

基于神经网络算法的单框架控制力矩陀螺系统复合控制

岳继光¹, 何洪志¹, 吴琛浩¹, 赵雷², 鲁明², 来林²

(1. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 北京控制工程研究所, 北京 100190)

摘要: 提出一种基于双神经网络的前馈-反馈控制系统, 采集单框架控制力矩陀螺系统在不同条件下的运行数据并使用卡尔曼滤波处理, 基于神经网络构建了涵盖控制通道与干扰通道信息的虚拟广义被控对象模型, 由此设计了神经网络前馈补偿器。实现了前馈补偿器-原反馈控制器的复合控制系统, 减少了传统的前馈-反馈复合控制需要精确地获取干扰通道信息的约束, 能够克服单框架控制力矩陀螺系统存在的复杂干扰对控制性能的影响。仿真结果表明了方案能够提升系统稳态精度, 减小稳态误差, 改善控制动态性能。

关键词: 单框架控制力矩陀螺系统; 神经网络; 补偿控制; 前馈-反馈控制

中图分类号: TP399

文献标志码: A

reduces the constraint that the traditional feedforward-feedback composite control needs to obtain the disturbance channel information accurately, and can overcome the influence of the complex disturbance existing in the SGCMG system on the control performance. The simulation results show that the scheme can improve the steady-state accuracy of the system, reduce the steady-state error and improve the control dynamic performance.

Key words: single gimbal control moment gyro; neural network; compensated control; feedforward feedback composite control

Compound Control of Single Gimbal Control Moment Gyro Based on Neural Network

YUE Jiguang¹, HE Hongzhi¹, WU Chenhao¹, ZHAO Lei², LU Ming², LAI Lin²

(1. College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper presents a feedforward-feedback control system based on the double neural network. The operation data of the single gimbal control moment gyro (SGCMG) system under different conditions is collected and processed by Kalman filter. A virtual generalized controlled object model covering the information of the control channel and the disturbance channel is constructed based on neural network, and a neural network feedforward compensator is designed. The composite control system of feedforward compensator and original feedback controller is realized, which

近年来我国的航天事业已进入世界先进行列^[1]。空间运动伺服机构是航天器的关键部件, 与地面的伺服机构不同, 需要工作在无重力、动基座环境, 具有运动控制强耦合、多源激励低阻尼等特点。这些特点给空间高动态、高精度的运动控制带来困难。单框架控制力矩陀螺 (single gimbal control moment gyro, SGCMG) 系统是空间运动伺服机构的核心部件, 通过一个高速旋转的转子获得一定的角动量, 改变角动量的方向对外输出力矩, 能够输出连续大力矩。SGCMG在国际上已经得到广泛应用, 成为长寿命大型航天器首选的执行机构。单框架控制力矩陀螺系统相关控制技术是我国未来航天事业的关键技术之一^[2]。

2011年9月, 天宫一号目标飞行器成功发射, 实现了我国自主研发控制力矩陀螺的首次在轨应用^[3-5]。北京控制工程研究所在控制力矩陀螺框架伺服系统抗干扰和控制精度方面的研究工作取得了突破性进展^[6]。北京航空航天大学针对控制力矩陀螺的控制策略, 在抑制系统所受扰动方面做了很多研究^[7-8]。文献[9]提

收稿日期: 2020-11-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2018YFB1700902); 中国空间技术研究院 CAST 创新基金项目 (No. 2018CAST22)

第一作者: 岳继光(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为先进测控理论、机电一体化技术与复杂系统可靠性研究等。E-mail: yuejiguang@tongji.edu.cn.

通信作者: 吴琛浩(1993—), 男, 博士生, 主要研究方向为先进测控技术、复杂系统故障诊断与机器学习等。E-mail: 1152448@tongji.edu.cn



出了一种基于遗传算法拟双环-锁相环的双模控制方法,引入干扰力矩补偿控制,实现了干扰情况下的稳速控制。文献[10]对柔性隔振结构下的控制力矩陀螺,搭建了数学模型并完成了仿真分析。由于单框架控制力矩陀螺系统的强耦合非线性特性,在使用传统控制方法时存在一定局限性。在制定控制策略时多针对具体问题采用与之相应的方案,针对单框架控制力矩陀螺系统强耦合非线性的特征,需要研究相应的控制方法,有效地提升系统实用性^[11]。

1 虚拟广义被控对象模型的建立

图1为单框架控制力矩陀螺系统的直接驱动架构控制系统。由于空间限制等因素,系统中只安装了一个角位置传感器和电机电流测量装置,使得挠性高动态、时变载荷、宽频扰振、结构和电气非线性特性、相互间强耦合等因素难以直接或间接测量,传统控制方法具有很大局限性。

