

飞机蒙皮检测机器人吸盘组控制分配器设计

陈磊, 王从庆, 谢勇, 吴林峰

(南京航空航天大学, 南京 211100)

摘要: 以飞机蒙皮检测机器人为研究平台, 设计了基于执行器控制矩阵切换策略的吸盘组控制分配器。飞机蒙皮检测机器人的曲率自适应姿态控制的关键是吸附过程中的稳定性以及姿态调整中的灵活性问题, 通过设计控制分配器控制真空负压系统改变执行器输出量达到提高机器人稳定性及灵活度的目的。首先, 针对机器人结构模型进行受力分析, 得到吸盘组控制分配矩阵, 并在此基础上设计控制分配器; 然后, 考虑吸盘组出现故障的情况, 采用改变吸盘优先级的故障适应策略改变吸盘对应加权系数; 接着, 建立吸盘组吸附安全增益数学模型, 并在此基础上设计执行器控制矩阵切换策略; 最后, 控制分配器采用伪逆二次规划算法来避免执行器饱和问题, 并通过仿真实验验证了控制分配器的可行性。

关键词: 飞机蒙皮检测机器人; 控制分配器; 执行器控制; 矩阵切换; 真空负压

中图分类号: V19; TP242 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2017)01-0096-06

Design of Suckers Controlling Distributor for Aircraft Skin Detection Robot

CHEN Lei, WANG Cong-qing, XIE Yong, WU Lin-feng

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: The suckers controlling distributor was designed for the aircraft skin detection robot based on the strategy of actuator control matrix switching. The stability and flexibility are critical for the robot's curvature adaptive attitude control. A controlling distributor was designed to improve the stability and flexibility of robot by controlling the output of the vacuum system. First, the control allocation matrix of the controlling distributor was established based on the force analysis to the robot structure model, and thus the controlling distributor was designed. Then, considering the possible failure of the sucker system, the strategy of changing the priority of the suckers was used to change the weighting coefficient value of corresponding sucker. Actuator control matrix switching strategy was designed based on the mathematical model of suction safety gain. The improved redistributed pseudo inverse algorithm was used to solve the saturation problem and finally controlling simulations and tests were carried out to prove the feasibility of the distributor.

Key words: aircraft skin detection robot; controlling allocation; actuator control; matrix switching; negative-pressure

0 引言

飞机蒙皮检测机器人采用真空负压吸附系统, 工作区域为复杂飞机表面, 因此, 曲面自适应姿态控制是其进行蒙皮无损检测的关键问题之一^[1]。机器人进行曲率自适应姿态控制的前提是吸附系统提供足够的稳定性系数以及机械腿切换时具有一定的灵活性, 这就

要求机器人对执行器输出吸附力进行有效的调控。

近年来, 许多学者对爬壁机器人的真空负压吸附系统展开了广泛的研究。文献[2]提出了一种新型的吸盘结构, 并开展关于吸持力方向的研究; 文献[3]通过改善吸盘结构及研究电机开展了对吸附力可控性方面的研究, 并利用电机参数辨识分析吸附力大小的影响因素; 文献[4]设计了爬壁机器人的气动伺服系统, 通过调控真空泵电压进行吸附力的控制; 文献[5]对真空泵进行数学建模, 设计了适用于真空泵电机的模糊 PID 控制器进行吸附力调控。上述研究的真空负压系统只适用于

收稿日期: 2015-12-28

修回日期: 2016-09-28

作者简介: 陈磊(1990—), 男, 江苏常州人, 硕士, 研究方向为控制系统应用工程。

机器人静态时的吸附力调整,并未考虑机器人处于运动状态时可能出现的抖动、气密性降低等因素,尤其对于本文研究的飞机蒙皮检测机器人进行曲面自适应姿态控制时,机器人实际工作过程中不仅要求真空负压系统提供足够的吸附力,而且能够有效调整输出量大小从而达到姿态调整灵活性的目的。

控制分配技术最先应用于飞行控制系统,在考虑飞行器偏转位置和速率约束的前提下,将控制指令以最优的目标分配到各个执行器上,以确保飞行器的稳定性和机动性能^[6],该技术是解决冗余控制量最优分配的有效方法。本文采用控制分配技术设计了一种针对真空负压吸附系统的控制分配器,通过计算执行器输出量的最优解提高机器人姿态调整的稳定性和灵活性。

