# 概述

## 简介

分布式系统中的节点通信存在两种模型：共享内存（Shared memory）和消息传递（Messages passing）。

基于消息传递通信模型的分布式系统，不可避免的会发生以下错误：

进程可能会慢、被杀死或者重启；

消息可能会延迟、丢失、重复；

在基础 Paxos 场景中，先不考虑可能出现消息篡改即拜占庭错误的情况；

……

Paxos算法解决的问题是在一个可能发生上述异常的分布式系统中如何就某个值达成一致，保证不论发生以上任何异常，都不会破坏决议的一致性。

简而言之：Paxos的目的是让整个集群的结点对某个值的变更达成一致。Paxos 可以说是一个民主选举的算法——大多数节点的决定会成个整个集群的统一决定。任何一个点都可以提出要修改某个数据的提案，是否通过这个提案取决于这个集群中是否有超过半数的节点同意。取值一旦确定将不再更改，并且可以被获取到（不可变性，可读取性）。

## Paxos VS Raft

Paxos和Raft最大的区别在于Paxos支持乱序同步，Raft只支持顺序同步。

Raft相当于是Paxos协议的一种简化，好处是实现简单，容易理解，坏处是损失了日志并行同步的性能。国内和开源界流行Raft，不过对于AWS、微软、Google等大公司，关键系统还是使用Paxos的。

# 分类

## Basic Paxos

## Multi Paxos

## Fast Paxos

# Basic Paxos

Basic Paxos可以简单的这么描述：

1、一个或多个服务器可以同时发起提议（propose）。

2、系统必须同意一个被选中的值。

3、只有一个值被选中。

## 角色

Paxos各角色的职能：

Client：产生议题者，发起新的请求（系统外部角色，像民众）；

Proposer：提议者，接受Client请求，向集群提出提议propose（同时存在一个或者多个，他们各自发出提案，像议员，替民众提出议案）；

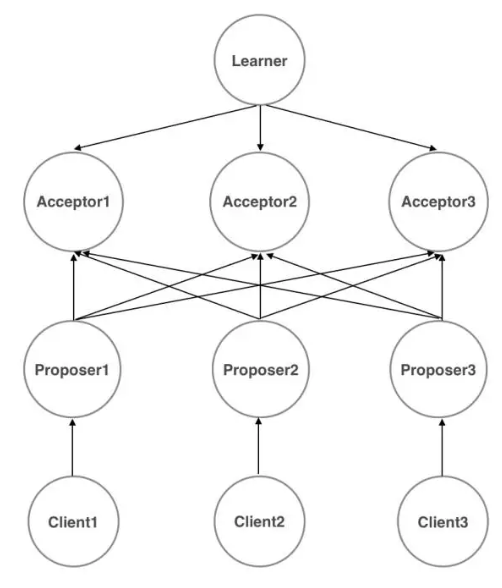
Acceptor（Voter）：提议投票和接受者，收到议案后选择是否接受（只有在形成法定人数quorum，一般即为多数派majority时，提议才会最终被接受，像国会）；

Learner：提议接受者，最终决策学习者，只学习正确的决议（backup备份，对集群一致性没有什么影响，像记录员）。

**注：**互相发短信其实就是发消息进行通信，短信的时间戳就是“epoch”。

上面4种角色中最主要的是 Proposer和Acceptor。Proposer就像Client的使者，由Proposer使者拿着Client的议题去向Acceptor提议，让Acceptor来决策。主要的交互过程在Proposer和Acceptor之间。

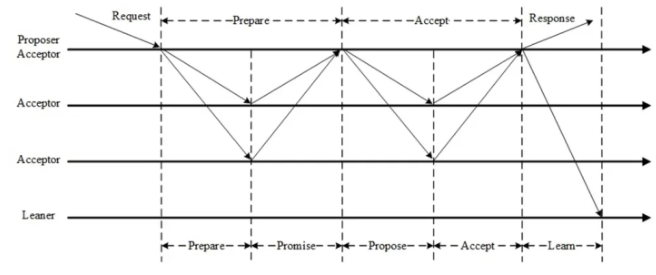
下面用一幅图来标识角色之间的关系。



上图中是画了很多节点的，每个节点需要一台机器么？答案是不需要的。上面的图是逻辑图，物理中，可以将Acceptor和Proposer以及Client放在一台机器上，Acceptor启动端口进行TCP监听，Proposer 来主动连接即可。所以完全可以将Client、Proposer、Acceptor、Learner合并到一个程序里面。

