

文章编号: 1000-8055(2009)10-2362-06

航空发动机分布式控制系统指数稳定性分析

彭靖波, 谢寿生, 武 卫, 孙 冬
(空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

摘 要: 建立具有时延与数据包丢失的航空发动机分布式控制系统模型, 模型为一类异步动态系统, 基于 Lyapunov 第二法和线性矩阵不等式方法推导了系统的指数稳定性判定定理, 根据该判据可以得到分布式控制系统的指数稳定意义下的状态反馈控制律, 数字仿真说明了该判据的有效性。

关 键 词: 航空发动机; 分布式控制系统; 时延与数据包丢失; 稳定性; Lyapunov 第二法; 线性矩阵不等式

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

Stability analyzation of aero-engine distributed control system

PENG Jing-bo, XIE Shou-sheng, WU Wei, SUN Dong

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The aero-engine distributed control system (DCS) with time-delay and data-packet dropout was established as an asynchronous dynamical system. Exponent stability of the system was presented using 2nd Lyapunov method and linear matrix inequalities (LMI) formulation, and the state-feedback control parameters of DCS could be obtained according to the stability criterion. Simulation examples show that the stability criterion is feasible.

Key words: aero-engine; distributed control system; time-delay and data-packet dropout; stability; 2nd Lyapunov method; linear matrix inequalities (LMI)

随着航空发动机多变量控制以及飞机/推进系统综合控制的发展,集中式控制结构由于自身的缺陷已不能满足航空发动机控制系统的要求^[1].相对于集中式控制结构,分布式控制从控制结构、控制方法、传感器和执行机构等方面都有着本质的不同,其系统性能、可靠性也有很大改观^[2].近年来,分布式控制在航空发动机控制领域的应用研究得到深入发展^[3-6].在分布式系统中,随着总线网络的引入,网络诱导时延将不可避免的存在.同时由于总线网络采用串行通信方式且网络带宽为系统中各节点设备所共享,在某一时间能够同时占有网络进行数据传输的节点数和数据传输量是有限的.当传感器、控制器和执行机构

通过总线传输数据时,极易出现数据碰撞导致节点竞争失败、数据传输与接收出错以及数据包在一定时间内未达到接收端等现象.虽然大多数通讯协议有重发机制,但仅重发在一定时间内未到达的数据包,超过一定时间后未到达的数据包将被丢弃.因此,我们将节点竞争失败、数据传输出错以及数据包在一定时间内未成功到达接收端的现象统称为数据包丢失.毋庸置疑,时延和数据包丢失将在一定程度上影响系统的稳定性.针对这一现象,本文以基于 CAN (controller area network) 总线的航空发动机分布式控制系统^[3-4]为例,利用 Lyapunov 第二法和线性矩阵不等式 (LMI) 方法对系统的指数稳定性进行了分析.

收稿日期: 2008-10-12; 修订日期: 2009-03-08

作者简介: 彭靖波(1980-),男,湖南南县人,博士生,研究领域为航空发动机分布式控制与故障诊断.

1 具有时延和数据包丢失的分布式控制系统建模

对于基于 CAN 总线的航空发动机分布式控制系统(DCS),假设:

- 1) 传感器为时钟驱动,控制器为事件驱动;
- 2) 传感器按采样次序先后发送数据;
- 3) 对于初始时刻 t_0 ,控制器传输给执行器的初始控制量一致 $u(t_0) = u^*(t_0)$.

注:时钟驱动是指网络节点按照一定的时钟周期定时地执行相应的应用程序;事件驱动是指网络节点一旦接收到某一事件的到来就立即触发执行相应的应用程序.

同时具有网络诱导时延和数据包丢失的分布式系统如图 1 所示.其中 τ_{cak} 和 τ_{sck} 为 kT 时刻控制器到执行机构的时延和传感器到控制器的时延.在此,我们将存在数据丢包的通讯网络看作是按一定速率切换的开关^[7].这里的数据传输分 3 种情况:①数据包成功传输;②数据包尝试传输时,总线被占用,本次发送放弃;③数据包已发送,但在传输过程中丢失或时延过大.对于这 3 种情况可归类为两类事件:事件 S_1 表示数据成功传输;事件 S_2 表示数据包丢失.

