ItasCAD v3.0 特色功能与案例集锦

2016 年 05 月

Itasca(武汉)咨询有限公司
Itasca International Inc.

前 言

Itasca 产品如 *FLAC*^{3D} 等得到用户青睐的内在原因在于其独特的研发方式，所有产品都由工程实践经验丰富的专家领衔设计、由岩土和计算机 “双料” 专业背景的核心技术人员领衔开发，并且，*Itasca* 是这些产品最忠实的用户，在经历实践应用以后再投放市场。

ItasCAD 研发过程秉承了 *Itasca* 公司传统工作方式，设计、开发、和应用测试均由经验丰富的海归专家团队负责和直接参与，在 *ItasCAD v3.0* 发布之际，研发团队组织汇总了产品的若干特色功能，扼要介绍研发团队完成的一些应用案例。

ItasCAD 如下几个方面的技术特色决定了其唯一性：

1) 系统框架和设计定位：按照“大岩土”工作理念设计，面向未来岩土体工程领域勘察、分析、设计一体化流程三维计算机化工作方式的需要；
2) 核心建模技术和方法：继 *GoCAD* 之后世界上第二款采用 *DSI* 核心技术的产品，区别于其他任何建模技术如克里金插值。针对国内行业性需求开发的的建模功能，实现国际顶尖技术和国内需求的结合；
3) 岩土工程专业性：强大的数据处理能力和岩土工程专业分析功能，体现 *Itasca* 传统技术优势。

ItasCAD v3.0 是国际先进理念、技术与国内行业需求相结合的产物，初步实现了研发团队的预期目标：为岩土工程行业打造一款国际水准的大型软件。*ItasCAD v3.0* 数据库和图形系统的信息处理功能已经部分具备直接接口 *BIM* 的能力，*Itasca* 在岩土工程力学分析方面深厚积累，为后续开发奠定了坚实基础。我们将一如既往地以极大热忱继续努力，为您奉献更好的实用工具。

ItasCAD 研发团队

目录

1. 概述 1
1.1 概述 1
1.2 地质三维技术发展历程 2
1.3 *ItasCAD* 研发历程 4
1.4 *ItasCAD* 设计定位与技术特点 6
1.5 *ItasCAD* 功能组成与应用流程 7
2. 数据库与应用 10
2.1 主要功能与应用原则 10
2.1.1. 主要功能 10
2.1.2. 设计路线与实现途径 11
2.1.3. 应用原则与流程 13
2.2 数据导入与应用 15
2.2.1. *EXCEL* 导入 16
2.2.2. 电子化编录 19
2.2.3. *ItasCAD* 图形返回 22
2.3 空间溯源分析与应用案例 23
2.3.1. 开发意图 23
2.3.2. 应用案例 24
2.4 综合应用：岩体质量分级 27
2.4.1. 功能简介 27
2.4.2. 工程背景与技术路线 30
2.4.3. 应用成果 31
3 *ItasCAD* 建模方法与应用案例 34
3.1 概述 34
3.1.1. 建模资料 34

3.1.2. 建模方法 35
3.2 基于平面地质图的建模案例 36
3.2.1. 背景条件与要求 36
3.2.2. 建模流程与技术路线 38
3.2.3. 建模过程与成果 40
3.3 物探剖面（图片）建模与多指标物探综合解译 47
3.3.1. 物探剖面（图片）建模 47
3.3.2. 物探多指标综合建模流程 50
3.4 土层建模 52
3.4.1. 概述 52
3.4.2. 一键建模工程实例 53
3.4.3. 土层属性建模工程实例 56
4 地质三维模型的工程应用 60
4.1 概述 60
4.2 地应力查询 60
4.2.1. 技术路线 60
4.2.2. 实现过程 62
4.3 Hoek 方法参数取值 63
4.3.1. 方法与原理 63
4.3.2. 应用过程 65
4.4 地灾评估 67
4.4.1. 方法与依据 67
4.4.2. 技术路线与过程 69
4.5 场平标高设计 72
5 后 记 75

1. 概述

1.1 概述

虽然国际和国内研发的地质三维产品已接近 20 款，但除地质学研究和石油行业以外，没有任何一款能够真正被岩土体工程领域（水利水电、电力、交通、工民建等行业）普遍接受和广泛应用，内在原因还是地质体的特殊性和行业需求的差异性。在国内，岩土体工程领域以建筑结构设计专业主导的思维模式和工作习惯，也是客观存在的因素之一。为此，本集锦首先简要回顾了国际上地质三维技术发展历程，披露我们对岩土体领域地质三维到底需要什么样的技术和产品的一些思考和认识。

概括地，《*ItasCAD* 特色功能与应用集锦》叙述了如下几个方面的内容：

1) 简要回顾地质三维技术起源和发展历程，侧重于介绍岩土体地质三维面临的关键技术问题和 *ItasCAD* 开发时采取的解决方案，帮助理解 *ItasCAD* 在设计定位、关键技术、功能等环节的特点及其与其他产品之间的内在差异；
2) *ItasCAD v3.0* 数据库：数据库是系统应用基础，也是和其他一些产品如 *GoCAD* 的重要差别之一。所列应用案例突出了数据库特色性功能，体现了对传统数据库能力的延伸，以及自身所具备的专业性；
3) 建模案例列举了三种特殊情形：仅依赖平面地质图（地质测绘成果）、仅依据物探、和土层建模；前两种针对勘探量不足时快速、合理建模能力，后者体现了 *ItasCAD v3.0* 在针对薄层起伏土层及存在复杂尖灭、透镜体时独有的强大建模能力；
4) 最后简要介绍了“含属性地质三维模型”服务工程分析和设计的一些应用，以实例演示除生成二维地质图以外、“地质三维模型用途”这一普遍关心的问题。

为控制篇幅，本集锦案例集中会在日常工作中遇到、真正检验产品能力的一些复杂问题，以体现核心技术能力决定的产品能力和适用范围，帮助鉴别与其他产品的差异。

关于地质三维核心底层技术的研究，虽然国际上在上世纪 80 年代已经基本盖棺定论，在过去的十几年内，基于 DSI 技术的产品一枝独秀地占据市场绝大多数份额，已经证实了高端产品核心技术的决定性作用。不过，当时的研究不会预计到目前我国岩

土体工程领域对地质三维如此广泛的需求和国内地质三维技术的“多姿多彩”。为此，在叙述 ItasCAD 特点和应用之前，借此机会分享研发团队的认识：即便在高速变化的当今社会，固执地坚守和默默耕耘，仍然是高端技术研发的根本。

1.2 地质三维技术发展历程

上世纪 80 年代，在设备制造、建筑结构行业开始采用三维可视化设计以后（代表性产品如 Catia 和 MicroStation），石油行业率先寻求一种针对地质体的三维计算机化工作模式，要求不仅像结构三维一样模拟地质体三维空间几何形态，更重要地，还能储存和处理地质体包含的各种信息，包括地质体固有的地质属性如时代和新老关系，以及石油行业关心的特定属性如油藏地震波传播速度、开采过程运动特征等。针对这一现实需求的研究表明，当时世界上既有理论和技术积累尚不能满足地质三维产品研发的需求，需要开发出新的三维建模数学理论和相应的计算机技术，即需要有创新性的底层理论和方法，其内在原因是地质体和地质工作的特殊性，主要体现在：

1）地质界面形态的不规则性，其中的尖灭、断层错动等很难用传统数学理论和当时已有的技术进行快速有效模拟，这些既有理论包括上世纪 50 年代针对矿山资源评估提出、相对最接近地质体特点的克里金插值技术（国内研发机构普遍采用）；

2）地质工作过程在认识上的不确定性：与事先构想形成的确定性建筑结构形态不同地，地质工作事先并不知道地质体形态，而是通过少数部位的信息、结合地质分析推测判断，要求地质建模技术能够满足现实中这种工作模式的需要，表现为少数已知部位 100%精度而其他绝大部分区域的推测和推测结果的随时修正；

3）地质体固有的特性，包括地质特性和工程属性，前者如沉积地层面之间绝对不会相互穿插、不同性质断层固有的错动方式等，是保证建模过程“数学成果地质合理性”的关键；后者则具有广泛的行业性和专业性，如岩土工程行业关心的岩体质量、土层划分、力学性质和参数值等。

以上三个方面是地质体具备的一般特征，总体上与行业无关，差别在于不同行业关心的地质体类型存在差异。现实中人类希望认识地质体的工程实践活动形式很多，因需求差异、关心点不同而催生不同行业如石油、采矿、工民建涉及的岩土工程等。这些工程活动的共同点是工作对象均为天然地质体，差别在于采用不同的技术手段和

工作方式了解和利用地质体的某些属性。因此，在上世纪 80 年代地质三维技术开发规划过程中，明确要求不仅需要描述地质体空间形态和正确表达地质特性，而且还需要根据行业需求，兼容行业信息、技术方法、行业标准等，实现地质三维基础上的工程分析和设计。

以上述需求为目标的研发工作持续了约 15 年，针对石油行业需求于 1999 年发行了首款地质三维建模与分析软件 *GoCAD*，与当时所有其他相似产品相比，*GoCAD* 在如下两个环节取得了突破性进展：

1）基于离散数学的地质建模理论和核心技术（即 *DSI--Discrete Smooth Interpolation*，离散光滑插值）：通过各种精确或模糊约束组合，满足任意复杂地质体快速建模，允许通过人机交互等方式随时修正，确保模型的地质合理性；

2）图形和数据一体化的构架和数据处理技术：图形和数据一体化保证了地质模型对属性的兼容能力，构建出含属性的地质三维模型。与地质体形态相同，大量的地质体属性信息也表现出空间分布不规则性等特点，需要专门的数据处理技术。

GoCAD 在满足创建含属性地质模型的同时，一些功能如数据导入、建模方式（如属性建模）、分析内容等特别针对了石油行业特点和要求。正是这一原因，本世纪初 *GoCAD* 被引入矿山行业时，许多研究和应用机构在 *GoCAD* 基础上进行了二次开发，以适应矿山行业的需要。*Itasca* 海外华人专家于 2002 年首次将 *GoCAD* 介绍给国内水利水电行业，随后的数年内持续为国内用户提供应用培训和二次开发服务，一方面认识到了 *GoCAD* 强大的建模和数据处理能力，另一方面也深刻体会到面向岩土体工程领域时的适应性问题。

国内对地质三维的探索工作也起源于上世纪 80 年代，当初以中南电力设计院、成都理工大学为代表的一些机构都采用了数学函数拟合的方式模拟地质界面，这种技术路线在本世纪仍然被少数单位采用。不过，最近 15 年以来，国内地质三维研发工作采用的主流底层技术为克里金插值，与 DSI 相比，前者是后者的特例解，在对 DSI 进行各种约束和限制以后，即得到克里金插值解。底层理论算法的差异从根本上决定了建模功能能够达到的高度，在处理相对简单问题时彼此还比较接近，随着问题复杂性增大、或者资料少人工干预的增多，二者的差别也就越悬殊，甚至影响到实际使用价值。比

如，在日常工作常见的起伏形态控制（避免穿插）、尖灭现象模拟等方面，底层技术的差别直接决定了建模过程的可控性和结果的合理性。

底层技术还直接决定了建模路线及其现实合理性，DSI 技术几乎可以利用任何类型的资料（几何和数值）、用最基本的表达方式（点的坐标及其在该点处的相关属性如产状和数值大小）创建模型，建模过程引用“约束”方便地实现地质判断和推测，弥补勘探资料少的天然不足。相比较而言，采用其他一些底层技术如克里金插值算法，需要利用“半成品”如二维剖面而不是原始资料建模，人工推测也往往通过构建辅助剖面的方式实现。在一些情况下（如探勘量少或地质变化性大），现实中几乎不可能事先勾画剖面形态，建模技术路线失去了必要的现实意义。本集锦中所列土层静力触探数据建模案例可以很好地说明这一点，由于大量嵌套透镜体的存在，用创建好的三维模型剖切出的二维剖面形态很复杂，不结合三维模型都难以理解二维成果代表的三维形态，现实中几乎不可能事先勾画出可靠的二维剖面，使得“从二维剖面创建三维模型”的技术路线失去实际应用价值。

正是基于以上认识，*ItasCAD* 研发团队选择坚守 DSI 技术：如果不能掌握该技术，就不推出地质三维建模功能。

1.3 *ItasCAD* 研发历程

ItasCAD 的开发开始于 2004 年，很大程度上受到 *GoCAD* 应用体验的启示：三维可视化、图形和信息一体化的岩土体工程工作方式，避免专业分割导致的信息传递障碍。当时条件下 *ItasCAD* 的开发集中在地质三维模型上的岩土力学分析，包括与 *Itasca* 三维数值计算软件尤其是 *3DEC* 的前后接口等。当时没有考虑开发地质三维建模功能，主要原因是技术难度和市场因素：技术门槛过高而市场上已经存在成熟产品如 *GoCAD*。

在 2006 到 2009 年间，以旅居加拿大华人专家团队领衔的 *ItasCAD* 研发工作先后从加拿大转移到国内，主要服务国内水电行业。当时国内水电行业地质三维发展途径之一是对 *GoCAD* 进行二次开发，以适应水电行业的相关需要。在这一过程中，*ItasCAD* 起到了 *GoCAD* 水电模块的作用，充当 *GoCAD* 在水电行业应用时的前后接口，将勘察资料导入 *GoCAD* 后建模、将模型返回到 *ItasCAD* 生成符合行业要求的二维成果图等。此外，研发团队还利用 *ItasCAD* 已有的图形和数据处理功能，针对白鹤滩、拉西瓦等水电站地下厂房和边坡开展监测资料处理和分析评价，拓展了 *ItasCAD* 数据处理、特别是时间维

数据处理功能。其意图是在地质三维相对成熟和推广应用以及能够创建含属性地质三维模型以后，在此基础上开展岩土工程专业分析，拓展地质三维的专业应用价值。

不过，由于行业性差异，*GoCAD* 二次开发虽然能够一定程度上满足水电行业地质三维工作方式的需求（如二维成图），但相对深入的应用仍然受到一些限制，难以兼容岩土分析所需要的基础数据、方法和行业标准，直接影响了创建“含工程地质属性三维模型”的工作进展。另一方面，针对行业需求的一些自主开发在建模技术、系统构架上难以达到所需要的高度，影响了复杂问题的处理能力和实践应用范围。在这种现实条件下，研发团队决定探索和开发 *DSI* 建模技术，为 *ItasCAD* 开发面向岩土工程的行业性地质三维建模和数据处理功能。

经过几年不懈努力，*ItasCAD* 研发团队不仅完全掌握、而且拓展了 *DSI* 算法，并成功地将数学算法转化为可操作的计算机技术。同时，研发团队深入总结了既往地质三维建模实践、尤其是 *GoCAD* 应用培训和推广应用过程中暴露的问题，对如何使用 *DSI* 技术快速建模、降低应用难度和保证模型合理性方面进行了系统研究，为 *ItasCAD* 设计了适应中国用户特点的若干建模方式，其中的流程建模和土体一键建模用“傻瓜”式的操作实现绝大部分问题快速、准确建模的需要，少数特殊问题提供命令操作和脚本运算等方式，为高端用户解决极端问题提供技术手段。

2013 年推出、主要在资助单位内部使用的 *ItasCAD v2.0* 的标志是数据库、建模、二维出图三大功能的一体化，即基本资料入库、然后直接用以建模和生成二维地质图。与该版本相比，*ItasCAD v3.0* 除强化建模能力（优化算法和提供新的建模方式，后者如土层建模、属性建模）以外，标志性特征是增加数据处理能力以创建含属性地质三维模型，奠定岩土工程分析设计的基础。体现这一标志性特征的新增功能和重大改进体现在如下几个方面：

1）数据库中增加了满足工程地质、岩土工程分析所需要的记录，嵌入了数据采集技术和分析处理功能。与此同时，提高了二维出图格式的自定义能力，最大程度地通过“设置”的方式满足定制需要；

2）重写 *ItasCAD v2.0* 中全部建模流程，重点是通过改进算法提高模型地质合理性和建模速度。针对土层新增一键建模功能，自动模拟尖灭和透镜体；增加属性建模功能；

3）新增空间网格技术，继 *DSI* 以后的另一项技术引擎，实现属性建模、数据处理、和数据分析的载体和核心。

以上在基础数据、建模技术、和数据处理三个关键环节的开发奠定了 *ItasCAD v3.0* 应用于工程分析和设计的基础，针对水利水电、电力、和国土资源行业资助单位的现实需要，研发团队开发了一系列专业应用功能，如地应力查询、勘探布置、场平设计、岩体质量分级与力学参数取值、隧洞围岩潜在问题类型评价等，初步实现了“含地质属性模型基础上岩土工程分析和设计”的预期目标。通过嵌入数值分析功能和提供数值计算接口强化产品的力学分析能力，自然地成为下一阶段（版本）的开发内容。

1.4 *ItasCAD* 设计定位与技术特点

ItasCAD 含意为 Itasca CAD，系地质三维建模、分析和辅助设计软件，设计定位是构建含属性地质三维模型、并在模型基础上开展岩土力学分析和岩土工程设计，其中的设计内容包括岩土工程开挖轮廓形态（边坡、基坑等）设计和地下工程支护设计等，设计过程嵌入变形和稳定分析，满足设计成果的安全性要求。

ItasCAD 针对的主体用户群为勘测设计院工程地质和岩土工程技术人员，用简捷的操作方式解决日常工作中常见的实际问题。此外，*ItasCAD* 为高级用户解决特别复杂问题提供有效工具，允许这部分用户使用脚本运算等高级功能。

ItasCAD 开发遵循了欧美国家工程实践中采用的 “大岩土” 工作流程，即岩土体工程的地质、分析、和设计一体化。实现 *ItasCAD* 预期开发目标需要两个方面的技术保障，一是 “大岩土” 的工程实践经验和涉及的计算机化技术应用积累，是开发过程中需求规划和功能设计的专业基础；另一个方面是前述的相关数学理论和计算机技术，是实现设计意图的技术保证。

概括地，*ItasCAD* 以地质三维模型为载体实现岩土力学分析和岩土工程设计，从研发团队掌握的信息看，目前世界上尚无相同市场定位的产品面市。实现这一预期目标涉及多个方面的关键技术，也构成了 *ItasCAD* 鲜明的技术特点，主要包括：

1）系统框架：*ItasCAD* 最初设计时即面向几何图形和属性数据一体化的要求，分别对应于岩土工程设计依赖的两个基本要素：地质边界条件（几何图形）和岩土体力学特性（属性数据）。*ItasCAD* 具体通过数据库和图形一体化、三维图形内部几何信息和属性信息一体化的方式实现，满足勘察、分析、设计一体化的需要；

2）地质三维建模技术：主要指 *DSI* 技术、以及便捷的建模方式，二者的结合构成 *ItasCAD* 在地质建模环节独有的技术特点；

3）空间网格及数据处理技术：*ItasCAD* 的网格技术可以在普通笔记本计算机上创建数千万网格单元，专门开发的加速算法满足大尺度空间数据分析处理的需要。特别地，*ItasCAD v3.0* 已经包含了完善的专业信息和一定的管理信息，为与其他平台如 BIM 接口奠定了良好基础；

4）专业计算分析技术，特别是能够帮助解决复杂岩土体问题的数值模拟技术（下一版本添加），是 *Itasca* 传统优势环节。

1.5 *ItasCAD* 功能组成与应用流程

从工程应用的角度，*ItasCAD v3.0* 包含三大功能模块，即数据库、建模与数据处理、应用与成果输出。其中的数据库对应于日常工作中勘察资料的采集、保存、业内整理，建模与数据处理是引入三维工作模式以后的一个中转平台，其作用是勘察资料转化成包括地质边界和岩土力学特性的“含属性地质三维模型”，而应用与成果输出对应于日常工作特定问题的分析评价和工程设计，以及不同专业之间协作所需要的数据交互。

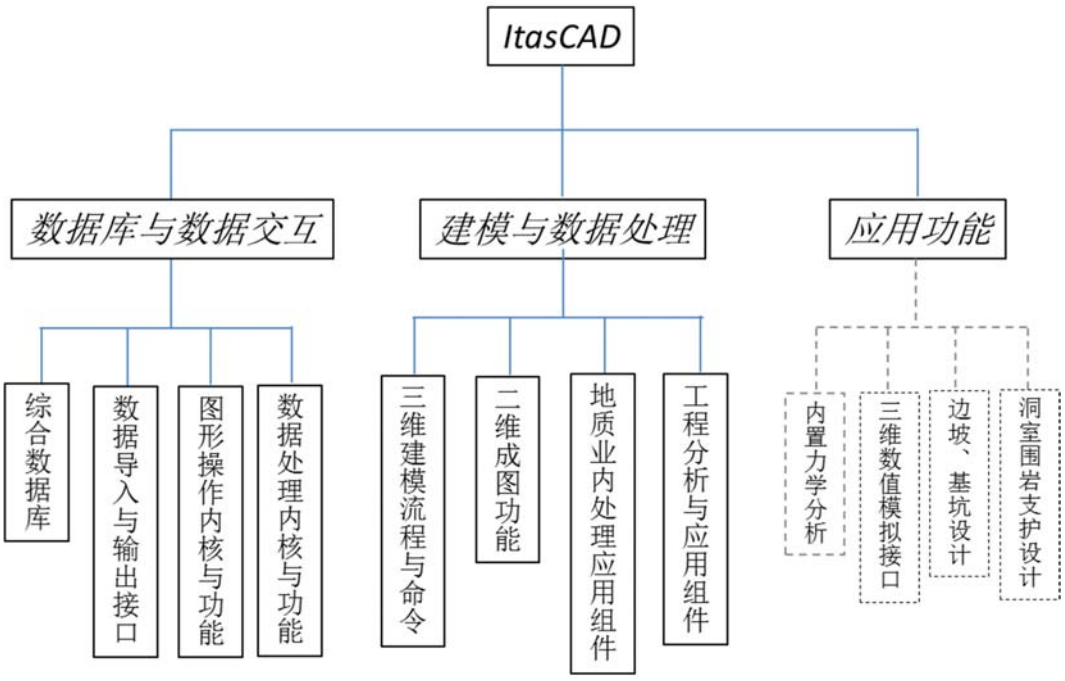


图 1： *ItasCAD* 功能组成

数据库的基本功能是为构建含属性地质三维模型提供基础资料，由于不同行业需求和资料采集方式的差异，数据库具有行业特性。与之相似地，应用功能和成果输出方式与行业需求、技术标准和规范密切相关。因此，这两个部分的具体功能需要体现行业特点，*ItasCAD* v3.0 满足水电、水利、电力三个行业的需求，同时考虑了国土资源

地灾评估的需要。不过，*ItasCAD v3.0* 对数据库和二维图输出采用了可配置的开发方式，即可以根据用户需要配置内容和格式等，因此，当应用到其他行业如工民建时，已有功能应该可以满足绝大部分条件下的需求，少数特定功能可能需要定制和补充。

ItasCAD 的建模和数据处理功能具有通用性，虽然不同行业地质体特点和已知资料存在较大差异，但是，*ItasCAD* 建模和数据处理功能设计时进行了 “一般化” 处理，从建模需要的角度把地质体分成若干类型分别设计建模流程，在流程内可以灵活地引入不同勘察数据、乃至人工推测，兼容不同行业特点和需求，实现其通用性。

虽然 *ItasCAD* 数据库可以独立运行，但本质上是系统的一个有机部分，不仅为建模和分析提供资料，更重要地，数据库实现了对地质体属性的定义，同时还体现了行业标准和规定。因此，脱离数据库的模型可能失去一些地质属性和行业标准的约束，直接影响到应用过程的效率和效果。为此，建议用户务必按照系统设计的流程要求开展工作，保持模型和数据库之间的联系。

图 2 给出了 *ItasCAD* 的应用流程和 v3.0 所具备的主要功能，该软件的应用流程包括三个阶段：

1）建立数据库：相对比较繁琐的工作阶段，但十分关键。正所谓“磨刀不占砍柴工”，完善的数据库自身功能可以大大提高工程地质内业整理的效率，而且是建模和模型应用的基础；

2）创建含属性地质三维模型：创建的模型不仅需要包含地质体空间几何形态特征，还需要包含岩土工程分析和设计需要的基本信息（力学参数值）。前者可以服务二维成图，而且还包含了工程分析设计的地质边界；

3）模型应用：包括三大方面，二维成图、岩土体专题问题分析、岩土工程设计。*ItasCAD v3.0* 包含相关专题问题的经验分析和解析法分析，但不包括数值分析，后者是下一版本的标志性功能。

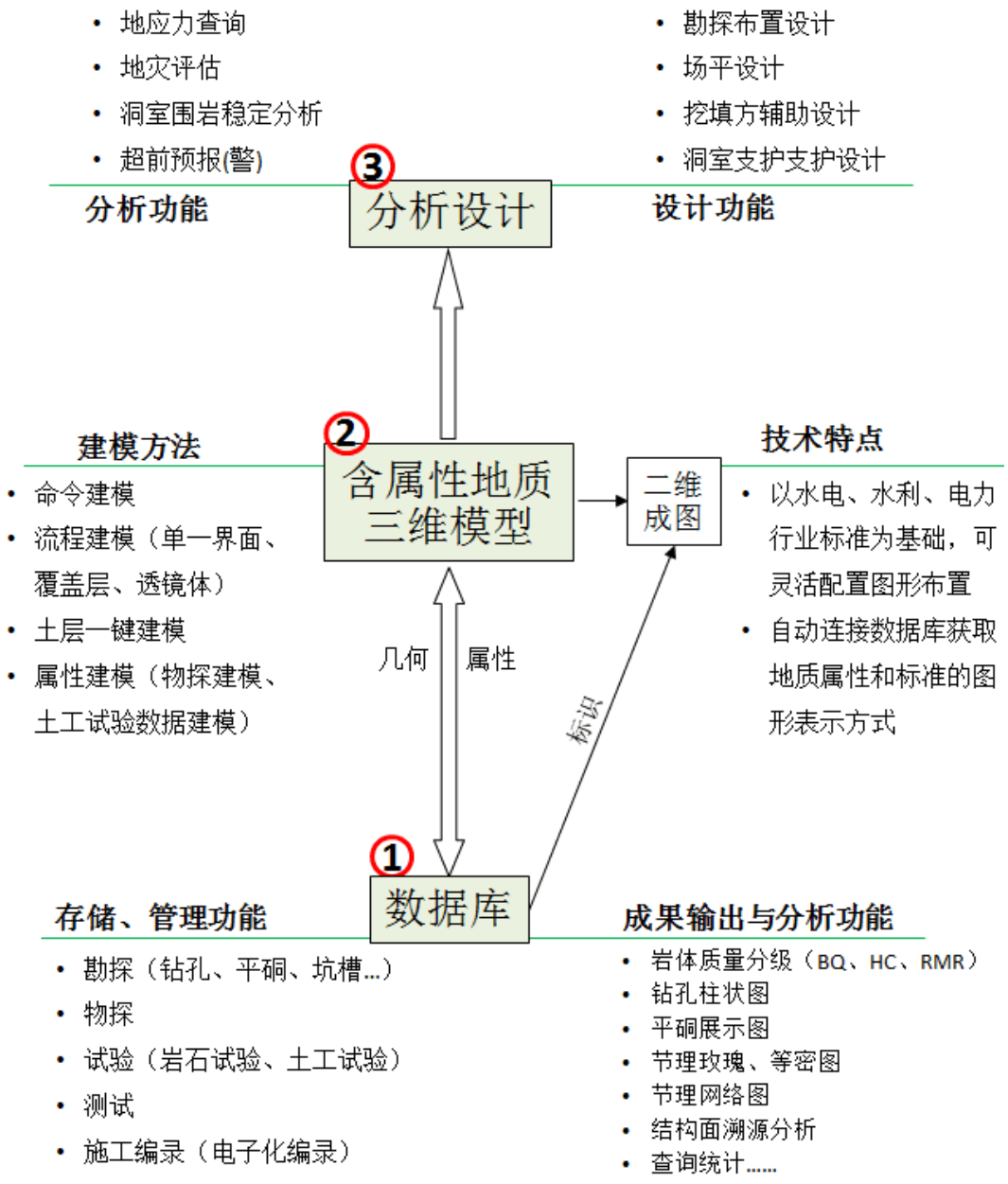


图 2： ItasCAD 应用流程框图与已开发功能

2. 数据库与应用

2.1 主要功能与应用原则

2.1.1. 主要功能

ItasCAD 数据库功能特点划分为三类：第一类为数据库通用功能，第二类是三维属性功能，第三类为专业性功能。

通用性功能包括字段的录入、储存、管理（角色和权限）、通讯（含远程通讯等），这些功能起到的作用包括：

1）资料录入：提供键入、*Excel* 导入、图形接口等几种方式，实际应用时仅记录值很少的字段建议直接键入；记录值较多时，建议使用 *Excel* 录入、编辑，完成以后导入到数据库。对于地质编录中常常遇到的地质界线位置等几何图形方面的数据，系统提供图形翻录和外接电子编录功能，直接将图形资料入库，并记录其空间位置、产状、性状等信息；

