

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

团 体 标 准

T/CCTAS XX—2024

疏浚工程开挖量计算三维模型应用技术指南

Technical guide for application of three-dimensional modeling in excavation
volume calculation for dredging projects

（征求意见稿）

（本草案完成时间：X）

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

中国交通运输协会 发布

目 次

前 言 II

1 范围 3

2 规范性引用文件 3

3 术语 3

 3.1 数字化 digitization 3

 3.2 参数化 parameterization 3

 3.3 人机交互 human-computer interaction 3

 3.4 多精度建模 multi-precision modeling 3

 3.5 工程构筑物 Engineered structure 3

 3.6 族构件 Family component 3

4 基本规定 3

5 数据获取与预处理 4

 5.1 钻孔数据 4

 5.2 水深点数据 4

 5.3 二维剖面数据 4

6 三维模型构建 5

 6.1 三维地质模型 5

 6.2 工程构筑物模型 6

7 开挖量计算应用 7

 7.1 疏浚工程量计算 7

 7.2 不同土质类别分类计算 7

附录 A （资料性） 三维剖面图分析与二维剖面图输出 9

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。

本文件由中国交通运输协会交通工程设施分会提出。

本文件由中国交通运输协会标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：天津大学、中交天津航道局有限公司、中交（天津）生态环保设计研究院有限公司、中国建筑第六工程局有限公司、深圳大学、武汉理工大学、深圳市水务工程检测有限公司、广东和协建设工程检测有限公司、上海中交水运设计研究有限公司、宁波中交水运设计研究有限公司、长江重庆航运工程勘察设计院、中交水运规划设计院有限公司、中交华南勘察测绘科技有限公司、中交第一航务工程勘察设计院有限公司、中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司。

本文件主要起草人：李明超、秦 斌、田会静、任秋兵、刘晓敏、余 流、韩 帅、秦 亮、董必钦、田桂平、王琰帅、孔 锐、白 硕、王 铮、周俊龙、吴殿春、陈 永、刘乐平、张晓健、吴文鑫、赵幸焕、尹杨特、李永科、周树高、陈 琦、常纪磊、马正勇、樊书刚、苏东升、高 源、李华山、白万里、杨长义、侯 伟、慕东霖。

疏浚工程开挖量计算三维模型应用技术指南

1 范围

本文件提供了利用三维地质模型计算疏浚工程土石方开挖量的方法。
本文件适用于航道、港口和运河等疏浚清淤工程。

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 55017 工程勘察通用规范
GB 55018 工程测量通用规范
GB/T 50145 土的工程分类标准
JTS 207 疏浚与吹填工程施工规范
JTS 181-5 疏浚与吹填工程设计规范
SL 17 疏浚与吹填工程技术规范

