采样数据系统的故障检测[1)]

张　萍[1]　DING Steven X[2]　王桂增[1]　周东华[1]

[1](清华大学自动化系　北京　100084)

[2](University of Duisburg, Duisburg, Germany)

(E-mail: zhangping@proc.au.tsinghua.edu.cn)

摘　要　研究了采样数据系统的故障检测问题.关键在于通过引入算子来分别描述连续时间的未知输入信号和故障信号对离散时间的残差信号的影响,从而把鲁棒性和灵敏度问题定义为一个优化问题,并给出了相应的解.仿真例子验证了该方法的有效性.

关键词　故障检测,采样数据系统,残差产生,鲁棒性,灵敏度

中图分类号　TP277

Fault Detection for Sampled-Data Systems

ZHANG Ping[1]　DING Steven X[2]　WANG Gui-Zeng[1]　ZHOU Dong-Hua[1]

[1](*Department of Automation, Tsinghua University, Beijing*　100084)

[2](*University of Duisburg, Duisburg, Germany*)

(E-mail: zhangping@proc.au.tsinghua.edu.cn)

Abstract　The fault detection problem in sampled-data systems is studied. The key point is to introduce operators to describe the influence of the continuous-time unknown input signal and fault signal on the discrete-time residual signal, respectively. Based on this, the robustness and sensitivity problem can be defined as an optimization problem and the corresponding solution is derived. The simulation results illustrate the effectiveness of the proposed approach.

Key words　Fault detection, sampled-data system, residual generation, robustness, sensitivity

1) 国家自然科学基金(69874023)、DAAD和国家教育部基金(20020003063)资助. 本文曾在 the 2001 American Control Conference 上宣读

Supported by the National Natural Science Foundation of P. R. China(69874023), DAAD of Germany and RFDP (200200003063). This paper was presented at the 2001 American Control Conference

收稿日期　2001-07-18　　收修改稿日期　2001-11-22

Received July 18, 2001; in revised form November 22, 2001

1 引言

随着计算机技术的迅速发展，数字控制器在工业过程中的广泛应用和故障诊断算法的计算机实现[7,8]，促使我们研究采样数据系统的故障诊断问题. 传统的方法或者离散化连续的过程模型，在此基础上设计离散的故障诊断系统，或者离散化基于连续过程模型设计的连续故障诊断系统. 它们都在设计的不同阶段存在着一定程度的近似，因此设计出的离散故障诊断系统在应用于采样数据系统时，性能有时得不到保证. 本文的主要目的就是提出一种针对采样数据系统直接设计离散的故障检测系统的方法，消除近似，提高故障检测系统的性能.

2 问题描述

考虑图 1 所示的采样数据系统.

