

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.01.013

太阳能汽车续航模型及光储优化配置方法*

毛涛涛, 潘国兵*, 欧阳静, 陈金鑫, 胥芳

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对太阳能汽车中能量系统投资成本和续航能力的矛盾问题,同时为了实现太阳能汽车光储容量配置方法,对太阳能汽车中光伏电源、储能系统和主要负荷的特性进行了研究,采用通用光储混合能量系统结构为对象,建立了光储容量优化配置模型,提出了一种基于NSGA-II多目标优化算法的太阳能汽车光储容量优化配置方法。建立了太阳能汽车续航能力计算模型,用于分析该容量配置方法的效果。利用NSGA-II多目标优化算法对光伏电源和储能系统容量进行了求解,得到了满足能源系统成本与续航能力优化目标的配置方案。通过算例求解了光储容量配置方法最优解集,针对具体工程案例优化了配置方案并对该配置方案进行了分析。结果表明,该太阳能汽车续航模型的准确性和光储容量优化配置方法的有效性、可靠性。

关键词:太阳能汽车;储能系统;多目标;容量配置

中图分类号:TM615

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)01-0068-06

Solar car endurance model and capacity optimal configuration of PV and battery method

MAO Tao-tao, PAN Guo-bing, OU YANG Jing, CHEN Jin-xin, XU Fang

(Key Laboratory of E & M, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the contradiction problem between energy system investment cost and endurance and in order to achieve the optimal configuration method of PV and battery in solar car, the characteristics of photovoltaic power, energy storage system and main load in solar car were studied, PV/battery mixed energy system structure was used as an object and the multi-objective optimal capacity configuration model was established, and then, the solar car capacity configuration method of PV and battery based on the NSGA-II multi-objective algorithm was proposed. The solar car endurance model was established and it was used to analysis the effect of the method. The NSGA-II multi-objective genetic algorithm was used to solve the capacity of photovoltaic power and battery and the configuration program was obtained. The example was used to solve the problem and the configuration method was used to solve the specific engineering case, and then, the configuration scheme was analyzed. The results show the accuracy of the solar car endurance model and the validity and reliability of the capacity optimal configuration method.

Key words: solar car; energy storage system; multi-objective; capacity configuration

0 引言

光伏发电转化效率的提高,光伏发电技术的革新

使其除了在集中式地面电站、分布式等传统光伏发电场景应用之外,与民用产品结合展现新生机。电动汽车作为节能减排的出行方式是很多国家研究的主要方

收稿日期:2017-04-05

基金项目:国家国际科技合作专项资助项目(2014DFE60020);浙江省自然科学基金资助项目(LY15E070004);浙江省科技厅协同创新资助项目(2016F50010)

作者简介:毛涛涛(1991-),男,浙江温岭人,硕士研究生,主要从事微网、新能源及分布式电力系统方面的研究。Email:ttmao@zjut.edu.cn

通信联系人:潘国兵,男,博士,副教授。E-mail:gbpan@zjut.edu.cn

向^[1-2],应用于太阳能汽车的光伏电源和动力电池价格较高,在考虑经济性的同时会极大程度限制汽车的续航能力。因此,研究光储容量优化配置,对得到符合投资成本和续航能力需求的较优配置有着关键作用。

AHMED^[3]设计了一辆两座轻型太阳能汽车,并从经济性角度分析太阳能汽车在其使用寿命内的总成本远远小于相同时间的传统汽车成本和燃料消耗总价;西安交通大学吴斌^[4]提出一种适用于太阳能汽车的混合动力储能系统方案,研究了能量管理控制算法,协调光伏电源、蓄电池和超级电容,改善电动车的运行性能;ALHAMMAD^[5]研究了如何提高光伏组件转化效率的方法并以此作为光储混合太阳能汽车的辅助电源;EIMENSHAWY^[6]采用光伏电源、蓄电池和超级电容共同提供能量,设计了一种适用于太阳能汽车能量管理系统的 Buck-Boost 变换器。以上的研究未考虑光伏电源成本和汽车续航能力之间的矛盾,缺乏解决光伏电源和储能系统容量合理配置的方法。

