arXiv:2603.04826v1 [cs.DC] 5 Mar 2026

语义时间之箭，V 部分：

莱布尼茨桥——迈向语义时间统一理论

Paul Borrill
DÆDÆLUS

02026年2月27日

迈向语义时间统一理论

摘要

这是五部分系列语义时间之箭的最后一篇论文。第一部分（Borrill，2026a）指出了这一 FITO 范畴错误——将前向时间流视为确立意义的充分条件。第二部分（Borrill，2026b）提出了建设性的替代方案：具有强制性反射阶段的 OAE链路层状态机。第三部分（Borrill，2026c）展示了 FITO谬误如何在 RDMA 完成语义中以工业规模运作。第四部分（Borrill，2026d）追踪了同一模式在文件同步、电子邮件、人类记忆和语言模型幻觉中的表现。

本文通过构建莱布尼茨桥为整个系列画上句号：这是一个统一框架，将哲学基础（莱布尼茨的不可分辨者同一性，由Spekkens形式化）、协议工程（OAE的双边事务结构）与物理基底（量子力学中的不定因果序）连接起来。这座桥建立在单一原则之上：互信息守恒——要求每次因果交换都保留双方端点可访问的总信息；时间方向并非源自公理，而是在可逆交换提交时由熵产生所显现。

我们表明，这一原则揭示 FLP、两将军问题和 CAP定理其实讨论的是 FITO系统，而不是物理学，从而消解了它们看似不可能实现的困境。我们提出三角网络，将其视为在没有集中式协调的情况下实现语义一致性的最小拓扑。最后，我们提出一些开放问题，并反思在放弃 FITO 这一假设后，分布式计算会呈现何种面貌。

1 引言：五篇论文，一个错误

这个系列通过五种不同的视角讲述了同一个故事：计算继承了一种关于时间的假设——因果关系向前流动，时间上的先后意味着语义上的进展，而返回路径只是开销，并非构成性要素。我们将这一假设称为仅前向时间（FITO）。正如吉尔伯特·赖尔（Ryle，1949）对“范畴错误”一词所作的精确定义，这种假设就是一种范畴错误：把属于一种逻辑类型的概念，当作属于另一种逻辑类型的概念。

第一部分追溯了这个错误：从爱丁顿于 1927 年创造“时间之箭”一词，到香农的单向信道模型和兰波特的先发生于关系，说明物理学已开始质疑这一默认假设，而计算领域尚未如此。第二部分介绍了 OAE链路层状态机，它是一种通过双边交换来构建因果序，而非

通过时间戳来假定因果序的协议。第三部分记录了在硬件规模上实现 FITO 时所带来的后果：RDMA 的完成信号报告称，在时间阶段 T_4 已成功，但在 T_6 处语义一致性仍未确立。第四部分表明，同样的模式——只有前向承诺，没有反射——会导致云同步中的静默数据破坏、电子邮件中的幻影消息、人类认知中的虚假记忆，以及语言模型中的幻觉。

这篇最终论文必须回答的问题是：什么取代了 FITO？答案不能只停留在协议层面（第二部分已回答）或诊断层面（第三部分和第四部分已回答），而必须上升到原则层面。采纳哪一种基础性承诺，才能让 FITO范畴错误变得不可能？

答案是莱布尼茨桥。

2 三个共同体中的莱布尼茨原理

戈特弗里德·威廉·莱布尼茨于1686年提出了不可分辨者同一性：如果两个实体拥有完全相同的所有属性，那么它们就不是两个实体，而是一个实体。Rob Spekkens（Spekkens，2019）将这一观点从形而上学公理提升为理论构建的方法论原则：

> 如果一种理论预测了两个本体论上不同、但在经验上不可区分的情景，就应当舍弃该理论，转而采用一种认为这些情景在本体论上相同的理论。

Spekkens指出，爱因斯坦曾反复运用这一原则：消除绝对同时性（狭义相对论），消除惯性质量与引力质量之间的区别（广义相对论）。每一次突破都不是源于新的实验证据，而是源于认识到：理论中一种没有经验后果的本体论区别，意味着存在冗余结构。

本系列提出的主张是：同一种冗余结构贯穿于三个社群，而莱布尼茨原理能在每种情况下将其消解。

2.1 计算机科学：缺失的第四格

兰波特的先发生于关系（Lamport，1978）为事件定义了一种偏序。对于任意一对事件 a 和 b，三种关系中恰有一种成立：$a \to b$（“a 先于 b发生”）、$b \to a$或 $a \| b$（并发：没有因果联系）。向量时钟、逻辑时钟及其衍生形式都继承了这一三值框架。

