

# 基于 Delphi 和 Matlab 混合编程的配电网无功优化软件设计

王建勋, 吕群芳, 刘会金

(武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 应用 Delphi 和 Matlab 混合编程的方法设计可视化的配电网无功优化计算软件, 其中 Delphi 实现图形界面和数据管理, Matlab 实现无功优化计算和绘图功能。使用 Matlab 软件中的 COM 组件封装工具对 Matlab 程序进行打包并在 Delphi 中注册该 COM 组件, 以实现对 Matlab 程序的调用。通过 OleVariant 变量格式或者文本文件动态传递矩阵参数; 通过剪切板操作或窗口嵌套将 Matlab 的图形窗口嵌入到 Delphi 环境中。指出通过分散文档或稀疏矩阵的形式进行参数传递, 对不同形式变量进行合理的定义, 可提高程序的运行效率。简要介绍了配电网无功优化的数学模型, 并采用自适应的微分进化算法作为无功优化算法, 算例结果表明该软件应用效果良好。

**关键词:** 混合编程; COM 技术; 无功优化; 微分进化算法

**中图分类号:** TM 731

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1006-6047(2011)04-0112-04

配电网无功优化是保证配电系统安全经济运行的有效手段, 也是提高电力系统电压质量的重要措施之一<sup>[1]</sup>。开发一套可视化的、易学易用的适用于配电网的无功优化软件, 使运行调度人员和规划设计人员能在良好的人机接口下, 实现快速准确的资料录入、计算分析和结果显示, 具有重要意义<sup>[2]</sup>。由于在无功优化中需要反复地进行潮流分析, 存在大量的数值及矩阵运算, 处理过程耗时耗力。如果采用计算和图形功能强大的 Matlab 语言和可视化编程语言相结合进行混合编程, 便可容易克服这些问题, 并能实现程序的可视化<sup>[3-5]</sup>。鉴于 Delphi 语言在可视化编程和数据库处理方面的优越性<sup>[6]</sup>, 本文使用 Delphi 与 Matlab 混合编程方法进行配电网无功优化软件的设计, 说明了如何通过 COM 技术实现 Delphi 对 Matlab 的调用并脱离 Matlab 环境运行, 并实现了 Matlab 绘图在 Delphi 环境中的嵌入。同时介绍了无功优化的模型, 并选用一种自适应的微分进化算法作为优化算法, 最后用算例验证了该软件有着良好的应用效果。

作为数据库开发工具, 在 Delphi 中通过 ADO 组件对后台数据库动态连接, 从而实现了快速高效地对用户信息、配电网中各元件的原始设备参数以及计算所得结果等数据进行管理, 方便用户进行查询。

