



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105259786 B

(45)授权公告日 2018.09.25

(21)申请号 201510724520.1

(22)申请日 2015.10.29

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 105259786 A

(43)申请公布日 2016.01.20

(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

(72)发明人 马欢 张珩 李文皓 肖歆昕

(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  
代理人 胡剑辉

(51)Int.Cl.  
G05B 17/02(2006.01)

(56)对比文件  
CN 102320043 A,2012.01.18,全文.

金磊等.空间机器人抓取未知目标的质量特性参数辨识.《宇航学报》.2012,第33卷(第11期),第1570-1576页.

郭琦等.双臂四自由度空间机器人捕捉未知目标的参数辨识.《机器人》.2005,第27卷(第6期),第512-516页.

吴倩.空间非合作目标惯性参数辨识研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库(电子期刊)》.2015,(第02期),第34-43页.

Yoshisada MUROTSU等.System Identificaiton and Resolved Acceleration Control of Space Robots by Using Experimental System.《IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Tobots and Systems IROS 91》.1991,第1669-1674页.

审查员 李彦琴

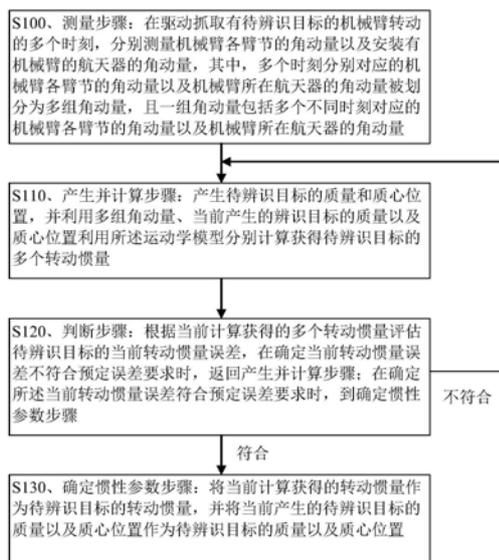
权利要求书6页 说明书16页 附图1页

(54)发明名称

待辨识目标的惯性参数辨识方法和装置

(57)摘要

本发明公开了一种待辨识目标的惯性参数辨识方法和装置;其中的方法包括:在驱动抓取有待辨识目标的机械臂转动的多个时刻,测量机械臂各臂节的角动量及航天器的角动量;产生待辨识目标的质量和质心位置,并利用多组角动量、当前产生的辨识目标的质量及质心位置根据预设的运动学模型计算获得待辨识目标的多个转动惯量;根据当前获得的多个转动惯量评估待辨识目标的当前转动惯量误差,在误差符合预定误差要求时,返回产生并计算过程,否则,将当前计算获得的转动惯量、当前产生的待辨识目标的质量及质心位置作为待辨识目标的转动惯量、质量以及质心位置。本发明节约了航天器宝贵的燃料,提高了待辨识目标的惯性参数辨识精度且具有较理想的泛用性。



1. 一种待辨识目标的惯性参数辨识方法,其特征在于,所述方法包括:

在驱动抓取有待辨识目标的机械臂转动的多个时刻,分别测量机械臂各臂节的角动量以及安装有机械臂的航天器的角动量,形成多组角动量;所述机械臂各臂节与航天器形成多刚体系统;

产生待辨识目标的质量和质心位置,并利用多组角动量、当前产生的辨识目标的质量以及质心位置基于运动学模型分别计算获得待辨识目标的多个转动惯量;

评估待辨识目标当前转动惯量误差,并根据评估结果重新执行上述产生并计算的操作或者将当前产生的待辨识目标的质量以及质心位置作为待辨识目标的质量以及质心位置,并将当前计算获得的转动惯量作为待辨识目标的转动惯量;

其中,所述利用多组角动量、当前产生的辨识目标的质量以及质心位置利用所述运动学模型分别计算获得待辨识目标的多个转动惯量包括:

针对一组角动量而言,利用该组角动量中的不同时刻对应的机械臂各臂节的角动量以及机械臂所在航天器的角动量、当前产生的辨识目标的质量以及质心位置计算公式  $\mathbf{S}^* \mathbf{I}_n^* = \mathbf{d}^*$  的最小二乘解  $\mathbf{I}_n^* = (\mathbf{S}^{*T} \mathbf{S}^*)^{-1} \mathbf{S}^{*T} \mathbf{d}^*$ , 所述最小二乘解  $\mathbf{I}_n^* = (\mathbf{S}^{*T} \mathbf{S}^*)^{-1} \mathbf{S}^{*T} \mathbf{d}^*$  即为本次计算出的待辨识目标的一个转动惯量:

其中,  $\mathbf{I}_n^* = [\mathbf{I}_{11} \quad \mathbf{I}_{22} \quad \mathbf{I}_{33} \quad \mathbf{I}_{12} \quad \mathbf{I}_{13} \quad \mathbf{I}_{23}]^T$ ,  $\mathbf{I}_{11}$ 、 $\mathbf{I}_{22}$ 、 $\mathbf{I}_{33}$ 、 $\mathbf{I}_{12}$ 、 $\mathbf{I}_{13}$  和  $\mathbf{I}_{23}$  表示本次计算出的待辨识目标的转动惯量中的六个独立的分量,  $\mathbf{S}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{S}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{S}^{(t)} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{S}^{(1)}$  为基于一组角动量中第一个时刻的  $\mathbf{S}$ ,  $\mathbf{S}^{(t)}$  为基于一组角动量中第  $t$  个时刻的  $\mathbf{S}$ ,  $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 & s_2 & s_3 & 0 \\ 0 & s_2 & 0 & s_1 & 0 & s_3 \\ 0 & 0 & s_3 & 0 & s_1 & s_2 \end{bmatrix}$ ,  $n$  为多刚体系统的刚体数量-1,  $\mathbf{d}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{d}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{d}^{(t)} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{d}^{(1)}$  为基于一组角动量中第一个时刻的  $\mathbf{d}$ ,  $\mathbf{d}^{(t)}$  为基于一组角动量中第  $t$  个时刻的  $\mathbf{d}$ ,  $\mathbf{d}$  包括  $d_1$ 、 $d_2$  和  $d_3$  三个分量;

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \sum_{j=0}^n A_{nj} \dot{\Phi}_j$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} &= -A_n^{-1} \sum_{i=0}^n \left[ m_i r_i \times v_0 - m_i r_i \times \left[ \sum_{k=0}^{i-1} A_{Ik} l_k \times \Omega_k + A_{Ii} a_i \times \Omega_i \right] \right] - A_n^{-1} \sum_{i=0}^{n-1} A_{Ii} I_i \Omega_i \\
&= -A_n^{-1} \sum_{i=0}^n \left[ m_i r_i \times v_0 - m_i r_i \times \left[ \sum_{k=0}^{i-1} A_{Ik} l_k \times \left( \sum_{j=0}^k A_{kj} \dot{\Phi}_j \right) + A_{Ii} a_i \times \left( \sum_{j=0}^i A_{ij} \dot{\Phi}_j \right) \right] \right] \\
&\quad - A_n^{-1} \sum_{i=0}^{n-1} A_{Ii} I_i \sum_{j=0}^i A_{ij} \dot{\Phi}_j
\end{aligned}$$

其中,  $A_{n_j}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_n$ 的坐标变换矩阵,  $\dot{\Phi}_j$ 表示基于 $F_j$ 的第 $j$ 个刚体相对于第 $j-1$ 个刚体的角速度,  $A^{-1}_{I_n}$ 表示 $A_{I_n}$ 的逆,  $A_{I_n}$ 表示从 $F_n$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵,  $I_n$ 表示基于 $F_n$ 的第 $n$ 个刚体的转动惯量,  $m_i$ 表示第 $i$ 个刚体的质量,  $r_i$ 表示基于 $F_I$ 的第 $i$ 个刚体的质心位置,  $F_I$ 表示惯性空间坐标系,  $v_0$ 表示基于 $F_I$ 的第 $0$ 个刚体的质心速度,  $A_{I_k}$ 表示从 $F_k$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵,  $F_k$ 表示第 $k$ 个刚体的坐标系,  $l_k$ 表示第 $k$ 个刚体的坐标系的原点指向第 $k+1$ 个刚体的坐标系的原点的矢量,  $\Omega_k$ 表示基于 $F_k$ 的第 $k$ 个刚体的角速度,  $A_{I_i}$ 表示从 $F_i$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵,  $a_i$ 表示第 $i$ 个刚体的坐标系的原点指向第 $i$ 个刚体的质心位置的矢量,  $I_i$ 表示基于 $F_i$ 的第 $i$ 个刚体的转动惯量,  $\Omega_i$ 表示基于 $F_i$ 的第 $i$ 个刚体的角速度,  $A_{k_j}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_k$ 的坐标变换矩阵,  $A_{i_j}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_i$ 的坐标变换矩阵,  $F_n$ 表示第 $n$ 个刚体的坐标系,  $F_j$ 表示第 $j$ 个刚体的坐标系,  $F_i$ 表示第 $i$ 个刚体的坐标系。

2. 一种待辨识目标的惯性参数辨识方法, 其特征在于, 设置有基于多刚体系统的角动量守恒原理而建立的求解待辨识目标的转动惯量的运动学模型, 且所述方法包括下述步骤:

**测量步骤:** 在驱动抓取有待辨识目标的机械臂转动的多个时刻, 分别测量机械臂各臂节的角动量以及安装有机械臂的航天器的角动量, 其中, 所述多个时刻分别对应的机械臂各臂节的角动量以及机械臂所在航天器的角动量被划分为多组角动量, 且一组角动量通常包括多不同时刻对应的机械臂各臂节的角动量以及机械臂所在航天器的角动量;

**产生并计算步骤:** 产生待辨识目标的质量和质心位置, 并利用多组角动量、当前产生的辨识目标的质量以及质心位置基于所述运动学模型分别计算获得待辨识目标的多个转动惯量;

**判断步骤:** 根据当前计算获得的多个转动惯量评估待辨识目标当前转动惯量误差, 在确定所述当前转动惯量误差不符合预定误差要求时, 返回所述产生并计算步骤; 在确定所述当前转动惯量误差符合预定误差要求时, 到确定惯性参数步骤;

**确定惯性参数步骤:** 将当前计算获得的转动惯量作为待辨识目标的转动惯量, 并将当前产生的待辨识目标的质量以及质心位置作为待辨识目标的质量以及质心位置;

其中, 所述利用多组角动量、当前产生的辨识目标的质量以及质心位置利用所述运动学模型分别计算获得待辨识目标的多个转动惯量包括:

针对一组角动量而言, 利用该组角动量中的不同时刻对应的机械臂各臂节的角动量以及机械臂所在航天器的角动量、当前产生的辨识目标的质量以及质心位置计算公式  $S^* I_n^* = d^*$  的最小二乘解  $I_n^* = (S^{*T} S^*)^{-1} S^{*T} d^*$ , 所述最小二乘解  $I_n^* = (S^{*T} S^*)^{-1} S^{*T} d^*$  即为本次计

