

## 储能系统与工程

# 基于天牛须搜索遗传算法的风光柴储互补发电系统容量优化配置研究

李益民<sup>1</sup>, 王关平<sup>1</sup>, 马建立<sup>2</sup>, 杨浩<sup>1</sup>, 朱亮<sup>1</sup>, 闫红强<sup>1</sup>, 徐铮<sup>2</sup>, 朱冬琴<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>甘肃农业大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730070; <sup>2</sup>北京智源新能电气科技有限公司, 北京 102628)

**摘要:** 依据设计员经验人为确定微电网建设中的容量配比不仅缺乏足够科学依据, 易于造成投资浪费, 而且还会对后续的经济调度、安全运行等产生负面影响。微电网建设最佳容量配比问题的本质是多目标寻优问题, 各电源容量配比与既定指标之间存在复杂的非线性关系。为此, 本文以某风光柴储互补发电系统设计为牵引, 将容易找到全局最优解且寻优速度较快的天牛须搜索算法 (bettle antennae search algorithm, BAS) 引入到非线性规划性能较好的遗传算法 (genetic algorithm, GA) 中, 在各电源出力模型和既定调度策略基础上, 以兰州某点2018年逐时风速、逐时太阳光辐射强度、逐时环境温度为依据, 以年供电可靠性最高作为首要目标、投资经济性最好为次要目标, 获取最优容量配比方案。算例结果显示, BAS-GA能够给出最优容量配比且具有更快的收敛速度, 每次都能得到相同结果, 稳定可靠; 其BAS-GA结果在负荷缺电率 (loss of power supply probability, LPSP) 为0.2%的情况下, 比0时基本GA数据投资节约66%, 也比2.3%时的基本GA结果效费比更高, 其他基本GA的结果亦均无法与BAS-GA相比。因此, BAS-GA是微电网建设容量配比优化方案获取中避免基本GA陷入局部最优的有效措施之一。

**关键词:** 微电网; 风光柴储互补发电系统; GA; BAS; 最优容量配比; 供电可靠性; 投资经济性

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2019.0247

中图分类号: TM 61

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2020) 03-918-09

## Study on optimal capacity in the construction of wind-solar-diesel-battery hybrid power system based on bettle antennae search algorithm improved genetic algorithm

LI Yimin<sup>1</sup>, WANG Guanping<sup>1</sup>, MA Jianli<sup>2</sup>, YANG Hao<sup>1</sup>, ZHU Liang<sup>1</sup>, YAN Hongqiang<sup>1</sup>,  
XU Zheng<sup>2</sup>, ZHU Dongqin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Mechanical and Electrical Engineering College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; <sup>2</sup>Beijing Intelligent Power & New Energy Electrical Limited Company, Beijing 102628, China)

**Abstract:** Determination the capacity ratio in microgrids (MGs) not only lacks a sufficient scientific basis, but also incurs large investment waste, with detrimental impact on subsequent economic dispatching and safe operation of the MG. Therefore, MG construction faces a multi-objective optimization problem. Moreover, there is a complex nonlinear relationship between the capacity of each type of power source and the given index. To solve the capacity ratio optimization problem, this work incorporates the Bettle Antennae Search (BAS) algorithm into the genetic algorithm (GA). Based on the design of a wind-solar-diesel battery hybrid power system, the BAS algorithm improves the ease and

收稿日期: 2019-11-04; 修改稿日期: 2020-01-12。

基金项目: 甘肃农业大学科技创新基金 (GAU-QDFC-2019-10), 国家自然科学基金 (11762002), 甘肃农业大学盛彤笙创新基金 (GAU-STS-2018-25), 甘肃农业大学科技创新基金 (GAU-XKJS-2018-192)。

第一作者: 李益民 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事新能源发电系统控制研究, E-mail: 916953199@qq.com; 联系人: 王关平, 副教授, 研究方向为农业电气化及其自动化, E-mail: wangguanping@gsau.edu.cn。

speed of finding the global optimal solution and thereby improves the nonlinear planning performance. The input data include the hourly wind speed, hourly solar radiation intensity, and hourly environmental temperature at a certain point in Lanzhou City (Gansu Province, Northwest China), where the power output model has an established dispatching strategy. The primary and secondary goals of the optimal capacity ratio are to maximize the annual power-supply reliability and find the best investment economy, respectively. In all tested cases, the BAS-GA optimized the capacity ratio at faster convergence speed than others and consistently obtained the same result, confirming its stability and reliability. In the BAS-GA with an LPSP of 0.2%, the investment saving was 66%, whereas the basic GA with an LPSP of 0% yielded no investment saving. Moreover, the efficiency/cost ratio obtained by the basic GA (2.3%) exceeded the LPSP. The data of other basic GAs were not comparable with those of BAS-GA. The BAS algorithm effectively prevented the basic GA from falling into the local optima of the capacity- ratio optimization scheme in MG construction.

