

风云二号卫星地面控制系统自适应同步控制方法

郭力兵, 何剑伟, 汪毅, 杨海民, 胡上成
(中国卫星海上测控部 江阴 214431)

摘要: 针对风云二号 07 星测控实施过程中部分姿章联控参数未能正常执行的系统间时序控制不同步问题, 研究提出一种地面控制系统自适应同步控制方法, 分析卫星历史数据得到有效接收时间区间, 取所有有效接收时间区间的交集得到最终有效接收时间区间。经验证, 方法可有效解决系统间时序不同步的问题, 精度高, 控制效果好。

关键词: 卫星; 姿章联控; 自适应; 同步控制

中图分类号: V11 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2020)02-0055-05

Adaptive and synchronous control method for ground control system of FY-2 satellite

GUO Libing, HE Jianwei, WANG Yi, YANG Haimin, HU Shangcheng
(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: To solve the problem of the out of sequence control sync between systems caused by the joint control of attitude and nutation parameters failing to execute in the TT&C process of FY-2 07 satellite, the adaptive and synchronous control method for ground control system is proposed. We analyze the historical data to achieve the effectively receiving time intervals and take the intersection as the final result. It is proved that this method of high precision and good control effect can effectively solve the problem of the out of sequence control sync between systems, which is meaningful for the synchronous control of spin-stabilized satellites.

Key words: Satellite; Joint control of attitude and nutation; Adaptive; Synchronous control

引 言

风云二号自旋稳定卫星采用绕自旋轴旋转的方式保持其姿态稳定性, 其特点是在远地点变轨前因未抛掉尾部的远地点发动机而呈细长圆柱体结构, 纵横惯量比小于 1, 由星体内的液体及挠性部件引起的能量耗散会增大卫星章动角, 极端情况下章动发散将使卫星平旋, 导致整个卫星任务失败^[1,2]。

由于存在章动发散这一问题, 风云二号自旋稳定卫星一般采用自主章动控制, 用轴喷管实施, 保持卫星章动角小于阈值。但在建立远地点点火姿态过程中, 地面控制系统需要完成对卫星姿态的控制, 其也是通过轴喷管实施。为了防止地面控制系统在实施姿态控制过程中姿控脉冲扰乱星上自主章动控制, 需将卫星自主章动暂时切断, 而由地面控制系统在姿态控制的同时兼顾章动控制。这意味着地面控制系统在控制过程中需要剔除那些使章动过分发散的姿控脉冲, 最大限度地提高姿控效率, 这就是姿态章动联合控制, 简称姿章联控^[3-5]。姿章联控系统的主要原理就是控制星上轴喷管工作, 在调整卫星姿态的同时保证卫星章动角不增大或者不超出阈值。当章动角大于阈值时, 姿章联控系统预测并消除姿控脉冲中增大卫星章动的脉冲, 抑制章动发散^[6]。

在风云二号 07 星任务姿章联控实施过程中, 地面控制系统发送给基带的 100 多个姿章联控参数被基带设备拒收而未能执行, 使得控制时间延长约 2.8mins。针对部分姿章联控参数未能正常执行的问题, 本文通过分析历次风云二号卫星的历史数据并结合姿章联控参数计算产生的过程, 确认了姿章联控参数未能执行的原因, 是由于风云二号卫星地面控制系统控制时序与卫星基带设备能接收姿章联控参数的时间不同步。基于上述分析, 对地面控制系统进行改进, 研究提出一种风云二号卫星地面控制系统

自适应同步控制方法, 分析卫星历史数据得到有效接收时间区间, 取所有有效接收时间区间的交集得到最终有效接收时间区间, 解决了地面控制系统与星上控制系统时序不同步控制的问题。在风云二号 08 星任务中, 该方法成功解决了 07 星任务中姿章联控参数被基带设备拒收而未能执行的问题, 验证了方法的有效性。

1 姿章联控同步控制原理及方法

姿章联控系统由星上控制系统和地面控制系统两部分构成, 姿章联控系统原理如图 1 所示。星上控制系统包括太阳角计、红外地平仪、在过渡轨道段用于测量章动的加速度计、遥测发送和遥控接收终端、驱动线路以及执行机构。地面控制系统主要包括以下几个部分:

- ① 遥测遥控处理计算机: 用于地面姿章联控的参数计算和过程控制;
- ② 同步控制器: 用于发送控制脉冲;
- ③ 遥测接收设备: 用于遥测接收和解调, 将解调好的编码遥测数据和模拟遥测数据发送给遥测遥控处理计算机;
- ④ 遥控发送设备: 用于遥控指令发送, 即接收遥测遥控处理计算机的遥控指令, 将其调制发送给卫星。

