

一类航天器控制系统反馈调度方法研究

孙 帅, 王 磊, 李声涛

(北京控制工程研究所, 北京 100190)

摘要: 针对目前航天器控制系统普遍采用静态调度方式, 不能够及时调整计算资源分配的问题, 提出了一种基于执行时间测量的计算资源反馈调度算法; 该方法一方面保证航天器在工作时间段控制精度达到指标要求, 另一方面能够动态调整计算资源与控制增益, 降低系统功耗; 同时在计算机发生故障时保证航天器控制系统稳定运行; 最后通过仿真分析验证了方法有效性。

关键词: 信息物理系统; 反馈调度; 姿态控制; 容错控制

A Feedback Scheduling Algorithm for Spacecraft Control System

Sun Shuai, Wang Lei, Li Shengtao

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: In this paper, for the commonly static scheduling method cannot timely adjust the allocation of computing resources, we propose a feedback scheduling algorithm for the spacecraft control system based on the execution time measurement. On the one hand, this method ensures that the control precision of the spacecraft meets the requirements of the performance index during working hours. And on the other hand, it can dynamically adjust the computing resources and control gains to reduce the system power consumption. At the same time, it ensures the stability of the spacecraft control system in the event of a computer failure. At last, the effectiveness of the method is verified by simulation analysis.

Keywords: cyber physical systems; feedback scheduling; attitude control; fault tolerance control

0 引言

信息物理系统 (cyber-physical systems) 是近年来控制与计算机领域兴起的一个重要研究方向。其主要内容是将系统中控制、计算、通信的过程当作一个整体来考虑, 研究其中信息系统行为与对象物理状态间的互动关系, 从而进一步提升系统性能^[1-2]。而基于对信息系统状态测量并在线对系统计算或通信资源进行分配的反馈调度方法就成为了 CPS 研究中的一条重要技术路线。

与此同时, 随着人类在太空的活动日益频繁, 宇航任务模式也更加多元, 进一步降低太空活动的成本, 提高航天器自主任务管理能力的的需求也不断提高。如何进一步提高航天器控制系统自主运行的能力、提升控制性能、节约能量消耗、提升容错能力和故障判读、处置^[3]能力, 也成为航天器控制系统研究中的关键问题之一。

在已有的国内外研究成果中, 在文献 [4] 中首次提出了反馈调度的概念和一般的设计思路。文章对嵌入式微处理器的利用率和计算任务的截止时间丢失率进行实时测量, 将其与各自设计值的误差作为模型输入, 建立误差传递函数。通过不断调整给各个计算任务分配的任务周期, 对 CPU 利用率进行动态调节。文献 [5] 研究了控制性能与微

处理器电压之间的关系。其将处理器期望利用率, 各个任务最大、最小执行时间等参数共同输入调度模型, 利用弹性调度算法, 设计出了一套考虑处理器能耗的任务调度方法。文献 [6] 将反馈调度方法应用在一类机械臂的控制系统设计过程中, 将控制算法分解成不同的周期性任务, 按照其数值大小分配权重, 从而动态分配计算资源, 在保证性能的前提下达到了节约计算资源的目的。文献 [7] 将模糊控制方法应用于反馈调度算法的设计中。在文章中其应用双层的模糊逻辑, 首先使用第一层模糊逻辑来调整任务优先级从而降低截止时间丢失率, 再应用第二次模糊逻辑在线调整和分配任务周期来控制处理器计算资源的利用率。与传统调度方法相比较, 在相同处理器利用率条件下达到更高控制精度。文献 [8] 是设计了一种考虑在可调度性约束条件下, 基于固定优先级的单调速率调度的多任务系统最优任务周期分配算法。并通过物理实验验证了算法的有效性。

