

基于并联悬置构型的光电吊舱解耦控制研究

张明闯, 任星宇, 孙寅

(北京航天控制仪器研究所, 北京 100089)

摘要: 为了实现光电吊舱内部载荷隔振和快速响应的能力, 针对并联悬置构型的光电吊舱建立动力学模型, 并提出了基于该动力学模型的解耦控制方法。首先介绍了光电吊舱并联悬置构型的结构和工作原理, 推导其理想动力学方程, 分析光电吊舱实际应用条件, 对方程做出相应简化。其次基于该动力学方程设计解耦矩阵, 实现驱动力通道之间相互解耦, 变成以力为输入载荷姿态为输出的单输入单输出通道, 再对单输入单输出通道进行控制律设计。最后根据设计的解耦变换矩阵和控制律进行仿真分析, 仿真结果表明设计的解耦矩阵可以实现通道之间的相互解耦, 同时设计的控制律可以提高系统快速响应速度。

关键词: 光电吊舱; 并联悬置构型; 动力学建模; 解耦控制; 控制律

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)12-0001-05

Research on decoupling control of photoelectric pod based on parallel suspension configuration

ZHANG Mingchuang, REN Xingyu, SUN Yin

(Beijing Institute of Aerospace Control Instruments, Beijing 100089, China)

Abstract: In order to realize the ability of vibration isolation and rapid response of the internal load of the photoelectric pod, a dynamic model is established for the photoelectric pod with parallel suspension configuration, and a decoupling control method based on the dynamic model is proposed. Firstly, the structure and working principle of the parallel suspension configuration of the photoelectric pod are introduced, the ideal dynamic equation is derived, the practical application conditions of the photoelectric pod are analyzed, the equation is simplified accordingly. Secondly, based on the dynamic equation, the decoupling matrix is designed to realize the mutual decoupling between the driving force channels, and it becomes a single-input single-output channel with force as the input load attitude as the output, and then the control law designs of the single-input single-output channel. Finally, the simulation analysis is carried out according to the designed decoupling transformation matrix and control law, and the simulation results show that the designed decoupling matrix can realize the mutual decoupling between channels, and the designed control law can improve the fast response speed of the system.

Keywords: photoelectric pod; parallel suspension configuration; kinetic modeling; decoupling control; control law

0 引言

随着光电技术的不断发展, 研究如何提高光电吊舱的稳定精度和响应速度是当前的热点^[1]。光电吊舱在实际工作中, 会受到外部载体的姿态变化和振动, 使传感器指向不稳定, 从而导致图像情报采集效率、质量降低^[2], 剧烈扰动可使得传感器获取的图像模糊, 降低跟踪精度, 甚至“丢失”跟踪目标^[3]。许多研究人员为了提高系统稳定性, 通过改进控制方法来隔离扰动, 保持传感器视轴指向的稳定性。例如滑模控制。滑模控制具有快速响应, 对系统参数变化不敏感, 无需对扰动模型在线辨识等特点^[4]; 自适应控制。自适应控制算法, 可以提高系统鲁棒性, 克服系统干扰的特点等^[5]。这些控制方法都是针对采用经典主动框架系统(两轴-两框架)、有限行程-主动随动框架系统(两轴-四框架)的光电吊舱进行控制系统设计。这两种框架结构, 可以归为串联式结构。所谓串联式是指机构的自由度是串联连

接, 前一个自由度的输出是后一个自由度的输入^[6-7]。这种串联结构易发生谐振现象^[8]很难提高系统的稳定性。与串联式结构相对的是并联式结构, 并联式结构是指多个自由度在结构上是平行的, 多自由度共同驱动一个机构运动^[9-10]。并联式结构便于提高系统响应速度, 但难点是并联式采用多个驱动器, 各个驱动器之间高度耦合, 因此如何解耦是首要解决的问题^[11]。并联悬置构型的设计就是采用并联式结构, 使光电吊舱设备可以提高内部空间利用率和隔离低频扰动, 提高光电吊舱系统快速响应能力。

