

## 基于 Modelica 的虚拟远程实验室

葛佳欢, 朱善安\*

(浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027)

(\* 通信作者电子邮箱 zsa@zju.edu.cn)

**摘要:**为了弥补传统实验教学模式的不足,介绍一种使用新型的、面向对象的多领域统一建模语言 Modelica 进行建模及仿真的电工电子虚拟远程实验室,并详述了其架构及远程实验的操作流程。构建两个子系统——模电实验系统及吹摆控制实验系统。通过调用 Modelica 标准模型库,实现了模电实验系统的建模;根据模块化建模的思想,对吹摆控制实验系统进行系统分解,利用 Modelica 编写每个模块的仿真模型,建立了可扩展的系统模型库,并基于该模型库实现了吹摆系统的构建。将两个子系统放在虚拟实验平台上仿真,仿真结果符合理论推算。

**关键词:**虚拟远程实验室; Modelica; 模拟电路实验系统; 吹摆控制实验系统; 虚拟建模

**中图分类号:** TP391.92 **文献标志码:** A

### Virtual remote laboratory based on Modelica

GE Jia-huan, ZHU Shan-an\*

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

**Abstract:** To make up for the deficiency of traditional labs, an Internet-based electrical and electronic virtual remote laboratory was introduced, in which a unified object-oriented language Modelica was used for modeling and simulation. The architecture and the internal mechanism of the virtual remote lab operation were elaborated. Two subsystems, the analog circuit system and the plate angle control experiment system were introduced as examples. The modeling of the analog circuit system was achieved by calling the Modelica standard library. The plate angle control experiment system was divided into modulars and the simulation models of each modular were built by Modelica. The scalable model library was established, and on the basis of it, the plate angle control experiment system was constructed. The two subsystems were simulated on the virtual platform and the results were consistent with theoretical calculations.

**Key words:** virtual remote laboratory; Modelica; analog circuit experiment system; plate angle control experiment system; virtual modeling

## 0 引言

随着信息技术的飞速发展,网络逐渐成为人类生活不可或缺的一部分,高等教育的实验室教学也必然由于网络的出现而产生巨变<sup>[1]</sup>。传统实验室基于硬件设备,受时空和经费的限制,远程实验室则能很好地弥补传统实验室的不足。远程实验室有着很强的开放性和自主性,用户可以在任何时间、任何地点通过网络远程登录,自主地根据实验要求选择实验内容<sup>[2]</sup>。远程实验可以和传统实体实验实现优势互补,解决我国当前实验资源明显不足的矛盾。基于实物的远程实验室具备上述所有优势,但由于是基于真实的设备,设备的老化和环境因素等原因将影响实验结果。虚拟远程实验室则是将真实的仪器虚拟化,为用户提供仿真环境,用户的所有操作都基于虚拟仪器。与实物远程实验室相比,虚拟远程实验室更为廉价和安全,且实验不受外界环境影响。

浙江大学电工电子网络实验室是基于实物远程实验和虚拟远程实验的综合性实验室,系统的总体框架如图1所示,主要分为客户端、服务器端和控制端。客户端主要完成显示图形界面、发送实验参数、连接服务器端及显示实验结果等工作,为用户提供两种登录方式,用户可以下载客户端软件进行实物实验或者通过 Web 远程登录进行虚拟实验;服务器连

接客户端和控制器端及数据库,采集实验结果返回给用户,将实验信息等数据保存到数据库,是整个电工电子网络实验室的核心。正如客户端提供两种方式给用户一样,服务器本身运行两个进程,分别与控制端的实物实验平台和虚拟实验平台相关。控制端构建了两个实验平台,实物远程实验平台和虚拟远程实验平台。实物实验平台连接真实设备,进行实时操作;虚拟实验平台由一组计算节点进行仿真计算,两者都将结果返回到服务器端。浙江大学电工电子网络实验室目前涵盖了控制类、电路类、电力电子类、电机类和微处理器类5大类共25组实验,其中实物远程实验室已于2003年投入使用,至今运作良好。

