

## 红外相机扫描镜轨迹跟踪的迭代学习控制方法

王淳 郭兰杰 鄢南兴 康建兵

### Trajectory tracking control for scanning mirror of infrared camera based on iterative learning algorithm

Wang Chun, Guo Lanjie, Yan Nanxing, Kang Jianbing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20200257>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于迭代学习控制的潜望式激光通信终端系统的动态跟踪设计

Design of dynamic tracking for periscopic laser communication terminal system based on iterative learning control

红外与激光工程. 2020, 49(10): 20200056-1-20200056-8 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200056>

#### 基于位置域迭代学习的激光导引头测试系统时变周期干扰抑制

Time-varying periodic disturbance suppression of laser seeker testing system based on spatial iterative learning control

红外与激光工程. 2019, 48(9): 913002-0913002(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0913002>

#### 外参数激励MOEMS扫描镜动力学过程与追踪控制

Kinetic process and tracking control of MOEMS scanning mirror under external parameter excitation

红外与激光工程. 2017, 46(9): 920004-0920004(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0920004>

#### 基于深度学习的目标跟踪方法研究现状与展望

Status and prospect of target tracking based on deep learning

红外与激光工程. 2017, 46(5): 502002-0502002(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0502002>

#### 基于深度学习物体检测的视觉跟踪方法

A visual tracking method via object detection based on deep learning

红外与激光工程. 2018, 47(5): 526001-0526001(11) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0526001>

#### 傅里叶光谱仪平动式光程扫描控制系统设计

Design of translating optical path scanning control system for Fourier spectrometer

红外与激光工程. 2020, 49(1): 0105002-0105002(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0105002>

## 红外相机扫描镜轨迹跟踪的迭代学习控制方法

王 淳, 郭兰杰, 鄢南兴, 康建兵

(北京空间机电研究所 机构与控制技术研究室, 北京 100094)

**摘要:** 为提高星载广域红外相机的观测效率与凝视成像质量,扫描镜需要在几十毫秒的时间内完成角度切换,实现角秒级的轨迹跟踪控制。在闭环带宽有限的情况下,性能指标难以通过基于经典控制理论的算法实现。针对枢轴支撑的扫描镜机构,提出了一种基于迭代学习的高阶系统轨迹跟踪控制方法,推导了迭代学习律,并通过预测型算法对学习律进行了优化,避免了误差高阶导数的计算。然后通过频域分析说明了算法收敛性,选取了关键参数。通过仿真与原理样机实验验证了其应用效果。测试结果表明,算法在闭环带宽低于 2 Hz 的情况下,无需辨识被控对象的高阶特性,即可实现扫描镜对角加速度超过  $10^6$  ( $^\circ$ )/ $s^3$  轨迹的高精度跟踪控制,跟踪误差优于  $\pm 1.5''$ ,满足相机应用要求。

**关键词:** 扫描镜控制系统; 轨迹跟踪; 迭代学习控制; 预测型学习律

中图分类号: TP73; TN216 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200257

## Trajectory tracking control for scanning mirror of infrared camera based on iterative learning algorithm

Wang Chun, Guo Lanjie, Yan Nanxing, Kang Jianbing

(Department of Mechanism and Control Technology, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of observation and the quality of staring imaging, satellite-borne wide field infrared camera has a strict requirement on the scanning mirror control system. The scanning mirror is required to achieve fast steering in tens of milliseconds and trajectory tracking with arc second level control precision. Due to the limit of control system bandwidth, the motion performances are difficult to realize by algorithm based on classical control theory. For the scanning mirror with pivot supporting, a trajectory tracking control method for high order controlled plant based on iterative learning algorithm was proposed. The design and optimization process of learning law was given. By using anticipatory learning scheme, the calculations of high order derivatives for tracking error were avoided. Furthermore, the convergence condition and the key parameter of control algorithm were derived by frequency domain analysis. Its application effect was verified by both simulation and prototype test. The prototype test results show that, in the scanning mirror closed-loop control system with less than 2 Hz bandwidth and no identification for high order characteristics of the controlled plant, the tracking error of a desired trajectory with above  $10^6$  ( $^\circ$ )/ $s^3$  angular jerk is reduced to  $\pm 1.5''$  after adopting the iterative learning algorithm, which meets the performance requirements of infrared camera system.

**Key words:** scanning mirror control system; trajectory tracking; iterative learning control; anticipatory learning scheme

收稿日期:2020-06-24; 修订日期:2020-08-11

基金项目:国防科工局民用航天“十三五”预研项目 (D040104)

## 0 引言

扫描镜机构作为光学遥感相机中的关键组件之一,通过扫描镜的往复运动实现运动补偿、大视场成像等功能,广泛应用于各领域的遥感卫星中<sup>[1-2]</sup>。目前工程上应用的扫描镜控制方法,以 PID 控制、前馈补偿等基于经典控制理论的算法为主<sup>[3-4]</sup>,相关文献中也提出了基于  $H_\infty$  的鲁棒控制方法<sup>[5]</sup>,但仅处于仿真阶段。

迭代学习控制<sup>[6-7]</sup>(Iterative Learning Control, ILC)适用于具有重复运动性质的被控对象,广泛应用于注塑机<sup>[8]</sup>、机械臂<sup>[9]</sup>、航空航天<sup>[10]</sup>等运动控制领域,实现周期性轨迹的完全跟踪<sup>[11]</sup>或周期性干扰抑制<sup>[12]</sup>。文中针对枢轴支撑的扫描镜高阶被控对象,提出了一种基于迭代学习的扫描镜快速切换与轨迹跟踪控制方法,详细阐述了控制系统的组成、算法结构、迭代学习律的设计与优化过程。通过频域分析的方法,说明了算法的收敛性并选取了关键控制参数。然后通过仿真以及原理样机实试验证了算法的可行性。实测结果表明,该方法在系统带宽受限的情况下,无需精确辨识被控对象的高阶特性,即可有效提升扫描轨迹的跟踪精度,从而保证相机对目标的凝视成像效果。

