

飞机飞控系统指令异构力传感器技术研究



陈勇¹,张新慧²,耿延升²,张军红²,巩磊²

1.海军装备部,北京 100071

2.航空工业第一飞机设计研究院,陕西 西安 710089

摘要:为了提升国内装备飞机飞控系统研制的适航安全性水平,对力传感器进行了设计技术和试验应用数据研究,提出了采用力传感器对飞控系统的位移指令进行异构的设计思路。通过梳理飞机的需求和力传感器的使用情况,明确了典型力传感器的工作原理;针对某型飞机飞控系统典型力传感器的应用形式,对比指令位移传感器的数据,分析了其数据的特点,提出了飞控系统指令采用力传感器的数据处理方法;通过进一步提炼应用力传感器相关特点,明确其作为飞控系统非相似指令的应用需求,提升飞机系统的总体性能,为国内研发高安全性飞机提供借鉴。

关键词:飞机;飞控系统;力传感器;非相似;指令

中图分类号:V249.1

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.04.007

力传感器的使用范围较为广泛,主要用于各种需要力反馈的闭环控制或者检测系统。应用于机械手上时,机械手与环境之间存在相互作用,需要利用阻抗控制实现力和位置统一控制^[1];应用于车辆上时,需要利用力传感器对车辆轮胎与路面三维接触力大小进行测量^[2];应用于现代工业设备时,需要在兼顾尺寸要求的基础上,精确快速感知三维空间作用力和三维空间力矩,并实现反馈控制^[3];应用于国内飞机装备时,需要利用测力传感器来测量对飞机结构强度试验施加的力载荷^[4-8],需要测量飞机驾驶员操纵力的大小,并将力测量信号供给飞控系统和飞参系统^[9]。各种力传感器为适应不同工作环境的需求,都设置成具有重量(质量)特性的不同类型,对于飞机上每克必争的设备减重需求,最大化发挥力传感器的功能就变得很有意义;同时,对于采用运输类飞机适航标准的飞机来说,系统与有关部件的设计在单独考虑以及与其他系统一同考虑情况下的故障概率需求^[10],即适航安全性有防共模故障的要求,对比电传飞机常采用位移传感器作为飞控系统指令,提出采用力传感器作为飞控系统非相似余度,进一步提升力传感器在飞控系统中的应用空间。执行同一功能的余度单元采取两种或多种物理构型或控制方式,采用非相似设计实现,可以

很好地抑制它们之间的共性故障^[11-12]。国内外大多飞机没有相关资料明确提及采用力传感器作为飞控系统的控制指令,仅安-124飞机提到了少量相关应用。因此,进一步研究力传感器特性为国内飞机系统提升安全性开拓了一条新的发展方向。

1 系统需求特点

1.1 基本使用需求

一般飞机上飞控系统对操纵力传感器的使用需求是较为明确的,主要用于测量驾驶员对操纵系统的操纵力,以满足飞行品质以及适航规章的要求^[13];还有一些飞机的需求,主要是实现对每个驾驶员操纵指令发出者的监测记录,用于飞行事故原因分析^[14];再有就是一些飞机提及杆力传感器不仅是操纵力的测量器件,也是驾驶员发出操纵指令的中央控制器件,是飞机操纵和飞行控制系统前端重要的信息源或作为自动飞行控制增稳系统的信号源,以及飞控系统根据驾驶员的操纵力位移指令传感器信号实现飞机的俯仰、滚转及偏航等^[15-17]。通过分析当前这些国内的研究资料可知,并没有实际飞机明确说明直接采用力传感器作为

收稿日期: 2022-12-16; 退修日期: 2023-02-15; 录用日期: 2023-03-13

引用格式: Chen Yong, Zhang Xinhui, Geng Yansheng, et al. Research on command heterogeneous force sensor technology for aircraft flight control system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(04): 55-60. 陈勇, 张新慧, 耿延升, 等. 飞机飞控系统指令异构力传感器技术研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(04): 55-60.

