

## 摘 要

随着因特网应用和计算机技术的飞速发展，数据库逐渐成为信息系统的核心部分并广泛应用于企业、金融机构、政府及国防等各个领域。但是传统的关系数据库在面对日益增多的大量数据时暴露了很多问题，不能对其高效、实时的处理。对系统提出的新需求，传统的关系数据库并不能很好的解决。非关系型数据库是为弥补关系数据库的不足而产生的，OrientDB数据库就是非关系型数据库的一种。目前现有的非关系数据库对大数据量数据的处理能力很强但是在很多关键领域，关系型数据库又是非关系型数据库无法代替的。如何结合关系型数据库和非关系型数据库的优点成为当前数据库领域的关键问题。

通过对分布式理论、关系数据库理论及非关系型数据库技术的学习和研究，本文基于Java语言实现了一个分布式的关系型数据库JSQL，JSQL是一个将关系数据库技术，非关系型数据库技术和分布式技术相结合的产物。JSQL采用常用的客户端-服务器架构，分为客户端和服务端，服务端又分为分布式管理节点和分布式数据库集群。分布式管理节点实现了数据库服务器的负载均衡和监控管理功能。分布式数据库集群节点主要包含五大模块，网络模块接收前端客户端的连接请求，对客户端进行认证和授权，并对连接进行管理，并实现基于Mysql的通信协议；Sql的解析和执行模块接收客户端的SQL请求，然后解析和执行数据库存储的调用，返回执行结果；审计模块是存储和分析所有对数据库的更改情况，向分布式管理节点提供审计数据；数据库引擎模块利用了非关系型Orientdb数据库引擎，实现可靠的数据存储；分布式模块利用hazlcast实现了数据库集群，本文提出了分布式多版本并发控制方法，用来解决分布式数据一致性问题。基于以上功能模块，J S Q L具有高可用性，可扩展性，负载均衡等特性，同时从数据库底层考虑了数据库安全审计需求，加入了数据审计图形化界面显示审计结果。

论文对系统进行了功能和性能测试。功能测试结果表明，系统在功能上符合分布式数据库的基本要求，审计系统的功能也达到本论文的要求。论文通过对性能测试结果进行分析，认为系统的性能基本达到本论文的要求。但是本系统对复杂SQL语句的支持还不是很完善，最后提出了改进的方案。

**关键词：**分布式数据库，关系数据库，安全审计，Mysql，非关系型数据库



## ABSTRACT

With the rapid development of Internet application and computer technology, the database has gradually become the core of information system Points and widely used in enterprises, financial institutions, government and national defense and other fields. However, the traditional relational database is facing increasing When exposed to a large number of data a lot of problems, can not be efficient and real-time processing. The new needs of the system Seeking, the traditional relational database can not be solved very well. Non-relational database is to make up for the lack of relational database, the OrientDB database Is a non-relational database. At present, the existing non-relational database has great ability to handle large amounts of data But in many key areas, relational databases are non-relational databases that can not be replaced. How to combine the advantages of relational databases and non-relational databases has become the key issue in the current database area.

Through the study of distributed theory, relational database theory and non-relational database technology, This article based on the Java language to achieve a distributed relational database JSQL, JSQL is a relational database technology, The combination of non-relational database technology and distributed technology. JSQL common client-server - server architecture, divided into customer service and server-side, Server-side is divided into distributed management nodes and distributed database nodes. Distributed management nodes to achieve a database server load balancing and monitoring and management functions. Distributed database node contains five major modules, The network module accepts the connection request of the front-end application, authenticates and authorizes the client-end, and manages the connection, And realize the communication protocol based on Mysql, so easy to migrate to Mysql users to the system; Sql parsing and execution module to accept the client's SQL request, and then parse and execute the database stored call, Return the execution result The audit module is to store and analyze all changes to the database, the distributed management node to provide audit data; The database engine module makes use of the non-relational OrientDB database engine for reliable data storage; Distributed modules use hazlcast to implement a database cluster. Based on the above functional modules, JSQL has high availability, scalability, load balancing and other characteristics, while taking into account the database security audit

needs from the bottom of the database, Joined the data audit graphical interface shows the audit results.

The thesis has carried on the function and the performance test to the system. The result of function test shows that the system conforms to the basic requirements of distributed database functionally, and the function of auditing system also meets the requirements of this dissertation. Papers through the performance test results analysis, that the performance of the system basically meet the requirements of this paper. However, the system of complex SQL statement support is not perfect, and finally proposed an improved program.

**Keywords:** Distributed database, relational database, security audit, Mysql, Non-relational database

# 目 录

<b>第一章 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景和研究意义	1
1.2 数据库历史与现状	3
1.3 论文的主要工作	6
1.4 本论文的结构安排	7
<b>第二章 相关理论和技术</b>	<b>9</b>
2.1 数据库系统	9
2.1.1 数据库系统概念	9
2.1.2 关系数据库系统	9
2.1.3 事务与并发控制	10
2.1.4 NoSQL数据库系统	12
2.2 分布式数据库	13
2.2.1 分布式数据库概述	13
2.2.2 分布式数据库的特点	13
2.2.3 数据分布和负载均衡	14
2.2.4 数据复制和一致性	16
2.3 算法和技术	18
2.3.1 分布式负载均衡算法	18
2.3.2 副本和分布式MVCC技术	19
2.4 本章小结	21
<b>第三章 系统分析</b>	<b>22</b>
3.1 系统需求分析	22
3.1.1 系统功能需求	22
3.1.2 系统功能用例	24
3.2 技术和框架分析	27
3.2.1 系统实现语言选择	27
3.2.2 网络实现技术分析	27
3.2.3 通信协议分析	29
3.2.4 SQL实现分析	29
3.2.5 存储引擎分析	31

3.2.6 分布式实现分析 .....	31
3.2.7 监控功能实现分析 .....	32
3.3 本章小结 .....	32
<b>第四章 系统设计 .....</b>	<b>33</b>
4.1 系统总体设计 .....	33
4.1.1 系统架构设计 .....	33
4.1.2 系统功能设计 .....	37
4.2 客服端模块设计 .....	38
4.3 分布式管理模块 .....	40
4.4 数据库功能模块详细设计 .....	40
4.4.1 数据库功能操作流程 .....	40
4.4.2 网络模块设计 .....	41
4.4.3 通信协议设计 .....	43
4.4.4 SQL引擎设计 .....	45
4.4.5 存储引擎设计 .....	45
4.5 集群架构详细设计 .....	46
4.6 审计模块详细设计 .....	46
4.7 本章小结 .....	47
<b>第五章 系统实现 .....</b>	<b>49</b>
5.1 代码规范和总体结构 .....	49
5.2 客服端功能实现 .....	49
5.3 分布式管理节点实现 .....	51
5.4 负载均衡功能实现 .....	51
5.5 多版本MVCC算法实现 .....	53
5.6 数据库系统实现 .....	55
5.6.1 网络模块 .....	55
5.6.2 SQL解析模块 .....	57
5.6.3 存储引擎模块 .....	61
5.7 集群架构的实现 .....	64
5.8 数据审计模块的实现 .....	67
5.9 本章小结 .....	68
<b>第六章 系统测试 .....</b>	<b>69</b>
6.1 测试环境 .....	69

6.2 功能测试 .....	69
6.2.1 数据库功能测试 .....	69
6.2.2 集群功能测试 .....	71
6.2.3 审计功能测试 .....	71
6.3 性能测试 .....	72
6.4 本章小结 .....	76
第七章 总结与展望 .....	77
致 谢 .....	78
参考文献 .....	79





## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景和研究意义

互联网诞生以来在全球迅速蔓延。2017年我国工业和信息化部最新发布的通信业经济运行情况显示，2月末，我国移动电话用户总数达到13.3亿户，移动互联网用户总数达到11.2亿户，使用手机上网的用户数接近10.6亿户。互联网用户数量还有很大的增长空间，特别是亚洲人口众多的发展中国家。同时，智能手机的革命发展通过移动互联网大大提升用户体验，使移动互联网迅速发展。伴随着互联网的发展出现了各种基于互联网的应用服务，从传统媒体门户网站到BBS以及近年来社会媒体的兴起，电子商务的巨大发展，还有各种各样的移动互联网应用程序。

随着互联网和互联网应用的发展，数据存储的需求不断增长。IDC报告显示，预计到2020年全球数据总量将超过40ZB，这一数据量是2011年的22倍。在过去几年，全球的数据量以每年百分之58的速度增长，在未来这个速度会更快。如果按照现在存储容量每年百分之40的增长速度计算，到2020年需要存储的数据量甚至会大于存储设备的总容量。

未来是“大数据”时代，这么大的存储需求，给数据存储技术的发展带来了很大的压力。有很多应用基于互联网提供的各种服务正在进入井喷时代的发展，而这些应用，背景的很大一部分面临同样的问题：怎么样以尽可能廉价的方式实现大规模数据存储和查询。如搜索服务，需要存储页面而分析，微博等社交网络需求的实时用户来表达查询的观点，在线旅游需要玩家的信息和操作来存储和查询，银行需要用户帐户信息和用户用于实时存储和查询。这种应用所面临的挑战总结为大数据可用性和可靠性要求高，部分应用需要实时查询响应和高并发性和数据一致性要求。在这样的环境下，传统的关系数据库不能很好的满足现在数据库存储技术的要求，这种情况催生了 Nosql 数据库如雨后春笋般的出现。Nosql数据库与 RDBMS 相比，最大的特点是其符合 BASE 模型，并且抛弃了其 ACID 特性，具有高可扩展性、并发性等优点，更加适合大数据应用场景特别是非关系型数据的存储和管理。在过去几年，这种新兴的存储机制正在逐渐吞噬大数据的存储市场。Nosql的一般解释为“non-relational”，不过“Not Only SQL”也是被大众接受的主流说法之一。它是大数据时代以及 WEB2.0 时代的产物，也是解决大数据时代非结构化数据存储问题的重要手段。

Nosql 数据库具有 RDBMS 所不具备的优势, 首先, 扩展性好, 基本上所有的 Nosql 数据库都摒弃了 RDBMS 的关系特性, 数据之间很少有关联甚至无关联, 这个特点在无形中使得 Nosql 在架构上扩展性更好; 其次 Nosql 能够管理的数据量更大, 性能更好, 数据库的结构简单, 一般根据特定场景从应用层来优化系统性能, 再加之新型存储器件的辅助, 使得在海量数据情况下, 其性能同样表现更加优秀; 再次, Nosql 的某些产品具有灵活的数据模型, 例如 MongoDB, 用户可以随意修改字段, 而这对于关系数据库来说是可望而不可及的; 最后, Nosql 同样具有高可用性, 在一个副本宕机之后, 其他副本还可以提供服务, 可以通过其他手段来同步新加入节点的数据一致性。这些特点都使得 Nosql 变得越来越流行。虽然新型非关系型数据库虽然在大数据量的存储和处理上有很大的优势, 但是关系数据库在很多关键领域又是无可替代的, 所以如何结合关系型数据库和非关系型数据库的优点成为当前数据库领域的关键问题。

基于目前数据库应用的现状, 迫切需要开发将分布式非关系数据库技术和关系数据库技术相结合的分布式数据库来解决系统对大容量、可用性和可扩展性的需求。如何将关系数据库技术, 非关系数据库技术和分布式技术的优点相集合来开发一个新的分布式数据库具有极现实的意义。相对于传统关系数据库, 这种分布式数据库容量和可用性具有很大的优势, 因此能够更好的应对大规模和超大规模的数据存储需求的应用。本文设计和实现的分布数据库系统(以下简称JSQL)就是一种将分布式非关系数据库技术和关系数据库技术相结合的系统, 一旦JSQL开发成功以后, 将会给系统和软件平台带来以下好处:

### 1. 结合关系数据库和NoSQL的优点

JSQL分布式数据库系统是一种将非关系型数据库技术和关系数据库技术相结合的系统, 首先, 它有Nosql系统的优点, 能够处理非常大的数据, 有很好性能和可扩展性。然后, JSQL作为关系数据库系统, 能满足应用程序的开发要求, 为应用程序提供SQL接口, 提供复杂的关系操作和事务支持。

### 2. 提高数据库系统资源使用效率

JSQL分布式数据库系统具有负载均衡功能, 负载均衡在多节点之间按照一定的策略分发网络或计算处理负载, 提供了一种廉价而有效的方法来扩展服务器带宽, 增加吞吐量, 提高数据处理能力, 同时又可以避免单点故障。在JSQL中, 分布式管理节点作为分布式数据库系统的负载均衡管理节点, 负责路由消息到指定的分布式数据库节点, 分布式管理节点采用动态局部性最少连接算法来实现分布式数据库节点的负载均衡, 提高对分布式数据库节点的使用效率。

### 3. 提高系统的访问效率

本文设计的分布式系统能为客户端选择最合适的分布式数据库节点，这样能够提高客户端的访问效率。系统为客户端选择最近的节点，同时也节约了系统的网络资源。

#### 4.提高系统的可扩展性

本文设计的分布式数据库系统，其分布式数据库节点集群采用无主服务器设计，能动态的增加节点，而不需要用户任何的配置。在系统需要扩展时，只需要增加一个或几个分布式数据库节点就能够提高系统的整体性能；在系统不需要大容量存储时，可以减少一个或几个分布式数据库节点降低系统的整体容量。

#### 5.提高系统可移植性

本文设计和实现的分布式数据库系统全套代码由JAVA语言实现，在Windows操作系统和Linux 操作系统之间，代码的可移植性较强，方便后续跨平台部署。

#### 6.方便数据库的安全审计

数据的重要性越来越重要，如何保证数据库的安全性是现在迫切需要解决的问题，如何防止用户随意篡改数据在系统的设计上作为一个重要的功能需求。JSQL从数据库底层实现了数据库的审计功能，提供比其他方法更高的性能。管理员通过管理客户端能够监视数据库系统的运行状态，能监控数据的更改情况。

## 1.2 数据库历史与现状

数据库技术的发展始于20世纪60年代。在没有数据库的情况下，使用计算机存储数据的用户（主要是财务科研单位）以操作系统中的文件的形式存储数据。随着业务的发展，应用程序变得越来越复杂，人们开始需要开发管理数据在通用软件，这促成了数据库的诞生。20世纪60年代以来，人们探索数据模型实现数据库，后来开发出三大数据库模型：层次数据模型，网络数据模型，关系数据模型，后来也出现过对象数据模型。其中，可以使用关系数据模型严格的数学理论来描述数据库的组织 and 操作，具有简单灵活，数据库独立性高的特点特征。从20世纪70年代到90年代，关系数据库理论成熟并得到广泛应用，这个里程碑是1974年，IBM的圣荷西，加利福尼亚研究实验室的D.D. Chamberlin和Ray Boyce开发了SEQUEL结构化查询语言，后来在1980年更名为SQL。SQL是数据库中的标准数据查询语言，在1986年，由美国国家标准学会规范SQL，就这样成为了数据库系统的标准语言。SQL包含三个部分：数据定义语言，数据操作语言，数据控制语言。SQL是一种全面的通用关系数据语言，可以当它是一种高级的非程序语言，它允许用户在高级数据结构中工作。使用SQL 用户无需知道数据的具体存储方式。在SQL中一个简单的语句实现效果，使用其他编程语言需要很大一

部分程序才能实现。另外，SQL通过使用这种语言允许用户掌握这种语言就可以使用这种语言来操作任何一个标准数据库产品。到20世纪90年代，关系数据库标准几乎适用于任何数据存储需求的应用程序。

分布式数据库系统是数据库系统技术与网络技术的结合。分布式数据库系统（DDBS）的研究始于20世纪70年代。但是，分布式数据库的理论与应用成为一个热门话题，是20世纪90年代的事情。90年代，互联网网络出现爆炸式增长，同时各种应用程序对存储的需求与日俱增。在这样的环境下，分布式数据库系统的研究成为了热门话题，人们探索分布式数据库系统理论和关键技术，并快速应用理论实践，开发了各种商业应用价值的数据库产品。2002年，Eric Brewer提出了引导分布式数据库研究的重要理论，并且后来证明是正确的，这个理论就是CAP定理，CAP定理的核心观点是：在分布式计算系统中，不可能同时满足以下三点：一致性，可用性，分区容忍性。CAP理论认为分布式数据库产品的设计必须介于三者之间，其中至少有两个可以满足，不可能同时满足三个。根据CAP理论的指导，有学者认为，基于传统的关系数据库构建分布式数据库，很难满足当前大型数据存储需求的各类互联网应用，如搜索引擎，社交网络等。由于传统的关系数据库非常重视数据一致性，在传统的关系数据库中，交易的四点必须保证要求：ACID（Atomicity，一致性，隔离，持久性）。有部分人认为，根据CAP理论，在满足强大的一致性之后，也希望获得互联网应用的高可用性是非常困难的。

在二十世纪九十年代末和二十一世纪初，互联网应用大幅增长出现了一些人认为是革命性的分布式数据库概念：NoSQL（not only SQL）。NoSQL和传统的关系数据库非常的不同，对于一个概念，NoSQL的显著特点是：非关系型，分布式，不提供ACID数据库设计模式。NoSQL不支持复杂的关系操作，不提供对交易一致性的支持。由于摆脱了必须满足支持一致性的功能要求，根据NoSQL概念设计产品生成的高可扩展性高并发高可用性支持得到了很大的改善，各种类似的开源或商业的NoSQL产品出现了，并且被大量和被各种互联网应用程序所使用。这些NoSQL产品被应用到新的产品，如博客，论坛，微博等其他社交服务。这些应用程序具有高度可扩展性，高可用性，并发性。高可用性这些功能很重要，因为这些应用压力主要来自大规模数据存储，大量并发访问及时响应，NoSQL拒绝一致性支持是合理的，因为像社交网络应用程序一样用户丢失数据库的后果不会太严重，毕竟，这不会导致用户遭受巨大的损失，如经济利益。

作为分布式数据库，NoSQL在过去两年爆发式增长，均受益于互联网高速发展，也是各种应用到“大数据”的发展趋势，CAP理论再一次证明了它的正确性。毕竟，NoSQL放弃了一致性的支持，这些产品可以应用到请求的一致性不

高在应用上，随着互联网的快速发展和“大数据”时代的到来，那些需要关系操作，需要高级一致性并且面临大规模数据存储查询要求的应用，比如电子商务，这样的应用程序不能使用NoSQL产品。所以，目前的分布式数据库开发方向，根据CAP理论，一个是尽可能的减少一致性，提高可用性，另一个方向是需要尝试确保操作之间的关系，一致性的支持，同时利用分布式技术的优势，提供尽量高性能的服务。

下面对目前市面上比较有代表性的分布式数据库系统进行简单的介绍。

### 1. Google Spanner

Spanner 是一个可扩展的、全球分布式的数据库，是在谷歌公司设计、开发和部署的。

在最高抽象层面，Spanner 就是一个数据库，把数据分片存储在许多 Paxos 状态机上，这些机器位于遍布全球的数据中心内。复制技术可以用来服务于全球可用性和地理局部性。客户端会自动在副本之间进行失败恢复。随着数据的变化和服务器的变化，Spanner 会自动把数据进行重新分片，从而有效应对负载变化和处理失败。Spanner 被设计成可以扩展到几百万个机器节点，跨越成百上千个数据中心，具备几万亿数据库行的规模。

应用可以借助于 Spanner 来实现高可用性，通过在一个洲的内部和跨越不同的洲之间复制数据，保证即使面对大范围的自然灾害时数据依然可用。作为一个全球分布式数据库，Spanner 提供了几个有趣的特性：第一，在数据的副本配置方面，应用可以在一个很细的粒度上进行动态控制。应用可以详细规定，哪些数据中心包含哪些数据，数据距离用户有多远(控制用户读取数据的延迟)，不同数据副本之间距离有多远(控制写操作的延迟)，以及需要维护多少个副本(控制可用性和读操作性能)。数据也可以被动态和透明地在数据中心之间进行移动，从而平衡不同数据中心内资源的使用。第二，Spanner 有两个重要的特性，很难在一个分布式数据库上实现，即 Spanner 提供了读和写操作的外部一致性，以及在一个时间戳下面的跨越数据库的全球一致性的读操作。这些特性使得 Spanner 可以支持一致的备份、一致的 MapReduce 执行和原子模式变更，所有都是在全球范围内实现，即使存在正在处理中的事务也可以。

### 2. 阿里巴巴 OceanBase

OceanBase 是一个支持海量数据的高性能分布式数据库系统，实现了数千亿条记录、数百TB数据上的跨行跨表事务，由淘宝核心系统研发部、运维、DBA、广告、应用研发等部门共同完成。在设计和实现 OceanBase 的时候暂时摒弃了不紧急的 DBMS 的功能，例如临时表，视图(view)，研发团队把有限的资源集中到关键点

上, 当前 OceanBase 主要解决数据更新一致性、高性能的跨表读事务、范围查询、join、数据全量及增量 dump、批量数据导入。

目前 OceanBase 已经应用于淘宝收藏夹, 用于存储淘宝用户收藏条目和具体的商品、店铺信息, 每天支持 4~5 千万的更新操作。等待上线的应用还包括 CTU、SNS 等, 每天更新超过 20 亿, 更新数据量超过 2.5TB, 并会逐步在淘宝内部推广。

OceanBase 设计和实现的时候暂时摒弃了不紧急的 DBMS 的功能, 例如临时表, 视图(view), 研发团队把有限的资源集中到关键点上, 当前 OceanBase 主要解决数据更新一致性、高性能的跨表读事务、范围查询、join、数据全量及增量 dump、批量数据导入。

### 3. 微软 SQL Azure

SQL Azure (旧称 SQL Server Data Services 或 SQL Services) 是由微软 SQL Server 2008 为主, 建构在 Windows Azure 云操作系统之上, 运行云计算 (Cloud Computing) 的关系数据库服务 (Database as a Service), 是一种云存储 (Cloud Storage) 的实现, 提供网络型的应用程序数据存储的服务。

SQL Azure 提供了一个功能强大且为人熟知的存储结构, SQL Server 2008 90% 的功能在 SQL Azure 中都得到了完美的支持。SQL Azure 兼具云计算的好处, 将数据存储基础结构托管, 可以大大地降低企业在 IT 方面的资源的投入, 根据具体需要的数据存储量和网络带宽支付进行支付, 即我们常说的, 即付即用!