然而，对因果关系进行 2 位编码会产生四个单元，而不是三个：

编码	关系	框架
01	$a \to b$	确定因果顺序（兰波特）
10	$b \to a$	确定因果顺序（兰波特）
00	$a \| b$ (并发)	偏序（向量时钟）
11	$a \leftrightarrow b$ (不确定)	**没有现成的计算机科学框架**

第四个单元——编码为 11，表示由双边交换连接、其因果方向确实不确定的事件——在任何现有的计算机科学框架中都没有对应表示。这正是缺口。不确定逻辑时间戳及其推广形式张量时钟通过提供包含不确定关系的四值因果代数，填补了这一缺口（Borrill，2026b）。

2.2 网络：返回路径具有构成性

每条真实的以太网链路在物理层上都是双向的。发射机发送数据，接收方确认收到。但协议设计将返回路径视为开销——ACK 是一种可靠性机制，而非信道的构成特征。香农的原始模型（Shannon，1948）是单向的：$X \to Y$，其中 $I(X;Y) = H(X) - H(X|Y)$。

莱布尼茨原理揭示了冗余结构：如果链路的两个方向都承载独立信息，并且在协议设计者将其中一个标记为“正向”之前，从经验上无法区分，那么正向与反向的区别就不是链路本身的属性，而是模型的属性。双边链路上的时间方向 是由协议设计者赋予的，而非由介质的物理性质决定。

完美信息反馈（PIF）将链路建模为两个共轭香农信道构成的闭合信息系统。其静态对称性为：

$$I_+(X;Y) = I_-(Y;X) \tag{1}$$

这是联合分布 $P(X,\ Y)$ 的属性，而非动力学流。正如 Lee 所指出的（Lee，2026，私人交流），在香农的表述中，互信息不是时间的函数——它表示每次使用信道所传递的信息量，是一个需要完美码和无界时延才能达到的理论极限。它没有说明任何关于时序的信息。

对 OAE 而言，其操作层面的结果是：双边链路的容量为 $C_{\text{PIF}} = 2 \cdot C_{\text{one-way}}$——这并非因为它双向传输数据，而是因为回声确认了正向断言，并闭合了因果回路（Munamala 等，2025）。两个共轭信道为同一互信息提供了互补视角：到达与离开分组的“方向”只是标记约定，而非物理不对称性（Stone，2018）。

2.3 物理层：不定因果序

Oreshkov、Costa 和 Brukner（Oreshkov 等，2012）证明，量子力学与不存在确定因果顺序的过程相容。Rubino 等人（Rubino 等，2017）使用量子开关进行了实验验证。Zhao 等人（Zhao等，2025）证明，ICO确实具有通信优势：不定因果序的量子通信能力严格高于任何固定序协议。

莱布尼茨原理补全了这一图景。贝尔对 EPR 问题的解决——接受非定域性，同时维持 FITO——正如 Spekkens 和 Lee 独立指出的那样，是一种选择，而非定理。物理学视为奇异的现象（ICO、过程矩阵、因果叠加），一直隐藏在最基本的网络原语中：双向链路上已确认的分组。

3 桥梁：互信息守恒

莱布尼茨桥是连接哲学基础（莱布尼茨–Spekkens）、协议工程（OAE）和物理基底（ICO）的原理。我们将其表述为一条形式化原理：

原则 3.1 (互信息守恒)。 对于端点 A与 B之间的任意双边因果交换：

1. 联合系统在整个交换过程中可访问的互信息 $I(A;\ B)$保持守恒。

2. 信息流的方向（链路层上的时间之箭）并不是物理层交换的属性，而是交换提交时熵产生的属性。 *3.* 任何在验证互信息守恒之前发出完成信号的协议，都违反莱布尼茨原理，并会产生语义损坏。

这一原　　理对本系列探讨的各个领域都有直接影响　　：

对于协议设计（第二部分）： OAE 链路层状态机中不可或缺的 REFLECTING 阶段并非工程上的选择，而是守恒要求。反射阶段中，接收方会向发送方反馈自己实际接收到的内容，从而闭合信息回路，并验证 $I(A;B)$是否得以保留。若没有这一阶段，发送方就无法确认所传输的信息是否完整保留了原意。

