

航空发动机分布式控制系统时延/ 丢包鲁棒性分析

李睿超¹, 郭迎清¹, 姜彩虹², 陈义峰¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 中国航空发动机集团有限公司 沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 为了定量描述航空发动机分布式控制系统对于时延/丢包的鲁棒性,开展了分布式控制系统鲁棒性分析研究. 针对能够同时刻画时延和丢包控制系统模型,以线性矩阵不等式的形式给出了稳定性判据;使用区域极点配置技术设计控制增益矩阵,并对极点位于不同区域的闭环系统进行了时延/丢包稳定裕度的求解和验证;从时延/丢包鲁棒性及动态性能的角度对闭环极点的配置区域选取进行了探讨. 仿真结果证实了该稳定性判据的有效性,进一步分析结果表明:当闭环极点被配置在 -4 附近时,系统具有最强的时延/丢包鲁棒性. 综合考虑控制系统对于时延/丢包鲁棒性和动态性能的要求,可以将闭环极点配置在圆心在 -8 和 -4 之间、半径为 1 的圆盘区域内.

关键词: 航空发动机; 分布式控制系统; 鲁棒性分析; 时延/丢包; 区域极点配置

中图分类号: V233.7

文献标志码: A

Transmission delay/packet dropout robustness analysis of distributed control system of aero-engine

LI Ruichao¹, GUO Yingqing¹, JIANG Caihong², CHEN Yifeng¹

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Shenyang Engine Research Institute,

Aero Engine (Group) Corporation of China, Shengyang 110015, China)

Abstract: Research on the robustness analysis of distributed engine control system was conducted to describe the robustness quantitatively. Stability criterion for control system model considering transmission delay/packet dropout was simultaneously presented in linear matrix inequality form. Gain matrix was designed utilizing regional poles assignment technology, and the delay/packet dropout margin of closed-loop systems with poles in various regions was solved and verified. Discussion was extended to the closed-loop poles region selection in terms of delay packet dropout robustness and dynamic performance. Simulation confirmed the validity of the stability criterion. Further analysis result showed that the strongest delay/packet dropout robustness was obtained when closed-loop poles were assigned near -4 . Considering the control requirements of delay/packet dropout robustness and dynamic performance comprehensively, it was feasible to place closed-loop poles in disk area with center between -8 and -4 and radius of 1 .

收稿日期: 2015-10-16

作者简介: 李睿超(1993—), 博士生, 主要从事航空发动机分布式控制研究. E-mail: liruichao@mail.nwpu.edu.cn

引用格式: 李睿超, 郭迎清, 姜彩虹, 等. 航空发动机分布式控制系统时延/丢包鲁棒性分析[J]. 航空动力学报, 2017, 32(6): 1441-1446. LI Ruichao, GUO Yingqing, JIANG Caihong, et al. Transmission delay/packet dropout robustness analysis of distributed control system of aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(6): 1441-1446.

Key words: aero-engine; distributed control system; robustness analysis; transmission delay/packet dropout; regional pole assignment

航空发动机控制系统下一次的革命性变化将是控制功能的物理分离,即航空发动机分布式控制系统^[1]. 航空发动机分布式控制(distributed engine control, DEC)这一概念源自工业自动化中的分布式控制系统,其主要特征是将先进的数据总线网络、智能传感器和智能执行机构等技术^[2]引入到发动机控制系统中去. 分布式控制系统的实现有利于诸如主动控制、基于模型的控制等先进控制模式和控制算法的应用,并带来质量减轻、模块化、高可靠性等一系列优点^[3-5].

在分布式控制系统中,各节点通过数据总线实现与其他节点的数据交互. 由于总线的引入,数据在传输的过程中不可避免地会出现延迟或丢包等情形,造成发动机控制系统性能下降,严重时可能会导致控制系统失稳. 针对航空发动机分布式控制系统稳定性问题, Belapurkar, Yedavall 等^[6-8]对具有分散化结构的控制系统开展了时延和丢包稳定性研究,并使用丢包裕度(packet dropping margin, PDM)描述控制系统对于丢包的鲁棒性. 国内彭靖波等^[9]将具有时延/丢包的航空发动机分布式控制系统建模为一类异步动态系统,并给出了相应的稳定性判据. 田飞龙等^[10-11]分别进行了时延/丢包情况下的航空发动机系统建模和稳定性分析. 但以上文献均没有明确给出发动机控制系统对于时延/丢包的容忍程度(下文称之为时延/丢包稳定裕度).

