

# 动态测量轨道电路参数的方法研究

苏娟, 姜道勇, 杜普选

(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 提出一种在分路状态下对轨道电路参数动态测量的方法。根据此方法定期检测轨道电路的主要参数, 可在误差允许范围之内判断轨道电路的安全性。

**关键词:** 轨道电路 测量方法 一次参数

我国传统的轨道电路参数测量方法是根据传输线理论假设测试条件, 动用大量的人力、物力和财力到铁路现场进行测量, 这不仅带来经济上的浪费, 同时也浪费了列车行驶的时间资源。目前实际测量方法一般为: 开路、短路受端开路电压法、两次短路三电压法、相位表法、三电压表法等。以上各方法基于四端网模型, 要求列车停止运行, 占用整条轨道, 在实地创造符合测量的条件。本文提出一种列车处于分路状态时, 对轨道电路参数进行动态测量的方法。此方法是在列车运行途中, 通过感应器感应钢轨中的电流信号, 基于钢轨阻抗在某一频率下为一个不变量, 根据传输线理论的二次参数和一次参数的关系推导轨道电路的漏导和分布电容。

## 1 传输线理论

### 1.1 电压 $U$ 、电流 $I$ 、入射波及反射波系数 $A$

在分布参数电路中, 电压、电流是空间和时间的函数, 它按空间分布、随时间而变化。若取均匀传输线的一小段微分元  $\Delta x$ , 则对于这一小段微分元电路, 仍可用基氏两定律分析。如图 1 为均匀传输线的微分电路模型, 取均匀传输线的一小段  $\Delta x$ , 建立如下的 KCL 和 KVL 方程:

$$\begin{cases} -i + (i + \Delta i) + (u + \Delta u)G_0\Delta x + C_0\Delta x \partial(u + \Delta u) / \partial t = 0 \\ -u + iR_0\Delta x + L_0\Delta x \partial i / \partial t + (u + \Delta u) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

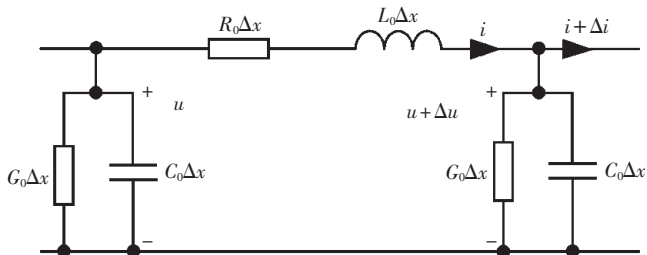


图 1 均匀传输线的微分电路

根据式(1), 分析整理可得:

$$\dot{U}(x) = \dot{A}_1 e^{-\gamma x} + \dot{A}_2 e^{\gamma x}, \quad \dot{I}(x) = \dot{A}_1 e^{-\gamma x} / Z_c - \dot{A}_2 e^{\gamma x} / Z_c \quad (2)$$

式(2)中  $\gamma$  为传播常数,  $\dot{A}_1$ 、 $\dot{A}_2$  为入射波、反射波系

数,  $Z_c$  为特性阻抗。

假设轨道电路发送端为始端, 且已知始端电压、电流向量分别为  $\dot{U}_1$  及  $\dot{I}_1$ , 并令传输线至始端的距离为  $x$ , 根据式(2)整理可得:

$$\dot{A}_1 = (\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_c) / 2, \quad \dot{A}_2 = (\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_c) / 2 \quad (3)$$

将反射波和入射波系数相比较:

$$\rho = \left| \frac{\dot{A}_2}{\dot{A}_1} \right| = \left| \frac{\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_c}{\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_c} \right| = \left| \frac{x-1}{x+1} \right| \quad (4)$$

式(4)中  $x = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1 Z_c}$ 。当传输线构成的四端口网络阻抗

$Z_c$  匹配时,  $\rho = 0$ ; 如果网络阻抗  $Z_c$  失配, 则  $0 < \rho < 1$ 。

### 1.2 传播常数 $\gamma$ 、衰减系数 $\alpha$ 及相位移系数 $\beta$

$$\gamma = \sqrt{Z_0 Y_0} = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta \quad (5)$$

