

DOI: 10.7667/PSPC151109

# 智能有序充电控制系统设计

费春国, 王鹏鹏

(中国民航大学航空自动化学院, 天津 300300)

**摘要:** 随着国家一系列相关优惠政策的实施, 电动车的数量将会逐步增多。关于电动车辆充电问题的研究, 已从过去对于电池自身充电特性的探究转变为多因子约束下充电控制系统的优化设计。针对电池自身物理特性所能承受情况、充电机输出功率、传输电网容量与车主充电需求等因子, 设计了多目标有序充电控制系统。它能够依照电池自身特点与所处环境情况对车辆充电进行智能化管控; 采用循环扫描监测与电路动态调整相结合的方法; 在保证整个充电进程安全的前提下, 引入加权算子用于满足车主不同的充电需求。随着相关技术与器件的不断进步, 该系统将逐步向小型、微型的便携式产品演变, 具有十分广阔的应用前景。

**关键词:** 车辆充电; 多因子; 有序控制; 循环扫描监测; 加权算子; 动态调整

## System design of the intelligent orderly charging control

FEI Chunguo, WANG Pengpeng

(College of Aviation Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** With the implementation of a series of preferential policies, the number of electric vehicles will gradually increase. It has been loaded into an optimum design of charging control system under multi-factors from the inquiry of battery charging characteristic itself in the past about issues of charging an electric vehicle. For the affordability of the battery's physical characteristics itself, the charger's output power, the transmission grid's capacity, the owners' charging requirements and other factors, this paper designs the multi-objective ordered charging control system. It is capable of intelligently control vehicle charging according to the battery's own characteristics and the environment situation. It uses a method which combines scan cycle monitoring with collaborative adjustment circuit. Under the premise of ensuring the charging process security, weighted operator is introduced in order to satisfy the needs of different user charging. With the progress of related technologies and devices, the system will gradually evolve towards small and micro portable products, which has a very broad application prospects.

**Key words:** vehicle charging; multiple factor; ordered control; scan cycle monitor; weighted priority; dynamic adjustment

## 0 引言

社会高速发展, 能源消耗巨大, 为更加合理有效地使用能源, 人们对能源结构逐步优化。电能因具备其他能源形式无法比拟的优点(易获取、易传输、零排放、零噪声等), 在人们日常生产、生活中得到日益广泛的应用。在诸多领域中, 逐步采用电能替代传统能源形式(如油改电项目)。

随着技术的不断进步, 电动车辆取代传统燃油车辆的趋势不可阻挡。现今, 在许多大中型城市, 已经采用电动车或者油气混合车替代传统燃油车。此外, 国家政府也出台相应鼓励优惠政策促进家庭电动车的推广。电动车辆数目的增多, 车辆充电成

为了一个严重制约电动车辆推广普及的重要因素。

截止到目前, 关于电动车辆的充电研究主要包含<sup>[1-10]</sup>电池自身充电特性探究、电池 SOC(State of Charge)的估算方法、充电桩的监测与设计、电池接入电网的谐波分析与影响、减弱谐波影响的方法、充电负载均衡问题、传输电网的分析等。可见, 电动车辆的充电过程需要考虑诸多制约因素, 且对于多因素的考虑十分必要。它们共同影响着整个充电过程的安全。

本文主要论述针对电池自身充电特性、充电机输出功率、电网传输容量与车主充电需求等因子下, 电动车辆有序充电问题的解决办法; 对该有序充电控制系统进行结构设计, 阐述系统主要环节的设计

思路与多因子调控优化的逻辑流程。

### 1 系统概述

本文所述的多目标有序充电控制系统<sup>[8-12]</sup>简化架构如图 1 所示, 主要包含控制器(检测单元、分析单元与控制单元等)、充电车辆、充电机组/充电桩、传输电网等。控制器中分析单元根据检测单元传送的信号, 结合相应控制规则, 将分析结果传输给控制单元; 控制单元依照分析单元发送的信息执行相应操作, 控制充电机组/充电桩的充电功率, 从而实现电动车辆充电过程的调控。

