

# V2G模式下电动汽车充放电控制策略研究

刘广才, 刘晓波, 李志明, 刘旭民

贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年9月1日; 录用日期: 2023年10月1日; 发布日期: 2023年10月9日

## 摘要

随着电动汽车的日益增加, 大量电动汽车入网将会对电力系统产生深刻影响。对电动汽车的有序充放电策略进行研究可以缓解电动汽车规模化入网造成的负面影响。本文首先对V2G (Vehicle-to-Grid)进行阐述, 介绍其概念、工作原理、主要功能及其关键技术。其次通过对电动汽车入网进行无序充电和有序充电的介绍, 论述了对V2G模式下电动汽车有序充放电控制策略研究的必要性。然后介绍了电动汽车的充电需求模型、充放电控制策略及其模型求解方法。最后对国内外有关V2G的示范应用进行了介绍, 并对V2G技术在国内外的研究现状进行了总结和展望。

## 关键词

电动汽车, V2G (Vehicle-to-Grid), 有序充放电, 控制策略

# Research on Charge and Discharge Control Strategy of Electric Vehicles in V2G Mode

Guangcai Liu, Xiaobo Liu, Zhiming Li, Xumin Liu

School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Sep. 1<sup>st</sup>, 2023; accepted: Oct. 1<sup>st</sup>, 2023; published: Oct. 9<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

With the increasing number of electric vehicles, a large number of electric vehicles will have a profound impact on the power system. The research on the orderly charging and discharging strategy of electric vehicle (EV) can alleviate the negative impact of large-scale EV network. In this paper, V2G (Vehicle-to-Grid) is introduced firstly, including its concept, working principle, main functions and key technologies. Secondly, through the introduction of electric vehicle (EV) random charging and sequential charging, this paper discusses the necessity of research on the control strategy of EV orderly charging and discharging in V2G mode. Then the charge demand model,

charge and discharge control strategy and model solving method of electric vehicle are introduced. Finally, it introduces the demonstration application of V2G at home and abroad, and summarizes and looks forward to the research status of V2G technology at home and abroad.

## Keywords

Electric Vehicles, V2G (Vehicle to Grid), Orderly Charging and Discharging, Control Strategy

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着现代社会的不断发展,家用汽车大量进入寻常人家,使人们的出行更为便捷。但是,燃油汽车增加了对化石能源的消耗,其过度消耗将导致能源危机。同时,大量汽车尾气排放对环境造成了严重影响,如酸雨、温室效应等,更是严重影响了人们的身体健康。针对严峻的能源与环境问题,人们开始寻求方法解决能源危机和空气污染,实现低碳经济以及绿色可持续发展。以电能为动力的电动汽车在此背景下逐渐兴起,成为解决上述问题的重要举措。近年来,我国提出了“双碳”目标和节能减排战略,电动汽车迅速发展。根据公安部数据,到2022年9月底,我国的新能源汽车保有量已经超过了1149万辆,其中纯电动汽车(Electric Vehicle, EV)的数量高达926万辆,占比80.56% [1]。然而,由于电动汽车的规模化入网,会给我们的电力系统造成严重的威胁,从而给电网的稳定性带来巨大挑战,如电网峰谷差不断增大[2]、电压质量下降[3]、电力系统网络损耗增加[4]等不利影响。此外,电动汽车配套充电设施在充电的过程中存在大量的AC/DC转换,将产生大量的谐波给电网带来谐波污染。用户出行习惯的不确定性将会导致电动汽车充电负荷在时间和空间上具有较大的随机性,使得电网运行调控越来越困难。

综上,电动汽车的规模化入网会对电网造成诸多不利影响,如不对其采取相应的控制措施,将会给电网运行带来极大的压力。V2G技术具有实际应用前景,是建设智能电网的必然要求,因此有必要对其进行深入研究。

## 2. V2G

### 2.1. V2G的概念

在1995年,Amory Lovins首次提出V2G的概念,随后特拉华大学教授William Kempton对V2G进行了进一步的发展。V2G (Vehicle-to-Grid)是一种将汽车与电网相连接的技术,它的核心思想是可以实现车辆与电网的互动。将电动汽车的车载动力电池作为分布式储能单元,能够使电网和电动汽车之间的能量相互流动,从而可以对电动汽车用户的充电行为进行管理,引导用户进行有序充电,在一定程度上降低电网受到电动汽车负荷的冲击[5]。要实现电动汽车用户每日的充放电行为进行控制,可将V2G技术考虑进去;在每日的负荷低谷阶段,因用电需求的降低,电网可以利用电动汽车的动力电池将发出的过多电量进行存储,采用降低电动汽车充电价格的措施用来引导电动汽车在这个阶段进行充电;在用电高峰阶段,电网可以提高电动汽车充电的价格,可以规避电动汽车在负荷高峰阶段集中充电,从而减小峰谷差、降低电动汽车充电成本与系统的网络损耗[6] [7]。在V2G模式下,对大规模电动汽车进行智能调度,在满足电动汽车用户日常出行需求的前提下,能够给用户侧带来经济收益,同时有利于电网的稳定,

