继电保护整定计算中的图论方法

能源部电科院　王旭蕃　邵秋晓　陈允平

湖南省电视大学　欧阳昶

摘要　本文是笔者在编制JBZD程序包时采用的图论方法的总结。文中介绍了复杂电网带方向继电保护计算机辅助整定中采用图论方法寻找所有有向回路、决定最小断点、决定继电器整定次序、找出主／后备保护对的实际计算方法。

关键词　继电保护　图论计算

1 继电保护计算机整定计算中的图论方法

本文介绍的是笔者在编制继电保护整定计算程序中所用的图论方法。实践证明，这些方法在用计算机进行继电保护整定计算中是十分有效的，是整定计算程序中的关键部件。

对一个现代电网进行继电保护设计或对已有保护的继电保护定值进行整定计算时，在具体进行定值计算时就必需决定：1．整定计算从哪些保护开始，2．决定哪些保护应先整定，哪些保护应后整定，即保护的顺序问题，3．哪些保护之间是具有主、后备保护关系的。

现代电力系统通常都有许多环网，环网中的保护都带有方向元件，用有向拓扑图的有向支路代表方向继电器，则一个系统的继电保护装置就组成一有向拓扑图。网络中的一次元件可用无向图来表示。在进行整定计算开始时我们得选定一些支路（继电保护装置），将这些装置假想地断开，使所有回路不复存在而变成辐射网络，保护整定计算就从这些点开始。这些断开的支路称为断点，记为BP。如何合理地选择断点？对于简单网络可采用观察法，由人工来决定；但对于复杂多环网络，选择断点本身已非易事，更不用说通过多次选择比较得到最少数目的断点了。选择断点是计算机在继电保护整定计算中应完成的任务之一，完成这项工作的理论基础是图论。

随着电力系统的不断扩大，环网越来越多，各处保护的主后备关系越来越复杂，具有主后备关系的保护对（简称主／后备保护对，记为P／B对）越来越多。即使对一个中等规模的系统，光靠人力来找出所有P／B对，从而实现所有保护的合理配合已非易事，更不用说接线复杂环网众多的大型系统了。在我们编制继电保护整定程序的过程中，利用图论方法，借助计算机成功地实现了找出所有P／B对的功能。这是保证程序能实现各级保护正确、合理的配合的关键问题。因为在一个多环系统中，一处的主保护会有多个相邻的后备保护，而一处的后备保护也会是多处主保护的后备保护。这个事实增加了保护之间关系的复杂性。

寻找一个系统所有保护的P／B对包括两个任务，首先得找出一个保护分别属于哪些回路，因而必须找出代表继电保护结构的有向图的全部回路；然后再在与保护支路有关连的回

路中找出所有的P／B对。如图1（a）所示的电力系统，代表它的继电保护系统的拓扑图如图1（b）所示。

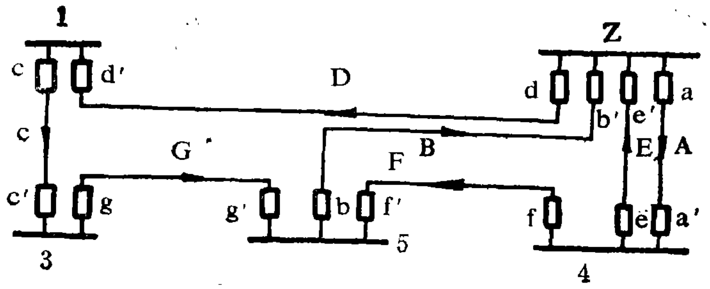

图1（a） 电力系统接线图

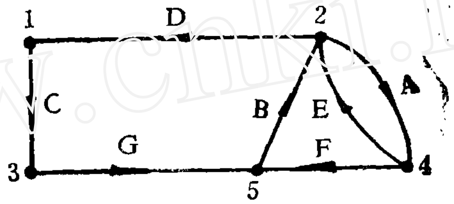

图1（b） 图1（a）的拓扑图

图中用数字表示母线节点，用大写字母表示有向支路，即被保护的电器元件。支路两端的保护分别用与线路标号一致的小写字母和带撇的小写字母表示。例如a，a′代表支路A两侧的保护，c、c′是支路C两侧的保护等等。带方向的保护将用有向图的有向边代表。从而形成一个表示所有有向继电器的有向图。当然，这个有向图可以由一次元件的无向图推出。从图1（a）可以看出，当B线路发生故障时，主保护b和b′应该动作。由观察可知，b的后备保护有g、f，b′的后备保护有a′、e、d′。这些相应的保护都是P／B对。不难想象，一旦遇到复杂系统，列举出所有的P／B对将是十分困难的。因而必须借助计算机使任一复杂电力系统所有继电保护装置的有效配合得以保证。这项工作的理论根据是图论。

