

# 电力设备在线监测系统的研发和应用

杨之望<sup>1</sup>, 杨启平<sup>2</sup>, 王鲁杨<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海电力设计院有限公司, 上海

<sup>2</sup>上海电力大学, 上海

Email: 1076767281@qq.com, yangqp1951156@sina.com

收稿日期: 2020年9月9日; 录用日期: 2020年10月2日; 发布日期: 2020年10月9日

---

## 摘要

本文介绍了电网中的电力设备安全运行的前景, 详细阐述了电力设备在线监测的技术。随着传感技术、无线通信网络、计算机在电力系统的推广, 电力工程师研发了新型的电力变压器和输电线路在线监测系统。进一步, 用人工智能诊断实例论证了电力设备智能化在线监测系统应用的可行性和实效性。

## 关键词

电力变压器, 输电线路, 在线监测, 传感技术, 专家系统, 人工神经网络, 人工智能

---

# Development and Application of Power Equipment On-Line Monitoring System

Zhiwang Yang<sup>1</sup>, Qiping Yang<sup>2</sup>, Luyang Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Electric Power Design Institute Co., Ltd., Shanghai

<sup>2</sup>Shanghai University of Electric Power, Shanghai

Email: 1076767281@qq.com, yangqp1951156@sina.com

Received: Sep. 9<sup>th</sup>, 2020; accepted: Oct. 2<sup>nd</sup>, 2020; published: Oct. 9<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

This paper introduces the prospects for safe operation of power equipment in the power grid. The on-line monitoring technology of power equipment is elaborated in detail. With the populariza-

tion and application of sensing technology, wireless communication networks, and computers in power systems, power engineers have developed a new type online monitoring systems for power transformers and transmission lines. Further, we used the artificial intelligent diagnosis power equipment examples, to prove the feasibility and effectiveness of the power equipment intelligent on-line monitoring system.

## Keywords

Power Transformer, Transmission Line, On-Line Monitor, Sensor Technology, Expert System, Artificial Neural Network, Artificial Intelligence

Copyright © 2020 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. 引言

电力设备是电网最重要的核心部分，电力设备输变电侧包括：高压输电线路；大型电力变压器；控制设备等。从智能电网的建设成效分析，尽管欧美及日本等发达国家早在 20 世纪中后期就开始了电力设备的在线监测研发工作，并已取得了一系列成果、发展了多个版本，但对输变电侧的研究相对较少。近年来，国内输变电主设备开发和应用人工智能在线监测的方法，加快了我国电力设备状态维修体系的建设，电力设备在线监测的大力发展对电力系统而言是十分迫切需要的。

## 2. 电力设备在线监测系统

在电网中，各类电力设备必须严格遵循电网的运行规则，引入人工智能，实现高集成化、高自动化、高智能化的在线监测系统，确保电力设备的安全运行。

### 2.1. 电力设备在线监测系统结构

为了加强电力设备运行的安全可靠、故障的及时诊断、设备寿命的延长，电力工程师设想应用传感技术采集现场信息，再结合人工智能，完成对电力设备智能化在线监测的技术指标。上海电力大学课题组和上海电力设计院经过多年的合作，联合开发了新型电力设备在线监测系统，如图 1 所示。

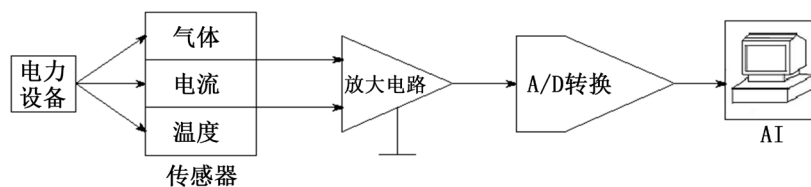


Figure 1. Structure diagram of power equipment online monitoring system

图 1. 电力设备在线监测系统结构

电力设备在线监测系统结构由两部分组成，① 由数据采集的前端(包括太阳能电源、各类传感器、信号处理器、无线通信传输等)；② 由数据分析处理的后端(人工智能诊断系统)组成。前端作用主要是由高性能的智能传感器和视频探头采集的信号，经放大、转换处理后，由无线通信网络的传输至监控中心。后端的人工智能用来处理相应数据，得出监测电力设备的实时诊断结论。

