

地面强激光操控空间碎片避碰的控制策略

侯重远, 李恒年, 杨元, 路毅

(西安卫星测控中心 宇航动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710043)

摘要: 日益增长的太空碎片为载人空间站和卫星带来严重的安全挑战。2011 年, NASA 提出使用地面连续激光照射空间碎片, 利用其微弱的光压力效应, 通过长期积累, 改变其轨道, 从而预防其与航天器可能的碰撞。这一碰撞避免方法并不把太空碎片拉回大气层内, 而是防止碰撞, 由于不需要航天器机动, 且光压的温和作用也对激光器发射功率没有太高要求, 因此这种避碰方法受到广泛关注。然而, 该方法的提出者采用的迎面照射控制律尽管简单但非最优, 故需要设计最优控制律。通过建立两点边值问题模型, 以两物体之间距离的最大化为控制目标, 求解了最优性条件。仿真显示, 经优化后控制律的避碰效果提高程度非常显著, 提高幅度与初轨有关, 通常为 25%~125%。

关键词: 地基激光系统; 控制策略; 空间碎片; 避碰

中图分类号: V19 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0329003

Control strategy of space debris collision avoidance using ground based laser system

Hou Chongyuan, Li Hengnian, Yang Yuan, Lu Yi

(State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China)

Abstract: The growing number of space debris threatens the flight safety of manned space station and satellites. In 2011, NASA proposed to use a continuous ground-based laser station irradiation to change orbit of space debris. The photon pressure is slight but durable, and accumulates to a considerable orbit change. The orbit change will avoid the possible collision. This method does not bring the space debris back into the atmosphere, but to prevent the collision. For the method, the spacecraft is no need to maneuver for space debris collision avoidance, and the mild photon pressure just need median power laser generator. Thus, the method gets widespread concern in recent years. However, the head-on irradiation control law in this method is simple, but not the best. It is necessary to design the optimal control law. Through the establishment of two point boundary value model to maximize the distance between two objects for control objectives, and then solving the optimality conditions, the optimal control problem is solved. The simulation shows that the modified control law has been optimized to improve the performance of collision avoidance, and the degree is very significant, concerning to the initial orbit of the space debris to avoid collision, it is usually 25% to 125%.

Key words: ground based laser system; control strategy; space debris; collision avoidance

收稿日期: 2016-07-10; 修订日期: 2016-08-12

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2015AA07046101); 国家自然科学基金(11372150)

作者简介: 侯重远(1982-), 男, 工程师, 博士, 主要从事空间碎片清除方面的研究。Email: houzenan@163.com

0 引言

太空碎片碰撞问题是载人空间站和人造卫星安全运行的最大威胁。据统计,国际空间站平均每年都需要进行一次机动,以规避可能发生的碎片碰撞,机动过程需进行大量准备工作,全过程耗费 30 h,而仅燃料消耗就价值 2000 万美元,国内未来将建成的载人空间站也面临这一问题;另外,人造卫星平均在其设计寿命以内,都要进行一次轨道机动以规避碰撞(下文简称“避碰”),由于耗费了用于维持工作轨道的宝贵燃料,因而避碰变轨会导致卫星减寿。碎片避碰问题近年来已成为国际热点。

随着大功率激光器和自适应光学器件的日益成熟^[1-2],使用强激光控制空间碎片具有广阔前景^[3]。强激光系统兼具对空间碎片的探测定位^[4-5]和轨道姿态控制能力。按原理之不同,激光控制空间物体技术可分为表面灼烧法^[6-7]和光压法^[8-9]。前者通过脉冲激光的瞬间升温作用引起空间物体微表面材料的蒸发或升华,产生气体喷射,从而产生反作用力,该力具有瞬时性和巨大性;后者通过连续波激光照射物体表面,利用光子的动量交换原理,产生小反作用力,该力具有持续性和微弱性,下文统称为光压法。

光压法由 NASA 埃姆斯研究中心 LightForce 项目团队于 2011 年提出,在其开山之作^[10]中,James Mason 系统地阐述了光压法避碰的概念、原理和应用前景,并通过仿真发现,使用价值约 80 万美元的工业用 5~20 kW 半导体激光器,在全球布置 1~3 个站,就可以达到大部分碎片的避碰。光压法随后引起关注和深入研究,其系统效能^[10]得到了数值仿真分析。在更大功率系统的效能方面,Jan Stupl^[11]发现全球只需要 4 台 20 kW 的激光站,配合 1.5 m 口径的聚束望远镜,就可以将近地空间中一年内 85% 的碰撞概率大于 10^{-6} 的接近事件消除,即降到 10^{-6} 以下。

