

基于统计学与BP神经网络的永磁同步电机故障识别方法

宋志金¹, 徐凤林², 蔡洋涛², 李威霖³, 陈 锋³, 贺青川^{1*}

¹浙江理工大学浙江省机电产品可靠性技术研究重点实验室, 浙江 杭州

²杭州中车车辆有限公司, 浙江 杭州

³浙江方圆检测集团股份有限公司浙江省市场监管新能源汽车驱动系统重点实验室, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年1月30日; 录用日期: 2023年3月10日; 发布日期: 2023年3月17日

摘 要

针对永磁同步电机三相定子不对称故障识别问题, 提出了基于参数统计分析提取优质指标与BP神经网络相结合的识别方法。基于永磁同步电机的数学模型建立仿真模型, 模拟正常状态和故障状态下的定子电流数据; 通过对电流特征指标的统计分析, 筛选出时域特征指标中的优质指标; 将筛选出来的指标输入BP神经网络进行故障识别, 结果表明所提方法可以实现对永磁同步电机定子电阻三相不对称故障的识别, 准确率超过96%。

关键词

永磁同步电机, 三相不对称, 故障识别, BP神经网络

Fault Identification Method of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Statistics and BP Neural Network

Zhijin Song¹, Fenglin Xu², Yangtao Cai², Weilin Li³, Feng Chen³, Qingchuan He^{1*}

¹Zhejiang Province's Key Laboratory of Reliability Technology for Mechanical and Electrical Product, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

²Hangzhou CRRC Vehicle Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

³Key Laboratory of New Energy Automotive Drive Systems for Zhejiang Market Regulation, Zhejiang Fangyuan Test Group Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

Received: Jan. 30th, 2023; accepted: Mar. 10th, 2023; published: Mar. 17th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 宋志金, 徐凤林, 蔡洋涛, 李威霖, 陈锋, 贺青川. 基于统计学与BP神经网络的永磁同步电机故障识别方法[J]. 建模与仿真, 2023, 12(2): 1132-1143. DOI: 10.12677/mos.2023.122107

Abstract

To identify the three-phase stator asymmetric fault of permanent magnet synchronous motor (PMSM), a statistical analysis and BP neural network based method is proposed. Firstly, a simulation model of PMSM is established to simulate the stator current data in normal state and fault state. Secondly, the time domain feature indexed are extracted by analyzing the current data, and the optimal indicators are screened out by statistics analysis. Finally, the optimal indicators are used to train a BP neural network to achieve fault identification. The results show that the proposed method can realize the identification of three-phase asymmetric fault of the PMSM, and the accuracy rate is more than 96%.

Keywords

Permanent Magnet Synchronous Motor, Three-Phase Asymmetry, Fault Identification, BP Neural Networks

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

永磁同步电机(PMSM)具有结构简单、运行可靠、体积小、质量轻、损耗小、效率高,以及电机的形状和尺寸可以灵活多样等显著优点,被广泛应用于自动化装备。三相不对称是常见电机故障之一,电机的本身质量问题、驱动线路绝缘破损和氧化等都会造成此类故障。电机的故障 30%~40%是由于定子电阻故障引起的,容易造成电机的转矩和转速波动,振动加剧,热损耗增加,效率降低,直接影响自动化装备的可靠性。因此,对三相定子电阻不对称故障进行故障诊断识别研究具有重要意义。

当前对三相定子电阻不对称故障研究较多,主要是通过分析电流数据和电机的基本参数开展。孙丽玲等[1]通过对三相定子电流的相位差进行对比,通过分析定子电阻在故障状态下和正常状态下的分布阈值,判定定子电阻的故障程度;张志艳等[2]利用通过计算电机正常运转状态下与定子不对称运行状态下负序分量幅值和相位的特性对比,并于模糊逻辑相结合对 PMSM 的定子电阻不对称故障进行诊断;Kim K H [3]利用对定子电流谐波进行傅里叶变换,通过分析定子电流谐波中 q 轴的二阶分量变化来检测电机的匝间短路故障;张凯等[4]通过分析电机正常状态与异常状态下运行电流的不同,通过卡尔曼滤波器计算其电流残差来检测电机的定子故障;唐静等[5]通过测量健康电机和故障电机的电阻和电感差异,对定子的故障进行检测,但该方法仅限于电机在离线条件下使用;白江坡等[6]通过 UFK 方法对电机中的故障检测仿真进行实时递推,通过 UFK 的预测输出值实际输出值的残差检测电机的定子电阻故障;李龚睿子等[7]通过改进平均电流法对定子电流进行滤波处理后进行三相电流均值计算,将正常状态与故障状态下的自适应阈值进行对比检测定子电阻故障。Cruz 等[8]利用多参考系理论对电机进行建模,通过固定参考系、顺时针和逆时针同步参考系相叠加提取电机电流,有效避免工作环境的影响,更精确地检测电机的定子故障;Zhang J 等[9]使用频率跟踪算法计算零序电压的幅值和相位角,根据计算出的特征指标判断电机的故障程度。

