

面向存储管理的 RFID 中间件设计与实现*

鄂晓征, 李松, 陈定方

(武汉理工大学 物流工程学院, 湖北 武汉 430063)

通讯作者: 鄂晓征, E-mail: e.xiaozheng@163.com

摘要: 现代物流对信息获取的及时性和准确性提出更高的要求. 将 RFID 技术应用于物流容器, 用以保存动态的物流信息, 由此提出了信息容器的概念. 针对 RFID 系统缺少存储管理、读写器对标签数据访问效率低的问题, 设计实现了标签操作系统(tag operating system, 简称 TOS) RFID 中间件体系. TOS 依据电子产品代码(electronic product code, 简称 EPC)的长度对标签内存进行分页, 在标签内存中构建位示图以索引存储空间使用状态, 应用数据存储格式标识提升内存分页的灵活性, 并在上位机建立实时内存数据库提高对标签数据查询的效率. 实验结果显示, TOS 中间件可以提高读写器对标签数据的操作效率. TOS 中间件可普遍应用于物品的生命周期管理.

关键词: 存储管理; RFID 中间件; 电子产品代码; 内存分页; 位示图; 实时内存数据库

中文引用格式: 鄂晓征, 李松, 陈定方. 面向存储管理的 RFID 中间件设计与实现. 软件学报, 2013, 24(Suppl. (2)): 73-79. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13025.htm>

英文引用格式: E XZ, Li S, Chen DF. Design and development of RFID middleware for datastore. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013, 24(Suppl. (2)): 73-79 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13025.htm>

Design and Development of RFID Middleware for Datastore

E Xiao-Zheng, LI Song, CHEN Ding-Fang

(School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Corresponding author: E Xiao-Zheng, E-mail: e.xiaozheng@163.com

Abstract: Speed and accuracy of information access are essential in modern logistics operations. In this paper, the RFID technology is applied to logistics containers for keeping information dynamically, and the concept of information containers as opposed to logistics containers is put forward. In order to improve the efficiency of data access on tag, a set of RFID middleware named tag operation system (TOS) is proposed. Firstly, the tag memory is paged according to the length of the electronic product code (EPC). Secondly, a bitmap is built up in the tag memory to index the free memory space. Thirdly, the data storage format identifier (DSFID) is designed to make memory paging more flexible. Finally, real-time memory database is set up in the host computer to improve efficiency of tag data query. The experimental results show that TOS can greatly enhance the efficiency of the reader operations on tag. TOS can be widely applied to the applications of lifecycle management of articles.

Key words: memory management; RFID middleware; EPC; memory paging; bitmap; real-time memory database

无线射频识别(RFID)由读写器和电子标签组成, 是一种利用电磁波在开放系统环境中为对象提供标识的自动识别技术. 作为物联网技术的重要组成部分, RFID 具有寿命长、大容量、可读写、可群读及非视距读取等特点, 目前已被广泛地应用在数据采集和物品识别领域.

1 信息容器及其困境

用于贸易的商品单元在物流过程中的属性保持不变, 适合用条形码标识. 然而, 为提高物流作业的效率 and 管

* 基金项目: 国家自然科学基金(51175394)

收稿时间: 2012-06-30; 定稿时间: 2013-05-24

理水平,物流作业操作的直接对象并非商品本身,而是集装箱、托盘或周转箱等物流容器与商品组成的物流单元,也即物流过程中的集装单元。目前,这类实体也使用基于条形码技术的物流标签来标识。但是,条形码受限于码容,仅能表示物流过程中的关键信息,不能灵活地记录物流的动态过程。与条形码相比,电子标签拥有更大的存储空间,可记录所承载商品的序列号、颜色、生产日期、所在位置,以及商品在到达最终用户手中之前,所经过的所有配送点的列表等用户关心的信息。并且,电子标签可读写特性使容器内容与标签信息的同步成为可能,即时反应物流中信息的动态变化过程,相比条形码更适合为物流单元提供标识^[1]。最后,电子标签的寿命更长,可与容器一起循环再利用,从而降低物流成本。所以,类似于物流容器,本文将用于物流容器上,为集装单元提供物流信息的电子标签称为信息容器。