实现了双赢，对电动汽车的大力发展有着重要影响[8]。

### 2.2. V2G 的工作原理

电动汽车与电网互动技术是一项较为前沿的新型科学技术，其结构框架有车辆层、智能充放电装置层、本地监控层和电网层，其结构示意图如图 1 所示。工作原理大致如下所述。

当电动汽车与智能充放电装置连接后，车辆层将电动汽车的荷电状态、动力电池额定容量、充放电上下限以及预计在网的充电时间等相关信息反馈给智能充放电装置层。智能充放电装置层获取车辆层上报的相关信息后，将其反馈给本地监控层的管理系统。本地监控层将智能充放电装置层获取的信息整合，将其上报给电网层的安全监控和数据采集系统。电网层是系统的最上层，在接收到本地监控层上报的电动汽车相关数据、分时电价等信息后，根据这些信息制定系统的调度计划，并将工作计划下发送给本地监控层，然后本地监控层根据电网层下发的工作计划向智能充放电装置层发出工作指令，智能充放电装置层执行本地监控层下达的充放电功率指令，对连接车辆进行充放电操作。

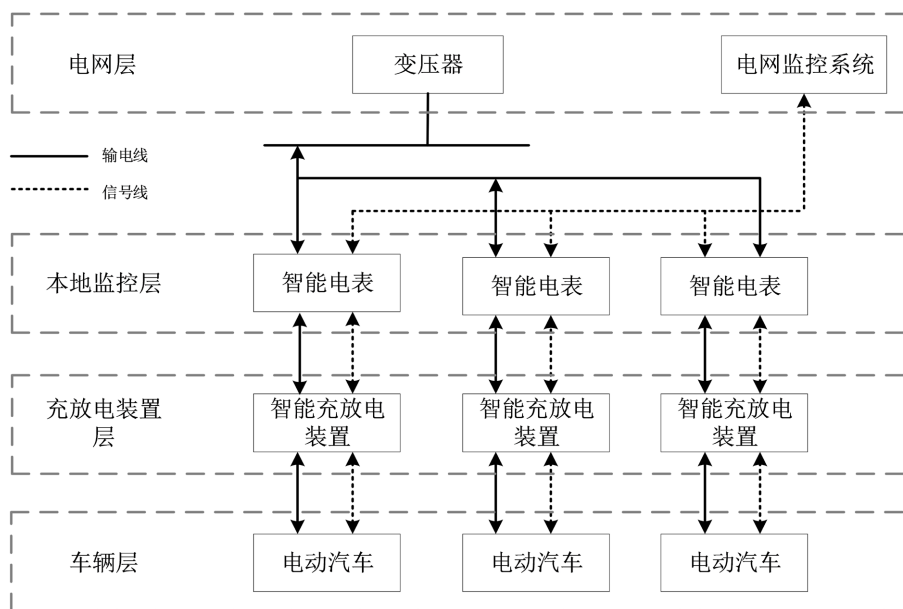


Figure 1. A schematic of the structure of V2G  
图 1. V2G 的结构示意图

### 2.3. V2G 的主要功能

#### 1) 削峰填谷

随着电动汽车的大量普及，电动汽车的数量不断增长，然而对于大部分电动汽车，其停车时间远远大于用车时间，因此可以将电动汽车动力电池所储存的电能加以合理的利用。文献[9]在电动汽车接入电网、电动汽车与电网功率交换方面进行了研究，指出在一天中的负荷高峰期，电动汽车将自身多余的有功功率输送给电网，在一天中的负荷低谷期，电动汽车从电网中吸收有功功率，从而实现负荷曲线的削峰填谷，降低电网的峰谷差，提高负荷率和设备使用率，在保证供电可靠性的同时，减少、减缓电力系统规划建设投资。

#### 2) 调频和调压

电压和频率的调节是电网日常运行管理的一个重要方面，而电网在这方面采取的措施是利用电能储

蓄,可以有效规避功率不平衡的问题。电力系统有功功率的供需平衡是由电网根据负荷的需求对频率进行调节来实现。大型发电机组的有功出力是目前主要的调频方式,但其缺点是使用和维护的成本很高,且响应速度慢。电动汽车动力电池的电能来自电网,而电动汽车也可以将自身动力电池储蓄的电能反馈给电网,因而电力系统中能量的不平衡可以利用电动汽车的充放电来加以平衡,以维持电网频率的稳定。当电动汽车参与电力系统的频率调节时,电动汽车通过电力电子接口接入电网参与 V2G 调频,具有比传统机组更快的响应速度[10]。文献[11]通过对电力系统的调频过程在电动汽车的参与下进行了分析,验证其在参与调节电力系统频率方面的优越性及其可行性。

