

地理信息系统与数据库结合研究(修改稿)

丁力 汪小林 罗英伟 张颖 曲磊 许卓群
(北京大学计算机系, 北京 100871)

摘要 地理信息系统需要对外提供灵活高效的地理信息访问途径,而采用数据库管理地理信息是发展趋势。目前存在三类数据库产品:关系型,对象-关系型,面向对象型,文中依次讨论了它们与地理信息系统结合的可行性,并重点介绍了三种结合方案:纯关系模型,空间扩展模型,包装模型。通过分析这三种方案的实现原理,比较其优缺点,指出了各方案的应用前景。由此归纳出在 GIS 与数据库结合中需要注意的问题及解决这些问题的关键技术。

关键词 地理信息系统 关系数据库 面向对象数据库 对象-关系数据库

中图分类号: TP391,TP311

Study on Combination of GIS and Database

DING Li, WANG Xiao-lin, LUO Ying-wei, ZHANG Ying, QU Lei, XU Zhuo-qun
(AI lab, Department of Computer Science, Peking University, Beijing, 100871)

Abstract It is very important for geographical information system (GIS) to provide flexible and efficient ways to access geospatial information, and the usage of database systems in geospatial information management is becoming prevalent. A series of issues were discussed, such as why database system but not file system was chosen to manage geospatial information, and why GIS chooses object-relational database but not relational database or object-oriented database. Then, three typical combination models -- pure relational model, spatial extension model and wrapped model, were presented, analyzed and compared. Their futures in GIS were suggested. At last, the key issues and technologies in the implementation of wrapped model, the most competitive solution, were presented.

Keywords Geographical Information System (GIS), Relational Database (RDB), Object-relational Database (ORDB), Object-oriented Database (OODB)

1 引言

随着人类对世界的不断探索,积累了大量关于周围环境的信息,如土地,大气,矿产,交通等。人们不但关心它们自身的特性,如土地肥力、大气污染情况等,而且也需要了解它们的空间特性,如所在位置、邻接关系等。这类信息通常被称为地理信息(Geospatial Information)。相应地,他们的自身特性一般被称为属性数据,空间特性一般被称为空间数据。而地理信息系统(Geographical Information System, GIS)就是用于存储、检索、操作、分析和显示地理信息的计算机化系统^[1]。它是应社会对信息管理的需要而产生的,涵盖地理学、测绘学、制图学、电子工程和计算机科学等多门学科^[2]。

如何灵活高效地管理地理信息是 GIS 的核心问题，而这依赖于计算机数据管理技术。一般看来，计算机数据管理的发展经历了三个阶段，人工管理阶段（50 年代中期以前），文件系统阶段（50 年代后期到 60 年代中期），数据库系统阶段（60 年代后期至今）^[3]。相应地，从 GIS 诞生以来，也依次出现了基于文件系统的 GIS，基于数据库的 GIS。

文件系统结构简单，在数据存取过程中几乎没有额外开销，可以按照用户需求任意定制数据存储格式或存储复杂数据结构。其缺点也很明显：数据冗余度大，难于共享数据，容易造成数据不一致性；程序与数据缺乏独立性，系统不易扩充^[3]。另外，不同文件与操作系统结合紧密，不同的操作系统可能使用不同的文件系统。

在计算机在各行各业的日益广泛的应用中，人们对数据管理的要求也逐渐从单一的数据存取扩展到数据安全性、数据完整性和数据并发访问能力等众多方面。很多应用都需要同时具备上述几种数据管理特性。显然，以简单的文件系统为起点开发这样的应用是不实际的：不但缺乏可靠性保障，开发成本也过高。而数据库系统恰好能有效地支持这些应用。

为了解决多用户，多应用共享数据的需求，数据库系统做了很多工作：减少数据冗余，提高扩充能力；支持数据与程序的独立性；提供数据控制功能，如数据的安全性控制，数据的完整性控制，并发控制^[3]；提供网络功能，支持网络数据传输，如 ODBC，WEB 服务。当然，为提供这些服务的额外开销也会在一定程度上影响数据库系统中数据访问效率。