飞控系统的基本操纵指令,实际上飞机更愿意直观地选择位移作为飞控系统的基本操纵指令,这本身也是由力是依附在位移之上的特殊属性决定的。

1.2 工作原理

目前,国内飞机上测量驾驶员操纵的测力传感器有两种类型:一类是采用变压器原理的位移传感器串联在操纵线系中进行测力弹性结构受力后的变形;另一类是采用电阻应变原理的形式测量专用弹性体受力后的变形。由于操纵系统中弹性体的变形量都较小,采用位移传感器相比采用电阻应变原理测力的误差较大,因此,应用较为普遍的测力设备多采用应变式电阻测力传感器,其借助可产生形变的弹性元件,将力的变化转化为变形,然后利用导体的应变效应,将力转化为电阻的变化,最终利用测量电路得到被测力的电信号。一种典型的力传感器测量电路即是惠斯通电桥,如图1所示,当传感器感受到操纵力时,惠斯通电桥输出一个与操纵力成线性关系的电压信号,实现对驾驶员操纵力的测量^[9]。

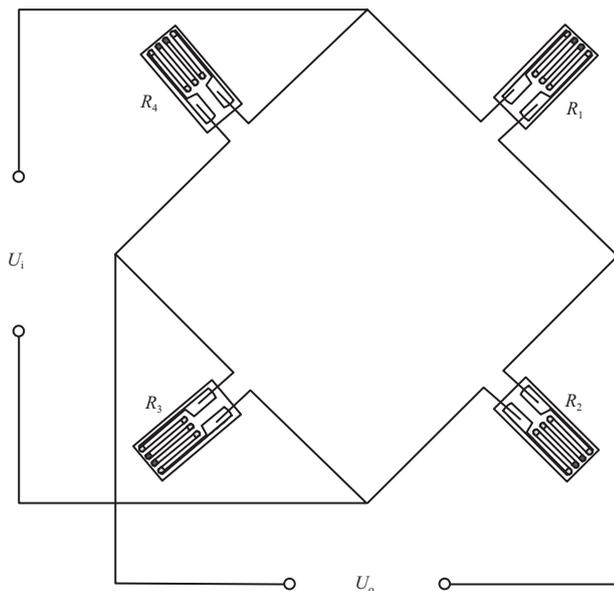


图1 惠斯通电桥

Fig.1 Wheatstone bridge

惠斯通电桥是由4个电阻组成的电桥电路,力传感器即将电阻应变片(将电阻丝做成栅状粘贴在两层薄纸或塑料薄膜之间构成)粘固在弹性体上,当弹性体形变时,应变片也随之发生形变,相应的电阻则产生变化,通过测得的电压与电阻应变片建立关系,进而通过计算得到力传感器所受外部载荷的大小,达到测量的目的。

然而位移传感器采用测量机械位移的工作原理,其内

部结构原理是铁芯与被测件相连,当铁芯随着被测件移动时线圈中的磁通产生变化,当在初级线圈施加一定频率的交变电压时,次级线圈的互感强度产生差异,从而输出感应电动势也会随之改变,形成电势差,通过解调电路将电势差与传感器铁芯位移建立关系,进而测得被测件位移的变化。一般在飞机上采用较广泛的有线位移传感器和角位移传感器,其具有结构简单、稳定度高和使用寿命长等优点。对比力传感器需要弹性体的力输入,位移传感器则需要被测件的位移输入,力和位移的非相似特性可以互补实现系统多余度测量驾驶员的输入功能。

2 工程应用

2.1 工程实例

某型飞机飞控系统为采集驾驶盘俯仰和滚转的操纵力采用了电阻应变原理的力传感器,示意实物^[8]如图2所示,其采用四线制接法,使用起来比较方便^[9]。通过粘贴在弹性体上由应变片组成的两组惠斯通电桥,将驾驶员俯仰操纵和滚转操纵的载荷力转换为电信号,系统再经过放大、滤波等电路处理形成与被测载荷力成一定关系的电压信号,实现采用电压信号表征俯仰和滚转的操纵载荷力。同时,某型飞机飞控系统采用安装于不同位置的位移传感器将位移信号转换为电压信号,实现用电压信号表征俯仰和滚转的操纵位移。