## 2.2. 传感技术的应用

传感器是一种检测装置，用于监测和控制电力设备运行中的各项参数，促使电力设备运行在正常状态或最佳状态。传感器特性在电力设备在线监测系统的关键作用[1]，是十分明显的，世界各国都十分重视这一领域的发展，是一个长盛不衰的研究热点。随着新型智能传感器的问世[2]，智能传感器具有信息采集处理和自动交换信息的能力，智能传感器的优势集中显示出以下三点：通过软件技术可实现高精度的信息采集，而且成本低；具有一定的编程自动化能力；功能的多样化，可以完成图象识别、特征检测、多维检测等复杂任务。近十年来，国内外一些大型电力设备制造商，纷纷将各类智能传感器直接安装在监测电力设备的敏感部位，以获取电力设备现场监测数据，取得了很大的成功。

## 2.3. 通信技术的应用

电力设备在线监测系统中，针对电力设备不同检测的需要，使用各类智能传感器，获取实时监测信号，再经由无线网络 GPRS/CDMA/4G，传输至监控平台，同时可实现远程设备的无人化巡视。GPRS/CDMA 具有数据传递快，抗干扰能力强，数据更安全可靠、网络覆盖广等优势；再则，无线数据通信设备可直接与 PLC、RTU 等数据终端相连接，可用于遥测系统中数据采集、检测、报警、控制、监视等环节，有效地解决了对电力设备进行数据的采集、监控在线监测信号的远程传输问题。

## 2.4. 人工智能(AI)的应用

半个世纪以来，人工智能应用研究取得了显著的进展[3]，专家系统(ES)的知识管理、智能决策；人工神经网络(ANN)的模糊集合、遗传算法理论，使人工智能显示出强大的生命力。人工智能在电力领域的应用主要集中在：逻辑推理、模式识别、智能控制、智能检索、智能调度等方面。电力设备人工智能诊断系统由专家系统(ES)和人工神经网络(ANN)组成，基于智能化诊断电力设备故障的应用程序的开发，采用 ES 和 ANN 诊断电力设备故障和老化状况[4]，分别得出的结论可相互印证，确保其诊断的准确性。

人工智能应用于电力设备的在线监测、故障诊断和寿命评估具有非常重大的意义。人工智能诊断系统具有以下优点：

- (1) 人工智能充分模仿和执行人脑的智力功能，利用计算机语言的特点，实现目标驱动的判断、推理、识别和学习机制。
- (2) 人工智能建立强大的数据库，有利于向管理部门提供信息检索和决策依据。
- (3) 人工智能采用模块化结构，有利于功能扩展，方便融入领域的新知识。
- (4) 人工智能的实现除了硬件保证，软件是核心，它在电力领域的应用是一个长期的渐进式过程，创新和成功，将在实践中得到检验。

## 3. 电力设备诊断的专家系统

电力设备故障诊断专家系统是一门新兴的边缘学科，得到了电力领域专家的高度重视。

### 3.1. 专家系统(ES)

专家系统是一种具有专门知识和经验的计算机智能化程序系统，专家系统已成为人工智能领域中最活跃、最受重视的一个分支。专家系统具备以下四个要素：(1) 应用于某一个专门领域；(2) 拥有领域的专家级知识；(3) 能模拟专家思维；(4) 能达到专家级的水平。专家系统是以知识库和推理机为中心而展开的，即：专家系统 = 知识库 + 推理机。如图 2 所示。

