

# 风光气储联合发电最优容量配比问题研究

郝晓弘<sup>1</sup>, 郝雪君<sup>1</sup>, 周强<sup>2</sup>, 马明<sup>2</sup>, 马志程<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050; 2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院风电技术中心, 兰州 730070)

**摘要:**开发和利用农村的风能、光能、沼气是解决偏远农村地区用电量快速增加和偏远山区供电问题的有效途径,该文针对3种可再生能源和储能的联合发电问题,通过研究它们之间的协调互补性,提出了一种新型的“风光气储”多能源互补的微电网供电系统,在该系统中因地制宜地采用沼气和蓄电池作为备用电源,通过改进的鲸鱼算法对“风光气储”联合运行问题进行了优化,仿真实验结果表明在成本最低和弃风弃光率最低这2个目标下都能稳定的运行,对已有的粒子群算法、遗传算法和鲸鱼算法进行了对比,实验结果表明改进的鲸鱼算法在解决“风光气储”最优容量配比问题上得到了很大的提升。

**关键词:**风光气储; 配比; 联合发电; 互补; 优化调度; 鲸鱼算法

**中图分类号:** TP273+.22      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-9944(2020)02-0090-05

## Research on Optimal Capacity Ratio of Wind, Solar and Natural Gas Storage Combined Generation

HAO Xiao-hong<sup>1</sup>, HAO Xue-jun<sup>1</sup>, ZHOU Qiang<sup>2</sup>, MA Ming<sup>2</sup>, MA Zhi-cheng<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Electric Power Research Institute, Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The development and utilization of rural wind energy, light energy and biogas are effective ways to solve the problem of rapid increase of electricity consumption in remote rural areas and power supply in remote mountainous areas. This paper deals with the problem of combined power generation of three renewable energy sources and energy storage. Coordination and complementarity, a new type of “wind and light gas storage” multi-energy complementary microgrid power supply system is proposed. In this system, biogas and battery are used as backup power sources, and the improved whale algorithm is used to “wind and gas storage”. The joint optimization problem is simulated. The results show that the two targets with the lowest cost and the lowest abandonment rate can operate stably. The existing particle swarm algorithm, genetic algorithm and whale algorithm are compared. The experimental results show that The improved whale algorithm has been greatly improved in solving the problem of optimal capacity ratio of “scenery water storage”.

**Key words:** wind, photovoltaic, gas and storage; match ratio; combined power generation; complementary; optimized scheduling; whale Algorithm

随着新农村的快速发展,农村地区用电量不断上升必将给我国严峻的能源形势增加更大的压力<sup>[1]</sup>。另一方面,对于一些经济欠发达的偏远山区和

农牧地区,由于环境因素和距离较长等问题,将输电线路修建过去需要较大的投资且运行成本高,或建成后会出现经常故障,导致大电网对偏远地区供

收稿日期:2019-11-19; 修订日期:2020-01-08

作者简介:郝晓弘(1960—),男,硕士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统安全稳定、新能源优化调控、新能源应用等;郝雪君(1991—),女,硕士研究生,研究方向为智能微网、新能源应用等。

电费用高、输电损耗大。因此,从经济与资源的角度看,将大电网延伸到偏远山区会使经济性降低且浪费资源<sup>[2]</sup>。

要解决上述两方面的问题,可以通过充分利用农村地区丰富的太阳能资源、风力资源、生物质能资源,采取互补发电的方式解决这部分地区的供电问题,可以取得较好的经济效益和社会效益<sup>[3]</sup>。由于新能源发电会受自然因素(天气等)的影响,所以其出力具有不确定性,单独使用新能源发电会造成电力系统不能够保证其安全运行,通常需要配置大量的蓄电池来解决电量的动态不平衡问题,但目前蓄电池价格昂贵,会造成系统成本过高,因此限制了风光单独供电形式的推广使用<sup>[4]</sup>。生物质能发电与新能源发电相比较,具有能量能以有形的方式有效存储的优点,以生物质能或沼气作为燃料,把生物质能转换为机械能,采用燃料发动机或燃气发动机驱动发电机产生电能,不仅输出可靠性高,稳定性和电能质量好,与新能源发电配合使用,不但节约资源还可以解决新能源发电不稳定的缺点。采用风光气储互补发电形式不但能获得较稳定的电能,还能减少储能设备,有力地增加了系统可靠性。故而,在农村等偏远地区采用多能源混合互补发电可以很好地解决独立供电的问题<sup>[5]</sup>。