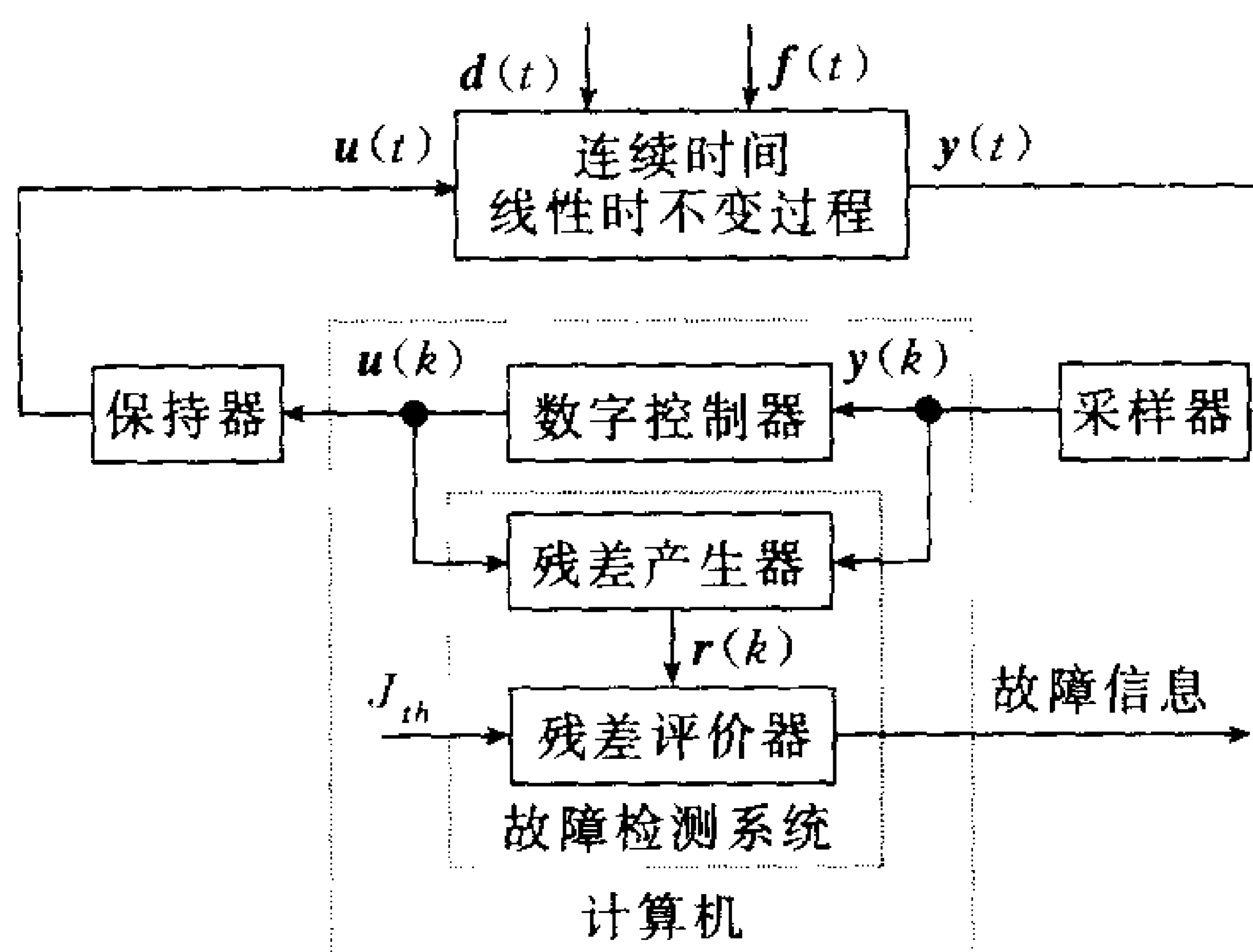

图 1　采样数据系统与故障检测系统的结构示意图

Fig. 1　Fault detection system for sampled-data systems

1）连续时间线性时不变过程

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = A\boldsymbol{x}(t) + B\boldsymbol{u}(t) + E_d\boldsymbol{d}(t) + E_f\boldsymbol{f}(t) \tag{1}$$

$$\boldsymbol{y}(t) = C\boldsymbol{x}(t) + D\boldsymbol{u}(t) + F_d\boldsymbol{d}(t) + F_f\boldsymbol{f}(t) \tag{2}$$

式中 $\boldsymbol{x}\in R^n$ 为状态，$\boldsymbol{u}\in R^{k_u}$ 为控制输入，$\boldsymbol{y}\in R^m$ 为测量输出，$\boldsymbol{d}\in R^{k_d}$ 为未知输入，$\boldsymbol{f}\in R^{k_f}$ 为待检测故障；A,B,E_d,E_f,C,D,F_d 和 F_f 是已知的适维矩阵.

2）采样器

$$\boldsymbol{y}(k) = \boldsymbol{y}(kT) \tag{3}$$

式中 T 表示采样时间.

3）零阶保持器

$$\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{u}(k),\quad kT \leqslant t < (k+1)T \tag{4}$$

不失一般性，我们假设 D,F_d 和 F_f 为零矩阵.

我们的任务是对于由式(1)～(4)描述的采样数据系统，设计残差产生器，产生离散的残差信号 $\boldsymbol{r}$，使其对未知输入 $\boldsymbol{d}$ 具有较强的鲁棒性，同时对于故障 $\boldsymbol{f}$ 具有较高的灵敏度.

