

一种感应电机转子断条早期故障诊断方法

吴立泉, 刘永强, 梁兆文
(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510000)

摘要: 针对感应电机转子发生早期断条故障时, 定子电流故障特征频率容易被基波频率淹没, 导致电机转子断条故障发现不及时的问题, 采用多回路方程建立感应电机发生转子断条故障的模型, 推导了 $dq0$ 坐标系下感应电机发生早期断条故障的模型。在该故障模型的基础上, 利用参数辨识和滑窗技术得到电机等效参数变化曲线。该方法得到的电机等效参数曲线对转子早期断条故障具有明显的故障特征信号, 通过辨识曲线特征可诊断电机转子断条故障, 同时给出了转子发生不同程度故障时的差异指标。最后试验验证了该方法的可行性。

关键词: 感应电机; 故障诊断; 转子断条; 参数辨识; 滑窗

中图分类号: TM 346 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)09-0101-10

A Method for Early Broken Rotor Bars Fault Diagnosis of Induction Motor

WU Liquan, LIU Yongqiang, LIANG Zhaowen
(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510000, China)

Abstract: For the early broken rotor bars fault of induction motor, the fault characteristic frequency of the stator current was easily submerged by the fundamental frequency, so the broken rotor bars fault of motor could not be detected in time. Multiple coupled circuit equation was used to establish the model of the broken rotor bars fault occurring in induction motor, and the model of the early broken rotor bars fault of induction motor in $dq0$ coordinate system was derived. Based on the fault model, the variation curves of motor equivalent parameters were obtained by parameter identification and sliding window technology. These curves had obvious fault characteristic signals for the early broken rotor bars fault, and the characteristics of the curves could be used to diagnose the broken rotor bars fault. The different indexes of the rotor faults with different degrees were given. The experiment verified the feasibility of the proposed method.

Key words: induction motor; fault diagnosis; broken rotor bars; parameter identification; sliding window

0 引言

感应电机具有结构简单、价格低廉等优点, 广泛应用于工业领域。对于连续工艺流程部门, 一旦感应电机发生故障, 造成的经济损失往往会超出驱动电机本身的价值。统计表明, 在感应电机的四大类故障中, 转子故障占 10%, 因此感应电机转子故障诊断是不可忽略的一部分。

国内外对感应电机转子故障已经进行了大量研究。在国内, 转子故障诊断方法分为 3 类: (1) 基于信息处理的方法; (2) 基于知识的方法; (3) 基于解析模型的方法。文献[1-3]用瞬时功率频谱分析对电机转子故障进行诊断。文献[4-5]用 Park 矢量法来检测电机转子故障, 但在故障早期存在椭圆率度量难等问题。文献[6]利用定子电流作 Park 变换后的频谱特征来诊断转子故障。

作者简介: 吴立泉(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机参数辨识和电机故障诊断。

刘永强(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电能质量检测与控制, 用于供电系统的成套电力电子装置。

梁兆文(1989—), 男, 博士研究生, 研究方向为非侵入式负荷识别与分解、数据挖掘。

文献[7]在去除定子电流信号基波信息的基础上,提出了基于互相关函数(CCF)的CCF-HTLS算法,旨在抑制定子电流中可能出现的高斯噪声产生的影响。针对传统快速傅里叶变换(FFT)只考虑频谱低频段的特征,文献[8]对定子电流进行倍频小波分析,同时考虑频谱的低频段和高频段特征。文献[9-12]利用数据融合方法诊断感应电机故障,以期解决依靠单一信息进行电机诊断结果的不足。文献[13]基于电机振动故障信号,利用遗传小波神经网络进行电机故障诊断。文献[14-15]引入鼠笼断条的空间位置角和断条率来建立 $dq0$ 坐标系下的故障模型,通过参数估计的方法来对电机定转子故障进行诊断,但存在故障早期特征不明显的问题。

上述方法对感应电机转子断条早期故障的识别准确率不高,就常用的定子电流特征分析法而言,发生转子断条时,定子电流中会出现基频周围的边频带,特征频率是 $f_b, f_b = (1 \pm 2ks)f_1, s$ 为转差

率, f_1 为电网频率。电机运行在额定负载、轻载或空载条件下时,转差率较小,特征频率 f_b 与 f_1 非常接近,且幅值相差较大,导致频谱中 f_b 易被 f_1 淹没。为了解决感应电机转子断条早期故障诊断的不足,本文从解析模型出发,通过参数辨识来诊断感应电机转子断条故障。应用参数辨识方法的关键是准确建立电机模型,自感应电机多回路模型被提出以来,因物理概念明确和能准确描述电机故障状态而受到广泛关注。利用感应电机多回路模型推导了转子发生断条的故障模型,通过滑窗技术对电机等效参数进行辨识,并以电机等效参数为依据对感应电机转子断条故障进行了研究与诊断。通过仿真试验验证了该方法的可行性。

1 感应电机正常模型方程

由文献[16]可得感应电机多回路模型方程。

电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \\ u_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r & -r_b & 0 & \cdots & -r_b \\ 0 & 0 & 0 & -r_b & r_r & -r_b & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -r_b & 0 & 0 & \cdots & r_r \\ 0 & 0 & 0 & r_e & r_e & r_e & \cdots & r_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \\ i_e \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \\ \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_n \\ \varphi_e \end{bmatrix} \quad (1)$$

