

基于电流残差估计的五相永磁同步电机定子故障检测与分类*

张 凯, 时维国

(大连交通大学 自动化与电气工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘 要: 针对五相永磁同步电机匝间短路故障和高电阻连接故障具有相同的故障特征的问题, 提出一种基于电流残差估计和高频电流对比的故障检测与分类方法。首先利用卡尔曼滤波器估计故障时交直流电流残差来检测电机异常状况; 然后利用高频时电感和电阻的特性不同, 来区分匝间短路和高电阻连接故障; 最后对两种故障的严重程度和故障相位进行研究。仿真结果表明, 该方法能够有效诊断电机定子故障, 准确识别电机匝间短路故障和高电阻连接故障, 并且故障的严重程度对转速及负载变化有良好的鲁棒性。

关键词: 电流残差; 高频信号注入; 匝间短路故障; 高电阻连接故障; 卡尔曼滤波器

中图分类号: TM341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2022)06-0066-10

doi: 10.12177/emca.2022.030

Fault Detection and Classification of Stator of Five-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Current Residual Estimation*

ZHANG Kai, SHI Weiguo

(School of Automation and Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: For the problem that five-phase permanent magnet synchronous motor inter-turn short-circuit fault and high resistance connection fault have the same fault characteristics, a fault detection and classification method based on current residual estimation and high-frequency current comparison is proposed. Firstly, the Kalman filter is used to detect the abnormal condition of motor by estimating the current residual of d - q axis during fault. Then the different characteristics of inductance and resistance at high frequency are used to distinguish the inter-turn short-circuit fault and high resistance connection fault. Finally, the severity and faulty phase of the two faults are studied. Simulation results show that this method can effectively diagnose motor stator faults and accurately identify inter-turn short-circuit fault and high resistance connection fault, and the severity of the fault has good robustness against the change of speed and load.

Key words: current residual; high-frequency signal injection; inter-turn short-circuit fault; high resistance connection fault; Kalman filter

0 引 言

五相永磁同步电机(PMSM)相比于三相电机,具有更低的转矩脉动、更高的功率密度以及更强的容错能力^[1],在工业应用中越来越受欢迎。

同时,在电机长期运行期间,其安全性与可靠性也是需要解决的紧要问题,尤其在船舶电力推进^[2]、航空航天^[3]、电动汽车^[4]以及轨道交通^[2]等工作条件要求较高的场合,如有故障发生,轻则造成停机停产,重则危及生命安全。

收稿日期: 2022-04-11; 收到修改稿日期: 2022-05-15

* 基金项目: 辽宁省教育厅科学研究项目(JDL2019011, LJKZ0489); 辽宁省自然科学基金资助项目(20170540141)

作者简介: 张 凯(1995—),男,硕士研究生,研究方向为电机控制与故障诊断。

时维国(1973—),男,博士,教授,研究方向为网络控制与电机驱动控制。(通信作者)

五相 PMSM 约有 37% 的故障发生在定子^[5], 定子故障又以匝间短路 (ITSC) 故障和高电阻连接 (HRC) 故障居多, 并且这两种故障具有相同的故障特征, 很难区分。ITSC 故障主要是由于电气应力、机械应力和过载导致定子线圈的匝间绝缘劣化引起的, 若不能及时处理, 相邻匝间的故障会迅速扩散到整个绕组, 导致主绕组短路^[6]。而 HRC 故障是一种渐进式故障, 引起电机局部过热, 对电机本身的损坏有限, HRC 故障特征为相电阻增大而相电感不变。大多数情况下, 只会恶化机器的运行性能, 如增加转矩脉动、降低运行效率^[7]。

目前, 针对 PMSM 定子故障在线诊断已经开展了大量研究, 主要方法有解析模型法、信号处理法和智能算法。基于解析模型的方法主要采用观测器估计或状态估计进行故障识别。文献[8]根据 ITSC 故障会对模型预测控制系统中价值函数产生影响, 将价值函数的直流分量和二次谐波分量存储到表格中, 利用查表的方式诊断 ITSC 故障。文献[9]根据 ITSC 数学模型建立故障观测器, 估计故障情况下电流异常变化, 进行故障诊断。基于信号处理的方法主要选择电机电流、电压进行频谱分析提取故障特征量。文献[10]利用改进小波包变换提取 ITSC 故障电流信号, 对早期 ITSC 故障进行分析和检测。文献[11]采用信号注入的方法, 利用定子电流直流分量的增量, 对 HRC 故障的严重程度和故障相位进行检测。文献[12]分析了零序电压的幅值与初始相位, 提出了基于改进带相角差的故障指示器, 用于 HRC 故障检测与故障相识别。利用智能算法进行故障诊断, 需要大量的数据训练故障诊断模型。文献[13]考虑时间序列数据对时间的依赖性, 利用长短时记忆构造编码器和解码器, 提出基于递归神经网络的 ITSC 故障程度估计方法。文献[14]基于条件生成式双对抗自编码网络生成大量数据样本, 然后利用卷积神经网络提取特征对 ITSC 故障进行诊断。

上述故障诊断方法只是检测单一故障, 电机运行过程中 ITSC 故障与 HRC 故障都会引起电机不对称性, 具有相同故障特征。文献[15]采用注入高频方波信号的方法, 利用 ITSC 故障和 HRC 故障高频阻抗的差异, 检测三相电流均方根值比率的异常变化, 区分两种故障。文献[16]利用零序电压分量检测电机异常状态, 然后根据 ITSC 故

障时零序电压高频分量幅值与注入信号频率成正比, 而 HRC 故障时零序电压高频分量幅值恒定, 进行两种故障类型识别。

本文提出了一种基于电流残差估计的定子故障诊断方法, 根据高频时电感与电阻的阻抗特性不同, 进行 ITSC 故障和 HRC 故障的分类研究。首先根据五相 PMSM 正常运行与发生两种故障时电流不同, 采用观测器估计电流的故障残差, 在线检测电机的异常状态。在检测到电机异常运行时, 向电机驱动系统注入高频电流信号, 利用高频分量来识别故障类型。然后对两种故障的故障程度与故障相位进行研究, 分析转速和负载变化对故障程度的影响。最后, 通过仿真验证证明本文提出的电机定子故障检测与分类方法的有效性。