上述研究主要是针对于单一特征参数进行故障识别研究,或对电机在离线状态下测量分析,存在准确率低,实际应用不便等问题。本文通过永磁同步电机的数学模型搭建仿真模型,模拟电机在不同故障

状态下的定子电流，计算出定子电流中的多个常用时域指标，通过统计学中的参数统计分析筛选出最优指标，解决单一指标表征不全面的问题，提高永磁同步电机故障识别的精度和效率。

2. Pmsm 数学模型

永磁同步电机的广义动态数学模型主要包括四类，分别为电压方程、运动方程、磁链方程和转矩方程[10]。

2.1. 磁链方程

dq 轴坐标系下磁链方程：

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (1)$$

其中： i_d ， i_q 分别是定子电流的 $d-q$ 轴的分量， R 是定子的电阻， ψ_d ， ψ_q 为定子电感的直轴和交轴分量； L_d ， L_q 分别是 $d-q$ 轴电感的分量； ψ_f 代表永磁体磁链。

2.2. 电压方程

通常选用同步旋转坐标系 $d-q$ 下的数学模型，

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_e L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (2)$$

其中， u_d ， u_q 分别是定子电压的 $d-q$ 轴分量， i_d ， i_q 分别是定子电流的 $d-q$ 轴的分量， R 是定子的电阻， ψ_d ， ψ_q 为定子磁链的 $d-q$ 轴分量， ω_e 是电角速度； L_d ， L_q 分别是 $d-q$ 轴电感的分量； ψ_f 代表永磁体磁链。

式(2)是理想条件(忽略涡流及三相不对称的影响)下建立的数学模型[11]，当 PMSM 的三相定子转子电阻及电感不对称时，也会发生一定的变化。

在三相静止坐标系下，PMSM 的电压方程为[12]：

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中， u_a 、 u_b 、 u_c 为三相电压； i_a 、 i_b 、 i_c 为三相定子电流； R_a 、 R_b 、 R_c 为三相定子电阻； ψ_a 、 ψ_b 、 ψ_c 为三相磁链； p 为微分算子。

将磁链方程及 park 变换方程代入电压方程最终可以得到：

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_d & R_{dq} \\ R_{dq} & R_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p i_d \\ p i_q \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} L_q i_q \\ -L_d i_d + \Psi_f \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中：

$$\begin{bmatrix} R_d \\ R_q \\ R_{dq} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 + \cos(2\theta) & 1 - \frac{1}{2} \cos(2\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(2\theta) & 1 - \frac{1}{2} \cos(2\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(2\theta) \\ 1 - \cos(2\theta) & 1 + \frac{1}{2} \cos(2\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(2\theta) & 1 + \frac{1}{2} \cos(2\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(2\theta) \\ -\sin(2\theta) & \frac{1}{2} \sin(2\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\theta) & \frac{1}{2} \sin(2\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_a \\ R_b \\ R_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

显然, 当 $R_a = R_b = R_c = R$ 即三相电阻对称时, $R_d = R_q$ 且 $R_{dq} = 0$, 此时电压方程就转化为公式(2); 当三相电阻不对称时, 此时 $R_d \neq R_q$ 且 $R_{dq} \neq 0$, 式(5)为计算定子电流的关键。

2.3. 运动方程

三相永磁同步电机的运动方程为:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (6)$$

式中, ω_m 为电机的机械角速度; J 为转动惯量; B 为阻尼系数; T_L 为负载转矩。

2.4. 转矩方程

PMSM 的转矩方程为:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n i_q [\psi_f + i_d (L_d - L_q)] \quad (7)$$

式中: 左半部分是电流与永磁体磁场之间的相互作用产生, 称之为永磁转矩; 右半部分称为磁阻转矩[13]。

3. PMSM 仿真模型搭建

常见的 PMSM 矢量控制策略有 $i_d = 0$ 和最大电流比控制两种, 而在永磁同步电机中, 两者的控制是等价的, 故在本文中采用 $i_d = 0$ 控制策略, 拟搭建的控制策略模型图如图 1 所示。