## 步骤

Paxos达成一个决议至少需要两个阶段（Prepare阶段和Accept阶段）。



Prepare阶段的作用：

1. 争取提议权，争取到了提议权才能在Accept阶段发起提议，否则需要重新争取。
2. 学习之前已经提议的值。

Accept阶段使提议形成多数派，提议一旦形成多数派则决议达成，可以开始学习达成的决议。

Accept阶段若被拒绝需要重新走Prepare阶段。

可以将Basic Paxos分为两个大阶段四个小阶段：

1. Phase 1.1：Prepare

Propose提出一个议案，编号为N，此N大于这个proposer之前提出的提案编号，请求acceptors的quorum接受。

1. Phase1.2：Promise

如果N大于此acceptor之前接受的任何提案编号则接受，否则拒绝。

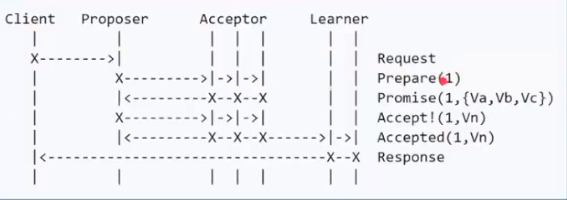
1. Phase2.1

如果达到多数派，proposer会发出accept请求，此请求包含提案编号N，以及提案内容。

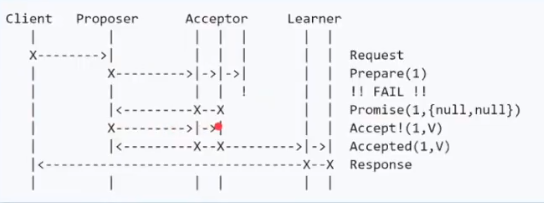
1. Phase2.2：Accepted

如果此acceptor在此期间没有收到任何编号大于N的提案，则接受此提案内容，否则忽略。

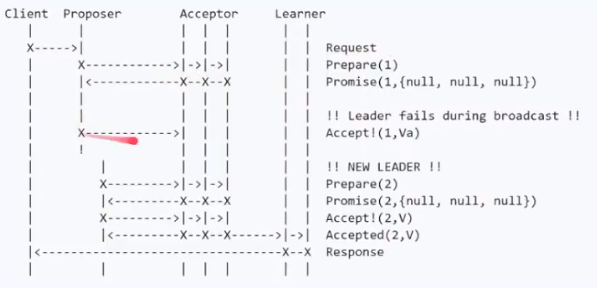
基本流程：



部分节点失败，但是达到了Quorums：

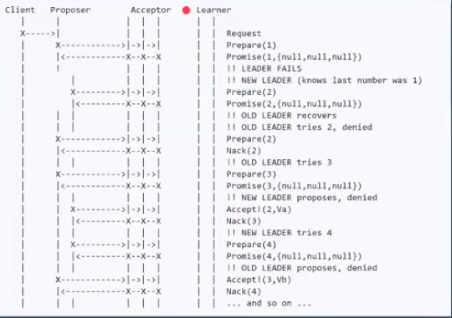


Proposer失败：



注：如果一个Proposer宕机，则会另起一个Proposer，Client连接到这个新的Proposer上，然后另起一个编号为2的Proposer执行任务。

潜在问题：活锁（liveness）或dueling



Paxos 在原作者的《Paxos Made Simple》中的描述：

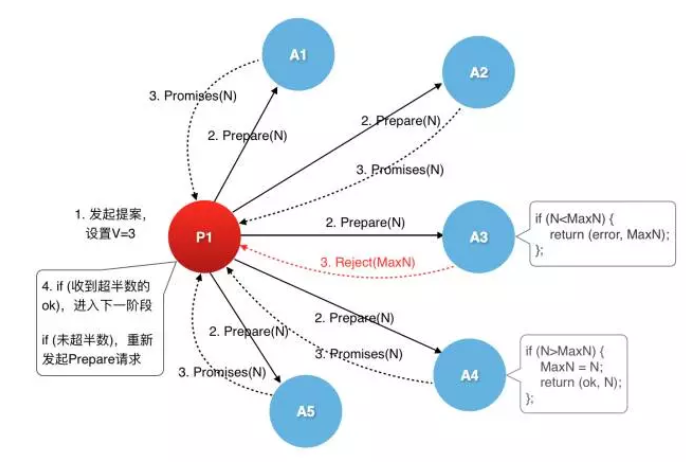
**决议的提出与批准**

通过一个决议分为两个阶段：

1）prepare阶段

proposer选择一个提案编号n并将prepare请求发送给acceptors中的一个多数派；acceptor收到prepare消息后，如果提案的编号大于它已经回复的所有prepare消息，则acceptor将自己上次接受的提案回复给proposer，并承诺不再回复小于n的提案；

