文章编号:1000-8152(2010)12-1612-06

基于Levenberg-Marquardt算法和广义S-变换的 无绝缘轨道电路补偿电容的故障检测

赵林海, 许俊杰, 刘伟宁, 蔡伯根

(北京交通大学电子信息工程学院,北京100044)

摘要:本文利用传输线理论分析了无绝缘轨道电路补偿电容故障对轨道电路短路电流幅度包络的影响,提出了 短路电流幅度包络的回归模型,并利用Levenberg-Marquardt(L-M)算法验证了该模型的正确性和适用性.根据机车 信号的工作原理,将对短路电流幅度包络的检测转换为对机车信号感应电压幅度包络的检测.在利用L-M算法进行 分段指数拟合以去除信号的衰减趋势的基础上,通过广义S变换(GST)得到信号的瞬时频率变化,最终根据短路电 流幅度包络的回归模型,对瞬时频率变化结果进行判决,得到发生故障电容的具体位置.实验表明,GST具有较高的 时-频分辨率,可以此对故障电容进行准确定位.由于该方法的检测数据全部来自于机车信号的日常运用,使得利 用本文方法可大大缩短补偿电容的检测间隔时间,在很大程度上克服了目前检测方法在检测的及时性、成本和影 响铁路运输等方面的不足.

关键词: 故障检测; 广义S变换; 莱文伯格--马夸特算法; 短路电流; 补偿电容

中图分类号: TP321.6 文献标识码: A

Compensation capacitor fault detection method in jointless track circuit based on Levenberg-Marquardt algorithm and generalized S-transform

ZHAO Lin-hai, XU Jun-jie, LIU Wei-ning, CAI Bo-gen

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Transmission-line theory is used to study the impact on the short circuit current in the jointless railway track circuit caused by the faulty compensation capacitor. Levenberg-Marquardt(L-M) algorithm is used to verify the validity and adaptability of the regression model for the short circuit current. According to the operation principle of the cab signal, the envelop of the induced voltage recorded in cab signal represents the short circuit current; its attenuation tendency is removed through piecewise exponential fitting based on L-M algorithm. Secondly, Generalized S-transform(GST) is used to compute the instantaneous frequency. Finally, based on the instantaneous frequency, location of the faulty capacitor is determined. Experiment shows that due to the high time-frequency resolution of GST, the faulty capacitor is accurately located. Because the data used are drawn from the cab signal, this method shortens the detection interval, reacts more promptly and with lower cost and less impact on railway transportation than other current methods.

Key words: fault detection; generalized S-transform; levenberg-marquardt algorithm; short circuit current; compensation capacitor

1 引言(Introduction)

随着我国铁路的发展,无绝缘轨道电路成为当前 的主要运用设备.该种轨道电路采用在轨道上分段 加装补偿电容的方式来平衡轨道的高感抗,使轨道 的整体传输特性趋于阻性.通过现场调研,目前补偿 电容最为常见的是断线故障,约占其故障总数的一 半以上.补偿电容断线会使轨道的传输特性恶化,信 号有效传输距离缩短,直接影响轨道电路和车载机 车信号设备的正常工作,给行车带来安全隐患.

目前,对补偿电容的检测主要通过电务试验车上专门的硬件设备来进行^[1].此方法虽然检测准确度较高,但在检测的及时性、成本以及对铁路运输计划的影响等方面存在不足.因此,改进补偿电容的检测手段是一项十分必要和迫切的工作.

标准S变换(S-transform, 简称: ST)^[2]将小波和短时傅里叶变换相结合, 能准确反映信号的时--频分布

基金项目:国家自然科学重点基金资助项目(60736047);国家高技术研究发展计划资助项目(0912JJ0104-XH00-H-HZ-001-20100419).

收稿日期: 2009-11-30; 收修改稿日期: 2010-05-05.

情况,且不存在类似Wigner-Ville分布的交叉项和负频率问题,其高频部分更细致,比连续小波变换更直观和易于理解. 广义S变换(generalized S-transform,简称: GST)^[3]是对标准S变换的优化,比标准S变换的灵活性更高,对高斯窗的调整能力更强.