算出的待辨识目标的一个转动惯量：

其中,  $\mathbf{I}_n^* = [\mathbf{I}_{11} \ \mathbf{I}_{22} \ \mathbf{I}_{33} \ \mathbf{I}_{12} \ \mathbf{I}_{13} \ \mathbf{I}_{23}]^T$ ,  $\mathbf{I}_{11}$ 、 $\mathbf{I}_{22}$ 、 $\mathbf{I}_{33}$ 、 $\mathbf{I}_{12}$ 、 $\mathbf{I}_{13}$ 和 $\mathbf{I}_{23}$ 表示本次计算出的待辨识目标的转动惯量中的六个独立的分量,  $\mathbf{S}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{S}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{S}^{(t)} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{S}^{(1)}$ 为基于一组角动量中第一个时刻的 $\mathbf{S}$ ,  $\mathbf{S}^{(t)}$ 为基于一组角动量中第 $t$ 个时刻的 $\mathbf{S}$ ,  $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 & s_2 & s_3 & 0 \\ 0 & s_2 & 0 & s_1 & 0 & s_3 \\ 0 & 0 & s_3 & 0 & s_1 & s_2 \end{bmatrix}$ ,  $n$ 为多刚体系统的刚体数量-1,  $\mathbf{d}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{d}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{d}^{(t)} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{d}^{(1)}$ 为基于一组角动量中第一个时刻的 $\mathbf{d}$ ,  $\mathbf{d}^{(t)}$ 为基于一组角动量中第 $t$ 个时刻的 $\mathbf{d}$ ,  $\mathbf{d}$ 包括 $d_1$ 、 $d_2$ 和 $d_3$ 三个分量；

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \sum_{j=0}^n A_{nj} \dot{\Phi}_j$$

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} = -A_n^{-1} \sum_{i=0}^n \left[ m_i r_i \times v_0 - m_i r_i \times \left[ \sum_{k=0}^{i-1} A_{ik} l_k \times \Omega_k + A_{ii} a_i \times \Omega_i \right] \right] - A_n^{-1} \sum_{i=0}^{n-1} A_{ii} I_i \Omega_i$$

$$= -A_n^{-1} \sum_{i=0}^n \left[ m_i r_i \times v_0 - m_i r_i \times \left[ \sum_{k=0}^{i-1} A_{ik} l_k \times \left( \sum_{j=0}^k A_{kj} \dot{\Phi}_j \right) + A_{ii} a_i \times \left( \sum_{j=0}^i A_{ij} \dot{\Phi}_j \right) \right] \right]$$

$$- A_n^{-1} \sum_{i=0}^{n-1} A_{ii} I_i \sum_{j=0}^i A_{ij} \dot{\Phi}_j$$

其中,  $A_{nj}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_n$ 的坐标变换矩阵,  $\dot{\Phi}_j$ 表示基于 $F_j$ 的第 $j$ 个刚体相对于第 $j-1$ 个刚体的角速度,  $A^{-1}_{In}$ 表示 $A_{In}$ 的逆,  $A_{In}$ 表示从 $F_n$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵,  $I_n$ 表示基于 $F_n$ 的第 $n$ 个刚体的转动惯量,  $m_i$ 表示第 $i$ 个刚体的质量,  $r_i$ 表示基于 $F_I$ 的第 $i$ 个刚体的质心位置,  $F_I$ 表示惯性空间坐标系,  $v_0$ 表示基于 $F_I$ 的第 $0$ 个刚体的质心速度,  $A_{ik}$ 表示从 $F_k$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵,  $F_k$ 表示第 $k$ 个刚体的坐标系,  $l_k$ 表示第 $k$ 个刚体的坐标系的原点指向第 $k+1$ 个刚体的坐标系的原点的矢量,  $\Omega_k$ 表示基于 $F_k$ 的第 $k$ 个刚体的角速度,  $A_{ii}$ 表示从 $F_i$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵,  $a_i$ 表示第 $i$ 个刚体的坐标系的原点指向第 $i$ 个刚体的质心位置的矢量,  $I_i$ 表示基于 $F_i$ 的第 $i$ 个刚体的转动惯量,  $\Omega_i$ 表示基于 $F_i$ 的第 $i$ 个刚体的角速度,  $A_{kj}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_k$ 的坐标变换矩阵,  $A_{ij}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_i$ 的坐标变换矩阵,  $F_n$ 表示第 $n$ 个刚体的坐标系,  $F_j$ 表示第 $j$ 个刚体的坐标系,  $F_i$ 表示第 $i$ 个刚体的坐标系。

3. 如权利要求2所述的方法,其特征在于,所述机械臂各臂节与航天器形成多刚体系统,且所述运动学模型包括:

$$\begin{aligned}
& A_{In} I_n \sum_{j=0}^n A_{nj} \dot{\Phi}_j \\
& = - \sum_{i=0}^n \left[ m_i r_i \times v_0 - m_i r_i \times \left[ \sum_{k=0}^{i-1} A_{Ik} l_k \times \left( \sum_{j=0}^k A_{kj} \dot{\Phi}_j \right) + A_{Ii} a_i \times \left( \sum_{j=0}^i A_{ij} \dot{\Phi}_j \right) \right] \right] - \sum_{i=0}^{n-1} A_{Ii} I_i \sum_{j=0}^i A_{ij} \dot{\Phi}_j ;
\end{aligned}$$

其中,  $n$  为多刚体系统的刚体数量-1,  $A_{In}$  表示从  $F_n$  到惯性空间坐标系  $F_I$  的坐标变换矩阵,  $I_n$  表示基于  $F_n$  的第  $n$  个刚体的转动惯量,  $A_{nj}$  表示从  $F_j$  到  $F_n$  的坐标变换矩阵,  $F_n$  表示第  $n$  个刚体的坐标系,  $\dot{\Phi}_j$  表示基于  $F_j$  的第  $j$  个刚体相对于第  $j-1$  个刚体的角速度,  $m_i$  表示第  $i$  个刚体的质量,  $r_i$  表示基于  $F_I$  的第  $i$  个刚体的质心位置,  $F_I$  表示惯性空间坐标系,  $v_0$  表示基于  $F_I$  的第 0 个刚体的质心速度,  $A_{Ik}$  表示从  $F_k$  到惯性空间坐标系  $F_I$  的坐标变换矩阵,  $F_k$  表示第  $k$  个刚体的坐标系,  $l_k$  表示第  $k$  个刚体的坐标系的原点指向第  $k+1$  个刚体的坐标系的原点的矢量,  $A_{kj}$  表示从  $F_j$  到  $F_k$  的坐标变换矩阵,  $F_j$  表示第  $j$  个刚体的坐标系,  $A_{Ii}$  表示从  $F_i$  到惯性空间坐标系  $F_I$  的坐标变换矩阵,  $a_i$  表示第  $i$  个刚体的坐标系的原点指向第  $i$  个刚体的质心位置的矢量,  $A_{ij}$  表示从  $F_j$  到  $F_i$  的坐标变换矩阵,  $I_i$  表示基于  $F_i$  的第  $i$  个刚体的转动惯量,  $F_i$  表示第  $i$  个刚体的坐标系。

4. 如权利要求 2 所述的方法, 其特征在于, 所述产生待辨识目标的质量和质心位置包括:

在首次产生待辨识目标的质量和质心位置时, 随机产生待辨识目标的质量和质心位置;

在非首次产生待辨识目标的质量和质心位置时, 根据之前产生的待辨识目标的质量和质心位置以及相应的转动惯量误差利用智能优化算法产生待辨识目标的质量和质心位置。

5. 如权利要求 2 至 4 中任一权利要求所述的方法, 其中, 所述根据当前计算获得的多个转动惯量评估待辨识目标当前转动惯量误差包括:

根据当前计算获得的多个转动惯量中的所有独立分量的方差之和评估待辨识目标当前转动惯量误差。

6. 一种被空间机器人抓取的待辨识目标的惯性参数辨识装置, 包括:

存储模块, 适于存储基于多刚体系统的角动量守恒原理而建立的求解待辨识目标的转动惯量的运动学模型;

测量模块, 适于在驱动抓取有待辨识目标的机械臂转动的多个时刻, 分别测量机械臂各臂节的角动量以及安装有机械臂的航天器的角动量;

其中, 所述多个时刻分别对应的机械臂各臂节的角动量以及机械臂所在航天器的角动量被划分为多组角动量, 且一组角动量包括多个不同时刻对应的机械臂各臂节的角动量以及机械臂所在航天器的角动量;

产生并计算模块, 适于产生待辨识目标的质量和质心位置, 并利用多组角动量、当前产生的辨识目标的质量以及质心位置利用所述运动学模型分别计算获得待辨识目标的多个转动惯量;

判断模块, 适于根据当前计算获得的多个转动惯量评估待辨识目标的当前转动惯量误差, 在确定所述当前转动惯量误差不符合预定误差要求时, 触发产生并计算模块, 使产生并计算模块再次执行产生及计算操作; 在确定所述当前转动惯量误差符合预定误差要求时,

触发确定惯性参数模块执行相应的操作；

确定惯性参数模块,适于将当前计算获得的转动惯量作为待辨识目标的转动惯量,并将当前产生的待辨识目标的质量以及质心位置作为待辨识目标的质量以及质心位置；

其中,所述产生并计算模块具体适于:

针对一组角动量而言,利用该组角动量中的不同时刻对应的机械臂各臂节的角动量以及机械臂所在航天器的角动量、当前产生的辨识目标的质量以及质心位置计算公式  $\mathbf{S}^* \mathbf{I}_n^* = \mathbf{d}^*$  的最小二乘解  $\mathbf{I}_n^* = (\mathbf{S}^{*T} \mathbf{S}^*)^{-1} \mathbf{S}^{*T} \mathbf{d}^*$ , 所述最小二乘解  $\mathbf{I}_n^* = (\mathbf{S}^{*T} \mathbf{S}^*)^{-1} \mathbf{S}^{*T} \mathbf{d}^*$  即为本次计算出的待辨识目标的一个转动惯量:

其中,  $\mathbf{I}_n^* = [\mathbf{I}_{11} \ \mathbf{I}_{22} \ \mathbf{I}_{33} \ \mathbf{I}_{12} \ \mathbf{I}_{13} \ \mathbf{I}_{23}]^T$ ,  $\mathbf{I}_{11}$ 、 $\mathbf{I}_{22}$ 、 $\mathbf{I}_{33}$ 、 $\mathbf{I}_{12}$ 、 $\mathbf{I}_{13}$ 和 $\mathbf{I}_{23}$ 表示本次计算出的待辨识目标的转动惯量中的六个独立的分量,  $\mathbf{S}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{S}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{S}^{(t)} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{S}^{(1)}$ 为基于一组角动量中第一个时刻的 $\mathbf{S}$ ,  $\mathbf{S}^{(t)}$ 为基于一组角动量中第 $t$ 个时刻的 $\mathbf{S}$ ,  $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 & s_2 & s_3 & 0 \\ 0 & s_2 & 0 & s_1 & 0 & s_3 \\ 0 & 0 & s_3 & 0 & s_1 & s_2 \end{bmatrix}$ ,  $n$ 为多刚体系统的刚体数量-1,  $\mathbf{d}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{d}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{d}^{(t)} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{d}^{(1)}$ 为基于一组角动量中第一个时刻的 $\mathbf{d}$ ,  $\mathbf{d}^{(t)}$ 为基于一组角动量中第 $t$ 个时刻的 $\mathbf{d}$ ,  $\mathbf{d}$ 包括 $d_1$ 、 $d_2$ 和 $d_3$ 三个分量;

