毛善君,杨乃时,高彦清,等.煤矿分布式协同“一张图”系统的设计和关键技术[J].煤炭学报,2018,43(1):280-286.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.4206
MAO Shanjun,YANG Naishi,GAO Yanqing,et al. Design and key technology research of coal mine distributed cooperative “one map” system[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(1):280-286.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.4206

煤矿分布式协同“一张图”系统的设计和关键技术

毛善君[1],杨乃时[2],高彦清[2],张鹏鹏[3],吴道政[3]

(1.北京大学 地球与空间科学学院,北京　100871;2.山西阳泉煤业(集团)有限责任公司,山西 阳泉　045000;3.北京龙软科技股份有限公司,北京　100190)

摘　要:实现煤矿空间信息的一体化管理是智能矿山建设的重要基础。在充分分析国内外现状的基础上,提出了建立煤矿空间数据管理平台,构建分布式协同“一张图”的理念,阐述了实现煤矿“一张图”的软件平台架构、标准规范体系、统一的时态空间数据管理、分布式协同更新、空间数据服务发布等关键技术问题的解决方案,开发了具有我国完全自主知识产权的煤矿专用地理信息系统服务平台,并在阳泉煤业(集团)有限责任公司、神华神东煤炭集团公司、中煤能源集团有限公司等得到实际应用,效果良好。

关键词:智能矿山;分布式协同;一张图;煤矿信息化

中图分类号:TD67　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:0253-9993(2018)01-0280-07

Design and key technology research of coal mine distributed cooperative “one map” system

MAO Shanjun[1],YANG Naishi[2],GAO Yanqing[2],ZHANG Pengpeng[3],WU Daozheng[3]

(1. *School of Earth and Space Science*,*Peking University*,*Beijing*　100871,*China*;2. *Yangquan Coal Industry*(*GROUP*) *Co.*,*Ltd.*,*Yangquan*　045000,*China*;3. *Beijing Longruan Technology Co.*,*Ltd.*,*Beijing*　100190,*China*)

Abstract:To realize the integrated management of coal mine spatial information is an important foundation of intelligent mine construction. Based on the analysis of the status quo at home and abroad,the paper puts forward the concept of establishment of coal mine spatial data management platform,construction of distributed collaborative “one map”,expounds the key technological solutions of the realization of the coal mine “one map” software platform architecture,standard system,unified temporal spatial data management,spatial data service,distributed collaborative update released,and develops a Coal Mine Geographic Information System with independent intellectual property rights. Yangquan Coal Industry Group,Shenhua Coal Group,China Coal Energy Group and other units have practical applications,and the effect is very good.

Key words:intelligent mine;distributed coordination;one map;coal mine informatization

实现对煤矿空间数据的一体化管理是高科技矿山建设的重要基础。煤矿是一个典型的多部门、多专业管理的行业,涉及“采、掘、机、运、通”和“水、火、瓦斯、顶板”等专业方向,如何将分散、孤立的业务系统和数据资源整合到一个集成和统一的管理平台,是科学采矿或高科技矿山建设的关键问题[1]。我国煤炭工业经过 30 多年的发展,其信息化建设已经从数字矿山向智能矿山方向迈进,包括空间数据管理等若干方面已经

收稿日期:2017-12-01　　**修回日期**:2017-12-20　　**责任编辑**:许书阁
基金项目:重点研发计划资助项目(2016YFC0801800)
作者简介:毛善君(1964—),男,四川成都人,教授,博士生导师。Tel:010-62759803,Email:sjmao@pku.edu.cn

取得了丰硕的成果,但还存在如下几个问题:

(1)建立的信息化系统数据孤岛严重,数据共享和交换多数仍是人工方式,缺乏空间数据处理系统之间的业务协同,时效性差,数据仍以分散和弱关联方式存在,系统效率低下,无法满足高科技矿山的建设需求。

(2)采用的信息化技术较为落后,主要是基于传统手工管理模式下的事务处理,如微机制图、数据库管理等。近年来,Internet 和 GIS 等信息技术飞速发展,在国家一系列政策引导下,整个社会正快速向信息化过程迈进。反观煤炭行业,由于历史原因,整体信息化水平相对落后,生产和管理架构都是基于传统的人工管理模式,而且对空间数据的处理,仍有不少企业和业务部门采用不适合处理空间信息的 AutoCAD 作为数据处理平台,无法适应信息化社会对数字煤矿、智慧煤矿、少人或无人煤矿的管理需求[2-4]。