**Key words:** MG; WSDB-HPS; GA; BAS; optimal capacity ratio; PSR; IE

在经济发展的浪潮下, 能源需求与日俱增。由于传统化石燃料的资源储备、环境容量等限制, 已经越来越不适应可持续发展的时代要求。风能和光能由于其普遍可得性和环境友好性, 近二十年以来, 随着技术的进步已成为新能源研究与应用的主要方向<sup>[1-2]</sup>。在目前新能源发电应用中, 含有许多小型分散电源, 包括小型燃气轮机和小型风力发电机组、光伏电池、燃料电池等, 这类电力系统容量小、可靠性低。因此, 新能源发电系统中通常被加入储能装置和能量转换装置, 在监控、保护装置的管理下, 既可以孤立运行, 又可以与外部联网运行, 被称为微电网<sup>[3-4]</sup>。储能装置的配套可以使新能源发电系统功率输出更为平缓, 避免风、光的随机性给电网调度造成的影响, 能够充分促进分布式电源的大规模接入, 从而提供高质量和更清洁的电力能源供应。风光柴储互补发电系统是近年来微电网建设的主流形式之一<sup>[5-7]</sup>。然而, 满足同一个负荷需求的风光柴储容量配比是多样的。不同的配比不仅关系到项目的投资和经济效益, 也与系统的调度便利化和安全运行息息相关, 更涉及整个新能源发电系统的弃光、弃风局面的转变。传统风光柴储互补发电系统的设计是根据负载的电能需求, 由设计人员的设计经验人为确定其配比关系<sup>[8-9]</sup>。这种确定方法虽然简单, 但缺乏严格的科学依据, 这导致许多微电网系统建设成本偏高、经济调度困难、弃风弃光现象时有发生, 而且系统稳定性欠佳。因此, 在风光柴储互补发电系统设计阶段就能做到容量配比的科学决策, 对其系统建设与安全经济运行意义重大。

本质上来说, 在诸多可能性中寻找符合要求的最佳容量配比是一个寻优问题。为此, 各种新兴的智能算法被引用或改造<sup>[10-11]</sup>, 用于解决微电网建设的容量配比优化问题。例如, 姚天亮等<sup>[12]</sup>提出了风光互补电站的实际经济效益, 其中同时考虑功率限制, 风电站设施遮挡等环境因素, 但是未考虑到极端恶劣条件下的风光均无法输出电能, 系统抗干扰能力较差。周莹<sup>[13]</sup>使用基本遗传算法, 以投资成本最优为准则, 对微电网系统的规划问题进行研究。该方案具有普遍指导意义, 但基本遗传算法容易陷入局部最优解, 实际使用需要加强。类似的, 如于文英等<sup>[14]</sup>也使用遗传算法对风光互补系统容量进行配置, 但未考虑实际使用中所具有的限制问题, 模型较为粗糙。文献[15]则利用多目标万有引力搜索算法对风光柴储容量进行配置, 但其中电源模型较为简单, 万有引力搜索算法也较为容易陷入局部最优而无法获得真正的最优方案。

综上所述, 算法本身能否摆脱局部最优解是目标能否实现的关键所在。本文将容易找到全局最优解和寻优速度较快的天牛须算法 (BAS)<sup>[16-18]</sup>引入到非线性规划较好的遗传算法 (GA)<sup>[13-14]</sup>中, 将供电可靠性最高<sup>[19]</sup>作为首要目标, 经济效益最好<sup>[20]</sup>作为次要目标, 建立仿真平台, 通过算例表明基本GA和BAS-GA的优劣, 旨在获得风光柴储互补发电系统各电源最优容量配比。

## 1 风光柴储互补发电系统模型

风光柴储互补发电系统由风力发电机、光伏发

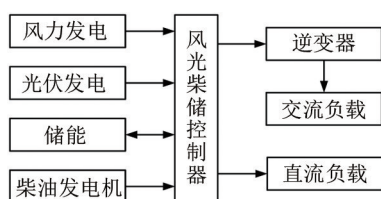


图1 风光柴储互补发电系统结构图

Fig. 1 The structure of WSDB-HPS

电、储能装置、柴油发电机、交流负载和直流负载等部分组成，风光柴储互补发电系统的结构如图1所示。

### 1.1 风力发电输出模型

风力发电是风能利用的主要形式，主要部件为风机。风机输出功率依据厂家指导手册中风速-功率曲线确定，但指导手册中的风速指的是风机轮毂处风速。在实际测量中，一般可以获得距离地面10 m的风速数据，经式(1)换算得到风机轮毂处风速<sup>[15]</sup>

$$\frac{v}{v_{\text{ref}}} = \left( \frac{H}{H_{\text{ref}}} \right)^{\alpha} \quad (1)$$

式中， $H$ 为实际高度，指风机轮毂轴心高度，本文中取23 m； $H_{\text{ref}}$ 为标准高度，一般取10 m； $v_{\text{ref}}$ 为标准风速，指标准高度下风速大小，单位为m/s； $\alpha$ 为地表粗糙程度，一般取0.3。根据风速-功率曲线得到风机输出功率<sup>[15]</sup>

$$P_{\text{wt}} = \begin{cases} 0 & v \leq v_i \\ \eta_{\text{wt}} P_{\text{Nwt}} & v_i < v \leq v_N \\ P_{\text{Nwt}} & v_N < v \leq v_p \\ 0 & v > v_p \end{cases} \quad (2)$$

式中， $P_{\text{wt}}$ 为风机实时输出功率； $v_i$ 为切入风速； $v_N$ 为额定风速； $v_p$ 为切除风速； $\eta_{\text{wt}}$ 为风机输出功率与额定功率的比值； $P_{\text{Nwt}}$ 为风机额定功率。

### 1.2 光伏阵列出力模型

光伏发电是将太阳能直接转化为电能的一种发电形式，其核心组件是太阳能电池板。太阳能电池板输出功率 $P_{\text{pv}}$ 和太阳光照射强度 $E_{\text{ac}}$ 、环境温度公式模型<sup>[15]</sup>见式(3)

$$P_{\text{pv}} = \zeta_{\text{pv}} P_{\text{stc}} \frac{E_{\text{ac}}}{E_{\text{stc}}} \left[ 1 + k(T_c - T_{\text{stc}}) \right] \quad (3)$$

