

doi: 10.7690/bgzdh.2014.02.018

预定目标的在轨服务飞行器待机轨道分析

李岩, 蔡远文, 程龙

(装备学院航天装备系, 北京 101416)

摘要: 为确定单艘在轨服务飞行器 (on-orbit Service Vehicle, OSV) 针对预定目标的待机轨道, 综合轨道动力学和球面几何学原理, 利用经典二体动力学模型、霍曼转移轨道模型以及球面三角几何关系, 设置具体实例分析 OSV 针对低、中、高轨道目标的待机轨道选择方法, 得到轨道平面调整的能耗和变轨位置与目标轨道平面参数的变化关系, 提出待机轨道参数优化的一般思路。该研究可为 OSV 实施“一对一”在轨服务的待机轨道选择提供理论依据。

关键词: 在轨服务; 待机轨道; 最优化; 机动能力

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Parking Orbit Analysis of On-Orbit Service Vehicle for Specified Servicing Target

Li Yan, Cai Yuanwen, Cheng Long

(Department of Spaceflight Equipment, The Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: In order to get the parking orbit of single on-orbit service vehicle (OSV) for specified servicing target, the approach for low, medium and high orbit target was analyzed using some real examples, in which the space dynamics and the spherical geometry were combined together, and the classical two-body dynamics, Hohmann transfer model and spherical trigonometric relationship were concerned. Then, the variability of the energy cost and orbital changing position of OSV for different target orbit plane was presented, as well as the optimization of the parking orbit. The approach provides good reference for the one to one on orbit service operation.

Keywords: on orbit service; parking orbit; optimization; maneuverability

0 引言

文献[1]基于单艘在轨服务飞行器 (on-orbit service vehicle, OSV) 的机动能力和变轨方式, 提出了 OSV 待机轨道服务范围的计算方法。文献[2]在此基础上研究了“多对多”的在轨服务飞行器部署策略。在合理选择待机轨道^[3-4]的前提下, 单艘 OSV 的服务范围能够得到充分利用, 可以满足预定服务对象或轨道参数相近的若干服务对象群体的服务需求, 即执行“一对一”或“一对多”的在轨服务任务。单艘 OSV 待机轨道的选择同样需要考虑服务对象的轨道分布以及 OSV 自身的变轨机动能力。

为了减轻运载系统的压力, 降低服务成本, OSV 待机轨道高度一般选为中低轨道。由于预定任务中, 目标轨道参数是确定的, 考虑到 OSV 机动能力有限, 待机轨道最好与目标轨道共面。对于倾角、高度相差不多的服务对象, 可以由同一 OSV 来完成服务任务; 因此, 笔者选择有代表性的不同轨道服务对象进行讨论。

1 对低轨道航天器服务时的待机轨道

低轨道主要指低地球圆\近圆轨道和太阳同步

(sun synchronous orbit, SSO)圆\近圆轨道, 以 LEO 的国际空间站 (international space station, ISS) 和 SSO 的某型号气象卫星为例进行讨论。

1) 针对 ISS 的待机轨道选择。



图1 地面待命型 OSV 针对 ISS 的待机轨道

ISS 运行在近地点高度 354 km, 远地点 359 km, 升交点赤经 33.1°, 近地点幅角 182.3°, 倾角 51.6°, 偏心率为 0.000 3 的近圆轨道上。ISS 的在轨服务已经有成功的经验可借鉴, 如美国的航天飞机、俄罗斯“进步”货运飞船和欧空局的 ATV 等。地基 OSV 可以采用类似的方式对 ISS 进行服务。OSV 待机轨

收稿日期: 2013-09-06; 修回日期: 2013-10-09

作者简介: 李岩(1981—), 男, 河南人, 博士, 讲师, 从事自动化测试与控制研究。

道与 ISS 轨道越接近，机动消耗越少，但是调相时间就越多，所以待机轨道高度应该与目标轨道高度有一定差距，可以选择倾角 51.6°，高度 200~300 km (比 ISS 轨道低 50~100 km) 的圆轨道，如图 1。