(3)缺乏数据采集、管理和集成共享的规范标准。目前的软件系统主要是事务处理系统,目的与手工数据处理一样,只要完成相关图形的绘制和数值计算任务即可,图形和属性代码、分类、分层、属性内容等没有标准可依,数据处理的规范性弱,系统的实用性受到很大的影响。

(4)近年来,“一张图”的概念已经在我国国土资源管理,甚至煤炭空间信息管理领域开始得到应用,取得了阶段性的成果:① 只是基于统一空间数据库的管理,缺乏实时的业务协同,更缺乏煤炭行业生产矿井、二级公司到集团公司的高度一体化和协同化,不能满足煤炭工业信息化的要求[5-10];② 关于 GIS 数据的协同更新,国内外很多学者也参与了相关研究,如 Mac Eachren 和 Brewer 给出了用于可视化的地理协同概念框架,包括评估和开发协同系统的 6 个重要方面,涉及用户和协作环境之间的交互及协同系统的支持[11]。Yaqin SUN 和 Songnian LI[12] 开发了一个实时协作 GIS 系统原型,支持空间查询和缓冲区分析功能的协同工作。Zar Chi AYE 等[13] 基于经验数据给出了用于水文气象灾害管理的概念框架,强调用户的参与和体验。MARION 和 JOMIER[14] 尝试了用 WebGL 和 WebSocket 开发 3D 实时协作可视化,并在平均延迟、同步速率、主渲染速率方面进行评估。SHIVANAND 和 SUZANA[15] 等提出了一种协同地理信息系统方法,将地方和技术专家的知识与现有的空间环境数据结合起来,建立生物多样性保护的优先领域。BOROUSHAKI 等[16] 提出了一个协作的 WebGIS 多标准决策分析框架,着重于设计和实施概念框架的基础理论和技术,采用服务器端架构方法来实现基于 Web 的 GIS。BLAGOJ 等[17] 采用 OpenLayers,GeoServer,PostgreSQL 等搭建了可从任何地方访问的实时多用户协作平台原型,可以灵活地添加额外的组件和服务,并且可以根据工作负载进行扩展。这些离实用还有一定距离的原型系统,也同样不适合煤炭工业安全生产的业务流程。

煤矿生产环境复杂多变,为了实现安全生产的目标,需要地测、一通三防、机电、生产等业务部门紧密协同,实时处理,并结合井下人员定位、视频、轨道运输、胶带、提升、安全监测、瓦斯抽采、供电、排水、大型机电设备等大量监控系统来保证对井下信息的全方位掌控,以保证安全生产。运用先进的信息化技术、自动化技术,借助物联网、大数据和云计算等最新发展成果构建智能矿山,以信息化手段推进煤炭生产方式变革,是新常态时期降低安全事故、提升生产效益的必然举措,是煤炭企业在资源、安全、环保政策的强力约束下应对严峻市场危机、促进企业转型升级的必然选择[18]。目前,在我国煤炭工业,全面的智能矿山建设已经提上议事日程,其关键技术之一就是实现煤矿空间信息管理的一体化、协同化。

因此,结合煤炭工业信息化存在的问题和实际需求,基于 Internet、最新的空间信息技术,本文提出了煤矿分布式协同“一张图”(简称“一张图”)的管理理念,并对涉及的技术架构、关键技术等内容做了深入探索与实践,为智能矿山的顺利建设提供了高技术保证。

1 煤矿“一张图”管理的思路

煤矿安全生产涉及地质、测量、采掘、设计、机电、运输、通风等各种专业业务部门,种类繁多,数据更新快,且业务部门之间数据交互频繁。煤矿“一张图”就是以新一代信息技术、矿山专业 GIS 技术及与信息化相适应的现代企业管理制度为基础,以分布式、协同化的网络服务为纽带,基于统一的基础地理空间参考系、统一的数据标准规范体系、统一的 GIS 平台、统一的空间数据存储,借助 GIS 特有的地理空间及属性关联特性,建立以地测(如采掘工程平面图)数据为基础(图 1),整合、关联和分层叠加各类安全管理、计划审批、生产调度、安全监测、综合自动化、人员定位、通防系统等数据,共同构建一体化的生产技术和安全综合监管平台,为生产控制层、生产执行层、经营分析层、决策支持层提供最新或实时的数据和服务。

“一张图”是掌握全集团、全矿井安全生产状况的“电子沙盘”或作战指挥地图,是制度、机制、数据及其管理、技术、标准、应用和服务的总和,其核心理念是“综合、集成”统一管理、“随时、随地”访问使用,

