

# 基于网络拓扑的地铁列车控制电路仿真研究

卢银锋 钱雪军

(同济大学电子与信息工程学院, 201804, 上海)

**摘要** [目的]为满足地铁司机和维保人员在地铁控制电路原理学习方面的培训需求,针对地铁控制电路耦合度高、控制逻辑复杂等问题,设计了一套地铁列车控制电路仿真系统。[方法]介绍了地铁列车控制电路仿真系统的总体结构;建立了地铁列车控制电路逻辑控制模型;基于深度优先的通路搜索算法搜索网络拓扑图中的所有有效通路,建立节点、支路、有效通路与元件状态的数学关系,并配合继电器联动控制建立逻辑控制模型;以上海轨道交通 15 号线列车控制电路为例,对所提控制电路仿真系统进行仿真测试。[结果及结论]所提控制电路仿真系统能够满足地铁司机和维保人员对于地铁控制电路原理的学习培训需求,具有一定的实用价值。

**关键词** 地铁; 网络拓扑; 控制电路

**中图分类号** U284.92

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.02.040

## Simulation Research on Metro Train Control Circuit Based on Network Topology

LU Yinfeng, QIAN Xuejun

(College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] To meet the training needs of metro drivers and maintenance personnel in studying metro control circuit principles, a MTCCS (metro train control circuit simulation system) is designed to address the issues of high coupling and complex control logic in metro control circuits. [Method] The overall structure of the MTCCS is introduced, and a logical control model of metro train control circuit is established. The depth-first path search algorithm is used to search for all valid paths in the network topology diagram, establishing the mathematical relationship between nodes, branches, valid paths and component states, and cooperating with relay linkage control to establish the logical control model. Taking the control circuit of Shanghai Rail Transit Line 15 as example, simulation testing is conducted on proposed control circuit simulation system. [Result & Conclusion] The proposed control circuit simulation system can meet the learning and training needs of metro drivers and maintenance personnel in understanding the principles of metro control circuits, posing

practical value.

**Key words** metro; network topology; control circuit

在地铁项目的研发、生产及后期维护的全生命周期中,仿真技术是一种重要的研究方法。目前,计算机仿真技术在变电站二次电路仿真培训系统<sup>[1]</sup>、计算机联锁控制继电逻辑电路<sup>[2-3]</sup>、列车电路图虚拟仿真运行维护模拟<sup>[4]</sup>等领域已有较好的应用。采用计算机仿真技术对地铁列车的控制电路进行仿真研究,能够达到在研发阶段优化电路结构、降低设计与验证成本的目的。此外,计算机仿真技术还能在培训阶段采用形象化的方式动态演示控制电路的运行逻辑。

为解决地铁列车控制电路耦合程度高、控制逻辑复杂的问题,本文基于计算机仿真技术,使用 C++ 程序设计开发出一种基于网络拓扑的地铁列车控制电路仿真系统,结合司机控制台等输入装置的输入信号,实时计算出元件的物理状态及电状态,实现地铁列车控制电路的动态仿真。以上海轨道交通 15 号线列车的控制电路为例,对所提地铁列车控制电路仿真系统进行仿真验证。本文研究可为列车司机及维保人员的培训提供良好的实验学习平台。

## 1 地铁列车控制电路仿真系统总体结构

地铁列车控制电路包括列车唤醒电路、升弓电路、紧急制动电路、门回路电路等,不但电路数量较大,而且采用多图纸分散绘制。地铁列车控制电路仿真系统将控制电路原理图作为仿真对象。首先,采用所研制的输入软件将控制电路原理图输入计算机,根据连接关系自动将控制电路原理图转化为网络拓扑图;在此基础上,通过基于深度优先的通路搜索算法搜索出从电源到地的全部有效通路,建立地铁控制电路逻辑控制模型;最后,结合司机室控制台及各电气柜等输入设备对逻辑控制模型进行仿真,以获得电路中各元件的状态,同时进行动

态显示,从而实现地铁列车控制电路的动态仿真。地铁列车控制电路仿真系统总体结构示意图如图1所示。

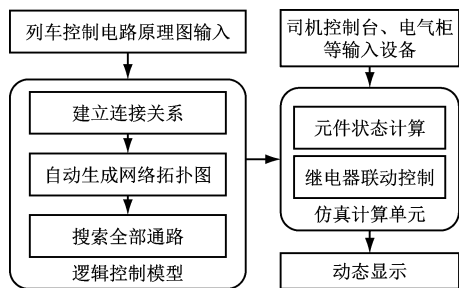


图1 地铁列车控制电路仿真系统总体结构示意图

Fig. 1 Overall structural diagram of metro train control circuit simulation system