## 1 星载广域红外相机扫描镜工作原理

某星载广域红外相机的工作原理示意图如图 1 所示。其相机主体(包括扫描镜机构、光学镜头、面阵探测器等组件)安装于星载转台上,与星载转台一起以角速度  $\omega_{zt}$  匀速单方向 360° 连续旋转,实现广域观测功能。扫描镜的旋转轴与转台的旋转轴严格平行,在探测器的一次成像积分时间内,扫描镜以角速度  $\omega_{sm}=0.5\omega_{zt}$  旋转。扫描镜旋转方向与转台旋转方向相反,从而实现对观测目标的相移补偿,使相机实现在探测器积分时间内对观测目标的凝视成像。这种通过扫描镜补偿目标相移的面阵凝视成像方式具有探测器积分时间长、易实现高灵敏度探测等优点。

为了提高相机的观测效率,相机分系统要求扫描镜具备快速的角度位置切换复位能力,即扫描镜在探测器前一次积分时间结束后,需要快速切换到扫描运动的初始位置,并再次开始匀速扫描,使相机进行下一次曝光成像。扫描镜的期望运动轨迹  $\theta_d(t)$  如图 2 所示。

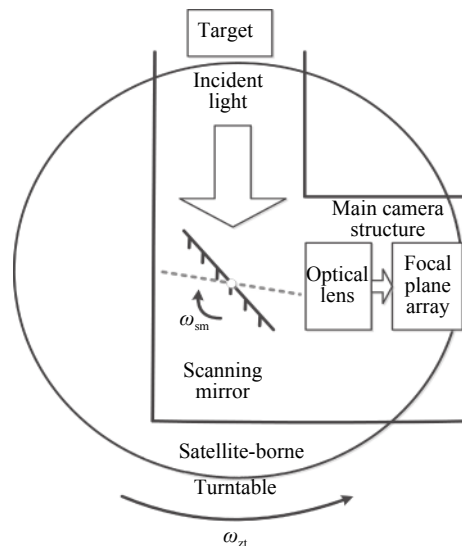
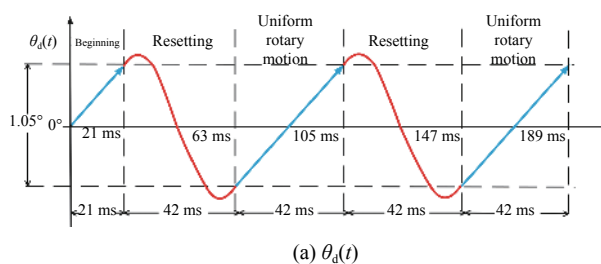
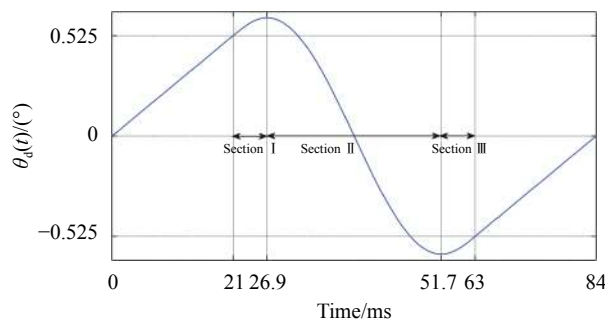


图 1 星载广域红外相机工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of satellite-borne wide field infrared camera



(a)  $\theta_d(t)$



(b)  $\theta_d(t)$  of resetting section

图 2 扫描镜期望运动轨迹图

Fig. 2 Desired trajectory of scanning mirror

扫描镜的每个运动周期都分为匀速段与复位段两部分。根据相机使用需求,匀速段与复位段的时间皆为 42 ms,每个运动周期合计为 84 ms,频率约 11.9 Hz。匀速段对应相机成像曝光时段,扫描速度  $\omega_{sm}=25$  (°)/s,扫描镜在匀速段的摆角范围为 1.05°。为了保证目标的凝视成像效果,要求星载转台与扫描镜都必须具有较高的控制精度,确保两者在匀速段内的二倍角关系。系统要求扫描镜在匀速段内的位置跟踪精度达到角秒级。在复位段内,系统对扫描镜没有跟踪精度

要求,但是在复位段结束、下个匀速段开始的时刻,要求扫描镜的跟踪误差已稳定到角秒级。如图 2(b)所示,扫描镜要在 42 ms 内依次完成减速停止,从一端切换到另一端,然后再加速到  $\omega_{sm}$  共三个步骤。对基于经典控制理论的闭环系统设计而言,极短的切换及稳定时间必然要求较高的控制系统带宽。目前遇到的问题是,为了提高控制带宽,系统要满足多个前提条件,包括扫描镜机构(含扫描镜)须具备足够高的

扭转刚度;控制器须具备较强的实时计算能力保证与带宽匹配的高采样/控制频率;测量元件须具有足够低的测量噪声与时间延迟等,这些硬件条件都极大地增加了工程实现的难度与成本。

