

DOI: 10.7667/PSPC171742

海量配电网调度监测信息的非主键倒排索引查询技术

屈志坚, 范明明, 周锐霖, 王汉林, 朱丹

(华东交通大学电气工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为解决配电网调度监控系统数据体量不断增大导致数据检索速度越来越慢的问题, 结合数据同步技术与倒排索引机制, 提出了一种二级索引架构。使用数据库的同步组件与索引器生成非主键索引, 在搜索时先获得数据主键, 再根据主键检索到需要的数据, 完成非主键检索, 再利用倒排索引技术改变数据的信息结构, 缩短检索时间。以某铁路局 10 kV 供电调度监控信息为算例, 进行非主键检索测试。结果表明: 完成非主键检索所用时间为 161 ms, 满足在配电网调度监控系统中对数据进行快速检索的工程应用需求。

关键词: 调度监控; 快速查询; 非主键; 二级索引; 倒排索引

Inverted index query technique of non-primary key for mass dispatch and monitoring information of distribution network

QU Zhijian, FAN Mingming, ZHOU Ruilin, WANG Hanlin, ZHU Dan

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Power distribution network data volume for the monitoring system is increasing, which results in the difficulty in fast retrieval of data. Therefore this paper proposes a secondary index structure by using the data replication technology and mechanism of inverted index structure. It generates the non-primary key index by using the replication component of the database and the indexer. The primary key of data is obtained first in the search. Then the data is retrieved according to the primary key to complete the non-primary key query. Inverted index technique is used to change the information structure of data and shorten the query time. The non-primary key query test is based on the 10 kV dispatch and monitoring information of a railway bureau. The results show that the time for the query of non-primary key is 161 ms, meeting the requirement of the engineering application for the fast query of data in the dispatch and monitoring system of the distribution network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51567008 and No. 51867009), Foundation Plan for Distinguished Young Scholars in Jiangxi Province (No. 20162BCB23045), Natural Science Foundation of Jiangxi Province (No. 20171BAB206044), and Application and Cultivation Plan of Jiangxi Provincial Science Department (No. 20181BBE58010).

Key words: dispatch and monitoring; fast query; non-primary key; secondary index; inverted index

0 引言

传统的变电站主要靠人工对各项设备进行监控、检测, 智能化程度较低^[1-3]。与传统监控技术相比, 智能监控系统融入了大量的智能电子设备和仪

器仪表^[4], 可对电网信息进行全景数据采集, 对暂态过程进行录波处理^[5-7]。大量的红外线传感器、烟感传感器、温湿度传感器等传感设备信息、操作日志与故障报警信息的数据体量剧增, 如某风电厂风机 SCADA 系统一个月产生的数据量约 2 TB^[8], 超过了关系数据库 TB 级的支撑容量。如何构建新的大数据索引结构, 快速查询 TB 级以上的数据, 已成为当前智能配电网调度监控系统中急需解决的一个瓶颈技术问题。

根据储存方式的不同, 目前数据库主要分为行

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (51567008, 51867009); 江西省杰出青年人才计划项目资助 (20162BCB23045); 江西省自然科学基金项目资助 (20171BAB206044); 江西省科技厅应用培育计划项目资助 (20181BBE58010)

式数据库和列式数据库两类。第一类是以关系数据库为代表的行式数据库^[9-10], 以行作为储存单位, 通过创建索引来进行快速搜索, 擅长随机读操作。有研究表明^[11-12], TB 级数据量的关系数据库需要使用性能更好、存储容量更大、价格更昂贵的数据服务器, 但智能配电网调度监控数据的增长速度远远超过数据服务器存储容量的增长。第二类是以 Apache HBase 为代表的分布式列式数据库^[13-14], 按主行键排序, 仅生成主行键索引, 主行键索引速度达百毫秒级。但不支持非主行键索引, 难以满足智能配电网调度监控按站所和设备编号等特定条件查询要求^[15]。对于非主行键的大数据研究主要集中在二级索引的设计, 主要分为两类:

一类是协处理器方法。其代表是华为公司提出的二级索引方案^[16-17]。由协处理器生成一个索引表, 将主表中数据及其所属列组合为字符串记录在新表的主行键中。当主表更新时, 协处理器直接对索引表更新, 虽然可对非主行键检索, 但大量重复的属性名会造成空间冗余, 不但影响查询效率, 而且在新增或删除属性列时, 更新索引表的主行键值困难。