1 五相 PMSM 故障模型

1.1 ITSC 故障模型

假设 ITSC 故障发生在 A 相, 故障模型如图 1 所示。其中 R_f 是匝间绝缘劣化的短路电阻, i_f 是短路绕组内的故障循环电流。利用 ITSC 故障的等效电路图进行故障研究, 如图 2 所示。电机每一相均有相电阻、自感、互感、反电动势, 相绕组分为健康部分和短路部分。短路匝数比 μ 为短路匝数与总匝数之比。

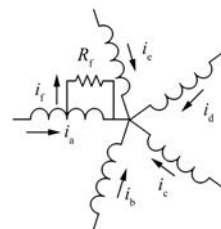


图 1 ITSC 故障发生在 A 相的故障模型

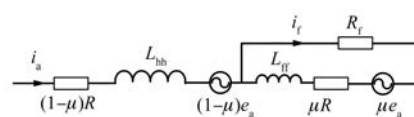


图 2 A 相 ITSC 故障等效电路图

基于等效电路, A 相 ITSC 故障忽略互感的电压平衡方程为

$$\begin{cases} u_{ah} = (1 - \mu) Ri_a + L_{hh} \frac{di_a}{dt} + (1 - \mu) e_a \\ u_{af} = \mu R (i_a - i_f) + L_{ff} \frac{d(i_a - i_f)}{dt} + \mu e_a \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{ah} 和 u_{af} 分别为健康部分和故障部分绕组电压, 无故障发生时 $u_{af} = 0$; L_{hh} 和 L_{ff} 是正常绕组自感和短路绕组自感, 与定子绕组自感 L 的关系为 $L_{hh} = (1-\mu)^2 L$, $L_{ff} = \mu^2 L$; R 为定子电阻; e_a 为定子反电动势; i_a 为定子电流。

由于 A 相多了故障部分电压方程, 电机模型维数增加至六维。通过坐标变换, 得到旋转坐标系下的电机 A 相定子绕组发生 ITSC 故障时的电压平衡方程。由于五相 PMSM 发生 ITSC 故障时 d_1 - q_1 轴电流故障特征明显, 所以在 d_1 - q_1 轴下进行研究, 交直流电压方程表示为

$$\begin{cases} u_{d_1} = Ri_{d_1} + L_{d_1} \frac{di_{d_1}}{dt} - \omega_e L_{q_1} i_{q_1} - \\ \frac{2}{5} \left[R_{af} i_f \cos\theta + \frac{d}{dt} (L_{af} i_f \cos\theta) + \omega_e L_{af} i_f \sin\theta \right] \\ u_{q_1} = Ri_{q_1} + L_{q_1} \frac{di_{q_1}}{dt} + \omega_e L_{d_1} i_{d_1} - \\ \frac{2}{5} \left[-R_{af} i_f \sin\theta - \frac{d}{dt} (L_{af} i_f \sin\theta) + \omega_e L_{af} i_f \cos\theta \right] + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (2)$$

式中: d_1 轴电压、电流、电感、反电动势分别为 u_{d_1} 、 i_{d_1} 、 L_{d_1} 、 e_{d_1} , q_1 轴类似; θ 是电机转子电角度; ω_e 是电角速度; 本文采用隐极式电机分析, $L_{d_1} = L_{q_1} = L$, $L_{af} = \mu L$; $R_{af} = \mu R$; ψ_f 为永磁体磁链。

1.2 HRC 故障模型

电机发生 HRC 故障时, 故障模型可以用电机相绕组连接附加电阻 R_{dd} 来表示, 如图 3 所示。假设 HRC 故障发生在 A 相绕组, 其他四相正常, A 相电压方程可表示为

$$u_a = (R + R_{dd}) i_a + L \frac{di_a}{dt} + M \frac{di_b}{dt} + M \frac{di_c}{dt} + M \frac{di_d}{dt} + M \frac{di_e}{dt} + e_a \quad (3)$$

式中: M 为定子绕组互感。

d_1 - q_1 轴的电压方程为

$$\begin{cases} u_{d_1} = Ri_{d_1} + L \frac{di_{d_1}}{dt} - \omega_e Li_{q_1} + \frac{2}{5} R_{dd} i_a \cos\theta \\ u_{q_1} = Ri_{q_1} + L \frac{di_{q_1}}{dt} + \omega_e (Li_{d_1} + \psi_f) - \frac{2}{5} R_{dd} i_a \sin\theta \end{cases} \quad (4)$$

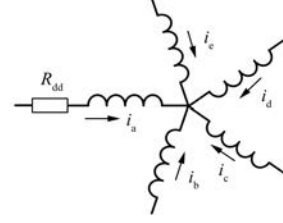


图3 HRC 故障模型

2 故障研究

2.1 电流估计

五相 PMSM 正常运行时 d_1 - q_1 轴电压平衡方程式为

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{d_1}}{dt} \\ \frac{di_{q_1}}{dt} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} i_{d_1} \\ i_{q_1} \end{bmatrix} + \mathbf{b} \quad (5)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_e \\ -\omega_e & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}; \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \frac{u_{d_1}}{L} \\ \frac{u_{q_1} - \omega_e \psi_f}{L} \end{bmatrix}; \text{矩阵}$$

$\mathbf{A}$ 的两个特征值为 $-R/L \pm j\omega_e$ 。

矩阵函数式(6)的通解可以写为

$$\begin{bmatrix} i_{d_1} \\ i_{q_1} \end{bmatrix} = e^{\mathbf{A}T_s} \begin{bmatrix} i_{d_1}(n) \\ i_{q_1}(n) \end{bmatrix} + \int_0^{T_s} e^{\mathbf{A}(T_s-\tau)} \mathbf{b}(\tau) d\tau \quad (6)$$