数据在企业中扮演的角色越来越重要, 确保数据安全, 确保数据的高可用性, 也是近年来企业不断追求的目标。SQL Azure 完美地保证了高可用性 (High Availability) 和故障转移 (Failover), 当应用 SQL Azure 进行数据的增删改的时候, SQL Azure 会自动地将数据备份到若干节点 (node), 以保证数据的高可用性; SQL Azure 后台内置的集群机制完美的保证了自动故障转移, 无需人工监守。

## 1.3 论文的主要工作

通过对分布式理论、关系数据库理论及非关系型数据库技术的学习和研究, 论文基于 Java 语言设计和实现了一个分布式的关系型数据库 JSQL, JSQL 结合了非关系型数据库 OrientDB 和关系型数据库的优点, 同时实现了 Mysql 的通信协议, 是一个兼容 Mysqk 通信协议的分布式数据库。在系统的实现过程中做的主要工作包括:

1. 利用 OrientDB 非关系型存储引擎设计和实现了关系型数据库的本地存储系统。

- 2.实现了Mysql通信协议，使得可以通过Mysql客服端来连接JSQL分布式数据库，方便Mysql用户迁移到本数据库系统。
- 3.实现了对SQL语句的解析和执行，完成对关系数据库接口的支持。
- 4.实现了数据库的分布式架构，使得数据可以存储在多台计算机上面。
- 5.实现了系统的审计系统，使得系统的安全性得到增强。
- 6.设计和实现了分布式负载均衡算法，完成了分布式数据库节点的动态负载均衡功能。
- 7.利用分布式多版本并发控制机制解决了分布式数据一致性问题。
- 8.数据库系统做完以后，对系统进行了各项软件测试，包括功能测试，性能测试等，以验证系统是否满足需求，达到了系统设计的目标。

## 1.4 本论文的结构安排

第一章作为本论文的绪论，首先介绍了论文的选题背景和本论文进行研究的意义。接着阐述了数据库的发展历史和现状，对当前几个流行的分布式数据库系统进行了简单的介绍。最后一节里介绍了论文的主要工作。

第二章，主要介绍了本论文相关的理论基础和相关的技术。这一章首先对数据库系统方面的理论知识进行了说明，包括数据库系统和关系数据库系统的概念，简单的讨论了NoSQL数据库系统；然后介绍分布式数据库相关理论，对分布式系统中数据库分布式和数据复制技术进行了介绍。最后介绍了LBLCR动态均衡算法和分布式MVCC技术，这些技术为论文的实现提供了坚实的基础。

第三章，作为分布式系统JSQL的分析。本章首先给出了分布式数据库JSQL的实现目标，对系统进行需求分析。从系统用户的角度出发，对分布式内存数据库进行详细、切合实际的需求分析，并在需求分析的基础上，对分布式数据库的整体架构等进行模块划分，按照功能分解结构细化、模块化系统功能，并对各个模块进行再划分。然后本章对重要的模块进行了分析，包括对各种技术和框架的选择，详细说明了实现分布式数据库系统需要用到的各种技术。

第四章，是系统的设计，包括总体设计和模块划分，本章对系统的总体架构和各个模块的详细架构给出了阐述。系统主要包括分布式管理节点和分布式数据库节点。本章对分布式管理节点和分布式数据库节点的各个模块进行了详细的分析。

第五章，是关于系统的具体实现。在前面模块设计的基础上，给出每个模块的详细实现，重点对分布式管理节点和分布式数据库节点功能的实现进行阐述，对本系统中的关键算法进行了详细的流程分析。

第六章，论文对jsq分布式数据库进行测试，包括功能测试和性能测试。

第七章，论文总结了论文所做的工作，对本系统的优点和不足进行了说明。并对未来的工作进行了展望。

最后部分，是关于致谢和参考资料。



## 第二章 相关理论和技术

本节介绍数据库和分布式数据库有关的理论知识，以及本系统所需要用到的关键算法和技术。

### 2.1 数据库系统

#### 2.1.1 数据库系统概念

数据库管理系统是一种操纵和管理数据库的大型软件，用于建立、使用和维护数据库。它对数据库进行统一的管理和控制，以保证数据库的安全性和完整性。用户通过数据库系统访问数据库中的数据，数据库管理员也通过数据库系统进行数据库的维护工作。它可使多个应用程序和用户用不同的方法在同时或不同时刻去建立，修改和询问数据库。大部分数据库系统提供对数据的追加、删除等操作。数据库管理系统是数据库系统的核心，是管理数据库的软件。数据库管理系统就是实现把用户意义下抽象的逻辑数据处理，转换成为计算机中具体的物理数据处理的软件。有了数据库管理系统，用户就可以在抽象意义下处理数据，而不必顾及这些数据在计算机中的布局 and 物理位置。

#### 2.1.2 关系数据库系统

##### 2.1.2.1 关系模型

用于数据库管理的关系模型是基于谓词逻辑和集合论的一种数据模型，广泛被使用于关系型数据库之中。最早于1969年由埃德加·科德提出。关系模型的基本假定是所有数据都表示为数学上的关系，关系模型是采用二维表格结构表达实体类型及实体间联系的数据模型。关系模型允许设计者通过数据库规范化的提炼，去建立一个信息的一致性的模型。

基本的关系建造块是域或者叫数据类型。元组是属性的有序多重集，属性是域和值的有序对。关系变量是域和名字的有序对（序偶）的集合，它充当关系的表头。关系是元组的集合。尽管这些关系概念是数学上的定义的，它们可以宽松的映射到传统数据库概念上。表是关系的公认的可视表示；元组类似于行的概念。关系模型的基本原理是信息原理：所有信息都表示为关系中的数据值。所以，关系变量在设计时刻是相互无关联的；反而，设计者在多个关系变量中使用相同的域，如果一个属性依赖于另一个属性，则通过参照完整性来强制这种依赖性。

关系数据库，是建立在关系数据库模型基础上的数据库，借助于集合代数等概念和方法来处理数据库中的数据，同时也是一个被组织成一组拥有正式描述性的表格，该形式的表格作用的实质是装载着数据项的特殊收集体，这些表格中的数据能以许多不同的方式被存取或重新召集而不需要重新组织数据库表格。关系数据库的定义造成元数据的一张表格或造成表格、列、范围和约束的正式描述。每个表格包含用列表示的一个或更多的数据种类。每行包含一个唯一的数据实体，这些数据是被列定义的种类。当创建一个关系数据库的时候，你能定义数据列的可能值的范围和可能应用于那个数据值的进一步约束。

### 2.1.3 事务与并发控制

#### 2.1.3.1 事务

事务象征内执行工作单元的数据库管理系统中独立于其他事务的连贯和可靠的方式针。一个事务通常代表数据库中的任何变化。数据库环境中的事务有两个主要目的：为了提供可靠的工作单元，允许从故障中正确恢复，并保持数据库一致，即使在系统故障的情况下，执行停止，数据库上的许多操作仍未完成，状态不清楚。在同时访问数据库的程序之间提供隔离。如果没有提供这种隔离，程序的结果可能是错误的。根据定义，数据库事务必须是原子的，一致的，隔离的和持久的。数据库从业者通常使用缩写ACID来引用数据库事务的这些属性。交易提供了“全或无”的命题，指出在数据库中执行的每个工作单元必须完整或完全没有任何影响。此外，系统必须将每个事务与其他事务隔离开来，结果必须符合数据库中的现有约束，并且成功完成的事务必须写入持久存储。

将数据完整性视为最重要的数据库和其他数据存储通常包括处理事务以维护数据完整性的能力。单个事务由一个或多个独立的工作单元组成，每个读取和或写入数据库或其他数据存储的信息。当发生这种情况时，确保所有此类处理使数据库或数据存储处于一致状态时，通常很重要。

#### 2.1.3.2 并发控制

在信息技术和计算机科学领域，特别是在计算机编程，操作系统，多处理器和数据库领域，并发控制可以确保并发操作的正确结果，同时尽快获得这些结果。计算机系统，软件和硬件都由模块或组件组成。每个组件被设计为正确地操作，即遵守或符合某些一致性规则。当通过消息传递或通过共享访问的数据同时进行操作的组件时，某个组件的一致性可能被另一个组件违反。并发控制的一般领域提供了规则，方法，设计方法和理论以保持组件在交互时并发运行的一致性，从

而保持整个系统的一致性和正确性。将并发控制引入系统意味着应用操作约束，这通常会导致某些性能下降。操作一致性和正确性应尽可能高效地实现，而不会将性能降低到合理的水平以下。与更简单的顺序算法相比，并发控制可能需要大量额外的复杂性和并发算法的开销。例如，并发控制失败可能导致数据损坏，从而导致读取或写入操作受损。

在并发控制数据库管理系统，其它事务对象和相关的分布式应用程序（例如，网格计算和云计算）确保数据库事务被执行同时在不违反各数据库的数据完整性。因此，并发控制是任何系统中的正确性的基本要素，其中两个数据库事务或更多的数据库事务或多个时间重叠执行，可以访问相同的数据，例如实际上在任何通用数据库系统中。因此，自20世纪70年代初出现数据库系统以来，已经积累了大量相关研究。上述参考文献中提出了一个完善的数据库系统并发控制理论：序列化理论，可以有效地设计和分析并发控制方法和机制。中提出了一种用于抽象数据类型原子事务并发控制的替代理论。

为了确保正确性，一个DBMS通常可以保证只有序列化的交易时间表中产生，除非串行化是故意轻松提高性能，但只有在应用程序的正确性不受损害的情况。为了在失败（中止）事务（由于许多原因总是可能发生）的情况下维护正确性，计划也需要具有可恢复性属性。DB MS还保证不会导致提交的事务的影响，并且不会中止任何影响（回滚）交易保留在相关数据库中。整体交易表征通常由以下ACID规则汇总。随着数据库已经成为分布，或在分布式环境中进行合作需要，并发控制机制有效配置受到格外的关注。下面是并发控制的主要方法：

### 9. 锁定

通过分配给数据的锁控制对数据的访问。对另一个事务锁定的数据项的事务的访问可能被阻止，直到锁定释放。

### 10. 串行化

检查计划图中的周期并通过中止来破坏它们。

### 11. 时间戳排序

为事务分配时间戳，并按时间戳顺序控制或检查对数据的访问。

### 12. 承诺排序

控制或检查交易的提交事件的时间顺序与其各自的优先顺序兼容。

### 13. 多分支并发控制

通过在每次写入对象时生成新版本的数据库对象，并根据调度方式允许事务对每个对象的最后相关版本的读取操作来增加并发性和性能。

### 14. 索引并发控制

将访问操作同步到索引，而不是用户数据。专业方法提供了显著的性能提升。

每个事务都为其访问的数据维护一个私有工作空间，只有在事务提交之后，其更改的数据才会在事务外部变得可见。这种模式在许多情况下提供了不同的并发控制行为，并带来好处。

#### 2.1.4 NoSQL数据库系统

NoSQL，泛指非关系型的数据库。随着互联网web2.0网站的兴起，传统的关系数据库在应付web2.0网站，特别是超大规模和高并发的SNS类型的web2.0纯动态网站已经显得力不从心，暴露了很多难以克服的问题，而非关系型的数据库则由于其本身的特点得到了非常迅速的发展。NoSQL数据库的产生就是为了解决大规模数据集合多重数据种类带来的挑战，尤其是大数据应用难题。虽然NoSQL的流行与火起来才短短一年的时间，但是不可否认，现在已经开始了第二代运动。尽管早期的堆栈代码只能算是一种实验，然而现在的系统已经更加的成熟、稳定。不过现在也面临着一个严酷的事实：技术越来越成熟——以至于原来很好的NoSQL数据存储不得不进行重写，也有少数人认为这就是所谓的2.0版本。该工具可以为大数据建立快速、可扩展的存储库。

对于NoSQL并没有一个明确的范围和定义，但是他们都普遍存在下面一些共同特征：

- 1.不需要预定义模式：不需要事先定义数据模式，预定义表结构。数据中的每条记录都可能有不同的属性和格式。当插入数据时，并不需要预先定义它们的模式。

- 2.无共享架构：相对于将所有数据存储的存储区域网络中的全共享架构。NoSQL往往将数据划分后存储在各个本地服务器上。因为从本地磁盘读取数据的性能往往好于通过网络传输读取数据的性能，从而提高了系统的性能。

- 3.弹性可扩展：可以在系统运行的时候，动态增加或者删除结点。不需要停机维护，数据可以自动迁移。

- 4.分区：相对于将数据存放于同一个节点，NoSQL数据库需要将数据进行分区，将记录分散在多个节点上面。并且通常分区的同时还要做复制。这样既提高了并行性能，又能保证没有单点失效的问题。

- 5.异步复制：和RAID存储系统不同的是，NoSQL中的复制，往往是基于日志的异步复制。这样，数据就可以尽快地写入一个节点，而不会被网络传输引起迟延。缺点是并不总是能保证一致性，这样的方式在出现故障的时候，可能会丢失少量的数据。

6.BASE: 相对于事务严格的ACID特性, NoSQL数据库保证的是BASE特性。BASE是最终一致性和软事务。

#### 2.1.4.1 OrientDB介绍

OrientDB是一种NoSQL数据库, 虽然它不是关系数据库系统, 但是它底层的存储引擎支持事务。所以本系统在后面就直接用的这个这个存储引擎减少系统的开发时间, 同时也增加系统的稳定性。

## 2.2 分布式数据库

### 2.2.1 分布式数据库概述

分布式数据库是一个数据库, 其中存储设备没有全部连接到一个共同的处理器。它可以存储在位于相同物理位置的多台计算机中; 或者可以分散在互连计算机的网络上。与其中处理器紧密耦合并构成单个数据库系统的并行系统不同, 分布式数据库系统由松散耦合的站点组成, 共享没有物理组件。

### 2.2.2 分布式数据库的特点

#### 1.数据独立性

分布式数据库系统中, 每个系统节点都具有数据独立性。数据独立性包括了数据的逻辑独立性和物理独立性, 逻辑独立性是指用户的应用程序与数据库的逻辑结构是相互独立的, 即当数据的逻辑结构改变时, 用户程序也可以不变; 物理独立性是指用户的应用程序与存储在磁盘上的数据库中数据是相互独立的。即, 数据在磁盘上怎样存储由 DBMS 管理, 用户程序不需要了解, 这样当数据的物理存储改变了, 应用程序不用改变。

#### 2.分布透明性

分布式数据库还具有分布透明性, 该特性使用户不必关心数据的逻辑分片, 不必关心数据物理位置分布的细节及局部场地上数据库支持哪种数据模型。分布透明性的优点显而易见; 有了分布透明性, 用户的应用程序书写起来就如同数据没有分布一样, 当数据从一个场地移到另一个场地时, 不必改写应用程序, 当增加某些数据的重复副本时, 也不必改写应用程序。

#### 3.节点自治性

构成分布式数据库的每一个物理数据库都是独立的, 可以由数据库管理员分别进行管理, 如同一个非网络本地数据库。

#### 4.复制透明性

用户不用关心数据库在网络中各个节点的复制情况。被复制的数据,一般更新都由系统自动完成,在分布式数据库系统中,可以把一个场地的数据复制到其他场地存放,应用程序可以使用复制到本地的数据在本地完成分布式操作,避免通过网络传输数据,从而提高了系统的运行和查询效率。但是对于复制数据的更新操作,就要涉及到对所有复制数据的更新。

### 5.易于扩展性

在大多数网络环境中,单个数据库服务器最终会不满足使用。如果服务器软件支持透明的水平扩展,那么就可以增加多个服务器来进一步分布数据和分担处理任务。

## 2.2.3 数据分布和负载均衡

分布式系统如何拆解输入数据,将数据分发到不同的机器中。下面将介绍几种不同的数据分布方式。

### 2.2.3.1 哈希分布

哈希方式是最常见的数据分布方式,其方法是按照数据的某一特征计算哈希值,并将哈希值与机器中的机器建立映射关系,从而将不同哈希值的数据分布到不同的机器上。只要哈希散列性比较好,数据就能均匀到分发到不同机器中。同时,需要管理的元信息很少,只需要知道哈希函数和模(一般是机器总数)。但是有个明显的缺点,扩展性很差。如果我想把集群规模扩大,可能所有的数据需要被重新迁移。针对哈希方式扩展性差的问题,一种思路是不再简单的将哈希值与机器做除法取模映射,而是将对应关系作为元数据由专门的元数据服务器管理。访问数据时,首先计算哈希值并查询元数据服务器,获得该哈希值对应的机器。同时,哈希值取模个数往往大于机器个数,这样同一台机器上需要负责多个哈希取模的余数。不过,需要管理的元数据就多了。

### 2.2.3.2 顺序分布

按数据范围分布是另一个常见的数据分布式,将数据按特征值的值域范围划分为不同的区间,使得集群中每台(组)服务器处理不同区间的数据。对于上面哈希方式某个用户数据特别多我们就可以通过采用数据范围分布解决,动态划分范围空间,实现负载均衡。按数据范围分布数据需要记录所有的数据分布情况。一般的,往往需要使用专门的服务器在内存中维护数据分布信息,称这种数据的分布信息为一种元数据。实际工程中,一般也不按照某一维度划分数据范围,而是使用全部数据划分范围,从而避免数据倾斜的问题。使用范围分布数据的方式的最大优

点就是可以灵活的根据数据量的具体情况拆分原有数据区间, 拆分后的数据区间可以迁移到其他机器, 一旦需要集群完成负载均衡时, 与哈希方式相比非常灵活。另外, 当集群需要扩容时, 可以随意添加机器, 而不限为倍增的方式, 只需将原机器上的部分数据分区迁移到新加入的机器上就可以完成集群扩容。而缺点就是元数据可能会成为瓶颈。

### 2.2.3.3 一致性哈希

一致性哈希的基本方式是使用一个哈希函数计算数据或数据特征的哈希值, 令该哈希函数的输出值域为一个封闭的环, 即哈希函数输出的最大值是最小值的前序。将节点随机分布到这个环上, 每节点负责处理从自己开始顺时针至下一个节点的全部哈希值域上的数据。

一致性哈希的优点在于可以任意动态添加、删除节点, 每次添加、删除一个节点仅影响一致性哈希环上相邻的节点。但也有很明显的缺点, 随机分布节点的方式使得很难均匀的分布哈希值域, 尤其在动态增加节点后, 即使原先的分布均匀也很难保证继续均匀, 由此带来的另一个较为严重的缺点是, 当一个节点异常时, 该节点的压力全部转移到相邻的一个节点, 当加入一个新节点时只能为一个相邻节点分摊力。为此, 一种改进是引入“虚节点”的概念。系统初始时就创建许多虚节点, 虚节点的个数一般远大于未来集群中机器的个数, 将虚节点均匀分布到一致性哈希值域环上, 其功能与基本一致性哈希算法中的节点相同。为每个节点分配若干虚节点。操作数据时, 首先通过数据的哈希值在环上找到对应的虚节点, 进而查找元数据找到对应的真实节点。这样, 一旦某个节点不可用, 该节点将使得多个虚节点不可用, 从而使得多个相邻的真实节点负载失效节点的压里。同理, 一旦加入一个新节点, 可以分配多个虚节点, 从而使得新节点可以负载多个原有节点的压力, 从全局看, 较容易实现扩容时的负载均衡。

### 2.2.3.4 负载均衡

在计算中, 负载平衡可以改善多个计算资源(如计算机, 计算机集群, 网络连接, 中央处理单元或磁盘驱动器)之间的工作负载分配。负载平衡旨在优化资源使用, 最大化吞吐量, 最小化响应时间, 并避免任何单一资源的过载。使用负载均衡而不是单个组件的多个组件可以通过冗余来增加可靠性和可用性。负载平衡通常涉及专用软件或硬件, 如多层交换机或域名系统服务器进程。有很多种负载均衡的算法可用, 下面是常用的一些算法:

#### 1. 轮询法

轮询法是负载均衡中最常用的算法，它容易理解也容易实现。轮询法是指负载均衡服务器将客户端请求按顺序轮流分配到后端服务器上，以达到负载均衡的目的。

### 2.加权轮询法

简单的轮询法并不考虑后端机器的性能和负载差异。给性能高、负载低的机器配置较高的权重，让其处理较多的请求；而性能低、负载高的机器，配置较低的权重，让其处理较少的请求。加权轮询法可以很好地处理这一问题，它将请求顺序且按照权重分派到后端服务器。

### 3.最小连接数法

即使后端机器的性能和负载一样，不同客户端请求复杂度不一样导致处理时间也不一样。最小连接数法根据后端服务器当前的连接数情况，动态地选取其中积压连接数最小的一台服务器来处理当前的请求，尽可能提高后端服务器的利用效率，合理地将请求分流到每一台服务器。为什么根据连接数可以合理地利用服务器处理请求呢？考虑一个客户端请求的处理逻辑较复杂，需要服务器的处理时间较长，由于客户端需要等待服务器的响应，故需要保持与服务器的连接，这样一来，客户端就需要与服务器保持较长时间的连接。

### 4.随机法

随机法也很简单，就是随机选择一台后端服务器进行请求的处理。由于每次服务器被挑中的概率都一样，客户端的请求可以被均匀地分派到所有的后端服务器上。

### 5.源地址哈希法

源地址哈希的思想是根据获取客户端的IP地址，通过哈希函数计算得到一个数值，用该数值对服务器列表的大小进行取模运算，得到的结果便是客户端要访问服务器的序号。采用源地址哈希法进行负载均衡，同一IP地址的客户端，当后端服务器列表不变时，它每次都会映射到同一台后端服务器进行访问。如果后端服务器是一缓存系统，当后端服务器增加或者减少时，采用简单的哈希取模的方法，会使得命中率大大降低，这个问题可以采用一致性哈希的方法来解决。

## 2.2.4 数据复制和一致性

### 2.2.4.1 复制的概述

复制几乎是构成分布式系统，尤其是分布式存储和分布式数据库的关键所在，那么本文就来综合谈论下复制技术。



简单说复制本身可以分为同步复制和异步复制，两者的区别在于前者需要等待所有副本返回写入确认，而后者只需要一个返回确认即可。从用途上，复制可以分为两类，一类用于确保不同副本的表现行为一致，另一类则用于允许不同副本之间的数据差异，先来看看前者。有若干种手段用于确保不同副本之间的状态一致。

第一种叫主从复制。主从之间可以是异步复制，也可以是同步复制。例如MySQL，在默认情况下采用异步复制，异步复制容易引起数据丢失，比如主从结构中，主节点的写入请求还没有复制到从节点就挂了，当从节点被选为新的主节点之后，在这之前写入没有同步的数据就会被丢失。即便采用了同步复制，也只能提供相对较弱的基本保障，考虑如下情形：主接收写入请求然后发到从节点，从节点写入成功后并发送确认给主，如果此时主节点正准备发送确认信息给客户端时挂了，那么客户端就会认为提交失败，可是从节点已经提交成功了，如果这是从节点被提升为主，那么就出现问题了。在主从复制结构里，异步复制相比同步复制具备更高的吞吐量和更低延迟，因此，结合同步和异步复制是一个常见选项。第三种则引入分区一致性算法Paxos，又叫复制状态机。复制状态机在数据库开发的很多领域都可以遇到，比如Google Megastore，针对不同分区的每次提交采用复制状态机来确保每个分区的全局事务提交时序；Google Spanner在单分区内也采用了类似的设计。复制状态机主要用于满足两点需求：客户端在面对任何一个副本时都具备完全一致的访问行为；每个副本在执行请求时都需要按照完全一致的顺序来进行。

#### 2.2.4.2 一致性和可用性

在理论计算机科学中，CAP定理，又被称作布鲁尔定理，它指出对于一个分布式计算系统来说，不可能同时满足以下三点：

- 1.一致性
- 2.可用性
- 3.容忍网络分区

根据定理，分布式系统只能满足三项中的两项而不可能满足全部三项。理解CAP理论的最简单方式是想象两个节点分处分区两侧。允许至少一个节点更新状态会导致数据不一致，即丧失了C性质。如果为了保证数据一致性，将分区一侧的节点设置为不可用，那么又丧失了A性质。除非两个节点可以互相通信，才能既保证C又保证A，这又会导致丧失P性质。

CAP理论在互联网界有着广泛的知名度，知识稍微宽泛一点的工程师都会把其作为衡量系统设计的准则。大家都非常清楚地理解了CAP：任何分布式系统在

可用性、一致性、分区容错性方面，不能兼得，最多只能得其二，因此，任何分布式系统的设计只是在三者中的不同取舍而已。

CAP还有一个方面很多人认识不清，那就是放弃一致性其实有隐藏负担，即需要明确了解系统中存在的不变性约束。满足一致性的系统有一种保持其不变性约束的自然倾向，即便设计师不清楚系统中所有的不变性约束，相当一部分合理的不变性约束会自动地维持下去。相反，当设计师选择可用性的时候，因为需要在分区结束后恢复被破坏的不变性约束，显然必须将各种不变性约束一一列举出来，可想而知这件工作很有挑战又很容易犯错。放弃一致性为什么难，其核心还是“并发更新问题”，跟多线程编程比顺序编程难的原因是一样的。

## 2.3 算法和技术

### 2.3.1 分布式负载均衡算法

负载均衡在多节点之间按照一定的策略分发网络或计算处理负载，提供了一种廉价而有效的方法来扩展服务器带宽，增加吞吐量，提高数据处理能力，同时又可以避免单点故障。

负载均衡包括静态负载平衡和动态负载平衡。只是利用系统负载的平均信息，而忽视系统当前的负载状况的方法被称为静态负载均衡；根据系统当前的负载状况来调整任务划分的方法被称为动态负载均衡。目前，静态负载均衡已越来越不能满足需要，动态负载均衡技术有取而代之的趋势。动态均衡技术又可以分为集中式方法和分布式方法，在集中方法中，单个节点负责管理内部整个节点的负载状态信息；分布式方法中，每个节点，通过收集独立构建自己的负载状态信息，然后把负载信息分享给其他节点。

论文提出一种新的分布式负载均衡算法，其为后面系统负载均衡功能的实现提供了详细的理论和架构指导。下面对分布式负载均衡算法的步骤进行详细的说明。

第一步，分布式数据库集群中的节点根据一定的方法选出一个节点作用分布式管理节点。管理节点除了能存储数据，响应用户的数据操作请求以外，还能作为分布式管理节点。分布式管理节点的作用就是为数据库客户端选择正确的后端数据库服务器，作为负载均衡功能的总代理。

第二步，分布式数据库集群中每个服务器节点根据公式5-1得到自己的权重值 $P$ ，然后发送到分布式管理节点存储。其中 $L_c$ 为服务器节点CPU的个数， $L_r$ 为当前服务器总内存。

$$P = L_c * L_r \quad (2-1)$$

第三步，分布式数据库节点每过1秒就根据公式5-2得到自己当前的负载 $S$ ，同时发送到分布式管理节点。其中 $C$ 为当前CPU使用率， $R$ 为当前服务器内存剩余量，单位为兆。

$$S = \begin{cases} 1 & \text{if } C > 0.9 \text{ or } R < 300, \\ 0 & \text{if other.} \end{cases} \quad (2-2)$$

第四步，分布式管理节点根据每个服务器节点的权重排序，然后使其排列成一个圆形。最后一个服务器下一个服务器为第一个服务器，保存在数据库的元数据中。

第五步，遍历数据库的元数据库，依次检查其中的每个服务器节点，检查其当前的负载 $S$ 。如果 $S = 0$ 就返回当前服务器的地址，算法结束，下一次遍历的时候从下一个服务器节点开始检查；如果 $S = 1$ 就跳过这个节点，再检查下一个节点，如此循环，直到算法正确结束或者返回给客户端错误消息。

图2-1示出了负载均衡算法的一个例子。首先，我们给出4个分布式服务器节点VM1到VM4。根据每个节点的CPU和内存情况，计算出其权值，然后排序出一个圆。第一次，我们选择权值最大的节点VM1，检查其当前负载，并不是1，所以返回服务器VM1的地址给客户端，算法结束。第二次算法开始的时候，从节点VM2开始检查，返回VM2的地址，算法结束。依次类推。直到找到一个服务器地址为止。该算法考虑了基于CPU，RAM的每个服务器的基本负载。时间复杂度为线性的，复杂度较低。采用的分布式的负载均衡算法，同时也避免了单点故障问题，为后面的负载均衡功能实现提供了算法理论基础。

## 2.3.2 副本和分布式MVCC技术

### 2.3.2.1 副本的概念

副本指在分布式系统中为数据或服务提供的冗余。对于数据副本指在不同的节点上持久化同一份数据，当出现某一个节点的存储的数据丢失时，可以从副本上读到数据。数据副本是分布式系统解决数据丢失异常的唯一手段。另一类副本是服务副本，指数个节点提供某种相同的服务，这种服务一般并不依赖于节点的本地存储，其所需数据一般来自其他节点。

### 2.3.2.2 副本一致性

分布式系统通过副本控制协议，使得从系统外部读取系统内部各个副本的数据在一定的约束条件下相同，称之为副本一致性。副本一致性是针对分布式系统而言的，不是针对某一个副本而言。分布式系统为了提高可用性，总是不可避免的使用副本的机制，从而引发副本一致性的问题。

