

# 基于马尔科夫链的网络控制系统调度

徐英<sup>1</sup>, 王万良<sup>1</sup>, 徐晖<sup>2</sup>

(1. 浙江工业大学信息工程学院, 杭州 310014; 2. 上海大学机电工程及自动化学院, 上海 200072)

**摘要:** 网络控制系统数据包的丢失将导致控制系统性能下降与网络资源利用率降低。以马尔科夫链对网络控制系统的数据包丢失时延进行动态预测, 并将它作为网络利用率的一个重要参数, 利用反馈原理动态地调整网络控制系统控制任务周期, 在线分配网络资源, 实现调度与控制的集成, 提高了网络资源的利用率与控制系统性能, 仿真结果表明了该方法的有效性。

**关键词:** 数据包丢失; 马尔科夫链; 反馈调度; 丢包率

## Scheduling for NCS Based on Markov Chain

XU Ying<sup>1</sup>, WANG Wan-liang<sup>1</sup>, XU Hui<sup>2</sup>

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014;

2. School of Mechanical Electronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072)

**【Abstract】** The data packet dropout degrades the performance and network utilization of networked control system. The Markov chain is proposed to model the networked control system, to predict the delay and packet loss rate as an important parameter of the quality of service. Based on the dropout rate, a feedback scheduler is used to adjust the sampling periods for tasks of Networked Control Systems(NCS) and network resources. The integrated control-scheduling is realized and the total control performance is optimized. The emulation result shows it is effective.

**【Key words】** packet losses; Markov chain; feedback scheduling; dropout rate

### 1 概述

网络控制系统(Networked Control Systems, NCS)是一种完全分布式、网络化实时反馈控制系统。近年来, 网络控制中的调度问题已经引起了广大研究人员的广泛兴趣, 并取得了一系列的成果。

文献[1]提出了网络调度的概念, 将CPU调度问题中的RM(Rate Monotonic)调度方法扩展到网络控制领域中, 并应用单速率调度RM方法, 在单速率调度的有效性和网络控制系统的稳定性约束下提出采样周期的优化调度方法, 但这种方法只能应用于有优先权分配功能的网络, 如CAN, DeviceNet等, 且要求每个子控制系统的传输时延和最大允许时延已知。文献[2]针对单CPU多节点的连接方式, 提出用IAE(Integral Absolute-value Error)指标来制定CPU任务优先级的动态分配规则, 并以Truetime作为仿真工具说明协同设计的必要性, 但是对协同设计的方法及网络调度和控制算法的交互设计没有提及。文献[3]提出控制器的设计方法和实时系统及调度间的协同设计方法, 并从控制性能角度出发, 讨论当采样周期在期望值和有限共享CPU资源约束条件下如何获得最优值的问题。但这相当于不存在网络情况下的协同设计, 没有考虑网络调度问题。瑞典Lund工学院Martin Andersson, Anton Cervin<sup>[4]</sup>等人对此进行了一系列的研究, 设计出Matlab环境下进行仿真的工具箱Truetime。

在研究NCS时, 目前重点考虑的是网络延迟和数据包的丢失问题, 这些也成为衡量QoS的重要参数。本文采用马尔科夫链预测模型对NCS的数据包丢失率进行实时估计, 而后利用反馈原理集成到NCS系统结构中, 在线调整实时控制任务周期, 将系统资源利用率与控制系统性能有机结合, 实现NCS的调度与控制集成。

### 2 NCS 中的数据包丢失模型

#### 2.1 NCS 中的数据包丢失一般模型

网络控制系统的控制性能分析中除了网络传输时延问题外, 丢包和多帧传输也是比较重要的问题。网络可以被建构成一个开关, 它可以确定速率开合。当开关关闭时, 包含的网络数据包被传输; 当开关打开时, 数据包丢弃。当闭环控制网络系统中数据传输具有数据包丢失问题时(只考虑传感器至控制器有网络连接), 其系统结构如图1所示。

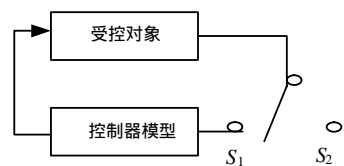


图1 具有数据包丢失的NCS结构示意图

对于数据包丢失, 可以将NCS的网络作为一种速率开关 $S_i$ , 当 $S_i$ 关闭时( $S_i = 1$ ), 控制信息传输; 当 $S_i$ 打开时( $S_i = 0$ ), 数据丢失。

一个由 $n$ 个子控制系统组成的NCS的集合为 $L_{loop} = \{L_{loop1}, L_{loop2}, \dots, L_{loopn}\}$ , 其中子系统为 $L_{loopi}$ 。为了更好地预测出数据丢包的相关参数, 下文将子系统丢包过程用基于马尔科夫链的丢包模型来预测, 以估计出实时丢包率。

