



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103344243 B

(45) 授权公告日 2015. 12. 09

(21) 申请号 201310275237. 6

(22) 申请日 2013. 07. 02

(73) 专利权人 北京航空航天大学
地址 100191 北京市海淀区学院路 37 号

(72) 发明人 周向阳 宫国浩 刘炜 房建成
赵强 李永 岳海潇 俞瑞霞

(74) 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责
任公司 11251
代理人 成金玉 贾玉忠

(51) Int. Cl.
G01C 21/18(2006. 01)
G05B 13/04(2006. 01)

(56) 对比文件
CN 101709975 A, 2010. 05. 19,
CN 102109350 A, 2011. 06. 29,
CN 102230801 A, 2011. 11. 02,
CN 102508503 A, 2012. 06. 20,
RU 2112926 C1, 1998. 06. 10,
RU 2282153 C1, 2006. 08. 20,

李树胜等. 基于 PID 的航空遥感三轴惯性
稳定平台控制系统设计. 《吉林大学学报(工业
版)》. 2011, 第 41 卷

周向阳等. 航空摄影惯性稳定平台框架动力
学研究与分析. 《测绘科学》. 2013, 第 38 卷(第
3 期),

审查员 房倩

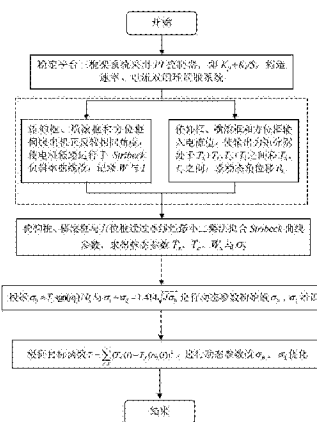
权利要求书2页 说明书4页 附图2页

(54) 发明名称

一种航空遥感惯性稳定平台摩擦参数辨识方
法

(57) 摘要

一种航空遥感惯性稳定平台摩擦参数辨识方
法。在分析系统正弦响应曲线基础上, 建立惯性
稳定平台的 LuGre 摩擦模型, 通过对惯性稳定平
台三个框架系统分别设计参数辨识方案, 利用两
步辨识及动态参数优化的摩擦参数辨识方法得到
LuGre 摩擦模型参数。本发明能够较准确的得到
LuGre 摩擦模型参数, 实现摩擦力矩补偿, 提高惯
性稳定平台系统的控制精度和稳定精度, 可广泛
适用于各类航空遥感惯性稳定平台系统。



CN 103344243 B

1. 一种航空遥感惯性稳定平台摩擦参数辨识方法,其特征在于:首先进行摩擦模型静态参数辨识,构造航空遥感惯性稳定平台三框架伺服系统 PI 闭环,使三框架伺服电机以不同转速正反转相同角度,低速运行,获得 Stribeck 负斜率段曲线,测得对应转速下的电流环电流,然后拟合 Stribeck 曲线,进行静态参数辨识,同时,对稳定平台三框架伺服系统输入适当电流,获得稳态角位移;其次,进行动态参数辨识,根据动力学模型计算动态参数初始值,利用动态参数初始值以稳态条件下实测摩擦力矩随速率变化曲线和摩擦模型仿真曲线的相似程度为目标函数进行动态参数优化,具体包括以下步骤:

(1) 采用 K_p+K_i/S 控制器对航空遥感惯性稳定平台三框架伺服电机系统构造 PI 控制速率、电流双闭环系统, K_p+K_i/S 为拉普拉斯表示法下的控制器结构, K_p 为比例环节放大倍数, K_i/S 表示积分环节, K_i 为积分环节放大倍数;

(2) 在静基座下,三个框架伺服电机在负载及速率闭环情况下,分别给定不同的横滚框电机转速 $W_{L,R}$ 、俯仰框电机转速 $W_{L,P}$ 、方位框电机转速 $W_{L,A}$,在 $\pm 0.5 \sim \pm 6^\circ/s$ 的转速下运行,使三个框架伺服电机正向或反向恒速转动同样角度,运行于 Stribeck 负斜率段曲线,测量不同转速恒速运行下对应的横滚框电流环电流 I_R 、俯仰框电流环电流 I_P 、方位框电流环电流 I_A ,其中, Stribeck 曲线在这里是框架转速与对应摩擦力矩的曲线;