式中， $\zeta_{\text{pv}}$ 为太阳能电池板输出功率在实际条件下与标准测试条件下的比值，一般取0.8。 $P_{\text{stc}}$ 为标准测试条件下（25.0 °C，1.0 MPa）太阳能电池板额定输出功率； $E_{\text{stc}}$ 为标准测试条件下的光照强度，取值为1 kW/m<sup>2</sup>； $k$ 为温度系数，取-0.4%/°C； $T_{\text{stc}}$ 为

测试参考温度，一般取值为25 °C； $T_c$ 为太阳能电池板表面摄氏温度。

### 1.3 储能设备出力模型

储能设备有效地解决了新能源发电中供需不平衡问题。本文中采用蓄电池作为储能设备模型，蓄电池具有充电和放电两种状态模型<sup>[15]</sup>，具体计算式见式(4)

$$\begin{cases} P_{\text{bat, charge}} = \gamma_{\text{bat}} (P_{\text{re}} - P_{\text{load}}) & C_{\text{bat}}(t + \Delta t) = C_{\text{bat}}(t) + P_{\text{bat, charge}} \Delta t & P_{\text{re}} > P_{\text{load}} \\ P_{\text{bat, discharge}} = \lambda_{\text{bat}} (P_{\text{load}} - P_{\text{re}}) & C_{\text{bat}}(t + \Delta t) = C_{\text{bat}}(t) - P_{\text{bat, discharge}} \Delta t & P_{\text{re}} < P_{\text{load}} \end{cases} \quad (4)$$

式中， $C_{\text{bat}}$ 为蓄电池容量； $P_{\text{bat, charge}}$ 为蓄电池充电功率； $P_{\text{bat, discharge}}$ 为蓄电池放电功率； $\gamma_{\text{bat}}$ 为蓄电池充电效率； $\lambda_{\text{bat}}$ 为蓄电池放电效率； $P_{\text{re}}$ 为风机输出功率与太阳能板的输出功率之和； $P_{\text{load}}$ 为负载功率； $\Delta t$ 为间隔时间，取1 h； $t$ 指一年中某个时刻。

### 1.4 柴油发电机模型

柴油发电机具有操作简便、启动迅速、较快达到全负荷运行的特点。在实际工程中，可能会出现光照不足和风资源匮乏现象，风光发电机组无法输出充足电能且蓄电池中剩余电能低于下限值，柴油发电机用于保证负载运行。柴油发电机燃料成本与输出功率模型<sup>[14]</sup>见式(5)

$$C_F = aP_{\text{DG}}^2 + bP_{\text{DG}} + c \quad (5)$$

式中， $C_F$ 为柴油发电机燃油费； $P_{\text{DG}}$ 为柴油发电机输出功率； $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为柴油燃料曲线系数， $a$ 、 $b$ 、 $c$ 一般由厂家提供，本文中取值 $a=0.0071$ 、 $b=0.2333$ 、 $c=0.4333$ 。

