

# Kafka

xbZhong

2025-10-30

[本页PDF](#)

[Kafka原理文档](#)

[Spring Kafka](#)

[Kafka官方文档](#)

## 概述

Kafka偏重吞吐与持久化

**定义：**Kafka是一个分布式的基于发布/订阅模式的消息队列，主要应用于大数据实时处理领域

**发布/订阅：**消息的发布者不会将消息直接发布给特定的订阅者，而是将发布的消息分为不同的类别，订阅者只接收感兴趣的消  
息（和RabbitMQ一样）

## 传统消息队列的应用场景

传统的消息队列的主要应用场景包括：缓存/消峰、解耦和异步通信

**缓冲/削峰：**有助于控制和优化数据流经过系统的速度，解决生产消息和消费消息的处理速度不一致的情况

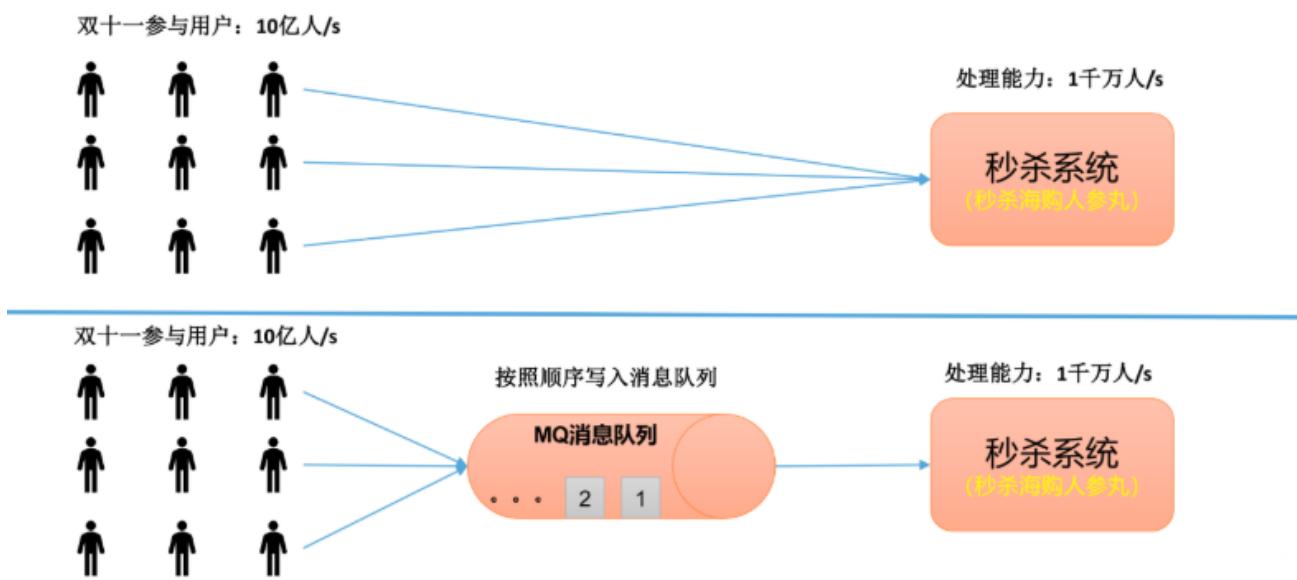


image-20251023233518657

**解耦：**允许你独立的扩展或修改两边的处理过程，只要确保它们遵守同样的接口约束

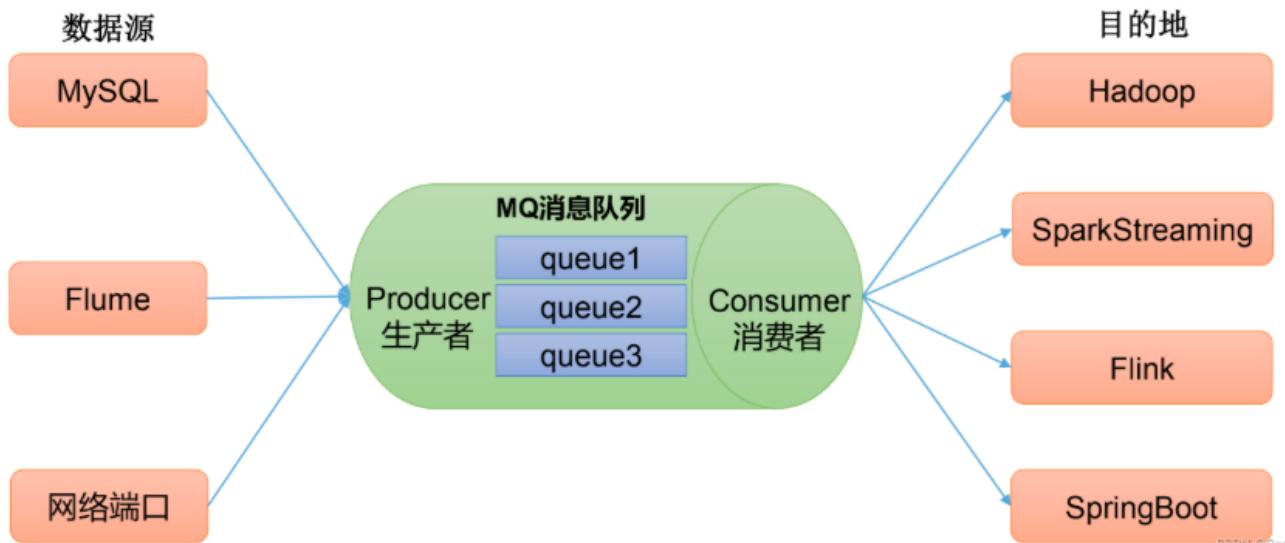


image-20251023233533002

**异步通信：**允许用户把一个消息放入队列，但并不立即处理它，然后再需要的时候再去处理它们

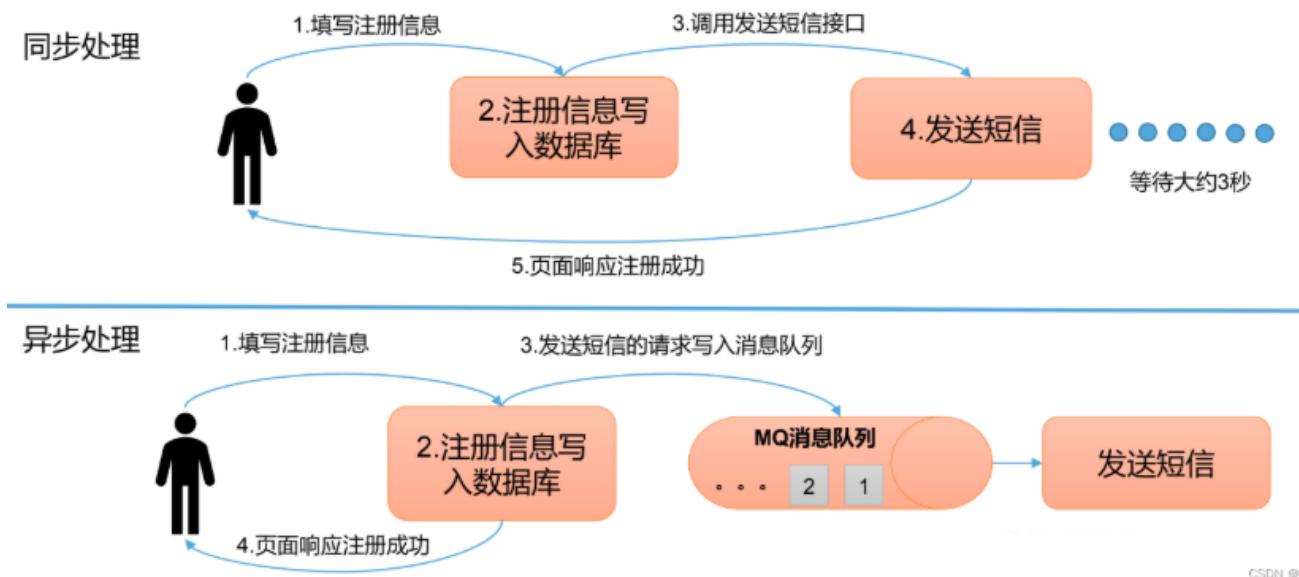