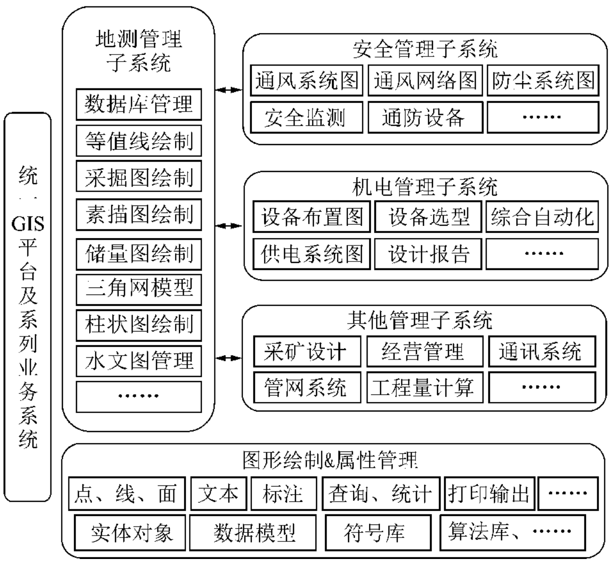


图 1　“一张图”涉及的专业内容及应用示意

Fig. 1　Sketch map of “one map” involved in the professional content and application

“持续、及时”协同、动态更新。

在“一张图”模式的数据组织管理方式下，数据是按照 GIS 图层的方式存在，每一类专题数据均对应一个或若干个图层，又根据权限进一步对应具体的部门或人员。这样，每个岗位负责各自数据的更新和维护，并通过“一张图”服务端的协同，自动推送给其他所有数据关注人员，解决了数据统一存储和更新的问题。针对煤矿日常实际业务，一个基于“一张图”模式的典型业务流程如图 2 所示。

2　煤矿“一张图”平台技术架构

“一张图”管理是指在建立数据标准规范、数据存储环境之后，将原有相互独立的各类业务数据，根据地理空间参考、对象属性等关联关系，统一纳入 GIS 空间数据库管理。同时，随煤矿生产的不断进行，利用 GIS 空间数据库的时态特性，对相关数据进行分布式协同更新，并根据版本建立历史记录和回溯机制，实现实时更新的“一张图”、全过程可回溯的“一张图”。系统包括数据源、协同更新服务、数据存储、业务应用 4 层架构，如图 3 所示。

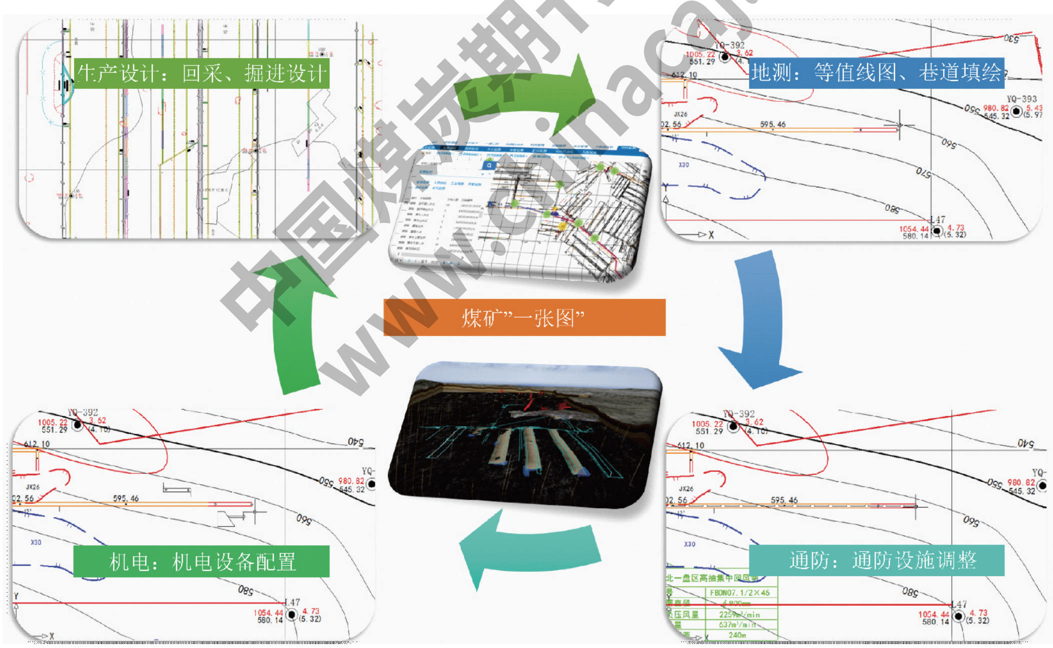


图 2　基于煤矿“一张图”的数据协同更新原理

Fig. 2　Principle of data cooperative updating based on the “one map” of coal mine