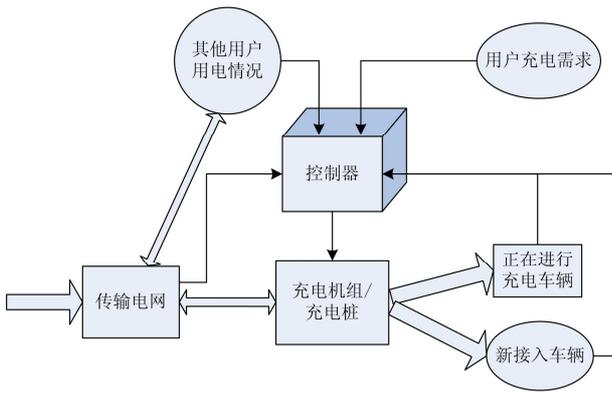


图 1 有序充电系统简化结构框图

Fig. 1 Simplified block diagram of an ordered charging system

该系统设计主要考虑因素为电动车辆本身可承受的充电能力、充电机组/充电桩的输出功率、电网当前负荷与其他用户用电情况、充电车辆业主的充电需求等。其中, 电动车辆自身能够承受的充电电流或充电电压是系统设计考虑的关键因素, 电池采用简化电流源模型; 它与充电机组/充电桩功率、电网当前负荷与容量一起作为电动车辆充电调控过程中制约因素考虑; 充电车辆业主的充电要求作为补充因素考虑; 依照相关控制规则, 综合上述多个因子, 控制电动车辆的充电进程。

### 2 系统调控的逻辑说明

系统调控相关因子的处理流程<sup>[5,7,9,13-14]</sup>如图 2 所示。在充电开关闭合之后, 首先进行电路自检, 同时依照前述方法获得依照电池自身特性的可承受最佳充电电流值。然后, 检测充电机组/充电桩当前功率, 判断其是否处于负荷的情况下, 并进行相应的功率调整。若充电机过载, 则立即减小充电输出功率; 反之, 检测当前电网容量, 增大充电机输出功率。判断是否超出电网容量, 保证电网运行安全。

若上述三因子(电池承受能力、充电机负载、电

网容量)均在安全运行范围之内, 检测充电车辆业主需求。电路协调平衡模块, 依照充电车辆业主的优先等级, 在保证电池、充电机与电网运行安全的前提下, 动态分配调整充电机组的输出功率, 使得充电进程安全有序进行。

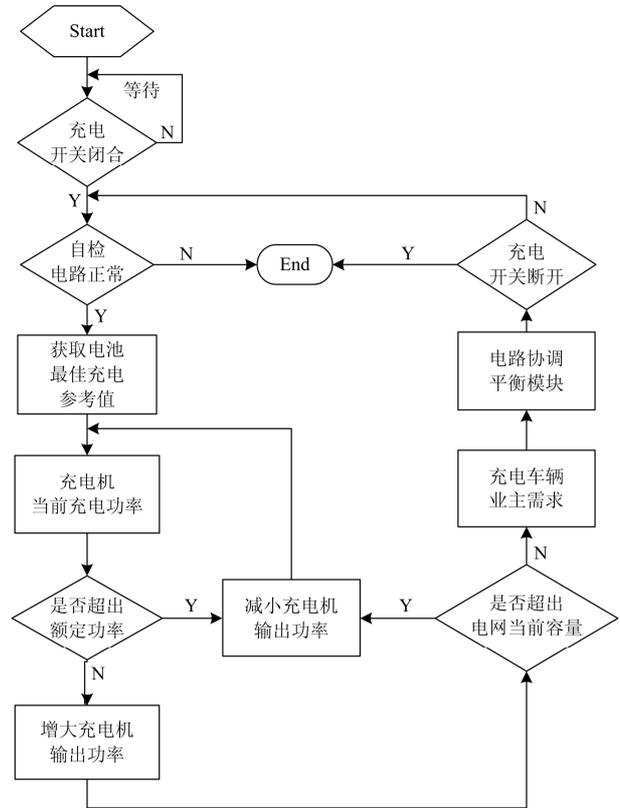


图 2 系统调控逻辑简化流程图

Fig. 2 Simplified flowchart of the system's logic regulation

电路协调平衡模块中关于功率分配调整的策略可简述为: 首先, 针对充电车辆业主的不同需求, 设定不同的事件优先级, 并匹配相应的权值; 优先级高的用户, 分配高权值, 反之, 分配低权值; 处于同一优先级, 采用平均分配策略, 处于不同优先级, 采用加权平均值的方法进行功率分配。

