

Research on Communication Technology of Internet of Things Based on HPLC^{*}

WANG Hongxi^{*}, TAO Peng, LI Fei, SHI Zhengang, SHEN Hongtao, GAO Bo

(Marketing Service Center, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei 050000, China)

Abstract: Aiming at the resource allocation problem of broadband power line carrier communication, a physical layer resource allocation algorithm is proposed to meet the needs of low complexity. Firstly, based on the equal power allocation method, the set of sub-carriers required by each user to meet the minimum rate requirements is determined. The multi-user problem in resource allocation can be split into single-user problems is determined the optimal power allocation. Then Lagrange Multiplier Method is used to optimize the power of the sub-carrier set used by each user to further improve the system throughput. Simulation analysis shows that the proposed algorithm has higher throughput, and it is 13.52% and 5.61% higher than the maximum throughput algorithm and the Gong algorithm respectively, meeting the minimum rate requirements of users.

Key words: broadband power line carrier communication; Internet of Things communication; physical layer; resource allocation; Subcarrier EEACC: 6150P; 6240J doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2023.01.007

基于 HPLC 的物联网通信技术研究^{*}

王鸿玺^{*}, 陶 鹏, 李 飞, 石振刚, 申洪涛, 高 波

(国网河北省电力有限公司营销服务中心, 河北 石家庄 050000)

摘 要: 针对宽带电力线载波通信资源分配问题, 提出一种物理层资源分配算法, 满足低复杂度的需求。首先, 基于等功率分配方法, 确定每个用户满足其最小速率要求所需的子载波集合, 资源分配中的多用户问题可以拆分为单用户问题, 并满足最优功率分配, 然后将拉格朗日乘子法用于优化每个用户使用的子载波集的功率, 以进一步提高系统吞吐量。仿真分析表明, 所提算法具有更高的吞吐量, 比最大吞吐量算法和 Gong 算法提高了 13.52% 和 5.61%, 能够满足用户的最低速率要求。

关键词: 宽带电力线载波通信; 物联网通信; 物理层; 资源分配; 子载波

中图分类号: TM913.6; TN915.853

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2023)01-0041-05

随着智能传感器设备的海量接入, 电力系统中出现了各种类型的通信需求, 导致数据量呈爆炸式增长, 这对现有的通信方式提出了严峻的挑战。电力物联网要实现电网综合态势感知, 需要依托强大可靠的通信网络作为支撑。因此, 通信系统是电力物联网的核心, 在电力物联网行业具有较大的潜力^[1]。电力物联网利用电力线作为数据传输的媒介, 其通信系统能够与电气设备进行连接, 通过低成本的优势, 有效实现了各类终端设备的接入, 有效提升了效率^[2-3]。随着业界对电力线载波通信技术不断提出的需求, 宽带电力线载波通信应运而生, 通过这几年的不断发展, 其速率也从原来的几千 bps 提高到每秒几兆, 甚至是每秒几十兆, 通信性能有了很大的提高^[4]。随着智能电网对终端设备通信需求的不断增加, 传统的正交频分复用 (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM) 资源分配算法已经无法满足信息传输和用户服务质量保证的需

求, 因而众多研究者也对此投入了广泛的关注。

物联网和电力线通信 (Power Line Communication, PLC) 在家庭网络方面有广泛的应用前景。这个想法在物联网和射频识别 (Radio Frequency Identification, RFID) 流行之前就出现了。在物联网范式中, 已经为家庭网络开发了服务, 其作为物联网服务的一部分, 在家庭网络上得到了充分的发展; 存在没有与 RFID 或传感器之间的连接问题, 它们是资源有限的微型设备, 主要是电池供电, 整体推广存在一定的限制^[11]。

在智慧城市方面, PLC 和物联网可以帮助减少全球能源使用。世界上大约三分之二的能源、60% 的水消耗和 70% 的温室气体被城市使用。建筑和交通占能源消耗的 40% 和温室气体 (CO₂) 产生的约 21%, 使用高效技术可在不影响舒适度的情况下降低建筑物的能耗和二氧化碳排放量。智慧城市的概念部分基于物联网和 PLC, 其总体目标是实现基

项目来源: 2020 年国网河北省电力有限公司科技项目资助 (kjeb202019)