2）通讯：*ItasCAD* 提供 *SQL Server* 和 *SQL Lite* 或 *ACCESS* 两个版本的数据库，前者部署在后方服务器，后者安装在单机分散使用，允许二者之间利用 *Internet* 进行数据传递，从而使后方及时获得前方采集的数据资料。

三维空间属性是 *ItasCAD* 数据库的典型特点之一，数据库表单中储存的几乎所有信息都和三维空间位置关联，因此都可以“归位”到三维空间及其对应的地质背景条件。这一特点大大拓宽了数据库专业应用能力，如考虑地质相关性的统计分析，后文介绍的结构面溯源分析、勘探解译等，不仅能针对一般工程高效完成日常性内业整理，而且，对复杂地质条件下研究某些特性空间变化规律非常有效。

ItasCAD 定位设计时实际已经决定了数据库的专业性功能，总体包括利用上述三维空间特性的建模和相关性分析、工程管理、地质分析和力学特性分析等几个部分。这类功能很多，从应用的角度主要包括：

1）术语定义：在数据库中作为关键字段出现的参数与描述，比如地层代号、岩性命名等，同一对象需要用统一的命名（关键字段记录值），否则在查询统计等应用过程出现混乱和错误。使用时建议由技术负责人统一定义，其他人员则只需要引用，避免混淆；

2）勘察方式选择：数据库兼容了不同行业采用的工作手段和方式，一些常规工作可能只使用其中 1—2 种，此时系统允许只选择和配置采用的勘察手段，避免过多无用信息造成的操作不便；

3）查询统计：提高业内整理效率和地质分析深度的重要功能，由一系列数十个具体专业指标组成，具体不详细叙述；

4）结构面统计与溯源分析：结构面统计指传统的走向玫瑰图、等密图等，后者是系统特色功能，可以帮助筛选出关键性结构面露头和分析它们的空间分布特征，对复杂问题研究（如分析结构面控制的变形体边界和空间形态、变形模式等）十分有用；

5）岩体质量分级：典型的专业功能之一，利用数据库资料实现 *BQ*、水电、*RMR* 三种方法的岩体质量分级。

2.1.2. 设计路线与实现途径

理解数据库设计路线是高效应用数据库的基础，数据库采用了“逆向思维”的设计路线，即根据需要实现的目标设计表单和字段。比如，日常内业整理中需要生成钻孔柱状图、节理统计图、相关信息的查询与统计（如实物工程量统计），针对这一现实需要，数据库需要包含生成所有这些成果必备的信息（字段）。此外，数据库还需要满足地质三维建模的需要，因此数据库需要涵盖建模所需要的露头编号、位置、产状等基本信息；当希望提高建模效率和效果时，数据库还需要包含地层厚度、断层断距等信息，在三维建模时作为约束条件自动调用。

把所有这些需求汇总以后，按照现场实际工作方式和数据采集便利程度进行合理规划和编排，即形成了具体到字段的数据库需求与功能设计成果。保持紧凑性是这一过程的基本要求，具体是避免不必要的重复、最大程度保证一个字段多种用途。

图 3 以钻孔地层编录表为例说明上述设计思想，该表单包含层底深度、地层代号、地层时代、岩性名称、地质描述、层面产状（倾向、倾角）、岩层真厚度等几个字段，其中地层代号和地层时代关联（通过“术语定义”功能实现，对于第四纪地层，则关联到岩性名称）。

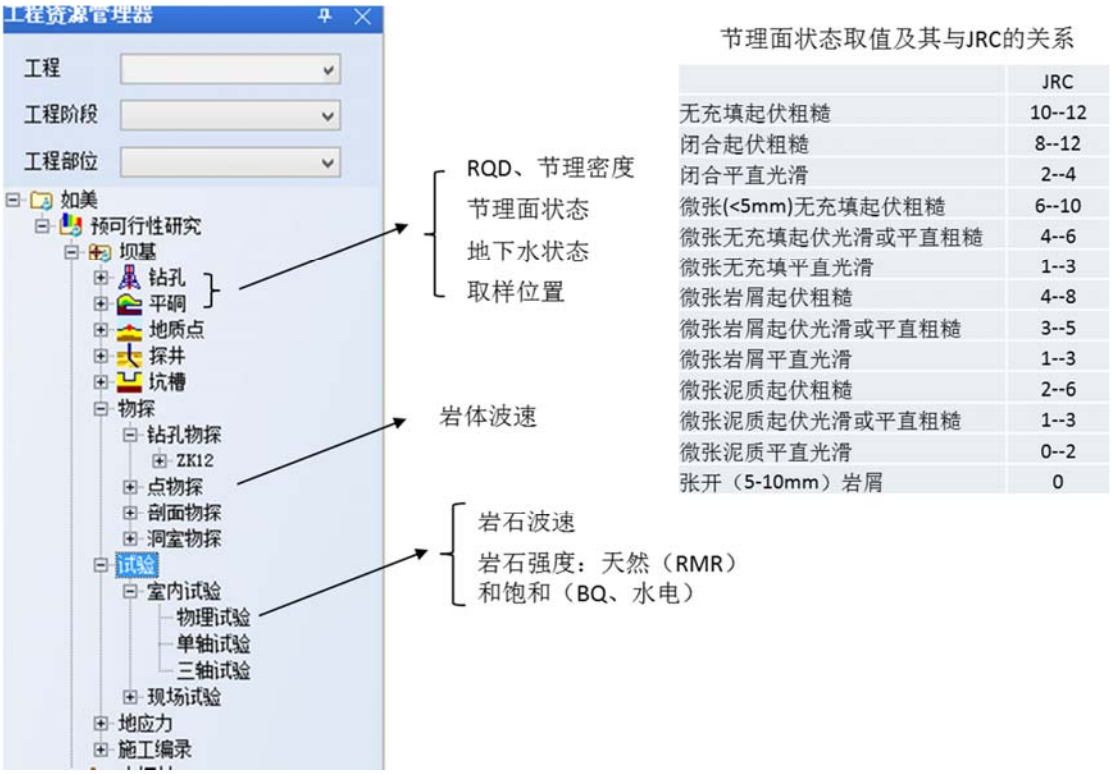
图 3：数据库中钻孔地层编录表字段与用途设计

如图 3 所示，层底深度、地层代号等几个关键字段具有多个方面的用途，如服务三维建模、生成钻孔柱状图、查询统计、二维出图自动添加代号和选择线型等。

为满足岩土工程分析设计的需要，利用数据库储存的信息还可以实现岩、土体力学参数取值，前者相对复杂，一般条件下通过岩体质量分级和相应的参数取值方法实现，比如 *RMR* 分级和 *Hoek—Brown* 方法取值。这类设计目标体现了对数据库基础资料的综合应用，所有相关指标按照实际专业分工和工作方式化整为零地隐藏在数据库中，设计过程中通过严密的关联关系保持彼此之间的联系，从而“不经意”地实现综合应用功能。

图 4 表示了通过数据库实现 *BQ*、水电、*RMR* 三种岩体质量分级的途径，综合地，这三种方法包含 *RQD*、节理密度、节理面状态、地下水条件、岩石波速、岩体波速、岩石强度等若干独立的指标，当这些指标作为独立字段出现在数据库时，即具备同时开展三种分级的条件。*图 4* 表示了这些指标在数据库中的位置，岩石波速和强度指标来源于室内试验、岩体波速（*BQ* 和水电分类中计算完整性系数 *Kv*）来源于物探、其他来源于地质编录，这些字段因此被隐藏在不同勘探类型对应的表单中。

在实现技术可行性以后，设计工作还需要关注应用友好性。以节理面状态为例，虽然水电和 *RMR* 分类中都采用了该指标，但划分的等级和取值标准不同，当要求用户根据不同方法重复录入时，会增加重复工作而影响友好性。为此，设计时采用了一些处理措施，其中节理面状态以相对更完善的水电分类为标准，建立和 *RMR* 的关系。这一处理方式有效避免了重复，但为保证成果可靠性，大大增加了科研和测试工作量。具体到岩体质量分级和参数取值，研发工作建立在与国家能源局水电工程技术研发中心为期 3 年的科研工作基础上，其工作量可见一斑。



节理面状态取值及其与JRC的关系

	JRC
无充填起伏粗糙	10--12
闭合起伏粗糙	8--12
闭合平直光滑	2--4
微张(<5mm)无充填起伏粗糙	6--10
微张无充填起伏光滑或平直粗糙	4--6
微张无充填平直光滑	1--3
微张岩屑起伏粗糙	4--8
微张岩屑起伏光滑或平直粗糙	3--5
微张岩屑平直光滑	1--3
微张泥质起伏粗糙	2--6
微张泥质起伏光滑或平直粗糙	1--3
微张泥质平直光滑	0--2
张开（5-10mm）岩屑	0

图 4：数据库岩体质量分级功能实现途径（未显示土工试验表单）

如图 4 右上所示，数据库设计是试图建立节理面状态和 *JRC* 取值的关系，从而引入节理力学参数的 *Barton—Bandis* 取值方法（西方国家应用）。此外，节理面状态字段值包含了节理面张开程度，可用于卸荷等方面的统计分析，通过一个字段多种用途的方式保持数据库的紧凑和用户友好性，显然，深入理解相关功能的设计思路和实现途径，有助于在应用过程充分发挥数据库的能力。

2.1.3. 应用原则与流程

将相关资料完整地录入到数据库是使用 *ItasCAD* 的基础，缺少其中一些关键信息时，会直接影响应用效率和效果。因此，当计划对一个工程系统使用 *ItasCAD* 时，基本要求是尽可能完善数据库。

针对给定工程使用数据库时需要首先完成术语定义，比如该工程揭露的地层、岩性、断层及其编号等，这些都是关键字段。只有定义以后在表单中以选择的方式录入相应记录值时，表单中才可能出现可供选择的信息。

另一个基本原则是从应用数据库角度理解其工作原理和关键环节，岩体质量分级是很好的案例。RMR 分级所需要的 RQD、岩石强度、节理密度、节理面状态、地下水条件等 5 个基本指标分列在不同表单中，岩体质量分级针对空间一个单元（位置），

这要求现实中的空间关联关系在数据库得到正确体现。以岩石单轴抗压强度为例，该指标值记录在室内试验表单中，试验结果对应的空间位置通过试件的取样编号与取样位置关联，如果不填入取样位置数据、或者填入以后缺少试件编号或取样编号，都会使得试验结果失去与对应空间位置的关联。

岩石试件取样位置也是关键字段，据此可以了解对应的地层、岩性、风化程度等地质背景，当然，如果缺失任何其中一个记录（如风化分带），则丢失和该地质条件的关联，影响到后续应用（如查询统计和关联分析）。

由此可见，理解这些内在关系和尽可能录入所有数据，是使用数据库的基本原则和要求。保证关键字段记录的完善性，是充分利用数据库功能的基础。不过，即便如此，*ItasCAD* 同一应用多种实现途径的设计方式，客观上为数据库资料缺少关联时提供了补救措施，但增加了应用难度。

图 5 概要地表示了数据库应用流程，其中的服务器配置和角色与权限设置针对初次使用，对象为管理员，与一般用户无关。图中用灰色字体表示的勘察类型选择只影响操作便捷性，不影响应用效果。

一般用户使用数据库的第 1 步工作时创建和定义工程属性，明确以后操作对应的工程名称、阶段、和部位，数据库考虑了建筑物布置设计等方面变化对属性的影响，这里不详细叙述。

随后需要进行术语定义，或者称为定义工程字典值。如前所述，这是非常关键的一步，否则无法完成相关记录，即便可以完成其他字段记录，但整个数据库内的信息将失去最重要的关联关系，资料入库的价值得不到体现。

数据录入是应用数据库最常用的操作，如前所述，系统提供键入、*Excel* 导入、图形接口等几种工作方式。这一过程需要特别注意关键字段记录完整性，不影响数据库地质分析和成果输出的可行性和效果。用户可以采用逆向思维的方式理解，即需要开展某项应用时依赖哪些信息、这些信息是否完整入库。

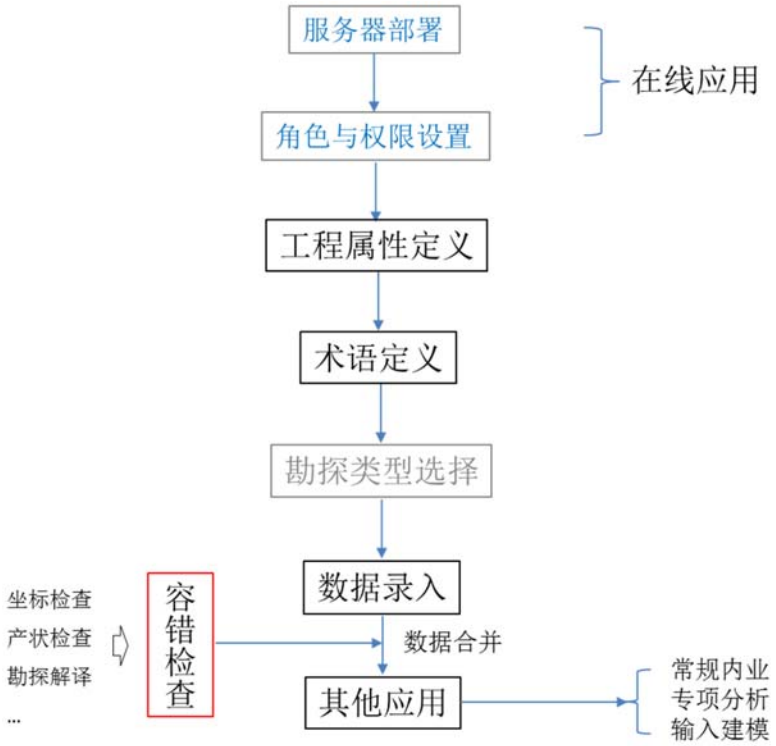


图 5：数据库应用流程图

数据合并和检验也是一项基本工作，包括三个方面的实际意义：一是分散作业的各小组数据的汇总，二是对汇总后数据可靠性的检查和修正，三是校核后的数据上传到服务器，提供给技术负责人审查。原则上，只有通过校审流程以后的数据才能用于建模和分析，因此要求应用前的数据必须来自服务器。

数据合并、检验、上传操作的现实目的是最大程度保证基础数据的完整性和正确性，实际工作中可以在现场将合并的数据进行初步的应用分析，通过应用结果合理性可以更快捷地发现和帮助修正问题。事实上，后面介绍的勘探解译就是甄别分析原始数据、提高入库数据质量的应用案例。

2.2 数据导入与应用

本节简要介绍 *Excel* 导入、电子化编录、*ItasCAD* 图形导入三种方式，分别针对现实中的不同情形。总体而言，广泛使用的 *Excel* 方便于将各种手段采集的常规数据类型导入数据库，甚至把用户自己的数据库导入 *ItasCAD* 数据库；电子化编录特别针对现场地质露头线的素描，针对图形格式难以入库的问题；*ItasCAD* 图形导入体现和图形与数据库的逆向通讯，主要针对两种用途：针对新工程在图形系统完成的勘探布置设计结果可以一次性地导入到数据库，另一方面，用 *ItasCAD* 导入其他软件建立的模型以后，

将模型中包含的勘探成果信息导入数据库，提供其他平台创建的地质模型与 *ItasCAD* 数据库的接口。

2.2.1. *EXCEL* 导入

Excel 导入功能的设计目的是为数据库提供一个通用性的外部接口，已有的数据文件可以通过该接口导入到数据库。此外，现场工作如钻孔编录时建议仍然采用 *Excel* 表单，在完成必要的编辑工作以后再导入到数据库统一管理。现实中数据库中电子表单的功能不可能与 *Excel* 相媲美，且 *Excel* 的应用广泛性很好。

目前的 *Excel* 导入功能主要针对钻孔和平硐内的表单设计，每个钻孔或平硐对应一个 *Excel* 文件，每个文件所含表单与数据库保持一致。

ItasCAD 安装包内带有钻孔和平硐 *Excel* 范本文件，使用导入功能时，建议使用该范本。用户也可以自己制作范本文件，建议的方法是先从数据库导出一个空白 *Excel* 文件（仅针对单一表单），然后合并成包含所有表单的单独文件。

注意 *Excel* 文件中表单、字段名称名称需要和数据库中保持一致。

导入过程非常简单，先选定需要导入数据的钻孔或平硐，点击右键菜单中的【数据录入】（参见图 6 左），在弹出界面的左上部位找到【导入数据】图标（图 6 右），点击以后即可导入所需要的 *Excel* 文件。

实际工作中导入 *Excel* 文件往往包括 4 个步骤：数据清理、复制到模板文件、导入、结果检查。其中数据清理针对可能存在的数据格式不规范（如一个单元储存多个信息）问题，清理后的数据复制到 *ItasCAD* 提供的 *Excel* 模板文件，导入完成以后系统提供检查信息，如是否缺少数据、或者与本工程定义的术语存在冲突等，属容错功能。

案例：某工程已经完成 100 余钻孔的钻进和现场编录，绝大部分编录成果通过 Excel 保存，需要将这些文件中的数据导入数据库，建立彼此之间的关联关系。基本过程如下：

1) 清理数据： 如图 7 所示，先对该工程提供的钻孔记录数据进行清理，图 7 上为原始数据，下图为清理后的结果，清理后各字段数据格式满足要求；
2) 数据导入 Excel 范本。清理数据后，得到的数据文件数据类型可被数据库识别，下一步，将数据按照 Excel 范本所示的格式整理（此时，应注意数据单位与数据库一致），作为导入数据库前的最后准备工作，图 8 以钻孔岩芯编录数

据为例，展示了导入前（上图）和导入后（下图）的结果，此时所有数据记录的位置（字段名、表单名）与数据库要求吻合；

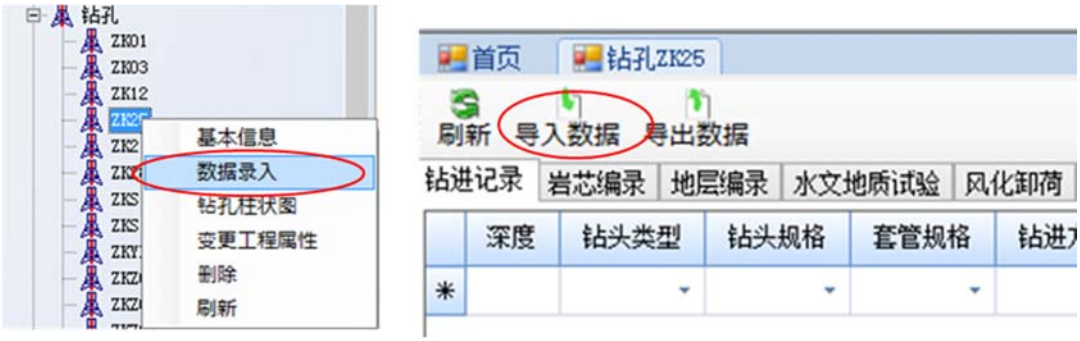
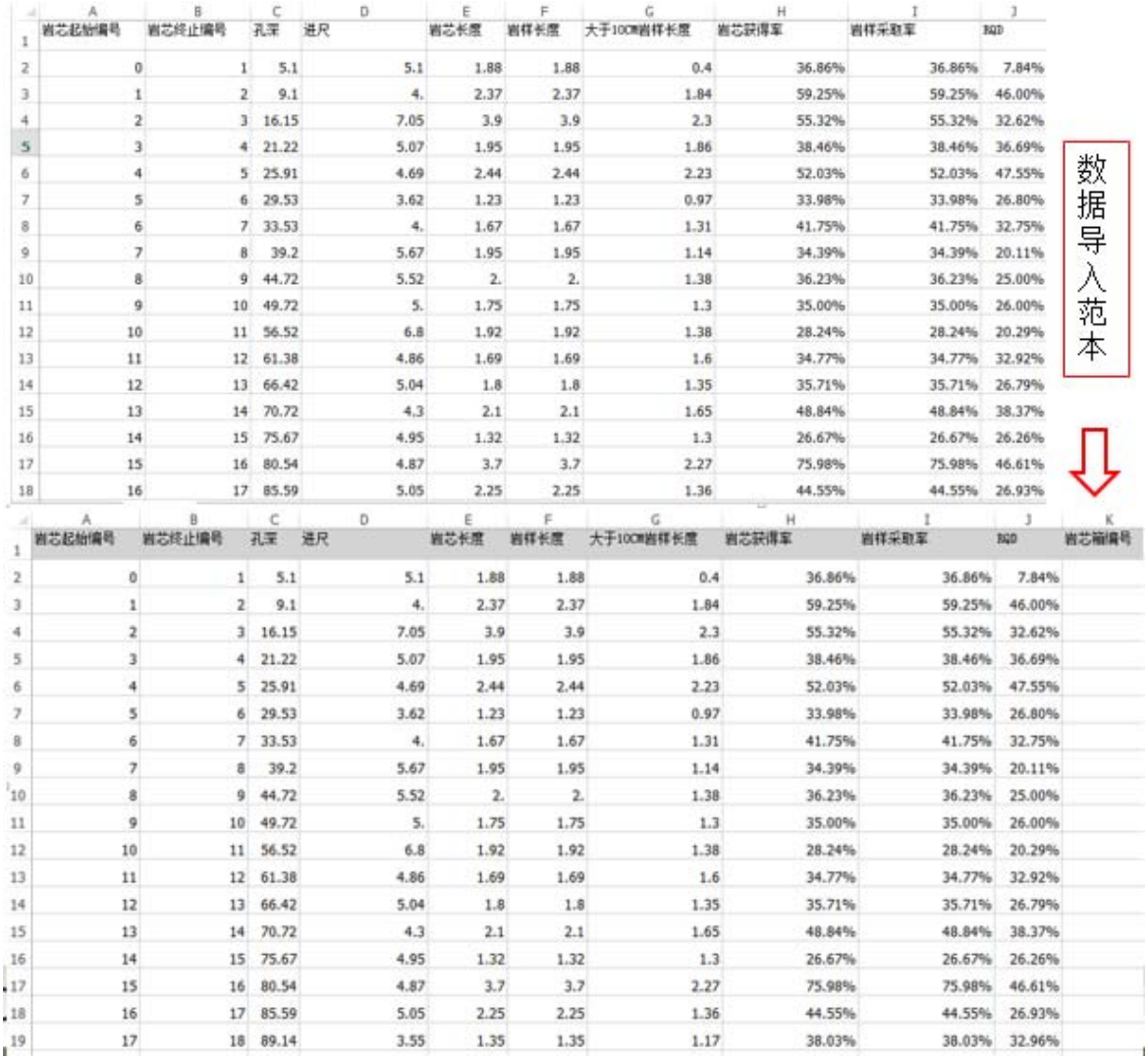


图 6：通过 Excel 导入批量数据的相关操作命名

图 7：钻孔数据清理过程（以岩芯编录为例）



岩芯起始编号	岩芯终止编号	孔深	进尺	岩芯长度	岩样长度	大于100mm岩样长度	岩芯获得率	岩样采取率	RQD
0	1	5.1	5.1	1.88	1.88	0.4	36.86%	36.86%	7.84%
1	2	9.1	4.	2.37	2.37	1.84	59.25%	59.25%	46.00%
2	3	16.15	7.05	3.9	3.9	2.3	55.32%	55.32%	32.62%
3	4	21.22	5.07	1.95	1.95	1.86	38.46%	38.46%	36.69%
4	5	25.91	4.69	2.44	2.44	2.23	52.03%	52.03%	47.55%
5	6	29.53	3.62	1.23	1.23	0.97	33.98%	33.98%	26.80%
6	7	33.53	4.	1.67	1.67	1.31	41.75%	41.75%	32.75%
7	8	39.2	5.67	1.95	1.95	1.14	34.39%	34.39%	20.11%
8	9	44.72	5.52	2.	2.	1.38	36.23%	36.23%	25.00%
9	10	49.72	5.	1.75	1.75	1.3	35.00%	35.00%	26.00%
10	11	56.52	6.8	1.92	1.92	1.38	28.24%	28.24%	20.29%
11	12	61.38	4.86	1.69	1.69	1.6	34.77%	34.77%	32.92%
12	13	66.42	5.04	1.8	1.8	1.35	35.71%	35.71%	26.79%
13	14	70.72	4.3	2.1	2.1	1.65	48.84%	48.84%	38.37%
14	15	75.67	4.95	1.32	1.32	1.3	26.67%	26.67%	26.26%
15	16	80.54	4.87	3.7	3.7	2.27	75.98%	75.98%	46.61%
16	17	85.59	5.05	2.25	2.25	1.36	44.55%	44.55%	26.93%

岩芯起始编号	岩芯终止编号	孔深	进尺	岩芯长度	岩样长度	大于100mm岩样长度	岩芯获得率	岩样采取率	RQD	岩芯箱编号
0	1	5.1	5.1	1.88	1.88	0.4	36.86%	36.86%	7.84%	
1	2	9.1	4.	2.37	2.37	1.84	59.25%	59.25%	46.00%	
2	3	16.15	7.05	3.9	3.9	2.3	55.32%	55.32%	32.62%	
3	4	21.22	5.07	1.95	1.95	1.86	38.46%	38.46%	36.69%	
4	5	25.91	4.69	2.44	2.44	2.23	52.03%	52.03%	47.55%	
5	6	29.53	3.62	1.23	1.23	0.97	33.98%	33.98%	26.80%	
6	7	33.53	4.	1.67	1.67	1.31	41.75%	41.75%	32.75%	
7	8	39.2	5.67	1.95	1.95	1.14	34.39%	34.39%	20.11%	
8	9	44.72	5.52	2.	2.	1.38	36.23%	36.23%	25.00%	
9	10	49.72	5.	1.75	1.75	1.3	35.00%	35.00%	26.00%	
10	11	56.52	6.8	1.92	1.92	1.38	28.24%	28.24%	20.29%	
11	12	61.38	4.86	1.69	1.69	1.6	34.77%	34.77%	32.92%	
12	13	66.42	5.04	1.8	1.8	1.35	35.71%	35.71%	26.79%	
13	14	70.72	4.3	2.1	2.1	1.65	48.84%	48.84%	38.37%	
14	15	75.67	4.95	1.32	1.32	1.3	26.67%	26.67%	26.26%	
15	16	80.54	4.87	3.7	3.7	2.27	75.98%	75.98%	46.61%	
16	17	85.59	5.05	2.25	2.25	1.36	44.55%	44.55%	26.93%	
17	18	89.14	3.55	1.35	1.35	1.17	38.03%	38.03%	32.96%	

图 8：钻孔数据导入 Excel 范本（以岩芯编录为例）

3) 数据导入：包括单个表单和多个表单批量导入，其中的单个表单导入简单明了，在数据库中打开某个表单以后，点击导入图标即可引导完成。相对而言，以单一钻孔或平硐为对象的所有表单批量导入更常用一些，可以一次导入指定钻孔的全部信息，图 9 展示了 ItasCAD 数据库导入一个钻孔全部数据的操作方式。

