

网络控制中基于 DR 模型的预估算法¹⁾

黄四牛 陈宗基 魏 晨

(北京航空航天大学自动控制系 北京 100083)

(E-mail: huangsiniu@hotmail.com)

摘 要 针对网络控制中的延迟问题,提出了一种基于 DR 模型进行预估的新的网络控制设计方法,并深入分析了以实际模型作为 DR 模型的预估算法的稳定性.该方法通过对状态进行基于 DR 模型的预估,克服了传输延迟对网络控制的影响,使得不考虑网络延迟的控制律能够应用于具有网络延迟的网络控制系统中,同时该方案能够有效地解决网络控制过程中数据包超时到达或者数据包丢失的问题.

关键词 网络,控制系统,延迟,时间同步

中图分类号 TP273

An Estimating Algorithm Based on DR Model in NCS

HUANG Si-Niu CHEN Zong-Ji WEI Chen

(Department of Automatic Control, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

(E-mail: huangsiniu@hotmail.com)

Abstract A novel estimating scheme based on DR model for NCS is proposed. Both the detailed DR estimation algorithm and the stability analysis of the system are given. By using DR estimation of the state, the effect of the communication delays is overcome, so that the controller designed without considering delays is still applicable to NCS. Moreover, the scheme can effectively solve the problem of data packets loss or timeout.

Key words Network, control system, delay, time synchronization

1 引言

对于具有传输延迟的网络控制系统的设计与分析,已有很多学者从不同方面作过研究.其中 Branicky^[1]通过分析采样速率和网络延迟对网络控制系统的影响来分析网络控制系统的稳定性. Johan Nilsson^[2]对网络延迟建模(独立随机延迟和 Markov 链随机延迟),使用时戳和测量信号,分析了闭环系统的稳定性和二次型,但其最大随机延迟限制为一个采样周期. Yoram Helevi^[3]提出了一种增广对象模型,以系统的当前状态、延迟控制和延迟输出信息构成新的状态向量,利用该增广对象来分析.其他学者^[4]从随机控制和动态规划的角度对

1) 航空基金(02E51 014)资助

Supported by the National Aviation Foundation (02E51 014)

收稿日期 2002-11-04 收修改稿日期 2003-07-08

Received November 4 2002; in revised form July 8 2003

网络控制系统进行分析和设计. 然而这些研究要么由于涉及延迟的统计特性, 需要事先知道延迟的概率特性, 而且控制过程中需要大量的均值和方差的运算, 要么假定传输延迟具有上界, 特别是没有考虑网络控制过程中数据包超时到达或者数据包丢失的问题, 另外其设计思路往往是抛开以往在传统控制系统中设计好的控制律, 来为网络控制系统重新设计控制器.

本文针对这种情况, 提出了基于 DR 模型进行预估的新的网络控制设计方法, 并分析了具体的 DR 预估算法的稳定性问题. 该方法通过对状态进行 DR 预估, 克服了传输延迟对网络控制的影响, 使得不考虑网络延迟的控制律能够应用于具有网络延迟的网络控制系统中.

2 基于 DR 模型的预估算法

2.1 DR 算法

DR(dead reckoning)是分布交互仿真(DIS)中普遍采用的一项技术. 假如仿真中节点 A, B 需要交互, 结点 A 通过结点 B 的 DR 模型推算结点 B 的真实状态; 同时节点 A 通过判断节点 B 对节点 A 的估计状态与准确模型计算出的真实状态之差是否超出门限值来决定是否发送新的状态信息^[5]. DR 算法不仅极大地减轻网络的信息传输负载量, 同时补偿了实体状态信息的传输延迟.

2.2 接口延迟模型

定义 1. 在 kT 时刻, 如果网络节点 A 通过网络所能接收到网络节点 B 的最新状态信息的产生时间为 $t(n)$, 那么将 $\tau(k) = t(k) - t(n)$ 定义为 kT 时刻从 B 到 A 的接口延迟.

根据接口延迟的定义, 可以根据实际传输延迟来求取接口延迟:

$$\tau(k) = t(k) - t(k'), \quad k' = \max\{n \mid t(n) + d(n) \leq t(k), n = 1, 2, \dots, k\} \quad (1)$$

通过分析, 可以得到接口延迟的一个重要性质: 如果 $\{\tau(k)\}$ 为接口延迟模型, 那么 $\tau(k+1) \leq \tau(k) + 1, \forall k$. 正是由于这个性质, 对于相对较大的实际传输延迟 (包括数据包超时到达或者数据包丢失), 其接口延迟并不大. 相当于接口延迟屏蔽掉了网络传输中非法的实际传输延迟, 能自动解决数据包超时到达或者数据包丢失的问题.

根据以上的分析可知, 接口延迟并非实际的传输延迟. 传输延迟是从数据的传输角度上来说的, 指一个状态信息包从发送到接收所经过的时间. 而接口延迟是从数据的使用的角度上来说的, 指正在使用的状态信息从产生时刻到使用时刻所经过的时间.

2.3 基于 DR 预估的闭环网络控制系统

假设网络控制系统中的控制器和执行器都采用时间驱动, 将接口延迟模型和 DR 预估器引入到网络控制系统中, 图 1 是使用 DR 算法对接口延迟进行补偿的示意图, 图中的 DR 预估器根据对象的 DR 模型和具有延迟的状态信息以及具体的接口延迟, 预估出对象的当前状态信息. 图 2 表示基于 DR 预估的闭环网络控制系统的结构.