Levenberg-Marquardt(L-M)算法^[4]属于非线性最 小二乘法,其迭代效率高,且迭代步长可根据实际情 况进行调整,对于过参数化问题不敏感,能有效处理 冗余参数问题,使代价函数不易陷入局部极小值.

本文利用L-M算法对所提出的短路电流幅值包 络回归模型进行验证,并将L-M与GST相结合,利用 机车信号记录数据,实现对补偿电容的故障检测.

2 补偿电容对短路电流的影响分析 (Analysis of influence on short circuit current from compensation capacitor fault)

无绝缘轨道电路的基本结构如图1所示. 主要包括: 发送器、发送电缆、发送端调谐区、钢轨、补偿电容、接收端调谐区、接收电缆和接收器等. 轨道电路 信号由发送器产生, 经传输电缆和调谐区, 沿钢轨向 接收器方向传送. 当列车沿轨道运行时, 机车信号利 用其接收线圈采用电磁耦合的方式接收轨道电路信 号并对其进行解调, 以获得其中所包含的控车命令.



Fig. 1 Structure diagram of jointless track circuit

通常将轨道电路等效为均匀分布参数的传输线,其传输特性可利用传输线理论,由四端网来描述^[5].若轨道电路包含n个补偿电容且间距均为 $L_{\rm T}$,则钢轨线路可被划分为n个补偿单元 T_i ($i = 1, 2, \cdots, n$)级联的形式.其中:每个补偿单元都是由相应的补偿电容及其两边各 $L_{\rm T}$ /2长度的轨道线路共同构成,其传输特性可由四端网 $\vec{N_c}$ 表示为

$$\vec{N}_{\rm c} = \vec{N}_{\rm g} \cdot \vec{N}_{\rm cp} \cdot \vec{N}_{\rm g},\tag{1}$$

式中: \vec{N}_{g} 为 L_{T} /2长度的轨道线路的四端网, \vec{N}_{cp} 为补偿电容的四端网. 列车占用轨道电路可等效为机车第1轮对所在的分路点的两根钢轨间并接一个分路电阻 R_{f} ,其上所流经的电流即为短路电流 $\vec{I}_{R_{f}}(x)$, x为分路点到发送端调谐区之间的距离. 设分路点x位于补偿单元 T_{m} 中, 即有

$$x = (n - m)L_{\rm T} + L_{\rm h},\tag{2}$$

其中: L_h 为补偿单元 T_m 中未被分路部分的长度, 由文献[5]可知, $\vec{I}_{R_f}(x)$ 的幅度包络 $|\vec{I}_{R_f}(x)|$ 可表示 为

$$\left|\frac{U_{\rm s}}{\vec{F}_{11}(x)R_{\rm f}+\vec{F}_{12}(x)\cdot(R_{\rm f}+\vec{Z}_{\rm rz}(x))/\vec{Z}_{\rm rz}(x)}\right|,\quad(3)$$

其中: U_{s} 为发送器输出电压; $\vec{Z}_{rz}(x)$ 为在分路 点x处向接收器方向的视入阻抗; $\vec{F}(x)$ 为发送器 和分路点间的四端网,由图1可知,其值由发送电 缆四端网 \vec{N}_{p} 和调谐区四端网 \vec{N}_{b} 以及(n-m)个补 偿单元四端网和补偿单元 T_{m} 中长度为 L_{h} 的未被 分路部分的四端网 $\vec{N}_{L_{h}}$ 共同级联构成,即有

$$\vec{F}(x) = \begin{bmatrix} \vec{F}_{11}(x) & \vec{F}_{12}(x) \\ \vec{F}_{21}(x) & \vec{F}_{22}(x) \end{bmatrix} = \vec{N}_{\rm p} \cdot \vec{N}_{\rm b} \cdot (\vec{N}_{\rm c})^{n-m} \cdot \vec{N}_{L_{\rm h}}.$$
(4)

为保证轨道电路能在列车正常分路下可靠工作,必须要求 $R_{\rm f} \ll |\vec{Z}_{\rm rz}(x)|$,则式(3)可化简为

$$|\vec{I}_{R_{\rm f}}(x)| = |\frac{U_{\rm s}}{\vec{F}_{11}(x)R_{\rm f} + \vec{F}_{12}(x)}|.$$
 (5)