image-20251023233546291

## Kafka基础架构

整体上由

- Producer
- Consumer
- Kafka Cluster

组成

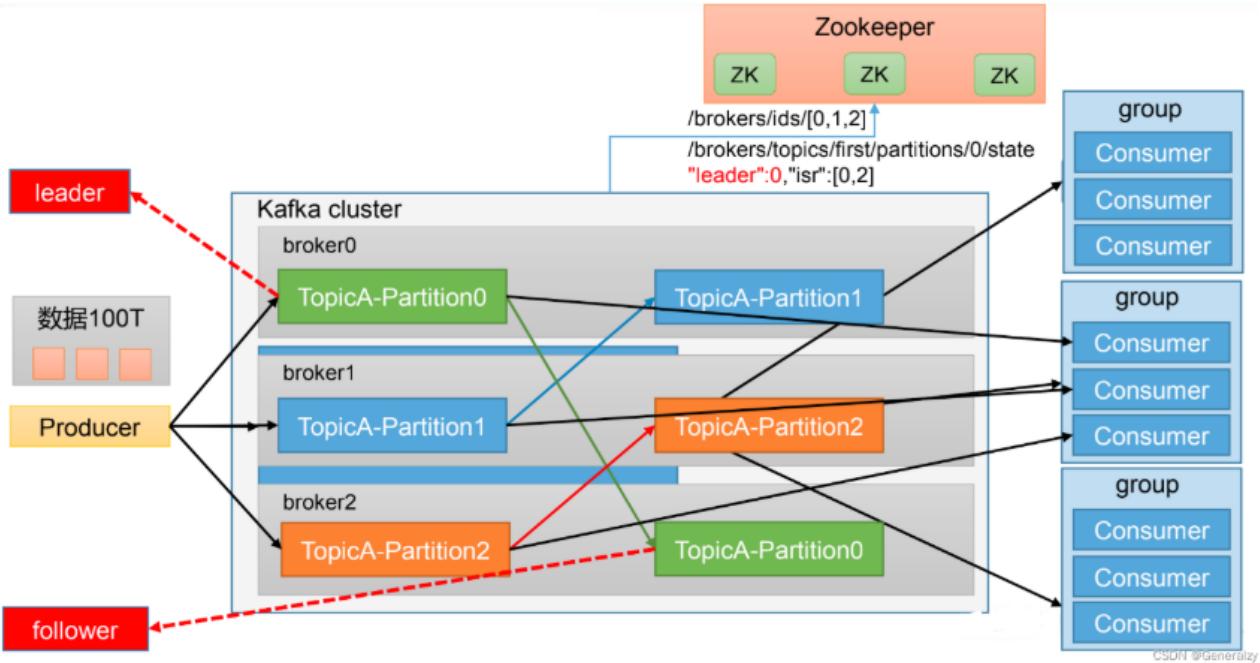


image-20251023233656992

- Producer: 消息生产者, 就是向Kafka broker发消息的客户端
- Consumer: 消息消费者, 向Kafka broker取消息的客户端
- Consumer Group(CG): 消费者组, 由多个consumer组成
  - 消费者组内每个消费者负责消费**不同分区的数据**
  - 消费者组之间互不影响, 所有的消费者都属于某个消费者组

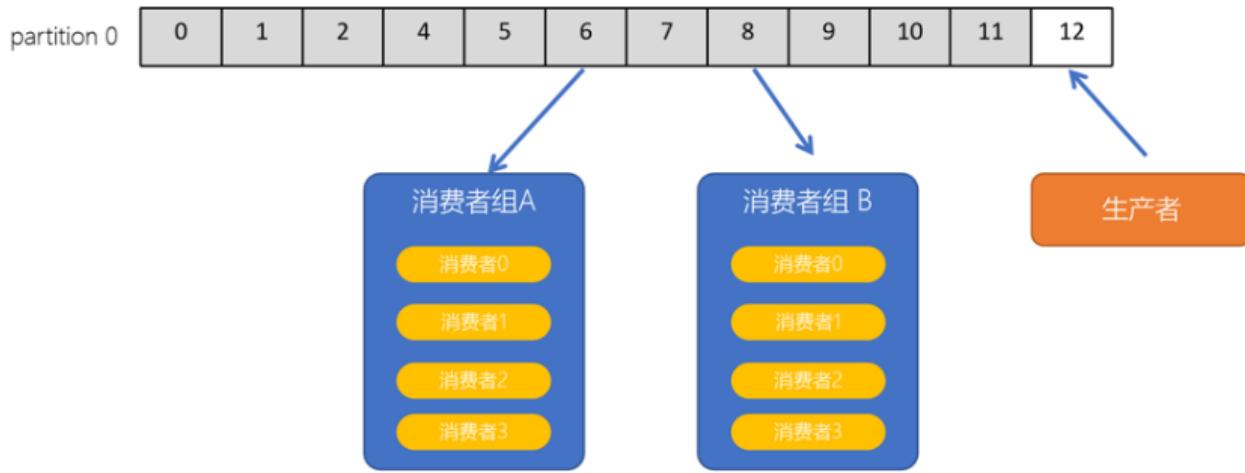


image-20251025101503778

- Broker: 一台Kafka服务器就是一个**broker**, 一个集群由多个broker组成, 一个broker可以容纳多个topic
- Topic: 可以理解为一个队列, 生产者和消费者面向的都是一个topic
- Partition: 分区, 一个非常大的Topic可以分布到多个broker上, 也就是每个Topic会被分成多个Partition, 提高并行度和可扩展性

