

8-5-2020

High Accuracy and Stable Transient Process Design of Orbit Control for Space Rendezvous and Docking

Kaikai Li

Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

Weiwei Shang

Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

High Accuracy and Stable Transient Process Design of Orbit Control for Space Rendezvous and Docking

Abstract

Abstract: In the docking phase of orbit control task of space rendezvous and docking, smooth without overshoot, good robustness and fuel-saving control are required. To this end, *a transient process for orbit control was proposed, and new controllers were designed on the basis of the transient process for the space rendezvous and docking. The ultimate goal was refined to the gradual arrival goal to build the transient process between the initial coordinate and the target coordinate of the system. The output of the transient process was designed as a smooth S-type curve. Three different orbit controllers of space rendezvous and docking were analyzed.* The simulation results indicate that the system task can be completed in a high accuracy and stable way by adding the transient process in the orbit control task, and the common controllers can be used to complete the task by adding the transient process.

Keywords

orbit control, rendezvous and docking, transient process, golden section control

Recommended Citation

Li Kaikai, Shang Weiwei. High Accuracy and Stable Transient Process Design of Orbit Control for Space Rendezvous and Docking[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(11): 2784-2790.

交会对接轨道控制的高精度平稳过渡过程设计

李凯凯, 尚伟伟

(中国科学技术大学自动化系, 合肥 230027)

摘要: 在交会对接轨道控制任务的停靠阶段, 系统需要进行平滑无超调、鲁棒性好、节约燃料的控制, 为此, 在轨道控制中引入过渡过程, 设计了基于过渡过程的空间交会轨道控制器。在系统的初始坐标和目标坐标之间, 将最终目标细化分级为逐步到达的平滑的 S 型曲线形式, 设计了 3 种不同的基于过渡过程的空间交会轨道控制器。仿真实验表明所提出的过渡过程可以使系统以高精度平稳的方式完成轨道控制任务, 使简单的控制器也可完成控制任务。

关键词: 轨道控制; 交会对接; 过渡过程; 黄金分割控制

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 11-2784-07

High Accuracy and Stable Transient Process Design of Orbit Control for Space Rendezvous and Docking

Li Kaikai, Shang Weiwei

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: In the docking phase of orbit control task of space rendezvous and docking, smooth without overshoot, good robustness and fuel-saving control are required. To this end, a transient process for orbit control was proposed, and new controllers were designed on the basis of the transient process for the space rendezvous and docking. The ultimate goal was refined to the gradual arrival goal to build the transient process between the initial coordinate and the target coordinate of the system. The output of the transient process was designed as a smooth S-type curve. Three different orbit controllers of space rendezvous and docking were analyzed. The simulation results indicate that the system task can be completed in a high accuracy and stable way by adding the transient process in the orbit control task, and the common controllers can be used to complete the task by adding the transient process.

Keywords: orbit control; rendezvous and docking; transient process; golden section control

引言

随着航空航天技术的发展, 空间交会对接技术越来越受到各个国家的高度重视, 它是一个国家航天技术发展水平的重要标志, 交会对接是实现航天

站、航天飞机、太空平台和空间运输系统的装配、回收、补给、维修、航天员交换及营救等在轨道上服务的先决条件。交会对接分为远程导引段、近程导引段和最后逼近段, 其中近程导引段分为寻的段和接近段, 接近段的任务是捕获对接走廊, 接近段安排了 400 m 和 140 m 两个停靠点, 对于这个阶段需要进行高精度轨道控制^[1]。

在圆轨道下, 通过轨道坐标系可建立交会对接的动力学模型^[2], 即 Hill 方程。由 Hill 方程可知, 追踪航天器相对于目标航天器的相对运动可以分



收稿日期: 2014-05-10 修回日期: 2014-10-01;
基金项目: 国家自然科学基金(51275500); 机械系统与振动国家重点实验室开放基金课题(MSV201502); 中国科学院青年创新促进会(2012321);
作者简介: 李凯凯(1990-), 男, 安徽宿州, 硕士生, 研究方向为空间交会对接控制; 尚伟伟(1981-), 男, 江西南昌, 副教授。