(3) 采用非线性最小二乘方法,结合步骤 (2) 测得的速率和电流值,对三个框架的稳态 LuGre 摩擦模型 $T_{fs} = \left[T_c + (T_s - T_c)e^{-\frac{\omega}{\omega_s}} \right] \text{sgn}(\omega) + \sigma_2 \omega$ 进行拟合,获得三个框架的稳态

LuGre 摩擦模型的静态参数 T_s , T_c , ω_s 和 σ_2 ;

T_{fs} 表示静基座稳态时的摩擦力矩, T_s , T_c , ω_s 和 σ_2 为摩擦模型的四个静态参数, T_s 表示最大静摩擦力矩, T_c 表示库仑摩擦力矩, ω_s 表示临界 Stribeck 角速度, σ_2 表示粘性摩擦系数, ω_1 表示负载端角速度;

(4) 根据步骤 (3) 拟合得到的静态参数,俯仰轴、横滚轴电机输入电流使其伺服电机输出力矩介于 T_s+T_i 和 T_c+T_i 之间,其中 T_i 为干扰力矩,测得横滚框、俯仰框静摩擦区域的对应稳态角位移 $\theta_{s,R}$ 和 $\theta_{s,P}$,方位轴电机输入电流使伺服电机输出力矩介于 T_s 和 T_c 之间,测得对应稳态角位移 $\theta_{s,A}$;

(5) 动态参数辨识,首先根据公式 $\sigma_0 \approx T_c \text{sgn}(\omega_1) / \theta_s$, ω_1 为负载端角速度,由步骤 (3)、(4) 所得静态参数,求出运动停止时三框架模型的动态参数初值 σ_0 ,然后根据 $\sigma_1 + \sigma_2 = 1.414\sqrt{J\sigma_0}$,求得动态参数初值 σ_1 ,其中 J 为等效到负载端的转动惯量;(6) 动态参数优化,以稳态条件下实测摩擦力矩随速率变化曲线和摩擦模型仿真曲线的相似程度目标函数 $T = \sum_{i=1}^n (T_f(i) - T_f(\omega_1(i)))^2$ 为动态参数优化的依据,利用 Matlab 优化工具箱,得到动态参数 σ_0 与 σ_1 优化值,式中 $T_f(i)$ 和 $T_f(\omega_1(i))$ 分别为稳态条件下实测摩擦力矩和稳态条件下仿真摩擦力矩。

2. 根据权利要求 1 所述一种航空遥感惯性稳定平台摩擦参数辨识方法,其特征在于:所述步骤 (3) 中:

① LuGre 摩擦模型方程为:

$$T_{fs} = \left[T_c + (T_s - T_c) e^{-\frac{|\omega_l|}{\omega_s}} \right] \text{sgn}(\omega_l) + \sigma_2 \omega_l$$

式中, T_{fs} 表示静基座稳态时的摩擦力矩, T_s, T_c, ω_s 和 σ_2 为摩擦模型的四个静态参数, T_s 表示最大静摩擦力矩, T_c 表示库仑摩擦力矩, ω_s 表示临界 Stribeck 速度, σ_2 表示粘性摩擦系数, ω_l 表示负载端角速度;

② T_{fs} 计算方法如下: 首先计算横滚轴摩擦力矩, 横滚框恒速绕横滚轴正反转动 θ 角, 系统受力平衡方程为:

$$\begin{cases} N_r k_T I_{r1} = -mg \cdot \sin \theta \cdot l_z - mg \cdot \cos \theta \cdot l_y + T_{rfsz} \\ N_r k_T I_{r2} = -mg \cdot \sin \theta \cdot l_z + mg \cdot \cos \theta \cdot l_y + T_{rfsf} \end{cases}$$

