

文章编号: 1001- 2486(2010) 05- 0017- 06

## 空间交会轨迹安全特性分析\*

梁立波, 罗亚中, 王 华, 唐国金

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**建立了空间交会轨迹安全性定量评价指标体系, 考虑实际交会中的导航和控制误差扰动, 利用相对轨迹散布的 3 $\sigma$  椭球来定量描述追踪器和目标器之间的轨迹安全性。采用正交试验设计方法分析交会时间、脉冲次数、脉冲间隔等对安全性指标的影响, 结果表明机动时间的影响最显著, 脉冲数目次之, 脉冲间隔变化影响甚微。数值仿真分析了交会初始条件影响, 分析表明共面交会-R-bar 接近时安全性指标最小。分析了影响因素和初始条件对推进剂消耗的影响, 结果表明影响效果与安全性指标相反。这项工作为安全交会轨迹设计指明了方向, 为交会轨道的多目标最优设计提供了设计思路。

**关键词:**空间交会; 轨迹安全; 3 $\sigma$  椭球; 正交试验设计; 共面交会

中图分类号: V412 文献标识码: A

## Characteristic Analysis of Space Rendezvous Trajectory Safety

LIANG Li-bo, LUO Ya-zhong, WANG Hua, TANG Guo-jin

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The trajectory safety characteristic of space rendezvous was studied. First of all, the quantitative performance index of space rendezvous trajectory safety was proposed. The 3 $\sigma$  ellipsoid of relative position dispersal resulting from the navigation errors and control errors was investigated to describe quantitatively the relative trajectory safety between chaser and target vehicles. And then the orthogonal design of experiment method was adopted to analyze the influence of the transfer time, the number of impulses, and the intervals of impulses on the trajectory safety characteristic. The results show that the transfer time is the most significant among all the factors, the number of impulses is the secondary, and the interval influence is very small. Finally, the influence of initial rendezvous condition was analyzed by numerical simulation, and the results illustrate that -R-bar coplanar rendezvous makes the trajectory safety index the smallest. Furthermore, the influence on fuel consumption was analyzed, and the effect is opposite to that on safety index. The study points out the direction of the design of safe rendezvous trajectory, and provides the way to design the multi-objective optimal rendezvous trajectory.

**Key words:** space rendezvous; trajectory safety; 3 $\sigma$  ellipsoid; orthogonal design of experiments; coplanar rendezvous

随着交会对接技术朝着自主交会对接方向发展和应用领域的不断扩展, 轨迹安全性在交会对接任务设计中占有越来越重要的位置。目前美国、日本和欧洲正着力发展自主交会对接技术, 有关项目包括自动交会技术验证(DART)、试验卫星系列XSS、轨道快车(Orbital Express)卫星服务演示计划以及工程试验卫星计划(ETS-VII)等。自主交会对接由于地面的参与程度更少, 对安全性提出了更高的要求, 要求参与航天器有更高的故障识别处理与自主防护能力。ETS-VII和DART在进行飞行试验时, 均出现了异常情况, 前者由于有较好的安全轨迹设计准则<sup>[1]</sup>, 在推力器点火故障发生后, 工作模式转换到安全保险模式, 同时禁止推力器工作, 并执行了应急退出操作, 确保了追踪器和目标器的安全; 而后者, 则由于受错误导航数据引导, 导致额外的推力器点火, 同时计算机的逻辑设置(规定航天器如何调整轨道速度及位置的估计值和测量值)设定过高, 致使故障对策失误, 发生碰撞<sup>[2]</sup>。这些经验表明轨迹安全对于自主交会对接技术有重要意义。

\* 收稿日期: 2010- 04- 09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10902121); 中国博士后科学基金资助项目(20090450210); 国防科技大学科研计划资助项目(JC09-01-01)

