

# 尚硅谷 Flink 教程

Flink 理论与项目实践

尚硅谷大数据教学组

v3.1.2, Copyright © November 13, 2019

# 目录

第一章，有状态的流式处理简介 . . . . .	6
传统数据处理架构 . . . . .	7
事务处理 . . . . .	7
分析处理 . . . . .	8
有状态的流式处理 . . . . .	9
事件驱动应用程序（Event-Driven Applications） . . . . .	11
数据管道（Data Pipelines） . . . . .	12
流分析 . . . . .	12
开源流处理的演进 . . . . .	13
流处理的历史 . . . . .	13
Flink 简介 . . . . .	15
第二章，流处理基础 . . . . .	15
数据流编程简介 . . . . .	15
数据流图（dataflow graph） . . . . .	15
数据并行和任务并行 . . . . .	16
数据交换策略 . . . . .	16
并行处理流数据 . . . . .	17
延迟和吞吐量 . . . . .	17
延迟 . . . . .	18
吞吐量 . . . . .	18
延迟与吞吐量的对比 . . . . .	19
数据流上的操作 . . . . .	19
数据摄入和数据吞吐量 . . . . .	19
转换算子 . . . . .	20
滚动聚合 . . . . .	20
窗口操作符 . . . . .	21
时间语义 . . . . .	23
在流处理中一分钟代表什么？ . . . . .	23
处理时间 . . . . .	24
事件时间 . . . . .	25
水位线（Watermarks） . . . . .	26
处理时间 vs 事件时间 . . . . .	27
状态和持久化模型 . . . . .	27

任务失败 . . . . .	28
第三章, Flink 运行架构 . . . . .	30
系统架构 . . . . .	30
Flink 运行时组件 . . . . .	30
应用部署 . . . . .	31
任务执行 . . . . .	32
高可用配置 . . . . .	33
Flink 中的数据传输 . . . . .	34
基于信任度 (credit) 的流控制 . . . . .	35
任务链 (Task Chaining) . . . . .	36
事件时间 (Event-Time) 处理 . . . . .	37
时间戳 (Timestamps) . . . . .	37
水位线 (Watermarks) . . . . .	38
watermark 的传递和事件时间 . . . . .	38
时间戳的分配和水位线的产生 . . . . .	40
状态管理 . . . . .	41
算子状态 . . . . .	42
键控状态 (Keyed State) . . . . .	43
状态后端 (State Backends) . . . . .	45
调整有状态算子的并行度 . . . . .	45
检查点, 保存点和状态恢复 . . . . .	47
一致的检查点 (Checkpoints) . . . . .	48
从一致检查点中恢复状态 . . . . .	49
Flink 的检查点算法 . . . . .	51
检查点的性能影响 . . . . .	55
保存点 (Savepoints) . . . . .	55
第四章, 编写第一个 Flink 程序 . . . . .	57
在 IDEA 中编写 Flink 程序 . . . . .	57
下载 Flink 运行时环境, 提交 Jar 包的运行方式 . . . . .	58
第五章, Flink DataStream API . . . . .	59
你好, Flink! . . . . .	59
搭建执行环境 . . . . .	61
读取输入流 . . . . .	61
转换算子的使用 . . . . .	62
输出结果 . . . . .	62
执行 . . . . .	63
产生传感器读数代码编写 . . . . .	63
从批读取数据 . . . . .	63
从文件读取数据 . . . . .	63
以 Kafka 消息队列的数据为数据来源 . . . . .	63
自定义数据源 . . . . .	64
转换算子 . . . . .	66

基本转换算子 . . . . .	67
键控流转换算子 . . . . .	69
多流转换算子 . . . . .	71
分布式转换算子 . . . . .	74
设置并行度 . . . . .	76
类型 . . . . .	77
支持的数据类型 . . . . .	77
为数据类型创建类型信息 . . . . .	80
定义 Key 以及引用字段 . . . . .	80
使用字段位置进行 keyBy . . . . .	80
使用字段表达式来进行 keyBy . . . . .	81
Key 选择器 . . . . .	82
实现 UDF 函数，更细粒度的控制流 . . . . .	82
函数类 (Function Classes) . . . . .	82
匿名函数 (Lambda Functions) . . . . .	83
富函数 (Rich Functions) . . . . .	83
Sink . . . . .	84
Kafka . . . . .	84
Redis . . . . .	85
ElasticSearch . . . . .	85
JDBC 自定义 sink . . . . .	86
第六章，基于时间和窗口的操作符 . . . . .	87
设置时间属性 . . . . .	88
指定时间戳和产生水位线 . . . . .	89
周期性的生成水位线 . . . . .	90
如何产生不规则的水位线 . . . . .	91
Process Function(Low-Level API) . . . . .	93
TimerService and Timers . . . . .	94
将事件发送到侧输出 (Emitting to Side Outputs) . . . . .	96
CoProcessFunction . . . . .	97
窗口操作符 (Window Operators) . . . . .	99
定义窗口操作符 . . . . .	99
内置的窗口分配器 (built-in window assigner) . . . . .	99
调用窗口计算函数 . . . . .	102
自定义窗口操作符 (windows operators) . . . . .	107
基于时间的双流 Join . . . . .	115
基于间隔的 Join . . . . .	116
基于窗口的 Join . . . . .	119
处理迟到的元素 (Handling Late Data) . . . . .	120
抛弃迟到元素 . . . . .	121
重定向迟到元素 . . . . .	121

使用迟到元素更新窗口计算结果 (Updating Results by Including Late Events) . . . . .	123
第七章，有状态算子和应用 . . . . .	124
实现有状态的用户自定义函数 . . . . .	124
在 RuntimeContext 中定义键控状态 (keyed state) . . . . .	124
使用 ListCheckpointed 接口来实现操作符的列表状态 (List State) . . . . .	127
使用连接的广播状态 (using connected broadcast state) . . . . .	129
配置检查点 . . . . .	131
将 hdfs 配置为状态后端 . . . . .	131
保证有状态应用的可维护性 . . . . .	132
指定唯一的操作符标识符 (operator identifiers) . . . . .	132
指定操作符的最大并行度 . . . . .	132
有状态应用的性能和健壮性 . . . . .	133
选择一个状态后端 . . . . .	133
防止状态泄露 . . . . .	133
第八章，读写外部系统 . . . . .	135
应用的一致性保证 . . . . .	136
幂等性写入 . . . . .	136
事务性写入 . . . . .	137
Flink 提供的连接器 . . . . .	137
Apache Kafka Source 连接器 . . . . .	138
Apache Kafka Sink 连接器 . . . . .	140
Kafka Sink 的 at-least-once 保证 . . . . .	140
Kafka Sink 的恰好处理一次语义保证 . . . . .	140
文件系统 source 连接器 . . . . .	141
文件系统 sink 连接器 . . . . .	141
实现自定义源函数 . . . . .	142
可重置的源函数 . . . . .	143
实现自定义 sink 函数 . . . . .	144
幂等 sink 连接器 . . . . .	146
事务性 sink 连接器 . . . . .	147
第九章，搭建 Flink 运行流式应用 . . . . .	152
部署方式 . . . . .	152
standalone 集群 . . . . .	152
Apache Hadoop Yarn . . . . .	154
高可用配置 (HA) . . . . .	156
standalone 集群高可用配置 . . . . .	157
yarn 集群高可用配置 . . . . .	157
与 Hadoop 集成 . . . . .	158
保存点操作 . . . . .	158
取消一个应用 . . . . .	158
从保存点启动应用程序 . . . . .	159

扩容, 改变并行度操作 . . . . .	159
第十章, Flink 和流式应用运维 . . . . .	159
第十一章, Flink CEP 简介 . . . . .	159
第十二章, Table API 和 Flink SQL . . . . .	165
整体介绍 . . . . .	165
什么是 Table API 和 Flink SQL . . . . .	165
需要引入的依赖 . . . . .	165
两种 planner (old & blink) 的区别 . . . . .	166
API 调用 . . . . .	166
基本程序结构 . . . . .	166
创建表环境 . . . . .	167
在 Catalog 中注册表 . . . . .	168
表的查询 . . . . .	170
将 DataStream 转换成表 . . . . .	171
创建临时视图 (Temporary View) . . . . .	172
输出表 . . . . .	172
将表转换成 DataStream . . . . .	176
Query 的解释和执行 . . . . .	176
流处理中的特殊概念 . . . . .	177
流处理和关系代数 (表, 及 SQL) 的区别 . . . . .	177
动态表 (Dynamic Tables) . . . . .	177
流式持续查询的过程 . . . . .	178
时间特性 . . . . .	180
窗口 (Windows) . . . . .	184
分组窗口 (Group Windows) . . . . .	184
Over Windows . . . . .	186
SQL 中窗口的定义 . . . . .	187
代码练习 (以分组滚动窗口为例) . . . . .	188
函数 (Functions) . . . . .	189
系统内置函数 . . . . .	189
UDF . . . . .	191
使用 Table API 结合 SQL 实现 TopN 需求 . . . . .	199
只使用 Flink SQL 实现 TopN 需求 . . . . .	200
第十三章, 尚硅谷大数据技术之电商用户行为分析 . . . . .	202
数据集解析 . . . . .	202
淘宝数据集解析 . . . . .	202
Apache 服务器日志数据集解析 . . . . .	202
实时热门商品统计 . . . . .	203
实时流量统计 . . . . .	208
Uv 统计的布隆过滤器实现 . . . . .	212
APP 分渠道数据统计 . . . . .	215
APP 不分渠道数据统计 . . . . .	217

恶意登陆实现 . . . . .	218
订单支付实时监控 . . . . .	220
使用 Flink CEP 来实现 . . . . .	221
使用 Process Function 实现订单超时需求 . . . . .	223
实时对帐：实现两条流的 Join . . . . .	224
第十四章，常见面试题解答 . . . . .	227
面试题一 . . . . .	227
面试题二 . . . . .	228
面试题三 . . . . .	228
面试题四 . . . . .	229
面试题五 . . . . .	229
面试题六 . . . . .	229
面试题七 . . . . .	229
面试题八 . . . . .	229
面试题九 . . . . .	230
面试题十 . . . . .	230
面试题十一 . . . . .	230
面试题十二 . . . . .	230
面试题十三 . . . . .	230
面试题十四 . . . . .	231
面试题十五 . . . . .	231
面试题十六 . . . . .	231
面试题十七 . . . . .	231
面试题十八 . . . . .	232
面试题十九 . . . . .	233
面试题二十 . . . . .	233

## 第一章，有状态的流式处理简介

Apache Flink 是一个分布式流处理器，具有直观和富有表现力的 API，可实现有状态的流处理应用程序。它以容错的方式有效地大规模运行这些应用程序。Flink 于 2014 年 4 月加入 Apache 软件基金会作为孵化项目，并于 2015 年 1 月成为顶级项目。从一开始，Flink 就拥有一个非常活跃且不断增长的用户和贡献者社区。到目前为止，已有超过五百人为 Flink 做出贡献，并且它已经发展成为最复杂的开源流处理引擎之一，并得到了广泛采用的证明。Flink 为不同行业和全球的许多公司和企业提供大规模的商业关键应用。

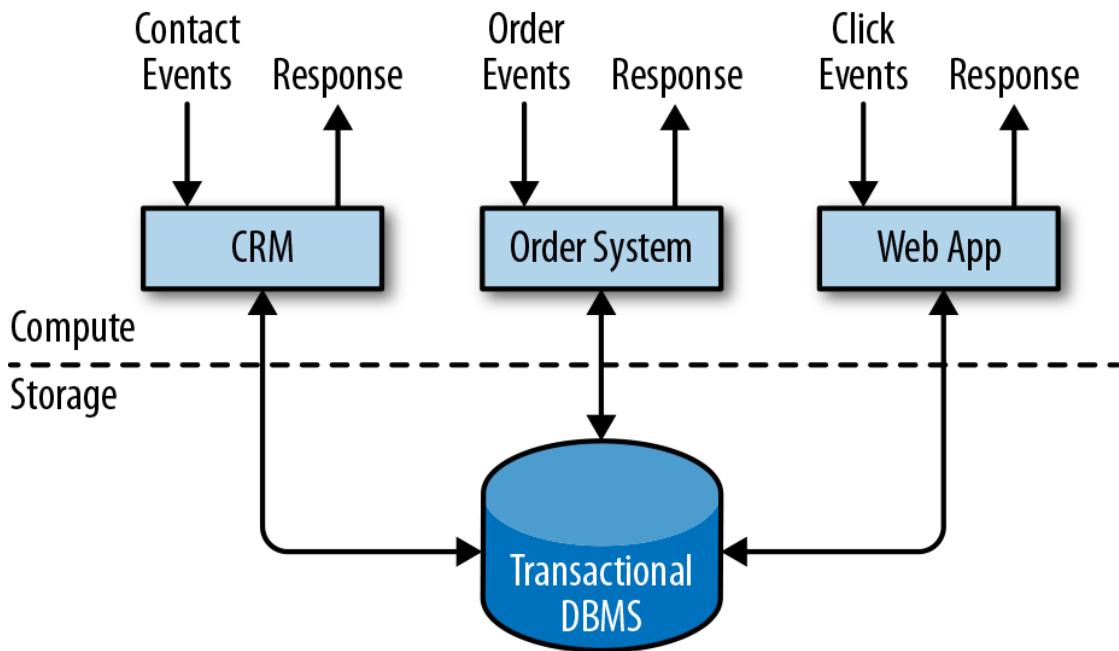
流处理技术在大大小小的公司中越来越受欢迎，因为它为许多已建立的用例（如数据分析，ETL 和事务应用程序）提供了卓越的解决方案，同时也促进了新颖的应用程序，软件架构和商机。接下来我们将讨论，为什么有状态流处理变得如此受欢迎并评估其潜力。我们首先回顾传统的数据应用程序架构并指出它们的局限性。接下来，我们介绍基于状态流处理的应用程序设计与传统方法相比，它具有许多有趣的特征最后，我们简要讨论开源流处理器的发展，并在本地 Flink 实例上运行流应用程序。

## 传统数据处理架构

数十年来，数据和数据处理在企业中无处不在。多年来，数据的收集和使用一直在增长，公司已经设计并构建了基础架构来管理数据。大多数企业实施的传统架构区分了两种类型的数据处理：事务处理（OLTP）和分析处理（OLAP）。

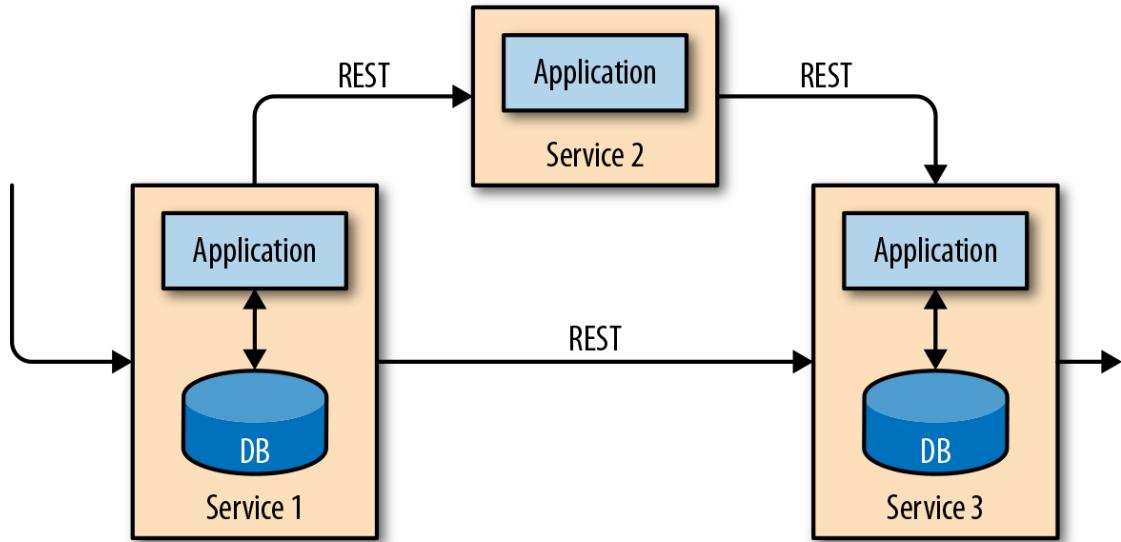
### 事务处理

公司将各种应用程序用于日常业务活动，例如企业资源规划（ERP）系统，客户关系管理（CRM）软件和基于 Web 的应用程序。这些系统通常设计有单独的层，用于数据处理（应用程序本身）和数据存储（事务数据库系统），如图 1-1 所示。



应用程序通常连接到外部服务或直接面向用户，并持续处理传入的事件，如网站上的订单，电子邮件或点击。处理事件时，应用程序将会读取远程数据库的状态，或者通过运行事务来更新它。通常，一个数据库系统可以服务于多个应用程序，它们有时会访问相同的数据库或表。

当应用程序需要扩展时，这样的设计可能会导致问题。由于多个应用程序可能会同时用到相同的数据表示，或者共享相同的基础设施，因此想要更改表的结构或扩展数据库，就需要仔细的规划和大量的工作。克服紧耦合应用程序的最新方法是微服务设计模式。微服务被设计为小型、完备且独立的应用程序。他们遵循 UNIX 的理念，即“只做一件事并且把它做好”。通过将几个微服务相互连接来构建更复杂的应用程序，这些微服务仅通过标准化接口（例如 RESTful HTTP 连接）进行通信。由于微服务严格地彼此分离并且仅通过明确定义的接口进行通信，因此每个微服务都可以用不同技术栈来实现，包括编程语言、类库和数据存储。微服务和所有必需的软件和服务通常捆绑在一起并部署在独立的容器中。图 1-2 描绘了一种微服务架构。

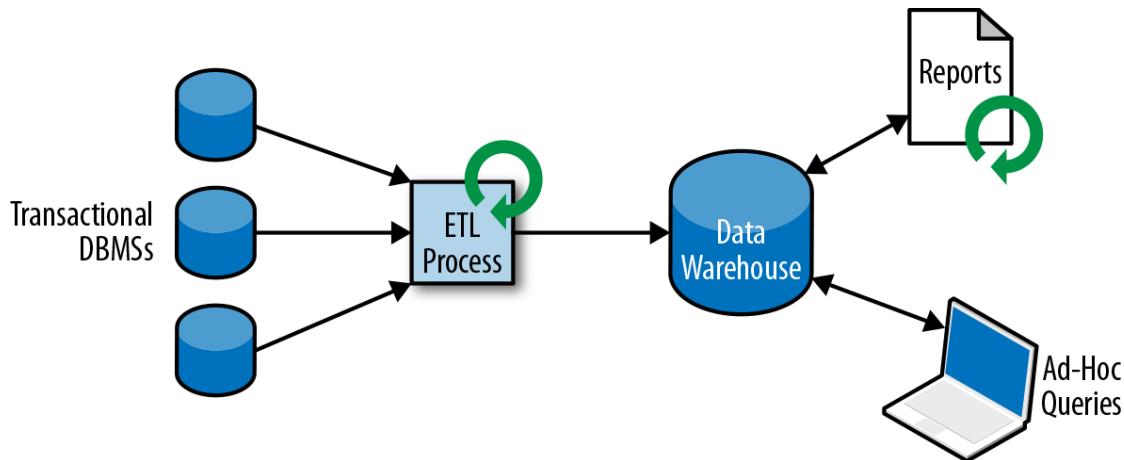


## 分析处理

大量数据存储在公司的各种事务数据库系统中，它们可以为公司业务运营提供宝贵的参考意见。例如，分析订单处理系统的数据，可以获得销量随时间的增长曲线；可以识别延迟发货的原因；还可以预测未来的销量以便提前调整库存。但是，事务数据通常分布在多个数据库中，它们往往汇总起来联合分析时更有价值。而且，数据通常需要转换为通用格式。

所以我们一般不会直接在事务数据库上运行分析查询，而是复制数据到数据仓库。数据仓库是对工作负载进行分析和查询的专用数据存储。为了填充数据仓库，需要将事务数据库系统管理的数据复制过来。将数据复制到数据仓库的过程称为 extract-transform-load (ETL)。ETL 过程从事务数据库中提取数据，将其转换为某种通用的结构表示，可能包括验证，值的规范化，编码，重复数据删除（去重）和模式转换，最后将其加载到分析数据库中。ETL 过程可能非常复杂，并且通常需要技术复杂的解决方案来满足性能要求。ETL 过程需要定期运行以保持数据仓库中的数据同步。

将数据导入数据仓库后，可以查询和分析数据。通常，在数据仓库上执行两类查询。第一种类型是定期报告查询，用于计算与业务相关的统计信息，比如收入、用户增长或者输出的产量。这些指标汇总到报告中，帮助管理层评估业务的整体健康状况。第二种类型是即席查询，旨在提供特定问题的答案并支持关键业务决策，例如收集统计在投放商业广告上的花费，和获取的相应收入，以评估营销活动的有效性。两种查询由批处理方式由数据仓库执行，如图 1-3 所示。



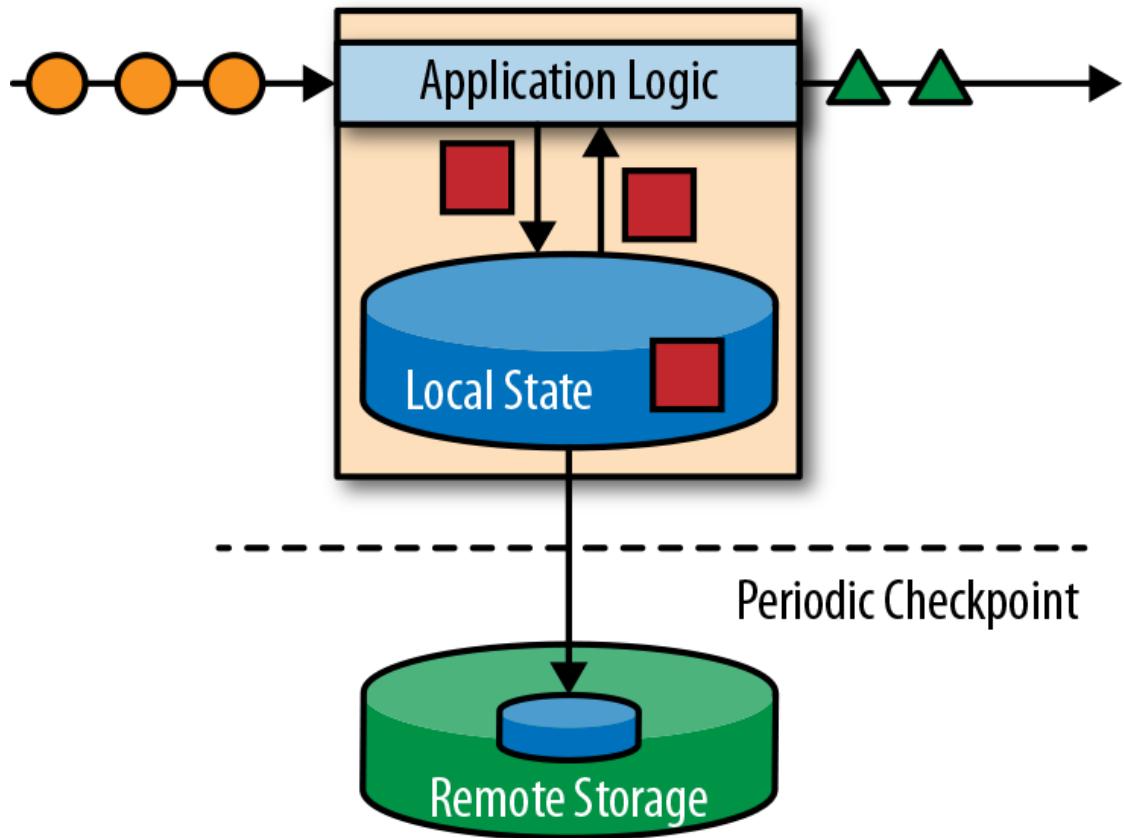
如今，Apache Hadoop 生态系统的组件，已经是许多企业 IT 基础架构中不可或缺的组成部分。现在的做法不是直接将所有数据都插入关系数据库系统，而是将大量数据（如日志文件、社交媒体或 Web 点击日志）写入 Hadoop 的分布式文件系统（HDFS）、S3 或其他批量数据存储库，如 Apache HBase，以较低的成本提供大容量存储容量。驻留在此类存储系统中的数据可以通过 SQL-on-Hadoop 引擎查询和处理，例如 Apache Hive、Apache Drill 或 Apache Impala。但是，基础结构与传统数据仓库架构基本相同。

## 有状态的流式处理

日常生活中，所有数据都是作为连续的事件流创建的。比如网站或者移动应用中的用户交互动作，订单的提交，服务器日志或传感器测量数据：所有这些都是事件流。实际上，很少有应用场景，能一次性地生成所需要的完整（有限）数据集。实际应用中更多的是无限事件流。有状态的流处理就是用于处理这种无限事件流的应用程序设计模式，在公司的 IT 基础设施中有广泛的应用场景。在我们讨论其用例之前，我们将简要介绍有状态流处理的工作原理。

如果我们想要无限处理事件流，并且不愿意繁琐地每收到一个事件就记录一次，那这样的应用程序就需要是有状态的，也就是说能够存储和访问中间数据。当应用程序收到一个新事件时，它可以从状态中读取数据，或者向该状态写入数据，总之可以执行任何计算。原则上讲，我们可以在各种不同的地方存储和访问状态，包括程序变量（内存）、本地文件，还有嵌入式或外部数据库。

Apache Flink 将应用程序状态，存储在内存或者嵌入式数据库中。由于 Flink 是一个分布式系统，因此需要保护本地状态以防止在应用程序或计算机故障时数据丢失。Flink 通过定期将应用程序状态的一致性检查点（check point）写入远程且持久的存储，来保证这一点。状态、状态一致性和 Flink 的检查点将在后面的章节中更详细地讨论，但是，现在，图 1-4 显示了有状态的流式 Flink 应用程序。



有状态的流处理应用程序，通常从事件日志中提取输入事件。事件日志就用来存储和分发事件流。事件被写入持久的仅添加（append-only）日志，这意味着无法更改写入事件的顺序。写入事件日志的流，可以被相同或不同的消费者多次读取。由于日志的仅附加（append-only）属性，事件始终以完全相同的顺序发布给所有消费者。现在已有几种事件日志系统，其中 Apache Kafka 是最受欢迎的，可以作为开源软件使用，或者是云计算提供商提供的集成服务。

在 Flink 上运行的有状态的流处理应用程序，是很有意思的一件事。在这个架构中，事件日志会按顺序保留输入事件，并且可以按确定的顺序重播它们。如果发生故障，Flink 将从先前的检查点（check point）恢复其状态，并重置事件日志上的读取位置，这样就可以恢复整个应用。应用程序将重放（并快进）事件日志中的输入事件，直到它到达流的尾部。此技术一般用于从故障中恢复，但也可用于更新应用程序、修复 bug 或者修复以前发出的结果，另外还可以用于将应用程序迁移到其他群集，或使用不同的应用程序版本执行 A / B 测试。

如前所述，有状态的流处理是一种通用且灵活的设计架构，可用于许多不同的场景。在下文中，我们提出了三类通常使用有状态流处理实现的应用程序：(1) 事件驱动应用程序，(2) 数据管道应用程序，以及 (3) 数据分析应用程序。

我们将应用程序分类描述，是为了强调有状态流处理适用于多种业务场景；而实际的应用中，往往会具有以上多种情况的特征。

## 事件驱动应用程序 (Event-Driven Applications)

事件驱动的应用程序是有状态的流应用程序，它们使用特定的业务逻辑来提取事件流并处理事件。根据业务逻辑，事件驱动的应用程序可以触发诸如发送警报、或电子邮件之类的操作，或者将事件写入向外发送的事件流以供另一个应用程序使用。

事件驱动应用程序的典型场景包括：

- 实时推荐（例如，在客户浏览零售商网站时推荐产品）
- 行为模式检测或复杂事件处理（例如，用于信用卡交易中的欺诈检测）
- 异常检测（例如，检测侵入计算机网络的尝试）

事件驱动应用程序是微服务的演变。它们通过事件日志而不是 REST 调用进行通信，并将应用程序数据保存为本地状态，而不是将其写入外部数据存储区（例如关系数据库或键值数据库）。图 1-5 显示了由事件驱动的流应用程序组成的服务架构。

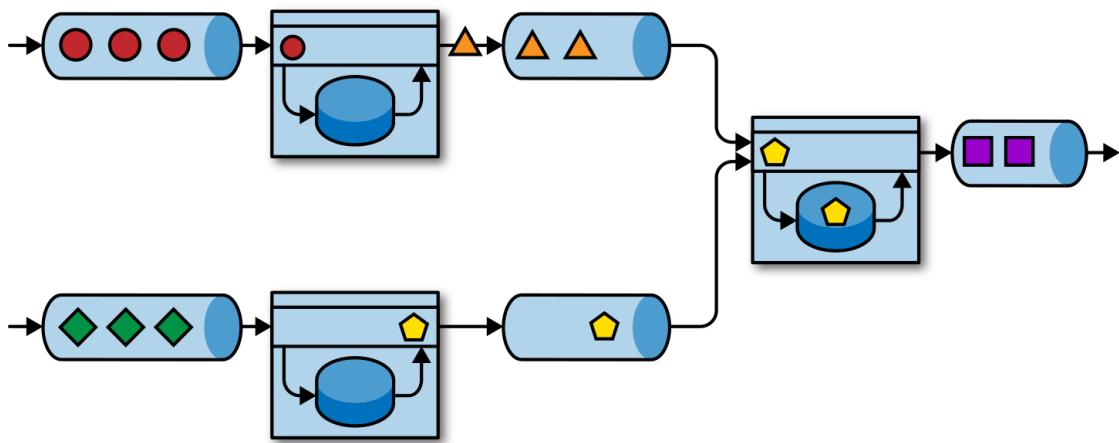


图 1-5 中的应用程序通过事件日志连接。一个应用程序将其输出发送到事件日志通道 (kafka)，另一个应用程序使用其他应用程序发出的事件。事件日志通道将发送者和接收者分离，并提供异步、非阻塞的事件传输。每个应用程序都可以是有状态的，并且可以本地管理自己的状态而无需访问外部数据存储。应用程序也可以单独处理和扩展。

与事务性应用程序或微服务相比，事件驱动的应用程序具有多种优势。与读写远程数据库相比，本地状态访问提供了非常好的性能。扩展性和容错性都由流处理器来保证，并且以事件日志作为输入源，应用程序的整个输入数据可以可靠地存储，并且可以确定性地重放。此外，Flink 可以将应用程序的状态重置为先前的保存点 (save point)，从而可以在不丢失状态的情况下更新或重新扩展应用程序。

事件驱动的应用程序对运行它们的流处理器有很高的要求，并不是所有流处理器都适合运行事件驱动的应用程序。API 的表现力，以及对状态处理和事件时间支持的程度，决定了可以实现和执行的业务逻辑。这方面取决于流处理器的 API，主要看它能提供什么样的状态类型，以及它对事件时间处理的支持程度。此外，精确一次 (exactly-once) 的状态一致性和扩展应用程序的能力是事件驱动应用程序的基本要求。Apache Flink 符合所有的这些要求，是运行此类应用程序的一个非常好的选择。

## 数据管道（Data Pipelines）

当今的 IT 架构包括许多不同的数据存储，例如关系型数据库和专用数据库系统、事件日志、分布式文件系统，内存中的缓存和搜索索引。所有这些系统都以不同的格式和数据结构存储数据，为其特定的访问模式提供最佳性能。公司通常将相同的数据存储在多个不同的系统中，以提高数据访问的性能。例如，网上商店中提供的产品的信息，可以存储在交易数据库中，同时也存储在缓存（如 redis）和搜索索引（如 ES）中。由于数据的这种复制，数据存储必须保持同步。

在不同存储系统中同步数据的传统方法是定期 ETL 作业。但是，它们不能满足当今许多场景的延迟要求。另一种方法是使用事件日志（event log）来发布更新。更新将写入事件日志并由事件日志分发。日志的消费者获取到更新之后，将更新合并到受影响的数据存储中。根据使用情况，传输的数据可能需要标准化、使用外部数据进行扩展，或者在目标数据存储提取之前进行聚合。

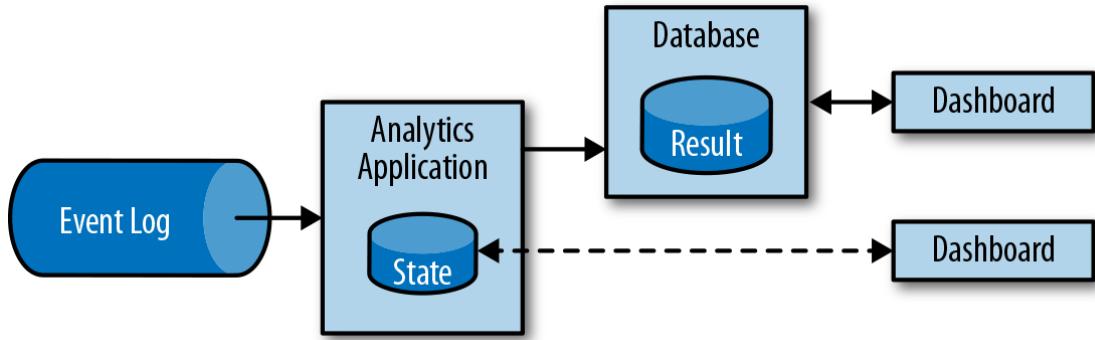
以较低的延迟，来提取、转换和插入数据是有状态流处理应用程序的另一个常见应用场景。这种类型的应用程序称为数据管道（data pipeline）。数据管道必须能够在短时间内处理大量数据。操作数据管道的流处理器还应具有许多源（source）和接收器（sink）的连接器，以便从各种存储系统读取数据并将数据写入各种存储系统。当然，同样地，Flink 完成了所有这些功能。

## 流分析

ETL 作业定期将数据导入数据存储区，数据的处理是由即席查询（用户自定义查询）或设定好的通常查询来做的。无论架构是基于数据仓库还是基于 Hadoop 生态系统的组件，这都是批处理。多年来最好的处理方式就是，定期将数据加载到数据分析系统中，但它给分析管道带来的延迟相当大，而且无法避免。

根据设定好的时间间隔，可能需要数小时或数天才能将数据点包含在报告中。我们前面已经提到，数据管道可以实现低延迟的 ETL，所以在某种程度上，可以通过使用数据管道将数据导入存储区来减少延迟。但是，即使持续不停地进行 ETL 操作，在用查询来处理事件之前总会有延迟。虽然这种延迟在过去可能是可以接受的，但是今天的应用程序，往往要求必须能够实时收集数据，并立即对其进行操作（例如，在手机游戏中去适应不断变化的条件，或者在电商网站中提供个性化的用户体验）。

流式分析应用程序不是等待定期触发，而是连续地提取事件流，并且通过纳入最新事件来更新其计算结果，这个过程是低延迟的。这有些类似于数据库中用于更新视图（views）的技术。通常，流应用程序将其结果存储在支持更新的外部数据存储中，例如数据库或键值（key-value）存储。流分析应用程序的实时更新结果可用于驱动监控仪表板（dashboard）应用程序，如图 1-6 所示。



流分析应用程序最大的优势就是，将每个事件纳入到分析结果所需的时间短得多。除此之外，流分析应用程序还有另一个不太明显的优势。传统的分析管道由几个独立的组件组成，例如 ETL 过程、存储系统、对于基于 Hadoop 的环境，还包括用于触发任务（jobs）的数据处理和调度程序。相比之下，如果我们运行一个有状态流应用程序，那么流处理器就会负责所有这些处理步骤，包括事件提取、带有状态维护的连续计算以及更新结果。此外，流处理器可以从故障中恢复，并且具有精确一次（exactly-once）的状态一致性保证，还可以调整应用程序的计算资源。像 Flink 这样的流处理器还支持事件时间（event-time）处理，这可以保证产生正确和确定的结果，并且能够在很短的时间内处理大量数据。

流分析应用程序通常用于：

- 监控手机网络的质量分析
- 移动应用中的用户行为
- 实时数据的即席分析

虽然我们不在此处介绍，但 Flink 还提供对流上的分析 SQL 查询的支持。

## 开源流处理的演进

数据流处理并不是一项新技术。一些最初的研究原型和商业产品可以追溯到 20 世纪 90 年代（1990s）。然而，在很大程度上，过去采用的流处理技术是由成熟的开源流处理器驱动的。如今，分布式开源流处理器在不同行业的许多企业中，处理着核心业务应用，比如电商、社交媒体、电信、游戏和银行等。开源软件是这一趋势的主要驱动力，主要原因有两个：

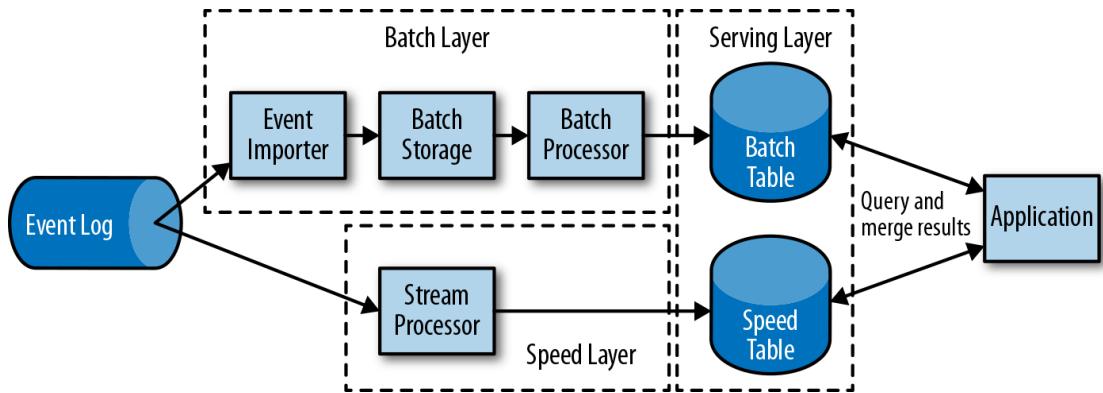
- 开源流处理软件是大家每一个人都可以评估和使用的产品。
- 由于许多开源社区的努力，可扩展流处理技术正在迅速成熟和发展

仅仅一个 Apache 软件基金会就支持了十几个与流处理相关的项目。新的分布式流处理项目不断进入开源阶段，并不断增加新的特性和功能。开源社区不断改进其项目的功能，并正在推动流处理的技术边界。我们将简要介绍一下过去，看看开源流处理的起源和今天的状态。

## 流处理的历史

第一代分布式开源流处理器（2011）专注于具有毫秒延迟的事件处理，并提供了在发生故障时防止事件丢失的保证。这些系统具有相当低级的 API，并且对于流应用程序的准确性和结

果的一致性，不提供内置支持，因为结果会取决于到达事件的时间和顺序。另外，即使事件没有丢失，也可能不止一次地处理它们。与批处理器相比，第一代开源流处理器牺牲了结果准确性，用来获得更低的延迟。为了让当时的数据处理系统，可以同时提供快速和准确的结果，人们设计了所谓的 lambda 架构，如图 1-7 所示。



lambda 架构增强了传统的批处理架构，其“快速层”（speed layer）由低延迟的流处理器来支持。数据到达之后由流处理器提取出来，并写入批处理存储。流处理器近乎实时地计算近似结果并将它们写入“快速表”（speed table）。批处理器定期处理批量存储中的数据，将准确的结果写入批处理表，并从速度表中删除相应的不准确结果。应用程序会合并快速表中的近似结果和批处理表中的准确结果，然后消费最终的结果。

lambda 架构现在已经不再是最先进的，但仍在许多地方使用。该体系结构的最初目标是改善原始批处理分析体系结构的高延迟。但是，它有一些明显的缺点。首先，它需要对一个应用程序，做出两个语义上等效的逻辑实现，用于两个独立的、具有不同 API 的处理系统。其次，流处理器计算的结果只是近似的。第三，lambda 架构很难建立和维护。

通过在第一代基础上进行改进，下一代分布式开源流处理器（2013）提供了更好的故障保证，并确保在发生故障时，每个输入记录仅对结果产生一次影响（exactly-once）。此外，编程 API 从相当低级的操作符接口演变为高级 API。但是，一些改进（例如更高的吞吐量和更好的故障保证）是以将处理延迟从毫秒增加到几秒为代价的。此外，结果仍然取决于到达事件的时间和顺序。

第三代分布式开源流处理器（2015）解决了结果对到达事件的时间和顺序的依赖性。结合精确一次（exactly-once）的故障语义，这一代系统是第一个具有计算一致性和准确结果的开源流处理器。通过基于实际数据来计算结果（“重演”数据），这些系统还能够以与“实时”数据相同的方式处理历史数据。另一个改进是解决了延迟/吞吐量无法同时保证的问题。先前的流处理器仅能提供高吞吐量或者低延迟（其中之一），而第三代系统能够同时提供这两个特性。这一代的流处理器使得 lambda 架构过时了。当然，这一代流处理以 flink 为代表。

除了目前讨论的特性，例如容错、性能和结果准确性之外，流处理器还不断添加新的操作功能，例如高可用性设置，与资源管理器（如 YARN 或 Kubernetes）的紧密集成，以及能够动态扩展流应用程序。其他功能包括：支持升级应用程序代码，或将作业迁移到其他群集或新版本的流处理器，而不会丢失当前状态。

## Flink 简介

Apache Flink 是第三代分布式流处理器，它拥有极富竞争力的功能。它提供准确的大规模流处理，具有高吞吐量和低延迟。特别的是，以下功能使 Flink 脱颖而出：

- 事件时间 (event-time) 和处理时间 (processing-time) 语义。即使对于无序事件流，事件时间 (event-time) 语义仍然能提供一致且准确的结果。而处理时间 (processing-time) 语义可用于具有极低延迟要求的应用程序。
- 精确一次 (exactly-once) 的状态一致性保证。
- 每秒处理数百万个事件，毫秒级延迟。Flink 应用程序可以扩展为在数千个核 (cores) 上运行。
- 分层 API，具有不同的权衡表现力和易用性。本书介绍了 DataStream API 和过程函数 (process function)，为常见的流处理操作提供原语，如窗口和异步操作，以及精确控制状态和时间的接口。本书不讨论 Flink 的关系 API, SQL 和 LINQ 风格的 Table API。
- 连接到最常用的存储系统，如 Apache Kafka, Apache Cassandra, Elasticsearch, JDBC, Kinesis 和（分布式）文件系统，如 HDFS 和 S3。
- 由于其高可用的设置（无单点故障），以及与 Kubernetes, YARN 和 Apache Mesos 的紧密集成，再加上从故障中快速恢复和动态扩展任务的能力，Flink 能够以极少的停机时间 7\*24 全天候运行流应用程序。
- 能够更新应用程序代码并将作业 (jobs) 迁移到不同的 Flink 集群，而不会丢失应用程序的状态。
- 详细且可自定义的系统和应用程序指标集合，以提前识别问题并对其做出反应。
- 最后但同样重要的是，Flink 也是一个成熟的批处理器。

除了这些功能之外，Flink 还是一个非常易于开发的框架，因为它易于使用的 API。嵌入式执行模式，可以在单个 JVM 进程中启动应用程序和整个 Flink 系统，这种模式一般用于在 IDE 中运行和调试 Flink 作业。在开发和测试 Flink 应用程序时，此功能非常有用。

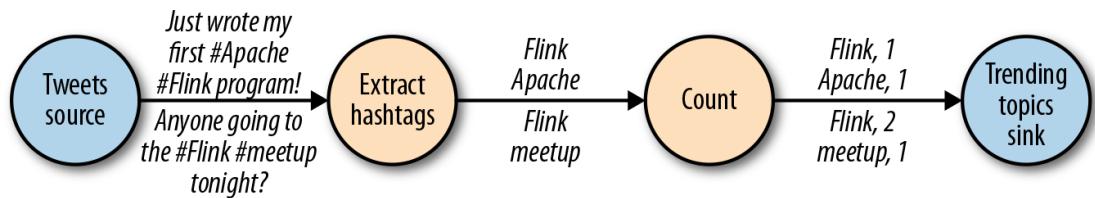
## 第二章，流处理基础

### 数据流编程简介

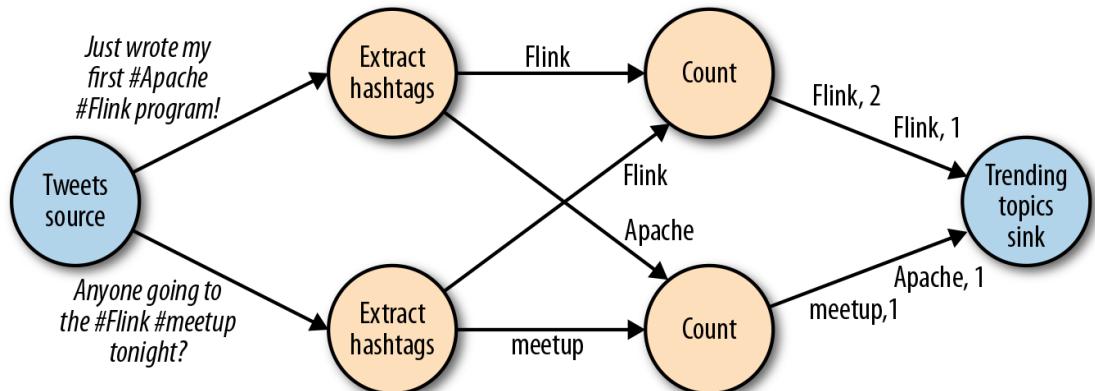
在我们深入研究流处理的基础知识之前，让我们来看看在数据流程编程的背景和使用的术语。

#### 数据流图 (dataflow graph)

顾名思义，数据流程序描述了数据如何在算子之间流动。数据流程序通常表示为有向图，其中节点称为算子，用来表示计算，边表示数据之间的依赖性。算子是数据流程序的基本功能单元。他们从输入消耗数据，对它们执行计算，并生成数据输出用于进一步处理。一个数据流图必须至少有一个数据源和一个数据接收器。



像图 2-1 中的数据流图被称为逻辑流图，因为它们表示了计算逻辑的高级视图。为了执行一个数据流程序，Flink 会将逻辑流图转换为物理数据流图，详细说明程序的执行方式。例如，如果我们使用分布式处理引擎，每个算子在不同的物理机器可能有几个并行的任务运行。图 2-2 显示了图 2-1 逻辑图的物理数据流图。而在逻辑数据流图中节点表示算子，在物理数据流图中，节点是任务。“Extract hashtags” 和 “Count” 算子有两个并行算子任务，每个算子任务对输入数据的子集执行计算。

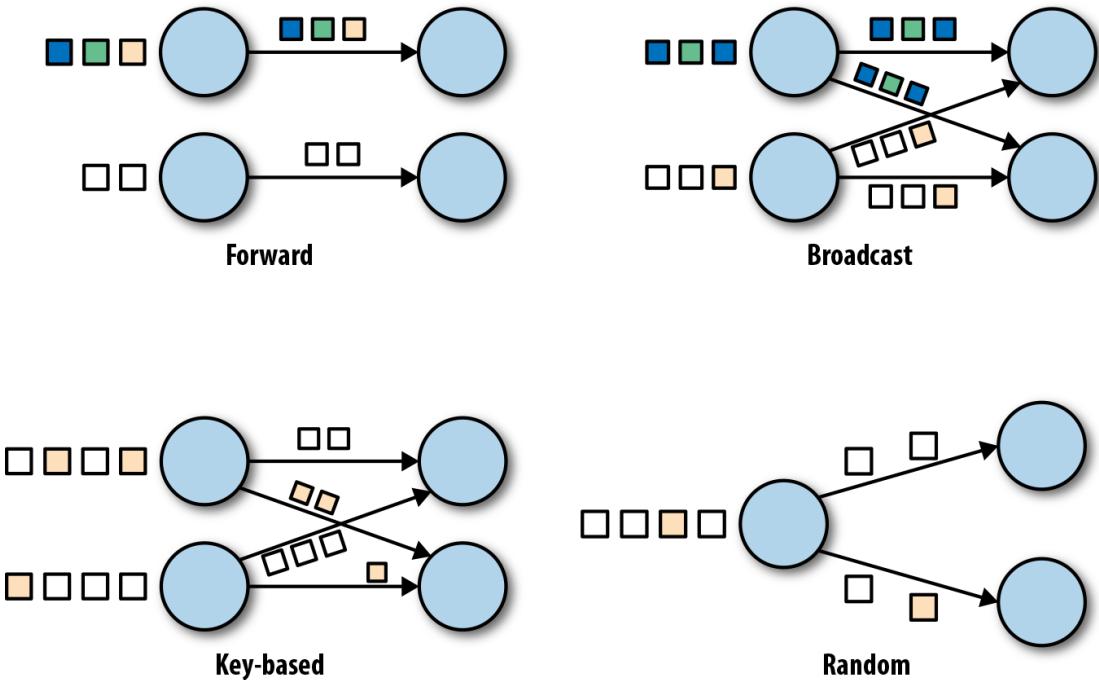


## 数据并行和任务并行

我们可以以不同方式利用数据流图中的并行性。第一，我们可以对输入数据进行分区，并在数据的子集上并行执行具有相同算子的任务并行。这种类型的并行性被称为数据并行性。数据并行是有用的，因为它允许处理大量数据，并将计算分散到不同的计算节点上。第二，我们可以将不同的算子在相同或不同的数据上并行执行。这种并行性称为任务并行性。使用任务并行性，我们可以更好地利用计算资源。

## 数据交换策略

数据交换策略定义了在物理执行流图中如何将数据分配给任务。数据交换策略可以由执行引擎自动选择，具体取决于算子的语义或我们明确指定的语义。在这里，我们简要回顾一些常见的数据交换策略，如图 2-3 所示。



- 前向策略将数据从一个任务发送到接收任务。如果两个任务都位于同一台物理计算机上（这通常由任务调度器确保），这种交换策略可以避免网络通信。
- 广播策略将所有数据发送到算子的所有的并行任务上面去。因为这种策略会复制数据和涉及网络通信，所以代价相当昂贵。
- 基于键控的策略通过 Key 值（键）对数据进行分区保证具有相同 Key 的数据将由同一任务处理。在图 2-2 中，输出“Extract hashtags” 算子使用键来分区（hashtag），以便 count 算子的任务可以正确计算每个 # 标签的出现次数。
- 随机策略统一将数据分配到算子的任务中去，以便均匀地将负载分配到不同的计算任务。

## 并行处理流数据

既然我们熟悉了数据流编程的基础知识，现在是时候看看这些概念如何应用于并行的处理数据流了。但首先，让我们定义术语数据流：数据流是一个可能无限的事件序列。

数据流中的事件可以表示监控数据，传感器测量数据，信用卡交易数据，气象站观测数据，在线用户交互数据，网络搜索数据等。在本节中，我们将学习如何并行处理无限流，使用数据流编程范式。

## 延迟和吞吐量

流处理程序不同与批处理程序。在评估性能时，要求也有所不同。对于批处理程序，我们通常关心一个作业的总的执行时间，或我们的处理引擎读取输入所需的时间，执行计算，并回写结果。由于流处理程序是连续运行的，输入可能是无界的，所以数据流处理中没有总执行时间的概念。相反，流处理程序必须尽可能快的提供输入数据的计算结果。我们使用延迟和吞吐量来表征流处理的性能要求。

## 延迟

延迟表示处理事件所需的时间。它是接收事件和看到在输出中处理此事件的效果之间的时间间隔。要直观的理解延迟，考虑去咖啡店买咖啡。当你进入咖啡店时，可能还有其他顾客在里面。因此，你排队等候直到轮到你下订单。收银员收到你的付款并通知准备饮料的咖啡师。一旦你的咖啡准备好了，咖啡师会叫你的名字，你可以到柜台拿你的咖啡。服务延迟是从你进入咖啡店的那一刻起，直到你喝上第一口咖啡之间的时间间隔。

在数据流中，延迟是以时间为单位测量的，例如毫秒。根据应用程序，我们可能会关心平均延迟，最大延迟或百分位延迟。例如，平均延迟值为 10ms 意味着处理事件的平均时间在 10 毫秒内。或者，延迟值为 95%，10ms 表示 95% 的事件在 10ms 内处理完毕。平均值隐藏了处理延迟的真实分布，可能会让人难以发现问题。如果咖啡师在准备卡布奇诺之前用完了牛奶，你必须等到他们从供应室带来一些。虽然你可能会因为这么长时间的延迟而生气，但大多数其他客户仍然会感到高兴。

确保低延迟对于许多流应用程序来说至关重要，例如欺诈检测，系统警报，网络监控和提供具有严格服务水平协议的服务。低延迟是流处理的关键特性，它实现了我们所谓的实时应用程序。像 Apache Flink 这样的现代流处理器可以提供低至几毫秒的延迟。相比之下，传统批处理程序延迟通常从几分钟到几个小时不等。在批处理中，首先需要收集事件批次，然后才能处理它们。因此，延迟是受每个批次中最后一个事件的到达时间的限制。所以自然而然取决于批的大小。真正的流处理不会引入这样的人为延迟，因此可以实现真正的低延迟。真的流模型，事件一进入系统就可以得到处理。延迟更密切地反映了在每个事件上必须进行的实际工作。

## 吞吐量

吞吐量是衡量系统处理能力的指标，也就是处理速率。也就是说，吞吐量告诉我们每个时间单位系统可以处理多少事件。重温咖啡店的例子，如果商店营业时间为早上 7 点至晚上 7 点。当天为 600 个客户提供了服务，它的平均吞吐量将是每小时 50 个客户。虽然我们希望延迟尽可能低，但我们通常也需要吞吐量尽可能高。

吞吐量以每个时间单位系统所能处理的事件数量或操作数量来衡量。值得注意的是，事件处理速率取决于事件到达的速率，低吞吐量并不一定表示性能不佳。在流式系统中，我们通常希望确保我们的系统可以处理最大的预期事件到达的速率。也就是说，我们主要的关注点在于确定的峰值吞吐量是多少，当系统处于最大负载时性能怎么样。为了更好地理解峰值吞吐量的概念，让我们考虑一个流处理程序没有收到任何输入的数据，因此没有消耗任何系统资源。当第一个事件进来时，它会尽可能以最小延迟立即处理。例如，如果你是第一个出现在咖啡店的顾客，在早上开门后，你将立即获得服务。理想情况下，您希望此延迟保持不变，并且独立于传入事件的速率。但是，一旦我们达到使系统资源被完全使用的事件传入速率，我们将不得不开始缓冲事件。在咖啡店里，午餐后会看到这种情况发生。许多人出现在同一时间，必须排队等候。在此刻，咖啡店系统已达到其峰值吞吐量，进一步增加事件传入的速率只会导致更糟糕的延迟。如果系统继续以可以处理的速率接收数据，缓冲区可能变为不可用，数据可能会丢失。这种情况是众所周知的作为背压，有不同的策略来处理它。

## 延迟与吞吐量的对比

此时，应该清楚延迟和吞吐量不是独立指标。如果事件需要在处理流水线中待上很长时间，我们不能轻易确保高吞吐量。同样，如果系统容量很小，事件将被缓冲，而且必须等待才能得到处理。

让我们重温一下咖啡店的例子来阐明一下延迟和吞吐量如何相互影响。首先，应该清楚存在没有负载时的最佳延迟。也就是说，如果你是咖啡店的唯一客户，会很快得到咖啡。然而，在繁忙时期，客户将不得不排队等待，并且会有延迟增加。另一个影响延迟和吞吐量的因素是处理事件所花费的时间或为每个客户提供服务所花费的时间。想象一下，期间圣诞节假期，咖啡师不得不为每杯咖啡画圣诞老人。这意味着准备一杯咖啡需要的时间会增加，导致每个人花费更多的时间在等待咖啡师画圣诞老人，从而降低整体吞吐量。

那么，你可以同时获得低延迟和高吞吐量吗？或者这是一个无望的努力？我们可以降低得到咖啡的延迟，方法是：聘请一位更熟练的咖啡师来准备咖啡。在高负载时，这种变化也会增加吞吐量，因为会在相同的时间内为更多的客户提供服务。实现相同结果的另一种方法是雇用第二个咖啡师来利用并行性。这里的主要想法是降低延迟来增加吞吐量。当然，如果系统可以更快的执行操作，它可以在相同的时间内执行更多操作。事实上，在流中利用并行性时也会发生这种情况。通过并行处理多个流，在同时处理更多事件的同时降低延迟。

## 数据流上的操作

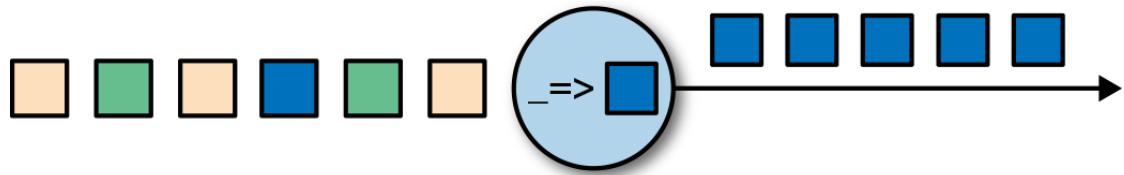
流处理引擎通常提供一组内置操作：摄取 (ingest)，转换 (transform) 和输出流 (output)。这些操作可以结合到数据流图中来实现逻辑流处理程序。在本节中，我们描述最常见的流处理操作。

操作可以是无状态的或有状态的。无状态操作不保持任何内部状态。也就是说，事件的处理不依赖于过去看到的任何事件，也没有保留历史。无状态操作很容易并行化，因为事件可以彼此独立地处理，也独立于事件到达的顺序 (和事件到达顺序没有关系)。而且，在失败的情况下，无状态操作可以是简单的重新启动并从中断处继续处理。相反，有状态操作可能会维护之前收到的事件的信息。此状态可以通过传入事件更新，也可以用于未来事件的处理逻辑。有状态的流处理应用程序更难以并行化和以容错的方式来运行，因为状态需要有效的进行分区和在发生故障的情况下可靠地恢复。

## 数据摄入和数据吞吐量

数据摄取和数据出口操作允许流处理程序与外部系统通信。数据摄取是操作从外部源获取原始数据并将其转换为其他格式 (ETL)。实现数据提取逻辑的运算符被称为数据源。数据源可以从 TCP Socket，文件，Kafka Topic 或传感器数据接口中提取数据。数据出口是以适合消费的形式产出到外部系统。执行数据出口的运算符称为数据接收器，包括文件，数据库，消息队列和监控接口。

## 转换算子

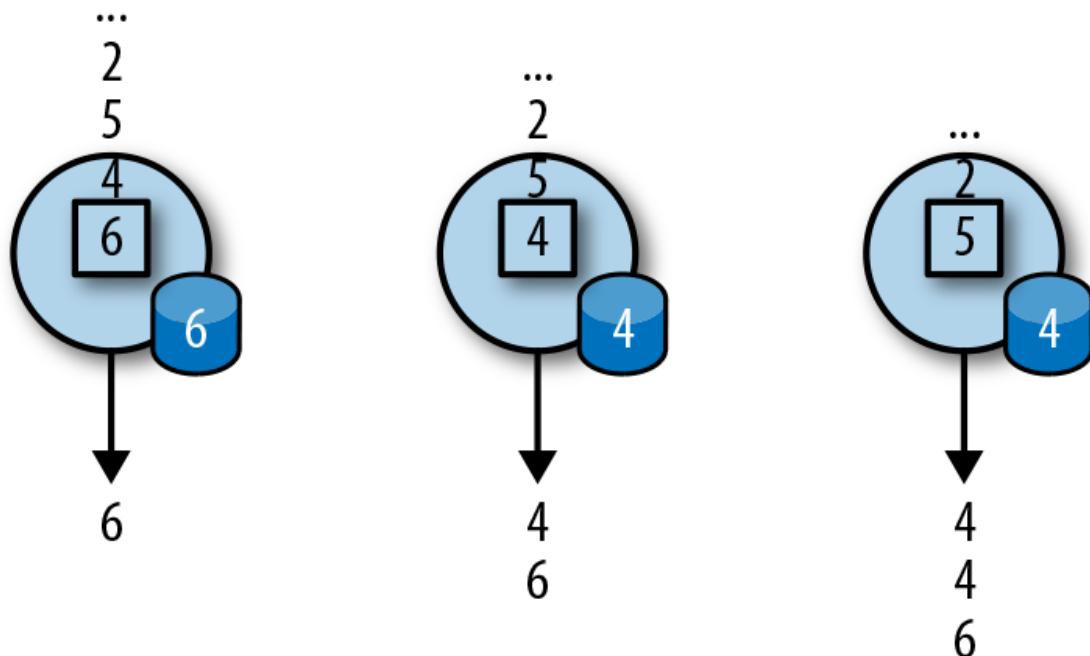


转换算子是单遍处理算子，碰到一个事件处理一个事件。这些操作在使用后会消费一个事件，然后对事件数据做一些转换，产生一个新的输出流。转换逻辑可以集成在操作符中或由 UDF 函数提供，如图所示图 2-4。程序员编写实现自定义计算逻辑。

操作符可以接受多个输入流并产生多个输出流。他们还可以通过修改数据流图的结构要么将流分成多个流，要么将流合并为一条流。

## 滚动聚合

滚动聚合是一种聚合，例如 sum, minimum 和 maximum，为每个输入事件不断更新。聚合操作是有状态的，并将当前状态与传入事件一起计算以产生更新的聚合值。请注意能够有效地将当前状态与事件相结合产生单个值，聚合函数必须是关联的和可交换的。否则，操作符必须存储完整的流数据历史。图 2-5 显示了最小滚动聚合。操作符保持当前的最小值和相应地为每个传入的事件来更新最小值。



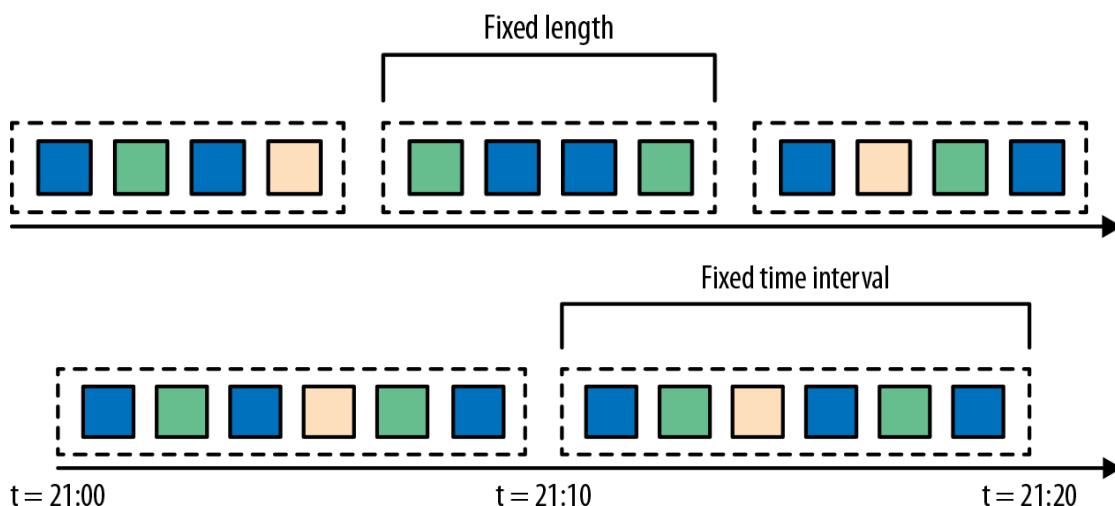
## 窗口操作符

转换和滚动聚合一次处理一个事件产生输出事件并可能更新状态。但是，有些操作必须收集并缓冲数据以计算其结果。例如，考虑不同流之间的连接或整体聚合这样的操作，例如中值函数。为了在无界流上高效运行这些操作符，我们需要限制这些操作维护的数据量。在本节中，我们将讨论窗口操作，提供此服务。

窗口还可以在语义上实现关于流的比较复杂的查询。我们已经看到了滚动聚合的方式，以聚合值编码整个流的历史数据来为每个事件提供低延迟的结果。但如果我们只对最近的数据感兴趣的话会怎样？考虑给司机提供实时交通信息的应用程序。这个程序可以使他们避免拥挤的路线。在这种场景下，你想知道某个位置在最近几分钟内是否有事故发生。另一方面，了解所有发生过的事故在这个应用场景下并没有什么卵用。更重要的是，通过将流历史缩减为单一聚合值，我们将丢失这段时间内数据的变化。例如，我们可能想知道每 5 分钟有多少车辆穿过某个路口。

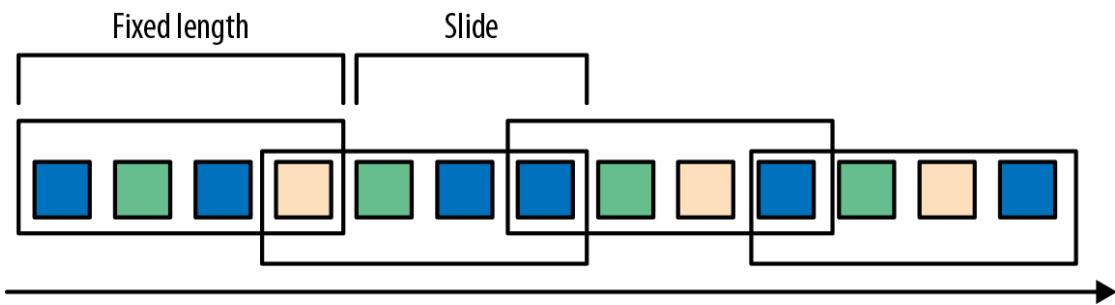
窗口操作不断从无限事件流中创建有限的事件集，好让我们执行有限集的计算。通常会基于数据属性或基于时间的窗口来分配事件。要正确定义窗口运算符语义，我们需要确定如何给窗口分配事件以及对窗口中的元素进行求值的频率是什么样的。窗口的行为由一组策略定义。窗口策略决定何时创建新的窗口以及要分配的事件属于哪个窗口，以及何时对窗口中的元素进行求值。而窗口的求值基于触发条件。一旦触发条件得到满足，窗口的内容将会被发送到求值函数，求值函数会将计算逻辑应用于窗口中的元素。求值函数可以是 sum 或 minimal 或自定义的聚合函数。求值策略可以根据时间或者数据属性计算（例如，在过去五秒内收到的事件或者最近的一百个事件等等）。接下来，我们描述常见窗口类型的语义。

- 滚动窗口是将事件分配到固定大小的不重叠的窗口中。当通过窗口的结尾时，全部事件被发送到求值函数进行处理。基于计数的滚动窗口定义了在触发求值之前需要收集多少事件。图 2-6 显示了一个基于计数的翻滚窗口，每四个元素一个窗口。基于时间的滚动窗口定义一个时间间隔，包含在此时间间隔内的事件。图 2-7 显示了基于时间的滚动窗口，将事件收集到窗口中每 10 分钟触发一次计算。