本文利用 Matlab 仿真软件,并搭建了数学模型,对在并网和孤岛 2 种运行方式下该微电网系统持续供电和维持电能质量能力进行仿真研究。

## 1 联合发电系统容量优化配置

### 1.1 风光气储互补发电容量优化配置分析

“风光气储”联合发电是农村微电网通过把风能、太阳能、沼气和蓄电池组合起来发电对偏远农村进行供电的小型发配电系统。在微电网中,储能装置不仅可以抑制功率波动、储存电能,还可以跟不可调的风电、光伏发电相互配合,提高整体发电的可调性,以满足负荷需求和功率稳定输出。风光气储联合发电系统拓扑结构如图 1 所示。

风、光、沼气在同一个节点上并网,可以将风力发电机、光伏电池、沼气发电机的联合发电看作一个虚拟电厂。虚拟电厂中各能源的互补发电,可以保证并网点出力的稳定性,提高年发电量的同时改善电网的安全稳定运行<sup>[6]</sup>。在风光气储协调发电系统中,若风光气发电量高于地区电量需求,则多出

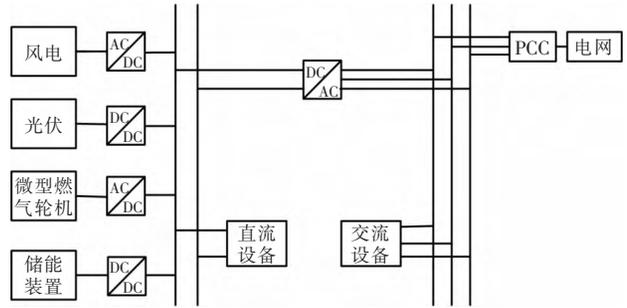


图 1 风光气储联合发电系统拓扑结构图

Fig.1 Topological structure of wind and gas storage combined power generation system

的电量对蓄电池充电,以备能源供电不足时,供给负荷以满足需求。若风、光、沼气发电不能满足地区消耗时,则蓄电池放电以进行补充<sup>[7]</sup>。

由于天气因素,风光出力具有不确定性,需通过控制器来控制发电机组各部分的出力。目前,风光气储联合发电系统具有多种运行方式,设风力发电功率为  $P_w$ ,光伏发电功率为  $P_s$ ,沼气发电功率为  $P_H$ ,蓄电池最大充电功率  $P_a$ ,负载功率  $P_L$ 。则根据不同运行方式  $P_{总}=P_w+P_s+P_H$  与  $P_L$  的差值可以得到风光气储联合供电系统的各种运行状态。

微电网在不同模式下的调度策略:

**孤岛运行的调度策略** 在孤岛模式下,供电电源的出力主要是风光,蓄电池和生物能作为备用电源;负荷的需求优先由风光 2 种电源供给,如果不满足负荷需求则由生物质能发电补足缺额,如仍然不能满足负荷需求,再用蓄电池供电来满足负荷;如果风光能发电功率满足区域用电量,则多出部分对蓄电池充电。

**并网运行的调度策略** 并网运行有电网、沼气和蓄电池 3 个备用电源。首先通过微电网内部调节来提供负荷需求,多出功率优先用于储能;如果风光出力不足,沼气发电优先补充,其次为蓄电池补充,最后才由电网补足。

### 1.2 风光气储互补发电系统的数学模型

#### 1.2.1 目标函数

目标函数包括两个部分:储能容量和成本,各部分所占比例为 1:1,当二者总和达到最小时,系统配置最优。搭建包含风、光、沼气、储能的微电网电源优化配置模型:

$$E_H = \max_T \left[ H_{\text{store}}(t) - \min_{t' \geq t} H_{\text{store}}(t') \right] \quad (1)$$

