

电气化铁道牵引网的统一链式电路模型

吴命利

(北京交通大学电气工程学院, 北京市海淀区 100044)

Uniform Chain Circuit Model for Traction Networks of Electric Railways

WU Mingli

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Haidian District, Beijing 100044, China)

ABSTRACT: A uniform chain circuit model was built for various electric power feeding systems of AC electrified railways. All electrical elements in the traction network, including the short circuit and the conductor break fault, were described conformably by a serial element or a shunt element. According to the chain circuit structure, the mathematical model of the whole network can be assembled conveniently using the nodal admittance matrices of elements. Considering the relatively large leakage conductance of the return circuit to the ground, the multiphase equivalent π -circuits were adopted for the uniform multi-conductor sections of the traction network. The characteristic admittance matrix, which can be calculated by the phase-modal transformation method, was introduced for the truncation treatment at terminals of the feeding system. The proposed mathematical model provides a base for calculating the power flow, i.e. the voltage and current distribution of the traction network under certain load conditions. This model can also be used in researches such as the steady state short circuit calculation and the harmonic resonance analysis.

KEY WORDS: electric railway; traction network; chain circuit; mathematical model

摘要: 针对交流电气化铁道不同供电方式牵引网, 建立统一复合链式电路模型。牵引网中的各种电气元件, 包括短路和断线故障, 都描述为纵向串联元件或横向并联元件。按照链式电路结构, 可方便地利用各电气元件的节点导纳矩阵构建出整个牵引网的数学模型。考虑到回流网络存在较大对地漏泄电导, 对牵引网均匀多导体传输线段采用多相等值 π 型电

路。在牵引网端部截断处理上, 引入了半无限长多导体传输线的特征导纳矩阵模型, 利用相-模变换理论给出相关计算公式。牵引网统一数学模型的建立为进一步研究潮流计算, 即一定负荷条件下的电压电流分布奠定了基础, 同时该模型也可用于牵引网稳态短路电流计算和谐波谐振等研究。

关键词: 电气化铁道; 牵引网; 链式电路; 数学模型

0 引言

电气化铁道牵引网不同于电力系统的输电线路, 具有特殊的拓扑结构。人们为三相电力系统开发的大量通用稳态或暂态计算程序通常不能直接应用于牵引网。在长期的工程实践当中, 电气化铁道研究者发展了一些简化计算方法, 以解决工程实际问题, 如, 基于等效阻抗的电压损失计算^[1]、广义对称分量法^[2]、自耦变压器(autotransformer, AT)供电方式牵引网的互阻抗消去法^[3]。近些年, 随着人们对电气化铁道供电安全要求的提高, 在设计和运行中需要更加详细地掌握牵引网的电气性能, 传统的供电计算手段已不能满足工程需要, 借助计算机的仿真方法引起越来越多工程技术人员的关注。

在开发电气化铁道自耦变压器供电技术过程中, 人们首次把多导体传输线模型引入到牵引网建模中, 并开发了相应的计算机程序, 这些建模和计算方法被国际电报电话咨询委员会的防干扰导则采用^[4-5]。中国 1980 年后就掌握了这一方法, 并在稍后的研究中得到了很好的结果^[6-7]。本文在已有研究基础上, 对直接(trolley-rail, T-R)供电方式、带回流线(也称负馈线)的直接(trolley-rail with negative feeder, T-R+NF)供电方式、吸流变压器(booster transformer, BT)供电方式、AT 供电方式和同轴电缆(coaxial cable, CC)供电方式等不同拓扑结构的牵引网, 建立统一的复合链式电路模型, 给出节点导纳矩阵的构建方法, 为利用计算机进行牵引

基金项目: 国家自然科学基金项目(60776830); 国家电网公司科技项目(SGKJ[2007]102); 中国电机工程学会电力青年科技创新项目(2007年)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (60776830); Scientific and Technological Project of State Grid Corporation of China (SGKJ[2007]102); Power Youth Innovation Project of Chinese Society for Electrical Engineering (2007).