<http://www.china-simulation.com>

• 2784 •

解为轨道平面内以及垂直轨道平面的两个相互独立的运动, 其中轨道平面内的运动相互耦合^[2]。此外, 由于执行机构安装在追踪器本体, 它的偏心安装加上推力的非线性因素等, 使得被控对象呈现非线性时变和多变量耦合的特点, 从而采用固定控制结构的 PID(Proportion-Integral-Derivative)控制和在线辨识参数的自适应控制方法均很难达到在接近段的控制要求^[3]。为了实现交会对接控制任务, 文献[4]提出了非线性黄金分割的控制方法, 这种控制器的比例系数会随着系统误差的变化而变化: 小误差对应大的比例增益, 而大的误差对应小的比例增益, 通过这种控制方法使得系统具有加速段、保持段和减速段, 这样的控制方法有利于节省燃料, 并且可以减弱速度耦合的作用^[4]。但是这种控制方法需要对系统进行特征建模, 并用梯度下降法对模型进行参数估计, 而且从文献[3]中可知, 这种非线性黄金分割的控制方法必须在控制中额外的引入微分项和限幅, 才能达到控制要求, 这使得控制变得复杂化, 另外, 由于额外引入微分项和限幅, 这有可能导致系统出现噪声和震荡的现象, 工程上的可行性也会受到限制。随着交会对接的发展, 燃料消耗、交会轨道的平滑度以及交会时间受到越来越多的重视^[5-6]。文献[5]提出了一种鲁棒输出跟踪控制器来进行交会对接轨道控制, 然而从仿真结果可以看出系统存在超调等问题, 使得可行性受到限制。文献[6]基于线性协方差分析方法, 建立自主交会闭环控制偏差分析模型, 而后采用非支配排序多目标遗传算法(NSGA-II)对轨道进行研究, 此方法控制复杂, 而且由于误差是直接由初始值和目标值比较获得, 所以造成初始误差大, 控制精度低等问题。因此, 在空间交会停靠控制任务上, 设计一种简单而又实用的控制策略具有十分重要的意义。

为此, 本文在空间交会停靠现有控制方法的基础上引入了过渡过程, 通过让系统的实际输出跟踪过渡过程来降低误差, 从而减小系统的超调, 提高系统的鲁棒性。文献[7-10]提出了过渡过程的概念,

过渡过程具有以下优点: 首先, 通过安排过渡过程可以很好的解决超调与快速性之间的矛盾; 其次, 扩大了误差反馈增益和误差微分反馈增益的选取范围, 从而使系统整定更为容易; 最后, 事先安排过渡过程使给定的反馈增益所能适应的对象参数范围大为扩大, 即控制器的鲁棒性更为加强^[7]。正因为上述优点, 过渡过程已经在实际中得以广泛应用, 并取得了很好的控制效果, 如同步电机调速系统^[11], 航天器姿态控制^[12], 并联机器人控制^[13]等, 然而这些文献中的过渡过程只有加速段和减速段, 满足不了空间停靠控制需要同时具有加速段、保持段和减速段的要求。

