



网络化系统的量化控制 策略分析与设计

闫晶晶 夏元清 文成林 冯肖亮 著



科学出版社

网络化系统的 量化控制策略分析与设计

闫晶晶 夏元清 文成林 冯肖亮 著

科学出版社

北京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书结合作者的研究工作,详细介绍了通信受限约束下网络化控制系统的建模、分析和设计方法。概述了网络化控制系统需要解决的几个根本问题,介绍了通信受限给网络化控制系统带来的挑战和常用的解决方案。重点介绍了受丢包和量化影响的线性、模糊和非线性网络化控制系统的建模、分析和镇定控制器设计方法。建立了丢包率与系统性能之间的定量关系;讨论了受量化和噪声影响的网络化控制系统的控制器设计方法和稳定性分析问题;通过引入收包率这一概念,介绍了受带宽受限和丢包、外扰影响的网络化控制系统的输入到状态镇定问题;并分析了双边量化系统的镇定控制器设计方法。

本书可用于自动化及控制领域学生学习网络化控制及量化控制相关知识,亦可用于通信领域学生学习网络带宽受限条件下的数据传输策略。

图书在版编目(CIP)数据

网络化系统的量化控制策略分析与设计/闫晶晶等著. —北京:科学出版社, 2016.3

ISBN 978-7-03-047956-3

I. ①网… II. ①闫… III. ①计算机网络—自动控制系统—研究
IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 060923 号

责任编辑:张颖兵 杨光华/责任校对:肖 婷

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉中科兴业印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2016 年 3 月第 一 版 印张:8 3/4

2016 年 3 月第一次印刷 字数:207 500

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

传统的控制系统内部各个节点之间采用专线连接,若两个节点的地理位置相距较远,布线成本就会很高。如果系统节点间改用网络连接,则必然大大降低布线的成本。由此,网络化控制系统应运而生。该系统通过一个实时共享媒介网络连接各个节点,具有如下主要优点:布线方便,易于扩展,成本较低,设备即插即用,故障检修和维护方便,抗干扰性强,数据可交换性强,数据传输可靠性高,能实现资源的共享等。因此,网络化控制系统是计算机控制系统的高级发展阶段,是目前控制领域的研究热点之一。

反馈回路中网络的引入在给人们带来便利的同时,也带来了许多新的问题和挑战。在网络化控制系统中,数据在传输过程中会受到网络带宽、通信协议、通信机制的影响。当控制系统的传感器、执行器和控制器交换数据时,不可避免地导致信息延迟、数据包丢失、多包传输、通信受限以及及时变采样周期等问题。这些问题的存在破坏了系统性能,甚至导致系统不稳定。

本书主要针对网络化控制系统中的通信受限问题开展研究。事实上,在网络化控制系统,尤其是公用网络系统中,用户量巨大必然导致海量数据的传输,而网络带宽的限定致使数据无法全部精确地传送给接收端,影响系统良性运行,给人类生活和工业生产带来不良影响。随着网络化进程的推进,通信受限问题已存在于远程医疗、智能城市、物联网等多个国家重点发展的新兴领域中。在等效的经济

投入前提下,通信受限成为制约系统良性运行的主要因素,而传统的针对点对点传输方式设计的反馈控制方法无法从根本上解决上述问题,因此,需要针对通信受限问题开展深入研究。

本书主要研究通信受限约束下网络化控制系统的建模、分析和设计方法。介绍了通信受限给网络化控制系统带来的挑战和常用的解决方案。重点研究了受丢包和量化影响的各类网络化控制系统的建模、分析和镇定控制器设计方法。建立了丢包率与系统性能之间的定量关系;借用 Kalman 滤波方法,讨论了受量化和噪声影响的网络化控制系统的控制器设计方法和稳定性分析问题;通过引入收包率这一概念,分析了受带宽受限和丢包、外扰影响的网络化控制系统的输入到状态镇定问题;同时分析了上行线和下行线同时存在数据量化影响的闭环系统的镇定控制器设计方法。

本书的研究工作和撰写出版得到了国家自然科学基金项目(61403125)、河南省教育厅自然科学基金项目(15A413012)和河南工业大学“省属高校基本科研业务费专项资金”项目(2015RCJH15)的资助,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2016 年 1 月

