

DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2020.02.011

城市水光互补分布式能源的优化配置研究

Optimal configuration of hydro-solar complementary distributed
power systems in cities

蒋璿¹, 许明珠², 周雅娣²

JIANG Li¹, XU Mingzhu², ZHOU Yadi²

(1. 伯明翰大学, 伯明翰 B152TT; 2. 石家庄铁道大学, 石家庄 050043)

(1. University of Birmingham, Birmingham B152TT, UK; 2. Shijiazhuang
Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

摘 要: 随着化石资源的不断消耗、人类环保意识的增强以及科技的不断进步, 新能源的发展得到了更多的重视, 分布式新能源系统也成为综合能源系统的重点研究对象。基于 Roy Billinton 测试系统(RBTS)模型, 以长江流域某城市为例, 依据该城市用电情况设计了由光伏发电装置和水力发电机组组成的水光互补分布式新能源发电系统模型, 以满足城市的用电需求。使用 PowerFactory 软件对电网配置进行了优化分析, 考虑实践中可能发生的情况, 采用成本最小化法探讨了负荷变化情况下电力系统边际成本的变化, 找到系统的利润最大点, 为电网建设规模和电价的制定提供参考; 以线路安全运行为目标, 对可能出现的故障进行了测试和分析, 确保电网整体运行的安全。

关键词: 分布式可再生能源系统; Roy Billinton 测试系统; 光伏发电装置; 水力发电机组; 电网配置; 边际成本; 电价; 水光互补; 综合能源系统

中图分类号: TK 01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1951(2020)02-0058-05

Abstract: With the continuous consumption of fossil fuels, our environmental protection awareness, science and technology is developing, and renewable energy has received more attention. Distributed renewable energy system have become a key object in integrated energy utilization. Based on Roy Billinton test system (RBTS) model, a hydro-solar complementary distributed power system was designed to meet the electricity demand of a city along the Yangtze River. PowerFactory software was taken to make optimized analysis on power grid configuration. Considering the practical cases, the cost minimization method is used to study the marginal cost varied with load and the maximum profit point of the power system, which can provide a reference for the government to set electricity price. And with the goal of line safety, possible faults were tested and analyzed to ensure the safety of the operation of the overall power grid.

Keywords: distributed renewable power system; Roy Billinton test system; photovoltaic power generation device; hydro-power units; configuration of grid; marginal cost; electricity price; hydro-solar complementation; comprehensive energy system

0 引言

分布式能源(DER)是指由许多小容量的发电机组组成, 向电网不同的点注入电压的分布式电力系统^[1]。分布式能源基础设施建设是城市配电网的关键, 是实现城市可持续发展目标、营造更清洁环境的保证。可再生能源系统发展、化石燃料成本上升、环境保护意识提高等变化的出现都对传统电力系统运行方式的转变提出了更高的要求^[2-3]。

目前, 分布式能源管理存在 2 个主要问题: 一是

新能源装置的建设还达不到经济、高效的要求^[4]; 二是后期运营采用的新能源管理方法对电力供应的要求很高, 供电量要根据用户侧的需求随时调整, 以确保满足客户使用^[5-6]。

近年来, 为了实现城市中 DER 能源管理目标, 很多学者进行了深入的研究, 发表了很多各具特色的研究成果。例如: 分布式能源管理系统(SICAM DEMS)的功能包可以配置许多不同的功能分区, 实现不同城市、不同情况下的不同目标^[7]; 利用报童模型管理储能装置, 配合智能电网实现能源管理^[8]; 基于 IEEE 21451 标准建立的网络控制分布式能源管理系统(NCDEMS)可以将执行器、区域分析仪等应用程序合并到同一系统中, 使用 LabVIEW 软件实现

收稿日期: 2020-01-14; 修回日期: 2020-01-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11972238)

系统的能源管理^[9]。

混合能源系统的研究也有了新进展, Yang等人基于香港气候数据开发了光-风-电池优化模型, 引入电源损耗概率, 采用遗传算法并达到了预期的效果^[10]; Olatomiwa等人提出在使用混合能源向系统供电时, 应用能源管理策略(EMS)来最大化系统效率, 评估了基于不同能源组合的多个独立或并网的混合系统优化配置的例子^[11]; 文献[12]在综合考虑电价的基础上通过计算发电量和储电量来调整能量管理策略, 以实现经济利益最大化。