1 光电吊舱的并联悬置构型

并联悬置构型简图如图1所示, 四个二维音圈电机共同作用可以使内部载荷具备六个自由度, 具体运动的原理为, 内部载荷等效为正方体, 正方体的8个顶点上放柔性支撑弹簧, 主要对内部载荷起支撑作用和被动的隔振。8个驱动器放到正方体的4条棱上, 若驱动器1,2沿着X轴方向出力, 同时驱动器3,4沿着X轴反方向出力, 则可以实

* 基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3205005)

收稿日期: 2024-04-21

现内部载荷绕着 Y 轴进行俯仰运动,同理 8 个驱动器相互配合可以实现内部载荷六自由度的运动。内部载荷运动不需要 8 个驱动器同时运动,最少 4 个驱动器就可以满足内部载荷进行某一自由度运动,8 个驱动器存在冗余的情况。

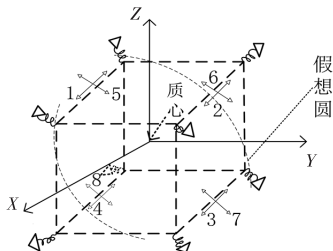


图 1 并联悬置构型简图

2 并联悬置构型的建模

对并联悬置构型吊舱建立机体光电载荷坐标系 ($O_A - X_A Y_A Z_A$) 和内部载荷坐标系 ($O_B - X_B Y_B Z_B$),两坐标系原点重合,然后针对音圈电机动子进行分析。

第 i 个音圈电机动子计算公式为

$$f_{mi} - f_{qi} - c_i \dot{q}_{ai} - t_i - m_i g_{ai} = m_i \ddot{q}_{ai} \quad (1)$$

其中, m_i 是音圈电机动子的质量; c_i 是动子的摩擦系数; t_i 是等效弹簧作用力; $m_i g_{ai}$ 是 m_i 所受的重力在音圈电机轴向力的投影; \ddot{q}_{ai} 是音圈电机的动子产生的加速度; f_{mi} 是音圈电机产生的作用力, f_{qi} 是载荷对音圈电机动子的作用力。

从而得到

$$f_{qi} = f_{mi} - c_i \dot{q}_{ai} - t_i - m_i g_{ai} - m_i \ddot{q}_{ai} \quad (2)$$

将内部载荷平台所有音圈电机动子的力平衡方程写成矩阵形式有

$$\mathbf{f}_q = \mathbf{f}_m - \mathbf{c} \dot{\mathbf{q}}_a - \mathbf{t} - \mathbf{m}_s \mathbf{g}_a - \mathbf{m}_s \ddot{\mathbf{q}}_a \quad (3)$$

其中, $\mathbf{f}_q = [f_{q1} \ f_{q2} \ \cdots \ f_{q8}]^T$, \mathbf{f}_m 和 $\ddot{\mathbf{q}}_a$ 与 \mathbf{f}_q 的表达式类似。

$\mathbf{m}_s = \text{diag}\{m_1 \ m_2 \ \cdots \ m_8\}$, 是 8 个音圈电机动子的质量矩阵。

$\mathbf{c}_i = \text{diag}\{c_1 \ c_2 \ \cdots \ c_8\}$, 是 8 个音圈电机动子的摩擦系数矩阵。

$\mathbf{t}_i = [t_1 \ t_2 \ \cdots \ t_8]^T$, 是 8 个弹簧等效在音圈电机动子的轴向作用力。

推导载荷的动力学方程。由 Neon-Euler 方程为

$${}^A \mathbf{F} = \begin{bmatrix} m_p \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & {}^A \mathbf{I}_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \boldsymbol{\omega} \times {}^A \mathbf{I}_p \cdot \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} = {}^A \mathbf{M}_x \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{c}(\boldsymbol{\omega}) \quad (4)$$

因此作用在内部载荷上的力为

$${}^A \mathbf{F} = {}^A \mathbf{R} \mathbf{J}^T \mathbf{f}_q + \mathbf{F}_e - \begin{bmatrix} m_p \mathbf{g} \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, ${}^A \mathbf{F}$ 是对内部载荷施加的作用力; \mathbf{F}_e 是内部载荷质

