

基于联盟区块链的航空里程积分结算方法

高庆吉 孟令烨 邢志伟

(中国民航大学机器人研究所 天津 300300)

摘要 为解决航空联盟公司里程积分结算的互信问题,研究基于联盟链的里程积分结算方法。提出基于智能合约的同态加密的里程结算方法,对里程值进行同态加密,实现交易信息链上保密存储。通过智能合约对比自证里程结算数据以及同态计算结果数据,识别联盟公司是否发布虚假结算结果,解决里程结算可信问题。在超级账本对该方法进行模拟测试,结果表明该方法链上结算数据完整并准确识别发布虚假结算结果公司,具有较好的性能和较高的安全性。

关键词 航空联盟 联盟链 智能合约 同态加密 里程积分结算

中图分类号 TP311

文献标志码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2024.10.012

AIRLINE MILEAGE POINTS SETTLEMENT METHOD BASED ON CONSORTIUM BLOCKCHAIN

Gao Qingji Meng Lingye Xing Zhiwei

(Robotics Institute of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract In order to solve the mutual trust problem of mileage points settlement of airline alliance companies, the mileage points settlement method based on consortium blockchain is studied. A mileage settlement method based on homomorphic encryption of smart contracts was proposed, which homomorphically encrypted mileage values and achieved confidential storage of transaction information on-chain. By comparing self-certified mileage settlement data and homomorphic calculation result data through smart contracts, it identified whether the affiliate company released false settlement results, and solved the mileage settlement credibility problem. The method was simulated and tested in the super ledger. The results show that the on-chain settlement data is complete and accurately identifies the companies that issue false settlement results, and the proposed method has better performance and higher safety.

Keywords Airline alliance Consortium blockchain Smart contract Homomorphic encryption Mileage credit settlement

0 引言

航空联盟是由多家航空公司组成的商业联盟。联盟成员通过共享航班代码、优惠政策和增值服务,提升旅客的服务体验,为成员航空公司创造更具竞争力的商业优势。里程积分是航空联盟中常用的优惠政策。旅客可在联盟内任何成员公司内购买机票获得积分累积,并在其他成员公司凭积分兑换商品或服务。在传

统的里程积分结算过程中,旅客需要在航空联盟内的主导航空公司开设账户,用于记录里程积分。当旅客在合作公司获得积分时,合作公司定期从会员管理系统收集汇总兑换请求数据,生成约定的兑换文件,并发送到主导航空公司 FTP 服务器;主导航空公司接收兑换文件完成兑换,兑换成功后,更新中心数据库中的旅客账户积分^[1]。由于航空联盟中的公司存在竞争关系,使用中心数据库^[2]的里程积分结算方法,存在数据库管理者篡改里程积分的可能性。因此,需研究一种

航空联盟内透明的里程积分结算方法,提高积分交易的可信度。

区块链技术如今已进入 3.0 时代——以区块链技术为基础的可编程社会^[3]。不同于 1.0 时代的可编程货币^[4]、2.0 时代的可编程金融^[5],3.0 时代中的区块链技术更广泛地应用在物联网^[6-7]、智慧医疗^[8-9]、可信供应链^[10-12]、可信交易等领域。例如,薛腾飞等^[13]提出基于区块链的医疗共享模型解决了医疗数据可信存储与共享。王文奇等^[14]将区块链应用到电子仓单的存储领域,设计了电子仓单交易以及存储的交易算法,解决了仓储过程信息可信问题。张森等^[15]研究了面向冷链物流的区块链技术方案,针对订单数据和环境数据设计了链上系统,实现冷链数据实时上链,提高了冷链物流行业的可信性和数据的安全性。杨迪等^[16]利用区块链作为底层数据存储模块设计了路边停车管理系统,保障了停车收费数据安全可靠。Elis 等^[17]提出了一种基于区块链的电子政务系统,通过区块链可信存储政府政令,提高了政府的公信力。秦金磊等^[18]研究了基于区块链的电能交易方法,以信用值影响其获得挖矿奖励的概率,实现微电网电能可信交易。综上所述,将区块链的可信存储应用到航空联盟领域,可保障联盟内里程积分结算的可信执行。