光压法是一种较为成熟、可靠的解决空间碎片碰撞问题的方法,一经提出立即获得公众、学界和产业界的高度关注,英国《每日邮报》2011 年高度评价了该方案。然而,光压法在控制策略方面所采用的迎面照射减速法,并非是避碰问题的最优控制律。文中旨在设计光压法的最优避碰控制律,也就是通过选择合适的激光照射时机,使碎片与碰撞保护目标之

间的距离最大化。

1 激光压控制空间碎片避碰的原理

2011 年由 NASA 埃姆斯研究中心 LightForce 项目组所提出的激光压避碰法,是解决空间碎片碰撞问题最有实用前景的方案之一,引起广泛关注。该方法是利用地面激光器对空间中的碎片进行照射,利用激光光压的微弱作用力改变其轨道(与地心引力相比约为 $10e-7$ 量级),如图 1 所示。

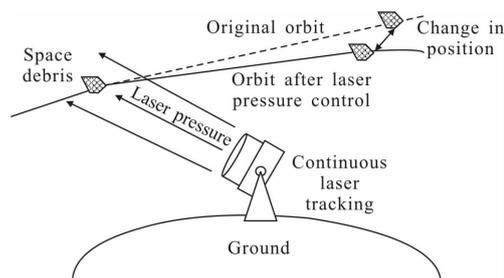


图 1 利用激光光压微弱作用力控制空间物体的原理

Fig.1 Principle of controlling space debris using slight acting force of laser pressure

尽管光压力非常微弱,但通过作用力的长期累积,就可以大大改变太空碎片的位置,虽然尚达不到将其拉入大气层的量级,但用来避碰则足够了。LightForce 项目组作了如下仿真:激光站站址位于南极洲 PLATO 地区,使用一台 5 kW 商业级中功率激光器,随机选取 100 个 LEO 轨道碎片,在 48 h 内,只要碎片飞过激光站上空就对这些碎片进行反飞行方向的照射,仿真结果显示,48 h 后,43% 的碎片距离改变量超过 200 m,13% 的碎片距离改变量超过 500 m,5% 超过了 5 000 m。通过长时间的累积,这种位置改变量是非常显著的。可见,该方法完全可以用来避免碰撞。

2 光压避碰法控制律的不足

LightForce 项目之前,也有人提出过使用激光清除太空碎片,但是都是利用强脉冲激光的表面蒸发喷射作用机理。而 LightForce 项目首次提出的光压法的辐照强度与太阳光量级相当,非常温和,原理是通过光压的长期摄动照射,达到和短时强脉冲相同的变轨效果,并且只需要千瓦级的中等功率激光器

即可实现。

然而,在深入研究光压法后,发现 LightForce 项目中激光照射控制律的研究存在美中不足之处。

在其仿真计算中,采用的控制律都是反速度方向照射^[8],即当光压方向与碎片速度方向相反时照射,同向时则停止照射,如图 2 所示。

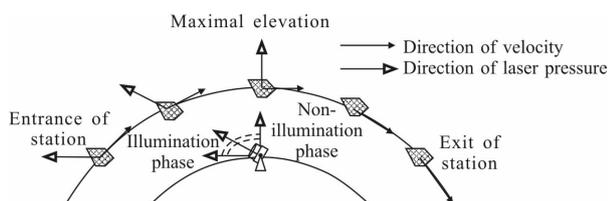


图 2 LightForce 项目采用的控制律
Fig.2 Control law of LightForce project

LightForce 项目组采用这种逆速度方向的照射控制律,是为了使光压力近似地对碎片做负功(“近似地”之原因:由于站址所在地和地球自转影响,照射方向并不总是朝着碎片在惯性系下的反速度方向),从而减小其机械能,进而减小其长半轴。也就是说,LightForce 采用的这种控制律只能近似地使碎片与受保护目标之间的长半轴之差最大化,它是一种近似地以 Δa 为优化指标的控制律,尽管 Δa 最大化的结果可以使碎片与保护目标拉开较大距离,但却不是一种以二者距离最大化为优化指标的控制律,也不是一种使二者碰撞概率最小化为优化指标的控制律,因此对避碰问题而言,这不是最优控制律。显然,应该为这一问题设计最优控制律,即通过选择合适的激光照射时机,使碎片与碰撞保护目标之间的距离最大化。