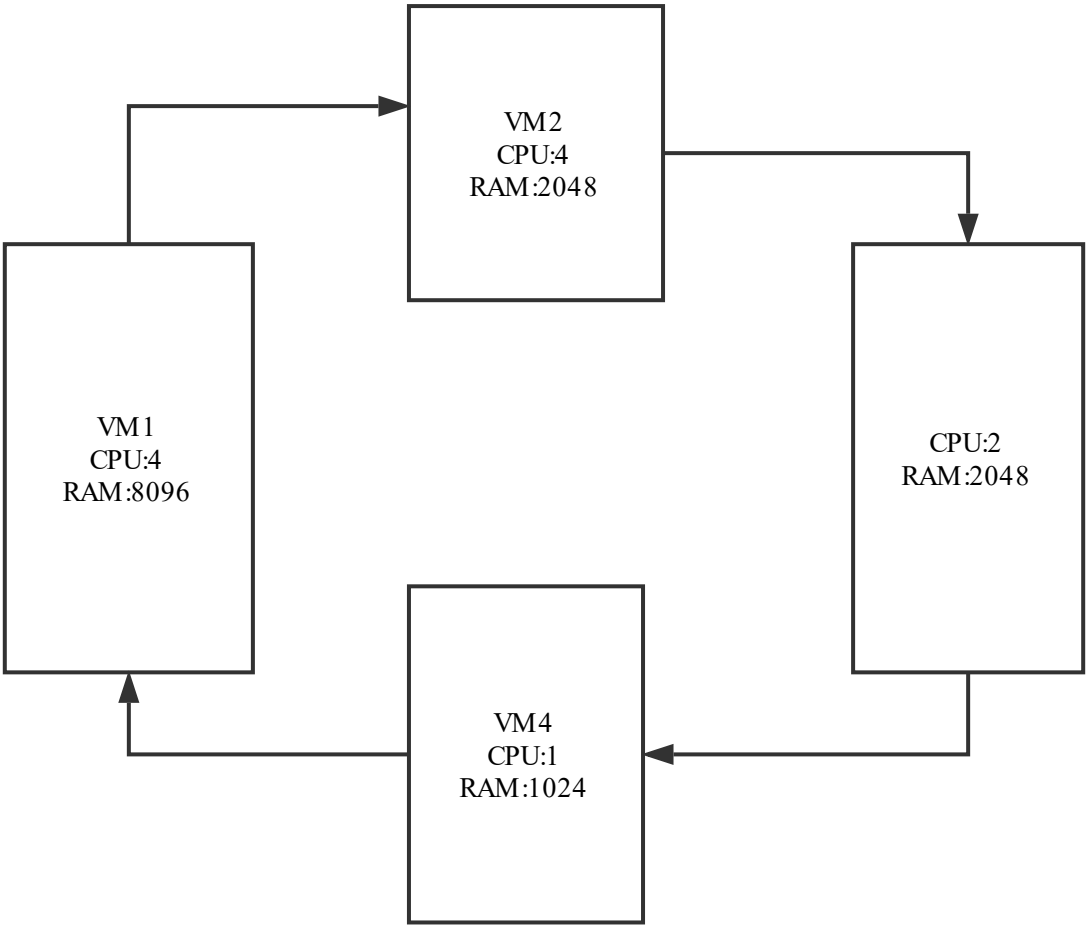


图 2-1 负载均衡示意图

### 2.3.2.3 分布式 MVCC

分布式 MVCC 技术不但能解决分布式副本一致性问题，还能实现分布式事务。假设在一个分布式系统中，更新操作以事务进行，每个事务包括若干个对不同节点的不同更新操作。更新事务必须具有原子性，即事务中的所有更新操作要么同时在各个节点生效，要么都不生效。假设不存在并发的事务，即上一个事务成功提交后才进行下一个事务。

基于 MVCC 的分布式事务的方法为：为每个事务分配一个递增的事务编号，这个编号也代表了数据的版本号。当事务在各个节点上执行时，各个节点只需记录更新操作及事务编号，当事务在各个节点都完成后，在全局元信息中记录本次事务的编号。在读取数据时，先读取元信息中已成功的最大事务编号，再于各个节点上读取数据，只读取更新操作编号小于等于最后最大已成功提交事务编号的操作，并将这些操作应用到基础数据形成读取结果。

## 2.4 本章小结

本节介绍数据库有关的理论知识。包括硬件知识和数据库事务相关理论，以及分布式系统系统有关的算法和协议。另外，本章最后讨论了目前几种成熟的分布式的系统，作为实例学习和学习研究。

## 第三章 系统分析

系统需求分析的工作阶段是软件开发过程的开始阶段，是软件生命周期中的一个重要环节，对于整个软件开发过程以及软件产品的质量是至关重要的，因为构建软件系统最艰难的一个部分就是准确的决定要构建什么，没有其他的概念性工作像建立详细的技术需求这样难，包括所有对人的界面、对机器的接口、以及对其他软件系统的接口。如果做错了会对最终系统造成相当大的损害，并且后期难以调整。而设计是将问题转换为解决方案的创造性过程，系统设计是在系统分析的基础上研究系统如何实现需求中所描述的功能，给出满足需求的解决方案。本章的主要内容是介绍分布式内存数据库系统的需求分析与设计，需求分析主要包括整个系统的需求分析与功能分析，同时也包括了对各个功能模块的实现分析。

### 3.1 系统需求分析

需求阶段的目标是理解客户的问题和需要，需求分析是在综合分析用户对系统提出的一组需求（功能、性能、数据等方面）的基础上，构造一个从抽象到具体的逻辑模型表达软件将要实现的需求，并以“软件需求规格说明书”的形式作为本阶段工作的结果，为下一阶段的软件设计提供设计基础。

#### 3.1.1 系统功能需求

本论文所研究的分布式数据库系统，主要对大数据量进行高效处理，需要系统具备大容量存储和高速率运算。传统的关系数据库在应付日益增长的大量数据时暴露了越来越多难以克服的问题，而现在的各种NOSQL数据虽然支持大量数据的存储，但是对关系的操作又很少。因此，本文结合关系型技术与分布式NOSQL技术，来设计能够对大量数据进行高效处理的分布式数据库系统。作为项目的前期工作，本文所设计的分布式数据库系统的主要功能如下：

##### 1.提供负载均衡

本文所述的分布式系统，为了实现系统中各个数据库节点的负载均衡，需要系统具有良好的分散性，即客户端发送的请求消息能够均匀的发送到各数据库节点。因此本文提出了分布式管理节点，该节点的功能构成本文的分布式管理模块的主要功能，其为客户端选择合适的后端分布式数据库节点，从而达到负载均衡的效果。分布式管理节点并不存储消息，它只存储分布式数据库节点的元数据和负载均衡算法的设置，为客户端选择合适的后端服务器。

## 2.提供数据库功能

站在客户的角度，需要本系统能够提供增加、删除、修改、查询等数据库基本功能操作。本文结合非关系型数据库和关系数据库技术。实现了一种分布式数据库功能。对用户来说，本系统提供的功能接口就是SQL接口，更准确的说，是Mysql接口，这样常用的关系操作都是支持的。同时本系统利用非关系型数据库OrientDB存储，实现数据的高效存储和访问。

## 3.提供管理监控功能

JSQL系统在分布式管理节点和分布式数据库节点的结合下，从数据库的底层实现了数据库的安全审计的功能。在分布式管理节点，实现了审计监控的界面功能，管理员通过管理计算机连接分布式管理节点就可以对数据库进行管理和维护。同时也能进行监控报警功能的设置。

因此，基于对整个分布式数据库系统的功能需求的分析，系统可分为两部分，提供负载均衡功能和管理监控功能的分布式管理节点，提供增加、删除、修改、查询等数据库基本功能操作的数据库节点。具体的，提供的数据库功能主要包括：

1.数据定义：系统提供数据定义语言DDL，供用户定义数据库的三级模式结构、两级映像以及完整性约束和保密限制等约束。DDL主要用于建立、修改数据库的库结构。DDL所描述的库结构仅仅给出了数据库的框架，数据库的框架信息被存放在数据字典中。

2.数据操作：系统提供数据操作语言DML，供用户实现对数据的追加、删除、更新、查询等操作。

3.数据库的运行管理：数据库的运行管理功能是系统的运行控制、管理功能，包括多用户环境下的并发控制、安全性检查和存取限制控制、完整性检查和执行、运行日志的组织管理、事务的管理和自动恢复，即保证事务的原子性。这些功能保证了数据库系统的正常运行。

4.数据组织、存储与管理：系统要分类组织、存储和管理各种数据，包括数据字典、用户数据、存取路径等，需确定以何种文件结构和存取方式在存储级上组织这些数据，如何实现数据之间的联系。数据组织和存储的基本目标是提高存储空间利用率，选择合适的存取方法提高存取效率。

5.数据库的保护：数据库中的数据是信息社会的战略资源，所以数据的保护至关重要。系统对数据库的保护通过4个方面来实现：数据库的恢复、数据库的并发控制、数据库的完整性控制、数据库安全性控制。系统的其他保护功能还有系统缓冲区的管理以及数据存储的某些自适应调节机制等。

6.数据库的维护：这一部分包括数据库的数据载入、转换、转储、数据库的重组重构以及性能监控等功能，这些功能分别由各个使用程序来完成。

7.通信：系统具有与操作系统的联机处理、分时系统及远程作业输入的相关接口，负责处理数据的传送。对网络环境下的数据库系统，还应该包括系统与网络中其他软件系统的通信功能以及数据库之间的互操作功能。

### 3.1.2 系统功能用例

用例图用于描述一组用例、参与者及它们之间的连接关系。一个用例描述了一组动作序列，每一个序列表示系统的外部设施（系统的参与者）与系统本身的交互。本系统的用例图是从参与者使用系统的角度来描述系统中的信息，即站在系统外部查看系统应该具有何种的功能，而不是描述功能在系统内是如何实现的。本文设计的分布式数据库系统的主要功能为新增数据、查询数据、修改数据、删除数据。系统总体的用例图如图3-1所示。

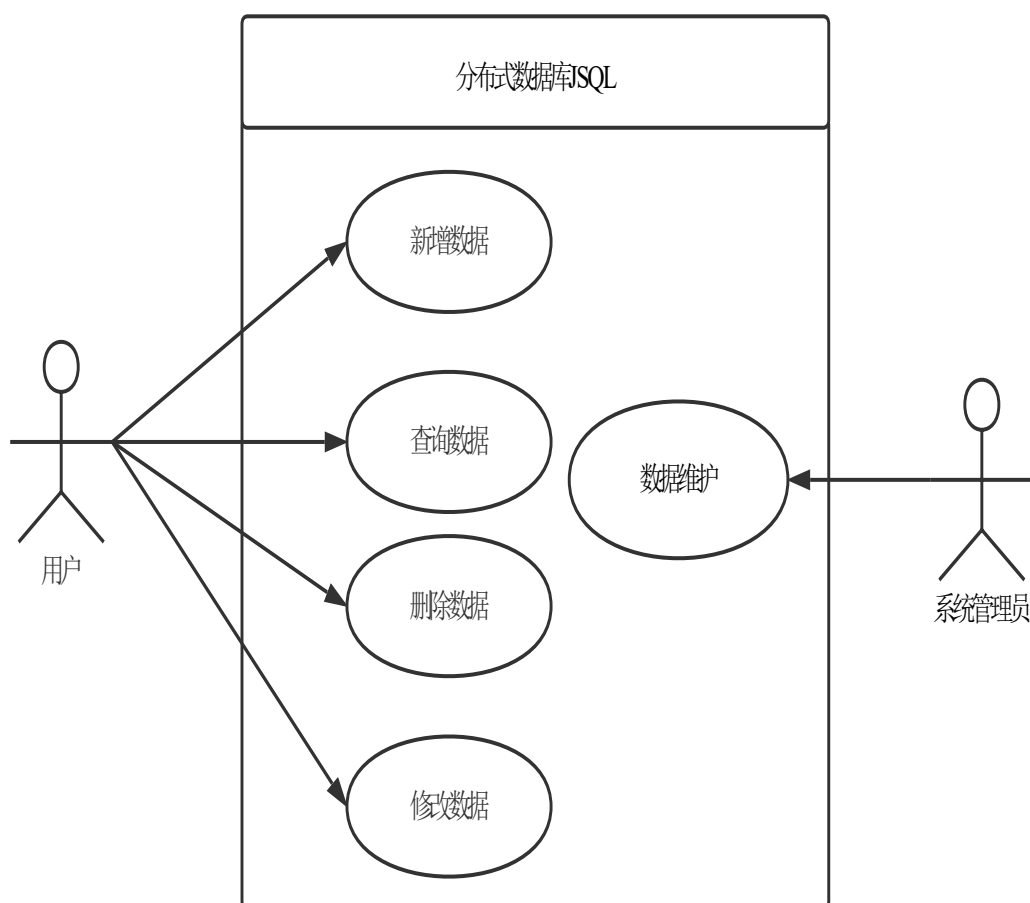


图 3-1 系统用例图



分布式内存数据库的主要功能用例为新增数据、查询数据、修改数据、删除数据等，下面对这几种操作的用例进行说明。

1.新增数据是用户从客户端向系统发起新增数据请求，具体用例见表3-1。

表 3-1 新增数据用例

用例名称	新增数据
用例描述	客户端发送新增数据的请求到分布式数据库
参与者	分布式数据库的用户
前置条件	1、 系统各个模块运行正常。 2、 用户已经成功成功登陆系统。
后置条件	分布式数据库系统能够正确处理客户端请求，成功保存数据。
基本操作	1、用户运行客户端，用户登陆。 2、在客户端上发送新增数据的命令。 3、在客户端上确认发送信息后，请求消息被发送到分布式数据库。 4、数据库存储成功后返回操作成功，如果失败，返回失败原因。
业务规则	如果数据信息已经存在，重复发送命令会增加新的数据

2.数据查询是指利用用户在客户端上输入指定数据标识作为关键字，查询该条数据的基本信息，具体用例见表3-2。

表 3-2 查询数据用例

用例名称	查询数据
用例描述	用户通过客户端发起数据查询的请求
参与者	分布式数据库用户
前置条件	1、 分布式数据库系统各模块运行正常。 2、 数据信息已经存入数据库。 3、 用户已经成功登陆客户端。
后置条件	分布式数据库系统能够处理客户端请求，正确返回用户查询数据。
基本操作	1、 运行客户端，登陆分布式数据库。 2、 在客户端上发送查询数据的命令。 3、 在客户端上确认信息后，请求消息被发送到存储该数据的数据库。 4、 数据库服务器查询成功后返回数据信息，如果失败，返回失败原因。
业务规则	客户端发送查询命令时，携带数据标识字段作为查找关键字。

3.删除数据是指当数据无效时，客户端发送删除信息请求分布式数据库系统删除该条数据，具体用例见表3-3。

4.修改数据是指当数据需要修正时，管理员通过客户端发送修改消息请求，通知分布式内存数据库系统存入新数据，刷新数据变化部分，具体用例见表3-4。

表 3-3 删除数据用例

用例名称	删除数据
用例描述	管理员或者用户通过客户端发起数据删除的请求
参与者	分布式数据库管理员和用户
前置条件	1、 分布式数据库系统运行正常。 2、 数据信息已经存在。 3、 管理员或者用户已成功登陆系统。
后置条件	分布式数据库系统能够正确处理客户端请求，删除该条数据。
基本操作	1、 运行客户端，登陆数据库服务器。 2、 在客户端上发送删除数据库的命令。 3、 在客户端上确认信息后，请求消息被发送到分布式数据库。 4、 数据库处理成功后返回删除成功响应，如果失败，返回失败原因。
业务规则	1、 客户端发送删除命令是，必须要指定关键字。 2、 有权限的用户才能删除数据。

表 3-4 修改数据用例

用例名称	修改数据
用例描述	管理员或者用户通过客户端发起数据修改请求
参与者	分布式数据库管理员和用户
前置条件	1、 分布式数据库系统运行正常。 2、 数据信息已经存在。 3、 管理员或者用户已成功登陆系统。
后置条件	分布式数据库系统能够处理客户端请求，正确修改该条数据发生变化的部分。
基本操作	1、 运行客户端，登陆分布式数据库服务器。 2、 在客户端上发送修改数据的命令。 3、 在客户端上确认信息后，请求消息被发送到分布式数据库。 4、 数据库查询成功后返回修改成功响应，如果失败，返回失败原因。
业务规则	1、 客户端填写数据信息时，必须要指定关键字。 2、 不能修改数据标识，其余修改的值在有效范围内。 3、 有权限的用户才能修改数据。

## 3.2 技术和框架分析

### 3.2.1 系统实现语言选择

本数据库系统选择了JAVA语言和KOTLIN语言作为开发语言，之所以这样选择，主要基于以下几个原因：

- 1.JAVA是跨平台的开发语言，用JAVA开发实现数据库系统，可用实现所有主流平台的数据库部署。
- 2.JAVA是企业开发的首选语言，其安全性比本地语言更高。
- 3.非关系型数据库引擎OrientDB也是用JAVA开发的，为了方便调用。本系统也应该使用同一种语言。
- 4.JAVA易于开发和调试，作为学生时期个人开发的数据库系统，一个人的精力是有限的，如何选择高效的开发工具和语言对我们来说非常重要。

### 3.2.2 网络实现技术分析

所有的服务软件都需要实现网络模块，这样才能连接客服端的请求。JSQL用java语言开发，主要用到的是java的网络开发模块。

网络IO的方式通常分为同步阻塞的BIO、同步非阻塞的NIO和异步非阻塞的AIO<sup>[1]</sup>。

在JDK1.4出来之前，我们建立网络连接的时候采用BIO模式，需要先在服务端启动一个ServerSocket，然后在客户端启动Socket来对服务端进行通信，默认情况下服务端需要对每个请求建立一堆线程等待请求，而客户端发送请求后，先咨询服务端是否有线程相应，如果没有则会一直等待或者遭到拒绝请求，如果有的话，客户端会线程会等待请求结束后才继续执行。

NIO本身是基于事件驱动思想来完成的，其主要想解决的是BIO的大并发问题：在使用同步I/O的网络应用中，如果要同时处理多个客户端请求，或是在客户端要同时和多个服务器进行通讯，就必须使用多线程来处理。也就是说，将每一个客户端请求分配给一个线程来单独处理。这样做虽然可以达到我们的要求，但同时又会带来另外一个问题。由于每创建一个线程，就要为这个线程分配一定的内存空间（也叫工作存储器），而且操作系统本身也对线程的总数有一定的限制。如果客户端的请求过多，服务端程序可能会因为不堪重负而拒绝客户端的请求，甚至服务器可能会因此而瘫痪。

在高性能的I/O设计中，有两个比较著名的模式Reactor和Proactor模式，其中Reactor模式用于同步I/O，而Proactor运用于异步I/O操作。在比较这两个模式之前，我们首先的搞明白几个概念，什么是阻塞和非阻塞，什么是同步和异步,同步和异步是针

对应用程序和内核的交互而言的，同步指的是用户进程触发IO操作并等待或者轮询的去查看IO操作是否就绪，而异步是指用户进程触发IO操作以后便开始做自己的事情，而当IO操作已经完成的时候会得到IO完成的通知。而阻塞和非阻塞是针对进程在访问数据的时候，根据IO操作的就绪状态来采取的不同方式，说白了是一种读取或者写入操作函数的实现方式，阻塞方式下读取或者写入函数将一直等待，而非阻塞方式下，读取或者写入函数会立即返回一个状态值。

Netty的主要目的是建立基于NIO的高性能协议服务器，分离和松散耦合网络和业务逻辑组件。它可能会实现一个广为人知的协议，如HTTP或您自己的特定协议。Netty的线程模型如如4-7所示。Netty是一个非阻塞框架。与阻塞IO相比，这

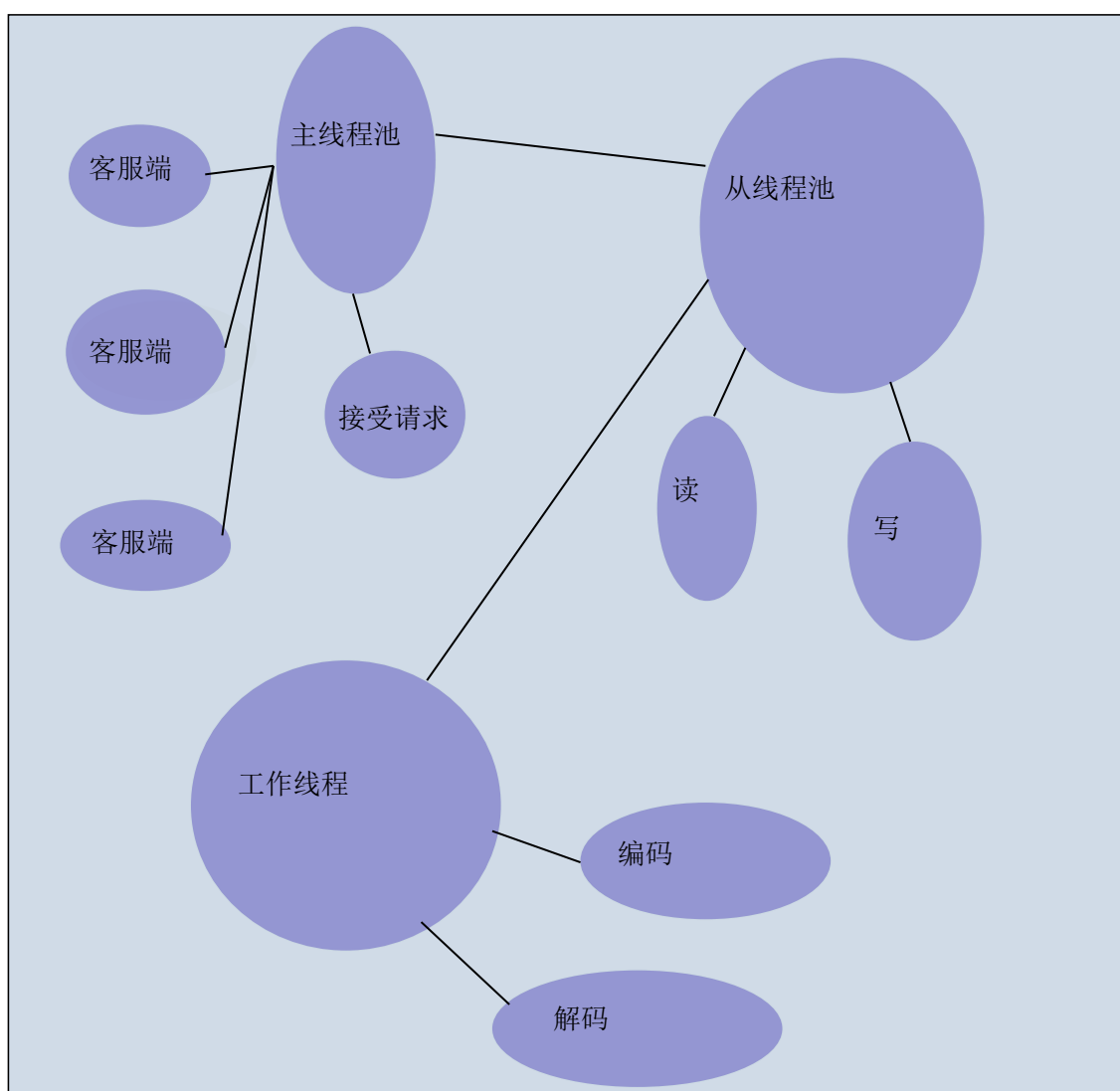


图 3-2 Netty

导致高吞吐量。Netty使用事件驱动的应用程序范例，因此数据处理的流水线是一系列事件处理程序。

因为Netty的这些特效，利用它可以实现一个高性能的网络应用程序，所以本系统的网络模块也是用的Netty来实现的，它直接高并发的客服端访问。

### 3.2.3 通信协议分析

每个服务器和客服端通信都要实现自己的通信协议，考虑到mysql使用的广泛性。jsql采用mysql的通信协议。这样就不用自己开发协议了。在MySQL数据库通信过程开始时，服务器会使用TCP监听一个本地socket 端口或本地socket链接。当一个客户端的连接请求到达，就会执行握手和权限验证。如果验证成功，会话开始。客户端发送消息，服务器会以一个适合该发送命令的数据类型的数据集或一条消息进行回复。当客户端发送完成后，会发送一个特殊的命令，告诉服务器已发送，然后会话结束。通信的基本单位是应用程序包。多个指令可以合成一个包；答复可以包含多个包。MySQL客户端与服务器的交互主要分为两个阶段：握手认证阶段和命令执行阶段：

#### 1.握手认证阶段

握手认证阶段为客户端与服务器建立连接后进行，交互过程如下：

- (a) 服务器发送给客户端握手初始化报文。
- (b) 客服端回复服务器端登陆认证报文。
- (c) 服务器发送给客户端认证结果报文。

#### 2.命令执行阶段

客户端认证成功后，会进入命令执行阶段，交互过程如下：

- (a) 客户端发送服务器执行命令报文。
- (b) 服务器发送给客服端命令执行结果。

MySQL客户端与服务器之间的完整交互过程如图4-8所示。

### 3.2.4 SQL实现分析

结构化查询语言是一种特殊目的编程语言，用于数据库中的标准数据查询语言，IBM公司最早使用在其开发的数据库系统中。1986年10月，美国国家标准协会对SQL进行规范后，以此作为关系式数据库管理系统的标准语言，1987年得到国际标准组织的支持下成为国际标准。不过各种通行的数据库系统在其实践过程中都对SQL规范作了某些编改和扩充。所以，实际上不同数据库系统之间的SQL不能完全相互通用，甚至不同版本间也可能无法互通。

