



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110990943 B

(45) 授权公告日 2023.10.20

(21) 申请号 201911106889.0
 (22) 申请日 2019.11.13
 (65) 同一申请的已公布的文献号
 申请公布号 CN 110990943 A
 (43) 申请公布日 2020.04.10
 (73) 专利权人 上海航天控制技术研究所
 地址 201109 上海市闵行区中春路1555号
 (72) 发明人 吴敬玉 钟超 林扬皓 王新
 陈撼 裴甲瑞
 (74) 专利代理机构 上海元好知识产权代理有限公司 31323
 专利代理师 张妍 刘琰
 (51) Int. Cl.
 G06F 30/15 (2020.01)
 G06F 30/17 (2020.01)
 B64G 1/28 (2006.01)
 (56) 对比文件
 CA 2711825 A1, 2012.01.30

CN 101353086 A, 2009.01.28
 CN 101694570 A, 2010.04.14
 CN 101891018 A, 2010.11.24
 CN 102566578 A, 2012.07.11
 CN 103592848 A, 2014.02.19
 CN 103941741 A, 2014.07.23
 CN 104527994 A, 2015.04.22
 CN 105223961 A, 2016.01.06
 CN 105235917 A, 2016.01.13
 CN 105388902 A, 2016.03.09
 CN 106896821 A, 2017.06.27
 CN 106919055 A, 2017.07.04
 CN 108015774 A, 2018.05.11
 CN 109871025 A, 2019.06.11
 EP 1908686 A1, 2008.04.09
 JP 2007042109 A, 2007.02.15
 US 7747055 B1, 2010.06.29
 审查员 施宏杰

(续)

权利要求书3页 说明书6页 附图2页

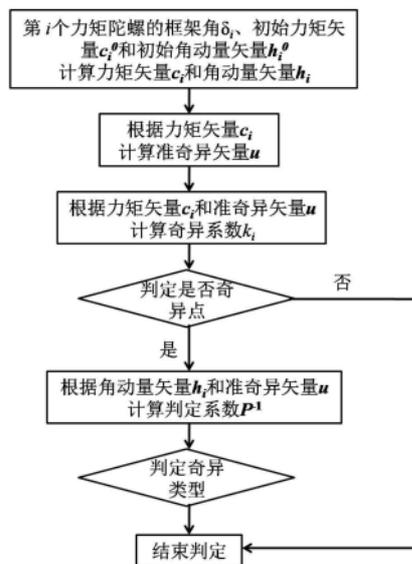
(54) 发明名称

一种基于控制力矩陀螺群奇异几何意义的奇异点判定方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于控制力矩陀螺群奇异几何意义的奇异点判定方法,该方法包括以下步骤:步骤1:根据框架角、初始力矩矢量和初始角动量矢量分别计算力矩矢量和角动量矢量;步骤2:根据力矩矢量计算准奇异矢量;步骤3:根据准奇异矢量与力矩矢量计算奇异系数,并判断框架角是否为奇异点;步骤4:若框架角不为奇异点,结束判定;若框架角为奇异点,则计算出判定系数,并判断奇异点类型,结束判定。此发明解决了不同控制力矩陀螺群的奇异点判定运算复杂和操作率低的问题,选取控制力矩陀螺群中任意两个力矩陀螺共面状态判定不同控制力矩陀螺群的任意框架角是否为奇异点,并确定奇异点类型,简化了判定运算量,提高了控制系统的精度

和可靠性。



CN 110990943 B

[接上页]

(56) 对比文件

刘付成. 一种改进的SGCMGs奇异鲁棒伪逆操纵律算法. 上海航天. 2009, (第02期),

金磊;徐世杰. 采用单框架控制力矩陀螺和动量轮的航天器姿态跟踪控制研究. 宇航学报. 2008, (第03期),

汤亮,徐世杰. 单框架控制力矩陀螺群的奇异几何分析(英文). Chinese Journal of Aeronautics. 2005, (第04期),

袁启明;施侃乐;雍俊海;古和今. 曲面二阶几何连续性的混合曲率评价与可视化. 计算机辅

助设计与图形学学报. 2011, (第11期),

刘付成. 一种改进的SGCMGs奇异鲁棒伪逆操纵律算法. 上海航天. 2009, (第02期), 全文.

金磊;徐世杰. 采用单框架控制力矩陀螺和动量轮的航天器姿态跟踪控制研究. 宇航学报. 2008, (第03期), 全文.

汤亮,徐世杰. 单框架控制力矩陀螺群的奇异几何分析(英文). Chinese Journal of Aeronautics. 2005, (第04期), 全文.

袁启明;施侃乐;雍俊海;古和今. 曲面二阶几何连续性的混合曲率评价与可视化. 计算机辅助设计与图形学学报. 2011, (第11期), 全文.