(1) 数据源层。

数据源有地测、通防、机电、生产、设计等业务的管理数据，监测监控、人员定位、综合自动化等实时数据等，以及煤矿生产各个阶段的历史数据、档案资料等。

(2) 协同更新层。

通过基于煤矿协同 GIS 平台的各业务管理系统，如地测空间管理系统、通风管理系统、供电辅助计算及图形系统、采矿辅助设计系统等，将各类业务数据纳入“一张图”业务数据库和空间数据库。同时，对于监测监控、综合自动化等实时数据，通过对接设备厂家，解析各类数据协议，实现与 GIS 关联并接入、集成到“一张图”实时数据库。

(3) 数据存储层。

根据标准规范，与地理空间位置相关的图形数据和属性数据存储到空间数据库；与业务管理流程

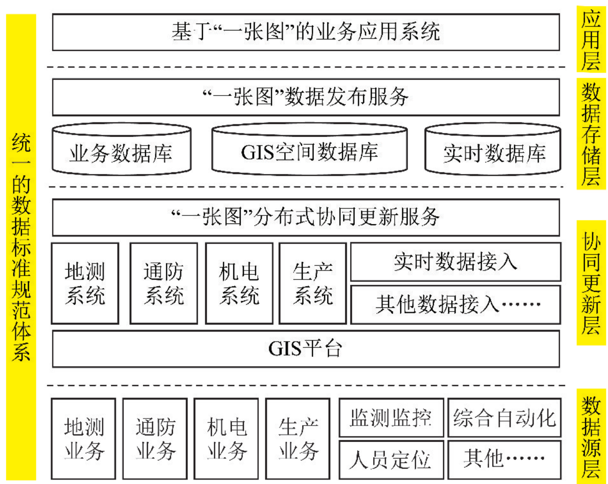


图 3　煤矿“一张图”技术架构

Fig. 3　Technical framework of “one map” of coal mine

相关的数据存储到业务数据库;各类实时数据通过添加与 GIS 空间数据库关联关系后,存储到实时数据库。同时,数据存储层通过建立空间索引、属性索引等相关机制,对数据存储和访问进行优化,通过统一的数据发布接口,提供高效、全面、准确的矿井数据访问服务。

(4)业务应用层。

应用层包括各类基于“一张图”的业务应用系统。在“一张图”数据发布服务提供的支撑下,可以将原有分散、孤立的业务系统,通过“一张图”数据的关联,搭建跨业务、跨部门的综合型应用系统。

3　煤矿“一张图”关键技术

3.1　标准规范体系

煤矿“一张图”的目标是建立全矿井乃至全集团基础数据管理和应用平台。由于面对的业务和数据来源复杂多样,无论从原始数据的入库管理,还是实时或成果数据的集成应用,都必须以统一的标准规范为前提。

煤矿“一张图”管理的数据以地理空间数据为主。国家测绘局曾组织发布了《基础地理信息要素分类与代码》、《地理信息分类与编码规则》等一系列基础地理信息国家标准,但主要面向地形图及相关要素,如地理要素方面包括水系、居民地及设施、交通、管线、境界与政区、地貌、植被与土质、地名等,缺乏对地下空间要素,特别是煤矿专业领域的具体标准。

本文在参考国家相关标准指导思想、制定原则、分类编码规则、完整性和可扩展性要求等内容的基础上,结合我国煤矿的实际情况,提出了煤矿“一张图”建设的空间数据标准规范框架,包括分类标准、编码标准、分层标准及要素数据字典等。因受篇幅限制,下面主要简介一下“分类标准”:

将煤矿数据类型分为大类、中类、小类、子类、要素类 5 个层次,并规定了大类、中类、小类、子类、要素类的分类名称,要素类根据应用需求再进行细分和命名。

煤矿的大类是根据数据的来源,即根据煤矿中各专业部门产生的煤矿数据分为 6 大类,见表 1。

对于煤矿数据涉及的地形部分,可按 GB/T 13923—2006 执行。

3.2　时态空间数据管理

煤矿数据具有典型的“时态”特性。随煤矿的开采,安全生产管理关注的重点数据会发生或多或少的变化,如巷道掘进、工作面开采、环境监测、煤层形态等。因此,煤矿“一张图”不仅要存储和管理实时最新的煤矿现状数据,还需要支持对历史数据进行回溯管理。