式中电流和摩擦力矩均为标量, I_{r1}, I_{r2} 分别表示绕横滚轴恒速正、反转时电机控制电流, T_{rfsz}, T_{rfsf} 分别表示绕横滚轴恒速正、反转时的摩擦力矩, N_r 为已知横滚系统传动比, k_T 为已知电机力矩系数, l_y 和 l_z 分别表示力臂大小, m 为平台质量, g 为重力加速度, 横滚运动范围为小角度, 则 $\sin \theta$ 近似值为 0, 对上式进行小角度线性化, 得到稳态时横滚系统摩擦力矩 T_{rfs} 为:

$$T_{rfs} \approx N_r k_T (I_{r1} + I_{r2}) / 2。$$

一种航空遥感惯性稳定平台摩擦参数辨识方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种航空遥感惯性稳定平台摩擦参数辨识方法。

背景技术

[0002] 航空遥感系统在机动性、实时性、可重复观测性、遥感设备可更换性、获取高分辨率遥感数据能力、经济成本以及立体观测等很多方面,都具有独特的优势。因此,在西方发达国家,用于城市规划和基本地图测绘大约 65% 以上的高分辨率空间数据是依靠航空遥感系统来保证的。高分辨率对地观测是航空遥感系统发展的重要方向,但是由于大气紊流和载机自身因素的影响,载机机体无法保持平稳,造成安装在载机上的成像载荷视轴摇晃,成像质量下降。惯性稳定平台组成的高分辨率航空遥感平台是解决这个问题的有效措施。惯性稳定平台用于隔离载机的角运动,跟踪当地地理水平,消除干扰力矩对成像载荷的影响,使成像载荷稳定成像。航空遥感用惯性稳定平台是螺稳定跟踪装置的一个分支,其结构和功能与传统的机载光电吊仓有相似之处,但又不同于传统的机载光电吊仓。光电吊仓只需要承载天线、导引头等小负载,因此光电吊仓一般较轻,承载能力小;而航空遥感用惯性稳定平台需要承载质量较大的成像载荷,特别对于多镜头的成像载荷,其质量可达 100kg,同时平台自身的重量要求一般不超过 40kg。低速、大承载比、有限运动范围内往复角运动条件下的高精度实时控制是惯性稳定平台的基本特性。

[0003] 稳定精度是惯性稳定平台的主要技术指标之一,反映了稳定平台对干扰力矩的抑制能力。平台的干扰力矩主要包括不平衡力矩、摩擦力矩,控制系统一般通过反馈控制实现对各种干扰力矩的有效抑制。成像载荷通常要求惯性稳定平台在较低跟踪角速度下实现高控制精度,摩擦力矩是影响低速性能因素中的主要因素,直接影响系统传动精度和运动平稳性。摩擦力矩呈现出高度的非线性,其大小主要与轴系的结构及其润滑情况、负载大小和角速度等因素有关,且摩擦力矩可能随角位置、时间和温度的变化发生随机变化。惯性稳定平台三个框架一般通过滚动轴承支承、力矩电机和齿轮减速装置驱动,由于工作转速低承载大,滚动轴承滚道接触表面润滑情况较差,容易发生低速爬行现象,导致运动不平稳和控制精度降低;此外,较大的静摩擦力使传动齿轮发生弹性变形,从而导致位置误差,降低系统分辨率及重复率。之前,在航空遥感惯性稳定平台控制系统的设计中,仅把摩擦力矩作为一个扰动力矩加以抑制,并没有考虑摩擦力矩的非线性特性对整个系统稳定性的影响。随着对系统性能的要求不断提高,摩擦力矩的非线性及动态特性给控制系统带来的不良影响越来越不容忽视,这就需要对控制系统中的摩擦力矩进行更有效地消除或抑制。消除或抑制摩擦力矩对控制系统造成的不良影响可以从两个方面来考虑:一方面是机械结构设计中采用一些降低摩擦力矩的方法。然而,纯机械的设计方法往往会受到加工工艺水平、材料水平及研究经费等条件的制约,而且不便于维护,以至于很难得到使用;另一方面则是从系统的控制角度上设计能够消除或抑制摩擦力矩影响的控制律,即控制领域的摩擦补偿方法。因此,研究低速条件下框架系统的摩擦模型并进行摩擦补偿,合理解决系统中存在的摩擦环节尤其是非线性摩擦环节的模型参数问题,是提高航空遥感惯性稳定平台系统性能,实

