

用于液晶可调谐滤光片型多光谱成像仪的 中继成像系统设计

付 强^{1,2} 黄 旻³ 景娟娟^{1,2} 相里斌³

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

³ 中国科学院光电研究院, 北京 100094

摘要 液晶可调谐滤光片(LCTF)是多光谱成像中一种高效的分光元件,但其物理尺寸超出了一般商业镜头的法兰距,很难直接与商业镜头及工业相机结合进行多光谱成像。设计了一种工作在单位放大率下的中继成像系统,用以适应它们的接口关系。其工作波段为 400~720 nm,工作 F 数为 4.5,利用完全对称的结构,自动校正彗差、畸变和垂轴色差,设计结果满足多光谱成像的使用要求。该系统结构紧凑,生产成本低,适用于液晶可调谐滤光片型便携式多光谱成像仪的模块化设计。

关键词 光学设计;中继成像系统;像差平衡;多光谱成像;液晶可调谐滤光片

中图分类号 TP73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1022002

Relay Lens Design for an LCTF Multi-Spectral Imager

Fu Qiang^{1,2} Huang Min³ Jing Juanjuan^{1,2} Xiangli Bin³

(¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract Liquid crystal tunable filter (LCTF) is a powerful dispersive element in multi-spectral imaging. Its physical size, however, exceeds the flange focal distance of general commercial off-the-shelf photographic lenses, which makes it difficult to combine with commercial lenses and cameras directly for multi-spectral imaging applications. A relay lens design working at unit magnification is proposed to accommodate the interface. The spectral range is from 400 nm to 720 nm, and the working F number is 4.5. With the symmetrical design strategy, coma, distortion and lateral color are canceled out automatically. The result satisfies the requirements of multi-spectral imaging. This system is compact and low-cost. It is applicable to the design of a portable multi-spectral imager based on the liquid crystal tunable filter.

Key words optical design; relay lens; aberration balance; multi-spectral imaging; liquid crystal tunable filter(LCTF)

OCIS codes 220.3620; 110.4234; 300.6190; 230.2090; 080.1010

1 引 言

多光谱成像技术是在传统二维成像的基础上增加了光谱维的信息,其获得的三维数据称为数据立方体。由于能够提供更为丰富的目标信息,多光谱成像在航空航天遥感、工农业监测、生物医药、物质分析、大气探测及军事应用等方面取得了广泛的应用^[1~3]。

近年来,液晶可调谐滤光片(LCTF)的产生和发展,为多光谱成像提供了新的手段。液晶可调谐滤光片结构简单,体积小,重量轻,具有调谐范围宽、带宽窄和响应快等优点,而且功耗低,无运动部件,适合在实验室和野外等环境下工作^[4~8]。目前国外已经有相关产品问世,如美国 CRi 公司的 VariSpec

收稿日期: 2011-03-10; **收到修改稿日期**: 2011-05-20

基金项目: 国家 963 计划(2009CB724005)资助课题。

作者简介: 付 强(1985—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: vorQ.Fu@hotmail.com

导师简介: 相里斌(1967—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光谱成像技术研究和航空航天光学遥感等方面的研究。E-mail: xiangli@aoe.ac.cn

系列产品^[9],可用于便携式多光谱成像仪的设计^[10]。

鉴于 LCTF 的上述特点,采用合适的商业镜头、LCTF 和工业相机等成品模块可方便地组成一种便携式多光谱成像系统。然而利用 LCTF 作为分光元件设计模块化的便携式多光谱成像仪时,为了充分利用 LCTF 的性能,有效利用照相镜头的通光口径,宜采用将 LCTF 置于相机镜头和探测器之间的结构^[9~11]。但一般商业镜头的法兰距(FFD)是为特定机身设计的,如 Nikon 镜头为 F 卡口,FFD 为 46.50 mm,Canon 镜头为 EF 卡口,FFD 为 44.0 mm,工业相机采用标准 C 卡口,FFD 为 17.526 mm^[12]。LCTF 本身有一定的物理尺寸,如 CRi 公司的 VariSpec VIS 产品,前后端面距离为 49.53 mm^[9]。对于较远的目标,像距接近物镜焦距值,LCTF 可占据的空间只有法兰距减去工业相机 C 卡口尺寸的距离(以 Nikon 镜头为例,该距离即为 28.974 mm),小于 LCTF 的尺寸。此时采用 LCTF 位于镜头和探测器之间的结构就无法对任意位置的目标清晰成像,限制了仪器的使用,降低了便携式多光谱成像仪的灵活性。