2.2 试飞数据

某型飞机试飞记录的同一时间段采样点的操纵力传感



图2 示意实物力传感器

Fig.2 Physical force sensor

器对应数值和传感器对应位移的时间历程曲线分别如图3和图4所示。通过对比操纵力和位移的对应关系可知,操纵力对应数值与位移传感器对应位移的方向相反,数值大小存在较大差别,虽然前段部分状态趋势有所对应,但是后段部分对应不够明晰。考虑飞控系统整体操纵机构的设计原理,可知造成这种现象的主要原因是操纵位移传感器和操纵力传感器安装位置不同,以及操纵电气极性不同,这其中的差距涉及配平作动器系统、操纵系统间隙以及各种误差等因素,只有经过一定的信号处理策略才能较好地使用,力参数的性能曲线是通过测试校准和数据处理得到的^[20]。

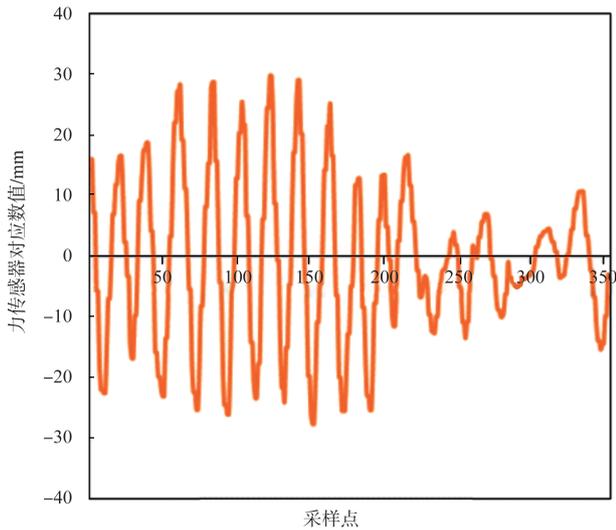


图3 力传感器测力对应数值

Fig.3 Force sensor force corresponding value

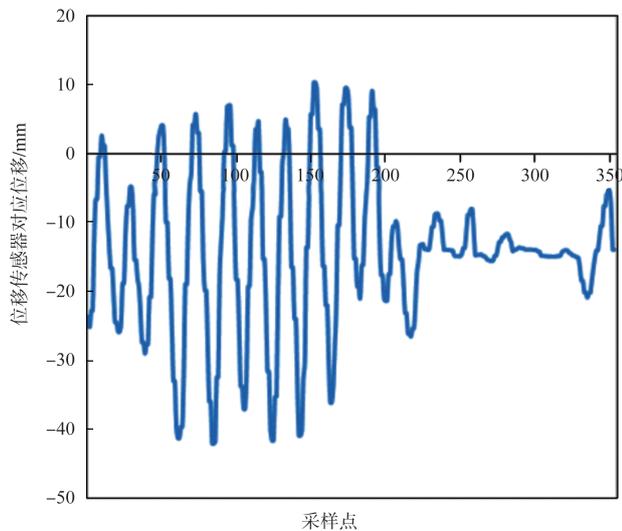


图4 位移传感器对应位移

Fig.4 Displacement sensor corresponding displacement

同一时间段的配平作动器对应位移和力传感器测力对应位移的时间历程曲线分别如图5和图6所示。通过数据发现配平作动器在这个过程中保持在一个位置没有变化,仅仅是高频杂波导致记录数据波动;将力传感器测力对应数据转换符号后对应的位移与位移传感器对应位移的趋势更为明显。

