

某型一维大摆角扫描器的总体设计

浦恩昌, 贺仕伟, 陈洁, 张林, 张红宇, 李红伟

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 采用线列焦平面探测器成像须借助光机扫描覆盖视场, 而高线性大摆角的扫描器是实现高性能扫描型热像仪的重要条件。针对基于某支撑技术而研究的大摆角扫描器做光机优化设计, 对所需电机驱动转矩进行理论计算和选型, 并用 Motion 进行仿真验证, 验证结果能达到设计要求。

关键词: 大摆角扫描器; 红外焦平面; 电机转矩; 角加速度

中图分类号: TN216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)06-0463-04

Overall Design of a Type of One-dimension Large Swing Angle Scanner

PU En-chang, HE Shi-wei, CHEN Jie, ZHANG Lin, ZHANG Hong-yu, LI Hong-wei

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: It's necessary that optical and mechanical scanning is applied to cover the FOV in thermal imaging with linear FPA detector, so scanner with high linearity and large swing angle is an important requirement to realize high characteristic scanning thermal imager. This paper includes optical and mechanical optimization design of scanner with large swing angle and theoretic calculation about torque of such motor, therefore the selection is given. The simulation results with Motion show that it can meet the needs of design.

Key words: large swing angle scanner, infrared FPA, torque, angular acceleration

0 引言

在采用线列焦平面器件的像方扫描热成像系统中, 都有光机扫描机构位于光学系统和红外探测器之间, 它对目标景物进行扫描。线列探测器的每个像元对应于景物空间相应的瞬时视场, 整个线列探测器对应于所观察的景物线性空间, 再加上方位光机扫描来实现对整个景物空间的分解。成像系统只需采用一维扫描就能获得热图像^[1]。工作原理如图1所示。

1 大摆角扫描器的由来

扫描严格匹配是以扫描角速率恒为常量为先决条件的, 事实上, 由于技术上的困难及工作环境的影响, 扫描机构工作时必然会偏离严格的线性关系, 其结果不仅影响系统的配准精度, 同时也将使整机的分辨率下降。热成像扫描器线性度指标与红外探测器TDI级数有直接关系。对4N型探测器, 其速度失配需限制在0.25%以内(即扫描效率大于75%, 才能保证成像质量。

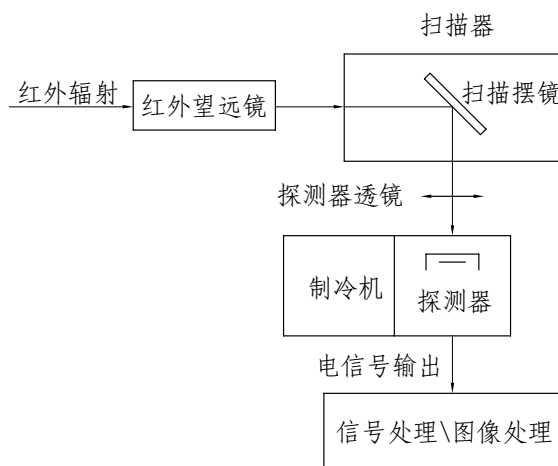


图1 扫描型二代焦平面红外热像仪工作原理图

Fig.1 Diagram of Working Principle for the second generation scanning FPA infrared thermal imager

在一些红外系统中, 为提高整机的 MRTD、NETD 等指标, 光学系统设计中会尽量减小 F 数, 通过增加入瞳的直径来获得更多的热辐射, 入瞳的增加将带来

扫描角度 γ 的增加;另外,随着红外焦平面探测器的发展,长线列焦平面靶面垂直方向尺寸 H 增加(如图2所示),要保持图像的长宽比例 r ,则水平扫描线距离相应必定增加,探测器透镜焦距受整机尺寸限制不可能取得太大,同时还要折衷考虑摆镜尺寸也不能太大,扫描角度 γ 必然增加^[2]。所以,“大摆角”扫描器应运而生。

