

文章编号: 2095-2163(2022)02-0143-05

中图分类号: TM 615

文献标志码: A

光伏阵列故障诊断算法研究综述

张希康, 李泽滔

(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 有效对光伏阵列进行快速、准确的故障诊断是保证光伏发电系统安全稳定运行的必要条件。本文结合国内外的研究成果,分析了光伏阵列故障的主要类型及形成原因,并从传统诊断法和智能算法两个方面对光伏阵列故障诊断进行阐述,分析了各种算法的原理以及优缺点。结合目前已取得的研究成果,对未来光伏阵列故障诊断的方法进行了初步的展望。

关键词: 光伏阵列; 故障诊断; 传统诊断法; 智能算法

A survey on photovoltaic array fault diagnosis algorithms

ZHANG Xikang, LI Zetao

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

[Abstract] Fast and accurate fault diagnosis of photovoltaic array is essential for ensuring the safe and stable operation of photovoltaic system. Combined with the research results at home and abroad, this paper analyzes the main types and causes of photovoltaic array faults, expounds the photovoltaic array fault diagnosis from two aspects of traditional diagnosis methods and intelligent algorithms, and analyzes the principles, advantages and disadvantages of various algorithms. Combined with the current research results, the fault diagnosis methods of photovoltaic arrays in the future are prospected.

[Key words] photovoltaic array; fault diagnosis; traditional diagnostic method; intelligent algorithm

0 引言

随着太阳能发展“十三五”规划的提出,太阳能光伏发电规模迅速增加,光伏阵列是由许多光伏电池通过串并联连接而成,是光伏发电系统核心部件之一^[1]。由于光伏阵列经常工作在屋顶、山地、以及各种室外环境,相比于光伏系统其他组件更容易发生故障,导致光伏发电系统不能正常运行。因此,对光伏阵列进行故障诊断是保证光伏发电系统正常运行的必要条件。

本文首先介绍了光伏阵列的常见故障类型并分析其形成原因;根据国内外学者的研究成果,综述了光伏阵列故障诊断的各种方法;最后,对目前诊断方法进行了总结,并对未来发展趋势进行了展望。

1 光伏阵列常见故障及其原因

光伏阵列作为光伏发电系统的重要组成部分,通常安装环境较为恶劣,容易出现组件老化、组件开路、组件短路、局部遮挡4种典型的故障^[2],各种典型故障的形成原因见表1。

表1 常见故障及形成原因

Tab. 1 Common faults and their causes

故障类型	故障形成原因
组件老化	光伏组件的平均使用寿命理论上约为20年左右,长时间处于室外运行环境下,经历风吹雨淋,加剧了组件的老化。
组件开路	在安装组件时,可能由于安装失误导致后期接线头脱落,或是由于其他异常情况致使线路断开。
组件短路	由于组件内部线路破坏、化学腐蚀、天气因素、或接线短路等因素容易造成组件短路故障。
局部遮挡	异物掉落在光伏电池板上或者电池板被周围物体遮挡时,电池板会产生热斑效应,电池板被遮挡区域温度会升高,从而烧坏组件。

除典型故障外,光伏阵列中还包括电池板开路、电池板短路、旁路二极管失效、组件分层等故障^[3]。若光伏阵列持续处于故障状态,则会产生热斑效应,从而损坏光伏组件,导致光伏发电系统瘫痪,严重时可能导致火灾的发生,危及到生命财产安全。

2 光伏阵列故障传统诊断法

2.1 红外图像分析法

红外图像分析法的基本原理是根据光伏电池在

作者简介: 张希康(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:控制理论与控制工程;李泽滔(1960-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:智能电网、故障诊断、计算机控制技术。

通讯作者: 李泽滔 Email:gzulzt@163.com

收稿日期: 2021-09-24

哈尔滨工业大学主办 ◆ 科技创新与应用

正常和故障两种工作状态下温度的不同,通过红外成像仪来进行故障诊断^[4]。文献[5]提出了利用红外图像分析法在线实时提取热斑区域图像特征,并通过结合 YCbCr 模型,分割图像亮度来缩小图像特征信息的体积,从而进行故障的检测,提高了故障诊断的实时性。