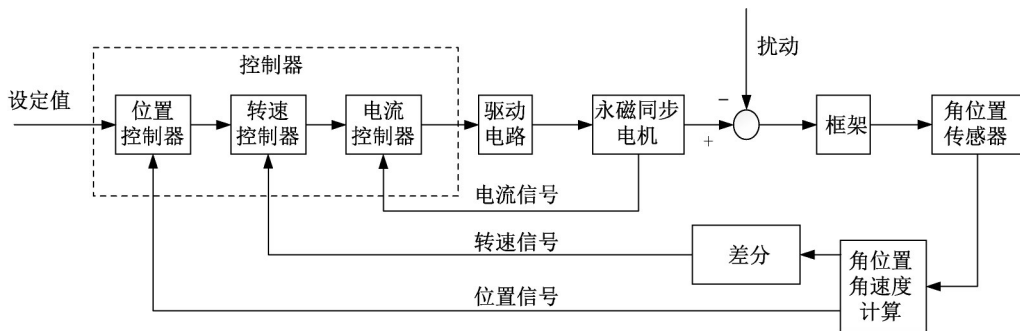


图1 SGCMM 框架伺服系统示意图

Fig. 1 Diagram of SGCMM gimbal servo system

在图1所示的SGCMM框架伺服系统中,将永磁同步电机、框架以及角位置传感器三部分作为广义被控对象。对于广义被控对象,输入信号为永磁同步电机励磁电流,输出信号包括框架位置、框架转速以及转子电机电流。采用神经网络建立对应输入输出关系的虚拟广义被控对象模型。

1.1 训练数据采集与虚拟广义被控对象模型训练方案

本文采集了500 N·ms单框架控制力矩陀螺系统在不同条件下的运行数据,包括稳定的刚性条件和对系统施加不同频率(25~80 Hz)振动的柔性条件,采样周期为30 ms,得到系统在不同状态下的运行数据。

选择永磁同步电机励磁电流作为神经网络的输入,输出层包括框架位置,框架转速以及转子电机电流。考虑到框架位置与框架转速之间为积分关系,根据实际需求,可以将输出层分为包含框架位置与不包含框架位置两种。最终确定虚拟广义被控对象模型训练方案如下:

(1)输出层为框架位置、框架转速及转子电机电流,输入层为励磁电流与前 k 时刻的输出层数据(其中 $k=0, 1, 2, \dots$)。

(2)输出层为框架转速及转子电机电流,输入层为励磁电流与前 k 时刻的输出层数据(其中 $k=0, 1, 2, \dots$)。

模型的训练使用反向传播(back ground, BP)神经网络。神经网络训练过程中,按照8:1:1的比例将训练数据划分为训练集、验证集以及测试集;设置最大迭代次数为1 000,学习速率为0.1,期望误差为 10^{-7} ,隐含层节点数根据经验公式及实验确定,在满足精度的前提下,取尽可能少的隐含层节点数。

1.2 训练数据预处理

采集得到的训练数据存在测量噪声,为更好地训练广义被控对象,使其训练结果更接近系统真实情况,采用卡尔曼滤波^[12]对训练数据进行滤波处理。

卡尔曼滤波是一种最优状态估计方法,能够利用上一时刻最优估计以及测量值来估计当前状态,得到更接近真值的测量值。通过卡尔曼滤波分别处理刚性及柔性(本文所述用于构建虚拟广义被控对象模型的柔性条件为50 Hz振动条件下系统运行数据)两种条件下的测量数据,图2给出了刚性条件数据的滤波结果。

图2所示滤波结果表明,经过卡尔曼滤波处理后的数据能够有效地平滑数据曲线,去除毛刺,使得数据更接近系统运行真值,为下一步虚拟广义被控对象模型的建立提供较为准确的训练数据。