心受到的其他干扰力; \mathbf{g} 是重力向量; \mathbf{J}^T 是平台的雅克比矩阵。

由式(5)可以得到

$${}^A \mathbf{R} \mathbf{J}^T [\mathbf{f}_m - \mathbf{c}_i \dot{\mathbf{q}}_a - \mathbf{t}_i - \mathbf{m}_s \mathbf{g}_a - \mathbf{m}_s \ddot{\mathbf{q}}_a] + \mathbf{F}_e - \begin{bmatrix} m_p \mathbf{g} \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix} = {}^A \mathbf{M}_x \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{c}(\boldsymbol{\omega}) \quad (6)$$

式(6)中音圈电机动子端的加速度变量不可测,需要进一步推导。

内部载荷 4 个音圈电机驱动,拥有 8 个音圈电机动子,写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_{a1} \\ \ddot{\mathbf{q}}_{a2} \\ \vdots \\ \ddot{\mathbf{q}}_{a8} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A \mathbf{u}_1^T & -({}^A \mathbf{u}_1 \times {}_B^A \mathbf{R}^B \mathbf{q}_1)^T \\ {}^A \mathbf{u}_2^T & -({}^A \mathbf{u}_2 \times {}_B^A \mathbf{R}^B \mathbf{q}_2)^T \\ \vdots & \vdots \\ {}^A \mathbf{u}_8^T & -({}^A \mathbf{u}_8 \times {}_B^A \mathbf{R}^B \mathbf{q}_8)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_B \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^A \mathbf{u}_1^T [{}_{\boldsymbol{\omega}_B} \times (\boldsymbol{\omega}_B \times ({}_B^A \mathbf{R}^B \mathbf{q}_1))] \\ {}^A \mathbf{u}_2^T [{}_{\boldsymbol{\omega}_B} \times (\boldsymbol{\omega}_B \times ({}_B^A \mathbf{R}^B \mathbf{q}_2))] \\ \vdots \\ {}^A \mathbf{u}_8^T [{}_{\boldsymbol{\omega}_B} \times (\boldsymbol{\omega}_B \times ({}_B^A \mathbf{R}^B \mathbf{q}_1))] \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{J}_B = \begin{bmatrix} {}^A \mathbf{u}_1^T & -({}^A \mathbf{u}_1 \times {}_B^A \mathbf{R}^B \mathbf{q}_1)^T \\ {}^A \mathbf{u}_2^T & -({}^A \mathbf{u}_2 \times {}_B^A \mathbf{R}^B \mathbf{q}_2)^T \\ \vdots & \vdots \\ {}^A \mathbf{u}_8^T & -({}^A \mathbf{u}_8 \times {}_B^A \mathbf{R}^B \mathbf{q}_8)^T \end{bmatrix},$$

$$\text{令: } \mathbf{c}_B = \begin{bmatrix} {}^A \mathbf{u}_1^T [{}_{\boldsymbol{\omega}_B} \times (\boldsymbol{\omega}_B \times ({}_B^A \mathbf{R}^B \mathbf{q}_1))] \\ {}^A \mathbf{u}_2^T [{}_{\boldsymbol{\omega}_B} \times (\boldsymbol{\omega}_B \times ({}_B^A \mathbf{R}^B \mathbf{q}_1))] \\ \vdots \\ {}^A \mathbf{u}_8^T [{}_{\boldsymbol{\omega}_B} \times (\boldsymbol{\omega}_B \times ({}_B^A \mathbf{R}^B \mathbf{q}_1))] \end{bmatrix}$$

式(7)可以简化为

$$\ddot{\mathbf{q}}_a = \mathbf{J}_B \ddot{\mathbf{X}}_B + \mathbf{c}_B \quad (8)$$

其中, $\ddot{\mathbf{q}}_a = [\ddot{\mathbf{q}}_{a1} \ \ddot{\mathbf{q}}_{a2} \ \cdots \ \ddot{\mathbf{q}}_{a8}]^T$ 表示的是动子的轴向加速度; $\ddot{\mathbf{X}}_B = [\dot{\mathbf{v}}_B \ \dot{\boldsymbol{\omega}}_B]^T$ 表示内部载荷在 ($O_B - X_B Y_B Z_B$) 坐标系下相对于 ($O_A - X_A Y_A Z_A$) 坐标系的广义加速度。