文献 [9] 是航天器容错控制与故障诊断方面的一篇比较权威的综述。从文中可知, 目前航天器控制系统的故障研究主要集中在执行机构 (如推力器、反作用轮) 以及测量机构 (陀螺、传感器) 的故障上, 而且多以开环的故障诊断方式为主。一般方法是利用先进控制算法在执行机构故障时设计欠驱动的控制算法, 以及应用滤波估计方法在无直接测量输出情形下对状态量进行重构与估计。而对于航天器上嵌入式计算与通信系统的故障研究较少, 仅有在网络控制领域会分析数据丢包等故障, 但诸如处理器因为

收稿日期:2018-03-13; 修回日期:2018-03-30。

基金项目:国家 863 基金项目资助(2015AA7046306)。

作者简介:孙 帅(1989-),男,陕西西安人,博士研究生,主要从事信息物理系统、航天器控制理论方向的研究。

供电电压不足或多核处理器部分故障导致的降频等故障形式, 以及相关的容错控制方法未见研究成果发布。

本文主要结合已有的反馈调度方法, 设计了一种基于对任务执行时间测量的在线反馈调度与控制算法。能够通过调节任务执行周期, 一方面保证航天器在轨工作过程具有满足指标的高控制精度, 另一方面可以使航天器在轨的非工作过程通过延长控制周期, 来降低整个轨道周期的平均能耗。与此同时, 在处理器发生降频故障时, 能够自主调节任务的周期分配, 保证航天器姿态稳定。文章结构如下: 第一部分引言介绍文章的主要研究内容及背景; 第二部分给出所研究问题的数学模型; 第三部分介绍所提出的反馈调度与控制算法; 第四部分为仿真验证; 第五部分为文章的结论。

1 问题描述

航天器线性化姿态动力学模型可描述为^[10]:

$$\begin{aligned} J_x \ddot{\varphi} + (J_y - J_z)\omega_o^2 \varphi + (J_y - J_z - J_x)\omega_o \dot{\psi} &= u_x + T_x \\ J_y \ddot{\theta} &= u_y + T_y \\ J_z \ddot{\psi} + (J_y - J_z)\omega_o^2 \psi - (J_y - J_z - J_x)\omega_o \dot{\varphi} &= \\ u_z - \omega_o h_x + T_z \end{aligned} \quad (1)$$

$J_x J_y J_z$ 为航天器三轴的主转动惯量。 ω_o 为航天器所在轨道的角速度。 φ, θ, ψ 为航天器在轨道坐标系内的姿态角变量。 $\mathbf{u} = [u_x \ u_y \ u_z]^T \in \mathbb{R}^3$ 为三轴的控制力矩, 由安装在航天器内部主惯量轴上的反作用飞轮提供, $\mathbf{T} = [T_x \ T_y \ T_z]^T \in \mathbb{R}^3$ 为航天器在空间中所受的外部干扰力矩。在本文研究的小型低轨航天器的运行过程中, 所受到的干扰力矩主要为地球重力梯度力矩, 可以描述为:

$$\begin{aligned} T_x &\approx -3\omega_o^2(J_y - J_z)\varphi \\ T_y &\approx -3\omega_o^2(J_x - J_z)\theta \\ T_z &\approx 0 \end{aligned} \quad (2)$$

联立式 (2) 可得到系统模型的状态空间表达式:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_p \ \mathbf{x}_d) = (\varphi \ \theta \ \psi \ \dot{\varphi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi})^T$, \mathbf{x}_p 为姿态角状态, \mathbf{x}_d 为角速度率状态。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ -a/I_x & 0 & 0 & 0 & 0 & -b/I_x \\ 0 & -d/I_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c/I_z & b/I_z & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ 1/I_x \\ 1/I_y \\ 1/I_z \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \mathbf{I}_{6 \times 6}$$

其中:

$$\begin{aligned} a &= 4(J_y - J_z)\omega_o^2, b = (J_y - J_x - J_z)\omega_o \\ c &= (J_y - J_x)\omega_o^2, d = 3(J_x - J_z)\omega_o^2 \end{aligned}$$

星上控制系统采用计算机控制模式, 所以将式 (3) 进行离散化处理, 得到:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{F}(T)\mathbf{x}(k) + \mathbf{G}(T)\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{u}(k) &= -\mathbf{K}\mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (4)$$