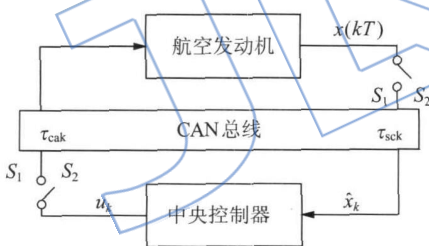


图 1 具有时延与数据包丢失的分布式控制系统模型

Fig. 1 Model of DCS with time-delay and data-packet dropout

在图 1 所示模型中,忽略事件 S_2 发生位置不同对控制系统的影响,数据 $u(kT)$ 在传输过程中事件 S_2 的发生与数据 $x(kT)$ 在传输过程中事件 S_2 的发生都等同于整个闭环的断开.由此,对该模型作如下简化:

- 1) 将数据 $u(kT)$ 的网络通讯时延与数据 $x(kT)$ 的网络通讯时延合并用总时延 τ_k 表示;
- 2) 将数据 $u(kT)$ 在传输过程中事件 S_2 的发生归于数据 $x(kT)$ 在传输过程中事件 S_2 的发生;
- 3) 将数据 $u(kT)$ 的传输丢失率与数据 $x(kT)$ 的传输丢失率合并.

由此简化后的模型如图 2 所示.

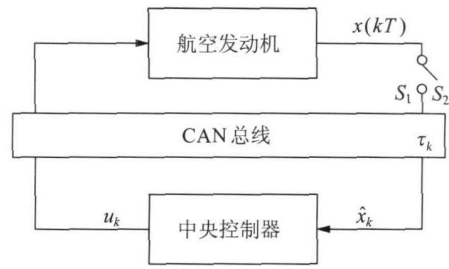


图 2 具有时延与数据包丢失的分布式控制系统简化模型

Fig. 2 Laconic model of DCS with time-delay and data-packet dropout

航空发动机本质上是一个非线性时变系统,由于其工作状态和工作环境条件变化范围很大,难以用某一固定的简单的非线性数学模型对其进行稳定性分析.基于非线性系统与其线性逼近在一个小运动区域内应当具有相似行为的思想,加之线性系统分析方面成熟的理论,本文以小偏离状态空间模型进行分析

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $C \in \mathbb{R}^{l \times n}$ 为常矩阵.

具有不确定网络诱导时延 $\tau_k < T$ 的分布式控制系统离散化后的模型为

$$x(k+1) = A' \hat{x}(k) + B_0(\tau_k) u(k) + B_1(\tau_k) u(k-1) \quad (2)$$

其中

$$A' = e^{AT}; \quad B_0' = \int_0^{\tau_k} e^{As} B ds; \quad B_1' = \int_{\tau_k}^T e^{As} B ds$$

状态反馈控制器模型为

$$u(k) = K\hat{x}(k) \quad (3)$$

当事件 S_1 发生时: $\hat{x}(k) = x(k)$.

闭环系统模型为

$$x(k+1) = A' \hat{x}(k) + B_0(\tau_k) u(k) + B_1(\tau_k) u(k-1) \quad (4)$$

当事件 S_2 发生时: $\hat{x}(k) = x(k-1)$.

闭环系统模型为

$$x(k+1) = A' \hat{x}(k) + B' \hat{u}(k-1) \quad (5)$$

其中 $B' = \int_0^{\tau_k} e^{As} B ds$

令 $z(k) = [x^T(k) \quad u^T(k-1)]^T$

则带时延和数据包丢失的闭环分布式系统模型为

$$z(k+1) = \Phi_i z(k), \quad i=1,2 \quad (6)$$

其中

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} A' + B_0 K & B_1' \\ K & 0 \end{bmatrix}'; \quad \Phi_2 = \begin{bmatrix} A' & B \\ 0 & I \end{bmatrix}'$$

显然, Φ_i 是随 i 值变化的时变矩阵, i 决定于网络的通断状态.

2 系统指数稳定性定理及证明

定义 1: 状态反馈结构事件率定义: 闭环系统特性矩阵 Φ_i 描述的结构发生的比率, 称为状态反馈结构事件率, 用 $\bar{r}_i$ 表示, 显然 $\bar{r}_1 + \bar{r}_2 = 1$.

