

UHF 读写器设计难点——防碰撞

什么是碰撞？

除某些类似于文物防盗的特殊的应用场景外，很少会出现一台读写器仅针对一枚标签读写的情况。事实上，环境中总是存在着多枚标签能被读写器发出的射频场激活，在符合条件的情况下，它们均会对读写器发出的命令进行应答。如果在同一时刻，有大等于两枚标签应答读写器，那么它们的应答信号就会互相干扰，从而导致读写器无法正确识别，这种情况被称为“碰撞”，如图 1 所示。

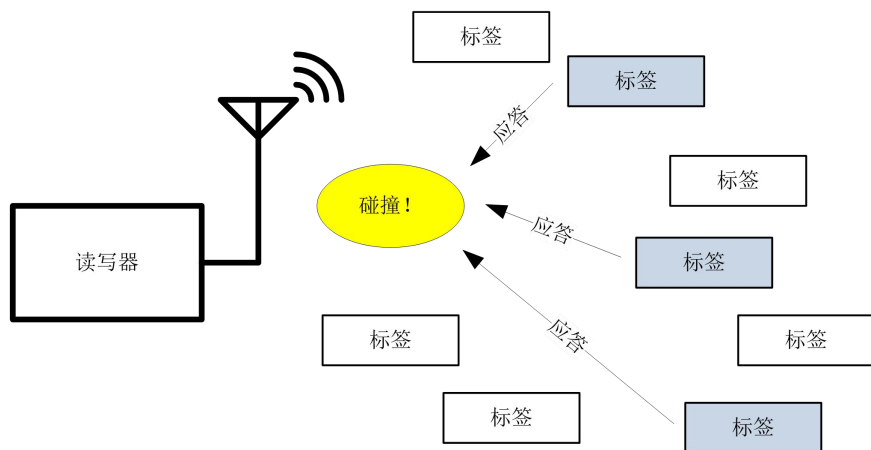


图 1 典型的标签碰撞示意图

为什么读写器设计上需要做防碰撞？

在超高频 RFID 应用中，无源标签的能量完全来自读写器，它们既无法知晓环境中同时存在的其他标签的情况，也无法主动在应答时间上进行避让，因此碰撞问题的解决完全取决于读写器的设计，即读写器必须通过合理的方式使得同时尽可能只有一枚标签应答。

防碰撞设计关心什么？

通过前文的描述，我们知道，防碰撞措施是保证读写器可以完整地发现环境中所有的标签的必要手段。另外，除了完整性需求，时间效率也是防碰撞设计必须要考虑的方面。例如对于标签处于运动状态的 RFID 系统来说，如果不能在标签通过读写器射频场范围的时间内找到它，则会永远地“丢失”该标签。此外，对于使用电池的便携式读写器来说，防碰撞效率还直接关系到设备的续航能力。

防碰撞设计的难点？

我们知道，超高频 RFID 系统会被应用于不同的领域，不同领域拥有不同的特性。我们可以尝试将一些常见的 RFID 应用按照“标签数量”，“标签被射频场激励时长”以及“标签运动速度”做一个简单归纳，如表 1 所述。显然，很难从设计上就做到满足各种不同的特性。

表 1 不同应用领域 RFID 系统特性

应用领域	标签数量	标签被激励时长	标签运动速度
图书馆借还书系统	已知	已知	慢
机场行李传送带	已知	未知	较快
超市收银	未知	已知	较慢
车联网系统	未知	未知	快

防碰撞算法的分类？

无源标签的防碰撞算法可以分为 ALOHA 类算法和二进制树搜索类算法。这两种算法各有特点，ALOHA 类算法的防碰撞基于概率，其算法复杂度较低，系统开销相应也较小。二进制类算法虽然是一种确定性算法，但其性能强相关于算法复杂度，会造成更高的系统开销。

如表 2 所示，工作在不同的频段 RFID 系统，其协议推荐的防碰撞算法的种类不尽相同。而本文研究的超高频 RFID 的空中接口协议，无论是 EPC 协议，国标协议还是国军标协议，其规定的读写器搜寻标签的基本过程都是基于 ALOHA 算法来实现的。