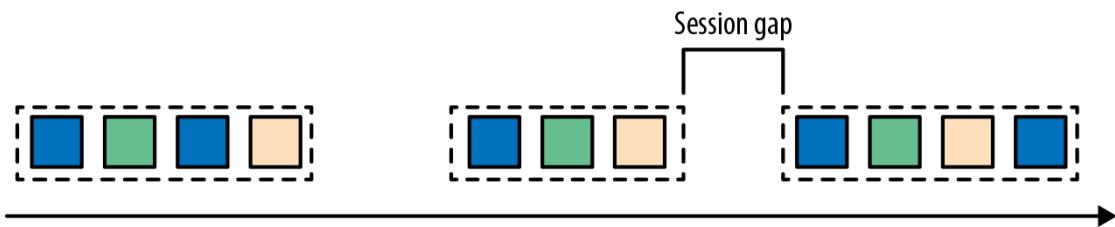


- 滑动窗口将事件分配到固定大小的重叠的窗口中去。因此，事件可能属于多个桶。我们通过提供窗口的长度和滑动距离来定义滑动窗口。滑动距离定义了创建新窗口的间

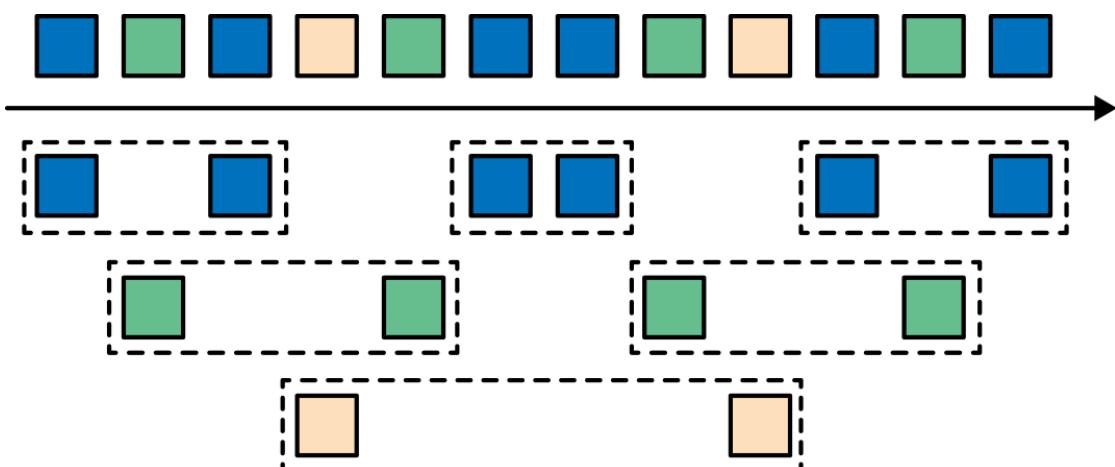
隔。基于滑动计数的窗口，图 2-8 的长度为四个事件，三个为滑动距离。



- 会话窗口在常见的真实场景中很有用，一些场景既不能使用滚动窗口也不能使用滑动窗口。考虑一个分析在线用户行为的应用程序。在应用程序里，我们想把源自同一时期的用户活动或会话事件分组在一起。会话由一系列相邻时间发生的事件组成，接下来有一段时间没有活动。例如，用户在 App 上浏览一系列的新闻，然后关掉 App，那么浏览新闻这段时间的浏览事件就是一个会话。会话窗口事先没有定义窗口的长度，而是取决于数据的实际情况，滚动窗口和滑动窗口无法应用于这个场景。相反，我们需要将同一会话中的事件分配到同一个窗口中去，而不同的会话可能窗口长度不一样。会话窗口会定义一个间隙值来区分不同的会话。间隙值的意思是：用户一段时间内不活动，就认为用户的会话结束了。图 2-9 显示了一个会话窗口。



到目前为止，所有窗口类型都是在整条流上去做窗口操作。但实际上你可能想要将一条流分流成多个逻辑流并定义并行窗口。例如，如果我们正在接收来自不同传感器的测量结果，那么可能想要在做窗口计算之前按传感器 ID 对流进行分流操作。在并行窗口中，每条流都独立于其他流，然后应用了窗口逻辑。图 2-10 显示了一个基于计数的长度为 2 的并行滚动窗口，根据事件颜色分流。



在流处理中，窗口操作与两个主要概念密切相关：时间语义和状态管理。时间也许是流处理最重要的方面。即使低延迟是流处理的一个有吸引力的特性，它的真正价值不仅仅是快速分

析。真实世界的系统，网络和通信渠道远非完美，流数据经常被推迟或无序(乱序)到达。理解如何在这种条件下提供准确和确定的结果是至关重要的。更重要的是，流处理程序可以按原样处理事件制作的也应该能够处理相同的历史事件方式，从而实现离线分析甚至时间旅行分析。当然，前提是我们的系统可以保存状态，因为可能有故障发生。到目前为止，我们看到的所有窗口类型在产生结果前都需要保存之前的数据。实际上，如果我们想计算任何指标，即使是简单的计数，我们也需要保存状态。考虑到流处理程序可能会运行几天，几个月甚至几年，我们需要确保状态可以在发生故障的情况下可靠地恢复。并且即使程序崩溃，我们的系统也能保证计算出准确的结果。本章，我们将在流处理应用可能发生故障的语境下，深入探讨时间和状态的概念。

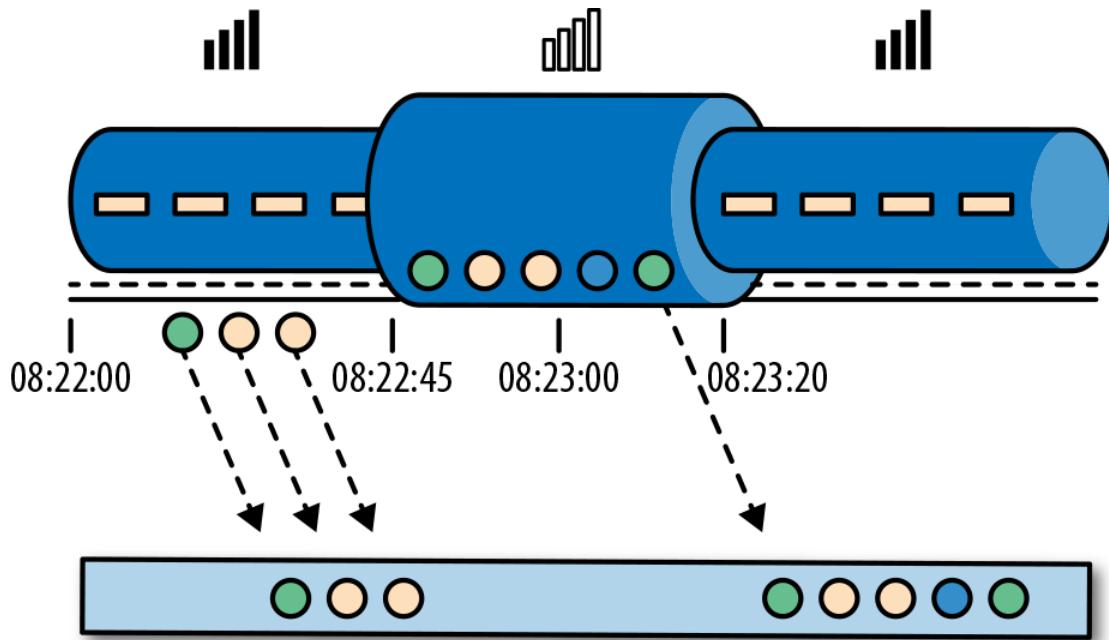
## 时间语义

在本节中，我们将介绍时间语义，并描述流中不同的时间概念。我们将讨论流处理器在乱序事件流的情况下如何提供准确的计算结果，以及我们如何处理历史事件流，如何在流中进行时间旅行。

### 在流处理中一分钟代表什么？

在处理可能是无限的事件流（包含了连续到达的事件），时间成为流处理程序的核心方面。假设我们想要连续的计算结果，可能每分钟就要计算一次。在我们的流处理程序上下文中，一分钟的意思是什么？

考虑一个程序需要分析一款移动端的在线游戏的用户所产生的事件流。游戏中的用户分了组，而应用程序将收集每个小组的活动数据，基于小组中的成员多快达到了游戏设定的目标，然后在游戏中提供奖励。例如额外的生命和用户升级。例如，如果一个小组中的所有用户在一分钟之内都弹出了 500 个泡泡，他们将升一级。Alice 是一个勤奋的玩家，她在每天早晨的通勤时间玩游戏。问题在于 Alice 住在柏林，并且乘地铁去上班。而柏林的地铁手机信号很差。我们设想一个这样的场景，Alice 当她的手机连上网时，开始弹泡泡，然后游戏会将数据发送到我们编写的应用程序中，这时地铁突然进入了隧道，她的手机也断网了。Alice 还在玩这个游戏，而产生的事件将会缓存在手机中。当地铁离开隧道，Alice 的手机又在线了，而手机中缓存的游戏事件将发送到应用程序。我们的应用程序应该如何处理这些数据？在这个场景中一分钟的意思是什么？这个一分钟应该包含 Alice 离线的那段时间吗？下图展示了这个问题。

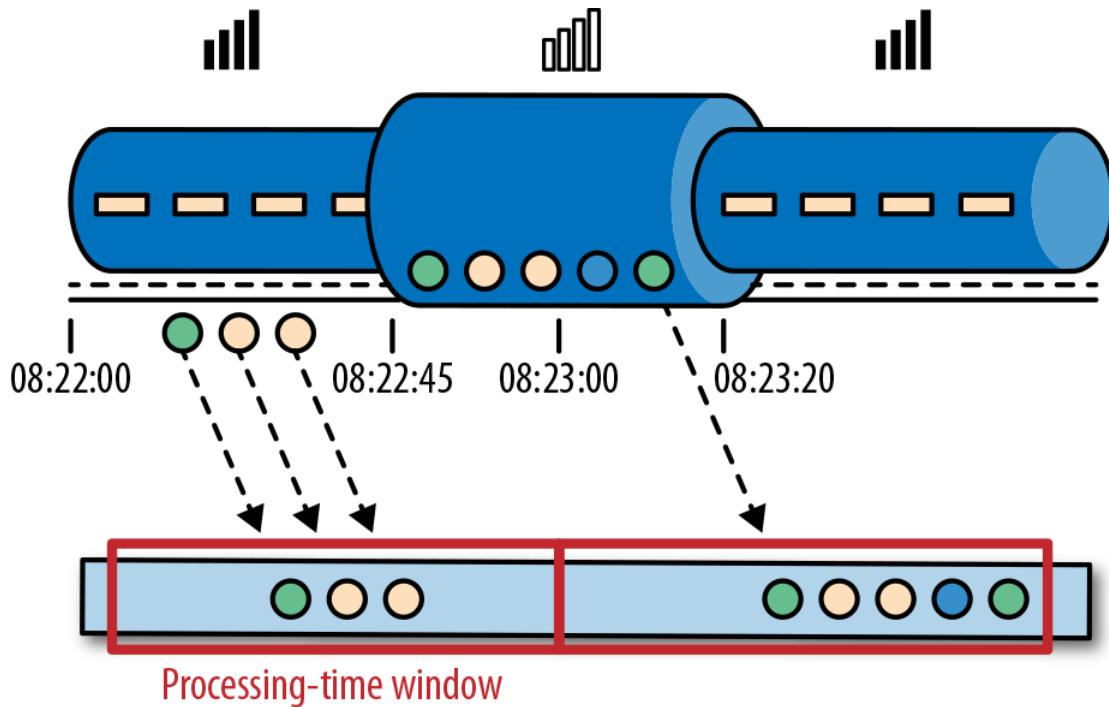


在线手游是一个简单的场景，展示了应用程序的运算应该取决于事件实际发生的时间，而不是应用程序收到事件的时间。如果我们按照应用程序收到事件的时间来进行处理的话，最糟糕的后果就是，Alice 和她的朋友们再也不玩这个游戏了。但是还有很多时间语义非常关键的应用程序，我们需要保证时间语义的正确性。如果我们只考虑我们在一分钟之内收到了多少数据，我们的结果会变化，因为结果取决于网络连接的速度或处理的速度。相反，定义一分钟之内的事件数量，这个一分钟应该是数据本身的时间。

在 Alice 的这个例子中，流处理程序可能会碰到两个不同的时间概念：处理时间和事件时间。我们将在接下来的部分，讨论这两个概念。

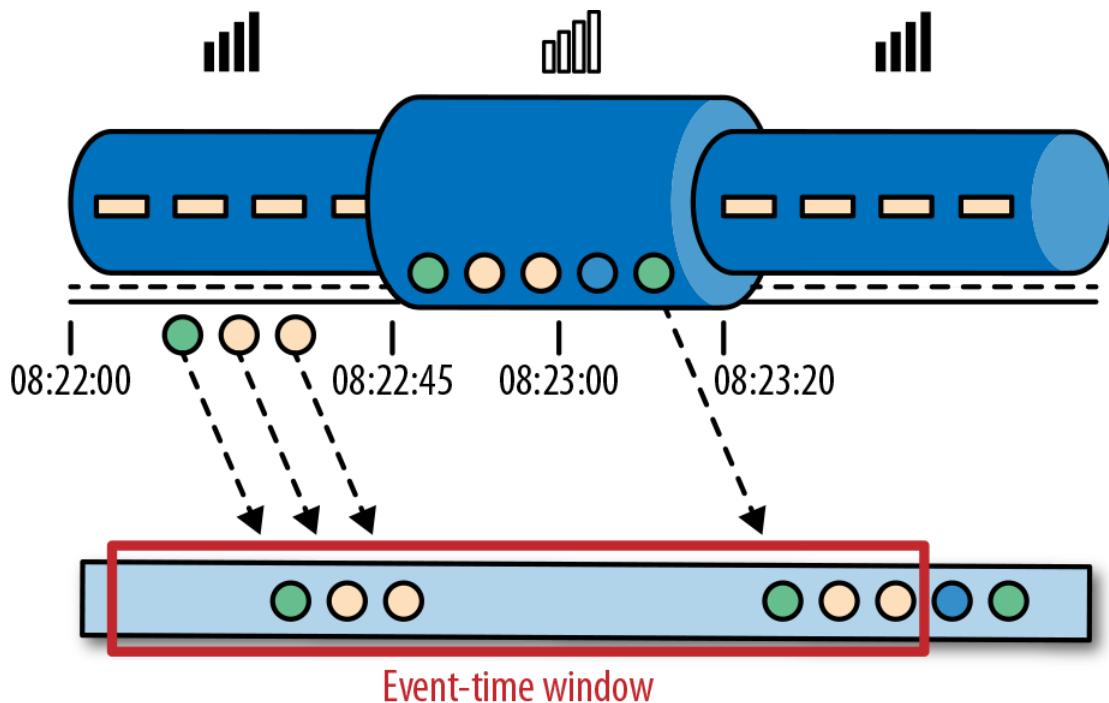
### 处理时间

处理时间是处理流的应用程序的本地时钟的时间（墙上时钟）。处理时间的窗口包含了一个时间段内来到机器的所有事件。这个时间段指的是机器的墙上时钟。如下图所示，在 Alice 的这个例子中，处理时间窗口在 Alice 的手机离线的情况下，时间将会继续行走。但这个处理时间窗口将不会收集 Alice 的手机离线时产生的事件。



### 事件时间

事件时间是流中的事件实际发生的时间。事件时间基于流中的事件所包含的时间戳。通常情况下，在事件进入流处理程序前，事件数据就已经包含了时间戳。下图展示了事件时间窗口将会正确的将事件分发到窗口中去。可以如实反应事情是怎么发生的。即使事件可能存在延迟。



事件时间使得计算结果的过程不需要依赖处理数据的速度。基于事件时间的操作是可以预测的，而计算结果也是确定的。无论流处理程序处理流数据的速度快或是慢，无论事件到达

流处理程序的速度快或是慢，事件时间窗口的计算结果都是一样的。

可以处理迟到的事件只是我们使用事件时间所克服的一个挑战而已。普遍存在的事件乱序问题可以使用事件时间得到解决。考虑和 Alice 玩同样游戏的 Bob，他恰好和 Alice 在同一趟地铁上。Alice 和 Bob 虽然玩的游戏一样，但他们的手机信号是不同的运营商提供的。当 Alice 的手机没信号时，Bob 的手机依然有信号，游戏数据可以正常发送出去。

如果使用事件时间，即使碰到了事件乱序到达的情况，我们也可以保证结果的正确性。还有，当我们在处理可以重播的流数据时，由于时间戳的确定性，我们可以快进过去。也就是说，我们可以重播一条流，然后分析历史数据，就好像流中的事件是实时发生一样。另外，我们可以快进历史数据来使我们的应用程序追上现在的事件，然后应用程序仍然是一个实时处理程序，而且业务逻辑不需要改变。

## 水位线 (Watermarks)

在我们对事件时间窗口的讨论中，我们忽略了一个很重要的方面：我们应该怎样去决定何时触发事件时间窗口的计算？也就是说，在我们可以确定一个时间点之前的所有事件都已经到达之前，我们需要等待多久？我们如何知道事件是迟到的？在分布式系统无法准确预测行为的现实条件下，以及外部组件所引发的事件的延迟，以上问题并没有准确的答案。在本小节中，我们将会看到如何使用水位线来设置事件时间窗口的行为。

水位线是全局进度的度量标准。系统可以确信在一个时间点之后，不会有早于这个时间点发生的事件到来了。本质上，水位线提供了一个逻辑时钟，这个逻辑时钟告诉系统当前的事件时间。当一个运算符接收到含有时间 T 的水位线时，这个运算符会认为早于时间 T 的发生的事件已经全部都到达了。对于事件时间窗口和乱序事件的处理，水位线非常重要。运算符一旦接收到水位线，运算符会认为一段时间内发生的所有事件都已经观察到，可以触发针对这段时间内所有事件的计算了。

水位线提供了一种结果可信度和延时之间的妥协。激进的水位线设置可以保证低延迟，但结果的准确性不够。在这种情况下，迟到的事件有可能晚于水位线到达，我们需要编写一些代码来处理迟到事件。另一方面，如果水位线设置的过于宽松，计算的结果准确性会很高，但可能会增加流处理程序不必要的延时。

在很多真实世界的场景里面，系统无法获得足够的知识来完美的确定水位线。在手游这个场景中，我们无法得知一个用户离线时间会有多长，他们可能正在穿越一条隧道，可能正在乘飞机，可能永远不会再玩儿了。水位线无论是用户自定义的或者是自动生成的，在一个分布式系统中追踪全局的时间进度都不是很容易。所以仅仅依靠水位线可能并不是一个很好的主意。流处理系统还需要提供一些机制来处理迟到的元素（在水位线之后到达的事件）。根据应用场景，我们可能需要把迟到事件丢弃掉，或者写到日志里，或者使用迟到事件来更新之前已经计算好的结果。

## 处理时间 vs 事件时间

大家可能会有疑问，既然事件时间已经可以解决我们的所有问题，为什么我们还要对比这两个时间概念？真相是，处理时间在很多情况下依然很有用。处理时间窗口将会带来理论上最低的延迟。因为我们不需要考虑迟到事件以及乱序事件，所以一个窗口只需要简单的缓存窗口内的数据即可，一旦机器时间超过指定的处理时间窗口的结束时间，就会触发窗口的计算。所以对于一些处理速度比结果准确性更重要的流处理程序，处理时间就派上用场了。另一个应用场景是，当我们需要在真实的时间场景下，周期性的报告结果时，同时不考虑结果的准确性。一个例子就是一个实时监控的仪表盘，负责显示当事件到达时立即聚合的结果。最后，处理时间窗口可以提供流本身数据的忠实表达，对于一些案例可能是很必要的特性。例如我们可能对观察流和对每分钟事件的计数（检测可能存在的停电状况）很感兴趣。简单的说，处理时间提供了低延迟，同时结果也取决于处理速度，并且也不能保证确定性。另一方面，事件时间保证了结果的确定性，同时还可以使我们能够处理迟到的或者乱序的事件流。

## 状态和持久化模型

我们现在转向另一个对于流处理程序非常重要的话题：状态。在数据处理中，状态是普遍存在的。任何稍微复杂一点的计算，都涉及到状态。为了产生计算结果，一个函数在一段时间内的一定数量的事件上来累加状态（例如，聚合计算或者模式匹配）。有状态的运算符使用输入的事件以及内部保存的状态来计算得到输出。例如，一个滚动聚合运算符需要输出这个运算符所观察到的所有事件的累加和。这个运算符将会在内部保存当前观察到的所有事件的累加和，同时每输入一个事件就更新一次累加和的计算结果。相似的，当一个运算符检测到一个“高温”事件紧接着十分钟以内检测到一个“烟雾”事件时，将会报警。直到运算符观察到一个“烟雾”事件或者十分钟的时间段已经过去，这个运算符需要在内部状态中一直保存着“高温”事件。

当我们考虑一下使用批处理系统来分析一个无界数据集时，会发现状态的重要性显而易见。在现代流处理器兴起之前，处理无界数据集的一个通常做法是将输入的事件攒成微批，然后交由批处理器来处理。当一个任务结束时，计算结果将被持久化，而所有的运算符状态就丢失了。一旦一个任务在计算下一个微批次的数据时，这个任务是无法访问上一个任务的状态的（都丢掉了）。这个问题通常使用将状态代理到外部系统（例如数据库）的方法来解决。相反，在一个连续不间断运行的流处理任务中，事件的状态是一直存在的，我们可以将状态暴露出来作为编程模型中的一等公民。当然，我们的确可以使用外部系统来管理流的状态，即使这个解决方案会带来额外的延迟。

由于流处理运算符默认处理的是无界数据流。所以我们必须要注意不要让内部状态无限的增长。为了限制状态的大小，运算符通常情况下会保存一些之前所观察到的事件流的总结或者概要。这个总结可能是一个计数值，一个累加和，或者事件流的采样，窗口的缓存操作，或者是一个自定义的数据结构，这个数据结构用来保存数据流中感兴趣的一些特性。

我们可以想象的到，支持有状态的运算符可能会碰到一些实现上的挑战：

状态管理

系统需要高效的管理状态，并保证针对状态的并发更新，不会产生竞争条件（race condition）。

### 状态分区

并行会带来复杂性。因为计算结果同时取决于已经保存的状态和输入的事件流。幸运的是，大多数情况下，我们可以使用 Key 来对状态进行分区，然后独立的管理每一个分区。例如，当我们处理一组传感器的测量事件流时，我们可以使用分区的运算符状态来针对不同的传感器独立的保存状态。

### 状态恢复

第三个挑战是有状态的运算符如何保证状态可以恢复，即使出现任务失败的情况，计算也是正确的。

下一节，我们将讨论任务失败和计算结果的保证。

## 任务失败

流任务中的运算符状态是很宝贵的，也需要抵御任务失败带来的问题。如果在任务失败的情况下，状态丢失的话，在任务恢复以后计算的结果将是不正确的。流任务会连续不断的运行很长时间，而状态可能已经收集了几天甚至几个月。在失败的情况下，重新处理所有的输入并重新生成一个丢失的状态，将会很浪费时间，开销也很大。

在本章开始时，我们看到如何将流的编程建模成数据流模型。在执行之前，流程序将会被翻译成物理层数据流图，物理层数据流图由连接的并行任务组成，而一个并行任务运行一些运算符逻辑，消费输入流数据，并为其他任务产生输出流数据。真实场景下，可能有数百个这样的任务并行运行在很多的物理机器上。在长时间的运行中，流任务中的任意一个任务在任意时间点都有可能失败。我们如何保证任务的失败能被正确的处理，以使任务能继续的运行下去呢？事实上，我们可能希望我们的流处理器不仅能在任务失败的情况下继续处理数据，还能保证计算结果的正确性以及运算符状态的安全。我们在本小节来讨论这些问题。

**什么是任务失败？** 对于流中的每一个事件，一个处理任务分为以下步骤：(1) 接收事件，并将事件存储在本地的缓存中；(2) 可能会更新内部状态；(3) 产生输出记录。这些步骤都能失败，而系统必须对于在失败的场景下如何处理有清晰的定义。如果任务在第一步就失败了，事件会丢失吗？如果当更新内部状态的时候任务失败，那么内部状态会在任务恢复以后更新吗？在以上这些场景中，输出是确定性的吗？

在批处理场景下，所有的问题都不是问题。因为我们可以很方便的重新计算。所以不会有事件丢失，状态也可以得到完全恢复。在流的世界里，处理失败不是一个小问题。流系统在失败的情况下需要保证结果的准确性。接下来，我们需要看一下现代流处理系统所提供的一些保障，以及实现这些保障的机制。

**结果的保证** 当我们讨论保证计算的结果时，我们的意思是流处理器的内部状态需要保证一致性。也就是说我们关心的是应用程序的代码在故障恢复以后看到的状态值是什么。要注

意保证应用程序状态的一致性并不是保证应用程序的输出结果的一致性。一旦输出结果被持久化，结果的准确性就很难保证了。除非持久化系统支持事务。

### *AT-MOST-ONCE*

当任务故障时，最简单的做法是什么都不干，既不恢复丢失的状态，也不重播丢失的事件。At-most-once 语义的含义是最多处理一次事件。换句话说，事件可以被丢弃掉，也没有任何操作来保证结果的准确性。这种类型的保证也叫“没有保证”，因为一个丢弃掉所有事件的系统其实也提供了这样的保障。没有保障听起来是一个糟糕的主意，但如果我们将接受近似的结果，并且希望尽可能低的延迟，那么这样也挺好。

### *AT-LEAST-ONCE*

在大多数的真实应用场景，我们希望不丢失事件。这种类型的保障成为 at-least-once，意思是所有的事件都得到了处理，而且一些事件还可能被处理多次。如果结果的正确性仅仅依赖于数据的完整性，那么重复处理是可以接受的。例如，判断一个事件是否在流中出现过，at-least-once 这样的保证完全可以正确的实现。在最坏的情况下，我们多次遇到了这个事件。而如果我们要对一个特定的事件进行计数，计算结果就可能是错误的了。

为了保证在 at-least-once 语义的保证下，计算结果也能正确。我们还需要另一套系统来从数据源或者缓存中重新播放数据。持久化的事件日志系统将会把所有的事件写入到持久化存储中。所以如果任务发生故障，这些数据可以重新播放。还有一种方法可以获得同等的效果，就是使用结果承认机制。这种方法将会把每一条数据都保存在缓存中，直到数据的处理等到所有的任务的承认。一旦得到所有任务的承认，数据将被丢弃。

### *EXACTLY-ONCE*

恰好处理一次是最严格的保证，也是最难实现的。恰好处理一次语义不仅仅意味着没有事件丢失，还意味着针对每一个数据，内部状态仅仅更新一次。本质上，恰好处理一次语义意味着我们的应用程序可以提供准确的结果，就好像从未发生过故障。

提供恰好处理一次语义的保证必须有至少处理一次语义的保证才行，同时还需要数据重放机制。另外，流处理器还需要保证内部状态的一致性。也就是说，在故障恢复以后，流处理器应该知道一个事件有没有在状态中更新。事务更新是达到这个目标的一种方法，但可能引入很大的性能问题。Flink 使用了一种轻量级快照机制来保证恰好处理一次语义。

#### 端到端恰好处理一次

目前我们看到的一致性保证都是由流处理器实现的，也就是说都是在 Flink 流处理器内部保证的。而在真实世界中，流处理应用除了流处理器以外还包含了数据源（例如 Kafka）和持久化系统。端到端的一致性保证意味着结果的正确性贯穿了整个流处理应用的始终。每一个组件都保证了它自己的一致性。而整个端到端的一致性级别取决于所有组件中一致性最弱的组件。要注意的是，我们可以通过弱一致性来实现更强的一致性语义。例如，当任务的操作具有幂等性时，比如流的最大值或者最小值的计算。在这种场景下，我们可以通过最少处理一次这样的一致性来实现恰好处理一次这样的最高级别的一致性。

## 第三章，Flink 运行架构

### 系统架构

Flink 是一个用于有状态的并行数据流处理的分布式系统。它由多个进程构成，这些进程一般会分布运行在不同的机器上。对于分布式系统来说，面对的常见问题有：集群中资源的分配和管理、进程协调调度、持久化和高可用的数据存储，以及故障恢复。

对于这些分布式系统的经典问题，业内已有比较成熟的解决方案和服务。所以 Flink 并不会自己去处理所有的问题，而是利用了现有的集群架构和服务，这样它就可以把精力集中在核心工作——分布式数据流处理上了。Flink 与一些集群资源管理工具有很好的集成，比如 Apache Mesos、YARN 和 Kubernetes；同时，也可以配置为独立（stand-alone）集群运行。Flink 自己并不提供持久化的分布式存储，而是直接利用了已有的分布式文件系统（比如 HDFS）或者对象存储（比如 S3）。对于高可用的配置，Flink 需要依靠 Apache ZooKeeper 来完成。

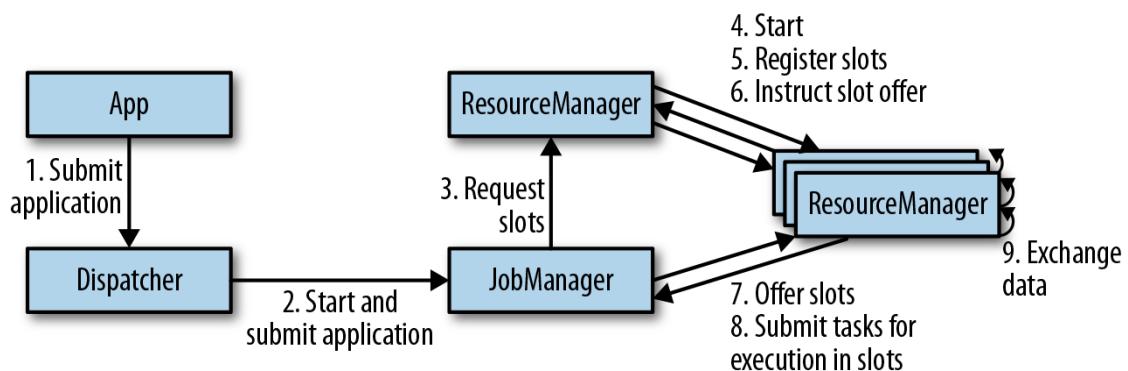
在本节中，我们将介绍 Flink 的不同组件，以及在运行程序时它们如何相互作用。我们会讨论部署 Flink 应用程序的两种模式，并且了解每种模式下分发和执行任务的方式。最后，我们还会解释一下 Flink 的高可用性模式是如何工作的。

### Flink 运行时组件

Flink 运行时架构主要包括四个不同的组件，它们会在运行流处理应用程序时协同工作：作业管理器（JobManager）、资源管理器（ResourceManager）、任务管理器（TaskManager），以及分发器（Dispatcher）。因为 Flink 是用 Java 和 Scala 实现的，所以所有组件都会运行在 Java 虚拟机（JVMs）上。每个组件的职责如下：

- 作业管理器（JobManager）是控制一个应用程序执行的主进程，也就是说，每个应用程序都会被一个不同的 JobManager 所控制执行。JobManager 会先接收到要执行的应用程序。这个应用程序会包括：作业图（JobGraph）、逻辑数据流图（logical dataflow graph）和打包了所有的类、库和其它资源的 JAR 包。JobManager 会把 JobGraph 转换成一个物理层面的数据流图，这个图被叫做“执行图”（ExecutionGraph），包含了所有可以并发执行的任务。JobManager 会向资源管理器（ResourceManager）请求执行任务必要的资源，也就是任务管理器（TaskManager）上的插槽（slot）。一旦它获取到了足够的资源，就会将执行图分发到真正运行它们的 TaskManager 上。而在运行过程中，JobManager 会负责所有需要中央协调的操作，比如说检查点（checkpoints）的协调。
- ResourceManager 主要负责管理任务管理器（TaskManager）的插槽（slot），TaskManager 插槽是 Flink 中定义的处理资源单元。Flink 为不同的环境和资源管理工具提供了不同资源管理器（ResourceManager），比如 YARN、Mesos、K8s，以及 standalone 部署。当 JobManager 申请插槽资源时，ResourceManager 会将有空闲插槽的 TaskManager 分配给 JobManager。如果 ResourceManager 没有足够的插槽来满足 JobManager 的请求，它还可以向资源提供平台发起会话，以提供启动 TaskManager 进程的容器。另外，ResourceManager 还负责终止空闲的 TaskManager，释放计算资源。

- 任务管理器（TaskManager）是 Flink 中的工作进程。通常在 Flink 中会有多个 TaskManager 运行，每一个 TaskManager 都包含了一定数量的插槽（slots）。插槽的数量限制了 TaskManager 能够执行的任务数量。启动之后，TaskManager 会向资源管理器注册它的插槽；收到资源管理器的指令后，TaskManager 就会将一个或者多个插槽提供给 JobManager 调用。JobManager 就可以向插槽分配任务（tasks）来执行了。在执行过程中，一个 TaskManager 可以跟其它运行同一应用程序的 TaskManager 交换数据。任务的执行和插槽的概念会在“任务执行”一节做具体讨论。
- 分发器（Dispatcher）可以跨作业运行，它为应用提交提供了 REST 接口。当一个应用被提交执行时，分发器就会启动并将应用移交给一个 JobManager。由于是 REST 接口，所以 Dispatcher 可以作为集群的一个 HTTP 接入点，这样就能够不受防火墙阻挡。Dispatcher 也会启动一个 Web UI，用来方便地展示和监控作业执行的信息。Dispatcher 在架构中可能并不是必需的，这取决于应用提交运行的方式。



上图是从一个较为高级别的视角，来看应用中各组件的交互协作。如果部署的集群环境不同（例如 YARN, Mesos, Kubernetes, standalone 等），其中一些步骤可以被省略，或是有些组件会运行在同一个 JVM 进程中。

## 应用部署

Flink 应用程序可以用以下两种不同的方式部署：

### 框架（Framework）方式

在这个模式下，Flink 应用被打包成一个 Jar 文件，并由客户端提交给一个运行服务（running service）。这个服务可以是一个 Flink 的 Dispatcher，也可以是一个 Flink 的 JobManager，或是 Yarn 的 ResourceManager。如果 application 被提交给一个 JobManager，则它会立即开始执行这个 application。如果 application 被提交给了一个 Dispatcher，或是 Yarn ResourceManager，则它会启动一个 JobManager，然后将 application 交给它，再由 JobManager 开始执行此应用。

### 库（Library）方式

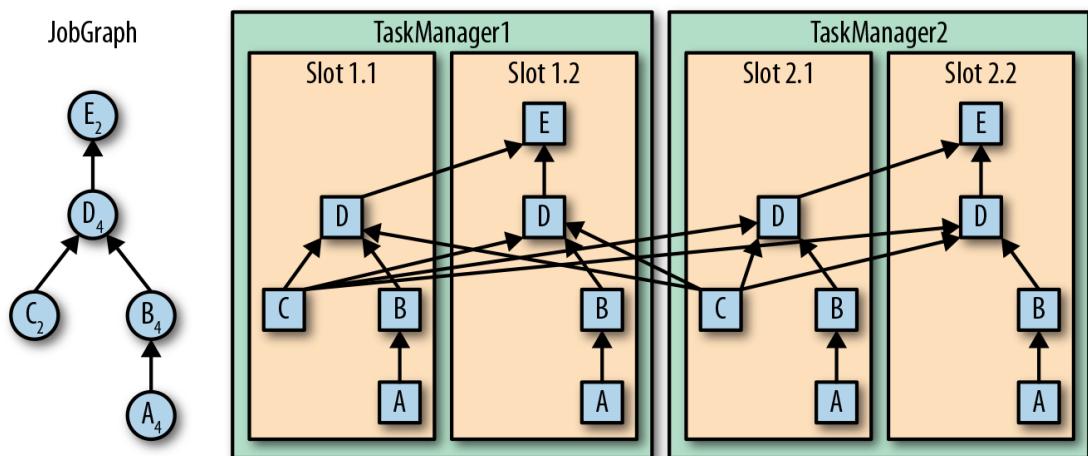
在这个模式下，Flink Application 会被打包在一个容器（container）镜像里，例如一个 Docker 镜像。此镜像包含了运行 JobManager 和 ResourceManager 的代码。当一个容器从镜像启动后，它会自动启动 ResourceManager 和 JobManager，并提交打包好的应用。另一种方法是：将应用打

包到镜像后，只用于部署 TaskManager 容器。从镜像启动的容器会自动启动一个 TaskManager，然后连接 ResourceManager 并注册它的 slots。这些镜像的启动以及失败重启，通常都会由一个外部的资源管理器管理（比如 Kubernetes）。

框架模式遵循了传统的任务提交方式，从客户端提交到 Flink 运行服务。而在库模式下，没有运行的 Flink 服务。它是将 Flink 作为一个库，与应用程序一同打包到了一个容器镜像。这种部署方式在微服务架构中较为常见。我们会在“运行管理流式应用程序”一节对这个话题做详细讨论。

## 任务执行

一个 TaskManager 可以同时执行多个任务（tasks）。这些任务可以是同一个算子（operator）的子任务（数据并行），也可以是来自不同算子的（任务并行），甚至可以是另一个不同应用程序的（作业并行）。TaskManager 提供了一定数量的处理插槽（processing slots），用于控制可以并行执行的任务数。一个 slot 可以执行应用的一个分片，也就是应用中每一个算子的一个并行任务。图 3-2 展示了 TaskManagers, slots, tasks 以及 operators 之间的关系：



最左边是一个“作业图”（JobGraph），包含了 5 个算子——它是应用程序的非并行表示。其中算子 A 和 C 是数据源（source），E 是输出端（sink）。C 和 E 并行度为 2，而其他的算子并行度为 4。因为最高的并行度是 4，所以应用需要至少四个 slot 来执行任务。现在有两个 TaskManager，每个又各有两个 slot，所以我们的需求是满足的。JobManager 将 JobGraph 转化为“执行图”（ExecutionGraph），并将任务分配到四个可用的 slot 上。对于有 4 个并行任务的算子，它的 task 会分配到每个 slot 上。而对于并行度为 2 的 operator C 和 E，它们的任务被分配到 slot 1.1、2.1 以及 slot 1.2、2.2。将 tasks 调度到 slots 上，可以让多个 tasks 跑在同一个 TaskManager 内，也就可以是的 tasks 之间的数据交换更高效。然而将太多任务调度到同一个 TaskManager 上会导致 TaskManager 过载，继而影响效率。之后我们会在“控制任务调度”一节继续讨论如何控制任务的调度。

TaskManager 在同一个 JVM 中以多线程的方式执行任务。线程较进程会更轻量级，但是线程之间并没有对任务进行严格隔离。所以，单个任务的异常行为有可能会导致整个 TaskManager 进程挂掉，当然也同时包括运行在此进程上的所有任务。通过为每个 TaskManager 配置单独的 slot，就可以将应用在 TaskManager 上相互隔离开来。TaskManager 内部有多线程并行的

机制，而且在一台主机上可以部署多个 TaskManager，所以 Flink 在资源配置上非常灵活，在部署应用时可以充分权衡性能和资源的隔离。我们将会在第九章对 Flink 集群的配置和搭建继续做详细讨论。

## 高可用配置

流式应用程序一般被设计为  $7 \times 24$  小时运行。所以很重要的一点是：即使出现了进程挂掉的情况，应用仍需要继续保持运行。为了从故障恢复，系统首先需要重启进程、然后重启应用并恢复它的状态。接下来，我们就来了解 Flink 如何重启失败的进程。

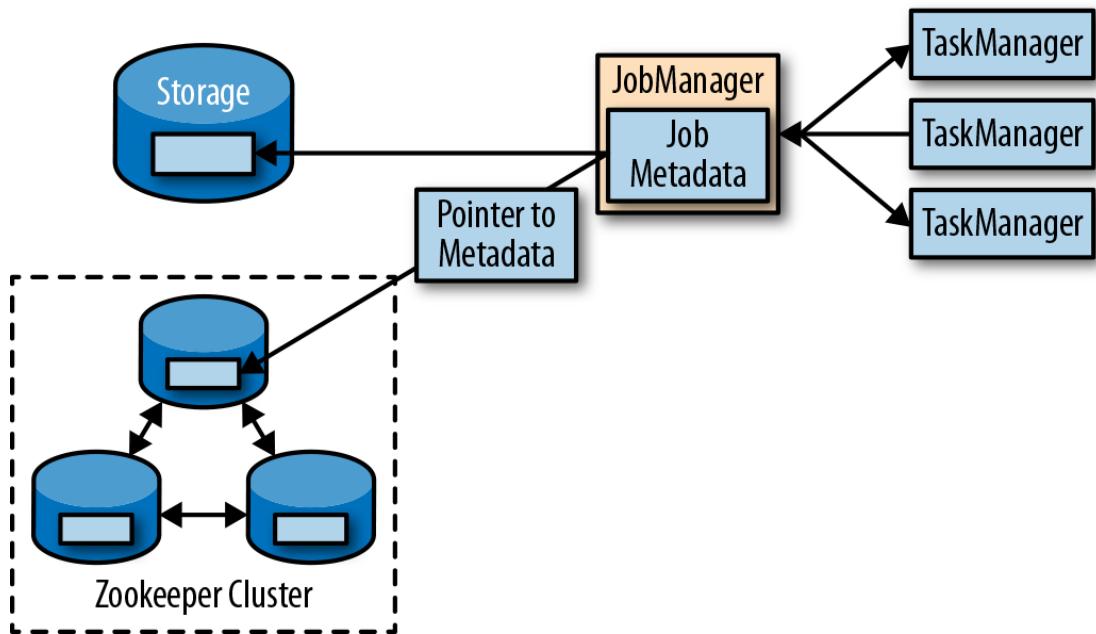
### *TaskManager 故障*

如前所述，Flink 需要足够数目的 slot，来执行一个应用的所有任务。假设一个 Flink 环境有 4 个 TaskManager，每个提供 2 个插槽，那么流应用程序执行的最高并行度为 8。如果其中一个 TaskManager 挂掉了，那么可用的 slots 会降到 6。在这种情况下，JobManager 会请求 ResourceManager 提供更多的 slots。如果此请求无法满足——例如应用跑在一个 standalone 集群——那么 JobManager 在有足够的 slots 之前，无法重启应用。应用的重启策略决定了 JobManager 的重启频率，以及两次重启尝试之间的时间间隔。

### *JobManager 故障*

比 TaskManager 故障更严重的问题是 JobManager 故障。JobManager 控制整个流应用程序的执行，并维护执行中的元数据——例如指向已完成检查点的指针。若是对应的 JobManager 挂掉，则流程序无法继续运行。所以这就导致在 Flink 应用中，JobManager 是单点故障。为了解决这个问题，Flink 提供了高可用模式。在原先的 JobManager 挂掉后，可以将一个作业的状态和元数据迁移到另一个 JobManager，并继续执行。

Flink 的高可用模式基于 Apache ZooKeeper，我们知道，ZooKeeper 是用来管理需要协调和共识的分布式服务的系统。Flink 主要利用 ZooKeeper 来进行领导者 (leader) 的选举，并把它作为一个高可用和持久化的数据存储。当在高可用模式下运行时，JobManager 会将 JobGraph 以及所有需要的元数据（例如应用程序的 jar 文件），写入到一个远程的持久化存储系统中。而且，JobManager 会将指向存储位置的指针，写入到 ZooKeeper 的数据存储中。在执行一个应用的过程中，JobManager 会接收每个独立任务检查点的状态句柄（也就是存储位置）。当一个检查点完成时（所有任务已经成功地将它们的状态写入到远程存储），JobManager 把状态句柄写入远程存储，并将指向这个远程存储的指针写入 ZooKeeper。这样，一个 JobManager 挂掉之后再恢复，所需要的所有数据信息已经都保存在了远程存储，而 ZooKeeper 里存有指向此存储位置的指针。图 3-3 描述了这个设计：



当一个 JobManager 失败，所有属于这个应用的任务都会自动取消。一个新的 JobManager 接管工作，会执行以下操作：

- 从 ZooKeeper 请求存储位置 (storage location)，从远端存储获取 JobGraph, Jar 文件，以及应用最近一次检查点 (checkpoint) 的状态句柄 (state handles)
- 从 ResourceManager 请求 slots，用来继续运行应用
- 重启应用，并将所有任务的状态，重设为最近一次已完成的检查点

如果我们是在容器环境里运行应用 (如 Kubernetes)，故障的 JobManager 或 TaskManager 容器通常会由容器服务自动重启。当运行在 YARN 或 Mesos 之上时，JobManager 或 TaskManager 进程会由 Flink 的保留进程自动触发重启。而在 standalone 模式下，Flink 并未提供重启故障进程的工具。所以，此模式下我们可以增加备用 (standby) 的 JobManager 和 TaskManager，用于接管故障的进程。我们将会在“高可用配置”一节中做进一步讨论。

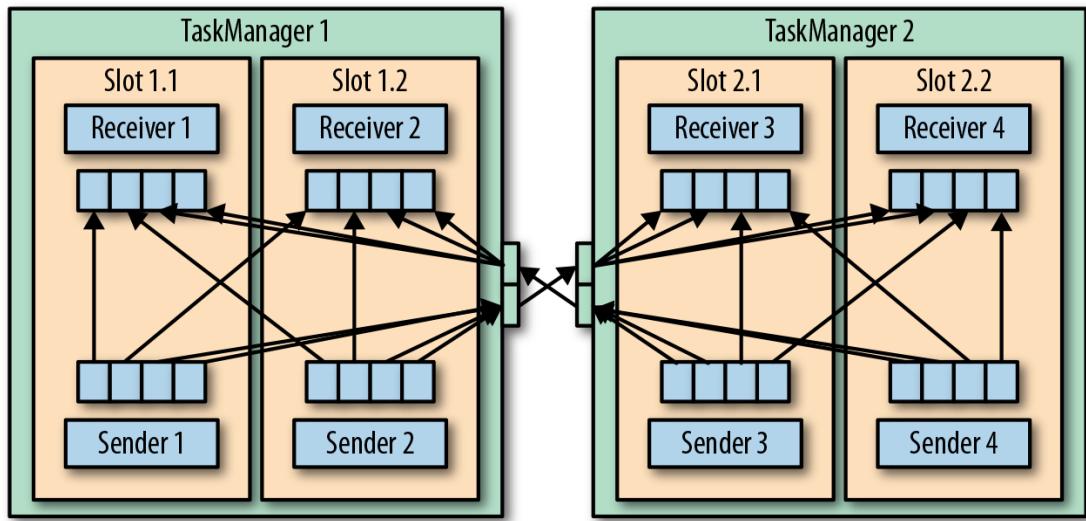
## Flink 中的数据传输

运行中的应用任务，会持续不断地交换数据。TaskManager 负责将数据从“发送任务”(sending tasks) 传递到“接收任务”(receiving tasks)。TaskManager 的网络组件会在缓冲区中收集数据，然后再将其发送，也就是说，数据不是逐条发送的，而是在缓冲区中“攒”成了一批。这种技术是有效利用网络资源和实现高吞吐量的基础，机制类似于网络或磁盘 I/O 协议中使用的缓冲技术。

通过缓冲区来传递数据，意味着 Flink 的处理模型是基于微批的。

每个 TaskManager 都有一个网络缓冲池（默认大小为 32KB），用于发送和接收数据。如果发送任务和接收任务运行在不同的 TaskManager 进程中，那么它们会通过操作系统的网络栈来进行通信。流应用程序需要以管道方式传递数据，所以每对 TaskManager 之间都需要维护一

个永久 TCP 连接，用来交换数据。在无序连接模式下，每个发送任务都需要能向任何接收任务传递数据。所以我们发现，TaskManager 需要为每一个接收任务设置一个专用的网络缓冲区，因为其中的每一个任务都需要接收数据。图 3-4 展示了这种架构。



如图 3-4 所示，四个发送任务中的每一个都需要至少四个网络缓冲区，用来向每个接收任务发送数据，而每个接收任务也需要至少四个缓冲区来接收数据。需要发送到另一个 TaskManager 的缓冲数据，会复用同一网络连接。为了实现平滑的管道数据传输，TaskManager 必须能够提供足够的缓冲，来同时为所有传出和传入连接提供服务。对于无序或广播连接，每个发送任务都需要为每个接收任务提供一个缓冲；所以，所需缓冲区的数量是相关算子任务数量的平方。Flink 网络缓冲区的默认配置足以满足中小型应用；对于更大的应用场景，就需要按照“主内存和网络缓冲区”一节中的叙述调整配置了。

当发送任务和接收任务在同一个 TaskManager 进程中运行时，发送任务会将传出的数据序列化，放入字节缓冲区，并在缓冲区填满后将其放入队列。接收任务从队列中提取缓冲数据并对其进行反序列化。因此，在同一个 TaskManager 上运行的任务，它们之间的数据传输不会导致网络通信。

Flink 采用不同的技术来降低任务之间的通信成本。在下面的部分中，我们会简要讨论基于信任度（Credit）的流控制和任务链。

### 基于信任度（credit）的流控制

通过网络连接来发送每条数据的效率很低，会导致很大的开销。为了充分利用网络连接的带宽，就需要进行缓冲了。在流处理的上下文中，缓冲的一个缺点是会增加延迟，因为数据需要在缓冲区中进行收集，而不是立即发送。

Flink 实现了一个基于信任度的流量控制机制，其工作原理如下。接收任务授予发送任务一些“信任度”（credit），也就是为了接收其数据而保留的网络缓冲区数。当发送者收到一个信任度通知，它就会按照被授予的信任度，发送尽可能多的缓冲数据，并且同时发送目前积压数据的大小——也就是已填满并准备发送的网络缓冲的数量。接收者用保留的缓冲区处理发来的数据，并对发送者传来的积压量进行综合考量，为其所有连接的发送者确定下一个信

用度授权的优先级。

基于信用度的流控制可以减少延迟，因为发送者可以在接收者有足够的资源接受数据时立即发送数据。此外，在数据倾斜的情况下，这样分配网络资源是一种很有效的机制，因为信用度是根据发送者积压数据量的规模授予的。因此，基于信用的流量控制是 Flink 实现高吞吐量和低延迟的重要组成部分。

### 任务链 (Task Chaining)

Flink 采用了一种称为任务链的优化技术，可以在特定条件下减少本地通信的开销。为了满足任务链的要求，必须将两个或多个算子设为相同的并行度，并通过本地转发 (local forward) 的方式进行连接。图 3-5 所示的算子管道满足这些要求。它由三个算子组成，这些算子的任务并行度都被设为 2，并且通过本地转发方式相连接。

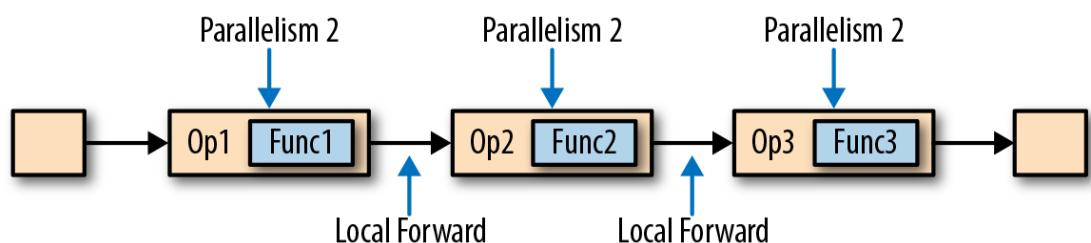
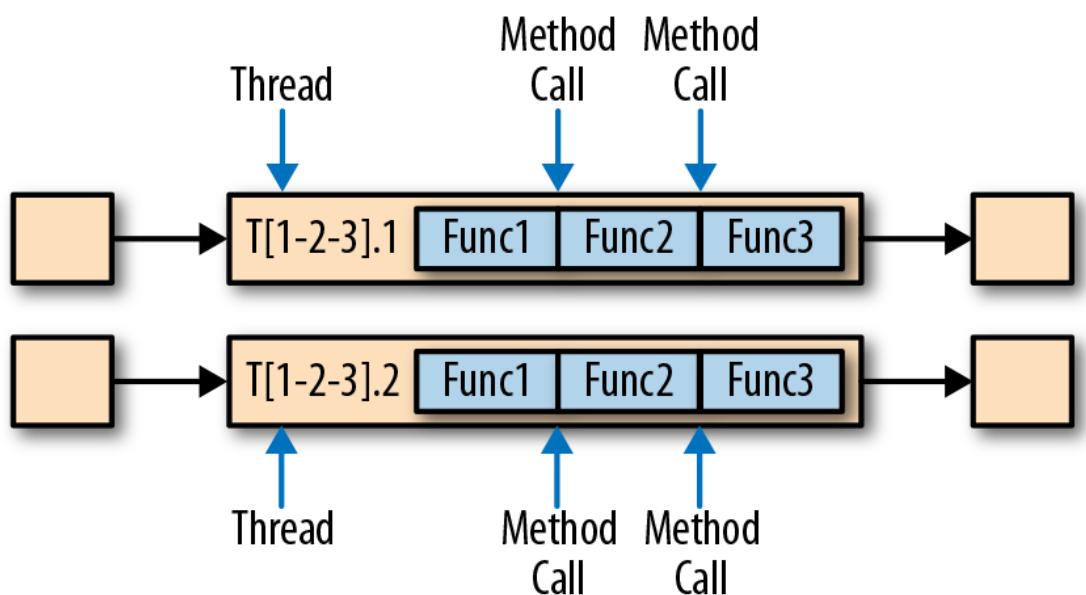
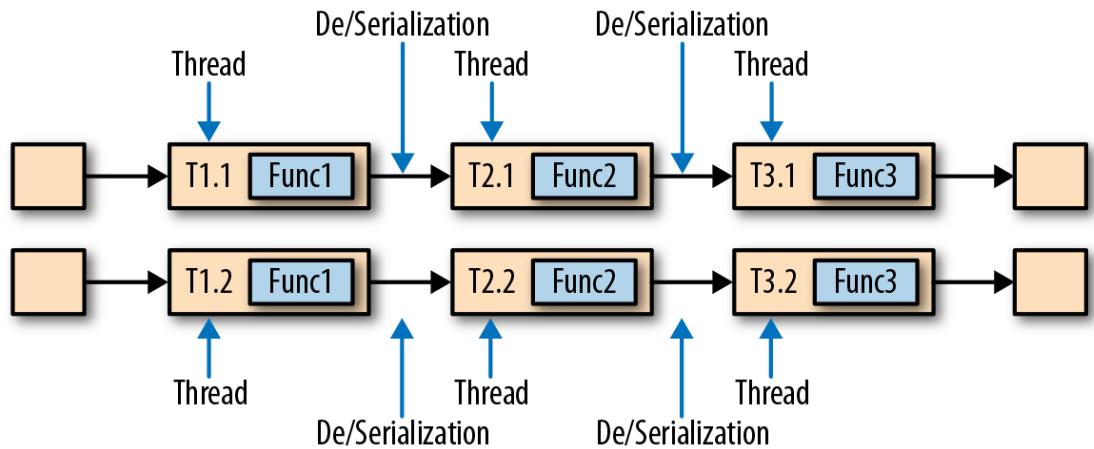


图 3-6 展示了管道以任务链方式运行的过程。算子的函数被融合成了一个单一的任务，由一个线程执行。由函数生成的数据通过一个简单的方法调用移交给下一个函数；这样在函数之间直接传递数据，基本上没有序列化和通信成本。



任务链可以显著降低本地任务之间的通信成本，但也有一些场景，在没有链接的情况下运行管道操作是有意义的。例如，如果任务链中某个函数执行的开销巨大，那就可以将一条长的任务链管道断开，或者将一条链断开为两个任务，从而可以将这个开销大的函数调度到不同的槽 (slots) 中。图 3-7 显示了在没有任务链的情况下相同管道操作的执行情况。所有函数都由独立的单个任务来评估，每个任务都在专有的线程中运行。



任务链在 Flink 中默认会启用。在“控制任务链”一节中，我们展示了如何禁用应用程序的任务链，以及如何控制各个算子的链接行为。

## 事件时间（Event-Time）处理

在“时间语义”一节，我们重点强调了时间语义在流处理应用中的重要性，并且解释了处理时间（processing time）和事件时间（event time）的不同。处理时间比较好理解，因为它是基于处理器本地时间的；但同时，它会带来比较混乱、不一致、并且不可重现的结果。相比之下，事件时间语义能够产生可重现且一致的结果，这也是许多流处理场景希望解决的一大难题。但是，与处理时间应用程序相比，事件时间应用程序会更复杂，需要额外的配置。另外，支持事件时间的流处理器，也比纯粹在处理时间中运行的系统内部更为复杂。

Flink 为常见的事件时间处理操作提供了直观且易于使用的原语，同时暴露了表达性很强的 API，用户可以使用自定义算子实现更高级的事件时间应用程序。很好地理解 Flink 的内部时间处理，对于实现这样的高级应用程序会有很大帮助，有时也是必需的。上一章介绍了 Flink 利用两个概念来支持事件时间语义：记录时间戳（timestamps）和水位线（watermarks）。接下来，我们将描述 Flink 如何在内部实现并处理时间戳和水位线，进而支持具有事件时间语义的流式应用程序。

### 时间戳（Timestamps）

由 Flink 事件时间流应用程序处理的所有记录都必须伴有时间戳。时间戳将数据与特定时间点相关联，通常就是数据所表示的事件发生的时间点。而只要时间戳大致跟数据流保持一致，基本上随着数据流的前进而增大，应用程序就可以自由选择时间戳的含义。不过正如“时间语义”一节中所讨论的，在现实场景中，时间戳基本上都是乱序的，所以采用“事件时间”而非“处理事件”往往显得更为重要。

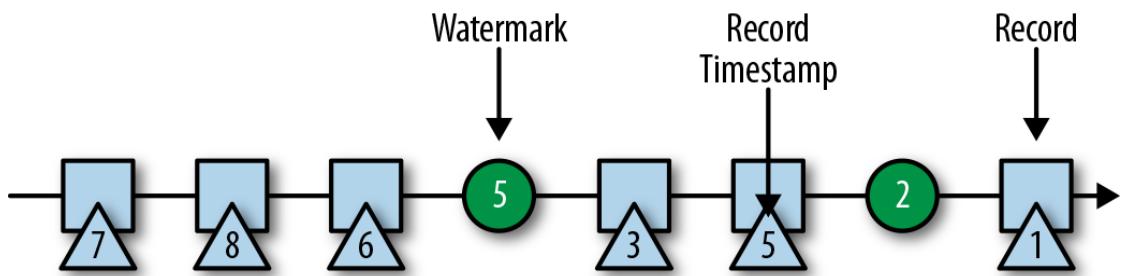
当 Flink 以事件时间模式处理数据流时，它会根据数据记录的时间戳来处理基于时间的算子。例如，时间窗口算子根据相关时间戳将数据分配给不同的时间窗口。Flink 将时间戳编码为 16 字节的长整型值，并将其作为元数据附加到数据记录中。它的内置运算符会将这个长整型值解释为一个具有毫秒精度的 Unix 时间戳，也就是 1970-01-01-00:00:00.000 以来的毫秒。

数。当然，如果用户进行了自定义，那么运算符可以有自己的解释，例如，可以将精度调整到微秒。

## 水位线 (Watermarks)

除了时间戳，基于事件时间的 Flink 应用程序还必须支持水位线 (watermark)。在基于事件时间的应用中，水位线用于生成每个任务的当前事件时间。基于时间的算子使用这个“当前事件时间”来触发计算和处理操作。例如，一个时间窗口任务 (time-window task) 会在任务的事件时间超出窗口的关闭边界时，完成窗口计算，并输出计算结果。

在 Flink 中，水位线被实现为一条特殊的数据记录，它里面以长整型值保存了一个时间戳。水位线在带有时间戳的数据流中，跟随着其它数据一起流动，如图 3-8 所示。



水位线有两个基本属性：

- 必须单调递增，以确保任务的事件时间时钟在向前推进，而不是在后退。
- 它们与数据的时间戳相关。带有时间戳  $T$  的水位线表示，所有后续数据的时间戳都应该大于  $T$ 。

上面的第二个属性用于处理带有乱序时间戳的数据流，比如图 3-8 中时间戳 3 和 5 的数据。基于时间的算子任务会收集和处理数据（这些数据可能具有乱序的时间戳），并在事件时间时钟到达某个时刻时完成计算。这个时刻就表示数据收集的截止，具有之前时间戳的数据应该都已经到达、不再需要了；而其中的事件时间时钟，正是由当前接收到的水位线来指示的。如果任务再接收到的数据违反了 watermark 的这一属性，也就是时间戳小于以前接收到的水位线时，它所属的那部分计算可能已经完成了。这种数据被称为延迟数据 (late records)。Flink 提供了处理延迟数据的不同方式，我们会在“处理延迟数据”一节中讨论。

水位线还有一个很有趣的特性，它允许应用程序自己来平衡结果的完整性和延迟。如果水位线与数据的时间戳非常接近，那么我们可以得到较低的处理延迟，因为任务在完成计算之前只会短暂地等待更多数据到达。而同时，结果的完整性可能会受到影响，因为相关数据可能因为迟到而被视为“延迟数据”，这样就不会包含在结果中。相反，非常保守的水位线提供了足够的时间去等待所有数据到达，这样会增加处理延迟，但提高了结果的完整性。

### watermark 的传递和事件时间

在本节中，我们将讨论算子如何处理水位线。Flink 把 watermark 作为一条特殊的数据来实现，它也会由算子任务接收和发送。任务会有一个内部的时间服务，它会维护定时器，并在

收到 watermark 时触发。任务可以在计时器服务中注册定时器，以便在将来特定的时间点执行计算。例如，窗口算子为每个活动窗口注册一个定时器，当事件时间超过窗口的结束时间时，该计时器将清除窗口的状态。

当任务收到 watermark 时，将执行以下操作：

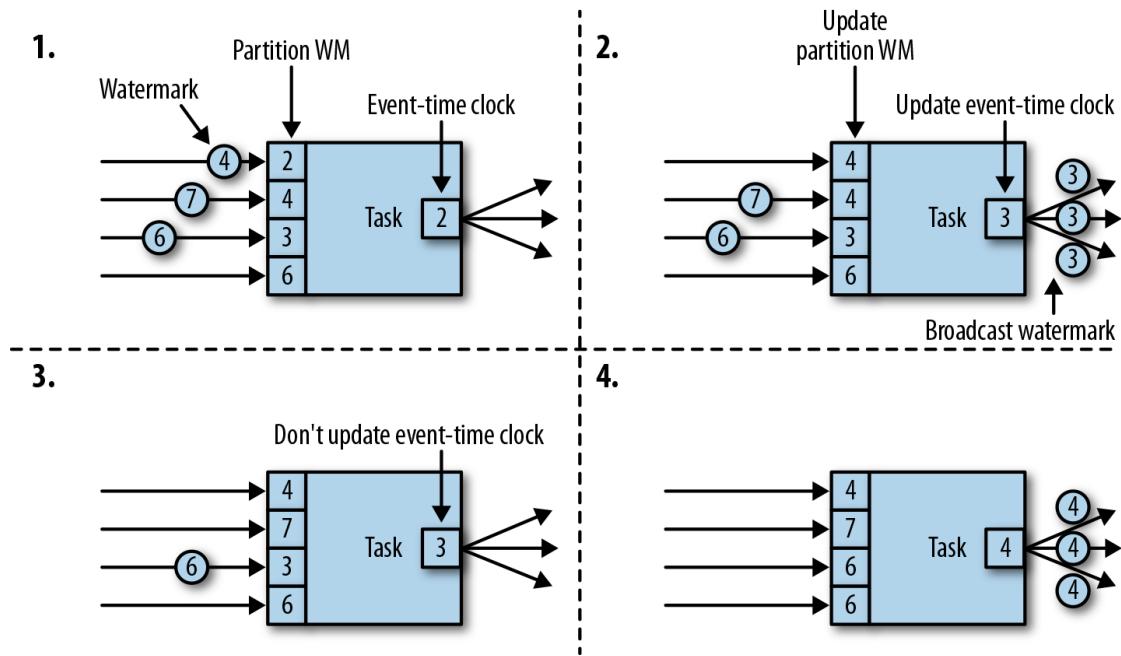
- 任务根据 watermark 的时间戳更新其内部事件时钟。
- 任务的时间服务会将所有过期的计时器标识出来，它们的时间小于当前的事件时间。对于每个过期的计时器，任务调用一个回调函数，该函数可以执行计算并发送结果。
- 任务会发出一个带有更新后的事件时间的 watermark。

Flink 限制通过 DataStream API 访问时间戳和 watermark。函数不能读取或修改数据的时间戳和 watermark，但底层的“处理函数”（process functions）除外，它们可以读取当前处理数据的时间戳、请求算子的当前事件时间，还可以注册定时器。通常的函数都不会暴露这些可以设置时间戳、操作任务事件时间时钟、或者发出水位线的 API。而基于时间的数据流算子任务则会配置发送出的数据的时间戳，以确保它们能够与已到达的水位线平齐。例如，窗口计算完成后，时间窗口的算子任务会将窗口的结束时间作为时间戳附加到将要发送出的结果数据上，然后再使用触发窗口计算的时间戳发出 watermark。

现在，让我们更详细地解释一下任务在接收到新的 watermark 时，如何继续发送 watermark 并更新其事件时钟。正如我们在“数据并发和任务并发”中所了解的，Flink 将数据流拆分为多个分区，并通过单独的算子任务并行地处理每个分区。每个分区都是一个流，里面包含了带着时间戳的数据和 watermark。一个算子与它前置或后续算子的连接方式有多种情况，所以它对应的任务可以从一个或多个“输入分区”接收数据和 watermark，同时也可以将数据和 watermark 发送到一个或多个“输出分区”。接下来，我们将详细描述一个任务如何向多个输出任务发送 watermark，以及如何通过接收到的 watermark 来驱动事件时间时钟前进。

任务为每个输入分区维护一个分区水位线（watermark）。当从一个分区接收到 watermark 时，它会比较新接收到的值和当前水位值，然后将相应的分区 watermark 更新为两者最大值。然后，任务会比较所有分区 watermark 的大小，将其事件时钟更新为所有分区 watermark 的最小值。如果事件时间时钟前进了，任务就将处理所有被触发的定时器操作，并向所有连接的输出分区发送出相应的 watermark，最终将新的事件时间广播给所有下游任务。

图 3-9 显示了具有四个输入分区和三个输出分区的任务如何接收 watermark、更新分区 watermark 和事件时间时钟，以及向下游发出 watermark。



具有两个或多个输入流（如 Union 或 CoFlatMap）的算子任务（参见“多流转换”一节）也会以所有分区 watermark 的最小值作为事件时间时钟。它们并不区分不同输入流的分区 watermark，所以两个输入流的数据都是基于相同的事件时间时钟进行处理的。当然我们可以想到，如果应用程序的各个输入流的事件时间不一致，那么这种处理方式可能会导致问题。

Flink 的水位处理和传递算法，确保了算子任务发出的时间戳和 watermark 是“对齐”的。不过它依赖一个条件，那就是所有分区都会提供不断增长的 watermark。一旦一个分区不再推进水位线的上升，或者完全处于空闲状态、不再发送任何数据和 watermark，任务的事件时间时钟就将停滞不前，任务的定时器也就无法触发了。对于基于时间的算子来说，它们需要依赖时钟的推进来执行计算和清除状态，这种情况显然就会有问题。如果任务没有定期从所有输入任务接收到新的 watermark，那么基于时间的算子的处理延迟和状态空间的大小都会显著增加。

对于具有两个输入流而且 watermark 明显不同的算子，也会出现类似的情况。具有两个输入流的任务的事件时间时钟，将同较慢的那条流的 watermark 保持一致，而通常较快流的数据或者中间结果会在 state 中缓冲，直到事件时间时钟达到这条流的 watermark，才会允许处理它们。