本文为了满足特定城市的用电需求设计了综合能源配置架构, 配置了水力发电站和太阳能光伏发电装置。使用 PowerFactory 软件进行系统模拟试验, 基于边际成本理论, 以供电成本最小化为目标, 计算不同情况下的利润变化; 以线路安全运行为目标, 研究了故障情况下电网的运行状态, 对电网运行可能出现的故障情况进行分析和测试。

1 边际成本原理

在金融领域中, 边际成本是指生产数量增加1个单位所引起的总成本变化。利用边际成本法获取信息对管理者进行相关的分析和决策具有重要的指导作用。在短期内, 假设生产要素的成本为常数, 则成本可以表示为产量 y 的函数^[13]

$$c(y) = c_v(y) + c_f, \quad (1)$$

边际成本函数为

$$c_m(y) = \frac{dc(y)}{dy}, \quad (2)$$

式中: $c(y)$ 为产量 y 的成本函数; $c_v(y)$ 为变动成本; c_f 为固定成本; $c_m(y)$ 为边际成本。

边际成本的理论曲线如图1所示。当边际成本达到最小值时, 系统可获得最大利润。

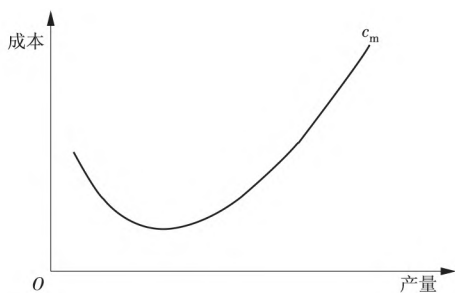


图1 边际成本理论曲线

Fig.1 Theoretical curve of marginal cost

2 Roy Billinton 测试系统(RBTS)模型

RBTS是一种由2个发电站和6条总线组成的模型。发电站的总装机容量为240 MW, 系统的峰值

负荷为185 MW。5条负载总线依据负载能力的不同分别适用于不同特性的区域, 例如: #5总线主要适用于大中型城市, 具有26个负载点, 其峰值负载为20 MW, 拥有多种类型的负载模块; 住宅、政府、工业、商业、办公的峰值负载分别为8.90、5.55、3.70、1.85 MW。系统中的相关数据详见文献[14-15]。RBTS模型如图2所示。

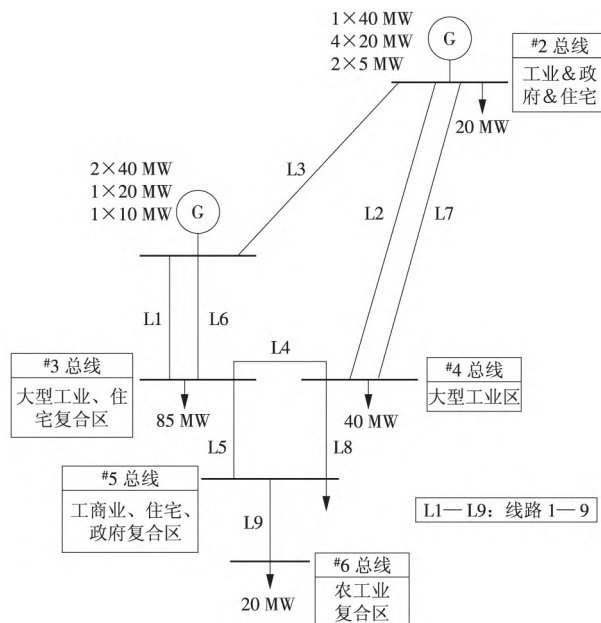


图2 RBTS模型

Fig.2 RBTS model

3 案例研究

3.1 城市配电模型

电力资源的配置不仅要考虑供电成本, 还要考虑当地的资源、人口分布状况以及电厂噪声对居民生活的影响等多种因素。根据地理位置、能源分布、人口密度等, 将长江流域某城市的用电结构分为4个部分(如图3所示), 其中A、D部分分别设计了7个负荷点, B、C部分分别设计了6个负荷点。

