方向	是
angle	double	旋转角度	是

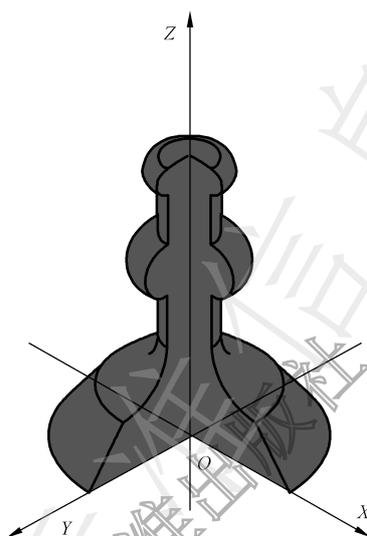


图 10 回转体的几何结构

#### 5.4 扫掠体及表示

类型 ID:swpV。

扫掠体 swpV(sweptVolume)是通过在一个几何形状(称为截面)沿着一条路径进行平移、旋转或缩放而生成的三维几何体。如果平面区域具有内部边界(定义的孔),则这些孔也一并拉伸为实体的孔。

图 11 为一般扫掠体示意图。

扫掠体的“截面”也可以是三维形体,称为运动形体,运动形体沿着一条路径扫掠形成的三维形体,构成一个扫掠体,其中的起始截面与终止截面分别为运动形体的部分表面。

扫掠体应由 2 个整型变量、1 个不定长数组表示。其中第一个整型变量作为 ID 指向截面包含一个外边界为有界曲线;第二个整型变量指向扫掠曲线 sweptDirectionCurve;不定长数组指定 sweptAreaCurve 内部的有界曲线。

扫掠体的几何结构应满足表 13 的要求。

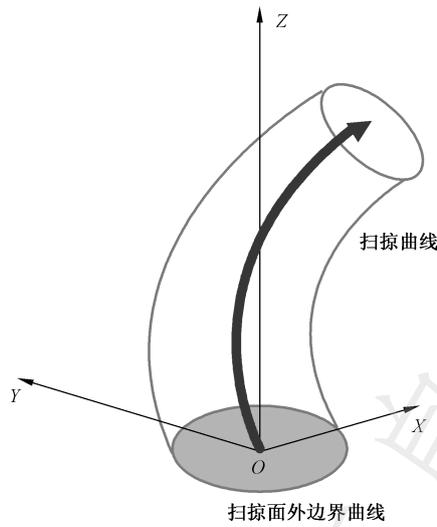


图 11 扫掠体的几何结构

表 13 扫掠体的几何结构

参数	类型	说明	是否必须
sweptAreaCurve	int	合围成截面外边界的有界曲线 ID	是
holes	array<int>	sweptAreaCurve 内部的有界曲线 ID 列表	否
sweptDirectionCurve	int	拉伸方向的曲线 ID	是

### 5.5 放样体及表示

类型 ID: loftV。

放样体 loftV(loftVolume)是顺序插值通过空间中多个截面边界线而形成的三维形体,并且放样体的表面上应在各顺序截面边界线对应点的插值曲线上具有一定连续性(一般地,至少应保持  $G^1$  或者  $C^1$  连续)。放样体的几何结构如图 12 所示。

放样体应由两个不定长的整型数组表示,其中 loftAreaCurve 用于表示多个截面上的外边界曲线 ID,表示几何体的多个截面;holes 用于表示各个截面内的边界曲线。

放样体的几何结构应满足表 14 的要求。

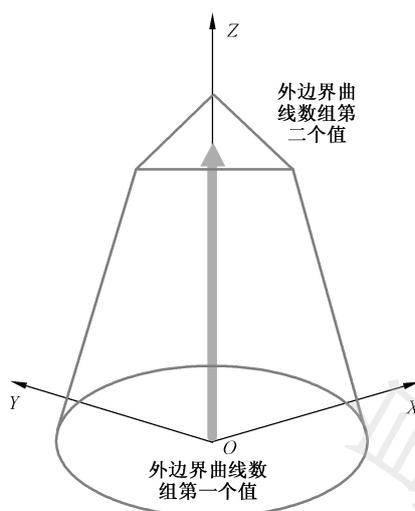


图 12 放样体的几何结构

表 14 放样体的几何结构

参数	类型	说明	是否必须
loftAreaCurve	array<int>	表示多个截面上的外边界曲线 ID	是
holes	array[array<int>]	loftAreaCurve 内部的边界曲线 ID 列表	否

## 6 细分体

### 6.1 细分曲线及表示

类型 ID:sbdC。

给定初始控制顶点与细分规则,线细分曲线 sbdC(subdivisionCurve)格式应满足表 15 的要求。

表 15 线细分的结构

属性	类型	说明	是否必须
controlPoints	array<double>	空间中顺序的初始顶点坐标	是
subdivisionScheme	string	使用的细分方法,如 Chaikin 等	是
newcontrlPnts	array<double>	细分结果,按顺序的顶点坐标	否
subdivNumb	uint	细分次数,默认为 2	否