#### 2.2 基于马尔科夫链NCS中的数据包丢失模型

在网络控制系统中, 信道以概率 $\varepsilon$ 模拟丢包。因此, 信

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60573123)

**作者简介:** 徐英(1983-), 女, 硕士研究生, 主研方向: 网络控制系统调度优化; 王万良, 教授、博士生导师; 徐晖, 硕士研究生

**收稿日期:** 2007-10-10 **E-mail:** xuying012@yahoo.com.cn

道可以建模成信号  $y$  和随机丢包过程  $d$  作为输入的系统。当丢包发生时,  $d$  值为 1, 反之为 0。用满足马尔科夫链的分布来模拟预测, 该马尔科夫链是不可逆的、周期的, 它包含  $N(N < \infty)$  个状态, 例如  $\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ , 转移矩阵即  $Q = (q_{ij})_{N \times N}$ , 其元素值的含义即是概率  $\varepsilon$ 。在第  $N$  时刻,  $d[n]$  是被马尔科夫链状态  $q[n]$  唯一决定的, 因此有等式  $d[n] = f(q[n])$ , 如图 2 所示。

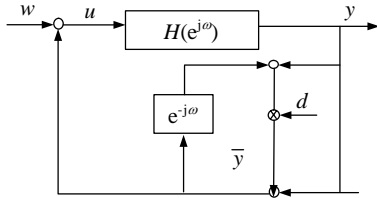


图 2 单个子系统的基于马尔科夫链的丢包模型

因此对于单输入输出系统来说, NCS 的状态空间方程可以表示为

$$\begin{cases} x[n+1] = A[n]x[n] + Bw[n] \\ y[n] = Cx[n] \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $A[n]$  是开关矩阵, 其值是随机变换的过程。对概率  $1 - \varepsilon$ ,  $d[n] = 0, A[n] = A^0$ ; 对概率  $\varepsilon$ ,  $d[n] = 1, A[n] = A^1$ 。

$$A^0 = \begin{pmatrix} A_p + B_p C_p & O \\ C_p & O \end{pmatrix}, A^1 = \begin{pmatrix} A_p & B_p \\ O_p & I_m \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} B_p \\ O \end{pmatrix}, C = [C_p, O]$$

其中,  $I_m$  可表示成是一个  $m$  维的特征矩阵;  $O$  矩阵含有的维数是个约数。为了方便起见,  $A[n]$  可以用矩阵  $A$  来表示, 当  $d[n] = f(q_i) = 0$  时, 有  $A_i = A^0$ ; 当  $d[n] = f(q_i) = 1$  时, 有  $A_i = A^1$ 。

以上建立的是网络控制系统的模型, 下面介绍在此模型基础上利用HMM<sup>[5]</sup>原理来预测丢包和时延情况。以校园环境为背景, 将网络状态分为 4 类: 第 1 类为轻负荷, 第 2 类为中等负荷, 第 3 类为重负荷, 第 4 类为堵塞。观察值也分为 4 类: 第 1 类时延小于 200 ms, 第 2 类时延在 200 ms~400 ms 之间, 第 3 类时延在 400 ms~1 s 之间, 第 4 类时延大于 1 s。经离散化后, 状态  $S_i$  和观察  $O_i$  的论域均为  $\{1, 2, 3, 4\}$ 。故该模型是一个  $4 \times 4$  的矩阵。因为校园环境实验中采用UDP协议传输, 测得时延大于发送周期 1 s 时就认为产生了丢包的情况。所以, 这里所建的HMM是时延和丢包的混合模型。

选取第 1 组观察数据, 应用 Baum-Welch 算法对 HMM 的参数  $\{A, B, \pi\}$  进行辨识。得出这 3 个参数的值。为了评价所得模型的准确性, 利用多组新的实验数据不断优化 HMM 模型参数。利用再一组新的实验数据, 对以上所得模型应用 Viterbi 算法预测下一步的时延, 即根据已经确定的部分观察序列  $O_1, O_2, \dots, O_t$  和最优状态序列  $q_1, q_2, \dots, q_t$ , 找到当部分观察序列增 1 时的最优状态序列  $q_1, q_2, \dots, q_t, q_{t+1}$ , 然后由  $q_t$  推算出下一步出现概率最大的  $o_{t+1}$ , 将这一预测值记为  $pre_{t+1}$ , 并将其与下一步实际观测数据  $o_{t+1}$  进行比较。判断这一数据是否丢包, 例如在校园实验中大于发送周期 1 s 就认为是丢包, 由多组预测数据得出平均丢包率。

