

高温电视摄像镜头设计*

杨建峰¹ 阮萍¹ 常凌颖^{1,2} 陈立武^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学研究室, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 讨论了在高温环境下使用的电视摄像镜头的设计方法, 分析了在这种特殊使用条件下的材料选择、光学参数的确定和光轴的指向问题. 提出了一种采用三次成像的方法来实现设计要求, 在保持系统各单元孔径都很小的前提下, 拉长系统的结构长度, 并给出了具体设计结果的评价参数, 表明该系统可在较宽的温度范围内获得非常好的成像质量, 设计思想适合于高温环境下光学系统的设计实践.

关键词 光学系统; 光学设计; 温度影响

中图分类号 TB851; TB133 **文献标识码** A

0 引言

大型的冶炼炉、加热炉和玻璃熔炼等槽炉灶每天要消耗成百上千吨的工业燃料, 因此对炉内燃料的燃烧情况进行实时的监测, 并进行有效的控制, 以提高现有燃料的热转换效率, 提高能源有效利用率, 保护生态环境, 减少废气排放量都具有非常现实的意义.

高温电视摄像镜头就是一种用于监测高温加热炉内燃烧情况的光学设备, 其作用是实时监视炉体内燃料的燃烧情况, 根据监视的结果, 进行实时调整, 以提高燃烧效率. 本文结合实际需要, 针对我国某发电厂的长方体高温加热炉的具体尺寸和要求, 进行了该摄像镜头的光学系统研究^[1~4].

1 光学参数分析

1) 视场角

如图 1 长方体炉膛为 ABCD-EFGH, 摄像镜头

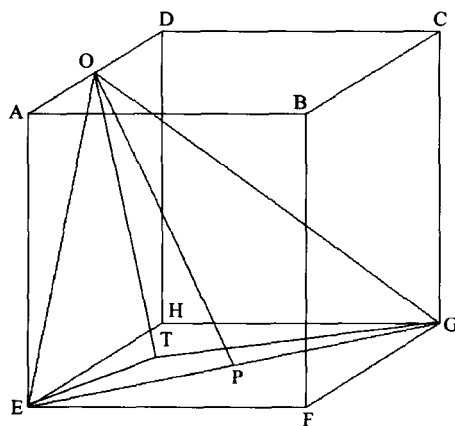


图 1 炉膛结构
Fig. 1 Inner layout of stove

位于长方体炉膛顶边 AD 的中心 O 点, 要求摄像镜头同时能对长方体炉膛内底面每个点燃料的燃烧情况进行观察.

炉膛的尺寸为已知条件, $AB=24\text{ m}$, $BC=24\text{ m}$, $CG=27\text{ m}$. 经计算, 确定光学系统的全视场角为 $2\omega=60^\circ$, 光轴指向为图 1 中 OT 方向, 光轴指向偏离地面中心 P 大约 3.2 m, 可以保证光学系统观测到底面 EFGH 上每一点.

2) 焦距

当系统的空间分辨率和所选用的探测器确定后, 可以定出系统的焦距. 项目使用 CCD 的像元大小为 $10\ \mu\text{m}$, 要求达到 40 mm 左右的像元分辨率. 给一定余量后, 取系统的焦距为 8 mm, 可以满足空间分辨率的要求. 此系统的焦距较短, 物距比焦距大很多, 在光学系统设计时, 可以按照无限远成像来处理.

3) 相对孔径

光学系统的观察目标是炉内燃料燃烧的火焰, 其亮度很大, 因此不需要太大的相对孔径. 为使光学系统对不同燃烧时期都有较好的观察效果, 系统设置可变光阑, 把相对孔径控制在 $1/20\sim 1/4$ 之间.

4) 光谱范围

用户要求光学系统的工作波长范围是 $0.5\ \mu\text{m}\sim 0.7\ \mu\text{m}$. 在光学系统校正像差时, 选定了三个波长, 分别是 D 光 ($0.5893\ \mu\text{m}$)、C 光 ($0.6563\ \mu\text{m}$) 和 e 光 ($0.5461\ \mu\text{m}$).

5) 探测器

使用 $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 的硅探测器作为成像接收器件. 由于目标的亮度较好, 虽然探测器在短波方向的响应稍低, 但对使用影响不大.

