

一种基于电力线路布局优化的城市 供电数据可视分析方法

路 强^{1,4}, 张海波¹, YUAN Xiao-hui², 陈 晨^{3,4}

- (1. 合肥工业大学计算机与信息学院 VCC 研究室, 安徽 合肥 230601;
2. 北得克萨斯大学计算机科学与工程学院, 丹顿 TX 76201;
3. 国网安徽省电力公司合肥供电公司, 安徽 合肥 230031;
4. 合肥市电力大数据应用工程技术研究中心, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 电力数据可视化可以实现海量电力设备在线监测数据中各种属性、运行状态等电力特征信息以图形、图像化直观呈现, 为设备运行状态的及时、有效监控分析提供有力保障。基于城市供电数据, 提出一种城市供电态势的可视分析方法。首先根据供电系统中的变电站数据对总体供电态势进行可视化, 然后根据供电线路数据对线路进行基于多标准约束的布局优化并对其进行可视化编码, 最后根据线路的附属关系对线路下挂载的用户进行可视化编码。设计了一套可视分析系统, 旨在方便用户探索分析某一区域的供电态势。基于上海市城市供电数据的案例分析表明, 该方法可以有效地反映某一区域内的总体供电态势和具体供电细节。

关 键 词: 城市供电数据可视化; 供电态势; 线路布局优化; 可视化编码

中图分类号: TP 391

DOI: 10.11996/JGj.2095-302X.2019010024

文献标识码: A

文章编号: 2095-302X(2019)01-0024-08

A Method for Visual Analysis of Urban Power Supply Data Based on Power Line Layout Optimization

LU Qiang^{1,4}, ZHANG Hai-bo¹, YUAN Xiao-hui², CHEN Chen^{3,4}

- (1. VCC Division, School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230601, China;
2. Department of Computer Science and Engineering, University of North Texas, Denton TX 76201, America;
3. State Grid Hefei Electric Power Supply Company, Hefei Anhui 230031, China;
4. Hefei Engineering Research Center of Electric Power Data Application, Hefei Anhui 230031, China)

Abstract: The visualization of power data can realize the online monitoring of different power features including various attributes and operating status, etc., which can be graphically and visually presented to provide a powerful guarantee for the timely and effective monitoring and analysis of equipment operation status. Based on the urban power supply data, a method for the visual analysis of power supply situation in the city is proposed. Firstly, the overall power supply situation is visualized based on the substation data in the power supply system. Then, the layout is optimized based on multi-criteria constraints and visually coded according to the power supply line data. Finally, according to the relation of lines, the visualized coding is conducted on the users of different lines. A visual analysis system has also been designed to facilitate the user's exploration and analysis of the

收稿日期: 2018-06-28; 定稿日期: 2018-07-11

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(1708085MF158); 国家自然科学基金项目(61602146); 国家留学基金项目(201706695044); 合肥工业大学智能制造技术研究院科技成果转化及产业化重点项目(IMICZ2017010)

第一作者: 路 强(1978-), 男, 安徽合肥人, 副教授, 博士, 硕士生导师。主要研究方向为信息可视化、可视分析。E-mail: luqiang@hfut.edu.cn

power supply situation in a certain area. Case studies based on Shanghai City Power Supply data show that the method can effectively reflect the overall power supply situation and specific power supply details in a certain area.