作者简介: 梁立波(1982-), 女, 博士生。

最近 10 多年,国内外的研究人员在交会轨迹安全分析与设计方面开展了大量的研究工作。目前交会对接飞行器之间的安全问题研究主要集中在两个方面:第一是平移靠拢段的安全逼近速度分析和紧急避撞机动<sup>[3-8]</sup>,第二是具有被动安全防护能力的安全轨迹设计技术<sup>[9-13]</sup>。上述研究成果为交会轨迹安全分析提供了一定手段,但是常将追踪飞行器是否进入目标飞行器控制区域作为轨迹安全的评价指标,缺乏有效的量化评价指标;并且轨迹安全分析多是对标称情况分析,尚未考虑轨迹偏差情况。此外,在交会对接飞行任务设计中,虽然人们一直把轨迹安全作为一项重要的考虑因素,但是从来没有研究并试图设计安全性最优的交会轨迹,分析其特性。

考虑实际交会过程的导航偏差和控制偏差,本文将建立近距离交会轨迹安全的定量评价指标体系,利用相对轨迹散布的  $3\sigma$  椭球来定量描述追踪器和目标器之间的轨迹安全性。采用正交实验设计方法分析设计试验分析交会时间、脉冲次数、脉冲间隔等对交会轨迹安全指标的影响,并通过极差和方差分析方法分析各因素的影响能力。确定了影响因素最优搭配之后,通过数值仿真分析交会初始条件对安全性指标的影响。此外,推进剂消耗也是安全轨道设计过程中不可忽视的,因此本文还将分析影响因素和初始条件对推进剂消耗的影响,以便在轨迹设计中能够兼顾这两个指标。这项工作将避免安全交会轨迹设计的盲目性,为交会轨道的多目标最优设计提供设计思路。

## 1 安全性描述

### 1.1 相关概念

在设计追踪器接近目标器的轨道时,必须考虑误差扰动所引起的轨迹散布,保证相对运动轨迹的安全性要求,即交会对接过程必须保证任何误差扰动下追踪飞行器都不得进入目标飞行器的控制区域。这里需要引入三个概念。

1) 目标器控制域。为了保证交会对接的安全,通常在目标航天器周围定义一些参考区域,对追踪器进行约束,这些参考区域成为控制区域(control zone)。

2) 相对位置误差  $3\sigma$  椭球。在实际的交会对接飞行中,不可避免地存在着如导航误差、控制误差等会引起追踪飞行器相对于目标飞行器的相对运动轨迹散布,两个飞行器相对位置误差在空间上可以描述为一个  $3\sigma$  椭球,椭球中心定义为追踪航天器中心。

3) 碰撞概率。描述两个位置预报有误差的空间物体发生碰撞的概率。

### 1.2 安全性定量评价指标体系

根据交会轨迹的安全性要求,将误差扰动影响全部分配给追踪器,用追踪飞行器的相对位置误差分布的  $3\sigma$  椭球来描述,这样交会轨迹安全性可以用目标器控制域和追踪器位置误差分布的  $3\sigma$  椭球之间关系来表示,如图 1(a)、(b)。

由图 1(a),当目标器控制域和追踪器相对位置误差  $3\sigma$  椭球没有交互即二者的最小距离  $R_{rel} > 0$  时,

两个飞行器的相对运动是安全的,没有碰撞的危险,此时  $R_{rel}$  可以作为相对运动安全性的描述指标;由图 1(b),当目标器的控制域和追踪器的  $3\sigma$  椭球发生交互时,  $R_{rel} = 0$ ,追踪器可能会落在目标器的控制域内,两个飞行器有碰撞的危险,但是此时  $R_{rel}$  无法描述相对运动的危险程度,采用追踪器和目标器控制域之间的碰撞概率  $P_c$  作为碰撞危险程度的描述指标。因此安全性定量评价指标  $I_{sfe}$  表示为

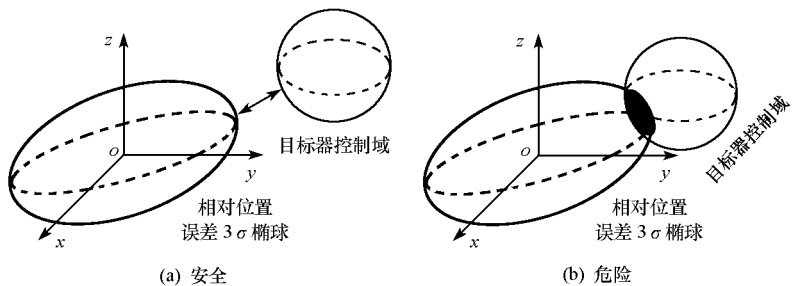


图 1 误差扰动下的交会安全性评价

Fig. 1 Rendezvous safety performance with uncertainty

$$I_{sfe} = \begin{cases} -R_{rel}, & R_{rel} > 0 \\ P_c, & R_{rel} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