本文针对某型双轴混排涡扇发动机^[12-13]展开时延/丢包鲁棒性研究. 首先,建立航空发动机分布式控制系统模型,对用于求解时延/丢包稳定裕度的稳定性定理进行推导;在此基础上,给出一种获得控制增益矩阵的区域极点配置方法,并对相应闭环系统的时延/丢包稳定裕度进行求解;最后,从时延/丢包鲁棒性及动态性能的角度对闭环极点的配置区域选取进行探讨.

1 航空发动机分布式控制系统模型

航空发动机分布式控制系统结构框图如图 1

所示. 其中,多个传感器与控制器之间的传输时延为 $\tau_{sc}^i (i=1,2,\cdots,m)$, 控制器与多个执行机构之间传输时延为 $\tau_{ca}^j (j=1,2,\cdots,n)$, 控制器的计算时延为 τ_c , 近似认为系统中的传输时延 $\tau = \max \tau_{sc}^i + \tau_c + \max \tau_{ca}^j$.

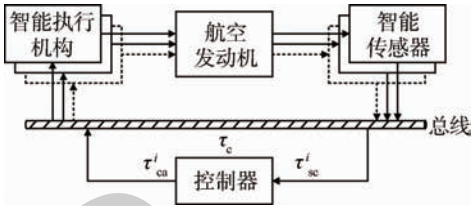


图 1 分布式控制系统结构框图
Fig. 1 Structural diagram of distributed control system

假设系统中传感器为时间触发,控制器和执行机构为事件触发. 当发生丢包时控制器和执行机构均使用上一周期的数据进行计算和作动. 以最后一个数据包到达执行机构的时刻为基准,则航空发动机分布式模型可描述为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ t \in [i_k h + \tau_k, i_{k+1} h + \tau_{k+1}) \\ u(t^+) = Kx(t - \tau_k) \\ t = i_k h + \tau_k, k = 1, 2, \cdots \end{cases} \quad (1)$$

其中 h 为采样周期, τ_k 为第 k 个采样周期内系统的总传输时延. i_k 为 $\{1, 2, 3, \cdots\}$ 的一个子集. $i_{k+1} = i_k + 1$ 意味着传输过程中没有丢包; $i_{k+1} \geq i_k + 1$ 意味着传输过程中存在丢包现象,且最大连续丢包数量为 $\max(i_{k+1} - i_k - 1)$ 个.

2 分布式控制系统稳定性理论

对于具有时延/丢包的航空发动机分布式控制系统(式(1)),假设存在正数 η 满足 $\eta \geq (i_{k+1} - i_k)h + \tau_{k+1} (k=1, 2, \cdots)$, 则有如下稳定性定理:

定理 1^[14] 给定 $\eta \geq (i_{k+1} - i_k)h + \tau_{k+1} (k=1, 2, \cdots)$ 和控制增益矩阵 K , 如果存在矩阵 $P > 0$, $T > 0$ 和适维矩阵 N_i 和 $M_i (i=1, 2, 3)$ 使得式(2)中的线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)成立,则系统在控制增益矩阵 K 的作用下是渐近稳定的. 式(2)为对称矩阵, $*$ 表示对称项.

$$\begin{bmatrix} N_1 + N_1^T - M_1 A - (M_1 A)^T & N_2^T - N_1 - M_1 B K - (M_2 A)^T & P + N_3^T + M_1 - (M_3 A)^T & \eta N_1 \\ * & -N_2 - N_2^T - M_2 B K - (M_2 B K)^T & -N_3^T + M_2 - (M_3 B K)^T & \eta N_2 \\ * & * & \eta T + M_3 + M_3^T & \eta N_3 \\ * & * & * & -\eta T \end{bmatrix} < 0 \quad (2)$$

条件 $\eta \geq (i_{k+1} - i_k)h + \tau_{k+1}$ 同时给出了对于时延/丢包的刻画,这一条件包含了定常/随机时延、随机丢包、同时具有时延和丢包等多种情形.