2) 针对 SSO 目标的待机轨道选择。

要对太阳同步轨道的航天器进行在轨服务，OSV 同样可以采用与之共面且高度较低的待机轨道。但是由于太阳同步轨道的设计必须考虑地球非球形引力摄动，其高度与倾角存在固定关系式 (1)^[5]，考虑带谐项 J₂ 的影响，如图 2^[5-6]。倾角相同而高度不同的共面轨道难以控制和维持，因而可以将 OSV 的待机轨道选为高度较低，而与服务对象轨道有较小夹角的太阳同步轨道。

$$-9.97 \left(\frac{a_e}{h+a_e} \right)^{3.5} \cos i = 0.9856 \quad \text{其中 } a_e = 6\,378.14 \quad (1)$$

另外，从平时的常规应用方面考虑，为充分发

挥 OSV 待机状态下的多种功能，如对地观测等，可以将其待机轨道设计为太阳同步回归轨道。如某型号气象卫星轨道高度约为 836 km，倾角为 98.73°。对该目标进行服务时，可以设计待机轨道高度在 500~800 km，最小重复周期为 15 d 的一组太阳同步回归轨道，并比较优劣，如表 1。

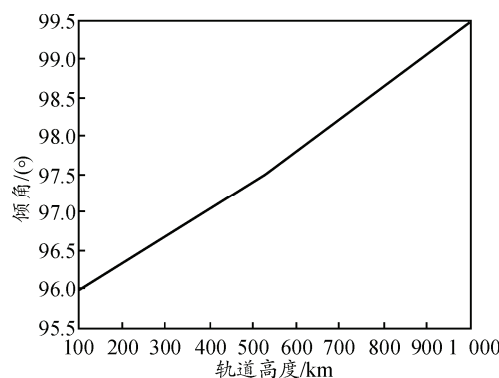


图 2 太阳同步轨道高度和轨道倾角关系

表 1 不同高度太阳同步回归待机轨道数据比较

N/D (圈/d)	轨道高 度 h/km	轨道倾 角 i/(°)	轨道周 期 T/s	最省能量机动消耗		快速机动消耗	
				速度增量 Δv/(km/s)	时间 t/s	速度增量 Δv/(km/s)	时间 t/s
14(7/15)	736.55	98.3	5 972.4	0.048/0.056	3 017.52	2.0	205.30
14(8/15)	714.78	98.2	5 945.0	0.063/0.069	3 010.66	2.0	226.43
14(11/15)	650.45	98.0	5 864.3	0.097/0.095	2 990.38	2.0	279.32
14(13/15)	608.36	97.8	5 811.7	0.119/0.121	2 977.13	2.0	308.79
14(14/15)	587.55	97.7	5 785.7	0.130/0.134	2 970.61	2.0	322.29
15(1/15)	546.39	97.6	5 734.5	0.152/0.147	2 957.67	2.0	347.31
15(2/15)	526.04	97.5	5 709.3	0.163/0.160	2 951.30	2.0	358.97

备注 最省能量机动消耗的速度增量(A/B)，A、B 分别为改变轨道高度与倾角所需的速度增量。

从表 1 中数据可以看出 (计算方法见文献[1, 5-6]，表 2、表 3 同)：在重复周期相同时，轨道高度与轨道倾角成正比关系，由于待机轨道与目标轨道高度相差不大，所以变轨所需的速度增量较小，表中只给出了轨道转移机动时间，而并未考虑调相和最终接近时间。待机轨道选择要对运载能力、机动时间和能量消耗等指标因素进行综合权衡，侧重点不同选择方式也不同。

2 对中轨道航天器服务时的待机轨道

中轨道的服务对象主要是各种导航卫星星座系统。以 GPS 星座为例，星座卫星分布在 6 个轨道平

面内，对于地基 OSV，可针对有服务需求的卫星所在位置确定待机轨道。轨道倾角选择与该卫星所在轨道平面相同，轨道高度则主要取决于运载能力，应尽量选择接近服务对象的高度，可在 10~18 Mm 之间选择。