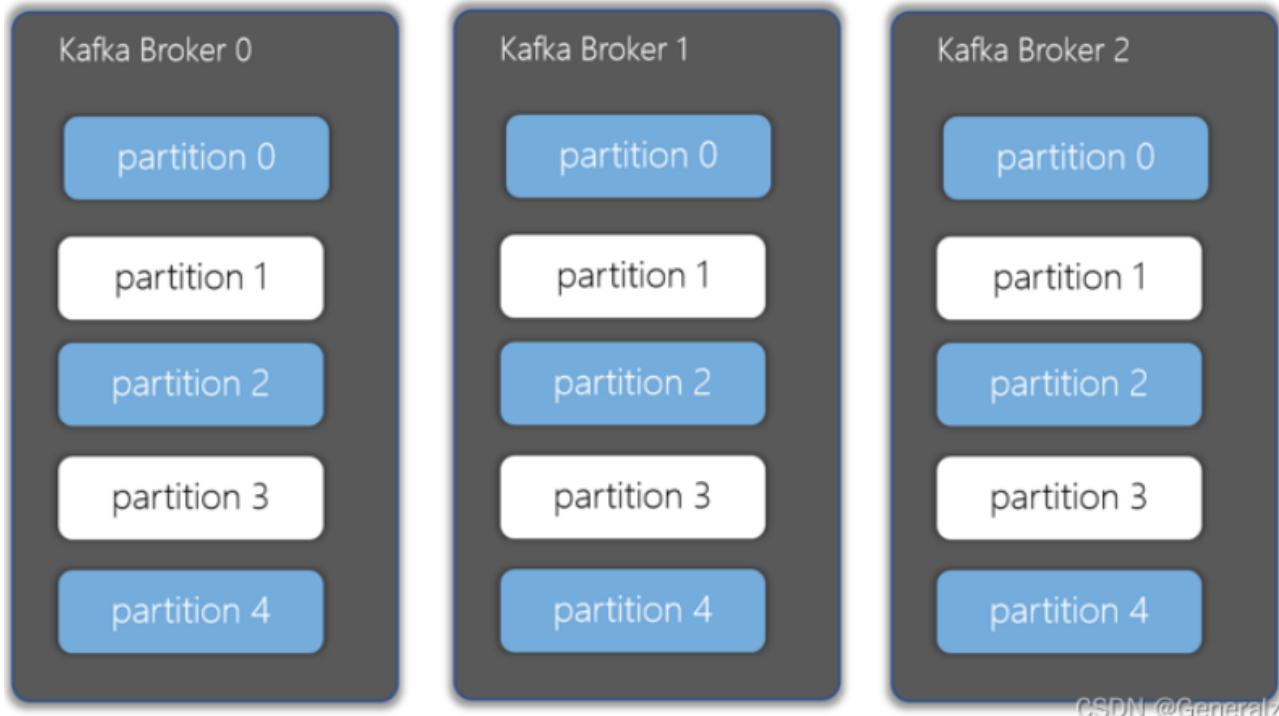


image-20251025101859263

- Replica: 副本, 一个topic的每个分区都有若干个副本, 一个leader和若干个follower
- Leader: Partition的主副本, 负责读写
- Follower: Partition的从副本, 负责同步

## Kafka API

接下来只阐述了在Spring项目中如何使用Kafka

### 主要组件

- KafkaTemplate: 用于发送消息
- @KafkaListener: 用于消费消息

下面的组件主要用于高级自定义和底层的了解

- ProducerFactory: 创建生产者实例
- ConsumerFactory: 创建消费者实例, 负责连接配置
- ConcurrentKafkaListenerContainerFactory: 控制监听线程数量、并发消费等
- KafkaProducer: 真正和Kafka集群通信的组件, KafkaTemplate底层委托这个组件进行消息发送
- DefaultKafkaProducerFactory: 是ProducerFactory的实现类, 用于加载配置并创建KafkaProducer实例
- ContainerFactory: 用于创建和管理消息监听容器 (MessageListenerContainer) 的工厂, 负责消费行为配置

## 生产者

### 使用步骤

- 引入依赖

```
<dependency>
<groupId>org.springframework.kafka</groupId>
<artifactId>spring-kafka</artifactId>
<version>3.3.10</version>
</dependency>
```

- 生产者配置

- 在yaml文件进行生产者的配置

```
spring:
kafka:
  bootstrap-servers: localhost:9092      # Kafka集群地址 (多个用逗号隔开)
  client-id: my-app                      # 客户端标识, 可选, 用于区分不同客户端
  properties:                            # 传递给底层Kafka客户端的自定义参数
    security.protocol: PLAINTEXT          # 连接协议 (PLAINTEXT、SASL_PLAINTEXT等)
producer:
  acks: all                                # 确认级别: 0(不等确认)、1(leader确认)、all
  retries: 3                                 # 发送失败时的重试次数
  batch-size: 16384                          # 批次大小 (字节)
  buffer-memory: 33554432                   # 生产者缓冲区内存大小
  linger-ms: 10                             # 批次发送延迟时间 (毫秒)
  compression-type: gzip                    # 压缩方式: none/gzip/snappy/lz4/zstd
  enable-idempotence: true                 # 开启幂等性, 防止重复消息
  key-serializer: org.apache.kafka.common.serialization.StringSerializer
  value-serializer: org.springframework.kafka.support.serializer.JsonSerializer
  transaction-id-prefix: tx-                # 启用事务
  properties:                               # 额外的Kafka原生参数
    max.request.size: 1048576               # 单条消息最大大小 (1MB)
```

- 当你做完上述配置, Spring 框架会自动

- 创建一个 DefaultKafkaProducerFactory
    - 这个工具类用于加载配置并创建**KafkaProducer**实例, 用于和Kafka集群通信
    - **KafkaTemplate**底层是委托**KafkaProducer**通信的
  - 创建一个 KafkaTemplate
  - 自动注入到你任何使用 KafkaTemplate 的类中

- 所以你可以直接写业务逻辑，下面是个例子
  - 当然KafkaTemplate有许多重载的方法，需要边用边学，支持同步、异步发送

```
@Service
public class KafkaProducerService {

    private final KafkaTemplate<String, String> kafkaTemplate;

    public KafkaProducerService(KafkaTemplate<String, String> kafkaTemplate) {
        this.kafkaTemplate = kafkaTemplate;
    }

    public void send(String topic, String msg) {
        kafkaTemplate.send(topic, msg);
        System.out.println("发送成功: " + msg);
    }
}
```

- 如果想自定义功能（如拦截器、事务），可以自己手动创建KafkaTemplate Bean
  - 在配置类里声明，并让启动类可以扫描到
  - 需要使用到ProducerFactory为生产者创建模板，也就是注入我们提供的配置

```
@Configuration
public class KafkaProducerConfig {

    @Bean
    public KafkaTemplate<String, String> kafkaTemplate(
        ProducerFactory<String, String> producerFactory) {
        return new KafkaTemplate<>(producerFactory);
    }
}
```

## 两种发送消息的格式

- 常规发送

```
// send(String topic, Integer partition, K key, V value)

kafkaTemplate.send("test-topic", 0, "myKey", "Hello Partition 0!");
```

- 可附加元信息

- 使用MessageBuilder配置消息
  - withPayload：配置消息内容
  - KafkaHeaders.TOPIC：消息要发送的主题
  - KafkaHeaders.PARTITION：消息要发送的分区
  - KafkaHeaders.KEY：消息的Key
  - KafkaHeaders.TIMESTAMP：消息发送时的时间戳

```
kafkaTemplate.send(
    MessageBuilder.withPayload("Hello Partition & Header")
        .setHeader(KafkaHeaders.TOPIC, "test-topic")
        .setHeader(KafkaHeaders.PARTITION_ID, 1)      // 指定分区
        .setHeader(KafkaHeaders.MESSAGE_KEY, "myKey") // 指定 key
        .setHeader("traceId", "trace-001")           // 自定义 header
        .build()
);
```

## 异步发送

SpringKafka默认使用**异步发送**

- 返回类型为CompletableFuture，我们需要使用它的whenComplete方法获取异步结果

```
kafkaTemplate.send("topic", "key", "message")
    .whenComplete((result, ex) -> {
        if (ex != null) {
            System.err.println("发送失败: " + ex.getMessage());
        } else {
            System.out.println("发送成功, offset=" + result.getRecordMetadata().o
        }
    });