在继电保护计算机整定计算中图论计算所要完成的第三项工作是在选定断点，并对断点的保护进行整定之后，决定保护整定计算的顺序。并把这一顺序计入相对顺序矩阵RSM矩阵中。综上所述，在继电保护整定计算中，计算机在图论的指导下应该完成的工作为：

1.1 找出所有表示带方向保护的有向简单回路；

1.2 找出断开点，即决定整定计算的起始点；

1.3 找出所有保护的P／B对；

1.4 找出RSM矩阵，根据整定原则进行计算。

下面将分别说明如何实现上述功能。

2 所有简单回路的求法

为了表示电力系统中各元件的联接关系，通常采用拓扑图。拓扑图只表示元件的联接关系而不涉及元件的电器性质，即不论元件是线路、是变压器、是发电机还是其它元件，都一

视同仁地用拓扑图的边来表示而不予区别。

在计算机中常用关联矩阵A、基本回路矩阵B_l等来存储图的信息。关联矩阵A表示了图中节点与边的关联关系，而基本回路矩阵B_l表示了基本回路由哪些边组成，即基本回路与边的关联关系。A的每一行代表了拓扑图的一个节，点每一列代表拓扑图的一条边；B_l的每一行代表一个基本回路，每一列代表一条边。如果一个图有E条边，N个节点，则必有N—1个树枝，连枝数$l=E-N+1$，且A为（N－1）*E阶矩阵，B_l为l*E阶矩阵。根据图论，如果我们按先树枝后连枝的顺序对支路编号，则B_l和A可以写成：

$$B_l = [B_0 \mid 1_l]$$

$$A = [A_t \mid A_l]$$

又由$AB_l^T=0$得：

$$[A_t \mid A_l]\ [B_0^T \mid 1_l] = A_t B_0^T + A_l = 0 \qquad (1)$$

可见已知A可求出B_l，A和B_l均包含了图的全部信息。

已知图G的B_l矩阵后，由基本回路的全部线路组合可以求出图G的一切可能的回路。所有回路包括所有简单回路和多重回路。所谓多重回路可以是仅有一公共点的两基本回路之和；也可以是有一公共边的两基本回路之和。对继电保护整定计算有意义的是简单回路。寻找简单回路的方法有许多种，这里介绍较为方便、占用内存较少的一种。

对于有l个基本回路的图G，这l个基本回路的线性组合个数为：

$$C_l^1 + C_l^2 + \cdots\cdots + C_l^l = 2^{l-1} \qquad (2)$$

为了描述这所有可能的线性组合，可以构成一个矩阵N。矩阵N中的行是用二进制数表示的整数m，$1 \leqslant m \leqslant 2^{(l-1)}$，即N为$2^{(l-1)}*1$阶矩阵。以图1（b）所示的拓扑图为例，$l=3$，

$$N = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \qquad (3)$$

在图1（b）中选A、B、C、D、支路为树枝，则可写出基本回路矩阵B_l：

$$B_l = \begin{array}{c} \begin{matrix} A & B & C & D & E & F & G \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

用N中的第i行非零元素决定B_l矩阵中第i种基本回路线性组合的可能。将这种可能记录于矩阵F_i'。例如，取N中的第5行，记为N_5

$$N_5 = [1\ 0\ 1]$$

即说要选取B_l中的第一条回路和第三条回路作线性组合，构成新的回路。将得N_5所对应的基本回路构成F_5'：

$$F_5' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

如前所述，N矩阵有2^{l-1}行，也就是说，B_l中的基本回路的线性组合有2^{l-1}种。依次以上述方法处理得2^{l-1}个F_i'矩阵。从矩阵和拓扑图都不难看出，F_i'所指出的线性组合不全

