



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112949074 B

(45) 授权公告日 2023. 10. 20

(21) 申请号 202110271992.1

(22) 申请日 2021.03.12

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 112949074 A

(43) 申请公布日 2021.06.11

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所  
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

专利权人 中国科学院力学研究所广东空天  
科技研究院

(72) 发明人 冯冠华 李文皓 张珩

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理  
事务所(普通合伙) 11390  
专利代理师 胡剑辉

(51) Int. Cl.  
G06F 30/20 (2020.01)

(56) 对比文件

CN 109502058 A, 2019.03.22

CN 110395412 A, 2019.11.01

CN 110510153 A, 2019.11.29

KR 100865157 B1, 2008.10.24

Zhong, HW等.Cobb-Douglas Function, evaluating the best five active removal methods of space junk.《PROCEEDINGS OF THE 2016 2ND WORKSHOP ON ADVANCED RESEARCH AND TECHNOLOGY IN INDUSTRY APPLICATIONS》.2017,第81卷579-582.

刘亚鑫;李怡勇.基于FAHP小卫星星座碎片化风险评估.兵器装备工程学报.2020,(第07期),213-218.

审查员 刘晓丹

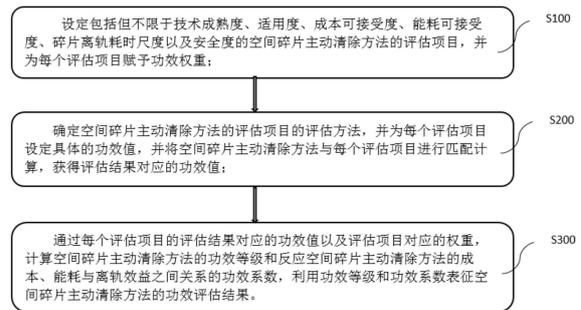
权利要求书3页 说明书9页 附图1页

(54) 发明名称

一种空间碎片主动清除方法的功效评估方法与系统

(57) 摘要

本发明公开了一种空间碎片主动清除方法的功效评估方法,设定空间碎片主动清除方法的评估项目,为每个评估项目赋予功效权重;确定空间碎片主动清除方法的评估项目的评估方法,为每个评估项目设定具体的功效值,并将空间碎片主动清除方法与每个评估项目进行匹配计算,获得评估结果对应的功效值;计算空间碎片主动清除方法的功效等级和反应空间碎片主动清除方法的成本、能耗与离轨效益之间关系的功效系数,表征空间碎片主动清除方法的功效评估结果,其评估系统包括系统控制模块,方法信息获取模块和评估项目计算模块。本发明定义了方法的功效等级、功效系数,可有效反应和明晰方法的总体特性和局部特性,简单、明晰,给各个概念/方法的准确评估。



1. 一种空间碎片主动清除方法的功效评估方法,其特征在于,包括步骤:

S100、设定包括但不限于技术成熟度、适用度、成本可接受度、能耗可接受度、碎片离轨耗时尺度以及安全度的空间碎片主动清除方法的评估项目,并为每个评估项目赋予功效权重;

S200、确定空间碎片主动清除方法的评估项目的评估方法,并为每个评估项目设定具体的功效值,并将空间碎片主动清除方法与每个评估项目进行匹配计算,获得评估结果对应的功效值;

S300、通过每个评估项目的评估结果对应的功效值以及评估项目对应的权重,计算空间碎片主动清除方法的功效等级和反应空间碎片主动清除方法的成本、能耗与离轨效益之间的功效系数,利用功效等级和功效系数表征空间碎片主动清除方法的功效评估结果;

在S100中,所述技术成熟度,设定为技术成熟度描述,空间碎片主动清除方法的技术等级和技术成熟等级对应的功效值;

所述适用度,设定为从空间碎片尺度和空间碎片轨道分布情况确定碎片主动清除方法的适用度的功效值;

所述成本可接受,设定为系统结构复杂度、系统尺度、系统制造难度、系统可维护/重复性,以及系统研制预算五个方面的加和的功效值;

所述能耗可接受度,设定为以空间碎片主动清除方法在发射段和任务段的组合能量消耗量为可接受度的功效值;

所述碎片离轨耗时尺度,设定为空间碎片主动清除方法的目标碎片离轨所需时间的功效值;

所述安全度,设定为空间碎片主动清除方法是否会在方法进行过程中产生新的空间碎片,以及二次产生碎片的概率的功效值;

空间碎片主动清除方法与技术成熟度、适用度、成本可接受度、能耗可接受度、碎片离轨耗时尺度以及安全度的设定进行匹配,并获得每个设定对应的功效值;

其中,定义碎片主动清除方法的反应方法的总体成本和能耗与他的离轨效益之间的关系的功效系数为E;

方法的总体功效系数为 $S_e+S_c/S_t$ 和空间任务段功效系数 $S_{em}/S_t$ ,则:

$$E = \begin{cases} \frac{S_c+S_e}{S_t} \\ \frac{S_{em}}{S_t} \end{cases};$$

其中, $S_c$ 表示成本可接受度的功效值, $S_e$ 表示能耗可接受度的功效值; $S_t$ 表示碎片离轨耗时尺度的功效值; $S_{em}$ 表示空间任务段的消耗量的功效值;