式中:  $E_H$  为微网所需配置的储能容量;  $T$  为微网年

运行时间; $H\_store(t)$ 是  $t$  时刻系统不考虑储能设备荷电状态限制时所需的储能容量; $\min_{t' \geq t} H\_store(t')$ 为  $t$  时刻之后各电源端与储能系统之间差额的最小值。

$$H\_store(t) = H\_store(t-1) + \begin{cases} \eta_{in} \Delta(t) & \Delta(t) \geq 0 \\ \Delta(t) / \eta_{out} & \Delta(t) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\eta_{in}$  为充电效率; $\eta_{out}$  为放电效率; $\Delta(t)$  为单位小时内的功率失配,其表达式如下:

$$\Delta(t) = \gamma [aS(t) + bH(t) + cW(t)] - L(t) \quad (3)$$

式中: $\gamma$  是微网中 3 种发电能源相对负荷的比例; $a$ 、 $b$ 、 $c$  则分别对应于光伏、沼气与风电的出力占比,其中, $c=1-a-b$ ; $L(t)$  为负荷 1 h 的数值; $S(t)$  表示微网中光伏占比 100% 时每小时内的出力; $H(t)$ 、 $W(t)$  分别为沼气与风电每小时的出力。

### 1.2.2 约束条件

#### ①系统容量约束

风、光、沼气 3 种分布式能源同时供电时,风、光、沼气 3 种电源装机容量所占份额需大于零且小于 1,其总和为 1。

$$\begin{aligned} 0 \leq a, b, c \leq 1 \\ a + b + c = 1 \end{aligned} \quad (4)$$

#### ②SOC 约束

储能系统的剩余容量使用 SOC(荷电状态)来表示:储能系统的剩余容量比上额定容量。

$$SOC = \frac{H_c(t)}{E_H} \quad (5)$$

$$C_{low} \leq SOC \leq C_{up} \quad (6)$$

式中: $C_{up}$ 、 $C_{low}$ 、 $H_c(t)$ 、 $E_H$  分别是储能系统中的运行荷电状态的上限约束、运行荷电状态的下限约束、实际存储容量、储能系统中的额定容量; $C_{up}$  和  $C_{low}$  的取值范围为  $[0, 1]$ 。

将无限制条件的存储容量等级变换为有限制条件的存储容量等级,即随时间变化的情况可以表示为

$$H_c(t) = \begin{cases} C_{up} E_H \\ H_c(t-1) + \eta_{in} \Delta t \\ H_c(t-1) + \Delta t / \eta_{out} \\ C_{low} E_H \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} C_{up} E_H - H_c(t-1) < \eta_{in} \Delta t \\ C_{up} E_H - H_c(t-1) \geq \eta_{in} \Delta t > 0 \\ \Delta t \leq 0 \\ C_{low} E_H - H_c(t-1) > \Delta t / \eta_{out} \end{cases} \quad (8)$$

DOD(放电深度)为储能系统放出量比上额定容量。

$$DOD = 1 - SOC \quad (9)$$

由式(9)可以看出 DOD 和 SOC 成反比,因此在使用过程中应尽量防止深度放电,但在系统设计时,如果将 DOD 取得很小,虽然充放电寿命会增长,但造成储能系统释放的电容量较少,造成电能的浪费。因此需综合考虑,本文设计储能系统的 SOC 保持在 0.6~1 之间,即  $C_{low}=0.6$ ,  $C_{up}=1$ 。

#### ③微电网系统独立供电安全稳定性指标约束

定义每日的能量不平衡量为  $K_i$ :

$$K_i \geq 0 \quad (10)$$

$$K_i = E_{B(i-1)} \eta_{out} + E_{w(i)} + E_{p(i)} + E_{H(i)} - Q_{L(i)} \quad (11)$$

式中: $K_i$  为每日的不平衡动态能量; $E_{B(i-1)}$  为蓄电池前一日所剩余的电量; $\eta_{out}$  为蓄电池的充电效率; $E_{w(i)}$  为当日风电总发电量; $E_{p(i)}$  为当日光伏总发电量; $E_{H(i)}$  为当日沼气总发电量; $Q_{L(i)}$  为当天所需负荷量。当  $K_i > 0$  时,即当日总电量能满足负荷需求,且蓄电池电量还有剩余;当  $K_i \geq 0$  时,即当日的发电量与蓄电池之和小于当天的需求负荷。本文以在满足日负荷需求的前提下,对储能配置优化,利用混合粒子群算法进行求解,综合考虑储能系统的上述因素,以储能量最小为约束条件,对风光气储的优化配置分析。