### 3) 提供旋转备用

旋转备用,指发电机的转速运行正常,维持在一个额定的转速,能够实现随时并入电网,或者已经并入电网但是基本不带负荷,因而能够随时加大出力达到发电机组的额定容量。成本高、耗时长是传统旋转备用的缺点,随着可再生能源的入网,以风电为代表的可再生能源发电迅速发展,但由于风电出力的不稳定性,大规模的风电接入电网将会给电网的稳定运行带来巨大的挑战。对于当下的情况,传统的旋转备用预留方式难以满足,而且只依靠火电机组来提供旋转备用也变得不太科学,而利用电动汽车的动力电池来代替备用发电机不仅可以节约成本还更加灵活。文献[12]针对需求侧的旋转备用优化问题,提出了将电动汽车作为旋转备用调度的研究策略,通过算例分析得出其显著提高了系统运行的可靠性。

## 2.4. V2G 的关键技术

电网对电动汽车储能源的规划与调度,通过在电网与电动汽车群之间建立一个中间系统,负责将一定区域内的电动汽车组织成一个整体服从电网调度。随着电动汽车数量的大量增加,由总调度中心统一完成调度难度急剧上升。文献[13]针对大量的电动汽车接入电网不仅会导致用电负荷急剧增加,而且还会使电网的集中调度模式存在多维度的处理难题进行了研究,提出将不同时间尺度加以考虑的电动汽车充电负荷模型,能够预测未来电动汽车多时间尺度充电负荷。文献[14]将不同层次、不同区域各自调度的思想与电动汽车的调度相结合,构建了不同层次、不同区域的电动汽车优化调度充电模型。文献[15]提出了一种基于电动汽车与电网互动的电动汽车调度策略,能够实现电动汽车的充电与放电的双层优化。

要使电动汽车内部充放电系统能够实现电网与电动汽车之间的电能进行双向流动,电网与电动汽车之间需要一个连接双方的充电器,并且这个充电器是一个能够使电网与电动汽车之间能量相互流动的智能充电器,即该智能充电器既能够为电动汽车充电,也能够根据调节向电网回馈能量。双向充电器由三相 PWM 整流器、双向 DC-DC 变流器、双向 AC-DC 变流器以及滤波电路组成[16]。当电动汽车用户在进行充电的时候,智能充电器启动充电模式。智能充电器在接入交流电时会产生不需要的谐波分量,这时滤波器会将其滤除掉;电动汽车动力电池充电是直流充电,这时双向 AC-DC 变流器将处于工作模式,将交流电整流为直流电。为了避免直流储能单元的电压与双向变流器 AC-DC 所输出出来的电压不匹配,还需要一个用来调整电压使得充电电压保证在合理区间的双向变流器 DC-DC。当电动汽车停放时,可进行放电操作,智能充电器启动充电模式,其放电过程与充电过程正好相反。V2G 的一个核心技术就是双向 DC-AC 变流器,其充电过程与放电过程就是依靠此变流器完成,能够实现对电能质量的输入与输出进行合理的控制,进而合理地优化电网运行[17]。

## 3. EV 无序充电和有序充电

近年来,随着电动汽车数量的大量增加,电动汽车大规模无序充电将对电网运行产生消极影响。文献[18][19]指出电动汽车充电需求表现出午间降低、晚高峰上涨的变化特征,这将使白天的电力输出无法被充分利用,同时在晚高峰进行充电将带来负荷的新高峰,出现“峰上加峰”的现象;文献[20]表明配电



网的峰谷差增加,其原因之一就是由于电动汽车进行无序充电导致负荷聚集,而电动汽车的充电负荷在总负荷中的占比又较大,故峰谷差增大不可避免;文献[21]表明在电网基础负荷高峰时段,电动汽车充电负荷出现了聚集现象,这就导致负荷在各阶段的分布不匀称;文献[22]指出大量的电动汽车以无序充电为主,导致本地区域的负荷峰谷差增大;此外,电动汽车的数量激增,其充电负荷随之而同步增加,这使得大量电动汽车加入电网导致电网运行压力过大,且带来变压器过载,线路阻塞等问题。引导电动汽车集群由无序充电向有序充电转变可以实现充电负荷的自我调控是一项重要解决措施。