1) 当传输过程中没有发生丢包时,有 $\tau_{k+1} \leq \eta_{\max} - h$, 此时系统允许的最大时延 $\tau_{\max}$ 可通过下式求解:

$$\tau_{\max} = \eta_{\max} - h \tag{3}$$

2) 当传输过程中没有时延时,有 $(i_{k+1} - i_k) \leq \frac{\eta_{\max}}{h}$, 此时系统允许的最大连续丢包数 $n_{\max}$ 可通过式(4)求解,式中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整符号.

$$n_{\max} = \lfloor \frac{\eta_{\max}}{h} \rfloor - 1 \tag{4}$$

给定航空发动机的小偏离线性模型及相应的状态控制增益矩阵 K ,使用成熟的 LMI 求解工具箱可以求解得到使定理 1 中 LMI 有解的 η 的最大值 $\eta_{\max}$,进而根据式(3)和式(4)可以获得系统允许的最大时延 $\tau_{\max}$ 和最大连续丢包数 $n_{\max}$.

需要注意的是,该时延和丢包稳定性判据是通过李雅普诺夫第二定理给出的,因而求得的最大时延 $\tau_{\max}$ 和最大连续丢包数 $n_{\max}$ 具有一定的保守性.

3 带有区域极点配置的线性二次型最优控制方法

线性二次最优控制方法(linear quadratic regulator, LQR)提供了一套系统的方法来计算控制增益矩阵 K .使用该方法求得 K 可以使得多输入多输出系统的每个反馈控制回路均具有至少 60° 的相位裕度和 50% 以上的增益裕度^[15].

然而在使用传统的 LQR 方法设计控制增益矩阵 K 的过程中,常需要对性能加权对角阵 Q 和 R 进行反复试凑,这一调整方法需要进行大量的试错性仿真.为了有效地利用 LQR 方法提供的工作量,可以使用带有区域极点配置的 LQR 方法^[16].该方法通过将闭环极点配置在圆盘区域 $C(-q, r)$ 中(如图 2 所示),保证系统具有最小的衰减度 α ,最小阻尼比 $\xi = \cos\theta$,这将进一步保证系统的最大超调、衰减时间、上升时间、调节时间等动态特性指标不超过由 α 和 ξ 确定的上界.

这一配置过程的详细说明如下所示.设原系统的连续状态空间方程为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \tag{5}$$

两端作拉普拉斯变换有

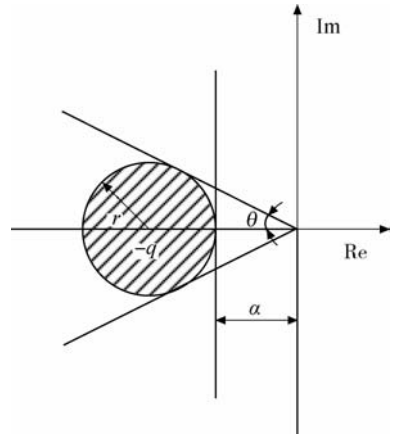


图 2 期望的极点配置区域 $C(-q, r)$

Fig. 2 Expected pole assignment region $C(-q, r)$

$$sX(s) = AX(s) + BU(s) \tag{6}$$

1) 引入变换将 s 域上的圆形区域 $C(-q, r)$ 映射为 ξ 域上的单位圆区域 $C(0, 1)$

$$\xi = \frac{s+q}{r} \tag{7}$$

相应的,变换后的状态空间方程为

$$\xi X(\xi) = \frac{1}{r}(A + qI)X(\xi) + \frac{1}{r}BU(\xi) \tag{8}$$

2) 将式中的状态空间方程看作是离散系统 $\frac{1}{r}(A + qI, B)$,求解离散系统最优控制问题可以得到 K ,使得 $\frac{1}{r}(A + qI - BK)$ 的极点均在单位圆 $C(0, 1)$ 内,这意味着当将 K 应用于原连续系统 (A, B) 时,系统的闭环极点均在 s 域中的期望圆盘区域 $C(-q, r)$ 内,从而使系统具有期望的动态特性.