功效系数E越大,说明方法能在较少的成本和能耗支持下,用较短的时间离轨目标碎片,表明方法好,反之则表明方法不好;

方法的空间任务段功效系数E更针对性的反应空间任务时的功效,同样是功效系数越大,说明方法能在较少的空间任务能耗支持下,用较短的时间离轨目标碎片。

2. 根据权利要求1所述的一种空间碎片主动清除方法的功效评估方法,其特征在于,所述技术成熟度设定的技术成熟度描述包括碎片主动清除方法的理论可行性,以及在理论可

行性下的技术问题或试验案例或应用规模的限定,根据设定的技术成熟度描述分为0-10等级,并对应赋予0-10等级的功效值数值。

3.根据权利要求1所述的一种空间碎片主动清除方法的功效评估方法,其特征在于,所述适用度设定的空间碎片尺度根据尺度从大到小约定:

空间碎片主动清除方法适用的碎片尺度越小,则相应的功效值 $S_{a1}$ 越高,以及空间碎片主动清除方法适用的碎片尺度范围越宽,则相应的功效值 $S_{a1}$ 越高;

所述适用度的空间碎片的分布轨道情况具体包括空间碎片轨道高度、空间碎片的轨道倾角,空间碎片的分部轨道情况的功效值定义为 $S_{a2}$ ;

所述适用度的整体的功效值定义为 $S_a$ ,其计算公式为:

$$S_a = \sum_{i=1} S_i \omega_i, i=1,2,L;$$

其中, $0 \leq \omega_i \leq 1$ ,且 $\sum \omega_i = 1$ ;  $S_i = S_{a1}, S_{a2}$ ;  $\omega_i$ 表示所述适用度设定的空间碎片尺度和空间碎片的分布轨道情况的对应功效值 $S_{a1}, S_{a2}$ 的权重。

4.根据权利要求1所述的一种空间碎片主动清除方法的功效评估方法,其特征在于,所述能耗可接受度,用于根据碎片主动清除方法的能量具体包括发射时消耗量和任务时消耗量确定能耗可接受度的功效值;

其中,消耗量包括工质消耗量和电能消耗量两种形式,并通过发射时消耗量和任务时消耗量的单个或组合形式进行能耗可接受度的功效值 $S_e$ ,其计算公式为:

$$S_e = S_{e1} + S_{em};$$

其中, $S_{e1}$ 为地面发射段/任务段的消耗量, $S_{em}$ 为空间任务段的消耗量。

5.根据权利要求4所述的一种空间碎片主动清除方法的功效评估方法,其特征在于,其中,碎片主动清除方法的能量具体包括发射时消耗量和任务时消耗量确定能耗可接受度的具体取值方法为:

将仅有电能消耗的地基激光推移方法的能耗可接受度取值为100,将其消耗的电能和工质均转化为统一的热量,得到该方法的电能和工质消耗量为 $C_1$ ;

将需要发射段和消耗工质的空间捕获拖拽方法的能耗可接受度取值为0,将其消耗的电能和工质均转化为统一的热量,得到该方法的电能和工质消耗量为 $C_m$ ;

并根据工质消耗量和电能消耗量两种形式对空间碎片主动清除方法进行动态更新评估,动态更新评估的具体方法为:

记空间碎片主动清除方法的电能消耗量和工质消耗量为 $C_j$ ,新提出的空间碎片主动清除方法,其电能和工质消耗量小于 $C_1$ 或大于 $C_m$ ,则重新定义分值0或100取为该方法,得到更新的能耗可接受度取值计算公式:

$$S_e = \left\lfloor \frac{C_m - C_j}{C_m - C_1} \times 100 \right\rfloor。$$

6.根据权利要求1所述的一种空间碎片主动清除方法的功效评估方法,其特征在于,将安全度的功效值设定为 $S_s$ ,并将二次碎片产生的概率对应转换为相应的百分制分值,作为 $S_t$ 的值,其中分值0表示二次碎片产生的概率最大,方法的安全度最低;分值100表示二次碎片产生的概率最小,方法的安全度最高,安全度的功效值计算方法公式为:

$$S_s = 100 \times (1 - P_s)$$

式中, $P_s$ 为二次产生碎片的概率。

7. 根据权利要求1所述的一种空间碎片主动清除方法的功效评估方法,其特征在于,在S100中,用于赋予技术成熟度,适用度,成本可接受,能耗可接受度,离轨耗时尺度和安全度的功效值的权重,给出碎片主动清除方法的功效评估结果为S,S的计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^L S_i \omega_i, i=1,2,L;$$

其中, $0 \leq \omega_i \leq 1$ ,且 $\sum \omega_i = 1$ , $S_i, \omega_i$ 为技术成熟度,适用度,成本可接受,能耗可接受度,耗时尺度和安全度的评估结果和结果对应的权重。