有序充电是指在满足电动汽车用户充电需求,不影响用户正常用车的基础上,利用切实可行的技术手段控制用户的充电行为,能够有效地控制和引导其接入电网完成充电。尤其是在负荷高峰时段,该措施能够有效确保电网安全、稳定运行。电价控制和功率控制是有序充电的两种具体充电控制方法[23]。电价控制是指采用分时电价的激励方式,在负荷较大和负荷高峰阶段提高充电费用,在负荷较小和负荷低谷阶段降低充电费用,引导用户避开负荷高峰阶段而在负荷低谷阶段进行充电[24]。文献[25]提出了制定分时电价用来实现有序充电,用户可以根据分时电价进行充电,以实现降低负荷峰谷差的目的。文献[26]在充分考虑了用户每日的用车习惯以及电动汽车充电站的日常运行状态,提出了一种基于电价机制的有序充电控制策略,减小用户的充电成本。但因为出行的刚性需求,价格机制只能一定程度上缓解电网的调峰压力。文献[27]同时将电网侧和用户侧的需求纳入考虑范围,将电网侧的负荷波动最小和用户侧参与V2G调度获得收益最大作为优化目标,求解方法采用粒子群优化算法,结果表明该方法能够有效降低电网负荷峰谷差,提高用户收益。功率控制是指电动汽车进行充电的充电时间和充电功率是由电网或充电站运营商直接控制,以达到减小电网的网络损耗和峰谷差的目的。文献[28]提出了考虑电动汽车灵活储能的交直流混合微电网功率协调控制策略,通过搭建一个同时考虑交流电与直流的混合微型电网仿真模型,对所提控制策略的有效性进行了验证。文献[29]为解决电动汽车大规模入网进行无序充电带来的“峰上加峰”,导致变压器过载和系统网络损耗增加等问题,提出了以系统的负荷波动偏差最小为目标的电动汽车有序充电控制策略,并且能够控制电动汽车的实时输出功率使其达到最优。

综上所述,目前针对电动汽车大规模入网进行无序充电对电网运行产生影响的相关研究表明,由于电动汽车充电负荷高峰阶段与电网基础负荷高峰阶段出现了重叠,致使配电网的峰谷差率逐渐增加,出现“峰上加峰”的现象,以至于电网运行压力过大,变压器过载,线路阻塞等。而引导电动汽车集群由无序充电向有序充电转变可以有效的解决当前负荷高峰叠加问题,稳定电网运行。但是相关研究所提电动汽车有序充电策略大多针对电动汽车充电调度,只满足了电动汽车用户的充电需求,鲜有将电动汽车的动力电池可以作为电源参与放电的情况进行考虑以及未深入考虑成本等其他需求。此外,电动汽车用户的响应能力和意愿对有序充放电策略的实施的效果影响重大,在实际实施中应加以重视。电动汽车是具备储能的可控负荷,可以通过充放电的方式参与电网的调度。在白天负荷高峰时段作为电源向电网反馈电能,在凌晨负荷低谷时段进行充电,通过调整充放电时间段来减小电网峰谷差率,抑制日负荷曲线的波动,降低电力系统发电成本和运营成本,提高电网设备利用率,有利于电网的稳定运行;还可以为参与V2G的用户带来经济收益,降低用户充电成本。同时电动汽车可以利用风、光等新能源发电进行充电,实现能源的就近消纳,提高新能源利用率以及减小能源随机性与波动性给电网带来的负面影响。因此,可以运用V2G技术为电网提供辅助服务,实现电网和车主的互利。

#### 4. EV 充电需求分析

电动汽车充电需求取决于用户出行习惯和电动汽车的电池特性。本文拟合所用车辆出行数据是基于2009年美国交通部(National Household Travel Survey, NHTS)的统计。由文献[30]可知,电动汽车每天回家和离家均满足正态分布的特征。式(1)为电动汽车回家的概率密度函数,式(2)为电动汽车离家的概率密度函数。

$$f_r(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_r \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x+24-\mu_r)^2}{2\sigma_r^2}\right], & 0 < x \leq \mu_r - 12 \\ \frac{1}{\sigma_r \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu_r)^2}{2\sigma_r^2}\right], & \mu_r - 12 < x \leq 24 \end{cases} \quad (1)$$

$$f_l(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_l \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu_l)^2}{2\sigma_l^2}\right], & 0 < x \leq \mu_l + 12 \\ \frac{1}{\sigma_l \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-24-\mu_l)^2}{2\sigma_l^2}\right], & \mu_l + 12 < x \leq 24 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $f_r(x)$ 为电动汽车回家的概率密度函数， $m_r=17.6$ ， $s_r=3.4$ ； $f_l(x)$ 为电动汽车离家的概率密度函数， $m_l=9.24$ ， $s_l=3.16$ 。

车辆日行驶里程满足对数正态分布，其概率密度函数如式(3)所示：

$$f_d(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma_d^2}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2}\right] \quad (3)$$

式中： $x$ 表示每日行驶距离， $m_d=3.2$ ， $s_d=0.88$ 。

令电动汽车所需充电时长为 $T_i$ ，则有 $T_i$ 如式(4)所示：

$$T_i = \frac{(S_{oc,i}^e - S_{oc,i}^b)C_i}{\eta_{c,i}P_{c,i}} \quad (4)$$

其中， $S_{oc,i}^b$ 为 $EV_i$ 的起始SOC； $S_{oc,i}^e$ 为 $EV_i$ 的期望SOC； $C_i$ 为 $EV_i$ 的电池容量； $\eta_{c,i}$ 为 $EV_i$ 的充电效率； $P_{c,i}$ 为 $EV_i$ 充电功率。