现对航空遥感惯性稳定平台高精度控制要求的关键。

发明内容

[0004] 本发明的技术解决问题是：针对航空遥感三轴惯性稳定平台系统高精度控制的 LuGre 摩擦模型参数难以准确辨识的难题，设计了两步辨识与动态参数优化相结合的参数辨识方法，根据三轴惯性稳定平台各框架系统的结构特性及扰动因素，分别设计不同的参数辨识方案，通过两步辨识方法得到静态参数及动态参数初始值，再选择适当的目标函数对动态参数初始值进行优化，得到动态参数优化值，得到各框架系统较精确的 LuGre 模型参数。该发明辨识方案有效，能够得到各框架较为准确的摩擦模型，为高精度、高可靠性、低成本三轴惯性稳定平台的研制提供了技术支撑。

[0005] 本发明的技术方案是：一种航空遥感惯性稳定平台摩擦参数辨识方法，首先进行摩擦模型静态参数辨识，构造航空遥感惯性稳定平台三框架伺服系统 PI 闭环，使三框架伺服电机以不同转速正反转相同角度低速运行，获得 Stribeck 负斜率段曲线，测得对应转速下的电流环电流，然后拟合 Stribeck 曲线进行静态参数辨识，同时，对稳定平台三框架伺服系统输入适当电流，获得稳态角位移；其次，进行动态参数辨识，根据动力学模型计算动态参数初始值，利用动态参数初始值以稳态条件下实测摩擦力矩随速率变化曲线和摩擦模型仿真曲线的相似程度为目标函数进行动态参数优化。具体步骤如下：

[0006] (1) 采用 K_p+K_i/S 控制器对航空遥感惯性稳定平台三框架伺服电机系统构造 PI 控制速率、电流双闭环系统， K_p+K_i/S 为拉普拉斯表示法下的控制器结构， K_p 为比例环节放大倍数， K_i/S 表示积分环节， K_i 为积分环节放大倍数；

[0007] (2) 在静基座下，三个框架伺服电机在负载及速率闭环情况下，分别给定不同的横滚框电机转速值 $w_{L,R}$ 、俯仰框电机转速 $w_{L,P}$ 、方位框电机转速 $w_{L,A}$ ，在 $\pm 0.5 \sim \pm 6^\circ/s$ 的转速下运行，使三个框架伺服电机正向或反向恒速转动同样角度，运行于 Stribeck 负斜率段曲线，测量不同转速恒速运行下对应的横滚框电流环电流 I_R 、俯仰框电流环电流 I_P 、方位框电流环电流 I_A 。其中，Stribeck 曲线在这里是框架转速与对应摩擦力矩的曲线；

[0008] (3) 采用非线性最小二乘方法，结合步骤(2)测得的速率和电流值，对三个框架的稳态 LuGre 摩擦模型 $T_s = [T_c + (T_s - T_c)e^{-\frac{w}{\omega_s}}] \text{sgn}(w) + \sigma_2 w$ 进行拟合，获得三个框架的稳态 LuGre 摩擦模型的静态参数 T_s 、 T_c 、 ω_s 和 σ_2 ；

[0009] (4) 根据步骤(3)拟合得到的静态参数，俯仰轴、横滚轴电机输入电流使其伺服电机输出力矩介于 T_s+T_i 和 T_c+T_i 之间，其中 T_i 为干扰力矩，测得横滚框、俯仰框静摩擦区域的对应稳态角位移 $\theta_{s,R}$ 和 $\theta_{s,P}$ ，方位轴电机输入电流使伺服电机输出力矩介于 T_s 和 T_c 之间，测得对应稳态角位移 $\theta_{s,A}$ ；

