

文章编号 1004-924X(2010)01-0135-07

关节臂式坐标测量机角度传感器偏心参数辨识

王 文, 林 铿, 高贯斌, 陈子辰

(浙江大学 现代制造工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要:对关节臂式坐标测量机中圆光栅角度传感器分度盘安装存在的偏心误差进行修正,可以有效提高测量机的测量精度。为了实现坐标测量机动态、实时的现场标校,建立了一种六自由度关节臂式坐标测量机的坐标系统,分析了圆光栅分度盘的安装偏心对角度测量的影响,推导了由于偏心引起的测量误差及其修正公式。分析表明,较小的安装偏心便会引起较大的角度测量偏差。以测量机的单点重复测量精度为目标函数,提出了一种基于模拟退火算法的角度传感器偏心参数辨识方法,并将其用于测量机关节圆光栅 12 个偏心参数的辨识和修正,实验结果表明,修正之后测量机的重复测量精度提高了 11.3%。

关键词:关节臂式坐标测量机;角度传感器;偏心误差;参数辨识;误差修正

中图分类号:TH721 **文献标识码:**A

Eccentricity parameter identification of angle sensors for articulated arm CMMs

WANG Wen, LIN Keng, GAO Guan-bin, CHEN Zi-chen

(*Institute of Advanced Manufacturing Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract: The installation accuracy of angle sensors is an important factor relating to the measuring precision of an Articulated Arm Coordinate Measuring Machine (AACMM). In order to realize the dynamic calibration in real time for an AACMM, a coordinate system of the AACMM was established and a compensation expression for angle measuring errors was obtained from analyzing the effect of the off-center installed errors of circular gratings on the angle measurement. Theoretical analysis shows that a little eccentricity could cause a major error, so the angle data of circular gratings should be corrected in practical applications. A method using single-point repeatability as the objective function to identify the eccentricity parameters of the AACMM was introduced based on a simulated annealing algorithm and then it was applied to the identification and correction for the twelve eccentricity parameters of the AACMM. The result demonstrates that the repeatability of the AACMM has improved by 11.3%.

Key words: Articulated Arm Coordinate Measuring Machines(AACMM); angle sensor; eccentricity error; parameter identification; error compensation

收稿日期:2009-01-15;修订日期:2009-03-02.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50875241);浙江省科技计划重大专项资助项目(No. 2006C11256)

1 引言

关节臂式坐标测量机是一种典型的非正交坐标测量系统,仿照人体手臂关节结构,由基座、测量臂、旋转关节通过串联方式连接而成。与传统的三坐标测量机相比,关节臂式坐标测量机具有体积小、重量轻、便于携带、测量灵活、测量空间大、环境适应性强、成本低等优点^[1]。然而,关节臂式坐标测量机的串联式开链连杆结构决定了其具有误差放大、误差控制与补偿困难等缺点,测量精度较难保证,因此,该类测量机的应用受到较大的限制,目前主要应用于对精度要求相对较低的产品反求设计和维修等领域。如果能够提高其测量精度,将会极大地提高其应用范围。

关节臂式坐标测量机采用角度传感器(通常为圆光栅)测量关节转角,并通过坐标转换求得测头空间三维坐标,角度传感器的测量误差直接影响系统的测量精度。影响角度传感器测量精度的因素有传感器自身精度、关节轴承的径向与轴向窜动、角度传感器分度盘的轴向安装倾斜度和径向安装偏心等。对于前两个影响因素可以选用高精度的角度传感器^[2]和高精度的轴承来保证,而传感器分度盘的轴向安装倾斜容易通过加工装配工艺保证,且其对于角度传感器的测量误差影响也较小。因此,影响角度传感器测量误差的主要因素是分度盘的径向安装偏心误差。目前,对于该影响因素的研究集中于安装偏心的调校与修正。张礼松^[3]用最小二乘法对圆光栅偏心进行修正;黄宗升^[4]提出了一种用激光陀螺对圆光栅进行标校的方法;郭阳宽^[5]阐述了运动偏心对圆光栅副测量的影响。然而,由于关节臂式坐标测量机的实际使用特点,当使用环境变化、偏心误差漂移、周期性精度调校时都需要对旋转关节偏心情况进行重新标定,对角度测量传感器的角度测量误差也需要重新修正。为了实现动态、实时的现场标校和修正,本文参考工业机器人的位姿标定方法^[6-7],提出一种对关节臂式坐标测量机旋转关节角度测量传感器的安装偏心参数进行辨识,并对其测量角度进行修正的方法。