8. 一种基于权利要求1-7任意一项所述的空间碎片主动清除方法的功效评估系统,其特征在于,包括系统控制模块,方法信息获取模块和评估项目计算模块;

所述方法信息获取模块,用于对输入的空间碎片主动清除方法的信息进行主动的网络抓取或提供方法的信息输入界面;

所述评估项目计算模块用于对所述方法信息获取模块的空间碎片主动清除方法的信息数据进行包括技术成熟度单元,适用度单元,成本可接受单元,能耗可接受度单元,耗时尺度单元和安全度单元的评估,并获取对应的功效值;

所述系统控制模块,用于赋予所述技术成熟度单元,所述适用度单元,所述成本可接受单元,所述能耗可接受度单元,所述耗时尺度单元和所述安全度单元的功效值的权重,并通过功效值和权重计算功效等级,或根据功效值计算功效系数两个参量值,给出碎片主动清除方法的功效评估结果。

## 一种空间碎片主动清除方法的功效评估方法与系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及空间碎片清除技术领域,具体涉及一种空间碎片主动清除方法的功效评估方法与系统。

### 背景技术

[0002] 空间碎片是人类空间活动的产物,对空间资源造成了巨大威胁。由于废弃卫星、火箭末级、灾难性解体或碰撞等,已在地球空间轨道形成了碎片带,其中70%的空间碎片分布在低地球轨道,剩下大部分集中在地球同步轨道,仅靠碎片的自然轨道衰减而进入大气层烧毁,很难在短期内减少空间碎片的增长速度。因此,大量的空间碎片主动清除概念、方法被提出,相应的地面/空间演示验证实验被实施。然而,没有一种方法或概念能够有效地清除合作/非合作的、翻转的、不同轨道高度/轨道倾角的空间碎片,到目前为止仍没有一次在轨实际任务实现空间碎片的清除。2019年,RemoveDEBRIS是世界上首次完成在轨主动碎片清除演示验证的卫星任务,成功验证了空间飞网、飞矛、视觉导航捕获等技术。但是主动碎片清除依旧是亟待解决的技术难题。

[0003] 目前问题:

[0004] 大量文献或报道实现了对现有的空间碎片清除方法进行了分类、优缺点罗列等工作,提供了有效的方法对比,但是他们仅罗列方法优缺点,对地面/空间是否易于实施等方面进行了综述,现有的空间碎片清除的概念/方法的成本及效率被忽略,而概念/方法的成本及效率正是目前限制所有方法无法得到实际空间实施的关键因素。

[0005] 综上,现有的针对空间碎片清除方法缺少综合性的空间碎片清除的概念/方法的成本及效率的评估方法。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种空间碎片主动清除方法的功效评估方法与系统,以解决现有的针对空间碎片清除方法缺少综合性的空间碎片清除的概念/方法的成本及效率的评估方法的技术问题。

[0007] 为解决上述技术问题,本发明具体提供下述技术方案:

[0008] 一种空间碎片主动清除方法的功效评估方法,包括步骤:

[0009] S100、设定包括但不限于技术成熟度、适用度、成本可接受度、能耗可接受度、碎片离轨耗时尺度以及安全度的空间碎片主动清除方法的评估项目,并为每个评估项目赋予功效权重;

[0010] S200、确定空间碎片主动清除方法的评估项目的评估方法,并为每个评估项目设定具体的功效值,并将空间碎片主动清除方法与每个评估项目进行匹配计算,获得评估结果对应的功效值;

[0011] S300、通过每个评估项目的评估结果对应的功效值以及评估项目对应的权重,计算空间碎片主动清除方法的功效等级和反应空间碎片主动清除方法的成本、能耗与离轨

效益之间关系的功效系数,利用功效等级和功效系数表 征空间碎片主动清除方法的功效评估结果。

[0012] 作为本发明的一种优选方案,在S100中,所述技术成熟度,设定为技术 成熟度描述,空间碎片主动清除方法的技术等级和技术成等级对应的功效值;

[0013] 所述适用度,设定为从空间碎片尺度和空间碎片轨道分布情况确定碎片 主动清除方法的适用度的功效值;

[0014] 所述成本可接受,设定为系统结构复杂度、系统尺度、系统制造难度、 系统可维护/重复性,以及系统研制预算五个方面的加和的功效值;

[0015] 所述能耗可接受度,设定为以空间碎片主动清除方法在发射段和任务段 的组合能量消耗量为可接受度的功效值;

[0016] 所述碎片离轨耗时尺度,设定为空间碎片主动清除方法的目标碎片离轨 所需时间的功效值;

[0017] 所述安全度,设定为空间碎片主动清除方法是否会在方法进行过程中产 生新的空间碎片,以及二次产生碎片的概率的功效值;

[0018] 空间碎片主动清除方法的与技术成熟度、适用度、成本可接受度、能耗 可接受度、碎片离轨耗时尺度以及安全度的设定进行匹配,并获得每个设定 对应的功效值。

[0019] 作为本发明的一种优选方案,所述技术成熟度设定的技术成熟度描述包 括碎片主动清除方法的理论可行性,以及在理论可行性下的技术问题或试验 案例或应用规模的限定,根据设定的技术成熟度描述分为0-10等级,并对应 赋予0-10等级的功效值数值。