[0010] (5) 动态参数辨识，首先根据公式 $\sigma_0 \approx T_c \text{sgn}(\omega_1) / \theta_s$ ， ω_1 为负载端角速度，由步骤(3)、(4)所得静态参数，求出运动停止时三框架模型的动态参数初值 σ_0 ，然后根据 $\sigma_1 + \sigma_2 = 1.414\sqrt{J\sigma_0}$ ，求得动态参数初值 σ_1 ；

[0011] (6) 动态参数优化，以稳态条件下实测摩擦力矩随速率变化曲线和摩擦模型仿真曲线的相似程度目标函数 $T = \sum_{i=1}^n (T_f(i) - T_s(\omega(i)))^2$ 为动态参数优化的依据，利用 Matlab 优化工具

具箱,得到动态参数 σ_0 与 σ_1 优化值。

[0012] 本发明与现有技术相比的优点在于:

[0013] (1) 航空遥感系统的高分辨率、高精度成像要求惯性稳定平台具有高实时控制精度和稳定精度。其中,惯性稳定平台较低跟踪角速度下实现高精度控制是研究重点。而摩擦力矩是影响低速性能因素中的主要因素,直接影响系统传动精度和运动平稳性。本发明解决了航空遥感三轴惯性稳定平台低速条件下框架伺服系统轴系非线性摩擦模型的建立以及非线性摩擦模型参数的高精度辨识,为通过摩擦补偿实现高稳定精度提供基础,满足高分辨率航空遥感的需求。

[0014] (2) 相对经验法而言,本发明利用两步辨识及动态参数优化的摩擦参数辨识方法得到更为准确的 LuGre 摩擦模型参数,可实现高精度摩擦力矩补偿;

[0015] (3) 本发明针对 LuGre 模型摩擦的参数辨识,根据稳定平台三框架不同的结构及扰动因素特点,分别对三框架设计参数辨识方案,获得三框架各自的摩擦特性更为准确;

[0016] (4) 本发明提出的辨识方法可有效得到 LuGre 模型的静、动态参数,因此建立的摩擦模型更为准确,可实现航空遥感惯性平台高精度控制。

附图说明

[0017] 图 1 为本发明实施步骤示意图;

[0018] 图 2 为航空遥感用三轴惯性稳定平台结构示意图;

[0019] 图 3 为使用本发明的航空遥感惯性稳定平台三框架伺服电机系统构造 PI 控制速率闭环系统函数框图。

具体实施方式

[0020] 如图 2 所示为航空遥感三轴惯性稳定平台结构示意图,平台由外至内分别是横滚框、俯仰框和方位框。横滚框的回转轴沿飞行方向,俯仰框的回转轴沿飞行翼展方向,方位框的回转轴垂直向下, M_x, M_y, M_z 为三台力矩电机,分别驱动横滚框转动、俯仰框转动、方位框转动; G_x, G_y, G_z 为安装在各框架上的速率陀螺,敏感三个框架相对于惯性空间的转动角速度, A_x, A_y 为安装在俯仰框上的加速度计,其中 A_x 的敏感轴与横滚框的旋转轴重合, A_y 的敏感轴与俯仰框的旋转轴重合; R_x, R_y, R_z 为三台旋转变压器,提供姿态信息。 R_x 用于测量横滚框相对于机座的转动角度, R_y 用于测量俯仰相对于横滚框的转动角度, R_z 用于测量方位框相对于横滚框的转动角度。伺服控制器根据速率陀螺敏感到的框架角速率信息和加速度计或 POS 测量出的姿态和位置信息产生控制信号给力矩电机,力矩电机输出驱动力矩以抵消干扰力矩并驱动框架转动,达到稳定和跟踪的目的。

[0021] 如图 1 和图 3 所示,本发明的具体实施方法如下:

[0022] (1) 采用 $K_p + K_i/S$ 控制器对航空遥感惯性稳定平台三框架伺服电机系统构造 PI 控制速率、电流双闭环系统,稳定平台三框架伺服电机系统 PI 控制闭环系统结构框图如图 3。