Keywords: urban power data visualization; power supply situation; line layout optimization; visual coding

近年来, 大数据发展迅猛, 同时开启了一次重大的时代转型, 很多传统行业都在积极借助大数据的力量, 帮助企业实现转型升级。电力作为国民经济的基础产业, 是关乎国计民生的重要支柱产业, 通过大数据可视化方法推动电力产业升级优化, 提高电力生产、营销及电网运维等方面的管理水平具有重要意义。

城市供电系统是电力系统中最重要的一环, 其供电态势直接反映城市供电情况的稳定与否。在城市供电系统中, 变电站、供电线路和用电用户三者扮演着重要的角色也包含着复杂的层次关系, 变电站下设有许多附属线路, 线路下挂载多个用户。传统的电力数据可视化系统对城市供电中的变电站主要采用热力图和散点图等可视化方法, 让电力部门工作人员大体掌握电网的整体情况。而对于供电线路大多采用直接法进行绘制。对于下属的用电用户, 传统的供电系统很少提到对其的可视化, 也没有将变电站、供电线路和用电用户三者数据进行关联可视化。为此, 本文提出了通过多标准约束的方法将线路进行布局优化, 在此基础上对变电站和供电线路以及用电用户进行关联可视化。

首先根据城市供电系统中的变电站数据对总体供电态势进行可视化, 然后根据供电线路数据对线路进行基于多标准约束的布局优化并对其进行可视化编码, 最后根据线路的附属关系对线路下挂载的用户进行可视化编码。根据此 3 种层次关系的城市供电数据的关联可视化, 可以对某一区域的供电态势进行探索和分析。

1 相关工作

1.1 城市供电数据可视化

在城市供电系统中, 电力数据主要来源于变电站、变电站附属线路和线路下挂载的用户。传统的对于城市供电数据的可视化, 如 GEGNER 等^[1]对变电站和供电线路的可视化采用的是饼图、线路潮流图、热力图的方式; DUTTA 和 OVERBYE^[2]对城市供电态势采用了散点图和折线图的方式; LI 等^[3]采用了基

于 OpenGL 的方法对电力线路潮流进行可视化。

对于布局复杂的供电线路来说, 直接法绘制会增加视觉干扰, 也难以让用户进行交互操作。同时由于分布式电源的快速发展, 城市供电系统中的数据形态发生了巨大变化。在含有大量分布式电源的供电网络中, 部分线路的潮流方向因为分布式电源的存在而不同于传统的潮流方向, 因为分布式电源会给局部线路节点供电, 使得潮流方向并不只是单纯的从变电站流向下属的各个用电节点。传统的电力可视化系统也缺少对拥有分布式电源的用户用电的可视化。

结合上述工作, 本文利用城市供电系统中的供电数据, 对变电站、供电线路和用电用户采用多种可视化编码方式对三者进行关联可视化。

1.2 线路数据可视化

在城市供电系统中供电线路数据最为复杂, 其数据以变电站为根节点呈放射状向四周扩散, 且布局错综复杂, 在传统的可视化技术中大多采用直接法绘制供电线路, 易出现线路的遮挡, 造成视觉混乱不利于用户观察。对于供电线路的可视化可以借鉴可视化技术中的线路布局问题。线路布局问题一直是信息可视化研究的热点问题之一, 而基于规则的线路变形就属于其中的一种。在一些可视化元素较多, 线路走向杂乱无章的图中, 为了避免线路带来的视觉混乱干扰, 而进行的一系列的满足某种约束规则的变形过程称之为基于规则的线路变形^[4]。该规则可以是约定俗成成为美学标准, 也可以是用户自定义的规则。

最早的基于规则的线路变形是 Harry Beck 的手工地铁线路图, 其不保留原始车站的地理位置信息, 而是强调地铁网络的拓扑结构。但是手工绘制优雅好看的地铁线路图需要专业技能且非常耗时。BARKOWSKY 等^[5]首次尝试地铁线路自动布局, 该算法虽然实现了自动布局, 但是由于没有考虑扩大站点的间距, 导致市中心站点过于密集, 同时还存在站点重叠的问题。HONG 等^[6-7]使用了美学标准, 在力导向算法的基础上使用了 5 种不同的处理