## 5. EV 充放电控制策略

从电网侧看，电动汽车的动力电池可视为分布式电源，通过区域代理商收集并上传电动汽车的信息给调度中心，配合调度中心制定合理的调度策略，有利于稳定电网的运行。从用户侧看，电动汽车用户参与V2G是为了获得一定的收益与降低充电成本。因此，制定合理的充放电控制策略可以使得电网侧和用户侧皆可获利，实现二者的双赢。

### 5.1. 上层调度模型

为了实现电力系统的削峰填谷，调度中心通过制定各个时段的基础负荷、电动汽车充电负荷和各分布式电源的放电出力，使得电网负荷方差达到最小。

上层调度目标函数为

$$\min H = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T \left( Q_{l,t} + \sum_{n=1}^{N_0} Q_{e,t} - Q_d - \bar{Q}_a \right)^2 \quad (5)$$

其中， $\bar{Q}_a = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left( Q_{l,t} + \sum_{n=1}^{N_0} Q_{e,t} - Q_d \right)$ 为系统平均负荷； $T$ 为一天的24个时段； $N_0$ 为代理商数量； $Q_{l,t}$ 为 $t$ 时段原电网基础负荷； $Q_{e,t}$ 为 $t$ 时段电动汽车集群参与充放电负荷，当 $Q_{e,t} > 0$ 时，电动汽车充电，当 $Q_{e,t} < 0$ 时，电动汽车放电； $Q_d$ 为 $t$ 时段该区域内其他分布式能源出力。

为了使用户的出行不受影响，保证总负荷在调度时间段内不变，需要设置电量约束。约束条件如式

(6)所示:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^{N_0} Q_{n,t} = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^{N_0} Q_{e,t} \quad (6)$$

其中,  $Q_{n,t}$  为  $t$  时段代理商  $n$  管理区域内的无序充电负荷。

## 5.2. 下层调度模型

为了使用户积极参与电网的调度, 应充分考虑用户收益, 在区域代理商配合调度中心的基础上, 建立以用户充电成本最小为目标函数的数学模型。

下层调度目标函数为

$$\min f = \left( \sum_{T_0}^{T_1} L_{c,i} P_{c,i} c_{c,i} - \sum_{T_0}^{T_1} L_{d,i} P_{d,i} c_{d,i} \right) \cdot \Delta T \cdot k_i \quad (7)$$

其中,  $T_0$  为充放电开始时间,  $T_1$  为充放电结束时间;  $L_{c,i}$  为充电决策参数,  $L_{d,i}$  为放电决策参数, 充电时  $L_{c,i}$  为 1,  $L_{d,i}$  为 0, 放电时  $L_{c,i}$  为 0,  $L_{d,i}$  为 1;  $P_{c,i}$  为充电功率,  $P_{d,i}$  为放电功率;  $c_{c,i}$  为充电电价,  $c_{d,i}$  为放电电价;  $\Delta T = T_1 - T_0$  充放电时长;  $k_i$  为用户响应度。电动汽车不能同时充电和放电, 应满足如式(8)所示的约束条件

$$L_{c,i} + L_{d,i} \leq 1 \quad (8)$$

电动汽车的放电要保持在安全范围内, 其 SOC 应满足如式(9)所示的约束条件

$$S_{oc,\min} \leq S_{oc,i} \leq S_{oc,\max} \quad (9)$$

其中,  $S_{oc,\min}$  为电动汽车 SOC 的下限,  $S_{oc,\max}$  为电动汽车 SOC 的上限;  $S_{oc,i} = \left( \sum_{T_0}^{T_1} L_{c,i} P_{c,i} \eta_{c,i} - \sum_{T_0}^{T_1} L_{d,i} P_{d,i} \eta_{d,i} \right)$  为电动汽车在任意时段的 SOC,  $\eta_{c,i}$  为  $EV_i$  的充电效率,  $\eta_{d,i}$  为  $EV_i$  的放电效率。

## 6. 模型求解方法

本文所建立的电动汽车充放电控制策略, 是以减小电网负荷方差、降低电动汽车充电成本为目标的二层调度模型, 可采用粒子群优化算法进行求解。

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是一种基于进化理论的计算方法。该计算广泛应用于电力系统求解, 能够有效的解决复杂优化问题[31]。其优点主要表现在收敛速度快、参数少且调节简单。

在粒子群优化算法中, 每个粒子都分别代表一个解, 每个粒子都有自己相应的位置和速度以及自己的适应值。其中, 适应值由目标函数决定, 其值的大小表示粒子的最优程度; 粒子的位置代表问题的可行解; 所有粒子的飞行距离和方向都由它们的速度决定。所有粒子都知道到目前为止发现的最佳位置和当前位置。此外, 所有粒子也知道到目前为止整个群体所有粒子的最佳位置。每个粒子都根据位置和速度的更新来寻找所搜索空间中的最优解。当粒子在更新位置和速度后, 会将自己当前位置与历史最优位置的适应值进行比较, 并将个体历史最优位置和全局历史最优位置进行更新。通过如此循环迭代更新, 粒子群算法能够逐渐找到问题的最优解。

