局限性，剖面图在第三维方向上只能作有限外推，难以得到第三维的准确结构特征；为了弥补这一点，需要在滑坡体上建立大量的纵、横剖面。有人利用剖面图建立立体剖面图，但立体剖面图在关联剖面之间的信息时非常困难。另外，用地质数据绘制剖面图时，使用的是样点之间的相对位置，而不是各样点的真实空间位置，对剖面之外的其它位置的数据的影响很少予以考虑。为正确表达滑坡的时空分布规律和内部结构特征，需进行滑坡三维表达研究。

滑坡稳定分析是对边坡的稳定性作出评价，预测滑坡产生变形破坏的可能性，研究其破坏方式和规模。目前滑坡稳定分析的方法包括：自然地质历史分析法、模型模拟方法、工程地质类比法、现场监测方法以及数学-力学计算法（张倬元等，1994.3，黄昌乾等，1999）。在实际滑坡分析中，常常是综合使用这些方法，并且最终归结到数学与力学计算上。根据计算使用的数学模型，滑坡计算大致可分为两类：一类是基于极限平衡理论的条分法，另一类是数值分析方法。

条分法将滑坡体分割为条块，并假定条块间的作用力方向或位置进行计算。这一方法发展历史较长，计算简单，工程中已有成功的经验和计算程序，目前还在广泛应用。条分法研究主要用于确定滑坡的最可能滑动面。一般将稳定性系数 *Fs* 视为滑动面坐标的泛函，用变分法或数值方法求该泛函的极值，*Fs* 最小的面即为最可能滑面。条分法一般沿滑坡纵剖面进行二维计算（*Hook，1977，Spencer，1979，Carber,1979，Sarma，1979，Baker，1980，Scavia etc.*，1990），对滑坡横向变化的影响未予以考虑，这在滑坡周界形状规则、滑坡体分布基本对称的情况下，能够代表滑坡的实际情况；但实际滑坡形态十分复杂，规则、对称的情况很少，因此二维分析难以正确反映滑坡的真实状态（*Zuyu Chen*，2001），要真正完整地进行滑坡计算，需要进行三维空间分析。

边坡稳定性计算的另一类方法是数值分析方法(有限单元法 *FEM*、边界单元法 *BEM*、离散单元法 *DEM*、有限差分法 *FDM* 等)。由于现代数学的发展和计算机性能的不断提高，数值分析方法得到了极大的发展，并进入成熟阶段。现阶段边坡稳定性分析的数值计算以二维计算为主；目前有一些三维计算如三维有限元、三维离散元等方法（王泳嘉等，1992，*D. Leshchinsky*，1985，*Chen ZY*，2001，张发明，2002，安关辉等，2002，），但这些计算仍有一定局限性，如三维结构形成还具有很大的随意性、模型可视化程度较低、模型修改困难等，在滑坡计算中未能广泛应用。

在滑坡的防治规划中，滑坡的各种图件目前多数也是以二维图形表示的；而在实际滑坡治理过程中，三维图形表达对工程施工的指导作用比二维表达要更直观、具体。

0.2 三维滑坡研究

由于二维表达的局限性，工程中很早就开始了三维建模研究。地质工程中的计算机三维建模开始于上世纪 60～70 年代，当时主要是基于 *CAD* 辅助功能进行地质图形绘制；随着计算机图形处理能力和显示功能的增强，特别是三维图形的显示和渲染技术的提高，三维模型的设计和建模水平也不断提高，进入

80年代，三维建模技术开始推广使用，并出现了以地质目标为目的计算机辅助设计；科学计算可视化这一概念被重新定义，并由此推动了三维数据结构和可视技术的发展（李德仁，2000，龚健雅，1999，李青元，2000）；近些年来，国内和国外关于地质信息三维建模和可视化的信息系统发展较快，已经有许多可供使用的商业化的三维建模和分析软件。如 *DGI* 公司的可视模型系统*(Earth Vision Modeling System)*能够生成三维空间立体图像，反映地层与地质结构的空间分布特征的相互交切关系；*Reservior Characterization Research and Consulting* 的三维地球模型软件（*3D Earth Modeling*），用于一维、二维、三维地质统计和结构面三维显示和分析；*Gemcom Software Inc.* 推出 *Gemcom* 地质模型三维建模工具，以地质钻探信息为数据源，利用体数据结构建立地质结构的三维模型。一些以地学空间数据为研究对象的GIS软件，也都提供了三维建模和可视化功能或模块，如 *ARC/INFO*、*ERDAS*、*ENVI*、*PCI*。国内大量的软件也提供了三维建模和可视化功能，如 *GEOSTAR*、*GEOTIN/GEOGRID*，*MAPGIS*，*T3D* 等。

但是目前的滑坡研究还是以二维为主，缺乏专门的三维滑坡建模系统。随着地理信息系统技术的发展及其在地质领域的广泛应用，三维研究逐渐被重视，并将成为今后滑坡研究的主要技术。

现有的三维地学研究多是针对区域性地质条件进行的，滑坡研究与这种区域性的地质工程相比（*Mecour*，1998，*Dubrule*，1998），有其自身的特点，主要表现在：

1) 范围较小，一般滑坡范围限于数平立公尺～数平方公里之内，而区域地质研究范围一般在数十平方公里或者更大。
2) 勘探深度小，滑坡滑动面的深度一般在数米至数十米之间，而包括石油勘探等的地质工程勘探深度可达数千米。
3) 勘探精度高，滑坡勘查的工程性要求其勘探精度很高。
4) 资料来源，滑坡地质信息主要依靠高分辨率遥感、地面测绘、钻探、物探。而区域性地质研究主要使用遥感资料、地震等资料获得地表特征和地质信息。
5) 地质结构复杂，由于滑动面的存在和滑坡运动，使滑坡组成结构复杂，而且影响滑坡稳定的因素众多，要正确建立三维滑坡模型需要更细致的工作。

滑坡的这些特征决定了在三维滑坡研究中，即要应用地质工程三维研究的思路和方法，又要考虑滑坡研究高分辨率的特点，建立适用于滑坡表达的三维模型。“数字滑坡”技术就是考虑滑坡特点，并有效利用遥感、全球定位系统、地理信息系统等方法与技术的全数字化的滑坡表达方式。

0.3“数字滑坡”和三维滑坡模型

“数字滑坡”的概念是王治华研究员在总结多年滑坡 *RS*、*GIS* 研究的基础上，于1999年初提出的（*Wang ZH*, 1999），并将其定义为：数字滑坡技术就是以遥感（*RS*）和全球定位系统（*GPS*）方法为主获取滑坡基本信息，将该基本信息或原始数据（滑坡各要素，地形、光谱、土地覆盖、形变、地质构成、物