6) 高温环境

一般情况下, 高温炉内环境温度在 $1000^\circ\text{C}\sim 1600^\circ\text{C}$ 之间, 即需要使摄像探头在大于 1000°C 的环境下连续长期工作. 但一般光学玻璃的转变温度在

* * 863-708 资助项目
Tel: 029-88484260 Email: yangjf@opt. . ac. cn
收稿日期: 2004-07-02

400℃~690℃之间,镜头在1000℃高温环境中会变成液体,根本谈不上成像问题.目前采用的办法是加入冷却系统.冷却系统正常工作时,光学系统的工作温度可以保证在60℃以下.即要求光学系统在60℃的环境温度下,仍然有高的成像质量.

当此高温电视系统在高温环境下长时间工作后,冷却系统的效率会下降,因此,仪器的工作寿命主要由冷却系统决定.为了增加高温摄像系统的工作时间,也为了减少系统维修的次数,用户希望光学系统在更高环境温度下(比如200℃)仍然有好的成像质量,这些要求使得光学系统在玻璃选择上受到较大限制,给设计带来很大困难.

7) 结构长度

高温电视镜头对结构长度的要求比较特殊.为了降低CCD噪声,提高系统的信噪比,CCD应放在炉外室温区内,因此,要求光学长度大于600mm(本系统长度>700mm),增加了设计难度.

8) 镜头的径向尺寸

为了尽量减少热量通过开孔传递到炉外,保持燃烧炉内温度的稳定性,炉壁上开口尺寸应该尽量小,从而就要求光学系统的径向尺寸最小化.本系统要求光学镜片的孔径限制在35mm以内,在考虑结构和冷却系统后,可以确保炉壁开孔尺寸小于50mm.

根据以上分析,光学系统参数为:视场角 $2\omega=60^\circ$,焦距 $f'=8\text{mm}$,相对孔径 $D/f'=1:20\sim 1:4$,光谱范围 $0.5\mu\text{m}\sim 0.7\mu\text{m}$,结构长度大于700mm,光学系统要能够适应较高工作环境温度.

2 设计思想

在此场合下使用的摄像镜头,根据上面的计算要求,光学系统的焦距只有8mm.对一般光学系统,其总长度和光学系统的焦距相当,而总体要求系统的结构长度要达到700mm以上,在光学系统设计时,首先要解决的就是如何拉大轴向尺寸的问题.

要实现结构长度为光学焦距长度的100倍左右,采用普通的单次成像方法显然是无法满足要求的,必须采用二次或二次以上成像的方法.即该光学系统必须由前组和中继组组成,前组光学系统决定系统的视场角,中继组光学系统用以延长光路.

中继透镜组的放大倍率可以大于1,也可以小于1.对透射光学系统而言,每组透镜都不可能完善成像,必定有或大或小的残余像差^[1].系统组合后的综合像差各分系统的残余像差和中继组放大倍率M中有关^[5,6].垂轴像差是前组像差的M2中倍与后组像差之和;轴向像差是前组像差的M2中倍与后组像差之和.所以,应该选取中继组放大倍率的绝对值小于1的方案,这样对校正像差有利.

系统设计的另一个难点在于拉长结构的同时,还必须控制镜筒的口径不能太大.由于光学系统的视场角又非常大,所以采用一级中继是不能同时满足这两个要求的,必须采用二级或二级以上的中继.图2是光学系统的结构示意图.I是系统的孔径光阑,II是前组高温区镜头,III是第一中继组,IV是第二中继组,V是焦平面探测器.孔径光阑前置的主要目的是减小1000多度的高温对光学玻璃的影像,为尽可能降低光学玻璃所处部位的温度创造有利条件.

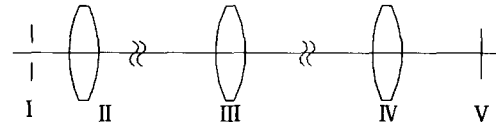


图2 光学系统结构

Fig. 2 Layout of optical system

具体设计时,II、III和IV各组首先要单独校正像差.由于II组镜头受玻璃材料选择的限制,单独校正像差时会很不容易.系统合成时首先要考虑光学系统光瞳的匹配,其次才是系统的整体像差匹配.只有靠各部分像差合理匹配,才能使整个光学系统有较好的成像质量.

3 设计结果

图3是设计结果的光学系统示意图,I是系统的孔径光阑,II是前组广角针孔镜头,III是第一中继组,IV是第二中继组,V是焦平面探测器.光学系统的设计结果为:焦距8mm,视场角 60° ,相对孔径1:4(改变光阑大小,可减小相对孔径),系统结构总长为800mm.