本文将建立以太阳能汽车能源系统投资成本和续航能力为优化目标的模型,运用 NSGA-II 多目标优化算法对光伏电源和储能系统进行求解,得到较优配置方案。

1 太阳能汽车能源系统及电源特性

太阳能汽车的能源系统主要包括光伏电源和动力电池,负荷主要包括交流的三相异步电机和直流的车内空调、照明灯,太阳能汽车能源系统拓扑如图 1 所示。

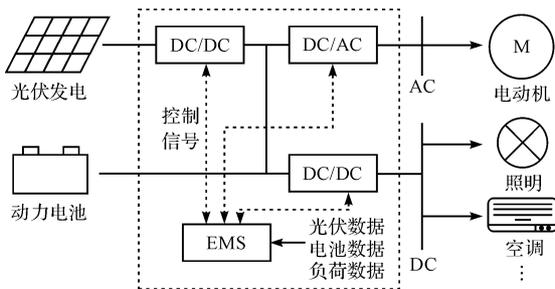


图 1 太阳能汽车能源系统拓扑

光伏电源和动力电池共同为系统提供能量,保持系统的稳定运行。光伏电源和动力电池输出的都是直流电,需要通过功率电子模块(PEM)将直流电逆变成交流电为交流电动机供电。另外功率电子模块还具有控制充放电速率、电压等级、电机转速、转矩和再生制动系统。照明和空调等直流负载通过直流馈线直接供电。动力电池作为主从控制策略的主电源,若光伏输出功率超过负荷需求,电池工作在充电状

态吸收多余能量,当电池处于最高荷电状态时,选择弃光平衡功率;若光伏输出功率无法满足负荷需求,电池工作在放电状态补充不足能量,维持系统稳定运行。

1.1 光伏输出功率特性

工程应用中,依据太阳辐射度和环境温度,可得光伏电源输出功率数学模型^[7]:

$$\begin{cases} P_{pv}(t) = P_{STC} G_C(t) \frac{1 + k(T_C(t) - T_{STC})}{G_{STC}} \\ T_C(t) = T_a(t) + \frac{(T_{NOC} - 20)}{800} G_C(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{pv}(t)$ — t 时刻单位面积光伏电源的输出功率,kW; P_{STC} —单位面积光伏电源在标准测试条件(太阳辐射度为 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$,环境温度为 $25\ \text{℃}$)下的输出功率,kW; $G_C(t)$ — t 时刻太阳辐射度, W/m^2 ; G_{STC} —标准测试条件下的太阳辐射度,取值 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$; k —功率温度系数,取值 $-0.004\ 5\ \text{℃}$; T_{STC} —标准测试条件下的环境温度,取值 $25\ \text{℃}$; $T_C(t)$ — t 时刻光伏组件表面温度, ℃ ; $T_a(t)$ — t 时刻环境温度, ℃ ; T_{NOC} —光伏组件额定电压工作温度,取值 $47\ \text{℃}$ 。

1.2 电池特性

电池的能量状态通常采用荷电状态(state of charge, SOC)来衡量,即电池剩余电量占总容量的百分比^[8]。其充电状态和放电状态的数学模型为:

$$\text{SOC}(t) = (1 - \delta)\text{SOC}(t - 1) + \frac{P_c(t)\Delta t\eta_c}{E_B} \quad (2)$$

$$\text{SOC}(t) = (1 - \delta)\text{SOC}(t - 1) - \frac{P_d(t)\Delta t}{\eta_d E_B} \quad (3)$$

式中: $\text{SOC}(t)$ — t 时刻电池的剩余电量; δ —电池每小时的自放电比例; η_c, η_d —蓄电池充、放电效率; $P_c(t), P_d(t)$ —蓄电池 t 时刻充、放电功率,kW; E_B —蓄电池的额定容量,kWh。

1.3 交流电动机特性

额定转矩 T_N 的计算公式如下

$$T_N = \frac{P_N}{\Omega} = \frac{1\ 000 P_N}{2\pi n_N} = 9\ 550 \frac{P_N}{n_N} \quad (4)$$

