



面向智能电网二元复杂网络的电力统一空间信息模型

刘汇慧¹, 杨成月², 吴丽莎³, 张翼英⁴

- (1. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079;
2. 国网信息通信产业集团有限公司深圳市国电科技通信有限公司, 广东 深圳 518031;
3. 国网安徽电力安庆供电公司, 安徽 安庆 230061;
4. 天津科技大学计算机科学与信息工程学院, 天津 300222)

摘要:智能电网融合了电力网和电力通信网(以下简称二元网络),是现代电网的升级和跨越。针对电力空间信息模型存在的信息共享、专题应用及动态展示等难题,提出了面向智能电网二元网络的统一空间信息模型。分析了电力企业二元网络统一模型管理需求,按照抽象、实体、业务3个层次构建了二元网络的几何对象、拓扑关系、台账参数的概念模型与逻辑模型,实现了基于公共信息模型的电力二元网络统一空间信息模型表达、建模和一体化管理。

关键词:智能电网;二元网络;统一空间信息模型;概念模型;逻辑模型

中图分类号:TP399

文献标识码:A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016148

Power unified spatial information model for smart grid dual complex network

LIU Huihui¹, YANG Chengyue², WU Lisha³, ZHANG Yiyi⁴

1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China
2. China Gridcom Co., Ltd., State Grid Information & Telecommunication Group Co., Ltd., Shenzhen 518031, China
3. State Grid Anhui Electric Power Company, State Grid Anqing Power Supply Company, Anqing 230061, China
4. College of Computer Science and Information Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China

Abstract: Smart grid refers to the next generation power grid in which the electricity distribution and management are upgraded by combining the power grid and power communication network (called dual network). According to the problems, such as the power spatial information sharing of multi-business integration problem, the thematic application and the dynamic display etc, the new power unified spatial information model (PUSIM) was proposed for smart grid dual network. Based on the abstract layer, entity layer and business layer, PUSIM built the geometric object, topology relationship and the conceptual model and logical model of account property for the dual network, and constructed the unified model, expression and integration management for the dual network based on common information model.

Key words: smart grid, dual network, unified spatial information model, conceptual model, logical model

收稿日期:2016-03-20;修回日期:2016-05-11

通信作者:张翼英, winzyy@163.com

1 引言

随着智能电网建设的推进,电力网能量流和电力通信网信息流交织在一起,并且业务交互日益频繁,最终使得未来智能电网在很大程度上将发展成为由信息通信网和物理电力网构成的相互依存的二元复合网络^[1]。电力地理信息系统(geographic information system, GIS)为面向智能电网的二元网络资源信息化管理提供了强大的支撑^[2]。电力地理信息系统逐步由输电 GIS、配电 GIS、通信 GIS 等单个孤立地理信息系统向企业级空间信息共享服务平台演进。电力 GIS 在面对多域多态电力业务资源的信息化管理,需要结合通信技术、网络技术和 GIS 技术,从专业化、集成化向统一化演进,以降低空间信息的冗余度,提高 GIS 综合智能化决策能力。

但是电力 GIS 具有很强的专业性和区域性,既不规范,也不统一,在信息共享、专题应用及动态展示等方面实现困难。同时,智能电网支撑能源互联网的发展,更加要求电力企业二元网络必须高度融合、进行统一管理,实现“电力流、信息流、业务流”的高度一体化应用;要求网络专题图能够准确、实时、直观地反馈二元网络变化。那么,面向智能电网的二元网络,仅通过集成的演进方式很难从根本上实现涉及空间信息的业务融合和空间数据的无缝共享。而且它会不断地增加资源维护的工作量并带来大量的冗余数据,数据现势性无法保证。同时数据更新容易出错,很难及时发现并纠正,在错误网络专题图应用中很可能造成错误调度,造成人身伤亡事故。本文提出基于多业务管理模型的电力统一空间信息模型(power unified spatial information model, PUSIM),是解决上述问题的有效方法。PUSIM 依托电力企业现代管理理念,面向资源优化和应用整合,以企业级电力 GIS 一体化平台为基础,可有效提升 GIS 应用水平,提升业务 GIS 的综合决策能力,增强企业核心竞争力,从而能够更好地支撑和推动智能电网的快速、健康发展。

2 电力空间信息模型

2.1 IEC CIM 国际电网公共信息模型标准

CIM(common information model)是一个抽象模型,描绘了电力企业中所有的主要对象,包括这些对象的公共类、属性以及对象之间的关系等。由于 CIM 对电力系统对象的描述本质上是抽象的,因此 CIM 具有广泛应用空间,这一标准可以理解为是在任何一个领域使集成成为可能