3 主要结果

在各采样时刻 $t=kT$,由式(1)～(4)描述的采样数据系统的动态特性为

$$\boldsymbol{x}(k+1)=A_d\boldsymbol{x}(k)+B_d\boldsymbol{u}(k)+\bar{\boldsymbol{d}}(k)+\bar{\boldsymbol{f}}(k),\quad \boldsymbol{y}(k)=C\boldsymbol{x}(k) \tag{5}$$

式中 $\boldsymbol{x}(k)=\boldsymbol{x}(kT)$, $A_d=e^{AT}$, $B_d=\int_0^T e^{At}B\,\mathrm{d}t$,

$$\bar{\boldsymbol{d}}(k)=\int_0^T e^{A(T-\tau)}E_d\boldsymbol{d}(kT+\tau)\boldsymbol{d}\tau,\quad \bar{\boldsymbol{f}}(k)=\int_0^T e^{A(T-\tau)}E_f\boldsymbol{f}(kT+\tau)\mathrm{d}\tau \tag{6}$$

由式(5)可得一组输入输出之间的等价关系

$$\boldsymbol{y}_s(k)=H_0\boldsymbol{x}(k-s)+H_u\boldsymbol{u}_s(k)+H_s(\bar{\boldsymbol{d}}_s(k)+\bar{\boldsymbol{f}}_s(k)) \tag{7}$$

式中 s 为等价关系的阶次[9],

$$\begin{aligned}\boldsymbol{y}_s(k)&=[\boldsymbol{y}'(k-s)\quad \boldsymbol{y}'(k-s+1)\quad\cdots\quad \boldsymbol{y}'(k)]',\\ \boldsymbol{u}_s(k)&=[\boldsymbol{u}'(k-s)\quad \boldsymbol{u}'(k-s+1)\quad\cdots\quad \boldsymbol{u}'(k)]',\\ \bar{\boldsymbol{d}}_s(k)&=[\bar{\boldsymbol{d}}'(k-s)\quad \bar{\boldsymbol{d}}'(k-s+1)\quad\cdots\quad \bar{\boldsymbol{d}}'(k)]',\\ \bar{\boldsymbol{f}}_s(k)&=[\bar{\boldsymbol{f}}'(k-s)\quad \bar{\boldsymbol{f}}'(k-s+1)\quad\cdots\quad \bar{\boldsymbol{f}}'(k)]',\end{aligned}$$

$$H_0=\begin{bmatrix}C\\CA_d\\ \vdots\\ CA_d^s\end{bmatrix},\ H_u=\begin{bmatrix}0&0&\cdots&0\\CB_d&0&\ddots&\vdots\\ \vdots&\ddots&\ddots&0\\CA_d^{s-1}B_d&\cdots&CB_d&0\end{bmatrix},H_s=\begin{bmatrix}0&0&\cdots&0\\C&0&\ddots&\vdots\\ \vdots&\ddots&\ddots&0\\CA_d^{s-1}&\cdots&C&0\end{bmatrix}.$$

应用等价空间方法的基本思想,构造如下形式的残差产生器

$$\boldsymbol{r}(k)=\boldsymbol{v}_s(\boldsymbol{y}_s(k)-H_u\boldsymbol{u}_s(k)) \tag{8}$$

其中行向量 $\boldsymbol{v}_s\in R^{(s+1)m}$ 是残差产生器的设计参数,称为等价向量,它满足 $\boldsymbol{v}_sH_0=0$,由 $\boldsymbol{v}_s$ 构成的空间 $P_s=\{\boldsymbol{v}_s|\boldsymbol{v}_sH_0=0\}$ 称为等价空间. 由式(7)可知,残差产生器(7)的动态特性为

$$\boldsymbol{r}(k)=\boldsymbol{v}_sH_s(\bar{\boldsymbol{d}}_s(k)+\bar{\boldsymbol{f}}_s(k)) \tag{9}$$

残差产生器(8)消除了初始状态 $\boldsymbol{x}(k-s)$ 和控制输入 $\boldsymbol{u}$ 对残差 $\boldsymbol{r}$ 的影响. 残差信号实际上是由$[(k-s)T,(k+1)T)]$这段时间上的未知输入信号 $\boldsymbol{d}(t)$ 和故障信号 $\boldsymbol{f}(t)$ 所决定的. 问题在于如何表示连续时间的 $\boldsymbol{d}(t)$ 和 $\boldsymbol{f}(t)$ 对离散时间的残差信号 $\boldsymbol{r}(k)$ 的影响. 为此引入算子 Γ_M,定义为

$$\boldsymbol{\beta}_s(k)=\Gamma_M\boldsymbol{\alpha}_{k,s}(\boldsymbol{t}) \tag{10}$$

