

文章编号 1004-924X(2009)01-0104-05

# 大口径望远镜光学系统的误差分配与分析

明 名,王建立,张景旭,杨 飞

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

**摘要:**通过对比国内外大口径望远镜光学系统的发展和研究现状,提出针对大口径望远镜系统的加工、装调和使用建立误差分配体系的方案。介绍了误差分配体系包含的内容,并对其进行归类。以1.2 m望远镜光学系统为例,阐述了误差分配原则。首先,根据设计确定总体误差标准,然后,计算误差分配的项数,最后,依据分配原则,结合实际加工和装调水平,给出了合理的误差分配结果。结果表明,在满足目前国内加工要求和装配的条件下,该方案使分配后该望远镜光学系统误差(RMS波像差) $< \lambda/8.5$ ,为大口径望远镜光学系统的误差分配提供了有力的依据。

**关键词:**望远镜;误差分配;光学设计;ZEMAX

中图分类号:TH75 文献标识码:A

## Error budget and analysis for optical system in large telescope

MING Ming, WANG Jian-li, ZHANG Jing-xu, YANG Fei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** By comparing of the research and development of optical system in a large telescope at home and abroad, a scheme for establishing error budge system was presented to determine the influential factors on optical system to ensure the expected precision in design, manufacturing and assembling of large aperture optical system. By taking a 1.2 m telescope optical system as an example, the conformation of error budget was introduced and a reasonable static error allocation was worked out. Firstly, a total error standard was determined, then, the number of error budgets was counted, finally, error budge result was given based practical ability of manufacture and assemblage. Experimental results show that the RMS wavefront error of this telescope optical system is less than  $\lambda/8.5$ , which matches the machining and assembling capacity.

**Key words:** telescope; error budget; optic design; ZEMAX

## 1 引言

目前,随着对望远镜分辨率和能量的要求越

来越高,望远镜光学系统的口径也越来越大。口径增大的同时,光学系统的加工、装调难度也随之增加。很多大口径光学系统在经过加工和装调后<sup>[1]</sup>,得到的成像质量与初始光学设计时的成像

质量相差很大,甚至无法达到预定的使用要求。如果没有各项误差对像质的影响数据,就不能在加工、装调和使用时进行有针对性地修正,从而影响整个系统最终运行时的性能。因此,从大口径光学系统的发展前景来看,在光学系统的各个部件投入加工之前,为该系统建立一套完备的误差分配体系是极为必要的。

国外由于大口径光学系统出现很早,因此在这方面的研究比较深入,很多大口径望远镜在加工之前都建立了完备的误差分配体系。例如美国的 4 m 先进技术太阳望远镜(ATST),对望远镜系统的各方面误差进行了多种方案的分配<sup>[2]</sup>,并将它们进行了比较分析,为整个系统的加工、装调和使用时提供了完备的依据。国内由于较大口径光学系统研究的起步较晚,处于正在发展阶段,尚未有关于光学系统的完整误差分配体系的文献。

本文首先介绍了误差分配体系包含的内容,并将其进行了归类,然后以 1.2 m 望远镜系统为实例,对误差分配进行了详细阐述,并分析了各个误差对系统成像质量的影响,指出了关键误差,以及它们在加工装调中应注意的事项。

## 2 误差分配的组成

望远镜光学系统的误差可以分为静态误差和动态误差。静态误差包括加工、装调误差;其中加工误差又包括各个元件的面形、曲率半径、厚度误差,装调误差包括各元件相对之间的偏心、倾斜、间距误差,动态误差包括运动中个元件偏差、图像抖动误差和圆顶以及视宁度误差。

如图 1,根据建立的误差分配树,各级误差的平方等于下级所有子误差的平方和。

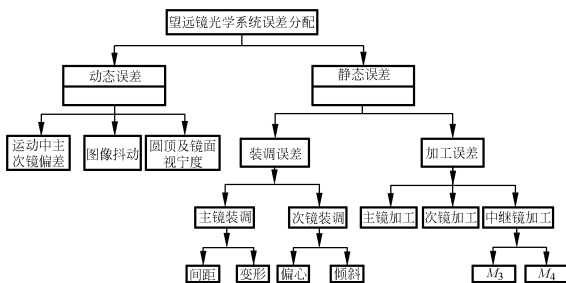


图 1 望远镜光学系统误差分配树

Fig. 1 Error budget tree of telescope optical system

误差对光学系统像质的影响,可以采用调制传递函数(MTF)、能量集中度(Encircled Energy)、RMS 波像差(Wavefront Error)和 RMS 弥散斑(Spot Radius)半径作为评价标准。