$$I'_i = \frac{\alpha_i}{\sum_{k=1}^m \alpha_k} I_i \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式中:  $\alpha_i$ 、 $\alpha_k$  为加权算子;  $I_i$ 、 $I_k$  为调整前充电电流值;  $I'_i$  为调整后充电电流值;  $m$  为充电用户数目。

### 3 电池监测与调控

#### 3.1 电池模型的搭建

在综合大量研究文献<sup>[11-12,14-16]</sup>的基础上, 结合实际充电进程中电池自身特性, 将电池等效为如图

3 所示的简化模型, 其中包含受控电流源、欧姆内阻、并联电容等。为使得后续调控过程中更加精准, 引入电流检测与电压检测单元。

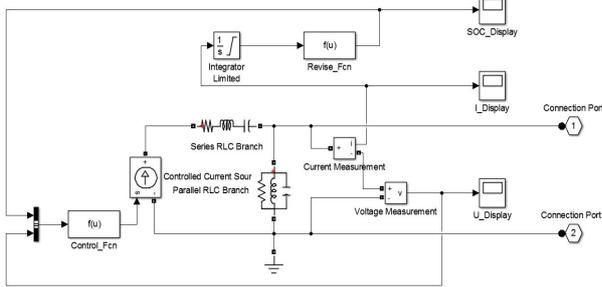


图 3 电池充电进程中简化模型

Fig. 3 Battery simplified model in the charging process

电流检测单元的电流信号通过安时积分器获得充电进程中电池 SOC 信息, 经修正函数  $Revise\_Fcn$  调整之后, 传送给控制函数  $Control\_Fcn$ 。修正函数  $Revise\_Fcn$  的作用关系可简化为式(2)。

$$Revise\_Fcn = C_0 + \int_0^t i(t)dt + \Delta \quad (2)$$

式中:  $C_0$  为充电开始时电池 SOC 信息;  $\Delta$  为充电过程中环境温度的影响及车载 BMS 相关信息。

电压检测单元的电压信号, 主要包含电池开路电压值  $U_k$ , 充电进程中的电压值  $U_i$ 。其中,  $U_k$  结合式(3)<sup>[17]</sup>, 综合电池 SOC 信息, 遵照马斯三定律, 获得充电进程中仅考虑电池自身所能承受充电情况下的最佳起始电流值与电流衰减指数。  $U_i$  主要用于切换电池充电模式的参照与电池自身的安全保护, 亦可用来对电池荷电状态信息的修正(通常所得结果偏差稍大, 不建议使用)。

### 3.2 电池检测与调控

电池检测与调控过程的简化结构如图 4 所示, 主要包含电池端电压的检测, 电池电流的检测, 车载 BMS(Battery Manage System)的通信、电池分析单元与控制单元等。该部分主要完成仅电池自身可承受能力条件下, 分析获得电池最佳起始电流值与电流衰减指数, 为后续过程电流的调控提供参照值  $I_{ref}$ , 且无论影响充电过程的其他因素如何变化, 图 4 中, 充电机组/充电桩的输出电流都不应超过该参照值  $I_{ref}$ ; 否则, 将会对电池造成损害。  $I_{ref}$  依照公式(10)变化。