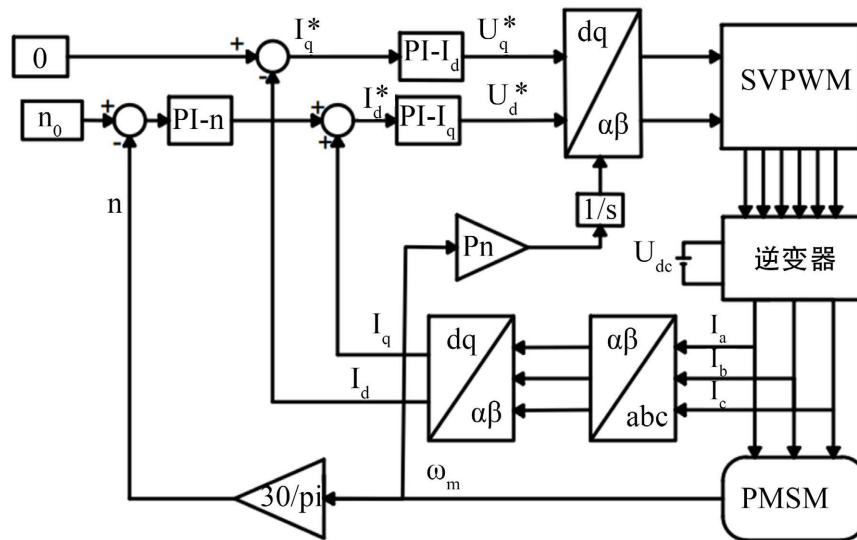


Figure 1. Simulation strategy model diagram

图 1. 仿真策略模型图

在以上控制策略模型图的基础上, 再结合上述已经搭建的数学模型, 将原有的矢量控制系统进行更改, 设计的矢量仿真系统如图 2 所示。同时由于电机模块是根据数学模型自行搭建的, 可以实现对需要的参数进行修改, 如图 3 所示 Simulink 自带电机模块只能对电机在定子电阻正常状态下的电流数据进行, 当三相定子电阻不同时无法进行仿真, 自建模块很好地解决了这一问题, 通过改变三相电阻值模拟永磁同步电机工作时定子电阻故障状态下的电流数据。电机仿真系统参数为: 定子电阻 $R = 0.38 \Omega$, 定子电感 $L_d = L_q = 1.3 \text{ mH}$, 磁链数 $\psi_f = 0.027 \text{ Wb}$, 转动惯量 $J = 0.342 \text{ kg/cm}^2$, 极对数 $P_n = 4$ 。电机在额定工