4 分布式控制系统稳定裕度求解

某型双轴混排涡扇发动机地面最大条件下的归一化线性模型如式(9)所示

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} -11.6191 & 11.9182 \\ -3.1377 & 0.8086 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0.6690 & 0.1474 \\ 0.7044 & 0.4208 \end{bmatrix} u \\ y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0.7100 & 2.1121 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.0297 & 0.8982 \end{bmatrix} u \end{cases} \tag{9}$$

其中状态量 $x = [\Delta N_l \quad \Delta N_h]^T$ 分别表示低、高压转子转速 N_h, H_l ;控制量 $u = [\Delta W_{fm} \quad \Delta A_8]^T$ 分别为主燃油流量和尾喷口面积 W_{fm}, A_8 ;输出量 $y = [\Delta N_l \quad \Delta \pi_t]^T$ 分别为低压转子转速、涡轮落

压比 N_1, π_1 .

为保证系统零稳态误差,根据内模原理^[16]将误差 $e = y_{\text{cmd}} - y$ 增广为状态量并附加积分器,增广后的系统状态方程为

$$\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{e}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ -\mathbf{D} \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (10)$$

记作 $\dot{\mathbf{x}}_a = \mathbf{A}_a \mathbf{x}_a + \mathbf{B}_a \mathbf{u}_a$.

针对系统(式(10)),在软件 Matlab 下使用 dlqr 命令求解控制增益矩阵 $\mathbf{K}$,将极点配置到不同的圆盘区域 $C(-q, r)$ 内并对相应的 $\eta_{\max}$ 进行求解. 由于已对模型进行了归一化处理,本文取性能指标矩阵为单位阵,即 $\mathbf{Q} = \mathbf{I}_4, \mathbf{R} = \mathbf{I}_2$. 取采样周期 $h = 20 \text{ ms}$,圆盘半径 $r = 1$. 使用 yalmip 工具箱^[17]求解定理 1 中的 LMI,解得圆盘区域圆心横坐标 $-q$ 与 $\eta_{\max}$ 的关系如表 1 所示.

表 1 圆盘圆心横坐标 $-q$ 与 $\eta_{\max}$ 的关系

Table 1 Relationship between the circle center

abscissa $-q$ and $\eta_{\max}$

$-q$	$\eta_{\max}$	$-q$	$\eta_{\max}$	$-q$	$\eta_{\max}$	$-q$	$\eta_{\max}$
-1.1	0.14	-5	0.20	-9	0.06	-13	0.04
-2	0.24	-6	0.12	-10	0.04	-14	0.04
-3	0.40	-7	0.10	-11	0.04	-15	0.02
-4	0.44	-8	0.08	-12	0.04	-16	0.02

以 $q = 8$ 为例,求得控制增益矩阵 $\mathbf{K}$ 为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} -2.88 & -14.28 & 60.16 & -3.65 \\ 1.35 & -1.96 & -5.47 & 8.93 \end{bmatrix} \quad (11)$$

相应地,在该增益矩阵作用下的闭环极点分别为 $\lambda_{1,2} = -7.793 \pm 0.194i, \lambda_3 = -7.877, \lambda_4 = -7.875$,均在圆盘区域 $C(-8, 1)$ 内. 根据定理 1,求解得到 $\eta_{\max} = 0.08$,根据式(3)和式(4),此时系统可以容忍 0.06 s 的时延或不超过 3 个的连续丢包数.

下面通过零输入响应仿真对定理 1 进行验证. 假设传输时延 $\tau = 0.02 \text{ s}$,根据 $\eta_{\max} = (i_{k+1} - i_k)h + \tau_{k+1}$,当 $\eta_{\max} = 0.08$ 时,系统对于长度不超过两个的连续丢包($n_{\max} \leq 2$)均是鲁棒的. 对状态量 N_1 和 N_h 作幅值为 1% 和 -1% 的扰动,图 3 给出了 0.02 s 时延和不同 $n_{\max}$ 情形下的系统零输入响应曲线,图 4 为相应的丢包标志量.

