

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306792

电动汽车驱动电机与负载模拟系统建模及 电弧故障仿真研究*

杨凯^{1,2,3} 庄宏航^{1,2} 董毓利⁴ 张认成^{1,2} 涂然^{1,2}

(1. 华侨大学机电装备过程监测及系统优化福建省高校重点实验室 厦门 361021; 2. 华侨大学机电及自动化学院 厦门 361021; 3. 厦门产业技术研究院 厦门 361001; 4. 华侨大学土木工程学院 厦门 361021)

摘要: 电弧故障是引发电动汽车电气火灾的重要原因之一。电动汽车行驶工况复杂,电机及其驱动系统电压高、电流大,且其电弧故障随机性强、隐蔽性高导致真车故障实验难以开展,因此提出一种借助小功率电机与负载系统模拟故障的方法,以便快速开展大量实验,研究电弧故障特性。首先,在电动汽车负载转矩计算和等效缩放的基础上搭建了模拟实验平台,采集三相永磁同步电机线路串联电弧故障电流。其次,运用 MATLAB 软件构建空间矢量脉宽调制控制的电动汽车驱动电机与负载模拟系统,引入 Cassie 电弧故障模型并进行改进,对电动汽车三相永磁同步电机线路串联电弧故障展开仿真分析。最后,采用基于平肩宽度占比和小波包分解能量占比的特征提取方法,将仿真数据与实测数据进行比较并定量评价。结果表明,所提出的高斯电弧故障复合模型的相对平均误差最小,仅为 7.6%。所构建的仿真系统可有效模拟实际线路的电弧故障,对电动汽车电气火灾的防控具有重要意义。

关键词: 电动汽车; 驱动电机; 负载模拟; 电弧故障; 模型评价

中图分类号: TN701; TM501.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4031

Modeling of electric vehicle driving motor and load simulation system and arc fault simulation research

Yang Kai^{1,2,3} Zhuang Honghang^{1,2} Dong Yuli⁴ Zhang Rencheng^{1,2} Tu Ran^{1,2}

(1. Key Laboratory of Process Monitoring and System Optimization for Mechanical and Electrical Equipment, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 3. Amoy Institute of Technovation, Xiamen 361001, China; 4. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Arc fault is an important cause of electric vehicle fire. The complex driving conditions of electric vehicles, the high voltage and current in the motor and its drive system, and the great randomness and concealment of the arc fault, make it difficult to conduct the real vehicle experiment. Therefore, a method using a fractional horsepower motor and load system is proposed in order to simulate faults and carry out a large number of experiments to research arc fault characteristics. Firstly, based on the load torque calculation and equivalent scaling, a simulation experiment platform is built to collect the line series arc fault current of a three-phase permanent magnet synchronous motor. Secondly, a driving motor and load simulation system of electric vehicle controlled by space vector pulse width modulation is built via MATLAB software, and through introducing and improving Cassie arc fault models, the line series arc fault of the electric vehicle three-phase permanent magnet synchronous motor is simulated and analyzed. Finally, a feature extraction method based on the proportion of flat shoulder width and the proportion of wavelet packet decomposition energy is used to quantitatively evaluate the results by comparing the simulation and the measured data. The results show that the relative average error of the proposed Gaussian arc fault composite model is only 7.6%, the smallest one among all models. The constructed simulation system can effectively simulate the actual line arc fault, which is of great significance for the prevention and control of electric fire in electric vehicles.

Keywords: electric vehicle; driving motor; load simulation; arc fault; model evaluation

收稿日期: 2023-07-31 Received Date: 2023-07-31

* 基金项目: 国家自然科学基金(52175508 和 52076084)、中国博士后科学基金(2021M691861)项目资助

0 引言

目前我国纯电动汽车的保有量已超过 1 552 万辆,随着保有量的迅速增长,电动汽车起火自燃事故也在不断增加。电动汽车在行驶过程中工况复杂,车内线束由于长期颠簸振动,加上温度、湿度等环境因素影响,会出现线路绝缘老化、破损或线束连接松动等问题,极易诱发电弧故障,并引燃周围可燃物进而造成电动汽车起火事故^[1-3]。研究电动汽车行驶过程电气系统发生电弧故障时的电参数变化特性,对预防电动汽车起火致灾、提升公共交通安全水平以及促进新能源汽车产业健康持续发展具有重要的实际意义。

目前国内外学者对电动汽车的电弧故障模型展开了一些研究。Kiffmeier 等^[4]在汽车上引入 48 V 电源系统,用新的电弧故障模型分析电弧与典型供电系统之间的相互作用关系,并提出了电弧故障识别方法。刘艳丽等^[5]搭建了电动汽车电弧故障实验平台,利用音圈电机控制铜碳棒的往复分离过程,以此模拟电动汽车接触不良导致的电弧故障。李文初^[6]利用光栅尺传感器的反馈对触头运动进行控制,模拟电动汽车电芯电流切断装置受振情况下触点松动导致的电弧故障。王雨等^[7]建立了电动汽车用直流继电器的电弧等离子体数学模型,模拟了直流接触器灭弧室内分断电弧的整个过程。郭琳等^[8]针对新能源汽车在单一串联负载、混合负载下发生电弧故障的情况,建立了直流电弧故障的时频域 Cassie 仿真模型。周灵锋等^[9]提出用具有概率分布规律的阻抗模型来反映电弧故障的时域特征,用分段噪声模型来反映电弧故障的频域特征,通过模型叠加实现对电弧故障时频域特性的准确反映。康乐等^[10]基于 Mayr 模型对电弧故障进行仿真,通过对比分析仿真数据与电弧故障实验数据的时频域特性,验证了仿真模型的准确性。Xia 等^[11]采用不同的电极材料在电动汽车电池供电测试电路中进行电弧试验,获取了直流系统中的电弧功率和能量水平信息。综上所述,上述研究为电弧故障模型的修正提供了一些参考与指导,然而,大多数学者主要集中于电动汽车电源系统和继电器的直流电弧故障研究,并未涉及电动汽车电机驱动控制系统大功率交流电弧故障的研究。