纵观 GIS 的发展趋势，一方面地理信息从内容上、数量上、类型上以及关系上都在高速增长着；另一方面，用户对 GIS 的功能要求也不断增加，从最初的数据管理、数据分析，到如今的网络 GIS、信息安全、可互操作性和智能搜索等。可以看出，GIS 多元化的趋势要求强大可靠且低成本的数据管理支持，采用单纯的文件系统缺乏灵活性且开发维护成本过高，因此 GIS 与数据库结合势在必行。

本文总结并探讨了 GIS 数据管理方面的一些问题。本节介绍了计算机数据管理技术的发展历史，说明了 GIS 数据管理采用数据库的可行性与必要性。第二节在分析了三种主流数据库的基础上，介绍了三种 GIS 与数据库结合的方案，通过对比分别说明了他们的应用前景。第三节总结了 GIS 与数据库结合时存在的问题以及关键技术。第四节展望了 GIS 与数据库结合的前景。

2 GIS 与数据库的结合

当前主流数据库产品主要有三类：关系型，面向对象型，对象-关系型。它们与 GIS 结合的方法各具特色。

关系型数据库（RDB）有强大的关系理论为支持，无疑是数据库产品中最成熟的。基于几种简单的基本类型和简单的二维表，它能完成非常复杂的关系操作，并得到几乎任何期望的信息组合。它的优点是明显的：物理数据存储与逻辑数据库结构的独立性，多样、简易的数据访问能力，从而提供了高效数据访问的可能性；相当灵活的数据库设计；数据存储和冗余的减少^[3]。

采用关系数据库管理地理信息是 GIS 与数据库结合的初步尝试。其中存在两个难题：首先，难以在关系数据库存储空间数据。为了存储和表示结构复杂多变的空间数据，需要设计复杂的 E-R 模型并在数据库中存放大量的表，增大系统的复杂性。而且还无法利用数据库提供的索引机制。其次，难以保持地理信息的数据一致性。地理信息的空间数据和属性数据通常不能存放在一张表里，这样会割裂逻辑上为整体的地理信息。而且拓扑关系也难于维护。

由于上述难题，虽然关系数据库在与 GIS 的结合中做出了有益的尝试，最终还是没能成为主流。因此，随着面向对象型数据库(OODB)的出现与发展，人们提出了用面向对象型数据库与 GIS 结合。

面向对象型数据库（OODB）是面向对象思想与数据库管理系统结合的产物。它摒弃了原有的关系理论，具有完全面向对象的特征，包括抽象、继承、封装、重载、多态等特性。从理论上来说，它可以很好地解决关系型数据库碰到的两个难题。

但面向对象数据库管理系统的商业化产品侧重点是程序设计语言对复杂数据的访问，缺乏足够丰富的查询语言来表达用户查询，相比之下存在查询效率低下的问题^[4]。目前虽然出现了一些探索性的实验模型，但距离成熟还有一定距离。作为非主流产品，OODB 还难以用于 GIS 应用开发。

对象-关系型数据库（ORDB）是面向对象思想与数据库管理系统相结合的一个折中产物。与 OODB 的区别在于，它没有抛弃关系理论，而是在关系模型的基础上，进一步支持了面向对象思想。这样不但继承了关系模型的优良特性，兼容了原有的使用关系数据库的软件系统；而且提供了支持面向对象的类型与接口，满足了面向对象软件系统的要求。不论在科学研究中还是实际应用中，它都占有重要的地位，是当前数据管理技术的中流砥柱。

ORDB 在与 GIS 结合的过程中，具有明显的优势：支持基本类型扩充；支持复杂对象；支持继承；支持规则^[4]。通过对对象存储访问的支持，解决了关系型数据库所面临的难题，同时通过兼容关系数据库系统，保证了对现有运行系统升级的可能性。最为重要的是对象-关系数据库已经拥有比较成熟的商业化产品，这为关系数据库与 GIS 结合打下了良好的基础。

下面介绍几种常见的 GIS 与数据库结合的方案。

2.1 纯关系模型

此方案基于关系型数据库。它通过关系模型描述空间对象。空间数据都被分解成一组相关的简单类型的组合。例如，在 Oracle8i 中^[5]，空间对象可以用一个表中的预先定义的一列过或多列存储，其实例可以占一行（例如点）或多行（例如多边形）。每个空间数据都具有唯一的 ID，以便与属性数据关联。图 1 描述了一条铁路在纯关系模型下是如何存储的。