表 1　煤矿地理信息要素分类

Table 1　Classification table of geological information elements in coal mines

大类	地质类	测量类	机电类	运输类	通防类	安全类
代码	(01)	(02)	(03)	(04)	(05)	(06)
中类	地层、地质构造、地质边界、储量估算、……	控制点、井巷工程、……	工作面支架、采掘机械设备、……	工作面设备、巷道运输设备、……	通风、防灭火、防尘、瓦斯抽采、……	采集端设备、传输控制设备、……
小类	地层年代、断层、陷落柱、风氧化带、……	经纬仪导线点、回采工作面、巷道、……	支架、支柱、采煤机、掘进机、装载机、……	刮板输送机、转载机、输送机、……	通风设备、防灭火设备、……	安全监控、人员定位、水文监测、……

关于时态 GIS,国内外相关研究成果较多,例如时空数据库的设计及利用时空 GIS 数据库实现时空交互的框架等[19-20],为时态空间数据的管理提供了理论基础。本文针对煤矿业务管理的实际需求,从满足“一张图”数据变化的管理以及基于时间点的历史数据回溯的需求出发,提出了基于 GIS 空间数据库的版本化时态空间数据管理方案。

在 GIS 空间数据库中,一个典型的数据集表存储

模型包括对象 ID、对象外包矩形、对象几何数据(点、线、面等元素)、属性,见表 2。当数据发生变化时,一般系统中数据的修改会直接覆盖原有数据集表中的记录。基于版本化的时态空间数据管理,对每一个数据集对象表,建立一一对应的数据集对象历史版本表,增加了协同 ID、版本 ID、版本类型 3 个数据维,见表 3。

表 2 数据集对象

Table 2 Dataset object table

实体 ID	系统保留	外包矩形最小 X	外包矩形最大 X	外包矩形最小 Y	外包矩形最大 Y	几何数据	属性

表 3 数据集历史版本

Table 3 Data set history version table

实体 ID	系统保留	协同 ID	版本 ID	版本类型	外包矩形最小 X	外包矩形最大 X	外包矩形最小 Y	外包矩形最大 Y	几何数据	属性

同时,在空间数据库中建立全局的版本记录表,包括版本 ID、版本创建时间、版本创建者、版本唯一标识、版本描述等。当数据发生变化时,将经过如下步骤:① 检查相关变化的数据是否存在版本冲突;② 冲突检查完成后,在全局版本记录表中添加一条 ID 为 VN 的记录;③ 在数据集历史版本表中插入所有变化实体对应的 VN 历史版本记录,并区别版本类型(新增、删除、修改);④ 将变化实体的数据更新到数据集对象表。

基于 GIS 空间数据库的版本化时态空间数据管理方案以版本代替直接的时间维,可以大大减少时态 GIS 中保存连续时间数据带来的数据冗余及复杂度问题,在数据存储的时间和空间方面达到了比较好的平衡。同时,数据物理存储的粒度也控制到了实体对象级别,可以很好的满足对于数据修改历史记录和回溯的需求。

3.3 分布式协同更新

智能煤矿的建设和日常生产,需要地测、通防、机电、生产等业务部门紧密协作,智能工作,是一个典型的多人协作工作场景。煤矿“一张图”在建立全矿井的数据存储平台后,必须支持各类数据的实时更新,并能够快速、高效地在各业务部门间同步共享。

GIS 数据的协同更新,除了数据管理和存储方案研究之外,最关键的是冲突处理问题。冲突处理方法可以分为 2 种大的类型:① 无冲突法,即阻止任何同时发生的更新以避免冲突;② 冲突消解法,即允许有冲突,采用一定的机制处理冲突。常见的并发控制算法有加锁法、集中控制法、事务机制、依赖检测、可逆执行、操作转换等。Saul GREENDERG 把这几种并发控制方法概括为加锁法和可串行化法 2 类机制,并指出每一种都可以细分为乐观和悲观法。加锁法通过对共享数据的加锁与解锁来控制用户的并发操作,通常分为乐观锁和悲观锁,可以有效地保证共享数据的一致性。加锁法需要控制加锁粒度合理,否则影响系统效率。王劲波、薛永生等对并发控制中的几种锁模型在分布式环境下进行拓展,提出了一种基于加锁粒度的分布式高优先级两段锁模型。