2 关节臂式坐标测量机坐标变换模型

自行设计的关节臂式坐标测量机(以下简称为测量机)结构如图 1 所示,主要由 1 个基座、2 个测量臂、6 个旋转关节和 1 个测头系统构成,整个测量机共有 6 个自由度,与 6 个旋转关节相对应。

针对图 1 所示的测量机,各关节转角和测头坐标之间的关系可表示为:

$$y = f(\theta, p), \quad (1)$$

式中 y 为测头坐标, θ 为关节转角, p 为结构参数。结构参数 p 确定之后,根据关节转角 θ 和 f 中定义的方程,即可利用式(1)计算出测头的坐标 y 。

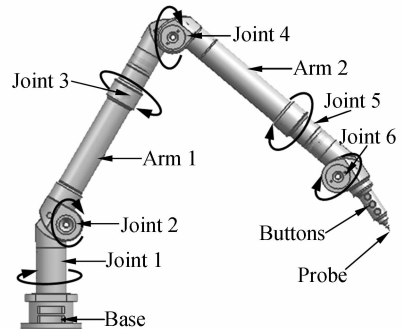


图 1 关节臂式坐标测量机结构图

Fig. 1 Mechanical structure of AACMM

采用 Denavit-Hartenberg 方法^[8](简称 D-H 方法)建立测量机的坐标变换模型。D-H 方法使用 4 组参数(杆长 d_i 、关节长度 a_i 、关节扭转角 α_i 、关节转角 θ_i)建立相邻坐标系的坐标变换矩阵,坐标系 i 与 $i-1$ 之间的齐次变换矩阵由这 4 组参数决定。基于 D-H 方法建立测量机的坐标系统,如图 2 所示。

根据 D-H 方法可知相邻的两个坐标系 $\{x_i, y_i, z_i\}$ 与 $\{x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}\}$ 之间的齐次变换矩阵为^[7]:

$$T_{i-1,i} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。

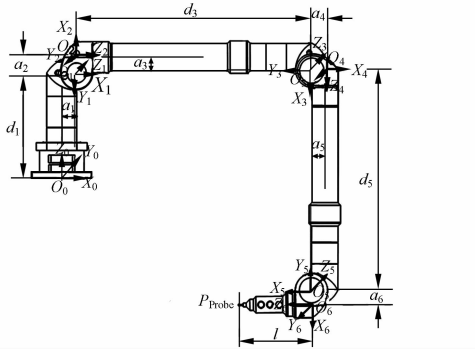


图 2 关节臂式坐标测量机的坐标系统
Fig. 2 Coordinate system of AACMM

测头通常由探杆和红宝石小球构成,设球心在坐标系 $\{x_6 y_6 z_6\}$ 中的坐标为 (l_x, l_y, l_z) , 则其在坐标系 $\{x_6 y_6 z_6\}$ 中的齐次变换矩阵为

$$T_{6,7} = [l_x \quad l_y \quad l_z \quad 1]^T, \quad (3)$$

测头球心在基座坐标系 $\{x_0 y_0 z_0\}$ 中的坐标为:

$$T_{Probe} = T_{0,1} \times T_{1,2} \times T_{2,3} \times T_{3,4} \times T_{4,5} \times T_{5,6} \times T_{6,7}. \quad (4)$$

六自由度关节臂式坐标测量机的结构参数共有 27 项,各项参数经过标定后的值如表 1 所示。

表 1 关节臂式坐标测量机结构参数

Tab. 1 Nominal structural parameters of AACMM

关节	d_i/mm	a_i/mm	$\alpha_i/(\circ)$	$\theta_{0i}/(\circ)$
1	401.000	43.010	-89.505 7	0.000 0
2	0.023	41.985	-90.889 4	0.627 2
3	327.193	37.970	-89.855 5	0.078 4
4	1.046	35.690	-90.859 7	-1.035 5
5	326.299	38.118	-90.721 8	1.305 1
6	0.192	36.399	-90.571 0	0.042 2

