

某涡扇发动机分布式控制系统设计与总线性能

田飞龙¹, 郭迎清¹, 李睿超¹, 姜彩虹²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 针对国内某型涡扇发动机,以该机目前采用的集中式FADEC为基础,依据地域分散原则,设计了一种发动机部分分布式控制系统结构,并对发动机控制系统中的传输信号进行了合理划分;对发动机采用分布式控制进行了总线通信需求分析;选择时间触发CAN总线作为发动机分布式控制系统通信总线,并进行了通信方案设计;利用TrueTime构建了分布式控制仿真系统,研究了网络时延、掉包对发动机性能的影响.研究表明:在250 kbit/s和1 Mbit/s带宽下,总线利用率分别为50%和12.34%,满足通信要求;250 kbit/s带宽下所设计时间触发系统的网络诱导时延为12 ms,高压转子转速上升时间延迟0.02 s,而网络随机掉包使发动机响应明显变慢,设计时需要加以考虑.

关 键 词: 涡扇发动机; 分布式控制系统; 数据集中器; 总线通信; 时延和掉包

中图分类号: V233.7

文献标志码: A

Design of distributed control system and investigation on bus communication performance of a turbofan engine

TIAN Fei-long¹, GUO Ying-qing¹, LI Rui-chao¹, JIANG Cai-hong²

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Shenyang Engine Design and Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: A partially distributed engine control system was designed based on the centralized FADEC (full authority digital engine control) of domestic turbofan engine by geographical distribution principle. A reasonable classification of various signals in the control system was presented. According to communication requirement assessment for distributed turbine engine control, Time-triggered CAN (controller area network) bus was determined as the engine area network and the communication strategy was designed. TrueTime was exploited to develop a distributed control system simulation. Impact of network delay and data dropout on the engine performance was studied. The results show that bus utilization is 50% at 250 kbit/s and 12.34% at 1 Mbit/s, which meets the communication requirement. The network-induced delay of the time-triggered system is 12 ms. It prolongs the rise time of high pressure rotor speed for 0.02 s. However, the engine response is significantly slower under the random packet dropout, which should be taken into account at the design phase.

Key words: turbofan engine; distributed control system; data concentrator; bus communication; delay and packet dropout

符号表

XNLC	低压转子转速
XNHC	高压转子转速
Ps31	高压压气机出口静压
SMC	压气机喘振裕度
T_1	风扇进口总温
T_{25}	压气机进口总温
T_{41}	高压涡轮进口总温
T_{45}	低压涡轮进口总温
p_6	低压涡轮出口总压

WFAR	油气比
T_6	低压涡轮出口总温
WFM	主燃油流量控制指令
WFA	加力燃油流量控制指令
A8	尾喷管喉部截面积控制指令
A1	风扇进口导叶偏转角控制指令
A2	压气机进口导叶偏转角控制指令
IGN	点火信号
角标 f	表示测量反馈值

发动机分布式控制系统(distributed control system, DCS)是未来发动机控制系统的发展趋势^[1-3],它是计算机技术、通信技术与控制技术发展和融合的产物.目前采用的集中式 FADEC(全权限数字式发动机控制)的低级功能将分散到元件级,将智能节点和总线网络引入发动机控制系统中,可以有效实现系统减重、模块化设计、故障诊断以及各种先进控制.

与此同时,分布式控制系统应用于航空发动机控制领域将产生一些新的问题,如总线通讯产生的网络诱导延时、数据掉包等现象^[1-3]需要引起关注.近些年来,美、英等航空发动机大国已开展多项关于发动机的分布式控制研究计划,尤其是美国分布式发动机控制研究工作组(DECWG)已给出其未来发动机分布式控制发展路线图,Belapurkar 等人对航空发动机 DCS 中的网络时延和掉包问题进行了研究^[4-5],国内彭靖波等人对延时和掉包情况下航空发动机 DCS 的指数稳定性进行了分析研究^[6].这些研究中均以发动机线性模型为对象,研究结果的适应性有局限性;另外总线是 DCS 的核心,而以上研究均没有针对总线性能做具体的仿真研究;最后对于实际发动机中的众多信号也没有进行信号分类和传输方面的研究.

