基于特征电流的低压线路拓扑识别方法与实践

文/丛振刚[1] 杜宏伟[2] 丛雨欣[3] 李宝忠[1]
1. 积成电子股份有限公司；2. 山东山大电力技术股份有限公司；3. 济南大学

掌握低压线路的拓扑是供电单位运维低压线路的基本诉求与工作依据。在低压线路上的某个测量点施加特征电流信号于低压线路，流过特征电流的线路就是与该测量点相关联的上游线路。利用这个原理可以实现低压线路拓扑分析。方法是：在低压线路上安装能够发生与识别特征电流信号的终端，并建立相关区域终端档案；需要生成拓扑时，按相关区域终端档案依次命令一台终端在低压线路上施加特征电流信号，其余终端检测到特征电流信号则将其存为拓扑事项记录；收集每个终端的拓扑事项记录，对其进行分析得出低压线路拓扑。文章介绍了上述拓扑识别方法的一整套工程实践方案，详细阐述一种利用拓扑事项记录分析线路拓扑的算法。

自低压配电网引出的低压线路将电能直接输送给用电客户，它的运行使用与供电单位及用电者的财产与安全有着直接的关联。准确掌握线路的拓扑是供电单位能更好地运行与维护低压线路的基本诉求与工作依据。由于低压线路规模庞大、路径复杂及拓扑易变，造成依靠人工管理台账的方式很不经济，甚至不现实，低压线路拓扑自动识别技术应运而生。

许多科研院所及企业开展了对拓扑自动识别技术的研究与实践。在众多低压配电线路拓扑识别方法中，电流注入法应用非常广泛。其基本原理是：在低压线路上的某个测量点将特征电流信号施加在低压线路上，流过特征电流的线路就是该测量点的上游线路。

实施方案是：

1）在低压线路分支节点处安装能够发生与识别特征电流信号的终端设备（如：智能断路器、智能量测开关和出线监测终端等），建立相关区域终端设备档案。

2）需要生成拓扑时，智能融合终端按相关区域终端设备档案分时，依次命令档案中某个终端设备在低压线路上发生特征电流信号，其余终端设备时刻监视线路上的信号，如果发现特征电流信号则将其存为拓扑事项记录。

3）由智能融合终端收集每个终端设备的拓扑事项记录，并对其进行分析计算得出低压线路拓扑。

上述拓扑识别方案属于一种拓扑识别硬件方案，也是“信号注入”法的一个应用场景，已被国家电网公司采纳并规模应用。国家电网公司2022年初发布的《Q/GDW12174—2021智能量测开关技术规范》[10]中对特征信号发送（流程、特征、信号强度、功耗、温升及谐波影响）、特征信号接收（流程、灵敏度、记录内容及记录条数）做了比较具体的要求，山东省电力公司在招标量测开关的技术规范中对拓扑识别功能做了进一步的细化。

怎样按有关规范要求设计硬件与软件实现特征信号发送、特征信号接收，如何利用终端设备内的拓扑事项记录识别出所有设备的台区归属关系、工作相位，以及每个设备的物理供电父节点，都需要

科技工作者或设备供应厂家研发人员去设计电路、开发软件和付诸工程实践。与低压拓扑识别相关的公开文献很多，阐述的侧重点各不相同，鲜见有从工程实现角度出发阐明全环节原理及实现方法的文献。本文介绍了笔者依据《Q/GDW12174—2021智能量测开关技术规范》中提及的基于特征电流的低压线路拓扑识别方法推出的一整套工程实践方案，包括如何发生特征电流，如何接收特征电流，如何对结果进行拓扑分析。