由运动的关联性可得

$$\dot{\mathbf{q}}_a = \mathbf{J}_B \dot{\mathbf{X}}_B \quad (9)$$

所以由式(6)、(8)、(9)联立可得

$${}^A \mathbf{R} \mathbf{J}^T [\mathbf{f}_m - \mathbf{c}_i \mathbf{J}_B \dot{\mathbf{X}}_B - \mathbf{t}_i - \mathbf{m}_s \mathbf{g}_a - \mathbf{m}_s [\mathbf{J}_B \ddot{\mathbf{X}}_B + \mathbf{c}_B]] + \mathbf{F}_e - \begin{bmatrix} m_p \mathbf{g} \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix} = {}^A \mathbf{M}_x \ddot{\mathbf{X}}_B + \mathbf{c}(\boldsymbol{\omega}) \quad (10)$$

$${}^A \mathbf{M}_x \ddot{\mathbf{X}}_B + \mathbf{m}_s {}^A \mathbf{R} \mathbf{J}^T \mathbf{J}_B \ddot{\mathbf{X}}_B + {}^A \mathbf{R} \mathbf{J}^T \mathbf{c}_i \mathbf{J}_B \dot{\mathbf{X}}_B = {}^A \mathbf{R} \mathbf{J}^T \mathbf{f}_m - {}^A \mathbf{R} \mathbf{J}^T \mathbf{t}_i - {}^A \mathbf{R} \mathbf{J}^T \mathbf{m}_s \mathbf{g}_a - {}^A \mathbf{R} \mathbf{J}^T \mathbf{m}_s \mathbf{c}_B +$$

$$\mathbf{F}_e - \begin{bmatrix} m_p \mathbf{g} \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix} - \mathbf{c}(\boldsymbol{\omega}) \quad (11)$$

其中,变量 $\ddot{\mathbf{X}} = \ddot{\mathbf{X}}_B$, 是内部载荷相对于 $(O_A - X_A Y_A Z_A)$ 坐标系的广义速度, $\dot{\mathbf{X}}_B$ 是内部载荷相对于 $(O_A - X_A Y_A Z_A)$ 坐标系的广义速度。

说明: 因为音圈电机可动部分的质量远小于载荷的质量, 所以动子对系统的影响可以忽略, 即 $\mathbf{m}_s = \mathbf{0}$, $\mathbf{g} = \mathbf{0}$; 由于内部载荷是与吊舱外部空间无直接接触, 则外部对载荷的作用力可以忽略即 $\mathbf{F}_e = \mathbf{0}$; 因为是小幅值运动, 速度的二阶项, 柯西项可以忽略, 即 $\mathbf{c}(\boldsymbol{\omega}) = \mathbf{0}$; 因为弹簧主要起到的作用是支撑作用, 且内部载荷的运动范围很小(实际稳定工作情况下几十微弧), 旋转矩阵为单位阵, 弹簧的影响是可以忽略的。

式(11)可以进一步简化为

$${}^A M_x \ddot{\mathbf{X}}_B + \mathbf{J}^T \mathbf{c}_i \mathbf{J}_B \dot{\mathbf{X}}_B = \mathbf{J}^T \mathbf{f}_m \quad (12)$$

式(12)是以 \mathbf{f}_m 为输入, $\ddot{\mathbf{X}}_B, \dot{\mathbf{X}}_B$ 为输出的动力学方程。

3 解耦控制设计

3.1 解耦矩阵设计

对式(12)取拉氏变换有

$$({}^A M_x s^2 + \mathbf{J}^T \mathbf{c}_i \mathbf{J}_B s) \mathbf{X} = \mathbf{J}^T \mathbf{f}_m \quad (13)$$

式(13)就是六自由度内部载荷在平衡位置附近的完整动力学模型。动力学模型中为了表示方便可以将 ${}^A M_x$ 写为 \mathbf{M} 。在实际应用中, 为了便于平台的分析和设计, 一般使载荷驱动器的阻尼都相同, 这时有 $\mathbf{c}_i = \mathbf{c} \mathbf{I}$, 即式(13)可简化为

$$(\mathbf{M} s^2 + \mathbf{c} \mathbf{J}^T \mathbf{J}_B s) \mathbf{X} = \mathbf{J}^T \mathbf{f}_m \quad (14)$$

当平台驱动器的个数大于6时, 这有些驱动器是多余的, 不需要出力。为了方便对解耦系统进行设计, 令

$$\mathbf{f}^* = \mathbf{J}^T \mathbf{f}_m = [\mathbf{f}_1^* \quad \mathbf{f}_2^* \quad \cdots \quad \mathbf{f}_6^*]^T \quad (15)$$

