

doi: 10.7690/bgzdh.2018.06.018

一种基于商空间的非欧时空数据索引模型

唐志贤, 王彤, 金紫薇

(中国电子科技集团公司第二十八研究所国际防务部, 南京 210007)

摘要: 为解决受限网络时空数据的非欧特性限制数据聚类与查询剪枝效率问题, 以水利领域为背景, 构建一种面向商空间的非欧时空数据索引模型。通过对水系河网进行建模与分析, 结合受限网络表征受限时空数据的非欧时空特征, 引入商空间的多粒度分析理论对非欧时空数据进行粒化建模, 利用定义相应的空间网络结构查询算法实现非欧查询到欧氏空间查询的转换, 构建索引框架管理模型, 并对模型进行验证。验证结果表明, 该研究为非欧数据的索引建模提供了一套可行的解决方案。

关键词: 商空间; 时空数据; 索引模型; 非欧时空特征

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

An Indexing Model for Non-euclidean Spatio-temporal Data Based on Quotient Space

Tang Zhixian, Wang Tong, Jin Ziheng

(Research Department of International Defense Information Systems, No. 28 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China)

Abstract: To address the problem that the non-euclidean characteristic of spatio-temporal data restricts the efficiency of data clustering and query pruning in restricted network, we proposed a quotient space oriented non-euclidean spatial-temporal indexing model based on the domain of water resource data. Through the modeling and analysis of the network of river basin, in conjunction with the non-euclidean characteristic of restricted spatial-temporal data, we introduced the multi-granularity of quotient space to model the spatial-temporal data, utilized the query algorithms of spatial network to convert non-euclidean query into query in Euclidean space, constructed the framework of index management model, and then verified the model. Experimental result showed that this work provides a feasible solution to model the index of non-euclidean data.

Keywords: quotient space; spatio-temporal data; indexing model; non-euclidean characteristics

0 引言

随着数据规模的日益增长, 数据已经从简单的处理对象开始转变为一种基础性资源^[1-2], 如何高效地分析利用这些日益增长的大数据已经成为数据库领域的热门问题^[3-4]。数据的存取效率是影响数据服务质量的关键因素, 建立高效的索引机制是提高数据存取效率的有效解决途径。目前对于具有非欧空间网络拓扑关系数据索引研究较多的是移动对象数据库研究领域, 较为典型的方法有: FNR-Tree^[5]、MON-Tree^[6]、NDTR-Tree^[7]、UTR-Tree^[8]和UTR*-Tree^[9]。这些方法大多采用双层索引模型, 上层是自下而上的R-Tree或者R*-Tree通过对道路进行MBR外包后来索引路网结构; 下层针对具有交通约束的最近邻、逆最近邻等关系的查询需求, 采用R-Tree、R*-Tree和草图索引^[10]等建立对移动

对象数据进行索引, 所关注的移动对象数据分布在道路网中, 相应的度量距离表现为基于路网的受限距离^[11-13], 关系多表现为具有交通约束的最近邻、逆最近邻等复杂关系。上述索引方法面向的查询需求不一、数据结构不尽相同。面对日益增多的领域业务数据, 需要一套能够支持对多种类型数据进行索引建模的基础方法论。索引多表现为树形结构, 树的不同层次可以看成是对数据划分的不同粒度的抽象, 商空间理论^[14]是人工智能领域处理不同粒度问题的新方法, 基于数学上的等价关系对论域进行划分, 形成分层递阶多粒度空间, 进而实现问题求解过程中的不同粒度之间的互相转换。为此, 笔者以水利领域为研究背景, 引入商空间的多粒度分析理论, 建立分布式索引框架的数学模型, 构建一套面向非欧时空特征的数据索引模型。

收稿日期: 2018-03-22; 修回日期: 2018-04-17

作者简介: 唐志贤(1983—), 男, 四川人, 博士, 工程师, 从事数据管理与知识工程, 时间数据索引研究。

1 基于受限网络的非欧时空数据访问模型

对于依赖于受限网络的非欧时空数据，其非欧时空特征来源于底层非欧网络。以水利行业为例，从逻辑上将受限时空数据分为水系河网数据和水利业务数据（对水利对象进行观测和分析而得的属性信息），通过对水系河网进行建模与分析，实现非欧查询到欧氏空间查询的转换，以支持对业务数据的高效访问。

