

此该车队是公路上唯一一批汽车。最后，假定无论该车队的第一辆汽车何时到达收费站，它在入口处等待，直到其他 9 辆汽车到达并整队依次前行。（因此，整个车队在它能够“转发”之前，必须存储在收费站。）收费站将整个车队推向公路所需要的时间是（10 辆车）/（5 辆车/min）= 2min。该时间类比于一台路由器中的传输时延。因此，一辆汽车从一个收费站出口行驶到下一个收费站所需要的时间是 100h/（100km/h）= 1h。这个时间类比于传播时延。因此，从该车队存储在收费站前到该车队存储在下一个收费站前的时间是“传输时延”和“传播时间”总和，在本例中为 62min。



图 1-17 车队的类比

我们更深入地探讨一下这个类比。如果收费站对车队的服务时间大于汽车在收费站之间行驶的时间，将会发生什么情况呢？例如，假定现在汽车是以 1000km/h 的速率行驶，收费站是以每分钟一辆汽车的速率为汽车服务。则汽车在两个收费站之间的行驶时延是 6min，收费站为车队服务的时间是 10min。在此情况下，在该车队中的最后几辆汽车离开第一个收费站之前，该车队中前面的几辆汽车将会达到第二个收费站。这种情况在分组交换网中也会发生，一个分组中的前几个比特到达了一台路由器，而该分组中许多余下的比特仍然在前面的路由器中等待传输。

如果说一图胜千言的话，则一个动画必定胜百万言。与本书配套的 Web 网站提供了一个交互式 Java 小程序，它很好地展现及对比了传输时延和传播时延。我们极力推荐读者访问该 Java 小程序。[Smith 2009] 也提供了可读性很好的有关传播、排队和传输时延的讨论。

如果我们令  $d_{proc}$ 、 $d_{queue}$ 、 $d_{trans}$  和  $d_{prop}$  分别表示处理时延、排队时延、传输时延和传播时延，则结点的总时延由下式给定：

$$d_{nodal} = d_{proc} + d_{queue} + d_{trans} + d_{prop}$$

这些时延成分所起的作用可能变化很大。例如， $d_{prop}$  对于连接两台位于同一个大学校园的路由器的链路而言可能是微不足道的（例如，几个微秒）；然而， $d_{prop}$  对于由同步卫星链路互联的两台路由器来说是几百毫秒，能够成为  $d_{nodal}$  中的主要成分。类似地， $d_{trans}$  的影响能够是微不足道的，也能是很大的。它的影响通常对于 10Mbps 和更高的传输速率（例如，对于 LAN）的信道而言是微不足道的；然而，对于通过低速拨号调制解调器链路发送的长因特网分组而言，可能是数百毫秒。处理时延  $d_{proc}$  通常是微不足道的；然而，它对一台路由器的最大吞吐量有重要影响，最大吞吐量是一台路由器能够转发分组的最大速率。

### 1.4.2 排队时延和丢包

结点时延的最为复杂和有趣的成分是排队时延  $d_{queue}$ 。事实上，排队时延在计算机网络中的重要程度及人们对它感兴趣的程度，从发表的数以千计的论文和大量专著的情况可见一斑 [Bersekas 1991; Daigle 1991; Kleinrock 1975, 1976; Ross 1995]。我们这里仅给出