网电气计算奠定了基础。

1 牵引网拓扑结构

1.1 供电方式

交流电气化铁道牵引网采用的 5 种供电方式如图 1 所示，图中，PF 表示正馈线(positive feeder)，

PW 表示保护线(protective wire)，CPW 表示保护线连接线(connector of PW)。详细分析一个供电臂牵引网电气性能时，可把电力系统和牵引变电所在馈线端口用戴维南等值电路代替，相应的系统阻抗和变压器阻抗折算方法可根据变压器的接线方式来确定^[8-9]。

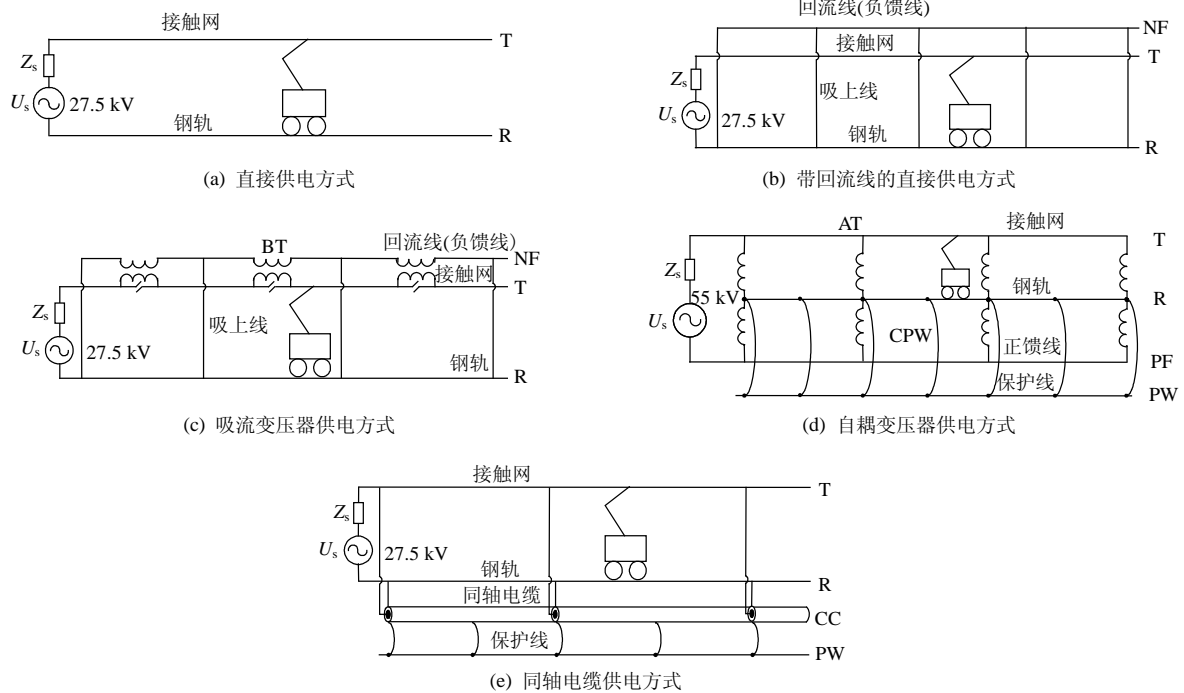


图 1 牵引网供电方式

Fig. 1 Feeding systems of traction network

1.2 复线

对于复线铁路，中国一般采用变电所两侧异相、同侧上下行同相的供电方式，并且在供电臂末端分区所处上下行并联，以改善网压，如图 2(a)所示。在中国哈尔滨—大连电气化铁路上，则采用了全并联型带回流线的直接供电方式。即，除末端外，在供电臂中间也适当增设并联点，一般设在沿线车站上，如图 2(b)所示。对于 AT 供电方式，中间如