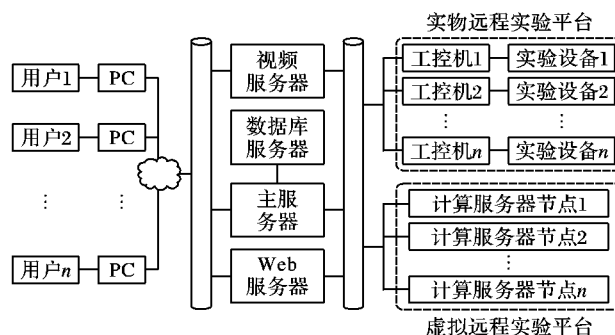


图1 电工电子网络实验室物理拓扑结构

收稿日期: 2011-08-04; 修回日期: 2011-09-20。 基金项目: 国家十一五重点支撑计划项目(2008BAH29B00)。

作者简介: 葛佳欢(1987-),女,浙江台州人,硕士研究生,主要研究方向:虚拟实验室、计算机辅助教育; 朱善安(1952-),男,浙江温州人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:网络实验室、基于PC的智能控制系统、预测自适应控制。

本文主要阐述虚拟远程实验室的架构和实现,对实物远程实验室相关细节不再赘述,文献[3-4]已对其进行了详细的描述。虚拟远程实验室是对实物实验的虚拟化,采用面向对象的统一建模语言 Modelica 进行建模,并调用开源编译器 OMC(Open Modelica Compiler)对实验进行计算求解。虚拟远程实验室于 2008 年开始进行架构,目前已初具雏形,可于 2011 年底投入使用。

## 1 基于 Modelica 的虚拟远程实验室

### 1.1 Modelica 语言

Modelica 语言是一种新型的,面向大型、复杂、异构的物理系统对象的建模语言<sup>[5]</sup>,采用方程的形式描述各个物理对象之间的规律和联系,通过求解微分代数方程实现系统仿真运行。Modelica 支持多领域统一建模,可以弥补一些仿真软件不同领域互不耦合的缺陷,符合浙江大学电工电子网络实验室覆盖多学科的特点<sup>[6]</sup>。因此,虚拟远程实验室采用 Modelica 对各个实验模块进行建模,并调用开源编译器 OMC 对各个实验进行仿真求解。

Modelica 采用类的方式构建基本单元,复杂对象由一个或多个类单元通过组件连接机制进行连接构成,一些最基本的对象已经预存到 Modelica 标准库中,用户可以直接调用,复杂对象需要用户自行构建。本文后半部分所示的两个子系统,模电实验的元件都是基于模型库中已有的模型,构造相对比较容易,而吹摆控制实验系统除了某些元件可以从模型库中找到,其余的都是通过模块化建模的方式自主开发构建。

### 1.2 XML 语言

本文所述虚拟实验室需要客户端对实验场景进行抽象,传送到控制端做进一步的计算,因此需要一种简单易用又能实现客户端、服务器端及控制端之间数据交换的语言进行场景的抽象。XML 的可扩展性使用户可以根据文档的内容定义自己的标记语言<sup>[7]</sup>,数据与格式的可分离性方便地实现了不同应用间的数据交换<sup>[8]</sup>,正好符合虚拟实验室的要求。

### 1.3 虚拟远程实验室的架构

图 2 所示为虚拟远程实验室的整体架构,分为客户端、虚拟实验服务器及虚拟实验平台三个部分。

1) 客户端。客户端采用浏览器/服务器(Browser/Server, B/S)架构,利用 Applet/Flex 浏览器插件技术实现,用户只需通过浏览器登录远程实验室的网站,即可在网上进行实验浏览和操作,无需下载任何客户端应用程序,这就避免了传统客户机/服务器(Client/Server, C/S)架构下必须下载客户端应用程序带来的麻烦。客户端的实验都是以模块化的方式添加到原框架下,任何子系统的增加与删除都不影响其他实验系统的正常运行,各个实验模块之间相互独立,互不干扰。

2) 虚拟实验主控节点服务器。它是连接客户端和虚拟实验平台的桥梁,主要承担求解任务调度。当客户端通知为虚拟远程实验时,主服务器启动虚拟实验主控节点服务器进程,该进程将客户端传来的数据转发到虚拟实验平台; Web 服务器为进行虚拟实验的用户提供网页下载。