由图 3 可知,闭环系统在由 $\eta_{\max}$ 刻画的时延和丢包的作用下是稳定的. 当丢包数进一步增大时(如 $n_{\max} = 3$)状态量 $\mathbf{x}$ 的波动加剧,但系统依然能够保持稳定.

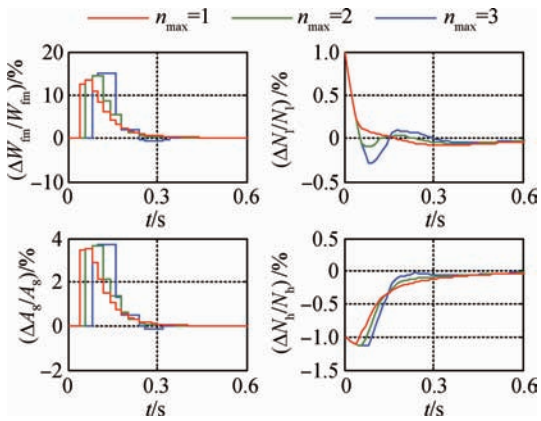


图 3 闭环系统零输入响应曲线

Fig. 3 Zero input response curve of closed-loop system

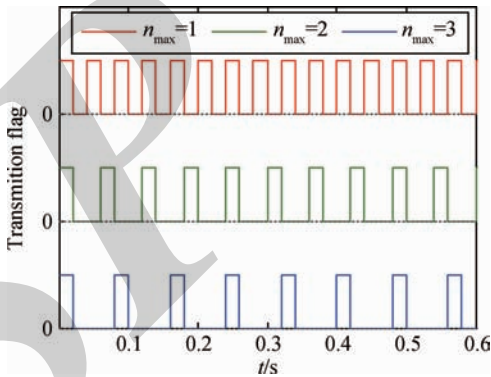


图 4 丢包标志量(值为 0 时表示丢包)

Fig. 4 Packet dropout flag (value of 0 indicates packet dropout)

5 控制系统闭环极点位置选取分析

5.1 闭环极点位置对时延/丢包鲁棒性的影响

由表 1 易知,随着闭环极点远离虚轴,系统所能允许的 $\tau_{\max}$ 和 $n_{\max}$ 都在减少. 当极点被配置在圆盘区域 $C(-4, 1)$ 内时有 $\eta_{\max} = 0.44$,此时系统能够容忍 21 个周期的时延或连续丢包(即具有较强的时延/丢包鲁棒性). 如果在发动机分布式控制系统中使用时间触发总线,则传输时延通常小于一个采样周期^[18]. 此外总线所具有的容错功能和多条总线的冗余备份也可以大大减少传输过程中的丢包现象,故这一性能足以满足正常传输状态下控制系统的稳定性需求.

然而在发动机分布式控制系统发生极端故障的情况下总线传输可能完全中断,在等待冗余备份切换或传输任务重启的过程中控制算法应具备足够的鲁棒性以维持系统稳定,故较强的时延/丢包鲁棒性仍是必要的.

5.2 闭环极点位置对系统动态特性的影响

在地面最大条件下对指令信号作阶跃扰动,

分别使 $N_{l,cmd}$ 和 $\pi_{t,cmd}$ 单独发生阶跃(阶跃量分别为 10r/min 和 1)。极点在不同圆盘区域 $C(-q,r)$ (取 $q \in \{4,8,12,16\}, r=1$) 内的闭环系统阶跃响应曲线如图 5 和图 6 所示。