**c. 计算和绘图模块。** 选用矩阵运算功能强大的 Matlab 2009 开发无功优化计算模块, 包括了配电网潮流计算、无功规划优化计算、无功运行优化计算和绘图 4 个部分。

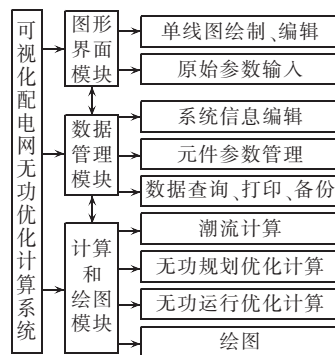


图 1 系统功能结构图

Fig.1 Structure of system functions

## 1 软件功能

可视化配电网无功优化软件是一个基于图形界面的配电网无功优化计算及其数据库管理的高级应用软件, 其从功能上可分为图形界面模块、数据管理模块及计算模块三大功能模块。

**a. 图形界面模块。** 采用 Delphi 7.0 中的矢量绘图控件 TCAD 开发, 可完成主接线图的绘制和参数录入。在建立图形主界面时, 可利用设备图元的属性自动生成参数信息后存入相应数据库, 也可以通过外部数据文件直接导入数据。

**b. 数据管理模块。** 选择 Microsoft Office Access

## 2 Delphi 与 Matlab 混合编程

传统的 Matlab 程序调用方法存在环境和参数设置复杂, 或者不能脱离 Matlab 软件环境运行的缺点<sup>[7-9]</sup>。文献[9]指出采用 COM 技术可将 Matlab 的 M 文件转换为 COM 组件后在 Delphi 中直接调用。该方法能避免复杂的环境设置过程, 同时 COM 组件可以方便地随同应用程序进行发布, 实现脱离 Matlab 软件环境运行。Matlab 6.5 以上版本中所推出的 COM Builder 工具可方便地制作出所需的 COM 组件, 只要在打包组件选择包含 MCR, 即可产生与工程同名的可执行文件。运行该文件便可自动进行 COM 组件注册, 并安装 Matlab 程序运算时所需调用的计算程序 MCR

Installe.exe,从而保证在需要发布的计算机上正常运行。本软件采用较新的 Matlab R2009a 版本,其 COM 组件制作工具为 Generic COM component,已经被集成到 Matlab Builder NE 工具中,具体的制作过程大致不变。

## 2.1 函数调用方法

在本机调试时,还需要先在 Delphi 软件中注册 COM 组件,具体的配置过程可参见文献[9]。配置工作完成后直接以下面的形式调用 Matlab 函数:

```
classname.function(num,output1,...,input1,...);
```

其中,classname 为相应的控件名,function 为所调用的函数,num 为输出变量数目,紧接着的是输出变量名和输入变量名。

## 2.2 参数传递方法

Delphi 中的 OleVariant 变量包含了所有与 OLE 自动化兼容定义的数据类型,通过 OleVariant 变量的操作,数据可以自由地在程序或者网络之间交换而不用担心其他支持 OLE 自动化的用户能否操作这些数据。所以使用 OleVariant 变量即可保证多种数据格式的自动兼容,若传递的是矩阵,利用 VarArrayCreate 函数即可动态设置传递数组(即矩阵)的大小,如:

```
data:=VarArrayCreate([1,m,1,n],varDouble);
//动态设置m行n列的双精度矩阵data
```

或者在函数调用时不传递任何变量,使用 txt 文档来传递所需数据。参数信息由 Delphi 按字符串的形式逐行写入 txt 文档,而 Matlab 程序使用 dlmread,dlmwrite 或者 load,save 函数直接对 txt 文档中的数据进行读写。Delphi 回读 txt 时仍旧按字符串读取然后再做转换,为自动识别分隔符,可使用 tline 方式截取:

```
tfile:=tstringlist.Create;
tline:=tstringlist.Create;
tfile.LoadFromFile('myresult.txt');//加载矩阵数据
tline.CommaText:=tfile.Strings[i];//i行数据分解
```

tline[j]即表示 i 行 j 列的元素(序号从 0 开始),可将计算结果逐个回存数据库,方便后续查询打印。

## 2.3 图形嵌入方法

图形嵌入可通过剪切板操作实现,在 Matlab 程序中将图形复制到系统剪贴板上:

```
figure('Visible','off');//图形置为不可见
print-dmeta;//图形复制到系统剪切板
```

然后在 Delphi 中将图形粘入 Timage 组件:

```
if (Clipboard.HasFormat(CF_BITMAP)) then
image1.Picture.Assign(Clipboard);
```

上述方法实现简单,但因是静态图像,图形工具栏被去除并且不能进行图形设置。若要保留工具栏和图形设置功能,则需要通过窗口嵌入来实现。具体做法就是在 Matlab 中先画一个很小的窗口(若置不可见,后面寻找窗口可能会失败),然后在 Delphi 中寻找该窗口,并将其嵌入窗体控件中:

```
var
h:HWND;//窗口句柄变量
lStyle:longint;//表示窗口设置的变量
begin
```

```
h:=FindWindow(nil,'Figure 1');//寻找图形窗口
ShowWindow(h,SW_HIDE);
lStyle:=GetWindowLong(h,GWL_STYLE);
SetWindowLong(h,GWL_STYLE,lStyle);
SetWindowPos(h,HWND_TOPMOST,0,0,panel1.Width,
panel1.Height,SWP_SHOWWINDOW);
//设置图形大小、位置等参数
windows.SetParent(h,panel1.Handle);//嵌入 panel
end
```