收稿日期: 2021-12-21 **修改日期:** 2022-02-11

于智慧城市、智能家居、智能建筑和智能移动的智能环境。

通过将智能设备与 IoT 和 PLC 结合使用,建筑物或家庭的运营将更加简单、安全、可靠、环保且具有成本效益。这些智能设备将通过互连的传感器和执行器收集数据,并根据特定事件的请求实时做出反应,为人类生活提供了极佳的便利。因此,拥有可靠的通信网络基础设施,例如允许对智能设备进行编程的无处不在的网络系统。这种基础设施需要价格低廉、易于安装和维护且可靠,这是因为具有高性能和可靠性的传统网络价格昂贵且难以在家庭环境中进行管理。这些因素使无处不在的网络和 PLC 成为智能家居环境网络基础设施的良好候选者,因为它们随时可用且几乎没有 PLC 安装成本。

文献[5]提出了最大吞吐量算法,该算法根据同一子载波在不同用户之间的差异的问题,信道质量最好的用户拥有更多的子载波,实现多用户分集增益。该算法的主要目的在于使得系统的吞吐量达到最大化利用,但却忽略了信道质量较差的用户,在该算法下,这些用户没有得到足够的资源,服务质量相对较差,极大地影响了公平性。基于此,文献[6]提出了应对于最大吞吐量的 max-min 算法,主要用于解决最大吞吐量算法造成的公平性问题,其将大量的系统资源分配给信道质量较差的用户,而将少量的资源分配给信道质量较好的用户,以实现用户之间的绝对公平。虽然这使得用户之间的公平性得到了保证,但却使得网络性能整体下降了,从而使得系统的总吞吐量降低。文献[7]提出了基于速率最大化(Rate Adaptation, RA)准则的遗传算法和注水算法相结合的优化分布。优化后的算法在性能上得到了一定的提升,系统的总吞吐量也提升了,但算法忽略了服务层面,导致整体的服务质量下降了,这是因为部分服务的服务质量需求(Quality of Service, QoS)无法满足。文献[8]采用等功率分配方法为每个子载波加载功率,根据公平偏差最大累积原则为用户分配系统资源,通过调整偏差度来控制用户速率的稳定性。但是这种算法在系统容量不足的情况下很容易导致非实时用户无法满足其 QoS 要求。

综上所述,目前的算法在一定程度上解决了资源分配的问题,但也存在一定的缺陷,用户没有按需获得足够的资源,导致网络整体通信性能不够理想,系统的吞吐量也没有达到最大化的要求。针对以上问题,本文提出一种物理层资源分配算法,该算法满足低复杂度的要求。仿真分析表明,本文算法具有更高的吞吐量,能够满足用户的最低速率要求。

1 物联网资源分配算法

物联网的发展面临着诸多的问题,如物联网设备爆炸式增长,无线资源匮乏等,充分考虑到物联网的特点,必须设计有效的资源分配算法。

1.1 电力线载波通信问题描述

如图 1 所示,电力线通道为开放共享通道^[12],所有的 PLC 网关都是独立存在的个体。每个 PLC 设备的相位资源是通过互相竞争得到的,通过相互之间的竞争得到原始资源。本文的资源分配问题归根到底是分配子载波信道的问题,而如何分配取决于功率的状态信息,根据该信息可以实时为用户和非实时用户动态分配,根据动态分配得到子载波。有了子载波之后,需要选择调制方式,不同调制方案的选择在于信道增益的大小,根据大小可动态选择,并利用香农公式可以得到比特。多用户动态资源分配除了提到的不同用户之间的 QoS 速率需求之外,用户之间的公平性也是不可或缺的考量。这是因为,往往一些信道质量较好的用户由于其优越性占据了大量的资源,这使得信道质量降低。所以在资源分配的时候,不仅仅要考虑到各业务 QoS 速率要求,更需要从系统整体的角度出发,提高系统整体吞吐量。