式中: T_s 为采样时间; $i_{d_1}(n)$ 、 $i_{q_1}(n)$ 为 n 时刻电流值; τ 为时间变量。

由于观测器用于观测稳态时的电流^[17], 可以忽略式(6)的导数分量, 稳态时电流方程为

$$\begin{bmatrix} i_{d_1} \\ i_{q_1} \end{bmatrix} = -\mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{u_{d_1}}{L} \\ \frac{u_{q_1} - \omega_e \psi_f}{L} \end{bmatrix} \quad (7)$$

结合式(6)和式(7), 得到电流的估计值 $i_{d_1}(n+1)$ 、 $i_{q_1}(n+1)$ 为

$$\begin{bmatrix} i_{d_1}(n+1) \\ i_{q_1}(n+1) \end{bmatrix} = e^{\mathbf{A}T_s} \begin{bmatrix} i_{d_1}(n) \\ i_{q_1}(n) \end{bmatrix} - (\mathbf{I} - e^{\mathbf{A}T_s}) \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{u_{d_1}(n)}{L} \\ \frac{u_{q_1}(n) - \omega_e \psi_f}{L} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{I}$ 为二阶单位矩阵。

式(8)中矩阵 $\mathbf{A}$ 的两个特征值实部为负数, 这表示 e^{At} 会随着时间的推移而迅速减小, 电流估计值接近稳态时的电机电流值。

2.2 故障电流估计

当电机发生 ITSC 故障和 HRC 故障时, 估计电流方程中多了故障特征电流 i_{df} 和 i_{qf} , 含有故障电流的电流稳态方程为

$$\begin{bmatrix} i_{d1-f} \\ i_{q1-f} \end{bmatrix} = -\mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{u_{d1-f}}{L} \\ \frac{u_{q1-f} - \omega_e \psi_f}{L} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{df} \\ i_{qf} \end{bmatrix} \quad (9)$$

电机发生 ITSC 故障时, 根据式(2), 并代入故障循环电流 $i_f = I_f \sin(\theta + \varphi)$ (I_f 和 φ 为故障循环电流幅值和初相位), 得到故障电流 i_{df_ITSC} 与 i_{qf_ITSC} 为

$$\begin{bmatrix} i_{df_ITSC} \\ i_{qf_ITSC} \end{bmatrix} = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} -\mu I_f \cos\theta \sin(\theta + \varphi) \\ \mu I_f \sin\theta \sin(\theta + \varphi) \end{bmatrix} \quad (10)$$

电机含有 ITSC 故障时, d_1 - q_1 轴多出了含有故障特征的电流项 i_{df_ITSC} 与 i_{qf_ITSC} 。电机正常运行时, 电流估计值不含二次谐波分量。当发生 ITSC 故障后, 电流估计值发生变化, 估计电流中含有幅值为 $2\mu I_f/5$ 的二次谐波分量, 其初相位与故障电流 i_f 的初相位有关。并且估计电流二次谐波的大小与 μ 和故障电流幅值 I_f 有关。

电机发生 HRC 故障时, 根据式(4), 并带入相电流 $i_a = I_a \sin\theta$, 得到含有 HRC 故障特征的电流项 i_{df_HRC} 与 i_{qf_HRC} 为

$$\begin{bmatrix} i_{df_HRC} \\ i_{qf_HRC} \end{bmatrix} = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} R_{dd} I_a \sin\theta \cos\theta \\ -R_{dd} I_a \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

从式(11)可以看出, 发生 HRC 故障时, d_1 - q_1 轴估计电流多出了幅值为 $2R_{dd} I_a/5$ 的二次谐波分量。

分析式(10)和式(11)可知, ITSC 和 HRC 故障电流估计残差都含有二次谐波, 可以根据电流残差判断电机是否发生故障, 但是仅凭借电流残差的二次谐波不能区分两种故障。

2.3 故障分类

比较图 1 和图 3, 可以看出 ITSC 故障会改变电机相电阻和相电感, HRC 故障只改变电机相电阻。因此, 可以根据高频时电感是否占主导地位,

区分两种故障。根据文献[18], 逆变器最佳开关频率为 20 kHz, 为了减少逆变器开关的影响, 注入信号选择 1 kHz 左右的高频信号。高频注入信号如式(12)所示, 高频注入电流的幅值为 I_h , 高频电流的角频率为 ω_h 。在高频条件下, 由于 ω_e 远小于 ω_h , 电阻压降和反电动势可以忽略^[18], d_1 - q_1 轴电压方程如式(13)所示。

$$\begin{cases} i_{\alpha}^h = I_h \sin(\omega_h t) \\ i_{\beta}^h = I_h \sin(\omega_h t + 90^\circ) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} u_{d1}^h \approx j(\omega_h - \omega_e) L i_{d1}^h \\ u_{q1}^h \approx j(\omega_h - \omega_e) L i_{q1}^h \end{cases} \quad (13)$$

式中: $j(\omega_h - \omega_e)L$ 为高频条件下的电机阻抗; j 为虚数单位。

当 A 相发生 ITSC 故障时, 故障电流包含高频分量, 高频条件下电压方程为

$$\begin{cases} u_{d1}^h = j(\omega_h - \omega_e) i_{d1_ITSC}^h L - \frac{2}{5} j(\omega_h - \omega_e) \mu \omega_e L i_f^h \cos\theta \\ u_{q1}^h = j(\omega_h - \omega_e) i_{q1_ITSC}^h L + \frac{2}{5} j(\omega_h - \omega_e) \mu \omega_e L i_f^h \sin\theta \end{cases} \quad (14)$$