3 术语

下列术语适用于本文件。

3.1 数字化 digitization

将许多复杂多变的信息转变为可度量的数字、数据，再以这些数字、数据建立模型，并转变为一列二进制代码，引入计算机内部，进行统一处理。

3.2 参数化 parameterization

以疏浚工程特征参数驱动三维模型构建与更新的一种计算机辅助设计方法。

3.3 人机交互 human-computer interaction

人与计算机或其他智能设备之间的相互作用和信息交流过程。

3.4 多精度建模 multi-precision modeling

根据不同勘察设计阶段的目标，将工程对象分解为多个精度级别，以准确反映其结构和属性。

3.5 工程构筑物 Engineered structure

为特定工程目的而设计建造的临时性或永久性构筑物，如挖槽、围堰等。

3.6 族构件 Family component

具有相似属性和参数的预定义图形元素，如不同类型的挖槽、围堰、疏浚船只等，用以三维参数化设计。

4 基本规定

4.1 钻孔数据宜与二维剖面数据联合使用，提高地质信息的完整性和准确性。

4.2 地质勘察基本规定、勘察要求、勘探和取样规定、原位测试和室内试验、分析评价和工程勘察报告应按照 GB 55017 规定执行。

4.3 应按 GB/T 50145 规定进行疏浚土的工程分类。

4.4 挖槽宽度和深度控制应按照 SL 17 执行。

5 数据获取与预处理

疏浚工程中应采用钻孔数据、水深点数据和二维剖面数据进行三维模型构建。下面规定了这三种数据的获取方式和预处理方法。

5.1 钻孔数据

5.1.1 获取方式

5.1.1.1 应通过地质勘探，在预布设位置进行钻孔取样。

5.1.1.2 应记录相应钻孔段的岩土物理性质、岩性等特征信息。

5.1.1.3 钻孔过程应保证岩芯样本的质量和完整性。选择勘探机具时，应考虑岩土类型及深度。

5.1.2 预处理

5.1.2.1 应清理和校正钻孔中的异常值。

5.1.2.2 以孔口高程为基准，确保钻孔空间坐标数据的一致性。

5.1.2.3 整理每个钻孔的数据为一系列样本点，并明确钻孔的地层属性。

5.1.2.4 钻孔样本点应包括钻孔编号、坐标、孔口标高、采样深度、岩土类别、物理性质等信息。

5.1.2.5 在建模阶段，钻孔数据存在缺失时，应采取适当的填充方法，宜采用克里金插值法。

5.2 水深点数据

5.2.1 获取方式

5.2.1.1 采用声纳测深技术获取水深点数据。在测量过程中，使用多波束或单波束声纳系统进行水深测量，以获得精确的水深数据。

5.2.1.2 进行水深测量时，应在预设的测量网格点上，以确保数据的均匀分布和代表性。

5.2.1.3 在测量过程中，应记录水深点的具体位置，包括经纬度坐标和水深值，同时记录测量时的潮位、气象条件及其他影响因素，以便进行数据校正。

5.2.1.4 对于复杂的水域环境，应进行多次测量，并在不同时间或潮汐条件下进行，以获得更准确的水深数据。

5.2.2 预处理

5.2.2.1 应清理和校正水深点数据中的异常值，如测量误差、设备故障导致的不正常读数等。异常值应根据统计特性进行修正或删除。

5.2.2.2 对水深数据进行潮位校正，消除潮汐、气象等因素对测量结果的影响。将实际水深数据转换为相对于基准水位的深度值。

5.2.2.3 确保水深点数据的坐标系统一致。将水深点数据统一转换为国家大地坐标系或项目指定坐标系，以便与其他数据（如钻孔数据和二维剖面数据）进行空间叠加和分析。