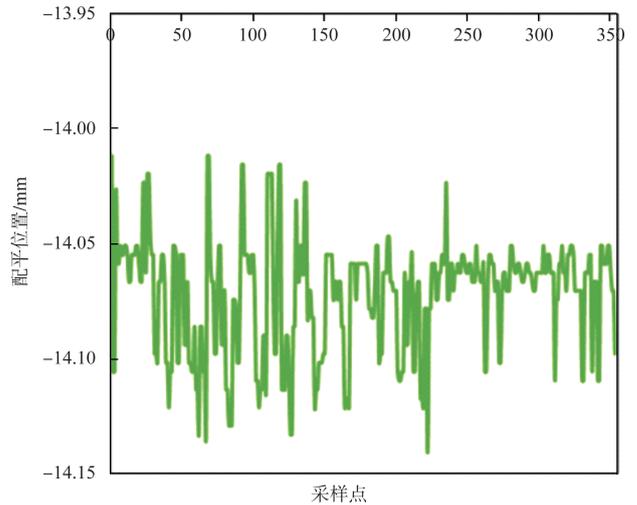


图5 配平作动器对应位移

Fig.5 Matching actuator's corresponding displacement

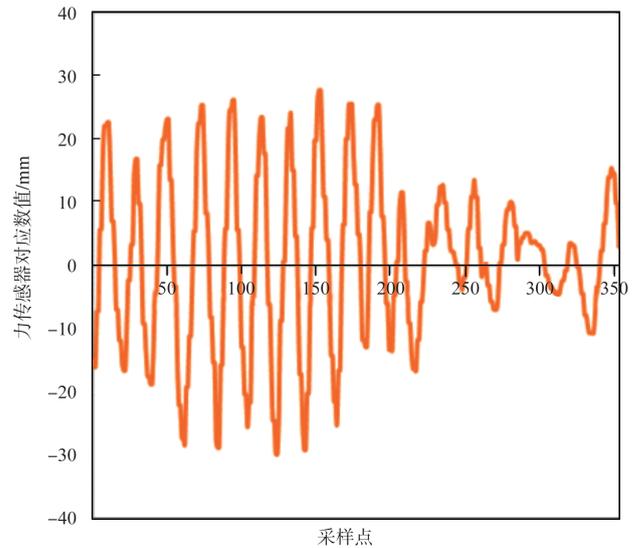


图6 力传感器测力对应位移

Fig.6 Corresponding displacement of force sensor

修正力传感器及叠加配平位置对应位移和位移传感器对应位移的时间历程曲线如图7所示。分析数据可知,修正力传感器及叠加配平位置对应位移和位移传感器对应位移在整体趋势上是一致的,具有一定的对应关系;在前段高

频操纵段具体点上存在时间前后和对应数值大小的少量误差,需要系统进行特定的处理(如进行延迟多拍有效性判断)才能准确对应上;对于力传感器在低频操纵段配平位置附近则出现较大误差,即力传感器零点在实际使用过程中存在突然变化的情况^[21],需要进行安装调整标定工作^[22](如安装后进行增益和零偏校正,留有零位力间隙范围)。

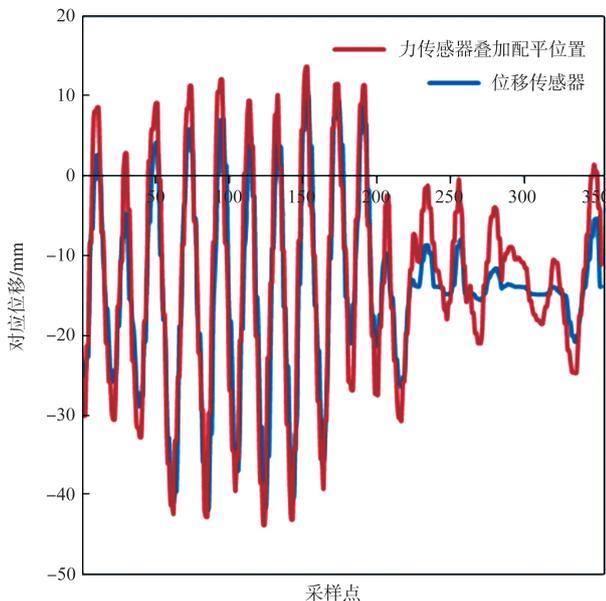


图7 修正力传感器及叠加配平对应位移

Fig.7 Correction force sensor and superposition leveling corresponding displacement