联立式(13)和式(14), 得到故障时高频电流表达式:

$$\begin{cases} i_{d1_ITSC}^h = i_{d1}^h + \frac{2}{5} \mu \omega_e i_f^h \cos\theta \\ i_{q1_ITSC}^h = i_{q1}^h - \frac{2}{5} \mu \omega_e i_f^h \sin\theta \end{cases} \quad (15)$$

同理可得 HRC 故障时高频电流表达式:

$$\begin{cases} i_{d1_HRC}^h = i_{d1}^h - \frac{2}{5} R_{dd} i_a^h \cos\theta \\ i_{q1_HRC}^h = i_{q1}^h + \frac{2}{5} R_{dd} i_a^h \sin\theta \end{cases} \quad (16)$$

比较式(15)和式(16), 高频条件下 ITSC 和 HRC 故障分别与 i_f^h 和 i_a^h 有关。根据文献[19], 在电机漏感 $L_{ls} = 1.375 \times 10^{-5}$ H, ITSC 单匝故障的故障率为 0.063 时, 高频故障循环电流 i_f^h 的均方根(RMS)值约为高频相电流 i_a^h 均方根值的 8~10 倍。以上说明 ITSC 故障引起的电感微小变化将在故障循环电流 i_f 中产生更大的故障特征。为了从电流残差中提取高频电流信号故障特征, 需要设计带通滤波器(BPF)。经过 BPF, 滤除低频分量和逆变器高频分量的影响, 从故障电流残差中提取约 1 kHz 的高频分量。

根据 ITSC 故障在高频时更加明显, 设置故障分类指示器 FI_f^h 为 $RMS \sqrt{(i_{d1}^h)^2 + (i_{q1}^h)^2}$ 与 $RMS(i_a^h)$ 的比值, 如式(17)所示。

$$FI_f^h = \begin{cases} \frac{2}{5} \frac{RMS(\mu\omega_e i_f^h)}{RMS(i_a^h)} > \varepsilon & (\text{ITSC 故障}) \\ \frac{2}{5} \frac{RMS(R_{dd} i_a^h)}{RMS(i_a^h)} < \varepsilon & (\text{HRC 故障}) \end{cases} \quad (17)$$

当发生 HRC 故障时, FI_f^h 值只与附加电阻 R_{dd} 有关; 当发生 ITSC 故障时, FI_f^h 与 $\mu\omega_e$ 有关, 并且 $RMS(i_f^h)/RMS(i_a^h)$ 大于 1, 如果电机转速为额定转速时, ITSC 故障时的 FI_f^h 远远大于 HRC 故障时的 FI_f^h 。根据以上分析, 可以设置阈值 ε , 判断故障类别。

3 故障诊断

基于观测器的电机故障检测系统, 其核心是一个非线性状态观测器。本文利用 Kalman 滤波器估计故障残差。系统状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} di_{d1}/dt \\ di_{q1}/dt \end{bmatrix}$; $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix}$; $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{d1} \\ u_{q1} - \omega_e \psi_f \end{bmatrix}$;

$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/L \end{bmatrix}$; $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$; y 为输出电流值。

故障电流检测观测器表达式为

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{L}_h(\mathbf{y} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}) \quad (19)$$

式中: 上标“ $\hat{\cdot}$ ”表示变量的估计值; $\mathbf{L}_h$ 为滤波器的增益。

残差 $\mathbf{r}$ 可以定义为

$$\mathbf{r} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{y} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} \quad (20)$$

令 $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$, 则有 $\dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A} - \mathbf{L}_h\mathbf{C})\mathbf{e}$, 残差 $\mathbf{r} = \mathbf{C}\mathbf{e}$ 。适当地选择观测器的增益矩阵 $\mathbf{L}_h$, 使得 $\mathbf{A} - \mathbf{L}_h\mathbf{C}$ 稳定, 则 $\lim_{t \rightarrow \infty} [\mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t)] = 0$ 。此时状态 $\mathbf{x}(t)$ 获得无偏估计^[20]。故障残差估计如图 4 所示。

3.1 故障诊断策略

为了提高故障检测准确度, 根据电机在健康和故障状态下的残差 $\mathbf{r}$ 设置阈值 ε 。根据前文分

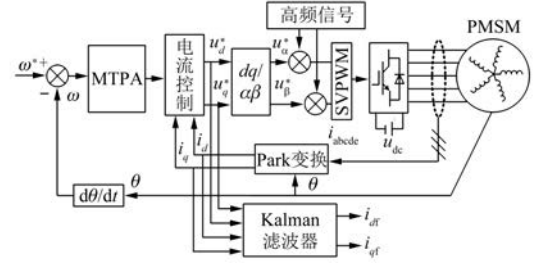


图 4 故障残差估计

析, 故障残差 $\mathbf{r} = [i_{df} \ i_{qf}]^T$ 。交直流电流残差平方和可以表示为 $\mathbf{r}^T \mathbf{r}$ 。定义电机异常运行指标 FI_1 为 $\sqrt{\mathbf{r}^T \mathbf{r}}$ 的幅值 (AMP):

$$FI_1 = AMP(\sqrt{\mathbf{r}^T \mathbf{r}}) \quad (21)$$

电机正常运行时, FI_1 基本为零, 电机发生 ITSC 或 HRC 故障时, 可以检测到明显的二次谐波分量。根据上述不同, 可以根据 FI_1 突变判断电机发生故障, 但是故障类型未知。高频分量会降低电机运行效率, 因此在 FI_1 检测到电机发生故障后, 激活高频电流信号注入程序, 进行故障类型的识别。故障分类指示器 FI_f^h 为

$$FI_f^h = \frac{RMS(\sqrt{\mathbf{r}^T \mathbf{r}})}{RMS(i_a^h)} \quad (22)$$

3.2 ITSC 故障程度与故障相位分析

3.2.1 故障程度

根据式(10)和式(21), 当电机发生 ITSC 故障时, 故障程度 FI_1 为

$$FI_1 = AMP \left[\sqrt{\frac{4}{25} \mu^2 I_f^2 \sin^2(\theta + \varphi)} \right] = AMP \left[\frac{\sqrt{2}}{5} \mu I_f \sqrt{1 - \cos(2\theta + 2\varphi)} \right] \quad (23)$$

