

第 5 章 射频识别防碰撞算法分析

5.1 射频识别防碰撞概述

随着自动识别技术的发展,射频识别(RFID)技术逐渐兴起,对供应链管理、物流、生产控制和零售等领域产生了重要影响,并将成为未来自动识别技术的主流。RFID 技术利用无线射频方式进行非接触双向通信,以达到识别目的并交换数据,其原理是利用射频信号、空间耦合和传输特性实现对物体的自动识别。

典型的 RFID 系统主要包括 3 个部分:电子标签(tag)、读写器(reader)和数据处理^[21]。电子标签放置在被识别的对象上,是 RFID 系统真正的数据载体。通常电子标签处于休眠状态,一旦进入读写器作用范围之内就会被激活,并与读写器进行无线射频方式的非接触式双向数据通信,以达到识别并交换数据的目的。读写器是可以利用射频技术读、写电子标签信息的设备。数据处理主要是对所识别的对象进行相关处理的部件。RFID 系统结构如图 5-1 所示。

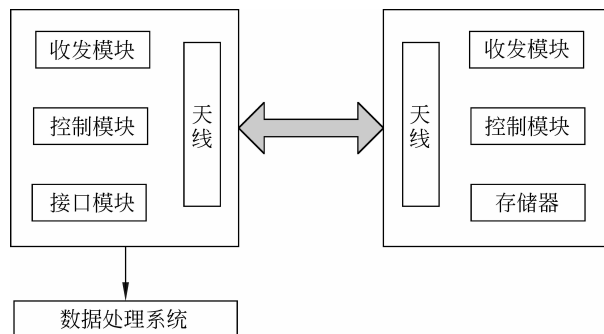


图 5-1 RFID 系统结构图

RFID 系统工作时,当读写器的射频场作用范围内存在多个标签,并有两个或者以上的标签同时响应读写器,同时发送数据,就会产生通信冲突,使读写器无法识别标签,称为标签碰撞;同样有时也有电子标签处于多个读写器的工作范围之内,读写器之间由于工作范围重叠,导致信息读取失败,称为读写器碰撞。因此 RFID 系统中的碰撞分为标签碰撞和读写器碰撞,由于整个读写器系统一般是一个静止的体系,只需要在全球上合理分配时间和频率就可有效地克服读写器碰撞问题,因此标签碰撞问题就成为 RFID 系统发展的瓶颈。解决碰撞的算法称为防碰撞算法。良好的防碰撞算法可以有效地解决标签的碰撞问题,实现标签的快速、高效的读取^[22]。

5.2 防碰撞复用技术

RFID 系统常用的防碰撞复用技术主要有以下 4 种：频分多路法 (Frequency Division Multiple Access, FDMA)、空分多路法 (Space Division Multiple Access, SDMA)、码分多路法 (Code Division Multiple Access, CDMA) 和时分多路法 (Time Division Multiple Access, TDMA)。

5.2.1 频分多路法

频分多路法 (FDMA) 是把若干个使用不同载波频率的调制信号传输通路同时供通信用户使用的技术。

具体的 FDMA 可以如图 5-2 所示。其中对电子标签的能量供应以及控制信号的传输使用最佳的适用频率 f_a 。电子标签的应答可以使用若干个供选用的电子标签频率 $f_1 \sim f_n$ 。

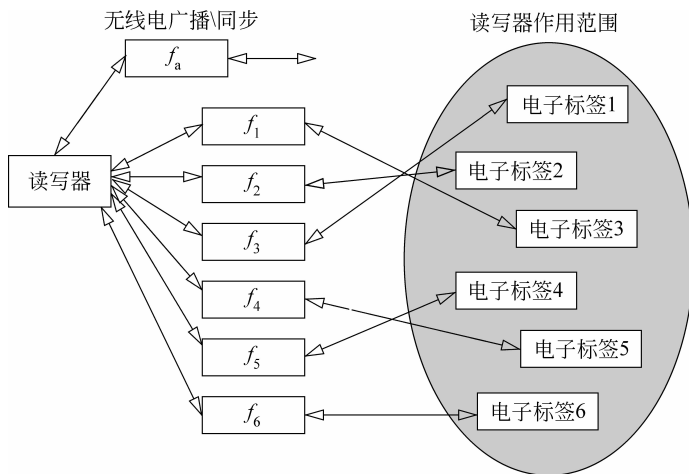


图 5-2 频分多路法

通常情况下,RFID 系统的前向链路(从读写器到标签)频率是固定的,用于能量的供应和数据的传输。对于反向链路(从标签到读写器),不同的标签采用不同频率的载波对数据进行调制,这些信号之间不会产生干扰,读写器接收到不同频率的信号后,可以将不同频率的信号进行分离,从而实现对不同标签的识别。