3) 虚拟远程实验平台控制端。控制端由一群计算节点构成,每个节点承担一定的仿真任务。当接收到服务器传过来的信息后,某一个计算节点会被调用,开始执行仿真任务,

并将仿真的结果传回服务器<sup>[9]</sup>。

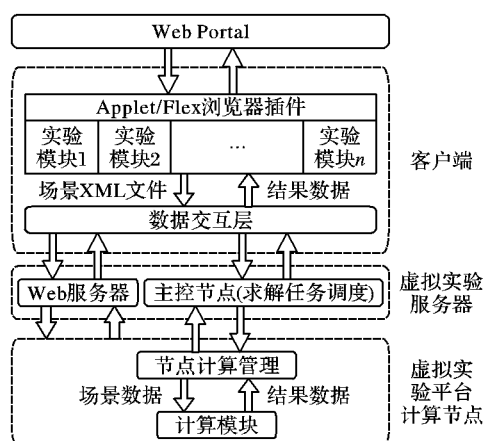


图2 虚拟远程实验室架构

### 1.4 虚拟实验操作流程

虚拟实验操作流程如图 3 所示。在客户端,每个实验的元器件都有其对应的 XML 构件列表,保存在器件模型元数据库中。该列表描述了器件的基本信息,包括 id、名称及属性等,最重要的是其对应的 Modelica 库的模型。当用户调用器件组建实验时,客户端会相应地调用器件元数据库中的已有 XML 文件,组建虚拟实验场景。

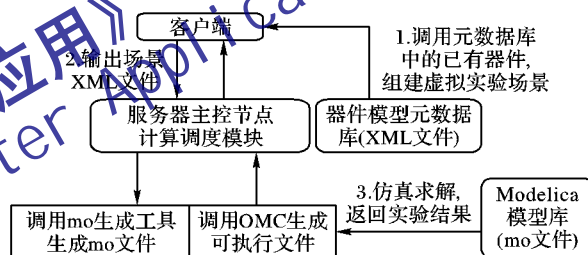


图3 操作流程

场景 XML 文件一旦形成,将会被发送到虚拟主控节点服务器端,服务器根据当前的负载情况,将其转发到虚拟实验平台的某一个计算节点,该节点调用 mo 生成工具将场景 XML 文件转换成 Modelica 描述文件(mo 文件),mo 文件保存的是实验场景的拓扑结构信息及各器件之间的连接关系。开源编译器 OMC 编译当前的 mo 文件,求解微分代数方程,得到计算结果。计算节点进一步对结果文件进行数据封装,生成规定的 XML 格式文件,返回到主控节点服务器端,进而返回到客户端。

## 2 虚拟远程实验室教学实例

如前所述,虚拟远程实验室的诸多子系统可以用两种方式构建,一种是基于标准模型库中的已有模型,另一种是自主构建。本文介绍的模拟电路实验基于调用标准模型库,而吹摆控制实验则基于自主构建模型。

### 2.1 模拟电路实验系统

本文将以共射极放大电路实验为例进行阐述,该实验电路由三极管、电源、电阻及示波器等元件组成。

#### 2.1.1 共射极放大电路实验原理

共射极放大电路的原理如图 4 所示,三极管的基极作为输入,集电极作为输出,发射极接地。NPN 型三极管是放大电路的核心元件,它可以将基极电流的微小变化放大几十倍至上百倍(视具体电路而定,设放大倍数为  $\beta$ )。

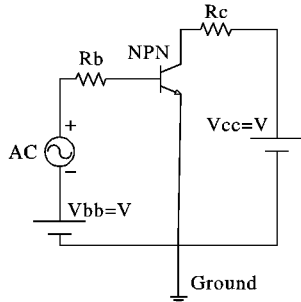


图4 共射极放大电路原理

### 2.1.2 共射极放大电路实验的虚拟仿真

图5所示为共射极放大电路实验结果图。输入正弦电压的幅值为0.5 V,波动的曲线代表输出电压值,可以看到,在0.26 s的时候,达到最大值18 V(箭头所指点),输出信号对输入信号的放大效果显而易见。