SQL是高级的非过程化编程语言，它允许用户在高层数据结构上工作。它不要求用户指定对数据的存放方法，也不需要用户了解其具体的数据存放方式。而

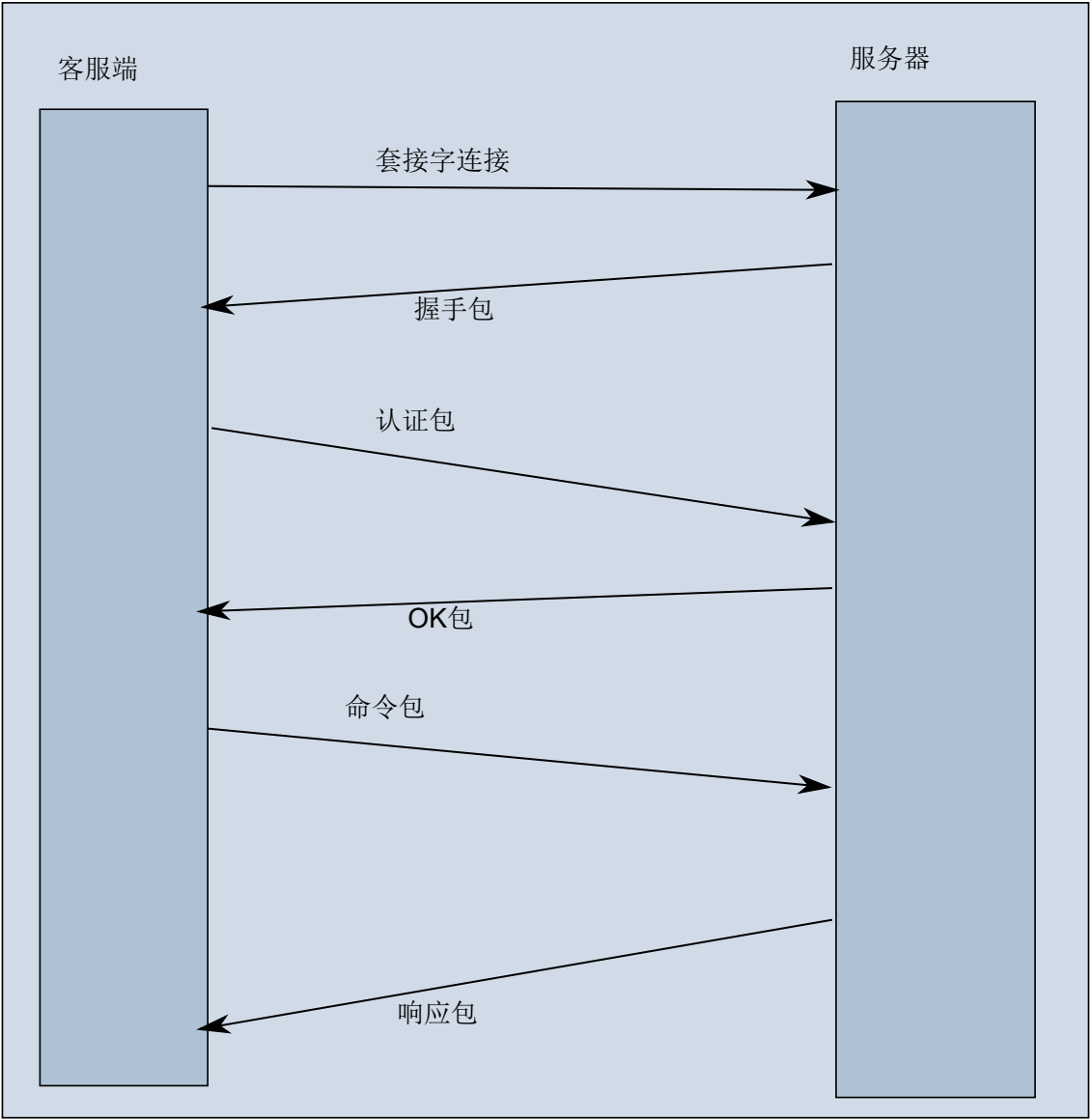


图 3-3 协议交互流程图

它的界面，能使具有底层结构完全不同的数据库系统和不同数据库之间，使用相同的SQL作为数据的输入与管理。

Mysql支持的sql语句和标准的sql语句不全一样，它支持下面这几种语句类型：

- 1.数据定义语句
- 2.数据操作语句
- 3.交易和锁定声明
- 4.复制语句
- 5.准备的SQL语句语法
- 6.复合语句语法
- 7.数据库管理语句
- 8.效用声明

其中每种语句类型又分为很多种sql语句，所以mysql支持的sql语句非常的多，因为本系统选择了兼容mysql的协议，所以我们要解析这些不同的sql语句，本系统利用Druid框架实现了对SQL语句的解析功能。

### 3.2.5 存储引擎分析

存储引擎是存储系统的发动机，直接决定了存储系统能够提供的性能和功能。存储系统的基本功能包括：增、删、读、改，其中，读取操作又分为随机读取和顺序扫描。每种存储引擎底层都基于一种数据结构。比如常用的哈希表结构和B+树结构。本系统所用的OrientDB存储引擎底层就是用的B+树结构。利用非关系数据库OrientDB实现可靠的数据存储。

### 3.2.6 分布式实现分析

虽然现在很多NOSQL数据库都实现了分布式，但是本系统还是利用Hazelcast自己开发分布式功能。在计算中，Hazelcast是基于Java的开源内存数据网格。它也是开发产品的公司的名称。Hazelcast公司由风险投资资助。在一个Hazelcast网格中，数据被一个均匀的节点之间分配计算机集群，从而允许水平缩放的处理和可用存储。备份也分布在节点之间，以防止任何单个节点的故障。Hazelcast通过内存中访问经常使用的数据和可弹性扩展的数据网格，提供中央，可预测的应用程序扩展。这些技术减少了对数据库的查询负载，并提高了速度利用Hazelcast可以轻松开发出各种的分布式应用程序，而且部署非常简单，只需要嵌入它的二进制包就可以直接使用，避免再部署另外的系统来实现分布式，所以本系统选择了它来实现分布式的功能。

### 3.2.7 监控功能实现分析

监控功能主要在分布式管理节点部署，管理员通过连接分布式管理节点，就能对分布式数据库进行监控。对数据进行操作。本系统实现最简单的监控模块，一个监控模块首先要存储所有的日志数据，而且这个数据不能随意的更改，所以我改了Elasticsearch的源代码，让它来存储所有的sql更新记录，然后用可视化的框架来显示出结果。之所以用这个框架，主要是因为它是一种搜索引擎，能够非常快速的检索出我们需要的各种信息，这对于信息审计来说非常的重要。

## 3.3 本章小结

本章对分布式数据库系统进行需求分析。首先，站在用户的角度对系统的需求进行具体的分析，描述系统的功能需求，并结合系统用例图给出功能用例。然后本章分析了系统每个功能模块所需要的技术，每个模块的实现都要用到不同的技术，对每种技术进行了分析。



## 第四章 系统设计

在软件工程中，需求分析之后就是设计阶段。首先，开发者需要对软件系统进行概要设计，即系统设计。概要设计需要对软件系统的设计进行考虑，包括系统的基本处理流程、系统的组织结构、模块划分、功能分配、接口设计、运行设计、数据结构设计和出错处理设计等，为软件的详细设计提供基础。在概要设计的基础上，开发者需要进行软件系统的详细设计。在详细设计中，描述实现具体模块所涉及到的主要算法、数据结构、类的层次结构及调用关系，需要说明软件系统各个层次中的每一个程序(每个模块或子程序)的设计考虑，以便进行编码和测试。应当保证软件的需求完全分配给整个软件。详细设计应当足够详细，能够根据详细设计报告进行编码。只有经过仔细的系统设计，在编码阶段才能提前减少不必要的错误。

### 4.1 系统总体设计

#### 4.1.1 系统架构设计

原型化设计意味着构建一个系统的小版本，通常只有有限的功能，它可用于：

- 1.帮助用户和客户标识系统的关键需求。
- 2.证明设计或方法的可行性。

通常，原型化过程是迭代的：首先构建原型，然后对原型进行评估（利用用户和客户的反馈），考虑如何改变可以改进产品或设计，之后再构建另外一个原型。当开发团队和客户认为解决方案满意时，迭代过程就终止了。由于本文所涉及的分布式数据库系统是作为实验室数据库，并没有做实际上线的考虑，因此采用了原型化模型的软件开发方式开发一个数据库原型。重点针对分布式数据库系统的大容量可扩展性进行设计，主要完成数据库的增加、查询、修改、删除等功能，所以对系统的架构作了简化调整。系统的网络拓扑结构如图4-1所示。在系统网络拓扑图中，主要有下面几种节点：

##### 1. 客服端节点

客服端节点作为连接分布式数据库服务器的代理，发送SQL命令请求到数据库服务器，请求数据，客服端节点可以是原生的Mysql节点，也可以是自己开发的具有负载均衡的JDBC客服端。如果是用Mysql客服端，就可以直接连接分布式数据库节点，可以任意选择一台分布式数据库节点执行数据库操作命令，其中数据

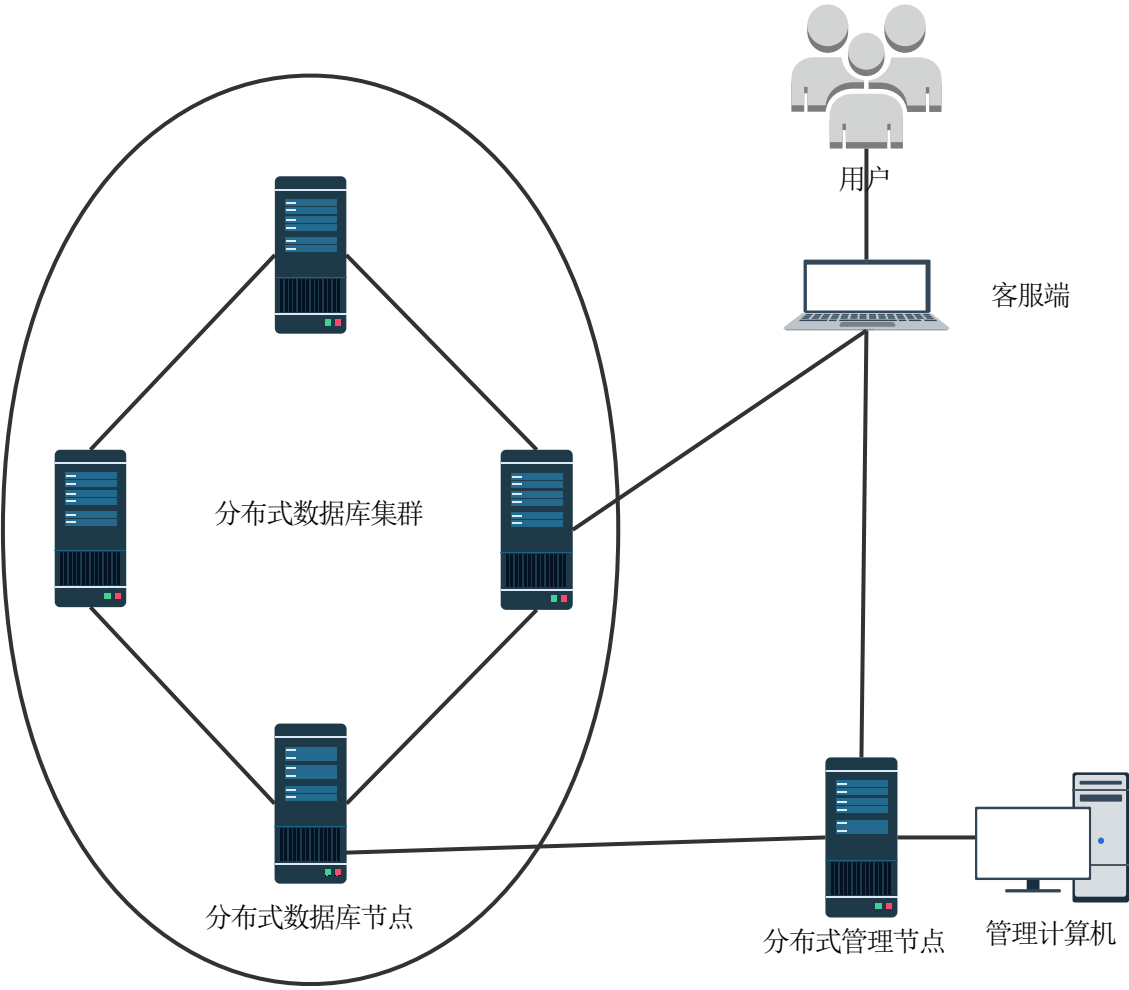


图 4-1 系统网络拓扑结构图

库会自动同步到其他数据库节点。当用自己开发的JDBC客服端的时候，客服端就会首先连接分布式管理节点，得到具体的分布式数据库节点后，才能连接数据库节点执行具体的数据库命令。

## 2. 分布式管理节点

分布式管理节点管理分布式数据库节点的元数据和实现负载均衡算法。管理计算机通过连接分布式管理节点，可以对分布式节点进行管理，对系统进行监控。这样当客服端请求到来的时候，分布式管理节点就可以返回适合的分布式数据库节点，从而达到负载均衡的效果。

## 3. 分布式数据库节点

分布式节点存储具体的数据，数据库系统功能主要在这个节点上面执行，响应客服端的增删改查的命令请求。当客服端连接分布式数据库节点以后，会检查客服端的权限，只有有权限的用户才能执行命令。

## 4. 管理计算机

管理员通过管理计算机管理分布式数据库节点和负载均衡算法。也可以通过管理计算机来查看审计信息，设置监控报警功能。

在系统网络拓扑结构图中，客户端模拟负责发送命令的终端设备，各个分布式数据库节点和分布式管理节点构成了系统的服务器端。其中，分布式管理节点作为中心节点接收所有的控制消息，通过分布式管理节点才能找到分布式数据库节点的IP地址。得到地址以后，客服端再连接数据库节点，得到具体的数据，分布式管理节点通过选举参数，也就是第一次启动的服务器节点，同时也能存储数据库数据。根据原型化模型和系统的网络拓扑结构图，本文所涉及的分布式数据库系统的整体结构是：有两种计算机，一台作为客户端使用，另一台作为服务器使用，根据需求设定服务器端的数据库节点数个数 $N$ 。这 $N$ 个数据库之间相互独立、存储各自的数据信息。它们的数据结构、存储方式都是相同的，由服务器端的分布式管理节点负责把客户端发来的数据分发到对应的数据库节点，因此不同的数据库节点中存放着不同的数据。每一个数据库节点构成了自己的数据库单元，每个数据库单元具有独立处理的能力，它可以执行局部应用。同时，如果这 $N$ 个数据库物理上应用于多台计算机时，每个数据库节点也能通过网络通信子系统执行全局应用。本系统的架构图如图4-2所示。本系统中，客户端模拟真实终端设备。分布式管理节点收到客服端请求以后，返回给客服端数据库节点的地址，然后客服端再连接数据库节点，数据库节点负责对请求消息进行处理，包括增加、删除、修改、查询等操作，并将响应消息返回给客户端。分布式管理节点与各个数据库模块在同一台机器中运行，也可以分布到不同的计算机上面。在系统可靠

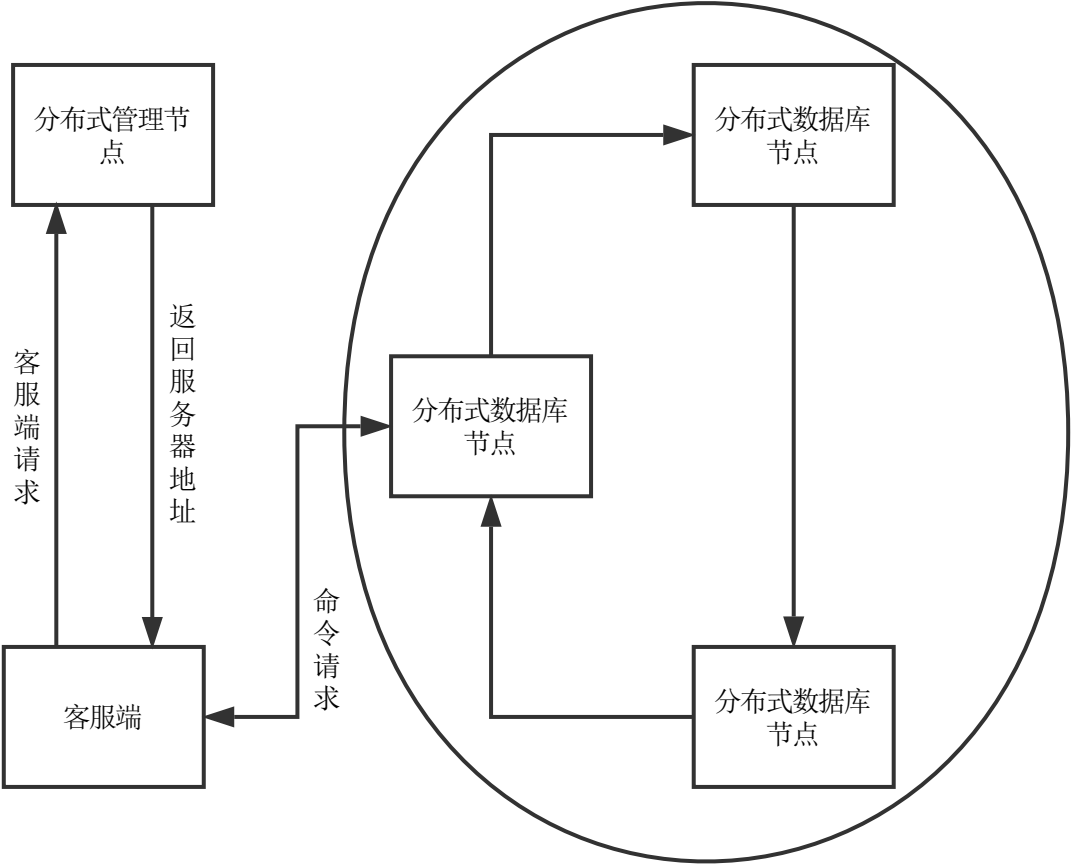


图 4-2 系统总体架构图

性保护方面，当出现某个数据库模块发生故障时，分布式管理节点会实时的更新管理信息，同时其他数据库节点也会同步这台计算机的信息。数据因为在不同的计算机上面都有备份，所以不存储丢失的危险。

4.1.2 系统功能设计

根据系统的需求分析，采用模块化分解结构划分本系统，使系统能够进行增加、删除、查询、修改等数据库基本操作。系统采用传统的C/S架构，分布式管理节点和数据库节点共同组成了服务器端。分布式数据库系统的功能模块分解图如图4-3所示。

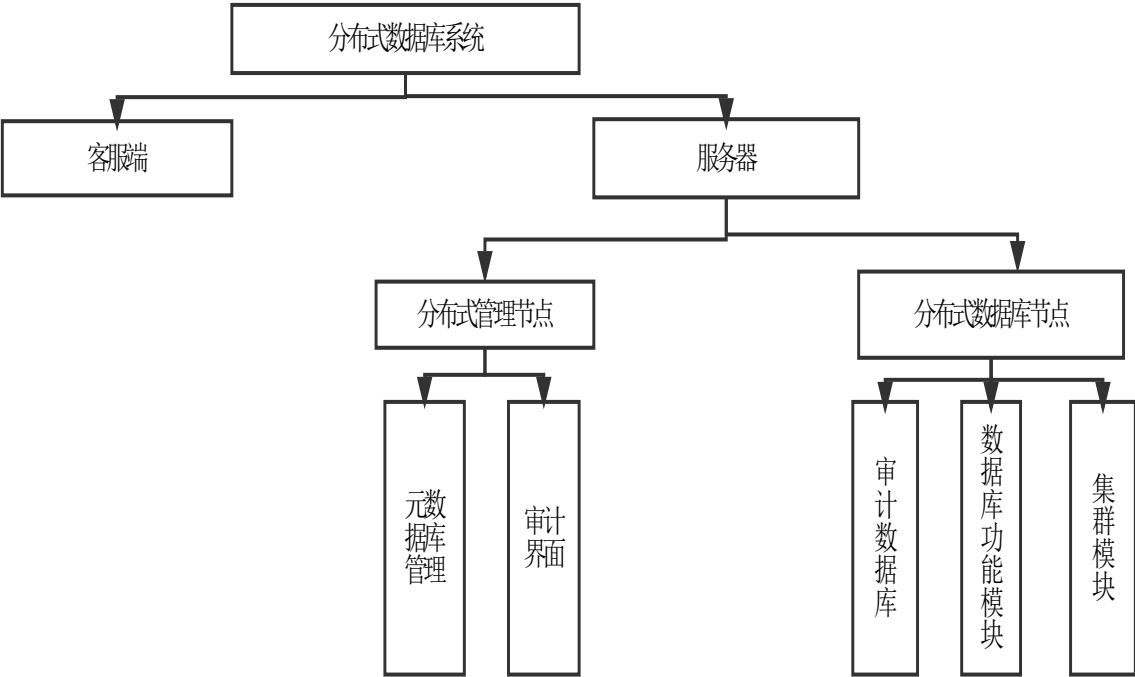


图 4-3 系统总体架构图

以下对图4-3中服务器端各个模块的功能进行简要说明。分布式管理节点按逻辑功能划分为两个子模块，元数据管理模块、审计界面模块。下面分别对两个子模块的功能作介绍。

1.元数据管理模块管理服务器的所有元数据，包括每个数据库节点的 IP地址和端口号。分布式管理节点利用这些元数据来完成分布式的负载均衡算法，为客户端选择合适的分布式数据库节点。

2.审计界面管理模块对管理员使用，它可以让管理员管理所有的数据节点。审计功能除了审计界面以外，还包括分布式数据库节点的审计数据库。只有结合了分布式数据库的审计模块和分布式管理节点的审计模块，管理员才能对分布式系统进行审计管理。

分布式数据库节点由审计数据库模块、数据库功能模块、集群功能模块组成，下面分别对 3 个模块的功能进行介绍。

1. 审计数据库模块用来收集所有的日志信息，作为审计使用。所有的数据库节点在接受到数据更改请求以后，就会把这些日志信息发送到审计数据库。然后分布式管理节点就能利用这个数据为管理员提供审计功能。

2. 数据库功能模块完成具体的数据库功能。为用户提供操作接口，数据库功能模块可以分为网络模块，协议模块，解析模块和存储模块。在收到用户的请求命令以后。数据库功能模块就会对用户返回正确的信息。

3. 集群功能实现每个数据库节点的通信。本系统利用Hazelcast实现了数据库的集群。每个分布式数据库节点的数据都能自动同步。同时，利用分布式多版本并发控制技术解决了数据的一致性问题的。

## 4.2 客服端模块设计

分布式系统需要解决的一个重要问题便是决定数据在集群中的分布策略，好的分布策略应该能将数据均衡地分布到所有节点上，并且还应该能适应集群节点的变化，本文采用的分布式管理节点较好地满足了这两点。分布式管理节点存储所有数据库节点的元数据信息，实现了分布式负载均衡算法。对于分布式系统，系统中每个节点的负载均衡是非常重要的，分布式算法必须具有良好的分散性，使消息能够均匀的转发到各个数据库节点。分布式管理节点实现了负载均衡功能，所以当我们想要使用负载均衡的时候我们必须要先连接管理节点，再连接数据库节点。客服端连接的流程图如图4-4所示。每个流程解释如下：

1. 首先客服端连接到分布式管理节点，管理节点返回给客服端正确的数据库节点的地址。
2. 然后客服端连接到正确的数据库节点。
3. 最后数据库节点返回给客服端具体的数据。

当然我们也可以直接连接分布式数据库节点，其中的数据会自动同步到其他的分布式数据库节点，这样可以直接用Mysql的客服端，减少用户的使用成本。使用Mysql客服端，可以执行几乎所有的Mysql命令。在用户看来，分布式数据库节点就像一个Mysql数据库服务器一样。只是本系统能自动同步每个分布式数据库节点的数据。

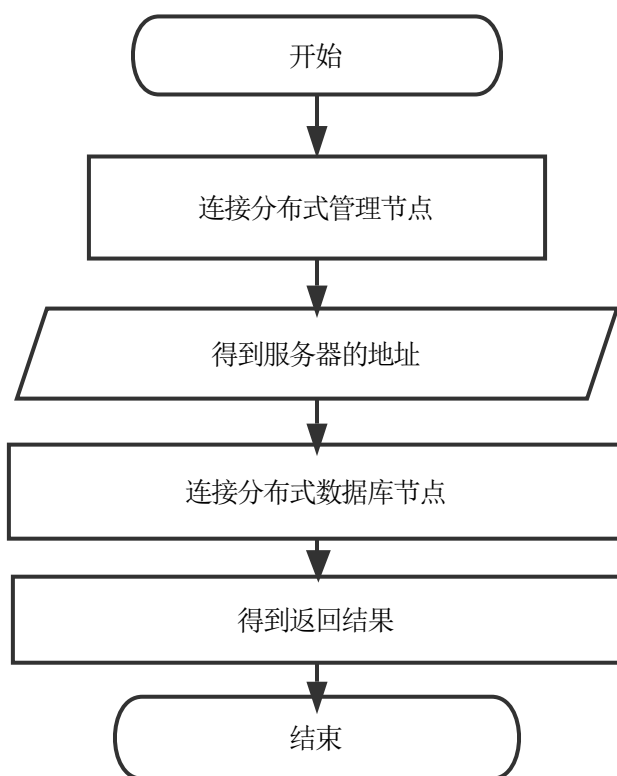


图 4-4 客户端连接流程图

### 4.3 分布式管理模块

要实现负载均衡和其他管理功能，只实现客服端是不够的。还需要一个分布式管理节点。分布式管理模块存储所有数据库节点的元数据和实现负载均衡算法，当启动分布式管理节点的时候，它会去查找所有的数据库节点，然后存储到数据库里面保存。分布式管理节点的启动流程图如图4-5所示。 分布式管理节点和分