下面论述充电进程中电池所能承受最佳电流参照值  $I_{ref}$  的获取过程。

电池分析单元依照电压检测单元中电池开路电压  $U_k$ , 结合式(3), 获得电池电解质浓度  $d_c$ 。

$$d_c = U_k - C_{ons} \quad (3)$$

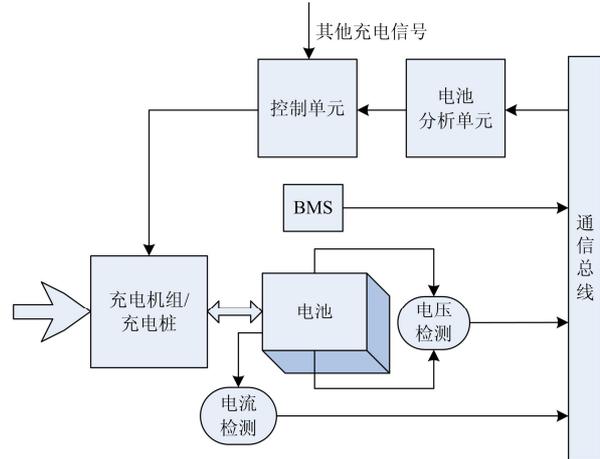


图 4 电池检测与调控结构简化框图

Fig. 4 Simplified block diagram of battery detection and control

式中:  $d_c$  为电池电解质浓度;  $U_k$  为电池开路端电压;  $C_{ons}$  为取决于电池特性的常数。

获得  $d_c$  后, 运用下述模糊推理规则<sup>[12]</sup>。

$$U = \int_x \frac{\mu_U(x)}{x} \quad (4)$$

$$I = \int_y \frac{\mu_I(y)}{y} \quad (5)$$

$$I = U \times R \quad (6)$$

式中:  $X$  为模糊集合  $U$  的论域;  $\mu_U(x)$  为模糊集合  $U$  的隶属函数;  $Y$  为模糊集合  $I$  的论域;  $\mu_I(y)$  为模糊集合  $I$  的隶属函数;  $R$  为依据模糊关系确立的一个多级条件语句<sup>[17]</sup>。

可得考虑电池自身特性条件下, 电池所能承受的最佳初始充电电流值  $I_j$  为

$$I_j = U_k \times R \quad (7)$$

再结合式(2)与式(8)、式(9), 即可推得最佳电流衰减指数  $\alpha_j$ 。

$$C_{rej} = C - Revise\_Fcn \quad (8)$$

式中:  $C$  为电池总容量;  $C_{rej}$  为开始充电时刻电池待充入电量。

$$\alpha_j = \frac{I_j}{C_{rej}} \quad (9)$$

式中,  $\alpha_j$  为遵循马斯定律的最佳充电电流衰减指数。

$$I_{ref} = I_j \exp(-\alpha_j t) \quad (10)$$

将获得的电池最佳充电电流参照值  $I_{ref}$  信息传送给控制单元, 作为控制单元控制充电机组/充电桩的一个原则性参照; 控制单元依照最佳电流参照值  $I_{ref}$  与其他充电信号信息向充电机组/充电桩发布调控指令, 控制相关器件的导通角。考虑到多数车载

BMS 中包含电池 SOC 信息，可以读取其中信息作为本系统调控的参照或者修正依据，便于提升整个系统的控制精度。

### 4 充电机监测与调控

#### 4.1 充电机模型搭建

充电机可简化<sup>[10,15,18-22]</sup>为图 5 所示，主要包含变压器、晶闸管、压控型/流控型/功率型变换器件等。通过编程控制脉冲触发器的脉冲周期、相应的事件时刻，脉冲触发器的脉冲信号控制晶闸管器件的导通角，实现对电路通断时间的控制；在经过相应的压控型/流控型/功率型变换电路部分，完成对电池充电进程中电流与功率的变换调控。

其中，编程控制部分的设计与实施，依照后述中多因子逻辑调控进行。可选用现行的 DSP、FPGA 等分析处理产品，亦可通过集散方式，通过后台分析处理，只将结果反馈到充电机单元。