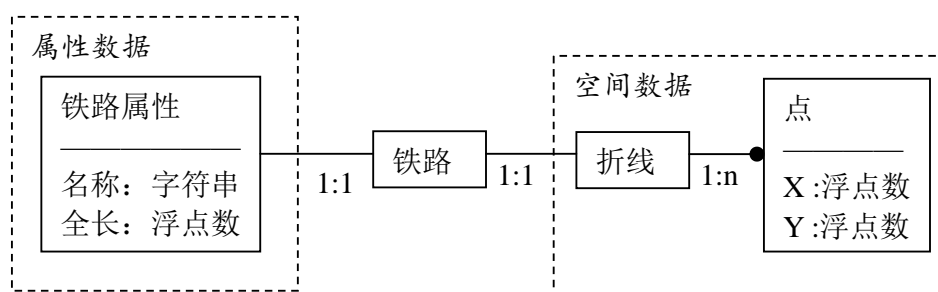


图1 用纯关系模型存储一条铁路的信息

此方案的特点在于，存储空间对象时只使用了数据库支持简单数据类型，用户只需要用 SQL 语言就可以完成数据访问。这样，当需要存储的空间数据结构比较简单时性能很好，例如只存储点对象时不但节省空间，而且效率也高。可是，遇到结构比较复杂的空间数据时，用方案存储一个对象将要涉及成百上千条记录。访问空间数据时可能出现效率问题，或空间数据和属性数据不一致等问题。

2.2 空间扩展模型

此方案是基于对象-关系型数据库而建立的。它通过建立一个空间对象表达模型，把空间数据和属性数据存储统一在 DBMS 之下，从而把 GIS 的数据管理部分的功能统一到 DBMS 之中。ORACLE8i、DB2 以及 INFOMIX 等都支持空间扩展方案。下面以 DB2 Spatial Extension^[6]为例介绍空间扩展方案的具体实现。

DB2 Spatial Extension 支持 GIS 相关的抽象数据类型，也即空间对象。这包括：所有空间对象的基类 Geometry；基本空间对象，如 Point、LineString、Polygon；复杂空间对象，如 MultiPoint、MultiLineString、MultiPolygon。另外，在定义抽象数据类型的同时，可以控制数据存储管理，如用户可以决定是否将数据存放在表的行内还是存储在其他地方。空间对象通过继承关系，形成树型系统。Geometry 是一个抽象类，只提供空间对象的基本访问接口，所有空间对象类都要从该类中派生出来。空间关系的派生关系如图 2。系统支持在表的同一列中同时保存有相同基类空间对象的数据。这样提高了对表操作的灵活性；也有助于提高操作的性能，避免过多连接。

在支持空间对象表示的同时，DB2 Spatial Extension 支持了 SQL3 语法，允许用户使用统一的 SQL 语句操作空间数据或属性数据，保证的无缝访问地理信息的接口。为了方便处理地理信息，它也提供了一些预定义的函数，如空间计算，比较，数据交换等函数。

DB2 Spatial Extension 还支持用户定制操作。用户可以添加自定义数据类型，并在其上自定义操作。用户也可以自定义索引，如索引的类型，索引建立在什么类型上，索引项如何从列上产生。目前 ERSI 已经利用此项功能实现了网格索引（Grid Index）。

目前已有两个基于 DB2 Spatial Extension 的应用。一个应用是由 IBM 与 ESRI 联合完成的“精确农业系统”。土地状况受到很多因素影响，如降水量、土壤酸性等，该系统可以通过高精度设备采集到各种因素的分布图存入数据库中，通过 DB2 Spatial Extension 提供的叠加分析功能，精确计算每一小块土地的特性，并由此决定在这块土地种植什么农作物。另一个是 IBM 协助升级的“复杂网络的自动制图与设施管理（AM/FM）系统”。该系统的早期版本中，空间数据存储在数据库以外，而属性数据存储在关系数据库之中，二者需要通过外码关联，很不方便。在 DB2 Spatial Extension 的支持下，该系统的新版本将空间数据和属性数据统一到对象-关系数据库中存储管理，加上对象-关系数据库对复杂对象的支持，不但可以显示网络连接情况，还可以播放网络中设备的图片或录像。