飞机蒙皮检测机器人的执行器包括内外框吸盘组、气动收缩模块及电机位移转动模块。机器人通过控制吸盘组及气动模块实现曲率自适应爬壁动作,气动模块可以调整机器人重心位置姿态,从而实现姿态控制,吸盘组可以调整吸附力以提高机器人稳定性灵活性,从而使其更适应曲面。针对机器人吸盘组执行器,本文设计的控制分配器基于执行器控制矩阵切换策略,采用伪逆二次规划算法对机器人吸盘组输出量进行控制分配,并通过仿真与实验证明该控制器的有效性。

1 机器人控制分配器模块介绍

飞机蒙皮检测机器人采用双框架结构,如图 1 所示。机器人的机械结构采用 3 层结构,其中第 1 层为机器人外框,第 2 层携带机器人核心控制芯片以及 2 个电机,第 3 层为机器人内框。转动电机自带减速转动轴,通过中心轴和第 1 层结构连接,采用这样的连接可以使机器人实现第 1 层和第 2、第 3 层相对转动的功能;其中滑动电机利用滚珠丝杆使第 1 层与第 3 层连接,从而使机器人的第 1、第 2 层和第 3 层具有相对滑动的功能^[7]。

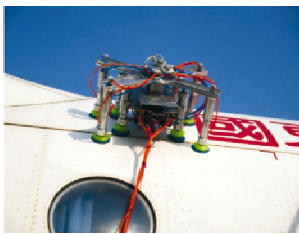


图 1 飞机蒙皮检测机器人
Fig.1 Aircraft detection robot

吸附力控制分配器是飞机蒙皮检测机器人的重要组成部分,其设计性能直接影响机器人的总体性能。飞机蒙皮检测机器人曲面工作区域要求机器人的爬壁动作能够适应蒙皮变曲率的特点,因此在保证稳定性的前提下,机器人利用吸附力分配模块根据步态变化趋势改

变框架着力点负压变化,通过实时调整位姿协助机器人完成曲率自适应爬壁动作。爬壁机器人吸附力控制分配存在以下难点:1) 在考虑机器人结构设计情况下保证运动的灵活性及可靠性;2) 使机器人适应变曲率不对称的飞机外蒙皮;3) 执行器输出饱和和性问题。

文献[7]提出了反演-滑模控制方法用于机器人轨迹跟踪,并设计了基于事件驱动的切换策略实现机器人双框架系统间的切换。本文在此基础上提出了基于保障稳定性建立吸附力控制分配矩阵最优解的闭环控制系统结构,如图 2 所示,控制分配器在控制器与执行器之间,实现对期望控制量的分配与优化。此外,控制分配器需要考虑吸盘组执行器的吸附力输出饱和问题和执行器控制矩阵切换问题。

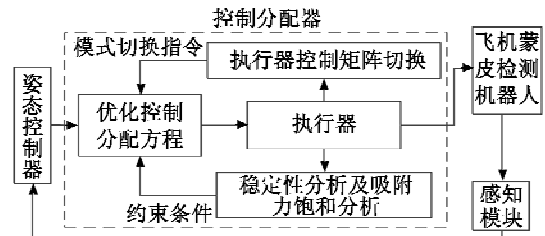


图 2 机器人控制系统整体框图

Fig.2 Block diagram of the robot control system

为保障机器人曲率自适应姿态控制时吸盘组执行器输出量不受漏气影响以及步态切换时机器人具有一定的灵活性,本文将设计控制分配器及执行器控制矩阵切换策略对吸盘组吸附力输出量进行控制分配。图 3、图 4 分别为飞机蒙皮检测机器人吸盘组产生吸附力以及框架结构示意图。

