

# 一种快速二维扫描机构的设计研究

曹德华

(中国电子科技集团公司第五十研究所, 上海 200331)

**摘要:** 本文针对电机直接驱动式扫描机构的缺点, 设计了一种电机直驱与曲柄连杆驱动相结合的二维快速扫描机构, 该机构结构紧凑、扫描速度快, 同时可以极大降低对驱动电机的力矩要求。

**关键词:** 二维扫描机构; 曲柄连杆; 电机直驱

中图分类号: TN206

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2018)03-0241-05

## A Design of Fast Two Dimensional Optical-Mechanical Scanner

CAO Dehua

(No.50 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 200331, China)

**Abstract:** To solved the problems of current motor direct driven scanners, a new design of fast optical-mechanical scanner was presented. In this design, direct drive on motor shaft was combined with crank-link mechanism. This design was compact and has a fast scanning speed. In the meantime, torque requirement for driving motor was significantly decreased.

**Key words:** dimensional optical-mechanical scanner, crank-link mechanism, direct drive on motor shaft

## 0 引言

光机扫描机构是各种航天航空遥感扫描成像系统的重要组成部分, 扫描驱动装置驱动扫描镜实现对目标的扫描成像, 以获取目标信息<sup>[1]</sup>。在航天遥感仪器中, 往往采用二维扫描摆镜绕两轴摆动实现大的扫描视场<sup>[2]</sup>。目前常用的光机扫描方式有: 旋转(摆动)的45°平面反射镜扫描、旋转(摆动)的单(双)面镜扫描、望远镜整体扫描等<sup>[3]</sup>。本文针对电机直接驱动旋转轴方式的缺点, 从工程应用出发, 重新设计了一种结构紧凑、扫描速度快的二维扫描机构。

## 1 设计背景

在前期的项目中, 根据实际使用需求, 设计了一种双电机直接驱动的二维扫描机构(如图1所示)。在此机构中, 由于二维扫描机构采用的是一维连续扫描(扫描镜绕长轴俯仰摆动), 另一维步进扫描的方式(扫描镜绕短轴水平摆动), 因此为了实现一个维度的连续扫描, 需要步进电机频繁的启停, 同时也会增加获取一帧图像所需的时间; 且水平电机负载力矩过大, 需选用较大尺寸的电机以满足力矩需求, 不符合轻量化、紧凑化的设计初衷。

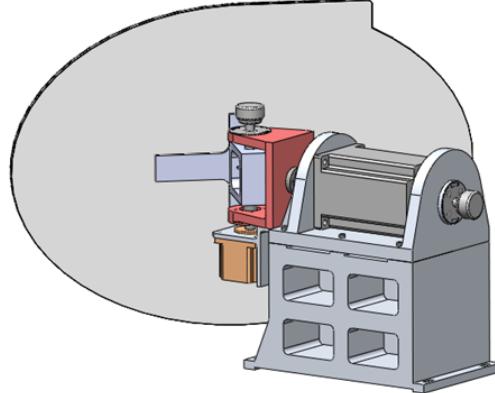


图1 电机直接驱动型扫描机构

Fig.1 Optical-mechanical scanner driven directly by motor

为了消除这些缺陷, 决定采用一种更加紧凑的结构形式对扫描机构进行重新设计。新的设计方案采用电机直接驱动和曲柄连杆驱动相结合的方式: 使用曲柄连杆结构实现连续维度的扫描, 以避免电机的频繁启停; 同时利用电机直接驱动的方式实现步进方向的扫描, 这样可以不受曲柄连杆机构死点等的限制, 可以在步进方向上得到更高密度的像素点; 另外, 采用曲柄连杆方式实现连续扫描还可以大幅降低电机所需负载的力矩, 大大缩减整个扫描

机构的尺寸和重量。

## 2 总体方案

根据总体指标要求：扫描镜初始位置与光轴成 $42.5^\circ$ 夹角；物方扫描范围为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的区域，探测距离为 $10\text{ m}$ ，对应水平方向扫描视场为 $0.1\text{ rad}$ ，即 $5.73^\circ$ ，垂直方向扫描视场为 $0.1\text{ rad}$ ，即 $5.73^\circ$ ，对应扫描镜摆扫范围为：水平方向 $\pm 1.44^\circ$ ，垂直方向 $\pm 2.88^\circ$ 。扫描机构角度测量精度 $\leq \pm 0.5\text{ mrad}$ 。