因此, 当网络时延 τ_k 和数据丢包率一定时, 具有时延和数据丢包的状态反馈分布式系统可以看作是由 Φ_i 的结构事件率 $\bar{r}_i$ 约束的异步动态开关系统. 由概率论的知识可以推出, 结构事件率 $\bar{r}_i$ 和数据丢包率 r 之间具有如下的关系:

$$\begin{cases} \bar{r}_1 = 1 - r \\ \bar{r}_2 = r \end{cases} \quad (7)$$

定义 2: 若存在常数 $\alpha > 1$, 对于动态系统的状态变量 $x_k, x_k \in \mathbb{R}^n$, 若 $\lim_{k \rightarrow \infty} \alpha^k \|x_k\| = 0$, 则称动态系统是指数稳定的^[8].

显然如果系统指数稳定, 系统必然是一致渐进稳定.

引理 1^[9]: 对于由事件率 $\bar{r}_i$ 约束的异步动态系统 $z(k+1) = \Phi_i z(k)$, $i = 1, 2, \dots, m$, 如果存在一个 $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^+$ 的满足 $\beta_1 \|x\|^2 \leq V(x) \leq \beta_2 \|x\|^2$, ($\beta_1, \beta_2 > 0$) 的 Lyapunov 函数 $V(x)$ 及标量 α 和 $\alpha_i > 0$, 满足条件

$$V(x_{k+1}) - V(x_k) \leq (\alpha_i^{-2} - 1)V(x_k) \quad (8)$$

$$\prod_{i=1}^m \alpha_i^{\bar{r}_i} > \alpha > 1 \quad (9)$$

则该系统指数稳定.

引理 2: (Schur 补定理) 对于对称阵

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$$

其中 S_{11}, S_{12}, S_{22} 为块阵, S_{21} 为方阵, 以下 3 个条件等价

- 1) $S < 0$;
- 2) $S_{22} < 0, \quad S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0$;
- 3) $S_{11} < 0, \quad S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0$.

根据以上定义和引理, 具有已知时延和数据丢包率约束的航空发动机闭环分布式系统指数稳定性由下面的定理给出.

定理 1: 具有时延 $\tau_k \leq T$ 和数据丢包率 r 的状态反馈系统 (6), 如果存在标量 α_1, α_2 及对称正定矩阵 $X \in \mathbb{R}^{n \times n}, Y \in \mathbb{R}^{m \times m}, U \in \mathbb{R}^{m \times n}$, 满足条件

$$\alpha_1^{1-r} \alpha_2^r > \alpha > 1 \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} -\alpha_1^{-2} X & 0 & XA^T + U^T B_0^T & U^T \\ 0 & -\alpha_1^{-2} Y & YB_1^T & 0 \\ A'X + B_0'U & B_1'Y & -X & 0 \\ U & 0 & 0 & -Y \end{bmatrix} < 0 \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} -\alpha_2^{-2} X & 0 & XA^T \\ 0 & (1 - \alpha_2^{-2}) Y & YB_1^T \\ A'X & B'Y & -X \end{bmatrix} < 0 \quad (12)$$

则闭环系统指数稳定, 其状态反馈控制律为

$$u(k) = UX^{-1}x(k) \quad (13)$$

证明: 式 (10) 等于引理 1 的式 (9).

选择对称正定矩阵 $P \in \mathbb{R}^{n \times n}, Z \in \mathbb{R}^{m \times m}$, 定义 Lyapunov 函数 $V[x(k)]$ 为

$$V[x(k)] = x^T(k) P x(k) + u^T(k-1) Z u(k-1) \quad (14)$$

根据引理 1, 当满足

$$\begin{aligned} V[x(k+1)] - (\alpha_i^{-2} - 1)V[x(k)] = \\ x^T(k+1) P x(k+1) + u^T(k) Z u(k) - \\ \alpha_i^{-2} x^T(k) P x(k) - \alpha_i^{-2} u^T(k-1) Z u(k-1) < 0 \end{aligned} \quad (15)$$

时, 系统指数稳定.