5.2.2.4 将水深点数据整理成结构化数据集，包括水深点编号、坐标、实际水深值、校正后的水深值等信息。

5.2.2.5 通过与已知水深数据进行对比，或进行现场复测来检查数据的合理性和准确性。

5.3 二维剖面数据

5.3.1 获取方式

5.3.1.1 通过现场地质勘察或物探技术（如声波探测、地震勘探）获取二维剖面数据。

5.3.1.2 记录剖面线的地质特征，如地层厚度、岩性变化、断层及褶皱等，确保详细描述地质构造特征。

5.3.2 预处理

5.3.2.1 采用统一的国家大地坐标系对二维剖面进行坐标转换，坐标转换精度应按 GB 55018 执行。

5.3.2.2 在二维剖面中，明确并记录线条的地质属性，如地层特征和岩性分布，确保数据的精度控制。

5.3.2.3 将二维剖面数据通过平面到空间的转化规则，进行空间叠加，转换为三维模型，确保空间位置精度符合模型绝对公差，并保持数据一致性。

5.3.2.4 将处理后的数据转换成结构化数据集，对地质线进行分层归类，确保多个剖面数据在空间上的一致性处理。

6 三维模型构建

6.1 三维地质模型

6.1.1 三维地质模型参数化建模

6.1.1.1 将钻孔数据导入三维可视化环境，自动生成点，并利用几何数据结构等技术逐层生成对应岩性的空间地层曲面。

6.1.1.2 依据计算几何算法，求解所有钻孔点“凸包”，生成地质结构体。

6.1.1.3 对地质结构体和空间地层曲面进行互相切割、自动组合，形成对应分层分块的地层实体。

6.1.1.4 经切割、组合等系列自动操作，输出最终的三维地质模型。

6.1.2 三维地形体模型参数化建模

6.1.2.1 在三维可视化环境中输入水深点数据，形成空间三维点集。

6.1.2.2 对输入的空间三维水深点进行处理，自动搜索求解水深测量点“凸包”。

6.1.2.3 根据求解的“凸包”和水深测量点数据，输入相应的地形体深度参数，构建水下三维地形体模型。

6.1.3 三维地质体建模

6.1.3.1 根据处理后的钻孔等数据，建立初步的地质体模型。模型构建应包括空间坐标系的确定、地层的划分及其物理属性的定义。

6.1.3.2 在建立初步模型的基础上，根据疏浚工程阶段的需求和数据的精度要求，进行细节层次的建模调整，以符合实际工程需求。

6.1.3.3 对建立的地质体模型进行验证，检查模型是否符合实际地质条件及工程要求，并对模型进行必要的修正和优化。

6.1.3.4 针对实际工程情况可采用直接拉伸建模法、点线混合建模法、网络线拟合建模法和边界线封闭建模法 4 种不同精度的建模方法，如图 1 所示。

6.1.3.5 直接拉伸建模法适用于工程前期钻孔数据稀少且仅有一个二维剖面的情况。通过将二维剖面数据在垂直方向上进行拉伸，建立初步的三维模型。

6.1.3.6 点线混合建模法适用于工程前期具有少量钻孔数据和简单二维剖面数据的情况。通过结合点数据和线数据来构建三维模型，提高模型的精度和细节层次。

6.1.3.7 网络线拟合建模法适用于具有大量交叉剖面数据的情况。通过拟合多个交叉剖面线，建立更加精细的三维模型，以准确表示复杂的地质体结构。

6.1.3.8 边界线封闭建模法适用于具有完整、连续且几何特性合理的边界线情况。通过对边界线进行封闭处理，建立精确的三维模型，适用于对模型精度要求较高的情况。

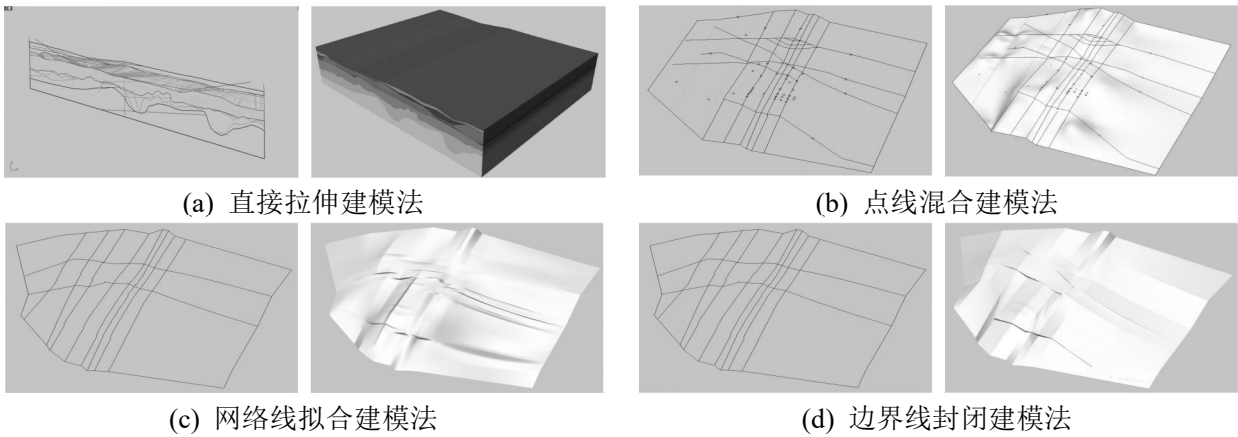


图 1 三维多精度建模方法

6.1.3.9 应建立曲面拟合的土质质量评价模型并提出相应的精度评价方法，计算公式如下：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (R(u_k, v_k) - Z_k)^2} \quad (1)$$

式中： n 为原始数据点个数， Z_k 为第 k 个点的高程， $R(u_k, v_k)$ 为曲面上距离 Z_k 最近点的高程，单位为 m 。

6.2 工程构筑物模型

6.2.1 三维族构件参数化建模

三维族构件的参数化建模旨在通过设置和调整参数来更新模型的结构尺寸和属性，从而构建具备信息属性的结构模型。

- 6.2.1.1 确定三维族构件（如挖槽、围堰等）的控制参数，包括底面形状、挖槽深度、开挖坡比等。
- 6.2.1.2 根据控制参数生成三维族构件的基本几何框架。
- 6.2.1.3 将定义好的参数集与几何模型关联，通过赋值驱动模型的创建与更新。
- 6.2.1.4 实时与模型构件数据库连接，进行模型的存储和再利用管理。
- 6.2.1.5 应确保所有控制参数间逻辑关系明确，保证模型的准确性和一致性；定期保存模型数据，防止丢失；应确保前端用户界面友好，以提高用户操作的效率和准确性。