按照模块化设计的思路,考虑到用户根据不同应用需求,需要采用不同的商业物镜,与 LCTF、工业相机通过镜头接口搭配使用。因此,有必要将 LCTF 和工业相机组合为一个模块进行设计,满足物镜可更换的需求,实现“一机多用”。考虑到上述接口尺寸矛盾的问题,为了匹配摄影镜头、LCTF 和

工业相机之间的接口尺寸关系,保证该多光谱成像仪能够对任意距离的目标进行探测,需要设计一组中继成像系统,将商业镜头所成的像经过 LCTF 后中转到探测器靶面,为 LCTF 提供足够的空间,从而实现由 LCTF、中继成像系统和工业相机组成的模块化多光谱成像仪。

本文设计了一种满足便携式多光谱成像仪方案要求的中继成像系统,其工作在单位放大率下,采用完全对称的结构形式,自动校正彗差、畸变和垂轴色差,适应了商业镜头、液晶可调谐滤光片和工业相机之间的尺寸接口关系,实现了基于 LCTF 的便携式多光谱成像仪的模块化设计。

2 系统结构及参数

2.1 系统结构

一般来说,利用 LCTF 为分光元件的多光谱成像系统可采用两种结构形式,如图 1 所示。图 1(a)的结构简单,易于实现,且容易调焦和标定,但无法充分利用镜头的光圈,容易造成渐晕,LCTF 的自重也会导致系统重心前移,造成光机系统设计的困难;图 1(b)的结构更紧凑,重心位于系统中部,而且 LCTF 工作在会聚光路中,能够充分接收光线,能量利用率高,但由于外形尺寸的制约,需要破坏相机的卡口或选用某些后工作距离较大的专业镜头才能成像。

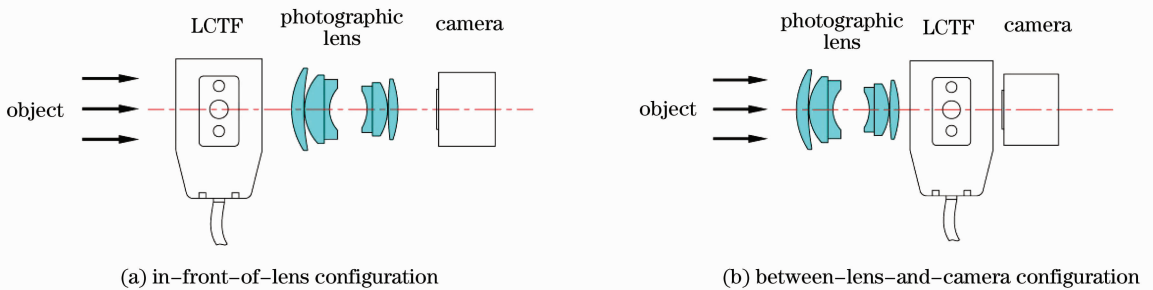


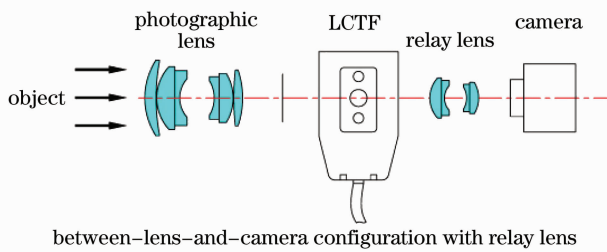
图 1 LCTF 多光谱成像仪结构图

Fig. 1 Layout of multi-spectral imager with LCTF

为了利用常见的摄影镜头和工业相机与 LCTF 组成多光谱成像系统,需采用如图 2 所示的二次成像方式。LCTF 位于摄影镜头所成一次像和探测器之间,通过中继成像系统将一次像再成像到探测器靶面。此结构兼顾上述两种方式的优点,摄影物镜可以工作在其所设计的光圈下,能量利用率高;无需选用大工作距离的摄影物镜,也无需破坏相机前段的卡口;LCTF 位于系统中间,不需要额外的支撑机