## 时间戳的分配和水位线的产生

我们已经解释了什么是时间戳和水位线，以及它们是如何由 Flink 内部处理的；然而我们还没有讨论它们的产生。流应用程序接收到数据流时，通常就会先分配时间戳并生成水位线（watermark）。因为时间戳的选择是由不同的应用程序决定的，而且 watermark 取决于时间戳和流的特性，所以应用程序必须首先显式地分配时间戳并生成 watermark。Flink 流应用程序可以通过三种方式分配时间戳和生成 watermark：

- 在数据源（source）处分配：当数据流被摄入到应用程序中时，可以由“源函数”SourceFunction 分配和生成时间戳和 watermark。SourceFunction 可以产生并发送

一个数据流；数据会与相关的时间戳一起发送出去，而 watermark 可以作为一条特殊数据在任何时间点发出。如果 SourceFunction（暂时）不再发出 watermark，它可以声明自己处于“空闲”（idle）状态。Flink 会在后续算子的水位计算中，把空闲的 SourceFunction 产生的流分区排除掉。source 的这一空闲机制，可以用来解决前面提到的水位不再上升的问题。源函数（Source Function）在“实现自定义源函数”一节中进行了更详细的讨论。

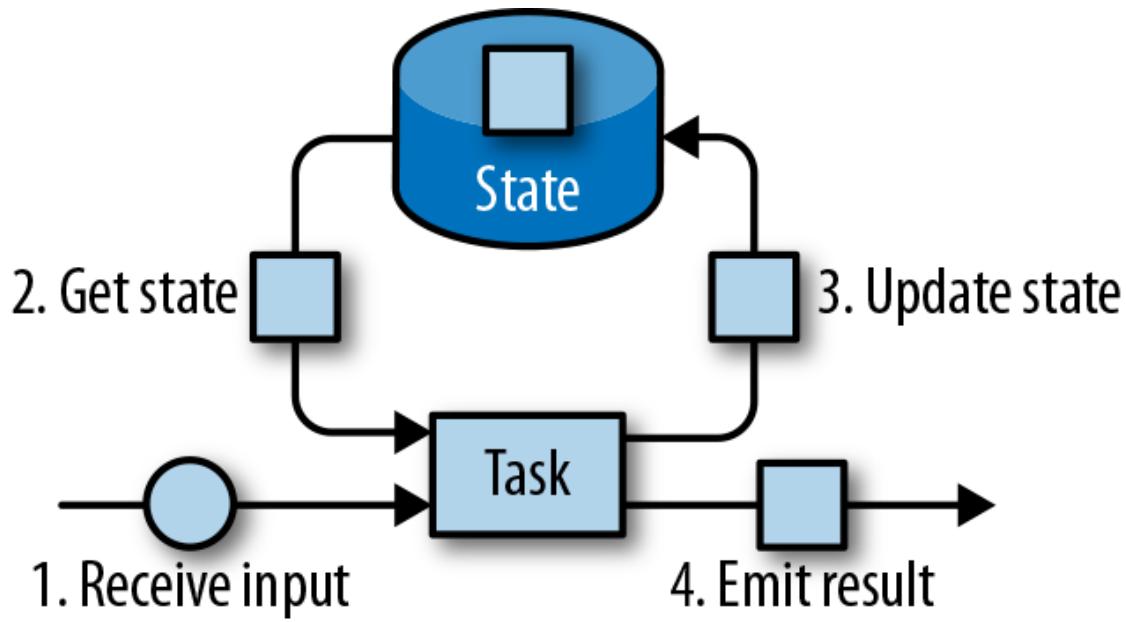
- 定期分配：在 Flink 中，DataStream API 提供一个名为 AssignerWithPeriodicWatermarks 的用户定义函数，它可以从每个数据中提取时间戳，并被定期调用以生成当前 watermark。提取出的时间戳被分配给相应的数据，而生成的 watermark 也会添加到流中。这个函数将在“分配时间戳和生成水位线”一节中讨论。
- 间断分配：AssignerWithPunctuatedWatermarks 是另一个用户定义的函数，它同样会从每个数据中提取一个时间戳。它可用于生成特殊输入数据中的 watermark。与 AssignerWithPeriodicWatermarks 相比，此函数可以（但不是必须）从每个记录中提取 watermark。我们在“分配时间戳和生成水位线”一节中同样讨论了该函数。

用户定义的时间戳分配函数并没有严格的限制，通常会放在尽可能靠近 source 算子的位置，因为当经过一些算子处理后，数据及其时间戳的顺序就更加难以解释了。所以尽管我们可以在流应用程序的中段覆盖已有的时间戳和 watermark——Flink 通过用户定义的函数提供了这种灵活性，但这显然并不是推荐的做法。

## 状态管理

在第 2 章中，我们已经知道大多数流应用程序都是有状态的。许多算子会不断地读取和更新状态，例如在窗口中收集的数据、读取输入源的位置，或者像机器学习模型那样的用户定制化的算子状态。Flink 用同样的方式处理所有的状态，无论是内置的还是用户自定义的算子。本节我们将会讨论 Flink 支持的不同类型的状态，并解释“状态后端”是如何存储和维护状态的。

一般来说，由一个任务维护，并且用来计算某个结果的所有数据，都属于这个任务的状态。你可以认为状态就是一个本地变量，可以被任务的业务逻辑访问。图 3-10 显示了任务与其状态之间的交互。



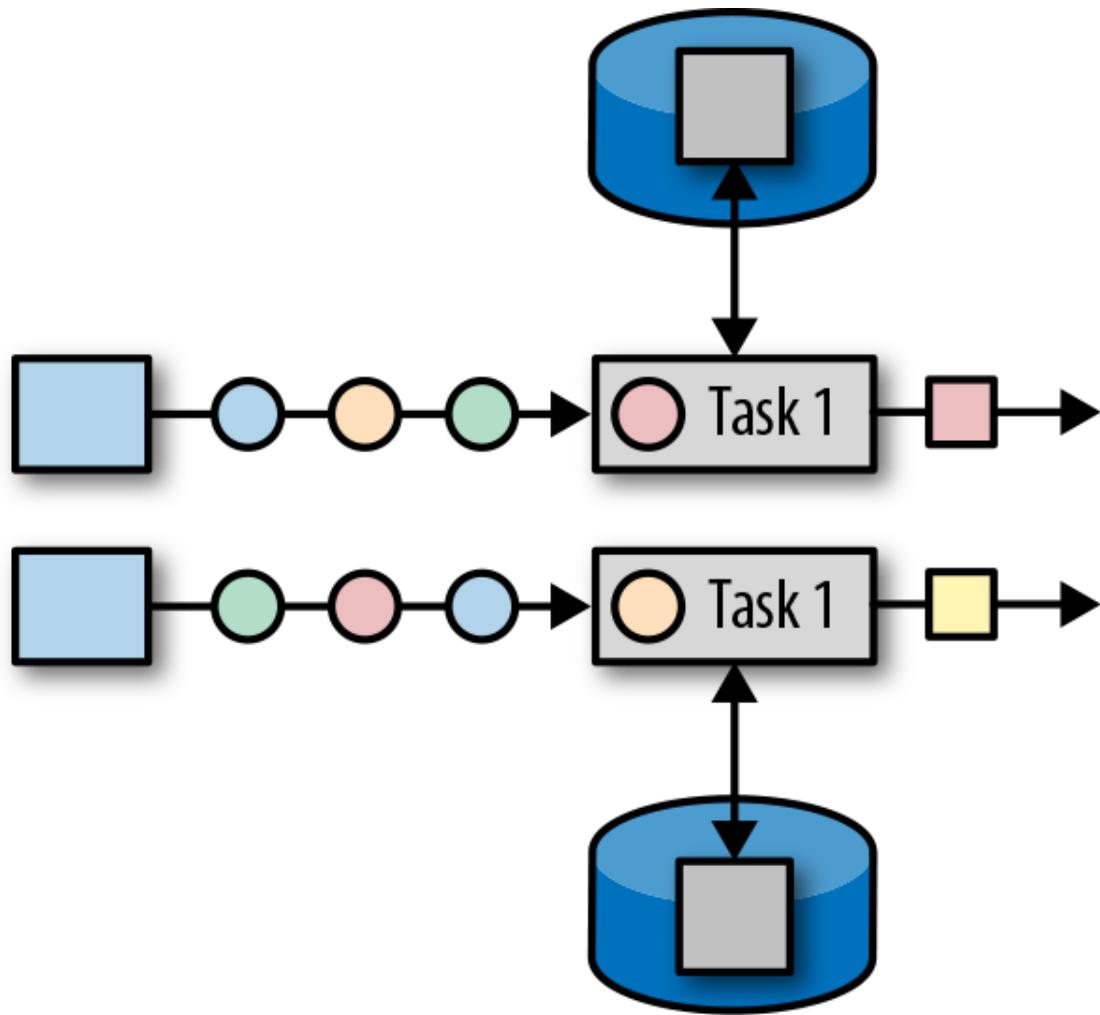
任务会接收一些输入数据。在处理数据时，任务可以读取和更新状态，并根据输入数据和状态计算结果。最简单的例子，就是统计接收到多少条数据的任务。当任务收到新数据时，它会访问状态以获取当前的计数，然后让计数递增，更新状态并发送出新的计数。

应用程序里，读取和写入状态的逻辑一般都很简单直接，而有效可靠的状态管理会复杂一些。这包括如何处理很大的状态——可能会超过内存，并且保证在发生故障时不会丢失任何状态。幸运的是，Flink 会帮我们处理这相关的所有问题，包括状态一致性、故障处理以及高效存储和访问，以便开发人员可以专注于应用程序的逻辑。

在 Flink 中，状态始终与特定算子相关联。为了使运行时的 Flink 了解算子的状态，算子需要预先注册其状态。总的说来，有两种类型的状态：算子状态（operator state）和键控状态（keyed state），它们有着不同的范围访问，我们将在下面展开讨论。

## 算子状态

算子状态的作用范围限定为算子任务。这意味着由同一并行任务所处理的所有数据都可以访问到相同的状态，状态对于同一任务而言是共享的。算子状态不能由相同或不同算子的另一个任务访问。图 3-11 显示了任务如何访问算子状态。



Flink 为算子状态提供三种基本数据结构：

**列表状态（List state）** 将状态表示为一组数据的列表。

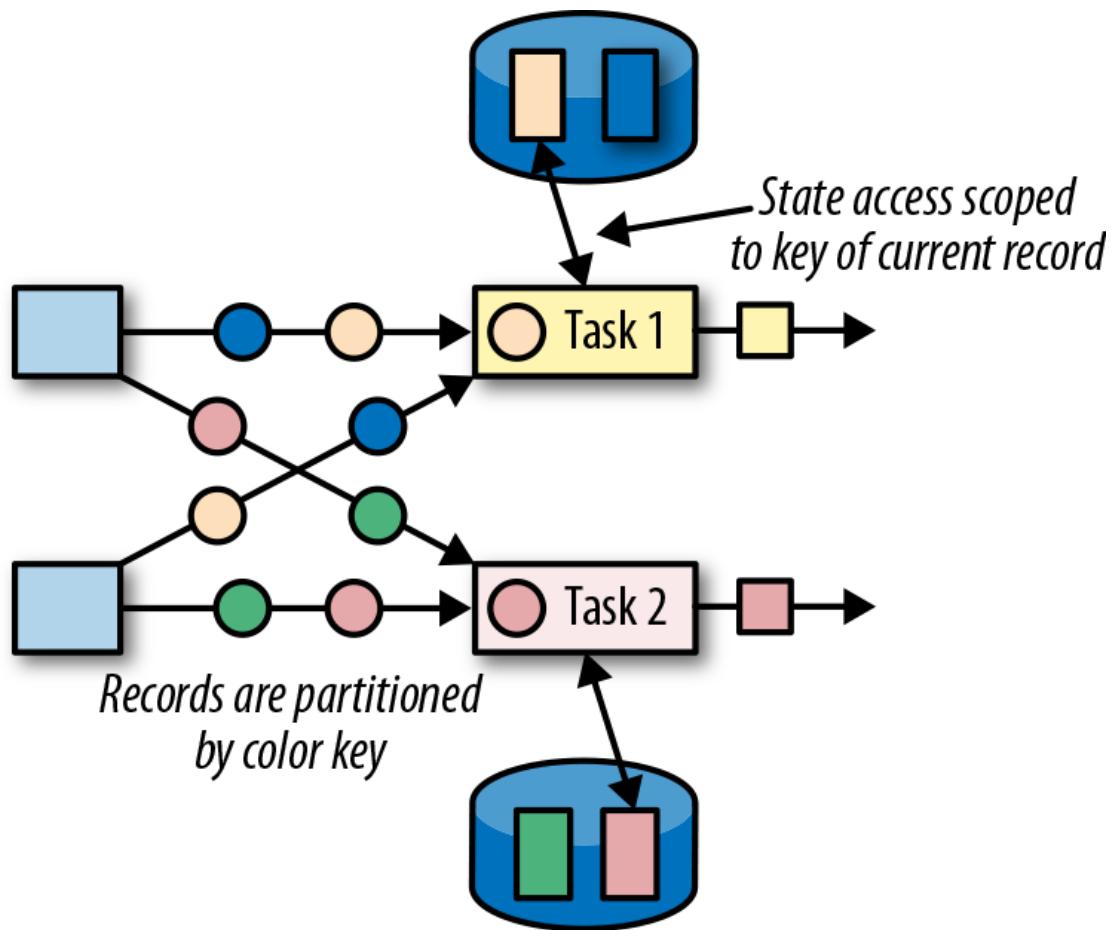
**联合列表状态（Union list state）** 也将状态表示为数据的列表。它与常规列表状态的区别在于，在发生故障时，或者从保存点（savepoint）启动应用程序时如何恢复。我们将在后面继续讨论。

**广播状态（Broadcast state）** 如果一个算子有多项任务，而它的每项任务状态又都相同，那么这种特殊情况最适合应用广播状态。在保存检查点和重新调整算子并行度时，会用到这个特性。这两部分内容将在本章后面讨论。

### 键控状态（Keyed State）

顾名思义，键控状态是根据输入数据流中定义的键（key）来维护和访问的。Flink 为每个键值维护一个状态实例，并将具有相同键的所有数据，都分区到同一个算子任务中，这个任务会维护和处理这个 key 对应的状态。当任务处理一条数据时，它会自动将状态的访问范围限

定为当前数据的 key。因此，具有相同 key 的所有数据都会访问相同的状态。图 3-12 显示了任务如何与键控状态进行交互。



我们可以将键控状态看成是在算子所有并行任务上，对键进行分区（或分片）之后的一个键值映射（key-value map）。Flink 为键控状态提供不同的数据结构，用于确定 map 中每个 key 存储的值的类型。我们简单了解一下最常见的键控状态。

**值状态 (Value state)** 为每个键存储一个任意类型的单个值。复杂数据结构也可以存储为值状态。

**列表状态 (List state)** 为每个键存储一个值的列表。列表里的每个数据可以是任意类型。

**映射状态 (Map state)** 为每个键存储一个键值映射 (map)。map 的 key 和 value 可以是任意类型。

状态的数据结构可以让 Flink 实现更有效的状态访问。我们将在“在运行时上下文 (Runtime-Context) 中声明键控状态”中做进一步讨论。

## 状态后端（State Backends）

每传入一条数据，有状态的算子任务都会读取和更新状态。由于有效的状态访问对于处理数据的低延迟至关重要，因此每个并行任务都会在本地维护其状态，以确保快速的状态访问。状态到底是如何被存储、访问以及维护的？这件事由一个可插入的组件决定，这个组件就叫做状态后端（state backend）。状态后端主要负责两件事：本地的状态管理，以及将检查点（checkpoint）状态写入远程存储。

对于本地状态管理，状态后端会存储所有键控状态，并确保所有的访问都被正确地限定在当前键范围。Flink 提供了默认的状态后端，会将键控状态作为内存中的对象进行管理，将它们存储在 JVM 堆上。另一种状态后端则会把状态对象进行序列化，并将它们放入 RocksDB 中，然后写入本地硬盘。第一种方式可以提供非常快速的状态访问，但它受内存大小的限制；而访问 RocksDB 状态后端存储的状态速度会较慢，但其状态可以增长到非常大。

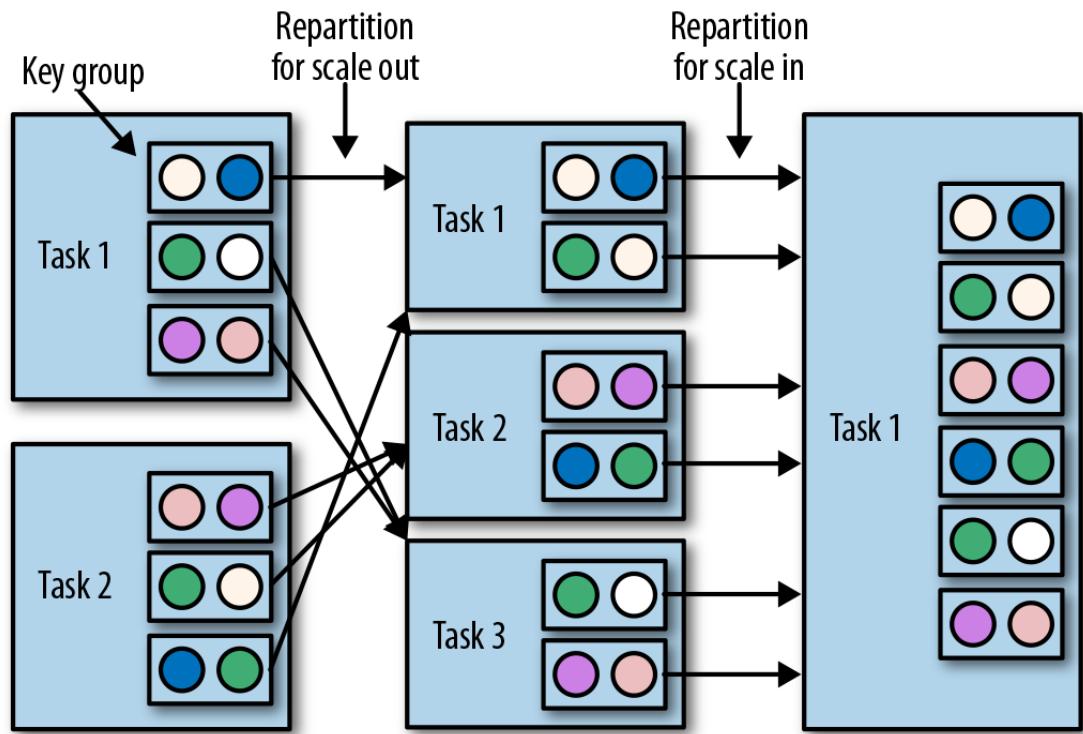
状态检查点的写入也非常重要，这是因为 Flink 是一个分布式系统，而状态只能在本地维护。TaskManager 进程（所有任务在其上运行）可能在任何时间点挂掉。因此，它的本地存储只能被认为是不稳定的。状态后端负责将任务的状态检查点写入远程的持久存储。写入检查点的远程存储可以是分布式文件系统，也可以是数据库。不同的状态后端在状态检查点的写入机制方面有所不同。例如，RocksDB 状态后端支持增量的检查点，这对于非常大的状态来说，可以显著减少状态检查点写入的开销。

我们将在“选择状态后端”一节中更详细地讨论不同的状态后端及其优缺点。

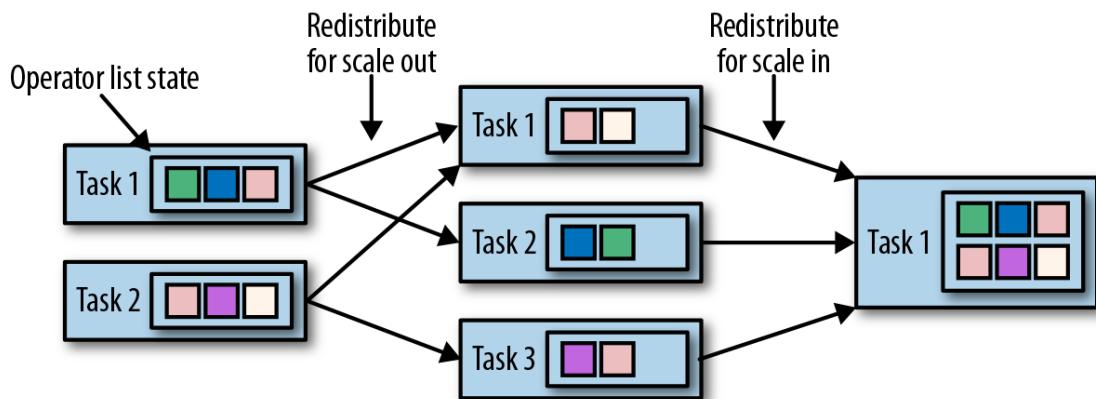
## 调整有状态算子的并行度

流应用程序的一个常见要求是，为了增大或较小输入数据的速率，需要灵活地调整算子的并行度。对于无状态算子而言，並行度的调整没有任何问题，但更改有状态算子的并行度显然就没那么简单了，因为它们的状态需要重新分区并分配给更多或更少的并行任务。Flink 支持四种模式来调整不同类型的状态。

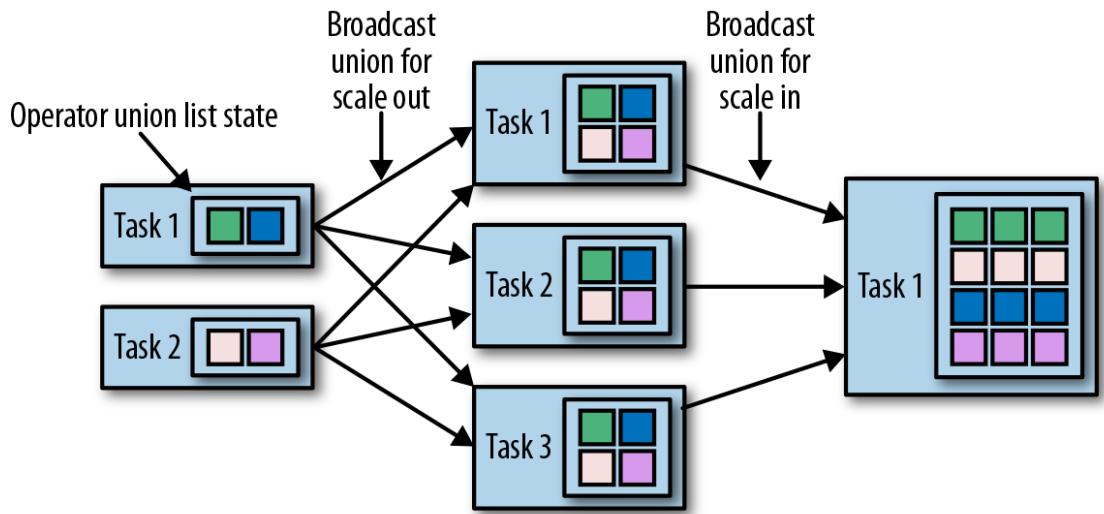
具有键控状态的算子通过将键重新分区为更少或更多任务来缩放并行度。不过，并行度调整时任务之间会有一些必要的状态转移。为了提高效率，Flink 并不会对单独的 key 做重新分配，而是用所谓的“键组”（key group）把键管理起来。键组是 key 的分区形式，同时也是 Flink 为任务分配 key 的方式。图 3-13 显示了如何在键组中重新分配键控状态。



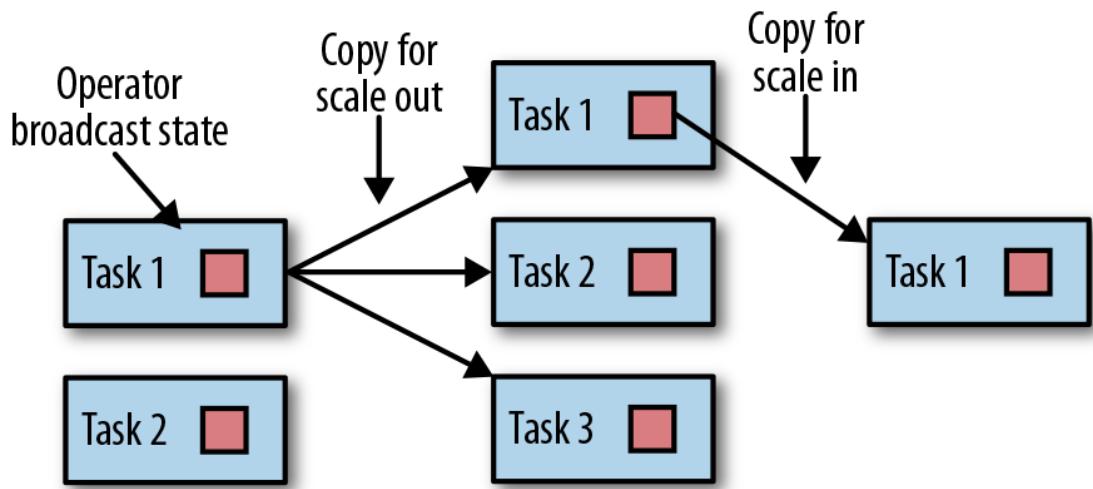
具有算子列表状态的算子，会通过重新分配列表中的数据项目来进行并行度缩放。从概念上讲，所有并行算子任务的列表项目会被收集起来，并将其均匀地重新分配给更少或更多的任务。如果列表条目少于算子的新并行度，则某些任务将以空状态开始。图 3-14 显示了算子列表状态的重新分配。



具有算子联合列表状态的算子，会通过向每个任务广播状态的完整列表，来进行并行度的缩放。然后，任务可以选择要使用的状态项和要丢弃的状态项。图 3-15 显示了如何重新分配算子联合列表状态。



具有算子广播状态的算子，通过将状态复制到新任务，来增大任务的并行度。这是没问题的，因为广播状态保证了所有任务都具有相同的状态。而对于缩小并行度的情况，我们可以直接取消剩余任务，因为状态是相同的，已经被复制并且不会丢失。图 3-16 显示了算子广播状态的重新分配。



## 检查点，保存点和状态恢复

Flink 是一个分布式数据处理系统，因此必须有一套机制处理各种故障，比如被杀掉的进程，故障的机器和中断的网络连接。任务都是在本地维护状态的，所以 Flink 必须确保状态不会丢失，并且在发生故障时能够保持一致。

在本节中，我们将介绍 Flink 的检查点 (checkpoint) 和恢复机制，这保证了“精确一次”(exactly-once) 的状态一致性。我们还会讨论 Flink 独特的保存点 (savepoint) 功能，这是一个“瑞士军刀”式的工具，可以解决许多操作数据流时面对的问题。

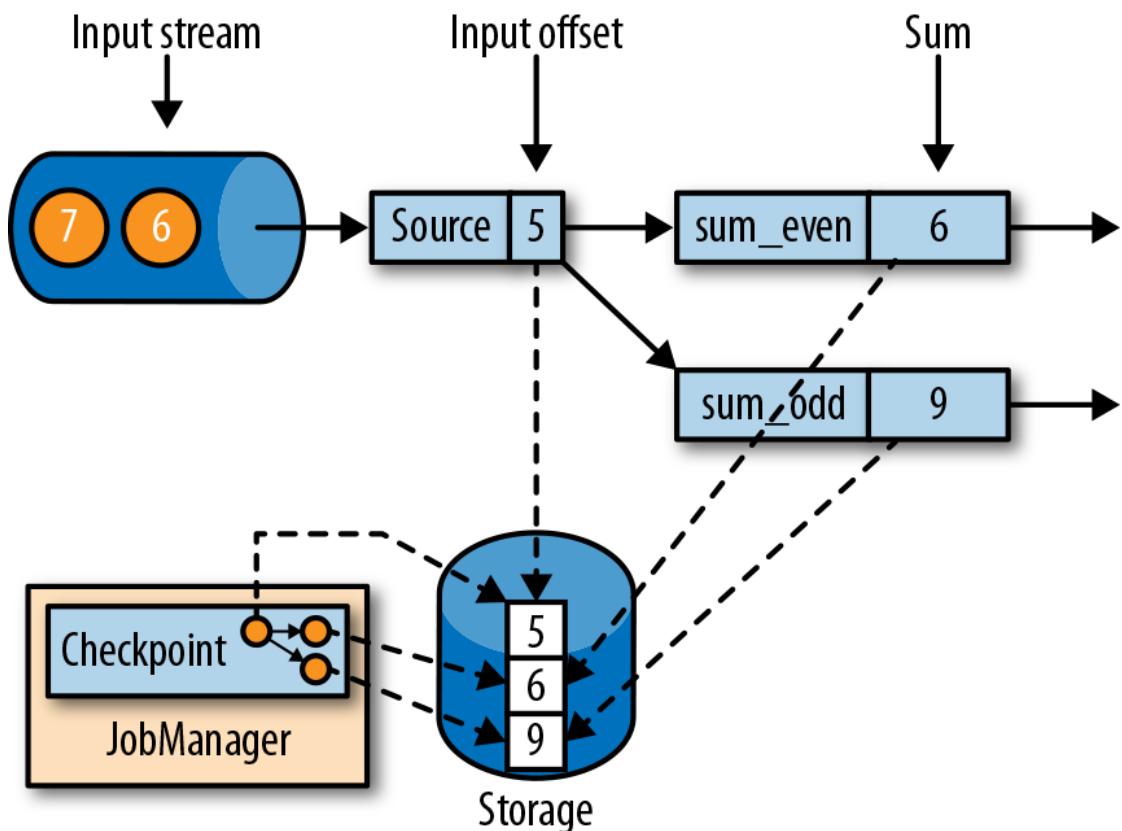
### 一致的检查点 (Checkpoints)

Flink 的恢复机制的核心，就是应用状态的一致检查点。有状态流应用的一致检查点，其实就是所有任务状态在某个时间点的一份拷贝，而这个时间点应该是所有任务都恰好处理完一个相同的输入数据的时候。这个过程可以通过一致检查点的一个简单算法步骤来解释。这个算法的步骤是：

- 暂停所有输入流的摄取，也就是不再接收新数据的输入。
- 等待所有正在处理的数据计算完毕，这意味着结束时，所有任务都已经处理了所有输入数据。
- 通过将每个任务的状态复制到远程持久存储，来得到一个检查点。所有任务完成拷贝操作后，检查点就完成了。
- 恢复所有输入流的摄取。

需要注意，Flink 实现的并不是这种简单的机制。我们将在本节后面介绍 Flink 更精妙的检查点算法。

图 3-17 显示了一个简单应用中的一致检查点。

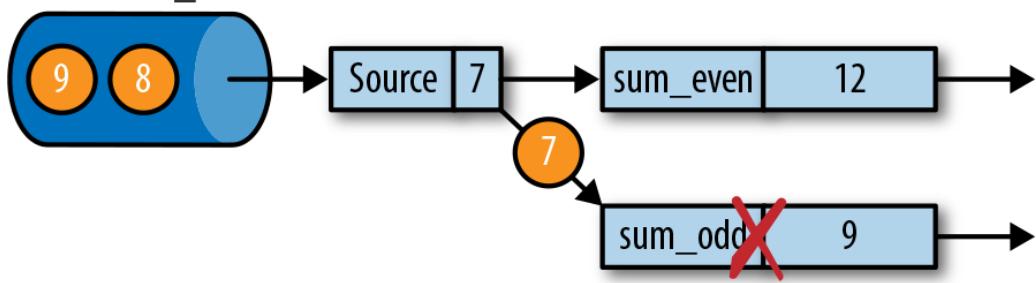


上面的应用程序中具有单一的输入源（source）任务，输入数据就是一组不断增长的数字的流——1,2,3 等。数字流被划分为偶数流和奇数流。求和算子（sum）的两个任务会分别实时计算当前所有偶数和奇数的总和。源任务会将其输入流的当前偏移量存储为状态，而求和任务则将当前的总和值存储为状态。在图 3-17 中，Flink 在输入偏移量为 5 时，将检查点写入了远程存储，当前的总和为 6 和 9。

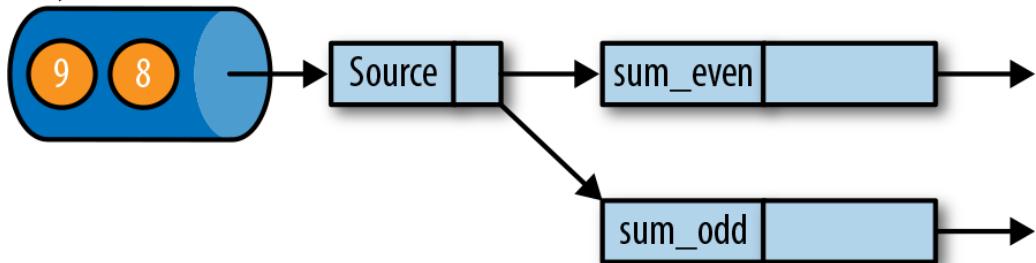
## 从一致检查点中恢复状态

在执行流应用程序期间，Flink 会定期检查状态的一致检查点。如果发生故障，Flink 将会使用最近的检查点来一致恢复应用程序的状态，并重新启动处理流程。图 3-18 显示了恢复过程。

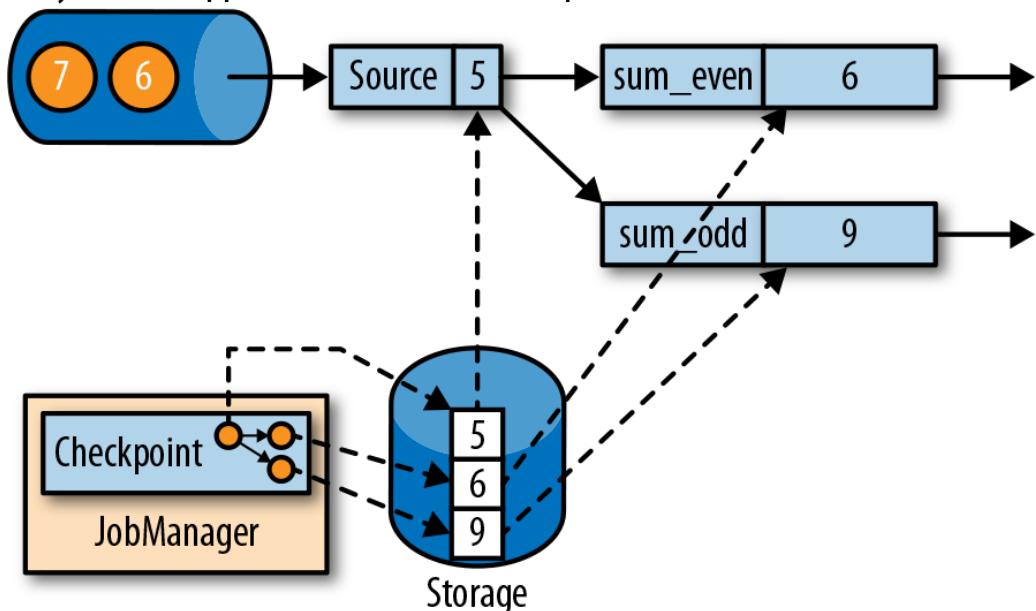
Failure: Task sum\_odd fails



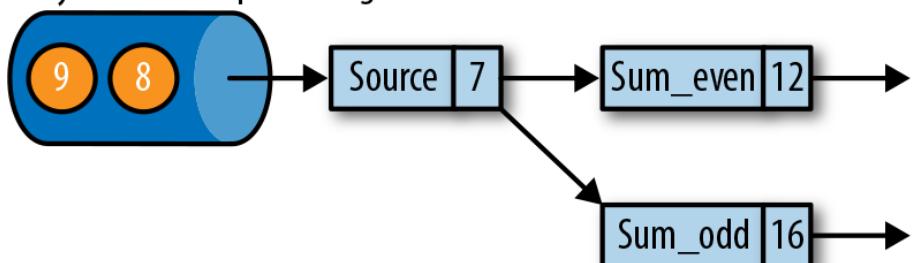
Recovery 1: Restart application



Recovery 2: Reset application state from Checkpoint



Recovery 3: Continue processing



应用程序从检查点的恢复分为三步：

- 重新启动整个应用程序。
- 将所有的有状态任务的状态重置为最近一次的检查点。
- 恢复所有任务的处理。

这种检查点的保存和恢复机制可以为应用程序状态提供“精确一次”（exactly-once）的一致性，因为所有算子都会保存检查点并恢复其所有状态，这样以来所有的输入流就都会被重置到检查点完成时的位置。至于数据源是否可以重置它的输入流，这取决于其实现方式和消费流数据的外部接口。例如，像 Apache Kafka 这样的事件日志系统可以提供流上之前偏移位置的数据，所以我们可以将源重置到之前的偏移量，重新消费数据。而从套接字（socket）消费数据的流就不能被重置了，因为套接字的数据一旦被消费就会丢弃掉。因此，对于应用程序而言，只有当所有的输入流消费的都是可重置的数据源时，才能确保在“精确一次”的状态一致性下运行。

从检查点重新启动应用程序后，其内部状态与检查点完成时的状态完全相同。然后它就会开始消费并处理检查点和发生故障之间的所有数据。尽管这意味着 Flink 会对一些数据处理两次（在故障之前和之后），我们仍然可以说这个机制实现了精确一次的一致性语义，因为所有算子的状态都已被重置，而重置后的状态下还不曾看到这些数据。

我们必须指出，Flink 的检查点保存和恢复机制仅仅可以重置流应用程序的内部状态。对于应用中的一些输出（sink）算子，在恢复期间，某些结果数据可能会多次发送到下游系统，比如事件日志、文件系统或数据库。对于某些存储系统，Flink 提供了具有精确一次输出功能的 sink 函数，比如，可以在检查点完成时提交发出的记录。另一种适用于许多存储系统的方法是幂等更新。在“应用程序一致性保证”一节中，我们还会详细讨论如何解决应用程序端到端的精确一次一致性问题。

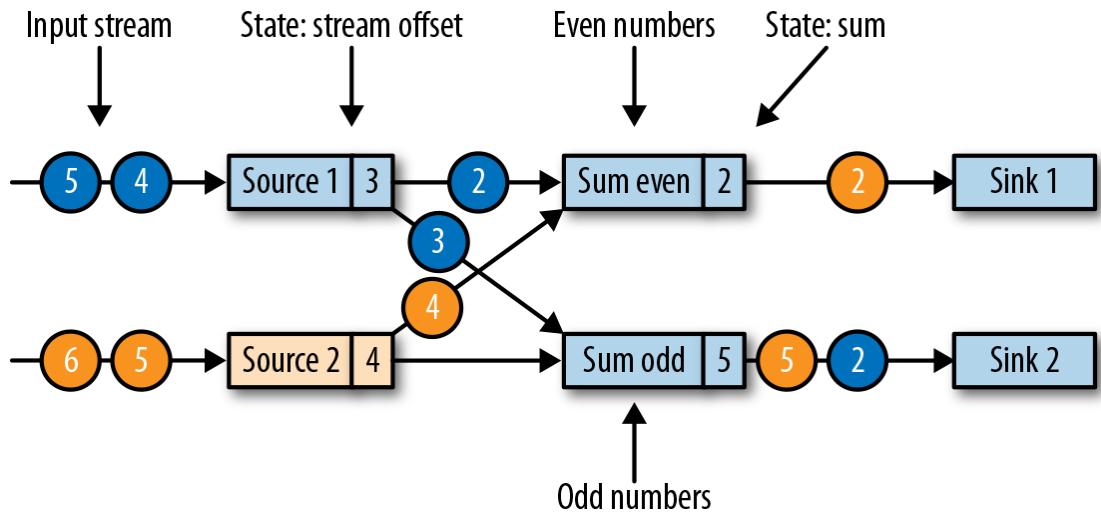
## Flink 的检查点算法

Flink 的恢复机制，基于它的一致性检查点。前面我们已经了解了从流应用中创建检查点的简单方法——先暂停应用，保存检查点，然后再恢复应用程序，这种方法很好理解，但它的理念是“停止一切”，这对于即使是中等延迟要求的应用程序而言也是不实用的。所以 Flink 没有这么简单粗暴，而是基于 Chandy-Lamport 算法实现了分布式快照的检查点保存。该算法并不会暂停整个应用程序，而是将检查点的保存与数据处理分离，这样就可以实现在其它任务做检查点状态保存状态时，让某些任务继续进行而不受影响。接下来我们将解释此算法的工作原理。

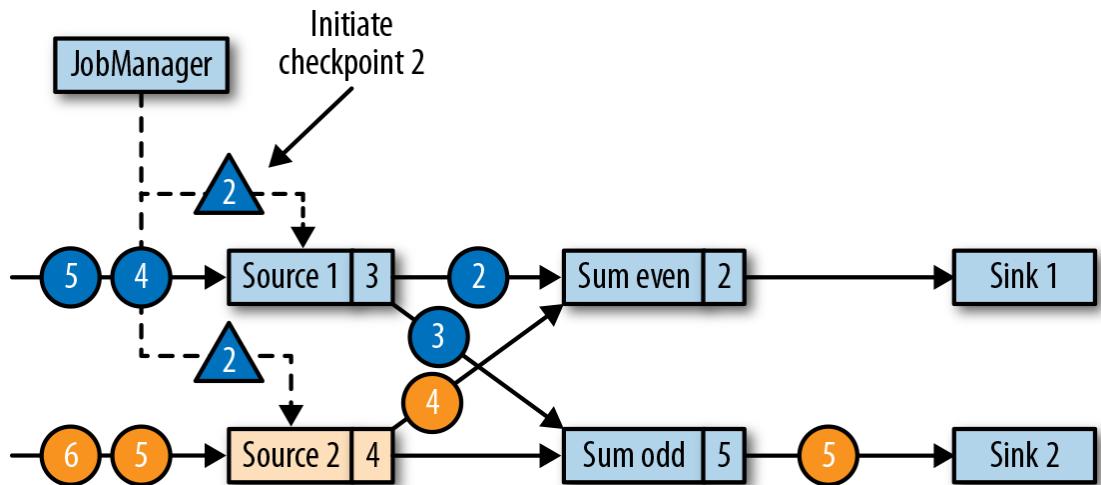
Flink 的检查点算法用到了一种称为“检查点分界线”（checkpoint barrier）的特殊数据形式。与水位线（watermark）类似，检查点分界线由 source 算子注入到常规的数据流中，它的位置是限定好的，不能超过其他数据，也不能被后面的数据超过。检查点分界线带有检查点 ID，用来标识它所属的检查点；这样，这个分界线就将一条流逻辑上分成了两部分。分界线之前到来的数据导致的状态更改，都会被包含在当前分界线所属的检查点中；而基于分界线之后的数据导致的所有更改，就会被包含在之后的检查点中。

我们用一个简单的流应用程序作为示例，来一步一步解释这个算法。该应用程序有两个源

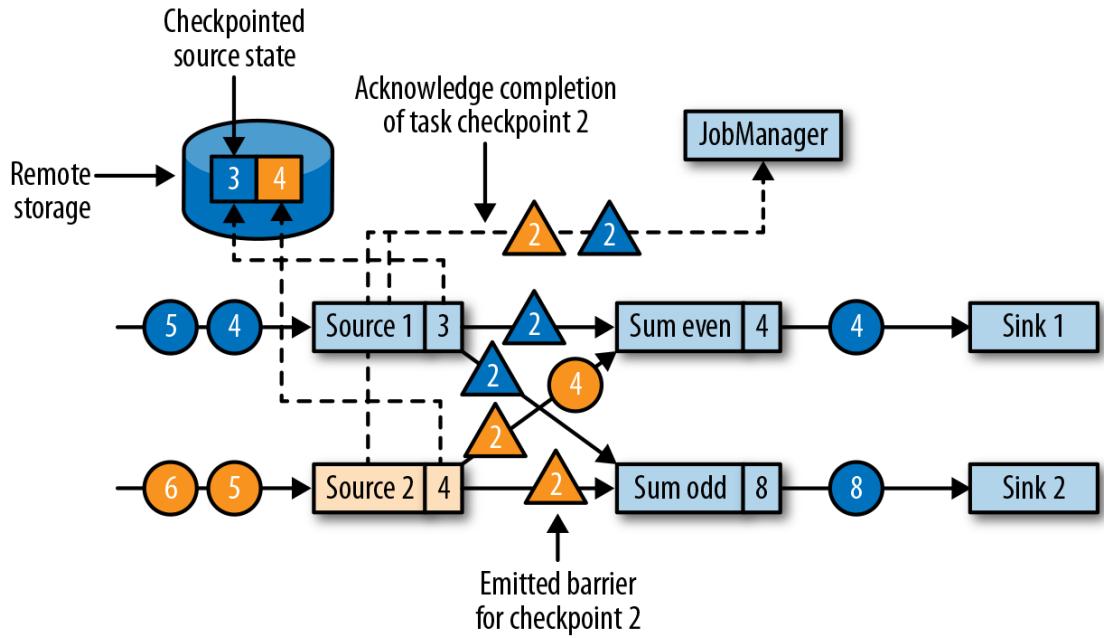
(source) 任务，每个任务都消费一个增长的数字流。源任务的输出被划分为两部分：偶数和奇数的流。每个分区由一个任务处理，该任务计算所有收到的数字的总和，并将更新的总和转发给输出（sink）任务。这个应用程序的结构如图 3-19 所示。



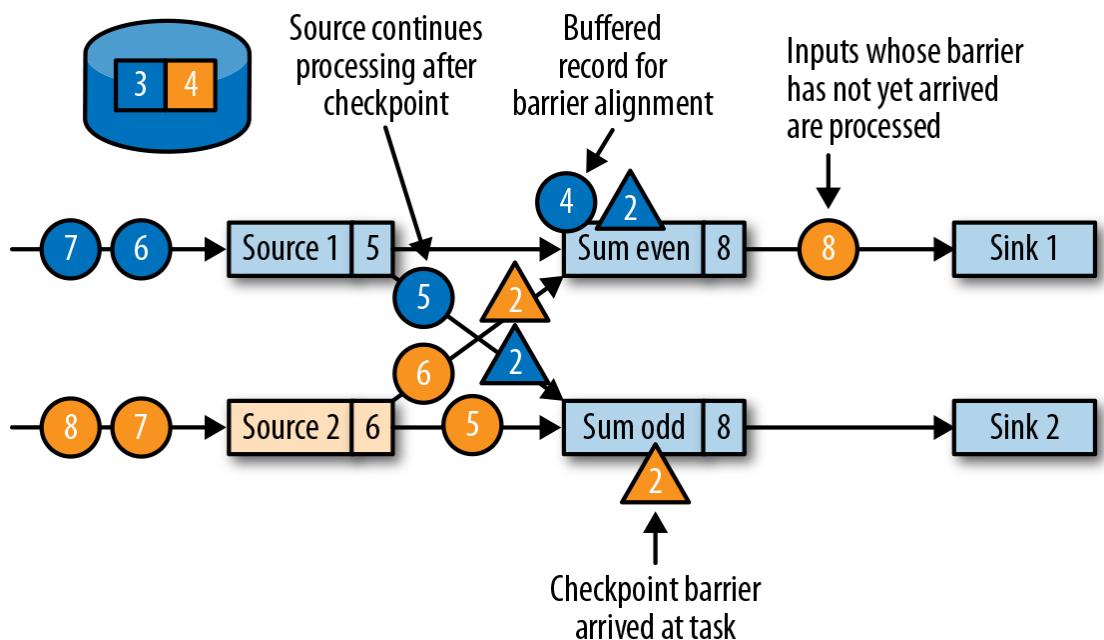
JobManager 会向每个数据源（source）任务发送一条带有新检查点 ID 的消息，通过这种方式来启动检查点，如图 3-20 所示。



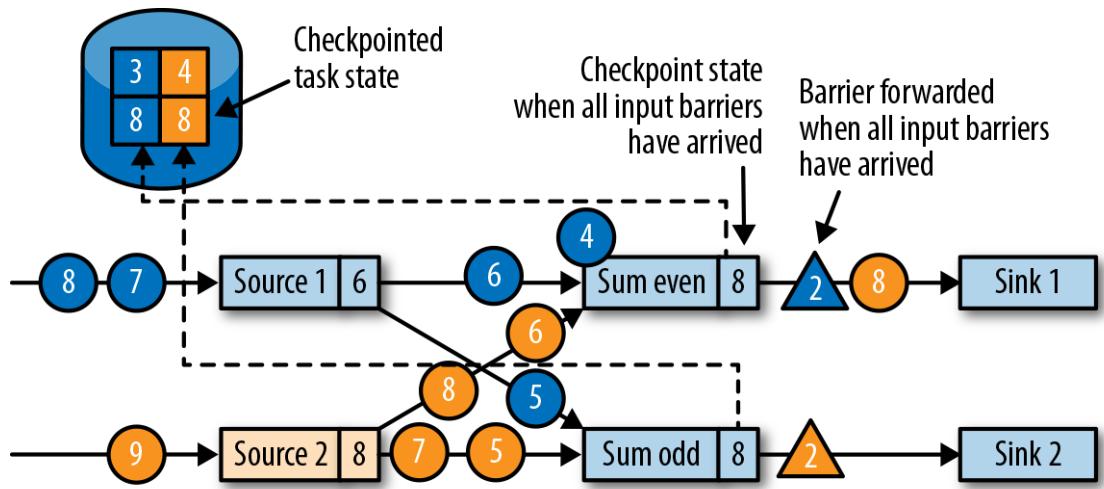
当 source 任务收到消息时，它会暂停发出新的数据，在状态后端触发本地状态的检查点保存，并向所有传出的流分区广播带着检查点 ID 的分界线（barriers）。状态后端在状态检查点完成后会通知任务，而任务会向 JobManager 确认检查点完成。在发出所有分界线后，source 任务就可以继续常规操作，发出新的数据了。通过将分界线注入到输出流中，源函数（source function）定义了检查点在流中所处的位置。图 3-21 显示了两个源任务将本地状态保存到检查点，并发出检查点分界线之后的流应用程序。



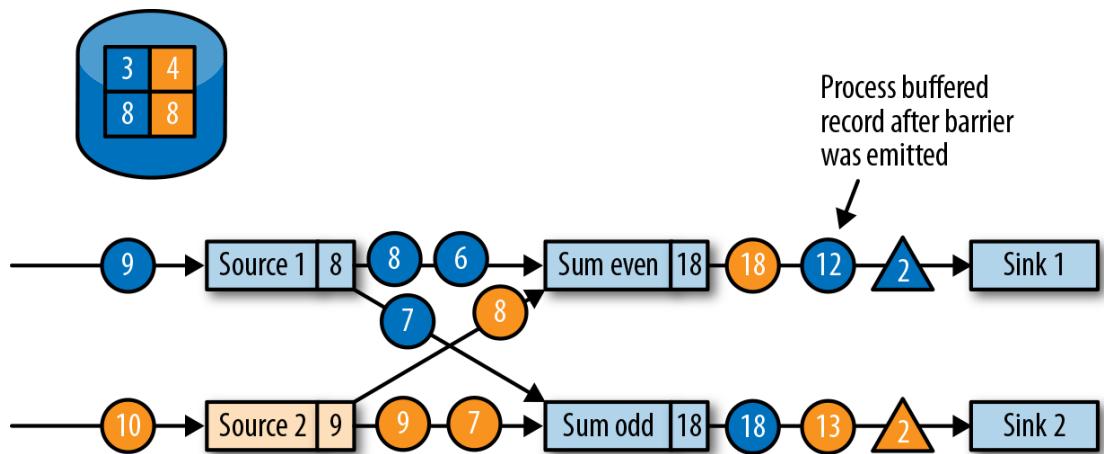
源任务发出的检查点分界线 (barrier)，将被传递给所连接的任务。与水位线 (watermark) 类似，barrier 会被广播到所有连接的并行任务，以确保每个任务从它的每个输入流中都能接收到。当任务收到一个新检查点的 barrier 时，它会等待这个检查点的所有输入分区的 barrier 到达。在等待的过程中，任务并不会闲着，而是会继续处理尚未提供 barrier 的流分区中的数据。对于那些 barrier 已经到达的分区，如果继续有新的数据到达，它们就不会被立即处理，而是先缓存起来。这个等待所有分界线到达的过程，称为“分界线对齐” (barrier alignment)，如图 3-22 所示。



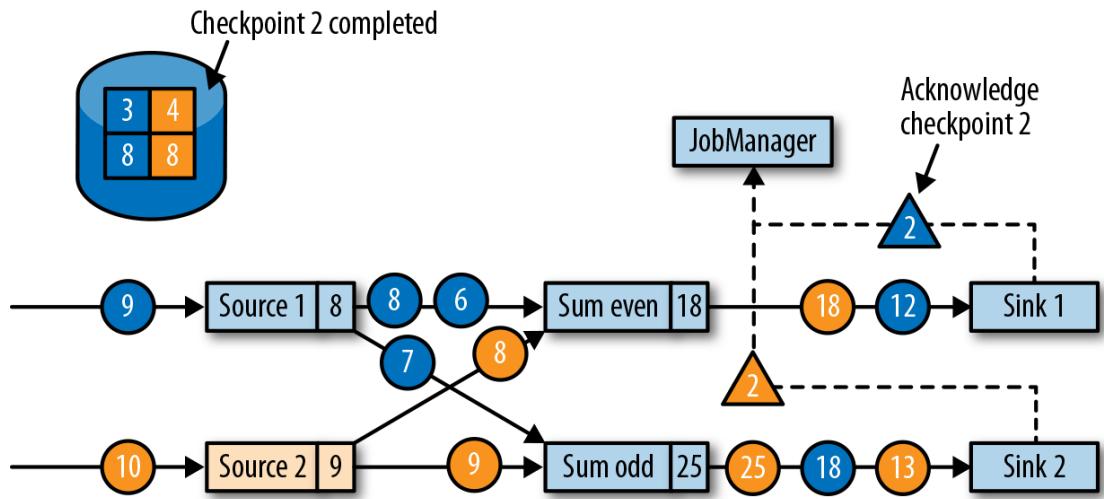
当任务从所有输入分区都收到 barrier 时，它就会在状态后端启动一个检查点的保存，并继续向所有下游连接的任务广播检查点分界线，如图 3-23 所示。



所有的检查点 barrier 都发出后，任务就开始处理之前缓冲的数据。在处理并发出所有缓冲数据之后，任务就可以继续正常处理输入流了。图 3-24 显示了此时的应用程序。



最终，检查点分界线会到达输出（sink）任务。当 sink 任务接收到 barrier 时，它也会先执行“分界线对齐”，然后将自己的状态保存到检查点，并向 JobManager 确认已接收到 barrier。一旦从应用程序的所有任务收到一个检查点的确认信息，JobManager 就会将这个检查点记录为已完成。图 3-25 显示了检查点算法的最后一步。这样，当发生故障时，我们就可以用已完成的检查点恢复应用程序了。



### 检查点的性能影响

Flink 的检查点算法可以在不停止整个应用程序的情况下，生成一致的分布式检查点。但是，它可能会增加应用程序的处理延迟。Flink 对此有一些调整措施，可以在某些场景下显得对性能的影响没那么大。

当任务将其状态保存到检查点时，它其实处于一个阻塞状态，而此时新的输入会被缓存起来。由于状态可能变得非常大，而且检查点需要通过网络将数据写入远程存储系统，检查点的写入很容易就会花费几秒到几分钟的时间——这对于要求低延迟的应用程序而言，显然是不可接受的。在 Flink 的设计中，真正负责执行检查点写入的，其实是状态后端。具体怎样复制任务的状态，取决于状态后端的实现方式。例如，文件系统（FileSystem）状态后端和 RocksDB 状态后端都支持了异步（asynchronous）检查点。触发检查点操作时，状态后端会先创建状态的本地副本。本地拷贝完成后，任务就将继续常规的数据处理，这往往并不会花费太多时间。一个后台线程会将本地快照异步复制到远程存储，并在完成检查点后再回来通知任务。异步检查点的机制，显著减少了任务继续处理数据之前的等待时间。此外，RocksDB 状态后端还实现了增量的检查点，这样可以大大减少要传输的数据量。

为了减少检查点算法对处理延迟的影响，另一种技术是调整分界线对齐的步骤。对于需要非常低的延迟、并且可以容忍“至少一次”（at-least-once）状态保证的应用程序，Flink 可以将检查点算法配置为，在等待 barrier 对齐期间处理所有到达的数据，而不是把 barrier 已经到达的那些分区的数据缓存起来。当检查点的所有 barrier 到达，算子任务就会将状态写入检查点——当然，现在的状态中，就可能包括了一些“提前”的更改，这些更改由本该属于下一个检查点的数据到来时触发。如果发生故障，从检查点恢复时，就将再次处理这些数据：这意味着检查点现在提供的是“至少一次”（at-least-once）而不是“精确一次”（exactly-once）的一致性保证。

### 保存点（Savepoints）

Flink 的恢复算法是基于状态检查点的。Flink 根据可配置的策略，定期保存并自动丢弃检查点。检查点的目的是确保在发生故障时可以重新启动应用程序，所以当应用程序被显式地撤

销 (cancel) 时, 检查点会被删除掉。除此之外, 应用程序状态的一致性快照还可用于除故障恢复之外的更多功能。

Flink 中一个最有价值, 也是最独特的功能是保存点 (savepoints)。原则上, 创建保存点使用的算法与检查点完全相同, 因此保存点可以认为就是具有一些额外元数据的检查点。Flink 不会自动创建保存点, 因此用户 (或者外部调度程序) 必须明确地触发创建操作。同样, Flink 也不会自动清理保存点。第 10 章将会具体介绍如何触发和处理保存点。

**使用保存点** 有了应用程序和与之兼容的保存点, 我们就可以从保存点启动应用程序了。这会将应用程序的状态初始化为保存点的状态, 并从保存点创建时的状态开始运行应用程序。虽然看起来这种行为似乎与用检查点从故障中恢复应用程序完全相同, 但实际上故障恢复只是一种特殊情况, 它只是在相同的集群上以相同的配置启动相同的应用程序。而从保存点启动应用程序会更加灵活, 这就可以让我们做更多事情了。

- 可以从保存点启动不同但兼容的应用程序。这样一来, 我们就可以及时修复应用程序中的逻辑 bug, 并让流式应用的源尽可能多地提供之前发生的事件, 然后重新处理, 以便修复之前的计算结果。修改后的应用程序还可用于运行 A/B 测试, 或者具有不同业务逻辑的假设场景。这里要注意, 应用程序和保存点必须兼容才可以这么做——也就是说, 应用程序必须能够加载保存点的状态。
- 可以使用不同的并行度来启动相同的应用程序, 可以将应用程序的并行度增大或减小。
- 可以在不同的集群上启动同样的应用程序。这非常有意义, 意味着我们可以将应用程序迁移到较新的 Flink 版本或不同的集群上去。
- 可以使用保存点暂停应用程序, 稍后再恢复。这样做的意义在于, 可以为更高优先级的应用程序释放集群资源, 或者在输入数据不连续生成时释放集群资源。
- 还可以将保存点设置为某一版本, 并归档 (archive) 存储应用程序的状态。

保存点是非常强大的功能, 所以许多用户会定期创建保存点以便能够及时退回之前的状态。我们见到的各种场景中, 保存点一个最有趣的应用是不断将流应用程序迁移到更便宜的数据中心上去。

**从保存点启动应用程序** 前面提到的保存点的所有用例, 都遵循相同的模式。那就是首先创建正在运行的应用程序的保存点, 然后在一个新启动的应用程序中用它来恢复状态。之前我们已经知道, 保存点的创建和检查点非常相似, 而接下来我们就将介绍对于一个从保存点启动的应用程序, Flink 如何初始化其状态。

应用程序由多个算子组成。每个算子可以定义一个或多个键控状态和算子状态。算子由一个或多个算子任务并行执行。因此, 一个典型的应用程序会包含多个状态, 这些状态分布在多个算子任务中, 这些任务可以运行在不同的 TaskManager 进程上。

图 3-26 显示了一个具有三个算子的应用程序, 每个算子执行两个算子任务。一个算子 (OP-1) 具有单一的算子状态 (OS-1), 而另一个算子 (OP-2) 具有两个键控状态 (KS-1 和 KS-2)。当保存点创建时, 会将所有任务的状态复制到持久化的存储位置。

保存点中的状态拷贝会以算子标识符 (operator ID) 和状态名称 (state name) 组织起来。算子 ID 和状态名称必须能够将保存点的状态数据, 映射到一个正在启动的应用程序的算子状

态。从保存点启动应用程序时，Flink 会将保存点的数据重新分配给相应的算子任务。

请注意，保存点不包含有关算子任务的信息。这是因为当应用程序以不同的并行度启动时，任务数量可能会更改。

如果我们要从保存点启动一个修改过的应用程序，那么保存点中的状态只能映射到符合标准的应用程序——它里面的算子必须具有相应的 ID 和状态名称。默认情况下，Flink 会自动分配唯一的算子 ID。然而，一个算子的 ID，是基于它之前算子的 ID 确定性地生成的。因此，算子的 ID 会在其前序算子改变时改变，比如，当我们添加了新的或移除掉一个算子时，前序算子 ID 改变，当前算子 ID 就会变化。所以对于具有默认算子 ID 的应用程序而言，如果想在不丢失状态的前提下升级，就会受到极大的限制。因此，我们强烈建议在程序中为算子手动分配唯一 ID，而不是依靠 Flink 的默认分配。我们将在“指定唯一的算子标识符”一节中详细说明如何分配算子标识符。

## 第四章，编写第一个 Flink 程序

### 在 IDEA 中编写 Flink 程序

本项目使用的 Flink 版本为最新版本，也就是 1.10.0。现在提供 maven 项目的配置文件。

1. 使用 IntelliJ IDEA 创建一个 Maven 新项目
2. 勾选 Create from archetype，然后点击 Add Archetype 按钮
3. GroupId 中输入 org.apache.flink，ArtifactId 中输入 flink-quickstart-scala，Version 中输入 1.10.0，然后点击 OK
4. 点击向右箭头，出现下拉列表，选中 flink-quickstart-scala:1.10.0，点击 Next
5. Name 中输入 FlinkTutorial，GroupId 中输入 com.atguigu，ArtifactId 中输入 FlinkTutorial，点击 Next
6. 最好使用 IDEA 默认的 Maven 工具：Bundled (Maven 3)，点击 Finish，等待一会儿，项目就创建好了

编写 WordCount.scala 程序

```
1 package com.atguigu
2
3 import org.apache.flink.streaming.api.scala._
4 import org.apache.flink.streaming.api.windowing.time.Time
5
6 object StreamingJob {
7
8     /** Main program method */
9     def main(args: Array[String]): Unit = {
10
11         // get the execution environment
```

```
12     val env: StreamExecutionEnvironment = StreamExecutionEnvironment
13         .getExecutionEnvironment
14
15     // get input data by connecting to the socket
16     val text: DataStream[String] = env
17         .socketTextStream("localhost", 9999, '\n')
18
19     // parse the data, group it, window it, and aggregate the counts
20     val windowCounts = text
21         .flatMap { w => w.split("\\s") }
22         .map { w => WordWithCount(w, 1) }
23         .keyBy("word")
24         .timeWindow(Time.seconds(5))
25         .sum("count")
26
27     // print the results with a single thread, rather than in parallel
28     windowCounts
29         .print()
30         .setParallelism(1)
31
32     env.execute("Socket Window WordCount")
33 }
34
35 /**
36  * Data type for words with count */
37 case class WordWithCount(word: String, count: Long)
}
```

打开一个终端 (Terminal)，运行以下命令

```
$ nc -lk 9999
```

接下来使用 IDEA 运行就可以了。

## 下载 Flink 运行时环境，提交 Jar 包的运行方式

下载链接：[http://mirror.bit.edu.cn/apache/flink/flink-1.10.1/flink-1.10.1-bin-scala\\_2.11.tgz](http://mirror.bit.edu.cn/apache/flink/flink-1.10.1/flink-1.10.1-bin-scala_2.11.tgz)

然后解压

```
$ tar xvfz flink-1.10.0-bin-scala_2.11.tgz
```

启动 Flink 集群

```
$ cd flink-1.10.0
$ ./bin/start-cluster.sh
```

可以打开 Flink WebUI 查看集群状态: <http://localhost:8081>

在 IDEA 中使用 maven package 打包。

提交打包好的 JAR 包

```
$ cd flink-1.10.0  
$ ./bin/flink run 打包好的 JAR 包的绝对路径
```

停止 Flink 集群

```
$ ./bin/stop-cluster.sh
```

查看标准输出日志的位置，在 log 文件夹中。

```
$ cd flink-1.10.0/log
```

## 第五章，Flink DataStream API

本章介绍了 Flink DataStream API 的基本知识。我们展示了典型的 Flink 流处理程序的结构和组成部分，还讨论了 Flink 的类型系统以及支持的数据类型，还展示了数据和分区转换操作。窗口操作符，基于时间语义的转换操作，有状态的操作符，以及和外部系统的连接器将在接下来的章节进行介绍。阅读完这一章后，我们将会知道如何去实现一个具有基本功能的流处理程序。我们的示例程序采用 Scala 语言，因为 Scala 语言相对比较简洁。但 Java API 也是十分类似的（特殊情况，我们将会指出）。在我们的 Github 仓库里，我们所写的应用程序具有 Scala 和 Java 两种版本。

### 你好，Flink！

让我们写一个简单的例子来获得使用 DataStream API 编写流处理应用程序的粗浅印象。我们将使用这个简单的示例来展示一个 Flink 程序的基本结构，以及介绍一些 DataStream API 的重要特性。我们的示例程序摄取了一条（来自多个传感器的）温度测量数据流。

首先让我们看一下表示传感器读数的数据结构：

```
case class SensorReading(  
    id: String,  
    timestamp: Long,  
    temperature: Double)
```

示例程序 5-1 将温度从华氏温度读数转换成摄氏温度读数，然后针对每一个传感器，每 5 秒钟计算一次平均温度。

```
1 // Scala object that defines  
2 // the DataStream program in the main() method.  
3 object AverageSensorReadings {
```

```
4  // main() defines and executes the DataStream program
5  def main(args: Array[String]) {
6      // set up the streaming execution environment
7      val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
8      // use event time for the application
9      env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)
10     // create a DataStream[SensorReading] from a stream source
11     val sensorData: DataStream[SensorReading] = env
12         // ingest sensor readings with a SensorSource SourceFunction
13         .addSource(new SensorSource)
14         // assign timestamps and watermarks (required for event time)
15     val avgTemp: DataStream[SensorReading] = sensorData
16         // convert Fahrenheit to Celsius with an inline lambda function
17         .map( r => {
18             val celsius = (r.temperature - 32) * (5.0 / 9.0)
19             SensorReading(r.id, r.timestamp, celsius)
20         })
21         // organize readings by sensor id
22         .keyBy(_.id)
23         // group readings in 5 second tumbling windows
24         .timeWindow(Time.seconds(5))
25         // compute average temperature using a user-defined function
26         .apply(new TemperatureAverager)
27         // print result stream to standard out
28         avgTemp.print()
29         // execute application
30         env.execute("Compute average sensor temperature")
31     }
32 }
```

你可能已经注意到 Flink 程序的定义和提交执行使用的就是正常的 Scala 或者 Java 的方法。大多数情况下，这些代码都写在一个静态 main 方法中。在我们的例子中，我们定义了 AverageSensorReadings 对象，然后将大多数的应用程序逻辑放在了 main() 中。

Flink 流处理程序的结构如下：

1. 创建 Flink 程序执行环境。
2. 从数据源读取一条或者多条流数据
3. 使用流转换算子实现业务逻辑
4. 将计算结果输出到一个或者多个外部设备（可选）
5. 执行程序