粒子群优化算法的迭代过程是首先初始化一批粒子, 然后每次迭代都通过跟踪两个极值点来更新自身的速度和位置, 从而使得粒子逐步搜寻到个体最优解(Pbest)和所有粒子在当前时刻搜寻到的全局最优解(Gbest)。粒子  $N$  的信息用  $D$  维向量表示,  $D$  维空间有  $n$  个粒子:

$$\text{粒子群集合: } x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$\text{粒子 } i \text{ 位置: } x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$$

粒子  $i$  速度:  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$

粒子  $i$  的个体最优解:  $Pbest_i = [Pbest_{i1}, Pbest_{i2}, \dots, Pbest_{iD}]$

种群全局最优解:  $Gbest = [Gbest_1, Gbest_2, \dots, Gbest_D]$

粒子更新自己的速度和位置如式(10)、式(11)所示

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 \times rand_1^k \times (Pbest_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \times rand_2^k \times (Gbest_d^k - x_{id}^k) \quad (10)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (11)$$

其中,  $v_{id}^{k+1}$  和  $v_{id}^k$  表示第  $k+1$  次和第  $k$  次迭代粒子  $i$  的速度矢量的第  $d$  维分量,  $x_{id}^{k+1}$  和  $x_{id}^k$  表示第  $k+1$  次和第  $k$  次迭代粒子  $i$  的位置矢量的第  $d$  维分量,  $c_1$  和  $c_2$  表示学习因子,  $rand_1^k$  和  $rand_2^k$  表示生成的随机数, 取值范围为  $[0, 1]$ 。  $\omega$  表示惯性权重系数, 如式(12)所示。

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{k(\omega_{\max} - \omega_{\min})}{K_{\max}} \quad (12)$$

其中,  $\omega_{\max}$  和  $\omega_{\min}$  分别表示惯性权重的最大值和最小值;  $k$  表示当前迭代次数;  $K_{\max}$  表示最大迭代次数。

粒子群优化算法流程如图 2 所示。

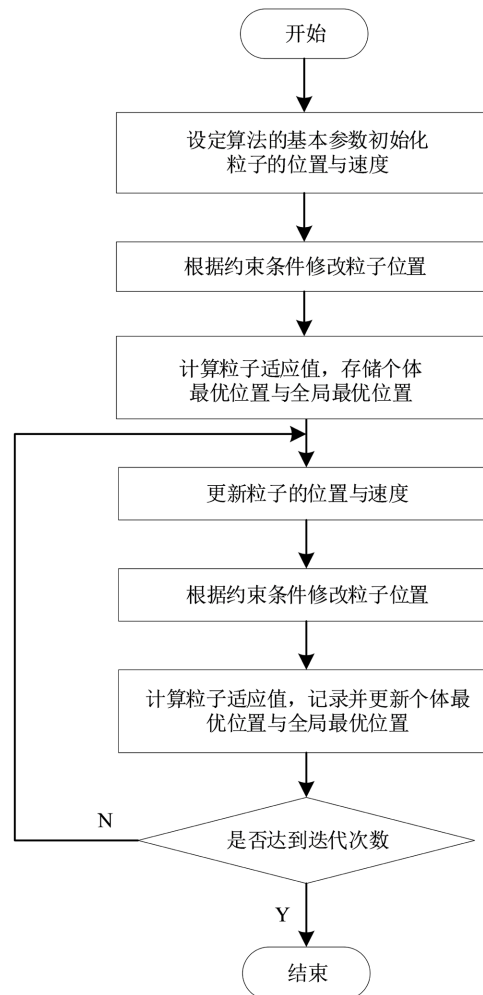


Figure 2. Flow chart of particle swarm optimization algorithm  
图 2. 粒子群优化算法流程图



## 7. V2G 示范应用

### 7.1. 国内 V2G 示范应用

#### 1) 郑州世纪家园示范项目

2018年7月9日,我国的首个规模化电动汽车有序充电项目在郑州世纪家园小区建成投运,该工程是为了响应国家电网对于居民电动汽车“80%在居民区充电,80%使用低谷电”的要求。为了保证居民充电方便,在小区业主的停车位上共建成50个有序充电桩,能够更好的实现居民区“一车一桩”的充电服务。新建的有序充电桩充电功率范围是1.3~7 kW,可根据负荷实时情况对充电桩的输出功率进行智能调整,更为灵活方便。当小区居民用电负荷较大时,充电桩自动降低输出功率,以此保证居民生活用电;当负荷较小时,充电桩自动提高输出功率,实现削峰填谷,此外还能使用户充电成本降低。小区居民充电操作流程如下:打开手机充电APP,选择有序充电模式,输入充电量和预计取车时间。充电启动后,充电桩自动根据小区负荷情况和车主需求调整充电时间和充电功率,以达到充电功率最优和保障居民用电的目的;车主也可以根据实际需求提前结束充电。有序充电模式多用于时间充裕以及下班后这段时间,如果白天车主着急开车,车主可以选择立即充电模式[32]。该项目能够实现削峰填谷,其削峰填谷的效果与参与有序充电的电动汽车数量有关,参与有序充电的电动汽车数量越多,削峰填谷的效果越好;同时能够节省车主的充电费用,实现电网与用户的互利共赢。

