

电力系统控制中心三维可视化技术及其实时应用

陈 佳¹, 孙宏斌¹, 汤 磊¹, 郭庆来¹, 吴文传¹, 张伯明¹,
辛耀中², 王 蓓³, 吴素农⁴, 陶洪铸², 宁文元³

(1. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京市 100084; 2. 国家电力调度通信中心, 北京市 100031;
3. 华北电网有限公司电力调度通信中心, 北京市 100053; 4. 江西电力调度中心, 江西省南昌市 330077)

摘要: 针对电力系统控制中心的节点型和线路型数据, 分别设计三维曲面图、三维柱状图和三维管道图、三维箭头图等基于电网接线图背景的可视化表达方式, 设计常用的三维可视化主题, 对曲面图中的空间插值算法做了优化改进, 讨论了色彩表映射的应用。在现有能量管理系统(EMS)二维图形平台的基础上, 设计并开发三维可视化模块, 具有展示形式多样、实时性好、跨平台实现、易于与不同应用系统集成等特点。该模块已投入实时运行, 介绍了现场实时应用效果和性能。

关键词: 电力系统; 控制中心; 三维可视化; 空间插值算法

中图分类号: TM734

0 引言

随着电网规模的不断扩大, 电力系统日趋复杂, 系统运行中产生的数据种类和数量都大大增加。在电网接线图上用数字标注的传统数据表达方法虽然具有显示速度快、显示数据准确的优点, 但其缺点是不够直观, 从大量数字中识别出关键信息困难, 已难以满足大电网实时监控的需要。

三维可视化技术充分利用了空间的第 3 个维度, 相对传统二维显示方式具备更强的信息表达能力, 能更高效、直观地表达电网中的大量数据, 便于调度员迅速了解当前系统中存在的问题及其严重程度, 并使调度员对电网运行有整体的把握, 引起了学者和工业界的广泛关注, 成为新一代电网能量管理系统(EMS)^[1]的重要特征之一。

电力系统可视化研究多以电力网络为基础^[2]。例如: 用饼图和动画箭头表示线路潮流^[3-4]; 用柱图和饼图表示节点电压^[5]; 用圆柱表示发电机出力^[3]; 用等值线图或曲面图表示空间分布^[6-7]; 用三维图展示故障分析结果^[8]以及稳定域可视化^[9]。

目前, 电力系统的三维可视化技术尚存在以下问题, 限制了其在控制中心的实际应用: ①实时性不高, 特别是三维曲面计算量很大, 显示速度有待提

高; ②第三方开发的可视化模块与现有 EMS 集成困难; ③依赖特定操作系统平台, 不利于推广应用。本文对电力系统中基于电力网络的三维可视化技术做了进一步的实用化研究, 较好地解决了实时性、系统集成和跨平台等问题。

1 三维可视化方法

1.1 表达方式

电力系统运行中的常见数据一般可归结为节点型和线路型 2 大类, 例如母线电压和线路潮流。

针对节点型数据, 直观做法是利用空间的第 3 个维度, 在节点所在位置用三维圆柱表达, 圆柱高度表示数据的相对大小。在圆柱上加以修饰还能表示更多信息, 如用圆环标记上下限值位置以及用不同颜色标识当前值、安全状态和裕度。文献[6-7]用等值线图、色彩图和三维曲面图将节点型数据空间插值后作为二维标量场进行显示, 适用于表达大量数据在空间上的整体分布。其中, 等值线图和色彩图可看做三维曲面图着色后投影到二维平面的结果。

针对线路型数据, 本文采用三维管道图和三维箭头图 2 种表达方式。三维管道图用沿线路分布的圆柱管道表示数据, 管道半径代表数据的相对大小, 当数据有向时用箭头标出方向。三维箭头图^[3-4]在线路上用三角箭头表示有向的线路型数据, 箭头大小代表数据的相对大小, 并具有流动的动画效果。