磁链方程为

$$\begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \\ \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_n \\ \varphi_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{ab} & M_{ac} & M_{a1} & M_{a2} & M_{a3} & \cdots & M_{an} & 0 \\ M_{ba} & L_s & M_{bc} & M_{b1} & M_{b2} & M_{b3} & \cdots & M_{bn} & 0 \\ M_{ca} & M_{cb} & L_s & M_{c1} & M_{c2} & M_{c3} & \cdots & M_{cn} & 0 \\ M_{1a} & M_{1b} & M_{1c} & L_r & M_{12} & M_{13} & \cdots & M_{1n} & L_e \\ M_{2a} & M_{2b} & M_{2c} & M_{21} & L_r & M_{23} & \cdots & M_{2n} & L_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ M_{na} & M_{nb} & M_{nc} & M_{n1} & M_{n2} & M_{n3} & \cdots & L_r & L_e \\ 0 & 0 & 0 & L_e & L_e & L_e & \cdots & L_e & nL_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \\ i_e \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: u_x, i_x, φ_x ——定子 x 相等效绕组的电压、电流和磁链, $x=a, b, c$;

u_y, i_y, φ_y ——转子第 y 个回路的电压、电流和磁链, $y=1, 2, \cdots, n$;

u_e, i_e, φ_e ——转子端环的电压、电流和

磁链;

r_s, r_r, r_b, r_e ——定子相绕组电阻、转子回路电阻、转子每根导条电阻和转子每段端环电阻;

$L_s, L_r, L_e, M_{xy}, M_{y1y2}$ ——定子相绕组自感、

转子回路自感、转子每段端环的电感、定子 x 相绕组与转子 y 回路间的互感和转子 $y1$ 回路 $y2$ 回路间的互感, $x=a, b, c; y, y1, y2=1, 2, \dots, n; M_{yx}=M_{xy}$ 。

由文献[17]可得电感系数 M_{xy} 的一般化计算公式为

$$M_{xy} = \frac{\varphi_{xy}}{i_y} = \frac{1}{i_y} \int d\varphi_{xy} = \frac{\Lambda_g N_x N_y}{4p_n} \cos \alpha_{xy} \quad (3)$$

式中: i_y —— y 相绕组电流;

φ_{xy} —— y 相绕组通以电流 i_y 后与 x 相绕组交链的磁链;

Λ_g ——气隙磁导, $\Lambda_g = \frac{\mu_0 \tau l}{g}$;

μ_0 ——气隙磁导率;

τ ——极距;

l ——铁心有效长度;

g ——气隙有效长度;

N_x, N_y —— x 相和 y 相等效正弦绕组的串联匝数;

p_n ——电机极对数;

α_{xy} —— y 相绕组轴线滞后 x 相绕组轴线的电角度。

由此可得:

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = \frac{\Lambda_g N_s^2}{4p_n} = L_{ms} \quad (4)$$

$$L_A = L_{ms} + L_{\sigma s} \quad (5)$$

$$M_{ab} = M_{bc} = M_{ca} = -\frac{\Lambda_g N_s^2}{8p_n} = -\frac{1}{2} L_{ms} \quad (6)$$

$$L_N = \frac{\Lambda_g N_r^2}{4p_n} + L_{\sigma r} = L_{mr} + L_{\sigma r} \quad (7)$$

$$\mathbf{X} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \cos\left(\theta_1 - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta_1 + \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\sin \theta_1 & -\sin\left(\theta_1 - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta_1 + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{Y} = \frac{2}{n} \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 - \theta_r) & \cos(\theta_1 - \theta_r - \alpha) & \cdots & \cos[\theta_1 - \theta_r - (n-1)\alpha] \\ -\sin(\theta_1 - \theta_r) & -\sin(\theta_1 - \theta_r - \alpha) & \cdots & -\sin[\theta_1 - \theta_r - (n-1)\alpha] \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: θ_1 ——同步电角度。

由于端环电流 i_e 较小, 可忽略, 则将式(4)~式(11)代入式(1)、式(2), 并均折算到一次侧, 同

$$M_{ia} = M_{ai} = \frac{\Lambda_g N_s N_r}{4p_n} \cos[\theta_r + (i-1)\alpha] = \frac{N_r}{N_s} L_{ms} \cos[\theta_r + (i-1)\alpha] \quad (8)$$

$$M_{ib} = M_{bi} = \frac{N_r}{N_s} L_{ms} \cos\left[\theta_r + (i-1)\alpha - \frac{2}{3}\pi\right] \quad (9)$$

$$M_{ic} = M_{ci} = \frac{N_r}{N_s} L_{ms} \cos\left[\theta_r + (i-1)\alpha + \frac{2}{3}\pi\right] \quad (10)$$

$$M_{ij} = \frac{\Lambda_g N_r^2}{4p_n} \cos[(j-i)\alpha] = \frac{N_r^2}{N_s^2} L_{ms} \cos[(j-i)\alpha] \quad (11)$$

式中: L_{aa} ——定子 a 相绕组对自身的互感;

$L_{\sigma s}, L_{\sigma r}$ ——定子相绕组漏感和转子回路漏感;

L_A ——定子相绕组的自感;

M_{ab} ——定子相绕组 a 和 b 间的互感;

L_N ——转子回路的自感;

M_{ai} ——定子 a 相绕组和转子回路 i 间的互感;

M_{ij} ——转子回路 i 和回路 j 的互感, $i, j=1, 2, \dots, n$, 且 $j>i$;

N_s, N_r ——定子相绕组和转子回路的等效正弦绕组的串联匝数;

θ_r, α ——转子电角度和相邻转子回路轴线间的电角度。

假设

时式(1)和式(2)等式两边分别左乘 $\begin{bmatrix} \mathbf{X} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Y} \end{bmatrix}$, 简化得:

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & -\omega_1 L_s & 0 & -\omega_1 L'_m \\ \omega_1 L_s & r_s & \omega_1 L'_m & 0 \\ 0 & -(\omega_1 - \omega_r) L_m & R_r & -(\omega_1 - \omega_r) L_r \\ (\omega_1 - \omega_r) L_m & 0 & (\omega_1 - \omega_r) L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L'_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L'_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: L_s, L_r ——定子等效电感和转子等效电感,

$$L_s = \frac{3}{2} L_{ms} + L_{\sigma s}, L_r = \frac{n}{2} L_{mr} + L_{\sigma r};$$

$$L_m, L'_m \text{——等效互感}, L_m = \frac{3}{2} L_{ms}, L'_m = \frac{n}{2} L_{mr};$$

r_s, R_r ——定子相绕组电阻和转子等效电阻, $R_r = r_r - 2r_b \cos \alpha$;

ω_1, ω_r ——同步电角速度和转子电角速度。

经过 Park 变换, 感应电机多回路模型方程可转化为 $dq0$ 坐标系下的方程。

2 感应电机故障模型方程

2.1 感应电机 1 根鼠笼条断裂模型方程

假设第 $j+1$ 根鼠笼条断裂, 则将式 (1) 和式 (2) 中电阻和电感矩阵的第 $j+4$ 行和第 $j+4$ 列分别加到第 $j+3$ 行和第 $j+3$ 列, 并删掉第 $j+4$ 行和第

$j+4$ 列; 电压、电流和磁链向量的第 $j+4$ 行加到第 $j+3$ 行, 并删掉第 $j+4$ 行, 可得感应电机转子断条数量为 1 根时的多回路模型方程:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_1 = \mathbf{R}_1 \mathbf{I}_1 + p \mathbf{\Phi}_1 \\ \mathbf{\Phi}_1 = \mathbf{L}_1 \mathbf{I}_1 \end{cases} \quad (16)$$

经过多回路模型仿真分析转子回路电流, 可作近似处理: 转子发生 1 根断条时, 只有断条新形成的回路电流发生变化, 则电机稳态运行时:

$$\begin{cases} i_k = A_m \cos[(\omega_1 - \omega_r)t + \theta_i - (k-1)\alpha] \\ i_j = A_m \cos[(\omega_1 - \omega_r)t + \theta_i - (j - \frac{1}{2})\alpha] \end{cases} \quad (17)$$

其中: $k=1, 2, \dots, n$, 且 $k \neq j, j+1$ 。

令 $\mathbf{I}_1 = [i_1, i_2, \dots, i_{j-1}, i_j, i_{j+2}, \dots, i_n]^T$ 。为了保持变换之后转子电流与电机正常状态时一致, 设:

$$\mathbf{Y}' = \frac{1}{y'} \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 - \theta_r) & -\sin(\theta_1 - \theta_r) \\ \cos(\theta_1 - \theta_r - \alpha) & -\sin(\theta_1 - \theta_r - \alpha) \\ \dots & \dots \\ 2\cos\alpha\cos\left[\theta_1 - \theta_r - \left(j - \frac{1}{2}\right)\alpha\right] & -2\cos\alpha\sin\left[\theta_1 - \theta_r - \left(j - \frac{1}{2}\right)\alpha\right] \\ \dots & \dots \\ \cos[\theta_1 - \theta_r - (n-1)\alpha] & -\sin[\theta_1 - \theta_r - (n-1)\alpha] \end{bmatrix}^T \quad (18)$$

$$\mathbf{Y}_1 = \frac{1}{y'} \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 - \theta_r) & -\sin(\theta_1 - \theta_r) \\ \cos(\theta_1 - \theta_r - \alpha) & -\sin(\theta_1 - \theta_r - \alpha) \\ \dots & \dots \\ \frac{\cos\alpha}{\cos(\alpha/2)}\cos\left[\theta_1 - \theta_r - \left(j - \frac{1}{2}\right)\alpha\right] & -\frac{\cos\alpha}{\cos(\alpha/2)}\sin\left[\theta_1 - \theta_r - \left(j - \frac{1}{2}\right)\alpha\right] \\ \dots & \dots \\ \cos[\theta_1 - \theta_r - (n-1)\alpha] & -\sin[\theta_1 - \theta_r - (n-1)\alpha] \end{bmatrix}^T \quad (19)$$

其中, $y' = (n-2)/2 + \cos \alpha$ 。

则有:

$$Y'I_1 = \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = A_m \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{bmatrix} \quad (20)$$

式(14)等号两边分别左乘 $\begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & Y_1 \end{bmatrix}$ 得:

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & -\omega_1 L_s & 0 & -\omega_1 L_{m11} \\ \omega_1 L_s & r_s & \omega_1 L_{m12} & 0 \\ 0 & -(\omega_1 - \omega_r) L_m & R_{r11} & -(\omega_1 - \omega_r) L_{r11} \\ (\omega_1 - \omega_r) L_m & 0 & (\omega_1 - \omega_r) L_{r12} & R_{r12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_{m12} & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_{m11} \\ L_m & 0 & L_{r12} & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_{r11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (22)$$

L_{m11} 、 L_{m12} 、 L_{r11} 、 L_{r12} 、 R_{r11} 和 R_{r12} 的表达式见附录 A。

电机稳定运行时, i_{dq} 和 i_{qd} 均为常数。当电机参数已知, 并把 x 作为自变量, 将实测电流与故障模型输出电流差值作为目标函数 F , 则 F 是关于自变量 x 的函数, 进一步求解知 x 是关于定子 a 相输入电压初相位 θ_u 的函数, 具体表达式因目标函数 F 的表达式而变。故 L_{m11} 、 L_{m12} 、 L_{r11} 、 L_{r12} 、 R_{r11} 和 R_{r12} 均是关于 θ_u 和 θ_i 的函数, 而对于同一台电机, θ_i 是关于 θ_u 的函数, 故 L_{m11} 、 L_{m12} 、 L_{r11} 、 L_{r12} 、 R_{r11} 和 R_{r12} 是关于 θ_u 的函数。设:

$$\begin{cases} g_1(\theta_u, x) = \cos x + i_{dq} \sin x = \\ \cos x + \frac{\cos(\theta_u + \theta)}{\sin(\theta_u + \theta)} \sin x \\ g_2(\theta_u, x) = \cos x - i_{qd} \sin x = \\ \cos x - \frac{\sin(\theta_u + \theta)}{\cos(\theta_u + \theta)} \sin x \\ x = f(\theta_u) \end{cases} \quad (23)$$