方式进行地铁线路自动布局,线路的方向仅限于水平、竖直、对角上。但是线路布局还是存在视觉混乱的情况。NÖLLENBURG 和 WOLFF^[8-9]使用混合整数程序法 (mixed integer programming, MIP)给地铁地图规定了软约束和硬约束,避免了局部最优的问题,但是运行速度太慢。STOTT 等^[10]利用爬山法的多目标优化法进行地铁线路布局,每个初始布局中,有 5 种度量准则,其迭代过程是以原始图中加入的整数网格开始的,并给出了一个启发式的解决局部最优解的方法。WANG 等^[11-12]用高斯牛顿法和拉格朗日乘子法优化地铁线路,其中使用鱼眼的变形方法来解决小屏幕显示的问题,用户选择不同的路线或编辑的关键点地铁线路呈现方式也会随之发生变化,但用户很难发现示意图描述的是同一线路。FINK 等^[13]使用基于力导向布局的贝赛尔曲线来绘制地铁线路示意图。ROBERTS 等^[14]讨论了曲线和线性布局的可用性。

综上,本文提出一种新的基于约束规则的可视化方法,将线路布局优化应用到城市供电系统电力

线路布局中,降低电力线路的复杂性,减少其对人产生的视觉干扰。使用户可以根据优化后的线路布局图方便、快捷地掌握某一区域供电态势并方便用户进行交互操作,同时将城市供电中的变电站、供电线路和用电用户进行关联可视化,用户可以通过交互操作探索分析出异常电力信息产生的原因。

2 系统概述

本文设计了一套城市供电数据可视分析系统。该系统采用多视图合作的方式,结合不同层次类型的城市供电数据提供多角度的分析方法。系统的整体界面如图 1 所示,其中,图 1(a)为供电态势视图,图 1(d)为变电站负荷总览视图,其展示了城市供电系统供电态势的总概貌;图 1(c)为供电线路负载视图展示了局部区域变电站供电线路的优化布局;图 1(b)为用户用电显示图,其能较好地支持对线路下挂载用户的用电情况的展示和探索。本系统的设计严格遵守“Overview First, Zoom and Filter, Details on Demand”^[15]的设计准则。



图 1 基于线路布局优化的城市供电数据可视分析系统

3 数据和方法

3.1 数据类型

由于城市供电数据涉密,本文的城市供电数据主要基于对已有的电力数据字段的模拟。

模拟城市供电数据主要包括如下信息:

- (1) 变电站的供电信息。变电站经纬度坐标、变电站的额定容量、变电站的当前负荷。
- (2) 供电线路的信息。线路节点经纬度坐标、

所属线路及线路额定电流和实际电流。

(3) 用户用电信息。用户经纬度坐标、额定容量和实际容量,对于拥有分布式电源的用户还包括额定发电量和实际发电量。

3.2 需求概述

为了从城市供电数据中对城市供电态势和供电细节进行有效的可视化,在咨询相关专家后,对城市供电数据可视分析方法提出 2 点要求:

- (1) 保留供电信息的完整性。即包含区域的供

电细节, 是可视化分析城市供电数据的关键。

(2) 保持供电线路的拓扑关系。对于结合实际地理位置分析城市供电态势至关重要。

3.3 方法描述

本文采用多标准约束对城市供电线路数据进行可视化布局优化, 其总体流程如图 2 所示。

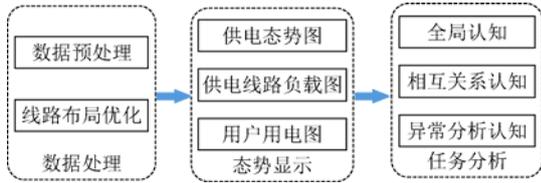


图 2 电力数据可视化方法总体流程

多标准约束线路布局算法的关键是布局优化过程中所遵循的规则, 而在电路线路布局优化的过程中, 最重要的是保持供电线路的拓扑信息不被改变。可通过表达式 $G = \{V, E\}$ 来表示供电线路, V 为供电线路中节点集合, 即 $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$, n 为某一变电站下属的供电线路的节点数量; E 为边的集合, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, m 为变电站下属的供电线路的边的数量。