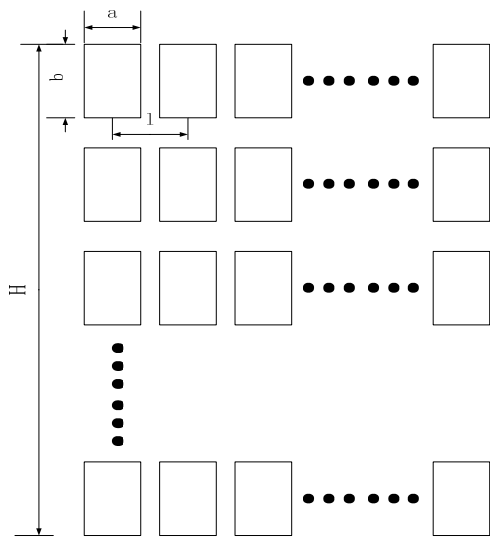


图2 探测器像元分布示意图

Fig.2 Diagram of Detector array

本文就是针对某支撑技术项目中所用摆角为 $\pm 12^\circ$ 的扫描器而进行的光机优化设计及电机驱动转矩理论计算。

2 扫描器工作原理

扫描器主要由扫描摆镜、扫描器座、扫描电机(包括定子和转子)和轴承座等零部件组成(见图3所示)。

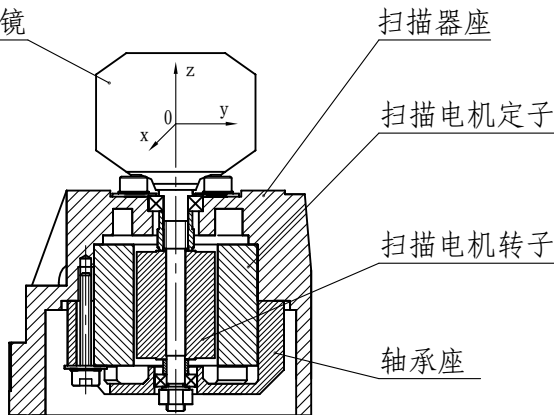


图3 扫描器结构示意图

Fig.3 Diagram of scanner structure

扫描器的工作原理是,通过扫描驱动电路驱动电机往复摆动,实现对红外场景的线性扫描,达到扫描成像的目的。选用的有限转角无刷直流电机是在无刷

直流电机的基础上,通过每级下定子绕组占据一周内角度和转子磁极占据角度的合理设计,使电机只能在要求的一定角度范围内转动。作为力矩电机可以通过减速器直接驱动负载并能在低速甚至堵转状态下运行,从而提高系统的性能^[3]。在本项目中,为了匹配热成像系统,扫描器扫描频率为50 Hz,扫描效率为80%,如图4所示。

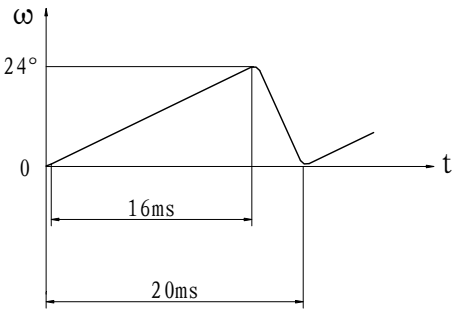


图4 扫描摆镜摆动示意图

Fig.4 Diagram of scanning mirror swing motion

3 电机转矩计算

电机转矩的公式为:

$$M_{\epsilon}=J_L\cdot\epsilon+M_d$$

式中: J_L 为负载转动惯量; ϵ 为角加速度; M_d 为轴承摩擦与空气阻尼等因素造成的阻尼转矩,在本文内忽略不计。

3.1 扫描器负载转动惯量计算

刚体绕定轴转动时,转动惯量的表达式为 $J_z=\sum mr^2$ ^[4]。

如果刚体的质量是连续分布的,则转动惯量可写成积分的形式 $J_z=\int_M r^2 dm$ 。图5为扫描摆镜轴测图。

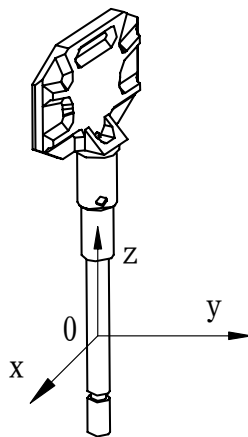


图5 扫描摆镜轴测图

Fig.5 Axonometric drawing of scanning mirror

用工具软件计算得出,摆镜的质量为 2.93×10^{-3} kg,平行于旋转轴(Z轴)并通过质心的转动惯量 J_z

为 $6.95 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 质心与 Z 轴的距离 d 为 0.55 mm 。

根据转动惯量的平行移轴定理, 沿摆镜旋转轴 (Z 轴) 的转动惯量

$$J_1 = J_z + M \cdot d^2 = 6.95 \times 10^{-8} + 2.93 \times 10^{-3} \times (0.55 \times 10^{-3})^2 = 7.04 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

已知某型扫描电机转子的转动惯量 J_2 为 $3.05 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

那么, 扫描器负载转动惯量 $J_L = J_1 + J_2 = 7.04 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 + 3.05 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 = 1.01 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

