一种用于调度员培训仿真的快速因子修正法*

傅　健　唐国庆　李乃湖
（东南大学电气系·210096·南京）

王力科　姚建国　王元林
（电力部电力自动化研究院·210003·南京）

【摘　要】　介绍一种适用于结构性变化时因子修正的路径树节点取用方法。由此提出一种能有效跟踪随机开关状态变化的因子表快速局部修正法。经华东网测试，确实可满足动态仿真的需要。对于电力系统的类似计算，此方法也具有较强的通用性。

【关键词】　因子表修正　路径树取用　开关状态变化　调度员培训仿真

1　引言

调度员培训仿真器（DTS）是 EMS 的一个重要组成部分，它运用计算机技术，仿真电力系统运行的全过程，对于提高调度员素质、保障电网安全运行所起的作用是十分巨大的。

DTS 由静态仿真与动态仿真两部分构成，两部分的计算均离不开迭代求解一组代数方程[1]：

$$[A][X]=[b] \tag{1}$$

式（1）通常是通过先对$[A]$阵因子化，再用已知向量$[b]$的前代回代来求得未知向量$[X]$。在仿真过程中，系统的开关状态经常发生局部变化，引起基于导纳阵的系数阵$[A]$的变化。由于$[A]$阵与导纳阵具有相同的稀疏结构，局部开关状态的变化只会引起$[A]$阵若干元素的变化，完全重新因子化显然是十分耗时且无必要的。如何快速修正因子表是达到仿真实时要求的关键之一。

为此，本文结合华东电网 DTS 动态仿真软件开发的实践，重点讨论仿真过程中开关状态变化时因子表的快速局部修正。

2　路径树及其取用

2.1　PR1 法与路径树

因子表修正方法经过简单 PR 法（Partial Refactorization）、带特殊排序的简单 PR 法，Bennett 法，直至发展到目前较成功的带因子化路径的 PR1 法及 PR2 法，其中 PR1 法最为简单实用[3]。它的步骤为：

（1）给出系数阵元素变化的节点号，即源节点号；

（2）找出各单条路径的并集形成路径树；

---

*　1994 年 9 月收稿。

傅　健，女，1971 年生，硕士。

唐国庆，男，1937 年生，教授，博士生导师，主要从事电力系统运行和控制以及人工智能在电力系统中的应用研究。

李乃湖，男，1960 年生，博士，副教授，主要从事电力系统优化运行和仿真方面的研究。

(3) 取路径树上节点，若该节点系数阵无变化，用原值送入；否则用修改后值送入，将该节点重新因子化。

路径树的形成与取用是 PR1 法的关键。路径树是因子表的一个固有属性，只要源节点号一致，且因子表无结构性变化，则路径树不变。路径树所含节点总数我们称之为路径树的长度。图 1 (b) 即为一棵基于图 1(a) 的 20 节点网的路径树[2][3]。