本文拟采用三相永磁同步电机、磁滞制动器和控制器搭建电动汽车驱动电机与负载模拟实验平台,串接电弧故障发生装置模拟不同负载下电动汽车线路发生的电弧故障。运用空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)控制策略,借助 MATLAB/Simulink 软件建立电动汽车驱动电机与负载模拟仿真系统,并开展 3 种电弧故障模型的仿真分析。最后基于特征提取的评价方法对仿真结果和实际电弧故障数据进行

比对研究,验证模拟仿真系统的有效性。

1 电动汽车驱动电机与负载模拟系统基本原理

电动汽车三相永磁同步电机负载模拟是以负载电机转矩的形式表现出汽车驱动电机的实时负载转矩,通过控制负载电机输出转矩为汽车驱动电机加载,模拟汽车驱动电机实际的负载情况。在实际情况中,电动汽车驱动电机的负载变化十分复杂,受到固有阻力和惯性质量以及各种随机扰动的影响,但这些影响因素最终都可以转化到驱动电机转轴端,并以转矩和转动惯量的形式表现出来。负载模拟的最终目的就是使驱动电机作用在负载模拟系统与实际电动汽车上时具有同样的外部响应特性^[12-14]。

对电动汽车展开力矩分析,建立电动汽车负载转矩的力学模型,并基于在线动力学的模拟拓扑,计算模拟系统的电机转速,对负载电机实施速度闭环控制。驱动电机与负载模拟实验系统原理如图 1 所示,该系统采用磁滞制动器的输出转矩来模拟电动汽车实际负载。使用功率缩放后的电机代替实际电动汽车的驱动电机,采用加速时间对应相等的方式对负载进行等效缩放。

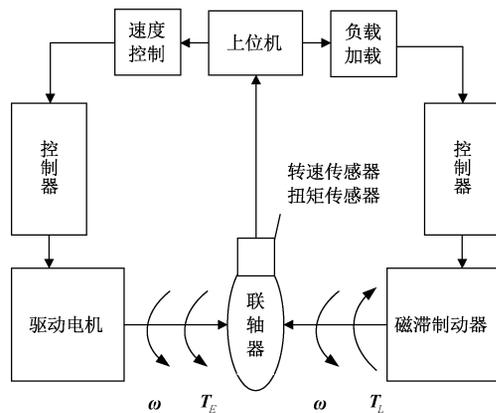


图 1 驱动电机与负载模拟系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of the driving motor and load simulation system

1.1 电动汽车负载转矩分析

对电动汽车进行整体受力分析,如图 2 所示,汽车的行驶方程式为:

$$F_i = \sum f \quad (1)$$

式中: F_i 为驱动力; $\sum f$ 为行驶阻力之和。

汽车驱动电机牵引转矩经传动系统传递到车轮上得

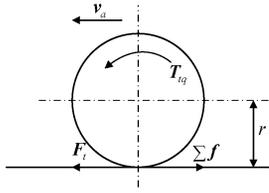


图2 电动汽车整体受力分析

Fig.2 Overall force analysis of electric vehicle

到汽车的驱动力,具体计算公式为:

$$F_t = \frac{T_{tq} i_g i_0 \eta_T}{r} \quad (2)$$

式中: T_{tq} 为牵引转矩; i_g 为变速器的传动比; i_0 为主传动比; η_T 为传动系统的机械效率; r 为车轮半径。

行驶阻力包括滚动阻力、空气阻力、坡度阻力和加速阻力,可表示为:

$$\sum f = F_f + F_w + F_i + F_j \quad (3)$$

式中: F_f 为滚动阻力; F_w 为空气阻力; F_i 为坡度阻力; F_j 为加速阻力。

将各阻力进一步细化计算,代入式(3)可得:

$$\sum f = Gf \cos \alpha + \frac{C_D A}{21.15} v_a^2 + G \sin \alpha + \delta m a \quad (4)$$

式中: G 为汽车重力; f 为路面滚动阻力系数; α 为坡度角; C_D 为空气阻力系数; A 为迎风面积; v_a 为汽车行驶速度; δ 为汽车旋转质量换算系数; m 为汽车质量; a 为汽车行驶加速度。

汽车驱动电机等效阻尼负载转矩为:

$$T_{lf} = \frac{r}{i_g i_0 \eta_T} \left(i_g \frac{dv_a}{dt} + v_a \frac{di_g}{dt} \right) \quad (5)$$

若汽车驱动电机的角速度为 ω_e , 那么电机的角加速度 $d\omega_e/dt$ 与汽车行驶速度 v_a 的关系为:

$$\frac{d\omega_e}{dt} = \frac{i_0}{r} \left(i_g \frac{dv_a}{dt} + v_a \frac{di_g}{dt} \right) \quad (6)$$