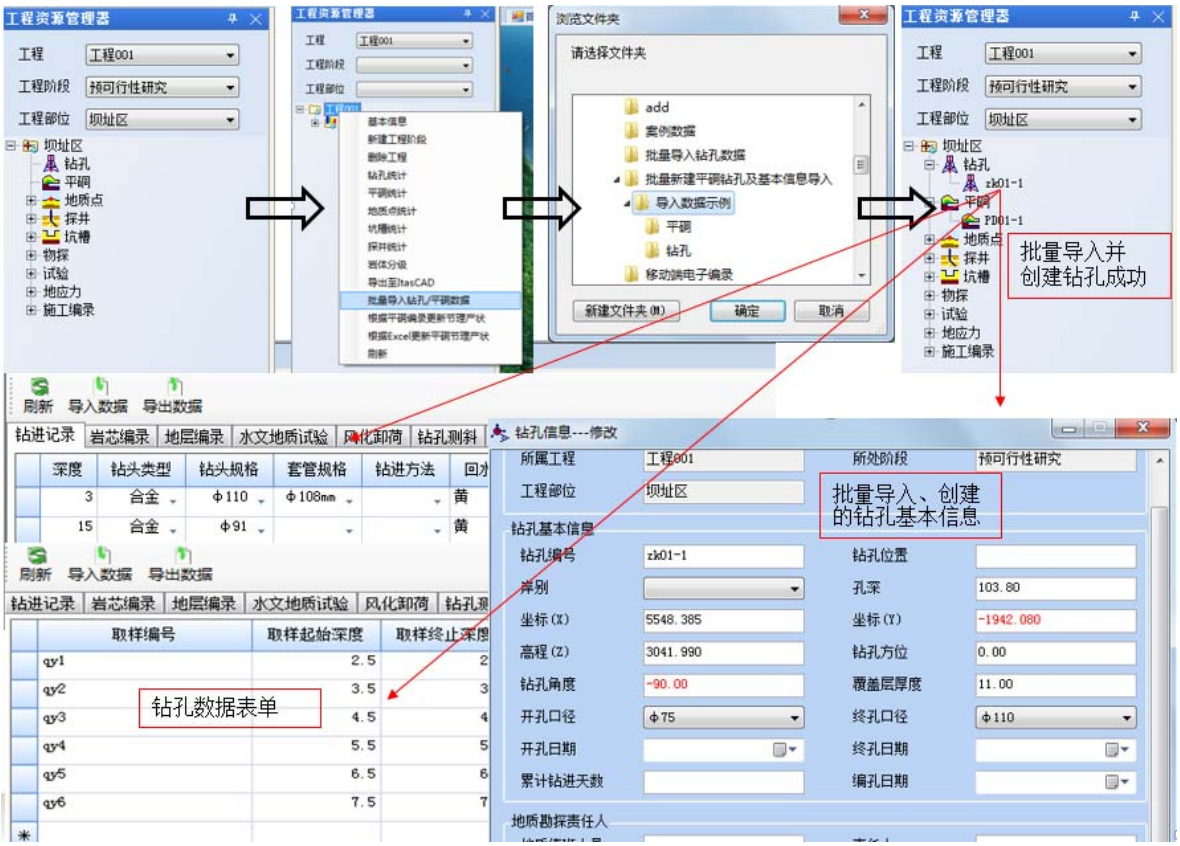


图 9：钻孔信息批量导入示例

4) 检查提示信息：导入完成后，数据库系统会在 Excel 文件后添加提示信息，方便用户查看导入结果，引导发现入库数据潜在问题。

与之相似地，用户可以导入地质点、平硐的相关信息，也可以导入物探成果，这里不重复介绍。

2.2.2. 电子化编录

工程地质的重要工作内容之一是在开挖面上编录地质露头线（地层线、断裂线、节理露头线等），如平硐编录、施工洞室编录，通过钻孔成像也可以获得孔壁上的地质露头线。显然地，这些基础资料包含了很多重要信息（如结构面分布变化规律），但现实中难以挖掘出这些信息应有的价值，这是因为编录获得的几何图形形式的信息相对较“死”，除生成相关图件以外，难以发挥出其他作用。

如果露头线信息能够录入到数据库，数据库具备的关联性可以有效地发挥这些信息的作用，但常规方式难以实现这类几何性数据的入库管理。*ItasCAD* 数据库和图形一体化的特点有效地解决了这一传统难题，数据库兼容的图形功能可以用几何图形的形

式直接描述露头线空间位置，而电子化编录、相当于在电子化的坐标网格纸上进行编录，把图形和相关描述性信息直接入库。

ItasCAD v3.0 电子化编录包括两种工作方式：

1）移动版：针对现场编录，取代传统的纸质编录，编录结果直接记入数据库，无需转换。移动版针对 *Windows Form* 操作系统下的平板电脑；

2）*PC* 版：相当于矢量化或翻录，把纸质扫描版的既往资料翻录到数据库。

移动版的应用过程相对简单明了，编录工作本身只需要在平板上打开数据库，通过导航树找到待编录区域，按照相关功能勾画露头线、填入相应的信息即可，内容与 *PC* 版完全相同，操作方式略有差异，体现了移动设备（平板电脑）的特点。

移动版不具备在数据库内添加新的编录对象（平硐、施工洞室、施工边坡或基坑等），要求事先在 *PC* 版创建好待编录对象，移动版只针对现场信息采集工作。移动版和 *PC* 版共享一个相同的数据库，无需进行数据转换或导入。

PC 版矢量化和翻录针对图片文件（如.*JPG*、*PDF* 格式）设计，当待翻录对象为其他格式如.*dwg* 时，需要实现转换成图片格式。

下面分别以案例介绍移动版和 PC 版电子编录功能应用，实现几何图形（露头线）类型数据的入库。

移动端电子编录案例：图 10 展示了移动端电子化编录工作流程，左上为移动端界面截图，用户直接在电子网格纸上勾画露头线，并键入各露头线的相关信息（如节理性状等），所有这些都自动保存在后台数据库，且自动归位到三维空间，完成几何图形格式地质数据的入库，供后续地质分析使用。

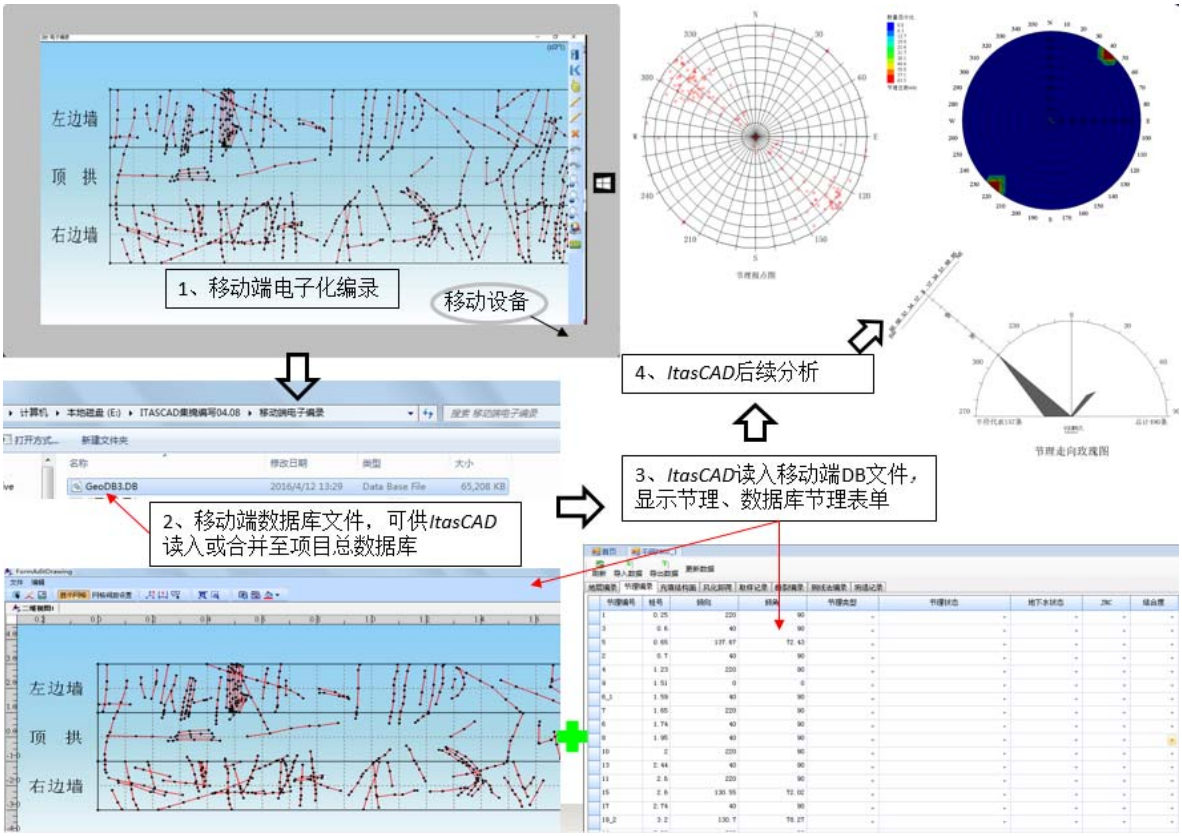


图 10：移动端电子化编录数据导入案例

PC 版电子编录案例：针对水电行业已经完成平硐编录的情形设计，其目的是把平硐展示图中的 “死” 信息、通过入库以后盘 “活” 。以常见的节理为例，入库以后每条节理的空间位置、与其他地质对象的三维空间关系得到体现，大大提高其工程应用价值。

目前，水电系统勘探平硐现场编录成果主要整理成平硐展示图 *CAD* 文件（如 *DXF* 格式），编录时先将这些文件转换成.JPG 格式，然后导入 ItasCAD 数据库电子化编录窗口，再依照所导入的图形进行描绘（翻录）。并将地层线、充填结构面露头线、节理露头线按照实际情形依次辅以编号，翻录以后即把每条露头线的编号和位置信息储存在数据库。

完成上述翻录工作以后，对应于每条地质露头线的地质信息（如地层对应的岩性、产状等），如现场获得相关记录时，则可以通过 Excel 导入，从而获得完整信息。

图 11 表示了 PC 版电子化编录（翻录）功能应用过程，上图为转换成.JPG 格式的平硐展示图，当平硐较长上，可截断成若干段、然后分段导入到电子化编录窗口，然后进行素描翻录。

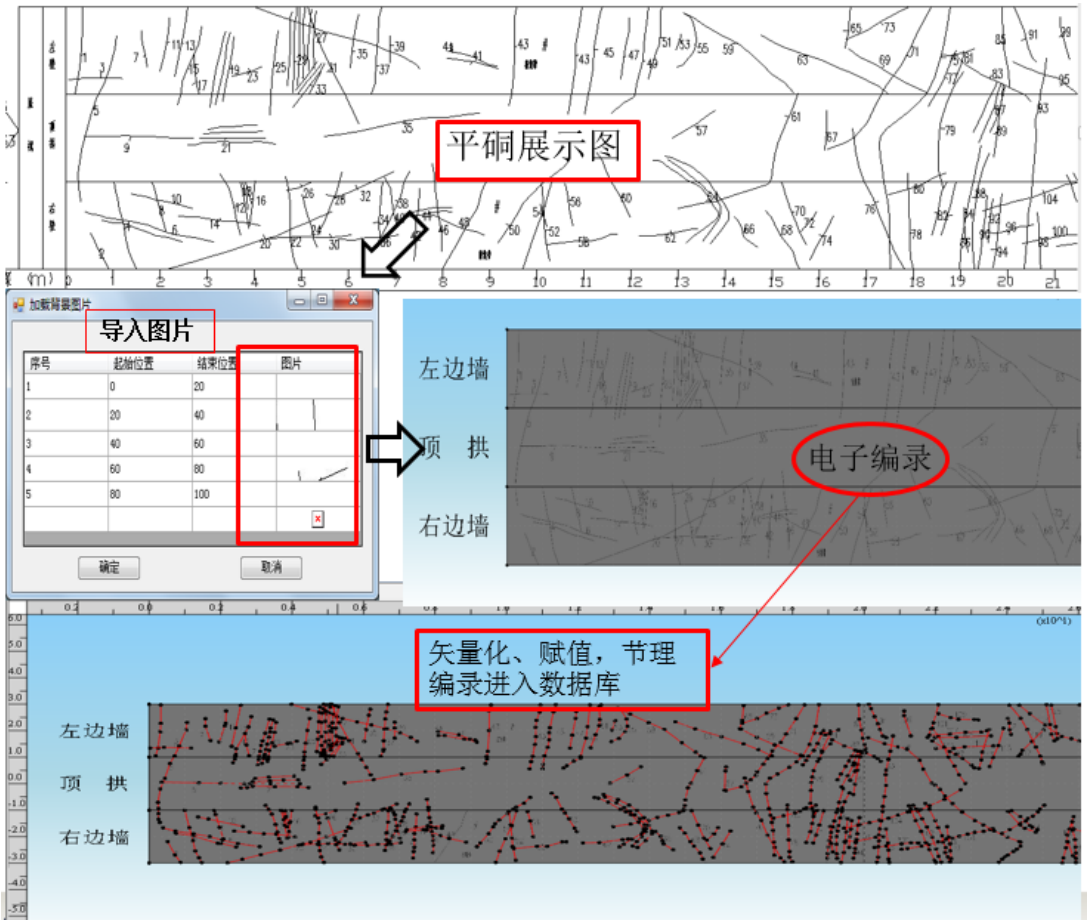


图 11：平硐电子编录应用过程（PC 版）

2.2.3. *ItasCAD* 图形返回

如前所述，数据库中的一些勘探信息可以从地质三维模型中返回，设计这一功能主要是针对如下几个方面的现实需要：

1) 在图形系统中采用【勘探布置】功能完成钻孔布置以后，一次性将所有钻孔基本信息（名称、类型、孔口坐标、深度…）导入数据库，提高工作效率；
2) 采用 ItasCAD 导入其他系统构建的模型（如 *GoCAD* 模型），当这些模型中包括钻孔、平硐已经揭示的地层等地质界面位置信息时，将所有信息一次性导入数据库；
3) 其他：如在地质三维模型中创建一个虚拟钻孔、并获得钻孔揭露的地质界面的方式作为地质推测判断结果，然后返回到数据库保存备用。

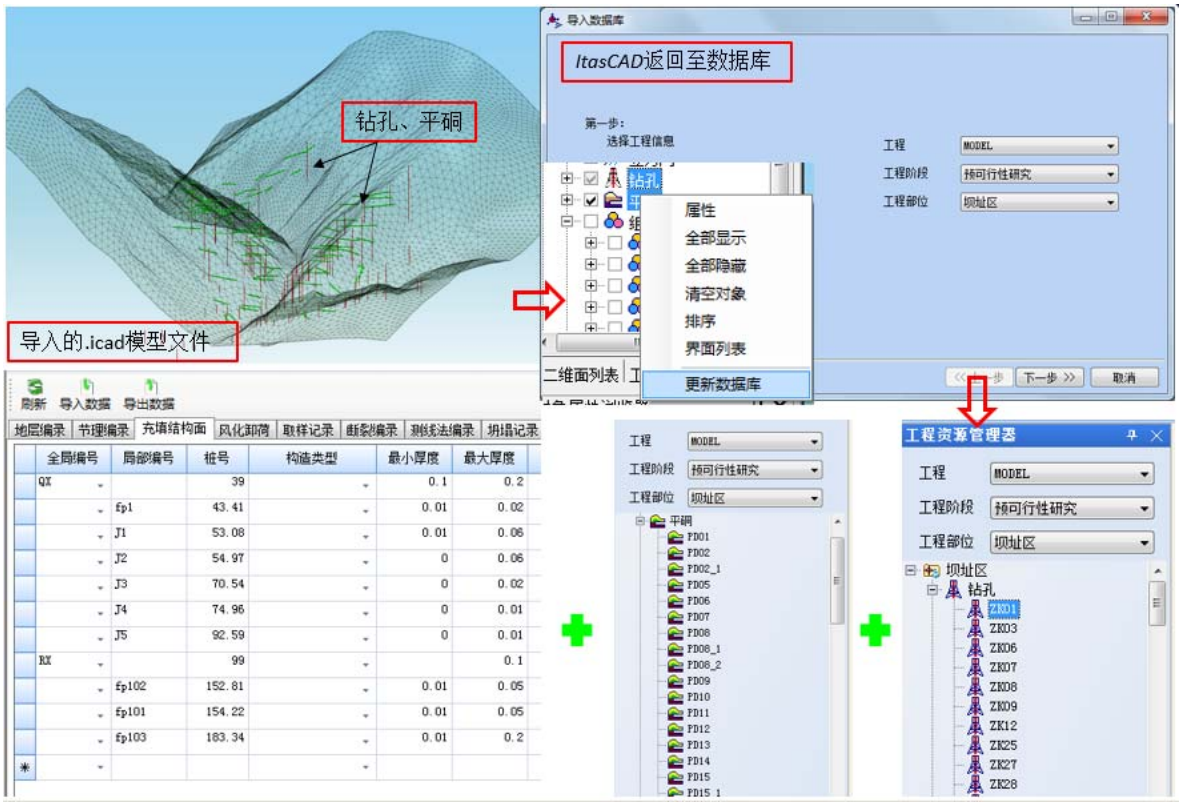


图 12：从模型文件到数据库（*ItasCAD* 返回）操作案例

图 12 案例分别展示了从 *ItasCAD* 图形将勘探资料返回数据库的应用过程，左上是采用 *GoCAD* 创建的地质三维模型，包含大量钻孔和平硐，且每个钻孔和平硐内包含编录结果。在导入该模型到 *ItasCAD* 以后，通过如右上所示的操作，可以将指定的钻孔和平硐导入到指定工程、阶段、和部位，实现数据入库。

2.3 空间溯源分析与应用案例

2.3.1. 开发意图

地质工程实践中经常会关心某个地质要素或指标值的空间分布特征，如资源分布的地质关联、勘探揭露的结构面露头之间空间关系等，*ItasCAD* 规划和功能设计时考虑了现实工作中存在的这种普遍性需求，并通过将所有信息“归位”到三维空间、通过空间位置建立彼此之间的关联关系。

空间溯源分析，简单地讲，是利用数据库的空间关联关系、追溯到某个指标值的空间位置和开展相关的分析工作，最常见的应用是分析某个指标值空间变化性及其与某些地质条件的关系，具有普遍性意义的功能，可广泛应于多个行业的大量具体问题。

注意针对不同问题采取的分析途径有所差异，需要用户根据分析目的和对象的内在地质特性灵活应用，对于一些特定要求，*ItasCAD* 研发团队可以协助完善功能、甚至形成创新性的工作方法，以提高工作效率。

2.3.2. 应用案例

这里介绍不同部位揭露的结构面露头之间吻合程度甄别的应用，本案例为边坡工程，帮助甄别零散分布结构面露头之间的关系，即从大量零散结构面露头甄别出彼此相同者。

背景：某大型边坡工程勘察获得了具有一定厚度的充填结构面地表露头线（含产状）和边坡内不同高程勘探平硐揭露的大量结构面露头，但彼此之间空间关系形态复杂，给甄别这些露头之间的关系、寻找到长大结构面及其空间分布造成困难，影响了勘察资料的应用效率。

工作原理与流程：甄别这些结构面露头的原理非常简单明了，即彼此在几何特征（空间位置和产状）和地质特性（结构面类型、地质性质、性状等）相同或充分接近者，可以认为属于同一结构面露头。

简单地说，结构面露头甄别是依照露头的几何和地质属性不断筛选，在剔除大量不相吻合的露头以后，从少数露头中甄别出彼此一致者。按照这一原理的实施流程如图 13 所示，就这类问题而言，包括了三个层次的筛选：

1）按地质成因：利用数据库记录的结构面类型和产状信息进行筛选，其中的类型指断层、夹层等（由工程负责人在术语定义中规定），产状信息用于分组。这个层次的筛选将剔除成因类型、和不同组的结构面露头，一般地，数据库记录的大部分会被剔除；

2）将所筛选出来相同类型的同一组结构面输出到 *ItasCAD* 图形中，利用图形三维特性对比彼此之间位置合理性；对空间位置相对合理的露头，进一步与地表露头线对比（建议参考已构建的地表模型）；

3）利用其他特性的进一步筛选：对满足上述所有条件的露头，进一步对比彼此之间的地质属性（具体与露头类型相关，如断层露头则对比断层错动性质，夹层时可以对比充填类型、厚度等），并依据具体情况最终决定。

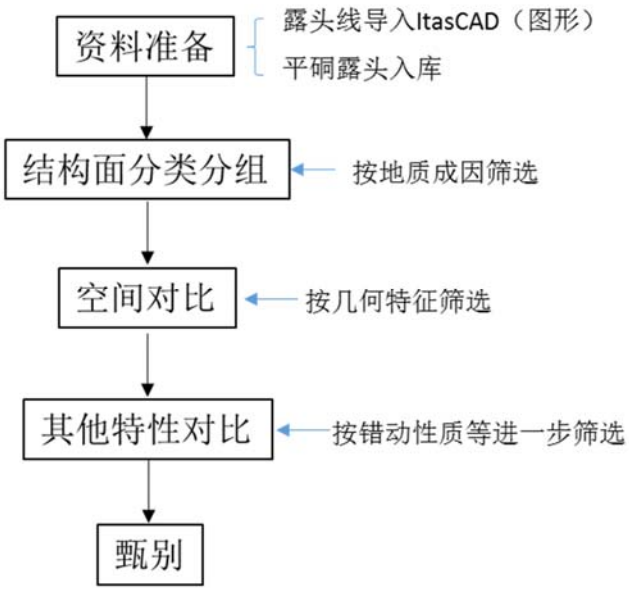


图 13：*ItasCAD* 溯源分析功能用于甄别结构面露头的应用流程

应用过程：按照上述流程的应用过程包括分类筛选、产状分组筛选、位置筛选、特性对比、编号修改等几个步骤。

图 14：利用数据库查询功能的分类筛选

图 14 表示了第 1 步（分类筛选）操作对话框，图中勾选部分为筛选条件，即针对左右岸所有地层、所有岩性的弱卸荷和未卸荷平硐洞段，按照选定的查询条件，点击查询按钮后对话框中将列出满足条件的平硐编号。

全部选定这些平硐，在出图选项中勾选断层。

以上操作的含意是：针对平硐揭露、位于弱卸荷带及其以内岩体中的断层露头进行甄别，剔除了其他结构面类型如夹层和错动带，认为彼此之间不可能相。

在点击*图 14* 右下角的出图按钮以后，程序将提取出所选定范围内的全部断层露头进行分组统计，这一过程即为按产状分组筛选，*图 15* 表示了所选定范围内断层露头（产状）等密图，并勾选中其中的优势组，如图中白框范围内的“1”所示，表示第 1 组。

以上两步操作实现了按类型和优势产状的筛选，从弱卸荷和未卸荷岩体内平硐揭露的 121 条断层中筛选出 34 条产状相近者，即剔除了其中 87 个露头。

在*图 15* 点击【导出到 *ItasCAD*】按钮以后，该优势组内的 34 条断层露头将输出到三维图形视窗，再利用彼此之间空间位置关系进一步筛选。

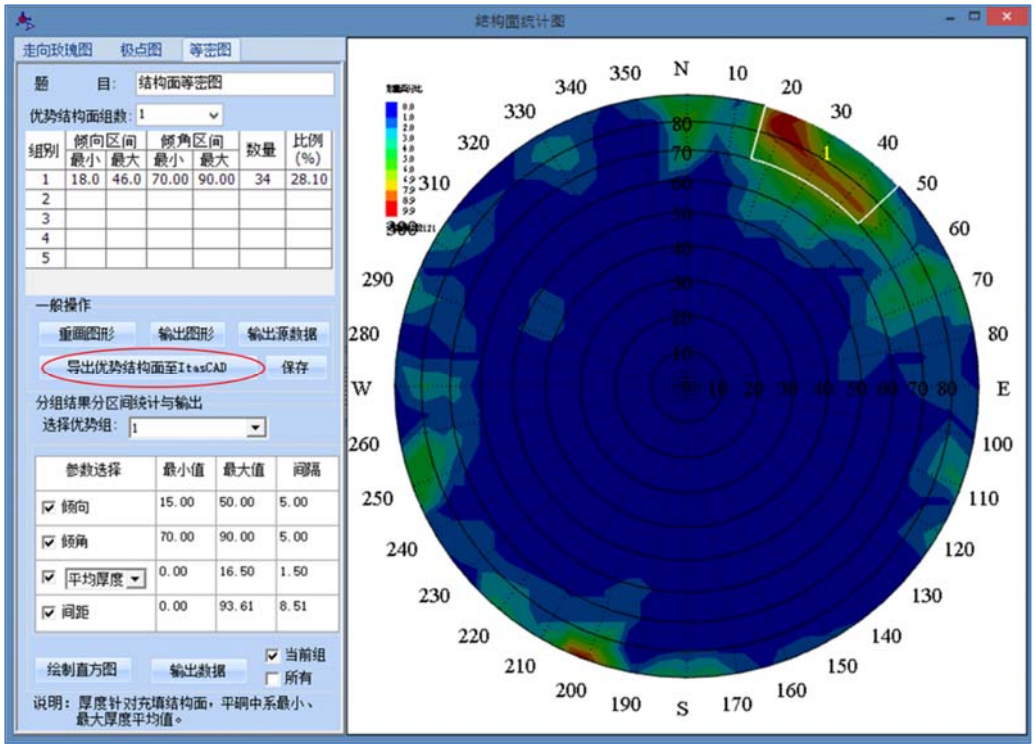


图 15：所选定断层露头按照产状分组筛选

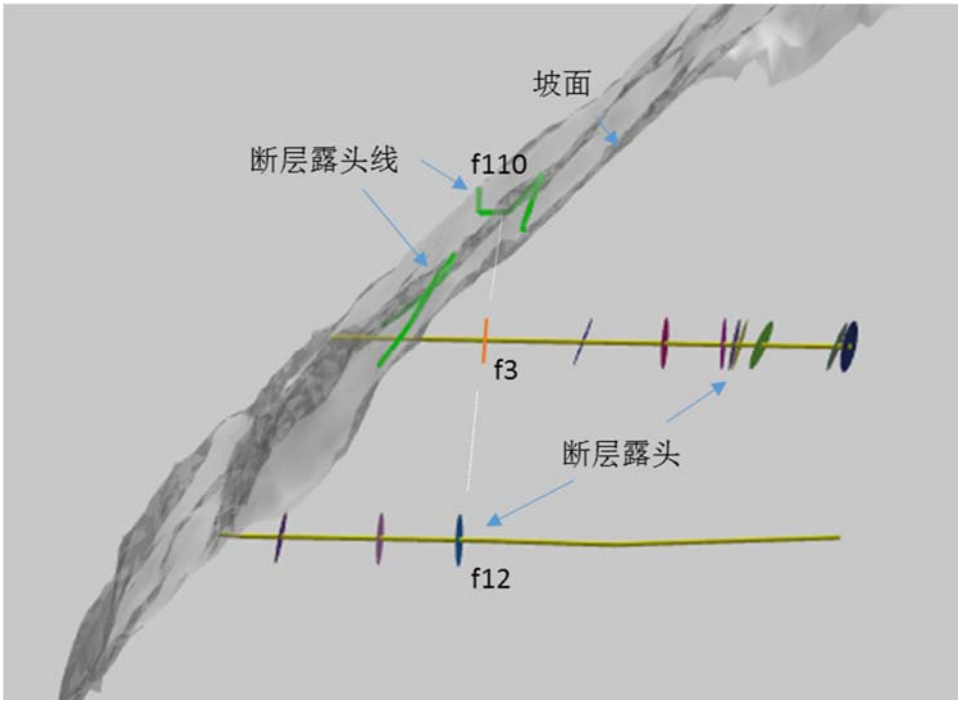


图 16：研究区域内第 1 组断层露头空间分布（位置筛选）

图16 是研究区域内第 1 组断层露头的空间分布，其数量为 12 条，即根据这些露头空间分布范围完成进一步筛选。在剩下的 12 条中，直观地，两条平硐揭露的 f12、f3 和地表露头 f110 之间位置和产状特征能够相互吻合。但彼此能否相互连接、代表同一断层，还需要进一步考察彼此的性状。

断层露头地质性状对比类似于在网络上对比候选汽车的配置、性能等，在选定相互对比的露头 f3 和 f12 以后，即从数据库调出相应记录结果，供用户评估彼此之间的吻合程度，这里不详细介绍。

本例中认为上述三个露头代表了同一断层，此时需要在给这些露头一个统一的编号。如果数据库中没有相应的编号时，需要在数据库术语定义中增加新编号，然后在相应的表单中“全局编号”字段下选择该编号。