针对航空联盟公司里程积分结算的互信问题,提出基于联盟区块链的里程积分结算方法。研究基于智能合约的同态加密的里程结算方法对里程积分进行加密结算,实现在不公开具体交易信息的情况下对里程积分进行可信结算并识别不诚信公司。

1 里程结算方法设计

1.1 结算系统区块链架构设计

区块链按照准入机制^[19]可分为公有链、联盟链、私有链。公有链中所有节点均可自由加入或者退出,加入公有链的节点可以看到从创世块到当前区块上的所有信息。联盟链只允许授权的节点加入网络,适用于已经具有一定信任度的节点使用。私有链主要用于调试发布前的区块链平台。公司间具有一定的信任度,才会组成航空联盟,因此联盟内积分结算区块链架构选择联盟链。只有通过授权加入的公司才能被许可加入联盟组织,进而对数据进行对应的读写操作。加入联盟组织的授权证书由证书颁发机构(CA)节点负责颁发,CA节点本身不会参与航空里程结算。

据此设计的里程积分结算系统如图 1 所示。航空联盟成员拥有自己的节点以及自己的世界账本,通过智能合约实现交易数据上链、获得结算数据、存储获得密钥信息。监管机构拥有 CA 节点,为联盟成员提供数字证书。

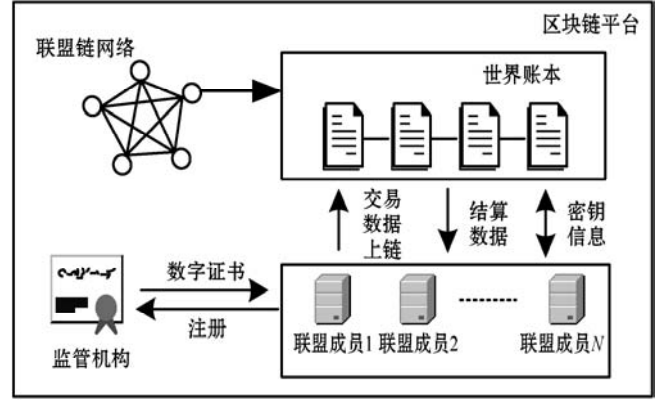


图 1 里程积分结算系统架构

1.2 基于智能合约的同态加密方案

在交易后需要将旅客与联盟公司积分交易信息记录在区块链上。同一时间段内同一公司可能进行多次里程积分交易。如果为公司开设交易的独立存储单元,则需要频繁地读取和写入操作,降低了系统的性能。因此不为公司交易开设独立存储单元,而是只在区块链上记录以由联盟公司 ID、交易 TxID、里程积分值 m 组成的交易信息,其表示形式为以 ID、TxID、 m 共同命名的 Message 结构体。区块链上存储的交易具体信息属于交易企业的商业机密,故不可以对联盟内其他企业开放,即需要对交易信息进行加密,加密后又不影响里程结算,因此使用同态加密算法对交易信息中的里程积分值进行加密。使得其他企业可以获得里程积分的最终值但是不能获得每条交易的具体信息。使用 Paillier 加密方法进行同态加密,Paillier 加密方法如下。

选择两个完全独立长度相等的大素数 p, q , 即满足 $\gcd(pq, (p-1)(q-1)) = 1$, 令 $n = pq, \lambda = \text{lcm}(p-1, q-1)$, lcm 为最小公倍数, 并定义 $L(x) = (x-1)/n$ 。随机选择 $g \in \mathbf{Z}_n^*$, 满足 n 可以整 g 的阶, 并通过式(1)计算 μ 。

$$\mu = (L(g^\lambda \pmod{n^2}))^{-1} \pmod{n} \quad (1)$$

其中 mod 为取余操作, 得到了用于加密解密公私钥对, 公钥为 (g, n) , 私钥为 (λ, μ) 。公钥负责对明文进行加密, 私钥负责对明文进行解密, 此时有 $g = n + 1, \lambda = \varphi(n), \mu = \varphi(n)^{-1} \pmod{n}$ 其中 $\varphi(n) = (p-1)(q-1)$ 。