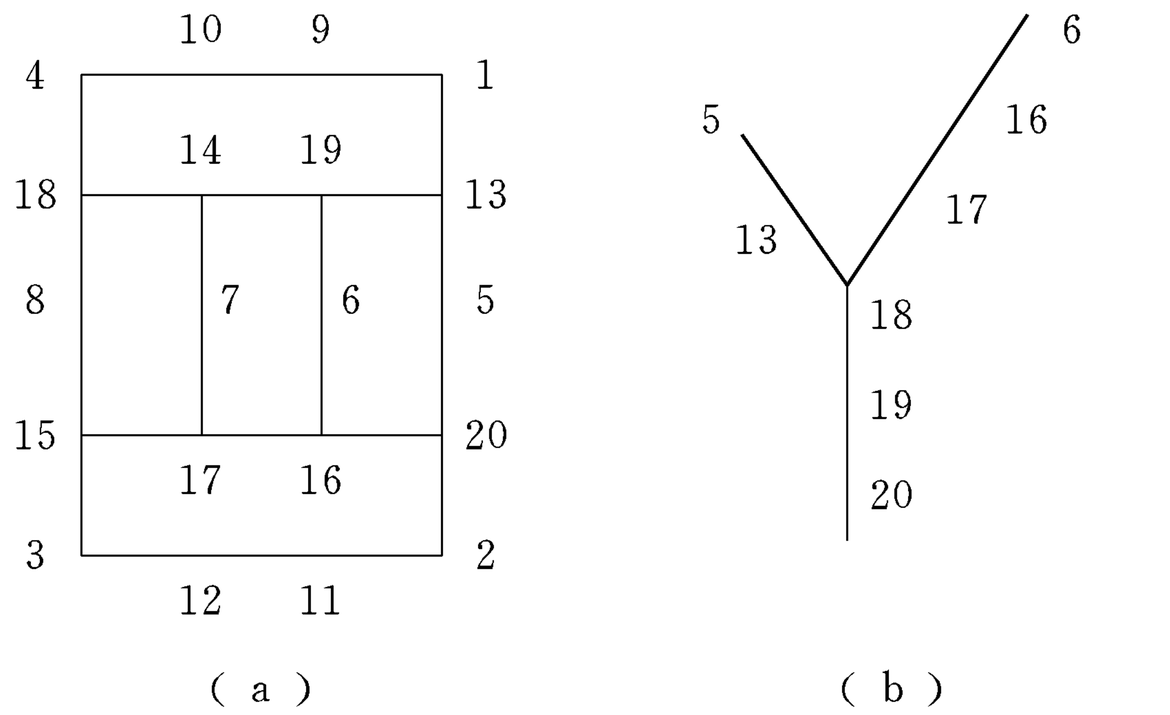


图1 20节点网络及其路径树

Fig. 1 A 20-node network and part of its path graph

2.2 路径树的有序取用与无序取用

从 PR1 法的步骤 (3) 可以看出，当修正因子表时，需把路径树上节点依次取出重新因子化，而不在树上的节点则不予修正。路径树上节点的取用顺序根据系数阵变化的性质不同分为有序取用与无序取用两种。

当系数阵发生非结构性变化，即系数阵元素只有数值上的变化，而无位置与个数的变化时，可以采用无序取用的方法进行因子修正。

所谓无序取用，即路径树上节点按照“由上到下，先分支，后主干，分支与分支之间顺序任意”的原则取用。如果路径树由一棵以上独立的“树”构成，则各树之间顺序任意。仍以图 1 (a) 20 节点网为例。设 5 号节点与 6 号节点对角元数值发生变化，PR1 法所需的路径树恰为图 1 (b)。由于 5、13 分支与 6、16、17 分支之间无直接联系，它们的计算顺序任意。而 13 与 17 号节点均对 18 号节点有影响，18 号节点及其以下的主干节点必须在这两分支计算完后才可计算，所以图 1 (b) 的路径树依无序取用原则产生的节点取用顺序表为：

5→13→6→16→17→18→19→20 或

6→16→17→5→13→18→19→20

这种基于无序取用的 PR1 法是传统 PR1 法。当系数阵出现阶数的增减或非零非对角元个数的增减时，发生结构性变化。由于系数阵的结构性变化可能带来因子表的结构性变化，使得从旧因子表中无法直接得出新路径树，也就得不到局部修正所需的路径树。此时，传统 PR1 法虽然也有一些变通措施（如新添节点时增广列向量的快速前代），但其使用仍受到很大限制[4]。当原网有新注入元产生时，传统 PR1 法则完全无能为力，此时只能采用路径树的有序取用。