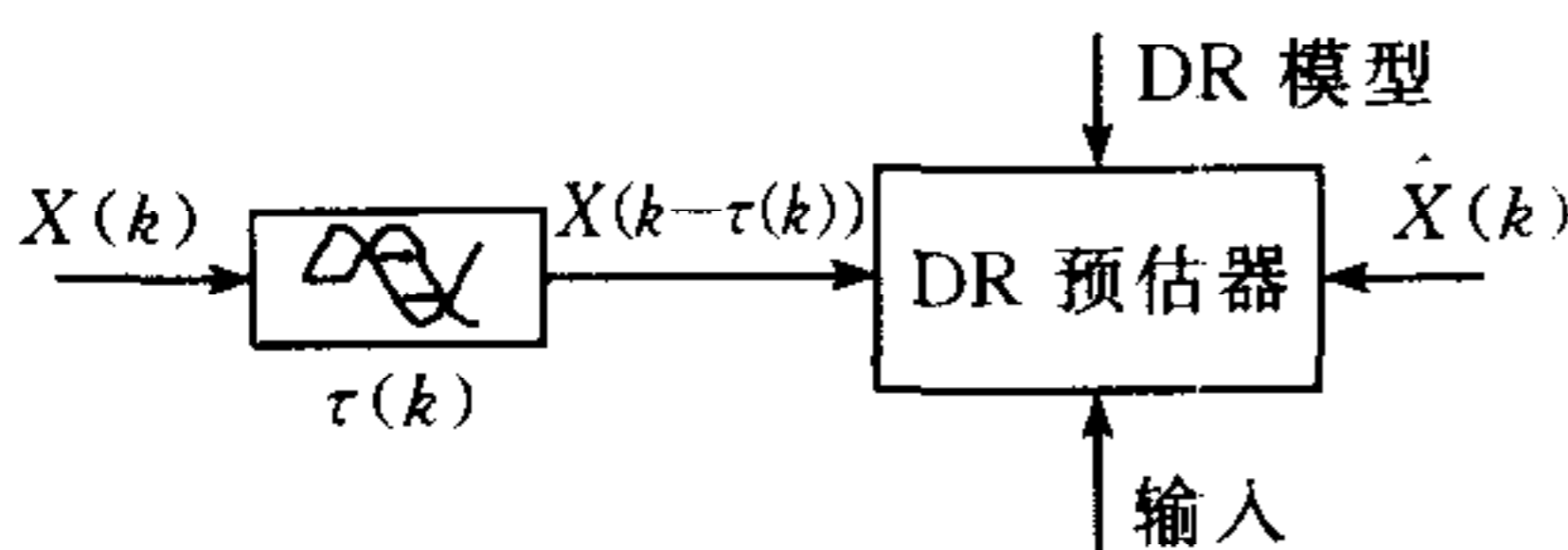


图 1 接口延迟和 DR 预估器示意图
Fig. 1 Interface delay and DR estimating

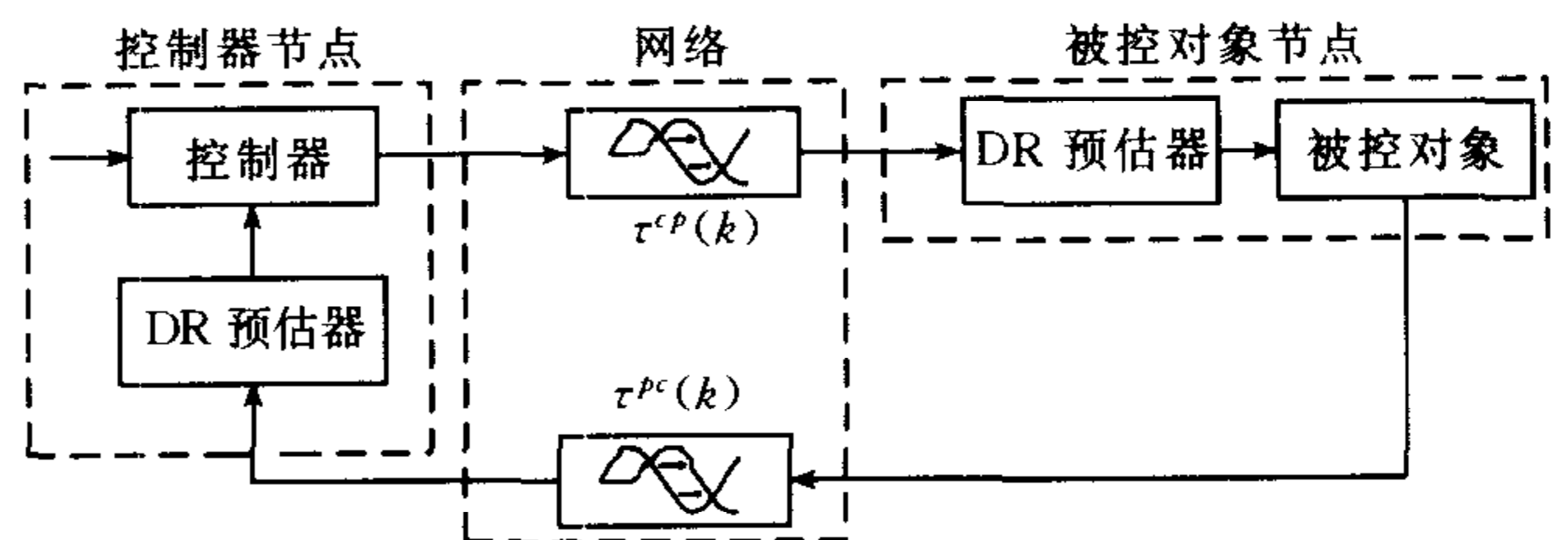


图 2 基于 DR 预估的闭环网络控制系统的结构图
Fig. 2 NCS based on DR estimating

其中 $\tau^p(k)$ 表示控制器到被控对象的接口延迟, $\tau^{pc}(k)$ 表示被控对象到控制器的接口延迟. 根据接口延迟的性质, 对于每一 kT 时刻, 被控对象上已经收到的关于控制器的最新状态信息为 $(k - \tau^p(k))T$ 时刻的信息, 控制器已经收到的关于被控对象的最新状态信息为 $(k - \tau^{pc}(k))T$ 时刻的信息.

2.4 NCS 中基于 DR 模型的预估算法

为了书写的方便, 以下将 $\tau^p(k)$ 简写作 p , 将 $\tau^{pc}(k)$ 简写作 q .

