

基于积分反推原理的天线定向伺服技术研究

褚立新 林辉

(西北工业大学, 西安 710072)

摘要 针对卫星天线定位伺服系统, 提出了基于有限转角力矩电机(LATM)直接驱动伺服控制系统, 并设计了一种简单有效的基于积分反推原理的伺服控制器, 利用Lyapunov直接法稳定理论证明了系统的全局稳定性。通过数字仿真, 验证了该控制器对外部扰动及系统参数变化具有较强的鲁棒性。

关键词 卫星天线 定向 控制器 力矩电机 鲁棒性

1 引言

在卫星通信系统中, 卫星与卫星、卫星与地面站之间进行通信时, 两者的天线需要精确指向对方以保证通信的质量, 这就需要及时调整卫星通信天线的指向, 保证信号接受和发送始终处于最佳状态。

目前在星上已采用的驱动装置有两类: 第一类为同步电机加谐波减速器方式, 第二类为同步电机直接驱动方式。前者驱动力矩大, 但功率效率低; 后者结构简单, 可靠效率高, 但驱动力矩小。文献[1]中所讲到的点波束天线伺服定位系统采用两相混合式步进电机加谐波减速器方式, 由于步进电机低速状态下转矩脉动比较大, 导致伺服系统低速匀速时存在抖动现象。并且谐波减速器存在间隙、传动效率和刚度低, 空间机械润滑等一系列问题。

无槽环形绕组有限转角力矩电机(LATM)运行在一定角度范围内, 可直接驱动负载作快速运动和准确定位, 具有惯量低、加速度高、散热好、维护少及可靠性高等特点, 而且只有单相绕组、无需电子换相装置、控制简单、无齿槽效应、电机低速运行平滑、无力矩波动。虽然其驱动力矩不如第一类驱动装置, 影响了其在航天器中的应用范围, 但凭借优良的低速运行性能, 已被广泛应用于国外各种航天器光学扫描、伺服阀、小型天线定位、机械臂等驱动系统中, 如印度在其INSAT-2卫星高分辨率辐射计扫描系统中采用了两款LATM, 一种最大力矩为 $0.2\text{ N}\cdot\text{m}$, 恒力矩范围 $\pm 60^\circ$; 一种最大力矩 $0.35\text{ N}\cdot\text{m}$, 恒定力矩范围 $\pm 18^\circ$ ^[2]。

针对文献[1]本文提出了基于LATM的卫星天线直接驱动定向伺服系统, 直接驱动消除了传动间隙, 可以实现高精度定向。伺服控制器采用积分反推(Back-stepping)方法设计, 通过逐步修正算法来设计镇定控制器, 按照Lyapunov稳定性理论证明反馈系统是全局稳定的, 系统对外部扰动及系统参数变化具有较强的鲁棒性。

2 天线定向伺服系统简介

天线定向伺服系统结构图如图1所示。天线定向伺服系统是个位置跟随系统，伺服控制器接受外部系统的指令从而控制天线运动，并可将天线运行状况信息发送到外部系统。天线有俯仰、方位两个自由度，俯仰和方位 LAMT 直接驱动各自旋转轴上的惯量负载。位置传感器采用高精度 19 位双通道旋转变压器 + RDC 轴角解码模块组合，直接产生位置数字信号，转换精度高、不易受到干扰，RDC 模块可输出速度模拟信号。本文只讨论俯仰轴定向伺服系统。

天线定向伺服系统主要指标^[1]：

- 1) 转动范围为 $-8^\circ \sim +8^\circ$ ；
- 2) 误差范围为 $\pm 0.05^\circ$ ；
- 3) 系统工作方式为 $0.2(^{\circ})/s$ 匀速运行。

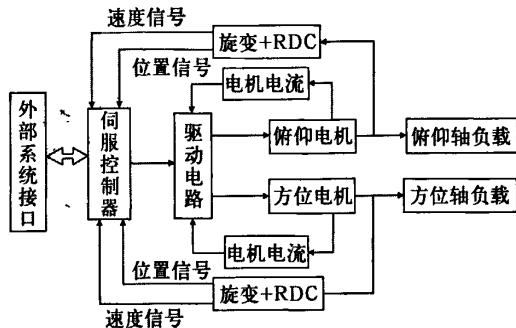


图1 天线定向伺服系统结构图

3 无槽环形有限转角力矩电机(LATM)的数学模型及特性

(1) 无槽环形绕组 LATM 数学模型

假设电机无饱和并忽略铁损，则 LATM 的动态方程可表示为

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di}{dt} &= u - Ri - k_b \omega \\ J \frac{d\omega}{dt} &= T_e - B\omega - T_f \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega \\ T_e &= k_t i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 u 、 i 、 R 、 L 分别为电机绕组的电压、电流、电阻和电感； θ 、 ω 分别为转子的转角和角速度； J 为折合到电机轴上的转动惯量； T_e 为电磁转矩； T_f 为负载摩擦转矩； B 为粘滞摩擦系数； k_b 为反电势常数； k_t 为力矩常数。