学术界,RFID 的防冲突算法一直是学者们研究的热点之一^[2],但至今仍未很好地解决多标签识读可靠性问题^[3]。由于识读距离较远,使用超高频和微波 RFID 系统作为信息容器会出现不可控制的误读和漏读情况。所以,基于电磁反向散射耦合的系统并不适合作为信息容器。而电感耦合的低频系统通信速度慢,标签容量也小。基于 ISO-15693 协议的 13.56MHz 高频系统使用比特(Bit)级数据格式定义,因具有足够的存储容量和较快通信速度,在有效识读距离内能够保证读写操作的可靠性,成为信息容器的最佳载体。

用电子标签存储物流信息,可以即时反应容器内容的变化,提高获取信息的效率。但是,要真正实现现代物流中商品流和信息流的统一,还需要解决电子标签数据操作的关键问题。例如,运输时承运商的临时变更,配送线路的改变,仓储过程中对商品的分拣和包装等。在这些情况下,为同步实体与信息,读写器需要对电子标签的数据执行高频次的添加和删除指令。然而,ISO-15693 协议仅定义了电子标签存储器的字段以及数据格式,没有对其保存数据组织和管理的相关要求,数据操作效率较低。读写器与电子标签的数据传输速度与载波频率关系密切,13.56MHz 高频系统的理论最大通信速度为 26.48kb/s^[4],实际工作时,受串口通信的影响,这个数值会更低。实验表明,以 9 600bps 波特率完全读取一张 2kbits 的电子标签,需要耗时 2.5s 以上。更多的时间会耗费在对标签存储器内特定数据的查找过程中,最终导致数据操作效率低下,其根本原因在于现有系统缺乏对标签内存的存储管理。

2 标签存储管理与 RFID 中间件

存储管理原是计算机操作系统的重要任务,包括对内存和外存的管理。这里指对 RFID 系统的存储管理,对象为电子标签的存储空间。存储管理的职能有:标签内存的分配和回收;存储保护;地址转换等。根据电子标签存储数据的特点,本文将构建比特级的分区存储管理体系,实现对标签内存及数据的组织与维护,以提高数据存储应用下 RFID 系统的响应速度。对 RFID 标签的内存的存储管理属于 RFID 中间件的研究范畴。

RFID 中间件作为处于 RFID 读写设备与后端应用之间的软件,提供了对不同数据采集设备的硬件管理,以及对来自这些设备的数据进行过滤、分组、计数、存储等处理,并为后端的企业应用程序提供符合要求的数据。其核心功能是对读写器硬件的管理和对标签数据的预处理。从目前国内外对 RFID 中间件的研究现状来看,这类研究主要集中在读写器从多标签系统中获取信息后,上位机对数据的组织和处理算法,以获得更佳的查询效率。包括,Ahn 等人^[5]通过树对标签中位置数据排序和索引,提高指定标签的发现的效率;Dai 等人^[6]在上位机主内存中建立了一种一次性的空间数据索引结构,在提升查询效率的同时,减轻了大量移动数据对计算机内存的消耗;Bok^[7]等人研究了在大型仓库中货物的运动规律,采用压缩和索引组织数据,提高了仓库内货物的追踪效率;国内的喻剑^[8]等学者应用改进的 T 树结构,消除多标签应用的系统中内存数据库的效率瓶颈。在对单标签内存数据维护方面,釜山大学做了一定的研究工作。Jang^[9]在 ISO-18000 标准协议下的电子标签中创建缓存状态字,用以维护多读头对单标签操作情况下的数据一致性,并利用读写器缓存提高对标签内存访问的效率。现有研究都未能从根本上提升 RFID 读写器对标签内存的操作效率。本文将在分析标签内存空间结构的基础上,通过软件管理标签内存的方式,研究能够大幅提供 RFID 标签数据管理性能的中间件。

3 TOS 中间件设计

本文 RFID 中间件设计的主要目的是为电子标签内存数据增加存储管理功能,提高读写器对标签执行添加,删除和查询等操作的效率,本文称为标签操作系统(tag operating system,简称 TOS).TOS 的研究对象是电子标签的存储空间,图 1 所示为符合 ISO-15693 标准的标准的 I•CODE SL2 ICS20 型标签的内存空间组织结构图.