\mathbf{f}^* 为内部载荷平台的广义驱动力向量, 驱动力 \mathbf{f}_m 矩阵和雅可比矩阵 \mathbf{J}^T 的阶次与驱动器个数有关。

将式(15)代入式(14)可得公式为

$$(\mathbf{M} s^2 + \mathbf{c} \mathbf{J}^T \mathbf{J}_B s) \mathbf{X} = \mathbf{f}^* \quad (16)$$

式中, \mathbf{J}_B 与矩阵 \mathbf{J} 是等效的, 则得

$$(\mathbf{M} s^2 + \mathbf{c} \mathbf{J}^T \mathbf{J} s) \mathbf{X} = \mathbf{f}^* \quad (17)$$

由式(17)可见, 输入 \mathbf{f}_m 与内部载荷输出响应 \mathbf{X} 之间的耦合关系与矩阵 $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$ 和内部功能载荷的质量惯性矩阵 \mathbf{M} 有关, $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$ 和 \mathbf{M} 总是6阶正定实对称阵。则 \mathbf{M} 和 $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$ 可以经过数学变换相似对角化, 即存在6阶实矩阵 \mathbf{T} , 使得其中如下如示。

$$\mathbf{T}^T \mathbf{M} \mathbf{T} = \mathbf{I}_6 \quad (18)$$

$$\mathbf{T}^T \mathbf{J}^T \mathbf{J} \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \mathbf{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{M} \\ \mathbf{M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{L} & 0 & \lambda_6 \end{bmatrix} = \mathbf{G} \quad (19)$$

其中, $\lambda_1 \cdots \lambda_6$ 是 $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$ 相对于 \mathbf{M} 的广义特征值; \mathbf{T} 的列向量

是 $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$ 相对于 \mathbf{M} 的广义特征向量; \mathbf{I}_6 为单位矩阵。

在等号两端同时左乘 \mathbf{T}^T , 并定义为

$$\mathbf{X} = \mathbf{T} \mathbf{Y} \quad (20)$$

$$\mathbf{f}^{**} = \mathbf{T}^T \mathbf{f}^* = [\mathbf{f}_1^{**} \quad \mathbf{f}_2^{**} \quad \cdots \quad \mathbf{f}_6^{**}]^T \quad (21)$$

$$\mathbf{Y}^* = \mathbf{T}^T \mathbf{J}^T \mathbf{J} \mathbf{X} = [\mathbf{y}_1^{**} \quad \mathbf{y}_2^{**} \quad \cdots \quad \mathbf{y}_6^{**}]^T \quad (22)$$

将式(20), (21), (22)代入式(17)可得

$$(\mathbf{I}_6 s^2 + \mathbf{c} \mathbf{G} s) \mathbf{Y} = \mathbf{f}^{**} \quad (23)$$

可见以 \mathbf{f}^{**} 为输入、以 \mathbf{Y} 为输出的系统各个通道之间是相互解耦的, 此时可以对每个通道进行控制系统设计。

3.2 控制系统设计

利用上面所推导的解耦控制模型设计可以应用于振动的主动控制方法。以通道 y_1^{**} 为例, 解耦后的输入输出传递函数为

$$(s^2 + c\lambda_1 s) y_1^{**} = f_1^{**} \quad (24)$$

控制系统设计的目标是尽量抑制外部输入的干扰, 由于该干扰是可以利用传感器测量出来的, 故采用前馈加反馈的控制策略, 需要选取合适的 $G_1(s)$ 和 $G_c(s)$ 来抑制干扰。

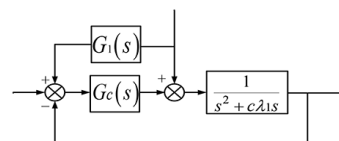


图2 解耦后单入单出通道

扰动信号 y_{b1} 对输出 y_1 的影响可表示为

$$\frac{y_1}{y_{b1}} = \frac{G_1(s) G_c(s) + 1}{s^2 + c\lambda_1 s + G_c(s)} \quad (25)$$