频分多路法的缺点是对读写器和标签的成本要求较高,因为在每个接收通路上都必须有自己单独的接收器供使用。因此在实际 RFID 系统的应用中,频分多路法也很少使用。

5.2.2 空分多路法

空分多路法 (SDMA) 是在分离的空间范围内实现多个目标识别。其实现的方法有两种。

(1) 将读写器和天线之间的作用距离按空间区域进行划分,把大量的读写器和天线安置在一个天线阵列中。当标签进入这个天线阵列的覆盖范围后,与之距离最近的读写器对该标签进行识别。由于每个天线的覆盖范围较小,相邻的读写器识别范围内的标签同样可以进行识别而不受到相邻的干扰。如果有多个标签,根据在天线阵列中的空间位置的不同,可以同时被识别。

(2) 读写器利用一个相控阵天线,使天线的方向性图对准单独的标签,这样标签根据其在读写器作用范围内的角度位置的不同而区别开来。相控阵天线由若干个偶极子元件构成,这些偶极子元件由独立的、确定的相位控制,天线的方向由各个不同方向上的偶极子的单个波叠加而成,偶极子元件的单个场叠加,由于相位的关系,在某个方向上得到加强,而在其他方向上则全部抵消或部分抵消而被削弱。为了改变方向,可以调节各个偶极子供给的可调高频电压。

具体的自适应 SDMA 模型如图 5-3 所示。

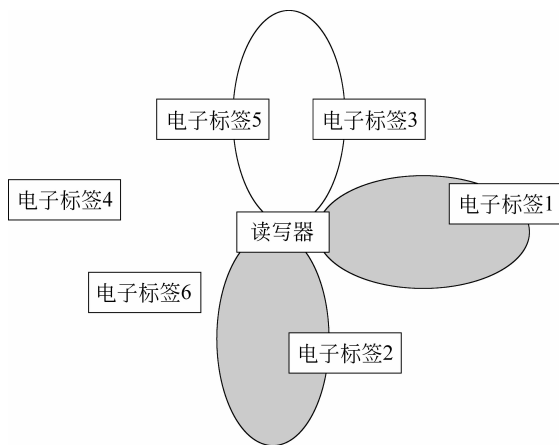


图 5-3 自适应空分多路法

空分多路法的缺点是需要使用复杂的天线系统,不易实现,并且会大幅提高 RFID 设备的成本,因此这种方法只适用于一些特殊的应用场合。

5.2.3 码分多路法

码分多路法(CDMA)是在扩频通信技术的基础上发展起来的一种无线通信技术。扩频技术包含扩频(spread spectrum)与多址(multiple access)两个基本的概念。扩频是将信息带宽扩展,即把需要发送的具有一定信号带宽的信息数据用一个带宽远大于其信号带宽的伪随机码进行调制,这样使原来的信息数据的带宽被扩展,最后通过载波调制发送出去。解扩是指在接收端采用完全一致的伪随机码,与接收到的宽带信号做相关处理,把宽带信号转换成原来的信息数据,以实现通信。

码分多路法具有抗干扰性好、保密安全性高、信道利用率高的优点。但是该技术也存在频带利用率低、信道容量小、伪随机码的产生和选择较难、接收时地址码捕获时间长等缺点,所以该方法很难应用于实际的 RFID 系统中。

5.2.4 时分多路法

时分多路法(TDMA)是把整个可供使用的通路容量按时间分配给多个用户的技术。目前 RFID 系统的标签防碰撞算法中大多采用时分多路法。该方法可以分为标签控制法和读写器控制法。详细分类如图 5-4 所示。