另一类则是由使用者自行设计, 如文献^[18]提出的分层式索引和 HiBase 查询系统, 在索引表主键中存放非主行键的属性及数据, 并通过热点数据缓存技术和热度累计缓存替换策略, 降低了磁盘访问开销, 加快了访问速度。该方法通过在主行键中索引非主行键, 但只能实现单条件查询, 无法满足多条件组合查询要求。若能利用倒排索引技术改变数据索引结构^[19-21], 从非主行键索引进行定位, 就可能获取任意条件的数据。

本文搭建海量智能监控数据存储平台, 通过数据 Replication 技术对配电网监控数据生成索引, 使用倒排索引机制改变配电网调度监控数据索引的信息结构, 缩短检索时间。然后通过非主行键构建二级索引结构, 满足非主行键快速索引的要求。结果表明, 本文的非主行键查询方法在 CentOS 计算机集群条件下, 对亿级以上配电网调度监控数据记录的查询时间为 160 ms 左右, 满足工程应用需要。

1 配电网海量数据索引的生存

1.1 索引结构

利用索引段、索引文档、索引域和索引项建立索引的结构, 如图 1 所示。

索引项是索引结构中最小也是最基本的单位。利用后台将数据分割为一个个关键词进行管理, 得到的每一个独立元素作为一个索引项, 如调度监控数据中的“站所 443”, 就是一个索引项。

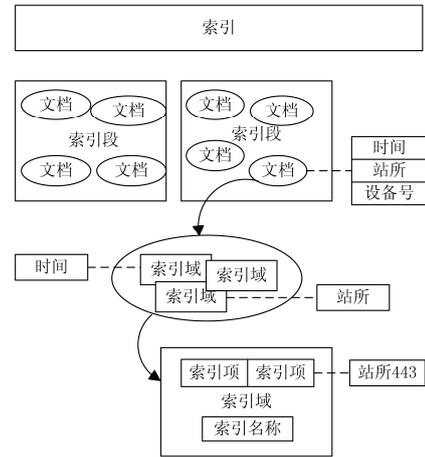


图 1 索引的结构

Fig. 1 Structure of index

对同一类型的索引项统一划分管理, 构成索引域。索引域可以看作一个集合, 包含了一系列同类型的关键词。每个索引域都包含了不同类型的数据, 如配电网调度监控系统中的时间、站所信息、设备号等。

将一个或多个索引域进行集中管理, 并以索引文档的形式保存。一个索引文档可以包含不同类型的关键词, 是进行检索的管理框架。为了方便管理, 将多索引文档储存在一个索引段中, 段与段相互独立, 构成完整索引结构。不同的索引段可以相互合并, 当创建了新的索引文档时, 生成一个新的索引段将其存储, 并随着索引段的合并添加进现有的索引结构中。

1.2 配电网索引库的构建

索引并不是由配电网数据库生成的, 而是由索引器近乎实时地把数据库中的数据索引到索引库中。索引器在整个系统中的大致架构如图 2 所示。

通过 HBase 的 Replication 组件, 监听数据库的预写日志, 预写日志记录了数据库中所有数据的增删改操作, 并将数据的更新转化成索引的更新。这种依赖于 Replication 的方式与使用协处理器实现的方式不同, 使用协处理器更新索引会给 HBase 带来侵入式的代码, 影响 HBase 集群的工作效率, 而 Replication 组件对 HBase 集群的使用几乎没有侵占性, 对数据库的工作效率没有影响。

副效应处理器是索引器的核心, 监听数据库集群上所有的数据变化, 然后对变化进行处理。布置好索引器后, 对需要索引的数据预先打开 Replication 组件, 当这些数据更新时, Replication 系统会给索引器发送通知, 以保证索引和数据的同步更新, 具体流程如图 3 所示。