针对现有过渡过程存在的问题, 本文设计了一种包含保持段的过渡过程用于空间交会对接的轨道控制。首先, 在文献[7-8]的基础上重新提出了一种过渡过程, 此过渡过程具有加速度、保持段和减速段, 可以很好的满足空间停靠控制对速度的要求, 并且有利于节省燃料。其次, 在黄金分割控制器, 非线性黄金分割控制器, PID 控制器的基础上对空间交会轨道控制加入了此过渡过程, 通过在此过渡过程的前提下对空间交会轨道控制设计了相应的控制器, 从降低控制器要求和扩大控制器选择范围两个方面完成了相应的仿真实验, 仿真实验给出了系统的输出曲线和相应的控制律。从降低控制器要求验证实验的输出曲线可以发现两种控制器都可以以高精度平稳的方式完成空间交会停靠任务, 系统稳态误差非常小, 并将输出曲线与文献[4]的结果进行了对比可知在加入本文设计的过渡过程后可以使原来满足不了控制要求的控制器也能达到控制要求。从扩大控制器选择范围的验证实验可以得到, 基于过渡过程的很多控制器都可以满足系统的控制要求, 并且能够以高精度平稳的方式实现轨道控制。最后, 由实验结果进一步得知加入过渡过程后的这些优点可以使空间交会轨道控制选择一个相对简单并且工程中比较容易实现的控制器来进行轨道控制, 从而简化控制系统, 降低控制难度, 节约燃料成本。

1 交会对接动力学模型

假设航天器为刚体, 目标航天器在圆轨道或者近圆轨道上飞行, 则目标航天器的轨道角速度近似为常值, 记为 ω , 在轨道坐标系中的 Hill 方程为:

$$\begin{cases} \ddot{x} - 2\omega\dot{y} = a_x \\ \ddot{y} + 2\omega\dot{x} - 3\omega^2 y = a_y \\ \ddot{z} + \omega^2 z = a_z \end{cases} \quad (1)$$

其中: a_x, a_y, a_z 为各坐标轴方向上对应的加速度。由式(1)可以看出, x 轴和 y 轴之间存在速度耦合。取采样周期为 Δt , 对耦合平面内的二阶对象按照前向差分与后向差分相结合的离散方法进行离散化^[4], 离散化后的模型可记为:

$$\begin{cases} x(k+1) = 2x(k) - x(k-1) + \\ \quad 2\omega\Delta t(y(k) - y(k-1)) + \Delta t^2 u_x(k) \\ y(k+1) = (2 + 3\omega^2 \Delta t^2)y(k) - y(k-1) - \\ \quad 2\omega\Delta t(x(k) - x(k-1)) + \Delta t^2 u_y(k) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $u_x(k), u_y(k)$ 为 k 时刻各个坐标轴方向上对应的控制律。

2 过渡过程的设计

对于经典 PID 控制而言, 其最主要的特点是利用目标与实际输出之间的误差来设计控制器, 而不是靠对象的输入—输出关系, 即不是靠对象的输入—输出模型来决定控制策略^[7]。基于误差反馈来消除误差是 PID 控制的精髓, 但直接取目标值与实际值之间的误差作为误差反馈并不是十分的合理, 因为利用这种方式进行控制器的设计常常会使初始误差太大, 导致初始控制力太大而使系统出现超调的现象。因此, 在控制对象所能承受的能力范围内, 根据控制目标的要求安排一个合适的过渡过程, 让系统的实际输出跟踪过渡过程来降低初始误差, 从而减小超调提高系统的鲁棒性。

过渡过程安排就是在被控量的初始状态与最终目标状态之间, 根据系统所能承受的能力, 将被

控制量按时间段, 将最终目标量值细化分级为逐步到达最终状态的多个目标的设计工作^[9]。对于空间交会停靠中的位置保持控制, 目的是使系统的速度曲线有加速段、保持段和减速段, 这样的速度变化曲线有利于节省燃料, 并且能够减弱速度耦合的作用^[4], 然而文献[7-8]中的过渡过程只有加速段和减速段, 因此满足不了空间停靠位置的控制要求, 安排过渡过程有很多方法, 在本文中采用的过渡过程的具体算法如下:

$$tp(t) = \begin{cases} c - \frac{h}{100}t^2, & 0 < t \leq 50 \\ c - (ht - 25h), & 50 < t \leq 150 \\ c - (-\frac{h}{100}t^2 + 4ht - 250h), & 150 < t \leq 200 \\ v, & t > 200 \end{cases} \quad (3)$$

$$tv(t) = \begin{cases} -\frac{h}{50}t, & 0 < t \leq 50 \\ -h, & 50 < t \leq 150 \\ \frac{h}{50}(t - 200), & 150 < t \leq 200 \\ 0, & t > 200 \end{cases} \quad (4)$$