的一个工具,只要那里需要一个公用系统模型来促进各种应用和系统之间的互操作性和插入兼容性,而且这和任何一种特定的实现无关。IEC CIM 标准的建立为电力企业各系统数据建模和系统间数据交换与集成提供了基础^[3]。

2.2 SG-CIM 国家电网公司公共信息模型标准

为满足 SG-ERP 建设目标,国家电网公司在 IEC 系列标准基础上对 CIM 进行扩展,并形成了统一信息模型(SG-CIM)标准。SG-CIM 直接引用 IEC61970/61968CIM 中与国家电网公司相符的内容;此外,SG-CIM 中亦包含 CIM 未涵盖、但依据国家电网公司需求进行了个性化扩展的内容。SG-CIM 实现了不同层面、不同系统、不同结构的数据统一表达和统一访问途径,完成了不同应用系统之间的通用数据共享方案^[4]。但是 SG-CIM 模型未考虑通信设备;对于 GIS 模型仅仅是从系统集成角度考虑。特别是基于 SG-CIM 标准来设计电力空间信息模型的相关研究内容还未见报道。

3 电力业务对统一空间信息模型需求分析

3.1 电力业务资源需求

(1)数据共享

电力通信网是保证电网安全可靠运行的基础,主要随电网建设而同步敷设。因此,电力业务资源在空间资源范围内的相同点或相似点达到 95%;而电力 GIS 作为管理电力业务资源最有效的平台之一,各业务 GIS 应用之间存在平台版本、资源模型、管理粒度、应用模式等方面的不统一,造成多域多态网络下的资源建设不能有效保证其资源的完整性和唯一性。因此,迫切需要建立电力空间统一信息模型,以达到统一 GIS 平台、规范资源建设以及避免资源冗余的目的,实现电力业务资源合理有效和完整共享。

(2)数据维护

电力二元网络纵横交错、资源类型繁多,一般通过传统的测绘、制图方法进行资源信息运维。图纸保存历史数据,但实际情况是不断变化的,因而不可避免地导致图纸信息的过时和不准确。更为棘手的是多域多态网络资源的运维,由于受各不同专业运维人员的维护,因此极易出现同一对象多人维护且维护信息不一致现象,缺乏资源维护的有效联动性,对公共资源而言是一种浪费。

3.2 电力业务应用需求

(1)生产管理

将电网地理信息、设备接线图、实时监测信息、业务流程



信息、设备台账和维护信息等数据有机结合,进行统一管理。

(2) 营销管理

将 GIS 技术应用于新装/增容/变更、线损管理、计量点管理、客户关系管理、客户联络管理等业务,为用电管理和用电咨询提供依据,提高客户服务响应速度。

(3) 防灾应急

基于 GIS 整合生产管理 GIS、营销管理 GIS 等业务信息,实现跨地域、跨部门的空间数据共享,基于 GIS 电网在线综合评估、抢险救灾、资源分配、辅助调度、灾患综合治理与应急演练集于一体,实现防灾、减灾、治灾和应急全过程管理,提供可视化和智能化辅助应急指挥手段^[9]。

(4) 电网规划

为电网规划专责提供历史断面电网、现状电网和未来规划电网的全面动态空间信息资料;在地理图上进行可视化的电网规划设计,开展变电站站址以及输配电线路路径设计优选;基于 GIS 的负荷预测和电网规划方案优选,提高电网规划设计水平^[9]。

4 电力统一空间信息模型

统一空间信息模型 PUSIM 构建了抽象、实体及业务网络层次模型,建立了对象数据模型、统一拓扑模型和场景应用模型,在应用灵活性、资源共享性、决策综合性、运维复杂度和业务融合度方面比传统电力 GIS 模型有了根

本性的变化,这些变化将对地理网络模型、实体网络模型、业务网络模型以及模型应用的研究工作带来挑战。下面拟从网络层次模型、统一拓扑模型和应用场景模型等方面进行分析讨论。

4.1 网络分层模型

电力 GIS 由现实地理空间中一系列电力特征以及电力特征之间的关系组成。其中,电力特征是指用于描述电力领域中具有空间或时空位置的客观实体或现象的地理对象。在综合业务应用中,电力特征网络具有描述、承载和计算等作用;同时具有复杂性和多样性的特点,要求数据描述详细、应用表达灵活和智能分析全面。从场景、空间以及层次 3 个维度描述电力特征概念如下:

$Power_Feature = \langle ID, SCENE(spacelevel), SPACE(scalelevel), LEVEL \rangle$

其中, ID 表示电力特征独一无二的标识; $SCENE$ 表示电力特征的场景属性,它可随空间($space$)变化而变化,也可随层次($level$)变化而变化; $SPACE$ 表示电力特征的空间属性,它可随场景变化而变化; $LEVEL$ 表示电力特征的层次属性。

针对电力业务资源,从数据和应用两方面,深入剖析电力业务资源的动/静态、直接/间接、共性/个性等表达的特点,形成抽象、实体、业务 3 层网络的层次框架(如图 1 所示)。

在 PUSIM 中, $Power_Feature$ 所表达的电力业务资源

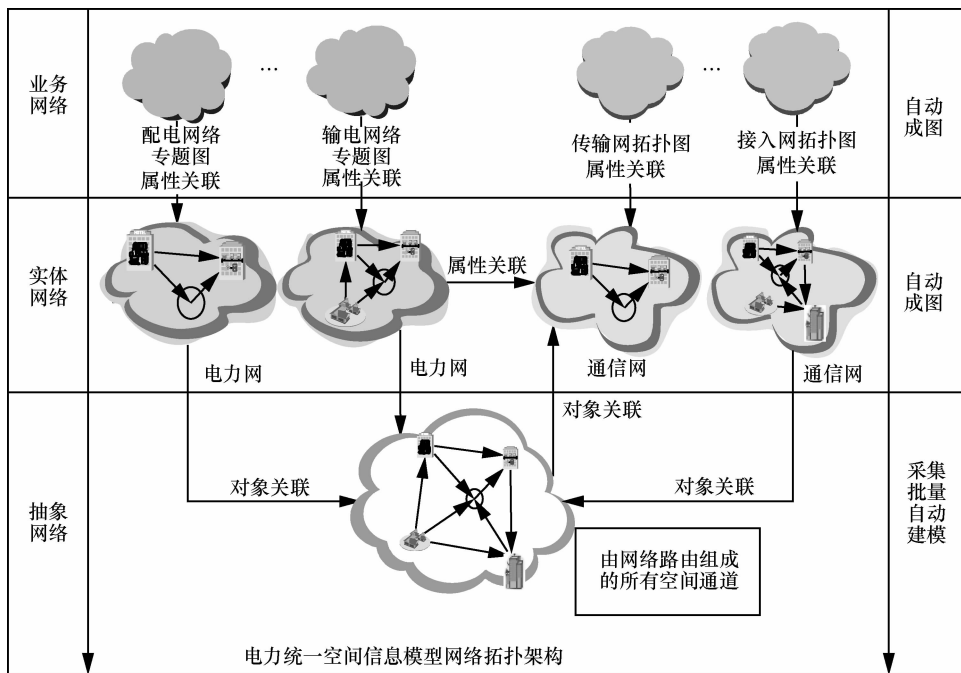


图 1 PUSIM 网络分层示意

实体在信息化应用中主要通过对象、属性、关系进行描述(如图 2 所示)。其中,实时数据是资源实体相关的实时信息(性能数据、状态信息、SCADA(supervisory control and data acquisition)等)。电力业务资源实体在 GIS 上通过点、线、面 3 种组合方式进行展示。

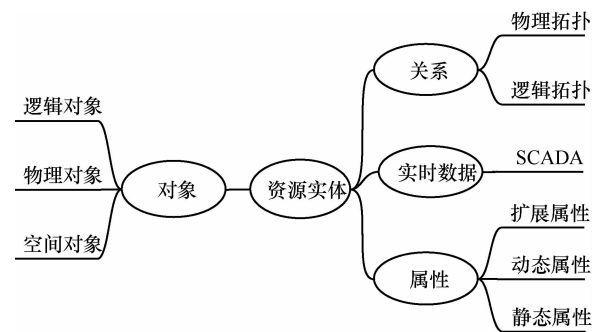


图 2 电力实体资源描述

PUSIM 中各层级的对象之间存在映射关系(如图 3 所示),使得比传统电力 GIS 单一模型在数据共享、灵活展示、综合分析方面具有优势,且更加智能化。电力业务资源空间表达的网络分层模型是电力统一空间信息模型的核心思想。