式中: T_N —电动机的额定转矩,Nm; P_N —电动机额定功率,kW; n_N —电动机额定转速,r/min。

太阳能汽车的三相交流感应电动机采用矢量变频控制技术,在启动时会产生较大的短时功率,在启动时低转速时保持恒定的最大转矩,在高转速时保持恒定的功率。电动机转矩功率特性如图 2 所示。

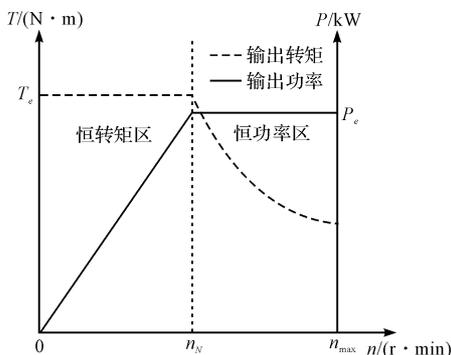


图 2 电动机转矩功率特性

2 太阳能汽车源荷容量优化配置模型

适用于汽车上的光伏组件为薄膜柔性光伏组件,在容量配置过程中,本研究建立以光伏电源的铺设面积 S_{PV} 和动力电池额定容量 E_B 为变量,各电源输出功率约束和系统能量守恒、功率平衡为约束条件,成本和续航时间最优为目标的数学模型。

2.1 目标函数

2.1.1 能量系统最小成本

光伏汽车的能量主要来自光伏电源和动力电池,能量系统的成本表达式如下:

$$\min F_1 = f(E_B, S_{PV}) = k_B \cdot E_B + k_{PV} \cdot S_{PV} \quad (5)$$

式中: k_B —储能系统能量成本系数,元/kWh; k_{PV} —光伏组件成本系数,元/m²。

2.1.2 光伏汽车续航能力

本研究采用在特定工况,典型天气条件下光伏汽车的最大续航里程 S 来衡量汽车的续航能力,续航里程的表达式如下:

$$\max F_2 = f(E_B, S_{PV}) = \frac{Q_B(t) + Q_{PV}(t)}{P_M} = \frac{E_B \cdot t + \int_0^t S_{PV} \cdot P_{PV}(t) dt}{P_M} \quad (6)$$

式中: $Q_B(t)$ —动力电池总功率; $Q_{PV}(t)$ — t 时间段内光伏发电功率; P_M —以恒定速度行驶时电动机所需功率。

2.2 约束条件

2.2.1 光伏电源输出功率约束

光伏电源总输出功率受光伏铺设面积自身条件和光照,温度等外界环境因素影响,其输出总功率 $P_{PV}(t)$ 满足:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{PV}(t) \leq P_{STC} \\ S_{PVmin} \leq S_{PV} \leq S_{PVmax} \\ P_{PVS}(t) = S_{PV} \cdot P_{PV}(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中: S_{PVmin}, S_{PVmax} —光伏电源设计安装的最小面积和最大面积, m²; $P_{PVS}(t)$ — t 时刻光伏汽车安装的所有光伏组件输出总功率, kW。

2.2.2 储能系统自身约束

为了避免储能系统的深度放电和过度充电,延长其使用寿命,需要限制储能系统的荷电状态 SOC。

$$\begin{cases} E_{Bmin} \leq E_B \leq E_{Bmax} \\ SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: E_{Bmin}, E_{Bmax} —电池最小容量和最大容量, kWh; SOC_{min}, SOC_{max} —储能系统剩余容量的最小值和最大值。

2.2.3 功率平衡约束

太阳能汽车负荷包括电动机负荷和其他常规负荷。电动机负荷为最主要负荷,其峰值功率需满足以下条件:

$$P_{Mmax} \geq \max(P_{M_a}, P_{M_b}, P_{M_c}) \quad (9)$$

式中: P_{M_a} —整车在最高车速时的功率; P_{M_b} —整车在最大爬坡角度时的功率; P_{M_c} —整车依据加速性能在加速过程末时刻的输出功率,因为在加速末时刻输出功率最大。