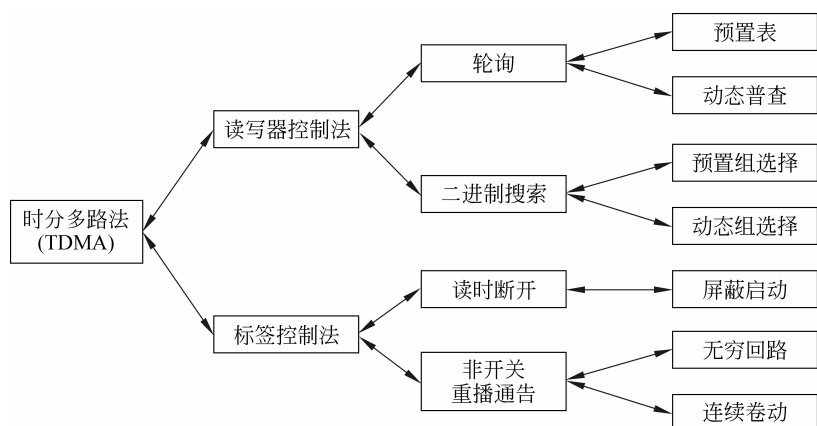


图 5-4 TDMA 法的分类

在标签控制法中,读写器没有对数据传输进行控制,标签的工作是非同步的。按照标签被成功识别后是否通过读写器发出的命令进入“静默”状态,标签控制法可以分为开关断开法和非开关法。

在读写器控制法中,所有标签同时由读写器进行观察和控制。按照规定的算法,在读写器作用范围内,首先在标签组中选中的一个标签,然后完成读写器对标签的识别。在同一时间内读写器只能与一个标签建立通信关系,所以如果要选择另外一个标签进行通信,就必须解除与原来标签的通信关系,也就是说在同一时间内只能有单个标签占用通信信道。所以读写器控制法也称作定时双工传输法。

时分多路复用中常见的两大类标签防碰撞算法是 ALOHA 算法和二进制树算法。ALOHA 算法是一种随机性的算法,会出现某一标签在很长时间内无法得到识别,即标签饥渴(Tag starvation)问题。二进制树算法是一种确定性的算法,该类算法比较复杂,识别时间较长,但不存在标签饥渴问题。现阶段,在高频(HF)频段,标签的防碰撞算法一般采用 ALOHA 算法。标签通过随机选择一个时间向读写器发送数据,来避免冲突,绝大多数高频读写器能同时扫描几十个标签。

5.3 标签防碰撞 ALOHA 算法

5.3.1 基本 ALOHA 算法

ALOHA 是一种为交互计算机传输而设计的时分多路法的多路存取方式。1968 年开始研究,最初由美国夏威夷大学应用于地面网络,1973 年应用于卫星通信系统。ALOHA

系统所采用的方式实质上是一种无规则的时分多址,或者称为随机多址。

ALOHA 法是所有防碰撞方法中最简单的,只要有一个数据包提供使用,这个数据包就立即从电子标签发送到读取器去,因此,这种处理本身与电子标签控制的、随机的 TDMA 法有关。

这种方法仅用于只读电子标签中,这类电子标签通常只有一些数据(序列号)需要传送给读写器,并且是在一个周期性的循环中将数据发送给读写器。数据传输时间只是重读时间的一小部分,以致在传输之间产生相当长的间隙。此外,各个电子标签的重复时间的差别是微不足道的。所以存在着一定概率,使两个电子标签可以在不同的时间段上设置它们的数据,使数据包不再互相碰撞。