对于一段轨道电路, U_s, R_f, N_p和N_b均为定 值,则由式(4)(5)确定短路电流幅度包络只随分路 点x的变化而改变.如图1所示,对于补偿电容无故 障情况,由式(4)可计算出列车分别在a,b,c,d,e五 点分路时,发送器和分路点间的四端网F(a),F(b),

 $|\vec{I}_{R_f}(x)| =$

$$\vec{F}(c), \vec{F}(d) \Re \vec{F}(e) \mathcal{H}:$$

$$\begin{cases}
\vec{F}(a) = \vec{N}_{\rm p} \cdot \vec{N}_{\rm b} \cdot (\vec{N}_{\rm c})^{n-m+2}, \\
\vec{F}(b) = \vec{N}_{\rm p} \cdot \vec{N}_{\rm b} \cdot (\vec{N}_{\rm c})^{n-m+1} \cdot \vec{N}_{\rm g}, \\
\vec{F}(c) = \vec{N}_{\rm p} \cdot \vec{N}_{\rm b} \cdot (\vec{N}_{\rm c})^{n-m+1}, \\
\vec{F}(d) = \vec{N}_{\rm p} \cdot \vec{N}_{\rm b} \cdot (\vec{N}_{\rm c})^{n-m} \cdot \vec{N}_{\rm g}, \\
\vec{F}(e) = \vec{N}_{\rm p} \cdot \vec{N}_{\rm b} \cdot (\vec{N}_{\rm c})^{n-m}.
\end{cases}$$
(6)

从式(6)可知, 在*a*, *c*和*e*点, 由于传输通道近似 匹配, 使短路电流的幅度在相应位置分别取得极 大值; 而在*b*和*d*点, 由于传输通道的匹配性能"极 差", 而使短路电流的幅度在此出现极小值. 可见, 在补偿电容正常情况下, 短路电流的幅度从发送 端到接收端呈现"波浪"式的震荡衰减过程.

若补偿单元*T_m*中的电容断线,则*T_m*仅由轨道 线路构成,式(6)相应地变为:

$$\begin{cases} \vec{F}(a) = \vec{N}_{\rm p} \cdot \vec{N}_{\rm b} \cdot (\vec{N}_{\rm c})^{n-m} \cdot (\vec{N}_{\rm g})^2 \cdot \vec{N}_{\rm c}, \\ \vec{F}(b) = \vec{N}_{\rm p} \cdot \vec{N}_{\rm b} \cdot (\vec{N}_{\rm c})^{n-m} \cdot (\vec{N}_{\rm g})^2 \cdot \vec{N}_{\rm g}, \\ \vec{F}(c) = \vec{N}_{\rm p} \cdot \vec{N}_{\rm b} \cdot (\vec{N}_{\rm c})^{n-m} \cdot (\vec{N}_{\rm g})^2, \\ \vec{F}(d) = \vec{N}_{\rm p} \cdot \vec{N}_{\rm b} \cdot (\vec{N}_{\rm c})^{n-m} \cdot \vec{N}_{\rm g}, \\ \vec{F}(e) = \vec{N}_{\rm p} \cdot \vec{N}_{\rm b} \cdot (\vec{N}_{\rm c})^{n-m}. \end{cases}$$
(7)

对比式(6)和式(7)可知,补偿电容断线对其断 线点发送端方向的d和e点的短路电流几乎没有影 响,而对其断线点接收端方向的a,b,c各点影响较 大,且b点因失配最为严重而使短路电流幅度在此 处出现最小值.由此可知,通过检测短路电流的幅 度在补偿电容前后的变化可对补偿电容断线故障 进行准确判断.

通过仿真可以进一步验证以上分析的正确性. 利用无绝缘轨道电路基本电气参数^[6],由式(5)对 一段轨道电路补偿电容正常和C6发生断线时的短 路电流幅度变化情况进行仿真,如图2所示.其中: 横轴代表列车在轨道上由接收端到发送端的不同 分路点x,其刻度为各补偿电容位置.