当事件 S_1 发生时, 联合式 (4)

$$\begin{aligned} V[x(k+1)] - (\alpha_1^{-2} - 1)V[x(k)] = \\ x^T(k) (A' + B_0'K)^T P (A' + B_0'K) x(k) + \\ x^T(k) (A' + B_0'K)^T P B_1' u(k-1) + \\ u^T(k-1) B_1'^T P (A' + B_0'K) x(k) + \\ u^T(k-1) B_1'^T P B_1' u(k-1) + \\ x^T(k) K^T Z K x(k) - \alpha_1^{-2} x^T(k) P x(k) - \\ \alpha_1^{-2} u^T(k-1) Z u(k-1) = \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} x^T(k) \\ u^T(k-1) \end{bmatrix} \Omega \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k-1) \end{bmatrix} < 0$$

其中

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} (A' + B_0 k)^T P (A' + B_0 k) - a_i^{-2} P + K^T Z K & (A' + B_0 k)^T P B_1 \\ B_1^T P (A' + B_0 k) & B_1^T P B_1 - a_i^{-2} Z \end{bmatrix}'$$

上式等价于

$$\begin{bmatrix} (A' + B_0 k)^T P (A' + B_0 k) - a_i^{-2} P + K^T Z K & (A' + B_0 k)^T P B_1 \\ B_1^T P (A' + B_0 k) & B_1^T P B_1 - a_i^{-2} Z \end{bmatrix}' = \begin{bmatrix} K^T Z K - a_i^{-2} P & 0 \\ 0 & -a_i^{-2} Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (A' + B_0 k)^T \\ B_1^T \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} (A' + B_0 k) & B_1 \end{bmatrix}' < 0$$

由引理 2,进一步可得

$$\begin{bmatrix} -a_i^{-2} P & 0 & (A' + B_0 k)^T & K^T \\ 0 & -a_i^{-2} Z & B_1^T & 0 \\ A' + B_0 k & B_1 & -P^{-1} & 0 \\ K & 0 & 0 & -Z^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (16)$$

对式 (16) 两边左乘右乘对角阵 $\text{diag}\{P^{-1} \quad Z^{-1} \quad I \quad I\}$,并令 $X = P^{-1}$, $Y = Z^{-1}$,经化简后得

$$\begin{bmatrix} -a_i^{-2} X & 0 & X A^T + X^T K^T B_0^T & X^T K^T \\ 0 & -a_i^{-2} Y & Y B_1^T & 0 \\ A X + B_0^T K X & B_1 Y & -X & 0 \\ K X & 0 & 0 & -Y \end{bmatrix} < 0 \quad (17)$$

令 $U = KX$,式(17)即为式(11).

当事件 S_2 发生时,联合式(5)可得

$$\begin{aligned} V[x(k+1)] - (a_i^{-2} - 1)V[x(k)] = & x^T(k) A^T P A x(k) + x^T(k) A^T P B u(k-1) + \\ & u^T(k-1) B^T P A x(k) + u^T(k-1) B^T P B u(k-1) + \\ & u^T(k-1) Z u(k-1) - a_i^{-2} x^T(k) P x(k) - \\ & a_i^{-2} u^T(k-1) Z u(k-1) = \\ & \begin{bmatrix} x^T(k) \\ u^T(k-1) \end{bmatrix} \Omega_2 \begin{bmatrix} x(k) & u(k-1) \end{bmatrix} < 0 \end{aligned}$$

其中

$$\Omega_2 = \begin{bmatrix} A^T P A - a_i^{-2} P & A^T P B \\ B^T P A & B^T P B + Z - a_i^{-2} Z \end{bmatrix}$$

上式等价于

$$\begin{bmatrix} A^T P A - a_i^{-2} P & A^T P B \\ B^T P A & B^T P B + Z - a_i^{-2} Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_i^{-2} P & 0 \\ 0 & (1 - a_i^{-2}) Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A^T \\ B^T \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} A & B \end{bmatrix}' < 0$$

由引理 2,进一步可得

$$\begin{bmatrix} -a_i^{-2} P & 0 & A^T \\ 0 & (1 - a_i^{-2}) Z & B^T \\ A & B & -P^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (18)$$

对式 (18) 两边左乘右乘对角阵 $\text{diag}\{P^{-1} \quad Z^{-1} \quad I\}$,并令 $X = P^{-1}$, $Y = Z^{-1}$,经化简后得

$$\begin{bmatrix} -a_i^{-2} X & 0 & X A^T \\ 0 & (1 - a_i^{-2}) Y & Y B^T \\ A X & B Y & -X \end{bmatrix} < 0 \quad (19)$$

式(19)即为式(12).