测头 $l_x = -0.169 \text{ mm}$ $l_y = 0.016 \text{ mm}$ $l_z = 211.783 \text{ mm}$

3 传感器分度盘安装偏心误差分析

关节臂式坐标测量机中旋转关节的角度测量传感器(圆光栅),会由于加工、装配等原因造成圆光栅几何中心与装配后的关节旋转中心不重合而使轴系转动中产生偏心,使得光栅读数头读出的角度值与实际旋转角度值不一致。

如图 3 所示,圆光栅由于安装等原因造成偏心,光栅盘圆心为 O' ,实际的旋转中心为 O ,偏心距为 ϵ ; $O'O$ 与 $O'B$ 的夹角为偏心相位角 ω ;读数

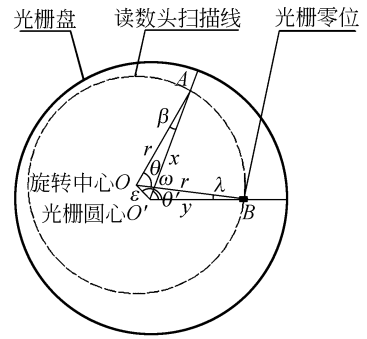


图 3 偏心分析示意图
Fig. 3 Scheme of eccentricity analysis

头在圆光栅上读数,读数头处的光栅距离实际转轴中心 O 的距离为 r ,即为光栅读数半径。理想状态下(实际旋转中心与光栅盘圆心重合时),当读数头从光栅零位位置 B 旋转扫描到位置 A 时,读数头读出的理论角度值为 $\angle A'O'B$,即光栅测量值 θ' ,而实际的旋转角度为 $\angle AOB$,即实际值 θ 。因此,存在偏心时光栅测量偏差为

$$\Delta\theta = \theta' - \theta, \quad (5)$$

如图 3 所示,在 $\triangle O'OB$ 中由正弦定理可得

$$\lambda = \arcsin\left(\frac{\epsilon \sin \omega}{r}\right). \quad (6)$$

在 $\triangle O'OA$ 中由正弦定理可得

$$\beta = \arcsin\left(\frac{\epsilon \sin(\omega - \theta')}{r}\right). \quad (7)$$

$O'A$ 与 OB 相交,对顶角相等,即

$$\theta + \beta = \theta' + \lambda. \quad (8)$$

由式(5)~(8)可得系统在偏心的情况下光栅测量值的偏差为

$$\Delta\theta = \arcsin\left(\frac{\epsilon \sin(\omega - \theta')}{r}\right) - \arcsin\left(\frac{\epsilon \sin \omega}{r}\right). \quad (9)$$

由于偏心率 $a = \epsilon/r$,式(9)可表达为

$$\Delta\theta = \arcsin(a \cdot \sin(\omega - \theta')) - \arcsin(a \cdot \sin \omega). \quad (10)$$

则由式(5)和式(10)可得实际的旋转角度值 θ 与光栅测量值 θ' 的关系为

$$\theta = \theta' - \arcsin(a \cdot \sin(\omega - \theta')) + \arcsin(a \cdot \sin \omega). \quad (11)$$

式(10)两边对 θ' 求导数得

$$(\Delta\theta)' = \frac{-a \cdot \cos(\omega - \theta')}{\sqrt{1 - a^2 \sin^2(\omega - \theta')}}. \quad (12)$$

当式(12)等于 0 时,光栅测量偏差取极大值,此时 $|\omega - \theta'| = 90^\circ$ 或者 $|\omega - \theta'| = 270^\circ$ 。

针对上述推导结果,可以假设偏心率 $a = 0.001$ (如:半径 r 为 20 mm 的光栅盘,如果安装偏心距 ε 为 0.02 mm 时,其偏心率为 $a = 0.001$),且当 $\omega = 90^\circ, \theta' = 180^\circ$ 时,光栅测量偏差取极大值 $(\Delta\theta)_{\text{MAX}} = 206''$ 。若测量机第 2 关节的光栅测量偏差 $\Delta\theta_2 = 206''$,则引起的测量机最大测量偏差(即测量机的多个关节串联成一直线时)为 $2(d_3 + d_5 + l_2) \cdot \sin \Delta\theta_2 = 1.73 \text{ mm}$,误差比较大,需要对偏心情况进行修正才能保证测量机的精度。