定义 1 领域数据模型：领域时空数据模型 (water domain data model, WDDM) 是一个二元组， $WDDM=(RND,WBD)$ 。其中： RND (river network data) 是指描述水系河网非欧网络结构的数据； WBD (water business data) 是指依附于水系河网的水利领域业务数据，例如水位、流量以及水质数据等。

基于领域数据模型，笔者提出一种基于受限的领域查询模型，通过对受限网络建立图论化模型表征数据的非欧时空特征，在此基础上建立空间网络结构索引，定义相应的空间网络结构查询算法，实现非欧查询到欧氏空间查询的转换。领域数据查询模型的形式化定义如下：

定义 2 领域数据查询模型：领域数据查询模型 (water domain data query model, WDDQM) 是一个四元组， $WDDQM=(RNDQ, RNDI, WDQ, WBDI)$ 。其中：

$RNDQ$ (river network data query) 表示对受限网络的空间分析，通过查询受限河网索引 RN (river network) 实现非欧查询请求到欧氏空间查询范围的转换，其定义如下：

$$RNDQ: WQ \rightarrow EQ. \quad (1)$$

$WBDQ$ (water business data query) 表示对领域业务数据的查询，利用 $RNDQ$ 转换而来的欧氏空间查询范围对业务数据索引 WBD (water business data) 进行查询，实现对业务数据的快速获取，其定义为：

$$WBDQ: EQ \rightarrow RS. \quad (2)$$

$WDDQM$ 可以表示为 $RNDQ$ 和 $WBDQ$ 的复合映射，形式化描述如下：

$$WDDQM = WBDQ(RNDQ(WQ)): WDQ \rightarrow RS. \quad (3)$$

式(1)、式(2)和式(3)中的 WQ (water query) 表示领域业务应用的非欧查询请求， EQ (euclidean query) 表示经过转换符合领域时空特征的欧氏空间时空查询范围， RS (result set) 表示最终的查询结果集。

2 基于商空间非欧时空特征数据索引模型

2.1 数据的商空间建模

定义 3 数据对象表：数据对象表是一个三元组 $DT=(X,f,V)$ 。其中：

1) 问题论域 $X=\{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ 是数据对象的非空有限集合；

2) $f=(f_1, f_2, \dots, f_k)$ 数据对象的属性函数， $f_i: X \rightarrow V_i, 1 \leq i \leq k$ 为单射函数；

3) $V=\bigcup_{a \in At} V_a$ 为对象所有属性的值域， V_a 是属性 $a \in At$ 的值域。

定义 4 对于数据表 $DT=(X,f,V)$ ，定义：

1) $Y_i=(y_1^i, y_2^i, \dots, y_k^i), y_j^i=f_j(o_i) \in V_j, 1 \leq j \leq k$ 为对象 o_i 的属性值向量；

2) $V=\bigcup_{i=1}^n Y_i$ 为属性值向量集合。

定义 5 商空间问题模型：商空间的问题模型是一个三元组 $Q=(X,f,T)$ 。其中：集合 X 是问题的论域； $f: X \rightarrow Y$ 是论域 X 中元素的属性函数， Y 是论域 X 的值域； T 是论域的结构，用以描述论域 X 中各元素间关系。

定义 6 商空间：对于一个问题 $Q=(X,f,T)$ ，给定一个等价关系 R ， $[X]$ 是 X 关于 R 的商集， $[f]$ 和 $[T]$ 是商集 $[X]$ 上对应的商属性函数和商结构，则称 $([X],[f],[T])$ 为 $Q=(X,f,T)$ 的商空间。其中：

1) $[T]=\{u | p^{-1}(u) \in T, u \in [X]\}$ ， $p: X \rightarrow [X]$ 是自然投影；

2) $[f]: [X] \rightarrow Y$ 。

通过定义 6 可以发现，商空间实质上是基于等价关系 R 对原始问题划分后形成的新问题(商问题)，相应的等价关系 R 即对应于一定的粒度。

定义 7 分层递阶商空间链：对于一个数据表 $DT=(X,f,V)$ ，定义等价关系 $\{R_i | R_i \in \mathfrak{R}, i=1, \dots, n\}$ ， $R_1 < R_2 < \dots < R_n \in \mathfrak{R}$ ，设其对应的商空间为 (X^i, f^i, X^i) ，则称 $(X, f, X) < (X^1, f^1, X^1) < (X^2, f^2, X^2) < \dots < (X^n, f^n, X^n)$ 为数据的分层递阶商空间链，简称为数据商空间链。