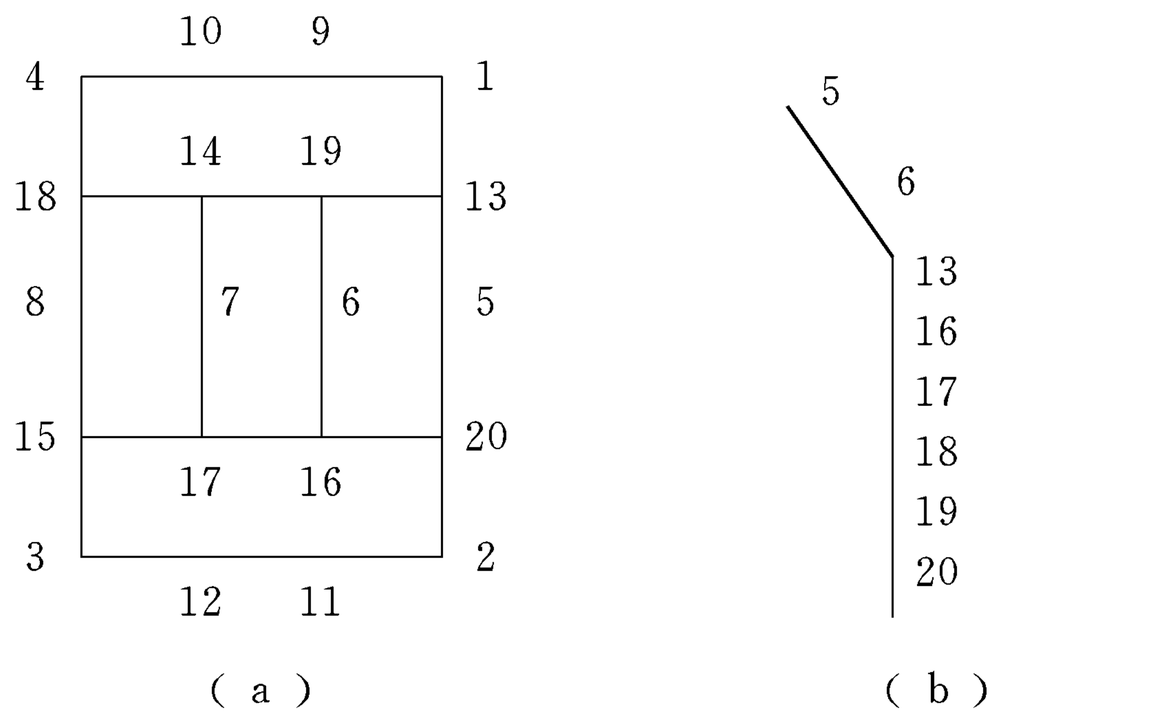


图2 20节点网络及其路径树

Fig. 2 New 20-node network and part of its path graph

以图 1 (a) 20 节点网增添一条 5 至 6 的新支路为例，在新网 (图 2(a)) 基础上，仍以 5、6 号节点为源节点的路径树如图 2 (b) 所示，它与图 1 (b) 有明显不同。

在图 1 (b) 上，分支 5、13 与分支 6、16、17 之间无直接联系，而在新网上，由于 5 至 6 号节点之间新支路的出现及由此产生的新注入元，使 5 与 6 号节点的单条路径发生了变化，从而影响了整个路径树。

经分析，可以发现，虽然此时新路径树在因子修正开始之前无法获得，但其上所包含的因子变化节点却全部落在旧路径树上。为此，可以从旧树获得所需修正的节点号，但无序取用再不能

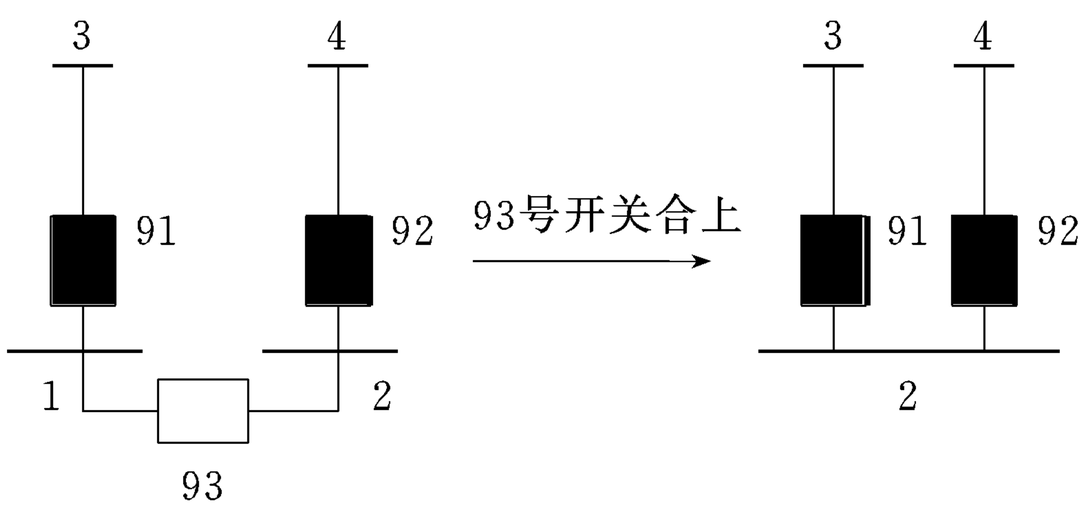
采用。为尽可能考虑到任何结构性变化的种类，对于图 1 (b) 的旧路径树应按照“先取上层节点，再取下层节点”原则取用，即 5→6→13→16→17→18→19→20，这种打破路径树分支之间界限、完全按照上下层节点顺序取用的取用方法我们称之为有序取用。有序取用尤其适用于有新注入元产生时的因子修正。

