

文章编号: 1672-8785(2017)11-0005-06

F-Theta 光学镜头的畸变标定 及测角精度分析

朱 瑶 王治乐 贺 磊 陆 敏

(哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 对于精密测角定位系统来说, 畸变的存在会直接影响测量的几何精度, 因此需要对光学系统进行畸变标定以便于后期的畸变校正。为了解决 F-Theta 光学镜头的畸变标定问题, 建立了一种基于精密测角法的标定系统, 并详细论述了畸变标定过程。通过实验测得了视场与绝对畸变量之间的关系。利用基于曲线拟合的最小二乘逼近方法求解出了 F-Theta 光学镜头的焦距。最后对 F-Theta 光学镜头的测角精度进行了分析。结果表明, 该镜头满足秒级测角精度的要求。

关键词: F-Theta 光学镜头; 畸变标定; 曲线拟合; 测角精度

中图分类号: TB851+.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.11.002

Distortion Calibration and Angle Measurement Accuracy Analysis of F-Theta Optical Lens

ZHU Yao, WANG Zhi-le, HE Lei, LU Min

(Department of Electronic Science and Technology, Harbin Institute of technology, Harbin 150001, China)

Abstract: For a precise angle measurement positioning system, the existence of distortion may affect the geometric measurement accuracy directly. Therefore, the distortion of the optical system should be calibrated for its subsequent distortion correction. To solve the distortion calibration problem of a F-Theta optical lens, a calibration system based on the precise angle measurement method is established. The distortion calibration process is discussed in detail. The relation between the field of view and the absolute distortion is measured experimentally. The focal length of the F-Theta optical lens is derived by the least square approximation method based on curve fitting. Finally, the angle measurement accuracy of the F-Theta optical lens is analyzed. The result shows that the lens can meet the requirement of second-level angle measurement accuracy.

Key words: F-Theta optical lens; distortion calibration; curve fitting; angle measurement accuracy

0 引言

镜头大多数像差的产生都是由于将信息混合在一起而造成图像模糊的。它们在高斯像面

上均是弥散斑, 会影响成像的清晰度^[1]。而畸变则是在几何上将信息放错了位置, 不会影响成像的清晰度。因此, 畸变不会减少图像中的信息。这意味着畸变可以从图像中通过计算或者

收稿日期: 2017-07-18

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ350747)

作者简介: 朱瑶(1991-), 男, 江苏徐州人, 博士研究生, 主要从事光学图像处理技术方面的研究。

E-mail: yuzhimingren@163.com

映射来校正, 而镜头的其他像差会造成信息丢失, 而且这些信息不容易被重新创建。与其他像差一样, 畸变也是由光学镜头设计决定的。畸变是三级像差 (初级像差)。由于它与视场的立方值相关, 具有较大视场的镜头通常会有大的失真。也就是说, 大视场镜头会比小视场镜头更容易产生畸变。但实际上, 镜头畸变也受到光学镜头制造误差和装调误差的影响^[2]。畸变的存在会直接影响测量时的几何位置精度^[3]。因此, 要想实现精确定位与测量, 首先需要对光学镜头的畸变进行标定^[4-5]。本文主要对 F-Theta 光学镜头的畸变进行测试, 并对其数据进行处理, 最后分析 F-Theta 光学镜头的测角精度。

1 畸变的定义

轴外点上的宽光束和细光束都有像差存在。即使只有主光线通过光学系统, 由于球差的影响也无法与第二近轴光一致。因此, 主光线与高斯像面交点的高度不等于理想像高, 其差别就是系统畸变^[6]。畸变通常用相对畸变表示:

$$Distortion = \frac{AD - PD}{PD} \times 100\% \quad (1)$$

式中, AD 为实际像高; PD 为理想像高。

一些简单的光学镜头主要有两种畸变类型: 桶形畸变 (正畸变, 视场中的像点距离中心太远) 和枕形畸变 (负畸变, 视场中的像点距离中心太远), 如图 1 所示。

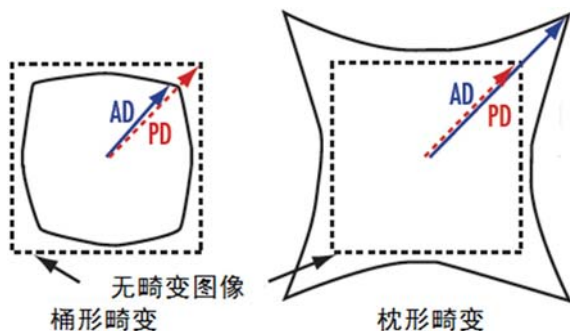


图 1 桶形畸变和枕形畸变

值得注意的是, 对于单个透镜来说, 畸变通常呈现正畸变或负畸变; 但是对于由多个元件构成的镜头来说, 整幅图像的表现并不一定是线性的, 而是会呈现出非线性畸变^[7]。另外,