定义 8 分层坐标：对于对象 $x \in X$ ，令 $x=(x_0, x_1, \dots, x_n)$ 为 x 的分层坐标，定义分层映射

$p_i: X \rightarrow X^i$ 是初始空间到商空间 X^i 映射， $p_i(x) = x_k^i, x \in X$ ，表示 x 在商空间 X^i 映射为下标 t 的对象，令 $x_i = k$ 。

数据对象的分层坐标建立对象在不同粒度商空间的关联关系，通过分层坐标可以快速获取商空间对应的对象。通过商空间的保假原理^[14]可以得知：若问题在较粗的商空间无解，则在原始空间也无解，将分层坐标和保假原理相结合，在较粗的粒度上先进行运算，利用商空间模型对水系河网进行建模，形成多尺度水系河网商空间模型，能够将细粒度复杂关系问题映射到较粗粒度空间处理，进行快速查询剪枝。

2.2 多层集合划分树建模

索引的作用是将数据组织成特殊数据结构，在查询过程中过滤掉大量不必要的搜索路径以加速查询速度。目前绝大多数索引方法均采用树形结构组织数据，为此，笔者将商空间理论索引技术相结合，设计分布式的索引框架，利用集合论的概念构建一个多层次集合划分树，将数据的不同粒度世界映射到树的不同层次，然后通过索引框架所采用的具体索引方法(例如 B-Tree 或者 R-Tree)和分布式覆盖网络结构，获取不同粒度的数据划分，最后建立分布式索引与多层递阶商空间链的形式化映射关系。

定义 9 多层集合划分树：基于给定条件 $c_0, c_1, c_2, \dots, c_n$ 的多层集合划分树是一个二元组 (R, \leq) 。这里 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ 是集合，且：

- 1) $\forall c_i, \exists R_j \in R$ ，使得 R_j 满足 c_i ；
- 2) 存在一个正整数 h ，使得 $h < N$ ；
- 3) 存在一个正整数 N ，使得 $n < N$ ；
- 4) 如果条件 c_k 满足 $k = \min\{q | R_i \text{ 满足条件 } c_q, \dots, c_n\}$ ，则 k 称为区域 R_i 的层次(level)，记为 $\text{Level}(R_i)$ ；
- 5) $\forall i, j (1 \leq i \leq h, 1 \leq j \leq h)$ ，若 R_i 覆盖了 R_j ，则称 R_i 为 R_j 的祖先， $R_i \in \text{Ancestors}(R_j)$ ，记作 $R_j \leq R_i$ ；
- 6) \leq 是区域集合 R 上的偏序关系，对每一个 R_i ， $0 \leq \text{Level}(R_i) \leq n$ ，且 $R_i \leq \text{Ancestors}(R_i)$ ；
- 7) $\forall i, j (1 \leq i < j \leq h)$ 且 $\text{Level}(R_i) = \text{Level}(R_j) = k$ ，那么 R_i 与 R_j 交集为空，即 $R_i \cap R_j = \emptyset$ 。

条件 c_0, c_1, \dots, c_n 定义了特定的划分，对于定义 7 中的商空间链，粒度越细，需要满足的条件就越多，如在水利领域： c_0 表示按流域划分空间， c_1 表示按子流域划分空间等，这里的条件也是有限的，即 h 有上界；空间本身是有限范围，根据有限的条件只能划分出有限的子空间，故集合 R 是有穷集合。如图 1 所示：商空间层次树的根为待划分空间，接下来按流域、子流域等划分，进而形成树状结构，下一个层次为其父结点的一个划分。

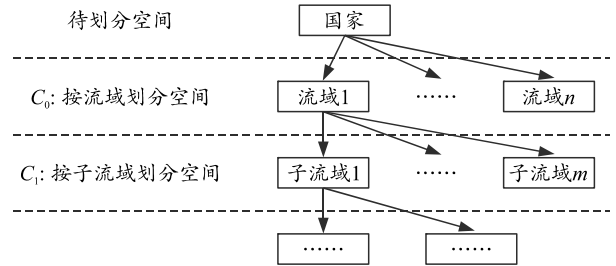


图 1 基于流域水系特征的多层划分树示例

商空间链的建立是由细粒度到粗粒度逐步综合的过程，而通过建立多层划分树，可实现集合由粗粒度到细粒度的逐步划分，多层划分树的条件确定了商空间链的层次，划分满足的条件越少，其在商空间链中粒度也越粗，反之亦然。