本机构拟采用两个步进电机：水平方向上，利用电机驱动十字框架带动扫描镜绕同扫描镜短轴平行的方位轴在水平方向步进摆动；垂直方向上，利用电机驱动曲柄连杆机构带动扫描镜绕同扫描镜长轴平行的俯仰轴实现垂直方向的连续摆动。电机控制单元向电机驱动器发出控制信号，由驱动器直接驱动步进电机运动。安装在扫描镜上的角度编码器，实时获取扫描镜摆动的位置信息，为扫描镜两个维度的位置校准提供依据。扫描机构控制系统框图如图 2 所示。

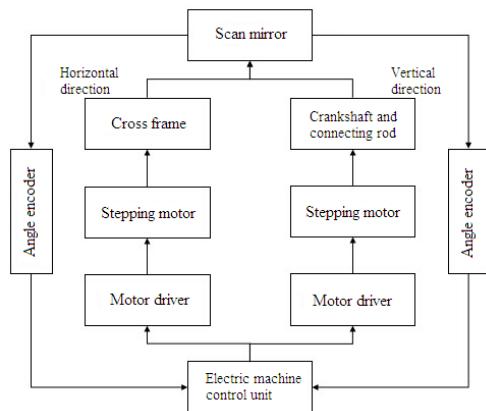


图 2 扫描机构控制系统框图

Fig.2 Control system of optical-mechanical scanner

扫描机构在垂直方向为连续扫描，水平方向步进，去程起点为扫描视场的左上角，终点为右下角，一次扫描行程完成扫描视场的全覆盖；回程扫描方向与去程正好相反，起点为右下角，终点为左上角，一去程和回程的扫描周期可以形成2帧完整图像。扫描行程如图 3 所示。

## 3 轴系设计

### 3.1 方位轴系设计

水平方向的方位轴系为步进运动，由步进电机直接驱动转轴以带动扫描镜步进运动，设计模型如图 4 所示。

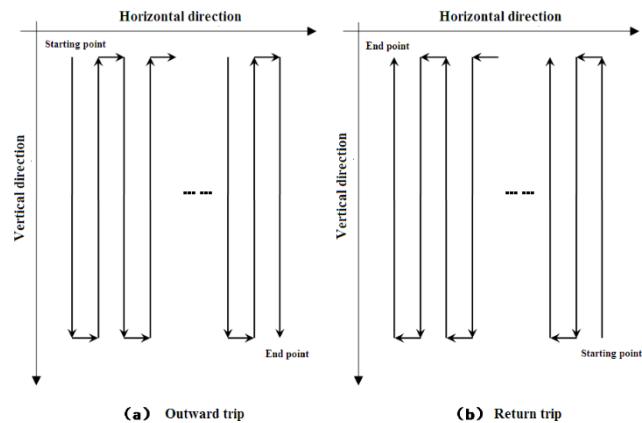


图 3 二维扫描行程图

Fig.3 Two-dimensional scan stroke diagrams

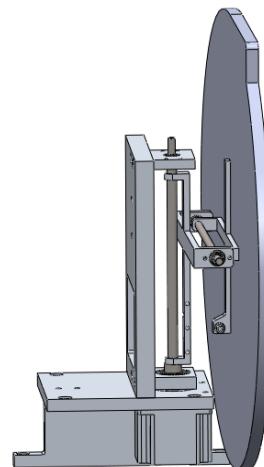


图 4 方位轴系模型图

Fig.4 The model of azimuth axis

方位轴电机通过螺钉固定在底座的底板下部；方位轴一端通过锥形面配合以及螺母固定安装在方位轴电机上，一端通过两个轴承和轴承座固定在底座竖板上；十字支撑架在垂直方向和方位轴通过紧定螺钉形成固定联接，位置通过方位轴上的轴肩限位，可随方位轴在水平方向上转动；十字支撑架在水平方向和扫描镜支撑架之间通过俯仰轴和轴承形成转动副联接；扫描镜和扫描镜支撑架之间通过粘结固定，扫描镜可随十字框架绕方位轴在水平方向运动。