汽车在行驶过程中会产生平动惯量和转动惯量,整车质量所产生的平动惯量作用于车速方向,而无级变速器旋转元件、传动轴与主减速器齿轮等会产生转动惯量。本文将这两部分惯量折算到汽车驱动电机的负载称为等效惯性负载,其表达式为:

$$T_{ld} = \frac{J_\omega + mr^2(1 - S_r)}{i_g^2 \eta_T} \cdot \frac{d\omega_e}{dt} \quad (7)$$

式中: J_ω 为系统转动惯量; S_r 为滑转率。

汽车驱动电机的总负载转矩可以表示为^[15]:

$$T_L = T_{lf} + T_{ld} \quad (8)$$

1.2 驱动电机负载缩放策略

按照电动汽车真车与模拟实验平台情况分别对驱动电机建立转矩方程:

$$T_{tq} - T_{lf} = (J_n + J_m) \frac{d\omega_e}{dt} \quad (9)$$

$$T'_{tq} - T'_{lf} = (J_{ad} + J_{ms}) \frac{d\omega'_e}{dt} \quad (10)$$

式中: T'_{tq} 为实验电机牵引转矩; T'_{lf} 为实验电机阻尼负载转矩; J_n 为汽车驱动电机等效转动惯量; J_m 为汽车驱动电机转动惯量; J_{ad} 为磁滞制动器施加在实验电机上的附加转动惯量; J_{ms} 为实验电机固有转动惯量; ω'_e 为实验电机机械角速度。

电机转速缩放系数 k_n 及转矩缩放系数 k_T 为:

$$k_n = \frac{n}{n'} \quad (11)$$

$$k_T = \frac{T_{tq}}{T'_{tq}} \quad (12)$$

保持加速时间一致,那么系统缩放前后的加速度关系可表示为:

$$a' = \frac{1}{k_n} a \quad (13)$$

进一步地,施加在实验电机上的附加转动惯量值可表示为:

$$J_{ad} = \frac{k_n}{k_T} (J_n + J_m) - J_{ms} \quad (14)$$

式(14)将作为选取磁滞制动器惯性负载转矩控制的依据^[16]。

根据上述缩放策略设置缩放条件为 $k_n = 6$ 、 $k_T = 80$, 对实际电动汽车驱动电机的牵引曲线进行缩放,结果如图3所示。

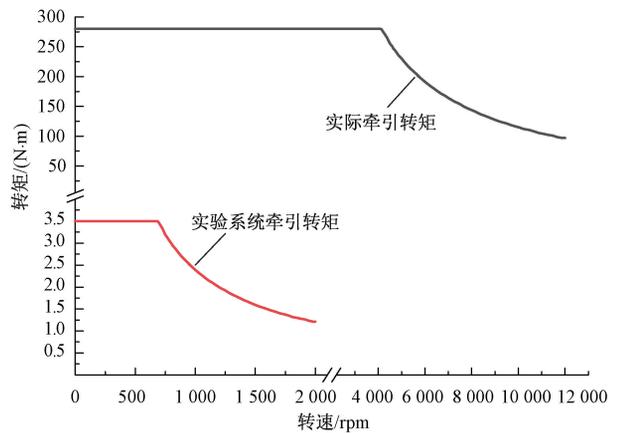


图3 牵引转矩缩放示意图

Fig.3 Scaling diagram of traction torque

2 驱动电机与负载模拟系统电弧故障实验

电动汽车驱动电机与负载模拟实验的电机参数如表1所示。

表 1 电机参数
Table 1 Motor parameter

电机种类	电动汽车三相	实验三相永磁	磁滞制动器
	永磁同步电机	同步电机	
额定功率/kW	42	0.73	0.8(滑差功率)
额定电压/V	336	220	24
额定转矩/(N·m)	105	3.5	4
额定转速/rpm	12 000	2 000	12 000

将电弧故障发生装置串接入到电机控制器与实验三相永磁同步电机之间的 A 相线,模拟驱动电机运行过程中线路出现的电弧故障。搭建的实验平台如图 4 所示。

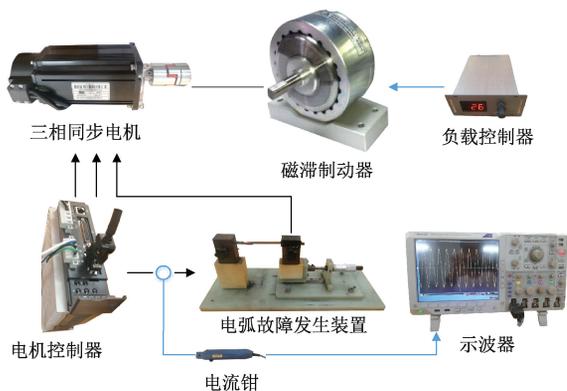
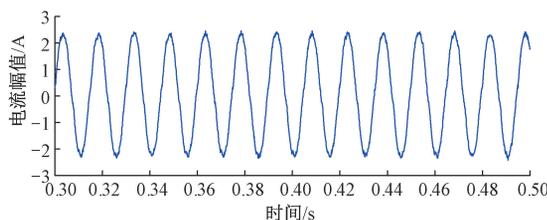


图 4 驱动电机与负载模拟系统电弧故障实验平台
Fig. 4 Arc fault experiment platform of the driving motor and load simulation system