其中: $tp(t)$ 为过渡过程输出函数; $tv(t)$ 为过渡过程速度函数, $h = (c - v) / 150$; c 为系统初始值, v 为系统目标值。

对于空间交会停靠系统, x 轴的初始位置 $c = 410$ m, 目标位置 $v = 400$ m, 则其过渡过程如图 1~2 所示, 图 1 表示过渡过程输出曲线, 从图中可以看出此过渡过程可以使追踪器从初始位置以平滑的 S 型曲线的方式过渡到目标位置, 从而可以平稳的实现空间停靠位置控制。图 2 给出了过渡过程对应的速度曲线, 从中可以看出此过渡过程分为加速段, 匀速段和减速段, 这种安排可以很好的满足空间停靠控制对速度的要求。

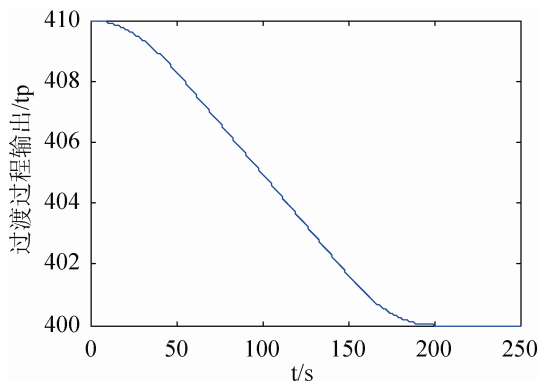


图 1 过渡过程输出曲线

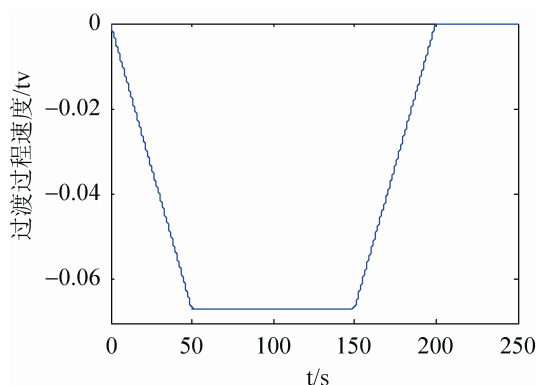


图 2 过渡过程速度曲线

3 空间交会对接轨道控制器的分析

对于式(2)所示的动力学模型而言, 由于 x 轴和 y 轴之间存在速度耦合, 所以很难控制, 通常可以把耦合项作为干扰来处理, 例如对于式(2)的

$$x(k+1) = 2x(k) - x(k-1) + 2\omega\Delta t(y(k) - y(k-1)) + \Delta t^2 u_x(k) \quad (5)$$

而言, 可以把 $2\omega\Delta t(y(k) - y(k-1))$ 作为干扰项, 令:

$$r(k) = 2\omega\Delta t(y(k) - y(k-1)) \quad (6)$$

则(5)式可化为

$$x(k+1) = \alpha_1(k)x(k) + \alpha_2 x(k-1) + r(k) + \beta_0(k)u(k) \quad (7)$$

式中, $\alpha_1(k)$, α_2 , $\beta_0(k)$ 为(5)式对应的系数; $u(k)$ 为该系统的控制律。

对于方程(7)表示的二阶系统, 为了使系统稳定, 可设计黄金分割控制器^[4]为

$$u(k) = -[L_1\alpha_1(k)e(k) + L_2\alpha_2(k)e(k-1)] / \beta_0(k) \quad (8)$$

式中, 黄金分割反馈系数 $L_1 = 0.382$, $L_2 = 0.618$; 误差 $e(k) = x(k) - x_r(k)$, $x_r(k)$ 为系统目标值。