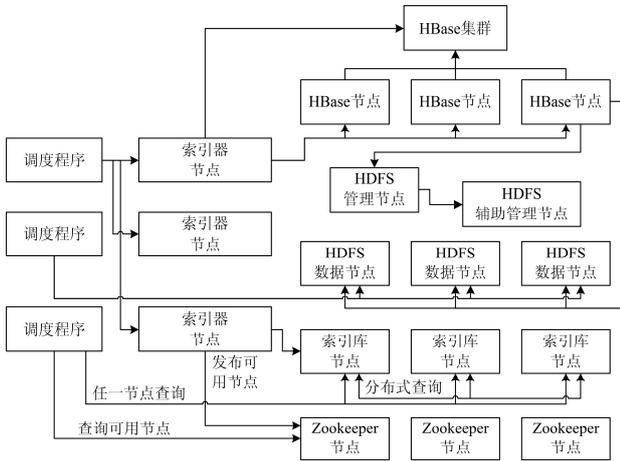


图 2 调度监控系统的架构

Fig. 2 Framework of the dispatch and monitoring system

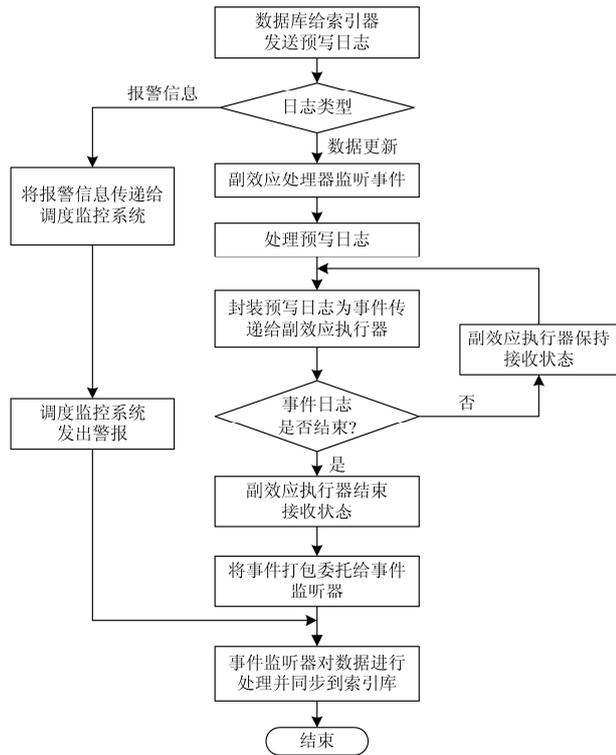


图 3 副效应处理器工作流程

Fig. 3 Workflow of side-effect processor

当副效应处理器监听到事件后，将对预写日志进行分析处理，并把日志封装传递给副效应执行器，当累计到一定的数据量或是数据更新结束时，副效应执行器就会将事件委托给事件监听器，由事件监听器对数据进行处理并同步到索引库。

2 配电网信息的倒排设计

2.1 数据倒排索引

在配电网调度监控系统中，经常通过给出几个

关键的数据，例如站所号，来查找相应设备信息，如何快速找出这些数据是搜索的关键。

配电网调度监控系统中存放了海量监控数据，若按照数据原本的信息结构生成索引，在搜索时需要按照搜索的关键词逐条索引进行对比，无法做到高效搜索。倒排索引是一种以关键词为索引核心和链表访问入口的索引结构。倒排索引利用搜索的关键词来直接定位数据的位置找到目标数据，倒排索引的基本结构如图 4 所示。

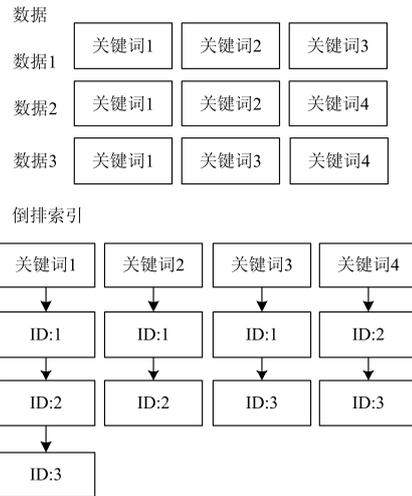


图 4 倒排索引的基本结构

Fig. 4 Basic structure of inverted index

倒排索引源于实际应用中需要根据用户的需求查找特定的数据。索引表中每一项都包含一个属性值以及记录该属性值所属数据的地址。由于不是由主行键来确定数据关键词，而是由关键词来确定数据的位置，所以被称为倒排索引。倒排索引的存储形式一般为一个关键词以及它出现的频率次数、位置、主行键或 ID，在查询时可直接根据特定关键词查询，而不是逐条数据地查找。

