

doi: 10.7690/bgzdh.2022.11.013

加权最小二乘融合技术在主动侧杆中的应用

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: 针对主动侧杆伺服跟踪系统中角位移传感器 (rotary variable differential transformer, RVDT) 和旋转变压器去除噪声的问题, 提出一种加权最小二乘 (weighted least squares, WLS) 算法。以主动侧杆系统为研究对象, 在最小二乘算法、递推最小二乘算法的基础上, 对主动侧杆伺服跟踪系统进行分析, 通过最小二乘算法、递推最小二乘算法、加权最小二乘算法融合算法进行仿真。通过对比 3 种融合算法的仿真结果, 结果证明: 该算法使伺服系统获得了更精确的位置信息, 具备去除噪声的优越性以及可行性。

关键词: 主动侧杆伺服系统; 最小二乘融合算法; 递推最小二乘融合算法; 加权最小二乘算法

中图分类号: TP275 **文献标志码:** A

Application of Weighted Least Squares Fusion Technique in Active Side Stick

Zheng Tao, Wang Donghui, Yang Guang, Meng Fanjun

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

Abstract: A weighted least squares (WLS) algorithm is proposed to reduce the noise of rotary variable differential transformer (RVDT) and resolver in active side stick servo tracking system. Based on the least squares algorithm and the recursive least squares algorithm, the active side stick system is studied. The active side stick servo tracking system is analyzed and simulated by the least squares algorithm, the recursive least squares algorithm, the WLS algorithm and the fusion algorithm. By comparing the simulation results of the 3 fusion algorithms, the results show that the algorithm can make the servo system obtain more accurate position information, and has the superiority and feasibility of removing noise.

Keywords: active side stick servo system; least squares fusion algorithm; recursive least squares fusion algorithm; weighted least squares algorithm

0 引言

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, 飞机主动侧杆成为当前研究热点^[1]。侧杆类型可分为主动侧杆和被动侧杆 2 种。大部分飞机在电传操纵系统阶段, 使用的是被动驾驶杆系统。这种驾驶杆上的反作用力只与飞机驾驶杆角位移有关, 并未和飞机的飞行状态建立起联系。直到 20 世纪中后期, 美国科研人员研究出了一种新型飞行器设计技术—主动驾驶杆技术 (active control technology, ACT), 由此研发的主动驾驶杆, 具有可编程升级等优点^[2-3], 可弥补被动驾驶杆的缺陷。主动侧杆不仅可以提升飞机的操纵特性, 而且能使飞机的飞行品质得到进一步提高。

主动侧杆是一个高度机电一体化的产品^[4], 其伺服控制是主动侧杆技术的核心问题。伺服系统也常被称作随动系统。作为一个反馈控制系统, 要求可以精确、快速地实现控制过程, 包括被控对象的位置、方位、状态等。为能获得更精确的位置信息,

将角位移传感器 (RVDT) 和旋转变压器得到的位置信息进行多信息融合, 去除由传感器带来的噪声, 进而得出一个更精确的位置信息, 满足主动侧杆伺服系统位移跟踪的要求。

1 主动侧杆伺服跟踪系统

美军 F16C 侧杆如图 1 所示。



图 1 F16C 侧杆

主动侧杆伺服系统是主动侧杆的技术核心, 主动侧杆的各项主要功能都由主动侧杆伺服系统实现,

收稿日期: 2022-07-10; 修回日期: 2022-08-08

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。

主动侧杆伺服系统是一个多回路、多变量耦合的系统，要求具有高精度的伺服跟踪性能。

1) 多回路。

主动侧杆伺服系统是一个多回路系统，主要包括电机电流回路、侧杆位置反馈回路等。

2) 多变量耦合。

多变量耦合主要包括俯仰和滚转通道耦合、正副驾驶输入耦合、侧杆控制和自动驾驶系统耦合。

3) 高动态。

主动侧杆伺服跟踪系统需要满足杆位移的快速跟踪响应及高精度需求。

笔者采用的电机为永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM)，其具体参数如表 1 所示。以期望杆位移为输入，经过控制器调节电机电流、转速以及侧杆角速率、位移等多个反馈回路，最终得到主动侧杆的输出杆位移如图 2 所示。

