文章编号:1002-2082(2009)04-0547-05

透雾连续变焦镜头的小型化设计

胡际先,胡 锋
(华中光电技术研究所 武汉国家光电实验室,湖北 武汉 430073)

摘 要:根据探测设备电视通道要求实现普通彩色和透雾黑白两种模式观察并小型化的特点,运用最速变焦路线凸轮曲线的设计及凸轮曲线平滑性优化的方法实现了小型化设计;采用可见光加近红外波段并在全波段范围内进行像质评价的方法,即根据外形尺寸计算中所求出的每个透镜组的光焦度和通光口径,参考现有结构,选定每组透镜的结构形式,缩放成要求的焦距以后组合成全系统进行像差校正,这样既可实现普通彩色和透雾黑白两种模式的观察,又保证了系统的齐焦性。系统通过了像质检测、实景成像的验证及环境应力筛选及环境例行试验的考查,并成功地用于探测设备。

关键词:透雾连续变焦光学系统;最速变焦路线;凸轮曲线;像质
中图分类号:TN942.21 **文献标志码**:A

Design of miniaturization for fog transmission zoom lens

HU Ji-xian, HU Feng
(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong Institute of Electro-Optics, Wuhan 430073, China)

Abstract: The minimized design was realized by using the design of fast zooming route cam curve and the method of cam curve flatness optimization according to the requirement of the detection device TV channel for realizing the conventional color mode and fog transparent black/white mode. In the design, the visible light plus near infrared band and a method of image quality evaluation in the range of the whole band was applied to meet the needs of observation in the conventional color mode and fog transmission black/white mode on the premise of avoiding the focal shift of zoom. The system was passed through MTF test, imaging verification, environment stress screening and environment routine experiment, and was equipped to the detection device successfully.

Key words: fog transmission zoom optical system; fast zoom route; cam curve; image quality

引言

随着小型化隐蔽性强的光电探测设备在军事或民用上的广泛应用,体积小、质量轻、探测距离大、适装性强,并能在雾、雨、尘天气下观察的连续变焦透雾电视传感器以其技术成熟、价格低廉、图像分辨率高等众多特点,成为近年来的研究方向。本文以某光电探测设备可见光通道性能指标的要求为例,运用机械补偿和正组补偿连续变焦光学系统设计技术及最速变焦路线凸轮曲线设计技术设计了一种体积小、质量小的透雾连续变焦光学镜头。设计的透雾连续变焦镜头经过像质评价各项性能指标均满足该探测设备要求。

1 指标要求及结构形式分析

1.1 主要指标要求

系统的主要指标包括:

收稿日期:2008-11-14; **修回日期**:2009-02-18
作者简介:胡际先(1965—),女,湖北鄂州人,高级工程师,主要从事光学设计工作。E-mail:xia_hua555@126.com

· 工作波段:400 nm～1 000 nm

· 焦距:20 mm～400 mm 连续变焦

· 口径:D =88 mm

· 相对孔径:D/F=1/3.5～1/4.5

· 弥散斑直径不大于10 μm(80%能量集中处的设计值)

· CCD 探测靶面尺寸:4.8 mm×3.6 mm

· 后截距:不小于22 mm

· 外型尺寸不大于:280 mm(L)×150 mm(W)×140 mm(H);总质量不大于4 kg。

1.2　结构形式选择

该系统的焦距 f'=20 mm～400 mm,变倍比为20倍。由于镜头的外型尺寸不大于280 mm(L)×150 mm(W)×140 mm(H),要实现小型化,首先必须缩短该电视传感器光学系统的总长并减小径向尺寸。光学系统总长的缩短,导致系统变倍组和补偿组的移动范围受到限制。在光学系统设计过程中,既要保证凸轮曲线平滑、不陡峭、无拐点,还要保证系统像质满足设计要求,则凸轮曲线必须采用最速变焦路线的设计方法。在保证相对孔径的前提下,减小径向尺寸,表明该电视传感器应采用正组机械补偿的结构形式。最速变焦路线设计有两大缺点:一是前固定组的第一辅助光线投射光在换根后迅速增长,即孔径增大,导致前固定组的相对孔径较大,像差平衡难度增加;二是长焦时变倍组和调焦组间隔太小,为了使变倍组和调焦组在长焦位置时不相碰,只能增加补偿组的焦距,而补偿组焦距过长时补偿像面位移需要的补偿量太大。为了弥补以上缺陷,在设计前固定组时,尽量采用能减小前固定组本身的色差和二级光谱的光学材料(如 CaF_2 和FK)的结构形式。设计补偿组时,在保证长焦的最小间隔的前提下,尽量缩短补偿组的焦距。该光学系统的结构形式如图1所示,由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组组成。