增设并联点时，一般只选在自耦变压器处，这样上下行还可共用自耦变压器。

2 链式电路模型

不论采用何种供电方式，不论是单线还是复线，从整体上看，牵引网的骨架都是平行多导体传输线，从拓扑结构上构成一个复合链式电路。这个链式电路由纵向串联元件和横向并联元件这 2 类元件组成。则牵引网总可以等效成图 3 所示的网络形式。设平行导体数为 m ，则图中各阻抗矩阵和导纳矩阵均为 $m \times m$ 的方阵，而各切面的注入电流源向量 I_k (用以模拟列车) 为 m 维。

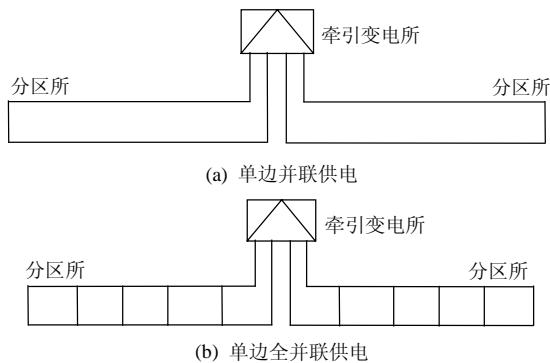


图 2 复线铁路供电方式

Fig. 2 Power supply for double-track railway

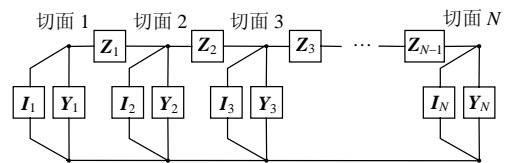


图 3 复合链式电路

Fig. 3 Composite chain circuit

对图 3 链式电路，可列写出如下形式的节点导纳方程：

$$\begin{bmatrix} Y_1 + Z_1^{-1} & -Z_1^{-1} & & & & \\ -Z_1^{-1} & Z_1^{-1} + Y_2 + Z_2^{-1} & -Z_2^{-1} & & & \\ & -Z_2^{-1} & Z_2^{-1} + Y_3 + Z_3^{-1} & -Z_3^{-1} & & \\ & & & \ddots & \ddots & \\ & & & & Z_{N-2}^{-1} + Y_{N-1} + Z_{N-1}^{-1} & -Z_{N-1}^{-1} \\ & & & & -Z_{N-1}^{-1} & Z_{N-1}^{-1} + Y_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_{N-1} \\ U_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_{N-1} \\ I_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

链式电路拓扑结构决定了整个网络的节点导纳矩阵为三对角带状矩阵，其中的每个子矩阵阶数均为 m 。式(1)可采用 LU 分解法递推求解，整个计算过程都只用到 $m \times m$ 矩阵的运算^[5-6]。

在形成节点导纳矩阵时，可按照串联元件的顺序逐个形成 $2m \times 2m$ 的节点导纳矩阵，然后依序错位叠加，并把连接于 2 串联元件之间切面处各并联元件的 $m \times m$ 节点导纳矩阵叠加在重合部分，如图 4 所示。利用计算机实现这一过程十分方便。

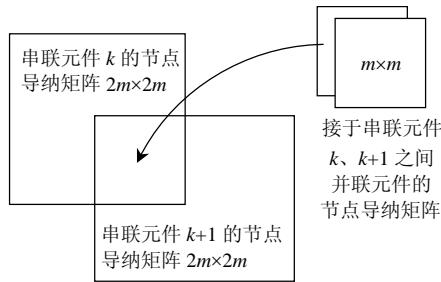


图 4 节点导纳矩阵的形成
Fig. 4 Formation of the node admittance matrix

3 网络元件

3.1 串联元件

3.1.1 平行多导体均匀传输线段

构成牵引网骨架的平行多导体传输线被横向并联元件“切割”成了不同的均匀段。考虑到钢轨对地漏泄电导较大，单线铁路通常在 $0.002 \sim 2$ S/km 范围，远较一般电力架空输电线路的横向导纳大，为获得较高的计算精度，以前采用常规 π 型电路 (nominal π -circuit) 时，在高次谐波频率下不得不把牵引网划分得很短 (≤ 1 km)，在牵引网的自然分段基础上还要人为切割。本文采用精确的等值 π 型电路 (equivalent π -circuit)，从而可按横向并联元件的自然切割来划分牵引网的均匀段，在没有横向并联元件的地方，不必再切割牵引网，在保证计算精度的前提下能有效减少计算节点。

