

doi: 10.7690/bgzdh.2023.01.013

# 导纳控制算法在主动侧杆系统中的应用

郑涛, 王东辉, 杨光, 孟凡军

(航空工业西安飞行自动控制研究所, 西安 710065)

**摘要:** 为解决主动侧杆系统操作平顺性的问题, 对柔顺控制算法里的导纳控制算法进行分析。将柔顺控制技术运用到主动侧杆系统中, 用来优化主动侧杆系统中杆力与杆位置的关系; 将导纳控制算法运用到主动侧杆系统中, 提高主动侧杆系统的运动柔顺性, 达到优化杆力和杆位移的目的。仿真验证结果表明: 该算法能提高飞行员输入推力指令的带宽, 提高飞机的操纵品质。

**关键词:** 主动侧杆系统; 柔顺控制技术; 导纳控制算法

**中图分类号:** TJ85 **文献标志码:** A

## Application of Admittance Control Algorithm in Active Side Stick System

Zheng Tao, Wang Donghui, Yang Guang, Meng Fanjun

(AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of the ride comfort of the active side stick system, the admittance control algorithm in the compliance control algorithm is analyzed. The compliance control technology is applied to the active side stick system to optimize the relationship between the stick force and the stick position in the active side stick system, and the mobility control algorithm is applied to the active side-stick system to improve the motion compliance of the active side-stick system, so as to achieve the purpose of optimizing the stick force and displacement. The simulation results show that the algorithm improves the bandwidth of the thrust command input by the pilot and improves the handling qualities of the aircraft.

**Keywords:** active side stick system; compliance control technology; admittance control algorithm

### 0 引言

飞机的操纵系统历经长时间的发展, 随着飞机操纵系统的不断发展, 为提高飞机操纵品质以及飞行质量, 飞机主动侧杆已成为当前研究热点<sup>[1]</sup>。

在电传操纵系统阶段, 大部分飞机上使用的是被动驾驶杆系统。这种驾驶杆上反作用力的设置仅仅与驾驶杆的角位移相关, 没有与飞机的飞行状态建立联系。20世纪60年代中期, 美国发展了一种新的飞机设计技术—主动驾驶杆技术(active control technology, ACT), 由此研制的主动驾驶杆<sup>[2-3]</sup>最终改变了这一局面。为解决主动侧杆系统操作平顺性的问题, 需要提高主动侧杆的操纵品质, 优化杆力和杆位移之间的关系。笔者将导纳控制算法运用到主动侧杆系统中, 在Matlab中搭建相关模型进行研究, 将杆力信号通过导纳控制器转化成杆位移信号, 并作为输入信号输入到主动侧杆伺服系统中。

### 1 主动侧杆系统

#### 1.1 主动侧杆系统组成<sup>[4]</sup>

飞机主动侧杆如图1所示。



图1 主动侧杆

主动侧杆系统主要包括电机、角位置传感器、电机驱动电路、杆力传感器、控制器、无源弹簧和主板, 如图2所示。位置传感器安装在电机尾轴处, 测量电机转子和主动侧杆手柄的位置, 电机用于给侧杆手柄施加反驱力或拖动侧杆手柄旋转; 杆力传感器安装在手柄与侧杆杆体之间, 用来测量手柄力。

#### 1.2 永磁同步三相电机模型

本文中使用的电机为永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM), 三相PMSM的矢量数学模型表达式为:

$$u_r = Ri_r + d\varphi_r/dt + j\omega_e\varphi_r; \quad (1)$$

收稿日期: 2022-09-20; 修回日期: 2022-10-28

作者简介: 郑涛(1996—), 男, 新疆人, 硕士, 从事导航、制导与控制研究。E-mail: 939965721@qq.com。

$$\varphi_r = \varphi_f + L_s i_r ; \quad (2)$$

$$T_e = 3p_n(\varphi_d i_q - \varphi_q i_d)/2 = 3p_n \varphi_f i_q / 2 。 \quad (3)$$