构;通过合理设计机械结构以及标定的方法可以保持摄影物镜所标识的各项数据准确。缺点是由于中继系统的引入,增加了系统长度。

在图 2 的结构中,中继成像系统的作用是转像,同时提供能够容纳 LCTF 物理尺寸所需的空间。摄影物镜可以通过移动镜组位置对不同距离的目标成像,但像面位置与镜筒法兰面距离保持不变,为法兰距,这样对于中继成像系统,其物面位置是确定



between-lens-and-camera configuration with relay lens

图 2 采用二次成像的 LCTF 多光谱成像仪原理图
Fig. 2 Schematic layout of an LCTF-based multi-spectral imager with relay optics

的,因此中继成像系统工作时不需移动即可保持物像共轭关系。其他设计参数的确定与 LCTF 有直接关系,在本系统中,LCTF 的口径和所能接收的入射角范围是中继系统相关光学参数选定的限制条件。

2.2 系统参数

中继成像系统设计需综合考虑 LCTF 和探测器的参数,而且受到整体尺寸要求的限制。本系统设计中,选用 CRi 公司的 VariSpec VIS 型 LCTF,其参数如表 1 所示;探测器选用 Point Grey Research Inc. 的 Grasshopper 单色面阵 CCD 相机 GRAS-14S5M/C,其参数如表 2 所示。

表 1 VariSpec VIS 型 LCTF 参数

Table 1 VariSpec VIS LCTF parameters

Item	Value
Wavelength range /nm	400~720
Bandwidth FWHM /nm	10
Working aperture /mm	22
Angle-of-acceptance /($^{\circ}$)	± 7.5

表 2 探测器参数

Table 2 CCD parameters

Item	Value
Maximum resolution /pixel	1384(H) \times 1036(V)
Pixel size / μ m	6.45 \times 6.45
Sensor format /($^{\circ}$)	2/3
Interface	C-Mount

中继成像系统工作波段应与 LCTF 一致,即 400~720 nm。由于垂轴放大率为 -1,系统的物方视场与像方视场相等,由探测器尺寸决定,即 ± 5.6 mm。为了尽可能多的收集光线,中继成像系统的 F 数应尽可能高,这里设计为 $F=2.25$,相当于工作 F 数为 4.5 或数值孔径 NA 为 0.11。根据 LCTF 多光谱成像仪的工作原理,每次曝光时 LCTF 通透一

种波长的准单色光,带宽为 10 nm,在探测器靶面形成一幅准单色图像,再次曝光时,主波长按设定步长移动,在探测器靶面得到另一幅准单色光图像。为了在一系列图像之间配准,中继系统应校正轴向色差、畸变和垂轴色差。在保证实现图 2 所示结构的同时,应使系统尽可能紧凑,因此中继系统焦距可设定为 50 mm,保证多光谱成像仪能够正常工作,并且满足小型化、轻量化的设计要求。

3 中继成像系统设计

工作在单位放大率下的中继成像系统适宜采用完全对称的结构形式,这样彗差、畸变和垂轴色差自动得到校正^[13,14],适合多光谱成像的使用要求。本系统设计中主要考虑校正球差、轴向色差、场曲和像散。

3.1 设计原理

常用的完全对称的消色差透镜是 Celor 型分离透镜^[15],结构如图 3 所示,它是一种有空气间隔的消色差系统,引入空气间隔提供了更多的自由度来校正其他像差。首先设计半部系统,有 5 个自由度,即 2 个光焦度、2 个透镜曲率和 1 个空气间隔,用来保证系统的焦距值、校正色差、降低 Petzval 和以及控制球差和像散。半部系统设计好后,两部分再结合起来使用。

