

# 基于物联网及 ADRC 的航天器在轨姿态监测系统设计

张淑清

(广西警察学院 交通管理工程学院, 广西南宁 530022)

**摘要:** 在特殊航天环境中, 由于电磁波等干扰条件的存在, 容易导致航天器设备偏离预设的轨迹路径, 为解决此问题, 设计基于物联网及 ADRC 的航天器的在轨姿态监测系统; 分析物联网监测体系中的位姿控制需求, 分层次连接主动振动控制器与航天器姿态控制器, 借助 FBG 应变传感器, 建立主机结构与航天器元件之间的监测感应连接, 实现在轨姿态监测系统的硬件应用结构设计; 在此基础上, 对应变传感器进行标定处理, 通过计算姿态传递系数的方式, 确定航天器的横向在轨应变效应, 再通过 ADRC 原理, 提取航天器在轨姿态感知参量的最佳行进状态信号, 完善航天器的在轨姿态监测控制律, 实现基于物联网及航天器的在轨姿态监测系统设计; 对比实验结果显示, 与光纤传感型监测系统相比, 物联网监测系统能够有效屏蔽电磁波干扰, 确保航天器在特殊航天环境中不会出现偏离预设轨迹路径的行进行为。

**关键词:** 物联网; 航天器; 在轨姿态; 振动控制器; 应变传感器; 姿态传递; 应变效应; 监测控制律

## Design of Spacecraft Attitude Monitoring System Based on Internet of Things and ADRC

Zhang Shuqing

(Traffic management engineering college, Guangxi police college, Nanning 530022, China)

**Abstract:** In a special aerospace environment, due to interference conditions such as electromagnetic waves, it is easy to cause spacecraft equipment to deviate from the preset trajectory path. To solve this problem, a spacecraft on-orbit attitude monitoring system based on the Internet of Things and ADRC is designed. Analyze the pose control requirements in the monitoring system of the Internet of Things, connect the active vibration controller and the spacecraft attitude controller in layers, and establish a monitoring and induction connection between the host structure and the spacecraft components with the help of FBG strain sensors to realize on-orbit attitude monitoring. The hardware application structure design of the system. On this basis, the strain sensor is calibrated to determine the lateral on-orbit strain effect of the spacecraft by calculating the attitude transfer coefficient, and then the ADRC principle is used to extract the best travel state signal of the spacecraft's on-orbit attitude sensing parameters. Improve the on-orbit attitude monitoring control law of spacecraft, and realize the design of on-orbit attitude monitoring system based on the Internet of Things and spacecraft. Comparative experiment results show that, compared with fiber-optic sensing monitoring systems, the IoT monitoring system can effectively shield electromagnetic interference and ensure that the spacecraft will not deviate from the preset trajectory in the special aerospace environment.

**Keywords:** internet of things; spacecraft; on-orbit attitude; vibration controller; strain sensor; attitude transfer; strain effect; monitoring control law

## 0 引言

航天器可按照天体力学规律在太空环境中飞行, 负责执行开发、探索等特定天体飞行任务, 但由于电磁波等外界干扰条件的影响, 航天器设备基本只能在太阳系内运行。受到自然重力条件的限制作用, 大多数航天器设备不携带额外的飞行动力装置, 因此在极高的真空宇宙中只能依靠惯性保持自由飞行状态<sup>[1]</sup>。常规航天器的运动速度可到 8~10 km/s, 且该速度数值是由航天运载器设备独立提供的。在大多数航天任务中, 航天器轨迹路径都是提前按照航天任务进行设计与选择的, 然而有些航天器因自身动力装置的存在, 在实施

变轨时, 可提供一定强度的辅助支持力作用。

在航天器变轨、发射及交会对接的过程中, 由于航天环境的改变, 易导致传输电磁波效应出现严重变化, 从而使航天器设备偏离预设的行进轨迹路径<sup>[2]</sup>。近年来国内外对航天器在轨姿态监测系统做出了研究, 文献 [3] 提出基于加油扰动扭矩的航天器组合姿态监测方法。首先, 根据燃料传递速率来表达惯性张量矩阵的变化, 并分析与惯性张量变化相关的加油扰动扭矩。其次, 另外考虑重力梯度的影响, 研究了燃料传输过程中和之后的姿态动力学行为, 能够监测航天器在轨加油任务的姿态扰动和稳定性; 文献 [4] 提出在光栅传感机理的支持下, 定义传感器设备的力

收稿日期: 2021-02-08; 修回日期: 2021-03-10。

基金项目: 广西科学研究与技术开发计划项目(2015BC17063)。

作者简介: 张淑清(1966-), 女, 广西来宾人, 硕士研究生, 副教授, 主要从事网络与信息技术方向的研究。

引用格式: 张淑清. 基于物联网及 ADRC 的航天器在轨姿态监测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(5): 74-78.