其中: \mathbf{K} 为反馈增益阵, 根据控制算法求得, T 为采样周期。一般来说, 对于计算机控制系统越小的控制周期能够实现更高的控制精度。而同时越小的周期就意味着系统需要将更多的 CPU 分配资源给控制系统。对于低轨道航天器而言, 其轨道周期约 95 min, 但其中需要航天器进行高精度指向控制的工作时段只有约 10 min, 其余时间均可认为是控制系统的非工作时段。所以在任务设计时可以在工作时段给控制系统分配较多的计算资源, 提高控制精度, 而在非工作时段可将资源分配给如数据处理、通信等系统, 提高任务完成质量, 优化航天器的整体性能。

航天器的控制任务在星载嵌入式系统上具体实现时, 要将数据采集、计算、输出的过程分解为顺序执行的几个周期性子任务^[11]。对于微小型航天器控制系统而言, 由于功耗和体积限制苛刻, 所以各个测量敏感器需要共用一块 CPU。其一阶状态量 \mathbf{x}_p 以及二阶状态量 \mathbf{x}_d 通过 MEMS 地球、太阳敏感器和三轴陀螺仪进行采集。计算单元在一个控制周期开始时发出采集指令, 在经过一段执行时间后, 所采集到的状态量进入系统内存中, 在控制算法所需的状态量均采样得到之后, 一同送入处理器, 代入控制算法进行运算, 最终将计算机所生成的控制指令发到执行机构。整个控制任务的周期为采样周期 T , \mathbf{x}_p 的采集的子任务执行时间为 c_p , \mathbf{x}_d 的采集子任务执行时间为 c_d , 最终控制算法执行及输出子任务执行时间为 c_o 。在此过程中, CPU 用于控制任务的利用率可表示为 $U_a = (c_p + c_d + c_o)/T < 1$ 。在相同的软硬件环境内, CPU 功耗 E 与利用率直接相关, 存在表达式:

$$E \propto \left(\sum_{i=1}^N \frac{C_i}{h_i} \right)^2 \quad (5)$$

整个控制任务模型可以描述为 $\tau_c(c_p, c_d, c_o, T, U_a)$, 对于传统的航天器控制系统而言, 一般在设计过程中就确定一个固定参数的 τ_c 。不同任务间留够充足的时间裕量避免时序冲突。这种思路的优点是便于进行不同系统间的衔接, 设计难度较低。但随着对航天器集约化要求及容错能力日益提高, 就需要设计一种能够自主灵活分配资源, 处置故障的调度与控制算法。

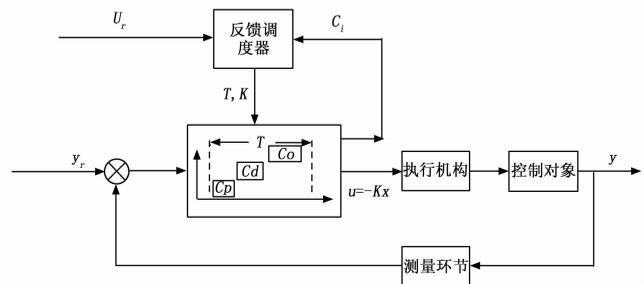


图 1 反馈调度算法结构图

2 算法描述

本文所研究的此类反馈调度算法, 其实现过程主要分

为三个步骤：第一是任务执行时间测量；其内容是对处理器在一个控制周期内所需执行的各个任务的具体耗时进行测量与估计；第二是资源调度；其核心是根据上层软件分配给控制系统的可用处理器利用率以及控制任务所需的执行时间，来调整控制周期。第三是反馈增益计算；即根据新的控制周期，来重新调整控制算法中的控制增益。如果不进行调整，有可能造成控制性能下降甚至系统发散。本反馈调度算法结构如下所示。

