

# 基于遗传禁忌搜索算法的PMU布点配置

马勇<sup>1</sup>, 陈赤培<sup>2</sup>, 王林<sup>1</sup>, 姜琴<sup>1</sup>

(1. 华东交通大学电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 江西电力设计院, 江西 南昌 330006)

**摘要:** 将遗传算法 GA (Genetic Algorithm) 和禁忌搜索算法 TS (Tabu search) 相结合, 提出一种遗传禁忌搜索算法 GATS (Genetic Algorithm & Tabu search) 用于相量测量单元优化配置。GATS 算法结合了遗传算法的随机搜索能力、并行性和禁忌搜索算法的记忆功能, 有效地解决了遗传算法的爬山能力差、早熟的问题, 提高了收敛速度及优化质量; 同时遗传算法的种群操作, 保留了遗传算法的多出发点的优势, 弥补了禁忌搜索的单一操作缺乏并行性的弱点。在约束条件处理时, 采用了不可行解启发式修复方法, 提高了算法的优化效果。基于图论的深度优先方法用于系统可观性分析。将 GATS 算法应用于优化相量测量装置安装地点选择, 实现了安装地点最少, 而整个系统可观的目标。通过算例证明了算法的有效可靠。

**关键词:** 可观性分析; 相量测量单元; 遗传算法; 改进遗传算法; 禁忌搜索算法

## Optimal PMU placement based on genetic algorithm and tabu search algorithm

MA Yong<sup>1</sup>, CHEN Chi-pei<sup>2</sup>, WANG Lin<sup>1</sup>, JIANG Qin<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 300013, China; 2. Jiangxi Electric Power Design Institute, Nanchang 330006, China)

**Abstract:** This paper presents a hybrid algorithm which based on genetic algorithm and tabu search algorithm to optimize the phasor measurement units (PMU) placement problem. Genetic-Tabu Search combines the random searching ability and parallel of Genetic Algorithm with the memory function of Tabu Algorithm, and solves problems of Genetic Algorithm such as bad grade ability, Pre-maturity effectively, and enhances the convergence speed and utilization quality. Meanwhile, the category operations of Generic Algorithm keep the advantages of multi-origin of Generic Algorithm and amend the weak point of Tabu Searching which is the lack of parallel for single-single operation. It takes the infeasible and heuristic restoration while the constraint is handling. The Genetic-Tabu Search algorithm is applied to PMU placement optimization and fulfills the requirement of minimizing the number of PMUs in the system while the all node voltage phasor observable. A graph-theoretic procedure based on depth first search is adopted to analyze the system observability. Test results show that the GATS algorithm is effective.

**Key words:** observability analysis; phasor measurement unit; genetic algorithm; improved genetic algorithm; tabu search algorithm

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)02-0021-05

## 0 引言

基于全球定位系统 GPS (Global Positioning System) 的广域测量系统 WAMS (Wide Area Measurement System) 是近年发展起来的一项新技术, 被称为电力系统三项前沿课题之一<sup>[1,2]</sup>。电力系统中的发电机功角和母线电压相量是系统运行的主要状态变量, 为了对系统进行动态监控, 必须对其进行精确监测。基于全球定位系统 GPS 的同步相量测量单元 PMU (phasor measurement unit) 是广域测

量系统的重要组成部分, PMU 的出现使在电力系统广域范围内实现发电机功角和母线电压的实时监控成为可能, 能为电力系统安全稳定运行提供必要的预测和控制依据。目前有很多学者在研究如何利用 PMU 的特性以进行电力系统分析和控制已经取得了一定的成果<sup>[3]</sup>。

现在日益增大的电网装机容量以及日益复杂的全国联网格局使得电网的稳定监视和控制越来越重要, 由于经济和技术条件上的限制, 目前还不可能在每个节点配置 PMU, 而且对每个节点都配置