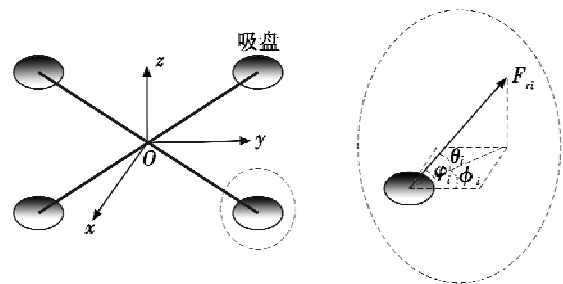


图 3 吸盘产生吸附力

Fig.3 The adsorption force produced by the sucker

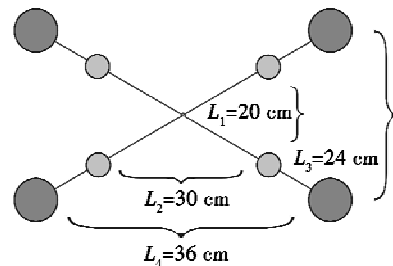


图 4 吸盘组布置俯视图

Fig.4 Vertical view of suction cup group

图 3 中,坐标系 $Oxyz$ 表示机体坐标系; F_n 表示单个

吸盘产生吸附力。图4中,内框矩阵长宽分别为30 cm, 20 cm;外框矩阵长宽分别为36 cm, 24 cm。根据图3建立机器人吸附力控制分配矩阵。图2中:姿态控制器输入控制量为 \mathbf{u} ,由内外框架吸盘组实际输出的吸附力构成, $\mathbf{u} = [F_{r1}, F_{r2}, \dots, F_{r8}]$;期望控制向量为 $\boldsymbol{\tau}_{att}$,由吸盘产生的合力与力矩构成。假设机器人合外力力矩 $\boldsymbol{\tau} = [\tau_\theta, \tau_\varphi, \tau_\phi]$ 表示控制吸盘吸附力在机器人重心处产生的合力矩, $\boldsymbol{\tau}$ 中元素分别表示合力矩沿机器人坐标系 $Oxyz$ 欧拉角方向的分量;机器人吸盘组产生的吸附力 $\mathbf{F} = [F_x,$

$$\boldsymbol{\tau}_{att} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cos \phi_1 & \cos \theta_2 \cos \phi_2 & \cos \theta_3 \cos \phi_3 & \cos \theta_4 \cos \phi_4 & \cos \theta_5 \cos \phi_5 & \cos \theta_6 \cos \phi_6 & \cos \theta_7 \cos \phi_7 & \cos \theta_8 \cos \phi_8 \\ \cos \theta_1 \sin \phi_1 & \cos \theta_2 \sin \phi_2 & \cos \theta_3 \sin \phi_3 & \cos \theta_4 \sin \phi_4 & \cos \theta_5 \sin \phi_5 & \cos \theta_6 \sin \phi_6 & \cos \theta_7 \sin \phi_7 & \cos \theta_8 \sin \phi_8 \\ \sin \theta_1 & \sin \theta_2 & \sin \theta_3 & \sin \theta_4 & \sin \theta_5 & \sin \theta_6 & \sin \theta_7 & \sin \theta_8 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2}L_1 & \frac{\sqrt{2}}{2}L_1 & \frac{\sqrt{2}}{2}L_1 & -\frac{\sqrt{2}}{2}L_1 & -\frac{\sqrt{2}}{2}L_3 & \frac{\sqrt{2}}{2}L_3 & \frac{\sqrt{2}}{2}L_3 & -\frac{\sqrt{2}}{2}L_3 \\ \frac{\sqrt{2}}{2}L_2 & \frac{\sqrt{2}}{2}L_2 & -\frac{\sqrt{2}}{2}L_2 & -\frac{\sqrt{2}}{2}L_2 & \frac{\sqrt{2}}{2}L_4 & \frac{\sqrt{2}}{2}L_4 & -\frac{\sqrt{2}}{2}L_4 & -\frac{\sqrt{2}}{2}L_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 F_{r1} \\ k_2 F_{r2} \\ k_3 F_{r3} \\ k_4 F_{r4} \\ k_5 F_{r5} \\ k_6 F_{r6} \\ k_7 F_{r7} \\ k_8 F_{r8} \end{bmatrix} \quad (3)$$

针对本文机器人工作环境及执行器具体参数设计合适的吸附力控制分配器,并结合式(3)给出的吸附力控制分配矩阵,计算出真空负压吸附系统的最优控制量。

2 吸盘组控制分配器设计

吸盘故障分为两种类型:一种是部分故障产生泄漏,损失部分吸附力;另一种是完全故障,即吸盘不能产生吸附力。假设吸盘 n 出现故障,根据其故障类型确定吸盘最大吸附力减小系数 μ^n 。当吸盘故障为漏气情况时, $0 < \mu^n < 1$;当吸盘故障为完全故障时, $\mu^n = 0$ 。

除了调整吸盘的最大吸附力外,还可以通过调整故障吸盘的使用优先等级进行吸附力重分配^[8],即通过增大加权矩阵 \mathbf{W}_u 中相应的加权系数 w^i ,降低吸盘的使用优先等级。本文采用的加权系数调整策略为

$$w^i = w_0^i \left(1 + \frac{\lambda}{\varepsilon^i} \right) \quad (4)$$

式中: w_0^i 为初始加权系数,可以根据吸盘动态特性设定; λ 为正常数。

3 执行器控制矩阵切换策略

飞机蒙皮检测机器人吸盘工作状态由吸盘组执行器控制矩阵 \mathbf{K} 决定。当机器人仅有内框吸附时,执行器控制矩阵 $\mathbf{K}_1 = \text{diag}(0, 0, 0, 0, 1, \dots, 1)$;当仅有外框吸附时,执行器控制矩阵 $\mathbf{K}_2 = \text{diag}(1, 1, 1, 1, 0, \dots, 0)$;机器人完成曲面姿态调整动作需要内框或外框吸盘组完全吸附,但当机器人进行曲面爬壁动作时,吸盘组对单个吸盘的工作状况有不同要求。因此,吸盘组具有