式中,$\boldsymbol{\alpha}_{k,s}(\boldsymbol{t})$ 和 $\boldsymbol{\beta}_s(k)$ 分别为

$$\boldsymbol{\alpha}_{k,s}(\boldsymbol{t})=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\alpha}((k-s)T+t_0)\\ \boldsymbol{\alpha}((k-s+1)T+t_1)\\ \vdots\\ \boldsymbol{\alpha}(kT+t_s)\end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{t}=(t_0,t_1,\cdots,t_s),\ \boldsymbol{\alpha}((k-s+i)T+t_i)\in R^q,\ 0\leqslant t_i<T,\ i=0,1,\cdots,s,$$

$$\boldsymbol{\beta}_s(k)=\begin{bmatrix}\int_0^T e^{A(T-\tau)}M\boldsymbol{\alpha}((k-s)T+\tau)\mathrm{d}\tau\\ \int_0^T e^{A(T-\tau)}M\boldsymbol{\alpha}((k-s+1)T+\tau)\mathrm{d}\tau\\ \vdots\\ \int_0^T e^{A(T-\tau)}M\boldsymbol{\alpha}(kT+\tau)\mathrm{d}\tau\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\beta}_{s,0}(k)\\ \boldsymbol{\beta}_{s,1}(k)\\ \vdots\\ \boldsymbol{\beta}_{s,s}(k)\end{bmatrix}\in R^{(s+1)n} \tag{12}$$

其中 $A\in R^{n\times n}$，$M\in R^{n\times q}$，算子 Γ_M 表示有限时间窗内的连续时间信号 $\boldsymbol{\alpha}(t)$，$(k-s)T\leqslant t<(k+1)T$ 通过一个动态系统和采样器后对离散时间信号 $\boldsymbol{\beta}_s(k)$ 的映射关系. 输入、输出空间上的内积分别定义为

$$\langle\boldsymbol{\alpha}_{k,s}(\boldsymbol{t}),\boldsymbol{\gamma}_{k,s}(\boldsymbol{t})\rangle=\sum_{i=0}^{s}\int_0^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\alpha}'((k-s+i)T+\tau)\boldsymbol{\gamma}((k-s+i)T+\tau)\mathrm{d}\tau \tag{13}$$

$$\langle\boldsymbol{\chi}_s(k),\boldsymbol{\beta}_s(k)\rangle=\boldsymbol{\chi}_s'(k)\boldsymbol{\beta}_s(k)=\sum_{i=0}^{s}\boldsymbol{\chi}_{s,i}'(k)\boldsymbol{\beta}_{s,i}(k) \tag{14}$$

将矩阵 M 分别替换为 E_d 和 E_f，可以定义算子 Γ_{E_d} 和 Γ_{E_f}. 相应地，式(9)表示为

$$\boldsymbol{r}(k)=\boldsymbol{v}_sH_s(\Gamma_{E_d}\boldsymbol{d}_{k,s}(\boldsymbol{t})+\Gamma_{E_f}\boldsymbol{f}_{k,s}(\boldsymbol{t})) \tag{15}$$

定义优化问题为

$$\min_{\boldsymbol{v}_s\in P_s}J=\min_{\boldsymbol{v}_s\in P_s}\frac{\boldsymbol{v}_sH_s\Gamma_{E_d}\Gamma_{E_d}^{*}H_s'\boldsymbol{v}_s'}{\boldsymbol{v}_sH_s\Gamma_{E_f}\Gamma_{E_f}^{*}H_s'\boldsymbol{v}_s'} \tag{16}$$

其中 $\Gamma_{E_d}^{*}$ 和 $\Gamma_{E_f}^{*}$ 分别表示 Γ_{E_d} 和 Γ_{E_f} 的伴随算子(adjoint). 性能指标 J 的分子和分母分别反映了未知输入和故障对残差的影响. 最小化 J，意味着通过选择合适的等价向量 $\boldsymbol{v}_s$，尽量削弱未知输入的影响并加强故障的影响，从而提高残差产生器的鲁棒性和灵敏度.