证毕.

对于时延和数据丢包率均已知的系统,首先选择满足式(10)的一组标量 a_i ,然后将其代入到式(11)和式(12),利用 Matlab 的 LMI 工具箱,求出可行解 U 和 X 代入式(13)即得到指数稳定意义下的状态反馈控制律.

3 仿真算例

由于某涡扇发动机在最大及其以上状态采用双变量控制,即用主燃油流量 m_t 调节低压转子转速 n ,用尾喷管临界截面积 A_8 调节涡轮落压比 π_t .因此,以 m_t 和 A_8 为控制量, n 和 π_t 为被控量,按照“顺数算法”建立某涡扇发动机在地面最大状态的双变量相对化状态空间模型为

$$\begin{cases} \Delta \dot{\bar{x}}(t) = A \Delta \bar{x}(t) + B \Delta \bar{u}(t) \\ \Delta \dot{\bar{y}}(t) = C \Delta \bar{x}(t) \end{cases} \quad (20)$$

$$A = \begin{bmatrix} -3.2501 & 0.067731 & 0.60994 & 0.48945 \\ 2.0448 & -3.6263 & 0.63024 & 0.3949 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 2.3866 \\ 1 & -1.4792 \\ 0 & 0.2071 \\ 0 & 0.67859 \end{bmatrix}^T$$

式中

$$x = [n_h, m, m_f, A_8]^T; u = [m_f, A_8]^T; y = [m, \tau_r]^T;$$
$$\Delta x = \frac{x - x_0}{x_0}; \quad \Delta u = \frac{u - u_0}{u_0}; \quad \Delta y = \frac{y - y_0}{y_0};$$

$n_h, n_l, m_f, A_8, \tau_r$ 分别为发动机高压转子转速、低压转子转速、主燃油流量、尾喷管临界截面积和涡轮落压比; A, B, C 为系数矩阵.

注:因为状态量中含有控制量,所以 B 矩阵前两行为 0,控制量对状态量 n_h, n_l 的控制通过 A 矩阵的右上部分实现.

设时延 $\tau_k = 8\text{ms}$,采样周期 $T = 20\text{ms}$,由 2 节所述方法建立具有时延和数据丢包的闭环分布式系统模型,其中

$$A' = \begin{bmatrix} 0.9371 & 1.0014 & 1.0123 & 1.0098 \\ 1.0417 & 0.9300 & 1.0127 & 1.0079 \\ 1.0000 & 1.0000 & 0.9802 & 1.0000 \\ 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 0.9802 \end{bmatrix}$$

$$B' = \begin{bmatrix} 0.1830 & 0.1455 \\ 0.3580 & 0.2626 \\ 0.0198 & 0 \\ 0.0002 & 0.0198 \end{bmatrix}$$

$$B_0' = \begin{bmatrix} 0.6167 & 0.3001 \\ 0.9868 & 0.4587 \\ 1.0000 & 0 \\ 1.0569 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

$$B_1' = \begin{bmatrix} -0.4337 & -0.1546 \\ -0.6288 & -0.1960 \\ -0.9802 & 0 \\ -1.0567 & -0.9802 \end{bmatrix}$$

设数据丢包率 $r = 0.01$,根据定理 1 的式(10),选择 $\alpha_1 = 0.8, \alpha_2 = 1.3$,求得线性矩阵不等式(11)和(12)的可行解为

$$U = \begin{bmatrix} -0.0801 & -0.0769 & -0.1214 & -0.0841 \\ 0.0074 & 0.0005 & -0.0077 & 0.0296 \end{bmatrix} 10^{-11}$$

$$X =$$

$$\begin{bmatrix} 0.5340 & -0.1583 & -0.1377 & -0.1620 \\ -0.1583 & 0.5119 & -0.0909 & -0.1760 \\ -0.1377 & -0.0909 & 0.7317 & -0.3766 \\ -0.1620 & -0.1760 & -0.3766 & 0.7841 \end{bmatrix} 10^{-11}$$

于是在指数稳定意义下的状态反馈控制器参数为

$$K = UX^{-1} =$$

$$\begin{bmatrix} 1.0156 & 0.9954 & 1.0081 & 1.0246 \\ -0.0875 & -0.0774 & -0.0707 & -0.1071 \end{bmatrix}$$

采用该状态反馈控制律,在初值作用下,系统的稳定过程如图 3 所示.