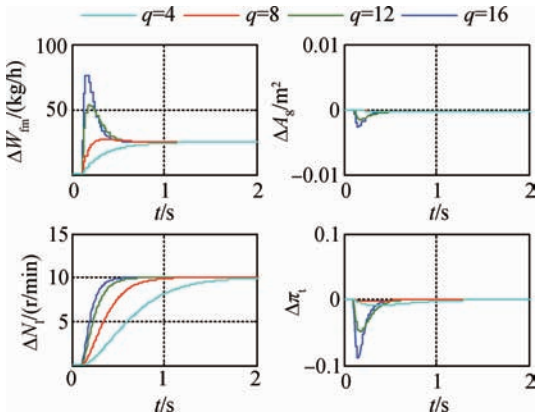


图 5 $N_{l,cmd}$ 阶跃响应曲线
Fig. 5 $N_{l,cmd}$ step response curve

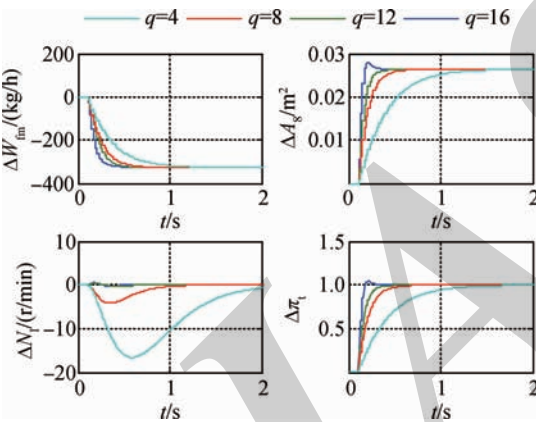


图 6 $\pi_{t,cmd}$ 阶跃响应曲线
Fig. 6 $\pi_{t,cmd}$ step response curve

由图 5 和图 6 可知,由于闭环极点具有较小的虚部, N_l 和 π_t 在上升过程中均没有发生明显的超调。随着闭环极点远离虚轴,系统的动态响应也在逐渐地加快。然而当闭环极点距离虚轴过远时,系统可能会要求执行机构以超限的速率动作,此时会发生积分饱和现象,导致系统动态响应变差。表 2 中给出了在上述仿真中控制量变化速率的变化区间,由表可知当 $q=12$ 时,主燃油流量的变

表 2 控制量变化速率区间

控制量	速率区间	
	$q=12$	$q=16$
$\dot{W}_{fm}/((\text{kg/h})/\text{s})$	$[-1979.6, 1081.0]$	$[-3124.5, 1839.2]$
$\dot{A}_8/((\text{m}^2)/\text{s})$	$[-0.0315, 0.3078]$	$[-0.0635, 0.5144]$

化速率 $\dot{W}_{fm}$ 已接近超限($\dot{W}_{fm}$ 上限为 2000(kg/h)/s, $\dot{A}_8$ 上限为 2m²/s)。

为避免积分饱和现象,减少快速动作对执行机构的磨损,闭环极点所在的圆盘区域圆心不应小于 -12。

综合考虑系统对于时延/丢包鲁棒性及动态性能的要求,将闭环系统极点配置在 $q \in [-8, -4], r=1$ 的圆盘区域 $C(-q,r)$ 内是较为合适的。

6 结 论

本文针对国内某型涡扇发动机分布式控制系统开展时延/丢包鲁棒性研究,主要成果如下:

- 1) 给出了一种同时刻画时延/丢包的通用航空发动机分布式控制模型及相应的稳定性判据,该模型适用于传输过程中存在随机/定常时延、随机丢包、同时具有时延和丢包等多种情形;
 - 2) 通过使用带有区域极点配置的 LQR 方法设计了具有期望动态特性的控制增益矩阵 K 并对相应的时延/丢包稳定裕度进行了求解。仿真结果证实了上述稳定性判据的有效性,但所求得的时延/丢包稳定裕度具有一定的保守性;
 - 3) 在设计控制增益矩阵 K 的过程中对时延/丢包鲁棒性和动态性能进行了折衷考虑,给出了闭环极点适合的配置区域。
- 进一步的工作可以从减少时延/丢包稳定性定理的保守性、设计具有低回路耦合、高时延/丢包鲁棒性的分布式控制器等方面展开。

参考文献:

[1] CULLEY E D, THOMAS R, SAUS J. Concepts for distributed engine control[R]. AIAA-2007-5709, 2007.