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \sum_{j=0}^n A_{nj} \dot{\Phi}_j$$

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} = -A_{in}^{-1} \sum_{i=0}^n \left[ m_i r_i \times v_0 - m_i r_i \times \left[ \sum_{k=0}^{i-1} A_{ik} l_k \times \Omega_k + A_{ii} a_i \times \Omega_i \right] \right] - A_{in}^{-1} \sum_{i=0}^{n-1} A_{ii} I_i \Omega_i$$

$$= -A_{in}^{-1} \sum_{i=0}^n \left[ m_i r_i \times v_0 - m_i r_i \times \left[ \sum_{k=0}^{i-1} A_{ik} l_k \times \left( \sum_{j=0}^k A_{kj} \dot{\Phi}_j \right) + A_{ii} a_i \times \left( \sum_{j=0}^i A_{ij} \dot{\Phi}_j \right) \right] \right]$$

$$- A_{in}^{-1} \sum_{i=0}^{n-1} A_{ii} I_i \sum_{j=0}^i A_{ij} \dot{\Phi}_j$$

其中,  $A_{nj}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_n$ 的坐标变换矩阵,  $\dot{\Phi}_j$ 表示基于 $F_j$ 的第 $j$ 个刚体相对于第 $j-1$ 个刚体的角速度,  $A_{in}^{-1}$ 表示 $A_{in}$ 的逆,  $A_{in}$ 表示从 $F_n$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵,  $I_n$ 表示基于 $F_n$ 的第 $n$ 个刚体的转动惯量,  $m_i$ 表示第 $i$ 个刚体的质量,  $r_i$ 表示基于 $F_I$ 的第 $i$ 个刚体的质心位置,  $F_I$ 表示惯性空间坐标系,  $v_0$ 表示基于 $F_I$ 的第 $0$ 个刚体的质心速度,  $A_{ik}$ 表示从 $F_k$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵,  $F_k$ 表示第 $k$ 个刚体的坐标系,  $l_k$ 表示第 $k$ 个刚体的坐标系的原点指

向第k+1个刚体的坐标系的原点的矢量,  $\Omega_k$ 表示基于 $F_k$ 的第k个刚体的角速度,  $A_{I_i}$ 表示从 $F_i$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵,  $a_i$ 表示第i个刚体的坐标系的原点指向第i个刚体的质心位置的矢量,  $I_i$ 表示基于 $F_i$ 的第i个刚体的转动惯量,  $\Omega_i$ 表示基于 $F_i$ 的第i个刚体的角速度,  $A_{k_j}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_k$ 的坐标变换矩阵,  $A_{i_j}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_i$ 的坐标变换矩阵,  $F_i$ 表示第i个刚体的坐标系,  $F_n$ 表示第n个刚体的坐标系,  $F_j$ 表示第j个刚体的坐标系。

7. 如权利要求6所述的装置, 其中, 所述机械臂各臂节与航天器形成多刚体系统, 且所述运动学模型包括:

$$A_{I_n} I_n \sum_{j=0}^n A_{n_j} \dot{\Phi}_j \\ = - \sum_{i=0}^n \left[ m_i r_i \times v_0 - m_i r_i \times \left[ \sum_{k=0}^{i-1} A_{I_k} l_k \times \left( \sum_{j=0}^k A_{k_j} \dot{\Phi}_j \right) + A_{I_i} a_i \times \left( \sum_{j=0}^i A_{i_j} \dot{\Phi}_j \right) \right] \right] - \sum_{i=0}^{n-1} A_{I_i} I_i \sum_{j=0}^i A_{i_j} \dot{\Phi}_j ;$$

其中, n为多刚体系统的刚体数量-1,  $A_{I_n}$ 表示从 $F_n$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵,  $I_n$ 表示基于 $F_n$ 的第n个刚体的转动惯量,  $A_{n_j}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_n$ 的坐标变换矩阵,  $F_n$ 表示第n个刚体的坐标系,  $\dot{\Phi}_j$ 表示基于 $F_j$ 的第j个刚体相对于第j-1个刚体的角速度,  $m_i$ 表示第i个刚体的质量,  $r_i$ 表示基于 $F_I$ 的第i个刚体的质心位置,  $v_0$ 表示基于 $F_I$ 的第0个刚体的质心速度,  $A_{I_k}$ 表示从 $F_k$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵,  $F_k$ 表示第k个刚体的坐标系,  $l_k$ 表示第k个刚体的坐标系的原点指向第k+1个刚体的坐标系的原点的矢量,  $A_{k_j}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_k$ 的坐标变换矩阵,  $F_j$ 表示第j个刚体的坐标系,  $A_{I_i}$ 表示从 $F_i$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵,  $a_i$ 表示第i个刚体的坐标系的原点指向第i个刚体的质心位置的矢量,  $A_{i_j}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_i$ 的坐标变换矩阵,  $I_i$ 表示基于 $F_i$ 的第i个刚体的转动惯量,  $F_i$ 表示第i个刚体的坐标系。

8. 如权利要求6至7中任一权利要求所述的装置, 其中, 所述判断模块具体适于:

根据当前计算获得的多个转动惯量中的所有独立分量的方差之和评估待辨识目标当前转动惯量误差。

## 待辨识目标的惯性参数辨识方法和装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及空间机器人技术,具体涉及一种待辨识目标的惯性参数辨识方法以及待辨识目标的惯性参数辨识装置。

### 背景技术

[0002] 卫星等航天器中通常设置有多臂节的机械臂,在航天器的在轨运行过程中,往往会出现利用机械臂来抓取未知目标(也可以称为非合作目标或者待辨识目标)的需求;这里的未知目标是指质量、质心位置以及转动惯量等惯性参数未知(如部分未知或者全部未知)的目标。

[0003] 在控制机械臂抓取未知目标的过程中,应准确及时的辨识出未知目标的惯性参数,否则,未知目标的抓取会使航天器的质量分布发生不可预知的变化,从而会给后续的机械臂操作路径的规划带来一定的困难。

[0004] 目前,对未知目标的惯性参数的辨识方法主要包括如下三种:

[0005] 方法一、在利用助推器对未知目标施加外力的同时,测量航天器(如卫星)姿态的角加速度信号以及力矩信息,之后,利用测量获得的角加速度信号和力矩信息来求解牛顿-欧拉运动方程,从而根据求解结果获得未知目标的惯性参数。

[0006] 方法二、在机械臂抓取到未知目标时,驱动机械臂的臂节转动,并测量臂节转动前后航天器的姿态变化以及位置变化信息,然后,利用测量获得的姿态变化以及位置变化信息基于动量和角动量守恒定律计算出未知目标的惯性参数。

[0007] 方法三、建立样本库(如利用运动学仿真建立样本库),并利用样本库中的各样本对多层前向神经网络进行训练;在机械臂抓取未知目标时,利用前述训练好的多层前向神经网络来辨识未知目标的惯性参数。

[0008] 发明人在实现本发明过程中发现:

[0009] 上述方法一由于需要利用助推器来推动未知目标,因此会消耗航天器的燃料;另外,由于目前的角加速度信号和力矩信息的测量精度较低,导致利用方法一所获得的惯性参数的精度较低;

[0010] 上述方法二由于需要足够数量的方程才能够求解出惯性参数,因此,需要多次驱动臂节进行运动,惯性参数辨识过程较复杂;另外,由于方法二需要获取角动量和线动量,而在目前线动量测量精度较低的情况下,方法二所获得的惯性参数的精度较低;

[0011] 上述方法三由于其惯性参数识别建立在样本库的基础上,从而使可辨识的未知目标的范围受到限制,即该方法的泛用性较差;另外,在机械臂臂节自由度较高以及样本较多等情况下,多层前向神经网络的设计难度以及训练难度均较高。

### 发明内容

[0012] 鉴于上述问题,提出了本发明以便提供一种克服上述问题或者至少部分地解决上述问题的待辨识目标的惯性参数辨识方法和装置。

[0013] 依据本发明的其中一个方面,提供了一种待辨识目标的惯性参数辨识方法,该方法主要包括:设置有基于多刚体系统的角动量守恒原理而建立的求解待辨识目标的转动惯量的运动学模型,且所述方法包括下述步骤:

[0014] 测量步骤:在驱动抓取有待辨识目标的机械臂转动的多个时刻,分别测量机械臂各臂节的角动量以及安装有机械臂的航天器的角动量,其中,所述多个时刻分别对应的机械臂各臂节的角动量以及机械臂所在航天器的角动量被划分为多组角动量,且一组角动量通常包括多不同时刻对应的机械臂各臂节的角动量以及机械臂所在航天器的角动量;

[0015] 产生并计算步骤:产生待辨识目标的质量和质心位置,并利用多组角动量、当前产生的辨识目标的质量以及质心位置利用所述运动学模型分别计算获得待辨识目标的多个转动惯量;

[0016] 判断步骤:根据当前计算获得的多个转动惯量评估待辨识目标当前转动惯量误差,在确定所述当前转动惯量误差不符合预定误差要求时,返回所述产生并计算步骤;在确定所述当前转动惯量误差符合预定误差要求时,到确定惯性参数步骤;

[0017] 确定惯性参数步骤:将当前计算获得的转动惯量作为待辨识目标的转动惯量,并将当前产生的待辨识目标的质量以及质心位置作为待辨识目标的质量以及质心位置。。

[0018] 依据本发明的其中再一个方面,提供了一种待辨识目标的惯性参数辨识装置,该装置包括:

[0019] 存储模块,适于存储基于多刚体系统的角动量守恒原理而建立的求解待辨识目标的转动惯量的运动学模型;

[0020] 测量模块,适于在驱动抓取有待辨识目标的机械臂转动的多个时刻,分别测量机械臂各臂节的角动量以及安装有机械臂的航天器的角动量;

[0021] 其中,所述多个时刻分别对应的机械臂各臂节的角动量以及机械臂所在航天器的角动量被划分为多组角动量,且一组角动量包括多个不同时刻对应的机械臂各臂节的角动量以及机械臂所在航天器的角动量;

[0022] 产生并计算模块,适于产生待辨识目标的质量和质心位置,并利用多组角动量、当前产生的辨识目标的质量以及质心位置利用所述运动学模型分别计算获得待辨识目标的多个转动惯量;

[0023] 判断模块,适于根据当前计算获得的多个转动惯量评估待辨识目标的当前转动惯量误差,在确定所述当前转动惯量误差不符合预定误差要求时,触发产生并计算模块,使产生并计算模块再次执行产生及计算操作;在确定所述当前转动惯量误差符合预定误差要求时,触发确定惯性参数模块执行相应的操作;