随着波长的变化, 畸变程度也会有所变化。镜头不同, 畸变也会不同。而对于具有特定用途的镜头, 需从系统中去除畸变以保证测量的最高准确度。

2 畸变测试

根据技术指标要求, 采用 90° 高分辨率广角光学系统, 其镜头角度与像面上的像高成正比。这对光学设计提出了非常高的要求。因此, 在光学设计中需合理选择镜头的结构形式, 并引入光学非球面、远心、无畸变线性优化等先进技术手段。本文将光学系统设计为高分辨率/低畸变广角远心 F-Theta 镜头, 以减小由光学远心和畸变引起的镜头测角误差。如图 2 所示, 该系统是一个由低畸变广角成像光学镜头和 CMOS 探测器组成的光机电一体化产品。

本文采用精密测角法对低畸变广角光学镜头的畸变进行测量。它是利用高精度转台测试相机在不同视场下获得的畸变量。畸变测试的具体步骤如下:

(1) 如图 3 所示, 将待标定的光学镜头与各工装连接成一个整体, 合理定位光学系统入瞳与转台回转中心的相对位置, 保证在转台旋转 45° 时, 平行光管的有效口径能够覆盖光学系统入瞳, 同时保证载物平板与高精度气浮转台可靠连接, 且施加外力时没有相对位移。

(2) 将平行平晶贴合在光学镜头的基准面上。如图 4 所示, 通过自准直目镜可观察到十字靶标经光学平晶返回的十字像。图 5 所示为测试系统的十字靶标。调整畸变标定工装, 直至十字光标与自身返回像完全重合。

(3) 将待标定光学系统的光轴与平行光管的光轴重合。

(4) 调整面阵 CMOS 探测器的前后位置, 使十字靶标在光敏面上清晰成像。

(5) 调整高精度平移台与光学镜头的相对转动位置关系, 直至在转台旋转 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内清晰成像, 以保证高精度位移台的运动轨迹与光学系统的像面平行。