上述轴承中位于下端的轴承因为需要承受方位轴、十字支撑架、俯仰转动轴、扫描镜以及扫描镜支撑架的重量，因此选用的是角接触球轴承，轴承外圈通过轴承座上的截面孔限位，内圈通过轴肩压紧。方位轴上端轴承因为不承受轴向力所以选用的是深沟球轴承，外圈通过底座轴承座上的阶梯孔限位，内圈一端通过轴肩限位，一端通过轴用挡圈限位。其中方位轴距离俯仰转动轴的尺寸为 $30\text{ mm}$ ，距离底座底板

边沿的距离也为30 mm。

### 3.2 俯仰轴系的设计

俯仰轴系的设计如图5所示，俯仰轴电机通过一个安装板用螺钉固定在十字支撑架上，可以随十字支撑架绕方位轴进行水平方向的摆动；作为曲柄的偏心轴一端通过圆锥结合面以及螺钉同俯仰轴电机联接，另一段和连杆通过轴承形成转动副联接，连杆和扫描镜支撑架之间也通过轴承以转动副联接。俯仰轴驱动连杆拉动扫描镜绕俯仰轴转动；俯仰轴和扫描镜支撑架之间通过紧定螺钉形成固定联接。

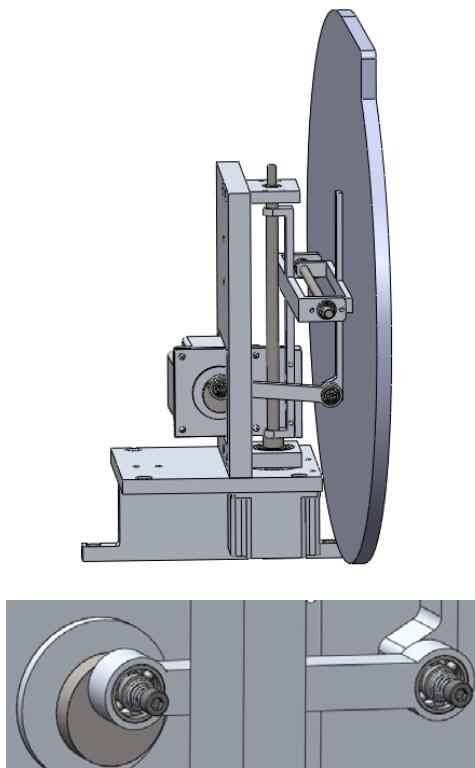


图5 俯仰轴系模型图

Fig.5 Model diagram of pitch axis

其中起曲柄作用的偏心轴的偏心距为7 mm，连杆长76 mm，偏心轴的转动中心距离俯仰轴的高度为66 mm。

值得注意的是，由于在高速运转时，曲柄连杆机构在工作过程中会产生一定的加速度冲击，因此要求曲柄连杆机构各部分之间的间隙足够小。在此，本文在曲柄和连杆的转动副以及连杆和扫描镜支撑架的转动副中选用配合间隙较小的高精度深沟球轴承，同时轴承外圈与连杆轴承座之间装配为过盈配合，轴承内圈和轴之间采用过渡配合，同时在轴端开螺纹孔，通过螺钉固定锥形弹簧压紧轴承内圈，减少曲柄连杆机构的振动，减小机构运行时的噪声。同时，俯仰轴固定在十字支撑架上保证了二维扫描机构在运动时不发生干涉。

## 4 力矩计算

### 4.1 曲柄连杆的变速运动特性分析

本设计中曲柄连杆机构可简化为如图6所示的曲柄四杆机构，构件1、2、3的杆长分别为 $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ ，构件1为主动件绕 $O'$ 作圆周运动，构件1、2的瞬心为 $P_{12}$ ，构件2、3的瞬心为 $P_{23}$ ，过 $O'$ 、 $O''$ 建立坐标系 $xOy$ ，设 $OO'=a$ ， $OO''=b$ ，则根据几何关系有：

$$l_1 \sin \theta_0 - l_2 \sin \theta_2 = b - l_3 \cos \theta_3 \quad (1)$$

$$l_2 \cos \theta_2 - l_1 \cos \theta_0 = a - l_3 \sin \theta_3 \quad (2)$$

令 $M=a+l_1 \cos \theta_0$ ， $N=b-l_1 \sin \theta_0$ ，则由(1)、(2)得：

$$-l_2 \sin \theta_2 = N - \cos \theta_3 \quad (3)$$

$$l_2 \cos \theta_2 = M - l_3 \sin \theta_3 \quad (4)$$

式(3)、(4)平方相加得：

$$l_2^2 = M^2 + N^2 - 2Nl_3 \cos \theta_3 + l_3^2 - 2Ml_3 \sin \theta_3 \quad (5)$$