$\gamma$  被称为传播常数, 是一个复数量, 它描述单位长度的均匀传输线的电流行波及电压行波的衰减和相位的变化。其实部  $\alpha$  称为衰减系数, 描述单位长度的均匀传输线的电流行波及电压行波幅值的衰减, 单位是 Np/m (奈培/米); 其虚部  $\beta$  称为相位移系数, 描述单位长度的均匀传输线的电流行波及电压行波相位的变化, 单位是 rad/m (弧度/米)。

轨道传输线上波的相速(度)定义为电压、电流入射波(或反射波)等相位面沿传输方向的传播速度, 用  $v_p$  表示。根据相速定义, 等相位面的运动方程为:

$$\omega t + \beta x = \text{常数} \quad (6)$$

将上式两边对  $t$  微分, 并考虑到入射波等相位面的坐标随时间增加而减小, 则可得:

$$v_p = \frac{\mp dx}{dt} = \frac{\omega}{\beta} \quad (7)$$

传输线上电压(或电流)相差  $2\pi$  的两观察点间的距离称为波长, 记为  $\lambda$ , 即有  $\beta\lambda = 2\pi$ 。因此:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{v_p}{f} = \frac{c}{f\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (8)$$

其中  $\mu_r$  为相对磁导率,  $\varepsilon_r$  为传输线材料的相对介电常数(或电介质的相对电容率)。

由式(8)可得:

$$\beta = \frac{2\pi f \sqrt{\mu_r \varepsilon_r}}{c} \quad (9)$$

由式(9)可知,在钢轨传输线上相对介电常数一定时,相移常数  $\beta$  随频率的增大而增大。

## 2 感应线圈接收模型及参数计算

列车行驶过程中,当轨道电路被列车轮轨分路时,轨道电路处于分路状态,其轨道电路模型与调整状态时的模型不一样。由于列车轮轨前方装有感应线圈用来接收轨道电路上的信号,仍可以假设列车行驶的前方满足传输线理论,相当于此段轨道电路处于调整状态,但是轨道电路的负载和传输线长度不断变化,即视入电阻不断变化,如图2。

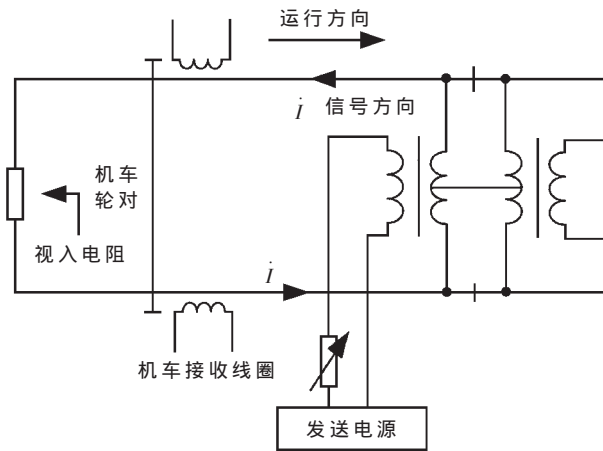


图2 分路状态下轨道电路等效电路图

移频轨道信号在钢轨上传输,感应线圈在钢轨正上方产生感应电动势,此感应电动势包含钢轨的传输参数。假设单根钢轨为一根无限长的传输线,则可以建立感应线圈产生感应电动势的数学模型,如图3所示。