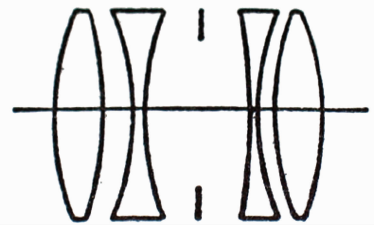


图 3 Celor 透镜结构图

Fig. 3 Configuration of Celor lens

根据近轴光学计算,如图 4 所示,Celor 系统半部结构应满足以下条件^[15,16]:

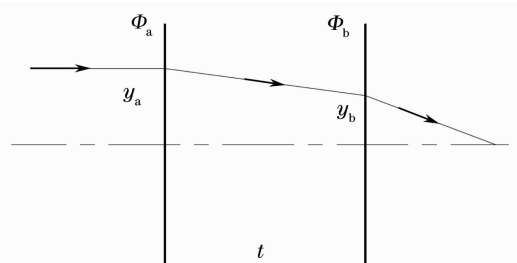


图 4 Celor 系统半部结构近轴光学计算示意图

Fig. 4 Diagram of paraxial ray trace for rear half of Celor lens

$$\Phi = \left(\frac{1}{y_a}\right)(y_a\Phi_a + y_b\Phi_b), \quad (1)$$

$$\frac{y_a^2}{V_a}\Phi_a + \frac{y_b^2}{V_b}\Phi_b = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\Phi_a}{n_a} + \frac{\Phi_b}{n_b} = \Phi_p. \quad (3)$$

其中(1)式是光焦度条件,(2)式是色差校正条件,(3)式是 Petzval 条件。从以上条件可得到 Celor 透镜的光焦度计算公式为

$$\left(V_a - \frac{n_b V_b}{n_a}\right)\Phi_a^2 + (\Phi_p n_b V_b - 2\Phi V_a)\Phi_a + V_a\Phi^2 = 0, \quad (4)$$

从而求解出

$$\Phi_a = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (5)$$

式中

$$\begin{cases} a = V_a - \frac{n_b V_b}{n_a} \\ b = \Phi_p n_b V_b - 2\Phi V_a, \\ c = V_a\Phi^2 \end{cases} \quad (6)$$

进一步可求得

$$\Phi_b = n_b\Phi_p - \frac{n_b}{n_a}\Phi_a, \quad (7)$$

两组透镜的间隔为

$$t = \frac{\Phi_a + \Phi_b - \Phi}{\Phi_a\Phi_b}. \quad (8)$$

全系统的焦距为 50 mm,则半部系统焦距为 100 mm,选择初始材料分别为 H-ZF2 ($n_d = 1.67269, V_d = 32.2191$)和 H-ZK4 ($n_d = 1.608813, V_d = 58.8806$),取 $\Phi_p = 0.002 \text{ mm}^{-1}$,计算出初始结构参数:

$$\begin{cases} \Phi_a = -0.0241 \\ \Phi_b = 0.0264 \\ t = 12.1 \end{cases}. \quad (9)$$

将上述计算的初始参数输入到 Zemax 软件中,得到一个简单的初始结构,通过复杂化和更换材料等方法进行优化,控制系统的球差、像散、场曲和色差等指标。

3.2 设计结果

根据上述设计原理,按照系统要求的指标,设计了全对称的 Celor 型中继成像系统。为了校正工作波段范围内的球差、色差,将初始结构中的两组单透镜改为双胶合,并增加了一个厚弯月透镜来校正场曲。另外,一次像面到第一块透镜的距离和最后一块透镜到探测器靶面之间的距离也略有差异,这有助于减小场曲和球差。最终设计结果如图 5 所示。