为求解此优化问题，首先需要计算 $\Gamma_{E_d}\Gamma_{E_d}^{*}$ 和 $\Gamma_{E_f}\Gamma_{E_f}^{*}$. 根据伴随算子的定义，应有

$$\langle\Gamma_M\boldsymbol{\alpha}_{k,s}(\boldsymbol{t}),\boldsymbol{\beta}_s(k)\rangle=\langle\boldsymbol{\alpha}_{k,s}(\boldsymbol{t}),\Gamma_M^{*}\boldsymbol{\beta}_s(k)\rangle \tag{17}$$

由式(10)，(13)，(14)和(17)可得

$$\Gamma_M\Gamma_M^{*}=\mathrm{diag}(\boldsymbol{\Phi}_M,\boldsymbol{\Phi}_M,\cdots,\boldsymbol{\Phi}_M),\ \boldsymbol{\Phi}_M=\int_0^{\mathrm{T}}e^{A\tau}MM'e^{\tau A'}\mathrm{d}\tau \tag{18}$$

$\boldsymbol{\Phi}_M$ 的计算可参见文献[7]. 因为 $\boldsymbol{\Phi}_M$ 是正定或半正定的矩阵，所以利用 Cholesky 方法或奇异值分解方法总可以找到常数矩阵 $\overline{M}$，使得 $\overline{M}\overline{M}'=\boldsymbol{\Phi}_M$. 因此有

$$\Gamma_M\Gamma_M^{*}=\mathrm{diag}(\overline{M}\overline{M}',\overline{M}\overline{M}',\cdots,\overline{M}\overline{M}') \tag{19}$$

因此优化问题(16)等价于

$$\min_{\boldsymbol{v}_s\in P_s}J=\min_{\boldsymbol{v}_s\in P_s}\frac{\boldsymbol{v}_sH_{ds}H_{ds}'\boldsymbol{v}_s'}{\boldsymbol{v}_sH_{fs}H_{fs}'\boldsymbol{v}_s'} \tag{20}$$

式中

$$H_{ds}=\begin{bmatrix}0&0&\cdots&0\\C\overline{E}_d&0&\ddots&\vdots\\\vdots&\ddots&\ddots&0\\CA_d^{s-1}\overline{E}_d&\cdots&C\overline{E}_d&0\end{bmatrix},\quad H_{fs}=\begin{bmatrix}0&0&\cdots&0\\C\overline{E}_f&0&\ddots&\vdots\\\vdots&\ddots&\ddots&0\\CA_d^{s-1}\overline{E}_f&\cdots&C\overline{E}_f&0\end{bmatrix} \tag{21}$$

其中 $\overline{E}_d\overline{E}_d'=\boldsymbol{\Phi}_{E_d}=\int_0^{\mathrm{T}}e^{A\tau}E_dE_d'e^{\tau A'}\mathrm{d}\tau$，　$\overline{E}_f\overline{E}_f'=\boldsymbol{\Phi}_{E_f}=\int_0^{\mathrm{T}}e^{A\tau}E_fE_f'e^{\tau A'}\mathrm{d}\tau$.

优化问题(20)的形式类似于传统的等价空间方法. 根据文献[10]，最优解为

$$\boldsymbol{v}_{s,opt}=\boldsymbol{p}_{s,\min}N_b,\quad J_{opt}=\min_{\boldsymbol{v}_s\in P_s}J=\lambda_{\min} \tag{22}$$

式中 N_b 是等价空间 P_s 的基矩阵；$\lambda_{\min}$ 和 $\boldsymbol{p}_{s,\min}$ 分别是广义特征值和特征向量问题

$$\boldsymbol{p}_{s,\min}(N_bH_{ds}H_{ds}'N_b'-\lambda_{\min}N_bH_{fs}H_{fs}'N_b')=0 \tag{23}$$

的最小广义特征值和对应的广义特征向量. 此最优解也是原优化问题(16)的最优解.

综上所述，对由式(1)～(4)描述的采样数据系统直接设计最优的离散残差产生器的步骤：(Ⅰ) 计算 A_d 和 B_d；(Ⅱ)计算 $\boldsymbol{\Phi}_{E_d}$，$\boldsymbol{\Phi}_{E_f}$，$\overline{E}_d$ 和 $\overline{E}_f$；(Ⅲ)计算 H_0，H_u，H_{ds}，H_{fs} 和 N_b；(Ⅳ)解广义特征值特征向量问题(23)；(Ⅴ)确定最优等价向量 $\boldsymbol{v}_{s,opt}$；(Ⅵ)构造形如式(8)的残差产生器.

4 仿真例子

考虑形如式(1)~(4)的采样数据系统,采样时间 $T=0.5$ 秒,各系数矩阵分别为

$$A=\begin{bmatrix}-1 & 5\\ 0 & -2\end{bmatrix},\ B=\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix},\ E_d=\begin{bmatrix}0.1\\1\end{bmatrix},\ E_f=\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix},\ C=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix} \tag{24}$$

分别采用以下方法设计最优的离散残差产生器.