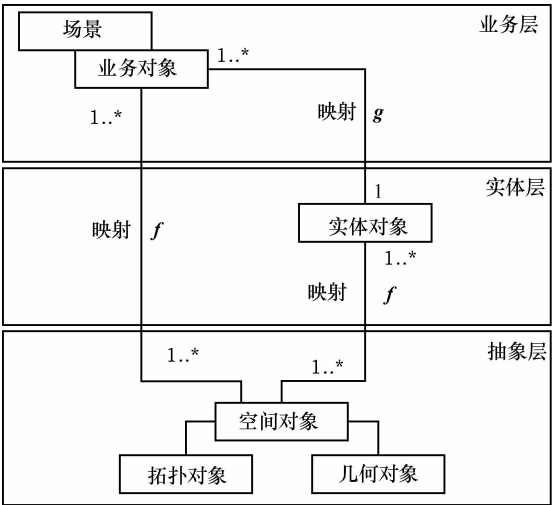


图 3 PUSIM 3 层结构关系

4.2 统一拓扑模型

GIS 空间拓扑关系庞大而又复杂,从 Egenhofer 等人^[7,8]提出 4-交集模型和 9-交集模型,到区域连接计算(region connection calculation, RCC)模型^[9,10],再到 CBM(calculus based method)空间拓扑关系分类方法^[11]以及基于层次分类方法(hierarchy based method, HBM)等,均对空间拓扑关系进行了深入研究。体现了很强空间拓扑表达能力、完备性

与互斥性等。电力二元网络拓扑关系除了在 GIS 上进行空间拓扑表达外,更需要表达设备对象之间的拓扑关系以及关系的动态变化,主要分为物理拓扑连接和逻辑拓扑连接。通过逻辑拓扑关系和物理拓扑关系形成更加完整的拓扑结构。

(1)物理拓扑单元

在 PUSIM 中的物理拓扑关系,可以通过空间对象拓扑关系或者物理对象属性进行拓扑关系描述。其对象之间的连接关系遵循 IEC CIM 拓扑包容关系模型的抽象描述,具体是对点和线的计算和分析,用线来表述电力设备,用节点来表述连接关系。

图 4 是电网中典型的拓扑关系,连接对象是 PUSIM 物理对象或者逻辑对象,两连接对象端点通过连接节点模型建立连接关系。附加属性补充,以描述设备附加属性,同时可附加电网参数。对应关系见表 1,其附属信息见表 2。

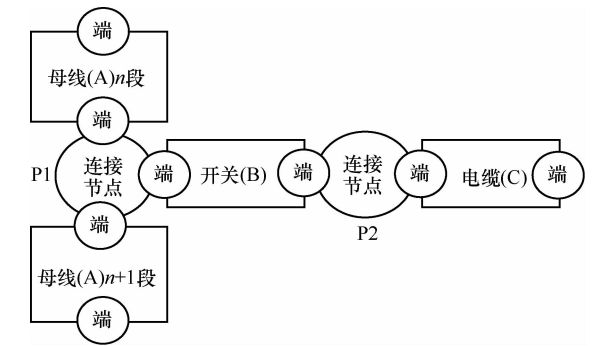


图 4 电力二元网典型物理拓扑关系

表 1 电网物理拓扑单元连接关系

连接节点	对象端点
P1	(A _n)2 端、(A _{n+1})1 端、(B)1 端
P2	(B)2 端、(C)1 端

表 2 拓扑模型的附加属性字段

对象	名称	ID	类型	模型分解
母线	A		多点连接设备	母线导电段
开关	B		端点连接设备	开关导电段
电缆	C		端点连接设备	电缆导电段(端点叠加电缆头)

(2)逻辑拓扑单元

逻辑拓扑描述的是物理设备对象或逻辑设备对象之间(或内部)在应用上的一种逻辑关系,这个逻辑关系在网络运行中是动态变化的。如开关和通信设备(如图 5 所示),并建立关系映射(见表 3),来描述图 5 各个容器对象内的逻辑连接。