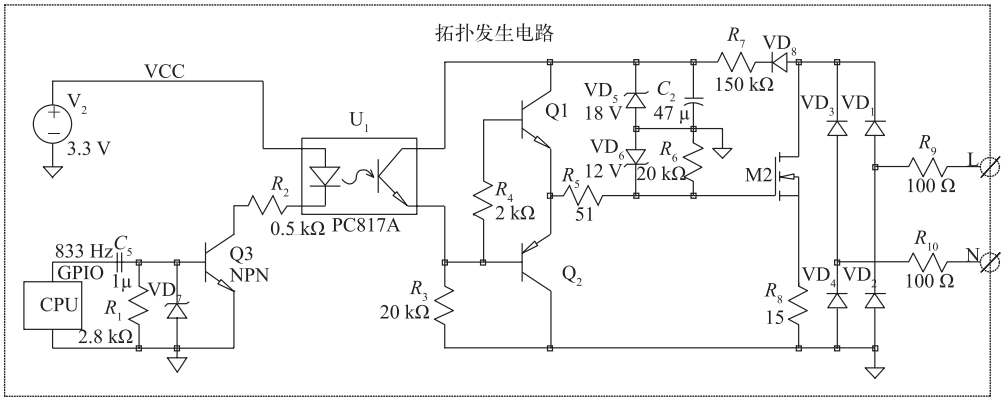
特征电流发生

1. 特征电流的要求

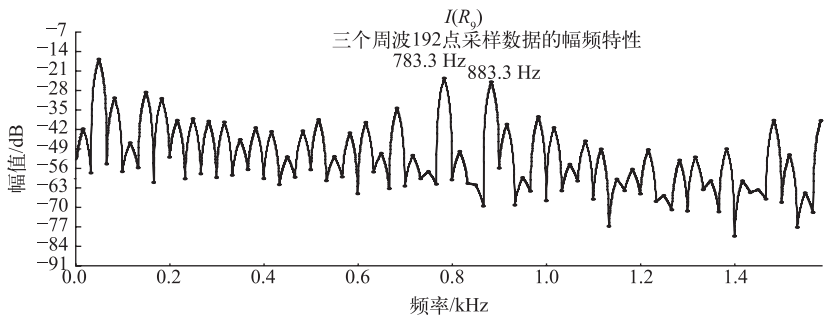
《Q/GDW12174—2021智能量测开关技术规范》附录J拓扑识别功能要求（基于特征电流的拓扑识别技术要求）中规定，电流信号特征频率可设，默认为833.3 Hz，同时高、低电平脉宽可设，特征电流携带信息可设，后续扩展域信息长度可变，起始符为AAH=10101010B，控制码为E9H=11101001B。其中，码位为0时，无特征发送，码位为1时，有特征发送。每位编码发送时间长度可设，默认为600±15 ms，负载为恒阻负载或恒流负载。对于恒流负载电流信号峰值范围在0.38～0.45 A之间；对于恒阻负载电流信号峰值范围在0.5～0.65 A之间。

2. 特征电流的发生

智能量测开关（下文简称“量测开关”）选用产生恒阻负载特征波形的方案。产生特征信号的电路原理如图1a所示。光耦U_1为强电与弱电的分隔面，U_1左侧电路为CPU的数字电路部分。当需要产生特征电流信号时，CPU在CPU_IO引脚上发生833.3 Hz的载波信号，信号经C5、Q3等器件耦合至U_1的输入端，进而控制U_1的输出端。U_1右侧包含一套交流取电电路，在Q_1集电极端获得约DC18 V电压，可控制MOS管M_2跟随U_1输出端的通断。M_2的通断使R8不断跨接到L（火线）、N（零线）之间，从而在L、N上注入833 Hz的特征波形，如图1b所示。因为有C_5的隔直流通交流特性，当CPU_IO引脚异常地进入电平保持状态，M_2会断开R_8所在回路，不至于R_8长期通电导致电路烧毁。北京智芯微电子科技有限公司也推出了类似的电路[11]。



（a）恒阻负载特征电流发生电路



（b）流经R_9的特征电流（仿真）

图1　恒阻特征电流发生原理

特征电流识别

1. 特征电流的特性

对L、N上注入833 Hz的特征电流信号进行每周波（50 Hz）64或128点采样、三个周波的傅里叶变换，仿真分析得到的频谱如图2所示。该特征信号在783.3 Hz和883.3 Hz处的幅值显著高于基波以外的其他频点的幅值。对四个周波的信号进行傅里叶变换也不失此特性，只是特殊幅值出现在787.5 Hz和887.5 Hz，这是鉴别线路上是否存在特征电流的主要依据。有公开文献对特征电流信号的特性进行了深入的理论分析[7]，本文侧重工程实现，不再赘述其幅频特性的原理。