表 1 永磁同步电机参数

电枢电/H	极对数	定子电阻/ohm	转动惯量/(kg·m ²)
0.004 25	4	0.1	3.23e-4

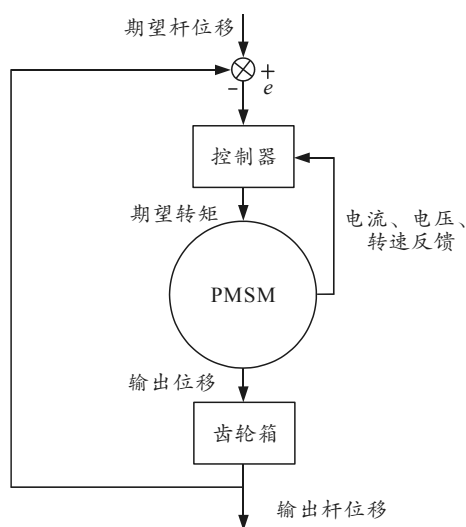


图 2 主动侧杆杆位移伺服跟踪系统

2 融合算法研究

在科技迅猛发展与升级创新的背景之下，传感器技术与数据处理技术逐步成为现代各行各业中不可或缺的重要技术种类之一^[5-6]。在多传感器信息系统中，不同传感器信息的融合主要通过各种具体的融合算法来实现，最终生成一致结果。到目前为止，没有一种信息融合算法能够适用于所有的数据融合处理，要依据具体的应用场合来选用合适的信息融合算法。笔者在最小二乘融合算法、递推最小二乘融合算法的基础上，为进一步优化计算机数据存储

空间，获得更佳的电机位置信息，提出加权最小二乘算法，使得主动侧杆伺服跟踪系统满足杆位移的快速跟踪响应以及高精度要求。

2.1 最小二乘融合算法

设对于随机向量 \mathbf{X} 作 K 次测量得到的结果为：

$$\mathbf{Z}_{(i)} = \mathbf{H}_{(i)}\mathbf{X} + V_{(i)}。 \quad (1)$$

式中： $\mathbf{Z}_{(i)}$ 为量测向量； $\mathbf{H}_{(i)}$ 为观测系统矩阵； $V_{(i)}$ 为噪声误差。

写成矩阵形式为：

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{e}。 \quad (2)$$

残差的平方和为：

$$J = \sum_{i=1}^m e_i^2 = \mathbf{e}^T \mathbf{e}。 \quad (3)$$

求 J 对 $\hat{\mathbf{x}}$ 的偏导数，令其偏导数为 0，可得：

$$\partial J / \partial \hat{\mathbf{x}} = -2(\mathbf{H}^T \mathbf{Z} - \mathbf{H}^T \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}) = 0； \quad (4)$$

$$\mathbf{H}^T \mathbf{Z} = \mathbf{H}^T \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}。 \quad (5)$$

因而 \mathbf{x} 的最小二乘估计值为：

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{Z}。 \quad (6)$$

式中： \mathbf{H} 取单位向量； $\mathbf{Z} = [\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2]^T$ ，其中 \mathbf{Z}_1 为旋转变压器的量测值， \mathbf{Z}_2 为 RVDT 传感器的量测值。

在使用此算法时，需要同时使用所有的量测数据。这使得计算机具有很大的存储空间来存储这些数据，并且计算速度较慢，获得的电机位置欠佳。

2.2 递推最小二乘融合算法

最小二乘融合算法需要同时用到所有量测数据，在计算时不考虑量测数据的时间顺序。当量测数据较多时，要求计算机具有很大的存储空间。然而在实际数据处理过程中，量测数据按照时间顺序逐步给出^[7]。可先处理已经得到的一批数据，得到 \mathbf{x} 的近似估计值，来了新的数据后，再对原来的估计值进行修正，这样可节省计算机的存储空间^[7]。

假定已经进行了 K 次试验，得到 \mathbf{Z} 的 K 个观测值，把观测方程写成矩阵形式：

$$\mathbf{Z}_{(k)} = \mathbf{H}_{(k)}\mathbf{x} + V_{(k)}。 \quad (7)$$

先用最小二乘法处理 K 个观测值，在本课题中 W_k 取为单位阵，可得到 \mathbf{x} 的估值 \widehat{X}_k 为：

$$\widehat{X}_k = (\mathbf{H}_k^T W_k \mathbf{H}_k)^{-1} \mathbf{H}_k^T W_k \mathbf{Z}_{(k)}。 \quad (8)$$

又得到了第 $k+1$ 次的观测值 \widehat{X}_{k+1} 为：

$$\widehat{X}_{k+1} = (\mathbf{H}_{k+1}^T W_{k+1} \mathbf{H}_{k+1})^{-1} * \mathbf{H}_{k+1}^T W_{k+1} \mathbf{Z}_{(k+1)}。 \quad (9)$$

设 $P_K = (\mathbf{H}_k^T W_k \mathbf{H}_k)^{-1}$ ，则

$$P_{k+1} = (H_{k+1}^T W_{k+1} H_{k+1})^{-1} \quad (10)$$

根据矩阵求逆引理可得:

$$P_{k+1} = P_k - P_k H_{k+1}^T * (W_{k+1}^{-1} + H_{k+1} P_k H_{k+1}^T)^{-1} H_{k+1} P_k \quad (11)$$

