

从这个公式我们看到，当  $d_{\text{prop}}$  接近 0 时，效率接近 1。这和我们的直觉相符，如果传播时延是 0，碰撞的结点将立即中止而不会浪费信道。同时，当  $d_{\text{trans}}$  变得很大时，效率也接近于 1。这也和直觉相符，因为当一个帧取得了信道时，它将占有信道很长时间；因此信道在大多数时间都会有效地工作。

### 5.3.3 轮流协议

前面讲过多路访问协议的两个理想特性是：①当只有一个结点活跃时，该活跃结点具有  $R$  bps 的吞吐量；②当有  $M$  个结点活跃时，每个活跃结点的吞吐量接近  $R/M$  bps。ALOHA 和 CSMA 协议具备第一个特性，但不具备第二个特性。这激发研究人员创造另一类协议，也就是**轮流协议**（taking-turns protocol）。和随机接入协议一样，有几十种轮流协议，其中每一个协议又都有很多变种。这里我们要讨论两种比较重要的协议。第一种是**轮询协议**（polling protocol）。轮询协议要求这些结点之一要被指定为主结点。主结点以循环的方式**轮询**（poll）每个结点。特别是，主结点首先向结点 1 发送一个报文，告诉它（结点 1）能够传输的帧的最多数量。在结点 1 传输了某些帧后，主结点告诉结点 2 它（结点 2）能够传输的帧的最多数量。（主结点能够通过观察在信道上是否缺乏信号，来决定一个结点何时完成了帧的发送。）上述过程以这种方式继续进行，主结点以循环的方式轮询了每个结点。

轮询协议消除了困扰随机接入协议的碰撞和空时隙，这使得轮询取得高得多的效率。但是它也有一些缺点。第一个缺点是该协议引入了轮询时延，即通知一个结点“它可以传输”所需的时间。例如，如果只有一个结点是活跃的，那么这个结点将以小于  $R$  bps 的速率传输，因为每次活跃结点发送了它最多数量的帧时，主结点必须依次轮询每一个非活跃的结点。第二个缺点可能更为严重，就是如果主结点有故障，整个信道都变得不可操作。

第二种轮流协议是**令牌传递协议**（token-passing protocol）。在这种协议中没有主结点。一个称为**令牌**（token）的小的特殊帧在结点之间以某种固定的次序进行交换。例如，结点 1 可能总是把令牌发送给结点 2，结点 2 可能总是把令牌发送给结点 3，而结点  $N$  可能总是把令牌发送给结点 1。当一个结点收到令牌时，仅当它有一些帧要发送时，它才持有这个令牌；否则，它立即向下一个结点转发该令牌。当一个结点收到令牌时，如果它确实有帧要传输，它发送最大数目的帧数，然后把令牌转发给下一个结点。令牌传递是分散的，并有很高的效率。但是它也有自己的一些问题。例如，一个结点的故障可能会使整个信道崩溃。或者如果一个结点偶然忘记了释放令牌，则必须调用某些恢复步骤使令牌返回到循环中来。经过多年，人们已经开发了许多令牌传递协议，包括光纤分布式数据接口（FDDI）协议[Jain 1994] 和 IEEE 802.5 令牌环协议 [IEEE 802.5 2012]，每一种都必须解决这些和其他一些棘手的问题。

### 5.3.4 DOCSIS：用于电缆因特网接入的链路层协议

在前面 3 小节中，我们已经学习了 3 大类多路访问协议：信道划分协议、随机接入协议和轮流协议。这里的电缆接入网将作为一种很好的学习案例，因为在电缆接入网中我们将看到这三类多路访问协议中的每一种！

1.2.1 节讲过，一个电缆接入网通常在电缆网头端将几千个住宅电缆调制解调器与一个电缆调制解调器端接系统（Cable Modem Termination System, CMTS）连接。数据经**电缆服务接口**（Data-Over-Cable Service Interface, CMTS）规范（DOCSIS）[DOCSIS 2012] 定