PMU不仅不经济而且也没必要,研究如何利用最少的PMU来进行整个电网的稳态分析具有不可估量的重要性与迫切性。目前,PMU配置策略一般从满足系统可观性<sup>[4-11]</sup>或安全稳定性的角度出发<sup>[12,13]</sup>。但PMU的优化配置策略主要集中在满足系统可观性上,文献[4]引入PMU相关量测集后的增广关联矩阵的电力系统可观性拓扑分析方法,以保证系统结构完全可观性和最大量测数据冗余度为约束,以配置PMU数目最小为目标,并应用禁忌搜索(TS)方法求解问题,保证全局最优。文献[5]提出一种最小生成树算法,在深度优先搜索算法的基础上采用一种新的寻优规则来寻求PMU的优化配置。文献[9]将PMU的配置问题归结为多目标规划问题,其中一个目标为PMU的数目最小,另一个目标为故障(某条线路停运)后系统的观测冗余度最大,并采用遗传算法求取该多目标规划问题的帕累托(Pareto)最优解,取得了较好的效果。文献[10]采用模拟退火算法SA(Simulated Annealing)在满足系统可观性的条件寻找最优配置方案。文献[11]研究了潮流可解条件下PMU的优化配置问题。这些方法都是在满足可观性的前提下如何实现PMU的优化配置问题。文献[12]提出了同时考虑发电机同调性和母线电压同调性的PMU配置问题,采用扩展等面积法对不同动态场景的仿真结果进行挖掘,再进行同调机群的划分。文献[13]提出对各种动态场景进行压缩,再在压缩后的每一个场景内单独进行同调分群,最后组合不同场景的分群结果来进行PMU的优化配置。这些方法从系统保稳性出发考虑PMU配置问题,但由于电力系统的运行方式和故障场景(动态场景)十分复杂,数据处理运算复杂,不利于推广。

本文在前人研究的基础上,提出基于可观性拓扑分析为设计,把深度优先方法用于系统可观性分析,并采用遗传算法和禁忌搜索算法的混合算法来进行PMU的最优配置。

## 1 电力系统可观性分析及PMU布点配置规则

PMU在电网中的分布是否达到最优,其判断原则主要是系统的可观性。在系统中配置一台新的PMU之后,不管用哪种寻优方法,都要检测系统的可观性,如果可观,则停止配置,否则继续。如果对于任意给定的输入,在有限的观测时间内,输出都能唯一确定系统在初始时刻的状态,则称系统状态是能观测的。文献[14]提到,考察一个系统是否可观可以从两个角度来分析,即代数可观与拓扑可

观。代数可观主要通过检查信息矩阵三角分解是否出现零主元来判断可观性。如果测量雅可比矩阵是满秩且良态的,则这个系统是代数可观的。对于大规模复杂结构的电网,代数可观实现困难,运算量大,积累误差影响运算精度及结果。

因此,本文的优化设计程序以拓扑可观为基础,采用深度优先搜索技术,从安装PMU的节点开始,通过测量或虚拟测量的电流支路,扩张到虚拟测量的电压节点,然后再从这些电压节点通过电流支路继续向外扩张,在所有节点扩张完成后会生成一棵测量树。若这棵树包含所有系统节点,则整个系统是拓扑可观的。若某些系统节点不在测量树上,则系统不完全可观,且这些节点也不可观。本文着重介绍了以禁忌搜索和改进遗传算法的混合算法为基础的拓扑可观在优化过程中的实现方法。

### 1.1 拓扑可观

电力系统可以看作一个由 $N$ 个节点和 $e$ 条边构成的图 $G=(V,E)$ , $V$ 表示顶点集合, $E$ 表示边的集合,分别对应系统的节点和支路集合。测量网络构成测量子图 $G'=(V',E')$ ,其中, $V' \subseteq V, E' \subseteq E$ 。如果测量子图 $G'$ 与图 $G$ 满足 $V' \subseteq V$ ,则系统是拓扑可观的。系统拓扑可观的核心思想是检查配置的量测集能否建立满秩的支撑树以覆盖全网所有节点。