[0023] (2) 在静基座下,俯仰轴伺服电机在负载及速率闭环情况下,给定不同低速度值 W_{Lr} ,使其正向或反向恒速转动同样角度,获得 Stribeck 负斜率段曲线,测量不同低转速恒速运行下对应的电流环电流 I_R 。俯仰轴摩擦模型如下式:

$$[0024] \quad T_f = [T_s + (T_s - T_c) e^{-\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2}] \operatorname{sgn}(\omega) + \sigma_2 \omega$$

[0025] 式中, T_{fs} 表示静基座稳态时的摩擦力矩, T_s , T_c , ω_s 和 σ_2 为摩擦模型的四个静态参数, T_s 表示最大静摩擦力矩, T_c 表示库仑摩擦力矩, ω_s 表示临界 Stribeck 角速度, σ_2 表示粘性摩擦系数, ω_1 表示负载端角速度。

[0026] T_{fs} 计算方法如下: 横滚轴恒速正反转动 θ 角, 系统受力平衡方程为:

$$[0027] \quad \begin{cases} N_r k_T I_{r1} = -mg \cdot \sin \theta \cdot l_z - mg \cdot \cos \theta \cdot l_y + T_{rfsz} \\ N_r k_T I_{r2} = -mg \cdot \sin \theta \cdot l_z + mg \cdot \cos \theta \cdot l_y + T_{rfsf} \end{cases}$$

[0028] 式中电流和摩擦力矩均为标量, I_{r1} 、 I_{r2} 分别表示绕横滚轴恒速正、反转时电机控制电流, T_{rfsz} 、 T_{rfsf} 分别表示绕横滚轴恒速正、反转时的摩擦力矩, k_T 为电机力矩系数。横滚运动范围为小角度, 则 $\sin \theta$ 近似值为 0, 可对上式进行小角度线性化, 得到稳态时横滚系统摩擦力矩 T_{rfs} 为:

$$[0029] \quad T_{rfs} \approx N_r k_T (I_{r1} + I_{r2}) / 2$$

[0030] N_r 表示横滚系统传动比, k_T 为电机力矩系数, 可由电机说明书得到, 代入各参数值后得到 T_{rfs} 值。求得 T_{rfs} 值后, 再根据测得的速率和电流值, 采用非线性最小二乘方法拟合 Stribeck 曲线, 求得静态参数 T_s , T_c , ω_s 和 σ_2 。

[0031] (3) 对横滚轴框架、方位轴框架伺服系统的静态参数辨识与(2)步骤相同。

[0032] (4) 动态参数辨识, 首先根据公式 $\sigma_0 \approx T_c \operatorname{sgn}(\omega_1) / \theta_s$ (ω_1 表示负载端角速度), 根据(2)、(3)所得静态参数, 求出运动停止时三框架模型的动态参数 σ_0 , 然后根据 $\sigma_1 + \sigma_2 = 1.414 \sqrt{J \sigma_0}$, 求得动态参数初值 σ_1 。

[0033] (5) 动态参数优化, 以稳态条件下实测摩擦力矩随速率变化曲线和摩擦模型仿真曲线的相似程度目标函数 $T = \sum_{i=1}^n (T_f(i) - T_f(\omega_i(i)))^2$ 作为动态参数优化的依据, 利用 Matlab 优化工具箱, 得到动态参数 σ_0 与 σ_1 优化值。