1. 一种基于控制力矩陀螺群奇异几何意义的奇异点判定方法,其特征在于,该方法包括以下步骤:

步骤1:根据SGCMG中各个力矩陀螺的框架角、初始力矩矢量和初始角动量矢量,分别计算SGCMG中各个力矩陀螺的力矩矢量和角动量矢量;所述各个力矩陀螺的角动量矢量为 h ,则第 i 个力矩陀螺的角动量矢量为 h_i , $i=1,2,3,\dots,n$, n 为力矩陀螺的个数,且满足:

$$h_i = h_i^0 \cos \delta_i + c_i^0 \sin \delta_i$$

其中, c_i^0 为第 i 个力矩陀螺的初始力矩矢量, h_i^0 为第 i 个力矩陀螺的初始角动量矢量, δ_i 为第 i 个力矩陀螺的框架角;

所述各个力矩陀螺的力矩矢量为 c ,则第 i 个力矩陀螺的力矩矢量为 c_i , $i=1,2,3,\dots,n$, n 为力矩陀螺的个数,且满足:

$$c_i = -h_i^0 \sin \delta_i + c_i^0 \cos \delta_i$$

其中, c_i^0 为第 i 个力矩陀螺的初始力矩矢量, h_i^0 为第 i 个力矩陀螺的初始角动量矢量, δ_i 为第 i 个力矩陀螺的框架角;

步骤2:根据所述各个力矩陀螺的力矩矢量计算SGCMG的准奇异矢量;

所述准奇异矢量的计算还包括以下步骤:

步骤2.1:从SGCMG中选择任意两个力矩陀螺的力矩矢量,分别为第 e 和第 f 个力矩陀螺 c_e 和 c_f , $e,f \in i$, $i=1,2,3,\dots,n$;

步骤2.2:根据所述第 e 和第 f 个力矩陀螺 c_e 和 c_f 计算SGCMG的准奇异矢量;所述准奇异矢量为 u ,且满足:

$$u = \frac{c_e \times c_f}{|c_e \times c_f|};$$

步骤3:根据所述准奇异矢量与所述各个力矩陀螺的力矩矢量,计算SGCMG的奇异系数,并根据所述奇异系数判断所述各个力矩陀螺的框架角是否为SGCMG的奇异点;

步骤4:若所述各个力矩陀螺的框架角不为SGCMG的奇异点,结束判定;若所述各个力矩陀螺的框架角为SGCMG的奇异点,则根据所述各个力矩陀螺的角动量矢量和所述准奇异矢量计算出判定系数,并根据所述判定系数判断SGCMG的奇异点类型,结束判定。

2. 如权利要求1所述的基于控制力矩陀螺群奇异几何意义的奇异点判定方法,其特征在于,所述奇异系数的计算还包括以下步骤:

步骤3.1:从SGCMG中选择出除去第 e 和第 f 个力矩陀螺 c_e 和 c_f 以外的剩余力矩陀螺的力矩矢量;所述剩余力矩陀螺的力矩矢量为 c_{i-e-f} , $e,f \in i$, $i=1,2,3,\dots,n$;

步骤3.2:根据所述准奇异矢量 u 与所述剩余力矩陀螺的力矩矢量 c_{i-e-f} 计算SGCMG的奇异系数;所述奇异系数为 k_i ,且满足:

$$k_i = u \cdot c_{i-e-f}, i=1,2,3,\dots,n。$$

3. 如权利要求2所述的基于控制力矩陀螺群奇异几何意义的奇异点判定方法,其特征在于,所述奇异点的判断是通过判断奇异系数 k_i 的数值;当所述奇异系数 k_i 均为零时,所述各个力矩陀螺的框架角为SGCMG的奇异点;反之,所述各个力矩陀螺的框架角不为SGCMG的奇异点。

4. 如权利要求2所述的基于控制力矩陀螺群奇异几何意义的奇异点判定方法,其特征

在于,所述判定系数为 P^{-1} ,且满足:

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} h_1 \cdot u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_2 \cdot u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_i \cdot u \end{bmatrix}$$

其中, h_i 为所述第*i*个力矩陀螺的角动量矢量; u 为所述准奇异矢量。

5.如权利要求4所述的基于控制力矩陀螺群奇异几何意义的奇异点判定方法,其特征
在于,所述奇异点类型的判断还包括以下步骤:

步骤4.1:从*i*行*i*列所述判定系数 P^{-1} 的对角阵中提取出所有的对角元素;

所述第*i*个对角元素为 S_i ,且满足:

$$S_i = h_i \cdot u, i = 1, 2, 3, \dots, n;$$

步骤4.2:对所述*i*个对角元素 S_i 的正负值进行第一次判断,若所述*i*个对角元素 S_i 均为正值,即 $S_i > 0$,所述奇异点类型为饱和奇异,结束判定;若所述*i*个对角元素 S_i 中存在负值,则对所述*i*个对角元素 S_i 中存在负值的个数进行第二次判断;