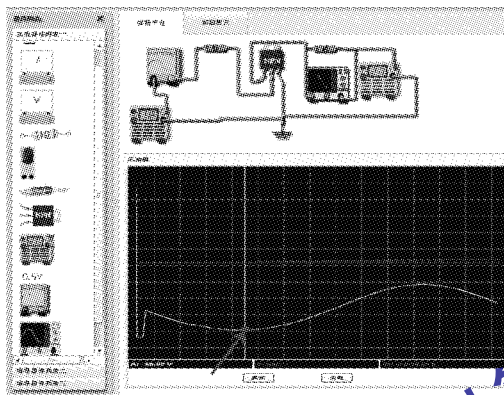


图5 共射极放大电路仿真结果

## 2.2 吹摆控制实验系统

与模电实验直接调用模型库模型不同,吹摆控制实验的大部分元件都需要自行建模。

图6所示为吹摆模型结构图,吹摆模型包括支架、风扇和摆叶,摆角为摆叶被风扇吹动的角度值,即被控对象,吹摆控制实验的原理图如图7所示。采用闭环控制算法,利用角度传感器测量实际角度,与预先设定的角度一起输入控制器,控制器根据预先设定的算法输出电压控制量控制风扇的转速,进而使摆叶被吹动的角度值达到预定的角度值。控制器的算法为PID算法或者是用户自定义的算法,本文采用PID算法作为例子,用户在实际实验过程中,可以输入自定义的算法。

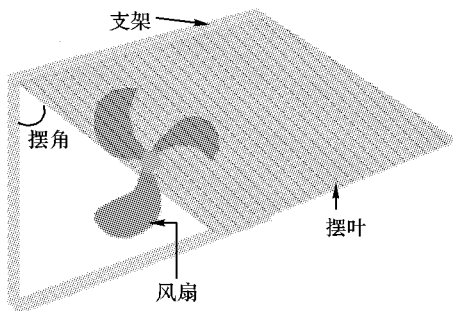


图6 吹摆模型

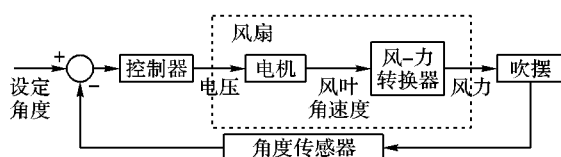


图7 吹摆控制实验原理

### 2.2.2 吹摆实验系统建模

根据模块化建模的思想,将吹摆控制实验系统分为控制器、风扇、吹摆、角度传感器几个部分,其中PID控制器、反馈环节、角度传感器已在标准库中定义,风扇、吹摆需要自行建模。

#### 1) 吹摆建模。

吹摆系统的动力学模型如图8所示,该图所描述的是摆叶在受到风力后从静止到平衡状态中某一瞬间的状态图。为简便起见,对吹摆模型做一些理想化处理:1)设摆叶的重心位于其几何中心 $(x_a, y_a)$ ,这样只需研究摆叶重心即可;2)设风扇吹出的风力是均匀的,且由于风扇和摆叶的距离很近,忽略距离增长造成的风力减弱,那么,在整个研究的区域内,在同一时间点,各点风力大小是相同的。图中所示摆叶重心 $(x_a, y_a)$ 沿轴的运动方程为:

$$\frac{md^2x_a}{dt^2} = F - (Fl * x_a)/L \quad (1)$$

$$\frac{md^2y_a}{dt^2} = mg - (Fl * y_a)/L \quad (2)$$

其中:  $2L$  为摆叶长度,  $F$  为风力,  $Fl$  为支架对摆叶的拉力,  $mg$  为重力,  $V$  为摆叶瞬时速度,  $V_x, V_y$  分别为瞬时速度的  $x, y$  轴分量。