```

## 请求-响应模式

使用ReplyingKafkaTemplate实现，它支持同步或异步等待响应消息，这使Kafka也能像RPC那样工作

- 首先进行配置类的声明，需要在这声明消费者工厂，它创建的消费者实例（监听消费者）会一直监听业务消费者返回值到达的那个topic
  - Spring并不会帮我们自动创建ReplyingKafkaTemplate

```
@Configuration
public class KafkaReplyConfig {

    // 生产者工厂
    @Bean
    public ProducerFactory<String, String> producerFactory() {
        Map<String, Object> props = new HashMap<>();
        props.put(ProducerConfig.BOOTSTRAP_SERVERS_CONFIG, "localhost:9092");
        props.put(ProducerConfig.KEY_SERIALIZER_CLASS_CONFIG, StringSerializer.c
        props.put(ProducerConfig.VALUE_SERIALIZER_CLASS_CONFIG, StringSerializer
        return new DefaultKafkaProducerFactory<>(props);
    }

    // 消费者工厂 (用于回复容器)
    @Bean
    public ConsumerFactory<String, String> consumerFactory() {
        Map<String, Object> props = new HashMap<>();
        props.put(ConsumerConfig.BOOTSTRAP_SERVERS_CONFIG, "localhost:9092");
        props.put(ConsumerConfig.GROUP_ID_CONFIG, "reply-group");
        props.put(ConsumerConfig.KEY_DESERIALIZER_CLASS_CONFIG, StringDeserializ
        props.put(ConsumerConfig.VALUE_DESERIALIZER_CLASS_CONFIG, StringDeserial
        return new DefaultKafkaConsumerFactory<>(props);
    }

    // 监听 "reply-topic" 的容器 (RepliesKafkaTemplate 需要)
    @Bean
    public KafkaMessageListenerContainer<String, String> replyContainer(
        ConsumerFactory<String, String> cf) {

        ContainerProperties containerProperties = new ContainerProperties("reply
        return new KafkaMessageListenerContainer<>(cf, containerProperties);
    }

    // RepliesKafkaTemplate — 核心组件
    @Bean
    public RepliesKafkaTemplate<String, String, String> repliesKafkaTemplate(
        ProducerFactory<String, String> pf,
        KafkaMessageListenerContainer<String, String> replyContainer) {
        return new RepliesKafkaTemplate<>(pf, replyContainer);
    }
}
```

- 进行依赖注入并发送消息

```
@Service
public class RequestProducer {

    @Autowired
    private ReplyingKafkaTemplate<String, String, String> replyingKafkaTemplate;

    public String sendAndReceive(String data) throws Exception {
        // 构造请求消息
        ProducerRecord<String, String> record =
            new ProducerRecord<>("request-topic", data);

        // 指定响应主题 (Reply-To)
        record.headers().add(new RecordHeader(
            KafkaHeaders.REPLY_TOPIC, "reply-topic".getBytes()));

        // 发送并等待响应 (同步)
        RequestReplyFuture<String, String, String> future =
            replyingKafkaTemplate.sendAndReceive(record);

        // 等待结果 (阻塞直到 reply 到达)
        ConsumerRecord<String, String> response = future.get(10, TimeUnit.SECONDS);

        System.out.println("收到响应: " + response.value());
        return response.value();
    }
}
```

## 消费者

### 调用流程

```
@KafkaListener  
    ↓ (指定或默认)  
ContainerFactory (工厂)  
    ↓ (创建和管理)  
MessageListenerContainer (容器)  
    ↓ (管理消费线程)  
KafkaConsumer (实际消费者)  
    ↓ (拉取消息)  
Kafka Broker
```

## 使用步骤

- 引入依赖

```
<dependency>  
    <groupId>org.springframework.kafka</groupId>  
    <artifactId>spring-kafka</artifactId>  
    <version>3.3.10</version>  
</dependency>
```

- 进行消费者配置

```

spring:
  kafka:
    bootstrap-servers: localhost:9092      # Kafka集群地址 (多个用逗号隔开)
    client-id: my-app                      # 客户端标识, 可选, 用于区分不同客户端
    properties:                            # 传递给底层Kafka客户端的自定义参数
      security.protocol: PLAINTEXT          # 连接协议 (PLAINTEXT、SASL_PLAINTEXT等)
    consumer:
      group-id: my-group                  # 消费者组ID
      auto-offset-reset: earliest           # 无偏移量时从最早消息开始消费
      enable-auto-commit: true             # 是否自动提交offset
      auto-commit-interval: 1000            # 自动提交间隔 (毫秒)
      max-poll-records: 500                # 每次拉取的最大消息数量
      fetch-min-size: 1                   # 每次拉取的最小字节数
      fetch-max-wait: 500                 # 服务器等待数据返回的最大时间(ms)
      key-deserializer: org.apache.kafka.common.serialization.StringDeserializer
      value-deserializer: org.springframework.kafka.support.serializer.JsonDeserializer
      properties:
        spring.json.trusted.packages: "*"   # 允许反序列化任意包的对象

```

- 当你做完上述配置后, Spring会自动:
  - 自动创建 **ConsumerFactory**
  - 自动创建 **ConcurrentKafkaListenerContainerFactory**
  - 自动注入这些 Bean 到 @KafkaListener 所用的监听容器
- 使用 @KafkaListener 注解进行消费端的声明
  - 默认的 factory 会读取 **spring.kafka.consumer.\\*** 配置

```

@KafkaListener(topics = "test-topic")
public void listen(String message) {
    System.out.println("收到消息: " + message);
}

```

- 消费带 Header 的消息
  - 用 @Header 可以拿到消息头的各种信息, 例如:
    - KafkaHeaders.RECEIVED\_TOPIC
    - KafkaHeaders.RECEIVED\_PARTITION
    - KafkaHeaders.OFFSET
    - KafkaHeaders.RECEIVED\_TIMESTAMP

- 自定义 header (比如 traceId)

```
@KafkaListener(topics = "orders")
public void listenWithKey(@Header(KafkaHeaders.RECEIVED_KEY) String key,
                           @Payload String value) {
    System.out.println("key=" + key + ", value=" + value);
}
```

## 自定义容器工厂

用于自定义 ContainerFactory

- 控制并发消费
- 消息批量处理
- 等等

### 步骤

- 首先进行工厂的配置

```
@Bean
public ConcurrentKafkaListenerContainerFactory<String, String> kafkaListenerCont
    ConcurrentKafkaListenerContainerFactory<String, String> factory =
        new ConcurrentKafkaListenerContainerFactory<>();
    factory.setConsumerFactory(consumerFactory()); // 自定义 ConsumerFactory
    factory.setConcurrency(3); // 并发线程数
    factory.setBatchListener(true); // 批量消费
    return factory;
}
```

- 然后在@KafkaListener 使用

```
@KafkaListener(topics = "test-topic", containerFactory = "kafkaListenerContainer"
public void listen(String message) { ... }
```

## 手动提交偏移量

Kafka默认是自动提交偏移量到`_consumer_offsets`的，想要实现手动提交`offset`，需要进行如下工作

- 关闭自动提交

```
spring:  
  kafka:  
    consumer:  
      enable-auto-commit: false # 关闭自动提交
```