数据库中对这些零散的露头采用“局部编号”表征，即该编号仅在该钻孔或平硐内有效，在系统对局部编号自动添加钻孔或平硐名称，以相互区别和保持唯一性。

2.4 综合应用：岩体质量分级

2.4.1. 功能简介

综合应用中的“综合”包含两层意思，一是数据库和三维图形的结合，二是地质边界（几何）和数据分析的结合，岩体质量分级是综合应用的典型代表。用户可以据

此推广到其他情形，如水文地质分析、矿山资源评价等。 某种程度上讲，*ItasCAD v3.0* 提供了平台和工具（如数据脚本运算功能），用户可以创造性地发挥。

ItasCAD v3.0 能够实现水电、BQ、RMR 三种岩体质量分级（数据库中考虑一系列具体问题，如同一指标一次录入多种应用、结构面编录方式、参数取值方法与标准等，具体不在这里介绍），每种分级包括两种实现方式：

1) 通过数据库表单字段值综合计算，获得各种分级综合指标值沿钻孔或平硐的分布，然后输出到 ItasCAD 图形插值到三维空间；
2) 从 ItasCAD 图形中读入单指标值分别进行三维空间的插值，然后综合计算出分级综合值（结果）。

第 1）种情形适合于沿钻孔或平硐资料相对完善的情形，尤其是对节理发育密度和节理面状态等进行了详细编录。即便如此，岩石单轴抗压强度指标仍然需要采用统计结果，如根据风化程度取统计值，具体已经内置在数据库内。

第 2）种情形具有广泛适用性，考虑了沿钻孔或平硐分级数据相对不完善的现实情形，其基本思路是把各钻孔和平硐的分级指标数据分别输出到三维空间、彼此之间相互补充，获得完整的数据。

相比较而言，第 1）种情形是后者的特例。不管是哪种方式，在实际应用过程中都会遇到一些实际问题，如岩体质量分级必须遵循的地质分区特性、地质边界（断层）的影响、某种指标（如岩石单轴强度和地下水）数据量不足、必要的人工干预等。针对这些问题，*ItasCAD v3.0* 采用了如**图 17** 所示的技术路线，后文中将具体介绍。

针对上述第 2）种情形进行岩体质量分级的基本要求是把各单指标（RQD、岩石强度、节理密度、结构面状态、地下水条件等）导入到 *ItasCAD v3.0* 的立方网内，分级之前要求事先创建该立方网，并进行必要的分区，各分区代表不同的地质单元。如覆盖层或散体结构岩体往往因数据不足而不进行分级，由人为给定，因此需要在立方网内将这些地质单元划分成单独的区域，不在这些区域内进行插值运算。如**图 17** 所示，事先创建立方网和进行必要的区域划分是岩体质量分级的基础性工作。

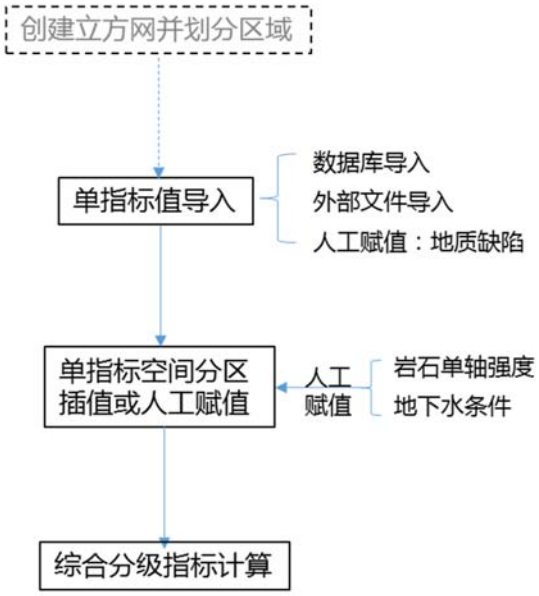


图 17：岩体质量分级技术路线

如**图 17** 所示，岩体质量分级所需要的各单指标值均可以从数据库导入，即导入数据库内沿钻孔或平硐的单指标编录（如结构面状态）或测试（如纵波速）结果导入到已经创建的立方网。*ItasCAD* 同时允许用户不使用数据库、将所有这些现场采集到的指标按外部文件的形式导入，具体包括两种形式：

1）钻孔或平硐数据形式：在 *ItasCAD* 图形钻孔或平硐对象的“数据”中选择“创建并导入”命令，将以“深度、数值”两列数据的文本文件内的记录导入给对应的钻孔或平硐；

2）点对象数据形式：即换算成坐标（X、Y、Z）、数据的文本文件格式，通过在文件主菜单下用导入、ASCII 文件命令实现，属于最一般的导入方式。

现实中的断层等地质缺陷直接影响了岩体指标和指标取值，这些地质缺陷起到边界条件的作用，影响到单指标和岩体质量综合值的空间分布，需要体现在分级结果中。*ItasCAD* 提供了人工赋值的干预方式，以断层面对 RQD 的影响为例，可以给断层面上各节点的 RQD 赋零，然后通过立方网、数据、自面集的操作菜单将该人工赋值结果导入到立方网内，使得与断层相交的立方网 RQD 都为零（更通用的操作方式是通过点集实现，先创建点集对象的数据并完成赋值、然后再传递到立方网，即几乎所有的人工赋值都可以通过点集实现）。

现实工作中可能难以获得一些单指标（如岩石单轴抗压强度、地下水条件）沿钻孔或平硐的取值，但是，这些指标往往存在某些地质相关性，如岩石单轴抗压强度取

决于岩性和风化程度，地下水条件和地下水位密切相关。因此，在缺乏足够数据时，可以根据统计结果或地质判断，直接对这些指标进行空间赋值（参见立方网、数据菜单下岩体分级命令；也可以通过立方网、数据菜单下的赋值命令实现）。

2.4.2. 工程背景与技术路线

某边坡工程内布置了 3 个平硐和一个钻孔，按照 RMR 岩体质量分级的要求进行了部分指标的现场编录，获得了 RMR 分级所需要的其中三个单项指标 RQD、结构面间距、和结构面状态。RMR 分级所依赖的另外两个指标如岩石单轴抗压强度和地下水状态相对缺失，除钻孔揭露地下水以外，所有平硐均处于干燥状态。

地质分析将该边坡岩体分两个区，浅表残坡积层及其下部的基岩，岩体质量分级只针对基岩。该项工作的实质是属性分析，需要先创建地质面模型和边坡区域立方网，并利用残坡积底面对立方网分区。

边坡基岩 RMR 分级采用先对各单指标进行空间插值，然后计算 RMR 的方式（系统还提供了直接从数据库输出 RMR 插值，无需从单指标计算的方式），操作流程如下：

1) 准备工作：主要包括创建面模型（地形面和残坡积底面）、创建边坡立方网和利用覆盖层底面进行分区；
2) 导入从现场获得、沿钻孔和平硐分布的三个指标 RQD、结构面间距、结构面状态；
3) 根据 RMR 评分标准，将这三个指标换算成 RMR 分值，如 RQD 原始记录值在[0, 100]区间内，在 RMR 分级系统的分值范围为[0, 20]，后者为 RMR 分值；
4) 将上述三个指标导入立方网内，并分别进行空间插值（仅限于基岩对应的范围）；
5) 对基岩区域内岩石强度指标采用分工赋值的方式，假设岩石单轴抗压强度在[90， 130]MPa 之间，服从正态分布；
6) 对地下水条件也采用人工赋值，所不同的时，此时细分三个等级：所有平硐高程以上为干燥、钻孔揭露水位和平硐最低高程之间为潮湿、水位以下为滴水。即对立方网的基岩划分三个亚区，对每个亚区赋地下水条件对应的 RMR 分值，假设服从均匀分布；
7) 计算 RMR 值，即立方网内每个单元上述 5 个指标值相加，完成 RMR 分级。

上述人工赋值实际上是人工干预，插值分析时也可能比较频繁地使用。比如，现实工作中对边坡进行插值分析时，往往需要考虑山脊的影响，在缺乏资料时，可以对山脊划分成小区域，对区域内赋若干推测值，作为约束条件参与插值运算，用定量方式表示地质体特性局部范围变化规律的合理性。

如果需要将上述百分制的 RMR 分级结果转换为国内常用的 V 级制时，可以 V 级区间边界对应的 RMR 值作等值面，获得 V 级分类结果。

2.4.3. 应用成果

图 **18** 表示了按照上述流程的准备工作成果，左图表示了沿钻孔和平硐编录获得的结构面间距值分布，可以直接从数据库输出（也可以用外部文件方式导入成带数据的点对象，也可以直接导入到对应的钻孔或平硐），是岩体质量 RMR 分级的指标之一。右图为划分的立方网，隐藏了覆盖层底板以上的部分，是本例开展岩体质量分级的载体。

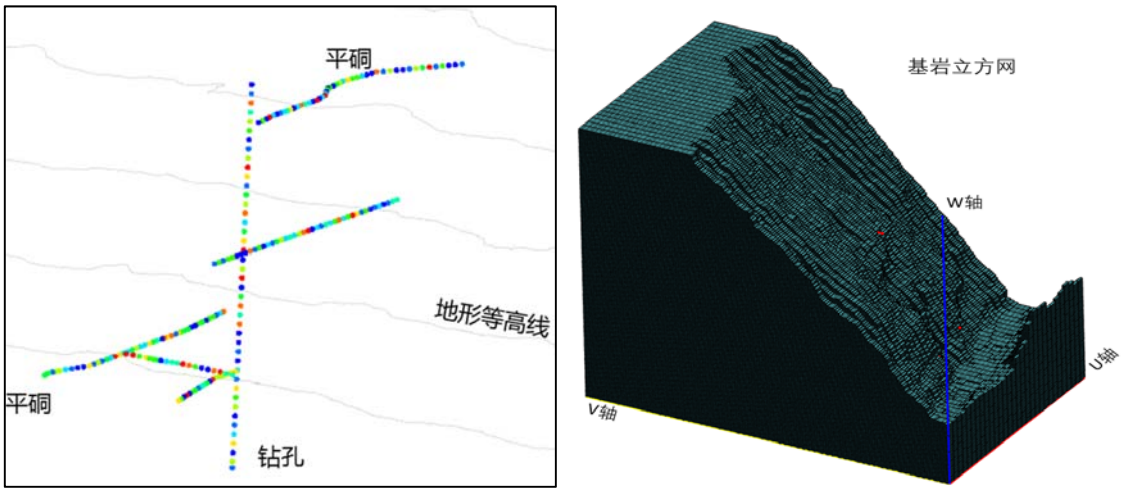


图 18：数据导入（左）和基岩立方网（右）

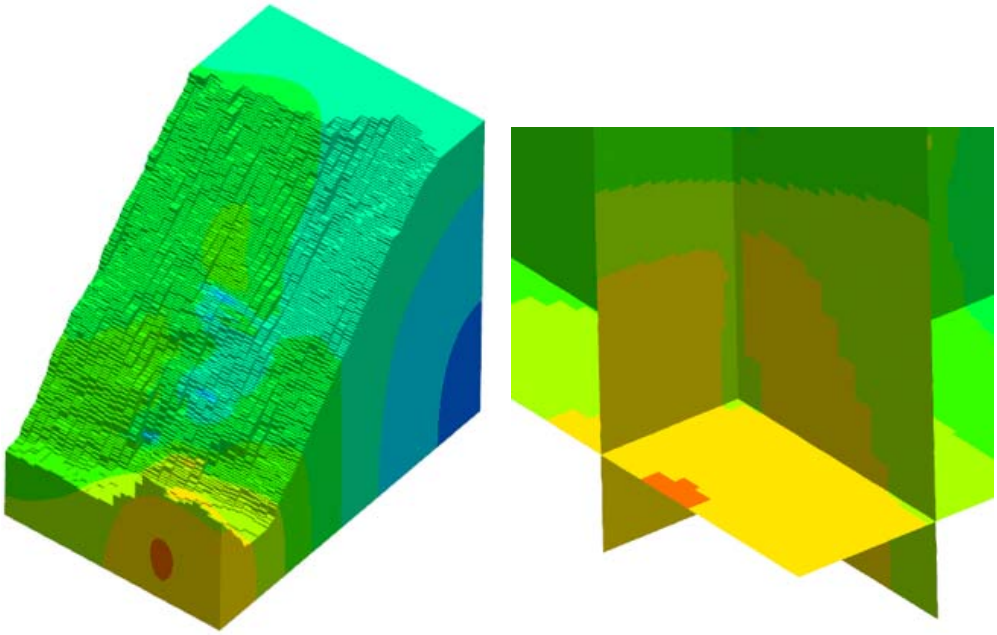


图 19：结构面状态分值在三维空间（左）和在三个轴平面上的分布（右）

完成上述工作以后，通过【立方网】中【数据】计算操作，将沿钻孔和平硐获得的三个指标值一次导入立方网内，并在指定的区域内进行插值，一次性将三个指标值从钻孔和平硐所在部位推广到三维空间（系统还提供先仅映射参数值、然后进行插值运算的方式，这里不详细介绍），图 **19** 表示了其中结构面状态（JD）指标值插值结果，其中左图为三维空间分布，右图为局部区域沿三种轴平面分布。

RMR 分级所依赖的另外两个指标岩石单轴抗压强度和地下水条件缺乏系统的原始数据，实际工作中采用人工赋值的方式给出初始值。这一过程与上述将已知值 “导入”立方网非常相似，差别在于人工赋值，满足现实中可能出现的原始数据不全、但可以可靠估计的情形。

上述操作完成了所有单指标空间插值，然后只需要根据 RMR 分级方法对每个单元执行累加计算，即可获得 RMR 值的空间分布。累加计算工作可以通过脚本运算完成，为便于操作，ItasCAD v3.0 专门开发了【岩体分级】命令，可以通过原始数据（如 RQD 为百分制的记录值、岩石强度为试验值，而不是单指标分级值）插值以后自动计算出岩体质量值，【岩体分级】命令适用于 RMR、BQ、和水电三种分级方式。需要说明的是，该命令内置的处理方式与数据库相一致（主要针对结构面状态和地下水条件），脱离数据库开展岩体分级时，需要通过分步操作，不再适合使用【岩体分级】命令。

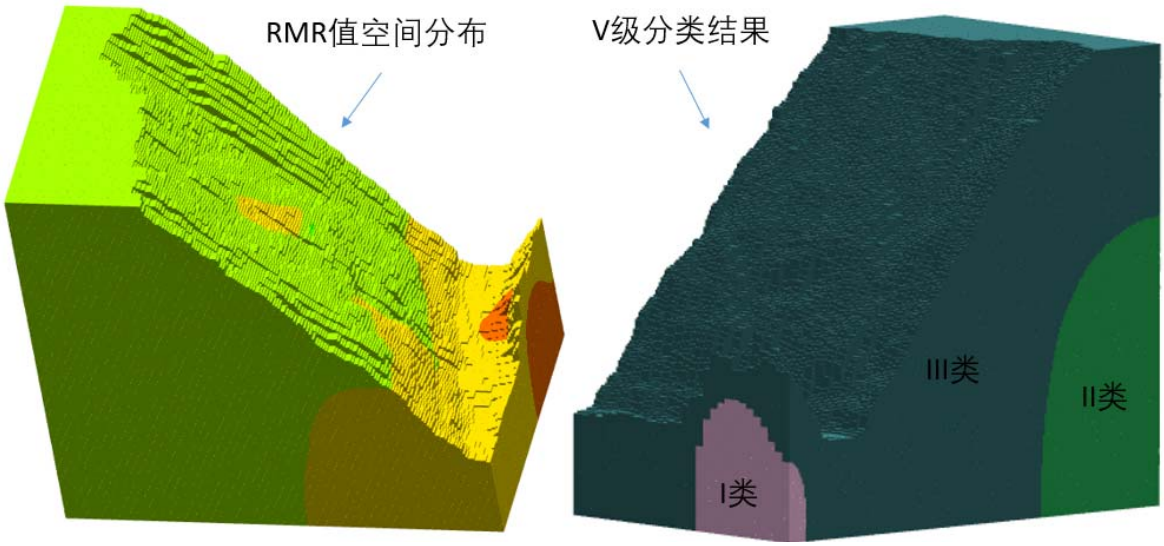


图 20：边坡岩体 RMR 分级结果（左）和转化为 V 个等级以后的空间形态（右）

如前所述，国内岩体工程领域习惯于采用 V 级分类，如果以 20 分为级差，百分制的 RMR 数值即可转换为 V 个等级，两种表达方式的分级结果分别与图 **20** 左和图 **20** 右所示。其中右图显示该边坡以 III 类岩体为主，I 类和 II 类范围相对较小，比较有意思的是 III 类岩体与 I 类、II 类岩体分界面形态，空间上很不规则，难以通过剖面准确描述。

3 ItasCAD 建模方法与应用案例

3.1 概述

3.1.1. 建模资料

ItasCAD 采用的建模技术和实现方式决定了建模能力和特点，以广泛性、适用性和便捷性见长，易于上手并轻松解决常见乃至复杂问题。特别地，对于覆盖层和土层建模等传统难题专门开发的建模技术，极大程度降低了应用操作门槛，优势十分突出。

ItasCAD 广泛适用性的具体体现之一是可以采用几乎任意形式的数据资料建模，受行业特点和工作深度影响，具体工程之间可资利用数据形式和数量差别十分巨大，一些行业为资料稀少发愁，而另一些行业因为资料太多、难以全面利用而苦恼。但是，任何地区地质资料和利用地质资料分析地质体空间形态时具有如下两个基本特点：

1）不论勘察手段如何，点坐标与属性值是表征地质体存在方式的最基本形式。地质调查获得的地质点和产状、勘探获得的深度位置和产状、物探获得物性指标空间分布，归根到底，都是空间点坐标位置和属性。当点坐标位置和属性作为建模最基本依据时，则包括了所有勘察手段获得的资料；

2）人工推测，勘探部位之间地质体形态、物探结果中物性值和地质界面之间的关系都是地质分析工作过程中必须具备的人工推测。

ItasCAD 建模功能设计时充分考虑了上述两个基本特点，归根结底，建模依据的基本资料为地质对象**空间点**坐标位置（属性最终也转为位置），只是因为获取手段差异采用不同的表达方式如孔深。*ItasCAD* 建模时把任何形式的资料都用 “点坐标” 作为最基本单元，但表达方式可以与现实手段保持一致，如地质点、露头线、钻孔、给定位置物探属性值等。可供 *ItasCAD* 建模的数据类型包括：

1）数据库：指 *ItasCAD* 数据库，推荐使用，与图形一体化，通过数据库定义模型中地质对象的地质属性，建模时自动调用，从而强化模型合理性和建模快捷性；

2）外部数据文件：包括图形格式的文件和 *ASCII* 文件，前者适用于导入已有的图形成果（*GoCAD*、*AutoDesk*、*Catia*、*MicroStation* 等），后者多用于物探获得的点云数据文件，即“坐标点+物性值”的数据格式；

3）图片：*.JPG* 或*.PDF* 等格式，可通过 *ItasCAD* 内置矢量化功能数字化（图 21）。

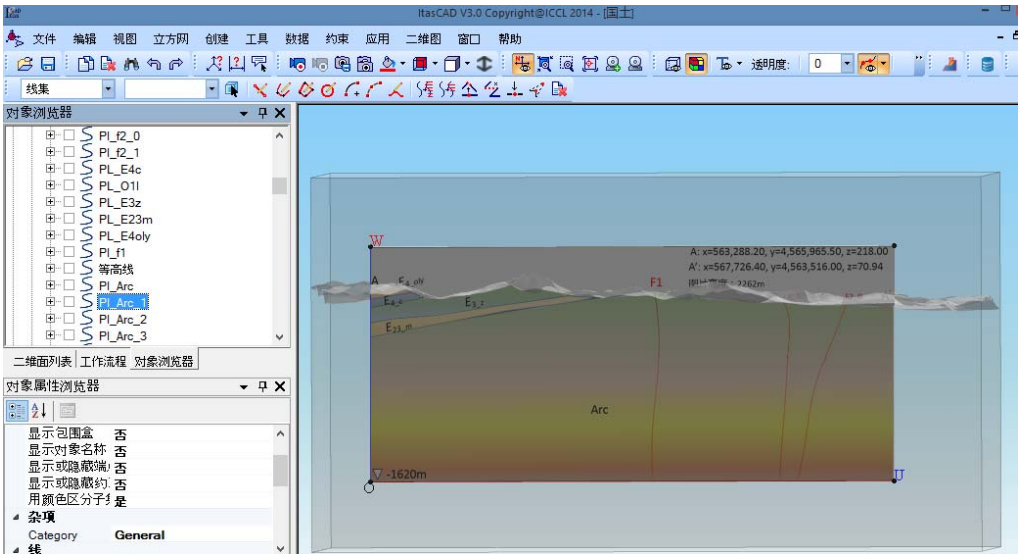


图 21：将物探剖面解译成果图片导入 *ItasCAD* 后的效果

3.1.2. 建模方法

如前所述，*ItasCAD* 提供多种建模方式，特别地，按照地质界面特征和建模需求设计了不同的实现途径如建模流程。在所有这些方式中，“单一界面建模流程”适用面最大，该流程针对地质调查和/或勘探为主、物探为辅的条件设计，可以快速构建连续的地质界面，包括地层面、构造面、侵入界面、覆盖层底板等。当地质界面局部被断层切割错动时，建模时先忽略这种错动，然后通过断层错动模拟进行修正。

单一界面建模流程可以使用地质调查、勘探、物探、推测等手段中任意一种或任意多种方式获得的资料建模，一般地，勘察资料被处理为精确约束（100%满足）、其余处理为模糊约束（趋势合理）。

该流程建模的一个重要特点是允许参考一个或多个可靠的对象进行人工干预，以体现地质面彼此之间的关系。建模过程的本质是逼近拟合，是一种数学方法，人工干预的意义在于数学方法获得的结果符合地质规律，因此是建模过程中极其重要的环节。

土建行业往往采用大量钻孔了解土层分布，同一钻孔内不同土层之间的厚度可以作为建模的约束条件。此外，相邻钻孔之间土层界面的出露特征指示了界面的连续性，是否出现尖灭或者透镜体形式的分布。也就是说，完善的钻孔资料可以获得土层之间厚度统计分布，帮助确定钻孔之间相邻层面距离关系而不出现穿插；相邻孔之间层位关系还可以帮助判断是否存在尖灭和透镜体、以及它们的平面形态。针对这一特点，*ItasCAD* 开发了针对土层的一键建模技术，除透镜体特别复杂时（多个透镜体彼此嵌套），该功能可以一键创建出土体模型，满足绝大多数情况下土层建模需要。

现实中存在一些特殊情况使得上述依据几何信息建模的方式都难以满足要求，矿体中的夹石、土体特性急剧交替变化出现的大量透镜体等，甚至难以获得这些对象边界的资料，因此也无法利用几何信息建模。由于夹石本质上是资源品位低于一定标准的统称，而复杂透镜体是土层物性指标变化的结果，这两种情形都是某个属性值空间变化的体现。针对这类问题，*ItasCAD* 提供了属性建模技术。

本案例集锦中介绍了这些功能解决复杂问题的应用，其中一些问题采用常规建模手段非常耗时，且合理性难以保证，*ItasCAD* 提供的建模方式可以轻松解决问题。

考虑到节省篇幅，本集锦中罗列了三种“极端”情形的应用案例：

1) 基于平面地质图建模案例：即仅依据地表地质测绘成果，如任何勘探、物探资料控制深部形态，完全依赖地质判断，重点体现如何快速合理地实现地质判断。显然，如果现实中具备勘探或/物探成果时，通过全部或部分取代地质判断结果，即实现多种资料的综合建模；
2) 物探综合解译与建模：以物探成果为依据、没有勘探或采用少量勘探成果的建模方式。分两种情形，一是完成物探解译生成物探剖面图（图片）的老工程；另一种情形为正在开展物探工作、采用多种手段获得综合性解释成果。这一案例的技术路线具有普遍性，可以推广应用到几乎任何数值的空间处理和地质分析；
3) 土层建模：针对土层特点和其他建模手段难以有效处理的现实问题，一般情况下一键建模和特别复杂情况下（大量套嵌透镜体）的指标分层建模（属性建模）两种情形，是 *ItasCAD v3.0* 针对土层建模的特色功能。

3.2 基于平面地质图的建模案例

3.2.1. 背景条件与要求

工程早期阶段或者在一些行业如地质调查普遍存在的情况是资料少，往往只能获得平面地质图，没有任何物探或勘探资料。平面地质图中实际上包含了地质体三维信息，如露头线产状表示的内部延伸情况和露头线构造类型（如褶皱形式）决定的空间基本形态。因此，依据平面地质图可以构建出地质体三维形态模型，并帮助直接展示和深化对地质条件的认识。本节介绍的案例就属于这种情形，建模所依赖的资料仅仅是一种平面地质图。

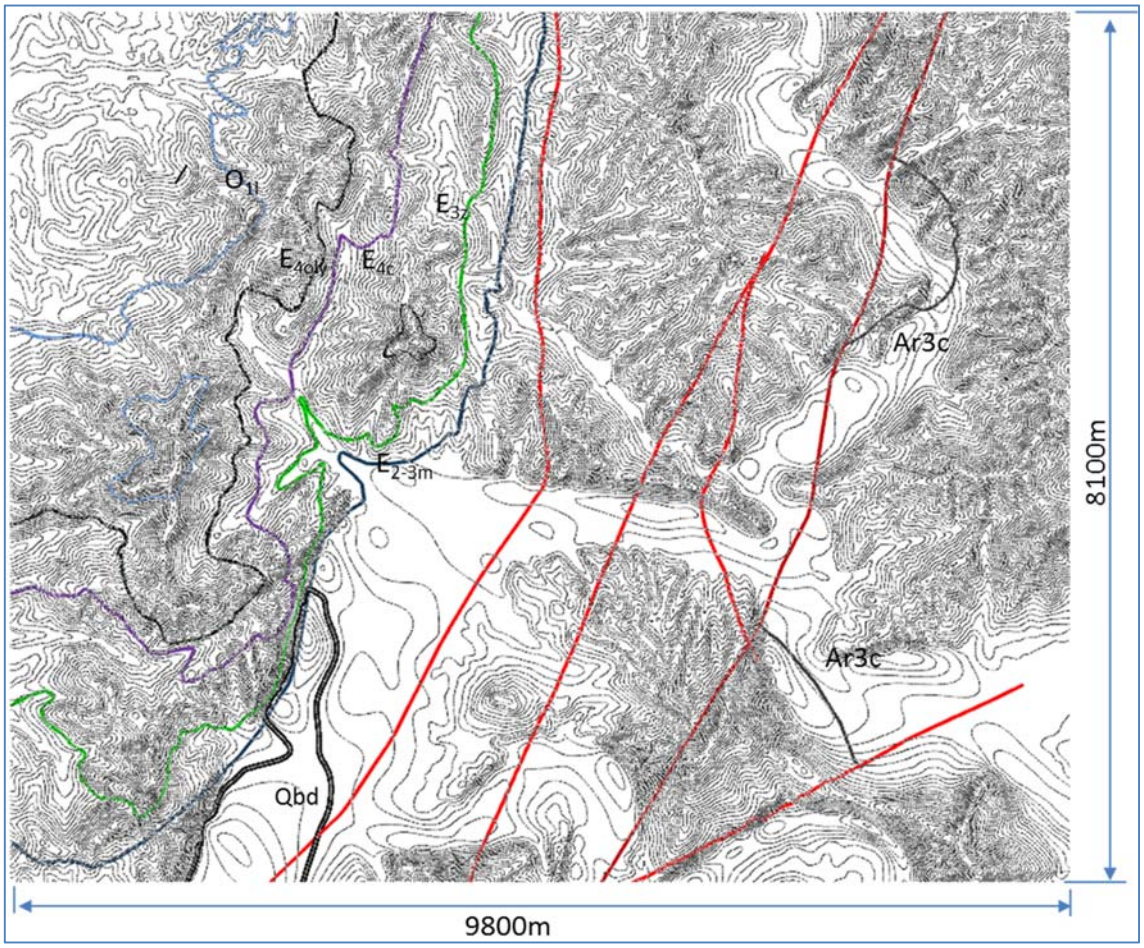


图 22：场区平面地质图截图

图 22 系工作区域平面地质图，场区长和宽度大约为 10KM 和 8KM，从地质三维建模角度，该场地地质条件的复杂性体现在如下几个方面：

1）薄层平缓地层（场区 NW 侧），构建这类地层建模时常见的问题是不正确的穿插关系，本次建模对象的产状变化形成的褶曲现象非常普遍，需要快捷和正确反映褶曲构造特征；此外，受地形起伏影响，同一地层在地表存在多处零星露头，如何快速建模也是常见问题之一；