### 6.2 细分曲面及表示

类型 ID:sbdS。

细分曲面 sbdS(subdivisionSurface)为初始控制网格经过多次细分格式细分而形成的曲面。

面细分的结构应满足表 16 的要求。

表 16 面细分的结构

属性	类型	说明	是否必须
initialControlPoints	array<double>	初始面网格的顶点的坐标	是
initialVertIndices	array<uint>	初始面网格的顶点的索引	是
subdivisionScheme	string	使用的细分方法, Loop、Catmull-Clark、Butterfly、Doo-Sabin	是
creaseEdges	array<uint>	顶点序号, 标记在网格内哪些顶点连接成 crease edges, 即表明哪些边是尖锐边, 在细分时应予以特殊处理	否
boundaryInterpolationRules	uint	边界插值规则, 默认为 0 0: BoundaryNone 不适用边界 1: EdgeOnly 仅适用边界 2: EdgeAndCorner 适用边界和角点	否
faceVaryingInterpolationRules	int	面插值规则, 默认为 0 0: LinearNone 处处平滑 1: LinearCornersOnly 线性插值角点 2: LinearCornersPlus1 线性插值角点和 3 个以上交界 3: LinearBoundaries 沿所有边界边和角进行线性插值 4: LinearALL 线性插值(边界和内部)	否
resultControlPoints	array<double>	细分结果面网格的顶点的坐标	否
resultVertIndices	array<uint>	细分结果面网格的顶点的索引	否
subdNumb	uint	细分次数	否

### 6.3 细分体及表示

类型 ID: sbdV。

细分体 sbdV(sudivisionVolume)与细分曲面定义类似, 初始网格为体网格。

细分体的结构应满足表 17 的要求。其中, initialControlPoints 定义了每个顶点在三维空间中的位置, initialPointIndices 描述每个顶点属于第几个四面体/六面体。如果表示第 1 个~第 4 个顶点构成第一个四面体, 第 5 个~第 8 个顶点构成第 2 个四面体, 可以写为 {[1, 2, 3, 4], [5, 6, 7, 8]}。description 属性对体表示的类型进行说明, 即说明此体表示是使用四面体网格, 还是六面体网格, 或二者皆有的混合网格。亦可在此描述自定义内容。

表 17 细分体的结构

属性	类型	说明	是否必须
initialControlVerts	array<double>	初始体网格的顶点的坐标	是
initialVertIndices	array<uint>	初始体网格的顶点的索引	是
description	string	描述该体网格的类型: 四面体网格(Tet), 或六面体网格(Hex), 或混合网格(Hybrid)	否

表 17 细分体的结构 (续)

属性	类型	说明	是否必须
subdivisionScheme	string	使用的细分方法,如 Loop、Catmull-Clark、Butterfly 等细分格式定义,包括体细分的边界位置的细分规则定义。 细分体表面的细分格式定义与细分曲面格式定义相同	是
resultControlPoints	array<double>	细分结果体网格的所有顶点的坐标	否
resultPointIndices	array<array<uint>>	细分结果体网格的所有顶点的索引和该顶点的细分次数	否

## 7 离散网格体的结构表示

类型 ID: DisV。

复杂的离散网格体 DisV(DiscreteVolume)应由系列多面体的组合构成,以离散的点线面体方式进行定义。

离散网格体的结构应满足表 18 的要求。

表 18 离散网格体的结构

属性	类型	说明	是否必须
Points	array<double>	网格体的顶点坐标	是
PointIndices	array<uint>	网格体的顶点索引	是
Edge	array<uint>	网格体的边由网格体的两个顶点构成,这里的顶点只需要引用顶点索引,不需要顶点的几何数据	是
EdgeIndices	array<uint>	网格体的边索引	是
PolyHdn	array<uint>	网格体的多面体由网格体的若干条边构成,这里的边只需要引用边索引,构成一个边索引数组	是
PolyHdnIndices	array<uint>	网格体的多面体索引	是
Face	array<uint>	网格体的面由网格体的若干条边构成,这里的边只需要引用边索引,构成一个边索引数组	否
FaceIndices	array<uint>	网格体的面索引	否