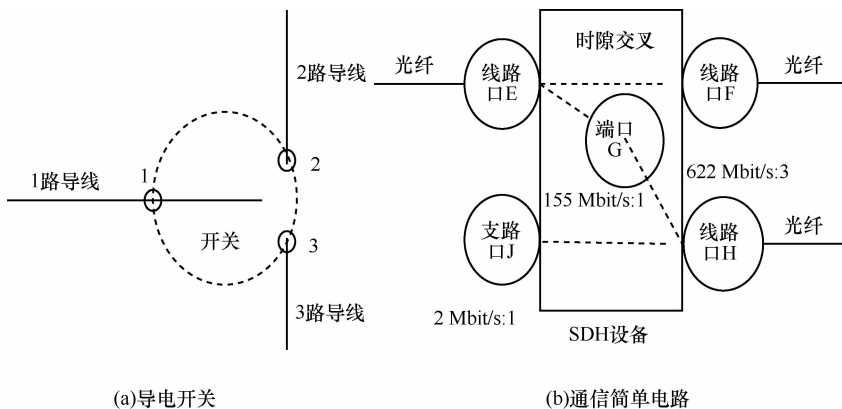


图5 电力二元网络中逻辑对象关系示意

表3 PUSIM 容器对象内的逻辑关系映射

容器对象 ID	逻辑连接一端 逻辑对象 ID	连接 参数	逻辑连接另一端 逻辑对象 ID	连接 参数
Equip_开关	开关端子 1	1	开关端子 2	1
Equip_开关	开关端子 1	1	开关端子 3	1
Equip_SDH 设备	支路口 J	1	线路口 H	2.111
Equip_SDH 设备	线路口 E	2	线路口 F	4
Equip_SDH 设备	线路口 E	2	端口 G	1
Equip_SDH 设备	端口 G	1	线路口 H	3

4.3 应用场景模型

在电力二元网络业务应用中,往往根据业务应用需求来设计应用展示和获取信息来源,称为业务场景。它随需求的变化而变化,体现场景对信息资源和信息展示的动态性和实时性。选取电力 GIS 应用的两个典型的业务场景——运行类场景和监视类场景,进行分析。

(1) 运行类场景

运行类场景,描述的是电力二元网络中相关联资源的一种网状拓扑模式,如传输系统网络图、电路路由图、设备逻辑拓扑图、潮流图、单线图、电系图、联络图、馈线图,通过拓扑关系直观反映电网业务网络的组织方式。运行类场景中的网络拓扑($V_{operation}$)是由规则决定的一系列业务对象及对象关系组成,它是实时动态变化的,规则不同,场景中网络图也不同。

$$V_{operation}(x) = \sum B_{obj}(x) + \sum B_{obj_relation}(B_{obj}(x)) + \sum B_{att_relation}(B_{obj}(x)) \quad (1)$$

其中, x 代表运行类场景规则,由于在 PUSIM 模型中存在函数 f_{obj} 、 $f_{relation}$,使得任何一个业务对象及关系存在与之对应的实体对象及关系,从而可灵活地实现运行类场景应用的业务网络在 GIS 平台上的自动成图展示。

$$R_{obj}(x) = f_{obj}(B_{obj}(x)) \quad (2)$$

$$R_{obj_relation}(x) = f_{relation}(B_{obj_relation}(B_{obj}(x))) \quad (3)$$

所以存在对应实体网络 $V_{real}(x) = f(V_{operation}(x))$,即:

$$V_{real}(x) = \sum f(B_{obj}(x)) + \sum f(B_{obj_relation}(B_{obj}(x))) + \sum f(B_{att_relation}(B_{obj}(x))) \\ = \sum R_{obj}(x) + \sum R_{obj_relation}(R_{obj}(x)) \quad (4)$$

其中:

$$f(x) = \begin{cases} f_{obj}(x), x \in \{B_G.point\} \\ f_{relation}(x), x \in \{B_G.line\} \\ 0, x \in \{attribute\} \end{cases} \quad (5)$$

- 同专业类业务应用采用 $V_{operation}(x)$ 模式进行表示;
- 跨专业类业务应用需通过 $V_{real}(x)$ 模式进行链接,如:

$$V_{operation}(x) \leftrightarrow V_{real}(x) \leftrightarrow V'_{operation}(x)$$

其中, $V_{operation}(x)$ 、 $V'_{operation}(x)$ 为跨专业的两个业务网络模型。

- 当 $V_{operation}(x)$ 发生变化时, $V_{real}(x)$ 不一定发生变化,这样在电力二元网络中业务频繁变更的情况下,大大提高了业务场景应用的灵活性,降低资源维护的复杂度(如图6所示)。

(2) 监视类场景

监视类场景建立在运行类场景等基础之上、综合反映资源实时状态的一种网络拓扑模式,并对实时状态可能引起的一些变化进行分析展示。电力二元网络中网络运行状态监视、网络资源利用率、故障影响范围等属于监视类场景。