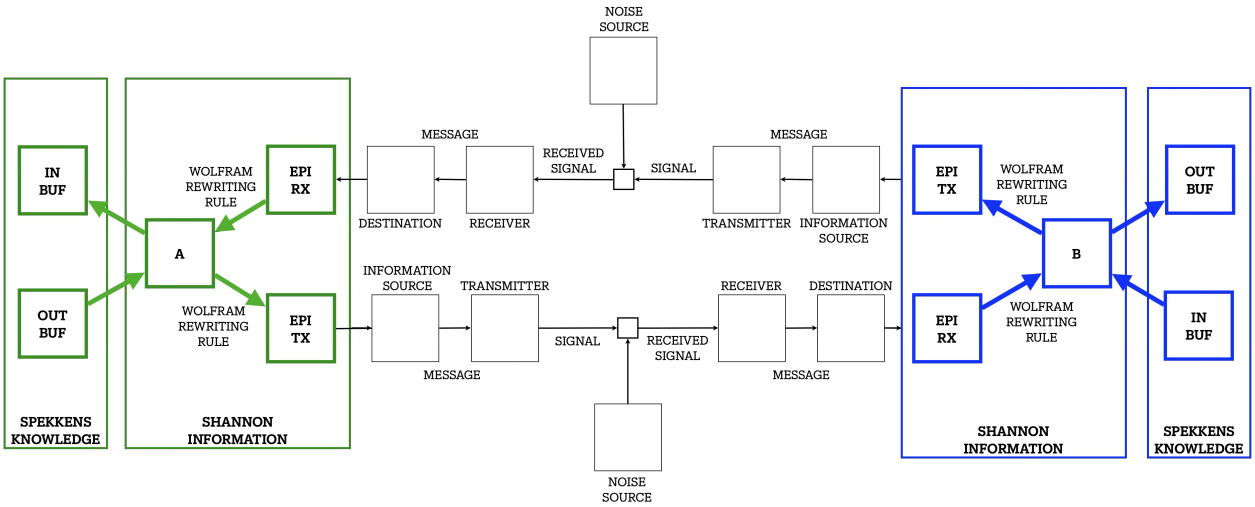

图 1：莱布尼茨桥架构。两个共轭香农信道（中央）连接端点 A （绿色）和 B （蓝色），每个端点都配备了 Spekkens 知识寄存器（EPI TX、EPI RX）和用于实施知识平衡原理的 Wolfram 重写规则。每个端点的输入/输出缓冲区保存本体态；EPI寄存器保存认知状态——根据 KBP，恰好为一半。噪声源分别作用于每个信道。双边结构使返回路径成为构成性要素，而非辅助部分：信息守恒通过闭环验证，而不能仅凭正向传输就假定其成立。

对于 RDMA（第三部分）： 完成谬误违反了原则 3.1： T_4处的完成队列项在接收方验证信息守恒之前就发出完成信号。 T_4与 T_6 之间的间隙，正是互信息可能丢失的空间；而完成信号宣称操作成功，使发送方无法检测到这种丢失。

对于文件同步和电子邮件（第四部分）： LWW 冲突解决违反了原则 3.1，因为它丢弃了并发修改的一方，却未验证被丢弃的信息是否可恢复。基于时间戳的电子邮件排序也违反了该原则，因为它强加了一种因果方向（“此操作发生在彼操作之前”），却未验证所强加的方向是否保留了用户意图表达的含义。

对于记忆与语言模型（第四部分）：模式驱动编码（Bartlett）与自回归生成（Transformer）都违反了原则 3.1，因为它们向前提交状态变更，却未验证所提交的状态是否保留了原始刺激或意图含义的信息内容。睡眠巩固和基于人类反馈的强化学习是部分缓解策略，能够减轻但无法消除这一违规。

4 可逆因果原理

交替因果性（AC）框架在预印本《*Entropy*》（Munamala 等，2025）中提出，将相互信息守恒原理整合为一条对称性定律：

$$P_{BA}(t) = P_{AB}(-t)^{\dagger} \tag{2}$$

每一次因果相互作用 $A \leftrightarrow B$ 都存在一个时间反演共轭。任何闭合因果环都满足 $\oint_{\Gamma} d\varphi = 0$（因果通量净值为零）。这扩展了诺特定理：

诺特（1918）：时间对称性 $\implies$ 能量守恒。

rcp：因果对称性 $\implies$ 信息守恒。

当复合完美（无噪声、无损耗）时，逆算子 R 满足 $R \circ F = \mathbb{I}$，信息得以传递而不被破坏。当复合不完美时，$X^{\dagger}X = \mathbb{I} - \Lambda$ 中的亏损 Λ 衡量信息熵产生——因果退相干。时间之箭源于这种熵产生，而非公理。

该 RCP 施加了与电路理论相呼应的守恒定律——信息领域的基尔霍夫定律：

节点定律： $\sum_{e \in \text{in}(v)} J_e[n] = \sum_{e \in \text{out}(v)} J_e[n]$（每个节点、每个时隙的信息通量均守恒。）

回路定律： $\sum_{e \in \Gamma} \Delta\Phi_e[n] = 0$（沿任何闭合因果循环都不存在净偏差。）

这些并非比喻，而是关于信息势 Φ_e（意外度、 –log p或对数似然比）的精确守恒定律。在稳态下， PIF 链路层的行为如同无损交流网络；噪声会引入电阻压降，将平衡的驻波转化为有方向的熵产生流（Munamala 等，2025）。