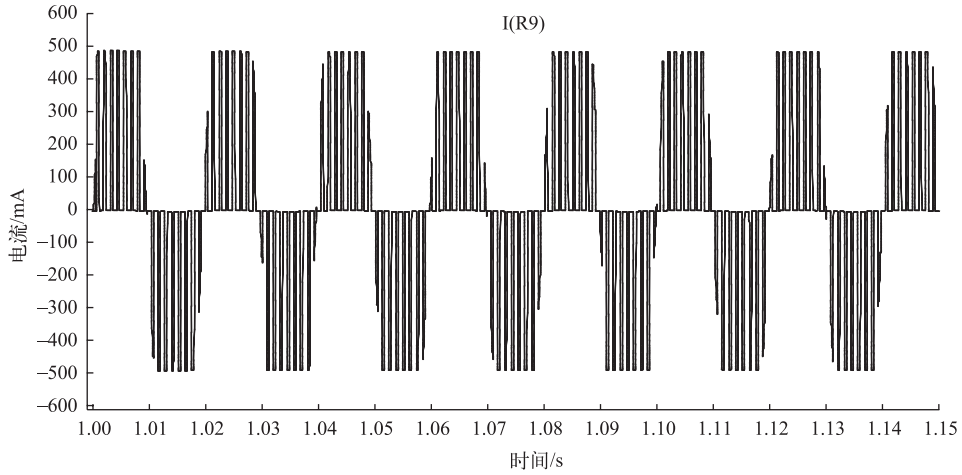


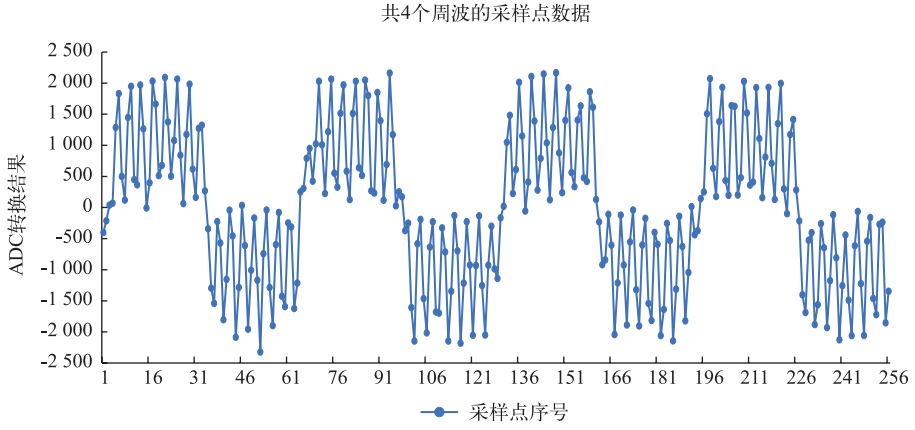
图2　恒阻特征电流的频谱

2. 特征电流的识别

量测开关的应用场景中，特征电流叠加在L、N上，信号要经过电流传感器（CT）才能进入量测开关的电流采集电路中，而且CT的变比非常大。以《Q/GDW12174—2021智能量测开关技术规范》附录H中的电流传感器列表中200 A、250 A规格的断路器为例，规范要求其CT电流比为250 A/50 mA，即5 000/1。

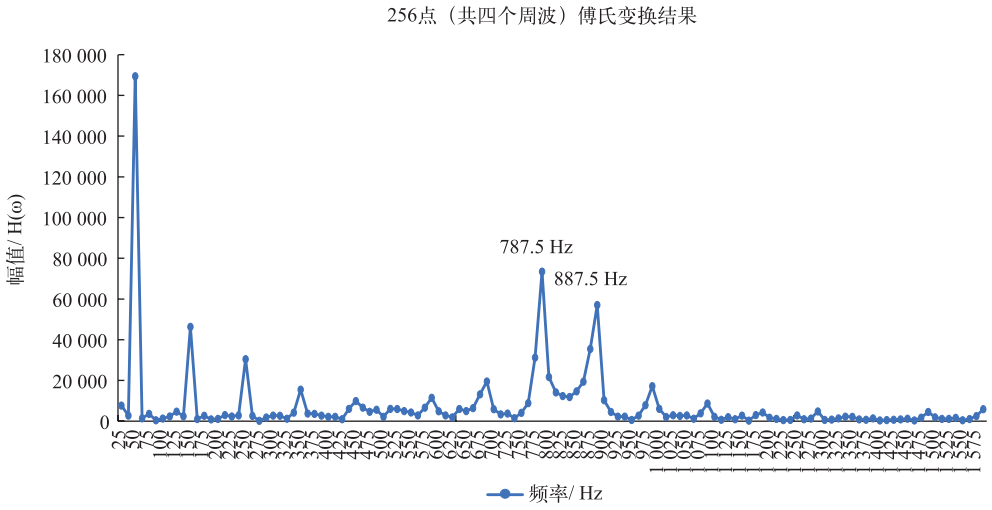
施加在L、N上峰值为0.5 A的特征信号经过CT后的峰值变为十分微弱的0.1 mA，仅为额定值250 A经CT后的峰值70.7 mA的0.14%。因此量测开关的电流采集电路要具备宽范围、高准确度和高分辨率才能承担负载电流采集与特征电流识别的双重任务。因此规范要求量测开关对电流信号进行采样的ADC准确度不小于22位。