况(额定转矩、额定转速)下工作时的仿真数据与实测数据对比如图 4 和图 5 所示。结果显示, 仿真模型输出电流与实际相符。

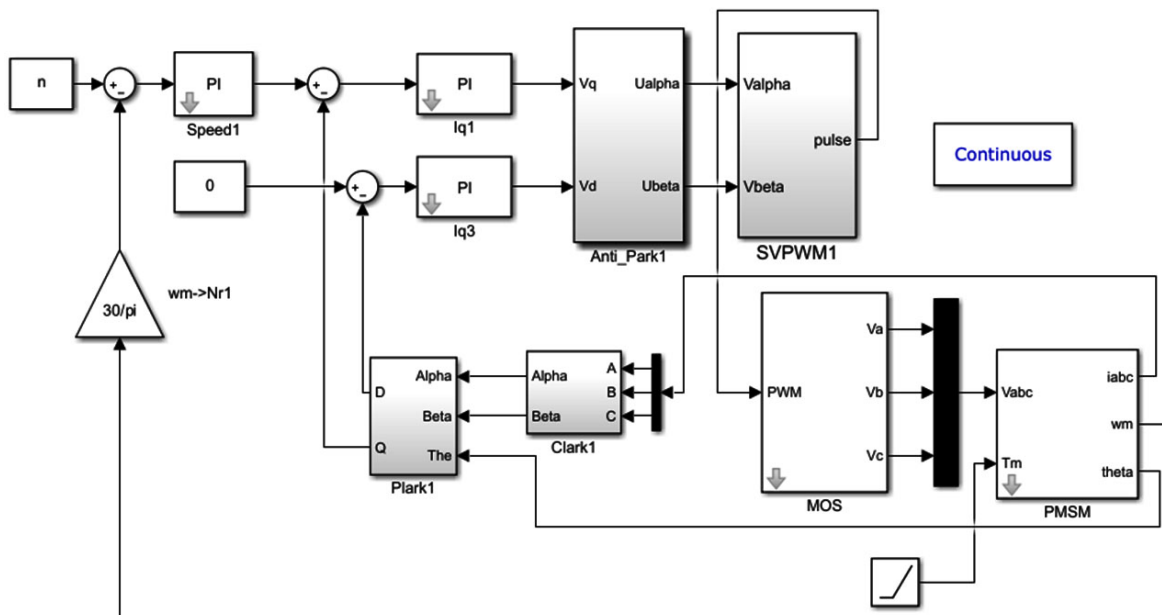


Figure 2. Vector simulation system
图 2. 矢量仿真系统

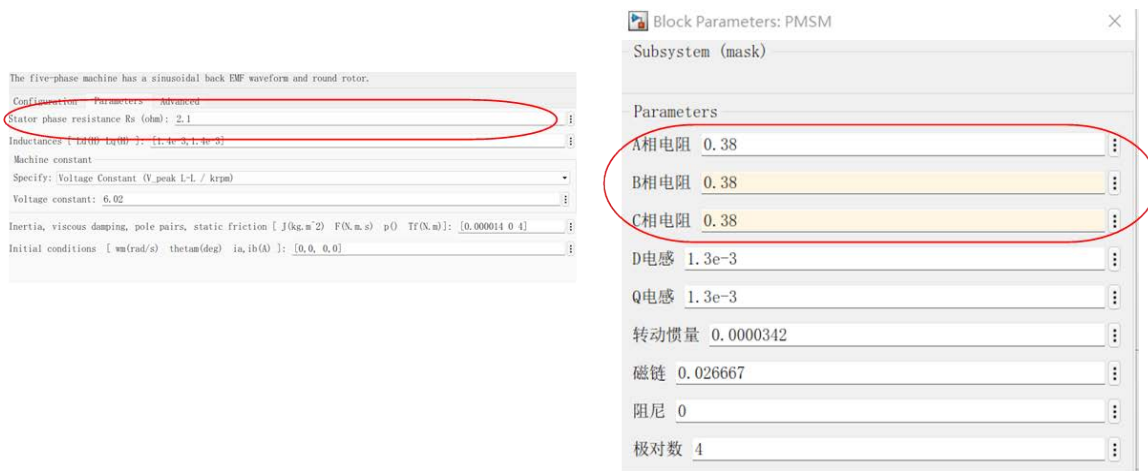


Figure 3. Comparison of MSM simulation system model and self-built model
图 3. MSM 仿真系统模型与自建模型对比

4. PMSM 定子电流时域特征指标提取

当永磁同步电机在使用时的故障状态发生变化时, 其电流波形会发生一定的变化, 其中最能反映其特征变化的是时域特征指标。常见的时域指标特征表达式如表 1 所示。

由于电机实际工作时转速转矩的变化会造成定子电流的变化, 可能会对计算的特征指标造成影响, 为了获得准确的分析结果需要对电流进行预处理。对三相电流进行标准化处理, 即用三相电流基本值除以他们有效值的平方根和。首先对 A 相电流进行标准化处理, 处理公式如下:

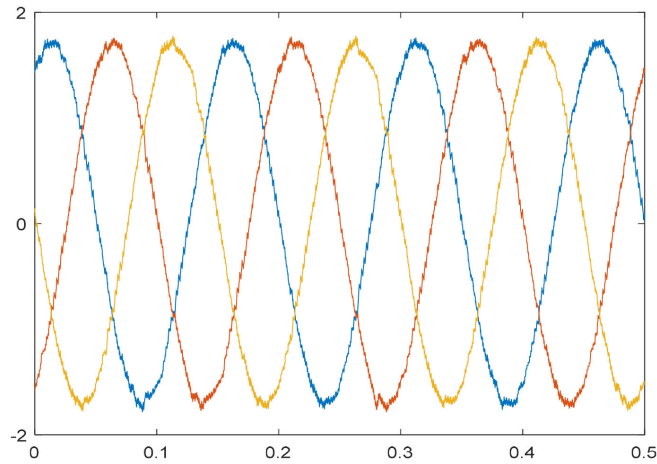


Figure 4. Simulation diagram under constant working condition
图 4. 恒工况下仿真图

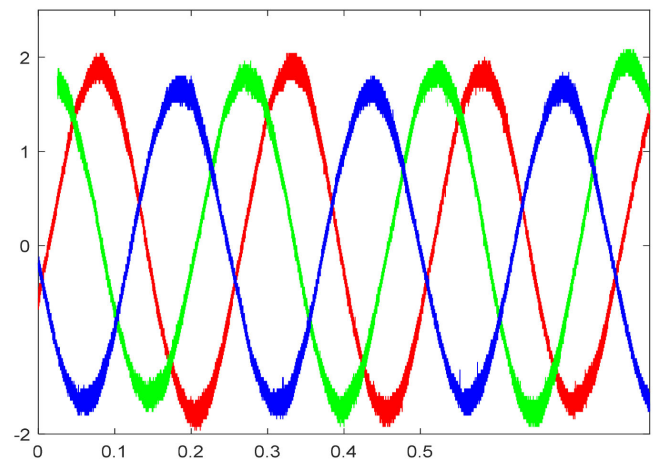


Figure 5. Measured figure under constant working condition
图 5. 工况下实测图

Table 1. Time domain characteristic metrics
表 1. 时域特征指标

| 特征 | 公式 | 特征 | 公式 |
|------|--|------|---|
| 峭度 | $x_{kur} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^4$ | 峰值 | $x_{p-p} = \max\{x_1, x_2, \dots, x_N\} - \min\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ |
| 均值 | $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ | 波形因子 | $S = \frac{x_{rms}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i }$ |
| 裕度因子 | $C_e = \frac{x_p}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{ x_i } \right)^2}$ | 峰值因子 | $C = \frac{x_p}{x_{rms}}$ |
| 有效值 | $x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$ | 脉冲因子 | $I = \frac{x_p}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i }$ |

$$I_a^1 = \frac{I_a}{\sqrt{\bar{I}_a^2 + \bar{I}_b^2 + \bar{I}_c^2}} \quad (8)$$

式中, I_a 代表初始 A 相电流数据; $\bar{I}_a, \bar{I}_b, \bar{I}_c$ 分别代表三相电流的有效值; I_a^1 代表处理后三相电流数据。B、C 相电流同理。