文献[6]提出了一种基于 DM642 红外图像分析法,通过对红外成像仪获取的热像图在 DM642 框架下进行去噪、校正处理,提高了光伏阵列故障诊断的准确率;文献[7]提出了基于红外图像分析法的光伏阵列故障自动检测与识别,通过模糊推理与信息融合的方式,实现对故障的精确识别。

针对红外图像分析法抗干扰能力较差的问题,文献[8]采用了一种阈值的二值化的技术来提取复杂背景下的特征信息;文献[9]提出了基于红外图像分析法的二维阈值化和模糊聚类相结合的方法,该方法能在红外图像背景对比度差、有较大噪声存在、以及非均匀成像等情况出现时,有效提取特征信息进行故障识别。

红外图像分析法优势在于能够实时检测故障,检测精度较高,但对热成像仪精度需求较高,安装成本较大,很难大面积推广使用,普适性较差,且抗干扰能力也较低。

2.2 传感器检测法

传感器检测法的基本原理是通过诸多传感器同时检测光伏阵列运行的数据,再根据检测到的数据与历史数据进行对比分析与运算,从而实现故障检测与识别^[10]。

针对传感器检测法需要大量传感器的问题,文献[11]提出了一种新的基于传感器检测法的光伏拓扑结构,该方法虽然减少了诊断过程中传感器的使用量和故障状态下的损失功率,但并未完全解决传感器过多的问题,不利于故障的检测。

为了降低环境因素对光伏阵列输出特性曲线的影响,提高诊断准确性,文献[12]提出了一种基于传感器检测法的决策树算法;文献[13]提出将传感器检测法与模糊逻辑分类器相结合的方式对光伏阵列故障诊断,该方法诊断的准确率明显高于传统的传感器检测法。

传感器检测法的诊断原理简单,但测量过程较为复杂,容易出现测量值离散的问题,且在实际应用过程中需要大量传感器,很难实现故障的精准定位,常常需要与其他方法结合。

2.3 电路结构法

电路结构法中组件之间连接方式有很多种,通过不同连接方式与传感器组合能够实现故障诊断和定位^[14]。文献[15]提出了一种全连接(TCT)结构的诊断法,如图1所示,通过将原有的TCT结构转换为等效的先并联再串联的结构,降低了传感器的冗余量,有效降低了成本;文献[16]提出了一种新型复合全连接(CTCT)的电路结构改进法,如图2所示,在满足输出功率不变的情况下,通过与传感器组合,监视光伏发电系统的运行状态,不仅能够有效检测光伏电池的热斑故障,还能够检测出出现遮荫故障的某个具体位置。

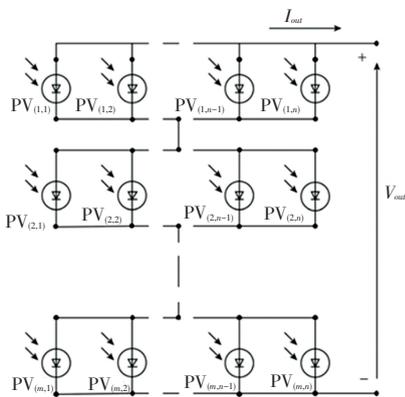


图1 TCT 结构图

Fig. 1 TCT structure diagram

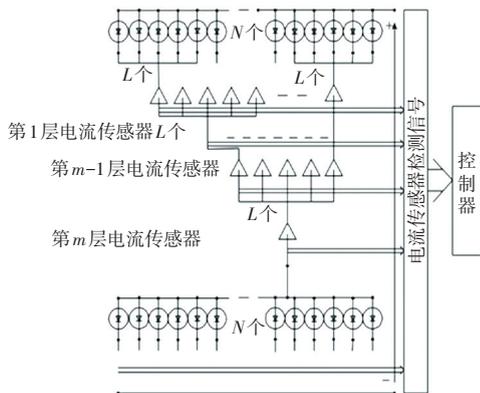


图2 CTCT 连接图

Fig. 2 CTCT connection diagram

文献[17]提出了一种基于 SC-CP (Sensor Crossed based on Series-Parallel) 的电路结构改进法,当某个区域光伏电池出现故障时不会干扰其他区域光伏电池的正常运行,降低了光伏电站安装难度,并提出在 SC-CP 架构基础上,引入辐照度和光伏电池的背板温度,结合群体决策理论以及模糊诊断技术,增强了光伏系统的抗干扰能力。