主要符号说明

$\mathbf{R}$	实数集
$\mathbf{R}_{>0}$	正实数集
$\mathbf{R}_{\geq 0}$	非负实数集
$\mathbf{R}^n$	n -维的欧拉空间
$\mathbf{R}^{m \times n}$	$m \times n$ 实矩阵
$\mathbf{A}^T$	矩阵 $\mathbf{A}$ 的转置
$\mathbf{A}^{-1}$	矩阵 $\mathbf{A}$ 的逆
$\text{rank}(\mathbf{A})$	矩阵 $\mathbf{A}$ 的秩
$\sup$	上确界
$\inf$	下确界
$\lim$	极限
$\mathbf{P} > 0$	对称正定矩阵 $\mathbf{P}$
$\mathbf{P} \geq 0$	对称半正定矩阵 $\mathbf{P}$
$\mathbf{P}_1 > \mathbf{P}_2$	$\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2$ 是对称正定矩阵
$\mathbf{P}_1 \geq \mathbf{P}_2$	$\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2$ 是对称半正定矩阵
$\text{diag}\{\mathbf{A}_1, \cdots, \mathbf{A}_n\}$	以矩阵 $\mathbf{A}_j (j=1, 2, \cdots, n)$ 为对角元素的分块对角矩阵
$*$	对称块矩阵中矩阵的对称部分
$\rho(\cdot)$	谱半径
$\ \mathbf{x}\ _2$	向量 $\mathbf{x}$ 的欧拉范数
$\ \mathbf{x}\ _\infty$	向量 $\mathbf{x}$ 的 ∞ 范数
$\ \mathbf{P}\ _2$	矩阵 $\mathbf{P}$ 的欧拉范数
$E\{x\}$	随机变量 x 的数学期望

$\lambda_{\min}(\mathbf{A})$	矩阵 $\mathbf{A}$ 的最小特征值
$\lambda_{\max}(\mathbf{A})$	矩阵 $\mathbf{A}$ 的最大特征值
$\mathbf{M}_n$	复数域上的 $n \times n$ 矩阵
$\mathbf{Z}$	整数集
$\mathbf{Z}_{>0}$	正整数集
$\mathbf{N}$	非负整数集
$Pr(x=a)$	$x=a$ 成立的概率
$\arg \min_{i \in \{1, \dots, N\}} \mathbf{x}^T \mathbf{P}_i \mathbf{x}$	返回使得表达式 $\mathbf{x}^T \mathbf{P}_i \mathbf{x}$ 达到最小的 i 值
$\arg \max_{i \in \{1, \dots, N\}} \mathbf{x}^T \mathbf{P}_i \mathbf{x}$	返回使得表达式 $\mathbf{x}^T \mathbf{P}_i \mathbf{x}$ 达到最大的 i 值
$\lfloor x \rfloor$	小于或等于 x 的最大整数
$\lceil x \rceil$	大于或等于 x 的最小整数
$\mathbf{I}$	适当维数的单位矩阵
$\triangleq$	定义为
$\sum$	求和
$\text{sgn}(x)$	x 的符号
$\forall$	任意
$\exists$	存在
$\in$	属于
$\rightarrow$	趋于

目 录

前言

主要符号说明

1 绪论	(1)
1.1 网络化控制系统概述	(1)
1.2 网络化控制的研究内容	(2)
1.2.1 采样和异步采样	(2)
1.2.2 数据错序	(3)
1.2.3 单包传输和多包传输	(3)
1.2.4 网络诱导的延时	(3)
1.2.5 数据丢包	(4)
1.2.6 通信受限	(5)
2 通信受限给网络化控制系统带来的挑战及解决方案	(6)
2.1 介质访问受限	(6)
2.1.1 调度协议	(6)
2.1.2 通信序列方法	(9)
2.2 数据率约束	(11)
2.2.1 量化的作用	(11)
2.2.2 量化的本质	(13)
2.2.3 量化器	(13)
3 线性系统的量化和丢包问题	(21)
3.1 概述	(21)
3.2 量化器	(22)
3.3 问题描述	(22)