从图 1 可以看出,此标签共 32 个区块(block),容量为 1024bits.为方便表述,本文约定用 Block[b]表示第 b 个区块,其中 $-4 \leq b \leq 27, b \in \mathbb{N}$.那么,从 Block[0]到 Block[27]共计 28 个区块为用户数据区,可根据应用自由读写数据.Block[-4]和 Block[-3]是只读的标签 UID(Unique Identifier,唯一性标识),可用以为容器自身提供唯一性标识.

区块是读写器对电子标签操作的最小数据单位.读写器对 RFID 标签的读写操作分为直接操作和寻址操作两种类型.直接操作用于具有固定地址字段,包括 UID,application field identifier,应用领域标识)和 DSFID(Data Saved Format Identifier,数据存储格式标识)等,ISO-15693 协议定义了直接访问这类字段的方法.另一方面,由于用户数据区的区块数目较多,对用户数据区的读/写操作需要指定操作的区块编号,属于寻址操作.例如向 Block[b]写入数据 data 的函数为 Write(byte b, IntPtr data),而读出数据的函数为 Read(byte b, byte n, IntPtr data).其中,读操作需要指出起始区块编号和连续读出的区块数目,而写操作只需要给定要写入数据的目标区块编号,系统将从指定区块开始依次向后写入数据,直至数据全部写入标签或者写完标签的最后一个区块.

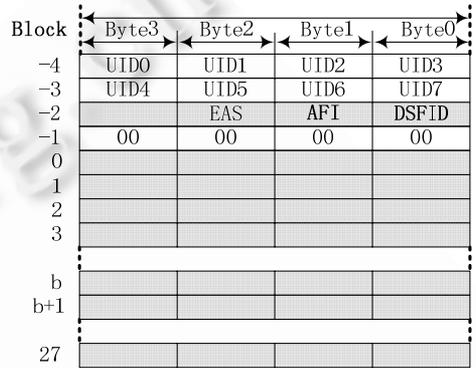


图 1 标签内存组织结构图

3.1 内存分页

电子产品代码(electronic product code,简称 EPC)是使用 RFID 技术为产品提供标识的编码标准.根据 EPC

Global 对标签数据的定义,EPC 可采用 96-bit 通用定长编码或针对不同应用领域的特定长度编码结构^[10].为管理每一个 EPC 代码,本文定义:每个 EPC 所使用的电子标签存储空间称为一个页面(page),如图 2 所示.

图 2 中,将 Block[3p], Block[3p+1]和 Block[3p+2], $(0 \leq p \leq 9, p \in \mathbb{N})$ 这 3 个连续的区块构成一个页面,p 称为该页面的页码.这样,在向标签中增加或者删除一个 EPC 代码的时候,对相应的页面操作可以保证不会影响到其它有效数据,读写 96-bit EPC 的操作也就转换成对一个页面的读写操作.内存的分页明确了操作的目标,保护了数据的完整性和连续性,并提高了内存的使用效率.

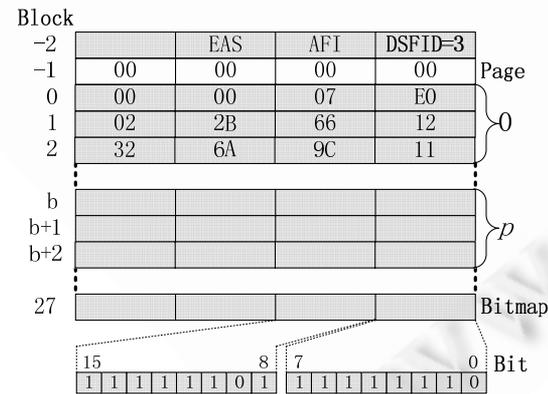


图 2 对标签内存的分页及索引

正如前文提到的,影响读写器对电子标签数据操作效率的主要原因是特定数据的查找.为了保护标签中的已有数据,在向标签添加数据时,需要判断目标页面是否已被占用,只有空白页面才能写入 EPC 数据.每次比较判断都需要一次读标签操作,反复地读写标签是降低 RFID 系统速度的主要原因.所以,通过对内存的分页,并不能减少对标签读写次数.为了提高空页面的寻址速度,本文将进一步在内存中构建位示图.