ALOHA 算法的主要流程如图 5-5 所示。

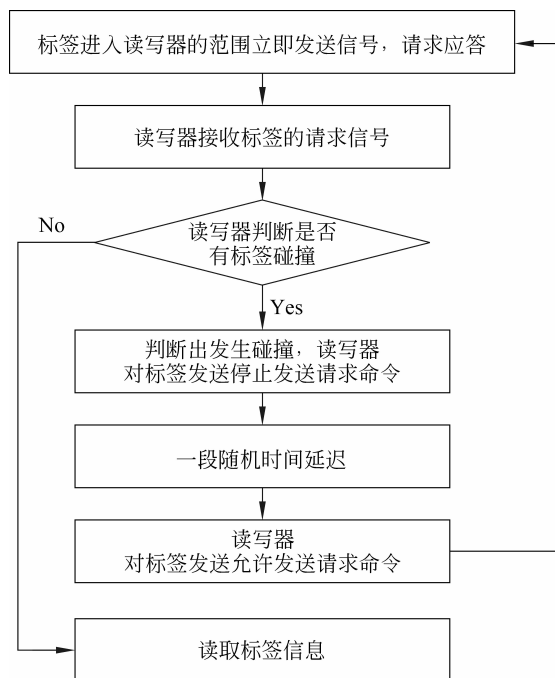


图 5-5 基本 ALOHA 算法流程图

如图 5-5 所示,ALOHA 算法采取“标签先发言”的方式,即标签一进入读写器的作用区域就自动向读写器发送其自身的信息。在标签发送数据的过程中,若有其他标签也在发送数据,那么将会导致碰撞。读写器检测接收到的信号有无碰撞,一旦检测到碰撞,读写器就发送命令让标签先停止发送,随机等待一段时间后再重新发送以减少碰撞。ALOHA 算法的数据传送和碰撞过程如图 5-6 所示。

如图 5-6 所示,假设标签传输数据包所需要的时间为 T_0 ,某一个标签在 t_0 时刻传送数据,如果要在 $(t_0 - T_0) \sim (t_0 + T_0)$ 时间段内,读写器接收到无碰撞数据,则在 $2T_0$ 长度的时间段内就只有这一个标签发送数据^[24]。

由于每秒钟时间内发送的数据包的数目服从泊松分布(Poisson distribution),所以在 t 秒钟发送 n 个数据包的概率是

$$P(n) = (\lambda t)^n e^{-\lambda t} / n! \quad (5.1)$$

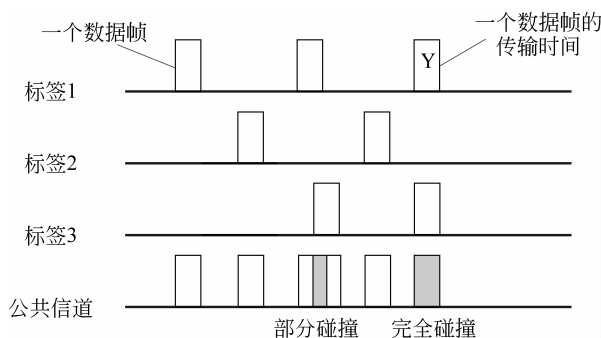


图 5-6 ALOHA 算法的数据传送和碰撞过程

其中, λ 是每秒钟内平均发送的总的数据包数, 输入负载 $G = \lambda T_0$, 在时间段 $2T_0$ 内没有发送数据的概率: $P(n=0) | t=2T_0$, 即 $P_e = e^{-2\lambda T_0} = e^{-2G}$ 。显然, P_e 为到达标签在时间段 $(t_0 - T_0) \sim (t_0 + T_0)$ 内成功通信的概率。定义系统的吞吐率为

$$S = GP_e = Ge^{-2G} \quad (5.2)$$

ALOHA 算法的主要特点是各个标签发射时间是完全随机的, 当工作范围内标签的数量不多时, ALOHA 算法可以很好地工作。缺点是数据帧发送过程中碰撞发生的概率很大, 碰撞周期长, 而且标签自己不能检测碰撞, 只能通过接收读写器的命令判断有无碰撞。当工作范围内的标签数增加时, 发生碰撞的概率增加, 性能急剧下降, 信道利用率只有 18.4%。

5.3.2 时隙 ALOHA 算法

时隙 ALOHA 算法是一种时分随机多址方式, 可以提高 ALOHA 算法的吞吐率。它是将信道分成许多时隙(slot), 每个时隙正好传送一个分组。时隙的长度由系统时钟决定, 各控制单元必须与此时钟同步。对于 RFID 系统, 电子标签都在规定的同步时隙内才能传送数据包, 对所有的电子标签所必需的同步由读写器控制。

算法过程主要通过 3 个命令实现:

(1) REQUEST(请求), 使读写器作用范围内的所有标签同步, 并促使电子标签在下一个时隙里将它的序列号传输给读写器。

(2) SELECT(选择序列号), 将一个事先确定的序列号作为参数发送给电子标签。

(3) READ-DATA(读出数据), 被选中的标签对此命令进行响应。

具体流程如图 5-7 所示。

标签传送数据包是在读写器控制的同步时隙内开始的, 因此时隙 ALOHA 算法的数据碰撞形式只会出现完全碰撞, 不会出现部分碰撞, 具体数据传送和碰撞过程如图 5-8 所示。