OSV 接近中高轨道服务对象的时间较长，但轨道转移速度增量要求较小。在运载能力允许的情况下，可以选择更加接近目标的待机轨道，并且采用快速机动方式，可大大节省转移时间。表 2 中给出了在满足机动相位要求时，OSV 在 1 km/s 脉冲速度约束下的轨道机动所需时间。

表 2 不同高度待机轨道速度增量及时间比较

轨道高 度 h/Mm	轨道倾 角 i/(°)	轨道周 期 T/h	最省能量机动消耗		快速机动消耗	
			速度增量 Δv/(km/s)	时间 t/h	速度增量 Δv/(km/s)	时间 t/h
10	55	5.794 4	1.044 3	4.348 4	1.0	2.026 6
12	55	6.887 5	0.776 8	4.655 7	1.0	1.811 1
14	55	8.041 8	0.546 5	4.969 9	1.0	1.592 2
16	55	9.254 3	0.346 0	5.290 9	1.0	1.334 0
18	55	10.522 3	0.169 7	5.618 6	1.0	0.985 4

3 对地球同步轨道服务时的待机轨道

以静止轨道定位于东经 105°赤道上空的某型

号卫星为例^[7-9]，OSV 选择轨道倾角为 0°的赤道轨道作为待机轨道。

由表 3 中可看出, 低轨道机动消耗能量较多, 所以待机轨道尽可能地部署在较高轨道, 以满足服务任务需求。选取轨道高度在 10~36 Mm 内的一组数据进行仿真分析。

由表 3 中数据可以看出, 随着待机轨道高度的增加, 速度增量急剧降低, 在 12~15 Mm 内, 变化率最大, 若单纯从机动消耗方面考虑, 待机轨道高度越高越好, 但考虑到目前运载火箭能力的限制, 综合多方面因素, 选择轨道高度可选为 15 Mm 的赤道轨道为待机轨道。

表 3 不同高度的赤道轨道对静止轨道卫星的机动消耗

轨道高度 h/Mm	最省能量机动消耗		快速机动消耗	
	速度增量 Δv/(km/s)	时间 t/h	速度增量 Δv/(km/s)	时间 t/h
10	1.762 4	6.92	1.0	2.17
12	1.518 2	7.28	1.0	1.64
15	1.208 9	7.83	1.0	1.42
20	0.801 7	8.77	1.0	1.22
25	0.486 8	9.75	1.0	1.04
30	0.235 2	10.76	1.0	0.79
35	0.029 1	11.80	1.0	0.30

4 待机轨道平面的调整

显然, 上述分析主要针对地基 OSV 而言, 为节省地面发射的能量消耗, 其待机轨道一般低于服务对象所在轨道。而对于天基 OSV, 其待机轨道则可高于服务对象轨道。天基 OSV 一般是多任务型的, 能够执行应急和突发的服务任务, 而每次任务的服务对象不一定是同一轨道的航天器, 因此针对不同任务, OSV 待机轨道并不相同。OSV 接到任务后需要先调整原待机轨道平面进入适合新任务的待机轨道, 再进行下一步接近。以低轨道服务对象 ISS 为例, 如图 3 所示, OSV 可以在上次任务结束时所在轨道与 ISS 轨道平面的交点 A 或 B 处, 施加速度增量, 进入与 ISS 轨道共面的待机轨道, 然后由高轨向低轨转移。

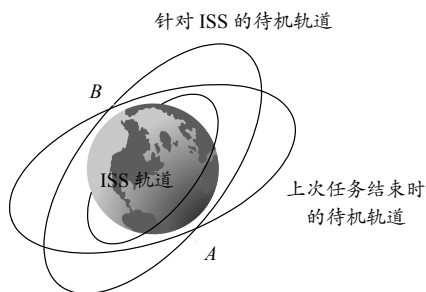


图 3 天基 OSV 针对 ISS 的待机轨道

上述过程中, 轨道平面的改变可以描述为, 已知初始轨道和目标轨道倾角 i_0 和 i_1 , 升交点赤经差

$\Delta\Omega$, 求两轨道面二面角 Δi , 变轨位置 γ 和变轨速度 Δv 的问题, 如图 4 所示。这里的变轨位置用变轨点 (图中 A 点) 与初始轨道升交点 (图中 B 点) 之间的地心角 γ 来表示。