计量芯片RN8302B具有7路24位ADC[16]，且可以编程实现采样波形存储供用户进行FFT分析，用此芯片来采集负载电流与识别特征信号取得了比较理想的结果，实际采集到的典型波形及FFT结果如图3所示。



（a）256点采样数据

图3　特征电流信号的时域图与频域图



（b）采样数据幅频特性

图3　特征电流信号的时域图与频域图

图3a的原始采样数据是按RN8302B用户手册典型电路设计的量测开关实际采集到的一组数据，共四个周波256点原始采样数据，为凸显特征信号，一次线路上没有施加负荷电流。

图3b是对图3a中256点数据的FFT得到的频谱。之所以选择对四个周波的256点采样数据进行傅里叶变换，是因为可以采用FFT算法大幅降低对CPU算力的要求，也没有发现降低特征电流的识别能力。按规范要求，载波信息每位有30个周波的时长，可以采用6个周波一个采集与计算周期来对每位信息进行5次甄别。

拓扑识别

1. 设备部署

如果要实现低压线路的拓扑自动识别，则需要在低压线路分支节点处安装能够发生与识别特征电流信号的终端设备（如：智能断路器、智能量测开关和出线监测终端等），在信息汇集点安装智能融合终端，建立相关区域终端设备档案。以图4为例说明拓扑自动识别原理及方法。

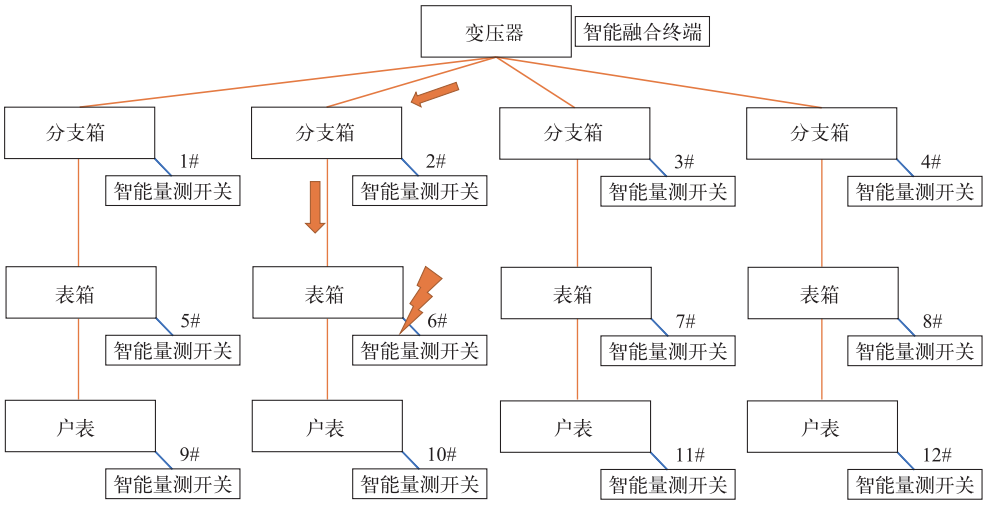


图4　某台区设备布局

2. 制造拓扑事项

需要生成拓扑时，智能融合终端按相关区域终端设备档案分时、依次命令档案中某个终端设备在低压线路上发生特征电流信号，其余终端设备时刻监视线路上的信号，如果发现特征电流信号则将其存为拓扑事项记录。