- 创建手动提交的ContainerFactory

- 常见的AckMode：
  - RECORD：每处理完一条消息自动提交
  - BATCH：每批消息处理完自动提交
  - TIME：定时提交
  - COUNT：每处理固定数量的消息提交
  - MANUAL：需要显式调用`ack.acknowledge()`
  - MANUAL\_IMMEDIATE：立即提交`offset`

```
@Configuration  
public class KafkaManualAckConfig {  
  
    @Bean  
    public ConcurrentKafkaListenerContainerFactory<String, String> manualFactory  
        ConsumerFactory<String, String> consumerFactory) {  
  
        ConcurrentKafkaListenerContainerFactory<String, String> factory =  
            new ConcurrentKafkaListenerContainerFactory<>();  
        factory.setConsumerFactory(consumerFactory);  
  
        // 设置手动确认模式  
        factory.getContainerProperties().setAckMode(ContainerProperties.AckMode.  
  
            return factory;  
    }  
}
```

- 在 @KafkaListener 使用 Acknowledgement 接口实现自动提交

```

@KafkaListener(topics = "manual-topic", containerFactory = "manualFactory")
public void consume(ConsumerRecord<String, String> record, Acknowledgment ack)
    try {
        System.out.println("收到消息: " + record.value());
        // 手动提交
        ack.acknowledge();
        System.out.println("消息已确认并提交 offset");
    } catch (Exception e) {
        System.err.println("处理消息失败: " + record.value());
    }
}

```

## 请求-响应模式

上文在生产者端已经提到，在这讲如何进行配置

- 在 @KafkaListener 注解的方法上加上 @SendTo 注解，里面填入返回值到达的 Topic

```

@Component
public class ReplyConsumer {

    // 监听请求主题，并自动将返回值发送到 reply-topic
    @KafkaListener(topics = "request-topic", groupId = "reply-group")
    @SendTo("reply-topic") // 表示自动回复到这个主题
    public String handleRequest(String message) {
        System.out.println("收到请求: " + message);
        return "处理完成: " + message.toUpperCase();
    }
}

```

## 异常处理与重试

当 Kafka 消费者出现异常时，可以实现自动重试，将失败消息发送到死信队列等功能

- 关闭自动提交 offset

```
spring:  
kafka:  
  consumer:  
    enable-auto-commit: false # 关闭自动提交
```

- 注册 **DefaultErrorHandler**, 注意是配置类
  - 使用 **DeadLetterPublishingRecoverer** 配置死信队列
    - 传入 KafkaTemplate, 原始失败消息和导致失败的异常
  - 使用 **FixedBackOff** 配置重试间隔和次数
  - 使用 **DefaultErrorHandler** 创建错误处理器
    - 传入 DeadLetterPublishingRecoverer 和 FixedBackOff

```
@Configuration
public class KafkaConsumerConfig {

    @Bean
    public DefaultErrorHandler errorHandler(KafkaTemplate<Object, Object> template) {
        // 配置 DLT (死信队列) 转发逻辑
        DeadLetterPublishingRecoverer recoverer = new DeadLetterPublishingRecoverer(
            template,
            (record, ex) -> new TopicPartition("main-topic-dlt", record.partition));
        // 设置重试间隔和次数 (每次间隔 2s, 最多重试 3 次)
        FixedBackOff backOff = new FixedBackOff(2000L, 3);

        // 生成错误处理器
        DefaultErrorHandler errorHandler = new DefaultErrorHandler(recoverer, backOff);
        // 配置哪些异常不重试 (比如非法参数)
        errorHandler.addNotRetryableExceptions(IllegalArgumentException.class);

        // 打印日志 (可选)
        errorHandler.setRetryListeners((record, ex, deliveryAttempt) ->
            System.err.printf("重试第 %d 次失败: %s%n", deliveryAttempt, ex.getMessage()));
        return errorHandler;
    }
}
```

- 你也可以使用 @RetryableTopic 注解进行异常处理和重试的配置

```

@RetryableTopic(
    attempts = "4", // 总共尝试 4 次
    backoff = @Backoff(delay = 2000), // 每次间隔 2s
    dltTopicSuffix = "-dlt" // 死信队列后缀
)
@KafkaListener(topics = "main-topic", groupId = "test-group")
public void consume(String message) {
    System.out.println("收到消息: " + message);
    throw new RuntimeException("模拟异常");
}

```

## Kafka Connect

两步

- 写配置文件
- 使用curl进行配置的提交

## Kafka Streams

引入依赖

```

<dependency>
    <groupId>org.springframework.cloud</groupId>
    <artifactId>spring-cloud-stream-binder-kafka-streams</artifactId>
</dependency>

```

写配置文件

- `spring.cloud.stream.function.definition`: 告诉Spring Cloud Stream要激活哪个函数Bean
  - 如果有多个函数bean，可以使用 ; 连接起来
- `spring.cloud.stream.function.bindings`: 用于定义逻辑函数的输入输出通道，通道对应的Topic，序列化、消费组、分区等
  - 命名规律：定义函数的输入输出
    - `{function-name}-in-{index}`
    - `{function-name}-out-{index}`
  - `destination`: Kafka的Topic名称

- `spring.cloud.stream.kafka.streams.binder`:
  - `application-id`: Kafka Streams应用的唯一ID
  - `brokers`: Kafka集群地址
  - `configuration`: Kafka Streams 的底层配置参数
    - `commit.interval.ms`: 控制状态更新提交到 `changelog topic` 的间隔
    - `cache.max.bytes.buffering`: 缓存大小 (控制 RocksDB 内缓存)
    - `state.dir`: 本地状态存储目录
    - `processing.guarantee`: 处理语义
      - `at_least_once`: 至少一次
      - `exactly_once_v2`: 恰好一次
    - `default.key.serde`: 默认 key 的序列化器
    - `default.value.serde`: 默认 value 的序列化器
    - `num.stream.threads`: Kafka Streams 工作线程数
- `spring.cloud.stream.binders`: 一个项目连接多个Kafka集群的时候使用

```

spring:
  cloud:
    stream:
      function:
        definition: process
      bindings:
        process-in-0:
          destination: input-topic
        process-out-0:
          destination: output-topic
      kafka:
        streams:
          binder:
            application-id: uppercase-app
            brokers: localhost:9092
            configuration:
              commit.interval.ms: 1000
              cache.max.bytes.buffering: 10485760

```

## 编写函数式Bean

- 写一个配置类，将函数式接口声明为Bean对象
- 定义一个函数式接口: `Function<KStream<String, String>, KStream<String, String>>`
- [常见KStream API](#)

```

@Configuration
public class KafkaStreamsConfig {

    @Bean
    public Function<KStream<String, String>, KStream<String, String>> process() {
        return input -> input
            .filter((key, value) -> value.contains("hello"))
            .mapValues(String::toUpperCase);
    }
}

```

## 基于磁盘的消息队列

设计目标：用磁盘存储要像内存一样快

Kafka是基于磁盘的消息队列，它收到的消息都会**存储在硬盘中**，而不是像Redis那样存储在内存中

- 每个 Topic 会被拆分成多个 Partition
- 每个 Partition 就对应一个目录，里面存放多个数据文件
  - 日志分为多个 **Segment 文件**：
    - .log：消息数据
    - .index：偏移量 → 文件位置
    - .timeindex：时间戳 → 偏移量

```

/kafka-logs/
├── topicA-0/
│   ├── 00000000000000000000.log
│   ├── 00000000000000000000.index
│   └── 00000000000000000000.timeindex
└── topicA-1/
    └── ...