本文以某国产涡扇发动机非线性模型作为研究对象,利用 TrueTime 工具箱搭建其分布式控制系统,实现对总线性能的模拟和仿真;根据信号性质和需求,对发动机控制系统中的传输信号进行了分类,并采用时间触发 CAN(控制器局域网)通信方案实现对信号传输和调度;最后通过仿真对比,研究了网络时延和数据掉包对发动机性能的影响.

1 分布式控制系统结构

1.1 部分分布式结构

航空发动机分布式控制系统的结构较为灵

活,目前没有统一的定论,国内外研究普遍认为分布式结构转变是个渐变过程.出于对高温电子技术实现难度和分布式特征的考虑,DECWG 提出了一种未来分布式控制系统结构^[7],这种结构采用三级系统分层架构,包括:智能节点、数据集中器和控制器.

智能节点处于系统最低级,直接同发动机上的传感器和执行机构相连,并将传感器和执行机构的数据传递给数据集中器.数据集中器位于发动机上,可以按功能和区域布置在发动机相应部位.为研究简便,暂不考虑智能节点的信号调理、传感器校正、故障检测、自检等功能.数据集中器获取传感器信号,与控制器进行总线通信,同时接收控制器发出的控制输出信号,通过总线发送给相应执行机构,完成整个闭环控制.

某型发动机原集中式 FADEC 系统设计包括控制、监控和输出共 18 路信号.本文按发动机区域和功能划分设计分布式控制系统结构,设置了 3 个数据集中器,分别位于压气机、燃烧室和涡轮的机匣附近,系统示意图如图 1.其中 SS(smart sensor)为智能传感器,SA(smart actuator)为智能执行机构,DC 为数据集中器,controller 为控制器节点.

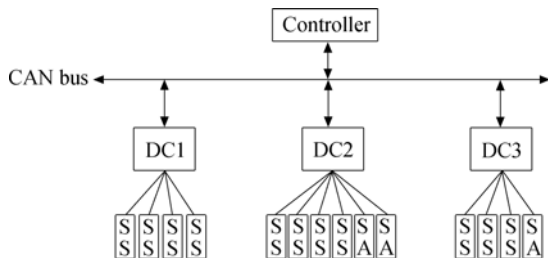


图 1 发动机 DCS 结构示意图

Fig. 1 Schematic of engine DCS architecture

1.2 发动机控制系统中的信号分类

发动机控制系统中需要测量的量有压力、转速、温度、振动以及供油量、几何调节量等,同时还

有一些开关量如命令、状态报警等. 根据信号功用不同, 将发动机控制系统中的信号划分为 3 类: ①控制关键信号, 指与发动机控制功能相关的关键信号, 传输周期设为 20 ms; ②状态监控信号, 指与发动机状态监控等相关的信号, 传输周期设为 80 ms; ③事件状态信号, 指一些接通关闭以及报

警等非周期性事件信号. 针对上节提出的分布式控制结构, 各节点传输的信号描述如表 1 所示. 其中 TTD, TND 分别代表 DC1/DC2/DC3 节点中的实时、非实时周期消息, TTC, TNC 分别代表控制器中的实时、非实时周期消息, ED, EC 分别代表 DC1/DC2/DC3 中、控制器中的事件消息.

表 1 各节点传输信号及发送周期

Table 1 Signals and their periods transmitted by each node

节点	消息(个数)	周期/ms	传输信号
DC1	TTD1(6)	20	XNLC, XNHC, Ps31, SMC, A1 _f , A2 _f
	TND(3)	80	T ₁ , T ₂₅ , 机匣振动
	ED1(1)		防喘接通信号
DC2	TTD2(3)	20	WFM _f , T ₄₁ , T ₄₅
	TND(5)	80	滑油温度、滑油压差、燃油温度、内涵、外涵火焰探测信号
	ED2(1)		总燃油滤压差信号
DC3	TTD3(4)	20	p ₆ , A8 _f , WFA _f , WFAR
	TND(1)	80	T ₆
	ED3(1)		接通加力开关信号
Controller	TTC(5)	20	WFM, WFA, A8, A1, A2
	TNC(1)	80	点火信号 IGN
	EC(4)		燃油急增、切断发动机点火、接通防冰信号、接通回油信号、防喘电磁阀
总计	实时信号=18 个		非实时信号=10 个