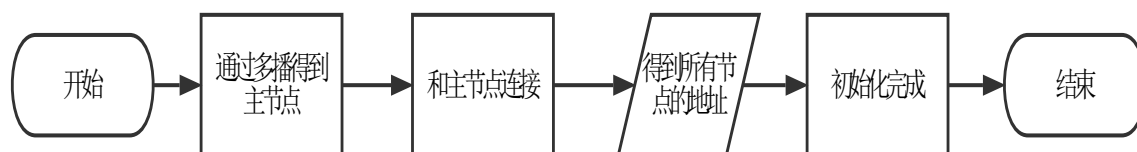


图 4-5 分布式管理节点初始化过程

布式数据库节点一样，都是服务器端的节点，都实现了同一个分布式功能。他们之间可以通过多播通信来交换信息。分布式管理节点得到这些信息以后。就能实现正确的负载均衡算法来选择合适的分布式数据库节点。分布式管理节点初始化成功以后，客服端就可以通过自己开发的基于JDBC的客服端来连接后端的分布式数据库节点，发送数据查询命令。

### 4.4 数据库功能模块详细设计

数据库功能模块主要负责根据命令消息类型来完成对应的业务逻辑处理。本模块利用资源管理模块提供的接口，完成数据的增加、删除、修改、查询等业务功能，并将响应消息返回给客户端。下面设计出每个操作业务的流程。

#### 4.4.1 数据库功能操作流程

##### 4.4.1.1 新增数据过程

第一步：客户端发送新增数据请求消息，消息包到达服务器端的分布式管理节点，由分布式管理节点返回客服端的连接会话信息，客服端得到服务器的地址。第二步：客服端连接具体的数据库节点，发送新增数据请求，请求发送到具体的数据库节点。数据库节点经过网络模块和通信模块，得到请求信息以后，调用数据库引擎的接口，得到具体的数据，返回给客服。



4.4.1.2 数据查询和修改过程

第一步：客户端发送查询和修改数据请求消息，消息包到达服务器端的分布式管理节点，由分布式管理节点返回客服端的连接会话信息，客服端得到服务器的地址。第二步：客服端连接具体的数据库节点，发送新增数据请求，请求发送到具体的数据库节点。数据库节点经过网络模块和通信模块，得到请求信息以后，调用数据库引擎的接口，得到具体的数据，返回给客服。

4.4.1.3 数据删除过程

第一步：客户端发送删除数据请求消息，消息包到达服务器端的分布式管理节点，由分布式管理节点返回客服端的连接会话信息，客服端得到服务器的地址。第二步：客服端连接具体的数据库节点，发送新增数据请求，请求发送到具体的数据库节点。数据库节点经过网络模块和通信模块，得到请求信息以后，调用数据库引擎的接口，得到具体的数据，返回给客服。数据库模块是本系统的主要开发模块，其详细模块图如图4-6所示。下面对每个功能模块进行详细的说明。

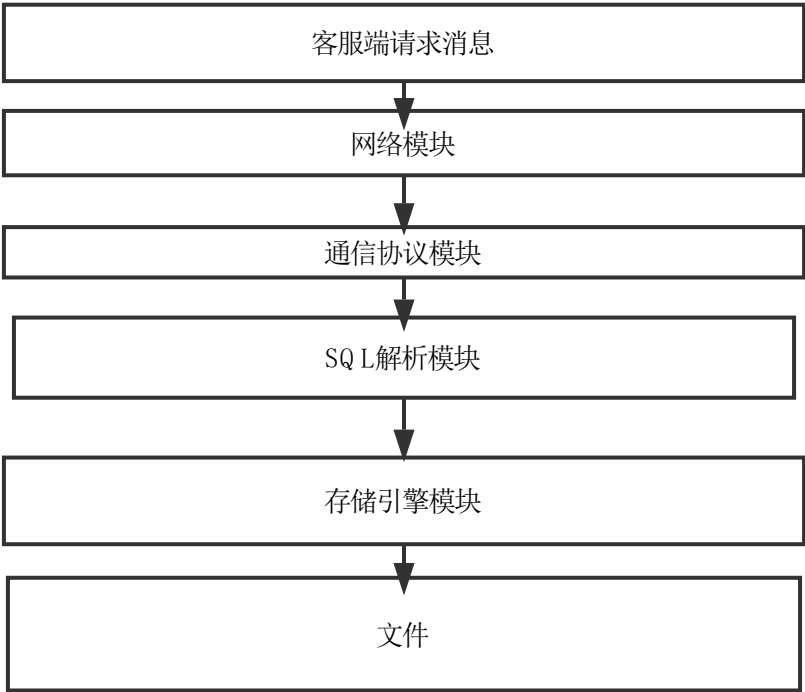


图 4-6 数据库功能模块图

4.4.2 网络模块设计

所有的服务软件都需要实现网络模块，这样才能连接客服端的请求。JSQL用java语言开发，主要用到的是java的网络开发模块。但是直接用java语言开发网络功能非

常的麻烦，所以本文基于Netty来开发直接的网络模块。具体的网络实现，包括线程池的规划都按照Netty的建议来开发。Netty的线程模型如图4-7所示。 根据图4-

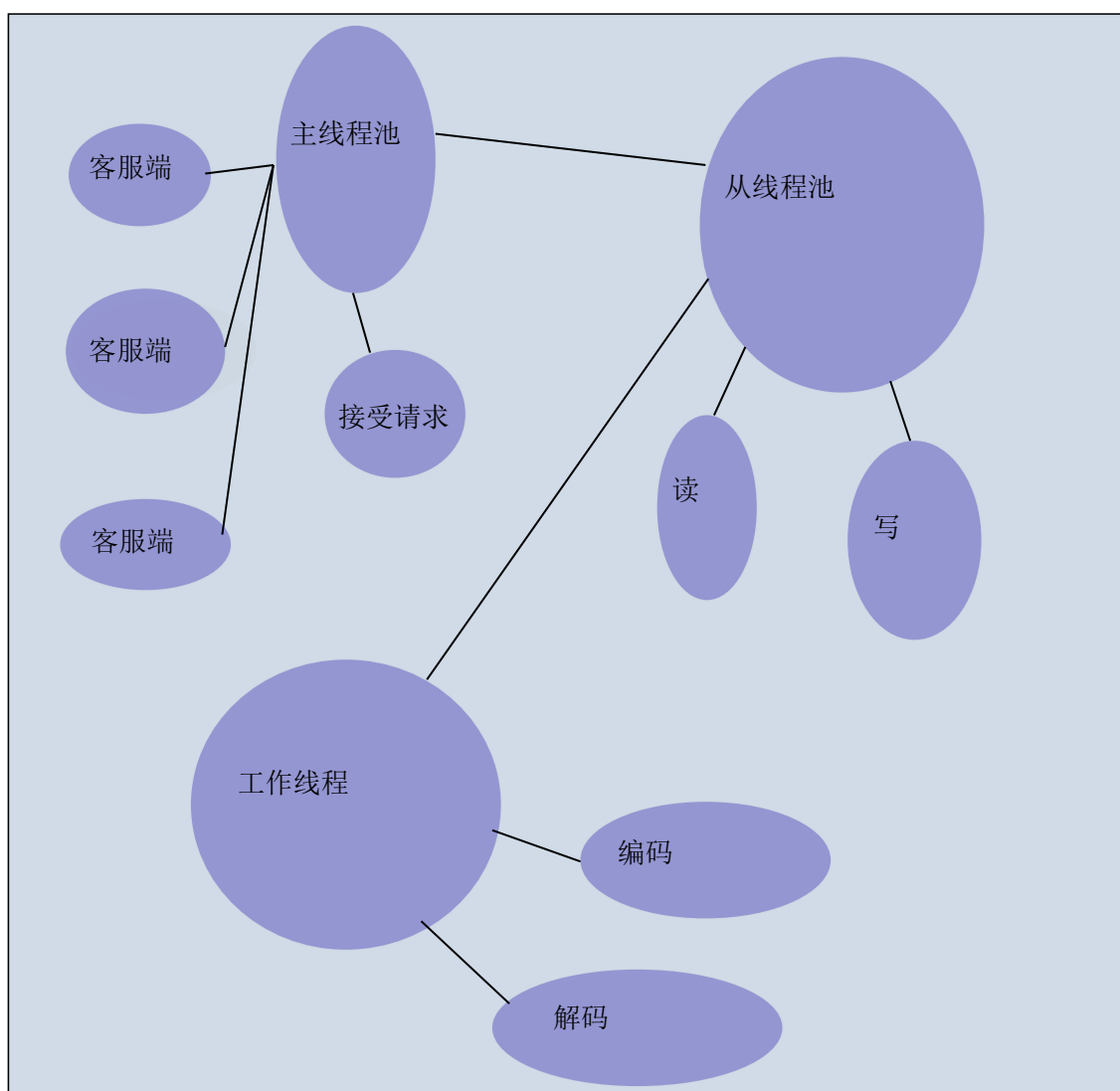


图 4-7 Netty线程模型

7所示，netty主要有三种线程：

- 1.主线程池主要接受客户端的网络连接请求，当主线程接受到客户端的请求以后，就可以把客户端的请求交给从线程池来处理。这样主线程就可以接受更多的其他客户端的连接请求。使得服务器的吞吐量大大的提高。

- 2.从线程从主线程得到客户端的连接以后，执行具体的读取操作。如果需要执行其他的事务逻辑，比如说读取磁盘，那么就需要把这个请求发送给工作线程来处理，这样客户端才不会因为从线程的忙碌而堵塞。

- 3.工作线程主要用来执行时间消耗比较大的任何，比如任何和磁盘文件有关的操作都应该放在工作线程来处理。

通过使用合适的线程模型，服务器具有很高的吞吐量，能接受成千上万的客服端连接。

### 4.4.3 通信协议设计

每个服务器和客服端通信都要实现自己的通信协议，考虑到mysql使用的广泛性。jsql采用mysql的通信协议。这样就不用自己开发协议了。在MySQL数据库通信过程开始时，服务器会使用TCP监听一个本地socket 端口或本地socket链接。当一个客户端的连接请求到达，就会执行握手和权限验证。如果验证成功，会话开始。客户端发送消息，服务器会以一个适合该发送命令的数据类型的数据集或一条消息进行回复。当客户端发送完成后，会发送一个特殊的命令，告诉服务器已发送，然后会话结束。通信的基本单位是应用程序包。多个指令可以合成一个包；答复可以包含多个包。MySQL客户端与服务器的交互主要分为两个阶段：握手认证阶段和命令执行阶段。

#### 1.握手认证阶段

握手认证阶段为客户端与服务器建立连接后进行，交互过程如下：

- (a) 服务器发送给客户端握手初始化报文。
- (b) 客服端回复服务器端登陆认证报文。
- (c) 服务器发送给客户端认证结果报文。

#### 2.命令执行阶段

客户端认证成功后，会进入命令执行阶段，交互过程如下：

- (a) 客户端发送服务器执行命令报文。
- (b) 服务器发送给客服端命令执行结果。

MySQL客户端与服务器之间的完整交互过程如图4-8所示。

每个报文分为报文头和报文数据两部分，其中报文头占用固定的4个字节，报文数据长度由报文头中的长度字段决定。报文头后面三个字节用于标记当前请求报文的实际数据长度值，以字节为单位，最大值为0xFFFFFFFF，即接近16 MB大小(比16MB少1个字节)。除了报文长度还有报文序列号，在一次完整的请求和响应交互过程中，用于保证报文顺序的正确，每次客户端发起请求时，序号值都会从0开始计算。每个报文后面的字节就是报文数据，报文数据用于存放请求的内容及响应的数据，长度由报文头中的长度值决定。

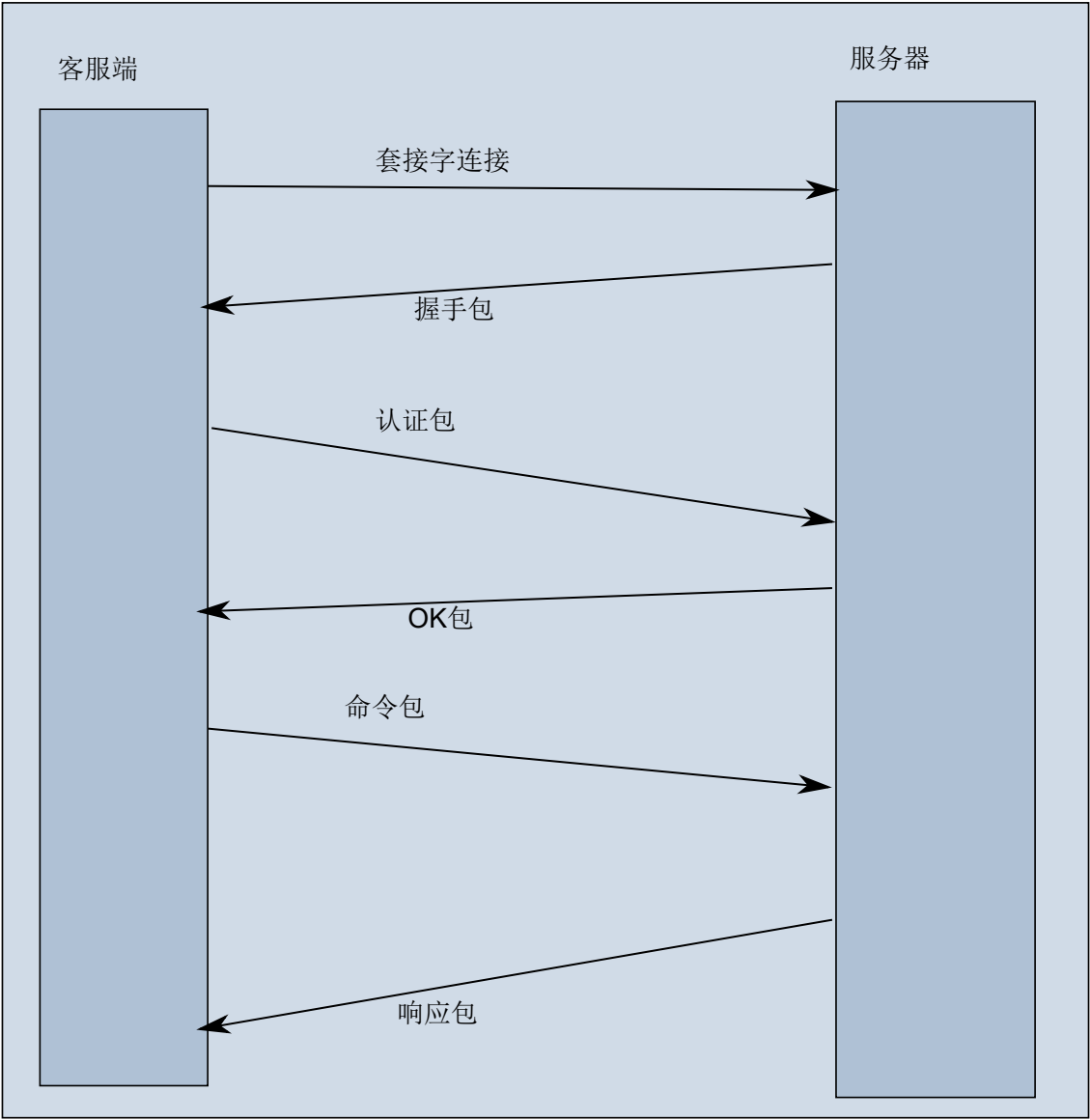


图 4-8 协议交互流程图

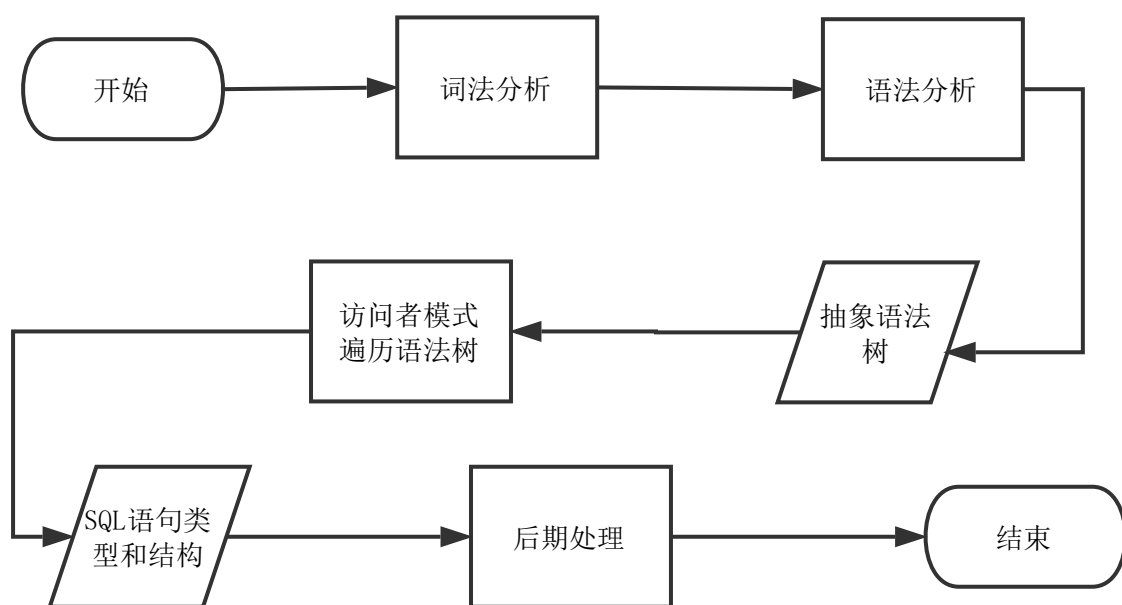


图 4-9 SQL解析流程图

#### 4.4.4 SQL引擎设计

本文基于成熟的开源框架Druid 来实现自己的解析模块，解析流程如图4-9所示。SQL引擎层从协议层解析到语句以后，就要对这个语句进行解析，才能交给下面的存储引擎处理具体的请求。解析模块首先对语句进行词法分析和语法分析，得到抽象语法树，然后用访问者模式去遍历抽象语法树，得到我们需要的数据结构。这个结构被封装成类，每种语句都有不同的类对应。得到语句类型以后，我们就可以对他进行具体的分析和处理。最后交个存储引擎层。

#### 4.4.5 存储引擎设计

存储引擎是存储系统的发动机，直接决定了存储系统能够提供的性能和功能。存储系统的基本功能包括：增、删、读、改，其中，读取操作又分为随机读取和顺序扫描。每种存储引擎底层都基于一种数据结构。比如常用的哈希表结构和B+树结构。本系统采用了一种NoSQL数据库引擎，这样可以结合关系数据库和非关系型数据库的优点。在OrientDB这个存储引擎基础之上，封装成关系型的操作。完成关系型表和NoSQL数据库的转化。对上一层来说，我们提供了关系型存储引擎的接口调用。在存储引擎的底层，我们调用OrientDB的接口来完成具体的功能。这样能结合关系型操作的便利和非关系型数据库的优点。

## 4.5 集群架构详细设计

要实现集群功能，肯定要用到网络功能，还要考虑各种不可靠的因素。为了系统的稳定性和可靠性，本文用到了一个开源的分布式的开发框架hazelcast，基于hazelcast的应用程序的结构图如图4-10所示。 分布式数据库节点和分布式管理

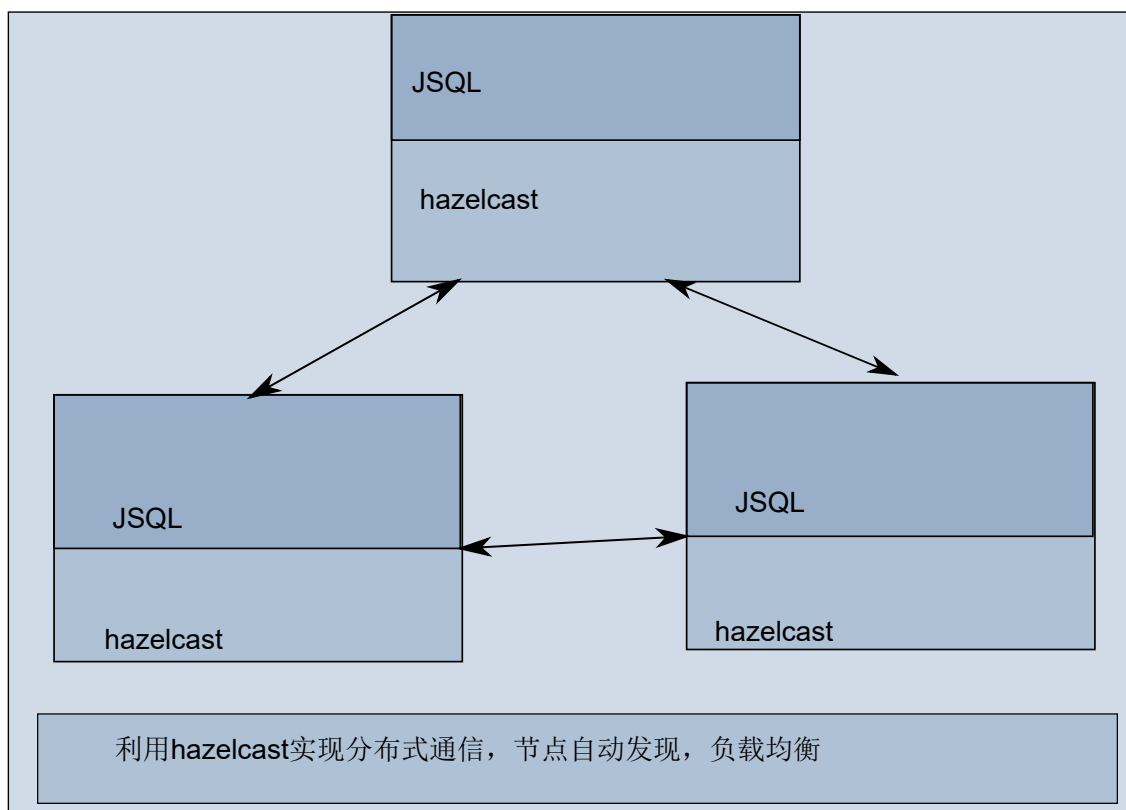


图 4-10 集群架构图

节点都嵌入了Hazelcast模块，这样分布式管理节点就能很容易的得到每个数据库节点的详细信息，直接调用框架的接口就可以得到这些信息。hazelcast分布式原理如图4-11所示。在分布式数据库集群中，不用设计主节点，集群会自己发现和设置主节点。在一个集群中，最先启动的计算机就是主节点，主节点拥有其他所有节点的信息。当其他节点启动的时候，通过多播技术，加入多播网络。主节点发现以后，就会把自己的信息和集群所有其他计算机的信息发送给这个新的计算机，同时更新集群的元数据。当第一个主节点关掉的时候，再一次启动的计算机就自动成为主节点。这样就不需要用户频繁的设置和更新元数据。分布式数据库集群在增加和删除节点的时候，不需要任何人为的干预。

## 4.6 审计模块详细设计

审计模块部署在管理计算机和分布式管理节点上面。管理员通过管理计算

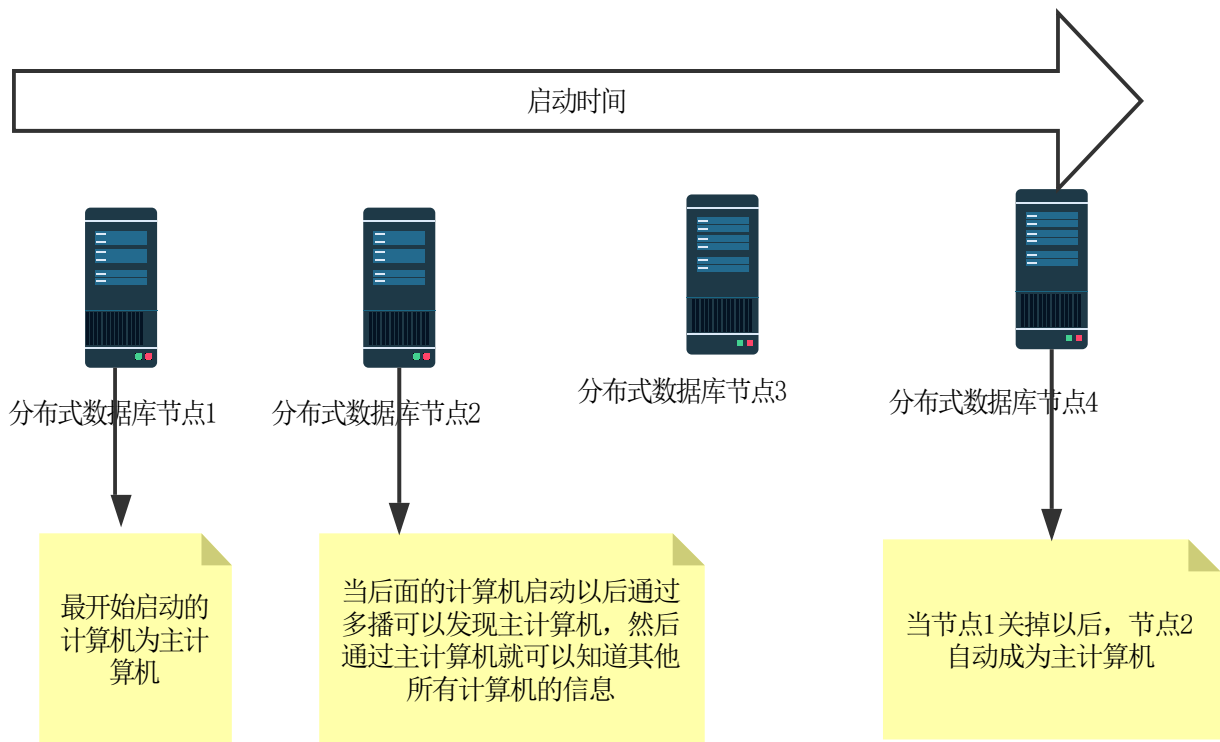


图 4-11 集群架构图

机连接分布式管理节点就可以管理所有的数据。监控所有数据的更改情况。图4-12显示了审计模块的实现结构图。从上大下一共可以分为下面4个模块：

- 1.grafana可视化和报警模块，主要用到了开源的图形框架，来显示底层的审计数据，同时也可以让用户设定预警数据，这样以后就可以在一定的情况下向用户报警。
- 2.elasticsearch模块用来存储监控数据，监控数据为了登陆日志和sql执行日志我们需要更改它的源代码才能用来作为审计数据库，因为审计数据库不能随意的更改和删除，只能查询和增加。
- 3.JSQL接口层，主要是为上面和下面的各层提供连接功能，为上面层提供数据接口，为下面层提供显示接口，使得更加容易使用。
- 4.本地日志层，主要是在文件系统中存储所有需要的日志记录，这样可以随时和审计数据库的数据来对比。审计数据的安全和一致性。