求解上述两个运动方程,可以得到吹摆系统模型。

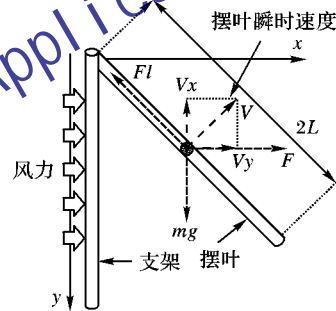


图8 吹摆系统的动力学模型

#### 2) 风扇建模。

风扇的工作原理是由电动机带动叶片旋转,继而带动空气流动产生风力。若对风扇单独建模,则可以将它看成是一个电动机,输入为电压 $u$ ,输出为风叶的转速 $w$ 。但由于吹摆控制实验系统是一个整体,必须考虑各模块之间的耦合,前文在给吹摆建模时,输入量是风叶旋转产生的风力 $F$ ,而电机的输出是其旋转角速度 $w$ ,这两者之间需要一个转换器,将角速度 $w$ 转换为风力 $F$ 。由流体动力学的原理可知<sup>[10]</sup>,对于同一个风机,在其他条件保持不变的情况下,风机旋转产生的风力与风机的角速度的平方成正比。暂时忽略其余外界条件的影响,则 $w - F$ 之间的关系可用下式表示:

$$F = k * w^2 \quad (3)$$

其中 $k$ 为转换系数。

电动机的模型与吹摆系统的闭环控制类似,由一个开环的直流电动机加测速机的反馈环节构成闭环控制系统。设其输入为电压 $u$ ,输出为电动机的转速 $w$ ,测速机测量电动机转速并将其转换为测速电压值 $u1$ 返回,电压放大系数为 $k1$ ,速度-电压转换系数为 $k2$ 。 $R$ 为电枢回路电阻, $L$ 为电枢回路电感, $km$ 为电磁转矩常数, $J$ 为电动机转动惯量<sup>[11]</sup>。由此建立电动机的Modelica模型如下:

```
model MotorModel
  parameter Modelica.SIunits.Inductance L = 0.05;
```



```

parameter Modelica. SIunits. Resistance R = 0.5;
parameter Real km = 1;
parameter Real k1 = 1;
parameter Real k2 = 1;
parameter Modelica. SIunits. Inertia J = 0.01;
Modelica. SIunits. Current i;
Modelica. SIunits. Voltage u1;
Modelica. Blocks. Interfaces. RealInput u;
Modelica. Blocks. Interfaces. RealOutput w;
equation
k1 * (u - u1) = L * der(i) + R * i;
km * i = J * der(w);
u1 = k2 * w;
end MotorModel;

```

### 2.2.3 吹摆控制系统仿真实验

图9所示为吹摆控制实验系统的结果图,1线代表预设的角度值,2线代表吹摆实际的角度值,可以看出,输出角度很好地跟踪了输入角度。

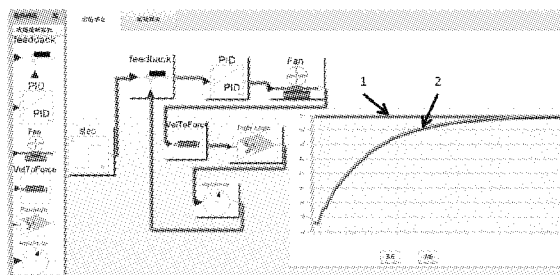


图9 吹摆虚拟远程实验结果图

## 3 结语

浙江大学电工电子网络实验室虚拟远程实验平台的共射

极放大电路实验及吹摆控制实验,运用 Modelica 语言的模块化建模方法,为用户提供一种虚拟化的实验方式。与实物实验平台整合后,浙江大学电工电子网络实验室将成为一个运用计算机实时控制、网络传输、虚拟仿真、数据库等多种技术的虚实结合的综合性实验平台,具有更强的通用性,为更多的远程实验用户提供更多的选择。

