

地理信息语义关系元数据研究及应用

曹彦荣 何建邦

(中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室 北京100101)

摘要 地理信息的发现是地理信息共享的前提和基础,目前主要以基于元数据的目录服务为主。目录服务中的信息发现是以关键字匹配为主,这种方法往往难于满足用户的需求。本文讨论了如何利用计算机领域内的本体(ontology)理论和语义网络的方法,建立描述数据之间语义关系的关系元数据(Relation Metadata),并初步实现了基于语义关系元数据的地理信息资源发现服务的原型系统。

关键词 地理信息发现服务,语义关系元数据,本体,地理信息共享

Research on Geographic Information Semantic Relation Metadata

CAO Yan-Rong HE Jian-Bang

(State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101)

Abstract Geographic information discovery which is mainly catalog service based metadata is foundation of Geographic information sharing. Today's information discovery methods in catalog service are typically limited to keyword searches or matches of sub-strings, which do not meet user's demand. This paper discusses how to use ontology theory and semantic Web methods to build Relation Metadata describing semantic relation between geographic data, and present a prototype system of geographic information resource discovery service based semantic relation metadata.

Keywords Geographic information discovery service, Semantic relation metadata, Ontology, Geographic information sharing

1 引言

1.1 地理信息发现服务研究现状及问题

地理信息共享是目前地理信息系统能为社会进步和可持续发展服务的一个关键问题和研究前沿。在地理信息共享过程中,地理信息发现是共享的核心之一,它是信息得以共享的前提和基础。OGC的互操作规程中专门阐述了地理信息发现(Geographic Information Discovery)的技术框架和标准^[1],并提出在网络环境中的地理信息资源发现,一般为基于元数据的目录服务(Catalog Service)。实际上,许多国家都已经建立了空间数据交换中心(Clearinghouse)。Clearinghouse发现数据主要是通过Z39.50网关,以关键字(Keyword)匹配的方式进行检索数据。

目录服务中的每个条目(entry)是以地理信息元数据中的一小部分为基础建立的。地理信息元数据按描述的数据的粒度,可以划分为三个层次:数据集系列(Dataset Series)、数据集(Dataset)、要素和要素实例以及属性和属性实例。目前绝大多数Clearinghouse仅仅维护数据集层次上的元数据^[2]。数据用户只能按照系统提供的几个关键词,获取数据的概略信息,并不能获得数据集内更为详细的信息。

就查询而言,目录服务的查询方式局限于按照预定的模式。用户表达一个查询后,系统只执行在查询和内部表达之间执行关键字或者子串(sub-string)的匹配。这种查询不支持任

何更深层的、隐含在数据内部的、数据用户真正想使用数据的目的^[3]。系统没有提供完好的机制来保证用户能以灵活的查询方式获得访问数据的入口。因此,以关键字匹配来查询元数据的方法往往难于响应用户需求,使用户得到语义上相关联的、更多的数据,而这恰恰是发现数据与知识的关键。举一个简单的例子:某用户想查询A地区的矿产资源数据,但在空间数据交换中心的目录中只是A地区有色金属数据、黑色金属数据、有色金属数据、化工数据、煤数据、贵金属数据等的专题图的元数据。其中每一个又由若干图层组成,如黑色金属数据由铁、镍等图层组成。按关键字匹配的方式检索,以“矿产资源”为关键字,用户得不到相应的结果。但实际上矿产资源包括有色金属、黑色金属...,在查询矿产资源时,系统应该能够满足用户的查询,返回和用户查询相关的数据集,并说明它们和用户提出的查询之间的关系。

此外,全球环境的变化研究是当今环境研究的热点,也是地球信息科学的应用问题之一^[4]。研究这样一个大尺度的问题,需要获取地球表面的大气、海洋、陆地和生物圈各种参数的变化信息。中国的可持续发展也是如此,需要多方面的数据的集成。面对这样一个局面,需要目录服务系统具备为用户提供一切必要的在内涵上关联的数据资源的能力。