## 2.4 提高混合编程效率的几点建议

Delphi 调用 Matlab 函数时,所传递的变量大多是矩阵数据。为提高调用效率,本文选择将不同的矩阵数据分散写入不同的文档中,Matlab 函数对数据即取即用,对如关联矩阵似的稀疏矩阵,则先在 Delphi 中以三维数组的形式形成,以减少数据的冗余性并便于 Matlab 函数直接对稀疏矩阵操作。而在 Matlab 函数实现中,尽量采用稀疏矩阵运算,减少循环操作,并将常用变量作为全局变量定义,避免变量的频繁传递,节省内存空间从而提高计算效率。

## 3 配电网无功优化计算的数学模型

配电网无功优化包括无功规划优化和无功运行优化<sup>[1]</sup>。规划优化通过优化无功补偿装置的安装地点、容量达到降低网损、提高电压质量及节约投资的目的。无功运行优化通过调节已有设备,如变压器分接头和确定电容器的投切组数,实现网损最小的目标。

### 3.1 配电网无功规划优化的数学模型

无功规划优化的目标函数<sup>[10]</sup>包括无功补偿装置设备年等值费用、系统有功网损年等值费用、节点电压越限罚函数,即

$$\min F = K_c \sum_{i \in N_Q} Q_{ci} + C_{kf} N_c + C_e t_l \Delta P_{\text{loss}} + K_{v1} \sum_{j=1}^N \Delta U_j^2 \quad (1)$$

约束条件包括:

$$\begin{aligned} p(x) &= 0 \\ U_{\min} &\leq U_i \leq U_{\max} \quad i \in N \\ \Delta U_j &= \begin{cases} U_j - U_{j\max} & U_j > U_{j\max} \\ 0 & U_{j\min} < U_j < U_{j\max} \\ U_{j\min} - U_j & U_j < U_{j\min} \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $K_c$ 为单位容量电容器的投资费用, $Q_{ci}$ 为节点  $i$  无功补偿容量, $N_Q$ 为无功补偿点集合; $C_{kf}$ 为每个节点的电容器固定安装费用, $N_c$ 为无功补偿点的个数; $C_e$ 为电能单价, $t_l$ 为年最大负荷损耗时间, $\Delta P_{\text{loss}}$ 为最大负荷方式下的有功网损; $K_{v1}$ 为节点电压越限罚因子, $N$ 为系统节点数; $U_i$ 、 $U_{\min}$ 、 $U_{\max}$ 为节点  $i$  电压及其下限和上限。为提高计算效率,在本程序中采用了无功电流损耗最小法<sup>[10]</sup>确定补偿点位置和相应的最大补偿容量,并采用分层前推回代算法<sup>[11]</sup>计算潮流。

### 3.2 配电网无功运行优化的数学模型

无功运行优化的目标函数为

$$\min F = \Delta P_{\text{loss}} + K_{v2} \sum_{j=1}^N \Delta U_j^2 \quad (3)$$

约束条件包括:

$$p(x) = 0 \quad (4)$$

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad i \in N \quad (5)$$

$$C_{\min} \leq C_i \leq C_{\max} \quad i \in S_c \quad (6)$$

$$T_{\min} \leq T_i \leq T_{\max} \quad i \in S_k \quad (7)$$

其中,  $S_c, S_k$  分别为可投切电容器节点集、可调变压器节点集;  $C_i, C_{\max}, C_{\min}$  分别为节点  $i$  投切电容器组数及其上、下限;  $T_i, T_{\max}, T_{\min}$  分别为变压器档位数及其上、下限;  $K_2$  为电压越限罚系数。需注意的是, 这里不需要像规划一样计算费用值, 故可直接用标么值计算。