$F_y, F_z]$ 分别表示机器人在 x, y, z 轴上吸盘产生的合力,则执行器吸盘组产生的合力/力矩为

$$\boldsymbol{\tau}_{att} = [\mathbf{F} \quad \boldsymbol{\tau}]^T = [F_x \quad F_y \quad F_z \quad \tau_\theta \quad \tau_\varphi \quad \tau_\phi]^T \quad (1)$$

根据执行器配置情况,引入控制分配矩阵 \mathbf{B} ,则有

$$\boldsymbol{\tau}_{att} = \mathbf{B} \mathbf{K} \mathbf{u} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{K} = \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_8)$ 为执行器控制矩阵,吸附力控制分配器根据机器人步态切换选择不同的控制量系数矩阵。由图3所示的爬壁机器人受力情况,可得吸附力控制分配矩阵为

不同的执行器控制矩阵,定义吸盘组执行器控制矩阵序列

$$s = \{ (\eta_1, \mathbf{K}_1), (\eta_2, \mathbf{K}_2), \dots, (\eta_k, \mathbf{K}_k) \} \quad (5)$$

假设机器人不同时刻的吸附状态分别为模式 i 、模式 j ,其中, \mathbf{K}_i 表示 η_i 对应序列下对应的执行器控制矩阵, η_i 和 η_j 分别表示 t 时刻机器人在吸附模式 i 和模式 j 下的吸附安全性能系数,定义吸附安全性能系数为吸盘组执行器改变输出吸附力造成的机器人吸附状态安全性能的变化系数,假设服从

$$d\eta_{i1}/\eta_{i1} = a_i dt + b_i d\chi_{i1} \quad (6)$$

$$d\eta_{j1}/\eta_{j1} = a_j dt + b_j d\chi_{j1} \quad (7)$$

式中, a_i, a_j 和 b_i, b_j 为大于零的常数。定义执行器输出量 χ 为单个吸盘产生的吸附力,单位时间内不同吸盘吸附力变化量相同,因此,通过式(6)、式(7)表示单个吸附力变化量对吸附安全性能系数的影响。由于内外框架结构参数不同,因此执行器输出吸附力增量 $d\chi_{i1}, d\chi_{j1}$ 不同,但两者之间必须存在一定的相关性,假设满足 $d\chi_{i1} d\chi_{j1} = \omega dt$, ω 为执行器过程增量的相关系数,由实际器材参数决定。

吸盘组的执行器冗余度指从模式 i 切换到模式 j 的执行器冗余度,为 $R_{i \rightarrow j} = R_{ij}$,而从模式 j 切换到模式 i 的执行器冗余度为 $R_{j \rightarrow i} = R_{ji}$,进行吸盘组执行器控制矩阵切换的关键是根据不同吸盘组吸附安全性能系数增益以及执行器冗余量进行切换。设从模式 i 到模式 j 切换获得的吸附安全性能增益函数为 $f(\eta_i, \eta_j)$,在模式 i 状态下,期望吸附安全性能增益与执行器的瞬时安全性能系数等于吸盘组的安全性能系数,即

$$E[df(\eta_i, \eta_j)] + \eta_i dt = \rho f(\eta_i, \eta_j) dt \quad (8)$$

式中： ρ 为随机故障系数，定义 $\rho = (\sum_{i=1}^k \mu^i)/k$ ，其中， μ^i 为吸盘最大吸附力减小系数，当前吸附模式下实际工作的吸盘数量为 k 。吸盘组在实际切换过程中输入控制指令无法通过负压系统完全执行，将式(6)、式(7)转化为考虑了概率故障情况下的随机过程，其过程变化为

$$d\eta_u/\eta_u = (\rho - \delta_i) dt + b_i d\chi_u \quad (9)$$

$$d\eta_j/\eta_j = (\rho - \delta_j) dt + b_j d\chi_j \quad (10)$$

式中， δ_i 和 δ_j 分别为吸盘组容错修正系数，即吸盘组采用故障适应策略后实际吸附状态下的容错率，与控制分配器性能有关。

吸盘组进行模式切换时，真空负压吸附系统产生随机误差的是连续时间下的随机过程，即当前时刻的随机误差受前一时刻影响，假设该过程符合几何布朗运动，同时，式(8)表示一个非连续随机过程的函数，可以对上述随机过程函数进行微分^[9]，得