由于在完全因子化过程中均是先算上层节点再算下层节点，有序取用对路径树上节点也按这种顺序计算，较之无序取用的计算次序更为严格，所以无序取用适合的场合有序取用均适合。显然，对于单条路径，它的有序取用与无序取用效果是一致的。

在实际编程中，通常是边形成路径树，边按指定的取用方式形成节点取用顺序表，路径树体现在节点取用顺序表里。

3　开关状态变化对系数阵的影响

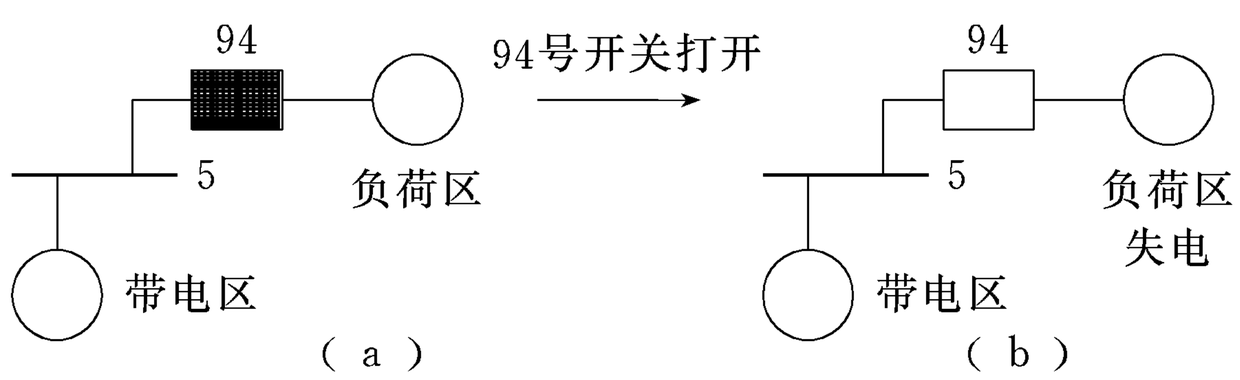
开关状态变化既可造成系数阵的非结构性变化，也能造成系数阵的结构性变化。为方便因子表修正，我们将开关状态变化后的系数阵节点分成 5 类：无变化节点、被增加节点、被删除节点、直接变化节点与间接变化节点。以图 3、4、5、6 分别说明如下。



(a)　(b)

图3　母线合并

Fig. 3　Bus merging



(a)　(b)

图4　负荷区失电

Fig. 4　Deenergized load area

3.1　无变化节点 (NochgBS)

此类节点在开关状态变化前后该行 (列) 系数阵元素不产生任何变化，如图 3、5 里的 4 号节点即为 NochgBS。在开关状态局部变化时，该类节点占绝大多数。

NochgBS 中可能有一部分节点受其它变化节点的影响落在路径树上而需重新因子化。

3.2　被删除节点 (RemvBS)

此类节点在开关状态变化后不再是计算网的一部分，被删除。该类节点通常在母线合并与局部网失电时出现。

在图 3 (a) 里，93 号开关合上，1 号节点与 2 号节点合并 (图 3(b))。为尽量减少需修正的因子表节点数，在两节点合并时，上层节点即此时的 1 号节点为 RemvBS，保留下层节点即此时的 2 号节点为合并后的节点。