## 4 自适应微分进化算法原理

### 4.1 微分进化算法原理

微分进化算法是一种通过模拟生物进化现象来表现复杂现象的概率搜索算法<sup>[12]</sup>, 其基本操作包括种群初始化、变异、交叉和选择。

#### 4.1.1 种群初始化

首先在解空间内产生随机分布的初始种群, 第  $i$  个个体的第  $j$  个参数值可由下式得到:

$$x_{i,0}^j = x_{\min}^j + r(x_{\max}^j - x_{\min}^j) \quad i=1, \dots, N_p; j=1, \dots, D \quad (8)$$

其中,  $r$  为 0~1 之间的随机数;  $N_p$  为种群大小;  $D$  为个体维度;  $x_{\max}^j$  和  $x_{\min}^j$  分别为控制变量  $x^j$  的上、下边界。

#### 4.1.2 变异操作

对第  $G$  代的个体  $x_{i,G}$  通过某种变异操作获得其变异向量。本文采用全局搜索性能最佳的变异算子<sup>[13]</sup> 以确保能获得最优解, 其表达式如下:

$$v_{i,G}^j = x_{i,G}^j + F(x_{r_1,G}^j - x_{r_2,G}^j) \quad (9)$$

其中,  $v_{i,G}^j$  表示第  $i$  个个体的第  $j$  个变异元素;  $r_1, r_2, r_3$  为从 1~ $N_p$  中随机选取的整数, 且不为  $i$ ; 比例因子  $F$  为表征差异大小的控制参数。

#### 4.1.3 交叉操作

在变异操作后, 对当前向量  $x_{i,G}$  和其相应的变异向量  $v_{i,G}$  进行交叉操作可得到试验向量  $u_{i,G}$ , 交叉算子为二项交叉, 表达式为

$$u_{i,G}^j = \begin{cases} v_{i,G}^j & r \leq C_r \text{ 或者 } j = j_{\text{rand}} \\ x_{i,G}^j & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $C_r$  为表征进化参数的变异概率, 取值 0~1;  $j_{\text{rand}}$  为从 1~ $N_p$  中随机选取的整数。如果试验向量某些位置的参数值越限, 则将其在限定范围内重新随机产生。

#### 4.1.4 选择操作

如果试验向量有更优的适应度函数, 则试验个体将取代当前个体进入下一代。本文为求最小化问题, 选择操作可用下式表达:

$$X_{i,G+1} = \begin{cases} U_{i,G} & f(U_{i,G}) \leq f(X_{i,G}) \\ X_{i,G} & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

### 4.2 自适应参数控制

控制参数经验值为:  $F=0.1 \sim 0.9, N_p=5D \sim 10D, C_r=0 \sim 1$ 。其中,  $C_r$  越大, 收敛速度越快, 但是存在局部收敛的可能性。  $F$  和  $N_p$  取得越大对搜索全局最优解更有利, 而越小则有可能导致早熟<sup>[13]</sup>。鉴于此, 为提高计算效率, 本文采用参数自适应控制来动态设置  $F$  和  $C_r$ , 两者随进化过程一同进化<sup>[14]</sup>:

$$F_{i,G+1} = \begin{cases} 0.1 + \text{rand} \times 0.9 & \text{rand} < 0.1 \\ F_{i,G} & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

$$C_{r,G+1} = \begin{cases} \text{rand} & \text{rand} < 0.1 \\ C_{r,G} & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

