

一种新的基于需求侧响应下光储微电网运行策略

李丙才¹, 张小勇², 陈敏勇², 穆书航²

(1. 兰州理工大学, 甘肃兰州, 730050; 2. 国家电网甘肃兰州供电公司, 甘肃兰州, 730050)

摘要:为了能达到光储微电网经济效益最大化, 以及在经济效益最大化的同时, 保证光储微电网的稳定性。从而提出一种新的基于需求侧响应下光储微电网运行策略即通过调整可转移负荷的工作时间, 对可转移负荷进行重置安排, 减少配电容量, 以及利用不同用电时段制定不同的电价制度即分时电价, 人为调控电力需求量, 实现削峰填谷的效果, 从而提高微网的稳定性。为了使得微电网有最大的经济收益, 利用博弈论的方法, 继而找到转移负荷用户、分时电价用户、储能方的 Nash 均衡点。

关键词:光储微电网; 需求侧响应; 可转移负荷; 分时电价; 博弈论; Nash 均衡点

DOI:10.16520/j.cnki.1000-8519.2020.02.013

A new operation strategy of optical storage microgrid based on demand side response

Li Bingcai¹, Zhang Xiaoyong², Chen Minyong², Mu Shuhang²

(1. Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu, 730000; 2. State Grid Gansu Lanzhou Power Supply Company, Lanzhou Gansu, 730000)

Abstract: In order to maximize the economic benefits of the optical storage microgrid and maximize the economic benefits, the stability of the optical storage microgrid is guaranteed. Therefore, a new operation strategy based on the demand side response of the optical storage microgrid is proposed, that is, by adjusting the working time of the transferable load, resetting the transferable load, reducing the distribution capacity, and making different use of different power consumption periods. The electricity price system is the time-sharing electricity price, artificially regulating the demand for electricity, realizing the effect of cutting peaks and filling the valley, thus improving the stability of the microgrid. Then use game theory to find the Nash equilibrium point of the load user and the time-of-use electricity price user and the energy storage party under the combination of the strategy, and achieve the maximum benefit of the optical storage microgrid.

Keywords: optical storage microgrid; demand side response; transferable load; time-of-use electricity price; game theory; Nash equilibrium point

0 引言

众所周知, 地球资源分为可再生资源 and 不可再生资源, 由于全球经济高速发展, 不断消耗地球的资源, 不可再生资源储备量急剧降低, 对可再生资源的需求急剧上升。同时由于大量使用不可再生资源已经对环境造成污染, 所以为了缓解资源的需求、减缓环境污染, 绿色可再生的资源的研究问题变得重要起来, 此时, 分布式发电这种方式被提了出来。

分布式发电是指利用分散的能源进行分布式发电。发电装置安装在用电现场或用户附近, 跟其传统发电模式下相比较其优势也是十分明显, 较为灵活, 经济效益高, 环保程度高, 符合现代经济发展的需要。但缺点也十分明显, 对于大电网来说, 分布式发电属于不可控电源, 由于自身的调节能力较为低下, 分布式电源并网后容易引起电压波动和电压闪变, 为了保持供电可靠性和电能质量, 需要其他的电源形式去配合, 因而引入微电网作为大电网与分布式电源之间的中介, 调节电源稳定性与间歇性。

在微电网中光储微电网是一种小型局域网, 它与大电网

有唯一一个连接点, 可以根据条件自身独立运行或者连入大电网使用。光储微电网本身是由分布式光伏, 储能装置, 本地负荷组成的。主要包含发电、输电、配电、用电这四个管理系统。具有清洁, 智能, 自治, 可靠, 灵活, 互动等优点, 能够为用电用户提供多样化及个性化的选择。因此研究一种新型光储微电网运行策略具有一定的市场及科研价值^[1]。

微电网的存在使得大电网不再是唯一的供电系统。从目前光储微电网发展阶段来看, 还存在以下一些问题。第一, 由于光伏渗透率不高, 在光储微电网进行发电时, 极易出现消纳困难和并网的现象, 光能利用率较低。第二, 由于光伏发电受到天气等其他不可调控因素的影响造成其具有较强的不稳定性, 间歇性及波动性, 在接入时会冲击大电网造成影响。第三, 用户侧的行为对光储微电网有影响, 同时电网负荷峰谷差值较大, 电网设施使用效率较低。