$$(\rho - \delta_i) \eta_i \frac{\partial f}{\partial \eta_i} + (\rho - \delta_j) \eta_j \frac{\partial f}{\partial \eta_j} + \frac{1}{2} b_i^2 \eta_i^2 \frac{\partial^2 f}{\partial \eta_i^2} + b_j^2 \eta_j^2 \frac{\partial^2 f}{\partial \eta_j^2} + \eta_i = \rho f \quad (11)$$

设不同吸附模式的相对吸附安全性能系数为 $Z = \eta_i/\eta_j$ ，相对吸附安全性能系数在考虑吸盘随机故障情况下服从随机过程，同样采用伊藤原理对随机过程函数进行微分得

$$dZ/Z = (\delta_j - \delta_i + b_j - 2\omega b_i b_j) dt + b_i d\chi_i - b_j d\chi_j \quad (12)$$

式中：相对吸附安全性能系数与随机故障系数 ρ 无关，若令 $b = \sqrt{b_i^2 + b_j^2 - 2\omega b_i b_j}$ ， $\chi = (b_i \chi_i - b_j \chi_j)/b$ ，则上式可记作

$$dZ/Z = \left(\delta_j - \delta_i + \frac{1}{2} (b_i^2 + b_j^2) + \frac{1}{2} \omega^2 \right) dt + b d\chi \quad (13)$$

假设 $f(\eta_i, \eta_j)$ 具有一阶齐次性，可写为 $f(\eta_i, \eta_j) = \eta_i f(\eta_i/\eta_j, 1) = \eta_j g(Z)$ ，由式(11)可知， $g(Z)$ 满足如下微分方程

$$(\delta_j - \delta_i) Z g'(Z) + \frac{1}{2} Z^2 b^2 g''(Z) - \delta_j g + 1 = 0 \quad (14)$$

当 $Z \rightarrow \infty$ 时，则 $p_j \rightarrow 0$ ，控制分配器不会将吸附模式切换为 j ，此时模式 i 产生的吸附安全性能增益为

$$\lim_{R \rightarrow \infty} f = E \int_0^\infty \eta_u e^{-\rho t} dt = \int_0^\infty \eta_u e^{(\rho - \eta_i)t} e^{-\rho t} dt = \eta_i/\delta_i \quad (15)$$

可得到式(14)的边界条件为

$$\lim_{R \rightarrow \infty} g(Z) = \left(\frac{\eta_i}{\eta_j} \right) / \delta_i = Z/\delta_i \quad (16)$$

同样，由模式 j 转化为模式 i 的吸附安全性能增益函数 $F(\eta_i, \eta_j)$ 满足

$$F(\eta_i, \eta_j) = \eta_j F(\eta_i/\eta_j, 1) = \eta_j h(Z) \quad (17)$$

$h(Z)$ 满足

$$(\delta_j - \delta_i) Z h'(Z) + \frac{1}{2} Z^2 b^2 h''(Z) - \delta_j h + 1 = 0 \quad (18)$$

当 $R \rightarrow 0$ 时， $\eta_i \rightarrow 0$ ，此时 $\lim_{R \rightarrow 0} F = \eta_j/\delta_j$ ，式(18)的边界条件为

$$\lim_{R \rightarrow 0} h = 1/\delta_j \quad (19)$$

微分方程(14)和式(18)的解的一般形式分别为

$$g(Z) = A_1 Z^{\beta_1} + Z/\delta_i \quad (20)$$

$$h(Z) = A_2 Z^{\beta_2} + 1/\delta_j \quad (21)$$

式中： A_1 和 A_2 为待定的系数； β_1 和 β_2 分别为

$$(\delta_j - \delta_i) \beta + \frac{1}{2} b^2 \beta(\beta - 1) - \delta_j = 0 \quad (22)$$