下图是一个proposer和5个acceptor之间的交互，对2种不同的情况做了处理。

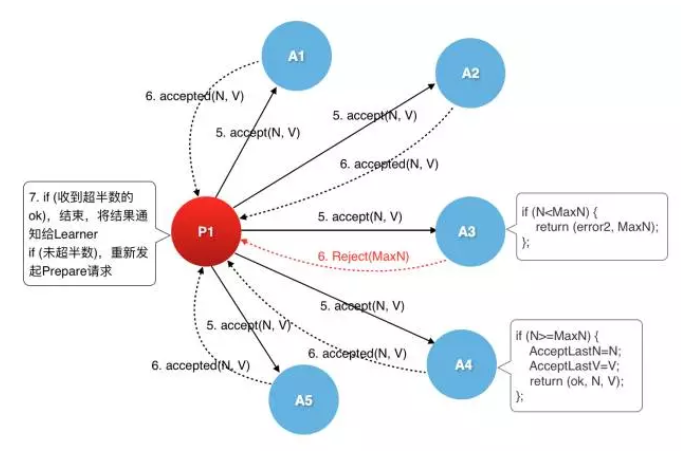


2）批准阶段

当一个proposer收到了多数acceptors对prepare的回复后，就进入批准阶段。它要向回复prepare请求的acceptors发送accept请求，包括编号n和value；

在不违背自己向其他 proposer 的承诺的前提下，acceptor 收到 accept 请求后即接受这个请求。

可以看出，Proposer 与 Acceptor 之间的交互主要有4类消息通信，这4类消息对应于 paxos 算法的两个阶段4个过程。用2轮 RPC 来确定一个值。上面的图解都只是一个 Proposer，但是实际中肯定是有其他 Proposer 针对同一件事情发出请求，所以在每个过程中都会有些特殊情况处理，这也是为了达成一致性所做的事情。



如果在整个过程中没有其他 Proposer 来竞争，那么这个操作的结果就是确定无异议的。但是如果有其他 Proposer 的话，情况就不一样了。

## 唯一编号

保证Paxos正确运行的一个重要因素就是提案(proposal)编号，编号之间要能比较大小/先后，如果是一个proposer很容易做到，如果是多个proposer同时提案，该如何处理？Lamport 不关心这个问题，只是要求编号必须是全序的，但我们必须关心。这个问题看似简单，实际还稍微有点棘手，因为这本质上是也是一个分布式的问题。

在Google的Chubby论文中给出了这样一种方法：

假设有n个proposer，每个编号为ir (0 <= ir < n)，proposol编号的任何值 s 都应该大于它已知的最大值，并且满足：s % n = ir => s = m \* n + ir

proposer已知的最大值来自两部分：proposer 自己对编号自增后的值和接收到acceptor的reject后所得到的值。

我们以3个proposer P1、P2、P3为例。

开始m=0，编号分别为0，1，2。 P1提交的时候发现了P2已经提交，P2编号为1 > P1的0，因此P1重新计算编号：new P1 = 1 \\* 3 + 0 = 4

P3以编号2提交，发现小于P1的4，因此P3重新编号：new P3 = 1 \* 3 + 2 = 5

整个paxos算法基本上就是围绕着proposal编号在进行：proposer忙于选择更大的编号提交proposal，acceptor则比较提交的proposal的编号是否已是最大，只要编号确定了，所对应的value也就确定了。所以说，在paxos算法中没有什么比proposal的编号更重要。

# Multi Paxos

## 背景

Paxos对某一个问题达成一致的一个协议。《Paxos Made Simple》花大部分的时间解释的就是这个一个提案的问题，然后在结尾的Implementing a State Machine 章节介绍了我们大部分的应用场景是对一堆连续的问题达成一致。