加密时, 对交易消息中的里程积分明文 m , 选择随

机数 $r \in \mathbf{Z}_N^*$, 并且 $\gcd(r, n) = 1$, 通过加密算法 E 得到密文 C , 如式(2)所示。

$$C = E(m) = g^m r^n \pmod{n^2} \quad (2)$$

解密时, 通过私钥 (λ, μ) 对密文 C 进行解密, 得到明文 m , 解密算法 D 如式(3)所示。

$$m = D(C) = L(C^\lambda \pmod{n^2}) \cdot \mu \pmod{n} \quad (3)$$

在密文状态下, 对明文 m_1, m_2 进行加减操作即对加密后的交易信息密文 C_1, C_2 进行乘除操作, 如式(4)所示。

$$E(m_1, pk) \cdot E(m_2, pk) = (g^{m_1} r_1^n)(g^{m_2} r_2^n) \pmod{n^2} = g^{m_1+m_2} (r_1 r_2)^n \pmod{n^2} = E(m_1 + m_2, pk) \quad (4)$$

因此联盟企业对 m_1, m_2 的求和后, 使用公钥 (g, n) 以及随机数 $R = r_1 r_2$ 进行同态加密计算得到的值与 C_1, C_2 的乘积运算值相同。可以通过比较联盟企业公布的里程积分计算结果同态加密后的值以及 C_1, C_2 乘积运算值之间是否一致, 来判断联盟企业公布的里程积分与其存储在区块链上的交易信息计算结果是否一致, 从而验证联盟企业结算时是否诚实。基于智能合约以及同态加密的里程结算方法中里程发布以及结算步骤如下:

Step1 公司 A 将与旅客交易产生的里程交易信息中的里程积分使用私钥 (λ, μ) 进行同态加密, 并保存加密时的随机数 r 。

Step2 调用写入交易智能合约, 将加密后的交易信息写入区块链中存储。

Step3 结算时, 公司 A 将所有的 r 进行乘法运算得到 $R = \prod r$, 并将 R 、公钥 (g, n) 、最终的里程积分结算结果通过发布结算智能合约发布到区块链中。

Step4 其他联盟公司调用结算智能合约获得 A 公司的 R 、公钥 (g, n) 、公司 A 发布的里程积分计算结果。使用加密算法对结果进行同态加密, 获得密文 C_g 。并通过结算智能合约对区块链中 A 公司写入的交易信息进行同态加法计算获得密文 C_b 。

Step5 比较 C_g 与 C_b , 如果值相同则认为 A 公司发布的里程积分计算结果可信且正确。

A 公司通过基于智能合约的同态加密方法加密里程积分, 不需要将每一次的里程积分交易情况公开, 就可以为其他公司提供可信结算结果, 从而与其他公司进行结算。

2 智能合约设计

根据第 1 节提到的智能合约进行设计, 主要有写

入交易智能合约、发布结算智能合约、结算智能合约。

2.1 写入交易智能合约设计

主要功能是将加密后的交易信息 C_V 写入区块链。首先获得当前交易 ID, 再组成由以联盟公司 ID、加密后的里程积分值、当前的交易 ID 为联合主键的 Message 结构体, 并返回调用结果, 如算法 1 所示。

算法 1 写入交易智能合约

输入: 联盟公司 ID I_D , 加密后的里程积分值 C_V 。

输出: InvokeResult(调用合约结果)。

Begin

1. $t_{xid} \leftarrow \text{GetTXID}()$ // 获得当前的交易 ID
2. $\text{Message} \leftarrow \langle I_D, t_{xid}, C_V \rangle$ // 将联盟公司 ID、当前的交易 ID、加密后的里程积分 C_V 组成交易消息写入区块链
3. $\text{InvokeResult} \leftarrow \text{Message}$ // 写入调用结果
4. return InvokeResult // 返回结果