通过长期对光储微电网研究发现, 利用储能装置会减少弃光率, 同时能降低电网负荷差值, 调节设施的配备容量, 提高设备利用率, 但储能装置价格较高, 需要找到合适的储能

容量使经济效益最大。所以需求侧与储能的优化配置是本文重点讨论的问题。

当前,微电网的蓬勃发展为需求侧响应与储能结合的研究带来了更多的挑战和机会。文献3^[2]介绍了分布式光储微电网的发展以及典型设计方案,并制定了设计原则。文献4^[3]提出了基于微电网响应模型,分别建立了分时电价模型和实时电价模型,验证了需求响应优化模型的合理性和有效性。文献5^[4]提出了一种基于可转移负荷调度和储能系统控制的微网能量管理策略。文献6^[5]分析了储能系统在光储微电网中的重要性,以及提出了微电网系统能量控制策略。文献7^[6]中利用合作博弈论对合作模型下的各个微电网的收益进行分配,以达到微电网收益最大化。文献8^[7]中提出了基于光伏和储能的微电网调度模型。

需求侧响应是指当客户受到市场激励或者电价信息的激励,再结合自身用电情况而改变消费模式和负荷使用方式的一种响应行为。因此,提出需求侧用户可转移负荷的方式和用户分时电价响应方式。转移负荷的目标是提高微网整体经济性,减少配电容量,但是在这种情况下,它的可靠性不比原来有更大的优势。分时电价负荷响应与原来比较可以降低负荷的峰谷差,并且还会有别的优点,即用电可靠性比之前更好,但带来的后果是光伏的渗透率降低,此时系统需要增加储能装置,但是这又会使使得经济性下降。所以通过合作博弈的方式,找到Nash均衡点,进而得出两种需求侧响应与储能系统之间的最优配置。

1 微网系统联合配置优化模型建立

1.1 转移负荷需求侧响应

这种方法是改变可转移负荷工作时间的办法,实现更合适的光伏发电。按题设要求和解决方法,将可转移负荷进行复位,使得储能装置的数量有所减少,从而增加了系统经济性。

1.2 转移负荷目标函数

转移负荷通过人为干涉来改变可移动负荷使用时间,达到负荷需求在时序上更贴近光伏发电,最后使发电效率得到较大的提高。

其表达式为

$$\begin{cases} Q_A = \sum_{t=1}^T [L(t) - P_{pv}(t)] \\ L(t) = L_{bef}(t) + L_m(t) - L_{out}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q_A 是负荷转移接近光伏功率; T 是可转移负荷周期,为一天; $P_{pv}(t)$ 是光伏发电功率; L_t 、 $L_{bef}(t)$ 、 $L_m(t)$ 、 $L_{out}(t)$ 分别是 t 时刻转移负荷之后的容量、转移负荷之前的容量、负荷转入容量以及转出容量^[8]。

转移负荷模型

$$\begin{cases} L_{in}(t) = \sum_{k=1}^{N_t} x_k(t) P_{ik} + \sum_{h=1}^{h_{max}-1} \sum_{k=1}^{N_t} x_k(t-h) P_{(h+1)k} \\ L_{out}(t) = \sum_{k=1}^{N_t} y_k(t) P_{ik} + \sum_{h=1}^{h_{max}-1} \sum_{k=1}^{N_t} y_k(t-h) P_{(h+1)k} \end{cases} \quad (2)$$

式中: N_t 是可转移负荷数量; N_{i_a} 是运行时间大于一个周期的转移负荷个数; h_{max-1} 是可转移负荷供电持续时间最大值; $x_k(t)$ 是 t 时刻起始运行的第 k 种负荷转入个数; $y_k(t)$ 是 t 时刻起始运行的第 k 种负荷转出个数; P_{ik} 为第 k 种转移负荷第 i 个时刻的容量。

转移负荷约束条件

$$\begin{cases} L_{in.min} \leq L_{in}(t) \leq L_{in.max} \\ L_{out.min} \leq L_{out}(t) \leq L_{out.max} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $L_{in.min}$ 和 $L_{in.max}$ 分别是转入负荷最小电量和最大电量; $L_{out.min}$ 和 $L_{out.max}$ 分别是转出负荷最小电量和最大电量。当负荷转移时,需要根据指定的转移负荷限制进行需求侧响应。