步骤4.3:所述第二次判断中若*i*个对角元素 S_i 中存在三个及三个以上的对角元素 S_i 为负值,所述奇异点类型为双曲奇异,结束判定;若*i*个对角元素 S_i 中存在一个或两个的对角元素 S_i 为负值,需要根据所述第*i*个力矩陀螺的角动量矢量 h_i 和所述准奇异矢量 u 进行高斯计算,计算出高斯曲率 λ ;

步骤4.4:在所述*i*个对角元素 S_i 中存在一个对角元素 S_i 为负值的情况下,根据所述高斯曲率 λ 的正负值对所述奇异点类型进行第三次判断;若所述高斯曲率 λ 为负值,即 $\lambda < 0$,所述奇异点类型为椭圆奇异,结束判定;若所述高斯曲率 λ 为正值,即 $\lambda > 0$,所述奇异点类型为双曲奇异,结束判定;

步骤4.5:在所述*i*个对角元素 S_i 中存在两个对角元素 S_i 为负值的情况下,根据所述高斯曲率 λ 的正负值对所述奇异点类型进行第四次判断;若所述高斯曲率 λ 为负值,即 $\lambda < 0$,所述奇异点类型为双曲奇异,结束判定;若所述高斯曲率 λ 为正值,即 $\lambda > 0$,还需要根据所述高斯曲率 λ 、所述角动量矢量 h_i 和所述准奇异矢量 u 进行平均曲率计算,计算出平均曲率 v ;

步骤4.6:根据所述平均曲率 v 的正负值对所述奇异点类型进行第五次判断;若所述平均曲率 v 为负值,即 $v < 0$,所述奇异点类型为双曲奇异,结束判定;若所述平均曲率 v 为正值,即 $v > 0$,所述奇异点类型为椭圆奇异,结束判定。

6.如权利要求5所述的基于控制力矩陀螺群奇异几何意义的奇异点判定方法,其特征
在于,所述高斯计算还包括以下步骤:

步骤4.3.1:根据所述第*i*个力矩陀螺的角动量矢量 h_i 和所述准奇异矢量 u 计算高斯系数;所述高斯系数为 q_i ,且满足:

$$q_i = \frac{1}{h_i \cdot u};$$

步骤4.3.2:根据所述高斯系数 q_i 计算高斯曲率 λ ;所述高斯曲率 λ 满足:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2} \sum_e \sum_f q_e^3 q_f^3 [\mathbf{g}_e \quad \mathbf{g}_f \quad \mathbf{u}]^2$$

其中, e, f 分别为SGCMG中任意两个力矩陀螺, $e, f \in i, i=1, 2, 3 \dots n$; g_e 和 g_f 分别为SGCMG中任意两个力矩陀螺的框架轴矢量; 且

$$[g_e \ g_f \ u] = g_e \cdot (g_f \times u)。$$

7. 如权利要求6所述的基于控制力矩陀螺群奇异几何意义的奇异点判定方法, 其特征在于, 所述平均曲率 ν 满足:

$$\nu = -\frac{\lambda}{2} \sum_{i=1}^n q_i$$

其中, q_i 为所述高斯系数。

一种基于控制力矩陀螺群奇异几何意义的奇异点判定方法

技术领域

[0001] 本发明涉及卫星控制力矩技术领域，具体涉及一种基于控制力矩陀螺群奇异几何意义的奇异点判定方法。

背景技术

[0002] 随着卫星任务的复杂性的不断增强，对卫星机动性能的要求也不断提高。控制力矩陀螺群 (SGCMG) 能够提供大的、连续的控制力矩，并具备较大的角动量空间，因此控制力矩陀螺群是大角度快速机动卫星比较理想的执行机构。

[0003] 但是，控制力矩陀螺群在对应力矩框架角解算时会存在奇异问题，使得输出力矩与指令力矩不符的状况出现，那么如何判定控制力矩陀螺群中奇异点的存在就显得至关重要。目前对不同力矩陀螺群的奇异点判定运算量大，运算复杂，且操作率低。

发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种基于控制力矩陀螺群奇异几何意义的奇异点判定方法。此方法旨在解决不同控制力矩陀螺群的奇异点判定运算复杂和操作率低的问题，选取控制力矩陀螺群中任意两个力矩陀螺共面状态判定不同控制力矩陀螺群的任意框架角是否为奇异点，并确定奇异点类型，简化判定运算量，提高控制系统的精度和可靠性。

[0005] 为达到上述目的，本发明提供了一种基于控制力矩陀螺群奇异几何意义的奇异点判定方法，该方法包括以下步骤：

[0006] 步骤1：根据SGCMG中各个力矩陀螺的框架角、初始力矩矢量和初始角动量矢量，分别计算SGCMG中各个力矩陀螺的力矩矢量和角动量矢量；

[0007] 步骤2：根据各个力矩陀螺的力矩矢量计算SGCMG的准奇异矢量；

[0008] 步骤3：根据准奇异矢量与各个力矩陀螺的力矩矢量，计算SGCMG的奇异系数，并根据奇异系数判断各个力矩陀螺的框架角是否为SGCMG的奇异点；

[0009] 步骤4：若各个力矩陀螺的框架角不为SGCMG的奇异点，结束判定；若各个力矩陀螺的框架角为SGCMG的奇异点，则根据各个力矩陀螺的角动量矢量和准奇异矢量计算出判定系数，并根据判定系数判断SGCMG的奇异点类型，结束判定。