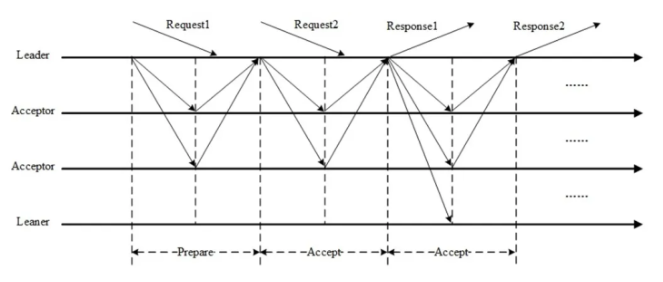
最简单的方法就是实现每一个问题独立运行一个 Paxos的过程（instance）。每个过程都是独立的，相互不会干扰，这样可以为一组连续的问题达成一致。但是这样每一个问题都需要 Prepare，Accept 两个阶段才能够完成。Prepare阶段频繁请求会造成无谓的浪费，我们能不能把这个过程给减少。

这样就引入Proposer Leader的选举，正常的Paxos二阶段从Proposer Group中选举出 Leader后，后续统一由Leader发起提案，只有Leader才能发起提案的话相当于Proposer只有一个，所以可以省略Prepare阶段直接进入到Accpet阶段。直至发生Leader宕机、重新进行选举。

《Paxos Made Live》论文中讲解了如何使用multi paxos实现chubby的过程，以及实现过程中需要解决的问题，比如需要解决磁盘冲突，如何优化读请求，引入了 Epoch number 等。

即：Leader唯一的propser，所有请求都需要经过此Leader。

Basic Paxos达成一次决议至少需要两次网络来回，并发情况下可能需要更多，极端情况下甚至可能形成活锁，效率低下，Multi-Paxos正是为解决此问题而提出。

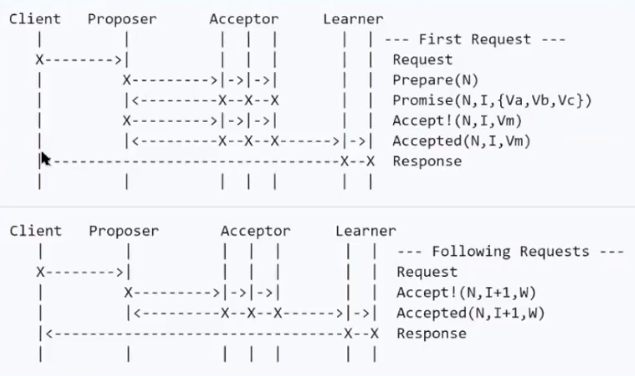


Multi-Paxos选举一个Leader，提议由Leader发起，没有竞争，解决了活锁问题。提议都由Leader发起的情况下，Prepare阶段可以跳过，将两阶段变为一阶段，提高效率。Multi-Paxos并不假设唯一Leader，它允许多Leader并发提议，不影响安全性，极端情况下退化为Basic Paxos。

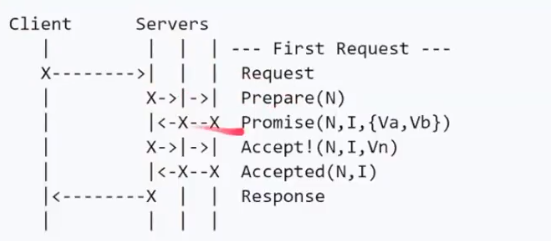
Multi-Paxos与Basic Paxos的区别并不在于Multi（Basic Paxos也可以Multi），只是在同一Proposer连续提议时可以优化跳过Prepare直接进入Accept阶段，仅此而已。

## 步骤

基本流程：



减少角色，进一步简化：



## 问题

难以实现，效率低（2轮RPC）、活锁

# 实际应用

由此可知，Paxos在节点宕机恢复、消息无序或丢失、网络分化的场景下能保证决议的一致性。而 Paxos 的描述侧重于理论，在实际项目应用中，处理了N多实际细节后，可能已经变成了另外一种算法，这时候正确性已经无法得到理论的保证。

**使用Paxos的开源项目包括：腾讯微信PhxPaxos。使用Raft的开源项目：etcd**。

要证明分布式一致性算法的正确性通常比实现算法还困难。所以很多系统实际中使用的都是以 Paxos 理论为基础而衍生出来的变种和简化版。例如Google的Chubby、MegaStore、Spanner等系统，ZooKeeper的ZAB协议，还有更加容易理解的raft协议。大部分系统都是靠在实践中运行很长一段时间才能谨慎的表示，系统已基本运行，没有发现大的问题。