上述三者的具体表达式如下式所示, P_{Mmax} 取三者最大值为:

$$\begin{cases} P_{M_a} = \frac{v_{max}}{3600\eta_T} \left(mgf + \frac{C_D A v_{max}^2}{21.15} \right) \\ P_{M_b} = \frac{v_i}{3600\eta_T} \left(mgf \cos \alpha_{max} + mg \sin \alpha_{max} + \frac{C_D A v_i^2}{21.15} \right) \\ P_{M_c} = \frac{v_a}{3600t_a \eta_T} \left(\delta m \frac{v_a}{2\sqrt{t_a}} + \frac{mgf}{1.5t_a} + \frac{C_D A v_a^2}{21.15 \times 2.5t_a} \right) \end{cases} \quad (10)$$

式中: v_{max} —最高车速, km/h; m —整车总质量, kg; f —滚动阻力系数,取值 0.015; C_D —空气阻力系数,取值 0.3; A —整车迎风面积, m²; α_{max} —最大爬坡角度; v_i —爬坡速度, km/h; t_a —加速时间, s; v_a —加速末速度, km/h; η_T —齿轮传动系数,取值 0.93; δ —旋转质量换算系数,取 1.06。

太阳能汽车行驶时,需要保证光伏电源和储能系统的输出功率满足负荷需求最大功率,即电动机功率峰值和其他负荷功率峰值之和:

$$P_{PVS}(S_{PV}) + P_B(E_B) \geq P_{Mmax} + P_{Lmax} \quad (11)$$

式中: P_{Lmax} —整车中除电动机之外的负荷峰值功率, kW。

3 太阳能汽车容量优化配置模型求解

太阳能汽车源荷容量优化配置问题属于典型

的多目标优化问题。NSGA-II 是在常规遗传算法上改进而来的多目标优化算法^[9]。利用 NSGA-II 算法进行求解时,首先对目标函数进行处理转化为最小化多目标问题,如公式(12)所示,进行多目标算法解得最优解集,然后对其进行还原处理得到原解集。

$$\begin{cases} \min F_1 = f(E_B, S_{PV}) \\ \min F_2 = -\max F_2 = -f(E_B, S_{PV}) \end{cases} \quad (12)$$

NSGA-II 算法实现步骤:

(1) 设定种群规模 M , 最大迭代次数 G_{\max} , 随机生成满足上述优化配置模型约束条件的 $2M$ 个个体, 种群中每个个体变量为 $\{E_B | S_{PV}\}$, 组成初始种群 Q_G , $G=0$;

(2) 计算每个个体的多目标函数值和适应度, 对初始种群进行快速非支配排序并选择前 M 个个体作为第一代种群 Q_G ;

(3) 依据交叉概率和变异概率对新一代种群进行双点交叉、变异操作得到子代种群, 并计算子代个体目标函数值和拥挤度;

(4) 将子代和父代合并进行非支配排序确定非支配解, 依据拥挤距离排序选择前 M 个个体作为新一代种群;