## 2 单目标标准算法的改进

单目标优化问题的求解,相关的学者进行许多工作,例如关于蚁群算法研究,文献[8]采用改进的人工蚁群算法对优化配置模型进行求解,提出了改进的能量管理策略;关于遗传算法,文献[9]提出了一种用于微电网中分布式电源的优化配置的方法;关于粒子群优化算法,文献[10]对同一系统的单一的分布式电源和混合的分布式电源的结果进行了验证。分析比较本文采用鲸鱼算法。

### 2.1 鲸鱼算法

鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm),简称 WOA,是 Mirjalili 等人提出的一种新型启发式搜索优化算法。该算法的优点是调整参数少、操作简单且局部最优能力强<sup>[11]</sup>。

WOA 是根据首鲸围堵猎物、涉猎、搜寻猎物的 3 种行为建立数学模型<sup>[12]</sup>。

第一阶段:

围堵猎物。根据 Mirjalili 等人建立的优化数学模型,首鲸在搜寻到目标后能够快速反应包围猎物,并持续更新其所在坐标,鲸群可以快速围捕所在坐标目标猎物或者接近目标猎物,数学模型为<sup>[13]</sup>

$$D=|C \cdot X^*(t)-X(t)| \quad (12)$$

$$X(t+1)=X^*(t)-A \cdot D \quad (13)$$

式中: $D$ 为当前最优解与搜索体的距离向量; $t$ 为当前迭代次数; $X^*$ 为当前最优解的位置向量; $X$ 为搜索体的位置向量。

第二阶段:

$$X(t+1)=D' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l)+X^*(t) \quad (14)$$

式中: $D'=|X^*(t)-X(t)|$ 为搜索个体与目标猎物间的距离向量; $b$ 是定义对数螺旋形状的常量系数; $l$ 表示 $[-1,1]$ 区间内的随机数。

第三阶段:

$$D=|C \cdot X_{rand}-X| \quad (15)$$

$$X(t+1)=X_{rand}-A \cdot D \quad (16)$$

式中: $X_{rand}$ 表示当前种群中随机一个搜索体所在的位置<sup>[14]</sup>。

针对鲸鱼算法迭代次数高且易出现局部最优等问题,本文使用了核模糊聚类的动态鲸鱼改进(KFCM-WOA)算法,并将其与WOA算法、粒子群(PSO)算法和遗传算法在多目标容量优化配置求解中进行了对比分析。

### 2.2 改进的鲸鱼算法

核模糊C-均值聚类(Kernel Fuzzy C-Means Clustering)算法针对复杂的非线性和高维度问题具有较大优势<sup>[15]</sup>。

设  $n$  个  $P$  维数据样本集合  $X=\{x_1, \dots, x_n\} \in R^P$ , 使用函数  $\phi$  把集合  $X$  映射到高维特征空间,得到  $\phi(x_1), \phi(x_2), \dots, \phi(x_n)$ , 并在特征空间  $Q$  中进行聚类。高维核函数  $K(x, y)$  利用其原空间的点积运算表现,即  $K(x, y)=\phi(x)^T \phi(y)$ 。即在  $Q$  中,核模糊 C-均值聚类算法的目标函数可写为

$$J_m(U, V)=\sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^m \|\phi(x_k)-\phi(v_i)\|^2 \quad (17)$$

式中: $U$ 为模糊隶属度矩阵; $U_{ik}$ 为第  $i$  类的隶属度中第  $k$  个样本; $V$ 为聚类中心; $v_i$ 为第  $i$  个聚类中心; $x_k$ 为第  $k$  个样本; $m$ 为加权指数,且  $m>1$ ; $\|\phi(x_k)-\phi(v_i)\|^2$ 为第  $j$  个样本与第  $i$  个聚类中心的距离,可写为

$$\|\phi(x_k)-\phi(v_i)\|^2=K(x_k, x_k)+K(v_i, v_i)-2K(x_k, v_i) \quad (18)$$

取高斯核函数时  $K(x, y)=\exp(-\|x-y\|^2/\sigma^2)$ ,  $\sigma^2$  为常数,则  $K(x, x)=1$ , 则式(17)改写为

$$J_m(U, V)=2 \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^m (1-K(x_k, v_i)) \quad (19)$$