由式(10)可知光栅偏心导致的测量偏差与光栅的偏心参数(偏心率 a 和偏心相位角 ω)、光栅测量值 θ' 有关。式(11)就是偏心误差导致的角度测量偏差的修正公式,只要得到偏心误差参数就可以对角度测量偏差进行误差修正。

由于关节臂式坐标测量机有 6 个关节,即有 6 个角度测量圆光栅,因此测量机结构的偏心参数包括 6 个偏心率 a 和 6 个偏心相位角 ω 。只有得到这 12 个偏心参数才能对测量机的测量转角进行修正。

4 偏心参数辨识方法

4.1 数据采集方法

关节臂式坐标测量机是通过采集 6 个转动关节的转角并结合坐标变换获得测头坐标值。测头球心的每一个空间位置对应的测量机关节臂测量位姿有无限个,每一个位姿相当于一组关节转角 $[\theta_1', \theta_2', \theta_3', \theta_4', \theta_5', \theta_6']$,即有无穷多组角度值对应着测头的同一组空间坐标 (x, y, z) 。如果关节转角测量值存在偏心误差,则测量机所获得的一组测头坐标值也会有偏差。转角偏差越大,则测头偏差也越大。如果能够找到光栅的偏心参数,对光栅测量转角进行修正以消除偏心误差,就可以得到准确的关节转角值 $[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]$ 。

为了获得测头处于空间某一位置时所对应的多种不同测量位姿的转角数据,设计了一种数据采集方法:设计一个锥孔,将测头小球置于锥孔中并与锥孔保持良好接触,使测头的空间坐标保持

不变,改变测量机的测量位姿(即改变各关节转角),得到一系列的关节转角测量值 $[\theta_1', \theta_2', \theta_3', \theta_4', \theta_5', \theta_6']$ 。根据所测得的系列关节转角值辨识出 6 个关节的 12 个偏心参数,辨识过程的基本流程如图 4 所示。

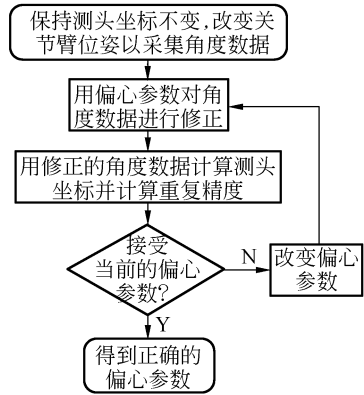


图 4 偏心参数的辨识流程

Fig. 4 Identification of eccentricity parameters

根据式(11)代入辨识得到的偏心参数来对转角测量值进行修正,通过式(4)的坐标转换计算得到一系列修正过的测头坐标值。由于存在误差,所得到的测头坐标是分散的,计算出重复精度。基于模拟退火算法搜索寻找重复性精度最高的那组偏心参数作为偏心参数的最终辨识结果,从而可以修正角度传感器测量精度,提高关节臂式坐标测量机的重复测量精度。

偏心参数辨识的目标函数为测头坐标重复精度

$$RP = \bar{E} + 3\sigma, \quad (13)$$

式中, \bar{E} 为测头坐标误差平均值, σ 为测头坐标误差标准差。

4.2 偏心参数辨识算法

偏心参数的微小变化对于角度的影响都比较大,偏心参数的搜索如果采用等步长全局搜索法,需设置较小步长,搜索量比较大,搜索过程也较长。模拟退火算法是一种适合于解决大规模组合优化问题的全局优化方法,其基本思想是利用随机优化问题求解过程与统计力学中热平衡问题的相似性,通过设定初温、初态以及降温率控制温度的不断下降,结合概率突跳特性利用解空间的邻域结构进行随机搜索。它可以有效、快速地搜索到一个近似全局最优解^[9]。因此,采用模拟退火