1.3 虚拟广义被控对象模型训练结果

根据1.1节训练方案,对刚性条件及柔性条件下的数据进行训练,在训练过程中,选择 $k=0, 1, 3$ 构建了不同结构的神经网络模型。图3~图5分别给出了

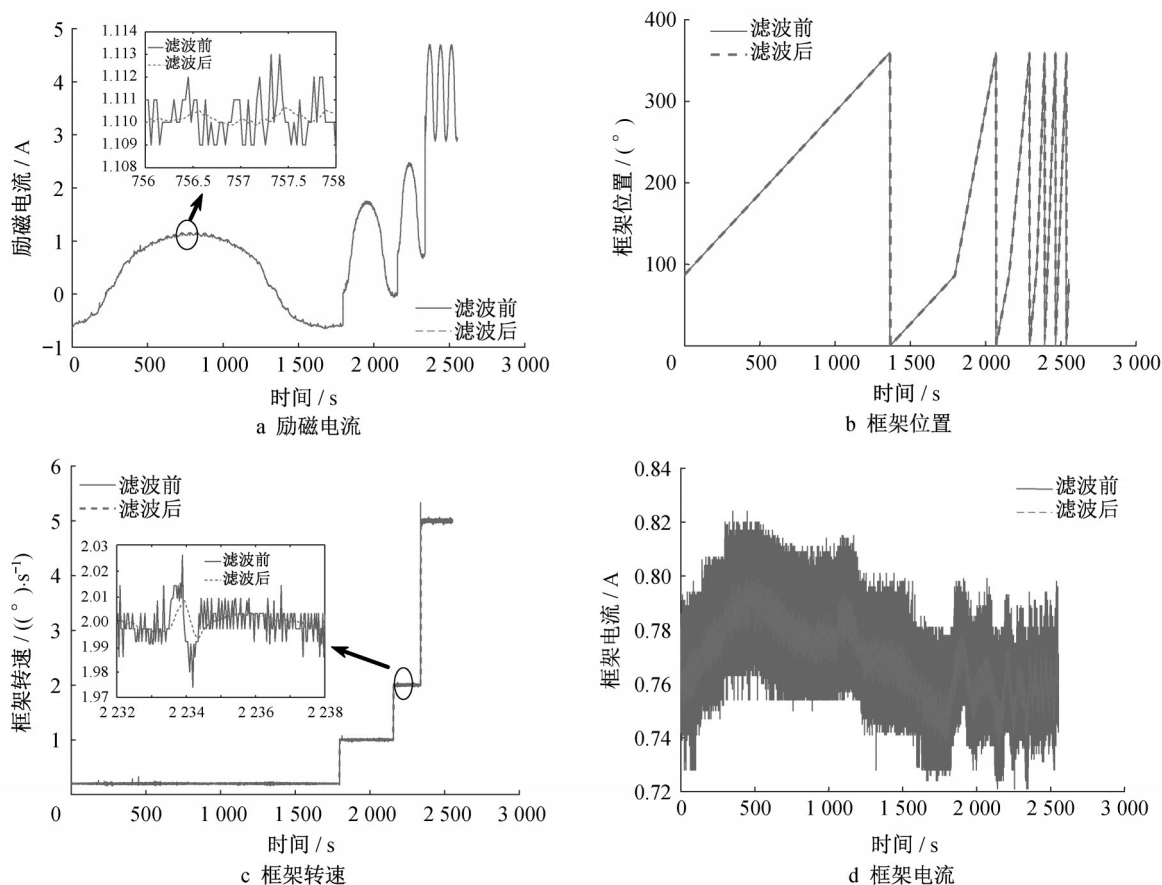
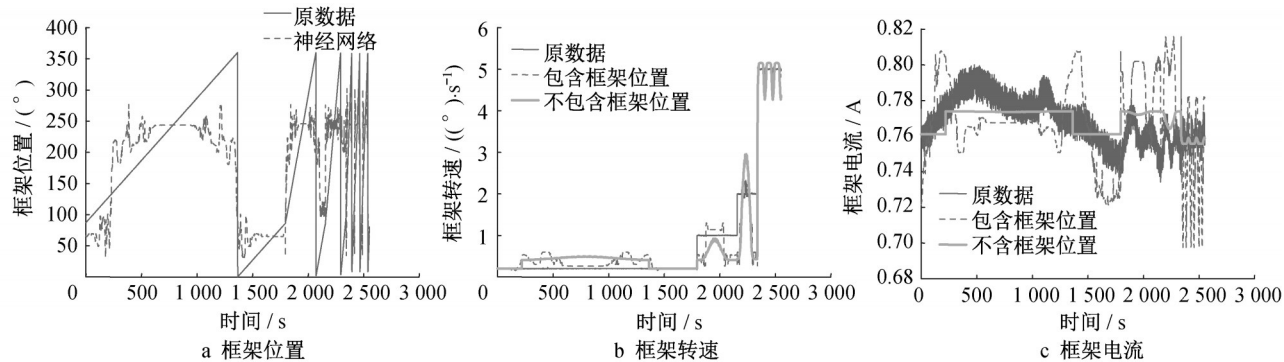


