arXiv:2611.33019v1 [cs.DC] 24 Nov 2026

区块链—物联网融合在时空数据系统中的应用：挑战、解决方案与研究空白

Natalia Chaudhry，Muhammad Murtaza Yousaf

软件工程系，拉合尔旁遮普大学，旁遮普省，巴基斯坦

摘要

区块链与物联网（IoT）的结合，正在以前所未有的方式改变时空数据的管理。在从大型物联网设备网络收集地理空间数据和带时间戳数据的过程中，数据真实性、准确性以及及时处理是主要问题。区块链环境中的时空索引对于确保快速数据检索以及支持实时数据处理需求至关重要。区块链凭借其去中心化的共识机制，有望防止物联网时空应用中的数据伪造、未授权访问和单点故障。本文旨在阐述如何结合区块链与物联网索引，以增强时空数据管理，尤其是数据的索引与查询。本文将回顾并比较已有文献中的解决方案，以突出未来区块链集成物联网在具有韧性的时空数据生态系统中的挑战与发展方向。

关键词： 区块链、物联网、时空数据。

1. 引言

随着物联网（IoT）的快速发展，具有空间和时间属性的数据日益增多。物联网传感器会生成各种数据，包括文本数据、图像、多媒体，

电子邮件地址： natalia@pucit.edu.pk（Natalia Chaudhry）、murtaza@pucit.edu.pk（Muhammad Murtaza Yousaf）

感官数据、时空数据。本文主要关注时空数据，如图1所示。其次关注基于通用物联网数据索引，或针对空间方面或时间方面进行索引的区块链赋能解决方案。智慧城市、智能

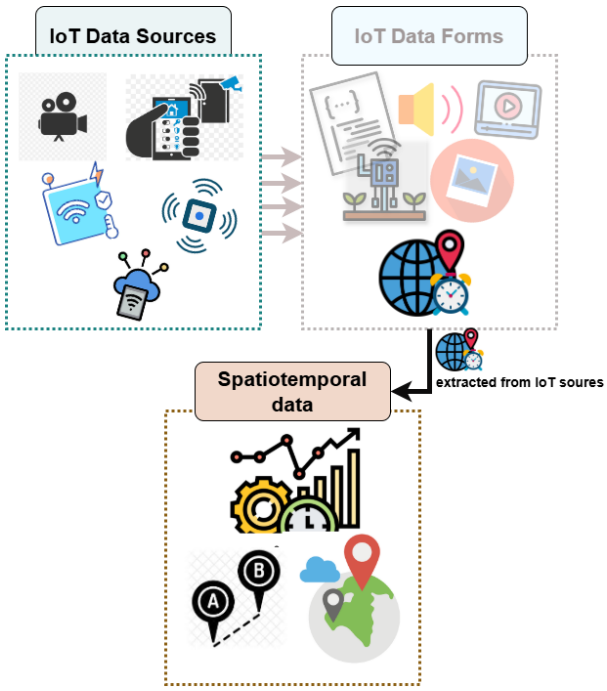

图1：物联网数据源和数据形式　　ats

交通运输系统、环境监测和供应链物流等领域，都依赖于物联网设备；这些设备会实时产生海量地理空间数据，需要以高效的方式进行存储、保护和扩展。然而，在高度去中心化的环境中，如何确保此类数据的准确性、安全性和实时交付，仍是一项重大挑战。区块链技术或可解决这一问题，因为它能为物联网系统带来去中心化、不可篡改性和密码学安全。借助区块链技术，物联网产生的时空数据可以得到安全存储和共享，而且无需第三方协助即可验证其完整性。智能合约还可依据无需信任规则，促进不同参与方之间的数据共享。然而，要使区块链与物联网的融合得到广泛应用，必须解决可扩展性、能源消耗和实时数据处理等问题。

尽管区块链赋能的物联网已在不同领域得到应用，但时空数据管理尤其值得关注。在此类环境中引入索引，是应对效率、可扩展性和实时查询处理挑战的必要手段。物联网传感器会产生海量数据，需要通过索引解决方案加快基于时间和位置的数据查询与检索。随着传感器设备数量不断增加，数据量也随之增长。采用索引方案降低搜索复杂度，并通过优化数据检索和存储来确保可扩展性，至关重要。这对于许多有实时处理需求的物联网应用都很有用，例如智能交通管理、跟踪以及自动驾驶车辆跟踪。

区块链技术已成为时空应用广泛领域中的一项革命性突破。区块链在时空应用中的重要性由多种因素共同促成，具体如下。去中心化：区块链架构消除了由中心机构管理数据存储和处理的需求。在时空应用中，这一特性支持分布式数据存储，从而确保韧性和容错能力。这对于需要实时访问数据的应用尤其有用。不可篡改性：区块链包含一个不可篡改账本，其中的交易不会被更改。这能够确保时空数据的完整性，尤其适用于数据溯源至关重要的应用。

安全性： 区块链利用密码技术保护交易，防止未授权访问。这对于处理敏感信息的时空应用至关重要，例如涉及资产跟踪、位置和环境监测的数据。网络攻击和数据泄露可以得到避免。

透明性与信任： 通过提供数据和交易的共享透明表示，参与者不仅能够受益于透明性，还可以对采用区块链的技术建立信任。在促进政府机构、企业和公民之间协作与合作的时空应用中，这种透明性发挥着至关重要的作用。例如，区块链可以通过赋予公众访问和核查与公共实体相关的任何数据的能力，确保智慧城市计划中的治理透明且负责任。

智能合约： 大多数区块链平台都支持智能合约。智能合约是具有预定义条件或规则的自动执行合同。合同中的时空数据方面包括数据共享协议、访问权限以及数据货币化法律。

这种自动化流程旨在提高时空应用的效率，并通过减少人为错误来确保质量，同时确保合同义务得到履行。

区块链技术在时空应用领域具有巨大潜力。这是因为它提供了一种安全基础设施，既透明又去中心化，同时还能管理地理空间数据和时间数据。也就是说，利用区块链的一些重要特性，包括去中心化、不可篡改性、安全性、透明性和智能合约，企业和社会便拥有了可加以利用的可能性。这些应用领域包括供应链管理、智能电网、医疗保健等。图 2 展示了区块链与时空数据管理及应用的融合。区块链技术与物联网应用的结合带来了挑战与机遇，也凸显出一些亟待解决的灰色地带。区块链有助于缩短查询响应时间，但要为涉及多个时间、数据和位置维度的物联网环境复杂查询设计索引结构颇具挑战，需要创新解决方案。在保持区块链不可篡改性的同时，确保数据隐私，例如仅允许授权用户访问索引数据，也是值得考虑的灰色地带。处理物联网设备产生的大量数据时，如何在不影响可扩展性的前提下优化性能至关重要。另一个灰色地带在于设计标准化索引结构，以应对物联网传感器生成的数据格式的异构性。应对这些挑战和灰色地带，需要采取多学科方法，综合考虑伦理、技术和性能方面的影响。物联网系统可能需要处理基于多个数据维度（即时间、位置和数据类型）的范围查询。区块链仅支持对交易进行基于时间戳的查询，因此查询效率较低。许多研究尝试通过修改区块链结构来提高查询效率。

据我们所知，现有文献中的研究尚未详细评述区块链与时空数据索引和管理的融合。现有研究大多仅基于区块链概念，并且主要围绕区块链特有的功能进行比较。然而，本文讨论、评述并比较了现有文献中针对这两个领域（区块链与