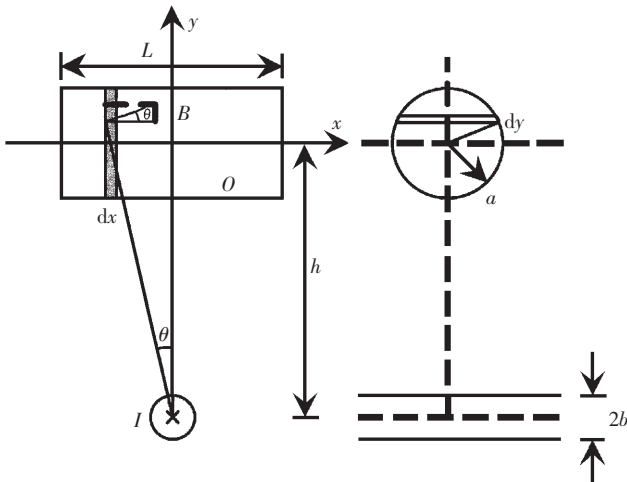


图3 感应线圈数学模型

当钢轨中通过变化的电流  $I$  时,钢轨周围产生变化磁场,变化的磁场在感应线圈中产生感应电动势。离导线为  $r$  处的磁感强度为:  $B = \frac{\mu_r \mu_0 I}{2\pi r}$ 。

通过感应线圈的磁通量为:

$$\Phi = \iint_S \vec{B} d\vec{S} = \frac{N}{L} \iint B \cos\theta \times 2\sqrt{a^2 - y^2} dx dy \quad (10)$$

通过图3可知:

$$r = \sqrt{x^2 + (h+y)^2} \quad (11)$$

$$\cos\theta = \frac{h+y}{r} = \frac{h+y}{\sqrt{x^2 + (h+y)^2}} \quad (12)$$

将式(10)、式(11)代入式(12)中整理可得:

$$\Phi = \frac{\mu_r \mu_0 IN}{\pi L} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-a}^a \frac{(h+y) \times \sqrt{a^2 - y^2}}{x^2 + (h+y)^2} dx dy \quad (13)$$

从式(13)可知,当感应线圈安装固定后,通过感应线圈的磁通量只与通过钢轨的电流有关。令:

$$M = \frac{\mu_r \mu_0 N}{\pi L} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-a}^a \frac{(h+y) \times \sqrt{a^2 - y^2}}{x^2 + (h+y)^2} dx dy$$

则有:  $\Phi = MI$  (14)

当  $L$  远小于  $h$  时,可以假定感应线圈安装在钢轨正上方,则通过感应线圈的磁通量可以计算为:

$$\Phi' = \frac{\mu_r \mu_0 IN}{\pi} \int_{-a}^a \frac{\sqrt{a^2 - y^2}}{h+y} dy = \mu_r \mu_0 IN (h - \sqrt{h^2 - a^2}) \quad (15)$$

根据麦克斯韦方程(法拉第电磁感应定律)可知,一个闭合线圈在时变磁场中运动时,感应电动势由磁生感应电动势和动生感应电动势两部分组成,即:  $E = E_1 + E_m$ 。当列车在轨道上以  $v$  的速度行驶时,感应线圈产生的动生感应电动势  $E_m$  为零,则有:

$$E = E_1 = - \frac{d\Phi}{dt} = -M \frac{dI}{dt} \quad (16)$$

## 3 轨道电路参数推导

假设钢轨上任意一点的电流  $I = A \cos(\omega t + \varphi_0)$  时,感应线圈上接收到的感应电动势为:

$$E = MA \omega \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (17)$$

根据式(2)和式(3)可知,在轨道电路始端电压和电流的边界条件已知时,并设:

$$\dot{A}_1 = \left| \dot{A}_1 \right| e^{j\varphi_1} = \left| \frac{\dot{U}_s + \dot{I}_s Z_c}{2} \right| e^{j\varphi_1}$$

$$\dot{A}_2 = \left| \dot{A}_2 \right| e^{j\varphi_2} = \left| \frac{\dot{U}_s - \dot{I}_s Z_c}{2} \right| e^{j\varphi_2}$$

$$Z_c = |Z_c| e^{j\varphi_3}$$

则轨道电路上任意一点的电流瞬时值的表达式为:

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_c} \operatorname{Re}[U(x) e^{j\omega t}]$$

$$= \frac{1}{Z_c} \operatorname{Re}[\dot{A}_1 e^{-\alpha x} e^{j(\omega t - \beta x)} - \dot{A}_2 e^{\alpha x} e^{j(\omega t + \beta x)}]$$

$$= \frac{1}{Z_c} \left[ \dot{A}_1 \left| e^{-\alpha x} \cos(\omega t + \varphi_1 - \varphi_3 - \beta x) \right. \right. \\ \left. \left. - \dot{A}_2 \left| e^{\alpha x} \cos(\omega t + \varphi_2 - \varphi_3 + \beta x) \right| \right] \quad (18)$$