```

Kafka为什么那么快？

- 采用**顺序写入**的方案，也就是**只追加写**，可以把速度提升至600MB/s
- **Page Cache**：操作系统还会把最近访问的磁盘页缓存到内存，加快读取效率
- **零拷贝机制**：使用Linux的 **sendfile()** 系统调用 来实现零拷贝传输，让数据从磁盘直接到达网卡，避免用户态/内核态的切换
- Kafka在三个环节都使用**批处理机制**，将多条消息打包在一起发送，实现高吞吐
  - Producer 批量发送
  - Broker 批量刷磁盘
  - Consumer 批量拉取

- 通过**时间戳和偏移量**进行文件内容的定位，使读出和写入都做到**常数级别的时间复杂度**
  - `.index`: 偏移量 → 物理位置
  - `.timeindex`: 时间戳 → 偏移量

## KRaft

---

Kafka自身实现的**元数据管理模式**，用**Raft协议**取代ZooKeeper

- **RAFT 协议**是一种**分布式一致性算法**，它的目标是让多个节点在分布式系统中达成数据的一致性，它把分布式一致问题分解成三个子问题：
  - 领导选举
  - 日志复制
  - 安全性
- 在KRaft中，一个节点既可以做Broker，也可以做Controller
  - Controller有**两种类型**
    - Controller Leader负责管理集群的元数据和协调各种操作，如**选取Leader，创建Topic，管理Partition等**
    - Controller Follower主要负责**备份和容灾**

### 实现方式

- 在Kafka Broker本身的配置文件 `server.properties` 进行配置，如果是多节点，**所有结点的配置必须相同！！！**
  - `process.roles`: 指明这个节点的角色
  - `node.id`: 节点的唯一标识id
  - `listeners`: 节点的监听端口
    - `PLAINTEXT`: 普通消息端口，生产者/消费者客户端连接这个端口
    - `CONTROLLER`: 内部 Controller 通信端口，用于同步元数据
  - `metadata.log.dir`: 源数据存储路径
  - `controller.quorum.voters`: Raft集群的投票节点列表，用于**选举 Controller leader**
  - `log.dirs`: 消费日志目录
  - `num.partitions`: 新创建的topic默认分区数
  - `default.replication.factor`: 新topic默认副本数

```

# -----
# 节点角色
# -----
process.roles=broker,controller    # 同时做 broker 和 controller
node.id=1                          # 节点唯一 ID

# -----
# 监听端口
# -----
listeners=PLAINTEXT://localhost:9092,CONTROLLER://localhost:9093

# -----
# 元数据存储目录
# -----
metadata.log.dir=/tmp/kraft-metadata-logs

# -----
# Controller Raft quorum (单节点自己投自己)
# -----
controller.quorum.voters=1@localhost:9093

# -----
# 消息日志目录
# -----
log.dirs=/tmp/kafka-logs

# -----
# 默认 topic 配置
# -----
num.partitions=1
default.replication.factor=1

```

## 选举流程

- 启动时，每个 Broker 加入**controller quorum**
- 通过 Raft 协议的**投票机制**选出 Controller Leader
  - 需要过半节点投票 (majority vote)
- 选出的 Controller Leader 负责：
  - 创建/删除 topic
  - 分区副本分配
  - Leader/Follower 切换
  - ISR 更新等操作
- 其他节点作为 Follower，从 Leader 复制元数据日志
- 如果 Controller Leader 崩溃：
  - 其余节点检测超时（未收到心跳），发起新一轮投票，选出新的 Leader
  - 新 Leader 从已提交的元数据日志恢复状态

# 消息

## 消息的组成部分

- 消息的键
- 消息的值
- 生成消息的时间戳
- 消息偏移量：分区中消息的唯一标识符
- 如果携带了密钥，生产者会通过密钥计算要把消息投递到哪个分区
- 消息头，存储额外的元数据

Kafka 中，消息一旦被使用就不会被清除，消费者通过消息偏移量得知自己读到了哪条信息

## 消息传递语义

Producer 端 + Broker 端 + Consumer 端 的配置共同决定的

Kafka的三种消息传递语义：

- **最多一次**：消息最多被处理一次，可能丢失，但不会重复
  - 生产者：通过设置 `acks = 0` 实现
  - 消费者：先提交 `offset`
- **至少一次**：消息至少被处理一次，不会丢失，但可能重复
  - 生产者：通过 `acks=1` 或 `acks=all` 并启用重试实现
  - 消费者：先处理再提交 `offset`
- **恰好一次**：每条消息只被处理一次，既不丢失也不重复
  - 通过幂等生产者 + 事务机制实现
  - Kafka给每个生产者分配一个 **Producer ID**，给每个分区维护一个序列号 **sequence number**
  - 生产者：在每条消息中加上唯一的序列号 `PID + sequence number`，写入数据、`offset`（消费者偏移量），然后进行事务的提交
    - 普通状态下，`offset` 是消费者提交的
    - 事务机制中，**offset** 是生产者提交的
  - Broker：记录每个分区上最新的序列号，若生产者因网络重试再次发送相同序号的消息，直接忽略
  - 消费者：从 broker 获取消息，并处理消息，但只能获取并处理已提交的信息

## 复制

Kafka的每个Topic会被拆成多个Partition，每个分区又会在多台 broker 上复制（Replication）

- 每个分区有一个 **Leader**（主副本），其余是 **Follower**（从副本）
- 所有生产者写入、消费者读取都只与**Leader**通信
- Follower会从Leader拉取数据，使自己的日志保持一致
- Kafka 通过复制保证即使某些服务器宕机，也不会丢失数据（高可用性）

## 复制机制

- 使用**ISR**集合等待所有副本确认才会告诉Producer消息提交成功
- 资源开销低，性能高

当所有**ISR**中的副本都挂掉时，有两种策略

- 等待**ISR**中的副本恢复（默认）

- 保证数据一致性，但可能长时间不可用
- 允许非同步副本直接当Leader（不干净选举）
  - 提高可用性，但可能丢数据

## 同步副本 (ISR)

Kafka使用一个集合叫做**ISR**（同步副本集），用来存储**保持同步的副本**

只有在以下条件下，副本才被认为是同步的：

- Broker与控制器保持心跳
- 如果是Follower，它的日志追的够快，没有落后太多
  - Follower落后太多时会被踢出**ISR**，当超过某个时间未同步即刻踢出

当Leader挂掉时，新的Leader必须从**ISR**中选出

- 集群中有一个特殊节点**Controller**，负责整个分区副本分配和**Leader选举**
- Controller检测到**Leader**宕机
- 从**ISR**中挑选**第一个副本**作为新**Leader**，保证数据一致
- 广播新**Leader**信息给其他Broker和Producer/Consumer

## 生产者

**负载均衡**：生产者可以知道每个**broker**有哪些分区，从而通过负载均衡算法把消息发送给不同的分区

- **随机分区**：自动随即分配消息到不同分区
- **按键分区**：根据消息的key做哈希运算，把相同的key放到一个分区

### 批处理机制

- 生产者会把要发送的消息暂存在**内存缓冲区**中
  - 当消息大小到达**batch.size**
  - 或者等了**linger.ms**
  - 就会把消息发送出去
- 这样设计有利于减少I/O请求次数，提升吞吐量，但也会引入**额外延迟**

### 生产者有三种确认机制

- **Acks 0**：消息发送时，生产者不关心你的消息是否发送到了Kafka集群
  - 延迟会很低，但是加剧了数据丢失的风险
- **Acks 1**：发送消息并等待**Leader**确认已收到消息
  - 延迟不会很高，也保证了数据安全
- **Acks -1**：发送消息并等待**Leader**和所有**follower**确认已收到消息
  - 是三种确认机制中最慢的，但是可以保证消息写入多个磁盘，安全性最高