其中 C_i 为任务执行时间， U_r 为系统给控制任务的 CPU 利用率， y_r 为控制系统的参考输入。

2.1 执行时间测量

C_i 为反馈调度器对 CPU 内不同任务执行时间的测量。一般来说可以通过对计算单元内时间片的判读得到，但其中会存在因量化效应、时间抖动产生的噪声，需要进行滤波估计。而反馈调度算法的另外一个重要功能就是当计算单元发生故障，导致执行时间发生变化时，传统的固定参数的优先级调度方法会产生计算超时等时序问题，导致系统失控，而反馈调度方法能够自主调整任务周期，调整控制增益，保证控制系统稳定运行。

执行时间测量模型可描述为：

$$C_i = \bar{C}_i + \omega \quad (6)$$

其中： \bar{C}_i 为测得的一段时间内的平均执行时间值， C_i 为任务实际执行时间， ω 为噪声。在此，本文选用一个简单的数字滤波器来进行处理，可得平均执行时间估计值 \bar{C}_i 表达式为：

$$\bar{C}_i = k_c(1 + z^{-1})\bar{C}_i \quad (7)$$

k_c 为滤波系数。反馈调度算法就是通过对一段时间内 \bar{C}_i 的测量，来决定任务周期的分配。

2.2 资源调度

U_r 为 CPU 分配给控制系统的参考利用率，一般由操作系统及任务规划软件决定。

定义调度任务模型为 $\tau_i(c_i, T_i)$ ，一般情况下为保证计算资源有效利用及系统稳定，调度周期不易过小，设定 $T_i > 3T$ 。调度任务的作用就是根据给系统给控制任务分配的 CPU 利用率，来对控制周期进行分配，并计算相应的控制增益。则根据式 (7)，有控制周期表达式为：

$$T(k+1) = \frac{\sum \bar{C}_i(k)}{U_r(k)} \quad (8)$$

但由于 $U_r \in (0, 1)$ ，所以可得到 $T > \sum \bar{C}_i$ ；与此同时在控制系统设计中，往往要求系统采样频率大于系统带宽 ω_d 5 倍以上，所以可得到任务周期的约束条件为：

$$\sum \bar{C}_i < T < \frac{0.2}{\omega_d} \quad (9)$$

2.3 控制增益计算

控制增益计算一般应用计算机控制理论，根据系统状态矩阵及采样周期计算控制增益阵。本文中采用离散最优控制方法，将系统式 (4) 带入 Ricatti 方程：

$$F^T S F - S - F^T S G (G^T S G + R)^{-1} G^T S F + Q = 0$$

其中：正定阵 Q 和 R 为二次型指标的加权阵，表达式为：

$$J = \sum_{k=1}^{\infty} (x(k)^T Q x(k) + u(k)^T R u(k))$$

解得对称阵 S ，再解出：

$$K = (G^T S G)^{-1} G^T S F \quad (10)$$

其中： Q 越大则得到的控制精度越高，而 R 越大则控制输出则越小， Q 和 R 的选择决定了控制精度与控制输出的折中关系，同时也需要谨慎调节以避免执行机构输出达到饱和。

此时就可以保证对于调度算法给出的任务周期 T ，找到一个对应的最优反馈增益阵 K 。

3 仿真分析

仿真研究的任务背景是一个微型低轨道航天器，工具使用 Matlab 中 Truetime 工具箱。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置^[12]

质量	3 kg	轨道高度	500 km
I_x	0.025 kg·m ²	最大力矩	0.03 N·m
I_y	0.025 kg·m ²	c_p	20 ms
I_z	0.005 kg·m ²	c_d	30 ms
ω_o	0.001 1 rad/s	c_o	40 ms
轨道周期	95 min	k_c	0.5
指标要求	$\pm 0.5^\circ$	仿真时长	1800 s

控制系统参考输入是 $y_r = [x_{pr} \quad x_{dr}]^T$ ，其中：

$$\begin{aligned} x_{pr} &= [0 \quad 0 \quad 0]^T \text{deg} \\ x_{dr} &= [0.57 \sin(t/40), -0.57 \cos(t/50), \\ &\quad 0.57 \sin(t/60)]^T \text{deg/s} \end{aligned}$$