3.4	主要结果	(23)
3.5	数值仿真	(28)
4	模糊系统的量化和丢包问题	(32)
4.1	概述	(32)
4.2	问题描述	(33)
4.2.1	系统模型	(33)
4.2.2	量化器	(34)
4.2.3	不可靠网络	(35)
4.2.4	控制器	(35)
4.2.5	闭环系统	(36)
4.3	相关引理	(38)
4.4	主要结果	(38)
4.5	仿真实例	(47)
5	非线性系统的量化和丢包问题	(50)
5.1	概述	(50)
5.2	问题描述	(51)
5.2.1	量化器	(51)
5.2.2	网络	(52)
5.2.3	编码器/解码器	(52)
5.2.4	预测器和控制器	(53)
5.3	Gronwall-Bellman 引理	(54)
5.4	受丢包影响的渐近估计	(54)
5.5	受编码和丢包影响的半全局状态反馈镇定	(57)
5.6	数值仿真	(60)
6	基于 Kalman 滤波的量化线性系统的镇定问题	(63)
6.1	概述	(63)
6.2	问题描述	(63)
6.3	量化策略	(65)
6.4	稳定性分析	(66)
6.5	仿真实例	(69)
6.5.1	F-16 战斗机	(69)
6.5.2	两车 MSD 系统	(73)
7	带宽受限和不可靠网络影响下线性系统的输入到状态镇定问题	(78)
7.1	概述	(78)
7.2	问题描述	(79)
7.3	量化算法	(81)
7.4	收敛性质	(84)

7.5	主要结果	(88)
7.6	仿真实例	(94)
8	双边量化离散系统的稳定性分析	(97)
8.1	概述	(97)
8.2	QIQM 系统描述	(98)
8.3	QIQM 系统的稳定性	(99)
8.3.1	等价系统和乘法算子的构建	(99)
8.3.2	乘法算子定义的合理性	(100)
8.3.3	乘法算子的正定性	(104)
8.3.4	乘法算子的有界性	(106)
8.3.5	总结	(108)
8.3.6	引理	(109)
8.3.7	QIQM 系统的稳定性定理	(109)
8.4	仿真实例	(112)
参考文献		(116)
附录 1		(126)
附录 2		(127)

1 绪 论

1.1 网络化控制系统概述

网络化控制系统(Networked Control Systems, NCSs)产生的主要标志是在控制系统中引入了计算机网络,从而使传感器、执行器、控制器等各个节点通过网络相连接,信号及数据通过网络进行传输与交换,避免了点对点专线的铺设,从而降低了布线成本。网络的引入可以实现资源共享、远程操作和控制,便于系统的安装、扩展、诊断与维护,增加了系统的可靠性^[1-8]。网络化控制系统的出现不仅顺应现代科技的发展,而且它涉及机械及电子工程、软件工程、控制理论、计算机科学和信息理论等学科的知识,反映了在以信息科学为支柱的时代里,各学科的交叉、渗透和融合的趋势。

从 20 世纪 90 年代出现网络化控制系统以来,它在国民经济和国防建设等领域得到了迅速的应用,网络的应用范围也在不断地扩大,比如工业控制、机器人遥控操作^[9-12]、飞行器设计^[13]、远程教学和实验、基于 Internet 的远程过程控制^[14,15]、直流控制系统、武器兵工系统、智能交通、远程医疗、航空航天、楼宇自动化领域等。所以,探索和建立更加完善的研究网络化控制系统的方法是当今社会各领域的必然需要,对网络化控制系统进行进一步的研究具

有重要的战略意义和现实意义。从理论上讲,网络化控制必将大大推动已见端倪的系统控制理论的发展。从应用上讲,提供各种信息处理的网络化系统的大量涌现,必将大大推动国家经济、社会、国防等领域的信息化应用,促进国家的“以信息化带动工业化”的发展。

网络化控制系统的定义被提出以来,其研究已经引起了越来越多的国内外学者的广泛关注,成为当前控制理论领域的一个研究热点。国内外许多高校和科研院所均开展了网络化控制系统的理论和应用研究工作,并取得了丰硕的研究成果。网络化控制系统的理论存在诸多的问题有待解决,网络化控制系统的研究具有重要的理论意义和一定的应用价值。

1.2 网络化控制的研究内容

反馈回路中网络的引入使得数据在传输过程中会受到网络带宽、通信协议、通信机制的影响。当控制系统的传感器、执行器和控制器交换数据时,不可避免地导致信息延迟、数据包丢失、多包传输、通信受限以及时变采样周期等问题。这些问题的存在破坏了系统性能,甚至导致系统不稳定。所以,传统的控制理论和控制方法并不能直接应用在网络化控制系统的分析和设计中,在研究网络化控制系统的时候必须重新审视传统的研究方法,充分考虑网络的特点,对网络化控制系统的建模、分析和设计进行深入的研究。虽然网络化控制系统具有很多优点,但是由于网络的介入,带来了许多新的问题和挑战,这些问题主要包括以下几点。