学灵敏度系数,再通过增敏处理的方式,实现对航天器设备实时在轨姿态的准确分析。然而上述系统在特殊航天条件下,对电磁波干扰的屏蔽能力有限,很难保证航天器设备不出现偏离预设轨迹路径的行进行为<sup>[5-6]</sup>。

为避免上述情况的发生,设计基于物联网及 ADRC 的航天器的在轨姿态监测系统,按照主动振动控制器、FBG 应变传感器等硬件设备之间的实际连接需求,对姿态传递系数进行计算,再联合横向在轨应变效应,实现对航天器在轨姿态监测控制律的分析与研究。

## 1 航天器在轨姿态监测系统主机结构

基于物联网及 ADRC 的航天器的在轨姿态监测系统硬件主机结构由物联网监测体系、主动振动控制器、航天器姿态控制器等多个应用元件共同组成,具体搭建方法如下。

### 1.1 物联网监测体系

物联网监测体系是航天器在轨姿态监测系统硬件执行环境搭建的基础设计结构,可将航行应力信息由航天器主机反馈至主动振动控制器、姿态控制器等下级设备应用结构之中。由航天器主机输出的航行应力信息首先进入物联网环境中,并在相关设备元件的作用下,进行初步的调制与解调处理,直至其中存储的监测信息文件得到完全释放。完成调制解调处理的航天器航行应力信息可遵照物联网传输需求,生成全新的在轨姿态功率谱,在此过程中,由于外界航天环境始终处于连续变化状态,因此最终分解所得出的航天器监测行为必须具有较强的位姿适应性,一方面能与航天器设备保持相同的变化状态,另一方面可对物联网监测指令与主动振动控制器之间的数据传输关系进行较好维护。物联网监测体系示意图如图 1 所示。

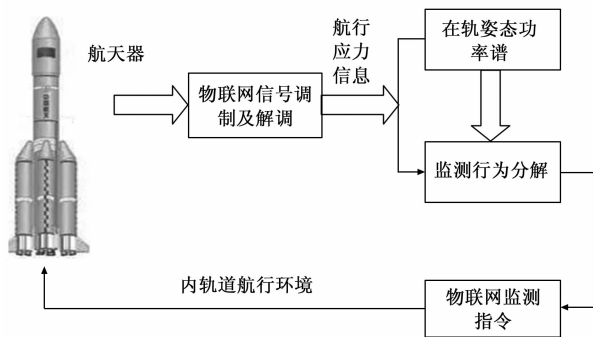


图 1 物联网监测体系示意图

如图 1 所示,物联网监测体系采集航天器在轨姿态监测数据,通过信号调制及解调获取航行应力信息,监测在轨姿态功率谱并对功率谱进行分解,得到物联网检测指令,再应用到航天器在轨姿态监测中,实现物联网监测体系流程。

### 1.2 主动振动控制器

主动振动控制器隶属于物联网监测体系,可记录航天器振荡电流的现有连接形式,并可根据手动指示灯、自动指示灯的显示情况,控制设备结构的现有连接与断开形态,从而实现对航天器在轨姿态的监测与调试。控制器结构体内部包含一个电流调节旋钮、一个调度表和一个电流示数

装置。其中,电流调节旋钮可供人工调节使用,处于电流平衡性考虑,当手动指示灯与自动指示灯同时亮起时,相关监测人员可向左旋调电流调节钮,从而使航天器在物联网环境中所承载的物理电流数值不断缩小;当手动指示灯与自动指示灯不同时亮起或同时熄灭时,相关监测人员可向右旋调电流调节钮,从而使指示灯设备再次达到理想化亮起状态<sup>[7-8]</sup>。调度表起到一定的调节辅助作用,当现有电流旋调幅度不能达到指示灯亮起需求时,相关监测人员可对该原件进行适当幅度的调节。电流示数装置能够显示航天器在物联网环境中所承载的实时电流数值,当其指针偏转超过示数量程一半时,即可判定航天器设备的在轨姿态已发生偏离现象。