5 知识平衡原则即协议设计

Spekkens 的知识平衡原则（KBP）（Spekkens，2007）指出：对于任何系统，若要获得最大限度的知识，你所知道的必须等于你所不知道的。对于本体态有 $2N$ 比特的系统，认知主体最多只能知道 N 比特。

这一原则由 Spekkens 为量子基础领域提出，并在 OAE链路层协议（Borrill，2022）中得到了直接的工程实现：

ONT寄存器：表示链路层的假想本体态：4 位（每个方向 2 位 $\times$ 2方向）。这些寄存器**并非真实存在**。它们是一个理论构造——根据定义，任何单个端点都无法访问完整的本体态。ONT寄存器描述的是：如果全知观察者能够同时看到两端，链路层“将会拥有”的状态；在任何物理实现中，这样的观察者都不存在。

EPI寄存器：保存可访问的认知状态：2 位（恰好是本体态的一半，符合 KBP）。这是任何端点能够获知的关于链路层的一切。

每个端点都确切知道链路本体态的一半——它知道自己的贡献，却不知道另一方的贡献。这并非设计上的局限，而是施加于知识之上的一种守恒定律。ONT寄存器的不可访问性并不是需要通过工程手段规避的缺陷，而是任何双边交换的构成性特征，其基础性不亚于量子力学中的不确定性原理。六种一致的Spekkens状态映射为有效的协议状态。三十六种乘积状态描述了可分离链路配置。二十四种“纠缠”状态描述了端点之间的非局部关联。作用于EPI寄存器的Wolfram 重写规则强制执行遵循知识平衡的状态转换（Borrill，2022）。

与第三部分和第四部分的联系是直接的。 RDMA的完成信号让发送方产生一种错觉，以为自己知道事务的完整状态——“写入成功”——但实际上它只知道自己这一半（数据已放置）。接收方的那一半（数据已在语义上完成整合）是未知的，并且在 FITO 语义下，在应用执行自身验证之前是不可知的。 KBP 将这种不对称性形式化，并将其变为一项设计约束：除非知识平衡的两半都已得到确认，否则任何协议都不应发出完成信号。

6 消解不可能性定理

三项不可能性结果数十年来塑造了分布式系统理论：FLP共识不可能性（Fischer等，1985年）、两将军问题（Gray，1978年）以及CAP定理（Brewer，2000年；Gilbert和Lynch，2002年）。每一项都被视为分布式计算的根本限制。莱布尼茨桥揭示，它们是关于 FITO系统的定理，而非关于物理学的定理。

6.1 FLP：fito下的共识

Fischer、Lynch和Paterson（Fischer等，1985年）证明，在异步系统中，即使只有一个进程可能发生故障，也没有任何确定性协议能够保证共识。该证明假定进程通过具有单向 投递的消息系统进行通信：进程发送一条消息，该消息最终会到达，但发送方不会收到关于投递时机的确认。

这被 FITO 编码为一个系统模型。该消息系统是一条香农信道： $X \to Y$、仅正向，且模型中不存在返回路径。在这些假设下，FLP是正确的：你无法区分缓慢的进程与已失效的进程，因此无法决定何时提交。

在莱布尼茨桥下，问题发生了变化。带有 REFLECTING 阶段的双边交换无需区分缓慢与失效——它只需验证该交换是否在事务的熵预算内完成。若反射到达，交换即被提交。若反射未在链路层的时间范围内到达，则中止该交换，并将状态回滚至最后一次已提交的检查点。

6.2 两将军问题：原型不可实现性

两将军问题（Gray，1978年）是最简单的不可能性结果：两位将军必须就进攻时间达成一致，但任何信使都可能被俘。无论发送多少条消息，都无法保证达成一致，因为任何一位将军都无法确定自己发出的最后一条消息是否已被收到。

这是 FITO 最纯粹的形式：单向消息，没有反射阶段，也没有双向确认。该问题假设通信本质上是单向的——信使从 A 前往 B，或从 B 前往 A，但绝不会同时双向传递。

OAE 框架通过改变通信原语来解决这一问题。将军不再派遣信使，而是共享一条实现 TIKTYKTIK 协议的双边链路：通过四条消息构成的可逆交换，借助交替因果性建立共同知识，而无需保证任何单条消息必定送达。该协议并没有推翻两将军不可能性，而是通过替换不可能性成立时所依据的系统模型来化解它。

6.3 CAP：一致性、可用性与 fito

Brewer 的 CAP 定理（Brewer，2000年）由 Gilbert 和 Lynch（Gilbert和Lynch，2002年）形式化，指出分布式系统无法同时提供一致性、可用性和分区容错性。标准解释是：发生网络分区时，必须在一致性（拒绝提供过时数据）与可用性（提供可能不一致的数据）之间做出选择。