3.2 位示图

位示图也叫字位映像图,利用一个二进制位(bit)表示内存中一个页面的状态.在实践中,用 0xFF 对标签置空要比用 0x00 更容易实现,为此,这里规定当位示图中的标记位值为 0 时,表示对应的页面已被占用;标记位值为 1 时,表示该页面处于空闲状态.例如,在图 2 中,Block[27]所有位构成了位示图. SL2 ICS20 标签的用户数据区共 28 个区块,除去位示图,其余空间被划分成 9 个页面,所以,位示图的 32 个位中只使用了 10 个.与 Page[0]对应的位示图 Bit[0]被标记为 0,表示 Page[0]存储着有效的 EPC 代码.Bit[9]在中间件系统对标签初始化被置位 0,标识 Page[9]正被使用,以从中间件层面保护位示图数据区.

应用位示图可以快速地执行空间分配和删除数据操作.在添加 EPC 时,系统从 Bit[0]开始查找位示图中标记位为 1 的页面分配给用户使用,比如 Page[1],Page[2]等.应用位示图删除前述 EPC 数据则更简单直接,仅需将 Page[0]对应的标记位 Bit[0]取反即可,而不必要向 Page[0]写入 12 个字节的 0xFF.在后续的写入操作时,RFID 中间件会将 Page[0]再分配给用户,在写入新的 EPC 的过程中覆盖掉原有数据,有效减少了读写操作的次数,提高 RFID 系统的操作效率.

位示图数据映射了电子标签存储器的使用状态.若 TOS 的位示图数据损坏,则意味着整张标签数据的丢失.所以,出于数据安全的考虑,将标签内存的最后一个区块定义为位示图区.

3.3 改进内存分页

除 96-bit 的 EPC 代码以外,EPC Global 面向不同的应用还定义了不同长度的 EPC 编码方案,如 198-bit 的序列化全球贸易项目代码(serialized global trade item number,简称 SGTIN),113-bit 的全球文档类型标识(global document type identifier,简称 GDTI)等,以解决 96-bit 版本可能出现的码容不足的问题.上文针对 96-bit 的 EPC,通过内存分页和位示图实现了对标签内存空间的管理,属于静态的内存分页,灵活性较差,无法满足其他版本 EPC 的应用.为提高内存分页的灵活性,本文利用 DSFID 字段记录 EPC 的版本格式.

DSFID 是 ISO-15693 协议的规定字段,由用户根据应用自由定义,用以表示存储在电子标签中的数据格式.这里定义,DSFID 表示页面的大小,也即电子标签存储的单个 EPC 所占用的区块数,用 d 表示,有:

$$d = \left\lceil \frac{B_E}{B_b} \right\rceil.$$

上式中, B_E 为 EPC 的位长度, B_b 是每区块的比特数,本文用的标签 $B_b=32$, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整.当使用 96-bit 的

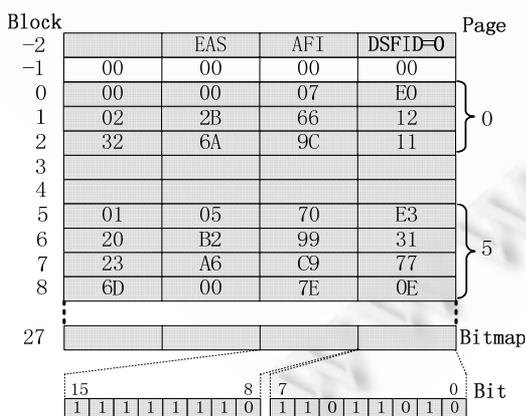


图 3 改进的内存分页

图 3 中,两个页面的大小分别为 3 和 4,将页面起始区块的首地址作为页面编号,并利用位示图反映存储空间分配状态.在位示图区,每个比特位对应用户数据区一个区块,EPC 开始和终止区块的地址在位示图中都用 0 表示,其余位用 1 填充.奇-偶 0 及其之间的 1 表示被 EPC 占用的区块,偶-奇 0 之间的 1 代表自由区块.此页面分

EPC 时, $d=3$.在中间件对标签初始化的过程中,根据需要保存的 EPC 位长度,将 d 的值写入到每张标签的 DSFID 中,如图 2 中 Block[-2] 的 Byte[1].应用过程中,首先读取容器电子标签 DSFID 的值 d ,再通过位示图查找符合条件的页面 p ,根据 $b=p \times d$ 转换为本次操作的目标区块首地址 b ,执行对从 Block[b] 开始到 Block[$b+d-1$] 为止的 d 个区块的读写操作,完成一次指令过程.