θ_u 取 $0 \sim 2\pi$, 步长为 $\pi/40$ 的一系列值, 可得式(25)的大致曲线如图 1 所示。

因此, 通过滑窗技术改变 θ_u 的值, 利用改进粒子群算法辨识电机等效参数可得 L_{m11} 、 L_{m12} 、 L_{r11} 、 L_{r12} 、 R_{r11} 和 R_{r12} 的周期变化曲线, 从而通过辨识曲线来监测电机转子的运行状况。

2.2 感应电机 2 根鼠笼条断裂模型方程

假设第 $j+1$ 和第 $j+2$ 根鼠笼条断裂, 作与第 2.1 节相似处理, 可得感应电机转子断条数量为 2 根时的多回路模型方程:

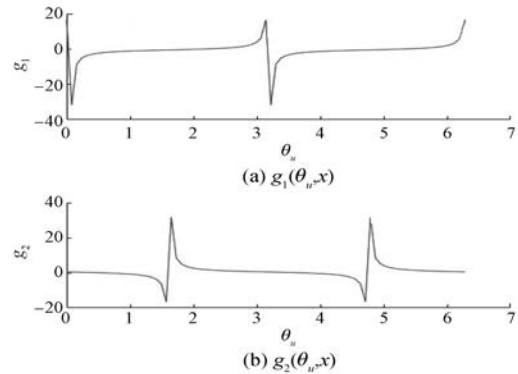


图 1 函数 $g(\theta_u, x)$ 图形

$$\begin{cases} U_2 = R_2 I_2 + p \Phi_2 \\ \Phi_2 = L_2 I_2 \end{cases} \quad (24)$$

对于 2 根鼠笼条断裂的电机, 同样可作如下近似处理: 转子发生 2 根断条时, 只有断条新形成的回路和相邻回路电流发生变化。则电机稳态运行时有:

$$\begin{cases} i_k = A_m \cos[(\omega_1 - \omega_r)t + \theta_i - (k-1)\alpha] \\ i_{j-1} = k_1 A_m \cos[(\omega_1 - \omega_r)t + \theta_i - (j-2)\alpha - \alpha_1] \\ i_j = A_m \cos[(\omega_1 - \omega_r)t + \theta_i - j\alpha] \\ i_{j+3} = k_1 A_m \cos[(\omega_1 - \omega_r)t + \theta_i - (j+2)\alpha + \alpha_1] \end{cases} \quad (25)$$

其中: $k=1, 2, \dots, n$, 且 $k \neq j-1, j, j+1, j+2, j+3$ 。 k_1 取 0.86; α_1 取 0.3α 。

令 $I_2 = [i_1, i_2, \dots, i_{j-1}, i_j, i_{j+3}, \dots, i_n]^T$ 。为了保持变换之后转子电流与电机正常状态时一致, 设:

$$Y'' = \frac{1}{y''} \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 - \theta_r) & -\sin(\theta_1 - \theta_r) \\ \dots & \dots \\ k_2 \cos[\theta_1 - \theta_r - (j-2)\alpha - \alpha_1] & -k_2 \sin[\theta_1 - \theta_r - (j-2)\alpha - \alpha_1] \\ k_{j1} \cos(\theta_1 - \theta_r - j\alpha) & -k_{j1} \sin(\theta_1 - \theta_r - j\alpha) \\ k_2 \cos[\theta_1 - \theta_r - (j+2)\alpha + \alpha_1] & -k_2 \sin[\theta_1 - \theta_r - (j+2)\alpha + \alpha_1] \\ \dots & \dots \\ \cos[\theta_1 - \theta_r - (n-1)\alpha] & -\sin[\theta_1 - \theta_r - (n-1)\alpha] \end{bmatrix}^T \quad (26)$$

$$Y_2 = \frac{1}{y_2} \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 - \theta_r) & -\sin(\theta_1 - \theta_r) \\ \dots & \dots \\ \cos[\theta_1 - \theta_r - (j-2)\alpha] & -\sin[\theta_1 - \theta_r - (j-2)\alpha] \\ k_{j2} \cos(\theta_1 - \theta_r - j\alpha) & -k_{j2} \sin(\theta_1 - \theta_r - j\alpha) \\ \cos[\theta_1 - \theta_r - (j+2)\alpha] & -\sin[\theta_1 - \theta_r - (j+2)\alpha] \\ \dots & \dots \\ \cos[\theta_1 - \theta_r - (n-1)\alpha] & -\sin[\theta_1 - \theta_r - (n-1)\alpha] \end{bmatrix}^T \quad (27)$$

其中: $y'' = \frac{1}{2}(n-4) + \cos 2\alpha + \frac{\cos 4\alpha}{\cos(4\alpha - 2\alpha_1)}$;

$y_2 = \frac{1}{2}(n-2) + \cos 2\alpha$; $k_{j1} = 2\cos 2\alpha + 1$; $k_{j2} =$

$\frac{2\cos 2\alpha + 1}{2\cos \alpha + 1}$; $k_2 = \frac{\cos 4\alpha}{k_1 \cos(4\alpha - 2\alpha_1)}$ 。