图 5 以 $m=4$ 为例给出了一段平行多导体传输线的等值 π 型电路，已知牵引网的单位长度串联阻抗参数矩阵为 Z 、并联导纳参数矩阵为 Y 和线段长度

为 l 时，有

$$\begin{cases} Z_L = \sinh(\sqrt{ZY}l)(ZY)^{-\frac{1}{2}}Z \\ Y_L/2 = Y(ZY)^{-\frac{1}{2}}\tanh(\sqrt{ZY}l/2) \end{cases} \quad (2)$$

矩阵函数可以利用相-模变换算法计算^[10-11]，也可以采用矩阵级数算法。矩阵级数算法的公式为

$$\begin{cases} Z_L = [\sum_{n=0}^{\infty} \frac{l^{2n+1}}{(2n+1)!} (ZY)^n] Z \\ Y_L/2 = Z_L^{-1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{l^{2n}}{(2n)!} (ZY)^n \end{cases} \quad (3)$$

由于线段长度并不很长，矩阵级数收敛很快，此算法的优点是编程简单、计算稳定。

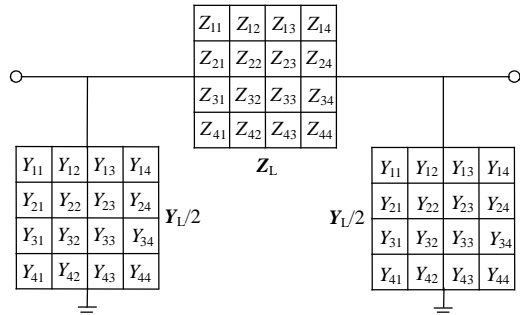


图 5 多导体传输线等值 π 型电路
Fig. 5 Equivalent π -circuit for multi-conductor transmission line

牵引网的自然平行导体数较多，一般需要对导线进行等值合并，通常：1) 属同一支接触网的接触线和承力索等值成 1 根导线(T 线)；2) 如果牵引网有加强线，则加强线也要合并到 T 线中去；3) 裂相的回流线或正馈线合并成 1 根等值导线；4) 对上下行全并联供电方式，当上下行回流线或保护线并联紧密时，可合并成 1 根导线；5) 同一轨道的 2 根钢轨可合并成 1 根导线(R 线)，但若分析牵引网对铁路信号轨道电路的干扰时，则不能合并。

关于牵引网的单位长度串联阻抗参数矩阵 Z 、并联导纳参数矩阵 Y 的计算以及导线合并过程中的处理方法，可参考文献[10]。实际上，对电气化铁道来说，钢轨阻抗以及高架桥和隧道等特殊环境对牵引网电气参数的影响是目前尚需进一步深入研

究的课题^[12-13]。

3.1.2 吸流变压器

吸流变压器实际上是一台 1:1 的单相变压器，如图 6 所示， y_1 、 y_M 分别为漏导纳和励磁导纳，其节点导纳方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \\ \dot{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 & -y_1 & -y_1 & y_1 \\ -y_1 & y_1 + y_M & y_1 & -y_1 - y_M \\ -y_1 & y_1 & y_1 & -y_1 \\ y_1 & -y_1 - y_M & -y_1 & y_1 + y_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \\ \dot{U}_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

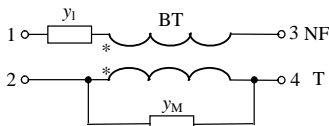


图 6 吸流变压器

Fig. 6 Booster transformer

在形成牵引网模型时并不直接使用这个 4×4 的矩阵，而是根据 T 线和 NF 线在多导体传输线中的排序位置，把这个矩阵填写到 $2m \times 2m$ 串联元件导纳矩阵的相应位置上。在吸流变压器处 2 个切面之间的其他等值导线用一个很小的集中电阻来模拟。