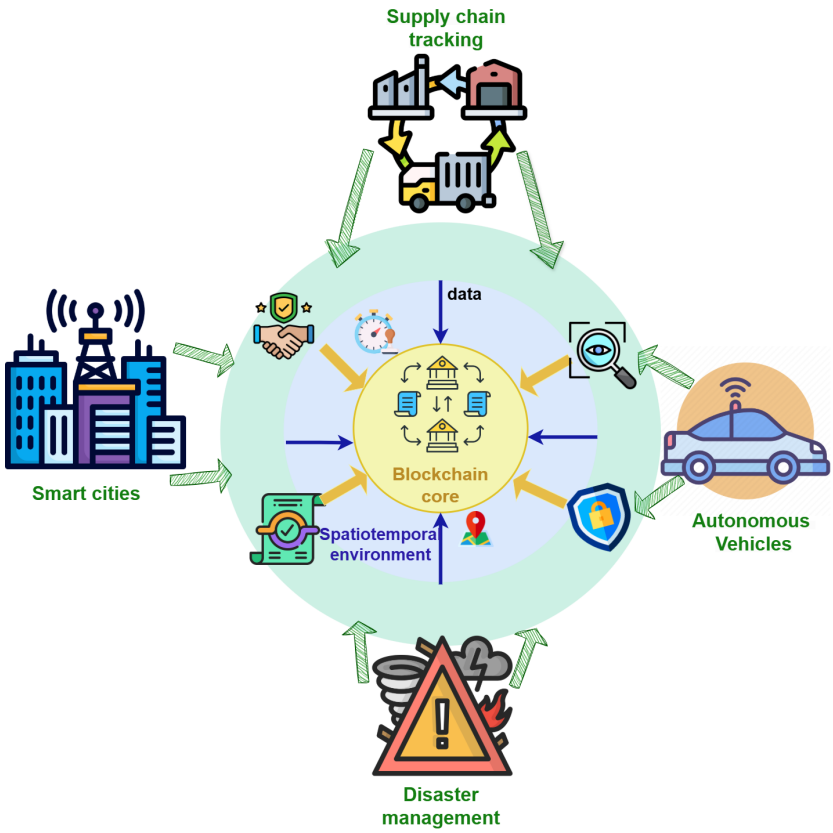

图 2：区块链与时空数据融合：实现安全性、透明性、信任与智能合约

时空数据管理与索引）。我们详细综述了相关研究工作，这些工作为区块链支持的时空环境设计了查询或索引方法，或提出了相应框架。我们还讨论了这些解决方案在实际应用中的适用性。本文还介绍了挑战及有意义的见解，我们认为现有综述或比较研究中缺少这些内容。

我们首先确定并讨论了时空数据管理领域值得关注的特征和方面。值得一提的是，数据管理是一个涵盖范围更广的术语，除索引和查询处理外，还包括数据分区、数据安全、ETL 及其他集成服务、数据分析、备份/恢复、数据协作和云数据管理等多个方面。然而，在本综述中，我们仅关注提出了索引结构、数据管理框架或查询处理算法的研究。因此，本文讨论的数据管理主要涉及数据索引和数据查询处理。我们评估了区块链如何改善物联网应用中的位置与空间分析，以及实时决策。我们详细探讨了这些主题的现有研究，并进行了比较分析。本文的主要贡献如下：

- 我们回顾了文献中聚焦于区块链与物联网数据管理集成的研究工作，特别关注时空数据索引与查询。我们回顾了提出查询方法、索引方法或面向区块链赋能时空环境的框架的相关研究。

- 我们指出并介绍了审视时空与区块链赋能解决方案时需要关注的一些重要方面和特征。为使内容更清晰易懂，我们将这些特征归入相关类别（特征向量）。

- 我们还重点指出并详细讨论了此类环境中的挑战。现有的比较研究缺乏对挑战的讨论，尤其是对时空赋能区块链环境中挑战的讨论。

- 我们还评估了现有解决方案（文献中已有的方案）在实际应用中的适用性。现有综述和研究在分析和比较过程中均未讨论实际应用。

据我们所知，文献中尚无研究工作专门针对时空数据开展如此全面的比较分析。本文其余部分安排如下：第 2 节讨论了物联网（尤其是时空数据）与区块链这两项技术进步的融合相关研究；第 4 节根据第 3 节讨论的特征和特征向量进行详细的比较分析；第 5 节提出了优化区块链和时空数据管理的有意义见解；第 6 节总结全文。

2. 实现研究目标的方法论

为确保研究的透明性和可重复性，文献综述遵循结构化方法。研究人员识别并评估了物联网环境中有关区块链和时空索引的研究。文献调研期间考虑了以下电子数据库。

- Scopus
- IEEE Xplore
- ACM数字图书馆
- Google Scholar

这使得研究涵盖了涉及区块链、时空数据管理与索引以及物联网的跨学科研究高影响力期刊。下文所定义的文献检索中使用的检索字符串，由与研究主题和目标一致的预定义关键词组成布尔组合。

（区块链或分布式账本）AND 数据管理 OR 数据索引 OR 数据结构 OR 查询处理 AND（时空或物联网）

检索范围限定为以英语撰写并于2018年—2025年期间发表的会议论文和期刊论文。研究的纳入/排除标准如下所述。

纳入符合以下条件的研究：

- 已提出或研究的基于区块链的数据管理系统。

- 已研究或提出的区块链索引结构
- 研究了与时空环境和区块链相关的查询处理。
- 研究了物联网赋能的基于区块链的数据管理系统或方法。

如果研究符合以下条件，则予以排除：

- 与基于区块链的数据管理没有直接关联。
- 在不同数据库中似乎重复出现。
- 不关注数据管理。
- 无可用全文

文章筛选流程借鉴了PRISMA [1] 流程，具体阶段如下所定义。

- **识别：** 使用既定检索标准检索初始文章。
- **去重**：移除/删除重复文章。
- **筛选**：研究文章的标题和摘要，以根据其与基于区块链的时空数据管理和索引的相关性进一步筛选。全文审查：对剩余文章进行全面评估，以确定其纳入资格。
- **最终纳入**：符合既定纳入标准的研究和文章最终纳入文献分析。

我们仅找到20篇相关研究文章，因为时空数据管理与区块链融合方面的研究仍处于初步发展阶段。为进行详细评估，我们对检索到的研究进行了分组。我们将文献分为两组：1）综述；2）提出索引、框架或查询处理解决方案的研究。总结如表1所示。

类别	纳入的研究工作 类别	数量
提案	[2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15]	14
综述	[16], [17], [18], [19], [20], [21]	6

表1：研究文章汇总

3. 相关工作

下文将按照所定义的分组讨论相关工作。我们的目标是将以下研究纳入比较分析：这些研究要么提出了新的查询处理方法、新的数据结构或索引解决方案，要么提出了面向区块链赋能环境的框架，重点关注物联网（总体而言）和时空数据管理（具体而言）。图3展示了本研究的范围，表明其特别关注时空数据索引与查询方面，以及区块链集成。

3.1. 综述与比较研究

论文 [16] 回顾了当前使用区块链所面临挑战的现状，并提出了若干未来研究方向。论文深入评估了区块链的发展、区块链的应用及其特征。论文还从数据隐私和管理方面阐述了实施挑战。论文讨论了多种共识机制，例如工作量证明、实用拜占庭容错和权益证明，并解释了如何利用这些机制实现完整性和安全性。

论文 [17] 研究了区块链与数据科学的融合，重点阐述了区块链与大数据及安全挑战之间的关系。这种融合带来了诸多益处，例如改善数据访问、安全性和共享。此外，论文还识别了有待解决的问题和挑战。

论文 [18]综述了适用于物联网网络的区块链协议。为便于分析，论文将威胁模型分为五类，分别是操纵、信誉、身份、面向服务和密码分析攻击。此外，论文还详细讨论了研究挑战。

该论文 [19] 回顾了文献中关于网络安全性和区块链的研究成果。本文提出了在工业4.0背景下根据四个类别对重大网络攻击进行分类。这些

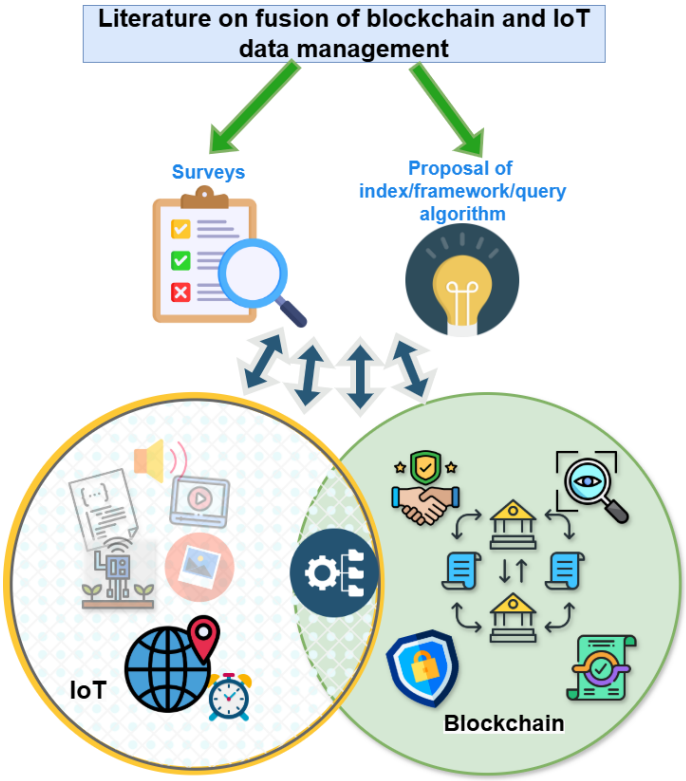

图3：文献综述分类体系

类别包括本地/远程攻击、拒绝服务攻击、根权限攻击和扫描攻击。本文比较了现有关于工业4.0中区块链的文献，重点关注机密性、完整性和可用性。同时，概述了与区块链性能和安全性相关的开放性研究问题。