## 2 扫描镜控制系统组成与实施方案

控制系统由扫描镜机构与电子学控制器组成,如图 3 所示。

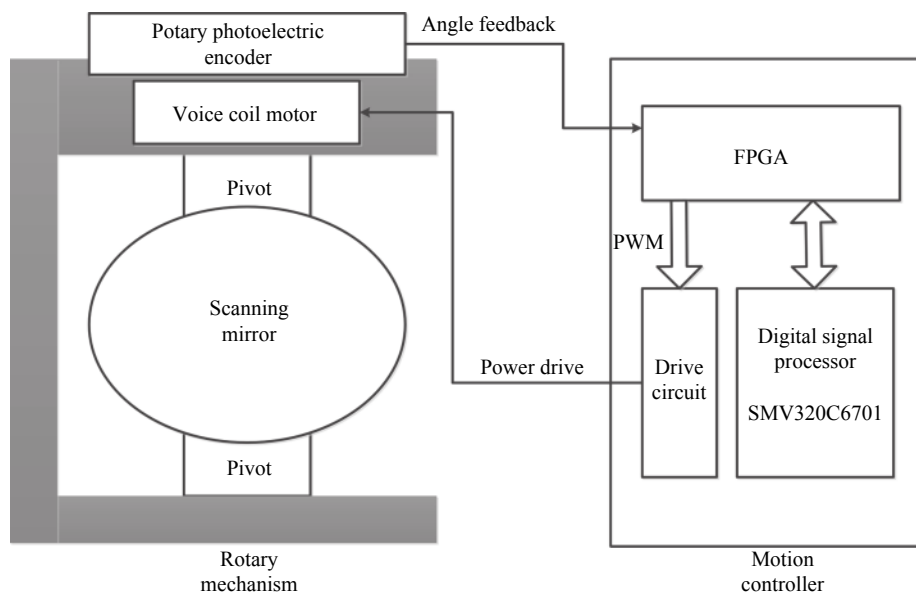


图 3 扫描镜控制系统组成

Fig.3 Composition of scanning mirror control system

原理样机机构中的光学扫描镜采用 SiC 镜坯,尺寸为 181 mm×120 mm,质量约 0.57 kg,绕旋转轴的转动惯量约为  $1.2 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

根据扫描镜往复摆动的运动方式,1°左右的摆角范围,以及高达  $10^9$  的摆动次数要求,扫描镜机构采用挠性枢轴支撑,音圈电机驱动的方案。角度反馈元件选用高精度光电码盘,分辨率可达 26 bit 及以上,从而实现角秒级的控制精度。

电子学控制器主要由控制电路与驱动电路组成。控制电路的核心器件为高性能浮点型数字信号处理器 SMV320C6701(简称 C6701)与 FPGA。C6701 通过 32 bit 的外部存储总线接口(External Memory Interface, EMIF)与 SRAM、PROM、MRAM 及 FPGA 相连,并通过不同的使能信号(CE0~CE3)将其配置在不同的外部存储空间,其中 SRAM 用来存储 C6701

计算过程中产生的临时数据,MRAM 则作为非易失性存储器保存需要重复使用的数据,PROM 用来实现程序的固化。伺服过程中,FPGA 接收并解析来自光电码盘的角度位置信号。C6701 以 0.1 ms 的采样/控制周期从 FPGA 中读取当前角度位置,再根据扫描镜的期望轨迹与控制算法实时计算产生音圈电机的驱动电压值并发送给 FPGA,FPGA 产生相应的 PWM 波形发送给驱动电路。驱动电路由 MOSFET 管组成 H 桥电路,实现音圈电机的双极性驱动。

闭环控制所需的角指令,即图 2 中的扫描镜期望运动轨迹  $\theta_d(t)$  由 C6701 按 0.1 ms 的控制周期实时计算生成。为使切换复位过程尽可能平滑,复位段的位置指令由 3 段正余弦信号拼接而成,总时间为 42 ms,如图 2(b)所示。图中第 I 段与第 III 段为 1/4 周期的正弦信号,分别对应扫描镜的减速过程与加速过程。

第 II 段为 1/2 周期的余弦信号, 对应扫描镜的角度切换过程。以角加速度(角速度的导数)最小为目标, 经计算可得, 第 I 段与第 III 段的持续时间约为 5.9 ms, 对应的正弦信号频率约为 42 Hz。第 II 段的持续时间约为 30.2 ms, 对应的余弦信号频率约为 16.5 Hz。尽管角度指令已进行了平滑处理, 但复位段轨迹的最大角加速度依然高达  $6677 (^{\circ}/s^2)$ , 最大角加加速度(角加速度的导数)达到  $1.78 \times 10^6 (^{\circ}/s^3)$ 。

扫描镜机构作为被控对象, 其特点是枢轴支撑, 音圈电机驱动。枢轴支撑的摩擦极小可忽略不计, 则被控对象的动力学模型用微分方程组表达, 如公式(1)所示:

$$\begin{cases} u = L \frac{di}{dt} + Ri + K_v \omega \\ K_m i - K_n \theta = J \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\theta(t)$  为  $t$  时刻扫描镜角度;  $\omega(t)$  为角速度;  $u(t)$  为音圈电机绕组两端驱动电压;  $i(t)$  为绕组电流。测试用的原理样机的参数包括: 音圈电机绕组电阻  $R=4.5 \Omega$ , 绕组电感  $L=4.3 \text{ mH}$ , 电流力矩系数  $K_m=0.26 \text{ Nm/A}$ , 反电势系数  $K_v=0.26 \text{ V/rad}\cdot\text{s}^{-1}$ , 枢轴扭转刚度(两个共

计)  $K_n=0.382 \text{ Nm/rad}$ , 电机总负载惯量(含扫描镜, 码盘等)  $J=5 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

音圈电机驱动电压  $U(s)$  至扫描镜角度  $\theta(s)$  的传递函数记为  $G_p(s)$ , 如公式(2)所示:

$$G_p(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{JLs^3 + JRs^2 + (K_nL + K_mK_v)s + K_nR} \quad (2)$$

由公式(2)可知, 由于枢轴挠性支撑的影响, 扫描镜机构为三阶被控对象, 并且存在谐振点。因此在基于经典控制理论的闭环算法设计中, 首先采用了基于角度位置与角速度的次环反馈来增加系统阻尼, 消除谐振点。同时, 为减小稳态误差, 提高系统型别, 在前向通道中采用比例-积分控制器。位置闭环控制算法的结构图如图 4(a) 所示。其中,  $K_a$ 、 $K_s$  分别为次环反馈中的位置增益与速度增益系数;  $K_p$ 、 $K_i$  分别为比例与积分控制器系数。扫描镜机构没有安装测速元件, 因此速度信号由角度位置经数字差分与低通滤波后得到。受量化影响, 数字差分会给速度信号带来较大的噪声, 因此机构选用的光电码盘应具有足够高角度测量分辨率, 使噪声降低到可接受的程度。