## 2 建立地铁列车控制电路逻辑控制模型

### 2.1 建立网络拓扑图

地铁列车控制电路为典型的复杂耦合网络,将电路图转化为网络拓扑进行仿真分析是行之有效的处理方法。将电路图抽象为支路与节点的集合,节点表示连接多条支路的连接点,支路表示电流的流通过程。将控制电路原理图中3条及3条以上导线的连接点称为节点,由 $n$ 个节点构成的节点集合 $D$ 记作:

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\} \quad (1)$$

两个节点之间由元件与导线串联形成的电路称为支路,由 $m$ 条支路构成的支路集合 $B$ 记作:

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\} \quad (2)$$

将包含 $k$ 个元件的控制电路输入计算机中,记录构成支路的元件集合以生成支路。为了描述支路与元件之间的关联情况,引入支路与元件的关联矩阵 $R$ 。 $R$ 的每一行对应一条支路,每一列对应一个元件。根据网络拓扑理论,可以使用节点与支路的关联矩阵 $A$ 来对网络结构进行建模和描述。 $A$ 的每一行代表一个节点,每一列代表一条支路。将节点和支路之间的连接关系映射到矩阵元素上,用以描述节点与支路之间的关联。需要注意的是,由于部分支路具有方向性,还需要考虑电流是否可以从节点流向支路。 $R$ 和 $A$ 的定义如下:

$$R = (r_{ij})_{m \times k} \quad (3)$$

$$A = (a_{ij})_{n \times m} \quad (4)$$

式中:

$r_{ij}$ ——关联矩阵 $R$ 第 $i$ 行第 $j$ 列的元素,  $r_{ij} = 1$

表示第 $i$ 条支路包含元件 $j$ ,  $r_{ij} = 0$ 表示第 $i$ 条支路不包含元件 $j$ ;

$a_{ij}$ ——第 $i$ 行第 $j$ 列关联矩阵 $A$ 的元素,  $a_{ij} = 1$ 表示节点 $i$ 与支路 $j$ 关联且节点 $i$ 可流向支路 $j$ ,  $a_{ij} = -1$ 表示节点 $i$ 与支路 $j$ 关联且节点 $i$ 不可流向支路 $j$ ,  $a_{ij} = 0$ 表示节点 $i$ 与支路 $j$ 无关联。

通过建立这些关联矩阵,能够清晰地描述地铁列车控制电路的网络拓扑结构。将地铁列车控制电路图纸输入计算机并自动进行网络拓扑化,以便后续计算机进行搜索通路 with 逻辑计算的步骤。

### 2.2 搜索有效通路

在地铁列车控制电路生成的网络拓扑图 $G$ 中,根据支路的方向性,假如从节点 $v_i$ 出发能到达节点 $v_j$ ,则称 $v_i$ 到 $v_j$ 之间存在通路。有效通路是指根据节点与支路的关联关系,使用基于深度优先的通路搜索算法,从电源节点出发直至到达地节点的有序支路集合。考虑到搜索出的通路只有当电源节点为起始节点和地节点为终止节点的条件才能工作,所以本文重点研究从电源节点到地节点之间的有效通路。

鉴于控制电路的复杂性,本文使用基于深度优先的通路搜索算法搜索全部有效通路,将包含 $l$ 条有效通路的通路集合 $V$ 记为:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_l\} \quad (5)$$

有效通路的支路集合构成了电流的流通过程,因此为描述有效通路中流通过程与支路之间的关系,引入通路与支路的关联矩阵 $Z$ :

$$Z = (z_{ij})_{l \times m} \quad (6)$$

式中:

$z_{ij}$ ——第 $i$ 行第 $j$ 列关联矩阵 $Z$ 的元素,  $z_{ij} = 1$ 表示第 $i$ 条通路包含支路 $j$ ,  $z_{ij} = 0$ 表示第 $i$ 条通路不包含支路 $j$ 。

### 2.3 计算元件状态

元件的物理状态是指元件的通断状态,元件导通为1,元件断开为0,定义元件的物理状态矩阵 $S_p$ 为:

$$S_p = [s_{p1} \quad s_{p2} \quad \dots \quad s_{pk}]^T \quad (7)$$

支路的物理状态表示该支路的导通情况,当支路中全部元件的物理状态为1时,支路导通,可获得支路的物理状态矩阵 $C_p = [c_{p1} \quad c_{p2} \quad \dots \quad c_{pm}]^T$ 。 $c_{pi}$ 可以表示为:

$$c_{pi} = \prod_{j=1}^k (\bar{r}_{ij} + s_{pj}) \quad (8)$$

式中:

$\bar{r}_{ij}$ ——对  $r_{ij}$  进行逻辑非运算。

通路的物理状态表示组成通路的所有支路的导通情况,当所有支路中的物理状态为 1,则通路的物理状态也为 1,可得到通路的物理状态矩阵  $\mathbf{Y}_p = [y_{p1} \ y_{p2} \ \cdots \ y_{pi}]^T$ 。 $y_{pi}$  可以表示为:

$$y_{pi} = \prod_{j=1}^m (\bar{z}_{ij} + c_{pj}) \quad (9)$$

式中:

$\bar{z}_{ij}$ ——对  $z_{ij}$  进行逻辑非运算。

通路的电状态表示组成通路的物理状态为 1,且在电源节点与地节点之间施加了有效电压,因此在电源正常工作情况下,通路的电状态矩阵  $\mathbf{Y}_E$  等于通路物理状态  $\mathbf{Y}_p$ 。当某一通路的电状态为 1 时,则构成通路的所有支路的电状态为 1。考虑到一条支路可能存在于多条通路中,所以只要其中一条通路的电状态为 1,则该支路得电。由此可以计算出所有支路的电状态  $\mathbf{C}_E = [c_{E1} \ c_{E2} \ \cdots \ c_{Em}]^T$ 。 $c_{Ej}$  可以表示为:

$$c_{Ej} = \sum_{i=1}^l z_{ij} y_{Ei} \quad (10)$$

元件的电状态指是否有电流流过该元件,当有电流流过时为 1,反之为 0。当支路电状态为 1,则构成该支路的全部元件得电,由此可以计算出元件的电状态矩阵  $\mathbf{S}_E = [s_{E1} \ s_{E2} \ \cdots \ s_{Ek}]^T$ 。 $s_{Ej}$  可以表示为:

$$s_{Ej} = \sum_{i=1}^m r_{ij} c_{Ei} \quad (11)$$

### 3 仿真计算

#### 3.1 搜索有效通路

采用基于深度优先的通路搜索算法搜索网络拓扑中全部有效通路,设计递归函数程序以实现该算法。基于深度优先的通路搜索算法流程图如图 2 所示。

#### 3.2 继电器联动控制

继电器与触点通过机械或电磁等物理关系耦合,但这两者往往分散在不同图纸上,这也是造成继电器与触点耦合程度高的原因之一。在绘制图纸阶段,由特定命名规则建立起继电器与触点的物理连接关系。为实现继电器联动控制设计事件管理单元。继电器联动控制示意图如图 3 所示。

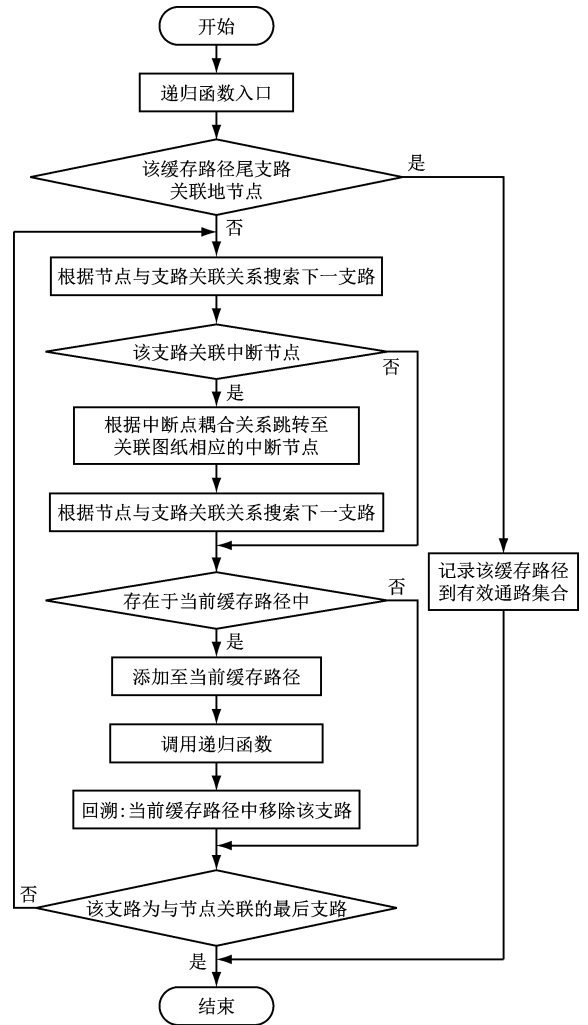
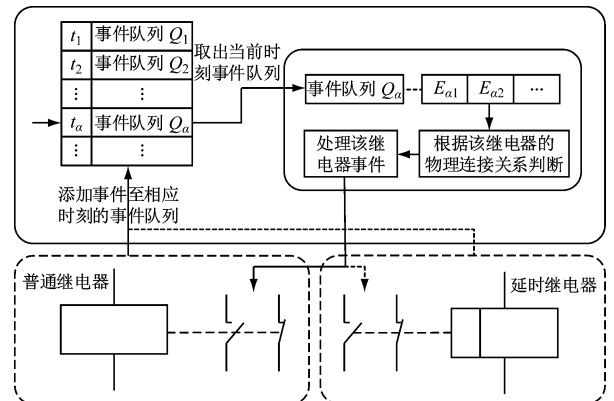