以式(17)取最小值为约束条件,对应的样本函数和聚类中心分别如式(20)和式(21)所示:

$$u_{ik}=\frac{(1-K(x_k, v_i))^{-1/(m-1)}}{\sum_{j=1}^c (1-K(x_k, v_j))^{-1/(m-1)}} \quad (20)$$

$$v_i=\frac{\sum_{k=1}^N u_{ik}^m K(x_k, v_i) x_k}{\sum_{k=1}^N u_{ik}^m K(x_k, v_i)} \quad (21)$$

### 3 风光气储最优容量配比仿真分析

本文采用 Matlab 软件进行仿真,基于KFCM-WOA智能优化算法求解模型,得到成本最低时的风电、光伏发电功率以及沼气发电的出力调度,验证算法的有效性。各部分仿真参数如下:风电,光伏和沼气的发电装机容量分别为 60 kW, 55 kW 和 50 kW, 风电、光伏、沼气发电电价分别为 0.54, 0.9, 0.28 元每千瓦时,风电、光伏和沼气的维护系数分别为 0.045, 0.0096 和 0.052, 蓄电池的初始电量为 50 kWh, 蓄电池储存容量上限为 90 kWh, 下限为 20 kWh, 充电比例为 0.2, 放电比例为 0.4。仿真得到风光气储功率如图 2 所示,在风、光联合系统加入蓄电池可进一步改善系统的输出特性,使系统输出稳定。

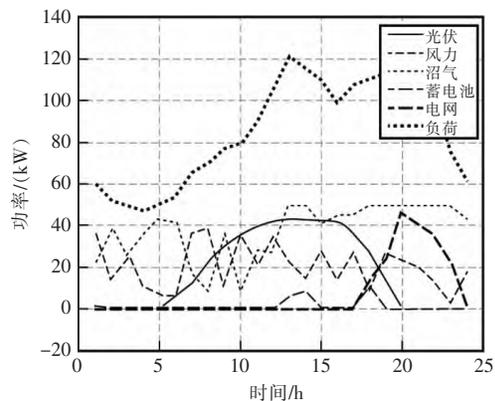


图2 风光气储的发电功率

Fig.2 Power generation of wind and gas storage

从图 2 各部分发电功率图可以看出风光沼气

储能电网的功率和等于负荷的功率,这样可以有效地减少弃风弃光率,从图 3 适应度迭代曲线图中可以看出改进的鲸鱼算法在风光气储容量配比问题上得到了改进,改善了之前鲸鱼算法的局部搜索问题的不足,在全局搜索能力、迭代次数、收敛精度上都有所提高。

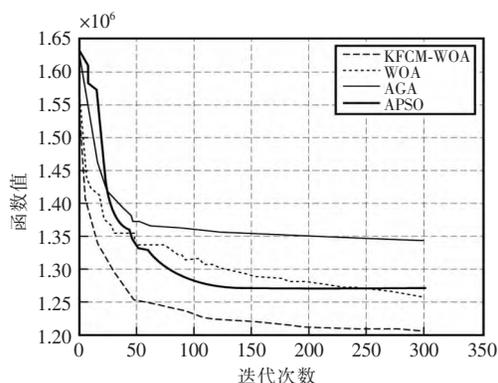


图 3 适应度迭代曲线

Fig.3 Fitness iteration curve

#### 4 结语

农村地区的风、光、沼气等新能源条件在季节模式和日前模式下均呈现出一定的互补特性,可以考虑在合理配置储能的情况下,减小弃风弃光率,降低利用成本。提高风光气储的综合利用率和供电可靠性。

本文针对农村供电系统中的风光沼气互补容量配比问题进行研究,并建立了相应的数学模型,仿真分析了风光气储的发电特性,结果显示在并网和孤岛时该微电网均能保持稳定运行,为解决农村地区风光气储供电调度问题提出了一些有益的探讨。

由仿真结果可以看出,改进的鲸鱼算法不论在收敛速度,收敛时间,全局搜索能力方面都有了很大的提升。

(上接第 71 页)