在图4中6#量测开关在一次线路上施加特征电流信号时，只有位于6#与变压器之间的同一条分支线上流过特征电流，有且仅有2#量测开关能检测到特征电流信号。当融合终端依据设备档案分时间段（T1到T12）、依次命令1#～12#量测开关产生特征电流信号后，再将1#～12#中检测到的拓扑事项记录收集起来，于是信息在融合终端中能够形成类似图5a中的结果，进而可以用图5b中的数组形式表示以便计算机编程处理。

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	
Y	0xAA	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	T1
Y	0x00	0xAA	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	T2
Y	0x00	0x00	0xAA	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	T3
Y	0x00	0x00	0x00	0xAA	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	T4
Y	0x55	0x00	0x00	0x00	0xAA	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	T5
Y	0x00	0x55	0x00	0x00	0x00	0xAA	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	T6
Y	0x00	0x00	0x55	0x00	0x00	0x00	0xAA	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	T7
Y	0x00	0x00	0x00	0x55	0x00	0x00	0x00	0xAA	0x00	0x00	0x00	0x00	T8
Y	0x55	0x00	0x00	0x00	0x55	0x00	0x00	0x00	0xAA	0x00	0x00	0x00	T9
Y	0x00	0x55	0x00	0x00	0x00	0x55	0x00	0x00	0x00	0xAA	0x00	0x00	T10
Y	0x00	0x00	0x55	0x00	0x00	0x00	0x55	0x00	0x00	0x00	0xAA	0x00	T11
Y	0x00	0x00	0x00	0x55	0x00	0x00	0x00	0x55	0x00	0x00	0x00	0xAA	T12

(a) 拓扑事项列表

```
char topo_arr[12][12] =
{
  // #01, #02, #03, #04, #05, #06, #07, #08, #09, #10, #11, #12
    {0xAA,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00}, // T1
    {0x00,0xAA,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00}, // T2
    {0x00,0x00,0xAA,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00}, // T3
    {0x00,0x00,0x00,0xAA,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00}, // T4
    {0x55,0x00,0x00,0x00,0xAA,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00}, // T5
    {0x00,0x55,0x00,0x00,0x00,0xAA,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00}, // T6
    {0x00,0x00,0x55,0x00,0x00,0x00,0xAA,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00}, // T7
    {0x00,0x00,0x00,0x55,0x00,0x00,0x00,0xAA,0x00,0x00,0x00,0x00}, // T8
    {0x55,0x00,0x00,0x00,0x55,0x00,0x00,0x00,0xAA,0x00,0x00,0x00}, // T9
    {0x00,0x55,0x00,0x00,0x00,0x55,0x00,0x00,0x00,0xAA,0x00,0x00}, // T10
    {0x00,0x00,0x55,0x00,0x00,0x00,0x55,0x00,0x00,0x00,0xAA,0x00}, // T11
    {0x00,0x00,0x00,0x55,0x00,0x00,0x00,0x55,0x00,0x00,0x00,0xAA}, // T12
};
```

(b) 拓扑事项数组

图5　拓扑事项整理

图5中0xAA代表产生特征信号的开关、0x55代表检测到特征信号的开关、0x00代表没有检测到特征信号的开关。例如，变量topo_arr[][]中第6行的数据的含义是在T6时间段6#量测开关产生了特征电流信号，02#量测开关检测到了特征电流信号，而其他开关都没有检测到。图5（a）中A列的“Y”为计算标志，下文会说明它的用途。

3. 分析拓扑关系

利用图5中的数据特点可以用计算机语言分析出各个量测开关之间的连接关系，即本区域内终端设备的拓扑。

图5中的数据具备以下特点：

1）数据表为正方形，有几个设备就有几行（列）数据。按制造拓扑事项的过程可知图5a中每一行有且仅有一个0xAA。

2）如果该行没有0x55，则与0xAA共处一列的量测开关位于最靠近变压器的一层。第1到第4行符合这个条件，可判断1#到4#量测开关位于最靠近变压器的一层。

3）如果该行只有一个0x55，则与0x55共处一列的量测开关是与该行0xAA共处一列的量测开关的相邻上级。第5～第8行符合这个条件，以第5行为例，01#号量测开关是05#号量测开关的相邻上级。

4）如果该行有多个0x55，则与0x55共处一列的量测开关是与该行0xAA共处一列的量测开关的上级。以第12行为例，04#号和08#号量测开关位于12#号量测开关的上级，04#、08#、12#号量测开关之间的层级关系还结合第8行的信息分析得出：第八行可分析出因04#号是08#号量测开关的相邻上级，因而得出08#号是12#号量测开关的相邻上级。