本文在基于版本化的时态空间数据管理方案基础上,采用中心协同服务来解决数据的一致性入库问题,同时对于可能发生的冲突采用乐观处理策略。协同更新处理流程如图 4 所示。

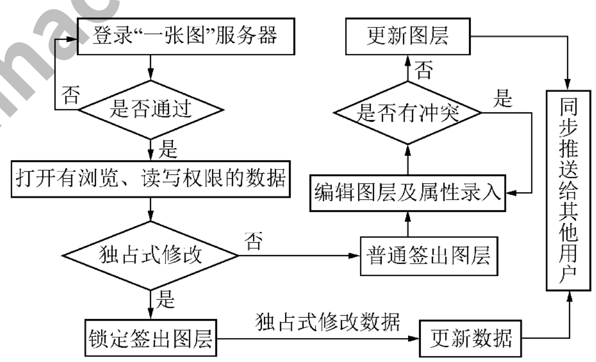


图 4 分布式协同更新处理流程

Fig. 4 Distributed collaborative update processing flow

中心协同服务是实现数据协同更新的中枢环节,承担识别服务请求类型、基本请求的处理以及将复杂请求分发给目录服务器或应用服务器的任务。在数据源比较多时,数据引擎服务器的压力较大,可采用分布式部署的方式,管理服务器负责将数据操作请求分发给相应数据源的引擎服务器,起到数据层负载均衡的作用。

协同服务的主要功能是实现基于“一张图”的多用户在线编辑、数据获取和数据保存、主要包括数据的请求(最新版本或特定版本)、数据的获取(最新数据或特定版本数据)、数据的提交、数据的签出、数据的锁定与取消锁定、图层管理、用户数据冲突处理、用户管理、用户与图层关联管理、权限管理、用户与权限关联管理、资源状态管理、历史版本管理、数据审核

等。多专业协同处理示意如图 5 所示。

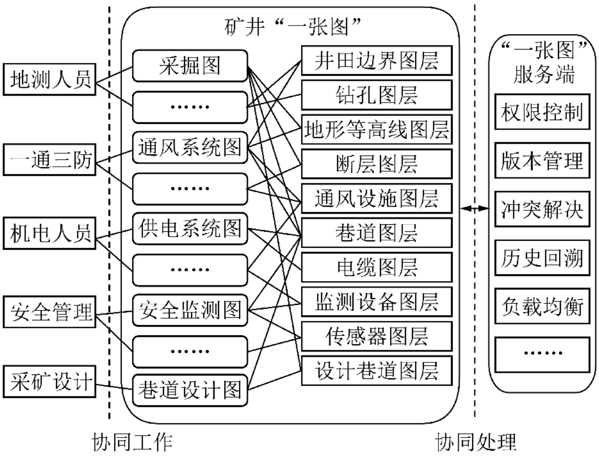


图 5　多专业协同处理技术示意

Fig. 5　Sketch map of multi professional cooperative processing technology

3.4　空间数据服务发布

在实现全矿井或全集团各类数据“一张图”管理和分布式协同更新后,还需要解决如何方便、快速、流畅地访问和使用“一张图”成果数据的问题,从而将煤矿“一张图”真正作为矿井安全生产管理中的基础数据管理和业务应用支撑平台。

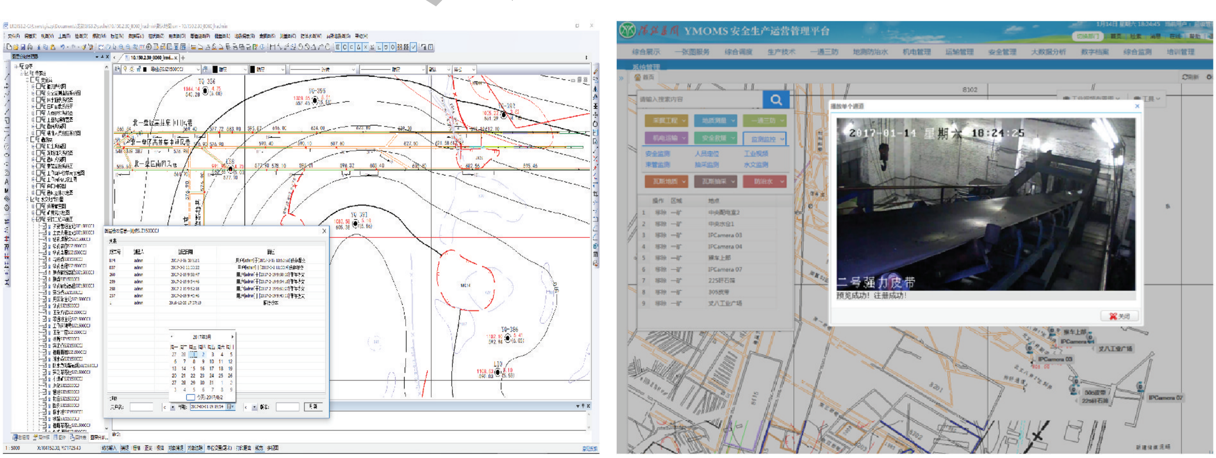
煤矿“一张图”数据量大(一般在 10 GB 以上)、数据类型多样(图形、图像、音频、视频、属性、附件等)、访问和统计分析需求量大,这些都对“一张图”数据的对外服务能力提出了很高的要求。