[0020] 作为本发明的一种优选方案,所述适用度设定的空间碎片尺度根据尺度 从大到小约定:

[0021] 空间碎片主动清除方法适用的碎片尺度越小,则相应的功效值 $S_{a1}$ 越高, 以及空间碎片主动清除方法适用的碎片尺度范围越宽,则相应的功效值 $S_{a1}$ 越 高;

[0022] 所述适用度的空间碎片的分布轨道情况具体包括空间碎片轨道高度、空 间碎片的轨道倾角,空间碎片的分部轨道情况的功效值定义为 $S_{a2}$ ;

[0023] 所述适用度的整体的功效值定义为 $S_a$ ,其计算公式为:

$$[0024] \quad S_a = \sum_{i=1}^L S_i \omega_i, i=1,2,L;$$

[0025] 其中, $0 \leq \omega_i \leq 1$ ,且 $\sum \omega_i = 1$ ;  $S_i = S_{a1}, S_{a2}$ ;  $\omega_i$ 表示所述适用度设定的 空间碎片尺度和空间碎片的分布轨道情况的对应功效值 $S_{a1}, S_{a2}$ 的权重。

[0026] 作为本发明的一种优选方案,所述能耗可接受度,用于根据碎片主动清 除方法的能量具体包括发射时消耗量和任务时消耗量确定能耗可接受度的功 效值;

[0027] 其中,消耗量包括工质消耗量和电能消耗量两种形式,并通过发射时消 耗量和任务时消耗量的单个或组合形式进行能耗可接受度的功效值 $S_e$ ,其计 算公式为:

$$[0028] \quad S_e = S_{e1} + S_{em};$$

[0029] 其中, $S_{e1}$ 为地面发射段/任务段的消耗量, $S_{em}$ 为空间任务段的消耗量。

[0030] 作为本发明的一种优选方案,其中,碎片主动清除方法的能量具体包括 发射时消耗量和任务时消耗量确定能耗可接受度的具体取值方法为:

[0031] 将仅有电能消耗的地基激光推移方法的能耗可接受度取值为100,将其消 耗的电能和工质均转化为统一的热量,得到该方法的电能和工质消耗量为 $C_1$ ;

[0032] 将需要发射段和消耗工质的空间捕获拖拽方法的能耗可接受度取值为0，将其消耗的电能和工质均转化为统一的热量，得到该方法的电能和工质消耗量为 $C_m$ ；

[0033] 并根据工质消耗量和电能消耗量两种形式对空间碎片主动清除方法进行动态更新评估，动态更新评估的具体方法为：

[0034] 记空间碎片主动清除方法的电能消耗量和工质消耗量为 $C_j$ ，新提出的空间碎片主动清除方法，其电能和工质消耗量小于 $C_1$ 或大于 $C_m$ ，则重新定义分值0或100取为该方法，得到更新的能耗可接受度取值计算公式：

$$[0035] \quad S_e = \left\lfloor \frac{C_m - C_j}{C_m - C_1} \times 100 \right\rfloor。$$

[0036] 作为本发明的一种优选方案，将安全度的功效值设定为 $S_s$ ，并将二次碎片产生的概率对应转换为相应的百分制分值，作为 $S_t$ 的值，其中分值0表示二次碎片产生的概率最大，方法的安全度最低；分值100表示二次碎片产生的概率最小，方法的安全度最高，安全度的功效值计算方法公式为：

$$[0037] \quad S_s = 100 \times (1 - P_s)$$

[0038] 式中， $P_s$ 为二次产生碎片的概率。

[0039] 在S100中，用于赋予技术成熟度，适用度，成本可接受，能耗可接受度，离轨耗时尺度和安全度的功效值的权重，给出碎片主动清除方法的功效评估结果为S，S的计算公式为：

$$[0040] \quad S = \sum_{i=1}^L S_i \omega_i, i=1, 2, L;$$

[0041] 其中， $0 \leq \omega_i \leq 1$ ，且 $\sum \omega_i = 1$ ， $S_i$ ， $\omega_i$ 为技术成熟度，适用度，成本可接受，能耗可接受度，耗时尺度和安全度的评估结果和结果对应的权重。

[0042] 作为本发明的一种优选方案，定义碎片主动清除方法的反应方法的总体成本和能耗与他的离轨效益之间的关系的功效系数为E；

[0043] 方法的总体功效系数为 $S_e + S_c / S_t$ 和空间任务段功效系数 $S_{em} / S_t$ ，则：

$$[0044] \quad E = \begin{cases} \frac{S_c + S_e}{S_t} \\ \frac{S_{em}}{S_t} \end{cases}。$$