图2 刚性条件数据卡尔曼滤波结果

Fig. 2 Kalman filtering results of flexible conditions

刚性条件下 $k=0,1,3$,即输入层分别为励磁电流、励磁电流与前一时刻输出层、励磁电流与前三时刻输出层

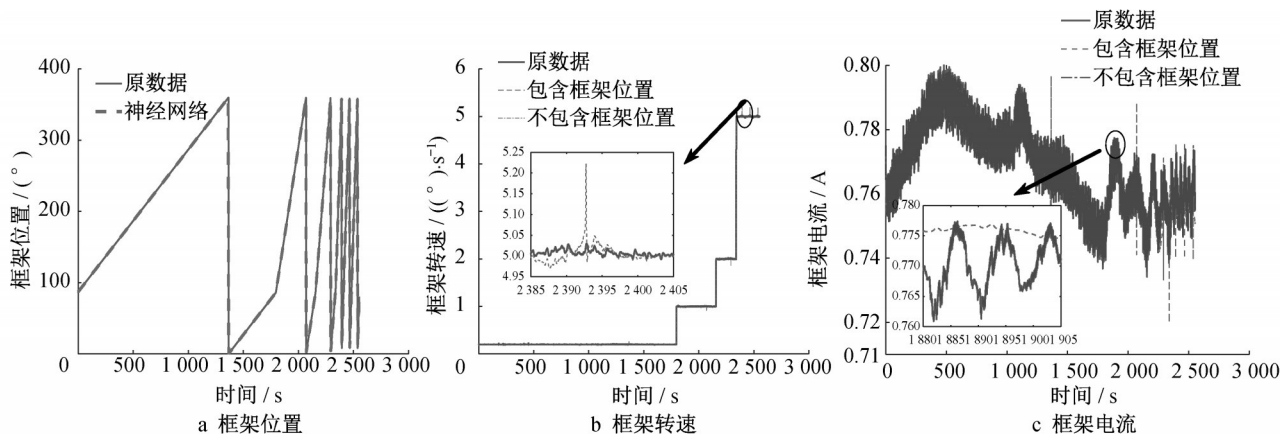
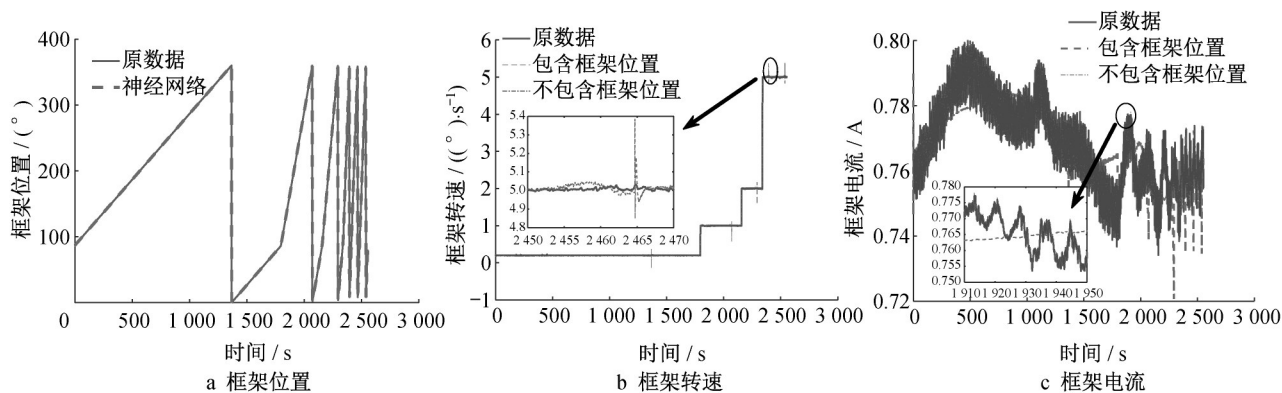
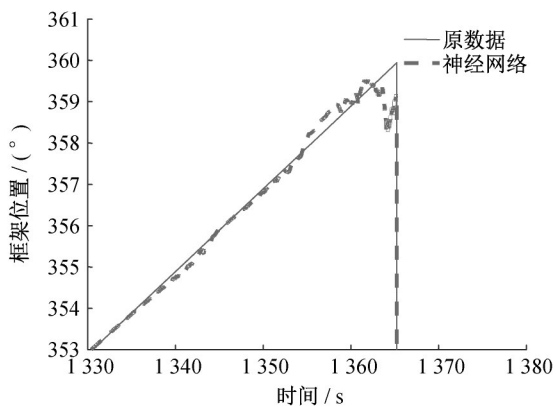
图3 刚性条件下模型训练结果($k=0$)Fig. 3 Model training results under rigid conditions ($k=0$)

1.4 模型训练结果

分析1.3节模型训练结果,当输出层包含框架位置时,在实际场景中, 0° 与 360° 为同一个位置,在数据上会出现一个 0° 与 360° 的跳变,使得在模型训练过程中神经网络的结构更为复杂,且会导致跳变处精度不足,如图6所示。

1.1节提到框架位置与框架转速之间为积分关系,因此在包含框架转速的前提下可以省略对框架位置的训练。当输出层不包含框架位置时可进一步简化神经网络模型,解决该问题。

从图3~图5可以看出,使用单输入多输出($k=0$)的神经网络模型无法有效拟合测试数据;当 $k=1$ 或3

图4 刚性条件下模型训练结果($k=1$)Fig. 4 Model training results under rigid conditions ($k=1$)图5 刚性条件模型训练结果($k=3$)Fig. 5 Model training results under rigid conditions ($k=3$)图6 框架位置跳变处局部放大图(刚性, $k=1$)Fig. 6 Local view of gimbal position jump (rigid, $k=1$)

时,能够较为精确地拟合测试数据。为简化模型结构,最终选择 $k=1$,得到输入层为励磁电流与前一时刻的框架转速及转子电机电流、输出层为框架转速及转子电机电流的神经网络模型。使用该训练方案可以得到柔性(50 Hz振动)条件下的虚拟广义被控对象模型。

在完成模型训练后,本文使用训练得到的柔性条件下的虚拟广义被控对象模型测试其他振动条件

下的系统数据,用于验证构建虚拟广义被控对象模型的有效性。表1给出了500 N·ms单框架控制力矩陀螺系统不同条件下的运行数据,经过柔性条件(50 Hz)训练模型的输出与实际输出之间的误差。

根据表1数据可以看出,训练得到的虚拟广义被控对象模型能够有效拟合不同条件下的系统运行数据。其中在70 Hz存在最大误差,原因在于该部分数据存在负转速状态,而本文训练使用数据为正转速转态,在正转速条件下符合要求。最后得到的虚拟广义被控对象模型如图7所示。

2 基于补偿控制器的前馈-反馈控制系统

在图1所示的控制系统中,由于被控对象存在着强耦合及非线性特性,会直接影响到原控制方案的控制效果,难以弥补或消除外界多源干扰的影响。本文在不改变原控制系统结构的基础上,根据前馈控制的思想,引入补偿控制器,加入到原控制系统

表 1 柔性条件(50 Hz)模型拟合不同条件数据

Tab. 1 Fitting of different conditional date by flexible condition model(50 Hz)