在图 4 (a) 里，94 号开关打开，负荷区失电，区内所有节点均不再参加计算，这些节点都成为 RemvBS。

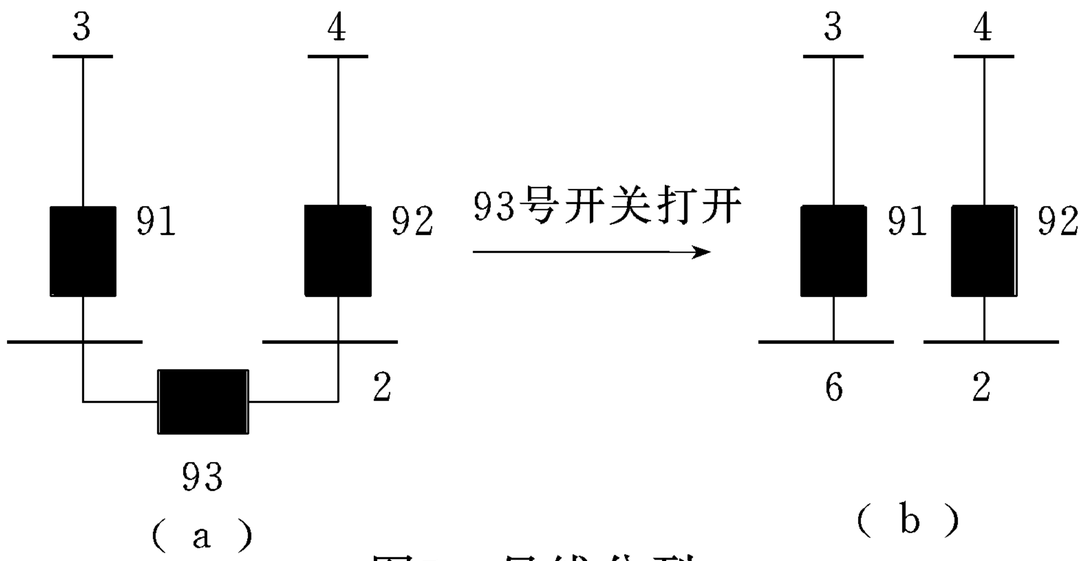
RemvBS 自身无需参加计算，但由于此类节点的消失，会使得与之在因子表上有直接联系的节点仍需重新因子化。

3.3　被增加节点 (AddBS)

此类节点在开关状态变化后才成为计算网的一部分。它通常在母线分裂与失电局部网再充电时出现。在图 5 (a) 里，93 号开关打开，2 号节点分裂成 2 号节点与 6 号节点，此时 6 号节点为

AddBS。在图 6 (a) 里，94 号开关合上，负荷区恢复供电，区内所有节点均需重新参加计算，它们成为 AddBS。

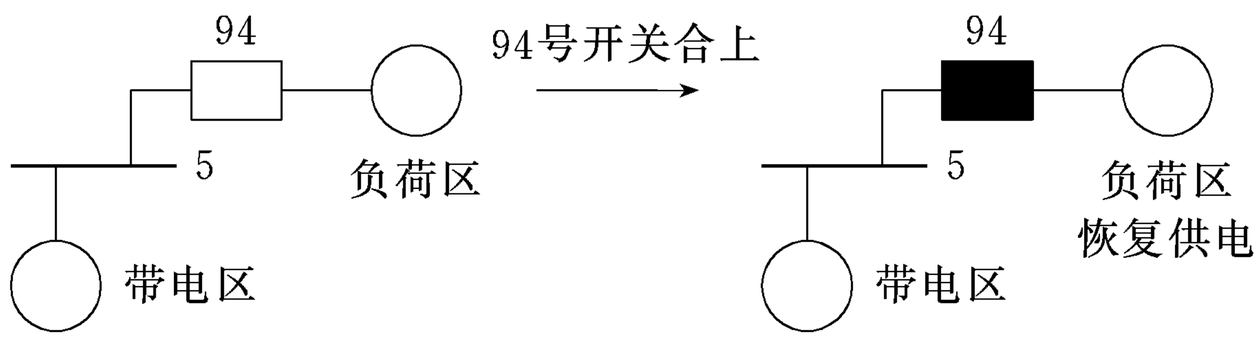
被增加节点按产生的先后排在原计算节点之后，这类节点均需重新因子化。



(a)　　(b)

图5　母线分裂

Fig. 5　Bus split



(a)　　(b)

图6　负荷区恢复供电

Fig. 6　Reclosed load area

3.4　直接变化节点 (ChgBS)

也就是状态变化的开关所在的节点。此类节点对角元大小发生变化，非对角元的个数和位置也可能变化。图 3、5 中的 2 号节点与图 4、6 中的 5 号节点即是 ChgBS。显然，直接变化节点均需重新因子化。

3.5　间接变化节点 (AuxchgBS)

间接变化节点的对角元、非对角元数值无任何变化，只是非对角元位置发生了变化。它通常在母线合并与母线分裂时才出现，并同时伴随 RemvBS 或 AddBS 的出现。图 3 (a) 里的 3 号节点与图 5(a) 里的 3 号节点在 93 号开关动作后成为 AuxchgBS。虽然间接变化节点的因子表元素个数、数值均无变化，但个别因子的位置有所改变，仍需重新形成因子表。