设计 y_{b1} 到 y_1 的传递函数具有惯性环节的形式, 这样可以对外框架的谐振有一定的抑制, 同时控制在高频段衰减, 以发挥被动隔振的作用如下。

$$\frac{y_1}{y_{b1}} = \frac{1}{T_a s + 1} \quad (26)$$

联立式(25)和式(26)可得

$$G_1(s) = \frac{s^2 + c\lambda_1 s + G_c(s) - 1 - T_a s}{(T_a s + 1) G_c(s)} \quad (27)$$

这里取 $T_a = 0.05$ s, 其余的各个通道都将时间常数设为此数值。所设计的控制系统要求具有较快的响应时间, 同时降低闭环控制系统的稳态误差, 所以前向通道采用串联比例超前校正控制器如下。

$$G_c(s) = K_1 \frac{T_s + 1}{\alpha T_s + 1} \quad (28)$$

4 仿真分析与结果

内部载荷上的8个驱动器放置在等效正方体4条棱上对称安装, 内部载荷平台部分参数如下, 内部载荷等效半径、 $r = 250$ mm; 整个并联悬置构型光电吊舱半径 $R = 250$ mm; 平衡状态两者质心重合。载荷的参数为有效载荷质量 20 kg, 转动惯量为 $I_x = 0.6$ kg/m³, $I_y = 0.2$ kg/m³, $I_z = 0.6$ kg/m³, 有效载荷质心位于内部载荷坐标系原点

上,驱动器与内部载荷连接点与载荷质心距离等效为 $d = 162.63 \text{ mm}$; 音圈电机的主要参数为线圈动子质量 100 g ,

直流电阻 4.8Ω , $c = 1 \text{ N/m}^2$ 。内部载荷的雅可比矩阵、质量矩阵、解耦矩阵具体表达式为

$$J^T J = \begin{bmatrix} -1.9994 & 0 & 0 & -0.1150 & 0 & -0.1150 \\ 0 & -1.9994 & -0.0049 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0049 & -3.9889 & 0.1161 & -0.2299 & 0.1150 \\ -0.1150 & 0 & 0.1161 & -0.0793 & 0.0132 & 0 \\ 0 & 0 & -0.2299 & 0.0132 & -0.0264 & 0.0132 \\ -0.1150 & 0 & 0.1150 & 0 & 0.0132 & -0.0264 \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 20 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.15 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} -0.1210 & 0.1076 & 0.0006 & -0.0731 & -0.1312 & 0.0349 \\ 0.0001 & 0.0007 & -0.2236 & -0.0002 & -0.0004 & -0.0001 \\ -0.0343 & -0.1340 & -0.0002 & -0.0281 & -0.1002 & -0.1415 \\ 0.4213 & -0.2414 & -0.0000 & -1.1593 & 0.1302 & 0.2645 \\ 1.3421 & 1.2627 & 0.0064 & -0.0954 & -0.4611 & -1.1760 \\ 1.2031 & -0.6075 & 0.0000 & 0.6782 & -1.6372 & 1.3076 \end{bmatrix}$$