由式(17)可得,通过感应线圈可以测得到感应电动势为:

$$E = \frac{\omega M}{Z_c} \left[ \dot{A}_1 \left| e^{-\alpha x} \sin(\omega t + \varphi_1 - \varphi_3 - \beta x) \right. \right. \\ \left. \left. - \dot{A}_2 \left| e^{\alpha x} \sin(\omega t + \varphi_2 - \varphi_3 + \beta x) \right| \right] \quad (19)$$

在列车行驶途中,对比系数  $0 < \rho < 1$  时,假设电流反射波为 0,即  $\dot{A}_2 \left| e^{\alpha x} \cos(\omega t + \varphi_2 - \varphi_3 + \beta x) \right| = 0$ ,则感应电动势可以进一步简化为:

$$E = \frac{\omega M}{Z_c} \left| \dot{A}_1 \right| e^{-\alpha x} \sin(\omega t + \varphi_1 - \varphi_3 - \beta x) \quad (20)$$

在轨道电路中,已知任意两点  $x_1, x_2$  上的测得电压值  $E_1, E_2$ ,根据式(20),可得:

$$\frac{E_1}{E_2} = e^{-\alpha(x_1 - x_2)} \frac{\sin(\omega t_1 + \varphi_1 - \varphi_2 - \beta x_1)}{\sin(\omega t_2 + \varphi_1 - \varphi_2 - \beta x_2)} \quad (21)$$

将式(21)两边同时取自然对数,整理可得:

$$\alpha = \frac{\ln \frac{\sin(\omega t_1 + \varphi_1 - \varphi_2 - \beta x_1)}{\sin(\omega t_2 + \varphi_1 - \varphi_2 - \beta x_2)} - \ln \frac{E_1}{E_2}}{x_1 - x_2} \quad (22)$$

假设已知钢轨阻抗  $Z_0$ ,根据式(5)、(9)和(22)可求得轨道电路分布电容  $C_0$  和导纳  $G_0$ :

$$\begin{cases} G_0 = \frac{(\alpha^2 - \beta^2)R_0 + 2\alpha\beta\omega L_0}{|Z_0|^2} \\ C_0 = \frac{2\alpha\beta R_0 - (\alpha^2 - \beta^2)\omega L_0}{\omega |Z_0|^2} \end{cases} \quad (23)$$

则道碴电阻为  $r_d = \frac{1}{G_0}$ 。

#### 4 实际轨道电路参数计算

图4所示数据是沈阳铁路局管辖范围内的通辽至四平区间段列车行驶途中实测所得。此区段内,铁轨上传输的信号为移频信号。从图4可知,当列车自远向信号发送端行驶时,感应线圈感应接收到的数据幅值逐渐增大。当列车接近信号发送端时,信号幅值的增加幅度明显大于列车处于远端的幅值。根据传输线理论可知,由于存在衰减,导致电压幅值自远至信号发送端逐渐增大。



图4 现场实测信号

根据移频信号频谱特征,设计 DSP 计算程序,可得信号频率参数为:载频为 850Hz,上边频为 905Hz,下边频为 795Hz,调制频率为 20.01Hz。

由式(22)可知,要想求得某两点间的衰减常数  $\alpha$ ,

必须知道两点的幅值和正弦值。假设  $x_1, x_2$  的位置选择在正弦值为 1 时,即波形峰值,式(22)可以简写为:

$$\alpha = \frac{\ln \frac{E_1}{E_2}}{x_1 - x_2} \quad (24)$$

式(24)中,  $x_1, x_2$  为数据采样点离信号发送机的距离,且有  $x_1 > x_2$ 。

图4是信号记录仪采样率为 8192Hz 时记录的实际信号,每隔 4s 取一次波峰数据。设通辽至四平的钢轨阻抗为  $Z_0 = 1.52 + 7.24j = 7.40 \angle 78.17^\circ (\Omega/\text{km})$ 。由于钢轨是铺设在以碎石为路基的轨枕上,则两钢轨之间的相对介电常数  $\epsilon_r = 80$ 。轨道电路的分布阻抗和电感为:

$$R_0 = 1.52 \Omega/\text{km} \\ L_0 = \frac{7.24}{\omega} = \frac{7.24}{2\pi f} = \frac{7.24}{2 \times 3.14 \times 850} \\ = 0.001356 (\text{H}/\text{km}) = 1.356 \times 10^{-3} (\text{mH}/\text{km})$$