#### 4.7 本章小结

任何系统只有经过仔细的系统设计，在编码阶段才能提前减少不必要的错误。本章从总体上设计了系统的部署模式和模块图，对每个模块进行了详细的模块设计，便于后面的具体实现。

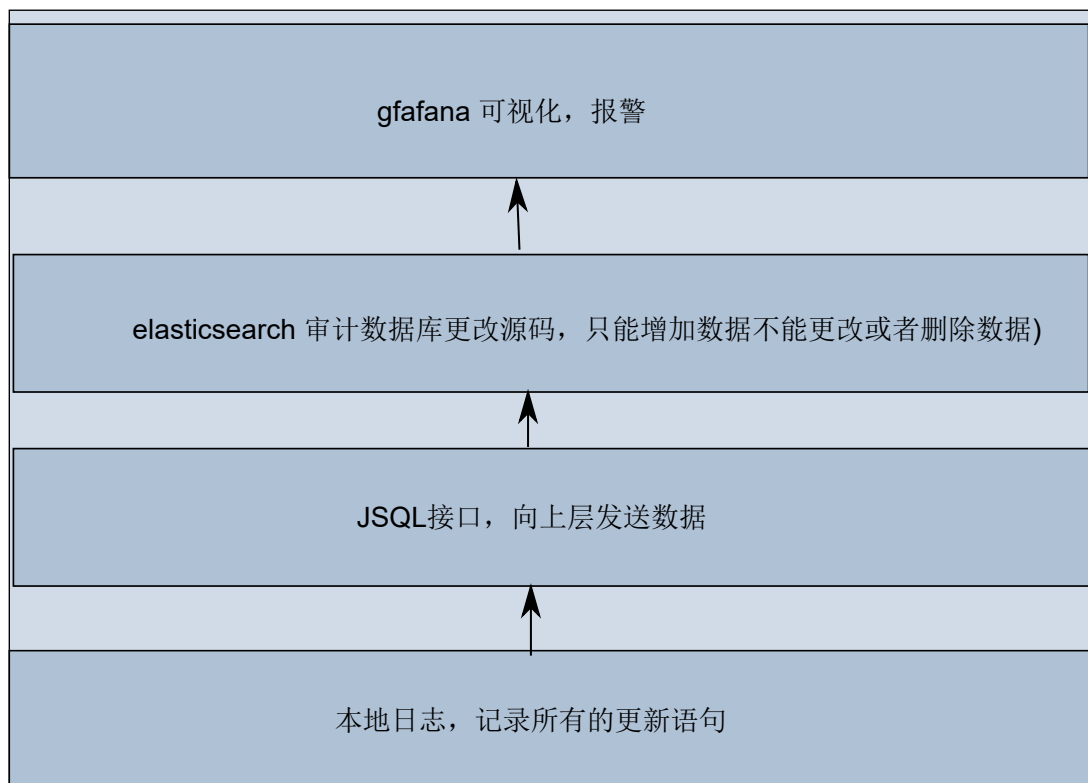


图 4-12 监控模块



## 第五章 系统实现

按照前一章的设计，本章给出每个功能模块的具体实现。详细分析关键功能实现流程图，也包括对关键代码的分析。

### 5.1 代码规范和总体结构

本数据库系统采用和JAVA语言类似的 Kotlin语言开发。JAVA中的代码以包为组织单位，这样组织代码的好处是逻辑结构分明。表5-1描述了本系统所有的包和每个包的详细功能。其中每个包实现具体的功能，这样分配代码在大型工程实践中很常见。除了逻辑清晰，方便管理以外，同时也方便团队协作。 在所有包里

表 5-1 本系统所有包和各个包的作用

包	作用
io.jsql	启动或者关闭服务器
io.jsql.audit	审计监控功能
io.jsql.cache	数据库缓存
io.jsql.config	配置功能，读取外部配置文件
io.jsql.hazelcast	集群功能实现
io.jsql.mysql	实现mysql通信协议
io.jsql.netty	Netty实现高性能网络前端
io.jsql.orientstorage	嵌入式存储引擎模块
io.jsql.shutdown	关闭数据库功能
io.jsql.springaop	面向切面，实现日志等功能
io.jsql.sql	实现SQL解析模块
io.jsql.storage	存储引擎接口
io.jsql.test	测试包
io.jsql.util	所有常用的工具类

面，config包没有实现具体的功能，这个包主要包括了系统常用的配置信息。图5-2给出了config包下面每个类的具体作用，这个包主要是让用户可以配置数据库的各个方面，比如配置数据库的端口号，配置最大的连接数等等。 在本章的后面会给出其他其他功能模块的详细实现。

### 5.2 客服端功能实现

客服端主要实现负载均衡功能，利于JDBC连接后端的分布式数据库，利用网络连接到分布式管理节点得到分布式数据库节点的IP地址。在分布式管理节点为

表 5-2 config包下面每个类的作用

类	作用
Capabilities	处理能力标识定义
ErrorCode	所有的错误代码
Fields	字段类型及标识定义
Isolations	事务隔离级别定义
Versions	本系统的版本号，通讯包

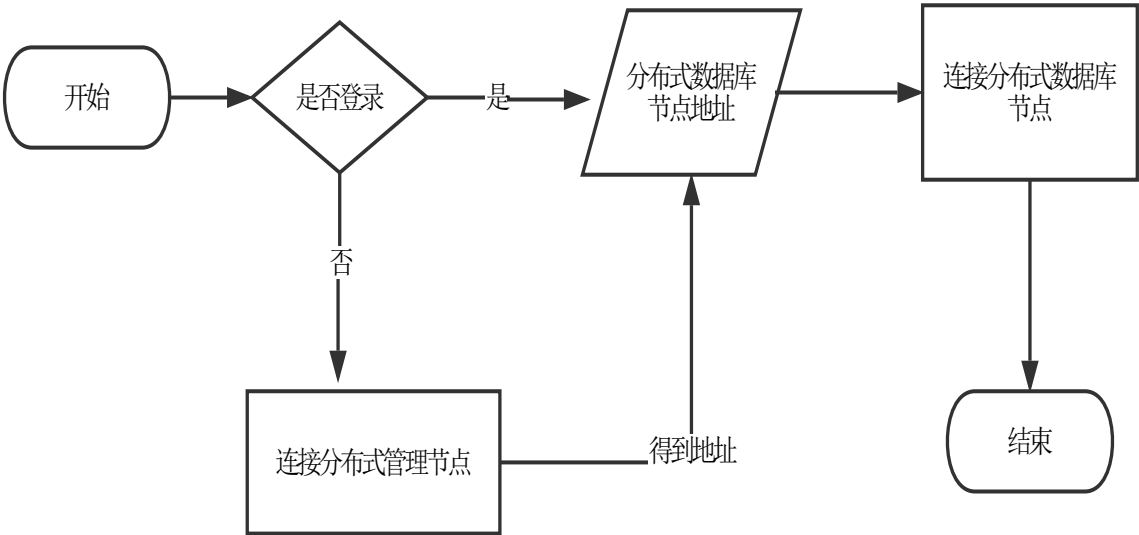


图 5-1 客服端连接功能流程图

客服端返回正确数据库地址以后, 客服端就可以通过JDBC连接数据库节点。客服端连接功能流程图如图5-1所示。

首先, 判断客服端有没有已经登录的会话, 如果已经有已经登录的会话, 那么就可以直接和对应的分布式数据库节点连接。发送数据库命令并且得到返回结果。当客服端没有连接会话的时候, 客服端就首先连接分布式管理节点, 分布式管理为客服端返回合适的数据节点地址, 然后客服端利用这个地址再连接数据库服务器。通过这样一个步骤, 分布式管理节点能利用合适的负载均衡算法为客服端选择合适的数据库节点, 有利于服务器资源的均衡利用。

### 5.3 分布式管理节点实现

管理节点存储数据库集群的元数据, 实现分布式负载均衡功能。同时也为管理员提供管理和监控功能。本节主要对分布式管理节点的负载均衡的实现进行说明。

### 5.4 负载均衡功能实现

负载均衡有两方面的含义: 首先, 将大量的并发访问或数据流量分担到多台节点设备上分别处理, 减少用户等待响应的时间; 其次, 单个重负载的运算分担到多台节点设备上做并行处理, 每个节点设备处理结束后, 将结果汇总, 返回给用户, 系统处理能力得到大幅度提高。负载均衡能够均衡所有的服务器和应用之间的通信负载, 根据实时响应时间进行判断, 将任务交由负载最轻的服务器来处理, 以实现真正的智能通信管理和最佳的服务性能。

负载均衡包括静态负载平衡和动态负载平衡。只是利用系统负载的平均信息, 而忽视系统当前的负载状况的方法被称为静态负载均衡; 根据系统当前的负载状况来调整任务划分的方法被称为动态负载均衡。目前, 静态负载均衡已越来越不能满足需要, 动态负载均衡技术有取而代之的趋势。动态均衡技术又可以分为集中式方法和分布式方法, 在集中方法中, 单个节点负责管理内部整个节点的负载状态信息, 有单点故障的危险; 分布式方法中, 每个节点, 通过收集独立构建自己的负载状态信息, 然后把负载信息分享给其他节点, 同时能在集群中保存元数据, 负者分布式管理功能的节点挂掉的时候, 可以通过选择一个新的管理节点。本论文实现了一种新的分布式负载均衡算法, 分布式管理节点就是这样的管理节点。

在集群启动的时候, 初始化管理节点, 其流程如图5-2所示。

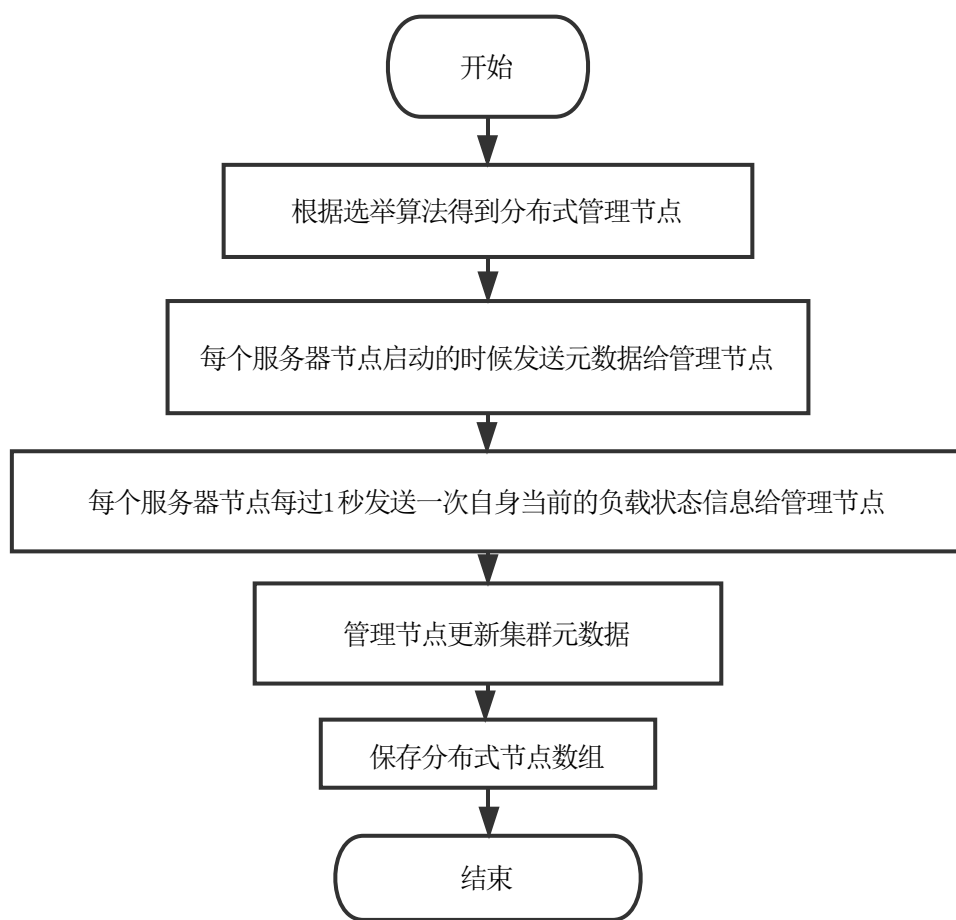


图 5-2 分布式管理节点初始化流程

第一步，分布式数据库集群中的节点根据一定的方法选出一个节点作用分布式管理节点。管理节点除了能存储数据，响应用户的数据操作请求以外，还能作为分布式管理节点。分布式管理节点的作用就是为数据库客户端选择正确的后端数据库服务器，作为负载均衡功能的总代理。

第二步，分布式数据库集群中每个服务器节点根据公式5-1得到自己的权重值 $P$ ，然后发送到分布式管理节点存储。其中  $L_c$  为服务器节点CPU的个数， $L_r$  为当前服务器总内存。

$$P = L_c * L_r \quad (5-1)$$

第三步，分布式数据库节点每过1秒就根据公式5-2得到自己当前的负载 $S$ ，同时发送到分布式管理节点。其中 $C$ 为当前CPU使用率， $R$ 为当前服务器内存剩余量，单位为兆。

$$S = \begin{cases} 1 & \text{if } C > 0.9 \text{ or } R < 300, \\ 0 & \text{if other.} \end{cases} \quad (5-2)$$

第四步，分布式管理节点根据每个服务器节点的权重排序，然后使其排列成一个圆形。最后一个服务器下一个服务器为第一个服务器，保存在数据库的元数据中。这样分布式负载均衡就初始化完成了。

在集群初始化完成以后，每当客户端发出连接请求，分布式管理节点就会为客户端选择正确的服务器地址，其流程如图5-3所示。当分布式管理节点收到客户端请求以后，遍历数据库的元数据库，依次检查其中的每个服务器节点，如果没有更多的服务器就返回错误信息；如果有的话，检查当前遍历节点的负载 $S$ 。如果 $S = 0$ 就返回当前服务器的地址，算法结束，下一次遍历的时候从下一个服务器节点开始检查；如果 $S = 1$ 就跳过这个节点，再检查下一个节点，如此循环，直到算法正确结束或者返回给客户端错误消息。

## 5.5 多版本MVCC算法实现

2.7.3.1 Megastore 中的 MVCC Megastore 利用了 Big Table 中数据的多版本特性实现分布式的更新事务。每个事务更新的都是不同版本（timestamp）的 Big Table 数据，在读取数据时利用 timestamp 过滤，从而不会读到正在进行的尚未生效的事务数据。其原理与本节中介绍完全一致，不再赘述。2.7.3.2 Doris\*中的 MVCC 在 Doris\*系统中，数据按批量进行更新，每个批量的数据都可以认为是一个事务，必须同时原子性的生效。为此，Doris\*将每条数据附带了一个导入的版本号，在读取数据时根据元数据中已生效的版本号与数据上的导入版本号做过滤，从而不

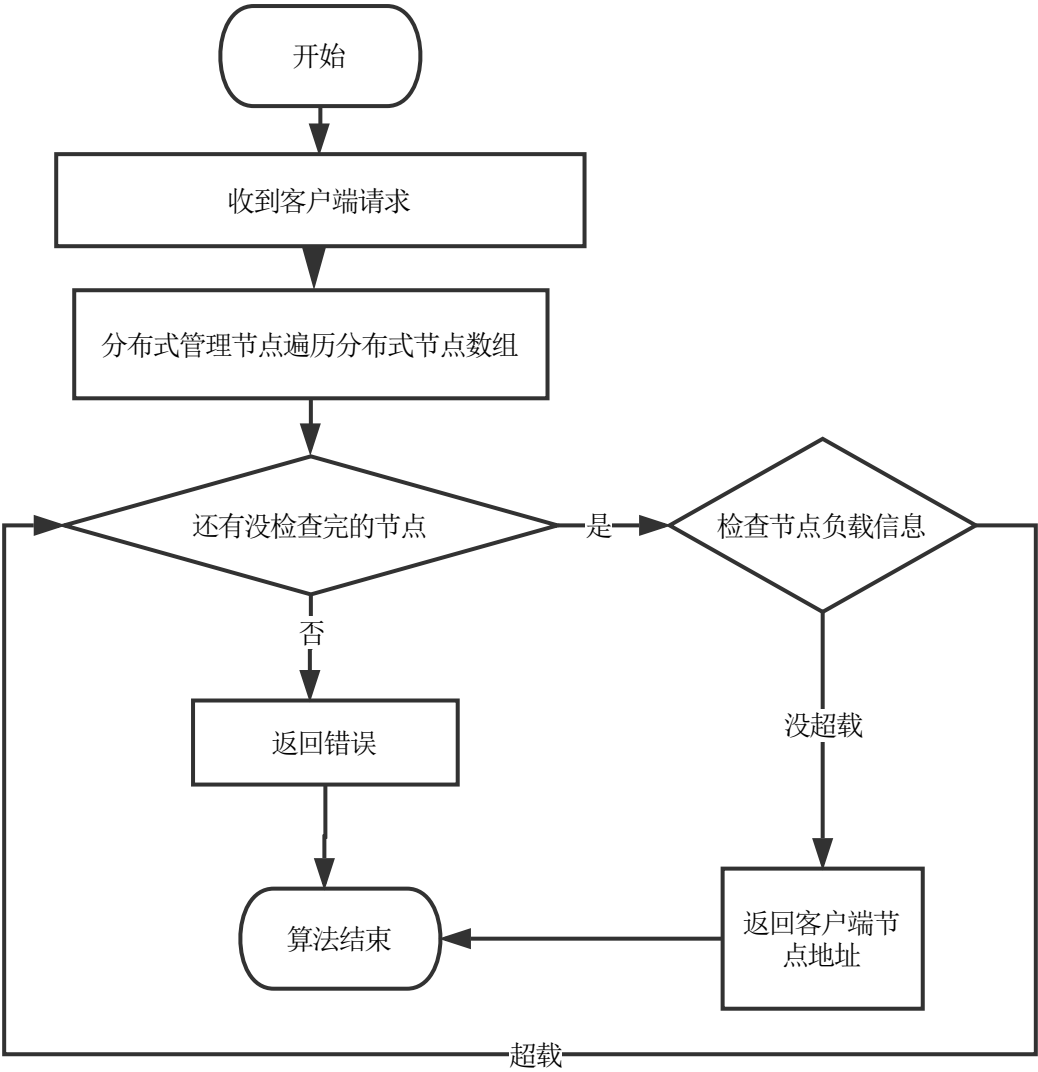


图 5-3 负载均衡流程图

读取正在更新的尚未生效的数据，实现了分布式事务更新。其详细流量与本节中介绍的一致。

5.6 数据库系统实现

数据库系统功能在是分布式数据库节点中最重要的功能模块，提供数据的更删改查的功能。在源代码实现里面，SQL包下面的类主要是作为数据库系统管理类，让用户启动数据库服务器或者关闭数据库服务器。表5-3描述了SQL包下每个类的作用。其中SpringMain类是数据库系统功能的入口，这个类主要调用其他模

表 5-3 SQL包的每个类的作用

类	功能
ShutdownMain	关闭本机服务器
SpringMain	启动类，通过spring boot启动。 ioc, aop功能

块，完成数据库系统的启动。ShutdownMain类用来关闭数据库系统。按照客服端请求信息的处理流程，数据库功能模块主要包括网络模块，SQL解析模块和存储引擎模块，下面分别描述每个模块具体的实现。

5.6.1 网络模块

在网络模块，处理网络套接字的连接和网络字节的处理。在分布式数据库节点接收到客服端的套接字连接请求以后，网络模块服务器端套接字接收请求，完成三次握手建立连接以后。交个Netty来处理。网络字节处理模块主要是用了Netty来实现的，所有和网络字节处理有关的代码都在netty包下面。表5-4描述了每个类的功能。在接收到客服端套接字连接以后，客服端信息会依次经过下面四个类的处

表 5-4 网络模块中各个类的作用

类	作用
ByteToMysqlDecoder	接受客服端的字节消息，转化为mysql的消息格式
ByteToMysqlPacket	包字节格式转化为包对象
MysqlPacketHandler	解码器，处理接受到的包对象
NettyServer	前端线程池，接受客服端的请求

理：

- 1.ByteToMysqlDecoder
- 2.ByteToMysqlPacket
- 3.MysqlPacketHandler
- 4.NettyServer

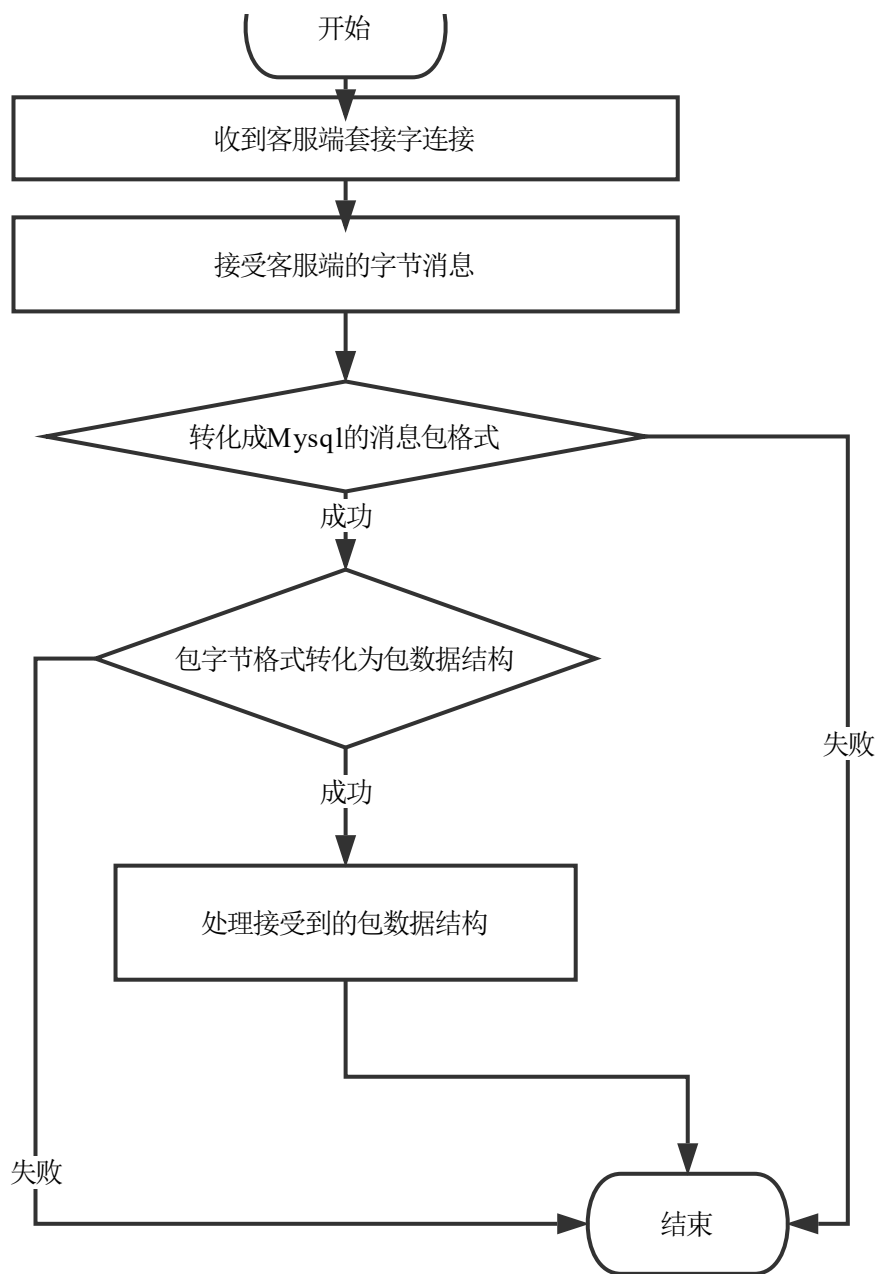


图 5-4 网络模块功能图



具体处理流程如图5-4所示。网络模块收到客服端的套接字连接以后需要包网络字节包装成Mysql的消息包格式，如果错误就说明客服端不是我们的客服端或者客服端发送了其他的错误。当截取到消息包格式以后，还需要解析成我们的数据结构，如果解析成功就包数据结构发送到解析模块，如果解析错误，就断开连接。

除了实现网络模块以外，我们还要实现通信协议，系统采用了和mysql一样的通信协议，在mysql包下面实现了mysql的通信协议。表5-5给出了实现通信协议所用到的所有的类。

表 5-5 通信协议实现所用到的类

文件	类
BindValue	class BindValue
BindValueUtil	object BindValueUtil
BufferUtil	object BufferUtil
ByteUtil	object ByteUtil
CharsetUtil	object CharsetUtil
MBufferUtil	object MBufferUtil
MySQLMessage	class MySQLMessage
PacketUtil	object PacketUtil
PreparedStatement	class PreparedStatement
SecurityUtil	object SecurityUtil
StreamUtil	object StreamUtil