2）扭曲断层（NE 向，场区中部），即沿走向和深部延伸的不同部位，陡倾断层倾向发生变化，空间形态扭曲；

3）侵入界面（场区东侧）：其复杂性主要体现在无任何可靠的深部资料，需要实现毫无规则的深部形态人工推测结果的快速模拟。

建模可以依赖的资料为*.dwg* 格式的地质平面图（注：如为纸质，则可以扫描后利用 *ItasCAD* 的矢量化功能实现电子化），包括地形等高线、露头线及其代表性位置产状（其中侵入体露头线没有产状信息）。

本区建模实际仅依赖平面地质图，该平面图中露头线包括平缓沉积岩层、陡倾断层、和侵入体。其中沉积岩层露头产状显示空间形态变化较大，SW 侧普遍发育褶曲现象。

3.2.2. 建模流程与技术路线

本次建模工作的难点体现在利用少量的地质资料创建上述三种类型地质体形态，除此之外其余工作相对比较简单。不过，对图 22 所示的所有地质界面及地表，本次建模时都采用了相同的建模方法，即单一界面建模流程，差别在于针对不同类型地质体，在资料准备环节存在一定差别。

建模工作经历四个阶段，即数据准备、建模规划、创建面模型、创建体模型。前三个阶段实际上彼此关联，并不完全独立，综合地讲，是根据地质体形态特征和已知资料思考拟定一种建模方式，然后依此为依据准备资料。这实际上要求用户具备一定的建模经验，因此，对初学者而言，难点并非在操作环节，而是复杂地质体建模技术路线，因此往往需要一定的培训。

上述三种地质体中，创建沉积地层面和扭曲断层的技术路线基本相同，简要描述如下：

1）在数据库创建一个工程名称，但平面地质图中的地层代号、岩性、断层代号和性质等信息录入到数据库中相应部位（数据库中的“术语定义”）；

2）从平面地质图中露头线上标注有产状部位人工拾取一个露头点，将坐标和产状记入数据库中的“地层点”和“构造点”表单中，即人为“恢复”标注产状的露头点信息，并在表单中记录各点对应的信息（如地层点的地层代号、岩性…）。这些点将在建模过程中被视为“勘察点”，视需要在建模过程中可以要求 100%满足精度（通过且产状相符）；

3）将数据库中的“勘察点”信息输出到图形，利用包含的产状信息生成深部推测点，和露头线一起控制其基本形态，在建模过程中被处理成“模糊约束”，即不要求 100%通过；

4）以“勘察点”（可设为精确约束）、推测点和露头线（默认为模糊约束）为依据，采用单一界面建模流程创建界面形态，断层扭曲、地层面零星分布现象自动体现。

以上 4 个环节的操作适用于地层面和所有断层，二者之间的差别在于地层面建模过程中需要遵循从新到老的顺序，与已有的地层面对比是否存在不合理的穿插关系（创建最新地层面时参考地形面），通过自动（具有钻孔揭露层厚信息时适用）或手动方式（对不同部位地层厚度的认识判断）保证任何部位都不出现不合理的穿插，本质是在数学拟合过程加入地质约束条件，保证地质合理性。

侵入面建模需要在平面露头线基础上增加深部控制信息，由于平面地质图没有侵入面露头产状（即便有该信息也不适合于用来推测深部形态），其深部形态采用了地质判断：即利用露头线形态特征、与断层之间交切关系（新老关系）估计深部特征。具体是利用【点与产状】功能在地下不同高程创建 3 个水平面，参照露头线及其与相关断层的交切关系分别勾画出侵入面在该水平面交线的基本特征，作为内部推测线信息。

与前述相似地，在侵入面露头线上任意拾取一个或多个点“恢复”成现实工作中的“勘察点”（无产状，可以不录入到数据库，仅在 *ItasCAD* 图形中将其地质属性定义为地质点即可），然后利用露头线和推测得到的深部交线为辅助信息（模糊约束），按照上述过程采用单一界面流程建模。

按照以上技术路线建模时还涉及建模范围设计和建模顺序等两个非常重要的环节，基本考虑和要求如下：

1）设计模型范围：包括平面尺寸和深度。设计时主要考虑工程需求，同时考虑建模过程和后期编辑需要，其中一个常见要求是模型能够“包住”所有地质界面且面和面之间交切后能形成封闭边界（后续生成体模型和开展分析工作需求，如仅输出二维图时，无需考虑封闭要求）。为此，数据准备期间适当延伸露头线长度，从而保证它们都能终止于模型边界或另一个地质面；

2）建模顺序规划：主要依据从新到老、高精度到低精度的原则。从新到老原则的本质是体现交切关系，先构建时代较新、不被切割的地质界面。实际操作因此都首先构建地表模型，当然更重要的是对场区范围地质构造进行分区，对每个区规划建模顺序。在本例中场区按照交切关系可以分两个单元，靠西侧平缓沉积地层没有被断层切割，建模时主要关心彼此之间层序关系的正确

性和厚度的合理性；场区中东部范围系侵入岩层，形成时代早于沉积地层，断层相对发育，该单元内建模顺序按照切割关系。从高精度到低精度的建模顺序适合于勘探工作量相对较大、但对地质界面揭露程度不均匀的情形，此时可以优先构建揭露点较多的界面模型，供其他对象建模时参考。

3.2.3. 建模过程与成果

按照上述技术路线，建模过程的第 1 步是数据准备，图 23 表示了将平面地质图地层露头线产状信息所在位置、产状和对应的地层代号、岩性信息录入到数据库后的结果，在数据库中被归结为地质点中的地层分界点。该功能的设计目的是记录现场地质测绘成果，本例中的应用与设计意图基本相符，差别在于相关信息来源于地质图，而不是实际量测的原始记录数据，但不影响可靠和建模。

图 23：将平面地质图非图形化地质信息录入到数据后的截图

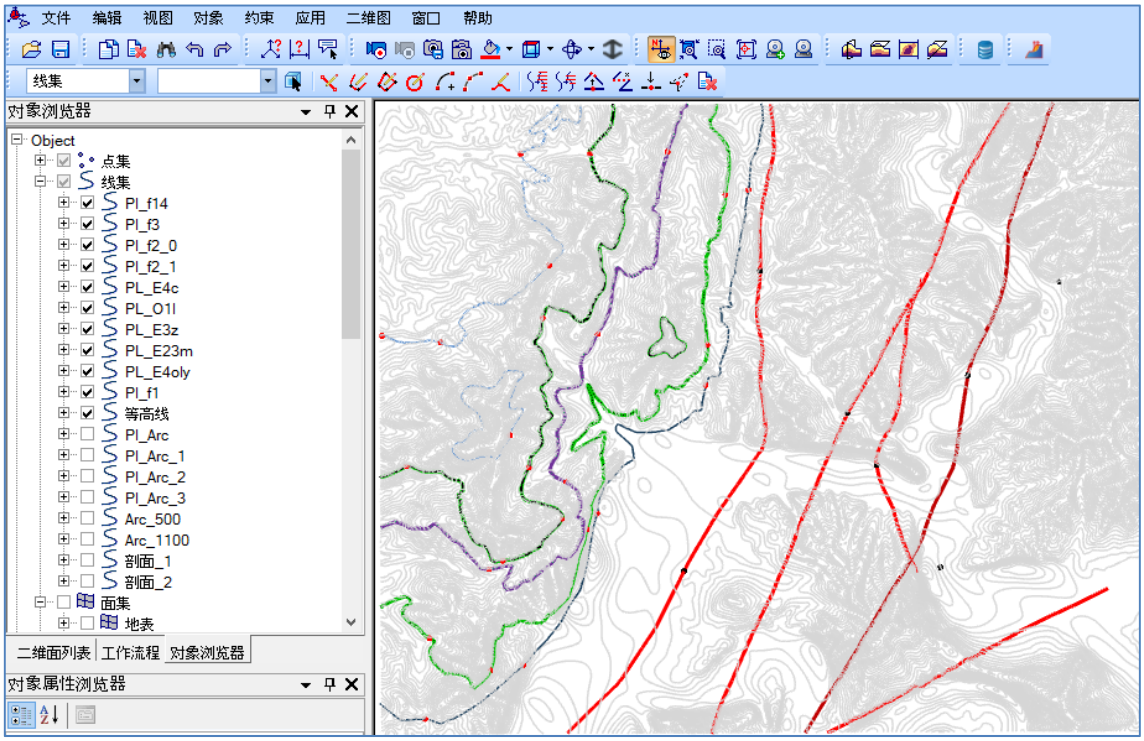


图 24：将平面地质图导入 *ItasCAD* 并对图形属性编辑后的效果

将这些资料入库以后，其中各点的位置和产状不仅可以直接输出到图形系统作为建模的控制性信息，而且，地层代号、岩性类型等都可以在二维出图过程中直接调用，无需重新设置。

图 24 为平面地质图导入到 *ItasCAD* 图形系统以后、并对图形属性（颜色、粗细等）进行编辑以后的效果，建模采用其中的等高线和露头线。注意此时的露头线上的节点只包含平面坐标，Z 坐标为全部为零，需要通过数据处理恢复高程信息。图中的点系数据库中地质点导入后的效果，其中的产状通过数据的方式隐藏在各点内，可以在系统内调用。

导入平面地质图数据资料以后，现实工作中往往利用三维图形功能检查数据质量和处理其中可能存在的缺陷，很多情况下可能还需要创建地形模型。本例中遇到的相关问题和处理方式如下：

1）地形建模数据处理：将*.DWG* 或*.DXF* 格式平面地质图导入到 *ItasCAD* 以后常常遇到地形坐标点重复和高程坐标不正确的问题，*ItasCAD* 在导入文件时已经自动删除了重复点（仅保留其中一个），而高程坐标的恢复和修正往往比较费时，需要根据标识的高程数字进行移动处理。对于完全无法恢复的不正确坐标点，则需要剔除处理，*ItasCAD* 提供两种快捷删除方式，一是利用高程数值划分区

域，一次性删除不正确区域内的坐标点；二是人工框选，删除勾选框内的点。处理后的坐标点即可以通过单一界面建模流层创建地形面（推荐方式）；

2）露头线检查与处理：常常针对检查露头线连续性和是否适当延伸到建模范围以外，这是因为在构建一些地质分界面模型时，为保证和地表 100%相交，往往会适当延伸到地表以上，需要用露头线进行裁剪处理。当露头线因为图形质量问题出现断点、或者长度不足时，就会出现无法切穿的情形，给后期编辑增加工作量和工作难度。此时需要检查和连接断点（*ItasCAD* 提供断点自动判断和自动衔接功能，不过，应用自动衔接时需要注意是否正确，不正确时需要人工打断和人工衔接）；

完成上述操作以后获得了可用于建模的地表信息，随之需要生成深部参考点，具体采用如下三种方式：

1）通过露头和产状推测，针对场区西侧沉积地层，地层分界面产状总体稳定，推测结果合理性相对较好；

2）物探解释结果的矢量化处理，即对导入的图片进行矢量化处理，获得各地质界线在三维的空间位置。*ItasCAD* 提供了简捷、精确矢量化操作方式，以满足不同需求；

3）地质推测：针对侵入界面。本次建模中先在-500m、-1100m、-1700m 三个不同高程创建三个平面二维工作面，然后参照侵入体露头和断层交切关系，在这三个水平面上勾画出侵入面形态的“想象”结果，作为深部参考点。

显然地，深部参考点都存在不同程度的误差，因此，建模时将它们作为模糊约束处理，构建的模型可以充分接近、但不保证通过。客观地，深部参考点的作用是保证深部总体形态的合理性，这是因为 *ItasCAD* 采用了从粗到细、分步拟合的建模方式，早期拟合过程中模糊约束点的误差水平相对较大，但能够保证趋势和形态的合理性。

图 25 表示可利用测绘点产状和露头线生成深部参考点操作界面，图中的绿色为露头线，红色为生成的参考点。

该界面可以一次生成多个测绘点部位、不同产状条件下的深部参考点，测绘点部位的地层产状作为数据储存在该节点内，操作该命令过程中，当勾选的区域范围内包括产状信息时，倾向和倾角将自动出现在列表中，帮助计算给定延伸长度以后参考点的位置。并且，该命令操作过程中还可以体现产状随深度变化。

图中下侧测点产状显示了向斜褶曲翘起端的构造特征，这一判断来源于露头产状变化，因此，当利用这些测绘点生成深部推测点坐标位置时，可以通过控制每个测绘点产状延伸影响范围，体现这一构造特征。采用这些数据构建的模型不仅模拟了层面空间总体延伸状态，还可以同时自动反映局部褶曲和翘起等局部构造特征。

在获得地表和地下信息以后，即可调用单一界面建模流程构建地质界面形态，对于地层而言，这一过程最关键的环节是保证彼此之间相对关系满足地质规律，即上下层关系（厚度变化乃至尖灭）正确体现，该流程中的局部编辑功能。

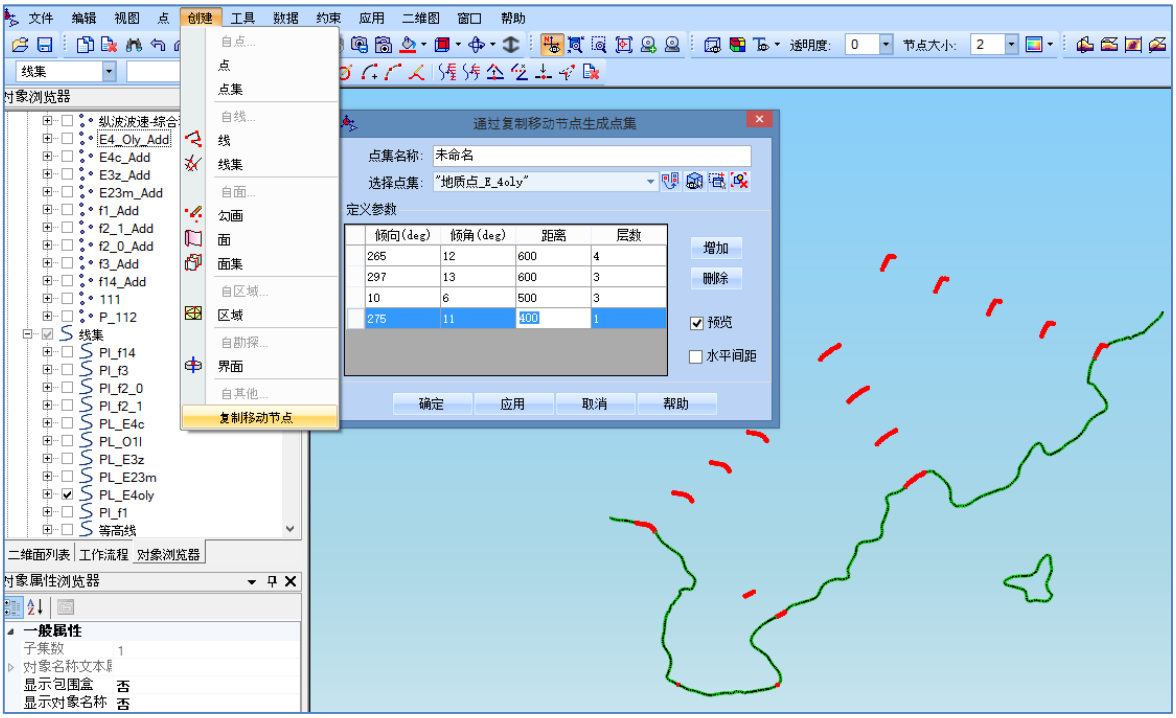


图 25：利用测绘点产状和露头线生成深部参考点

图 26 表示了针对上述地层面、采用单一界面建模流程创建模型的初始形态，注意右侧左下部位用红色虚线标识的“局部异常”，该范围内地层面露出地表，形成不正确的穿插。图 26 左侧的 “区域调整” 操作功能专门针对这类问题设计，通过设置推测厚度进行局部调整，保证其地质合理性。

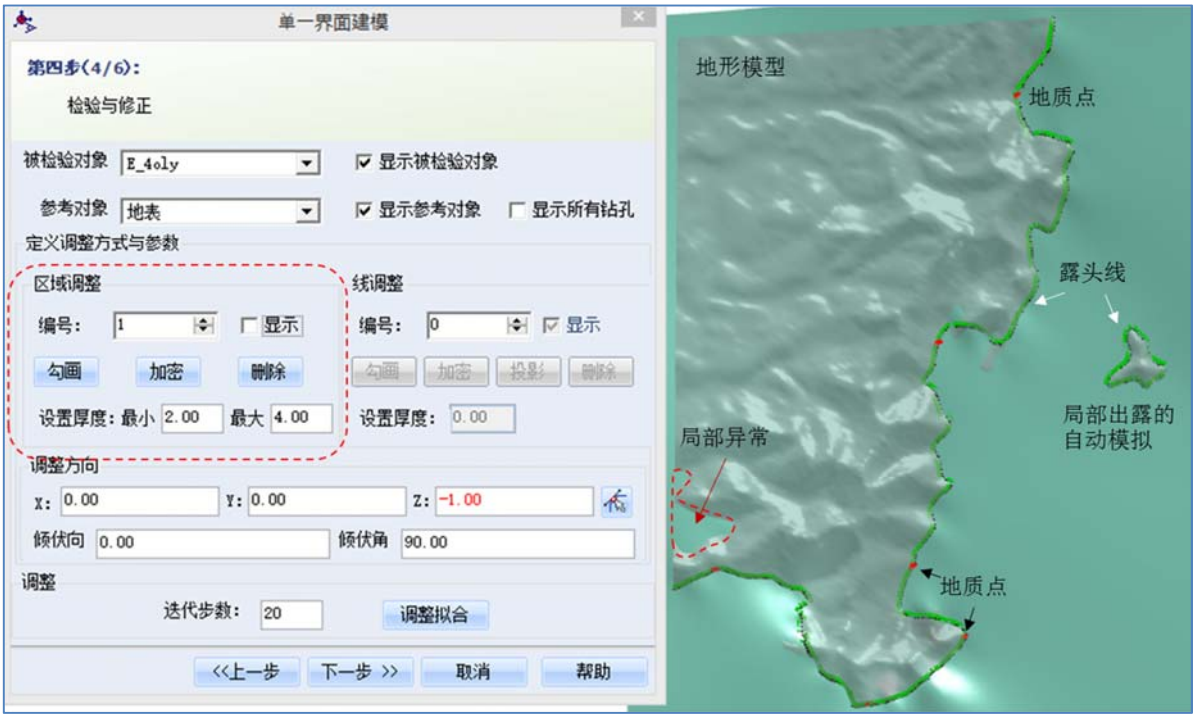


图 26：对局部异常穿插区域设置厚度约束的消除处理操作

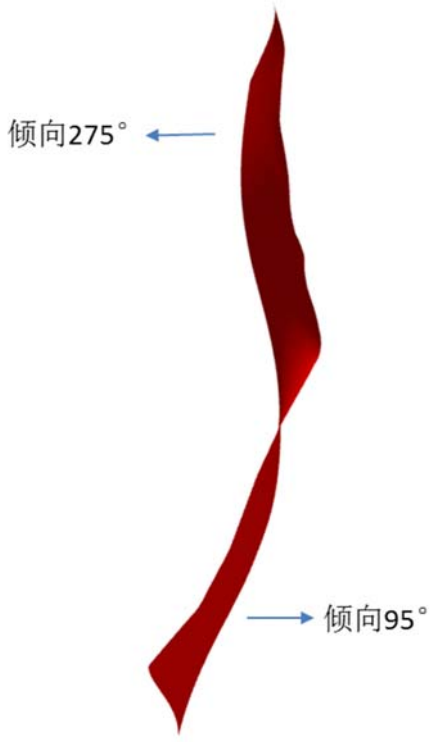


图 27：扭曲形态的断层模型（F1）

图 27 是利用上述相同方式创建的 *F1* 模型形态，地表露头揭示背侧倾 *NWW* 方向而南端倾 *SEE*，即沿断层走向倾向发生扭曲，这种特征在创建模型过程中自动体现。相对于上述的地层面建模而言，创建 *F1* 模型更简捷，省略了和参考面对比和修正过程。

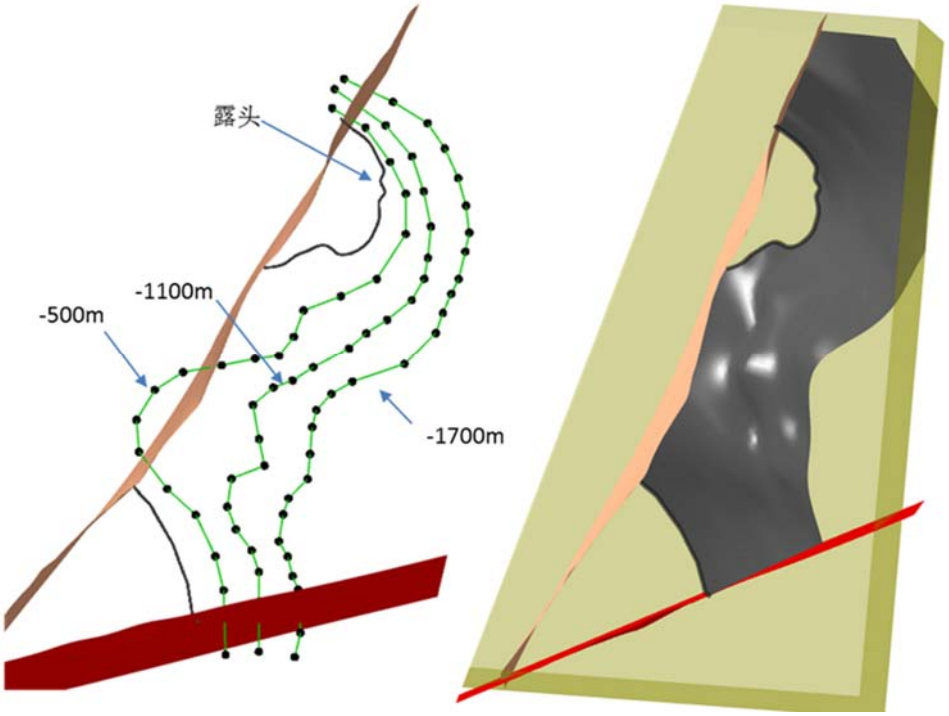


图 28：推测深部侵入边界形态的快速勾画（左）和创建的三维模型（右）

图 28 表示了创建侵入面模型的关键过程和结果，其中左图表示侵入体露头线和推测的形态特征（在-500m 高程、-1100、-1700m 三个高程工作面上的形态）、及其和断层的交切关系。图 28 右表示同时利用露头线和推测形态创建的模型、及其被断层切割以后的结果，侵入边界复杂形态及其和断层的切割关系得到正确体现，而建模过程无需特殊处理，简单易行。

按照上述方法依次完成全部地层面、断层面建模以后，即得到空间地质界面模型。如果建模目的仅关注地质体几何形态和彼此之间的交切关系，此时的成果基本满足要求。如果建模目标是创建“含属性地质三维模型”时，则还需要完成两个环节的工作：

1）地质面模型的交切和裁剪，与模型边界相互共同构成完整的面模型，其中的任意一个面都可以是某个空间区域的边界；

2）将模型用网格充填，并选取其中部分面划分若干区域，形成地质单元体。

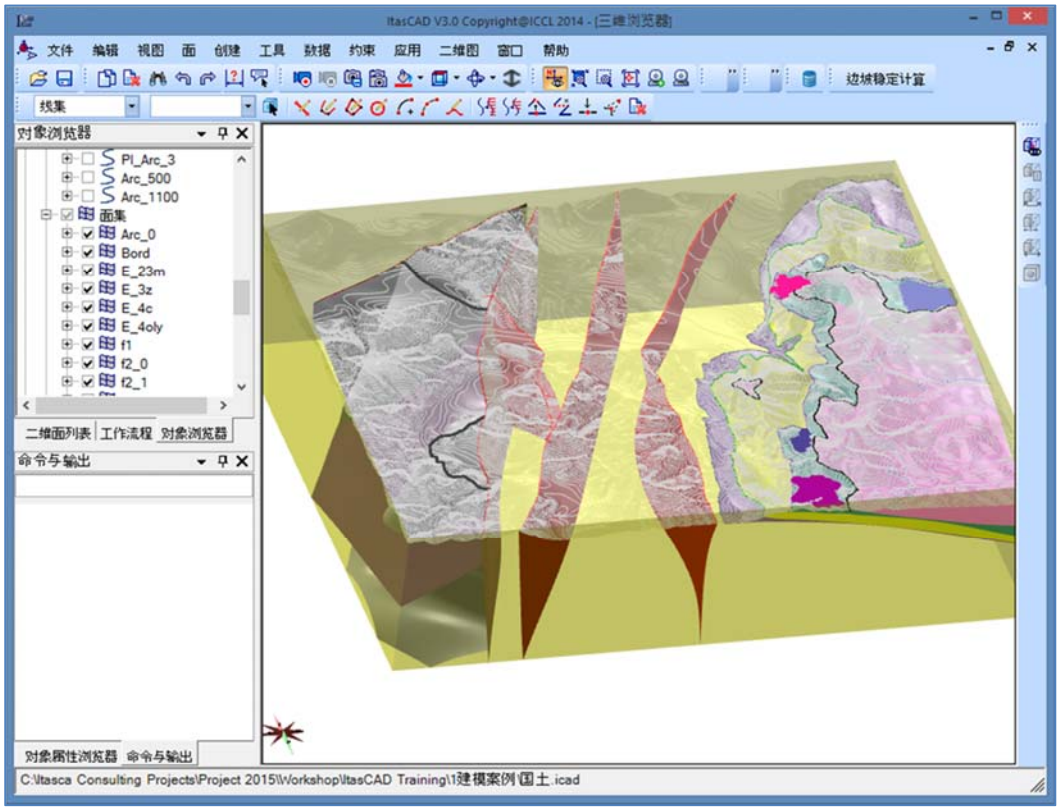


图 29：场址区地质界面三维模型

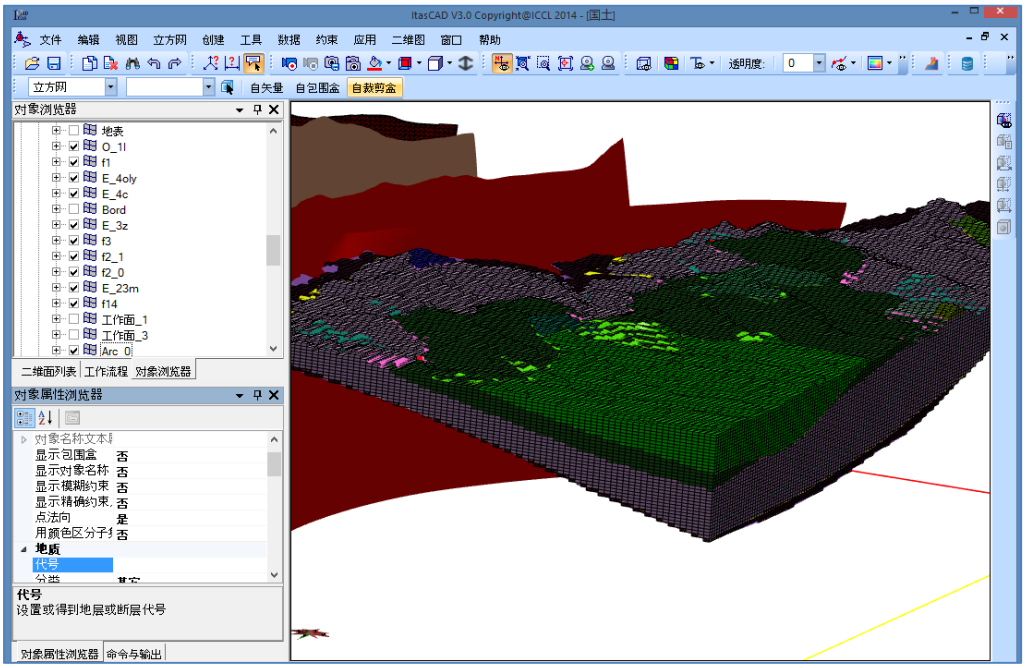


图 30：场址区地质界面三维实体模型中沉积地层分区结果

图 29 系满足创建含属性地质三维模型要求的地质三维面模型，图 30 表示在该模型基础上充填实体单元后、仅显示沉积岩层地质分区结果。本次采用了 360 万个网格充填，普通计算机可以完成 3000—5000 万网格的操作，满足一般需求。