系统状态初值为 $x_{p0} = [1 \quad -0.5 \quad 0.5]^T \text{deg}$ ， $x_{d0} = [0.02 \quad 0.01 \quad 0.05]^T \text{deg/s}$ 。

在此设定航天器的轨道周期在 $t \in [600, 1000]$ s 时为工作弧段，要求在此时段内达到指标跟踪精度要求，以便于载荷正常工作。而在其余非工作时段内，要求航天器姿态保证跟踪误差较小，保证航天器姿态可控即可。而在 $t = 1200$ s 时，给系统注入计算单元发生故障，验证反馈调度系统的容错能力。此时处理器降频至 0.25 f ，则任务执行时间均变为标称值的 4 倍（考虑控制任务代码执行速率均与处理器速度相关）。

根据以上所交代的任务背景，可得到各个时段内控制系统分配到的计算单元的任务参数为：

$$\left\{ \begin{aligned} &\tau_c(c_p, c_d, c_o, U_a) = \tau_c(0.02s, 0.03s, 0.04s, 0.05), \\ &t \in (0, 600]s \\ &\tau_c(c_p, c_d, c_o, U_a) = \tau_c(0.02s, 0.03s, 0.04s, 0.05), \\ &t \in (600, 1000]s \\ &\tau_c(c_p, c_d, c_o, U_a) = \tau_c(0.02s, 0.03s, 0.04s, 0.05), \\ &t \in (1000, 1200]s \\ &\tau_c(c_p, c_d, c_o, U_a) = \tau_c(0.08, 0.12, 0.16, 0.05), \\ &t \in (1200, 1800]s \\ &\tau_i(c_i, T_i) = \tau_i(0.02s, 10s), t \in (0, 1800]s \end{aligned} \right.$$

图 2 为计算单元利用率变化曲线, 实线为计算单元利用率的参考输入, 虚线为根据为系统实际利用率。可以看出本文给出的反馈调度算法对利用率需求变化具有很高的跟踪精度。特别是在 1200 s 故障注入时刻之后, 如图所示, 调度算法经过 30 s, 即 3 个调度周期后使系统计算利用率恢复到参考输入水平。

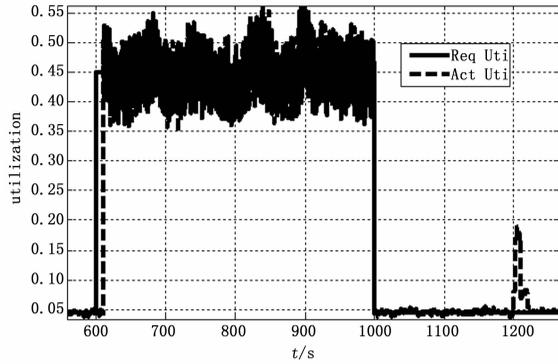


图 2 CPU 利用率变化曲线

图 3 为航天器在轨姿态角状态变化曲线, 从图 3 可以看出, 在整个仿真时间段内, 即使在 1200 s 故障发生后内角度跟踪精度均保持在 $\pm 5^\circ$ 之内。在所设置的航天器工作弧段 600~1000 s 内, 系统姿态控制精度从 $\pm 1.5^\circ$ 提升到 $\pm 0.5^\circ$, 达到性能指标要求。而对于传统控制与调度方法, 要保证工作弧段性能指标要求, 就需要在整个周期内保持控制精度在 $\pm 0.5^\circ$ 之内, 这就需要计算单元给控制系统分配固定的计算资源以保证任务要求, 在非工作时段就会造成一定的计算资源浪费及过多的能耗损失。所以本文提出的反馈调度方法与传统方法相比, 根据式 (5) 可知, 在一个轨道周期之内控制系统能够极大的节约 CPU 能耗及计算资源。

