



中国期刊方阵双效期刊 中国中文核心期刊 中国科技核心期刊

ISSN 1001-8425

# 变压器®

www.ctn.cn

# 4 2019

第56卷

沈阳变压器研究院主办

## TRANSFORMER

国家电网  
STATE GRID  
中国电力科学研究院  
CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

专利保护 违者必究

科宏仪表  
KNOW HOW  
杭州科宏仪器仪表有限公司  
HANGZHOU KNOW HOW INSTRUMENT CO., LTD.



## 检验机器人助力周期检定·事半功倍

- 一次插入传感温包
- 一次连接传输导线
- 一次设置检验项目
- 4个接点动作误差
- 3个示值检验点
- 3个两表偏差

120分钟搞定

ISSN 1001-8425  
04  
9 771001 842005

☎ 400 6451 661

KnowHow  
Door-Button



## 《变压器》杂志简介

《变压器》杂志创刊于1964年,是中国变压器专业惟一国内外公开发行的期刊。《变压器》杂志刊登变压器、互感器、电抗器及组件等方面的技术文献资料,设有“专题综述”、“设计计算”、“制造工艺”、“试验研究”、“运行维护”、“学习之友”、“变压器组件”、“变压器标准”、“专利信息”和“信息荟萃”等栏目,报道国内外变压器类产品的应用技术、科技成果、变压器标准和信息动态,并刊登国内外广告。《变压器》杂志内容充实丰富,信息量大。

《变压器》杂志所刊载的内容版权归《变压器》杂志编辑部所有,未经许可,不得转载或复制。

### 本刊为:

中国期刊方阵双效期刊  
中国中文核心期刊  
中国科技核心期刊  
中国科学引文数据库来源期刊  
中国期刊网全文收录期刊  
中国学术期刊(光盘版)收录期刊  
万方数据—数字化期刊群收录期刊  
中国期刊全文数据库全文收录期刊  
中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊  
中文科技期刊数据库收录期刊  
辽宁省一级期刊  
沈阳市优秀期刊

开户银行:中国建设银行沈阳彩霞街支行

户名:沈阳变压器研究院股份有限公司

帐号:21001434101052501633

中国国内定价:10元/册

中国港澳台定价:8美元/册

国外定价:10美元/册

(参加期刊编校无差错承诺活动)

肖艳炜,楼平,蒋水中等

51 110kV天然酯变压器的油面温升计算与分析

黄芝强

54 DSP控制的变压器在线监测系统 杜静,王娟平

## 试验研究

58 基于双极性多脉冲的电抗器匝间绝缘检测方法研究

李中元,姜鹏,王鲁昕等

63 变压器绕组频率响应测试方法研究 周健科

69 太平湾水电站3号变压器时频域介电响应研究

郭善成,王廷廷,崔光源等

74 220kV电容式电压互感器二次电压单相异常试验分析

周庆红,张鹏飞,张燕珂等

78 植物油替换矿物油配变负载性能研究

王锐锋,汪进锋,林一峰等

## 运行维护

81 一起35kV电磁式电压互感器爆炸事故案例及仿真分析

高一壹,咸日常,咸日明等

B2 下期要目及网上浏览网址

## 信息荟萃

第十五届全国变压器技术学术年会暨“双江能源杯”有奖征文活动通知(7);青海-河南±800kV特高压直流输电工程海南换流站开工(17);新疆特变电工两项目获2018年中国建设工程鲁班奖(26);《变压器》杂志征稿启事(31);天津首座地下220kV变电站开工建设(36);新疆四地州煤改电配套电网工程启动(45);车载移动变电站格林美项目顺利送电投运(53);粤港澳大湾区启动智能电网建设投资1700多亿(68)

# DSP 控制的变压器在线监测系统

杜 静,王娟平

(山西电力职业技术学院(国网山西省电力公司技能培训中心), 山西 太原 030021)

**摘要:**本文中作者确定了反映变压器各种运行状态及故障的监测参数,提出了各参数的在线监测方法,设计了以DSP为核心的状态监测硬件电路和软件程序。

**关键词:**变压器;数字信号处理;故障;诊断

**中图分类号:**TM407 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-8425(2019)04-0054-04

## On-Line Monitoring System of Transformer Based on DSP

DU Jing, WANG Juan-ping

(Electric Power Occupational Technical Institute of SEPC(State Grid Shanxi Power Company Training Center), Taiyuan 030021, China)

**Abstract:**The monitoring parameters reflecting various operating states and faults of transformers are determined. The on-line monitoring method for various parameters is proposed. The hardware circuit and software program of state monitoring based on DSP are designed.

**Key words:**Transformer; DSP; Fault; Diagnosis

## 1 引言

为了确保供电的可靠性、安全性和连续性,需要实时监测变压器重要状态参数,如运行电压、运行电流和温度等,以便了解其运行状态。同时对于可能存在的故障隐患,须尽早发现,以免重大事故的发生。

本文中笔者构建了对变压器状态参量实施的在线监测系统,为其故障诊断奠定了应用基础。

## 2 系统总体设计

### 2.1 系统功能划分

变压器状态参量在线监测系统由六个基本单元组成。

(1)信号变送。利用对应的功能传感器实现信号变送。功能传感器的作用是把变压器上的相关物理参量,包括电信号和非电信号,转变为电信号,然后传输给下一级。这些物理参量主要指能够检测变压器运行状态的信号,包括三相运行电压、三相运行电流和三相绕组温度。

(2)信号调理。将信号变送传输的信号进行处理。这种处理主要是解决信噪比低的问题,起到降低

噪声干扰的作用。

(3)数据采集。其功能包括数据采集、数据变换及数据存储。

(4)数据传输。其功能包括数据传递、数据变换及数据隔离,保证数据延续到下一级。

(5)数据处理。其功能是提高信噪比,降低噪声干扰,从而提取出信号的特征量。这些处理涉及到相关算法理论,包括数字滤波、时域-频域相互转换、算数平均数和几何平均数等。

(6)故障诊断。其功能是分析数据、特征值历史数据的变化趋势,根据规程、规范、标准及判据等,对设备的状态进行诊断。目前,已经有很多成熟的专家系统可以起到故障诊断的作用。这在电力生产系统中已有所应用。

监测系统结构如图1所示。

### 2.2 软件设计

变压器软件系统包括在线监测和故障诊断两部分。这两部分分别实现前置监测和后端诊断两种不同的功能。

(1)在线监测。

①下位机对设备状态参量进行数据采集、数据



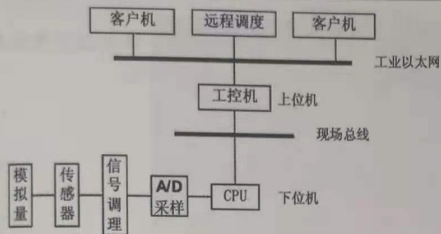


图1 变压器监控系统结构框图

传输和数据处理。特别是要进行降噪处理,比如数字滤波、特征量提取及基本运算等。还需要和上位机通讯。这部分软件设计需要反复调试,不断优化,编写高效的算法软件,提高系统的运算能力。下位机的核心 CPU 采用 DSP 芯片。

②上位机将下位机获取的数据通过人机交互界面显示出来。其基本功能包括实时参量、变化趋势、报文记录、报警信息及模拟画面等。

(2)故障诊断。

故障诊断需要由专家系统完成。专家系统软件安装在上位机中,并联网在线,可以实时更新。专家系统将下位机获取的数据进行提取、分辨及转换,得到大量有效信息。这些信息中有些是故障量,便于专家系统判别和诊断,并能给出检修策略,比如加强监视、增加带电检测次数及建议停电处理等。

2.3 硬件电路

本系统采用 TMS320F2812 作为核心 CPU,按照功能性质划分,本系统硬件分为以下几个模块,完成对变压器状态参量的在线监测。

(1)DSP 最小系统单元。包括 DSP 芯片、电源电路、时钟电路、复位按钮和 JTAG 接口等模块。它的设计完全遵循 TMS320F2812 DSP 数据指南的相关指标。

(2)数据采集单元。包括相应的传感器、信号调理电路、锁相环电路和模数转换电路。

(3)存储器扩展单元。

(4)串口通信单元。

3 运行电压、电流在线监测调理电路的设计

3.1 互感器的选择

互感器将变压器的一次电压和电流通过变换为合适的信号,用作测量、保护或控制等功能。按照电路结构划分,互感器分为一级和二级。

一级电压互感器将高电压变换成低电压信号,比如二次额定电压为 100V;一级电流互感器将大电

流变换成小电流信号,比如二次额定电流为 1A 或 5A。

一级互感器变换后的信号,通过调理电路变换为合适的信号,输入到 DSP 相应接口。

3.2 调理电路

调理电路对信号进行滤波和幅值调整(放大或衰减、偏置),调至模数转换部分输入所要求的范围,用于数据采集、控制过程和执行计算。

调理电路包括二级互感器、二次侧辅助电路和偏置电路。

二级电压互感器选用 2mA/2mA 电流型电压互感器,二级电流互感器选用 5A/2.5mA 电流互感器。

由于 CPU 需要采集电压信号,所以必须通过二次侧辅助电路,将电流信号转换为电压信号。此外,该电路还能将电压信号放大一定比例,如图 2 所示。

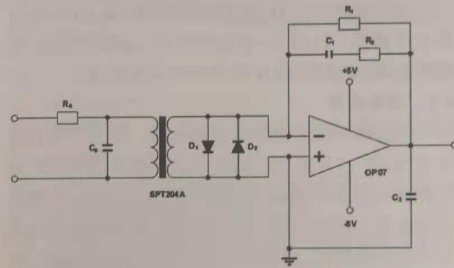


图2 副边辅助电路

3.3 锁相环电路

锁相环同步电路包括方波发生电路、锁相环和分频器三部分,其电路如图 3 所示。

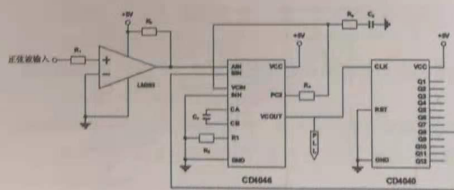


图3 锁相环同步电路

(1)方波发生电路。

方波发生电路由过零比较器和输入、输出电阻组成。正弦波信号经过过零比较器变换为工频方波信号。这些正弦波模拟量过零就跳变为 TTL 电平量,之后输入到 CD4046,即通用的 CMOS 锁相环集成电路。过零比较器选用 LM393,即双电压比较器集成电路。



## (2) 锁相倍频电路。

本文中的锁相倍频电路可以实现工频信号的锁相倍频,分频比为 1/128。它由锁相芯片 CD4046(通用的 CMOS 锁相环集成电路)和分频芯片 CD4040(12 位二进制串行计数器)组成。

具体原理:当输入信号为 50Hz 时,该电路的锁相倍频频率为:

$$50 \times k = 50 \times 128 = 6.4 \text{ kHz}$$

即在一个工频周期内有 128 个脉冲。该电路使得一个工频周期内可以相同间隔采样 128 个点。通过这 128 倍的脉冲信号来启动 AD 采样。

## 4 绕组温度在线监测调理电路的设计

为了监测变压器绕组温度,本系统的温度监测主要由两部分组成:温度传感器和调理电路。

## 4.1 温度传感器的选择

文中笔者选用 Pt100 型铂热电阻(即 RTD)作为温度传感器。Pt100 具有稳定性好、温度范围宽、测量精度高、抗震动、抗冲击及尺寸小等优点。

## 4.2 调理电路

传感器连接至温度电流变送器。本文中笔者选用 XTR105 芯片组成的温度电流变送器。XTR105 是一种具有传感器激励和线性化的 4mA~20mA 的电流发送器。根据 RTD 的电气特性,随温度的变化对应不同的电阻值。它可以把电阻值转换为电流值。由于该电流值仅与 RTD 阻值有关,与线路电阻  $R_{LINE}$  无关,从而消除了线路电阻产生的误差。它可对铂热电阻中的温度二次项进行线性补偿,提高整个系统的线性度和精度。

(1) 电路设计(如图 4 所示)。

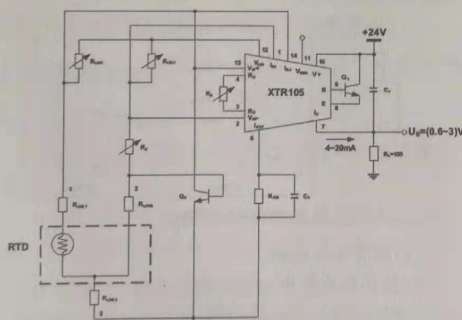


图 4 温度变送电路

整个电路的电压、电流传递函数为:

$$I_0 = 4 + V_{IN}(40/R_G)$$

其中,  $V_{IN}$  为  $V_{IN+}$ 、 $V_{IN-}$  两端输入电压。

## (2) 参数选择。

量程为 0°C~200°C 的 Pt100 一体化温度变送器的参数选择公式如式(1)~式(3)所示。

$$R_G = \frac{2(R_2 - R_Z)(R_1 - R_Z)}{R_2 - R_1} \quad (1)$$

$$R_{LIN1} = \frac{R_{LIN}(R_2 - R_1)}{2(2R_1 - R_2 - R_Z)} \quad (2)$$

$$R_{LIN2} = \frac{(R_{LIN} + R_G)(R_2 - R_1)}{2(2R_1 - R_2 - R_Z)} \quad (3)$$

式中:  $R_Z$ ——温度为温度下限  $T_{MIN}$  时 RTD 电阻值,  $\Omega$

$R_1$ ——温度为  $(T_{MIN} + T_{MAX})/2$  时 RTD 电阻值,  $\Omega$

$R_2$ ——温度为温度上限  $T_{MAX}$  时 RTD 电阻值,  $\Omega$

$\Omega$

$R_G$ ——量程电阻值,  $\Omega$ 。它影响放大器的放大倍数,是根据测温范围设置的。

$$R_{LIN} = 1 \text{ k}\Omega$$

本系统的测温范围为 0°C~200°C, 即  $T_{MIN} = 0^\circ\text{C}$ ,  $T_{MAX} = 200^\circ\text{C}$ ,  $(T_{MIN} + T_{MAX})/2 = 100^\circ\text{C}$ , 对应这些温度下 RTD 的阻值由 Pt100 的分度表可知, 由此可以计算出电路中的参数。