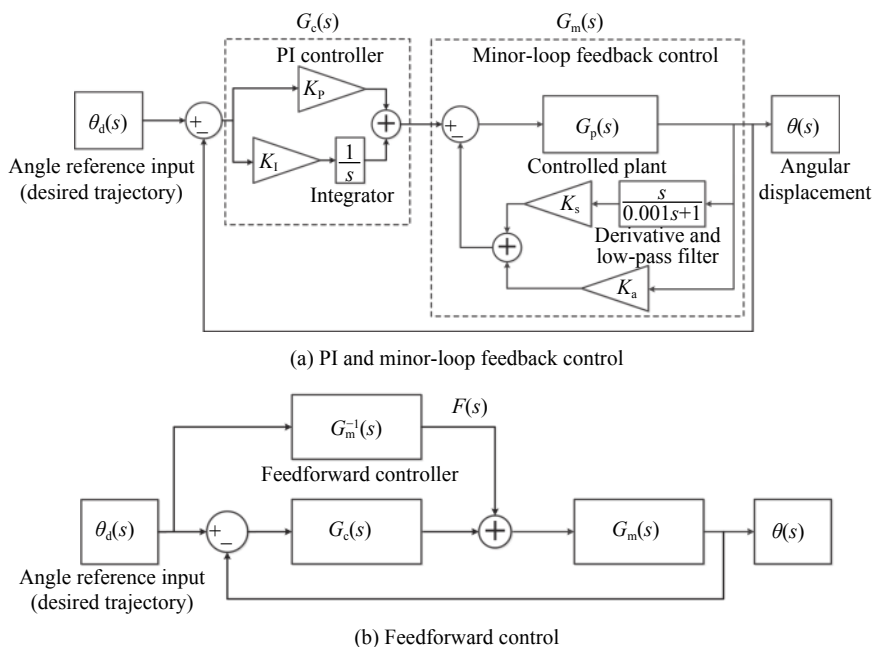


图 4 基于经典控制理论的闭环算法结构图

Fig.4 Block diagram of closed-loop system based on classical control theory

记 PI 控制器的传递函数为  $G_c(s)$ , 次环反馈闭环后的被控对象记为  $G_m(s)$ , 为方便后文描述, 将  $G_m(s)$  写成如下形式(忽略速度低通滤波产生的高阶项):

$$G_m(s) = \frac{1}{C_3s^3 + C_2s^2 + C_1s + C_0} \quad (3)$$

当  $K_a \gg K_nR/K_m$ ,  $K_s \gg (K_nL + K_mK_v)/K_m$  时, 可得  $C_0 \approx K_a$ ,  $C_1 \approx K_s$ 。



按照图 2 的期望轨迹与图 4(a) 的控制系统设计闭环算法, 若要实现复位段快速切换稳定并满足匀速段角秒级的跟踪误差, 经仿真, 系统闭环带宽须达到百赫兹以上, 工程实现代价极大。

对于周期性往复运动的控制系统, 前馈控制可以在不提高系统带宽的前提下有效提高控制精度<sup>[13]</sup>。前馈控制结构图如图 4(b) 所示。

理论上, 如果设计的前馈控制器能完全实现  $G_m^{-1}(s)$  的频率特性, 则系统能实现对输入轨迹的完全跟踪。由公式 (3) 可知, 对于枢轴支撑的高阶被控对象, 系统需要精确辨识  $C_0 \sim C_3$  这四个系数, 然后分别与角度指令、角速度指令、角加速度指令以及角加加速度指令相乘, 才能实现  $G_m^{-1}(s)$ 。图 2(b) 所示的期望轨迹的角加加速度达到了  $10^6 (^\circ)/s^3$  的量级, 因此前馈控制器的输出 (图 4(b) 中的  $F(s)$ ) 对高阶系数  $C_3$  极为敏感。在实际工程中, 由于难以准确地辨识被控对象的高阶特性, 无法实现理想的前馈控制。通过原理样

机实测, 在闭环带宽有限的情况下, 基于固定系数的前馈控制只能实现百角秒左右的跟踪精度。文中提出的基于迭代学习算法的轨迹跟踪控制, 本质上也是一种前馈控制方法, 其区别在于控制量  $F(s)$  不是固定的, 而是根据误差信号不断迭代修正得到的, 因此不需要精确辨识被控对象的动力学特性, 是一种智能控制<sup>[6]</sup>。

### 3 基于迭代学习算法的轨迹跟踪控制

#### 3.1 迭代学习控制器结构与学习律设计

基于迭代学习算法的控制器结构如图 5 所示。图中,  $F_j(s)$  为第  $j$  次迭代时产生的控制量  $f_j(t)$  的拉普拉斯变换。 $E_j(s)$  为第  $j$  次迭代时, 期望轨迹与系统输出之间的误差。ILC 的目标是通过多次重复运行与迭代后, 使  $f_j(t)$  逼近理想的控制量  $f_d(t)$ 。在  $f_d(t)$  的作用下, 可使得系统输出  $\theta(t)=\theta_d(t)$ ,  $e(t)=0$ , 即实现期望轨迹的完全跟踪。