在不存在延迟的情况下, 假设被控对象方程和被控对象对应的控制器方程为

$$\begin{cases} X_{k+1} = AX_k + BU_k \\ Y_k = CX_k + DU_k \end{cases}, \quad \begin{cases} Z_{k+1} = FZ_k + GY_k \\ U_k = HX_k + IY_k \end{cases} \quad (2)$$

系统中引入延迟后, 对状态进行 DR 预估, 那么被控对象方程和对应的控制器方程转化为

$$\begin{cases} X_{k+1} = AX_k + BU_{k|p} \\ Y_k = CX_k + DU_{k|p} \end{cases}, \quad \begin{cases} Z_{k+1} = FZ_k + GY_{k|q} \\ U_k = HX_k + IY_{k|q} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中 $U_{k|p}$ 表示对 U_k 进行的 p 步 DR 预估值, 该预估值根据初始状态 U_{k-p} 和控制器的 DR 模型预估得到; $Y_{k|q}$ 表示对 Y_k 时刻对进行的 q 步 DR 预估值, 该预估值根据初始值 Y_{k-q} 和被控对象的 DR 模型预估得到.

需要指出的是: 上述用于预估的 DR 模型由被预估对象通过网络实时告诉别的节点, 可以是时变的, 可以是自己离线或在线辨识出的低阶模型. 该 DR 模型可以为低阶模型, 也可以为被预估对象的实际模型. 比如对于一阶 DR 模型, DR 算法可以表示为 $\hat{X}_k = X_{k-p} + \dot{X}_{k-p} \cdot (t_k - t_{k-p})$; 对于二阶 DR 模型, DR 算法可以表示为 $\hat{X}_k = X_{k-p} + \dot{X}_{k-p} \cdot (t_k - t_{k-p}) + \frac{1}{2} \ddot{X}_{k-p} \cdot (t_k - t_{k-p})^2$.

2.5 DR 模型为实际对象模型的预估算法

如果对控制器取实际模型作为 DR 模型, 取被控对象的实际模型作为 DR 模型, 那么式(3)中的 $U_{k|p}, Y_{k|q}$ 可根据如下 DR 预估算法得到

$$U_{k|p} = H(F^p Z_{k-p} + \sum_{i=1}^p F^{p-i} G Y_{k-i}) + I Y_k, \quad Y_{k|p} = C(A^p X_{k-p} + \sum_{i=1}^p A^{p-i} B U_{k-i}) + D U_k \quad (4)$$

综合式(3), (4)得到使用以实际模型作为 DR 模型的预估算法的网络控制闭环方程.

3 基于 DR 模型的预估算法的稳定性

3.1 系统模型分析

为了研究上述以实际模型作为 DR 模型的预估算法的稳定性, 假设 $i-ID$ 为非奇异阵, 其中 i 为单位矩阵(因为 D 通常情况下为 0, 所以假设是合理的). 另外可知如果 $i-ID$ 为非奇异阵, 那么 $i-DI$ 也为非奇异阵. 同时定义

$$\begin{cases} \bar{A} := A + B(i-ID)^{-1}KC \\ \bar{B} := B(i-ID)^{-1}H \end{cases}, \quad \begin{cases} \bar{F} := F + G(i-DI)^{-1}DH \\ \bar{G} := G(i-DI)^{-1}C \end{cases} \quad (5)$$

式(3)可以转化成

$$\begin{cases} X_{k+1} = \bar{A}X_k + \bar{B}Z_{k|p} \\ Z_{k+1} = \bar{F}Z_k + \bar{G}X_{k|q} \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6)和 DR 算法(4),并对状态进行增广,可以得到

$$\bar{X}_{k+1} = \Phi(k)\bar{X}_k \tag{7}$$

其中, $\bar{X}_k^T = [X_{k|0}^T, X_{k|1}^T, X_{k|2}^T, \dots, X_{k|q-1}^T, X_{k|q}^T, \dots, X_{k|\max q}^T, Z_{k|0}^T, Z_{k|1}^T, Z_{k|2}^T, \dots, Z_{k|p-1}^T, Z_{k|p}^T, \dots, Z_{k|\max p}^T]$

$$\Phi(k) = q(p, q) = \begin{bmatrix} \bar{A} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \bar{B} & 0 \\ \hline \bar{A} & 0 & & & & & 0 & & & \bar{B} & \\ & \bar{A} & & & & & 0 & & & \vdots & \bar{B} \\ & & \ddots & & & & 0 & & & \vdots & \\ & & & \bar{A} & & & \vdots & & & \bar{B} & \\ 0 & \dots & 0 & \bar{A} & 0 & & \bar{B} & & & & \\ \hline 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & & \dots & & 0 & \\ \hline 0 & \dots & 0 & \bar{G} & 0 & \bar{F} & 0 & \dots & & 0 & \\ \hline \bar{G} & & & & & \bar{F} & 0 & & & & \\ \bar{G} & & & & & \bar{F} & & 0 & \dots & & \\ \vdots & & 0 & \dots & 0 & & \ddots & & \ddots & & 0 \\ \bar{G} & & & & & 0 & \bar{F} & & & & \\ \bar{G} & & & & & & \bar{F} & 0 & & & \\ \hline 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \end{bmatrix} \begin{matrix} \left. \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \right\} 1 \cdot m \\ \left. \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \right\} q \cdot m \\ \left. \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \right\} (\max q - q) \cdot m \\ \left. \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \right\} 1 \cdot n \\ \left. \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \right\} p \cdot n \\ \left. \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \right\} (\max p - p) \cdot n \end{matrix} \tag{8}$$

其中 m 表示方阵 \bar{A} 的维数, n 表示方阵 \bar{F} 的维数.

先考虑如下定义.

定义 2. 对于随机延迟 $\tau(k) \in [\tau_{\min} \ \tau_{\max}]$, 在任意时刻如果 $\tau(k)$ 可以在 $[\tau_{\min} \ \tau_{\max}]$ 之内任意随机变化, 而且任意时刻的延迟不会受到其它时刻的影响, 那么这种随机延迟称为 $[\tau_{\min} \ \tau_{\max}]$ 内的有界任意延迟.