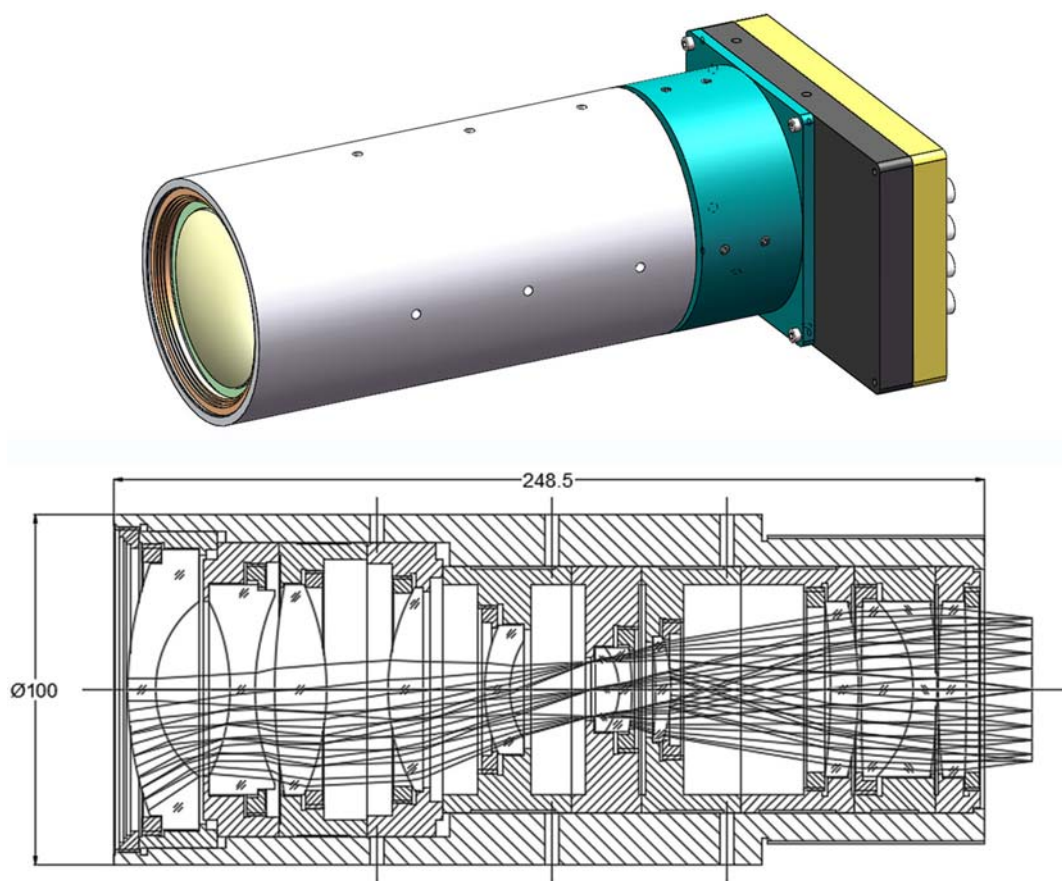


图 2 光学系统的组成图

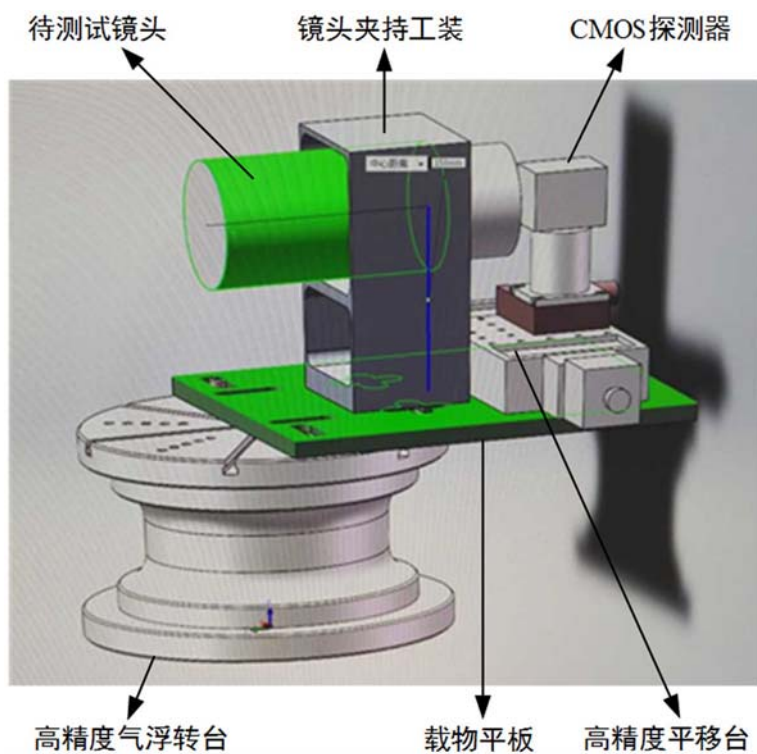


图 3 待测镜头及测试工装图

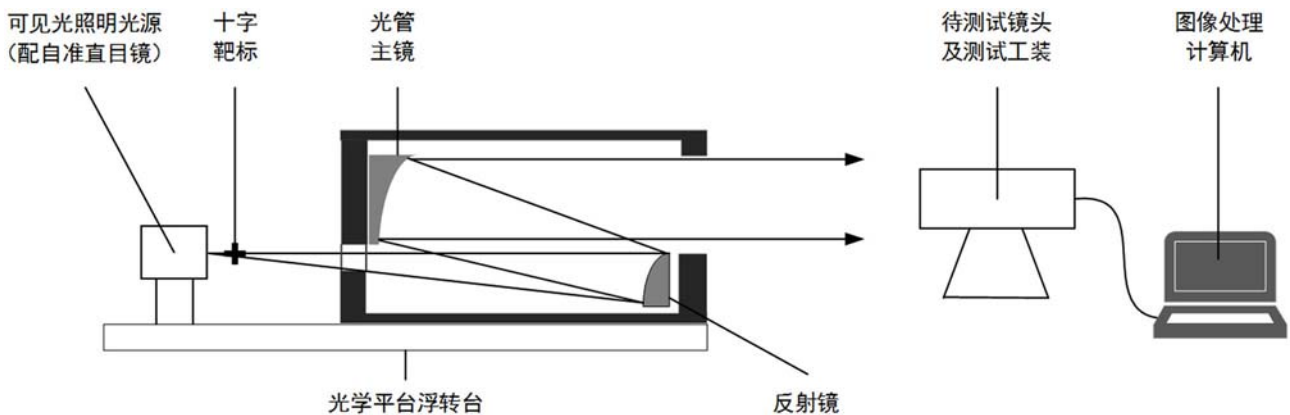


图 4 畸变测试系统的组成图

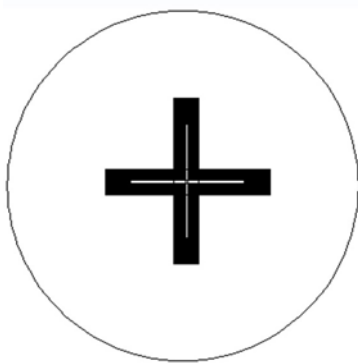


图 5 测试系统的十字靶标

(6) 驱动高精度平移台, 使十字光标成像在面阵 CMOS 相机的中心位置上, 同时记录此时十字光标中心点的像素坐标 (xxx,xxx) 即零位坐标, 并将高精度气浮转台及高精度平移台的坐标位置清零。

(7) 驱动高精度转台旋转至 0.1 视场即 4.5° 。

(8) 记录此时十字靶标成像的像素点坐标及其与中心点的距离即实际像高 (若探测器的尺寸不够, 则需驱动高精度平移台, 并记录高精度平移台的移动数据, 即为实际像高)。

(9) 此时转台每隔 $10''$ 转动一次, 并记录十字靶标成像的像素点坐标。当获得 6 组数据时, 转台刚好转动 $1'$ 。这样做是为了提高数据的可靠性, 即需要多采集一些数据以减小测试误差。

(10) 重复步骤 (7) ~ (9), 分别测量 0.2 视场 (9°)、0.3 视场 (13.5°)、 \dots 、1 视场 (45°) 的十字靶标成像的像素点坐标, 并记录相应数据。