离散网格体的拓扑结构,应可以通过点查找到边,通过边查找相邻的多面体,通过相邻边查找到多面体的面结构,从而形成离散网格体中点、线、面、体之间相互连接的拓扑关系。

## 8 几何体的体表示

### 8.1 几何体的语义特征框架

由网格体的多条边连接形成闭合的线框,构成语义特征框架(semantic feature wireframe),该框架是一种拓扑结构。

几何体的部分几何块可以定义该区域的语义信息,由这些区域几何块的边界框架构成的几何体边

界框架,称为语义特征框架的一个闭合线框。如果把几何体表面区域分成多个带语义的表面区域块,这些表面区域块的边框组合构成一个几何体表面语义特征框架。语义特征框架是附着在几何体的一个拓扑结构,该结构表示采用几何体拓扑结构中的点边面的索引值。

几何体的语义特征框架主要用于对几何体的局部区域进行编辑修改操作,包括几何编辑修改,以及定义在区域几何块或者区域表面上的各种语义属性信息。当几何体是离散网格体时,基于语义特征框架的编辑操作具有一定的便捷性。例如,传统的 FFD 表示框架,可以看作是一种语义特征框架。

如图 13 中,语义特征框架是利用几何体的拓扑结构表示,在语义特征框架上可以定义任意表示粒度的语义信息,例如,语义特征框架的各种元素上,包括框架节点(vert node)、框架边(edge)、特征区域边界线(patchbd line)、特征区域(patch)、特征框架(wireframe)或者整体(body)上,都可以定义或者用户自定义的各种语义特征。

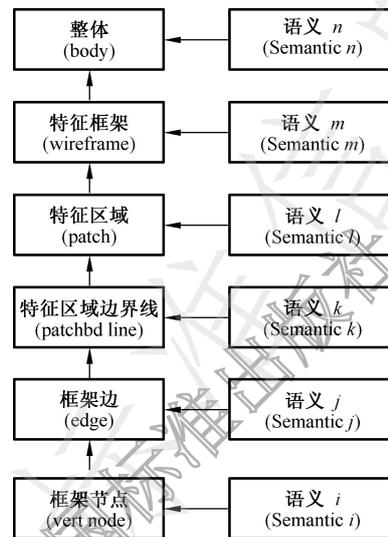


图 13 语义特征框架的表示结构

## 8.2 几何体的体表示结构

本文件中一个几何体的体表示(VRep)结构只包含几何结构和拓扑结构。三维模型的各种结构表示,例如属性表示,需要额外定义相应的结构。传统的三维模型表示格式标准已经进行了各种定义,第六章也定义了属性的表示结构。

如图 14 所示,在体表示结构中,除了保留传统体表面的 BRep(B-Rep)表示中的几何与拓扑之间的对应关系外,体表示(VRep)还具有几何体内部各种几何表示以及各几何之间连接关系的拓扑表示结构。VRep 是 BRep 的一种拓展。

一个单元体(primitive)应由若干面(face)构成。体块(block)由单元体的组合构成,可以构成几何体(volume)。壳体(shell)是一种特殊的几何体,应由体块或特征区域构成。拓扑表面是几何体的表面,可以构建生成几何体。

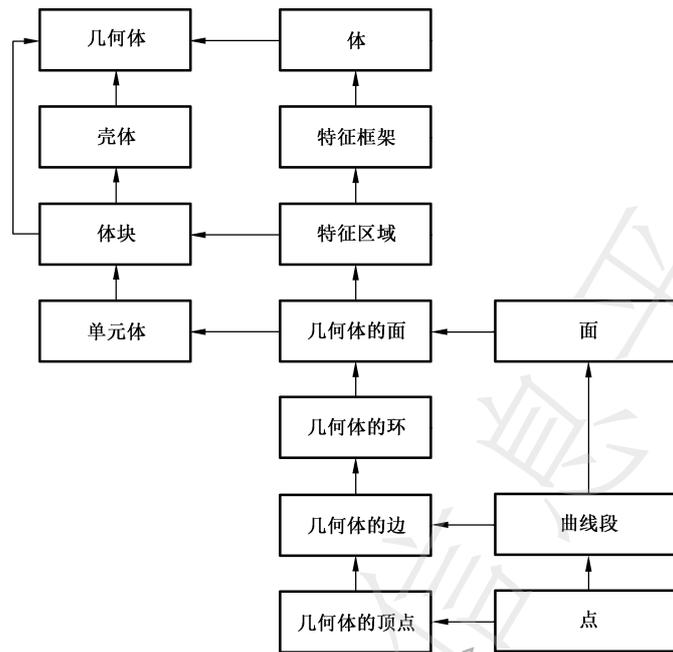


图 14 几何体的体表示结构

参 考 文 献

- [1] GB/T 5271.1 信息技术 词汇 第1部分:基本术语
  - [2] GB/T 20000.1 标准化工作指南 第1部分:标准化和相关活动的通用词汇
  - [3] TC10-SC6 Mechanical engineering documentation
  - [4] TC10-SC8 Construction documentation
  - [5] ISO/TC 184 Automation systems and integration
  - [6] ISO 16792 Technical product documentation—Digital product definition data practices
-