网络运行状态监视在运行类场景基础上显示资源运行状态。当网络发生状态告警或者性能告警时,网络运行状态监视场景会接收到告警信息并准确定位。设定 $(V_1, V_2, V_3, \dots, V_n)$ 为一组运行类场景, $(\bar{V}_1, \bar{V}_2, \bar{V}_3, \dots, \bar{V}_m)$ 为一组监视类场景, Obj_i 为告警对象,则存在:

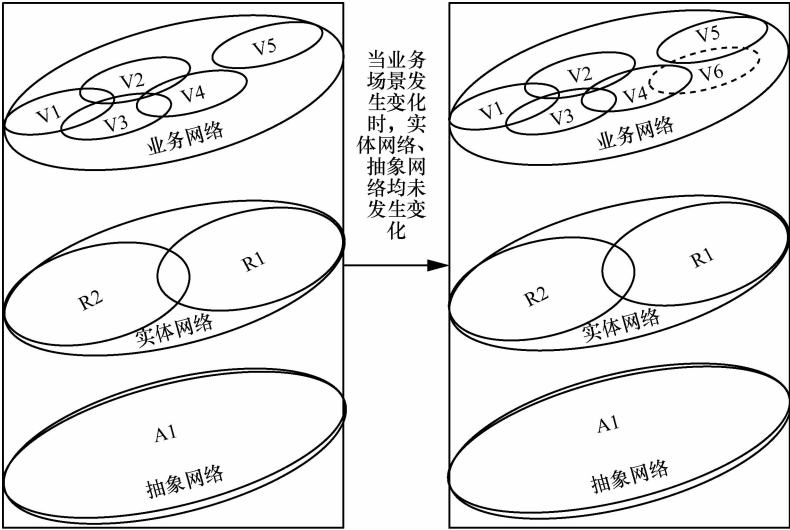


图 6 业务场景变化示意

$$(\bar{V}_1, \bar{V}_2, \bar{V}_3, \dots, \bar{V}_m) = (V_1, V_2, V_3, \dots, V_n) \times \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_{mm} \end{pmatrix}, m \leq n \quad (6)$$

其中, $a_{mm} = \begin{cases} 1, \text{Obj}_i \in V_i \\ 0, \text{Obj}_i \notin V_i \end{cases}$, 当告警发生时, 则与告警对象相关的运行场景同时显示告警信息。

- 当 $\text{Obj}_i \in \{B_{\text{obj}}\}$, 在 $\bar{V}_m$ 场景中将 Obj_i 图元符号更换告警符号, 或者绘制一个告警符号, 其告警坐标 $\text{Alarm}(x, y) = \text{Obj}_i(x, y) + \text{offset}$, 依据实际需要而定。
- 当 $\text{Obj}_i \in \{B_{\text{obj_relation}}\}$, 在 $\bar{V}_m$ 场景中不能直接通过对象坐标来获取告警对象, 需要经过一定故障诊断方法, 如人工神经网络方法^[12]、基于专家系统方法^[13]、贝叶斯网络的方法^[14]、信息理论方法^[15]、数据挖掘技术和粗糙集方法^[16]等几种故障诊断方法在电力二元网络应用进行分析评价。通过对告警信息诊断, 确定故障对象, 进行一定信息换算过程, 才能准确地进行故障定位。下面列举一个在光缆在线监测^[14]应用中的故障定位案例(如图 7 所示)。

图 7 中 A-E 代表一条敷设光缆轨迹, B、D 均为 A-E 光缆段的拐点(例如地井、杆塔), 当 A-E 光缆发生中断告警时, 告警信息除了包含光缆对象, 还包括故障中断长度信息, 若要在 $\bar{V}_m$ 场景中精准地显示故障源位置, 需要进行长

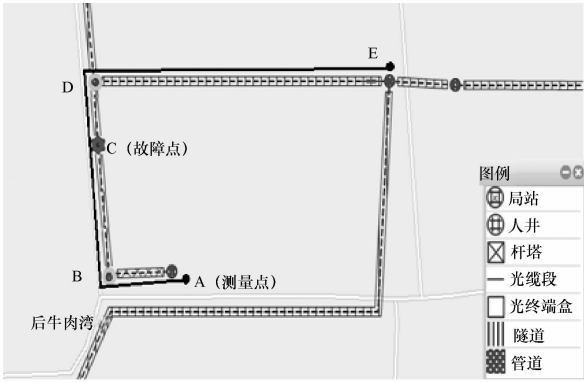


图 7 光缆敷设空间轨迹

度与坐标换算。
A(x₁, y₁)与 B(x₂, y₂)的长度 S_{AB} 计算式:
$$S_{AB} = 2 \times \sin^{-2} \sqrt{\sin^2 \frac{|y_1 - y_2|}{360} + \cos \left(\frac{\pi x_1}{180} \right) \times \cos \left(\frac{\pi x_2}{180} \right) \times \sin^2 \frac{|x_1 - x_2|}{2}} \times r \quad (7)$$