1.2.1 采样和异步采样

要通过网络传送一个连续时间信号,首先需要对信号进行采样,即把在时间上连续的信号转变成在时间上离散的信号。在传统的数据采样系统中,系统可以允许较快的采样速率,这样离散系统的设计和性能会接近于连续系统,有利于系统的稳定。但在网络化控制系统中,较快的采样速率会产生大量的信息包,从而增加网络的负担,导致信号在传输过程中存在更大的延时或丢失,引起系统的不稳定。相反,如果传感器产生的数据速率过慢,又会降低控制性能。同时,不同于传统的数据采样系统,网络化控制系统中的信号采样频率往往是非周期的。

由于网络传输字节长度的限制,或由于网络化控制系统中存在多个传感器节点,所以系统的采样过程是异步工作(Asynchronous)的,即反馈信息通过多个数据包传送,这种网络化控制系统被称为多包传输网络化控制系统。多包传输导致在控制系统的反馈信息中存在多个不同时滞,从而增加了控制系统分析的复杂性。

1.2.2 数据错序

在网络化控制系统中,如果传输的数据包经过多个通信设备且路径不唯一,数据包在传输过程中会根据网络状况选择不同的路由。因此,网络中同一节点发送到同一目标端的数据包不可能在相同的时间内到达接收端,后产生的数据可能会先到达目标端,因而产生数据包先后顺序的错乱,称为数据包错序。节点冲突、网络拥塞、连接中断和多路径传输机制等因素是造成数据包错序的主要原因。错序的结果将导致目的节点利用过时的信息从而给出错误的输出,比如传感器信息封装的数据包在传输到控制器的时候发生了错序,控制器会处理过时的传感器信息从而给出错误的控制指令,这样会给整个控制系统的性能带来影响,甚至使系统失稳。

1.2.3 单包传输和多包传输

网络化控制系统的传感器采样数据以及控制器计算出的控制量等是以数据包的形式通过网络进行传输的。如果把所有待发送的数据封装在一个数据包内进行传输,称为单包传输。例如以太网的单个数据包容量大,多采用单包传输方式。有时需要把待发送的数据分成多个数据包进行传输,称为多包传输。多个数据包传输时,由于节点冲突、网络拥塞、连接中断和多路径传输机制等原因,多个数据包不可能同时到达,这将增加接收端的数据处理时间,从而间接地增加网络诱导延时。节点单包传输还是多包传输,系统的分析与设计方法将有所不同。如何对多数据包的信息进行整合,采用什么方式和顺序传输多个数据包,在多包传输的条件下如何保证系统稳定是网络化控制系统研究中一个不可或缺的内容。

1.2.4 网络诱导的延时

由于网络通信具有独占特性,当网络化控制系统中存在多个智能节点时,在网络通信中存在对网络使用权的竞争,如果智能节点对网络的使用权限处于“无规则”或“不良规则”竞争状态时,则在网络通信中不可避免地存在大量的消息碰撞,待发送的信息只有等到网络空闲或设备的优先级相对较高时才能被发送出去,这就不可避免地影响采样和控制的定常性、完整性、因果性和确定性,从而导致访问延时。另外,由于网络通信带宽的限制、网络媒介本身的特性,以及传输距离的影响,所以在网络通信中几乎不可避免地存在传输延时,从而导致反馈信息或控制量延时。当网络传输延时不可忽略时,网络化控制系统为时滞系统。网络延迟主要包括:数据从传感器到控制器的传

输时间,控制器的计算时间和数据从控制器到执行器的传输时间。由于控制器的计算时间相对于其他两者来说通常较小,因此在实际处理时经常将其忽略。这些延迟在传统的点对点控制系统中完全可以忽略不计。但是将网络引入控制系统后,由于带宽有限、信道分时复用、数据传输路径不确定等因素的存在会导致信息传输中的等待、阻塞、时序错乱及丢包等现象的发生,不可避免地产生了网络诱导延时。这些受网络通信协议、网络节点驱动方式、数据采样技术等因素影响的网络诱导延时,会不同程度地影响控制系统性能。对于一次网络传输,延时的产生如图 1.1 所示。