状态	测量项	均方误差/ 10^{-4}	平均误差	最大误差	状态	测量项	均方误差	平均误差	最大误差
25 Hz	框架转速/ $((^{\circ})\cdot\text{s}^{-1})$	2.412 0	0.008 7	0.931 2	55 Hz	框架转速/ $((^{\circ})\cdot\text{s}^{-1})$	0.002 8	0.025 5	0.789 2
	框架电流/mA	8.488 1	0.020 7	0.716 2		框架电流/(mA)	$9.240\ 9\times10^{-4}$	0.021 3	0.057 6
35 Hz	框架转速/ $((^{\circ})\cdot\text{s}^{-1})$	2.006 0	0.008 4	0.699 5	65 Hz	框架转速/ $((^{\circ})\cdot\text{s}^{-1})$	$2.552\ 6\times10^{-4}$	0.009 2	0.803 5
	框架电流/(mA)	6.135 8	0.020 8	0.580 0		框架电流/mA	$6.097\ 5\times10^{-4}$	0.020 6	0.385 7
45 Hz	框架转速/ $((^{\circ})\cdot\text{s}^{-1})$	3.588 7	0.012 3	0.972 8	70 Hz	框架转速/ $((^{\circ})\cdot\text{s}^{-1})$	0.013 3	0.017 2	6.754 5
	框架电流/mA	6.000 0	0.019 6	2.880 0		框架电流/mA	0.002 6	0.023 0	2.029 7

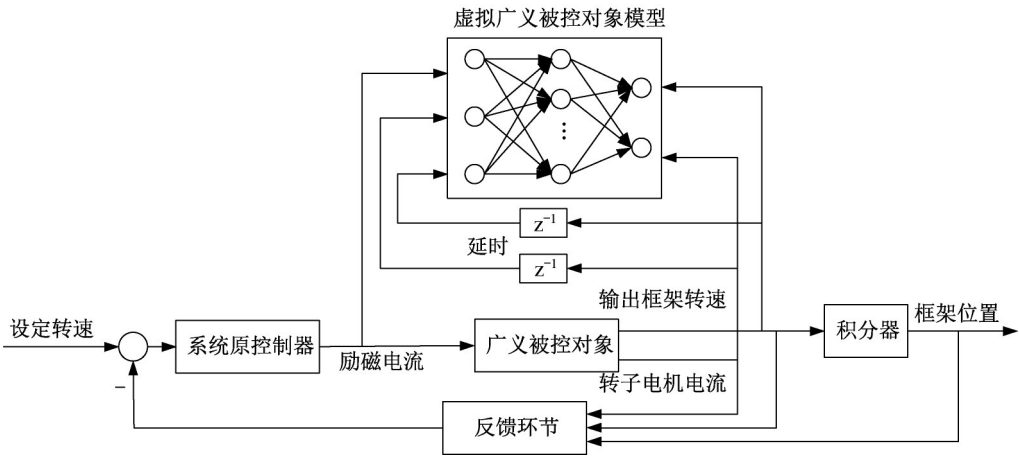


图 7 虚拟广义被控对象模型

Fig. 7 Virtual generalized controlled object model

中,实现基于补偿控制器的前馈-反馈控制系统。

2.1 前馈控制方案

从图1中可以看出,广义被控对象的控制变量为励磁电流,为了弥补外界多源干扰的影响,拟通过在系统控制器输出的励磁电流中加入控制增量,以实现对干扰因素的抑制作用。本文将刚性条件下的系统

看作是处于稳定运行状态,近似于无干扰,柔性条件下的系统视为受到外界干扰,通过两种条件下的差异分离出外界干扰对系统的影响。补偿控制器输出控制增量弥补该部分干扰。设计补偿控制器如下:

图8、图9分别为刚性条件和柔性条件下广义被控对象控制框图。

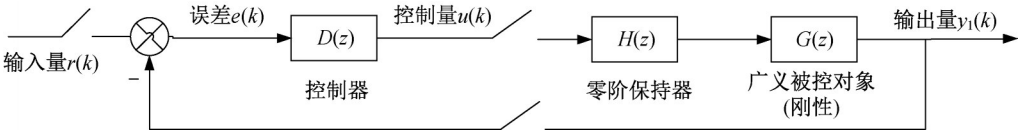


图 8 刚性条件下广义被控对象控制框图

Fig. 8 Control block diagram of generalized controlled object under rigid conditions

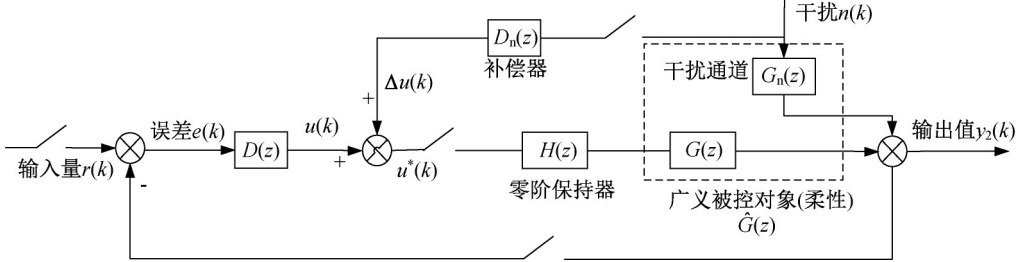


图 9 柔性条件下广义被控对象控制框图

Fig. 9 Control block diagram of generalized controlled object under flexible conditions