#### 2) 龙华区民兴苑示范项目

由南方电网公司运营实施的双向有序充放电项目,在广东省深圳市龙华区民兴苑小区建成投运,该工程是南方电网公司在深圳投运的粤港澳大湾区首个车网双向互动(V2G)示范项目。这个双向有序充放电项目不仅能够进行有序充电,还能进行放电,将车载动力电池的电能返送回电网,而且电动汽车停放时向电网反馈的电量可观。据相关方面统计,续航600公里的一辆电动汽车向电网反馈的电量可同时满足五个家庭一天的用电量。该项目不仅对能源的利用实现了最大化,还缓解了在用电高峰阶段电网的运行压力。电动汽车要实现向电网的电能反馈,需要通过运营商所建立的充电桩完成,因而电动汽车的充电流程涉及电网、充电桩运营商和用户,而用户响应电网的充电调度可以为三者都带来收益,实现“车-桩-网”三者互利互惠[33]。

### 7.2. 国外 V2G 示范应用

2007年,美国的电力系统运营商 PJM 联合特拉华大学对 V2G 展开了一系列的研究,并论证了 EV 作为移动的储能装置,能够为电网进行服务的可行性以及 EV 对电网调度信号响应的能力,对 V2G 技术的未来发展进程与研究起到了引领作用[34]。现阶段,国外在一定程度下相当重视对 V2G 的研究和应用。为了测试 V2G 在微电网中的应用,美国 NRG 能源公司和电动汽车充电运营商 EVgo 与加利福尼亚大学圣迭戈分校进行合作,在电动汽车中安装了双向供电设备[35]。2017年,为了利用 EV 动力电池的存储能力在最大程度上消纳可再生能源风能,在德国的奥芬巴赫工厂,汽车生产公司 NISSAN 与电力系统运营商 Tennet 以及 The Mobility House 公司联合进行了大规模的 EV 与电网互动的试点项目[36]。

通过对国内外 V2G 示范应用进行对比,不难发现国外 V2G 技术起步早,技术发展相对成熟;而我国 V2G 技术起步相对较晚,虽取得了一定成果,但仍然处于发展阶段。此外,国外 V2G 技术多数是由汽车企业牵头或与高校合作进行,而我国多数项目由电网公司牵头统筹安排,形式较为单一。

## 8. 总结与展望

随着电动汽车的快速发展,电动汽车数量急剧增加,大量电动汽车的充放电行为将会给电网带来较

大影响。本文对电动汽车的概念、工作原理、主要功能及其关键技术进行了介绍；并通过对电动汽车的无序充电和有序充电的介绍，论述了对 V2G 模式下有序充放电的必要性；然后介绍了电动汽车的充电需求模型、充放电控制策略及其模型求解方法。最后对电动汽车的充电需求模型和国内外有关 V2G 的示范应用进行了介绍。