3.3 物探剖面（图片）建模与多指标物探综合解译

以上案例的建模利用了地质体几何信息（位置、产状），往往来源于地质测绘和勘探。一些情况下（如地质体非常复杂时），物探和试验（土工试验）数据资料能够更有效地揭示地质体空间形态，为此，*ItasCAD v3.0* 属性建模功能满足利用物探资料完成建模的需要。本案例仅简要介绍两种情形：

1） 老工程：依据已经解译好的若干物探剖面成果构建地质界面，这些成果为.JPG 图片格式。当然，将老工程的纸质蓝图扫描以后，同样可以创建地质三维模型；

2） 新工程：侧重多种物探指标的综合解译，即综合利用多指标物探成果综合解译、构建地质三维面形态。其中包含的关键技术是矢量加权约束，综合面的起伏形态是多个面起伏形态加权结果。对应于现实工作，利用了物探成果空间形态可靠性良好的优势。

为节省篇幅，这里不介绍将物探数据值进行空间插值处理、形成剖面的过程，其操作方式与岩体质量分级非常接近。

3.3.1. 物探剖面（图片）建模

某工程已经完成 3 个剖面的物探和成果解译工作，获得了三个剖面物性云图和地质分界面解译成果，过程如下：

1) 先将三个物探剖面图片按照实际位置导入到 *ItasCAD* 内，此时每个剖面都归位到三维空间对应的位置，并且，任何一个剖面都是二维工作面；

2) 在剖面上勾画待建的地质分界线，这一过程实质是在二维工作面上进行矢量化；

3) 启动单一界面建模流程，以地质含义相同的地质分界线为目标（约束条件），创建出通过或充分逼近地质界线的空间曲面。

图 31 表示了定义和导入二维剖面的操作界面，首先在【二维面列表】界面上右键点击【自定义剖面】弹出菜单，选择【创建】来创建一个剖面（例如 B-B 剖面）；然后输入剖面底部起始点坐标和图片高度，实现所创建剖面的“归位”。

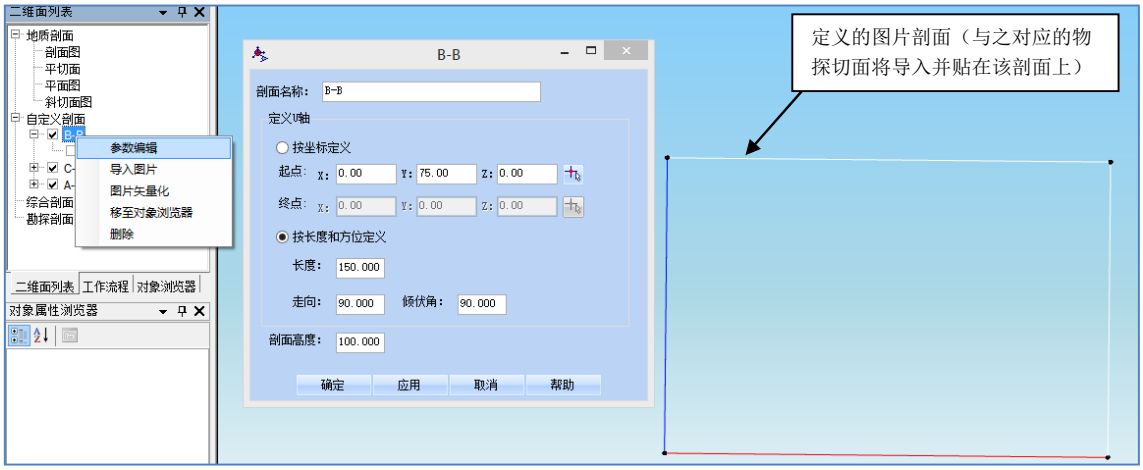


图 31：图片剖面参数定义或编辑

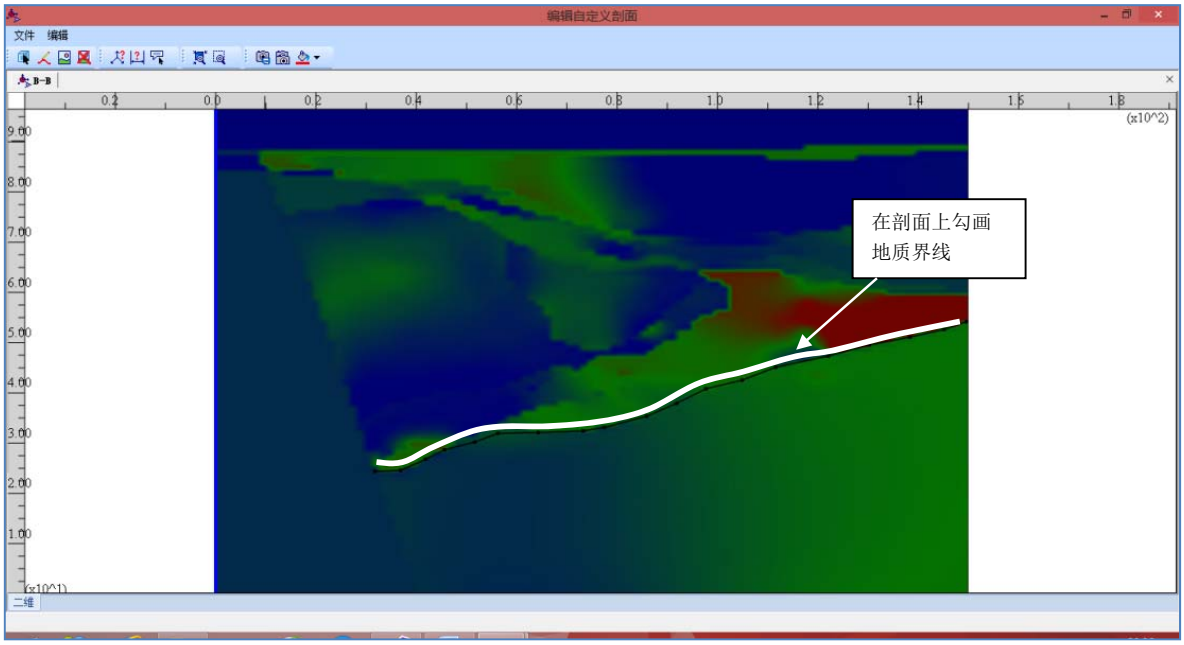


图 32：图片矢量化窗口

通过【导入图片】命令导入与所创建剖面（如 *B-B*）相对应的剖面图片，再用【图片矢量化】功能导出矢量化窗口（如图 32 所示），在该窗口直接勾画地质界线。其中一个地层面在三个物探剖面矢量化后的成果如图 33 所示，所勾画的三条线条代表了同一地层面。此时的线条仍然归属于二维剖面中，需要通过【移至对象浏览器】将其转化为三维空间中可以自由使用的对象，用于建模。

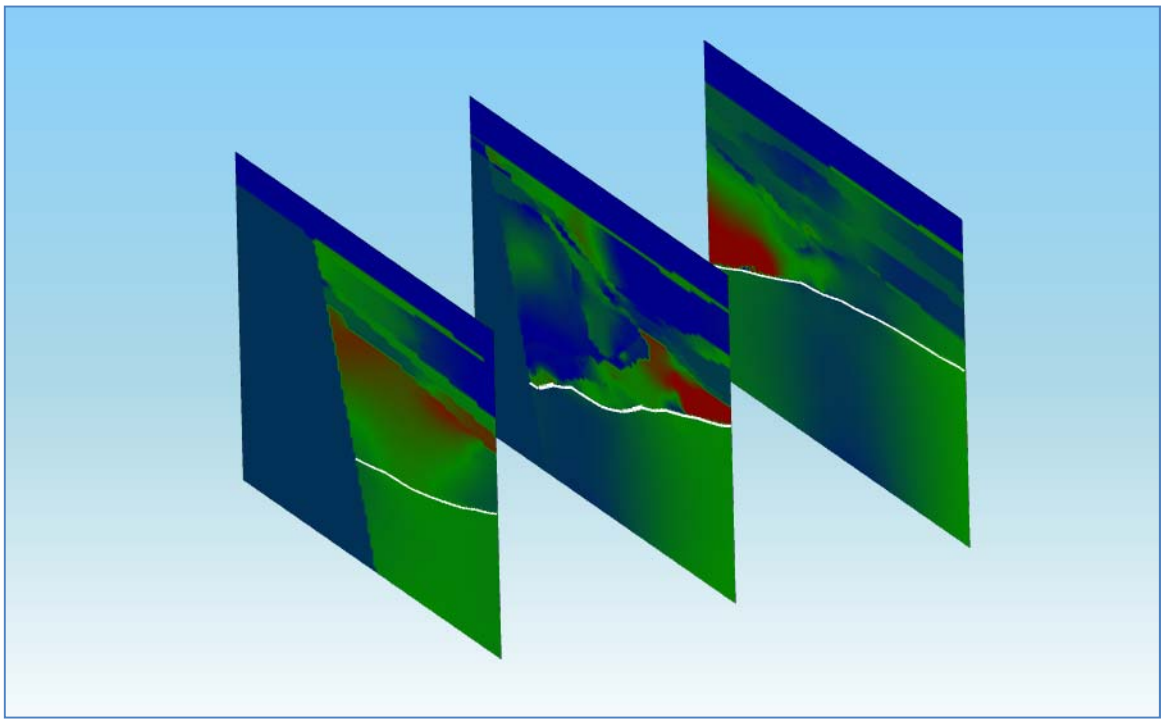


图 33：图片矢量化位于剖面的地质界线

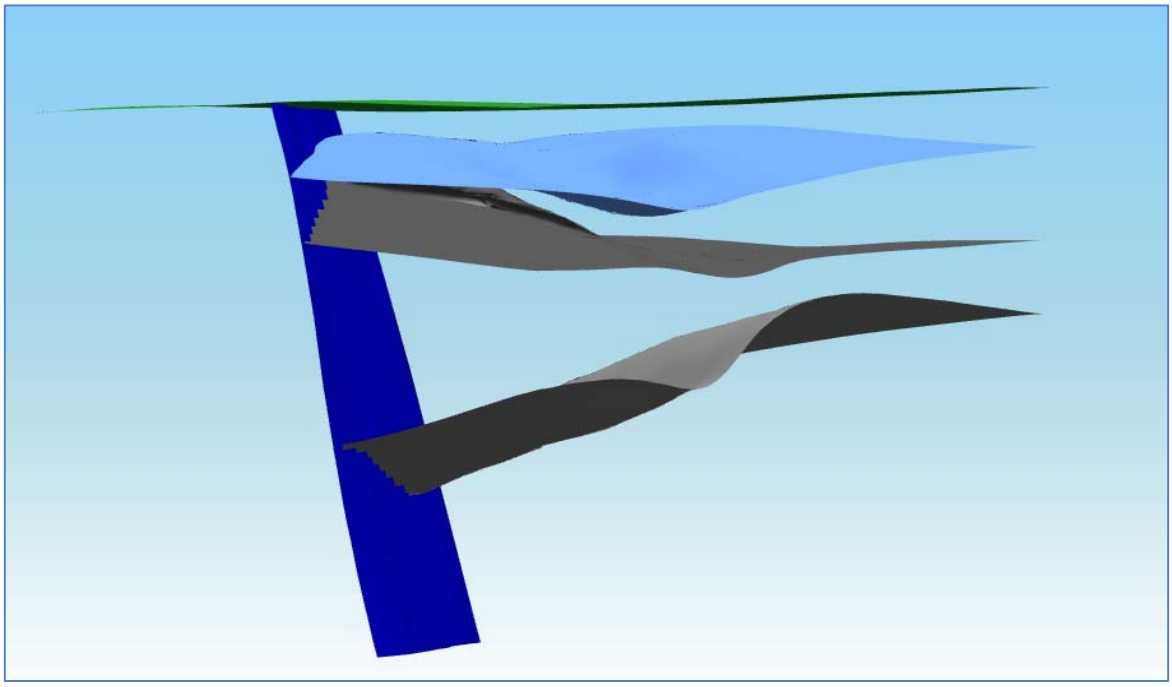


图 34：利用物探剖面构建的地质面模型形态

上述工作从三个物探剖面图片中提取出了地质面在三个剖面上的交线，显然，在综合趋势合理的前提下、完全通过或充分逼近这些交线的曲面即为所需要创建的地质面模型，建模过程可以采用命令操作、也可以采用单一界面建模流程，这里不详细介

绍。图 34 是最终的地质面模型形态，利用三张物探剖面图创建，没有使用任何勘探成果。

3.3.2. 物探多指标综合建模流程

这项工作也可以称为物探综合解译，其中的综合包含两层意思：一是多种物性指标按权重体现其作用，二是同时使用少量勘探（如果存在）。或者说，这种建模方式对应于物探为主、勘探为辅的情形。基本技术思路为：

1) 地质面空间形态（起伏特征）以物探成果为主，且不同物性指标占不同权重；
2) 地质面位置用勘探成果决定，视工作目的，创建的地质面可以充分接近勘探点（物探解译和误差分析时使用）、也可以 100%通过勘探点且其他部位起伏特征受物探成果控制（地质建模时采用）。

工作背景：在同一工程场址区布置了三条物探剖面和一个钻孔（钻孔不在物探剖面上），每条剖面采用电法和地震波法两种物探手段，以确定沉积层（2-1 层）底部界面的空间形态。

工作流程：

1) 先进行物探剖面解译，将两种物性数据结果（电阻率和纵波速）分别导入到 ItasCAD，用立方网进行插值处理，分别获得电法和地震波法的三个物探剖面（等同于此前的物探剖面成果）；
2) 利用两种方法的三个物探剖面成果，参照上述方式，分别构建出电法和地震波法解译出的覆盖层形态，一般情况下二者存在差别，且很可能都不通过钻孔揭露的覆盖层底板；
3) 启动“物探解译流程”，把这两个面合成一个综合面，该综合面满足：
    a. 空间形态是电法和地震波法解译面的平均（两种方法所占权重均为 50%），这一过程采用了 *ItasCAD* 特有的“模糊平行约束”技术，或者称为矢量约束技术；
    b. 综合面通过钻孔揭露的该沉积层底板。

这里仅介绍上面最后一步、即采用“物探解译流程”工作背景：在同一工程场址区布置了三条物探剖面和一个钻孔（钻孔不在物探剖面上），每条剖面采用电法和地震波法两种物探手段，以确定沉积层（2-1 层）底部界面的空间形态。

实现过程非常简捷，启动“物探解译流程”以后，即进入向导式操作，引导分步完成综合解译和建模。

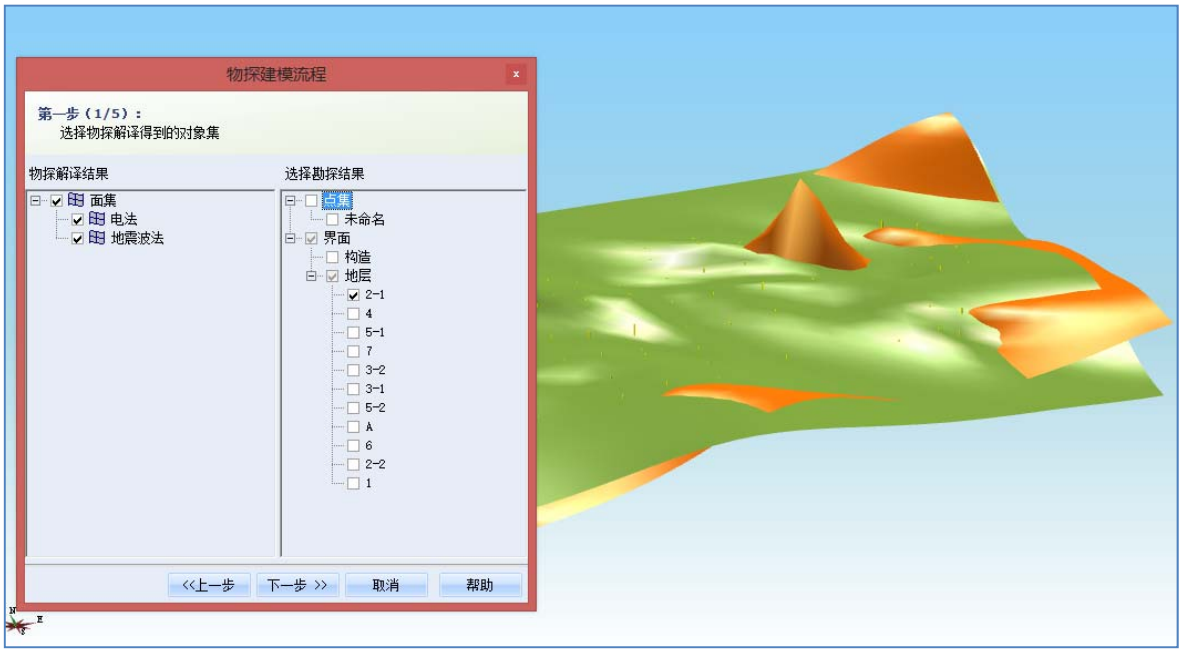


图 35： 导入基本资料的操作

图 35 是流程的第一步操作界面，当事先（在数据库）定义了该工程采用的物探方法以后，对话框左侧将列出所有物探方法列表，该工程仅两种方法，全部列于左侧，且全部勾选用于综合解译。对话框右侧是选择综合解译需要采用的勘探点，即钻孔揭露的 2-1 层位置（本工程仅一个钻孔揭露）。完成勾选以后三维视窗中显示所勾选的结果，即两个物性面和一个钻孔揭露的位置。

点击对话框中的下一步以后将进入图 36 左所示对话框，要求对两种物探方法分别赋不同的权重，本次各赋 50%（ItasCAD 支持两种确定权重的方式，即人工赋值和系统计算（后者适用于有勘探资料的情形，采用物性面和勘探点之间最小距离计算，这里不详细叙述），完成后进入下一步，即图 36 右所示的对话框，允许进行局部修正（定义区域和在区域内采用不同的权重，目的是体现空间变化性）。本次不进行局部修正，即对整个范围内采用相同权重，插值运算后即得形成一个新的综合面，满足所设定的全部条件（图 37）。

图 36： 定义各物性面的权重系数及区域权重系数

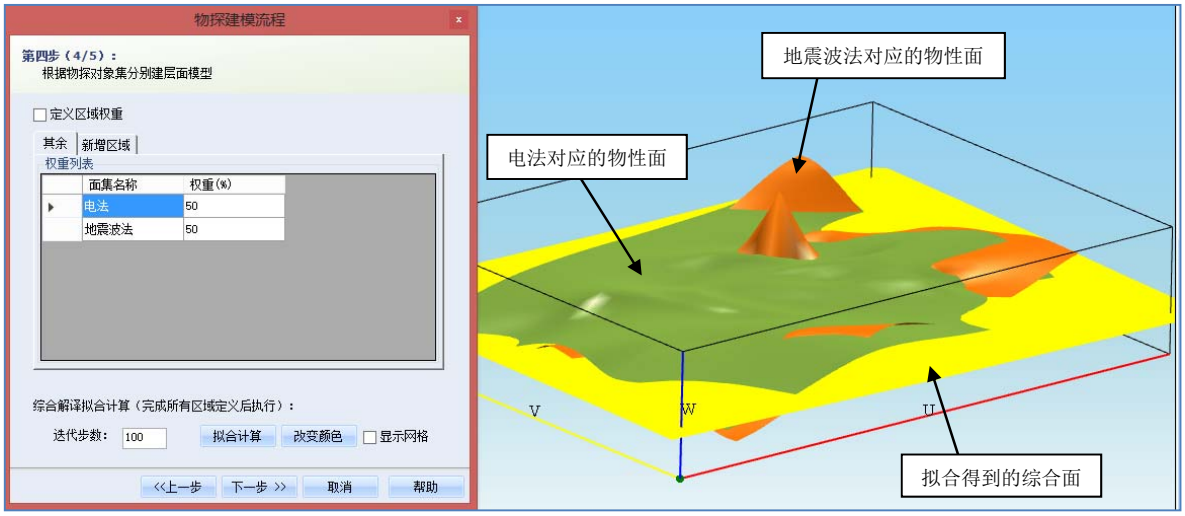


图 37：综合解译成果（右）

3.4 土层建模

3.4.1. 概述

地质三维建模技术起源于石油和矿山行业需要，几乎不顾及工民建行业的需求，虽然从技术上讲，世界上一些知名的软件如 *GoCAD* 可以实现土层建模，但在处理穿插、尖灭、透镜体时非常耗时，以至于严重影响实用价值。国内基于克里金插值理论的地质三维产品，在针对这类问题时则存在天然的短板，内在原因是难以体现复杂的约束条件以保证模型地质合理性。

ItasCAD 开发过程中特别专注了土层建模需要，提供了如下几种建模形式：

1) 一键建模：相当于自动建模，一键操作自动创建多个土层模型，适用于采用钻孔揭露的分层结果，满足现实工作中绝大部分情况下的工作需要；
2) 单一界面建模：对每个土层面逐一建模，针对一键建模难以解决的情形，如需要考虑地表测绘等除钻孔分层以外的资料；
3) 属性建模：针对钻孔人工分层困难、采用触探资料或土工试验结果进行分层的复杂情形，特别是存在多个透镜体嵌套时，很难进行准确的人工分层。

一键建模是 DSI 建模技术与行业需求结合的自然结果，该方法具有如下几个方面的突出优点：

1) 自动判断尖灭界线，尖灭位置可人工微调；
2) 自动生成透镜体（限于少量单一的透镜体）；
3) 杜绝薄层起伏土层面模型之间出现穿插；
4) 自动判断和标注不确定钻孔下层的不确定土层范围，方便后期人工编辑；
5) 生成实体模型，方便后续应用（比如特定土层的体积查询、开挖计算、虚拟钻孔生成、数据空间插值、材质贴图等）。

3.4.2. 一键建模工程实例

工程背景：某工程场址区地基为第四纪土层，在场区范围内布置了 60 余各深度不一的钻孔，所有钻孔参数和揭露的分层结果都录入到 ItasCAD 数据库内，通过数据库保存的信息、以及地形测绘资料创建场址区土层三维模型。

技术路线与工作流程：钻孔分层结果揭示土层层位关系相对单一，不存在复杂嵌套形式的透镜体，符合采用【一键建模】命令创建模型的条件。基本流程为：

1) 从数据库将所有钻孔和分层结果导出到 ItasCAD 图形；
2) 导入地形图（.dwg 格式），创建地形模型，作为一键建模时的重要参考对象（建模时自动遵循从新到老的原则，并以此判断尖灭情况。而地形是地质时代最新的界面）；
3) 在主菜单中选择【地质体】，点击其中的【一键建模】命令，按照所弹出的对话框操作，完成所选择土层的一次性建模。

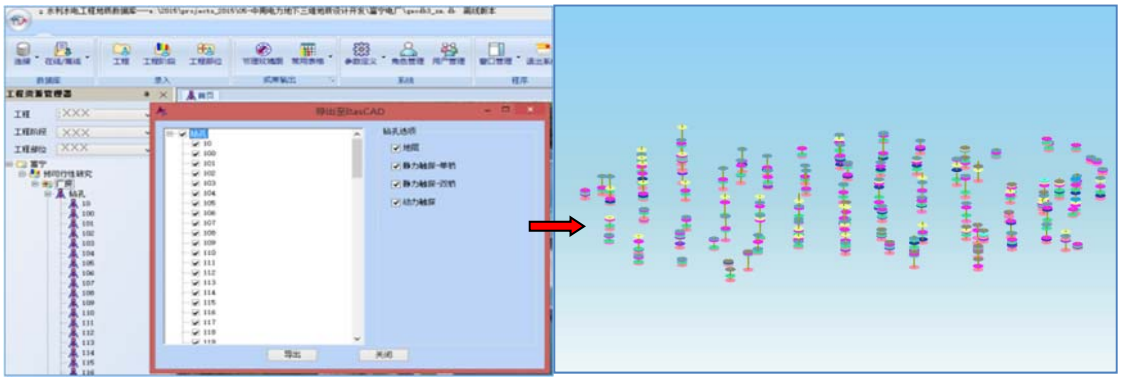


图 38： 从数据库中将钻孔数据导入到可视化界面

图 38 左是从数据库导出该工程钻孔和分层的操作对话框，右图是这些钻孔和分层结果的空间分布，相同颜色的小圆盘代表了相同的土层面。

图 39 系点击【一键建模】命令后弹出的对话框，其中一些命令的含义如下：

1) 激活计算：利用输入的数据（钻孔及其包含的层位、地形面）识别出现尖灭，并初步标识出尖灭边界（位于相邻尖灭孔和未尖灭孔之间，与未尖灭孔内层厚、孔间距相关）。注意数据库中已经定义了各层的层序，并记录了各层在每个钻孔内的厚度，是识别尖灭的基本依据；
2) 尖灭范围大小：人工微调尖灭线位置的参数，对所有尖灭现象采用统一准则，是每个未尖灭孔内厚度的倍数关系；
3) 网格精度控制：即所生成土层面上三角形网格的粗细，相同数值下的网格大小与模型范围有关，系相对大小。
4) 层位排序：默认采用数据库的定义，允许用户检查后修正，同时允许用户删除个别层位（如受其他因素控制需要更多的人工干预时，可单独使用单一界面流程创建）。

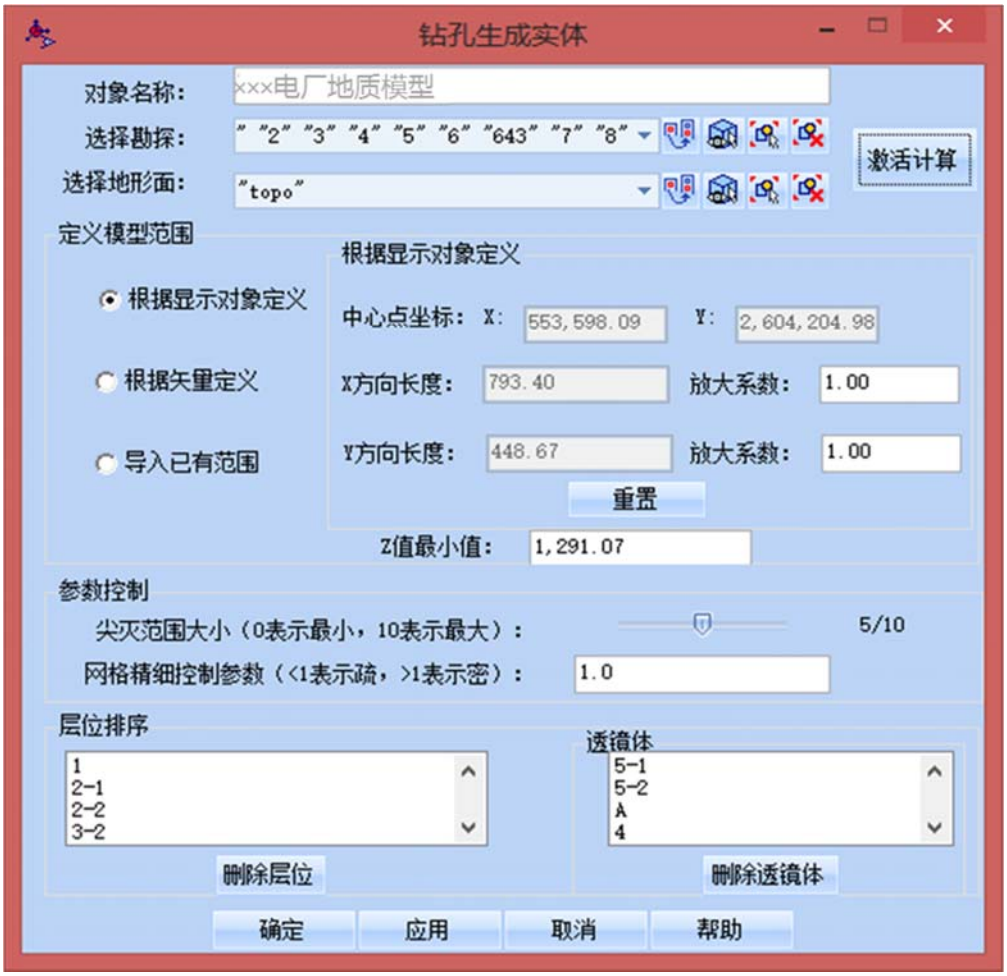


图 39：【一键建模】操作界面

图 40 是系统自动生成的模型（未显示地形），不同颜色代表的层位之间空间关系揭示了非常复杂的尖灭关系，极大程度减轻了人工工作量。并且，所生成的层面之间相互封闭，从而为后续应用如体积计算、乃至数值计算网格转换等奠定良好基础。