是简单回路。推而广之：若F_l'（$l=1，2，\cdots，2^{l-1}$）中没有任何一列有两个以上非零元素时，表示参与线性组合的几个基本回路无公共边，即所得基本回路的线性组合不是一个简单回路。为得到图G的所有简单回路，需对F_i'（$i=1，2，\cdots，2^{l-1}$）做下述处理：

第一步：决定F_i'中有偶数个非零项的列数的集合W。设$W=\{C_i，C_j，C_k\cdots\}$，其中$C_i，C_j，C_k$，……均为列号。如果F_i'只有一行，显然代表一简单回路，而且是一个基本回路。

第二步：按下面二条件选出F_i'阵中的第K列使得：

（i）K（列号）是W中的元素，即B_f中的第K列是F_i'中含有偶数个非零元素的列；

（ii）该列中第一行元素非零。

如果F_i'中没有满足这两个条件的元素存在，则意味F_i'中的所有基本回路没有公共边。至多只有一个公共节点。此矩阵对于寻找全部简单回路没有意义，予以舍弃。

第三步：当找到满足（i），（ii）两条件的列时，设F_i'中第j行和第一行的第K列均为非零元素。若$F_i'(j，K)=-F_i'(1，K)$，则用第j行与第一行的代数和代替第一行，并取消第一行；若$F_i'(j，K)=F_i'(1，K)$，则第一行反号与第j行相加代替第j行；取消第一行，如此得到新的F_i'然后回到第一步。直到所取得的F_i'不再有满足（i），（ii）两条件的列为止。记此时的F_i'为F_i。仍以图1（a）的网络为例说明上述过程。设i＝6，其二进制表示为：j＝（1 1 0），$N_6=(1\ 1\ 0)$

$$F_6'=\begin{bmatrix}1&0&0&0&1&0&0\\1&1&0&0&0&1&0\end{bmatrix}$$

$$W=\{1\}$$

即F_6'中的第一列偶数个非零元素，且满足条件（i），（ii）。将第1行反号加第2行消去第一行得：

$$\begin{array}{c}\quad\ \ A\ B\ C\ D\ \ E\ \ F\ G\\ F_6=[0\ 1\ 0\ 0\ {-1}\ 1\ 0]\end{array}$$

代表由B、E、F组成的简单回路，又如i＝7时：

$$N_7=[1\ 1\ 1]$$

$$F_7'=\begin{bmatrix}1&0&0&0&1&0&0\\1&1&0&0&0&1&0\\0&1&1&1&0&0&1\end{bmatrix}$$

$$W=\{1，2\}$$

按上述步骤对F_7'进行处理。首先将第一行加到第二行消去第一行得：

$$F_7'=\begin{bmatrix}0&1&0&0&-1&1&0\\0&1&1&1&0&0&1\end{bmatrix}$$

取将第一行元素变号与第二行相加取消第一行：

$$\begin{array}{c}\quad\ \ A\ \ B\ \ C\ D\ \ E\ \ F\ G\\ F_7=[0\ \ 0\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ {-1}\ 1]\end{array}$$

F_7代表由3个基本回路的线性组合得到由C、D、E、F、G支路组成的简单回路。上面的过程逐次对$i=1，2\cdots，2^{l-1}$进行，这样就由F_i得到所有的简单回路。