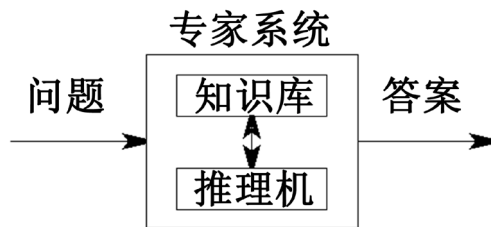


Figure 2. Simplified structure diagram of expert system  
图 2. 专家系统简化结构图

专家系统知识库的建立,是 ES 开发成功的关键,知识库内存放的是问题求解所需要的专家领域知识、知识工程师的经验、基本事实、规则和各类数据的集合;推理机是实施问题求解的核心执行机构,推理机根据知识进行推理并导出结论,使专家系统以逻辑方式协调工作。专家系统具有解释、预测、诊断、设计、规划、监视、控制、决策、维护等功能。目前,专家系统在电力系统中得到广泛应用,尤其在电力设备运行监测、故障诊断、寿命评估等方面取得了很大的成果。

### 3.2. 变压器故障诊断专家系统

电力变压器在线监测系统中传感技术是关键所在,多种智能传感器的联合使用,将产生连锁的复合效应。目前,变压器生产厂商已逐步开始将热辐射光纤传感器、气敏传感器、电流传感器、光纤振动传感器、超声波传感器等的传感探头直接嵌入变压器绕组、铁心等监测部位,以取得运行时的检测信号,再经专家系统处理,得到变压器运行状况的结论。

电力变压器故障诊断专家系统的开发(TFDES),可对变压器内部潜伏性故障进行早期诊断和实时监测及寿命评估。本专家系统(TFDES)的软件开发,其获取的领域知识:① 根据电力变压器专家的领域知识和现场工程师的运行经验。② 围绕特征气体色谱分析(DGA)法则,根据油中气体色谱分析的数据(包括 H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>)采用 IEC 三比值法、特征气体排列图、产气速率等领域知识。③ 根据各类传感器红外、电流、超声波等传感装置检测手段,获取变压器故障对应的监测信号。④ 变压器绝缘老化监测模块中涉及的高性能液相色谱分析(糠醛含量 HPLC)、极化电流(PDC) [5]、恢复电压(RVM)等诊断法则都属于先进技术,糠醛含量(HPLC)、极化电流(PDC)和恢复电压(RVM)用于分析判断纸纤维老化程度[6]。⑤ 根据变压器运行的当前数据和历史数据。ES 的知识的表示采用产生式系统的 IF-THEN 规则,所有这些领域知识建成一一对应的知识库模块。专家系统知识库是核心。本专家系统(TFDES)所开发的知识库建成模块化结构,如图 3 所示。

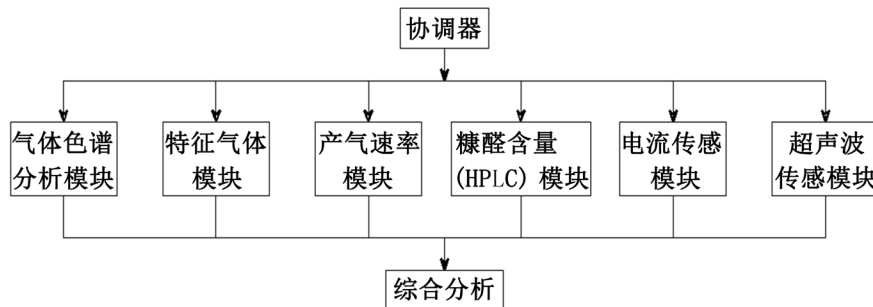


Figure 3. TFDES knowledge block diagram  
图 3. TFDES 知识库模块图

TFDES 知识库中并行的六大模块和综合模块受协调器统一控制。综合分析模块对变压器的运行状况

作全面的判断,当变压器内部发生异常时,TFDES除了给出故障性质外[7][8],还将结合异常气体的产气速率、变压器负荷状况等,向现场运行人员做故障出诊断结论和建议。