为了将线路布局算法应用到电力线路中, 需设定以下约束规则:

(1) 均分角度规则(N1)。为了避免某一节点延伸出来的多条电力线路因为距离太近而造成视觉混乱, 边与边之间的夹角应该尽量大, 即

$$N1 = \sum_{v \in V} \sum_{\{e_1, e_2\} \in E_v} \left| \frac{2\pi}{n(v)} - \frac{\theta(e_1, e_2)\pi}{180} \right| \quad (1)$$

其中, v 为点集合 V 中的点, $\{e_1, e_2\}$ 是边集合 E 中以 v 为端点的两条相邻线段; $n(v)$ 为 v 节点相邻节点的个数; $\theta(e_1, e_2)$ 为 e_1 与 e_2 之间的夹角。

(2) 边长均等规则(N2)。为了保证供电线路中每条线的长度与整体地图协调, 不能有太长的节点线路, 即每条节点线路长度要近似相等, 且不能超过规定的长度

$$N2 = \sum_{e \in E} \left| \frac{|e|}{D} - 1 \right| \quad (2)$$

其中, e 为边集合 E 中的边; D 为可以自定义的统一的线段长度。

(3) 线性规则(N3)。为了保证供电线路规则化且易于观察, 每条边可以绘制的方向规定在水平、竖直和对角线这 8 个方向

$$N3 = \sum_{\{v_1, v_2\} \in E} \left| \sin 4 \left(\frac{\theta(v_1, v_2)\pi}{180} \right) \right| \quad (3)$$

其中, $\{v_1, v_2\}$ 为边集合 E 中边的两个端点; $\theta(v_1, v_2)$ 为 v_1 和 v_2 代表的线段在直角坐标系下与 x 轴正向逆时针方向上的夹角。

基于规则的线路变形一般是对多目标函数进行优化的过程。本文采用实现简单且易于实现的爬山算法对多目标函数进行优化。具体多目标函数为

$$P_N = \sum_{i=1}^3 W_{Ni} C_{Ni} \quad (4)$$

其中, P_N 为权重总和; W_{Ni} 为对应约束规则 C_{Ni} 的权重。

本文布局算法步骤如下:

输入: 变电站下属供电线路所有节点 V 。

输出: 经过约束优化后的供电线路布局图 M 。

步骤 1. 根据供电线路节点 V 计算所有其相邻节点信息并统计个数, 得到节点间的拓扑结构, 再根据节点与线路的附属关系将节点集成线路。

步骤 2. 遍历每条线路, 先将线路中的节点根据墨卡托投影将经纬度坐标转换成像素点坐标, 然后计算各线路在 3 个标准下的数值, 并得到目标函数。

步骤 2.1. 遍历线路下的节点, 根据当前节点与相邻节点之间的连线, 计算其在直角坐标系下相对于 x 轴正向逆时针方向的角度, 根据其大小对所有连线进行排序, 排序后的每 2 条线段组成一对计算其线段之间的角度, 最后将节点的邻居节点数量和计算出来的角度输入式(1), 得到每条线路在该约束下的数值之和。

步骤 2.2. 遍历线路下的线段, 根据像素点坐标计算 2 点间的距离, 然后输入式(2), 得到每条线路在该约束下的数值之和。

步骤 2.3. 遍历线路下的线段, 计算线段在直角坐标系下相对于 x 轴正方向的角度, 然后输入式(3), 得到每条线路在该约束下的数值之和。

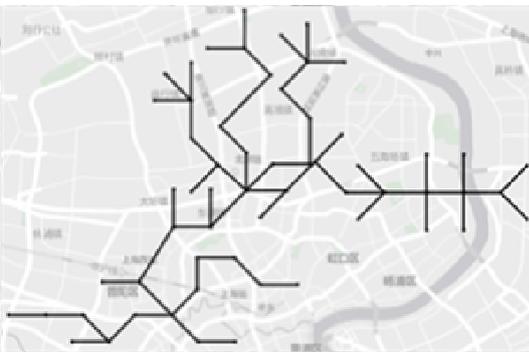
步骤 3. 根据爬山法对目标函数式(4)进行优化得到最终变换后的线路节点坐标, 根据之前的拓扑结构和线路附属关系, 分别绘制每条线路得到最终的布局优化后的线路布局图 M 。