从上面的原则和例子的演算看出，经上述步骤，可以得到给定图G的所有基本回路的线

性组合，并获得全部简单回路。记用这样的方法获得的所有简单回路矩阵为L′。L′称之为图G的完全简单回路矩阵。

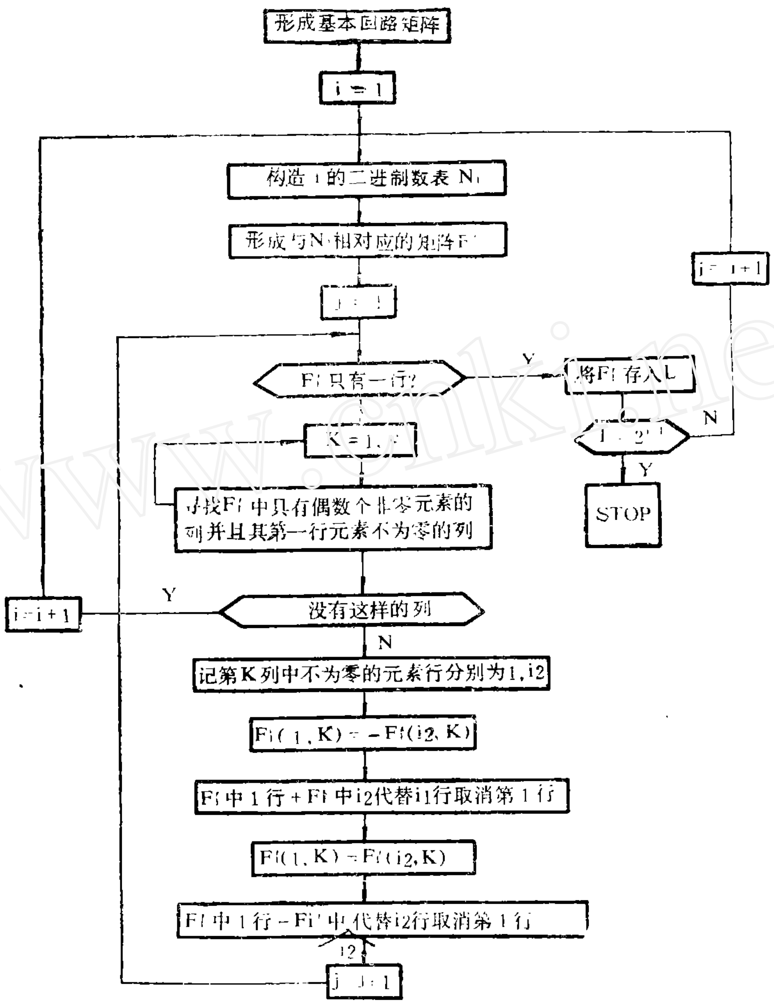

图 2　形成L′流程图

从上面的原则和例子的演算看出，经上述步骤，可以得到给定图G的所有基本回路的线
性组合，并获得全部简单回路。记用这样的方法获得的所有简单回路矩阵为L′。L′称之为图G的完全简单回路矩阵。

$$L' = \begin{bmatrix} F1 \\ F2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \qquad (4)$$

用上述方法求出图1（b）所示的拓扑图的完全简单回路矩阵为：

$$
L' = \begin{array}{c}
\begin{array}{ccccccc} A & B & C & D & E & F & G \end{array} \\
\begin{pmatrix}
1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\
0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\
-1 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 1 \\
0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1
\end{pmatrix}
\end{array} \qquad (5)
$$

由L′ 及其相应的拓扑图形可以看出，这样形成的L′ 不是有向回路矩阵，即构成回路的边可以是与回路假定正向相反的，也可以与回路假定正向相同。而对于带方向的继电保护整定计算来讲，继电器只对一个确定方向起保护作用。因此，我们必须形成一个带方向的完全简单回路矩阵。或者说L′ 是以母线为节点，以一次元件（线路、变压器、发电机等）为边的完全简单回路矩阵。而对于带方向的继电器的整定计算需要得到的是以母线为节点，带方向的继电保护为边的完全简单回路矩阵。对于带方向的继电保护而言，线路两侧均装有保护装置。如图 3 所示，如果线路E上的保护e与支路E一致的话，则e′ 保护的保护方向与 支路E的方向相反。