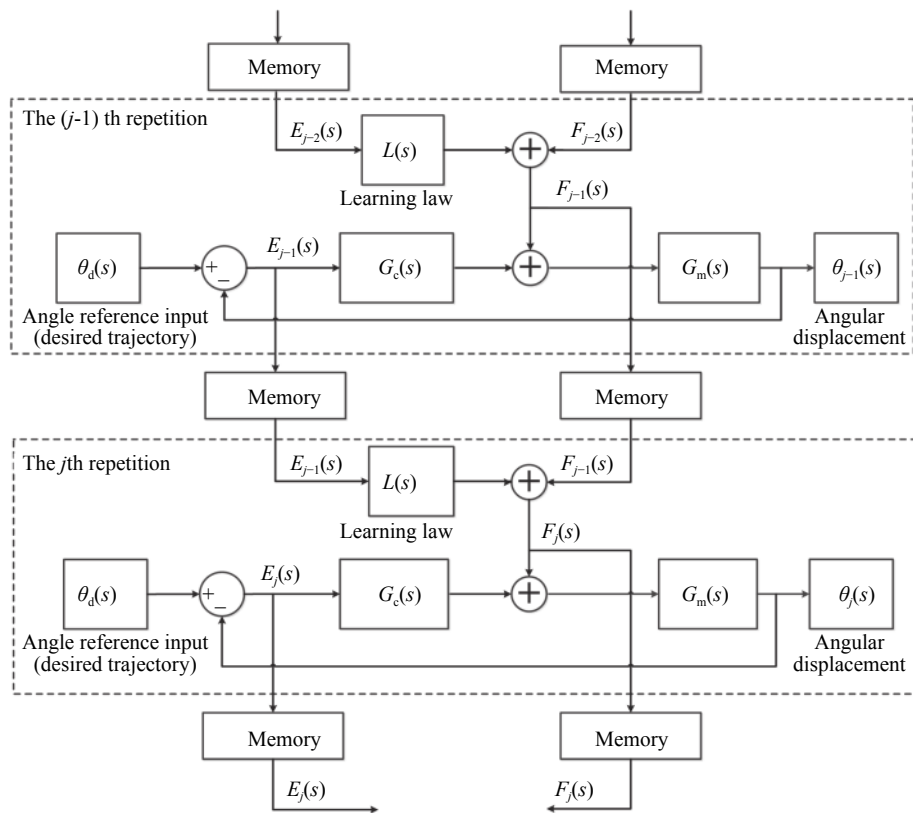


图 5 基于迭代学习算法的控制系统结构图

Fig.5 Block diagram of control system based on ILC

$L(s)$  为需要进行设计的迭代学习律, 常见的学习律类型包括 D 型、P 型、PD 型。预测型迭代学习控

制<sup>[14-15]</sup>(Anticipatory Iterative Learning Control) 的原理是基于控制量  $f_j(t)$  在  $t$  时刻对系统产生的影响, 会经

系统延迟后体现在  $t+\Delta$  时刻的系统输出上。因此在预测型 ILC 中, 用  $j-1$  次迭代时,  $t+\Delta$  时刻的误差  $e_{j-1}(t+\Delta)$  来修正  $j$  次迭代中  $t$  时刻的控制量  $f_j(t)$ , 取得了较好的控制效果。控制量迭代过程的时域表达式为:

$$f_j(t) = f_{j-1}(t) + L(e_{j-1}(t+\Delta)) \quad (4)$$

对于图 5 所示系统, 可得到如下关系式:

$$F_j(s) = F_{j-1}(s) + E_{j-1}(s)L(s) \quad (5)$$

$$E_{j-1}(s) = \theta_d(s) - \theta_{j-1}(s) \quad (6)$$

$$(E_{j-1}(s)G_c(s) + F_{j-1}(s))G_m(s) = \theta_{j-1}(s) \quad (7)$$

$$E_j(s) = \theta_d(s) - \theta_j(s) \quad (8)$$

$$(E_j(s)G_c(s) + F_j(s))G_m(s) = \theta_j(s) \quad (9)$$

由公式 (5)~(9) 可得:

$$E_j(s) = E_{j-1}(s) \left( 1 - \frac{G_m(s)}{1 + G_c(s)G_m(s)} L(s) \right) \quad (10)$$

易知, 若将迭代学习律  $L(s)$  设计为:

$$L(s) = \frac{1 + G_c(s)G_m(s)}{G_m(s)} = \frac{C_3s^3 + C_2s^2 + C_1s + C_0 + G_c(s)}{G_m(s)} \quad (11)$$

则  $E_j(s) = E_{j-1}(s) \times 0$ , 即误差会在一次迭代后变为 0, 实现完全跟踪。但是实际被控对象的  $C_0 \sim C_3$  无法精确辨识, 并且公式 (11) 中的前三项  $s^3$ 、 $s^2$ 、 $s$  分别对应系统的角加加速度误差、角加速度误差与角速度误差, 控制器无法直接测量。如果通过差分计算误差的高阶导数会引入极大的噪声, 一般无法在工程上实施。为此, 文中进行了如下的工程优化设计:

(1) 用  $K_a$  代替  $C_0$ , 用  $K_s$  代替  $C_1$ 。如上文所述, 当  $K_a$  与  $K_s$  的值较大时,  $C_0 \approx K_a$ ,  $C_1 \approx K_s$ 。

(2) 由角度位置误差  $E(s)$  通过数字差分与低通滤波的方式, 计算得到速度误差  $\frac{s}{0.001s+1}E(s)$ 。

(3) 根据预测型 ILC 的原理, 利用速度误差在  $t+\Delta$  时刻的值去近似  $t$  时刻的加加速度误差与加速度误差, 即代替公式 (11) 中的  $C_3s^3 + C_2s^2 + C_1s$ , 从而避免误差高阶导数的计算与噪声的引入。

$t+\Delta$  的  $s$  域表达式为  $e^{Ds}$ , 则公式 (11) 学习律的优化设计结果为:

$$L(s) = K_s \frac{s}{0.001s+1} e^{Ds} + K_a + G_c(s) \quad (12)$$

优化后的学习律中只有一个参数待定, 即预测型

ILC 算法中的误差超前时间  $\Delta$ , 易于工程实现。下文说明如何通过频域分析的方法选取参数  $\Delta$ 。

### 3.2 迭代学习律频域分析及算法仿真

首先, 按照图 4(a) 中的控制器结构设计一组闭环参数, 使闭环系统稳定。系统的前向通道增益不宜太高, 避免电机从静止到启动运行时闭环系统产生较大振荡, 影响后续迭代效果。但同时闭环算法要保证扫描镜每一次摆动之前都能稳定伺服到同一初始位置 (即  $0^\circ$ ), 从而满足迭代学习的初始状态要求。在弧度单位制下, 设计的闭环控制参数为  $K_a=200$ ,  $K_s=20$ ,  $K_p=50$ ,  $K_i=2\ 000$ 。此时系统开环穿越频率为 1.26 Hz, 相角裕度为  $62^\circ$ , 系统稳定, 闭环带宽 1.84 Hz。