目前，我国对电动汽车产业正进行大力发展，然而具有放电功能的电动汽车以及支持 V2G 的充电桩数量不多，因此在未来对电动汽车基础设施进行建设时，应将 V2G 考虑进去。为进一步分析大规模电动汽车充放电参与电网优化调控给新型电力系统的安全稳定运行带来的影响，可对试点项目的规模加以扩大。为避免不合理电价导致“高峰转移、峰上加峰”的风险，应实行分时电价实时调整，滚动优化。电动汽车动力电池寿命损耗是车主顾虑的重要方面，解决好此问题是提高用户参与度的关键，在后续的研究方向中应着重考虑。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国公安部网站. 全国汽车达 3.15 亿辆, 第三季度汽车月均新增量明显高于上半年连续 3 个月保持较快增[EB/OL]. <https://www.mps.gov.cn/n2254314/n6409334/c8719751/content.html>, 2022-10-08.
- [2] 马静, 沈玉明, 荣秀婷, 等. 考虑储能用户与新能源双边交易调峰服务的电力系统联合运营模式[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(1): 113-120.
- [3] 袁欣, 胡文博. 考虑电动汽车有序充电的配电网重构降损策略[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(34): 213-220.
- [4] Crozier, C., Deakin, M., Morstyn, T., et al. (2020) Coordinated Electric Vehicle Charging to Reduce Losses without Network Impedances. *IET Smart Grid*, 3, 677-685. <https://doi.org/10.1049/iet-stg.2019.0216>
- [5] 董佳宝. 基于 V2G 的电动汽车充放电电机研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [6] Mu, Y.F., Wu, J.Z., Jenkins, N., et al. (2014) A Spatial-Temporal Model for Grid Impact Analysis of Plug-in Electric Vehicles. *Applied Energy*, 114, 456-465. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.006>
- [7] Lin, J.H., Leung, K.C. and Li, V.O.K. (2014) Optimal Scheduling with Vehicle-to-Grid Regulation Service. *IEEE Internet of Things Journal*, 1, 556-569. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2361911>
- [8] 崔岩, 胡泽春, 段小宇. 考虑充电需求空间灵活性的电动汽车运行优化研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 981-994.
- [9] Wu, D.Y., Chau, K.T. and Gao, S. (2010) Multilayer Framework for Vehicle-to-Grid Operation. 2010 *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Lille, 1-3 September 2010, 1-6. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2010.5729041>
- [10] 裴振坤, 王学梅, 康龙云. 考虑用户充电计划的电动汽车辅助调频控制策略[J]. 动力工程技术, 2023, 42(1): 88-97.
- [11] 张冬蕊. 电动汽车参与电网调频交互影响研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [12] 蒋成成. 大规模风电并网背景下的电力系统旋转备用优化研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海工程技术大学, 2021.
- [13] 牛牧童, 廖凯, 杨健维, 等. 考虑季节特性的多时间尺度电动汽车负荷预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 74-85.
- [14] 康振南, 程杉. 采用双层优化模型的电动汽车有序充放电策略研究[J]. 东北电力技术, 2019, 40(3): 1-6.
- [15] 肖丽. 基于 V2G 的电动汽车充放电双层优化调度策略[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 164-171.
- [16] 荆磊, 张俊峰, 邱茂航, 等. 基于 V2G 的双向 AC/DC 变换器控制技术及电流畸变问题的研究[J]. 电源学报, 2018, 16(2): 45-50.
- [17] 刘晓飞, 张千帆, 崔淑梅. 电动汽车 V2G 技术综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 121-127.
- [18] 金志刚, 胡怡, 李根, 等. 面向“代客加电”服务的电动汽车充电引导策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 76-84.
- [19] 白泽洋, 巨健, 姜炎君, 等. 电动汽车参与电网调峰的关键技术研究综述[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(6): 25-31.
- [20] 苏粟, 刘紫琦, 王世丹, 等. 基于用户驾驶行为特性的电动汽车有序充电策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 63-71.

- [21] 郭创新, 刘洞宇, 朱承治, 等. 电动汽车居民区充电负荷建模分析[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 1-9.
- [22] 宋雨浓, 林舜江, 唐智强, 等. 基于动态车流的电动汽车充电负荷时空分布概率建模[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23), 47-56.
- [23] 刘翔宇. 基于实时电价的电动汽车有序充电策略研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2021.
- [24] 包宁宁, 刘晓波. 分时电价下电动汽车有序充放电优化策略[J]. 电力科学与工程, 2023, 39(2): 14-20.
- [25] 吴雨, 王育飞, 张宇, 等. 基于改进免疫克隆选择算法的电动汽车充电站选址定容方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(7): 95-103.
- [26] 陈立兴, 黄学良. 高速公路充电站电动汽车有序充电策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 112-117, 126.
- [27] 董龙昌, 陈民铀, 李哲, 等. 基于 V2G 的电动汽车有序充放电控制策略[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(1): 1-15.
- [28] 王浩, 康博阳, 郑征, 等. 考虑电动汽车灵活储能的交直流混合微电网功率协调控制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 2009-2025.
- [29] 周步祥, 何飞宇, 魏金萧, 等. 基于实时最优恒定功率的电动汽车有序充电策略[J]. 电测与仪表, 2021, 58(12): 18-23.
- [30] 侯慧, 徐焘, 柯贤彬, 等. 电动汽车快充对配电网的风险研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 87-93.
- [31] 纪震等. 粒子群算法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [32] 河南省人民政府门户网站. 国内首个规模化电动汽车有序充电项目在郑州投运[EB/OL]. <https://www.henan.gov.cn/2018/07-14/663815.html>, 2018-07-14.
- [33] 中国能源网网站. 南网在深圳投运粤港澳大湾区首个 V2G 项目[EB/OL]. [http://www.cnenergynews.cn/peixun/2022/01/26/detail\\_20220126116666.html](http://www.cnenergynews.cn/peixun/2022/01/26/detail_20220126116666.html), 2022-01-26.
- [34] Kempton, W., Udo, V., Huber, K., *et al.* (2008) A Test of Vehicle-to-Grid (V2G) for Energy Storage and Frequency Regulation in the PJM System. <https://www1.udel.edu/V2G/resources/test-v2g-in-pjm-jan09>
- [35] Steward, D.M. (2017) Critical Elements of Vehicle-to-Grid (V2G) Economics. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States). <https://doi.org/10.2172/1390043>
- [36] Roeder, S. (2021) The Car as an Energy Storage System. *ATZ Worldwide*, **123**, 8-13. <https://doi.org/10.1007/s38311-021-0654-1>