利用上述特性设计出分析量测开关间拓扑关系的流程图，如图6所示。

算法采取了处理完一行再将该行0xAA一列的0x55变成0x88、0x88变成0x33的技巧来应对上述第4）种情况，使一些行里的数据转化成第2）或第3）种情况。当一行在计算中演化成第2）种情况时（行中没有0x55）认为该行被处理完，然后处理该行产生特征信号量测开关的那列数据，运算过程很像在层层剥洋葱。

结束语

本文系统地论述在推出基于特征电流的低压线路拓扑识别方法工程实践方案时用到的主要原理与实现方法，对方案的关键点、重点和难点问题进行了细致说明。其中利用拓扑事项记录分析线路拓扑的方法受到消除类手机游戏启发，分析角度独特，处置逻辑清晰，提供的C语言算法短小简单、与硬件无关、资源要求少及执行效率高。以上方案、方法经过笔者所处研发团队的大量测试，暂未发现严重缺陷，希望能对从事此方面工程应用与产品开发的人员具有一定的参考价值，在工程实践中体现出这套拓扑自动识别方案的经济价值。EA

（收稿日期：2024-06-21）

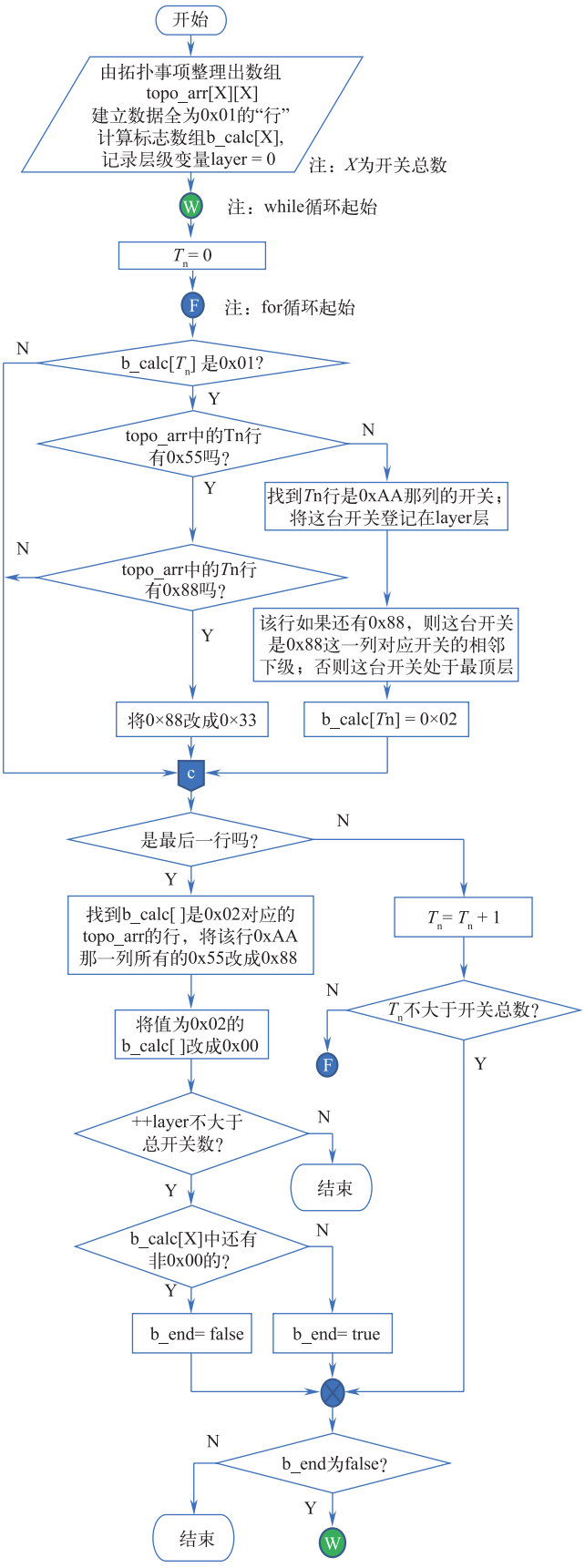


图6　拓扑关系分析流程图