图 2 补偿电容正常和C6断线情况下的短路电流幅度 包络变化的仿真结果

Fig. 2 Simulation result of short circuit current amplitude envelope when capacitor C6 is in good condition or has disconnection fault

3 短路电流幅度包络的回归建模(Regression modeling of short circuit current amplitude envelope)

经过试验,图2所示的短路电流幅度包络可用 叠加在指数衰减趋势上的且幅度变化满足指数衰 减规律的余弦信号来近似,即有:

$$|\vec{I}_{R_{\rm f}}(x)| = b_1 \exp(b_2 x) + (b_3 \exp(b_4 x) - b_1 \exp(b_2 x)) \cos(b_5 x + b_6), \tag{8}$$

其中: $b_1 \exp(b_2 x)$ 表示短路电流幅度包络的总体 衰减趋势; $b_3 \exp(b_4 x)$ 表示短路电流幅度包络的极 大值点(或极小值点)的变化趋势; $(b_3 \exp(b_4 x) - b_1 \exp(b_2 x))$ 表示短路电流幅度的波动范围; 用 $\cos(b_5 x + b_6)$ 代表短路电流幅度包络受补偿电 容影响的"波浪"式变化规律.若轨道电路长度 为 L_g ,补偿电容总数为n,则短路电流幅度包络将 是包含n个整周期的余弦信号,其固有频率 f_c 满足 关系:

$$f_{\rm c} = b_5/2\pi = n/L_{\rm g},$$
 (9)

而 b_6 为初始相位, 若 $b_3 \exp(b_4 x)$ 表示短路电流幅度 包络极大值点的变化趋势, 则 b_6 近似取 $2k\pi$, $k = 0, 1, 2, \cdots$; 否则, 若 $b_3 \exp(b_4 x)$ 表示短路电流幅 度包络极小值点的变化趋势, 则 b_6 近似取(2k + 1) π , $k = 0, 1, 2, \cdots$.

4 GST和L-M基本原理(Basic principle of GST and L-M)

4.1 GST基本原理(Basic principle of GST)

S变换实质上就是对信号经加窗平移后的短时 傅里叶变换. 设*x*(*t*)为连续时间信号,则其一维连 续S变换定义为^[2]

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t-\tau) \exp(-i2\pi ft) dt, \quad (10)$$

其中: t为时间, f为频率, i为虚数单位, $w(t - \tau)$ 为 窗函数, τ 为窗函数的时移参数. 通常将窗函数取 为高斯窗, 即

$$w(t-\tau) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{(t-\tau)^2}{2\sigma^2}),$$
 (11)

其中: σ为尺度因子, 其决定窗的时间宽度, 若 令σ满足如下关系^[3]:

$$\sigma = \frac{1}{\xi \cdot |f|^{\eta}}, \xi > 0, \eta > 0,$$
(12)

则将式(11)(12)带入式(10),可得一种广义S变换为 $GS(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[x(t) \frac{\xi |f|^{\eta}}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{(t-\tau)^2 \xi^2 f^{2\eta}}{2}) \right] \cdot$

$$\exp(-i2\pi ft)]dt.$$
 (13)

由式(11)(12)可知,尺度因子 σ 依赖于频率变化, 使得 $w(t - \tau)$ 具备在时–频面上随频率变化而自适 应地调整其时窗宽度的能力:在低频段,高斯窗 变宽,使S变换获得较高的频率分辨率;在高频段, 高斯窗变窄,使S变换获得较高的时间分辨率.对 比式(10)和式(13)可知,GST比ST具有更高的灵活 性,对高斯窗的调整能力更强.设采样间隔为T, 总采样点数为 $Q, x(jT), j = 0, 1, \cdots, Q - 1$ 为信 号x(t)经采样后的离散时间序列, $X(\frac{q}{QT})$ 为其离 散傅立叶变换,则由式(13)定义的GST计算公式 为^[2,3]:

$$GS(jT, \frac{q}{QT}) = \begin{cases} \sum_{r=0}^{Q-1} \left[X(\frac{r+q}{QT}) \exp(\frac{i2\pi rj}{Q}) \cdot \\ & \left[\frac{-2\pi^2 (\frac{r}{QT})^2}{\exp(\frac{-2\pi^2 (\frac{r}{QT})^2}{\xi^2 (\frac{q}{QT})^{2\eta}}) \right], q \neq 0; \\ & \left[\frac{1}{Q} \sum_{r=0}^{Q-1} x(rT), \qquad q = 0. \end{cases} \end{cases}$$
(14)