### 3.3. 输电线路故障诊断专家系统

输电线路是电网的重要组成部分,为了确保线路的运行安全[9],本课题组经过多年的研究和探索,依据输电线路途径的各种不同地貌、气候、及电网状况、负荷等情况,提出将测线路温度的红外传感器;测电流的传感器;测环境气象变化的传感器(包括气温、湿度、日照、风速等);及测绝缘子污闪、覆冰拉力传感器、测避雷器、舞动、鸟害等各类智能传感器和远程视频监控装置[10][11],直接安装在输电架空线铁塔上,获取现场同步监测数据信号,再通过高速无线网络,将获取的被测数据信号传输到信号监控中心,由此建立输电线路安全保障信息共享机制和技术数据平台[12],最后经专家系统的信息处理[13],得到监测输电线路的实时信号。

输电线路(架空线)故障诊断专家系统(TRLES)的开发,知识的获取围绕输电线路的安全运行、增容、绝缘子污闪[14][15]、舞动[16]、覆冰、鸟害、避雷器(MOA)[17]、和远程可视等专业知识;取自于现场运行人员的经验和领域专家的知识;取自于输电线路沿途的气候、地形、风貌等情况。本专家系统的知识表示采用了产生式系统的规则,应用了不确定性等高级知识推理机制,并引入了缺省推理规则,在一些实际诊断中取得了较理想效果。TRLES知识库建成模块化机构,各模块间相互独立,如图4所示。

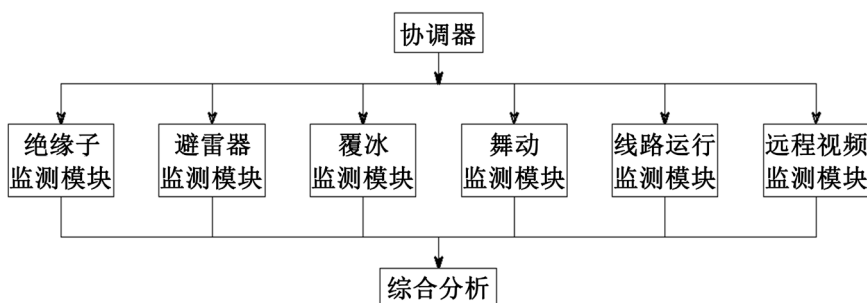


Figure 4. TRLES knowledge block diagram

图4. TRLES知识库模块图

专家系统推理是一个不断运用知识的过程。当ES运作时,首先由协调器控制、协调各模块的运作,启动输电线路远程可视监测模块,获取输电线路现场可视图像数据,接着启动知识库各模块。然后由综合分析模块根据各模块分析结果,进行全面的判断,并给出诊断结论。目前,TRLES系统专门用于监视线路的运行状况,可对运行中输电线路的早期故障做出诊断,实现了输电线路安全运行的全天候监控。