### 3 基于网络利用率的 NCS 控制周期调度

#### 3.1 调度方法概述

对于一组周期性控制任务的网络控制系统, 每个控制子系统的任务模型表示为  $L_{loop_i}(h_i, D_i, C_i, B_i)$ 。其中,  $h_i$  为控制任

务的传输周期;  $D_i$  为相对时延;  $C_i$  为任务传输时间;  $B_i$  为传输的阻塞时间。为了对网络中传输数据进行实时预测, 利用前文中由马尔科夫链的丢包预测模型来估计数据包丢失率, 计算出网络利用率。本文选用网络利用率  $U_s$  作为给定值,  $U_s$  依赖于数据包的丢失率  $\bar{\varepsilon}$  与通过率  $\beta_i$ , 在  $[(k-1)h_s, kh_s]$  内, 网络利用率  $U_i = \sum_{i=1}^n [(1-\bar{\varepsilon})\bar{C}_i]/h_i$ 。网络传输采用非强占方式,  $\bar{C}_i$  为包括  $B_i$  的数据平均传输时间。利用反馈调度<sup>[6]</sup>选择控制任务传输周期作为操纵变量, 用于在线调节各个控制任务周期, 调节控制系统采样周期, 同时改善NCS的QoC和QoS。网络监控器将网络传输信息反馈到控制器与给定值  $U_s$  进行比较, 根据偏差对控制任务的传输周期进行调整, 控制任务新周期调整为  $h'_i = h_i(U_i/U_s)$ , 实时任务调度通过基本调度器实现。

#### 3.2 调度方法推导实现

对基于网络利用率的 NCS 调度系统, 网络利用率的设定必须满足可调度条件。对于采用单调速率调度的网络,  $U_s = \sum_{i=1}^n \bar{C}_i/h_i \quad i(2^{h_i} - 1)$ 。为了对传输时间进行快速评估, 引入遗忘因素  $\lambda$ , 则实时任务传输时间为

$$\hat{C}(kh_s) = \lambda \hat{C}((k-1)h_s) + (1-\lambda)\hat{C}(kh_s) \quad (2)$$

当  $\bar{\varepsilon} = 0$  时, 网络无数据包丢失, 控制信息 100% 传输, 网络利用率  $U = \sum_{i=1}^n \hat{C}_i/h_i, \Delta U = 0$ , 反馈调度器保持原调度参数不变, NCS 各子系统采样周期为  $h_i$ 。当  $\bar{\varepsilon} \neq 0$  时, 部分控制信息丢失, 对应于每个反馈调度周期  $h_s$ , 网络的利用率为

$$U(kh_s) = \sum_{i=1}^n [(1-\bar{\varepsilon})\hat{C}_i(kh_s)]/h_i((k-1)h_s)$$

其中,  $h_i(kh_s)$  为分配到控制任务  $i$  的采样周期;  $\hat{C}_i(kh_s)$  为每个周期控制任务的传输时间。由于  $U \neq U_s$ , 因此QoS控制器<sup>[7]</sup>对控制任务周期进行重新分配, 新控制任务周期为

$$h'_i = h_i((k-1)h_s) \frac{U(kh_s)}{U_s} \quad (3)$$

调度器根据新任务周期对 NCS 各个控制子系统进行重新调整分配。数据包丢失率  $\bar{\varepsilon}$  的增加导致网络利用率降低, 动态调整相应控制任务周期, 使得  $h'_i$  减少, 从而提高了网络利用率  $U(kh_s)$ , 优化了网络控制系统性能, 新控制任务周期的调整必须满足网络可调度条件。

### 4 仿真研究

仿真实验以 3 个直流伺服电动机控制系统构成的网络控制系统为例, 伺服电动机控制对象描述为  $G(s) = k/(s^2 + s)$ ,  $k$  为 500, 3 个控制子系统相互独立, 控制任务采用单数据包方式传输。假设每个控制任务数据包平均传输时间为 2.4 ms。初始时 3 个子系统周期性控制任务的传输周期分别为 10 ms, 10.8 ms, 9 ms, 控制回路采用 PID 控制方法。设给定网络利用率为 72%。网络环境利用上例中 TrueTime 仿真环境, 利用模型参数为  $M=4, N=3$  的 HMM 实时预测出的校园网络环境, 进行下面 3 种情况的仿真:

(1) 初始时设置网络丢包率为 0, TrueTime 仿真环境实验中可以得出系统能稳定工作。

(2) 利用网络环境下的数据训练出参数 HMM 模型, 训练

(下转第 144 页)