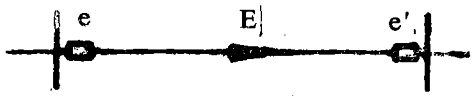

图 3　支路与保护关系

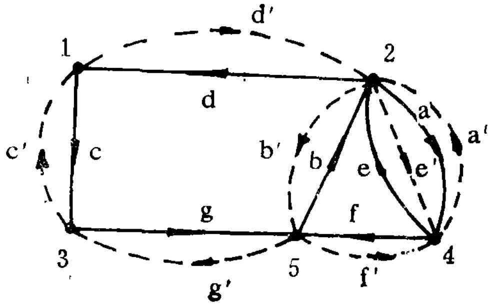

图 4　以方向继电器为支路的拓扑图

如果将图 1（b）所示的网络有向拓扑图按上述原则扩充，则得图 4 所示 2 E条 边 的继电保护系统有向拓扑图。其中，用a′ 、a代替A；b′ 、b代替B等。并称a′是a的 补 支；b′是b的补支等。因为带方向的继电保护应相互配合的只是方向相同的保护。从拓 扑 图 来看，则表现为只有同一方向的支路才能形成回路。将图 4 的拓扑图用有向的完全简单回路矩阵L_D表示。诚然，L_D是可以由对L′ 进行运算形成的。在下面一节中详述形成L_D的一种方法。有向图支路方向正好表示了相应方向继电保护的动作方向。

3 形成L_D及决定断开点BP（Break Point）

在矩阵L′ 中，－1 项表示支路方向与回路假定正向相反，即是一个无向图的有向回路矩阵。在无向图中，方向相反的支路可以共同构成一回路。而在有向图中，方向相反的支路不能构成回路。故与回路方向相反的支路应以其补支代替原来的支路，以形成有向回路。在

矩阵表示中，则应将－1 代之以零，并在补支处填上 1；如式（ 5 ）中L′的第 5 行表示一个无向回路：

$$\begin{array}{ccccccc} a & b & c & d & e & f & g \\ \end{array}$$
$$\left[\begin{array}{ccccccc} -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 1 \end{array}\right] \qquad (6)$$

对于有向回路而言，应由a′、c、d、f′、g组成。即原回路中的a、f支路应由a′、f′代替。而对于一个有向回路总有一个与之相反的回路。与（ 6 ）式所示的回路方向相反的有向回路由a、c′、d′、f、g′组成。

对于上述由L′ 矩阵扩展成有向的完全简单回路矩阵的过程可以抽象成下面的过程：将L′ 中所有值为－1的元素用零代替形成的矩阵记为L_1；将L′中所有的＋1元素用零代替，并将－1置为＋1，记为L_2由L_1和L_2形成L_D。

$$L_D=\begin{array}{c} \xrightarrow{\text{支路}} \\ \begin{bmatrix} L_1 & L_2 \\ L_2 & L_1 \end{bmatrix} \end{array} \Big\downarrow \text{回路} \qquad (7)$$

式中每一行代表有向图的有向简单回路，每一列代表一支路与某些回路相关联。共有 2F 个支路。根据上述法则，写出图 4 中的L_D表达式于（ 8 ）式：

$$L_D=\begin{array}{c|cccccccccccccc|} & a & b & c & d & e & f & g & a' & b' & c' & d' & e' & f' & g' \\ \hline 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 11 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{array} \qquad (8)$$

至此，我们已从无向图的基本无向回路矩阵B_f推出了用于描述带方向继电保护作用的有向图的完全简单回路矩阵L_D。这种形成L_D的方法比其它计算方法的计算量小。

在进行环网的继电保护整定计算时，首先要决定从那个点，即从那个继电器开始进行整定计算；为保证保护装置的配合，要决定所有的主保护和后备保护关系，即找出所要进行整定计算的顺序，即RSM矩阵。为此要选出一组支路，使得如果去掉这组支路，则网络中不

再有任何有向回路。这组支路的集合称之为断点。保护整定计算正是从这组断点开始。如何求出断点？又如何求出最小断点？这正是下面要回答的问题。为此先说明以下几个有关的概念：

覆盖：如果选出L_D中的一些列（边），组成一个边的集合C，对L_D的任一行，即图中任一回路均可在这个集合中至少找到一个元素（即图中的一条边）是该行的非零元素。则这个边的集合称之为矩阵L_D的一个覆盖。即，如果一个“边的集合”中的元素和一有向回路矩阵中的一切有向回路相关联，则称这个“边的集合”为这个有向回路矩阵的一个覆盖。例如有向回路矩阵L

$$L=\begin{array}{c} \begin{array}{ccccccc} a & b & c & d & e & f & g \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \qquad (9)$$

今选C＝｛a，c｝，即a，c二支路组成集合c，在这个集合中不能找到一个元素在第二行中有非零元素。故这个边的集合不是L的覆盖。如果取c＝｛a，b，c｝，则不难验明，这是L的一个覆盖。