忽略弹簧等效作用力,代入上面参数得到未解耦的输入输出伯德图。

从图 3 中可以清楚地看到系统中某 3 个通道之间(任意选取 3 个通道)未解耦时通道之间高度耦合。

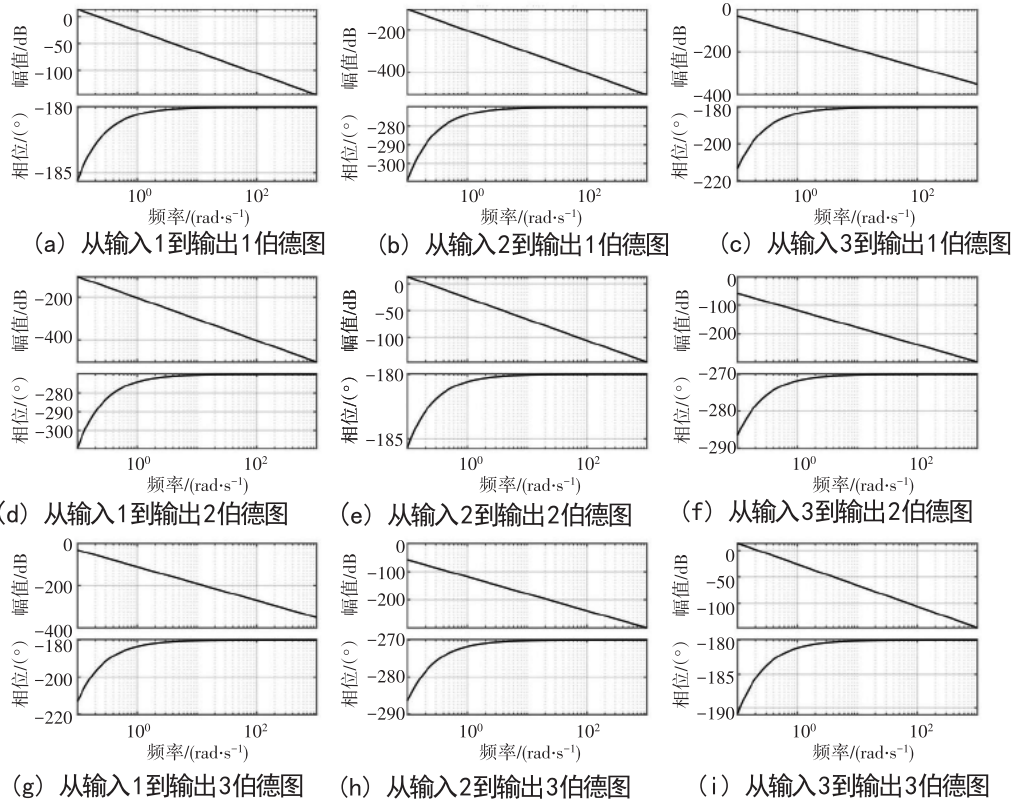


图 3 未解耦前输入到输出伯德图

图 4 是将系统进行解耦变换后选取其中某 3 个通道的伯德图,可以看到内部载荷各个通道之间高度耦合情况消失了,但是每个通道很不稳定(相位裕度很大),需要对每个通道设计控制器。