则有:

$$Y'' I_2 = \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = A_m \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{bmatrix} \quad (28)$$

式(24)等号两边分别左乘 $\begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & Y_2 \end{bmatrix}$, 得:

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & -\omega_1 L_s & 0 & -\omega_1 L_{m21} \\ \omega_1 L_s & r_s & \omega_1 L_{m22} & 0 \\ 0 & -(\omega_1 - \omega_r) L_m & R_{r21} & -(\omega_1 - \omega_r) L_{r21} \\ (\omega_1 - \omega_r) L_m & 0 & (\omega_1 - \omega_r) L_{r22} & R_{r22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_{m22} & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_{m21} \\ L_m & 0 & L_{r22} & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_{r21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

L_{m21} 、 L_{m22} 、 L_{r21} 、 L_{r22} 、 R_{r21} 和 R_{r22} 的表达式见附录 B。

3 感应电机参数辨识

对型号为 Y160L-4 的 15 kW 电机进行参数辨识,运用优化算法对电机进行参数辨识的研究已有很多^[18-20],不再赘述。运用感应电机多回路模型方程对断 1 根鼠笼条的故障电机进行仿真,利用滑窗技术可以得到一系列输入电压和电流响应的值,作 $dq0$ 变换后,运用改进粒子群算法和推导的故障电机方程进行参数辨识,可得电机等效参数周期变化曲线。仿真步骤如图 2 所示。

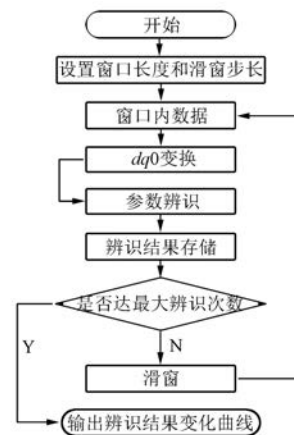
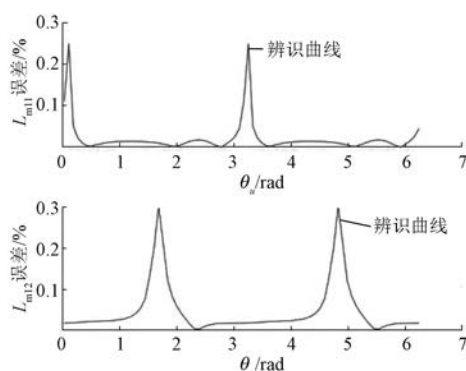
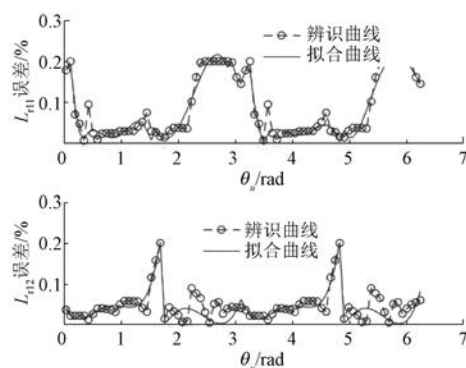
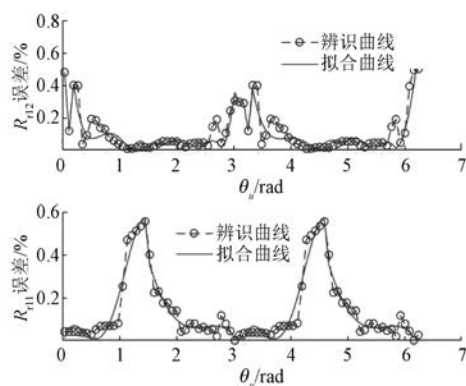


图 2 仿真步骤

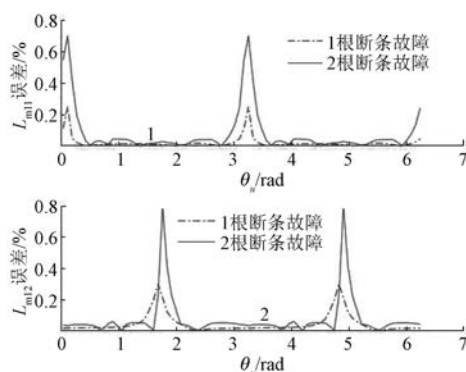
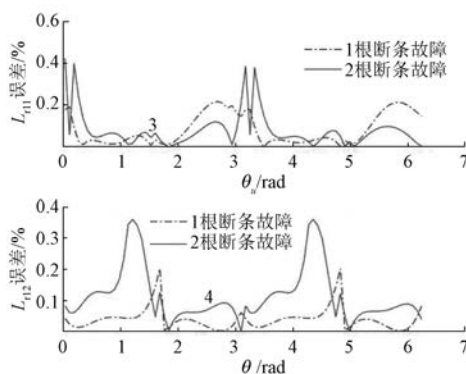
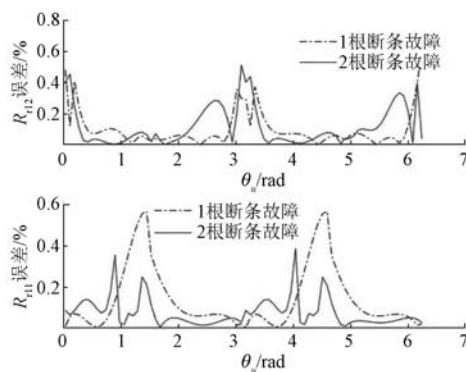
广州贯行电能技术有限公司的 CEIU-S-01 高级智能量测单元能实现准确的常规电气参量及电能质量六项指标监测,并可实现波形召测和高次谐波分解。电气参量的采样频率为 8 000 Hz,故滑窗步长可选为 $\pi/40$,则输入电压在一个周期内变化时,电机发生 1 根断条故障的等效参数辨识结果如图 3~图 5 所示。