在 [20]，中，对区块链数据库和关系型数据库进行了比较分析，指出了每种技术的优势和不足。该研究概述了各项技术的特点，并为开发人员选择适合其应用的数据库提供了指导。文中还讨论了技术集成的潜力，并特别分析了兼具这两种技术特点的 BigchainDB。

论文 [21] 强制要求在去中心化数据管理中使用区块链，以获得区块链技术带来的诸多优势，例如可审计性、透明性和可追溯性。文中提出了一种资源分配方法，

用于优化区块链环境中物联网设备之间的数据传输。文中还提出了一种高性能的随机优化框架，用于在交易传输过程中进行信道选择。

3.2. 区块链赋能物联网数据索引的相关贡献

论文 [2] 提出了一种名为 S-DAG 的双层架构，用于管理物联网系统中的数据。该架构结合了有向无环图和区块链，以避免查询效率低下和过热问题。自适应负载均衡算法可平衡节点的性能。该方案采用结合 KD 树和默克尔树的三维默克尔索引结构来支持三维查询，从而提高了交易效率。然而，该方案实现起来较为复杂，且对资源有一定要求。边缘节点能够处理时空数据，从而支持对时空信息进行高级分析，这有助于监控和预测性决策。边缘节点是一种连接物联网设备与云服务器的设备。边缘节点靠近数据生成位置，可在将数据发送至云端进行进一步处理之前，执行数据聚合、过滤和处理任务。论文还评估了现有的分片方案。研究提出了ABLA算法，该算法综合考虑交易处理时间和面向硬件的能力（以边缘节点为例），以处理负载较低的节点，从而防止分片过热。该算法通过重新分片和节点调整来平衡性能负载。

论文 [3] 提出了一种基于区块链技术的框架，用于管理分布式网络中支持基于向量的数据的二维数据。该框架提出了一种用于时空数据的索引结构，以处理范围查询。索引主要由两个部分组成：区间树和四叉树。区间树处理点查询，并处理相互重叠的时间区间。四叉树处理查询的空间方面。重点主要集中于范围查询、拓扑查询和时间查询。所提出的结构仅处理仅追加数据，且未针对删除操作进行优化。因此，它仅适用于涉及频繁删除的场景之外的情况。文中未明确讨论分片，但讨论了分布式环境中的数据管理。这意味着无需依赖集中式系统即可实现可扩展性和高效的查询处理。通过点对点网络进行分布，可以随着数据量增加而扩展系统，从而引入瓶颈问题。论文未明确讨论

能源消耗，但有几个方面会影响能源的高效消耗。在索引的副本版本上进行本地查询处理，可最大限度地减少远程服务器之间的数据传输。此外，每个 P2P节点管理自己的数据，避免了中心化瓶颈问题，从而降低整个网络的能源成本。论文讨论了在区块链上使用智能合约进行数据访问控制。本文未明确讨论共识机制。

论文 [4] 提出了一种名为 SCATC 的新型结构，通过将交易链划分为子链来简化查询处理，从而减少存储需求并提升可扩展性，尤其适用于交易历史记录丰富的交易。该结构将同一账户的多笔交易合并到同一区块中，并缩短了查询账户子链数据的路径，从而减少对无关区块的数据访问。该结构使用哈希指针连接子链。论文未明确讨论分片，也未讨论能源消耗；不过，查询性能的提升可能会间接降低能耗。本文提出的解决方案既不能确保数据隐私，也未采用任何共识机制，而共识机制对于在分布式区块链环境中维持一致意见至关重要。

文献 [5] 提出了一种可扩展框架，用于集成多个区块链平台，以高效管理传感器生成的物联网数据。该框架支持交易的并行验证。论文未专门讨论时空数据。论文未明确讨论能源消耗，但轻量级客户端的使用可能会间接降低能耗。论文讨论了使用 BigChainDB、IPFS 和 DAG结构进行存储和高效交易处理。数据访问控制协议和加密措施可确保交易安全。该框架采用拜占庭容错（BFT）共识算法实现共识。由于 Tangle 中采用并行处理，据报告吞吐量有所提升，从而降低了延迟。该框架支持通过智能合约进行查询。论文未详细讨论所采用的复制策略。不过，联盟区块链意味着存在某种复制机制，可在各节点间复制数据以确保容错。BFT机制可确保强一致性。

论文 [6] 介绍了一种数据管理方法，可确保去中心化管理、基于信任的数据交换、防篡改数据和数据隐私。文中讨论了 BigchainDB 使用的不可篡改索引，以及带有哈希指针的区块链结构，这些有助于快速检索。

文中未明确讨论分片和能源消耗。据称，BigchainDB 采用基于联盟投票的共识机制，有助于实现可扩展性。文中还回顾了其他一些共识机制，例如拜占庭容错和工作量证明。文中也讨论了安全性的重要意义，以避免智能合约中的漏洞。文中笼统地讨论了区块链查询机制，但未提及或讨论具体的查询类型。对一致性和共识的关注体现了对 CAP 和 DCS 概念的认识，但文中并未具体讨论这些概念。文中讨论并强调了一致性和共识的重要性。文中未明确讨论时空数据的处理。

论文 [7] 提出了一种位置证明协议，用于验证涉及位置属性的时空数据。论文还提出了一种分片策略，可改善负载均衡并提升可扩展性。所提出的框架还集成了安全协议，以防止对数据的未授权访问。论文对此提出了一个效度威胁模型。论文引入了一种稳健的复制策略，这对于容错至关重要。论文提出了一种共识算法，可改善网络节点间的同步，并针对时空数据有效性检查进行了定制。论文并未明确讨论复制，也未提出任何新的复制模型；然而，本文采用的许可型区块链天然提供了复制能力。论文讨论了一致性、可用性与分区容错性之间的权衡，并引入分布式共识的概念，以平衡这些方面。论文强调采用最终一致性模型来解决一致性问题。由于许可型区块链通过实用拜占庭容错等机制确保强一致性，本文提出的解决方案也继承了这些一致性属性。

该论文 [22]评估了区块链与数据管理实践的整合。研究从数据管理的视角考察了区块链技术，强调了对软件设计至关重要的见解。文章对软件系统的典型层次进行了概念化，并考察了区块链如何融入其中。此外，文章还讨论了数据管理方面，以评估区块链在分布式数据存储管理中的作用，并提出了未来的研究方向。

论文 [23] 对三种用于不可变数据的索引结构——默克尔桶树（MBT）、模式导向分裂树（POS-Tree）和默克尔帕特里夏树（MPT）进行了全面评估。在评估这些索引时，综合考虑了理论和实证性能特征，包括每种索引在最坏情况下的性能保证。

POS-Tree 被认为是用于不可变数据索引的最佳候选结构。

文献 [24]确定了数据管理中的关键问题与挑战，并评估了区块链如何应对这些问题。文中将可追溯性、安全性、去中心化、自动验证和数据一致性作为区块链的主要优势加以讨论。该论文还提出了一种基于区块链的数据管理模型，通过引入身份认证、加密算法、共识机制、数据验证与共享，使数据管理流程更加有效。