对于地面控制系统而言, 姿章联控脉冲和姿控脉冲两种脉冲的时序关系如图 2 所示。姿章联控脉冲前沿为 τ_s , 后沿为 τ_r , τ_1 为姿章联控脉冲前沿至姿控脉冲前沿的时间间隔, τ_2 为姿控脉冲后沿至姿章联控脉冲后沿的时间间隔。假设姿章联控脉冲的脉宽为 $\Delta\tau$, 姿控脉冲的脉宽为 ΔT , 则 $\Delta\tau = \Delta T + \tau_1 + \tau_2$ 。为保证同步控制器生成的姿控脉冲能够完整地通过, 即姿控脉冲与章控器生成的姿章联控脉冲相“与”后不被截除, 姿章联控脉冲前沿 τ_s 应超前于姿控脉冲发出, 后沿 τ_r 滞后于姿控脉冲结束。当章动角大于阈值时, 且预测姿控脉冲将加大章动发散, 则置 $\Delta\tau$ 为 0, 使姿控脉冲无法通过, 从而抑制章动发散。

2 风云二号卫星同步控制问题分析及定位

针对部分姿章联控参数未能正常执行的问题, 分析 07 星任务记盘数据。统计基带设备执行完上一个姿控脉冲后的执行结果返回到地面控制系统的记盘时间 T_1 , 当前发送下一个自旋周期姿控脉冲时地面控制

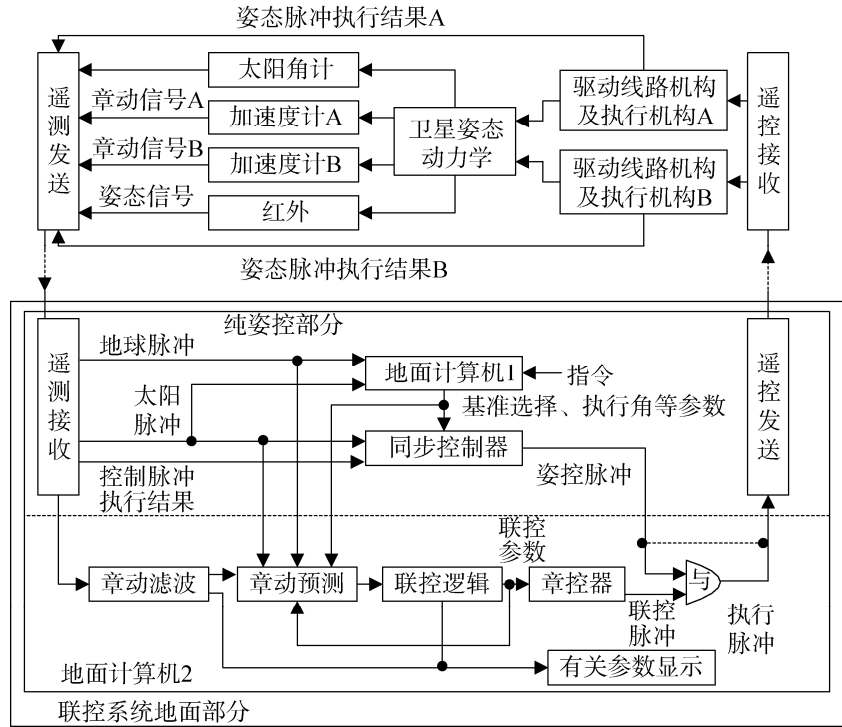


图 1 姿章联控系统原理

Fig. 1 Theory of the joint control of attitude and nutation

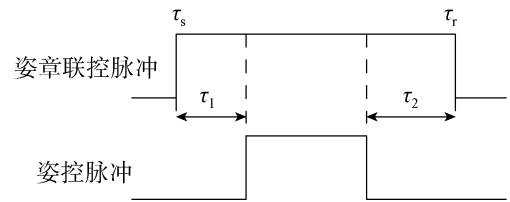


图 2 姿章联控脉冲和姿控脉冲的时序关系

Fig. 2 The time series relationship between the joint control of attitude and nutation pulse and the control of attitude pulse