例如,这样一个查询:查找可以分析S地区沙漠化的数据。需要注意的是,并非S地区的沙漠化灾害数据就是全部数据。沙漠化灾害形成的主导因素有:气候干旱,降雨量少;风沙

曹彦荣 博士研究生,主要从事地理空间元数据和地理信息服务的研究。**何建邦** 研究员,博士生导师,国际欧亚科学院院士,长期从事地理信息共享与标准研究。

频繁;植被稀疏低矮;地表径流不发育等^[5]。这样,对于上述的查询,至少应该返回该地区的降雨、风力、水系、植被等数据,以供查询者分析。

值得注意的是,地理信息分类和编码是一种非常有效的组织和管理地理数据的方法。如果地理数据的编码包含地理实体的分类码和地域划分编码,则在数据发现服务中,利用分类编码就可以迅速获取非常精确的数据,也可以得到一定程度的相关的数据。目前的目录服务多数还没有提供基于地理信息分类编码的查询;即使采用这种方法,满足地理数据语义查询的编码也应该建立在每个字段甚至每个字段的值上^[6],这种工作量是非常大的,不易于实现。同时,对一个数据(集)的编码只是说明了这个数据集的内容,并没有给出与它可能存在语义关系的其他数据集的说明。

1.2 语义网络方法

随着计算机技术的发展,以增强机器的数据发现、数据集成功能、数据导航和自动完成任务的能力^[7]为目的的语义网络(Semantic Web)是第二代计算机网络的发展目标。Frauenfelder^[8]提出了构建语义网络的四个基本条件:(1)机器可读性,网络内容一定要用机器可读的标记来表示;(2)建立语义索引。开发能读取语义标记,并对标记建索引的工具。以目前的网络为例,语义网络将依赖于已经按知识库建立索引的分布的资源。软件 Agent 会自动搜索语义网络,找到描述资源之间关系的元数据;(3)语义服务,指处理语义信息和推理新的事实的服务和工具的开发;(4)推理,指某种具有推理能力和支持决策的 Agent 的实现。

Tim Berners-Lee, Web 的创始人以及当前 W3C 的总裁,在 XML2000 大会上提出了 Semantic Web 的技术架构:

最底层的是 Unicode 编码和 URI (Universal Resource Indicator);

上面一层是用于结构化文档的 XML 技术, name space (可以定义领域的 tab), XML schema;

再上面的 RDF (Resource Description Framework) 和 RDF schema 定义了一种元数据的描述语言;

在 RDF/RDFS 上面是本体(ontology), 本体描述特定领域的资源之间的特定联合的、有因果关系的、功能性的联系(下面将谈到)。正如 Tim Berners-Lee^[9]所说的:“下面一层是逻辑层。我们需要在文档中写入逻辑,如表达一种类型的文件向另一种类型的文件演绎,按照自我一致性的方法检查文件的规则,把一个查询从未知词汇转变为已知词汇。”

采用语义网络的方法,可以生成数据集中隐含的“逻辑信息”,这种信息不仅详细地描述了数据的内容信息,而且还在内涵上提供了和其他数据之间的关系的描述。

虽然语义网络在信息发现方面,具有许多得天独厚的优点,但就目前而言,语义网络的技术仅仅处于起步的阶段,还没有开发出一个成熟的语义网络的应用。地理信息语义网络更是如此。而空间数据交换中心的技术却达到了比较成熟的程度。作为一个过渡,如果将这两者有机地结合,将会大大地提高目前数据发现服务的质量。

2 本体和语义关系元数据

2.1 本体概述

本体(ontology),是从本体论(Ontology)中发展来的概念。本体论在哲学上属于形而上学理论的分支,研究客观事物存在的本质。它与认识论(Epistemology)相对,认识论研究人

类知识的本质和来源。也就是说,本体论研究客观存在,认识论研究主观认知。而本体的含义是形成现象的根本实体^[10]。

在计算机领域,本体的定义多种多样,比较经典的定义是:本体是共享概念模型的明确的形式化规范说明^[11]。该定义包含四层含义:概念模型(conceptualization)、明确(explicit)、形式化(formal)和共享(share)。“概念模型”指通过抽象出客观世界中一些现象的相关概念而得到的模型。“明确”指所使用的概念及使用这些概念的约束都有明确的定义。“形式化”指本体是计算机可读的(即能被计算机所处理)。“共享”指本体实现的是共同认可的知识,反映的是相关领域中公认的概念集。