表 2 常见 RFID 标准及其对应的防碰撞算法

标准 \ 频率	<135kHz	13.56MHz	900MHz	2.45GHz
EPC Global		ALOHA		
ISO 11784/5	ALOHA			
ISO 14443		Binary_Tree		
ISO 15693		Binary_Tree		
ISO 18000	ALOHA			

ALOHA 类算法实质上是一类“应答器主导式防碰撞算法”，其主要思想是通过应答器发出响应在时间上的随机性来进行碰撞的规避。这类算法历经了从纯 ALOHA 算法向时隙 ALOHA 算法再向帧时隙 ALOHA 算法的演进过程。

纯 ALOHA 算法中，应答机可以在任意时刻进行应答，响应时间完全随机。显然，这样会存在无碰撞，部分碰撞以及完全碰撞三种情况。但无论哪种碰撞，对于询问机来说都无法正确识别，因此纯 ALOHA 系统的吞吐率较低，仅能达到 18.4%。

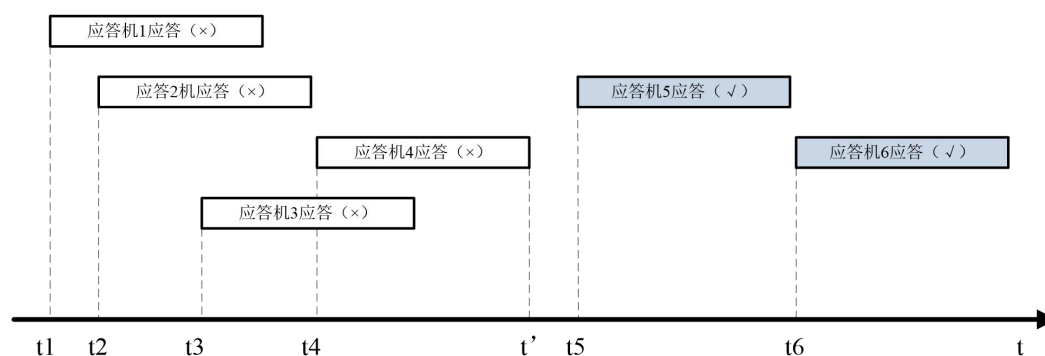


图 2 纯 ALOHA 算法的碰撞情况示意图

如图 2 所示，在纯 ALOHA 算法中，任何落在 t_1 至 t' 时间区间内的应答都会因为碰撞而丢失数据。

时隙 ALOHA 算法将纯 ALOHA 算法连续应答的时间进行离散化，形成了时隙的概念。应答机发送响应帧的时间被限制在每个时隙的起始时刻，因此在帧时隙 ALOHA 算法中，应答机的响应帧要么不发生碰撞而被询问机正确识别，要么发生完全碰撞导致信息丢失，不存在部分碰撞的情况，如图 3 所示。这样一来，相比纯 ALOHA 算法，时隙 ALOHA 算法显著地提高了系统吞吐率，达到了 36.8%。