[2] DECASTRO A J, PALMER A C, BEHBAHANI A. Meeting the requirements of distributed engine control via decentralized, modular smart sensing [R]. AIAA-2010-6748, 2010.

[3] BEHBAHANI A, TULPUL B. Perspective for distributed intelligent engine controls of the future[R]. AIAA-2010-6631, 2010.

[4] CULLEY D. Transition in gas turbine control system architecture: modular, distributed, and embedded[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Glasgow, UK: American Society of Mechanical Engineers, 2010: 287-297.

[5] BERNER W A. Challenges for implementing a distributed-control system for turbine engines[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Glasgow, UK: American Society of Mechanical Engineers,

- 2010;401-407.
- [6] BELAPURKAR K R, YEDAVALLI K R, MOSLEHI B. Stability of fiber optic networked decentralized distributed engine control under time delays [R]. AIAA-2009-4885, 2009.
- [7] YEDAVALLI K R, BELAPURKAR K R, BEHBAHANI A. Stability analysis of distributed engine control systems under communication packet drop [R]. AIAA-2008-4580, 2008.
- [8] BELAPURKAR K R, YEDAVALLI K R, PAUL P, et al. Stability analysis of ARINC 825-based partially distributed aircraft engine control with transmission delays and packet dropouts[R]. AIAA-2010-6675, 2010.
- [9] 彭靖波, 谢寿生, 武卫, 等. 航空发动机分布式控制系统指数稳定性分析[J]. 航空动力学报, 2009, 24(10): 2362-2367.
PENG Jingbo, XIE Shousheng, WU Wei, et al. Stability analyzation of aero-engine distributed control system[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(10): 2362-2367. (in Chinese)
- [10] 田飞龙, 郭迎清, 姜彩虹. 分布式控制系统稳定性分析及控制器设计[J]. 航空发动机, 2015, 41(5): 38-42.
TIAN Feilong, GUO Yingqing, JIANG Caihong. Controller design and stability analysis for DCS with communication delay and packet dropout[J]. Aeroengine, 2015, 41(5): 38-42. (in Chinese)
- [11] 田飞龙, 郭迎清, 李睿超, 等. 某涡扇发动机分布式控制系统设计与总线性能[J]. 航空动力学报, 2015, 30(9): 2278-2285.
TIAN Feilong, GUO Yingqing, LI Ruichao, et al. Design of distributed control system and investigation on bus communication performance of a turbofan engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(9): 2278-2285. (in Chinese)
- [12] 陆军, 郭迎清, 陈小磊. 线性拟合法建立航空发动机状态变量模型[J]. 航空动力学报, 2011, 26(5): 1172-1177.
LU Jun, GUO Yingqing, CHEN Xiaolei. Establishment of aero-engine state variable model based on linear fitting method[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(5): 1172-1177. (in Chinese)
- [13] 张书刚, 郭迎清, 陆军. 基于 GasTurb/MATLAB 的航空发动机部件级模型研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27(12): 2850-2856.
ZHANG Shugang, GUO Yingqing, LU Jun. Research on aircraft engine component-level models based on GasTurb/MATLAB[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(12): 2850-2856. (in Chinese)
- [14] YUE D, HAN Q, PENG C. State feedback controller design of networked control systems[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications. Taipei: IEEE, 2004: 242-247.
- [15] 郑大钟. 线性系统理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [16] GOODWIN G C, GRAEBE S F, SALGADO M E. Control system design[M]. Bergen County, New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- [17] LÖFBERG J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB[C]// Proceedings of the IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design. Taipei: IEEE, 2004: 284-289.
- [18] 李睿超, 郭迎清, 李岩, 等. 基于数据集中器的超燃冲压发动机分布式控制系统通信方案设计[J]. 推进技术, 2016, 37(9): 1-8.
LI Ruichao, GUO Yingqing, LI Yan, et al. Communication scheme design of distributed control system for scramjet engine based on data concentrators[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(9): 1-8. (in Chinese)

(编辑: 王碧琚)