从图 5-8 可以看出, 时隙 ALOHA 算法中数据发送碰撞的时间段缩短为 $T = f$ 。因此, 时隙 ALOHA 算法相对基本 ALOHA 算法的吞吐率可以提高一倍。时隙 ALOHA 算法的吞吐率为

$$S = Ge^{-G} \quad (5.3)$$

但是, 时隙 ALOHA 算法需要同步时钟, 标签的设计相对于基本 ALOHA 算法要复杂, 成本也会增加。

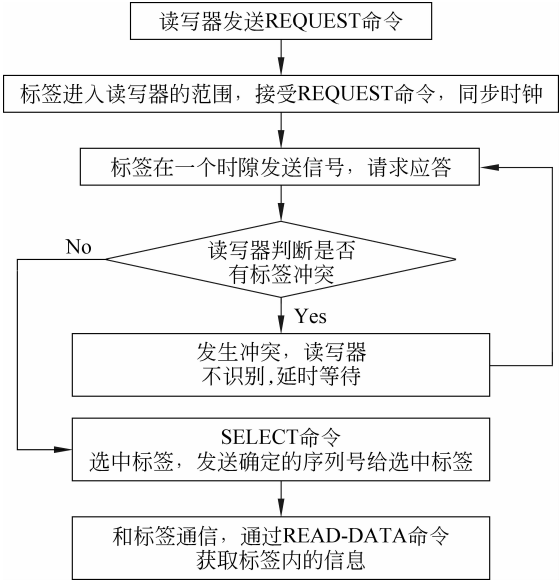


图 5-7 时隙 ALOHA 算法流程图

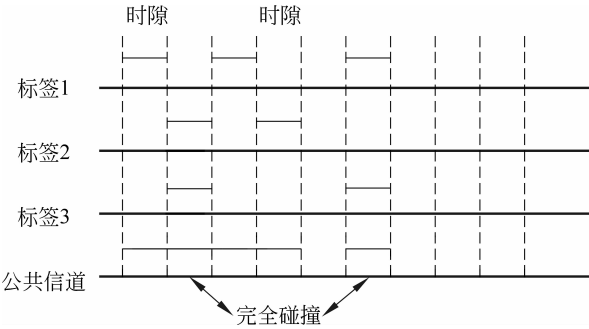


图 5-8 时隙 ALOHA 算法的数据传送和碰撞情况

5.3.3 帧隙 ALOHA 算法

帧时隙 ALOHA 算法在时隙 ALOHA 算法的基础上引入了帧的概念。每帧由多个时隙组成。读写器发送一个广播命令后，读写器识别范围内的所有标签做出响应，标签随机选择一个时隙返回数据包，这个过程称为一个帧长周期。读写器接收每个时隙的数据，会出现以下 3 种情况：单个时隙中只有一个标签返回数据包，这个标签就能够和读写器成功通信，将这个时隙称为成功时隙；单个时隙内没有标签返回数据，将这个时隙称为空闲时隙；单个时隙内有多个标签返回数据包，读写器不能正确识别标签，将这个时隙称为碰撞时隙。