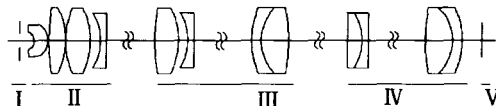


图3 设计结果的光学系统

Fig. 3 Layout of design result

为减小冷却系统的设计难度,也为了留一定的安全系数,摄像头前端伸进高温炉内部分所用的光学玻璃材料都有较高的转变温度.实际设计时4块光学玻璃都选用了ZK6材料,其转变温度为668℃,折射率温度系数和线膨胀系数都比较合适.镜头III前两块玻璃分别选用了ZK₆和ZbaF₃,ZbaF₃玻璃的转变温度为628℃.其余玻璃由于离开高温区较远,转变温度可以较低,玻璃的选择主要考虑像差的匹配.

在光学系统设计中注意了大视场光学系统的畸变校正,各色光的最大相对畸变均小于5%,光学玻璃的最大通光孔径为30mm,都满足使用需要.光学系统像差曲线如图4,光学系统各视场的弥散斑如图5,光学系统的MTF曲线如图6.

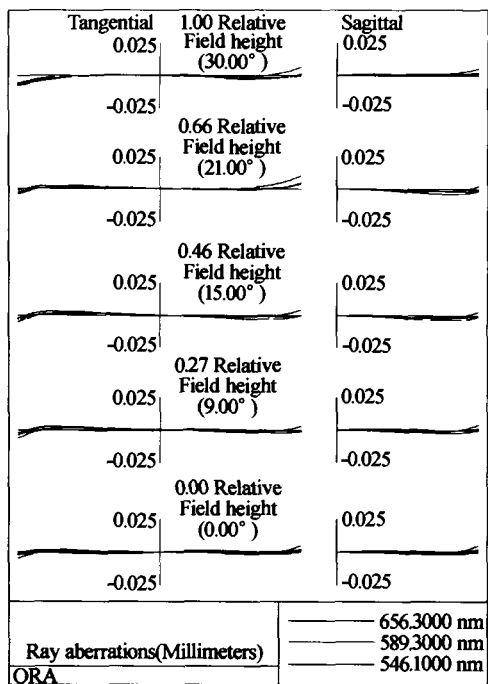


图 4 光学系统像差曲线
Fig. 4 The aberration curve

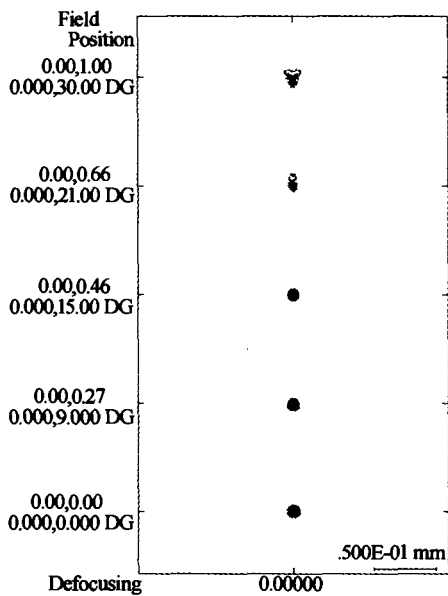


图 5 光学系统的弥散斑
Fig. 5 The spot diagram

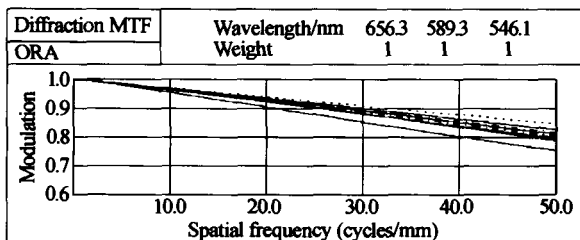


图 6 设计结果的 MTF 曲线
Fig. 6 The MTF curve of design result

从像差图 4 中看出,光学系统的残余像差非常

小. 各视场弥散斑直径分别是: 0 视场: $3.0 \mu\text{m}$; 0.3 视场: $3.5 \mu\text{m}$; 0.5 视场: $4.0 \mu\text{m}$; 0.7 视场: $4.2 \mu\text{m}$; 全视场: $4.4 \mu\text{m}$. 从图 6 中可以看到,在奈奎斯特空间频率 50 pl/mm 下,各视场 MTF 均大于 0.7,平均光学调制传递函数接近 0.8,各视场都有较好的成像质量.