[0010] 最优选的，各个力矩陀螺的角动量矢量为 h ，则第 i 个力矩陀螺的角动量矢量为 h_i ， $i=1,2,3\dots n$ ， n 为力矩陀螺的个数，且满足：

$$[0011] \quad h_i = h_i^0 \cos \delta_i + c_i^0 \sin \delta_i$$

[0012] 其中， c_i^0 为第 i 个力矩陀螺的初始力矩矢量， h_i^0 为第 i 个力矩陀螺的初始角动量矢量， δ_i 为第 i 个力矩陀螺的框架角。

[0013] 最优选的，各个力矩陀螺的力矩矢量为 c ，则第 i 个力矩陀螺的力矩矢量为 c_i ， $i=1,2,3\dots n$ ， n 为力矩陀螺的个数，且满足：

$$[0014] \quad c_i = -h_i^0 \sin \delta_i + c_i^0 \cos \delta_i$$

[0015] 其中， c_i^0 为第 i 个力矩陀螺的初始力矩矢量， h_i^0 为第 i 个力矩陀螺的初始角动量矢

量, δ_i 为第 i 个力矩陀螺的框架角。

[0016] 最优的, 准奇异矢量的计算还包括以下步骤:

[0017] 步骤2.1: 从SGCMG中选择任意两个力矩陀螺的力矩矢量, 分别为第 e 和第 f 个力矩陀螺 c_e 和 c_f , $e, f \in i, i=1, 2, 3 \dots n$;

[0018] 步骤2.2: 根据第 e 和第 f 个力矩陀螺 c_e 和 c_f 计算SGCMG的准奇异矢量; 准奇异矢量为 u , 且满足:

$$[0019] \quad \mathbf{u} = \frac{\mathbf{c}_e \times \mathbf{c}_f}{|\mathbf{c}_e \times \mathbf{c}_f|}。$$

[0020] 最优的, 奇异系数的计算还包括以下步骤:

[0021] 步骤3.1: 从SGCMG中选择出除去第 e 和第 f 个力矩陀螺 c_e 和 c_f 以外的剩余力矩陀螺的力矩矢量; 剩余力矩陀螺的力矩矢量为 c_{i-e-f} , $e, f \in i, i=1, 2, 3 \dots n$;

[0022] 步骤3.2: 根据准奇异矢量 u 与剩余力矩陀螺的力矩矢量 c_{i-e-f} 计算SGCMG的奇异系数; 奇异系数为 k_i , 且满足:

$$[0023] \quad k_i = \mathbf{u} \cdot \mathbf{c}_{i-e-f}, i=1, 2, 3 \dots n。$$

[0024] 最优的, 奇异点的判断是通过判断奇异系数 k_i 的数值; 当奇异系数 k_i 均为零时, 各个力矩陀螺的框架角为SGCMG的奇异点; 反之, 各个力矩陀螺的框架角不为SGCMG的奇异点。

[0025] 最优的, 判定系数为 P^{-1} , 且满足:

$$[0026] \quad P^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 \cdot \mathbf{u} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{h}_2 \cdot \mathbf{u} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{h}_i \cdot \mathbf{u} \end{bmatrix}$$

[0027] 其中, h_i 为第 i 个力矩陀螺的角动量矢量; u 为准奇异矢量。

[0028] 最优的, 奇异点类型的判断还包括以下步骤:

[0029] 步骤4.1: 从 i 行 i 列所述判定系数 P^{-1} 的对角阵中提取出所有的对角元素; 所述第 i 个对角元素为 S_i , 且满足:

$$[0030] \quad S_i = \mathbf{h}_i \cdot \mathbf{u}, i=1, 2, 3 \dots n;$$

[0031] 步骤4.2: 对 i 个对角元素 S_i 的正负值进行第一次判断, 若 i 个对角元素 S_i 均为正值, 即 $S_i > 0$, 奇异点类型为饱和奇异, 结束判定; 若 i 个对角元素 S_i 中存在负值, 则对 i 个对角元素 S_i 中存在负值的个数进行第二次判断;

[0032] 步骤4.3: 第二次判断中若 i 个对角元素 S_i 中存在三个及三个以上的对角元素 S_i 为负值, 奇异点类型为双曲奇异, 结束判定; 若 i 个对角元素 S_i 中存在一个或两个的对角元素 S_i 为负值, 需要根据第 i 个力矩陀螺的角动量矢量 h_i 和准奇异矢量 u 进行高斯计算, 计算出高斯曲率 λ ;