### 1.2 PMU布点配置规则

电力系统的节点电压和支路电流可以通过直接测量或虚拟测量的方式获得。其中虚拟测量是利用与其相关的测量经计算而得出待测量的方法。根据测量方法的不同可知有以下几条测量规则。

对于直接测量:

规则一 安装PMU的节点,其节点电压和与该节点相关的支路电流可知。

对于虚拟测量<sup>[15]</sup>:

规则二 如果支路两端的电压可知,则该支路电流可知。

规则三 如果零注入节点未配置PMU且仅一条相关支路电流未知,则该支路电流可知。

规则四 如果零注入节点未配置PMU且所有相邻节点电压已知,则该节点电压可知。

规则五 如果支路电流和一端电压可知,则该支路的另一端的电压可知。

考虑系统测量的冗余度:

规则六 如果支路及支路两端节点的可观次数不同,则最小观测次数可改为与次小观测次数相等。

根据以上六条规则,如果PMU的位置和数量合理,则一定可以发现使整个系统可观的配置方案,但结果未必是最优解。

## 2 遗传禁忌搜索算法

### 2.1 遗传算法和禁忌搜索算法简介

GA<sup>[6]</sup>算法是一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机化搜索算法。该算法是一种群体型操作,这种操作以全体中的所有个体为对象,其操作包括:选择(selection)、交叉(crossover)、变异(mutation)三个主要遗传算子,他们使得遗传算法具有了其他传统方法所没有的特性。遗传算法的核心内容是它的五个基本要素,它们是:参数编码、初始群体的设定、适应度函数的设计、遗传操作的设计、控制参数的设定。

TS算法是Glover<sup>[16]</sup>于1986年提出的一种人工智能算法。它是由局部邻域搜索算法推广为全局逐步寻优算法。其核心思想是采用一种灵活的对历史进行记录的技术指导下一步的搜索方向,当到达局部最优解时,禁忌搜索将搜索方向指向导致目标函数退化最小的方向上,由此避开局部最优解<sup>[17]</sup>。禁忌搜索算法主要是由邻域、初始解、禁忌表、禁忌表规模、期望标准、停止规则等这些要素构成。

### 2.2 混合算法(GATS)的设计思想

遗传禁忌搜索算法的基本思想是将遗传算法与禁忌搜索算法相结合而构成一种优化算法。遗传算法的局部搜索能力较差,但把握总体搜索过程的能力较强;而禁忌搜索算法具有较强的局部搜索能力,并能使搜索过程避免陷入局部最优解。本文的GATS算法是先用GA进行全局搜索,使群体中的个体比较稳定地分布在解空间的大部分区域,再从群体中每个个体开始,用TS算法进行局部搜索,改善群体的质量,这样可减少调用TS算法的次数,也就减少了计算时间。混合策略有效结合了GA并行的大范围搜索能力和TS的局部搜索能力,力图在算法的全局收敛性能和避免局部极小方面有较大改善。

## 3 遗传禁忌算法在PMU的优化配置

### 3.1 安装地点选择优化的数学模型

PMU的安装地点选择是一个组合优化的问题,数学模型如下

$$\text{Min } J = m \quad (1)$$

$$\text{s. t. } U_i = 0 \quad i = 1, \dots, N$$

式中: $m$ 为PMU安装数量; $U_i$ 为第 $i$ 个节点不

可观; $N$ 为系统节点数。

### 3.2 染色体编码

染色体采用二进制编码,染色体等于系统节点数 $N$ ,每个基因位置由下式确定

$X_i = 1$  节点 $i$ 安装测量装置; $X_i = 0$  节点 $i$ 未安装测量装置( $i = 1, \dots, N$ )

### 3.3 适应度函数与约束条件处理

优化对象的约束条件是 $U_i = 0$ ,即保持整个系统可观。当出现不满足约束条件的解(存在不可观节点)时,本文将采用不可行解的启发性修复方法进行处理。具体为:先从不可观节点中选择支路最多的节点,为其安装1台PMU,即将该节点对应的染色体基因位置“1”;再判断染色体是否满足约束条件,如果不满足则重复上述过程,直到满足约束条件为止。经过以上过程,问题的解就被严格限定在满足约束的可行解空间内。