电力系统实时运行中的监控数据很多, 需要对其进行分类, 再根据不同类别的特点, 选择合适的表达方式, 即进行可视化主题设计。EMS 中常用的可视化

收稿日期: 2007-10-18; 修回日期: 2007-11-29。
国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA05Z217); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2004CB217904); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-05-0074)。

主题如表 1 所示。

表 1 EMS 中常用的可视化主题设计
Table 1 Common topics of visualization in EMS

主题	类别	可视化表达形式
电压类	厂站母线电压	三维柱状图、曲面图
	电压统计量	三维柱状图
无功类	旋转设备无功裕度	三维柱状图、饼图
	固定设备无功裕度	三维柱状图、饼图
	无功裕度总和	三维柱状图、饼图
有功类	厂站负荷或出力	三维柱状图、饼图
	线路有功潮流	三维管道图、箭头图
	线路有功损耗	三维管道图
稳定指标类	电压稳定裕度(电压崩溃距离)指标	三维柱状图、饼图
	重要断面可用输电能力(ATC)指标	三维柱状图、饼图

1.2 基本算法

1.2.1 空间插值算法及改进

在三维曲面图中,关键的一步是选择合适的空间插值算法,将定义在离散点上的数据扩展到整个平面。例如图 1 所示情况,在平面上已经定义了 $v_1 \sim v_4$ 这 4 点数据, p 是平面中的任意一点,空间插值算法的任务就是计算出 p 点的虚拟数值 v_p 。

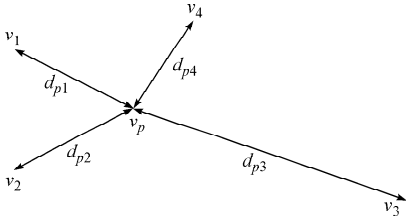


图 1 空间插值算法示例

Fig. 1 Illustration of spatial interpolation algorithm

最常见的空间插值算法是距离平方反比算法^[6],其算式为:

$$v_p = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{v_i}{d_{pi}^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_{pi}^2}} \quad (1)$$

式中: N 为已知数据点个数; d_{pi} 为数据点 i 到 p 的距离。实际中,一般要对二维网格上的各点进行插值,计算量很大。文献[6]对空间插值算法提出 2 点优化。首先,在式(1)中仅考虑离 p 较近数据点的影响,即

$$v_p = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{v_i}{d_{pi}^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_{pi}^2}} \quad (2)$$

式中: d_{inf} 为预设的影响距离,每个数据点只影响距离小于 d_{inf} 的区域。其次,利用整数坐标正方形网格的对称性,将距离的计算次数减少到原来的 $1/8$ 。

但经过上述改进后,算法尚有不足之处:①无法计算所有数据点影响区域外的待插值点;②计算结果在影响区域边界处不连续;③仅在一个数据点影响区域内的插值点取值始终与该数据点相同。

以上不足影响了插值后图形的视觉效果。本文进一步提出了新的快速插值算法,新算式为:

$$v_p = \frac{Cv_{\infty} + \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{d_{pi}^2} - \frac{1}{d_{inf}^2} \right) v_i}{C + \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{d_{pi}^2} - \frac{1}{d_{inf}^2} \right)} \quad (3)$$

式中: $v_{\infty} = \sum_{i=1}^N v_i / N$; C 为平滑常数,可调节插值结果在影响区域边界处过渡的平滑程度。

理论上,已知 N 个数据点在 $M \times M$ 的网格上插值,原始算法(式(1))的乘除法计算量与 NM^2 成正比,而当 d_{inf} 根据经验设置为 $\sqrt{S/N}$ (S 为插值区域面积)时,文献[6]及本文改进算法的乘除法计算量都只与 M^2 成正比,计算量大大减少。

本文的新算法保持了计算快速的特点,并且通过引入虚拟的平均点(v_{∞})和权重修正项($1/d_{inf}^2$)解决了文献[6]中算法的不足:①在所有数据点影响区域外,插值结果 $v_p = v_{\infty}$;②在第 i 点影响区域边界处, v_i 的权重系数 $1/d_{pi}^2 - 1/d_{inf}^2 = 0$,保证了结果的连续性;③仅在一个数据点影响区域内时,插值结果为该点数值与 v_{∞} 的加权平均,变化连续。