由式(14)可知,信号经GST之后得到一个复时–频矩阵,其行向量的模表示该行所对应的频率分量随时间的变化情况;其列向量的模表示信号各频率分量在该列所对应时刻的分布情况.对复时–频矩阵,以列为单位,分别提取各列中模极大值点所对应的频率 f_j ,则 $(jT, f_j), j = 0, 1, \cdots, Q - 1$,即为信号在各时刻的瞬时频率.

4.2 L-M算法的基本原理(Basic principle of L-M algorithm)

非线性关系的一般形式为

$$\boldsymbol{y} = f(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{d}), \tag{15}$$

其中: f为己知非线性函数; $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ 为自变量向量; $d = (d_1, d_2, \dots, d_n)$ 为未知参数向 量. 设对y和x进行p次观测, 得到p组数据Y和X, 则其残差平方和e为

$$\boldsymbol{e} = \sum_{i=1}^{p} (Y_i - f(X_i, \boldsymbol{d}))^2.$$
(16)

L-M算法的目的就是求出一组d使e极小化. 若 第k次迭代结果为 $d^{(k)}$,则将f(x, d)在 $d^{(k)}$ 附近的 一阶近似表示为

$$f(d^{(k)} + \delta^{(k)}) \approx f(x, d^{(k)}) + A^{(k)}\delta^{(k)}.$$
 (17)

$$A^{(k)} = \left[\frac{\partial f(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{d})}{\partial d_j}\right]_{\boldsymbol{d}=\boldsymbol{d}^{(k)}}, j = 1, 2, \cdots, n, \quad (18)$$

1615

(19)

则寻找下一个迭代点: $d^{(k+1)} = d^{(k)} + \delta^{(k)},$

使得

$$\|\boldsymbol{y} - f(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{b}^{(k+1)})\| = \min_{\boldsymbol{\delta}^k} \|A^{(k)} \boldsymbol{\delta}^{(k)} - \boldsymbol{e}^{(k)}\|,$$
(20)

即在已知 $A^{(k)}$ 和 $e^{(k)}$ 的情况下求解超定线性方程 $A^{(k)}\delta^{(k)} = e^{(k)}$,其最小二乘解为^[4]

$$(\boldsymbol{\delta}^{(k)})_{\rm LS} = ((A^{(k)})'A^{(k)})^{-1}(A^{(k)})'\boldsymbol{e}^{(k)},$$
 (21)

而对于L-M算法,则用 $(A^{(k)})'A^{(k)} + \lambda^{(k)}I$ 代替式 (21)中的 $(A^{(k)})'A^{(k)}$,则有

$$(\boldsymbol{\delta}^{(k)})_{\rm LM} = ((A^{(k)})'A^{(k)} + \lambda^{(k)}I)^{-1}(A^{(k)})'\boldsymbol{e}^{(k)},$$
 (22)

其中: $\lambda^{(k)}$ 和 $\lambda^{(k)}$ I分别称为阻尼因子和阻尼项,而 正是这一改变使得L-M算法相对于最小二乘法, 克服了系数矩阵奇异或病态时导致的异常情况. L-M算法的灵活性还在于当 $\lambda^{(k)} = 0$ 时,算法变成 为高斯-牛顿法的最优步长计算;而当 $\lambda^{(k)}$ 很大时, 则又变为梯度下降法的最优步长计算.