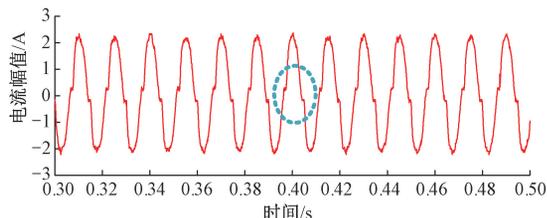
电弧故障发生装置主要由固定电极、移动电极和高精度螺杆 3 部分组成,通过调节高精度螺杆来使移动电极横向移动,两电极之间由接触导通逐渐缓慢分离,当两极间空气被击穿时即可模拟电机线路中由于绝缘老化、破损或线束连接松动引发的电弧故障。

本实验平台采用是德科技有限公司的有源交直流电流钳 N2783B 对电流数据进行采集,借助 Tektronix DPO4104B 示波器进行电流数据的观测与存储,采样频率为 10 kSa/s。

根据图 3 所绘制的牵引转矩缩放曲线,本文选取电机转速 1 000 r/min 和转矩 2.3 N·m 为实验条件,在模拟实验平台上进行电弧故障实验。图 5(a)、(b)分别是电机转速为 1 000 r/min、磁滞制动器输出转矩为 2.3 N·m 时,电机正常工作及发生电弧故障情况下的 A 相电流波形。可以看出发生电弧故障时,A 相电流的幅值出现轻微下降,电流信号出现较明显的平肩现象,如图 5(b)虚线圈圈内所示,由于电机属于感性负载,平肩位置不在电流过零点处,而是略有滞后。



(a) 正常工作时的电流波形
(a) Current waveform during normal operation



(b) 电弧故障时的电流波形
(b) Current waveform in case of arc fault

图 5 1 000 r/min 和 2.3 N·m 时的 A 相电流
Fig. 5 A-phase current at 1 000 r/min and 2.3 N·m

3 电弧故障仿真模型

在描述电弧故障过程中,Mayr 模型和 Cassie 模型是两个典型的黑盒模型。其中,Mayr 模型假定热传导引发线路电流功率损耗并保持恒定,通常用于分析交流电弧故障的电气特性,尤其是在电流过零时的行为,适用于大电阻小电流情况下的电弧故障^[17]。Cassie 模型假定电弧的功率损耗是由强制对流引起的,并且考虑到电弧截面积与电弧电流成正比的关系,这种假设更适用于大电流小电阻情况下的电弧故障^[18]。考虑到电动汽车驱动电机运行过程中电气线路内阻较小、电流往往较大,本文选择 Cassie 模型作为驱动电机运行过程电气回路电弧故障的仿真模型。Cassie 电弧故障模型的微分方程式为:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2}{u_c^2} - 1 \right) \quad (15)$$

式中: g 为电弧故障电导; u 为瞬时电弧故障电压; u_c 为电弧故障电压稳态值; τ 为电弧故障时间常数。

在电弧故障的形成和维持过程中,电弧故障内部存在局部内阻、击穿等现象,会导致电弧故障阻抗产生变化,从而影响电弧故障的瞬时电压和电流。一般情况下,当线路电流增大时,电弧故障电阻会降低,电弧故障的瞬时电压也会相应下降。考虑到线路电流对电弧故障的影响,本文将 Cassie 电弧故障模型方程中的电弧故障电压修改为与线路电流相关的非线性方程,构建改进型 Cassie 电弧故障模型,具体可描述为:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u + \frac{B}{I^n}}{u_c} - 1 \right) \quad (16)$$

式中: B 为电极材料相关常数; I 为线路瞬时电流。

考虑到电弧故障过程存在一定的随机性和不确定性,本文在改进型 Cassie 电弧故障模型中加入高斯白噪声 s ,构建高斯电弧故障复合模型, s 的概率密度为:

$$f(s) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(s-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (17)$$

式中: μ 为噪声均值, σ^2 为噪声方差。

4 驱动电机与负载模拟系统电弧故障仿真分析

4.1 系统仿真模型建立与仿真分析

本文使用 MATLAB/Simulink 软件构建 SVPWM 控制策略下的驱动电机与负载模拟仿真系统,使仿真系统电路的电气特性与实际系统尽量接近,用以提高后续电弧故障仿真的可靠性。

SVPWM 技术将两个独立的 PWM 信号(正常 PWM 基本波和三角波)合并成一个矢量波,并利用矢量波的方向和幅值来生成 PWM 脉冲以此来控制电压型 PWM 整流器(voltage source pulse width modulation rectifier, VSR)。与其他 PWM 技术相比,SVPWM 技术具有更高的控制精度和更低的谐波失真率^[19-20]。

为便于控制系统设计,一般将三相对称静止坐标系中的三相 VSR 模型经同步旋转坐标变换后转换成三相 VSR_{dq} 模型^[21]。为避免 d 、 q 轴电流分量 I_d 、 I_q 相互耦合,本文引入前馈解耦控制,采用比例积分调节控制电流环^[22],得到三相同步旋转坐标系下三相 VSR 电流控制时的指令电压为:

$$\begin{cases} U_q^* = (K_{ip} + \frac{K_{id}}{s})(I_q^* - I_q) - \omega L_{id} + e_q \\ U_d^* = (K_{ip} + \frac{K_{id}}{s})(I_d^* - I_d) - \omega L_{iq} + e_d \end{cases} \quad (18)$$

式中: U_d^* 、 U_q^* 为坐标系中三相 VSR 的指令电压; I_d^* 、 I_q^* 为坐标系中三相 VSR 的指令电流; K_{ip} 、 K_{id} 分别为控制器的比例和积分增益; e_d 、 e_q 分别为 I_d 和 I_q 的跟踪误差。