虽然黄金分割控制器能够使(7)式所示的二阶系统闭环稳定, 但是它具有一定的局限性, 有时不能够满足系统的控制要求, 比如在空间交会停靠控制任务中, 要求追踪器具有加速段, 匀速段和减速段, 但在这里黄金分割控制器满足不了追踪器的这些要求。为此, 吴宏鑫院士在黄金分割控制器的基础上设计出非线性黄金分割控制器^[4]

$$u(k) = -[K_p(k, e(k))e(k) + k_d(k)(e(k) - e(k-1))] \quad (9)$$

其中: 误差 $e(k) = x(k) - x_r(k)$, $x_r(k)$ 为系统目标值; 控制器的微分增益 $k_d(k) = -L_2\alpha_2(k) / \beta_0(k)$;

非线性比例增益为 $K_p(k, e(k)) = \frac{k_p(k)}{\eta_1 |e(k)|^\mu + \eta_2}$, $k_p(k) = (L_1\alpha_1(k) + L_2\alpha_2(k)) / \beta_0(k)$ 。控制器增益中的参数为: η_1 , η_2 为正常数; μ 为常数, 黄金分割反馈系数 $L_1 = 0.382$, $L_2 = 0.618$ 。

非线性黄金分割控制器的非线性比例系数 $K_p(k, e(k))$ 的变化与 $|e(k)|$, η_1 , η_2 , μ 有关, 通过改变 μ 的正负号可以改变非线性比例系数 $K_p(k, e(k))$ 与 $|e(k)|$ 的正反比例系数的关系, η_1 可以调整 $|e(k)|$ 对 $K_p(k, e(k))$ 作用的大小, 同时调整 η_1 , η_2 可以调整 $K_p(k, e(k))$ 变化的分界点。由于非线性黄金分割控制器的上述特性使得它具有在系统小误差时能够产生大的比例增益, 而大的误差对应小的比例增益, 通过这种控制方法可以在空间交会停靠任务中追踪器具有加速段、保持段和减速段, 从而很好的达到系统的控制要求。

由第 2 节可知, 直接用目标值减去被控量当前的实际值作为误差进行误差反馈控制常常会使系统初始控制量较大, 容易出现超调, 而过渡过程可以很好的解决这些问题, 其核心思想就是通过对目标值进行细化成每个时刻目标值, 通过每一时刻的实际值减去对应的每个时刻的目标值作为误差进行误差反馈控制, 从而使控制更合理。

对于黄金分割控制器而言,联合(3)式与(8)式,把式(8)中的 $e(k) = x(k) - x_r(k)$ 改为

$$e(k) = x(k) - tp(k) \quad (10)$$

此时,黄金分割控制器就成为基于过渡过程的黄金分割控制器。对于非线性黄金分割控制器采用同样的方式可变成基于过渡过程的非线性黄金分割控制器。

由(10)式可知,由于把误差变为每个时刻的实际值与对应时刻的目标值进行相减计算,这样就把过渡过程作为了系统的参考输入,从而使每个时刻的误差变得非常小,极大的减小了控制律,使得系统的输入输出变得更加平缓,进而使系统的控制变得更加简单容易。

4 实验仿真

设空间交会轨道为圆或者近圆轨道,轨道角速度 $\omega = 0.001$, 对于空间交会停靠任务,航天器的初始状态为(410, -0.0123), 单位为 m, 停靠点位置为(400, 0), 单位为 m, 则由公式(3), (4)可知安排过渡过程的初始参数为: x 轴的初始位置 $c_x = 410$ m, 目标位置 $v_x = 400$ m; y 轴的初始位置 $c_y = -0.0123$ m, 目标位置 $v_y = 0$ m。