从图5可以清楚地看出,幅值衰减常数  $\alpha$  增大时,道碴电阻减小,分布电容也减小;反之,幅值衰减常数  $\alpha$  减小时,道碴电阻增大,分布电容也增大。当列车离信号机越来越远时,幅值衰减常数总体趋势增大;在列车从 700 多米开始向信号机行驶时,幅值衰减常数都大于 1。

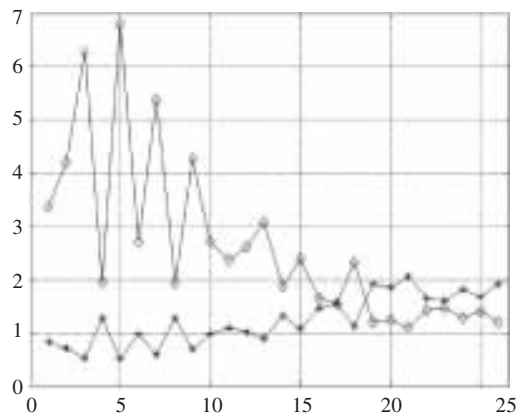


图5 衰减系数与道碴电阻变化关系图

在此区段内,衰减常数的平均值为 1.2449 Np/km,道碴电阻平均值为 2.0129  $\Omega \cdot \text{km}$ ,分布电容值为 45.005  $\mu\text{F}/\text{km}$ 。在一个区间段内,每 55 米取样一次峰值,相邻两个峰值可以计算一组参数。根据《信号维护规则—技术标准》的要求,轨道电路的道碴电阻值在区间内不小于 1.0  $\Omega/\text{km}$ ,站内不小于 0.6  $\Omega/\text{km}$ 。数据分析可知,列车安全行驶时,轨道电路的道碴电阻都大于 1.0  $\Omega/\text{km}$ 。

根据信号时域幅值变化特征,采用轨道电路参数动态测量的理论,分析试验数据,推导轨道电路的幅值衰减常数、相位衰减常数、道碴电阻和分布电容。对照铁道部的技术标准,列车在行驶途中测得的轨道电路参数在其范围之内。根据此方法定期检测轨道电路的主要参数,在误差允许范围之内判断轨道电路的安全性具有较强的实际应用价值。

(下转第 16 页)

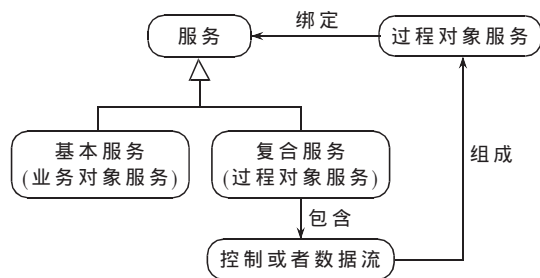


图6 过程对象服务的组成结构

### 3 集成案例

根据本文所探讨的集成架构和集成原理,镇江移动电话公司构建了一个集成系统。公司有一组互不相连或部分相连的应用程序,分别为:

- (1)客户信息应用程序;
- (2)客户账户管理应用程序;
- (3)打印发票应用程序;
- (4)市话话费计价应用程序;
- (5)长话话费计价应用程序;
- (6)话费信息应用程序。

这些应用程序没有集成,因此用户要在不同应用程序中手工输入数据。有些应用程序提供基于共享数据文件的简单数据交换,用专属格式格式化。在这几个应用程序中,客户信息应用程序、客户账户管理应用程序、话费信息应用程序提供了API,分别通过封装增加接口。打印发票应用程序用JMS封装,另外两个用CORBA封装。