[0024] 确定惯性参数模块,适于将当前计算获得的转动惯量作为待辨识目标的转动惯量,并将当前产生的待辨识目标的质量以及质心位置作为待辨识目标的质量以及质心位置。

[0025] 本发明提供的待辨识目标的惯性参数辨识方法和装置至少具有下列优点及有益效果:本发明通过驱动抓取了待辨识目标的机械臂转动,并利用测量出的机械臂各臂节的角动量以及安装有机械臂的航天器的角动量进行后续的惯性参数辨识,避免了在借助外推力来推动待辨识目标的基础上实现惯性参数辨识的同时,还避免了需要测量线动量而线动量测量精度较低对惯性参数识别的不良影响;本发明通过利用测量获得的多组角动量、当

前产生的待辨识目标的质量和质心位置在预先设置的求解待辨识目标的转动惯量的运动学模型的基础上计算出待辨识目标的多个转动惯量,并基于当前获得的多个转动惯量对应的当前转动惯量误差不断的调整当前产生的待辨识目标的质量和质心位置,可以使当前产生的待辨识目标的质量和质心位置不断的逼近待辨识目标真实的质量和质心位置,而在当前产生的待辨识目标的质量和质心位置不断逼近待辨识目标真实的质量和质心位置的情况下,计算出的转动惯量也会不断的逼近待辨识目标真实的转动惯量,由此可知,本发明确定待辨识目标的惯性参数的实现过程并没有受到样本库等因素的影响,而且能够快速准确的辨识出任一待辨识目标的惯性参数;从而本发明提供的技术方案在节约了航天器宝贵的燃料的同时,提高了待辨识目标的惯性参数辨识精度,并具有较理想的泛用性。

[0026] 上述说明仅是本发明技术方案的概述,为了能够更清楚了解本发明的技术手段,而可依照说明书的内容予以实施,并且为了让本发明的上述和其它目的、特征和优点能够更明显易懂,以下特举本发明的具体实施方式。

### 附图说明

[0027] 通过阅读下文优选实施方式的详细描述,各种其他的优点和益处对于本领域普通技术人员将变得清楚明了。本实施例的附图仅用于示出优选实施方式的目的,而并不认为是对本发明的限制。而且在整个附图中,用相同的参考符号表示相同的部件。在附图中:

[0028] 图1为本发明待辨识目标的惯性参数辨识方法流程图;

[0029] 图2为本发明待辨识目标的惯性参数辨识装置示意图。

### 具体实施方式

[0030] 下面将参照附图更详细地描述本公开的示例性实施例。虽然附图中显示了本公开的示例性实施例,然而应当理解,可以以各种形式实现本公开而不应被这里阐述的实施例所限制。相反,提供这些实施例是为了能够更透彻地理解本公开,并且能够将本公开的范围完整的传达给本领域的技术人员。

[0031] 实施例一、待辨识目标的惯性参数辨识方法。

[0032] 本实施例的方法可以使安装有机械臂的航天器有效地识别(如在轨识别)出待辨识目标(即未知目标)的惯性参数。本实施例中的待辨识目标的惯性参数是指待辨识目标的质量、质心位置以及转动惯量。本实施例中的待辨识目标的质心位置通常为质心的三维坐标,即待辨识目标的质量和质心位置为四个标量。

[0033] 本实施例中的航天器和机械臂之间形成星臂耦合系统,例如,机械臂包含有 $n-1$ 个臂节(如包含有连杆和关节的臂节),且这 $n-1$ 个臂节分别通过其上的关节(总共 $n-1$ 个关节,也可以称为旋转关节)依次连接(如铰接),并最终接续固定在航天器上,从而形成具有 $n-1$ 个臂节的星臂耦合系统。

[0034] 在本实施例的方法中,预先设置有求解待辨识目标的转动惯量的运动学模型,且该求解待辨识目标的转动惯量的运动学模型是根据多刚体系统的角动量守恒原理而预先设置的,即本实施例的求解待辨识目标的转动惯量的运动学模型是由多刚体系统的角动量守恒原理转化而来的。具体的,在本实施例中的机械臂抓取到待辨识目标的情况下,可以将航天器、机械臂以及待辨识目标看作一个多刚体系统,在忽略地球扁率、大气阻尼、太阳光

压以及地球磁场等影响因素的情况下,该多刚体系统是满足多刚体系统的角动量守恒原理的,从而本实施例完全可以利用现有的多刚体系统的角动量守恒原理来设置求解待辨识目标的转动惯量的运动学模型。

[0035] 下面对利用现有的多刚体系统的角动量守恒原理来设置求解待辨识目标的转动惯量的运动学模型(下述简称为运动学模型)的一个具体例子进行详细说明。

[0036] 设定星臂耦合系统具有 $n-1$ 个臂节(如包含有连杆和关节的臂节),且这 $n-1$ 个臂节分别通过其上的关节(如铰链)依次连接,并最终固定接续到航天器(也可以称为主星)上,形成多刚体系统;其中的每一个臂节均只有一个自由度。该多刚体系统包括 $n+1$ 个刚体,主星为第0个刚体,各臂节分别为第1个刚体至第 $n-1$ 个刚体,待辨识目标为第 $n$ 个刚体,且在机械臂稳定抓取到待辨识目标的情况下,第 $n$ 个刚体(待辨识目标)与第 $n-1$ 个刚体(最末端臂节)之间由于固定连接而无相对运动。

[0037] 设定星臂耦合系统处于无轨控推力以及无姿控力矩作用下的在轨飞行状态,即设定主星的位置和姿态均不受助推器或者其他外力的控制。

[0038] 设定地球扁率、大气阻尼、太阳光压以及地球磁场等影响因素均被忽略不计。

[0039] 角动量守恒原理如下述公式(1)所示:

$$[0040] \quad \sum_i h_i = \dot{h}^{(0)} = const \quad \text{公式 (1)}$$

[0041] 在上述公式(1)中, $i$ 的取值范围为 $[0, n]$ , $n$ 为多刚体系统所包含的刚体数量-1, $h_i$ 表示第 $i$ 个刚体(如臂节或连杆等)的角动量, $\dot{h}^{(0)}$ 表示初始时刻(即第0时刻)的多刚体系统的角动量, $const$ 表示常数。

[0042] 在单独考虑星臂耦合系统中的每段刚体(即主星、各臂节以及待辨识目标)时,每段刚体的角动量都满足下述公式(2):

$$[0043] \quad h_i = m_i r_i \times v_i + A_{ri} I_i \Omega_i = m_i r_i \times v_i + A_{ri} I_i \sum_{k=0}^i A_{ik} \dot{\Phi}_k \quad \text{公式 (2)}$$

[0044] 在上述公式(2)中, $m_i$ 表示第 $i$ 个刚体的质量, $r_i$ 表示基于 $F_{-1}$ 的第 $i$ 个刚体的质心位置, $F_I$ 表示惯性空间坐标系,即 $r_i$ 表示第 $i$ 个刚体的质心的绝对位置, $v_i$ 表示基于 $F_I$ 的第 $i$ 个刚体的质心速度(即第 $i$ 个刚体的质心的绝对速度), $A_{ri}$ 表示从 $F_i$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵( $F_I$ 表示惯性空间坐标系), $I_i$ 表示基于 $F_i$ 的第 $i$ 个刚体的转动惯量,且 $F_i, i \in \{0, 2, \dots, n\}$ 表示第 $i$ 个刚体的坐标系(如机械臂中的第 $i-1$ 个连杆的坐标系),对于机械臂来说,该第 $i$ 个刚体的坐标系的原点被固定在第 $i-1$ 段臂节与第 $i$ 段臂节之间的连接点(即关节)处,且该坐标系的 $z$ 轴与第 $i$ 段臂节的旋转轴保持一致, $\Omega_i$ 表示基于 $F_i$ 的第 $i$ 个刚体的角速度, $A_{ik}$ 表示从 $F_k$ 到 $F_i$ 的坐标变换矩阵, $F_k$ 表示第 $k$ 个刚体的坐标系, $\dot{\Phi}_k$ 表示基于 $F_k$ 的第 $k$ 个刚体相对于第 $k-1$ 个刚体的角速度。

[0045] 上述公式(2)中的 $r_i$ 可以用下述公式(3)来表示:

$$[0046] \quad r_i = r_0 + \sum_{k=0}^{i-1} A_{rk} l_k + A_{ri} a_i$$

公式 (3)

[0047] 在上述公式(3)中, $r_0$ 表示基于 $F_I$ 的主星的质心位置, $F_I$ 表示惯性空间坐标系, $A_{rk}$ 表

示从 $F_k$ 到 $F_i$ 的坐标变换矩阵,  $F_k$ 表示第 $k$ 个刚体的坐标系,  $l_k$ 表示第 $k$ 个刚体的坐标系的原点指向第 $k+1$ 个刚体的坐标系的原点的矢量,  $A_{Ii}$ 表示从 $F_i$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵,  $a_i$ 表示第 $i$ 个刚体的坐标系的原点指向第 $i$ 个刚体的质心位置的矢量。

[0048] 上述公式(2)中的 $v_i$ 可以用下述公式(4)来表示:

$$\begin{aligned} v_i &= \dot{r}_i \\ &= \dot{r}_0 + \sum_{k=0}^{i-1} A_{Ik} \Omega_k \times l_k + A_{Ii} \Omega_i \times a_i \end{aligned}$$

[0049]

$$= \dot{r}_0 - \sum_{k=0}^{i-1} A_{Ik} l_k \times \left( \sum_{j=0}^k A_{kj} \dot{\Phi}_j \right) - A_{Ii} a_i \times \left( \sum_{j=0}^i A_{ij} \dot{\Phi}_j \right)$$

#### 公式(4)

[0050] 在上述公式(4)中,  $\dot{r}_i$ 表示第 $i$ 个刚体的质心绝对位置对时间的一阶导数, 也即第 $i$ 个刚体的速度,  $\dot{r}_0$ 表示第0个刚体的质心绝对位置对时间的一阶导数, 也即第0个刚体的速度,  $A_{Ik}$ 表示从 $F_k$ 到 $F_i$ 的坐标变换矩阵,  $F_k$ 表示第 $k$ 个刚体的坐标系,  $\Omega_k$ 表示基于 $F_k$ 的第 $k$ 个刚体的角速度,  $l_k$ 表示第 $k$ 个刚体的坐标系(即 $F_k$ )的原点指向第 $k+1$ 个刚体的坐标系的原点的矢量,  $A_{Ii}$ 表示从 $F_i$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵,  $\Omega_i$ 表示基于 $F_i$ 的第 $i$ 个刚体的角速度,  $a_i$ 表示第 $i$ 个刚体的坐标系(即 $F_i$ )的原点指向第 $i$ 个刚体的质心位置的矢量,  $A_{kj}$ 表示从 $F_k$ 到 $F_j$ 的坐标变换矩阵,  $\dot{\Phi}_j$ 表示基于 $F_j$ 的第 $j$ 个刚体相对于第 $j-1$ 个刚体的角速度,  $A_{ij}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_i$ 的坐标变换矩阵,  $F_j$ 表示第 $j$ 个刚体的坐标系, 该坐标系的原点为第 $j-1$ 个刚体和第 $j$ 个刚体的连接处(即关节处), 且该坐标系的 $z$ 轴与第 $j$ 个刚体的旋转轴保持一致,  $F_i$ 表示第 $i$ 个刚体的坐标系, 该坐标系的原点为第 $i-1$ 个刚体和第 $i$ 个刚体的连接处(即关节处), 且该坐标系的 $z$ 轴与第 $i$ 个刚体的旋转轴保持一致。