(11) 将高精度气浮转台回归到零位, 重复步骤 (7) ~ (9), 分别测量 -0.1 视场 (-9°)、 -0.3 视

场 (-13.5°)、 \dots 、 -1 视场 (-45°) 的十字靶标成像的像素点坐标, 并记录相应数据。

3 焦距及畸变的计算

焦距是光学系统的重要参数之一, 其精度会直接影响系统的测量定位精度。光学元件在生产过程中存在加工制造误差。而在装配过程中, 为了使像质达到指标要求, 人们会按照实际的零件尺寸, 重新对装配公差进行优化。但是依旧会引起系统的焦距变化, 因此需要实际测量镜头的焦距值。

基于前面畸变测试步骤中记录的 n 组测量数据可以发现, 实际像高 y'_i 与理想像高 y_i 之间存在一定的差值, 即绝对畸变量 δ_i :

$$\delta_i = y'_i - y_i = y'_i - f\theta_i \quad (2)$$

式中, θ_i 为视场角; f 为经过标定的光学镜头焦距。在计算像点坐标时, 采用基于灰度值的内插细分方法进行求解, 可将结果精确到亚像素级; 而实际像高用像元尺寸乘以像点坐标即可得到^[8]。采用曲线拟合的最小二乘逼近方法要求绝对畸变量 δ_i 的平方和最小^[9], 即

$$\|\delta_i\|_2^2 = \min \quad (3)$$

根据式 (3) 可以求解出光学镜头的焦距:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^k y'_i \theta_i}{\sum_{i=1}^k \theta_i^2} \quad (4)$$