WMS(Web Map Service,网络地图服务)和 WMTS(Web Map Tile Service,网络地图切片服务)是 OGC 定义的 GIS 标准网络地图发布服务协议,可以用来解决煤矿“一张图”中大量的图形数据对外提供服务的问题。WMS 提供的是实时切图服务,每次服务请求均会在服务端根据矢量数据渲染成图片返回客户端,效率较低;WMTS 则需要服务端提前准备好所有矢量数据的切片,服务请求发生时直接返回静态图片,效率更高,是 GIS 应用中主流的方式。

煤矿相比其他行业的 GIS 应用,由于其数据动态变化周期很短,无法采用一般的 WMTS 方案,而单纯采用 WMS 方案又会存在性能问题。本文在版本化时态空间数据管理的基础上,采用“WMS+WMTS”混合的地图服务方案来优化煤矿“一张图”数据的存储和访问能力。在默认情况下,地图服务端会提供 WMTS 的静态切片访问,当“一张图”数据经过分布式协同更新时,会发送局部数据更新的消息到地图服务端,并触发 WMS 服务来完成对局部地图切片的更新,从而在保证数据最新的前提下,兼顾地图服务的性能问题,并使全矿井数据的查询和访问响应时间在秒级以下。

4　应用实例

本文提出的煤矿“一张图”平台建设思路及相关关键技术在阳泉煤业集团等矿区进行了实际应用。结合阳泉煤业现行企业标准规范,建立了本文设计的“一张图”数据组织和管理标准规范,通过中心协同服务端的支撑入库,形成了生产矿井的“一张图”时态空间数据库,并可以通过协同 GIS 客户端实现“一张图”内数据的分布式协同实时更新,如图 6(a)所示。



(a)生产矿井“一张图”数据及协同更新　　(b)集团“一张图”的业务管理应用

图 6　煤矿“一张图”的应用

Fig. 6　Application of “one map” of coal mine

基于分布式协同 GIS 平台支持下的最新“一张图”成果,通过地图服务发布、各类业务应用,可以很方便地集成使用,以阳泉煤业安全生产运营管理平台系统为例,基于集团“一张图”的支撑,各管理部室可以很方便的掌握下属矿井的实时运行状况,如图 6(b)所示。

5 结 论

根据智能煤矿建设的需求,本文提出了煤矿分布式协同“一张图”的管理和建设思路,对与“一张图”技术体系相关的数据标准规范、煤矿时态空间数据管理、分布式协同更新、空间数据服务发布等关键技术进行了探讨和研究,形成了一整套适合煤矿实际应用的“一张图”解决方案。

实践证明,煤矿和矿业集团“一张图”的管理思路和方法可以有效解决煤矿信息化过程中数据孤岛严重、信息化基础不牢、数据难集成、智能化分析水平差、应用效果不佳等问题,对充分发挥信息化在煤矿安全生产和管理中的作用,并最终建立智能矿山具有重要的现实意义。

煤矿和矿业集团“一张图”管理平台的实现,为我国煤炭工业“一张图”、国家安全监管总局“一盘棋、一张网、一张图、一张表”战略目标的顺利实施奠定了坚实的基础。

参考文献(References):

[1] 钱鸣高,许家林. 科学采矿的理念与技术框架[J]. 中国矿业大学学报(社会科版),2011(3):1-7.
QIAN Minggao,XU Jialin. Concept and technical framework of sustainable mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology(Social Science),2011(3):1-7.