3.1.3 串联阻抗元件

串联阻抗元件用以模拟各种串联在牵引网中的无源 RLC 元件，常见的有：1) 串联电容补偿装置；2) 抗雷圈。

图 7 所示的串联阻抗元件的支路阻抗矩阵为

$$\mathbf{Z}_{\text{serial}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

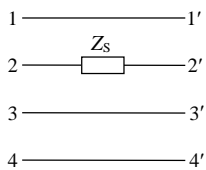


图 7 串联阻抗元件

Fig. 7 Serial impedance element

在形成牵引网模型时使用的是如下 $2m \times 2m$ 的节点导纳矩阵：

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{\text{serial}} & -\mathbf{Y}_{\text{serial}} \\ -\mathbf{Y}_{\text{serial}} & \mathbf{Y}_{\text{serial}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 $\mathbf{Y}_{\text{serial}}$ 为支路导纳矩阵：

$$\mathbf{Y}_{\text{serial}} = \begin{bmatrix} \Delta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/Z_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 Δ 为一个很大的实数，如 10^8 。

3.1.4 断线故障

断线故障实际上是一种特殊的串联阻抗元件，如图 8 所示，其支路导纳矩阵为

$$\mathbf{Y}_{\text{serial}} = \begin{bmatrix} \Delta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 δ 为一个很小的实数，如 10^{-8} 。

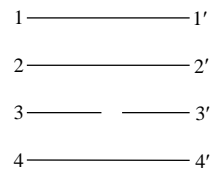


图 8 断线故障

Fig. 8 Wire break fault

3.2 并联元件

3.2.1 横向连接

横向连接用于在一个切面上连接不同的等值导线，为金属性连接，可描述：1) BT 供电方式和带回流线的直接供电方式的吸上线，AT 供电方式的 CPW 线；2) 牵引网采用综合接地时回流网络的等电位横向连接线；3) 复线首末端的并联连接线，全并联供电方式的上下行并联连接线；4) 2 等值导线之间的金属性短路；5) 导线对地之间的金属性短路。

以图 9 所示的 2 种情形为例，节点导纳矩阵分别为

$$\mathbf{Y}_{\text{shunt}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta & 0 & -\Delta \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\Delta & 0 & \Delta \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{Y}_{\text{shunt}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

同一切面上横连的导线数再多时，亦不难写出。

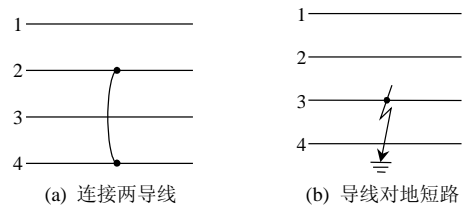


图 9 横向连接

Fig. 9 Transversal connection

3.2.2 自耦变压器

自耦变压器的电路模型如图 10 所示， y_g 为折

算至中点的漏导纳, y_M 为励磁导纳, 其节点导纳矩阵为

$$Y_{shunt} = \frac{y_g}{4} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} + y_M \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

形成牵引网模型时, 需首先根据 T、R 和 PF 线在多导体传输线中的排序位置, 把这个矩阵填写到 $m \times m$ 并联元件节点导纳矩阵中的相应位置上。

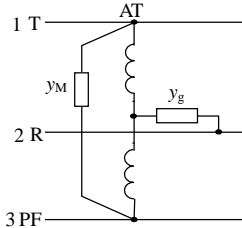


图 10 自耦变压器
Fig. 10 Autotransformer

3.2.3 并联阻抗元件

可用并联阻抗元件描述的有: 1) 安装于变电所、分区所及牵引网上的并联补偿装置和无源滤波装置; 2) 牵引网上的 RC 或 RLC 过电压吸收装置; 3) 集中接地极, 包括可能与回流线、保护线、贯通地线有直接电气连接的支柱基础、桥墩等线旁结构物的接地电阻; 4) 导线高阻接地故障; 5) 牵引网端部的截断处理。