莱布尼茨桥重新诠释了 CAP。在 FITO 系统中，分区意味着正向消息无法到达目的地，因此系统无法维持一致性。在采用 RCP的双边系统中，分区意味着反射阶段无法完成，也就意味着事务无法提交。系统不会提供不一致的数据，而是将事务保持在 TENTATIVE 状态，直到分区恢复或找到替代路径。

三角网络（第7节）提供了拓扑机制：当直接链路发生分区时，每个三角形的第三个顶点都会提供一条替代反射路径。这并不能消除分区——物理定律保证分区必然发生——但它将分区处理从二选一（选择一致性或可用性）转变为一种拓扑属性（替代反射路径）。

7 三角网络：实现语义一致性的最小拓扑

OAE 架构提出，三角形是无需集中式协调的语义一致性最小拓扑。论证分三步展开。

7.1 为什么是三角形

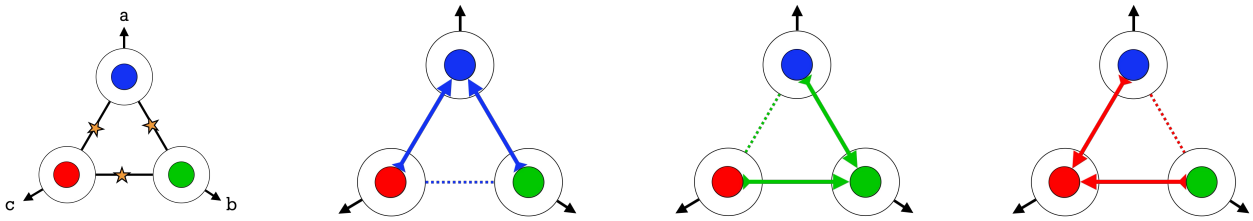

图2：三角网络与分区恢复。从左到右：健康三角形（橙色星标表示活跃链路）；b–c 发生分区，通过 a（蓝色）恢复；a–c 发生分区，通过 b（绿色）恢复；a–b 发生分区，通过 c（红色）恢复。

Gray 两阶段提交协议（Gray，1978b）存在一个众所周知的阻塞漏洞：如果协调者在发送 PREPARE 之后、发送 COMMIT之前发生故障，所有参与者都会卡在 TENTATIVE 状态而无法解决。三阶段提交（Skeen，1981）通过增加预提交阶段来解决这一问题，但代价是额外的消息轮次，并且对某些故障模式仍然存在脆弱性。

三角网络通过消除协调者来消除阻塞。在由三个节点 $\{A, B, C\}$组成的三角形中，每一对节点都通过双边 OAE 链路相连。如果 A–B 链路在事务期间发生分区，节点 A和 C 仍然可以通信，节点 B 和 C也同样如此。第三个节点 C 充当<style id='10'>恢复资源：它可以通过 A–C–B 路径中继反射阶段，使事务无需协调者即可完成，也无需等待发生分区的链路恢复。

定义 7.1（三角一致性属性）。 在一个每对节点都至少通过一个三角形相连的网络中，只要直接链路发生分区，任何双边事务都可以通过替代路径完成其反射阶段。只要任意一对节点之间至少有一条路径保持运行，网络就能维持语义一致性。

7.2 八价基底

OAE物理层架构采用八价拓扑：每个单元（模块服务器加 8 端口网卡）通过印制电路板走线或短电缆（<0.5 米）连接到二维平面中的八个相邻节点。在此拓扑中，每对相邻节点都参与多个三角形，为反射路径提供了大规模冗余。

节点与链路可动态重配置——不仅在故障与修复事件发生时，也随着微服务流量模式弹性扩张与收缩。每个单元在每个端口上构建有向无环图（有向无环图），从而仅凭本地信息即可提供修复所需的无环性质。

7.3 尺度无关性

三角形性质与尺度无关：它同样适用于芯粒上的三个节点、数据中心内的三个机架，以及横跨一片大陆的三个数据中心。唯一的变量是反射阶段的时间范围——即反射必须在该时间内到达，事务才能提交。在芯粒尺度上，这一时间范围为纳秒。在大陆尺度上，则为毫秒。协议结构完全相同；变化的只是时钟速率。

这是 RCP的工程实现：可逆因果原理具有尺度不变性，因为它取决于交换的结构 （双边、反射、信息守恒），而非介质的速度 。

8 九层 oae 架构(L2.1–L2.9)

完整的 OAE 架构（Borrill，2025）将莱布尼茨桥划分为九个子层，每个子层都实现互信息守恒的一个特定方面。这里有一点至关重要：**全部九个子层都完全位于 ISO/OSI 模型所称的第 2 层范围内**（数据链路层）。 OAE协议栈并非要取代 OSI 模型，而是对双边事务机制进行细粒度分解，使其能容纳在单个以太网帧内，位于 IP 开始之处以下。我们将这些子层标记为 L2.1–L2.9，以明确体现这种嵌套关系：