本体通过对某个领域进行抽象、归纳,即先把这一领域概念化,再对概念化的结果用一种人、计算机、代理程序(Agent)都可以理解的通用规范表达出来,表达出来后就形成了一个 ontology,勾画出某一领域的基本知识体系和描述语言。根据应用目的的不同,本体基本可以划分为这样五类:领域本体、元数据本体、一般本体(普通本体)、表示本体、方法和任务本体。

地理信息本体与地理信息分类编码、地理信息标准术语表之间有着相似之处,本体论与分类学、术语学也存在一定的交叉,所以有必要对这些相关概念做一下比较与区分。

地理信息本体并不是地理信息标准术语表。本体提供了一组具有良好结构性的词汇,而且出现在本体中的词汇是经过严格选取,确保所选的词汇是本领域中最基本概念的抽象与界定。概念与概念之间的关系采用相应技术(如谓词、逻辑等)进行了完整而全面的反映。而正是这些关系的反映使得基于本体的系统实现后能够完成语义层面上的一些功能。而地理信息标准术语表仅仅是地理信息领域中各种词汇的集合,相对本体而言还是比较松散。

本体也不是一个词汇的分类体系,即不是地理信息中的分类和编码表。本体和地理信息的分类非常相似,尤其是把本体的理论应用于地理信息分类编码时,这种相似性更为明显。可以说,地理信息分类体系是地理信息领域本体的一个真子集。总的说来,地理信息本体比分类编码表中所反映的词与词之间的关系要丰富。

领域本体的开发是一项繁重的工作,需要在领域专家的支持下完成大量繁琐的工作。而在本体的实际应用中,可以直接利用的、相对简单的应用就是用结合地理信息分类的结果,只采用了 sub-classof/is-a 关系,形成虽然简单但一致性、完整性都满足需要的本体。

2.2 本体的作用

从信息的角度而言,Web 上的数据具有半结构性、异构性和分布性等特点。屏蔽这些特性,为用户提供统一的模式,是目前 Web 信息集成的关键问题。本体因为具有良好的概念层次结构和对逻辑推理的支持,在 Web 信息集成系统,特别是在基于知识的 Web 信息集成中起到了广泛的作用^[12]。

本体能得到特定领域的知识模型。知识模型可以使描述网络上的资源,以及资源之间的关系。

本体中强调了类和类之间的关系,并把它们独立出来,规定了如何定义关系,如何使用关系等一系列限制条件。在以往的地理信息资源发现过程中,地理实体之间的关系并没有得到表达。这种关系对数据的发现有着非常重要的意义。本体对实体之间的关系有特别的关注,因此,它是适合研究地理信息语义网络问题的。

本体可以作为一个数据资源的“逻辑信息”，这种“逻辑信息”也可以看作是广义元数据的内容。因为它说明了数据的内容，属于“数据的数据”。在本文中，把这种特殊的元数据称作语义关系元数据。

2.3 地理信息语义关系元数据

目前已经生产了大量的地理数据，而且数据的量每天都在大量地增加。这些数据中只有被地理信息元数据描述一部分才能加入到目录服务体系中，从而才有了被用户发现和使用的可能。这些数据以及它们的描述信息，基本上已经成型，如果再去大规模地更改以求它们在内容中包括和其他数据之间的语义关系，工作量巨大，同时也不大可能有人去做。解决这个问题的办法就是把语义关系独立出来，用它来联系数据资源，这也是 RDFS 的思想。

在这个思路的指导下，适合地理信息资源发现的地理信息抽象模型应该尽可能地不改变原有数据的组织形式下，保留原有数据的元数据信息。其目的也就是为了更好地执行这种方法。因此，为达到这个目的，本文提出了地理信息共享单元的地理信息概念模型。

地理信息共享单元 (Geographic Information Sharing Unit, GISU) 是在地理信息共享过程中，可以在网络上交换的最小信息资源单位。它是相关领域本体中共享同类的数据的集合。如果已经建立了灾害领域的本体，且本体中包括数据集中的灾种，那么可以把这个数据集中相同灾种的数据记录看成是一个地理信息共享单元 (暂时不考虑地域)。例如，所有的灾种为“风雹”的记录可以看作是一个单元，所有“灾种”为“病虫”的记录也可以看成是一个单元。