1.3 分时电价需求侧响应

由于用户在需求侧不同时段对电力需求的差异而造成用电的“峰,平,谷”时段现象,所以实施分时电价调控。分时电价是指利用不同用电时段制定不同的电价制度,人为调控电力需求量,实现削峰填谷的效果,从而提高微网的稳定性。在实生活中用电的时候,用户在某个时间的用电量不仅与当时的电价有关,还与其他时间的电价有关系,因此,用户响应需要分为单周期响应和多周期响应

$$W_i = (\max R_i - \min R_i) \quad (4)$$

式中: W_i 为需求响应后 i 时段用户电量的峰谷差,峰谷差 W_i 越小越好,可以使系统稳定性更好; $\max R_i$ 和 $\min R_i$ 分别为实行分时电价后 i 时段需求响应电量的最大值和最小值。

1.4 分时电价响应负荷模型

分时电价应用之后用户 i 时刻的综合响应

$$\begin{cases} R_i = R_{i0} (1 + \rho_{ii} \frac{I_i - I_{i0}}{I_{i0}} + \sum_{j=1}^{24} \rho_{ij} \frac{I_j - I_{j0}}{I_{j0}}) \\ \rho_{ii} = \frac{\Delta R_i / R_{i0}}{\Delta I_i / I_{i0}} \\ \rho_{ij} = \frac{\Delta R_j / R_{j0}}{\Delta I_j / I_{j0}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: R_i 为实行分时电价后 i 时刻用户响应的电量; R_{i0} 、 I_{i0} 和 I_{j0} 分别为 i 时刻用户响应的原始电量、原始电价和 j 时段用户响应的原始电价; ρ_{ii} 和 ρ_{ij} 为电量电价自弹性系数和交叉弹性系数; ΔR_i 、 ΔI_i 和 ΔI_j 分别为 i 时刻用户响应电量变化大小、电价变化大小和 j 时段用户响应电价变化大小^[9]。

分时电价响应负荷约束条件

$$R_{i.min} \leq R_i \leq R_{i.max} \quad (6)$$

式中, $R_{i.min}$ 和 $R_{i.max}$ 分别是实行分时电价后用户响应电量的最大最小值。

1.5 用户综合响应模型

用户综合响应模型是把调整转移负荷与分时电价有利的结合,采取综合模式,既保证转移负荷情况下能达到增加光伏渗透率,又能保证在分时电价情况下降低负荷峰谷差值。即转移负荷的这种条件下同时考虑分时电价的需求侧综

合响应。

用户综合响应目标函数

$$H = Q_A + W_i \quad (7)$$

式中，H 为光伏贴近负荷功率与用户负荷峰谷差之和，即当 H 越小时，用户综合响应程度越好。

用户综合响应负荷模型

$$D = L_{in} + R_i - L_{out} \quad (8)$$

式中，D 为用户综合响应负荷电量。

1.6 蓄电池储能模型

本文只讨论储能蓄电池在用电过程中对需求侧的影响，电池储能系统的存储功率是通过充电状态 $S_{SOC}(t)$ 来测量，表达式为

$$S_{soc}(t+1) = S_{soc}(t) - \frac{E_{BESS}(t)}{V_{BESS}} \quad (9)$$

式中： $E_{BESS}(t)$ 为 t 时刻电池储能系统充放电的值， $E_{BESS}(t)$ 为负表示充电，为正表示放电； $V_{BESS}(t)$ 是蓄电池储能装置的总容量大小 [8]。

1.7 优化指标

文中采用合作博弈的求解模式，并利用迭代算法求解在转移负荷下考虑分时电价需求侧响应和储能系统之间的优化，并且寻求用户综合响应模型与储能系统两者之间优化的最优解—Nash 均衡点。微电网的总成本包括光伏系统的年成本、储能双向转换模块的年成本、用户转移负荷补偿、光伏补偿和运行维护成本。运营和维护成本包括日常运营中合理支出的维护、管理、人工和相关升级成本。