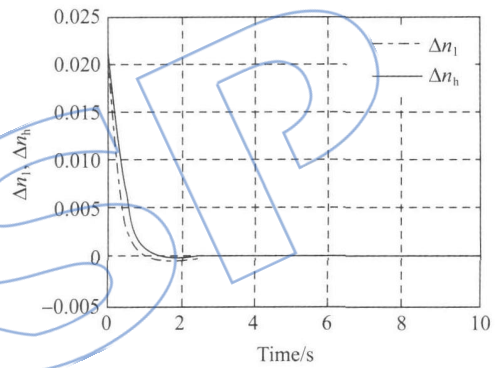


图 3 系统状态响应过程
Fig 3 State response of system

4 结 论

时延和数据包丢失是航空发动机分布式控制系统随着总线网络的引入而出现独特现象,它们将不可避免的影响系统的稳定性,本文以状态反馈控制器为例,利用 Lyapunov 第二法对这类系统的指数稳定性进行了推导,给出了由线性矩阵不等式描述的稳定性判定定理并给出了详细证明过程,由仿真的结果可以看到,根据这一定理计算得到的状态反馈控制律能够使系统指数稳定,该判据在某型航空发动机分布式控制系统中的应用是有效、可行的.

参考文献:

[1] Thompson H A, Benitez-Perez H, Lee D. A CAN bus-based safety-critical distributed aeroengine control systems architecture demonstrator[J]. Microprocessors and Microsystems, 1999, 23:345-355.

- [2] 郭迎清,章泓. 航空发动机分布式控制系统综述[J]. 航空发动机, 2003,29(3):52-55.
GUO Yingqing, ZHANG Hong. Survey of the distributed control system for an aeroengine[J]. Aeroengine, 2003, 29(3):52-55. (in Chinese)
- [3] 钱坤. 航空发动机分布式控制与状态监视系统及其算法研究[D]. 西安:空军工程大学, 2005.
QIAN Kun. Design and algorithm research of aero-engine distributed control and state monitor system[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2005. (in Chinese)
- [4] 蔡开龙. 航空推进系统分布式综合控制研究与试验[D]. 西安:空军工程大学, 2008.
CAI Kailong. Distributed integrative control research and test of aeronautic propulsion system[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2008. (in Chinese)
- [5] 胡金海,钱坤,谢寿生,等. 基于CAN总线的航空发动机智能执行机构的设计[J]. 传感技术学报, 2006,19(6):2617-2620.
HU Jinhai, QIAN Kun, XIE Shousheng, et al. Aero-engine intelligent actuator based on CAN bus[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuator, 2006,19(6):2617-2620. (in Chinese)
- [6] 何鹄环,郭迎清. 基于DSP和CAN的航空发动机分布式控制系统设计[J]. 航空计算技术, 2006,36(1):30-32.
HE Guhuan, GUO Yingqin. Design of distributed control system for aero-engines based on DSP and CAN[J]. Aeronautical Computing Technique, 2006,36(1):30-32. (in Chinese)
- [7] 张喜民,李建东,陈实. 具有时延和数据包丢失的网络控制系统稳定性[J]. 控制理论与应用, 2007,24(3):494-497.
ZHANG Ximin, LI Jiandong, CHEN Shi. Stability of the networked control systems with time-delay and data-packet dropout[J]. Control Theory and Application, 2007,24(3):494-497. (in Chinese)
- [8] Slotine J J E, Li W P. Applied nonlinear control[M]. New Jersey: Prentice Hall International Inc., 1991.
- [9] Rabello A, Bhaya A. Stability of asynchronous dynamical systems with rate constraints and application[J]. IEE Proceedings Control Theory Application, 2003,150(5):546-550.