2.2 发布结算智能合约设计

主要功能是在结算时, 将计算后的 R 、同态加密公钥 (g, n) 、最终的里程积分结算结果写入公司 ID 命名的结构体 Company 中, 结构体如下:

```
Company ID struct {
    int R // 结算交易中随机数乘积
    string g // 同态加密公钥对中 g 值
    string n // 同态加密公钥对中 n 值
    string v // 里程积分结算结果
}
```

首先, 读取区块链中存储的以联盟公司 ID 命名的 Company 结构体, 并将随机数 r 乘积、同态加密公钥、里程积分结算结果写入以联盟公司 ID 命名的 Company 结构体。最后返回调用结果, 如算法 2 所示。

算法 2 发布结算智能合约

输入: 随机数 r 乘积 R , 同态加密公钥 (g, n) , 里程积分结算结果 V , 联盟公司 ID I_D 。

输出: InvokeResult(调用合约结果)。

Begin

1. $\text{Company} \leftarrow \text{getCompany}(I_D)$ // 寻找以联盟公司 ID 命名的 Company 结构体
2. $\text{Company} \leftarrow (R, g, n, V)$ // 将随机数 r 乘积, 同态加密公钥, 里程积分结算结果写入以联盟公司 ID 命名的 Company 结构体
3. return InvokeResult // 返回调用结果

2.3 结算智能合约设计

主要功能是将区块链中其他公司存储的里程交易信息进行同态加法计算, 并返回计算后的密文。

首先, 读取区块链中存储的以联盟公司 ID 命名的

Company 结构体中随机数 r 乘积、同态加密公钥、里程积分结算结果。之后,计算所有以联盟公司 ID 为部分键值的交易消息中 C_v 的同态加法运算结果 C_b ,最后返回以随机数 r 乘积、同态加密公钥、里程积分结算结果、同态加法计算后的加密结果为内容的调用结果,如算法 3 所示。

算法 3 结算智能合约

输入:联盟公司 ID I_D 。

输出:InvokeResult(调用合约结果)。

Begin

1. Company \leftarrow getCompany(I_D) //寻找以联盟公司 ID 命名的
//Company 结构体
2. (R, g, n, V) \leftarrow Company //读取以联盟公司 ID 命名的
//Company 结构体中随机数 r 乘积、同态加密公钥、
//里程积分结算结果
3. Message \leftarrow queryMessage(I_D) //读取所有以联盟公司 ID 为
//部分键值的交易消息
4. $C_b \leftarrow \Pi(\text{Message}, C_v)$ //对消息中的 C_v 进行同态加法运算
//得到结果 C_b
5. InvokeResult \leftarrow (R, g, n, V, C_b) //将随机数 r 乘积,
//同态加密公钥、里程积分结算结果、同态加法计算后
//的加密结果写入返回结果
6. return InvokeResult //返回结果

3 系统测试

为了测试所研究的基于智能合约的里程积分结算方法的可行性,在 Ubuntu18.04 环境下,使用 Hyperledger Fabric 2.0 区块链平台搭建里程积分结算系统。在服务器上搭建区块链,通过 Docker 运行 3 个模拟联盟节点。配置创世块以及区块链网络,部署智能合约到 3 个节点中,并使用 CA 节点注册 3 个联盟公司用户分别代表航空公司 A、航空公司 B、酒店 C,每个公司初始化 9 999 里程积分。

3.1 同态加密结算正确性测试

为了验证联盟公司间里程结算的正确性,模拟多家联盟公司与客户进行交易。

- (1) Airline B 支付旅客 100 里程积分。
- (2) Hotel C 因旅客住宿获得 50 里程积分。
- (3) Airline B 支付旅客 100 里程积分。
- (4) Airline A 因旅客兑换机票获得 100 里程积分。
- (5) Hotel C 因旅客住宿获得 150 里程积分。
- (6) Hotel C 支付旅客 200 里程积分。
- (7) Airline A 因旅客兑换机票获得 100 里程积分。