此外,在浮点坐标矩形网格下将数据点位置近似到网格点,也能利用对称性在 $1/4$ 圆上完成整个影响区域中的距离计算,从而可再将计算量减少 $3/4$ 。通过插值算法的改进,三维曲面图显示的实时性和实用性得到了很大改善。

1.2.2 色彩表映射

色彩的运用是可视化表达中的重要内容,需要设计将不同数值映射为不同颜色的色彩映射方案。良好的色彩映射方案应该满足:①颜色的变化范围宽,数值区分度好;②符合人们的直观视觉习惯,易于理解记忆。

用红绿蓝(RGB)分量表示色彩,则色彩映射方案可以表示为函数向量 $f(v) = [f_R(v), f_G(v), f_B(v)]$ 。其中: v 为待映射数值,通常取实际数据归一化到 $[0, 1]$ 区间的结果; $f_R, f_G, f_B \in [0, 1]$ 分别为与 v 对应的色彩分量。

经过比较试验,采用 MATLAB 软件中称为

“jet”的色彩映射方案(见图 2)最适宜。该方案常在气温分布图中使用,本文称之为温度色彩映射方案。

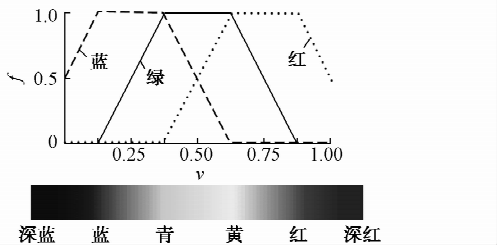


图 2 温度色彩映射方案及其红绿蓝分量
Fig. 2 The jet color-mapping scheme and its red, green and blue components

从工程应用的需求出发,温度色彩映射还衍生出若干变种。例如:①将色彩表反向,红色表示小数值,蓝色表示大数值;②将两端边界处的颜色变化由渐变改为突变,以突出显示越限数据,体现安全状态的转移;③将颜色离散化,实现等值线图的显示效果。此外,着色既可依据物理量的实际值,也可依据实际值与限值的接近程度。除温度色彩外,还可以设计其他色彩映射方案。

2 软件设计与实现

从软件复用性角度出发,基于现有 EMS^[10] 的二维图形平台,设计并实现了电力系统三维可视化模块。利用二维图形平台中的电网接线图以及数据和位置信息,对电力系统运行数据进行实时的三维可视化表达。

2.1 技术路线

计算机领域有多种成熟的三维图形显示技术可供选择。例如:可利用地理信息系统等成熟软件中的三维显示功能;可输出为标准的三维图形格式(VRML/X3D)后再显示;可直接用三维图形接口(如 Java3D、Direct3D 和 OpenGL)编程。为克服已有技术的不足,电力系统三维可视化技术的选择需考虑如下因素:①能应用于多种操作系统平台;②易与现有 EMS 二维图形平台结合;③显示速度快。

附录 A 表 A1 给出了几种技术路线的综合比较。本文选用了 Qt/OpenGL 技术进行开发,可满足控制中心实时应用要求,并解决了已有技术不能跨平台的问题。

2.2 可视化的模块设计与系统集成

遵循模块化、可复用和面向对象的设计原则,图 3 给出三维可视化模块的基本结构。该模块直接建立在现有 EMS 二维图形平台基础上,与 EMS 紧密集成,分为三维显示场景和三维对象 2 部分功能。