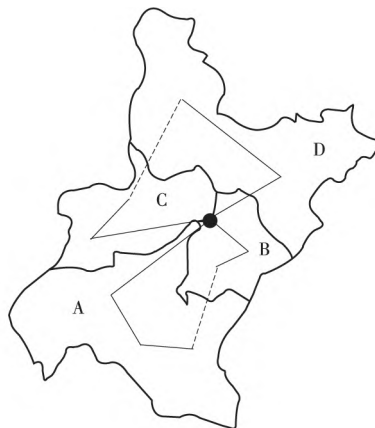


图3 某城市的电网分布

Fig.3 Power grid distribution of a city

在 PowerFactory 中建立一个由光伏发电装置和水力发电机组成的水光互补的分布式发电系统模型,供 #5 总线使用,如图 4 所示。其中,公共配电网能供给电网中其他线路,并为 #5 总线提供备份电源。

根据该城市自然资源的地理位置,水力发电机需建在水资源丰富的 #20(LP20) 和 #7(LP7) 负荷点上。商业区占地面积大,光伏发电装置可以建在建筑物的顶部,节省空间,收集太阳能并转换成电能就地使用,如 #1(LP1), #12(LP12), #14(LP14) 和 #24(LP24) 负荷点。为整个系统的安全考虑,光伏发电装置的容量不能超过系统容量的 20%。本文中分布式发电系统的光伏发电装置和水力发电机额定容量分别设为 4 MW 和 16 MW,具体配置见表 1。

表 1 #5 总线发电机数据汇总

Tab. 1 Summary of data from No. 5 bus generator

发电机 类型	发电机额定 容量/MW	发电机 数量	平均发电价格/ [USD · (MW · h) ⁻¹]
水力发电机	8	2	116.4
光伏发电装置	1	4	280.0

3.2 能源数据分析

该地区太阳能资源不太稳定,因此首先计算太阳能的时间特性,并依照该数据来计算水力资源的

时间特性,以满足所有用户全年的能源需求。由于光照为不稳定能源,在建立发电机模型时,需要考虑时间因素。一年中 6 月到 8 月是夏季,日照高峰时间较长,12 月到次年 2 月是冬季,日照高峰时间较短,该城市一年中各个月份的峰值日照时间见表 2。太阳能的时间特性 T_{pv} 计算公式如下

$$T_{pv} = \frac{t_{ps}}{t_{ps,max}}, \quad (3)$$

式中: t_{ps} 为单日照时间; $t_{ps,max}$ 为一年中最长单日照时间。

表 2 峰值日照时间数据汇总

Tab. 2 Summary of data in peak sunshine hours

月份	峰值日照 / [(kW · h) · m ⁻² · d ⁻¹]	时间特性 / %
1	2.57	52.3
2	2.76	56.1
3	3.24	65.9
4	4.05	82.3
5	4.48	91.1
6	4.63	94.1
7	4.92	100.0
8	4.73	96.1
9	4.05	82.3
10	3.15	64.0
11	2.89	58.7
12	2.52	51.2