### 1.3 航天器姿态控制器

航天器姿态控制器能够控制航天器的实际行进,可在物联网监测体系的作用下,通过内、外广播同步输出的方式,完成对电压、电流等电子传感量的聚集处理,并可从中分离部分传输电子量,以用于驱动 FBG 应变传感器等下级设备应用元件<sup>[9]</sup>。电极板分别部署于航天器姿态控制器两侧,可在感知到外界光照射作用的同时,将电量感应主机填满,以此同时,借助聚能器设备,更改转换器元件的连接状态,当前导向器、后导向器同时达到电量充盈状态后,航天器后翼元件打开,使自然风力进入主机体中,此时姿态控制器可建立与聚能器设备间的电子量对应连接关系<sup>[10]</sup>。聚能器设备具备较强的电量感知能力,可根据电极板元件中的实际电流输出量,记录航天器的航行习惯,且由于主电机设备的存在,当航天器达到临界航行状态时,外广播设备、内广播设备开启同步转播形式,一方面避免电量感应主机出现过量的电子输出行为,另一方面也可将发动机元件调试至最佳应用状态。在整个航行过程中,物联网监测体系仅起到一定强度的调频与控制作用,并不能干扰航天器主机所输出的实际行进行为指令<sup>[11]</sup>。航天器姿态控制器结构图如图 2 所示。

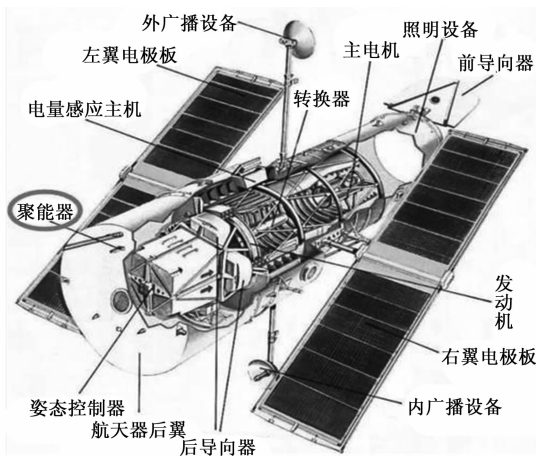


图 2 航天器姿态控制器结构图

### 1.4 FBG 应变传感器

FBG 应变传感器的研究目标在于利用航天器光纤光栅

与结构状态监测设备,实现对航行结构在轨姿态的有效控制<sup>[12-13]</sup>。光纤光栅、结构状态监测设备作为航天器在轨姿态监测系统的重要组成部分,其修复性能力由航天飞行器所处航行环境的不可维修性与空间恶劣性共同决定。为规避航天器姿态控制器对实际监测结果造成的抑制性影响,FBG 应变传感器的连接需具备如下应用特点:

1) 较高水平的抗电磁干扰能力,在物联网低磁光波辐射频率下,FBG 应变传感器的实时监测能力可不被磁通信信号干扰。

2) 电磁绝缘性能相对良好,可在物联网环境中,不借助光纤电信号驱动作用,实现对航天器在轨姿态行为的有效监测与控制。

3) 耐高压、电流传输性能稳定,可屏蔽由主动振动控制器带来的航天器姿态变动行为。

4) 传感器设备体积小、质量轻,可直接装载于航天器主机之中。

5) 在低电量损耗条件下,具有较大的电流传输容量,能够较好满足航天器在轨姿态行为的分布式监测需求。

## 2 基于 ADRC 的监测系统解调处理

在相关硬件设备元素的支持下,按照应变传感器标定、姿态传递系数计算、航天器在轨姿态监测控制律制定的执行流程,实现基于 ADRC (自抗扰控制理论)的航天器在轨姿态监测系统解调处理。