假如接口延迟 $\{\tau^p(k)\}, \{\tau^{pc}(k)\}$ 为有界任意延迟, 那么方程(7)为一特殊的时变离散系统, 其系统矩阵 $\Phi(k)$ 在任意时刻都只能在集合 q^l 中取值, 且可取集合 q^l 中的任意值. 其中

$$q^l = \{q(p, q), p \in [\min \tau^{cp}(k), \max \tau^{cp}(k)], q \in [\min \tau^{pc}(k), \max \tau^{pc}(k)]\} \tag{9}$$

下面讨论这类特殊的时变离散系统的稳定性.

3.2 稳定性分析

定理 1. 如果存在某一正整数 n 和某种矩阵范数 $\|\cdot\|$, 使得 $\max \left\| \prod_{k=1}^n \Phi(i_k) \right\| < 1$, 那么系统(7)是渐近稳定的.

证明. 设 $N = \left[\frac{k}{n} \right]$, 即 $\frac{k}{n}$ 的整数部分; $M = \max \|\Phi(i)\|, \Phi(i) \in Q^l$; 记 $\lambda =$

$$\max \left\| \prod_{k=1}^n \Phi(i_k) \right\|, \text{ 根据题设, } \lambda < 1.$$

由式(7)得到

$$\begin{aligned} \|x(k)\| &= \|\Phi(1)\Phi(2)\dots\Phi(n) \cdot \Phi(n+1)\Phi(n+2)\dots\Phi(2n) \cdot \dots \cdot \\ &\quad \Phi((N-1)n+1)\Phi((N-1)n+2)\dots\Phi(N \cdot n) \cdot \\ &\quad \Phi(N \cdot n+1)\dots\Phi(k-1)\Phi(k) \cdot x(0)\| \leq \\ &\|\Phi(1)\Phi(2)\dots\Phi(n)\| \cdot \|\Phi(n+1)\Phi(n+2)\dots\Phi(2n)\| \cdot \dots \cdot \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \| \Phi((N-1)n+1)\Phi((N-1)n+2)\cdots\Phi(Nn) \| \cdot \\ & \| \Phi(Nn+1) \| \cdots \| \Phi(k-1) \| \cdot \| \Phi(k) \| \cdot \| x(0) \| \leq \\ & \lambda^N \| \Phi(N \cdot n+1) \| \cdots \| \Phi(k-1) \| \cdot \| \Phi(k) \| \cdot \| x(0) \| \leq \\ & \lambda^N M^{k-N \cdot n} \| x(0) \| \end{aligned}$$

由于 $0 \leq k - Kn < n$, 所以, 如果 $M \geq 1$, $\| x(k) \| \leq \lambda^N M^n \cdot \| x(0) \|$, 否则 $\| x(k) \| \leq \lambda^N \cdot \| x(0) \|$. 所以, 总有 $\| x(k) \| \leq \lambda^N \cdot \max(M^n, 1) \cdot \| x(0) \|$. 由于 $\lambda < 1$, 很显然系统 (7) 是渐近稳定的. 证毕.

定理 2. 如果存在序列 i_1, i_2, \dots, i_n , 使得 $\rho(\prod_{k=1}^n \Phi(i_k)) > 1$, 那么系统 (7) 不稳定. 其中 $\rho(\Phi)$ 表示方阵 Φ 的谱半径.

证明. 如果 \exists 序列 i_1, i_2, \dots, i_n , 使得 $\rho(\prod_{k=1}^n \Phi(i_k)) > 1$, 先构造序列:

$$\begin{aligned} \Phi(1) &= \Phi(i_1), & \Phi(2) &= \Phi(i_2), & \cdots, & & \Phi(n) &= \Phi(i_n), \\ \Phi(1+n) &= \Phi(i_1), & \Phi(2+n) &= \Phi(i_2), & \cdots, & & \Phi(n+n) &= \Phi(i_n), \\ \Phi(1+2n) &= \Phi(i_1), & \Phi(2+2n) &= \Phi(i_2), & \cdots, & & \Phi(n+2n) &= \Phi(i_n), \\ & \vdots & & & & & & \end{aligned}$$

那么 $x(mn) = \prod_{k=1}^n \Phi(i_k) x((m-1)n) = \rho(\prod_{k=1}^n \Phi(i_k))^m x(0)$, 由于其中 $\rho(\prod_{k=1}^n \Phi(i_k)) > 1$, 所以系统 (7) 在这种情况下不稳定.

因此, 若 $\exists \Phi(i_k) \in Q^I$, 使得 $\rho(\Phi(i_k)) > 1$, 那么系统 (7) 不稳定. 需要注意的是, 如果仅仅满足 $\rho(\Phi(i_k)) < 1, \forall \Phi(i_k) \in Q^I$, 即 Q^I 中所有矩阵的全部特征根在单位圆内, 并不能保证系统 (7) 在最坏的情况下是稳定的.

引理 1. 下面矩阵的谱半径 $\rho(\Phi) \leq \|M\| + \|N\|$.

$$\Phi = \begin{bmatrix} M & N & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ N & 0 & M & 0 & \cdots & 0 \\ N & 0 & 0 & M & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N & 0 & 0 & 0 & \cdots & M \\ M+N & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \tag{10}$$

证明. 设 λ 是 Φ 的特征值, 则必存在 $x \neq 0$, 使得 $\lambda x = \Phi x$.

用 X_k 表示 $[x_{(k-1)n+1}^T, x_{(k-1)n+2}^T, \dots, x_{(k-1)n+n}^T]^T$, 其中 n 为方阵 M 的的维数, 方阵 Φ 的总维数为 $n \times m$. 那么存在 X_p , 使得 $\| X_p \| = \max \| X_k \| \neq 0$.

$$\text{根据 } \lambda x = \Phi x, \lambda X_p = \begin{cases} MX_1 + NX_1, & p=m \\ MX_1 + NX_2, & p=1, p \neq m \\ NX_1 + MX_{p+1}, & \text{其它} \end{cases}$$

又因为 $X_p = \max X_k$, 所以 $\| \lambda X_p \| \leq \|M\| \|X_p\| + \|N\| \|X_p\|$, 又 $X_p \neq 0, |\lambda| \leq \|M\| + \|N\|$. 因为 λ 为 Φ 的任意特征值, 所以 $\rho(\Phi) \leq \|M\| + \|N\|$. 证毕.