如图 3 所示, 图 3(a)中 A 处原本的线路较为拥挤, 根据角度均分原则(N1)和线性规则(N3), 变换后的线路方向分散且呈线性; B 处原本曲折的线路, 根据角度均分规则(N1), 变换后的线路水平美观;

C 处和 D 处原本的线路长度长短不一, 根据边长均等规则(N2), 变换后的线路长度均等。



(a) 原始线路布局图



(b) 优化线路布局图

图 3 多标准约束的线路布局优化

4 分析任务与可视化视图

4.1 分析任务

使用多标准约束的方法将供电线路进行布局优化后, 本文从对城市供电数据进行可视化分析出发, 设计了一套完整的分析流程, 从总体的城市供电态势来展示有问题的变电站信息, 然后引导用户探索变电站的供电线路以及线路附属的用电用户信息, 从而分析出异常产生的原因。可视分析系统应满足以下任务:

(1) 全局认知(T1)。将城市供电系统中的变电站按照地理位置分布和实时的供电情况对其进行展示, 其可视化编码信息间接反映了该区域的总体供电情况, 从全局视角观察变电站的分布情况有助于用户发现城市供电系统中的总体态势和异常值。

(2) 相互关系认知(T2)。通过数据预处理阶段后的数据中的层次信息判断数据之间的附属关系。通过表示不同电力层次信息数据, 可以体现城市供电数据之间的关系, 帮助探索城市供电系统中局部区域的细节。系统需能体现城市供电数据的相

互关系。

(3) 异常分析认知(T3)。从城市供电数据之间的相互关系可以探索出城市供电系统中异常信息产生的原因, 此过程需要结合用户对系统的交互操作来实现。

4.2 可视化视图

4.2.1 供电态势视图

针对第 1 个分析任务, 本文设计了总体供电态势显示视图。图 1(a)展示了不同时段的城市供电系统中某一地区变电站的供电情况, 用户可以根据左下方的时间选择器选择观测时段。并采用标签分类的方式代表变电站, 用颜色表示变电站的负荷情况, 颜色越深实时负荷越大, 标签下面的圆圈大小映射变电站的额定容量, 标签类型代表变电站当前负荷情况。闪电类型标签代表变电站当前负荷属于正常水平, 警告标签代表处于异常状态。通过对变电站采用标签分类的可视化方式, 用户可以直观地获知某一区域的总体供电态势, 同时报警提示框也很容易让用户发现负荷低于 20%和高于 80%的异常变电站。

供电态势视图可以为用户提供城市供电态势在地理位置上的全局视角(T1), 观察变电站在城市供电系统中的地理位置的分布情况以及负荷情况。

4.2.2 变电站负荷总览视图

变电站负荷总览视图显示了某一区域所有变电站近 10 天的负荷总体变化情况。如图 1(d)所示, 每条颜色不同的折线代表不同的供电站, 为了方便用户分析, 每条折线采用相同颜色的气泡的形式自动标注了所代表的变电站在近期 10 天之内的最大负荷和最小负荷, 并用一条虚线来表示 10 天之内负荷的均值。