可以看出每个通道之间相互独立,且通过设计控制器满足系统稳定性同时响应的速度很快。

图 6 是系统解耦校正后其中一个输入输出通道单位阶跃输入后系统的阶跃响应。

图 5 是设计控制器后 6 个通道之间的伯德图,从图中

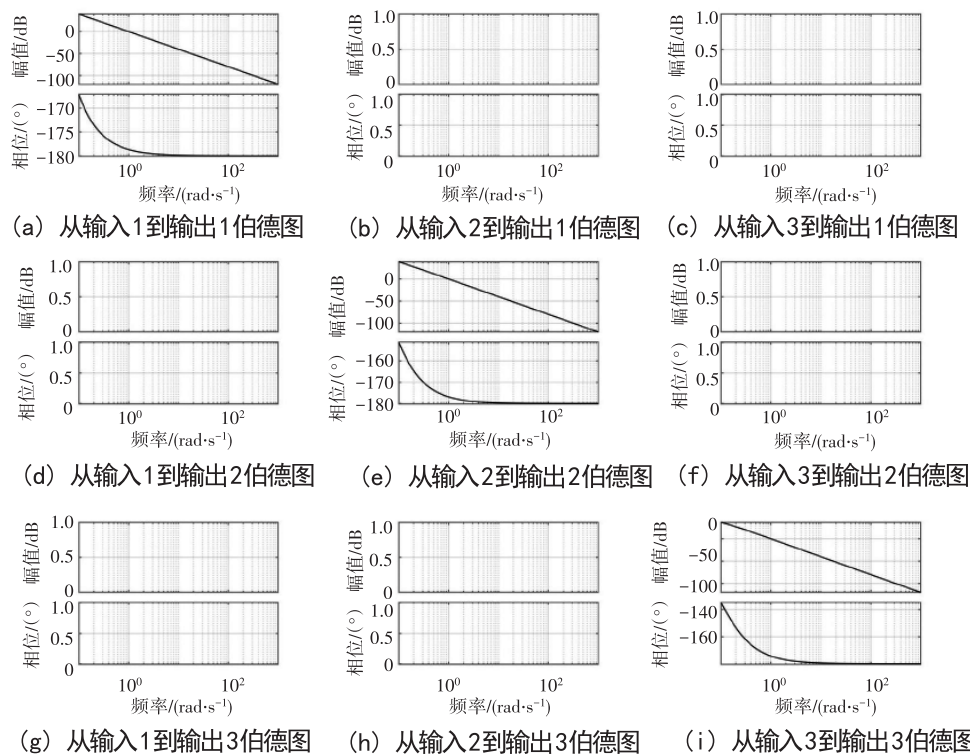


图4 解耦后输入到输出伯德图

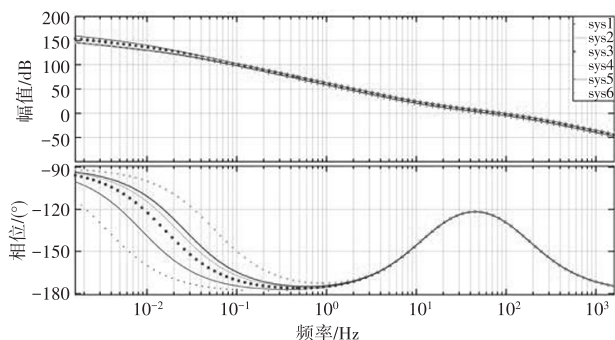


图5 解耦变换校正后输入到输出伯德图

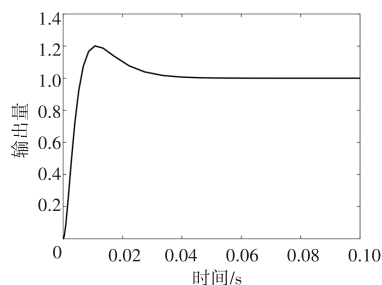


图6 解耦后单通道阶跃响应

5 结束语

本文以并联悬置构型的光电吊舱控制系统为应用背景,提出了一种基于并联悬置构型的动力学模型的解耦设计方法。首先介绍并联悬置构型的结构与工作原理,然后建立并联悬置结构简化动力学模型,最后设计解耦矩阵和校正控制器,并根据实际应用参数进行性能仿真。结果表明,基于简化模型对并联悬置构型的解耦设计,在满足运动原理的情况下,通过合理设计超前校正控制器,前馈控制器来保持

系统稳定性,可以使系统的带宽达到 70 Hz 以上,上升时间小于 5 ms,超调量小于 20%;所设计的并联悬置构型解耦矩阵和校正方法,可以使系统解耦,同时大大提高了系统响应速度。

参考文献

- [1] 张赛, 马会, 温庆荣. 机载光电侦察吊舱发展现状与分析[J]. 红外, 2022, 43(7): 8-14.
- [2] 杨晓冉, 蹇制京, 孙洁洁, 等. 基于无人机载图像的局部精细拼接算法[J]. 导航与控制, 2023, 22(1): 115-121, 74.
- [3] 马嘉程, 冯慧, 王生. 光电吊舱稳定控制方法研究与仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(6): 72-79.
- [4] 马悦飞, 林梯. 基于滑模变结构控制及预测跟踪的光电吊舱控制方法[J]. 应用光学, 2022, 43(1): 36-40.
- [5] 北京理工大学. 一种目标跟踪的吊舱控制自适应增益方法: CN202110466805. 5[P]. 2021-07-23.
- [6] 肖婕, 莫岫, 赵峻. 基于机器学习的工单诉求自适应分派模型[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(12): 43-46, 74.
- [7] 高建峰. 基于 Stewart 结构的六自由度并联稳定平台技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [8] 黎泉, 魏新生, 杨杰, 等. 二维驱动机构的机电一体化谐振问题探讨[J]. 导航与控制, 2020, 19(6): 83-89.
- [9] 程刚, 杜言鲁, 齐媛, 等. 新型机载光电平台万向架及其关键技术[J]. 应用光学, 2022, 43(4): 577-582.
- [10] 孙双园, 宋文杰, 刘沛铨, 等. 并联五连杆足式双足机器人稳定行走控制方法[J]. 导航与控制, 2023, 22(2): 1-8, 15.
- [11] 何景峰, 叶正茂, 姜洪洲, 等. 基于关节空间模型的并联机器人耦合性分析[J]. 机械工程学报, 2006, 42(6): 161-165.

作者简介: 张明闯(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 仪器科学与技术。