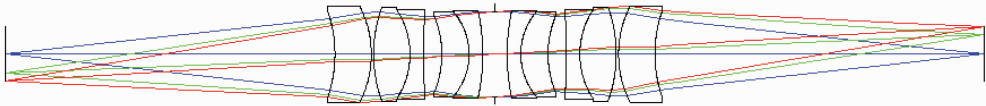


图 5 中继成像系统设计结果

Fig. 5 Layout of relay lens design

该系统的点列图和调制传递函数(MTF)曲线分别如图 6,7 所示。系统在 0 视场的均方根(RMS)半径约为 $5.4 \mu\text{m}$,0.7 视场的 RMS 半径约

为 $4.99 \mu\text{m}$,全视场 RMS 半径为 $4.7 \mu\text{m}$,各个视场弥散斑分布比较均匀。在探测器奈奎斯特频率 (78 lp/mm)处,轴上点 MTF 大于 0.55,0.7 视场

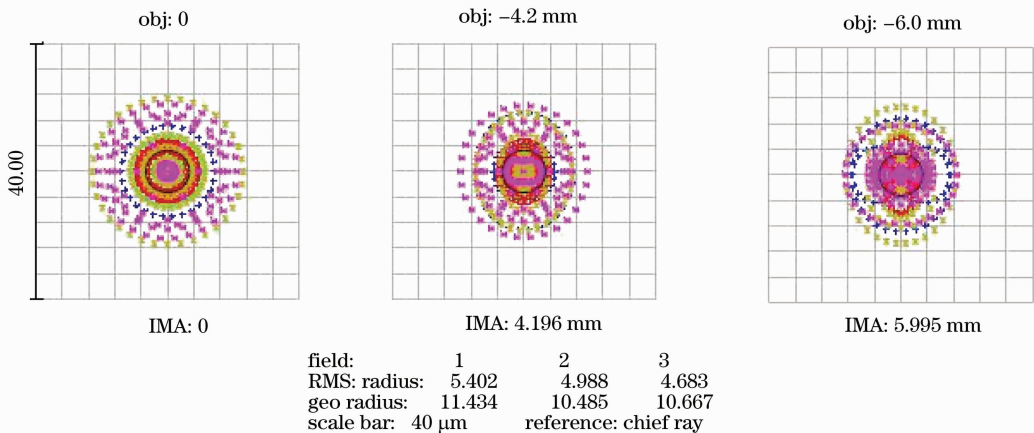


图 6 点列图

Fig. 6 Spot diagram

MTF 大于 0.5, 全视场 MTF 大于 0.4. 对于常用的照相物镜, 一般要求在 30 lp/mm 处 MTF 大于 0.5 以及在 50 lp/mm 处 MTF 大于 0.3, 即可满足使用要求^[17]. 本中继成像系统在 30 lp/mm 处 MTF 大

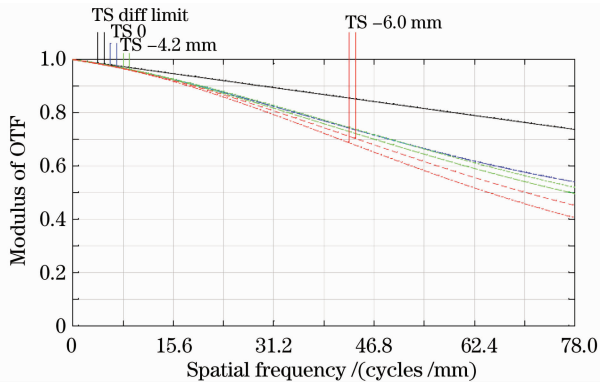


图 7 中继成像系统的调制传递函数(MTF)曲线
Fig. 7 MTF for relay lens

于 0.7, 在 50 lp/mm 处 MTF 大于 0.5, 可见其性能可以很好地满足成像的使用要求。

按照图 2 的结构, 利用所设计的中继成像系统, 与商业镜头、LCTF 和工业相机组成多光谱成像系统, 其结构如图 8 所示。商业镜头的光学参数往往不可知, 在 Zemax 中以 Paraxial 类型代替。在这种工作条件下, 要求商业镜头工作在最大光圈, 这样 LCTF 和中继系统是决定光束大小的限制因素, 中继系统的光阑在全系统中也起到光阑的作用。以普通的定焦镜头 Nikon AF-S 50 mm $f/1.4$ G 为例, 它工作在最大光圈时, 光瞳约为 35.7 mm (图 8 中物镜大小即按该尺寸), 而中继成像系统要求摄影物镜的通光孔径尺寸达到约为 25.12 mm 即可, 因此不会发生挡光。LCTF 位于一次像面后 10 mm 处, 保证后端面与中继成像系统第一面之间留有约 12.56 mm 的距离。