(5) 判断进化代数达到设定的最大进化代数 G_{\max} 则结束运算, 输出非劣最优解集; 否则继续步骤 S3。

流程图如图 3 所示。

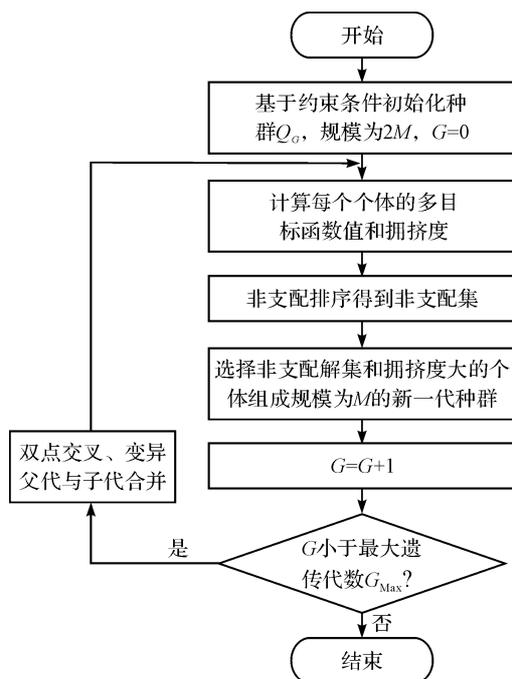


图 3 NSGA-II 算法流程图

4 算例及结果分析

依据本研究提出的太阳能汽车容量优化配置模型, 笔者采用 NSGA-II 算法进行求解, 并在 Matlab 环境下进行了编程实现。光伏电源采用柔性砷化镓薄膜太阳能电池, 转化率高达 31.6%, 铺设面积范围设定为 $3.5 \text{ m}^2 \sim 7.5 \text{ m}^2$, 成本系数设定为 40 000 元/ m^2 ; 储能系统的动力电池采用磷酸铁锂电池^[10], 储能容量设定范围在 20 kWh ~ 30 kWh, 成本系数为 2 000 元/kWh。城市某一天从早上 7 点到下午 5 点的温度和太阳辐射度参数如图 4(a)、4(b) 所示。续航里程依据国家工信部制定的国家标准 GB/T 18386-2005 中的 NEDC 工况为标准, 工况循环由 4 个市区循环和 1 个市郊循环组成, 理论距离为 11.022 km, 时间为 1 180 s, 太阳能汽车续航能力检测工况如图 4(c) 所示。动力电池的初始荷电状态 SOC = 1, 荷电状态限定范围为 0.1 ~ 1。NSGA-II 算法参数设置: 种群数 50, 最大迭代次数 100, 交叉率 0.8, 变异率 0.007。

太阳能汽车的整车参数参考常规电动汽车的参数配置^[11], 具体参数如表 1 所示。

表 1 整车动力性能相关参数

基本参数	参数取值
整车质量/kg	1 200
迎风面积/ m^2	2.4
最高车速/ $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	100
最大爬坡角度/(%)	≥ 20

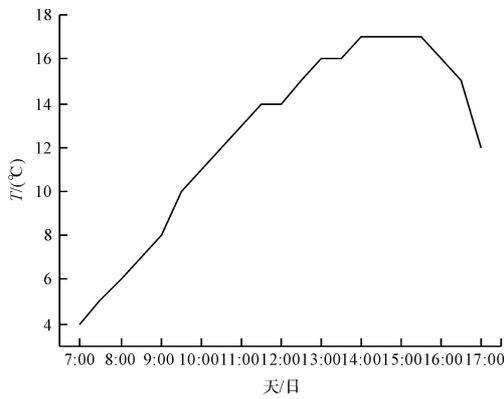
利用 NSGA-II 算法得到的容量优化配置最优解集如图 5 所示。

图 5 中: 横坐标表示储能系统和光伏电源总成本, 纵坐标表示光伏汽车续航能力, 每个点代表了一种配置方法下的两个目标函数值。从图中可以看到随着总成本的升高, 太阳能汽车的续航能力降低, 原因是光伏薄膜成本远高于储能系统的成本。

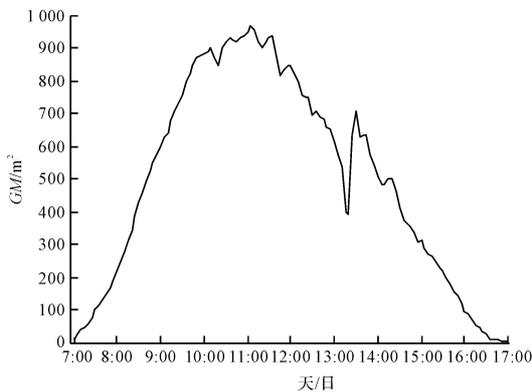
图中可以看出该算法对与求解多目标问题有较好的效果, 在快速收敛的同时保证了最优解集的多样性。

本研究针对众泰 E200 电动汽车进行优化配置, 众泰 E200 电动汽车的具体参数配置如表 2 所示。

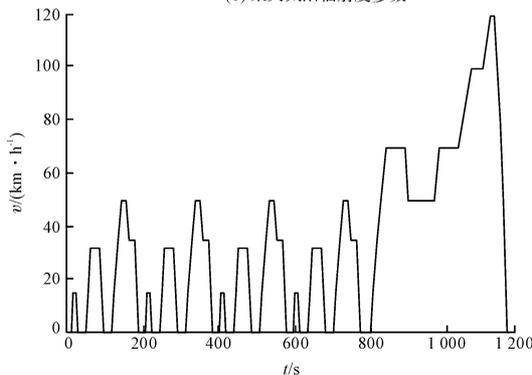
在上述的最优解集中选取光伏电源面积和电池容量, 两者范围确定依据为保持太阳能汽车最低续航里程 155 km, E200 电动汽车最大可安装光伏电源面积 5 m^2 , 电池容量最大为 24.5 kWh。仿真太阳能汽车行驶在续航检测工况的运行状态, 当电池的荷电状态降低为 0.1 时停止行驶, 行驶的距离即为续航里程。