接下来我们详细的学习一下这些部分。

## 搭建执行环境

编写 Flink 程序的第一件事情就是搭建执行环境。执行环境决定了程序是运行在单机上还是集群上。在 DataStream API 中，程序的执行环境是由 StreamExecutionEnvironment 设置的。在我们的例子中，我们通过调用静态 getExecutionEnvironment() 方法来获取执行环境。这个方法根据调用方法的上下文，返回一个本地的或者远程的环境。如果这个方法是一个客户端提交到远程集群的代码调用的，那么这个方法将会返回一个远程的执行环境。否则，将返回本地执行环境。

也可以用下面的方法来显式的创建本地或者远程执行环境：

```
// create a local stream execution environment
val localEnv = StreamExecutionEnvironment
    .createLocalEnvironment()

// create a remote stream execution environment
val remoteEnv = StreamExecutionEnvironment
    .createRemoteEnvironment(
        "host", // hostname of JobManager
        1234, // port of JobManager process
        "path/to/jarFile.jar"
    ) // JAR file to ship to the JobManager
```

接下来，我们使用 env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime) 来将我们程序的时间语义设置为事件时间。执行环境提供了很多配置选项，例如：设置程序的并行度和程序是否开启容错机制。

## 读取输入流

一旦执行环境设置好，就该写业务逻辑了。StreamExecutionEnvironment 提供了创建数据源的方法，这些方法可以从数据流中将数据摄取到程序中。数据流可以来自消息队列或者文件系统，也可能是实时产生的（例如 socket）。

在我们的例子里面，我们这样写：

```
val sensorData: DataStream[SensorReading] = env
    .addSource(new SensorSource)
```

这样就可以连接到传感器测量数据的数据源并创建一个类型为 SensorReading 的 DataStream 了。Flink 支持很多数据类型，我们将在接下来的章节里面讲解。在我们的例子里面，我们的数据类型是一个定义好的 Scala 样例类。SensorReading 样例类包含了传感器 ID，数据的测量时间戳，以及测量温度值。assignTimestampsAndWatermarks(new SensorTimeAssigner) 方法指定了如何设置事件时间语义的时间戳和水位线。有关 SensorTimeAssigner 我们后面再讲。

## 转换算子的使用

一旦我们有一条 DataStream，我们就可以在这条数据流上面使用转换算子了。转换算子有很多种。一些转换算子可以产生一条新的 DataStream，当然这个 DataStream 的类型可能是新类型。还有一些转换算子不会改变原有 DataStream 的数据，但会将数据流分区或者分组。业务逻辑就是由转换算子串起来组合而成的。

在我们的例子中，我们首先使用 `map()` 转换算子将传感器的温度值转换成了摄氏温度单位。然后，我们使用 `keyBy()` 转换算子将传感器读数流按照传感器 ID 进行分区。接下来，我们定义了一个 `timeWindow()` 转换算子，这个算子将每个传感器 ID 所对应的分区的传感器读数分配到了 5 秒钟的滚动窗口中。

```
val avgTemp: DataStream[SensorReading] = sensorData
  .map(r => {
    val celsius = (r.temperature - 32) * (5.0 / 9.0)
    SensorReading(r.id, r.timestamp, celsius)
  })
  .keyBy(_.id)
  .timeWindow(Time.seconds(5))
  .apply(new TemperatureAverager)
```

窗口转换算子将在“窗口操作符”一章中讲解。最后，我们使用了一个 UDF 函数来计算每个窗口的温度的平均值。我们稍后将会讨论 UDF 函数的实现。

## 输出结果

流处理程序经常将它们的计算结果发送到一些外部系统中去，例如：Apache Kafka，文件系统，或者数据库中。Flink 提供了一个维护的很好的 sink 算子的集合，这些 sink 算子可以用来将数据写入到不同的系统中去。我们也可以实现自己的 sink 算子。也有一些 Flink 程序并不会向第三方外部系统发送数据，而是将数据存储到 Flink 系统内部，然后可以使用 Flink 的可查询状态的特性来查询数据。

在我们的例子中，计算结果是一个 `DataStream[SensorReading]` 数据记录。每一条数据记录包含了一个传感器在 5 秒钟的周期里面的平均温度。计算结果组成的数据流将会调用 `print()` 将计算结果写到标准输出。

```
avgTemp.print()
```

要注意一点，流的 Sink 算子的选择将会影响应用程序端到端 (end-to-end) 的一致性，具体就是应用程序的计算提供的到底是 `at-least-once` 还是 `exactly-once` 的一致性语义。应用程序端到端的一致性依赖于所选择的流的 Sink 算子和 Flink 的检查点算法的集成使用。

## 执行

当应用程序完全写好时，我们可以调用 `StreamExecutionEnvironment.execute()` 来执行应用程序。在我们的例子中就是我们的最后一行调用：

```
env.execute("Compute average sensor temperature")
```

Flink 程序是惰性执行的。也就是说创建数据源和转换算子的 API 调用并不会立刻触发任何数据处理逻辑。API 调用仅仅是在执行环境中构建了一个执行计划，这个执行计划包含了执行环境创建的数据源和所有的将要用在数据源上的转换算子。只有当 `execute()` 被调用时，系统才会触发程序的执行。

构建好的执行计划将被翻译成一个 `JobGraph` 并提交到 `JobManager` 上面去执行。根据执行环境的种类，一个 `JobManager` 将会运行在一个本地线程中（如果是本地执行环境的话）或者 `JobGraph` 将会被发送到一个远程的 `JobManager` 上面去。如果 `JobManager` 远程运行，那么 `JobGraph` 必须和一个包含有所有类和应用程序的依赖的 JAR 包一起发送到远程 `JobManager`。

## 产生传感器读数代码编写

### 从批读取数据

```
val stream = env
    .fromCollection(List(
        SensorReading("sensor_1", 1547718199, 35.80018327300259),
        SensorReading("sensor_6", 1547718199, 15.402984393403084),
        SensorReading("sensor_7", 1547718199, 6.720945201171228),
        SensorReading("sensor_10", 1547718199, 38.101067604893444)
    ))
```

### 从文件读取数据

```
val stream = env.readTextFile(filePath)
```

### 以 Kafka 消息队列的数据为数据来源

```
val properties = new Properties()
properties.setProperty("bootstrap.servers", "localhost:9092")
properties.setProperty("group.id", "consumer-group")
properties.setProperty(
    "key.deserializer",
    "org.apache.kafka.common.serialization.StringDeserializer"
)
```

```
properties.setProperty(
    "value.deserializer",
    "org.apache.kafka.common.serialization.StringDeserializer"
)
properties.setProperty("auto.offset.reset", "latest")
val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)
env.setParallelism(1)
val stream = env
// source 为来自 Kafka 的数据，这里我们实例化一个消费者，topic 为 hotitems
.addSource(
    new FlinkKafkaConsumer[String](
        "hotitems",
        new SimpleStringSchema(),
        properties
    )
)
```

注意，Kafka 的版本为 2.2。

## 自定义数据源

```
1 import java.util.Calendar
2
3 import org.apache.flink.streaming.api.functions.source.RichParallelSourceFunction
4 import org.apache.flink.streaming.api.functions.source.SourceFunction.SourceContext
5
6 import scala.util.Random
7
8 // 传感器 id, 时间戳, 温度
9 case class SensorReading(id: String, timestamp: Long, temperature: Double)
10
11 // 需要 extends RichParallelSourceFunction, 泛型为 SensorReading
12 class SensorSource
13     extends RichParallelSourceFunction[SensorReading] {
14
15     // flag indicating whether source is still running.
16     // flag: 表示数据源是否还在正常运行
17     var running: Boolean = true
18
19     // run() 函数连续的发送 SensorReading 数据, 使用 SourceContext
```

```
20 // 需要 override
21 override def run(srcCtx: SourceContext[SensorReading]): Unit = {
22
23     // initialize random number generator
24     // 初始化随机数发生器
25     val rand = new Random()
26     // look up index of this parallel task
27     // 查找当前运行时上下文的任务的索引
28     val taskIdx = this.getRuntimeContext.getIndexOfThisSubtask
29
30     // initialize sensor ids and temperatures
31     // 初始化 10 个 (温度传感器的 id, 温度值) 元组
32     var curFTemp = (1 to 10).map {
33         // nextGaussian 产生高斯随机数
34         i => ("sensor_" + (taskIdx * 10 + i), 65 + (rand.nextGaussian() * 20))
35     }
36
37     // emit data until being canceled
38     // 无限循环，产生数据流
39     while (running) {
40
41         // update temperature
42         // 更新温度
43         curFTemp = curFTemp.map(t => (t._1, t._2 + (rand.nextGaussian() * 0.5)))
44         // get current time
45         // 获取当前时间戳
46         val curTime = Calendar.getInstance.getTimeInMillis
47
48         // emit new SensorReading
49         // 发射新的传感器数据，注意这里 srcCtx.collect
50         curFTemp.foreach(t => srcCtx.collect(SensorReading(t._1, curTime, t._2)))
51
52         // wait for 100 ms
53         Thread.sleep(100)
54     }
55 }
56
57 // override cancel 函数
58 override def cancel(): Unit = {
59     running = false
60 }
61 }
```

62

63 }

## 使用方法

```
// ingest sensor stream
val sensorData: DataStream[SensorReading] = env
    // SensorSource generates random temperature readings
    .addSource(new SensorSource)
```

注意，在我们本教程中，我们一直会使用这个自定义的数据源。

## 转换算子

在这一小节我们将大概看一下 DataStream API 的基本转换算子。与时间有关的操作符（例如窗口操作符和其他特殊的转换算子）将会在后面的章节叙述。一个流的转换操作将会应用在一个或者多个流上面，这些转换操作将流转换成一个或者多个输出流。编写一个 DataStream API 简单来说就是将这些转换算子组合在一起构建一个数据流图，这个数据流图就实现了我们的业务逻辑。

大部分的流转换操作都基于用户自定义函数 UDF。UDF 函数打包了一些业务逻辑并定义了输入流的元素如何转换成输出流的元素。像 `MapFunction` 这样的函数，将会被定义为类，这个类实现了 Flink 针对特定的转换操作暴露出来的接口。

```
class MyMapFunction extends MapFunction[Int, Int] {
    override def map(value: Int): Int = value + 1
}
```

函数接口定义了需要由用户实现的转换方法，例如上面例子中的 `map()` 方法。

大部分函数接口被设计为 `Single Abstract Method`（单独抽象方法）接口，并且接口可以使用 Java 8 匿名函数来实现。Scala DataStream API 也内置了对匿名函数的支持。当讲解 DataStream API 的转换算子时，我们展示了针对所有函数类的接口，但为了简洁，大部分接口的实现使用匿名函数而不是函数类的方式。

DataStream API 针对大多数数据转换操作提供了转换算子。如果你很熟悉批处理 API、函数式编程语言或者 SQL，那么你将会发现这些 API 很容易学习。我们会将 DataStream API 的转换算子分成四类：

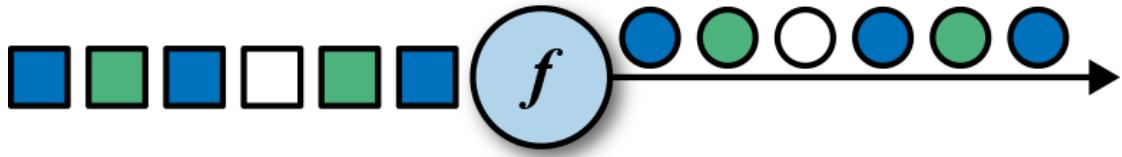
- 基本转换算子：将会作用在数据流中的每一条单独的数据上。
- KeyedStream 转换算子：在数据有 key 的情况下，对数据应用转换算子。
- 多流转换算子：合并多条流为一条流或者将一条流分割为多条流。
- 分布式转换算子：将重新组织流里面的事件。

## 基本转换算子

基本转换算子会针对流中的每一个单独的事件做处理，也就是说每一个输入数据会产生一个输出数据。单值转换，数据的分割，数据的过滤，都是基本转换操作的典型例子。我们将解释这些算子的语义并提供示例代码。

### MAP

`map` 算子通过调用 `DataStream.map()` 来指定。`map` 算子的使用将会产生一条新的数据流。它会将每一个输入的事件传送到一个用户自定义的 mapper，这个 mapper 只返回一个输出事件，这个输出事件和输入事件的类型可能不一样。图 5-1 展示了一个 `map` 算子，这个 `map` 将每一个正方形转化成了圆形。



`MapFunction` 的类型与输入事件和输出事件的类型相关，可以通过实现 `MapFunction` 接口来定义。接口包含 `map()` 函数，这个函数将一个输入事件恰好转换为一个输出事件。

```
// T: the type of input elements
// O: the type of output elements
MapFunction[T, O]
> map(T): O
```

下面的代码实现了将 `SensorReading` 中的 `id` 字段抽取出来的功能。

```
val readings: DataStream[SensorReading] = ...
val sensorIds: DataStream[String] = readings.map(new MyMapFunction)

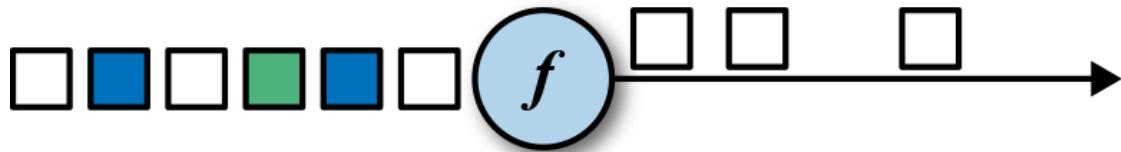
class MyMapFunction extends MapFunction[SensorReading, String] {
    override def map(r: SensorReading): String = r.id
}
```

当然我们更推荐匿名函数的写法。

```
val readings: DataStream[SensorReading] = ...
val sensorIds: DataStream[String] = readings.map(r => r.id)
```

### FILTER

`filter` 转换算子通过在每个输入事件上对一个布尔条件进行求值来过滤掉一些元素，然后将剩下的元素继续发送。一个 `true` 的求值结果将会把输入事件保留下并发送到输出，而如果求值结果为 `false`，则输入事件会被抛弃掉。我们通过调用 `DataStream.filter()` 来指定流的 `filter` 算子，`filter` 操作将产生一条新的流，其类型和输入流中的事件类型是一样的。图 5-2 展示了只产生白色方框的 `filter` 操作。



布尔条件可以使用函数、`FilterFunction` 接口或者匿名函数来实现。`FilterFunction` 中的泛型是输入事件的类型。定义的 `filter()` 方法会作用在每一个输入元素上面，并返回一个布尔值。

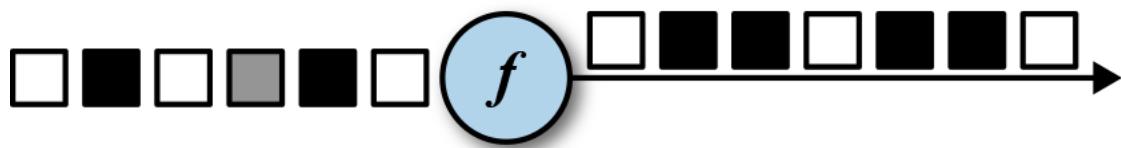
```
// T: the type of elements
FilterFunction[T]
> filter(T): Boolean
```

下面的例子展示了如何使用 `filter` 来从传感器数据中过滤掉温度值小于 25 华氏温度的读数。

```
val readings: DataStream[SensorReading] = ...
val filteredSensors = readings.filter(r => r.temperature >= 25)
```

#### FLATMAP

`flatMap` 算子和 `map` 算子很类似，不同之处在于针对每一个输入事件 `flatMap` 可以生成 0 个、1 个或者多个输出元素。事实上，`flatMap` 转换算子是 `filter` 和 `map` 的泛化。所以 `flatMap` 可以实现 `map` 和 `filter` 算子的功能。图 5-3 展示了 `flatMap` 如何根据输入事件的颜色来做不同的处理。如果输入事件是白色方框，则直接输出。输入元素是黑框，则复制输入。灰色方框会被过滤掉。



`flatMap` 算子将会应用在每一个输入事件上面。对应的 `FlatMapFunction` 定义了 `flatMap()` 方法，这个方法返回 0 个、1 个或者多个事件到一个 `Collector` 集合中，作为输出结果。

```
// T: the type of input elements
// O: the type of output elements
FlatMapFunction[T, O]
> flatMap(T, Collector[O]): Unit
```

下面的例子展示了在数据分析教程中经常用到的例子，我们用 `flatMap` 来实现。这个函数应用在一个语句流上面，将每个句子用空格切分，然后把切分出来的单词作为单独的事件发送出去。

```
val sentences: DataStream[String] = ...
val words: DataStream[String] = sentences
.flatMap(id => id.split(" "))
```

## 键控流转换算子

很多流处理程序的一个基本要求就是要能对数据进行分组，分组后的数据共享某一个相同的属性。DataStream API 提供了一个叫做 `KeyedStream` 的抽象，此抽象会从逻辑上对 DataStream 进行分区，分区后的数据拥有同样的 key 值，分区后的流互不相关。

针对 `KeyedStream` 的状态转换操作可以读取数据或者写入数据到当前事件 Key 所对应的状态中。这表明拥有同样 Key 的所有事件都可以访问同样的状态，也就是说所以这些事件可以一起处理。

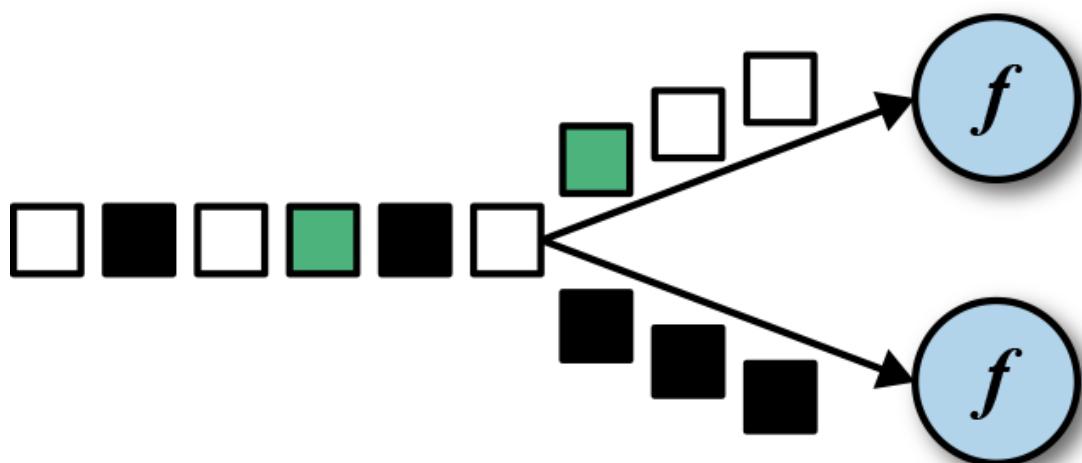
要小心使用状态转换操作和基于 Key 的聚合操作。如果 Key 的值越来越多，例如：Key 是订单 ID，我们必须及时清空 Key 所对应的状态，以免引起内存方面的问题。稍后我们会详细讲解。

`KeyedStream` 可以使用 `map`, `flatMap` 和 `filter` 算子来处理。接下来我们会使用 `keyBy` 算子来将 `DataStream` 转换成 `KeyedStream`，并讲解基于 key 的转换操作：滚动聚合和 `reduce` 算子。

### KEYBY

`keyBy` 通过指定 key 来将 `DataStream` 转换成 `KeyedStream`。基于不同的 key，流中的事件将被分配到不同的分区中去。所有具有相同 key 的事件将会在接下来的操作符的同一个子任务槽中进行处理。拥有不同 key 的事件可以在同一个任务中处理。但是算子只能访问当前事件的 key 所对应的状态。

如图 5-4 所示，把输入事件的颜色作为 key，黑色的事件输出到了一个分区，其他颜色输出到了另一个分区。



`keyBy()` 方法接收一个参数，这个参数指定了 key 或者 keys，有很多不同的方法来指定 key。我们将在后面讲解。下面的代码声明了 `id` 这个字段为 `SensorReading` 流的 key。

```
val readings: DataStream[SensorReading] = ...
val keyed: KeyedStream[SensorReading, String] = readings
    .keyBy(r => r.id)
```

匿名函数 `r => r.id` 抽取了传感器读数 SensorReading 的 id 值。

### 滚动聚合

滚动聚合算子由 `KeyedStream` 调用，并生成一个聚合以后的 `DataStream`，例如：`sum`, `minimum`, `maximum`。一个滚动聚合算子会为每一个观察到的 key 保存一个聚合的值。针对每一个输入事件，算子将会更新保存的聚合结果，并发送一个带有更新后的值的事件到下游算子。滚动聚合不需要用户自定义函数，但需要接受一个参数，这个参数指定了在哪个字段上面做聚合操作。`DataStream API` 提供了以下滚动聚合方法。

滚动聚合算子只能用在滚动窗口，不能用在滑动窗口。

- `sum()`: 在输入流上对指定的字段做滚动相加操作。
- `min()`: 在输入流上对指定的字段求最小值。
- `max()`: 在输入流上对指定的字段求最大值。
- `minBy()`: 在输入流上针对指定字段求最小值，并返回包含当前观察到的最小值的事件。
- `maxBy()`: 在输入流上针对指定字段求最大值，并返回包含当前观察到的最大值的事件。

滚动聚合算子无法组合起来使用，每次计算只能使用一个单独的滚动聚合算子。

下面的例子根据第一个字段来对类型为 `Tuple3[Int, Int, Int]` 的流做分流操作，然后针对第二个字段做滚动求和操作。

```
val inputStream: DataStream[(Int, Int, Int)] = env.fromElements(  
    (1, 2, 2), (2, 3, 1), (2, 2, 4), (1, 5, 3))  
  
val resultStream: DataStream[(Int, Int, Int)] = inputStream  
    .keyBy(0) // key on first field of the tuple  
    .sum(1)   // sum the second field of the tuple in place
```

在这个例子里面，输入流根据第一个字段来分流，然后在第二个字段上做计算。对于 key 1，输出结果是 (1,2,2),(1,7,2)。对于 key 2，输出结果是 (2,3,1),(2,5,1)。第一个字段是 key，第二个字段是求和的数值，第三个字段未定义。

滚动聚合操作会对每一个 key 都保存一个状态。因为状态从来不会被清空，所以我们在使用滚动聚合算子时只能使用在含有有限个 key 的流上面。

### REDUCE

`reduce` 算子是滚动聚合的泛化实现。它将一个 `ReduceFunction` 应用到了一个 `KeyedStream` 上面去。`reduce` 算子将会把每一个输入事件和当前已经 `reduce` 出来的值做聚合计算。`reduce` 操作不会改变流的事件类型。输出流数据类型和输入流数据类型是一样的。

`reduce` 函数可以通过实现接口 `ReduceFunction` 来创建一个类。`ReduceFunction` 接口定义了 `reduce()` 方法，此方法接收两个输入事件，输入一个相同类型的事件。

```
// T: the element type
ReduceFunction[T]
  > reduce(T, T): T
```

下面的例子，流根据语言这个 key 来分区，输出结果为针对每一种语言都实时更新的单词列表。

```
val inputStream: DataStream[(String, List[String])] = env.fromElements(
  ("en", List("tea")), ("fr", List("vin")), ("en", List("cake")))

val resultStream: DataStream[(String, List[String])] = inputStream
  .keyBy(0)
  .reduce((x, y) => (x._1, x._2 :: y._2))
```

reduce 匿名函数将连续两个 tuple 的第一个字段 (key 字段) 继续发送出去，然后将两个 tuple 的第二个字段 List[String] 连接。

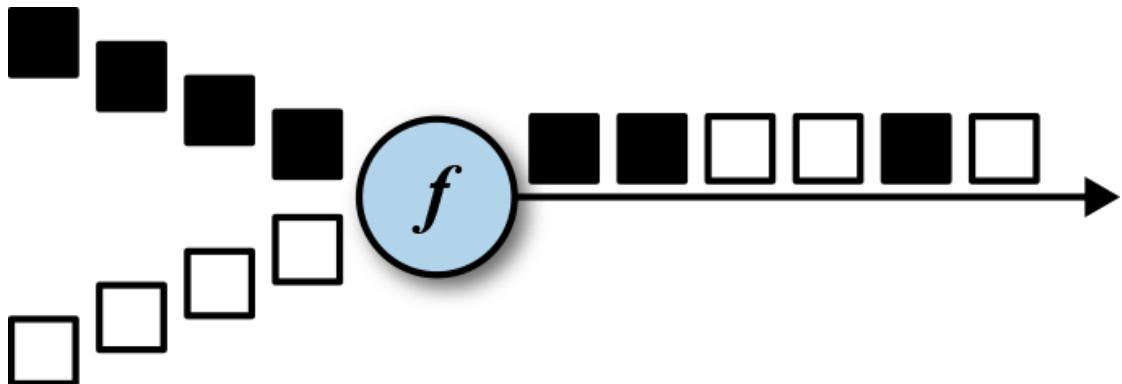
reduce 作为滚动聚合的泛化实现，同样也要针对每一个 key 保存状态。因为状态从来不会清空，所以我们需要将 reduce 算子应用在一个有限 key 的流上。

## 多流转换算子

许多应用需要摄入多个流并将流合并处理，还可能需要将一条流分割成多条流然后针对每一条流应用不同的业务逻辑。接下来，我们将讨论 DataStream API 中提供的能够处理多条输入流或者发送多条输出流的操作算子。

### UNION

DataStream.union() 方法将两条或多条 DataStream 合并成一条具有与输入流相同类型的输出 DataStream。接下来的转换算子将会处理输入流中的所有元素。图 5-5 展示了 union 操作符如何将黑色和白色的事件流合并成一个单一输出流。



事件合流的方式为 FIFO 方式。操作符并不会产生一个特定顺序的事件流。union 操作符也不会进行去重。每一个输入事件都被发送到了下一个操作符。

下面的例子展示了如何将三条类型为 SensorReading 的数据流合并成一条流。

```

val parisStream: DataStream[SensorReading] = ...
val tokyoStream: DataStream[SensorReading] = ...
val rioStream: DataStream[SensorReading] = ...
val allCities: DataStream[SensorReading] = parisStream
    .union(tokyoStream, rioStream)

```

### CONNECT, COMAP 和 COFLATMAP

联合两条流的事件是非常常见的流处理需求。例如监控一片森林然后发出高危的火警警报。报警的 Application 接收两条流，一条是温度传感器传回来的数据，一条是烟雾传感器传回来的数据。当两条流都超过各自的阈值时，报警。

DataStream API 提供了 `connect` 操作来支持以上的应用场景。`DataStream.connect()` 方法接收一条 `DataStream`，然后返回一个 `ConnectedStreams` 类型的对象，这个对象表示了两条连接的流。

```

// first stream
val first: DataStream[Int] = ...

// second stream
val second: DataStream[String] = ...

// connect streams
val connected: ConnectedStreams[Int, String] = first.connect(second)

```

`ConnectedStreams` 提供了 `map()` 和 `flatMap()` 方法，分别需要接收类型为 `CoMapFunction` 和 `CoFlatMapFunction` 的参数。

以上两个函数里面的泛型是第一条流的事件类型和第二条流的事件类型，以及输出流的事件类型。还定义了两个方法，每一个方法针对一条流来调用。`map1()` 和 `flatMap1()` 会调用在第一条流的元素上面，`map2()` 和 `flatMap2()` 会调用在第二条流的元素上面。

```

// IN1: 第一条流的事件类型
// IN2: 第二条流的事件类型
// OUT: 输出流的事件类型
CoMapFunction[IN1, IN2, OUT]
  > map1(IN1): OUT
  > map2(IN2): OUT

CoFlatMapFunction[IN1, IN2, OUT]
  > flatMap1(IN1, Collector[OUT]): Unit
  > flatMap2(IN2, Collector[OUT]): Unit

```

函数无法选择读某一条流。我们是无法控制函数中的两个方法的调用顺序的。当一条流中的元素到来时，将会调用相对应的方法。

对两条流做连接查询通常需要这两条流基于某些条件被确定性的路由到操作符中相同的并

行实例里面去。在默认情况下，connect() 操作将不会对两条流的事件建立任何关系，所以两条流的事件将会随机的被发送到下游的算子实例里面去。这样的行为会产生不确定性的计算结果，显然不是我们想要的。为了针对 ConnectedStreams 进行确定性的转换操作，connect() 方法可以和 keyBy() 或者 broadcast() 组合起来使用。我们首先看一下 keyBy() 的示例。

```
val one: DataStream[(Int, Long)] = ...
val two: DataStream[(Int, String)] = ...

// keyBy two connected streams
val keyedConnect1: ConnectedStreams[(Int, Long), (Int, String)] = one
    .connect(two)
    .keyBy(0, 0) // key both input streams on first attribute

// alternative: connect two keyed streams
val keyedConnect2: ConnectedStreams[(Int, Long), (Int, String)] = one
    .keyBy(0)
    .connect(two.keyBy(0))
```

无论使用 keyBy() 算子操作 ConnectedStreams 还是使用 connect() 算子连接两条 KeyedStreams，connect() 算子会将两条流的含有相同 Key 的所有事件都发送到相同的算子实例。两条流的 key 必须是一样的类型和值，就像 SQL 中的 JOIN。在 connected 和 keyed stream 上面执行的算子有访问 keyed state 的权限。

下面的例子展示了如何连接一条 DataStream 和广播过的流。

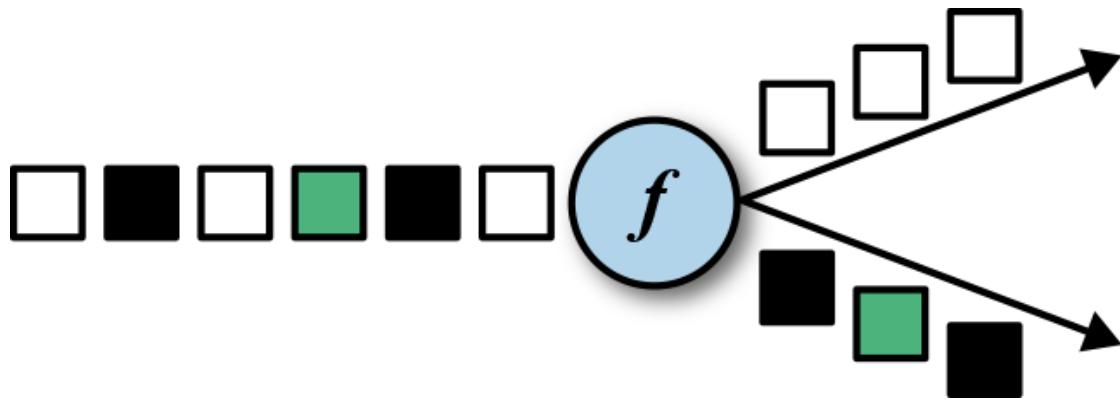
```
val first: DataStream[(Int, Long)] = ...
val second: DataStream[(Int, String)] = ...

// connect streams with broadcast
val keyedConnect: ConnectedStreams[(Int, Long), (Int, String)] = first
    // broadcast second input stream
    .connect(second.broadcast())
```

一条被广播过的流中的所有元素将会被复制然后发送到下游算子的所有并行实例中去。未被广播过的流仅仅向前发送。所以两条流的元素显然会被连接处理。

### SPLIT 和 SELECT

Split 是 Union 的反函数。Split 将输入的流分成两条或者多条流。每一个输入的元素都可以被路由到 0、1 或者多条流中去。所以，split 可以用来过滤或者复制元素。图 5-6 展示了 split 操作符将所有的白色事件都路由到同一条流中去了，剩下的元素去往另一条流。



`DataStream.split()` 方法接受 `OutputSelector` 类型，此类型定义了输入流中的元素被分配到哪个名字的流中去。`OutputSelector` 定义了 `select()` 方法，此方法将被每一个元素调用，并返回 `java.lang.Iterable[String]` 类型的数据。返回的 `String` 类型的值将指定元素将被路由到哪一条流。

```
// IN: the type of the split elements
OutputSelector[IN]
> select(IN): Iterable[String]
```

`DataStream.split()` 方法返回 `SplitStream` 类型，此类型提供 `select()` 方法，可以根据分流后不同流的名字，将某个名字对应的流提取出来。

例 5-2 将一条整数流分成了不同的流，大的整数一条流，小的整数一条流。

```
1 val inputStream: DataStream[(Int, String)] = ...
2
3 val splitted: SplitStream[(Int, String)] = inputStream
4   .split(t => if (t._1 > 1000) Seq("large") else Seq("small"))
5
6 val large: DataStream[(Int, String)] = splitted.select("large")
7 val small: DataStream[(Int, String)] = splitted.select("small")
8 val all: DataStream[(Int, String)] = splitted.select("small", "large")
```

不推荐使用 `split` 方法，推荐使用 Flink 的侧输出（side-output）特性。

## 分布式转换算子

分区操作对应于我们之前讲过的“数据交换策略”这一节。这些操作定义了事件如何分配到不同的任务中去。当我们使用 `DataStream API` 来编写程序时，系统将自动的选择数据分区策略，然后根据操作符的语义和设置的并行度将数据路由到正确的地方去。有些时候，我们需要在应用程序的层面控制分区策略，或者自定义分区策略。例如，如果我们知道会发生数据倾斜，那么我们想要针对数据流做负载均衡，将数据流平均发送到接下来的操作符中去。又或者，应用程序的业务逻辑可能需要一个算子所有的并行任务都需要接收同样的数据。再或

者，我们需要自定义分区策略的时候。在这一小节，我们将展示 DataStream 的一些方法，可以使我们来控制或者自定义数据分区策略。

`keyBy()` 方法不同于分布式转换算子。所有的分布式转换算子将产生 DataStream 数据类型。而 `keyBy()` 产生的类型是 KeyedStream，它拥有自己的 keyed state。

### Random

随机数据交换由 `DataStream.shuffle()` 方法实现。`shuffle` 方法将数据随机的分配到下游算子的并行任务中去。

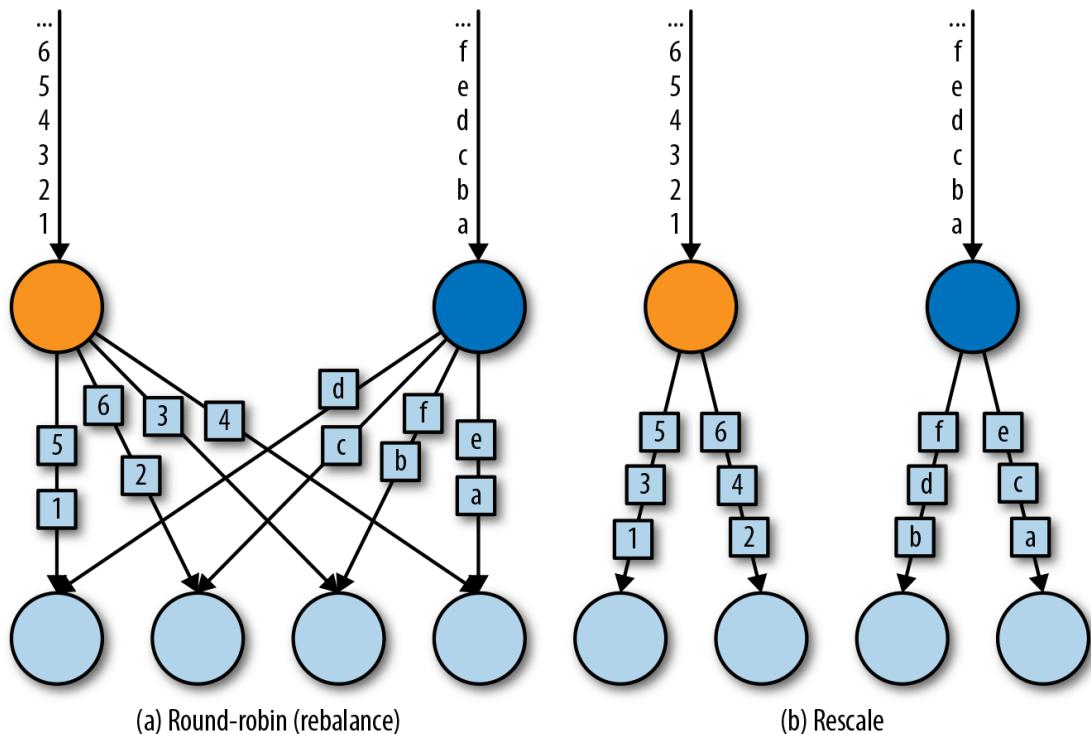
### Round-Robin

`rebalance()` 方法使用 Round-Robin 负载均衡算法将输入流平均分配到随后的并行运行的任务中去。图 5-7 为 round-robin 分布式转换算子的示意图。

### Rescale

`rescale()` 方法使用的也是 round-robin 算法，但只会将数据发送到接下来的并行运行的任务中的一部分任务中。本质上，当发送者任务数量和接收者任务数量不一样时，`rescale` 分区策略提供了一种轻量级的负载均衡策略。如果接收者任务的数量是发送者任务的数量的倍数时，`rescale` 操作将会效率更高。

`rebalance()` 和 `rescale()` 的根本区别在于任务之间连接的机制不同。`rebalance()` 将会针对所有发送者任务和所有接收者任务之间建立通信通道，而 `rescale()` 仅仅针对每一个任务和下游算子的一部分子并行任务之间建立通信通道。`rescale` 的示意图为图 5-7。



### Broadcast

`broadcast()` 方法将输入流的所有数据复制并发送到下游算子的所有并行任务中去。

### *Global*

`global()` 方法将所有的输入流数据都发送到下游算子的第一个并行任务中去。这个操作需要很谨慎，因为将所有数据发送到同一个 task，将会对应用程序造成很大的压力。

### *Custom*

当 Flink 提供的分区策略都不适用时，我们可以使用 `partitionCustom()` 方法来自定义分区策略。这个方法接收一个 `Partitioner` 对象，这个对象需要实现分区逻辑以及定义针对流的哪一个字段或者 key 来进行分区。下面的例子将一条整数流做 partition，使得所有的负整数都发送到第一个任务中，剩下的数随机分配。

```
val numbers: DataStream[(Int)] = ...
numbers.partitionCustom(myPartitioner, 0)

object myPartitioner extends Partitioner[Int] {
    val r = scala.util.Random

    override def partition(key: Int, numPartitions: Int): Int = {
        if (key < 0) 0 else r.nextInt(numPartitions)
    }
}
```

## 设置并行度

Flink 应用程序在一个像集群这样的分布式环境中并行执行。当一个数据流程序提交到 JobManager 执行时，系统将会创建一个数据流图，然后准备执行需要的操作符。每一个操作符将会并行化到一个或者多个任务中去。每个算子的并行任务都会处理这个算子的输入流中的一份子集。一个算子并行任务的个数叫做算子的并行度。它决定了算子执行的并行化程度，以及这个算子能处理多少数据量。

算子的并行度可以在执行环境这个层级来控制，也可以针对每个不同的算子设置不同的并行度。默认情况下，应用程序中所有算子的并行度都将设置为执行环境的并行度。执行环境的并行度（也就是所有算子的默认并行度）将在程序开始运行时自动初始化。如果应用程序在本地执行环境中运行，并行度将被设置为 CPU 的核数。当我们把应用程序提交到一个处于运行中的 Flink 集群时，执行环境的并行度将被设置为集群默认的并行度，除非我们在客户端提交应用程序时显式的设置好并行度。

通常情况下，将算子的并行度定义为和执行环境并行度相关的数值会是个好主意。这允许我们通过在客户端调整应用程序的并行度就可以将程序水平扩展了。我们可以使用以下代码来访问执行环境的默认并行度。

我们还可以重写执行环境的默认并行度，但这样的话我们将再也不能通过客户端来控制应用程序的并行度了。

算子默认的并行度也可以通过重写来明确指定。在下面的例子里面，数据源的操作符将会按照环境默认的并行度来并行执行，`map` 操作符的并行度将会是默认并行度的 2 倍，`sink` 操作符的并行度为 2。

```
val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment  
val defaultP = env.getParallelism  
val result = env.addSource(new CustomSource)  
.map(new MyMapper).setParallelism(defaultP * 2)  
.print().setParallelism(2)
```

当我们通过客户端将应用程序的并行度设置为 16 并提交执行时，`source` 操作符的并行度为 16，`mapper` 并行度为 32，`sink` 并行度为 2。如果我们在本地环境运行应用程序的话，例如在 IDE 中运行，机器是 8 核，那么 `source` 任务将会并行执行在 8 个任务上面，`mapper` 运行在 16 个任务上面，`sink` 运行在 2 个任务上面。

并行度是动态概念，任务槽数量是静态概念。并行度  $\leq$  任务槽数量。一个任务槽最多运行一个并行度。

## 类型

Flink 程序所处理的流中的事件一般是对象类型。操作符接收对象输出对象。所以 Flink 的内部机制需要能够处理事件的类型。在网络中传输数据，或者将数据写入到状态后端、检查点和保存点中，都需要我们对数据进行序列化和反序列化。为了高效的进行此类操作，Flink 需要流中事件类型的详细信息。Flink 使用了 `Type Information` 的概念来表达数据类型，这样就能针对不同的数据类型产生特定的序列化器，反序列化器和比较操作符。

有点像泛型。

Flink 也能够通过分析输入数据和输出数据来自动获取数据的类型信息以及序列化器和反序列化器。尽管如此，在一些特定的情况下，例如匿名函数或者使用泛型的情况下，我们需要明确的提供数据的类型信息，来提高我们程序的性能。

在这一节中，我们将讨论 Flink 支持的类型，以及如何为数据类型创建相应的类型信息，还有就是在 Flink 无法推断函数返回类型的情况下，如何帮助 Flink 的类型系统去做类型推断。

## 支持的数据类型

Flink 支持 Java 和 Scala 提供的所有普通数据类型。最常用的数据类型可以做以下分类：

- Primitives（原始数据类型）
- Java 和 Scala 的 Tuples（元组）
- Scala 的样例类
- POJO 类型

- 一些特殊的类型

接下来让我们一探究竟。

### Primitives

Java 和 Scala 提供的所有原始数据类型都支持，例如 Int(Java 的 Integer)，String，Double 等等。下面举一个例子：

```
val numbers: DataStream[Long] = env.fromElements(1L, 2L, 3L, 4L)
numbers.map(n => n + 1)
```

### Tuples

元组是一种组合数据类型，由固定数量的元素组成。

DataStream 的 Scala API 直接使用 Scala 内置的 Tuple。举个例子：

```
val persons: DataStream[(String, Integer)] =
env.fromElements(
  ("Adam", 17),
  ("Sarah", 23)
)

persons.filter(p => p._2 > 18)
```

Flink 为 Java 的 Tuple 同样提供了高效的实现。Flink 实现的 Java Tuple 最多可以有 25 个元素，根据元素数量的不同，Tuple 都被实现了不同的类：Tuple1，Tuple2，一直到 Tuple25。Tuple 类是强类型。

我们可以将上面的例子用 Java 的 DataStream API 重写：

```
DataStream<Tuple2<String, Integer>> persons = env
  .fromElements(
    Tuple2.of("Adam", 17),
    Tuple2.of("Sarah", 23)
  );

persons.filter(p -> p.f1 > 18);
```

Tuple 的元素可以通过它们的 public 属性访问—f0, f1, f2 等等。或者使用 getField(int pos) 方法来访问，元素下标从 0 开始：

```
import org.apache.flink.api.java.tuple.Tuple2

Tuple2<String, Integer> personTuple = Tuple2.of("Alex", 42);
Integer age = personTuple.getField(1); // age = 42
```

不同于 Scala 的 Tuple，Java 的 Tuple 是可变数据结构，所以 Tuple 中的元素可以重新进行赋

值。重复利用 Java 的 Tuple 可以减轻垃圾收集的压力。举个例子：

```
personTuple.f1 = 42; // set the 2nd field to 42
personTuple.setField(43, 1); // set the 2nd field to 43
```

*Scala case classes*

```
case class Person(name: String, age: Int)

val persons: DataStream[Person] = env.fromElements(
    Person("Adam", 17),
    Person("Sarah", 23)
)

persons.filter(p => p.age > 18)
```

*POJO*

POJO 类的定义：

- 公有类
- 无参数的公有构造器
- 所有的字段都是公有的，可以通过 getters 和 setters 访问。
- 所有字段的数据类型都必须是 Flink 支持的数据类型。

举个例子：

```
public class Person {
    public String name;
    public int age;

    public Person() {}

    public Person(String name, int age) {
        this.name = name;
        this.age = age;
    }
}

DataStream<Person> persons = env.fromElements(
    new Person("Alex", 42),
    new Person("Wendy", 23)
);
```

其他数据类型

- Array, ArrayList, HashMap, Enum

- Hadoop Writable types
- Either, Option, Try

## 为数据类型创建类型信息

Flink 类型系统的核心类是 `TypeInformation`。它为系统在产生序列化器和比较操作符时，提供了必要的类型信息。例如，如果我们想使用某个 key 来做联结查询或者分组操作，`TypeInformation` 可以让 Flink 做更严格的类型检查。

Flink 针对 Java 和 Scala 分别提供了类来产生类型信息。在 Java 中，类是

```
org.apache.flink.api.common.typeinfo.Types
```

举个例子：

```
TypeInformation<Integer> intType = Types.INT;

TypeInformation<Tuple2<Long, String>> tupleType = Types
    .TUPLE(Types.LONG, Types.STRING);

TypeInformation<Person> personType = Types
    .POJO(Person.class);
```

在 Scala 中，类是 `org.apache.flink.api.scala.typeutils.Types`，举个例子：

```
// TypeInformation for primitive types
val stringType: TypeInformation[String] = Types.STRING
// TypeInformation for Scala Tuples
val tupleType: TypeInformation[(Int, Long)] = Types.TUPLE[(Int, Long)]
// TypeInformation for case classes
val caseClassType: TypeInformation[Person] = Types.CASE_CLASS[Person]
```

别忘了导入 `import org.apache.flink.streaming.api.scala._`

## 定义 Key 以及引用字段

在 Flink 中，我们必须明确指定输入流中的元素中的哪一个字段是 key。

## 使用字段位置进行 `keyBy`

```
val input: DataStream[(Int, String, Long)] = ...
val keyed = input.keyBy(1)
```

注意，要么明确写清楚类型注释，要么让 Scala 做类型推断，不要用 IDEA 的类型推断功能。

如果我们想要用元组的第 2 个字段和第 3 个字段做 keyBy，可以看下面的例子。

```
val keyed2 = input.keyBy(1, 2)
```

### 使用字段表达式来进行 keyBy

对于样例类：

```
case class SensorReading(  
    id: String,  
    timestamp: Long,  
    temperature: Double  
)  
  
val sensorStream: DataStream[SensorReading] = ...  
val keyedSensors = sensorStream.keyBy("id")
```

对于元组：

```
val input: DataStream[(Int, String, Long)] = ...  
val keyed1 = input.keyBy("2") // key by 3rd field  
val keyed2 = input.keyBy("_1") // key by 1st field  
  
DataStream<Tuple3<Integer, String, Long>> javaInput = ...  
javaInput.keyBy("f2") // key Java tuple by 3rd field
```

对于存在嵌套的样例类：

```
case class Address (  
    address: String,  
    zip: String,  
    country: String  
)  
  
case class Person (  
    name: String,  
    birthday: (Int, Int, Int), // year, month, day  
    address: Address  
)  
  
val persons: DataStream[Person] = ...
```

```
persons.keyBy("address.zip") // key by nested POJO field
persons.keyBy("birthday._1") // key by field of nested tuple
persons.keyBy("birthday._") // key by all fields of nested tuple
```

## Key 选择器

方法类型

```
KeySelector[IN, KEY]
> getKey(IN): KEY
```

两个例子

```
val sensorData: DataStream[SensorReading] = ...
val byId: KeyedStream[SensorReading, String] = sensorData.keyBy(r => r.id)

val input: DataStream[(Int, Int)] = ...
val keyedStream = input.keyBy(value => math.max(value._1, value._2))
```

## 实现 UDF 函数，更细粒度的控制流

### 函数类 (Function Classes)

Flink 暴露了所有 udf 函数的接口 (实现方式为接口或者抽象类)。例如 MapFunction, FilterFunction, ProcessFunction 等等。

例子实现了 FilterFunction 接口

```
class FlinkFilter extends FilterFunction[String] {
  override def filter(value: String): Boolean = {
    value.contains("flink")
  }
}

val flinkTweets = tweets.filter(new FlinkFilter)
```

还可以将函数实现成匿名类

```
val flinkTweets = tweets.filter(
  new RichFilterFunction[String] {
    override def filter(value: String): Boolean = {
      value.contains("flink")
    }
  }
)
```

我们 filter 的字符串 “flink” 还可以当作参数传进去。

```
val tweets: DataStream[String] = ...
val flinkTweets = tweets.filter(new KeywordFilter("flink"))

class KeywordFilter(keyword: String) extends FilterFunction[String] {
    override def filter(value: String): Boolean = {
        value.contains(keyword)
    }
}
```

## 匿名函数 (Lambda Functions)

匿名函数可以实现一些简单的逻辑，但无法实现一些高级功能，例如访问状态等等。

```
val tweets: DataStream[String] = ...
val flinkTweets = tweets.filter(_.contains("flink"))
```

## 富函数 (Rich Functions)

我们经常会有这样的需求：在函数处理数据之前，需要做一些初始化的工作；或者需要在处理数据时可以获得函数执行上下文的一些信息；以及在处理完数据时做一些清理工作。而 DataStream API 就提供了这样的机制。

DataStream API 提供的所有转换操作函数，都拥有它们的“富”版本，并且我们在使用常规函数或者匿名函数的地方来使用富函数。例如下面就是富函数的一些例子，可以看出，只需要在常规函数的前面加上 Rich 前缀就是富函数了。

- RichMapFunction
- RichFlatMapFunction
- RichFilterFunction
- ...

当我们使用富函数时，我们可以实现两个额外的方法：

- open() 方法是 rich function 的初始化方法，当一个算子例如 map 或者 filter 被调用之前 open() 会被调用。open() 函数通常用来做一些只需要做一次即可的初始化工作。
- close() 方法是生命周期中的最后一个调用的方法，通常用来做一些清理工作。

另外，getRuntimeContext() 方法提供了函数的 RuntimeContext 的一些信息，例如函数执行的并行度，当前子任务的索引，当前子任务的名字。同时还它还包含了访问**分区状态**的方法。下面看一个例子：

```
class MyFlatMap extends RichFlatMapFunction[Int, (Int, Int)] {
    var subTaskIndex = 0
```

```

override def open(configuration: Configuration): Unit = {
    subTaskIndex = getRuntimeContext.getIndexOfThisSubtask
    // 做一些初始化工作
    // 例如建立一个和 HDFS 的连接
}

override def flatMap(in: Int, out: Collector[(Int, Int))]: Unit = {
    if (in % 2 == subTaskIndex) {
        out.collect((subTaskIndex, in))
    }
}

override def close(): Unit = {
    // 清理工作，断开和 HDFS 的连接。
}
}

```

## Sink

Flink 没有类似于 spark 中 foreach 方法，让用户进行迭代的操作。所有对外的输出操作都要利用 Sink 完成。最后通过类似如下方式完成整个任务最终输出操作。

```
stream.addSink(new MySink(xxxx))
```

官方提供了一部分的框架的 sink。除此以外，需要用户自定义实现 sink。

## Kafka

Kafka 版本为 0.11

```

<dependency>
    <groupId>org.apache.flink</groupId>
    <artifactId>flink-connector-kafka-0.11_2.11</artifactId>
    <version>1.10.0</version>
</dependency>

```

Kafka 版本为 2.0 以上

```

<dependency>
    <groupId>org.apache.flink</groupId>
    <artifactId>flink-connector-kafka_2.11</artifactId>
    <version>1.10.0</version>
</dependency>

```

主函数中添加 sink:

```

val union = high
    .union(low)
    .map(_.temperature.toString)

union.addSink(
    new FlinkKafkaProducer011[String](
        "localhost:9092",
        "test",
        new SimpleStringSchema()
    )
)

```

## Redis

```

<dependency>
    <groupId>org.apache.bahir</groupId>
    <artifactId>flink-connector-redis_2.11</artifactId>
    <version>1.0</version>
</dependency>

```

定义一个 redis 的 mapper 类，用于定义保存到 redis 时调用的命令：

```

1 class MyRedisMapper extends RedisMapper[SensorReading] {
2
3     override def getCommandDescription: RedisCommandDescription = {
4         new RedisCommandDescription(RedisCommand.HSET, "sensor_temperature")
5     }
6
7     override def getValueFromData(t: SensorReading): String = {
8         t.temperature.toString
9     }
10
11    override def getKeyFromData(t: SensorReading): String = t.id
12
13 }

```

## ElasticSearch

在主函数中调用：

```

<dependency>
    <groupId>org.apache.flink</groupId>
    <artifactId>flink-connector-elasticsearch6_2.11</artifactId>

```

```
<version>1.10.0</version>
</dependency>
```

在主函数中调用：

```
1 val httpHosts = new util.ArrayList[HttpHost]()
2 httpHosts.add(new HttpHost("localhost", 9200))
3 val esSinkBuilder = new ElasticsearchSink.Builder[SensorReading](
4   httpHosts,
5   new ElasticsearchSinkFunction[SensorReading] {
6     override def process(t: SensorReading,
7       runtimeContext: RuntimeContext,
8       requestIndexer: RequestIndexer): Unit = {
9       println("saving data: " + t)
10      val json = new util.HashMap[String, String]()
11      json.put("data", t.toString)
12      val indexRequest = Requests
13        .indexRequest()
14        .index("sensor")
15        .`type`("readingData")
16        .source(json)
17      requestIndexer.add(indexRequest)
18      println("saved successfully")
19    }
20  })
21 dataStream.addSink(esSinkBuilder.build())
```

## JDBC 自定义 sink

```
<dependency>
  <groupId>mysql</groupId>
  <artifactId>mysql-connector-java</artifactId>
  <version>5.1.44</version>
</dependency>
```

添加 MyJdbcSink

```
1 class MyJdbcSink() extends RichSinkFunction[SensorReading]{
2   var conn: Connection = _
3   var insertStmt: PreparedStatement = _
4   var updateStmt: PreparedStatement = _
5   // open 主要是创建连接
6   override def open(parameters: Configuration): Unit = {
7     super.open(parameters)
```

```
8     conn = DriverManager.getConnection(
9         "jdbc:mysql://localhost:3306/test",
10        "root",
11        "123456")
12     insertStmt = conn.prepareStatement(
13         "INSERT INTO temperatures (sensor, temp) VALUES (?, ?)"
14     )
15     updateStmt = conn.prepareStatement(
16         "UPDATE temperatures SET temp = ? WHERE sensor = ?"
17     )
18 }
19 // 调用连接，执行 sql
20 override def invoke(value: SensorReading,
21                     context: SinkFunction.Context[_]): Unit = {
22     updateStmt.setDouble(1, value.temperature)
23     updateStmt.setString(2, value.id)
24     updateStmt.execute()
25
26     if (updateStmt.getUpdateCount == 0) {
27         insertStmt.setString(1, value.id)
28         insertStmt.setDouble(2, value.temperature)
29         insertStmt.execute()
30     }
31 }
32
33 override def close(): Unit = {
34     insertStmt.close()
35     updateStmt.close()
36     conn.close()
37 }
38 }
```

在 main 方法中增加，把明细保存到 mysql 中

```
dataStream.addSink(new MyJdbcSink())
```

## 第六章，基于时间和窗口的操作符

在本章，我们将要学习 DataStream API 中处理时间和基于时间的操作符，例如窗口操作符。

首先，我们会学习如何定义时间属性，时间戳和水位线。然后我们将会学习底层操作 process function，它可以让访问时间戳和水位线，以及注册定时器事件。接下来，我们将会使用 Flink 的 window API，它提供了通常使用的各种窗口类型的内置实现。我们将会学到如何

进行用户自定义窗口操作符，以及窗口的核心功能：assigners（分配器）、triggers（触发器）和 evictors（清理器）。最后，我们将讨论如何基于时间来做流的联结查询，以及处理迟到事件的策略。

## 设置时间属性

如果我们想要在分布式流处理应用程序中定义有关时间的操作，彻底理解时间的语义是非常重要的。当我们指定了一个窗口去收集某 1 分钟内的数据时，这个长度为 1 分钟的桶中，到底应该包含哪些数据？在 DataStream API 中，我们将使用时间属性来告诉 Flink：当我们创建窗口时，我们如何定义时间。时间属性是 `StreamExecutionEnvironment` 的一个属性，有以下值：

### *ProcessingTime*

机器时间在分布式系统中又叫做“墙上时钟”。

当操作符执行时，此操作符看到的时间是操作符所在机器的机器时间。Processing-time window 的触发取决于机器时间，窗口包含的元素也是那个机器时间段内到达的元素。通常情况下，窗口操作符使用 processing time 会导致不确定的结果，因为基于机器时间的窗口中收集的元素取决于元素到达的速度快慢。使用 processing time 会为程序提供极低的延迟，因为无需等待水位线的到达。

如果要追求极限的低延迟，请使用 processing time。

### *EventTime*

当操作符执行时，操作符看的当前时间是由流中元素所携带的信息决定的。流中的每一个元素都必须包含时间戳信息。而系统的逻辑时钟由水位线 (Watermark) 定义。我们之前学习过，时间戳要么在事件进入流处理程序之前已经存在，要么就需要在程序的数据源 (source) 处进行分配。当水位线宣布特定时间段的数据都已经到达，事件时间窗口将会被触发计算。即使数据到达的顺序是乱序的，事件时间窗口的计算结果也将是确定性的。窗口的计算结果并不取决于元素到达的快与慢。

当水位线超过事件时间窗口的结束时间时，窗口将会闭合，不再接收数据，并触发计算。

### *IngestionTime*

当事件进入 source 操作符时，source 操作符所在机器的机器时间，就是此事件的“摄入时间” (IngestionTime)，并同时产生水位线。IngestionTime 相当于 EventTime 和 ProcessingTime 的混合体。一个事件的 IngestionTime 其实就是它进入流处理器中的时间。

IngestionTime 没什么价值，既有 EventTime 的执行效率（比较低），有没有 Event-Time 计算结果的准确性。

下面的例子展示了如何设置事件时间。

```
object AverageSensorReadings {
    def main(args: Array[String]) {
        val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
        env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)
        val sensorData: DataStream[SensorReading] = env.addSource(...)
    }
}
```

如果要使用 processing time，将 TimeCharacteristic.EventTime 替换为 TimeCharacteristic.ProcessingTime 就可以了。

### 指定时间戳和产生水位线

如果使用事件时间，那么流中的事件必须包含这个事件真正发生的时间。使用了事件时间的流必须携带水位线。

时间戳和水位线的单位是毫秒，记时从 1970-01-01T00:00:00Z 开始。到达某个操作符的水位线就会告知这个操作符：小于等于水位线中携带的时间戳的事件都已经到达这个操作符了。时间戳和水位线可以由 SourceFunction 产生，或者由用户自定义的时间戳分配器和水位线产生器来生成。

Flink 暴露了 TimestampAssigner 接口供我们实现，使我们可以自定义如何从事件数据中抽取时间戳。一般来说，时间戳分配器需要在 source 操作符后马上进行调用。

因为时间戳分配器看到的元素的顺序应该和 source 操作符产生数据的顺序是一样的，否则就乱了。这就是为什么我们经常将 source 操作符的并行度设置为 1 的原因。

也就是说，任何分区操作都会将元素的顺序打乱，例如：并行度改变，keyBy() 操作等等。

所以最佳实践是：在尽量接近数据源 source 操作符的地方分配时间戳和产生水位线，甚至最好在 SourceFunction 中分配时间戳和产生水位线。当然在分配时间戳和产生水位线之前可以对流进行 map 和 filter 操作是没问题的，也就是说必须是窄依赖。

以下这种写法是可以的。

```
val stream = env
    .addSource(...)
    .map(...)
```

```
.filter(...)  
.assignTimestampsAndWatermarks(...)
```

下面的例子展示了首先 filter 流，然后再分配时间戳和水位线。

```
val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment  
  
// 从调用时刻开始给 env 创建的每一个 stream 追加时间特征  
env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)  
  
val readings: DataStream[SensorReading] = env  
    .addSource(new SensorSource)  
    .filter(r => r.temperature > 25)  
    .assignTimestampsAndWatermarks(new MyAssigner())
```

MyAssigner 有两种类型

- AssignerWithPeriodicWatermarks
- AssignerWithPunctuatedWatermarks

以上两个接口都继承自 TimestampAssigner。

## 周期性的生成水位线

周期性的生成水位线：系统会周期性的将水位线插入到流中（水位线也是一种特殊的事件！）。默认周期是 200 毫秒，也就是说，系统会每隔 200 毫秒就往流中插入一次水位线。

这里的 200 毫秒是机器时间！

可以使用 ExecutionConfig.setAutoWatermarkInterval() 方法进行设置。

```
val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment  
env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)  
// 每隔 5 秒产生一个水位线  
env.getConfig.setAutoWatermarkInterval(5000)
```

上面的例子产生水位线的逻辑：每隔 5 秒钟，Flink 会调用 AssignerWithPeriodicWatermarks 中的 getCurrentWatermark() 方法。如果方法返回的时间戳大于之前水位线的时间戳，新的水位线会被插入到流中。这个检查保证了水位线是单调递增的。如果方法返回的时间戳小于等于之前水位线的时间戳，则不会产生新的水位线。

例子，自定义一个周期性的时间戳抽取

```
class PeriodicAssigner  
extends AssignerWithPeriodicWatermarks[SensorReading] {  
    val bound: Long = 60 * 1000 // 延时为 1 分钟
```

```

var maxTs: Long = Long.MinValue + bound // 观察到的最大时间戳

override def getCurrentWatermark: Watermark = {
    new Watermark(maxTs - bound)
}

override def extractTimestamp(r: SensorReading, previousTS: Long) = {
    maxTs = maxTs.max(r.timestamp)
    r.timestamp
}
}

```

如果我们事先得知数据流的时间戳是单调递增的，也就是说没有乱序。我们可以使用 `assignAscendingTimestamps`，方法会直接使用数据的时间戳生成水位线。

```

val stream: DataStream[SensorReading] = ...
val withTimestampsAndWatermarks = stream
    .assignAscendingTimestamps(e => e.timestamp)

```

如果我们能大致估算出数据流中的事件的最大延迟时间，可以使用如下代码：

最大延迟时间就是当前到达的事件的事件时间和之前所有到达的事件中最大时间戳的差。

```

val stream: DataStream[SensorReading] = ...
val withTimestampsAndWatermarks = stream.assignTimestampsAndWatermarks(
    new SensorTimeAssigner
)

class SensorTimeAssigner
    extends BoundedOutOfOrderTimestampExtractor[SensorReading](
        Time.seconds(5)
    ) {
        // 抽取时间戳
        override def extractTimestamp(r: SensorReading): Long = r.timestamp
    }

```

以上代码设置了最大延迟时间为 5 秒。

## 如何产生不规则的水位线

有时候输入流中会包含一些用于指示系统进度的特殊元组或标记。Flink 为此类情形以及可根据输入元素生成水位线的情形提供了 `AssignerWithPunctuatedWatermarks` 接口。该接口中的 `checkAndGetNextWatermark()` 方法会在针对每个事件的 `extractTimestamp()` 方

法后立即调用。它可以决定是否生成一个新的水位线。如果该方法返回一个非空、且大于之前值的水位线，算子就会将这个新水位线发出。

```
1 class PunctuatedAssigner
2   extends AssignerWithPunctuatedWatermarks[SensorReading] {
3     val bound: Long = 60 * 1000
4
5     // 每来一条数据就调用一次
6     // 紧跟`extractTimestamp`函数调用
7     override def checkAndGetNextWatermark(r: SensorReading,
8                                         extractedTS: Long): Watermark = {
9       if (r.id == "sensor_1") {
10         // 抽取的时间戳 - 最大延迟时间
11         new Watermark(extractedTS - bound)
12       } else {
13         null
14       }
15     }
16
17     // 每来一条数据就调用一次
18     override def extractTimestamp(r: SensorReading,
19                                     previousTS: Long): Long = {
20       r.timestamp
21     }
22 }
```

现在我们已经知道如何使用 `TimestampAssigner` 来产生水位线了。现在我们要讨论一下水位线会对我们的程序产生什么样的影响。

水位线用来平衡延迟和计算结果的正确性。水位线告诉我们，在触发计算（例如关闭窗口并触发窗口计算）之前，我们需要等待事件多长时间。基于事件时间的操作符根据水位线来衡量系统的逻辑时间的进度。

完美的水位线永远不会错：时间戳小于水位线的事件不会再出现。在特殊情况下（例如非乱序事件流），最近一次事件的时间戳就可能是完美的水位线。启发式水位线则相反，它只估计时间，因此有可能出错，即迟到的事件（其时间戳小于水位线标记时间）晚于水位线出现。针对启发式水位线，Flink 提供了处理迟到元素的机制。

设定水位线通常需要用到领域知识。举例来说，如果知道事件的迟到时间不会超过 5 秒，就可以将水位线标记时间设为收到的最大时间戳减去 5 秒。另一种做法是，采用一个 Flink 作业监控事件流，学习事件的迟到规律，并以此构建水位线生成模型。

如果最大延迟时间设置的很大，计算出的结果会更精确，但收到计算结果的速度会很慢，同时系统会缓存大量的数据，并对系统造成比较大的压力。如果最大延迟时间设置的很小，那么收到计算结果的速度会很快，但可能收到错误的计算结果。不过 Flink 处理迟到数据的机

制可以解决这个问题。上述问题看起来很复杂，但是恰恰符合现实世界的规律：大部分真实的事件流都是乱序的，并且通常无法了解它们的乱序程度(因为理论上不能预见未来)。水位线是唯一让我们直面乱序事件流并保证正确性的机制；否则只能选择忽视事实，假装错误的结果是正确的。

思考题一：实时程序，要求实时性非常高，并且结果并不一定要求非常准确，那么应该怎么办？直接使用处理时间。思考题二：如果要进行时间旅行，也就是要还原以前的数据集当时的流的状态，应该怎么办？使用事件时间。使用 Hive 将数据集先按照时间戳升序排列，再将最大延迟时间设置为 0。

## Process Function(Low-Level API)

我们之前学习的转换算子是无法访问事件的时间戳信息和水位线信息的。而这在一些应用场景下，极为重要。例如 MapFunction 这样的 map 转换算子就无法访问时间戳或者当前事件的事件时间。

基于此，DataStream API 提供了一系列的 Low-Level 转换算子。可以访问时间戳、水位线以及注册定时事件。还可以输出特定的一些事件，例如超时事件等。Process Function 用来构建事件驱动的应用以及实现自定义的业务逻辑(使用之前的 window 函数和转换算子无法实现)。例如，Flink-SQL 就是使用 Process Function 实现的。

Flink 提供了 8 个 Process Function：

- ProcessFunction
- KeyedProcessFunction
- CoProcessFunction
- ProcessJoinFunction
- BroadcastProcessFunction
- KeyedBroadcastProcessFunction
- ProcessWindowFunction
- ProcessAllWindowFunction

我们这里详细介绍一下 KeyedProcessFunction。

KeyedProcessFunction 用来操作 KeyedStream。KeyedProcessFunction 会处理流的每一个元素，输出为 0 个、1 个或者多个元素。所有的 Process Function 都继承自 RichFunction 接口，所以都有 open()、close() 和 getRuntimeContext() 等方法。而 KeyedProcessFunction[KEY, IN, OUT] 还额外提供了两个方法：