[0033] 步骤4.4: 在 i 个对角元素 S_i 中存在一个对角元素 S_i 为负值的情况下, 根据高斯曲率 λ 的正负值对奇异点类型进行第三次判断; 若高斯曲率 λ 为负值, 即 $\lambda < 0$, 奇异点类型为椭圆奇异, 结束判定; 若高斯曲率 λ 为正值, 即 $\lambda > 0$, 奇异点类型为双曲奇异, 结束判定;

[0034] 步骤4.5: 在 i 个对角元素 S_i 中存在两个对角元素 S_i 为负值的情况下, 根据高斯曲率

λ 的正负值对奇异点类型进行第四次判断;若高斯曲率 λ 为负值,即 $\lambda < 0$,奇异点类型为双曲奇异,结束判定;若高斯曲率 λ 为正值,即 $\lambda > 0$,还需要根据高斯曲率 λ 、角动量矢量 h_i 和准奇异矢量 u 进行平均曲率计算,计算出平均曲率 v ;

[0035] 步骤4.6:根据平均曲率 v 的正负值对奇异点类型进行第五次判断;若平均曲率 v 为负值,即 $v < 0$,奇异点类型为双曲奇异,结束判定;若平均曲率 v 为正值,即 $v > 0$,奇异点类型为椭圆奇异,结束判定。

[0036] 最优的,高斯计算还包括以下步骤:

[0037] 步骤4.3.1:根据第 i 个力矩陀螺的角动量矢量 h_i 和准奇异矢量 u 计算高斯系数;高斯系数为 q_i ,且满足:

$$[0038] \quad q_i = \frac{1}{h_i \cdot u};$$

[0039] 步骤4.3.2:根据高斯系数 q_i 计算高斯曲率 λ ;高斯曲率 λ 满足:

$$[0040] \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2} \sum_e \sum_f q_e^3 q_f^3 [g_e \quad g_f \quad u]^2$$

[0041] 其中, e, f 分别为SGCMG中任意两个力矩陀螺, $e, f \in i, i = 1, 2, 3 \dots n$; g_e 和 g_f 分别为SGCMG中任意两个力矩陀螺的框架轴矢量;且

$$[0042] \quad [g_e \quad g_f \quad u] = g_e \cdot (g_f \times u)。$$

[0043] 最优的,平均曲率 v 满足:

$$[0044] \quad v = -\frac{\lambda}{2} \sum_{i=1}^n q_i$$

[0045] 其中, q_i 为高斯系数。

[0046] 运用此发明,解决了不同控制力矩陀螺群的奇异点判定运算复杂和操作率低的问题,选取控制力矩陀螺群中任意两个力矩陀螺共面状态判定不同控制力矩陀螺群的任意框架角是否为奇异点,并确定奇异点类型,简化了判定运算量,提高了控制系统的精度和可靠性。

[0047] 相对于现有技术,本发明具有以下有益效果:

[0048] 1、本发明设计了控制力矩陀螺群中任意两个陀螺力矩共面状态判定不同控制力矩陀螺群的任意框架角是否为奇异点,并确定奇异点类型,为控制力矩陀螺群操纵率的设计提供依据,使其能尽量避开所有奇异点,提高控制系统的精度和可靠性。

[0049] 2、本发明对不同控制力矩陀螺群的任意框架角是否为该控制力矩陀螺群的奇异点进行快速判定,判定方法简单可靠,运算量小,工程易于实现。

附图说明

[0050] 图1为本发明提供的该奇异点判定方法的流程示意图;

[0051] 图2为本发明提供的奇异点类型判断的流程示意图。

具体实施方式

[0052] 以下结合附图通过具体实施例对本发明作进一步的描述,这些实施例仅用于说明

本发明,并不是对本发明保护范围的限制。

[0053] 本发明是一种基于控制力矩陀螺群 (SGCMG) 奇异几何意义的奇异点判定方法,如图1所示,该方法包括以下步骤:

[0054] 步骤1:根据SGCMG中各个力矩陀螺的框架角、初始力矩矢量和初始角动量矢量,分别计算SGCMG中各个力矩陀螺的力矩矢量和角动量矢量。

[0055] 各个力矩陀螺的力矩矢量为 c ,则第 i 个力矩陀螺的力矩矢量为 $c_i, i=1,2,3,\dots,n$, n 为力矩陀螺的个数,且满足:

$$[0056] \quad c_i = -h_i^0 \sin \delta_i + c_i^0 \cos \delta_i$$

[0057] 其中, c_i^0 为第 i 个力矩陀螺的初始力矩矢量, h_i^0 为第 i 个力矩陀螺的初始角动量矢量, δ_i 为第 i 个力矩陀螺的框架角。

[0058] 各个力矩陀螺的角动量矢量为 h ,则第 i 个力矩陀螺的角动量矢量为 $h_i, i=1,2,3,\dots,n$, n 为力矩陀螺的个数,且满足:

$$[0059] \quad h_i = h_i^0 \cos \delta_i + c_i^0 \sin \delta_i$$

[0060] 其中, c_i^0 为第 i 个力矩陀螺的初始力矩矢量, h_i^0 为第 i 个力矩陀螺的初始角动量矢量, δ_i 为第 i 个力矩陀螺的框架角。