由式(23)可知, μ 为短路匝数比, 不受电机负载和转速变化的影响, 而 I_f 受电机转速变化的影响。仅仅以 FI_1 作为检测 ITSC 故障程度的指标, 故障程度对故障敏感度降低。文献[21]指出, ITSC 故障电流 i_f 与转速成正比。为了提高故障程度 FI_1 的鲁棒性, 检测 ITSC 故障时 FI_{1_ITSC} 为

$$FI_{1_ITSC} = \frac{FI_1}{\omega_e} \quad (24)$$

3.2.2 故障相定位

故障相位与故障循环电流 i_f 的初相位有关, 但是故障循环电流是无法观测的。因此根据故障

电流残差 r 计算故障相位:

$$i_{d, qf} = \frac{i_{qf_ITSC}}{i_{df_ITSC}} = \tan(\theta + \varphi) \tag{25}$$

式中: $\theta = \omega_e t_o$.

根据文献[22],故障循环电流 i_t 的初相位与故障相电流的初相位相等。假设一个周期内 $i_{d, qf}$ 幅值达到最大值所对应时间为 t_φ , 定子电流达到最大值所对应时间为 t_p , 故障相标志位 d_j 为 t_φ 和 t_p 时刻的角度差:

$$d_j = \begin{cases} |age[i_{d, qf}(t_\varphi)] - age[i_p(t_p)]|, & |d_j| < 2\pi \\ 2\pi - |age[i_{d, qf}(t_\varphi)] - age[i_p(t_p)]|, & \text{其他} \end{cases} \tag{26}$$

式中: $age[i_{d, qf}(t_\varphi)]$ 为 $i_{d, qf}$ 幅值达到最大时所对应的角度; $age[i_p(t_p)]$ 为 i_p 幅值达到最大时所对应的角度; $j = a, b, c, d, e; p = a, b, c, d, e$.

表 1 列出每相故障时的 d_j 理论值。故障相的 d_j 为零, 非故障相 d_j 不为零。因此可以用 d_j 定位故障的相位。

表 1 故障相标志位 (°)					
故障相	d_a	d_b	d_c	d_d	d_e
A 相	0	72	144	216	288
B 相	72	0	72	144	216
C 相	144	72	0	72	144
D 相	216	144	72	0	72
E 相	288	216	144	72	0

3.3 HRC 故障程度与故障相位分析

3.3.1 故障程度

根据式 (11) 和式 (21), 当电机发生 HRC 故障时, 故障程度 FI_1 为

$$FI_1 = AMP \left(\sqrt{\frac{4}{25} R_{dd}^2 I_a^2 \sin^2 \theta} \right) = AMP \left(\frac{\sqrt{2}}{5} R_{dd} I_a \sqrt{1 - \cos 2\theta} \right) \tag{27}$$

由式 (27) 可知, HRC 故障程度与不平衡电阻 R_{dd} 和故障相电流幅值 I_a 有关, I_a 受电机负载变化的影响。为了提高故障程度 FI_1 的鲁棒性, 检测 HRC 故障时 FI_{1_HRC} 为

$$FI_{1_HRC} = \frac{FI_1}{I_a} \tag{28}$$

3.3.2 故障相定位

根据式 (11), HRC 故障相位可以由 $i_{qf_HRC}/$

i_{df_HRC} 计算得到, 与 ITSC 故障类似, 因此可以与 ITSC 故障使用相同的故障相定位方法。

根据以上分析, 在线故障诊断步骤如下。步骤 1: 电机故障检测。在线计算故障残差 $\sqrt{r^T r}$ 幅值 FI_1 , 如果 $FI_1 > \varepsilon$, 则可以判断电机发生故障。

步骤 2: 故障类型识别。向控制系统注入高频电流分量, 计算 FI_1^h 的值。如果 $FI_1^h > \varepsilon$, 则故障类型为 ITSC 故障, 如果 $FI_1^h < \varepsilon$, 则为 HRC 故障。步骤 3: 故障程度与故障相分析。为了使故障程度 FI_1 具有鲁棒性, 采用 FI_{1_ITSC} 和 FI_{1_HRC} 进行故障程度分析。故障诊断流程如图 5 所示。

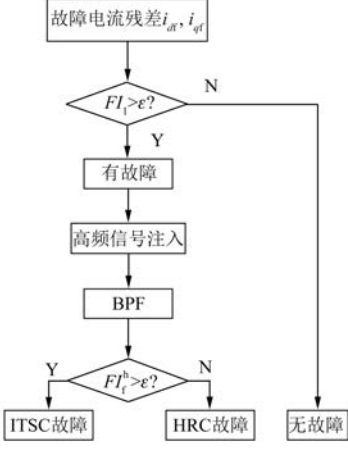


图 5 故障诊断流程

4 仿真分析

为了验证提出的 ITSC 故障和 HRC 故障诊断方法的有效性, 在 MATLAB/Simulink 下搭建故障诊断模型进行仿真验证。电机主要参数如表 2 所示。

表 2 电机主要参数	
参数名称	参数值
相电阻/Ω	0.46
自感恒定分量 L_{d0}/H	3.75×10^{-3}
自感倍频分量 L_{d2}/H	1.33×10^{-3}
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.07
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.002
极对数 n_p	4
额定功率/kW	8.5