为了证明处理方式的有效性, 设计了以下四组对照组:

- A 组: 2000 r/min, 1.37 N·m (额定);
- B 组: 2000 r/min, 0.68 N·m;
- C 组: 1500 r/min, 1.37 N·m;
- D 组: 1500 r/min, 0.68 N·m。

经过标准化处理前后的箱线对比结果如图 6 和图 7 所示, 各项电流特征指标在转速和转矩变化时变化的范围都有效的缩小, 其中峰值、均值、有效值、峭度和波形因子等的变化都得到了有效的控制, 其余特征指标如峰值因子、脉冲因子和裕度因子等变化不大。

根据上述分析, 当电机发生使用故障时其三相电流的波形会发生一定改变, 而定子电阻故障是造成电机故障的主要原因, 当电机长时间工作发热, 或定子电阻发生匝间相间故障时, 其阻值会发生一定的变化, 影响电机的使用。故在本文中, 针对定子电阻故障, 共设计了以下 5 组对照组, 如表 2 所示。其中对电机在每种工况下的数据采集 100 组, 总计 400 组数据。仿真计算得到的结果如图 8 所示。

Table 2. Simulation test resistance table
表 2. 仿真实验阻值表

| | a | b | c | d | f |
|-------|------|------|------|------|------|
| A 相电阻 | 0.38 | 0.38 | 0.38 | 0.38 | 0.38 |
| B 相电阻 | 0.38 | 0.38 | 0.76 | 0.38 | 0.76 |
| C 相电阻 | 0.38 | 0.76 | 0.76 | 1.14 | 1.14 |