[0061] 步骤2:根据 i 个力矩陀螺的力矩矢量为 c_i 计算SGCMG的准奇异矢量;准奇异矢量的计算还包括以下步骤:

[0062] 步骤2.1:从SGCMG中选择任意两个力矩陀螺的力矩矢量,分别为第 e 和第 f 个力矩陀螺 c_e 和 $c_f, e, f \in i, i=1,2,3,\dots,n$;

[0063] 步骤2.2:根据第 e 和第 f 个力矩陀螺 c_e 和 c_f 计算SGCMG的准奇异矢量;准奇异矢量为 u ,且满足:

$$[0064] \quad u = \frac{c_e \times c_f}{|c_e \times c_f|}。$$

[0065] 步骤3:根据准奇异矢量 u 与 i 个力矩陀螺的力矩矢量为 c_i ,计算SGCMG的奇异系数 k_i ;奇异系数 k_i 的计算还包括以下步骤:

[0066] 步骤3.1:从SGCMG中选择出除去第 e 和第 f 个力矩陀螺 c_e 和 c_f 以外的剩余力矩陀螺的力矩矢量;剩余力矩陀螺的力矩矢量为 c_{i-e-f} ,其中 $e, f \in i, i=1,2,3,\dots,n$;

[0067] 步骤3.2:根据准奇异矢量 u 与剩余力矩陀螺的力矩矢量 c_{i-e-f} 计算SGCMG的奇异系数;奇异系数为 k_i ,且满足:

$$[0068] \quad k_i = u \cdot c_{i-e-f}, i=1,2,3,\dots,n。$$

[0069] 并根据奇异系数 k_i 判断第 i 个力矩陀螺的框架角是否为SGCMG的奇异点,奇异点的判断是通过判断奇异系数 k_i 的数值;当奇异系数 k_i 均为零时,第 i 个力矩陀螺的框架角为SGCMG的奇异点;反之,第 i 个力矩陀螺的框架角不为SGCMG的奇异点。

[0070] 步骤4:若第 i 个力矩陀螺的框架角不为SGCMG的奇异点,结束判定;若第 i 个力矩陀螺的框架角为SGCMG的奇异点,则根据第 i 个力矩陀螺的角动量矢量 h_i 和准奇异矢量 u 计算出判定系数 P^{-1} ;判定系数为 P^{-1} 满足:

$$[0071] \quad P^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 \cdot \mathbf{u} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{h}_2 \cdot \mathbf{u} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{h}_i \cdot \mathbf{u} \end{bmatrix}。$$

[0072] 如图2所示,并根据判定系数 P^{-1} 判断SGCMG的奇异点类型,结束判定;奇异点类型的判断还包括以下步骤:

[0073] 步骤4.1:从 i 行 i 列判定系数 P^{-1} 的对角阵中提取出所有的对角元素;第 i 个对角元素为 S_i ,且满足:

$$[0074] \quad S_i = \mathbf{h}_i \cdot \mathbf{u}, i=1,2,3\dots n。$$

[0075] 步骤4.2:对 i 个对角元素 S_i 的正负值进行第一次判断,若 i 个对角元素 S_i 均为正值,即 $S_i > 0$,SGCMG的奇异点类型为饱和奇异,结束判定;若 i 个对角元素 S_i 中存在负值,则对 i 个对角元素 S_i 中存在负值的个数进行第二次判断。

[0076] 步骤4.3:第二次判断中若 i 个对角元素 S_i 中存在三个及三个以上的对角元素 S_i 为负值,SGCMG的奇异点类型为双曲奇异,结束判定;若 i 个对角元素 S_i 中存在一个或两个的对角元素 S_i 为负值,需要根据第 i 个力矩陀螺的角动量矢量 \mathbf{h}_i 和准奇异矢量 \mathbf{u} 进行高斯计算,计算出SGCMG的高斯曲率 λ 。

[0077] 其中,高斯计算还包括以下步骤:

[0078] 步骤4.3.1:根据第 i 个力矩陀螺的角动量矢量 \mathbf{h}_i 和准奇异矢量 \mathbf{u} 计算高斯系数;高斯系数为 q_i ,且满足:

$$[0079] \quad q_i = \frac{1}{\mathbf{h}_i \cdot \mathbf{u}};$$

[0080] 步骤4.3.2:根据高斯系数 q_i 计算高斯曲率 λ ;高斯曲率 λ 满足:

$$[0081] \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2} \sum_e \sum_f q_e^3 q_f^3 [\mathbf{g}_e \quad \mathbf{g}_f \quad \mathbf{u}]^2$$

[0082] 其中, e, f 分别为SGCMG中任意两个力矩陀螺,且 $e, f \in i, i=1,2,3\dots n$; \mathbf{g}_e 和 \mathbf{g}_f 分别为SGCMG中任意两个力矩陀螺的框架轴矢量;且

$$[0083] \quad [\mathbf{g}_e \quad \mathbf{g}_f \quad \mathbf{u}] = \mathbf{g}_e \cdot (\mathbf{g}_f \times \mathbf{u})。$$