虽然此光学系统比较复杂,会使设计 MTF 有所降低,但由于设计像质非常好,已经给加工装配预留了一定余量,所以仍然可以确保成品的光学成像质量.

4 设计结果的高温特性

对于光学系统而言,工作温度变化时,各光学面的半径、光学间隔、玻璃材料的折射率都将改变,这些都会引起光学系统像差的变化,进而影响光学系统的成像质量^[12],因此光学系统在玻璃选择时,要兼顾玻璃的折射率温度系数、转变温度、线膨胀系数等玻璃的热学性能. 对于任何一个光学系统,在不进行调焦的情况下,保证 200°C 温度范围内光学系统都有非常好的成像质量几乎是不可能的. 要使光学系统能够适应较宽的温度变化范围,需要光学和结构材料的匹配^[7~10].

我们仍然使用 MTF 和弥散斑直径来评价不同温度下光学系统的成像质量. 以下计算结果是在镜筒和隔圈均使用铝合金材料(线膨胀系数 α 为 $23.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)的前提下获得. 表 1 给出温度变化范围 $20^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ 下光学系统的 MTF 值,表 2 给出 $20^\circ\text{C} \sim$

表 1 不同温度下光学系统的 MTF 值

温度 / $^\circ\text{C}$	0 视场	0.7 视场		1.0 视场		MTF 平均值
		S	T	S	T	
20	0.828	0.793	0.797	0.807	0.754	0.8
25	0.794	0.724	0.767	0.821	0.747	0.759
40	0.634	0.529	0.631	0.749	0.683	0.605
60	0.328	0.232	0.359	0.513	0.521	0.325
80	0.061	0.016	0.100	0.234	0.325	0.09
100	0.071	0.067	0.103	0.023	0.161	0.088
200	0.034	0.022	0.073	0.051	0.050	0.039
300	0.010	0.015	0.036	0.022	0.038	0.018

表 2 不同温度下光学系统的弥散斑直径

温度 / $^\circ\text{C}$	0 视场	0.3 视	0.5 视	0.7 视	1.0 视	弥散斑直径平均值
	/ μm	场/ μm	场/ μm	场/ μm	场/ μm	
20	3.0	3.5	4.0	4.2	4.4	3.82
25	3.5	4.3	5.0	4.8	4.0	4.32
40	6.9	8.0	8.7	8.0	5.1	7.34
60	12.5	13.5	14.2	13.1	9.1	12.48
80	18.0	19.0	19.6	18.3	13.7	17.72
100	23.5	24.3	24.9	23.4	18.3	22.88
200	48.9	49.5	49.8	47.4	40.1	47.14
300	71.5	72.1	71.9	68.8	59.5	68.76

表3 焦面调整后不同温度下光学系统的 MTF 值

温度 / $^{\circ}\text{C}$	0	0.7 视场		1.0 视场		MTF 平均值
	视场	S	T	S	T	
20	0.828	0.793	0.797	0.807	0.754	0.8
25	0.828	0.793	0.797	0.807	0.754	0.8
40	0.828	0.793	0.795	0.808	0.754	0.8
60	0.829	0.793	0.793	0.809	0.754	0.8
80	0.829	0.793	0.791	0.808	0.753	0.8
100	0.829	0.793	0.789	0.808	0.752	0.799
200	0.827	0.792	0.777	0.805	0.743	0.795
300	0.823	0.786	0.761	0.798	0.731	0.788
400	0.816	0.779	0.747	0.789	0.715	0.779
500	0.806	0.768	0.727	0.778	0.699	0.766

表4 焦面调整后不同温度下光学系统的弥散斑直径

温度 / $^{\circ}\text{C}$	0 视场	0.7 视场	1.0 视场	弥散斑直径平均值
	/ μm	/ μm	/ μm	
20	3.1	4.1	4.8	3.78
25	3.1	4.1	4.8	3.78
40	3.2	4.1	4.8	3.8
60	3.2	4.2	4.8	3.86
80	3.3	4.2	4.9	3.9
100	3.4	4.3	4.9	3.94
200	3.8	4.6	5.1	4.26
300	4.2	5.1	5.5	4.68
400	4.7	5.6	6.0	5.14
500	5.3	5.7	6.5	5.58