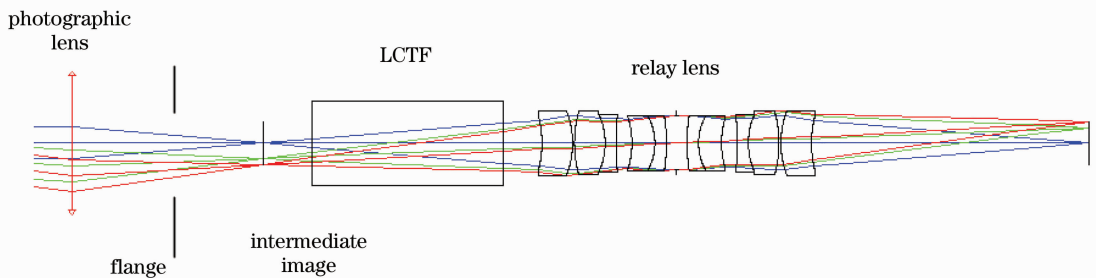


图 8 基于 LCTF 的多光谱成像系统图

Fig. 8 Layout of multispectral imaging system based on LCTF

需要指出的是, 并非市场上所有的商业镜头都适合与该模块化多光谱成像仪配合使用。一般来说, 使用常见的商业定焦镜头工作在最大光圈下不会发生挡光, 而变焦镜头工作在长焦段时有可能不适合与该多光谱成像仪配合使用。而且采用不同的商业镜头, 全系统的分辨率和 MTF 等性能会与图 6, 7 中的结果不同, 系统的实际空间分辨率、光谱分辨率等需要在定标阶段实测。

由于模块化设计要求摄影镜头可更换, 因此本方案无法做光瞳匹配设计, 但注意到 LCTF 的口径 ($\Phi 22$ mm) 和可接受视场角范围 ($\pm 7.5^\circ$) 是限制仪器有效孔径的视场的主要参数, 当采用市场上常见的定焦摄影镜头并工作在最大光圈下时, 其口径满足使用要求, 不会发生挡光。图 9 是本文设计的中继成像系统与 LCTF 和工业相机组成的模块化多光谱成像仪的实物图, 摄影镜头为 Nikon AF-S 50 mm $f/1.4$ G, LCTF 和工业相机为表 1 和表 2 中的型号。同时, 还分别以商业定焦镜头 Nikon

AF-S 50 mm $f/1.4$ G, AF Micro-NIKKOR 60 mm $f/2.8$ D 以及 Olympus BX51 显微镜 (UIS2 光学系统, 无限筒长设计, 可与标准工业相机配合使用) 等三类镜头进行了实验, 结果都验证了本方案的可行性。图 10 是采用图 9 的配置获得的 33 波段多光谱图像数据立方体, 被拍摄物是盛有若干种水果的果