由于经过处理的所有染色体都满足约束条件,适应度函数可以定义为

$$f = C_{\max} - C_l \sum_{i=1}^N X_i$$

其中: $C_{\max}$ 为一个较大的数以保证适应度函数值大于零, $C_l$ 为比例系数。

### 3.4 GATS算法在PMU布点配置的流程

GATS算法的一般步骤如下:

步骤1 给定初始参数,包括群体规模 $m$ ,最大迭代次数 $T$ ,交叉概率 $P_c$ ,变异概率 $P_m$ 。

步骤2 确定编码方式,令 $t = 0$ , $k = 0$ ,生成初始群体,其中有 $m$ 个个体 $x_1^1, \dots, x_1^m$ 。

步骤3 计算当前群体中每个个体的适应值 $f(x_1^1), \dots, f(x_1^m)$ 。

步骤4 从群体中选择 $m$ 个个体作为下一代的父本点,每个个体被选择的概率为

$$P_i = \frac{f(x_i^j)}{\sum_{j=1}^m f(x_i^j)}, \quad i = 1, \dots, m.$$

选择过程中使用择优原则,即上一代最优的个体以概率1保存至下一代。

步骤5 根据交换概率 $P_c$ ,对群体中的个体进行交换运算。

步骤6 按照变异概率 $P_m$ ,对群体中的个体进行变异运算,产生新一代群体。

步骤7 若 $k = 10$ ,调用TS搜索过程,对新一代

群体中的每一个个体进行局部搜索,改进群体点的质量,设改进后的群体点为  $x_{i+1}^1, \dots, x_{i+1}^m$ , 令  $k=0$ ; 否则, 转步骤8。

步骤8 可观性分析及不可行解修复。

步骤9 如果  $t < T$ , 令  $t=t+1, k=k+1$ , 转步骤3; 否则输出最优解, 终止算法。

事实上, 调用 TS 算法与否可视 GA 的收敛情况而定, 开始时调用 TS 算法次数少, 随着迭代的进行, 各个个体离最优点越来越近, 局部搜索的作用也越来越大, 调用 TS 算法的频率越高。为简单起见, 作者采用 GA 迭代 10 次调用 TS 算法搜索过程 1 次。

#### 4 算例分析

本文应用在 Matlab7.0 软件下开发的遗传禁忌搜索算法、PMU 测量网络可观性分析及 PMU 安装地点优化程序, 对以下算例进行了验证。

##### 4.1 算例 1 (见图 1)

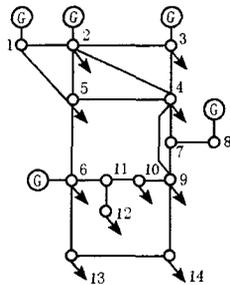


图 1 IEEE 14 节点系统  
Fig.1 IEEE14-bus system

以 IEEE14 节点系统为例: 14 个节点, 20 条边, 1 个零注入节点, 其中节点 7 为无负荷节点<sup>[15]</sup>。使用遗传禁忌搜索算法, 取群体规模  $M=40$ , 最大迭代次数  $T=30$ , 即可收敛到最优解。计算的结果为, 在 2、6、9 节点安装测量装置即可使全系统可观。

##### 4.2 算例 2 (见图 2)

本文将 GATS 算法与深度优先搜索 DFS (depth first search) 算法、模拟退火 SA (simulated annealing) 算法在新英格兰 39 节点系统<sup>[10]</sup>进行了仿真比较。取群体规模  $M=100$ , 进化代数  $T=100$ , 每种算法各算 10 次。优化计算对三种算法的收敛性时间、解的数目和安装节点等方面做了比较, 结果如表 1 所示。