表 1 光学镜头的畸变值

视场	角度 θ_i ($^\circ$)	理论像高 y_i (mm)	实际像高 y'_i (mm)	绝对畸变量 δ_i (mm)
-1	-45	-2.0479E+01	-2.0477E+01	2.4217E-03
-0.7	-31.5	-1.4336E+01	-1.4334E+01	1.5952E-03
-0.3	-13.5	-6.1438E+00	-6.1460E+00	-2.1735E-03
-0.1	-4.5	-2.0479E+00	-2.0480E+00	-5.7831E-05
0	0	-2.8421E-15	0.0000E+00	2.8421E-15
0.1	4.5	2.0479E+00	2.0470E+00	-9.4217E-04
0.3	13.5	6.1438E+00	6.1460E+00	2.1735E-03
0.7	31.5	1.4336E+01	1.4336E+01	4.0481E-04
1	45	2.0479E+01	2.0479E+01	-4.2169E-04

因此, 通过将实验测得的数据代入式 (2), 可以得到系统的畸变分布情况。而利用式 (4) 则可得光学镜头焦距的最佳估计值, 有利于系统的精确定位与测量。我们对 $f=26.07521$ mm 的镜头进行了测试。表 1 列出了测试数据, 即测试镜头各个视场的绝对畸变量 (数据有所省略)。通过用式 (4) 拟合数据, 求解出了光学镜头的实际焦距 (26.07343 mm)。

4 测角精度的误差分析

光学镜头的焦距与畸变测量值的标定误差主要来源于高精度气浮转台、高精度平移台或者像素细分精度^[10]。其中, 高精度气浮转台的定位精度为 $\pm 1''$ 、分辨率为 $0.3''$ 、轴向/径向精度优于 $0.12 \mu\text{m}$; 高精度平移台的重复定位精度为 $2 \mu\text{m}$ 。因此, 全视场内绝对畸变的测量精度要小于 $2 \mu\text{m}$ 。

本文设计的光学镜头是一款视场大、分辨率高、工作距离范围大的精密测角定位系统, 其测角精度要求达到秒级精度。光学系统的畸变、焦距和远心度对系统的测角精度都有很大的影响。为了提高系统的测角精度, 需要严格控制不同光学视场畸变曲线的线性偏差, 减小畸变值, 将光学系统设计为“无”畸变 F-Theta 镜头。当系统畸变被优化到 0.025% 时, 由其引起的测角偏差为 1 个像元即 $40''$ 。由此可见, 系统的畸变值越小, 越有利于减小系统的测角误差。本

文设计的 F-Theta 镜头的畸变曲线平直, 实际测得的相对畸变为 -0.0021% , 极大地减小了由镜头畸变引起的角度偏差。此时, 由系统畸变引起的角度偏差为 $3.4''$ 。光学系统在设计时采用了像方远心光路。当工作距离在 $3 \sim 100$ m 范围内时, 光学系统的焦面变化量为 0.2 mm。因此, 在工作距离内, 光学系统的角度变化量为 $3.84''$ 。

如表 2 所示, 畸变是影响 F-Theta 镜头测角精度的主要因素及误差来源。由此可见, 本文设计的 F-Theta 光学镜头的测角误差满足实现秒级测角精度的要求。

表 2 镜头测角精度的影响因素及误差

影响因素	变化条件	测角误差的变化量
畸变	1 视场	$3.4''$
焦距	0.3%	$0.15''$
远心度	$3 \sim 100$ m	$3.84''$

5 结束语

通过搭建畸变测试平台, 对多个光学镜头样品的畸变进行了标定。结果表明, 焦距及畸变量的测量精度可达到微米量级, 实现了广角光学镜头的畸变标定; 而且最终 F-Theta 光学镜头的测角精度可以达到秒级, 进而满足正常使用的实际需求。如果需要像点坐标的位置精度变得更高, 那么可以采取更高倍数的像素细分。本文方法不仅适合于可见光波段的镜头畸变测

试,而且还适合于红外光学镜头的畸变测试;此外,对于线阵相机和鱼镜头等光学镜头的畸变标定同样适用。

参考文献

- [1] Born M, Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light [M]. Oxford: Pergamon Press, 1980.
- [2] 行麦玲, 刘贱平, 林家明, 等. 大视场短焦距镜头 CCD 摄像系统的畸变校正 [J]. *光学技术*, 2003, **29**(3): 377-379.
- [3] 张全法, 何金田. 提高广角成像系统几何畸变数字校正精度的方法 [J]. *光学技术*, 2001, **27**(3): 242-246.