令 $Q = \frac{M^2 + N^2 + l_3^2 - l_2^2}{2l_3}$ ，则式(5)可化为：

$$M \sin \theta_3 + N \cos \theta_3 = Q \quad (6)$$

由此求得：

$$\theta_3 = \arcsin \left( \frac{MQ - N\sqrt{M^2 + N^2 - Q^2}}{M^2 + N^2} \right) \quad (7)$$

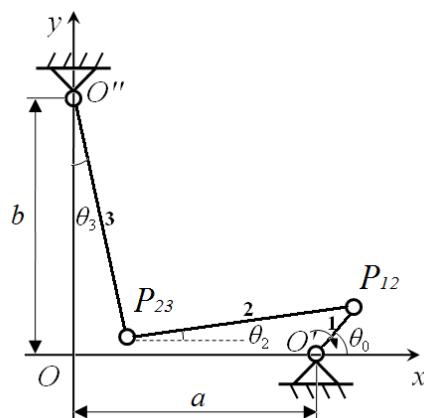


图6 曲柄连杆机构运动示意图

Fig.6 The motion of crankshaft and connecting rod mechanism

如图7所示为 $l_1=3.8$  mm， $l_2=76$  mm， $l_3=72.69$  mm， $a=62$  mm， $b=72$  mm时，电机转角和扫描镜俯仰角度之间的关系。由图7可知，曲柄连杆连续驱动俯仰轴转动，在俯仰轴电机匀速连续转动的情况下，扫描镜俯仰方向转动的角度是正弦变化的，因此扫描镜的摆动速度也是正弦变化的，如果按照扫描镜摆动的设计指标设计扫描范围，采取原有的均匀采样时，

图像在上下视场边缘将出现一定的畸变。

通过软件消除畸变的方法有两种：一种是改变数据采集的算法，在数据采集时使用不均匀采样，另一种是根据上述运动关系式，在采集后的成像算法数据后处理中利用上述的运动关系进行畸变的校正。

另外一种硬件上解决方式是通过增大结构上的扫描范围，只利用波峰波谷中间线性度比较好的一部分，降低对算法的要求。

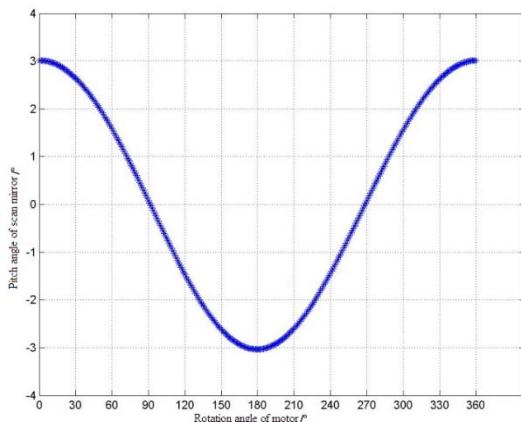


图7 俯仰轴电机转角和扫描镜俯仰角之间的关系

Fig.7 Relationship between the rotation angle of pitch axis motor and the pitch angle of scan mirror

#### 4.2 扫描镜速度计算

扫描镜最大角速度和角加速度：根据像元分辨率和物方扫描范围，采用单元探测器进行探测，需要扫描 $34 \times 34$ 个像素点，扫描1帧图像周期为12 s，在利用现有四元垂直分布探测器的情况下，每扫描一帧垂直方向，需要60个来回，俯仰电机需要转17圈，电机转动周期为0.3 s，根据曲柄连杆的运动计算公式(7)，求两次导数得出扫描镜在俯仰方向运动的最大角加速度为 $24.674 \text{ rad/s}^2$ 。在利用现有四元垂直分布探测器的情况下，每扫描一帧水平方向步进34次，水平方向扫描视场为0.1 rad，每次步进角度为3 mrad，假设回转轴电机步进时启停周期为0.04 s，假设加减速曲线为正弦加减速的曲线，利用在一个周期内速度的积分等于角度，得到正弦加减速曲线的最大速度幅值，求得加减速曲线公式后求导，得到最大角加速度约为 $2.5 \text{ rad/s}^2$ ；