[0051] 在设定多刚体系统的质心位置为 $r_G$ 的情况下, 则有下列公式(5):

$$r_G \sum_{i=0}^n m_i = \sum_{i=0}^n m_i r_i$$

[0052]

#### 公式(5)

[0053] 在上述公式(5)中,  $n$ 为多刚体系统所包含的刚体数量-1,  $m_i$ 表示第 $i$ 个刚体的质量,  $r_i$ 表示第 $i$ 个刚体的质心的绝对位置。

[0054] 将利用公式(3)所表示的每个刚体所表示质心的绝对位置 $r_i$ 代入到上述公式(5)的右侧可以得到下述公式(6):

$$r_G \sum_{i=0}^n m_i = \sum_{i=0}^n m_i \left( r_0 + \sum_{k=0}^{i-1} A_{Ik} l_k + A_{Ii} a_i \right)_i$$

[0055]

$$= r_0 \sum_{i=0}^n m_i + \sum_{i=0}^n m_i \left( \sum_{k=0}^{i-1} A_{Ik} l_k + A_{Ii} a_i \right)_i$$

#### 公式(6)

[0056] 在上述公式(6)中,  $n$ 为多刚体系统所包含的刚体数量-1,  $r_G$ 为多刚体系统的质心

位置,  $r_0$ 表示基于 $F_{-1}$ 的主星的质心位置,  $m_i$ 表示第 $i$ 个刚体的质量,  $A_{Ik}$ 表示从 $F_k$ 到 $F_i$ 的坐标变换矩阵,  $F_k$ 表示第 $k$ 个刚体的坐标系,  $l_k$ 表示第 $k$ 个刚体的坐标系的原点指向第 $k+1$ 个刚体的坐标系的原点的矢量,  $A_{Ii}$ 表示从 $F_i$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵,  $a_i$ 表示第 $i$ 个刚体的坐标系的原点指向第 $i$ 个刚体的质心位置的矢量。

[0057] 在将惯性空间坐标系 $F_I$ 建立在初始时刻的多刚体系统的质心位置上(即令 $r_G=0$ )的情况下, 则可以得到下述公式(7):

$$[0058] \quad r_0 = - \frac{\sum_{i=0}^n m_i \left( \sum_{k=0}^{i-1} A_{Ik} l_k + A_{Ii} a_i \right)_i}{\sum_{i=0}^n m_i}$$

### 公式(7)

[0059] 在上述公式(7)中,  $n$ 为多刚体系统所包含的刚体数量-1,  $r_0$ 表示基于 $F_{-1}$ 的主星的质心位置,  $m_i$ 表示第 $i$ 个刚体的质量,  $A_{Ik}$ 表示从 $F_k$ 到 $F_i$ 的坐标变换矩阵,  $F_k$ 表示第 $k$ 个刚体的坐标系,  $l_k$ 表示第 $k$ 个刚体的坐标系的原点指向第 $k+1$ 个刚体的坐标系的原点的矢量,  $A_{Ii}$ 表示从 $F_i$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵,  $a_i$ 表示第 $i$ 个刚体的坐标系的原点指向第 $i$ 个刚体的质心位置的矢量。

[0060] 利用上述公式(7)可以消除上述公式(3)和公式(4)中的 $r_0$ 。

[0061] 在设定初始0时刻的多刚体系统角动量 $h^{(0)}=0$ , 且将公式(2)所表示的每个刚体的 $h_i$ 代入公式(1)中的情况下, 可以得到下述公式(8):

$$[0062] \quad \sum_{i=0}^n \left[ m_i r_i \times v_0 - m_i r_i \times \left[ \sum_{k=0}^{i-1} A_{Ik} l_k \times \left( \sum_{j=0}^k A_{kj} \dot{\Phi}_j \right) + A_{Ii} a_i \times \left( \sum_{j=0}^i A_{ij} \dot{\Phi}_j \right) \right] + A_{Ii} I_i \sum_{j=0}^i A_{ij} \dot{\Phi}_j \right] = 0$$

### 公式(8)

[0063] 上述公式(8)中只含有待求解的转动惯量 $I_n$ , 本实施例在将转动惯量 $I_n$ 提取出来之后, 可以得到下述公式(9):

[0064]

$$\begin{aligned} & A_{In} I_n \sum_{j=0}^n A_{nj} \dot{\Phi}_j \\ &= - \sum_{i=0}^n \left[ m_i r_i \times v_0 - m_i r_i \times \left[ \sum_{k=0}^{i-1} A_{Ik} l_k \times \left( \sum_{j=0}^k A_{kj} \dot{\Phi}_j \right) + A_{Ii} a_i \times \left( \sum_{j=0}^i A_{ij} \dot{\Phi}_j \right) \right] \right] \\ & \quad - \sum_{i=0}^{n-1} A_{Ii} I_i \sum_{j=0}^i A_{ij} \dot{\Phi}_j \end{aligned} \quad \text{公式(9)}$$

[0065] 在上述公式(9)中,  $n$ 为多刚体系统的刚体数量-1,  $A_{In}$ 表示从 $F_n$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵,  $I_n$ 表示基于 $F_n$ 的第 $n$ 个刚体的转动惯量,  $A_{nj}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_n$ 的坐标变换矩阵,  $F_n$ 表示第 $n$ 个刚体的坐标系,  $\dot{\Phi}_j$ 表示基于 $F_j$ 的第 $j$ 个刚体相对于第 $j-1$ 个刚体的角速度,  $m_i$ 表示第 $i$ 个刚体的质量,  $r_i$ 表示基于 $F_I$ 的第 $i$ 个刚体的质心位置,  $F_I$ 表示惯性空间坐标系,  $v_0$

表示基于 $F_I$ 的第0个刚体的质心速度, $A_{Ik}$ 表示从 $F_k$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵, $F_k$ 表示第 $k$ 个刚体的坐标系, $l_k$ 表示第 $k$ 个刚体的坐标系的原点指向第 $k+1$ 个刚体的坐标系的原点的矢量, $A_{kj}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_k$ 的坐标变换矩阵, $F_j$ 表示第 $j$ 个刚体的坐标系, $A_{Ii}$ 表示从 $F_i$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵, $a_i$ 表示第 $i$ 个刚体的坐标系的原点指向第 $i$ 个刚体的质心位置的矢量, $A_{ij}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_i$ 的坐标变换矩阵。

[0066] 上述公式(9)即为本实施例的运动学模型。

[0067] 需要特别说明的是,上述公式(9)所表示的运动学模型仅仅是根据多刚体系统的角动量守恒原理推导出来的运动学模型的一个具体的例子,在实际应用中,公式(9)是存在多种变化的形式的,本实施例不限制根据多刚体系统的角动量守恒原理所推导出来的运动学模型的具体表现形式。

[0068] 下面以公式(9)所表示出的运动学模型为例,并结合图1对本实施例的方法进行说明。

[0069] 图1中,S100、在机械臂抓取待辨识目标的多个时刻,分别测量机械臂各臂节的角动量以及机械臂所在航天器的角动量。

[0070] 具体的,在机械臂抓取到待辨识目标时,可以驱动机械臂旋转,并在驱动机械臂旋转的过程中,针对多个不同的时刻(通常为几十个时刻,如40个时刻),分别测量机械臂各臂节的角动量及机械臂所在航天器的角动量,并按照时刻的前后顺序存储测量获得的角动量,从而针对每一个时刻(如采样时刻)均获得多个角动量。为描述方便起见,本实施例将一个时刻所对应的所有角动量称为一个角动量集合,从而不同时刻对应不同的角动量集合。

[0071] 本实施例中的不同时刻对应的角动量集合可以被划分为多个组(通常为几十个组,如20个组),且每一组均包含有多个角动量集合(通常包含几十个不同时刻分别对应的角动量集合,如20个角动量集合)。需要特别说明的是,不同组中的角动量集合是可以有交集的,如第一组角动量包括从第一时刻对应的角动量集合开始的 $k$ 个角动量集合,而第二组角动量包括从第二时刻对应的角动量集合开始的 $k$ 个角动量集合,以此类推。当然,本实施例也不排除不同组中的角动量集合没有交集的可能性。

[0072] 本实施例可以采用陀螺仪等设备来测量机械臂各臂节的角动量以及机械臂所在航天器的角动量,本实施例不限制测量机械臂各臂节的角动量以及机械臂所在航天器的角动量的具体实现方式。

[0073] S110、产生待辨识目标的质量和质心位置,并利用多组角动量、当前产生的辨识目标的质量以及质心位置利用预先设置的运动学模型分别计算获得待辨识目标的多个转动惯量。

[0074] 具体的,本实施例可以采用多种方式(如随机方式等)产生待辨识目标的质量和质心位置;为了使产生的待辨识目标的质量和质心位置尽快的逼近待辨识目标的真实质量以及质心位置,本实施例可以采用随机方式与智能优化算法相结合的方式产生待辨识目标的质量和质心位置。

[0075] 产生待辨识目标的质量和质心位置的一个具体的例子为:在首次产生待辨识目标的质量和质心位置时,随机产生待辨识目标的质量和质心位置,在非首次产生待辨识目标的质量和质心位置时,可以根据之前产生的待辨识目标的质量和质心位置以及相应的转动惯量误差利用智能优化算法产生待辨识目标的质量和质心位置。这里的智能优化算法可以

为遗传算法等。本实施例不限制智能优化算法的具体表现形式。

[0076] 本实施例可以利用一组角动量以及预先设置的运动学模型计算出待辨识目标的一个转动惯量,从而利用多组角动量以及预先设置的运动学模型计算出待辨识目标的多个转动惯量。

[0077] 利用一组角动量以及预先设置的运动学模型计算出待辨识目标的一个转动惯量的一个具体例子如下:

[0078] 设定s和d分别包括三个独立的分量,且s和d可以通过下述公式(10)和公式(11)来表示:

$$[0079] \quad \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \sum_{j=0}^n A_{nj} \dot{\Phi}_j \quad \text{公式 (10)}$$