2.2 配电网监测数据倒排设计

以铁路 10 kV 供电调度监控信息为例，描述配电网调度监控系统中数据倒排索引的设计及实现方法。表 1 为铁路 10 kV 供电调度监控信息。

常规的正排索引按照数据的顺序来生成索引记录，包含数据编号、索引关键词、关键词出现的次数和位置等信息如表 2 所示。

正排索引以数据 ID 即主行键作为索引关键词，给定任何一个 ID 就可获得其中包含的关键词，但当搜索关键词时需要逐条索引地搜索，因此正排索引对关键词的搜索效率不高。

经过倒排索引重新构造索引结构后，表 3 为表 1 中数据的倒排索引表。

表 1 铁路 10 kV 供电调度监控信息

Table 1 10 kV dispatch and monitoring information of railway

Id	Timestamp	Station	Rtu	Analogname	Analogvalue
1	2017-09-24 00:00:00.04	站所 443	站所 443	遥测 16385	1 800.0
2	2017-09-24 00:00:00.04	站所 443	站所 443	遥测 16386	8 200.0
3	2017-09-24 00:00:00.21	站所 173	站所 173	遥测 16386	6 600.0
4	2017-09-24 00:00:00.05	站所 427	站所 427	遥测 16385	2 600.0
...

表 2 调度监控数据正排索引表

Table 2 Forward index table of dispatch and monitoring information

数据 ID	索引关键词	出现次数	位置
Id: 1	2017-09-24 00:00:00.04	1	Timestamp
Id: 1	站所 443	2	Station、Rtu
Id: 1	遥测 16385	1	Analogname
Id: 1	1 800.0	1	Analogvalue
Id:2	2017-09-24 00:00:00.04	1	Timestamp
Id:2	站所 443	2	Station、Rtu
Id:2	遥测 16386	1	Analogname
...

表 3 调度监控数据倒排索引表

Table 3 Inverted index table of dispatch and monitoring information

关键词	出现次数	出现位置
2017-09-24 00:00:00.040	2	Id:1_ Timestamp, Id:2_ Timestamp
站所 443	4	Id:1_ Station,Id:1_ Rtu, Id:2_ Station,Id:2_ Rtu
遥测 16385	2	Id:1_ Analogname, Id:4_ Analogname
1 800.0	1	Id:1_ Analogvalue
2017-09-24 00:00:00.21	1	Id:3_ Timestamp
遥测 16386	2	Id:2_ Analogname, Id:3_ Analogname
8 200.0	1	Id:2_ Analogvalue
...

经过倒排后, 倒排索引可以快速地根据关键词查找到相应位置, 从而快速地确定目标数据, 提高了在配电网调度监控系统中海量数据查询的速度。

3 非主行键快速查询的实现

3.1 索引更新流程

索引的更新包括索引的修改、增加和删除。索引的修改操作由删除和增加组成, 先将需要更新的索引删除, 再插入更新后的索引数据。图 5 为完整的索引更新流程。

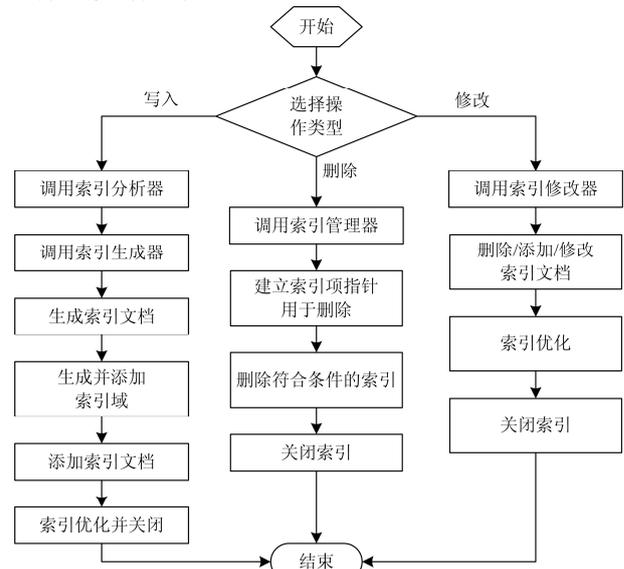


图 5 索引更新流程

Fig. 5 Update process of index

索引的删除操作不是直接将索引从磁盘存储中删除, 每个索引在建立的时候都带有一个编号也就是指针。当进行删除操作的时候, 索引管理器先搜索出符合删除条件的索引, 通过指针进行定位删除特定索引。索引的增加则是由索引器实现。