关系元数据是描述地理数据之间存在的本质的，固有的和隐式的关系的描述性信息。关系元数据可以由本体中的类和类之间的关系实例化形成。包括两大类型：显式关系元数据和隐式关系元数据。实际上，关系元数据描述的是地理信息共享单元之间的关系，这种关系映射了本体中概念和概念 (类和类) 之间的关系。

显式关系元数据是在本体建立后就可以直接发现的，包括空间关系和非空间关系。空间关系包括拓扑关系、方位关系、距离关系。非空间关系包括本体中类层次中的关系 subclass-of。

隐式关系元数据的建立比显式关系元数据困难得多，需要建立多个领域本体，并在应用数学模型的支持下才能实现。前面提到的“查询可以分析 S 地区沙漠化的数据集”，要正确响应这样的请求，必须在建立沙漠本体、植被本体、降水本体、地表径流本体等的基础上，发现领域本体之间暗含的“影响关系”，以及如何判断影响关系的存在的规则，才能返回正确和完全的数据集。

关系元数据和一般意义的地理信息元数据不一样，它的建立并不是按照一定的元数据标准来建立的，而是通过建立相关领域的本体，来描述数据集中出现的类以及类之间的关系。

采用关系元数据，用户在一个目录服务中检索的时候，不仅可以按照普通元数据发现数据，还可以根据关系元数据得到更多的信息。例如，这个数据 (集) 和哪个数据 (集) 之间相关，这样便于用户根据需要集成不同空间、不同时段、跨部门的数据。

本体和地理信息共享单元之间的关系如图1所示。图中的关系 P 的实例 P1 可以看作是关系元数据的内容。

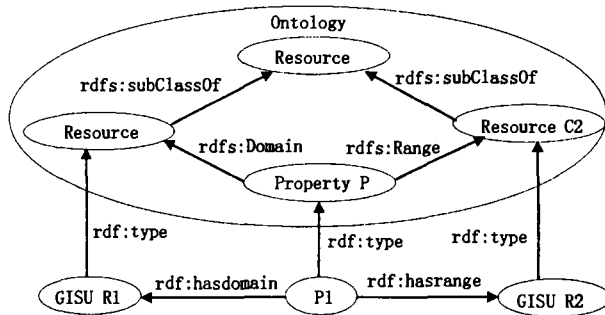


图1 GISU 和 ontology 之间的关系

3 语义关系元数据的开发实现

据前所述，基于语义的关系元数据的实现首先应该开发地理信息的领域本体，用 RDF/RDFS 格式的本体来描述数据集，形成数据集的关系元数据。

根据应用目的的不同，本体基本可以划分为领域本体、元数据本体、一般本体 (普通本体)、表达本体及方法和任务本体等。为了建立关系元数据，需要开发地理世界的领域本体。

3.1 领域本体的开发

本体的表现形式可以由一个五元组表示^[13]：

$$O = \langle CD, RD, FD, ID, AD \rangle$$

其中 CD 是指一系列类的定义，RD 是一系列关系的定义，FD 是一系列功能的定义，ID 是一系列实例的定义，AD 是一系列公理的定义。

建立地理领域本体应该遵从如下步骤：

第一，进行的是分析问题领域，分析共享单元的内容；然后需要找到可重用的本体，因为建造本体的目的是为了重用 (re-use)。本体的这种重用性可以节约大量的人力和物力；