此算例表明了 SA 算法收敛速度慢的缺点暴露无遗, 它所需的收敛时间为 3 个多小时, 是其它两种算法所需时间的几十到几百倍。DFS 算法所用的时间最少, 不到 1 s, 但它的收敛性很差, 所需的 PMU

数目是 16 台, 几乎是最佳结果 9 台的 2 倍, 从经济性角度考虑, 此算法在大系统中的实用性很差。但是此算法是很重要而且应用广泛的一种寻优算法, 只要规定了较好的寻优规则, 它就可以同时在解的质量与效率上达到好的平衡。针对这个问题, 本文提出了 GATS 算法, 达到了很好的应用效果, 仿真结果也证明了这一点。

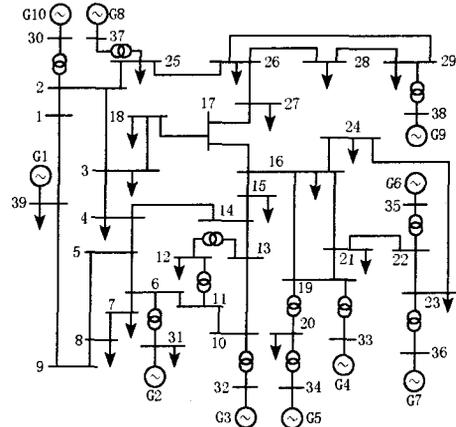


图 2 新英格兰 39 节点系统网络结构图  
Fig.2 Structure of New England 39 power system

表 1 新英格兰 39 节点系统仿真结果

Tab.1 Simulation results of New England 39-bus power system

配置方法	所用时间	PMU 数目	PMU 安装节点
DFS	0.661s	16	2,6,8,10,12,14,16,18,20,23,26,33,35,37,38,39
SA	3h12min16.679s	9	2,3,8,12,16,20,23,25,29
GATS	56.692s	9	1,3,8,10,16,20,23,25,29

#### 5 结论及展望

本文通过算例仿真实验验证了利用 GATS 算法进行电力系统 PMU 最优配置的有效性, 并与几种常用的寻优算法进行了比较。在 DFS 算法寻优原理的基础上, 通过对寻优法则不断改进得到的 MST 算法能使解的质量与效率达到更好的平衡, 克服了 DFS 算法收敛性差和 SA 算法收敛速度慢的缺点, 同时保证了解的多样性, 在达到系统可观的前提下使得 PMU 的安装数目最少。在新英格兰 39 节点系统的 PMU 配置中, 利用 GATS 算法只需 9 台 PMU 就能实现系统的可观性, PMU 数量为系统总节点数的 23%。