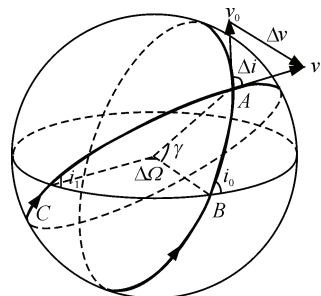


图 4 轨道平面的改变

根据球面三角关系, 首先得到二面角 Δi :

$$\cos \Delta i = \cos i_0 \cos i_1 + \sin i_0 \sin i_1 \cos \Delta \Omega \quad (2)$$

设轨道改变前后均为圆轨道, 可得:

$$\Delta v = \sqrt{v_0^2 + v_1^2 - 2v_0 v_1 \cos \Delta i} \quad (3)$$

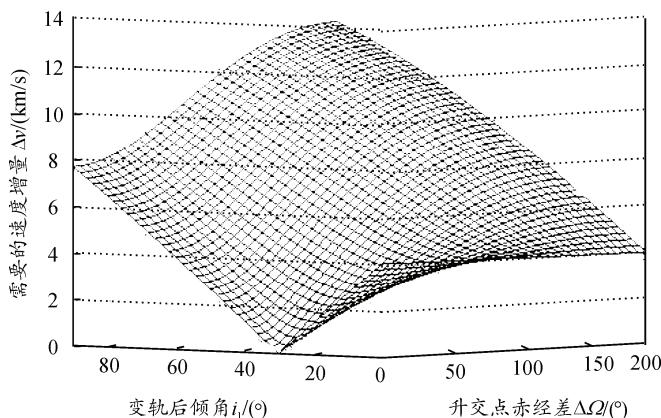
$$v_0 = v_1$$

再由球面三角关系得到:

$$\sin \gamma = \frac{\sin i_1 \sin \Delta \Omega}{\sin \Delta i} \quad (4)$$

以倾角为 30° , 轨道高度为 300 km 的待机轨道为例, OSV 从该轨道变轨至目标轨道, 所需的速度增量和变轨位置, 随目标轨道倾角和升交点赤经差的变化如图 5 所示。

图 5(a)描述了目标轨道倾角 i_1 从 0° 到 90° 变化, 而升交点赤经差 $\Delta\Omega$ 从 0° 到 180° 变化过程中, 需要的变轨速度。从图中可以看出, 随着倾角改变量和 $\Delta\Omega$ 的增加, 变轨速度需求逐渐增大, 甚至超出了轨道的逃逸速度。在 OSV 变轨能力有限的条件下, 大部分目标轨道是不可达的。



(a) Δv 变化视图

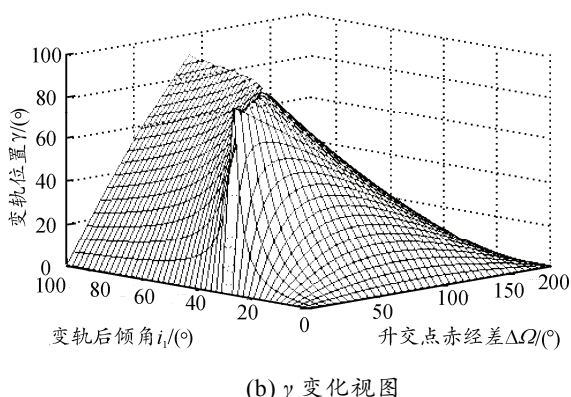


图 5 变轨速度 Δv 和变轨位置 γ 随目标轨道倾角 i_1 和升交点赤经差 $\Delta\Omega$ 变化三维图

5 针对预定目标的待机轨道优化思路

通过前面的分析，初步明确了针对预定目标的 OSV 待机轨道选择范围。对待机轨道进行优化，就是对待机轨道高度和轨道倾角进行优选。待机轨道方案初步确定之后，考虑到 OSV 能量消耗以及服务对象位置，尽量使 OSV 只进行轨道面内的机动，轨道倾角和平面一般不再做较大调整，所以主要对待机轨道的高度进行优化选择。从 OSV 执行任务的时间和能耗，以及自身安全角度出发，待机轨道高度的选优主要考虑以下方面(如图 6)：