在 MATLAB/Simulink 软件中构建驱动电机与负载模拟系统以及电弧故障仿真模型,如图 6 所示。

为了与实际实验情况相符,参考模拟实验的电机参数设置电机仿真模块。考虑到电机三相电流平衡,以 A 相电流为例进行仿真,将电弧故障仿真模型串入电机控制器与三相永磁同步电机之间的 A 相线中。仿真时间设为 0.5 s,且在 0.15 s 时对电机进行加载,在 0.3 s 时线路出现电弧故障。

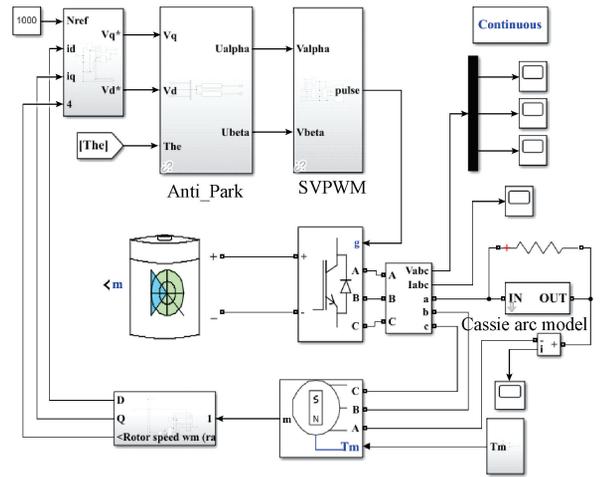


图 6 模拟仿真系统与电弧故障仿真模型

Fig. 6 Simulation system and arc fault simulation model

1) Cassie 电弧故障模型仿真分析

在 MATLAB/Simulink 软件中构建 Cassie 电弧故障模型,如图 7 所示。将仿真系统的电机转速设置为 1 000 r/min,根据牵引转矩缩放曲线可得对应的转矩为 2.3 N·m,将这些参数设为仿真条件。

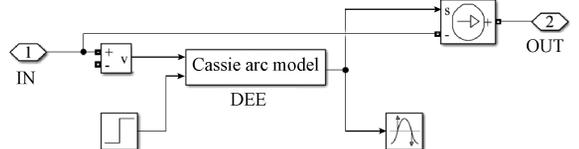


图 7 Cassie 电弧故障仿真模型

Fig. 7 Cassie arc fault simulation model

在仿真系统中串入 Cassie 电弧故障模型展开仿真分析,得到 A 相电流曲线,如图 8 所示。由图 8 可知,在空载状态下电机 A 相电流的幅值较小,虽然开始时 A 相电流有一些超调量,但能快速恢复至平稳状态,说明所设计的仿真系统具有较好的抗扰能力。在 0.15 s 时,电机开始加载,A 相电流峰值上升至 2.3 A 左右并保持稳定。在 0.3 s 时,驱动电机回路发生电弧故障,此时 A 相电流的幅值略微下降,电流信号在过零点附近出现平肩现象。

2) 改进型 Cassie 电弧故障模型仿真分析

在 MATLAB/Simulink 软件中构建改进型 Cassie 电弧故障模型,如图 9 所示,将仿真条件设置为:电机转速 1 000 r/min,转矩 2.3 N·m。

在串入改进型 Cassie 电弧故障模型的情况下,A 相电流的仿真曲线如图 10 所示。在图 10 中,发生电弧故障时 A 相电流出现一定的平肩现象,相较于 Cassie 电弧故障模型的仿真结果,平肩位置不在电流过零点,而是整体略微滞后。