本文以 1.2 m 望远镜光学系统为实例,在其光学设计基础上主要对静态误差进行了讨论、分配和分析。对望远镜光学系统像质评价采用 RMS 波像差作为评价标准。

## 3 误差分配与分析

### 3.1 1.2 m 望远镜光学系统

1.2 m 望远镜光学系统是可用于可见光、红外探测的地基望远镜光学系统,也可用于自适应光学校正下的高分辨率成像探测,其误差分配直接影响到系统最终的探测质量。

本文中分析的是其直接用于可见光探测的光学系统,它是由非球面主、次镜和平面反射镜组成的 RC 反射式系统,如图 2 所示。

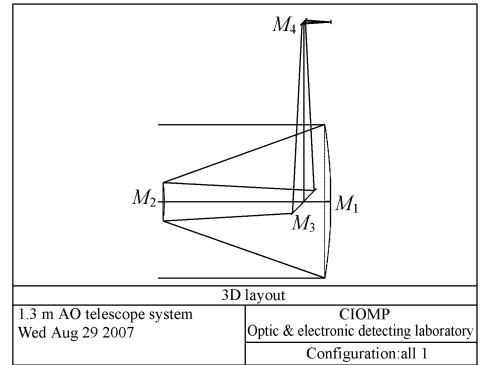


图 2 1.2 m 望远镜光学系统图

Fig. 2 Optical system diagram of 1.2 m telescope

其初始结构尺寸如表 1 所示。

表 1 1.2 m 望远镜光学系统结构参数

Tab. 1 Parameters of 1.2 m optical system

	主镜	次镜
元件编号	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>
类型	双曲面	双曲面
材料	微晶	微晶
曲率半径(mm)	3 600	1 076.087
主、次镜间距(mm)		1 350

### 3.2 误差分配

1.2 m 望远镜系统误差分配采用 Bottom-Up 方式<sup>[2]</sup>,由下向上分配,以光学系统轴上点 RMS 波像差为标准,分配完成后保证系统波像差 $<2$ 倍衍射极限。其误差分配主要分为元件加工误差分配和装调误差分配,本文的误差分配是借助 ZEMAX 软件工具来完成的<sup>[3]</sup>。

加工误差包括顶点曲率半径误差、非球面系数误差(非球面)和面形误差<sup>[4]</sup>,本文中分别对主、次、三、四镜的加工误差进行了分配。

#### 3.2.1 主镜加工误差

根据目前国内的加工能力和系统的技术要求,主镜加工的顶点曲率半径误差为 $\pm 1$  mm,对系统产生的波像差为 $\lambda/50$ (RMS);二次曲面系数误差为 $\pm 0.0001$ ,对系统产生的波像差为 $\lambda/1000$ (RMS);面形误差为 $\lambda/40$ (RMS),对系统产生的波像差为 $\lambda/20$ (RMS)。

#### 3.2.2 次镜加工误差

根据目前国内的加工能力和系统的技术要求,次镜加工的顶点曲率半径误差为 $\pm 1$  mm,对系统产生的波像差为 $\lambda/70$ (RMS);二次曲面系数误差为 $\pm 0.001$ ,对系统产生的波像差为 $\lambda/80$ (RMS);面形误差为 $\lambda/40$ (RMS),对系统产生的波像差为 $\lambda/20$ (RMS)。

#### 3.2.3 平面反射镜 $M_3$ 加工误差

平面反射镜  $M_3$  加工的面形误差为 $\lambda/80$ (RMS),对系统产生的波像差为 $\lambda/40$ (RMS)。

#### 3.2.4 平面反射镜 $M_4$ 加工误差

平面反射镜  $M_4$  加工的面形误差为 $\lambda/80$ (RMS),对系统产生的波像差为 $\lambda/40$ (RMS)。

#### 3.2.5 装调误差

装调误差包括装调中主、次镜的镜面变形、主、次镜之间的间距变化、主、次镜的相对偏心和倾斜。

##### 3.2.5.1 装调镜面变形误差

主镜由于支撑引起的镜面变形误差为 $\lambda/46$ ,对系统产生的轴上 RMS 波像差为 $\lambda/23$ 。

##### 3.2.5.2 装调镜面间距误差

主、次镜间距误差为 $\pm 0.05$  mm,对系统产生的轴上 RMS 波像差为 $\lambda/93$ 。

##### 3.2.5.3 装调相对偏心误差

次镜相对于主镜光轴在 X 轴方向的偏心误差为 $\pm 0.05$  mm,对系统产生的轴上 RMS 波像差为 $\lambda/20$ ;