分别将每个公司的交易信息中里程积分进行同态加密,并将交易信息写入区块链。通过智能合约对公司的交易信息进行同态加法计算得到如表 1 所示结果。

表 1 同态加密结果表

联盟企业	里程积分明文	同态加密值	链上密文同态加法计算值
Airline A	+ 100	1383013225664633... 1656463826481220662 6072719	186460230709386... 202086508414463042 5720423
	+ 100	7946646401359494... 1409887209244487010 0223549	
Airline B	- 100	5092991716223248... 1803774308772157736 7599026	178342476705998... 108725145978605071 4446120
	- 100	8715378392643242... 4193931990052949674 52786093	
Hotel C	+ 50	2630282720612246... 5668056234187263163 60801776	949076568764990... 035761044967313983 19098032
	- 200	3471918914828482... 7847367673118460290 08764711	
	+ 150	8007564292103348... 5318991341839797836 82629284	

通过智能合约获得各公司发布的里程结算结果,将结果使用链上存储公司对应的公钥以及 R 进行加密得到的结果如表 2 所示。对于诚实发布结算结果的公司,加密后的结算结果和从区块链中计算的结果相同。对于不诚实的公司,加密后的结算结果和从区块链中计算的结果不同,可以发现 Airline B 不诚实。因此可以保证结算结果可信。

表 2 里程积分结算结果表

联盟企业	企业发布里程积分结算结果	同态加密值	是否与链上密文同态加法计算值相同
Airline A	10 199	186460230709386...2020 865084144630425720423	是
Airline B	9 899	755548108982249...1387 066059770354440913009	否
Hotel C	10099	949076568764990...0357 6104496731398319098032	是

3.2 同态加密性能分析

为了分析同态加密对性能的影响,分别对同态加密解密过程以及密文加减所需时间进行测试。

对同态加密以及解密所需时间分别进行 20 次测试,测试结果如图 2 所示。从测试结果可知同态加密平均用时为 9.8 ms,解密平均用时为 3.7 ms。

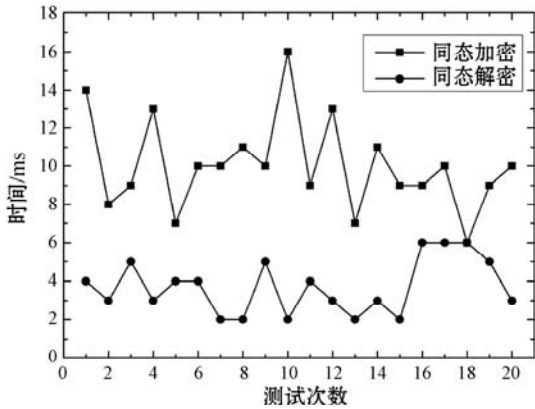


图 2 同态加解密时间测试

对不同数量的里程积分交易进行密文加减计算所需时间与明文加减所需时间进行对比测试,每个积分交易数下对加减运算测试 10 次,并对运算时间取平均值,测试结果如图 3 所示。

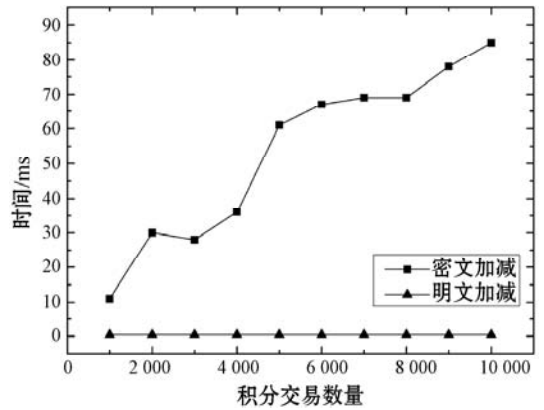


图 3 不同积分交易数运算时间测试

随着需要进行运算的交易数量增多,密文加减所需时间增多,而明文加减运算所需时间几乎不变。

由上述实验结果可知,本文提出的同态加密结算方法在提高安全性的同时并没有显著增加计算开支。

3.3 安全性分析

结合应用场景,对比分析了本文基于智能合约的同态加密方法以及其他文献中的同态加密方法,如表 3 所示,本文方法相较于其他文献提出的方法具有更好的密钥灵活性和较低的区块链计算压力,相较于未加密的存储方式,具有更好的数据安全性。