## 5 在线监测调试

## 5.1 三相电压、电流监测调试

根据上述设计,笔者研制出了变压器在线监测装置。系统调试在实验室完成。使用 XD-3020A 型电表校验仪作为信号源。

电表校验仪输出有效值约为 100V、5A 的正弦波信号,用来模拟三相电压、三相电流。锁相倍频电路触发装置 CPU TMS320F2812 进行 AD 采样。每个工频周期采集 128 个样本,由软件编制的平均数算法,求得其有效值。DSP 采样波形如图 5 所示,误差计算如表 1 所示。

## 5.2 温度监测调试

笔者通过对 30°C、60°C、90°C、120°C、150°C 及 180°C 温度下的监测,得到装置 CPU TMS320F2812 采集到的未经换算数值及计算平均值,然后进行曲线拟合,如图 6 所示。

通过曲线拟合可以得到未经换算数值和温度之间的公式。最后,调整程序中的相应换算系数,进一步修改软件参数。

## 6 结束语

本文中笔者确定了反映变压器运行状态及故障的监测参数,提出了各参数的监测方法,开发了基于数字信号处理的变压器在线监测系统,设计了系统的硬件电路,编写了相关的软件程序,并对系统进行

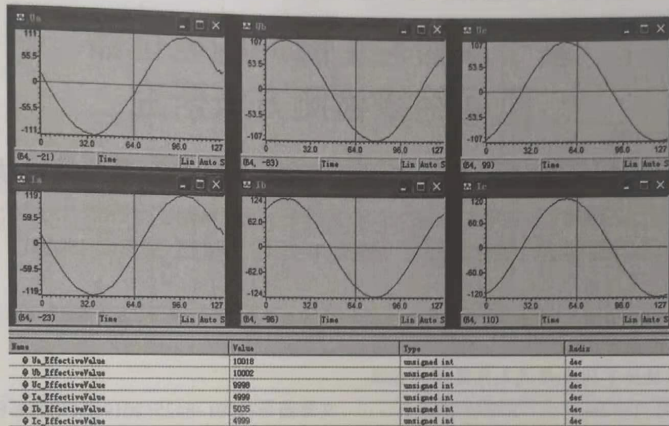


图5 采样波形和计算结果

表1 误差计算

名称	实际值	测试值	绝对误差	相对误差/%
A相电压/V	100.15	100.18	0.03	0.03
B相电压/V	100.00	100.02	0.02	0.02
C相电压/V	99.99	99.98	0.01	0.01
A相电流/A	4.996	4.999	0.003	0.06
B相电流/A	5.036	5.035	0.001	0.02
C相电流/A	4.998	4.999	0.001	0.02

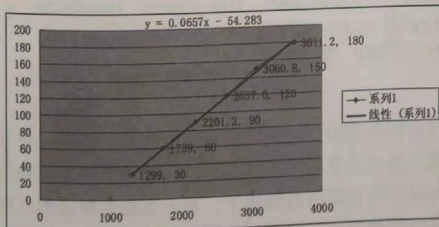


图6 曲线拟合

了实验室调试,为实现变压器专家系统的故障诊断提供了应用前提。

参考文献:

[1] 李常禧. 电气设备诊断技术概论[M].北京:水利电力出版社,1994.  
 [2] 周青龙. 故障诊断与检测[M].北京:兵器工业出版社,1992.  
 [3] 张雨. 设备状态检测与故障诊断地理论和实践[M].长沙:国防科技大学出版社,2000.  
 [4] 陈化钢. 电力设备预防性试验规程技术问答[M].北京:

中国电力出版社,1997.

[5] 严璋. 电气绝缘在线检测技术[M].北京:水利电力出版社,1994.  
 [6] 王昌长,李福祺. 电力设备的在线监测与故障诊断[M].北京:清华大学出版社,1996.  
 [7] 朱德恒,严璋. 高压绝缘[M].北京:清华大学出版社,1992.  
 [8] 刘和平. TMS320LF28xxDSP 结构、原理及应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2002.  
 [9] 江思敏. TMS320LF28xxDSP 硬件开发教程[M].北京:机械工业出版社,2003.  
 [10] 清源科技. TMS320LF28xx DSP 应用程序设计教程[M].北京:机械工业出版社,2003.  
 [11] 周霖. DSP 系统设计与实现[M].北京:国防工业出版社,2003.  
 [12] 王亚杰,刘利强,张梦彬,等.干式空心电抗器匝间绝缘检测综述[J]. 电力电容器与无功补偿,2018(1):91-95.  
 [13] 张晓娜,吴晓霞,胡孟谦,等. 基于变压器在线监测技术检测研究[J]. 变压器,2017,54(9):72-75.  
 [14] 杨红平,张翰林. 变压器套管故障的在线监测技术[J]. 变压器,2017,54(12):62-64.  
 [15] 石林,牟龙华,刘晓明,等. 基于滑动窗口和聚类算法的变压器状态异常检测[J]. 高压技术,2016,42(12):4020-4025.

作者简介:

杜静(1980-),女,山西阳泉人,硕士,工程师。

收稿日期:2018-08-23

ISSN 1001-7119

全国中文核心期刊

中国科技核心期刊

# 科技通报

BULLETIN OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

2019年2月 第35卷 第2期  
Vol.35 No.2 Feb. 2019

浙江省科学技术协会主办

Sponsored by Zhejiang Association for Science and Technology



中国·杭州  
HANGZHOU CHINA



## · 生物科学 ·

- 摄食不同饲料对大口黑鲈全鱼及肌肉营养成分的影响 ..... 黄爱霞,陈建明,沈斌乾,姜建湖,孙丽慧(42)
- 高粱穗型相关性状的遗传研究 ..... 邵健美,崔国伟,王 华(46)

## · 工业技术 ·

- 基于ARM处理器的生物质颗粒燃烧器控制系统设计 ..... 余有芳,鲍军民,盛奎川(49)
- 改进的Apriori算法在云计算控制下的研究 ..... 徐浙君(54)
- 信息物理系统数据格式交换性能研究 ..... 丁承君,崔 欣,朱雷宏,冯玉伯(59)
- 一种大功率无线触摸屏开窗机的设计 ..... 孙 明,崔 希,徐星海(64)
- 一种混沌的图像加密算法的研究 ..... 傅 彬(70)
- 基于关联规则的海量图书信息数据扩散研究 ..... 张 佳(76)
- 电力隧道消防机器人实时避障控制系统设计 ..... 谷山强,姜文东,罗 浩(80)
- 云计算下各分散文本数据的全方位集成融合方法 ..... 姜连国,李若斌,刘 冰,张冬冬(85)
- 续航里程约束条件下低空无人机高像素监控高速公路研究 ..... 郭晓峰,陈利正,谭政宇,张 薇(89)
- 地铁站深基坑周边地表沉降规律研究 ..... 俞伙伙,王立峰,庞 晋,杨开政,陈巧虹(94)
- 基于极限学习机的分布式电力负荷预测 ..... 张丽珍(101)
- 基于层次分析法的危旧房屋安全分析评价体系构建——以杭州市危旧房屋结构安全分级为例  
..... 周 园,何雨秋,沙 玲,洪 笑(106)
- 地下给排水管网入侵体积的影响因素研究 ..... 党晨凯,俞亭超,邵 程,张土乔(111)
- 冗余数据干扰下的关口表远传数据校验技术 ..... 黄虹霞(116)
- 基于ABAQUS的某混凝土结构加固工程研究 ..... 倪 玲,黄竹也,王国阳(121)
- 基于BIM技术的工程造价管理分析 ..... 包 胜,赵政婷,毛宇虹(125)
- 基于i-Tree模型的杭州市环西湖景区行道树生态效益分析 ..... 刘朋朋,蔡建国,章 毅,孙凯文,施健健(132)
- 基于变分模态分解的单通道信号盲源分离方法 ..... 王 康,程 浩,张 坤(138)
- 基于神经网络技术预测锈蚀开裂后混凝土中钢筋锈蚀量 ..... 甘海龙,郭容宽(144)
- 基于辐射时间序列法的房间空调负荷实验研究 ..... 吕留根,罗文英,黄 晨(150)
- 基于气象典型年的电力线路通道气温环境数据生成方法及结果分析 ..... 杨续超,周象贤,刘浩军,张 斌(155)
- 机电管线强风下最优有效临界档距的计算与实验分析 ..... 陈 斌,刘会军(161)
- 内支撑基坑变形空间效应特性研究 ..... 刘念武,俞济涛,龚晓南,朱祖华,杨云芳(166)
- 城区电力电缆接头故障检测装置准确度试验研究 ..... 葛少伟,刘 哲,侯建峰,邵 涛,王家斌(173)
- 医院绩效管理中的数据统计管理系统的应用 ..... 李文地,赵芳蓉(178)
- 碳纤维复合材料粉煤灰混凝土抗冲击性能试验研究 ..... 温世臣,胡桂娟(183)

## · 交通运输 ·

- 拉索-TMD系统在风荷载作用下的减振分析 ..... 梁 栋,王泽鑫(187)
- 综合超前地质预报技术在有主岭隧道破碎带预报中的应用 ..... 何 山,张文君,邱 波,孙 浩(195)
- 运动链式城市轨道交通多站协同客流控制模型研究 ..... 崔素萍(201)

# 基于极限学习机的分布式电力负荷预测

张丽珍

(山西电力职业技术学院, 山西太原, 030021)

**摘要:** 现代电力负荷数据以海量形式存在, 传统单机模式无法满足电力负荷在线预测效果的要求。为了改善大规模电力负荷数据的预测效果, 设计了基于极限学习机的分布式电力负荷预测模型。首先提取电力负荷数据, 通过混沌理论的相空间重构方法对电力负荷数据进行预处理, 产生电力负荷数据预测建模样本, 然后将电力负荷数据预测建模样本细分成为多个子样本, 通过云计算集群系统的分布式方式并行实现子样本建模, 每一个小样本通过极限学习机进行建模和预测, 最后采用具体电力负荷数据进行了仿真测试实例研究, 测试结果表明, 本文模型加快了大规模电力负荷数据建模速度, 可以满足电力负荷在线预测效果, 而且电力负荷预测精度要明显优于当前其它电力负荷预测模型。

**关键词:** 电力负荷; 单机模式; 分布式处理方式; 极限学习机; 云计算集群系统

**中图分类号:** TM76 **文献标志码:** A

## Distributed power load forecasting based on extreme learning machine

ZHANG Li-zhen

( Shanxi Vocational College of Power Technology ,Taiyuan, 030021 )

**Abstract:** modern power load data exist in mass form, and the traditional single machine model cannot meet the demand of power load online prediction. In order to improve the prediction effect of large-scale power load data, a distributed power load forecasting model based on limit learning machine is designed. The extraction of power load data, and the load data is preprocessed by phase space reconstruction of chaotic theory, predictive modeling sample from power load data, then the data of power load prediction modeling samples are divided into multiple sub samples, through cloud computing distributed cluster parallel sub sample modeling, each a small sample the modeling and forecasting by extreme learning machine, finally through the concrete data of power load simulation test case, test results show that this model can speed up large-scale power load data modeling speed can satisfy the on-line power load prediction effect, and the accuracy of load forecasting is better than the other power load forecasting model.

**Keywords:** power load; single machine mode; distributed processing mode; limit learning machine; cloud computing cluster system

### 1. 引言

近年来, 由于用户对电力的质量和稳定性要求越来越高, 电力系统的智能管理要求也日益提高<sup>[1]</sup>。电力负荷的建模与预测是电力系统智能管理中的一项关键技术, 如何建立高精度的电力负荷预测模型成为电力管理研究领域中的一个热点<sup>[2,3]</sup>。

当前电力负荷预测的建模方法很多, 出现了性能良好的电力负荷预测模型, 可以将当前电力负荷模型大致划分为2类: 传统模型和现代模型, 其中传统模型包括为: 线性回归, 移动平均等模

型, 它们对电力负荷的历史数据进行收集和分析, 从中找到电力负荷与因子间的变化规律, 并根据变化规律拟合出电力负荷将来的值<sup>[4]</sup>。传统模型假设电力负荷呈一种固定不变的变化趋势, 如上升趋势或者下降趋势, 而实际上电力负荷由到经济、区域、企业、供电系统等多种因素的影响, 并不是一种固定的变化趋势, 具有明显的随机性和时变性, 因此传统模型的电力负荷预测结果可靠性难以保证<sup>[5]</sup>。现代模型主要基于现代统计学理论和机器学习算法实现电力负荷的建模与预测, 主要有神经网络、支持向量机等电力负荷预测模型<sup>[6-8]</sup>, 它们具有强大的非线性拟合能力, 可以较

好描述电力负荷与因子间的变化规律,从电力负荷历史数据中发现变化特点,从而实现电力负荷的预测,预测精度要明显高于传统模型。现代电力负荷建模是一种海量数据的建模与学习过程,每天的电力负荷数据爆增,单机工作模式难以实现电力负荷在线预测<sup>[8]</sup>。云计算集群系统是在一种针对海量数据处理的工作模式,通过采用Map/Reduce工作方式将一个任务划分多个子任务,并分布式方式对子任务进行并行处理,建模效果大幅度提高,为海量电力负荷数据建模提供了一种平台。针对神经网络和支持向量机的局限性,有学者提出了极限学习机(extreme learning machine, ELM)<sup>[9]</sup>,其也属于机器学习算法范畴,自适应、自主学习能力强,具有支持向量机学习精度,同时也有具有神经网络的建模能力,在许多领域得到了成功应用。