## 2 系统优化设计算法和优化策略

### 2.1 系统能量调度策略

根据负载的特性和风光柴储互补发电系统特点，确定风光柴储互补发电系统的能量调度策略。具体能量调度策略如下（能量调度策略如图2所示）：

(1) 计算风、光输出电能之和与负载功率的差值 $\Delta P = P_{\text{re}} - P_{\text{load}}$ ；

(2) 检测蓄电池中剩余电能，判断 $\Delta P$ 是否大于0。如果 $\Delta P > 0$ ，进入步骤(3)，反之进入步骤(4)；

(3) 若蓄电池中剩余电量超过上限值，蓄电池停止充电，光伏限制功率输出，风机启动卸负荷

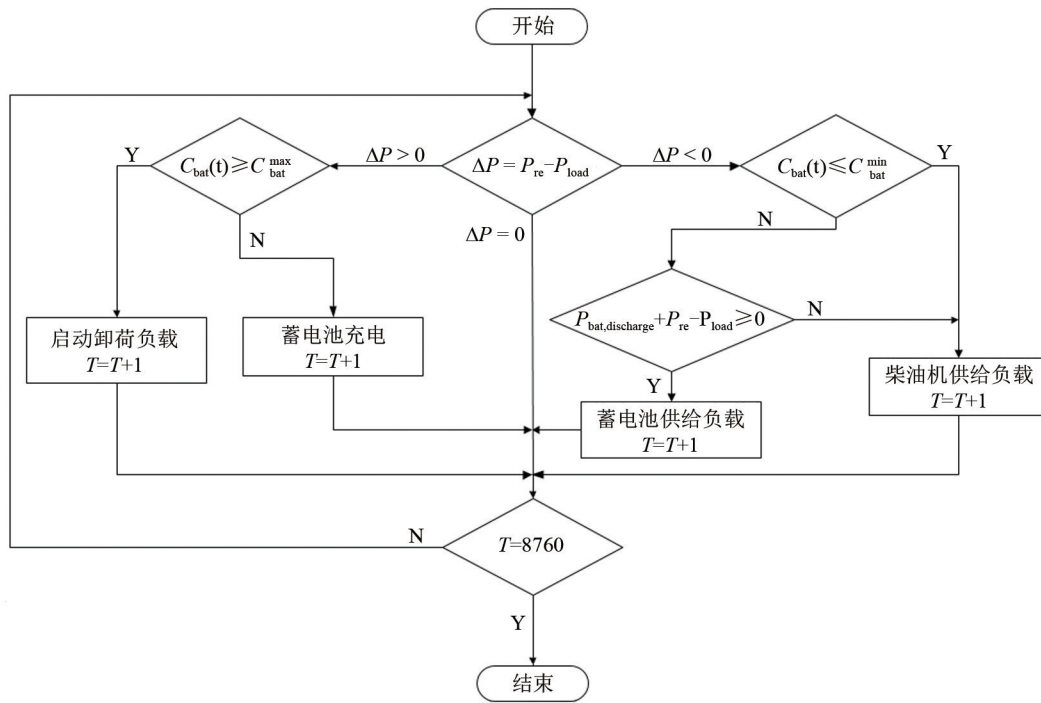


图2 风光柴储互补发电系统控制策略图

Fig.2 WSDDB-HPS control strategy structure

载，确保微电网系统的安全运行；若蓄电池中剩余电量未达到上限值，则蓄电池进行充电；

(4) 若蓄电池中剩余电量达到下限值或蓄电池输出功率与风光输出功率之和小于负载功率，调度并开启柴油发电机，保证负载供电。否则进入步骤(5)；

(5) 若蓄电池剩余电量未达到下限值且风光储输出功率之和大于负载功率，只需要蓄电池放电弥补功率缺值，不开启柴油发电机。

## 2.2 风光柴储互补发电系统优化设计

系统优化的目标是风光柴储各电源在满足约束条件下，将供电可靠性最高作为首要目标、经济效益最好为次要目标。因此，最终的优化结果是求得满足目标前提下的风机数目  $N_{wt}$ 、太阳能电池板数目  $N_{pv}$  和蓄电池数目  $N_{bat}$  的最优组合。

### 2.2.1 供电可靠性

供电可靠性<sup>[15]</sup>由能源浪费率 (energy wastage rate, EWR) 和负荷缺电率两个部分组成。当供电可靠性数值大于零时，表示能源浪费率；当供电可靠性数值小于零时，表示负荷缺电率。具体计算方式见式(6)

$$\max \beta(t) = 1 - \sum_{t=1}^{8760} [LPSP(t) + EWR(t)] \quad (6)$$

负荷缺电率是指在给定时间内，互补发电系统无法满足负载需求的概率。在风光柴储互补发电系统中，某时的风力发电设备、光伏发电设备和蓄电池输出功率之和小于满足负载所需功率。用式(7)计算负荷缺电率

$$LPSP(t) = \begin{cases} \frac{P_{re} + P_{bat, discharge} - P_{load}}{P_{load}} & P_{re} + P_{bat, discharge} < P_{load} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

能源浪费率是指在给定时间内，互补发电系统输出电能大于负载需求的概率。在风光柴储互补发电设备系统中，某时的风光输出功率之和最大值大于负载功率，且蓄电池达到全荷状态时，使用式(8)计算

$$EWR(t) = \begin{cases} \frac{P_{re} - P_{load}}{P_{load}} & P_{re} > P_{load} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

### 2.2.2 投资经济性

风光柴储互补发电系统的容量配置次要目标是经济效益最好。经济效益最好代表风光柴储的投资额度最小。投资额包含设备初始投资、运营维护费用两部分费用，其中运营维护费用含有柴油发电机的燃料费。计算式如式(9)

$$\min C_{TOC} = C_{NINV} + C_{OPEX} \quad (9)$$



式中,  $C_{\text{TOC}}$  为风光柴储互补发电系统总成本;  $C_{\text{NINV}}$  为设备初始投资;  $C_{\text{OPEX}}$  为设备运营维护成本。

### (1) 设备初始投资

设备初始投资指的是项目初始需要的设备成本。这是各项经济投资中数目最大的部分, 也是最直接的一部分。但设备初始投资为一次性投资, 不需要二次计算。考虑到部分设备具有回收利用的价值, 在初始投资中包含设备折旧系数, 具体计算式如式(10)所示

$$C_{\text{NINV}} = \sum_{i=1}^4 N_i \left[ C_{i,\text{insi}} P_i \frac{r(1+r)^m}{(1+r)^m - 1} \right] \quad (10)$$

式中,  $i$  为电源设备种类, 包含风机、光伏、蓄电池、柴油发电机4种;  $N_i$  为第  $i$  种电源的数目;  $C_{i,\text{insi}}$  为第  $i$  种电源的单价, 单位为元;  $P_i$  为第  $i$  种电源的输出功率;  $r$  为设备折旧率, 本文取8%;  $m$  为设备折旧年限, 本文取20年。

### (2) 运营维护费用

风光柴储互补发电系统运营过程中需要维护, 确保设备运行正常, 运营维护费用与电源输出功率成正比

$$C_{\text{OPEX}} = \sum_{i=1}^4 P_i(t) * k_i \quad (11)$$

式中,  $P_i(t)$  为在全年某个时刻  $t$ , 第  $i$  个电源的输出功率总和;  $k_i$  为第  $i$  个电源的维护成本系数, 单位为元/kW。

### 2.2.3 约束条件

根据负载和元件特性, 建立系统的约束函数, 使风光柴储互补发电系统既能保证负载要求, 又能使发电曲线较为光滑。

#### (1) 风光柴储数目约束

$$\begin{cases} N_{\text{wt}} \leq N_{\text{wt,max}} \\ N_{\text{pv}} \leq N_{\text{pv,max}} \\ N_{\text{bat}} \leq N_{\text{bat,max}} \\ N_{\text{DG}} \leq N_{\text{DG,max}} \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $N_{\text{wt,max}}$ 、 $N_{\text{pv,max}}$ 、 $N_{\text{bat,max}}$ 、 $N_{\text{DG,max}}$  指风机、光伏、蓄电池、柴油发电机各电源最大安装数目。在实际工程中, 占地、环保、地形等诸多条件对工程的相关数据会产生限制, 需要提前规划各电源能容纳的最大数目。