采用最优控制律的实际意义在于,不仅可以进一步地大幅减小碎片碰撞可能性,还可以减小地面激光站的功率等级、建设数量和运行成本。

3 光压避碰的最优控制策略

3.1 动力学模型

James Mason 在提出光压法的论文中认为,激光束应照射在空间碎片的速度反方向上才能最大化位置改变量,而事实上,这种控制策略只能最大化 Δa ,不能最大化位置改变量。

为了求解以位置改变最大值为目标函数的最优

控制问题,文中建立了基于极小值原理的最优控制模型,从而使问题转化为两点边值问题,求解的目的也变为最优性条件的求解问题。最优性条件一旦确立,两点边值问题就能退化为常微分方程数值求解问题,从而迎刃而解。但是,最优性条件的求解是非常复杂的,这不仅与碎片所受的各种力有关,也与激光站位置、地球自转等因素有关。

在空间动力学模型方面,考虑到激光光压摄动的量级在空间站 400 km 高度上略小于 J2 项和大气摄动,因此动力学模型考虑到了 J2 项和理想大气模型,尽管高阶引力摄动和大气模式随机性未予考虑,但在工程实施时,由于会进行数十次甚至上百次激光照射,这些摄动量和不确定因素相对激光光压摄动的长期照射而言是微不足道的,因而大气只考虑其平均作用力。

其中,J2 项动力学模型为:

$$\vec{a}_{\text{gravity}} = -\frac{G \cdot M}{r^3} \cdot \left(1 + \frac{3}{2} J_2 \left(\frac{R_{\text{earth}}}{r} \right)^2 \left(1 - 5 \left(\frac{z}{r} \right)^2 \right) \right) \cdot \vec{r} - \left(2 \frac{G \cdot M}{r^2} \frac{3}{2} J_2 \left(\frac{R_{\text{earth}}}{r} \right)^2 \left(\frac{z}{r} \right) \right) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

大气阻力的动力学模型为:

$$\vec{a}_{\text{drag}} = \frac{1}{2} \cdot \rho(h) \cdot v_e \cdot \vec{v}_e \cdot C_d \cdot \frac{S}{m} \quad (2)$$

其中,阻力系数 C_d 取 2.2; v_e 为相对大气的速度,即

$$\vec{v}_e = \vec{v} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ w_e \end{pmatrix} \times \vec{r} \quad (3)$$

大气密度模型可以采用查表法或解析法,前者精度较高。采用何种模型不影响文中方法的适用性。在仿真实验中,为了增强结果数据的直观性,故采用解析模型,即利用在 200~600 km 高度上,理想大气模型存在如下近似线性解析关系。其中, H 为大气密度标高。

$$\rho(h) = \rho_0 \cdot e^{\left(\frac{-r-r_0}{H} \right)} \quad (4)$$

3.2 求解协态变量

根据以上模型,给出汉密尔顿函数。

$$H = \sum \lambda_i \cdot v_i$$

$$\lambda_i = \frac{\partial H}{\partial (rx, ry, rz, vx, vy, vz)} \quad (5)$$

然后求解协态方程,由于公式项数很多,不便在文中列举。可使用 Maple 等机械推导偏微分的软件得到

这些公式,再利用 Maple 的代码语言转换功能,转变为仿真程序中所需的 MATLAB、C、Fortran 等代码。

3.3 求解边值条件

边值条件如下:

$$\begin{aligned} \lambda_1(tf) &= \frac{\partial \varphi}{\partial [rx(tf)]} = A \\ \lambda_2(tf) &= \frac{\partial \varphi}{\partial [ry(tf)]} = B \\ \lambda_3(tf) &= \frac{\partial \varphi}{\partial [rz(tf)]} = C \\ \lambda_4(tf) &= \lambda_5(tf) = \lambda_6 = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $A、B、C$ 为空间单位向量指向,代表了在某个方向的可控位置改变的极值; φ 为末值型优化指标。

3.4 得出极大值条件

根据极小值原理,若要 H 函数取极值,只需要判断矢量 $(\lambda_4, \lambda_5, \lambda_6)^T$ 与激光指向矢量的夹角,若大于 0 ,则进行照射,否则停止照射,如此的 Bang-Bang 控制可以实现位置改变量在 $[A, B, C]$ 矢量方向的最大值。