为了改善大规模电力负荷数据的预测效果,设计了基于极限学习机的分布式电力负荷预测模型。首先通过混沌理论的相空间重构对电力负荷数据进行预处理,然后电力负荷样本细分为多个子样本,通过云计算集群的分布式方式并行对小样本通过极限学习机进行建模和预测,最后实现了电力负荷预测仿真测试,结果表明,本文模型的大规模电力负荷数据建模速度快,电力负荷预测精度高。

## 2. 云计算集群系统和极限学习机

### 2.1. 云计算集群系统

由于单机工作模型无法适应大数据时代的数据处理要求,为此有学者提出了云计算平台<sup>[10]</sup>。云计算平台通过分布式管理系统将多个功能弱的节点组成一个功能强大的集群系统,各个节点相互独立,互不影响实现各自任务的完成,这样可以实现子任务的并行运行,加快了大数据的处理速度。通常情况下,云计算集群系统根据Map/Reduce工作流程进行任务分配和处理结果的融合,而且通过分布式文件系统的支撑,用户不需要了解底层实现细节,实现简单、方便,通用性强,工作过程如下

(1) 通过一个大数据库存储于分布式文件系统中,将大数据进行分片处理,产生多个子数据,

而且1个子数据与1个Map函数相对应。

(2) 把子数据看作一组(Key, value)键值对,Map节点的程序进行处理,生成新的(Key, value)值。

(3) 把新的(Key, value)值对从Map节点转移到Reduce节点中。

(4) 采用Reduce函数对全部中间值、以及中间键进行数据处理,生成新的(key, value)键值对。

(5) 将Reduce结果输出到相应的分布式文件系统路径下,从而输出大数据的处理结果,减少数据的处理时间。

### 2.2. 极限学习机算法

对于一个采集了k个训练样本的预测问题,训练样本组成的集合为:  $S_k = \{(\mathbf{X}_p, \mathbf{t}_p)\}_{p=1}^k$ , 这些数据以时间先后进行收集和组织的,是一种典型的时间序列,通过一定处理变成多维时间序列,即:  $\mathbf{X}_p = [x_p, x_{p+1}, \dots, x_{p+m-1}]^T$ ,  $\mathbf{t}_p = x_{p+m}$ , m表示维数,那么这样极限学习机的回归可以表示

$$\min \left( \frac{1}{2} \beta_k^T \beta_k + \frac{\gamma}{2} \varepsilon_k^T \varepsilon \right)$$

s.t.

$$\begin{cases} \mathbf{t}_p = \sum_{i=1}^L \beta_k f(\alpha_i \mathbf{X}_p + b_i) - \varepsilon_p \\ p = 1, 2, \dots, k \end{cases} \quad (1)$$

要建立基于极限学习机的回归模型,首先要对式(1)的参数进行求解,而对参数直接求解相当复杂,一般情况下难以进行,为了简化求解过程,常引入拉格朗日函数进行变换,这样就变为:

$$L(\mathbf{w}, \varepsilon, \beta_k) = \frac{1}{2} \beta_k^T \beta_k + \frac{\gamma}{2} \varepsilon_k^T \varepsilon - \mathbf{w}(\mathbf{H}_k \beta_k - \mathbf{T}_k - \varepsilon)$$

s.t.

$$\begin{cases} \mathbf{t}_p = \sum_{i=1}^L \beta_k f(\alpha_i \mathbf{X}_p + b_i) - \varepsilon_p \\ p = 1, 2, \dots, k \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{H}_k$  表示矩阵;  $\mathbf{w}$  表示权值。对式(2)求偏导,并且使偏导数为零,则能够产生



$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \beta_k} \rightarrow \beta_k^T = wH_k \\ \frac{\partial L}{\partial \varepsilon} \rightarrow \gamma \varepsilon^T + w = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial w} \rightarrow H_k \beta_k - T - \varepsilon = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$t$  和  $x$  分别为输入和输出, 这样问题输出的预测值为

$$t = \sum_k \beta_k f(a_k x + b_k) \quad (4)$$

### 3. 极限学习机的分布式电力负荷预测模型

#### 3.1. 电力负荷的预处理

电力负荷是一种多变的数据, 尤其是短期负荷数据, 时变性更强, 若直接采用原始电力数据进行建模, 建立的电力负荷预测模型无法刻画电力负荷的变化特点, 电力负荷预测误差大, 同时实际研究结果表明, 电力负荷数据具有一定的混沌性, 即表面上看似无规律可循, 实际内部隐含一定的规律, 因此选择混沌理论中的空间重构方法对电力负荷数据处理, 从混沌吸引子中找到电力负荷的变化特点, 便于后继的电力负荷建模与预测。

收到的电力负荷原始一维数据为:  $\{x(i), i=1, 2, \dots, n\}$ , 共有  $n$  个数据点, 那么可以通过混沌处理将其变化一个多维数据, 即:  $X(t) = \{x(t), x(i+\tau), \dots, x(i+(m-1)\tau)\}$ , 其中,  $\tau$  为电力负荷数据之间的延迟时间,  $m$  表示变换后的电力数据维数, 称之为嵌入维。

##### 3.1.1. 延迟时间的确定

两个电力负荷数据点:  $X(i)$  和  $X(j)$ , 它们之间的距离  $r_{ij}(m)$  计算公式为

$$r_{ij}(m) = \|X(i) - X(j)\| \quad (5)$$

得到  $X(t) = \{x(t), x(i+\tau), \dots, x(i+(m-1)\tau)\}$  关联积分值为:

$$C(m, N, r, \tau) = \frac{2}{M(M-1)} \sum_{1 \leq i < j \leq M} H(r - \|X(i) - X(j)\|) \quad (6)$$

式中,  $r$  表示距离的阈值;  $M=(m-1)*\tau$ 。

将整电力负荷数据划分为  $t$  个子数据集, 那么

可以产生如下计算公式

$$S(m, r, \tau) = \frac{1}{t} \sum_{l=1}^t \{C_l(m, r, \tau) - C_l(l, r, \tau)^m\} \quad (7)$$

式中,  $C_l$  为第  $l$  个子数据相关积分。

$S(m, r, \tau)$  极小值点为

$$\Delta \bar{S}(t) = \frac{1}{4} \sum_{m=2}^5 \max[S(m, r_j, t)] - \min[S(m, r_j, t)] \quad (8)$$

与  $\Delta \bar{S}(t)$  第一个极小值点相对应的  $\tau$  表示电力负荷数据之间的延迟时间。

#### 3.1.2. 嵌入维的确定

$X_{(m+1)}$  为重构后的第  $i$  个样本;  $X_{n(i,m)(m+1)}$  为其最近邻样本, 设

$$\alpha(i, m) = \frac{\|X_i(m+1) - X_{n(i,m)(m+1)}\|}{\|X_i(m) - X_{n(i,m)(m)}\|} \quad (9)$$

$E(m) = \frac{1}{N - m\tau} \sum_{i,j=1}^{N-m\tau} \alpha(i, m)$ , 若  $E(m)$  变化十分平稳或不发生变化时, 就表示得到了电力负荷数据的最佳  $m$ 。

### 3.2. 极限学习机的分布式电力负荷预测模型设计

#### 3.2.1. 极限学习机的分布式电力负荷预测模型框架

当前电力负荷数据呈几何倍增多, 单机工作模式难以与电力负荷建模与预测要求相适应, 为此设计了基于极限学习机的分布式电力负荷预测模型。将力负荷建模与预测任务划分多个子任务, 每一个子任务通一个节点来实现力负荷建模与预测, 最后通过加权平均得到电力负荷的最后预测结果, 模型的框架如图 1 所示。

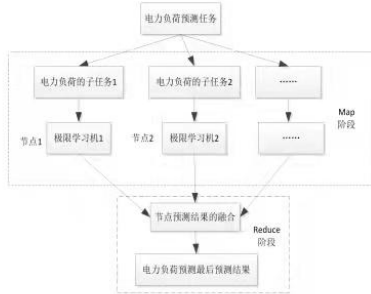


图1 电力负荷预测模型的框架

Fig.1 Framework of power load forecasting model

### 3.2.2. 分布式电力负荷预测步骤

- (1) 采集电力负荷的数据，并进行混沌处理，得到电力负荷的建模样本。
- (2) 将电力负荷样本划分为训练样本和测试样本。
- (3) 将电力负荷训练样本划分为多个不同的负荷样本训练子集，其中子样本集数量与 Map 的数量相等。
- (4) 采用极限学习机对每一个训练子样本集进行学习。
- (5) 计算每一个极限学习机的电力负荷预测结果。
- (6) 确定极限学习机的电力负荷预测结果的权重值。
- (7) 根据权重值得到电力负荷的最终预测值。
- (8) 对电力负荷的测试样本预测，并对预测结果进行分析，验证模型的有效性。

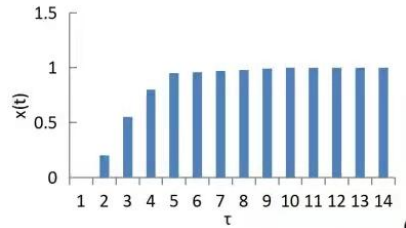
## 4. 电力负荷预测模型的性能分析

### 4.1. 测试环境

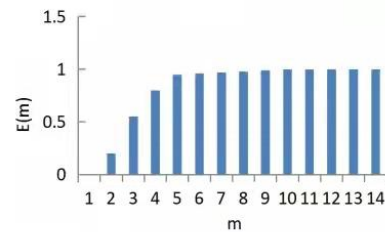
为了分析本文设计的电力负荷预测模型性能，搭建了 100 个节点组成的云计算集群系统，节点配置为：Intel 4 核 3.0GHz CPU, 16 GB 的 RAM, 100M 的网络带宽，每一个节点的极限学习机采用 VC++6.0 编程实现实验。选择某市的每小时电力负荷数据作为测试对象，共收集到 1000 个样本，最后 200 个样本作为测试样本，分析电力负荷预测模型的泛化性能，其它样本用于建立电力负荷预测模型。

### 4.2. 电力负荷数据的预处理

采用第 3.1 的电力负荷数据预处理方式，它们结果如图 2 所示，从图 2 可知，该电力负荷数据的最优  $\tau=5$ ,  $m=5$ ，这样根据  $\tau=5$ ,  $m=5$  对电力负荷数据进行预处理，得到具有多维特性的电力负荷数据。



a)  $\tau$  的变化



(b) m 的变化

图2 电力负荷数据预处理结果

Fig. 2 Preprocessing results of power load data

### 4.3. 结果与分析

为了极限学习机的预测结果有可比性，选择 BP 神经网络和支持向量机与极限学习机进行电力负荷预测建模，并选择平均绝对百分误差 (MAPE) 作为电力负荷预测结果评价指标，设  $y_i$  和  $\hat{y}_i$  为第  $i$  个电力负荷的实际值和预测值，那么有

$$MAPE = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} / n \right] \times 100\% \quad (10)$$

式中， $n$  为待预测的样本数。

所有算法的电力负荷结果的 MAPE 如表 1 所示。从表 1 可以看出：极限学习机的电力负荷预测的 MAPE 值最小，而电力负荷预测的 MAPE 最大为 BP 神经网络，说明极限学习机获得较高的电力负荷预测精度，验证了极限学习机用于电力负荷建模的优越性。

表 1 极限学习机与其它算法的电力负荷预测性能对比

Tab.1 Comparison of power load forecasting performance between limit learning machine and other algorithms

算法	MAPE/%
BP 神经网络	7.24
支持向量机	6.15
极限学习机	5.78

为了体现云计算集群系统的分布式建模优越性,将电力负荷数据进行扩充,变为100、500、1000、2000、10000倍的数据集,分别统计它们相对于单机工作模式的加速比,其中加速比定义为云计算平台与单机械式的建模时间之比,加速比统计结果如图3所示。从图3的加速结果可知,加速比的值大幅度增加,这表明,云计算集群系统采用分布式处理技术,加快了电力负荷的建模速度,而且数据规模越大,加速的效果就越明显,完全可以满足海量电力负荷的在线建模要求。

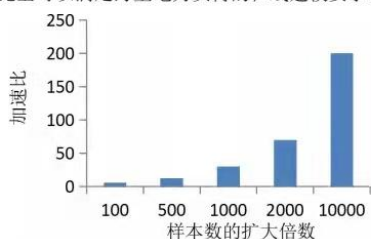


图3 电力负荷预测的加速比变化曲线

Fig.3 Acceleration ratio variation curve of power load forecasting

## 5. 结论

提出了基于极限学习机的分布式电力负荷智能预测模型,并通过具体仿真测试得到如下结论:

(1) 根据电力负荷数据复杂、多变的特点,引入了相空间重构理论对原始电力负荷数据将看似无规律的电力负荷数据变为有规模的数据,有利于分析电力负荷数据中隐含的规律,有助于后续的电力负荷数据建模。

(2) 根据电力负荷数据海量特点,引入云计算系统将海量数据进行分布式处理,并行实现电力负荷数据的建模与预测,加快电力负荷的建模速度,以满足大规模电力负荷数据的在线预

测要求。

(3) 针对电力负荷数据的非线性变化特点,引入了极限学习机对电力负荷数据变化特点进行拟合,有效提高了电力负荷的预测精度。

(4) 无论是电力负荷预测精度或者是建模效率,相对于当前其它电力负荷预测模型,本文模型均具有不可比拟的优势,为海量电力负荷数据预测问题提供了一种有效的解决方法。

## 参考文献

- [1] 宋亚奇,周国亮,朱永利.智能电网大数据处理技术现状与挑战[J].电网技术,2013,37(4):927-935.
- [2] 张思远,何光宇,梅生伟,等.基于相似时间序列检索的超短期负荷预测[J].电网技术,2008,32(12):56-59.
- [3] 陈昊.基于不对称自回归条件方差模型的短期负荷预测[J].电网技术,2008,32(15):84-89.
- [4] 李楠,曾兴雯.基于EMD和神经网络的时间序列预测[J].西安邮电学院学报,2007,12(1):51-54.
- [5] 曾鸣,刘宝华,徐志勇,等.基于混沌模糊神经网络方法的短期负荷预测[J].湖南大学学报:自然科学版,2008,35(1):58-61.
- [6] 黄元生,方伟.基于灰色傅里叶变换残差修正的电力负荷预测模型[J].电力自动化设备,2013,33(9):105-108.
- [7] 王奔,冷北雪,张喜海,等.支持向量机在短期负荷预测中的应用概况[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(4):115-121.
- [8] 黎武,冯平,李九林,李树光.基于重构相空间AD-SVM的短期电力负荷预测[J].后勤工程学院学报,2014,30(6):72-77.
- [9] 成天乐,周胜瑜,李斯,等.基于极限学习机方法的短期负荷预测[J].电力科学与工程,2013,29(4):24-25.
- [10] 崔贯勋.基于云计算技术的计算机实验教学平台[J].实验室研究与探索,2013,32(10):447-450.