(2) 无槽环形绕组 LATM 特性^[2]

LATM 特性曲线如图 2 所示。无槽环形绕组 LATM 电磁转矩 T_e 与电枢电流基本呈线性关系，且在一定的转子转动角度范围内保持恒定，并随着角度 θ 的进一步增大而逐渐趋于零，恒转矩范围 Q 的大小取决于每极电枢绕组的长度 a 及极弧宽度 φ ，即

$$Q = (\varphi - \theta)/2 \quad (2)$$

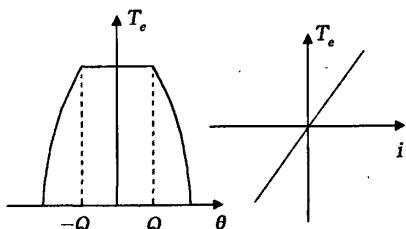


图2 $T_e-\theta$ 及 T_e-i 特性曲线

4 基于积分反推原理的非线性伺服控制原理

4.1 积分反推控制律^[3]

对于天线定向伺服系统，其运动动力学二阶模型为

$$\left. \begin{aligned} J \frac{d\omega}{dt} &= T_e = T_e - B\omega - T_f \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

定义位置跟踪误差为

$$e_1 = \theta_{ref} - \theta \quad (4)$$

式中 θ_{ref} 为位置参考信号。由式(4)，有

$$\dot{e}_1 = \dot{\theta}_{ref} - \dot{\theta} = \dot{\theta}_{ref} - \omega \quad (5)$$

设 ω_{ref} 为理想“虚拟”控制输入，令

$$\omega_{ref} = c_1 e_1 + \lambda_1 \chi_1 + \dot{\theta}_{ref} \quad (6)$$

式中 c_1 和 λ_1 为正实数； $\chi_1 = \int_0^t e_1(\tau) d\tau$ 为位置误差的积分。引入新的状态变量 e_2 ：

$$e_2 = \omega_{ref} - \omega = c_1 e_1 + \lambda_1 \chi_1 + \dot{\theta}_{ref} - \omega \quad (7)$$

由式(5)~(7)有

$$\dot{e}_1 = -c_1 e_1 - \lambda_1 \chi_1 + e_2 \quad (8)$$

考虑到天线均按 $0.2(^{\circ})/s$ 匀速运行，在匀速运动过程 $\ddot{\theta}_{ref} = 0$ ，由式(7)、(8)得

$$\dot{e}_2 = c_1(-c_1 e_1 - \lambda_1 \chi_1 + e_2) + \lambda_1 e_1 - \frac{1}{J} T_c \quad (9)$$

选取力矩 T_c 为

$$T_c = J((1 + \lambda_1 - c_1^2)e_1 + (c_1 + c_2)e_2 - c_1 \lambda_1 \chi_1) \quad (10)$$

式中 c_2 为正实数。

则电磁力矩 T_e 为

$$T_e = J((1 + \lambda_1 - c_1^2)e_1 + (c_1 + c_2)e_2 - c_1 \lambda_1 \chi_1) + B\omega + T_f \quad (11)$$

由式(8)、(9)，有

$$\dot{e}_2 = -c_2 e_2 - e_1 \quad (12)$$

4.2 稳定性证明^[7]

选取闭环系统的 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} \lambda_1 \chi_1^2 + \frac{1}{2} (e_1^2 + e_2^2) \quad (13)$$

则由式(8)、(12)有

$$\dot{V} = -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 \leq 0 \quad (14)$$

$$V(\infty) - V(0) = -c_1 \int_0^\infty e_1^2(\tau) d\tau - c_2 \int_0^\infty e_2^2(\tau) d\tau \leq 0 \quad (15)$$