文献 [8] 提出了一种用于处理时空数据的新型查询处理方案。文中提出了名为“通用时空区块链索引遍历”的算法，可处理在区块有向无环图结构上执行的查询。研究对所提出的方案进行了详细评估，证实了该方案在现实场景中的实际适用性。所提出的方案具有可扩展性，能够处理大型数据集以及多种查询，包括球形点查询、有界 k 近邻查询、k 近邻查询和范围查询。该算法有望通过区块有向无环图中的加密签名历史提供一致的结果。研究表明，该算法的性能优于传统区块链系统，但文中未报告确切的数值。延迟情况也是如此。结果表明，对于 k 近邻查询，延迟与最近邻数量成正比。对于球形点查询和有界 k 近邻查询，增大边界半径并不会使总体查询时间发生明显波动，这表明该方案能够处理较大的搜索区域，同时不会牺牲性能或增加延迟。

提出了一种密切接触者追踪解决方案， [9]该方案利用区块链处理时空信息，同时优先保护用户隐私。所提出的系统支持密切接触者追踪查询，用于处理时空数据。该系统具备可扩展性，吞吐量可达每秒 100 笔交易。该方案采用 Geohash 和 Unix时间戳进行地理和时间索引。通过使用智能合约实施访问控制并采用加密机制，增强了系统的安全性。

该论文 [10] 提出了一种利用无人机辅助无线传感器网络的区块链数据收集框架。本研究采用的稀疏优化压缩感知方法（SCSDA）用于减少数据冗余，从而确保能源效率。所提出的解决方案采用

稀疏优化聚合技术，以增强可扩展性。提出了数据重构导向共识机制，能够准确反映从传感设备收集的数据，从而增强系统的可靠性。

论文 [11] 提出了一种能够捕捉加密货币市场动态并适应市场变化的索引。论文未说明所采用的具体数据结构或模型。

WSN 中传统的查询处理方法依赖于固定的结构或网络拓扑，这会导致较高的能源消耗和低效率。论文 [12] 提出了一种不依赖预定义网络结构的动态查询处理算法。该设计仅允许网络中的特定节点参与聚合查询处理，从而大幅降低能源消耗。同时，论文还提出了一种数据共享的隐私保护方法，提升了数据聚合的安全性。该方法将数据划分为多个数据块（份额），从而确保数据分片。此外，论文还评述了现有的聚合查询保护算法。

论文 [13]提出了一种面向去中心化环境的新型检索系统。论文还提出了一种基于 B+ 树和布隆过滤器的二级索引（BB+ 树），用于执行检索操作。为进一步提升性能，论文引入了一种名为 I2B+ 树的新索引，用于管理区块链交易的时间属性。所提出的索引显著提升了性能，大幅缩短了单特征和多特征检索查询的检索时间。然而，这些索引结构会占用额外空间；当账户数量大幅增长时，这会对可扩展性产生负面影响。尽管布隆过滤器有助于提高系统的空间效率，但也可能引入假阳性，从而导致 B+ 树中出现不必要的查找。此外，论文也未讨论安全性影响。

论文 [14] 提出了一种名为 GEM2树的数据结构，用于处理区块链的认证范围查询。该结构专为一种旨在最大限度降低交易成本的 Gas 成本模型而设计。与传统方法相比，该方法将 Gas 成本降低了 4 倍。为增强可扩展性，论文还提出了一种用于处理大型数据集的两级索引。该索引依靠哈希值来确保数据的完整性和一致性。

本文提出了一种用于对区块链系统中的地理空间数据进行索引的结构（分层象限空间LSM树（HQ-sLSM树）），见 [15]。数据

在插入索引之前，首先使用地理哈希进行线性化。为处理范围和最近邻查询，应用空间过滤，以确保较低的磁盘输入输出操作。本文重点提升插入性能，使该解决方案适用于处理写密集型操作的区块链环境。该索引包含内存和磁盘组件。内存组件处理最近插入的数据，从而支持写密集型环境中的快速访问。当容量超过某一阈值时，会形成四象限空间，并将数据刷新到磁盘。该索引不直接处理时空数据，其主要重点是空间索引。
HQ-sLSM树支持范围和最近邻查询，并通过使用最小边界矩形、生成查询过滤器、空间过滤器、高效的结果管理以及选择性组件访问对这些查询进行优化。

总而言之，将区块链应用于物联网应用可带来诸多优势，例如数据完整性、增强的数据安全性以及去中心化信任。除了这些益处之外，一些局限性也值得关注。当大量物联网设备产生海量交易时，由于共识和复制机制固有的限制，区块链网络会面临可扩展性危机。共识过程会引入延迟，导致物联网应用响应延迟。物联网传感器的计算能力、存储空间和带宽通常有限。对于物联网应用而言，采用区块链技术并维护分布式账本可能颇具挑战，因为这些设备资源受限。此外，对于物联网部署而言，区块链的网络和计算开销可能变得十分庞大，难以承受。在公有区块链的情况下，存储物联网数据可能引发数据机密性和隐私问题。异构性也是使用区块链时的一项主要问题。物联网应用通常需要处理多样化的通信协议和不同的数据格式。要整合这些设备与区块链网络，需要对解决方案进行谨慎的标准化，以确保互操作性和数据的无缝交换。区块链中的挖矿操作还会消耗大量能源，因此难以满足物联网设备的高能效要求。要应对这些挑战，需要仔细审视物联网部署的需求、共识与数据管理策略，以及区块链平台的选择，从而在解决物联网环境中这些局限性的同时，实现区块链技术的优势。

4. 比较分析的特征

本文对区块链与物联网时空数据管理融合方面的文献进行了详细探讨。据我们所知，现有综述中尚无一篇针对相关文献展开详细评述，并从多个方面对其进行比较，包括结构、性能导向以及其他重要方面。现有研究要么仅围绕区块链的少数基本特性（如不可篡改性、安全性和共识）对相关工作进行简要比较。然而，由于我们的目标是研究两个重要子领域（物联网和时空数据管理）与区块链的融合，因此有必要开展详细分析，涵盖这两个子领域的相关方面。

在文献分析过程中，我们提取了一些有用的特征，这些特征对于评估和比较研究工作具有重要意义。以下部分对这些特征进行了概述和简要说明。

- **分片**：分片是一种通过将数据拆分成称为分片的小型、易于管理的部分来增强区块链可扩展性的技术。随后，每个分片都可以并行处理数据，从而提高系统的效率和吞吐量。通过将交易分配到易于管理的分片中，该技术有助于消除网络拥塞。这减轻了单个节点的负载，从而缩短交易处理时间。此外，由于降低了每个节点的计算与存储需求，也能实现更好的资源利用。除了这些优势之外，分片还带来了维护分片之间数据一致性的挑战。

- **可扩展性**：区块链技术和时空数据的处理都必须考虑高效扩展的需求，以适应不断增加的数据量和用户数量。当这两个领域相互交汇时，例如在基于区块链的时空数据管理中，可扩展性变得更加关键，因为时空数据的规模、速度和复杂性带来了独特的挑战。随着区块链的日益普及，用户数量和交易量呈指数级增长。缺乏可扩展性可能导致拥塞，从而增加交易所需的时间和成本。随着物联网设备、卫星和移动应用程序的出现，时空数据以极大的规模产生。单个自主

车辆例如每小时可产生吉字节级的数据。随着移动设备和基于位置的服务的普及，大量时空数据不断生成。需要采用可扩展的解决方案，以高效处理这些数据。例如，大多数现代区块链应用程序（如去中心化金融和游戏）都要求近乎实时地处理交易。可扩展性确保网络能够及时满足这些需求。

• **能源消耗**处理时空数据的区块链网络必须处理规模、速度（实时）和频率都十分庞大的数据。因此，能源消耗是一个需要重点考虑的因素。由于时空数据需要频繁更新，传统共识机制可能需要进行密集计算。在多个分片上运行查询时，能源消耗可能会进一步增加。

• **所采用的结构与索引**使用索引对于区块链在实际应用中的普及是不利的，因为不使用索引会显著降低查询和存储效率。管理时空数据的动态特性以及按顺序进行的区块链交易，需要采用各种数据结构。历史数据可能需要以避免重新处理整个链上数据的方式进行引用和处理。例如，土地登记验证应用使用默克尔树证明来验证所有权记录（地理空间记录），而不是扫描整个区块链的数据。这在很大程度上减少了存储和处理开销。此外，基于地理空间区块链的拼车应用需要使用R树或四叉树索引来定位可用的最近出租车，而无需扫描整个账本。总体而言，由于区块链架构具有顺序性，因此必须使用索引来运行时空查询，以实现更快的检索。能够从中受益的应用包括自主车辆追踪、事件追踪、供应链追踪、犯罪现场调查以及灾害管理与响应系统。