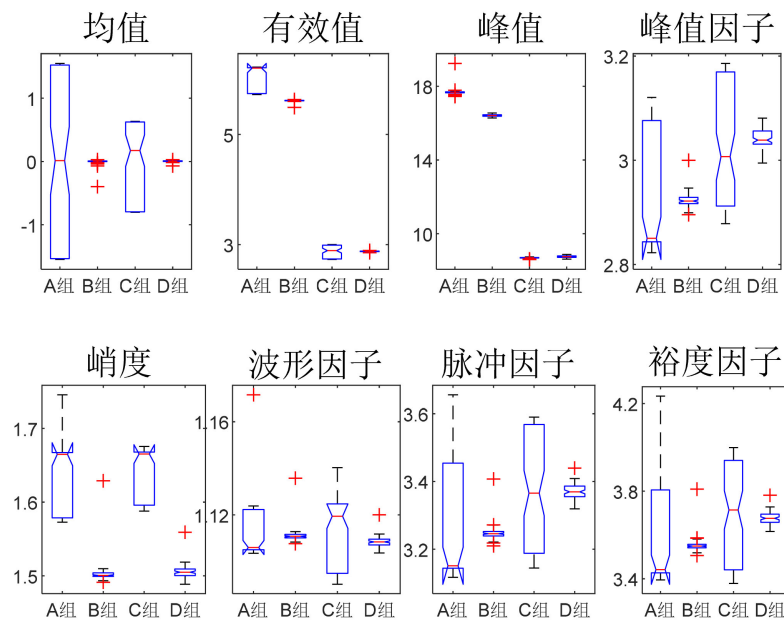


Figure 6. Box diagram of characteristic signal before processing
图 6. 处理前特征指标箱线图

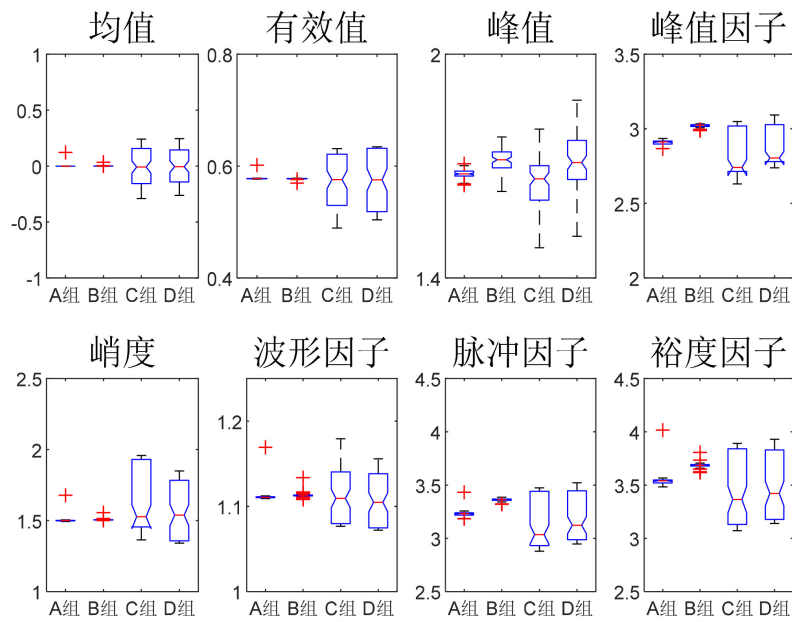


Figure 7. Box diagram of characteristic signal after processing
图 7. 处理后特征指标箱线图

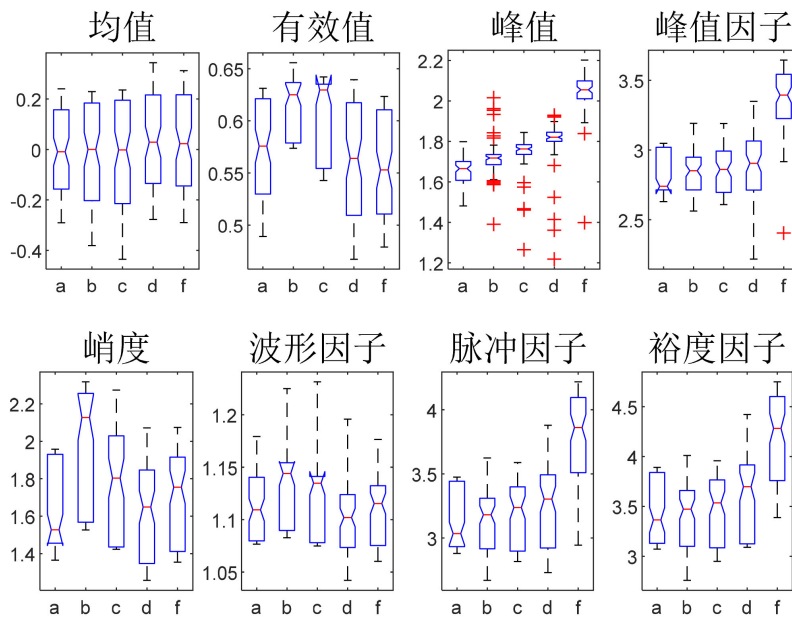


Figure 8. Box diagrams of characteristic signals in different states
图 8. 不同状态下特征指标箱线图

根据图 8 可以看出, 发生故障时, 特征指标中的峰值、峰值因子、脉冲因子和裕度因子会发生较为明显的变化, 都呈现明显的上升趋势; 均值、有效值、峭度和波形因子有一定的变化, 但变化趋势和幅度不太明显。

在箱线图的基础上, 对特征指标中变化较为明显的峰值、峰值因子、脉冲因子和裕度因子指标进行正态性检验、相关性检验和趋势性检验。将正态检验和相关性检验安排于趋势性检验之前的原因主要有以下两点: 首先, 为了解数据的基本特征, 便于之后更精确的分析检验; 其次, 趋势性检验的方法与数

据的正态性和相关性息息相关。本文中在独立样本使用 Kruskal-Wallis 检验和趋势秩检验，在相关样本中使用 Friedman 检验和 Page 检验，共采用了四种检验方式。

以峰值指标的检验过程为例：首先正态性检验，由于电机的特征指标的样本属于大样本，故采用 E-P 检验方法对峰值进行正态性检验，取显著性水平 $\alpha = 0.05$ ，可查得 E-P 检验统计量 $T_{EP,1-\alpha}$ 的临界值为 0.376，检验值计算如表 3 所示[14]。20 组数据中仅有两组不服从原假设，将两组中(B 状态工况 3、D 状态工况 3)中的异常值进行去除后，全部通过检验，可认为全部服从正态分布。之后，对指标进行相关性检验时取显著性水平 $\alpha = 0.05$ ，通过 Matlab 中的 Corr 函数求得需检验的 p 值的大小(如果求出 $p < \alpha$ ，则代表接受 $r > r_{(1-\alpha/2)}$ ，即拒绝原假设)，计算结果如表 4 所示[15]。结果显示，检验的 n 值比较小，因此拒绝原假设，可以认为不同电阻状态下的定子电流的峰值指标的数据呈现相关性。最后，对峰值指标进行趋势性检验，将电阻状态视为“处理”，取显著性水平 $\alpha = 0.05$ ，可查得处理数为 5，区组数为 20 时的 Page 检验的临界值为 570，Friedman 检验的临界值为 9.200，检验结果如表 5 所示[16]。