2　光学系统的设计及像质评价

2.1　最速变焦路线结构参数的确定

该系统初始结构参数计算的主要目的是找到补偿组的最速变焦路线,使变倍组的倍率由绝对值小的负值向绝对值大的负值变化,补偿组处于补偿组倍率曲线的一个解 $|m_{31}|<1$ 的上半段,且长焦时变倍组和补偿组的间距 d_{23l} 最小。如图1所示,设前固定组、变倍组、补偿组和后固定组的焦距分别为 f_1'、f_2'、f_3' 和 f_4',短焦时各透镜组之间的距离分别为 d_{12s}、d_{23s} 和 d_{34s},长焦时各透镜组之间的距离分别为 d_{12l}、d_{23l} 和 d_{34l},长焦时变倍组的倍率 m_{2l},长焦时补偿组的倍率 m_{3l},变倍组的移动量 q_2,补偿组像

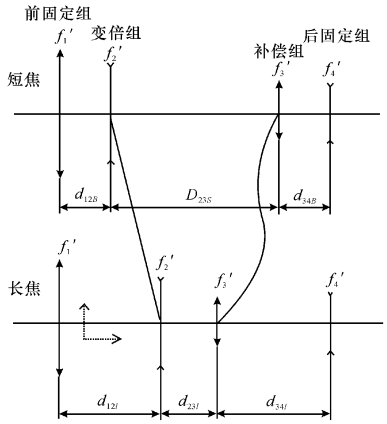

图1　光学系统结构原理图

Fig. 1　Principle of optical system

面位移量 Δ。运用机械补偿正组补偿变焦系统初始结构参数的计算公式计算图1中的各结构参数,由于补偿组的2个解 m_{31} 和 m_{32} 的极值一定发生在变倍组倍率 m_2=－1 的时候,适当调整 f_3'、m_{2l} 和 m_{3l} 的值,使 b=－2,从而使 m_{31}=－1,m_{32}=－1,使补偿组平滑快速地从 $|m_{31}|<1$ 曲线的上半段过渡到 $|m_{32}|>1$ 曲线的下半段,换根之后,补偿组作少量的运动而变倍比迅速增加,达到最速变焦路线。

2.2　光学系统的优化设计

该系统优化设计包括像质、凸轮曲线的平滑性、工艺性及透镜的加工和装调工艺性的优化。

2.2.1　光学系统像质的优化

光学系统像质的优化即像差设计是,该系统要求透雾,因此工作波段比一般可见光波段(400 nm～700 nm)要求宽,应扩展为400 nm～1 000 nm。若按使用要求(普通彩色观察和透雾黑白观察)将系统波段分为 400 nm～700 nm 和 760 nm～1 000 nm 两段进行优化时,像差的优化难度可以降低,但在普通彩色观察和透雾黑白观察进行转换时像面不能齐焦。为了保证齐焦性,必须在其中一种模式下增加补偿镜,增加补偿镜就意味着增加一套运动机构,降低了镜头的可靠性。若在400 nm～1 000 nm 范围内进行整体优化,其优点是能保证普通彩色观察和透雾黑白观察转换时的齐焦性,但

色差的校正难度十分突出。为了保证系统的齐焦性并尽量减少运动机构,该系统采用在全波段范围内进行像质优化。首先根据外形尺寸计算所求出的每个透镜组的光焦度和通光口径,参考现有结构,选定每组透镜的结构形式,缩放成要求的焦距以后组合成全系统进行像差校正。该过程一般可分为3步进行:首先把整个变焦范围按等比级数取出3～5个不同的焦距位置,改变前固定组和变焦透镜组的结构参数,使各种像差在不同焦距位置时尽量一致,但不一定要求数值很小。当各种像差在不同焦距时的差别校正得比较小时,取每一种像差的平均值作为对后固定组校正像差的要求,进行第二步校正;这时把前部系统固定在某一个焦距,用改变后固定组的结构使整个系统达到校正;最后,把整个变焦范围按等比级数取出7～11个不同的焦距位置进行整体优化,使系统的像质基本达到要求。