电网中开关数目众多，其状态变化对拓扑结构的影响也有大有小。不论开关处于何种地位，起何种作用，均可以用以上 5 类节点的组合来反映其状态变化对网络的影响。5 类节点的划分完全取决于局部拓扑化的结果，因而具有较强的通用性。

4　开关状态变化时因子表的修正

4.1　5 类节点的处理

开关状态变化后系数阵节点可以分为 5 类，除 NochgBS 外，其它 4 类节点的出现必然会造成因子表的变化。

被删除节点由于直接影响到原因子表的维数，必须首先处理。先将该类节点从因子表中去除，包括对角元从对角元数组中去除及相关非零非对角元从各自行（列）中去除，“斩断”被删除节点与其它因子表上的联系，形成一个过渡因子表。过渡因子表对应一个过渡网，该网在原网基础上将其中的全部 RemvBS “抠出”。它承接了原网的 ChgBS、AuxchgBS 与 AddBS，并将在原因子表里与 RemvBS 有直接联系的节点增添为 ChgBS。这样，以下所有的因子修正均在过渡因子表的基础上进行。

直接变化节点均需重新因子化，应将它们作为源节点的一部分参与路径树的形成。

当全部开关均为由合→开且不存在 AddBS 与 AuxchgBS 时，可以断定，过渡因子表决不可能有新注入元产生。仅在这种特殊情况下，可将 ChgBS 的变化当作数值性变化处理，用路径树的无序取用方式形成节点取用顺序表，逐一修正。对于在新因子表中为零的元素在修正过程中删去即

可。

当间接变化节点存在时，由于该类节点因子也需重新形成，应将它们作为终端节点的一部分参与路径树的形成。

被增加节点总是位于原网节点之后，因此在形成其因子表之前，对 AddBS 有影响的节点因子必然存在或已重新修正好。这样，对于被增加节点，只要将它们接在路径树的尾部，与其它路径树节点用同样方式因子化即可。