#### (2) 蓄电池容量约束

$$C_{\text{bat}}^{\min} \leq C_{\text{bat}} \leq C_{\text{bat}}^{\max} \quad (13)$$

式中,  $C_{\text{bat}}^{\min}$  为蓄电池容量约束下限值, 取值为蓄电池总容量5%;  $C_{\text{bat}}^{\max}$  为蓄电池容量约束上限值,

取值为蓄电池总容量的95%。

## 3 基于天牛须搜索算法改进的遗传算法(BAS-GA)

### 3.1 遗传算法

风光柴储系统设计的核心是其容量配比问题。然而, 解决这一问题的前提是: 对象众多、约束复杂、规则统一的模型难以建立以及搜索必须要有继承性和自适应性。而这些拦路虎却是基本GA优点的体现。

基本GA<sup>[13-14]</sup>是一个生物进化过程的数学模型, 它模仿达尔文的生物进化理论的自然选择和遗传机制, 也是通过自然进化过程的模拟寻求最佳解决方案的方法。遵循优胜劣汰、适者生存的法则。因此, 显然可以预先随机选择若干组合作为种群, 评价其适应性, 然后产生子代, 进而变异, 进一步评价其适应性。这样往复迭代, 就有可能求得本研究所需的最优解。然而, 由于初始种群的随机性、种群数量的限制、变异概率和方法的局限性以及适应性评价自身的多样性等诸多环节的不确定, 通常导致基本GA容易陷入局部最优, 可能无法真正得到全局最优解。因此, 要在实践中更为可靠地使用GA, 显然需要更有力的搜索方法, 使得GA在迭代过程中能够敏感地找到最正确的方向从而不断前进。对此, 本文计划将天牛须搜索算法引入基本GA。

### 3.2 天牛须搜索算法(BAS)

天牛须搜索算法<sup>[16-18]</sup>是近年来提出的算法, 该算法是基于天牛觅食原理启发得到的智能优化算法。在空间中, 食物气味在每个点的值各不相同, 天牛左右须只能采集自身附近两点的气味值, 比较采集到的气味值大小, 天牛会继续向气味值大的方向前进, 最终寻找到食物。BAS同遗传算法类似, 对于某一方面研究不需要深入、只需要目标函数和约定条件即可对种群进行高效寻优<sup>[22]</sup>。

本文采用简化模型假设描述天牛, 假设如下(模型简单示意图如图3所示): ①天牛进行下一步时, 头朝向随机; ②天牛的左右须均匀分布在质心两边; ③天牛步长与两须之间的比值为固定常数, 即大天牛走大步, 小天牛走小步。

对于一个多维的空间优化问题, 核心编程如下[天牛须算法流程图如图4(a)所示]:

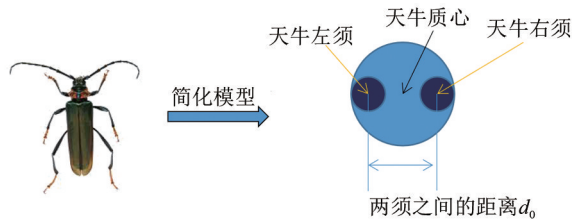


图3 天牛简易模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of simple model of beetle

```

1 for  $i = 1:n$ 
2.  $d_0 = \text{step}/c$ ;
   //确定天牛步长
3.  $\text{dir} = \text{rands}(n,1)$ ;  $\text{dir} = \text{dir}/\text{norm}(\text{dir})$ ;
   //天牛数据模型进行归一
4.  $x_i = x + d_0 * \text{dir}/2$ ;
    $\text{fleft} = f(x_i)$ ; //天牛左须采集到的信息数据
5.  $x_r = x - d_0 * \text{dir}/2$ ;  $\text{fright} = f(x_r)$ ;
   //天牛右须采集到的信息数据
6. if  $\text{fleft} < \text{fright}$ 
    $x = x + \text{step} * \text{normal}(x_i - x_r)$ ; //天牛下一步的朝向
7. else  $x = x - \text{step} * \text{normal}(x_i - x_r)$ ;
8. end if
9. end

```

其中，天牛质心用  $x$  表示；天牛左须用  $x_l$  表示；天牛右须用  $x_r$  表示； $d_0$  表示两须之间的距离，一般取 10；天牛的步长用  $\text{step}$  表示，取数值为 1； $n$  表示迭代次数，一般取 20。

### 3.3 基于天牛须搜索算法改进的遗传算法(BAS-GA)

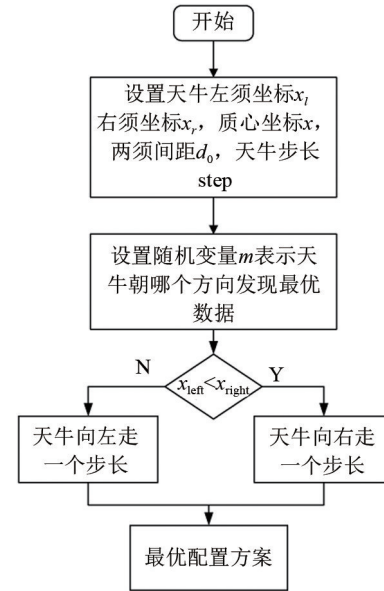
本文采用改进遗传算法可以避免基本 GA 容易陷入局部最优的问题，得到准确的容量配置。BAS-GA 实现流程如图 4(a)、4(b)所示，具体实现步骤如下：