磁链幅值的表达式为：

$$d\varphi_r/dt = u_d - Ri_d 。 \quad (4)$$

仿真实现所用的 PMSM 参数如表 1 所示。

表 1 永磁同步三相电机的基本参数

| 参数                        | 取值                    |
|---------------------------|-----------------------|
| 相数                        | 3.0                   |
| 定子相电阻/ohm                 | 0.1                   |
| 电枢电感/mH                   | 8.5                   |
| 磁链/(V·S)                  | 0.021235              |
| 转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> ) | 3.23×10 <sup>-4</sup> |
| 极对数                       | 4.0                   |

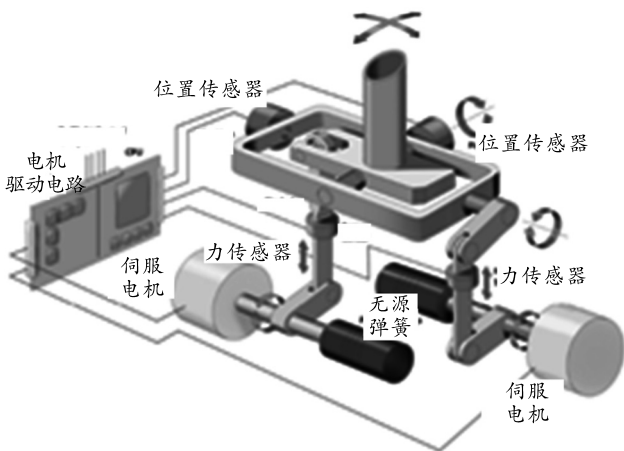


图 2 主动侧杆系统构架

## 2 柔顺控制算法研究

为优化杆力和杆位移的关系，解决主动侧杆系统操作平顺性的问题，研究柔顺控制算法很有必要。简单来讲，柔顺控制系统就是在普通控制系统的基础上，对接触力或者接触位置进行动态的反馈控制<sup>[5]</sup>，在基础的位置控制模式上使主动侧杆系统具有相应的运动柔顺性<sup>[6]</sup>，以增强主动侧杆系统对环境的适应性。笔者主要对柔顺算法中的导纳控制算法进行研究。在柔顺控制算法中，导纳控制是根据产生的力偏差，来计算系统内环位置控制对应的位置修正量<sup>[7-9]</sup>，进而实现控制系统控制力和位置的关系。

根据导纳控制算法的原理可知，假设末端在正确的位置时目标接触力应该为 0，则末端力传感器检测的力直接转换为力误差作为导纳控制量输入，通过导纳控制器，输出位置修正量修正初始位置，内环位置控制器仍正常运行<sup>[10]</sup>。导纳控制器基本控制原理为：

$$M\Delta\ddot{x} + B\Delta\dot{x} + K\Delta x = F 。 \quad (5)$$

在导纳控制中：输入的是力，通过杆力传感器获得；输出的是位移，通过拉普拉斯变换，将上式变为：

$$X = F/(Ms^2 + Bs + K) 。 \quad (6)$$

式中： $M$  为加速度偏差对运动的控制系数； $B$  为速度偏差对运动的控制系数； $K$  为位置偏差对运动的控制系数。整个系统流程如图 3 所示。

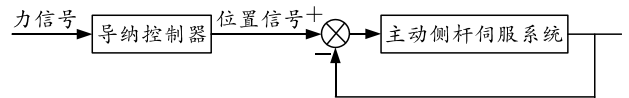


图 3 主动侧杆系统流程

## 3 仿真实验

在 Matlab 中搭建模型对上一节所讲述的导纳算法进行仿真实验。本文中主动侧杆与电机侧的折算比为 50:1。

### 3.1 比例控制器仿真实验

本文中，未使用导纳控制算法之前，为了优化杆力和杆位移的关系，使用的是比例控制器，比例控制器的基本原理为：

$$F = K\Delta x 。 \quad (7)$$

式中  $K$  为位置偏差对运动的控制系数。

在 Matlab 里搭建仿真模型：给侧杆分别输入 10 N 的阶跃力信号，幅值为 10，频率为 1 Hz 的正弦信号；幅值为 10，频率为 3 Hz 的正弦信号；幅值为 10，频率为 5 Hz 的正弦信号。仿真波形如图 4—7 所示。虚线代表通过比例控制器的位置信号，实线代表位置反馈信号。