2.3 索引框架模型定义

商空间的建模和多层次划分树构建将数据集划分成不同的粒度数据分片(定义 9 中的集合 R)，分布式索引框架的建模则需要将集合 R 中元素映射到分布式集群中的各个计算节点。如图 2 所示，笔者采用全局索引和局部索引相结合的方式进行分布式索引框架建模，通过全局索引对问题空间进行划分构建粗粒度的商空间(即多层划分树高层结点)，本地索引构成细粒度的商空间；核心思想是通过分布式网络协议和本地索引对论域进行划分，形成不同粒度的数据划分块，进而实现定义 9 中的集合 R 与全局索引和局部索引。

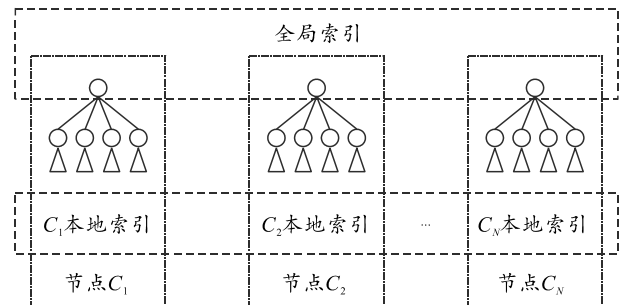


图 2 分布式索引结构

定义 10 分布式索引框架模型 DIM 是一个二

元组 $DIM = \langle GI, LI \rangle$ ，其中：

GI 是全局索引，由覆盖网络对问题空间进行划分，形成集合：

$$R^j = \left\{ R_i \mid R_i \text{ 满足条件 } (c_0), (c_0, c_1), \dots, (c_0, c_1, \dots, c_j) \right\}_{j < n}。$$

LI 是本地索引，通过传统索引结构进行空间划分或者数据对象聚类的方式，形成集合：

$$R^h = \left\{ R_i \mid R_i \text{ 满足条件 } (c_0, c_1, \dots, c_j), (c_0, c_1, \dots, c_{j+1}), \dots \right\}_{(c_0, c_1, \dots, c_h), h \leq n}$$

$$R = R^j \cup R^h, R^j \cap R^h = \{ R_i \mid R_i \text{ 满足条件 } (c_0, c_1, \dots, c_j) \}。$$

在 DIM 模型中，全局索引是多层集合划分树的上面部分，对应于分层商空间链的粒度较粗部分 $(X^j, f^j, T^j) < (X^{j+1}, f^{j+1}, T^{j+1}) < \dots < (X^n, f^n, T^n)$ ；本地索引是多层集合划分树的下面部分，对应于分层商空间链的粒度较细的部分 $(X, f, T) < (X^1, f^1, T^1) < \dots < (X^j, f^j, T^j)$ ；特别的全局索引的叶子结点，对应于本地索引的根结点。通过定义，实现了商空间(多层集合划分树)与索引的映射关系。

定义 11 全局索引结点：是一个六元组 $GIN = (\text{type}, \text{route}, \text{pN}, \text{cN}, R, LI)$ 。其中：type 是代表索引结点的类型(0 为实体结点，1 为虚拟结点)，route 是基于覆盖网络的路由协议表(记录同层间索引结点路由关系)，pN 为该索引结点的父结点(若无则取值为 NULL)，cN 为子集结点列表(若结点无子集则为 NULL，表示该结点为全局索引中的叶子结点，更细粒度的商空间将为本地索引)，R 表示该结点维护的数据范围，LI 是本地索引(由内部结点和叶子结点组成)。

定义 12 本地索引内部结点：是一个四元组 $LIN = (\text{Level}, \text{Count}, R, \text{cL})$ ，Level 是结点的层次，Count 是指该结点的孩子数量，R 是该结点的数据范围， $\text{cL} = \{(Cp_i, R_i) \mid 1 \leq i \leq \text{Count}\}$ 为子结点列表(Cp_i 为子结点指针， R_i 为子结点的数据范围)。