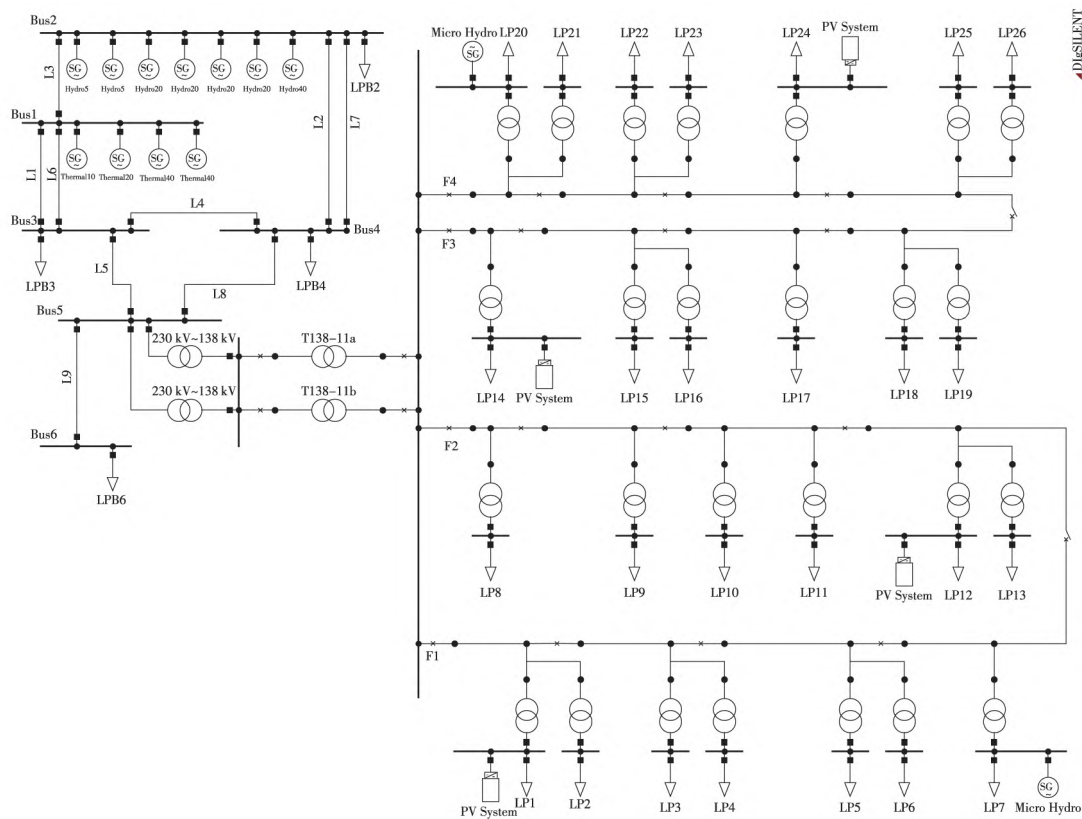


图 4 水光互补的分布式发电系统详细模型

Fig. Detailed model of the hydro-solar complementary distributed power system

南方城市冬季河流一般不会结冰,水力发电受到的影响较小^[16]。本文利用水力发电机配合光伏发电的时间特性,以满足配电需求。水力发电的时间特性 T_{mh} 计算公式为

$$T_{mh} = \frac{P_{total} - P_{pv} T_{pv}}{P_{mh,max}}, \quad (4)$$

式中: P_{total} 为系统总负荷量; P_{pv} 为光伏发电装置产生的电能; P_{mh} 为水力发电机产生的电能。

3.3 负荷需求变化的研究

电力系统在整个使用过程中可能会出现一些参数变动,本案例考虑了实践中可能发生的情况,采用成本最小化法探讨了负荷变化情况下电力系统边际成本的变化。

人口的增长会导致负荷需求不断增长,电力系统的平均使用寿命为 20 年,在这期间人口密度的增加一般不超过 150%,所设计的系统应该有能力应对逐年提高的负荷需求量。在本案例中,负荷需求以 5% 的步长从 100% 增加到 150%,发电机的边际成本数据见表 3(忽略线路损耗)。

表 3 中数据显示,当负荷需求从 100% 增加到 135% 时,水力发电机组的边际成本逐渐降低,超过 135% 后边际成本逐渐增加,这与图 1 的理论曲线趋势一致。这意味着当负荷需求为 135% 时,生产者可以获得水力发电站的最大利润。另一方面,光伏

表 3 不周负荷需求下的发电成本

Tab. 3 Power generation cost under various

load demand		USD/(MW · h)	
负荷需求	水力发电机	光伏发电装置	总计
100%	262.19	166.99	429.18
105%	262.10	170.68	432.78
110%	261.98	174.56	436.54
115%	261.94	177.98	439.92
120%	261.86	181.75	443.61
125%	261.77	187.44	449.21
130%	261.69	189.73	451.42
135%	261.61	192.83	454.44
140%	261.78	193.99	455.77
145%	262.05	194.10	456.15
150%	262.33	194.20	456.53

发电装置在负荷为初始容量时已经达到了该区间内的利润最大值,若负荷需求一直增加,则需要铺设新的光伏发电装置,会导致边际成本增加。综上所述,人口增长幅度在 135% 以内时,为保证利润,应尽量多使用水力发电机,不新增光伏发电装置;人口增长幅度超过 135% 后,应根据具体使用成本另行计算系统的利润,若利润过低可考虑重新置换电网系统。