图 2 基于深度优先的通路搜索算法流程图

Fig. 2 Flow chart of depth-first path search algorithm



注:  $t_\alpha$  为仿真时刻;  $Q_\alpha$  为时刻  $t_\alpha$  对应的事件队列;  $E_{\alpha\alpha}$  为事件队列  $Q_\alpha$  中的事件。

图 3 继电器联动控制示意图

Fig. 3 Diagram of relay linkage control

继电器的得电过程和失电过程分别定义为继电器得电事件和继电器失电事件。当继电器的电

状态发生变化时,会触发相应的继电器事件,并将其添加到对应时刻的事件队列中。当普通继电器电状态发生变化时,将触发的继电器事件添加至下一时刻事件队列中;当延时继电器电状态发生变化时,将触发的继电器事件添加到相应时刻的事件队列里。仿真按照固定时间步长推进,依次取当前时刻事件队列中的事件。响应继电器事件时,根据继电器与触点元件间建立的物理连接关系,更新相应触点元件的物理状态。

结合上述地铁列车控制电路逻辑控制模型,通过仿真计算可以实时更新元件的电状态。

## 4 仿真验证

以上海轨道交通 15 号线列车控制电路为例,对所提地铁列车控制电路仿真系统进行仿真验证。仿真系统选取控制电路的主要电路(包括列车唤醒电路、升弓电路、紧急制动电路、门回路电路及辅助电路)进行输入与仿真,根据连接关系自动生成网络拓扑图,同时通过深度优先算法搜索出全部有效通路,建立逻辑控制模型,配合继电器联动控制方法,由元件状态计算式(7)一式(11)实时计算得出元件的电状态,并进行动态显示,实现地铁列车控制电路的多图纸联合仿真计算。本文以紧急制动回路为例进行验证说明。

紧急制动回路主要采用得电缓解、失电制动的控制方式。在地铁列车控制电路仿真软件中将元件得电与失电的两种状态赋予不同颜色,根据元件的颜色变化可以形象地观测出元件的得失电情况。

计算机开始仿真时,列车 110 V 直流电源装置得电,列车钥匙打开,A1 车厢司机室占有继电器 COR1—COR8 得电。司机控制台上的驾驶控制手柄放置非制动位,制动指令继电器 NBDR1 失电。由仿真计算结果可知,紧急制动电路中形成了导通回路,紧急制动接触器 EK1、EK2 得电,并形成自锁,列车处于非紧急制动状态。当按下紧急制动按钮 EMPB1 时,紧急制动回路断开,紧急制动接触器 EK1、EK2 失电,列车处于紧急制动状态,全部元件

失电。

## 5 结语

本文将地铁列车控制电路作为仿真对象,介绍了地铁列车控制电路仿真系统的总体结构与建模过程,基于深度优先搜索算法搜索有效通路,根据所建立的数学关系实时更新元件状态,并配合继电器联动控制方法实现地铁控制电路的多图纸联合仿真。以上海轨道交通 15 号线列车控制电路为例,验证了所提控制电路仿真系统的正确性。该仿真系统能够满足地铁司机和维保人员对于地铁控制电路原理的学习培训需求,具有一定的实用价值。

## 参考文献

- [1] WU Z, ZHENG W, WANG M, et al. A novel substation secondary circuit simulation training system[C]//2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITO-EC). Chongqing: IEEE, 2022: 737.
- [2] 刘羽. 基于继电逻辑的信号系统中电路图软件设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.  
LIU Yu. Circuit diagram software design in signal system based on relay logic[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [3] 黄祥. 基于继电电路的计算机联锁控制逻辑研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.  
HUANG Xiang. Research on computer interlocking control logic based on relay circuit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [4] 许镭炜. 电路图虚拟仿真在城市轨道交通列车维护中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(增刊2): 81.  
XU Liwei. Application of circuit diagram virtual simulation in urban rail transit vehicle maintenance[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(S2): 81.

· 收稿日期:2022-12-27 修回日期:2023-05-12 出版日期:2024-02-10  
Received:2022-12-27 Revised:2023-05-12 Published:2024-02-10  
· 第一作者:卢银锋,硕士研究生,lyf\_6982@163.com  
通信作者:钱雪军,副教授,qian1966@163.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821