的负根和正根。

控制分配器在选择吸盘组吸附模式时，只需考虑其吸附效果增益，设从模式 i 切换为模式 j 的相对吸附安全性能系数 Z 的临界值为 Z_H ，从模式 j 切换为模式 i 的相对吸附安全性能系数 Z 的临界值为 Z_L ，取 $Z_H > 1$ ， $Z_L < 0.8$ ，则切换点应满足以下执行器控制矩阵切换条件

$$\begin{cases} A_1 Z_L^{\beta_1} + \frac{Z_L}{\delta_i} = A_2 Z_L^{\beta_2} + \frac{1}{\delta_j} - Z_{ij} \\ A_1 Z_H^{\beta_1} + \frac{Z_H}{\delta_i} - Z_{ji} = A_2 Z_H^{\beta_2} + \frac{1}{\delta_j} \\ A_1 \beta_1 Z_L^{\beta_1 - 1} + \frac{1}{\delta_i} = A_2 \beta_2 Z_L^{\beta_2 - 1} \\ A_1 \beta_1 Z_H^{\beta_1 - 1} + \frac{1}{\delta_i} = A_2 \beta_2 Z_H^{\beta_2 - 1} \end{cases} \quad (23)$$

式中， Z_{ij} 、 Z_{ji} 是指当吸盘组进行切换时对吸附效果产生的影响，实际过程中应考虑安全系数等因素，此处为了简化模型将其忽略。通过联立方程组(23)得到待定系数 A_1 、 A_2 及执行器控制矩阵切换临界点 Z_H 和 Z_L 。

上述模型通过GS非线性迭代算法进行求解，真空系统执行器控制矩阵切换相对吸附安全性能增益定义为 $Z = \eta_i/\eta_j$ ，当 Z 增大时，模式 i 的吸附安全性能增大，而模式 j 的吸附安全性能减少，本文分析了参数变化对最优执行器控制矩阵切换点的影响。当模式 i 和模式 j 的随机故障系数 ρ 相同，其他参数取值为 $\omega = 0.4$ ， $\delta_i = 0.05$ ， $\delta_j = 0.05$ ， $R_{i \rightarrow j} = R_{j \rightarrow i} = 1$ ，当 ρ 增大时，相对吸附安全性能增益 Z 变化如图5所示。当模式 i 和模式 j 的执行器冗余系数相同，其他参数取值为 $\omega = 0.4$ ， $\delta_i = 0.05$ ， $\delta_j = 0.05$ ， $\rho = 0.15$ ，当执行器冗余系数增大时，相对吸附安全性能增益 Z 随之变化；当模式 i 和模式 j 的执行器过程增量系数相同，其他参数取值为 $\delta_i = 0.05$ ， $\delta_j = 0.05$ ， $\rho = 0.15$ ， $R_{i \rightarrow j} = R_{j \rightarrow i} = 1$ ，当执行器过程增量的相关系数增大时，同样，相对吸附安全性能增益 Z 随之变化。

由图5可知：随机故障系数增大时，触发模式进行

执行器控制矩阵切换所需吸附安全性能增益逐渐增大,控制分配器考虑切换要求时,只有模式提供的吸附安全性能足够大才能继续执行器控制矩阵切换;当执行器冗余度相同时,吸附安全性能增益幅度与随机故障系数变化时相对吸附安全性能增益幅度类似;当执行器过程增益增大时,两个模式切换的相对吸附安全性能增益逐渐减少,随之带来的是机器人本体的稳定性系数减少,当模式进行切换时,需要提供更多的吸附安全性能增益。

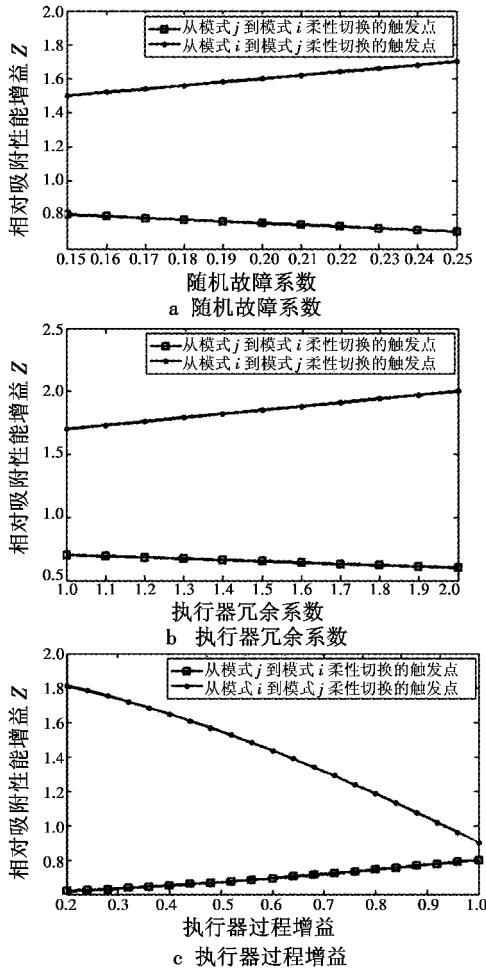


图 5 不同参数对系统的影响

Fig. 5 The effect of different parameters on the system

4 控制分配求解策略

本文采用伪逆二次规划控制算法^[10],不同于加权伪逆法,该算法利用加权伪逆法进行第一次求解,当执行器控制量超出饱和范围时,以执行器控制量二范数最小为目标,重新建立不足的期望控制力控制分配模型,并给予二次规划算法再次优化分配,详细步骤如下所述。