(1) 初始化：定义种群大小  $N_{\text{pop}}=150$ ，迭代次数  $T=200$ ，交叉概率  $p_m=0.8$ ，变异概率  $p_c=0.05$ ；

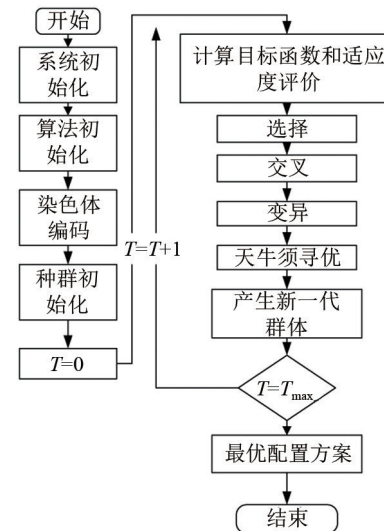
(2) 染色体编码：将风机、光伏、蓄电池的数目由十进制数转换为二进制数，对转换后的二进制数进行染色体编码，每种编码长度均为 5。染色体由  $L=N_{\text{wt}}+N_{\text{pv}}+N_{\text{bat}}$  构成，染色体总长度  $L=15$ ；

(3) 将种群内的目标函数值转换为对应的适应度值，适应度值取均值，目标函数包括供电可靠性和经济效益两个部分；

(4) 对种群内部进行选择操作，选择采用轮盘



(a) 天牛须搜索算法流程图



(b) 基于天牛须搜索算法改进的遗传算法流程图

图4 基于天牛须搜索算法改进的遗传算法

Fig.4 Improved GA based on BAS

赌选择算法<sup>[21]</sup>，个人选择的可能性  $p_i$  与其适应价值  $q_i$  及个人选择的可能性成正比

$$p_i = q_i / \sum_{i=1}^{N_{\text{pop}}} q_i \quad (14)$$

(5) 对种群内进行交叉操作，种群内的数据都是二进制数，采用的是单点交叉，相交点不确定，两个个体的组成部分在相交点之前或之后交换，从而产生两个新的个体；

(6) 对种群内进行二进制变异操作，根据事先确定的转型可能性确定群体内是否有转型，如果没

有转型的可能性,则确定群体内随机选择个人的转型;

(7) 选取  $N_{\text{pop}}/3$  的个体,随机令某种电源的数量增加1或者减少1,其余电源的数量不变,变化后的电源作为天牛须中的个体重新计算,计算目标函数适应值,如果此后的适应值比变化之前的适应值小,新个体替换之前个体;

(8) 重复(3)~(7)步直至迭代结束。

## 4 算例分析

### 4.1 系统数据及算法使用概述

利用NASA数据库,获取兰州某点(36°03'N, 103°40'E)全年8760 h的风速、太阳光辐射强度、环境温度<sup>[23]</sup>。

#### 4.1.1 风速数据及风机参数

一年逐时风速数据如图5,单台30 kW风机平均每天输出电能129 kW·h。

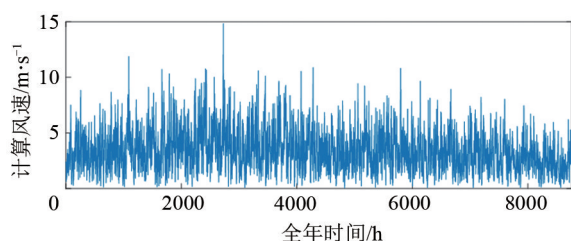


图5 计算点2018年全年逐时风速数据<sup>[23]</sup>

Fig.5 Hourly wind speed data of calculation point in 2018<sup>[23]</sup>

风力发电机型号为H13.2-30,风机额定容量为30 kW;切入风速为3 m/s;额定风速为11 m/s;切出风速为25 m/s;安全风速为50 m/s;风机售价270000元;运行成本18元/(kW·年)。

#### 4.1.2 光照强度数据及光伏参数

全年太阳光光照强度和环境温度数据分别为图6、图7。太阳能电池板选用0.3 kW单晶硅电池板<sup>[24]</sup>,

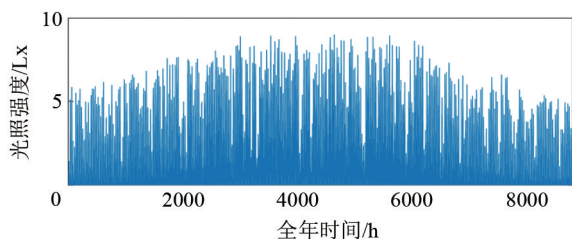


图6 计算点2018年全年逐时光照数据<sup>[23]</sup>

Fig.6 Hourly sunlight illumination data of calculation point in 2018<sup>[23]</sup>

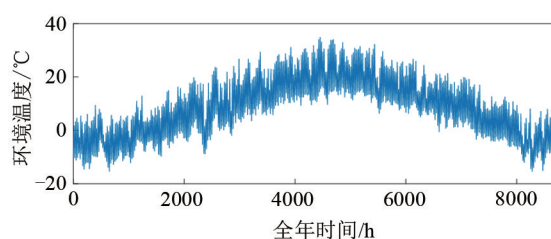


图7 计算点2018年全年逐时环境温度数据<sup>[23]</sup>

Fig.7 Hourly ambient temperature data of calculation point in 2018<sup>[23]</sup>