1.8 微网系统年净利润

$$\left\{ \begin{aligned} C_{net} &= C_R - C_0 \\ C_1 &= \sum_{t=1}^T [e_d(t)P_d(t) + e_c(t)P_c(t) + e_{pv}(t) + P_{pv}(t) + e_i(t)P_i(t) - e_l(t)P_l(t)] \Delta t \\ C_0 &= C_{PV} + C_B + C_C \\ C_{PV} &= Q_{PV} \left[I_{PV} \frac{r_0(1+r_0)^m}{(1+r_0)^m - 1} \right] + u(A) \\ C_B &= Q_B \left[I_B R_E \frac{r_0(1+r_0)^m}{(1+r_0)^m - 1} \right] + u(B) \\ C_C &= P_C \left[I_C \frac{r_0(1+r_0)^m}{(1+r_0)^m - 1} \right] + u(C) \end{aligned} \right. \quad (10)$$

式中： C_{net} 为微电网年净利润； C_1 和 C_0 为微电网年收益和投资年成本 [9]；R 是相似日，取 270，等效得到系统年收益； $e_d(t)$ 、 $e_c(t)$ 、 $e_{pv}(t)$ 、 $e_i(t)$ 、 $e_l(t)$ 分别为用户电价、光伏上网电价、光伏补贴电价、用户转移负荷补贴和微网从电网的购电电价，其中， $e_d(t) = e_l(t)$ ； $P_d(t)$ 、 $P_c(t)$ 、 $P_{pv}(t)$ 、 $P_i(t)$ 、 $P_l(t)$ 分别为用户负荷功率、微网上网功率、光伏发电量、用户转移负荷所有量和微网向电网购入电能功率； C_{PV} 、 C_B 、 C_C 分别为光伏系统年成本、储能系统年成本和储能变流器模块年成本； Q_{PV} 、 Q_B 分别为系统光伏容量和储能系统容量； I_{PV} 、 I_B 、 I_C 分别为光伏组件单价、储能电池单价和储能变流器单价； R_E 为储能电池更换次数，u(A)，u(B)，u(C) 分别为光伏、储能和储能变流器年运行和维护费用； r_0 为贴现率。

光伏渗透率

$$S_{new} = \frac{Q_{PV,one} + Q_{PV,BESS}}{Q_{load,all}} \quad (11)$$

式中： S_{new} 为光伏渗透率； $Q_{PV,one}$ 为光伏直接供给负荷电量； $Q_{PV,BESS}$ 为光伏发电经过电池储存再供给负荷的容量大小； $Q_{load,all}$ 为用户负荷总量。

1.9 约束条件

系统运行功率平衡约束

$$P_{PV}(t) + P_{grid}(t) + P_{BESS}(t) - P_{load}(t) = 0 \quad (12)$$

式中： $P_{PV}(t)$ 、 $P_{grid}(t)$ 、 $P_{BESS}(t)$ 和 $P_{load}(t)$ 分别是光伏发电功率、微电网与大电网置换功率、储能电池充放电功率和负荷功率 [10]。

1.10 蓄电池充放电约束

在考虑到电池放电倍率、荷电状态等与电池寿命之间的关系，并且参考相关文献，储能电池充放电表达式如下所示

$$\left\{ \begin{aligned} E_b(t + \Delta t) &= E_b(t) + \varepsilon_c P_c(t) \Delta t \eta_c - \varepsilon_{dc} P_{dc}(t) \Delta t / \eta_{dc} \\ \sum_{t=1}^T \eta_c P_c \Delta t &= \sum_{t=1}^T \frac{P_{dc} \Delta t}{\eta_{dc}} \\ S_{SOC}(t + \Delta t) &= [E_b(t) + \Delta E_b] / E_{rate} \\ S_{SOC, \min} &\leq S_{SOC}(t) \leq S_{SOC, \max} \\ D_{OD} &\leq 0.8 \\ \varepsilon_c + \varepsilon_{dc} &= 1, \varepsilon_c, \varepsilon_{dc} \in \{0, 1\} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中： E_b 为储能电池容量； P_c 和 P_{dc} 为储能电池的充放电功率；c 和 dc 代表着储能是否能够充放电，1 为可以充放电，两者中必有一个为 1；c 和 dc 为储能电池的充放电效率； S_{SOC} 为储能电池的荷电状态； $S_{SOC, \max}$ 和 $S_{SOC, \min}$ 为储能电池荷电状态的最大值和最小值； D_{OD} 为储能电池的放电深度； E_{rate} 为储能电池的额定容量 [11]。