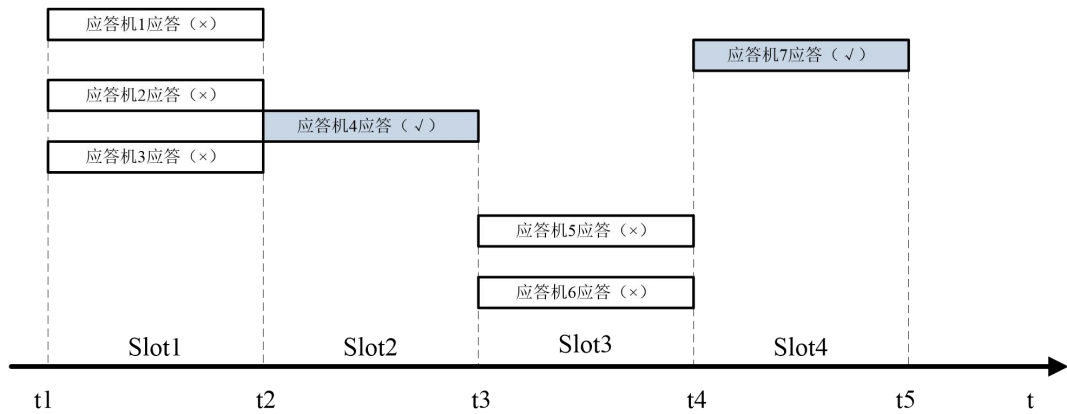


图 3 时隙 ALOHA 算法的碰撞情况示意图

帧时隙 ALOHA 算法可以看作是在应答机数量远大于时隙数量时，针对时隙 ALOHA 算法的一种改良，即引入帧的概念。整个询问和应答的过程被分为若干个帧，每一帧又包含若干时隙。就时间和链路的层面来讲，帧时隙 ALOHA 算法与时隙 ALOHA 算法是一致的，其系统吞吐率也相同，但帧概念的引入可以为询问机在控制上带来不小的便利。例如，询问机可以根据某一帧内已知的时隙碰撞情况，灵活地调整下一帧的时隙数，从而继续将帧时隙 ALOHA 算法演进为动态帧时隙 ALOHA 算法。

超高频 RFID 系统中的基本 ALOHA 过程？

以 EPC 协议为例，读写器盘点标签的流程主要通过下发“查询”（Query）和“重复查询”（Query_Rep）命令来进行。查询命令中带有随机数因子 Q ，标签获取该因子后，会自行在 $[0, 2^Q - 1]$ 的范围内产生一个随机数并计入自己的时隙计数器（Slot_Cnt）中。根据协议规定，标签当且仅当时隙计数器的值为 0 时才会发送应答帧，而时隙计数器的值当且仅当收到“重复查询”命令后减 1。因此，可以简单地将 EPC 协议盘点过程看作一个典型的帧长为 2^Q 的帧时隙 ALOHA 过程。随机数的引入使得各标签的时隙计数器的初始值尽可能地分散开，也就在很大程度上降低了碰撞的概率。读写器依靠“重复查询”命令，可以轻松地完成时隙的推进，也可以依靠重新下发“查询”命令来使标签重新产生一个随机数，从而开始新一轮帧时隙 ALOHA 过程。具体的盘点流程可以参照图 4 所示。