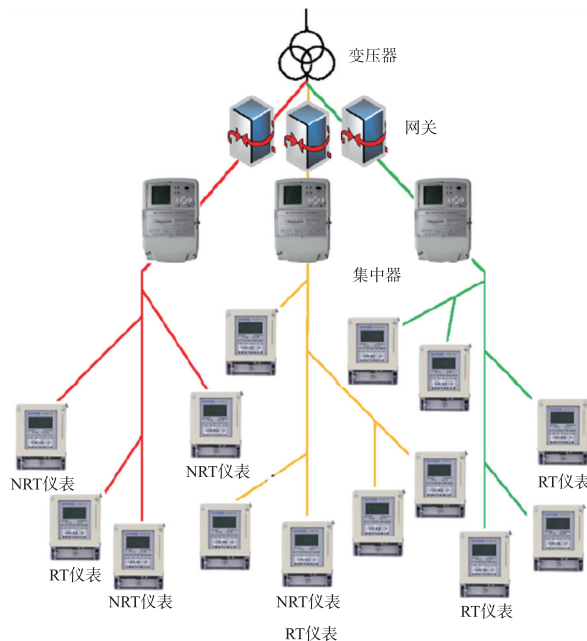


图 1 网络拓扑

1.2 物理层资源分配模型

假设载波通信系统中有 N 个子载波, h 个实时(Real-Time, RT)用户, j 个非实时(None-Real-Time, NRT)用户, RT 用户集合为 Ω_h , NRT 用户集合为 Ω_j 。对于多用户宽带电力线载波通信系统,系统在资源分配时,由于时延的问题,为了满足 RT 用户的速率

要求 R_{kRT}^{QoS} , 系统为用户分配了子载波, 为 RT 用户分配资源在满足其 QoS 速率要求时, 应尽可能降低 RT 用户的资源占用率, 以预留足够的资源满足 NRT 用户的 QoS 速率要求 R_{kNRT}^{QoS} 。上述步骤之后, 如果系统有剩余资源, 继续将剩余的资源全部分配给用户, 以提高系统的整体吞吐量。通过以上分配思路, 宽带电力线载波通信的动态资源分配数学模型如下:

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K C_{n,i,k} R_{n,i,k} \quad \text{s.t} \\
 & C1: C_{n,i,k} \in \{0, 1\} \quad \forall n, i, k \\
 & C2: \sum_{k=1}^K C_{n,i,k} \leq 1 \quad \forall n, i \\
 & C3: \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K C_{n,i,k} P_{n,i,k} \leq P_{\text{total}} \quad \forall i \\
 & C4: P_{n,i,k} \leq P_{\text{max}} \quad \forall n, i, k \\
 & C5: \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I C_{n,i,k} R_{n,i,k} \leq R_{kRT}^{QoS} \quad \forall k \in \Omega_h \\
 & C6: \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I C_{n,i,k} R_{n,i,k} \leq R_{kNRT}^{QoS} \quad \forall k \in \Omega_j
 \end{aligned} \quad (1)$$

如方程(1)所示, 式中变量的定义与描述如表 1 所示。

表 1 变量描述

变量	描述
$C_{n,i,k}$	子载波分配标志位
$C_{n,i,k}=0$	子载波 n 没有分配给第 i 个载波调制符号中的用户 k
$C_{n,i,k}=1$	子载波 n 分配给用户 k
$R_{n,i,k}$	第 i 个载波调制符号中分配给用户 k 的子载波 n 上的比特数
P_{total}	系统总发射功率的上限
P_{max}	功率谱限制下每个子载波的发射功率上限
R_k^{QoS}	用户 k 的 QoS 速率要求

该数学模型中的约束条件: C1 为子载波的标志位分配, C2 表示在任何 OFDM 符号中, 子载波 n 只能分配给一个用户; C3 表示 N 个子载波上的功率之和不超过总发射功率限制; C4 表示每个子载波上的发射功率不超过功率谱限制下的单载波最大发射功率; C5 表示在任意第 i 个 OFDM 符号, 用户 k 获得的速率大于 RT 用户 QoS 速率要求; C6 表示在任意第 i 个 OFDM 符号处, 用户 k 获得的速率大于 NRT 用户的 QoS 速率要求。

1.3 物理层资源分配算法

该分配算法主要针对宽带电力线载波通信资源分配问题, 首先基于等功率分配方法, 确定每个用户满足其最小速率要求所需的子载波集合, 资源分配中的多用户问题可以拆分为单用户问题, 并满足最优功率分配, 然后利用拉格朗日乘子法优化功率, 以