Scopus数据库收录期刊 英国《科学文摘》(SA)  
中文核心期刊 美国《化学文摘》(CA)

俄罗斯《文摘杂志》(AJ)  
CSCD、CSTPCD、RCCSE收录期刊

ISSN 1001-1609  
CODEN GADIE9

# 高压电器®

07  
2019

第55卷 第07期

2019年07月

Vol.55 No.07 Jul. 2019

GAOYA DIANQI

西安高压电器研究院有限责任公司主办

HIGH VOLTAGE APPARATUS

## 革命性的创新 \* SF<sub>6</sub>气体在线干燥净化设备

- ▶ 无油压缩机11.4m<sup>3</sup>/h, 干燥滤芯可将至少5000kg的SF<sub>6</sub>气体从500ppmv微水浓度处理到<50ppmv。
- ▶ 自带16m<sup>3</sup>/h真空泵和补气功能。
- ▶ 压力带有温度补偿。
- ▶ 可通过WAN.LAN.VPN-3G SIM卡实现手机、IPad、电脑远程操作控制, 无人值守。
- ▶ 德国DILO公司原产, 密封性和运行安全有绝对性的保证。



为解决SF<sub>6</sub>气体因微水及分解物超标导致需要停电检修带来的损失和不便, 珠海恒迪科技、南网专家组及德国DILO公司共同合作研发的SF<sub>6</sub>气体在线干燥及净化处理设备, 满足不停电在线对带电设备的检修要求, 经过几个GIS站的实际在线挂网使用, 证明效果非常理想。

专利证书号: 5798899



珠海经济特区恒迪科技有限公司

TEL: 0756-3344338, 3344448, 3366788

FAX: 0756-3366789

www.dilo.com.cn www.chinahangto.com

E-mail: info@dilo.com.cn

ISSN 1001-1609



9 771001 160192

07>



## 目次

### 研究与分析

基于ICPT的非接触式牵引供电系统研究综述 .....	李欣, 李若琼(1)
频率响应复数值在电力变压器故障诊断中的应用 .....	刘云鹏, 程槐号, 胡焕(10)
旋转磁场强度测量方式研究 .....	师沃夏, 靳宇晖, 吴邦, 胡德贵, 邱爱慈, 李军浩, 王国利, 杨芸(15)
MMC换流阀最优三次谐波注入方法研究 .....	荣飞, 黄韬, 饶宏, 周保荣, 黄守道(20)
基于BP神经网络的IGBT模块开关损耗求解 .....	唐波, 刘任, 江浩田, 孙睿, 吴卓(27)
一种低存储迭代伽辽金间接边界元方法与其在有界波发生器设计中的应用 .....	杨泽栋, 朱崇铭, 伍小刚, 邹军(33)
基于SVM主成分分析的高压断路器分合闸线圈故障诊断研究 .....	彭在兴, 王颂, 易林, 刘芹, 陈曦, 梁梦婕, 褚飞航, 曹辰, 严海波, 刘定新(39)
1100 kV柱式断路器地震模拟振动台抗震试验研究 .....	朱秋楠, 谭盛武, 韩峰, 刘焱, 魏建巍, 张敬涛, 段昊, 孟宪政(47)
四断口小组滤波器断路器均压措施研究 .....	武志恒, 张杰, 廖敏夫, 江翼, 苏丹, 张豪(56)
纵向磁场对真空电弧微观特性影响的研究 .....	李静, 杜志鹏, 曹云东, 王玲玲(63)
基于经验小波与小波变换的GIS局部放电信号去噪方法研究 .....	秦金飞, 朱琦, 周玮, 张军, 薛丽, 冯晓栋(70)
特高压高补偿度串补线路潜供电弧特性研究 .....	顾雅迪, 何柏娜, 孟涛, 李辉, 宁家兴, 孔杰, 王乐森(78)
40.5 kV大电流固封极柱绝缘结构电场分析及优化设计 .....	李俊豪, 吴小钊, 白维正, 李长鹏, 李猛, 汤清双(87)
基于随机森林算法的断路器分合闸线圈故障电流曲线识别 .....	刘芹, 彭在兴, 王颂, 易林, 陈曦, 褚飞航, 骆挺, 梁梦婕, 羿敏, 刘定新(93)
水平伸缩式隔离开关主闸刀特性分析及平衡弹簧的设计 .....	王巧红, 孙玉洲, 李付永, 夏立国, 高坚, 郭海涛, 谢丽丹(101)
基于直流隔离开关底座系统故障机理的可靠性分配方法 .....	张任, 孙玉洲, 李付永, 陈亚亚, 张帆, 徐刚, 时彦文, 姚灿江, 袁攀科, 师丽芳(107)
接触不良放电的影响因素及影响规律研究 .....	王成江, 刘强, 王晓娟, 张琦, 周博(114)
波动荷载下弓网滑动电接触载流特性研究 .....	陈忠华, 刘福升, 回立川, 时光(119)
环境压力对滑动弧放电等离子体助燃激励器特性的影响研究 .....	费力, 张磊, 何立明, 陈一, 朱春昶, 赵兵兵(127)
地铁高架桥段接触轨线路雷击闪络特性研究 .....	孙晓东, 曹晓斌, 李瑞芳(135)
基于变压器模型的特高压变压器饱和励磁特性研究 .....	陈宇, 高波, 粟茂, 汤浩, 吴广宁(142)
基于层次分析法和粗糙集的变压器状态评估研究 .....	彭道刚, 陈跃伟, 范俊辉, 钱玉良(150)
基于NDIR技术的高压组合电器中CF <sub>4</sub> 气体检测方法研究 .....	张施令, 李京伟(158)
基于差值电流分析的高压电缆在线监测研究 .....	夏君山, 夏向阳, 赵威, 李明德, 黄海, 陈善求(165)
XLPE直流电缆典型缺陷局部放电特性研究 .....	宣耀伟, 胡凯, 杨丰源, 盛戈峰, 郑新龙, 乐彦杰(173)
一种混合直流输电故障检测和处理策略 .....	郑眉, 李威, 常彬, 闫鹤鸣, 徐政(181)
混合直流输电系统过电压抑制方法研究 .....	张军, 吴金龙, 王先为, 胡丁文, 牛群(187)
基于DAPSO算法的含分布式电源的配电网重构 .....	程杉, 倪凯旋, 苏高参, 孙伟斌(195)
基于改进鸡群算法的微电网协同优化运行研究 .....	李静雅, 易庚, 胡汉梅, 黄景光(203)
光伏接入对系统小干扰稳定的影响研究 .....	苗长越, 王维庆, 王海云, 李自明, 吕超, 梅永振, 李朝阳(211)
<b>技术讨论</b>	
不对称样本下基于支持向量机的变压器故障诊断 .....	刘晨斐, 崔昊杨, 李鑫, 束江, 李亚(216)
基于两层知识架构的电力设备差异化运维技术 .....	彭红霞, 文艳, 王磊, 闫冬, 王智杰, 徐珂, 李亚锦, 于大洋(221)



# High Voltage Apparatus

(Monthly, Founded 1958)

Vol.55 No.7 (Ser.No.364)

Jul. 2019

## Main Contents

### •Research & Analysis•

Review of Contactless Traction Power Supply System Based on ICPT .....	LI Xin, LI Ruoqiong(1)
Application of the Complex Values of the Frequency Response in Fault Diagnosis of Power Transformer .....	LIU Yunpeng, CHENG Huaihao, HU Huan(10)
Study of Methods for Measuring Rotating Magnetic Field .....	SHI Minxia, JIN Yuhui, WU Bang, HU Degui, QIU Aici, LI Junhao, WANG Guoli, YANG Yun(15)
Optimal Method of Third Harmonic Injection to MMC Value .....	RONG Fei, HUANG Tao, RAO Hong, ZHOU Baorong, HUANG Shoudao(20)
Solution of Switching Loss of IGBT Module Based on Back Propagation Neural Network .....	TANG Bo, LIU Ren, JIANG Haotian, SUN Rui, WU Zhuo(27)
Low-storage Iterative Galerkin Indirect Boundary Element Method and Its Application in the Design of Bounded Wave Simulator Generator .....	YANG Zedong, ZHU Chongming, WU Xiaogang, ZOU Jun(33)
Research on Fault Diagnosis of High Voltage Circuit Breaker Opening/Closing Coils Based on SVM Principal Component Analysis .....	PENG Zaixing, WANG Song, YI Lin, LIU Qin, CHEN Xi, LIANG Mengjie, CHU Feihang, CAO Chen, YAN Haibo, LIU Dingxin(39)
Research on Seismic Test of Seismic Simulated Shaking Table for 1 100 kV Column Circuit Breaker .....	ZHU Qiunan, TAN Shengwu, HAN Feng, LIU Yan, WEI Jianwei, ZHANG Jingtao, DUAN Hao, MENG Xianzheng(47)
Research on Voltage-sharing Measures of Quadruple-break Group Filter Circuit Breaker .....	WU Zhiheng, ZHANG Jie, LIAO Minfu, JIANG Yi, SU Dan, ZHANG Hao(56)
Study on the Influence of Axial Magnetic Field on the Microscopic Characteristics of Vacuum Arc .....	LI Jing, DU Zhipeng, CAO Yundong, WANG Lingling(63)
Research on Denoising Method of GIS Partial Discharge Signal Based on Improved Empirical Wavelet and Wavelet Transform .....	QIN Jinfei, ZHU Qi, ZHOU Wei, ZHANG Jun, XUE Li, FENG Xiaodong(70)
Research on Secondary Arc Characteristics of UHV Lines With High Compensation Degree Series Compensation .....	XIE Yadi, HE Baina, MENG Tao, LI Hui, NING Jiaying, KONG Jie, WANG Lemiao(78)
Electric Field Analysis and Optimization Design of Insulation Structure for 40.5 kV Large Current Solid-insulation-embedded Pole .....	LI Junhao, WU Xiaozhao, BAI Weizheng, LI Changpeng, LI Meng, TANG Qingshuang(87)
Fault Current Curves Identification of Circuit Breaker Opening/Closing Coil Based on Random Forest Algorithm .....	LIU Qin, PENG Zaixing, WANG Song, YI Lin, CHEN Xi, CHU Feihang, LUO Ting, LIANG Mengjie, YI Min, LIU Dingxin(93)
Characteristic Analysis and Balance Spring Design of Main Blade of the Horizontal Retractable Disconnecter .....	WANG Qiaohong, SUN Yuzhou, LI Fuyong, XIA Liguo, GAO Jian, GUO Haitao, XIE Lidan(101)
Reliability Distribution Method Based on Fault Mechanism of DC Allocation Base System .....	ZHANG Ren, SUN Yuzhou, LI Fuyong, CHEN Yaya, ZHANG Fan, XU Gang, SHI Yanwen, YAO Canjiang, YUAN Panke, SHI Lifang(107)
Study on Influence Factor and Influence Rule of the Discharge of Poor Contact .....	WANG Chengjiang, LIU Qiang, WANG Xiaojuan, ZHANG Qi, ZHOU Bo(114)
Study on the Current Carrying Characteristics of Pantograph Catenary Sliding Electrical Contact Under Fluctuating Load .....	CHEN Zhonghua, LIU Fusheng, HUI Lichuan, SHI Guang(119)
Investigation on the Influence of Environmental Pressure on the Gliding Arc Discharge Plasma Actuator Combustion Characteristics .....	FEI Li, ZHANG Lei, HE Liming, CHEN Yi, ZHU Chunchang, ZHAO Bingbing(127)
Research on Lightning Flashover Characteristics of Metro Contact Rail Line Along Viaduct Section .....	SUN Xiaodong, CAO Xiaobin, LI Ruifang(135)
Research on Saturated Excitation Characteristics of UHV Transformer Based on Transformer Model .....	CHEN Yu, GAO Bo, SU Mao, TANG Hao, WU Guangning(142)
Research on Assessment of Transformer State Using Analytic Hierarchy Process and Rough Set Theory .....	PENG Daogang, CHEN Yuewei, FAN Junhui, QIAN Yuliang(150)
Research on CF <sub>4</sub> Gas Detection Method in GIS Gas Chamber Based on NDIR Technology .....	ZHANG Shiling, LI Jingwei(158)
Research on Online Monitoring for HV Cable Based on Differential Current Analysis .....	XIA Junshan, XIA Xiangyang, ZHAO Wei, LI Mingde, HUANG Hai, CHEN Shanqiu(165)
Research on Partial Discharge Characteristics of Typical Defects in XLPE Cables Under DC Voltage .....	XUAN Yaowei, HU Kai, YANG Fengyuan, SHENG Gehao, ZHENG Xinlong, LE Yanjie(173)
Method of Fault Detection and Processing Strategy for Hybrid HVDC Transmission .....	ZHENG Mei, LI Wei, CHANG Bin, YAN Heming, XU Zheng(181)
Research of Control Strategy of Suppressing Overvoltage on Hybrid-HVDC Transmission System .....	ZHANG Jun, WU Jinlong, WANG Xianwei, HU Dingwen, NIU Chong(187)