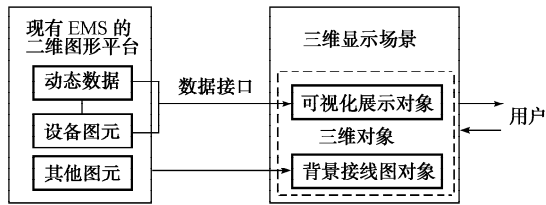


图 3 三维可视化模块的结构
Fig. 3 Structure of 3D visualization module

显示场景对应最终在屏幕上的显示区域,可包含若干三维对象。该部分负责维护内部三维对象列表和整个场景的姿态信息,创建和显示三维对象,并且根据用户鼠标操作调整场景的姿态。三维对象对应需要显示在屏幕上的一个或一组三维图形,包括简单的几何图形、用做背景的电网接线图,以及对应特定可视化表达的图形,如柱状图中的一组圆柱。它根据从二维图形平台中获取的数据在内存中生成三维图形,并负责具体绘图。

三维可视化模块嵌入并集成在现有 EMS 二维图形平台中,保证模块内部实现与具体数据源无关。模块通过场景窗口的显示和隐藏实现二维与三维显示的切换,通过动态销毁和创建三维对象实现在不同三维可视化表达形式之间的切换。模块中的数据接口从现有 EMS 二维图形平台的动态数据和设备图元中分别获取数值和位置信息,提供给可视化展示对象使用。背景接线图对象负责在三维显示场景中重新绘制二维接线图。

如图 4 所示,二维图形平台的动态数据的数值可以来自数据收集程序维护的可视化实时库,也可以通过数据接口获取不同厂家 EMS 中的实时数据,实现与控制中心 EMS 的数据集成。

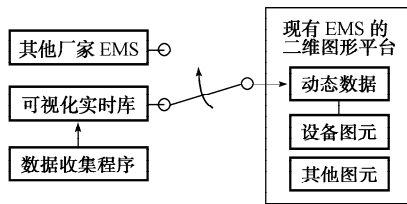


图 4 二维图形平台与数据源
Fig. 4 2D graphics platform and its data source

3 实时应用

所提出的电力系统三维可视化软件系统采用 C++/Qt 编程,已集成于包括国调、华北网调和江西省调等多家控制中心在内的不同实时应用系统中,具体见表 2。

表 2 三维可视化技术在控制中心的实时应用
Table 2 Real-time applications of 3D visualization technique in control centers

系统应用 相关信息	江西电网在线 安全预警系统 ^[11]	华北电网自动电 压控制系统 ^[12]	国调跨区电网 动态稳定监测 预警系统 ^[13]
电网级别	省调	网调	国调
展示内容	厂站电压分布	多种主题(如 表 1 所示)	厂站电压分布, 线路潮流分布
展示方式	三维柱状图, 三维曲面图	三维柱状图, 三维曲面图, 三维管道图, 三维箭头图	三维柱状图, 三维曲面图, 三维管道图, 三维箭头图
应用时间	2006 年秋	2007 年春	2007 年夏
运行环境	Redhat Linux	Tru64 UNIX	Windows XP
数据来源	实时库	实时库	CC2000 EMS

3.1 应用效果

附录 A 图 A1 和图 A2 给出了厂站电压分布的三维曲面彩图。通过彩图中的高度和颜色,可以很容易地掌握电压在全网的整体分布情况,发现其中电压偏高和偏低的区域。附录 A 图 A3 给出了厂站电压分布的三维柱状彩图。

线路有功潮流分布的三维管道彩图和三维箭头彩图如附录 A 图 A4 和图 A5 所示。从图中可以迅速、直观地了解电网的有功潮流分布情况、输电方向和越限情况。

3.2 性能测试

3.2.1 空间插值算法性能

采用某省网主要厂站母线电压标么值实际数据共 69 组,检验空间插值算法的速度性能。使用 3 种空间插值算法,在 800×800 规模的矩形网格上测试,式(3)中的 d_{inf} 根据经验设置为 $\sqrt{S/N}$ (S 为插值区域面积, N 为数据组数), C 设置为 $5/d_{inf}^2$ 。计算结果如表 3 所示。

表 3 空间插值算法计算时间比较
Table 3 Comparison of CPU elapsed time among different spatial interpolation algorithms

算法	计算时间/s					
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	平均
①	1.547	1.500	1.516	1.531	1.531	1.525
②	0.187	0.172	0.188	0.188	0.187	0.184
③	0.109	0.109	0.110	0.110	0.109	0.109