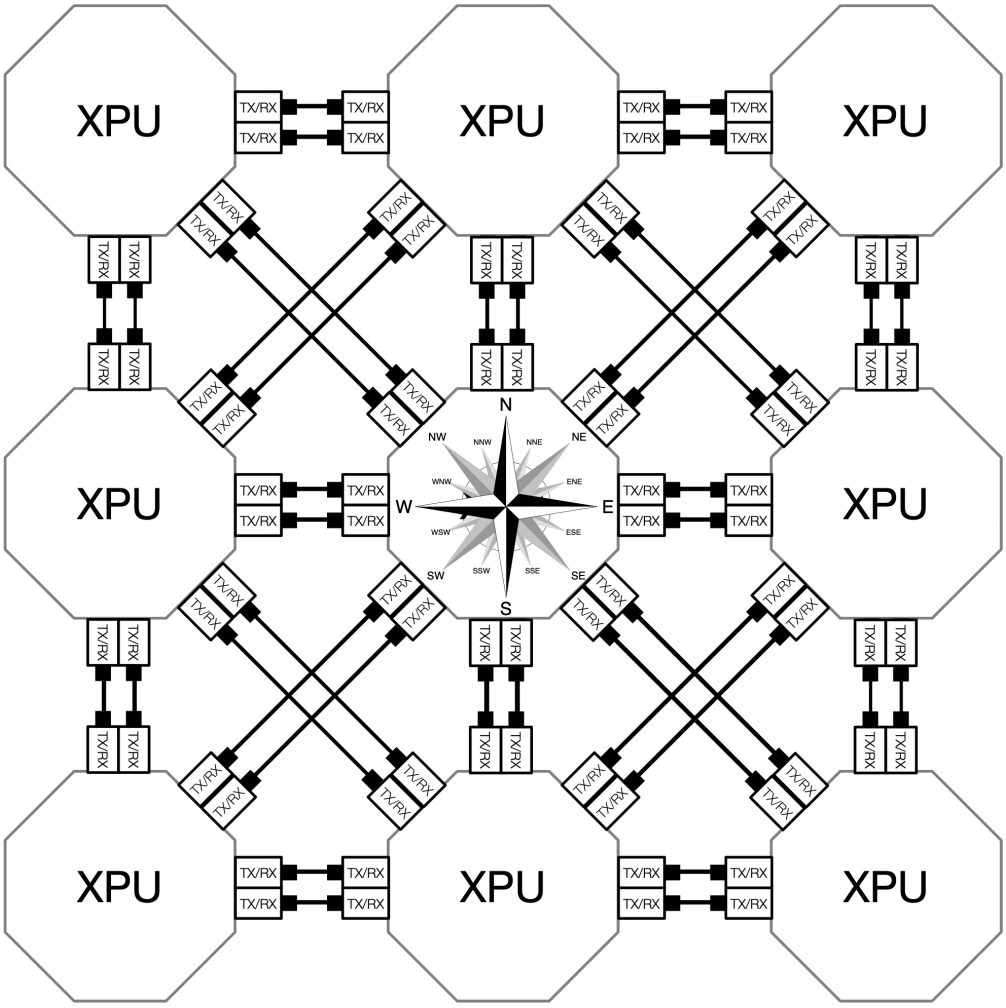

图 3：八价拓扑。每个单元都包含一个 XPU，配有八个双向 TX/RX 端口（罗盘方向从北到西北）。每对相邻单元都参与多个三角形，为反射路径提供了大量冗余。

子层	Name	守恒作用
L2.9	应用	语义不变量
L2.8	事务	原子性边界
L2.7	会话	跨事务状态
L2.6	协议	双边承诺
L2.5	反射	知识平衡验证
L2.4	传输	可靠交付
L2.3	网络	路由与拓扑
L2.2	Link	双向帧交换
L2.1	物理层	双向信令

这些名称刻意呼应 OSI 层（物理层、链路层、网络、传输、会话、应用），以强调其结构上的平行关系；但 L2.n 这一编号始终提醒我们，整个协议栈都在以太网帧内运行。OSI 模型通过七层和多个协议边界处理的事务， OAE 架构则在单个第 2 层协议数据单元内处理。

通过在每个子层明确双边事务结构。

关键的架构差异在于，L2.5（反思）和 L2.6（协商）是独特且必需的子层。传统的第2层协议都不包含这些子层。在 OSI 模型中，反射是可选的，而协商则交由应用（第7层）处理。在 OAE 模型中，它们是链路层的架构要求：任何事务在完成其反射阶段并验证知识平衡之前，都不能跨越子层边界。