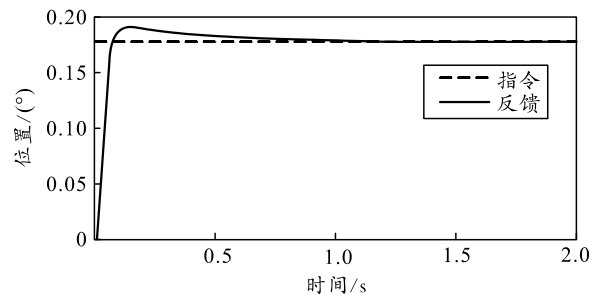


图 4 阶跃信号仿真波形

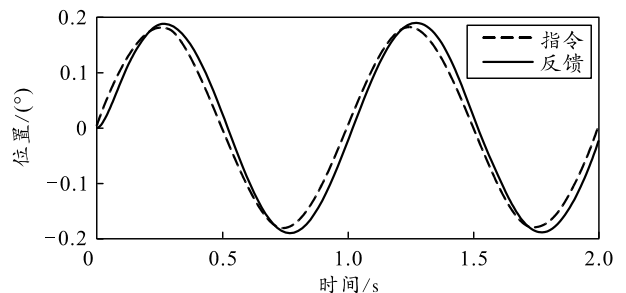


图 5 1 Hz 仿真信号波形

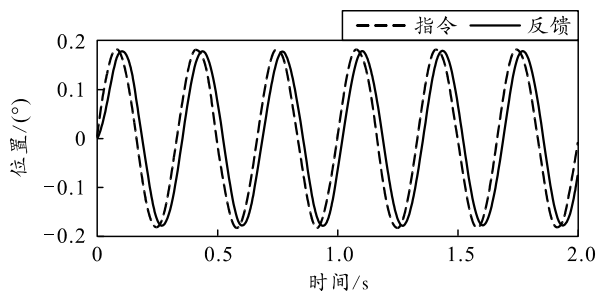


图 6 3 Hz 仿真信号波形

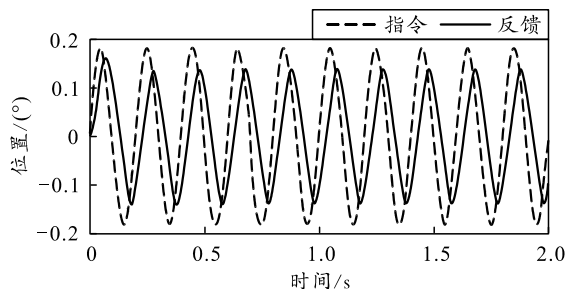


图 7 5 Hz 仿真信号波形

仿真结果：当输入 10 N 的阶跃信号时，仿真结果如表 2 所示。输入幅值为 10，频率为 1 Hz 的正弦信号；幅值为 10，频率为 3 Hz 的正弦信号；幅值为 10，频率为 5 Hz 的正弦信号时，仿真结果如表 3 所示。

表 2 阶跃信号仿真结果

| 超调量/% | 上升时间/s |
|-------|--------|
| 4.7   | 0.146  |

表 3 不同频率正弦信号仿真结果

| 频率/Hz | 幅值/%     | 相位滞后/(°) |
|-------|----------|----------|
| 1     | 3.5(增加)  | 14.93    |
| 3     | 4.3(衰减)  | 30.40    |
| 5     | 34.5(衰减) | 57.60    |