(上接第 4 页)

这种结构以硅为基底,易于集成,只需要进行一次硅的刻蚀,且容易制造,在新能源、传感器、光谱探测成像、杂散光抑制、光子器件、纳米尺度光热转化与传递等众多领域都有着广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect Metamaterial Absorber[J].*Phys. Rev. Lett*, 2008, **100**:207402 .
- [2] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, et al. Design, Theory, and Measurement of a Polarization Insensitive Absorber for Terahertz Imaging[J].*Phys. Rev. B*, 2009, **79**(12):125104 .
- [3] Avitzour Y , Urzhumov Y A, Shvets G.Wide-angle Infrared Absorber Based on Negative Index Plasmonic Metamaterial[J].*Phys. Rev. B*, 2009, **79**:045131 .
- [4] Aydin K, Ferry V E, Briggs R M, et al. Broadband Polarization-independent Resonant Light Absorption Using Ultrathin Plasmonic Super Absorbers[J].*Nat. Commun*, 2011,**2**:517 .
- [5] Watts C M, Liu X L, Padilla W J. Metamaterial Electromagnetic Wave Absorbers[J].*Adv. Mater*, 2012, **24**: OP98 .
- [6] Hao J M, Wang J, Liu X L, et al. High Performance Optical Absorber Based on a Plasmonic Metamaterial[J]. *Appl. Phys. Lett*, 2010,**96**: 251104 .
- [7] Wang Y, Sun T, Paudel T, et al. Metamaterial-plasmonic Absorber Structure for High Efficiency

- [4] 李晋惠, 韩黄璞. CCD 光学系统成像畸变量与视场角的标定 [J]. *西安工业大学学报*, 2012, **32**(2): 99-102.
- [5] 刘航, 郁道银. 广角成像系统光学畸变的数字校正方法 [J]. *光学学报*, 1998, **18**(8): 1108-1112.
- [6] 张以谟. *应用光学 (第 3 版)* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [7] 杨必武, 郭晓松. 摄像机镜头非线性畸变校正方法综述 [J]. *中国图象图形学报*, 2005, **10**(3): 269-274.
- [8] 吴国栋, 韩冰, 何煦. 精密测角法的线阵 CCD 相机几何参数实验室标定方法 [J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(10): 1628-1632.
- [9] 张蔚, 李恩普, 陈建明. 大视场光学系统畸变曲线拟合 [J]. *电光与控制*, 2004, **11**(4): 57-59.
- [10] 陈元培, 蔡章模, 田世雄. 超广角光学系统畸变与主距的测量方法 [J]. *光电工程*, 1999, **26**(S1): 126-130.

Amorphous Silicon Solar Cells[J].*Nano Lett*, 2012, **12**:440 .

- [8] Maier T , Brueckl H. Multispectral Microbolometers for the Midinfrared[J].*Opt. Lett*,2009, **34**:3012 .
- [9] Liu X L , Starr T, Starr A F, et al. Infrared Spatial and Frequency Selective Metamaterial with Near-unity Absorbance[J]. *Phys. Rev. Lett*, 2010, **104**:207403 .
- [10] Shrekenhamer D, Xu W R, Venkatesh S, et al. Experimental Realization of a Metamaterial Detector Focal Plane Array[J].*Phys. Rev. Lett*, 2012, **109**:177401 .
- [11] Zhou L, Tan Y, Wang J, et al. 3D Self-assembly of Aluminium Nanoparticles for Plasmon-enhanced Solar Desalination[J].*Nature Photonics*,2016,**10**:393-398 .
- [12] Glybovski S B, Tretyakov S A, Belov P A, et al. Metasurfaces: From Microwaves to Visible[J].*Physics Reports*, 2016,**634**:1-72 .
- [13] 文永刁. 多波段超材料完美吸收器的研究 [D]. 南京航空航天大学, 2015.
- [14] Liu N, Mesch M, Weiss T, et al. Infrared Perfect Absorber and its Application as Plasmonic Sensor[J].*Nano letters*, 2010,**10**:2342-2348 .
- [15] Lin K T, Chen H L, Lai Y S, et al. Silicon-based Broadband Antenna for High Responsivity and Polarization-insensitive Photodetection at Telecommunication Wavelengths[J].*Nature Communications*, 2014,**5**: 3288 .
- [16] Palik E D. Handbook of Optical Constants of Solids, Academic Press, 1997.