1) 控制分配评价函数为控制量的二范数函数 $J = W_u \|Ku\|_2$,其中, W_u 表示对称的正定权值矩阵,由加权系数 w^i 组成,得到加权伪逆控制分配的解为^[9]

$$Ku = W_u^{-1}(BW_u^{-1})^+ K\tau_{att} \quad (24)$$

2) 当控制量超出约束范围及真空负压吸附系统无法提供足够吸附力时,控制量不足将导致控制力不足,而伪逆法不具备自动调整控制量功能,因此,实际分配的控制力达不到期望控制力,为弥补该缺点,本文将控制量二范数最小作为期望条件,进行再次控制分配。

定义执行器控制量偏差矩阵 M_{err} ,而执行器输出的最大值及最小值向量分别为 u_{max} 和 u_{min} ,则二次分配时执行器控制量的可行域分别为

$$M_{err} \leq u_{max} - u \quad (25)$$

$$-M_{err} \leq u - u_{min} \quad (26)$$

根据 $BK(u + M_{err}) = \tau_{att}$ 及矩阵乘法的性质,有

$$BKM_{err} = \tau_{att} - BKu \quad (27)$$

$$BKM_{err} = O_{8 \times 1} \quad (28)$$

为了保证二次分配后执行器输出控制量的二范数最小,应保证二次控制分配所得的期望控制量之和的 l_2 范数最小。控制器对未饱和控制量的再次分配得到不足的控制力,以补偿因控制约束引起的实际控制量与期望控制量的差值,二次分配指标为 $\min \|u + M_{err}\|$ 。根据范数的性质得到

$$\|u + M_{err}\| \leq \|u\| + \|M_{err}\| \quad (29)$$

由于 $\|Ku\| = \|W_u^{-1}(BW_u^{-1})^+ K\tau_{att}\|$ 是加权伪逆法求得的固定值,二次分配可理解为求解 $\min \|M_{err}\|$ 。对于飞机蒙皮检测机器人,其目标函数为

$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} u_{max} - u \\ u - u_{min} \end{bmatrix}, \quad C = O_{8 \times 8} \quad (30)$$

上述问题的二次规划标准表达形式为

$$\min J = M_{err}^T H M_{err} + C M_{err} \quad (31)$$

式中, H 为二次规划权值矩阵。

$$A M_{err} \leq b \quad (32)$$

$$\text{s. t. } B M_{err} = O$$

5 仿真验证

飞机蒙皮检测机器人结构参数选择可参考图 4。同时,设置机器人初始姿态参数:方位角 θ 为 0° ,俯仰角 ϕ 为 45° ,结合机器人结构参数以及初始姿态角可以得到吸附力控制分配矩阵 B ;仿真假设机器人吸盘组外框吸附, $K = \text{diag}(1, 1, 1, 1, 0, \dots, 0)$ 为其执行器控制矩阵;输入期望控制力系控制力(矩)如图 6 所示,根据稳定性判据设置机器人期望力矩及期望合外力,期望力矩初始值分别为 $0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$, $0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$, $0 \text{ N} \cdot \text{m}$,到达稳态时力矩大小分别为 $\pm 0.75 \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $0 \text{ N} \cdot \text{m}$,期望合外力三轴初始值分别为 0 N , 0 N , 4 N ,到达稳态时合外力大小为 1 N , 2 N , 8 N 。经过吸附力控制分配矩阵计算得出执行器控制量 u 取值,如图 6 所示。

分析图 6 可知,当 0.18 s 期望合外力达到峰值,为

满足合外力矩,此时的机器人外框架吸附力控制量分别为7 N,6 N,2 N,0.5 N;当期望力矩与期望合外力到达稳态时机器人外框架吸附力控制量分别为1 N,6 N,1 N,1 N。整个过程中,0~0.1 s时,吸附力变化最大为5 N,考虑实验平台采用的可调真空泵参数,本文采用的控制分配算法可以在执行器控制量滞后时间保持在合理数值的情况下,同时满足试验平台的可实行性。