Table 3. Critical value table of test for normality

表 3. 正态性检验临界值表

| | | 不同工况 | | | |
|--------|------|--------|--------|---------------|--------|
| | | 工况 A | 工况 B | 工况 C | 工况 D |
| 电机运行状态 | 状态 a | 0.1615 | 0.0794 | 0.0688 | 0.1403 |
| | 状态 b | 0.0347 | 0.1406 | 3.8141 | 0.5193 |
| | 状态 c | 0.8523 | 0.3214 | 0.3406 | 0.3508 |
| | 状态 d | 0.1628 | 0.2856 | 2.7241 | 0.4145 |
| | 状态 f | 0.0673 | 0.3648 | 0.3648 | 0.2593 |

Table 4. Critical value table of correlation test

表 4. 相关性检验临界值表

| | 状态 a | 状态 b | 状态 c | 状态 d | 状态 f |
|------|--------|--------|--------|---------|------|
| 状态 a | 0 | | | | |
| 状态 b | 0.012 | 0 | | | |
| 状态 c | 0.0035 | 0.0051 | 0 | | |
| 状态 d | 0.0015 | 0.0034 | 0.0016 | 0 | |
| 状态 f | 0.0042 | 0.0032 | 0.0047 | 0.00364 | 0 |

Table 5. Critical value table of trend check

表 5. 趋势性检验临界值表

| | a | b | c | d | f |
|------------|--------|-------|-------|--------|--------|
| Friedma 检验 | 12.300 | 15.30 | 14.30 | 11.236 | 23.251 |
| Page 检验 | 665 | 836 | 752 | 781 | 1036 |

同理，依次对峰值因子、脉动因子、裕度因子三个特征指标进行正态性检验、相关性检验和趋势性检验，统计推断的结果如表 6 所示。当电阻发生变化时，裕度因子、峰值因子和峰值呈现出随电阻增大而上升的趋势。分析结果表明：定子电流的时域特征指标中，裕度因子、峰值因子和峰值是能够表征电阻状态变化的优选指标。

Table 6. Inspection result
表 6. 检验结果

| | 正态性检验 | 相关性检验 | 趋势性检验 |
|------|-------|-------|-------|
| 峰值 | 通过 | 通过 | 通过 |
| 峰值因子 | 通过 | 通过 | 通过 |
| 脉冲因子 | 通过 | 未通过 | 未通过 |
| 裕度因子 | 通过 | 通过 | 通过 |

5. 故障识别方法

本文中使用的 BP 神经网络算法进行故障识别。BP 神经网络是一种多层的前向型神经网络，具备超强的学习能力，可在海量数据中对数据进行储存，被广泛应用于一般复杂程度的模型的故障诊断，故障模式的识别中[17]。

具体诊断过程如图 9 所示，先将电机中模拟的仿真数据经过预处理后，进行特征提取，之后再继续进行信息融合分析，得到诊断结果，并与直接 BP 神经网络诊断结果进行对比。

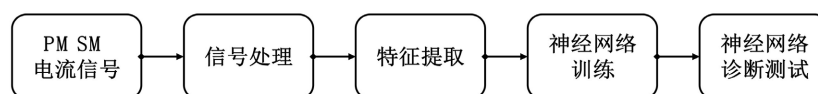


Figure 9. Diagnostic flow chart
图 9. 诊断流程图

BP 神经网络采用三层神经网络结构，第一层为输入层，神经元个数与输入个数相等；第二层为隐含层，根据测试结果将隐含层层数设为 10；第三层为输出层，根据模式识别结果，输出层采用线性输出，期望输出分别为无故障(0, 0, 1)、轻微故障(0, 1, 0)和故障(1, 0, 0)三类。诊断参数如表 7 所示。

Table 7. Diagnostic parameter table
表 7. 诊断参数表

| 诊断方式 | 指标优选 BP 诊断 | 直接 BP 诊断 |
|---------|------------|----------|
| 输入神经元个数 | 3 | 8 |
| 隐含层数目 | 10 | 10 |
| 训练集数据占比 | 80% | 80% |
| 测试集数据占比 | 20% | 20% |

6. 试验验证

本研究中采用的实验装置如图 10 所示，通过联轴器联结电机和磁粉制动器；张力控制器控制磁粉制动器的制动力矩，模拟电机可能存在的不同工况，应用功率计记录电机的输出功率，同时电流传感器和数据采集卡等记录电机工作时的实时数据。本文共采取了正常电机与故障电机两种，正常产品为经过出厂检验合格的产品，故障电机为由于其匝间短路导致的三相电阻不对称，且经过测量其三相阻值已经发生较大变化。电机的具体参数为：定子电阻 $R = 2.1 \Omega$ ，定子电感 $L_d = L_q = 1.4 \text{ mH}$ ，磁链数 $\psi_f = 0.00726 \text{ Wb}$ ，转动惯量 $J = 0.14 \text{ kg/cm}^2$ ，极对数 $P_n = 4$ 。