[0045] 功效系数E越大，说明方法能在较少的成本和能耗支持下，用较短的时间离轨目标碎片，表明方法好，反之则表明方法不好；

[0046] 方法的空间任务段功效系数E更针对性的反应空间任务时的功效，同样是功效系数越大，说明方法能在较少的空间任务能耗支持下，用较短的时间离轨目标碎片。

[0047] 本发明提供了一种基于所述的空间碎片主动清除方法的功效评估系统，包括系统控制模块，方法信息获取模块和评估项目计算模块；

[0048] 所述方法信息获取模块，用于对输入的空间碎片主动清除方法的信息进行主动的网络抓取或提供方法的信息输入界面；

[0049] 所述评估项目计算模块用于对所述方法信息获取模块的空间碎片主动清除方法的信息数据进行包括技术成熟度单元，适用度单元，成本可接受单元，能耗可接受度单元，耗时尺度单元和安全度单元的评估，并获取对应的功效值；

[0050] 所述系统控制模块，用于赋予所述技术成熟度单元，所述适用度单元，所述成本

可接受单元,所述能耗可接受度单元,所述耗时尺度单元和所述安全度单元的能效值的权重,并通过能效值和权重计算能效等级,或根据能效值计算能效系数两个参量值,给出碎片主动清除方法的能效评估结果。

[0051] 本发明与现有技术相比较具有如下有益效果:

[0052] 本发明可用于评估现有空间碎片清除的概念/方法的成本及效率,具体可包括概念/方法的工作质量消耗、碎片清除周期等;能效评估方法与系统方法简单、明晰,给各个概念/方法的发展与应用提供指导,为空间碎片主动清除新方法发展提供导向;创新性地定义了方法的能效等级、能效系数,可有效反应和明晰方法的总体特性和局部特性。

### 附图说明

[0053] 为了更清楚地说明本发明的实施方式或现有技术中的技术方案,下面将对实施方式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍。显而易见地,下面描述中的附图仅仅是示例性的,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据提供的附图引伸获得其它的实施附图。

[0054] 图1为本发明实施例提供空间碎片主动清除方法的能效评估方法的流程图示意图。

### 具体实施方式

[0055] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0056] 如图1所示,本发明提供了一种空间碎片主动清除方法,包括步骤:

[0057] S100、设定包括但不限于技术成熟度、适用度、成本可接受度、能耗可接受度、碎片离轨耗时尺度以及安全度的空间碎片主动清除方法的评估项目,并为每个评估项目赋予能效权重;

[0058] S200、确定空间碎片主动清除方法的评估项目的评估方法,并为每个评估项目设定具体的能效值,并将空间碎片主动清除方法与每个评估项目进行匹配计算,获得评估结果对应的能效值;

[0059] S300、通过每个评估项目的评估结果对应的能效值以及评估项目对应的权重,计算空间碎片主动清除方法的能效等级和反应空间碎片主动清除方法的成本、能耗与离轨效益之间关系的能效系数,利用能效等级和能效系数表征空间碎片主动清除方法的能效评估结果。

[0060] 在S100中,技术成熟度,设定为技术成熟度描述,空间碎片主动清除方法的技术等级和技术成熟度等级对应的能效值。

[0061] 技术成熟度设定的技术成熟度描述包括碎片主动清除方法的理论可行性,以及在理论可行性下的技术问题或试验案例或应用规模的限定,根据设定的技术成熟度描述分为0-10等级,并对应赋予0-10等级的能效值数值。其中分值0表示技术成熟度最低,分值100表示技术成熟度最高,如表1所示。

[0062] 例如:针对目前发展较好的空间电动绳系,该方法理论完善,系统搭建基础理论

完善,美国、苏联、日本等国家有过在轨演示验证实验案例,同时有完全在轨部署成功并实现变轨的成功案例,且目前成功记录数不超过3次,因此可以按照表1中的技术成熟度描述,属于等级7,依此来对空间电动绳系方法的技术成熟度进行功效值 $S_m$ 取值, $S_m=80$ ,如表1所示。

[0063] 表1技术成熟度等级划分

等级	成熟度描述	分值
0	理论未完全形成,处于概念阶段	0~10
1	理论可行,但有关键问题待解决	11~20
2	理论可行,技术得到初步发展	21~30
3	技术可行,但有关键技术待解决	31~40
4	技术可行	41~50
5	技术可行,有地面试验成功案例	51~60
6	技术可行,有过在轨演示验证实验案例	61~70
7	技术可行,有三次以内的在轨演示验证实验成功案例	71~80
8	技术可行,有三次及以上的在轨演示验证实验成功案例	81~90
9	技术可行,并已小规模实际应用	91~99
10	技术可行,并已大规模实际应用,得到世界认可	100

[0065] 适用度,设定为从空间碎片尺度和空间碎片轨道分布情况确定碎片主动清除方法的适用度的功效值。

[0066] 适用度设定的空间碎片尺度根据尺度从大到小约定:

[0067] 空间碎片主动清除方法适用的碎片尺度越小,则相应的功效值 $S_{a1}$ 越高,以及空间碎片主动清除方法适用的碎片尺度范围越宽,则相应的功效值 $S_{a1}$ 越高;