### 2.1 应变传感器标定

在实施航天器应变传感器标定的过程中,应将应变片设备粘贴于垂直的航天器悬臂梁表面,并在另一端施加等强度的标准力矩,从而使悬臂梁产生标准的应变形式,以便于后续的应变片灵敏度标定处理。当航天器悬臂梁中性层不产生应变效应时,材料表面的应变系数始终与航天器在轨姿态深度保持正比数值关系,由于应变片设备与 FBG 传感器都具有一定的物理厚度,因此粘贴于航天器悬臂梁表面传感器设备实际所发生的应变效应,则应与航天器的重力应变效应不完全相等<sup>[14-15]</sup>。在实施标定时,需要准确掌握悬臂梁厚度、航天器重力等参量的物理数值,并应在对应高度梯度数值处,对这些物理参量进行补偿处理,从而得到最终的航天器应变传感器标定结果<sup>[16-17]</sup>。应变传感器标定原理如图 3 所示。

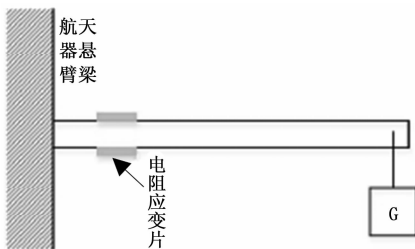


图 3 应变传感器标定原理

设  $\alpha_0$  代表最小的悬臂梁厚度取值结果,  $\alpha_n$  代表最大的悬臂梁厚度取值结果,  $n$  代表航天器的标准力矩系数, 联立上

述物理量,可将物联网环境下的航天器应变传感器标定结果表示为:

$$Q = \log \frac{\sum_{\alpha_0=1}^{\alpha_n} [g_0(t) - g_n(t)]^2}{\sum_{\alpha_0=1}^{\alpha_n} [n(\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n)]^2} \quad (1)$$

式中,  $g_0$  代表最小的航天器重力参量,  $g_n$  代表最大的航天器重力参量,  $t$  代表 FBG 应变传感器的时间标定系数,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\dots$ 、 $\omega_n$  分别代表  $n$  个不同的应变片灵敏度系数指标。

### 2.2 姿态传递系数

姿态传递系数是存在于航天器姿态控制器与主动振动控制器之间的监测解调处理指标,可联合应变传感器标定结果,建立必要的力学平衡微分方程,再以此为基础,确定航天器在轨姿态在物联网环境中所具备的行为传递能力。在物联网应用环境中,设  $\varphi$  代表航天器在轨航行位移与实际监测位移之间的物理夹角,  $\sin\varphi$  代表夹角  $\varphi$  的正弦计算值,  $\cos\varphi$  代表夹角  $\varphi$  的余弦计算值,联立公式 (1),可将航天器的姿态传递系数定义为:

$$E = 1 - \frac{\sin\varphi(\bar{k} \cdot \bar{y})}{\lambda \cdot Q \cdot \cos\varphi(k' \cdot y')} \quad (2)$$

其中:  $\bar{k}$  代表夹角  $\varphi$  在轨航行位移的对应边长度值,  $\bar{y}$  代表在轨航行位移的斜对边长度值,  $k'$  代表夹角  $\varphi$  实际监测位移的对应边长度值,  $y'$  代表实际监测位移的斜对边长度值,  $\chi$  代表物联网环境下航天器的航行边角对应关系,  $L$  代表位移轨迹均值量,  $\lambda$  代表航天器的在轨姿态传递周期。

### 2.3 基于 ADRC 的航天器在轨姿态的监测控制律

横向在轨应变效应描述了航天器在阶段性时间内的航行姿态变化趋势,从参量数值的角度来看,在与物联网监测主机建交的情况下,横向在轨应变效应能够影响监测系统对于航天器在轨航行能力的判定结果,且无论航天器所处何种行进状态,应变效应的数值指标规律都不会受到影响。设  $I$  代表航天器的在轨航行终止节点坐标,  $I_0$  代表起始节点坐标,  $\bar{D}$  代表基于物联网的航天器在轨姿态变化量均值,联立公式 (2),可将横向在轨应变效应定义为:

$$A = \frac{(I - I_0)}{\bar{D} - \eta \times (f - f_0)} \cdot E^2 \quad (3)$$

式中,  $f$  代表航天器的终止位移坐标,  $f_0$  代表起始位移坐标,  $\eta$  代表基于物联网的航天器在轨航行适应性监测指标。

航天器在轨姿态监测控制律基于 ADRC 原理,可根据横向在轨应变效应原理,将航天器主机调试至最佳行进状态,通过 ADRC 提取最佳行进状态信号,能够在物联网感应的作用下,更改监测设备所记录的航行数据参量,并将其信息文件的形式,反馈至相关物联网设备元件之中。