2 总线通信需求分析及方案设计

2.1 总线通信需求分析

CAN 总线本质是事件触发总线, 汽车领域发展了基于 CAN 的时间触发协议 TTCAN^[8], 用于汽车的 X-by-Wire 安全关键控制. 同时, CAN 的优越性能得到航空界的关注, 美国和欧洲在 CAN 的基础上发展了适用于航空领域的 CANaero-space 以及 ARINC 825, 对其做了安全性和适应性改造^[9-11]. 这些时间触发协议基本是在 ISO(国际标准化组织)标准定义的高层采用 TDMA(时分多路)策略, 将时间分割成周期性的时间窗, 以避免消息冲突和仲裁, 并且向下完全兼容 CAN 的数据链路层和物理层, 同时支持周期性消息和非周期性消息传输. 时间触发 CAN 总线的时延具有确定性, 适合实时性及容错安全要求较高领域, 因此, 在未来发动机分布式控制中有较好的应用前景^[12-14].

为了使得控制系统中各信号能正常传输, 需要选择合适的总线带宽, 因此需要对控制系统的

通信需求进行评估. 针对本文研究对象, 若采用扩展标识符, 数据域取 4 字节, 包括位填充开销在内, 按文献[15]计算 CAN 最大报文帧为 112 bit. CAN 总线最高支持 1 Mbit/s 带宽和最大报文传输, 计算总线利用率为 12.34%. 如果选择带宽为 250 kbit/s, 则相应的总线利用率为 50%, 具体如表 2 所示. 为了允许周期和非周期的数据在同一

表 2 250 kbit/s 总线带宽利用估计

Table 2 Estimation of bandwidth utilization for data transmission with 250 kbit/s bandwidth

信号类型	参数/个	周期/ ms	每槽传数据 包数/个	传输槽 数/个
控制关键	18	20	1	18
非关键	10	80	2.5	4
总计	28		22	
100%负载传 输槽个数			44	
带宽利用率			50%	

通道上传输,一般建议带宽利用率低于 50%^[5]. 因此对应所设计方案,总线带宽处于 250 kbit/s~1 Mbit/s 均满足要求.

2.2 通信方案设计

对周期性消息,首先要确定“基本周期”(basic cycle, BC)以及“矩阵循环”(matrix cycle, MC)长度. BC 指系统要求的最小传输周期,MC 是指系统所有消息全部传输完所需的时间,要求 MC 是 BC 的 2^n ($n=0,1,2,\dots$) 倍. 同时,还需要确定基本周期中一帧消息完整传输的时间窗长度 (column width, CW) 以及一个 BC 可调度的消息个数 N_{cw} . 对非周期性消息,通过在矩阵循环中安排一定数量的仲裁窗,利用 CAN 的基本协议 CSMA/CD (载波监听多路访问/冲突检测) 机制进行优先级仲裁发送.

采用均匀装载算法^[16],可使消息按照其周期均匀地分布在各个基本周期内. 按式(1)计算 BC 的长度 T_{bc} 为 20 ms, MC 的长度 T_{mc} 为 80 ms,共 4 行. 其中, GCD 为求最小公约数, LCM 为求最大公倍数.

$$\begin{cases} T_{bc} = \text{GCD}(T_1, T_2) \\ T_{mc} = \text{LCM}(T_1, T_2) \\ N_{bc} = T_{mc} / T_{bc} \end{cases} \quad (1)$$

按照式(2)进行消息的可调度分析,计算一个 BC 中的时间窗个数 N_{cw} 为 24 个 (加上行首的同步窗). 采用通信带宽为 250 kbit/s, 报文大小为 112 bit, 一帧消息完整传输需要的时间窗长度 T_{cw}

为 0.448 ms, 设时间窗长度为 0.5 ms, 则一个 BC 内可传输的最大时间窗个数 $\gamma_{\max}$ 为 40. 由于 $N_{cw} < \gamma_{\max}$, 则所有周期性消息按照设计都能满足可调度条件.

$$\begin{cases} N_{cw} = \sum_{i=1}^3 N_{tdi} + N_{tnc} + \max(N_{tdi}, N_{tnc}) + 1 \\ T_{cw} = \text{数据帧大小} / \text{总线带宽} \\ \gamma_{\max} = T_{bc} / T_{cw} \\ N_{cw} < \gamma_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