太阳能电池板面积为1.63 m<sup>2</sup>;工作电压32.2 V;工作电流9.32 A;短路电流为9.97 A;开路电压为39.7 V;组件效率为18.44%;额定功率为0.3 kW;输出效率为80%;单价为680元/块;运营成本为6.6元/(kW·h)。

#### 4.1.3 蓄电池和负载参数

蓄电池采用磷酸铁锂电池<sup>[25]</sup>,单块电池标称电压为25.6 V;额定容量200 A·h;放电深度为90%;充、放电效率均为85%;单价6500元/块;运维成本1.5元/(kW·h)。负载采用30 kW,进行24 h不间断输出,每天需要总电能为720 kW·h。

### 4.2 数据分析

根据图8结果显示,GA迭代65次后趋于稳定,BAS-GA迭代62次后趋于稳定(图8所示结果为本研究进行过程中所获得的最悲观参数,一般情况下,BAS-GA的迭代次数不会超过基本GA的2/3,常见的约为其50%左右)。由此可见,改进BAS-GA比基本GA的收敛速度更快,且更为可靠。

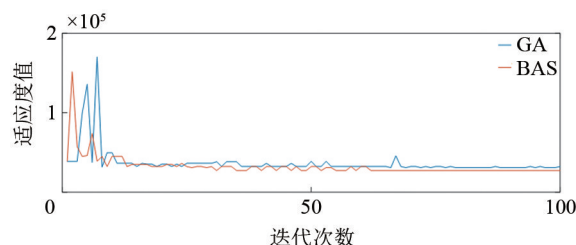


图8 遗传算法和改进遗传算法结果比较

Fig.8 Comparison of GA and BAS-GA

表1中表示风光柴储容量优化的结果,方案1、方案2、方案3中数据包含了各电源的使用数目、经济成本、负荷缺电率。方案1是BAS-GA的结果,方案2和方案3则为基本GA的结果。其中,方案1的负荷缺电率为0.2%,经济成本为10.9432万元;方案2的负荷缺电率为0,而经济成本则为



表1 风光柴储容量配置

Table 1 WSDDB-HPS capacity ratio

方案	风机 /台	太阳能电 池板/块	蓄电池 /块	柴油发电 机/台	经济成本 /万元	负荷缺 电率/%
1	2	160	24	1	10.9432	0.2
2	10	120	28	1	32.1222	0
3	2	100	30	1	10.7843	2.3

32.1222万元；方案3的负荷缺电率略有降低，为2.3%，经济亦略降为10.7843万元。因此，方案1与方案2相比，负荷缺电率只提升了0.2%，但其年经济成本却增加了194%，故效费比较小。方案1与方案3相比，负荷缺电率增加了2.1%，但年经济成本只提高了1500元左右，投资增幅仅为0.015%。因此，方案1的效费比更有价值，其数据也是本案例的最优结果。

## 5 结 论

本文使用NASA数据库，获取兰州某点（36°03'N, 103°40'E）全年共8760小时的风速数据、太阳辐射强度和环境温度。根据获取到的风速数据和风机参数得出单台风机逐时平均输出电能，依据太阳辐射强度、环境温度和太阳能电池板参数计算出单块太阳能电池板逐时平均输出电能，利用风机输出电能和太阳能电池板输出电能与所需负载之间的差值确定蓄电池的充电电能和放电电能。为了防止出现光照不足及风资源极度匮乏的天气情况，本系统选用柴油发电机作为备用电源以满足负载需求，并使柴油发电机能够独立满足负荷的电能需求。本文选用供电可靠性和投资经济性两个指标，通过综合分析确定目标函数，将目标函数作为基本GA和BAS-GA的衡量指标。

所给算例结果表明，BAS-GA所获系统中各电源功率配比数据比基本GA结果更为贴近设定的指标，同时也发现，一般情况下，BAS-GA的迭代速度均比基本GA明显加快。因此，BAS-GA是风光柴储互补发电系统建设中科学容量配比获取的有效手段，有进一步推广使用的价值。

## 参 考 文 献

[1] 袁益, 舒展. 中美能源安全现状比较与启示[J]. 中外能源, 2019, 24(2): 1-14.  
YUAN Y, SHU Z. Comparison of energy security of china and the US and the inspirations[J]. Sino-Global Energy, 2019, 24(2): 1-14.

[2] 王蕾. 新能源产业发展回顾与展望[J]. 中国发展观察, 2019(16): 31-35.  
WANG L. Retrospect and prospect of new energy industry development [J]. China Development Observation, 2019(16): 31-35.

[3] Guangdong University of Technology. Researchers submit patent application, "Alternating current/direct current home smart micro-grid coordination system and operation method there of", for approval (USPTO 20180342869[N]. Energy Weekly News, 2018.

[4] JITENDER K, PRASENJIT B. A novel approach for determination of power quality monitoring index of an ac micro-grid using fuzzy inference system[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering, 2018, 42(4): doi: 10.1007/s40998-018-0087-Z

[5] 郭伟, 张建成, 李翀, 等. 针对并网型风储微网的飞轮储能阵列系统控制方法[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(5): 810-814.  
GUO W, ZHANG J C, LI C, et al. Control method of flywheel energy storage array for grid-connected wind-storage micro-grid[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(5): 810-814.

[6] 刘旭峰, 张继红, 吴振奎. 一种混合储能微电网中对频率的下垂控制方法[J]. 电气自动化, 2018, 40(6): 13-15+44.  
LIU X F, ZHANG J H, WU Z K. Frequency droop control method in the hybrid energy storage micro-grid[J]. Electrical Automation, 2018, 40(6): 13-15+44.