算法进行了偏心参数辨识。

偏心参数辨识算法主要的流程如图 5 所示。

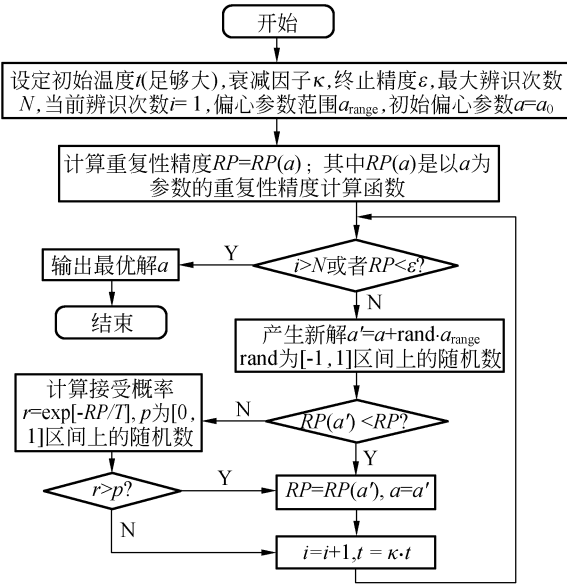


图 5 基于模拟退火算法的偏心参数辨识流程

Fig. 5 Flowchart of eccentricity parameter identification based on annealing algorithm

5 实验研究

5.1 参数辨识实验

实验中关节臂式坐标测量机安装的关节角度传感器可实现 0.395 5"的分辨率。根据改进的模拟退火算法对关节臂式坐标测量机的 12 个偏心参数进行参数辨识实验。主要参数设定如下：

结构参数如表 1。设初始温度 $t=900$ K, 衰减因子 $\kappa=0.9$, 终止精度 $\epsilon=0.01$, 总迭代次数 $N=1200$, 设置偏心参数范围 $a_{range}=0.1$, 初始偏心参数 $a_0=0$ 。

按照上述方法均匀采集 200 组关节转角数据, 采集现场如图 6 所示。



图 6 利用锥孔进行数据采集

Fig. 6 Data acquisition with cone-shape hole

对 12 个偏心参数进行辨识, 辨识结果如表 2。

表 2 关节臂式坐标测量机的偏心参数

Tab. 2 Identified eccentric parameters of AACMM

关节	a	$\omega/(^\circ)$
1	0.000 304	303.858 15
2	0.000 960	92.892 24
3	0.000 247	4.757 23
4	0.000 410	226.457 11
5	0.000 165	90.365 31
6	0.000 905	356.055 79

5.2 验证实验

为了验证辨识结果的有效性, 按照上述的方法采集 200 组不同空间位姿的关节转角数据, 进行测量 5 次。对圆光栅偏心修正前、后的测量机重复精度如图 7 所示。

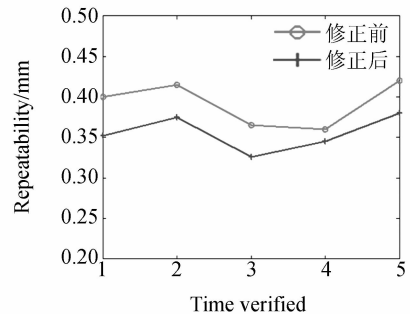


图 7 偏心修正前后的重复精度

Fig. 7 Repeatability before and after eccentric compensations

表 3 列出了对每次测量的角度数据进行圆光栅的偏心修正后提高的精度。由图 7 可知, 修正之前测量的最低重复精度为 0.42 mm, 修正之后精度提高到 0.37 mm。计算结果表明, 对偏心引起的角度测量误差进行修正之后, 测量机的测量精度有了明显的提高。

表 3 偏心修正后提高的精度百分比

Tab. 3 Percent of improved precision after eccentric compensation

次数	1	2	3	4	5
提高精度/%	11.3	8.8	9.4	5.3	7.8

6 结 论

通过对偏心误差的分析可知,角度传感器的偏心误差对其角度测量精度有很大影响,对其偏心误差进行修正可以有效提高测量机的测量精度。

参考文献:

- [1] 叶东, 黄庆成, 车仁生. 多关节坐标测量机的误差模型[J]. 光学精密工程, 1999, 7(2): 91-96.
YE D, HUANG Q CH, CHE R SH. A error model for multi joint coordinate measuring machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(2): 91-96. (in Chinese)
- [2] 熊文卓, 孔志勇, 张炜. 光电轴角编码器光电信号正交性偏差的相量校正方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1745-1748.
XIONG W ZH, KONG ZH Y, ZHANG W. Phase correction of quartering deviation of photoelectric rotary encoder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1745-1748. (in Chinese)
- [3] 张礼松, 管炳良. 关节坐标测量机研制中圆光栅误差修正技术[J]. 计测技术, 2007, 27(4): 41-43.
ZHANG L S, GUAN B L. Error correction and its application to multi-joint CMM research [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2007, 27(4): 41-43. (in Chinese)
- [4] 黄宗升, 秦石乔, 王省书, 等. 光栅角编码器误差分析及用激光陀螺标校的研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(10): 1866-1869.
HUANG Z SH, QIN SH Q, WANG X SH, *et al.*. Error analysis of optical angular encoder and its calibration with ring laser gyro [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(10): 1866-1869. (in Chinese)
- [5] 郭阳宽, 李玉和, 李庆祥, 等. 运动偏心对圆光栅副测量的影响及误差补偿[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(2): 178-181.
GUO Y K, LI Y H, LI Q X, *et al.*. Error compensation for eccentric motions of circular gratings [J]. *Journal of Tsinghua University (Sci & Tech)*, 2005, 45(2): 178-181. (in Chinese)
- [6] BRANK K, MIOMIR V. Calibration and accuracy of manipulation robot models-an overview [J]. *Mech Mach Theory*, 1994, 29(3): 479-500.
- [7] 汪平平, 费业泰, 林慎旺. 柔性三坐标测量臂的标定技术研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(3): 284-288.
WANG P P, FEI Y T, LIN SH W. Calibration technology of a flexible coordinate measuring arm [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(3): 284-288. (in Chinese)
- [8] DENAVIT J, HARTENBERG R. A kinematic notation for lower pair mechanism based on matrices [J]. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1955, 22(6): 215-221.
- [9] 闫利军, 李宗斌, 卫军胡. 模拟退火算法的一种参数设定方法研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(1): 245-247.
YAN L J, LI Z B, WEI J H. Study on parameter setting method for simulated annealing algorithm [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(1): 245-247. (in Chinese)

本文用几何方法推导出安装偏心造成的圆光栅测量误差和误差修正公式,这种分析方法同样适用于其它的角度传感器。基于模拟退火算法对圆光栅安装偏心误差进行了辨识和修正,实验结果表明,辨识和修正之后测量机的重复精度可提高 11.3%。

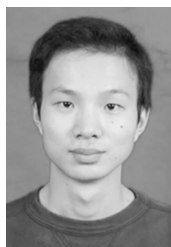
作者简介:



王 文(1968—),男,湖北大冶人,博士,副教授,硕士生导师,1996年于浙江大学获得博士学位,主要从事精密工程、微纳测量与数字控制等方面的研究。Email:wangwn@zju.edu.cn



高贯斌(1979—),男,山东成武人,博士研究生,主要从事精密测量系统方面的研究。E-mail:gbgao@163.com



林 铿(1985—),男,福建罗源人,硕士研究生,主要从事精密测量系统方面的研究。E-mail:loganlinkeng@163.com



陈子辰(1950—),男,福建福州人,博士,教授,博士生导师,主要从事精密机械、数字控制、MEMS等方面的研究。Email:chenzc@zju.edu.cn

●下期预告

采用杂波模型进行天基目标红外探测波段的选择

张 伟,曹移明,丛明煜,鲍文卓,孟祥龙

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心,黑龙江 哈尔滨 150001)

为了实现对导弹目标的及时发现,美国国防支援计划(DSP)系统采用了大气吸收波段进行探测。对该系统的波段设置及其选择方法进行了探索性研究,提出了一种基于背景杂波模型的波段选择方法。首先推导了简化的场景辐射参数表达形式,建立了场景空间杂波辐射模型,分析了中短波红外吸收波段内背景杂波辐射的主要影响因素,给出了综合信噪比解析式,然后在可能的目标辐射特性与背景杂波水平内选择出最佳工作波段,使得探测系统对辐射特性相似的一类目标的综合探测性能达到最佳。最后通过算例说明了该方法的有效性。经计算分析可以可知,系统最佳探测波段与场景的杂波辐射水平以及目标的辐射特征密切相关;在不同的杂波水平下,对两种发动机喷焰的目标探测时,DSP的最佳工作波段为 $2.73\sim 2.85\ \mu\text{m}$ 与 $4.2\sim 4.43\ \mu\text{m}$ 。