系统矩阵设计如图 2 所示, 其中 A0~A5, B0~B2, C0~C3, E0~E4 分别为 DC1, DC2, DC3, controller 中的实时消息; 而 Di[0], Di[1], Di[2], Di[3] 分别为 DC1, DC2, DC3, controller 中的非实时消息; 同步窗 (Ref) 中发送时间同步参考消息; 仲裁窗 (Abr) 中发送事件消息, 由多个时间窗合并; 空闲窗 (Free) 用于系统扩展.

2.3 利用 TrueTime 搭建分布式控制仿真系统

瑞典 LUND 工学院研制的基于 Matlab 的网络控制仿真工具箱 TrueTime^[17] 为网络控制系统的仿真研究提供了简易可行、功能齐全的工具, 支持控制与网络调度的同时仿真. 本文以某型涡扇发动机非线性模型为对象, 利用 TrueTime 搭建其分布式控制系统仿真平台如图 3 所示, 其中, TrueTime 的计算内核模块 Kernel 模拟分布式控制中的数据集中器, 网络模块 Network 选择 CAN 总线协议.

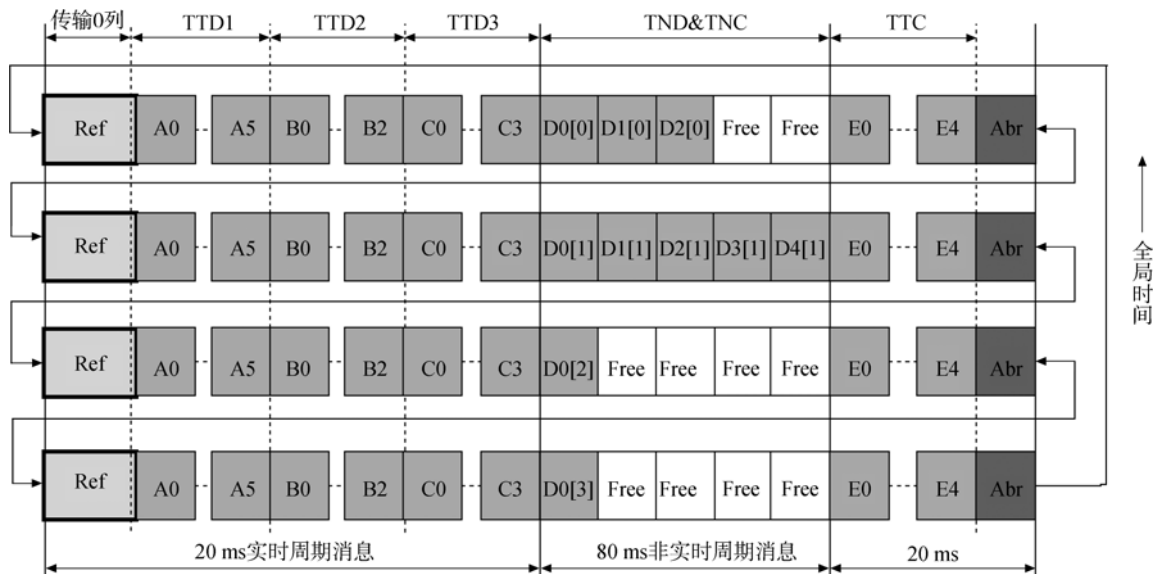


图 2 时间触发系统矩阵循环

Fig. 2 Time-triggered system matrix cycle

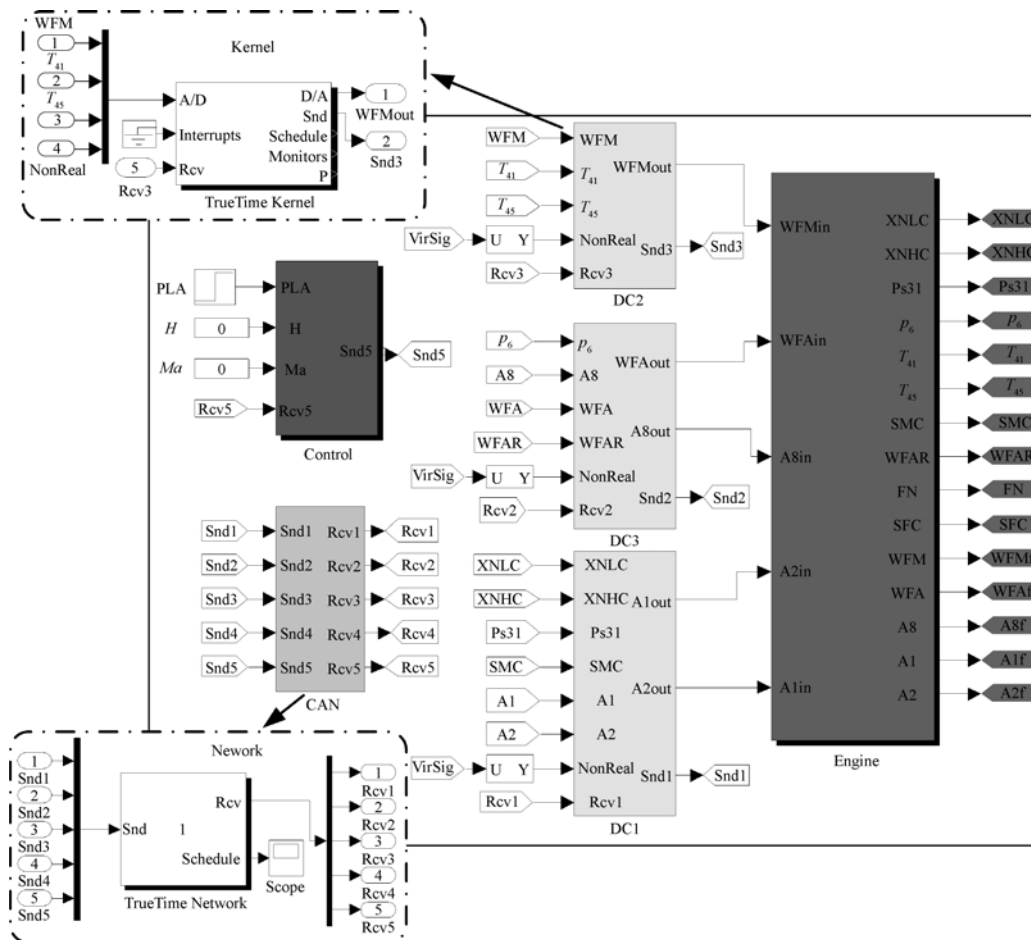


图3 基于 TrueTime 的发动机分布式控制仿真系统

Fig. 3 Simulation diagram of aero-engine DCS based on TrueTime

设置控制器为时间主节点,每 20 ms 周期开始向各数据集中器节点广播发送同步参考消息,各节点按照设计好的系统矩阵,本地时间同参考消息比较,定时进行消息发送.选取一段时间片,

总线网络资源调度情况如图 4,可以看出各节点避免了消息冲突,实时消息周期为 20 ms,非实时消息周期为 80 ms,事件消息在仲裁窗中竞争发送.