文献[18]提出了一种新的传感器网络光伏阵

列连接方式(SN-TCT)的电路结构改进法,通过利用 Dempster/Shافر(DS)证据理论复合信息融合技术计算出各个相关阵列差值信息的概率分配函数以及似真度函数,从而能够快速识别光伏故障,提升了故障诊断的速度。

3 光伏阵列故障诊断智能算法

3.1 神经网络算法

神经网络算法是通过模拟人类大脑的一种工作模式而提出的一种智能优化算法,分为输入层、输出层、以及隐含层,其网络模型如图3所示。模型在光伏发电系统中也常用于光伏阵列的故障诊断,与光伏阵列的传统诊断方法相比,神经网络算法自适应更强。

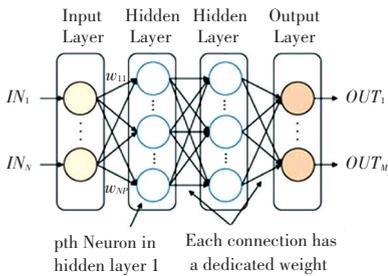


图3 神经网络模型

Fig. 3 Neural network model

文献[19]提出了使用神经网络诊断方法对光伏电池的热斑故障进行识别和定位;针对BP神经网络算法容易陷入局部最优的情况,文献[20]提出了一种改进的BP神经网络算法,通过优化神经网络模型中的连接初始权值与阈值,避免了陷入局部最优值的情况,保证了光伏电池故障诊断的全面性,提高了故障诊断的准确率;文献[21]提出了一种优化的径向基(RBF)神经网络算法,通过优化模型中的连接权值、网络中心以及函数宽度,显著提高了故障诊断的效率。

为解决传统神经网络在故障诊断时容易出现均方误差较大的问题,文献[22]提出了基于粒子群优化的小波神经网络算法,故障诊断正确率高达94%;文献[23]提出了一种基于概率神经网络的算法,该方法可以对光伏阵列故障识别精度高达到97.561%;文献[24]提出了一种基于长短期记忆神经网络算法,将不同故障模式下的光伏阵列特征值作为训练数据集,其故障诊断准确率比传统神经网络也有所提高。

面对训练数据集有限的情况,文献[25]提出了利用深度信念网络算法进行故障诊断,通过提取数

据更深层次的架构特征信息来完善网络模型,从而提高了故障类型识别的准确率。

3.2 支持向量机算法

支持向量机(SVM)是一种经典的二元分类方法,通过寻找超平面的方式来求解二分类问题。SVM优化问题的数学模型为式(1)

$$\begin{cases} \min_{w,b} \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ \text{约束条件为: } y^{(i)}(w^T x^{(i)} + b) \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

其约束条件可转化为式(2):

$$g_i(w) = -y^{(i)}(w^T x^{(i)} + b) + 1 \leq 0 \quad (2)$$

其中, x 是一组列向量,是已知的样本数据; y 为真实结果值; w 为 x 的系数; b 为常数, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

可将优化问题的模型等效为拉格朗日问题,式(3):

$$L(w, b, a) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^n a_i [y^{(i)}(w^T x^{(i)} + b) - 1] \quad (3)$$

其中, a 为拉格朗日乘子。

而感知机与SVM最根本的区别在于其原理模型是定义在特征空间上的间隔最大的线性分类器, SVM成为非线性分类器的本质在于直接利用核函数计算。

在诊断过程中,由于SVM采用了结构风险最小化原则,因此只需要获取一些光照强度、温度、电流、电压等关键特征数据就能很好的进行故障的识别^[26]。为了获得更精确的SVM模型,提高故障诊断准确率,也提出了许多优化后的SVM算法,文献[27]提出了利用遗传算法来优化SVM中的惩罚因子与核函数两者的系数;文献[28]提出了利用粒子群算法来优化SVM中的惩罚因子与核函数两者系数,从而得到两者系数的最优值;文献[29]提出了一种新的基于高斯核函数的SVM诊断法,解决了传统SVM不能进行多元分类的问题。