定理 3. 在接口延迟 $\tau^{cp}(k), \tau^{pc}(k)$ 为定常且相等时, 如果存在一个矩阵范数 $\| \cdot \|$, 使得 $\|M\| + \|N\| < 1$, 那么系统 (7) 渐近稳定. 其中 M, N 由下式确定.

$$M := \begin{bmatrix} \bar{A} & 0 \\ 0 & \bar{F} \end{bmatrix}, \quad N := \begin{bmatrix} 0 & \bar{B} \\ \bar{G} & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

证明. 系统(7)中的系统矩阵 $\Phi(k)$ 在接口延迟 $\tau^p(k), \tau^{pc}(k)$ 为定常且相等时, 式(8)中 $\tau^{pc}(k) = \tau^p(k) = \max \tau^{pc}(k) = \max \tau^p(k)$, $\Phi(k)$ 可以等价变换为式(11)中的矩阵 Φ . 根据引理, 如果存在一个矩阵范数 $\|\cdot\|$, 使得 $\|M\| + \|N\| < 1$, 那么矩阵 Φ 的谱半径 $\rho(\Phi) \leq \|M\| + \|N\| < 1$, 也即系统矩阵 Φ 的特征值的模的最大值小于 1, 又因为该系统已经转化为一个时不变系统, 所以系统稳定. 定理得证. 证毕.

注意: 该定理中的充分条件与接口延迟的具体大小没有关系, 只要 $\|M\| + \|N\| < 1$, 接口延迟 $\tau^p(k), \tau^{pc}(k)$ 为定常且相等, 那么不论该接口延迟具体为多大, 系统仍然是稳定的.

定理 4. 对于系统(7), 在两接口延迟 $\tau^p(k), \tau^{pc}(k)$ 相等时, 如果 $\rho\left(\begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{G} & \bar{F} \end{bmatrix}\right) > 1$, 那么系统不稳定.

证明略.

说明: $\begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{G} & \bar{F} \end{bmatrix}$ 是系统(7)在延迟为 0 时的系统矩阵, 在两接口延迟 $\tau^p(k), \tau^{pc}(k)$ 相等时,

(7)中 $\Phi(k)$ 始终含有 $\begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{G} & \bar{F} \end{bmatrix}$ 的全部特征值, 根据定理 2, 如果 $\rho\left(\begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{G} & \bar{F} \end{bmatrix}\right) > 1$, 系统(7)不稳定.

3.3 使用基于 DR 模型的预估算法要注意的一些问题

- 1) 在进行网络控制之前, 必须进行时间同步; 必须给每一个状态信息打上时间戳.
- 2) 为了尽可能减少延迟, 可以使用 UDP 发送数据.
- 3) 被控对象向外发送的数据应包括全状态信息 X_k , 而不仅是以前的输出信息 y_k . 如果不知道全状态信息 X_k , 可以使用状态观测器求得 \hat{X}_k , 再发送出去.
- 4) 用于预估的 DR 模型由被预估节点动态确定, 并通过网络实时告诉别的节点.

4 仿真

4.1 被控对象和控制器方程描述

为了对上文中提出的基于 DR 预估的网络控制算法的验证, 下面以一飞机的具有舵机动态特性的纵向短周期方程作为被控对象方程进行仿真研究该纵向短周期方程与文献[4]一样, 动态方程为 $d\xi/dt = a\xi + bu$, $y = c\xi$, 其中, $\xi = [\delta_c \quad Wq]^T$, $u = \delta_a$, $y = [\alpha \quad A_n \quad q]^T$, 其中, δ_c 表示升降舵偏转角, W 表示质心的线速度, q 表示围绕质心的俯仰速率, δ_a 表示升降舵指令, α 表示攻角, A_n 表示线心加速度. 代入具体数值得到, 并取采样周期 $T = 0.025s$, 离散化后, 得到对象的离散方程(2)中的系数矩阵如下.

$$A = \begin{bmatrix} 0.6065 & 0 & 0 \\ -4.1997 & 0.9216 & 6.8975 \\ -0.7504 & -0.0008 & 0.9059 \end{bmatrix}, \quad B = (0.3935 \quad -0.8547 \quad -0.2072),$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0.0033 & 0 \\ 21.6204 & 0.3328 & 1.9801 \\ 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

取控制器方程(3)中的系数矩阵如下.

$$F = \begin{pmatrix} -0.5211 & 0.0007 & 0.4058 \\ -27.6428 & 0.4772 & -1.3282 \\ -0.5389 & -0.0088 & 0.4636 \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} -0.1248 & 0.0156 & -0.0456 \\ 13.8962 & 1.1637 & 5.0717 \\ 0.5959 & 0.0095 & 0.2175 \end{pmatrix}$$

$$H = (-2.0081 \quad 0.0139 \quad 0.9942), \quad I = (0 \quad 0 \quad 0)$$

4.2 仿真条件和仿真结果

以下研究俯仰角速率 q 初值为 0.1, 而其余状态初值均为 0 的情况下, 整个闭环网络控制系统零输入时 q 在没有延迟的理想响应、使用 DR 预估控制器的响应以及直接使用常规控制器的响应. 在以下四种条件下进行仿真验证:

- 1) 设定实际传输延迟为固定延迟, 先后取为 $1T, 2T, 3T$, 仿真结果如图 3;
- 2) 设定实际传输延迟都为独立随机延迟, 最小随机延迟均为 $0T$, 最大随机延迟先后取为 $1T, 2T, 3T$, 仿真结果如图 4;
- 3) 在上述独立随机延迟的基础上, 设定数据包以 20% 的概率丢失, 仿真结果如图 5;
- 4) 另外, 为了检验系统对模型的误差的鲁棒性的问题, 在上述独立随机延迟的基础上, 设定 DR 模型误差为 10%, 分别得到仰角速率 q 的没有延迟的理想响应和使用 DR 预估控制器的响应. 仿真结果如图 6.