图 9 由 Nikon 镜头、LCTF、中继系统和工业相机组成的多光谱成像仪实物图

Fig. 9 Multispectral imager using Nikon lens, LCTF, relay lens and camera



图 10 由图 9 的多光谱成像仪获得的多光谱图像数据立方体

Fig. 10 Image cube acquired by the device shown in Fig. 9

篮,最上层是由光谱图合成的彩色图像。

4 结 论

为实现基于 LCTF 的便携式多光谱成像仪的模块化设计,采用中继成像的方式,解决了商业镜头、LCTF 和工业相机之间接口关系匹配的问题。本文中设计的中继成像系统采用完全对称的结构形式,自动校正彗差、畸变和垂轴色差,大大简化了设计难度,而且加工时只需将同样的镜片加工两套,降低了成本。这种中继成像系统工作在 $400\sim 720\text{ nm}$ 波段范围内,垂轴放大率为 -1 ,在 78 lp/mm 处各视场 MTF 均在 0.4 以上,能够满足多光谱成像的使用要求。利用 LCTF、本中继成像系统和工业相机构成的模块化多光谱成像仪,与用户选择合适的商业镜头配合,在镜头工作在最大光圈的条件下,不会发生挡光。实验表明,该模块化多光谱成像仪可与多种摄影定焦镜头以及无限筒长设计的显微镜等通过标准工业卡口匹配工作,一定程度上实现了一机多用,可以满足实验室、工业现场以及野外作业等使用需求。

参 考 文 献

- Xiangli Bin, Zhao Baochang, Xue Mingqiu. Spatially modulated imaging interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 18~22
- 相里斌, 赵葆常, 薛鸣球. 空间调制干涉成像光谱技术[J]. *光学学报*, 1998, **18**(1): 18~22

- Yuan Yan. Theoretical and Technical Study of the Imaging Spectrometry[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of the Chinese Academy of Sciences, 2005. 1~22
- 袁 艳. 成像光谱理论与技术研究[D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所, 2005. 1~22
- R. Glenn Sellar, Glenn D. Boreman. Classification of imaging spectrometers for remote sensing applications[J]. *Opt. Engng.*, 2005, **44**(1): 013602-1~013602-3
- Nahum Gat. Imaging spectroscopy using tunable filters: a review [C]. *SPIE*, 2003, **4056**: 50~64
- Zhang Dongying, Hong Jin, Tang Weiping *et al.*. Design of hyperspectral imaging system based on LCTF[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(10): 2455~2458
- 张冬英, 洪 津, 汤伟平等. 基于 LCTF 调谐的高光谱成像系统设计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(10): 2455~2458
- Du Lili, Yi Weining, Zhang Dongying *et al.*. Multispectral image acquisition system based on liquid crystal tunable filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 187~191
- 杜丽丽, 易维宁, 张冬英等. 基于液晶可调谐滤光片的多光谱图像采集系统[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 187~191
- Du Peisheng, Guo Jing, Dong Qianmin. Application of liquid crystal tunable filter in multispectral imager[J]. *Infrared*, 2007, **28**(11): 4~8
- 杜培胜, 郭 靖, 董前民. 液晶可调谐滤光片及其在光谱仪上的应用[J]. *红外*, 2007, **28**(11): 4~8
- Yun Maojin, Li Guohua, Wu Fuquan *et al.*. Characteristics of Lyot tunable liquid crystal filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 627~631
- 云茂金, 李国华, 吴福全等. 利奥型可调谐液晶电光滤波器的特性分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 627~631
- Cambridge Research & Instrumentation, Inc. (CRi). VariSpec liquid crystal tunable filter user's manual
- Wang Xinquan, Huang Min, Gao Xiaohui *et al.*. Portable multispectral imager based on LCTF[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 71~75
- 王新全, 黄 旻, 高晓惠等. 基于液晶可调谐滤光片的便携式多光谱成像仪[J]. *光子学报*, 2010, **39**(1): 71~75
- LOT-Oriel GmbH & Co. KG. VariSpec imaging system integration. Technical report
- http://en.wikipedia.org/wiki/Flange_focal_distance
- Li Xiaotong, Ceng Zhaofeng. Geometric Optics, Aberration and Optical Design [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 145~146
- 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州:浙江大学出版社, 145~146
- Milton Laikin. Lens Design [M]. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 169~181
- Joseph M. Geary. Introduction to Lens Design with Practical ZEMAX Examples[M]. Virginia: Willmann, Inc., 315~328
- Warren J. Smith. Modern Optical Engineering[M]. New York: McGraw-Hill, 2000. 404~413
- Robert E. Fischer. Optical System Design [M]. New York: McGraw-Hill, 2008. 612~632