## 分区分配

### Producer分区策略

- **Range**：按 key 的哈希或索引顺序均匀分布
- **RoundRobin**：轮询分配分区
- **Sticky**（新协议常用）：一段时间内持续向同一个分区发送，直到 batch 满或超时，再切换下一个分区

# 消费者

## 拉取模式

- 消费者主动向 broker 请求数据
- 可以一次性拉取多条消息
- 消费者落后时可以追赶上消息
- 有利于让消费者自己控制节奏和批量

## 推送模式

- broker 主动推送消息给消费者
- 消费者无法控制拉取速率

## 消费者组

- 每个分区同一时间只能被组内一个消费者消费
- 一个消费者可以消费不同的分区
- 消费者组内每个消费者平摊不同分区
- 使用 group.id 标识用一个组

# 消费者偏移量

- 是一个整数，表示消费者下一条要读取的消息位置
- Kafka 将偏移量存储在内部 Topic 的 \_\_consumer\_offsets 中，当消费者崩溃或重启，可以从上次提交的偏移量继续消费

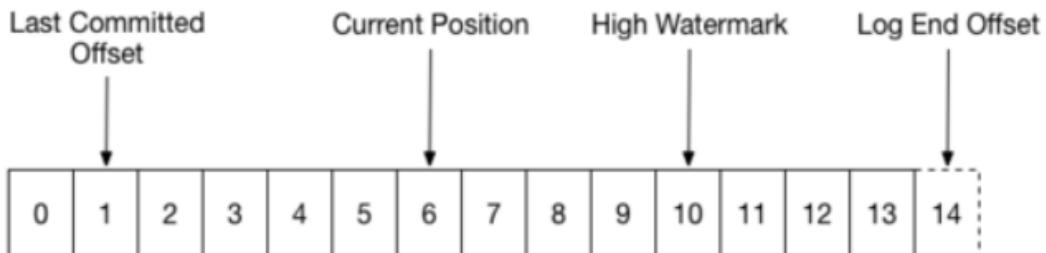


Figure 2: The Consumer's Position in the Log

image-20251026155003645

在上图中，标记了4个定位：

- 消费者在处理第6条消息
- 上次提交偏移量为1，下次可以从这里恢复
- 高水位线，所有副本已经同步至第10条消息
- 日志中最新写入的消息偏移量为14
- 且消费者只能看到并读取  $\leq$  高水位线的信息，避免信息丢失

## 紧凑压缩 (Compact)

- Kafka 会为每个消费者组维护一个特殊的 Topic: \_\_consumer\_offsets，用来记录每个消费者组在每个分区的 offset

- key = consumer group + partition
- value = 最新的offset
- Kafka对 \_\_consumer\_offsets 启用 紧凑压缩
  - 对于相同 key (同一个 consumer group + partition) 只保留最新的一条记录
  - 删掉过期或重复的offset

## 分区分配

### Consumer分区分配策略

- Kafka通过分区分配策略把分区分配给组内消费者，如下
  - Range：连续分区按消费者顺序分配
  - RoundRobin：轮询分配，平均分配分区
  - Sticky (新协议常用)：尽量保持上次分配不变，减少分配变动

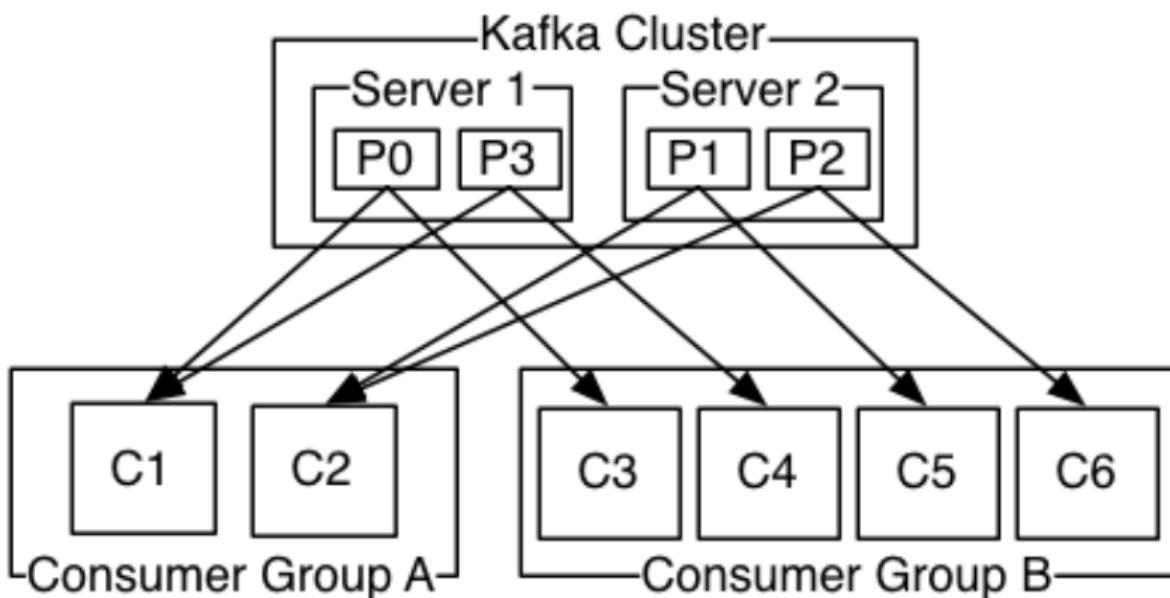


image-20251026163046158

## 重平衡 (Rebalance)

当消费者组里的消费者数发生变化，就会触发重平衡，使用分区分配策略进行动态分配分区

- 经典协议
  - 步骤：
    - 所有消费者暂停消费并提交当前 offset
    - 消费者发送 JoinGroup 请求给组协调器 Group Coordinator
    - 组协调器选出一个组长
    - 组长进行动态分区并上报新的分配方案
    - 组协调器通知所有消费者新的分配
    - 消费者从上次提交的 offset 继续消费
  - 缺点：
    - 重平衡时，全员暂停消费
    - 每次都要重新计算所有分区
    - 延迟高

- 增量协作重平衡（新版本协议）
  - 步骤
    - 新消费者发送 JoinGroup 给协调器
    - 协调器计算新的目标分配
    - 通知现有消费者：哪些分区需要释放
    - 被要求让渡的消费者停止消费那些分区
    - 其他未受影响的消费者照常消费
  - 未受影响的消费者无停顿，消费几乎不中止

## Kafka Connect

---

**Kafka Connect**是Kafka的一个重要组件，是一种**数据管道框架**，用于在Kafka与外部系统之间（如 Elasticsearch、Hadoop 等）传输数据，可实现**自动化、可扩展的数据导入导出**

它具有以下优势：

- 以数据为中心的管道
- 具有灵活性和可扩展性
- 具有可重用性

## 概念

- **Connectors**：连接器，负责协调数据流
- **Tasks**：Connectors 的执行单元，实际实现数据传输逻辑
- **Workers**：运行 Connector 和 Task 的进程
- **Converters**：消息转换器，用于消息格式的转换，处理数据的序列化/反序列化
- **Transforms**：更改每条消息的简单逻辑，用于在消息进入或离开 Connector 时修改它
- **Dead Letter Queue**：死信队列，处理 Connector 错误消息的机制