[0068] 地球空间轨道有较多的具有重要科研、军用/民用价值的轨道,对于各类清除方法,如果能更适用于这类有价值轨道区域,则相应的得分越高;更适用于这类有价值轨道的区域越多,则相应的得分越高。

[0069] 适用度的空间碎片的分布轨道情况具体包括空间碎片轨道高度、空间碎片的轨道倾角,空间碎片的分部轨道情况的功效值定义为 $S_{a2}$ ;

[0070] 适用度的整体的功效值定义为 $S_a$ ,其计算公式为:

$$[0071] \quad S_a = \sum_{i=1}^L S_i \omega_i, i=1, 2, L;$$

[0072] 其中, $0 \leq \omega_i \leq 1$ ,且 $\sum \omega_i = 1$ ;  $S_i = S_{a1}, S_{a2}$ ;  $\omega_i$ 表示适用度设定的空间碎片尺度和空间碎片的分布轨道情况的对应功效值 $S_{a1}, S_{a2}$ 的权重。

[0073] 例:

[0074] 碎片尺度:按照美国空间监测网的跟踪统计及分类,将空间碎片的尺度主要分为如下表4所示的4类,此处采用20-20-30-30的分布取值,当然不排除采用其他分类、分值分布情况。

[0075] 表4空间碎片的尺度及其分值

尺度编号	碎片尺度	分值
1	<1mm	20
2	1~10mm	20

3	1~10cm	30
4	>10cm	30

[0077] 碎片分布轨道区域:按照欧空局官方公布的数据,将空间碎片的重点分布区域为以下几个区域,如表5所示,包括L1~L5、G共计6个区域,对应采

[0078] 表5空间碎片的轨道区域及其得分

轨道区域	编号	轨道高度	轨道倾角	备注	分值
低地球轨道 (LEO)	L1	750±100km	86±1°	通信卫星星座	16
	L2	800±100km	99±1°	太阳同步轨道(SSO)	16
	L3	850±100km	71±1°	火箭壳体	16
	L4	1000±100km	82±1°	卫星星座	16
	L5	1400±100km	82±1°	卫星星座	16
地球同步轨道 (GEO)	G	35786±200km	纬度±15°	坟墓轨道(Graveyard Orbit)	20

[0080] 用16-16-16-16-16-20的分布取值,当然不排除采用其他分类、分值分布情况。对于上述两方面,分值越小表示该项的指标最差,分值越大表示该项的指标最好。

[0081] 针对空间机械臂拖拽离轨方法,其仅较适用于尺度>10cm的碎片清除,并适用于表2所示的所有轨道区域,因此将其 $S_{a1}$ , $S_{a2}$ 分别取值为 $S_{a1}=30$ 和 $S_{a2}=16+16+16+16+16+20=100$ ,此处对应的 $\omega_{a1}$ 和 $\omega_{a2}$ 取为 $\omega_{a1}=\omega_{a2}=0.5$ ,因此,空间机械臂拖拽离轨方法的适用度的功效取值计算公式为:

[0082]  $S_a = \sum_{i=1} S_{ai} \omega_{ai} = S_{a1} \omega_{a1} + S_{a2} \omega_{a2} = (30+100) \times 0.5 = 65$ 。

[0083] 成本可接受,设定为系统结构复杂度、系统尺度、系统制造难度、系统可维护/重复性,以及系统研制预算五个方面的加和的功效值,五个方面各项 占分均为0~20,其中分值0表示该项的成本可接受度最差,分值20表示该项 的成本可接受度最好,最后取五项的加和,取值为 $S_c$ 。

[0084] 能耗可接受度,设定为以空间碎片主动清除方法在发射段和任务段的组合能量消耗量为可接受度的功效值。

[0085] 能耗可接受度,用于根据碎片主动清除方法的能量具体包括发射时消耗量和任务时消耗量确定能耗可接受度的功效值;

[0086] 其中,消耗量包括工质消耗量和电能消耗量两种形式,并通过发射时消耗量和任务时消耗量的单个或组合形式进行能耗可接受度的功效值 $S_e$ ,其计算公式为:

[0087]  $S_e = S_{e1} + S_{em}$ ;如表2所示

[0088] 表2系统研制成本分项划分

项	指标	分值
1	系统结构复杂度	0~20
2	系统尺度	0~20
3	系统制造难度	0~20

4	系统可维护&重复性	0~20
5	系统研制预算	0~20

[0090] 其中,  $S_{e1}$  为地面发射段/任务段的消耗量,  $S_{em}$  为空间任务段的消耗量。

[0091] 发射时消耗量和任务时消耗量的单个或组合形式具体包括:

[0092] 考虑到大部分清除方法需要借助空间任务执行,空间任务过程中,任务部署及机动、碎片清除等均消耗航天器的工作质量(如液体推进剂),来达到碎片清除目的,诸如此类方法采用“发射时工质消耗量+任务时的工质消耗量”来评估他们的能耗可接受度;

[0093] 此外,诸如地基激光推移方法,其系统无需发射空间任务,只需在地面提供电能即可完成碎片清除任务,诸如此类方法采用“任务时的电能消耗量”来评估他们的能耗可接受度;