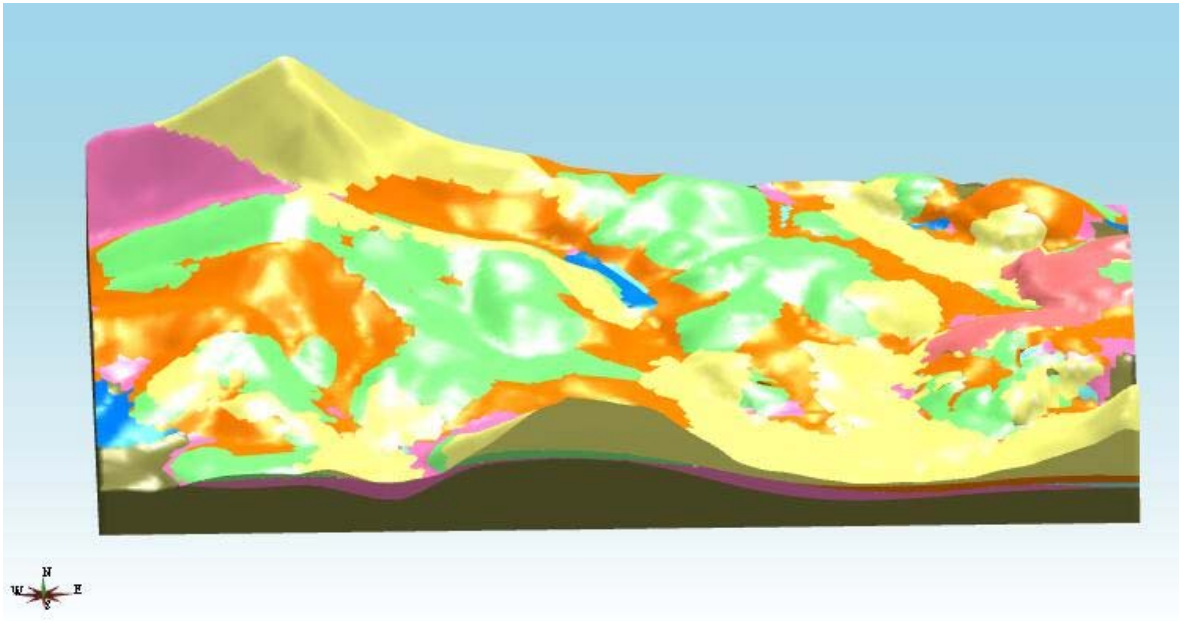


图 40 【一键建模】生成的含尖灭层和透镜体的封闭三维地质模型

3.4.3. 土层属性建模工程实例

静力触探、土工试验等手段获得的成果也是土层分层的重要依据，在土层沉积环境比较剧烈地循环变化时，土层重复尖灭形成大量透镜体，此时静探或土工试验结果往往成为土层（小层）划分的主要依据。这种分层方式采用的是数据，在采用地质三维技术以后，则可以直接利用数据创建土层的地质三维模型，即实现土层属性建模。不过，由于各地区土层特性差异，土层划分标准存在差别，一些情况下可能需要通过采用 C#语言编制脚本代码实现，对用户要求较高。当然，用户可以提供地区性规范以后，*ItasCAD* 研发团队可以编制定制性的脚本文件，快速有效地解决问题。

工程背景：某工程场址区布置的超过 100 个揭示了数量多、分布不连续的淤泥与粉土交互出现的土层结构，不仅难以对单一钻孔进行统一分层，并且，勉强完成分层以后难以建立彼此之间的正确层位关系。该工程大量采用了静力触探（双桥），为此，工程应用过程采用了属性建模方式，即直接用触探结果建模而无需进行层位划分（完成建模以后，*ItasCAD* 提供生成钻孔层位的功能）。

与上一工程相同地，该工程所有钻孔和静探结果均已入库，即储存于 *ItasCAD* 数据库。

工作流程：利用钻孔触探数据建模的工作流程如下：

1) 将所有钻孔和触探结果（q_c 和 f_s）输出到 ItasCAD；
2) 根据场地范围创建立方网，将触探值从钻孔赋到立方网相应网格内；

3) 在立方网内对这两个指标分别进行插值，获得整个空间上触探值分布；

4) 根据相关规范中对土层分区，通过运行脚本实现；

5) 将各分区边界转换成面，即为所需要创建的各土层面三维模型。

以下简要介绍上述流程中若干环节的结果。

图 41 表示了所创建的立方网，以及该立方网内所包含的钻孔，沿钻孔分布的彩色柱体是 f_s 值分布。

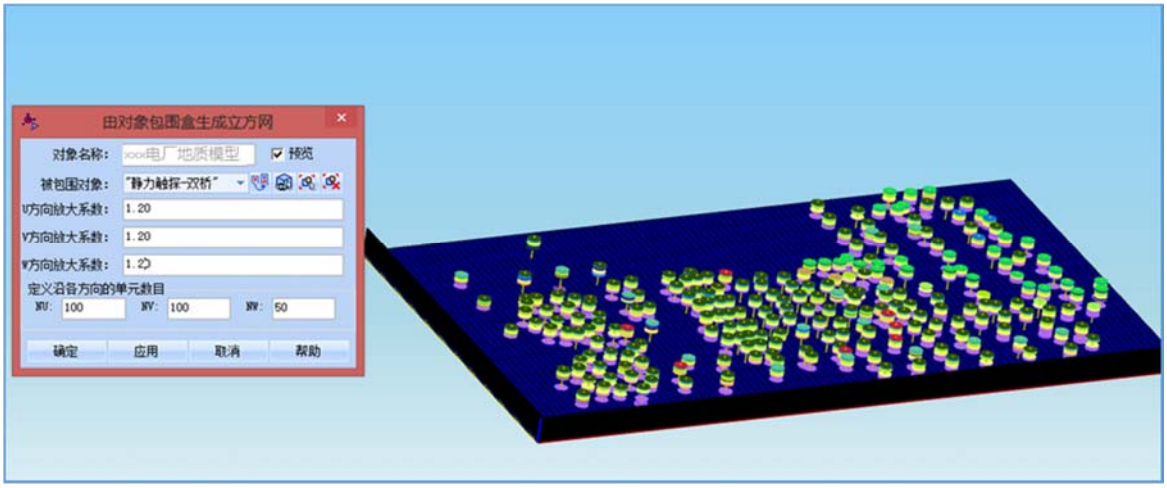


图 41：创建的立方网及其包围的钻孔孔内 f_s 值

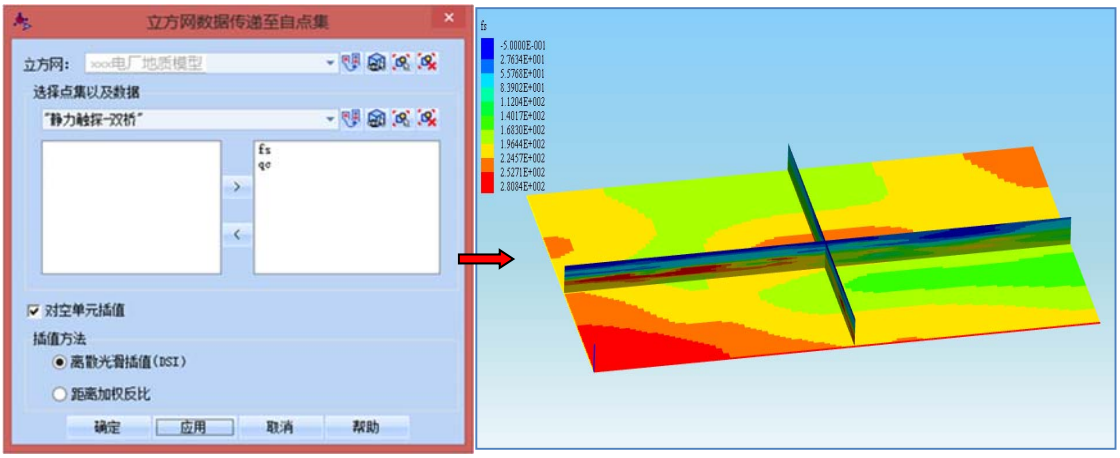


图 42：将静探数据映射到立方网后对 fs 分别插值处理后的云图

图 42 左表示将两个触探指标映射（赋值）到立方网的操作界面，此时立方网内少量单元具备了数值，并作为约束条件通过插值获得整个空间的分布，图 42 右表示对 f_s 插值后的结果，用三个相互垂直二维面上的云图显示空间分布基本特征。

完成上述插值以后，即可调用立方网对象【数据】菜单下的土层分类功能，该功能嵌入了依据双桥静力触探进行土层分类的专业方法和标准，其中划分标准考虑了地区差异，允许用户选择符合当地规范的标准。

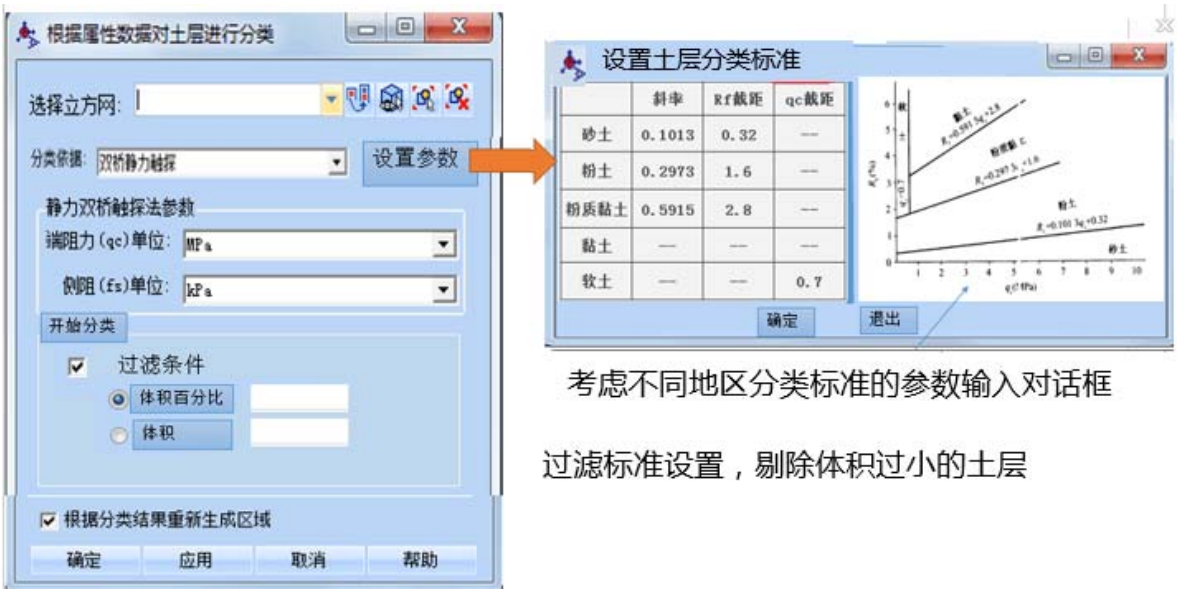


图 43： 土层双桥静探资料进行土层划分的操作界面

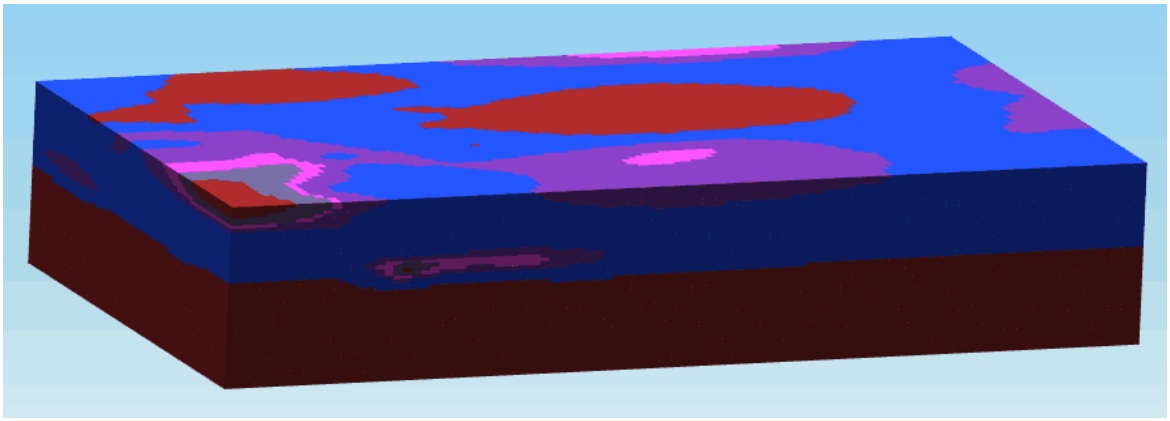


图 44： 土层双桥静探数据得到的土层面三维模型（隐藏地表）

完成插值运算以后即通过运算事先编制的脚本文件，该文件中体现了给定地区土层划分标准，最后的分层结果如图 44（三维视图），不同颜色表示了不同类型土层的划分结果和空间分布，其空间形态几乎不可能通过传统的人工作业方式（连剖面）所清晰描述，因此也不可能采用“从剖面到三维”的建模技术路线所实现，属性建模是目前技术能力下唯一有效和现实可行的工作途径。

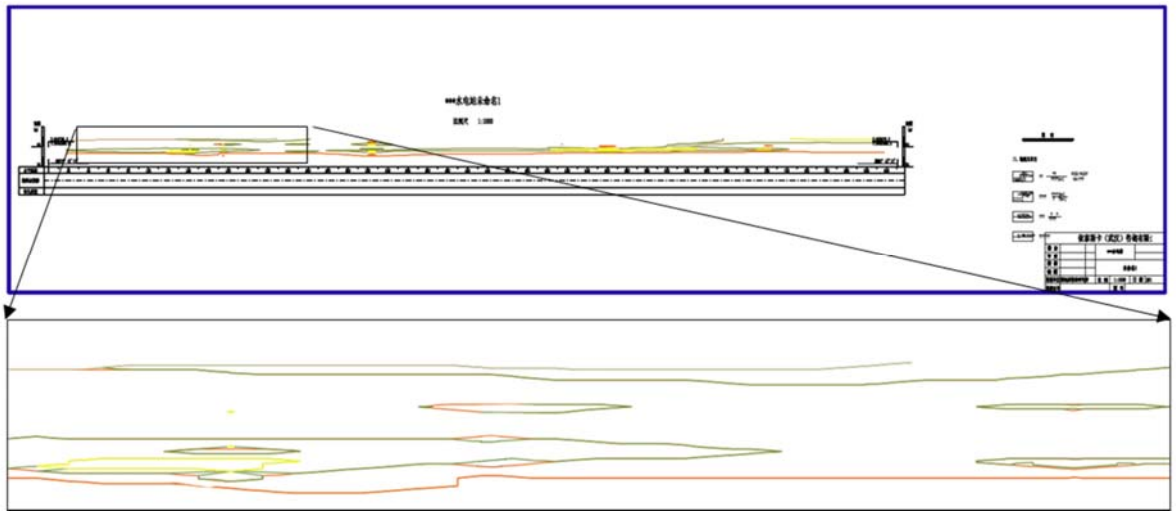


图 45： 土层双桥静探数据分层结果剖面图（上）和局部放大效果（下）

图 45 表示了从图 44 三维模型生成的纵剖面（上图，未添加标注，下图为局部放大），其空间分布极其复杂，包含多个嵌套的透镜体。

4 地质三维模型的工程应用

4.1 概述

含属性地质三维模型包含了工程和岩土工程分析评价所需要的绝大部分信息，因此具备开展工程分析评价的基本条件。其中一些应用受到行业所要求的分析方法和标准的影响，具有行业性，而另一部分则具有通用性。本章简要介绍列举这两个方面的应用案例，目的在于说明完成地质建模以后，除二维出图以外，如何开展工程分析。创建地质三维模型只是 *ItasCAD* 的中间成果，应用模型服务工程设计和决策才是 *ItasCAD* 开发目标，*ItasCAD v3.0* 具备的一些相对简单问题的分析和设计，本章列举四个案例：

1) 地应力查询：一般性应用，与行业无关。设计目的是输入经纬度即给出地应力分布参数的查询结果（不考虑地形影响，适用于一般场地或一定深度以下），其原理是地应力主要受到构造板块、构造活动性、岩性等几个方面因素，当模型中体现这几个方面因素以后，具备分析评价地应力分布参数的条件；
2) 地下工程岩体力学参数取值：一般性应用，采用 Hoek 取值方法，针对国内取值体系不考虑围压（埋深）影响、在海外工程实践中可能不被接受等两个方面的现实问题。岩性和埋深是地质三维模型基本信息，当包含岩体质量分级成果时，即具体采用 Hoek 取值方法的条件。
3) 地灾评估：遵循特定行业技术规范的规定，地质三维模型包含了地形、岩性、构造等基本信息，具备评价地灾风险的基本条件；
4) 场平设计：具有一定的行业性，快速计算挖填方平衡的场平标高，针对相对简单问题的典型辅助设计功能。

4.2 地应力查询

4.2.1. 技术路线

地应力查询是指给出某个指定部位的经纬度坐标以后，系统给出三个主应力（假设两个水平、一个铅直）的方位、以及它们的大小随深度线性变化的参数值（斜率 K 和截距 T）。这一功能采用了地质三维建模的一些技术，主要目的是利用现有资料和认识，为给定区域提供地应力状态的基本认识，适合于缺乏地应力测试资料情况下的前

期调查和评估，注意当地形条件比较复杂时，给出的结果主要代表了忽略地形起伏影响的基本应力场。

地应力往往指地壳中某个点的应力状态，空间多个点地应力分布则体现了地应力场基本特征。地应力的突出特点是对地质条件的依赖性，地质构造是地质条件的基本要素，也是影响地应力分布的关键。地质构造尺度变化非常大，大到地球板块边界、小到细小裂纹，不过，即便是后者，也足以对其附近的地应力状态造成影响。

地应力对地质条件的依赖性决定了现实中有可能利用地质条件分析判断岩体地应力状态，地质三维信息平台可以构建出一定范围内的地质模型，从理论上讲，也可以据此推测分析模型内地应力分布特征，其中的关键在于哪些地质因素可以显著影响地应力状态、以及如何以一种可靠的方式描述，体现分析结果的合理性。

全球性地质构造构成了地球板块的边界，而中国境内的区域性构造也将中国全境划分成若干次级板块/断块，这些次级版块之间地应力场虽然彼此联系，但总体呈现非连续性，因此，在分析区域性地应力场特征时，首先需要考虑板块的作用，板块之间的边界同样是地应力场分界的边界。

在明确构造板块边界的作用以后，如何定量地估计地应力方位和大小成为需要解决的另一个基本问题，此时有三个方面的资料可供应用：

1）地表运动的 GPS 监测成果，指示了现今条件下构造板块相互作用特征，运动位移矢量方向总体指示了最大主应力方向，而速度大小与构造挤压程度、即最大主应力大小密切相关。或者说，构造板块对地应力中最大主应力方位和大小的影响可以通过地表运动速度方位和大小体现，从而建立地应力和构造之间的定量性关系。

2）另一个可资应用的资料是测试和震源解译成果，奥地利组织开展的“世界地应力”研究获得了中国境内 800 多组地应力资料；

3）此外，朱焕春等人（1994）统计了 300 多组实测应力大小和岩石成因的关系，可以帮助根据岩性特征进一步分析地应力状态。

地应力查询系统的研发工作因此可以遵循如下的技术路线：

1）引用中国范围内构造板块的相关研究成果，用板块边界“划分”中国大陆区域范围，其中的每个区域对应现实中的板块；

2）将如下三个方面的信息植入系统后台，作为定量评价的依据：

a. 地表运动速度大小和方位；

b. 中国境内 800 余组地应力测试结果（含震源机制解译结果）；

c. 不同成因岩石中地应力大小随深度分布的统计结果。

3）假定三个主应力中两个近水平，一个近垂直，拟定地应力大小和方向的估计方法，基本技术路线为：

a. 最大水平主应力方向为地表运动方位和测试结果的加权平均值，从既往应用结果看，速度方位更具有代表性，使用时应赋更高的权重；

b. 三个主应力大小考虑速度大小、岩性的影响，为二者的加权平均。具体以岩性影响按照相关统计结果为基础，增加考虑地表运动速度的作用；

4）将上述方法编制成程序，在系统内按照大地构造板块为单元进行查询。即某个点的地应力状态查询所依赖的“种子”仅限制于其所在板块内，查询时采用距离反比平方考虑种子点相对查询点位置的影响程度。

4.2.2. 实现过程

ItasCAD v3.0 地应力查询功能的研发由数据整理和计算机实现两部分构成。第一项工作的内容主要是收集相关资料，包括中国地区范围内的板块纲要图、板块运动速度图、和世界范围内地应力测试成果，数据采集方式包括已有数据表格、和基于图片的电子化（如板块运动速度），并最终汇总数据成果以类似数据库的方式存储于系统后台供前端调用，这一环节属于计算机实现阶段的工作内容，主要是将前述经验公式和处理手段程序化，此处不作过多论述。

显然地，地应力查询功能实现的难点不在于程序开发环节，困难更多体现在将中国境内地应力特性在经验认识的基础上进行具体化，即最终以公式理论及程序的方式来对地应力特征进行表达，前一小节重点就地应力经验认识的理论化进行了论述，此外，工作中遇到的另一现实问题是如何建立地应力查询数据库。简单来说，在地应力数据库建设过程中，除需对多样化数据来源进行电子化外，还涉及到数据信息的匹配或统一问题。

如前所述，地应力数据库原始数据来源包括中国境内板块纲要图、板块运动速度图和世界地应力图和相应的地应力测试成果，数据来源渠道的差异导致数据间存在坐标系不一致问题，其中坐标系特别指地质成果表达时所采用的地理坐标系，如球面坐标或平面坐标系统，因此，坐标系统归一化即成为源数据采集阶段的重点工作环节，

具体解决方式是先采用地理信息系统（GIS）对源数据特别是图片资料进行坐标系统一化，由此形成数据采集和入库的基本依据。即便如此，应意识到原始资料之间存在精度差异，上述系统归一化处理可能进一步导致系统误差增大，视数据来源的丰富程度和可靠性，数据库建设及优化成为后续地应力查询功能的工作内容之一。

图 46 给出了地应力查询功能的窗口界面，操作层面相对简单，不作进一步叙述。

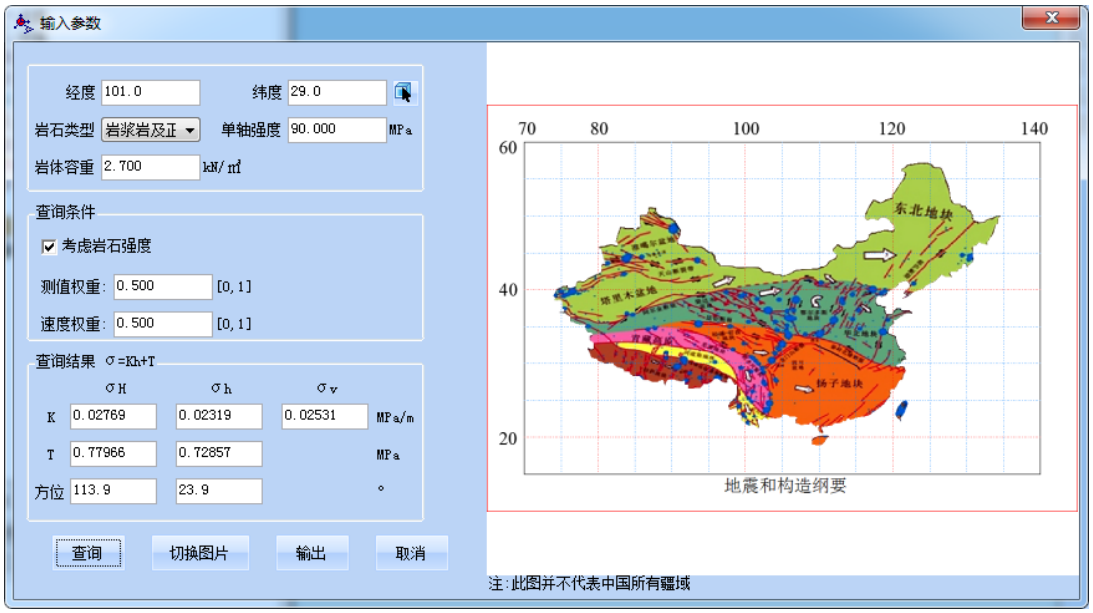


图 46：地应力查询窗口界面

4.3 Hoek 方法参数取值

4.3.1. 方法与原理

岩体力学参数取值是 *ItasCAD v3.0* 的专业功能之一，也是 *ItasCAD v3.0* 岩体质量分级功能的后续应用，即转化为岩体力学参数值。与国内传统取值方法相比，Hoek 方法的优势之一在于考虑了围压（埋深）的影响，因而在地下工程、尤其是埋深较大时更合理一些。*ItasCAD v3.0* 提供了多种参数取值方法，这里仅介绍其中 Hoek 方法及其应用。

Hoek 取值方法原理和过程已经在大量文献中介绍，最终可以给出两组参数值，分别基于 Hoek—Brown 强度准则和传统的摩尔—库伦强度准则，这里以后者为例，即介绍从地质三维模型中计算任何一处岩体、在考虑围压影响后的 c 和 f 取值结果（还可以获得包括弹模 *E*、泊松比 v）。相关计算公式罗列如下：

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci}\left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^a \quad (1)$$

式中，σ1、σ3 分别为破坏时的最大、最小有效应力；σci 为完整岩块的单轴抗压强度；mb、s、a 为 HB 准则参数，分别服从下式定义：

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (2)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right) \quad (4)$$

其中，D 称为损伤因子或扰动系数。GSI 可以通过 RMR 值换算。根据上述关系，变形参数（*E*、v）、和摩尔—库伦强度参数（c′、φ′）换算公式如下：

$$E_{\mathrm{rm}}(\mathrm{MPa}) = 100,000\left(\frac{1 - D/2}{1 + \mathrm{e}^{((75+25D-\mathrm{GSI})/11)}}\right) \quad (5)$$

$$v = 0.32 - 0.0015GSI \quad (6)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}\left[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}\right](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1 + \left(6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}\right)/\left((1+a)(2+a)\right)}} \quad (7)$$

$$\phi' = \sin^{-1}\left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}\right] \quad (8)$$

为简化应用，系统中默认参数 D = 0。

上述参数取值方法依赖的资料包括岩石单轴抗压强度、岩性决定的材质指标 mi、以及岩体质量分级结果 RMR。其中各种岩性及不同风化程度的强度指标可以保存在数据库，取值是调用，也可以采用人工输入赋值的形式。地质模型中已经包含岩性，在没有试验结果赋值时，mi 取值采用 Hoek 建议值。而 RMR 是 ItasCAD v3.0 内置的岩体质量分级指标之一，如何获得分级结果已经在前面叙述。

需要说明的是，ItasCAD v3.0 提供的 Hoek 取值方法和结果与 RocLab 相同，差别在于工作方式。ItasCAD v3.0 给出各参数值在三维空间的分布，具有两个方面的优势：