图 3 L'_m 辨识结果图 4 L_r 辨识结果

由图 3~图 5 可知,电机发生断条故障的等效

图 5 R_r 辨识结果

参数辨识曲线周期是输入电压周期的 1/2,且在一个电压周期内存在 2 个尖峰,可以作为故障特征区别于正常电机。同理可得转子发生 2 根断条故障时,电机等效参数辨识结果如图 6~图 8 所示。

图 6 L'_m 辨识结果比较图 7 L_r 辨识结果比较图 8 R_r 辨识结果比较

为了进一步区分发生的是 1 根断条故障和还是发生 2 根断条故障,将图 6~图 8 中的平缓部分取平均值。通过将图 6~图 8 中的 1、2、3 和 4 局

部放大图如图 9 所示。分别计算电感误差平均值,如表 1 所示。

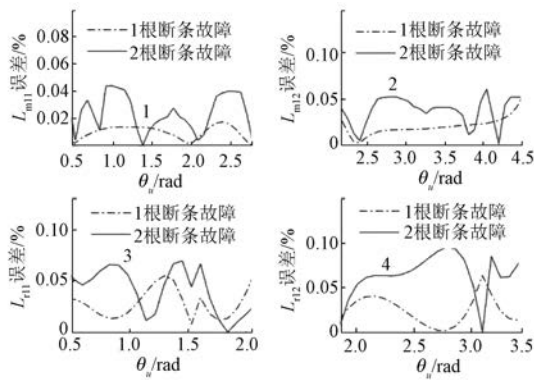


图 9 电感辨识结果局部放大

表 1 电感误差平均值

参数名称		误差平均值/%	
		1 根断条故障	2 根断条故障
L'_m	L_{m11}	1.26	2.61
	L_{m12}	2.62	3.85
L_r	L_{r11}	3.30	4.71
	L_{r12}	3.11	6.29

通过图 9 和表 1 可知,发生不同程度的转子断条故障时,电感等效参数的变化百分比大小存在差异,因此可将电感等效参数的百分比变化大小作为判断转子断条故障严重程度的依据。

4 结 语

本文针对感应电机转子发生早期断条故障时,因故障特征信号不明显而造成早期故障发现不及时的问题,推导了感应电机转子断条故障模型,运用改进粒子群算法和滑窗技术辨识电机等效参数,通过电机等效参数的变化曲线,诊断出电机早期断条故障,同时给出了转子发生不同程度故障时的差异指标。试验结果与理论分析的一致性验证了该方法的可行性;同时为利用信息融合技术诊断电机转子断条故障提供了新思路。

【参 考 文 献】

[1] 阳同光,蒋新华,付强.瞬时功率频谱分析在牵引电机转子故障诊断的应用研究[J].电机与控制学报,2012,16(10): 95.
[2] DRIF M, CARDOSO A J M. The use of the

instantaneous-reactive-power signature analysis for rotor-cage-fault diagnostics in three-phase induction motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11): 4606.

[3] 贾朱植,杨理践,祝洪宇,等.基于瞬时频率分析的笼型电机转子断条故障诊断[J].电机与控制应用,2017,44(8): 74.
[4] CARDOSO A J M, CRUZ S M A, FONSECA D S B. Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors, by Park's vector approach [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14 (3): 595.
[5] 蒋建东,蔡泽祥.用 Park 变换方法检测感应电动机转子故障[J].电力自动化设备,2004,24(5): 55.
[6] 刘振兴,张哲,尹项根,等.一种新型的笼型异步电动机转子故障在线监测和诊断方法[J].电工技术学报,2002,17(4): 89.
[7] 林志芳.基于 CCF-HTLS 算法的异步电动机转子故障检测[J].电机与控制应用,2019,46(3): 109.
[8] 曹志彤,何国光,陈宏平,等.电机故障特征值的倍频小波分析[J].中国电机工程学报,2003,23(7): 112.
[9] 夏立,费奇.基于信息融合分析的感应电机故障检测方法[J].电机与控制学报,2006,10(3): 291.
[10] 李学军,李平,蒋玲莉,等.基于异类信息特征融合的异步电机故障诊断[J].仪器仪表学报,2013,34 (1): 227.
[11] 韩丽,史丽萍.基于信息融合技术的异步电机故障诊断研究[J].中国矿业大学学报,2010,39(2): 178.
[12] 李俊卿,李忠徽,全宗义.基于信息融合的双馈风机定子匝间短路故障诊断[J].电机与控制应用, 2017,44(8): 99.
[13] 钱华明,王雯升.遗传小波神经网络及在电机故障诊断中的应用[J].电子测量与仪器学报,2009,23 (3): 81.
[14] BACHIR S, TNANI S, TRIGEASSOU J C, et al. Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(3): 963.
[15] BAZINE I B A, TNANI S, POINOT T, et al. On-line detection of stator and rotor faults occurring in induction machine diagnosis by parameters estimation [C] // 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives,

- 2011.
- [16] 邱阿瑞, 张龙照. 鼠笼式异步电动机转子导条及端环故障时的稳态运行分析[J]. 电工技术学报, 1987, 2(3): 7.
- [17] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010: 393-395.
- [18] 黄开胜, 童怀, 郑泰胜, 等. 遗传算法在异步电动机动态模型参数识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 38.
- [19] 李洁, 杜茜, 宋海军, 等. 考虑铁损的异步电机参数辨识实验研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 89.
- [20] 黄宇, 韩璞, 刘长良, 等. 改进量子粒子群算法及其在系统辨识中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(20): 114.