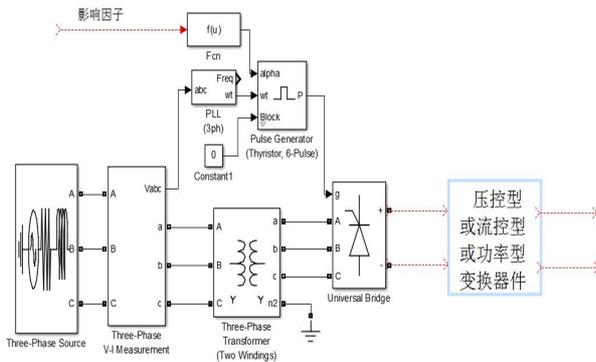


图 5 充电机简化模型

Fig. 5 Charger simplified model

#### 4.2 充电机组/充电桩检测与调控

充电机组/充电桩检测与调控部分如图 6 所示，主要包含电压检测、电流检测、充电机分析单元与控制单元等。其中，电压与电流检测模块完成对充电机电压与电流信息的获取，信号经通信总线传送给充电机分析单元；分析单元依照充电机额定功率与实际功率、当前负载充电车辆情况，结合用户充电需求与负载均衡规则，分析得到充电车辆的电流调控参照值，并将该参照值传送给控制单元；控制单元依照该参照值与其他影响因子相应参照值，经图 6 中函数变换后，得到脉冲触发器的触发角数值，进而实现充电进程中的电流调控。

传输网容量的检测与充电机组/充电桩的检测相类似，且无法对其进行调控，故本文在此不再赘述。

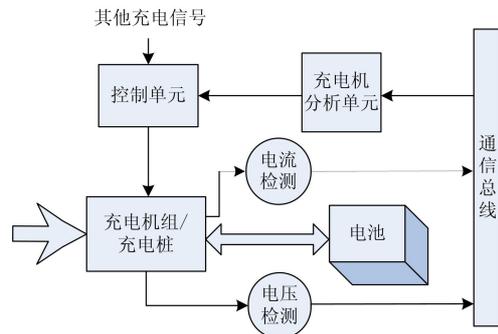


图 6 充电机组/充电桩检测与调控结构简化框图

Fig. 6 Simplified block diagram of charging unit/ charging pile detection and control

### 5 结论与应用前景

本文所述的多目标有序充电系统，相对于普通不可调控充电机，能够在保证电池自身可承受能力范围、充电机、传输电网运行安全的前提下，对电池进行有效快速充电，缩短充电时间。同时，能够依照电网当前负荷与电价情况、充电车辆业主的充电需求，动态调整分配各充电机的输出功率，提升服务或实际使用进程中的满意度。在现行技术条件与设备配置条件下，可通过引入控制分析器与相应检测装置实现所设计的系统功能；主要可用于充电站/充电桩的充电传输调控。

随着电动车辆的普及，除去大规模大功率充电站/充电桩的建设之外，为满足用户实际使用的需求，社区或公共场所内，中小功率可控可调整充电设备推出与使用势在必行。

本文所述的多目标有序充电系统，亦为类似情景提供一种行之有效的技术方案。现今，市场中压控型、流控型、功率型电力电子器件比较成熟，且产品种类与性能较之前有非常大的提升；用于分析计算的处理器(如 DSP、FPGA、PLC 等)，运算分析能力亦可满足系统设计需求，且价格在可接受范围之内。此外，随着半导体技术、微纳技术的不断发展，器件体积逐步缩减、性能逐步提升，具备所述功能的系统可逐渐向小型、微型化改进，发展演变成车载便携式设备，达到能够依照车辆自身特性与所处环境情况随时随地随心充电的效果。

#### 参考文献

[1] CHOE S Y, LI X Y, XIAO M. Fast charging method based on estimation of ion concentrations using a reduced order of electrochemical thermal model for lithium ion polymer battery[C] // EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, 2013, 17(20): 1-11.