分层结构具有复合性：每个子层都可以视为一个具有自身正向与反向算子的 PIF 链路，而子层的复合会保持信息守恒不变量。这使该架构具有*dagger-*幺半范畴结构：串联复合（$\odot$）对应子层堆叠，并联复合（$\otimes$）对应空间分布，而 dagger 运算则对应时间反演（Munamala 等，2025）。

9 个未解问题

莱布尼茨桥提出的问题比它解决的更多。我们确定了七个我们认为最为紧迫的问题。

1. 语义箭头能否在进程代数中形式化？ 范畴框架（dagger-幺半范畴、过程矩阵）提供了数学词汇，但一套完整的语义事务进程代数——包含复合、隐藏和细化算子——尚未构建。Abramsky–Gorard范畴语义框架提供了一个有前景的起点。

2. 它与Hardy因果结构有何关系？ Hardy的量子引力框架（Hardy，2001年）以动态因果结构取代固定的背景时空。OAE的动态DAG拓扑——其中因果路径由协议创建和销毁，而非由模型预先假定——可能是Hardy的构想的一种经典实现。这一联系值得进行形式化研究。

3. 量子不定因果序是否提供了物理基底？ Zhao等（Zhao等，2025）表明， ICO 提供了真正的通信优势。如果双边以太网链路实现了 ICO的一种经典形式，这一优势是否延伸到经典网络？ PIF 容量结果（$C_{\text{PIF}} = 2 \cdot C_{\text{one-way}}$）表明答案是肯定的，但仍需要一个将量子情形与经典情形联系起来的严格证明。

4. 大语言模型能否通过语义事务保证进行训练？ 第四部分表明，自回归生成在 FITO 词元级进行。能否采用一种融入反射阶段的训练架构——在将每个生成的词元提交到输出之前，先根据语义约束对其进行验证——来减少幻觉？自一致性方法（Wang等，2022）在序列级近似实现了这一点，但词元级反射仍有待探索。

5. Edward Lee 的 Lingua Franca 和 Maxwait 机制。 Lee 的 Lingua Franca 框架（Lohstroh等，2021）要求程序员明确声明时序假设，并规定在这些假设遭到违反时使用故障处理程序。Maxwait 机制——等待最慢的参与者——可能已经实现了某种形式的双边因果交换。如果 Maxwait 能在参与者之间保持锁相，就可能隐式地强制执行类似于 PIF的$R \simeq F^{-1}$的条件。这需要仔细分析。

6. Ken Birman 在 ico 框架中的虚拟同步。Birman 的虚拟同步（Birman 和 Joseph，1987年）已被证明在确定因果顺序约束下是最优的。当放宽这一约束时会发生什么？不确定逻辑时间戳框架中的张量时钟可以表示完整的 2 位状态空间。这是否会改变组通信协议的最优性格局?

7. 重新表述交替因果性 dI/dt 框架。Lee（Lee，2026，私人通信）指出，交替因果性的表述中可能存在范畴错误：香农互信息 $I(X;Y)$ 是联合概率分布的属性，而不是时间的函数，因此导数 dI_+/dt 和 dI_-/dt 各自都为零，而不只是它们的和为零。对此有三种可能的重新表述方式：(a) 将该符号理解为信道容量利用率（分配给各个方向的比特/秒），而非互信息的导数；(b) 转而采用时间索引随机过程，其中联合分布 $P(X_t,\ Y_t)$ 本身随时间演变，从而使 I_t 成为合法的时间函数；或 (c) 完全放弃动力学符号，将 PIF 表述为关于双边容量分配的静态约束。解决这一问题至关重要：如果形式体系将信息论静态学与动力学方程混为一谈，就必须为 AC 框架重新奠定严谨的数学基础。

10 尾声：Mulligan Stew

Mulligan Stew 是物理学家、计算机科学家和工程师每周举行的聚会，也是本系列观点的“试验场”。两年多来，这个团队一直在探讨这五篇论文试图回答的问题。这个名字体现了团队专长的多样性：每个人都带来自己的所长，最终的成果比任何单一的组成部分都更加丰富。

Pat Helland 在分布式事务处理领域做出了奠基性贡献，影响跨越四十年——从 Tandem 的 NonStop 到微软的分布式 SQL。他曾表达过想要“重来一次”的愿望：借助自 20 世纪 70 年代以来我们对问题如何发生、为何发生所积累的一切认识，重新构建分布式计算。

这个系列就是那次重来。

这并不是因为它给出了所有答案——第 9 节中的未解问题确实存在，其中有些可能需要数年才能解决。而是因为它找出了最初导致我们需要重来的一处根本性结构错误：假设时间向前流动，假设向前流动就意味着语义上的进展，并且把返回路径视为开销，而不是视为确立意义所必需的构成机制。