4.2　框图

根据以上分析，开关状态变化时因子表局部修正的流程图如图 7 所示。

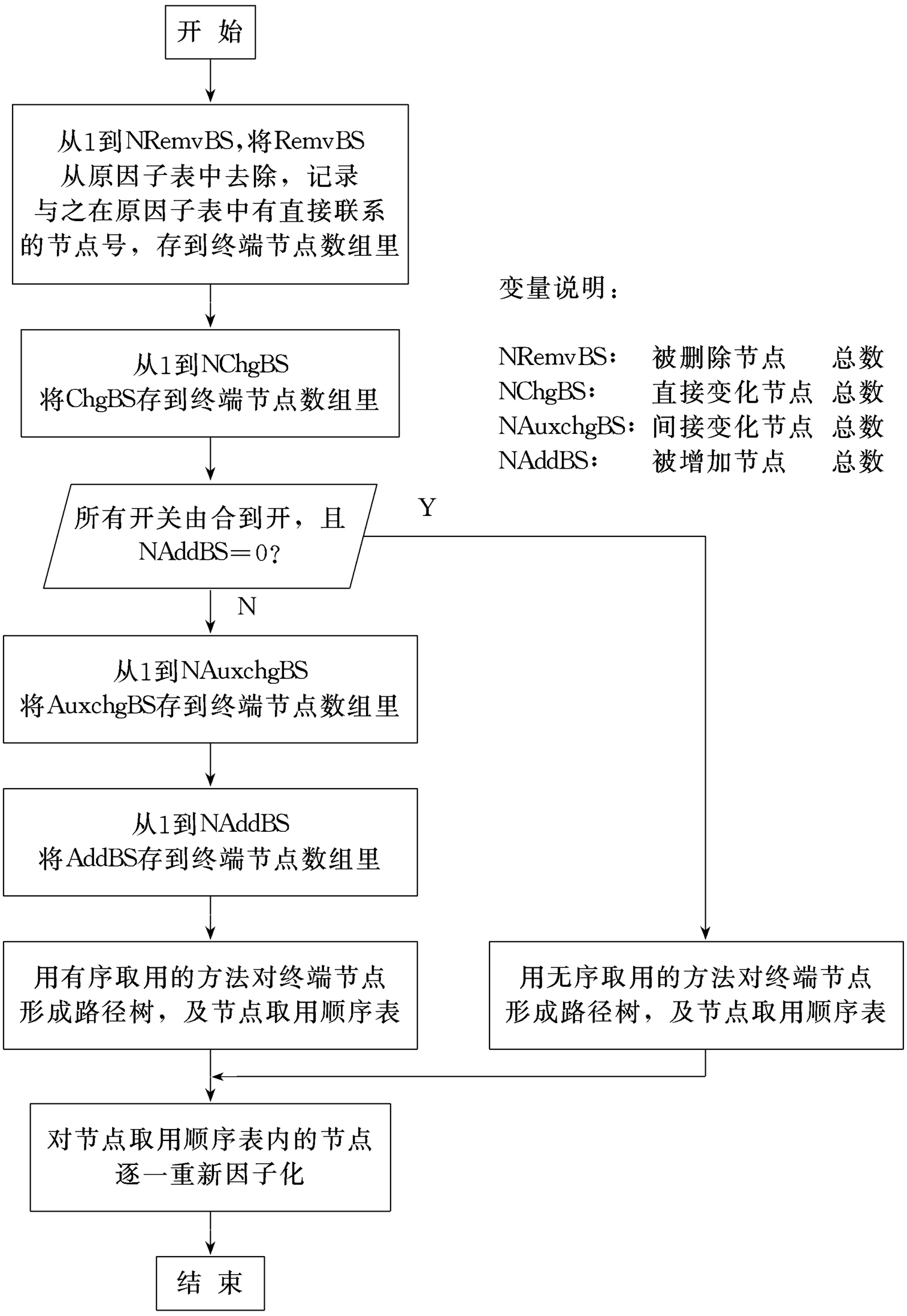


图7　开关状态变化后因子表局部修正流程图

Fig. 7　Flow chart for partial refactorization after breaker status changing

在实现 DTS 动态仿真过程中，考虑到开关状态会经常发生变化，从而造成多个节点因子需重新形成，其中牵涉到多处因子元素的增加、删除或位置变化，为便于因子表的存取，方便路径树的生成，我们对因子表中的对角元单独存放，非对角元则采用十字链表式数据结构[5]。

5　测试结果

在 Micro VAX－11 上对华东网的某一基本运行状态进行测试。该网共有 350 个节点，完全因子化一遍所需时间为 1.98 s，平均单条路径长度为 12.44。测试结果见图 8 与图 9。

从图 8 可以发现，随着有状态变化的开关数目的增多，路径树的长度不断增大。由于开关所处的厂站位置不同，同样的开关数对应的路径树长度不同。因子表的修正时间并不直接取决于开关数，而是取决于开关产生的路径树长度。从图 9 可以发现，随着路径树长度的增大，因子表的修正时间也在增长，但修正时间的增长比路径树长度的增长速度要慢。这样，随状态变化开关数的增加，因子修正的相对速度将越来越快。

6　结论

本文将开关状态变化后的系数阵节点分成 5 类。在此基础上，根据开关状态变化性质所决定的路径树节点的不同取用方式，对于任何形式的由单个或多个开关状态变化所引起的系数阵的结