以图 11 所示的 2 种情形为例, 节点导纳矩阵分别为

$$Y_{shunt} = \frac{1}{Z_p} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$Y_{shunt} = \frac{1}{R_d} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

可看出, 横向连接实际上也可归为并联阻抗元件, 用计算机处理时, 并无本质不同。

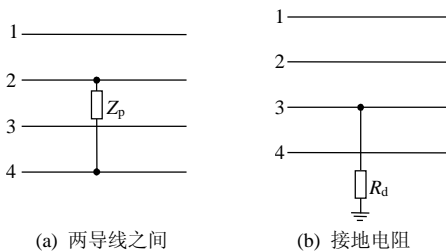


图 11 并联阻抗元件
Fig. 11 Shunt impedance element

3.2.4 电力机车

电力机车(或动车组)可视作接于接触网和钢轨之间的并联元件, 只是其所处“切面”随列车运行而沿线路移动。工程上通常采用的供电计算中, 一般把电力机车当作电流源负荷, 电流的大小及其在线路中所处位置由牵引计算给出。电流源模型不能计及网压对电流的影响, 具有较大的局限性, 更合理的模型是把电力机车按功率源建模, 由牵引计算直接给出电力机车每一仿真时步的有功功率和无功功率。

对于交直整流型电力机车, 它同时还是一个谐波源, 进行谐波分析时, 需要建立电力机车的谐波模型。目前比较通用的建模方法是根据电力机车的主电路和基波工况解算其网侧电流波形, 从而得到各次谐波值^[14-16]。

4 牵引网端部的截断处理

由于电气化铁道牵引网是分区段供电的, 相邻的 2 个供电臂接触网之间存在一段无电中性区, 在不少牵引供电问题的分析计算中, 往往只需对 1 个供电臂的牵引网详细建模, 然而, 作为牵引回流网主要导体的钢轨, 沿线路实际上是不间断的, 这就涉及到在牵引网两端如何截断处理的问题。

以往的建模方法是把上下行线路的钢轨等值成 1 根导体, 按单相半无限长均匀传输线, 在牵引网端部并联钢轨等值导体的特征阻抗。对带回流线的直接供电方式和 AT 供电方式, 在变电所出口处, 左右两侧供电臂的回流线和保护线是电气连通的; 在分区所处, 按设计规程, 这些导线应串联绝缘子以分隔由不同变电所供电的牵引网区段, 但在实际线路上, 也存在回流线和保护线不中断的情况。此外, 当牵引网中敷设有贯通地线时, 不管是埋地还是架空, 沿线路通常都是不中断的, 中间不做绝缘隔断处理。在含有连通的回流线、保护线或贯通地线的情况下, 仅仅在端部并接钢轨特征阻抗, 会导致端部钢轨电位计算结果出现较大偏差。本文引入了新的处理方法, 把牵引网端部的回流网视作向无限远延伸的多导体传输线, 考虑存在于各回流导线之间的电磁耦合, 在端部采用特征阻抗矩阵来模拟。

按并联元件建模方法, 实际需要的是特征导纳矩阵。根据相-模变换理论^[10]得出

$$T_u^{-1} Z_r T_i = \text{diag}(z_{mode,k}), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$T_i^{-1} Y_r T_u = \text{diag}(y_{mode,k}), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

式中 Z_r 、 Y_r 为牵引回流网的参数矩阵, 只涉及不中断的回流导线($n < m$)。最终要用的特征导纳矩阵 Y_c

要满足

$$Y_c U_r = I_r \quad (16)$$

式中： U_r 为端部回流网导线电压向量； I_r 为端部向半无限长回流网注入的电流向量。把式中的相量用模量替换，得到

$$Y_c T_u U_{mode} = T_i I_{mode} \quad (17)$$

进而

$$I_{mode} = (T_i^{-1} Y_c T_u) U_{mode} \quad (18)$$

而各模是解耦的，有

$$I_{mode} = \text{diag}\left(\sqrt{\frac{y_{mode,k}}{z_{mode,k}}}\right) U_{mode}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