5 基于L-M和GST的补偿电容故障检测方 案(L-M and GST based compensation capacitor fault detection method)

根据机车信号工作原理,车载接收线圈中产 生的感应电流 $\vec{I}_{jg}(x)$ 与短路电流 $\vec{I}_{R_f}(x)$ 满足线性关 系^[7]:

$$\vec{I}_{jg}(x) = a_1 \vec{I}_{R_f}(x),$$
 (23)

这里: a_1 为常数, 由接收线圈型号及其安装位置决定. 机车信号感应电流 $\vec{I}_{jg}(x)$ 需要转换成相应的电压信号 $U_{jg}(x)$, 才能满足机车信号的工作要求, 则有

$$U_{jg}(x) = a_2 |\vec{I}_{jg}(x)|,$$
 (24)

这里: *a*₂为常数, 由机车信号内部电路的结构决定. 由式(23)和式(24)可得

$$U_{\rm jg}(x) = a_1 a_2 |\vec{I}_{R_{\rm f}}(x)|.$$
 (25)

由式(25)可知,由于机车信号感应电压U_{jg}(x) 与轨道电路短路电流**I**_{Rt}在幅度包络上具有变化 一致性关系.因此,可将对短路电流幅度包络变化 的检测转换为对机车信号感应电压幅度包络的检 测.若以此来定位发生断线的补偿电容位置,则可

其中

第27卷

在很大程度上提高补偿电容的检测效率. 在铁路 实际运用中, 机车信号设备每隔125 ms计算一次 感应电压信号的有效值, 将其作为*U*_{jg}(*x*)的幅度包 络信息记录在相应的存储媒质中.

补偿电容断线检测算法的功能结构共分为信号调理、GST和故障判决等3部分.信号调理的主要目的是对U_{jg}(x)信号进行预处理,避免给GST计算效果造成不利影响.这其中主要是利用L-M算法去除式(8)中的指数衰减项b1 exp(b2x).首先,对输入数据进行归一化,再通过L-M算法对数据以补偿单元为单位进行分段指数拟合,再在归一化的数据中逐段减去拟合结果所代表的衰减项,最终生成GST环节的输入信号.

GST环节是通过式(14)对信号调理环节的输出 信号进行广义**S**变换,并将变换后得到的瞬时频率 结果*f_i*输出给故障判决环节.

故障判决环节根据补偿电容故障对短路电流的影响规律,对获得的瞬时频率结果,从轨道电路 发送端向其接收端以L_T为时窗宽度,依次计算相 邻补偿电容间瞬时频率的均值m_i,即:

$$m_{i} = \begin{cases} \frac{1}{x_{1} + L_{T}/2} \sum_{j=0}^{x_{1} + L_{T}/2} f_{j}, & i = 1; \\ \frac{1}{x_{i} - x_{i-1}} \sum_{j=x_{i-1} + L_{T}/2}^{x_{i} + L_{T}/2} f_{j}, i = 2, 3, \cdots, n. \end{cases}$$
(26)

其中: f_j为轨道电路j点的短路电流幅度包络的瞬时频率, x_i为第i个补偿电容所在位置. 计算m_i相对于式(9)所给出的固有频率的变化率k_i为

$$k_i = |1 - \frac{m_i}{f_c}|.$$
 (27)

由此制定故障判决策略,如图3所示.从轨道 电路发送端向其接收端方向进行搜素,查找 k_i 的 突变点,以确定故障电容位置. R为最终判决结果, R = 0表示补偿电容无故障; $R = i \neq 0$ 则表示 第i个补偿电容发生故障.

6 实验验证(Experimental verification)

6.1 短路电流模型验证(Verification of short circuit current model)

如图4所示,为根据电务试验车09年5月对某线

路的补偿电容检测结果所提取的2771轨道区段当时机车信号感应电压幅度包络信号.电务试验车的检测结果提示该区段补偿电容C6发生断线故障,后经铁路现场人员实地勘测得到证实.



图 3 补偿电容故障判决流程

Fig. 3 Flow chart of compensation capacitor fault decision



图 4 2711区段机车信号感应电压幅度包络信号以及利用 短路电流幅度包络回归模型的分段拟合曲线

Fig. 4 Envelope of induced voltage recorded by cab signal and short circuit current representation model based piecewise exponential fitting curve

根据式(8)提出的短路电流信号回归模型,利用L-M方法,对图4所示的[0,C6]和[C6,C20]两段数据信号进行分段拟合,拟合结果如图4中虚线所示.[C6,C20]的拟合参数及其拟合评价,如表1所示.