300 $^{\circ}\text{C}$ 下光学系统对应的弥散斑直径。表3为调整焦面位置后光学系统的MTF值,表4为调整焦面后的弥散斑直径。

光学系统的最佳设计工作温度是20 $^{\circ}\text{C}$,从表1和表2可知,在不调整焦面时,随着环境温度偏离最佳设计温度,光学系统的成像质量将会下降。在环境温度变化20 $^{\circ}\text{C}$ (20 $^{\circ}\text{C}$ ~40 $^{\circ}\text{C}$)时,光学系统都可以保持较好的成像质量,当环境温度升高到60 $^{\circ}\text{C}$ 时,光学系统仍然有基本可用的成像质量,说明光学系统本身对温度变化有比较强的适应性。

由表3和表4可知,当仪器温度非常高(例如500 $^{\circ}\text{C}$),通过调整焦面位置,MTF的下降量和弥散斑直径的增加量都非常有限,系统仍然可获得非常好的成像质量。

5 结论

本文提出了一种采用三次成像的方法来达到设计目标,在保持系统各单元孔径都很小的前提下,拉长了系统的结构长度;前组高温区镜头所有镜片都采用转变温度很高的同一种材料,保证了光学玻璃

在高温下使用时能有较高的温度承受能力。设计结果本身在较宽温度变化范围内都有较好的成像质量,经过焦面位置调整,光学系统在更宽的环境温度下,成像质量基本保持不变。

参考文献

- 1 杨建峰. 高温摄像镜头的光学系统. 中国专利, ZL 98 1 13037. 2
Yang J F. *Chinese Patent*, ZL 98 1 13037. 2
- 2 赵立新. 空间望远镜的热设计和热光学分析综述. 航天返回与遥感, 2001, 22(2): 13~19
Zhao L X. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2001, 22(2): 13~19
- 3 卢锴, 牛晓明, 孙丽同, 等. 基于CAD/CAE/CAT技术的空间遥感相机热设计研究. 光学精密工程, 1998, 6(6): 21~32
Lu E, Niu X L, Sun L T, et al. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(6): 21~32
- 4 李永强, 刘明磊. 浅谈纯风冷型高温工业电视. 水泥技术, 2003, (2): 50~51
Li Y Q, Liu M L. *Cement Technology*, 2003, (2): 50~51
- 5 王之江. 光学设计理论基础. 北京: 科学出版社, 1965. 107~115
Wang Z J. *Fundamental of Optical Design Theory*. Beijing: Science Publishing Company, 1965. 107~115
- 6 Yang Jianfeng. Optical design of space solar telescope. *SPIE*, 1998, 3482: 703~710
- 7 史光辉, 姜会林. 环境温度和气压变化对象面位移的影响与二级光谱校正. 光学学报, 1983, 3(7): 598~601
Shi G H, Jiang H L. *Acta Optica Sinica*, 1983, 3(7): 598~601
- 8 李士贤, 李林. 光学设计手册. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. 26~31
Li S X, Li L. *Handbook of optic design*. Beijing: Beijing institute of technology publishing company, 1996. 26~31
- 9 金乐天, 胡玉禧, 杨建峰, 等. 共轴球面光学系统的热象差分析. 光子学报, 1999, 28(7): 647~650
Jin L T, Hu Y X, Yang J F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(7): 647~650
- 10 杨建峰. 温度自补偿光学系统研究. 中国科学院应用研究与发展重点项目结题报告. 2000, 中科院西安光机所
Yang J F. *Research of the thermal Auto-compensate optic system*. The terminal report of the Academia sinca's emphases item in applying and development, 2000, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics

Design of High-temperature Tv Camera

Yang Jianfeng¹, Ruan Ping¹, Chang Lingying^{1,2}, Chen Liwu^{1,2}

1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710068*

2 *The Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039*

Received date: 2004-07-02

Abstract The designing method of high-temperature TV optical camera was discussed; the problem of the material which used in this case, the parameters and the direction pointing of the optical axis were analyzed. Three times imaging system has been used to realize the objective. By maintaining the little diameter of all lens in the system the whole system has been elongated. And the evaluation result of the designed system were showed, the outcome identified that the system can work well under large variety range of temperature, the idea which design this optical system could be adopted by other high temperature optical system.

Keywords Optical system; Optical design; Effect of temperature



Yang Jianfeng was born in Sep. 1969, received his B. S. Degree from Physics Department of University of Science and Technology of China (USTC) in 1990. Upon graduation from the USTC, he entered the Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics (XIOPM), Chinese Academy of Science. Three years later, he passed a competitive examination and continued his education towards Master Degree also in the XIOPM. Because of his excellent grade during the basic course study in the first years, he have the chance to study for Ph. D. Degree directly in 1994, and received the PH. D. in 1997.