[0034] 本发明说明书中未作详细描述的内容属于本领域专业技术人员公知的现有技术。

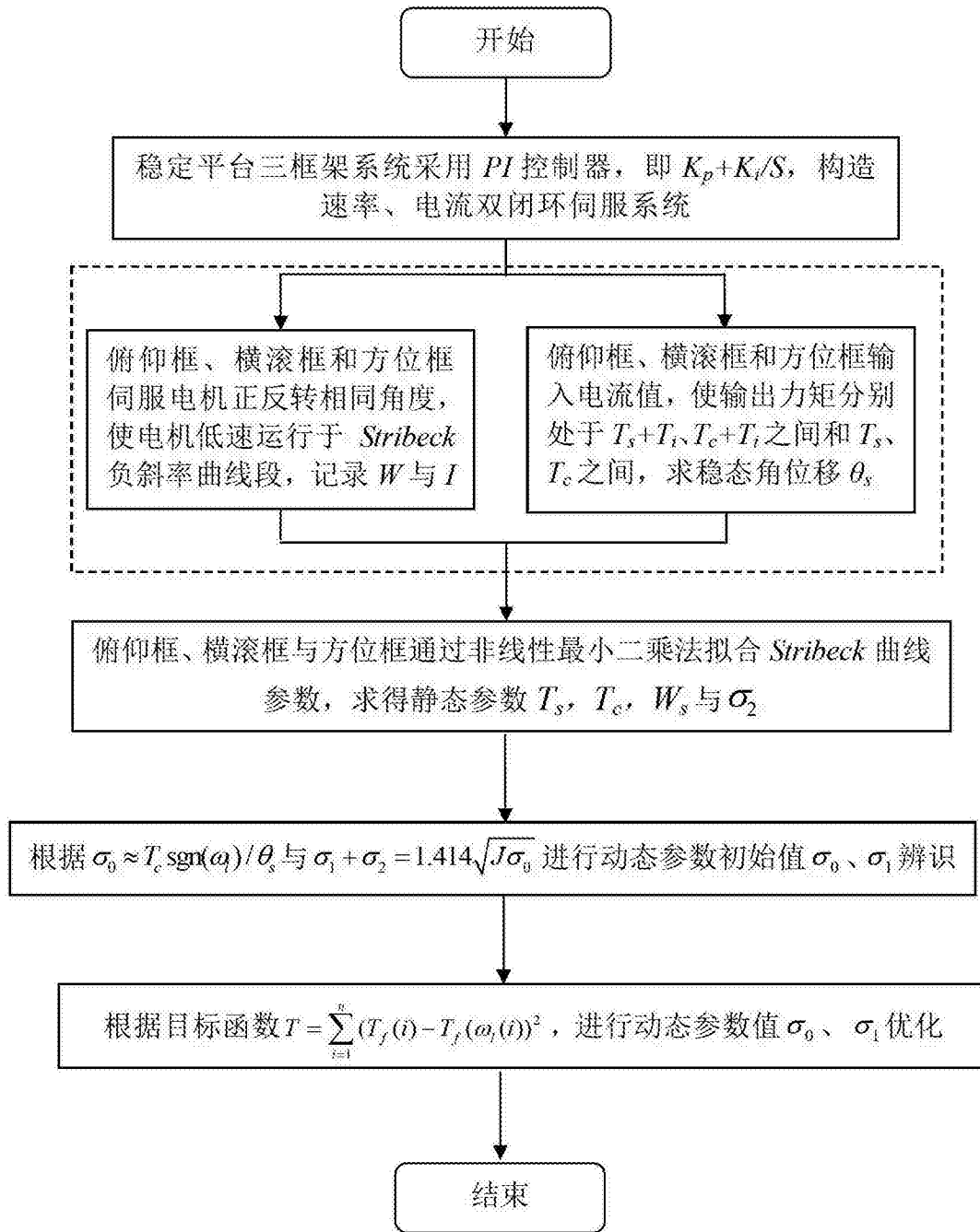


图 1