光伏渗透率得约束条件

$$S_{new} \geq S_{new, \min} \quad (14)$$

式中： $S_{new, \min}$ 表示光伏渗透率最小的数值。光伏渗透率最小值不能低于此值。

2 模型求解

2.1 博弈论

若一个决策情况存在多个决策者且各自追求自身利益最大化，则称其为博弈。在光储微电网中，决策情况为光伏微电网的净收益最大化，多个决策者能够在使用时间电价下转移负载容量百分比和负载响应容量百分比，还有储能端的容量。文中运用了合作博弈的类型，寻找 Nash 均衡点，把三方或者两方的决策者结合起来，在已给定的约束条件下寻求满足自身条件的最优解，达到 Nash 均衡。最后，微电效益最大化，并且微电网的可靠性和光伏渗透率将是最大。本文中的三方合作博弈或会存在四种可能的联盟模式，即三者中两者组成一方与另一者博弈以及三者进行合作的合作模式，以下用 $[\{Q, W\}, \{E\}]$ 、 $[\{Q, E\}, \{W\}]$ 、 $[\{Q\}, \{W, E\}]$ 和 $[\{Q, W, E\}]$ 说明这种博弈类型。两方合作博弈的模式用 $[D, E]$ 表示。下文中用 $[\{Q, W\}, \{E\}]$ 的方式表达三方博弈策略模型，两方模型跟

随后。Q 表示转移负荷用户方，W 表示分时电价负荷响应用户方，D 表示转移负荷下考虑分时电价负荷响应用户方，E 表示储能方。

(1) $[Q, W], \{E\}$ 博弈的模型

成员： $\{Q, W\}$ 、 $\{E\}$

策略公式：

$$S_{QW} = [P_{Q,\min}, P_{Q,\max}, P_{W,\min}, P_{W,\max}], S_E = [P_{E,\min}, P_{E,\max}]$$

：负荷、电气参数、经济参数，功率等

目标函数： $I_{QW}(P_Q, P_W, P_E)$ ， $I_E(P_Q, P_W, P_E)$ 分别是可转移负荷能力的百分比，使用时间电价下的负载响应容量百分比和储能电池数量； $P_{Q,\min}$ 、 $P_{W,\min}$ 是双方的最小容量百分比和最小储能电池数量； $P_{Q,\max}$ 、 $P_{W,\max}$ 、 $P_{E,\max}$ 是双方最大容量的百分比和最大储能电池数； I_{QW} 是转移负荷和分时电价下用户联盟的目的函数；是储能方的目的函数。目的函数可以表明为利润与自身及对手策略还有设定的信息有关。目的函数使用体系的总目标函数，即和。当有合适的 Nash 均衡点 (P_Q^*, P_W^*, P_E^*) ，意味着和是我们和对手共同的最优对策，即这样的条件下转移负荷用户，分时电价用户和储能方能在 Nash 均衡意义下各自获得最大的经济效益。此外三种博弈模型与本文所述这种类似，在此不重复。

(2) $[D, E]$ 博弈的模型

成员：D, E

策略目标：

数据类型：负荷、电气参数、经济参数，功率等

需求函数：

其中， $P_{Q,\min}$ 是用户综合响应能力负载百分比； $P_{W,\min}$ 和 $P_{E,\min}$ 分别是用户综合响应负载能力百分比的最小最大值； I_{QW} 为用户综合响应负载目的函数。目标函数即利润与自身及对手策略包括设定的数据有关。目标函数使用体系的目的函数，即和。当找到 Nash 均衡点，就可以表示为和都是对方及我们的最优策略，意味着这样的条件下用户综合响应和储能方都能达到 Nash 均衡意义下的最大经济效益。

2.2 求解步骤

本次博弈模型的优化，采用迭代算法求解。

步骤一：原始数据运行之后，初始化博弈模型，即负荷大小、光照大小和电价等。

步骤二：在上面描述的情况下，以合作博弈为基础，得出工作过程中需要的优化模型。

步骤三：根据自身条件以及方法要求设定 Nash 点初值。选择过程是随机的，选择过程的区间为各决策变量，最后得到： $(P_{Q,0}, P_{W,0}, P_{E,0})$ 和 $(P_{D,0}, P_{E,0})$ 。