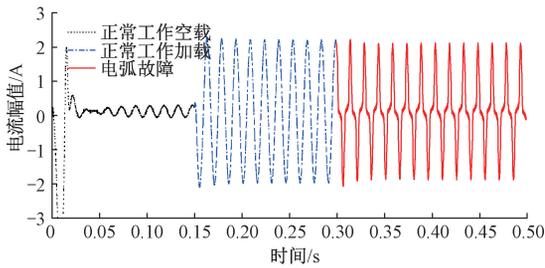


图 8 Cassie 电弧故障模型仿真结果

Fig. 8 Simulation results of the Cassie arc fault model

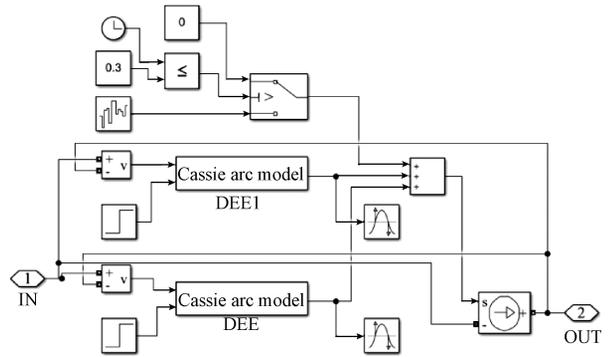


图 11 高斯电弧故障复合仿真模型

Fig. 11 Gaussian arc fault composite simulation model

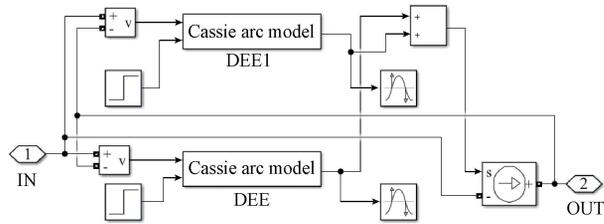


图 9 改进型 Cassie 电弧故障仿真模型

Fig. 9 Improved Cassie arc fault simulation model

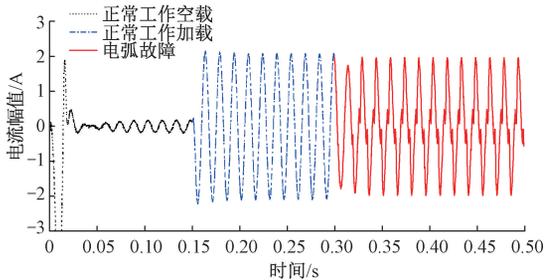


图 10 改进型 Cassie 电弧故障模型仿真结果

Fig. 10 Simulation results of the improved Cassie arc fault model

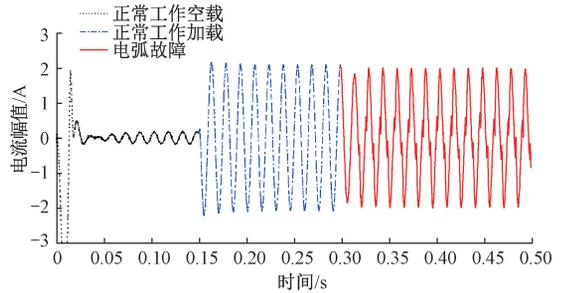


图 12 高斯电弧故障复合模型仿真结果

Fig. 12 Simulation results of the Gaussian arc fault composite model

5 驱动电机与负载模拟系统电弧故障模型评价

为了评价模型的仿真精度和适用性,需要对不同电弧故障模型的仿真结果与实际电弧故障数据进行定量分析。为了有效应对电弧故障模型仿真数据重复性与实际电弧故障数据随机性的矛盾,本文提出基于平肩宽度占比和小波包分解能量占比的模型评价策略,对不同电弧故障仿真模型及实际电弧故障数据进行不同维度的特征提取以便评价电弧故障模型。

5.1 基于平肩宽度占比的模型评价

考虑到实际电弧故障发生时线路电流存在较为明显的平肩现象,本文提出一种基于电流斜率变化的平肩宽度占比作为电弧故障的特征量之一,具体计算方式如下:

1) 对一个周期的电流信号进行窗口宽度为 5 的高斯平滑滤波,记为电流序列 $x[n]$, n 表示离散时间点的索引。

2) 计算电流信号在时间点 n 和 $n+1$ 之间的斜率,记为 $k[n]$ 。

3) 计算 $k[n] - k[n-1]$ 并取绝对值,超过阈值 10 说明信号斜率的变化足够显著,此处即为平肩信号的起始

3) 高斯电弧故障复合模型仿真分析

在 MATLAB/Simulink 软件中构建高斯电弧故障复合模型,如图 11 所示,将仿真条件设置为:电机转速 1 000 r/min,转矩 2.3 N·m。

在串入高斯电弧故障复合模型的情况下,A 相电流仿真曲线如图 12 所示。由图 12 可知,发生电弧故障时 A 相电流出现较为明显的平肩现象,平肩附近的电流噪声比较显著、丰富,并且此处的局部电流峰值出现轻微波动。

4.2 仿真模型结果对比

将上述不同仿真模型的电弧故障电流与实际电弧故障电流相比较,如图 13 所示。由图 13 可知,相较于传统 Cassie 电弧故障模型,本文所提出高斯电弧故障复合模型的电流在幅值、周期性和畸变特征等方面都更加符合实际电弧故障的电气特性,所包含的特征信息更为丰富。

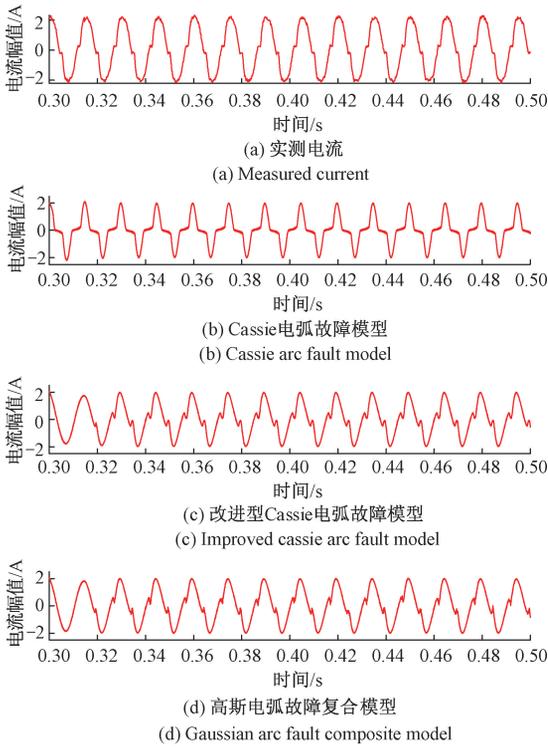


图 13 电弧故障电流比较

Fig. 13 Comparison of arc fault currents

或结束点,进而计算平肩信号所占时间 t 。

4) 计算 t 占一个电流周期 T 的百分比,即 $t/T \times 100\%$, 所得数值即为基于电流斜率变化的平肩宽度占比。

采用基于电流斜率变化的平肩宽度占比作为电弧故障特征量不仅能够时域上反映电弧故障的平肩现象,还能反映电弧故障波形的变化速率。计算不同电弧故障模型仿真结果的平肩宽度占比,并与实际电弧故障情况进行比较,结果如表 2 所示。