4.1 故障类别仿真分析

仿真研究分为两个时间段, 在 $t = 1\text{ s}$ 之前, 电

机处于健康状态; $t=1\text{ s}$ 时, 电机分别发生 ITSC 故障和 HRC 故障。电机转速为 750 r/min , 负载为 $5\text{ N}\cdot\text{m}$ 。ITSC 故障发生在 A 相, $\mu=0.2$, $R_f=0.3\ \Omega$; HRC 故障发生在 B 相, $R_{dd}=0.5\ \Omega$ 。由图 6 可知, 两种故障时, 相电流特征不同, ITSC 故障由于故障循环电流的影响, 故障相电流幅值变大, 非故障相电流幅值小幅变大。HRC 由于故障相多了附加电阻 R_{dd} , 在端电压保持不变的情况下, 故障相电流降低, 非故障相电流没有变化。

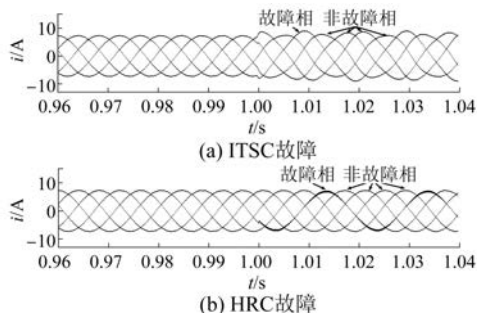


图6 定子电流

由图 7 可知, 发生 ITSC 故障和 HRC 故障时, 电机转速和负载转矩发生了波动, 这两种故障都能引起电机振荡, 降低电机运行效率。图 8 为 d_1 - q_1 轴电流残差, 发生故障时出现了波动。电机在基频 50 Hz 下运行, 根据快速傅里叶变换 (FFT) 分析, 故障时的电流波动频率为二次谐波, 如图 9 所示。

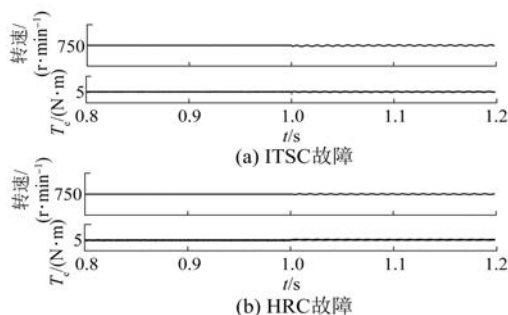


图7 转速和转矩

图 10 为故障残差 $\sqrt{\mathbf{r}^T \mathbf{r}}$ 及其幅值 FI_1 在健康和故障情况下的波形。在 $t=1\text{ s}$ 之前, 电机没有发生故障, FI_1 基本为零。 $t=1\text{ s}$ 之后, 电流残差平方根出现了波动, 且波动频率为二倍频, FI_1 明显增大。说明当电机发生故障时, 可以根据 FI_1 检测到异常状况。但是图 10 说明 ITSC 故障和

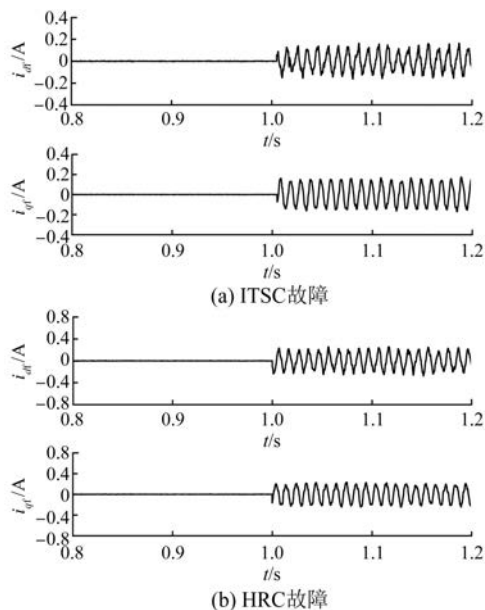
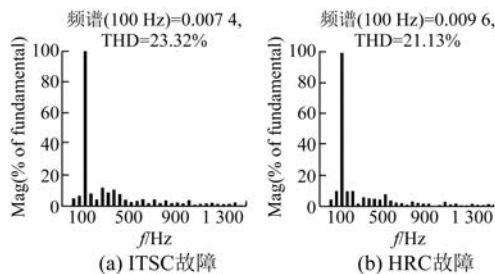
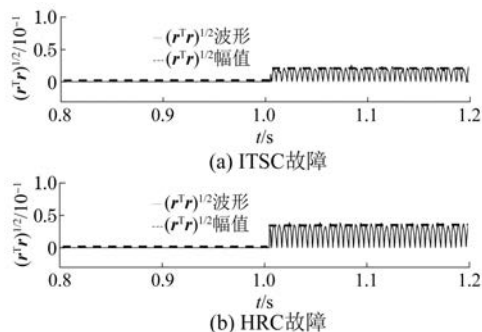
图8 故障残差 i_{d1} 和 i_{q1} 

图9 故障残差 FFT 分析

图10 $\sqrt{\mathbf{r}^T \mathbf{r}}$ 波形

HRC 故障有相同的故障特征, 都能使 FI_1 突变。因此仅仅凭借 FI_1 只能检测到电机发生故障, 但是故障类型未知, 这与 2.2 节分析一致。

图 11 为高频信号注入时, 电流残差平方根 $\sqrt{\mathbf{r}^T \mathbf{r}}$ 的 FFT 分析情况。注入信号频率为 1 kHz , ITSC 故障时, 注入高频分量占比较大, 约为

1 350% ;HRC 故障时,高频分量占比较小,约为 251%。图 12 为 FI_1^h 波形,ITSC 故障时, FI_1^h 约为 46;HRC 故障时, FI_1^h 小于 1。根据仿真研究,ITSC 故障程度较小,高频分量占比最小时 FI_1^h 也不会小于 5,HRC 故障高频分量占比最大时 FI_1^h 也不会大于 2。设置合适的 ε 值(本文设置 $\varepsilon=3$),当 $FI_1^h > \varepsilon$ 时,表示电机发生 ITSC 故障,当 $FI_1^h < \varepsilon$ 时,表示电机发生 HRC 故障。所以根据高频条件下 FI_1^h 的值可以区分两种故障。