1) 直接映射到建筑物如隧道，获得沿隧道轴线不同部位岩体力学参数，为隧道围岩稳定分析评价提供关键性指标值；
2) 体现了岩体力学参数取值的空间变化性，可以实现一些高端分析如参数取值概率分析及其决定的岩体破坏概率，服务概率设计。

4.3.2. 应用过程

在创建地质三维模型、完成沿钻孔或平硐 RMR 岩体质量分级以后，依据 Hoek 方法的取值过程非常简单，图 47 给出了取值操作菜单和工作流程。

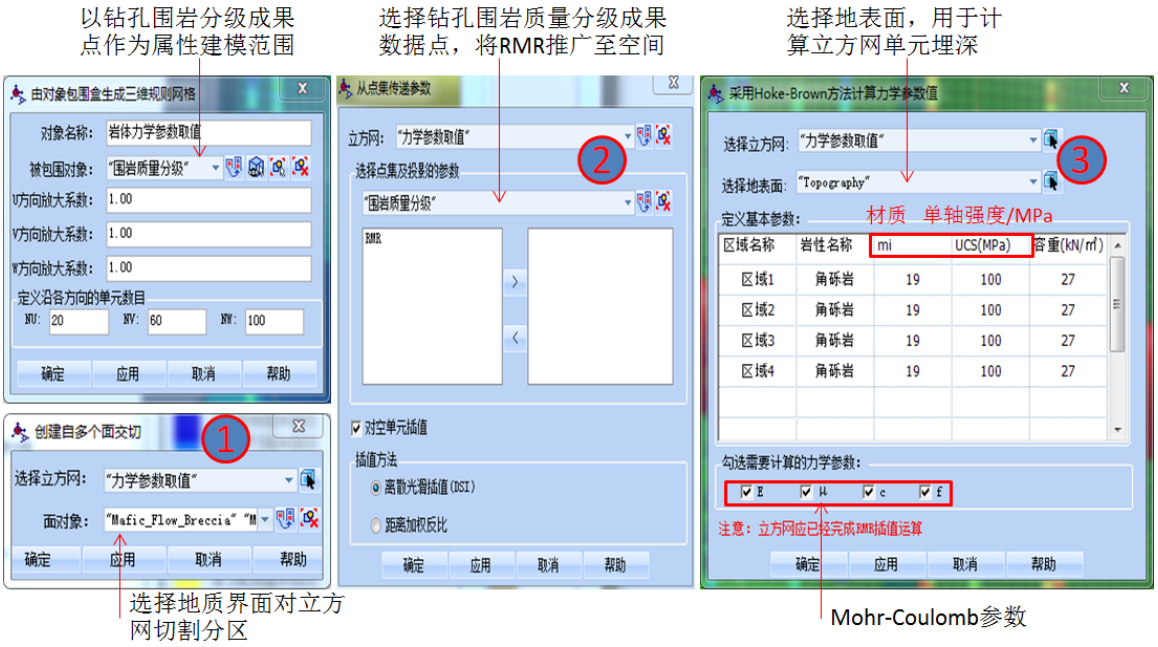


图 47：力学参数取值功能菜单、操作流程

图 47 所示的应用流程归纳如下：

1）创建立方网（左上图）：立方网创建的控制性参数包括建模范围和网格调整，建模范围确定了立方网位置和空间范围，而网格大小显然决定了插值计算精度，这两个参数通常参考插值数据点的空间范围和数据点间距进行综合确定，以取得计算效率和精度间达到平衡为原则。本例中数据参照即选择采用隧洞范围内沿钻孔开展的岩体分级成果（点集对象）；

2）地质分区（左下图）：引入业已形成的地质界面对立方网进行切割，形成地质单元体，后续的插值处理在地质单元内完成；

3）岩体分级空间插值（中图）：选择立方网和分区，导入岩体分级成果，选择分级属性即 RMR 进行 DSI 插值运算，得到岩体分级在整个立方网空间内的分布状态，由此形成包含分级属性的节点性属性模型；

4）力学参数取值（右图）：采用 ItasCAD 内置的 Hoek-Brown 方法进行参数取值运算，此时考虑了每个单元埋深的影响。本例中岩性为火山角砾岩，mi、UCS 经验取值分别为 19 和 100MPa。

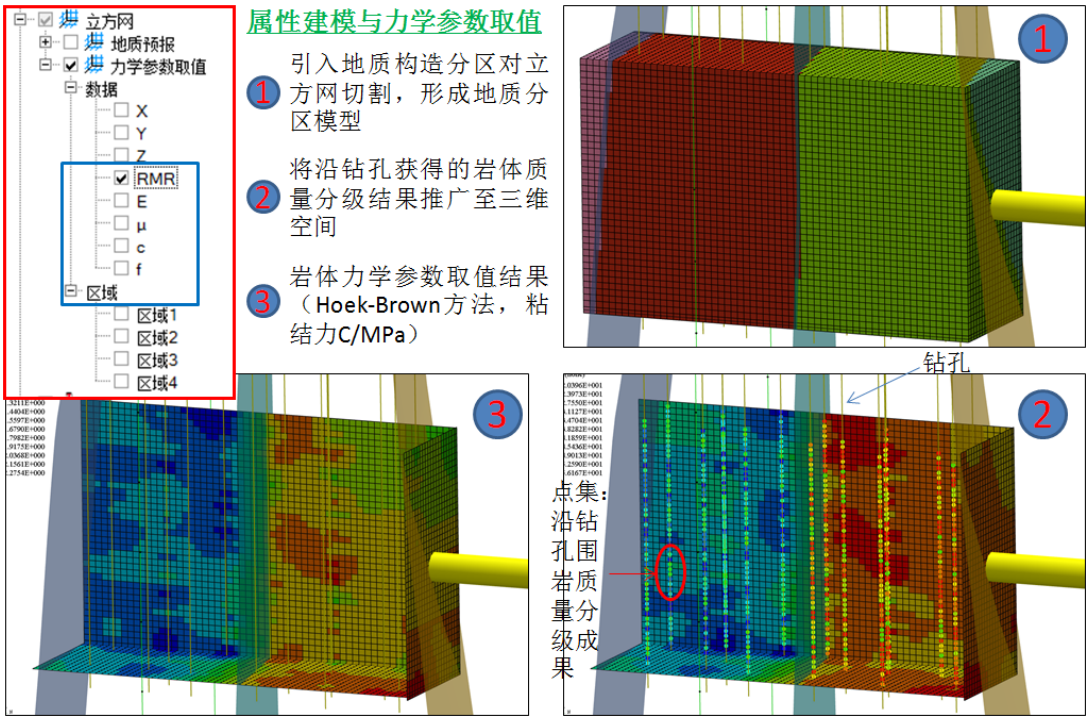


图 48：RMR 插值处理与参数取值操作结果

图 48 给出了 RMR 插值处理与力学参数取值操作的运算结果，其中右上图为地质分区，右下为从钻孔导入 RMR 插值后的空间分布，左下为获得的 C 值空间分布，即完成参数取值。此时 C 值空间变化性得到充分体现，用户可以根据需要进行不同形式的分析处理：

1) 深化研究：研究 C 值统计分布特征和给定 C 值大小（如平均）对应的取值概率；

2) 简化处理：用指定值替代给定范围（地质分区）内全部取值结果，即一个区域给出一组固定值，与目前的日常工作习惯保持一致。

4.4 地灾评估

4.4.1. 方法与依据

在 *ItasCAD v3.0* 含属性模型基础上进行地灾评估采用两种工作方式，其一是利用现场测绘获得的基本资料和现场判断，在地质三维模型表示出人工判断结果，侧重于展示、数据管理、和信息查询；其二是在创建地质三维模型以后，直接利用地质模型包含的信息、采用相关规范的地灾评价方法和划分标准，自动评估地表不同部位的地灾风险程度，这里介绍第二种方式的应用案例。

相比较而言，第一种评估方法依赖现场地质调查和直观评估，第二种方法比较适合于地质三维技术普遍应用、服务早期工作阶段的情形，事先利用已有的区域资料创建地质三维模型，在模型上完成地灾评估，帮助甄别重点区域，指导后续的现场工作。

第二种评估方法的依据是《地质灾害危险性评估规范》，与一些建立在数学理论基础上的因素计分方法相比，规范方法的优点是专业性强，通过考察地形地貌、地层岩性、构造、水文地质、以及人类活动等因素评估地灾风险程度。不过，规范方法也存在不足，就是定量性相对较差，给计算机程序化过程造成困难。

该规范方法的另一个特点是主要适用于建筑行业，重点针对丘陵地区，具体表现为规范中地形复杂程度划分标准相对较低，比如坡角超过 25 度、岩质条件坡高达到 30m 以上或覆盖层中坡高超过 15 米时，属于复杂地形条件，直接影响到地灾易发程度评价结果。对于山区而言，这些标准显得似乎过于严格，评估结果会明显高估地灾风险程度。为此，在系统开发过程中采取了如下策略：

1）采用规范方法的技术路线，即按照各因素对地质复杂程度分级评估的方式计算该给定范围内的地灾易发性指标值，作为地灾风险程度评估的依据；

2）对具体各指标“地质复杂程度”分级标准采用“可调”方式，即默认使用规范推荐的标准，但允许用户修改，从而实现从丘陵地区向其他地形地貌条件的推广。

规范方法考察的因素和建议的取值标准（地质环境复杂程度划分等级和标准）如下表所示。

表 1：地灾评估规范方法考察的因素和分级标准

判定因素			地质环境复杂程度[a]		
			复杂	中等复杂	简单
地形地貌	地形坡角°		＞25	25～10	＜10
	自然陡坡高度 m	岩坡	＞30	30～15	＜15
		土坡	＞15	15～8	＜8
地层岩性	土层厚度 m		＞15	15～8	＜8
	岩层或土层差异		多元组合	二元组合	岩性单一
岩体结构与地质构造	岩体结构类型		碎裂、散体结构	薄～厚层状结构	巨厚层状～整体状结构
	断裂构造		可见断层；裂隙超过 4 组，间距小于 0.3m	偶见断层或破碎带，有 3～4 组裂隙，间距多为 0.3～1.0m	无断层，有 0～2 组裂隙，间距大于 1.0m
	贯通性结构面与斜（边）坡关系		倾角＞15° 且外倾临空	倾角 15～8° 且外倾临空、倾角＞15° 的切向临空、倾角＞15° 的顺向不临空	其他
	地震基本烈度[b]		＞Ⅵ	Ⅵ	＜Ⅵ
水文及水文地质	地表水对岩土体的影响		大	中等	小
	地下水对岩土体的影响		大	中等	小
不良地质现象占用地面积比例%			＞30	30～15	＜15
破环地质环境的人类活动[d]	边坡高度[e] m	土质边坡	＞15	15～8	＜8
		岩质边坡	＞30	30～10	＜10
	洞顶围岩厚度与洞跨之比		＜1	1～3	＞3
	采空区占用地面积比例 %		＞30	30～10	＜10

和实际工作流程相同地，程序实现地灾评估时根据勘察阶段精度要求，将被评估区域分别按照对应的范围大小（如 200×200m）将待评估区地形进行分区，然后对每个区评估上述参数取值结果，再计算地质灾害易发程度指数值计算，计算公式为：

$$Y = 0.618D + 0.382R \qquad (9)$$

其中： r 为地质灾害易发程度指数；

D 为地质环境复杂程度指数，基本分值在地质环境复杂时取 0.6，中等复杂时取 0.4，简单是取 0.2，且需结合分量指标进行综合计算。基本取值按照表 1 进行，具体和因素重要程度、不同因素取值结果相关，详细内容可参阅相应规范的说明。

式中的 R 系降水量指数，按下表取值：

表 2：降水量指数取值表

多年平均最大日降水量 a mm	多年年平均降水量 b mm			
	≥1500	1000	700	≤400
≥120	1.00	0.90	0.85	0.80
95	0.90	0.85	0.80	0.70
70	0.85	0.80	0.70	0.60
≤45	0.80	0.70	0.60	0.50

a 多年最大日平均降水量超过 120mm 时按 120mm 计，低于 45mm 时按 45mm 计；多年年平均降水量超过 1500mm 时按 1500mm 计，低于 400mm 时按 400mm 计。

b 多年年平均降水量和多年最大日平均降水量均大时取大值，多年年平均降水量和多年最大日平均降水量均小时取小值。

4.4.2. 技术路线与过程

采用地质三维模型进行地灾评估的技术路线与现场工作比较相似，首先对需要评估范围的地形面模型划分为若干虚拟的正方形（或长方形）区域，然后对每个区域进行参数分析包括地形地貌、地层岩性、岩体结构与地质构造等，继而组合参数分析结果得到地灾易发性指标指导现实工程判断。其中的区域划分环节采用如下方式处理计算机实现与规范方法的衔接：

1）根据规范要求，地形图中分区面积为0.01m²（地形图上的面积），实际调查区域与地形图比例尺有关。规范要求的地形图比例尺为 1/500、1/5000 和 1/10000，对应的实际面积分别为 2500m²、250000m²、1000000m²。因此，对于矩形分区而言，在三维模型中待评价区域局部坐标系下的 U 和 V 轴方向区域边长对应为 50m、500m 和 1000m，程序默认 50m；

2）指定地灾分析对象即地形面内分区一旦形成，程序会自动在对象中添加虚拟分区是否已形成的识别码，在后续任意阶段指定区域评估时，若虚拟地形分区已操作，则直接引用即可，即无需再执行区域分区操作。

图 49：地灾评估规范分析对话框界面

图 49 给出了针对采用规范方法进行地灾评估工作所实现的计算机程序功能界面，从操作层面的考虑，基本应用流程为：

1）首选选择某一地形面作为地灾评估工作开展的对象；

2）评估区域：采用前述方法对地形面进行区域分区计算，为后续参数指标分析提供空间位置依据；

3）界面中功能区“地质复杂程度计算”栏用于计算获得式（2）中地质复杂程序指数D，指数计算所需的数据采用两种输入方式，其中地形地貌、地层岩性、结构与构造、不良地质现象、人类活动影响这几类判定因素的计算数据需用户

鼠标拾取几何对象进行定义，而地震烈度、水文地质两个指标在弹出窗口中使用键盘输入即可。特别地，主要数据输入的使用意图为：

- 导入覆盖层：指定覆盖层底板界面，用于计算表 1 中地层岩性相关参数，包括土层厚度和岩层或土层差异；
- 导入贯通性界面：指定重点地质界面（包括断裂、层面等），作为判断因素“岩体结构与地质构造”中“断裂构造”与“贯通性结构面与斜坡的关系”这两个指标的计算，需注意的是，同因素下指标“岩体结构类型”则直接读取地质点来源于数据库中的物质结构属性，该属性不以图形方式进行表达。

4）功能区“评估区域”提供对整个评估范围内降水条件的定义接口，用于计算式（2）中降水量指标 R。

如前所述，规范方法的优点是专业性强，通过综合考察地表和地下多种地质条件判定因素来评估地灾风险程度，不过，规范方法与一些建立在数学理论基础上的因素计分方法相比，存在不足是定量性相对较差，给计算机程序化过程造成困难。参考表 1，地灾评估规范方法所需量化的指标包括两类即判定因素和地质环境复杂程度，需引入一定的假定、采用数学手段开展计算分析，实施过程遵循如下规定：

1）区域复杂程度主要控制性因素或指标，包括自然陡坡高度、贯通性结构面与斜坡关系、不良地质现象占用地面积比例、破坏地质环境的人类活动，共计 4 项；

2）复杂程度次要控制性因素或指标：地形坡角、土层厚度、岩层或土层差异、岩体结构类型、断裂构造、地震烈度、地表水影响、地下水影响、厚跨比、采空区占用地面积比，共计 10 项；

3）先计算区域内主要控制性因素或指标达到“复杂”或“中等”标准的数量，如共有 N1 个满足“复杂”标准的指标分量、及其 N2 次满足“中等”标准的指标分量，参考第 1）条，应有 0≤N1（或 N2）≤4。利用主要指标进行区域复杂等级判定时，区域复杂程度取这些分量指标的最不利结果，如任一分量满足“复杂”标准，则区域复杂程度也定义为复杂；

4）再判断区域内次要控制性因素或指标达到“复杂”或“中等”标准的数量，若 10 个分量指标中有 5 个（或以上）能同时满足较高复杂程度标准时，利用次要

指标判断得到的区域地质环境复杂程度即为该等级，假设满足“复杂”和“中等”标准的分量数分别为 N1’、N2’，显然有 0≤N1’（或 N2’）≤10；

5）区域复杂程度等级最终依据 3）、4）分析结果综合判断，取最不利复杂等级，且统计达到某标准的指标总数，即“复杂”标准重复次数 A = N1 + N1’、中等等级重复次数 B = N2 + N2’。

6）地灾易发性指标计算：

- 区域地质环境复杂程度为复杂：$D = 0.6 + \gamma_1 \cdot A$
- 区域地质环境复杂程度为中等：$D = 0.4 + \gamma_2 \cdot A + \gamma_3 \cdot B$
- 区域地质环境复杂程度为简单：$D = 0.2 + \gamma_2 \cdot A + \gamma_3 \cdot B$

其中，γ_1、γ_2、γ_3 为计算系数，由规范建议表格插值计算获得。

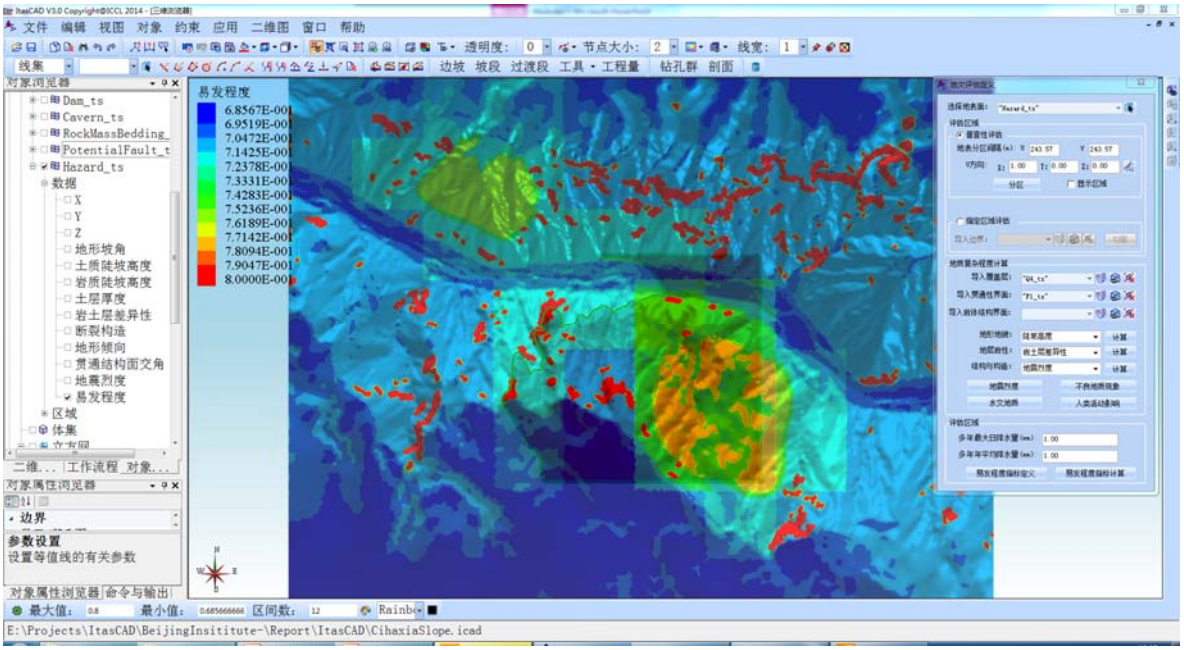


图 50：地灾评估规范方法应用案例

图 50 为采用规范方法进行地灾评估应用案例，案例背景为河谷岸坡，地形变化大且部分地区地表为覆盖层。图中的颜色表示了易发指数，红色表示最高风险，黄色次之，蓝色为无风险。虽然这一评估结果系程序化结果，但还是比较好地体现了地形地质条件变化的影响，可以为地灾调查提供指导性意见。

4.5 场平标高设计

在电力、工民建等行业完成场地规划布置以后即可确定场地边界，将该场地边界

导入到 *ItasCAD v3.0* 地质模型以后，调整场地边界高程，即可以获得开挖区体积和填方区体积，系统内置二者平衡的约束条件以后，即可获得满足要求的场平标高，完成场平标高设计。

需要说明的是，场平标高设计时涉及到开挖边坡设计，虽然研发团队于 2013 年即开始了边坡设计功能的开发，完成了多种类型边坡轮廓形态参数化设计、不同坡段参数变化时自动过渡的漂移算法等研发工作，但尚未开展与地质条件相结合、自动选择坡角的相关工作，这里不打算详细介绍边坡设计过程。也正是这一原因，场地标高设计功能可以在 *ItasCAD v3.0* 后续小版本如 *v3.2* 中发布。

图 51：场平标高设计依赖的基本资料

图 51 表示了某电力工程厂区场地标高设计依赖的主要基本资料，即地表面模型和场区边界轮廓形态，在此基础上的设计过程如下：

1） 以初步估计的场地标高为出发点，按照边坡轮廓设计的需要进行必要的连接和打断编辑；

2） 按照挖方区地质条件（边坡结构、岩性和风化程度）选择合理的边坡参数（梯段坡角、坡高、马道宽等）进行边坡轮廓形态设计，直到完全伸出地表；

3） 与之相似地，按照相关标准进行填方边坡轮廓形态设计，直到完全延伸到地表以下；

4） 给定若干场地高程，分别进行挖方区和填方区体积计算（考虑松散系数）。然后采用二分法求得挖填方平衡对应的场平，并移动设计的边坡底板到设计高程位置；

5） 采用地形对边坡轮廓进行交切，删除多余部分。

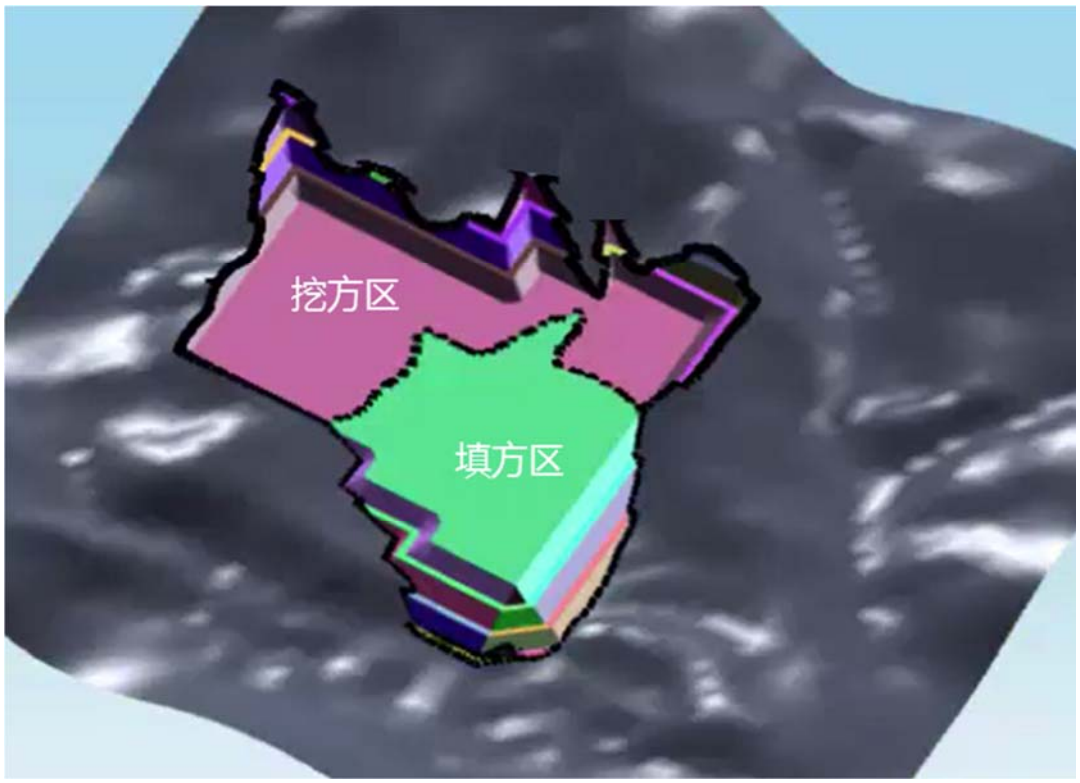


图 52：场平标高设计结果

图 52 表示了采用图 51 所示资料完成的场平设计效果，其关键在于边坡轮廓快速设计，这里不深入讨论。

5 后 记

ItasCAD 是一款大型平台软件，*ItasCAD v3.0* 是该产品在历经 12 年研发后的首次商业发行，又一次验证了 “厚积薄发” 是高端产品研发的必然经历。虽然研发团队尽力将每一处做到最好，但 12 年研发历程中在技术发展、市场需求等方面的变化，仍然给研发团队造成很大压力，也是不断向前的动力。我们期待着 *ItasCAD v3.0* 的优势功能能够帮助您取得优秀成果，更期待把您的需求不吝惜地留给我们。

ItasCAD v3.0 可以很大程度上满足岩土体工程勘察工作在内业整理环节的需要，在实践中推广应用以后，预计会面临如下几个方面的需求：

1) 跨专业协同：即与其他平台的接口，*ItasCAD v3.0* 提供了与一些平台如 *Catia*、*MicroStation*、*AutoCAD* 的接口，还会根据需要提供和其他平台接口。不过，这些平台自身均专注于确定性对象几何形态绘制，对地质体不确定性和数据等方面的兼容性存在一定不足，跨平台的终极解决方案应该不是文件传输，而是数据共享；
2) 校审流程管理：即日常校核、审查、审定的会签流程和质量保障，除强化管理以外，希望能够从技术角度强化质量保障，保证审查和发布以后模型的权威性而不被修改（恶意性除外）；
3) 丰富应用功能：创建含属性地质三维模型是 ItasCAD 开发的阶段性成果，服务工程分析和工程设计才是终极目标，嵌入 Itasca 数值分析功能和实现与 Itasca 三维数值模拟软件的双向接口，是未来一个阶段的主要工作方向。

ItasCAD v3.0 的发布标志着一个阶段的结束，也是实现服务工程分析、设计目标的新开始。为了这一目标，*ItasCAD* 研发团队早已悄悄出发，再次踏上厚积薄发的旅程。

Itasca 公司简介

Itasca 是岩体工程领域世界著名高科技机构，以解决岩体工程实践过程中的复杂问题为主要服务方向，并围绕这一目标开展基础研究和技术开发。公司总部位于美国明尼苏达州，目前在全球 13 个国家设有 17 家成员公司。

Itasca 专家对岩体工程学科发展和工程实践作出了突出贡献，主要体现在：

1) 岩石力学学科和国际岩石力学学会创始人之一；
2) 历任国际岩石力学学会主席 1 届、副主席 2 届；
3) 在英国、美国、加拿大、瑞典等 4 个国家拥有 6 席院士席位；
4) 1 人次获岩石力学最高奖 Muller 奖，多人次获 Rocha 奖。

Itasca 还发明、开发了一系列在国际范围内普遍应用的技术、设备、和计算机软件，主要包括：

1) 岩石试验伺服加压技术和岩石伺服试验机（MTS）；
2) 水压致裂地应力测试技术；
3) 全球范围内应用范围最广、用户最多的岩石力学数值分析软件 FLAC、FLAC3D、UDEC、3DEC、PFC2D、PFC3D 等；
4) 其他专业性计算机软件如三维可视化平台软件 ItasCAD、矿山水文地质分析软件 *MineDW*、世界上唯一可独立使用的微震和声发射解译软件 *InSite*；
5) 微震和声发射系列设备，针对高精度科研和科研型实践需要。

Itasca（武汉）咨询有限公司是 Itasca 集团在华独资控股机构，2004 年在武汉注册成立， 由 Itasca 委派海外华人专家团队领衔组建，从事岩体工程领域的科研和技术开发。理论和实践结合、实用型技术手段开发成为该团队的鲜明技术特色。Itasca（武汉）咨询有限公司相继承担了多座国家重点工程数十项专题攻关研究，并为中电建、中能建、国土资源、交通等行业十余家国家级设计院提供地质三维技术及行业定制功能的开发服务，为 *ItasCAD* 研发奠定了实践基础。