Figure 10. Testing device
图 10. 测试装置

本文中利用试验装置分别采集了在 1500 rpm 和 2000 rpm 转速下的定子电流波形。针对每个电机、每种工况下的定子电流信号采集 100 组，每组采集时间为 10 s，同时对采集到的数据进行指标提取与计算。在故障识别时，本文设计了两组对照组，一组仅利用选出的裕度因子、峰值因子和峰值；另一组利用峰值、均值、有效值、峭度和波形因子等全部指标。利用两组指标集进行 BP 神经网络训练，训练集结果和测试结果如表 8。在不同转速下，利用优选的指标进行故障识别的准确率超过 96%，准确率有了很大的提升。

Table 8. Accuracy comparison table
表 8. 准确率对比表

| 项目 | BP 神经网络识别 | | | | | |
|-------|-----------------|-----------------|-------|-----------------|-----------------|-------|
| | 1500 rpm 训练集 | 1500 rpm 测试集 | 准确率 | 2000 rpm 训练集 | 2000 rpm 测试集 | 准确率 |
| 指标优化 | 100% | 97.2% | 98.3% | 100% | 97.2% | 97.5% |
| 指标无优化 | 88.3% | 86.1% | 86.3% | 86.9% | 91.7% | 87.9% |

7. 结语

本文基于永磁同步电机三相定子电阻正常状态与故障状态下的数学模型，在 MATLAB 的 simulink 模块中搭建了仿真模型，模拟了电机在正常状态、轻微故障状态和严重故障状态下的定子电流数据；通过统计学中参数统计分析的方法提取出能够表征三相永磁同步电机故障状态变化的优质指标；通过 BP 神经网络进行诊断。结果显示，将筛选出来的指标输入 BP 神经网络进行故障识别，实现了永磁同步电机三相不对称高精度故障识别。

基金项目

浙江省市场监管新能源汽车驱动系统重点实验室开放课题(2022NV002)；国家自然科学基金(51875529)。

参考文献

- [1] 许伯强, 孙丽玲. 异步电动机转子故障与负荷波动的协同识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6518-6527+6619. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.160019>

-
- [2] 张志艳, 马宏忠, 钟钦, 赵利军. 永磁同步电机不对称运行负序分量特性分析[J]. 电测与仪表, 2014, 51(16): 46-50.
- [3] Kim, K.H. (2010) Simple Online Fault Detecting Scheme for Short-Circuited Turn in a PMSM through Current Harmonic Monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **58**, 2565-2568.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2060463>
- [4] 张凯, 时维国. 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[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(6): 66-75.
- [5] Tang, J., Liang, C., Wang, Y.H., Lu, S.H. and Zhou, J. (2021) A Stator Fault Diagnosis Method Based on the Offline Motor Parameter Measurement for PMSM. *World Electric Vehicle Journal*, **12**, Article No. 248.
<https://doi.org/10.3390/wevj12040248>
- [6] 白江坡, 邱静, 姜宜春. UKF 方法在永磁同步电机故障检测中的应用[J]. 电机与控制学报, 2007(1): 33-36.
- [7] 李龚睿子, 陈超波, 张彬彬, 郎宝华, 高嵩. 基于改进电流法的 PMSM 绕组开路诊断方法[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(7): 63-69.
- [8] Cruz, S.M.A. and Cardoso, A.J.M. (2005) Multiple Reference Frames Theory: A New Method for the Diagnosis of Stator Faults in Three-Phase Induction Motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **20**, 611-619.
<https://doi.org/10.1109/TEC.2005.847975>
- [9] Zhang, J., Hang, J., Ding, S., *et al.* (2016) Online Diagnosis and Localization of High-Resistance Connection in PMSM with Improved Fault Indicator. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **32**, 3585-3594.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2587670>
- [10] 王灿. 三相不对称状态下的 PMSM 故障诊断及控制[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2019.
<https://doi.org/10.27166/d.cnki.gsdcc.2019.000067>
- [11] 谷涛. 永磁同步电机伺服系统低速性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [12] Meng, F.W., Liu, C.Y., Li, Z.J. and Wang, L.P. (2013) Adaptive PI Control Strategy for Flat Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Vibration Suppression. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **26**, 11-20.
<https://doi.org/10.3901/CJME.2013.01.011>
- [13] 王海兵. 双三相永磁同步电机高性能调速系统及容错运行研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [14] 王静龙, 梁小筠. 非参数统计分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [15] 王万中. 试验的设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [16] 茆师松. 统计手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [17] 孙永厚, 李聪. 基于粗糙集-BP 神经网络的垃圾破碎机故障诊断[J]. 机械设计与制造, 2012(1): 218-220.
<https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.2012.01.082>