[0084] 步骤4.4:在 i 个对角元素 S_i 中存在一个对角元素 S_i 为负值的情况下,根据高斯曲率 λ 的正负值对SGCMG的奇异点类型进行第三次判断;若高斯曲率 λ 为负值,即 $\lambda < 0$,SGCMG的奇异点类型为椭圆奇异,结束判定;若高斯曲率 λ 为正值,即 $\lambda > 0$,SGCMG的奇异点类型为双曲奇异,结束判定。

[0085] 步骤4.5:在 i 个对角元素 S_i 中存在两个对角元素 S_i 为负值的情况下,根据高斯曲率 λ 的正负值对SGCMG的奇异点类型进行第四次判断;若高斯曲率 λ 为负值,即 $\lambda < 0$,SGCMG的奇异点类型为双曲奇异,结束判定;若高斯曲率 λ 为正值,即 $\lambda > 0$,还需要根据高斯曲率 λ 、高斯系数 q_i 进行平均曲率计算,计算出SGCMG的平均曲率 ν ,平均曲率 ν 满足:

$$[0086] \quad \nu = -\frac{\lambda}{2} \sum_{i=1}^n q_i。$$

[0087] 步骤4.6:根据平均曲率 ν 的正负值对SGCMG的奇异点类型进行第五次判断;若平均

曲率 ν 为负值,即 $\nu < 0$,SGCMG的奇异点类型为双曲奇异,结束判定;若平均曲率 ν 为正值,即 $\nu > 0$,SGCMG的奇异点类型为椭圆奇异,结束判定。

[0088] 本发明的工作原理:

[0089] 根据SGCMG中各个力矩陀螺的框架角、初始力矩矢量和初始角动量矢量,分别计算SGCMG中各个力矩陀螺的力矩矢量和角动量矢量;根据各个力矩陀螺的力矩矢量计算SGCMG的准奇异矢量;根据准奇异矢量与各个力矩陀螺的力矩矢量,计算SGCMG的奇异系数,并根据奇异系数判断各个力矩陀螺的框架角是否为SGCMG的奇异点;若各个力矩陀螺的框架角不为SGCMG的奇异点,结束判定;若各个力矩陀螺的框架角为SGCMG的奇异点,则根据各个力矩陀螺的角动量矢量和准奇异矢量计算出判定系数,并根据判定系数判断SGCMG的奇异点类型,结束判定。

[0090] 综上所述,本发明一种基于控制力矩陀螺群奇异几何意义的奇异点判定方法,解决了不同控制力矩陀螺群的奇异点判定运算复杂和操作率低的问题,选取控制力矩陀螺群中任意两个力矩陀螺共面状态判定不同控制力矩陀螺群的任意框架角是否为奇异点,并确定奇异点类型,简化了判定运算量,提高了控制系统的精度和可靠性。

[0091] 尽管本发明的内容已经通过上述优选实施例作了详细介绍,但应当认识到上述的描述不应被认为是对本发明的限制。在本领域技术人员阅读了上述内容后,对于本发明的多种修改和替代都将是显而易见的。因此,本发明的保护范围应由所附的权利要求来限定。