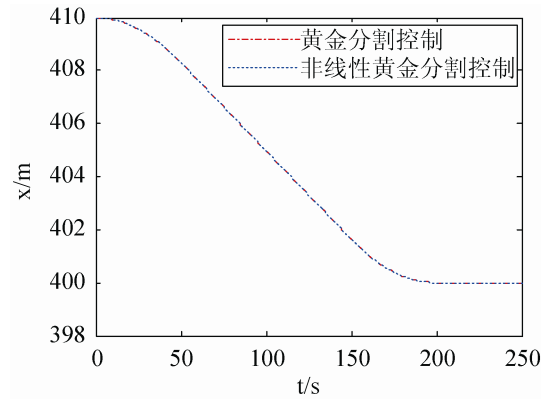
取采样周期为 0.05 s, 设位置测量误差为 0.1 m, 速度测量误差为 0.01 m/s。实验仿真部分针对在空间交会停靠控制任务中加入过渡过程可以降低系统对控制器的要求,以及扩大控制器的选择范围进行了 4.1 和 4.2 这两部分仿真验证实验。

4.1 降低控制器要求验证实验

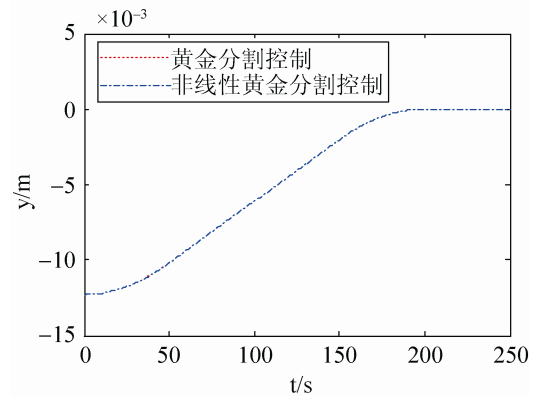
在使用公式(3), (4)所示的过渡过程的前提下,利用第 3 节所设计的基于过渡过程的黄金分割控制器以及基于过渡过程的非线性黄金分割控制器进行空间交会停靠控制仿真,并将仿真结果与文献[4]进行比较。

根据第 3 节所设计的基于过渡过程的非线性黄金分割自适应控制器的特征,取 x 轴和 y 轴的参数都为: $\mu = 1$, $\eta_1 = 1$, $\eta_2 = 0.9$ 。

仿真如图 3 所示,图中(a), (b)分别表示在基于过渡过程的黄金分割控制器以及基于过渡过程的非线性黄金分割控制器控制下的系统 x , y 轴输出曲线。



(a) x 轴输出曲线



(b) y 轴输出曲线

图 3 基于过渡过程的黄金分割控制和基于过渡过程的非线性黄金分割控制下的输出曲线

从上述的仿真结果可以看出基于过渡过程的黄金分割控制器和基于过渡过程的非线性黄金分割控制器都可以满足空间交会停靠控制的任务要求,可以使系统以高精度平稳的 S 型曲线方式从初始值达到目标值,而且基于过渡过程的黄金分割控制器和基于过渡过程的非线性控制器的控制效果相同,并且由于加入了过渡过程致使期望的控制律一样,从而致使这两个控制器所表现出的控制律也大致相同,而在文献[4]中,只有非线性黄金分割控制器才能满足空间停靠控制任务的要求,自适应(即黄金分割自适应)控制器满足不了空间停靠控