构性或非结构性变化，一次性形成囊括所有需修正节点的路径树及节点取用顺序表，经华东网测试，确实可以满足动态仿真对因子修正的需要。

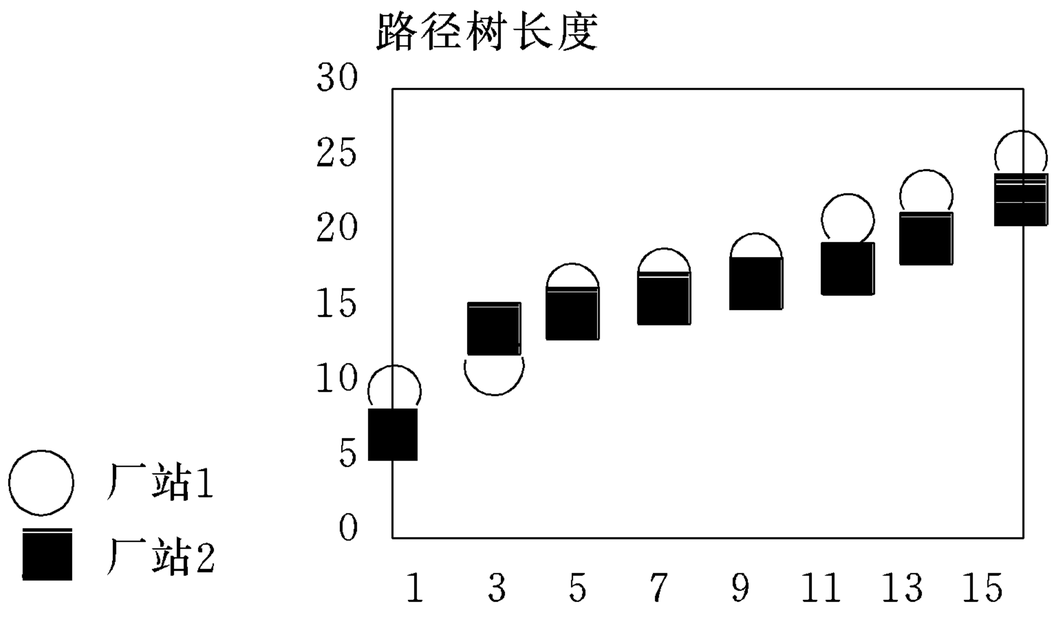


图8 路径树长度与开关数目的关系

Fig. 8 Relationship between path length and breaker number

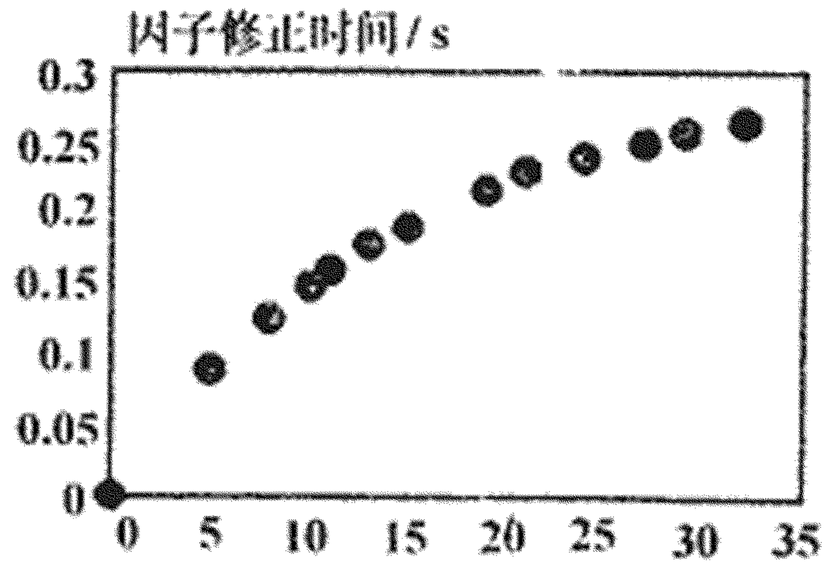


图 9 因子修正时间与路径树长度的关系

Fig. 1 Relationship between PR time and path length

这种开关状态变化时的因子表快速局部修正法是为动态仿真软件编制的。在动态仿真中，系数阵 $[A]$ 由基于导纳阵的 2×2 块矩阵构成，考虑到块矩阵的特殊性，我们仅在 PR1 法的基础作一些探索。对于电力系统的其它计算，只要所解方程的系数阵是基于导纳阵，如潮流计算、状态估计、安全分析等，在能获得足够的拓扑信息下，这种方法也同样适用。

参 考 文 献

1 Tinney W F, Walker J F. Direct Solution of Sparse Network Equation by Optimally Ordered Triangular Factorization. Proc. IEEE, 1967.11, 55

2 Tinney W F, Brandwajn V, Chan S M. Sparse Vector Method. IEEE Trans. on Power System, Vol. PAS—104, 1985.2, (2)

3 Chan S M, Brandwajn V. Partial Refactorization. IEEE Trans. on Power System, Vol. PWRS—1, 1986.2, (1)

4 吴际舜. 电力系统稳态分析的计算机方法. 上海交通大学出版社，1992

5 于尔铿. 电力系统状态估计. 水力电力出版社，1985

A FAST METHOD OF PARTIAL REFACTORIZATION FOR DTS

Fu Jian, Tang Guoqing, Li Naihu (Southeast University, Nanjing)

Wang Like, Yao Jiangou, Wang Yuanlin (Nanjing Automation Research Institute)

Abstract A new permutation of node sequence in path graph suitable for sturctural modifications is introduced. Based on this technique, the paper presents a fast method of partial refactorization which can track random breaker status changes. Tests results show that the new method can not only satisfy the need of real time simulation but also has the potential to speed up the calculation of similar power system problems.

Keywords partial refactorization node sequence in path graph breaker status changes DTS