其中, $r = 6\,378.137$ (地球半径, 单位为 km)。
依据斜率公式, 直线段 $P_1 \rightarrow P_2$ 中任意长度 $l(P_1 \rightarrow P)$ 的点 P 坐标可表示为:

$$\begin{aligned} P.x &= P_1.x + \frac{1}{S_{P_1 P_2}} \times (P_2.x - P_1.x) \\ P.y &= P_1.y + \frac{1}{S_{P_1 P_2}} \times (P_2.y - P_1.y) \end{aligned} \quad (8)$$

那么, 故障点 C(x_c, y_c)的坐标可表示为:

$$\begin{aligned} x_c &= x_b + \frac{L_{ac} - \sum S_{ab}}{S_{ld}} \times (x_d - x_b) \\ y_c &= y_b + \frac{L_{ac} - \sum S_{ab}}{S_{ld}} \times (y_d - y_b) \end{aligned} \quad (9)$$



其中,点 $A(x_a, y_a)$ 、 $B(x_b, y_b)$ 、 $D(x_d, y_d)$ 、 $E(x_e, y_e)$ 均可通过 A-E 对象在 V 中获取。 L_{ac} 代表故障测距, $\sum S_{ab}$ 代表 A-B 折线段总长度。

考虑到电网中诸多因素而引起实际物理长度与模型中轨迹长度偏差,例如电缆悬垂、光缆盘留、杆塔接头盒等因素。那么,存在偏差因子 k ,使得:

$$\begin{aligned} x'_c &= x_b + \frac{L_{ac} - \sum k \times S_{ab}}{k \times S_{bd}} \times (x_d - x_b) \\ y'_c &= y_b + \frac{L_{ac} - \sum k \times S_{ab}}{k \times S_{bd}} \times (y_d - y_b) \end{aligned} \quad (10)$$

当 $Obj_i \in \{B_{all_relation}\}$, 在 $\bar{V}_m$ 场景中可将 Obj_i 图元符号更换警告符号,或者映射到相关对象上进行展示,具体实现可依据需求灵活制定。

网络资源利用率在运行类场景基础上显示网络运行中资源利用情况,依据设定的阈值进行监视预警,如通信网中光缆或光纤中业务承载量以及电网中线路的负荷量等。在单一业务场景中或许很难体现资源的利用情况,当多个业务场景叠加后会在实体网络中产生权重矩阵 W (具体计算值在统计类场景描述), 权重矩阵中元素值的大小可反映实体网络资源的利用情况,通过其最大最小值分析实体网络区段中的隐患和业务网络规划的合理性。