表 2 平肩宽度占比的计算结果

Table 2 Calculated results of the flat shoulder width proportion

类别	平肩宽度占比/%
实测电弧故障数据	10.67~16.38
Cassie 电弧故障模型	34.67
改进型 Cassie 电弧故障模型	15.2
高斯电弧故障复合模型	11.25~16.67

从电流斜率变化情况的评价结果发现, Cassie 电弧故障模型的平肩宽度占比与实际电弧故障的差异最大,其次是改进型 Cassie 电弧故障模型,而高斯电弧故障复合模型的平肩宽度占比与实际电弧故障的数据最接近,误差最小。

5.2 基于小波包分解能量占比的模型评价

研究发现,在环境和系统噪声影响下,电弧故障发生前后的电流信号在频域上具有明显的特征变化,因此本文基于小波包分解法提取电弧故障的电流特征量。

小波包分解克服了小波分解在信号高频部分分解的缺陷,对包含大量中、高频信息的电弧故障信号能够进行更全面的时频局部化分析。本文对实际电弧故障电流和仿真模型数据进行 3 层小波包分解,计算各个频段能量占比,定义特征量 E_i 为评价指标:

$$E_i = \frac{P'_i}{P_i} \tag{19}$$

式中: P'_i 为电弧故障发生后第 i 个频段的能量占比; P_i 为电弧故障发生前第 i 个频段的能量占比。

特征量 E_i 越大表明电弧故障发生后第 i 个频段的能量占比提升越显著。针对本文中不同的电弧故障仿真模型,分别计算特征量 E_i , 并与实际电弧故障情况进行比较,所得结果如表 3 所示。在表 3 中,频段 I、II... VIII 分别对应 0~10 kHz 的 8 等分频段。

表 3 特征量 E_i 的计算结果

Table 3 Calculated results of the feature E_i

频段	实测电弧故障数据	Cassie 电弧故障模型	改进型 Cassie 电弧故障模型	高斯电弧故障复合模型
I	0.999	1.000	1.000	1.000
II	2.732	0.349	0.711	2.371
III	1.273	0.299	0.839	1.104
IV	1.199	0.271	0.890	1.104
V	1.125	0.328	0.998	1.034
VI	1.236	0.326	0.964	1.094
VII	1.287	0.271	0.974	1.098
VIII	1.318	0.380	1.282	1.421

计算仿真模型各个频段特征量与实测电弧故障特征量的相对平均误差 δ , 其计算公式为:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^8 \left(\frac{E'_i - E_i}{E_i} \right)}{8} \times 100\% \tag{20}$$

式中: E'_i 为仿真模型数据第 i 个频段的特征量; E_i 为实测电弧故障第 i 个频段的特征量。

计算得到 Cassie 电弧故障模型、改进型 Cassie 电弧故障模型及高斯电弧故障复合模型的相对平均误差分别为 66.95%、24.26% 和 7.60%。由此可知,高斯电弧故障复合模型的相对平均误差最小,与实际电弧故障数据最接近。不过,由于实际电弧故障工况复杂多样,线路存在多种噪声叠加干扰,因此,高斯电弧故障复合模型也存在相对较小的误差。

6 结 论

本文计算了电动汽车的负载转矩,通过对负载转矩的等效缩放,提出了在实验驱动电机上施加附加转动惯量,以此作为选取磁滞制动器惯性负载转矩的依据。同时,针对不同转速下所搭建的驱动电机与负载模拟实验平台,本文确定了磁滞制动器所需施加的相应转矩。在此基础上,将电弧故障发生装置接入电机控制器与三相电机之间的 A 相线,实现了对电动汽车不同负载下电机线路发生电弧故障的模拟。

文中采用 SVPWM 控制策略,在 MATLAB/Simulink 软件中搭建了电动汽车驱动电机与负载模拟仿真系统,设计了三种电弧故障模型进行仿真模拟,提出了基于平肩宽度占比和小波包分解能量占比的特征提取方法,并对仿真模型进行定量评价,本文所提出的高斯电弧故障复合模型的误差最小,所构建的仿真系统具有良好的电气特性和实用性,可用于电动汽车电机驱动系统电弧故障的模拟仿真与故障特征研究,对电动汽车电气火灾的防控具有重要的实际意义。