图中, $G(z)$ 表示刚性广义被控对象等效被控对象, $\hat{G}(z)$ 为柔性广义被控对象等效被动对象。

刚性条件下: 输入 $u(k)$, 输出 $y_1(k)$, 有:

$$u(k) * G(k) = y_1(k)$$

柔性条件下: 输入 $u(k)$ 并考虑干扰的耦合作用, 输出 $y_2(k)$, 有:

$$u(k) * \hat{G}(k) = y_2(k) \quad (1)$$

设计控制增量: $\Delta u(k)$ 消除 $y_1(k)$ 与 $y_2(k)$ 之间的误差:

$$[u(k) + \Delta u(k)] * \hat{G}(k) = y_1(k)$$

$$u_1(k) * \hat{G}(k) + \Delta u(k) * \hat{G}(k) = y_1(k) \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)后得到:

$$y_2(k) + \Delta u(k) * \hat{G}(k) = y_1(k)$$

$$\Delta u(k) * \hat{G}(k) = y_1(k) - y_2(k)$$

其中, $\hat{G}(k)$:

$$f\{u(k), \omega(k-1), I_f(k-1)\} = \{\omega(k), I_f(k)\}$$

$$\Delta u(k) * \hat{G}(k) = y_1(k) - y_2(k) = \Delta y(k)$$

$$\Delta u(k) * \hat{G}(k) = \Delta y(k)$$

2.2 补偿控制器模型

结合 2.1 节计算结果, 可以建立输入为转速差 $\Delta\omega$, 输出为电流增量 ΔI 的补偿控制器模型, 补偿控制器训练方案如图 10 所示。图中, BPNN 表示 BP 神经网络, I 和 I^* 分别为刚性条件与柔性条件系统控制器输出控制电流, 相减得到两种条件下励磁电流差值 ΔI , ω_k 和 ω_k^* 分别为刚性条件下和柔性条件下系统输出转速, 两者之间的差异为转速变化量 $\Delta\omega$, I_f , I_f^* 分别表示刚性和柔性条件下输出框架电流, θ 和 θ^* 表示刚性和柔性条件下输出框架位置, 使用 1.1 节所述神经网络训练得到补偿控制器。

训练结果如图 11 所示。

训练得到的补偿控制器模型均方误差为 0.006 5

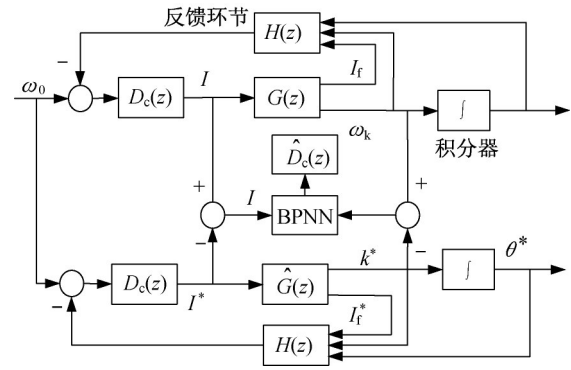


图 10 补偿控制器

Fig. 10 Compensation controller

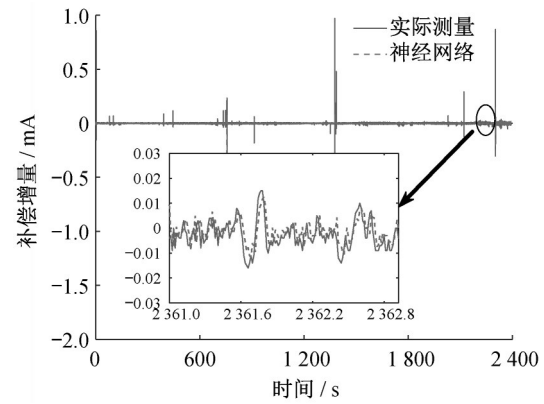


图 11 补偿控制器训练结果

Fig. 11 Training results of compensation controller

mA, 平均误差为 0.079 7 mA, 最大误差为 0.085 2 mA。为避免控制电流增量对系统造成损害, 在使用中需结合实际设置补偿控制器输出控制增量范围。

2.3 前馈-反馈控制系统

将补偿控制器模型加入到原控制系统中, 即可得到基于补偿控制器的前馈-反馈控制系统, 如图 12 所示。

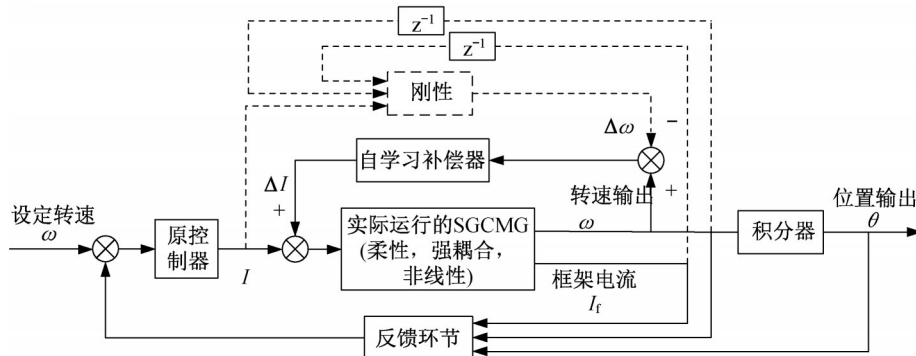


图 12 基于补偿控制器的前馈-反馈控制系统

Fig. 12 Feedforward-feedback control system based on compensation controller

3 实验仿真及结果

结合第2节设计内容,搭建Simulink环境下的仿真实验。本文构建的柔性条件下虚拟广义被控对象输入为励磁电流,输出为框架转速及转子电机电流,系统输入励磁电流使用文献[13]给出的一种考虑柔性基座影响的PID(proportion-integral-differential)控制系统模型。