5 结束语

本文分析了电力业务在资源共享、业务融合、深化应用等方面对统一空间信息模型的需求。构建了符合电网特征的 PUSIM,实现电力二元网络几何对象、拓扑路由、台账参数的统一表达、建模与一体化管理,解决了电力二元网络空间资源信息模型的全覆盖、业务流全融合、信息资源共享的难题,达到了 PUSIM 对于 GIS 图形、拓扑关系、台账参数一体化管理的先进水平,并基于多版本管理技术可以为电力企业网络空间资源全生命周期管理提供模型方面的支撑。随着二三维一体化技术的发展,基于 PUSIM 可扩展支持三维 GIS 模型,实现全景全息建模、业务全过程、二三维一体化的电力 GIS 时空信息模型与应用是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 梅生伟,王莹莹,陈来军.从复杂网络视角评述智能电网信息安全研究现状及若干展望[J].高电压技术,2011,37(3): 672-679.
MEI S W, WANG Y Y, CHEN L J. Overviews and prospects of the cyber security of smart grid from the view of complex network theory[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 672-679.
- [2] 王浩浩,管霖,邱生敏,等.基于地理信息系统的大规模配电网可靠性评估方法[J].电网技术,2011,35(4): 92-97.
WANG H H, GUAN L, QIU S M, et al. A method to evaluate reliability of large-scale distribution network based on geographic information system [J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 92-97.
- [3] 周成成,许童羽,付立思.基于 CIM 和 SOA 的电力 GIS 系统架构[J].电网技术,2014,38(4): 1115-1121.
ZHOU Y C, XU T Y, FU L S. Electric power GIS system architecture based on CIM and SOA [J]. Power System Technology, 38(4): 1115-1121.
- [4] 王家凯.电力企业数据中心公共信息模型的研究与应用[D].北京:华北电力大学,2011.
WANG J K. Research and application about common information model of power enterprise data center [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [5] 杨成月.基于物联网与空间信息技术的电网应急指挥系统[J].电网技术,2013,37(6): 1632-1638.
YANG C Y. Power grid emergency command system based on internet of things and spatial information technologies [J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1632-1638.
- [6] 肖白,杨修宇,穆钢,等.基于元胞历史负荷数据的负荷密度指标法[J].电网技术,2014,38(4): 1014-1019.
XIAO B, YANG X Y, MU G, et al. A load density index method based on historical data of cell load[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 1014-1019.
- [7] PULLAR D V, EGENHOFER M J. Toward formal definitions of topological relations among spatial objects [C]//The 3rd International Symposium on Spatial Data Handling, August 17-19, 1988, Sydney, Australia. [S.l.:s.n.], 1988:225-241.
- [8] EGENHOFER M J, HERRING J R. Categorizing binary topological relationships between regions, lines and points in geographic database[R]. 1991.
- [9] RANDELL D A, CUI Z, COHN A G. A spatial logic based on regions and connection [C]//The 3rd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning, Oct 1, 1992, Cambridge, MA, USA. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1992: 165-176.
- [10] COHN A G. A hierarchical representation of qualitative shape based on connection and convexity[C]//International Conference COSIT'97, October 15-18, 1997, Pennsylvania, USA. Heidelberg: Springer, 1995: 311-326.
- [11] CLEMENTINI E, FELICE D P, OOSTEROM P. A small set of formal topological relationships suitable for end-user interaction[C]//The 3rd International Symposium on Advances in Spatial Databases, June 23-25, 1993, Singapore. New York: ACM Press,

1993: 277-295.

- [12] 姚建刚, 关石磊, 陆佳政, 等. 相对温度分布特征与人工神经网络相结合的零值绝缘子识别方法[J]. 电网技术, 2014, 36(2): 170-175.

YAO J G, GUAN S L, LU J Z, et al. Identification of zero resistance insulators by combining relative temperature distribution characteristics with artificial neural network[J]. Power System Technology, 2014, 36(2): 170-175.

- [13] HUANG Y C. Fault section estimation in power system using a novel decision support system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2): 439-444.

- [14] 孙明蔚, 童晓阳, 刘新宇, 等. 运用时序贝叶斯知识库的电网故障诊断方法[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 715-722.

SUN M W, TONG X Y, LIU X Y, et al. A power system fault diagnosis method using temporal bayesian knowledge bases[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 715-722.

- [15] 汤磊, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于信息理论的电力系统在线故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 5-11.

TANG L, SUN H B, ZHANG B M, et al. Online fault diagnosis for power system based on information theory [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2003, 23(7): 5-11.

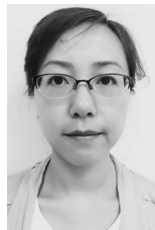
- [16] 张旭, 程雪婷, 赵冬梅. 基于粗糙集的电网操作票规则提取[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1600-1605.

ZHANG X, CHENG X T, ZHAO D M. Rule extraction of network operation ticket for power system based on the rough sets[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1600-1605.

- [17] 石军. 基于通信 GIS 系统的光缆在线监测设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2011.

SHI J. Design and implementation of optical fiber cable online monitoring based on communication GIS system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.

[作者简介]



刘汇慧(1978-),女,武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室博士生,武汉大学测绘学院助理实验员,主要研究方向为时空 GIS、地理学时空数据分析和时空轨迹大数据分析等。



杨成月(1977-),男,博士,国网信息通信产业集团公司深圳市国电科技通信有限公司副总经理、高级工程师,主要从事能源互联网、电力 GIS 与电力物联网相关信息化工作。



吴丽莎(1973-),女,国网安徽电力安庆供电公司高级工程师,信息通信公司经理,主要从事电力系统信息、通信网络设计建设、安全运行、应用维护理论研究和管理工作以及智能电网、智能变电站新技术新设备等应用管理相关的信息化工作。



张翼英(1973-),男,博士后,天津科技大学海河学者特聘教授,主要研究方向为物联网及其安全、安全密钥、智能电网和 GIS 信息安全等。