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.07.010

## 纵向磁场对真空电弧微观特性影响的研究

李 静<sup>1</sup>, 杜志鹏<sup>1,2</sup>, 曹云东<sup>1</sup>, 王玲玲<sup>3</sup>

(1. 沈阳工业大学电气工程学院, 沈阳 110870; 2. 国网山西省电力公司技能培训中心(山西电力职业技术学院), 太原 030021; 3. 辽宁省兴城市国家电网兴城供电分公司, 辽宁 兴城 125100)

**摘要:** 纵向磁场作用下真空电弧等离子体的微观参数变化趋势对于真空电弧的发展和能量变化有着重要的意义。文中基于气体动力学的漂移扩散方程, 耦合电场计算的泊松方程, 仿真分析了真空电弧在液态金属桥断裂之后, 极间充满了大量的Cu金属蒸气后, 到电弧等离子体形成的这段非平衡态过程。考虑了真空电弧等离子体中微观电子、离子与金属蒸气分子间的碰撞、重组及粒子的漂移、扩散等复杂变化情况, 建立了纵向磁场影响下非平衡态真空电弧的微观模型。数值模拟并分析了不同磁场强度对电弧等离子体微观参数的影响及变化规律。仿真结果表明: 随着纵向磁场的增大, 阴极与阳极鞘层的电场强度减小, 有利于电弧熄灭; 同时电极过程减弱, 电子和铜离子的数密度均减小, 阳极表面的电子温度分布均匀且减小, 有利于抑制真空电弧能量的提高。

**关键词:** 非平衡态真空电弧; 纵向磁场; 微观特性参数; 气体动力学方程

### Study on the Influence of Axial Magnetic Field on the Microscopic Characteristics of Vacuum Arc

LI Jing<sup>1</sup>, DU Zhipeng<sup>1,2</sup>, CAO Yundong<sup>1</sup>, WANG Lingling<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. State Grid Skill Training Center of SEPC (Electric Power Occupational Technical Institute of SEPC), Taiyuan 030021, China; 3. Xingcheng Power Supply Branch of State Grid Liaoning Province Xingcheng City, Liaoning Xingcheng 125100, China)

**Abstract:** The variation of microscopic parameters of vacuum arc plasma under the action of axial magnetic field is of great significance to the development of vacuum arc and energy change. In this paper, a non-equilibrium state micro model for vacuum arc under the action of the axial magnetic field is established based on the drift-diffusion equation of gas dynamics and Poisson equation of the electric field. The non-equilibrium process of vacuum arc which is from a large number of Cu metal vapor is filled with the fracture of liquid arc bridge to the formation of arc plasma is simulated. Collision and recombination of microelectronics, ion and metal vapor molecules with each other in vacuum arc plasma and other complex changes such as drift and diffusion of particles are also considered here. The laws of the plasma parameters at the function of different magnetic field strength are analyzed. The simulation results show that the electric field strength of cathode and anode sheath decreases with the increase of the axial magnetic field, which is advantageous for quenching the arc meanwhile the electrode process is weakened and the density of the electrons and the copper ions are reduced, and the electron temperature distribution on the anode surface is uniform and reduced, which is helpful to suppress the increase of the vacuum arc energy.

**Key words:** non-equilibrium vacuum arc; axial magnetic field; microscopic characteristics parameter; gas dynamic equation

## 0 引言

随着人们环保意识的加强, 真空开关逐渐取代

SF<sub>6</sub>开关成为中高压领域的主导产品。开关电器在开断的瞬间会产生电弧, 真空电弧燃弧过程中发生的电极烧蚀与材料转移是决定开关电器寿命的关

收稿日期: 2018-12-04; 修回日期: 2019-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51407120); 辽宁省自然科学基金(20180550280)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51407120), Natural Science Foundation of Liaoning Province (20180550280).



键因素之一<sup>[1-3]</sup>。因此,深入研究真空电弧特性、影响因素从而提出限制真空电弧的手段对提高电器寿命具有实际意义<sup>[3-5]</sup>。磁场的作用可以加速真空电弧的熄灭,缩短燃弧时间,降低真空电弧对电极的烧蚀。因此在工程中,磁吹灭弧作为一种有效的灭弧方式被应用于各种开关电器设计和制造中。传统磁场对真空电弧的影响研究主要分为实验与仿真两种方法,从宏观角度研究磁场变化对弧压、弧流、电弧温度等电参数及能量的影响,相比之下仿真不受实验条件的限制和干扰,对真空电弧特性的研究更为深入,可以从本质上解释电弧能量变化的物理规律,受到众多专家学者的重视<sup>[6-8]</sup>。1977年,Boxman最先使用流体模型分析真空电弧,在文[9]中,他假定电弧电流密度恒定来计算等离子体密度分布,并且假设电弧等离子体的密度恒定来计算电流密度的分布,他的研究说明了真空电弧中等离子体和电流存在集聚效应。在文[10]中,Wieckert和Christian考虑阳极鞘层的作用建立电弧模型,并利用磁传输方程分析了扩散型电弧阳极侧电流密度和能量分布,研究表明在近阳极区域,鞘层对电弧等离子体参数分布有着很大影响。由于计算机技术的飞速发展,1998年左右,Beilis等人假定真空电弧为非局部热动力平衡等离子体,并将气流场和电磁场耦合到一起,建立了二维磁流体力学模型<sup>[11]</sup>。到2003年,Sjöström等考虑电子和离子能量守恒方程,建立了二维真空电弧磁流体动力学模型,仿真了大电流情况下扩散型的真空电弧<sup>[12]</sup>。并且进一步对考虑大电流真空电弧下阳极蒸发情况进行了初步的仿真与研究<sup>[13]</sup>。2005年,王立军等人基于离子、电子的双流体模型和麦克斯韦方程组建立了纵向磁场作用下的真空电弧模型,仿真得到了二维轴对称磁流体动力学模型大电流真空电弧<sup>[14-16]</sup>。到2009年,Jadidian仿真了较强外加纵磁作用下的高压直流断路器中的直流电弧<sup>[17]</sup>,通过注入反向电流的方法,建立一个瞬态的二维电弧模型,使用多物理场软件COMSOL,仿真得出强纵磁对真空断路器的直流开断具有可靠的效果。2017年Todorovic通过实验得出具有径向磁场的开关在断开操作期间具有较小的不可逆变化<sup>[18-19]</sup>。以上所建立的真空电弧模型主要研究电弧稳定燃烧的阶段而忽略电弧初期非平衡过程中鞘层的形成阶段。文中在传统稳态电弧模型的基础上考虑电弧初期鞘层的形成过程,基于气体动力学的漂移扩散方程,耦合电场计算的泊松方程,并考虑真空电弧等离子体中微观电子、离子与金属蒸气分子及电极间的碰撞、重组

及粒子的漂移、扩散等复杂变化情况。从微观角度出发,建立真空电弧初期非平衡态的微观数学模型,着重研究直流真空电弧在液态金属桥断裂后,极间充满金属蒸汽的前提下,金属蒸气电离初期的发展进程,并分析在不同纵向磁场作用下,鞘层区域场强、空间电荷密度、弧柱半径等真空电弧参数的变化规律及其对电弧能量的影响。

## 1 非平衡态电弧模型

触头快要分离时,接触斑点附近的金属熔化成液体,触头继续分开,被熔化的金属形成液体金属桥,此后触头继续分离,金属桥气化,当电压高于最小生弧电压时,桥拉断后,形成电弧<sup>[20]</sup>。一个完整的电弧发生过程可分为触头材料加热液化、液桥形成扩展、断裂过程、触头间气体击穿过程及稳态电弧燃烧过程,文中研究的过程主要集中于液桥断裂后,触头间气体击穿到稳态形成前的这个非平衡态弧前过程。针对真空电弧弧前发展过程,建立了基于漂移扩散方程耦合泊松方程的初期非平衡态数学模型。考虑到断路器处于小开距的动态过程中,电子会迅速到达阳极被吸收,粒子浓度、能量均较低,磁场的作用也不明显,且计算量较大,因此文中的计算仿真假设触头达到定长开距后,分析带电粒子运动、碰撞及磁场对其的影响。

真空电弧初期非平衡过程非常复杂。在这一过程中,近极区由于触头分断液桥爆炸产生的金属原子及带电粒子与电极发生剧烈碰撞,提升了电极温度,增加了二次电子发射几率,同时阴极发射出的带电粒子与爆炸产生的金属蒸气中性粒子间的碰撞频率很高,从而影响粒子在空间的概率密度分布,因而,对于弧前过程中的碰撞必须予以考虑。

### 1.1 数学方程与物理模型

根据上述物理过程,采用基于气体动力学的漂移扩散方程,耦合电场计算的泊松方程,并考虑真空电弧等离子体中微观电子、离子与金属蒸气分子及电极间的碰撞、重组及粒子的漂移、扩散等复杂变化情况<sup>[21-22]</sup>,建立数学方程。

电子及电子能量漂移扩散方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla \cdot \Gamma_e = R_e - (u \cdot \nabla) n_e \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla \cdot [-n_e(\mu_e \cdot E) - D_e \cdot \nabla n_e] + E \cdot \Gamma_e = R_e \quad (2)$$

$$\Gamma_e = -n_e(\mu_e \cdot E) - D_e \cdot \nabla n_e \quad (3)$$

式(1)-(3)中: $n_e$ 、 $n_e$ 为电子、电子能密度,  $1/\text{m}^3$ ;  $\mu_e$ 、 $\mu_e$ 为电子、电子能迁移率,  $\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ;  $E$ 为电场强度,  $\text{V}/\text{m}$ ;  $D_e$ 、 $D_e$ 为电子、电子能扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $R_e$ 为电子

源,  $1/(m^3 \cdot s)$ ;  $\Gamma_e$  为电子通量;  $R_e$  为电子能损耗,  $V/(m^3 \cdot s)$ ;  $u$  为中性流体速度矢量,  $m/s$ 。

重物质传输方程采用 Maxwell—Stefan 方程, 即

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}(\omega_k) + \rho(u \cdot \nabla)\omega_k = \nabla \cdot j_k + R_k \quad (4)$$

式(4)中:  $\rho$  为混合物密度;  $\omega_k$  为质量分数;  $j_k$  为扩散通量;  $R_k$  为源项。

触头间电场分布通过泊松方程求解, 则

$$-\nabla \cdot \epsilon_0 \epsilon_r \nabla U = \rho \quad (5)$$

式(5)中:  $U$  为电位,  $V$ ;  $\epsilon_0$  为真空介电常数;  $\epsilon_r$  为相对介电常数;  $\rho$  为空间电荷密度,  $C/m^2$ 。

电磁场 Maxwell 方程为

$$\nabla \times H - \sigma(E + v \times B) = J_e \quad (6)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (7)$$

式(6)中:  $J_e$  为电流密度,  $A/m^2$ 。

文中对真空电弧弧前的形成过程进行了二维数值仿真。简化的轴对称仿真模型结构见图 1。触头直径为 32 mm; 触头间距为 10 mm; 触头间电压为 380 V; 初始温度为 293 K; 初始电子密度  $1 \times 10^{25} 1/m^3$ ; 初始平均电子能 5 eV; 二次电子发射系数 0.25; 二次电子初始能 4 eV; 铜原子碰撞截面见图 2。

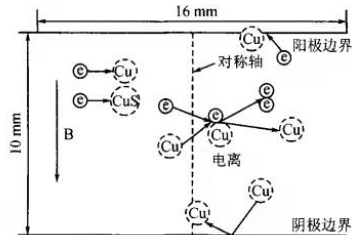


图1 简化触头模型

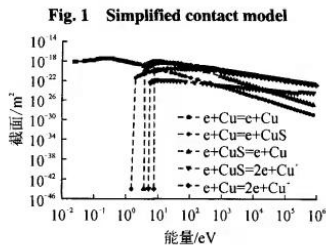


图2 Cu的碰撞截面

Fig. 2 Collision cross section of Cu

### 1.2 碰撞反应

铜的电极表面过程反应及等离子体区反应分别见表 1、2。

### 1.3 数学方程及边界条件

将图 1 模型中的阴极边界定义为壁边界 1, 其他

表 1 电极表面过程反应

Table 1 Process response of electrode surface

方程	二次电子发射系数
$CuS \Rightarrow Cu$	0.00
$Cu^+ \Rightarrow Cu$	0.25
$e \Rightarrow Cu$	0.00

注: Cu 为铜原子; CuS 为激发态的铜原子;  $Cu^+$  为铜离子, 以下同。

表 2 等离子体区反应

Table 2 Reactions in the plasma region

方程	类型
$e+Cu \Rightarrow e+Cu$	弹性碰撞
$e+Cu \Rightarrow e+CuS$	激发
$e+CuS \Rightarrow e+Cu$	伪弹性
$e+Cu \Rightarrow 2e+Cu^+$	电离
$e+CuS \Rightarrow 2e+Cu^+$	电离
$CuS+CuS \Rightarrow e+Cu+Cu^+$	潘宁电离
$CuS+Cu \Rightarrow Cu+Cu$	稳态淬灭