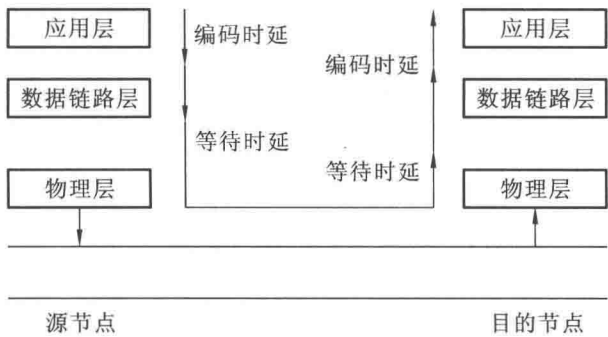


图 1.1 网络诱导延时产生过程

因此,根据不同的网络诱导延时建模以及设计适当的控制器,可以提高网络化控制系统的性能。这使得针对网络化控制系统延时的系统建模和控制器设计问题非常重要,也非常具有挑战性^[16-28]。

1.2.5 数据丢包

共享网络中难免存在着网络阻塞、连接中断、传输错误、节点竞争发送失败和时序错乱等现象,所以网络并不具有百分之百的可靠性传输。虽然大多数网络均具有重新传输的机制,但是一般对重传的时间或次数都有一定的限制,超出这个时限后,数据便会丢失,此种情况下的数据包丢失被称为“网络诱导丢包”或“被动丢包”。如以太网在传输数据包 16 次冲突后停止发送数据包,并向上一层报告发送错误,丢弃该包。再者,由于控制系统对实时性要求很高,当某个传感器节点在准备发送信息的同时又接收到了新的信息,从实时性的角度考虑,各个节点往往需要最新的数据包而将超时的数据包主动丢弃,这便造成了网络环境下的数据丢包现象,这种因时序错乱产生的数据包丢失被称为“主动丢包”。往往是网络负荷越大,丢包率越高。丢包对系统的性能是一柄双刃剑。一方面,对于主动丢包而言,丢失过时的信息,始终发送最新的数据,不进行信息的重发,这样有利于最新信息的利用,保证信息的实时

性;另一方面,被动丢包使数据和通信的延时加剧。更糟糕的情况是,数据包可能发生连续丢失,系统不能立即恢复正常,数据样本不能准时到达,这样便产生了空采样的问题。如果控制器不能在传感器产生新样本之前及时得到样本,在无缓存的情况下,旧的样本将被覆盖,这样便产生了样本拒绝问题。一般而言,反馈控制的被控对象只能承受一定比例的丢包,对于本来没有丢包的系统,当丢包率达到一定值时,系统将变得不稳定。关于数据包丢失时系统是否稳定,以及针对数据包丢失寻求正确的解决办法无疑都是很有价值的。

1.2.6 通信受限

由于通信网络特殊的数据传输方法以及带宽约束,在网络化控制系统中,通信受限问题往往不可避免。通信受限主要包括介质访问受限和数据率约束^[29]。

1. 介质访问受限

在网络化控制系统中,由于通信网络的有限带宽和分时复用原则,节点对网络的访问总是受限的,即在同一时刻只有一个节点能访问网络,通常称这一现象为介质访问受限,而节点访问网络的权限由 MAC 协议决定。一方面,当一个节点访问网络时,其他节点将处于数据发送等待状态,因此这些节点所对应的目标节点的输入将得不到及时更新;另一方面,控制系统通常具有实时性要求,控制器或执行器输入长时间得不到更新,将导致系统性能下降甚至失稳。因此,在网络化控制系统中,有必要进行合理的节点调度以保证节点信息尽可能及时更新。

2. 数据率约束

由于网络化控制系统中使用的网络一般是公共网络,数据传输信道的带宽会受到很大的限制,导致各节点的数据传输速率受到约束。因此,信号必须经过一定程度的量化后才能传输,以满足节点的数据率约束。另一方面,由于网络化控制系统中的各控制节点大都是数字形式的处理器,因此需要将模拟信号转化成数字信号以及将数字信号转化成模拟信号。在转化过程中必然存在一个精度问题,由于传感器自身的精度限制以及成本的要求,这种转换不可能以无限的精度进行,所以数据量化在所难免。如何确定保证系统稳定或者可镇定的最小数据率,以及如何在数据率约束下进行控制器设计和状态估计等是具有数据率约束的网络化控制系统分析和综合中的两个主要问题。此外,合理的带宽分配策略和有效的数据量化策略设计也可提高网络化控制系统的闭环性能。