变电站负荷总览视图为用户提供了城市供电态势在时间上的全局视角(T1), 观察变电站负荷在城市供电系统中随时间的变化情况。

4.2.3 供电线路布局图

供电态势视图和变电站负荷总览视图提供了对城市供电系统供电态势信息在地理位置和时间上分布的总览, 粒度较大, 属于 overview 的范畴。对于具体的供电情况, 仍需要向下钻取到更细的供电层面, 同时也需要一个更加直观高效的图来研究每个变电站在某一时刻的供电细节。根据此原则并针对第 2 个分析任务, 本文设计了供电线路负载视图, 可先将城市供电线路进行布局优化, 然后对其

进行可视化编码。采用的是基于多标准约束的电力线路布局优化算法(图 1(c)), 用户在选择要观察的变电站后, 图中会出现经过布局优化的供电线路布局图, 并根据线路的实时负荷将其映射成不同的颜色。颜色越深, 代表供电线路的负荷越高。用户将鼠标悬停在线路上方时会显示该线路的实时负荷数据。

供电线路布局视图为用户提供了城市供电系统中变电站、供电线路的相互关系(T2)以及探索分析变电站负荷异常的方式(T3), 方便用户观察变电站下属线路实时负荷情况。

4.2.4 用户用电展示图

针对第 3 个分析任务, 本文设计了用户用电展示视图, 可根据用户的点击事件将用户视角聚焦到感兴趣的供电线路, 然后对其下属的用户用电信息进行可视化编码。如图 1(b)所示, 用户用电展示模块可显示不同时段某一线路下属的用户用电情况。地图上的人型标识代表正常的用电用户, 颜色代表实时用电负荷; 闪电标识为拥有分布式电源但是仍需供电线路供电的用户, 颜色代表实时用电负荷; 数据上传标识为拥有分布式电源且发电有节余需要向上供电的用户, 颜色代表实时发电量与额定发电量的比值。

用户用电展示视图为用户提供了城市供电系统中供电线路与用电用户的相互关系(T2)以及探索分析线路负荷异常的方式(T3), 方便用户观察线路下属用户实时用电情况。

5 案例分析

本文根据城市供电系统中电力数据已有的字段对数据进行模拟, 并从不同视图的角度分析上海市的城市供电态势。

5.1 供电态势分析

供电态势视图如图 4 所示, 当前视框内的 10 个标签代表上海市内 10 个变电站 2017 年 5 月 29

日早上 8 点的负荷情况, 根据标签的颜色信息可以分析出当前供电情况整体稳定, 对于弹出报警框的 1 号和 3 号变电站根据其标签类型和颜色以及圆圈大小可以分析得出, 1 号和 3 号变电站容量较大, 安全性不容忽视, 其中 1 号变电站处于高负荷报警状态, 3 号处于低负荷报警状态。报警框内显示的电力数据信息表明 1 号和 3 号变电站为 220 kV 级别城市供电系统变电站。城市供电系统中应该避免变电站出现长时间的高负荷和低负荷的异常情况, 分析其原因就需要查看变电站下属的供电线路的供电情况, 用户只需点击想要查看的变电站标签就能进一步地探索下属的线路信息, 对异常进行进一步的分析。



图 4 供电态势视图

5.2 变电站负荷分析

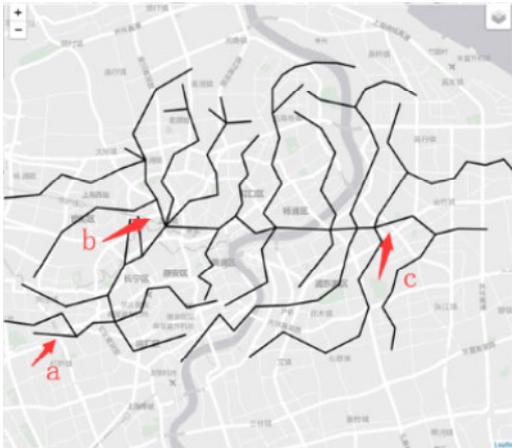
图 5 中的折线分别代表上海市内 10 个变电站在近 10 天内的负荷变化情况。从图可知, 上海市 1 号变电站在近 10 天内最高负荷达到 90%, 负荷均值为 76%, 其余点较为平稳; 鼠标悬停在 5 月 23 日时间线上还可以比较当天所有变电站的平均负荷。用户可以对感兴趣的变电站折线进行点击操作, 同时供电态势图中心视角就会锁定在相应的变电站位置上, 以方便用户进行探索。