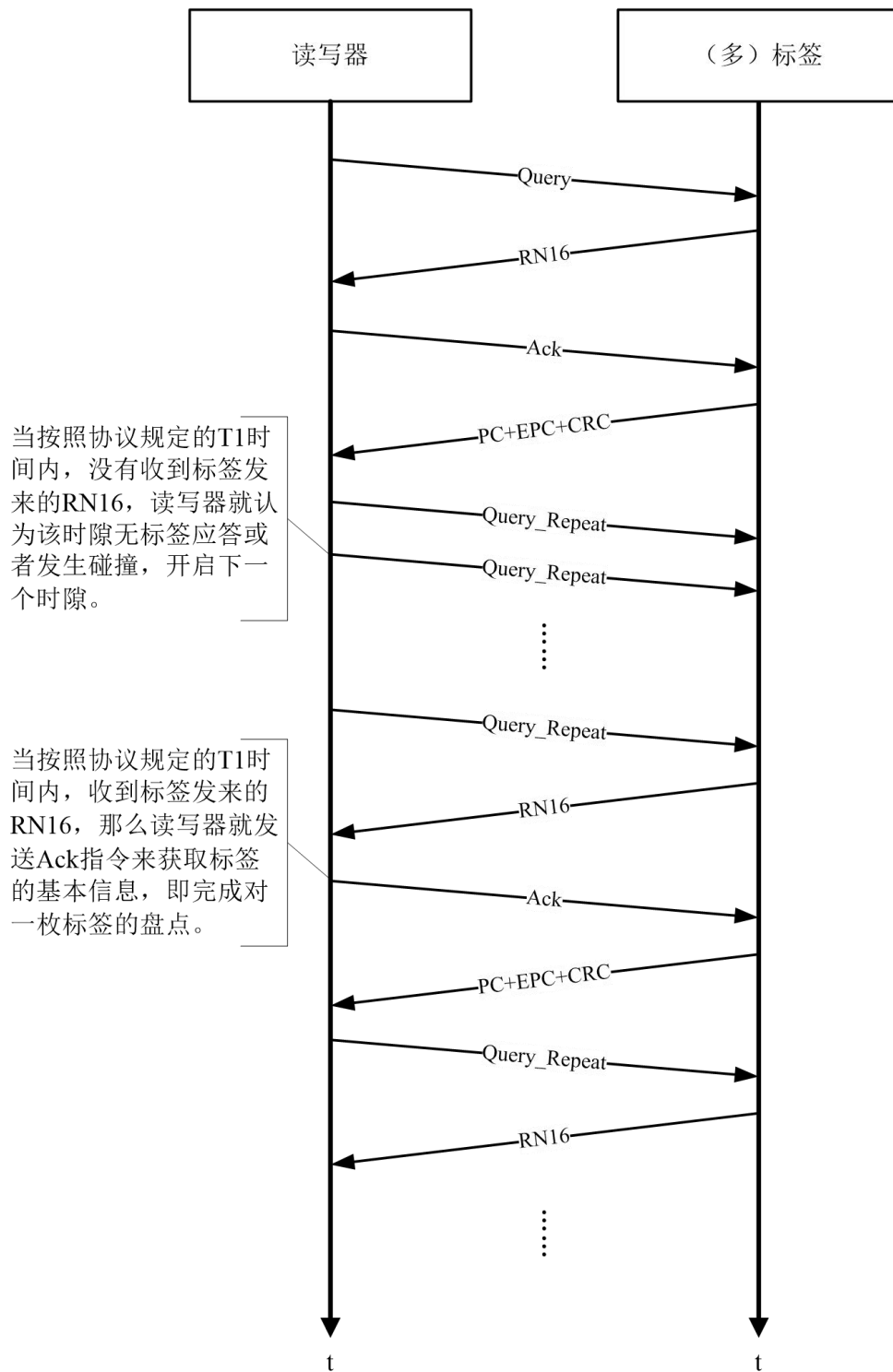


图4 EPC 协议的基本盘点流程

此外，EPC 协议中还设计了一套完整的标志机制来保证已经被盘点到的标签不在同轮次内被重复盘点达到，但这些标志与帧时隙 ALOHA 过程关系不大，此处不再赘述。

在国标以及国军标协议中，通过“查询”和“重复查询”两条命令来进行时隙推进的基本思路与 EPC 协议相同。有所区别的是，在这两种协议里，“查询命

令”不带有随机数因子 Q ，所有标签的时隙计数器的值在收到“查询”命令后全部赋值为 0。显然，当标签的数量大等于 2 时，第一个时隙必然发生碰撞。为了应对这种情况，国标和国军标协议另外设计了一条“分散”（Disperse）命令，收到该命令后，标签将时隙计数器的值乘以 2，并加上 1 比特随机数，即加 0 或者加 1。通过简单计算即可知，经过 Q 次“分散”后，标签的时隙计数器值同样分布在 $[0, 2^Q - 1]$ 之间。此外，国标和国军标协议在应答“查询”或者“重复查询”命令时，回应的数据也与 EPC 协议存在细微差别，但与防碰撞基本流程无关。因此，国标以及国军标协议的盘点过程同样也是一个帧长为 2^Q 的帧时隙 ALOHA 过程。

同样的，国标和国军标协议也包含与 EPC 协议一致的预防重复盘点的标志机制，此处同样不再赘述。

如何评估防碰撞性能？

通过对时隙 ALOHA 过程的分析可知，对于单个时隙来说，显然可能存在着有多个标签回应（发生碰撞），有且只有一个标签回应（标签被读写器正确盘点到）以及没有标签回应三种情况。因此我们可以将这三种时隙分别定义为“碰撞时隙”，“有效时隙”和“空闲时隙”。

防碰撞策略的本质，即是通过协议提供的命令，对帧时隙 ALOHA 过程进行合理地控制和运用，从而尽可能高效地完成大量标签的搜寻与识别。一般来说，评判一个 RFID 系统防碰撞方面的性能指标有很多，例如：吞吐率，误码率，能量消耗等。但就算法本身来说，主要还是围绕“识别率”，“识别速度”这两个维度展开，本文为了简化分析，分别将其定义为“完整度”和“效率”。

“完整度”是指被搜寻到的标签数与环境中标签数的比值，该指标体现了算法搜索的广度。

“效率”定义为平均每个时隙盘点到的标签数，单位为“标签数/时隙”。该指标体现了算法收敛的速度。

另外，防碰撞算法运行在主控 MCU 端，作为嵌入式系统，资源一定程度上受限，因此在算法的设计上也需要考虑到运算量不能过于复杂。