网络服务器接受到客服端的连接以后，就要解析mysql的通信协议，把每一个消息包封装到具体的对象里面，表5-6描述了所有的mysql通信协议的封装对象。mysql协议里面有很多的包，每个协议包都需要一个类来实现，图5-5是握手包的类图，其他包的实现大体相同，所以在这里不再重复说明。

解析到协议包以后我们就要对协议包进行处理，协议包的主要有两个阶段，一个是认证阶段，一个是命令阶段，认证阶段就是接受客服端的请求，然后检查用户的认证信息，比如用户名和密码，图5-6显示了认证流程过程。如果认证成功以后，就建立连接会话，然后客服端就可以进行向服务器发送命令请求向分布式数据库节点处理数据。如果失败失败就返回给客服端失败原因。认证成功以后就是命令阶段，服务器接受客服端的命令，然后处理，图5-7显示了命令处理流程。在接收到客服端的命令请求以后，网络模块就会调用下面模块的功能接口来对这个命令进行处理。如果命令处理过程中没有发生异常，那么就把命令处理结果发送给客服端，如果命令处理工程中发送了异常，就返回失败原因。

5.6.2 SQL解析模块

经过网络模块的处理，我们建立了客服端的连接会话，接下来我们就要对

表 5-6 mysql所有协议包的封装对象

文件	解释
AuthPacket	From client to server during initial handshake.
BinaryPacket	class BinaryPacket : MySQLPacket
CommandPacket	From client to server , the client wants the server to do something
EOFPacket	the EOF packet contains a warning
EmptyPacket	class EmptyPacket : MySQLPacket
ErrorPacket	From server to client in response to command, if error.
ExecutePacket	class ExecutePacket : MySQLPacket
FieldPacket	part of Result Set Packets. One for each column in the result set.
HandshakePacket	From server to client during initial handshake
HandshakeV10Packet	Connection Phase The Connection Phase performs these tasks
HeartbeatPacket	From client to server when the client do heartbeat between jsql cluster
LongDataPacket	class LongDataPacket : MySQLPacket
MySQLPacket	abstract class MySQLPacket
OkPacket	From server to client ,if no error and no result set
PingPacket	class PingPacket : MySQLPacket
PreparedOkPacket	class PreparedOkPacket : MySQLPacket
QuitPacket	class QuitPacket : MySQLPacket
Reply323Packet	class Reply323Packet : MySQLPacket
RequestFilePacket	load data local infile
ResetPacket	class ResetPacket : MySQLPacket
ResultSetHeaderPacket	The Result Set Header Packet is the first of several packets
RowDataPacket	From server to client. One packet for each row in the result set

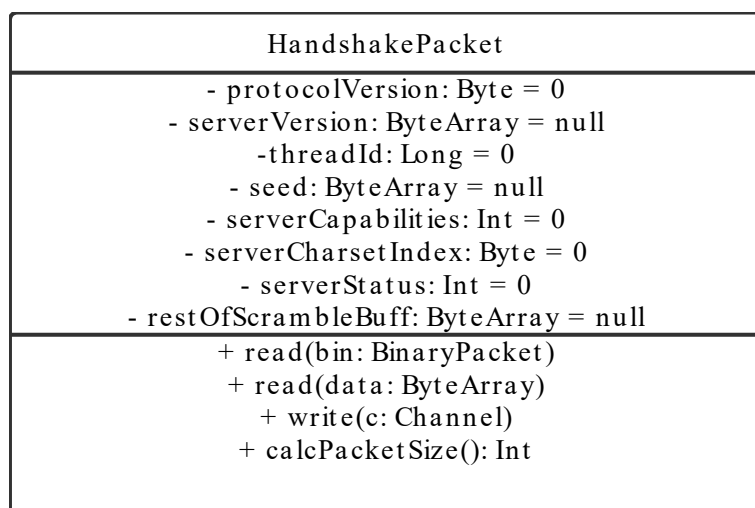


图 5-5 握手包实现类图

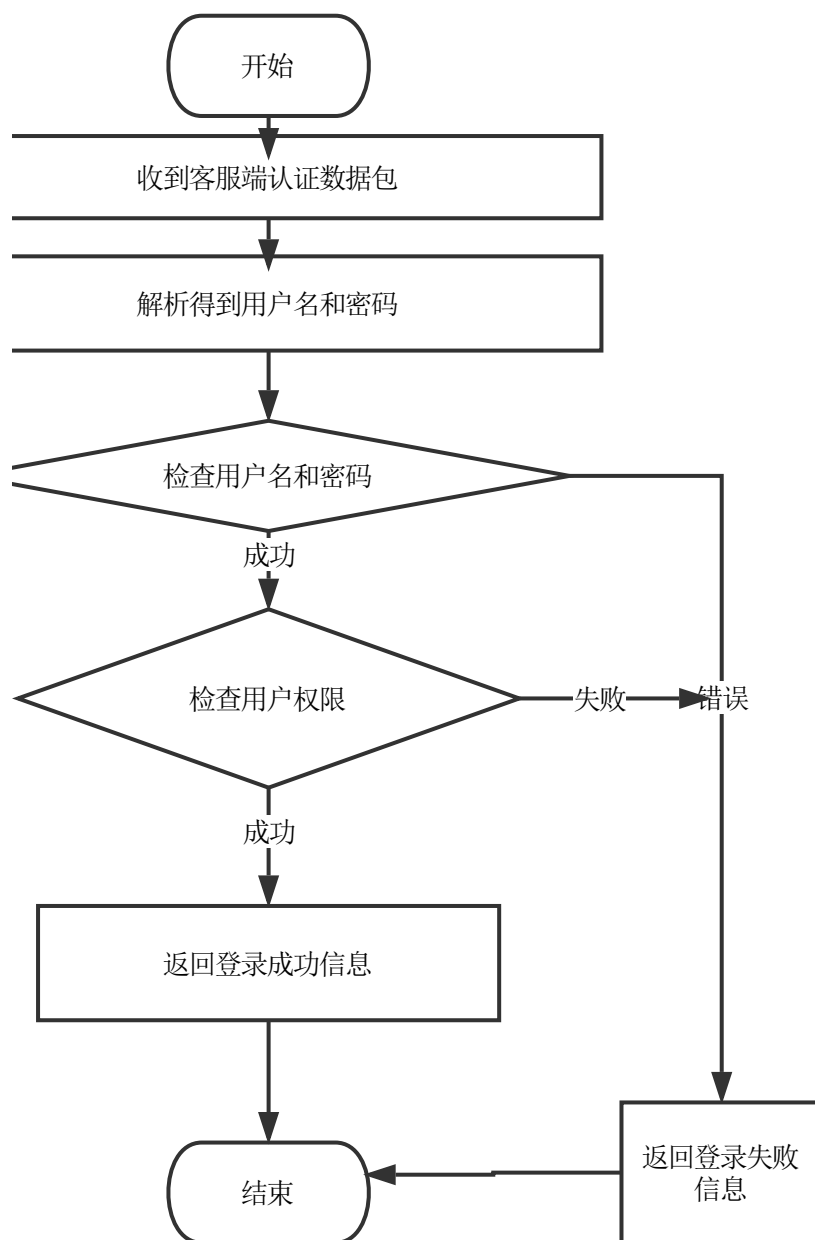


图 5-6 认证流程图

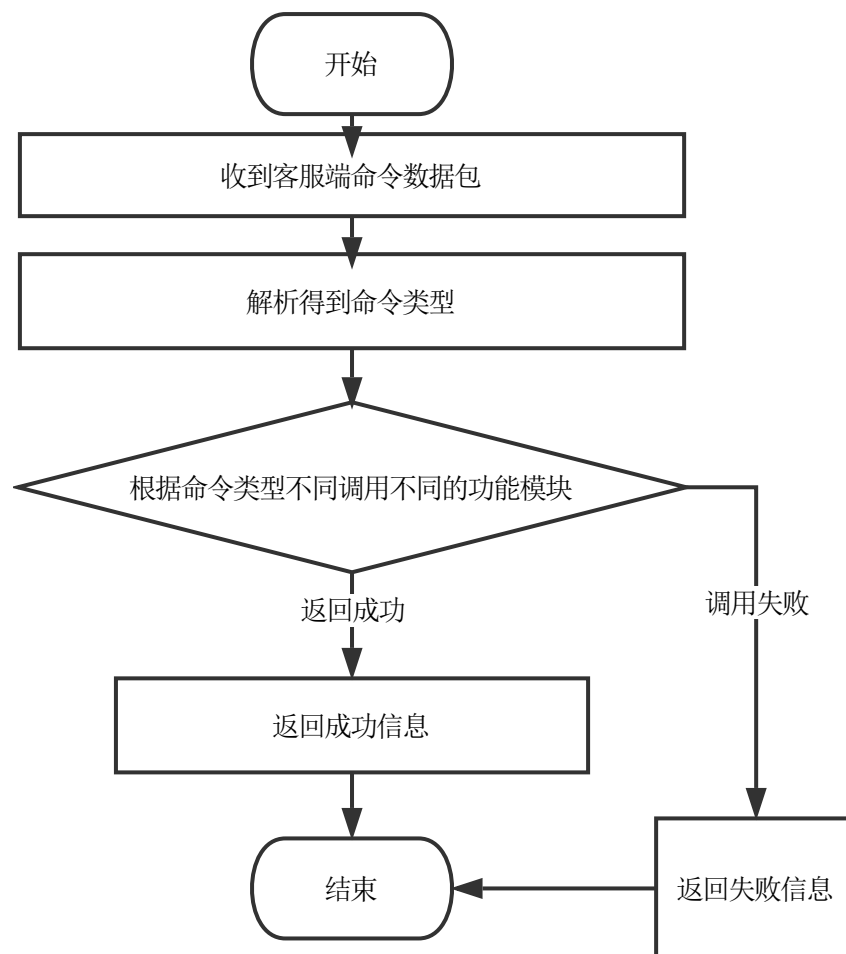


图 5-7 命令处理流程图

客服端发送过来的命令进行判断，如果是SQL命令，就要对这个命令进行解析，进行词法分析，语法分析和语意检查。在代码实现中，sql包下面的类主要完成对客服端连接和会话的封装和管理，表5-7显示了sql包下面每个类的具体作用。在sql解析功能模块里面系统用到了druid开源框架，用来解析sql，解析sql以后就

表 5-7 SQL前端连接模块相关的类

类	作用
MysqlSQLHandler	接受前端的语句，处理用户的请求
OConnection	前端连接对象，一个客服端一个连接
ONullConnection	继承连接对象，但是不处理具体任务，用在分布式中
OconnectionPool	管理前端的连接，作为一个连接池对象

要做具体的数据处理，图5-8显示了SQL模块的处理流程图。在sql解析流程中，如果遇到Druid框架不支持的语句，我们就要自己对这个语句进行解析。再这个工程中。任何一个步骤发送错误就返回错误信息给客服端。不然就进行发送给下一个功能模块进行具体的数据操作。mysql当中的sql语句有很多种，每一种语句都要做不同的处理，5-8描述了sql模块下实现的各种类型的语句。

表 5-8 SQL模块下实现的各种类型的语句

类	作用
io.jsql.sql.handler.adminstatement	处理管理语句
io.jsql.sql.handler.componed_statement	处理组合语句
io.jsql.sql.handler.data_define	处理数据定义语句
io.jsql.sql.handler.data_mannipulation	处理数据操作数据
io.jsql.sql.handler.preparestatement	处理准备语句
io.jsql.sql.handler.replication_statement	处理复制语句
io.jsql.sql.handler.tx_and_lock	处理事务和锁控制语句
io.jsql.sql.handler.utilstatement	处理其他工具语句

每一种类型语句下面又回有很多种具体语句的实现，表5-9给出了数据操纵类型语句实现的所有相关的类和响应的功能。其他类型的语句也需要进行相同的处理，这里就不再进行详细表述。

5.6.3 存储引擎模块

存储引擎有关的功能主要在storage包下面实现，表5-10给出了 storage包下面各种文件的功能。其中DB类作为底层存储引擎的接口，他的功能接口如表5-11所示。和表有关的功能接口如表5-12所示。

存储引擎利用非关系型数据存储，为上面模块提供操作接口。其中有关数据库操作的类接口如图5-9b所示，有关表操作的类接口如图5-10所示。类的实现主要是封装了OrientDB存储引擎的功能，为上一次提供关系操作的接口。在关系数

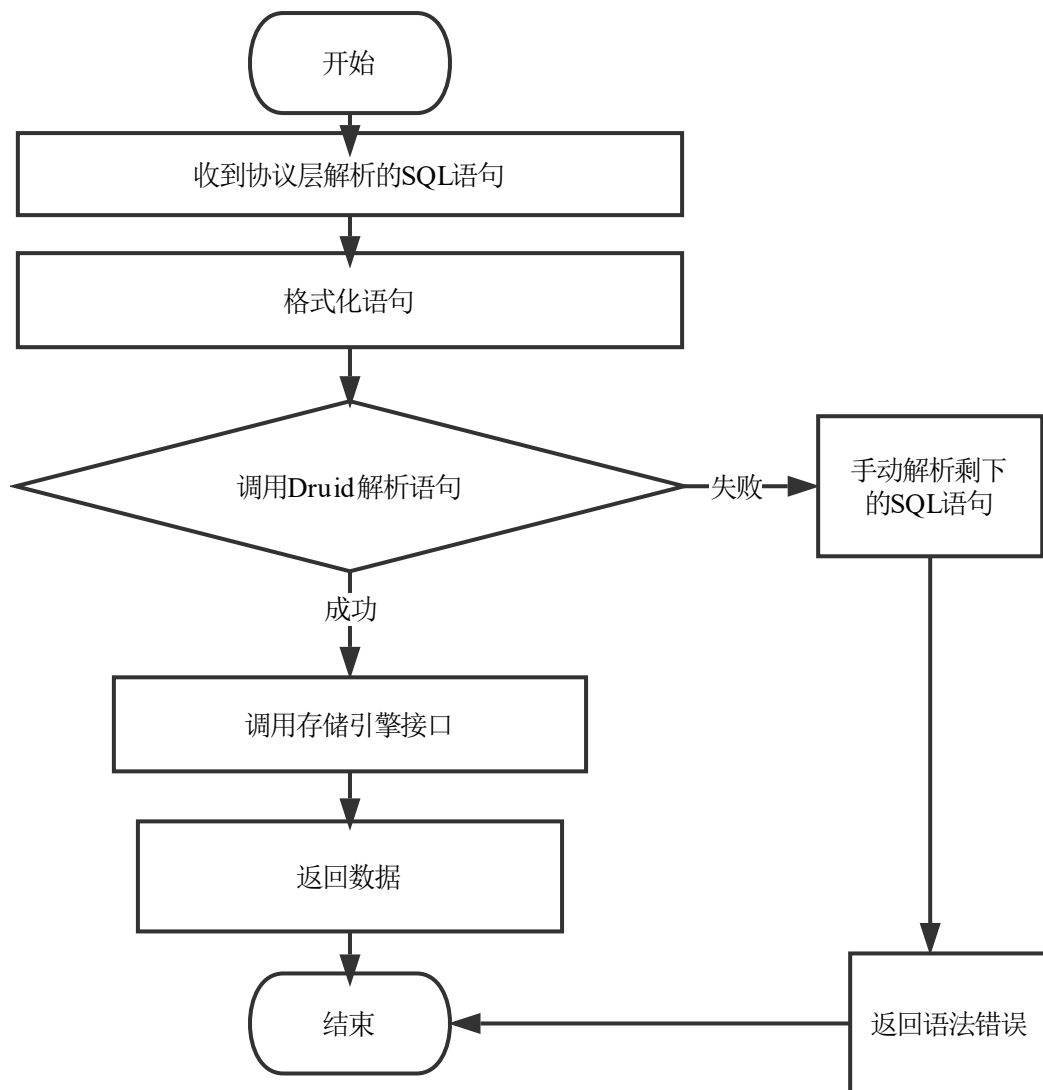


图 5-8 SQL处理流程图

表 5-9 数据操纵数据实现所相关的类

文件	作用
MSelectHandler	处理查找语句
Mcall	处理函数调用语句
Mdelete	处理删除语句
Mdo	处理mysql中的do语句
Mhandler	所有类的基类
Minsert	处理插入语句
MloaddataINfile	处理导入文件的语句
Mloadxml	处理导入xml的语句
Mrepelace	处理解释语句
MselectVariables	处理查找变量的语句
Msubquery	处理子查询
Mupdate	处理更新语句

表 5-10 storage包下面各种文件的作用

文件	功能
DB	接口，规定所有的存储引擎应该实现的和数据库有关的功能
Table	接口，规定所有的存储引擎应该实现的和表有关的功能

表 5-11 数据库存储引擎的函数接口

接口	函数签名
close	abstract fun close(): Unit
createdbAsync	abstract fun createdbAsync(dbname: String): Unit
createdbSync	abstract fun createdbSync(dbname: String): Unit
deletedbAsync	abstract fun deletedbAsync(dbname: String): Unit
deletedbSync	abstract fun deletedbSync(dbname: String): Unit
exe	abstract fun exe(sql: String, db: String): Unit
exesqlNoResultAsync	abstract fun exesqlNoResultAsync(sql: String, dbname: String): Unit
exesqlForResult	abstract fun exesqlForResult(sql: String, dbname: String): Oresult
getallDBs	abstract fun getallDBs(): List<String>
getdb	abstract fun getdb(dbname: String): ODatabaseDocument
query	abstract fun query(sqlquery: String, dbname: String): Stream<OElement>

表 5-12 数据库引擎和表有关功能的接口

函数	函数签名
createtableSyn	abstract fun createtableSyn(dbname: String, createTableStatement
droptableSyn	abstract fun droptableSyn(dbname: String, table: String): Unit
getalltable	abstract fun getalltable(dbname: String): List<String>
gettableclass	abstract fun gettableclass(tablename: String, db: String): OClass
selectSyn	abstract fun selectSyn(oClass: OClass, dbname: String): Stream<OElement>

数据库中，操作接口就是SQL语言。JSQL因为选择了兼容Mysql协议，所以实现了大部分的Mysql语句功能。这样上层功能模块就可以当做Mysql一样的使用本数据库引擎。

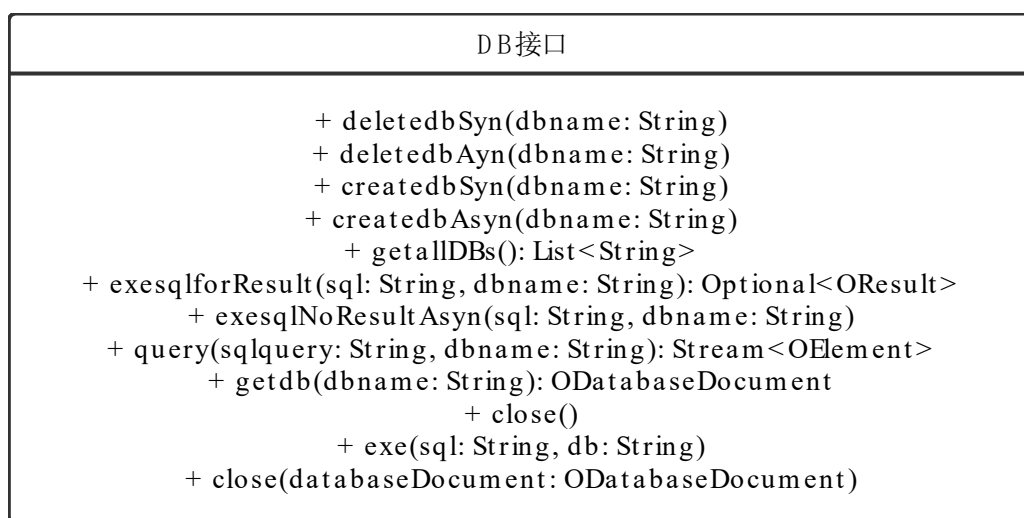


图 5-9 数据库操作接口类图

## 5.7 集群架构的实现

集群功能主要是利用了开源的hazelcast框架来实现，其中的功能全在hazelcast包下面实现，表5-13给出了该包下面每个类的具体的作用。其中最关键的代码如下。

表 5-13 集群模块下面各个类的作用

类	作用
LogFile	本地文件系统中存储日志文件
MyHazelcast	利用Hazelcast的分布式数据结构实现集群，比如分布式队列和分布式锁
ReplicationCMD	分布式对象，在不同集群之间传输
SqlUpdateLog	当前系统LSN最大值，新的事务日志LSN将在此基础上生成

下。



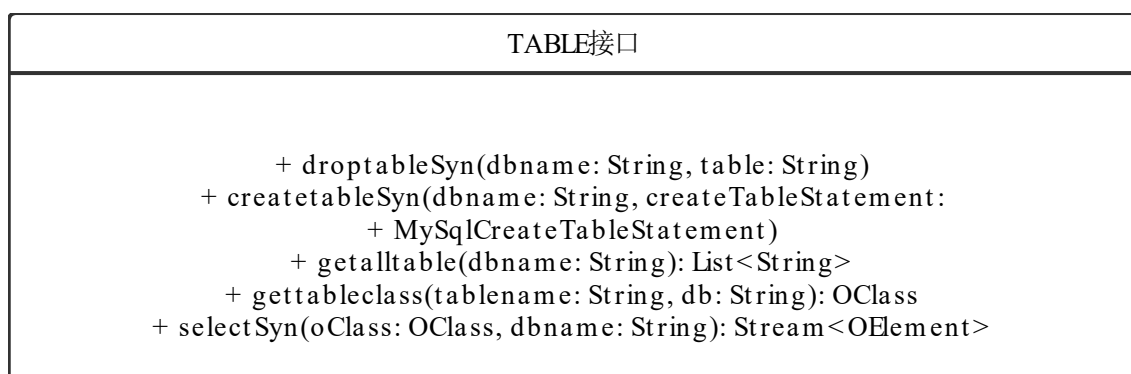


图 5-10 表操作接口类图

```

01 //sql队列 复制队列命令队列。2个锁。发布
02 @Component
03 class MyHazelcast : ItemListener<SqlUpdateLog> {
04     private fun exeSqlforReplication() {
05         Collections.sort(localqueneReplication)
06         var log: SqlUpdateLog? = localqueneReplication.poll()
07         var lastlsn: Long = 0
08         while (log != null) {
09             locals_maxlsn = log.LSN
10             logger.info("exeSqlforReplication exe sql " + log)
11             oNullConnection!!.schema = log.db
12             sqlHandler.handle(log, oNullConnection)
13             logFile!!.write(log)
14             lastlsn = log.LSN
15             log = localqueneReplication.poll()
16         }
17         isreplicating = false
18         log = localquene.poll()
19         val remotel = iAtomic_remote_lsn!!.get()
20         while (log != null) {
21             locals_maxlsn = log.LSN
22             logger.info("exe Sql : " + log)
23             oNullConnection!!.schema = log.db
24             sqlHandler.handle(log, oNullConnection)

```

```

25         logFile!!.write(log)
26         lastlsn = log.LSN
27         if (lastlsn > remotel) {
28             remotequene!!.offer(log)
29         }
30         log = localqueneReplication.poll()
31     }
32     if (lastlsn > remotel) {
33         iAtomic_remote_lsn!!.set(lastlsn)
34     }
35 }
36 /**
37  * 本机发出的sql语句.记录到本地logfile。
38 同时发布到其他服务器*/
39 fun exeSql(sql: String, db: String) {
40     if (isreplicating) {
41         val l = iAtomic_remote_lsn!!.get()
42         val log = SqlUpdateLog(l + 1, sql, db)
43         localquene.addLast(log)
44     } else {
45         locals_maxlsn++
46         val l = iAtomic_remote_lsn!!.addAndGet(1)
47         val log = SqlUpdateLog(l, sql, db)
48         logger.info("exe sql " + log)
49         logFile!!.write(log)
50         remotequene!!.offer(log)
51     }
52 }
53 private fun exesqlforremoteData() {
54     Collections.sort(localquene)
55     var log: SqlUpdateLog? = localquene.poll()
56     var last: Long = 0
57     while (log != null) {

```

```
58         locals_maxlsn = log.LSN
59         logger.info("exesqlforremoteData()  " + log)
60         oNullConnection!!.schema = log.db
61         sqlhander.handle(log, oNullConnection)
62         logFile!!.write(log)
63         last = log.LSN
64         log = localquene.poll()
65     }
66     val l = iAtomic_remote_lsn!!.get()
67     if (last > l) {
68         iAtomic_remote_lsn!!.set(last)
69     }
70
71 }
72
73 }
```

5.8 数据审计模块的实现

JSQL除了结合关系数据库和非关系型数据库以外，还从数据库的底层考虑数据的安全问题，对数据审计功能进行了简单的实现，在代码实现中，审计模块有关的功能全部在audit包下面实现，表5-14给出了audit包下面每个类的具体的作用。其中LoginLog和SQLlog类主要封装了两种日志类型，一种是客服端的登录记录日

表 5-14 audit包下面每个类的作用

类	作用
LoginLog	简单对象，记录登陆日志
SqlLog	简单对象，记录SQL执行日志
elasticUtil	工具类，包日志记录发送到ELK

志，一种是客服端的命令执行日志。通过封装这两种日志记录，很容易的就可以实现审计数据的收集和发送功能。图5-11显示了审计功能演示图。 审计功能主要包括审计数据库，审计管理器和审计可视化功能模块，下面分别对每个模块进行说明