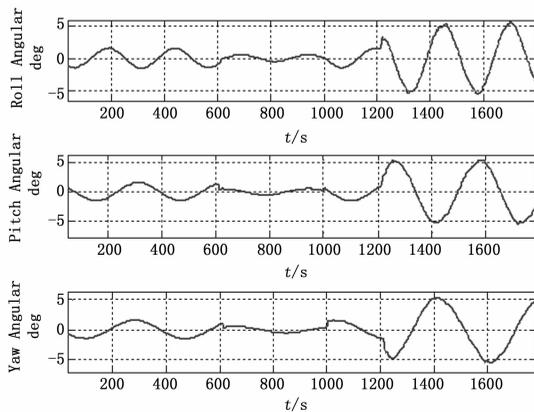


图 3 角度变化曲线

图 4~6 为基于 Truetime 工具箱得到的计算单元内部的工作时序仿真结果。从图 4 可知, 在 600 s 之后因为航天器进入指向跟踪的工作弧段, 系统给予控制系统的计算资源有所增加, 此时的控制任务周期从 2 s 降为 0.2 s 左右, 而同时由图 3 所示的系统状态变化曲线上也能反映在得到更多 CPU 资源后, 航天器的控制精度明显提高, 验证了反馈

调度算法能够动态分配资源, 提高系统整体性能。

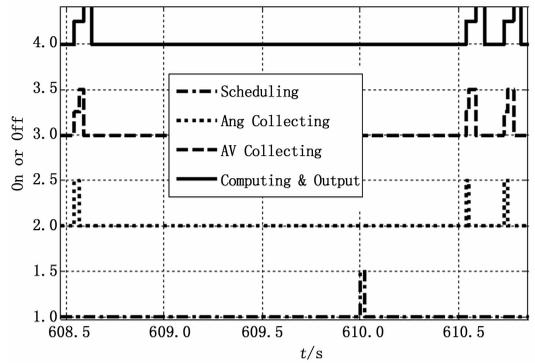


图 4 工作时段时序变化曲线

由图 5 可以发现, 在 1200 s 对航天器进行了故障注入之后, 控制任务中的各个子任务的执行时间显著增加。但从图 6 可以看出, 在 1210 s 之后, 经过一个调度之后, 系统的控制周期开始逐渐变大, 说明反馈调度系统已经及时感知到了故障的发生, 并采取了相应的应对策略。

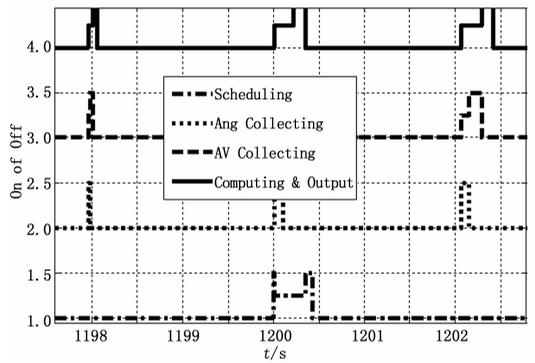


图 5 故障时刻执行时间变化

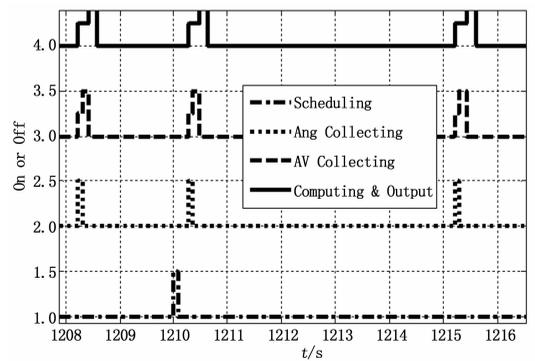


图 6 故障后任务周期变化

同时这也验证了反馈调度算法能够通过调整控制周期来保证系统的实际 CPU 利用率的恒定, 从而保证控制系统内部任务之间以及控制系统与其他需要使用 CPU 的系统间不会发生时序冲突, 保证整个航天器系统能够稳定运行。

4 结论

本文介绍了一类应用于航天器控制系统的动态调度 CPU