### 参考文献:

- [1] 宋象军. 虚拟实验室在高校实验教学中的应用前景[J]. 实验技术与管理, 2002, 22(1): 35-37, 47.
- [2] 战巧玲. 基于网络的远程虚拟实验室构建[J]. 科技信息, 2008(4): 86-87.
- [3] 徐广宁, 朱善安. 一个集成的基于 Internet 的网络实验室[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2005, 4(1): 41-44.
- [4] 阎磊, 朱善安. 基于 TCP/IP 协议的虚拟电工电子网络实验室[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2005, 4(3): 276-279.
- [5] BACHMANN B, BOUDAUD F, BROENINK J, et al. Modelica—A unified object-oriented language for physical systems modeling [M]. [S. l.]: Modelica Association, 2009.
- [6] 赵建军, 丁建完, 周凡利, 等. Modelica 语言及其多领域统一建模与仿真机理[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(2): 570-573.
- [7] 江鹏. 浅析 XML 与高级语言之间的数据交换措施[J]. 民营科技, 2007(7): 70.
- [8] 郑伟勇, 周建峰, 王新星, 等. 基于 XML 的社保数据迁移系统的设计与实现[J]. 软件导刊, 2010, 19(3): 136-139.
- [9] 曹晓欢, 朱善安. 面向电气工程高等教育的综合性远程实验室[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(10): 175-178.
- [10] 王志魁. 化工原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [11] 张晓华. 系统建模与仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

(上接第 584 页)

## 4 结语

在对矿山各种空间现象进行分析与归纳的基础上,本文设计了一种面向矿山领域的多维混合时空数据模型。该模型已经在中南大学数字矿山研究中心开发的地下矿可视化管控系统中得到应用,实践表明该模型在矿山领域具有良好的实用性。其特点如下:

1) 利用在矢量边界模型约束下的八叉树块段模型描述矿体内部属性,能准确地进行属性查询,并具备良好的三维可视化效果;

2) 引入 PENDM 建立了坑道和各种生产系统的几何网络,弥补了体模型的不足,方便进行空间分析。同时,骨架模型包含了建立三维矢量体模型的全部信息,可以实现井巷工程和生产系统的快速建模与动态更新。

### 参考文献:

- [1] 王李管, 曾庆田, 贾明涛. 数字矿山整体实施方案及其关键技术[J]. 采矿技术, 2006(3): 494-498.
- [2] 毕林. 数字采矿平台软件关键技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [3] 谭正华, 王李管, 毕林, 等. 平面连通巷道三维实体分层建模方法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2010, 35(3): 360-363.
- [4] 陈忠强, 王李管, 毕林. 矿床三维可视化建模技术的应用与发展[J]. 现代矿业, 2009, 28(9): 59-62.
- [5] 周智勇, 陈建宏, 杨立兵. 大型矿山地矿工程三维可视化模型的构建[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(3): 423-428.

- [6] 华钢, 周磊, 任凯. 地下煤矿人员定位跟踪系统发展综述[J]. 矿山机械, 2008, 36(6): 36-40.
- [7] 吴立新. 论三维地学空间构模[J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(1): 1-4.
- [8] 郑坤, 刘修国, 吴信才, 等. 顾及拓扑面向实体的三维矢量数据模型[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(3): 474-479.
- [9] 熊书敏, 郑坤, 吴信才. 基于实体模型的三维 GIS 矢量数据管理[J]. 地理空间信息, 2006, 4(1): 18-20.
- [10] 李景文, 周文婷, 刘军锋. 基于地理实体的面向对象矢量模型设计[J]. 地理与地理信息科学, 2008, 24(4): 29-31.
- [11] 王黎明, 王英, 文辉, 等. 面向对象的区域规划空间信息时空数据模型[J]. 地理科学进展, 2004, 23(3): 1-8.
- [12] 李阳东, 刘妙龙, 童小华. 时空数据模型的研究与进展[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(5): 1281-1284.
- [13] 龚健雅, 夏宗国. 矢量与栅格集成的三维数据模型[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22(1): 7-15.
- [14] 马荣华, 黄杏元, 贾建华, 等. 矿山地理信息系统中巷道模型的研究[J]. 测绘学报, 2000, 29(4): 356-361.
- [15] 李海霞, 贾建华, 杨硕. 适合矿井巷道特点的三维数据结构研究[J]. 矿山测量, 2000, 27(4): 10-12.
- [16] 周科平, 郭明明, 杨念哥, 等. 地下矿山开拓运输仿真系统研究[J]. 计算机系统应用, 2008, 17(11): 6-10.
- [17] 胡勇, 武殿良, 韦乃琨. 基于虚拟环境的矿山运输系统实时监控技术研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(9): 109-116.
- [18] 孔令标, 侯运炳. 基于三维地理网络的矿井供电自动设计系统[J]. 金属矿山, 2005(8): 52-55.