因为 Lyapunov 函数导数的非正性，保证了能量函数 V 是有界的和耗散的，系统内部所有信号都是

有界的, 可以推断 e_1 、 e_2 渐进收敛于零。

4.3 天线定向积分反推控制系统

天线定向伺服系统是一位置伺服系统, 同时对速度有匀速运动的限制。方位定向积分反推控制系统结构图见图 3 所示。

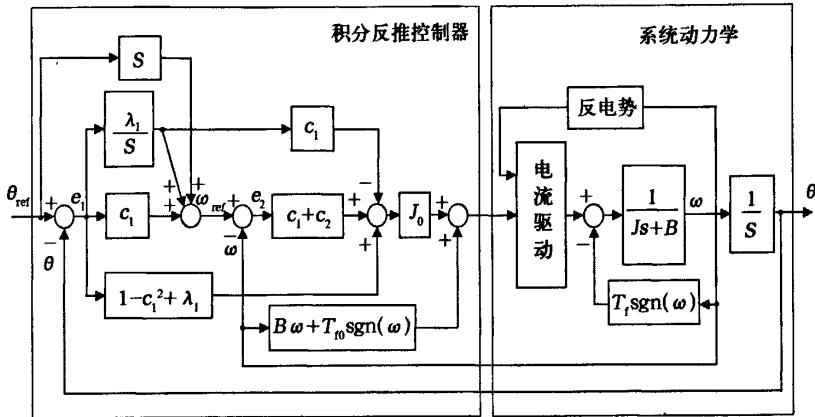


图 3 天线定向积分反推控制系统结构图

1) 其中 J_0 和 J_0 分别为系统名义负载摩擦力矩和转动惯量, $J_0 = 0.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $T_{f0} = [0.2 + 0.1 \exp(-30 \text{ abs}(\omega)/\pi)] \text{ sgn} \omega \text{ N} \cdot \text{m}$; T_f 和 J 分别为系统实际负载摩擦力矩和转动惯量。积分反推控制器采用数字控制, 为加快电流响应, 电流 PWM 驱动环节可采用模拟电路实现。

2) 同步电机加减速器天线定向伺服系统, 基本上只有位置环和电流环控制, 依靠位置环来实现定向; 而积分反推控制除位置环、速度环和电流环外, 还加入了参考信号速度前馈、位置误差前馈和位置误差积分前馈环节, 动、静态性能好, 提高了系统的抗干扰能力, 工程实现也比较容易。

3) LATM 工作在转矩控制方式(即电流控制方式), 选用 4 极 LATM, 恒转矩范围满足 $+8^\circ \sim -8^\circ$, 连续转矩 $1.87 \text{ N} \cdot \text{m}$, 最大转矩 $5.6 \text{ N} \cdot \text{m}$, 电机尺寸 $\phi 133 \text{ mm} \times 43 \text{ mm}$, $R = 9.7 \Omega$, $L = 0.012 \text{ H}$, $k_t = 0.5 \text{ N} \cdot \text{m/A}$, 粘滞摩擦系数 $B = 0.001 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ 。

4) 积分反推控制器参数: $c_1 = 40$, $c_2 = 960$, $\lambda_1 = 1$ 。

5 系统仿真研究

应用 MATLAB 对天线定向控制系统进行了仿真。在系统名义参数条件下进行了 $-8^\circ \sim +8^\circ$ 天线定向过程仿真, 在系统参数变化条件下进行了 $+8^\circ \sim -8^\circ$ 天线定向过程仿真(假设实际负载摩擦力矩 $T_f = [0.3 + 0.2 \exp(-30 \text{ abs} \omega/\pi)] \text{ sgn} \omega$, 实际转动惯量为 $J = 0.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 电机的力矩常数 k_t 下降 20%)。在 20s 和 82s 各加入 $+0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$, 持续时间为 1s 的干扰力矩。位置环采样周期取 0.01s, 速度环采样时间取 0.001s。仿真曲线见图 4~6。

从仿真结果可以看出, 积分反推控制器的控制性能良好, 对于 $-8^\circ \sim +8^\circ$ 和 $+8^\circ \sim -8^\circ$ 位置参考信号跟踪, 匀速运行和定位误差优于 0.015° , 匀速运动速度稳定度优于 1%, 对负载突变和系统