## 4. 电力设备诊断的人工神经网络

计算机科学的发展,使人工神经网络技术在电力系统得到了广泛的应用,它具有创新性、前瞻性和实用性。

### 4.1. 人工神经网络法(ANN)

人工神经网络中最常用的BP网络是具有三层或三层以上的阶层型神经网络,由输入层、隐含层和输出层构成,相邻层之间的神经元全互连,同一层内的神经元无连接。如图5所示。

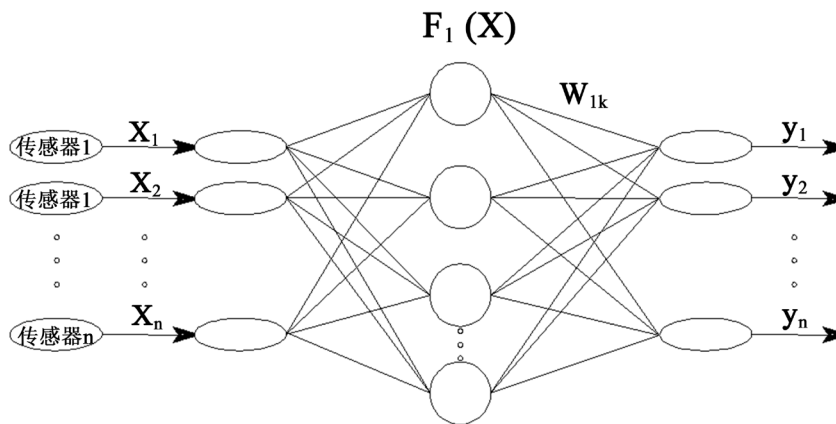


Figure 5. BP network structure diagram  
图 5. BP 网络结构图

人工神经网络的 BP 算法具有学习和存储大量的输入、输出模式映射关系，而无须事前揭示描述这种映射关系的数学方程。它的学习规则是：使用梯度下降法，通过反向传播(就是一层一层往前传)不断调整网络的权值和阈值，最后使全局误差系数最小。算法分为两个阶段：(1) (正向传播过程)输入信息从输入层经隐层逐层计算各单元的输值；(2) (反向传播过程)输出误差逐层向前算出隐层各单元的误差，并用此误差修正前层权值(即运用后向反馈的学习机制，来修正神经网络中的权重)，最终输出正确的结果。

#### 4.2. 变压器故障诊断人工神经网络

电力变压器故障诊断人工神经网络的开发(TFDANN)正成为监测、诊断变压器故障、老化的一种理想工具。本 TFDANN 的建模，选用误差反传的 BP 网络，网络结构由输入层、隐含层和输出层三个层面构成。ANN 的开发，选用反映故障的采样信息及相应的警报信号作为输入特征矢量，考虑到各类传感器检测特征对应的变压器故障性质；特征气体色谱  $H_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $C_2H_4$ 、 $C_2H_2$  分析在诊断变压器故障中的特殊地位；糠醛含量(HPLC)对评估变压器老化的意义，将这些因素作为 TFDANN 对应输入层节点的特征输入元素。输出层节点选定为 5 个，分别对应变压器运行中五种常见的故障特性： $Y_1$  表示正常状况、 $Y_2$  表示过热故障程度、 $Y_3$  表示放电故障程度、 $Y_4$  表示电弧故障程度、 $Y_5$  表示绝缘老化程度。样本训练选用梯度下降法，样本训练的过程着重分析的因素是输出收敛趋势和误差均方差为小。电力变压器故障诊断人工神经网络输出  $Y_j$  的值，数值范围在 0~1 之间，当  $Y_j$  的值显示 >0.5 时，则表示变压器已存在早期的故障现象，当输出  $Y_j$  数值增大而趋近 1 时，则表示电力变压器某一故障性质的严重程度增加。

#### 4.3. 输电线路诊断人工神经网络

输电线路(架空线)故障诊断人工神经网络的开发(TRLANN)实现了输电线路的故障监测、故障分类和故障定位，并具有模糊逻辑推理功能[18]。本 TRLANN 的建模选用了反向传播的 BP 网络，网络结构由输入层、隐含层和输出层三个层面构成。样本的训练采用 BP 算法的梯度下降法。考虑到输电线路(架空线)运行的安全，往往受到气象环境、雷电、过载、覆冰、鸟害、风偏舞动、绝缘子污闪等干扰影响，会产生各种异常和故障，选择了反映故障状况与对应的警报信号作为输入特征矢量。选择了输出层节点为 4 个  $Y_j$  ( $j = 1\sim 4$ )，分别与电力输电线路运行时，四种常见状况和故障特征： $Y_1$  正常运行、 $Y_2$  过热现象、 $Y_3$  故障状态、 $Y_4$  寿命老化对应。输出  $Y_j$  值的范围在  $0.0 < Y_j < 1.0$  之间，值的趋大反映了输电线路故障的严重程度。