图13为给定转速下系统输出,图14为对应的位置输出。从图13中可以看出,相比于传统PID控制系统,本文设计的前馈-反馈控制系统精度更高;加入补偿控制器后,系统精度进一步提高,稳态误差小,跟踪给定输入能力更强。图14结果表明,加入补偿控制器后系统输出误差更小,更加稳定,近似于一条直线,指向精度更高。

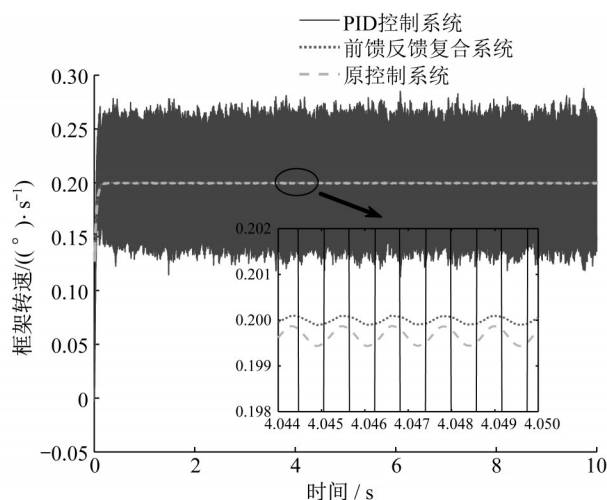


图13 制系统输出转速($w=0.2$)

Fig.13 Output speed of control system($w=0.2$)

本文测试了不同转速条件下,加入补偿控制器系统的稳态误差,与原系统测试数据稳态误差对比结果如表2所示。从表2中可以看出,加入补偿控制器的前馈-反馈控制系统稳态误差有明显提升,系统控制性能更优。

空间运动伺服系统需要工作在多种转速状态下,

表2 加入补偿控制器前后稳态误差

Tab. 2 Steady-state error before and after adding the compensation controller

给定转速/ $((^{\circ})\cdot s^{-1})$	原系统稳态误差/ $((^{\circ})\cdot s^{-1})$	相对误差/%	前馈-反馈系统稳态误差/ $((^{\circ})\cdot s^{-1})$	相对误差/%
0.2	0.005 4	2.7	5.5×10^{-5}	0.025
1	0.007 6	0.76	0.001 0	0.1
2	0.010 1	0.51	2.2×10^{-4}	0.011
5	0.012 5	0.25	2.2×10^{-4}	0.004

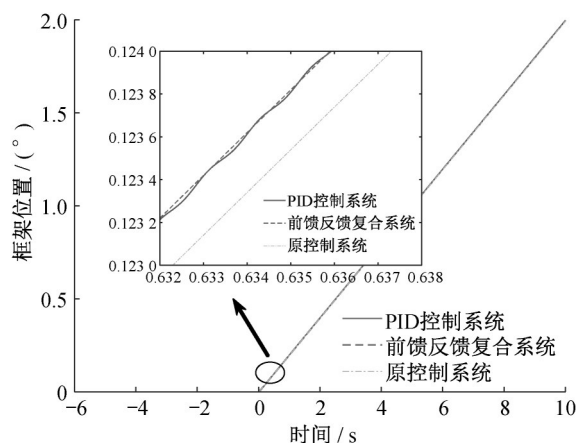


图14 控制系统位置输出($w=0.2$)

Fig. 14 Position output of control systems ($w = 0.2$)

不同转速之间的切换会对系统输出转速造成影响。根据实际工作要求,本文选择 $0.2, 1, 2, 5(^{\circ})\cdot s^{-1}$ 实施转速切换情况下系统的控制性能测试。图15给出了系统在转速切换条件下的转速输出情况。可以看出,本文设计的前馈-反馈控制系统在转速切换时,在保持较高控制精度的基础上,超调量小,响应时间短,控制性能好。