边界定义为壁边界 2。根据实际情况, 将阴极边界设置为接地(电势为零), 阳极边界设置电势电压为 380 V。其他边界均为外表面电荷堆积, 其方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_s}{\partial t} = n \cdot J_i + n \cdot J_e \\ -n \cdot D = \rho_s \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中:  $\rho_s$  为电荷密度,  $C/m^2$ ;  $J_i$  为离子电流密度的法向分量,  $A/m^2$ ;  $J_e$  为电子电流密度的法向分量,  $A/m^2$ ;  $n$  为离子或电子的个数;  $D$  为电位移矢量,  $C/m^2$ 。

## 2 仿真结果分析

根据上述所建立的真空电弧弧前仿真模型, 仿真分析了触头开距为 10 mm 时的二维轴对称真空电弧弧前形成的微观过程, 得到了弧前过程的电子、离子密度, 平均电子能量等微观参数的分布图以及轴向及近极附近各参数的时变分布规律。

### 2.1 真空电弧弧前形成过程

在触头开断的瞬间, 由于强的场致发射和热电离发射, 触头表面会发射大量电子, 与液桥爆炸及粒子高速碰撞触头产生的气化金属铜蒸汽之间发生碰撞, 形成电子崩。当一定数量的电子崩抵达阳极的时候, 阳极附近的电子密度很大, 大量电子进入阳极以致在阳极附近形成电子密度相对较高的区域, 而正离子运行速度慢, 均匀分布于触头间, 见图 3(a)。

大量电子在被阳极吸收以后会在空间滞留大量空间正电荷, 电子崩的头部接近于阳极侧。所以

阳极侧正空间电荷浓度最高,见图3(b)。由于电子崩的头部聚集着大量的电子,且电子的运动速度较快,大量的电子到达阳极后被阳极吸收,而正电荷的速度较慢滞留在空间的时间较长,此时电弧还没有达到稳态,故铜离子与电子的密度不同。正空间电荷形成的内电场与外施电场方向相反,近阳极侧的反向电场的存在会排斥后续的电子继续进入近阳极区域。电子的密度逐渐减小,正离子的密度增加,逐渐超过电子的密度。近阳极区域转变为电子和正离子共存的状态。为形成等离子体创造了条件。

在近阳极区域,由于正离子在空间上大量的集聚,将转变原有的外施电场方向。使电子不能回到阳极,在空间反复振荡,震荡的过程中与中性原子不断地发生碰撞电离。导致阳极与阴极鞘层之间电子和正离子的密度越来越大,最终此区域内电子和离子的密度达到动态平衡,见图3(c)。

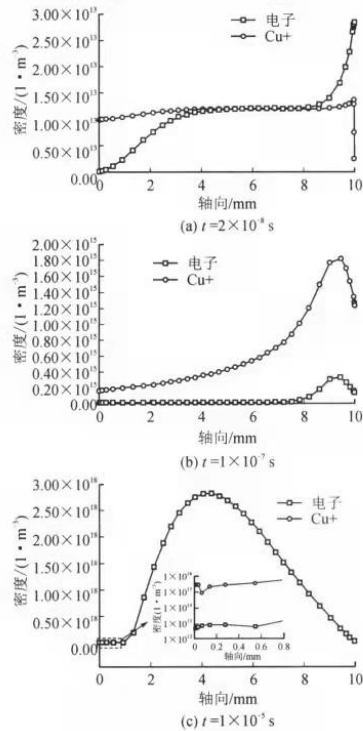


图3 各时刻电子/Cu<sup>+</sup>的轴向密度分布图

Fig. 3 Axial density distribution of electron and Cu<sup>+</sup> at various moments

弧前过程中,不同时间轴向平均电子能的分布图见图4。由于反向电场的产生使原有的电场发生

了畸变,进而电子与其他粒子之间的相互碰撞电离也被加强,平均电子能量随之增加。电弧等离子体形成过程中,平均电子能量的峰值不断增大,并向阴极移动。触头间的轴向电子密度峰值也向阴极侧移动,这些高能带电粒子将大大加强粒子之间的碰撞电离,从而形成大量的次级电子崩。次级电子崩的端部电场强度较高,又会引发新的碰撞电离,最后这些局部电弧放电形成强烈的主放电通道,阴极鞘层出现,真空电弧基本形成,见图5。

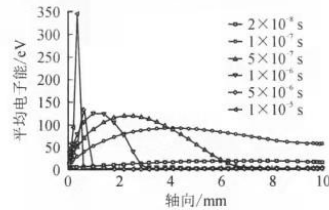


图4 不同时刻轴向的平均电子能分布

Fig. 4 Distribution of average electron energy in different time

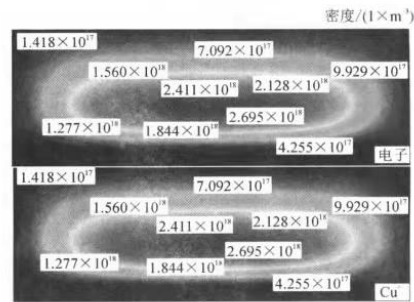


图5  $t = 1 \times 10^{-5} \text{ s}$ 时刻的电子和Cu<sup>+</sup>密度分布云图

Fig. 5 Electron and Cu<sup>+</sup> density profiles at  $t = 1 \times 10^{-5} \text{ s}$

### 2.2 不同纵向磁场对真空电弧等离子体特性的影响

采用所建立的模型,在外施纵向均匀磁场,磁场大小分别为0、20、40、60、80 mT时,对纵向磁场影响下真空电弧弧前非平衡态过程中近极区域场强进行了仿真计算,得到不同纵向磁场作用下的近阴极与近阳极区域的电场强度分布,见图6。

由于没有其他介质,真空电弧的形成主要是两极之间强场作用下的场致发射产生大量的电子与金属蒸汽离子,他们之间碰撞电离产生大量的二次电子,进而产生的电子崩与次级电子崩所形成。在阴极鞘层区域,随着纵向磁场的增大,阴极鞘层区的反向电场大幅度减小,场致发射所产生的电子也随之减小。同样在近阳极区域,电场强度随着磁场的增大也为减小的趋势。

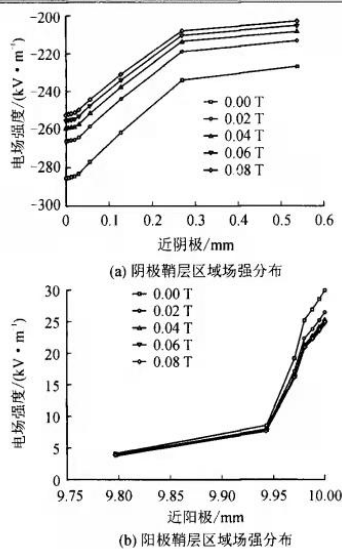


图6 不同纵向磁场下近阴极与近阳极电场强度分布  
Fig. 6 Electric field intensity distribution of near cathode and near anode under different axial magnetic field

由于纵磁影响下近极鞘层区的场强减弱, 出射电子浓度下降, 碰撞电离减弱, 导致弧柱区电子浓度下降, 见图7。从而弧柱能量随着纵向磁场的增强而减弱。

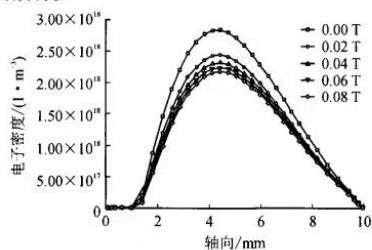


图7 不同纵向磁场下轴向电子密度分布  
Fig. 7 Axial electron density distribution in different axial magnetic fields

弧柱区最大电子浓度及弧柱半径与纵向磁场大小的关系曲线见图8。从图8可知, 随着纵向磁场的增加, 最大电子浓度减小。纵向磁场的加入使得电子不仅在极间强电场的作用下运动, 同时在纵向磁场的作用下使得带电粒子的运动轨迹发生变化, 运动速度减小, 有效的电离碰撞减弱, 电子密度减小。随着纵向磁场由20 mT增大到80 mT, 等离子体弧柱区的半径由11.69 mm增大到14.41 mm, 故电弧等离子体的形态向外扩散的趋势亦有所增大, 极间

等离子体的分布更加的均匀, 电子与铜蒸气粒子的碰撞电离被削弱, 减小了弧柱的能量, 电子密度的最大值也由 $2.71 \times 10^{18} \text{ 1/m}^3$ 降低到 $2.11 \times 10^{18} \text{ 1/m}^3$ , 电弧能量减小, 有利于电弧的熄灭。

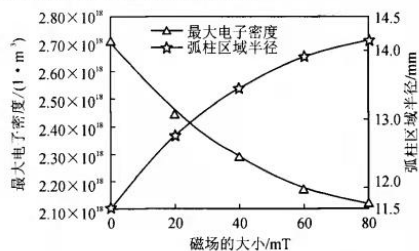


图8 磁场大小与最大电子密度/弧柱区半径关系  
Fig. 8 Relation between magnetic field and maximum electron density and radius of arc column region

由图7轴向电子密度分布图也可以看出: 随着纵向磁场的增大, 电弧弧柱中心区的密度降低, 高能电子区域减小。电子的速度也随之减小, 到达阳极后电子所累积的能量也减小。进而也使得阳极表面的电子温度有所下降, 见图9。弧柱中心电子温度在阳极表面径向的分布更加的均匀, 减缓阳极斑点的形成。

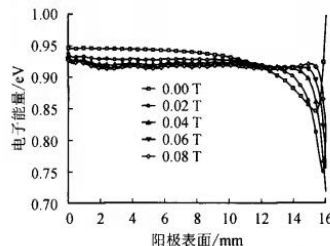


图9 不同纵向磁场下阳极表面电子温度  
Fig. 9 Electronic temperature of anode surface under different axial magnetic fields

### 3 结论

建立了磁场作用下非平衡态真空电弧仿真模型, 考虑鞘层的形成过程, 对弧前发展过程进行了数值仿真, 并分析了纵向磁场对真空电弧微观参数的影响, 得到如下结论:

- 1) 真空电弧等离子体本质上是强场作用下电极过程与极间粒子与金属蒸气碰撞过程共同形成的, 弧前鞘层的形成为电弧等离子体的形成过程中的重要阶段。
- 2) 随着纵向磁场增大, 阳极鞘层与阴极鞘层区域的电场强度均减小, 弧柱区最大电子数密度减



小,电弧形态稍向径向扩散,有利于降低电弧等离子体能量,利于熄弧。

3)纵向磁场的增大使得阳极表面的电子温度分布变得更加均匀且量值有所减小,减缓后期阳极斑点的形成,有利于后期电弧的熄灭。

#### 参考文献:

- [1] 王立军,贾申利,史宗谦,等.电弧电流以及纵向磁场对小电流真空电弧特性影响的数值仿真[J].电工技术学报,2007,22(1):54-61.  
WANG Lijun, JIA Shenli, SHI Zongqian, et al. Numerical simulation of effect of arc current and axial magnetic field on low current vacuum arc characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(1): 54-61.
- [2] LIAO M, GE G, DUAN X, et al. Simulation and experimental research on series vacuum arc of vacuum circuit breaker with double-break[C]/International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. [S.l.]: IEEE, 2014:497-500.
- [3] REDDY B S, KUMAR U. Enhancement of surface flash-over performance of high voltage ceramic disc insulators[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2011, 20(1):24-30.
- [4] 王立军,贾申利,杨泽,等.纵磁作用下真空电弧的建模与仿真研究进展[J].高压电器,2017,53(3):17-25.  
WANG Lijun, JIA Shenli, YANG Ze, et al. Progress in modeling and simulation of vacuum arc under axial magnetic field. [J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 17-25.
- [5] 蒋原,武建文.纵向磁场中触头材料和直径对中频真空电弧特性的影响[J].中国电机工程学报,2015,35(20):5367-5374.  
JIANG Yuan, WU Jianwen. Effects of contact materials and diameters on characteristics of intermediate-frequency vacuum arc in axial magnetic field[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5367-5374.
- [6] 贾申利,史宗谦,王立军.真空断路器用于直流开断研究综述[J].高压电器,2017,53(3):12-16.  
JIA Shenli, SHI Zongqian, WANG Lijun. Review on the research of vacuum circuit breaker for dc breaking[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 12-16.
- [7] 李静.高压断路器弧前微观机理研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2013.  
LI Jing. Research on micro arc mechanism of high voltage circuit breaker[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
- [8] 段肖力,修士新,吴水峰,等.真空开关横磁触头磁场仿真与电弧特性研究[J].高压电器,2017,53(3):57-63.  
DUAN Xiaoli, XIU Shixin, WU Shuifeng, et al. Study on magnetic field simulation and arc characteristics of transverse magnetic contact of vacuum switch[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 57-63.
- [9] BOXMAN R L. Magnetic constriction effects in high-current vacuum arcs prior to the release of anode vapor[J]. Journal of Applied Physics, 1977, 48(6): 2338-2345.
- [10] WIECKERT C, EGLI W. Theoretical analysis of the current and energy flow to the anode in the diffuse vacuum arc [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1989, 17(5): 649-652.
- [11] BEILIS I, KEIDAR M, BOXMAN R, et al. Theoretical study of plasma expansion in a magnetic field in a disk anode vacuum arc[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 83(2): 709-717.
- [12] SJÖSTRÖM E, JANSON T, HAGLUND P, et al. Numerical simulation of high-current vacuum arcs with an external axial magnetic field[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003, 31(5): 890-901.
- [13] SHADE E, SHMELEV D. Numerical simulation of high-current vacuum arcs in external magnetic fields taking into account essential anode evaporation[C]/21th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. [S.l.]: IEEE, 2004:411-414.
- [14] 王立军,贾申利,史宗谦,等.真空电弧磁流体动力学模型与仿真研究[J].中国电机工程学报,2005,25(4):115-120.  
WANG Lijun, JIA Shenli, SHI Zongqian, et al. Study on the MHD model and simulation of vacuum arc[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 115-120.
- [15] 王立军,邓杰,周鑫,等.两种纵磁电极下真空电弧初始扩散过程的仿真研究[J].中国电机工程学报,2014,34(36):6536-6544.  
WANG Lijun, DENG Jie, ZHOU Xin, et al. Simulation researches of vacuum arc initial diffusion process under two kinds of axial magnetic field electrodes[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6536-6544.
- [16] 黄小龙,王立军,贾申利,等.纵向磁场和外部横向磁场共同作用下真空电弧偏移与阳极偏烧现象的仿真研究[J].中国电机工程学报,2014,34(6):941-946.  
HUANG Xiaolong, WANG Lijun, JIA Shenli, et al. Simulation research of deflection phenomenon of vacuum arc and anode erosion under the combined action of axial magnetic field and external transverse magnetic field[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 941-946.
- [17] JADIDIAN J. A compact design for high voltage direct current circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(6): 1084-1091.
- [18] TODOROVIĆ R B, ŠKATARIĆ D M, BAJRAMOVIĆ Z M, et al. The influence of magnetic field shape on dielectric characteristics of vacuum switches[J]. FME Transactions, 2017, 45(1): 135-141.