在设计安全轨道时,从最优设计角度出发, $I_{sfe}$  应该尽可能小,即

$$\min J = I_{sfe} \quad (2)$$

图2给出了安全性定量评价指标体系的计算流程。

## 2 基于正交试验设计的安全性指标影响因素分析

为了避免安全轨道设计的盲目性,本节将对影响交会轨迹安全性定量评价指标的主要因素进行分析,为近距离安全交会轨道的最优设计提供设计思路。可能影响交会轨迹安全性的因素有交会初始条件、终端条件、交会时间、脉冲次数、脉冲矢量等<sup>[9]</sup>,因此在交会初始、终端条件固定的前提下,本节将分析机动时间、脉冲次数、脉冲间隔的影响程度,此外,还将分析影响因素对推进剂消耗的影响。

### 2.1 正交试验设计方法

本节要进行的分析涉及多个影响因素,每个影响因素都有多个取值,且相互之间也可能会有影响。试验设计方法是从全面试验的样本点中挑选出部分有代表性的样本点做试验,很好地设计复杂的试验因素,对试验进行科学合理的安排,并有效分析试验数据,从而用较少的人力、物力和时间,最大限度地获得丰富而可靠的资料。试验设计方法很多,本文采取正交设计方法,它适合于因素数目多而因素水平数不多的试验,并且可以采用极差分析方法和方差分析方法对因素的影响能力进行分析,从而通过较少的试验次数就可以找出因素水平间的最优搭配,或由试验结果计算推断出最优搭配。试验设计方法常用术语定义如下:

**试验指标:** 衡量试验结果好坏程度的指标,是试验研究过程的因变量,也称为响应变量,这里指安全性指标和推进剂消耗量;

**因素:** 试验的设计者希望考察的试验条件,是试验研究过程的自变量,这里指机动时间、脉冲次数、脉冲间隔;

**水平:** 试验因素所处的具体状态和具体取值;

**正交表:** 正交试验设计的基本工具。表示符号为  $L_n(t^q)$ , 其中  $L$  为正交表代号,  $t$  是表中数码数,表示因素的水平,  $q$  为正交表列数,表示最多可以安排的因素个数,  $t^q$  为采用穷举法所需要的试验次数,  $n$  为正交表行数,表示正交分析的试验次数。

### 2.2 影响因素分析

本节根据试验设计原理,固定交会初始和终端状态,改变机动时间、脉冲次数和脉冲间隔,基于CW方程计算安全性指标和推进剂消耗,并对试验结果进行分析。

#### (1) 问题配置

初始相对状态  $X_0 = (-5000\text{m}, 0, 0, 8\text{m/s}, 0, 0)^T$ , 终端相对状态  $X_f = (-400\text{m}, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ 。实际交会过程考虑导航和控制偏差,初始导航偏差协方差阵  $C_{\delta X_0} = \text{diag}(100, 100, 100, 0.01, 0.01, 0.01)$ , 控制偏差协方差矩阵  $C_{\delta \Delta v_i} = \text{diag}((0.02 + 0.01\Delta v_i)^2, (0.02 + 0.01\Delta v_i)^2, (0.02 + 0.01\Delta v_i)^2)$ , 目标器控制区域为球体,球体半径  $100\text{m}$ 。

#### (2) 正交表设计

正交试验选取的因素是脉冲数目  $X$ 、机动时间  $Y$  和脉冲间隔  $Z$ , 每个因素有三个水平,见表1。此外因素  $X$  的变化会引起因素  $Z$  的变化,因素  $Y$  的变化也会引起  $Z$  的变化,故试验设计时也考虑了  $X$  和  $Z$  的交互作用  $X \times Z$ ,  $Y$  和  $Z$  的交互作用  $Y \times Z$ , 因此采用正交试验表  $L_{27}(3^13)$  来安排试验,正交表表头设