[7] 李瑞民, 张新敬, 徐玉杰, 等. 风光互补系统中混合储能容量优化配置研究[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(3): 512-522.  
LI R M, ZHANG X J, XU Y J, et al. Research on optimal configuration of hybrid energy storage capacity for wind-solar generation system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(3): 512-522.

[8] 李湃, 黄越辉, 王跃峰, 等. 含抽蓄电站的多端柔性直流电网风光接入容量配比优化方法[J]. 中国电力, 2019, 52(4): 32-40.  
LI P, HUANG Y H, WANG Y F, et al. Optimization of wind and solar power capacity proportion integrated in multi-terminal VSC-HVDC system with a pumped storage power station[J]. Electric Power, 2019, 52(4): 32-40.

[9] 范斌, 周德群. 中央与地方政府促进产业发展的关系——基于光伏产业准入规制政策的演化博弈分析[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2017, 19(3): 8-14.  
FAN B, ZHOU D Q. Research on the industry development relationship between the central and local government—An evolutionary game analysis on the policy of entry regulation based on PV industry[J]. Journal of Beijing Institute of Technology(Social Sciences Edition), 2017, 19(3): 8-14.

[10] 曹阳, 黄越辉, 袁越, 等. 基于时序仿真的风光容量配比分层优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1072-1078.  
CAO Y, HUANG Y H, YUAN Y, et al. Stratified optimization algorithm for optimal proportion of wind and solar capacity based on time sequence simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1072-1078.

[11] 张进峰, 杨涛宁, 马伟皓. 基于多目标粒子群算法的船舶航速优化[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(4): 787-794.  
ZHANG J F, YANG T N, MA W H. Ship speed optimization based on multi-objective particle swarm algorithm[J]. Journal of System



- Simulation, 2019, 31(4): 787-794.
- [12] 姚天亮, 吴兴全, 李志伟, 等. 计及多约束条件的风光互补容量配比研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 126-132.
- YAO T L, WU X Q, LI Z W, et al. Research on complementary capacity ratio of wind power and photovoltaic considering multiple constraints [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 126-132.
- [13] 周莹. 计及风电的配电网扩展规划研究[J]. 煤炭技术, 2012, 31(1): 50-52.
- ZHOU Y. Research of distribution network expansion planning with wind power[J]. Coal Technology, 2012, 31(1): 50-52.
- [14] 于文英, 王玖芳, 马新秀, 等. 改进遗传算法的风、光互补发电系统优化设计[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(1): 25-129, 185
- YU W Y, WANG W L, MA X X, et al. Optimization design of hybrid wind-PV system based on improved genetic algorithm[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2018, 37(1): 25-129, 185.
- [15] 袁晓玲, 程淋伟, 鲁丽娟, 等. 基于万有引力搜索算法的微电网风光储能容量优化配置[J]. 电力需求侧管理, 2017, 19(6): 14-19.
- YUAN X L, CHENG L W, LU L J, et al. Configuration optimization of wind-solar-storage system in microgrid based on GSA[J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(6): 14-19.
- [16] 周田江, 钱谦, 伏云发. 融合模拟退火和自适应的天牛须搜索算法[J]. 通信技术, 2019, 52(7): 1626-1631.
- ZHOU T J, QIAN Q, FU Y F. Fusion simulated annealing and adaptive beetle antennae search algorithm[J]. Communications Technology, 2019, 52(7): 1626-1631.
- [17] 陈馨凝, 刘辉, 刘雨薇, 等. 基于BAS-BP模型的电缆阻水性评估研究[J]. 湖北工业大学学报, 2019, 34(4): 35-39.
- CHEN X N, LIU H, LIU Y W, et al. Research on cable water resistance based on bas-bp model[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2019, 34(4): 35-39.
- [18] 卢光辉, 滕欢, 廖寒逊, 等. 基于改进天牛须搜索算法的分布式电源选址定容[J]. 电测与仪表, 2019, 56(17): 6-12.
- LU G H, TENG H, LIAO H X, et al. Location and sizing of distributed generation planning based on the improved beetle antennae search algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(17): 6-12.
- [19] 钱一晨, 金晶. 可再生能源混合系统电源优化配置综述[J]. 太阳能学报, 2012, 33(S1): 98-102.
- QIAN Y C, JIN J. Summary of optimal allocation of renewable energy hybrid system power[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2012, 33(S1): 98-102.
- [20] 刘峪涵, 汪泓, 谭阳红. 并网型微电网多目标容量优化配置及减排效益分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(9): 70-75.
- LIU Y H, WANG F, TAN Y H. Multi-objective optimal capacity configuration and emission reduction benefit analysis of grid-connected microgrid[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2017, 29(9): 70-75.
- [21] 王芳, 邱玉辉. 一种引入轮盘赌选择算子的混合粒子群算法[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2006(3): 93-96.
- WANG F, QIU Y H. A hybrid particle swarm algorithm with roulette selection operator[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science), 2006(3): 93-96.
- [22] JIANG X Y, LI S. BAS: Beetle antennae search algorithm for optimization problems[J]. ResearchGate, 2017, doi: 10.5430/ijrc.v1n1p1.
- [23] National aeronautics and space administration[EB/OL]. [2020-01-11]. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
- [24] 无锡佳洁科技有限公司[EB/OL]. [2020-01-11]. [www.jajesolar.cn/jj/265-300WMonoh.html](http://www.jajesolar.cn/jj/265-300WMonoh.html).
- [25] 东莞市钜大电子有限公司[DB/OL]. [2020-01-11]. [www.juda.cn/product/358.html](http://www.juda.cn/product/358.html).