小覆盖：如果这个边的集合是一个有向回路矩阵的必要覆盖；也就是说在这个边的集合中去掉任何一条边都不满足覆盖的定义，则称它为一个小覆盖。例如：对L而言，c＝｛a，b，c｝是一个覆盖而且是小覆盖，c＝｛a，b，c，f｝仅是一个覆盖。

最小覆盖：c中所含元素最少。由矩阵L_D的拓扑意义看出，如果取L_D的一个覆盖为断点，肯定可以断开所有有向回路。那么如何选取一个覆盖，使得这个覆盖所含支路数最少，也就是说如何选择一个最小覆盖呢？这是图论中S问题的最小反馈边集合问题。在此可用布尔法求得。

为利用布尔法求得最小覆盖，首先必须构成S函数。下面简述S函数的构造原则：

设图G有有向回路C_1，C_2，…，C_m，其中C_1回路由支路b_{i1}，b_{i2}，…b_{ik}组成；C_2回路由支路b_{j1}，b_{j2}，…，b_{jl}组成；C_m回路由支路b_{n1}，b_{n2}，…，b_{nr}组成；等等。则：

$$S=(b_{i1}+b_{i2}+\cdots+b_{ik})(b_{j1}+b_{j2}+\cdots b_{jl})\cdots(b_{n1}+b_{n2}+\cdots+b_{nr}) \qquad (10)$$

以布尔代数运算法则$ab+a=a$化简这一函数，得出S的多项式表达式，则得G图有向回路矩阵的所有小覆盖。现以（9）所示的L矩阵为例说明这一计算过程：L中的第一回路与支路a、e、f关联。则S的第一积项为（a＋e＋f）；L中的第二回路与支路b、f、g关联则S的第二积项为（b＋f＋g）；L中的第三回路与支路a，c，d，g关联则S的第三积项为（a＋c＋d＋g）；至此为止可以写出矩阵L的S函数：

$$S=(a+e+f)(b+f+g)(a+c+d+g) \qquad (11)$$

用布尔运算法则化简（11）得：

$$S=ab+ag+af+cf+df+eg+ceb+deb \qquad (12)$$

（12）中的每一项都是L的一个小覆盖。而支路数最少的项，如：ab、ag、af、cf、df、gf、eg均为最小覆盖。

显然随着行数的增加寻找最小覆盖的计算量会剧增。在实际计算中采用下面方法决定L_D

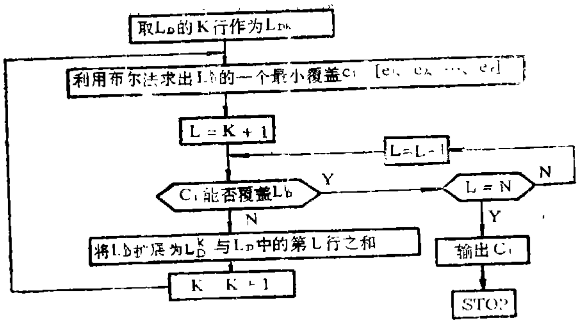

图 5　求实际有向图的最小覆盖流程图

的最小覆盖：

设L_D的行数为n_0首先在L_D中任选K行，用前述布尔法求出这K行的最小覆盖。然后检查K行以外的各行是否也能被这K行的最小覆盖所覆盖。如果是，显然这K行的最小覆盖也是L_D的最小覆盖。反之如果找出了没有被覆盖的一行，则将K行的集合扩展到(K + 1)行，对这（K + 1）行重复实行上述过程。直到找到L_D的一个最小覆盖为止。

将L_D的一个最小覆盖选为断点BP，断开覆盖的支路集合即断开一切有向回路。断点即是继电保护整定计算的起始点。不难用上述方法得到图 4 所示图的断点为a．e′、 b′、c。

4 相对顺序矩阵RSM

断点BP即继电保护整定计算的起始点。一旦BP确定后，则要着手决定后继的继电保护整定计算的顺序了。将整定计算的顺序排成一表，组成相对顺序矩阵RSM。RSM可以跟据BP和增广关联矩阵Aa来确定。Aa是包括所有母线(即包括参考节点)的关联矩阵。因此Aa是一个N＊2 E阶矩阵。