## 5. 电力设备故障诊断实例

下面将二个现场实例来论证：人工智能在电力设备故障诊断中的作用和意义。

### 5.1. 变压器故障诊断实例

我们分析一个变压器在线监测系统诊断实例：

某市供电局 2018 年 9 月 13 日变压器额定容量 100 MVA 额定电压为 330/132/16 KV。其采样数据见表 1。

Table 1. Sample data

表 1. 采样数据

检测项目	检测数据						
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
色谱(μL/L)	157.5	56.4	6.9	22	3.5	530	4500
糠醛含量(mg/L)	1.952						
电流传感器 PD 测试(mv)	高压: A: <20, B: 50, C: <20 低压: a: <20, b: 820, c: 120						
超声波传感器 PD 测试(μV)	95 (异常信号)						

根据油中气体色谱 DGA 分析：H<sub>2</sub> 超过正常值，H<sub>2</sub> 绝对产气速率  $r_a$  在正常范围内，CH<sub>4</sub> 占总烃中的主要部分，三对比值为 1, 1, 0。

TFDES 综合分析结果：变压器内部异常，故障性质为：存在高能量局部放电故障；且 H<sub>2</sub> = 157.5，超过额定值，电流传感器 PD 测试，PD = 820 mv (低压侧 b 相放电)，超声波传感器出现异常信号。变压器寿命老化程度为中度。

TFDANN 输出结果：Y<sub>1</sub> = 0.1131, Y<sub>2</sub> = 0.4987, Y<sub>3</sub> = 0.8431, Y<sub>4</sub> = 0.4416, Y<sub>5</sub> = 0.7112。

人工智能诊断结论：变压器内部异常，低压侧 b 相存在高能量局部放电故障，且伴有过热现象；变压器老化评估中度。AI 建议：停机检查。

现场专家处理意见：吊芯检查。实际检查结果为：变压器低压侧 b 相严重放电故障。

### 5.2. 输电线路故障诊断实例

下面我们分析输电线路人工智能监测系统诊断实例：

上海某供电局 2018 年 6 月 17 日检测 Y10W-100/260 型避雷器(MOA)泄漏电流在线测量数据，如表 2 所示。

TRLES 诊断结果：塔 82259N A 相 MOA 存在故障，泄漏电流  $I_r \gg 500 \mu\text{A}$  (故障严重)；塔 40217N B 相 MOA 泄漏电流  $I_r = 680 \mu\text{A}$  存在故障；塔 45211 C 相 MOA 正常。

TRLANN 输出结果：塔 82259N A 相 MOA Y<sub>2</sub> 值为 0.7211, Y<sub>3</sub> 值为 0.9175；塔 40217N B 相 MOA Y<sub>2</sub> 值为 0.5211, Y<sub>3</sub> 值为 0.6172；塔 45211 C 相 MOA Y<sub>1</sub> 值为 0.3175。

人工智能诊断结论：塔 82259N A 相 MOA 存在问题(故障性质趋严重)应更换；塔 40217N B 相 MOA 污染，应清洗；塔 45211 C 相 MOA 属正常运行范围。

现场专家处理意见：塔 82259N A 相 MOA 严重损坏，采取措施：更换避雷器(MOA)；塔 40217N B 相 MOA 采取措施：清洗。

**Table 2.** Sample data of MOA**表 2.** MOA 采样数据

检测项目	检测数据		
相别	A	B	C
铁塔编号	82259N	40217N	45211N
泄漏电流( $\mu\text{A}$ )	950	680	290
环境温度( $^{\circ}\text{C}$ )	36		
环境湿度(%)	69		
电压等级(KV)	110		
安装日期	2015 年 6 月		

## 6. 结语

近年来,本课题组在开发专家系统软件时,选择采用具有反向逻辑推理的 Turbo prolog 语言;在开发人工智能神经网络软件时,选择采用 C++ 语言和采用反向推理的 BP 网络,这样既可充分发挥计算机语言功能的特长,同时,妥善解决了人工智能综合分析时出现的接口问题。本课题组从事电力设备在线监测系统的研发工作,研究各类智能传感器性能特征,并大力推广和应用到现场第一线。同时,开发多种人工智能软件应用于电力变压器、高压输电线等电力设备的安全运行、故障诊断、寿命评估、在线监测等方面,取得了很多成果。