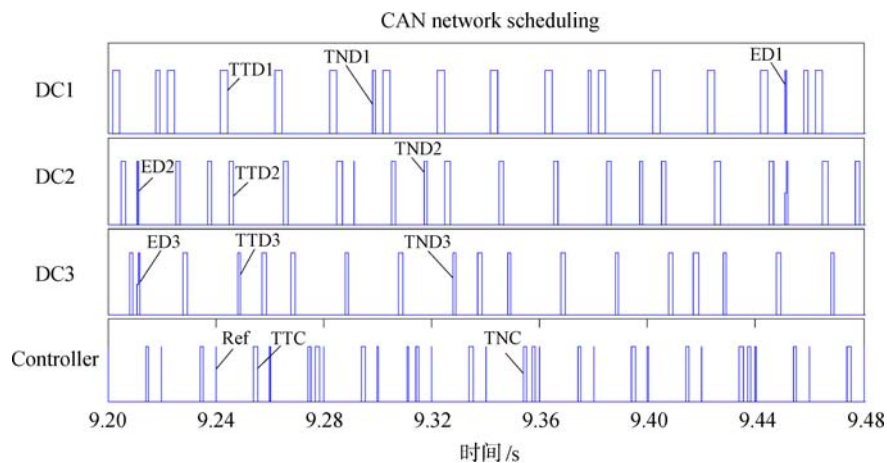


图4 总线网络资源调度情况

Fig. 4 Network resource scheduling

3 时延和掉包对发动机性能影响

3.1 网络诱导时延

网络诱导时延一般包括传输时延和传播时延. 由于采用时间触发机制, 避免了节点竞争引起的不确定排队时延, 因此传输时延主要与发送的数据包大小以及网络带宽相关; 传播时延是指电磁或光电信号在传输介质中传播的时延, 一般的双绞线和光纤的传播速度都在 $2 \times 10^8 \sim 3 \times 10^8$ m/s 以上, 而发动机中节点间的距离很短, 因此可以忽略.

按照 2.1 节中所选取的网络参数, 发送一个数据包的时间窗为 0.5 ms, 按最坏情况考虑, 即控制器接收完所有传感器数据包后再计算控制输入, 则系统的最大传输时延为 $0.5 \text{ ms} \times 24 = 12 \text{ ms}$.

采用分布式控制与原集中式 FADEC 系统情况下发动机性能仿真比较如图 5 所示. 仿真用例为地面状态 ($H=0$, $Ma=0$)、油门杆角度从 $50^\circ \sim$

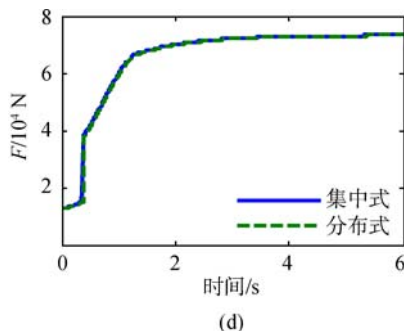


图5 存在时延的DCS和集中式FADEC的发动机性能比较

Fig. 5 Comparison of DCS with time delay and FADEC

70° 阶跃变化.

以高压转子转速子为例, 选择带宽为 250 kbit/s 的 CAN 总线构成的发动机 DCS 响应的上升时间较集中式控制系统的响应慢 0.02 s, 因此可以看出这种确定性的短时延(小于一个周期)对发动机性能影响较小, 而且由于时间触发系统的时延具有确定性和预测性, 在系统设计时可以充分考虑时延的影响, 并选择更高带宽以使时延对性能的影响进一步降低.

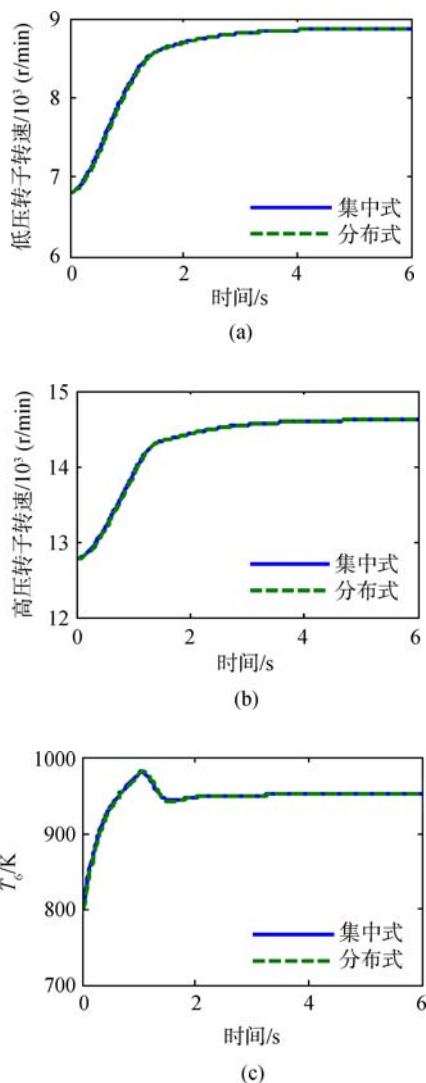
3.2 数据掉包

数据包冲突或节点失效会导致数据掉包. 虽然时间触发 CAN 总线协议避免了数据冲突的产生, 但网络仍然可能面临节点失效和数据损坏的情形. 如果数据报文中的 CRC(循环冗余校验码)检测到了数据损坏情况, 则会进行节点数据重发, 其他节点则接收到错误提示, 并通过错误计数器跟踪故障节点, 如果超过最大允许重发次数, 则该节点进入故障模式而被隔离. 短暂的掉电, 连接错误或者超时保护机制都会造成数据掉包.