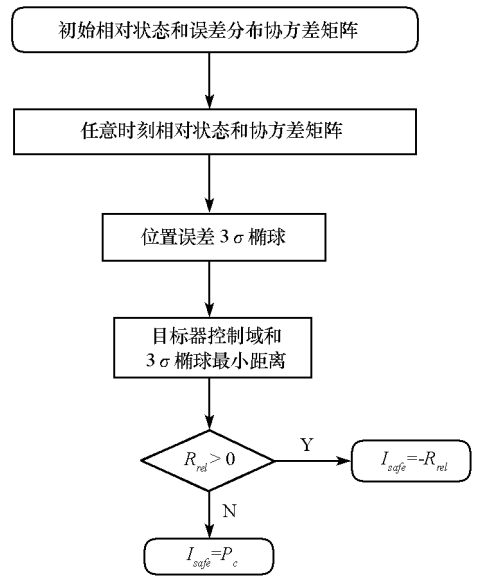


图2 安全性定量评价指标体系计算流程

Fig. 2 Process for calculating quantitative performance index of safety

计见表2。

表1 因素水平表

Tab.1 Factors and levels

水平	X(脉冲数)	因素	
		Y(机动时间/s)	Z(脉冲间隔)
1	$X_1 = 3$	$Y_1 = 5000$	$Z_1$ 等间隔
2	$X_2 = 4$	$Y_2 = 10\ 000$	$Z_2$ 间隔渐大
3	$X_3 = 5$	$Y_3 = 15\ 000$	$Z_3$ 间隔渐小

表2 正交表  $L_{27}(3^{13})$  表头设计

Tab.2 Table header design of orthogonal table  $L_{27}(3^{13})$

列号	1	2	3	4	5	6	7
因素	Z	X	$X \times Z$	$X \times Z$	Y	$Y \times Z$	$Y \times Z$

### (3) 试验结果

通过极差分析方法和方差分析方法对试验得到的安全性指标推进剂消耗进行了分析,试验结果分析见表3和表4。

表3 因素对安全性指标的影响

Tab.3 Influence of factors on safety index

因素	Z	X	$X \times Z$	$X \times Z$	Y	$Y \times Z$	$Y \times Z$
水平1	0.012 057	0.015 821	0.013 304	0.013 743	0.019 163	0.012 629	0.011 800
水平2	0.012 614	0.011 922	0.012 880	0.012 931	0.011 948	0.012 560	0.012 651
水平3	0.013 898	0.010 825	0.012 384	0.011 894	0.007 457	0.013 380	0.014 118
极差	0.001 841	0.004 995	0.000 920	0.001 849	0.011 705	0.000 821	0.002 317
离差平方和	0.000 016	0.000 124	0.000 019		0.000 628	0.000 028	
自由度	2	2	4		2	4	
均方	0.000 008	0.000 062	0.000 005		0.000 314	0.000 007	
F值	1.432 631	11.081 440	0.860 766		56.064 212	1.271 057	
P值	0.276 727	0.001 878	0.514 610		0.000 001	0.334 528	

由极差,可以看出因素Y机动时间的影响最大,X脉冲数目次之,Z脉冲间隔变化影响最小。由显著性概率P值,同样可以看出机动时间的P值=0.000 001,远远小于0.01,影响高度显著,是影响碰撞概率主要因素,脉冲数目 $P=0.001\ 878 < 0.05$ ,影响显著,是次要影响因素,而脉冲间隔 $P > 0.2$ ,脉冲间隔和脉冲数的相互作用以及脉冲间隔和机动时间的相互作用 $P > 0.2$ ,表明它们之间不存在交互作用。由表3各因素各水平对应的安全性指标,可以看出,机动时间越长,脉冲数目越多,安全性指标越小,因此使得安全性指标尽可能小的较优的取值组合是 $X_3 Y_3 Z_1$ ,机动时间15 000s内5个等间隔脉冲。