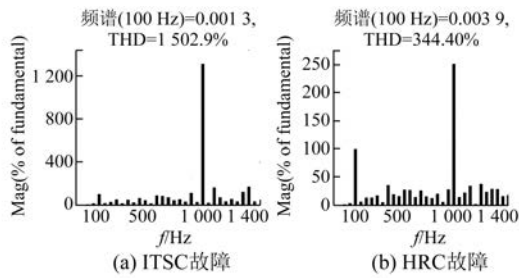
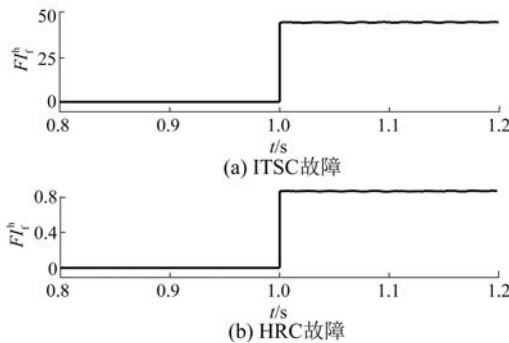


图 11 高频 FFT 分析

图 12 FI_1^h 波形

4.2 故障程度及故障相标志位仿真分析

ITSC 故障程度 FI_1 及故障相 d_j 仍然以 A 相故障为例进行分析。为了分析 ITSC 故障不同故障程度时故障指标 FI_1 和故障相标志位 d_j 的值,需要对故障参数 R_f 和 μ 分别进行分析。图 13 为故障电阻 $R_f=0.3 \Omega$,短路匝数比 μ 不同时 FI_1 和 d_j 的值。可以看出,随着 μ 的增大,故障程度 FI_1 增大;故障相标志位 d_j 基本不变。图 14 为短路匝数比 $\mu=0.2$,短路电阻 R_f 不同时 FI_1 和 d_j 的值。随着短路电阻的增大,故障程度 FI_1 变小,但是故障相标志位 d_j 基本不随 R_f 变化而变化。由以上分析可知, FI_1 可以反映故障程度,并且根据故障相 $d_j=0$,非故障相 $d_j \neq 0$,能够判断故障相位。

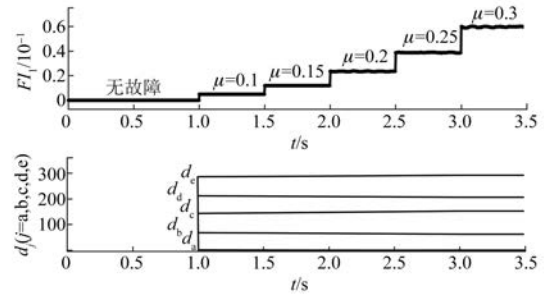
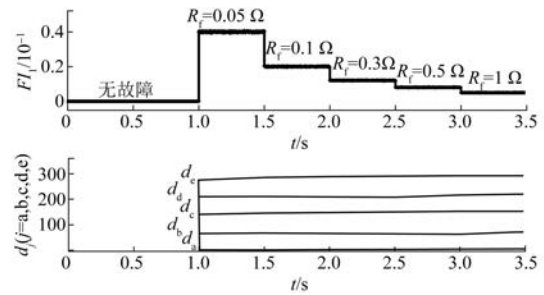
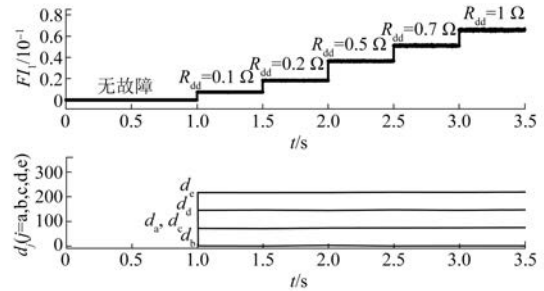
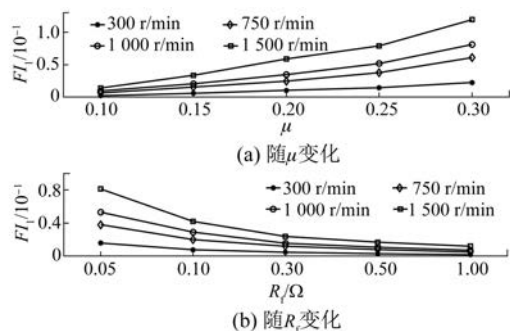
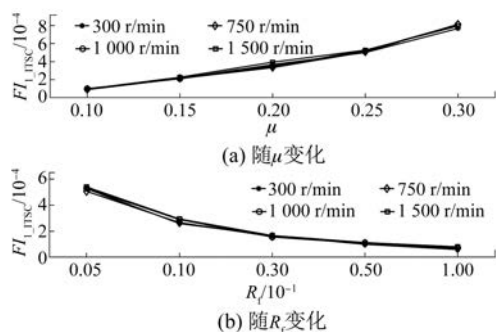
图 13 $R_f=0.3$ 时故障程度与故障相位图 14 $\mu=0.2$ 时故障程度与故障相位

图 15 HRC 故障程度与故障相位

HRC 故障程度 FI_1 及故障相 d_j 以 B 相故障为例进行分析。图 15 为附加电阻 R_{ad} 不同时,故障程度 FI_1 和故障相标志位 d_j 的值, FI_1 随着附加电阻 R_{ad} 的增大而增大,而 d_j 不受 R_{ad} 的影响,B 相 $d_j=0$,非故障相不为零。

4.3 故障程度鲁棒性仿真分析

图 16 为 ITSC 故障不同转速时 FI_1 仿真分析,给出电机在 300、750、1 000、1 500 r/min 四种转速下的故障程度。可以看出虽然在同一转速下故障程度 FI_1 随着 μ 增大而增大、随着 R_f 的增大而减小,但是转速变化时 FI_1 与故障程度并不是一一对应的关系,即故障程度 FI_1 在转速变化的情况下不具有鲁棒性。根据故障程度与转速的关