参考文献

- [1] 王淮斌,李阳,王钦正,等. 电动汽车事故致灾机理及调查方法[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(2): 544-557.
WANG H B, LI Y, WANG Q ZH, et al. Mechanisms causing thermal runaway-related electric vehicle accidents and accident investigation strategies[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(2): 544-557.
- [2] 林焯,董红磊,肖凌云,等. 基于运行参数的电动汽车火灾原因判别模型[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(3): 422-428.
LIN Y, DONG H L, XIAO L Y, et al. A fire cause discrimination model for electric vehicles based on operation parameters[J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(3): 422-428.
- [3] 刘硕文,黄海波,肖凌云,等. 汽车电气系统起火缺陷特征与判定分析[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(5): 684-687.
LIU SH W, HUANG H B, XIAO L Y, et al. Study on the judgment and characteristics of vehicle fire defects in the electrical system[J]. Fire Science and Technology, 2015, 34(5): 684-687.
- [4] KIFFMEIER M, AUSTERMANN C, FREI S. Model-based analysis and evaluation of 48 V automotive power supply systems regarding to electric arc faults[C]. 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), November 7-9 2018, Nottingham, UK. IEEE, 2018: 1-5.
- [5] 刘艳丽,王浩,张帆. 电动汽车串联型电弧故障检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(6): 222-231.
LIU Y L, WANG H, ZHANG F. Series arc fault detection method in electric vehicle[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(6): 222-231.
- [6] 李文初. 电动汽车电池包串联型故障电弧信号特征及诊断方法研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2021.
LI W CH. Research on signal characteristics and diagnosis methods of series arc fault in electric vehicle battery packs[D]. Fuxin:Liaoning Technical University, 2021.
- [7] 王雨. 电动汽车用直流接触器电弧特性仿真研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2022.
WANG Y. Simulation study on arc characteristics of DC contactor for electric vehicle[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [8] 郭琳,柯希彪,汤引生,等. 新能源汽车电弧故障检测方法 & 测试系统设计[J]. 绝缘材料, 2018, 51(11): 74-79.
GUO L, KE X B, TANG Y SH, et al. Design of arc fault detection method and test system for new energy automobiles[J]. Insulation Materials, 2018, 51(11): 74-79.
- [9] 周灵锋,杨善水,王莉,等. 阻性负载下含分段噪声的间歇性直流电弧阻抗模型[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 85-94.
ZHOU L F, YANG SH SH, WANG L, et al. Intermittent DC arc impedance model with segmented noise under resistive loads[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 85-94.
- [10] 康乐,田云博,杨骥,等. 串联故障电弧电流时频域特性的仿真与实验研究[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 104-112,119.
KANG L, TIAN Y B, YANG K, et al. Simulation and experimental research on time-frequency domain characteristics of series arc-fault current[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 104-112,119.
- [11] XIA K, GUO H T, HE SH, et al. Binary classification model based on machine learning algorithm for the DC serial arc detection in electric vehicle battery system[J]. IET Power Electronics, 2019, 12(1): 112-119.
- [12] 徐国卿,骆媛媛,杨影,等. 面向汽车动力学性能测

- 试的新型轮-地模拟负载模型与系统[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(5): 214-223.
- XU G Q, LUO Y Y, YANG Y, et al. Novel tire-road simulation load model for vehicle dynamic performance test[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(5): 214-223.
- [13] 同建辉, 张方圆, 同海呐, 等. 高速永磁电机试验台的研制[J]. 机械设计, 2018, 35(S2): 467-471.
- TONG J H, ZHANG F Y, TONG H N, et al. Development of high speed permanent magnet motor test equipment [J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(S2): 467-471.
- [14] YANG X F, ZHOU X J, FU Y M, et al. Research on modeling and load simulation algorithm of tracked vehicle braking system on mu-split road surfaces[J]. Machines, 2022, 10(4): 224.
- [15] 李文礼, 汪杨凡, 李建波, 等. 电动汽车电驱动系统起步工况台架模拟试验与性能评价[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(6): 54-60.
- LI W L, WANG Y F, LI J B, et al. Simulation and performance evaluation of the starting condition of the electric drive system of the electric vehicle on the test bench[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2020, 34(6): 54-60.
- [16] 韦宇豪, 李忠利, 杨永军, 等. 台架负载模拟控制方法研究 [J]. 中国农机化学报, 2022, 43 (8): 106-113.
- WEI Y H, LI ZH L, YANG Y J, et al. Research on load simulation control method of bench [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43 (8): 106-113.
- [17] 许晔, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 57-64.
- XU Y, GUO M F, CHEN B, et al. Modeling and simulation analysis of arc in distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 57-64.
- [18] GOUDA O E, IBRAHIM D K, SOLIMAN A. Parameters affecting the arcing time of HVDC circuit breakers using black box arc model[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(4): 461-467.
- [19] 巫春玲, 程琰清, 刘智轩, 等. 一种永磁同步电机系统效率优化控制策略研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(10): 36-41.
- WU CH L, CHENG Y Q, LIU ZH X, et al. Study on an efficiency optimization method for permanent magnet synchronous motor [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(10): 36-41.
- [20] MA L H, QIU X CH. Research on SVPWM control algorithm based on dual three-phase permanent magnet synchronous motor [C]. 2022 5th International Conference on Power Electronics and Control Engineering (ICPECE), August 19-21 2022, Changchun, China. IOP Publishing, 2022: 1-10.
- [21] 宋文祥, 任航, 杨煜, 等. 双三相永磁同步电机的双矢量模型预测转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(9): 97-107.
- SONG W X, REN H, YANG Y, et al. Two vectors based model predictive torque control of dual three phase permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(9): 97-107.
- [22] 贾宁, 程瑶, 田又源. 基于电流前馈的电动汽车永磁同步电机矢量控制[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(12): 61-66.
- JIA N, CHENG Y, TIAN Y Y. Vector control of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle based on current feedforward [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(12): 61-66.

作者简介



杨凯(通信作者), 2016年于华侨大学获得博士学位, 现为华侨大学讲师, 主要研究方向为电弧故障模型、检测与识别技术, 新能源汽车、动力电池系统电气故障诊断。
E-mail: yangkai1@hqu.edu.cn

Yang Kai (Corresponding author)

received his Ph. D. degree from Huaqiao University in 2016. Now he is a lecturer in Huaqiao University. His main research interests include arc fault model, arc fault detection and identification technology, electrical fault diagnosis for new energy vehicles and power battery systems.



庄宏航, 2019年于华侨大学获得学士学位, 现为华侨大学硕士研究生, 主要研究方向为电动汽车电气系统故障诊断。
E-mail: 1138399427@qq.com

Zhuang Honghang received his B. Sc. degree from Huaqiao University in 2019. Now

he is a M. Sc. candidate in Huaqiao University. His main research interest includes the fault diagnosis of electric vehicle electrical system.