第二，要列举该研究领域内的重要术语，这一过程是为了发现研究领域内部的对象，并用明确的术语表达它；

第三，通过抽象、聚类、泛化等方法，定义类和类的层次 (hierarchy)；

第四，发现类和类之间的关系，并用形式化的方法定义它们；

最后还要定义用于推理的一般规则，或者叫做公理 (axiom)。

本体作为语义网络的重要组成部分，目前已经得到许多软件厂商的支持。因此，开发本体，应该选择良好的语言规范和开发工具。W3C 组织宣称 RDFS 就可以作为定义本体的一种语言规范，由于 W3C 在网络技术标准方面的建树，RDFS 无疑是开发本体的一种基础语言规范。OIL 是第一个基于 W3C 的标准 (如 RDF/RDFS, XML/XML-schema) 的本体表达语言。它是欧盟信息团体的推荐技术；另一个基于 Web 的本体建模语言候选者是美国 DARPA 的 DAML (DARPA Agent Markup Language) 技术。DAML 继承了 OIL 的许多方面特点。这两种语言的能力大致相同。但这两个团体组成一个联合会，吸取了两种语言和其他一些语言的优点，形成了 DAML+OIL，这是目前最先进的 Web 本体语言，有望成为将来 Web 本体标准。图2就是以资源本体为例，用 OIL 工具开发的资源本体 (图形界面) 的一部分。

3.2 复杂的本体之间的关系

地理真实世界中的地理事物和现象之间不仅仅是在一个领域中用于分类的 is-a/subclass-of 的简单关系，或者领域内

其他的简单关系,如土地分类时定义的 coverage、Vegetation、Cultivation 等关系。这种关系是一种简单的领域内的关系。

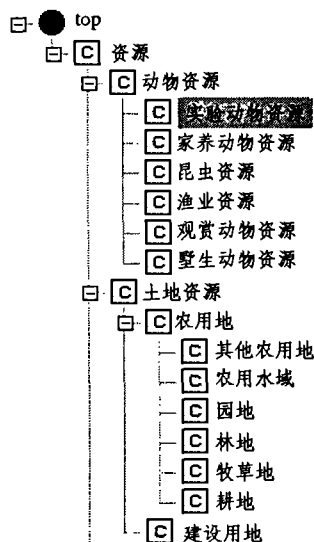


图2 以资源为例建立的资源本体

前面提及当用户提出“查询分析 S 地区沙漠化的数据”,按照领域本体内的关系,可能只返回相关沙漠的数据集,但这并不是用户真正需要的,或者说用户需要的数据不仅仅如此。因为与沙漠化相关的因素有气候干旱,降雨量少、风沙频繁、植被稀疏低矮、地表径流不发育等,所以系统应该返回的是与 S 地区沙漠化相关的气候数据、降雨量数据、植被数据等等。

这种发现数据的能力的实现,可以说是真正的语义网络。但是,目前并没有具有这种能力的集成海量数据的系统。这种地理实体和地理实体之间的关系需要领域专家通过数学建模的方法来实现,而且还需要全面的数据来支持。

同时,这种复杂关系的定义也不容易统一地去定义。例如地震灾害包括自然地震和人工地震。其中自然地震又包括构造地震、火山地震、陨石冲击地震和水库诱发地震等。构造地震是由于地质构造的原因引起的。这样,构造地震本体和地质构造本体也就有了“导致地震/被导致地震”的关系。在其他领域本体之间,也许还会出现“污染/被污染”、“破坏/被破坏”这样的关系。

Tarcisio Lima^[14]等人研究了领域本体之间的关系,认为这种复杂的关系可以统称为“影响关系”(Affection Relation)。

判断两个本体之间是否存在影响关系的依据如下:

$$\exists x|x \in ASC \text{ and } \exists y|y \in BSC$$

$$[FN(x)operator FN(y)]^* \Rightarrow [ASC \text{ relation } BSC]$$

$$[ASC \text{ relation } BSC]^* \Rightarrow A \text{ Affects } B$$

其中 A 和 B 是领域本体;ASC 和 BSC 分别是 A 本体和 B 本体的子集;FN 是函数集中的封闭函数。函数集实质上是领域本体的属性关系,如地区,位置,时间,数量,大小,高度,深度等;Operator 是操作符集中的操作符。操作符集中为一些逻辑操作符,如 <, >, =, >=, <=等;Relation 是关系集中的关系。它表明了两个本体中的要素相互之间的关系,针对不同领域本体,各不相同。

从 Affection 关系的定义可以看出,要解决领域本体之间的复杂关系问题,必须牵涉到应用领域的建模,而且是多个应用领域的建模。因为数据用户不仅仅只需要知道某几个地理