- [19] ANIKEEV V, DOKUKIN M Y. Research of influence of mobile cathodic stains of the vacuum arc for reception of the adjustable roughness of metal surfaces[J]. Journal of Physics:Conference Series, 2017, 830(1):1-6.
- [20] 张冠生. 电器学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- ZHANG Guansheng. Electrical engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 1997.
- [21] 翟国富, 薄凯, 李庆楠, 等. 直流电弧运动过程中重击穿现象及机理研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 105-113.
- ZHAI Guofu, BO Kai, LI Qingnan, et al. Study on the phenomenon and mechanism of critical penetration during direct arc motion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 105-113.
- [22] 李静, 杨光, 曹云东, 等. 低压断路器触头电弧非平衡态燃弧过程分析[J]. 电器与能效管理技术, 2016, (15): 7-12.
- LI Jing, YANG Guang, CAO Yundong, et al. Analysis of low voltage air switch arc non-equilibrium arcing process. [J]. Electric and Energy Management Technology, 2016, (15): 7-12.
- 李静(1977—), 女, 讲师, 硕士生导师, 研究领域为微电器电弧理论及气体绝缘应用。



全国优秀科技期刊

中文核心期刊

ISSN 1001-2095 CN 12-1067/TP

**ELECTRIC DRIVE**

Vol.49 No.11

# 电气传动

# 11

# 2019

DIANQI CHUANDONG

第49卷(总第361期)

天津电气科学研究院有限公司

中国自动化学会

## 电气传动

《电气传动》杂志在线投稿专用网站



# www.au365.cn

## 中国电气行业网

ISSN 1001-2095



主办单位:

天津电气科学研究院有限公司

《电气传动》编辑部





# 电气传动

月刊

2019年第49卷第11期  
(总第361期)

DIANQI CHUANDONG

全国优秀科技期刊 中国期刊方阵 双效期刊  
全国中文核心期刊 天津市优秀期刊 一级期刊

主管 天津电气科学研究院有限公司  
主办 天津电气科学研究院有限公司  
中国自动化学会  
编辑出版 《电气传动》编辑部  
地址 天津市河东区津塘路174号  
邮政编码 300180  
电话 (022)84376191(编辑部)  
(022)84376192(广告部)  
传真 (022)84376192  
E-mail mde@tried.com.cn(编辑部)  
ad@tried.com.cn(广告部)  
投稿网址 www.au365.cn  
印刷 天津市云海科贸开发公司  
发行范围 国内外公开发行  
国内总发行 天津市邮政局  
订购处 全国各地邮局  
邮发代号 6-85  
国外总发行 中国国际图书贸易集团  
有限公司  
国外发行代号 M5835  
创刊 1959年  
出版日期 2019年11月20日  
中国标准连续 ISSN 1001-2095  
出版物号 CN 12-1067/TP  
编委会顾问 陈伯时 马小亮  
编委会主任 刘国林  
编委会学术主任 徐殿国  
编委会委员 李永东 张承慧 谭国俊 刘国林  
杨斌 张兴 汪镭 刘国海 郭宏 高强 王跃  
宋鹏 王春华 王春武 倚鹏 解仑 张和生  
花为 蔡旭 王有云 杨明 刘辉  
本期审稿专家 叶王 李宁 李争 宋鹏  
周京华 袁小芳 耿强 董钺 程志江 谢维  
薛阳 戴薇  
主编 王建峰  
副主编 刘娟 刘舒慧  
责任编辑 田亚君  
广告联系人 韩旭  
广告经营许可证  
津工商广字 1201024000025号  
零售价 15.00元

## 目次

### \* 交、直流调速 \*

- 基于改进遗传算法的三相感应电机参数估计算法 ..... 王珏, 杨文刚(3)  
基于滑模观测器的矿用BLDCM控制系统 .....  
无电解电容和电感PMSM驱动系统控制研究 ..... 范莉, 徐晴(12)  
永磁同步电机调速系统变指数趋近律控制 .....  
基于模糊控制的双闭环直流电机调速系统 ..... 苗敬利, 周重霞, 郑大伟(18)  
李海侠, 林继灿, 唐海洋(22)

### \* 变流·滤波技术 \*

- 基于动态扇区双开关表直接功率控制研究 ..... 胡会智, 吉培荣, 张赟宁(27)  
电容滤波的单相不控整流器输入阻抗特性研究 ..... 师洪涛, 张巍巍, 潘俊涛, 等(34)

### \* 控制 \*

- 基于改进最速TD和DOBC的光储并网功率平滑策略 ..... 马翔, 李辉, 陈众励, 等(39)  
微网中虚拟同步发电机技术研究 ..... 黄辉, 王林, 魏亚龙, 等(45)  
具有低入网电流谐波的组合光伏发电系统研究 ..... 晋鑫, 张琦, 刘佳昊, 等(51)  
基于光伏集成变换器的发电系统工作机理研究 ..... 张琦, 刘佳昊, 孙向东, 等(57)  
全肘式四足仿生机器人爬台阶步态研究 ..... 邹明峻, 于金鹏, 于海生, 等(64)  
风力机变桨电机无速度传感器控制系统研究 ..... 本柏忠, 侯力, 张丹, 等(70)  
基于鲨鱼优化算法的液压伺服系统自抗扰控制 ..... 周美玲, 刘悦(76)  
一种基于Park模型的并网逆变器VSG控制策略 ..... 栗峰, 华光辉, 葛鹏江, 等(82)  
基于QPSO的MPPT控制研究 ..... 房俊龙, 张卫丹, 宋朝, 等(88)  
一种基于限值管理的混合储能系统控制策略 ..... 李冰, 李岚, 柴伦, 等(92)

### \* 其他 \*

- 电动汽车充电站的仿真建模与谐波分析 ..... 李想, 李晓飞, 卢碧玉, 等(97)  
球团风机电气驱动系统的可靠性研究 ..... 田圣彬, 张立刚, 门鸣, 等(103)  
LCL-S型无线充电耦合线圈的距离特性研究 ..... 马文博, 梅磊, 王珂(108)



## 基于改进遗传算法的三相感应电机 参数估计算法

王珏<sup>1</sup>, 杨文刚<sup>2</sup>

(1. 山西电力职业技术学院 电力工程系, 山西 太原 030021;

2. 山西交通职业技术学院 工程机械系, 山西 太原 030031)

**摘要:** 为了降低三相感应电机的参数测量成本, 提出了一种基于改进遗传算法的三相感应电机参数估计算法。首先, 建立了广义的三相感应电机动态模型, 并建立了电机电流与速度的状态空间模型; 其次, 对遗传算法进行了改进, 设计了基于改进遗传算法的函数逼近器, 通过最小二乘算法实现曲线的拟合; 最终, 模型输出三相感应电机的多个关键参数。实验结果表明, 该算法能够有效地估计出三相感应电机的7个关键参数, 并且实现了较低的估计误差。

**关键词:** 三相感应电机; 遗传算法; 人工智能; 最小二乘算法; 参数估计技术

**中图分类号:** TP18 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed18969

### Parameters Estimation Algorithm of TIM Based on Improved Genetic Algorithm

WANG Jue<sup>1</sup>, YANG Wengang<sup>2</sup>

(1. Department of Electric Power Engineering, Shanxi Electric Power Vocational Technology College,

Taiyuan 030021, Shanxi, China; 2. Department of Engineering Machine, Shanxi Traffic

Vocational and Technical College, Taiyuan 030031, Shanxi, China)

**Abstract:** In order to reduce the measure cost of the three-phase induction motor (TIM) parameters, a parameters estimation algorithm of TIM based on the improved genetic algorithm was proposed. Firstly, a generalized dynamic model of TIM was constructed, and the station space model of the current and the speed of the three-phase induction motor were constructed. Then, the genetic algorithm was improved, and a function approximator based on the improved genetic algorithm was designed, the curve fitting was realized by the least squares technique. Lastly, several important parameters of TIM was output by the model. The experimental results show that the proposed algorithm can estimate 7 important parameters of TIM effectively, at the same time, it realizes a low estimation error.

**Key words:** three-phase induction motor (TIM); genetic algorithm; artificial intelligence; least squares algorithm; parameters estimation technology

目前, 三相感应电机 (TIM) 广泛地应用于工业生产中, 每天消耗巨大的电量<sup>[1]</sup>。总体而言, 电机的实际工作负载大约仅为额定工作负载的60%, 这导致电机的工作效率较低, 从而造成了巨大的能量浪费<sup>[2]</sup>。为了减少电机的能量浪费, 需要寻找其最优的操作区间, 提高电机的工作效率。实际应用中, 三相感应电机大多由变频器驱动, 导致其操作频率不同于额定频率<sup>[3]</sup>。研究人员通过数学模型计算三相感应电机的效率, 但这些数学模型需要电机实时的电气参数与机械参

数作为输入量<sup>[4-5]</sup>。

根据诸多研究人员的分析报告, 采集三相电机实时的转矩、转速等参数是一个难题<sup>[6]</sup>, 因此一些研究人员采用精密的传感器检测这些参数, 但传感器的价格高昂, 导致三相感应电机的成本大幅度提高<sup>[7-8]</sup>。另外, 还有研究人员采用计算机技术估计三相感应电机的电气参数与机械参数, 文献[9-10]的方案仅能预测电气参数或者机械参数, 无法同时预测出电气参数与机械参数。文献[11]提出了兼顾电气参数与机械参数的估计算



法,但该方案需要准确的三相电压与电流数据,因此仍然需要6个精密的传感器。文献[12]全部使用计算的数据估计电机的电气参数与机械参数,从其实验结果来看,该方案的估计准确率并非十分理想。

本文提出的算法能够估计转子参数值、定子电阻、漏感、磁感、转动惯量以及三相感应电机的摩擦系数。估计系统仅需要1组输入信号:U相位的实时电流信号。该系统中结合TIM动态模型,采用基于遗传算法的函数逼近器<sup>[13]</sup>估计感应电机的参数。为了验证本算法的性能与效率,最终进行了估计实验与验证实验,并与其他三相感应电机参数估计算法进行了比较,结果显示本算法具有较好的性能。

### 1 三相感应电机模型

三相感应电机的数学模型是参数估计系统的关键部分。本文的参数估计是基于对感应电机动态的数值模拟而实现,其数学模型依赖于待辨识的参数。采用文献[14]的线性电机模型,假设电机为无负载模式。电机模型包括了转子与定子的电气方程、转子与定子的磁链以及电磁转矩。

定子与转子的电气方程如下式所示:

$$u_s = R_s i_s + \frac{d}{dt} \Phi_s \quad (1)$$

$$u_r = 0 \quad (2)$$

式中:  $R$  为定子的阻抗。

将式(1)、式(2)改写为矩阵形式,可得到下式:

$$\begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} (L_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + L_{H1} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}) \quad (3)$$

$$R_r \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} (L_r \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + L_{H2} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}) = 0 \quad (4)$$

式中:  $R_s, R_r$  分别为定子与转子的阻抗;  $i_s, i_r$  分别为定子与转子输出的三相电流;  $u_s, u_r$  分别为定子与转子的三相电压。

设  $\Phi_s$  与  $\Phi_r$  分别为定子与转子的磁通,定子与转子的磁通方程分别如下式所示:

$$\Phi_s = L_s i_s + L_{H1} i_r = L_H (i_s + i_r) + I_{\alpha s} i_s \quad (5)$$

$$\Phi_r = L_r i_r + L_{H2} i_s = L_H (i_s + i_r) + I_{\alpha r} i_r \quad (6)$$

其中  $L_s = L_H + I_{\alpha s}, L_r = L_H + I_{\alpha r}$   
 式中:  $L_s, L_r$  分别为定子与转子的总电感;  $I_{\alpha s},$

$I_{\alpha r}$  分别为定子和转子的漏电常量;  $L_{\alpha s}, L_{\alpha r}$  分别为定子与转子的漏感;  $L_H$  为磁感。

根据式(2)~式(6)计算磁通与电流,可通过下式计算电机的电磁转矩:

$$T_e = -p \Phi_s^T T^* i_s \quad (7)$$

其中 
$$T^* = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

式中:  $p$  为电机的极对数;  $T^*$  为唯一的参考转矩。

将电磁转矩加入机械方程中,可获得下式:

$$J \frac{d}{dt} \omega_{mec} = T_e - k_D \omega_{mec} - T_l \quad (8)$$

式中:  $J$  为转动惯量  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ;  $\omega_{mec}$  为电动机速度,  $\text{rad/s}$ ;  $T_l$  为负载转矩,  $\text{N} \cdot \text{m}$ ;  $T_e$  为电磁转矩;  $k_D$  为摩擦系数。