图 5 变电站负荷总览视图

5.3 供电线路负载分析

图 6(a)是 1 号变电站原始线路布局图, 图 6(b)是经过多标准约束布局优化和可视化编码后得到布局图。在图 6(a)的 a 处由于线路均等规则的约束, 过长的线路优化后长度明显变短; b 处从线路根节点延伸出去的 5 条线路角度拥挤, 在经过角度均分规则约束优化后线路之间角度区分明显; c 处原本曲折的线路在经过线性规则约束优化之后线路处于水平状态。



(a) 原始线路布局图



(b) 布局优化和编码后的线路图

图 6 供电线路负载图

在经过可视化编码之后, 供电线路的颜色代表其实时负荷。左下方的时间轴表示数据时间为 2017 年 5 月 29 日早上 8 点, 根据供电线路的分布和颜色可知当前负荷较高的区域为上海市西部区域。将鼠标悬停在负荷较高的 9 号线观察该线路的实时供电信息, 可以看到当前负荷超过其额定负荷的 80%, 下面挂载的用户数量为 6 个, 其用电情况需继续向下探索, 用户只需要点击想查看的供电线路

就可以进入用户用电情况分析视图。

5.4 用户用电情况分析

根据用户选择的供电线路, 地图视角会自动定位到能包含该线路的最小视框层级和用户点击的位置。如图 7 所示, 对于 9 号线路, 下面挂载 9 位用户, 编号为 1 的用户标签为红色代表实时用电负荷超过 80%; 编号为 2 和 9 的用户标志为电池代表其拥有分布式电源, 其标签为绿色代表其负荷低于 20%; 编号为 4 的用户标志为流量上传, 说明其也是拥有分布式电源的用户, 且发电有节余需要向上供电。除了 2 号、4 号和 9 号用户其余用户用电负荷都较高, 特别是 1 号用户用电负荷超过其额定负荷的 80%。

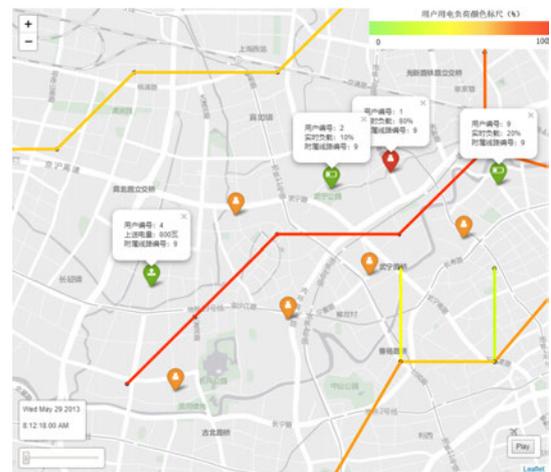


图 7 用户用电信息视图

结合 2017 年 5 月 29 日上午 8 点多种供电态势视图分析得出: 上海市地区, 整体供电情况良好, 没有过多的高负荷和低负荷的变电站。其中对负荷较高的上海 1 号变电站进行点击操作将视角转到供电线路视图, 得出该变电站下属供电线路负荷较高的区域为西部; 对于 9 号线路通过线路布局得知其没有下属的供电线路, 所以该类型的线路高负荷的情况可以大致推测是下属用户用电高负荷所导致的, 且通过用户用电视图可以证实这种推测。若对高负荷的 9 号线路进行改造, 需考虑由线路下的分布式电源用户 2 号、4 号、9 号来分摊 1 号用户的高负荷用电需求, 从而缓解 9 号线路的供电压力。