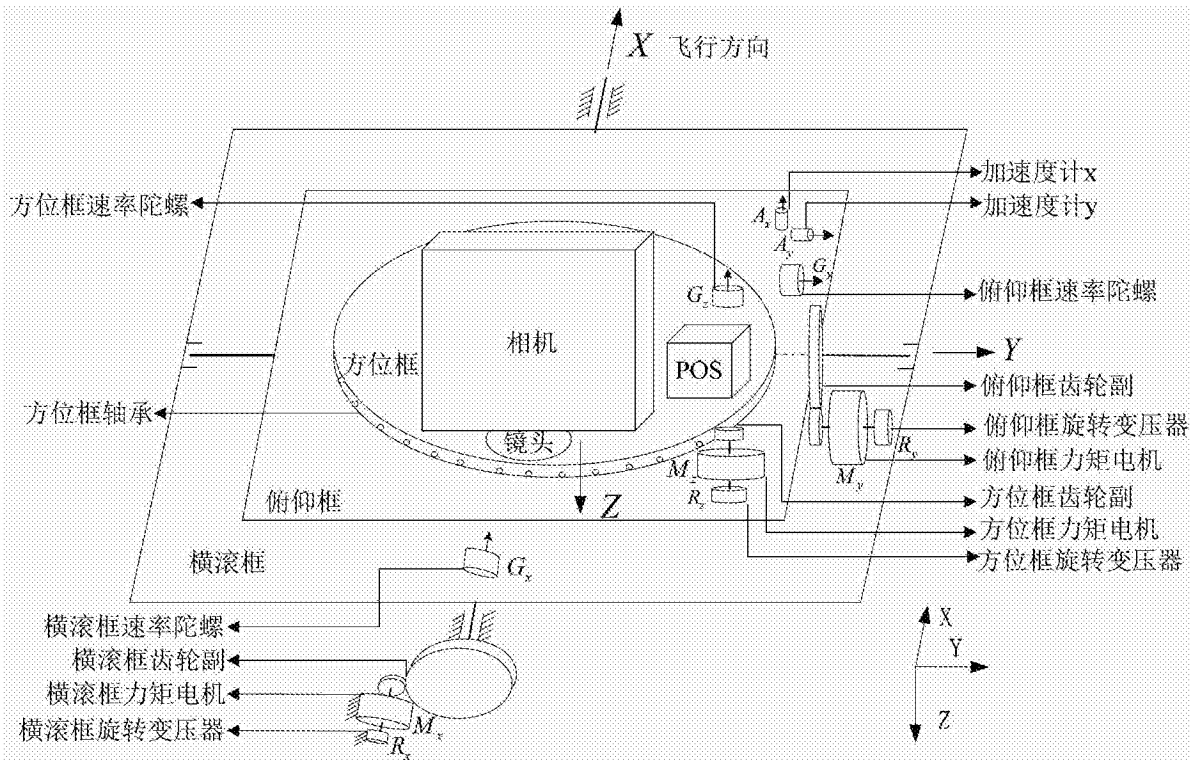


图 2

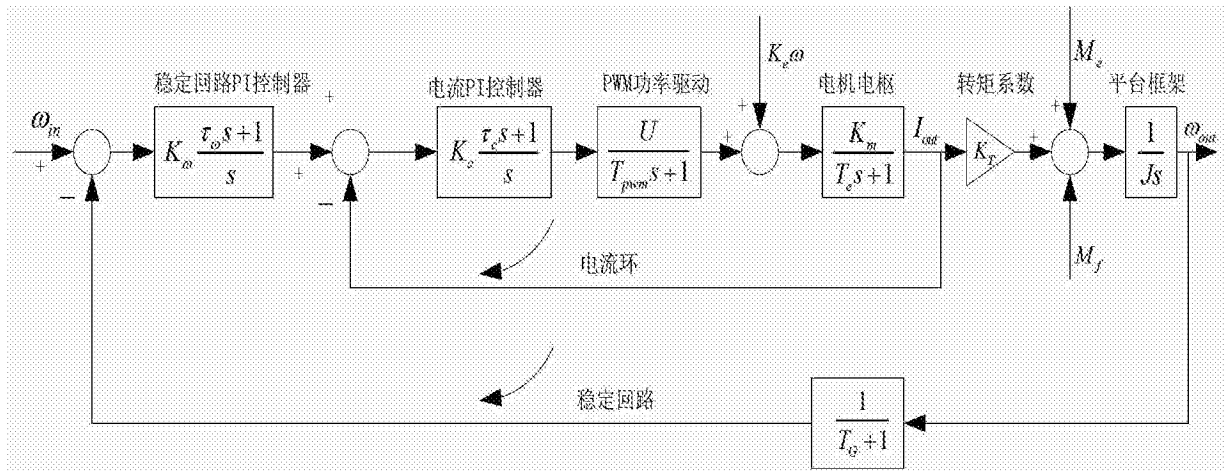


图 3