表 3 安全性对比表

方案	链上数据存储形式	密钥保存方式	密钥灵活性	加解密位置	区块链计算压力
未加密方法	明文	无	无	无	低
文献[20]方法	密文	将密钥对写入智能合约 加解密时调用智能合约	差	链上	高
文献[21]方法	密文	密钥对需要双方提前约定 双方并分别保存	较好	链下	较低
本文方法	密文	密钥对不需要提前约定 只需将公钥存入区块链	好	链下	较低

4 结 语

针对航空联盟内公司里程积分结算存在的信任问题,提出基于区块链技术的结算和信息同态加密方法。以联盟链技术为基础设计的里程积分结算系统区块链架构,依靠区块链去中心化、不可篡改的特点,实现里程积分数据在联盟内部公开可信,避免出现数据控制者随意篡改交易数据情况。重点研究基于智能合约以及同态加密的里程结算方法,可在联盟公司不共享具体交易信息的条件下可信结算。所研究方法在里程积分的数据安全、隐私保护和公开可信交易方面具有优越性,为民航领域里程积分结算提供了新的思路。未来可进一步研究航空联盟公司大运输量情况下区块链

结算具体实施方法。

参 考 文 献

- [1] 李福娟. 区块链技术在航空公司积分体系的应用探索[J]. 中小企业管理与科技, 2020(17): 165 - 167.
- [2] 邵奇峰, 金澈清, 张召, 等. 区块链技术: 架构及进展[J]. 计算机学报, 2018, 41(5): 969 - 988.
- [3] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2016, 42(4): 481 - 494.
- [4] Nakamoto S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system [EB/OL]. (2009 - 12 - 25) [2024 - 03 - 06]. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [5] 张中霞, 王明文. 区块链钱包方案研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(6): 28 - 38.
- [6] Si H, Sun C, Li Y, et al. IoT information sharing security

mechanism based on blockchain technology[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2019, 101: 1028 – 1040.

- [7] Novo O. Blockchain meets IoT: An architecture for scalable access management in IoT [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(2): 1184 – 1195.
- [8] 王辉, 刘玉祥, 曹顺湘, 等. 融入区块链技术的医疗数据存储机制[J]. *计算机科学*, 2020, 47(4): 285 – 291.
- [9] Mazlan A, Daud S, Sam S, et al. Scalability challenges in healthcare blockchain system—a systematic review [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 23663 – 23673.
- [10] Min H. Blockchain technology for enhancing supply chain resilience[J]. *Business Horizons*, 2019, 62(1): 35 – 45.
- [11] Nir K. 1 Blockchain's roles in meeting key supply chain management objectives[J]. *International Journal of Information Management*, 2018, 39: 80 – 89.
- [12] 作冀颖, 杜聪, 马志远, 等. 应用于食品追溯体系的区块链架构设计[J]. *计算机应用与软件*, 2019, 36(12): 46 – 50, 86.
- [13] 薛腾飞, 傅群超, 王枞, 等. 基于区块链的医疗数据共享模型研究[J]. *自动化学报*, 2017, 43(9): 1555 – 1562.
- [14] 王文奇, 潘恒, 潘磊, 等. 基于区块链的电子仓单可信存储技术[J]. *应用科学学报*, 2020, 38(1): 105 – 118.
- [15] 张森, 叶剑, 李国刚. 面向冷链物流的区块链技术方案研究与实现[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(3): 19 – 27.
- [16] 杨迪, 徐涵, 龙承念, 等. 基于区块链技术的道路路边停车管理系统[J]. *应用科学学报*, 2021, 39(1): 90 – 98.
- [17] Elisa N, Yang L, Chao F, et al. A framework of blockchain-based secure and privacy-preserving e-government system[J]. *Wireless Networks*, 2018, 29(3): 1005 – 1015.
- [18] 秦金磊, 孙文强, 朱有产, 等. 微电网中基于区块链的电能交易方法[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(11): 130 – 138.
- [19] 张志威, 王国仁, 徐建良, 等. 区块链的数据管理技术综述[J]. *软件学报*, 2020, 31(9): 2903 – 2925.
- [20] 余维, 陈建森, 刘琦, 等. 一种面向医疗大数据安全共享的新型区块链技术[J]. *小型微型计算机系统*, 2019, 40(7): 1449 – 1454.
- [21] 徐文玉, 吴磊, 阎允雪. 基于区块链和同态加密的电子健康记录隐私保护方案[J]. *计算机研究与发展*, 2018, 55(10): 2233 – 2243.