通过 ADRC 原理提取航天器在轨姿态感知参量的最佳行进状态信号:

$$\beta = Q(r^2 - h) \quad (4)$$

$$\xi = h * Ah(1 - r^2) \quad (5)$$

式中,  $\beta$ 、 $\xi$  分别代表两个不同的航天器在轨姿态感知参量最佳行进状态信号,  $r$  为跟踪速度因子,  $h$  为滤波因子。在物联网监测环境中, 上述两项物理量的数值水平越高, 最终计算所得的航天器在轨姿态监测控制律条件也就越符合实际应用需求。在上述物理量的支持下, 联立公式 (3)、(4)、(5), 可将航天器在轨姿态监测控制律表达式定义为:

$$Z = -\frac{A^2}{(\beta \times \xi) u_1 u_2} x_{\min} \quad (6)$$

其中:  $u_1$ 、 $u_2$  分别代表两个不同的航天器在轨姿态指标,  $x_{\min}$  代表最小的位姿变动感知量。至此, 实现各项软、硬件执行环境的搭建, 在物联网应用环境的支持下, 完成新型航天器在轨姿态监测系统设计。

### 3 系统应用与测试

为验证基于物联网及 ADRC 的航天器在轨姿态监测系统的实际应用价值, 设计如下对比实验。规定航天器设备的起始放置位置为在轨姿态的初始记录节点, 航天器设备的终止放置位置为在轨姿态的最终记录节点, 将物联网传感器与航天器设备相连, 在整个航行过程中, 利用传输导线导出各个时间节点处的物理参量指标, 以用作后续的实验结果研究与分析, 其中实验组主机搭载基于物联网及 ADRC 的航天器在轨姿态监测系统, 对照组主机搭载光纤传感型监测系统。

在特殊航天环境中, 由于电磁波干扰条件的存在, 航天器设备极易偏离预设的轨迹路径。已知电磁波能够影响航天器监测信号的解调偏差结果, 一般情况下, 解调偏差量越大, 航天器设备偏离预设轨迹的行为越明显。

表 1 记录了实验组、对照组航天器监测信号横向解调偏差量的数值对比情况。

表 1 横向解调偏差量

实验时间/ (min)	横向解调偏差量/(%)			
	实验组		对照组	
	1	2	1	2
5	16.4	16.9	35.7	34.6
10	16.1	16.8	35.8	35.0
15	16.3	16.8	35.9	35.1
20	16.2	17.0	36.0	35.3
25	16.5	16.5	36.1	35.4
30	16.1	16.4	36.2	35.4
35	16.3	16.8	36.3	35.4
40	16.1	16.7	36.4	35.7
45	16.2	16.5	36.5	35.7
50	16.4	16.6	36.6	35.9

分析表 1 可知, 随着实验时间的延长, 实验组横向解调偏差量基本保持相对稳定的数值波动变化状态, 且第一组均值结果低于第二组均值结果, 整个实验过程中的最大数值结果仅能达到 17.0%。对照组横向解调偏差量在第一个实验组别中始终保持小幅稳定上升的数值变化趋势, 在第二个实验组别中虽出现小幅稳定趋势, 但整体依然呈现

不断上升的数值变化状态, 整个实验过程中的最大数值结果达到了 36.6%, 与实验组最大值相比, 上升了 19.6%。

综上可认为, 随着基于物联网及 ADRC 的航天器在轨姿态监测系统的应用, 航天器监测信号横向解调偏差量出现了明显下降的数值变化趋势, 可在特殊航天环境中, 防止航天器设备偏离预设的轨迹路径。

表 2 记录了实验组、对照组航天器监测信号纵向解调偏差量的数值对比情况。

表 2 纵向解调偏差量

实验时间/ (min)	纵向解调偏差量/(%)			
	实验组		对照组	
	1	2	1	2
5	20.2	19.8	49.5	50.7
10	20.4	20.0	49.5	50.9
15	20.5	20.3	49.5	51.1
20	20.7	20.4	50.2	51.3
25	20.8	20.5	50.6	51.4
30	20.8	20.6	50.8	51.5
35	20.6	20.7	51.1	51.6
40	20.3	20.5	51.4	51.8
45	20.2	20.3	51.7	51.9
50	20.1	20.2	51.9	52.0