实体是相互影响的。Affection 关系的实现,将意味着地理信息语义网络的基础的奠定。

3.3 关系元数据的建立

关系元数据是利用领域本体建立的,反映数据集中的内容层次,以及和其他数据集之间的关系的数据。因为目前空间数据交换中心一般只维护数据集的元数据,而对数据集的要素元数据、要素实例元数据、属性元数据、属性实例元数据都暂时不处理。主要原因在于编写到具体一个数据项的值的元数据工作量太过于繁重。而关系元数据的建立,可以为这个问题的解决提供一种新的思路。

关系元数据的主要内容包含数据集的地名标识,在本体森林(forest)中的位置,子树的内容,以及时间范围等。因为目前我国的地理数据的采集主要是按照行政区划,自下而上,逐层上报统计的,所以数据集的地理位置标识可以采用省、市、县的地名词典,进一步地,可以按照行政管辖的关系,把地名词典组织成一个多叉树数据结构。

本体的建立有现成的可利用的工具 OILED 和 FaCT 等推理工具。关系元数据的生成,如果靠用户手工去添加,对于大批量的数据来说,是不现实的。需要开发用于自动生成数据集内本体层次的工具。借助于这个工具,在用户的干预下,能够为数据集添加像 Tim Lee^[9]所说的“逻辑”上的信息。笔者用 Java 开发了这个工具的原型系统:Onto-Builder。目前这个工具能做到处理 is-a/subclass-of 这样简单的关系,即可以实现地理信息分类和编码的任务。对于复杂的关系,如本体和本体之间的关系,还需要进一步的实验。

该工具主要的功能模块包括:

(1) 读入数据库中的编码字段(概念字段)

需要定义常见数据库的接口程序,目的是从常见数据属性文件读入该数据文件中编码字段存在的本体的词汇。如 arcinfo 的 .dbf 文件,Access 文件,Excel 文件等。这个接口类似于 ODBC 的编程接口。具体是用升序或者降序的次序选择词汇字段,然后把不重复的字段读入一个队列 L 中。根结点记作 R。

(2) 生成 RDFS 的关系元数据文件

例如,对前面提到的“矿产资源”的例子,可以生成 RDFS 格式的元数据如下(部分):

```
.....
<a:Class rdf:about="http://example/黑色金属##钒"/>
<a:subclassOf rdf:resource="http://example/黑色金属##黑色金属"/>
</a:Class>
<a:Class rdf:about="http://example/黑色金属##铁"/>
<a:subclassOf rdf:resource="http://example/黑色金属##黑色金属"/>
</a:Class>
<a:Class rdf:about="http://example/黑色金属##铁"/>
<a:subclassOf rdf:resource="http://example/黑色金属##黑色金属"/>
</a:Class>
<a:Class rdf:about="http://example/黑色金属##黑色金属"/>
.....
```

通过这种语义关系元数据,不仅为信息共享提供了一组可以共用的词汇,而且可以反映出在一个领域中概念和概念之间的关系。

4 利用语义关系元数据提供的数据发现服务体系

基于语义关系元数据的地理信息发现体系结构简单地可以用图3来表示。

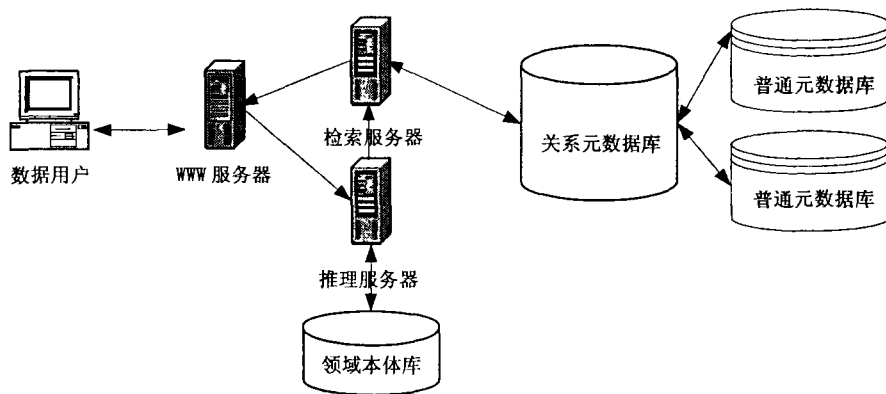


图3 基于关系元数据的地理信息发现

地理信息发现的过程如下:

(1)用户登录 WWW 服务器,按照形式化检索的格式,提交自己的查询请求,如:

〈地理空间查询〉::=〈地名|地名词典〉
地理关系本体
〈理空间本体类|地理信息领域本体〉

(2)WWW 服务器把查询请求提交到推理服务器中;

(3)推理服务器利用已经建立的领域本体库进行推理。推理可以采用人工智能中的 Prolog 来实现。最后得到一组可能包含目的数据的推理结果矩阵,并提交到检索服务器;

(4)检索服务器处理提交的推理结果矩阵,从关系数据库中查询,同时读取表元数据注册表中的存放的普通元数据字段,生成普通元数据的 XML 格式的文件。最后返回给 WWW 服务器;

(5)WWW 服务器返回给客户浏览端的是一组数据集列表,并标明每个数据集的相关程度(如“正选数据集的一部分”、“正选数据集”、“可能包含相关数据”等)。同时,生成每个数据集的普通元数据,并用 XSLT 转换为 HTML 格式的文档。

(6)用户可以直接获取相关的数据信息,一定程度上实现了地理信息语义网络的功能。

这种体系结构的优点在于直接能够获取相关的数据集的信息,不足之处是相关的技术还不够成熟。而且,目前易于实现赋予数据集中的领域本体的功能,对于领域本体之间的关系没有表述,虽然实现领域本体之间的关系可能是真正的地理信息语义网络的实现,但是,由于其复杂程度大大提高,不仅需要领域本体的建立,而且对地理信息建模的要求也很高,因此要实现领域本体之间的关系,还需要一定的时日。

讨论 (1)地理信息资源的发现常以元数据为依托,应当加强对元数据的研究与应用;

(2)以关键字匹配方法为主的地理信息资源发现难于响应用户的需求,使用户得到数量更多的、语义关联的数据,解决这个问题需要借助于语义网络和本体理论来完成;

(3)地理信息共享中的最小信息单位应该是数据集内共享本体中相同类的地理信息共享单元(GISU),描述它们之间

的关系的数据是关系元数据。关系元数据是描述地理数据之间存在的本质的、语义上的关系的元数据,它是发现数据和知识的一个纽带,是基于本体的地理信息网络共享中的一个基础。

(4)不同领域本体之间的复杂关系应该是研究地理信息语义网络的主要方向,这种复杂关系的实现将为真正的地理信息语义网络奠定基础。

参考文献

- OGC. The OpenGIS Abstract Specification. Topic 13: Catalog Services (version 4), 1999. 5,18
- 徐枫,李浩川,蓝文纪,张驰. NREDIS 空间元数据管理系统的技术框架研究. 中国地理信息元数据标准研究,科学出版社,1999
- Egenhofer M J. Towards Semantic Geospatial Web. 'GIS' 02, November 8-9, 2002, McLean, Virginia, USA
- 陈述彭,岳天祥. 全球环境变化的系统研究方法浅议. 自然资源学报,2001(1): 3~8
- 王劲锋,等. 中国自然灾害区划—灾害区划、影响评价、减灾对策. 中国科学技术出版社,1995. 110~130
- 黄裕霞. 地理信息语义共享方法及其应用实验:[中国科学院地理科学与资源研究所博士学位论文]. 1999
- Fensel D, Musen M. The Semantic Web: A New Brain for Humanity. IEEE Intelligent Systems, 2001, 16(1): 24~25
- Frauenfelder M. A Smarter Web. MIT Technology Review. 2001
- Tim Berners-Lee. Semantic Web Road map. 1998. <http://www.w3.org>
- 王昕. 综述:本体的概念、方法和应用. <http://www.prdm.net/papers/knowledge/Ontology%20overview.htm>
- Gruber T R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. Knowledge Acquisition, 1993, 5(2): 199~221
- 邓志鸿,唐世渭,杨冬青. 面向语义集成—本体在 Web 信息集中的研究进展. 计算机应用, 22(1): 15~17
- Gruber T R. Towards principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. International Journal of Human-Computer Studies, 1995, 43 (5/6): 907~928
- Limal T, Sheth A, Ashish N. Digital Library Services Supporting Information Integration over the Web. 2001