3.3 模糊控制算法

模糊控制算法又称为专家系统,其基本思想是模仿人的模糊推理行为与决策过程,其模糊规则主要是专家的先验知识。当对某个系统的模型认识不够深入时,通常采用模糊智能算法。

文献[30]提出了基于模糊C均值聚类(FCM)的方法进行光伏阵列故障诊断,采用聚类分析对不同故障类型的特征量进行分析,以获得一一对应的模糊关系,通过隶属度函数计算故障模型与故障特征量的隶属度来进行故障类型的识别,FCM算法流程图如图4所示。

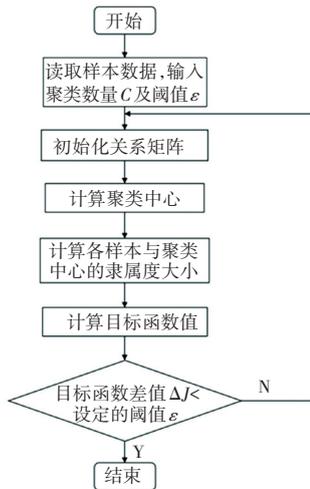


图4 FCM算法流程图

Fig. 4 Flow chart of FCM algorithm

该法的精确度较高,但模糊规则较难获得,且不能进行自主学习。为了便于大型光伏阵列更好的进行扩展,利用了 FCM 算法较好的聚类性能和模糊隶属(FM)算法良好的柔性分类能力,文献[31]提出了将 FCM 与 FM 相结合的算法。

文献[32]通过将 3 倍标准差 (3σ) 准则和 FCM 算法相结合,将 3σ 准则获取的故障因子经 FCM 算法求解出故障因子的阈值来进行故障的识别,解决了复杂计算的问题;文献[33]提出了基于高斯核函数(GK)的 FCM 算法,将故障特征相近的值通过 GK 变换,突出其差异性,解决了故障诊断过程中相似故障诊断难的问题。

3.4 其他智能算法

近几年,在光伏阵列故障诊断领域,除了以上所述算法之外,大量研究人员还提出了许多其他智能优化算法,例如,鲸鱼优化算法、萤火虫算法、灰狼优化算法、烟花算法、蜻蜓算法等。文献[34]提出了一种基于蜻蜓算法的自组织映射神经网络算法;文献[35]提出了一种优化的聚类算法(Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN);文献[36]提出了自适应神经网络模糊推理的算法;文献[37]提出的基于主元分析的有监督机器学习算法等。这些算法都各自有其优缺点,同时也表明智能算法在光伏阵列的故障诊断中扮演着重要的角色。

4 展望

光伏阵列是光伏发电系统的核心部件,为了避免因光伏阵列故障而导致重大安全事故的发生,对光伏阵列运行状态进行在线实时检测则显得尤为重要。在未来,光伏阵列的在线故障检测方法依然是重要的

研究方向,主要的工作可能聚焦在以下两个方面:

(1)传统电路结构法与智能算法相融合的方式是未来光伏阵列故障检测方法的重要研究方向之一,两种方法的结合既能减少传感器的使用量,又能保证故障定位的精度;

(2)随着光伏发电系统大面积地使用,为了保证系统的正常运行,减少安全事故的发生,不断提高光伏阵列故障诊断方法的精确性也是刻不容缓的,因此,继续对智能算法不断改进也是未来的重要研究方向。

5 结束语

光伏发电作为未来发电的一种主要形式,将会对国家长远发展战略以及社会生产生活产生重要的影响。有效对光伏阵列进行故障诊断,实现光伏阵列诊断智能化是保证光伏发电系统正常运行的必然要求。传统的光伏阵列诊断法虽然能够较为精确的识别出某种单一故障,但可扩展性较差,自适应较差,很难进行大规模的推广。

现代智能算法虽然自适应较强,但容易陷入局部最优,容易造成故障诊断不准确。因此,随着光伏发电需求日益增加,保证用电的安全性和稳定性,研究新的优化智能光伏阵列故障诊断算法是未来发展的趋势。