进一步提高系统吞吐量。

本文的物理层资源分配算法的低复杂度在于, 采用分步方式为每个用户分配子载波和系统功率。该算法首先对调度用户的子载波集进行划分, 保证用户满足其 QoS 要求, 在等功率子载波分配的基础上, 将宽带电力线载波频段的 N 个子载波加载到系统功率上。此时每个子载波得到的系统功率为:

$$p_n = P_{\text{total}} / N \quad (2)$$

式中: p_n 代表子载波 n 上的功率。

物理层计算子载波功率模式下满足用户 QoS 速率要求所需的子载波数为 n_k , 那么系统功率 $p_k = n_k \times p_n$, 其中:

$$\sum_{k=1}^K p_k \leq P_{\text{total}} \quad (3)$$

在确定了每个用户使用的一组子载波以满足其服务 QoS 速率要求后, 用户 k 使用的 n_k 个子载波通过拉格朗日乘数法进行最优分配, 以最大化每个用户的实际吞吐量。这时, 多用户资源分配模型缩减为单用户资源分配模型, 如下所示:

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{n=1}^{n_k} \log_2(1 + |H_{n,k}|^2 p_{n,k} / \sigma_{n,k}^2 \Gamma) \quad \text{s.t} \\
 & C1: \sum_{n=1}^{n_k} p_{n,k} \leq p_k \\
 & C2: p_{n,k} \leq p_k \quad \forall n
 \end{aligned} \quad (4)$$

$$C3: \sum_{n=1}^{n_k} \log_2(1 + |H_{n,k}|^2 p_{n,k} / \sigma_{n,k}^2 \Gamma) \geq R_k^{QoS}$$

上述问题的拉格朗日函数为:

$$\begin{aligned}
 L(\lambda_k, \mu_k, \nu_k) = & \sum_{n=1}^{n_k} \log_2(1 + |H_{n,k}|^2 p_{n,k} / \sigma_{n,k}^2 \Gamma) + \\
 & \lambda_k(p_k - \sum_{n=1}^{n_k} p_{n,k}) + \mu_k(P_{\text{max}} - p_{n,k}) + \\
 & \nu_k(\sum_{n=1}^{n_k} \log_2(1 + |H_{n,k}|^2 p_{n,k} / \sigma_{n,k}^2 \Gamma) - R_k^{QoS}) \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中: λ_k , μ_k 和 ν_k 是分别对应于 C1、C2 和 C3 的不等式约束的拉格朗日乘数。

所以式(4)的拉格朗日对偶问题可以通过以下公式进行表示:

$$\begin{aligned}
 & \min L(\lambda_k, \mu_k, \nu_k) \quad \text{s.t} \\
 & \lambda_k \geq 0, \mu_k \geq 0, \nu_k \geq 0
 \end{aligned} \quad (6)$$

最优拉格朗日系数的求解主要通过梯度下降法^[13]。设 λ_k 分别为 λ_k^* , μ_k^* 和 ν_k^* 的最优解, $p_{n,k}^*$ 的最优解为:

$$p_{n,k}^* = \left[\frac{1 + \nu_k^*}{(\lambda_k^* + \mu_k^*) \ln 2} - \frac{\sigma_{n,k}^2 \Gamma}{|H_{n,k}|^2} \right]^+ \quad (7)$$

本文的关键算法具体步骤如下:

Step 1: 初始化 $i=0$, 所有用户集 $\Omega_k = \Omega_h \cup \Omega_j$, 用户瞬时速率 $R_k(0)=0$, 其中 Ω_h 为 RT 用户集, Ω_j 为 NRT 用户集, 系统可用子载波集 $S = \{1, 2, \dots, N\}$ 。

Step 2: 从系统可用子载波集合 S 中为用户 k^* 选择信道质量最好的子载波 n^* [14], 其中 $n^* = \arg \max (\text{SNR}_{n,i,k^*})$ 。在选择完成之后, 未分配的子载波集 S 得到更新, 那么, 可以得到用户 k^* 的累加速率 $R_k^*(i)$ 。

Step 3: 判断 $R_k^*(i) \geq R_k^{\text{QoS}}$ 能否成立, 如果成立, 则从集合 Ω_k 中移除用户 k^* , 更新用户集合 $\Omega_k = \Omega_k - \{k^*\}$, 进入 Step 4。否则, 返回步骤 2。