参数变化具有较强的鲁棒性。

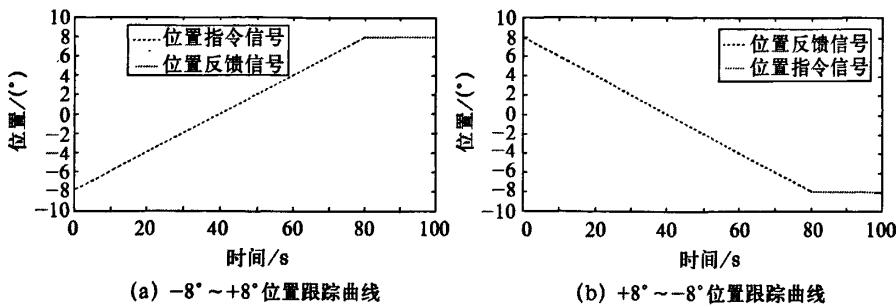


图4 位置跟踪曲线

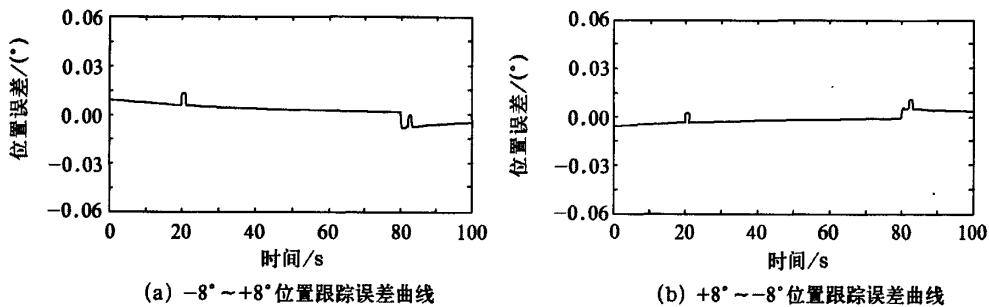


图5 位置跟踪误差曲线

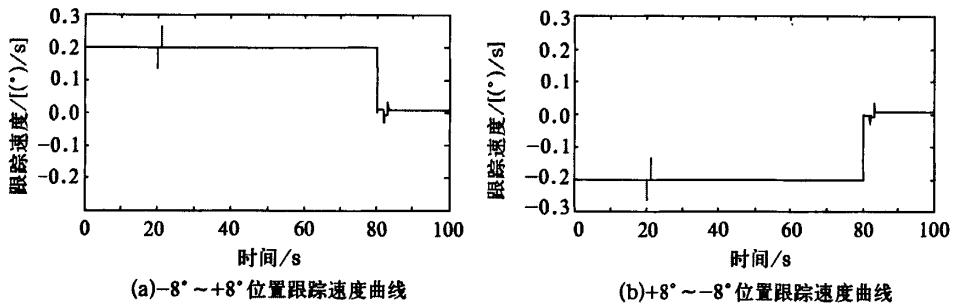


图6 位置跟踪速度

6 结论

基于 LATM 和积分反推原理的天线定向系统与文献[1]天线定向系统相比, 有以下特点:

- 1) 文献[1]天线定向系统靠步进电机基本步距角一步一步断续调节天线位置, 本系统采用高精度位置传感器可实现天线位置的连续调节, 定向精度高;
- 2) 采用直接驱动方式, 消除了减速器传动间隙非线性对指向精度的影响, 提高了传动效率和系统刚度, 结构简单, 可靠性高, 可以实现天线高精度定向控制;
- 3) LATM 优异的低速平稳运行特点保证了天线直接驱动定向过程中天线运转平稳;
- 4) 基于积分反推原理的控制器能够保证系统跟踪误差的全局渐进稳定性;
- 5) 控制算法简单、实时性好, 易于工程实现, 控制系统对外部扰动及参数变化具有较强的鲁棒性。

参 考 文 献

- [1] 扬培. Ka 点波束天线伺服系统[D]. 西安: 西北工业大学硕士论文, 2003.
- [2] MURALI KRISHNA P. Design and development of Brushless d. c. limited angle torquer for INSAT-II VHRR Scan Mirror Mechanism [D]. M. E. Thesis, Ahmedabad: Gujarat University, 1996.
- [3] KANELAKOPOULOS I, KREIN P T. Integral-action nonlinear control of induction motors [C]. Proceedings of the 12th IFAC World Congress, 1993: 251—2541.
- [4] TAYLOR D G. Nonlinear control of electric machines: an overview [J]. IEEE Control System Magazine, 1994, 14 (6): 41—511.
- [5] TAN H, CHANG J. Adaptive position control of induction motor systems under mechanical uncertainties [C]. Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Power Electronic and Drive Systems, 1999: 597—602.
- [6] KANELAKOPOULOS I, KOKOTOVIC P V, MORSE A S. Systematic design of adaptive controllers for feed-back linearizable systems [J]. IEEE Trans-Automation Control, 1991, 36 (11): 1241—1253.
- [7] 王家军, 赵光宙, 齐冬莲. 反推式控制在永磁同步电动机速度跟踪控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (8): 95—98.

作者简介

褚立新 1967 年生, 1989 年毕业于南京航空航天大学飞行器自动控制专业, 现为西北工业大学控制工程与科学专业在职博士研究生, 高级工程师, 研究方向为航空航天机电伺服系统智能控制与测试技术。

林 辉 1957 年生, 1992 年获西北工业大学控制理论与工程专业博士学位, 教授, 博士生导师。研究方向为高精度伺服控制、智能控制理论及应用。

Study of Antenna Pointing Servo System Based on Integral Back-stepping Scheme

Chu Lixin Lin Hui

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract A nonlinear controller based on back-stepping control with integral function was designed. The overall stability of the system was proved using Lyapunov function. Simulation results for the servo-system show that this controller has strong robustness to external disturbance and system parameter changes.

Key words Satellite antenna Pointing Controller Torque motor Robust

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>