方法 1. 先离散化连续过程模型,然后设计最优的离散残差产生器.

方法 2. 先设计最优的连续残差产生器,再离散化之得到相应的离散残差产生器.

方法 3. 利用本文提出的直接设计方法,设计最优的离散残差产生器.

假设控制输入 $\boldsymbol{u}(t)$ 是幅值为 1 的阶跃信号,未知输入 $\boldsymbol{d}(t)$ 是方差为 0.2 的白噪声,在第 60 秒时发生阶跃型故障,幅值为 2. 将方法 1、方法 2 和方法 3 设计得到的离散残差产生器应用于采样数据系统,仿真结果分别如图 2(a),2(b)和 2(c)所示. 从图中可以看出,传统方法(方法 1 和方法 2)在进行采样数据系统的故障检测时,效果并不理想. 采用本文提出的方法(方法 3)设计的残差产生器可以成功地检测出故障,性能明显优于传统方法.

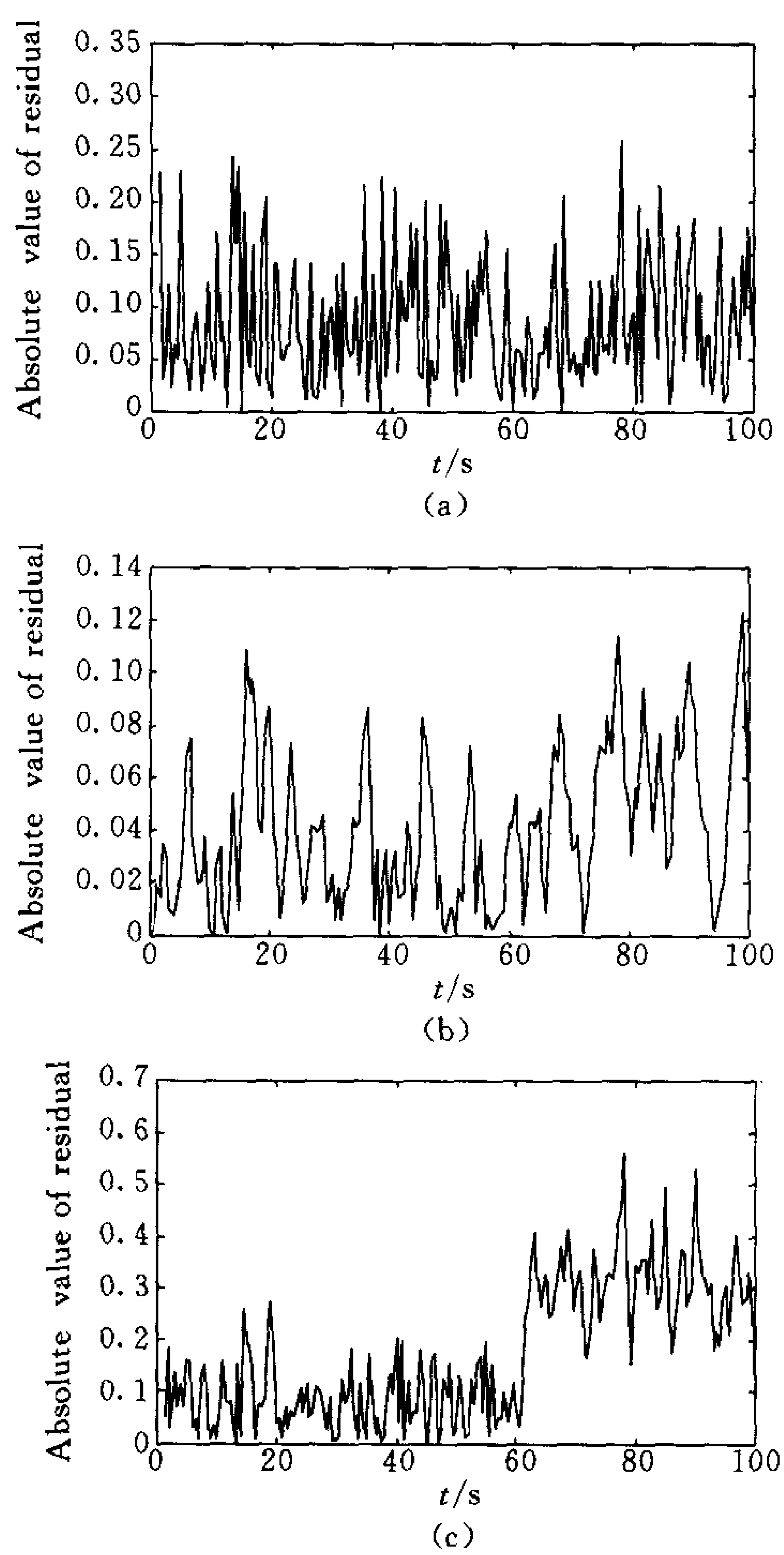

图 2 仿真结果

Fig. 2 Simulation results

5　结论

本文提出了针对采样数据系统直接设计最优离散残差产生器的方法. 理论分析和仿真结果均显示该方法可以显著提高残差产生器的性能. 进一步的研究将包括式(1)和(2)描述的过程的系数矩阵不完全已知时残差产生器的最优设计问题.

References

1 Ye Yin-Zhong, Pan Ri-Fang, Jiang Wei-Sun. Fault diagnosis and detection methods for dynamical systems. *Information and Control*, 1986, **15**(6): 27～34(in Chinese)

2 Patton R J, Frank P M, Clark R N (Eds.). Fault Diagnosis in Dynamic Systems, Theory and Application. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1989

3 Zhou Dong-Hua, Sun You-Xian. Fault Detection and Diagnosis Technology for Control Systems. Beijing: Tsinghua University Press, 1994(in Chinese)

4 Zhang Yu-Ling, Li Dong-Xu. Fault diagnosis for dynamical systems—Theory and Applications. Changsha: Press of Definse University of Science and Technology, 1997(in Chinese)

5 Wen Xing, Zhang Hong-Yue, Zhou Lu. Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control for Dynamical Sytems. Beijing: Mechanical Industry Press, 1998(in Chinese)

6 Chen J, Patton R. Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems. Bosten: Kluwer Academic Publishers, 1999

7 Chen T W, Francis B. Optimal Sampled-Data Control Systems. New York: Springer, 1995

8 Rosenwasser E N, Lampe B P. Computer Controlled Systems—Analysis and Design with Process-Orientated Models. London: Springer, 2000