注:测试环境:CPU 为 AMD Sempron™ 2200+,内存为 512 MB,操作系统为 Windows XP;编译环境:Visual C++ 6.0, Qt 3.2.3。算法:①距离平方反比空间插值算法(见式(1));②本文改进后的空间插值算法(见式(3));③在本文改进算法基础上针对网格对称性再进行优化。

从表 3 中看到,空间插值算法经过改进,其计算时间大为减少,从而能够满足实时性要求。

3.2.2 可视化显示性能

三维图形的生成和绘制过程也较耗时。在现场用不同规模的实际电网实时数据对系统的显示性能进行测试,结果如表 4 和表 5 所示。

表 4 线路有功功率的可视化显示耗时
Table 4 CPU elapsed time of line power flow visualization

画面 编号	线路 数目	三维箭头图耗时/s		三维管道图耗时/s	
		画面生成	完整绘图	画面生成	完整绘图
1	220	0.039	0.422	0.078	0.484
2	53	0.015	0.187	0.032	0.203
3	193	0.047	0.515	0.063	0.406
4	175	0.031	0.453	0.046	0.334
5	178	0.036	0.500	0.078	0.609
6	70	0.016	0.250	0.047	0.282
7	23	0.016	0.145	0.016	0.171

注:测试环境:CPU 为 Pentium®D 2.80 GHz,内存为 2 GB,操作系统为 Windows XP;编译环境:Visual C++ 6.0, Qt 3.2.3。

表 5 厂站电压幅值的可视化显示耗时
Table 5 CPU elapsed time of substation voltage visualization

画面 编号	厂站 数目	三维柱状图耗时/s		三维曲面图耗时/s	
		画面生成	完整绘图	画面生成	完整绘图
1	91	0.015	0.328	0.358	1.406
2	29	<0.015	0.156	0.359	1.313
3	87	0.016	0.203	0.301	1.312
4	80	<0.015	0.203	0.301	1.312
5	88	0.016	0.453	0.310	1.547
6	28	0.015	0.281	0.307	1.297

注:测试环境:CPU 为 Pentium®D 2.80 GHz,内存为 2 GB,操作系统为 Windows XP;编译环境:Visual C++ 6.0, Qt 3.2.3。

表 4 和表 5 中,画面生成耗时指从二维图形平台获取数据、进行必要处理(如过滤异常数据、空间插值计算)、生成 OpenGL 显示列表这一系列操作的时间;完整绘图耗时则还要在画面生成耗时基础上加上背景图 OpenGL 显示列表生成以及一次屏幕刷新显示的时间。从表 4 和表 5 可见,绘图时间随数据量的增大而增加,并且与表达形式的复杂程度相关。对所有画面,三维曲面图绘图时间都小于 1.6 s,其他表达方式的绘图时间则更在 0.6 s 以内,速度满足实时性要求。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

[1] 张伯明,孙宏斌,吴文传.3 维协调的新一代电网能量管理系统.电力系统自动化,2007,31(13):1-6.
ZHANG Boming, SUN Hongbin, WU Wenchuan. New generation of EMS with 3-dimensional coordination. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 1-6.

