

密级: ()



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

天文光学望远镜视场旋转及 K 镜消旋技术研究

作者姓名: 魏 焯 艳

指导教师: 王东光 研究员

中国科学院国家天文台

学位类别: 工程硕士

学科专业: 光学工程

研究所: 中国科学院国家天文台

2016 年 5 月

Study of Field Rotation and K Mirror Derotation Technology
in Astronomical Optical Telescopes

By

Wei Yeyan

A Thesis Submitted to

The University of Chinese Academy of Sciences

In partial fulfillment of the requirement

For the degree of

Master of Optical Engineering

National Astronomical Observatories

Chinese Academy of Sciences

May, 2016

光学天文望远镜视场旋转及 K 镜消旋技术研究

魏烨艳（光学工程）

指导教师：王东光 研究员

摘要

为了提高天文望远镜的分辨率，如今的光学天文望远镜朝着越来越大的口径发展，例如 TMT、E-ELT 和 GMT。这些大型光学天文望远镜要求有更好的图像处理技术和设备，其中图像消旋则是在光进入自适应设备之前所必不可少的一项工作。光学望远镜在跟踪过程中存在两种视场旋转，一是由于不同坐标系转换造成的物方视场旋转，二是由于望远镜内部光路中折轴平面反射镜之间的相对转动造成的像方视场旋转。为了提高空间分辨率和获得稳定的图像，需要对以上两种视场旋转进行补偿。通常的消旋方法有，电子消旋、物理消旋和光学消旋。电子消旋因为存在延时，无法长时间积分；而物理消旋不适合配备了各种结构复杂、质量和尺寸较大的光学电子设备的大型望远镜。相比较而言，光学消旋是较优的一种方案，这也是本论文选用的消旋方法。然而光学消旋器件的光学结构、机械结构的设计，以及它的装调都是需要研究的问题。

本论文的主要目的是为国家自然科学基金重大项目——AIMS 项目（用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统）提供可靠的消旋方案，AIMS 采用的是赤道式望远镜结构，入射光需要通过一系列折轴平面反射镜进入到库德房中，所以存在像方视场旋转。针对上述问题，本论文开展了光学消旋方案的研究及应用。这个方案也同样适用各种结构的光学望远镜。本论文的主要内容包括以下几个方面：

（1）比较两种不同机架结构的望远镜：地平式望远镜和赤道式望远镜。并通过这两个望远镜分析视场旋转的原因，计算视场旋转的规律。

（2）分析和探讨早期光学消旋器件，并提出了以 K 镜作为本论文采用的消旋器件。通过矢量矩阵方法分析了 K 镜的消旋原理、光学特点及消旋条件。分析结果证明在满足一定的条件下 K 镜确实具有消旋作用，消旋条件也用于之后的光学设计中。

（3）利用光学设计软件和机械设计软件对 K 镜进行分析和设计。其中，采用 Zemax

光学设计软件完成对 K 镜的光学设计。设计时结合 K 镜的口径、体积和角度需要考虑加工装调和望远镜整体光路的要求，并在满足要求后，进行一定的优化。而机械设计部分则用 Solidworks 进行设计和三维建模，使其满足设计要求。利用 Zemax 自带和误差分析功能和 Matlab 软件进行误差分析，并得到满足消旋精度要求的误差范围以指导装调工作。

(4) 对 K 镜光学结构和机械结构进行组装和装调。提出和实现 K 镜装调方案和检测光路。通过实验得到 K 镜装调的结果和规律。实验结果说明装调方案可行，在误差允许的范围内实现了 K 镜的消旋功能，满足设计要求。

以上的研究作为光学天文望远镜提供了一套完整的消旋方案。通过实验结果验证了本论文提出的消旋方案的可行性和有效性。

关键词：望远镜消旋，K 镜，光学结构，误差分析，装调

Study of Field Rotation and K Mirror Derotation Technology in Astronomical Optical Telescopes

Yeyan Wei (Optical Engineering)

Directed by Prof. Dongguang Wang

ABSTRACT

Nowadays, the aperture of the astronomical telescopes becomes larger in order to improve the resolution of the astronomical telescopes, such as TMT, E-ELT and GMT. These large optical telescopes also need better image processing technology and equipment. And the image derotation is a necessary job before entering the adaptive instrument. Two kinds of field rotation occur in optical telescopes, one is caused by the coordinate transformation between horizontal coordinate system and equatorial coordinate system, the other is caused by the mutual rotation among fold mirrors in telescopes. In order to get high spatial and stationary image, field rotation compensation is required. Three usual methods of derotation are electrical derotation, physical derotation and optical derotation. However, the electrical derotation has time delay and cannot do integral in a long time. Similarly, because some large optical telescopes are equipped with many optical and electrical instruments, which are structure complicated, large in mass and size, thus, the physical method don't suit these telescopes. By way of comparison, optical derotation is a better plan. So it is necessary to study of the optical derotator's optical and mechanical structure, also the assembly and alignment.