步骤四：参与者优化自己的方案。那么每个参与者在第 j 轮优化的结果为 $(P_{Q,j}, P_{W,j}, P_{E,j})$ 和 $(P_{D,j}, P_{E,j})$ 。在第 j 轮优化时，各联盟对比上轮结果， $(P_{Q,j-1}, P_{W,j-1}, P_{E,j-1})$ 和 $(P_{D,j-1}, P_{E,j-1})$ ，继而得到最优组合 $(P_{Q,j}, P_{W,j}, P_{E,j})$ 和 $(P_{D,j}, P_{E,j})$ 。即

$$P_{Q,j} = \arg \max I_Q(P_Q, P_{W,j-1}, P_{E,j-1})$$

$$P_{W,j} = \arg \max I_W(P_{Q,j-1}, P_W, P_{E,j-1})$$

$$P_{E,j} = \arg \max I_E(P_{Q,j-1}, P_{W,j-1}, P_E)$$

$$P_{D,j} = \arg \max I_D(P_D, P_{E,j-1})$$

$$P_{E,j} = \arg \max I_E(P_{D,j-1}, P_E)$$

步骤五：资源互相参照。这个过程中全部的博弈参与者要做到信息共享。

步骤六：得出计算的结果后，可确定 Nash 点。参与者在以上的过程里得到连续两次同样的最满意的结果，即 $(P_{Q,j}, P_{W,j}, P_{E,j}) = (P_{Q,j-1}, P_{W,j-1}, P_{E,j-1}) = (P_Q^*, P_W^*, P_E^*)$ 和 $(P_{D,j}, P_{E,j}) = (P_{D,j-1}, P_{E,j-1}) = (P_D^*, P_E^*)$ ，则本次弈达到了 Nash 均衡点。

步骤七： (P_Q^*, P_W^*, P_E^*) 和 (P_D^*, P_E^*) 为 Nash 均衡点。初值的计算与 Nash 点的计算有很大关系，所以会在算法发生发散的这种情况下，回到步骤三，经过再次的计算得到初值数值。

3 运行策略

本文的运行策略为：转移负荷的时候在工作过程中分时电价如何作用的运行策略。正常工作情况下 24 小时是它的需求响应周期，每一个小时为响应周期。以下为具体方式：(1) 光伏功率大于负载功率：首先，需求侧的负载转移在适当的容量配置下进行，然后根据分时电价策略进行负荷转移，即用户在峰谷电价下应制定具体的应对措施。(2) 光伏功率小于负载功率：首先，需求侧的负载转移在适当的容量配置下进行，观察此时的光伏功率和负载功率，工作时光伏功率和负载功率之间的关系没有变化，那么就有这样的结论：光伏和电网给负载供电，如果情况相反，结论就是光伏向负荷供电，再用分时电价的方法并且同时在需求侧响应模式的工作环境下运行。

4 结论

在现有情况的基础上，想要光伏微网在发电过程中有更好的稳定性和经济性，本文向读者介绍了在转移负荷这种方法的条件下分时电价负荷如何运行的模型，并且独特的运用了一种求解模型最优配置的法子，即博弈论，预期结果如下：(1) 并网型光储微电网在本文所述条件下，即在需求侧响应条件下，能够运行更好也可以创造更大利润，两种响应方式如下。转移负荷之后在发电的时候光伏渗透率将会向好的方向发展，带来的不好之处是负荷峰谷差增大；分时电价被提出并且在这样的环境下应运后，负荷峰谷差与原来相比有了降低，同时带来了光伏渗透率下降的不好影响。(2) 对得出的结果分析后，用合作博弈的解决问题办法，得到两种需求侧响应方式在适当条件下与储能系统的优化配置，也得出用户综合响应模型在适当的条件下与储能系统之间的优化配置。(3) 在上面模型产生的结果的环境下，负荷转移条件下分时电价需求侧负荷响应的微网系统运行优化策略被提了出来。实例表明，该模型和策略能够满足系统运行稳定性和经济性的要求。

(下转第 49 页)