比较式(18)、(19)，可推得特征导纳矩阵为

$$Y_c = T_i \text{diag}\left(\sqrt{\frac{y_{mode,k}}{z_{mode,k}}}\right) T_u^{-1}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

研究涉及整条电气化铁道的全局性问题，如电气化铁道对电力系统电能质量的影响，尽管理论上可以采用对各区段牵引网分别详细建模再与电网模型整合从而构成全系统三相节点导纳矩阵，但由于所需信息量过于庞大，这样的建模思路在实际应用中难以实现。目前中国对此类问题的研究往往都没有对牵引网详细建模，而是简化牵引网结构，用简单的单相线性阻抗模拟^[17]。另外一种研究思路是不考虑牵引网，仅需对牵引变电所馈线负荷进行统计建模，而不追溯到线路上运行的电力机车^[18]。

5 程序实现与初步应用

按照本文的建模方法，开发了基于面向对象编程技术和数据库技术的计算机程序 TRANAS，与国外软件及国内早期软件的对比计算证实了其结果的有效性。TRANAS 软件的结构框图如图 12 所示。自 2005 年下半年开始，TRANAS 已被国内有关设

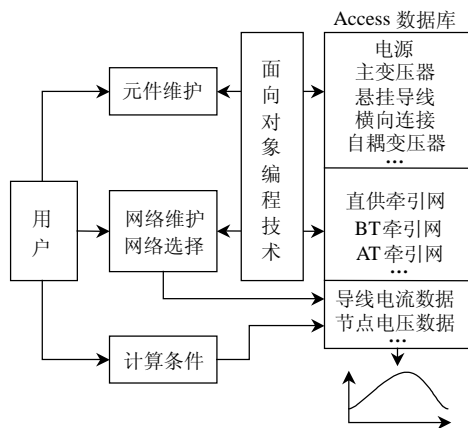


图 12 软件结构

Fig. 12 Software structure

计单位成功用于中国新建武广(武汉—广州)、石太(石家庄—太原)、郑西(郑州—西安)等高速客运专线的工程设计中，在牵引网导线选型、网压校核等方面发挥了作用^[19]。

6 结论

电气化铁道牵引网的特殊拓扑结构决定了其数学建模方法不同于三相输电线路。直接供电方式、带回流线的直接供电方式、BT 供电方式、AT 供电方式和同轴电缆供电方式牵引网，不管是单线还是复线，都具有以多导体传输线为骨架的链式电路结构。通过把牵引网中的各种电气元件，包括短路和断线故障，描述为纵向串联元件或横向并联元件，可方便地构建出整个牵引网的数学模型，形成具有三对角带状的节点导纳矩阵。牵引网统一数学模型的建立为电气性能分析奠定了基础。

参考文献

- [1] 曹建猷. 电气化铁道供电系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983: 70-77.
Cao Jianyou. Power supply systems of electric railways[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1983: 70-77(in Chinese).
- [2] 王风华. 广义对称分量法及其应用[J]. 西南交通大学学报, 1981, 16(4): 1-11.
Wang Fenghua. A generalized method of symmetrical components and its applications[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1981, 16(4): 1-11(in Chinese).
- [3] 高仕斌, 钱清泉. 电气化铁道应用三相变四相变压器的理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 174-177.
Gao Shibin, Qian Qingquan. Analysis on the application to electric railway of three-phase to four-phase transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 174-177(in Chinese).
- [4] Fujie H. Program ATTC-P for analyzing the power characteristics of AT feeder circuit[J]. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute of Japanese National Railways, 1983, 24(2): 87-88.
- [5] CCITT. Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines: Volume IV[R]. Geneva: CCITT, 1989.
- [6] 辛成山, 吴德范. 自耦变压器(AT)供电系统电算程序研究[J]. 铁道机车车辆, 1981, 1(1): 19-29.
Xin Chengshan, Wu Defan. Research on computer program for autotransformer (AT) power supply systems[J]. Railway Rolling Stocks, 1981, 1(1): 19-29(in Chinese).
- [7] 辛成山. 自耦变压器(AT)供电系统的研究: 馈电回路参数选择研究报告[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 1988.
Xin Chengshan. Research on the autotransformer (AT) power feeding system: report on the selection of feeding circuit parameters[R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 1988(in Chinese).
- [8] 吴命利, 范瑜. 星形延边三角形接线平衡变压器的阻抗匹配与数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 160-166.
Wu Mingli, Fan Yu. Impedance matching and mathematical model of