3.4 系统故障的研究

本文模拟了 4 种运行过程中可能发生的不同类型故障,故障位置如图 5 所示。当故障出现在不同类型的发电机或不同负荷点时,需要首先保障系统

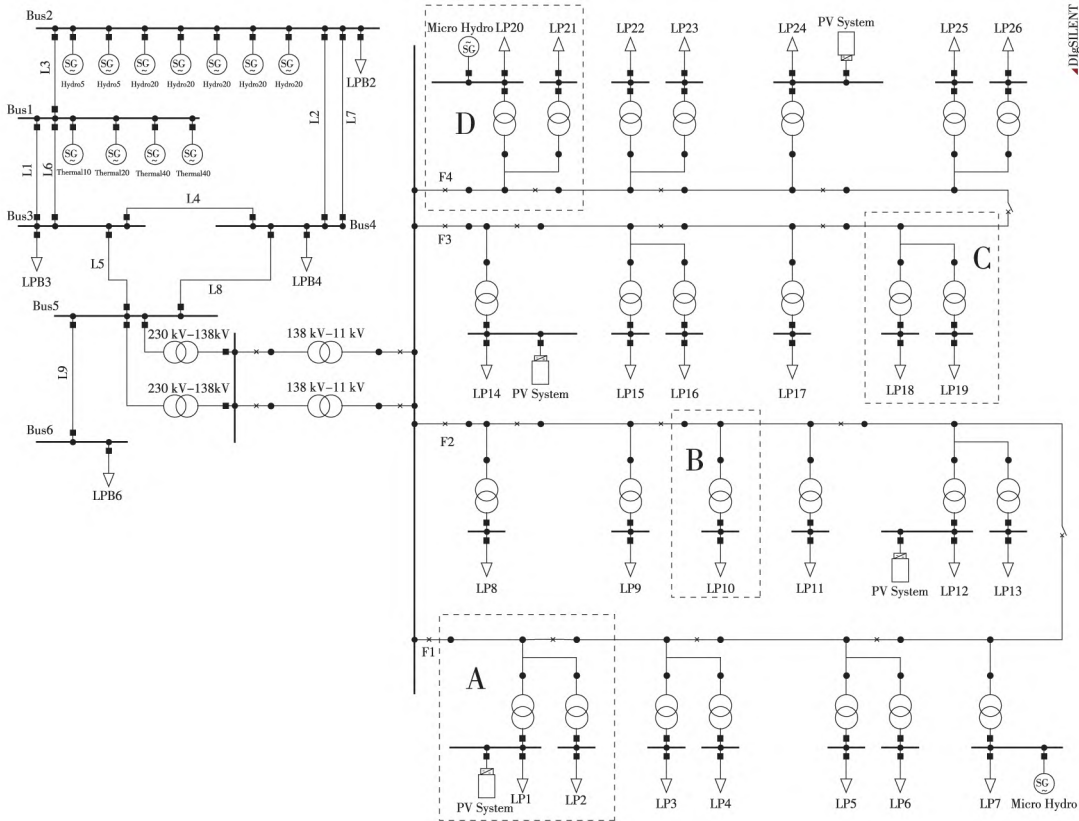


图 5 不同位置的线路故障示意

Fig. 5 Schematic diagram of line fault in different positions

其他部分能安全运行,然后再考虑成本预算。

故障发生时,故障负载点两端的常闭开关会打开,自动切除故障点,线路末端的常开开关将会闭合,以确保系统其余部分正常运行。若故障点位于线路末端,则常闭开关及常开开关将会相互配合,均处于打开状态,将故障点切除,线路其他部分不受故障影响。

当 A 处发生故障时, #1 负荷点(LP1)和 #2 负荷点(LP2)两端的常闭开关打开将故障点切除,线路末端的常开开关关闭,使用相邻线路供电,以维持故障点右侧负荷点的运行。此时,系统的总负荷需求下降了 1.525 0 MW,系统发电量减少了 0.587 2 MW,系统中总体需求量小于供给量,位于线路末端的水力发电站自动减少了发电量。

当 B 处出现故障时, #10 负荷点(LP10)被切除,由于故障位置在输电线路的中间,当故障发生时,右侧常开开关闭合,部分电能传输的方向发生改变,由下方支路供电。为减少线路损耗,2 组水电站的发电配比也会做出相应调整。

当 C 处发生故障时, #18, #19 负荷点(LP18, LP19)被切除,由于故障点位于线路末端,常闭开关及常开开关将会相互配合,均处于打开状态,将故障点切除,线路其他部分不受故障影响。距离故障点最近的水电站适当调整了发电量,减少电力资源的浪费。