根据断点的定义，将断点所代表的继电器记入RSM矩阵的第一行。将断点在Aa中取消，即将Aa矩阵中将断点所对应的边的元素置零。一旦将断点对应的元素置零后，在Aa中肯定会有下面两种情况之一或两种情况均出现：

（i）一些行只含有＋1其余均为零。即图上会出现这样一些节点，在这样节点上只有指向节点的边，而所有流出节点的边均已进入RSM矩阵，并在Aa中被置零。这些边可记入RSM矩阵。也就是说这些边所代表的继电器可进行整定计算。上述的情况相当于图6（a）所示的情况。这意味着a、b应与c、d配合，而c、d继电器均已进入RSM矩阵，已经在a、b之前整定完毕。故a、b与c、d的配合关系确定，可开始整定了。

(ii)一些行中只含有一个－1，其余的均为＋1或零，即图上会出现这样一些节点，该节点除一条边离开节点外其余均流入节点。－1所代表的边的补边可进入RSM矩阵。即这条补边所代表的继电器可以进行整定计算。其图论意义如图6（b）所示。图中a和b′的配合关系要等b′整定后才能确定，但b和b′无配合关系，故b（即b′的补边）可以整定了。

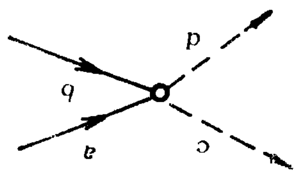

图6（a）可决定整定次序情况（i）的说明

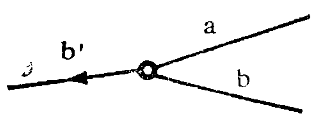

图6（b）可决定整定次序情况（ii）的说明

找出满足（i）、（ii）的行，按上述原则将其对应边记入RSM矩阵。并置Aa中该边所对 的列为零。重复上述过程，直到Aa为零阵。图4所示图的Aa阵表达于（13）

$$
Aa = \begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{cccccccccccccc} a & b & c & d & e & f & g & a' & b' & c' & d' & e' & f' & g' \end{array} \\
\left(\begin{array}{cccccccccccccc}
0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
-1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1
\end{array}\right)
\end{array}
\qquad (13)
$$

按上述过程，{a，c，b′，e′}为L_D的一个最小覆盖。选a、c、b′、e′为断点，将（13）式的矩阵中a、c、b’、e’列置为零，则节点1、2均只有一个－1元素分别为d和d′，意味着d需要配合的保护c，d′需要配合的保护a、c′已进入RSM整定完毕，故dd′均可进入RSM；从而由（13）所示的关联矩阵Aa得出的RSM矩阵。如（14）式

$$
RSM = \begin{pmatrix}
a & c & b' & e' \\
d & d' & 0 & 0 \\
b & e & a' & c' \\
f' & g' & 0 & 0 \\
f & g & 0 & 0
\end{pmatrix}
\qquad (14
$$

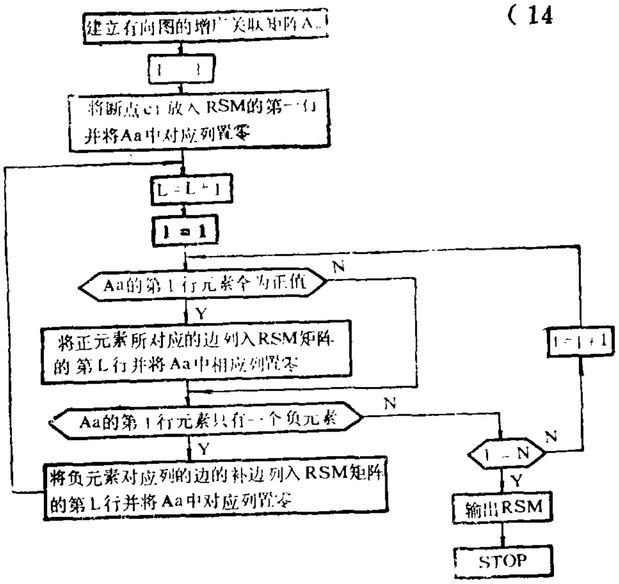

图7　求RSM矩阵流程图

形成RSM后，继电保护整定计算从RSM的第一行所代表的继电器开始，依次整定第二行，第三行，…直至最后一行。在同一行中整定顺序可以互换。RSM矩阵保证在着手整定某一行所代表的继电器时，这些继电器所应配合的继电器已经在前面整定完毕。这点不难从RSM的图论意义上看出。