目前, 国内的 PMU 应用研究正处于起步阶段。本文就 PMU 的实际应用研究, 从电力系统可观性与

经济性角度出发,用GATS算法实现PMU的最优布点配置。其效果表明该算法对电网稳定控制具有实际指导意义和实现的可行性。

但是,当PMU大规模安装时,特别是用于系统稳定控制时,算法还需进一步考虑测量冗余度问题。

### 参考文献

- [1] 许树楷,谢小荣,辛耀中.基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景[J].电网技术,2005,29(2):44-49.  
XU Shu-kai, XIE Xiao-rong, XIN Yao-zhong. Present Application Situation and Development Tendency of Synchronous Phasor Measurement Technology Based Wide Area Measurement System[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 44-49.
- [2] 罗建裕,王小英,鲁庭瑞,等.基于广域测量技术的电网实时动态监测系统应用[J].电力系统自动化,2003,27(24):78-80.  
LUO Jian-yu, WANG Xiao-ying, LU Ting-rui, et al. An Application of Power System Real-time Dynamic Monitoring System Based on Wide-area Measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 78-80.
- [3] Hauer J F. Validation of Phasor Calculations in the Macrodyne PMU for California-Oregon Transmission Project Tests of March 1993[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3): 1224-1231.
- [4] 彭疆南,孙元章,王海风.考虑系统完全可观测性的PMU最优配置方法[J].电力系统自动化,2003,27(4):10-16.  
PENG Jiang-nan, SUN Yuan-zhang, WANG Hai-feng. An Optimal PMU Placement Algorithm for Full Network Observability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 10-16.
- [5] 蔡田田,艾芊.电力系统中PMU最优配置研究[J].电网技术,2006,30(13):32-37.  
CAI Tian-tian, AI Qian. Research on Optimal PMU Placement in Power Systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 10-16.
- [6] 沙智明,郝育黔,郝玉山,等.基于改进自适应遗传算法的电力系统相量测量装置安装地点选择优化[J].电工技术学报,2004,19(8):107-112.  
SHA Zhi-ming, HAO Yu-qian, HAO Yu-shan, et al. A New Adaptive Genetic Algorithm and Its Application in Optimizing Phasor Measurement Units Placement in Electric Power System[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(8): 107-112.
- [7] 安天瑜,周苏荃,于继来.基于电压薄弱区域监视的PMU非完全观测配置[J].电网技术,2006,30(16):24-28.  
AN Tian-yu, ZHOU Su-quan, YU Ji-lai. Weak Voltage Area Surveillance Based PMU Incomplete Observable Configuration[J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 24-28.
- [8] 李川江,邱国跃.基于改进粒子群算法的PMU装置数量增加过程中的最优配置方法[J].继电器,2006,34(12):52-56.  
LI Chuan-jiang, QIU Guo-yue. Optimal Placement Algorithm of PMU Based on Enhanced Particle Swarm Optimization During the Increase of PMUs[J]. Relay, 2006, 34(12): 52-56.
- [9] Milosevic B, Begovic M. Nondominated Sorting Genetic Algorithm for Optimal Phasor Measurement Placement[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 69-75.
- [10] 李强,于尔铿,吕世超,等.一种改进的相量测量装置最优配置方法[J].电网技术,2005,29(12):57-64.  
LI Qiang, YU Er-keng, Lü Shi-chao, et al. An Improved Optimal Phasor Measurement Unit Placement Algorithm[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 57-64.
- [11] 卫志农,孙国强,常宝立,等.考虑电力系统潮流直接可解的同步相量测量单元最优配置[J].电网技术,2005,29(1):65-68.  
WEI Zhi-nong, SUN Guo-qiang, CHANG Bao-li, et al. Optimal Configuration of Synchronous Phasor Measurement Unit Considering Direct Solvable Power Flow[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 65-68.
- [12] 许剑冰,薛禹胜,张启平,等.基于系统同调性的PMU最优布点[J].电力系统自动化,2004,28(19):22-26.  
XU Jian-bing, XUE Yu-sheng, ZHANG Qi-ping, et al. Coherency Based Optimal Placement of PMU with Stability Observability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(19): 22-26.
- [13] 李大虎,江全元,曹一家.基于发电机组同调分群的相量测量单元优化配置方法[J].电网技术,2006,30(5):49-55.  
LI Da-hu, JIANG Quan-yuan, CAO Yi-jia. A Study on Optimal PMU Placement Based on Coherency Identification of Generating Sets[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 49-55.
- [14] 沙智明,郝育黔,郝玉山,等.电力系统PMU安装地点选择优化算法的研究[J].继电器,2005,4(5):31-36.  
SHA Zhi-ming, HAO Yu-qian, HAO Yu-shan, et al. A New Algorithm for PMU Placement Optimization in Power System[J]. Relay, 2005, 4(5): 31-36.
- [15] Baldwin T L, Mili L, et al. Power System Observability with Minimal Phasor Measurement Placement[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(2): 707-715.