1) 节省 OSV 执行任务的能量消耗。在满足能量可达和消耗较小的前提下，要求轨道高度与目标轨道高度差较小为优。

2) 提高任务执行效率，节省任务执行时间。主要指调相时间和接近机动时间。为保证调相时间充足，要求待机轨道与目标轨道有一定高度差，而接近机动时间则要求轨道高度差尽量缩小。

3) 提高待机轨道的安全性，主要考虑近地空间环境对轨道高度的影响，尤其是对于中轨道，要避开地球内、外辐射带的影响。

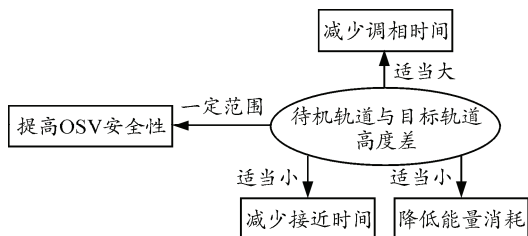


图 6 待机轨道高度差对服务任务各指标的影响
在优化轨道高度时，首先需要建立轨道优化的

目标函数，如：

$$\min J(h) = k_1 \Delta t_\omega(h) + k_2 \Delta t_H(h) + k_3 \Delta v(h) + k_4 s(h) \quad (5)$$

其中： Δt_ω 为调相时间； Δt_H 为轨道转移时间(霍曼转移)； Δv 为需要的速度增量； s 为空间环境对待机轨道安全性影响函数。上述指标值均为轨道高度 h 的函数，而且最好是根据自身变化范围和偏好类型确定的归一化指标。 k_1 、 k_2 、 k_3 和 k_4 为各指标的权重系数，在各指标值为归一化指标的前提下，取 $k_1 > 0, k_2 > 0, k_3 > 0, k_4 > 0$ 且 $k_1 + k_2 + k_3 + k_4 = 1$ 。

目标函数确定后，可将待选方案的轨道高度代入式 (5)，以目标函数值最小的方案为最优。也可运用各种多变量函数最优化设计方法，求解使目标函数达到最小的轨道高度值，最终确定待机轨道的选择方案。

6 结论

由上述定量和定性分析可知，针对轨道参数已知的预定服务对象，单艘在轨服务飞行器的待机轨道选择需要综合考虑运载能力、轨道高度和倾角、飞行器机动能力和安全性等因素。一般选择与目标轨道存在适当高度差、轨道平面夹角尽量小的待机轨道。该分析过程主要针对“一对一”的服务方式，“一对多”和“多对多”等服务形式的待机轨道部署策略，须进一步分析更多因素。

参考文献：

- [1] 李岩, 蔡远文, 同江. 在轨服务飞行器服务范围的定量分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(6): 773-779.
- [2] 李岩, 蔡远文. 多目标群的在轨服务飞行器部署策略[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(4): 459-463.
- [3] 王佳, 于小红. 轨道机动作战中的待机轨道研究[J]. 航天控制, 2005, 23(5): 17-22.
- [4] 李岩, 程龙. 构建空间在轨维护与服务系统的初步设想[J]. 导弹与航天运载技术, 2008(297): 31-34.
- [5] 杨嘉墀. 航天器轨道动力学与控制[M]. 北京: 宇航出版社, 1995: 187-345.
- [6] 刘瞰, 赵钧. 空间飞行器动力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003: 39-50.
- [7] 吴延勇, 吴诗其. 我国的静止轨道/中轨道跟踪与数据中继卫星系统的性能比较[J]. 科学技术与工程, 2002, 30(6): 1146-1149.
- [8] 李福昌. 运载火箭工程[M]. 北京: 宇航出版社, 2002: 232-242.
- [9] 于志坚. 我国航天测控系统的现状与发展[J]. 中国工程科学, 2006, 8(10): 42-46.