帧隙 ALOHA 算法的具体算法流程图如图 5-9 所示。

帧隙 ALOHA 算法每帧包含的时隙数是固定的。该算法的数据传送和碰撞的过程如图 5-10 所示。

根据图 5-10，假设每个帧由 L 个时隙组成，则称这个帧长度为 L 。假设读写器识别范围内的标签数为 n ，可以推导出系统的吞吐率为

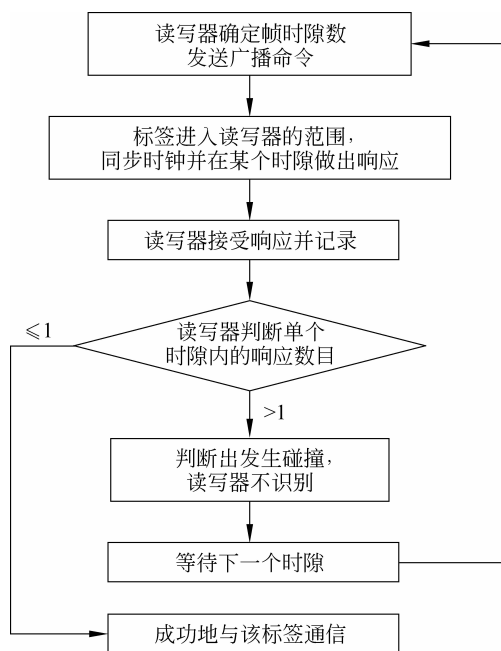


图 5-9 帧隙 ALOHA 算法流程图

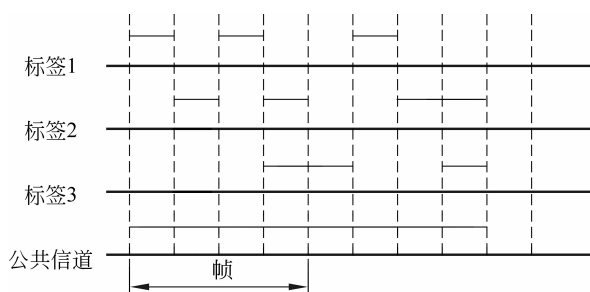


图 5-10 帧隙 ALOHA 算法的数据传送和碰撞情况

$$S = \frac{\text{成功时隙数}}{\text{帧长度}} = \frac{n}{L} \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{n-1} \quad (5.4)$$

帧隙 ALOHA 算法适用于传输信息量较大的场合。但当标签数量远大于时隙个数时，读取标签的时间将会增加；在标签数量远小于时隙个数时，就会造成时隙的浪费。

5.3.4 动态时隙 ALOHA 算法

动态时隙 ALOHA 算法是根据碰撞问题本身的这一数学特性的防碰撞方法。该算法既没有监测机制也没有恢复机制，只是通过某种数据编码检测冲突的存在，动态地调整各读写器的报警时间，从而将数据帧接收错误率降低到所要求的程度，并同时对电子标签的数据吞吐率没有什么损失。

基本原理是：用请求命令传送可供电子标签使用的时隙数，读写器在等待状态中的循环时隙段内发送请求命令，然后又 1~2 个时隙给可能存在的电子标签使用。如果有较多的

电子标签在两个时隙内发生了碰撞,就用下一个请求命令增加可供使用的时隙数量(如 1、2、4、8、…),直到能够发现一个唯一的电子标签为止。

具体实现步骤如下:

- (1) 标签进入读写器阅读范围后,接收到读写器的开始识别命令后进入识别状态,并且在开始识别命令中包含了初始的时隙数 N ;
- (2) 进入识别状态的标签随机选择一个时隙(由内部伪随机数发生器产生)同时将自己的时隙计数器复位为 1;
- (3) 当标签随机选择的时隙数等于时隙计数器的计数时,标签向读写器发送数据,当标签的时隙数不等于时隙计数器的计数时,将保留自己的时隙数并等待下一个命令;
- (4) 当读写器检测到时隙数量等于命令中规定的循环长度 N 时,本次循环将结束。读写器发送开始识别命令,进入步骤(2),开始新的循环,新的循环长度 N 是读写器根据前一次循环中的碰撞数量动态优化调整后产生的。