Step 4: 判断 Ω_k 集合是否为空集。这时候有两种情况:

①若为非空集, 且子载波集 S 也非空, 则返回步骤 2 中, 不断为 Ω_k 中其他用户分配子载波, 直到系统中集合 S 为空集。

②若为空集, 那么此时所有用户得到的速率都大于 QoS 要求的业务速率, 此时如果系统子载波 S 和剩余的采集资源可用, 则重置用户设置 $\Omega_k = \Omega_h \cup \Omega_j$, 将继续分配剩余的未分配子载波给信道质量最好的用户, 直到系统可用子载波集 S 为空 [14]。

Step 5: 依据前面的步骤, 利用用户分配的子载波集合, 优化单个用户 k^* 子载波集合的功率, 更新用户获得的实际速率 $R_k^*(i)$, 结束物理层资源配置。让 $i=i+1$ 进入 Step 2。

表 2 系统参数说明

参数名称	参数值
子载波数	131
频段范围	2.441 MHz~5.615 MHz
功率谱限制	-45 dBm/Hz
FFT/IFFT 长度	40.96 μs
保护间隔的长度	18.32 μs
系统发射功率	50 mW
RT 率要求	200 kbp/s
NRT 率要求	150 kbp/s

2 仿真模拟分析

为了验证所提方法的有效性, 本文采用的仿真平台为 MATLAB [15], 将资源分配问题视为多阶段决策过程, 对网络进行仿真, 并选取了六个典型用户, 以更好地评估方案的有效性。该系统所用到的参数如表 2 所示:

仿真实验选择 6 个用户, 其中 3 个 NRT 用户和 3 个 RT 用户。信道质量从高到低为 $\text{RT1} > \text{RT2} > \text{RT3}$ 和 $\text{NRT1} > \text{NRT2} > \text{NRT3}$ 。为了验证本文算法的性能, 将本文算法与文献 [5] 最大吞吐量算法和文献 [8] Gong 算法在两种环境下对 RT 用户和 NRT 用户的

吞吐量进行比较。图 2 展示了在系统容量充足的情况下, 文献 [5] 和文献 [8] 与本文所提出算法的吞吐量的比较, 图 3 展示了在系统容量不足的情况下, 文献 [5] 和文献 [8] 与本文所提出算法的吞吐量的比较。本文算法基于等功率分配方法对每个用户使用的子载波集进行划分, 然后进行每个用户内的子载波最优功率分配, 提高了每个用户的实际吞吐量。