3 异构应用需求

有了上述的分析基础,可知通过力传感器测得的操纵力可以通过修正处理产生操纵位移的效果,即在特定条件下代替操纵位移,用于飞控系统的基本操纵指令。对于现代电传飞控系统,则可以选择操纵位移传感器为主用的基本操纵指令,选择修正操纵力传感器为备用的基本操纵指令,再加上操纵位移传感器和操纵力传感器工作原理和安装位置都不相同,具有一定的非相似性,可以有效提高基本操纵指令的可用性,能够有效避免单一类型设备故障产生不期望的后果。一种可行的力传感器应用在飞控系统指令中的异构需求及应用系统架构示意如图8所示。

为了进一步满足飞控系统适航安全性需求,选择力传感器用于飞控系统基本操纵指令需要考虑系统架构的需求,每台力传感器应当配置4组惠斯通电桥,构成俯仰和滚转各两余度的电气输出信号,确保系统基本操纵指令的完

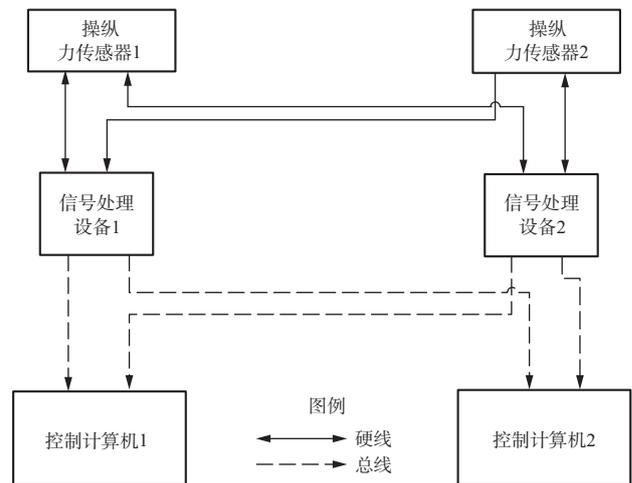


图8 异构需求及应用系统架构示意图

Fig.8 Heterogeneous requirements and application system architecture

整性。如果力传感器的使用环境温度变化范围较大,则还需要考虑补偿因温度变化带来的输出影响,以便获得良好的线性和分辨率^[23]。

4 结论

本文以飞控系统采用电阻应变原理的力传感器为基础,分析了某型飞机实际试飞测得的操纵力,对比其实际试飞测得的操纵位移,通过一定的数据修正和处理方法,得到了操纵力等同于操纵位移的效果,即飞控系统不仅可以采用操纵位移传感器作为操纵指令,而且可以采用操纵力传感器作为操纵指令。同时,基于飞机适航的需求,本文提出了操纵力传感器的系统应用架构,可以为国内飞机飞控系统非相似指令研发提供借鉴。

AST

参考文献

- [1] 罗萍,杨波,常峥,等.基于改进模糊自适应的机械手阻抗控制研究[J].机床与液压,2021,49(17):9-14.
Luo Ping, Yang Bo, Chang Zheng, et al. Study on manipulator impedance control based on improved fuzzy adaptive[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(17): 9-14. (in Chinese)
- [2] 骆训煌,周兴林,关佳希,等.高精度应变式三维力传感器研究[J].传感器与微系统,2022,41(5):64-67.
Luo Xunhuang, Zhou Xinglin, Guan Jiayi, et al. Research on high precision strain type 3D force sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(5):64-67. (in Chinese)
- [3] 宋逸,段晋军,相立峰,等.一种低耦合高精度六维力传感器