• **安全性** 区块链赋能的时空环境处理与位置和时间相关的数据，对于智慧城市、供应链、自动驾驶车辆和基于位置的服务等各种应用至关重要。确保安全性对于维护隐私、信任和数据完整性至关重要。必须防止位置遭到篡改，以

避免许多物联网应用中的欺诈活动。例如，共享出行、刑事调查和供应链管理相关应用中生成的虚假位置坐标。攻击者可能伪造基于位置的查询，并推断出敏感会面地点、个人家庭住址或出行模式。通过利用零知识证明、去中心化数据存储和同态加密，区块链能够构建一个安全的时空生态系统。

• **共识** 共识机制有助于保证数据完整性。如果没有共识机制，攻击者可能会声称虚假位置、伪造GPS位置或篡改时间戳，试图对交付过程发起欺诈性跟踪。通常，时空数据需要跨区域验证。例如，在区块链上进行跟踪的货物会经过多个地理位置。对于不同的时区，必须以一致的方式处理时间戳。

• **吞吐量** 为了实现有效的实时位置跟踪，需要较高的吞吐量来处理频繁的位置更新。必须在区块链上存储海量的连续数据流，同时避免发生拥塞。高吞吐量有助于提高查询效率并实现实时分析。

• **查询** 查询对于从时空数据中获取有用洞见至关重要。与传统系统不同，由于区块链采用去中心化架构，对时空数据进行查询会面临特定挑战。在实时决策中，查询可以跟踪车辆，并为选择适当的交通路线提供指导。鉴于区块链中的不可篡改记录，查询对于验证历史数据至关重要，尤其是在供应链审计中。查询有助于执行多种分析，例如识别高交通流量区域、发现时间与位置之间的相关性，以及检测某个区域内疾病的暴发。空间索引和查询实践（如R树索引和Geohash索引）有助于缩小搜索空间。表2概述了区块链支持的时空环境中的查询类型。

• **延迟** 延迟是指交易提交后，直到在区块链上得到确认所经历的时间。它会影响响应时间，而在需要即时决策的时空应用中，维持较短的响应时间至关重要。例如，应急响应管理

查询类- 别	类别中的查询
空间 查询	**空间连接**：查找与拥堵区域重叠的路线。 **点查询**：查找救护车的当前位置。 **最近邻查询**：在紧急情- 紧急情况。 **范围查询**：查找居住在距离某个 购物中心。
时间 查询	**点查询**：查找上午8:00救护车的位置 于2025年2月26日。，**区间查询**：查找运动 无人机在上午8:00至下午2:00之间的历史。，**时间序列** **查询**：跟踪天气 预测应用。
时空 查询	**事件检测查询**：检测特定位置发生的灾害， **连接查询**：在拼车应用中，关联乘客的出行请求与 10分钟时间范围内可接单的司机。， **轨迹查询**：跟踪某人所走的轨迹或路线 车队管理应用中的车辆。
历史 查询	**溯源查询**：在法律合规应用中查找位置历史 应用中。， **版本查询**：追踪产品从源头位置 至客户位置。

表 2：区块链支持的时空环境中的查询类型

系统、自动驾驶车辆。低延迟可直接最大限度地减少位置数据中的一致性问题。必须谨慎权衡吞吐量与延迟。如果试图提高吞吐量，延迟也会随之增加。区块链验证所采用的共识机制可能导致延迟。如果实施分片，还必须解决跨分片通信成本，以降低延迟。

•**一致性**共识与一致性是相关但不同的概念。共识是分布式环境中的多个实体达成共同认可值的过程，这对于系统完整性至关重要。而一致性则是系统的一种属性或特征，指多个实体对

同一数据项拥有相同视图，可以是同时拥有（强一致性的情况），也可以是最终拥有（最终一致性系统的情况）。即使同时进行更新，也能确保数据保持最新。在分布式或去中心化环境中，共识基本上确保了一致性。时空应用对一致性有着关键需求，因为不一致的数据可能导致灾害管理及其他安全关键型应用中的结果报告不准确。跨境货运追踪还需要在跨越多个时区和空间区域的过程中同步时间戳和位置。在智能交通管理系统中，不一致的查询结果可能导致错误的路由和预测。

仅有共识并不足以应对基于区块链的时空应用。数据的质量和准确性仅通过一致性加以处理，因为共识只能解决各方达成一致的问题。例如，智能交通管理应用使用共识机制，以确保网络中的每个节点都同意某辆车辆的位置数据。然而，无法验证该数据是否不一致或已经过时。时空数据具有依赖上下文的特性，因此必须从位置准确性和时间同步的角度考虑数据在上下文中的正确性。也就是说，GPS 分配的时间戳必须与实际事件时间相符，数据中的位置必须反映现实世界中的实际位置。仅凭共识无法验证这些事项。

4.1. 特征向量

为便于理解和说明，我们将相关特征合并为统一的组，并构建了一个特征向量。分组方式见表 3。

5. 比较分析：对挑战与优势的洞见

我们详细评估了针对时空数据管理与区块链融合所开展的研究工作。我们依据上一节设计并讨论的特征向量，对这些工作进行了比较分析。表 4-7 展示了针对相应特征向量的研究成果比较视图。我们对相关挑战进行了详细分析、识别和深入讨论，并结合实际应用，评述了时空数据与区块链

组标题	特征
架构基础	结构、采用的索引
性能与查询优化	可扩展性，吞吐量，La-延迟，查询
信任与安全性强化-措施	安全性，共识，一致-性
资源效率与优-化	分片，能源消耗tion

表 3：特征向量

数据管理融合在特征向量视角下的优势，具体内容将在后续章节中介绍。需要注意的是，由于这些特征仅与提出或设计了涉及区块链和时空数据管理融合的某种查询方法、索引或框架的研究相关，因此，我们仅在表 4-7 中以比较视图呈现了此类研究。

5.1. 架构基础

表 4 展示了从架构基础角度对研究工作进行的比较。后续章节将进行详细分析和比较，说明所面临的挑战以及取得的效益。讨论还涉及实际应用。

5.1.1. 所采用的结构与索引

考虑到数据结构的使用，区块链与时空数据管理的融合带来了一些挑战和益处。

存储开销：利用索引在区块链上管理和处理频繁变化的时空数据，可能会导致超出存储容量，因为索引本身会占用内存。

数据的复杂性：时空数据需要专门的结构和索引，才能有效处理空间和时间方面。然而，区块链使用的是专门用于处理仅追加数据特性的结构。因此，这些索引无法直接用于处理时空数据。

查询困难：时空数据应用本质上计算开销很大，在区块链上运行时会很慢，因为区块链无法

研究 work	结构	索引 Em-采用?
[2]	基于 3D 默克尔树的区块结构, DAG	Yes
[3]	两级树结构	Yes
[4]	连接子链的哈希指针	Yes
[5]	BigcainDB、IPFS和DAG结构	Yes
[6]	基于哈希指针的BigchainDB结构 和不可篡改索引	Yes
[7]	None	No
[8]	区块DAG	Yes
[9]	Geohash和Unix时间戳	Yes
[10]	None	No
[11]	None	Yes
[12]	None	No
[13]	基于树的结构（BB+ 树和 I2B+ 树）	Yes
[14]	基于树的结构 GEM2 树	Yes
[15]	基于树的结构 HQ-sLSM树	Yes

表 4: 与**架构基础**的比较分析

处理高性能查询，例如“查找特定时间位于 100 米范围内的车辆”。

此外，预计还能带来一些益处，例如防篡改的数据存储，这对于环境建模、供应链追踪以及涉及位置数据的法律纠纷管理等应用至关重要。由于区块链的去中心化特性，数据操纵的风险也会降低。

论文 [2] 提出了一种混合索引，将树结构与基于区块的结构结合起来。方案 [3], [13], [14], 和 [15] 基于树。研究工作 [4], [6], [9] 在其设计中采用了哈希结构。方案 [5] 和 [8] 基于区块。基于树的索引擅长处理范围查询和历史查找查询，适用于地理围栏和智慧城市应用。然而，不可篡改性会导致较高的更新开销。基于哈希的索引能够快速检索精确匹配查询，有效实现基于位置的分片，并降低存储消耗。但这类索引存在哈希冲突的问题，且处理范围查询的性能较差。