系统的记盘时间 T_2 ，(T_1 、 T_2 均为北京时间)，计算 $\Delta T=T_2-T_1$ 。统计发现当 $\Delta T<30\text{ms}$ 时，地面控制系统预测产生的下一个自旋周期的姿控脉冲未被执行，未执行个数为 100 个左右。为验证上述结论，对风云二号 04 星、05 星、06 星的任务数据进行分析，发现当 $\Delta T<30\text{ms}$ 时，同样出现上述姿控脉冲未被执行的情况。

根据上述结论，结合姿章联控参数计算产生和执行的过程，分析认为产生上述姿控脉冲未被执行的原因有两种可能，一是地面控制系统同步控制器不具备姿控脉冲的缓存功能，二是星上控制系统基带设备未对地面控制系统发送的姿控脉冲进行缓存处理。

针对地面控制系统同步控制器是否具备姿控脉冲的缓存功能这一问题，对同步控制器工作原理进行分析，确定其是具备缓存功能的。为了确认上述结论，对历次任务数据进行分析比对排查发现，地面控制系统同步控制器对所有姿控脉冲均能正常发送，没有出现丢弃正常姿控脉冲的情况。分析比对排查中发现当部分脉冲 ΔT 为负值时，即当地面控制系统发送下一自旋周期的预测姿控脉冲时，同步控制终端当前姿控脉冲还未调制完毕，同步控制器也能正常发送姿控脉冲。

针对星上控制系统基带设备是否对地面控制系统发送的姿控脉冲进行缓存处理这一问题，与相关设计人员交流得出结论，风云二号 07 星基带设备不会对地面控制系统发送的姿控脉冲进行缓存处理。基带设备在姿章联控过程中，会处于同步控制运行或同步控制等待两种状态。当基带设备处于同步控制运行状态时，仅接收复合控制命令，即控制中断命令，而拒收其它遥控命令。当同步控制运行状态完毕，转入等待状态。因此，当地面控制系统发送基带姿控脉冲较早时，如果基带设备处于同步控制运行状态，由于未作缓存处理，可能会丢掉该脉冲，从而导致在风云二号 07 星任务中，地面控制系统同步控制器发送的部分姿控脉冲基带设备未能正常执行。

3 改进的地面控制系统

出于综合考虑，不增加星上控制系统基带设备对姿控脉冲缓存的功能。因此，只有对地面控制系统进行相关改进，找准基带设备处于等待状态的时间，发送姿控脉冲，从而达到缩短之前被延长的控制时间的目的。

通过分析风云二号卫星历史数据，比对地面控制系统和基带设备姿章联控处理时序关系，确定基带设备处于运行状态的时间段。经分析，基带设备能接收姿章联控的时间范围为 $250\text{ms}<T_3<1185\text{ms}$ ， T_3 为地面控制系统发送本自旋周期预测的姿章联控参数至基带设备当前自旋周期的姿控脉冲前沿的时间间隔。进一步统计分析发现，当 $450\text{ms}<T_3<900\text{ms}$ 时，基带设备正常执行接收到的姿控脉冲，即[450, 900]为基带设备的有效接收时间区间。

根据上述结论，对地面控制系统进行改进，增加自适应同步控制器后的地面控制系统原理如图 3 所示。当同步控制器基准时间采用编码遥测时间时，自适应同步控制器接收编码遥测数据，从而确定基带设备当前自旋周期的姿控脉冲前沿的时间，这样可以进一步确定是否发送姿控脉冲。下一节将具体介绍地面控制系统自适应同步控制方法。

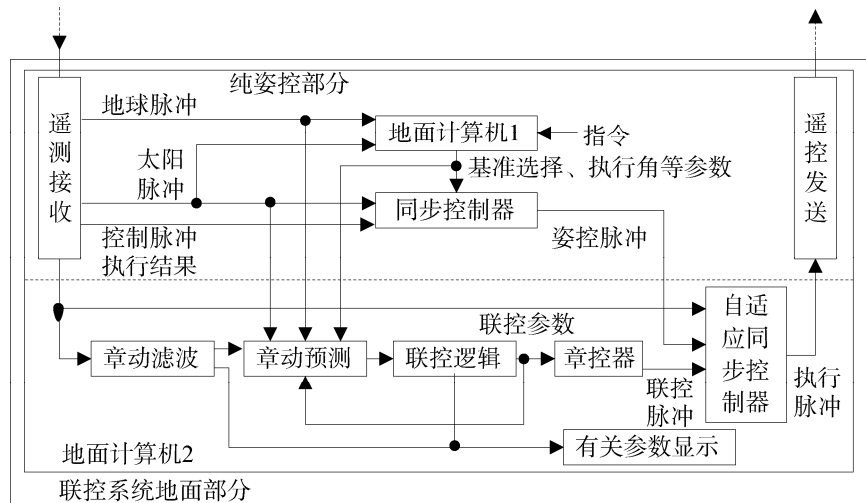


图 3 增加自适应同步控制器后的地面控制系统原理
Fig. 3 Theory of ground control system after adding the adaptive and synchronous control method