4 控制效果比较

通过数值法求解以上关于协态变量的微分方程,从而得到经过指定时间后的最大位置改变量。经仿真算例发现,文中方法相比 James Mason 的反速度方向照射控制策略可以获得更大的位置偏移量。仿真条件与基本假设:(1) 空间碎片飞行于高度 400 km 的圆轨道。(2) 激光站功率 10 kW 量级,根据 James Mason 的算例,在距离 400 km 时约对面质比 0.01 的物体产生 3×10^{-5} 量级的激光光压加速度,且大小随距离的平方成反比。(3) T_0 时间,空间碎片达到仰角 10° 开始计时。

James Mason 使用的反速度方向激光照射控制策略的位移量如图 3 所示。

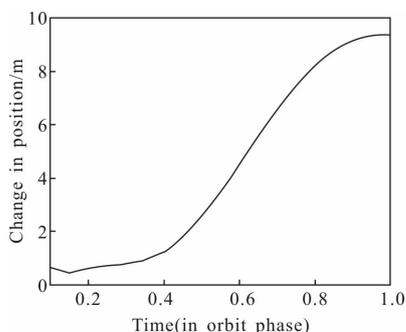


图 3 反速度方向照射律的位移量

Fig.3 Change in position of reverse velocity illumination control law

需要说明的是,反速度方向照射律所产生的位移量,由于不能选择位移矢量的方向,因此是标量,故用标量曲线图表示。

文中采用了最优控制策略,使得针对任意方向的距离最大化控制成为可能,只要给定所期望的距离最大化方向矢量 $[A, B, C]$,就能得出该方向上的最大位移量。在空间碎片避碰问题中,矢量 $[A, B, C]$ 方向就是空间碎片与保护目标接近时的距离矢量方向,从而保证设计的最优控制策略能最大化该方向上的距离。采用文中最优控制策略后的距离矢量改变量如下(为简洁体现控制效果,以下采用一个轨道周期的四等分时间来说明控制效果)。