[3] 李正军.现场总线及其应用技术[M].2 版.北京:机械工业出版社,2017.  
 [4] 郭宇光.泵站自动化监控系统设计[D].西安:西安工业大学,2013.  
 [5] 陈明.基于 STM32 与 ZigBee 的智能家居安防系统设计[J].电子测试,2015,22(18):19-20,57.  
 [6] 李跃华.基于 GPRS 模块小型泵站远程监控系统开发[D].扬州:扬州大学,2015.  
 [7] 王益涵.嵌入式系统原理及应用-基于 ARM Cortex-M3 内核的 STM32F103 系列微控制器[M].北京:清华大学出版社,2016.  
 [8] 刘锦波,张承慧.电机与拖动[M].2 版.北京:清华大学出版社,2015.  
 [9] 王冠,陈利.基于 STM32F103 的三相智能电表设计[J].电脑知识

#### 参考文献:

[1] 张建华,于雷,刘念,等.含风/光/柴/蓄及海水淡化负荷的微电网容量优化配置[J].电工技术学报,2014,29(2):102-112.  
 [2] 汪湘晋,赵波,吴红斌,等.并网型交直流混合微电网优化配置分析[J].电力系统自动化,2016,40(13):55-62.  
 [3] 吴杰康,熊焰.风、水、气互补发电模型的建立及求解[J].电网技术,2014,38(3):603-609.  
 [4] Flores R J,Shaffer B P,Brouwer J.Dynamic distributed generation dispatch strategy for lowering the cost of building energy[J].Applied Energy,2014(123):196-208.  
 [5] 刘一欣,郭力,王成山.微电网两阶段鲁棒优化经济调度方法[J].中国电机工程报,2018,38(14):4013-4022+4307.  
 [6] 曾鸣,彭丽霖,王丽华,等.主动配电网下分布式能源系统双层双阶段调度优化模型[J].电力自动化设备,2016,36(6):108-115.  
 [7] Mirjalili S,Lewis,Andrew.The whale optimization algorithm[J].Advances in Engineering Software,2016,95(5):51-67.  
 [8] 张晓雪,牛焕娜,赵静翔.含微电网的配电网优化调度[J].电工技术学报,2017,32(7):165-173.  
 [9] 任帅杰,杨晓东,张有兵,等.不确定性环境下基于可调度能力的微电网优化运行实时控制策略[J].中国电机工程学报,2017,37(23):6866-6877+7077.  
 [10] Trong Hop Dang,Dinh Sinh Mai,Long Thanh Ngo. Multiple kernel collaborative fuzzy clustering algorithm with weighted super-pixels for satellite image land-cover classification[J].Engineering Applications of Artificial Intelligence,2019(85).  
 [11] Lipismita Panigrahi,Kesari Verma,Bikesh Kumar Singh. Ultrasound image segmentation using a novel multi-scale gaussian kernel fuzzy clustering and multi-scale vector field convolution [J].Expert Systems With Applications,2018.  
 [12] 权超,董晓峰,姜彤.基于 CCHP 耦合的电力、天然气区域综合能源系统优化规划[J].电网技术,2018,42(8):2456-2466.  
 [13] 罗艳红,梁佳丽,杨东升,等.计及可靠性的电-气-热能量枢纽配置与运行优化[J].电力系统自动化,2018,42(4):47-54.  
 [14] 林刚,费宏运.规模化分布式光伏并网条件下储能电站削峰填谷的优化调度方法[J/OL].现代电力,2019(5):54-61.  
 [15] 李品,刘永前,郭伟钊.离网型风光储互补发电系统优化设计方法研究[J].现代电力,2010,27(6):51-57. ■  
 与技术,2018,14(22):219-221.  
 [10] 庄奕琪.电子设计可靠性工程[M].西安:西安电子科技大学出版社,2014.  
 [11] 汪建.电路原理教程[M].北京:清华大学出版社,2017.  
 [12] 刘晓波,邓计才.基于 CS5484 的电力参数测量装置设计[J].单片机与嵌入式系统应用,2014,14(1):40-43.  
 [13] 张会新,余俊斌,严帅,等.基于 RS485 总线的前端数字化数据采集系统[J].仪表技术与传感器,2018,48(6):71-75.  
 [14] 张明华.基于固件库的 STM32F107 的程序设计方法探讨[J].数字技术与应用,2014,32(12):171,173.  
 [15] 张冲,熊勇,房卫东,等.ZigBee 网络性能测试系统研究[J].国外电子测量技术,2015,34(8):74-81. ■