定义 13 本地索引叶子结点：是一个四元组 $LLN = (\text{Level}, \text{Count}, R, \text{oL})$ ，其中 $\text{oL} = \{(\text{old}_i, R_i) \mid 1 \leq i \leq \text{Count}\}$ 。本地索引的构建采用传统的 B-Tree、R-Tree 或 QuadTree 进行建立，本地索引结点可以对应于一个物理上存在的服务器，也可以是一个主从模式的集群(例如 Hadoop)，在这种情况下选取 NameNode 作为对应的服务器节点。

2.4 查询算法设计

DIM 的查询过程如算法 1 所示，结点获取到查询请求 q 后，首先判断是否被 n.R 所包含(第 1 行)，若是，表明查询请求只需要在该结点内部进行查询，则调用算法 2 进行结点内搜索(第 2-3 行)，并结束查询；若不是，则利用覆盖网络路由表获取同层与 q 有相交的候选索引结点(第 5 行)，然后进行结点内检索并合并查询结果(第 7 行)。由于 DIM 是多层覆盖网络索引模型，任何层级的实体结点都能够接受查询请求，为此，还需要判断本集群是否完全包含查询区域(第 10 行)，若是，将查询请求发送给上层覆盖网络，通过上层覆盖网络转发至其他集群进行检索，以保障查全率(第 11 行)；若不是，则表明查询请求只在本集群中检索即可。

算法 1 索引框架查询算法。

Algorithm DIMQuery(n, q, from)

输入：索引结点 n，查询条件 q，查询请求来源结点 from

输出：查询结果 RS

```

If (q Containedby n.R) Then //仅有结点 n，满足查询请求
    rs=InNodeQuery(n, q); //调用算法 2 进行结点内查询
    Return RS; //返回查询结果，查询结束
Else
    利用结点 n 的覆盖网络的路由协议表 route，获取同层中候选索引结点集合  $N = \{n' \mid n'.R \cap q \neq \emptyset, n' \neq \text{from}\}$ ；
    ForEach ( $n' \in N$ ) Do
         $RS = RS \cup \text{InNodeQuery}(n', q)$ ；
         $\tilde{R} = \bigcup_{n' \in N} n'.R$ 
    EndForEach
    If ( $\tilde{R}$  overlaps q) and ( $n.pN \neq \text{NULL}$ ) Then
         $RS = RS \cup \text{DIMQuery}(n.pN, q, n)$ ； //结点内查询时，不再处理结点 n
    EndIf
    Return RS; //返回查询结果，查询结束
EndIf

```

结点内查询算法用于搜索以其输入结点为根的子树，该算法不再利用覆盖网络获取输入结点同层的其他结点，也不向粗粒度商空间内的索引结点发送查询请求，对应于第一种查询情况。

算法 2 结点内查询算法。

Algorithm InNodeQuery(n, q)

输入: 索引结点 n, 查询条件 q

输出: 查询结果 RS

If (n.type=0) Then //仅有结点 n, 满足查询请求

RS=LocalQuery(LI,q); //利用结点的本索引进行检索

Else If(n.cN≠NULL)Then

从 n.cN 中任取一个结点 cN_i;

RS = RS ∪ InClustersQuery(cN_i, q); //调用算法

3 进行集群内查询

EndIf

Return RS; //返回查询结果, 查询结束

集群内查询实现同一个集群内所有结点的数据查询, 无需利用上层商空间覆盖网络将查询请求转发给同层的其他子集群, 对应第 2 种数据查询情况。如算法 3 所示, 首先获取到与集群内查询请求 q 相交的所有结点, 然后对每个后续结点进行结点内查询, 并将结果求并集。

算法 3 集群内查询算法。

Algorithm InClusterQuery(n, q)

输入: 索引结点 n, 查询条件 q

输出: 查询结果 RS

利用结点 n.route, 获取同层中候选索引结点集

合 $N = \{n' | n'.R \cap q \neq \emptyset\}$;

ForEach($n' \in N$) Do

RS = RS ∪ InNodeQuery(n', q);