分析表 2 可知, 随着实验时间的延长, 实验组纵向解调偏差量在第一个实验组别中保持先上升、再稳定、最后下降的数值变化趋势, 在第二个实验组别中则保持先上升、再下降的数值变化趋势, 整个实验过程中的最大数值结果达到了 20.8%。对照组纵向解调偏差量在第一个实验组别中保持先稳定、再上升的数值变化趋势, 在第二个实验组别中则保持连续上升的数值变化趋势, 整个实验过程中的最大数值结果达到了 52.0%, 与实验组最大值相比, 上升了 31.2%。

综上可认为, 随着基于物联网及 ADRC 的航天器在轨姿态监测系统的应用, 航天器监测信号纵向解调偏差量也出现了明显下降的数值变化趋势, 在特殊航天环境中, 能够较好地抑制航天器设备偏离预设轨迹路径。

### 4 结束语

在物联网环境中, 联合主动振动控制器、FBG 应变传感器等多个设备应用元件, 建立一个相对稳定的硬件执行环境, 再通过 ADRC 原理及应变传感器标定处理的方式, 实现基于物联网及 ADRC 的航天器的在轨姿态监测系统设计。由于姿态传递系数结果不断趋于清晰, 横向在轨应变效应可辅助航天器在轨姿态监测控制律提供更为可信的监测系统解调处理结果, 且随着横向解调偏差值、纵向解调偏差值物理量的不断减小, 可在特殊航天环境中, 有效屏蔽电磁波的物理干扰作用, 确保航天器设备不会轻易偏离预设的轨迹路径。

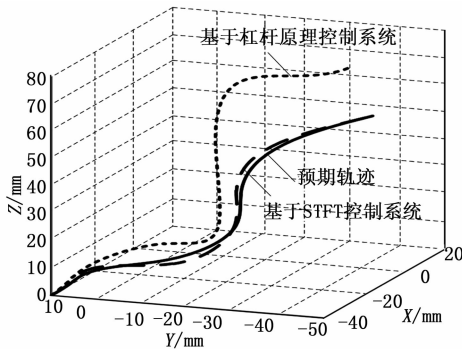
#### 参考文献:

[1] 李 硕, 朱纪洪, 和 阳, 等. 航天器永磁同步电机容错式直接

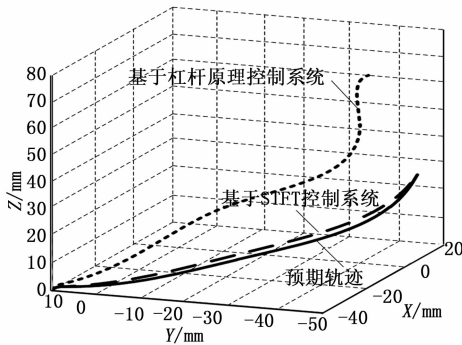
转矩控制 [J]. 空间控制技术与应用, 2019, 45 (5): 48-53.

- [2] 沈冲, 吴红飞, 高尚, 等. 基于光伏-储能集成功率模块的航天器分布式供电系统能量管理策略 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (20): 291-299.
- [3] Zheng H, Zhai G. Attitude dynamics of coupled spacecraft undergoing fuel transfer [J]. Multibody System Dynamics, 2019.
- [4] 刘海娃, 袁肖肖, 汤建华. 某航天器发动机机组热分析及在轨应用研究 [J]. 载人航天, 2020, 26 (4): 130-137.
- [5] Hansen D L, Ecale E, Hillman R, et al. Correlation of Single-Board Computer Ground-Test Data and On-Orbit Upset Rates From the Gaia Mission [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, 66 (1): 270-275.
- [6] Tsujita D, Okumura T, Kobayashi Y, et al. Analysis of Charging of the HTV-4 Based on On-Orbit Data [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019 (99): 1-10.
- [7] 王鹏飞, 杜忠华, 马祥, 等. 车辆主动悬架二次型最优控制器矩阵参数优化 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (13): 364-370.
- [8] 马天兵, 周青, 杜菲, 等. 基于机器视觉和改进 PID 的压电柔性机械臂振动控制 [J]. 光学精密工程, 2020, 28 (1):

(上接第 48 页)



(a) 主臂运动轨迹



(b) 从臂运动轨迹

图 8 两种系统机器人主从臂运动轨迹跟踪结果对比分析

出了系统的总体设计方案。通过对 CAN 总线网络分布式控制的研究, 确定了控制系统总体结构。利用蓝牙无线通讯技术, 实现了运动控制系统与主机的通讯。这样可以减少医生与病人之间的直接接触, 避免相互间的交叉感染。模块化设计, 便于系统调试和升级, 并充分考虑控制系统可靠性。实验结果表明, 该系统能满足运动控制器的实时稳

146-155.