#### 4.3 方位轴系力矩计算

方位轴系负载力矩，主要是扫描镜、扫描镜支撑矩引起的，而上述零件的总质量约为1.75 kg，假设其全部集中在距离方位轴最远的扫描镜处(53 mm)，则其转动惯量为 $0.0049 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，根据设计要求可知方位轴电机最大角加速度为 $2.5 \text{ rad/s}^2$ ，因此其惯性力矩小于 $0.013 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。而由方位轴和转动副引起的摩擦力矩由于扫描镜和电机分居十字支撑架两侧，且轴承轴线垂直布置，因此摩擦力在此忽略。

在本设计中，为使结构紧凑、方位轴及作为曲柄的偏心轴和电机主轴之间保持较好的同轴度，选择Autonics公司的AH4K-M564型中空轴步进电机，该电机的最大保持转矩也为0.42 N·m，电机参数如表1所示。

#### 4.4 倾仰轴系力矩计算

扫描机构中倾仰轴系的负载力矩主要来自于扫描镜和扫描镜支撑架由自身重力引起的力矩以及扫描镜在摆动过程中产生的惯性力矩。而由于轴承支撑引起的摩擦力矩相比于重力附加力矩则可以忽略。

重力附加力矩主要是由于本设计中扫描镜的二维轴系中心不在扫描镜中心，而是在扫描镜背后。本设计中扫描镜和倾仰轴之间的距离为19 mm，扫描镜、扫描镜支撑架以及连杆的总质量约为0.75 kg，因此由上述部件的重力引起的附加力矩约为 $0.14 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

惯性力矩主要是由曲柄连杆机构在扫描镜摆动过程中是正弦的变速运动引起的。本设计中扫描镜绕倾仰轴的转动惯量为 $6.08 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$ ，扫描镜在倾仰转动的时候最大角加速度为 $24.67 \text{ rad/s}^2$ ，因此由扫描镜的变速运动引起的惯性力矩约为 $0.15 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

同样，为使结构紧凑、方位轴及作为曲柄的偏心轴和电机主轴之间保持较好的同轴度，同时为了节省资源，选择与方位轴系相同的Autonics公司的AH4K-M564型中空轴步进电机，电机参数如表1所示。

#### 5 扫描机构的精度分析

扫描机构的倾仰轴系误差主要为曲柄连杆机构的传动误差，误差源在于曲柄和连杆之间连接的轴承的径向间隙以及连杆和扫描镜支撑座上传动轴之间连接轴承的径向间隙，电机轴的圆柱度，扫描镜支撑架传动轴的圆柱度等。在本设计中，选用的轴承全部

表1 步进电机参数

Table 1 Parameters of stepping motor

Type	Maximum hold torque	Motor rotation inertia	Rated current	Basic stepping angle	Weight
AH4K-M564	4.2 kgf·cm/0.42 N·m	175 g·cm <sup>2</sup>	1.4A/Phase	0.72°/0.36° (full/half step)	0.6 kg

为P6精度，内圈圆跳动误差在 $8 \mu\text{m}$ ，电机轴和扫描镜支撑架传动轴的圆柱度误差在 $108 \mu\text{m}$ 以内，根据曲柄连杆机构的运动规律公式(7)可知，由上述误差引起的指向误差为 $0.436 \text{ mrad}$ ，满足指向精度 $\pm 0.5 \text{ mrad}$ 的要求。

方位轴系由于是电机直接驱动的，而十字支撑架是和方位轴固定联接的，所以其误差主要在于十字支撑架和俯仰轴之间的轴向误差上，而俯仰轴和十字支撑架之间轴向固定是通过两个弹簧垫圈固定的，因此轴向间隙小于 $108 \mu\text{m}$ ，俯仰轴距离方位轴之间距离为 $30 \text{ mm}$ ，因此其指向误差小于 $0.333 \text{ mrad}$ ，满足指向精度 $\pm 0.5 \text{ mrad}$ 的要求。