以上设计可以满足 EPC 编码方案明确且固定时的应用.如需在一张电子标签中保存不同长度的 EPC 代码,比如,Block[0] 至 Block[2] 保存 SGTIN-96,Block[5] 至 Block[8] 存储 GDTI-113,由于每张标签的 DSFID 只有一个,则无法用唯一的 d 值标识.此时,令 $d=0$,并定义位示图如图 3 所示.

配方法仅通过位示图,利用符号 0 和 1 的奇偶位置关系,同时能够反映页面大小以及内存的使用状态,能够满足不同位长度 EPC 编码混用的需求,称为动态内存分页。

与静态分页相比,动态内存分页的位示图区将占用更多的内存空间,且无法表示仅占用一个区块的页面,但较好地实现了对标签数据区的动态分页管理,提高了标签内存的使用效率,增加了 TOS 应用的灵活性和适用性。

3.4 实时内存数据库

通过位示图的映射,可以快速判断标签内存的使用状态,有效避免对自由区块的无谓操作,但仍不能解决数据比较的问题。例如,在添加 EPC 时,避免重复地写入,以及删除操作时,从标签中删除恰当的数据,都需要将从读写器读到的物品代码与标签中的数据进行比较。获取标签中的数据,是从前向后遍历标签的过程。如果每次添加和删除操作都要对标签的有效数据区进行遍历,将会耗费大量的时间,降低工作效率。另一方面,如果保存 EPC 在标签内存中的地址至数据库系统,则在物流作业过程中,大量高频次的查询和更新操作也会增加服务器和网络的负荷。本文通过在上位机内存中构建实时内存数据库(real-time memory database,简称 RTMDB)来解决 RFID 查寻速度慢的问题。

在上位机内存创建 Int32 类型变量 *iBM* 和 Dictionary(*p, strEPC*)类型对象 *dEPCs*,利用该对象保存 EPC 与其在标签内存中的首地址之间的映射关系。电子标签进入读写器有效工作范围后,首先读取标签的标签位示图数据并保存到 *iBM*。比较数据时,根据位示图,优先从 *dEPCs* 对象中查找,若 *dEPCs* 对象中不存在相应键值 *p*,则从标签中读取键 *p* 对应的 EPC,并立即保存至 *dEPCs* 对象,供后续操作使用。添加和删除操作成功执行后,需要同步更新 *iBM* 变量和 *dEPCs* 对象,保持 RTMDB 与电子标签数据的一致。当电子标签即将离开读写器工作范围时,写回 *iBM* 变量至标签位示图区,最后释放掉内存中的变量。整个过程,内存数据库的生命周期即电子标签在读写器有效工作范围内的时间,因此称为实时内存数据库。

位示图标记了标签内存的分配状态,有助于对标签自由空间的快速寻址。内存数据库的建立则提高了数据比较的效率。TOS 的电子标签在使用前,应根据需要对电子标签进行初始化。TOS 的应用流程与相关操作如图 4 所示。