表4 因素对推进剂消耗的影响

Tab.4 Influence of factors on fuel consumption

因素	Z	X	$X \times Z$	$X \times Z$	Y	$Y \times Z$	$Y \times Z$
水平1	11.091 446	9.8 835 922	10.691 672	10.913 401	10.429 530	11.037 332	10.907 720
水平2	11.005 202	10.947 816	11.026 247	10.779 100	11.265 806	11.089 489	10.916 801
水平3	10.681 793	11.947 033	11.060 522	11.085 940	11.083 106	10.651 620	10.953 920
极差	0.409 652	2.063 441	0.368 850	0.306 840	0.836 276	0.437 869	0.046 200
离差平方和	0.839 538	19.166 390	1.173 367		3.479 691	1.040 454	
自由度	2	2	4		2	4	
均方	0.419 769	9.583 195	0.293 342		1.739 846	0.260 114	
F值	1.159 813	26.478 146	0.810 497		4.807 153	0.718 688	
P值	0.346 336	0.000 040	0.542 063		0.029 285	0.595 332	

由极差和  $P$  值均可以看出,对推进剂消耗影响因素大小排序分别是脉冲数目 > 机动时间 > 脉冲间隔。由  $P$  值,脉冲数目  $P$  值为 0.000040,远远小于 0.01,影响高度显著,是影响推进剂消耗主要因素,机动时间  $P$  值为 0.029285,小于 0.05,影响显著,是次要影响因素,脉冲间隔  $P$  值大于 0.2,对试验结果没有影响,而脉冲间隔和脉冲数的相互作用以及脉冲间隔和机动时间的相互作用  $P$  值大于 0.2,表明它们之间不存在交互作用。由表 4,脉冲数目越少、机动时间越短,推进剂消耗就越少。

综合表 3 和表 4 的试验结果分析,机动时间和脉冲数目对安全性指标和推进剂消耗的影响是显著的,但是影响效果是相反的,一个指标性能的改善会引起另一个指标性能的降低,因此不可能使两个指标同时达到比较好的水平,只能在指标间进行协调折中,设计时有所侧重。

### 3 交会初始条件对安全性指标的影响分析

基于上一节的分析结果,得到安全性指标较优的因素组合  $X_3 Y_3 Z_1$ ,本节在机动时间 15 000s、等间隔施加 5 个脉冲的情况下,进一步分析初始条件变化对安全性指标和推进剂消耗的影响。

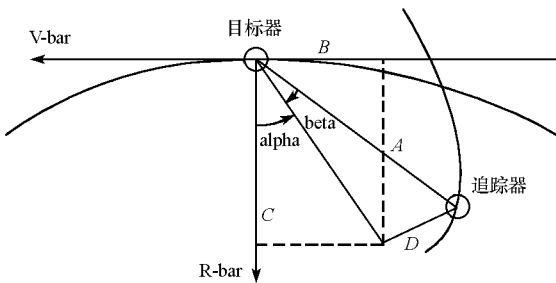


图 3 alpha 和 beta 的定义  
Fig. 3 Definition of alpha and beta

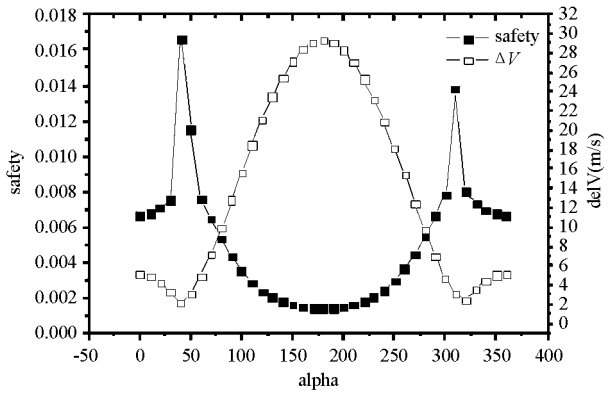


图 4 alpha 的影响 2D 图 (beta=0)  
Fig. 4 2D Figure of the influence of alpha (beta=0)