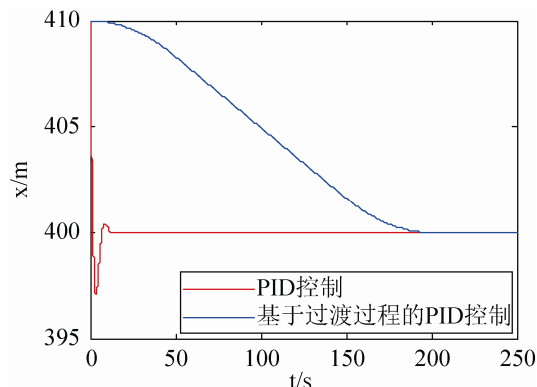
制任务的要求; 从上述仿真得知该系统到达目标值时两个控制器的输出稳态误差都为 0, 而在文献[4]中可以看出满足控制要求的非线性黄金分割的控制结果存在稳态误差, x 轴的稳态误差为 0.041 9 m, y 轴的稳态误差为 0.06 m, 其稳态误差远远大于本文的稳态误差。因此, 通过上述实验可以看出在空间交会停靠控制中加入过渡过程之后所设计的控制器大大降低了系统的稳态误差, 使稳态误差为 0, 并且能以高精度平稳的 S 型曲线方式完成控制任务, 另外可以使文献[4]不能满足控制要求的控制器也可以满足系统的控制要求, 而且控制效果表现良好, 所以在空间交会停靠控制系统中加入过渡过程后降低了系统对控制器的要求, 提高了系统的高精度平稳性能。

4.2 扩大控制器选择范围验证实验

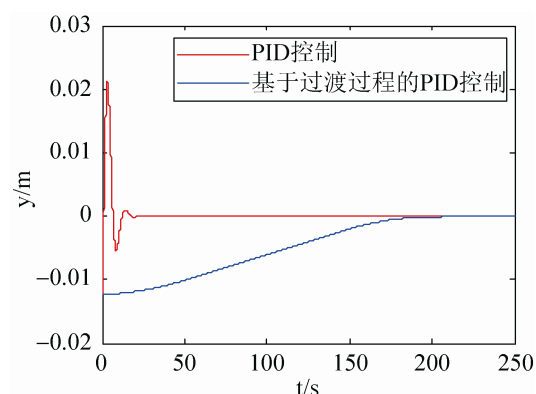
在 4.1 节的基础上, 通过利用第 2 节所设计的过渡过程设计出基于过渡过程的增量式 PID 控制器来验证在空间交会停靠控制任务中加入过渡过程之后多种控制器都可以达到控制要求, 从而扩大了控制器的选择范围。

仿真如图 4 所示, 图中(a), (b)分别表示在不加过渡过程的增量式 PID 控制器和基于过渡过程的增量式 PID 控制器控制下的系统 x 轴和 y 轴的输出曲线。

对于空间交会停靠控制而言不能使控制过快, 因为控制过快需要消耗大量的燃料, 而且控制过快不利于应对一些突发事件, 从图 4 可以看出, 在不加入过渡过程之前 PID 控制由于存在超调以及收敛时间太快而满足不了控制要求, 而通过加入第 2 节提出的过渡过程所设计的这种简单的基于过渡过程的增量式 PID 控制器可以以高精度平稳的 S 型曲线方式完成控制任务。从仿真得知基于过渡过程的增量式 PID 控制器的 x 轴输出稳态误差为 0.6×10^{-3} m, y 轴的稳态误差为 0.1×10^{-4} m, 远远小于文献[4]所得到的稳态误差。



(a) x 轴输出曲线



(b) y 轴输出曲线

图 4 基于过渡过程的增量式 PID 控制下的输出

可见, 通过加入本文第 2 节提出的过渡过程所设计的控制器能够大大地减小空间交会轨道控制系统的稳态误差, 提高系统的鲁棒性, 适应性, 能使原本达不到控制要求的控制器也能达到要求, 降低了空间交会轨道控制对控制器的要求, 从图 3—图 4 可以看出这几种基于过渡过程的控制器都可以满足空间交会停靠控制的控制要求, 从而使控制器的选择性变得多样化, 扩大了控制器的选择范围。

5 结论

本文在空间交会对接圆轨道控制任务中, 根据控制任务的要求, 在轨道坐标系下建立了动力学模型, 并对其进行离散化, 然后对空间交会轨道控制引入过渡过程, 通过在本文提出的过渡过程的前提下, 对空间交会轨道控制设计了 3 种控制器, 并进

行仿真。仿真结果表明:

1. 通过安排本文提出的过渡过程可以很好的以高精度平稳的 S 型曲线方式完成空间交会对接轨道控制任务,而且能够减小空间交会轨道控制系统的稳态误差,提高系统的鲁棒性,适应性。

2. 安排本文提出的过渡过程能够使原来不能满足控制要求的控制器也可以达到精确平稳的控制要求,从而降低空间交会轨道控制系统对控制器的要求,而且由于安排了过渡过程致使期望的控制律已知,这样通过设计不同控制器其表现出来的控制律也会大致相同。

3. 安排本文提出的过渡过程能够使一些简单的控制器也能以高精度平稳的方式完成空间交会轨道控制任务,从而扩大控制器的选择范围,设计一个相对简单并且工程实践中可行性比较好的控制器对此系统进行控制,从而简化整个控制系统,减少控制难度,提高其在工程实践中的可行性,大大的节约了燃料的消耗和成本。

通过以上结论可知在交会对接的控制过程中安排过渡过程具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 胡军, 解永春, 张昊, 等. 神舟八号飞船交会对接制导、导航与控制系统及其飞行结果评价 [J]. 空间控制技术与应用, 2011, 37(6): 1-13.
- [2] 吴宏鑫, 胡军, 解永春. 基于特征模型的智能自适应控制 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009.
- [3] 吴宏鑫, 胡海霞, 解永春, 等. 自主交会对接若干问题 [J]. 宇航学报, 2003, 24(2): 132-143.
- [4] 吴宏鑫, 王颖, 解永春. 非线性黄金分割自适应控制 [J]. 宇航学报, 2002, 23(6): 19-26.
- [5] Xuebo Yang, Yuming Bo, Yurong Liu, *et al.* Output Tracking Control for Autonomous Spacecraft Rendezvous [C]// IEEE Conf. on Decision and Control, Shanghai, China, Dec. 2009. USA: IEEE, 2009: 5227-5232.
- [6] Li Jiuren, Li Haiyang, Tang Guojin. Optimal Multi-Objective Trajectory Design based on Close-Looped Control for Autonomous Rendezvous [J]. Science China-Technological Sciences (S1674-7321), 2011, 54(11): 3091-3097.
- [7] 韩京清. 自抗扰控制技术-估计补偿不确定性因素的控制技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [8] 黄焕袍, 万晖, 韩京清. 安排过渡过程是提高闭环系统“鲁棒性、适应性和稳定性”的一种有效方法 [J]. 控制理论与应用, 2001, 18(增 1): 89-94.
- [9] 郭赣, 朱熙. 基于过渡过程安排的 PID 控制器设计 [J]. 宇航学报, 2012, 33(7): 930-935.
- [10] Han Jingqing. From PID to Active Disturbance Rejection Control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2009, 56(3): 900-906.
- [11] 彭露群, 解仑, 李崇坚, 等. 自抗扰控制器在同步电机调速系统中的应用 [J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(1): 107-111.
- [12] 吴忠, 黄丽雅, 魏孔明, 等. 航天器姿态自抗扰控制 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1617-1622.
- [13] 赵振民, 刘锋, 孔民秀, 等. 高速并联机械手臂的自抗扰控制算法研究 [J]. 电机与控制学报, 2011, 15(1): 98-104.
- [14] Chang W D, Shih S P. PID Controller Design of Nonlinear Systems Using an Improved Particle Swarm Optimization Approach [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation (S1007-5704), 2010, 15(11): 3632-3639.
- [15] 丁锋. 系统辨识新论 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 120-121.
- [16] Zhang R D, Wu S, Lu R Q, *et al.* Predictive Control Optimization based PID Control for Temperature in an Industrial Surfactant Reactor [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems (S0169-7439), 2014, 13: 48-62.
- [17] Ho H L, Rad A B, Chan C C, *et al.* Comparative Studies of Three Adaptive Controllers [J]. ISA Transactions (S0019-0578), 1999, 38(1): 43-53.

(上接第 2783 页)