### 4.3 自适应微分进化算法流程图

自适应微分进化算法流程图如图 2 所示。

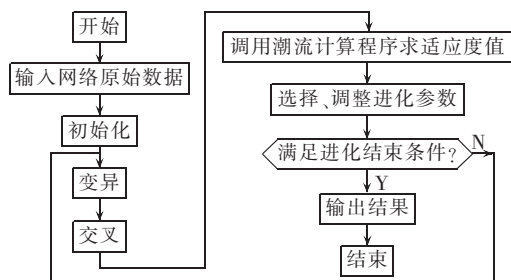


图 2 自适应微分进化算法流程图

Fig.2 Flowchart of adaptive differential evolution algorithm

## 5 算例分析

以 IEEE 33 节点系统<sup>[15]</sup>为例进行配电网无功规划优化计算。算法控制参数选为: 系统电价  $C_e = 0.45$  元/(kW·h), 最大负荷损耗时间  $t_l = 4\ 760$  h, 基准容量  $S_B = 10\ 000$  kV·A, 补偿电容器的单位容量价格  $K_c = 50$  元/kvar, 每个节点电容器固定安装费用  $C_{kf} = 0.5$  万元; 电容器的最小单位容量为 4 kvar, 种群规模  $N_p = 30$ , 最大代数  $N_{G,\max} = 100$ , 采用无功电流损耗最小法求得的待补偿节点 29、7、23、13、17, 可能的最大补偿容量为  $300 \times 4$  kvar, 利用待补偿节点构成了微分进化算法的寻优空间, 再结合自适应微分进化算法进行优化, 图 3 为算法的收敛曲线, 其中  $C$  为费用,  $n$  为迭代次数。

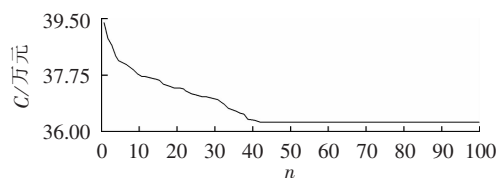


图 3 算法收敛曲线

Fig.3 Convergence curve of algorithm

由收敛曲线可知, 该算法有良好的收敛性能。最终结果为在节点 29 和节点 13 处分别配置容量为 972 kvar 和 212 kvar 容量的电容器。分析结果可知, 原来的网损为 0.020 26 p.u., 年网损费用为 43.268 4 万元, 经过合理补偿后, 网损下降到 0.013 71 p.u., 一年内总的投资和网损费用共计 36.279 万元, 最低点电压由 0.916 6 p.u. 上升到 0.930 8 p.u., 电压质量有了明显提高。可见, 所得规划方案可有效改善节点电压, 降低系统网损, 保证了配电网的电能质量和经济效益。

## 6 结语

采用 Delphi 和 Matlab 混合编程的方法进行无功优化软件设计, 方便地实现了可视化人机交互界面, 并能在很大程度上简化程序代码的编写, 缩短了应用程序的开发周期。采用 COM 技术实现 Delphi 和 Matlab