4 地面控制系统自适应同步控制方法及应用

自适应同步控制方法流程如图 4 所示。自适应同步控制器接收编码遥测数据驱动, 获取编码遥测数据中的加速度计、肼瓶的温度、压力等参数, 然后对 12 个加速度计进行卡尔曼滤波处理计算章动角速度。当收到姿控脉冲后, 根据当前收到的基准时刻, 预测下一自旋周期姿控脉冲的前沿时刻。随后根据计算出的姿控脉冲预测该脉冲所产生的推力效果即章动角速度, 由章动角速度计算出卫星的章动角。如果预测脉冲计算得出的章动角小于章动阈值, 则说明该预测脉冲发送后不仅能够调整卫星姿态, 而且不会使卫星的章动增大; 如果计算得出的章动角大于章动阈值, 则说明该预测脉冲发送后会使得卫星的章动增大, 那么该预测脉冲必须删除, 即脉冲前沿时刻取当前北京时间, 姿控脉冲的脉宽置为 0。阈值是可以灵活设定的, 风云二号卫星中设置为 0.7° 。姿控脉冲预测产生后, 取当前北京时间, 计算姿控脉冲前沿时间减去当前北京时间的时间间隔, 根据时间间隔判断是否发送姿控脉冲。如何确定姿控脉冲的发送时间, 使其与基带设备等待状态同步, 避开基带设备拒收的时间范围是缩短控制时间的关键。本自适应方法在很多领域得到应用^[7-13], 通过该方法得到有效接收时间区间。在最终有效接收时间区间内发送姿控脉冲, 可以确保基带设备接收姿控脉冲并正常执行。

地面控制系统自适应同步控制方法在风云二号卫星控制处理软件中已经得到很好的应用。经过风云二号 08 星任务验证, 该方法成功解决了 07 星任务中的地面控制系统控制时序不同步的问题。

5 结束语

针对风云二号 07 星测控实施过程中部分姿章联控参数未能正常执行的系统间时序控制不同步问题, 研究提出一种地面控制系统自适应同步控制方法。新方法有效解决了系统时序同步的问题, 其控制精度高、控制效果好, 对自旋稳定卫星的系统间同步控制研究具有较大的实用参考价值。

参考文献

- [1] 齐春子. FY-2C 星控制分系统设计[J]. 上海航天, 2005, 22(s1): 36-41.
QI Chunzi. Control subsystem design of FY-2C meteorological satellite[J]. Aerospace Shanghai, 2005, 22(s1): 36-41.
- [2] 李于衡, 易克初, 关鹏. 地球静止轨道自旋卫星姿态确定及控制策略[J]. 飞行器测控学报, 2009, 24(5): 19-26.
LI Yuheng, YI Kechu, GUAN Peng. The determination of attitude and control strategies for double spin geostationary satellites[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2009, 24(5): 19-26.
- [3] 黄福铭. 航天器飞行控制与仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 73-80.
- [4] 朱民才, 唐歌实. 载人航天轨道确定, 轨道控制及任务规划[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 18-19.
- [5] 王恒, 郭力兵, 李永刚, 等. 基于等倾角进动的自旋卫星姿态控制方法[J]. 飞行器测控学报, 2012, 4(31): 20-24.