由公式 (10) 可知, 基于迭代学习算法的系统跟踪误差的频域收敛条件可表示为<sup>[15]</sup>:

$$|\phi(j\omega)| = \left| 1 - \frac{G_m(j\omega)}{1 + G_c(j\omega)G_m(j\omega)} L(j\omega) \right| < 1 \quad (13)$$

将公式 (12) 代入, 得到不同  $\Delta$  下  $|\Phi(j\omega)|$  如图 6 所示。

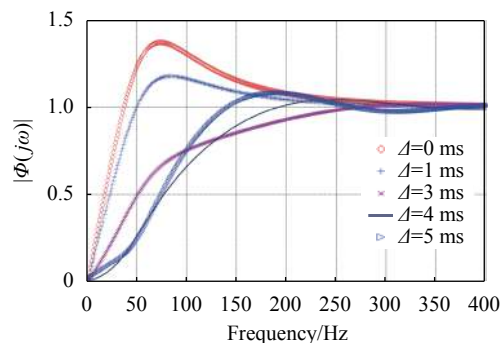


图 6 不同超前时间  $\Delta$  下的  $|\Phi(j\omega)|$

Fig.6 Diagram of  $|\Phi(j\omega)|$  with different lead-time  $\Delta$

当  $\Delta=0$  ms, 即没有超前时间时, 预测型 ILC 退化为 PD 型 ILC。由图 6 可知, 相比 PD 型 ILC, 预测型可以有效提高误差收敛的频率范围以及误差衰减速度。

根据  $|\Phi(j\omega)|$  选取参数  $\Delta$  时, 首先考虑误差收敛的频率范围。迭代过程中, 满足  $|\Phi(j\omega)| < 1$  频率范围内的误差信号会持续衰减, 反之则会持续增大。取  $\Delta=3$  ms 时, 误差收敛的频率范围约为 270 Hz, 超出部分的  $|\Phi(j\omega)|$  最大值为 1.018;  $\Delta=4$  ms 时, 约为 190 Hz, 超出部分最大值为 1.042;  $\Delta=5$  ms 时, 约为 140 Hz, 超出部分最大值为 1.08。然后考虑低频段内的误差衰减速度, 由上文分析可知, 期望轨迹的频率主要包括 11.9 Hz、

16.5 Hz 和 42 Hz, 因此主要考虑 50 Hz 以内的误差衰减情况。当频率为 50 Hz 时, 若  $\Delta=3$  ms,  $|\Phi(j\omega)|=0.49$ ;  $\Delta=4$  ms,  $|\Phi(j\omega)|=0.258$ ;  $\Delta=5$  ms,  $|\Phi(j\omega)|=0.243$ 。综合考虑, 选取  $\Delta=4$  ms 作为学习律的误差超前时间, 此时对 50 Hz 以下的误差信号, 在第五次迭代时便可衰减至初始值的 1‰左右, 而高频误差只放大 1.2 倍。对收敛频率范围以外的误差信号, 文献中一般采取“频率截断”<sup>[15]</sup> 或低通滤波的处理方式实现全频率范围内的误差收敛。工程上也可采用设置误差门限的方式, 即当低频误差已衰减至很小, 而高频误差开始显著增加时, 停止继续迭代, 保持当前的控制量  $f_i(t)$ 。

取  $\Delta=4$  ms, 通过 Simulink 仿真得到随着迭代次数增加, 稳态时, 扫描镜在匀速段内跟踪误差绝对值的最大值  $\max(|e(t)|)$ , 如图 7 所示。

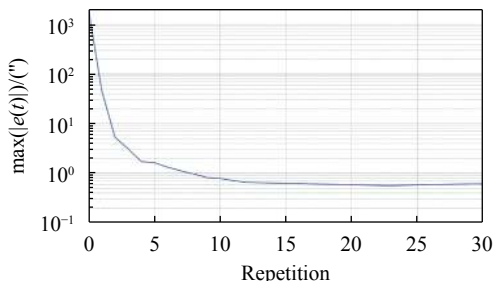


图 7 不同迭代次数时的  $\max(|e(t)|)$

Fig.7 Diagram of  $\max(|e(t)|)$  with different repetitions

仿真结果中, 在迭代的前 10 次, 匀速段内角度跟踪误差  $\max(|e(t)|)$  迅速衰减至约 0.8", 此后误差衰减速度放缓, 至第 23 次时达到最小值 0.57", 然后误差开始缓慢增大, 第 30 次时增至 0.62" 并继续增大。其原因为迭代前期误差信号中的低频分量迅速衰减,  $\max(|e(t)|)$  减小, 但高频误差持续放大, 使得进入迭代后期时,  $\max(|e(t)|)$  开始增大。仿真结果与理论分析一致。实际应用中, 可在迭代次数 10 次左右时停止迭代, 以防止高频误差持续增大最终导致系统发散。

为了验证算法对误差超前时间  $\Delta$  的敏感程度, 文中还对第 10 次迭代时不同  $\Delta$  下的  $\max(|e(t)|)$  进行了仿真, 其中  $\Delta$  的取值范围为 2.5~5 ms。仿真结果表明, 当  $\Delta$  在 2.9~4.4 ms 范围时, 迭代学习算法皆可以在第 10 次迭代时使  $\max(|e(t)|)$  衰减到 1" 以下, 说明算法具备一定的鲁棒性与工程可行性。

### 3.3 被控对象特性的稳定性问题分析

对于迭代学习而言, 被控对象  $G_p(s)$  的稳定性关

系到误差的最终收敛效果。对于扫描镜机构, 在音圈电机电阻  $R$ 、电感  $L$ 、电流力矩系数  $K_m$  等几个被控对象参数中, 电阻  $R$  的大小对温度的变化最为敏感。尤其是当机构工作在真空环境时, 音圈电机散热困难, 长时间工作可能产生较大的温升。若考虑极端工作情况, 假设绕组持续发热直到达到系统热平衡状态之前, 绕组产生 100 °C 的温升, 则电阻  $R$  会增大至开始时的 1.4 倍左右。此时, 被控对象  $G_p(s)$  的变化会对迭代学习算法的误差收敛效果产生较大的影响。