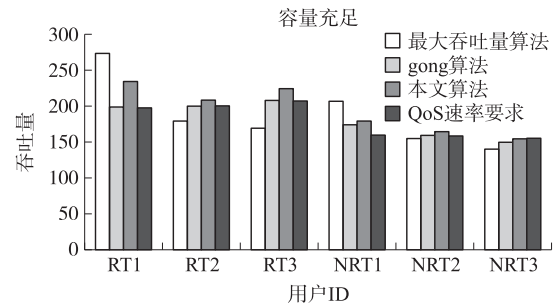


图 2 容量充足的用户吞吐量

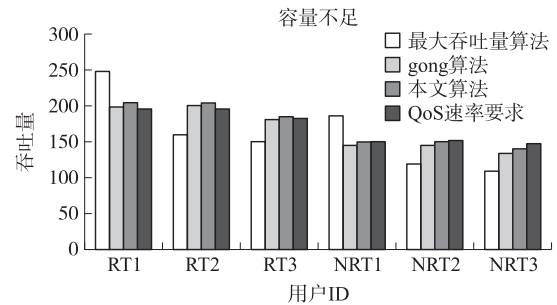


图 3 容量不足的用户吞吐量

针对系统容量充足的情况, 以用户 RT2 为例, 如图 2 所示, 所提出的算法比文献 [5] 算法和文献 [8] 算法提高了 16.94% 和 6.47%。

针对系统容量不足的情况, 以用户 NRT2 为例, 如图 3 所示, 所提出的算法比文献 [5] 算法和文献 [8] 算法提高了 13.52% 和 5.61%。

为验证本文算法的性能, 针对用户数据包丢失率将本文算法的与文献 [5] 算法和文献 [8] 算法进行比较, 比较 NRT 用户数据包丢失率。

图 4 显示了 NRT 用户的丢包率, 由于文献 [8] 算法采用最大累积公平偏差原则对 NRT 用户进行调

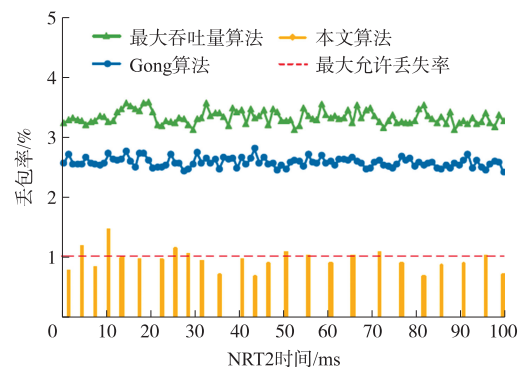


图 4 NRT 用户的丢包率

度,所以,当系统容量不足时,存在超过阈值的现象,分别为 2.89%和 2.67%^[16]。在本文的算法中,同样的环境下,NRT 用户仅在某些时刻存在超过阈值的情况。以 NRT2 用户为例,该算法比文献[5]算法和文献[8]算法分别降低了 72.04%和 65.54%的丢包率。

3 总结

本文提出了一种物理层资源分配算法,满足低复杂度的要求,该算法首先基于等功率分配方法确定每个用户满足其 QoS 速率要求所需的子载波集,优化功率分配问题,然后利用拉格朗日乘子法优化每个用户使用的子载波集的功率,进一步提高每个用户的吞吐量。通过系统容量充足和系统容量不足两种仿真环境,验证了本文提出的算法不仅能够提高系统的吞吐量,而且能够满足宽带电力线载波通信系统中更多用户的 QoS 需求。

参考文献:

- [1] 杨挺,赵黎媛,王成山. 人工智能在电力系统及综合能源系统中的应用综述[J]. 电力系统自动化,2019,43(1):2-14.
- [2] 黄家伟,夏中金,陈述. 宽带电力线载波通信信道特性研究与建模[J]. 黑龙江电力,2018,40(5):467-470.
- [3] 曹旺斌,尹成群,谢志远,等. 多输入多输出宽带电力线载波通信信道模型研究[J]. 中国电机工程学报,2017(4):1136-1141.
- [4] 戚佳金,陈雪萍,刘晓胜. 低压电力线载波通信技术研究进展[J]. 电网技术,2010,34(5):161-172.
- [5] Li S,Li D X,Zhao S. The internet of Things:A Survey[J]. Information Systems Frontiers,2015,17(2):243-259.
- [6] Jang J H,Lee K B. Transmit Power Adaptation for Multiuser OFDM Systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2003,21(2):171-178.
- [7] Xing Z,Wang W. Multiuser Frequency-Time Domain Radio Resource Allocation in Downlink OFDM Systems:Capacity Analysis and Scheduling Methods[J]. Computers & Electrical Engineering,2006,32(1-3):118-134.
- [8] 杨蓉,曹旺斌,尹成群. 基于自适应遗传算法的 PLC 信道动态子载波分配[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(12):111-116.
- [9] 李淞浓,胡晓锐,郑可,等. 低压电力线载波通信信道衰减特性测量与分析[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(4):99-106.
- [10] 龚钢军,陆俊,熊琛,等. 混合业务公平的宽带电力线正交频分复用系统跨层资源分配[J]. 中国电机工程学报,2015,35(6):1390-1390.
- [11] 朱友康. 基于拉格朗日的计算迁移能耗优化策略研究[D]. 赣州:江西理工大学.
- [12] 尹喜阳,刘乙召,杨挺,等. 一种用于电力物联网并发多业务的宽带电力线载波通信物理层资源切片方法及装置:CN112636787A[P]. 2121-04-09.
- [13] 孙立平,姜建芳. MATLAB 代码在 PLC 控制系统中的实现方法研究[J]. 微计算机信息,2012(5):36-37,42.
- [14] 刘永. 基于有限反馈的 OFDM 中继协作网络的联合资源分配[D]. 上海:上海交通大学.



王鸿玺(1986—),男,河北石家庄人,汉族,工学硕士,高级工程师,研究方向:电力线载波通信技术。