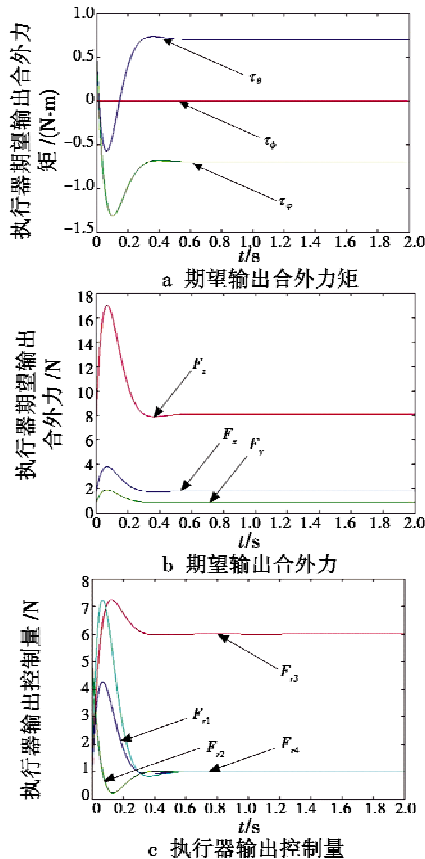


图6 执行器输出控制量控制分配输出结果

Fig.6 The actuator control output of control allocation

6 结束语

本文设计了飞机蒙皮检测机器人吸盘组控制分配器,通过控制吸盘组输出控制量,保证机器人在不同曲

面进行姿态调整时的吸附稳定性及灵活性,使机器人具有曲率自适应特性。首先,设计了调整吸盘优先级的故障适应策略;其次,针对吸盘组吸附力的控制分配矩阵,提出基于控制分配原理的吸盘组执行器矩阵切换策略;最后,采用伪逆二次算法对吸盘组输出吸附力进行分配,并对算法进行仿真分析,进而验证了飞机蒙皮检测机器人吸盘组控制分配器的可行性及有效性。

参考文献

- [1] 安康康,王从庆. 蒙皮检测机器人动力学建模与反步镇定控制[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2013,41(s1):34-37.
- [2] 李雪梅,曾德怀,丁峰. 真空吸盘的设计与应用[J]. 液压与气动,2004(3):48-49.
- [3] LIU J, TANAKA K, BAO L M, et al. Analytical modelling of suction cups used for window-cleaning robots[J]. Vacuum, 2006, 80(6):593-598.
- [4] 孙锦山,杨庆华,阮健. 气动多吸盘爬壁机器人[J]. 液压与气动,2005(8):56-59.
- [5] LONGO D, MUSCATO G. A modular approach for the design of the Alicia climbing robot for industrial inspection[J]. Nursing Spectrum, 2013, 5(3):10-11.
- [6] 陈勇,董新民,薛建平,等. 多操纵面飞行器控制分配技术的发展及应用[J]. 飞行力学,2012,30(4):289-294.
- [7] 沈桂鹏,王从庆,王琪. 双框架飞机蒙皮检测机器人切换运动控制方法[J]. 航空学报,2015,36(6):2064-2073.
- [8] 俞建成,张艾群,王晓辉. 7000米载人潜水器推进器故障容错控制分配研究[J]. 机器人,2006,28(5):519-524.
- [9] MERTON R C. Erratum: "optimum consumption and portfolio rules in a continuous-time model" (J. Econom. Theory 3 (1971), No. 4, 373-413) [J]. Journal of Economic Theory, 1973(2):213-214.
- [10] 杨立平. 舵桨联控式水下机器人容错控制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.

(上接第85页)

- LASSO[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1996, 58(1):267-288.
- [7] ZOU H, HASTIE T, TIBSHIRANI R. Sparse principal component analysis[J]. Journal of Computational and Graphical Statistics, 2006, 15(2):265-286.
 - [8] MONTEIRO R D C, HE Y L, PARK H. An efficient algorithm for sparse PCA[C]//Proceedings of the SIAM International Conference on Data Mining, 2011:771-782.

- [9] ULFARSSON M O, SOLO V. Sparse variable PCA using geodesic steepest descent[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(12):5823-5832.
- [10] JOHNSTONE I M, LU A Y. Sparse principal components analysis[J]. Proceedings, IMS Mini-Meeting on Functional Data Analysis, 2003, 40(2):309-316.
- [11] LEAN Y, SHAN F. Brief review on physiological and biochemical evaluations of human mental workload[J]. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, 2012, 22(3):177-187.