5 寻找主保护\后备保护对（P／B）

在整定一处的继电器时，必须知道这一处的继电器是那些保护的后备保护，以保证继电保护的正确动作。因为在RSM矩阵中并没指出一个具体的继电保护是那些保护的后备保护。现对所有的（P／B）对按后备保护分类，即找出给定保护是那些保护的后备保护。寻找P／B对的方法很多，这里介绍我们在程序中采用的而且较简单的一种。这种方法的图论根据是：对于某一方向的后备保护，沿同一方向找出其相邻保护，可用一简单图形图8说明如下：图8中a、b、c、d均代表同一方向的继电器。若从保护动作方向来看，显然a是保护

b、c、d的后备保护，a应与b、c、d配合，若从图论来说，寻找主后备保护对的过程可归结为：给定一代表保护的边a，找出a边的前向节点。图8中的m点，即前向母线，进而找出由前向母线离开的边，即图8中的b，c，d，这些边所代表的主保护即是a应配合的主保护，或者说，a是b、d、c处主保护的后备保护。对RSM矩阵中每一处的继电保护装置施行上述过程，即可得到整个网络的P／B对。这个过程可用图9所示的流程图表示。例如，利用这个方法不难求出4图中a、e′、b′、c也就是RSM矩阵中第一行代表的继电器的P／B对为：

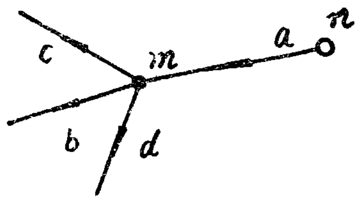

图8　P／B对决定原理说明

后备保护	a	a	e′	e′	b′	b′	b′	c
主保护	e	f	a′	f	e′	e	a′	g

至此我们已简要说明了继电保护整定计算过程中有关的拓扑图的计算过程。一旦上述过程完成，则可以用继电保护整定计算的原则进行计算了，后继的整定计算过程和程序说明将在本文的姊妹篇中另行论述。

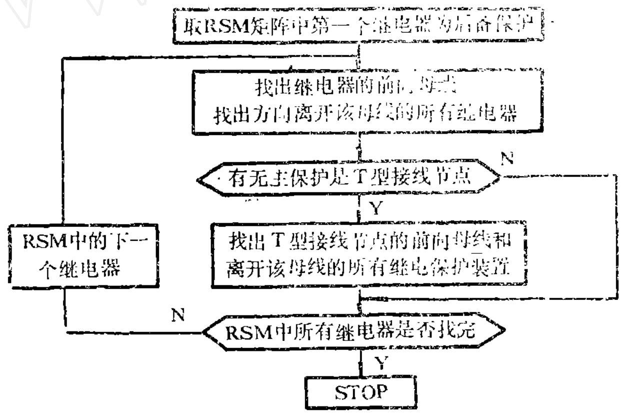

图9　P／B对寻找流程图

参 考 文 献

［1］M.H.Dwarakanarn and L.Nawitz, An In troduction of Linear GraPh Theory for Coordination of Directional Overcurrent Relays.

［2］M.J.Damborg.et.al, Computer-Aided Transmission Protection System Design IEEE on PAS. 1984, No. 1.

［3］R. Ramawami, etal, Enhunced Ugarithms for Transmission Protetion Relay Coordination IEEE trans. on Power Delivery 1986. No. 1

［4］V.V.Bapeswara Rao,Computer Aided Coordination of Direction Relay: Determination of Break point IEEE trans. on Power Delivery Vol. 3 No. 2 1988

［5］L. Divieti and A. Grassel,on the Determination of minimum Feedback Are and Vertex Sets, IEEE trans. on Circuit Theory Vol CT—15,Mar. 68. PP 86—88