表 1 基于L-M的短路电流幅度包络回归模型的拟合结果及其评价 Table 1 Short circuit current representation model based fitting result and evaluation

模型参数	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
最优化结果	0.2594	0.000999	0.2791	0.000977	0.09149	113.4491
评价结果	相关系数(R)	=0.9941,均方	ī差(RMSE)=	=0.01996,残差	平方和(SS	E)=0.3920

由于2711区段轨道电路的补偿电容个数n = 20,轨道电路长度 $L_g \approx 1374$ m,则由式(9)计算 $b_5 = 2\pi n/L_g \approx 0.09146$,与表1中L-M最优化拟合的结果 $b_5 = 0.09149$ 很近似,相对误差仅为0.033%; $b_6 = 113.4491 \approx 36.11\pi$,与理论分析结果基本一致.可见,短路电流幅度包络回归模型与仿真信号具有很好的拟合效果.

通过图4和表1验证了短路电流幅度包络回归 模型的正确性,且采用分段拟合方式,可使该模 型能够适用于补偿电容正常与故障等多种情况; 此外,由于图2仿真条件的设置,除道砟电阻外,与 图4的真实条件完全相同,因此通过对比可以说明 基于式(5)的短路电流幅度包络仿真结果的正确 性;最后,从图4中还可进一步说明,机车信号感应 电压幅度包络与短路电流幅度包络存在变化一致 性关系.

6.2 现场数据验证(Verification based on data from railway site)

针对图4所示的铁路现场实际采集数据, 按本 文提出的方法, 由GST(ξ=40, η=0.05)提取信号的 瞬时频率, 并将提取结果与标准ST, STFT, WVD和 SPWVD等其他当前主要的时–频分析方法进行比 较, 其对比结果如图5所示. 从中可明显看出基于 式(14)所描述的GST对信号突变点瞬时频率的提 取效果要明显优于其他时–频分析方法.



图 5 GST与ST, STFT和SPWVD的信号瞬时频率提取结 果的比较

Fig. 5 Instantaneous frequency extracted by GST, ST, STFT and SPWVD

按式(27)计算 k_i ,如表2所示,按照图3所示流程 进行判决,结果为R = 6说明补偿电容C6发生故 障. 表 2 m_i 相对于固有频率 f_c 的变化率 k_i

Table 2 Change rate k_i of m_i against natural frequency f_c

k_{20}	k_{19}	k_{18}	k_{17}	k_{16}	k_{15}	k_{14}
0.01	0	0.01	0.01	0	0.01	0
k_{13}	k_{12}	k_{11}	k_{10}	k_9	k_8	k_7
0	0.01	0	0.01	0	0	0.14
k_6	k_5	k_4	k_3	k_2	k_1	
0.44	0.44	0.45	0.45	0.45	0.47	

7 结论(Conclusion)

本文利用传输线理论分析了无绝缘轨道电路 补偿电容故障对轨道电路短路电流幅度包络的 影响,提出了短路电流幅度包络的回归模型,并利 用L-M算法验证了该模型的正确性和适用性. 根 据机车信号的工作原理,将对短路电流幅度包络 的检测转换为对机车信号感应电压幅度包络的检 测. 在利用L-M算法进行分段指数拟合以去除信 号的衰减趋势的基础上,通过GST得到信号的瞬 时频率变化,最终根据短路电流幅度包络的回归 模型,对瞬时频率变化结果进行判决,得到发生 故障电容的具体位置. 实验表明, GST具有较高的 时-频分辨率,可以此对故障电容进行准确定位. 由于该方法的检测数据全部来自于机车信号的日 常运用,使得利用本文方法可大大缩短补偿电容 的检测间隔时间,在很大程度上克服了目前检测 方法在检测的及时性、成本和影响铁路运输等方 面的不足.

参考文献(References):

[1] 郑利, 殷继宏. 补偿电容的测试与分析[J]. 铁道通信信号, 2005, 41(6): 26-27.