[0080] 在上述公式(10)中,n为多刚体系统所包含的刚体数量-1, $A_{nj}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_n$ 的坐标变换矩阵, $F_n$ 表示第n个刚体(通常为待辨识目标)的坐标系, $\dot{\Phi}_j$ 表示表示基于 $F_j$ 的第j个刚体相对于第j-1个刚体的角速度。

$$[0081] \quad \begin{aligned} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} &= -A_{In}^{-1} \sum_{i=0}^n \left[ m_i r_i \times v_0 - m_i r_i \times \left[ \sum_{k=0}^{i-1} A_{Ik} l_k \times \Omega_k + A_{Ii} a_i \times \Omega_i \right] \right] - A_{In}^{-1} \sum_{i=0}^{n-1} A_{Ii} I_i \Omega_i \\ &= -A_{In}^{-1} \sum_{i=0}^n \left[ m_i r_i \times v_0 - m_i r_i \times \left[ \sum_{k=0}^{i-1} A_{Ik} l_k \times \left( \sum_{j=0}^k A_{kj} \dot{\Phi}_j \right) + A_{Ii} a_i \times \left( \sum_{j=0}^i A_{ij} \dot{\Phi}_j \right) \right] \right] \\ &\quad - A_{In}^{-1} \sum_{i=0}^{n-1} A_{Ii} I_i \sum_{j=0}^i A_{ij} \dot{\Phi}_j \end{aligned}$$

公式 (11)

[0082] 在上述公式(11)中,n为多刚体系统所包含的刚体数量-1, $A_{In}^{-1}$ 表示 $A_{In}$ 的逆, $A_{In}$ 表示从 $F_n$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵, $m_i$ 表示第i个刚体的质量, $r_i$ 表示基于 $F_I$ 的第i个刚体的质心位置, $F_I$ 表示惯性空间坐标系,即 $r_i$ 表示第i个刚体的质心的绝对位置, $v_0$ 表示基于 $F_I$ 的第0个刚体的质心速度(即第0个刚体的质心的绝对速度,且第0个刚体通常为为主星), $A_{Ik}$ 表示从 $F_k$ 到 $F_i$ 的坐标变换矩阵, $F_k$ 表示第k个刚体的坐标系, $l_k$ 表示第k个刚体的坐标系的原点指向第k+1个刚体的坐标系的原点的矢量, $\Omega_k$ 表示基于 $F_k$ 的第k个刚体的角速度, $A_{Ii}$ 表示从 $F_i$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵( $F_I$ 与 $F_{-1}$ 均表示惯性空间坐标系), $a_i$ 表示第i个刚体的坐标系的原点指向第i个刚体的质心位置的矢量, $I_i$ 表示基于 $F_i$ 的第i个刚体的转动惯量,且 $F_i, i \in \{0, 2, \dots, n\}$ 表示第i个刚体的坐标系(如机械臂中的第i-1个连杆的坐标系),对于机械臂来说,该第i个刚体的坐标系的原点被固定在第i-1段臂节与第i段臂节之间的连接点(即关节)处,且该坐标系的z轴与第i段臂节的旋转轴保持一致, $\Omega_i$ 表示基于 $F_i$ 的第i个刚体的角速度, $A_{ik}$ 表示从 $F_k$ 到 $F_i$ 的坐标变换矩阵, $F_k$ 表示第k个刚体的坐标系, $\dot{\Phi}_j$ 表示基于 $F_j$ 的第j个刚体相对于第j-1个刚体的角速度, $A_{ij}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_i$ 的坐标变换矩阵。

[0083] 由此可知,上述公式(9)可以转化为如下公式(12)的形式:

$$[0084] \quad I_n s = d$$

[0085] 公式 (12)

[0086] 在将当前产生的待辨识目标的质量和质心位置作为待辨识目标的质量 $m_n$ 和质心位置 $r_n$ 的情况下,上述公式 (12) 中的 $s$ 和 $d$ 均不存在未知参数,而只有 $I_n$ 是待求解的变量。由于求解出的 $I_n$ 可能并不是待辨识目标的真实的转动惯量,因此,我们将利用运动学模型求解出的待辨识目标的转动惯量使用 $I_n^*$ 来表示。本实施例可以将 $I_n^*$ 表述为下述公式 (13) 形式:

$$I_n^* = [I_{11} \quad I_{22} \quad I_{33} \quad I_{12} \quad I_{13} \quad I_{23}]^T$$

[0087]

公式 (13)

[0088] 在上述公式 (13) 中, $I_{11}$ 、 $I_{22}$ 、 $I_{33}$ 、 $I_{12}$ 、 $I_{13}$ 以及 $I_{23}$ 表示待辨识目标的转动惯量中的六个独立的分量。

[0089] 上述 $s$ 可以表述为 $[s_1 \quad s_2 \quad s_3]^T$ 的形式,其中的 $s_1$ 、 $s_2$ 以及 $s_3$ 为 $s$  ( $s = [s_1 \quad s_2 \quad s_3]^T$ ) 中的三个独立的分量,且这三个独立的分量在被设置为如下述公式 (14) 所示的形式时,形成矩阵 $S$ :

$$S = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 & s_2 & s_3 & 0 \\ 0 & s_2 & 0 & s_1 & 0 & s_3 \\ 0 & 0 & s_3 & 0 & s_1 & s_2 \end{bmatrix} \quad \text{公式 (14)}$$

$$d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \quad \text{公式 (15)}$$

[0092] 在上述公式 (15) 中, $d_1$ 、 $d_2$ 以及 $d_3$ 为 $d$ 中的三个独立的分量。

[0093] 上述公式 (12) 可以转化为下述公式 (16) 的形式:

$$SI_n^* = d \quad \text{公式 (16)}$$

[0095] 将上述公式 (13)、公式 (14) 以及公式 (15) 带入上述公式 (16) 中可以获得下述公式 (17):

$$\begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 & s_2 & s_3 & 0 \\ 0 & s_2 & 0 & s_1 & 0 & s_3 \\ 0 & 0 & s_3 & 0 & s_1 & s_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \\ I_{12} \\ I_{13} \\ I_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix}$$

[0096]

公式 (17)

[0097] 上述公式 (17) 中存在六个未知数,即 $I_{11}$ 、 $I_{22}$ 、 $I_{33}$ 、 $I_{12}$ 、 $I_{13}$ 及 $I_{23}$ ,在将公式 (17) 表示成方程方程组的情况下,只有三个方程。显然公式 (17) 没有唯一解。然而,在利用了一组角动量中的多个或者所有角动量集合(即联立了更多时刻的数据)之后,本实施例可以得到更多组的公式,从而使公式 (17) 具有唯一解。

[0098] 设定 $S^*$ 表示由不同时刻的 $S$ 组成的矩阵,且 $d^*$ 表示由不同时刻的 $d$ 组成的矩阵,则 $S^*$

和 $d^*$ 分别如下述公式(18)和公式(19)所示:

$$[0099] \quad \mathbf{S}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{S}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{S}^{(t)} \end{bmatrix} \quad \text{公式 (18)}$$

$$[0100] \quad \mathbf{d}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{d}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{d}^{(t)} \end{bmatrix} \quad \text{公式 (19)}$$

[0101] 在上述公式(18)和公式(19)中,字母S和d的上标(1)以及上标(t)表示时刻,即时刻1和时刻t,其中的t通常为几十,如20。

[0102] 在联立了多个时刻的数据之后,可以得到下述公式(20):

$$[0103] \quad \mathbf{S}^* \mathbf{I}_n^* = \mathbf{d}^* \quad \text{公式 (20)}$$

[0104] 在不同时刻的数据足够多时,可以保证上述公式(20)为满秩,从而可以利用公式(20)计算出待辨识目标的转动惯量的列向量形式的 $\mathbf{I}_n^*$ 。

[0105] 利用公式(20)计算出待辨识目标的转动惯量的一个具体的例子为:求取上述公式(20)的最小二乘解,并将该最小二乘解作为本次计算出的待辨识目标的转动惯量的列向量形式的 $\mathbf{I}_n^*$ ;上述公式(20)的最小二乘解如下述公式(21)所示:

$$[0106] \quad \mathbf{I}_n^* = (\mathbf{S}^{*T} \mathbf{S}^*)^{-1} \mathbf{S}^{*T} \mathbf{d}^* \quad \text{公式 (21)}$$

[0107] 在上述公式(21)中, $\mathbf{S}^{*T}$ 表示 $\mathbf{S}^*$ 的转置矩阵, $(*)^{-1}$ 表示矩阵(\*)的逆。

[0108] S120、根据当前计算获得的多个转动惯量评估待辨识目标的当前转动惯量误差,在确定当前转动惯量误差不符合预定误差要求时,返回S110;在确定当前转动惯量误差符合预定误差要求时,到下述步骤S130。

[0109] 具体的,由于待辨识目标的质量以及质心位置是未知的,而上述S110中用于计算转动惯量的待辨识目标的质量以及质心位置是基于随机方式或者智能优化算法等方式产生的,因此,在S110中所使用到的待辨识目标的质量以及质心位置很可能并不是待辨识目标真实的质量以及质心位置,从而利用并不是待辨识目标真实的质量以及质心位置所计算出来的待辨识目标的转动惯量也不会是待辨识目标真实的转动惯量。由此可知,本实施例应对上述S110中计算出的待辨识目标的转动惯量进行验证,通过对转动惯量的验证可以促使本实施例不断的通过S110进行待辨识目标的转动惯量的计算,且计算出的待辨识目标的转动惯量会不断的逼近待辨识目标真实的转动惯量,直至S110所产生的待辨识目标的质量和质心位置基本上为待辨识目标真实的质量和质心位置,这样,计算出的待辨识目标的转动惯量基本上为待辨识目标真实的转动惯量。

[0110] 本实施例对待辨识目标的转动惯量进行验证的理论基础为:在待辨识目标的质量和质心位置这四个标量与待辨识目标真实的质量和质心位置差异较大时,利用这样的四个标量针对不同时刻的角动量(即不同组角动量)所计算出的待辨识目标的转动惯量会不相同(可能差异较大);而在待辨识目标的质量和质心位置这四个标量基本上逼近待辨识目标真实的质量和质心位置(或者是待辨识目标真实的质量和质心位置)时,利用这样的四个标

量针对不同时刻的角动量所计算出的待辨识目标的转动惯量基本上相同(即差异非常小)。也就是说,在利用待辨识目标真实的质量和质心位置来针对不同时刻的角动量(即不同组角动量)进行待辨识目标的转动惯量的计算时,计算出的待辨识目标的多个转动惯量(如最小二乘解)才会是完全相同的,而产生的待辨识目标的质量和质心位置越逼近真实值,则不同时刻所对应的求解结果会从各个方向逼近待辨识目标的转动惯量的真实值。

[0111] 基于上述理论基础,本实施例是在利用相同的待辨识目标的质量和质心位置基于多组角动量分别计算出多个待辨识目标的转动惯量来评估待辨识目标的当前转动惯量误差的。

[0112] 本实施例评估待辨识目标的当前转动惯量误差的一个具体例子为:针对相同的待辨识目标的质量和质心位置基于多组角动量分别计算出多个待辨识目标的转动惯量  $I_n^*$ , 分别求解多个  $I_n^*$  中的每个分量(六个分量)的方差,然后,再计算六个分量的方差之和,该方差之和即为待辨识目标的当前转动惯量误差。