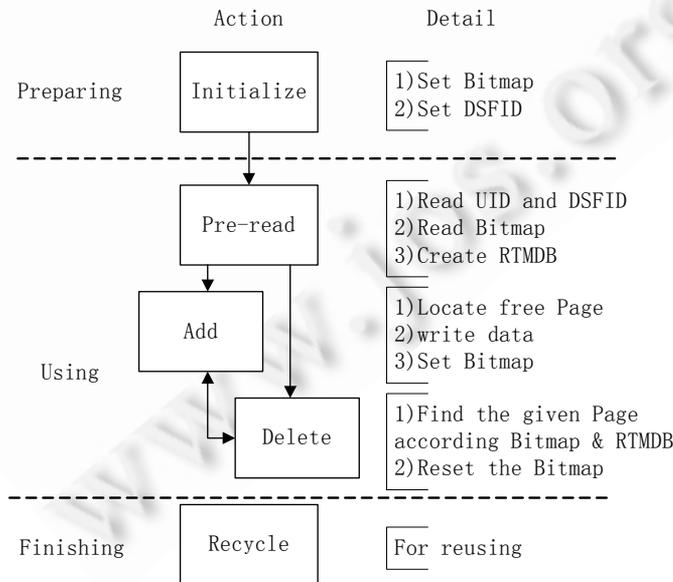
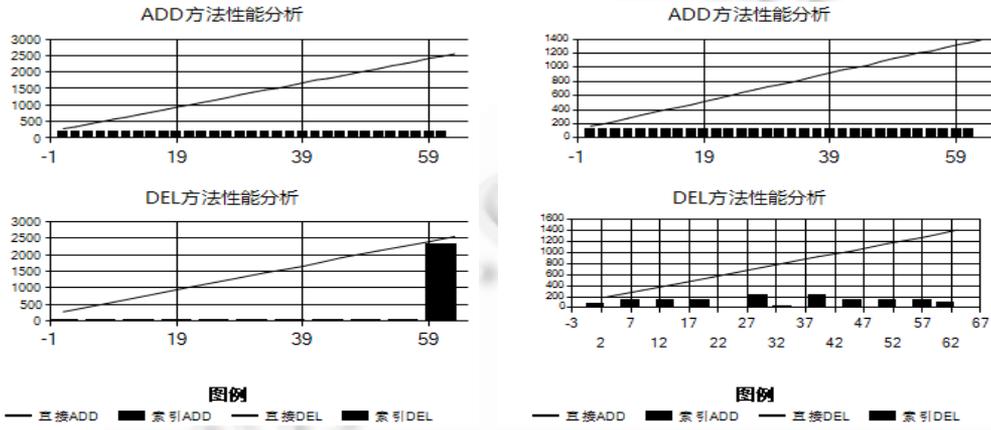


图 4 TOS 的标签操作及其流程

4 实验分析

为分析 TOS 的实际性能,本文使用 Visual Studio 2010 在 Net Framework 4.0 环境下创建了测试软件,实验使用 D-Think 501D 型高频读写器,分别以 9 600bps 和 57 600bps 两种不同的串口通信速度,对 Tag-it 标签(2kbits 内存空间)进行添加和删除 64-bit EPC 的测试.软件记录读写器执行各操作的时间,并以 Microsoft Chart 控件呈现结果,得到如图 5 所示的运行结果.



(a) 串口工作在 9600bps 下 (b) 串口工作在 57600bps 下

图 5 TOS 中间件时间性能分析

图 5 中,不使用 TOS 的直接方案用折线图表示;使用 TOS 的中间件方案(图例中的索引)用柱状图表示.横坐标为目标区块的编号;纵轴表示操作耗费的时间,以 ms 为单位.添加(ADD)数据为全标签操作,即向标签中所有的用户数据区添加数据,直到标签存储空间用尽为止;删除(DEL)是在添加操作的基础上,随机选择页面执行删除操作.

从图 5 中可以看出,不使用 TOS 的直接操作消耗的时间与操作的目标区块地址 b 成正比,与添加或删除方法无关.串口波特率直接影响读/写操作的速度,波特率越高,操作的速度越快.对标签最后一个页面的操作耗时,57 600bps 下约 1.4s,而 9 600bps 下长达 2.5s.在使用 TOS 中间件后,添加方法的时间消耗均降到 0.2s 左右,均为寻找到目标页面后的一次数据写入时间,与页面的地址无关,时间曲线也由一次降为 0 次.删除操作中,利用了 RTMDB 进行数据比较,TOS 消耗时间总和等同于读取一次全标签的时间.图 5(a)是从最大页面 toward 最小页面逆向删除生成的图线,由于第 1 次读标签操作就在内存中创建了完整的 RTMDB,所以其它页面的操作时间消耗很低;图 5(b)显示以不定的间隔,从前向后删除数据的结果,间隔页面越多,单次操作时间就越长,如 Block[27]处;当 RTMDB 构建完成后,对其他页面的删除操作时间消耗不再受 Block 地址的影响,如 Block[32]处.

可以看出,当 RTMDB 构建完全,含有标签中所有数据后,删除操作将变得非常高效,时间消耗降到微秒级,这是由于删除任务完全是在上位机的内存数据库中完成,通过计算机中的位运算实现.待所有操作都完成后才将 RTMDB 中的位示图信息写入标签的位示图区.