当出现掉包时, 接收节点的数据将保持上一周期的值, 因此, 数据掉包可以看作大小是采样周期整数倍的随机时延. TrueTime 中的网络模块可以通过设置掉包率(loss probability)来模拟数据的随机掉包.

在不同掉包率(0%, 10%, 30%)下, 发动机的低压转子转速、高压转子转速、涡轮后温度、推力变化如图 6 所示. 高压转子转速在不同掉包率下的上升时间和调节时间如表 3.

由图 6 和表 3 可以看出随着掉包率的增加, 系统的响应变慢, 在 30% 掉包率下, 低压转子转速的上升时间、调节时间分别增加了 0.88 s 和 0.98 s, 即变慢了 43.1% 和 36.6%. 因此这种随机掉包对系统的影响较大, 在系统设计时应该采取



一定的补偿措施. 文献[18]中讨论了网络控制系统掉包的估计补偿方法; 文献[19]针对数据掉包提出了一种预测补偿方法, 并在实际中得到了应用. 采取补偿措施, 可以大大减轻数据掉包对系统性能的影响.

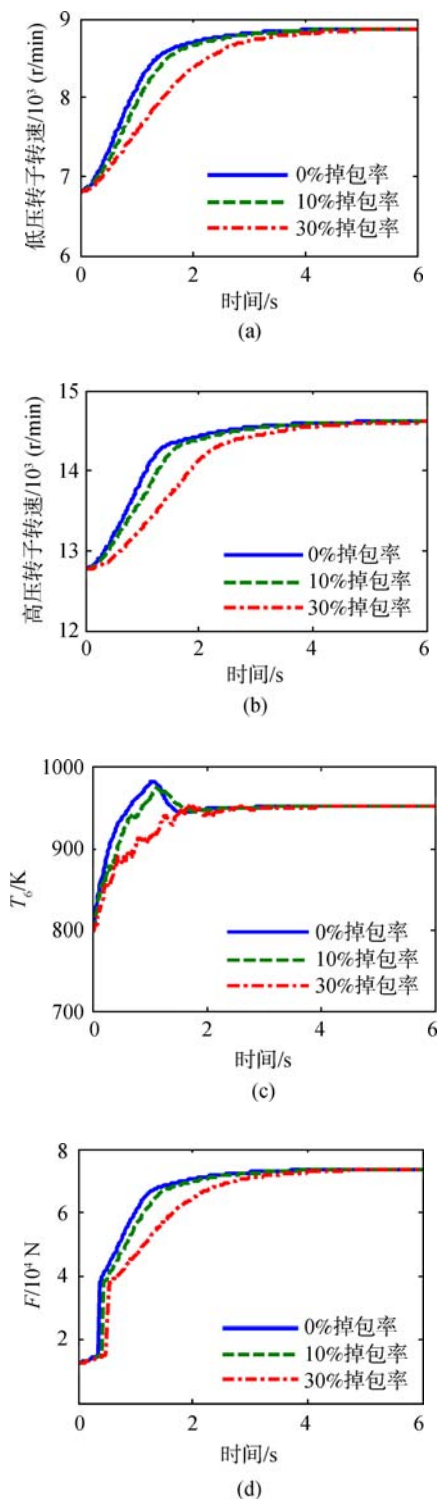


图6 不同掉包率下发动机性能比较

Fig. 6 Comparison of engine performances under different packet loss probability

表3 不同掉包率下XNLC响应的上升时间和调节时间
Table 3 Rise time and settling time of XNLC response under different packet loss probability

CAN 掉包率/%	上升时间/s	调节时间/s
0	2.04	2.68
10	2.24	2.94
30	2.92	3.66

4 结 论

本文针对国内某型涡扇发动机, 进行了分布式系统方案设计和总线性能研究, 得出了以下结论:

- 1) 提出的将数据集中器按地域分布化的三层分布式控制系统结构合理、实用.
- 2) 采用 CAN 总线时间触发协议可满足发动机分布式控制系统对信号传输的带宽利用率、通信时延等方面的要求, 而且网络时延具有确定性.
- 3) 按照本文所设计的方案, 时延对发动机性能的影响较小, 而随机掉包对发动机性能影响较大, 在系统设计时需要加以关注. 对数据掉包补偿措施的研究将作为今后的重点研究方向.