6.2.2 三维挖槽建模

挖槽是疏浚工程中最常用的一种工程构筑物，是疏浚工程量计算的主要模型依据之一，以下规定了挖槽的建模步骤。

- 6.2.2.1 在三维挖槽设计中，主要控制参数包括挖槽的底面形状、开挖坡比等。
- 6.2.2.2 以倾斜的四边形底面为例，通过解析几何技术确定三维挖槽的轮廓框架，进行底面形状的定义。
- 6.2.2.3 基于底面形状、开挖坡比等控制参数，使用统一函数完成三维挖槽的成面运算，以及三维挖槽模型的构建。
- 6.2.2.4 结合数据库技术，整合挖槽的几何尺寸、开挖坡比等属性信息，进行三维挖槽模型的存储和管理。

6.2.3 三维围堰建模

围堰是疏浚工程中用于隔离和保护施工区域的工程构筑物，以下规定了围堰构筑物的建模步骤。

- 6.2.3.1 在三维围堰设计中，主要控制参数包括围堰剖面形状、围堰高度、填筑坡比、围堰长度等。
- 6.2.3.2 以梯形剖面为例，通过解析几何技术确定围堰的剖面轮廓框架，完成剖面形状的定义。
- 6.2.3.3 基于围堰剖面形状、围堰高度等控制参数，使用相应的函数和算法，完成围堰模型构建，确保模型的实际结构符合设计要求。

6.2.3.4 结合数据库技术，整合围堰的剖面形状、围堰高度、填筑坡比等属性信息，进行模型的存储和管理。

7 开挖量计算应用

7.1 疏浚工程量计算

7.1.1 疏浚工程量的计算断面包括设计断面 ABCD、疏浚工程量计算断面 $A'B'C'D'$ 、超深 ΔH 和超宽 ΔW 计算区域，如图 2 所示。

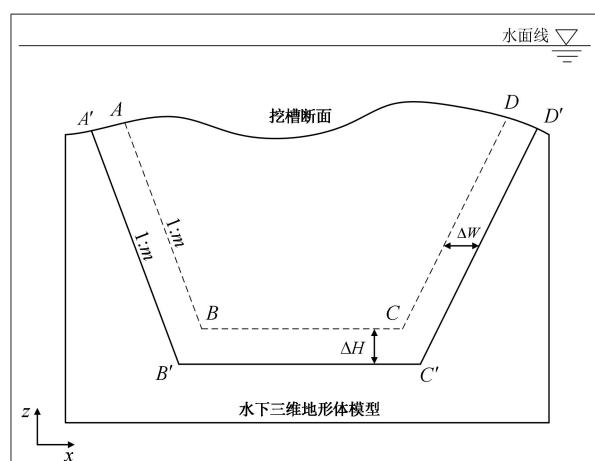


图 2 基于水下三维地形模型的疏浚工程量计算断面示意图

7.1.2 超深和超宽值与疏浚船舶类型及装机功率有关，应根据 JTS 207 进行选择。

7.1.3 应对水下三维地形模型和三维挖槽模型进行剖切分析，包括交线、二维剖面等，具体方法参见附录 A。

7.1.4 在剖切得到的疏挖区域三维模型之后，应采用高斯-勒让德求积方法进行疏浚工程量的计算。

7.1.5 水下三维地形模型和三维挖槽模型应采用几何数据结构数据模型实现。

7.1.6 疏挖区域三维模型围成的闭区域为 Ω ，依据微积分原理和高斯-勒让德公式计算疏浚工程量，公式如下：

$$V = \iiint_{\Omega} d\Omega = \iiint_{\Omega} dx dy dz = \oint_S z dx dy \quad (2)$$

式中： V 为疏挖区域三维模型的体积， m^3 ； Ω 为疏挖三维模型所围成的闭区域； S 为 Ω 对应于 xoy 的平面区域。

7.2 不同土质类别分类计算

7.2.1 应按照 JTS 181-5 的规定，根据各工程的疏浚精度要求，对三维剖面图进行适当的网格划分。

7.2.2 三维剖面图输出的详细步骤参考附录 A。

7.2.3 疏挖区中第 i 个网格下的第 j 种土质，其断面面积 S_{ij} 可按如公式(3)进行计算。

$$S_{ij} = \iint_S |\bar{S}_u(u, v) \times \bar{S}_v(u, v)| du dv = \iint_S F(u, v) du dv \quad (3)$$