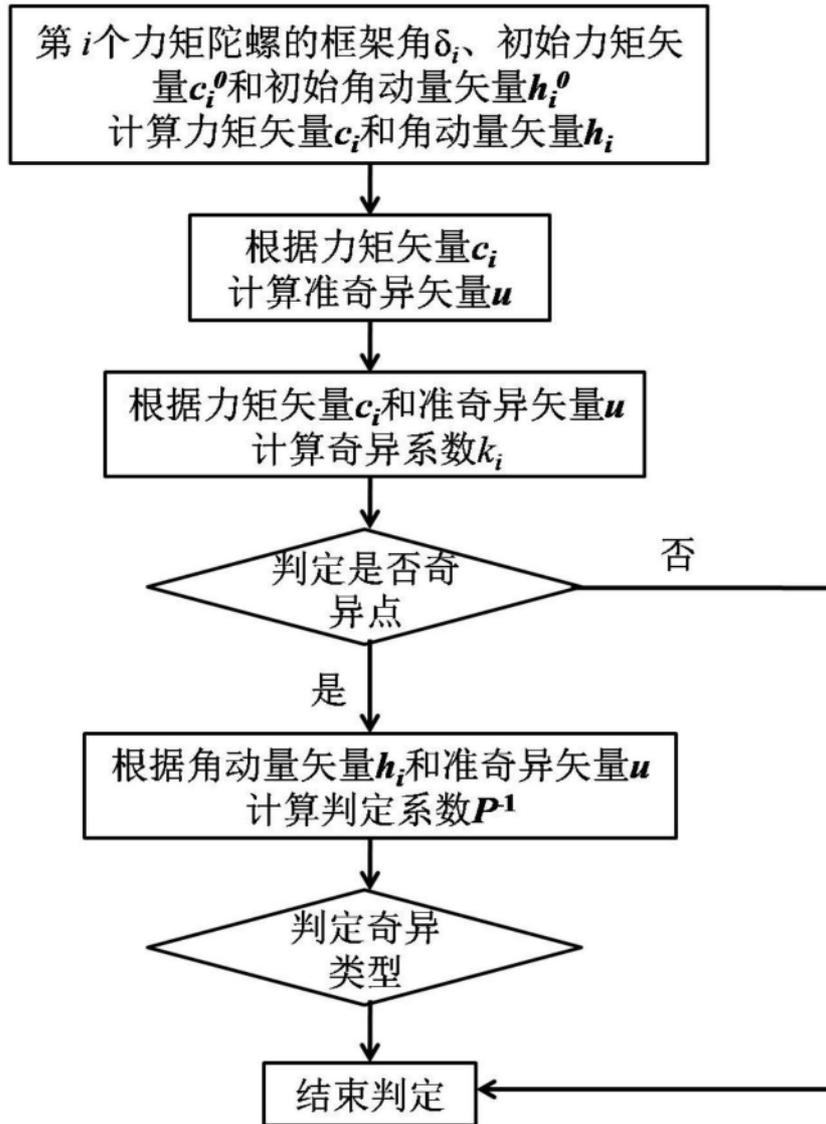


图1

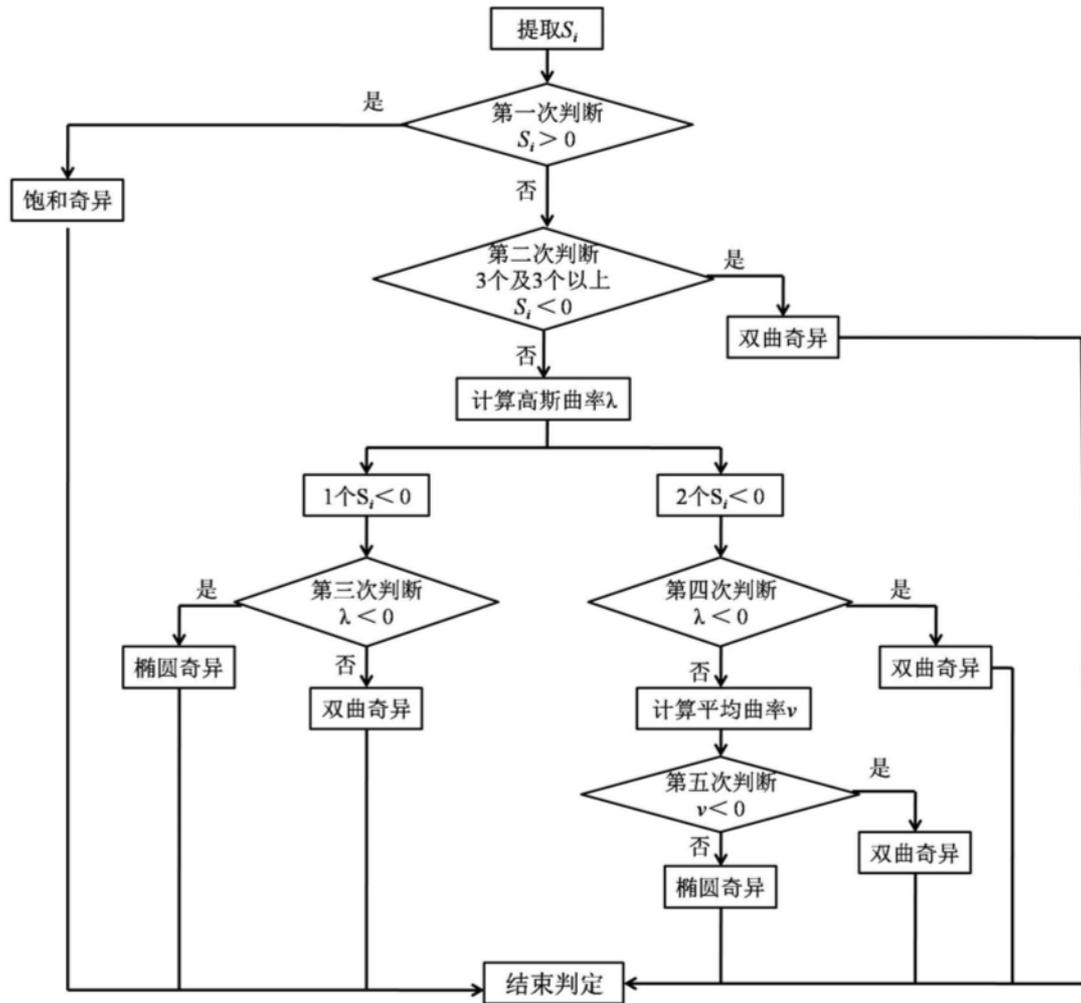


图2