由式(8)–(10)推出 \widehat{X}_{k+1} 为:

$$\widehat{X}_{k+1} = \widehat{X}_k + P_{k+1} H_{k+1}^T * W_{k+1} (Z_{k+1} - H_{k+1} \widehat{X}_k) \quad (12)$$

由式(11)可知, \widehat{X}_{k+1} 就是在 \widehat{X}_k 的基础上加上与新的观测值 Z_{k+1} 和 $H_{k+1} \widehat{X}_k$ 之差的线性修正项。在进行递推最小二乘时, 必须知道 \widehat{X}_k 和 P_k 的初值。在本课题中设 $\widehat{X}_0 = 0$; $P_0 = 10^6 I$ 。

2.3 加权最小二乘融合算法

在主动侧杆伺服跟踪系统中, 针对去除传感器噪声问题, 为节省计算机存储数据的空间, 减少电机位置反馈的超调量, 获得更准确的位置信息。在之前 2 种算法的基础上, 提出加权最小二乘融合算法去除噪声, 此算法运算速度快, 能有效提高数据精度^[8-10], 并且产生的超调量较小。

设 RVDT 和旋转变压器 2 个传感器的值为 \widehat{X}_1 和 \widehat{X}_2 , 对应的估计误差为 σ_1 和 σ_2 , 考虑线性组合:

$$\hat{X} = W_1 \hat{X}_1 + W_2 \hat{X}_2 \quad (13)$$

式中 W_1 和 W_2 为待定的权重系数, 利用最小二乘算法可得, 当 W_1 和 W_2 满足一定条件时, \hat{X} 无偏即由最小方差经过推导得出, 当 $W_1 = \sigma_2^2 / (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)$, $W_2 = \sigma_1^2 / (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)$ 时, \hat{X} 具有最小方差估计。2 个传感器融合值的估计值为:

$$\hat{X} = \sigma_2^2 / (\sigma_1^2 + \sigma_2^2) \hat{X}_1 + \sigma_1^2 / (\sigma_1^2 + \sigma_2^2) \hat{X}_2 \quad (14)$$

3 仿真验证

在 Matlab 中搭建模型对上节所述的 3 种融合算法进行仿真验证。在验证之前, 对 RVDT 和旋转变压器 2 个传感器的量测噪声进行假设: 1) 各传感器的噪声为白噪声; 2) 量测噪声的分布规律是正态分布的。