(a) 某天温度参数



(b) 某天太阳辐射度参数



(c) 太阳能汽车续航能力检测工况

图 4 参数曲线图

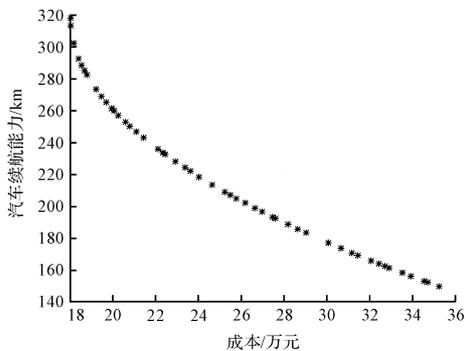


图 5 多目标遗传算法容量优化配置仿真结果

表 2 众泰 E200 配置相关参数

基本参数	参数取值
长 * 宽 * 高/mm	2 753 × 1 600 × 1 630
整车质量/kg	1 080
迎风面积/m ²	2.5
电动机总功率/kW	60
电动机最大扭矩/(N · m)	165
电池容量/kWh	24.5
续航里程/km	155
最高车速/(km · h ⁻¹)	120

续航里程与储能容量和光伏面积关系如图 6 所示。

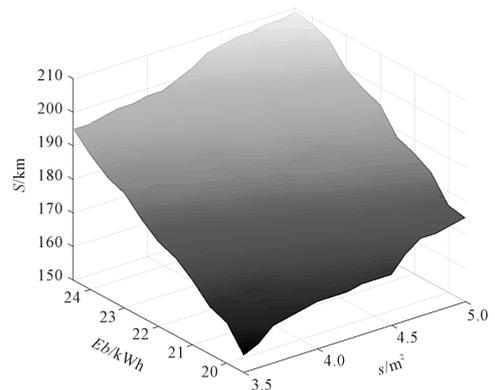


图 6 续航里程与储能容量和光伏面积关系

从上述关系中可以看出,仅需要配置 3.5 m² 的光伏电源面积和 19.5 kWh 的动力电池容量时便可达到 155 km 的续航里程。选择续航能力最高配置方案即光伏面积为 5 m², 储能系统容量为 24.5 kWh, 能源成本为 24.9 万元。参考普通光伏组件的价格变化, 薄膜发电电池的成本在未来几年之内会迅速下降 80% 以上, 则能源成本会在 8.9 万元以下。

本研究设定在当天太阳辐射度最强的时候, 即中午 11:00 开始进行一次道路工况行驶, 得到电池荷电状态变化, 储能系统荷电状态图如图 7 所示。

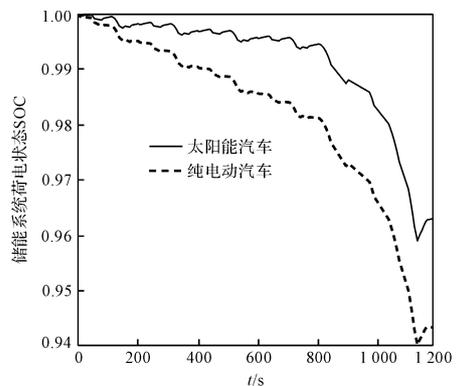


图 7 储能系统荷电状态图

(下转第 100 页)

本文引用格式:

毛涛涛, 潘国兵, 欧阳静, 等. 太阳能汽车续航模型及光储优化配置方法[J]. 机电工程, 2017, 35(1): 68-72, 100.

MAO Tao-tao, PAN Guo-bing, OU YANG Jing, et al. Solar car endurance model and capacity optimal configuration of pv and battery method[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 35(1): 68-72, 100.