[2] 吴立新,汪云甲,丁恩杰,等. 三论数字矿山——借力物联网保障矿山安全与智能采矿[J]. 煤炭学报,2012,37(3):357-365.
WU Lixin, WANG Yunjia, DING Enjie, et al. Thirdly study on digital mine:Serve for mine safety and intellimine with support from IoT[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(3):357-365.

[3] 孙继平. 煤矿信息化与智能化要求与关键技术[J]. 煤炭科学技术,2014,42(9):22-25.
SUN Jiping. Requirement and key technology on mine informationalization and intelligent technology[J]. Coal Science and Technology,2014,42(9):22-25.

[4] 毛善君. 高科技煤矿信息化建设的战略思考及关键技术[J]. 煤炭学报,2014,39(8):1572-1583.
MAO Shanjun. Strategic thinking and key technology of informatization construction of high-tech coal mine[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(8):1572-1583.

[5] 侯水云,毛善君,李文生. 煤矿地测“一张图”平台关键技术研究[J]. 煤炭科学技术,2017,45(8):32-36.
HOU Shuiyun,MAO Shanjun,LI Wensheng. Study on key technology of “one map” platform in coal mine[J]. Coal Science and Technology,2017,45(8):32-36.

[6] 黄兴. 国土一张图架构体系和关键技术研究[J]. 地理空间信息,2014,12(4):164-166.
HUANG Xing. Research on structure system and key technologies of one land map[J]. Geospatial Information,2014,12(4):164-166.

[7] 许等平,李晖,庞丽杰. 全国林地“一张图”数据库建设及扩展应用[J]. 林业资源管理,2015(5):36-43.
XU Dengping, LI Hui, PANG Lijie. Research of key technology for national forest-land “One Map” Database[J]. Forest Resources Management,2015(5):36-43.

[8] 陈国良. 煤矿区一张图建设的若干关键技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2011.

[9] 李红玲,肖金榜. 煤矿“一张图”概念及其体系结构研究[J]. 测绘与空间地理信息,2014,37(8):168-171.
LI Hongling,XIAO Jinbang. The concept of coal mine “One Map” and the study of its system structure[J]. Geomatics & Spatial Information Technology,2014,37(8):168-171.

[10] 聂立功,张海军. 基于 GIS 的煤矿井下电力监控管理系统[J]. 工矿自动化,2013,39(11):93-95.
NIE Ligong, ZHANG Haijun. Underground power monitoring and management system based on GIS[J]. Industry and Mine Automation,2013,39(11):93-95.

[11] BREWER I. Developing a conceptual framework for visually-enabled geocollaboration[J]. International Journal of Geographical Information Science,2004,18(1):1-34.

[12] SUN Yaqin,LI Songnian. Real-time collaborative GIS:A technological review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2016,115:143-152.

[13] AYE Z C,SPRAGUE T,CORTES V J,et al. A collaborative (web-GIS) framework based on empirical data collected from three case studies in Europe for risk management of hydro-meteorological hazards[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction,2016,15:10-23.

[14] MARION C,JOMIER J. Real-time collaborative scientific WebGL visualization with WebSocket[A]. Web3D'12 Proceedings of the 17th International Conference on 3D WEB Technology[C]. 2012:47-50.

[15] BALRAM Shivanand,DRAGICEVIC Suzana,MEREDITH Thomas. A collaborative GIS method for integrating local and technical knowledge in establishing biodiversity conservation priorities[J]. Biodiversity & Conservation,2004,13(6):1195-1208.

[16] SOHEIL Boroushaki,MALCZEWSKI Jacek. Participatory GIS:A web-based collaborative GIS and multicriteria decision analysis[J]. URISA Journal,2010,22(1):1-25.

[17] DELIPETREV Blagoj,JONOSKI Andreja,DIMITRI P Solomatine. Development of a web application for water resources based on open source software[J]. Computers & Geosciences,2014,62:35-42.

[18] 韩建国. 神华智能矿山建设关键技术研发与示范[J]. 煤炭学报,2016,41(12):3181-3189.
HAN Jianguo. Key technology research and demonstration of intelligent[J]. Journal of China Coal Society,2016,41(12):3181-3189.

[19] GAIL Langran. A review of temporal database research and its use in GIS applications[J]. International Journal of Geographical Information Systems,1989,3(3):215-232.

[20] SHAW Shih-Lung,XIN Xiaohong. Integrated land use and transportation interaction:A temporal GIS exploratory data analysis approach[J]. Journal of Transport Geography,2003,11(2):103-115.