为解决这个问题, 一方面在实际工程应用中, 会采取机构控温, 选用热耗小的电机等措施控制电机绕组的温升; 另一方面, 可采取电流闭环的控制策略, 减小被控对象特性对电阻  $R$  的敏感程度。加入电流闭环后的被控对象结构如图 8 所示。

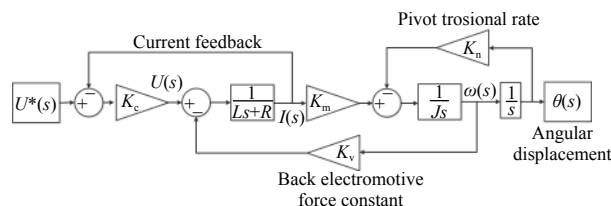


图 8 加入电流反馈后的被控对象结构图

Fig.8 Block diagram of controlled plant with current feedback

图中,  $K_c$  为电流闭环控制器增益系数, 电流闭环控制器采用比例型控制器即可。加入电流闭环后的被控对象  $G_p^*(s)$  如公式 (14) 所示:

$$G_p^*(s) = \frac{\theta(s)}{U^*(s)} = \frac{K_m K_c}{JLs^3 + J(R + K_c)s^2 + (K_n L + K_m K_v)s + K_n(R + K_c)} \quad (14)$$

易知, 当  $K_c \gg R$  时, 音圈电机绕组  $R$  的变化 (最大 1.4 倍) 不会使被控对象  $G_p^*(s)$  的特性产生较大的改变, 即不会影响到迭代学习算法的误差收敛效果。

取  $K_c=100$ , 其他控制参数不变, 按上文的频域分析方法选择  $\Delta=1.5$  ms, 再次进行仿真。仿真结果表明, 即使在音圈电机温升较大的情况下 (比如热平衡前, 每次迭代时绕组增加 10 °C 温升), 迭代学习仍然能使跟踪误差收敛到 1" 左右, 满足使用要求。

### 4 基于原理样机的算法验证

为了验证控制算法的可行性, 在图 3 与图 9 所示的扫描镜机构原理样机控制系统中进行了轨迹跟踪误差测试。



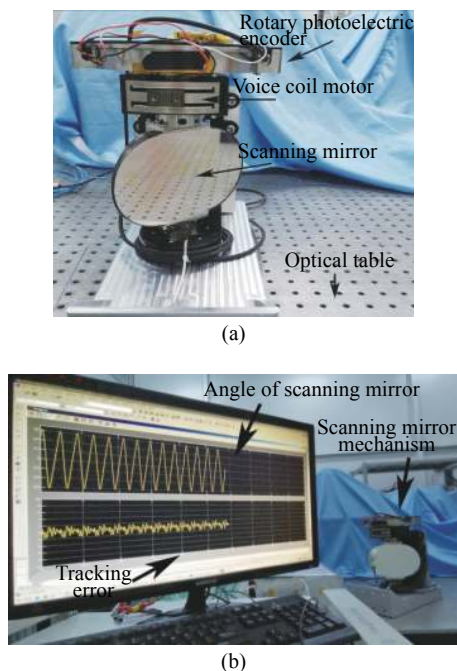


图 9 扫描镜机构原理样机 (a) 及轨迹跟踪误差测试 (b)

Fig.9 Scanning mirror prototype (a) and trajectory tracking error test (b)

测试过程中, 将扫描镜机构放置于星载红外相机地面测试用的光学平台上, 并远离测试设备, 如大功率电源的风扇等振动干扰源。

每次迭代学习开始前, 先通过闭环控制使扫描镜伺服到  $0^\circ$ , 然后对图 2 所示的期望角度轨迹进行跟踪与迭代学习控制。每次迭代运行后的误差值及控制量存储于控制电路的 SRAM 中, 用于下次控制量的迭代计算。多次迭代后的控制量可写入 MRAM 中, 在控制器重新上电后仍可使用。不同迭代次数下扫描镜在匀速段内的  $\max(|e(t)|)$  测试结果如图 10 所示。

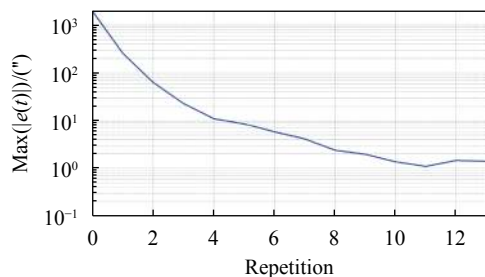


图 10 扫描镜机构原理样机的跟踪误差测试结果

Fig.10 Trajectory tracking error test results of scanning mirror prototype

经后仿真分析, 由于设计阶段仿真中使用的被控对象参数 (尤其是负载总惯量  $J$ ) 与原理样机机构实际的参数存在一定的差异, 图 10 中实测扫描镜轨迹跟踪误差的收敛速度与仿真中相比较为缓慢, 但跟踪误差

最终仍然达到了角秒级, 在第 11 次迭代时达到极小值, 为  $1.1''$ , 与上文仿真结果  $0.8''$  已经非常接近。后续迭代中高频误差增加, 使得  $\max(|e(t)|)$  增至  $1.4''$  左右。经多次反复测试, 基于原理样机的算法测试结果总结为经 10 次迭代后, 跟踪误差优于  $\pm 1.5''$ 。第 10 次迭代时的扫描镜期望轨迹  $\theta_d(t)$ 、跟踪误差  $e(t)$  及  $e(t)$  在  $\pm 5''$  区间的局部放大图如图 11 所示。图中, 扫描镜启动后经过约 1 s 的时间进入稳态, 稳态时跟踪误差优于  $\pm 1.5''$ 。满足原理样机阶段的红外相机对扫描机构的性能要求。