- 设计及应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(3): 473-480.
- Song Yi, Duan Jinjun, Xiang Lifeng, et al. Design and application of high-precision loosely coupled six-axis force sensor[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(3):473-480.(in Chinese)
- [4] 毛爽, 米征, 张永兴. 测力传感器分路校准改进方法的校准误差研究[J]. 工程与试验, 2020, 60(1):124-127.
- Mao Shuang, Mi Zheng, Zhang Yongxing. The study of calibration-error in the improved shunt-calibration method of the load cell [J]. Engineering & Test, 2020, 60(1):124-127. (in Chinese)
- [5] 赵婵. 力传感器线缆维修过程中的分类方法[J]. 工程与试验, 2020, 60(2):76-77.
- Zhao Chan. Classification method of force sensor cable maintenance process[J]. Engineering & Test, 2020, 60(2):76-77. (in Chinese)
- [6] 王晓英. 测力传感器校准误差来源分析[J]. 工程与试验, 2017, 57(4):56-58.
- Wang Xiaoying. Analysis of error source of force sensor calibration[J]. Engineering & Test, 2017, 57(4): 56-58. (in Chinese)
- [7] 毛爽, 张永兴, 李晓宁. 基于分路校准误差的测力传感器常见问题分析与处理[J]. 工程与试验, 2020, 60(4):78-79.
- Mao Shuang, Zhang Yongxing, Li Xiaoning. Analysis and processing of common problems of force sensors based on shunt calibration error [J]. Engineering & Test, 2020, 60(4):78-79.(in Chinese)
- [8] 徐明威, 张禹, 李延斌. 一种六维力传感器的信号噪声处理技术[J]. 现代信息科技, 2021, 23(5):33-36.
- Xu Mingwei, Zhang Yu, Li Yanbin. Signal noise processing technology of a six-axis force sensor [J]. Modern Information Technology, 2021,23(5):33-36.(in Chinese)
- [9] 余康. 基于电阻应变计的飞机驾驶杆力传感器研制[J]. 衡器, 2021, 50(3):46-51.
- Yu Kang. Development of force sensor for aircraft pilot lever based on resistance strain gauge [J]. Weighing Instrument, 2021, 50(3):46-51.(in Chinese)
- [10] CCAR-25-R4 运输类飞机适航标准[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
- CCAR-25-R4 Airworthiness standards of transport category aircraft [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2011. (in Chinese).
- [11] 李天为, 石鹏飞, 刘宏明. 基于适航安全的民用飞机电传飞控系统架构设计考虑[J]. 航空科学技术, 2021, 32(3):21-28.
- Li Tianwei, Shi Pengfei, Liu Hongming. Architecture design consideration of fly-by-wire flight control system for civil aircraft based on airworthiness and safety[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(3):21-28.(in Chinese)
- [12] 石鹏飞, 张航, 陈洁. 先进民机飞控系统安全性设计考虑[J]. 航空科学技术, 2019, 30(12):52-58.
- Shi Pengfei, Zhang Hang, Chen Jie. Safety design considerations for advanced civil aircraft flight control system [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(12):52-58. (in Chinese)
- [13] 徐州, 陆伟铭, 谢陵, 等. 双自由度侧杆操纵力测量系统设计与实现[J]. 民用飞机设计与研究, 2016, 21(1):72-74, 84.
- Xu Zhou, Lu Weiming, Xie Ling, et al. Design and realization of control force measurement system of side stick with two degree of freedom [J]. Civil Aircraft Design & Research, 2016, 21(1):72-74, 84.(in Chinese)
- [14] 邵瑞雪, 叶蕾, 郭丹, 等. 某串列座舱飞机驾驶员操纵装置子系统加/改装力监测系统方案研究[J]. 教练机, 2019(2):48-52.
- Tai Ruixue, Ye Lei, Guo Dan, et al. Study on the scheme of installing /modifying force monitoring system for pilot control device subsystem of a tandem-cockpit aircraft [J]. Trainer, 2019 (2):48-52. (in Chinese)
- [15] 汤大卿, 杨德兴, 廖威, 等. 光纤光栅式飞机驾驶杆力传感器研究[J]. 光子学报, 2010, 39(11):1993-1997.
- Tang Daqing, Yang Dexing, Liao Wei, et al. Joystick transducer based on fiber bragg gating [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39 (11):1993-1997.(in Chinese)
- [16] 严共鸣, 王洲伟, 赵德春. 飞机杆力传感器检测仪研制[J]. 机械与电子, 2016, 34(5):55-57.
- Yan Gongming, Wang Zhouwei, Zhao Dechun. Research and development of aircraft stick force sensor testers [J]. Machinery & Electronics, 2016, 34(5):55-57.(in Chinese)
- [17] 石荣武, 白新玉, 余康, 等. 一种测量飞机驾驶员操纵力传感器设计[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2020, 36(4):30-37.