已知精确位置时，这类索引适合快速检索，例如用于包裹追踪的基于GPS 的应用。基于区块的索引适合按时间顺序检索查询，但在空间查询中进行位置追踪时效率低下、速度缓慢。它们适用于灾害响应历史分析等时间查询，但实时位置追踪速度较慢。混合方法或许能有效优化数据管理。例如，智慧城市区块链可以使用 R树处理最近邻查询，使用哈希表根据车辆标识符进行查找，并使用基于时间的区块分区索引分析交通拥堵和历史轨迹。

5.2. 性能与查询优化

表 5 展示了研究工作在性能与查询优化方面的比较视图。下一节将进行详细分析与比较，阐述所面临的挑战及取得的益处，同时也将讨论实际应用。

5.2.1. 可扩展性

高频数据生成：时空应用生成的连续数据流规模日益庞大，使区块链面临吞吐量不断下降的挑战。例如，车队管理系统每秒跟踪数百万辆车辆，这极大地影响了以太坊等区块链系统的每秒交易量。

存储膨胀：与本质上离散的金融交易不同，时空数据具有连续性，并会随时间不断累积，从而导致区块链的存储需求增加。例如，天气预报系统每秒在多个地点记录温度、风和湿度水平等环境要素，导致区块链规模呈指数级增长。

实时查询处理的延迟：区块链网络首要关注安全性、隐私和去中心化。速度处于第二优先级，这会导致时空数据处理延迟。例如，智能交通监控系统可能会在区块链上发起查询，以检查交通拥堵情况。查询处理可能遭受高延迟，使实时分析难以实际执行。

不可变区块链上的索引难题：现有区块链系统不支持R树等传统空间索引，导致时空数据检索效率低下。例如，拼车

应用要查找位于10公里半径范围内的车辆，可能最终需要查询区块链中更大范围的数据。这与空间索引场景形成对比：经过优化的索引有助于缩小搜索空间，降低查询处理的复杂度和延迟。

除了这些挑战之外，区块链也带来了诸多益处。由于区块链具有不可篡改性，因此可以确保位置历史（时空数据）不被篡改。这对于供应链追踪等必须保持问责能力的应用而言极具价值。区块链的去中心化特性有助于消除单点故障，并降低数据在某个中心化站点遭到操纵的风险。这对于灾害应急管理应用很有用，因为在此类应用中，数据的可信度至关重要，必须加以维护。智能合约可用于时空数据管理应用，实现自动化。例如，在灾害管理应用中，如果某个特定地理区域发生灾害，可以利用智能合约自动发放保险索赔或赔付款。尽管传统区块链网络不支持大规模交易吞吐量，但近期已有一些研究成果致力于应对可扩展性和吞吐量方面的挑战。二层扩容以及基于DAG的区块链（如 Hedera）是其中一些值得关注的解决方案。二层扩容会将频繁更新的数据分批处理，汇总后仅将摘要数据提交到链上。批次在链下管理，从而提升吞吐量。DAG旨在以基于图的结构取代典型区块链的基于区块的结构，从而支持并行处理交易，进而提高吞吐量。

相关工作部分讨论的所有方案都支持可扩展性，但工作 [11], [12], [13], 和 [15]除外。

5.2.2. 吞吐量与延迟

时空数据由传感器以高速度和高频率生成。因此，区块链系统需要提高吞吐量，以提升用户体验。采用区块链的传统解决方案通常具有较低的吞吐量，例如以太坊。要将区块链理念应用于时空数据管理，必须采用高吞吐量解决方案。时空数据处理无法承受延迟，因为其具有明确的实时处理要求。例如，安全关键型应用无法承受高延迟，因为这可能导致人类生命损失。航空监控、自动驾驶车辆和紧急灾害响应系统必须具备较短的响应时间和低延迟。

除 [2], [5], 和 [9] 之外，所有研究工作都未评估其解决方案的吞吐量与延迟。必须针对吞吐量与延迟对这些解决方案进行评估，以更好地反映其是否适合应用于实际应用。

5.2.3. 查询

由于区块链采用共识机制，处理实时查询时可能会引入延迟。由于存储限制，大量时空数据无法存储在链上。通常，时空数据包含重复信息，例如重复的位置，这会耗尽存储容量。一种常用的解决方案是将数据存储在链下。但此类解决方案会增加数据检索和数据验证过程的复杂性。传统区块链涉及简单查询，通常只需检索特定区块。它们不原生支持时空查询，而时空查询本质上较为复杂，需要非平凡的处理技术。由于需要采用密码哈希等复杂机制或基于默克尔树的解决方案来检查链下数据的完整性，因此数据完整性可能面临挑战。此外，可能需要互操作框架来处理基于区块链的时空数据管理，因为时空数据来自各种来源，需要进行统一。

5.3. 信任与安全强化措施

表6展示了各项研究工作在信任与安全强化措施方面的对比。下一节将进行详细分析和比较，阐述所面临的挑战及取得的益处，并讨论实际应用。

5.3.1. 安全性

时空数据通常以位置历史和移动轨迹的形式存在，而泄露这些信息会带来敏感问题。确保隐私和安全性颇具挑战，因为应用安全技术会导致系统性能下降。尤其是在实时验证时空数据方面，挑战更大。数据通常来自不同的来源和传感器，格式也各不相同。这些来源之间的互操作性颇具挑战。维护安全标准有助于保留对数据的控制权，并适用于多种应用，例如供应链管理、灾害管理或军事相关应用。

研究工作 [3], [5], [6], [7], [9], [10], 和 [12]研究了安全性并提出了安全解决方案。然而，其他研究并未讨论所提出解决方案的安全性。

5.3.2. 共识

区块链中使用的传统共识机制无法处理时空数据，因为这类数据体量大且具有动态性。在不影响性能的情况下，针对如此庞大的数据集维持共识是一项挑战。此外，在不损失数据准确性的前提下尽量减少共识开销也很困难，因为数据往往包含毫秒级时间戳等细粒度信息。

适用于时空数据的共识技术有助于增强数据完整性，并确保记录下来的事件不会随着时间推移而遭到篡改。由于去中心化，共识技术有助于在无需中间方参与的情况下透明地共享数据。数据审计也会更加容易，因为共识可直接强化问责制，这对供应链跟踪应用至关重要。

[2] 提出了一种基于有向无环图的共识机制，支持交易的公平排序和高吞吐量。由于延迟低，该协议非常适合时空数据这类具有动态性的数据。此外，它最适合对低延迟有要求、且需要对交易或事件进行公平排序的应用，例如交通管理应用或环境变化追踪应用。不过，由于其运行机制采用了八卦之上的八卦机制，因此存在通信开销。

[5] 提出了一种基于 BFT 的共识机制，即使存在恶意节点，也能支持强一致性和安全性。该机制适用于联盟区块链，但不适合大型网络，因为验证者之间的通信量过大时可能出现可扩展性问题。它可用于对强一致性、时间完整性和安全性有严格要求的时空应用，例如军事或土地登记应用。

[6] 提出了一种基于联盟投票的共识机制：可信节点（即联盟成员）通过投票进行交易验证，从而降低能耗并加快交易的最终确定。不过，可信成员之间可能发生串通。该机制最适合行业相关应用，例如由一组利益相关者共同管理的智慧城市基础设施；这类应用对可扩展性和信任的要求适中。

提出了一种基于数据重构的方法，该方法依赖于

从多个来源重构数据。它主要支持数据冗余和高可用性。然而，这种方法容易受到数据篡改问题的影响。数据重构过程需要大量计算资源，可能会在验证过程中引入延迟。它可用于数据来自多个来源（物联网传感器）并随后进行交叉验证的应用场景。例如，环境监测或气候变化追踪。由于支持数据完整性，它也可用于灾难恢复应用。

5.3.3. 一致性

在区块链支持的时空环境中，实时实现一致性颇具挑战，因为共识和数据传播会带来延迟。海量数据可能使区块链不堪重负，从而难以确保一致性。在保护数据隐私的同时实现一致性也很困难。

确保一致性并非易事。时空数据可能因传感器误差或通信延迟而过时或含有噪声。在这种情况下，仅凭共识无法验证数据质量，因此可能需要采用数据清洗或相关技术。共识机制可能会导致系统延迟，这对于安全关键型和时间敏感型应用而言是无法承受的。时空数据具有连续性。记录每次更新可能会使区块链膨胀。