- processElement(v: IN, ctx: Context, out: Collector[OUT]), 流中的每一个元素都会调用这个方法，调用结果将会放在 Collector 数据类型中输出。Context 可以访问元素的时间戳，元素的 key，以及 TimerService 时间服务。Context 还可以将结果输出到别的流(side outputs)。

- `onTimer(timestamp: Long, ctx: OnTimerContext, out: Collector[OUT])` 是一个回调函数。当之前注册的定时器触发时调用。参数 `timestamp` 为定时器所设定的触发的时间戳。Collector 为输出结果的集合。OnTimerContext 和 processElement 的 Context 参数一样，提供了上下文的一些信息，例如 firing trigger 的时间信息（事件时间或者处理时间）。

## TimerService and Timers

Context 和 OnTimerContext 所持有的 TimerService 对象拥有以下方法：

- `currentProcessingTime(): Long` 返回当前处理时间
- `currentWatermark(): Long` 返回当前水位线的时间戳
- `registerProcessingTimeTimer(timestamp: Long): Unit` 会注册当前 key 的 processing time 的 timer。当 processing time 到达定时时间时，触发 timer。
- `registerEventTimeTimer(timestamp: Long): Unit` 会注册当前 key 的 event time timer。当水位线大于等于定时器注册的时间时，触发定时器执行回调函数。
- `deleteProcessingTimeTimer(timestamp: Long): Unit` 删除之前注册处理时间定时器。如果没有这个时间戳的定时器，则不执行。
- `deleteEventTimeTimer(timestamp: Long): Unit` 删除之前注册的事件时间定时器，如果没有此时间戳的定时器，则不执行。

当定时器 timer 触发时，执行回调函数 `onTimer()`。processElement() 方法和 onTimer() 方法是同步（不是异步）方法，这样可以避免并发访问和操作状态。

定时器 timer 只能在 KeyedStream 上面使用。

针对每一个 key 和 timestamp，只能注册一个定期器。也就是说，每一个 key 可以注册多个定时器，但在每一个时间戳只能注册一个定时器。KeyedProcessFunction 默认将所有定时器的时间戳放在一个优先队列中。在 Flink 做检查点操作时，定时器也会被保存到状态后端中。

举个例子说明 KeyedProcessFunction 如何操作 KeyedStream。

下面的程序展示了如何监控温度传感器的温度值，如果温度值在一秒钟之内（processing time）连续上升，报警。

```
val warnings = readings
    // key by sensor id
    .keyBy(_.id)
    // apply ProcessFunction to monitor temperatures
    .process(new TempIncreaseAlertFunction)
```

看一下 TempIncreaseAlertFunction 如何实现，程序中使用了 ValueState 这样一个状态变量，后面会详细讲解。

```
1 class TempIncreaseAlertFunction
2     extends KeyedProcessFunction[String, SensorReading, String] {
```



```
45             out: Collector[String]): Unit = {
46     out.collect(" 传感器 id 为: "
47         + ctx.getCurrentKey
48         + " 的传感器温度值已经连续 1s 上升了。")
49     currentTimer.clear()
50 }
51 }
```

## 将事件发送到侧输出 (Emitting to Side Outputs)

大部分的 DataStream API 的算子的输出是单一输出，也就是某种数据类型的流。除了 split 算子，可以将一条流分成多条流，这些流的数据类型也都相同。process function 的 side outputs 功能可以产生多条流，并且这些流的数据类型可以不一样。一个 side output 可以定义为 OutputTag[X] 对象，X 是输出流的数据类型。process function 可以通过 Context 对象发射一个事件到一个或者多个 side outputs。

例子

```
val monitoredReadings: DataStream[SensorReading] = readings
    .process(new FreezingMonitor)

monitoredReadings
    .getSideOutput(new OutputTag[String]("freezing-alarms"))
    .print()

readings.print()
```

接下来我们实现 FreezingMonitor 函数，用来监控传感器温度值，将温度值低于 32F 的温度输出到 side output。

```
1 class FreezingMonitor extends ProcessFunction[SensorReading, SensorReading] {
2     // define a side output tag
3     // 定义一个侧输出标签
4     lazy val freezingAlarmOutput: OutputTag[String] =
5         new OutputTag[String]("freezing-alarms")
6
7     override def processElement(r: SensorReading,
8                                 ctx: ProcessFunction[SensorReading,
9                                     SensorReading]#Context,
10                                out: Collector[SensorReading]): Unit = {
11         // emit freezing alarm if temperature is below 32F
12         if (r.temperature < 32.0) {
13             ctx.output(freezingAlarmOutput, s"Freezing Alarm for ${r.id}")
14         }
15     }
16 }
```

```
15     // forward all readings to the regular output
16     out.collect(r)
17 }
18 }
```

## CoProcessFunction

对于两条输入流，DataStream API 提供了 CoProcessFunction 这样的 low-level 操作。CoProcessFunction 提供了操作每一个输入流的方法：processElement1() 和 processElement2()。类似于 ProcessFunction，这两种方法都通过 Context 对象来调用。这个 Context 对象可以访问事件数据，定时器时间戳，TimerService，以及 side outputs。CoProcessFunction 也提供了 onTimer() 回调函数。下面的例子展示了如何使用 CoProcessFunction 来合并两条流。

```
1 // ingest sensor stream
2 val readings: DataStream[SensorReading] = ...
3
4 // filter switches enable forwarding of readings
5 val filterSwitches: DataStream[(String, Long)] = env
6   .fromCollection(Seq(
7     ("sensor_2", 10 * 1000L),
8     ("sensor_7", 60 * 1000L)
9   ))
10
11 val forwardedReadings = readings
12   // connect readings and switches
13   .connect(filterSwitches)
14   // key by sensor ids
15   .keyBy(_.id, _._1)
16   // apply filtering CoProcessFunction
17   .process(new ReadingFilter)
18
19 class ReadingFilter
20   extends CoProcessFunction[SensorReading,
21     (String, Long), SensorReading] {
22   // switch to enable forwarding
23   // 传递数据的开关
24   lazy val forwardingEnabled: ValueState[Boolean] = getRuntimeContext
25     .getState(
26       new ValueStateDescriptor[Boolean]("filterSwitch", Types.of[Boolean])
27     )
28
29   // hold timestamp of currently active disable timer
30   lazy val disableTimer: ValueState[Long] = getRuntimeContext
```

```
13     .getState(
14         new ValueStateDescriptor[Long]("timer", Types.of[Long])
15     )
16
17     override def processElement1(reading: SensorReading,
18                                 ctx: CoProcessFunction[SensorReading,
19                                         (String, Long), SensorReading]#Context,
20                                         out: Collector[SensorReading]): Unit = {
21         // check if we may forward the reading
22         // 决定我们是否要将数据继续传下去
23         if (forwardingEnabled.value()) {
24             out.collect(reading)
25         }
26     }
27
28     override def processElement2(switch: (String, Long),
29                                 ctx: CoProcessFunction[SensorReading,
30                                         (String, Long), SensorReading]#Context,
31                                         out: Collector[SensorReading]): Unit = {
32         // enable reading forwarding
33         // 允许继续传输数据
34         forwardingEnabled.update(true)
35         // set disable forward timer
36         val timerTimestamp = ctx.timerService().currentProcessingTime()
37         + switch._2
38
39         val curTimerTimestamp = disableTimer.value()
40
41         if (timerTimestamp > curTimerTimestamp) {
42             // remove current timer and register new timer
43             ctx.timerService().deleteProcessingTimeTimer(curTimerTimestamp)
44             ctx.timerService().registerProcessingTimeTimer(timerTimestamp)
45             disableTimer.update(timerTimestamp)
46         }
47     }
48
49     override def onTimer(ts: Long,
50                         ctx: CoProcessFunction[SensorReading,
51                                         (String, Long), SensorReading]#OnTimerContext,
52                                         out: Collector[SensorReading]): Unit = {
53         // remove all state; forward switch will be false by default
54         forwardingEnabled.clear()
```

```
55     disableTimer.clear()
56   }
57 }
```

## 窗口操作符 (Window Operators)

窗口操作是流处理程序中很常见的操作。窗口操作允许我们在无限流上的一段有界区间上面做聚合之类的操作。而我们使用基于时间的逻辑来定义区间。窗口操作符提供了一种将数据放进一个桶，并根据桶中的数据做计算的方法。例如，我们可以将事件放进 5 分钟的滚动窗口中，然后计数。

无限流转化成有限数据的方法：使用窗口。

### 定义窗口操作符

Window 算子可以在 keyed stream 或者 nokeyed stream 上面使用。

创建一个 Window 算子，需要指定两个部分：

1. window assigner 定义了流的元素如何分配到 window 中。window assigner 将会产生一条 WindowedStream(或者 AllWindowedStream，如果是 nonkeyed DataStream 的话)
2. window function 用来处理 WindowedStream(AllWindowedStream) 中的元素。

下面的代码说明了如何使用窗口操作符。

```
stream
  .keyBy(...)
  .window(...) // 指定 window assigner
  .reduce/aggregate/process(...) // 指定 window function

stream
  .windowAll(...) // 指定 window assigner
  .reduce/aggregate/process(...) // 指定 window function
```

我们的学习重点是 Keyed WindowedStream。

### 内置的窗口分配器 (built-in window assigner)

窗口分配器将会根据事件的事件时间或者处理时间来将事件分配到对应的窗口中去。窗口包含开始时间和结束时间这两个时间戳。

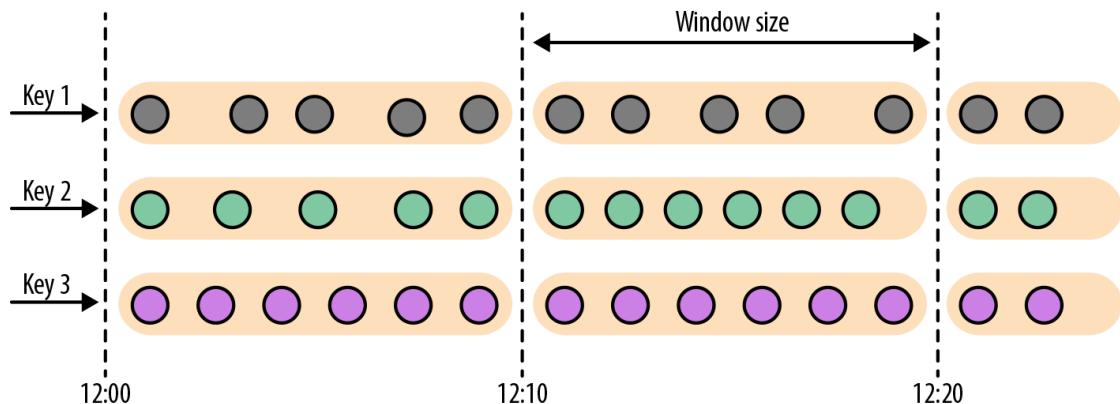
所有的窗口分配器都包含一个默认的触发器：

- 对于事件时间：当水位线超过窗口结束时间，触发窗口的求值操作。
- 对于处理时间：当机器时间超过窗口结束时间，触发窗口的求值操作。

需要注意的是：当处于某个窗口的第一个事件到达的时候，这个窗口才会被创建。Flink 不会对空窗口求值。

Flink 创建的窗口类型是 `TimeWindow`，包含开始时间和结束时间，区间是左闭右开的，也就是说包含开始时间截，不包含结束时间截。

滚动窗口 (*tumbling windows*)



```

val sensorData: DataStream[SensorReading] = ...

val avgTemp = sensorData
  .keyBy(_.id)
  // group readings in 1s event-time windows
  .window(TumblingEventTimeWindows.of(Time.seconds(1)))
  .process(new TemperatureAverager)

val avgTemp = sensorData
  .keyBy(_.id)
  // group readings in 1s processing-time windows
  .window(TumblingProcessingTimeWindows.of(Time.seconds(1)))
  .process(new TemperatureAverager)

// 其实就是之前的
// shortcut for window.(TumblingEventTimeWindows.of(size))
val avgTemp = sensorData
  .keyBy(_.id)
  .timeWindow(Time.seconds(1))
  .process(new TemperatureAverager)

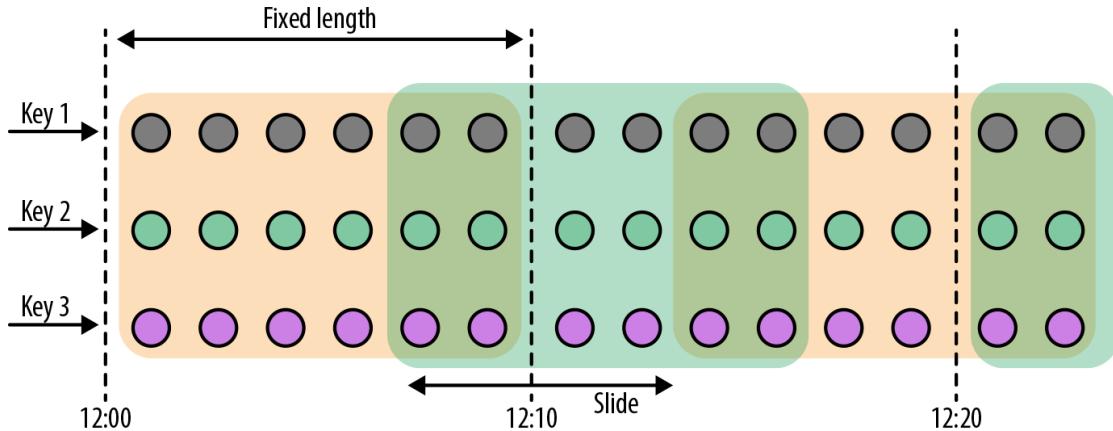
```

默认情况下，滚动窗口会和 1970-01-01-00:00:00.000 对齐，例如一个 1 小时的滚动窗口将会定义以下开始时间的窗口：00:00:00, 01:00:00, 02:00:00, 等等。

### 滑动窗口 (sliding window)

对于滑动窗口，我们需要指定窗口的大小和滑动的步长。当滑动步长小于窗口大小时，窗口将会出现重叠，而元素会被分配到不止一个窗口中去。当滑动步长大于窗口大小时，一些元素可能不会被分配到任何窗口中去，会被直接丢弃。

下面的代码定义了窗口大小为 1 小时，滑动步长为 15 分钟的窗口。每一个元素将被分配到 4 个窗口中去。



```

val slidingAvgTemp = sensorData
    .keyBy(_.id)
    .window(
        SlidingEventTimeWindows.of(Time.hours(1), Time.minutes(15))
    )
    .process(new TemperatureAverager)

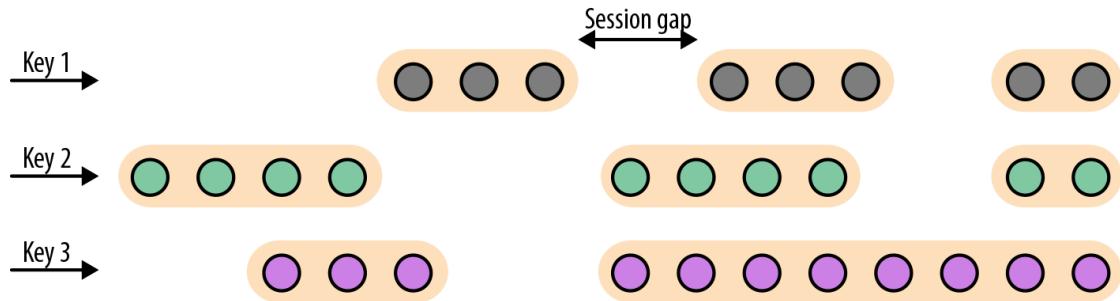
val slidingAvgTemp = sensorData
    .keyBy(_.id)
    .window(
        SlidingProcessingTimeWindows.of(Time.hours(1), Time.minutes(15))
    )
    .process(new TemperatureAverager)

val slidingAvgTemp = sensorData
    .keyBy(_.id)
    .timeWindow(Time.hours(1), Time.minutes(15))
    .process(new TemperatureAverager)

```

### 会话窗口 (session windows)

会话窗口不可能重叠，并且会话窗口的大小也不是固定的。不活跃的时间长度定义了会话窗口的界限。不活跃的时间是指这段时间没有元素到达。下图展示了元素如何被分配到会话窗口。



```
val sessionWindows = sensorData
    .keyBy(_.id)
    .window(EventTimeSessionWindows.withGap(Time.minutes(15)))
    .process(...)
```

```
val sessionWindows = sensorData
    .keyBy(_.id)
    .window(ProcessingTimeSessionWindows.withGap(Time.minutes(15)))
    .process(...)
```

由于会话窗口的开始时间和结束时间取决于接收到的元素，所以窗口分配器无法立即将所有的元素分配到正确的窗口中去。相反，会话窗口分配器最开始时先将每一个元素分配到它自己独有的窗口中去，窗口开始时间是这个元素的时间戳，窗口大小是 session gap 的大小。接下来，会话窗口分配器会将出现重叠的窗口合并成一个窗口。

## 调用窗口计算函数

window functions 定义了窗口中数据的计算逻辑。有两种计算逻辑：

1. 增量聚合函数 (Incremental aggregation functions): 当一个事件被添加到窗口时，触发函数计算，并且更新 window 的状态 (单个值)。最终聚合的结果将作为输出。ReduceFunction 和 AggregateFunction 是增量聚合函数。
2. 全窗口函数 (Full window functions): 这个函数将会收集窗口中所有的元素，可以做一些复杂计算。ProcessWindowFunction 是 window function。

### ReduceFunction

例子：计算每个传感器 15s 窗口中的温度最小值

```
val minTempPerWindow: DataStream[(String, Double)] = sensorData
    .map(r => (r.id, r.temperature))
    .keyBy(_.id)
    .timeWindow(Time.seconds(15))
    .reduce((r1, r2) => (r1._1, r1._2.min(r2._2)))
```

### AggregateFunction

先来看接口定义

```
public interface AggregateFunction<IN, ACC, OUT>
    extends Function, Serializable {

    // create a new accumulator to start a new aggregate
    ACC createAccumulator();

    // add an input element to the accumulator and return the accumulator
    ACC add(IN value, ACC accumulator);

    // compute the result from the accumulator and return it.
    OUT getResult(ACC accumulator);

    // merge two accumulators and return the result.
    ACC merge(ACC a, ACC b);
}
```

IN 是输入元素的类型，ACC 是累加器的类型，OUT 是输出元素的类型。

例子

```
1 val avgTempPerWindow: DataStream[(String, Double)] = sensorData
2     .map(r => (r.id, r.temperature))
3     .keyBy(_.id)
4     .timeWindow(Time.seconds(15))
5     .aggregate(new AvgTempFunction)
6
7     // An AggregateFunction to compute the average temperature per sensor.
8     // The accumulator holds the sum of temperatures and an event count.
9     class AvgTempFunction
10        extends AggregateFunction[(String, Double),
11            (String, Double, Int), (String, Double)] {
12
13        override def createAccumulator() = {
14            ("", 0.0, 0)
15        }
16
17        override def add(in: (String, Double), acc: (String, Double, Int)) = {
18            (in._1, in._2 + acc._2, 1 + acc._3)
19        }
20
21        override def getResult(acc: (String, Double, Int)) = {
22            (acc._1, acc._2 / acc._3)
```

```
23     }
24
25     override def merge(acc1: (String, Double, Int),
26         acc2: (String, Double, Int)) = {
27         (acc1._1, acc1._2 + acc2._2, acc1._3 + acc2._3)
28     }
29 }
```

### ProcessWindowFunction

一些业务场景，我们需要收集窗口内所有的数据进行计算，例如计算窗口数据的中位数，或者计算窗口数据中出现频率最高的值。这样的需求，使用 ReduceFunction 和 AggregateFunction 就无法实现了。这个时候就需要 ProcessWindowFunction 了。

先来看接口定义

```
public abstract class ProcessWindowFunction<IN, OUT, KEY, W extends Window>
    extends AbstractRichFunction {

    // Evaluates the window
    void process(KEY key, Context ctx, Iterable<IN> vals, Collector<OUT> out)
        throws Exception;

    // Deletes any custom per-window state when the window is purged
    public void clear(Context ctx) throws Exception {}

    // The context holding window metadata
    public abstract class Context implements Serializable {
        // Returns the metadata of the window
        public abstract W window();

        // Returns the current processing time
        public abstract long currentProcessingTime();

        // Returns the current event-time watermark
        public abstract long currentWatermark();

        // State accessor for per-window state
        public abstract KeyedStateStore windowState();

        // State accessor for per-key global state
        public abstract KeyedStateStore globalState();

        // Emits a record to the side output identified by the OutputTag.
    }
```

```

    public abstract <X> void output(OutputTag<X> outputTag, X value);
}
}

```

process() 方法接受的参数为: window 的 key, Iterable 迭代器包含窗口的所有元素, Collector 用于输出结果流。Context 参数和别的 process 方法一样。而 ProcessWindowFunction 的 Context 对象还可以访问 window 的元数据(窗口开始和结束时间), 当前处理时间和水位线, per-window state 和 per-key global state, side outputs。

- per-window state: 用于保存一些信息, 这些信息可以被 process() 访问, 只要 process 所处理的元素属于这个窗口。
- per-key global state: 同一个 key, 也就是在一条 KeyedStream 上, 不同的 window 可以访问 per-key global state 保存的值。

例子: 计算 5s 滚动窗口中的最低和最高的温度。输出的元素包含了(流的 Key, 最低温度, 最高温度, 窗口结束时间)。

```

1 val minMaxTempPerWindow: DataStream[MinMaxTemp] = sensorData
2   .keyBy(_.id)
3   .timeWindow(Time.seconds(5))
4   .process(new HighAndLowTempProcessFunction)
5
6 case class MinMaxTemp(id: String, min: Double, max: Double, endTs: Long)
7
8 class HighAndLowTempProcessFunction
9   extends ProcessWindowFunction[SensorReading,
10     MinMaxTemp, String, TimeWindow] {
11   override def process(key: String,
12     ctx: Context,
13     vals: Iterable[SensorReading],
14     out: Collector[MinMaxTemp]): Unit = {
15     val temps = vals.map(_.temperature)
16     val windowEnd = ctx.window.getEnd
17
18     out.collect(MinMaxTemp(key, temps.min, temps.max, windowEnd))
19   }
20 }

```

我们还可以将 ReduceFunction/AggregateFunction 和 ProcessWindowFunction 结合起来使用。ReduceFunction/AggregateFunction 做增量聚合, ProcessWindowFunction 提供更多的对数据流的访问权限。如果只使用 ProcessWindowFunction(底层的实现为将事件都保存在 ListState 中), 将会非常占用空间。分配到某个窗口的元素将被提前聚合, 而当窗口的 trigger 触发时, 也就是窗口收集完数据关闭时, 将会把聚合结果发送到 ProcessWindowFunction 中, 这时 Iterable 参数将会只有一个值, 就是前面聚合的值。

## 例子

```
input
  .keyBy(...)
  .timeWindow(...)
  .reduce(
    incrAggregator: ReduceFunction[IN],
    function: ProcessWindowFunction[IN, OUT, K, W])

input
  .keyBy(...)
  .timeWindow(...)
  .aggregate(
    incrAggregator: AggregateFunction[IN, ACC, V],
    windowFunction: ProcessWindowFunction[V, OUT, K, W])
```

我们把之前的需求重新使用以上两种方法实现一下。

```
1 case class MinMaxTemp(id: String, min: Double, max: Double, endTs: Long)
2
3 val minMaxTempPerWindow2: DataStream[MinMaxTemp] = sensorData
4   .map(r => (r.id, r.temperature, r.temperature))
5   .keyBy(_._1)
6   .timeWindow(Time.seconds(5))
7   .reduce(
8     (r1: (String, Double, Double), r2: (String, Double, Double)) => {
9       (r1._1, r1._2.min(r2._2), r1._3.max(r2._3))
10      },
11      new AssignWindowEndProcessFunction()
12    )
13
14 class AssignWindowEndProcessFunction
15   extends ProcessWindowFunction[(String, Double, Double),
16     MinMaxTemp, String, TimeWindow] {
17   override def process(key: String,
18                         ctx: Context,
19                         minMaxIt: Iterable[(String, Double, Double)],
20                         out: Collector[MinMaxTemp]): Unit = {
21     val minMax = minMaxIt.head
22     val windowEnd = ctx.window.getEnd
23     out.collect(MinMaxTemp(key, minMax._2, minMax._3, windowEnd))
24   }
25 }
```

## 自定义窗口操作符 (windows operators)

Flink 内置的 window operators 分配器已经足够应付大多数应用场景。尽管如此，如果我们需要实现一些复杂的窗口逻辑，例如：可以发射早到的事件或者碰到迟到的事件就更新窗口的结果，或者窗口的开始和结束决定于特定事件的接收。

DataStream API 暴露了接口和方法来自定义窗口操作符。

- 自定义窗口分配器
- 自定义窗口计算触发器 (trigger)
- 自定义窗口数据清理功能 (evictor)

当一个事件来到窗口操作符，首先将会传给 WindowAssigner 来处理。WindowAssigner 决定了事件将被分配到哪些窗口。如果窗口不存在，WindowAssigner 将会创建一个新的窗口。

如果一个 window operator 接受了一个增量聚合函数作为参数，例如 ReduceFunction 或者 AggregateFunction，新到的元素将会立即被聚合，而聚合结果 result 将存储在 window 中。如果 window operator 没有使用增量聚合函数，那么新元素将被添加到 ListState 中，ListState 中保存了所有分配给窗口的元素。

新元素被添加到窗口时，这个新元素同时也被传给了 window 的 trigger。trigger 定义了 window 何时准备好求值，何时 window 被清空。trigger 可以基于 window 被分配的元素和注册的定时器来对窗口的所有元素求值或者在特定事件清空 window 中所有的元素。

当 window operator 只接收一个增量聚合函数作为参数时：

当 window operator 只接收一个全窗口函数作为参数时：

当 window operator 接收一个增量聚合函数和一个全窗口函数作为参数时：

evictor 是一个可选的组件，可以被注入到 ProcessWindowFunction 之前或者之后调用。evictor 可以清除掉 window 中收集的元素。由于 evictor 需要迭代所有的元素，所以 evictor 只能使用在没有增量聚合函数作为参数的情况下。

下面的代码说明了如果使用自定义的 trigger 和 evictor 定义一个 window operator：

```
stream
    .keyBy(...)
    .window(...)
    [.trigger(...)]
    [.evictor(...)]
    .reduce/aggregate/process(...)
```

注意：每个 WindowAssigner 都有一个默认的 trigger。

### 窗口生命周期

当 WindowAssigner 分配某个窗口的第一个元素时，这个窗口才会被创建。所以不存在没有元素的窗口。

一个窗口包含了如下状态：

- Window content
  - 分配到这个窗口的元素
  - 增量聚合的结果 (如果 window operator 接收了 ReduceFunction 或者 AggregateFunction 作为参数)。
- Window object
  - WindowAssigner 返回 0 个, 1 个或者多个 window object。
  - window operator 根据返回的 window object 来聚合元素。
  - 每一个 window object 包含一个 windowEnd 时间戳, 来区别于其他窗口。
- 触发器的定时器: 一个触发器可以注册定时事件, 到了定时的时间可以执行相应的回调函数, 例如: 对窗口进行求值或者清空窗口。
- 触发器中的自定义状态: 触发器可以定义和使用自定义的、per-window 或者 per-key 状态。这个状态完全被触发器所控制。而不是被 window operator 控制。

当窗口结束时间来到, window operator 将删掉这个窗口。窗口结束时间是由 window object 的 end timestamp 所定义的。无论是使用 processing time 还是 event time, 窗口结束时间是什么类型可以调用 WindowAssigner.isEventTime() 方法获得。

#### 窗口分配器 (window assigners)

WindowAssigner 将会把元素分配到 0 个, 1 个或者多个窗口中去。我们看一下 WindowAssigner 接口:

```
public abstract class WindowAssigner<T, W extends Window>
    implements Serializable {

    public abstract Collection<W> assignWindows(
        T element,
        long timestamp,
        WindowAssignerContext context);

    public abstract Trigger<T, W> getDefaultTrigger(
        StreamExecutionEnvironment env);

    public abstract TypeSerializer<W> getWindowSerializer(
        ExecutionConfig executionConfig);

    public abstract boolean isEventTime();

    public abstract static class WindowAssignerContext {
        public abstract long getCurrentProcessingTime();
    }
}
```

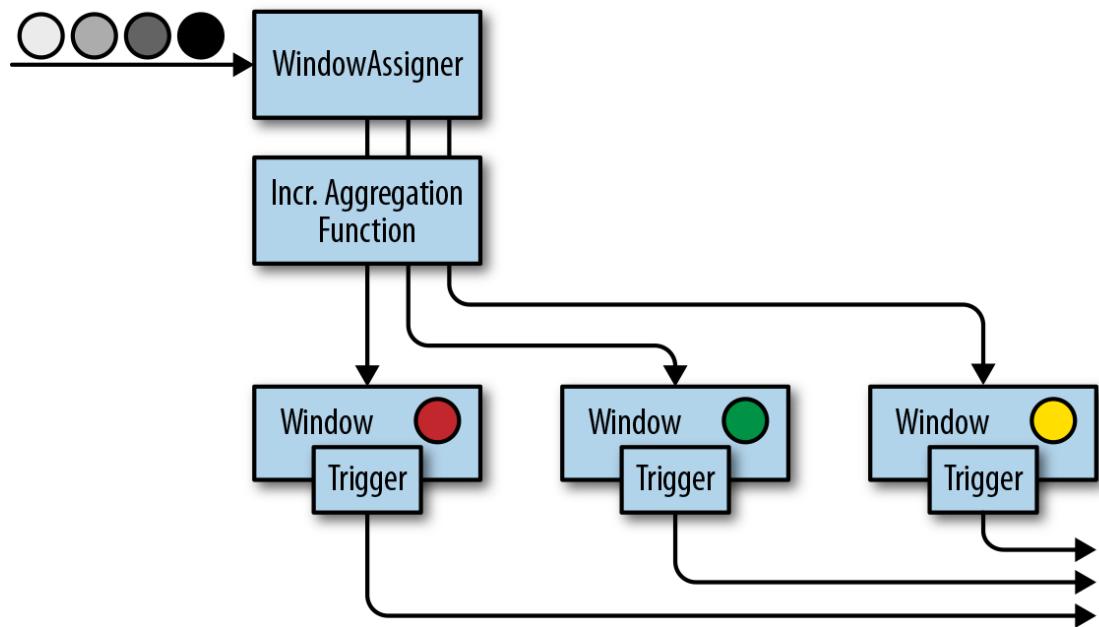
WindowAssigner 有两个泛型参数：

- T: 事件的数据类型
- W: 窗口的类型

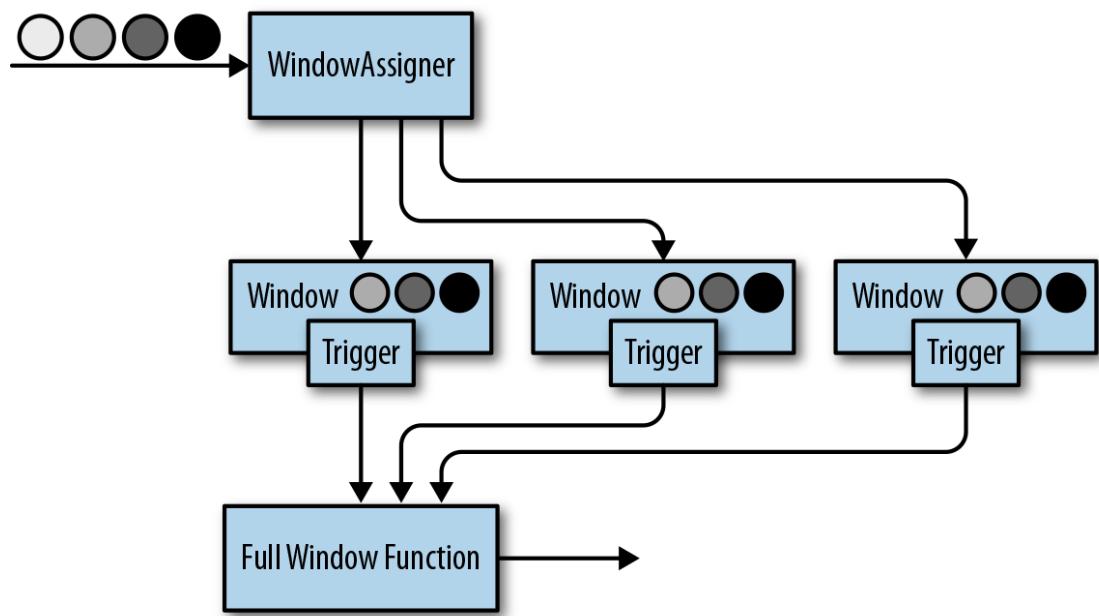
下面的代码创建了一个自定义窗口分配器，是一个 30 秒的滚动事件时间窗口。

```
1 class ThirtySecondsWindows
2     extends WindowAssigner[Object, TimeWindow] {
3
4     val windowHeight: Long = 30 * 1000L
5
6     override def assignWindows(
7         o: Object,
8         ts: Long,
9         ctx: WindowAssigner.WindowAssignerContext
10    ): java.util.List[TimeWindow] = {
11
12        val startTime = ts - (ts % windowHeight)
13        val endTime = startTime + windowHeight
14        Collections.singletonList(new TimeWindow(startTime, endTime))
15    }
16
17    override def getDefaultTrigger(
18        env: environment.StreamExecutionEnvironment
19    ): Trigger[Object, TimeWindow] = {
20        EventTimeTrigger.create()
21    }
22
23    override def getWindowSerializer(
24        executionConfig: ExecutionConfig
25    ): TypeSerializer[TimeWindow] = {
26        new TimeWindow.Serializer
27    }
28
29    override def isEventTime = true
30 }
```

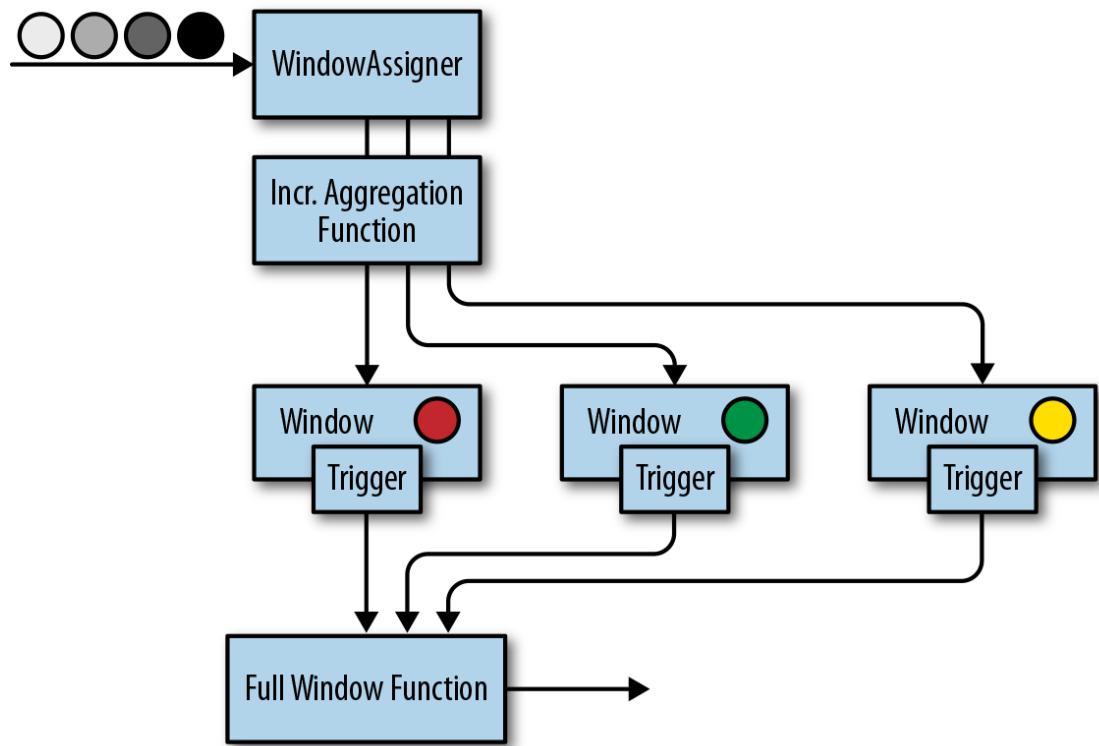
增量聚合示意图



全窗口聚合示意图



增量聚合和全窗口聚合结合使用的示意图



### 触发器 (Triggers)

触发器定义了 window 何时会被求值以及何时发送求值结果。触发器可以到了特定的时间触发也可以碰到特定的事件触发。例如：观察到事件数量符合一定条件或者观察到了特定的事件。

默认的触发器将会在两种情况下触发

- 处理时间：机器时间到达处理时间
- 事件时间：水位线超过了窗口的结束时间

触发器可以访问流的时间属性以及定时器，还可以对 state 状态编程。所以触发器和 process function 一样强大。例如我们可以实现一个触发逻辑：当窗口接收到一定数量的元素时，触发器触发。再比如当窗口接收到一个特定元素时，触发器触发。还有就是当窗口接收到的元素里面包含特定模式 (5 秒钟内接收到了两个同样类型的事件)，触发器也可以触发。在一个事件时间的窗口中，一个自定义的触发器可以提前 (在水位线没过窗口结束时间之前) 计算和发射计算结果。这是一个常见的低延迟计算策略，尽管计算不完全，但不像默认的那样需要等待水位线没过窗口结束时间。

每次调用触发器都会产生一个 TriggerResult 来决定窗口接下来发生什么。TriggerResult 可以取以下结果：

- CONTINUE：什么都不做
- FIRE：如果 window operator 有 ProcessWindowFunction 这个参数，将会调用这个 ProcessWindowFunction。如果窗口仅有增量聚合函数 (ReduceFunction 或者 AggregateFunction) 作为参数，那么当前的聚合结果将会被发送。窗口的 state 不变。
- PURGE：窗口所有内容包括窗口的元数据都将被丢弃。

- FIRE\_AND\_PURGE: 先对窗口进行求值，再将窗口中的内容丢弃。

TriggerResult 可能的取值使得我们可以实现很复杂的窗口逻辑。一个自定义触发器可以触发多次，可以计算或者更新结果，可以在发送结果之前清空窗口。

接下来我们看一下 Trigger API:

```
public abstract class Trigger<T, W extends Window>
    implements Serializable {

    TriggerResult onElement(
        long timestamp,
        W window,
        TriggerContext ctx);

    public abstract TriggerResult onProcessingTime(
        long timestamp,
        W window,
        TriggerContext ctx);

    public abstract TriggerResult onEventTime(
        long timestamp,
        W window,
        TriggerContext ctx);

    public boolean canMerge();

    public void onMerge(W window, OnMergeContext ctx);

    public abstract void clear(W window, TriggerContext ctx);
}

public interface TriggerContext {
    long getCurrentProcessingTime();

    long getCurrentWatermark();

    void registerProcessingTimeTimer(long time);

    void registerEventTimeTimer(long time);

    void deleteProcessingTimeTimer(long time);
}
```

```

    void deleteEventTimeTimer(long time);

    <S extends State> S getPartitionedState(
        StateDescriptor<S, ?> stateDescriptor);
}

public interface OnMergeContext extends TriggerContext {

    void mergePartitionedState(
        StateDescriptor<S, ?> stateDescriptor
    );
}

```

这里要注意两个地方：清空 state 和 merging 合并触发器。

当在触发器中使用 per-window state 时，这里我们需要保证当窗口被删除时 state 也要被删除，否则随着时间的推移，window operator 将会积累越来越多的数据，最终可能使应用崩溃。

当窗口被删除时，为了清空所有状态，触发器的 clear() 方法需要需要删掉所有的自定义 per-window state，以及使用 TriggerContext 对象将处理时间和事件时间的定时器都删除。

下面的例子展示了一个触发器在窗口结束时间之前触发。当第一个事件被分配到窗口时，这个触发器注册了一个定时器，定时时间为水位线之前一秒钟。当定时事件执行，将会注册一个新的定时事件，这样，这个触发器每秒钟最多触发一次。

```

1 class OneSecondIntervalTrigger
2     extends Trigger[SensorReading, TimeWindow] {
3
4     override def onElement(
5         r: SensorReading,
6         timestamp: Long,
7         window: TimeWindow,
8         ctx: Trigger.TriggerContext
9     ): TriggerResult = {
10
11     val firstSeen: ValueState[Boolean] = ctx
12         .getPartitionedState(
13             new ValueStateDescriptor[Boolean](
14                 "firstSeen", classOf[Boolean]
15             )
16         )
17
18     if (!firstSeen.value()) {
19         val t = ctx.getCurrentWatermark
20             + (1000 - (ctx.getCurrentWatermark % 1000))
21         ctx.registerEventTimeTimer(t)
22     }
23
24 }

```

```
21     ctx.registerEventTimeTimer(window.getEnd)
22     firstSeen.update(true)
23 }
24
25     TriggerResult.CONTINUE
26 }
27
28     override def onEventTime(
29         timestamp: Long,
30         window: TimeWindow,
31         ctx: Trigger.TriggerContext
32 ): TriggerResult = {
33     if (timestamp == window.getEnd) {
34         TriggerResult.FIRE_AND_PURGE
35     } else {
36         val t = ctx.getCurrentWatermark
37         + (1000 - (ctx.getCurrentWatermark % 1000))
38         if (t < window.getEnd) {
39             ctx.registerEventTimeTimer(t)
40         }
41         TriggerResult.FIRE
42     }
43 }
44
45     override def onProcessingTime(
46         timestamp: Long,
47         window: TimeWindow,
48         ctx: Trigger.TriggerContext
49 ): TriggerResult = {
50     TriggerResult.CONTINUE
51 }
52
53     override def clear(
54         window: TimeWindow,
55         ctx: Trigger.TriggerContext
56 ): Unit = {
57     val firstSeen: ValueState[Boolean] = ctx
58         .getPartitionedState(
59             new ValueStateDescriptor[Boolean](
60                 "firstSeen", classOf[Boolean]
61             )
62         )
63 }
```

```
63     firstSeen.clear()
64   }
65 }
```

### 清理器 (EVICTORS)

evictor 可以在 window function 求值之前或者之后移除窗口中的元素。

我们看一下 Evictor 的接口定义：

```
public interface Evictor<T, W extends Window>
    extends Serializable {
    void evictBefore(
        Iterable<TimestampedValue<T>> elements,
        int size,
        W window,
        EvictorContext evictorContext);

    void evictAfter(
        Iterable<TimestampedValue<T>> elements,
        int size,
        W window,
        EvictorContext evictorContext);

    interface EvictorContext {
        long getCurrentProcessingTime();

        long getCurrentWatermark();
    }
}
```

evictBefore() 和 evictAfter() 分别在 window function 计算之前或者之后调用。Iterable 迭代器包含了窗口所有的元素，size 为窗口中元素的数量，window object 和 EvictorContext 可以访问当前处理时间和水位线。可以对 Iterator 调用 remove() 方法来移除窗口中的元素。

evictor 也经常被用在 GlobalWindow 上，用来清除部分元素，而不是将窗口中的元素全部清空。

## 基于时间的双流 Join

数据流操作的另一个常见需求是对两条数据流中的事件进行联结 (connect) 或 Join。Flink DataStream API 中内置有两个可以根据时间条件对数据流进行 Join 的算子：基于间隔的 Join 和基于窗口的 Join。本节我们会对它们进行介绍。

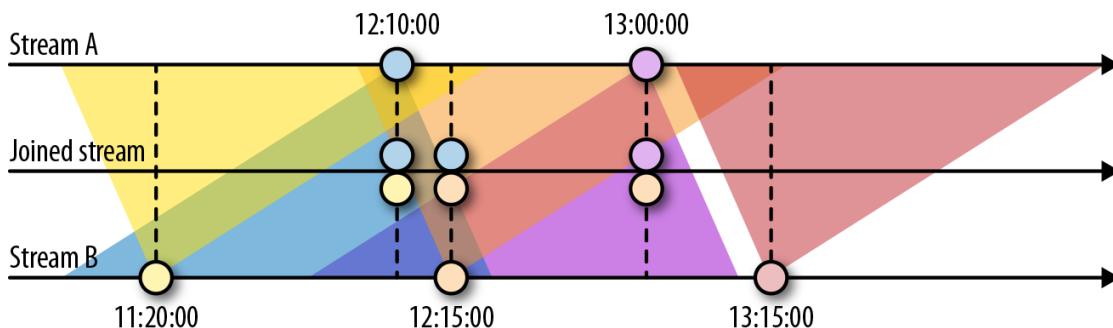
如果 Flink 内置的 Join 算子无法表达所需的 Join 语义，那么你可以通过 CoProcessFunction、BroadcastProcessFunction 或 KeyedBroadcastProcessFunction 实现自定义的 Join 逻辑。

注意，你要设计的 Join 算子需要具备高效的状态访问模式及有效的状态清理策略。

## 基于间隔的 Join

基于间隔的 Join 会对两条流中拥有相同键值以及彼此之间时间戳不超过某一指定间隔的事件进行 Join。

下图展示了两条流（A 和 B）上基于间隔的 Join，如果 B 中事件的时间戳相较于 A 中事件的时间戳不早于 1 小时且不晚于 15 分钟，则会将两个事件 Join 起来。Join 间隔具有对称性，因此上面的条件也可以表示为 A 中事件的时间戳相较 B 中事件的时间戳不早于 15 分钟且不晚于 1 小时。



基于间隔的 Join 目前只支持事件时间以及 INNER JOIN 语义（无法发出未匹配成功的事件）。下面的例子定义了一个基于间隔的 Join。

```
input1
    .keyBy(...)
    .between(<lower-bound>, <upper-bound>) // 相对于 input1 的上下界
    .process(ProcessJoinFunction) // 处理匹配的事件对
```

Join 成功的事件对会发送给 ProcessJoinFunction。下界和上界分别由负时间间隔和正时间间隔来定义，例如 between(Time.hour(-1), Time.minute(15))。在满足下界值小于上界值的前提下，你可以任意对它们赋值。例如，允许出现 B 中事件的时间戳相较 A 中事件的时间戳早 1 ~ 2 小时这样的条件。

基于间隔的 Join 需要同时对双流的记录进行缓冲。对第一个输入而言，所有时间戳大于当前水位线减去间隔上界的数据都会被缓冲起来；对第二个输入而言，所有时间戳大于当前水位线加上间隔下界的数据都会被缓冲起来。注意，两侧边界值都有可能为负。上图中的 Join 需要存储数据流 A 中所有时间戳大于当前水位线减去 15 分钟的记录，以及数据流 B 中所有时间戳大于当前水位线减去 1 小时的记录。不难想象，如果两条流的事件时间不同步，那么 Join 所需的存储就会显著增加，因为水位线总是由“较慢”的那条流来决定。

例子：每个用户的点击 Join 这个用户最近 10 分钟内的浏览

```
42     val clickStream = env
43         .fromElements(
44             UserClickLog("user_2", "2019-11-16 17:30:00", "click", "page_1")
45         )
46         .assignTimestampsAndWatermarks(
47             new BoundedOutOfOrdernessTimestampExtractor[UserClickLog](Time.seconds(0)) {
48                 override def extractTimestamp(t: UserClickLog): Long = {
49                     val dateTimeFormatter = DateTimeFormat.forPattern("yyyy-MM-dd HH:mm:ss")
50                     val dateTime = DateTime.parse(t.eventTime, dateTimeFormatter)
51                     dateTime.getMillis
52                 }
53             }
54         )
55
56     val browseStream = env
57         .fromElements(
58             UserBrowseLog("user_2", "2019-11-16 17:19:00", "browse", "product_1", "10"),
59             UserBrowseLog("user_2", "2019-11-16 17:20:00", "browse", "product_1", "10"),
60             UserBrowseLog("user_2", "2019-11-16 17:22:00", "browse", "product_1", "10"),
61             UserBrowseLog("user_2", "2019-11-16 17:26:00", "browse", "product_1", "10"),
62             UserBrowseLog("user_2", "2019-11-16 17:30:00", "browse", "product_1", "10"),
63             UserBrowseLog("user_2", "2019-11-16 17:31:00", "browse", "product_1", "10")
64         )
65         .assignTimestampsAndWatermarks(
66             new BoundedOutOfOrdernessTimestampExtractor[UserBrowseLog](Time.seconds(0)) {
67                 override def extractTimestamp(t: UserBrowseLog): Long = {
68                     val dateTimeFormatter = DateTimeFormat.forPattern("yyyy-MM-dd HH:mm:ss")
69                     val dateTime = DateTime.parse(t.eventTime, dateTimeFormatter)
70                     dateTime.getMillis
71                 }
72             }
73         )
74
75     clickStream
76         .keyBy("userID")
77         .intervalJoin(browseStream.keyBy("userID"))
78         .between(Time.minutes(-10), Time.seconds(0))
79         .process(new MyIntervalJoin)
80         .print()
81
82     env.execute()
83 }
```

```
84  
85 class MyIntervalJoin  
86     extends ProcessJoinFunction[UserClickLog, UserBrowseLog, String] {  
87     override def processElement(  
88         left: UserClickLog,  
89         right: UserBrowseLog,  
90         context: ProcessJoinFunction[UserClickLog, UserBrowseLog, String]#Context,  
91         out: Collector[String]  
92     ): Unit = {  
93         out.collect(left + " =Interval Join=> " + right)  
94     }  
95 }  
96 }
```

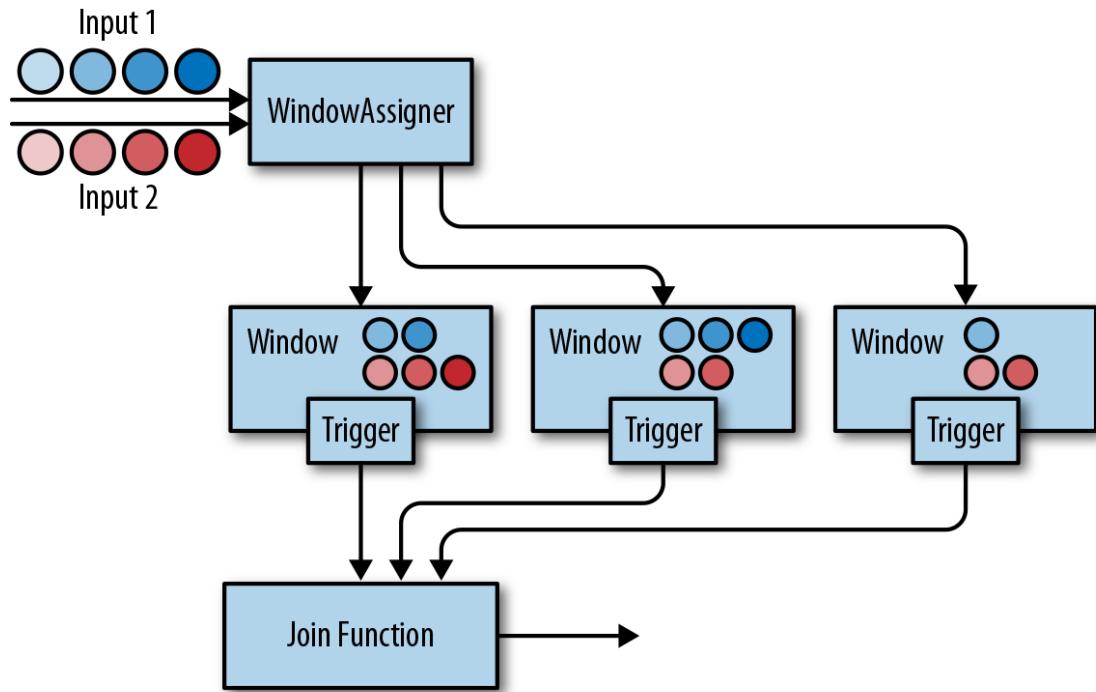
## 基于窗口的 Join

顾名思义，基于窗口的 Join 需要用到 Flink 中的窗口机制。其原理是将两条输入流中的元素分配到公共窗口中并在窗口完成时进行 Join (或 Cogroup)。

下面的例子展示了如何定义基于窗口的 Join。

```
input1.join(input2)  
    .where(...)      // 为 input1 指定键值属性  
    .equalTo(...)    // 为 input2 指定键值属性  
    .window(...)    // 指定 WindowAssigner  
    [.trigger(...)] // 选择性的指定 Trigger  
    [.evictor(...)] // 选择性的指定 Evictor  
    .apply(...)      // 指定 JoinFunction
```

下图展示了 DataStream API 中基于窗口的 Join 是如何工作的。



两条输入流都会根据各自的键值属性进行分区，公共窗口分配器会将二者的事件映射到公共窗口内（其中同时存储了两条流中的数据）。当窗口的计时器触发时，算子会遍历两个输入中元素的每个组合（叉乘积）去调用 `JoinFunction`。同时你也可以自定义触发器或移除器。由于两条流中的事件会被映射到同一个窗口中，因此该过程中的触发器和移除器与常规窗口算子中的完全相同。

除了对窗口中的两条流进行 `Join`，你还可以对它们进行 `Cogroup`，只需将算子定义开始位置的 `join` 改为 `coGroup()` 即可。`Join` 和 `Cogroup` 的总体逻辑相同，二者的唯一区别是：`Join` 会为两侧输入中的每个事件对调用 `JoinFunction`；而 `Cogroup` 中用到的 `CoGroupFunction` 会以两个输入的元素遍历器为参数，只在每个窗口中被调用一次。

注意，对划分窗口后的数据流进行 `Join` 可能会产生意想不到的语义。例如，假设你为执行 `Join` 操作的算子配置了 1 小时的滚动窗口，那么一旦来自两个输入的元素没有被划分到同一窗口，它们就无法 `Join` 在一起，即使二者彼此仅相差 1 秒钟。

## 处理迟到的元素 (Handling Late Data)

水位线可以用来平衡计算的完整性和延迟两方面。除非我们选择一种非常保守的水位线策略（最大延时设置的非常大，以至于包含了所有的元素，但结果是非常大的延迟），否则我们总需要处理迟到的元素。

迟到的元素是指当这个元素来到时，这个元素所对应的窗口已经计算完毕了（也就是说水位线已经没过窗口结束时间了）。这说明迟到这个特性只针对事件时间。

`DataStream API` 提供了三种策略来处理迟到元素

- 直接抛弃迟到的元素
- 将迟到的元素发送到另一条流中去
- 可以更新窗口已经计算完的结果，并发出计算结果。

## 抛弃迟到元素

抛弃迟到的元素是 event time window operator 的默认行为。也就是说一个迟到的元素不会创建一个新的窗口。

process function 可以通过比较迟到元素的时间戳和当前水位线的大小来很轻易的过滤掉迟到元素。

## 重定向迟到元素

迟到的元素也可以使用侧输出 (side output) 特性被重定向到另外的一条流中去。迟到元素所组成的侧输出流可以继续处理或者 sink 到持久化设施中去。

例子

```
1 val readings = env
2   .socketTextStream("localhost", 9999, '\n')
3   .map(line => {
4     val arr = line.split(" ")
5     (arr(0), arr(1).toLong * 1000)
6   })
7   .assignAscendingTimestamps(_._2)
8
9 val countPer10Secs = readings
10  .keyBy(_._1)
11  .timeWindow(Time.seconds(10))
12  .sideOutputLateData(
13    new OutputTag[(String, Long)]("late-readings")
14  )
15  .process(new CountFunction())
16
17 val lateStream = countPer10Secs
18  .getSideOutput(
19    new OutputTag[(String, Long)]("late-readings")
20  )
21
22 lateStream.print()
```

实现 CountFunction:

```
1 class CountFunction extends ProcessWindowFunction[(String, Long),  
2   String, String, TimeWindow] {  
3   override def process(key: String,  
4     context: Context,  
5     elements: Iterable[(String, Long)],  
6     out: Collector[String]): Unit = {  
7     out.collect(" 窗口共有" + elements.size + " 条数据")  
8   }  
9 }
```

下面这个例子展示了 ProcessFunction 如何过滤掉迟到的元素然后将迟到的元素发送到侧输出流中去。

```
val readings: DataStream[SensorReading] = ???  
val filteredReadings: DataStream[SensorReading] = readings  
  .process(new LateReadingsFilter)  
  
// retrieve late readings  
val lateReadings: DataStream[SensorReading] = filteredReadings  
  .getSideOutput(new OutputTag[SensorReading]("late-readings"))  
  
/** A ProcessFunction that filters out late sensor readings and  
 * re-directs them to a side output */  
class LateReadingsFilter  
  extends ProcessFunction[SensorReading, SensorReading] {  
  
  val lateReadingsOut = new OutputTag[SensorReading]("late-readings")  
  
  override def processElement(  
    r: SensorReading,  
    ctx: ProcessFunction[SensorReading, SensorReading]#Context,  
    out: Collector[SensorReading]): Unit = {  
  
    // compare record timestamp with current watermark  
    if (r.timestamp < ctx.timerService().currentWatermark()) {  
      // this is a late reading => redirect it to the side output  
      ctx.output(lateReadingsOut, r)  
    } else {  
      out.collect(r)  
    }  
  }  
}
```

## 使用迟到元素更新窗口计算结果 (Updating Results by Including Late Events)

由于存在迟到的元素，所以已经计算出的窗口结果是不准确和不完全的。我们可以使用迟到元素更新已经计算完的窗口结果。

如果我们要求一个 operator 支持重新计算和更新已经发出的结果，就需要在第一次发出结果以后也要保存之前所有的状态。但显然我们不能一直保存所有的状态，肯定会在某一个时间点将状态清空，而一旦状态被清空，结果就再也不能重新计算或者更新了。而迟到的元素只能被抛弃或者发送到侧输出流。

window operator API 提供了方法来明确声明我们要等待迟到元素。当使用 event-time window，我们可以指定一个时间段叫做 allowed lateness。window operator 如果设置了 allowed lateness，这个 window operator 在水位线没过窗口结束时间时也将不会删除窗口和窗口中的状态。窗口会在一段时间内 (allowed lateness 设置的) 保留所有的元素。

当迟到元素在 allowed lateness 时间内到达时，这个迟到元素会被实时处理并发送到触发器 (trigger)。当水位线没过了窗口结束时间 +allowed lateness 时间时，窗口会被删除，并且所有后来的迟到的元素都会被丢弃。

Allowed lateness 可以使用 allowedLateness() 方法来指定，如下所示：

```
val readings: DataStream[SensorReading] = ...

val countPer10Secs: DataStream[(String, Long, Int, String)] = readings
    .keyBy(_.id)
    .timeWindow(Time.seconds(10))
    // process late readings for 5 additional seconds
    .allowedLateness(Time.seconds(5))
    // count readings and update results if late readings arrive
    .process(new UpdatingWindowCountFunction)

    /**
     * A counting WindowProcessFunction that distinguishes between
     * first results and updates.
     */
class UpdatingWindowCountFunction
    extends ProcessWindowFunction[SensorReading,
        (String, Long, Int, String), String, TimeWindow] {

    override def process(
        id: String,
        ctx: Context,
        elements: Iterable[SensorReading],
        out: Collector[(String, Long, Int, String)]): Unit = {

        // count the number of readings
        val cnt = elements.count(_ => true)
```

```
// state to check if this is
// the first evaluation of the window or not
val isUpdate = ctx.windowState.getState(
    new ValueStateDescriptor[Boolean](
        "isUpdate",
        Types.of[Boolean]))  
  
if (!isUpdate.value()) {
    // first evaluation, emit first result
    out.collect((id, ctx.window.getEnd, cnt, "first"))
    isUpdate.update(true)
} else {
    // not the first evaluation, emit an update
    out.collect((id, ctx.window.getEnd, cnt, "update"))
}  
}  
}  
}
```

## 第七章，有状态算子和应用

状态操作符和用户自定义函数都是我们在写流处理程序时，常用的工具。事实上，大部分稍微复杂一点的逻辑都需要保存数据或者保存计算结果。很多 Flink 内置的操作符例如：source 操作符，sink 操作符等等都是有状态的，也就是说会缓存流数据或者计算结果。例如，窗口操作符将会为 ProcessWindowFunction 收集输入的数据，或者收集 ReduceFunction 计算的结果。而 ProcessFunction 也会保存定时器事件，一些 sink 方法为了做到 exactly-once，会将事务保存下来。除了内置的操作符以及提供的 source 和 sink 操作符，Flink 的 DataStream API 还在 UDF 函数中暴露了可以注册、保存和访问状态的接口。

本章重点讨论有状态的用户自定义函数的实现，以及讨论有状态应用的性能和健壮性。特别的，我们将解释在用户自定义函数中，如何定义不同类型的状态，以及如何与状态进行交互。我们还讨论了性能方面的问题以及如何控制状态大小的问题。

### 实现有状态的用户自定义函数

我们知道函数有两种状态，键控状态 (keyed state) 和操作符状态 (operator state)。

#### 在 `RuntimeContext` 中定义键控状态 (keyed state)

用户自定义函数可以使用 keyed state 来存储和访问 key 对应的状态。对于每一个 key，Flink 将会维护一个状态实例。一个操作符的状态实例将会被分发到操作符的所有并行任务中去。

这表明函数的每一个并行任务只为所有 key 的某一部分 key 保存 key 对应的状态实例。所以 keyed state 和分布式 key-value map 数据结构非常类似。

keyed state 仅可用于 KeyedStream。Flink 支持以下数据类型的状态变量：

- ValueState[T] 保存单个的值，值的类型为 T。
  - get 操作: ValueState.value()
  - set 操作: ValueState.update(value: T)
- ListState[T] 保存一个列表，列表里的元素的数据类型为 T。基本操作如下：
  - ListState.add(value: T)
  - ListState.addAll(values: java.util.List[T])
  - ListState.get() 返回 Iterable[T]
  - ListState.update(values: java.util.List[T])
- MapState[K, V] 保存 Key-Value 对。
  - MapState.get(key: K)
  - MapState.put(key: K, value: V)
  - MapState.contains(key: K)
  - MapState.remove(key: K)
- ReducingState[T]
- AggregatingState[I, O]

State.clear() 是清空操作。

```
val sensorData: DataStream[SensorReading] = ...
val keyedData: KeyedStream[SensorReading, String] = sensorData.keyBy(_.id)

val alerts: DataStream[(String, Double, Double)] = keyedData
    .flatMap(new TemperatureAlertFunction(1.7))

class TemperatureAlertFunction(val threshold: Double)
    extends RichFlatMapFunction[SensorReading, (String, Double, Double)] {
    private var lastTempState: ValueState[Double] = _

    override def open(parameters: Configuration): Unit = {
        val lastTempDescriptor = new ValueStateDescriptor[Double](
            "lastTemp", classOf[Double])

        lastTempState = getRuntimeContext.getState[Double](lastTempDescriptor)
    }

    override def flatMap(
        reading: SensorReading,
        out: Collector[(String, Double, Double)])
        : Unit = {
```

```
    val lastTemp = lastTempState.value()
    val tempDiff = (reading.temperature - lastTemp).abs
    if (tempDiff > threshold) {
        out.collect((reading.id, reading.temperature, tempDiff))
    }
    this.lastTempState.update(reading.temperature)
}
}
```

上面例子中的 FlatMapFunction 只能访问当前处理的元素所包含的 key 所对应的状态变量。

不同 key 对应的 keyed state 是相互隔离的。

- 通过 RuntimeContext 注册 StateDescriptor。StateDescriptor 以状态 state 的名字和存储的数据类型为参数。数据类型必须指定，因为 Flink 需要选择合适的序列化器。
- 在 open() 方法中创建 state 变量。注意复习之前的 RichFunction 相关知识。

当一个函数注册了 StateDescriptor 描述符，Flink 会检查状态后端是否已经存在这个状态。这种情况通常出现在应用挂掉要从检查点或者保存点恢复的时候。在这两种情况下，Flink 会将注册的状态连接到已经存在的状态。如果不存在状态，则初始化一个空的状态。

使用 FlatMap with keyed ValueState 的快捷方式 flatMapWithState 也可以实现以上需求。

```
val alerts: DataStream[(String, Double, Double)] = keyedSensorData
    .flatMapWithState[(String, Double, Double), Double] {
    case (in: SensorReading, None) =>
        // no previous temperature defined.
        // Just update the last temperature
        (List.empty, Some(in.temperature))
    case (r: SensorReading, lastTemp: Some[Double]) =>
        // compare temperature difference with threshold
        val tempDiff = (r.temperature - lastTemp.get).abs
        if (tempDiff > 1.7) {
            // threshold exceeded.
            // Emit an alert and update the last temperature
            (List((r.id, r.temperature, tempDiff)), Some(r.temperature))
        } else {
            // threshold not exceeded. Just update the last temperature
            (List.empty, Some(r.temperature))
        }
    }
}
```

## 使用 ListCheckpointed 接口来实现操作符的列表状态 (List State)

操作符状态会在操作符的每一个并行实例中去维护。一个操作符并行实例上的所有事件都可以访问同一个状态。Flink 支持三种操作符状态：list state, list union state, broadcast state。

一个函数可以实现 ListCheckpointed 接口来处理操作符的 list state。ListCheckpointed 接口无法处理 ValueState 和 ListState，因为这些状态是注册在状态后端的。操作符状态类似于成员变量，和状态后端的交互通过 ListCheckpointed 接口的回调函数实现。接口提供了两个方法：

```
// 返回函数状态的快照，返回值为列表  
snapshotState(checkpointId: Long, timestamp: Long): java.util.List[T]  
// 从列表恢复函数状态  
restoreState(java.util.List[T] state): Unit
```

当 Flink 触发 stateful function 的一次 checkpoint 时，snapshotState() 方法会被调用。方法接收两个参数，checkpointId 为唯一的单调递增的检查点 Id，timestamp 为当 master 机器开始做检查点操作时的墙上时钟（机器时间）。方法必须返回序列化好的状态对象的列表。

当宕机程序从检查点或者保存点恢复时会调用 restoreState() 方法。restoreState 使用 snapshotState 保存的列表来恢复。

下面的例子展示了如何实现 ListCheckpointed 接口。业务场景为：一个对每一个并行实例的超过阈值的温度的计数程序。

```
class HighTempCounter(val threshold: Double)  
  extends RichFlatMapFunction[SensorReading, (Int, Long)]  
  with ListCheckpointed[java.lang.Long] {  
  
  // index of the subtask  
  private lazy val subtaskIdx = getRuntimeContext  
    .getIndexofThisSubtask  
  // local count variable  
  private var highTempCnt = 0L  
  
  override def flatMap(  
    in: SensorReading,  
    out: Collector[(Int, Long)]): Unit = {  
    if (in.temperature > threshold) {  
      // increment counter if threshold is exceeded  
      highTempCnt += 1  
      // emit update with subtask index and counter  
      out.collect((subtaskIdx, highTempCnt))  
    }  
  }  
  
  override def restoreState(
```

```
state: util.List[java.lang.Long]): Unit = {
    highTempCnt = 0
    // restore state by adding all longs of the list
    for (cnt <- state.asScala) {
        highTempCnt += cnt
    }
}

override def snapshotState(
    chkpntId: Long,
    ts: Long): java.util.List[java.lang.Long] = {
    // snapshot state as list with a single count
    java.util.Collections.singletonList(highTempCnt)
}
```

上面的例子中，每一个并行实例都计数了本实例有多少温度值超过了设定的阈值。例子中使用了操作符状态，并且每一个并行实例都拥有自己的状态变量，这个状态变量将会被检查点操作保存下来，并且可以通过使用 ListCheckpointed 接口来恢复状态变量。

看了上面的例子，我们可能会有疑问，那就是为什么操作符状态是状态对象的列表。这是因为列表数据结构支持包含操作符状态的函数的并行度改变的操作。为了增加或者减少包含了操作符状态的函数的并行度，操作符状态需要被重新分区到更多或者更少的并行任务实例中去。而这样的操作需要合并或者分割状态对象。而对于每一个有状态的函数，分割和合并状态对象都是很常见的操作，所以这显然不是任何类型的状态都能自动完成的。

通过提供一个状态对象的列表，拥有操作符状态的函数可以使用 snapshotState() 方法和 restoreState() 方法来实现以上所说的逻辑。snapshotState() 方法将操作符状态分割成多个部分，restoreState() 方法从所有的部分中将状态对象收集起来。当函数的操作符状态恢复时，状态变量将被分区到函数的所有不同的并行实例中去，并作为参数传递给 restoreState() 方法。如果并行任务的数量大于状态对象的数量，那么一些并行任务在开始的时候是没有状态的，所以 restoreState() 函数的参数为空列表。

再来看一下上面的程序，我们可以看到操作符的每一个并行实例都暴露了一个状态对象的列表。如果我们增加操作符的并行度，那么一些并行任务将会从 0 开始计数。为了获得更好的状态分区的行为，当 HighTempCounter 函数扩容时，我们可以按照下面的程序来实现 snapshotState() 方法，这样就可以把计数值分配到不同的并行计数中去了。

```
override def snapshotState(
    chkpntId: Long,
    ts: Long): java.util.List[java.lang.Long] = {
    // split count into ten partial counts
    val div = highTempCnt / 10
    val mod = (highTempCnt % 10).toInt
    // return count as ten parts
```

```
(List.fill(mod)(new java.lang.Long(div + 1)) ++
  List.fill(10 - mod)(new java.lang.Long(div))).asJava
}
```

### 使用连接的广播状态 (using connected broadcast state)

一个常见的需求就是流应用需要将同样的事件分发到操作符的所有的并行实例中，而这样的分发操作还得是可恢复的。

我们举个例子：一条流是一个规则（比如 5 秒钟内连续两个超过阈值的温度），另一条流是待匹配的流。也就是说，规则流和事件流。所以每一个操作符的并行实例都需要把规则流保存在操作符状态中。也就是说，规则流需要被广播到所有的并行实例中去。

在 Flink 中，这样的状态叫做广播状态 (broadcast state)。广播状态和 DataStream 或者 Keyed-Stream 都可以做连接操作。

下面的例子实现了一个温度报警应用，应用有可以动态设定的阈值，动态设定通过广播流来实现。

```
val sensorData: DataStream[SensorReading] = ...
val thresholds: DataStream[ThresholdUpdate] = ...
val keyedSensorData: KeyedStream[SensorReading, String] = sensorData
  .keyBy(_.id)

// the descriptor of the broadcast state
val broadcastStateDescriptor =
  new MapStateDescriptor[String, Double](
    "thresholds", classOf[String], classOf[Double])

val broadcastThresholds: BroadcastStream[ThresholdUpdate] = thresholds
  .broadcast(broadcastStateDescriptor)

// connect keyed sensor stream and broadcasted rules stream
val alerts: DataStream[(String, Double, Double)] = keyedSensorData
  .connect(broadcastThresholds)
  .process(new UpdatableTemperatureAlertFunction())
```

带有广播状态的函数在应用到两条流上时分三个步骤：

- 调用 DataStream.broadcast() 来创建 BroadcastStream，定义一个或者多个 MapStateDescriptor 对象。
- 将 BroadcastStream 和 DataStream/KeyedStream 做 connect 操作。
- 在 connected streams 上调用 KeyedBroadcastProcessFunction/BroadcastProcessFunction。

下面的例子实现了动态设定温度阈值的功能。

```
class UpdatableTemperatureAlertFunction()
  extends KeyedBroadcastProcessFunction[String,
    SensorReading, ThresholdUpdate, (String, Double, Double)] {

  // the descriptor of the broadcast state
  private lazy val thresholdStateDescriptor =
    new MapStateDescriptor[String, Double](
      "thresholds", classOf[String], classOf[Double])

  // the keyed state handle
  private var lastTempState: ValueState[Double] = _

  override def open(parameters: Configuration): Unit = {
    // create keyed state descriptor
    val lastTempDescriptor = new ValueStateDescriptor[Double](
      "lastTemp", classOf[Double])
    // obtain the keyed state handle
    lastTempState = getRuntimeContext
      .getState[Double](lastTempDescriptor)
  }

  override def processBroadcastElement(
    update: ThresholdUpdate,
    ctx: KeyedBroadcastProcessFunction[String,
      SensorReading, ThresholdUpdate,
      (String, Double, Double)]#Context,
    out: Collector[(String, Double, Double)]): Unit = {
    // get broadcasted state handle
    val thresholds = ctx
      .getBroadcastState(thresholdStateDescriptor)

    if (update.threshold != 0.0d) {
      // configure a new threshold for the sensor
      thresholds.put(update.id, update.threshold)
    } else {
      // remove threshold for the sensor
      thresholds.remove(update.id)
    }
  }

  override def processElement(
    reading: SensorReading,
```

```

readOnlyCtx: KeyedBroadcastProcessFunction<String, SensorReading, ThresholdUpdate,
                                         (String, Double, Double)>>#ReadOnlyContext,
out: Collector<[(String, Double, Double)]>: Unit = {
    // get read-only broadcast state
    val thresholds = readOnlyCtx
        .getBroadcastState(thresholdStateDescriptor)
    // check if we have a threshold
    if (thresholds.contains(reading.id)) {
        // get threshold for sensor
        val sensorThreshold: Double = thresholds.get(reading.id)

        // fetch the last temperature from state
        val lastTemp = lastTempState.value()
        // check if we need to emit an alert
        val tempDiff = (reading.temperature - lastTemp).abs
        if (tempDiff > sensorThreshold) {
            // temperature increased by more than the threshold
            out.collect((reading.id, reading.temperature, tempDiff))
        }
    }

    // update lastTemp state
    this.lastTempState.update(reading.temperature)
}
}

```

## 配置检查点

10 秒钟保存一次检查点。

```

val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment

// set checkpointing interval to 10 seconds (10000 milliseconds)
env.enableCheckpointing(10000L)

```

## 将 hdfs 配置为状态后端

首先在 IDEA 的 pom 文件中添加依赖：

```

<dependency>
    <groupId>org.apache.hadoop</groupId>
    <artifactId>hadoop-client</artifactId>

```

```
<version>2.8.3</version>
<!-->
<scope>provided</scope>-->
</dependency>
```

在 `hdfs-site.xml` 添加:

```
<property>
  <name>dfs.permissions</name>
  <value>false</value>
</property>
```

别忘了重启 hdfs 文件系统!