参考文献:

- [1] Culley D E, Thomas R, Saus J. Concepts for distributed engine control[R]. AIAA-2007-5709, 2007.
- [2] 孙健国. 面向 21 世纪航空动力控制展望[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 98-102.
SUN Jianguo. Prospects of the aeroengine control development in the early time of the 21st century[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(3): 98-102. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] Belapurkar R K, Yedavalli R K. Stability analysis of ARINC-825 based partially distributed aircraft engine control with transmission delays and packet dropouts[R]. AIAA-2010-6675, 2010.
- [5] Belapurkar R K, Yedavalli R K, Paluszewski P J. Design of set-point controller for partially distributed turboshaft engine with network faults[R]. AIAA-2011-5858, 2011.
- [6] 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)

- Chinese)
- [7] Behbahani A, Tulpule B. Perspective for distributed intelligent engine controls of the future[R]. AIAA-2010-6631, 2010.
- [8] Leen G, Heffernan D. TTCAN: a new time-triggered controller area network[J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2002, 26(2): 77-94.
- [9] Knueppel R. Standardization of CAN networks for airborne use through ARINC 825[R]. Hambach; 13th International CAN Conference, 2012.
- [10] Yedavalli R K, Willett M, Behani A. The role of various real-time communication data bus for open system distributed engine control architectures for the future [R]. AIAA-2011-6145, 2011.
- [11] 冯源, 豆海利. CAN总线在航空领域应用的探讨[J]. *航空工程进展*, 2011(2): 231-235.
FENG Yuan, DOU Haili. Applicability of CAN bus in the aviation field [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2011(2): 231-235. (in Chinese)
- [12] 李光耀, 郭迎清, 王海泉. 基于CAN总线的航空发动机分布式控制系统通信研究[J]. *测控技术*, 2009, 28(1): 62-66, 69.
LI Guangyao, GUO Yingqing, WANG Haiquan. Communication research on CAN based distributed aero-engine control system [J]. *Measurement and Control Technology*, 2009, 28(1): 62-66, 69. (in Chinese)
- [13] Thompson H A, Benitez-Perez H, Lee D, et al. A CAN bus-based safety-critical distributed aeroengine control systems architecture demonstrator [J]. *Microprocessors and Microsystems*, 1999, 23(6): 345-355.
- [14] 关越, 潘慕绚. 基于DSP的航空发动机分布式控制 TTCAN总线的节点设计[J]. *航空发动机*, 2013, 39(4): 61-66.
GUAN Yue, PAN Muxuan. Design of TTCAN node for aeroengine distributed control system based on DSP [J]. *Aeroengine*, 2013, 39(4): 61-66. (in Chinese)
- [15] Tindell K, Burns A. Guaranteed message latencies for distributed safety-critical hard real-time control networks [R]. Department of Computer Science, University of York, Report YCS229, 1994.
- [16] 曹万科, 张天侠, 周淑文, 等. 基于CAN与TTCAN的汽车整车分层控制网络及调度[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2007, 28(11): 1640-1643.
CAO Wanke, ZHANG Tianxia, ZHOU Shuwen, et al. Automotive hierarchical control network based on TTCAN and CAN for entire cars and its scheduling strategy [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2007, 28(11): 1640-1643. (in Chinese)
- [17] Ohlin M, Henriksson D, Cervin A. TrueTime 1.5: reference manual[M]. Sweden: Department of Automatic Control, Lund University, 2007.
- [18] Schenato L, Sinopoli B, Franceschetti M, et al. Foundations of control and estimation over lossy networks[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 163-187.
- [19] Henriksson E, Sandberg H, Johansson K H. Predictive compensation for communication outages in networked control systems[R]. Cancun, Mexico: 47th IEEE Conference on Decision and Control, 2008.

(编辑: 秦理曼)