图 16 不同转速时故障程度 FI_1 图 17 不同转速时故障程度 FI_{1_HSC}

系,改进故障程度 FI_{1_HSC} 为 FI_1 与转速的比值。由图 17 可以看出,故障程度不再受转速变化的影响,只与 μ 和 R_f 有关。

电机负载变化会影响 HRC 故障程度的鲁棒性。图 18 为不同负载时故障程度 FI_1 与 FI_{1_HRC} 仿真分析,负载变化为 1、3、5、10 N·m。可以看出 FI_1 受负载变化的影响,而改进的故障程度 FI_{1_HRC} 只随 R_{fd} 变化而变化,因此 FI_{1_HRC} 对负载变化具有鲁棒性。

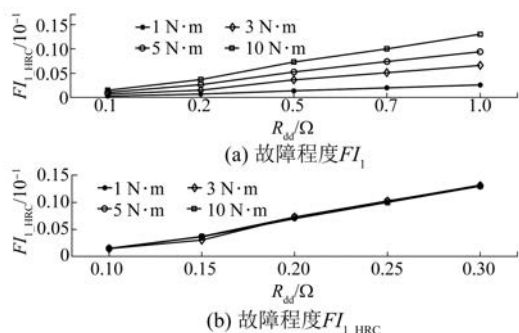


图 18 HRC 故障不同负载时故障程度

5 结 语

针对五相永磁同步电机定子匝间短路故障和

高电阻连接故障,本文通过电流残差估计来检测电机故障状态,然后根据高频时电流差异区分两种故障,最后对故障程度鲁棒性进行分析。通过仿真验证了所提出方法的有效性,并得到以下结论:

(1) 该方法能够准确检测和识别五相永磁同步电机匝间短路故障和高电阻连接故障,并且能够定位故障相。

(2) 两种故障严重程度不受电机转速和负载变化的显著影响,具有较好的鲁棒性。

(3) 该方法不需要增加额外的设备和测量装置,不需要提取、采集新的信号。

【参考文献】

- [1] THOMAS A S, ZHU Z Q, OWEN R L, et al. Multiphase flux-switching permanent-magnet brushless machine for aerospace application [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45 (6): 1971.
- [2] HE S, XU Z, CHEN M, et al. General derivation law with torque-free achieving of integral on-board charger on compact powertrains [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68 (2): 1791.
- [3] NOLAND J K, LEANDRO M, SUUL J A, et al. High-power machines and starter-generator topologies for more electric aircraft: a technology outlook [J]. IEEE Access, 2020, 8 (1): 130104.
- [4] SADEGHI S, GUO L, H. A. TOLIYAT H A, et al. Wide operational speed range of five-phase permanent magnet machines by using different stator winding configurations [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 59 (6): 2621.
- [5] ZHENG J, WANG Z, WANG D, et al. Review of fault diagnosis of PMSM drive system in electric vehicles [C] // 36th Chinese Control Conference (CCC), 2017: 7426.
- [6] ZAFARANI M, BOSTANCI E, QI Y, et al. Interturn short-circuit faults in permanent magnet synchronous machines: an extended review and comprehensive analysis [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6 (4): 2173.
- [7] DE LA BARRERA P M, BOSSIO G R, SOLSONA J A. High-resistance connection detection in induction motor drives using signal injection [J]. IEEE

- Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3563.
- [8] 丁石川, 王清明, 杭俊, 等. 计及模型预测控制的永磁同步电机匝间短路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3697.
- [9] MEYER R T, DECARLO R A, JOHNSON S C, et al. Short-circuit fault detection observer design in a PMSM [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(6): 3004.
- [10] 陈勇, 梁洪, 王成栋, 等. 基于改进小波包变换和信号融合的永磁同步电机匝间短路故障检测[J]. 电工技术报, 2020, 35(S1): 228.
- [11] HANG J, TANG C, DING S, et al. A signal injection method for fault diagnosis of high-resistance connection in vector-controlled PMSM drive system [C] // IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017: 5021.
- [12] ZHANG J, HANG J, DING S, et al. Online diagnosis and localization of high-resistance connection in PMSM with improved fault indicator [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2017, 32(5): 3585.
- [13] LEE H, JEONG H, KOO G, et al. Attention recurrent neural network-based severity estimation method for interturn short-circuit fault in permanent magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(4): 3445.
- [14] 李俊卿, 李斯璇, 陈雅婷, 等. 一种基于 CGAN-CNN 的同步电机转子绕组匝间短路故障诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 169.
- [15] HU R, WANG J, MILLS A R, et al. High-frequency voltage injection based stator interturn fault detection in permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 785.
- [16] ZHANG J, XU Z, WANG J, et al. Detection and discrimination of incipient stator faults for inverter-fed permanent magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(8): 7505.
- [17] JEWON L, SEOKBAE M, HYEYUN J, et al. Robust diagnosis method based on parameter estimation for an interturn short-circuit fault in multipole PMSM under high-speed operation [J]. Sensors, 2015, 15(11): 29452.
- [18] HU R, WANG J, SEN B, et al. PWM ripple currents based turn fault detection for multiphase permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2740.
- [19] HU R, WANG J, MILLS A R, et al. Detection and classification of turn fault and high resistance connection fault in permanent magnet machines based on zero sequence voltage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1922.
- [20] 杭俊, 胡齐涛, 丁石川, 等. 基于电流残差矢量模平方的永磁同步电机匝间短路故障鲁棒检测与定位方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 340.
- [21] URRESTY J, RIBA J, ROMERAL L. Diagnosis of interturn faults in PMSMs operating under nonstationary conditions by applying order tracking filtering [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 28(1): 507.
- [22] HANG J, ZHANG J, CHENG M, et al. Online interturn fault diagnosis of permanent magnet synchronous machine using zero-sequence components [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 6731.

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部