参考文献

- [1] 孙加敏. 光伏阵列故障诊断算法研究[D]. 北京:华北电力大学,2018.
- [2] 崔艺梦. 光伏阵列故障诊断方法研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2020.
- [3] 彭雅兰,李志刚. 太阳能光伏阵列在线故障诊断方法综述[J]. 电器与能效管理技术,2019(11):1-7.
- [4] 叶进,卢泉,王钰淞,等. 基于级联随机森林的光伏故障诊断模型研究[J]. 太阳能学报,2021,42(3):358-362.
- [5] 车曦. 基于红外图像识别的光伏组件热斑故障检测方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.
- [6] 黄永华,王培珍,刘建华. 基于 DM642 光伏阵列红外图像分析系统的实现[J]. 中国制造业信息化,2007(19):81-84.
- [7] 王培珍,郑诗程. 基于红外图像的太阳能光伏阵列故障分析[J]. 太阳能学报,2010,31(2):197-202.
- [8] 周维芳,王志陶,杨帆,等. 基于红外图像的太阳能电池缺陷检测[J]. 河北工业大学学报,2014,43(1):8-14.
- [9] 王培珍,王群京,杨维翰. 太阳能光伏阵列红外图像的特征提取[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2004(10):1187-1190.
- [10] 李光辉. 光伏阵列故障检测与诊断方法研究[D]. 西安:长安大学,2020.
- [11] F Ghali F M A, Syam F A, Abdelaziz M M. Analysis of interconnected configuration in PV arrays under fault condition [C]//2003 46th Midwest Symposium on Circuits and Systems.

- IEEE, 2003, 3: 1095-1099.
- [12] Budhaditya Hazra, Sriram Narasimhan. Gear Fault Diagnosis Using Synchro-Squeezing Transform Based Feature Analysis[J]. Key Engineering Materials, 2013, 569-570:449-456.
- [13] Dhimish M, Holmes V, Mehrdadi B, et al. Comparing Mamdani Sugeno fuzzy logic and RBF ANN network for PV fault detection[J]. Renewable Energy, 2017, 117:257-274.
- [14] 张晓娜,高德东,刘海雄,等.一种新型光伏阵列多传感器故障检测定位方法[J].可再生能源,2016,34(2):166-172.
- [15] 宋文海,李田泽,乔家振,等. TCT 结构光伏阵列故障检测方法研究[J]. 电源技术,2019,43(7):1164-1167.
- [16] 程泽,李兵峰,刘力,等.一种新型结构的光伏阵列故障检测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2010,24(2):131-136.
- [17] 钟丹. 基于复合信息融合技术的光伏阵列故障诊断研究[D]. 天津:天津大学,2012.
- [18] GHALI F M A, SYAM F A, ABDELAZIZ M M. Alternative configurations of PV module for minimizing the fault effect[J]. Midwest Symposium on Circuits & Systems, 2003, 3(3): 1085-1089.
- [19] 徐小奇,刘海波. 基于神经网络的光伏电池红外热图热斑识别[J]. 科学技术创新,2021(16):92-94.
- [20] 贾嵘,李云桥,张惠智,等. 基于改进 BP 神经网络的光伏阵列多传感器故障检测定位方法[J]. 太阳能学报,2018,39(1):110-116.
- [21] 郝思鹏,吴清,李佳伟,等. 基于人工蜂群算法优化 RBF 神经网络的光伏组件故障诊断定位方法[J]. 供用电,2019,36(10):87-92.
- [22] 尹春雨,孙凤杰,范杰清,等. 基于粒子群优化小波神经网络的光伏组件故障诊断方法[J]. 计算机应用,2017,37(S1):106-108,114.
- [23] 宋文海. 基于概率神经网络的光伏阵列故障检测研究[D]. 山东:山东理工大学,2020.
- [24] 张文军,林永君,李静,等. 基于长短期记忆神经网络的光伏阵列故障诊断[J]. 热力发电,2021,50(6):60-68.
- [25] 陶彩霞,王旭,高锋阳. 基于深度信念网络的光伏阵列故障诊断[J]. 中国电力,2019,52(12):105-112.
- [26] 周云峰,刘光宇,李华军,等. 基于支持向量机算法的光伏阵列故障智能检测方法[J]. 制造业自动化,2021,43(6):45-48.
- [27] 郭浩然,李泽滔. 遗传算法优化支持向量机的光伏阵列故障诊断研究[J]. 智能计算机与应用,2019,9(5):58-62.
- [28] 林培杰,陈志聪,吴丽君,等. 一种 PSO-SVM 的光伏阵列故障检测与分类[J]. 福州大学学报(自然科学版),2017,45(5):652-658.
- [29] 张晓鹏,张兴忠. 基于高斯核函数的支持向量机光伏故障诊断研究[J/OL]. 可再生能源,2021(6):760-765.
- [30] 毕锐,丁明,徐志成,等. 基于模糊 C 均值聚类的光伏阵列故障诊断方法[J]. 太阳能学报,2016,37(3):730-736.
- [31] 魏子杰,李爱武,邵帅,等. 基于 FCM-FM 算法的光伏阵列故障诊断[J]. 新能源进展,2018,6(4):297-303.
- [32] 于航,刘阳,王海政,等. 一种基于 3σ 准则与 FCM 算法相结合的光伏电站直流侧故障定位方法[J]. 太阳能,2019(2):50-55.
- [33] 刘圣洋,冬雷,王晓晓,等. 基于高斯核模糊 C 均值聚类的光伏阵列故障诊断方法[J]. 太阳能学报,2021,42(5):286-294.
- [34] 张晓阳,李田泽,张涵瑞,等. 应用于光伏阵列故障诊断的 DA-SOM 算法研究[J/OL]. 电源学报,2021,(6):136-159.
- [35] 叶进,朱健,卢泉,等. 一种基于改进 DBSCAN 算法的光伏故障检测方法[J]. 广西大学学报(自然科学版),2019,44(2):440-447.
- [36] BELAOUT A, KRIM F, MELLIT A, et al. Multiclass adaptive neuro-fuzzy classifier and feature selection techniques for photovoltaic array fault detection and classification[J]. Renewable Energy, 2018, 127.
- [37] Hajji Mansour, Harkat Mohamed Faouzi, Kouadri Abdelmalek, Abodayeh Kamaleldin, Mansouri Majdi, Nounou Hazem, Nounou Mohamed. Multivariate feature extraction based supervised machine learning for fault detection and diagnosis in photovoltaic systems[J]. European Journal of Control, 2020 (prepublish).