- [2] AZEVEDO G P, SOUZA C S, FEIJO B. Enhancing the human-computer interface of power system applications. *IEEE Trans on Power Systems*, 1996, 11(2): 646-653.
- [3] OVERBYE T J, WEBER J D. Visualization of power system data// *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*; Vol 4, Jan 4-7, 2000, Maui, HI, USA. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2000: 1228-1234.
- [4] KLUMP R, WU W, DOOLEY G. Displaying aggregate data, interrelated quantities, and data trends in electric power systems// *Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Jan 6-9, 2003, Big Island, HI, USA. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2003.
- [5] 邱家驹, 钱源平, 刘艳. 基于地理信息系统的电力系统静态安全分析可视化方法. *中国电机工程学报*, 1999, 19(5): 62-66.
- QIU Jiaju, QIAN Yuanping, LIU Yan. Visualization of power system static security assessment based on GIS. *Proceedings of the CSEE*, 1999, 19(5): 62-66.
- [6] WEBER J D. Individual welfare maximization in electricity markets including consumer and full transmission system modeling[D]. Urbana-Champaign, IL, USA: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1999.
- [7] 闵勇, 孙希健. 电力系统动态过程的可视化方法研究. *电网技术*, 2001, 25(11): 23-26.
- MIN Yong, SUN Xijian. Investigation on application of visualization in power system dynamics. *Power System Technology*, 2001, 25(11): 23-26.
- [8] SUN Y, OVERBYE T J. Visualizations for power system contingency analysis data. *IEEE Trans on Power Systems*, 2004, 19(4): 1859-1866.
- [9] 赵金利, 余贻鑫, 贾宏杰, 等. 电力系统割集空间静态电压稳定域的可视化及实现. *电力系统自动化*, 2005, 29(5): 56-61.
- ZHAO Jinli, YU Yixin, JIA Hongjie, et al. Visualization of the static voltage stability region in cut-sets space of power systems. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(5): 56-61.
- [10] 吴文传, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于 IEC 61970 标准的 EMS/DTS 一体化系统的设计与开发. *电力系统自动化*, 2005, 29(4): 53-57.
- WU Wenchuan, SUN Hongbin, ZHANG Boming, et al. Design of integrated EMS/DTS system based on IEC 61970. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(4): 53-57.
- [11] 吴文传, 张伯明, 孙宏斌, 等. 在线安全预警和决策支持系统的软件构架与实现. *电力系统自动化*, 2007, 31(12): 23-29.
- WU Wenchuan, ZHANG Boming, SUN Hongbin, et al. A software framework of an early warning and security countermeasure system for electric power control centers. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(12): 23-29.
- [12] 孙宏斌, 郭庆来, 张伯明. 大电网自动电压控制技术的研究与发展. *电力科学与技术学报*, 2007, 22(1): 7-12.
- SUN Hongbin, GUO Qinglai, ZHANG Boming. Research and prospects for automatic voltage control techniques in large-scale power grids. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2007, 22(1): 7-12.
- [13] XIN Yaozhong, ZHANG Zhigang, TAO Hongzhu, et al. Study of online security evaluation and application in National Grid of China// *Proceedings of CIGRE*, Aug 27-Sep 1, 2006, Paris, France: C2-202.

陈佳(1983—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统三维可视化和电力系统负荷预测。E-mail: chenja.yz@gmail.com

孙宏斌(1969—), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 会员, 主要研究方向: 调度自动化、无功电压优化控制、电力系统信息论。

汤磊(1973—), 男, 博士, 主要研究方向: 电力系统调度自动化以及人工智能和信息理论在其中的应用。

Three-dimensional Visualization Technique for Power System Control Centers and Its Real-time Applications

CHEN Jia¹, SUN Hongbin¹, TANG Lei¹, GUO Qinglai¹, WU Wenchuan¹,

ZHANG Boming¹, XIN Yaozhong², WANG Bei³, WU Sunong⁴, TAO Hongzhu², NING Wenyuan³

(1. State Key Laboratory of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. China National Electric Power Dispatching and Communication Center, Beijing 100031, China;

3. North China Power Dispatching Bureau, Beijing 100053, China;

4. Dispatch Center of Jiangxi Power Grid, Nanchang 330077, China)

Abstract: Several network connection-based visualization methods including the surface, bars, pipes and animated arrows are designed to express point and line data in power system control centers. Common visualization topics are proposed. The spatial interpolation algorithm in surface plotting is improved and the application of color-mapping is discussed. Based on an existing EMS 2D graphics platform, a 3D visualization software module is designed and developed, which has the features of rich display forms, good real-time performance, cross-platform implementation, and easy integration with other systems. This module has been put into operation in several power system control centers with the real-time effect and performance presented.

This work is jointly supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2006AA05Z217), Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217904), and Program for New Century Excellent Talents in University of the Education Ministry of China (No. NCET-05-0074).