电力设备在线监测系统的研发成功,大大提升了电力设备运行的安全性、可靠性和预测能力。随着实时的电力设备在线监测系统日臻完善,在线监测技术在电力行业广泛的应用,为电力设备实行“状态维修”,提供了强有力的支撑[19]。电力设备的监测和维护其根本目的是为了电力设备的可靠性运行、延长设备寿命,全面实现智能电网的特征要求。

目前,人工智能在电力变压器和电力输电线路安全运行中的监测、开发和应用方面取得了非常可喜成果。由于智能电网研究的深入,大幅度提高变压器、输电线路诊断的智能化程度,保障电力设备的安全、可靠,降低事故的发生率,人工智能正显示强大活力。进一步研究表明,电力设备安全运行若要拥有强大的自愈和抗外界干扰的能力,必须加强对变压器、输电线路运行状态实时数据的监测,进行连续的自分析、自诊断,及时发现故障隐患,并用自动控制手段将故障消灭在萌芽状态。总之,电力设备在线监测将在电网中产生巨大的社会效益和经济效益。

## 基金项目

上海市教委重点学科建设项目(J51301)。

## 参考文献

- [1] 彭志强,曾飞,等. 电力系统时间同步状态在线监测技术应用分析[J]. 华东电力, 2014, 42(10): 2060-2064.
- [2] 刘迎春. 传感器原理设计与应用技术[M]. 北京: 国防科技大学出版社, 2002: 250-255.
- [3] 李博,高志远. 人工智能技术在智能电网中的应用分析和展望[J]. 中国电力, 2017, 50(12): 136-140.
- [4] Yang, Q.P. and Xu, W.D. (2005) Development of an Artificial Intelligent Diagnosis System for Transformer Fault. *IEEE/PES T & D Apl-10*, A-6.
- [5] Saha, T.K. and Purkait, P. (2004) Investigation of Polarization and Depolarization Current Measurements for the Assessment of Oil-Paper Insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electric Insulation*, **11**, 144-153.



<https://doi.org/10.1109/TDEI.2004.1266329>

- [6] 刘玉仙. 油纸绝缘变压器中水分的聚积及其对热老化寿命的影响[J]. 变压器, 2004, 41(2): 8-12.
- [7] Chandrasekar, S., *et al.* (2010) Partial Discharge Detection as a Tool to Infer Pollution Severity of Polymeric Insulators. *Dielectrics and Electrical Insulation*, **17**, 181-188. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2010.5412016>
- [8] Mechsfske, C.K. (2013) Design and Implementation of Vibration On-Line Monitoring System of Power Transformer. *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES)*, Vancouver, 258-264.
- [9] 杨之望, 薛五德. 输电线路智能化监测系统[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 27-30.
- [10] 胡毅. 输电线路运行故障分析与防治[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 187-225.
- [11] 张厚荣, 张力, 等. 覆冰工况下耐张塔失效预警技术研究[J]. 南方电网技术, 2018, 12(1): 33-40.
- [12] 田野, 刘磊, 等. 输电线路风噪声防治对策研究[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 19-24.
- [13] Yang, Z.W., Zivlak, N., *et al.* (2016) Study on Overhead Transmission Line On-Line Monitoring Technology. *Thermal Science*, **20**, S383-S391. <https://doi.org/10.2298/TSCI151214024Y>
- [14] 毛颖科, 等. 基于 BP 人工神经网络的绝缘子泄漏电流预测[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(27): 7-14.
- [15] 蔡炜, 周国华, 等. 复合绝缘子光纤智能监测试验研究[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1167-1170.
- [16] 商全鸿, 赵彬. 架空输电线路防舞器排布方案效果评估技术研究[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 121-125.
- [17] 李如虎. 输电线路雷电绕击及其防雷研[J]. 南方电网技术, 2009(1): 53-57.
- [18] 戴栋, 张敏, 等. 输电线路在线监测装置研制及通信组网应用[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 3902-3908.
- [19] 李刚, 张博. 电力设备状态评估中的数据科学问题: 挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 10-20.