- [9] 周湛杰, 王新生, 王岩. 基于模糊自适应算法的航天器姿态控制 [J]. 电机与控制学报, 2019, 23 (2): 127-132.
- [10] 田源, 王俊波, 宿敬亚. 应用 PMPF 调节器的空间飞行器姿态控制方法研究 [J]. 现代防御技术, 2020, 48 (1): 36-41.
- [11] 沈培, 贾付金, 罗家维, 等. 空间飞行器的姿态和扰动抑制控制器设计 [J]. 火力与指挥控制, 2019, 44 (4): 103-108.
- [12] 魏莉, 刘芹, 王兢兢, 等. 光纤光栅应变传感在扭振测量中的应用 [J]. 机械设计与制造, 2020, 350 (4): 211-214.
- [13] 杨韬略, 李凤, 王省哲. 低温下 FBG-GMM 光纤磁场传感性能与增敏的实验研究 [J]. 实验力学, 2020, 35 (5): 65-71.
- [14] 王丽锋. “互联网+”在危急重症护理中的应用研究 [J]. 饮食保健, 2019, 6 (30): 197-198.
- [15] 胡方田, 章程. 物联网技术在水北调中线工程消防系统中的应用 [J]. 水电站机电技术, 2019, 42 (4): 6-8.
- [16] 庞学丰, 王瑞文, 张玉美, 等. 基于机器视觉的航天器密封舱内结构装配精度检测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020 (8): 53-57.
- [17] 王建军, 向永清, 何正文. 航天器试验大数据系统实现与典型应用 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (4): 260-263.

定控制要求。

参考文献:

- [1] 刘莉, 刘洁, 张锦. 基于 FPGA 的微创外科手术机器人运动控制系统的设计 [J]. 电气传动, 2019, 49 (4): 69-73.
- [2] 桑宏强, 张文刚, 刘芬. 微创手术机器人主从运动控制系统设计 [J]. 控制工程, 2020, 27 (4): 131-137.
- [3] 牛国君, 曲翠翠, 潘博, 等. 腹腔微创手术机器人的主从控制 [J]. 机器人, 2019, 41 (4): 551-560.
- [4] 朱家诚, 杨少锋, 余深泽, 等. 基于 PMAC 的四轴桁架机器人控制系统设计 [J]. 现代制造工程, 2018, 457 (10): 78-81.
- [5] 赵建伟, 项远城, 张冬顺, 等. 基于自适应算法驱动器的矿用机器人运动控制 [J]. 煤炭工程, 2018, 50 (7): 158-162.
- [6] 凌颖, 王国慧, 易波, 等. 基于 FNTFSMC 的国产腹腔镜手术机器人轨迹控制 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40 (5): 182-189.
- [7] 杨铨浩, 桑宏强, 刘芬, 等. 具有震颤抑制的微创机器人主从控制系统设计 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54 (1): 240-244.
- [8] 李政, 王国慧, 凌颖, 等. 基于术中轨迹的微创手术机器人的主从映射比例评估 [J]. 机械工程学报, 2018, 54 (17): 69-75.
- [9] 安嘉强, 汤晓华, 刘美莲, 等. 基于 ARM-MCX514 的机器人-数控协同系统运动控制器设计 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (3): 63-67.
- [10] 陈利辉. 腹腔镜微创治疗肝胆结石临床效果观察 [J]. 饮食保健, 2018, 5 (24): 58-59.
- [11] 李格伦, 崔天时, 刘春莉, 等. 农用轮式机器人运动控制系统设计与试验 [J]. 农机化研究, 2018, 40 (2): 198-202.
- [12] 张东涛, 周莹莹, 吴东林. 基于物联网的智能割草机器人运动控制系统研究 [J]. 农机化研究, 2020, 42 (10): 43-47.