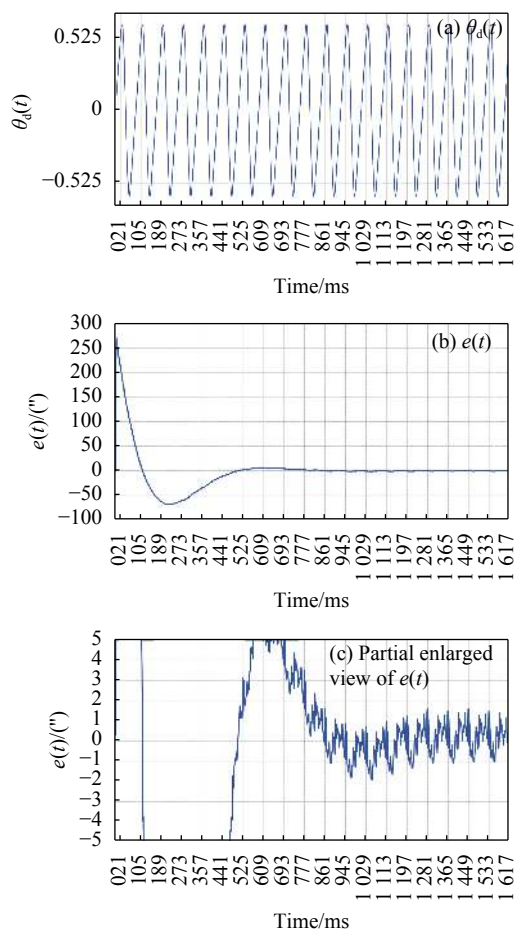


图 11 扫描镜机构原理样机第 10 次迭代时的跟踪误差测试结果

Fig.11 Trajectory tracking error test results of scanning mirror prototype on 10th repetition

## 5 结 论

文中针对星载广域红外相机中基于枢轴支撑的高阶扫描镜机构控制系统, 设计了基于迭代学习的轨迹跟踪控制方法, 并采用“预测型”算法优化了迭代学习律, 避免了误差的高阶导数计算, 使其易于工程实

现。然后通过频域分析的方式说明了算法的收敛性,选取了关键控制参数。通过 Simulink 仿真与原理样机实测,验证了算法的效果与可行性。实测结果表明,算法可在闭环带宽低于 2 Hz 的情况下,无需精确辨识被控对象的高阶特性,即可实现扫描镜对角加加速度超过  $10^6$  ( $^\circ$ )/ $s^3$  的期望轨迹的高精度跟踪控制,跟踪误差优于  $\pm 1.5''$ 。所提出的扫描镜控制方法可在不增加系统工程实现成本的情况下有效的提升轨迹跟踪精度,实现快速角度切换,为具有类似的周期特性星载扫描镜控制系统设计提供借鉴。

### 参考文献:

- [1] Zhao Huijie, Chen Ke, Jia Guorui, et al. FOV stitching method for hyperspectral image with tangent correction of panoramic distortion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(3): 0303005. (in Chinese)
- [2] Zhao Hangbin, Zhang Zongcun, Chai Mengyang, et al. Wide-swath and long-wave infrared zoom imaging method with variable frame rate [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(7): 1758-1764. (in Chinese)
- [3] Liu Xiaoyong, Cao Kaiqin, Sun Dexin, et al. Scanning control of spaceborne infrared imaging with super-swath and low distortion [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(1): 208-217. (in Chinese)
- [4] Xiong Xiaogang, Chen Sihai, Wu Xin, et al. Linear control of laser scanner driven by voice coil motor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 375-378. (in Chinese)
- [5] Nian Wei, Liu Zhaojun, Lin Zhe. Optical path scanning design based on robust  $H_\infty$  control for the Fourier spectrometer [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(6): 55-63. (in Chinese)
- [6] Lin Hui, Wang Lin. Iterative Learning Control Theory[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1998. (in Chinese).
- [7] Owens D H. Iterative Learning Control: An Optimization Paradigm[M]. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese)
- [8] He Xuesong, Wang Xuyong, Feng Zhengjin. Anticipatory learning control of position system of molding process for high speed servo injection molding machine [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2004, 38(8): 1350-1353. (in Chinese)
- [9] Zheng Yan, Jiang Yue. Trajectory tracking control of robotic manipulator system based on iterative learning algorithm [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2014, 35(6): 765-769. (in Chinese)
- [10] Huang Jing, Zheng Huayi, Li Hong, et al. Guiding signal iterative learning control method with parameter learning [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(11): 2363-2369. (in Chinese)
- [11] Fen Chao, Ling Jie, Ming Min, et al. Precision motion control for a piezoelectric micro-positioning stage via integrating iterative learning and disturbance observer [J]. *Robot*, 2018, 40(6): 826-834. (in Chinese)
- [12] Huo Xin, Wu Aijing, Wang Mengyu, et al. Time-varying periodic disturbance suppression of laser seeker testing system based on spatial iterative learning control [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(9): 0913002. (in Chinese)
- [13] Nian Wei, Liu Zhaojun, Lin Zhe, et al. Optical path scanning control system design of the Fourier spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2085-2091. (in Chinese)
- [14] Wang Danwei. On D-type and P-type ILC designs and anticipatory approach [J]. *International Journal of Control*, 2000, 73(10): 890-901.
- [15] Wang Danwei, Ye Yongqiang. Design and experiments of anticipatory learning control: Frequency-domain approach [J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2005, 10(3): 305-313.



**第一作者简介:** 王淳 (1985-), 男, 2010 年毕业于清华大学电机工程与应用电子技术系, 获硕士学位。同年入职北京空间机电研究所, 从事空间光学遥感器机构控制技术研究工作。2016 年聘为高级工程师, 现任机构与控制专业副主任设计师。2016 年至今, 参与科学技术部地球观测与导航专项国家重点研发项目, 重点研究内容包括: 空间红外相机扫描机构控制技术, 空间傅里叶干涉仪摆臂机构控制技术, 空间低温机构控制系统等。曾获 2011 年北京市科学技术一等奖。