EndForEach

Return RS; //返回查询结果, 查询结束

3 面向非欧时空数据索引模型的实现模式

基于笔者提出的非欧时空数据访问模型, 结合受限网络表征受限时空数据的非欧时空特征, 通过建立索引框架管理模型, 统一提供索引构建过程中的数据划分和数据映射。如图 3 所示, 索引框架管理模型包括数据视图管理器、数据划分模块、数据映射模块、本地索引模块和查询引擎等模块。数据视图管理器用以支持用户根据需要在水利对象数据之上定义水利对象及其属性的视图, 形成构建索引的数据对象, 对索引与数据进行松耦合, 将按照业务需求建立起的数据视图中的数据抽象为数据对象, 通过对数据对象进行划分和分布存储建立索引, 数据对象既可以是具体数据实体, 又可以是数据划分属性与指向底层数据记录的指针。

数据划分模块由一系列的分布式网络路由算法操作接口构建, 将需要索引的数据对象划分到分布式集群的计算节点, 实现数据划分模型和全局索引功能。数据映射模块包括 2 个层次映射规则: 第 1 层次是将数据对象的索引划分属性映射到分布式网络的划分空间, 笔者借助文献[15]提出的均匀映射机制和抽样映射机制进行实现; 第 2 层次是在建立本地索引构建和执行查询请求时, 以水利领域为例, 基于水系河网^[16]对受限时空数据的索引划分属性进行非欧空间到欧氏空间的转换, 以表征水利领域数据非欧时空特征。本地索引模块是分布式索引框架(定义)在 $j=0$ 情况下的实例, 用以支持利用传统索引结构(B-Tree、R-Tree 和 QuadTree 等)对通过第 1 层次数据映射机制映射到该计算节点数据对象进行索引, 以提高本地数据检索效率。查询引擎用以执行查询请求, 包括利用第 1 层数据映射机制进行分布式查询路由、第 2 层次数据映射机制的非欧数据查询转换及本地索引执行数据查询等功能。

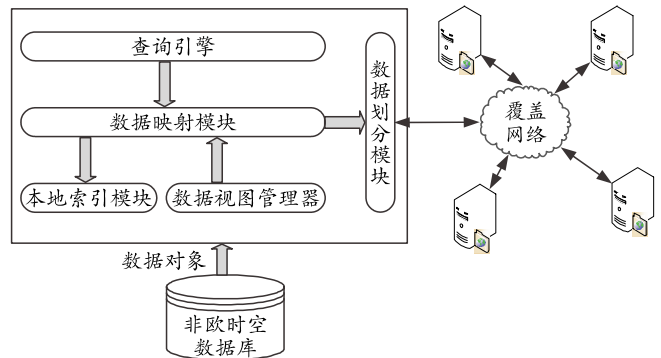


图 3 面向水利对象数据的索引框架管理模型

4 结束语

笔者在对树型索引进行多粒度抽象的基础上, 结合受限网络数据访问模型, 围绕数据划分和查询剪枝等数据索引的基本问题, 引入商空间理论, 对基于商空间的非欧时空数据进行研究, 建立了基于商空间的非欧时空数据索引模型, 设计了索引模型的实现形式。笔者通过对水系河网进行提取与建模^[16], 建立基于水系河网的索引方法^[17], 通过进行河段查询、水系追踪查询和子流域追踪查询对索引模型的查询效率进行了验证, 后续还将结合云计算技术进行索引建立和查询的并行化处理。

参考文献:

[1] 孟小峰, 慈祥. 大数据管理: 概念、技术与挑战[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(1): 146-169.

学出版社, 2014: 13-14.

[3] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 207-208.

[4] 黄亨建, 董海山, 张明. 高聚物改性 B 炸药研究: II [J]. 含能材料, 2005, 13(1): 7-9.

[5] HUANG H J, DONG H S, ZHANG M. Research on Modiacation of Composition B with Polymers(II)[J]. ENERGETIC MATERIALS, 2005, 13(1): 7-9.

[6] 高大元, 蓝林钢, 温茂萍. 改性 B 炸药的力学性能[J]. 含能材料, 2014, 22(3): 359-364.

[7] GAO D Y, LAN L G, WEN M P. Mechanical Properties of Modified Com position B[J]. ENERGETIC MATERIALS, 2014, 22(3): 359-364.

[8] 刘润滋, 王凤英, 刘天生. 不同上下罩高对复合药型罩射流形成影响的数值模拟[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(2): 55-58.

[9] LIU R Z, WANG F Y, LIU T S. Numerical simulation on effects of heights of upper and lower composite liner on jet formation [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(2): 55-58.