### 3.2 导纳控制器仿真实验验证

根据上节的导纳控制算法，在 Matlab 里搭建仿真模型。给侧杆分别输入 10 N 的阶跃力信号，幅值为 10，频率为 1 Hz 的正弦信号；幅值为 10，频率为 3 Hz 的正弦信号；幅值为 10，频率为 5 Hz 的正弦信号。仿真波形如图 8—11 所示。虚线代表通过导纳控制器的位置信号，实线代表位置反馈信号。

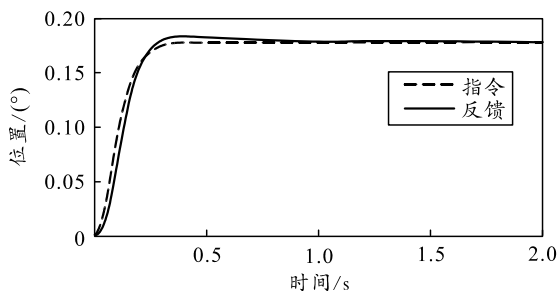


图 8 阶跃信号仿真波形

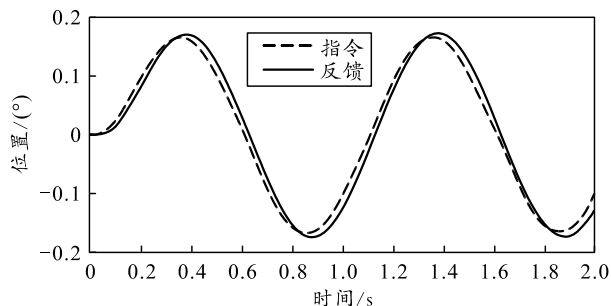


图 9 1 Hz 仿真信号波形

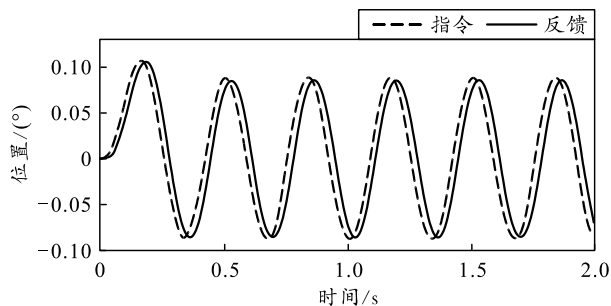


图 10 3 Hz 仿真信号波形

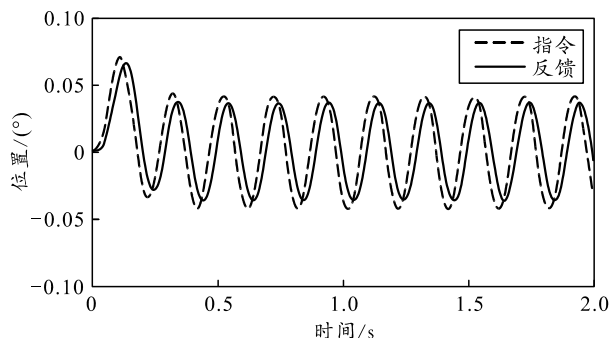


图 11 5 Hz 仿真信号波形

仿真结果：当输入 10 N 的阶跃信号时，仿真结果如表 4 所示。输入幅值为 10，频率为 1 Hz 的正弦信号；幅值为 10，频率为 3 Hz 的正弦信号；幅值为 10，频率为 5 Hz 的正弦信号时，仿真结果如表 5 所示。

表 4 阶跃信号仿真结果

| 超调量/% | 上升时间/s |
|-------|--------|
| 2.6   | 0.267  |

表 5 不同频率正弦信号仿真结果

| 频率/Hz | 幅值/%     | 相位滞后/(°) |
|-------|----------|----------|
| 1     | 2.5(增加)  | 8.15     |
| 3     | 3.2(衰减)  | 25.50    |
| 5     | 14.1(衰减) | 31.68    |

### 3.3 仿真分析

当输入 10 N 的阶跃力信号时，由比例控制器和导纳控制器的仿真波形和仿真结果可知，通过比例控制器产生的位置反馈信号的超调量为 4.7%，通过导纳控制器产生的位置反馈信号的超调量为 2.6%，