(上接第 142 页)

种基于知识关联树的知识服务体系,提出融合“知识”、“资源”、“用户”和“服务”4个核心要素,构建知识结构与资源关联。结合用户学习需求,将需求映射到领域核心知识结构树,为用户推荐精准的学习路径(相关联的核心知识集)和数据资源。

为完善基于知识关联树的知识服务体系,要实现“知识点聚合关联的数据挖掘”的智能化及自动化,完成基于任务式的知识协同学习智能推荐和自动化——“知识点之间的关联度”、“资源对知识点的支持度”以及“用户对知识点和资源的偏好”等是当前的研究热点也是下一步主要的研究工作。

参考文献

- [1] 吴金玉,胡斌,杨坤. 技术创新网络的一个知识协同模型:共生理论与协同学的融合视角[J]. 科技管理研究,2019,39(4):85-91.
- [2] 朱嘉贤,宋向瑛. 基于知识图谱驱动的程序类课程教育技术研究[J]. 现代计算机,2021(20):108-112.
- [3] GEDEN M, EMERSON A, ROWE J, et al. Predictive student modeling in educational games with multi-task learning[C]// Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2020, 34(1): 654-661.
- [4] NABIZADEH A H, LEAL J P, RAFSANJANI H N, et al. Learning path personalization and recommendation methods: A survey of the state-of-the-art[J]. Expert Systems with Applications, 2020, 159: 113596.
- [5] ESSALMI F, AYED L J B, JEMNI M, et al. Generalized metrics for the analysis of E-learning personalization strategies[J]. Computers in Human Behavior, 2015, 48: 310-322.
- [6] 吴正洋,汤庸,刘海. 个性化学习推荐研究综述[J/OL]. 计算机科学与探索:1-23[2021-12-01].
- [7] ASLAN S, REIGELUTH C M. Investigating “The Coolest School in America”: how technology is used in a learner-centered school[J]. Educational Technology Research and Development, 2016, 64(6): 1107-1133.
- [8] 周静虹,夏立新. 多维特征融合的 STM 图书资源标注框架构建研究[J]. 情报科学,2021,39(8):44-52.
- [9] 杨雅都,孙力. 基于区块链技术的在线学习资源管理模式研究[J]. 软件导刊,2021,20(7):149-155.
- [10] 朱嘉贤,傅秀芬等. 基于本体的服务管理代理的研究与实现[J]. 计算机工程与应用,2008(30):90-92,110.