(下转第48页 continued on page 48)

的设备名称找到另外一个间隔中对应的设备的名称, 这样当一个间隔的作图与连库完成后, 就可以以间隔为单位进行拷贝, 再根据已知间隔图形设备的参数连接情况, 就可以连接另外一个间隔中的设备参数, 而不必对间隔中的所有设备进行一一连库。这样不仅提高自动化人员的作图效率, 还大大降低了连库出错的几率, 因为我们只要保证被拷贝的间隔参数连接正确, 那么其它按照相同规则连库的间隔必然是正确的。

## 2 应用实例

中山电网旧的 SCADA 系统于 1995 建设成功并投入使用, 系统采用的是德国 SIEMENS 公司的 SINAUT Spectrum 系统的早期版本, 系统操作系统采用的是 Solaris Unix 版本, 运行于 SUN Sparc 5/20 工作站上。作为一个运行十来年仍然很稳定的系统, 和它友好的维护界面是分不开的。它数据模型的建立和连库工作全部是以间隔为单位进行的。完成一个间隔的建模和连库只需输入厂站名称、电压等级、间隔名称即可完成, 这大大降低了自动化人员的维护工作。对于中山供电局在 2006 年投运的南瑞科技的 OPEN3000 系统, 我们也提出了上述的需求。在 OPEN3000 系统中, 厂家根据我们的需求, 对原来的作图方式作了大量的改动, 终于实现了以间隔为单位进行连库。这大大地提高了我们的作图效率, 但是在以间隔为单位建模方面, 还需要作一定的改进。

## 3 结束语

就笔者所见过的国内的系统中, 例如 DF9100、DF8200、Open3000 等目前在 EMS 中对电气元件建模都是以电气元件为单位进行的, 数据库的用户界

面呈现在用户面前的是一张张的电器元件表, 有的还把所有厂站的电气元件一下子在用户的面前展开来, 这除了增加用户查找指定设备的难度以外, 不能给用户带来任何好处。本文以变电站中的间隔为单位, 对电气设备进行建模和连库, 必将大大降低维护人员的工作量, 改善 EMS 系统的易用性。

## 参考文献

- [1] 刘大鹏. 国产软件产品易用性何去何从[J]. 程序员, 2006 126 (2) : 58-60.  
LIU Da-peng. Domestically Produced Software Usability what Course to Follow[J]. Programmer, 2006, 126 (2) : 58-60.
- [2] IEC 61970 - 301, EMS-API-Part 301: Common Information Model (CIM) Base[S].
- [3] IEC 61968, 公用信息模型 (CIM) [S].
- [4] 邵立冬, 吴文传, 张伯明. 基于 CIM 的 EMS/DMS 图形支撑平台的设计和实现[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20) : 11-15.  
SHAO Li-dong, WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. A CIM-Based Interactive Graphics System For EMS/DMS [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20) : 11-15.
- [5] 胡玲霞, 邱军旗. “四遥”信息管理系统的设计[J]. 科技资讯, 2006, 35 (2) : 11-15.  
HU Ling-xia, QIU Jun-qi. The Design of Telecontrol Information System [J]. Science & Technology Information, 2006, 35(2) : 11-15.

收稿日期: 2007-06-14; 修回日期: 2007-08-24

作者简介:

邱军旗 (1977-), 男, 工程师, 主要从事调度自动化维护工作; E-mail: qiux7hyun@163.com

胡玲霞 (1978-), 女, 工程师, 从事计算机应用教育。

(上接第 25 页 continued from page 25)

- [16] Glover F. Tabu search-Part II. ORSA Journal on Computing[J]. 1990, 2(1): 4-32
- [17] 张芙蓉, 孟昭勇, 李剑. 基于 TS 和 GA 算法的配电电容器优化投切[J]. 继电器, 2004, 32 (14) : 29-31, 48.  
ZHANG Fu-rong, MENG Zhao-yong, LI Jian. Optimization of Distribution Capacitor Scheme Based on TS and GA[J]. Relay, 2004, 32 (14) : 29-31, 48.

收稿日期: 2007-07-09; 修回日期: 2007-09-06

作者简介:

马勇 (1972-) 男, 硕士研究生, 研究方向为电网的调度及控制; E-mail: mayong240066@sina.com

陈赤培 (1954-) 男, 高级工程师, 兼职教授, 从事电网调度自动化系统工作。