当 D 处发生故障时, #20 和 #21 负荷点(LP20, LP21)将被切除,负荷点及其所在支路的水力发电站被一同切除,导致分布式系统中 40% 的发电装置被切除。与另一水电站相比,距离故障位置较近的公共配电网将会弥补这一损失,但公共配电网传输距离较远,为保证系统供电充足,需要增加相应的发电量来弥补传输损失。

根据上述 4 种不同故障的研究可知,一旦电网发生故障,系统可以自行切除故障来保证其余部分正常运行,实际使用中应根据不同问题进行具体分析。

4 结束语

本文依据某城市的电能需求,基于 RBTS 建立了一个由光伏发电装置和水力发电机组成的水光互补的分布式新能源发电系统模型。利用 PowerFactory 软件和边际成本法进行了电网配置的优化分析并针对电网运行中可能出现的不同故障情况给出了有效解决方案。研究结果可以帮助当地电网在设计时选择合适的电网架构和规模,通过计算边际成本可以找到系统的利润最大点,确定最优装机容量,也

可为政府制定电价提供参考。

参考文献:

- [1] TARAZONA M M C, LOPEZ R, PASSELERGUE J. Integration of distributed energy resources in the operation of energy management systems[J]. IEEE PES/IAS Conference on Sustainable Alternative Energy (SAE) 2009.
- [2] YAMAGATA Y, SEYA H. Simulating a future smart city: An integrated land use-energy model[J]. Applied Energy, 2013, 112: 1466 - 1474.
- [3] MILLER M B J M T, SORTOMME E, VENKATA S S. Advanced integration of distributed energy resources[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting 2012.
- [4] LUND H, ØSTERGAARD P A, CONNOLLY D, et al. Smart energy and smart energy systems[J]. Energy 2017, 137: 556 - 565.
- [5] DINCER I, ACAR C. Smart energy systems for a sustainable future[J]. Applied Energy 2017, 194: 225 - 235.
- [6] ATWA Y M, EL-SAADANY E F, SALAMA M M A, et al. Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems 2010, 25(1): 360 - 370.
- [7] MULLER A R H, AUMAYR G. Studies of distributed energy supply systems using an innovative energy management system[C]// Proceedings of 2001 IEEE Power Engineering Society Meeting 2001.
- [8] MASATO M M T, HAO T. Energy management with battery system for smart city[C]// Processing of the 33rd Chinese Control Conference 2014.
- [9] SINGH A, KUMAR A, KUMAR A. Network controlled distributed energy management system for smart cities[C]// 2016 2nd International Conference on Communication Control and Intelligent Systems (CCIS) 2016.
- [10] YANG H, WEI Z, CHENG Z L. Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system[J]. Applied Energy 2009, 86(2): 163 - 169.
- [11] OLATOMIWA L, MEKHILEF S, ISMAIL M S, et al. Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 62: 821 - 835.
- [12] 李艳红, 王兴兴. 光储能综合能源系统设计与优化[J]. 华电技术 2019, 41(11): 76 - 79.
- LI Yanhong, WANG Xingxing. Design and optimization of solar energy storage and charging in integrated energy systems[J]. Huadian Technology 2019, 41(11): 76 - 79.
- [13] KRISCHEN D, STRBAC G. Fundamentals of power system economics[M]. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd 2004.
- [14] BILLINTON R, JONNAVITHULA S. A test system for teaching overall power system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, (下转第 75 页)