然后添加本地文件夹和 hdfs 文件的映射:

```
hdfs getconf -confKey fs.default.name
hdfs dfs -put /home/parallels/flink/checkpoint hdfs://localhost:9000/flink
```

然后在代码中添加:

```
env.enableCheckpointing(5000)
env.setStateBackend(new FsStateBackend("hdfs://localhost:9000/flink"))
```

检查一下检查点正确保存了没有:

```
hdfs dfs -ls hdfs://localhost:9000/flink
```

## 保证有状态应用的可维护性

### 指定唯一的操作符标识符 (operator identifiers)

每一个操作符都可以指定唯一的标识符。标识符将会作为操作符的元数据和状态数据一起保存到 savepoint 中去。当应用从保存点恢复时，标识符可以用来在 savepoint 中查找标识符对应的操作符的状态数据。标识符必须是唯一的，否则应用不知道从哪一个标识符恢复。

强烈建议为应用的每一个操作符定义唯一标识符。例子:

```
val alerts: DataStream[(String, Double, Double)] = keyedSensorData
  .flatMap(new TemperatureAlertFunction(1.1))
  .uid("TempAlert")
```

### 指定操作符的最大并行度

操作符的最大并行度定义了操作符的 keyed state 可以被分到多少个 key groups 中。

```

val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment

// set the maximum parallelism for this application
env.setMaxParallelism(512)

val alerts: DataStream[(String, Double, Double)] = keyedSensorData
  .flatMap(new TemperatureAlertFunction(1.1))
// set the maximum parallelism for this operator and
// override the application-wide value
  .setMaxParallelism(1024)

```

## 有状态应用的性能和健壮性

### 选择一个状态后端

- MemoryStateBackend 将状态当作 Java 的对象 (没有序列化操作) 存储在 TaskManager JVM 进程的堆上。
- FsStateBackend 将状态存储在本地的文件系统或者远程的文件系统如 HDFS。
- RocksDBStateBackend 将状态存储在 RocksDB<sup>1</sup> 中。

```

val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment

val checkpointPath: String = ???
// configure path for checkpoints on the remote filesystem
// env.setStateBackend(new FsStateBackend("file:///tmp/checkpoints"))

val backend = new RocksDBStateBackend(checkpointPath)
// configure the state backend
env.setStateBackend(backend)

```

### 防止状态泄露

流应用通常需要运行几个月或者几年。如果 state 数据不断增长的话，会爆炸。所以控制 state 数据的大小十分重要。而 Flink 并不会清理 state 和 gc。所以所有的 stateful operator 都需要控制他们各自的状态数据大小，保证不爆炸。

例如我们之前讲过增量聚合函数 ReduceFunction/AggregateFunction，就可以提前聚合而不给 state 太多压力。

我们来看一个例子，我们实现了一个 KeyedProcessFunction，用来计算连续两次的温度的差值，如果差值超过阈值，报警。

---

<sup>1</sup>Facebook 开源的 KV 数据库

我们之前实现过这个需求，但没有清理掉状态数据。比如一小时内不再产生温度数据的传感器对应的状态数据就可以清理掉了。

```
class SelfCleaningTemperatureAlertFunction(val threshold: Double)
  extends KeyedProcessFunction[String,
    SensorReading, (String, Double, Double)] {

  // the keyed state handle for the last temperature
  private var lastTempState: ValueState[Double] = _
  // the keyed state handle for the last registered timer
  private var lastTimerState: ValueState[Long] = _

  override def open(parameters: Configuration): Unit = {
    // register state for last temperature
    val lastTempDesc = new ValueStateDescriptor[Double](
      "lastTemp", classOf[Double])
    lastTempState = getRuntimeContext
      .getState[Double](lastTempDescriptor)
    // register state for last timer
    val lastTimerDesc = new ValueStateDescriptor[Long](
      "lastTimer", classOf[Long])
    lastTimerState = getRuntimeContext
      .getState(timestampDescriptor)
  }

  override def processElement(
    reading: SensorReading,
    ctx: KeyedProcessFunction
      [String, SensorReading, (String, Double, Double)]#Context,
    out: Collector[(String, Double, Double)]): Unit = {

    // compute timestamp of new clean up timer
    // as record timestamp + one hour
    val newTimer = ctx.timestamp() + (3600 * 1000)
    // get timestamp of current timer
    val curTimer = lastTimerState.value()
    // delete previous timer and register new timer
    ctx.timerService().deleteEventTimeTimer(curTimer)
    ctx.timerService().registerEventTimeTimer(newTimer)
    // update timer timestamp state
    lastTimerState.update(newTimer)

    // fetch the last temperature from state
  }
}
```

```
val lastTemp = lastTempState.value()
// check if we need to emit an alert
val tempDiff = (reading.temperature - lastTemp).abs
if (tempDiff > threshold) {
    // temperature increased by more than the threshold
    out.collect((reading.id, reading.temperature, tempDiff))
}

// update lastTemp state
this.lastTempState.update(reading.temperature)
}

override def onTimer(
    timestamp: Long,
    ctx: KeyedProcessFunction[String,
        SensorReading, (String, Double, Double)]#OnTimerContext,
    out: Collector[(String, Double, Double)]): Unit = {

    // clear all state for the key
    lastTempState.clear()
    lastTimerState.clear()
}
}
```

## 第八章，读写外部系统

数据可以存储在不同的系统中，例如：文件系统，对象存储系统（OSS），关系型数据库，Key-Value 存储，搜索引擎索引，日志系统，消息队列，等等。每一种系统都是给特定的应用场景设计的，在某一个特定的目标上超越了其他系统。今天的数据架构，往往包含着很多不同的存储系统。在将一个组件加入到我们的系统中时，我们需要问一个问题：“这个组件和架构中的其他组件能多好的一起工作？”

添加一个像 Flink 这样的数据处理系统，需要仔细的考虑。因为 Flink 没有自己的存储层，而是读取数据和持久化数据都需要依赖外部存储。所以，对于 Flink，针对外部系统提供良好的读取和写入的连接器就很重要了。尽管如此，仅仅能够读写外部系统对于 Flink 这样想要提供任务故障情况下一致性保证的流处理器来讲，是不够的。

在本章中，我们将会讨论 source 和 sink 的连接器。这些连接器影响了 Flink 的一致性保证，也提供了对于最流行的一些外部系统的读写的连接器。我们还将学习如何实现自定义 source 和 sink 连接器，以及如何实现可以向外部系统发送异步读写请求的函数。

## 应用的一致性保证

Flink 的检查点和恢复机制定期的会保存应用程序状态的一致性检查点。在故障的情况下，应用程序的状态将会从最近一次完成的检查点恢复，并继续处理。尽管如此，可以使用检查点来重置应用程序的状态无法完全达到令人满意的一致性保证。相反，source 和 sink 的连接器需要和 Flink 的检查点和恢复机制进行集成才能提供有意义的一致性保证。

为了给应用程序提供恰好处理一次语义的状态一致性保证，应用程序的 source 连接器需要能够将 source 的读位置重置到之前保存的检查点位置。当处理一次检查点时，source 操作符将会把 source 的读位置持久化，并在恢复的时候从这些读位置开始重新读取。支持读位置的检查点的 source 连接器一般来说是基于文件的存储系统，如：文件流或者 Kafka source（检查点会持久化某个正在消费的 topic 的读偏移量）。如果一个应用程序从一个无法存储和重置读位置的 source 连接器摄入数据，那么当任务出现故障的时候，数据就会丢失。也就是说我们只能提供 at-most-once）的一致性保证。

Flink 的检查点和恢复机制和可以重置读位置的 source 连接器结合使用，可以保证应用程序不会丢失任何数据。尽管如此，应用程序可能会发出两次计算结果，因为从上一次检查点恢复的应用程序所计算的结果将会被重新发送一次（一些结果已经发送出去了，这时任务故障，然后从上一次检查点恢复，这些结果将被重新计算一次然后发送出去）。所以，可重置读位置的 source 和 Flink 的恢复机制不足以提供端到端的恰好处理一次语义，即使应用程序的状态是恰好处理一次一致性级别。

一个志在提供端到端恰好处理一次语义一致性的应用程序需要特殊的 sink 连接器。sink 连接器可以在不同的情况下使用两种技术来达到恰好处理一次一致性语义：幂等性写入和事务性写入。

### 幂等性写入

一个幂等操作无论执行多少次都会返回同样的结果。例如，重复的向 hashmap 中插入同样的 key-value 对就是幂等操作，因为头一次插入操作之后所有的插入操作都不会改变这个 hashmap，因为 hashmap 已经包含这个 key-value 对了。另一方面，append 操作就不是幂等操作了，因为多次 append 同一个元素将会导致列表每次都会添加一个元素。在流处理程序中，幂等写入操作是很有意思的，因为幂等写入操作可以执行多次但不改变结果。所以它们可以在某种程度上缓和 Flink 检查点机制带来的重播计算结果的效应。

需要注意的是，依赖于幂等性 sink 来达到 exactly-once 语义的应用程序，必须保证在从检查点恢复以后，它将会覆盖之前已经写入的结果。例如，一个包含有 sink 操作的应用在 sink 到一个 key-value 存储时必须保证它能够确定的计算出将要更新的 key 值。同时，从 Flink 程序 sink 到的 key-value 存储中读取数据的应用，在 Flink 从检查点恢复的过程中，可能会看到不想看到的结果。当重播开始时，之前已经发出的计算结果可能会被更早的结果所覆盖（因为在恢复过程中）。所以，一个消费 Flink 程序输出数据的应用，可能会观察到时间回退，例如读到了比之前小的计数。也就是说，当流处理程序处于恢复过程中时，流处理程序的结果将处于不稳定的状态，因为一些结果被覆盖掉，而另一些结果还没有被覆盖。一旦重播完成，也就是说应用程序已经通过了之前出故障的点，结果将会继续保持一致性。

## 事务性写入

第二种实现端到端的恰好处理一次一致性语义的方法基于事务性写入。其思想是只将最近一次成功保存的检查点之前的计算结果写入到外部系统中去。这样就保证了在任务故障的情况下，端到端恰好处理一次语义。应用将被重置到最近一次的检查点，而在这个检查点之后并没有向外部系统发出任何计算结果。通过只有当检查点保存完成以后再写入数据这种方法，事务性的方法将不会遭受幂等性写入所遭受的重播不一致的问题。尽管如此，事务性写入却带来了延迟，因为只有在检查点完成以后，我们才能看到计算结果。

Flink 提供了两种构建模块来实现事务性 sink 连接器：write-ahead-log (WAL，预写式日志) sink 和两阶段提交 sink。WAL 式 sink 将会把所有计算结果写入到应用程序的状态中，等到检查点完成的通知，才会将计算结果发送到 sink 系统。因为 sink 操作会把数据都缓存在状态后段，所以 WAL 可以使用在任何外部 sink 系统上。尽管如此，WAL 还是无法提供刀枪不入的恰好处理一次语义的保证，再加上由于要缓存数据带来的状态后段的状态大小的问题，WAL 模型并不十分完美。

与之形成对比的，2PC sink 需要 sink 系统提供事务的支持或者可以模拟出事务特性的模块。对于每一个检查点，sink 开始一个事务，然后将所有的接收到的数据都添加到事务中，并将这些数据写入到 sink 系统，但并没有提交 (commit) 它们。当事务接收到检查点完成的通知时，事务将被 commit，数据将被真正的写入 sink 系统。这项机制主要依赖于一次 sink 可以在检查点完成之前开始事务，并在应用程序从一次故障中恢复以后再 commit 的能力。

2PC 协议依赖于 Flink 的检查点机制。检查点屏障是开始一个新的事务的通知，所有操作符自己的检查点成功的通知是它们可以 commit 的投票，而 JobManager 通知一个检查点成功的消息是 commit 事务的指令。于 WAL sink 形成对比的是，2PC sinks 依赖于 sink 系统和 sink 本身的实现可以实现恰好处理一次语义。更多的，2PC sink 不断的将数据写入到 sink 系统中，而 WAL 写模型就会有之前所述的问题。

不可重置的		
源	可重置的源	
any sink	at-most-once	at-least-once
幂等性 sink	at-most-once	exactly-once (当从任务失败中恢复时，存在暂时的一致性)
预写式日志 sink	at-most-once	at-least-once
2PC sink	at-most-once	exactly-once

## Flink 提供的连接器

Flink 提供了读写很多存储系统的连接器。消息队列，日志系统，例如 Apache Kafka, Kinesis, RabbitMQ 等等这些是常用的数据源。在批处理环境中，数据流很可能是监听一个文件系统，而当新的数据落盘的时候，读取这些新数据。

在 sink 一端，数据流经常写入到消息队列中，以供接下来的流处理程序消费。数据流也可

能写入到文件系统中做持久化，或者交给批处理程序来进行分析。数据流还可能被写入到 key-value 存储或者关系型数据库中，例如 Cassandra, ElasticSearch 或者 MySQL 中，这样数据可供查询，还可以在仪表盘中显示出来。

不幸的是，对于大多数存储系统并没有标准接口，除了针对 DBMS 的 JDBC。相反，每一个存储系统都需要有自己的特定的连接器。所以，Flink 需要维护针对不同存储系统（消息队列，日志系统，文件系统，k-v 数据库，关系型数据库等等）的连接器实现。

Flink 提供了针对 Apache Kafka, Kinesis, RabbitMQ, Apache Nifi, 各种文件系统，Cassandra, Elasticsearch, 还有 JDBC 的连接器。除此之外，Apache Bahir 项目还提供了额外的针对例如 ActiveMQ, Akka, Flume, Netty, 和 Redis 等的连接器。

## Apache Kafka Source 连接器

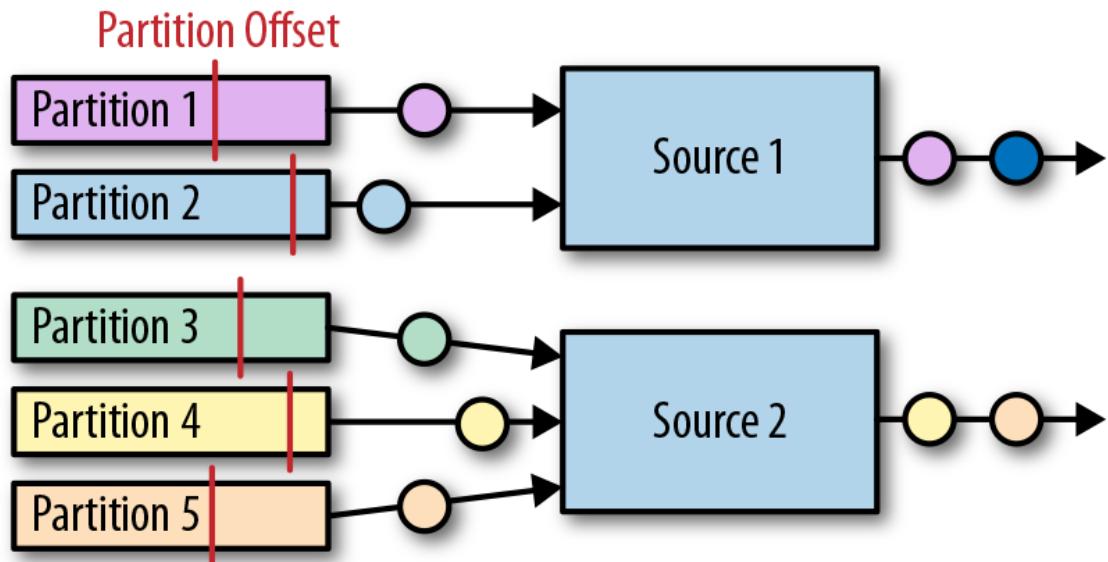
Apache Kafka 是一个分布式流式平台。它的核心是一个分布式的发布订阅消息系统。

Kafka 将事件流组织为所谓的 topics。一个主题就是一个事件日志系统，Kafka 可以保证主题中的数据在被读取时和这些数据在被写入时相同的顺序。为了扩大读写的规模，主题可以分裂为多个分区，这些分区分布在一个集群上面。这时，读写顺序的保证就限制到了分区这个粒度，Kafka 并没有提供从不同分区读取数据时的顺序保证。Kafka 分区的读位置称为偏移量 (offset)。

Kafka 的依赖引入如下：

```
<dependency>
    <groupId>org.apache.flink</groupId>
    <artifactId>flink-connector-kafka_2.12</artifactId>
    <version>1.7.1</version>
</dependency>
```

Flink Kafka 连接器并行的摄入事件流。每一个并行 source 任务可以从一个或者多个分区中读取数据。任务将会跟踪每一个分区当前的读偏移量，然后将读偏移量写入到检查点数据中。当从任务故障恢复时，读偏移量将被恢复，而 source 任务将从检查点保存的读偏移量开始重新读取数据。Flink Kafka 连接器并不依赖 Kafka 自己的 offset-tracking 机制（基于消费者组实现）。下图展示了分区如何分配给 source 实例。



Kafka source 连接器使用如下代码创建

```

val properties = new Properties()
properties.setProperty("bootstrap.servers", "localhost:9092")
properties.setProperty("group.id", "test")

val stream: DataStream[String] = env.addSource(
  new FlinkKafkaConsumer[String](
    "topic",
    new SimpleStringSchema(),
    properties))
  
```

构造器接受三个参数。第一个参数定义了从哪些 topic 中读取数据，可以是一个 topic，也可以是 topic 列表，还可以是匹配所有想要读取的 topic 的正则表达式。当从多个 topic 中读取数据时，Kafka 连接器将会处理所有 topic 的分区，将这些分区的数据放到一条流中去。

第二个参数是一个 DeserializationSchema 或者 KeyedDeserializationSchema。Kafka 消息被存储为原始的字节数据，所以需要反序列化成 Java 或者 Scala 对象。上例中使用的 SimpleStringSchema，是一个内置的 DeserializationSchema，它仅仅是简单的将字节数组反序列化成字符串。DeserializationSchema 和 KeyedDeserializationSchema 是公共的接口，所以我们自定义反序列化逻辑。

第三个参数是一个 Properties 对象，设置了用来读写的 Kafka 客户端的一些属性。

为了抽取事件时间的时间戳然后产生水印，我们可以通过调用

```
FlinkKafkaConsumer.assignTimestampsAndWatermark()
```

方法为 Kafka 消费者提供 AssignerWithPeriodicWatermark 或者 AssignerWithPunctuatedWatermark。每一个 assigner 都将被应用到每个分区，来利用每一个分区的顺序保证特性。source 实例将会根据水印的传播协议聚合所有分区的水印。

## Apache Kafka Sink 连接器

添加依赖:

```
<dependency>
  <groupId>org.apache.flink</groupId>
  <artifactId>flink-connector-kafka_2.12</artifactId>
  <version>1.7.1</version>
</dependency>
```

下面的例子展示了如何创建一个 Kafka sink

```
val stream: DataStream[String] = ...

val myProducer = new FlinkKafkaProducer[String](
  "localhost:9092",           // broker list
  "topic",                   // target topic
  new SimpleStringSchema)    // serialization schema

stream.addSink(myProducer)
```

### Kafka Sink 的 at-least-once 保证

Flink 的 Kafka sink 提供了基于配置的一致性保证。Kafka sink 使用下面的条件提供了至少处理一次保证:

- Flink 检查点机制开启，所有的数据源都是可重置的。
- 当写入失败时，sink 连接器将会抛出异常，使得应用程序挂掉然后重启。这是默认行为。应用程序内部的 Kafka 客户端还可以配置为重试写入，只要提前声明当写入失败时，重试几次这样的属性 (retries property)。
- sink 连接器在完成它的检查点之前会等待 Kafka 发送已经将数据写入的通知。

### Kafka Sink 的恰好处理一次语义保证

Kafka 0.11 版本引入了事务写特性。由于这个新特性，Flink Kafka sink 可以为输出结果提供恰好处理一次语义的一致性保证，只要经过合适的配置就行。Flink 程序必须开启检查点机制，并从可重置的数据源进行消费。FlinkKafkaProducer 还提供了包含 Semantic 参数的构造器来控制 sink 提供的一致性保证。可能的取值如下:

- Semantic.NONE，不提供任何一致性保证。数据可能丢失或者被重写多次。
- Semantic.AT\_LEAST\_ONCE，保证无数据丢失，但可能被处理多次。这个是默认设置。
- Semantic.EXACTLY\_ONCE，基于 Kafka 的事务性写入特性实现，保证每条数据恰好处理一次。

## 文件系统 source 连接器

Apache Flink 针对文件系统实现了一个可重置的 source 连接器，将文件看作流来读取数据。如下面的例子所示：

```
val lineReader = new TextInputFormat(null)

val lineStream: DataStream[String] = env.readFile[String](
    lineReader,                      // The FileInputFormat
    "hdfs://path/to/my/data",        // The path to read
    FileProcessingMode
    .PROCESS_CONTINUOUSLY,          // The processing mode
    30000L)                         // The monitoring interval in ms
```

StreamExecutionEnvironment.readFile() 接收如下参数：

- FileInputFormat 参数，负责读取文件中的内容。
- 文件路径。如果文件路径指向单个文件，那么将会读取这个文件。如果路径指向一个文件夹，FileInputFormat 将会扫描文件夹中所有的文件。
- PROCESS\_CONTINUOUSLY 将会周期性的扫描文件，以便扫描到文件新的改变。
- 30000L 表示多久扫描一次监听的文件。

FileInputFormat 是一个特定的 InputFormat，用来从文件系统中读取文件。FileInputFormat 分两步读取文件。首先扫描文件系统的路径，然后为所有匹配到的文件创建所谓的 input splits。一个 input split 将会定义文件上的一个范围，一般通过读取的开始偏移量和读取长度来定义。在将一个大的文件分割成一堆小的 splits 以后，这些 splits 可以分发到不同的读任务，这样就可以并行的读取文件了。FileInputFormat 的第二步会接收一个 input split，读取被 split 定义的文件范围，然后返回对应的数据。

DataStream 应用中使用的 FileInputFormat 需要实现 CheckpointableInputFormat 接口。这个接口定义了方法来做检查点和重置文件片段的当前的读取位置。

在 Flink 1.7 中，Flink 提供了一些类，这些类继承了 FileInputFormat，并实现了 CheckpointableInputFormat 接口。TextInputFormat 一行一行的读取文件，而 CsvInputFormat 使用逗号分隔符来读取文件。

## 文件系统 sink 连接器

在将流处理应用配置成 exactly-once 检查点机制，以及配置成所有源数据都能在故障的情况下可以重置，Flink 的 StreamingFileSink 提供了端到端的恰好处理一次语义保证。下面的例子展示了 StreamingFileSink 的使用方式。

```
val input: DataStream[String] = ...
val sink: StreamingFileSink[String] = StreamingFileSink
    .forRowFormat(
        new Path("/base/path"),
```

```
new SimpleStringEncoder[String]("UTF-8"))
.build()

input.addSink(sink)
```

当 StreamingFileSink 接到一条数据，这条数据将被分配到一个桶（bucket）中。一个桶是我们配置的 “/base/path” 的子目录。

Flink 使用 BucketAssigner 来分配桶。BucketAssigner 是一个公共的接口，为每一条数据返回一个 BucketId，BucketId 决定了数据被分配到哪个子目录。如果没有指定 BucketAssigner，Flink 将使用 DateTimeBucketAssigner 来将每条数据分配到每个一个小时所产生的桶中去，基于数据写入的处理时间（机器时间，墙上时钟）。

StreamingFileSink 提供了 exactly-once 输出的保证。sink 通过一个 commit 协议来达到恰好处理一次语义的保证。这个 commit 协议会将文件移动到不同的阶段，有以下状态：in progress，pending，finished。这个协议基于 Flink 的检查点机制。当 Flink 决定 roll a file 时，这个文件将被关闭并移动到 pending 状态，通过重命名文件来实现。当下一个检查点完成时，pending 文件将被移动到 finished 状态，同样是通过重命名来实现。

一旦任务故障，sink 任务需要将处于 in progress 状态的文件重置到上一次检查点的写偏移量。这个可以通过关闭当前 in progress 的文件，并将文件结尾无效的部分丢弃掉来实现。

## 实现自定义源函数

DataStream API 提供了两个接口来实现 source 连接器：

- SourceFunction 和 RichSourceFunction 可以用来定义非并行的 source 连接器，source 跑在单任务上。
- ParallelSourceFunction 和 RichParallelSourceFunction 可以用来定义跑在并行实例上的 source 连接器。

除了并行于非并行的区别，这两种接口完全一样。就像 process function 的 rich 版本一样，RichSourceFunction 和 RichParallelSourceFunction 的子类可以 override open() 和 close() 方法，也可以访问 RuntimeContext，RuntimeContext 提供了并行任务实例的数量，当前任务实例的索引，以及一些其他信息。

SourceFunction 和 ParallelSourceFunction 定义了两种方法：

- void run(SourceContext ctx)
- cancel()

run() 方法用来读取或者接收数据然后将数据摄入到 Flink 应用中。根据接收数据的系统，数据可能是推送的也可能是拉取的。Flink 仅仅在特定的线程调用 run() 方法一次，通常情况下会是一个无限循环来读取或者接收数据并发送数据。任务可以在某个时间点被显式的取消，或者由于流是有限流，当数据被消费完毕时，任务也会停止。

当应用被取消或者关闭时，cancel() 方法会被 Flink 调用。为了优雅的关闭 Flink 应用，run()

方法需要在 cancel() 被调用以后，立即终止执行。下面的例子显示了一个简单的源函数的例子：从 0 数到 Long.MaxValue。

```
class CountSource extends SourceFunction[Long] {  
    var isRunning: Boolean = true  
  
    override def run(ctx: SourceFunction.SourceContext[Long]) = {  
  
        var cnt: Long = -1  
        while (isRunning && cnt < Long.MaxValue) {  
            cnt += 1  
            ctx.collect(cnt)  
        }  
    }  
  
    override def cancel() = isRunning = false  
}
```

## 可重置的源函数

之前我们讲过，应用程序只有使用可以重播输出数据的数据源时，才能提供令人满意的一致性保证。如果外部系统暴露了获取和重置读偏移量的 API，那么 source 函数就可以重播源数据。这样的例子包括一些能够提供文件流的偏移量的文件系统，或者提供 seek 方法用来移动到文件的特定位置的文件系统。或者 Apache Kafka 这种可以为每一个主题的分区提供偏移量并且可以设置分区的读位置的系统。一个反例就是 source 连接器连接的是 socket，socket 将会立即丢弃已经发送过的数据。

支持重播输出的源函数需要和 Flink 的检查点机制集成起来，还需要在检查点被处理时，持久化当前所有的读取位置。当应用从一个保存点（savepoint）恢复或者从故障恢复时，Flink 会从最近一次的检查点或者保存点中获取读偏移量。如果程序开始时并不存在状态，那么读偏移量将会被设置到一个默认值。一个可重置的源函数需要实现 CheckpointedFunction 接口，还需要能够存储读偏移量和相关的元数据，例如文件的路径，分区的 ID。这些数据将被保留在 list state 或者 union list state 中。

下面的例子将 CountSource 重写为可重置的数据源。

```
class ResettableCountSource  
    extends SourceFunction[Long] with CheckpointedFunction {  
  
    var isRunning: Boolean = true  
    var cnt: Long = _  
    var offsetState: ListState[Long] = _  
  
    override def run(ctx: SourceFunction.SourceContext[Long]) = {
```

```
while (isRunning && cnt < Long.MaxValue) {
    // synchronize data emission and checkpoints
    ctx.getCheckpointLock.synchronized {
        cnt += 1
        ctx.collect(cnt)
    }
}

override def cancel() = isRunning = false

override def snapshotState(
    snapshotCtx: FunctionSnapshotContext
): Unit = {
    // remove previous cnt
    offsetState.clear()
    // add current cnt
    offsetState.add(cnt)
}

override def initializeState(
    initCtx: FunctionInitializationContext): Unit = {

    val desc = new ListStateDescriptor[Long](
        "offset", classOf[Long])
    offsetState = initCtx
        .getOperatorStateStore
        .getListState(desc)
    // initialize cnt variable
    val it = offsetState.get()
    cnt = if (null == it || !it.iterator().hasNext) {
        -1L
    } else {
        it.iterator().next()
    }
}
}
```

## 实现自定义 sink 函数

DataStream API 中，任何运算符或者函数都可以向外部系统发送数据。DataStream 不需要最终流向 sink 运算符。例如，我们可能实现了一个 FlatMapFunction，这个函数将每一个接收到

的数据通过 HTTP POST 请求发送出去, 而不使用 Collector 发送到下一个运算符。DataStream API 也提供了 SinkFunction 接口以及对应的 rich 版本 RichSinkFunction 抽象类。SinkFunction 接口提供了一个方法:

```
void invoke(IN value, Context ctx)
```

SinkFunction 的 Context 可以访问当前处理时间, 当前水位线, 以及数据的时间戳。

下面的例子展示了一个简单的 SinkFunction, 可以将传感器读数写入到 socket 中去。需要注意的是, 我们需要在启动 Flink 程序前启动一个监听相关端口的进程。否则将会抛出 ConnectException 异常。可以运行 “nc -l localhost 9191” 命令。

```
val readings: DataStream[SensorReading] = ...

// write the sensor readings to a socket
readings.addSink(new SimpleSocketSink("localhost", 9191))
    // set parallelism to 1 because only one thread can write to a socket
    .setParallelism(1)

// ----

class SimpleSocketSink(val host: String, val port: Int)
    extends RichSinkFunction[SensorReading] {

    var socket: Socket = _
    var writer: PrintStream = _

    override def open(config: Configuration): Unit = {
        // open socket and writer
        socket = new Socket(InetAddress.getByName(host), port)
        writer = new PrintStream(socket.getOutputStream)
    }

    override def invoke(
        value: SensorReading,
        ctx: SinkFunction.Context[_]): Unit = {
        // write sensor reading to socket
        writer.println(value.toString)
        writer.flush()
    }

    override def close(): Unit = {
        // close writer and socket
        writer.close()
    }
}
```

```
    socket.close()
}
}
```

之前我们讨论过，端到端的一致性保证建立在 sink 连接器的属性上面。为了达到端到端的恰好处理一次语义的目的，应用程序需要幂等性的 sink 连接器或者事务性的 sink 连接器。上面例子中的 SinkFunction 既不是幂等写入也不是事务性的写入。由于 socket 具有只能添加 (append-only) 这样的属性，所以不可能实现幂等性的写入。又因为 socket 不具备内置的事务支持，所以事务性写入就只能使用 Flink 的 WAL sink 特性来实现了。接下来我们将学习如何实现幂等 sink 连接器和事务 sink 连接器。

## 幂等 sink 连接器

对于大多数应用，SinkFunction 接口足以实现一个幂等性写入的 sink 连接器了。需要以下两个条件：

- 结果数据必须具有确定性的 key，在这个 key 上面幂等性更新才能实现。例如一个计算每分钟每个传感器的平均温度值的程序，确定性的 key 值可以是传感器的 ID 和每分钟的时间戳。确定性的 key 值，对于在故障恢复的场景下，能够正确的覆盖结果非常的重要。
- 外部系统支持针对每个 key 的更新，例如关系型数据库或者 key-value 存储。

下面的例子展示了如何实现一个针对 JDBC 数据库的幂等写入 sink 连接器，这里使用的是 Apache Derby 数据库。

```
1 val readings: DataStream[SensorReading] = ...
2
3 // write the sensor readings to a Derby table
4 readings.addSink(new DerbyUpsertSink)
5
6 // -----
7
8 class DerbyUpsertSink extends RichSinkFunction[SensorReading] {
9     var conn: Connection = _
10    var insertStmt: PreparedStatement = _
11    var updateStmt: PreparedStatement = _
12
13    override def open(parameters: Configuration): Unit = {
14        // connect to embedded in-memory Derby
15        conn = DriverManager.getConnection(
16            "jdbc:derby:memory:flinkExample",
17            new Properties())
18        // prepare insert and update statements
19        insertStmt = conn.prepareStatement(
```

```
20     "INSERT INTO Temperatures (sensor, temp) VALUES (?, ?)" )
21     updateStmt = conn.prepareStatement(
22         "UPDATE Temperatures SET temp = ? WHERE sensor = ?")
23 }
24
25     override def invoke(r: SensorReading, context: Context[_]): Unit = {
26         // set parameters for update statement and execute it
27         updateStmt.setDouble(1, r.temperature)
28         updateStmt.setString(2, r.id)
29         updateStmt.execute()
30         // execute insert statement
31         // if update statement did not update any row
32         if (updateStmt.getUpdateCount == 0) {
33             // set parameters for insert statement
34             insertStmt.setString(1, r.id)
35             insertStmt.setDouble(2, r.temperature)
36             // execute insert statement
37             insertStmt.execute()
38         }
39     }
40
41     override def close(): Unit = {
42         insertStmt.close()
43         updateStmt.close()
44         conn.close()
45     }
46 }
```

由于 Apache Derby 并没有提供内置的 UPSERT 方法，所以这个 sink 连接器实现了 UPSERT 写。具体实现方法是首先去尝试更新一行数据，如果这行数据不存在，则插入新的一行数据。

## 事务性 sink 连接器

事务写入 sink 连接器需要和 Flink 的检查点机制集成，因为只有在检查点成功完成以后，事务写入 sink 连接器才会向外部系统 commit 数据。

为了简化事务性 sink 的实现，Flink 提供了两个模版用来实现自定义 sink 运算符。这两个模版都实现了 CheckpointListener 接口。CheckpointListener 接口将会从 JobManager 接收到检查点完成的通知。

- GenericWriteAheadSink 模版会收集检查点之前的所有的数据，并将数据存储到 sink 任务的运算符状态中。状态保存到了检查点中，并在任务故障的情况下恢复。当任务接收到检查点完成的通知时，任务会将所有的数据写入到外部系统中。

- TwoPhaseCommitSinkFunction 模版利用了外部系统的事务特性。对于每一个检查点，任务首先开始一个新的事务，并将接下来所有的数据都写到外部系统的当前事务上下文中去。当任务接收到检查点完成的通知时，sink 连接器将会 commit 这个事务。

### GENERICWRITEAHEADSINK

GenericWriteAheadSink 使得 sink 运算符可以很方便的实现。这个运算符和 Flink 的检查点机制集成使用，目标是将每一条数据恰好一次写入到外部系统中去。需要注意的是，在发生故障的情况下，write-ahead log sink 可能会不止一次的发送相同的数据。所以 GenericWriteAheadSink 无法提供完美无缺的恰好处理一次语义的一致性保证，而是仅能提供 at-least-once 这样的保证。我们接下来详细的讨论这些场景。

GenericWriteAheadSink 的原理是将接收到的所有数据都追加到有检查点分割好的预写式日志中去。每当 sink 运算符碰到检查点屏障，运算符将会开辟一个新的 section，并将接下来的所有数据都追加到新的 section 中去。WAL（预写式日志）将会保存到运算符状态中。由于 log 能被恢复，所有不会有数据丢失。

当 GenericWriteAheadSink 接收到检查点完成的通知时，将会发送对应检查点的 WAL 中存储的所有数据。当所有数据发送成功，对应的检查点必须在内部提交。

检查点的提交分两步。第一步，sink 持久化检查点被提交的信息。第二步，删除 WAL 中所有的数据。我们不能将 commit 信息保存在 Flink 应用程序状态中，因为状态不是持久化的，会在故障恢复时重置状态。相反，GenericWriteAheadSink 依赖于可插拔的组件在一个外部持久化存储中存储和查找提交信息。这个组件就是 CheckpointCommitter。

继承 GenericWriteAheadSink 的运算符需要提供三个构造器函数。

- CheckpointCommitter
- TypeSerializer，用来序列化输入数据。
- 一个 job ID，传给 CheckpointCommitter，当应用重启时可以识别 commit 信息。

还有，write-ahead 运算符需要实现一个单独的方法：

```
boolean sendValues(Iterable<IN> values, long chkpntId, long timestamp)
```

当检查点完成时，GenericWriteAheadSink 调用 sendValues() 方法来将数据写入到外部存储系统中。这个方法接收一个检查点对应的所有数据的迭代器，检查点的 ID，检查点被处理时的时间戳。当数据写入成功时，方法必须返回 true，写入失败返回 false。

下面的例子展示了如何实现一个写入到标准输出的 write-ahead sink。它使用了 FileCheckpointCommitter。

```
val readings: DataStream[SensorReading] = ???  
  
// write the sensor readings to the standard out via a write-ahead log  
readings.transform(  
    "WriteAheadSink", new SocketWriteAheadSink)
```

```
// ``-` 

class StdOutWriteAheadSink extends GenericWriteAheadSink[SensorReading]{
    // CheckpointCommitter that commits
    // checkpoints to the local filesystem
    new FileCheckpointCommitter(System.getProperty("java.io.tmpdir")),
    // Serializer for records
    createTypeInformation[SensorReading]
        .createSerializer(new ExecutionConfig),
    // Random JobID used by the CheckpointCommitter
    UUID.randomUUID.toString) {

    override def sendValues(
        readings: Iterable[SensorReading],
        checkpointId: Long,
        timestamp: Long): Boolean = {

        for (r <- readings.asScala) {
            // write record to standard out
            println(r)
        }
        true
    }
}
```

之前我们讲过，GenericWriteAheadSink 无法提供完美的 exactly-once 保证。有两个故障状况会导致数据可能被发送不止一次。

- 当任务执行 sendValues() 方法时，程序挂掉了。如果外部系统无法原子性的写入所有数据（要么都写入要么都不写），一些数据可能会写入，而另一些数据并没有被写入。由于 checkpoint 还没有 commit，所以在任务恢复的过程中一些数据可能会被再次写入。
- 所有数据都写入成功了，sendValues() 方法也返回 true 了；但在 CheckpointCommitter 方法被调用之前程序挂了，或者 CheckpointCommitter 在 commit 检查点时失败了。那么在恢复的过程中，所有未被提交的检查点将会被重新写入。

## TWOPHASECOMMITTSINKFUNCTION

Flink 提供了 TwoPhaseCommitSinkFunction 接口来简化 sink 函数的实现。这个接口保证了端到端的 exactly-once 语义。2PC sink 函数是否提供这样的一致性保证取决于我们的实现细节。我们需要讨论一个问题：“2PC 协议是否开销太大？”

通常来讲，为了保证分布式系统的一致性，2PC 是一个非常昂贵的方法。尽管如此，在 Flink 的语境下，2PC 协议针对每一个检查点只运行一次。TwoPhaseCommitSinkFunction 和 WAL sink 很相似，不同点在于前者不会将数据收集到 state 中，而是会写入到外部系统事务的上下文中。

TwoPhaseCommitSinkFunction 实现了以下协议。在 sink 任务发送出第一条数据之前，任务将在外部系统中开始一个事务，所有接下来的数据将被写入这个事务的上下文中。当 JobManager 初始化检查点并将检查点屏障插入到流中的时候，2PC 协议的投票阶段开始。当运算符接收到检查点屏障，运算符将保存它的状态，当保存完成时，运算符将发送一个 acknowledgement 信息给 JobManager。当 sink 任务接收到检查点屏障时，运算符将会持久化它的状态，并准备提交当前的事务，以及 acknowledge JobManager 中的检查点。发送给 JobManager 的 acknowledgement 信息类似于 2PC 协议中的 commit 投票。sink 任务还不能提交事务，因为它还没有保证所有的任务都已经完成了它们的检查点操作。sink 任务也会为下一个检查点屏障之前的所有数据开始一个新的事务。

当 JobManager 成功接收到所有任务实例发出的检查点操作成功的通知时，JobManager 将会把检查点完成的通知发送给所有感兴趣的任务。这里的通知对应于 2PC 协议的提交命令。当 sink 任务接收到通知时，它将 commit 所有处于开启状态的事务。一旦 sink 任务 acknowledge 了检查点操作，它必须能够 commit 对应的事务，即使任务发生故障。如果 commit 失败，数据将会丢失。

让我们总结一下外部系统需要满足什么样的要求：

- 外部系统必须提供事务支持，或者 sink 的实现能在外部系统上模拟事务功能。
- 在检查点操作期间，事务必须处于 open 状态，并接收这段时间数据的持续写入。
- 事务必须等到检查点操作完成的通知到来才可以提交。在恢复周期中，可能需要一段时间等待。如果 sink 系统关闭了事务（例如超时了），那么未被 commit 的数据将会丢失。
- sink 必须在进程挂掉后能够恢复事务。一些 sink 系统会提供事务 ID，用来 commit 或者 abort 一个开始的事务。
- commit 一个事务必须是一个幂等性操作。sink 系统或者外部系统能够观察到事务已经被提交，或者重复提交并没有副作用。

下面的例子可能会让上面的一些概念好理解一些。

```
class TransactionalFileSink(val targetPath: String, val tempPath: String)
  extends TwoPhaseCommitSinkFunction[(String, Double), String, Void]{
  createTypeInformation[String].createSerializer(new ExecutionConfig),
  createTypeInformation[Void].createSerializer(new ExecutionConfig)) {

  var transactionWriter: BufferedWriter = _

  // Creates a temporary file for a transaction into
  // which the records are written.
  override def beginTransaction(): String = {
    // path of transaction file
    // is built from current time and task index
    val timeNow = LocalDateTime.now(ZoneId.of("UTC"))
      .format(DateTimeFormatter.ISO_LOCAL_DATE_TIME)
    val taskIdx = this.getRuntimeContext.getIndexOfThisSubtask
```

```
val transactionFile = s"$timeNow-$taskIdx"

// create transaction file and writer
val tFilePath = Paths.get(s"$tempPath/$transactionFile")
Files.createFile(tFilePath)
this.transactionWriter = Files.newBufferedWriter(tFilePath)
println(s"Creating Transaction File: $tFilePath")
// name of transaction file is returned to
// later identify the transaction
transactionFile
}

/** Write record into the current transaction file. */
override def invoke(
    transaction: String,
    value: (String, Double),
    context: Context[_]): Unit = {
  transactionWriter.write(value.toString)
  transactionWriter.write('\n')
}

/** Flush and close the current transaction file. */
override def preCommit(transaction: String): Unit = {
  transactionWriter.flush()
  transactionWriter.close()
}

// Commit a transaction by moving
// the precommitted transaction file
// to the target directory.
override def commit(transaction: String): Unit = {
  val tFilePath = Paths.get(s"$tempPath/$transaction")
  // check if the file exists to ensure
// that the commit is idempotent
  if (Files.exists(tFilePath)) {
    val cFilePath = Paths.get(s"$targetPath/$transaction")
    Files.move(tFilePath, cFilePath)
  }
}

// Aborts a transaction by deleting the transaction file.
override def abort(transaction: String): Unit = {
```

```
val tFilePath = Paths.get(s"$tempPath/$transaction")
if (Files.exists(tFilePath)) {
    Files.delete(tFilePath)
}
}
```

TwoPhaseCommitSinkFunction[IN, TXN, CONTEXT] 包含如下三个范型参数：

- IN 表示输入数据的类型。
- TXN 定义了一个事务的标识符，可以用来识别和恢复事务。
- CONTEXT 定义了自定义的上下文。

TwoPhaseCommitSinkFunction 的构造器需要两个 TypeSerializer。一个是 TXN 的类型，另一个是 CONTEXT 的类型。

最后，TwoPhaseCommitSinkFunction 定义了五个需要实现的方法：

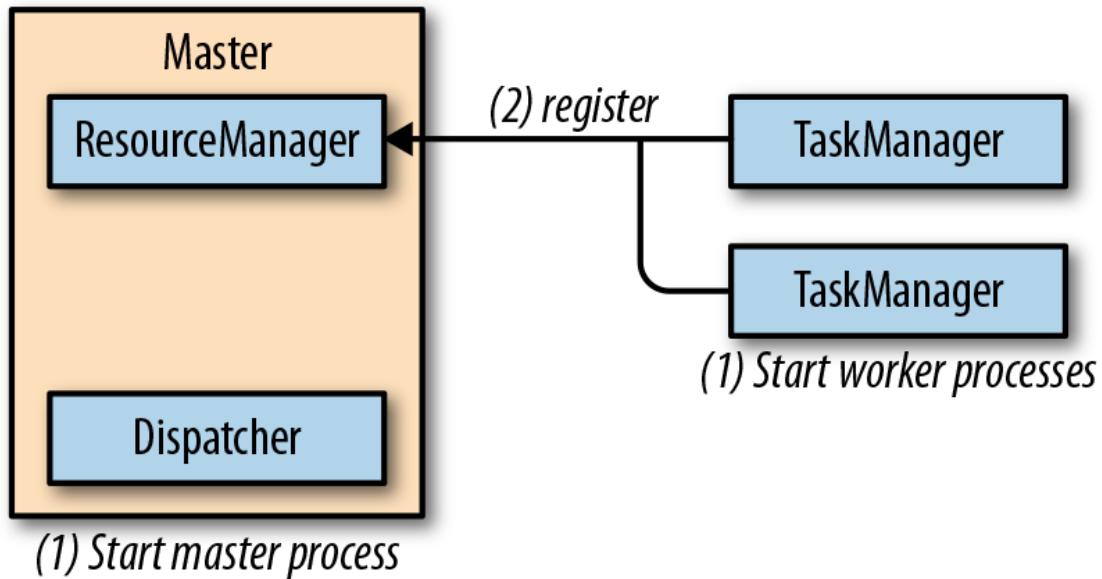
- beginTransaction(): TXN 开始一个事务，并返回事务的标识符。
- invoke(txn: TXN, value: IN, context: Context[\_]): Unit 将值写入到当前事务中。
- preCommit(txn: TXN): Unit 预提交一个事务。一个预提交的事务不会接收新的写入。
- commit(txn: TXN): Unit 提交一个事务。这个操作必须是幂等的。
- abort(txn: TXN): Unit 终止一个事务。

## 第九章，搭建 Flink 运行流式应用

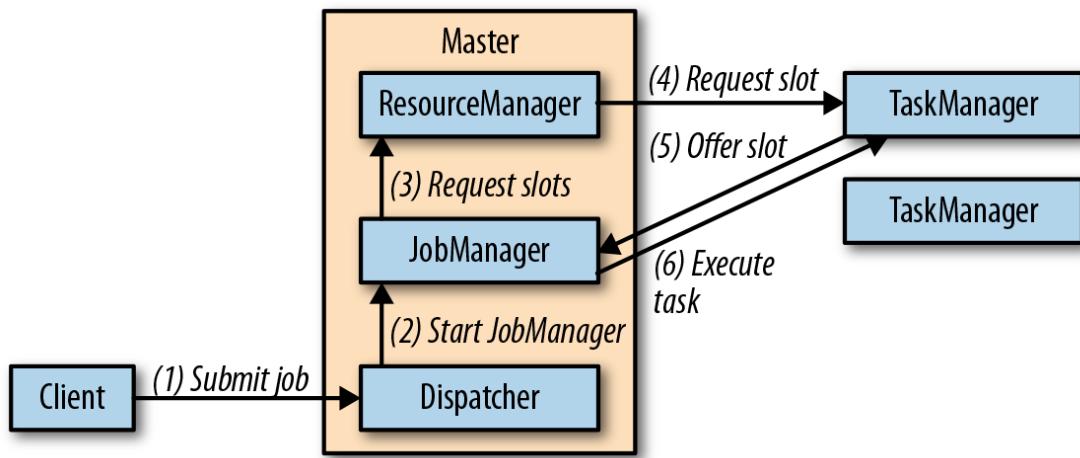
### 部署方式

#### standalone 集群

standalone 集群包含至少一个 master 进程，以及至少一个 TaskManager 进程，TaskManager 进程运行在一台或者多台机器上。所有的进程都是 JVM 进程。下图展示了 standalone 集群的部署。



master 进程在不同的线程中运行了一个 Dispatcher 和一个 ResourceManager。一旦它们开始运行，所有 TaskManager 都将在 Resourcemanager 中进行注册。下图展示了一个任务如何提交到一个 standalone 集群中去。



客户端向 Dispatcher 提交了一个任务，Dispatcher 将会启动一个 JobManager 线程，并提供执行所需的 JobGraph。JobManager 向 ResourceManager 请求必要的 task slots。一旦请求的 slots 分配好，JobManager 就会部署 job。

在 standalone 这种部署方式中，master 和 worker 进程在失败以后，并不会自动重启。如果有足够的 slots 可供使用，job 是可以从一次 worker 失败中恢复的。只要我们运行多个 worker 就好了。但如果 job 想从 master 失败中恢复的话，则需要进行高可用 (HA) 的配置了。

### 部署步骤

#### 下载压缩包

链接：[http://mirror.bit.edu.cn/apache/flink/flink-1.10.1/flink-1.10.1-bin-scala\\_2.11.tgz](http://mirror.bit.edu.cn/apache/flink/flink-1.10.1/flink-1.10.1-bin-scala_2.11.tgz)

#### 解压缩

```
$ tar xvfz flink-1.10.1-bin-scala_2.11.tgz
```

启动集群

```
$ cd flink-1.10.0
$ ./bin/start-cluster.sh
```

检查集群状态可以访问: <http://localhost:8081>

部署分布式集群

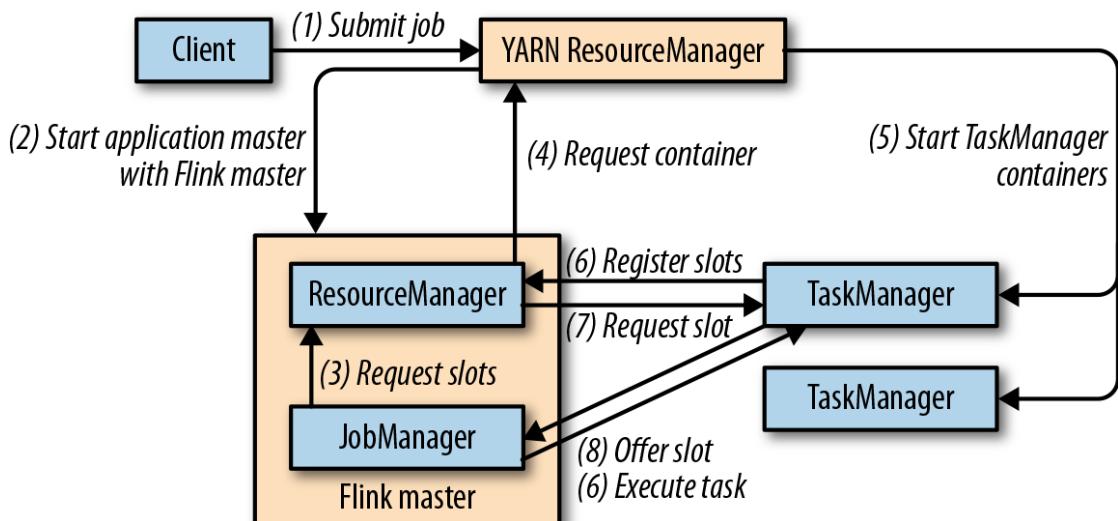
1. 所有运行 TaskManager 的机器的主机名（或者 IP 地址）都需要写入 `./conf/slaves` 文件中。
2. `start-cluster.sh` 脚本需要所有机器的无密码的 SSH 登录配置，方便启动 TaskManager 进程。
3. Flink 的文件夹在所有的机器上都需要有相同的绝对路径。
4. 运行 master 进程的机器的主机名或者 IP 地址需要写在 `./conf/flink-conf.yaml` 文件的 `jobmanager.rpc.address` 配置项。

一旦部署好，我们就可以调用 `./bin/start-cluster.sh` 命令启动集群了，脚本会在本地机器启动一个 JobManager，然后在每个 slave 机器上启动一个 TaskManager。停止运行，请使用 `./bin/stop-cluster.sh`。

## Apache Hadoop Yarn

YARN 是 Apache Hadoop 的资源管理组件。用来计算集群环境所需要的 CPU 和内存资源，然后提供给应用程序请求的资源。

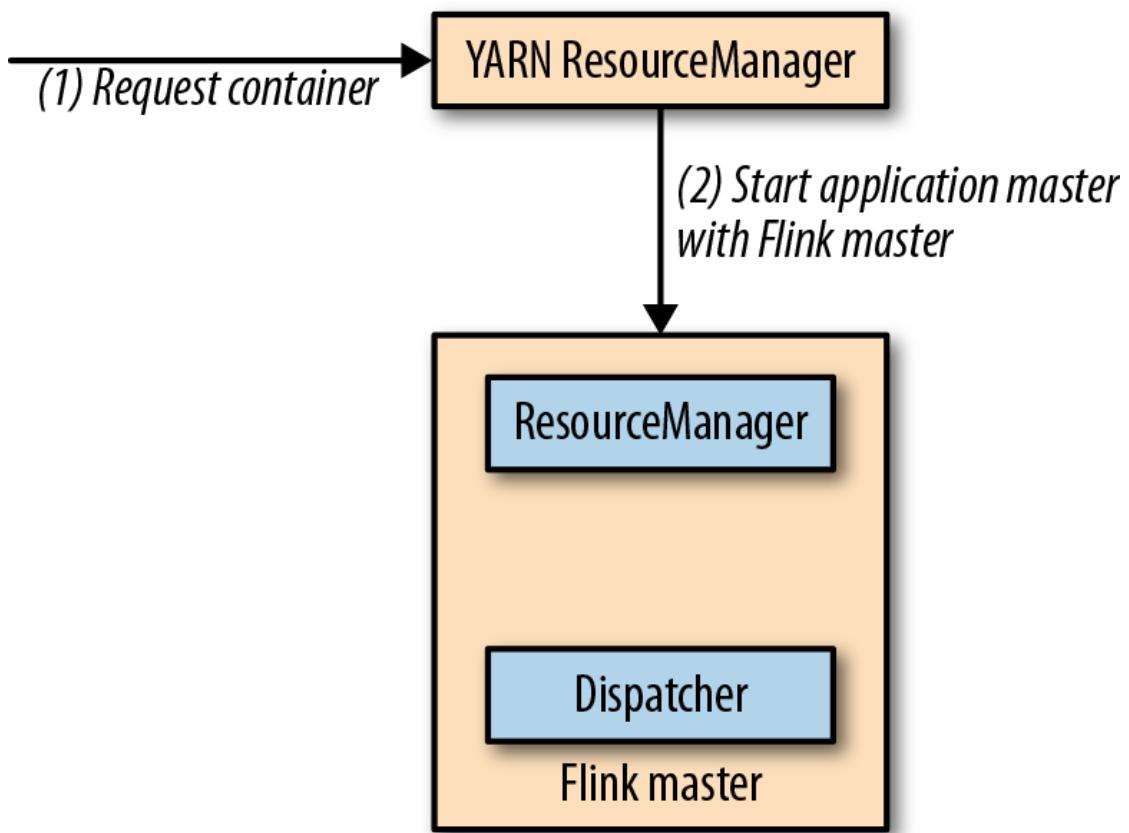
Flink 在 YARN 上运行，有两种模式：job 模式和 session 模式。在 job 模式中，Flink 集群用来运行一个单独的 job。一旦 job 结束，Flink 集群停止，并释放所有资源。下图展示了 Flink 的 job 如何提交到 YARN 集群。



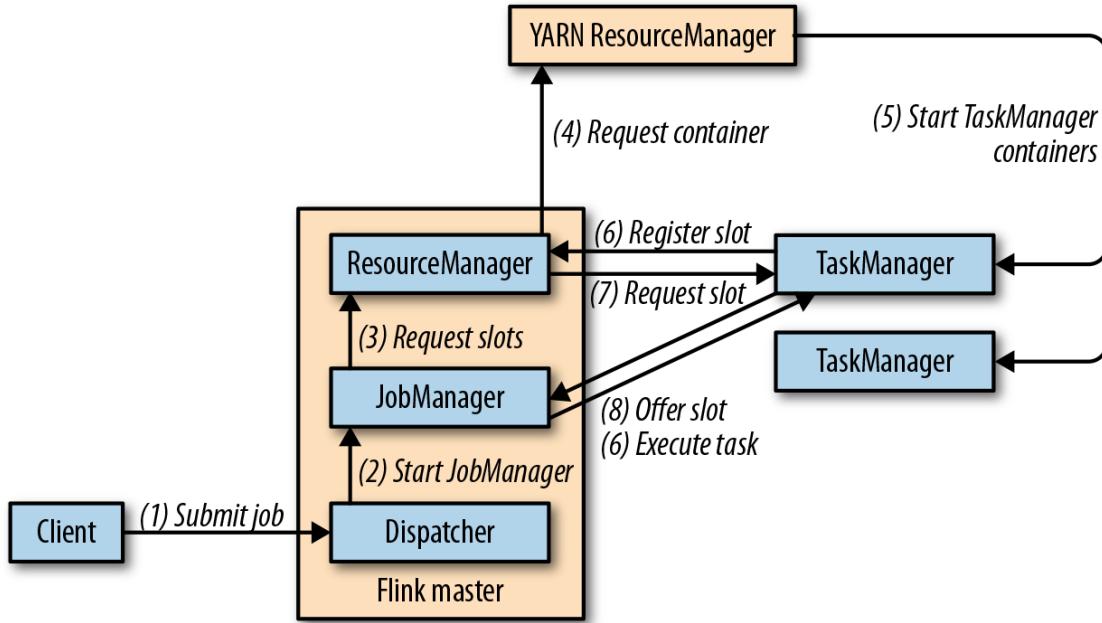
当客户端提交任务时，客户端将建立和 YARN ResourceManager 的连接，然后启动一个新

的 YARN 应用的 master 进程，进程中包含一个 JobManager 线程和一个 ResourceManager。JobManager 向 ResourceManager 请求所需要的 slots，用来运行 Flink 的 job。接下来，Flink 的 ResourceManager 将向 Yarn 的 ResourceManager 请求容器，然后启动 TaskManager 进程。一旦启动，TaskManager 会将 slots 注册在 Flink 的 ResourceManager 中，Flink 的 ResourceManager 将把 slots 提供给 JobManager。最终，JobManager 把 job 的任务提交给 TaskManager 执行。

sesison 模式将启动一个长期运行的 Flink 集群，这个集群可以运行多个 job，需要手动停止集群。如果以 session 模式启动，Flink 将会连接到 YARN 的 ResourceManager，然后启动一个 master 进程，包括一个 Dispatcher 线程和一个 Flink 的 ResourceManager 的线程。下图展示了 Flink YARN session 的启动。



当一个 job 被提交运行，Dispatcher 将启动一个 JobManager 线程，这个线程将向 Flink 的 ResourceManager 请求所需要的 slots。如果没有足够的 slots，Flink 的 ResourceManager 将向 YARN 的 ResourceManager 请求额外的容器，来启动 TaskManager 进程，并在 Flink 的 ResourceManager 中注册。一旦所需 slots 可用，Flink 的 ResourceManager 将吧 slots 分配给 JobManager，然后开始执行 job。下图展示了 job 如何在 session 模式下执行。



无论是作业模式还是会话模式，Flink 的 ResourceManager 都会自动对故障的 TaskManager 进行重启。你可以通过 `./conf/flink-conf.yaml` 配置文件来控制 Flink 在 YARN 上的故障恢复行为。例如，可以配置有多少容器发生故障后终止应用。

无论使用 job 模式还是 session 模式，都需要能够访问 Hadoop。

job 模式可以用以下命令来提交任务：

```
$ ./bin/flink run -m yarn-cluster ./path/to/job.jar
```

参数 `-m` 用来定义提交作业的目标主机。如果加上关键字 "yarn-cluster"，客户端会将作业提交到由 Hadoop 配置所指定的 YARN 集群上。Flink 的 CLI 客户端还支持很多参数，例如用于控制 TaskManager 容器内存大小的参数等。有关它们的详细信息，请参阅文档。Flink 集群的 Web UI 由 YARN 集群某个节点上的主进程负责提供。你可以通过 YARN 的 Web UI 对其进行访问，具体链接位置在 "Tracking URL: ApplicationMaster" 下的 Application Overview 页面上。

session 模式则是

```
$ ./bin/yarn-session.sh # 启动一个 yarn 会话
$ ./bin/flink run ./path/to/job.jar # 向会话提交作业
```

Flink 的 Web UI 链接可以从 YARN Web UI 的 Application Overview 页面上找到。

## 高可用配置 (HA)

Flink 的高可用配置需要 Apache ZooKeeper 组件，以及一个分布式文件系统，例如 HDFS 等等。JobManager 将会把相关信息都存储在文件系统中，并将指向文件系统中相关信息的指

针保存在 ZooKeeper 中。一旦失败，一个新的 JobManager 将从 ZooKeeper 中指向相关信息的指针所指向的文件系统中读取元数据，并恢复运行。

### 配置文件编写

```
# REQUIRED: enable HA mode via ZooKeeper high-availability: zookeeper
# REQUIRED: provide a list of all ZooKeeper servers of the quorum
high-availability.zookeeper.quorum: address1:2181[,...],addressX:2181
# REQUIRED: set storage location for job metadata in remote storage
high-availability.storageDir: hdfs:///flink/recovery
# RECOMMENDED: set the base path for all Flink clusters in ZooKeeper.
# Isolates Flink from other frameworks using the ZooKeeper cluster.
high-availability.zookeeper.path.root: /flink
```

### standalone 集群高可用配置

需要在配置文件中加一行集群标识符信息，因为可能多个集群共用一个 zookeeper 服务。

```
# RECOMMENDED: set the path for the Flink cluster in ZooKeeper.
# Isolates multiple Flink clusters from each other.
# The cluster id is required to look up the metadata of a failed cluster.
high-availability.cluster-id: /cluster-1
```

### yarn 集群高可用配置

首先在 yarn 集群的配置文件 `yarn-site.xml` 中加入以下代码

```
<property>
  <name>yarn.resourcemanager.am.max-attempts</name>
  <value>4</value>
  <description>
    The maximum number of application master execution attempts.
    Default value is 2, i.e., an application is restarted at most once.
  </description>
</property>
```

然后在 `./conf/flink-conf.yaml` 加上

```
# Restart an application at most 3 times (+ the initial start).
# Must be less or equal to the configured maximum number of attempts.
yarn.application-attempts: 4
```

## 与 Hadoop 集成

推荐两种方法

1. 下载包含 hadoop 的 Flink 版本。
2. 使用我们之前下载的 Flink, 然后配置 Hadoop 的环境变量。`export HADOOP_CLASSPATH={hadoop classpath}`

我们还需要提供 Hadoop 配置文件的路径。只需设置名为 `HADOOP_CONF_DIR` 的环境变量就可以了。这样 Flink 就能够连上 YARN 的 ResourceManager 和 HDFS 了。

## 保存点操作

```
$ ./bin/flink savepoint <jobId> [savepointPath]
```

例如

```
$ ./bin/flink savepoint bc0b2ad61ecd4a615d92ce25390f61ad \
hdfs:///xxx:50070/savepoints
Triggering savepoint for job bc0b2ad61ecd4a615d92ce25390f61ad.
Waiting for response...
Savepoint completed.
Path: hdfs:///xxx:50070/savepoints/savepoint-bc0b2a-63cf5d5cceef8
You can resume your program from this savepoint with the run command.
```

删除保存点文件

```
$ ./bin/flink savepoint -d <savepointPath>
```

例子

```
$ ./bin/flink savepoint -d \
hdfs:///xxx:50070/savepoints/savepoint-bc0b2a-63cf5d5cceef8
Disposing savepoint 'hdfs:///xxx:50070/savepoints/savepoint-bc0b2a-63cf5d5cceef8'.
Waiting for response...
Savepoint 'hdfs:///xxx:50070/savepoints/savepoint-bc0b2a-63cf5d5cceef8' disposed.
```

## 取消一个应用

```
$ ./bin/flink cancel <jobId>
```

取消的同时做保存点操作

```
$ ./bin/flink cancel -s [savepointPath] <jobId>
```

例如

```
$ ./bin/flink cancel -s \
hdfs:///xxx:50070/savepoints d5fdaff43022954f5f02fcda8f25ef855
 Cancelling job bc0b2ad61ecd4a615d92ce25390f61ad
 with savepoint to hdfs:///xxx:50070/savepoints.
Cancelled job bc0b2ad61ecd4a615d92ce25390f61ad.
Savepoint stored in hdfs:///xxx:50070/savepoints/savepoint-bc0b2a-d08de07fbb10.
```

## 从保存点启动应用程序

```
$ ./bin/flink run -s <savepointPath> [options] <jobJar> [arguments]
```

## 扩容，改变并行度操作

```
$ ./bin/flink modify <jobId> -p <newParallelism>
```

例子

```
$ ./bin/flink modify bc0b2ad61ecd4a615d92ce25390f61ad -p 16
 Modify job bc0b2ad61ecd4a615d92ce25390f61ad.
 Rescaled job bc0b2ad61ecd4a615d92ce25390f61ad. Its new parallelism is 16.
```

# 第十章，Flink 和流式应用运维

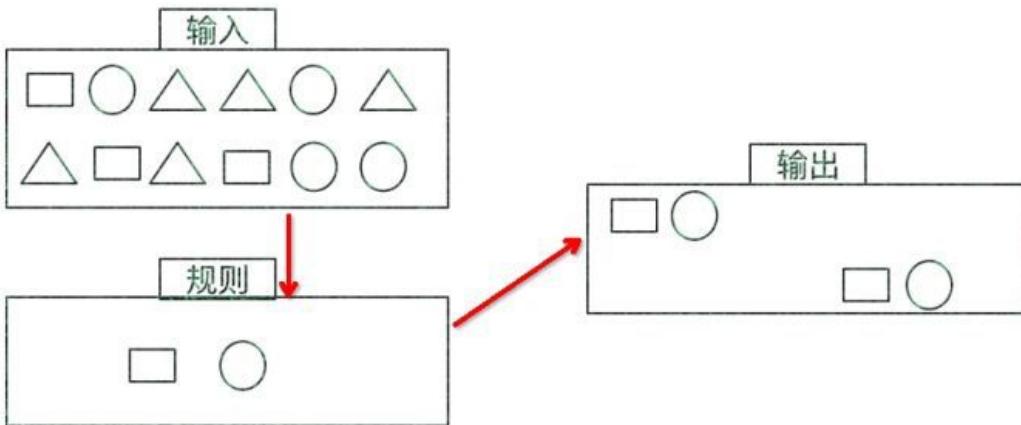
## 第十一章，Flink CEP 简介

什么是复杂事件 CEP ?