在上述例子中，体现空间扩展模型的两个优势：由数据库厂商支持的数据分析操作可以得到数据库系统内部优化机制的支持，因而效率较高；该模型提供了对 SQL3 的支持，在 DBMS 层为访问空间对象提供了统一接口，也方便了系统从 RDB 到 ORDB 的移植。

2.3 包装模型

此方案也是基于对象-关系型数据库而建立的。其本质就是在数据库和最终用户之间增加包装层，以消除二者间接口的差异：一方面充分利用数据库提供的功能，一方面满足最终用户的需求。包装层的主要任务就是解释并分解执行对空间对象的访问操作。

包装模型一般包括三个层次：用户，包装层，数据存储层。用户使用地理信息，数据存储层负责存储地理信息，而包装层负责用户与数据库之间的数据访问管理。

早期的对象-关系数据库只提供了长二进制字段（LOB）的存取接口，当时的包装模型将图层文件直接存储在数据库的长二进制字段中，一个图层对应一条记录。这样就可以利用数据库的数据管理，网络传输等功能。这种方法虽然把空间数据存入了数据库中，但在空间数据访问上存在很大的局限，例如，要查询图层中的一个空间实体，就需要把整个图层从数

数据库中取出，效率低下。这种以图层为粒度的空间数据存储方案局限性很大，因此不可取。

随后，以空间对象为粒度的存储方案出现了。类似于空间扩展模型，包装层也向用户提供了一组空间对象以表示地理信息。用户可以单独或同时存取空间对象的任意部分：空间数据或属性数据。包装层负责解释用户查询，并将其转化为对数据库的操作指令。它与空间扩展模型不同之处在于，众多的实现方式使它能提供除 SQL3 之外的接口，如可编程构件接口 ActiveX, Javabeans。包装层一般只利用数据库的数据存储功能来存放空间数据。它也可以利用对象-关系数据库的特性实现空间对象的无缝存储：把一个空间对象存作一条记录储在表中，其中一个长二进制字段负责存储空间数据，其他字段则存储属性数据。

包装模型可以为 GIS 应用提供一个稳定的接口：可以支持 GIS 在不同厂商，不同版本的对象-关系数据库系统之上的实现。包装模型在内部实现时可以采用当前的先进技术以改善空间数据处理效率。与空间扩展模型相比，可剪裁的特性使得包装模型极富竞争性。

2.4 各种结合模式的比较

以上介绍的三种方案各具特色：纯关系型方案比较适合于空间信息不太复杂的应用，对象-关系型方案比较适合于空间信息比较复杂的情况，而包装模型则适用于用户需求灵活多变的情况。在数据表示方面，三者都能够表示一般的空间数据，只是纯关系型的表达能力比后面两种方案要差一些，有些复杂对象还难以表示。

纯关系模型与早期的包装模型是 GIS 与数据库结合中有益的尝试，为确定地理信息的存储粒度提供了依据。作为一种实用性很强的系统，空间扩展方案和后期的包装模型是当前被广泛采用的，这说明目前 GIS 与对象-关系数据库结合是最理想的模式。

我们注意到数据库管理系统（DBMS）的发展与程序设计语言的演变存在很多相似性，表 1 对此作了比较。

表 1 程序设计语言与数据库管理系统的类比

程序设计语言	数据库管理系统	特点
C 语言	RDBMS	1、从以前到目前一直被广泛应用 2、效率比较高 3、目前遇到信息表达上的困难
Small Talk	OODBMS	1、纯面向对象，完全支持面向对象理论 2、决了信息表达上的困难 3、实现比较困难，目前没有得到广泛认可及应用
C++	ORDBMS	1、将原有的系统与面向对象结合，取长补短 2、很大程度上支持了面向对象概念 3、解决了信息表达上的困难 4、目前得到广泛认可及应用