说明相比于比例控制器而言，位置信号通过导纳控制器之后产生的超调量更小。当输入相同幅值、不同频率的正弦信号时，由比例控制器和导纳控制器的仿真波形和仿真结果可知，在输入相同频率的力信号时，通过导纳控制器产生的位置反馈信号的幅值衰减和相位滞后的程度均优于通过比例控制器的信号，当输入 1 Hz 和 3 Hz 的正弦信号时，通过 2 种控制器产生的位置反馈信号的幅值和相位滞后程度区别不大，导纳控制器略胜于比例控制器；当输入 5 Hz 的正弦信号时，通过比例控制器产生的位置反馈信号幅值衰减了 34.5%，相位滞后了 57.6°，已不满足主动侧杆系统对位置跟踪的要求。通过导纳控制器产生的位置反馈信号幅值衰减了 14.1%，相位滞后了 31.68°。由此可知，随着输入信号频率的增加，导纳控制器明显优于比例控制器。

#### 4 结论

从仿真波形和仿真结果来看，相比于比例控制器来说，主动侧杆通过导纳控制器后，位置跟踪性能较好，位置反馈信号能够及时跟上导纳控制器输出得到位置信号，并且随着输入信号频率的增加，导纳控制器的优势越来越明显，说明将导纳控制算法运用到主动侧杆系统中，输入信号的带宽进一步得到提高，提高了飞机的操纵品质。该研究对以后

\*\*\*\*\*

(上接第 50 页)

#### 参考文献：

[1] 张余清, 刘志远. 美国军事物联网及应用[J]. 智能处理与应用, 2017(2): 108-111.

[2] 张小冬, 陈齐贵, 刘晓琦, 等. 军事物联网技术初探[J]. 科技创新与应用, 2015(25): 96.

[3] 张云峰. 物联网技术在军事领域中的应用分析[J]. 网络安全技术与应用, 2021(3): 127-129.

[4] 赵平, 黄靖. 全面深化后勤改革的目标任务[J]. 后勤学术, 2016(2): 66-76.

的研究具有一定的参考价值。

#### 参考文献：

[1] 陈悦. 飞机主动侧杆高精度杆力控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.

[2] 王欢. 飞机主动侧杆控制方案的研究与设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

[3] 李丽. 基于自适应技术的侧杆操纵研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.

[4] SRUIZ F, PHAM Q. A framework for fine robotic assembly[C]//Proc of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA). Sweden: IEEE, 2016: 421-426.

[5] UEHARA A F. Use of active sidesticks in multi-crewcommercial fly-by-wire airplane[D]. Köln: German Aerospace Center, 2014.

[6] 洪坤. 灵巧臂柔顺控制技术研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2014: 2-8.

[7] 樊江龙. 抛光机器人动力学建模与柔顺控制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.

[8] PERRUSQUÍA A, WENY, ASORIA. Position/force control of robot manipulators using reinforcement learning[J]. The Industrial Robot, 2019, 46(2): 267-280.

[9] 刘宏, 蒋再男, 刘业超. 空间机器人技术发展综述[J]. 载人航天, 2015, 21(5): 435-443.

[10] 邓名第. 面向人机交互的外骨骼机器人基于学习的控制策略[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.

[5] 王芳, 周磊. 云计算在军队信息化建设中的应用[J]. 数字通信世界, 2018(2): 192.

[6] 杨正洪, 周发武. 云计算和物联网[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 7-33.

[7] 罗海东, 高殿森, 李晓媛, 等. 云计算与物联网技术在高寒山地野营保障中的应用[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(3): 80-83.

[8] 沈寿林. 美军弹药保障研究[M]. 北京: 军事科学出版社, 2010: 115-116.

[9] 李志亮, 邢国平, 杨枕, 等. 基于物联网技术的战场感知体系研究[J]. 兵工自动化, 2012, 31(8): 62-66.