动态时隙 ALOHA 算法流程图以及数据传送和碰撞情况如图 5-11 和图 5-12 所示。

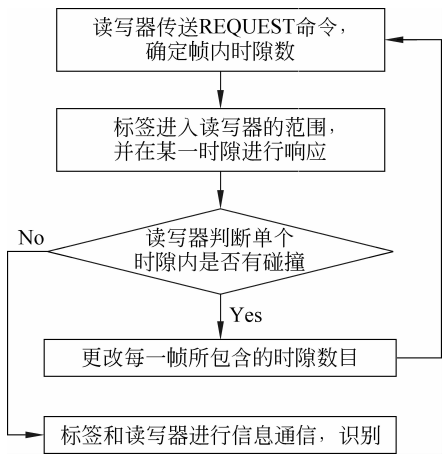


图 5-11 动态帧时隙 ALOHA 算法

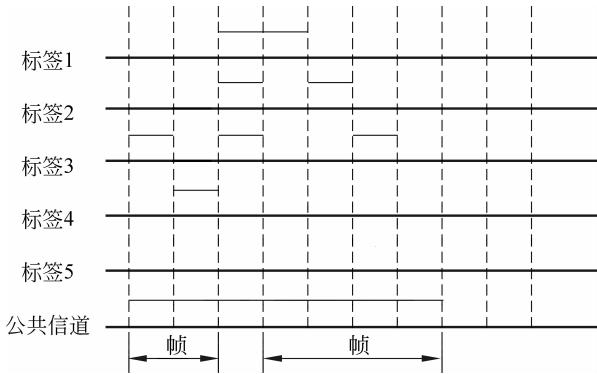


图 5-12 动态帧时隙 ALOHA 算法数据传送碰撞情况

5.4 标签防碰撞二进制搜索算法

5.4.1 基本二进制搜索算法

为了从一组电子标签中选择一个,读写器发出一个请求命令将电子标签序列号传输时的数据碰撞引导到读写器上。

实现二进制搜索算法系统的必要前提是能辨认出在读写器中的数据碰撞的比特的准确位置。为此,需用曼彻斯特(Manchester)编码,编码过程中需要用一位窗内电平的改变来表示某位的值,逻辑 0 编码为上升沿,逻辑 1 编码为下降沿。在数据传输过程中“没有变化”的状态是不允许的,也被用为错位状态以识别是否有碰撞。

算法的基本思想是将处于碰撞状态的标签分成左右两个子集 0 和 1,先查询子集 0,若没有碰撞,则正确识别标签;若仍有碰撞,则再分裂,把子集 0 分为 00 和 01 两个子集,依次

类推,直到识别出子集 0 中的所有标签,再按此步骤查询子集 1。使用基本的二进制搜索算法的标签能够记忆以前的查询结果,从而减少平均查询时间,但对功率要求很高。

二进制搜索算法如图 5-13 所示。

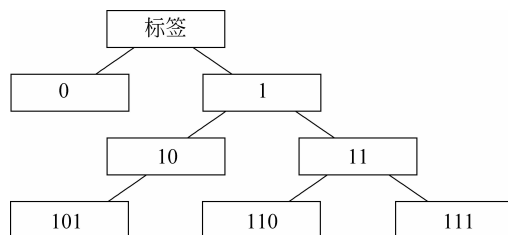


图 5-13 二进制搜索算法

该算法引入了以下几条命令：

- Request(ID)：该命令是读写器发送一串识别号给识别范围内的标签。标签将收到的识别号和自己的 ID 相比较,如果前者小于或等于后者,标签返回其识别号 ID 给读写器;否则,标签不响应。
- Select(ID)：读写器已经预知识别范围内某个标签的识别号,读写器发送该识别号给标签,与识别号匹配的唯一标签被选择,为读写器执行其他命令做准备。
- Ready：被选中的标签发送数据给读写器。
- Unselect：取消指定标签的选择状态,标签进入“休眠”状态,不再响应 Request 命令。

基本二进制搜索算法的流程如图 5-14 所示。

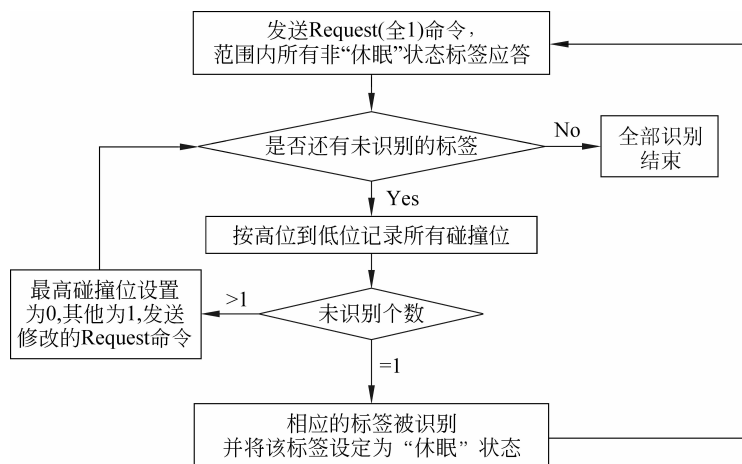


图 5-14 基本二进制搜索算法流程图

该算法应用到具体事例的过程如下。

假设标签识别号的长度为 8,读写器的识别范围内有 4 个标签：

标签 1: 10110110;

标签 2: 10010100;

标签 3: 10110100;

标签 4: 10011100。

读写器识别标签的过程如下。