式中： S_{ij} 为疏挖区中第 i 个网格下的第 j 种土质的剖面面积， m^2 ； $\bar{S}_u(u, v)$ 和 $\bar{S}_v(u, v)$ 分别为曲面上任意点 u 、 v 方向的一阶偏导矢量； $F(u, v)$ 为确定曲面法矢模长的函数。

7.2.4 对于疏挖区中第 i 个网格下的第 j 种土质的工程量可按公式(4)进行求解，土质类型 j 的疏浚工程量和整个疏挖区的疏浚工程量如公式(5)、公式(6)计算：

$$V_{ij} = S_{ij} \times a \quad (4)$$

$$V_j = \sum_{i=1}^N V_{ij} \quad (5)$$

$$V = \sum_{j=1}^M V_j \quad (6)$$

式中： V_{ij} 为疏挖区中第 i 个网格下的第 j 种土质工程量， m^3 ； V_j 为土质类型 j 的疏浚工程量， m^3 ； V 为整个疏挖区的疏浚工程量， m^3 ； a 为网格的宽度， m ； M 为土质的种类数； N 为某种土质 j 被网格剖分的块数。

附录 A (资料性) 三维剖面图分析与二维剖面图输出

A.1 三维剖面图分析

A.1.1 两对象相交

A.1.1.1 在确定两个对象的交线之前，应首先判断这两个对象是否相交，根据集合性质，三维模型和剖切面的交线取交结果为线类型。

A.1.1.2 在允许模型精度的条件下，宜利用离散法求解两对象的交线，其过程可通过统一的函数来实现和控制。

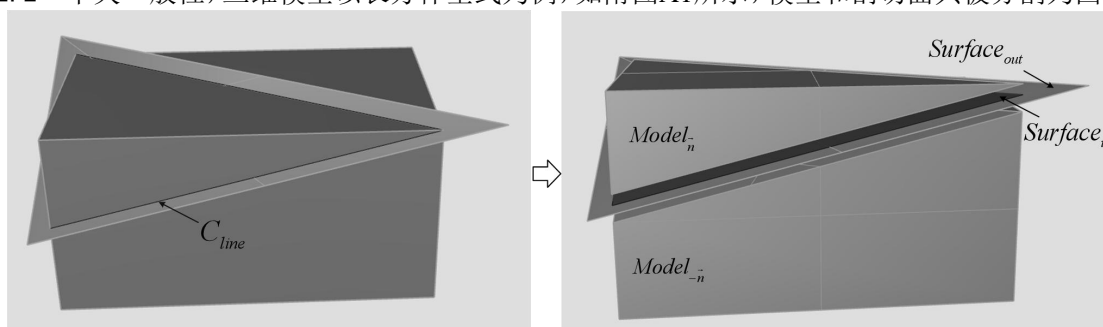
A.1.1.3 规定了函数的结构，包括输入参数和输出参数，具体要求如下：

- a) 输入参数 *model3D* 为三维模型，采用 NURBS 算法构造的边界表示类型。
- b) 参数 *section Surface* 为剖切面，采用 NURBS 算法构造的平面类型。
- c) 参数 *tolerance* 为允许模型精度，保持离散法求解的交线精度在一定范围内。
- d) 输出参数包括交线结果 *intersection Curves* 和 *is Success* 参数。
- e) 参数 *intersection Curves* 为两个对象的交线结果
- f) 参数 *is Success* 为 bool 类型，如果为 true，则返回相应的交线结果；如果为 false，则表示 *model3D* 和 *section Surface* 不相交，无法计算交线。

A.1.2 切割原始对象

A.1.2.1 应利用交线将三维模型和剖切面分别分割为两部分。

A.1.2.2 不失一般性，三维模型以长方体形式为例，如附图A1所示，模型和剖切面共被分割为四部分，。



附图 A1 三维模型互切示意图

A.1.2.3 依据集合运算性质，实现过程应采用一个统一互切运算函数来实现模型的剖面分离。

A.1.2.4 应由 SplitFunc 统一函数来操作。该函数的输入参数包括三维模型 *model3D*、剖切面 *section Surface* 和允许模型精度的 *tolerance*。输出参数为一个 NurbsBrep 类型的数组 *nurbsBreps*，包含分离后的三维模型。