为了实现较高层次的集成,在业务逻辑层定义低层虚拟组件,以使用一致的方式存取控制。根据案例分析和各种分析类图识别出高层EJB组件。识别出的高层EJB组件为:信用卡EJB组件、移动电话用户EJB组件、账户EJB组件、授权和选择账户EJB组件、充值EJB组件、检查余额EJB组件。这些高层EJB组件所完成的功能集中在业务处理上,通过对低层虚拟组件方法的调用实现业务功能,例如检查余额的虚拟组件计算账户余额的方法要涉及到客户账户管理、市话计费、长话计费、话费信息等低层虚拟组件的调用。

最后将这些业务方法级的高层EJB组件以Web Services的方式发布。如果要进行更高层次的集成,可以在这些Web Services的基础上集成,既实现了低耦合性,又实现了较高的性能。从而使公司内外的管理者和顾客都可以调用。公司外的顾客可以进行查询充值等操作,公司内的管理者可以进行更高权限的操作(如修改资费标准等)。要实现这种权限控制,可以用基于角色的权限

控制访问策略和企业信息门户的统一界面提供服务。

BPEAIAM模型的基本思想是快速实现企业业务流程的重组。BPEAIAM模型提供一个集成框架,可以通过多种方法实现。其中一种方法是利用Web服务技术实现,将遗留应用的功能包装成其他应用程序可以直接调用的Web服务,然后组合这些服务,产生满足企业业务需要的流程。

镇江移动电话集成系统是实现BPEAIAM模型的初步尝试,它证明了BPEAIAM模型的可行性。目前该系统正在进一步完善中。下一步的工作是以BPEAIAM模型为核心,尝试开发一个功能相对完善的集成开发环境(IDE)。该开发环境提供了所有相关的基础性服务,可以有效提高软件的抽象层次,使开发者能将主要精力集中在业务逻辑的开发上。

#### 参考文献

- 1 David S.Linthicum.Process Automation and EAI.EAI Journal, 2000,3;12~18
- 2 顾翊,张申生.一种企业应用集成(EAI)方案的研究.计算机工程与应用,2003;6
- 3 Denver Robert,Edward Williams.Adaptive integration architecture for software reuse[D].University of Central Florida,2001
- 4 James Chang.Envisioning the Process-Centric Enterprise[J].EAI Journal,2002;(8)30~33
- 5 SUN.Microsystems.Java™ 2 Platform Enterprise Edition Specification,v1.4.http://java.sun.com/j2ee/j2ee-1\_4-fr-spec.pdf:13~14
- 6 OMG.CORBA Specification.http://www.omg.org/docs/formal/04-03-01.pdf
- 7 Heather Kreger.Web Services Conceptual Architecture(WSCA 1.0).IBM Software Group,2001,5.http://www-306.ibm.com/software/solutions/webservices/pdf/WSCA.pdf
- 8 Mary Kirtland.A Platform for Web Services.Microsoft Developer Network,2001,1.http://msdn.microsoft.com/archive/default.asp?url=/archive/en-us/dnarxml/html/websvcs\_platform.asp
- 9 W3C Workshop.Web Services Framework.http://www.w3.org/2001/03/WSWS-popa/paper51.2001,4
- 10 SUN Microsystems.The J2EE 1.4 Tutorial.http://java.sun.com/j2ee/1.4/docs/tutorial/doc/Overview7.html
- 11 Binu John,Vu Trang,Michael Vemik.Performance Evaluation of Enterprise JavaBeans™(EJB™) CORBA Adapter to CORBA Server Interoperability.2001;1~6

(收稿日期:2006-05-26)

(上接第9页)

#### 参考文献

- 1 杨显清,赵家升,王园.电磁场与电磁波.长沙:国防工业出版社,2003
- 2 张之翔.电磁学千题解.北京:科学出版社,2002

- 3 费锡康.无绝缘轨道电路原理及分析.北京:中国铁道出版社,1993
- 4 中华人民共和国铁道部.信号维护规则技术标准.铁运[2000]14号.北京:中国铁道出版社,2000

(收稿日期:2006-06-02)