## 6 设计结果

经过上述方案设计和电机选型之后的二维扫描机构结构如图8所示。最终设计出的二维扫描机构整体重量为 $4.8 \text{ kg}$ 。将最终设计结果 $l_1=7 \text{ mm}$ ,  $l_2=76 \text{ mm}$ ,  $l_3=72.69 \text{ mm}$ ,  $a=66 \text{ mm}$ ,  $b=72 \text{ mm}$ 代入式(7)中得到曲柄连杆带动的俯仰角度扫描范围为 $\pm 5.6^\circ$ ，电机直接驱动的方位扫描范围大于 $\pm 2^\circ$ 时，也不会发生运动干涉，因此俯仰角和方位角的设计均比设计要求的 $\pm 5.16^\circ$ 和 $\pm 1.72^\circ$ 多出约 $10\%$ ，满足扫描镜扫描视场的要求。俯仰轴系指向误差为 $0.436 \text{ mrad}$ ，方位轴系指向误差为 $0.333 \text{ mrad}$ 满足指向精度 $\pm 0.5 \text{ mrad}$ 的要求。

俯仰轴电机选型最大保持力矩 $0.42 \text{ N}\cdot\text{m}$ 大于俯仰轴系负载力矩 $0.29 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，且留有约 $30\%$ 的余量；方位轴电机选型最大保持力矩 $0.42 \text{ N}\cdot\text{m}$ 大于方位轴系最大惯性负载 $0.013 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。电机选型满足结构重力负载和惯性负载的要求。

俯仰轴电机最大转速 $2.5 \text{ r/s}$ ，转动频率为 $2.5 \text{ Hz}$ ，

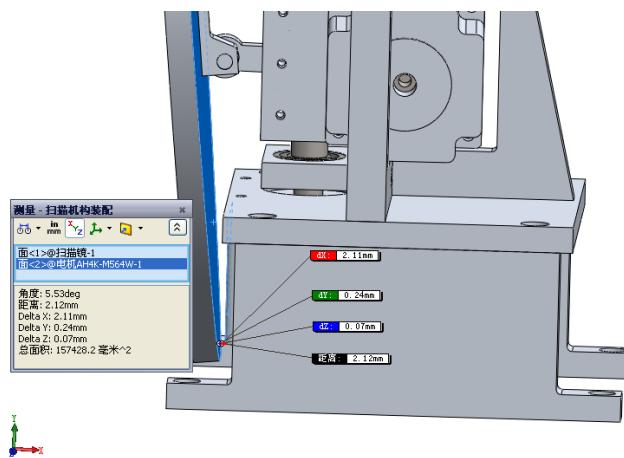


图9 扫描机构左下极限位置干涉分析

Fig.9 Interference analysis on the left lower limit location of scanner

结构底座采用的是厚 $15 \text{ mm}$ 的支撑架，相互之间通过M6的螺钉连接，强度满足设计要求，根据经验设计，电机转动频率远小于扫描机构底座一阶共振频率，满足防共振的设计要求。

由图8的扫描机构结构图可知，扫描机构在视场左上和右上极限位置时不可能发生运动干涉，因此只需要对其进行左下和右下的运动干涉分析即可。图9和图10为扫描机构位于左下侧极限位置和右下侧极限位置时的干涉分析图，由图可知，扫描机构在运动到左下极限位置和右下极限位置时距离底板电机最近处距离为 $2.12 \text{ mm}$ ，扫描机构在满足设计扫描范围指标的同时不会与底座发生运动干涉，满足设计要求。

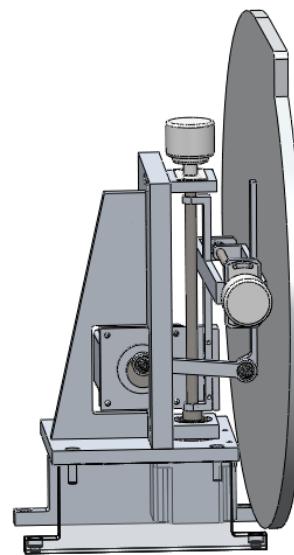


图8 快速二维扫描机构模型图

Fig.8 Model diagram of fast 2-Dimensional optical-mechanical scanner

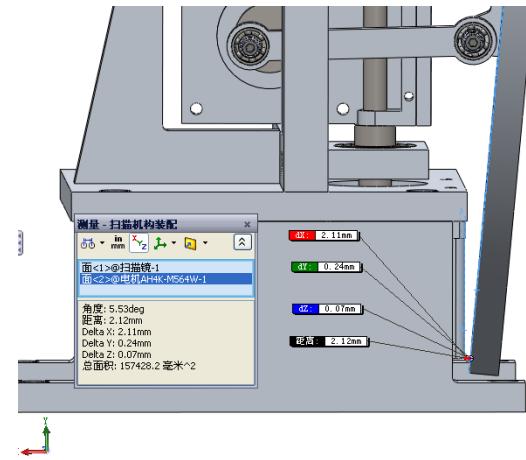


图10 扫描机构右下极限位置干涉分析

Fig.10 Interference analysis on the left lower limit location of scanner

(下转第268页)