一个或多个由简单事件构成的事件流通过一定的规则匹配，然后输出用户想得到的数据，满足规则的复杂事件。

特征：

- 目标：从有序的简单事件流中发现一些高阶特征
- 输入：一个或多个由简单事件构成的事件流
- 处理：识别简单事件之间的内在联系，多个符合一定规则的简单事件构成复杂事件
- 输出：满足规则的复杂事件



CEP 用于分析低延迟、频繁产生的不同来源的事件流。CEP 可以帮助在复杂的、不相关的事件流中找出有意义的模式和复杂的关系，以接近实时或准实时的获得通知并阻止一些行为。

CEP 支持在流上进行模式匹配，根据模式的条件不同，分为连续的条件或不连续的条件；模式的条件允许有时间的限制，当在条件范围内没有达到满足的条件时，会导致模式匹配超时。

看起来很简单，但是它有很多不同的功能：

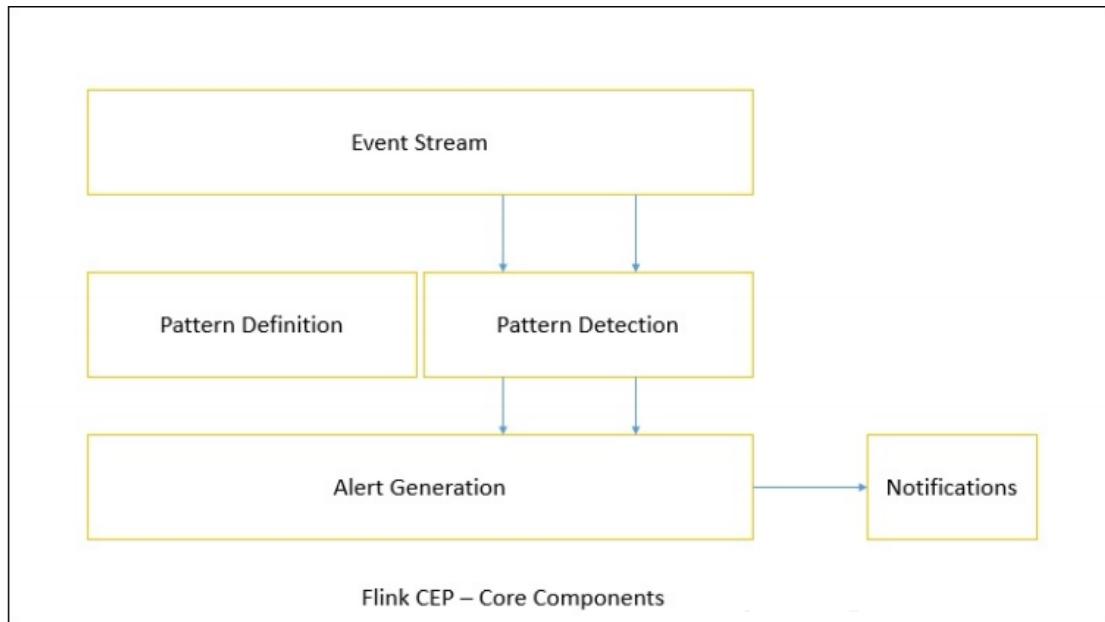
- 输入的流数据，尽快产生结果
- 在 2 个 event 流上，基于时间进行聚合类的计算
- 提供实时/准实时的警告和通知
- 在多样的数据源中产生关联并分析模式
- 高吞吐、低延迟的处理

市场上有多种 CEP 的解决方案，例如 Spark、Samza、Beam 等，但他们都没有提供专门的 library 支持。但是 Flink 提供了专门的 CEP library。

### Flink CEP

Flink 为 CEP 提供了专门的 Flink CEP library，它包含如下组件：

- Event Stream
- pattern 定义
- pattern 检测
- 生成 Alert



首先，开发人员要在 DataStream 流上定义出模式条件，之后 Flink CEP 引擎进行模式检测，必要时生成告警。

为了使用 Flink CEP，我们需要导入依赖：

```
<dependency>
  <groupId>org.apache.flink</groupId>
  <artifactId>flink-cep-scala_${scala.binary.version}</artifactId>
  <version>${flink.version}</version>
</dependency>
```

#### Event Streams

登录事件流

```
case class LoginEvent(userId: String,
                      ip: String,
                      eventType: String,
                      eventTime: String)

val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)
env.setParallelism(1)

val loginEventStream = env
  .fromCollection(List(
    LoginEvent("1", "192.168.0.1", "fail", "1558430842"),
    LoginEvent("1", "192.168.0.2", "fail", "1558430843"),
    LoginEvent("1", "192.168.0.3", "fail", "1558430844"),
    LoginEvent("2", "192.168.10.10", "success", "1558430845")
```

```
))
.assignAscendingTimestamps(_.eventTime.toLong * 1000)
```

### *Pattern API*

每个 Pattern 都应该包含几个步骤，或者叫做 state。从一个 state 到另一个 state，通常我们需要定义一些条件，例如下列的代码：

```
val loginFailPattern = Pattern.begin[LoginEvent]("begin")
  .where(_.eventType.equals("fail"))
  .next("next")
  .where(_.eventType.equals("fail"))
  .within(Time.seconds(10))
```

每个 state 都应该有一个标示：

例如: `.begin[LoginEvent]("begin")` 中的 “begin”

每个 state 都需要有一个唯一的名字，而且需要一个 filter 来过滤条件，这个过滤条件定义事件需要符合的条件

例如: `.where(_.eventType.equals("fail"))`

我们也可以通过 subtype 来限制 event 的子类型：

```
start.subtype(SubEvent.class).where(...);
```

事实上，你可以多次调用 subtype 和 where 方法；而且如果 where 条件是不相关的，你可以通过 or 来指定一个单独的 filter 函数：

```
pattern.where(...).or(...);
```

之后，我们可以在此条件基础上，通过 next 或者 followedBy 方法切换到下一个 state，next 的意思是说上一步符合条件的元素之后紧挨着的元素；而 followedBy 并不要求一定是挨着的元素。这两者分别称为严格近邻和非严格近邻。

```
val strictNext = start.next("middle")
val nonStrictNext = start.followedBy("middle")
```

最后，我们可以将所有的 Pattern 的条件限定在一定的时间范围内：

```
next.within(Time.seconds(10))
```

这个时间可以是 Processing Time，也可以是 Event Time。

### *Pattern 检测*

通过一个 input DataStream 以及刚刚我们定义的 Pattern，我们可以创建一个 PatternStream：

```
val input = ...
val pattern = ...
```

```
val patternStream = CEP.pattern(input, pattern)

val patternStream = CEP
    .pattern(
        loginEventStream.keyBy(_.userId), loginFailPattern
    )
```

一旦获得 PatternStream，我们就可以通过 select 或 flatSelect，从一个 Map 序列找到我们需要的告警信息。

#### *select*

select 方法需要实现一个 PatternSelectFunction，通过 select 方法来输出需要的警告。它接受一个 Map 对，包含 string/event，其中 key 为 state 的名字，event 则为真是的 Event。

```
val loginFailDataStream = patternStream
    .select((pattern: Map[String, Iterable[LoginEvent]]) => {
        val first = pattern.getOrElse("begin", null).iterator.next()
        val second = pattern.getOrElse("next", null).iterator.next()

        (second.userId, second.ip, second.eventType)
    })
```

其返回值仅为 1 条记录。

#### *flatSelect*

通过实现 PatternFlatSelectFunction，实现与 select 相似的功能。唯一的区别就是 flatSelect 方法可以返回多条记录。

#### 超时事件的处理

通过 within 方法，我们的 parttern 规则限定在一定的窗口范围内。当有超过窗口时间后还到达的 event，我们可以通过在 select 或 flatSelect 中，实现 PatternTimeoutFunction/PatternFlatTimeoutFunction 来处理这种情况。

```
val complexResult = patternStream.select(orderTimeoutOutput) {
    (pattern: Map[String, Iterable[OrderEvent]], timestamp: Long) => {
        val createOrder = pattern.get("begin")
        OrderTimeoutEvent(createOrder.get.iterator.next().orderId, "timeout")
    }
} {
    pattern: Map[String, Iterable[OrderEvent]] => {
        val payOrder = pattern.get("next")
        OrderTimeoutEvent(payOrder.get.iterator.next().orderId, "success")
    }
}
```

```
val timeoutResult = complexResult.getSideOutput(orderTimeoutOutput)

complexResult.print()
timeoutResult.print()
```

完整例子：

```
1 import org.apache.flink.cep.scala.CEP
2 import org.apache.flink.cep.scala.pattern.Pattern
3 import org.apache.flink.streaming.api.TimeCharacteristic
4 import org.apache.flink.streaming.api.scala._
5 import org.apache.flink.streaming.api.windowing.time.Time
6
7 import scala.collection.Map
8
9 object ScalaFlinkLoginFail {
10
11     def main(args: Array[String]): Unit = {
12
13         val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
14         env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)
15         env.setParallelism(1)
16
17         val loginEventStream = env.fromCollection(List(
18             LoginEvent("1", "192.168.0.1", "fail", "1558430842"),
19             LoginEvent("1", "192.168.0.2", "fail", "1558430843"),
20             LoginEvent("1", "192.168.0.3", "fail", "1558430844"),
21             LoginEvent("2", "192.168.10.10", "success", "1558430845")
22         )).assignAscendingTimestamps(_.eventTime.toLong)
23
24         val loginFailPattern = Pattern.begin[LoginEvent]("begin")
25             .where(_.eventType.equals("fail"))
26             .next("next")
27             .where(_.eventType.equals("fail"))
28             .within(Time.seconds(10))
29
30         val patternStream = CEP.pattern(
31             loginEventStream.keyBy(_.userId), loginFailPattern
32         )
33
34         val loginFailDataStream = patternStream
35             .select((pattern: Map[String, Iterable[LoginEvent]]) => {
```

```
36     val first = pattern.getOrElse("begin", null).iterator.next()
37     val second = pattern.getOrElse("next", null).iterator.next()
38
39     (second.userId, second.ip, second.eventType)
40   }
41
42   loginFailDataStream.print
43
44   env.execute
45 }
46
47 }
48
49 case class LoginEvent(userId: String,
50                       ip: String,
51                       eventType: String,
52                       eventTime: String)
```

## 第十二章，Table API 和 Flink SQL

### 整体介绍

#### 什么是 Table API 和 Flink SQL

Flink 本身是批流统一的处理框架，所以 Table API 和 SQL，就是批流统一的上层处理 API。目前功能尚未完善，处于活跃的开发阶段。

Table API 是一套内嵌在 Java 和 Scala 语言中的查询 API，它允许我们以非常直观的方式，组合来自一些关系运算符的查询（比如 select、filter 和 join）。而对于 Flink SQL，就是直接可以在代码中写 SQL，来实现一些查询（Query）操作。Flink 的 SQL 支持，基于实现了 SQL 标准的 Apache Calcite（Apache 开源 SQL 解析工具）。

无论输入是批输入还是流式输入，在这两套 API 中，指定的查询都具有相同的语义，得到相同的结果。

#### 需要引入的依赖

Table API 和 SQL 需要引入的依赖有两个：planner 和 bridge。

```
<dependency>
<groupId>org.apache.flink</groupId>
<artifactId>flink-table-planner_2.11</artifactId>
```

```
<version>1.10.0</version>
</dependency>
<dependency>
    <groupId>org.apache.flink</groupId>
    <artifactId>flink-table-api-scala-bridge_2.11</artifactId>
    <version>1.10.0</version>
</dependency>
```

- flink-table-planner: planner 计划器，是 table API 最主要的部分，提供了运行时环境和生成程序执行计划的 planner；
- flink-table-api-scala-bridge: bridge 桥接器，主要负责 table API 和 DataStream/DataSet API 的连接支持，按照语言分 java 和 scala。

这里的两个依赖，是 IDE 环境下运行需要添加的；如果是生产环境，lib 目录下默认已经有了 planner，就只需要有 bridge 就可以了。

当然，如果想使用用户自定义函数，或是跟 kafka 做连接，需要有一个 SQL client，这个包含在 flink-table-common 里。

## 两种 planner (old & blink) 的区别

1. 批流统一：Blink 将批处理作业，视为流式处理的特殊情况。所以，blink 不支持表和 DataSet 之间的转换，批处理作业将不转换为 DataSet 应用程序，而是跟流处理一样，转换为 DataStream 程序来处理。
2. 因为批流统一，Blink planner 也不支持 BatchTableSource，而使用有界的 StreamTableSource 代替。
3. Blink planner 只支持全新的目录，不支持已弃用的 ExternalCatalog。
4. 旧 planner 和 Blink planner 的 FilterableTableSource 实现不兼容。旧的 planner 会把 PlannerExpressions 下推到 filterableTableSource 中，而 blink planner 则会把 Expressions 下推。
5. 基于字符串的键值配置选项仅适用于 Blink planner。
6. PlannerConfig 在两个 planner 中的实现不同。
7. Blink planner 会将多个 sink 优化在一个 DAG 中（仅在 TableEnvironment 上受支持，而在 StreamTableEnvironment 上不受支持）。而旧 planner 的优化总是将每一个 sink 放在一个新的 DAG 中，其中所有 DAG 彼此独立。
8. 旧的 planner 不支持目录统计，而 Blink planner 支持。

## API 调用

### 基本程序结构

Table API 和 SQL 的程序结构，与流式处理的程序结构类似；也可以近似地认为有这么几步：首先创建执行环境，然后定义 source、transform 和 sink。

具体操作流程如下：

```
1 val tableEnv = ... // 创建表的执行环境
2
3 // 创建一张表，用于读取数据
4 tableEnv.connect(...).createTemporaryTable("inputTable")
5 // 注册一张表，用于把计算结果输出
6 tableEnv.connect(...).createTemporaryTable("outputTable")
7 // 通过 Table API 查询算子，得到一张结果表
8 val result = tableEnv.from("inputTable").select(...)
9 // 通过 SQL 查询语句，得到一张结果表
10 val sqlResult = tableEnv.sqlQuery("SELECT ... FROM inputTable ...")
11
12 // 将结果表写入输出表中
13 result.insertInto("outputTable")
```

## 创建表环境

创建表环境最简单的方式，就是基于流处理执行环境，调 create 方法直接创建：

```
val tableEnv = StreamTableEnvironment.create(env)
```

表环境（TableEnvironment）是 flink 中集成 Table API & SQL 的核心概念。它负责：

- 注册 catalog
- 在内部 catalog 中注册表
- 执行 SQL 查询
- 注册用户自定义函数
- 将 DataStream 或 DataSet 转换为表
- 保存对 ExecutionEnvironment 或 StreamExecutionEnvironment 的引用

在创建 TableEnv 的时候，可以多传入一个 EnvironmentSettings 或者 TableConfig 参数，可以用来配置 TableEnvironment 的一些特性。

比如，配置老版本的流式查询（Flink-Streaming-Query）：

```
val settings = EnvironmentSettings
    .newInstance()
    .useOldPlanner()      // 使用老版本 planner
    .inStreamingMode()    // 流处理模式
    .build()

val tableEnv = StreamTableEnvironment.create(env, settings)
```

基于老版本的批处理环境（Flink-Batch-Query）：

```
val batchEnv = ExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
val batchTableEnv = BatchTableEnvironment.create(batchEnv)
```

基于 blink 版本的流处理环境 (Blink-Streaming-Query) :

```
val bsSettings = EnvironmentSettings
    .newInstance()
    .useBlinkPlanner()
    .inStreamingMode()
    .build()
```

```
val bsTableEnv = StreamTableEnvironment.create(env, bsSettings)
```

基于 blink 版本的批处理环境 (Blink-Batch-Query) :

```
val bbSettings = EnvironmentSettings
    .newInstance()
    .useBlinkPlanner()
    .inBatchMode().build()
```

```
val bbTableEnv = TableEnvironment.create(bbSettings)
```

## 在 Catalog 中注册表

**表 (Table) 的概念** TableEnvironment 可以注册目录 Catalog，并可以基于 Catalog 注册表。它会维护一个 Catalog-Table 表之间的 map。

表 (Table) 是由一个“标识符”来指定的，由 3 部分组成：Catalog 名、数据库 (database) 名和对象名 (表名)。如果没有指定目录或数据库，就使用当前的默认值。

表可以是常规的 (Table, 表)，或者虚拟的 (View, 视图)。常规表 (Table) 一般可以用来描述外部数据，比如文件、数据库表或消息队列的数据，也可以直接从 DataStream 转换而来。视图可以从现有的表中创建，通常是 table API 或者 SQL 查询的一个结果。

**连接到文件系统 (Csv 格式)** 连接外部系统在 Catalog 中注册表，直接调用 tableEnv.connect() 就可以，里面参数要传入一个 ConnectorDescriptor，也就是 connector 描述器。对于文件系统的 connector 而言，flink 内部已经提供了，就叫做 FileSystem()。

代码如下：

```
tableEnv
    .connect(new FileSystem().path("sensor.txt")) // 定义表数据来源，外部连接
    .withFormat(new OldCsv()) // 定义从外部系统读取数据之后的格式化方法
    .withSchema(
        new Schema()
            .field("id", DataTypes.STRING()))
```

```
.field("timestamp", DataTypes.BIGINT())
.field("temperature", DataTypes.DOUBLE())
) // 定义表结构
.createTemporaryTable("inputTable") // 创建临时表
```

这是旧版本的 csv 格式描述器。由于它是非标的，跟外部系统对接并不通用，所以将被弃用，以后会被一个符合 RFC-4180 标准的新 format 描述器取代。新的描述器就叫 Csv()，但 flink 没有直接提供，需要引入依赖 flink-csv：

```
<dependency>
<groupId>org.apache.flink</groupId>
<artifactId>flink-csv</artifactId>
<version>1.10.0</version>
</dependency>
```

代码非常类似，只需要把 withFormat 里的 OldCsv 改成 Csv 就可以了。

**连接到 Kafka** kafka 的连接器 flink-kafka-connector 中，1.10 版本的已经提供了 Table API 的支持。我们可以在 connect 方法中直接传入一个叫做 Kafka 的类，这就是 kafka 连接器的描述器 ConnectorDescriptor。

```
tableEnv
.connect(
    new Kafka()
        .version("0.11") // 定义 kafka 的版本
        .topic("sensor") // 定义主题
        .property("zookeeper.connect", "localhost:2181")
        .property("bootstrap.servers", "localhost:9092")
)
.withFormat(new Csv())
.withSchema(
    new Schema()
        .field("id", DataTypes.STRING())
        .field("timestamp", DataTypes.BIGINT())
        .field("temperature", DataTypes.DOUBLE())
)
.createTemporaryTable("kafkaInputTable")
```

当然也可以连接到 ElasticSearch、 MySql、 HBase、 Hive 等外部系统，实现方式基本上是类似的。

## 表的查询

利用外部系统的连接器 connector，我们可以读写数据，并在环境的 Catalog 中注册表。接下来就可以对表做查询转换了。

Flink 给我们提供了两种查询方式：Table API 和 SQL。

**Table API 的调用** Table API 是集成在 Scala 和 Java 语言内的查询 API。与 SQL 不同，Table API 的查询不会用字符串表示，而是在宿主语言中一步一步调用完成的。

Table API 基于代表一张“表”的 Table 类，并提供一整套操作处理的方法 API。这些方法会返回一个新的 Table 对象，这个对象就表示对输入表应用转换操作的结果。有些关系型转换操作，可以由多个方法调用组成，构成链式调用结构。例如 table.select(...).filter(...)，其中 select (...) 表示选择表中指定的字段，filter(...) 表示筛选条件。

代码中的实现如下：

```
val sensorTable: Table = tableEnv.from("inputTable")

val resultTable: Table = sensorTable
    .select("id, temperature")
    .filter("id = 'sensor_1'")
```

**SQL 查询** Flink 的 SQL 集成，基于的是 Apache Calcite，它实现了 SQL 标准。在 Flink 中，用常规字符串来定义 SQL 查询语句。SQL 查询的结果，是一个新的 Table。

代码实现如下：

```
val resultSqlTable: Table = tableEnv
    .sqlQuery("select id, temperature from inputTable where id = 'sensor_1'")
```

或者：

```
val resultSqlTable: Table = tableEnv.sqlQuery(
    """
        |select id, temperature
        |from inputTable
        |where id = 'sensor_1'
    """".stripMargin)
```

当然，也可以加上聚合操作，比如我们统计每个 sensor 温度数据出现的个数，做个 count 统计：

```
val aggResultTable = sensorTable
    .groupBy('id)
    .select('id, 'id.count as 'count)
```

SQL 的实现：

```
val aggResultSqlTable = tableEnv  
    .sqlQuery("select id, count(id) as cnt from inputTable group by id")
```

这里 Table API 里指定的字段，前面加了一个单引号'，这是 Table API 中定义的 Expression 类型的写法，可以很方便地表示一个表中的字段。

字段可以直接全部用双引号引起来，也可以用半边单引号 + 字段名的方式。以后的代码中，一般都用后一种形式。

## 将 DataStream 转换成表

Flink 允许我们把 Table 和 DataStream 做转换：我们可以基于一个 DataStream，先流式地读取数据源，然后 map 成样例类，再把它转成 Table。Table 的列字段 (column fields)，就是样例类里的字段，这样就不用再麻烦地定义 schema 了。

**代码表达** 代码中实现非常简单，直接用 tableEnv.fromDataStream() 就可以了。默认转换后的 Table schema 和 DataStream 中的字段定义一一对应，也可以单独指定出来。

这就允许我们更换字段的顺序、重命名，或者只选取某些字段出来，相当于做了一次 map 操作（或者 Table API 的 select 操作）。

代码具体如下：

```
val inputStream: DataStream[String] = env.readTextFile("sensor.txt")  
val dataStream: DataStream[SensorReading] = inputStream  
    .map(data => {  
        val dataArray = data.split(",")  
        SensorReading(dataArray(0), dataArray(1).toLong, dataArray(2).toDouble)  
    })  
  
val sensorTable: Table = tableEnv.fromDataStream(dataStream)  
  
val sensorTable2 = tableEnv.fromDataStream(dataStream, 'id, 'timestamp as 'ts)
```

**数据类型与 Table schema 的对应** 在上节的例子中，DataStream 中的数据类型，与表的 Schema 之间的对应关系，是按照样例类中的字段名来对应的 (name-based mapping)，所以还可以用 as 做重命名。

另外一种对应方式是，直接按照字段的位置来对应 (position-based mapping)，对应的过程中，就可以直接指定新的字段名了。

基于名称的对应：

```
val sensorTable = tableEnv  
.fromDataStream(dataStream, 'timestamp as 'ts, 'id as 'myId, 'temperature)
```

基于位置的对应：

```
val sensorTable = tableEnv  
.fromDataStream(dataStream, 'myId, 'ts)
```

Flink 的 DataStream 和 DataSet API 支持多种类型。

组合类型，比如元组（内置 Scala 和 Java 元组）、POJO、Scala case 类和 Flink 的 Row 类型等，允许具有多个字段的嵌套数据结构，这些字段可以在 Table 的表达式中访问。其他类型，则被视为原子类型。

元组类型和原子类型，一般用位置对应会好一些；如果非要用名称对应，也是可以的：

元组类型，默认的名称是“\_1”，“\_2”；而原子类型，默认名称是“f0”。

## 创建临时视图 (Temporary View)

创建临时视图的第一种方式，就是直接从 DataStream 转换而来。同样，可以直接对应字段转换；也可以在转换的时候，指定相应的字段。

代码如下：

```
tableEnv.createTemporaryView("sensorView", dataStream)  
tableEnv.createTemporaryView("sensorView",  
    dataStream, 'id, 'temperature, 'timestamp as 'ts)
```

另外，当然还可以基于 Table 创建视图：

```
tableEnv.createTemporaryView("sensorView", sensorTable)
```

View 和 Table 的 Schema 完全相同。事实上，在 Table API 中，可以认为 View 和 Table 是等价的。

## 输出表

表的输出，是通过将数据写入 TableSink 来实现的。TableSink 是一个通用接口，可以支持不同的文件格式、存储数据库和消息队列。

具体实现，输出表最直接的方法，就是通过 Table.insertInto() 方法将一个 Table 写入注册过的 TableSink 中。

### 输出到文件 代码如下：

```
// 注册输出表  
tableEnv.connect(
```

```
new FileSystem().path("…\\resources\\out.txt")
) // 定义到文件系统的连接
.withFormat(new Csv()) // 定义格式化方法, Csv 格式
.withSchema(
    new Schema()
        .field("id", DataTypes.STRING())
        .field("temp", DataTypes.DOUBLE())
) // 定义表结构
.createTemporaryTable("outputTable") // 创建临时表

resultSqlTable.insertInto("outputTable")
```

**更新模式（Update Mode）** 在流处理过程中，表的处理并不像传统定义的那样简单。

对于流式查询（Streaming Queries），需要声明如何在（动态）表和外部连接器之间执行转换。与外部系统交换的消息类型，由更新模式（update mode）指定。

Flink Table API 中的更新模式有以下三种：

1. 追加模式（Append Mode）

在追加模式下，表（动态表）和外部连接器只交换插入（Insert）消息。

2. 撤回模式（Retract Mode）

在撤回模式下，表和外部连接器交换的是：添加（Add）和撤回（Retract）消息。

- 插入（Insert）会被编码为添加消息；
- 删除（Delete）则编码为撤回消息；
- 更新（Update）则会编码为，已更新行（上一行）的撤回消息，和更新行（新行）的添加消息。

在此模式下，不能定义 key，这一点跟 upsert 模式完全不同。

3. Upsert（更新插入）模式

在 Upsert 模式下，动态表和外部连接器交换 Upsert 和 Delete 消息。

这个模式需要一个唯一的 key，通过这个 key 可以传递更新消息。为了正确应用消息，外部连接器需要知道这个唯一 key 的属性。

- 插入（Insert）和更新（Update）都被编码为 Upsert 消息；
- 删除（Delete）编码为 Delete 信息。

这种模式和 Retract 模式的主要区别在于，Update 操作是用单个消息编码的，所以效率会更高。

**输出到 Kafka** 除了输出到文件，也可以输出到 Kafka。我们可以结合前面 Kafka 作为输入数据，构建数据管道，kafka 进，kafka 出。

代码如下：

```
// 输出到 kafka
tableEnv.connect(
    new Kafka()
        .version("0.11")
        .topic("sinkTest")
        .property("zookeeper.connect", "localhost:2181")
        .property("bootstrap.servers", "localhost:9092")
)
.withFormat(new Csv())
.withSchema(
    new Schema()
        .field("id", DataTypes.STRING())
        .field("temp", DataTypes.DOUBLE())
)
.createTemporaryTable("kafkaOutputTable")

resultTable.insertInto("kafkaOutputTable")
```

**输出到 ElasticSearch** ElasticSearch 的 connector 可以在 upsert (update+insert, 更新插入) 模式下操作，这样就可以使用 Query 定义的键 (key) 与外部系统交换 UPSERT/DELETE 消息。

另外，对于“仅追加”(append-only) 的查询，connector 还可以在 append 模式下操作，这样就可以与外部系统只交换 insert 消息。

es 目前支持的数据格式，只有 Json，而 flink 本身并没有对应的支持，所以还需要引入依赖：

```
<dependency>
    <groupId>org.apache.flink</groupId>
    <artifactId>flink-json</artifactId>
    <version>1.10.0</version>
</dependency>
```

代码实现如下：

```
// 输出到 es
tableEnv.connect(
    new Elasticsearch()
        .version("6")
        .host("localhost", 9200, "http")
        .index("sensor")
        .documentType("temp")
```

```
)  
.inUpsertMode()          // 指定是 Upsert 模式  
.withFormat(new Json())  
.withSchema(  
    new Schema()  
        .field("id", DataTypes.STRING())  
        .field("count", DataTypes.BIGINT())  
)  
.createTemporaryTable("esOutputTable")  
  
aggResultTable.insertInto("esOutputTable")
```

**输出到 MySql** Flink 专门为 Table API 的 jdbc 连接提供了 flink-jdbc 连接器，我们需要先引入依赖：

```
<dependency>  
    <groupId>org.apache.flink</groupId>  
    <artifactId>flink-jdbc_2.11</artifactId>  
    <version>1.10.0</version>  
</dependency>
```

jdbc 连接的代码实现比较特殊，因为没有对应的 java/scala 类实现 ConnectorDescriptor，所以不能直接 tableEnv.connect()。不过 Flink SQL 留下了执行 DDL 的接口：tableEnv.sqlUpdate()。

对于 jdbc 的创建表操作，天生就适合直接写 DDL 来实现，所以我们的代码可以这样写：

```
// 输出到 Mysql  
val sinkDDL: String =  
    """  
        |create table jdbcOutputTable (  
        |  id varchar(20) not null,  
        |  cnt bigint not null  
        |) with (  
        |  'connector.type' = 'jdbc',  
        |  'connector.url' = 'jdbc:mysql://localhost:3306/test',  
        |  'connector.table' = 'sensor_count',  
        |  'connector.driver' = 'com.mysql.jdbc.Driver',  
        |  'connector.username' = 'root',  
        |  'connector.password' = '123456'  
        |)  
    """".stripMargin  
  
tableEnv.sqlUpdate(sinkDDL)  
aggResultSqlTable.insertInto("jdbcOutputTable")
```

## 将表转换成 DataStream

表可以转换为 DataStream 或 DataSet。这样，自定义流处理或批处理程序就可以继续在 Table API 或 SQL 查询的结果上运行了。

将表转换为 DataStream 或 DataSet 时，需要指定生成的数据类型，即要将表的每一行转换成的数据类型。通常，最方便的转换类型就是 Row。当然，因为结果的所有字段类型都是明确的，我们也经常会用元组类型来表示。

表作为流式查询的结果，是动态更新的。所以，将这种动态查询转换成的数据流，同样需要对表的更新操作进行编码，进而有不同的转换模式。

Table API 中表到 DataStream 有两种模式：

- 追加模式（Append Mode）

用于表只会被插入（Insert）操作更改的场景。

- 撤回模式（Retract Mode）

用于任何场景。有些类似于更新模式中 Retract 模式，它只有 Insert 和 Delete 两类操作。

得到的数据会增加一个 Boolean 类型的标识位（返回的第一个字段），用它来表示到底是新增的数据（Insert），还是被删除的数据（老数据，Delete）。

代码实现如下：

```
val resultStream: DataStream[Row] = tableEnv  
    .toAppendStream[Row](resultTable)  
  
val aggResultStream: DataStream[(Boolean, (String, Long))] = tableEnv  
    .toRetractStream[(String, Long)](aggResultTable)  
  
resultStream.print("result")  
aggResultStream.print("aggResult")
```

所以，没有经过 groupby 之类聚合操作，可以直接用 toAppendStream 来转换；而如果经过了聚合，有更新操作，一般就必须用 toRetractDstream。

## Query 的解释和执行

Table API 提供了一种机制来解释（Explain）计算表的逻辑和优化查询计划。这是通过 TableEnvironment.explain（table）方法或 TableEnvironment.explain（）方法完成的。

explain 方法会返回一个字符串，描述三个计划：

- 未优化的逻辑查询计划
- 优化后的逻辑查询计划
- 实际执行计划

我们可以在代码中查看执行计划：

```
val explanation: String = tableEnv.explain(resultTable)  
println(explanation)
```

Query 的解释和执行过程，老 planner 和 blink planner 大体是一致的，又有所不同。整体来讲，Query 都会表示成一个逻辑查询计划，然后分两步解释：

1. 优化查询计划
2. 解释成 DataStream 或者 DataSet 程序

而 Blink 版本是批流统一的，所以所有的 Query，只会被解释成 DataStream 程序；另外在批处理环境 TableEnvironment 下，Blink 版本要到 tableEnv.execute() 执行调用才开始解释。

## 流处理中的特殊概念

Table API 和 SQL，本质上还是基于关系型表的操作方式；而关系型表、关系代数，以及 SQL 本身，一般是有界的，更适合批处理的场景。这就导致在进行流处理的过程中，理解会稍微复杂一些，需要引入一些特殊概念。

### 流处理和关系代数（表，及 SQL）的区别

	关系代数（表）/SQL	流处理
处理的数据对象	字段元组的有界集合	无法访问所有数据，必须持续等待流式输入
查询（Query）对数据的访问	可以访问到完整的数据输入	无法访问所有数据，必须持续等待流式输入
查询终止条件	生成固定大小的结果集后终止	永不停止，根据持续收到的数据不断更新查询结果

可以看到，其实关系代数（主要就是指关系型数据库中的表）和 SQL，主要就是针对批处理的，这和流处理有天生的隔阂。

## 动态表（Dynamic Tables）

因为流处理面对的数据，是连续不断的，这和我们熟悉的关系型数据库中保存的“表”完全不同。所以，如果我们把流数据转换成 Table，然后执行类似于 table 的 select 操作，结果就不是一成不变的，而是随着新数据的到来，会不停更新。

我们可以随着新数据的到来，不停地在之前的基础上更新结果。这样得到的表，在 Flink Table API 概念里，就叫做“动态表”（Dynamic Tables）。

动态表是 Flink 对流数据的 Table API 和 SQL 支持的核心概念。与表示批处理数据的静态表

不同，动态表是随时间变化的。动态表可以像静态的批处理表一样进行查询，查询一个动态表会产生持续查询（Continuous Query）。连续查询永远不会终止，并会生成另一个动态表。查询（Query）会不断更新其动态结果表，以反映其动态输入表上的更改。

### 流式持续查询的过程

下图显示了流、动态表和连续查询的关系：



流式持续查询的过程为：

1. 流被转换为动态表。
2. 对动态表计算连续查询，生成新的动态表。
3. 生成的动态表被转换回流。

### 将流转换成表（Table）

为了处理带有关系查询的流，必须先将其转换为表。

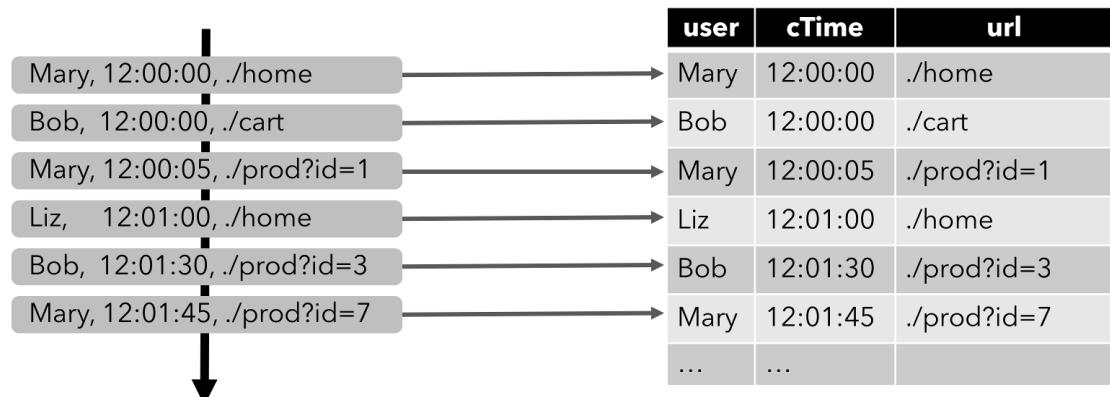
从概念上讲，流的每个数据记录，都被解释为对结果表的插入（Insert）修改。因为流式持续不断的，而且之前的输出结果无法改变。本质上，我们其实是从一个、只有插入操作的 changelog（更新日志）流，来构建一个表。

为了更好地说明动态表和持续查询的概念，我们来举一个具体的例子。

比如，我们现在的输入数据，就是用户在网站上的访问行为，数据类型（Schema）如下：

```
{
  user: VARCHAR, // 用户名
  cTime: TIMESTAMP, // 访问某个 URL 的时间戳
  url: VARCHAR // 用户访问的 URL
}
```

下图显示了如何将访问 URL 事件流，或者叫点击事件流（左侧）转换为表（右侧）。



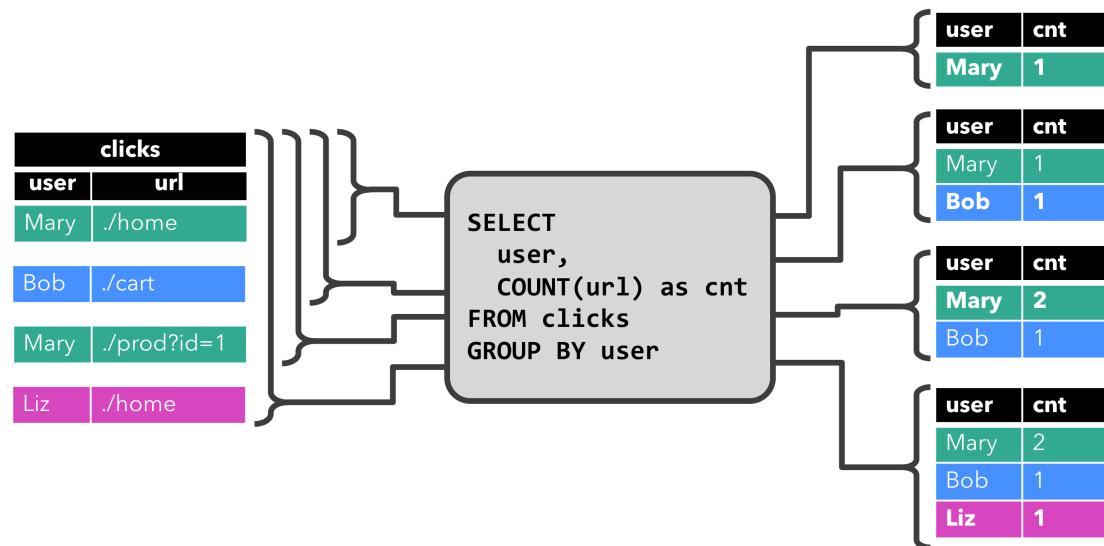
随着插入更多的访问事件流记录，生成的表将不断增长。

**持续查询 (Continuous Query)** 持续查询，会在动态表上做计算处理，并作为结果生成新的动态表。与批处理查询不同，连续查询从不终止，并根据输入表上的更新更新其结果表。

在任何时间点，连续查询的结果在语义上，等同于在输入表的快照上，以批处理模式执行的同一查询的结果。

在下面的示例中，我们展示了对点击事件流中的一个持续查询。

这个 Query 很简单，是一个分组聚合做 count 统计的查询。它将用户字段上的 clicks 表分组，并统计访问的 url 数。图中显示了随着时间的推移，当 clicks 表被其他行更新时如何计算查询。



**将动态表转换成流** 与常规的数据库表一样，动态表可以通过插入 (Insert)、更新 (Update) 和删除 (Delete) 更改，进行持续的修改。将动态表转换为流或将其写入外部系统时，需要对这些更改进行编码。Flink 的 Table API 和 SQL 支持三种方式对动态表的更改进行编码：

1. 仅追加 (Append-only) 流

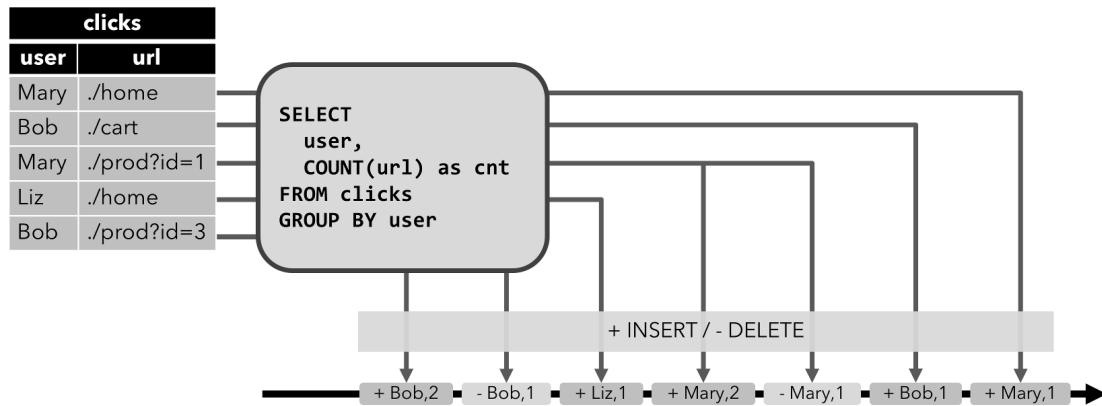
仅通过插入 (Insert) 更改，来修改的动态表，可以直接转换为“仅追加”流。这个流中发出的数据，就是动态表中新增的每一行。

2. 撤回 (Retract) 流

Retract 流是包含两类消息的流，添加 (Add) 消息和撤回 (Retract) 消息。

动态表通过将 INSERT 编码为 add 消息、DELETE 编码为 retract 消息、UPDATE 编码为被更改行（前一行）的 retract 消息和更新后行（新行）的 add 消息，转换为 retract 流。

下图显示了将动态表转换为 Retract 流的过程。

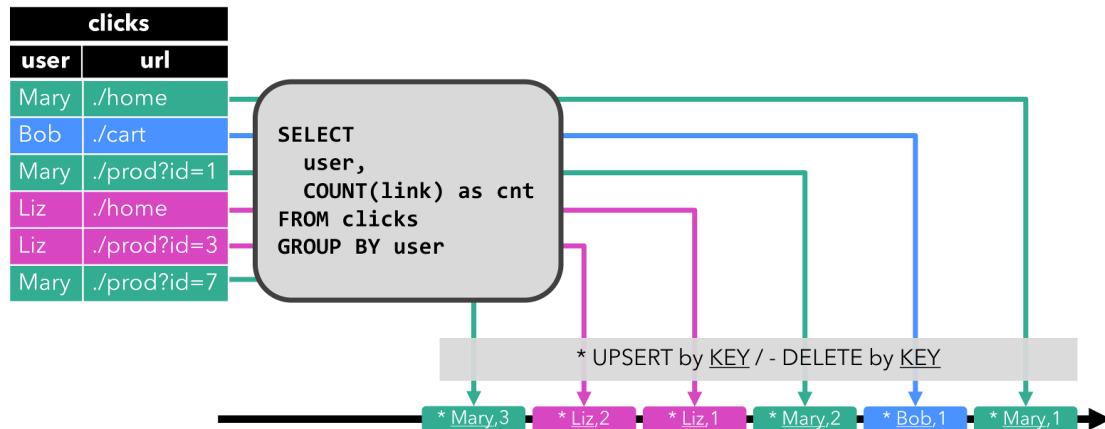


### 3. Upsert (更新插入) 流

Upsert 流包含两种类型的消息：Upsert 消息和 delete 消息。转换为 upsert 流的动态表，需要有唯一的键（key）。

通过将 INSERT 和 UPDATE 更改编码为 upsert 消息，将 DELETE 更改编码为 DELETE 消息，就可以将具有唯一键（Unique Key）的动态表转换为流。

下图显示了将动态表转换为 upsert 流的过程。



这些概念我们之前都已提到过。需要注意的是，在代码里将动态表转换为 DataStream 时，仅支持 Append 和 Retract 流。而向外部系统输出动态表的 TableSink 接口，则可以有不同的实现，比如之前我们讲到的 ES，就可以有 Upsert 模式。

## 时间特性

基于时间的操作（比如 Table API 和 SQL 中窗口操作），需要定义相关的时间语义和时间数据来源的信息。所以，Table 可以提供一个逻辑上的时间字段，用于在表处理程序中，指示时间和访问相应的时间截。

时间属性，可以是每个表 schema 的一部分。一旦定义了时间属性，它就可以作为一个字段引用，并且可以在基于时间的操作中使用。

时间属性的行为类似于常规时间截，可以访问，并且进行计算。

**处理时间 (Processing Time)** 处理时间语义下，允许表处理程序根据机器的本地时间生成结果。它是时间的最简单概念。它既不需要提取时间戳，也不需要生成 watermark。

定义处理时间属性有三种方法：在 DataStream 转化时直接指定；在定义 Table Schema 时指定；在创建表的 DDL 中指定。

### 1. DataStream 转化成 Table 时指定

由 DataStream 转换成表时，可以在后面指定字段名来定义 Schema。在定义 Schema 期间，可以使用`.proctime`，定义处理时间字段。

注意，这个`proctime`属性只能通过附加逻辑字段，来扩展物理 schema。因此，只能在 schema 定义的末尾定义它。

代码如下：

```
// 定义好 DataStream
val inputStream: DataStream[String] = env.readTextFile("../sensor.txt")
val dataStream: DataStream[SensorReading] = inputStream
.map(data => {
    val dataArray = data.split(",")
    SensorReading(dataArray(0), dataArray(1).toLong, dataArray(2).toDouble)
})

// 将 DataStream 转换为 Table，并指定时间字段
val sensorTable = tableEnv
.fromDataStream(dataStream, 'id, 'temperature, 'timestamp, 'pt.proctime)
```

### 2. 定义 Table Schema 时指定

这种方法其实也很简单，只要在定义 Schema 的时候，加上一个新的字段，并指定成`proctime`就可以了。

代码如下：

```
tableEnv
.connect(
    new FileSystem().path("../sensor.txt"))
.withFormat(new Csv())
.withSchema(
    new Schema()
        .field("id", DataTypes.STRING())
        .field("timestamp", DataTypes.BIGINT())
        .field("temperature", DataTypes.DOUBLE())
        .field("pt", DataTypes.TIMESTAMP(3))
        .proctime() // 指定 pt 字段为处理时间
) // 定义表结构
```

```
.createTemporaryTable("inputTable") // 创建临时表
```

### 3. 创建表的 DDL 中指定

在创建表的 DDL 中，增加一个字段并指定成 proctime，也可以指定当前的时间字段。

代码如下：

```
val sinkDDL: String =
"""
|create table dataTable (
|  id varchar(20) not null,
|  ts bigint,
|  temperature double,
|  pt AS PROCTIME()
|) with (
|  'connector.type' = 'filesystem',
|  'connector.path' = 'file:///D:/...\sensor.txt',
|  'format.type' = 'csv'
|)
""".stripMargin

tableEnv.sqlUpdate(sinkDDL) // 执行 DDL
```

注意：运行这段 DDL，必须使用 Blink Planner。

**事件时间（Event Time）** 事件时间语义，允许表处理程序根据每个记录中包含的时间生成结果。这样即使在有乱序事件或者延迟事件时，也可以获得正确的结果。

为了处理无序事件，并区分流中的准时和迟到事件；Flink 需要从事件数据中，提取时间戳，并用来推进事件时间的进展（watermark）。

### 1. DataStream 转化成 Table 时指定

在 DataStream 转换成 Table，schema 的定义期间，使用.rowtime 可以定义事件时间属性。注意，必须在转换的数据流中分配时间戳和 watermark。

在将数据流转换为表时，有两种定义时间属性的方法。根据指定的.rowtime 字段名是否存在与数据流的架构中，timestamp 字段可以：

- 作为新字段追加到 schema
- 替换现有字段

在这两种情况下，定义的事件时间戳字段，都将保存 DataStream 中事件时间戳的值。

代码如下：

```
val inputStream: DataStream[String] = env.readTextFile("\\sensor.txt")
val dataStream: DataStream[SensorReading] = inputStream
```

```

.map(data => {
    val dataArray = data.split(",")
    SensorReading(dataArray(0), dataArray(1).toLong, dataArray(2).toDouble)
})
.assignAscendingTimestamps(_.timestamp * 1000L)

// 将 DataStream 转换为 Table，并指定时间字段
val sensorTable = tableEnv
    .fromDataStream(dataStream, 'id, 'timestamp.rowtime, 'temperature)
// 或者，直接追加字段
val sensorTable2 = tableEnv
    .fromDataStream(dataStream, 'id, 'temperature, 'timestamp, 'rt.rowtime)

```

## 2. 定义 Table Schema 时指定

这种方法只要在定义 Schema 的时候，将事件时间字段，并指定成 rowtime 就可以了。

代码如下：

```

tableEnv
    .connect(new FileSystem().path("sensor.txt"))
    .withFormat(new Csv())
    .withSchema(
        new Schema()
            .field("id", DataTypes.STRING())
            .field("timestamp", DataTypes.BIGINT())
            .rowtime(
                new Rowtime()
                    .timestampsFromField("timestamp")      // 从字段中提取时间戳
                    .watermarksPeriodicBounded(1000)       // watermark 延迟 1 秒
            )
            .field("temperature", DataTypes.DOUBLE())
    ) // 定义表结构
    .createTemporaryTable("inputTable") // 创建临时表

```

## 3. 创建表的 DDL 中指定

事件时间属性，是使用 CREATE TABLE DDL 中的 WARDMARK 语句定义的。watermark 语句，定义现有事件时间字段上的 watermark 生成表达式，该表达式将事件时间字段标记为事件时间属性。

代码如下：

```

val sinkDDL: String =
"""
|create table dataTable (

```

```

|   id varchar(20) not null,
|   ts bigint,
|   temperature double,
|   rt AS TO_TIMESTAMP( FROM_UNIXTIME(ts) ),
|   watermark for rt as rt - interval '1' second
|) with (
|   'connector.type' = 'filesystem',
|   'connector.path' = 'file:///D:/..\sensor.txt',
|   'format.type' = 'csv'
|
""".stripMargin

```

tableEnv.sqlUpdate(sinkDDL) // 执行 DDL

这里 FROM\_UNIXTIME 是系统内置的时间函数，用来将一个整数（秒数）转换成“YYYY-MM-DD hh:mm:ss”格式（默认，也可以作为第二个 String 参数传入）的日期时间字符串（date time string）；然后再用 TO\_TIMESTAMP 将其转换成 Timestamp。

## 窗口（Windows）

时间语义，要配合窗口操作才能发挥作用。最主要的用途，当然就是开窗口、根据时间段做计算了。下面我们就来看看 Table API 和 SQL 中，怎么利用时间字段做窗口操作。

在 Table API 和 SQL 中，主要有两种窗口：Group Windows 和 Over Windows

### 分组窗口（Group Windows）

分组窗口（Group Windows）会根据时间或行计数间隔，将行聚合到有限的组（Group）中，并对每个组的数据执行一次聚合函数。

Table API 中的 Group Windows 都是使用>window (w:GroupWindow) 子句定义的，并且必须由 as 子句指定一个别名。为了按窗口对表进行分组，窗口的别名必须在 group by 子句中，像常规的分组字段一样引用。

```

val table = input
  .window([w: GroupWindow] as 'w') // 定义窗口，别名 w
  .groupBy('w, 'a) // 以属性 a 和窗口 w 作为分组的 key
  .select('a, 'b.sum) // 聚合字段 b 的值，求和

```

或者，还可以把窗口的相关信息，作为字段添加到结果表中：

```

val table = input
  .window([w: GroupWindow] as 'w')
  .groupBy('w, 'a)
  .select('a, 'w.start, 'w.end, 'w.rowtime, 'b.count)

```

Table API 提供了一组具有特定语义的预定义 Window 类，这些类会被转换为底层 DataStream 或 DataSet 的窗口操作。

Table API 支持的窗口定义，和我们熟悉的一样，主要也是三种：滚动（Tumbling）、滑动（Sliding）和会话（Session）。

**滚动窗口** 滚动窗口（Tumbling windows）要用 Tumble 类来定义，另外还有三个方法：

- over: 定义窗口长度
- on: 用来分组（按时间间隔）或者排序（按行数）的时间字段
- as: 别名，必须出现在后面的 groupBy 中

代码如下：

```
// Tumbling Event-time Window (事件时间字段 rowtime
>window(Tumble over 10.minutes on 'rowtime as 'w)
// Tumbling Processing-time Window (处理时间字段 proctime)
>window(Tumble over 10.minutes on 'proctime as 'w)
// Tumbling Row-count Window (类似于计数窗口，按处理时间排序，10 行一组)
>window(Tumble over 10.rows on 'proctime as 'w)
```

**滑动窗口** 滑动窗口（Sliding windows）要用 Slide 类来定义，另外还有四个方法：

- over: 定义窗口长度
- every: 定义滑动步长
- on: 用来分组（按时间间隔）或者排序（按行数）的时间字段
- as: 别名，必须出现在后面的 groupBy 中

代码如下：

```
// Sliding Event-time Window
>window(Slide over 10.minutes every 5.minutes on 'rowtime as 'w)
// Sliding Processing-time window
>window(Slide over 10.minutes every 5.minutes on 'proctime as 'w)
// Sliding Row-count window
>window(Slide over 10.rows every 5.rows on 'proctime as 'w)
```

**会话窗口** 会话窗口（Session windows）要用 Session 类来定义，另外还有三个方法：

- withGap: 会话时间间隔
- on: 用来分组（按时间间隔）或者排序（按行数）的时间字段
- as: 别名，必须出现在后面的 groupBy 中

代码如下：

```
// Session Event-time Window
```

```
.window(Session withGap 10.minutes on 'rowtime' as 'w')
// Session Processing-time Window
>window(Session withGap 10.minutes on 'proctime' as 'w')
```

## Over Windows

Over window 聚合是标准 SQL 中已有的 (Over 子句)，可以在查询的 SELECT 子句中定义。Over window 聚合，会针对每个输入行，计算相邻行范围内的聚合。Over windows 使用>window (w:overwindows\*) 子句定义，并在 select() 方法中通过别名来引用。

比如这样：

```
val table = input
>window([w: OverWindow] as 'w')
.select('a, 'b.sum over 'w, 'c.min over 'w)
```

Table API 提供了 Over 类，来配置 Over 窗口的属性。可以在事件时间或处理时间，以及指定为时间间隔、或行计数的范围内，定义 Over windows。

无界的 over window 是使用常量指定的。也就是说，时间间隔要指定 UNBOUNDED\_RANGE，或者行计数间隔要指定 UNBOUNDED\_ROW。而有界的 over window 是用间隔的大小指定的。

实际代码应用如下：

### 1. 无界的 over window

```
// 无界的事件时间 over window (时间字段 "rowtime")
>window(Over partitionBy 'a orderBy 'rowtime preceding UNBOUNDED_RANGE as 'w')
// 无界的处理时间 over window (时间字段 "proctime")
>window(Over partitionBy 'a orderBy 'proctime preceding UNBOUNDED_RANGE as 'w')
// 无界的事件时间 Row-count over window (时间字段 "rowtime")
>window(Over partitionBy 'a orderBy 'rowtime preceding UNBOUNDED_ROW as 'w')
// 无界的处理时间 Row-count over window (时间字段 "rowtime")
>window(Over partitionBy 'a orderBy 'proctime preceding UNBOUNDED_ROW as 'w')
```

### 2. 有界的 over window

```
// 有界的事件时间 over window (时间字段 "rowtime", 之前 1 分钟)
>window(Over partitionBy 'a orderBy 'rowtime preceding 1.minutes as 'w')
// 有界的处理时间 over window (时间字段 "rowtime", 之前 1 分钟)
>window(Over partitionBy 'a orderBy 'proctime preceding 1.minutes as 'w')
// 有界的事件时间 Row-count over window (时间字段 "rowtime", 之前 10 行)
>window(Over partitionBy 'a orderBy 'rowtime preceding 10.rows as 'w')
// 有界的处理时间 Row-count over window (时间字段 "rowtime", 之前 10 行)
>window(Over partitionBy 'a orderBy 'proctime preceding 10.rows as 'w')
```

## SQL 中窗口的定义

我们已经了解了在 Table API 里 window 的调用方式，同样，我们也可以在 SQL 中直接加入窗口的定义和使用。

**Group Windows** Group Windows 在 SQL 查询的 Group BY 子句中定义。与使用常规 GROUP BY 子句的查询一样，使用 GROUP BY 子句的查询会计算每个组的单个结果行。

SQL 支持以下 Group 窗口函数：

- TUMBLE(time\_attr, interval)

定义一个滚动窗口，第一个参数是时间字段，第二个参数是窗口长度。

- HOP(time\_attr, interval, interval)

定义一个滑动窗口，第一个参数是时间字段，第二个参数是窗口滑动步长，第三个是窗口长度。

- SESSION(time\_attr, interval)

定义一个会话窗口，第一个参数是时间字段，第二个参数是窗口间隔（Gap）。

另外还有一些辅助函数，可以用来选择 Group Window 的开始和结束时间戳，以及时间属性。

这里只写 TUMBLE\_，滑动和会话窗口是类似的（HOP\_，SESSION\_\*）。

- TUMBLE\_START(time\_attr, interval)
- TUMBLE\_END(time\_attr, interval)
- TUMBLE\_ROWTIME(time\_attr, interval)
- TUMBLE\_PROCTIME(time\_attr, interval)

**Over Windows** 由于 Over 本来就是 SQL 内置支持的语法，所以这在 SQL 中属于基本的聚合操作。所有聚合必须在同一窗口上定义，也就是说，必须是相同的分区、排序和范围。目前仅支持在当前行范围之前的窗口（无边界和有边界）。

注意，ORDER BY 必须在单一的时间属性上指定。

代码如下：

```
SELECT COUNT(amount) OVER (
    PARTITION BY user
    ORDER BY proctime
    ROWS BETWEEN 2 PRECEDING AND CURRENT ROW)
FROM Orders

// 也可以做多个聚合
SELECT COUNT(amount) OVER w, SUM(amount) OVER w
```

```
FROM Orders
WINDOW w AS (
    PARTITION BY user
    ORDER BY proctime
    ROWS BETWEEN 2 PRECEDING AND CURRENT ROW)
```

### 代码练习（以分组滚动窗口为例）

我们可以综合学习过的内容，用一段完整的代码实现一个具体的需求。例如，可以开一个滚动窗口，统计 10 秒内出现的每个 sensor 的个数。

代码如下：

```
def main(args: Array[String]): Unit = {
    val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
    env.setParallelism(1)
    env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)

    val streamFromFile: DataStream[String] = env.readTextFile("sensor.txt")
    val dataStream: DataStream[SensorReading] = streamFromFile
        .map( data => {
            val dataArray = data.split(",")
            SensorReading(dataArray(0).trim,
                dataArray(1).trim.toLong, dataArray(2).trim.toDouble)
        })
        .assignTimestampsAndWatermarks(
            new BoundedOutOfOrdernessTimestampExtractor[SensorReading](
                Time.seconds(1))
        ) {
            override def extractTimestamp(
                element: SensorReading
            ): Long = element.timestamp * 1000L
        })

    val settings: EnvironmentSettings = EnvironmentSettings
        .newInstance()
        .useOldPlanner()
        .inStreamingMode()
        .build()

    val tableEnv: StreamTableEnvironment = StreamTableEnvironment
        .create(env, settings)
```

```
val dataTable: Table = tableEnv
    .fromDataStream(dataStream, 'id, 'temperature, 'timestamp.rowtime)

val resultTable: Table = dataTable
    .window(Tumble over 10.seconds on 'timestamp as 'tw)
    .groupBy('id, 'tw)
    .select('id, 'id.count)

val sqlDataTable: Table = dataTable
    .select('id, 'temperature, 'timestamp as 'ts)
val resultSqlTable: Table = tableEnv
    .sqlQuery("select id, count(id) from "
        + sqlDataTable
        + " group by id,tumble(ts,interval '10' second)")

// 把 Table 转化成数据流
val resultDstream: DataStream[(Boolean, (String, Long))] = resultSqlTable
    .toRetractStream[(String, Long)]
resultDstream.filter(_._.1).print()
env.execute()

}
```

## 函数 (Functions)

Flink Table 和 SQL 内置了很多 SQL 中支持的函数；如果有无法满足的需要，则可以实现用户自定义的函数（UDF）来解决。

### 系统内置函数

Flink Table API 和 SQL 为用户提供了一组用于数据转换的内置函数。SQL 中支持的很多函数，Table API 和 SQL 都已经做了实现，其它还在快速开发扩展中。

以下是一些典型函数的举例，全部的内置函数，可以参考官网介绍。

- 比较函数

SQL:

value1 = value2

value1 > value2

Table API:

ANY1 === ANY2

ANY1 > ANY2

- 逻辑函数

SQL:

boolean1 OR boolean2

boolean IS FALSE

NOT boolean

Table API:

BOOLEAN1 || BOOLEAN2

BOOLEAN.isTrue

!BOOLEAN

- 算术函数

SQL:

numeric1 + numeric2

POWER(numeric1, numeric2)

Table API:

NUMERIC1 + NUMERIC2

NUMERIC1.power(NUMERIC2)

- 字符串函数

SQL:

string1 || string2

UPPER(string)

CHAR\_LENGTH(string)

Table API:

STRING1 + STRING2

STRING.upperCase()

STRING.charLength()

- 时间函数

SQL:

DATE string

TIMESTAMP string

CURRENT\_TIME

INTERVAL string range

Table API:

STRING.toDate

STRING.toTimestamp

currentTime()

NUMERIC.days

NUMERIC.minutes

- 聚合函数

SQL:

COUNT(\*)

SUM([ ALL | DISTINCT ] expression)

RANK()

ROW\_NUMBER()

Table API:

FIELD.count

FIELD.sum0

## UDF

用户定义函数（User-defined Functions，UDF）是一个重要的特性，因为它们显著地扩展了查询（Query）的表达能力。一些系统内置函数无法解决的需求，我们可以用 UDF 来自定义实现。

**注册用户自定义函数 UDF** 在大多数情况下，用户定义的函数必须先注册，然后才能在查询中使用。不需要专门为 Scala 的 Table API 注册函数。

函数通过调用 `registerFunction()` 方法在 `TableEnvironment` 中注册。当用户定义的函数被注册时，它被插入到 `TableEnvironment` 的函数目录中，这样 Table API 或 SQL 解析器就可以识别并正确地解释它。

**标量函数 (Scalar Functions)** 用户定义的标量函数，可以将 0、1 或多个标量值，映射到新的标量值。

为了定义标量函数，必须在 org.apache.flink.table.functions 中扩展基类 Scalar Function，并实现（一个或多个）求值（evaluation, eval）方法。标量函数的行为由求值方法决定，求值方法必须公开声明并命名为 eval（直接 def 声明，没有 override）。求值方法的参数类型和返回类型，确定了标量函数的参数和返回类型。

在下面的代码中，我们定义自己的 hashCode 函数，在 TableEnvironment 中注册它，并在查询中调用它。

```
// 自定义一个标量函数
class HashCode( factor: Int ) extends ScalarFunction {
    def eval( s: String ): Int = {
        s.hashCode * factor
    }
}
```