这种相似性从另一个侧面证明了选择对象-关系数据库是符合信息技术的发展趋势的。作为基于对象-空间数据库的方案，空间扩展模型与包装模型各具特色。

空间扩展模型是数据库厂商提供的解决方案，它希望通过增强数据库的空间功能来从根本上解决问题。该方案是由数据库厂商开发的，因此能够比较充分地利用底层数据库，从而达到比较好的性能。但是，数据库的空间扩展毕竟是数据库系统的附属产品，它不但继承了底层数据库的优势，也受到底层数据库的制约。例如，只有几个大的数据库厂商提供空间扩展，而这些数据库产品又只能应用于比较大的应用系统中，这样空间扩展的应用也就难以投入到中小应用中去。

包装模型则是 GIS 厂商提供的解决方案，它希望通过提供灵活方便的接口来适应多变的应用需求。通过设计包装层，封装了数据管理部分，提供对多种类型数据源的支持，降低了 GIS 应用开发的复杂度。但是，增加包装层也势必在空间数据存取中增加额外开销，从而影响系统整体效率，另外，构造并维护包装层的人力物力投入也不容忽视。

从本质上看，包装模型和空间扩展模型是一样的，都要为 GIS 应用提供方便高效的服务，都要提供一个空间对象的统一访问接口。包装模型是对应用需求的直接响应，是空间扩展模型的基础，而空间扩展模型则是包装模型的总结与改进。

相比之下，由于包装模型具有灵活的结构，不但在应用领域具有很大优势，在研究方面也很有潜力。在包装模型中可以方便地实验各种数据管理技术。因此，非数据库厂商通常选择包装模型实现 GIS 数据管理部分。

3 GIS 与数据库结合存在的问题及关键技术

以上三种结合方案中，纯关系型缺乏表现力，也少见于 GIS 应用中。空间扩展模型本身就是由数据库厂商实现的，其中的实现与数据库系统内部实现密切相关，一般人很难深入分析研究。而包装模型具有深厚的应用背景，其设计与实现与实际的 GIS 系统密切相关。因此我们在这里只讨论包装模型中存在的问题与解决问题的关键技术。事实上，这些问题在另外两种模型中也同样存在。

3.1 存在的问题

首先当然是表达问题，也即如何定义一个空间对象系统，来表达并存储地理信息。这需要系统比较好地实现空间对象从逻辑结构到物理存储映射。同时还能管理好空间对象的数据一致性，确保空间数据与属性数据的对应关系。另外空间拓扑关系的维护也很重要。

其次是效率问题，也即如何改善在数据库中访问空间对象的效率。这主要包括如何减少用户查询的等待时间，如何避免不必要的计算。效率问题是 GIS 应用的关键问题。用户评判一个系统是否实用，看中的是它能否高效而优质地完成任务。效率问题与表达问题是相辅相成的，表达方法是提高效率的基础，而提高效率也不应牺牲表达能力。好的表示方法确保了 GIS 的易用性，而较高的效率保证了 GIS 的可用性。

第三，事务管理问题。GIS 中存在一些比较复杂的事务，例如空间数据更新操作。这种事务通常持续时间比较长，涉及对象比较多，尤其是两个事务在时间上和数据上发生重合时，情况比较复杂。通常数据库提供的事务机制难以管理这样的事务。因此在包装模型中需要在包装层进行事务管理。

3.2 关键技术

为了解决在结合的过程中出现的问题，还需要进一步研究一些关键技术，通过它们来改善系统的功能与性能。

1) 优化技术

这需要考虑优化的时机与方法。一方面可以在空间对象表示模型中考虑优化：合理设计空间对象存储模式，以减少费时的数据库表的操作。另一方面，也可以在系统运行时考虑优化：用户可以定义操作量预测函数，帮助系统动态优化查询要求。

2) 空间索引技术

主要考虑空间索引的选择与维护问题。引入空间索引的目的就是提高空间数据访问效率。另外空间索引在辅助空间计算方面也有很大作用。

常规数据库产品通常使用 B+树索引, 这是一种一维索引, 只能建立在一维数据(基本数据类型)上。而空间数据是二维甚至是多维的, 因此需要引进二维索引, 如 R 树索引, 网格索引, PK 树索引等。这些索引算法不一, 性能上也有差异, 选择一个合适的索引方法很重要。