## 连接器（Connector）

### 类别

- **Source Connector**：从外部系统读数据写入 Kafka
- **Sink Connector**：从 Kafka 读数据写入外部系统

## 任务（Task）

Task 是 Connector 的执行单元，实际负责将数据从源系统复制到 Kafka，或从 Kafka 写入目标系统

### 作用与特点

- 支持并行执行，提高吞吐量
- 保存偏移量和状态在 Kafka 的特定主题（Topic）中，而不是 Task 本身
- 一个 Connector 可以有多个 Task
- Task 可以随时启动、停止、重新分配
- Task 失败不会自动触发重新平衡，需手动或通过 REST API 重启

### 模式

- **Standalone**（单机模式）：一个 Worker 进程管理所有 Connector/Task
- **Distributed**（分布式模式）：多个 Worker 协同工作，实现负载均衡和容错

## 进程 (Worker)

Worker是执行Connector和Task的进程

有两种不同的工作模式

- 独立模式 (Standalone) : 单进程执行所有任务
- 分布式模式 (Distributed) : 多个Worker协作，支持自动任务分配、负载均衡和故障恢复

## 转换器 (Converter)

用于消息格式的转换，处理数据的序列化/反序列化

- 将系统的原始数据转换成 Kafka 能处理的格式
- 从 Kafka 读取数据时，也将 Kafka 数据转换回系统可用格式
- 支持链式使用 (一个 Connector 可以串联多个 Transform)

## 逻辑转换器 (Transform)

和转换器不同，逻辑转换器用于

- 改变消息格式
- 添加字段、删除字段
- 改变 Topic 等

但其只能只处理单条消息，轻量级

## 死信队列 (Dead Letter Queue)

当 Task 处理消息失败时，不丢弃数据，而是发送到死信队列

### 作用

- 遇到无效或格式错误的记录时，不丢失数据，而是写入 **DLQ 主题**
  - **DLQ 主题 (Dead Letter Queue Topic)** 是一个专门用于存储处理失败消息的特殊主题
- `errors.tolerance` 配置：
  - `none` (默认) : 遇到任何错误都会导致任务失败
  - `all` : 忽略错误消息，可写入 DLQ

## Kafka Streams

Kafka Streams是一个轻量级的 Java 库，用来对Kafka中的消息流做实时流处理

### 常见流程

- 从输入 Topic 拉取消息
- 更新本地状态
- 把计算结果输出到 Topic

## 概念

### Stream (流)

连续不断的、按时间顺序到来的数据记录序列，是一个抽象的概念

- 无界流：数据是源源不断产生的
- stream的来源就是一个Topic里面的消息

## KStream

- 是Stream概念在Kafka Streams库中的具体实现
- 是一串按时间到达的事件记录（record），每条记录有key、value、timestamp
- Key非常重要
  - 数据分发：Key决定了数据被写入到Topic的哪个分区，从而影响并行度
  - 状态操作的基础：所有 groupByKey()、join() 等操作都基于Key

## KTable (表)

表示一张可更新的、动态的表，每个 key 只保留最新值

- 对于每个key只保留一个最新的值，新值会覆盖旧值
- 分区存储：每个KTable实例只会存储一部分数据
- 状态存储：运行时，每个KTable实例在本地维护着一个键值存储，用来快速查询每个Key的最新值
- 变更日志主题：当KTable的状态发生更新（插入、更新），这个更新操作不仅会应用到本地状态存储，还会被异步地发送到一个内部的、压缩的Kafka Topic，即Changelog Topic
  - 有利于宕机后的恢复

## GlobalKTable (全局表)

在每个应用程序实例上都拥有全量数据副本的特殊表

- 全量数据加载：当Kafka Streams应用程序启动时，每个实例都会从底层的Kafka Topic中读取全部数据来初始化自己的GlobalKTable
- 本地查找：当进行流表连接时，连接操作完全在本地内存中进行，使用自己的GlobalKTable副本进行查找
- 自动更新：当底层的Kafka Topic有新的更新时，GlobalKTable会进行自动同步
- 有利于避免昂贵的网络通信，但是对内存消耗大，启动速度慢

## Topology (拓扑)

Kafka Streams 应用处理逻辑的DAG（有向无环图）

- Kafka Streams 程序最终都会被编译成一个拓扑图，这张图描述了：
  - 数据从哪里来（source）
  - 经历了哪些处理步骤（processor）
  - 结果往哪里去（sink）
- 当Streams程序启动时，就会根据这张图创建线程，进行资源分配等

## DSL (Domain Specific Language)

Kafka Streams 的高级API，让开发者用函数式语法（链式编程）快速描述流处理逻辑

自动帮我们：

- 建立Topology
- 管理state store
- 设置changelog
- 处理序列化和反序列化

## State Store（状态存储）与 changelog（状态恢复）

Kafka Streams本地存储，用来**保存中间状态**

- 本地持久化存储（嵌入 RocksDB 或 内存）用于保存中间状态
- 当 KTable 的状态发生更新（插入、更新），这个更新操作不仅会应用到本地状态存储，还会被**异步地发送到一个内部的、压缩的 Kafka Topic**，即 Changelog Topic
- 当实例失败或重启时，会从 changelog topic 恢复本地 state

## Processor API

Kafka Streams 的**底层原生API**，可以手工搭建拓扑，完全控制数据处理流程，允许我们定义：

- 每个节点怎么处理数据（Processor）
- 节点之间怎么连接（Topology.addProcessor）
- 使用什么状态存储（StateStore）

## Window（窗口）

把无界流按时间切分成窗口，方便聚合

- 将无界流按**时间片段分组**做聚合
- 常见窗口类型与直观含义：
  - Tumbling（滚动窗口）：固定大小、不重叠（例如每 1 分钟一个桶）
  - Hopping（滑动窗口）：固定长度、按步长滑动，可重叠（例如窗口长度 1 分钟，每 30s 滑动一次）
  - Session（会话窗口）：基于事件间隔，若间隔超过 gap 则切新会话
- 窗口聚合需要为每个窗口维护 state（WindowStore）
- 需要设置保留时间（retention），过期窗口会被清理
- 时间处理可基于 event-time（事件时间）或 processing-time（处理时间），常用 event-time + watermark 处理乱序

## Watermark和GracePeriod

### Watermark（水位线）

- 是一个**时间进度指示器**，它帮助系统确定**何时关闭窗口并进行聚合计算**
- 当 Watermark 超过某个窗口的结束时间时，系统就会开始计算窗口中的数据
- Watermark 通过**事件时间**进行推进：它知道**目前处理进度**达到了哪个事件时间
- Watermark 标记的是**事件时间的最大值**，即已知最晚的事件时间

### GracePeriod（宽限期）

- 基于**事件时间**来处理，判断流的事件时间是否超过当前水位线加上宽限期，是的话则进行舍弃，不是的话则纳入当前窗口进行计算
- 允许**延迟到达的事件在窗口结束后的一段时间内**仍然能够进入当前窗口进行聚合计算

## 处理语义（Processing Guarantees）

有三种模式：

- **至多一次**：消息最多处理一次，可能会丢，但不会重复

- 至少一次：消息至少会被处理一次，不会丢，但可能重复
- 恰好一次：消息只会处理一次，不丢也不重复

## 恰好一次

目标：输入消费、状态更新、输出写入三者原子化

Kafka Streams把这三个操作放到一个事务里面，实现原子性。当真正commit之后，操作和状态才会真正更新

## 时间语义 (Time Semantics)

---

Kafka Streams 支持三种时间语义：

- Event Time：事件在真实世界中发生的时间
- Processing Time：事件被 Kafka Streams 应用处理的时间
- Ingestion Time：事件到达 Kafka broker 时的时间