3.2 摆镜角加速度计算

根据扫描摆镜的运动关系, 可以得出如图 6 所示几何关系。其中 ω 为摆镜转动速度, t 为时间, T 为摆镜运动周期, t_1 为扫描采样时间。

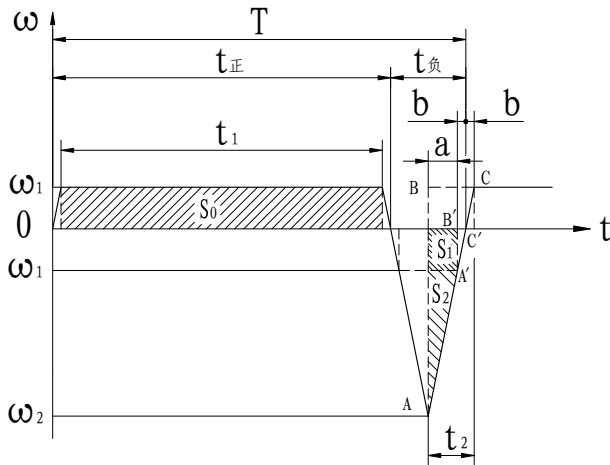


图6 摆镜运动关系近似图

Fig.6 Diagram of scanning mirror motion relation

由于扫描摆镜正转和反转的角度相等, 那么

$$\sum_{0 \rightarrow t_1} d\omega \cdot dt = \sum_{0 \rightarrow t_2} d\omega \cdot dt, \text{ 转换成几何关系, 则有:}$$

$S_0 = 2 \times (S_1 + S_2)$, 即:

$$\omega_1 \cdot t_1 = 2 \times \left[a \cdot \omega_1 + \frac{1}{2} \times a \cdot (\omega_2 - \omega_1) \right] = a \cdot (\omega_1 + \omega_2) \quad (1)$$

由上图可知, $a = t^2 - 2b$

再由三角形 ABC 和三角形 A'B'C' 相似可得,

$$\frac{b}{t_2} = \frac{\omega_1}{\omega_1 + \omega_2} \text{ 那么, } b = \frac{\omega_1 \cdot t_2}{\omega_1 + \omega_2}, \quad a = t_2 - 2 \times \frac{\omega_1 \cdot t_2}{\omega_1 + \omega_2};$$

代入式(1)有:

$$\omega_1 \cdot t_1 = \left(t_2 - 2 \times \frac{\omega_1 \cdot t_2}{\omega_1 + \omega_2} \right) \cdot (\omega_1 + \omega_2) = \omega_2 \cdot t_2 - \omega_1 \cdot t_2$$

所以:

$$\omega_2 = \frac{\omega_1 \cdot (t_1 + t_2)}{t_2}$$

线段 AC 的斜率即为摆镜反转时的角加速度, 于是:

$$\varepsilon = \frac{\omega_1 + \omega_2}{t_2}$$

已知摆镜转动角度为 24° , 扫描采样时间 $t_1 = 0.016 \text{ s}$,

$$\omega_1 = \frac{\omega}{t_1} = \frac{24 \times \pi}{180 \times 0.016} = 26.18 \text{ rad/s}$$

$$\text{所以, } \varepsilon = \frac{\omega_1 + \omega_2}{t_2} = \frac{10\omega_1}{0.002} = 1.31 \times 10^5 \text{ rad/s}^2$$

$$\begin{aligned} \text{电机转矩 } M_\varepsilon &= J_L \cdot \varepsilon = 1.01 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \times 1.31 \times 10^5 \text{ rad/s}^2 \\ &= 1.32 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

4 系统仿真验证

根据前文推导的数学模型及得出的结果, 使用动力学仿真软件 Motion 进行验证。本算例使用 Gstiff 积分器, 在电机转子的四个磁极施加符合上述计算值的分段扭矩作为输入, 如图 7 所示。

经仿真计算, 全程运动角位移为 24.3° , 有效扫描角位移及扫描效率结果符合预期。本次仿真验证了前文所建立的模型和理论计算的结果。仿真结果见图 8。

5 结束语

由于空气阻尼和轴承摩擦阻尼等阻尼因素在本设计中均为非常小的变量并且难以测量, 本阶段暂忽略不计, 可通过适量增大电机转矩的安全系数来补偿不计该阻尼因素造成的误差。考虑到本文所建立的物理模型为匀速——匀变速运动系统, 这个系统在运动状态改变的瞬间出现了猝动^[5], 而电机驱动的瞬态响应不可能达到转矩为无穷大, 因此实际电机的工作扭矩会比本文计算的值略微偏大。高低温工况 ($-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$) 对电机性能也会造成一定的影响。综合考虑上述因素, 我们选择某型额定转角为 $\pm 15^\circ$, 额定转矩为 $7.84 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$ 的有限转角力矩电机, 该电机应能满足本扫描机构的需求。