6 结束语

本文针对城市供电中的变电站、供电线路及用户用电数据, 提出一种针对城市供电中的电力数据

的可视分析方法。该方法对于变电站采用散点图加标签分类的表现形式,对供电线路采用多标准约束的方法进行布局优化,对用电用户根据其是否拥有分布式电源进行标签分类展示。其优势如下:

(1) 提供了对城市供电系统层次数据的可视化,将层次数据联系起来,有利于用户进行探索式分析,进而发现异常数据产生的原因,与传统方法相比,该方法更加高效。

(2) 针对供电线路数据采用多标准约束的方法对线路布局进行优化,有利于减少视觉混乱方便用户进行交互和探索操作。

本文方法的局限性包括:

(1) 随着线路节点数量的提升,基于多标准约束的线路布局优化算法得出结果所需要的时间也会随之增长。

(2) 对供电线路中分布式电源所引起的潮流方向转变信息未进行数据处理和可视化编码。

在后续研究工作中,本文将致力于结合城市供电系统中的分布式发电数据,对可视化方法进行改进,构建一种多角度、全方位、美观简洁的城市供电数据可视分析方法。

参 考 文 献

- [1] GEGNER K M, OVERBYE T J, SHETYE K S, et al. Visualization of power system wide-area, time varying information [C]//Power and Energy Conference at Illinois (PECI). New York: IEEE Press, 2016: 1-4.
- [2] DUTTA S, OVERBYE T J. Information processing and visualization of power system wide area time varying data [C]//Computational Intelligence Applications In Smart Grid (CIASG). New York: IEEE Press, 2013: 6-12.
- [3] LI B, LIU W Y, XING J, et al. The opengl-based visualization of power system flow and alarm [C]//Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). New York: IEEE Press, 2012: 1-4.
- [4] 路强, 梁翀, 曹书博, 等. 约束规则下的城市线路变形[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(6): 796-804.
- [5] BARKOWSKY T, LATECKI L J, RICHTER K F. Schematizing maps: Simplification of geographic shape by discrete curve evolution [M]. Spatial Cognition II. Berlin: Springer Press, 2000: 41-53.
- [6] HONG S H, MERRICK D, DO NASCIMENTO H A D. The metro map layout problem [C]//International Symposium on Graph Drawing. Berlin: Springer Press, 2004: 482-491.
- [7] HONG S H, MERRICK D, DO NASCIMENTO H A D. Automatic visualisation of metro maps [J]. Journal of Visual Languages and Computing, 2006, 17(3): 203-224.
- [8] NÖLLENBURG M, WOLFF A. A mixed-integer program for drawing high-quality metro maps [C]//International Symposium on Graph Drawing. Berlin: Springer Press, 2005: 321-333.
- [9] NÖLLENBURG M, WOLFF A. Drawing and labeling high-quality metro maps by mixed-integer programming [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 17(5): 626-641.
- [10] STOTT J, RODGERS P, MARTINEZ-OVANDO J C, et al. Automatic metro map layout using multicriteria optimization [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 17(1): 101-114.
- [11] WANG Y S, CHI M T. Focus+ context metro maps [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 17(12): 2528-2535.
- [12] WANG Y S, PENG W Y. Interactive metro map editing [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2016, 22(2): 1115-1126.
- [13] FINK M, HAVERKORT H, NÖLLENBURG M, et al. Drawing metro maps using Bézier curves [C]//International Symposium on Graph Drawing. Berlin: Springer Press, 2012: 463-474.
- [14] ROBERTS M J, NEWTON E J, LAGATTOLLA F D, et al. Objective versus subjective measures of Paris Metro map usability: Investigating traditional octolinear versus all-curves schematics [J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2013, 71(3): 363-386.
- [15] MUNZNER T. Visualization analysis and design [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews Computational Statistics, 2015, 2(4): 387-403.