[0113] 在评估获得了待辨识目标的当前转动惯量误差之后,应判断该误差是否满足预定误差要求,如判断计算出的方差之和是否小于预定误差阈值等;在判断出误差满足预定误差要求的情况下,到步骤S130;在判断出误差不满足预定误差要求的情况下,到步骤S110,即继续产生新的质量和质心位置(如通过智能优化算法产生新的质量和质心位置),并基于当前新产生的质量和质心位置再次计算待辨识目标的多个转动惯量。

[0114] S130、将当前计算获得的转动惯量作为待辨识目标的转动惯量,并将当前产生的待辨识目标的质量和质心位置作为待辨识目标的质量和质心位置。

[0115] 具体的,在计算出的误差满足预定误差要求的情况下,本实施例可以将当前计算出的待辨识目标的多个转动惯量中的一个作为待辨识目标最终的转动惯量,如将计算出的最接近预定误差阈值的转动惯量作为待辨识目标最终的转动惯量;本实施例也可以对当前计算出的待辨识目标的多个转动惯量进行综合计算,并将综合计算出的结果作为待辨识目标最终的转动惯量。

[0116] 实施例二、待辨识目标的惯性参数辨识方法。

[0117] 首先,在机械臂抓取待辨识目标的多个时刻,分别测量机械臂各臂节的角动量以及机械臂所在航天器的角动量。

[0118] 其次,产生待辨识目标的质量以及质心位置。在非首次产生待辨识目标的质量以及质心位置时,可以使用实值编码的基本遗传算法,基本遗传算法的实现过程可以包括:基于线性排序来分配适应度,并以轮盘赌方法进行选择,限定优化区间为保守估计的质量和质心位置的边界范围等。本实施例不限制基本遗传算法的具体实现过程。

[0119] 再次,使用  $i$  个不同时刻的测量数据分别计算  $S$  和  $d$ , 得到  $S^{(1)}, \dots, S^{(i)}$  和  $d^{(1)}, \dots, d^{(i)}$ ;

[0120] 之后,分别从  $S^{(1)}$  和  $d^{(1)}$  开始取前  $k$  个  $S$  和  $d$  组合成  $\mathbf{S}^{*(1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{S}^{(k)} \end{bmatrix}$  和  $\mathbf{d}^{*(1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{d}^{(k)} \end{bmatrix}$ , 并利

用  $\mathbf{S}^{*(1)}$  和  $\mathbf{d}^{*(1)}$  构成方程组,求解对应的  $I_n^{*(1)}$ ;

[0121] 再之后,分别从 $S^{(2)}$ 和 $d^{(2)}$ 开始取前 $k$ 个 $S$ 和 $d$ 组合成 $S^{*(2)} = \begin{bmatrix} S^{(2)} \\ \vdots \\ S^{(k+1)} \end{bmatrix}$ 和 $d^{*(2)} = \begin{bmatrix} d^{(2)} \\ \vdots \\ d^{(k+1)} \end{bmatrix}$ ,

并利用 $S^{*(2)}$ 和 $d^{*(2)}$ 构成方程组,求解对应的 $I_n^{*(2)}$ 。

[0122] 依次类推,反复选取不同的 $k$ 个 $S$ 和 $d$ 组合成不同的矩阵,构成不同的方程组,求解不同的转动惯量,直到全部 $i$ 个时刻的测量数据都已参与求解转动惯量的计算,最终会得到 $I_n^{*(1)}, \dots, I_n^{*(i-k)}$ ,共 $(i-k)$ 组求解结果,即获得了变量 $I_n^*$ 的容量为 $(i-k)$ 的一组样本。

[0123] 然后,计算 $I_n^*$ 中6个独立的分量各自的方差之和,该方差之和可以通过下述公式(22)来表示:

$$[0124] \quad e = \sum_{s=1}^6 \sigma [I_{n,s}^*] \quad \text{公式 (22)}$$

[0125] 在上述公式(22)中, $\sigma(*)$ 为\*的方差; $I_{n,s}^*$ 为 $I_n^*$ 第 $s$ 个分量的值构成的变量,其与 $I_n^*$ 拥有容量相等的样本。

[0126] 上述公式(22)为使用优化方法求解问题所需优化的目标函数,也就是说,在使公式(22)具有最小值时,本实施例即可准确的确定出待辨识目标的质量、质心位置以及转动惯量。

[0127] 在实际应用中,通过多次数据仿真实验可知,在 $i$ 大约取40左右, $k$ 大约取20左右的情况下,基本上可以得到较稳定的误差评价结果。另外,在使用的基本遗传算法中的种群规模为500、最大迭代次数为100、交叉概率为0.25以及变异概率为0.01的情况下,经实验证实,利用本实施例的方法最终获得的待辨识目标的惯性参数具有较高的精度。

[0128] 实施例三、待辨识目标的惯性参数辨识装置。该装置的结构如图2所示。

[0129] 图2中,本实施例的待辨识目标的惯性参数辨识装置主要包括:存储模块200、测量模块210、产生并计算模块220、判断模块230以及确定惯性参数模块250。

[0130] 存储模块200主要适于存储基于多刚体系统的角动量守恒原理而建立的求解待辨识目标的转动惯量的运动学模型。

[0131] 具体的,存储模块200中存储的运动学模型可以用下述公式表示:

$$[0132] \quad \begin{aligned} & A_{In} I_n \sum_{j=0}^n A_{nj} \dot{\Phi}_j \\ & = - \sum_{i=0}^n \left[ m_i r_i \times v_0 - m_i r_i \times \left[ \sum_{k=0}^{i-1} A_{ik} I_k \times \left( \sum_{j=0}^k A_{kj} \dot{\Phi}_j \right) + A_{ri} a_i \times \left( \sum_{j=0}^i A_{ij} \dot{\Phi}_j \right) \right] \right] \\ & \quad - \sum_{i=0}^{n-1} A_{ri} I_i \sum_{j=0}^i A_{ij} \dot{\Phi}_j \end{aligned}$$

[0133] 在上述公式中, $n$ 为多刚体系统的刚体数量-1, $A_{In}$ 表示从 $F_n$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵, $I_n$ 表示基于 $F_n$ 的第 $n$ 个刚体的转动惯量, $A_{nj}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_n$ 的坐标变换矩阵, $F_n$ 表示第 $n$ 个刚体的坐标系, $\dot{\Phi}_j$ 表示基于 $F_j$ 的第 $j$ 个刚体相对于第 $j-1$ 个刚体的角速度, $m_i$ 表示第 $i$ 个刚体的质量, $r_i$ 表示基于 $F_I$ 的第 $i$ 个刚体的质心位置, $F_I$ 表示惯性空间坐标系, $v_0$ 表示

基于 $F_I$ 的第0个刚体的质心速度, $A_{Ik}$ 表示从 $F_k$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵, $F_k$ 表示第 $k$ 个刚体的坐标系, $l_k$ 表示第 $k$ 个刚体的坐标系的原点指向第 $k+1$ 个刚体的坐标系的原点的矢量, $A_{kj}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_k$ 的坐标变换矩阵, $F_j$ 表示第 $j$ 个刚体的坐标系, $A_{Ii}$ 表示从 $F_i$ 到惯性空间坐标系 $F_I$ 的坐标变换矩阵, $a_i$ 表示第 $i$ 个刚体的坐标系的原点指向第 $i$ 个刚体的质心位置的矢量, $A_{ij}$ 表示从 $F_j$ 到 $F_i$ 的坐标变换矩阵。

[0134] 测量模块210主要适于在驱动抓取有待辨识目标的机械臂转动的多个时刻,分别测量机械臂各臂节的角动量以及安装有机械臂的航天器的角动量。

[0135] 具体的,在机械臂抓取到待辨识目标时,可以驱动机械臂旋转,并在驱动机械臂旋转的过程中,针对多个不同的时刻(通常为几十个时刻,如40个时刻),测量模块210分别测量机械臂各臂节的角动量及机械臂所在航天器的角动量,并按照时刻的前后顺序存储测量获得的角动量,从而测量模块210针对每一个时刻(如采样时刻)均获得多个角动量。为描述方便起见,本实施例将一个时刻所对应的所有角动量称为一个角动量集合,从而不同时刻对应不同的角动量集合。

[0136] 测量模块210中存储的不同时刻对应的角动量集合可以被划分为多个组(通常为几十个组,如20个组),且每一组均包含有多个角动量集合(通常包含几十个不同时刻分别对应的角动量集合,如20个角动量集合)。需要特别说明的是,不同组中的角动量集合是可以有交集的,如第一组角动量包括从第一时刻对应的角动量集合开始的 $k$ 个角动量集合,而第二组角动量包括从第二时刻对应的角动量集合开始的 $k$ 个角动量集合,以此类推。当然,本实施例也不排除测量模块210中的不同组中的角动量集合没有交集的可能性。

[0137] 测量模块210可以采用陀螺仪等设备来测量机械臂各臂节的角动量以及机械臂所在航天器的角动量,本实施例不限制测量模块210测量机械臂各臂节的角动量以及机械臂所在航天器的角动量的具体实现方式。

[0138] 产生并计算模块220主要适于产生待辨识目标的质量和质心位置,并利用多组角动量、当前产生的辨识目标的质量以及质心位置利用所述运动学模型分别计算获得待辨识目标的多个转动惯量。

[0139] 具体的,产生并计算模块220可以采用多种方式(如随机方式等)产生待辨识目标的质量和质心位置;为了使产生的待辨识目标的质量和质心位置尽快的逼近待辨识目标的真实质量以及质心位置,产生并计算模块220可以采用随机方式与智能优化算法相结合的方式产生待辨识目标的质量和质心位置。

[0140] 产生并计算模块220产生待辨识目标的质量和质心位置的一个具体的例子为:在首次产生待辨识目标的质量和质心位置时,产生并计算模块220随机产生待辨识目标的质量和质心位置,在非首次产生待辨识目标的质量和质心位置时,产生并计算模块220可以根据之前产生的待辨识目标的质量和质心位置以及相应的转动惯量误差利用智能优化算法产生待辨识目标的质量和质心位置。这里的智能优化算法可以为遗传算法等。本实施例不限制智能优化算法的具体表现形式。

[0141] 产生并计算模块220可以利用一组角动量以及预先设置的运动学模型计算出待辨识目标的一个转动惯量,从而利用多组角动量以及预先设置的运动学模型计算出待辨识目标的多个转动惯量。

[0142] 产生并计算模块220利用一组角动量以及预先设置的运动学模型计算出待辨识目

标的一个转动惯量的一个具体例子如上述实施例一中的描述,在此不再重复说明。

[0143] 判断模块230主要适于根据当前计算获得的多个转动惯量评估待辨识目标的当前转动惯量误差,判断模块230在确定当前转动惯量误差不符合预定误差要求时,触发产生并计算模块220,使产生并计算模块220再次执行产生以及计算的操作;判断模块230在确定当前转动惯量误差符合预定误差要求时,触发确定惯性参数模块240执行相应的操作。