3.2 非主行键二级索引的实现

由于 HBase 数据库本身并不带有二级索引功能, 所以利用索引器和倒排原理设计了一种配电网二级索引实现方法, 索引系统架构如图 6 所示。

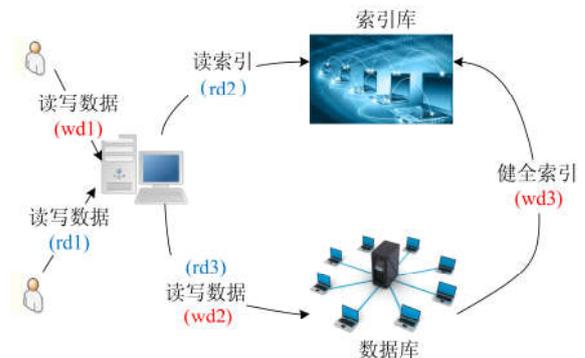


图 6 二级索引架构

Fig. 6 Framework of secondary index

- 1) 写入数据时
 - wd1: 数据写入配电网调度监控系统中;
 - wd2: 配电网调度监控系统将数据存入数据库 HBase 集群;
 - wd3: 数据库将更新的数据的信息传递给索引库完成索引的更新。
 - 2) 读取数据时
 - rd1: 在调度监控系统中输入想查看的数据的关键词, 如站所、RTU 编号等;
 - rd2: 调度监控系统在索引库中找出索引;
 - rd3: 根据所得的索引在数据库中查找到对应的信息。
- 该架构实现二级索引的具体步骤如图 7 所示。
- Step1: 在配电网调度监控查询界面中输入想要查找的数据的非主键关键词;
 - Step2: 调度监控查询界面将关键词送至索引库中进行比对;
 - Step3: 索引库根据关键词找到符合条件的关键词的索引, 并将其主键返回给调度监控查询界面;
 - Step4: 调度监控查询界面将得到的符合条件的主键送至数据库中进行搜索;
 - Step5: 数据库按照收到的主键进行一级索引, 找到对应的数据, 送回调度监控查询界面;
 - Step6: 调度监控查询界面将最终得到的数据返回给用户。

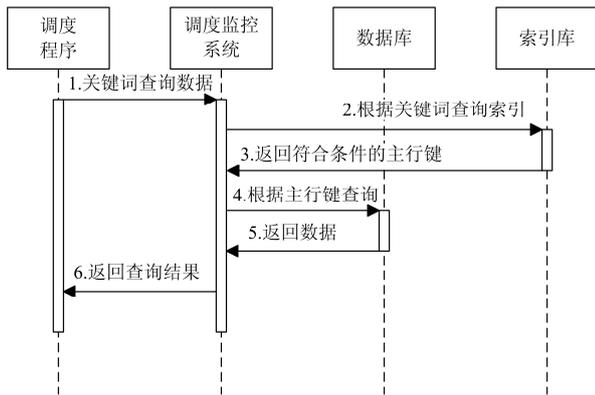


图 7 二级索引流程

Fig. 7 Process of secondary index

通过非主键条件查询快速过滤出符合条件的数据的主键, 再根据主键查询到用户需要的数据, 实现非主键的二级索引。

4 算例测试

4.1 架构设计验证

以铁路 10 kV 配电网调度监控信息为例, 将其输入配电网调度监控系统数据库。本例中对非主键

Timestamp、Station、Rtu、Analogname 和 Analogvalue 生成索引, 索引库中设置为

```

<fieldname="Timestamp"
type="string" indexed="true" stored="true" />
<fieldname="Station"
type="string" indexed="true" stored="true" />
<fieldname="Rtu"
type="string" indexed="true" stored="true" />
<fieldname="Analogname"
type="string" indexed="true" stored="true" />
<fieldname="Analogvalue"
type="string" indexed="true" stored="true" />