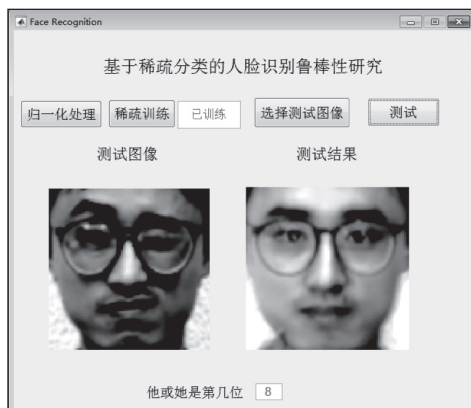


图8 表情不同的测试结果

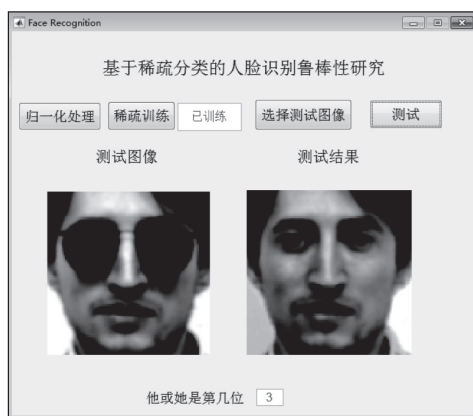


图9 人脸图像眼睛被遮挡测试结果

4 结论

本文提出一种基于光照鲁棒的稀疏表示人脸识别方法,该方法对人脸图像作小波变换,得到光照归一化人脸图像,再通过稀疏变换,稀疏分类获得测试结果。实验仿真结果表明,本文方法不仅对光照具有良好的鲁棒性,而且对人脸图像部分遮挡以及表情都表现出一定的鲁棒性。

参考文献

- [1] 平强, 庄连生, 俞能海. 姿态鲁棒的分块稀疏表示人脸识别算法 [J]. 中国科学技术大学学报. 2011, 41(11): 975-981.
- [2] 盛剑会, 范春年. 一种改进的基于小波的人脸图像光照归一化算法 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2011, 30(6): 917-920.
- [3] 王林, 邓芳娟. 改进的加权稀疏表示人脸识别算法 [J]. 计算机系统应用, 2018, v. 27(06): 136-141.
- [4] Candes E, Tao T. Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies [J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [5] GEORG HIADES A S, BELHUMEUR P N, KRIEGMAN D J. Form few to many: illumination cone models for face recognition under variable lighting and pose [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(6): 643-660.

(上接第 19 页)

- 机的智能车设计 [J]. 广西教育. 2016(19).
- [4] 涂市委, 薛诺诺, 方海洋. 基于 K60 的光电直立智能车控制系统设计 [J]. 汽车实用技术. 2018(04).
 - [5] 金永波, 张士金, 李宗帅, 费春国. 两轮自平衡小车的设计与实现 [J]. 电子制作. 2018(08).
 - [6] 戴福全, 李济泽, 朱悦涵, 阮玉镇. 两轮自平衡机器人转向

稳定性优化研究 [J]. 机械设计与制造. 2017(04).

- [7] 杨凌霄, 李晓阳. 基于卡尔曼滤波的两轮自平衡车姿态检测方法 [J]. 计算机仿真. 2014(06).
- [8] 赵智. 基于 STM32 的两轮自平衡电动车系统研制 [D]. 华中师范大学, 2013.

(上接第 39 页)

参考文献

- [1] 李越嘉, 杨莹, 常国祥. 微电网技术在中国的研究应用现状和前景展望 [J]. 中国电力, 2016, 49 增刊: 154-158+165.
- [2] 黄小红, 程鹏志, 白兆海等. 分布式光储微电网设计及应用研究 [J]. 2016, 09: 54-58.
- [3] 陈冉, 杨超, 沈冰等. 基于微电网的需求响应优化策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 124-130.
- [4] 方磊, 牛玉刚, 祖其武. 微网可转移负荷调度与储能控制策略 [J]. 华东理工大学学报(自然科学版), Vol.44 NO. 4 2018-08: 588-594.
- [5] 杨涛, 周俊, 王文轩等. 储能在光储微电网中的应用研究 [J]. 电力电子技术, 2018, 52(6): 72-77.
- [6] 刘念, 赵璟, 王杰等. 基于合作博弈论的光伏微电网群交

易模型 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 1903-1910.

- [7] HOSSAIN E, KABALCI E, BAYINDIR R, et al. Microgrid testbeds around the world: state of art [J]. Energy Conversion & Management, 2014, 86(10): 132-153.
- [8] 赵波, 包侃侃, 徐志成等. 考虑需求侧响应的光储并网型微电网优化配置 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5465-5474.
- [9] 许健, 刘念, 于雷等. 计及重要负荷的工业光伏微电网储能优化配置 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 29-37.
- [10] 周楠, 樊玮, 刘念. 基于需求响应的光伏微网储能系统多目标容量优化配置 [J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1709-1716.