[0144] 具体的,判断模块230应对产生并计算模块220计算出的待辨识目标的转动惯量进行验证,通过对转动惯量的验证可以促使本实施例不断的通过产生并计算模块220进行待辨识目标的转动惯量的计算,且计算出的待辨识目标的转动惯量会不断的逼近待辨识目标真实的转动惯量,直至产生并计算模块220所产生的待辨识目标的质量和质心位置基本上为待辨识目标真实的质量和质心位置,这样,产生并计算模块220计算出的待辨识目标的转动惯量基本上为待辨识目标真实的转动惯量。

[0145] 判断模块230对待辨识目标的转动惯量进行验证的理论基础为:在待辨识目标的质量和质心位置这四个标量与待辨识目标真实的质量和质心位置差异较大时,产生并计算模块220利用这样的四个标量针对不同时刻的角动量(即不同组角动量)计算出的待辨识目标的转动惯量会不相同(可能差异较大);而在待辨识目标的质量和质心位置这四个标量基本上逼近待辨识目标真实的质量和质心位置(或者是待辨识目标真实的质量和质心位置)时,产生并计算模块220利用这样的四个标量针对不同时刻的角动量所计算出的待辨识目标的转动惯量基本上相同(即差异非常小)。也就是说,在产生并计算模块220利用待辨识目标真实的质量和质心位置来针对不同时刻的角动量(即不同组角动量)进行待辨识目标的转动惯量的计算时,计算出的待辨识目标的多个转动惯量(如最小二乘解)才会是完全相同的,而产生并计算模块220产生的待辨识目标的质量和质心位置越逼近真实值,则不同时刻所对应的求解结果会从各个方向逼近待辨识目标的转动惯量的真实值。

[0146] 基于上述理论基础,判断模块230是在利用相同的待辨识目标的质量和质心位置基于多组角动量分别计算出多个待辨识目标的转动惯量来评估待辨识目标的当前转动惯量误差的。

[0147] 判断模块230评估待辨识目标的当前转动惯量误差的一个例子为:判断模块230针对相同的待辨识目标的质量和质心位置基于多组角动量分别计算出多个待辨识目标的转动惯量 $I_n^*$ ,分别求解多个 $I_n^*$ 中的每个分量(六个分量)的方差,然后,判断模块230再计算六个分量的方差之和,该方差之和即为待辨识目标的当前转动惯量误差。

[0148] 判断模块230在评估获得了待辨识目标的当前转动惯量误差之后,应判断该误差是否满足预定误差要求,如判断模块230判断计算出的方差之和是否小于预定误差阈值等;在判断模块230判断出误差满足预定误差要求的情况下,通知确定惯性参数模块240;在判断模块230判断出误差不满足预定误差要求的情况下,触发产生并计算模块220,即产生并计算模块220继续产生新的质量和质心位置(如通过智能优化算法产生新的质量和质心位置),并基于当前新产生的质量和质心位置再次计算待辨识目标的多个转动惯量。

[0149] 确定惯性参数模块240主要适于将当前计算获得的转动惯量作为待辨识目标的转动惯量,并将当前产生的待辨识目标的质量以及质心位置作为待辨识目标的质量以及质心位置。

[0150] 具体的,在判断模块230计算出的误差满足预定误差要求的情况下确定惯性参数

模块240可以将当前计算出的待辨识目标的多个转动惯量中的一个作为待辨识目标最终的转动惯量,如确定惯性参数模块240将计算出的最接近预定误差阈值的转动惯量作为待辨识目标最终的转动惯量;另外,确定惯性参数模块240也可以对当前计算出的待辨识目标的多个转动惯量进行综合计算,并将综合计算出的结果作为待辨识目标最终的转动惯量。

[0151] 在此提供的算法以及显示不与任何特定计算机、虚拟系统或者其它设备固有相关。各种通用系统也可以与基于在此的示教一起使用。根据上面的描述,构造这类系统所要求的结构是显而易见的。此外,本发明也不针对任何特定编程语言。应当明白,可以利用各种编程语言实现在此描述的本发明的内容,并且上面对特定语言所做的描述是为了披露本发明的最佳实施方式。

[0152] 在此处所提供的说明书中,说明了大量具体细节。然而,能够理解,本发明的实施例可以在没有这些具体细节的情况下实践。在一些实例中,并未详细示出公知的方法、结构和技术,以便不模糊对本说明书的理解。

[0153] 类似地,应当理解,为了精简本公开并帮助理解各个发明方面中的一个或多个,在上面对本发明的示例性实施例的描述中,本发明的各个特征有时被一起分组到单个实施例、图、或者对其的描述中。然而,并不应将该公开的方法解释成反映如下意图:即所要求保护的本发明要求比在每个权利要求中所明确记载的特征更多的特征。更确切地说,如下面的权利要求书所反映的那样,发明方面在于少于前面公开的单个实施例的所有特征。因此,遵循具体实施方式的权利要求书由此明确地并入该具体实施方式,其中每个权利要求本身都作为本发明的单独实施例。

[0154] 本领域那些技术人员可以理解,可以对实施例中的设备中的模块进行自适应性地改变并且把它们设置在与该实施例不同的一个或多个设备中。可以把实施例中的模块或单元或组件组合成一个模块或单元或组件,以及此外可以把它们分成多个子模块或子单元或子组件。除了这样的特征和/或过程或者单元中的至少一些是相互排斥之外,可以采用任何组合对本说明书(包括伴随的权利要求、摘要和附图)中公开的所有特征以及如此公开的任何方法或者设备的所有过程或单元进行组合。除非另外明确陈述,本说明书(包括伴随的权利要求、摘要和附图)中公开的每个特征可以由提供相同、等同或相似目的的替代特征来代替。

[0155] 此外,本领域的技术人员能够理解,尽管在此所述的实施例包括其它实施例中所包括的某些特征而不是其它特征,但是不同实施例的特征的组合意味着处于本发明的范围之内并且形成不同的实施例。例如,在下面的权利要求书中,所要求保护的实施例的任意之一都可以以任意的组合方式来使用。

[0156] 本发明的各个部件实施例可以以硬件实现,或者以在一个或者多个处理器上运行的软件模块实现,或者以它们的组合实现。本领域的技术人员应当理解,可以在实践中使用微处理器或者数字信号处理器(DSP)来实现根据本发明实施例的待辨识目标的惯性参数辨识装置中的一些或者全部功能。本发明还可以实现为用于执行这里所描述的方法的一部分或者全部的设备或者装置程序(如计算机程序和计算机程序产品)。这样的实现本发明的程序可以存储在计算机可读介质上,或者可以具有一个或者多个信号的形式。这样的信号可以从因特网的网站上下下载得到,也可以在载体信号上提供,或者以任何其他形式提供。

[0157] 应该注意的是,上述实施例是对本发明进行说明而不是对本发明进行限制,并且

本领域技术人员在不脱离所附权利要求的范围的情况下可设计出替换实施例。在权利要求中,不应将位于括号之间的任何参考符号构造成对权利要求的限制。单词“包含”不排除存在未列在权利要求中的元件或者步骤等。位于元件之前的单词“一”或“一个”不排除存在多个这样的元件。本发明可以借助于包括有若干不同元件的硬件以及借助于适当编程的计算机来实现。在列举了若干装置的单元权利要求中,这些装置中的若干个可以通过同一个硬件项来具体体现。单词第一、第二以及第三等的使用不表示任何顺序。可将这些单词解释为名称。

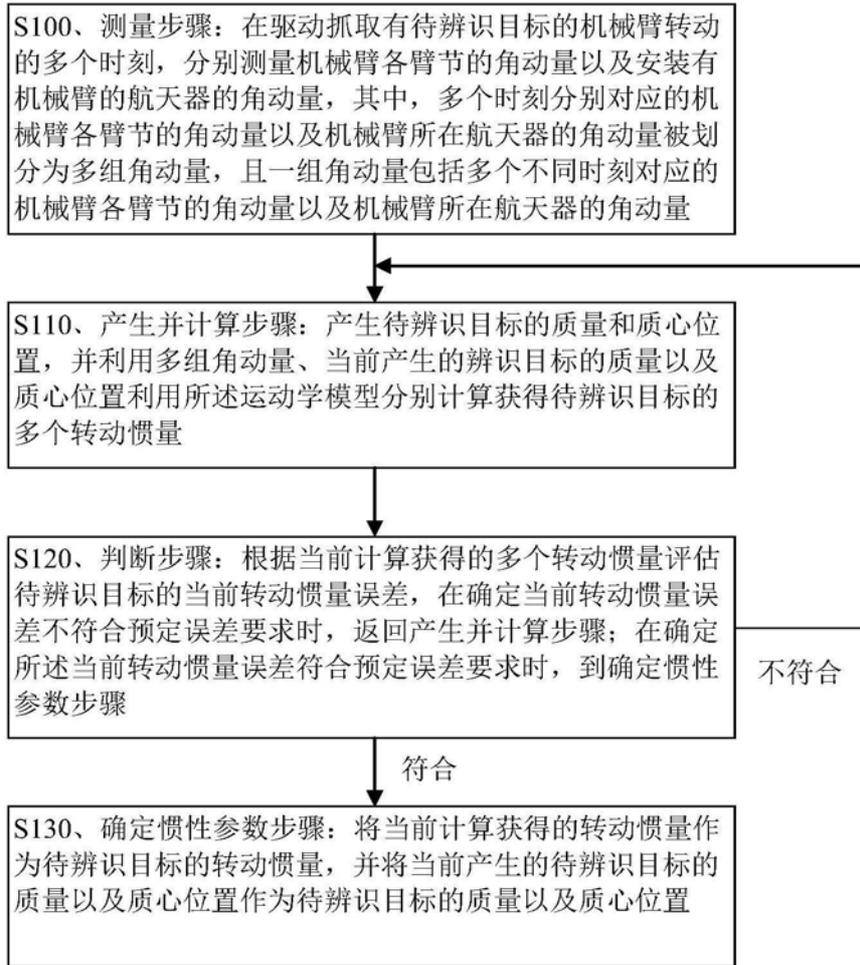


图1

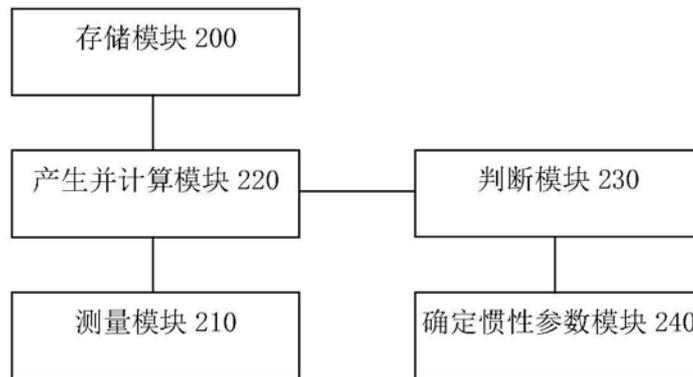


图2