- Shi Rongwu, Bai Xinyu, Yu Kang, et al. Design of a force sensor for measuring pilot's control [J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 36(4): 30-37.(in Chinese)
- [18] 石荣武,白新玉,王晓东,等.一种二维测力传感器的设计[J].衡器,2020,49(6):39-47.
- Shi Rongwu, Bai Xinyu, Wang Xiaodong, et al.Design of a two-dimensional force sensor [J]. Weighing Instrument,2020, 49(6): 39-47.(in Chinese)
- [19] 盛楷,李晓宁,米征.不同测力传感器接线制对试验件影响分析[J].工程与试验,2017,57(3):86-88.
- Sheng Kai, Li Xiaoning, Mi Zheng. Analysis of influence of different force sensor wiring system on test piece [J]. Engineering & Test, 2017, 57(3):86-88. (in Chinese)
- [20] 蒋红娜,朱丽,冯铭瑜.飞机驾驶杆(盘)力系统现场测试校准技术研究[J].国外电子测量技术,2016,35(5):88-90.
- Jiang Hongna, Zhu Li, Feng Mingyu. Technology research of the airplane stick (helm) force field testing calibration [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(5):88-90.(in Chinese)
- [21] 张伟,徐健.测力传感器的零点变化及测试分析[J].工程与试验,2019,59(3):121-123.
- Zhang Wei, Xu Jian. Zero change and test analysis of force sensor [J]. Engineering & Test, 2019, 59(3): 121-123. (in Chinese)
- [22] 段宝利,徐晓东.一种具有借鉴意义的传感器输入标定技术[J].物联网技术,2013,3(8):14-17.
- Duan Baoli, Xu Xiaodong. An input calibration technology of transducer with referential significance [J]. Internet of Things Technologies, 2013, 3(8):14-17.(in Chinese)
- [23] 张铭,杨德兴,许增奇,等.分析温度补偿的FBG式飞机驾驶杆力传感器[J].传感技术学报,2013,26(3):319-322.
- Zhang Ming, Yang Dexing, Xu Zengqi, et al. The temperature compensated aircraft joystick-force sensor based on FBG[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(3): 319-322.(in Chinese)

Research on Command Heterogeneous Force Sensor Technology for Aircraft Flight Control System

Chen Yong¹, Zhang Xinhui², Geng Yansheng², Zhang Junhong², Gong Lei²

1. Naval Equipment Department, Beijing 100071, China

2. AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: In order to improve the airworthiness safety level of domestic aircraft flight control system, the design technology and experimental data of force sensor are studied, and the idea of using force sensor to design the displacement instruction of flight control system is put forward. By combing the requirements of aircraft and the use of force sensors, the working principle of typical force sensors is clarified, and the data of the typical force sensors in the flight control system of an aircraft is compared, the characteristics of the data are analyzed, and the data processing method of the force sensors in the flight control system is put forward. By further refining the relevant characteristics of the applied force sensor, the application requirements of the non-similar command of the flight control system are clarified, and the overall performance of the aircraft system is improved, which can be used for reference in the domestic research and development of high-security aircraft.

Key Words: aircraft; flight control system; force sensor; non-similarity; command