2.2.2　最速变焦路线凸轮曲线平滑性的优化

光学系统的像质达到基本要求后,还需要进行变倍组和补偿组位移量之间的数值关系优化,即凸轮曲线平滑性的优化,从而设计出合理的凸轮曲线轨道。凸轮曲线是否平滑取决于变倍组和补偿组位移量之间的数值变化是否是较匀速的增大或减小,若某段数值变化较快(如表2中位置3加黑处),则拟合的曲线就不平滑,中间有明显的起伏(如图2a),以此设计的凸轮曲线轨迹就会有明显的拐点(如图2b),在实际变焦运动中会出现变倍跳超差;另外,若补偿组短焦部分变化较快,曲线尾部的斜率变大,曲线变陡(如图3a中200°之后段),导致变焦运动过程中阻力加大,在温度变化时变焦动作卡死。因此,在保证像质满足设计要求的前提下,控制变倍组和补偿组位移量之间的数值变化关系,使变倍组和补偿组位移量之间的数值较匀速地增大或减小(见表1),才能拟合出平滑性较好的凸轮曲线(如图3a),从而设计出满足使用要求的凸轮曲线轨道(如图3b)。

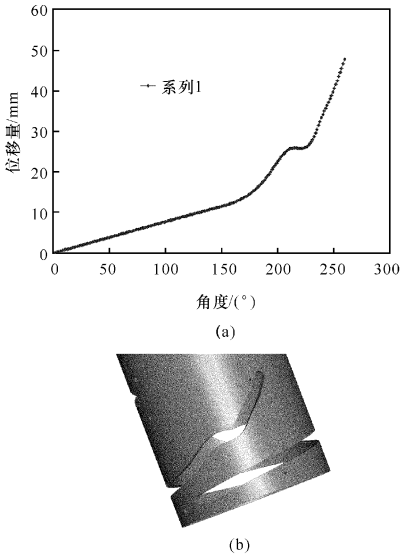

图2　变倍组和补偿组之间位移量的拟合曲线

Fig. 2　Fitting curve of displacement between zoom and compensation assemblies

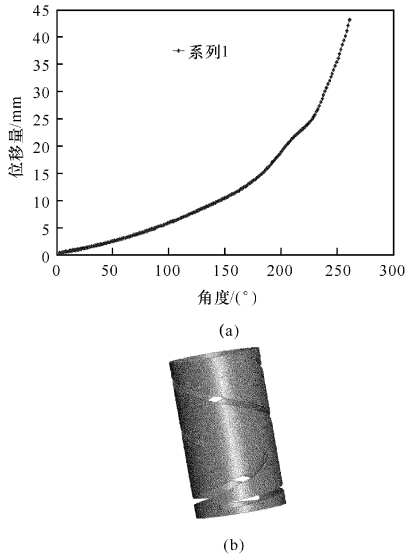

图3　变倍组和补偿组之间位移量的拟合曲线

Fig. 3　Fitting curve of displacement between zoom and compensation assemblies

表1　图3中变倍组和补偿组位移量之间的数值关系

Table 1　Numerical value relation between zoom and compensation assemblies in Fig. 3

点位	位置1	位置2	位置3	点位	位置1	位置2	位置3
1	17.58	113.03	3.04	184	78.53	21.76	33.35
173	74.87	31.55	27.23	185	78.87	20.79	33.99
174	75.20	30.87	27.58	186	79.20	19.82	34.63
175	75.54	30.14	27.97	187	79.53	18.85	35.26
176	75.87	29.37	28.41	188	79.87	17.87	35.91
177	76.20	28.54	28.91	189	80.20	16.87	36.58
178	76.54	27.65	29.47	190	80.53	15.85	37.27
179	76.87	26.71	30.07	191	80.87	14.79	37.99
180	77.20	25.74	30.70	192	81.19	13.70	38.75
181	77.53	24.75	31.36	193	81.53	12.59	39.53
182	77.87	23.757	32.037	194	81.86	11.46	40.33
183	78.20	22.75	32.70	200	83.86	4.00	45.79