A.1.2.5 互切运算符应用于从三维模型中获取与剖切面相交的部分。

A.1.2.6 SplitFunc 函数将三维模型分成了四个部分：法线方向外侧的部分、法线反方向的外侧部分、交线的内侧部分、以及交线的外侧部分。

A.1.2.7 在完成交线切割原对象运算之后，应删除与结果无关的边界，重构相应的数据结构，实现所需的三维剖面图分析。

A.2 二维剖面图输出

A.2.1 信息获取

A.2.1.1 实际工程设计中，应将三维模型互切操作得到各种类型的剖面图描述转变为二维图形显示。

A.2.1.2 这一过程通常包括一系列几何变换，如旋转、平移、投影等，具体操作如下：

- a) 旋转变换改变视角的方向，使剖切面对应的二维图形与需要呈现的角度相匹配。
- b) 平移变换调整图形位置，使其在纸张上的位置满足打印需求。
- c) 投影变换将三维图形“投影”到二维平面上。这里建议使用正交投影或透视投影等方法。

A.2.1.3 上述几何变换宜通过专业的 CAD 软件来实现，同时也鼓励根据具体需求进行程序化实现。

A. 2. 1. 4 根据二维图形的输出，应进行更为详细的分析和设计，进而辅助疏浚工程的顺利进行。不失一般性，某三维可视化模型为长方体型式，如附图A2所示。

A. 2. 2 位置确定

A. 2. 2. 1 其剖面为ABC，由三维可视化模型与剖面的交线上任意三点即可确定相应剖面的位置（公式(A1)）。

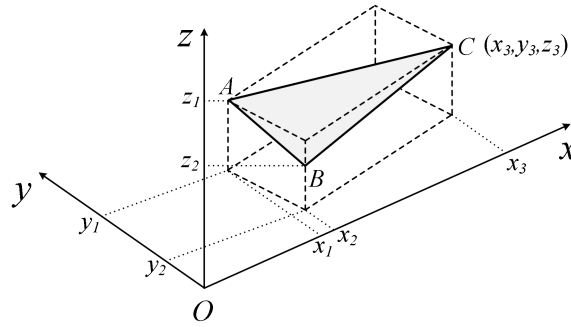
A. 2. 2. 2 附图A2中A、B、C三点构成了一个剖面，则该剖面ABC的法线应为 $\vec{n}_0$ ，如公式(A1)所示。

$$\vec{n}_0 = \overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = a\vec{i} + b\vec{j} + c\vec{k} = (a \ b \ c) \quad (A1)$$

式中： $\overrightarrow{AB} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$ ， $\overrightarrow{AC} = (x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1)$ ；

$a = (y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (y_3 - y_1)(z_2 - z_1)$ ， $b = (z_2 - z_1)(x_3 - x_1) - (z_3 - z_1)(x_2 - x_1)$ ，

$c = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)$ 。



附图A2 二维剖面的空间示意图

A. 2. 3 二维CAD剖面图形成

A. 2. 3. 1 将剖面ABC的法线 $\vec{n}_0$ 进行旋转复合变换至目标平面（水平面）的法线方向 $\vec{n}$ 上，再进行投影变换至xoy平面即可完成三维剖面图的二维化，从而输出相应的二维CAD剖面图，具体流程如下：

a)求解法线 $\vec{n}_0$ 与x轴、y轴、z轴的夹角；

b)绕x轴、y轴、z轴的三维旋转变换矩阵对剖面ABC的法线 $\vec{n}_0$ 进行旋转变换至水平面法线 $\vec{n}$ ；

c)再对位于水平面的剖面ABC进行投影变换，将投影前剖面上的任意点 (x', y', z') 投影变换为 (x, y, z) ，即可得到xoy平面的二维剖面图。

A. 2. 3. 2 特别地，当 $\alpha=0^\circ$ 时，即为垂直于xoy平面的铅直剖面图，当 $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ 时，即为斜剖切面，当 $\alpha=90^\circ$ 时，即为平行于xoy平面的水平剖面图，以上便可获得三维可视化环境下任意方向的剖面二维CAD图。