经查手册, 本文中的 RVDT 传感器的白噪声方差为 0.054, 旋转变压器的白噪声方差为 0.2。本文中主动侧杆与电机侧的折算比为 50:1。

3.1 未进行融合时仿真验证

在主动侧杆伺服控制系统中, 未进行多传感器信息融合之前, 只靠旋转变压器测得电机转子位置, 在 Matlab 中搭建仿真模型。给侧杆输入 10° 的位置

信号, 仿真波形如图 3 所示。虚线代表输入信号波形, 实线代表反馈波形。

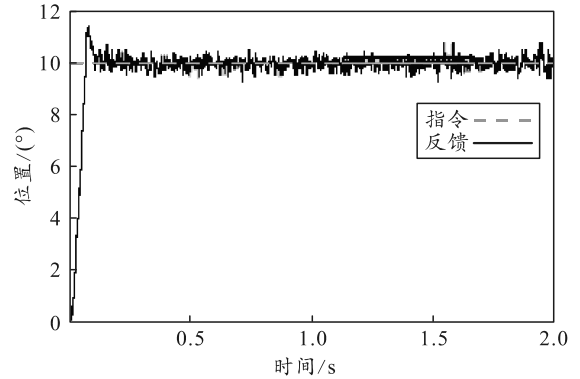


图 3 融合前位置波形

3.2 最小二乘融合算法仿真验证

在 Matlab 里编写 M 文件。给侧杆输入 10° 的位置信号, 仿真结果如图 4 所示。

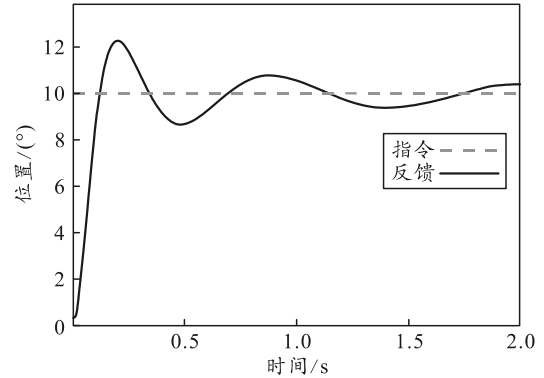


图 4 位置波形

3.3 递推最小二乘融合算法仿真验证

同样在 Matlab 里编写 M 文件。给侧杆输入 10° 的位置信号, 仿真结果如图 5 所示。

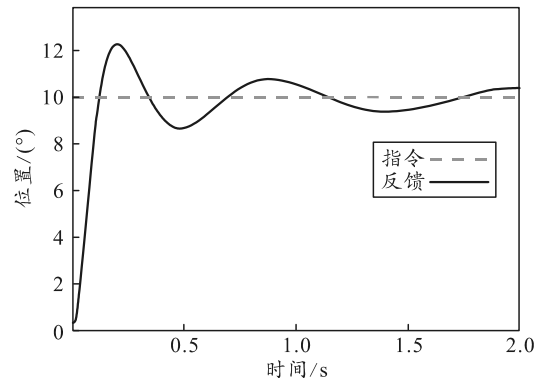


图 5 位置波形

3.4 加权最小二乘融合算法仿真验证

在 Matlab 搭建加权最小二乘模型。给侧杆输入 10° 的位置信号, 仿真结果如图 6 所示。虚线代表输入信号波形, 实线代表反馈波形。

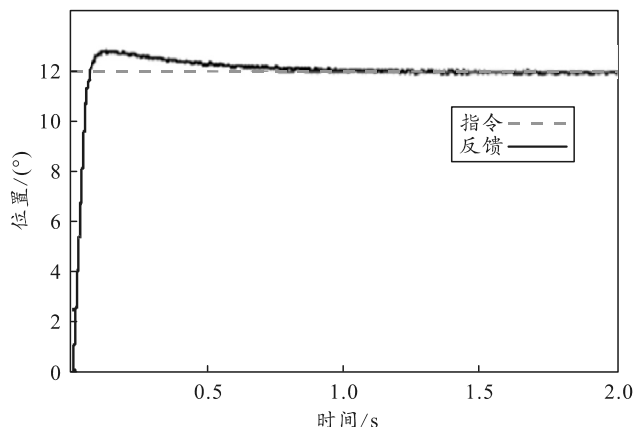


图 6 位置波形

从仿真波形来看，在未进行多信息融合前，主动侧杆反馈的位置波形会有噪声干扰，这会影响到主动侧杆位置的跟踪性能。通过使用 3 种融合算法可以看出，噪声已经被消除。对比 3 种信息融合算法的仿真结果不难看出，使用最小二乘算法和递推最小二乘算法进行多信息融合时，产生了较大的超调，最大超调量分别约为 23.1% 和 22.6%，上升时间分别为 0.116 和 0.119 s，二者的超调量和上升时间几乎相同，位置跟踪性能欠佳，二者的区别是在相同的仿真环境下，最小二乘算法的仿真速度比递推最小二乘算法的仿真速度慢很多。使用加权最小二乘算法时，产生的最大超调量约为 5%，上升时间为 0.016 s。相比于最小二乘融合算法和递推最小二乘融合算法，加权最小二乘融合算法既可以很好地滤除噪声，又不会产生较大的超调，超调量满足本文中对超调量的要求，并且位置跟踪的快速性较好，上升时间也是最小的。

4 结论

笔者主要分析主动侧杆系统中如何消除 RVDT 和旋转变压器噪声的问题，并且针对该问题，在最

小二乘算法、递推最小二乘算法的基础上，提出加权最小二乘算法。通过仿真验证发现，加权最小二乘算法最适用于本文中解决传感器噪声的问题，使用加权最小二乘算法，不仅可以消除主动侧杆系统中 RVDT 和旋转变压器带来的噪声，而且还不需要较大的存储空间来存储量测数据，也能满足主动侧杆系统对位置超调量的要求，还可以获得最佳的位置跟踪性能。该算法解决了主动侧杆系统中传感器噪声问题，证明了其在本文中去除噪声的优越性以及可行性，对以后的研究工作具有参考价值。

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] 郭小朝, 熊端琴, 陆惠良, 等. 国外飞机侧杆驾驶装置的基本参数和设计要求[J]. 人类工效学, 2006, 12(2): 33-35.
- [3] 张旭, 孙永荣, 陈悦. 基于 ILC 算法的飞机主动侧杆位置控制研究[J]. 机械与电子, 2019, 37(12): 42-46.
- [4] 贾会栋. 飞机主动杆结构设计及控制策略研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [5] 王美蕴. 基于多无线传感器的数据融合算法[J]. 电子测试, 2018(8): 73-74.
- [6] 赵玲. 多传感器信息融合技术及其应用[J]. 红外, 2019, 42(1): 21-26.
- [7] 秦秀常. 多传感器融合技术的应用研究[J]. 光源与照明, 2020(12): 44-46, 61.
- [8] 陈玉坤. 多模复合制导信息融合理论与技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [9] 羊肇俊, 曾理. 基于加权最小二乘滤波和引导滤波的铸件 DR 图像融合[J]. 仪器仪表学报, 2020, 42(6): 211-220.
- [10] 李洪伟, 刘兆东, 闵远胜. 多源数据融合方法研究[J]. 核动力工程, 2018, 39(3): 77-80.