综上所述,虽然网络的引入给国防建设以及工业建设带来了很多的便利,网络系统本身也具有很多优点,但同时带来了很多具有挑战性的问题。针对这些问题,控制界和工程界已经取得了不少的成果,但仍有许多问题等待我们去解决。对于网络化控制系统的研究仍将继续。

2

通信受限给网络化控制系统带来的挑战及解决方案

在网络化控制系统中,由于通信网络特殊的数据传输方式以及带宽的约束,通信受限问题往往不可避免。通信受限给网络化控制系统带来的挑战主要包括介质访问受限和数据率约束。

2.1 介质访问受限

2.1.1 调度协议

在网络化控制系统中,通信信道(或介质)是各个节点的共享资源,所有节点都可以访问这个共享资源。由于网络带宽的限制,节点对网络的访问总是受限的,即在同一时刻只有一个节点能访问网络。为了防止多个节点同时访问而造成冲突或信道被某一节点长期占用,必须有一种所有节点都能遵守的规则,称为访问控制方法或节点调度方法,以便使各个节点安全、公平、有效地使用信道。在网络化控制系统中,对节点传输数据进行合理调度可保证节点信息尽可能及时更新,而调度策略主要用于解决节点访问网络的优先权配置问题。

1. CSMA/CD

CSMA/CD(Carrier Sense Multiple Access/Collision

Detect,带冲突检测的载波检测多路访问)^[30]是一种局域网中应用最广泛的介质访问控制方法。它主要解决两个问题:一是各站点如何访问共享信道,二是如何解决同时访问造成的冲突。

CSMA/CD是一种采用随机访问技术的竞争型(有冲突的)介质访问控制方法。根据CSMA/CD的规定,网络中各节点都必须具有判断信道忙(闲)的能力。CSMA/CD协议的规则如下:

(1) 发送前先监听信道是否空闲,若空闲则立即发送;

(2) 如果信道忙,则继续监听,一旦发现信道空闲,再等待一个帧间隔时间,然后返回第(1)步重试;

(3) 在发送过程中,仍需继续监听。若监听到冲突,则立即停止发送数据,并向信道发送冲突强化信号(Jam),发送Jam信号的目的是使所有的站点都能检测到冲突;

(4) 等待一段随机时间(称为退避)以后,返回第(1)步再重新尝试。

归结为四句话:发前先听,空闲即发送,边发边听,冲突时退避。CSMA/CD将最大重传次数限定为16,若发送16次仍不成功,则发送失败,丢弃该数据,并向上层软件或者管理实体报告,由它们来决定如何处理此错误。这就是第1章提到的“网络诱导丢包”或“被动丢包”。

2. 令牌环

令牌环协议^[30]是CSMA/CD的一种传统替代协议。在令牌环网中,哪个站点可以发送数据,是由一个沿着环旋转的称为“令牌”(Token)的特殊帧来控制的。只有持有令牌的节点可以发送数据帧,而没有拿到令牌的节点只能等待。拿到令牌的节点将令牌转换成数据帧头,后面加挂上目的节点和自己的数据帧进行发送。目的站点从环上复制该数据帧,数据帧则沿环继续往下循环。数据帧循环一周后由源站点回收,并送出一个空令牌,使其余的站点能获得帧的发送权。

在图2.1中, T 表示令牌, $T=0$ 表示信道空闲, $T=1$ 表示令牌环网中有数据正在发送。 A, B, C, D 为网络中的四个节点。

图2.1(a)若节点A有数据Dat待发送,当空令牌 T 经过节点A时,A抓住 T 。

图2.1(b)节点A将令牌修改为数据帧头,并加挂目的节点C和数据Dat进行发送;数据帧经过节点B,B检查目的节点,发现并不是发送给自己的数据,忽略该数据帧。数据帧经过节点C,C检查目的节点并从环上拷贝数据。数据帧沿着环继续传输至节点D,D忽略该数据帧。

图2.1(c)数据帧循环一圈后,节点A将数据帧回收并放出空令牌。

3. 二次协议和 TOD 协议

设网络中的节点数目为 N 。在每个传输时刻 $t_k, k \in \mathbf{N}$,仅有一个节点的数据可通过网络进行传输,表示为 $\sigma_k \in \{1, \dots, N\}$ 。二次协议(Quadratic Protocols)的切换函数为