收稿日期: 2019-06-10

附录 A

$$\begin{aligned}
 L_{m11} &= L'_m + k_{\alpha 1} L_{ms} - k_{\alpha 2} (\cos x + i_{dq} \sin x) L_{ms}, L_{m12} = L'_m + k_{\alpha 1} L_{ms} + k_{\alpha 2} (\cos x - i_{dq} \sin x) L_{ms} \\
 L_{r11} &= L_r + k_{\alpha 1} L_{ms} + k_{\alpha 3} L_{\sigma r} - (k_{\alpha 2} L_{ms} + k_{\alpha 3} L_{\sigma r}) (\cos x + i_{dq} \sin x) \\
 L_{r12} &= L_r + k_{\alpha 1} L_{ms} + k_{\alpha 3} L_{\sigma r} + (k_{\alpha 2} L_{ms} + k_{\alpha 3} L_{\sigma r}) (\cos x - i_{dq} \sin x) \\
 R_{r11} &= R_r - \frac{\Delta 1 - r_b \cos \alpha}{(n-2)/2 + \cos \alpha} - \frac{(\Delta 1 - r_b \cos 2\alpha) (\cos x - i_{dq} \sin x)}{(n-2)/2 + \cos \alpha} \\
 R_{r12} &= R_r - \frac{\Delta 1 - r_b \cos \alpha}{(n-2)/2 + \cos \alpha} + \frac{(\Delta 1 - r_b \cos 2\alpha) (\cos x + i_{dq} \sin x)}{(n-2)/2 + \cos \alpha}
 \end{aligned}$$

其中: $k_{\alpha 1} = \cos(\alpha/2) - 1$; $k_{\alpha 2} = \cos(\alpha/2) - \cos \alpha$; $k_{\alpha 3} = \frac{\cos \alpha}{(n-2)/2 + \cos \alpha} \left[\frac{1}{\cos(\alpha/2)} - 1 \right]$; $i_{dq} = \frac{i_{dr}}{i_{qr}}$;

$$i_{qd} = \frac{i_{qr}}{i_{dr}}; \Delta 1 = r_r \cos \alpha \left[1 - \frac{1}{\cos(\alpha/2)} \right] + r_b \left[\cos \frac{3\alpha}{2} + \frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha/2)} \left(\cos \frac{3\alpha}{2} + 1 \right) - 2(\cos \alpha)^2 \right];$$

$$x = 2 \left[(\omega_1 - \omega_r) t - 2 \left(j - \frac{1}{2} \right) \alpha \right] \circ$$

附录 B

$$\begin{aligned}
 L_{m21} &= L'_m + l_{\alpha 1} L_{ms} - l_{\alpha 2} (\cos x + i_{dq} \sin x) L_{ms}, L_{m22} = L'_m + l_{\alpha 1} L_{ms} + l_{\alpha 2} (\cos x - i_{dq} \sin x) L_{ms} \\
 L_{r21} &= L_r + l_{\alpha 3} L_{ms} + l_{\alpha 4} L_{\sigma r} + \frac{L_M}{n-2+2\cos 2\alpha} - l_{\alpha 5} (\cos x + i_{dq} \sin x) \\
 L_{r22} &= L_r + l_{\alpha 3} L_{ms} + l_{\alpha 4} L_{\sigma r} + \frac{L_M}{n-2+2\cos 2\alpha} + l_{\alpha 5} (\cos x - i_{dq} \sin x) \\
 R_{r21} &= T_r R_r - \frac{l_{\alpha 6} r_r + l_{\alpha 8} r_b + (l_{\alpha 7} r_r + l_{\alpha 9} r_b) (\cos x - i_{dq} \sin x)}{(n-2)/2 + \cos 2\alpha} \\
 R_{r22} &= T_r R_r - \frac{l_{\alpha 6} r_r + l_{\alpha 8} r_b - (l_{\alpha 7} r_r + l_{\alpha 9} r_b) (\cos x + i_{dq} \sin x)}{(n-2)/2 + \cos 2\alpha}
 \end{aligned}$$

其中: $l_{\alpha 1} = k_1 \cos \alpha_1 + \cos \alpha - 2$; $l_{\alpha 2} = k_1 \cos(4\alpha - \alpha_1) + \cos \alpha - \cos 2\alpha - \cos 4\alpha$;

$$l_{\alpha 3} = k_1 \cos \alpha_1 + \cos 2\alpha - 2; l_{\alpha 4} = \frac{k_1 \cos \alpha_1 - 1}{(n-2)/2 + \cos 2\alpha};$$

$$l_{\alpha 5} = \frac{L_M}{n-2+2\cos 2\alpha} + [k_1 \cos(4\alpha - \alpha_1) - \cos 4\alpha] \left[L_{ms} + \frac{L_{\sigma r}}{(n-2)/2 + \cos 2\alpha} \right];$$

$$l_{\alpha 6} = \frac{2\cos 2\alpha + 1}{2} \left(1 - \frac{3}{2\cos \alpha + 1} \right) + k_1 k_2 - k_1 \cos \alpha_1;$$

$$l_{\alpha 7} = \frac{2\cos 2\alpha + 1}{2} \left(1 - \frac{3}{2\cos \alpha + 1} \right) + \cos 4\alpha - k_1 \cos(4\alpha - \alpha_1);$$