对于无负载且速度恒定的电动机,可将式(8)简化为下式:

$$k_D = \omega_{mec} / T_e \quad (9)$$

首先进行电机无负载状态的测量,测量出电机的摩擦系数;然后根据上述方程,通过数学模型建立电流与速度的状态空间模型。

基于遗传算法的优化程序作为一个函数近似器,其目标是采用电机模型的估计参数值代替实际的参数值,计算出TIM的速度曲线与电流曲线。然后将这些曲线与输入信号比较,对曲线的拟合进行优化处理。

### 2 改进的遗传算法

与其他启发式算法相比,遗传算法具有一些优势,例如:鲁棒性、算法可考虑边界值及能够避免陷入局部最优。为了控制估计算法(函数近似器)的计算时间,对遗传算法进行了改进,使其在处理大规模问题时,不仅获得较好的解质量,并且保持较低的计算时间。

本文采用遗传算法估计等效电路的电气参数、惯性以及电机的摩擦系数。为了提高遗传算法的计算效率,对遗传算法进行了修改,图1为改进遗传算法的流程框图。

首先,随机选择一组解作为初始化种群(优化的目标向量),计算每个解的适应度值,选出其中适应度值最小的3个解,将这3个解进行变异操作,变异操作的方法如下式所示:

$$v_{i,G+1} = x_{r,G} + F(x_{r,G} - x_{t,G}) \quad (10)$$

式中:  $G$  为第  $i$  次迭代的种群;  $G+1$  为第  $i+1$  次迭代的种群;  $v_{i,G+1}$  为变异种群的第  $i$  个元素;  $F$  为权



重因子;  $x_{r1,G}$ ,  $x_{r2,G}$ ,  $x_{r3,G}$  分别为变异操作的3个染色体。

1)改进的交叉算子。将目标向量与变异种群结合,为染色体每个元素分配1个区间为[0,1]的随机数,将该值与遗传算法的交叉率比较,如果该值低于交叉率,那么选择变异的基因,否则选择目标向量的基因。每次迭代评估个体的适应度值是否满足结束条件,如果满足条件即认为获得了最优解。

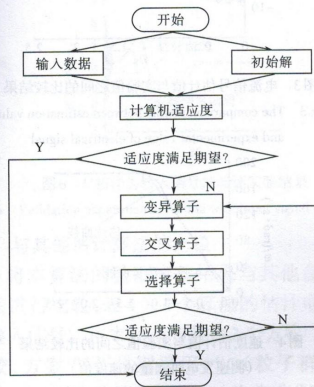


图1 改进的遗传算法流程图  
Fig.1 The flow diagram of improved genetic algorithm

2)遗传算法与电机参数关联。遗传算法作为线下程序运行,随机产生第1个初始化种群,估计出每个参数的边界。种群的每个染色体对应一个向量,该向量包含待辨识的电机参数。染色体中每个参数与电机动态模型的参数关联,将种群迭代的染色体结果与实际测量的信号比较,评估染色体的适应度。

3)遗传算法的适应度函数。输入信号为电流信号,使用最小平方误差评估适应度,如下式所示:

$$fitness = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{I_i - \hat{I}_i}{I_i} \right)^2 \quad (11)$$

式中:  $I_i$ ,  $\hat{I}_i$  分别为电流信号的测量值与估计值;  $N$  为适应度函数所使用的样本数量。

根据文献[15]的研究结果,最小二乘算法是常用曲线拟合方案,并且具有较好的性能。本文对目标函数进行了归一化处理,由此避免了最小二乘算法拟合过程的权重因子问题,本文的2个期望目标设置相等的权重。因为信号的样本数

量  $N$  与种群的个体数量影响每次迭代的计算时间,因此首先进行预处理实验决定这些参数的合理值,根据预处理实验的结果,遗传算法的种群设为15个个体。权重因子与交叉率的范围均为[0, 1],遗传算法的权重因子越小,越容易陷入局部最优,因此,将初始化权重因子设为接近1,迭代过程中逐渐减小权重因子,由此可将种群的搜索逐渐集中于目标区域。

### 3 本算法的具体实现方案

电气参数与机械参数是TIM的关键参数,对TIM的效率有直接的影响。待估计的电机参数包括:定子与转子阻抗( $R_s, R_r$ )、定子与转子的漏感( $L_{\sigma s}, L_{\sigma r}$ )、磁感( $L_{H1}$ )、转动惯量( $J$ )以及摩擦系数( $k_D$ )。基于Matlab编程实现了所提出的基于遗传算法的函数近似器。

#### 3.1 实验环境与实验方法

实验采用的电机为1-HP的电机,电机的极数为4,频率为60 Hz,额定电压为220 V。实验工作台可监控三相感应电机的电压、电流、振动、转矩与转速。霍尔传感器支持将相位电压与电流发送至数据采集板的模拟输入端口。工作台中装配1台感应电机与1台发电机,发电机的功率为2 kW,额定励磁电压为250 V,额定电枢电压为250 V,信号采集的转矩上限为50 N·m,转速上限为7 000 r/min。图2为估计程序的模块图。

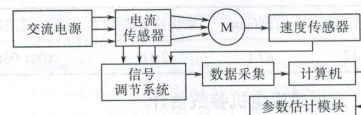


图2 估计程序的模块图  
Fig.2 The diagram of estimation procedure

#### 3.2 实验参数

本文的主要目标是估计感应电机的电气参数与机械参数,本算法输入信号集仅仅是1个相位的电流信号。使用2个传感器获得电机的实验测量值,2个速度测量设备分别为测速发电机与转矩测量仪。

遗传算法的初始化权重因子设为0.8,权重因子最终降低至0.2,交叉率设为0.5,从而保证目标向量与变异向量具有相等的被选择概率。本算法的编程环境为Matlab 2013a软件,PC机为Intel i7处理器,主频2.4 GHz,内存8 Gb,操作系



统为 Windows 8 64 位。

### 4 实验结果

实验结果分为2个部分:感应电机的参数估计结果与估计结果的验证。实验中采用较大的搜索空间,如表1所示,由此可实现一个较好的寻优效果。

表1 实验参数的上、下界  
Tab.1 The upper and lower bound of experimental parameters

参数	取值范围
$R_s/\Omega$	[1, 15]
$L_{\sigma}/mH$	[0.001, 0.5]
$R_r/\Omega$	[2, 15]
$L_{\sigma}/mH$	[0.001, 0.5]
$J/(kg \cdot m^2)$	[0.005, 0.08]
$k_b$	[0.000, 0.008]
$L_{\sigma}/T$	[0.1, 1.5]

估计实验的输入信号集为  $U$  相电流。根据预处理实验的结果,将遗传算法的结束条件设为适应度值小于 0.003,此时转速、电流的估计曲线与实验测量曲线之间的误差低于 5%。为了控制算法的计算时间,另一个结束条件的最大迭代次数设为 50 次。表 2 为估计实验的收敛数据。

表2 估计实验的收敛数据  
Tab.2 The convergence data of estimation experiment

迭代次数	时间/min	最优初始适应度	最优适应度
17	47.1	2.311 4	0.001 986

#### 4.1 三相感应电机参数估计

表 3 为使用最优适应度获得的参数估计结果。

表3 根据  $U$  相电流估计的参数  
Tab.3 The estimated parameters according to the current of phase  $U$

参数	取值范围
$R_s/\Omega$	5.079 8
$L_{\sigma}/mH$	0.031 1
$R_r/\Omega$	4.204 7
$L_{\sigma}/mH$	0.020 2
$J/(kg \cdot m^2)$	0.021 6
$k_b$	0.000 2
$L_{\sigma}/T$	0.470 5
适应度	0.002 083

图 3 为电流信号估计值与实验值之间的比较

结果。图 4、图 5 分别为测速发电机与转矩仪测量的速度与估计值的曲线图。从图 4 与图 5 可以看出,虽然估计算法并未采用速度传感器,但是仅使用电流信号也获得了较好的估计效果。

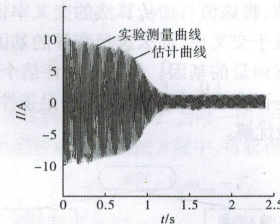


图3 电流信号估计值与实验值之间的比较结果

Fig.3 The comparison results between estimation value and experimental value of electrical signal

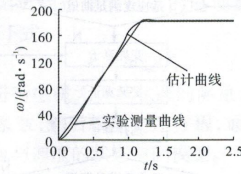


图4 速度估计值与实验值之间的比较结果 (测速发电机测量的速度值)

Fig.4 The comparison results between estimation value and experimental value of speed (the speed is measured by tachogenerator)

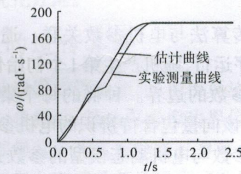


图5 速度估计值与实验值之间的比较结果 (转矩仪测量的速度值)

Fig.5 The comparison results between estimation value and experimental value of speed (the speed is measured by torque meter)

从图 4、图 5 中可观察不同速度下瞬时状态的测量信号与估计信号之间的差异。仅将电流作为输入信号,速度的估计值与实验测量值之间的差异低于 0.5%。

#### 4.2 估计算法的验证实验

通过一个有负载的电机对估计算法进行验证实验。将电机的初始化转矩设为  $0.5 N \cdot m$ ,在 3.5 s 之后,将电机的转矩设为  $2.3 N \cdot m$ 。验证实验将  $U$  相电流作为输入信号,在电机有负载的稳



定状态,电机估计曲线与实验测量曲线的误差比例低于0.13%。

实验的稳定状态验证结果获得了较低的误差率。此外,本文的线性估计模型忽略了非线性因素,如:趋肤效应和电磁饱和。最终,观察了电机瞬时状态测量数据与估计数据之间的偏差;在电机的稳定状态中,可验证计算模型实验测量值与估计值之间的相似性。图6是本算法的估计结果与实验测量结果的曲线图。

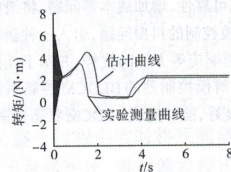


图6 U相作为输入信号的验证实验结果

Fig.6 Validation experimental results with input signal of phase U

#### 4.3 与其他估计算法的比较

将本算法的验证实验结果与其他参数估计算法进行比较,表4为4个算法的估计电机参数与输入信号。将本算法与其他3个方案<sup>[7-8,11]</sup>进行比较,方案<sup>[7-8,11]</sup>分别采用PSO(粒子群优化算法)、GA(原遗传算法)与DE(差分进化算法)优化算法。本算法的优势是在参数估计过程中仅使用电流信号,并且估计了7个三相感应电机的参数。文献[11]的方案与本文方案较为相似,差异在于文献[11]将电压作为输入信号,该文献也并未验证估计算法的性能。文献[11]采用原遗传算法,而本算法对于遗传算法进行了修改,使其更加适合三相感应电机的参数估计。

表4 估计算法的输入信号以及估计的参数  
Tab.4 The input signals and the related estimated parameters of estimation algorithm

算法	参数	本算法	文献 [7]	文献 [11]	文献 [8]
输入信号	电压	否	否	是	是
	电流	是	否	是	是
	速度	否	是	否	是
	转矩	否	是	否	是
参数	$R/\Omega$	是	是	是	是
	$R/\Omega$	是	是	是	是
	$L_{\sigma}/mH$	是	是	是	是
	$L_{\sigma}/mH$	是	是	是	是
	$L_m$	是	是	是	否
	$J$	是	否	是	否
	$k_b$	是	否	是	否

## 5 结论

对遗传算法进行了改进,不仅保证了遗传算法具有较大的搜索空间,而且实现了较快的收敛速度与鲁棒性。然后,本算法使用改进的遗传算法估计三相感应电机的参数,具体而言,通过遗传算法最小化实验测量信号与估计模型输出信号的差值以实现参数的估计。实验结果显示,估计结果与实验测量值能够较为准确地拟合,并且实现了较低的估计误差。本系统仅将电流作为输入信号,在电机稳定状态的估计误差仅为0.13%。

#### 参考文献

- [1] 孟昕元,范峥.基于事实搜索方法的三相感应电机节能控制研究[J].微特电机,2016,44(8):76-78.
- [2] 齐昕,付永星,周晓敏,等.基于双边界限定策略的感应电机预测控制研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):282-291.
- [3] Al-Badri M, Pillay P, Angers P. A Novel in Situ Efficiency Estimation Algorithm for Three-phase IM Using GA, IEEE Method F1 Calculations, and Pretested Motor Data[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(3):1092-1102.
- [4] Raj C T, Srivastava S P, Agarwal P. Energy Efficient Control of Three-phase Induction Motor—A Review[J]. 2009, 1(1): 61-70.
- [5] Guzman H, Duran M J, Barrero F, et al. Speed Control of Five-phase Induction Motors with Integrated Open-phase Fault Operation Using Model-based Predictive Current Control Techniques [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9):4474-4484.
- [6] Jirdehi M A, Rezaei A. Parameters Estimation of Squirrel-cage Induction Motors Using ANN and ANFIS[J]. Alexandria Engineering Journal, 2016, 55(1):357-368.
- [7] Sakthivel VP, Bhuaneswari R, Subramanian S. Multi-objective Parameter Estimation of Induction Motor Using Particle Swarm Optimization [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2010, 23(3):302-312.
- [8] Arslan M, Çunkaş M, Sağ T. Determination of Induction Motor Parameters with Differential Evolution Algorithm [J]. Neural Computing & Applications, 2012, 21(8):1995-2004.
- [9] Jirdehi M A, Rezaei A. Parameters Estimation of Squirrel-cage Induction Motors Using ANN and ANFIS[J]. Alexandria Engineering Journal, 2016, 55(1):357-368.
- [10] Monjo L, Kojoooyan-Jafari H, Córcoles F, et al. Squirrel-cage Induction Motor Parameter Estimation Using a Variable Frequency Test [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(2):550-557.

(下转第21页)