主函数中调用，计算 sensor id 的哈希值（前面部分照抄，流环境、表环境、读取 source、建表）：

```
1 package com.atguigu.course
2
3 import org.apache.flink.streaming.api.scala.StreamExecutionEnvironment
4 import org.apache.flink.api.scala._
5 import org.apache.flink.table.api.{EnvironmentSettings, Tumble}
6 import org.apache.flink.table.api.scala._
7 import org.apache.flink.table.functions.ScalarFunction
8
9 object TableUDFExample1 {
10     def main(args: Array[String]): Unit = {
11         val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
12         val settings = EnvironmentSettings.newInstance()
13             .useBlinkPlanner()
14             .inStreamingMode()
15             .build()
16         val tEnv = StreamTableEnvironment.create(env, settings)
17         env.setParallelism(1)
18         val stream = env.addSource(new SensorSource)
19         val hashCode = new HashCode(10)
20         tEnv.registerFunction("hashCode", new HashCode(10))
21         val table = tEnv.fromDataStream(stream, 'id)
22         // table api 写法
23         table
24             .select('id, hashCode('id))
```

```
25     .toAppendStream[(String, Int)]  
26     .print()  
27  
28     // sql 写法  
29     tEnv.createTemporaryView("t", table, 'id)  
30     tEnv  
31     .sqlQuery("SELECT id, hashCode(id) FROM t")  
32     .toAppendStream[(String, Int)]  
33     .print()  
34  
35     env.execute()  
36 }  
37  
38 class HashCode(factor: Int) extends ScalarFunction {  
39     def eval(s: String): Int = {  
40         s.hashCode() * factor  
41     }  
42 }  
43  
44 }
```

**表函数 (Table Functions)** 与用户定义的标量函数类似，用户定义的表函数，可以将 0、1 或多个标量值作为输入参数；与标量函数不同的是，它可以返回任意数量的行作为输出，而不是单个值。

为了定义一个表函数，必须扩展 org.apache.flink.table.functions 中的基类 TableFunction 并实现（一个或多个）求值方法。表函数的行为由其求值方法决定，求值方法必须是 public 的，并命名为 eval。求值方法的参数类型，决定表函数的所有有效参数。

返回表的类型由 TableFunction 的泛型类型确定。求值方法使用 protected collect (T) 方法发出输出行。

在 Table API 中，Table 函数需要与.joinLateral 或.leftOuterJoinLateral 一起使用。

joinLateral 算子，会将外部表中的每一行，与表函数 (TableFunction，算子的参数是它的表达式) 计算得到的所有行连接起来。

而 leftOuterJoinLateral 算子，则是左外连接，它同样会将外部表中的每一行与表函数计算生成的所有行连接起来；并且，对于表函数返回的是空表的外部行，也要保留下来。

在 SQL 中，则需要使用 Lateral Table ()，或者带有 ON TRUE 条件的左连接。

下面的代码中，我们将定义一个表函数，在表环境中注册它，并在查询中调用它。

自定义 TableFunction：

```
// 自定义 TableFunction
class Split(separator: String) extends TableFunction[(String, Int)]{
    def eval(str: String): Unit = {
        str.split(separator).foreach(
            word => collect((word, word.length))
        )
    }
}
```

接下来，就是在代码中调用。首先是 Table API 的方式：

```
// Table API 中调用，需要用 joinLateral
val resultTable = sensorTable
    .joinLateral(split('id) as ('word, 'length)) // as 对输出行的字段重命名
    .select('id, 'word, 'length)

// 或者用 leftOuterJoinLateral
val resultTable2 = sensorTable
    .leftOuterJoinLateral(split('id) as ('word, 'length))
    .select('id, 'word, 'length)

// 转换成流打印输出
resultTable.toAppendStream[Row].print("1")
resultTable2.toAppendStream[Row].print("2")
```

然后是 SQL 的方式：

```
tableEnv.createTemporaryView("sensor", sensorTable)
tableEnv.registerFunction("split", split)

val resultSqlTable = tableEnv.sqlQuery(
    """
        |select id, word, length
        |from
        |sensor, LATERAL TABLE(split(id)) AS newsensor(word, length)
    """".stripMargin)

// 或者用左连接的方式
val resultSqlTable2 = tableEnv.sqlQuery(
    """
        |SELECT id, word, length
        |FROM
        |sensor
        | LEFT JOIN
    """
```

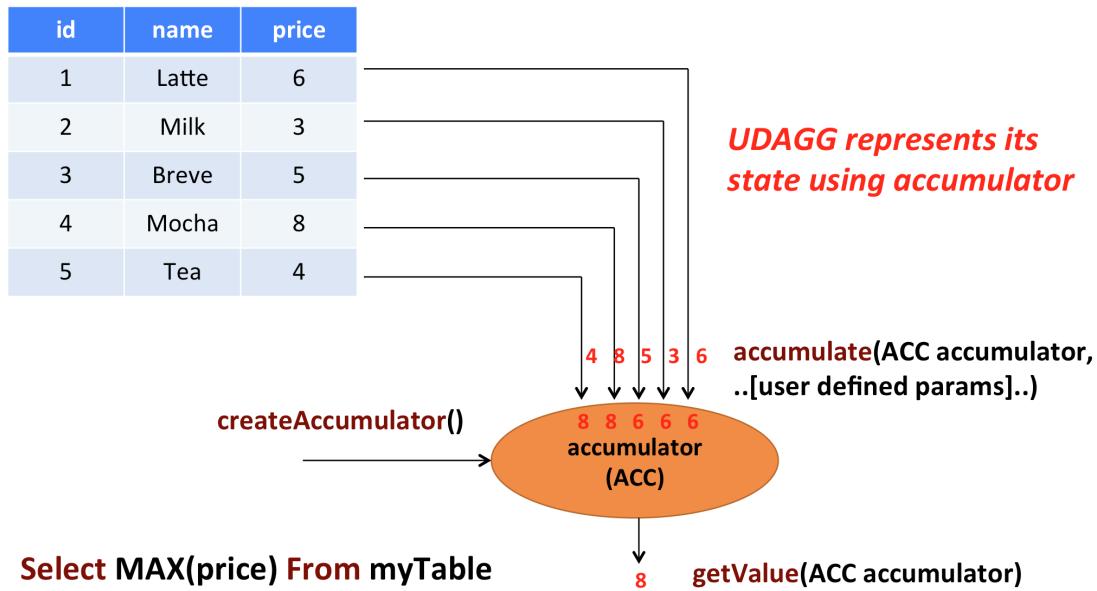
```

|   LATERAL TABLE(split(id)) AS newsensor(word, length)
|   ON TRUE
""".stripMargin)

// 转换成流打印输出
resultSqlTable.toAppendStream[Row].print("1")
resultSqlTable2.toAppendStream[Row].print("2")

```

**聚合函数 (Aggregate Functions)** 用户自定义聚合函数 (User-Defined Aggregate Functions, UDAGGs) 可以把一个表中的数据，聚合成一个标量值。用户定义的聚合函数，是通过继承 AggregateFunction 抽象类实现的。



上图中显示了一个聚合的例子。

假设现在有一张表，包含了各种饮料的数据。该表由三列 (id、name 和 price)、五行组成数据。现在我们需要找到表中所有饮料的最高价格，即执行 max () 聚合，结果将是一个数值。

AggregateFunction 的工作原理如下。

- 首先，它需要一个累加器，用来保存聚合中间结果的数据结构（状态）。可以通过调用 AggregateFunction 的 createAccumulator () 方法创建空累加器。
- 随后，对每个输入行调用函数的 accumulate () 方法来更新累加器。
- 处理完所有行后，将调用函数的 getValue () 方法来计算并返回最终结果。

AggregateFunction 要求必须实现的方法：

- createAccumulator()
- accumulate()

- `getValue()`

除了上述方法之外，还有一些可选择实现的方法。其中一些方法，可以让系统执行查询更有效率，而另一些方法，对于某些场景是必需的。例如，如果聚合函数应用在会话窗口（session group window）的上下文中，则 `merge()` 方法是必需的。

- `retract()`
- `merge()`
- `resetAccumulator()`

接下来我们写一个自定义 `AggregateFunction`，计算一下每个 sensor 的平均温度值。

```
// 定义 AggregateFunction 的 Accumulator
class AvgTempAcc {
    var sum: Double = 0.0
    var count: Int = 0
}

class AvgTemp extends AggregateFunction[Double, AvgTempAcc] {
    override def getValue(accumulator: AvgTempAcc): Double = accumulator.sum / accumulator.count

    override def createAccumulator(): AvgTempAcc = new AvgTempAcc

    def accumulate(accumulator: AvgTempAcc, temp: Double): Unit ={
        accumulator.sum += temp
        accumulator.count += 1
    }
}
```

接下来就可以在代码中调用了。

```
// 创建一个聚合函数实例
val avgTemp = new AvgTemp()
// Table API 的调用
val resultTable = sensorTable
    .groupBy('id)
    .aggregate(avgTemp('temperature) as 'avgTemp)
    .select('id, 'avgTemp)

// SQL 的实现
tableEnv.createTemporaryView("sensor", sensorTable)
tableEnv.registerFunction("avgTemp", avgTemp)
val resultSqlTable = tableEnv.sqlQuery(
    """
        |SELECT
    
```

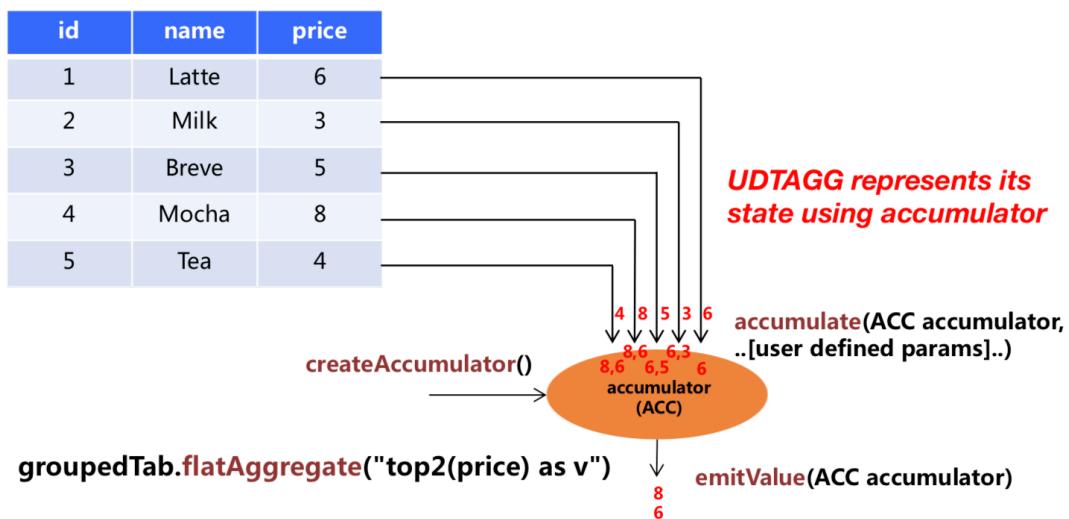
```

| id, avgTemp(temperature)
| FROM
| sensor
| GROUP BY id
""".stripMargin)

// 转换成流打印输出
resultTable.toRetractStream[(String, Double)].print("agg temp")
resultSqlTable.toRetractStream[Row].print("agg temp sql")

```

**表聚合函数 (Table Aggregate Functions)** 用户定义的表聚合函数 (User-Defined Table Aggregate Functions, UDTAGGs)，可以把一个表中数据，聚合为具有多行和多列的结果表。这跟 AggregateFunction 非常类似，只是之前聚合结果是一个标量值，现在变成了一张表。



比如现在我们需要找到表中所有饮料的前 2 个最高价格，即执行 top2() 表聚合。我们需要检查 5 行中的每一行，得到的结果将是一个具有排序后前 2 个值的表。

用户定义的表聚合函数，是通过继承 TableAggregateFunction 抽象类来实现的。

TableAggregateFunction 的工作原理如下。

- 首先，它同样需要一个累加器 (Accumulator)，它是保存聚合中间结果的数据结构。通过调用 TableAggregateFunction 的 createAccumulator() 方法可以创建空累加器。
- 随后，对每个输入行调用函数的 accumulate() 方法来更新累加器。
- 处理完所有行后，将调用函数的 emitValue() 方法来计算并返回最终结果。

AggregationFunction 要求必须实现的方法：

- createAccumulator()
- accumulate()

除了上述方法之外，还有一些可选择实现的方法。

- retract()
- merge()
- resetAccumulator()
- emitValue()
- emitUpdateWithRetract()

接下来我们写一个自定义 TableAggregateFunction，用来提取每个 sensor 最高的两个温度值。

```
// 先定义一个 Accumulator
class Top2TempAcc{
    var highestTemp: Double = Int.MinValue
    var secondHighestTemp: Double = Int.MinValue
}

// 自定义 TableAggregateFunction
class Top2Temp extends TableAggregateFunction[(Double, Int), Top2TempAcc]{

    override def createAccumulator(): Top2TempAcc = new Top2TempAcc

    def accumulate(acc: Top2TempAcc, temp: Double): Unit ={
        if( temp > acc.highestTemp ){
            acc.secondHighestTemp = acc.highestTemp
            acc.highestTemp = temp
        } else if( temp > acc.secondHighestTemp ){
            acc.secondHighestTemp = temp
        }
    }

    def emitValue(acc: Top2TempAcc, out: Collector[(Double, Int)]): Unit ={
        out.collect(acc.highestTemp, 1)
        out.collect(acc.secondHighestTemp, 2)
    }
}
```

接下来就可以在代码中调用了。

```
// 创建一个表聚合函数实例
val top2Temp = new Top2Temp()
// Table API 的调用
val resultTable = sensorTable
    .groupBy('id)
    .flatAggregate( top2Temp('temperature) as ('temp, 'rank) )
    .select('id, 'temp, 'rank)
```

```
// 转换成流打印输出
resultTable.toRetractStream[(String, Double, Int)].print("agg temp")
resultSqlTable.toRetractStream[Row].print("agg temp sql")
```

## 使用 Table API 结合 SQL 实现 TopN 需求

```
1 package com.atguigu.project.topnhotitems
2
3 import java.sql.Timestamp
4
5 import com.atguigu.project.util.UserBehavior
6 import org.apache.flink.streaming.api.TimeCharacteristic
7 import org.apache.flink.streaming.api.scala.StreamExecutionEnvironment
8 import org.apache.flink.api.scala._
9 import org.apache.flink.table.api.{EnvironmentSettings, Tumble}
10 import org.apache.flink.table.api.scala._
11
12 object HotItemsTable {
13
14     def main(args: Array[String]): Unit = {
15
16         val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
17         // 有关 Blink 的配置，样板代码
18         val settings = EnvironmentSettings.newInstance()
19             .useBlinkPlanner()
20             .inStreamingMode()
21             .build()
22         // 创建流式表的环境
23         val tEnv = StreamTableEnvironment.create(env, settings)
24         env.setParallelism(1)
25         // 使用事件时间
26         env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)
27         // 过滤出 pv 事件，并抽取时间戳
28         val stream = env
29             .readTextFile(`UserBehavior.csv`的绝对路径")
30             .map(line => {
31                 val arr = line.split(",")
32                 UserBehavior(arr(0).toLong,
33                     arr(1).toLong, arr(2).toInt, arr(3), arr(4).toLong * 1000)
34             })
35             .filter(_.behavior == "pv")
36             .assignAscendingTimestamps(_.timestamp)
```

```

37
38 // 从流中提取两个字段，时间戳；itemID，组成一张表
39 val table = tEnv.fromDataStream(stream, 'timestamp.rowtime, 'itemID)
40 val t = table
41     .window(Tumble over 60.minutes on 'timestamp as 'w) // 一小时滚动窗口
42     .groupBy('itemID, 'w)                                // 根据 itemID 和窗口进行分组
43     .aggregate('itemID.count as 'icount)                // 对 itemID 进行计数
44     .select('itemID, 'icount, 'w.end as 'windowEnd)    // 查询三个字段
45     .toAppendStream[(Long, Long, Timestamp)]           // 转换成 DataStream
46
47 // 创建临时表
48 tEnv.createTemporaryView("topn", t, 'itemID, 'icount, 'windowEnd)
49
50 // topN 查询，Blink 支持的特性
51 val result = tEnv.sqlQuery(
52     """
53         |SELECT *
54         |FROM (
55         |     SELECT *,
56         |             ROW_NUMBER() OVER
57         |                 (PARTITION BY windowEnd ORDER BY icount DESC) as row_num
58         |     FROM topn
59         |WHERE row_num <= 5
60         |""".stripMargin
61     )
62 // 使用 toRetractStream 转换成 DataStream，用来实时更新排行榜
63 // true 代表 insert, false 代表 delete
64 result.toRetractStream[(Long, Long, Timestamp, Long)].print()
65
66 env.execute()
67 }
68 }

```

## 只使用 Flink SQL 实现 TopN 需求

代码

```

1 package com.atguigu.project.topnhotitems
2
3 import java.sql.Timestamp
4
5 import com.atguigu.project.util.UserBehavior
6 import org.apache.flink.streaming.api.TimeCharacteristic

```

```
7 import org.apache.flink.streaming.api.scala.StreamExecutionEnvironment
8 import org.apache.flink.api.scala._
9 import org.apache.flink.table.api.{EnvironmentSettings, Tumble}
10 import org.apache.flink.table.api.scala._

11
12 object HotItemsSQL {
13
14     def main(args: Array[String]): Unit = {
15
16         val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
17         val settings = EnvironmentSettings.newInstance()
18             .useBlinkPlanner()
19             .inStreamingMode()
20             .build()
21         val tEnv = StreamTableEnvironment.create(env, settings)
22         env.setParallelism(1)
23         env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)
24         val stream = env
25             .readTextFile(`UserBehavior.csv`的绝对路径")
26             .map(line => {
27                 val arr = line.split(",")
28                 UserBehavior(arr(0).toLong,
29                               arr(1).toLong, arr(2).toInt, arr(3), arr(4).toLong * 1000)
30             })
31             .filter(_.behavior == "pv")
32             .assignAscendingTimestamps(_.timestamp)
33
34         tEnv.createTemporaryView("t", stream, 'itemId, 'timestamp.rowtime as 'ts)
35
36         val result = tEnv.sqlQuery(
37             """
38                 |SELECT *
39                 |FROM (
40                 |    SELECT *,
41                 |        ROW_NUMBER() OVER
42                 |            (PARTITION BY windowEnd ORDER BY icount DESC) as row_num
43                 |    FROM
44                 |        (SELECT count(itemId) as icount,
45                 |            TUMBLE_START(ts, INTERVAL '1' HOUR) as windowEnd
46                 |        FROM t GROUP BY TUMBLE(ts, INTERVAL '1' HOUR), itemId) topn
47                 |WHERE row_num <= 5
48             """.stripMargin
```

```
49      )
50      result.toRetractStream[(Long, Timestamp, Long)].print()
51
52      env.execute()
53  }
54 }
```

## 第十三章，尚硅谷大数据技术之电商用户行为分析

### 数据集解析

#### 淘宝数据集解析

我们准备了一份淘宝用户行为数据集，保存为 csv 文件。本数据集包含了淘宝上某一天随机一百万用户的所有行为（包括点击、购买、收藏、喜欢）。数据集的每一行表示一条用户行为，由用户 ID、商品 ID、商品类目 ID、行为类型和时间戳组成，并以逗号分隔。关于数据集中每一列的详细描述如下：

字段名	数据类型	说明
userId	Long	脱敏后的用户 ID
itemId	Long	脱敏后的商品 ID
categoryId	Int	脱敏后的商品所属类别 ID
behavior	String	用户行为类型，包括：('pv', 'buy', 'cart', 'fav')
timestamp	Long	行为发生的时间戳，单位秒

#### Apache 服务器日志数据集解析

这里以 apache 服务器的一份 log 为例，每一行日志记录了访问者的 IP、userId、访问时间、访问方法以及访问的 url，具体描述如下：

字段名	数据类型	说明
ip	String	访问的 IP
userId	Long	访问的 userId
eventTime	Long	访问时间
method	String	访问方法 GET/POST/PUT/DELETE
url	String	访问的 url

## 实时热门商品统计

首先要实现的是实时热门商品统计，我们将会基于 UserBehavior 数据集来进行分析。

### 基本需求

- 每隔 5 分钟输出最近一小时内点击量最多的前 N 个商品
- 点击量用浏览次数 (“pv”) 来衡量

### 解决思路

. 在所有用户行为数据中，过滤出浏览 (“pv”) 行为进行统计。构建滑动窗口，窗口长度为 1 小时，滑动距离为 5 分钟。窗口计算使用增量聚合函数和全窗口聚合函数相结合的方法。使用窗口结束时间作为 key，对 DataStream 进行 keyBy() 操作。将 KeyedStream 中的元素存储到 ListState 中，当水位线超过窗口结束时间时，排序输出

### 数据准备

将数据文件 UserBehavior.csv 复制到资源文件目录 src/main/resources 下。

### 程序主体

```
1 // 把数据需要 ETL 成 UserBehavior 类型
2 case class UserBehavior(userId: Long,
3                         itemId: Long,
4                         categoryId: Int,
5                         behavior: String,
6                         timestamp: Long)
7
8 // 全窗口聚合函数输出的数据类型
9 case class ItemViewCount(itemId: Long,
10                          windowEnd: Long,
11                          count: Long)
12
13 object HotItems {
14     def main(args: Array[String]): Unit = {
15         // 创建一个 StreamExecutionEnvironment
16         val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
17         // 设定 Time 类型为 EventTime
18         env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)
19         // 为了打印到控制台的结果不乱序,
20         // 我们配置全局的并发为 1, 这里改变并发对结果正确性没有影响
21         env.setParallelism(1)
22         val stream = env
23             // 以 window 下为例, 需替换成数据集的绝对路径
24             .readTextFile("YOUR_PATH\\resources\\UserBehavior.csv")
25             .map(line => {
```

```

26     val lineararray = line.split(",")
27     UserBehavior(linearray(0).toLong,
28                   lineararray(1).toLong,
29                   lineararray(2).toInt,
30                   lineararray(3),
31                   lineararray(4).toLong)
32   }
33   // 过滤出点击事件
34   .filter(_.behavior == "pv")
35   // 指定时间戳和 Watermark, 这里我们已经知道了数据集的时间戳是单调递增的了。
36   .assignAscendingTimestamps(_.timestamp * 1000)
37   // 根据商品 Id 分流
38   .keyBy(_.itemId)
39   // 开窗操作
40   .timeWindow(Time.minutes(60), Time.minutes(5))
41   // 窗口计算操作
42   .aggregate(new CountAgg(), new WindowResultFunction())
43   // 根据窗口结束时间分流
44   .keyBy(_.windowEnd)
45   // 求点击量前 3 名的商品
46   .process(new TopNHotItems(3))
47
48   // 打印结果
49   stream.print()
50
51   // 别忘了执行
52   env.execute("Hot Items Job")
53 }
54 }
```

真实业务场景一般都是乱序的, 所以一般不用 assignAscendingTimestamps, 而是使用 BoundedOutOfOrdernessTimestampExtractor。

### 增量聚合函数逻辑编写

```

// COUNT 统计的聚合函数实现, 每出现一条记录就加一
class CountAgg
  extends AggregateFunction[UserBehavior, Long, Long] {
  override def createAccumulator(): Long = 0L
  override def add(userBehavior: UserBehavior, acc: Long): Long = acc + 1
  override def getResult(acc: Long): Long = acc
  override def merge(acc1: Long, acc2: Long): Long = acc1 + acc2
}
```

## 全窗口聚合函数逻辑编写

其实就是将增量聚合的结果包上一层窗口信息和 key 的信息。

代码如下：

```
// 用于输出窗口的结果
class WindowResultFunction
  extends ProcessWindowFunction[Long, ItemViewCount, String, TimeWindow] {
  override def process(key: String,
    context: Context,
    elements: Iterable[Long],
    out: Collector[ItemViewCount]): Unit = {
    out.collect(ItemViewCount(key, context.window.getEnd, elements.iterator.next()))
  }
}
```

现在我们就得到了每个商品在每个窗口的点击量的数据流。

计算最热门  $TopN$  商品

```
class TopNHotItems(topSize: Int)
  extends KeyedProcessFunction[Long, ItemViewCount, String] {
  // 惰性赋值一个状态变量
  lazy val itemState = getRuntimeContext.getListState(
    new ListStateDescriptor[ItemViewCount]("items", Types.of[ItemViewCount])
  )

  // 来一条数据都会调用一次
  override def processElement(value: ItemViewCount,
    ctx: KeyedProcessFunction[Long,
      ItemViewCount, String]#Context,
    out: Collector[String]): Unit = {
    itemState.add(value)
    ctx.timerService().registerEventTimeTimer(value.windowEnd + 1)
  }

  // 定时器事件
  override def onTimer(
    ts: Long,
    ctx: KeyedProcessFunction[Long, ItemViewCount, String]#OnTimerContext,
    out: Collector[String]
  ): Unit = {
    val allItems: ListBuffer[ItemViewCount] = ListBuffer()
    // 导入一些隐式类型转换
```

```
import scala.collection.JavaConversions._  
for (item <- itemState.get) {  
    allItems += item  
}  
  
// 清空状态变量，释放空间  
itemState.clear()  
  
// 降序排列  
val sortedItems = allItems.sortBy(-_.count).take(topSize)  
val result = new StringBuilder  
result.append("=====\n")  
result.append(" 时间: ").append(new Timestamp(ts - 1)).append("\n")  
for (i <- sortedItems.indices) {  
    val currentItem = sortedItems(i)  
    result.append("No")  
    .append(i+1)  
    .append(":")  
    .append(" 商品 ID=")  
    .append(currentItem.itemId)  
    .append(" 浏览量 =")  
    .append(currentItem.count)  
    .append("\n")  
}  
result.append("=====\n\n")  
Thread.sleep(1000)  
out.collect(result.toString())  
}  
}
```

更换 Kafka 作为数据源

实际生产环境中，我们的数据流往往是从 Kafka 获取到的。如果要让代码更贴近生产实际，我们只需将 source 更换为 Kafka 即可：

注意：这里 Kafka 的版本要用 2.2！

添加依赖：

```
<dependency>  
    <groupId>org.apache.flink</groupId>  
    <artifactId>flink-connector-kafka_${scala.binary.version}</artifactId>  
    <version>${flink.version}</version>  
</dependency>
```

编写代码：

```
val properties = new Properties()
properties.setProperty("bootstrap.servers", "localhost:9092")
properties.setProperty("group.id", "consumer-group")
properties.setProperty(
    "key.deserializer",
    "org.apache.kafka.common.serialization.StringDeserializer"
)
properties.setProperty(
    "value.deserializer",
    "org.apache.kafka.common.serialization.StringDeserializer"
)
properties.setProperty("auto.offset.reset", "latest")

val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)
env.setParallelism(1)

val stream = env
    .addSource(new FlinkKafkaConsumer[String](
        "hotitems",
        new SimpleStringSchema(),
        properties)
    )
```

当然，根据实际的需要，我们还可以将 Sink 指定为 Kafka、ES、Redis 或其它存储，这里就不一一展开实现了。

*kafka 生产者程序*

添加依赖

```
<dependency>
    <groupId>org.apache.kafka</groupId>
    <artifactId>kafka_2.11</artifactId>
    <version>2.2.0</version>
</dependency>
```

编写代码：

```
import java.util.Properties
import org.apache.kafka.clients.producer.{KafkaProducer, ProducerRecord}

object KafkaProducerUtil {
```

```
def main(args: Array[String]): Unit = {
    writeToKafka("hotitems")
}

def writeToKafka(topic: String): Unit = {
    val props = new Properties()
    props.put("bootstrap.servers", "localhost:9092")
    props.put(
        "key.serializer",
        "org.apache.kafka.common.serialization.StringSerializer"
    )
    props.put(
        "value.serializer",
        "org.apache.kafka.common.serialization.StringSerializer"
    )
    val producer = new KafkaProducer[String, String](props)
    val bufferedSource = io.Source.fromFile("UserBehavior.csv 文件的绝对路径")
    for (line <- bufferedSource.getLines) {
        val record = new ProducerRecord[String, String](topic, line)
        producer.send(record)
    }
    producer.close()
}
}
```

## 实时流量统计

- 基本需求
  - 从 web 服务器的日志中，统计实时的访问流量
  - 统计每分钟的 ip 访问量，取出访问量最大的 5 个地址，每 5 秒更新一次
- 解决思路
  - 将 apache 服务器日志中的时间，转换为时间戳，作为 Event Time
  - 构建滑动窗口，窗口长度为 1 分钟，滑动距离为 5 秒

### 数据准备

将 apache 服务器的日志文件 apache.log 复制到资源文件目录 src/main/resources 下，我们将从这里读取数据。

### 代码实现

我们现在要实现的模块是“实时流量统计”。对于一个电商平台而言，用户登录的入口流量、不同页面的访问流量都是值得分析的重要数据，而这些数据，可以简单地从 web 服务器的日志中提取出来。我们在这里实现最基本的“页面浏览数”的统计，也就是读取服务器日志

中的每一行 log，统计在一段时间内用户访问 url 的次数。

具体做法为：每隔 5 秒，输出最近 10 分钟内访问量最多的前 N 个 URL。可以看出，这个需求与之前“实时热门商品统计”非常类似，所以我们完全可以借鉴此前的代码。

完整代码如下：

```
1 package com.atguigu.project
2
3 import java.sql.Timestamp
4 import java.text.SimpleDateFormat
5
6 import org.apache.flink.api.common.functions.AggregateFunction
7 import org.apache.flink.api.common.state.ListStateDescriptor
8 import org.apache.flink.api.scala.typeutils.Types
9 import org.apache.flink.streaming.api.TimeCharacteristic
10 import org.apache.flink.streaming.api.functions.KeyedProcessFunction
11
12 import org.apache.flink.streaming.api.functions
13 .timestamps.BoundedOutOfOrdernessTimestampExtractor
14
15 import org.apache.flink.streaming.api.scala._
16 import org.apache.flink.streaming.api.scala.function.ProcessWindowFunction
17 import org.apache.flink.streaming.api.windowing.time.Time
18 import org.apache.flink.streaming.api.windowing.windows.TimeWindow
19 import org.apache.flink.util.Collector
20
21 import scala.collection.mutable.ListBuffer
22
23 object ApacheLogAnalysis {
24
25     case class ApacheLogEvent(ip: String,
26                               userId: String,
27                               eventTime: Long,
28                               method: String,
29                               url: String)
30
31     case class UrlViewCount(url: String,
32                             windowEnd: Long,
33                             count: Long)
34
35     def main(args: Array[String]): Unit = {
36         val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
37         env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)
```

```
38     env.setParallelism(1)
39
40     val stream = env
41         // 文件的绝对路径
42         .readTextFile("apache.log 的绝对路径")
43         .map(line => {
44             val lineararray = line.split(" ")
45             // 把时间戳 ETL 成毫秒
46             val simpleDateFormat = new SimpleDateFormat("dd/MM/yyyy:HH:mm:ss")
47             val timestamp = simpleDateFormat.parse(linearray(3)).getTime
48             ApacheLogEvent(linearray(0),
49                             lineararray(2),
50                             timestamp,
51                             lineararray(5),
52                             lineararray(6))
53         })
54         .assignTimestampsAndWatermarks(
55             new BoundedOutOfOrderTimestampExtractor[ApacheLogEvent]{
56                 Time.milliseconds(1000)
57             } {
58                 override def extractTimestamp(t: ApacheLogEvent): Long = {
59                     t.eventTime
60                 }
61             }
62             .keyBy(_.url)
63             .timeWindow(Time.minutes(10), Time.seconds(5))
64             .aggregate(new CountAgg(), new WindowResultFunction())
65             .keyBy(_.windowEnd)
66             .process(new TopNHotUrls(5))
67             .print()
68
69     env.execute("Traffic Analysis Job")
70 }
71
72 class CountAgg extends AggregateFunction[ApacheLogEvent, Long, Long] {
73     override def createAccumulator(): Long = 0L
74     override def add(apacheLogEvent: ApacheLogEvent, acc: Long): Long = acc + 1
75     override def getResult(acc: Long): Long = acc
76     override def merge(acc1: Long, acc2: Long): Long = acc1 + acc2
77 }
78
79 class WindowResultFunction
```

```
80     extends ProcessWindowFunction[Long, UrlViewCount, String, TimeWindow] {
81         override def process(key: String, context: Context, elements: Iterable[Long], out: Collector[String]) {
82             out.collect(UrlViewCount(key, context.window.getEnd, elements.iterator.next()))
83         }
84     }
85
86     class TopNHotUrls(topSize: Int)
87         extends KeyedProcessFunction[Long, UrlViewCount, String] {
88
89         lazy val urlState = getRuntimeContext.getListState(
90             new ListStateDescriptor[UrlViewCount](
91                 "urlState-state",
92                 Types.of[UrlViewCount]
93             )
94         )
95
96         override def processElement(
97             input: UrlViewCount,
98             context: KeyedProcessFunction[Long, UrlViewCount, String]#Context,
99             collector: Collector[String]
100 ): Unit = {
101             // 每条数据都保存到状态中
102             urlState.add(input)
103             context
104                 .timerService
105                 .registerEventTimeTimer(input.windowEnd + 1)
106         }
107
108         override def onTimer(
109             timestamp: Long,
110             ctx: KeyedProcessFunction[Long, UrlViewCount, String]#OnTimerContext,
111             out: Collector[String]
112 ): Unit = {
113             // 获取收到的所有 URL 访问量
114             val allUrlViews: ListBuffer[UrlViewCount] = ListBuffer()
115             import scala.collection.JavaConversions._
116             for (urlView <- urlState.get) {
117                 allUrlViews += urlView
118             }
119             // 提前清除状态中的数据，释放空间
120             urlState.clear()
121             // 按照访问量从大到小排序
```

```

122     val sortedUrlViews = allUrlViews.sortBy(_.count)(Ordering[Long].reverse)
123         .take(topSize)
124     // 将排名信息格式化成 String, 便于打印
125     var result: StringBuilder = new StringBuilder
126     result
127         .append("=====\n")
128         .append(" 时间: ")
129         .append(new Timestamp(timestamp - 1))
130         .append("\n")
131
132     for (i <- sortedUrlViews.indices) {
133         val currentUrlView: UrlViewCount = sortedUrlViews(i)
134         // e.g. No1: URL=/blog/tags/firefox?flav=rss20 流量 =55
135         result
136             .append("No")
137             .append(i + 1)
138             .append(": ")
139             .append(" URL=")
140             .append(currentUrlView.url)
141             .append(" 流量 =")
142             .append(currentUrlView.count)
143             .append("\n")
144     }
145     result
146         .append("=====\n\n")
147     // 控制输出频率, 模拟实时滚动结果
148     Thread.sleep(1000)
149     out.collect(result.toString)
150 }
151 }
152 }
```

## Uv 统计的布隆过滤器实现

依赖:

```

<dependency>
    <groupId>redis.clients</groupId>
    <artifactId>jedis</artifactId>
    <version>2.8.1</version>
</dependency>
```

完整代码如下:

```
1 package com.atguigu
2
3 import com.atguigu.UserBehavior.UserAction
4 import org.apache.flink.streaming.api.TimeCharacteristic
5 import org.apache.flink.streaming.api.scala._
6 import org.apache.flink.streaming.api.scala.function.ProcessWindowFunction
7 import org.apache.flink.streaming.api.windowing.time.Time
8 import org.apache.flink.streaming.api.windowing.triggers.{Trigger, TriggerResult}
9 import org.apache.flink.streaming.api.windowing.triggers.Trigger.TriggerContext
10 import org.apache.flink.streaming.api.windowing.windows.TimeWindow
11 import org.apache.flink.util.Collector
12 import redis.clients.jedis.Jedis
13
14 object UvWithBloomFilter {
15     def main(args: Array[String]): Unit = {
16         val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
17         env.setParallelism(1)
18         env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)
19         val stream = env
20             .readTextFile("UserBehavior.csv 的绝对路径")
21             .map(line => {
22                 val arr = line.split(",")
23                 UserAction(arr(0), arr(1), arr(2), arr(3), arr(4).toLong * 1000)
24             })
25             .assignAscendingTimestamps(_.ts)
26             .filter(_.behavior == "pv")
27             .map(r => ("dummyKey", r.userId))
28             .keyBy(_._1)
29             .timeWindow(Time.minutes(60), Time.minutes(5))
30             .trigger(new MyTrigger123)
31             .process(new MyProcess)
32
33         stream.print()
34         env.execute()
35     }
36
37     class MyProcess
38         extends ProcessWindowFunction[(String, String),
39             (Long, Long), String, TimeWindow] {
40         lazy val jedis = new Jedis("localhost", 6379)
41         lazy val bloom = new Bloom(1 << 29)
```

```
43  override def process(key: String,
44      context: Context,
45      vals: Iterable[(String, String)],
46      out: Collector[(Long, Long)]): Unit = {
47    val storeKey = context.window.getEnd.toString
48    var count = 0L
49
50    if (jedis.hget("UvCountHashTable", storeKey) != null) {
51      count = jedis.hget("UvCountHashTable", storeKey).toLong
52    }
53
54    val userId = vals.last._2
55    val offset = bloom.hash(userId, 61)
56
57    val isExist = jedis.getbit(storeKey, offset)
58    if (!isExist) {
59      jedis.setbit(storeKey, offset, true)
60      jedis.hset("UvCountHashTable", storeKey, (count + 1).toString)
61    }
62
63    //      out.collect((count, storeKey.toLong))
64
65  }
66 }
67
68 class MyTrigger123 extends Trigger[(String, String), TimeWindow] {
69   override def onEventTime(time: Long,
70                           window: TimeWindow,
71                           ctx: TriggerContext): TriggerResult = {
72     if (ctx.getCurrentWatermark >= window.getEnd) {
73       val jedis = new jedis("localhost", 6379)
74       val key = window.getEnd.toString
75       TriggerResult.FIRE_AND_PURGE
76       println(key, jedis.hget("UvCountHashTable", key))
77     }
78     TriggerResult.CONTINUE
79   }
80
81   override def onProcessingTime(
82     time: Long,
83     window: TimeWindow,
84     ctx: TriggerContext
```

```
85     ): TriggerResult = {
86         TriggerResult.CONTINUE
87     }
88
89     override def clear(
90         window: TimeWindow,
91         ctx: Trigger.TriggerContext
92     ): Unit = {}
93
94     override def onElement(element: (String, String),
95                             timestamp: Long,
96                             window: TimeWindow,
97                             ctx: TriggerContext): TriggerResult = {
98         TriggerResult.FIRE_AND_PURGE
99     }
100 }
101
102 class Bloom(size: Long) extends Serializable {
103     private val cap = size
104
105     def hash(value: String, seed: Int): Long = {
106         var result = 0
107         for (i <- 0 until value.length) {
108             result = result * seed + value.charAt(i)
109         }
110         (cap - 1) & result
111     }
112 }
113 }
```

## APP 分渠道数据统计

完整代码如下：

```
1 package com.atguigu
2
3 import java.util.{Calendar, UUID}
4
5 import org.apache.flink.streaming.api.TimeCharacteristic
6 import org.apache.flink.streaming.api.functions.source.RichParallelSourceFunction
7 import org.apache.flink.streaming.api.functions.source.SourceFunction.SourceContext
8 import org.apache.flink.streaming.api.scala._
9 import org.apache.flink.streaming.api.scala.function.ProcessWindowFunction
```

```
10 import org.apache.flink.streaming.api.windowing.time.Time
11 import org.apache.flink.streaming.api.windowing.windows.TimeWindow
12 import org.apache.flink.util.Collector
13
14 import scala.util.Random
15
16 object AppMarketingByChannel {
17     case class MarketingUserBehavior(userId: String,
18                                         behavior: String,
19                                         channel: String,
20                                         ts: Long)
21
22     class SimulatedEventSource
23         extends RichParallelSourceFunction[MarketingUserBehavior] {
24
25         var running = true
26
27         val channelSet = Seq("AppStore", "XiaomiStore")
28         val behaviorTypes = Seq("BROWSE", "CLICK")
29         val rand = new Random
30
31         override def run(ctx: SourceContext[MarketingUserBehavior]): Unit = {
32             while (running) {
33                 val userId = UUID.randomUUID().toString
34                 val behaviorType = behaviorTypes(rand.nextInt(behaviorTypes.size))
35                 val channel = channelSet(rand.nextInt(channelSet.size))
36                 val ts = Calendar.getInstance().getTimeInMillis
37
38                 ctx.collect(MarketingUserBehavior(userId, behaviorType, channel, ts))
39
40                 Thread.sleep(10)
41             }
42         }
43
44         override def cancel(): Unit = running = false
45     }
46
47     def main(args: Array[String]): Unit = {
48         val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
49         env.setParallelism(1)
50         env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)
51         val stream = env
```

```
52     .addSource(new SimulatedEventSource)
53     .assignAscendingTimestamps(_.ts)
54     .filter(_.behavior != "UNINSTALL")
55     .map(r => {
56       ((r.channel, r.behavior), 1L)
57     })
58     .keyBy(_.1)
59     .timeWindow(Time.seconds(5), Time.seconds(1))
60     .process(new MarketingCountByChannel)
61   stream.print()
62   env.execute()
63 }
64
65 class MarketingCountByChannel
66   extends ProcessWindowFunction[((String, String), Long),
67     (String, Long, Long), (String, String), TimeWindow] {
68   override def process(key: (String, String),
69                         context: Context,
70                         elements: Iterable[((String, String), Long)],
71                         out: Collector[(String, Long, Long)]): Unit = {
72     out.collect((key._1, elements.size, context.window.getEnd))
73   }
74 }
75 }
```

## APP 不分渠道数据统计

完整代码如下：

```
1 package com.atguigu
2
3 import com.atguigu.AppMarketingByChannel.SimulatedEventSource
4 import org.apache.flink.streaming.api.TimeCharacteristic
5 import org.apache.flink.streaming.api.scala._
6 import org.apache.flink.streaming.api.scala.function.ProcessWindowFunction
7 import org.apache.flink.streaming.api.windowing.time.Time
8 import org.apache.flink.streaming.api.windowing.windows.TimeWindow
9 import org.apache.flink.util.Collector
10
11 object AppMarketingStatistics {
12   def main(args: Array[String]): Unit = {
13     val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
14     env.setParallelism(1)
```

```
15     env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)
16     val stream = env
17         .addSource(new SimulatedEventSource)
18         .assignAscendingTimestamps(_.ts)
19         .filter(_.behavior != "UNINSTALL")
20         .map(r => {
21             ("dummyKey", 1L)
22         })
23         .keyBy(_.id)
24         .timeWindow(Time.seconds(5), Time.seconds(1))
25         .process(new MarketingCountTotal)
26     stream.print()
27     env.execute()
28 }
29
30 class MarketingCountTotal
31     extends ProcessWindowFunction[(String, Long),
32         (String, Long, Long), String, TimeWindow] {
33     override def process(key: String,
34             context: Context,
35             elements: Iterable[(String, Long)],
36             out: Collector[(String, Long, Long)]): Unit = {
37         out.collect((key, elements.size, context.window.getEnd))
38     }
39 }
40 }
```

## 恶意登陆实现

```
1 package com.atguigu
2
3 import com.atguigu.FlinkCepExample.LoginEvent
4 import org.apache.flink.api.common.state.{ListStateDescriptor, ValueStateDescriptor}
5 import org.apache.flink.api.scala.typeutils.Types
6 import org.apache.flink.cep.scala.pattern.Pattern
7 import org.apache.flink.streaming.api.TimeCharacteristic
8 import org.apache.flink.streaming.api.functions.KeyedProcessFunction
9 import org.apache.flink.streaming.api.scala._
10 import org.apache.flink.util.Collector
11
12 import scala.collection.mutable.ListBuffer
13
```

```
14 object LoginFailWithoutCEP {
15     def main(args: Array[String]): Unit = {
16         val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
17         env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)
18         env.setParallelism(1)
19
20         val stream = env
21             .fromElements(
22                 LoginEvent("1", "0.0.0.0", "fail", "1"),
23                 LoginEvent("1", "0.0.0.0", "success", "2"),
24                 LoginEvent("1", "0.0.0.0", "fail", "3"),
25                 LoginEvent("1", "0.0.0.0", "fail", "4")
26             )
27             .assignAscendingTimestamps(_.ts.toLong * 1000)
28             .keyBy(_.userId)
29             .process(new MatchFunction)
30
31         stream.print()
32         env.execute()
33     }
34
35     class MatchFunction extends KeyedProcessFunction[String, LoginEvent, String] {
36
37         lazy val loginState = getRuntimeContext.getListState(
38             new ListStateDescriptor[LoginEvent]("login-fail", Types.of[LoginEvent])
39         )
40
41         lazy val timestamp = getRuntimeContext.getState(
42             new ValueStateDescriptor[Long]("ts", Types.of[Long])
43         )
44
45         override def processElement(
46             value: LoginEvent,
47             ctx: KeyedProcessFunction[String, LoginEvent, String]#Context,
48             out: Collector[String]
49         ): Unit = {
50             if (value.loginStatus == "fail") {
51                 loginState.add(value)
52                 if (!timestamp.value()) {
53                     timestamp.update(value.ts.toLong * 1000 + 5000L)
54                     ctx
55                         .timerService()
```

```
56         .registerEventTimeTimer(value.ts.toLong * 1000 + 5000L)
57     }
58 }
59
60     if (value.loginStatus == "success") {
61         loginState.clear()
62         ctx
63             .timerService()
64             .deleteEventTimeTimer(timestamp.value())
65     }
66 }
67
68 override def onTimer(
69     ts: Long,
70     ctx: KeyedProcessFunction[String, LoginEvent, String]#OnTimerContext,
71     out: Collector[String]
72 ): Unit = {
73     val allLogins = ListBuffer[LoginEvent]()
74     import scala.collection.JavaConversions._
75     for (login <- loginState.get) {
76         allLogins += login
77     }
78     loginState.clear()
79
80     if (allLogins.length > 1) {
81         out.collect("5s 以内连续两次登陆失败")
82     }
83 }
84 }
85 }
```

## 订单支付实时监控

- 基本需求
  - 用户下单之后，应设置订单失效时间，以提高用户支付的意愿，并降低系统风险
  - 用户下单后 15 分钟未支付，则输出监控信息
- 解决思路
  - 利用 CEP 库进行事件流的模式匹配，并设定匹配的时间间隔

## 使用 Flink CEP 来实现

在电商平台中，最终创造收入和利润的是用户下单购买的环节；更具体一点，是用户真正完成支付动作的时候。用户下单的行为可以表明用户对商品的需求，但在现实中，并不是每次下单都会被用户立刻支付。当拖延一段时间后，用户支付的意愿会降低。所以为了让用户更有紧迫感从而提高支付转化率，同时也为了防范订单支付环节的安全风险，电商网站往往会对订单状态进行监控，设置一个失效时间（比如 15 分钟），如果下单后一段时间仍未支付，订单就会被取消。

我们将会利用 CEP 库来实现这个功能。我们先将事件流按照订单号 orderId 分流，然后定义这样的一个事件模式：在 15 分钟内，事件“create”与“pay”严格紧邻：

```
val orderPayPattern = Pattern.begin[OrderEvent]("begin")
    .where(_.eventType == "create")
    .next("next")
    .where(_.eventType == "pay")
    .within(Time.seconds(5))
```

这样调用.select 方法时，就可以同时获取到匹配出的事件和超时未匹配的事件了。在 src/main-scala 下继续创建 OrderTimeout.scala 文件，新建一个单例对象。定义样例类 OrderEvent，这是输入的订单事件流；另外还有 OrderResult，这是输出显示的订单状态结果。由于没有现成的数据，我们还是用几条自定义的示例数据来做演示。完整代码如下：

```
1 import org.apache.flink.cep.scala.CEP
2 import org.apache.flink.cep.scala.pattern.Pattern
3 import org.apache.flink.streaming.api.scala._
4 import org.apache.flink.streaming.api.windowing.time.Time
5 import org.apache.flink.streaming.api.TimeCharacteristic
6 import org.apache.flink.util.Collector
7 import scala.collection.Map
8
9 case class OrderEvent(orderId: String, eventType: String, eventTime: String)
10
11 object OrderTimeout {
12
13     def main(args: Array[String]): Unit = {
14
15         val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
16         env.setParallelism(1)
17         env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)
18
19         val orderEventStream = env.fromCollection(List(
20             OrderEvent("1", "create", "1558430842"),
21             OrderEvent("2", "create", "1558430843"),
22             OrderEvent("2", "pay", "1558430844"),
```

```
23     OrderEvent("3", "pay", "1558430942"),
24     OrderEvent("4", "pay", "1558430943")
25   )).assignAscendingTimestamps(_.eventTime.toLong * 1000)
26
27 //   val orders: DataStream[String] = env
28 //     .socketTextStream("localhost", 9999)
29 //
30 //   val orderEventStream = orders
31 //     .map(s => {
32 //       println(s)
33 //       val slist = s.split("\\|")
34 //       println(slist)
35 //       OrderEvent(slist(0), slist(1), slist(2))
36 //     })
37 //     .assignAscendingTimestamps(_.eventTime.toLong * 1000)
38
39 val orderPayPattern = Pattern.begin[OrderEvent]("begin")
40   .where(_.eventType.equals("create"))
41   .next("next")
42   .where(_.eventType.equals("pay"))
43   .within(Time.seconds(5))
44
45 val orderTimeoutOutput = OutputTag[OrderEvent]("orderTimeout")
46
47 val patternStream = CEP.pattern(
48   orderEventStream.keyBy("orderId"), orderPayPattern)
49
50 val timeoutFunction = (
51   map: Map[String, Iterable[OrderEvent]],
52   timestamp: Long,
53   out: Collector[OrderEvent]
54 ) => {
55   print(timestamp)
56   val orderStart = map.get("begin").get.head
57   out.collect(orderStart)
58 }
59
60 val selectFunction = (
61   map: Map[String, Iterable[OrderEvent]],
62   out: Collector[OrderEvent]
63 ) => {}
```

```
65     val timeoutOrder = patternStream
66         .flatSelect(orderTimeoutOutput)(timeoutFunction)(selectFunction)
67
68     timeoutOrder.getSideOutput(orderTimeoutOutput).print()
69
70     env.execute
71
72 }
73 }
```

## 使用 Process Function 实现订单超时需求

```
1 package com.atguigu.project
2
3 import org.apache.flink.api.common.state.ValueStateDescriptor
4 import org.apache.flink.api.scala.typeutils.Types
5 import org.apache.flink.streaming.api.TimeCharacteristic
6 import org.apache.flink.streaming.api.functions.KeyedProcessFunction
7 import org.apache.flink.streaming.api.scala._
8 import org.apache.flink.util.Collector
9
10 object OrderTimeoutWithoutCep {
11
12     case class OrderEvent(orderId: String,
13                           eventType: String,
14                           eventTime: String)
15
16     def main(args: Array[String]): Unit = {
17         val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
18         env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)
19         env.setParallelism(1)
20
21         val stream = env
22             .fromElements(
23                 OrderEvent("1", "create", "2"),
24                 OrderEvent("2", "create", "3"),
25                 OrderEvent("2", "pay", "4")
26             )
27             .assignAscendingTimestamps(_.eventTime.toLong * 1000L)
28             .keyBy(_.orderId)
29             .process(new OrderMatchFunc)
30     }
31 }
```

```
31     stream.print()
32     env.execute()
33 }
34
35 class OrderMatchFunc extends KeyedProcessFunction[String, OrderEvent, String] {
36     lazy val orderState = getRuntimeContext.getState(
37         new ValueStateDescriptor[OrderEvent]("saved order", Types.of[OrderEvent])
38     )
39
40     override def processElement(value: OrderEvent,
41                                 ctx: KeyedProcessFunction[String, OrderEvent, String]#Context,
42                                 out: Collector[String]): Unit = {
43         if (value.eventType.equals("create")) {
44             if (orderState.value() == null) { // 为什么要判空？因为可能出现`pay`先到的情况
45                 // 如果 orderState 为空，保存`create`事件
46                 orderState.update(value)
47             }
48         } else {
49             // 保存`pay`事件
50             orderState.update(value)
51         }
52
53         ctx.timerService().registerEventTimeTimer(value.eventTime.toLong * 1000 + 5000L)
54     }
55
56     override def onTimer(timestamp: Long,
57                          ctx: KeyedProcessFunction[String, OrderEvent, String]#OnTimerContext,
58                          out: Collector[String]): Unit = {
59         val savedOrder = orderState.value()
60
61         if (savedOrder != null && savedOrder.eventType.equals("create")) {
62             out.collect("超时订单的 ID 为: " + savedOrder.orderId)
63         }
64
65         orderState.clear()
66     }
67 }
68 }
```

## 实时对账：实现两条流的 Join

完整代码如下：

```
1 import org.apache.flink.api.common.state.{ValueState, ValueStateDescriptor}
2 import org.apache.flink.streaming.api.TimeCharacteristic
3 import org.apache.flink.streaming.api.functions.co.CoProcessFunction
4 import org.apache.flink.streaming.api.scala.OutputTag
5 import org.apache.flink.streaming.api.scala._
6 import org.apache.flink.util.Collector
7
8 case class OrderEvent(orderId: String,
9                     eventType: String,
10                    eventTime: String)
11
12 case class PayEvent(orderId: String,
13                     eventType: String,
14                     eventTime: String)
15
16 object TwoStreamsJoin {
17     val unmatchedOrders = new OutputTag[OrderEvent]("unmatchedOrders){}
18     val unmatchedPays = new OutputTag[PayEvent]("unmatchedPays){}
19
20     def main(args: Array[String]): Unit = {
21         val env = StreamExecutionEnvironment.getExecutionEnvironment
22         env.setStreamTimeCharacteristic(TimeCharacteristic.EventTime)
23         env.setParallelism(1)
24
25         val orders = env
26             .fromCollection(List(
27                 OrderEvent("1", "create", "1558430842"),
28                 OrderEvent("2", "create", "1558430843"),
29                 OrderEvent("1", "pay", "1558430844"),
30                 OrderEvent("2", "pay", "1558430845"),
31                 OrderEvent("3", "create", "1558430849"),
32                 OrderEvent("3", "pay", "1558430849")
33             )).assignAscendingTimestamps(_.eventTime.toLong * 1000)
34             .keyBy("orderId")
35
36         val pays = env.fromCollection(List(
37             PayEvent("1", "weixin", "1558430847"),
38             PayEvent("2", "zhifubao", "1558430848"),
39             PayEvent("4", "zhifubao", "1558430850")
40         )).assignAscendingTimestamps(_.eventTime.toLong * 1000)
41             .keyBy("orderId")
42     }
}
```

```
43     val processed = orders
44         .connect(pays)
45         .process(new EnrichmentFunction)
46
47     processed.getSideOutput[PayEvent](unmatchedPays).print()
48     processed.getSideOutput[OrderEvent](unmatchedOrders).print()
49
50     env.execute
51 }
52
53 class EnrichmentFunction extends CoProcessFunction[
54   OrderEvent, PayEvent, (OrderEvent, PayEvent)] {
55   lazy val orderState: ValueState[OrderEvent] = getRuntimeContext
56       .getState(new ValueStateDescriptor[OrderEvent]("saved order",
57           classOf[OrderEvent]))
58
59   lazy val payState: ValueState[PayEvent] = getRuntimeContext
60       .getState(new ValueStateDescriptor[PayEvent]("saved pay",
61           classOf[PayEvent]))
62
63   override def processElement1(
64     order: OrderEvent,
65     context: CoProcessFunction[OrderEvent,
66         PayEvent, (OrderEvent, PayEvent)]#Context,
67     out: Collector[(OrderEvent, PayEvent)])
68 ): Unit = {
69     val pay = payState.value()
70
71     if (pay != null) {
72         payState.clear()
73         out.collect((order, pay))
74     } else {
75         orderState.update(order)
76         // as soon as the watermark arrives,
77         // we can stop waiting for the corresponding pay
78         context.timerService
79             .registerEventTimeTimer(order.eventTime.toLong * 1000)
80     }
81 }
82
83   override def processElement2(
84     pay: PayEvent,
```

```
85     context: CoProcessFunction[OrderEvent,
86         PayEvent, (OrderEvent, PayEvent)]#Context,
87     out: Collector[(OrderEvent, PayEvent)]
88 ): Unit = {
89     val order = orderState.value()
90
91     if (order != null) {
92         orderState.clear()
93         out.collect((order, pay))
94     } else {
95         payState.update(pay)
96         context
97             .timerService
98             .registerEventTimeTimer(pay.eventTime.toLong * 1000)
99     }
100 }
101
102 override def onTimer(
103     timestamp: Long,
104     ctx: CoProcessFunction[OrderEvent,
105         PayEvent, (OrderEvent, PayEvent)]#OnTimerContext,
106     out: Collector[(OrderEvent, PayEvent)])
107 ): Unit = {
108     if (payState.value != null) {
109         ctx.output(unmatchedPays, payState.value)
110         payState.clear()
111     }
112
113     if (orderState.value != null) {
114         ctx.output(unmatchedOrders, orderState.value)
115         orderState.clear()
116     }
117 }
118 }
119 }
```

## 第十四章，常见面试题解答

### 面试题一

问题：公司怎么提交的实时任务，有多少 Job Manager？

解答：

- 我们每次提交都会创建一个新的 Flink 集群，为每一个每个 job 提供一个 yarn-session，任务之间互相独立，互不影响，方便管理。任务执行完成之后创建的集群也会消失。

线上脚本如下：

```
$ bin/yarn-session.sh -n 7 -s 8 -jm 3072 -tm 32768 -qu root.*.*-nm *-* -d
```

其中申请 7 个 taskManager，每个 8 核，每个 taskmanager 有 32768M 内存。

- 集群默认只有一个 Job Manager。但为了防止单点故障，我们配置了高可用。我们公司一般配置一个主 Job Manager，两个备用 Job Manager，然后结合 ZooKeeper 的使用，来达到高可用。

作为参考，快手的 Flink 集群的机器数量是 1500 台。

## 面试题二

问题：怎么做压力测试和监控？

解答：我们一般碰到的压力来自以下几个方面：

一，产生数据流的速度如果过快，而下游的算子消费不过来的话，会产生背压问题。背压的监控可以使用 Flink Web UI(localhost:8081) 来可视化监控，一旦报警就能知道。一般情况下背压问题的产生可能是由于 sink 这个操作符没有优化好，做一下优化就可以了。比如如果是写入 ElasticSearch，那么可以改成批量写入，可以调大 ElasticSearch 队列的大小等等策略。

二，设置水位线的最大延迟时间这个参数，如果设置的过大，可能会造成内存的压力。可以设置的最大延迟时间小一些，然后把迟到元素发送到侧输出流中去。晚一点更新结果。或者使用类似于 RocksDB 这样的状态后端，RocksDB 会开辟堆外存储空间，但 IO 速度会变慢，需要权衡。

三，还有就是滑动窗口的长度如果过长，而滑动距离很短的话，Flink 的性能会下降的很厉害。

参见链接：[https://www.infoq.cn/article/sIhs\\_qY6HCpMQNb1TI9M](https://www.infoq.cn/article/sIhs_qY6HCpMQNb1TI9M)

四，状态后端使用 RocksDB，还没有碰到被撑爆的问题。

五，尽量使用滚动窗口，这样会大大减轻存储的压力。

六，如果想要达到极限的低延迟，可以考虑使用处理时间（Processing Time）。

## 面试题三

问题：问什么使用 Flink 替代 Spark？

解答：教材里面有 Flink 和 Spark 的详细对比。

一，Flink 是真正的流处理，延迟在毫秒级，Spark Streaming 是微批，延迟再秒级。

二，Flink 可以处理事件时间，而 Spark Streaming 只能处理机器时间，无法保证时间语义的正确性。

三，Flink 的检查点算法比 Spark Streaming 更加灵活，性能更高。Spark Streaming 的检查点算法是在每个 stage 结束以后，才会保存检查点。

四，Flink 易于实现端到端一致性。

## 面试题四

问题：Flink 的 CheckPoint 存在哪里？

解答：状态后端。内存，文件系统，或者 RocksDB。

## 面试题五

问题：如果下级存储不支持事务，Flink 怎么保证 exactly-once?

解答：幂等性写入。

## 面试题六

问题：说一下 Flink 状态机制？

解答：参见教材相关内容。流处理程序内部的一致性，端到端一致性。

## 面试题七

问题：怎么去重？考虑一个实时场景：双十一场景，滑动窗口长度为 1 小时，滑动距离为 10 秒钟，亿级用户，计算 UV?

解答：使用类似于 scala 的 set 数据结构或者 redis 的 set 数据结构显然是不行的，因为可能有上亿个 Key，内存放不下。所以可以考虑使用布隆过滤器（Bloom Filter）来去重。

## 面试题八

问题：Flink 的 checkpoint 机制对比 spark 有什么不同和优势？

解答：spark streaming 的 Checkpoint 仅仅是针对 driver 的故障恢复做了数据和元数据的 Checkpoint。而 flink 的 checkpoint 机制要复杂了很多，它采用的是轻量级的分布式快照，实现了每个操作符的快照，及循环流的在循环的数据的快照。参见教材内容和链接：

<https://cloud.tencent.com/developer/article/1189624>

## 面试题九

问题：Flink 的 Watermark 详细说明？

解答：见教材。

## 面试题十

问题：Flink ExactlyOnce 语义是如何实现的，状态是如何存储的？

解答：见教材。从两方面回答：

一，Flink 应用程序内部的 exactly-once

二，端到端一致性

## 面试题十一

问题：Flink CEP 编程中当状态没有到达的时候会将数据保存在哪里？

解答：CEP 当然在流式处理中是要支持 EventTime 的，那么相对应的要支持数据的晚到现象，也就是 watermark 的处理逻辑。在 Flink 的处理逻辑中，将晚到数据明细存储在了 Map<Long, List> 的结构中，也就是说，如果 watermark 设置为当前时间减去 5 分钟，那么内存中就会存储 5 分钟的数据，这在我看来，也是对内存的极大损伤之一。

## 面试题十二

问题：Flink 三种时间概念分别说出应用场景？

解答：

1. Event Time：见教材。
2. Processing Time：没有事件时间的情况下，或者对实时性要求超高的情况下。
3. Ingestion Time：存在多个 Source Operator 的情况下，每个 Source Operator 会使用自己本地系统时钟指派 Ingestion Time。后续基于时间相关的各种操作，都会使用数据记录中的 Ingestion Time。

## 面试题十三

问题：Flink 程序在面对数据高峰期时如何处理？

解答：

- 1, 使用大容量的 Kafka 把数据先放到消息队列里面。再使用 Flink 进行消费，不过这样会影响到一点实时性。
- 2, 使用滚动窗口
- 3, 使用处理时间
- 4, 下游使用消费速度快的外围设备（如 Kafka）

## 面试题十四

问题：flink 消费 kafka 保证数据不丢失（flink 消费 kafka 数据不丢不重，flink 消费 kafka 的时候挂了怎么恢复数据）

解答：端到端一致性（exactly-once），flink 会维护消费 kafka 的偏移量，checkpoint 操作。

## 面试题十五

问题：Flink 过来的数据量太大怎么处理？

解答：加机器，考虑使用处理时间（ProcessingTime），前面使用 Kafka 来做蓄水池，降低消费数据的速度。尽量使用滚动窗口，窗口没有重合，数据不会复制到不同的窗口中去。

## 面试题十六

问题：Kafka 每 5 分钟过来的数据量是多少，flink 跑的实时频率，flink topN 跑的频率？

解答：我们公司一天数据量是 100 万，所以我们的窗口大小一般设置为 1 小时，所以数据量大约在 10 万条左右。

## 面试题十七

问题：Flink 的资源是如何设置的，设置资源的时候依据是什么？

解答：我们公司购买的云计算资源比较多，所以跑平常的任务没有发现什么问题。会提前 mock 比较大的数据量，做一下压力测试，然后决定使用多少资源。

以下 6 个方面是确定 Flink 集群大小时最先要考虑的一些因素：

- 记录数和每条记录的大小

确定集群大小的首要事情就是估算预期进入流计算系统的每秒记录数（也就是我们常说的吞吐量），以及每条记录的大小。不同的记录类型会有不同的大小，这将最终影响 Flink 应用程序平稳运行所需的资源。

- 不同 key 的数量和每个 key 存储的 state 大小

应用程序中不同 key 的数量和每个 key 所需要存储的 state 大小，都将影响到 Flink 应用程序所需的资源，从而能高效地运行，避免任何反压。

- 状态的更新频率和状态后端的访问模式

第三个考虑因素是状态的更新频率，因为状态的更新通常是一个高消耗的动作。而不同的状态后端（如 RocksDB，Java Heap）的访问模式差异很大，RocksDB 的每次读取和更新都会涉及序列化和反序列化以及 JNI 操作，而 Java Heap 的状态后端不支持增量 checkpoint，导致大状态场景需要每次持久化的数据量较大。这些因素都会显著地影响集群的大小和 Flink 作业所需的资源。

- 网络容量

网络容量不仅仅会受到 Flink 应用程序本身的影响，也会受到可能正在交互的 Kafka、HDFS 等外部服务的影响。这些外部服务可能会导致额外的网络流量。例如，启用 replication 可能会在网络的消息 broker 之间产生额外的流量。

- 磁盘带宽

如果你的应用程序依赖了基于磁盘的状态后端，如 RocksDB，或者考虑使用 Kafka 或 HDFS，那么磁盘的带宽也需要纳入考虑。

- 机器数量及其可用 CPU 和内存

最后但并非最不重要的，在开始应用部署前，你需要考虑集群中可用机器的数量及其可用的 CPU 和内存。这最终确保了在将应用程序投入生产之后，集群有充足的处理能力。

## 面试题十八

- Flink 上有多少个指标，一个指标一个 jar 包吗？Flink 亲自负责的有几个 jar 包产出？
- flink 的开发中用了哪些算子？
- flink 的异步 join 有了解吗？就是例如 kafka 和 MySQL 的流进行 join
- flink 的 broadcast join 的原理是什么？
- flink 的双流 join 你们用的时候是类似数据中的 left join 还是 inner join，双流 join 中怎么确定左表还是右表【没太懂，好像应该是 full join，全外连接】
- flink 集群有多大，怎么部署的？
- hadoop 集群有多大，分给 flink 有多少资源，多少 cpu，多少内存，多少 slot？
- 你自己写的哪些 jar 包，用了多少 cpu，用了内存，多少个 slot？
- 有没有关注你的 jar 包的处理性能，就是处理 kafka 的 qps 和 tps？
- 你们有用过 flink 的背压吗，怎么做优化还是调整？
- flink 的知识点还有啥想介绍的？

## 面试题十九

- flink 如何实现精准一次性? flink 怎么保证容错性, 说些 checkpoint 的内部原理, 要很细节的。
- flink 的双流 join 有什么问题? 写代码实现 interval join 的功能, 怎么实现?
- 通过双流 join 进行对账, 有没有没 join 上的情况, interval join 的时间是多少, 你设置这个时间不会有数据丢失?

## 面试题二十

你们 flink 输出的目标数据库是什么, 答看需求到 es 或者 mysql 需要自定义 mysqlsink, 他问自定义 mysql sink 里面实际上是 jdbc 做的? 你们有没有发现用 jdbc 并发的写 mysql 他的性能很差, 怎么处理的? 答: 一般不直接写入 mysql, 一般先写入消息队列 (redis, kafka, rabbitmq, ...), 用消息队列来保护 mysql。