区块链的不可篡改性有助于确保数据一致性（例如，在供应链追踪应用中实现货物流动的防篡改记录）。去中心化特性有助于在跨境物流管理应用中透明且一致地共享数据。区块链可通过为交易和事件分配时间戳并确保其顺序，有效增强时间一致性。区块链能够追踪数据变更，因此可以轻松提供数据溯源。例如，追踪土地登记系统中的变更。

所有纳入考量的研究成果都讨论了一致性问题，或提供了一致性解决方案。然而，研究成果 [3], [4], [9], [10], [11],[12], [13] 并未明确讨论一致性及其影响。

5.4. 资源效率与优化

表7呈现了从资源效率和优化角度对研究工作进行的比较。下一节将对其进行详细分析和比较，阐述所面临的挑战以及

取得的益处。讨论还将涉及实际应用。

5.4.1. 分片

时空数据同时包含时间和位置信息，处理这类数据本身就需要消耗大量资源。在支持时空数据的区块链环境中应用分片，会带来独特的挑战与优势，下面将对此进行讨论。

跨分片通信：在这种环境中，需要维护历史轨迹，并通过传播更新确保所有分片上的数据都是最新的。假设有一个用于追踪配送车辆的区块链系统。每辆车的数据都具有时空属性（GPS坐标和时间戳）。分片后，每个分片负责特定的地理区域。假设分片 X 负责地理区域 X，分片 Y 负责区域 Y。配送车辆从区域 X 移动到区域 Y。在这种情况下，需要逐步将更新传播到各个分片。车辆从区域 X 出发时，数据存储在分片 X 中。当车辆移动到区域 Y 时，其位置现在归分片 Y 管辖，因此必须在 Y 中记录新的位置数据。为确保整个网络的一致性，分片 Y 中的更新必须传播到分片 X。这样可以确保各分片都保留历史轨迹。

跨分片查询：在时空系统中，涉及多个分片数据的查询十分常见。例如，检索 10 公里半径范围内发生的所有事件，可能需要访问多个分片；若管理不当，这会导致延迟增加、复杂性上升。如果更新未能跨分片传播，查询操作可能会返回部分或不完整的结果。

动态数据分布：另一个挑战是时空数据具有动态性。时空数据本质上是动态的，需要持续更新。因此，分片必须频繁重新分片和分布数据，这会显著增加网络开销和计算开销。

安全问题：从安全性角度来看，时空数据本质上具有敏感性，因为实体的位置数据不得被泄露。分片会将这些敏感数据暴露给少量节点，从而增加遭受定向安全攻击和数据泄露的风险。确保跨分片安全和隐私并非易事。

除这些挑战外，分片还为启用区块链的时空应用提供了一些优势，例如可扩展性、高效的查询处理、能源效率、可变的共识机制、故障隔离以及增强的可用性。由于分片会分散数据和负载，因此它适用于自动驾驶车辆、供应链跟踪系统和智慧城市等大型应用。在此类应用中，理想做法是将负载划分为分片，并分布到各个区域，以防止出现瓶颈问题。分片还有助于查询处理。例如，地理围栏应用可以高效地验证配送无人机是否位于限制区域内，因为只需查询相关区域的分片即可。采用分片的解决方案将更加节能，因为节点只需处理本地交易，而不必处理整个区块链的交易。此外，在某些场景中，不同分片可能需要不同的共识机制。例如，处理实时交通监控的分片可能需要轻量级共识机制，而处理历史气候数据的分片则可能需要相对更安全的共识机制。此外，如果一个分片发生故障，其余活动分片可以接管，从而保持系统可用。此功能对灾害响应系统非常有帮助。

这些研究工作 [21], [7], 和 [2] 提出并讨论了分片解决方案。然而，如上文所讨论的，分片并未针对可能面临的挑战进行评估。除这三项研究外，所有其他研究都未讨论分片。鉴于分片在时空环境中所带来的优势，在解决方案设计中采用这项技术十分重要。

5.4.2. 能源消耗

由于跨分片时空查询以及位置的频繁更新，区块链与数据管理的交叉融合带来了一些挑战。

频繁更新：GPS传感器生成的时空数据本质上需要在实时位置跟踪应用中频繁更新位置。使用区块链处理此类数据会增加交易量，并带来较高的能源需求。

扩展会导致高能耗：由于时空数据量大且具有动态特性，因此需要可扩展的解决方案来进行处理和管理。近年来，人们已采取措施提高区块链的可扩展性，例如采用 Layer-2解决方案。但这些方案带来了高昂的能源

消耗成本。

冗余信息：在时空数据处理中，往往会涉及价值较低的信息。例如，基于位置的服务反复发送位置 ping。将此类数据存储在区块链上可能会造成大量能源浪费。一种解决方案是先在链下对数据进行预处理，但这可能会对数据完整性产生负面影响。

复杂查询处理：支持时空功能的物联网应用通常需要处理 k近邻和范围查询等复杂查询。遗憾的是，区块链系统原生并不支持此类查询。因此，必须投入额外资源，从而增加能源消耗成本。

除了这些挑战之外，区块链还支持对时空数据进行去中心化管理，从而消除对单一服务器的依赖，最终提高能源效率。区块链环境中的代币奖励为节能型贡献者提供了激励。

研究工作 [12] 和 [10] 讨论了解决方案的能源消耗，并尝试节约能源。其余研究工作未讨论这一方面。

6. 总结性见解

总之，以下总结并呈现了重要见解。

链下与链上： 为了让时空数据管理解决方案具备可扩展性，可以将数据存储在链下。不过，关键数据可以在链上处理。

专用共识机制： 传统共识机制不适用于时空数据这类具有动态特性的数据。因此，我们需要采用专门的共识管理技术，以适应这类数据的动态性和实时性。

自适应分区： 传统区块链假设数据分片彼此独立。然而，时空数据包含相互依赖的组成部分，例如车辆在不同分片之间移动。因此，可以采用时间分片和地理分片等解决方案，避免高流量区域出现拥堵，并提升负载均衡和查询效率。

能源高效解决方案： 必须根据实时数据监测并调整能源使用，以提高能源效率。可以采用地理位置感知负载的共识这一概念，其中位于

高交通流量区域的节点采用权威证明等低能耗协议，而低交通流量区域则采用能耗适当但能确保安全性的协议，例如安全性证明。频繁更新的数据可以在链下处理和存储，以节省能源消耗。这样既能在区块链上成功验证时空交易，同时又能节约能源。

混合索引的使用： 传统区块链由于原生不支持时空索引，存在查询速度缓慢的问题。理想情况下，可以采用多重索引方法，根据数据的性质使用多个结构。例如，空间查询可以通过R树处理，基于时间事件的查询可以通过B树处理，而哈希结构则可用于完整性验证。

7. 结论

区块链与时空数据相结合，可以增强数据的完整性、安全性和可追溯性，这对于包括交通管理、供应链优化和智慧城市在内的各种物联网应用都十分有用。这两种技术的融合带来了许多亟待解决的挑战。现有文献中的相关研究，在评估区块链支持的时空环境中的数据管理挑战方面，还不够详细和全面。本文围绕两个技术层面的融合——区块链与时空数据管理，对相关文献进行了广泛综述。我们基于架构基础、性能与查询优化、信任与安全基础、资源效率与优化等方面，设计了用于详细比较分析的特征向量。我们依据所设计的特征向量，评估了文献中关于区块链与物联网（尤其是时空数据）融合所开展的工作。本文给出了重要见解，并指出了相关挑战。比较分析还纳入了实际应用。通过利用链下与链上数据管理、自适应分区、专用节能共识机制、混合索引或多重索引方法以及跨分片查询优化，可以对区块链进行优化，使其适用于时空数据管理。