- [3] XU J. GA optimized wavelet neural networks [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2006 4099: 1176 – 1180.
- [4] ZWEIRI Y H, WHIDBORNE J F, SENEVIRATNE L D. A three-term backpropagation algorithm [J]. Neurocomputing, 2003 50(1): 305 – 318.
- [5] 朱文龙. 基于遗传算法的 BP 神经网络在多目标优化中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学 2009.
- [6] 朱昱, 黄国立, 黄长征. 基于遗传算法的注塑工艺优化设计[J]. 机械设计与制造工程 2001 30(1): 13 – 14.
- [7] 陈世平, 杜江, 刘艳忠. 基于遗传算法的高速铣削工艺参数优化研究[J]. 工具技术 2014 48(6): 25 – 27. CHEN Shiping, DU Jiang, LIU Yanzhong. Research on optimization of process parameters for high-speed milling based on genetic algorithm [J]. Tool Engineering, 2014 48(6): 25 – 27.
- [8] 方琳, 殷素峰, 赵天婵. 基于 Kriging 模型的 P20H 模具钢激光熔覆多目标优化[J]. 材料保护 2017 50(12): 63 – 66. FANG Lin, YIN Sufeng, ZHAO Tianchan. Multi-objective optimization of P20H die steel laser cladding based on kriging [J]. Materials Protection 2017, 50(12): 63 – 66.
- [9] MA Q, LI Y, WANG J. Effects of Ti addition on microstructure homogenization and wear resistance of wide-band laser clad Ni60/WC composite coatings [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2017, 64: 225 – 233.
- [10] 肖逸锋, 杨燕, 龚伟伟, 等. 真空烧结反应合成 WC 铁基耐磨材料的组织与性能[J]. 材料热处理学报 2017 38(5): 19 – 24. XIAO Yifeng, YANG Yan, GONG Weiwei, et al. Microstructure and properties of WC/Fe wear resistant materials in-situ synthesized by vacuum sintering [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment 2017 38(5): 19 – 24.
- [11] 曾凡检. Ni60 合金真空烧结熔覆涂层的组织和性能[D]. 湘潭: 湘潭大学 2016.
- [12] ZHANG N, YANG X, ZHANG M, et al. A genetic algorithm-based task scheduling for cloud resource crowd-funding model [J]. International Journal of Communication Systems 2018 31(1): 3394 – 3404.
- [13] 王海霞, 王军. 基于遗传算法的板坯连铸凝固模型表面喷雾冷却优化研究[J]. 表面技术 2016 45(2): 194 – 198.
- [14] 樊文欣, 李众, 冯再新, 等. 基于遗传算法的强力旋压成形工艺参数优化[J]. 铸造技术 2017 38(11): 2709 – 2712. FAN Wenxin, LI Zhong, FENG Zaixin, et al. Optimization of process parameters of power spinning based on genetic algorithms [J]. Foundry Technology 2017 38(11): 2709 – 2712.
- [15] 许宏良, 殷苏民. 基于改进 BP 神经网络优化的管道腐蚀速率预测模型研究[J]. 表面技术 2018 47(2): 177 – 181. XU Hongliang, YIN Sumin. Prediction model of pipeline corrosion rate based on improved BP neural network [J]. Surface Technology 2018 47(2): 177 – 181.
- [16] 马廉洁, 曹小兵, 巩亚东, 等. 基于遗传算法与 BP 神经网络的微晶玻璃点磨削工艺参数优化[J]. 中国机械工程 2015 26(1): 102 – 106. MA Lianjie, CAO Xiaobing, GONG Yadong, et al. Process parameter optimization based on BP networks and [J]. China Mechanical Engineering 2015, 26(1): 102 – 106.
- [17] 陆永亚, 李航宇, 金龙. 大直径双辐板滑轮制造工艺研究[J]. 华电技术 2019 41(7): 54 – 57. LU Yongya, LI Hangyu, JIN Long. Study on manufacturing technology of large diameter double-spoke pulley [J]. Huadian Technology 2019 41(7): 54 – 57.
- (本文责编: 白银雷)
-
- 作者简介:
孙书刚(1984—), 男, 山东聊城人, 工程师, 硕士, 从事金属基复合耐磨材料的研究(E-mail: ssg22008@126.com)。
朱昱(1972—), 男, 江苏南通人, 教授, 从事新材料及 CAD/CAM 的研究(E-mail: zhu.y@ntu.edu.cn)。
钱兵(1973—), 男, 江苏南通人, 工程师, 硕士, 从事金属基复合耐磨材料的研究(E-mail: qianbing1973@163.com)。
李小武(1991—), 男, 湖北随州人, 工程师, 从事新材料及其制备工艺(E-mail: lxw1991917@163.com)。
倪红军(1965—), 男, 江苏南通人, 教授, 从事新能源与新材料的研究(E-mail: hjni910@aliyun.com)。
-
- ches [J]. Huadian Technology, 2019 41(11): 62 – 65 84.
- (本文责编: 刘芳)
-
- 作者简介:
蒋璵(1994—), 女, 河北衡水人, 在读硕士研究生, 从事综合能源系统研究(E-mail: ancy_jiang@163.com)。
许鸣珠(1967—), 女, 河北石家庄人, 教授, 工学博士, 从事自动控制系统研究(E-mail: xmzsyz@126.com)。