选定初始相对距离  $A = 5000\text{m}$  不变,可变因素为轨道面内追踪器距目标器后方距离  $B$ 、下方距离  $C$  和轨道面法向距离  $D$ ,定义相对距离  $A$  和目标器轨道面夹角为  $\beta$ ,从目标器顺两飞行器连线看去,相对距离  $A$  在轨道面内的投影在其下方时  $\beta$  为正;定义  $A$  在目标器轨道面内的投影和  $R$ -bar 的夹角为  $\alpha$ ,逆时针方向为正,见图 3。只要改变  $\alpha$  和  $\beta$ , $B$ 、 $C$  和  $D$  亦随之改变,因此初始条件的影响分析就是分析  $\alpha$  和  $\beta$  的变化影响。设定夹角  $\alpha$  变化范围  $[0, 360^\circ]$ , $\beta$  的变化范围  $[-10^\circ, 10^\circ]$ ,其他轨道参数取值见上节。既然有了夹角变化范围,最简单的就是打靶仿真,计算范围内的每一点(这里步长取  $1^\circ$ ),并且这样可以通过图示简单直观地呈现初始条件和指标的关系。

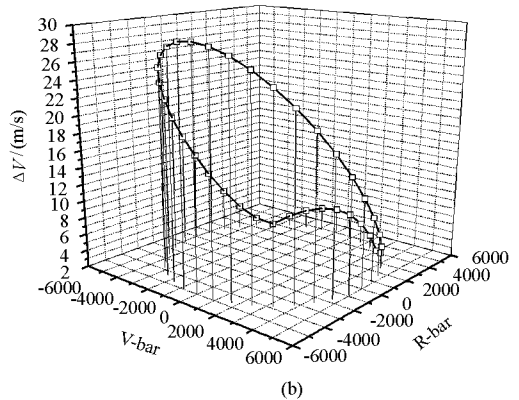
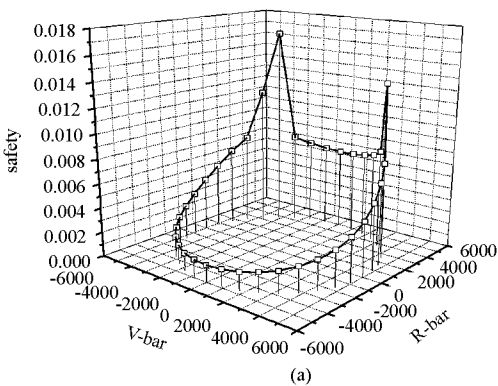


图 5 alpha 的影响 3D 图 (beta=0)  
Fig. 5 3D figure of the influence of alpha (beta=0)

首先令夹角  $\beta = 0$ , 计算分析共面情况下  $\alpha$  对安全性指标和推进剂消耗的影响。见图 4, 可以看出  $\alpha = 180^\circ$ , 即  $R\text{-bar}$  方向接近时, 安全性指标最小, 此时推进剂消耗最大。图 5(a) 给出了  $\alpha$  从  $0^\circ$  到  $360^\circ$  变化时, 随之变化的追踪器距目标器后方距离  $B$  和下方距离  $C$  对安全性指标的影响, 图 5(b) 给出了推进剂消耗随  $B$ 、 $C$  的变化, 得出的结论和图 4 是一致的。

根据上面的分析, 令夹角  $\alpha = 180^\circ$ , 计算分析  $\beta$  即交会异面程度对安全性指标和推进剂消耗的影响。见图 6,  $\beta = 0$  即共面时, 安全性指标最小, 此时推进剂消耗最大。