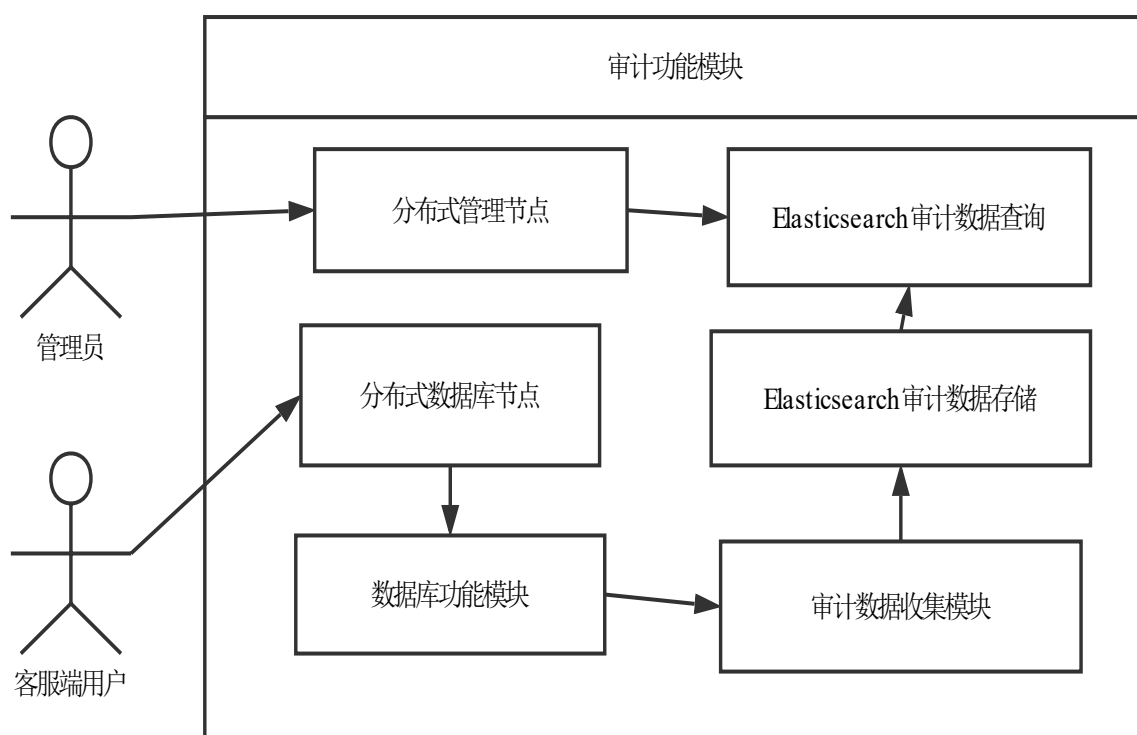


图 5-11 审计功能演示图

1.审计数据库: 审计数据库用Elasticsearch来实现, 作为审计数据库, 不能让用户随意的更改, 所以本系统更改了它的源代码, 使得它只能增加数据和查找数据不能更改和删除数据。其中主要存储的对象如图5-14所示。

2.审计管理器: 审计管理功能全部在audit下面实现, 主要是存储本地的日志文件, 然后发布到审计数据库。提供给前端可视化的接口。

3.审计可视化模块的实现: 审计可视化模块的实现用到了grafana, 主要用来监控ELK中的数据。管理员通过连接分布式管理节点可以对审计数据进行查询。从而对数据的更改情况进行掌控。

## 5.9 本章小结

本文前面一章设计了本系统的架构图和各个模块的详细功能, 本章给出每个功能模块的具体实现。。

## 第六章 系统测试

### 6.1 测试环境

本文的测试环境为个人的计算机。它的硬件和软件参与如下

#### 1.硬件参数:

- (a) CPU: intel(R) Xeon(R) E5620
- (b) 内存: 8G
- (c) 磁盘: 500G
- (d) 网络: 100Mbit/s

#### 2.软件参数:

- (a) 操作系统: windows10
- (b) java版本: 8.0

### 6.2 功能测试

#### 6.2.1 数据库功能测试

功能测试设计的细节非常多，项目繁杂。这里将给出几个关键的功能测试的条件、目的、步骤和结果。其他更为细节的，比如对失败的查询的测试，或其他类似的，比如与插入、更新类似的删除数据，删除表，由于篇幅原因，就不再细述。

##### 1.系统启动测试

- (a) 测试条件: 代码编码完成，系统功能正常
- (b) 测试步骤:
  - i. 启动系统
  - ii. 用mysql客服端连接系统
- (c) 测试结果: 系统能正常启动，而且mysql客服端也可以连接上系统

##### 2.工具语句测试

- (a) 测试条件: 系统启动成功，客服端连接上系统
- (b) 测试步骤:
  - i. 打开命令行客服端
  - ii. 输入语句show databases，发送给服务器
- (c) 测试结果: 系统返回当前所有的数据库。

### 3.建表语句测试

(a) 测试条件：系统启动成功，客服端连接上系统

(b) 测试步骤：

- i. 打开命令行客服端
- ii. 输入语句`create table test(id int,name varchar(100))`
- iii. 回头，发送命令给服务器

(c) 测试结果：系统返回正确，而且文件系统里面多了一个文件。

### 4.插入语句测试

(a) 测试条件：系统启动成功，客服端连接上系统

(b) 测试步骤：

- i. 打开命令行客服端
- ii. 输入语句`insert into test(id,name) values(1,'changhong');`
- iii. 回头，发送命令给服务器

(c) 测试结果：系统返回正确

### 5.查询语句测试

(a) 测试条件：系统启动成功，客服端连接上系统

(b) 测试步骤：

- i. 打开命令行客服端
- ii. 输入语句`select * from test;`
- iii. 回头，发送命令给服务器

(c) 测试结果：系统返回一行数据。

### 6.更新语句测试

(a) 测试条件：系统启动成功，客服端连接上系统

(b) 测试步骤：

- i. 打开命令行客服端
- ii. 输入语句`update test set name='changhong1'`
- iii. 回头，发送命令给服务器
- iv. 输入语句`select * from test`
- v. 回头，发送命令给服务器

(c) 测试结果：系统执行正确，返回一条数据，名字字段`weichangohng1`

### 7.更新语句测试

(a) 测试条件：系统启动成功，客服端连接上系统

(b) 测试步骤：

- i. 打开命令行客户端
  - ii. 输入语句`delete from test`
  - iii. 回头，发送命令给服务器
  - iv. 输入语句`select * from test`
  - v. 回头，发送命令给服务器
- (c) 测试结果：系统执行正确，没有返回数据

### 6.2.2 集群功能测试

集群的功能测试和单机版一样，考虑到不可能每条语句的测试。本次测试只测试最常用的insert语句：

#### 1.测试条件：

- (a) 数据库1启动成功，没有任何数据
- (b) 数据库2启动成功，没有任何数据
- (c) 数据库1和数据库2都有一个test表

#### 2.测试步骤：

- (a) 打开命令行客户端，连接数据库1
- (b) 输入语句`insert into test(id,name) values(1,'changhong')`并且执行;
- (c) 断开连接，连接数据库2
- (d) 输入语句`select * from test;`
- (e) 回头，发送命令给服务器

#### 3.测试结果

- (a) 数据库1执行语句正确
- (b) 语句2执行正确，并且返回一条数据

### 6.2.3 审计功能测试

审计功能的测试主要是测试可视化的显示功能。

#### 1.测试条件：

- (a) 数据库1启动成功，没有任何数据
- (b) 数据库1有一个test表

#### 2.测试步骤：

- (a) 打开命令行客户端，连接数据库1
- (b) 输入语句`insert into test(id,name) values(1,'changhong')`并且执行;
- (c) 打开grafana web界面

### 3.测试结果

- (a) 数据库1执行语句正确
- (b) 通过web界面可以观察到插入的数据和执行者的信息
- (c) 图6-1,图 6-2和图 6-3显示了监控的可视化结果

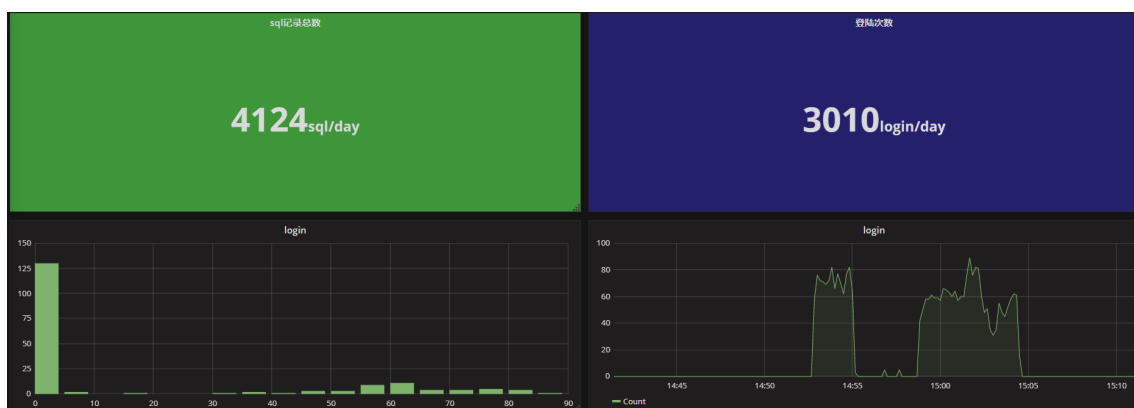


图 6-1 监控可视化结果

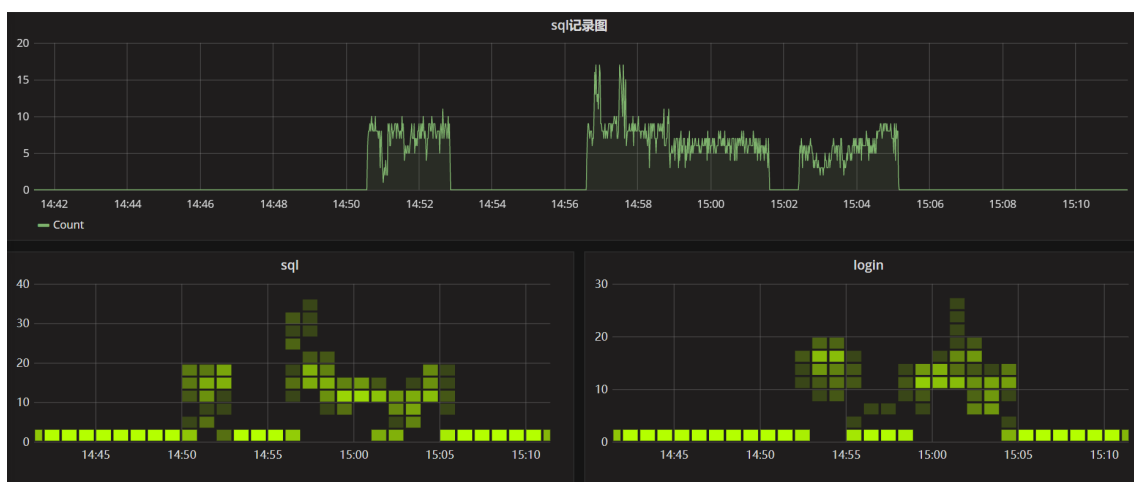


图 6-2 监控可视化结果

## 6.3 性能测试

数据库的更删改查是最常用的操作，其中又以查找使用的场景更多，所以本节主要测试数据库的查询性能。jsql和mysql都可以通过JDBC来连接，下面的源代码是测试代码，用来测试查询次数和执行时间的关系。执行结果如图6-4所示。

```
01 fun test() {  
02     //sql执行次数  
03     val sqlnumber = intArrayOf(10, 100, 1000, 3000, 5000, 10000)
```



登陆记录			
时间	user	host	result
2017-10-05 15:04:32	user 1000	localhost	true
2017-10-05 15:04:32	user 999	localhost	true
2017-10-05 15:04:32	user 998	localhost	true
2017-10-05 15:04:31	user 997	localhost	true
2017-10-05 15:04:31	user 996	localhost	true
2017-10-05 15:04:31	user 995	localhost	true
2017-10-05 15:04:31	user 994	localhost	true
2017-10-05 15:04:31	user 993	localhost	true
2017-10-05 15:04:31	user 992	localhost	true
2017-10-05 15:04:30	user 991	localhost	true

图 6-3 监控可视化结果

```

04      val mysql = "jdbc:mysql://localhost:3306/changhong?" + "user=root&"
+
05          "password=0000&useUnicode=" + "true&characterEncoding=UTF8"
06      var connection = DriverManager.getConnection(mysql)
07      var statement = connection.createStatement()
08      println("mysql sqlnumber to times:")
09      for (number in sqlnumber) {
10          val start = System.currentTimeMillis()
11          for (i in 1..number) {
12              statement.executeQuery("select * from test")
13          }
14          val end = System.currentTimeMillis()
15          println("$number      ${end - start}")
16      }
17      connection.close()
18      val jsql = "jdbc:mysql://localhost:9999/changhong?" + "user=root&"
+
19          "password=0000&useUnicode=" + "true&characterEncoding=UTF8"
20      connection = DriverManager.getConnection(jsql)
21      statement = connection.createStatement()
22      println("jsql sqlnumber to times:")
23      for (number in sqlnumber) {
24          val start = System.currentTimeMillis()
25          for (i in 1..number) {
26              statement.executeQuery("select * from test")

```

```

27         }
28         val end = System.currentTimeMillis()
29         println("$number      ${end - start}")
30     }
31     connection.close()
32 }
33 }

```

SQL执行次数	MYSQL完成时间（毫秒）	JSQL完成时间（毫秒）
10	5	4
100	31	40
1000	252	315
3000	1207	941
5000	648	1504
10000	1297	4495

图 6-4 mysql和jsql的性能比较

从图6-4可以看出，随着SQL执行次数的增加，mysql和jsql的执行时一般都响应的增加，在3000执行次数为3000以下时，jsql和mysql的性能相当，当执行次数大于5000时，mysql的性能小幅度的超过jsql。再从变化幅度来看，当执行语句是5000次数的时候，mysql的执行时候审计比执行3000次数的时候还要少，这点可能是因为mysql本身的缓存或者优化有关。而jsql就相对来说随着执行次数的增加，时间就随着增加，符合预期。

除了jdbc的测试以外，本次测试还用了一个流行的测试框架JMeter。Apache JMeter是Apache组织开发的基于Java的压力测试工具。用于对软件做压力测试，它最初被设计用于Web应用测试，但后来扩展到其他测试领域。它可以用于测试静态和动态资源，例如静态文件、Java 小服务程序、CGI 脚本、Java 对象、数据库、FTP 服务器，等等。JMeter 可以用于对服务器、网络或对象模拟巨大的负载，来自不同压力类别下测试它们的强度和分析整体性能另外，JMeter能够对应用程序做功能/回归测试，通过创建带有断言的脚本来验证你的程序返回了你期望的结果。为了最大限度的灵活性，JMeter允许使用正则表达式创建断言。用JMeter测试jsql的结果如图6-5所示。用JMeter测试jsql的结果如图6-6所示。

从测试结果来看，jsql相对mysql的性能有一定的差距。其中一个原因是jsql是用纯java语言开发的，而mysql用c语法开发，其中自然有一定的性能损耗。

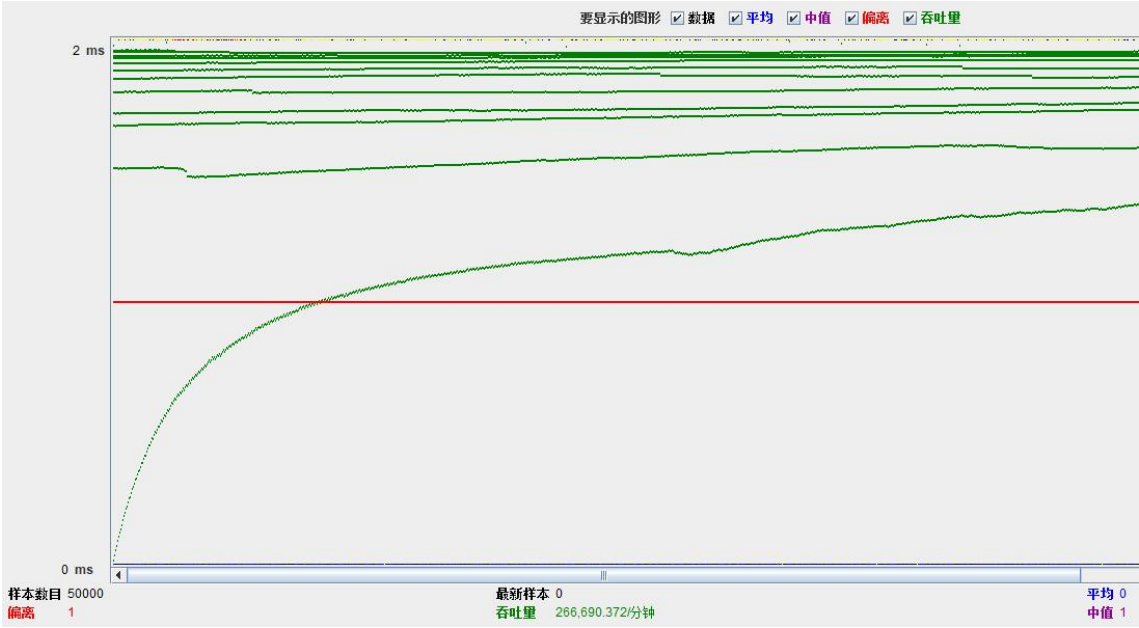


图 6-5 jsql的JMeter性能测试

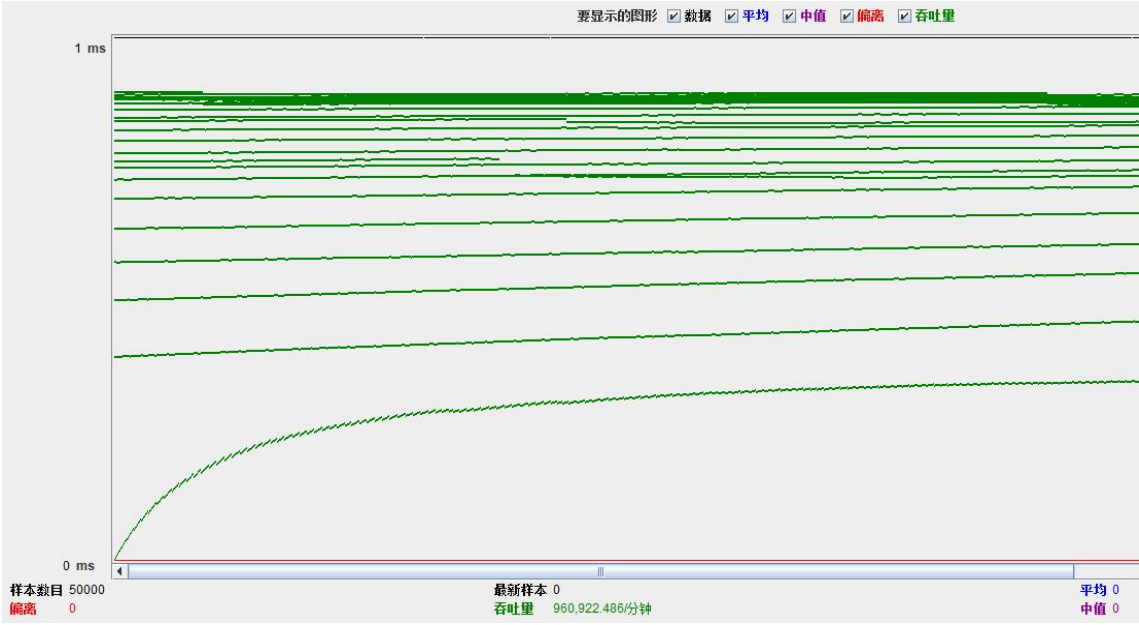


图 6-6 mysql的JMeter性能测试

## 6.4 本章小结

本章对JSQL数据库系统进行测试，主要分为功能测试和性能测试，功能测试包括数据库功能测试，集群功能测试以及审计功能的测试。性能测试分为JDBC和JMeter测试两部分。

## 第七章 总结与展望

现在社会的发展，离不开各种各样的数据库系统。关系型数据库在很多关键场合有不可替代的优势，对关系型数据库有关的理论研究和实践非常有意义。因此，在导师的指导下，在研究生阶段作者主要做数据库有关的开发工作。最终，将理论知识和实践技能相结合，开发出了这套分布式数据库系统。

分布式系统的研发是一个不小的挑战。作为这个系统的开发者，我首先在理论方面做了很多学习和研究，包括硬件硬件有关的知识，和数据库事务相关的理论，以及各种分布式相关的协议。理论只能作为指导，而不能成为一个系统。在实现方面，我主要深入学习了JAVA语言，对多线程和高性能网络开发技能也进行了深入的学习。最终实现的这套数据库系统作者认为有如下优先：

- 1.从数据库引擎到SQL模块完全采用JAVA语言编写，具有跨平台和安全的特特点。
- 2.利用哈希树实现了高性能的存储引擎，特别适合现在的应用程序。
- 3.在系统的架构设计上，采用了面向对象的思想，对各个模块进行了很好的划分，有利于对系统进行进一步的完善。
- 4.从数据库系统本身加入了审计功能。

当然，由于作者水平有限，本系统难免还有很多需要完善的地方，总结起来有下面几个方面：

- 1.系统的数据恢复机制不够完善，后续需要对存储引擎进行进一步的开发，加入日志等功能。
- 2.分布式数据库中数据迁移目前还没有实现，这是值得进一步研究的课题。
- 3.关系型数据库大都有存储过程和触发器这些功能，本系统作为一个实验室产品，目前还没有完全的实现这些功能。

作者认为，虽然现在出现了很多的Nosql数据库系统，但是关系型数据库的作用是无法替代的，电子商务和各种银行业务都需要关系型数据库的支持，所以对关系型数据库的学习和实践特别有意义。另外，数据库的安全问题越发严重，时常发生管理员篡改数据的情况发生，所以作者觉得，每个数据库系统，都要从底层加入安全审计功能，这样我们的数据才能保证最基本的可靠性。关于本系统，需要做的事情还有很多，但是我相信随着进一步的开发，本系统的功能会进一步完善。

## 致 谢

时间过的真快，转眼间，2年多的研究生生活就快要结束了。回顾自己的研究生学习生涯，感慨万千。论文的完成，除了自己的努力以外，更离不开老师和学弟们的帮助，在论文成稿之际，衷心感谢给予自己悉心指导和热情帮助的各位老师 and 学弟们。

论文的完成，首先要感谢我的校内导师曹晟教授，在整个论文的写作过程中，曹老师都给予了我很大的关心和帮助。从作者毕业论文的选题、写作一直到最终完成的过程中，曹老师都是在百忙的工作中以一贯认真负责的态度认真仔细阅读作者的论文，给予作者耐心的指导，使得论文能够顺利的完成。他严肃的科学态度，严谨的治学精神，以及精益求精的工作作风，深深地感染和激励着我。

在这一年多的时间里，我还要感谢我的学弟们。感谢你们陪我一起开发这个分布式数据库系统，我们一起学习，一个努力，才能让本系统顺利完成。任何一个系统都要靠团队合作，更何况分布式系统这个既具有挑战性的工程项目，没有你们的帮助，就不可能按时完成这个系统。对学弟们的帮助，在此表示非常的感谢。

最后，作者非常感谢负责评审论文的教师、专家和教授，感谢你们认真负责的阅读论文，感谢你们为论文提出的宝贵意见和建议。

## 参考文献

- [1] 刘蓬. NIO高性能框架的研究与应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2013, 50–60
- [2] 杨东, 谢菲. 分布式数据库技术的研究与实现[J]. 电子科学技术, 2015, 02(01):68–71
- [3] 杨传辉. 大规模分布式存储系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013, 56–60
- [4] 马应龙. 分布式系统概念和设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013, 56–60
- [5] 安延文. 数据库审计系统中MySQL协议的研究和解析[D]. 河北: 华北电力大学, 2013, 50–60
- [6] 贺杰. 分布式数据库中数据复制的研究和实现[D]. 南京: 东南大学, 2014, 50–60
- [7] 邓蕾. 基于关联规则的数据库安全审计系统[D]. 长沙: 中南大学, 2011, 50–60
- [8] 黄贵. OceanBase分布式存储引擎[N]. 华东师范大学学报, 2014年9月
- [9] 李黎明. 安全数据库概述和前瞻[R]. 北京: 南京航空航天大学信息与技术学院, 2005年5月
- [10] Wikipedia. Hard disk drive [EB/OL]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Hard\\_disk\\_drive](https://en.wikipedia.org/wiki/Hard_disk_drive)
- [11] Wikipedia. B+ tree [EB/OL]. <https://en.wikipedia.org/wiki/B>
- [12] Wikipedia. Log-structured merge-tree [EB/OL]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Log-structured\\_merge-tree](https://en.wikipedia.org/wiki/Log-structured_merge-tree)
- [13] Wikipedia. Netty [EB/OL]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Netty>
- [14] Wikipedia. Elasticsearch [EB/OL]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Elasticsearch>
- [15] Wikipedia. Apache JMeter [EB/OL]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Apache\\_JMeter](https://en.wikipedia.org/wiki/Apache_JMeter)
- [16] Wikipedia. Hazelcast [EB/OL]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Hazelcast>
- [17] 王智慧. 安全数据库审计子系统[D]. 上海: 复旦大学, 2011, 50–60
- [18] 张瑞芳. 分布式数据库的查询优化方法设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2010, 50–60
- [19] 王威. MySQL 数据库源代码分析及存储引擎的设计[D]. 南京: 南京邮电大学, 2012, 50–60
- [20] 别小凡. 分布式内存数据库的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012, 50–60
- [21] 解辉. 嵌入式数据库的设计与实现[D]. 太原: 太原科技大学, 2008, 50–60
- [22] 杨磊. 数据库安全审计检测系统的设计与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2014, 50–60
- [23] 张忠能. 分布式数据库关键技术研究与应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2015, 50–60
- [24] 王琳. 数据库监控系统的设计与实现[D]. 天津: 南开大学, 2011, 50–60
- [25] 谢鹏. 分布式数据库存储子系统设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2013, 50–60
- [26] 张俊民. 在线审计建模与实现[D]. 河北: 华北电力大学, 2015, 50–60