(1) 1/4 轨道周期

比较而言,最优控制律在 1/4 轨道周期时的位置改变量约比反速度方向照射控制律提高 25% 位移量,见图 4。

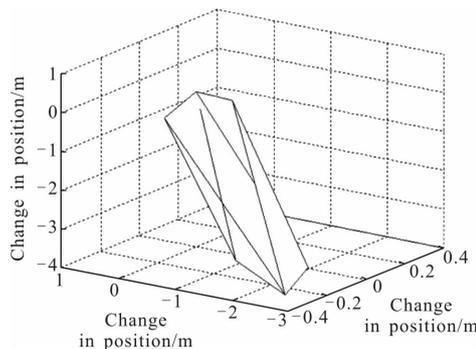


图 4 1/4 轨道周期时的位置改变量

Fig.4 Change in position of 1/4 orbit period

(2) 1/2 轨道周期

比较而言,最优控制律在 1/2 轨道周期时的位置改变量约比反速度方向照射控制律提高 80% 位移量,见图 5。

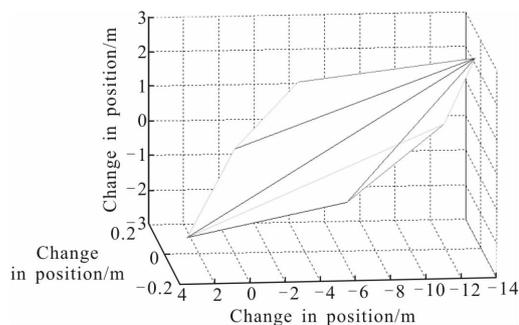


图 5 1/2 轨道周期时的位置改变量

Fig.5 Change in position of 1/2 orbit period

(3) 3/4 轨道周期

比较而言, 最优控制律在 3/4 轨道周期时的位置改变量约比反速度方向照射控制律提高 125% 位移量, 见图 6。

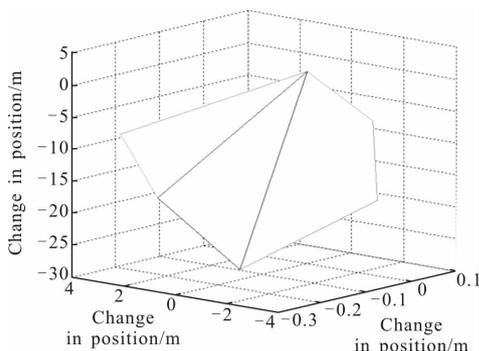


图 6 3/4 轨道周期时的位置改变量

Fig.6 Change in position of 3/4 orbit period

(4) 一个轨道周期

比较而言, 最优控制律在一个轨道周期时的位置改变量约比反速度方向照射控制律提高 50% 位移量, 见图 7。

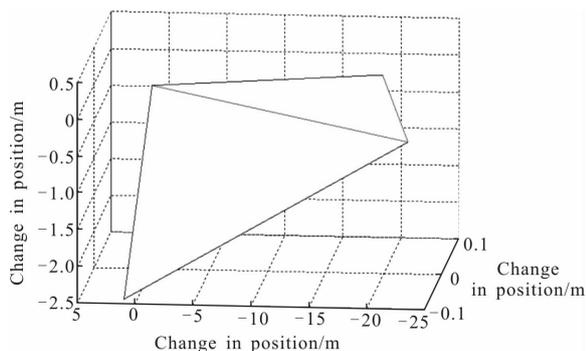


图 7 一个轨道周期时的位置改变量

Fig.7 Change in position of 1/4 orbit period

根据仿真结果可知, 文中的最优控制策略可以获得更大的位移控制量, 其提高程度与初轨有关, 通常为 25%~125%。

5 结束语

对空间碎片避碰问题而言, 强激光光压摄动避碰法的提出者 James Mason 所提出的迎面照射控制律, 并非是最优控制律。文中针对这一优化问题, 利用庞特里亚金极大值原理, 求解了光束控制问题的最优控制律, 并给出了最优性条件。

通过仿真算例比较, 验证了文中采用的基于极小值原理的激光光压最大位移控制策略优于光压法提出者 James Mason 的基于反速度方向照射的控制策略。其提高程度与初轨有关, 通常为 25%~125%, 可以大大提高强激光系统控制空间碎片的效能。

文中提出的最优控制律, 给出了强激光光压控制空间碎片时, 所能达到的距离改变的最大值。该最大值可以广泛应用于任务设计初期的轨道包络计算, 以及避碰控制过程中的控制策略计算。

后续研究旨在进一步精细化轨道动力学模型和激光大气吸收模型, 为控制策略的工程化铺平道路。

参考文献:

- [1] Wang Lijun, Peng Hangyu, Zhang Jun. Advance on high power diode laser coupling [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 517-534. (in Chinese)
王立军, 彭航宇, 张俊. 大功率半导体激光合束进展[J]. *中国光学*, 2015, 8(4): 517-534.
- [2] Hu Xiaodong, Xu Yuanfei, Yao Jianhua, et al. Development of high power direct output semiconductor laser processing system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 1996-2001. (in Chinese)
胡晓冬, 徐元飞, 姚建华, 等. 大功率半导体直接输出激光加工系统开发 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(7): 1996-2001.
- [3] Hong Yanji, Jin Xing, Chang Hao. Discussion of key problems in space based laser centimeter orbital debris removal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 1-6. (in Chinese)
洪延姬, 金星, 常浩. 天基平台激光清除厘米级空间碎片关键问题探讨[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 1-6.
- [4] Li Zhenwei, Zhang Tao, Zhang Nan, et al. High precision orientation of faint space objects [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(9): 2627-2634. (in Chinese)
李振伟, 张涛, 张楠, 等. 暗弱空间目标的高精度定位[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(9): 2627-2634.
- [5] Li Ming, Xue Li, Huang Chen, et al. Estimation of detection range for space debris laser ranging system based on efficient echo probability [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2): 260-267. (in Chinese)
李明, 薛莉, 黄晨, 等. 基于有效回波概率估计空间碎片激光测距系统作用距离 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2): 260-267.

- [6] Zhu Yin, Chen Hao, Xu Rong, et al. Optimized one-dimensional fluid mechanics model for laser cleaning up space debris [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): 1–6. (in Chinese)
朱殷, 陈浩, 徐融, 等. 优化的一维激光清理空间碎片流体力学模型[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S1): 1–6.
- [7] Apollonov V V. High power lasers for space debris elimination [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 187–195.
- [8] Mason J, Stupl J, Marshall W, et al. Orbital debris-debris collision avoidance [J]. *Advances in Space Research*, 2011, 48(10): 1643–1655.
- [9] Levit C, Smith C, Stupl J, et al. LightForce: Photon pressure induced collision avoidance [C]//AMOS: Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2012.
- [10] Stupl J, Faber N, Foster C, et al. LightForce photon-pressure collision avoidance: efficiency assessment on an entire catalogue of space debris [C]//AMOS: Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2013.
- [11] Stupl J, Faber N, Foster C, et al. LightForce photon-pressure collision avoidance: updated efficiency analysis utilizing a highly parallel simulation approach [C]//AMOS: Advanced Maui Optical and Space Surveillance Conference, 2014.