[10] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京:

(上接第 82 页)

[2] HOWE D, COSTANZO M, FEY P, et al. Big Data: The Future of Biocuration[J]. Nature, 2008, 455(7209): 47-50.

[3] ZHOU Z H, CHAWLA N V, JIN Y, et al. Big Data Opportunities and Challenges: Discussions from Data Analytics Perspectives [Discussion Forum][J]. Computational Intelligence Magazine, IEEE, 2014, 9(4): 62-74.

[4] LABRINIDIS A, JAGADISH H V. Challenges and Opportunities with Big Data [J]. Proc VLDB Endow, 2012, 5(12): 2032-2033.

[5] FRENTZOS E. Indexing Objects Moving on Fixed Networks [M]//HADZILACOS T, MANOLOPOULOS Y, RODDICK J, et al. Advances in Spatial and Temporal Databases. Springer Berlin Heidelberg, 2003: 289-305.

[6] DE ALMEIDA V, G TING R. Indexing the Trajectories of Moving Objects in Networks* [J]. GeoInformatica, 2005, 9(1): 33-60.

[7] DING Z, LI X, YU B. Indexing the Historical, Current, and Future Locations of Network-Constrained Moving Objects [J]. Ruan Jian Xue Bao, 2009, 20(12): 3193-3204.

[8] ZHIMING D. UTR-Tree: An Index Structure for the Full Uncertain Trajectories of Network-Constrained Moving Objects [M]. Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Data Management. Beijing, China. 2008: 33-40.

[9] LI H, TANG C, QIAO S, et al. UTR*-Tree: An uncertain trajectories model for indexing moving objects in

科学出版社, 2005: 68-96.

[11] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8. 1 进行显示动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 45-110.

[12] LEE E, HORNING H, KURY J. Adiabatic expansion of high explosive detonation products[R]. Lawrence National Laboratory Report UCRI-50422, 1968.

[13] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperature[C]. Proceeding of the 25th International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherland, 1983.

[14] 张国栋, 张国伟, 李阳. 炸药性能参数对爆炸成型弹丸的影响[J]. 机电技术, 2013, 8(4): 51-53.

[15] ZHANG G D, ZHANG G W, LI Y. Effect of Explosive Performance Parameters on Explosive Forming Projectile [J]. Electromechanical Technology, 2013, 8(4): 51-53.

[16] 史慧生. 小长径比石油射孔弹[J]. 爆破器材, 1999, 28(1): 28-32.

[17] SHI H S. Small diameter ratio of oil perforation [J]. Blasting equipment, 1999, 28(1): 28-32.

constrained networks [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(2): 118-125.

[10] TAO Y, KOLLIOS G, CONSIDINE J, et al. Spatio-Temporal Aggregation Using Sketches[C]. proceedings of the Proceedings of the 20th International Conference on Data Engineering, F, 2004 [C]. IEEE.

[11] BENETIS R, JENSEN S, KARCIAUSKAS G, et al. Nearest and Reverse Nearest Neighbor Queries for Moving Objects[J]. The VLDB Journal, 2006, 15(3): 229-249.

[12] FENG J, WU L, ZHU Y, et al. Continuous k-Nearest Neighbor Search Under Mobile Environment; proceedings of the Proceedings of the Joint 9th Asia-Pacific Web Conference on Advances in Data and Web Management, APWeb 2007 and 8th International Conference on Web-Age Information Management, Huang Shan, China, F, 2007 [C]. Springer Verlag: Berlin, Heidelberg.

[13] G TING R H, BEHR T, XU J. Efficient k-Nearest Neighbor Search on Moving Object Trajectories [J]. The VLDB Journal, 2010, 19(5): 687-714.

[14] 张铃, 张钹. 问题求解理论及应用: 商空间粒度计算理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 20-45.

[15] CHEN G, VO H T, WU S, et al. A Framework for Supporting DBMS-like Indexes in the Cloud [J]. Proc VLDB Endow, 2011, 4(11): 702-713.

[16] 冯钧, 唐志贤, 朱跃龙, 等. 一种基于 TIN 数据的河网提取方法: 中国, 201110115791[P/OL]. 2012-12-05.

[17] 唐志贤, 冯钧, 徐曦, 等. 面向水系河网的建模与索引方法研究[J]. 电子科技大学学报, 2015(4): 611-615.