表 2　图 2 中变倍组和补偿组位移量之间的数值关系

Table. 2　Numerical value relation between zoom and compensation assemblies in Fig. 2

点位	位置 1	位置 2	位置 3	点位	位置 1	位置 2	位置 3
1	3.00	122.39	3.50	167	62.99	36.67	**29.22**
157	58.38	43.08	27.43	168	63.35	36.29	**29.25**
158	58.73	42.32	27.83	169	63.70	35.87	**29.31**
159	59.09	41.60	28.20	170	64.06	35.39	**29.44**
160	59.44	40.92	28.52	171	64.41	34.84	**29.63**
161	59.80	40.30	28.79	172	64.77	34.21	**29.91**
162	60.15	39.73	**29.01**	173	65.12	33.48	30.29
163	60.51	39.30	**29.16**	174	65.48	32.63	30.78
164	60.86	38.77	**29.25**	175	65.83	31.66	31.39
165	61.22	38.38	**29.29**	176	66.19	30.56	32.14
166	61.57	38.02	**29.30**	177	66.54	29.36	32.99
167	61.93	37.68	**29.28**	178	66.90	28.08	33.91
165	62.28	37.35	**29.25**	179	67.25	26.76	34.87
166	62.64	37.02	**29.23**	200	73.64	4.00	51.25

2.3　设计结果与像质评价

2.3.1　设计结果

系统性能及结构参数设计结果如表 3 所示。

表 3　系统性能及结构参数设计结果

Table 3　Design results of system performances and structure parameters

EFL	20.061 2	100.565 1	200.362 1	299.178 4	399.535 9
FNO	3.500 0	3.700 0	3.900 0	4.200 0	4.500 0
IMG DIS	29.647 9	29.647 9	29.647 9	29.647 9	29.647 9
OAL	234.997 0	234.997 1	234.997 0	234.997 1	234.997 1

从表 3 可以看出,设计的系统在变焦过程中,焦距满足设计要求,像面距离和系统总长稳定不变,分别为 29.65 mm 和 23.5 mm,相对孔径在 1/3.5～1/4.5 的范围内。

2.3.2　像质评价

弥散斑直径计算结果(算术平均值)见表 4,对应的弥散斑形状如图 4 所示。

传递函数计算值见表 5,对应的传递函数曲线如图 5 所示。

表 4　弥散斑直径计算结果(算术平均值)

Table. 4　Calculation of dispersion circle (arithmetic mean value)

位置	焦距/mm	弥散斑直径/mm		
		0 视场	07 视场	1 视场
1	20	0.762 92E-02	0.828 40E-02	0.898 16E-02
2	100	0.519 07E-02	0.493 88E-02	0.622 26E-02
3	200	0.285 66E-02	0.413 36E-02	0.426 90E-02
4	300	0.385 18E-02	0.485 52E-02	0.621 39E-02
5	400	0.678 83E-02	0.654 01E-02	0.849 40E-02