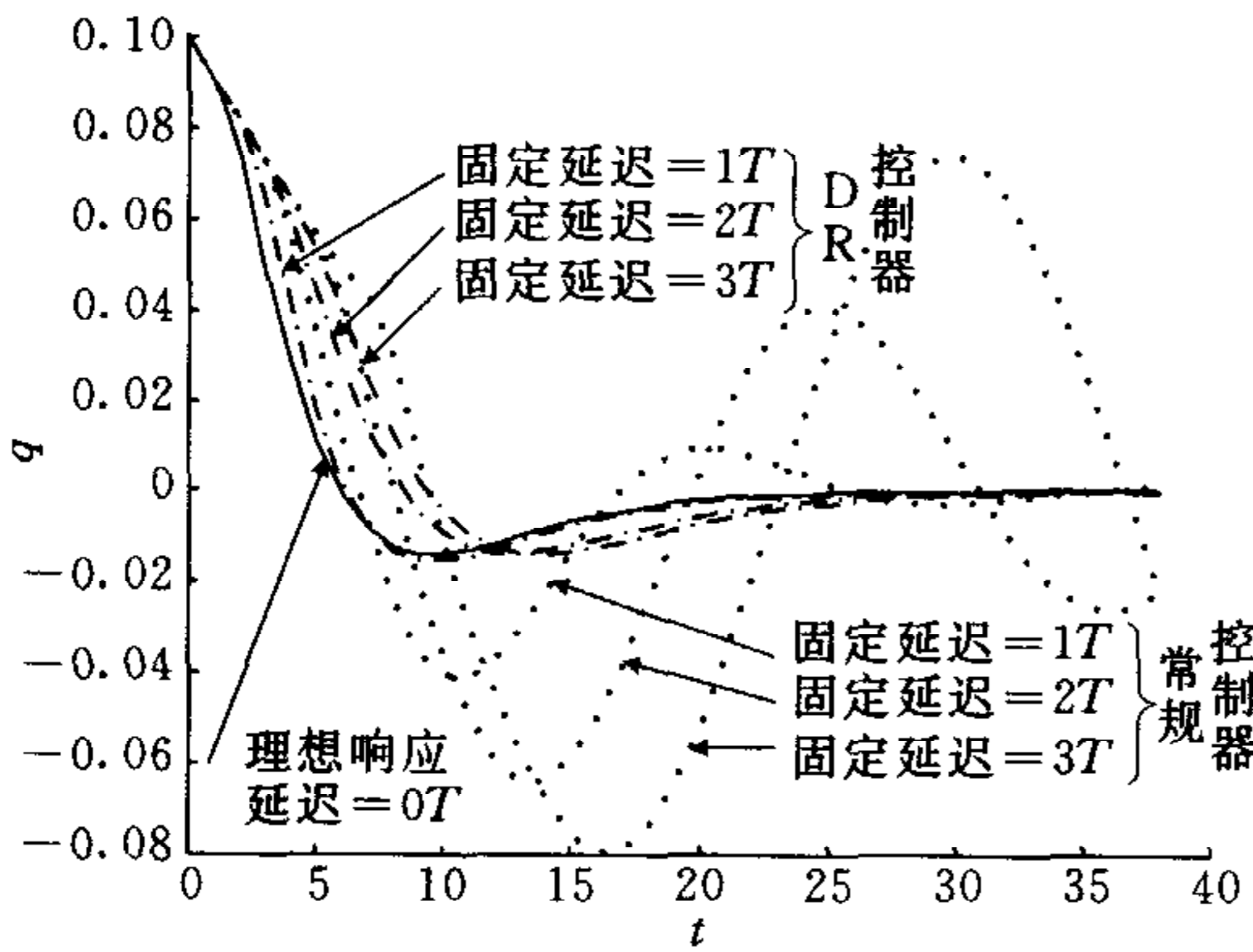


图 3 具有固定延迟的响应
Fig. 3 Response with constant delay

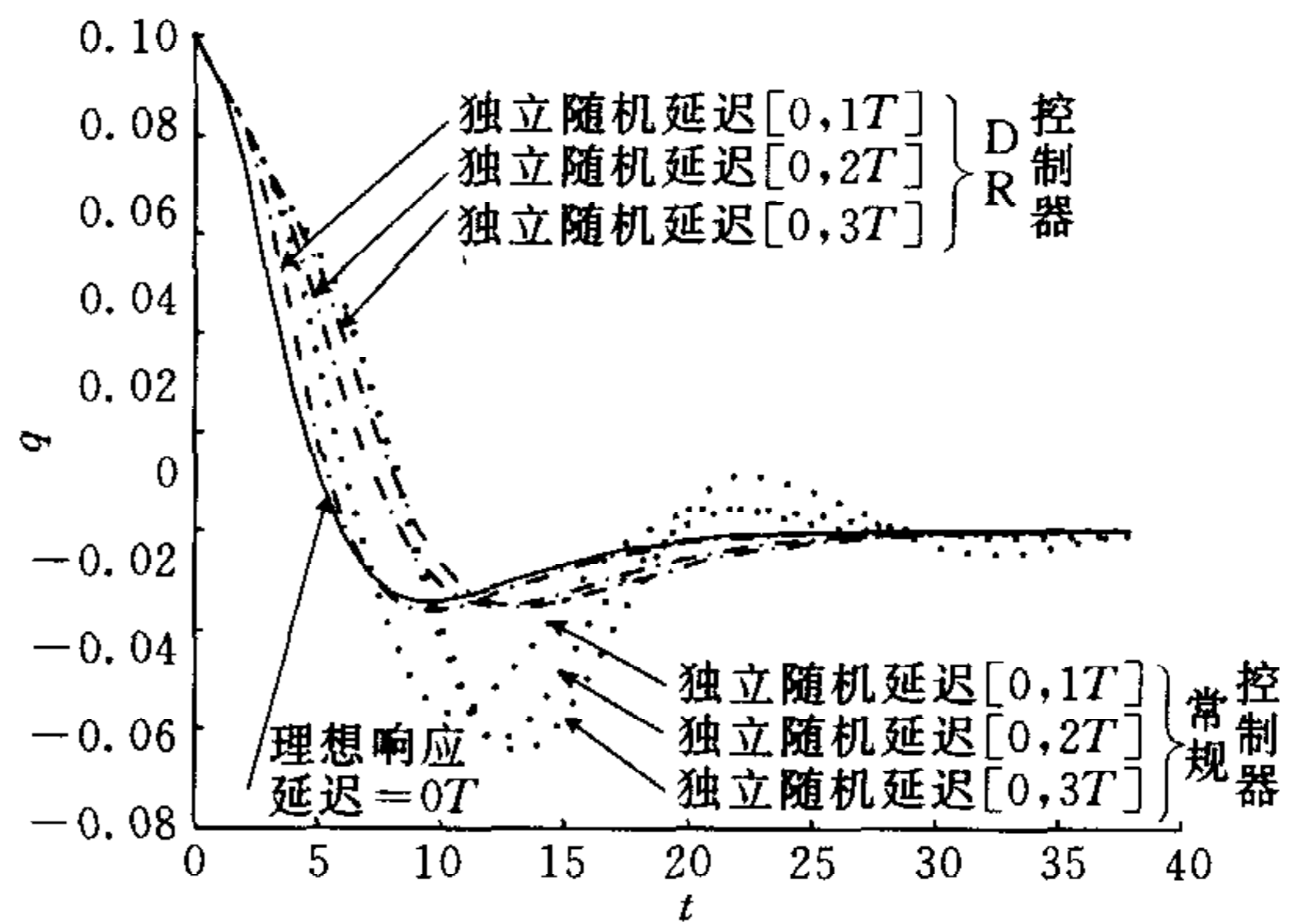


图 4 具有随机延迟的响应
Fig. 4 Response with random delay

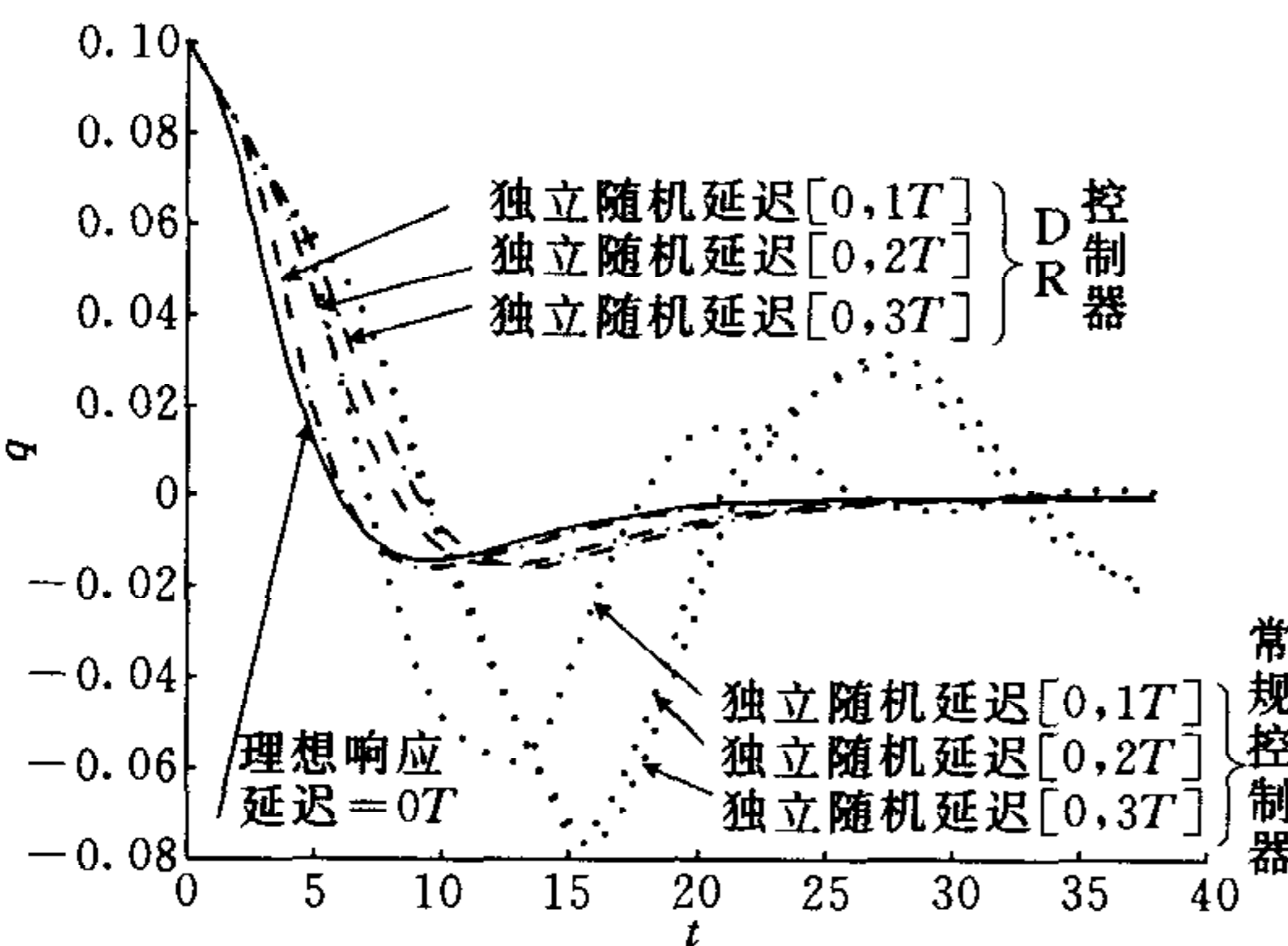


图 5 具有随机延迟且数据包丢失的响应
Fig. 5 Response with random delay and data packets lost

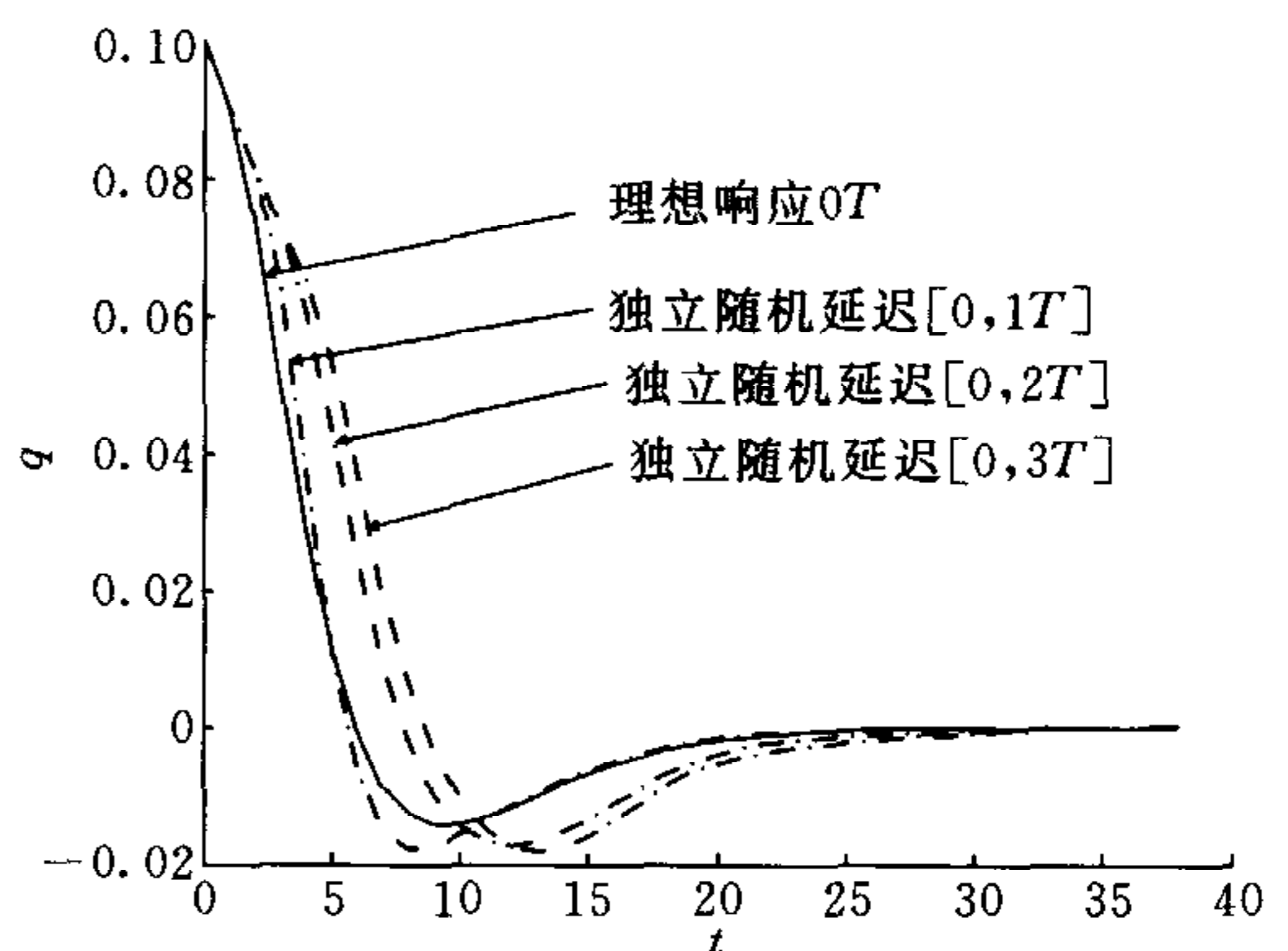


图 6 具有随机延迟和 DR 模型误差的响应
Fig. 6 Response with random delay and error in DR model

从图 3、图 4 和图 5 可以看出:直接使用不考虑延迟的常规控制器时,系统对于延迟的大小和数据包丢失都是非常敏感的,控制效果非常差甚至造成系统不稳定;但是,使用基于 DR 模型的预估器后,不论是随机延迟、固定延迟还是数据包丢失,控制效果与没有延迟的理想响应都非常接近,而且延迟的具体大小对于系统的影响也非常小.另外,模型的误差对系统控制性能的影响也并不明显.

5 结论

本文针对网络控制中的延迟问题,提出了接口延迟模型的概念,并将接口延迟和 DR 预估算法引入到网络控制系统中,给出了基于 DR 模型的预估算法,并深入分析了以 DR 模型为实际模型时的 DR 预估算法的稳定性.仿真结果表明:该方法通过对状态进行 DR 预估,有效地克服了传输延迟对网络控制的影响,使得不考虑网络延迟的控制律仍然能够应用于具有网络延迟的网络控制系统中,同时,该方案还能够解决网络控制过程中数据包超时到达或者数据包丢失的问题.