8. 声明

所有作者声明不存在利益冲突。

9. 数据可用性声明

数据共享不适用于本文，因为本研究期间未生成或分析任何数据集。

10. 作者贡献声明

所有作者均参与了研究的构思与设计。材料准备、数据收集和分析工作由各位作者完成。所有作者均阅读并批准了最终稿件。

11. 资金声明

本研究未获得外部资金支持。

参考文献

[1] A. A. Selçuk，《系统综述指南：PRISMA》，《土耳其耳鼻咽喉科档案》57 (1) (2019) 57。[2] W. Zheng, X. Wang, Z. Xie, Y. Li, X. Ye, J. Wang, X. Xiong，基于区块链分片和有向无环图构建物联网的数据管理方法，《物联网与信息物理系统》4 (2024) 217–234。[3] M. Hojati, S. Roberts, C. Robertson，Dstree：一种用于分布式网络的时空索引数据结构，《数学与计算应用》29 (3) (2024) 42。[4] X. Xing, Y. Chen, T. Li, Y. Xin, H. Sun，一种基于子链查询的区块链索引结构，《云计算杂志》10 (2021) 1–11。[5] Y. Jiang, C. Wang, Y. Wang, L. Gao，一种用于物联网数据管理的多区块链集成跨链方案，《传感器》19 (9) (2019) 2042。[6] X. Chen, Y. Liu, J. Ge，一种基于区块链技术的数据管理方法，载于：2020年第3届智能区块链国际会议（SmartBlock），IEEE，2020年，第203–208页。

[7] B. Nasrulin, M. Muzammal, Q. Qu，一种用于区块链的鲁棒时空验证协议，载于：Web信息系统工程—WISE 2018：第19届国际会议，阿联酋迪拜，2018年11月12日至15日，论文集，第I部分19，施普林格，2018年，第52–67页。[8] Q. Qu, I. Nurgaliev, M. Muzammal, C. S. Jensen, J. Fan，关于时空区块链查询处理，《未来互联网》98 (2019) 208–218。[9] Z. Wen, K. Yu, X. Qi, T. Sato, Y. Katsuyama, T. Sato, W. Kameyama, F. Kato, Y. Cao, M. Yoshikawa 等，利用加密时空信息实现由区块链赋能的新冠肺炎接触者追踪，载于：2020年IEEE电子健康网络、应用与服务国际会议（HEALTHCOM），IEEE，2021年，第1–6页。[10] G. Li, B. He, Z. Wang, X. Cheng, J. Chen，面向无人机辅助无线传感器网络的区块链增强型时空数据聚合，《IEEE工业信息学汇刊》18 (7) (2021) 4520–4530。[11] S. Trimborn, W. K. Härdle，Crix：一种区块链货币索引（2018）。[12] L. Liu, Z. Hu, L. Wang，无线传感器网络中节能且保护隐私的空间范围聚合查询处理，《国际分布式传感器网络杂志》15 (7) (2019) 1550147719861005。[13] H. Feng, J. Wang, Y. Li，一种高效的区块链交易检索系统，《未来互联网》14 (9) (2022) 267。[14] C. Zhang, C. Xu, J. Xu, Y. Tang, B. Choi，Gemˆ 2-tree：一种用于区块链认证范围查询的燃料费高效结构，载于：2019年IEEE第35届国际数据工程会议（ICDE），IEEE，2019年，第842–853页。[15] J. Lee, T. Kwon, M. Seo, S. Jung，用于索引基于区块链的地理空间点数据的分层象限空间LSM树，《IEEE Access》（2023）。

[16] Y. Lu, 《区块链及其相关问题：当前研究主题综述》, 《管理分析期刊》5（4）（2018年）231–255。[17] J. Liu、S. Peng、C. Long、L. Wei、Y. Liu、Z. Tian, 《面向数据科学的区块链》, 载于：2020年第2届国际区块链技术会议论文集，2020年，第24–28页。[18] M. A. Ferrag、M. Derdour、M. Mukherjee、A. Derhab、L. Maglaras、H. Janicke, 《物联网区块链技术：研究问题与挑战》, 《IEEE 物联网期刊》6（2）（2018年）2188–2204。[19] S. B. ElMamy、H. Mrabet、H. Gharbi、A. Jemai、D. Trentesaux, 《工业4.0背景下区块链技术在网络威胁中的应用综述》, 《可持续性》12（21）（2020年）9179。[20] P. Chitti、J. Murkin、R. Chitchyan, 《数据管理：关系型数据库与区块链数据库》, 载于：高级信息系统工程国际会议，施普林格，2019年，第189–200页。[21] Z. Xiong、Y. Zhang、N. C. Luong、D. Niyato、P. Wang、N. Guizani, 《兼顾两者优势：区块链赋能物联网的数据管理通用架构》, 《IEEE 网络》34（1）（2020年）166–173。[22] H.-Y. Paik、X. Xu、H. D. Bandara、S. U. Lee、S. K. Lo, 《基于区块链的系统中的数据管理分析：从架构到治理》, 《IEEE Access》7（2019年）186091–186107。[23] C. Yue、Z. Xie、M. Zhang、G. Chen、B. C. Ooi、S. Wang、X. Xiao, 《不可变数据索引结构分析》, 载于：2020年ACM SIGMOD国际数据管理会议论文集，2020年，第925–935页。[24] L. Wen、L. Zhang、J. Li, 《区块链技术在数据管理中的应用：优势与解决方案》, 载于：《大规模科学数据管理：第一届国际会议，BigSDM 2018，中国北京，2018年11月30日至12月1日，修订精选论文1》, 施普林格，2019年，第239–254页。

研究 work	可扩展性	吞吐量延迟		查询
[2]	Yes	upto 1800 TPS	三维 data 查询 and 多区块查询	70 % 较低 than 单链区块链解决方案
[3]	Yes	未评估-ated	时空查询	未评估
[4]	Yes	未评估-ated	关于账户的数据查询子链	未评估
[5]	Yes	upto 645 TPS	通过智能合约进行查询-摘录	4.77 的平均延迟 s
[6]	Yes	未评估-ated	未讨论具体的查询类型已讨论	未评估
[7]	Yes	未评估的 ated	分析型 and 范围查询	未评估
[8]	Yes	值 for 事务-数 per 每秒 （每秒事务数） are not 明确地提供	球形点查询、有界 k 近邻查询、k 近邻查询和范围查询	交易的数值每秒（TPS）未明确提供
[9]	Yes	每秒 100 笔交易 第二个	密切 联系方式 追踪查询 涉及 spa-时空数据	未评估
[10]	Yes	未评估-ated	未进行明确讨论	未进行评估
[11]	No ex- 明确的 讨论— sion	未评估— ated	没有明确讨论	未进行评估
[12]	No ex- 明确的 讨论-sion	未评估-ated	聚合查询	未评估
[13]	No	未评估-ated	单特征和多特征检-索查询	未评估
[14]	Yes	未评-ated	认证范围查询	未评估
[15]	No	未评估—— ated	范围与最近邻查询	未评估

表 5：在**性能与查询优化**方面的比较分析

研究 work	**安全性**	**共识**	**一致性**
[2]	No 明确的讨论	共识 实现 使用 Hashgraph算法	Yes
[3]	Yes	未明确讨论	未讨论
[4]	No	未明确讨论	未讨论
[5]	Yes	拜占庭容错（BFT）（BFT）共识算法	Yes
[6]	Yes	联盟 投票 基于, 拜占庭容错, 工作量证明	Yes
[7]	Yes	Yes	是的，由于许可型区块链固有的特 许可型的特征 区块链
[8]	No 明确的讨论	没有明确的讨论	使用 通过密码学方式 签名 历史 in 区块-DAGs
[9]	Yes	未进行明确讨论	未进行明确讨论
[10]	Yes	data 重构- 定向共识机制- nism	没有明确讨论
[11]	No	没有明确讨论	没有明确讨论
[12]	Yes	没有明确讨论	没有明确讨论
[13]	No	没有明确讨论	未明确讨论
[14]	No	未明确讨论	是，使用哈希值以确保 完整性
[15]	No	未明确讨论	是，使用哈希值以确保 完整性

表6：关于**信任与安全强化措施**的比较分析

研究 work	分片	能耗 tion 消耗-
[2]	区块链分片	未明确讨论
[3]	未作明确讨论	未作明确讨论
[4]	未作明确讨论	未作明确讨论
[5]	未作明确讨论	未作明确讨论
[6]	未作明确讨论	未作明确讨论
[7]	Yes	未作明确讨论
[8]	未作明确讨论	未作明确讨论
[9]	未作明确讨论	未明确讨论
[10]	未明确讨论	是，使用 SCSDA
[11]	未明确讨论	未明确讨论
[12]	Yes	Yes
[13]	未明确讨论	未作明确讨论
[14]	未作明确讨论	未作明确讨论
[15]	未作明确讨论	未作明确讨论

Ta表 7：关于**资源效率与优化**的比较分析