- LI Zhixiang, LIU Jianji, FAN Hongming, et al. Study on Convolution Operation of Optical Information via Quantum Storage[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(2): 91-96.
- [3] Donoho D L. Denosing by soft-thresholding[J]. *IEEE transactions on information theory*, 1995, **41**(3): 613-627.
- [4] Ramadan Z M. Eficient restorationmethodforimages corrupted with impulse noise[J]. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2012, **31**(4): 1397-1406.
- [5] Golroudbari M A. Signal denoising based on wavelet transform using a multi-level threshold function[C]//Application of Information and Communication Technologies(AICT). Baku: IEEE, 2013: 1-5.
- [6] BARRI A, DOOMS A, SCHELKENS P. The near shift-in-variance of the dual-tree complex wavelet transform tevisited[J]. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2012, **389**(2): 1303-1314.
- [7] Krishnamoorthy P, Prasanna S R M. Enhancement of noisy speech by temporal and spectral processing[J]. *Speech Communication*, 2011, **53**(2): 154-174.
- [8] Mitsuru I, Reiko M, Kuniharu I. A new evaluation method for image noise reduction and usefulness of the spatially adaptive wavelet thresholding method for CT images[J]. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, 2012, **35**(4): 475-483.
- [9] 张贤达. 现代信号处理[M]. 第2版, 北京: 清华大学出版社, 2002.  
ZHANG Xianda. *Modern Signal Processing*[M]. The second edition, Beijing: Tsinghua university press, 2002.
- [10] 陈喆, 彭钰林, 王舒文, 等. 从离散到连续——分数阶信号处理的理论、方法与应用[J]. *电子学报*, 2012, **40**(11): 2282-2289.
- CHEN Zhe, PENG Yulin, WANG Shuwen, et al. From Discrete to Continuous-Fractional Signal Processing Theories, Methods and Applications[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, **40**(11): 2283-2286.
- [11] 张旭秀, 邱天爽, 盛虎. 分数阶微积分的一种物理解释和定域长分数阶微积分[J]. *电子学报*, 2013, **41**(3): 508-512.
- ZHANG Xuxiu, QIU Tianshuang, SHENG Hu. A Physical Interpretation of Fractional Calculus and Fractional Calculus with Constant Extent of Integral[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, **41**(3): 509-512.
- [12] 蒲亦非, 袁晓, 廖科, 等. 现代信号分析与处理中分数阶微积分的五种数值实现算法[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2005, **37**(5): 119-124.
- PU Yifei, YUAN Xiao, LIAO Ke, et al. Five Numerical Algorithms of Fractional Calculus Applied in Modern Signal Analyzing and Processing[J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2005, **37**(5): 119-124.
- [13] 刘磊, 苗启广, 石程. 面向小波域的加权分数阶微积分图像数字水印新算法[J]. *计算机应用*, 2011, **31**(11): 3049-3052.
- LIU Lei, MIAO Qiguang, SHI Cheng. New image digital watermark algorithm with weighted fractional calculus based on wavelet coefficients[J]. *Journal of Computer Applications*, 2011, **31**(11): 3049-3052.

(上接第 245 页)

### 参考文献:

- [1] 叶虎勇, 陈桂林. 地球同步轨道三轴稳定卫星的扫描镜设计及考虑[J]. 红外技术, 2003, **25**(6): 1-5.  
YE Huyong, CHEN Guolin. Scanning Mirror Design Considerations of 3-axis Stability Satellite[J]. *Infrared Technology*, 2003, **25**(6): 1-5.
- [2] 惠彬, 李景镇, 黄虹宾, 等. 45°二维扫描镜扫描轴系特性分析[J]. 红外技术, 2006, **28**(9): 508-511.
- HUI Bin, LI Jingzhen, HUANG Hongbin, et al. Optical Analysis of Space Two-Axis Scanning Mirror[J]. *Infrared Technology*, 2006, **28**(9): 508-511.
- [3] 张幼文. 红外光学工程[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982.  
ZHANG Youwen. *Infrared optical engineering*[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1982.