提出了 LADRC 控制方法在解耦性能、快速性和抗扰性能方面均优于传统控制。

参 考 文 献

- [1] 许津铭, 谢少军, 张斌锋. 分布式发电系统中 LCL 滤波并网逆变器电流控制研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(16): 4153 – 4166.
- [2] 郑堃, 周林, 龙贵欣, 等. 一种针对数字控制下光伏并网逆变器的陷波器滞后补偿方法[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(6): 1749 – 1757.
- [3] 潘冬华, 阮新波, 王学华, 等. 提高 LCL 型并网逆变器鲁棒性的电容电流即时反馈有源阻尼方法[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(18): 1 – 10.
- [4] Dannehl J, Fuchs F W, Thogersen P B. PI state space current control of grid-connected PWM converters with LCL filters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, 25(9): 2320 – 2330.
- [5] 周乐明, 罗安, 陈燕东, 等. LCL 型并网逆变器的鲁棒并网电流反馈有源阻尼控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(10): 2742 – 2752.
- [6] Han Y, Li Z, Yang P, et al. Analysis and design of improved weighted average current control strategy for LCL-type grid-connected inverters[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(3): 941 – 952.
- [7] 游国栋, 李继生, 侯勇, 等. 光伏 LCL 型并网逆变器的积分滑模容错控制策略[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(4): 1008 – 1017.
- [8] 杨兴武, 陈磊, 牛梦娇. LCL 滤波并网逆变器多速率重复控制策略[J]. *高电压技术*, 2018, 44(10): 3231 – 3240.
- [9] 马兴, 徐瑞林, 陈民铀, 等. 提高弱电网下并网逆变器电流质量的自适应控制方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(8): 2892 – 2900.
- [10] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. *前沿科学*, 2007(1): 24 – 31.
- [11] 朱进权, 葛琼璇, 孙鹏琨, 等. 基于自抗扰的高速磁浮列车牵引控制策略[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(5): 1065 – 1074.
- [12] 袁东, 马晓军, 曾庆含, 等. 二阶系统线性自抗扰控制器频带特性与参数配置研究[J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(12): 1630 – 1640.
- [13] 麦倩屏, 陈鸣. 基于自抗扰控制技术的光储微电网无功支撑策略[J]. *电网技术*, 2019, 43(6): 2132 – 2138.
- [14] 马明, 廖鹏, 蔡雨希, 等. LCL 并网逆变器的自抗扰控制策略[J]. *高电压技术*, 2020, 47(6): 2223 – 2231.
- [15] 杨林, 曾江, 黄仲龙. 线性自抗扰技术在 LCL 逆变器并网电流控制及有源阻尼中的应用[J]. *电网技术*, 2019, 43(4): 1378 – 1386.

(上接第 57 页)

基于 LCL 型逆变器建立了在 d-q 轴坐标系下的数学模型, 设计了四阶扩张状态观测器来对其实现观测和补偿, 实现了 d-q 轴电流解耦控制。

在频率内对三阶 LADRC 进行了抗扰和追踪性能的分析, 并通过李亚普诺夫和稳定性判据证明了闭环系统是渐进稳定的。仿真实验结果分析表明, 本文所