References

- 1 Branicky M S, Phillips S R, Zhang Wei. Stability of networked control systems; Explicit analysis of delay. In: Proceedings of the 2000 American Control Conference, 2000. 2352~2357
- 2 Nilsson J, Bernhardsson B. Analysis of real-time control systems with time delays. In: Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control. 1996. 3173~3178
- 3 Yoram Halevi, Asok Ray. Integrated communication and control systems. Part I-analysis. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1988, **110**(4): 367~373
- 4 Liou Luen-Woei, Asok Ray. A stochastic regulator for integrate communication and control systems; Part II. Numerical analysis and simulation. In: Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1991. 612~619
- 5 Hui Tian-Shu, Chen Zong-Ji, Zhou Su-Ping. Research of interface processor in distributed interactive simulation. *Measurement & Control Technology*, 1998, **17**(2): 31~33(in Chinese)

黄四牛 北京航空航天大学博士生,研究方向为网络控制、DIS/HLA 和 C3I.

(HUANG Si-Niu Ph. D. of Beijing University of Aeronautics & Astronautics(BUAA). His research interests include network control, DIS/HLA, and C3I.)

陈宗基 博士生导师.研究方向为网络控制、混合控制系统、现代飞行控制系统和现代仿真技术.

(CHEN Zong-Ji Professor. His research interests include network control, hybrid control system, modern flight control system, and modern simulation technology.)

魏 晨 北京航空航天大学自动化学院副教授.研究方向为非线性系统的自适应控制、故障检测与诊断、增益调参、混合系统建模与分析.

(WEI Chen Associate professor of BUAA. Her research interests include adaptive nonlinear control, FDI, gain scheduling, and hybrid control system.)