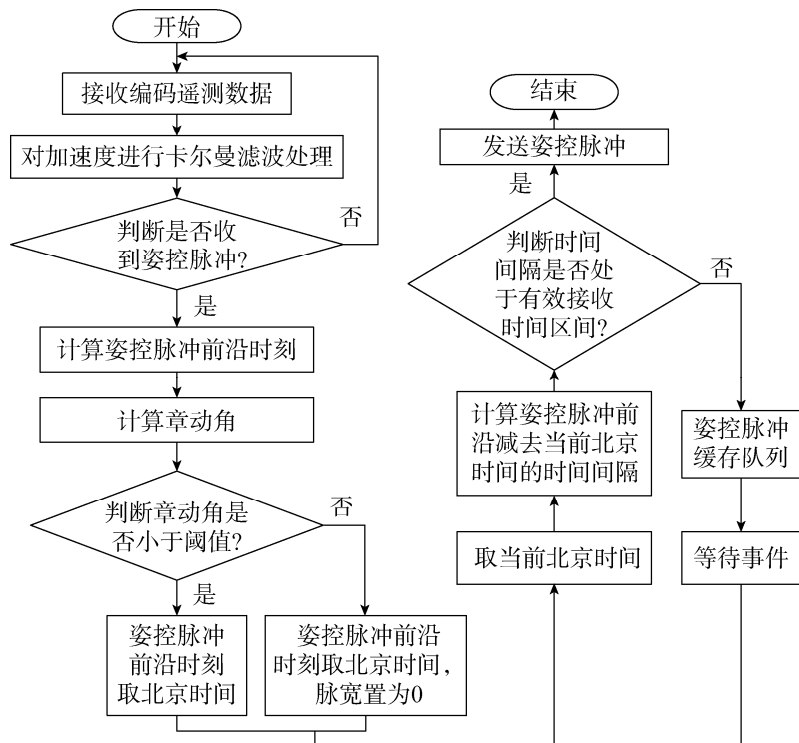


图 4 自适应同步控制方法流程

Fig. 4 The flow of the adaptive and synchronous control method

- WANG Heng, GUO Libing, LI Yonggang. Attitude control method for spin-stabilized satellites based on equiangular precession[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2012, 4(31): 20-24.
- [6] 柏文良, 顾炳俊, 朱加勇, 等. 自旋稳定卫星海上测控姿章联控及实现[J]. 上海航天, 2007, 24(5): 8-11.
BAI Wenliang, GU Bingjun, ZHU Jiayong, et al. The implementation of attitude & amp nutation united control for slow-roll stabilization satellite's maritime tracking and control[J]. Aerospace Shanghai, 2007, 24(5): 8-11.
- [7] 张振海, 尹晓珍, 任倩. 基于自适应均值的地铁轨道裂缝图像滤波算法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(6): 1-5.
ZHANG Zhenhai, YIN Xiaozhen, REN Qian. Image filtering algorithm for subway tunnel cracks based on self-adaptive mean[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2019, 38(6): 1-5.
- [8] 王岚, 彭敏, 周清峰. 基于自适应双阈值的计步算法[J]. 计算机应用研究, 2019, 37(5): 1-6.
WANG Lan, PENG Min, ZHOU Qingfeng. Pedometer method based on self-adaptive double threshold algorithm[J]. Application Research of Computers, 2019, 37(5): 1-6.
- [9] 韩航程, 程志恒, 孙灿灿, 等. 无源互调干扰的二维时延自适应估计算法[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(9): 944-949.
HAN Hangcheng, CHENG Zhiheng, SUN Cancan, et al. Two-dimensional adaptive delay estimation algorithm for passive inter-modulation interference[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(9): 944-949.
- [10] 朱赟, 陈明真, 陈莹, 等. 稀疏角度 CT 图像重建的一类自适应临近点算法[J]. 电子科技大学学报, 2019, 48(2): 228-232.
ZHU Yun, CHEN Mingzhen, CHEN Ying, et al. An adaptive proximity algorithm for sparse-angle CT image reconstruction[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology, 2019, 48(2): 228-232.
- [11] 唐海霞, 杨庚, 白云璐. 一种自适应差分隐私预算分配策略的直方图发布算法[J]. 计算机应用研究, 2019, 37(7): 1-8.
TANG Haixia, YANG Geng, BAI Yunlu. A histogram publishing algorithm based on adaptive differential privacy budget allocation strategy[J]. Application Research of Computer, 2019, 37(7): 1-8.
- [12] 周冲, 张鹏程, 刘欢, 等. 自适应反距离加权法滤除椒盐噪声[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 373-377.
ZHOU Chong, ZHANG Pengcheng, LIU Huan, et al. Adaptive inverse distance weighting method for salt and pepper noise filtering[J]. Journal of North University of China (Natural Science), 2019, 40(4): 373-377.
- [13] 李文杰, 闫世强, 蒋莹, 等. 自适应确定 DBSCAN 算法参数的算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(5): 1-7.
LI Wenjie, YAN Shiqiang, JIANG Ying, et al. Research on adaptive algorithm for determining DBSCAN algorithm parameters[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(5): 1-7.

[作者简介]

郭力兵 1978年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天测控。

何剑伟 1967年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天测控。

汪毅 1985年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天测控。

杨海民 1990年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为航天测控。

胡上成 1985年生, 本科, 工程师, 主要研究方向为航天测控。