(ZHENG Li, YIN Jihong. Testing and analysis of compensation capacitor[J]. *Railway Signaling & Communication*, 2005, 41(6): 26 – 27.)

- [2] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: the S transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(4): 998 – 1001.
- [3] 陈学华, 贺振华, 黄德济. 广义S变换及其时频滤波[J]. 信号处理, 2008, 24(1): 28 31.
 - (CHEN Xuehua, HE Zhenhua, HUANG Deji. Generalized S transform and its time-frequency filtering[J]. *Signal Processing*, 2008, 24(1): 28 31.)

(下转第1622页)

(LIU Yu, GUO Chen, et al. Sliding-mode control of ship course tracking based on backstepping[J]. *Journal of Center South University* (*Science and Technology*), 2007, 38(1): 278 – 282.)

- [4] HEDRICK J K, YIP P P. Multiple sliding control: theory and application[J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 2000, 122: 586 – 593.
- [5] 管成,朱善安. 电液伺服系统的多滑模鲁棒自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(6): 931 938.
 (GUAN Cheng, ZHU Shan'an. Multiple sliding mode robust adaptive control of an electro-hydraulic servo system[J]. Control Theory & Applications, 2005, 22(6): 931 938.)
- [6] NOMOTO K. On the steering quality of ships[J]. International Shipbuilding Progress, 1957, 35(1): 354 – 370.
- [7] LIN F J, SHEN P H, HSU S P. Adaptive backstepping sliding mode control for linear induction motor[J]. *IEEE Proceeding Electric Power Application*, 2002, 14(9): 184 – 194.

- [8] NUSSBAUMR D. Some remarks on the conjecture in parameter adaptive control[J]. Systems & Control Letters, 1983, 3(3): 243 – 246.
- [9] YE X D, JIANG J P. Adaptive nonlinear design without a priori knowledge of control directions[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(11): 1617 – 1621.
- [10] WANG L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1993, 1(1): 146 – 155.

作者简介:

袁 雷 (1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为船舶运动非线性 控制研究与仿真, E-mail: yuanl886@163.com;

吴汉松 (1954—), 男, 教授, 主要研究方向为非线性系统控制 理论与应用, E-mail: wuhs2002@163.com.

(上接第1617页)

- [4] 张鸿燕, 耿征. Levenberg-Marquardt算法的一种新解释[J]. 计算机 工程与应用, 2009, 45(19): 5 – 8.
 (ZHANG Hongyan, GENG Zheng. Novel interpretation for levenberg-marquardt algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(19): 5 – 8.)
- [5] ZHAO L H, LI H, LIU W N, et al. The simulation analysis of influence on jointless track circuit signal transmission from compensation capacitor based on transmission-line theory[C] //The Third IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation And EMC Technologies For Wireless Communications. Beijing: IEEE, 2009: 1137 – 1142.
- [6] 赵怀东. ZPW-2000A型自动闭塞设备安装与维护[M]. 北京: 中国 铁道出版社, 2005.
 (ZHAO Huaidong. Installation and Maintenance of Automatic Block Equipment of ZPW-TYPE-2000A[M]. Beijing: China Railway Press, 2005.)

[7] 邱宽民. JT1-CZ2000型机车信号车载系统[M]. 北京:中国铁道出版社, 2007.
 (QIU Kuanmin. JT1-CZ2000 Cab Signal on-Board System[M]. Beijing: China Railway Press, 2007.)

作者简介:

赵林海 (1971—), 男, 副教授, 研究方向为高速铁路列车运行 控制与故障诊断, E-mail: zhaolh@bjtu.edu.cn;

王时马取摩诊断, E-man. Zhaom@bjtu.edu.en,

许俊杰 (1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为模式识别技术

在铁路信号控制中的应用, E-mail: 09120368@bjtu.edu.cn;

刘伟宁 (1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为模式识别技术 在铁路信号控制中的应用, E-mail: 08120392@bjtu.edu.cn;

蔡伯根 (1966—), 男, 教授, 研究方向为智能交通控制技术, E-mail: bgcai@bjtu.edu.cn.