[0094] 地磁储能-释能投送离轨方法的系统平台需要借助发射任务,母航天器平台发射升空后,整个碎片清除过程中的任务部署及机动、碎片离轨无需消耗任何工作质量,仅消耗来自航天器太阳能板转换的电能,诸如此类方法采用“发射时的工质消耗量+任务时的电能消耗量”来评估他们的能耗可接受度。

[0095] 其中,碎片主动清除方法的能量具体包括发射时消耗量和任务时消耗量确定能耗可接受度的具体取值方法为:

[0096] 将仅有电能消耗的地基激光推移方法的能耗可接受度取值为100,将其消耗的电能和工质均转化为统一的热量,得到该方法的电能和工质消耗量为  $C_1$ ;

[0097] 将需要发射段和消耗工质的空间捕获拖拽方法的能耗可接受度取值为0,将其消耗的电能和工质均转化为统一的热量,得到该方法的电能和工质消耗量为  $C_m$ ;

[0098] 并根据工质消耗量和电能消耗量两种形式对空间碎片主动清除方法进行动态更新评估,动态更新评估的具体方法为:

[0099] 记空间碎片主动清除方法的电能消耗量和工质消耗量为  $C_j$ ,新提出的空间碎片主动清除方法,其电能和工质消耗量小于  $C_1$  或大于  $C_m$ ,则重新定义分值0或100取为该方法,得到更新的能耗可接受度取值计算公式:

$$[0100] \quad S_e = \left[ \frac{C_m - C_j}{C_m - C_1} \times 100 \right]。$$

[0101] 碎片离轨耗时尺度,设定为空间碎片主动清除方法的目标碎片离轨所需时间的功效值;

[0102] 以较低地球轨道(如轨道高度为的圆轨道)作为目标轨道,将碎片从其原始轨道转移到目标轨道所消耗的时间,作为考虑主动清除方法的又一项指标,取单位质量空间碎片的离轨时间作为具体考量指标,此处提供了如下表3所示的一种碎片离轨时间分级及其分值,将离轨时间分为1~5共计五个等级,分别对应相应的离轨时间量级及分值,当然不排除采用其他时间量级分段及其分值划定方法,其中分值0表示碎片离轨耗时最少,分值100表示碎片离轨耗时最多。将碎片离轨耗时的取值定义为  $S_t$ 。

[0103] 例如:地磁储能-地磁储能-释能投送离轨方法,适用于清除轨道高度小于1000km的任意轨道(倾角、偏心率均任意)上的空间碎片,经理论验证该方法可在数小时(几个轨道周期,单周期约100min)内实现10kg的空间碎片转移到轨道高度为150km的圆轨道上,因此参照表3,将其换算到单位质量的空间碎片,应取等级5,分值取为  $S_t = 2$ 。

[0104] 再例:同样针对空间电动绳系,该方法同样只适用于清除轨道高度小于 1000km的轨道上的空间碎片,已有证据表明通过太阳能使电动力绳产生电动 推力,可以在几个月内将单位质量的空间碎片离轨,因此参照表3,该方法应 取等级3,最终分值取为 $S_t=57$ 。

[0105] 表3单位质量空间碎片的离轨时间分级及其分值

等级	碎片离轨时间量级	分值
1	数年	81~100
2	半年~一年	61~80
3	数月~半年	41~60
4	数天~数月	21~40
5	数小时~数天	0~20

[0107] 安全度,设定为空间碎片主动清除方法是否会在方法进行过程中产生新 的空间碎片,以及二次产生碎片的概率的能效值;

[0108] 空间碎片主动清除方法的与技术成熟度、适用度、成本可接受度、能耗 可接受度、碎片离轨耗时尺度以及安全度的设定进行匹配,并获得每个设定 对应的能效值。

[0109] 将安全度的能效值设定为 $S_s$ ,并将二次碎片产生的概率对应转换为相应的 百分制分值,作为 $S_t$ 的值,其中分值0表示二次碎片产生的概率最大,方法的 安全度最低;分值100表示二次碎片产生的概率最小,方法的安全度最高, 安全度的能效值计算方法公式为:

$$[0110] \quad S_s = 100 \times (1 - P_s)$$

[0111] 式中, $P_s$ 为二次产生碎片的概率。

[0112] 为了更直观地展现分项及整体能效评估结果,选择通过最终的图片、表 格等形式将能效评估结果聚合显示,使人能够更总体把握方法的特性,作为 进一步研究的参考,在S100中,用于赋予技术成熟度,适用度,成本可接受, 能耗可接受度,离轨耗时尺度和安全度的能效值的权重,给出碎片主动清除方法的能效评估结果为S,S的计算公式为:

$$[0113] \quad S = \sum_{i=1}^L S_i \omega_i, i=1,2,L;$$

[0114] 其中, $0 \leq \omega_i \leq 1$ ,且 $\sum \omega_i = 1$ , $S_i$ ,  $\omega_i$ 为技术成熟度,适用度,成本可 接受,能耗可接受度,耗时尺度和安全度的评估结果和结果对应的权重。