5 TOS 的应用

意法半导体推出的 LRiS64K 型电子标签容量高达 64-kbit.该电子标签可为“技术设备提供详细的设备保养与维修信息,例如完整的检修记录,进而加快原始设备厂商和设备运营商的检修速度,并简化设备工作记录”.然而,面对如此巨大的存储空间,若没有可靠且有效的内存管理手段,势必影响 RFID 系统的工作效率.

TOS 中间件利用比特级位示图,在电子标签内存中建立了对其他用户数据区的数据的索引,实现了对标签内存的存储管理,以及 RFID 系统在数据存储环境下的读写效率.

基于 TOS 中间件的 RFID 系统可以满足将电子标签用作数据载体的数据存储应用环境.将电子标签用于物

流容器,能够反映物流信息的动态变化;用于 RFID 传感器,可以组织传感器数据并保存至电子标签的内存;也可以用于产品溯源,利用电子标签存储空间大的特点保存产品生命周期的关键信息.总之,TOS 在面向数据存储的 RFID 系统应用环境中起至关重要的作用.

6 结束语

创新地将存储管理的思想用于电子标签,以应对 RFID 系统在数据存储应用中效率低下问题.采用分区存储管理方法,提出了比特级的电子标签存储管理 RFID 中间件体系——TOS 中间件.TOS 中间件通过内存分页保持数据完整性;通过建立位示图索引标签内存分配状态;通过内存数据库实现数据的快速比较;并使用 DSFID 标识页面大小,再次改进内存分页,增加了内存分页的灵活性和 TOS 中间件的普遍适用性.实验分析了 TOS 中间件的性能,结果表明,TOS 中间件能大幅提升读写器对 RFID 标签数据的操作效率.

References:

- [1] E XZ, Li WF. The design and application of RFID tag system for logistical unit. In: Proc. of the Int'l Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2008. [doi: 10.1109/WiCom.2008.1465]
- [2] Hachani A. RFID estimation functions overview. In: Proc. of the 23rd Int'l Conf. on Microelectronics. 2011. [doi: 10.1109/ICM.2011.6177410]
- [3] Zhu XW, Mukhopadhyay SK., Kurata H. A review of RFID technology and its managerial applications in different industries. Journal of Engineering and Technology Management, 2012,29(1):152-167. [doi: 10.1016/j.jengtecman.2011.09.011]
- [4] ISO/IEC 15693. http://en.wikipedia.org/wiki/ISO/IEC_15693
- [5] Ahn S, Hong B. Reordering for indexing in an RFID tag database. Journal of Information Science and Engineering, 2009,25(6): 1671-1690.
- [6] Dai J, Lu CT. DIME: Disposable index for moving objects. In: Proc. of the 12th IEEE Int'l Conf. on Mobile Data Management. 2011. 68-77. [doi: 10.1109/MDM.2011.69]
- [7] Bok KS, Yeo MH, Lee BY, Yoo JS. Efficient complex event processing over RFID streams. Int'l Journal of Distributed Sensor Networks, 2012. [doi: 10.1155/2012/435213]
- [8] Yu J. Research on key technology of RFID middleware [Ph.D. Thesis]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [9] Jang SY, Chung SH, Kim HP. A study on management of active RFID tag memory map using caching. In: Proc. of the 9th Int'l Conf. on Advanced Communication Technology. 2007. 98-101. [doi: 10.1109/ICACT.2007.358313]
- [10] EPCglobal. GS1 EPC Tag Data Standard. 2011. http://www.gs1.org/gsm/kc/epcglobal/tds/tds_1_6-RatifiedStd-20110922.pdf

附中文参考文献:

- [8] 喻剑.RFID 中间件关键技术研究[博士学位论文].广州:华南理工大学,2009



鄂晓征(1979—),男,湖北武汉人,博士,讲师,主要研究领域为物联网技术,RFID 中间件,仓储自动化.

E-mail: e.xiaozheng@163.com



陈定方(1946—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为 CAD 与专家系统,科学计算可视化与计算机仿真,基于网络的虚拟设计/制造.

E-mail: dfchen@whut.edu.cn



李松(1975—),男,博士,副教授,主要研究领域为物联网技术,RFID 天线设计与测量.

E-mail: Songli_008@126.com