根据以上分析, 在交会对接过程中, 当追踪器选择从共面  $R\text{-bar}$  方向接近目标器时, 安全性指标最小, 但是此时推进剂消耗最大。

## 4 结论

考虑实际交会飞行器受到的导航、控制等误差扰动, 本文建立了交会轨迹安全性的定量评价指标体系, 把交会对接接近轨迹安全问题转化为相对位置误差分布的  $3\sigma$  椭球和目标飞行控制区域之间的相对距离或碰撞概率。然后采用正交试验设计分析了机动时间、脉冲次数、脉冲间隔等因素对交会轨迹安全性指标和推进剂消耗的影响, 经过对试验结果进行极差和方差分析得知, 机动时间是最显著的影响因素, 脉冲数目是次要影响因素, 而脉冲间隔变化影响甚微, 机动时间越长, 脉冲数目越多, 安全性指标越小, 但推进剂消耗越大。通过正交试验确定了使安全性指标尽可能小的因素水平组合, 之后进一步通过数值仿真分析了交会初始条件对安全性指标、推进剂消耗的影响。相比异面交会, 共面交会的更高; 并且对于共面交会, 当  $R\text{-bar}$  方向接近时, 安全性指标最小, 但是此时推进剂消耗最大。综上所述, 机动时间、脉冲数目是交会轨迹安全性最优设计的主要设计变量, 并且在多目标优化轨迹设计中可以根据指标的侧重, 选取适当的初始条件以机动时间和脉冲数目为优化变量进行设计。

通过对交会轨迹安全特性影响因素分析, 明确了主要和次要影响因素, 从而避免了兼顾燃料最优和安全性最优的交会轨迹设计的盲目性, 为交会轨迹多目标最优设计提供设计思路。

## 参考文献:

- [1] Kawano I, Mokuno M. 工程试验卫星 7 号的自动交会对接系统[J]. 控制工程, 1998(1): 31, 38- 46.
- [2] NASA. Overview of the DART Mishap Investigation Results[EB]. <http://www.nasa.gov/mission- page/dart/main/>
- [3] Fehse W. Automated Rendezvous and Docking of Spacecraft [M]. Cambridge University Press, 2003.
- [4] 朱仁璋, 汤溢, 尹艳. 空间交会最终平移轨迹安全模式设计[J]. 宇航学报, 2004, 25(4): 443- 447.
- [5] Veltz C. Numerical Simulator Dedicated to Validation of ATV Safety Algorithms [R]. AIAA 2002- 4966, 2002.
- [6] 王华, 李海阳, 唐国金. 基于碰撞概率的交会对接最优碰撞规避机动[J]. 宇航学报, 2008, 29(1): 220- 223.
- [7] Jacobsen S, et al. Planning of Safe Kinematics Trajectories for Free-flying Robots Approaching an Uncontrolled Spinning Satellite [C]//Proc. of ASME DETC, Montreal, Canada, 2002.
- [8] 陈长青, 解永春. 交会对接  $V\text{-bar}$  负向单脉冲撤离的轨迹安全性研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(3): 807- 811.
- [9] 唐国金, 罗亚中, 张进. 空间交会对接任务规划[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [10] 杨乐平, 朱彦伟, 安雪滢. 基于组合机动的空间  $V\text{-bar}$  交会策略[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(5): 6- 10.
- [11] 陈根社, 陈新海. 空间交会对接中的安全轨迹研究[J]. 西北工业大学学报, 1994, 12(3): 365- 369.
- [12] Breger L, How J P. Safe Trajectories for Autonomous Rendezvous of Spacecraft [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Keystone, Colorado, AIAA 2006- 6584, 2006.
- [13] Luo Y Z, Tang G J, Lei Y J. Optimal Multi-Objective Linearized Rendezvous[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2007, 30(2): 383- 389.

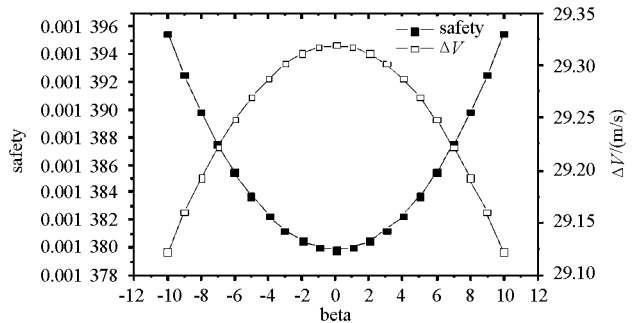


图 6  $\beta$  的影响 2D 图 ( $\alpha = 180^\circ$ )

Fig. 6 2D figure of the influence of  $\beta$  ( $\alpha = 180^\circ$ )