的无缝集成,还可以脱离 Matlab 环境。算例表明了所采用的自适应微分进化算法能有效地进行优化计算,在无功优化方面具有较好的应用效果。

### 参考文献:

- [1] 陈文彬. 电力系统无功优化与电压调整[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,2003:1-8.
- [2] 陈健,刘明波,曾勇刚,等. 面向对象的无功优化软件开发与应用[J]. 电力自动化设备,2003,23(3):78-81.  
CHEN Jian,LIU Mingbo,ZENG Yonggang,et al. Object-oriented development of reactive power optimization software and its application[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(3):78-81.
- [3] 徐鑫鑫,刘涤尘,黄涌. 基于 VC++ 和 Matlab 混合编程实现电力故障再现及分析系统研究[J]. 电力自动化设备,2006,26(12):38-40.  
XU Xinxin,LIU Dichen,HUANG Yong. Power system fault reoccurrence and analysis system based on hybrid programming of VC++ and Matlab[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(12):38-40.
- [4] 王建元,师旭,师耀林,等. VB 与 Matlab 混合编程在电力系统短路计算中的应用[J]. 电网技术,2007,31(增刊2):143-146.  
WANG Jianyuan,SHI Xu,SHI Yaolin,et al. Application of hybrid programming of VB and Matlab in short-circuit calculation of power system[J]. Power System Technology,2007,31(Supplement2):143-146.
- [5] 黎洪生,龚荣,陈雷. Matlab 与 VB 的无缝集成在电力系统仿真中的应用[J]. 电力自动化设备,2004,24(10):45-47.  
LI Hongsheng,GONG Rong,CHEN Lei. Application of Matlab & VB seamless integration in power system simulation[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(10):45-47.
- [6] 求是科技. Delphi7 程序设计与开发大全[M]. 北京:人民邮电出版社,2004:500-506.
- [7] 余啸海. Matlab 接口技术与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2004:193-211.
- [8] 刘海燕,姜麟,胡珂. 基于 Delphi 和 Matlab 的混合编程方法在交通流量估算中的应用[J]. 微计算机应用,2009,30(6):62-66.  
LIU Haiyan,JIANG Lin,HU Ke. The application of mixed programming method based on Delphi and Matlab in traffic flow estimate[J]. Microcomputer Applications,2009,30(6):62-66.
- [9] 姜银方,陈建希,李路娜. 基于 COM 的 Delphi 和 Matlab 接口编程研究[J]. 计算机应用与软件,2008(2):31-34.  
JIANG Yinfang,CHEN Jianxi,LI Luna. Study on the interface programming of Delphi and Matlab based on COM[J]. Computer Applications and Software,2008(2):31-34.
- [10] 余健明,张栋,姚李孝. 基于一种新待补偿点定位法的配电网无功优化[J]. 电网技术,2004,28(1):67-70.  
YU Jianming,ZHANG Dong,YAO Lixiao. Reactive power optimization of distribution network based on a new location algorithm for nodes to be compensated[J]. Power System Technology,2004,28(1):67-70.
- [11] 颜伟,刘方,王官洁,等. 辐射型网络潮流的分层前推回代算法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(8):76-80.  
YAN Wei,LIU Fang,WANG Guanjie,et al. Layer-by-layer back/forward sweep method for radial distribution load flow[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(8):76-80.
- [12] STORN R,PRICE K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous space[J]. Global Optimization,1997,11(4):341-359.
- [13] QIN A K,HUANG V L,SUGANTHAN P N. Differential evolution algorithm with strategy adaptation for global numerical optimization[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation,2009,13(2):398-417.
- [14] JANEZ B,SÄSO G,BORKO B,et al. Self-adapting control parameters in differential evolution:a comparative study on numerical benchmark problems[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation,2006,10(6):646-657.
- [15] 王守相,王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京:高等教育出版社,2007:196-199.

(编辑:李育燕)

### 作者简介:

王建勋(1984-),男,湖北随州人,博士研究生,研究方向为配电系统优化和电能质量分析与控制(E-mail:wangcoven7@163.com);

吕群芳(1985-),女,湖北大冶人,硕士研究生,研究方向为含分布式电源的配电系统优化(E-mail:lvqunfang@163.com);

刘会金(1952-),男,湖北大冶人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电能质量分析与控制(E-mail:hjliu@whu.edu.cn)。

## Reactive power optimization software design based on hybrid programming of Delphi and Matlab for distribution system

WANG Jianxun,LÜ Qunfang,LIU Huijin  
(Wuhan University,Wuhan 430072,China)

**Abstract:** The hybrid programming of Delphi and Matlab is applied to the design of visual reactive power optimization software for distribution network. The graphical interface module and data management module are programmed with Delphi while the computation module and graphics module are programmed with Matlab. The Matlab programs are packaged with the COM component packaging tool of Matlab and then are registered as COM component in Delphi for its call. The matrix parameters are dynamically transferred as OleVariant variable format or text file. The Matlab graphics window is embedded in Delphi environment by clipboard operations or window nesting. The operational efficiency of program is improved when the parameters are transferred by dispersed document or sparse matrix and the variables of different forms are defined reasonably. The math model of reactive power optimization for distribution network is briefly introduced,which applies the adaptive differential evolution algorithm. Case calculation shows its good effect.

**Key words:** hybrid programming; COM technology; reactive power optimization; differential evolution algorithm