- wye-prolonged delta connected balance transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 160-166(in Chinese).
- [9] 吴命利, 吴利仁. Scott 接线平衡变压器数学模型与阻抗匹配的实验验证[J]. 铁道学报, 2007, 29(2): 39-44.
Wu Mingli, Wu Liren. Experimental verification of mathematical model and impedance matching of the Scott connected balance transformer[J]. Journal of the China Railway Society, 2007, 29(2): 39-44(in Chinese).
- [10] Dommel H W. EMTP theory book[R]. Vancouver, British Columbia: Microtran Power System Analysis Corporation, 1992.
- [11] Arrillaga J, Densm T J, Harker B J. Zero sequence harmonic current generation in transmission lines connected to large convertor plant[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(7): 2357-2363.
- [12] 吴命利, 范瑜, 辛成山. 电气化隧道中的导线-地回路阻抗[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 176-181.
Wu Mingli, Fan Yu, Xin Chengshan. Impedance of conductor-earth circuits in electric railway tunnel[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 176-181(in Chinese).
- [13] 吴命利. 牵引供电系统电气参数与数学模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
Wu Mingli. Research on electrical parameters and mathematical models of traction power supply systems[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006(in Chinese).
- [14] 李曙辉, 张进思. SSI 整流器电力机车动态谐波分析[J]. 西南交通大学学报, 1991, 26(3): 20-27.
Li Shuhui, Zhang Jinsi. Dynamic harmonic analysis of SSI electric locomotive[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1991, 26(3): 20-27(in Chinese).
- [15] 徐春侠, 李庚银, 赵成勇, 等. SSIV 型电力机车谐波分析[J]. 华北电力大学学报, 1998, 25(3): 40-46.
Xu Chunxia, Li Gengyin, Zhao Chengyong, et al. Harmonic analysis of electric locomotive typed SSIV[J]. Journal of North China Electric Power University, 1998, 25(3): 40-46(in Chinese).
- [16] 韩奕, 李建华, 黄石柱, 等. SS4 型电力机车的动态模型及随机谐波电流计算[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(4): 31-36.
Han Yi, Li Jianhua, Huang Shizhu, et al. Harmonic model and computation of probabilistic harmonic currents for type-SS4 locomotive[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(4): 31-36(in Chinese).
- [17] 李庚银, 徐春侠, 王勇, 等. 含牵引负荷的电力系统三相不对称谐波潮流计算[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(17): 26-30.
Li Gengyin, Xu Chunxia, Wang Yong, et al. Calculation of three-phase asymmetrical harmonic power flow in power systems with traction loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(17): 26-30(in Chinese).
- [18] 解绍峰, 李群湛, 赵丽平. 电气化铁道牵引负载谐波分布特征与概率模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 79-83.
Xie Shaofeng, Li Qunzhan, Zhao Liping. Study on harmonic distribution characteristic and probability model of the traction load of electrified railway[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 79-83(in Chinese).
- [19] 吴命利, 黄足平, 辛成山. 降低电气化铁道钢轨电位技术措施的研究[J]. 电气化铁道, 2005(增刊): 30-38.
Wu Mingli, Huang Zuping, Xin Chengshan. Research on suppression countermeasures for rail potential of electric railways[J]. Electric Railway, 2005(Sup.): 30-38(in Chinese).



吴命利

收稿日期: 2009-12-24。

作者简介:

吴命利(1971), 男, 博士, 教授, 研究方向为电气化铁道供电、电能质量和电力系统数字仿真, mlwu@bjtu.edu.cn。

(责任编辑 谷子)