另外, 索引由谁来维护也是一个问题, 或者 DBMS 自身提供这些索引, 或者 DBMS 允许用户自定义这些索引, 或者用户在数据库外部的包装层中维护索引机制。

3) CACHE 技术

CACHE 技术来源与硬件, 其主要目的就是复用数据, 减少不必要的取数据操作以提高效率。同一份地理信息可能会被用户们经常性地访问, 每次都把它从数据库中取出是不合算的。我们可以把取出的数据临时存放在高速缓存中, 如果数据没有被修改, 那下次使用该数据就可以直接访问高速缓存, 避免再从数据库中取出数据。目前 DBMS 自身具备 CACHE 机制, 也可以在数据库外的包装层中实现 CACHE 机制。

4) 版本管理技术

版本管理技术是用于维护数据一致性的。通过在分布在系统中的数据上附加版本信息, 可以确定数据之间的新旧关系, 为 Cache 的淘汰算法提供依据。

4 总结

数据库技术的发展直接推动了 GIS 数据管理部分的发展。在 GIS 的数据管理部分的实现方案中, 基于 ORDB 的包装模型在应用与研究方面都具有很重要的意义。当然, 在研究和设计包装模型的过程中, 还存在一些需要考虑的问题, 如表达, 效率, 事务管理等。只有有效地解决了这些问题, 才能让 GIS 在数据库的支持下更好地投入广阔的应用领域中。

参 考 文 献

- [1] David M. Mark, Nicholas Chrisman, Andrew U. Frank etc. The GIS History Project, UCGIS Summer Assembly [EB/OL], http://www.geog.buffalo.edu/ncgia/gishist/bar_harbor.html, 1997
- [2] 宋小东、叶嘉安, 地理信息系统及在城市规划与管理中的应用 [M], 北京: 科学出版社, 1995
- [3] 萨师煊、王珊, 数据库系统概论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1991
- [4] Michael Stonebraker, Dorothy Moore 著, 杨冬青、唐世渭、裴芳等译, 对象关系数据库管理系统——下一个浪潮[M]. 北京: 北京大学出版社, 1997
- [5] Jeff Hebert, Oracle8i Spatial User's Guide and Reference [EB/CD], Part No. A67295-01, Release 8.1.5, 1999
- [6] Judith R. Davis, IBM's DB2 Spatial Extender: Managing Geo-Spatial Information Within The DBMS [EB/OL], <http://www-4.ibm.com/software/data/pubs/papers/spatial/>, 1998.5

附录

资助本文的基金项目：

* “中国高速互连实验网”的子专题“高速网上的数字地球实验系统”，国家自然科学基金重大项目（69999610）。负责人：李晓明，课题结题时间：2000年12月。

* “基于结盟 agent 的网上分布式异构空间信息库协同管理研究” 国家自然科学基金面上项目（60073016）。负责人：许卓群，课题结题时间：正在进行。

作者简介：

许卓群 1936年生，北京大学计算机系教授，博士生导师。国家教委高校“计算机科学”教学指导委员会副主任，中国电子学会参加 IFIP/TC-3 专业组中方委员，欧洲国际学术刊物“INFORMATION SYSTEM”编委（1985—）。主要从事空间信息处理与智能辅助决策、并行编译等方面的研究。

汪小林 1972年生，现为北京大学计算机系博士研究生，主要研究领域为地理信息系统、构件技术及 Agent 技术等。

丁力 1975年生，现为北京大学计算机系硕士研究生，主要研究领域为地理信息系统、数据库技术及软件 Agent 技术等。

罗英伟 1971年生，1999年毕业于北京大学，获博士学位。目前在北京大学计算机系从事博士后研究。主要研究领域为分布式地理信息系统、分布式计算技术及 Agent 技术等。

张颖 1976年生，现为北京大学计算机系硕士研究生，主要研究领域为地理信息系统、元数据及 Agent 技术等。

曲磊 1975年生，现为北京大学计算机系硕士研究生，主要研究领域为地理信息系统、网络技术及 Agent 技术等。

联系方式 Email: dl@geoagent.pku.edu.cn

Tel: (010) 62763373