```

完成以上索引, 索引库运行测试结果如图 8 所示。

```

response": {
  "numFound": 357480,
  "start": 0,
  "docs": [
    {
      "id": "129379057",
      "hiscurve2016-09-24_cfl_analogvalue": "4200.00000",
      "hiscurve2016-09-24_cfl_analogname": "遥测16392",
      "hiscurve2016-09-24_cfl_rtu": "站所443",
      "hiscurve2016-09-24_cfl_station": "站所443",
      "hiscurve2016-09-24_cfl_timestamp": "2016-09-24 19:21:27.999",
      "_version_": 1583038679058743300
    },
    {
      "id": "129379056",
      "hiscurve2016-09-24_cfl_analogvalue": "8200.00000",
      "hiscurve2016-09-24_cfl_analogname": "遥测16391",
      "hiscurve2016-09-24_cfl_rtu": "站所443",
      "hiscurve2016-09-24_cfl_station": "站所443",
      "hiscurve2016-09-24_cfl_timestamp": "2016-09-24 19:21:27.999",
      "_version_": 1583038679058743300
    },
    {
      "id": "129379059",
      "hiscurve2016-09-24_cfl_analogvalue": "1000.00000",
      "hiscurve2016-09-24_cfl_analogname": "遥测16394",
      "hiscurve2016-09-24_cfl_rtu": "站所443",
      "hiscurve2016-09-24_cfl_station": "站所443",
      "hiscurve2016-09-24_cfl_timestamp": "2016-09-24 19:21:27.999",
      "_version_": 1583038679058743300
    }
  ]
}

```

图 8 非主键查询测试

Fig. 8 Query test of non-primary key

结果表明, 使用非主键 Station 和 Rtu 关键词组合查询可得到其余非主键数据, 实现了配电网调度监控系统中的二级索引。

4.2 查询性能实验结果与分析

在同样的数据条件下, 使用本文设计的二级索

引架构对 Station 为“站所 443”的数据进行搜索, 数据总量为 160 380 000(一亿六千万以上)条数据, 进行检索效率测试, 关键代码如图 9 所示。

```

52 long startTime = System.currentTimeMillis();
53 SolrQuery query = new SolrQuery();
54 query.setQuery("hiscurve2016-09-24_cf1_station:站所443");
55 query.addField("id");
56 query.addField("hiscurve2016-09-24_cf1_analogvalue");
57 query.setStart(0);
58 query.setRows(4);
59 QueryResponse qrsp = server.query(query);
60 long endTime = System.currentTimeMillis();
61 SolrDocumentList docs = qrsp.getResults();

```

图 9 效率测试代码

Fig. 9 Code of efficiency test

以上代码使用 startTime 和 endTime 设置时间断点, 检测检索过程所用时间, 设置检索条件为 Station: “站所 443”, 并返回符合条件的数据的主行键 ID 以及非主行键 Analogvalue 的值, 该测试结果如图 10 所示。

```

<terminated> fmm [Java Application] D:\jdk16\bin\javaw.exe (2017年11月21日 下午3:07:
|abcdefg
SolrDocument{id=129379057, hiscurve2016-09-24_cf1_analogvalue=4200.00000
SolrDocument{id=129379056, hiscurve2016-09-24_cf1_analogvalue=8200.00000
SolrDocument{id=129379059, hiscurve2016-09-24_cf1_analogvalue=1000.00000
SolrDocument{id=129379058, hiscurve2016-09-24_cf1_analogvalue=3400.00000
程序运行时间: 161ms

```

图 10 效率测试结果

Fig. 10 Result of efficiency test

实验结果表明: 本文使用索引器以及倒排索引机制设计的二级索引架构, 非主行键查询耗时为 161 ms。验证了本文所设计的二级索引架构可满足配电网调度监控系统中对非主行键数据快速检索的要求。

5 结论

本文利用索引器和数据倒排设计对数据库中非主行键生成索引, 在非主行键检索时先获得数据的主行键, 再根据主行键检索到需要的数据, 实现二级索引, 且使用倒排索引技术改变数据索引的结构, 加快检索效率。对铁路 10 kV 供电调度监控信息进行具体工程算例测试, 结果表明: 该架构对非主行键的检索仅需 161 ms, 满足工程应用的需要。