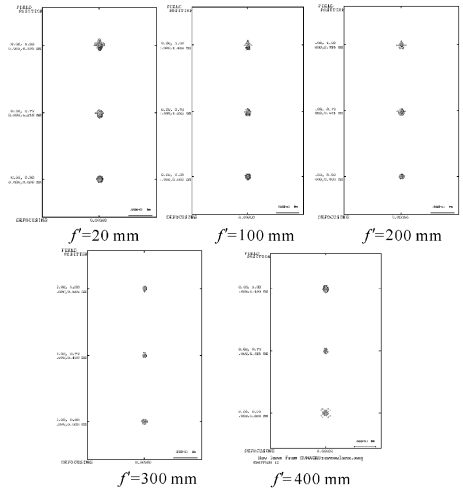

图 4　弥散斑

Fig. 4　Dispersed spots

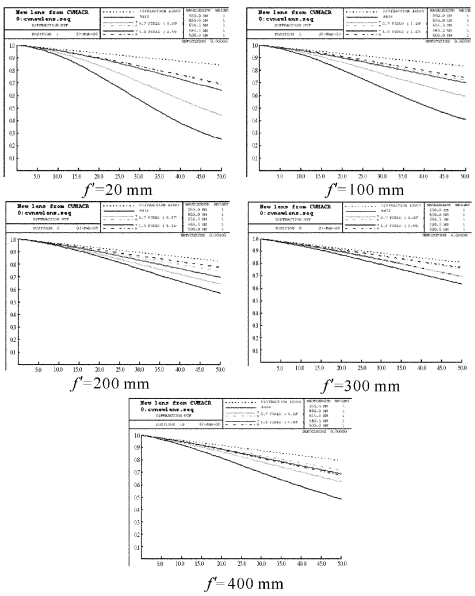

图 5　传递函数

Fig. 5　Transfer function

表 5　传递函数计算值

Table 5　Calculated value of transfer function

位置	焦距/mm	60 lp/mm 处的传递函数值(子午/弧矢方向)/%		
		0 视场	07 视场	1 视场
1	20	63.3/63.3	66.7/55.7	69.6/48.2
2	100	74.7/74.7	76.2/75.5	77.9/68.9
3	200	80.1/80.1	79.2/75.5	79.9/72.6
4	300	76.6/76.6	76.6/70	76.8/58.7
5	400	71.3/71.3	70.9/58	70.3/40.5

3　装调检测结果及外景观察

经检测,笔者设计的电视传感器各项技术指标达到了研制任务书的要求,主要技术指标对照情况如表6所示。

表6　主要技术指标对照表

Table 6　Major specifications

序号	项目	要求	达到的指标
1	焦距	20 mm～400 mm(±5%)	20.2 mm～390 mm
2	工作波段	0.5 μm～1 μm	0.5 μm～1 μm
3	透过率	≥40%	53.5%
4	弥散斑直径(轴上)	弥散斑直径:≤12 μm(轴上,设计值)	短焦:子午/弧矢 9.7/6.8 μm 长焦:子午/弧矢 11.8/12.4 μm
9	外形尺寸 总质量	≤280 mm(L)×(150 mm(W)×(140 mm(H) ≤4 kg	271 mm×146 mm×135.7 mm 3.6 kg
10	口径	88 mm(−1%)	88.1 mm
12	清晰成像范围	200 m～∞	200 m～∞
13	外景观察		与外购的同类日本镜头相比像质相当

4　结论

在实际使用过程中对一个光学系统的评价是非常广泛的,不但要求它有理想的成像质量,而且还对它的体积、质量、外形形式、适应性、牢固度、工艺性、材料、造价等等都有一定要求。如果系统有最好的成像质量,但在工艺性,材料的物理、化学性能上无法保证,也就没有实际应用价值。该系统所用的光学材料均是理化性能稳定的国产材料。加工装配及实验结果证明,该系统结构合理,工艺性好,检验及环境应力筛选、环境例行试验表明该系统像质好、透雾性好、体积小、质量轻、电气控制准确灵活、可靠性高,满足设计及使用要求。

参考文献:

[1] 陶纯堪.变焦距光学系统设计[M].北京:国防工业出版社,1988.
TAO Chun-kan. Optical design of zoom lens system [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1988. (in Chinese)

[2] 安连生.应用光学[M].北京:北京理工大学出版社,2002.
AN Lian-sheng. Applied optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002. (in Chinese)

[3] 翟学锋,董晓娜,王国富,等.水下变焦镜头的设计[J].应用光学,2007,28(4):416-420.
ZHAI Xue-feng, DONG Xiao-na, WANG Guo-fu, et al. Design of underwater zoom lens[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(4): 416-420. (in Chinese with an English abstract)

[4] 杨近松,胡君.光学镜头结构智能化设计系统[J].光学精密工程,2005,13(增刊):21-25.
YANG Jin-song, HU Jun. Development of intellectualized design system for structural design of optics lens[J]. Opt. Precision Eng., 2005, 13(sup): 21-25. (in Chinese with an English abstract)