- [2] 郭煜华, 范春菊. 含大规模电动汽车的配电网保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 14-20.  
GUO Yuhua, FAN Chunju. Research on relaying technologies of distribution network including mass electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 14-20.
- [3] TANBOONJIT B, FUENGWARODSAKUL N H. Implementation of charger and battery management system for fast charging technique of Li-FePO<sub>4</sub> battery in electric bicycles[C] // 2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2014: 1-5.
- [4] 张巧霞, 贾华伟, 叶海明, 等. 智能变电站虚拟二次回路监视方案设计及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 123-128.  
ZHANG Qiaoxia, JIA HuaWei, YE Haiming, et al. Design and application of virtual secondary circuit monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 123-128.
- [5] 李秋硕, 肖湘宁, 郭静, 等. 电动汽车有序充电方法研究[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 32-38.  
LI Qiushuo, XIAO Xiangning, GUO Jing, et al. Research on scheme for ordered charging of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 32-38.
- [6] 曹秉刚. 中国电动车技术新进展[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(1): 114-118.  
CAO Binggang. Current progress of electric vehicle development in China[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(1): 114-118.
- [7] YAN Jingyu, XU Guoqing, QIAN Huihuan, et al. Model predictive control-based fast charging for vehicular batteries[J]. Energies, 2011(4): 1178-1196.
- [8] 杨亚丽, 李匡成, 孙磊, 等. 改进型协同控制算法在快速充电技术中的应用[J]. 装甲兵工程学院学报, 2011, 25(5): 44-47.  
YANG Yali, LI Kuangcheng, SUN Lei, et al. Application of improved coordinate control algorithm to fast charging technique[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2011, 25(5): 44-47.
- [9] MACHIELS N, LEEMPUT N, GETH F, et al. Design criteria for electric vehicle fast charge infrastructure based on Flemish mobility behavior[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 320-327.
- [10] 杨亚丽, 孙磊, 李匡成, 等. 多用户实时控制快速充电技术研究[J]. 电测与仪表, 2011, 48(10): 77-79.  
YANG Yali, SUN Lei, LI Kuangcheng, et al. A study of fast charging technology on multiple users real-time controlling[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48(10): 77-79.
- [11] DHARMAKERTHI C H, MITHULANANTHAN N, SAHA T K. Modeling and planning of EV fast charging station in power grid[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE, 2012: 1-8.
- [12] SORTOMME E, HINDI M M, JAMES S D, et al. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 198-205.
- [13] 严辉, 李庚银, 赵磊, 等. 电动汽车充电站监控系统的设计与实现[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 15-19.  
YAN Hui, LI Gengyin, ZHAO Lei, et al. Development of supervisory control system for electric vehicle charging station[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 15-19.
- [14] MUSIO M, DAMIANO A. A simplified charging battery model for smart electric vehicles applications[C] // IEEE, 2014: 1357-1364.
- [15] 刘志勇. 电动汽车充电站对电网的影响及有序充电控制策略的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [16] 史鹏飞. 化学电源工艺学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
- [17] 陈伦琼, 李蓓. 蓄电池初始充电电流策略及模糊逻辑控制[J]. 电源技术, 2013, 137(10): 1809-1812.  
CHEN Lunqiong, LI Bei. Initial charging current strategy and mass theory control[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 137(10): 1809-1812.
- [18] 王大鹏. 灰色预测模型及中长期电力负荷预测应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.  
WANG Dapeng. Research on grey prediction models and their applications in medium-and long-term power load forecasts[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [19] ZHENG Yu, DONG Zhaoyang, YAN Xu. Electric vehicle battery charging/swap stations in distribution systems: comparison study and optimal planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 221-229.
- [20] 王澄, 徐延才, 魏庆来, 等. 智能小区商业模式及运营策略分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 147-154.  
WANG Cheng, XU Yancai, WEI Qinglai, et al. Analysis of intelligent community business model and operation mode[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 147-154.
- [21] 薛定宇. 控制系统仿真与计算机辅助设计[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [22] 刘晓娟. 基于智能方法的电力系统负荷预测模型及其应用研究[D]. 上海: 东华大学, 2013.  
LIU Xiaojuan. Intelligent method based load forecasting models and application research in power system[D]. Shanghai: Donghua University, 2013.

收稿日期: 2015-06-30; 修回日期: 2015-09-01

作者简介:

费春国(1974-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为神经网络优化算法、电力系统负载优化和工业控制等;

E-mail: fchunguo@163.com

王鹏鹏(1989-), 男, 硕士研究生, 主要学习方向为电力系统负载优化与控制等。E-mail: yantaiwpp@163.com

(编辑 魏小丽)