参考文献

- [1] 庞福滨, 杨毅, 袁宇波, 等. 智能变电站保护动作时间延时特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 86-92.
PANG Fubin, YANG Yi, YUAN Yubo, et al. Research on characteristics of intelligent substation protection time delay[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 86-92.
- [2] 蔡骥然, 郑永康, 周振宇, 等. 智能变电站二次设备状态监测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 148-154.
CAI Jiran, ZHENG Yongkang, ZHOU Zhenyu, et al. A survey of research on secondary device condition monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 148-154.
- [3] 于斐. 智能电网的发展及实施[J]. 电力技术, 2009(9): 1-6.
YU Fei. The development and implementation of smart grid[J]. Electric Power Technology, 2009(9): 1-6.
- [4] 关杰, 白凤香. 浅谈智能电网与智能变电站[J]. 中国电力教育, 2010(21): 251-253.
GUAN Jie, BAI Fengxiang. Discussion of smart grids and smart substations[J]. China Electric Power Education, 2010(21): 251-253.
- [5] 秦红霞, 武芳瑛, 彭世宽, 等. 智能电网二次设备运维新技术研讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 35-40.
QIN Hongxia, WU Fangying, PENG Shikuan, et al. New technology research on secondary equipment operation maintenance for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 35-40.
- [6] HE Jinghan, LIU Lin, DING Fanfan, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 102-110. DOI: 10.1186/s41601-017-0043-3.
- [7] 裘榆涛, 胡雪平, 凌光, 等. 国网公司智能变电站继电保护标准体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 7-13.
QIU Yutao, HU Xueping, LING Guang, et al. Research on state grid's technical specification system of relay protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 7-13.
- [8] 王小海, 齐军, 侯佑华, 等. 内蒙古电网大规模风电并网运行分析和思路[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 90-96, 146.
WANG Xiaohai, QI Jun, HOU Youhua, et al. Operation research for large scale wind power grid integration and further developments in inner mongolia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 90-96, 146.
- [9] ABADI D J. Query execution in column-oriented database systems[R]. Boston, MA: MIT, 2008.

[10] ABADI D J. Column-oriented database systems[C] // Proc VLDB Endow, 2009.

[11] YOON Y, JEONG C, LEE J, et al Hybrid database table stored as both row and column store: U.S. Patent Application 13/334, 711[P]. 2011-12-22.

[12] IVANOVA M G, KERSTEN M L, NES N J, et al. An architecture for recycling intermediates in a column-store[J]. ACM Transactions on Database Systems, 2010, 35(4).

[13] BHUPATHIRAJUL V. The dawn of big data – HBase[C] // IT in Business Industry and Government 2014 Conference, IEEE, 2014, Indore: 1-4.

[14] 孟祥萍, 周来, 王晖, 等. HBase 在智能电网异构数据同步中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 122-128.
MENG Xiangping, ZHOU Lai, WANG Hui, et al. Applications of Hbase for heterogeneous data synchronization in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 122-128.

[15] SAI T, YU L, JIANLIANG X, et al. Lazy-Update B+-Tree for flash devices[C] // 2009 Tenth International Conference on Mobile Data Management: System, Service and Middleware, May 18-20, 2009, Taipei: 323-328.

[16] 华为. HBase 二级索引 hindex [EB/OL]. [2016-06-15]. <https://www.oschina.net/p/hindex>.

[17] RAJESHBABUC. hindex[EB/OL]. [2016-06-15]. <https://github.com/Huawei-Hadoop/hindex>.

[18] 葛微, 罗圣美, 周文辉, 等. HiBase:一种基于分层式索引的高效 HBase 查询技术与系统[J]. 计算机学报, 2016, 39(1): 140-153.
GE Wei, LUO Shengmei, ZHOU Wenhui, et al. HiBase: a hierarchical indexing mechanism and system for efficient HBase query[J]. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(1): 140-153.

[19] 艾列富, 于俊清, 管涛, 等. 大规模图像特征检索中查询结果的自适应过滤[J]. 计算机学报, 2015, 38(1): 122-132.
AI Liefu, YU Junqing, GUAN Tao, et al. Adaptively filtering query result for large scale image feature retrieval[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(1): 122-132.

[20] 郑榕增, 林世平. 基于 Lucene 的中文倒排索引技术的研究[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(3): 80-83.
ZHENG Rongzeng, LIN Shiping. Research of Chinese full texts inverted index based on Lucene[J]. Computer Technology and Development, 2010, 20(3): 80-83.

[21] 马健, 张太红, 陈燕红. 中文搜索引擎分块倒排索引存储模式[J]. 计算机应用, 2013, 33(7): 2031-2036.
MA Jian, ZHANG Taihong, CHEN Yanhong. New inverted index storage scheme for Chinese search engine[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(7): 2031-2036.

收稿日期: 2017-11-29; 修回日期: 2018-02-11

作者简介:

屈志坚(1978—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为智能监控理论与信息处理; E-mail: 08117324@bjtu.edu.cn

范明明(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为大数据查询; E-mail: 573599681@qq.com

周锐霖(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高铁牵引变电所智能监控。E-mail: 1628939785@qq.com

(编辑 魏小丽)