次镜相对于主镜光轴在 Y 轴方向的偏心误差为 $\pm 0.05$  mm,对系统产生的轴上 RMS 波像差为 $\lambda/20$ 。

##### 3.2.5.4 装调相对倾斜误差

次镜相对于主镜光轴在 X 轴方向的倾斜误差为 $\pm 20''$ ,对系统产生的轴上 RMS 波像差为 $\lambda/24$ ;

次镜相对于主镜光轴在 Y 轴方向的倾斜误差为 $\pm 20''$ ,对系统产生的轴上 RMS 波像差为 $\lambda/24$ 。

### 3.3 误差分析

按照上面的误差分配,其误差分析主要围绕元件加工误差对系统的波像差贡献和装调误差对系统的波像差贡献来进行。其误差分配树如图 3 所示。

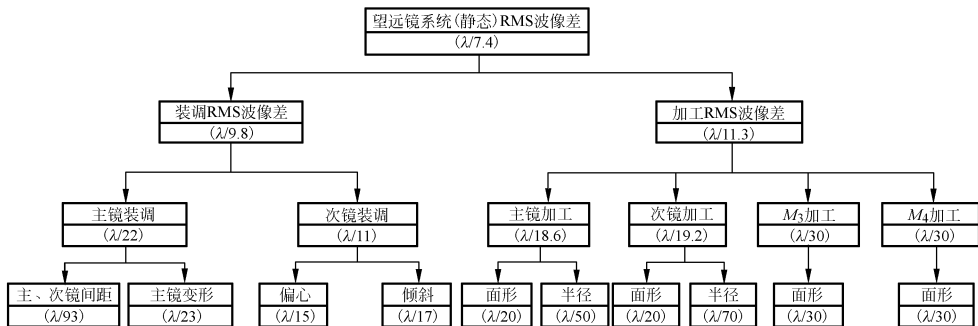


图 3 1.2 m 望远镜光学系统静态误差分配树

Fig. 3 Error budget tree of optical system in 1.2 m telescope

由上图可知,加工误差中的主、次镜面误差和装调误差中的偏心和倾斜误差对系统最终波像差影响较大。而本文进行误差分配的目标是使系统最终的 RMS 波像差 $<2$  倍的衍射极限,即 $\lambda/7$ ,包括动态误差和静态误差。经过分析,为了达到预定的要求,系统静态误差至少应该 $<\lambda/8.5$ 。

由于主、次镜为二次圆锥曲面,上节分配的加工面形误差已是国内最先进水平,无法进行紧缩。而在目前国内水平下,装调误差和平面反射镜加工误差是可以进一步压缩的,因此本文对装调中的偏心和倾斜误差、加工中平面反射镜面形误差进行了压缩<sup>[5]</sup>。压缩后装调中的偏心和倾斜误差分别为 $\pm 0.025$  mm、 $\pm 10''$ ,产生的 RMS 波像差分别为 $\lambda/25$ 和 $\lambda/20$ ,平面反射镜的加工面形误差均为 $\lambda/70$ ,产生的 RMS 波像差均为 $\lambda/35$ 。通过最后的计算,得到整个系统静态误差产生的 RMS 波像差为 $\lambda/8.8$ 。

## 4 比较与讨论

将美国的 4 m ATST 先进技术太阳望远镜的误差分配结果与本文中 1.2 m 望远镜误差分配结果进行了比较<sup>[6]</sup>,如表 2 所示。

表 2 1.2 m 望远镜与 ATST 望远镜的静态误差分配结果比较

Tab.2 Error budget comparison of 1.2 m telescope and ATST telescope

	ATST 望远镜光学系统	1.2 m 望远镜光学系统
光学设计	9 nm	0
$M_1$	10 nm	30 nm
$M_2$	10 nm	30 nm
传递光学元件	8 nm	20 nm
主动光学系统	0	0
光学对准	2 nm	70 nm

## 参考文献:

- [1] 刘磊,李景林,吕清涛,等.大口径反射光学系统装调装置设计研究[J].光学精密工程,2005,13(增):134-137.  
LIU L,LI J L,LV Q T,*et al.*. Research on adjusting device of large aperture reflective optics system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13 (supp.): 134-

由上面的比较可以看出,本文的 1.2 m 望远镜光学系统由主、次、三、四镜组成,其静态误差分配在考虑加工、装调和主、次镜镜面支撑变形等方面的分配下,其光学系统的静态 RMS 波像差为 85 nm,其中检测波长为 633 nm。而 4 m ATST 望远镜的静态误差仅为 20 nm( $\lambda=500$  nm),能够达到衍射极限成像。1.2 m 望远镜光学系统与 ATST 望远镜光学系统的主要区别如下:

### 4.1 主、次镜的静态误差

这主要是两个方面引起的:一是国内外的加工水平差异,一是 ATST 望远镜的主动光学系统能消除主、次镜的面形误差,而 1.2 m 望远镜没有主动光学系统来进行低频校正;

### 4.2 光学对准的静态误差

这是因为 ATST 的自适应光学系统闭环校正时能很好地消除由于元件不对准引起的各种像差,而 1.2 m 望远镜没有自适应光学系统。

## 5 结 论

本文通过对比国内外大口径望远镜光学系统的发展和研究现状,提出建立完备的误差分配体系应用于大口径光学系统的加工、装调和使用过程。然后以 1.2 m 望远镜为例,为其光学系统建立了一种误差分配模式,使其经过误差分配后的 RMS 波像差小于 $\lambda/8.5$ 。其中的关键点在于找出所有的误差源,取重去轻,然后选择合理的分配方式,如 Top-down、Down-top 等等,并与 4 m ATST 望远镜的静态误差分配进行了比较和讨论。通过该模式可以对 1.2 m 望远镜光学系统的加工和装调进行有根据的指导,其误差分配均符合国内加工、装调水平。本文的误差分配内容和分配方法均适用于 1 m 级以上的成像要求级别望远镜光学系统。

137. (in Chinese)

- [2] ROBERT H. ATST system error budget [R]. SPEC-0009,2006.  
[3] ZEMAX development corporation. *ZEMAX Optical Design Program User's Guide* [M]. San Diego:2003.  
[4] 钟兴,金光,王栋,等.共轴 TMA 反射镜面形不规则对波前误差的影响[J].光学精密工程,2008,16

(8):1516-1521.

ZHONG X, JIN G, WANG D, *et al.*. Influence of surface irregularity of on-axis TMA mirror on wave-front error[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8): 1516-1521. (in Chinese)

- [5] 李士贤, 李林. 光学设计手册[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.

LI SH X, LI L. *Optical design manual*[M]. Beijing: Publishing Company of Beijing University of Technology, 1996. (in Chinese)

- [6] STEPHEN L K, THOMAS R. Design and development of advanced technology solar telescope[J]. *SPIE*, 2003, 4853: 240-251.

#### 作者简介:



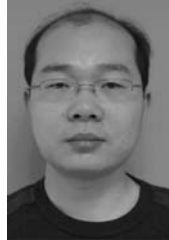
**明 名**(1983—), 男, 湖南临澧人, 研究实习员, 主要从事光学设计、光学检测、大口径光学系统等方面的研究。E-mail: mingm1118@yahoo.com.cn



**张景旭**(1964—), 男, 吉林松原人, 博士研究生, 研究员, 主要从事地基大口径光电望远镜光机结构技术的研究。E-mail: zhangjx@ciomp.ac.cn



**王建立**(1971—), 男, 山东曲阜人, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像光电望远镜总体技术的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn



**杨 飞**(1982—), 男, 湖北天门人, 助理研究员, 主要从事地基大口径光电望远镜镜面支撑和光机结构技术的研究。E-mail: yangflying@hotmail.com

(本栏目编辑 严 寒)

#### ● 下期预告

## 精密、超精密圆柱渐开线齿轮的加工方法

王立鼎<sup>1,2</sup>, 凌四营<sup>1</sup>, 马 勇<sup>1</sup>, 王晓东<sup>1,2</sup>

- (1. 大连理工大学 精密特种加工及微系统教育部重点实验室 高精度齿轮研究组, 辽宁 大连 116023;  
2. 大连理工大学 微纳米技术及系统辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116023)

研究了精密、超精密圆柱渐开线齿轮的加工方法。分析比较了锥形砂轮磨齿、蝶形砂轮磨齿、大平面砂轮磨齿、蜗杆砂轮磨齿和成形砂轮磨齿的工作原理及当前国内外精密、超精密圆柱渐开线齿轮的加工现状。接着, 探讨了 ISO1328-1997 标准中 2 级以上精度超精密齿轮的加工。最后, 指出大平面砂轮磨齿机 Y7125 有着结构简单、传动链刚度高、磨齿精度高等优点, 具有较大的改装空间。通过一系列的研究工作, 有可能把它改装精化成磨削超精密圆柱渐开线齿轮的加工母机, 实现 2 到 1 级精度超精密齿轮的加工。1 级精度超精密齿轮的研制成功, 可提高齿轮的传递基准, 从而可提高齿轮制造的技术水平。