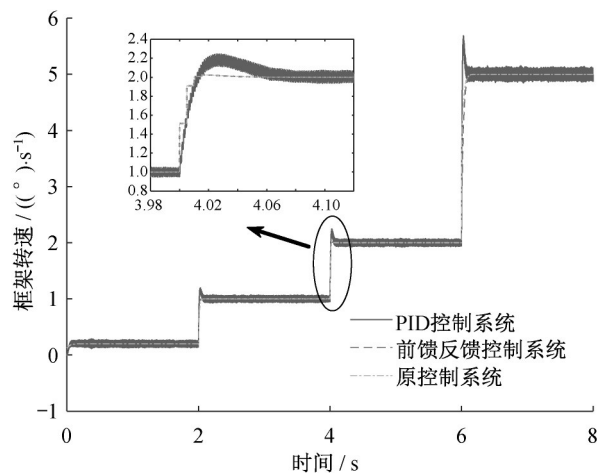


图15 转速切换条件下系统输出

Fig. 15 System output under switching speed condition

4 小结

传统前馈-反馈复合控制需要精准获取干扰通道数学模型,本文在获取空间运动伺服机构实际运行数据的基础上,使用神经网络方法构建了涵盖干扰通道信息的虚拟广义被控对象模型;在不改变原系统控制结构的基础上,设计了一种“外挂式”的补偿控制器,与原空间运动伺服机构控制器构成了基于神经网络的前馈-反馈控制系统。本文给出的基于500 N·ms单框架控制力矩陀螺系统的实验数据的仿真结果,表明了本方案可以提升系统稳态精度,减小稳态误差,实现转速的高精度控制。在单框架控制力矩陀螺系统工作转速切换时能够快速跟踪给定输入,响应时间短,跟踪能力强,控制性能好。对类似的航天器姿态控制具有参考价值。

作者贡献说明:

岳继光:总体方案设计。

何洪志:方案实施与实验仿真。

吴琛浩:神经网络算法。

赵雷:实验方案设计。

鲁明:实验平台搭建。

来林:实验数据采集。

参考文献:

- [1] 袁利,黄煌.空间飞行器智能自主控制技术现状与发展思考[J].空间控制技术与应用,2019,45(4):7.
YUAN Li, HUANG Huang. Current trends of spacecraft intelligent autonomous control [J]. Aerospace Control and Application, 2019, 45(4):7.
- [2] 职光伸.控制力矩陀螺群的操纵律研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
ZHI Guangshen. Research on steering laws of SGCMGs [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [3] 魏大忠,张激扬,武登云,等.200 N·ms单框架控制力矩陀螺研制[J].空间控制技术与应用,2011,37(6):14.
WEI Dazhong, ZHANG Jiyang, WU Dengyun, *et al.* Development of a 200 N·ms single gimbal control moment gyro [J]. Aerospace Control and Application, 2011, 37(6):14.
- [4] 张志方,董文强,张锦江,等.控制力矩陀螺在天宫一号目标飞行器姿态控制上的应用[J].空间控制技术与应用,2011,37(6):52.
ZHANG Zhifang, DONG Wenqiang, ZHANG Jinjiang, *et al.* The application of control moment gyro in attitude control of tiangong-1 Spacecraft [J]. Aerospace Control and Application, 2011, 37(6):52.
- [5] 魏大忠,李刚,伏蓉,等.天宫一号单框架控制力矩陀螺研制及长寿命转子轴系技术[J].中国科学:技术科学,2014,44(3):261.
WEI Dazhong, LI Gang, FU Rong, *et al.* Design of SGCMG and long life rotor bearing system technology in Tiangong-1 [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2014, 44(3):261.
- [6] WU Zhong, ZHANG Jiyang. Dynamics and control of gimbal servo systems for control moment gyroscopes [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2007, 15(1):130.
- [7] LI Haitao, NING Xin, HAN Bangcheng. Composite decoupling control of gimbal servo system in double-gimbaled variable speed CMG via disturbance observer [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 22(1):312.
- [8] 宁欣,韩邦成,房建成.基于干扰观测器的双框架变速率控制力矩陀螺解耦控制[J].机械工程学报,2017,53(10):52.
NING Xin, HAN Bangcheng, FANG Jiancheng. Disturbance observer based decoupling method of double-gimbaled variable speed control moment gyroscope [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(10):52.
- [9] 林鲁超,徐开,陈长青,等.单框架控制力矩陀螺转子的稳速控制[J].电光与控制,2019,26(8):95.
LIN Luchao, XU Kai, CHEN Changqing, *et al.* Steady speed control of SGCMG rotor [J]. *Electronics Optics & Control*, 2019, 26(8):95.
- [10] 徐张凡,潘松,陈雷,等.柔性隔振结构影响下控制力矩陀螺的动力学建模与仿真[J].空间控制技术与应用,2020(4):1.
XU Zhangfan, PAN Song, CHEN Lei, *et al.* Dynamic modeling and analysis of the CMG considering the influence of the vibration isolator [J]. *Aerospace Control and Application*, 2020(4):1.
- [11] 李哲.空间对接系统直线驱动机构的控制技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2014.
LI Zhe. Research of control technology on electro-mechanical actuator used in space docking system [D]. Nanjing: Nanjing University Of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [12] CHUI Charlesk, CHEN Guanrong, 崔锦泰,等.卡尔曼滤波及其实时应用[M].北京:清华大学出版社,2013.
CHUI Charlesk, CHEN Guanrong, CUI Jintai, *et al.* Kalman filter with real-time applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [13] 吴琛浩,岳继光,王栗,等.控制力矩陀螺框架伺服系统神经网络控制[C]//第30届中国过程控制会议(CPCC 2019)摘要集.昆明:中国自动化学会过程控制专业委员会,2019:1-7.
WU Chenhao, YUE Jiguang, WANG Li, *et al.* Neural network control for control moment gyroscope gimbal servo system [C]// The thirtieth Chinese Process Control Conference (CPCC). Kunming: Technical Committee on Process Control, 2019:1-7.