[0115] 定义碎片主动清除方法的反应方法的总体成本和能耗与他的离轨效益之 间的关系的能效系数为E;

[0116] 方法的总体能效系数为 $S_e + S_c / S_t$ 和空间任务段能效系数 $S_{em} / S_t$ ,则:

$$[0117] \quad E = \begin{cases} \frac{S_c + S_e}{S_t} \\ \frac{S_{em}}{S_t} \end{cases}。$$

[0118] 能效系数E越大,说明方法能在较少的成本和能耗支持下,用较短的时间 离轨目 标碎片,表明方法好,反之则表明方法不好;

[0119] 方法的空间任务段能效系数E更针对性的反应空间任务时的能效,同样是 能效系数越大,说明方法能在较少的空间任务能耗支持下,用较短的时间离 轨目标碎片,如表6所示。

[0120] 表6主动清除方法能效评级

[0121]	整体功效评估结果	功效级别
	96~100	SSS
	90~95.9	SS
	86~89.9	S
	80~85.9	A+
	76~79.9	A
	70~75.9	B+
	60~69.9	B
	40~59.9	C
	0~39.9	D

[0122] 本发明还提供了一种基于上述的空间碎片主动清除方法的功效评估系统，包括系统控制模块，方法信息获取模块和评估项目计算模块；

[0123] 方法信息获取模块，用于对输入的空间碎片主动清除方法的信息进行主动的网络抓取或提供方法的信息输入界面；

[0124] 评估项目计算模块用于对方法信息获取模块的空间碎片主动清除方法的信息数据进行包括技术成熟度单元，适用度单元，成本可接受单元，能耗可接受度单元，耗时尺度单元和安全度单元的评估，并获取对应的功效值；

[0125] 系统控制模块，用于赋予技术成熟度单元，适用度单元，成本可接受单元，能耗可接受度单元，耗时尺度单元和安全度单元的功效值的权重，并通过功效值和权重计算功效等级，或根据功效值计算功效系数两个参量值，给出碎片主动清除方法的功效评估结果。

[0126] 以上实施例仅为本申请的示例性实施例，不用于限制本申请，本申请的保护范围由权利要求书限定。本领域技术人员可以在本申请的实质和保护范围内，对本申请做出各种修改或等同替换，这种修改或等同替换也应视为落在本申请的保护范围内。

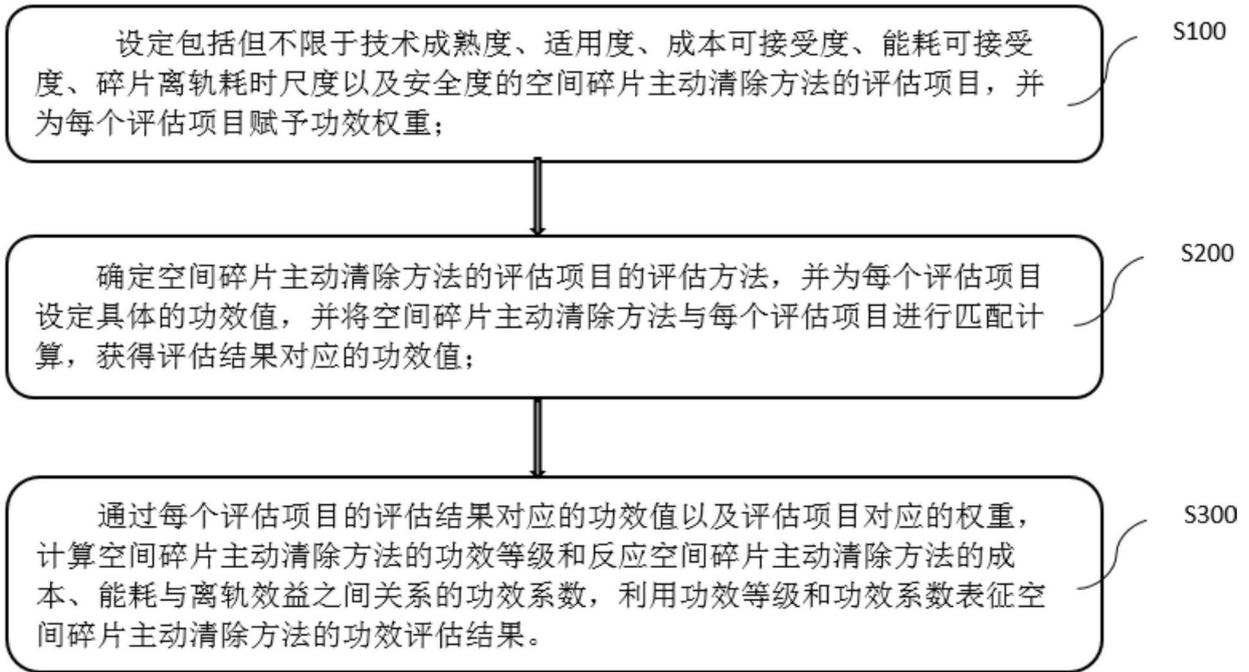


图1