9 Ding S X, Guo L, Jeinsch T. A characterization of parity space and its application to robust fault detection. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, **44**(2): 337～343

10 Ding S X, Ding E L, Jeinsch T, Zhang P. An approach to a unified design of FDI systems. In: Proceedings of the Asian Control Conference, Shanghai, 2000

11 Frank P M, Ding S X, Marcu T. Model-based fault diagnosis in technical process. In: Proceedings of the IFAC Symposium SAFEPROCESS'00, Budapest, 2000

张　萍　1997 年在华中理工大学自动控制工程系获学士学位，现为清华大学自动化系博士研究生. 主要研究领域为动态系统的故障诊断.

(**ZHANG Ping**　Received her bachelor degree from the Department of Automatic Control Engineering, Middle China University of Science and Technology in 1997, and currently is a Ph. D. candidate at the Department of Automation, Tsinghua University. The research interests include fault diagnosis for dynamical systems.)

DING Steven X　Duisburg 大学教授. 主要研究领域为动态系统的故障诊断和容错控制.

(**DING Steven X**　Professor at University of Duisburg, Germany, his research interests include fault diagnosis and fault tolerant control for dynamical systems.)

王桂增　1965 年毕业于清华大学. 目前为清华大学自动化系系主任、教授、博士生导师. 研究方向为过程建模与控制以及故障诊断技术.

(**WANG Gui-Zeng**　Graduated from Tsinghua University in 1965. He is now with the Department of Automation, Tsinghua University as the department chair and professor. His research interests include process modeling and control, and fault diagnosis.)

周东华　分别于 1985、1988 和 1990 年在上海交通大学自控系获学士、硕士和博士学位. 目前为清华大学自动化教授、博士生导师. 研究方向为故障诊断与安全控制.

(**ZHOU Dong-Hua**　Received his bachelor, master and Ph. D. degrees all from Shanghai Jiaotong University in 1985, 1988 and 1990, respectively. Now he is a professor in the Department of Automation, Tsinighua University. His research interests include fault diagnosis and security control.)