莱布尼茨桥以一个原则取代了这一假设：互信息守恒。语义时间之箭并非预先假定，而是构建出来的，在一次次交换、一次次反射、一次次提交中逐渐形成。链路层上的时间方向并非物理定律，而是可逆交换不可逆地提交时所产生熵的涌现属性。

Edward Ashford Lee 将这一点说得最为精准：“这里现实与模型之间存在一道分界，你必须把这道分界弄清楚。”（Lee，2026） FITO 范畴错误抹去了这道分界。莱布尼茨桥则恢复了它。

Mulligan Stew 仍在继续。

参考文献

Borrill, Paul. «时间的语义箭头，第一部分：从爱丁顿到以太网》。DÆDÆLUS，2026。

Borrill, Paul. «时间的语义箭头，第二部分：开放式原子以太网链路的语义》。DÆDÆLUS，2026。Borrill, Paul. «时间的语义箭头，第三部分：RDMA与完成谬误》。DÆDÆLUS，2026。Borrill, Paul. «时间的语义箭头，第四部分：事务为何失败》。DÆDÆLUS，2026。Ryle, Gilbert.《心灵概念》。Hutchinson，1949。Spekkens, Robert W. «经验上不可区分者的本体论同一性：莱布尼茨的方法论原则及其在爱因斯坦研究中的意义》。 arXiv:1909.04628，2019。Spekkens, Robert W. «量子态的认知观证据：一个玩具理论》。《物理评论*A*》，75:032110，2007。兰波特, Leslie. «分布式系统中的时间、时钟与事件排序》。《*ACM*通讯》，21(7):558–565，1978。香农, Claude E. «通信的数学理论》。《贝尔系统技术期刊》，27(3):379–423，1948。Lee, Edward Ashford.《柏拉图与极客：人类与技术的创造性伙伴关系》。麻省理工学院出版社，2017。Lee, Edward Ashford. 2026年2月 Mulligan Stew 会议发言。ˇ Oreshkov, Ognyan, Costa, Fabio, and Brukner, Caslav. «无因果序的量子关联》。《自然·通讯》，3:1092，2012。Rubino, Giulia et al. «不定因果序的实验验证》。《科学进展》，3:e1602589，2017。Zhao, Xiangrui et al. «不定因果序的量子通信能力》。arXiv:2510.08507，2025。Munamala, Sahas, Borrill, Paul, Johnston, David, Hammock, Dugan, and Gladish, Dean. «交替因果关系》。已提交至*Entropy*，2025。Borrill, Paul. «量子以太网》。Wolfram暑期学校（WSS22），2022。Fischer, Michael J., Lynch, Nancy A., and Paterson, Michael S. «存在一个故障进程时分布式共识的不可能性》。《*ACM*期刊》，32(2):374–382，1985。Gray, Jim. «数据库操作系统札记》。载于《操作系统：高级课程》，施普林格，1978。Gray, Jim. «事务概念：优点与局限》。载于《第七届*VLDB*会议论文集》，1978。Brewer, Eric A. «迈向健壮的分布式系统》。主题演讲，*ACM*分布式计算原理研讨会，2000。Gilbert, Seth and Lynch, Nancy. «布鲁尔猜想与一致、可用、分区容错Web服务的可行性》。《*ACM SIGACT*新闻》，33(2):51–59，2002。

Skeen, Dale.《非阻塞提交协议》。《*1981*年*ACM SIGMOD*国际会议论文集》，1981年。Hardy, Lucien.《量子引力计算机：不定因果结构下的计算理论》 arXiv:quant-ph/0701019, 2001年。Wang, Xuezhi 等。《语言模型中的自洽性提升思维链推理能力》arXiv:2203.11171, 2022。Lohstroh, Marten 等。《面向确定性并发系统的 Lingua Franca》。《*ACM*嵌入式计算系统汇刊》，20(4)，2021年。Birman, Kenneth P. 和 Joseph, Thomas A.《在分布式系统中利用虚拟同步》。《第*11*届*ACM*操作系统原理研讨会论文集》，1987年。Borrill, Paul.《九层OAE架构》。DÆDÆLUS技术报告，2025。Parker, D. Stott 等。《检测分布式系统中的相互不一致》。《*IEEE*软件工程汇刊》，SE-9(3):240–247，1983年。Lee, Edward A. 于02026年2月9日向 Paul Borrill 发送的私人通信。关于 dI/dt 表述：“在香农的表述中，互信息不是时间的函数，因此这些导数各自都为零，所以并非只有它们的和为零。”Stone, James V.《信息论：教程导论。</style》Sebtel出版社，谢菲尔德，2018年。arXiv:1802.05968。