$$\begin{aligned}
l_{\alpha 8} &= \frac{2\cos 2\alpha + 1}{2\cos \alpha + 1} [k_1 \cos(2\alpha - \alpha_1) + 2] + \cos 2\alpha + k_1 \cos(\alpha + \alpha_1) - \cos \alpha (2\cos 2\alpha + 1 + 2k_1 k_2); \\
l_{\alpha 9} &= \frac{2\cos 2\alpha + 1}{2\cos \alpha + 1} [k_1 \cos(2\alpha - \alpha_1) + 2] + \cos 2\alpha + k_1 \cos(5\alpha - \alpha_1) - \cos \alpha (2\cos 2\alpha + 1 + 2\cos 4\alpha); \\
L_M &= l_{\alpha 10} L_{ms} + l_{\alpha 11} L_{sr}; \\
l_{\alpha 10} &= \frac{2\cos 2\alpha + 1}{2\cos \alpha + 1} (4\cos \alpha + 2\cos 2\alpha + 3) + 2(\cos \alpha - \cos 2\alpha) \left(\frac{n-4}{2} - \cos 2\alpha \right) - (2\cos 2\alpha + 1)^2; \\
l_{\alpha 11} &= 3 \times \frac{2\cos 2\alpha + 1}{2\cos \alpha + 1} - 2\cos 2\alpha - 1; \\
T_r &= \frac{1}{(n-2)/2 + \cos 2\alpha} \cdot \left[\frac{n-4}{2} + \frac{\cos 4\alpha}{\cos(4\alpha - 2\alpha_1)} + \cos 2\alpha \right]; \\
x &= 2[(\omega_1 - \omega_r)t - j\alpha]_0.
\end{aligned}$$

(上接第 94 页)

$$\begin{aligned}
M_2 &= X_L X_{T3} X_{dT} X_w K_3 K_4 (6i) + X_{T2} X_{T3} X_{dT} X_w K_2 K_3 (9i) + X_{T2} X_{T3} X_{dT} X_w K_3 K_4 (3i) + \\
&\quad X_L X_{T2} X_{T3} K_2 K_3 r_w (-4i) + X_L X_{T2} X_{dT} K_2 K_3 r_w (-6i) + X_L X_{T2} X_{dT} K_2 K_4 r_w (-i) + \\
&\quad X_L X_{T3} X_{dT} K_2 K_3 r_w (-18i) + X_L X_{T3} X_{dT} K_3 K_4 r_w (-6i) + X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_2 K_3 r_w (-9i) + \\
&\quad X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_3 K_4 r_w (-3i) - X_L X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_1 K_2^2; \\
N_2 &= X_L X_{T2} X_{dT} X_w K_2^2 K_3 (-3i) - 6X_L X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_1 K_2 K_3 - X_L X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_1 K_2 K_4 + \\
&\quad X_L X_{T2} X_{T3} X_w K_2 K_3 K_4 (-2i) + X_L X_{T2} X_{dT} X_w K_2 K_3 K_4 (-3i) + \\
&\quad X_L X_{T3} X_{dT} X_w K_2 K_3 K_4 (-18i) + X_L X_{T2} X_{T3} K_2 K_3 K_4 r_w (2i); \\
O_2 &= X_L X_{T2} X_{dT} K_2 K_3 K_4 r_w (3i) + X_L X_{T3} X_{dT} K_2 K_3 K_4 r_w (18i) + 3X_L X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_1 K_2^2 K_3 + \\
&\quad 6X_L^2 X_{T3} X_{dT} K_1 K_2 K_3 K_4 + X_L^2 X_{T2} X_{T3} K_1 K_2^2 K_3 K_4 - 6X_L^2 X_{T3} X_{dT} K_1 K_2^2 K_3 K_4 + \\
&\quad 3X_L X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_1 K_2 K_3 K_4; \\
P_{22} &= 2X_L^3 X_w K_2^2 + M_1 - 2X_L^2 X_{T3} X_w - 2X_L^2 X_{dT} X_w - 2X_L^3 X_w K_2 + X_L^2 X_{T3} r_w (-2i) + \\
&\quad X_L^2 X_{dT} r_w (-2i) + P_{11} - 2X_L^2 X_{T3} X_{dT} K_1 + L_1 - 2X_L^2 X_{T2} X_w K_2 - 2X_L^2 X_{T3} X_w K_2 + \\
&\quad 2X_L^2 X_{T3} X_w K_4 + K_1 + N_1 + 2X_L^2 X_{dT} X_w K_2 + 2X_L^2 X_{dT} X_w K_4 - V_1 + 2X_L^3 X_w K_2 K_4 + S_1 + \\
&\quad X_L^2 X_{T3} K_2 r_w (-2i) + X_L^2 X_{T3} K_4 r_w (2i) - 2X_L X_{T2} X_{T3} X_w + X_L^2 X_{dT} K_4 r_w (2i) + \\
&\quad R_1 + X_L^2 X_{T2} X_w K_2^2 + Y_1 - 2X_L^3 X_w K_2^2 K_4; \\
Q_{22} &= -2X_L X_{T2} X_{dT} X_w - 4X_L X_{T3} X_{dT} X_w - 2X_{T2} X_{T3} X_{dT} X_w - T_1 + X_L X_{T2} X_{T3} r_w (-2i) + \\
&\quad X_L X_{T2} X_{dT} r_w (-2i) + X_L X_{T3} X_{dT} r_w (-4i) + X_{T2} X_{T3} X_{dT} r_w (-2i) - 2X_L X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_1 - \\
&\quad X_L X_{T2} X_{T3} X_w K_2 + X_L X_{T2} X_{T3} X_w K_4 + X_L X_{T2} X_{dT} X_w K_2 + X_L X_{T2} X_{dT} X_w K_4 + \\
&\quad 4X_L X_{T3} X_{dT} X_w K_4 + X_L X_{T2} X_{T3} K_2 r_w (-i) + X_L X_{T2} X_{T3} K_4 r_w i + X_L X_{T2} X_{dT} K_2 r_w i_0.
\end{aligned}$$