Key words: power systems; control center; three-dimensional visualization; spatial interpolation algorithm

附录 A

表 A1 三维显示技术路线比较
Table A1 Comparison of 3D display technical routes

实现方案	跨平台	EMS 集成	速度性能
GIS	差	差	优
VRML/X3D	优	中	差
Java3D	优	差	优
Direct3D	差	中	优
Qt/OpenGL	优	优	优

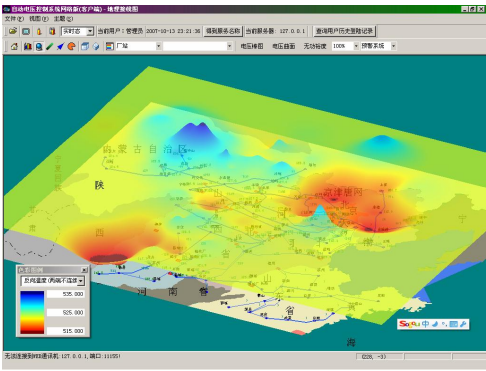


图 A1 厂站电压的三维曲面图（斜视图）
Fig. A1 3D surface of substation voltage (oblique view)

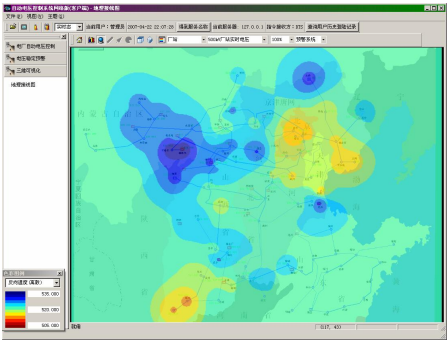


图 A2 厂站电压的三维曲面图（俯视图）
Fig. A2 3D surface of substation voltage (top view)

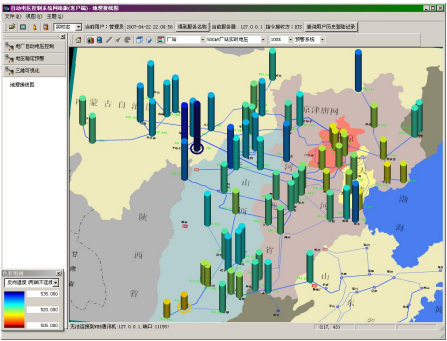


图 A3 厂站电压的三维柱状图
Fig.A3 3D bars of substation voltage

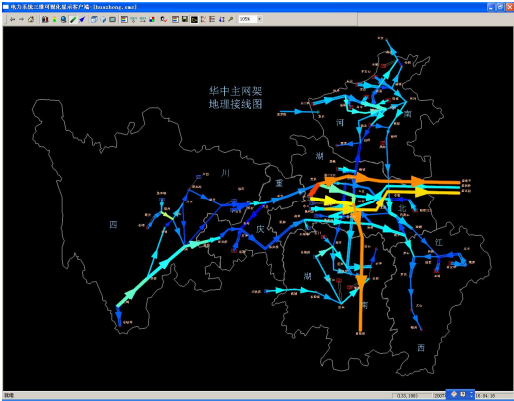


图 A4 线路有功功率的三维管道图
Fig.A4 3D pipes of line power flow

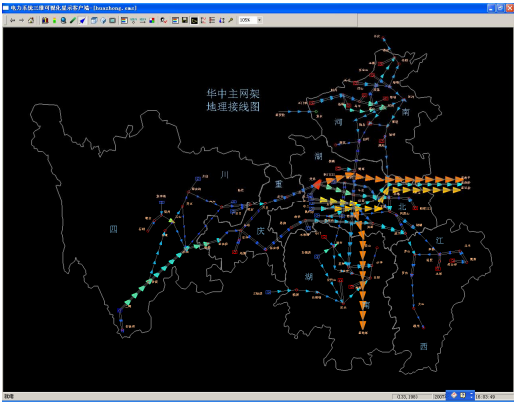


图 A5 线路有功功率的三维箭头图
Fig.A5 Animated arrows of line power flow