The thesis aims to offer a reliable derotation plan for the project of NSFC—AIMS project (An Infrared System for the Accurate Measurement of Solar Magnetic Field). AIMS uses equatorial telescope's structure. And the incident ray would enter the coude room through some folder mirrors, which could lead to pupil rotation. Thus, the thesis develops the study and application of optical derotator according to the questions above. Meanwhile, the plan could be used in any telescopes, regardless the structure and geographical position. The main content in the thesis contains the following aspects:

(1) This thesis compares two kinds of optical telescopes: alt-az telescope and equatorial

telescope, analyzes and calculates the field derotation's rules through the two telescopes.

(2) By discussing and analyzing the former optical derotators, the thesis employs K mirror as the derotator of AIMS. The derotation principle, optical properties and derotation conditions are analyzed here by using vector matrix. The results prove that K mirror indeed could be used as derotator under certain situations. Besides, the derotation conditions could be applied in the optical designing part.

(3) By employing optical and mechanical design software, K mirror could be analyzed and designed very well. Zemax could accomplish the optical part. When designing, the aperture, volume and base angle of K mirror should be considered, as well as the mechanical processing, alignment and overall optical system in telescope. Besides, the mechanical part uses Solidworks to design. Zemax have its own tolerancing tools, which could be used in the later tolerancing. Thus, the allowance and accuracy could be get and guide the alignment work.

(4) The thesis puts forward a reliable alignment and adjustment plan. And the light path is designed and finished in order to do the experiment. The experimental results testifies the practical of the plan and realize the K mirror's derotation function.

All the study above offers an integrated derotation project for optical telescopes. The final experimental results prove the feasibility and reliability of the derotation project.

Key words: telescope derotation, K mirror, optical structure, tolerancing, assembly and alignment

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
第一章 绪论	1
1.1 引言.....	1
1.2 视场旋转现象及其原因.....	1
1.2.1 物方视场旋转原因分析.....	1
1.2.2 像方视场旋转原因分析.....	3
1.3 三种常见消旋方法.....	4
1.4 国内外研究现状.....	5
1.5 本论文的研究内容与论文结构.....	6
第二章 视场旋转规律计算和分析	8
2.1 物方视场旋转规律.....	8
2.2 像方视场旋转规律.....	9
2.2.1 AIMS 望远镜光路简介	10
2.2.2 Coude 焦点处像旋分析	10
2.3 本章小结.....	12
第三章 光学消旋器件发展及消旋原理研究.....	13
3.1 光学消旋器件介绍和发展.....	13
3.2 K 镜消旋原理和光学性质	14
3.2.1 平面反射镜变换矩阵和旋转变换矩阵.....	14
3.2.2 K 镜消旋原理.....	15
3.2.3 K 镜成像性质分析.....	18
3.3 本章小结.....	19
第四章 K 镜结构设计及分析	20
4.1 K 镜光学结构设计.....	20
4.1.1 三面镜子的倾角设计.....	20
4.1.2 K 镜口径和体积设计.....	22
4.1.3 Zemax 对 K 镜的设计.....	24
4.2 K 镜机械结构设计.....	27
4.2.1 设计目标.....	27

4.2.2 需求分析.....	28
4.2.3 设计方案研究.....	29
4.3 控制系统.....	32
4.4 本章小结.....	32
第五章 消旋 K 镜误差分析.....	34
5.1 K 镜误差来源及分析方法.....	34
5.1.1 K 镜误差来源.....	34
5.1.2 K 镜的平移及偏转误差分析.....	35
5.1.3 K 镜三轴间误差分析.....	36
5.2 实例分析.....	38
5.3 本章小结.....	42
第六章 K 镜装调与检测.....	43
6.1 装调方案.....	43
6.2 装调结果及其分析.....	45
6.3 本章小结.....	47
第七章 总结与展望.....	48
7.1 论文的研究成果及结论.....	48
7.2 论文创新点.....	49
7.3 展望.....	50
参考文献.....	51
附录 1 K 镜误差分析（解析法）.....	53
读学位期间发表论文.....	61
致 谢.....	62

第一章 绪论

1.1 引言

目前，大口径望远镜已经成为很多国家建设望远镜的目标，它是对空间目标探测和跟踪的重要光学设备。单纯地增大望远镜的口径可以提高望远镜的分辨率，但在一定口径下，要接近该望远镜所能达到的最大分辨率，工程师需要在其他技术方面提高望远镜的分辨率，比如为了减小大气扰动产生的影响而在望远镜的主镜上安装触动物，或者在望远镜后端添加一系列处理成像的光学或者电子设备。而其中就包括了消旋设备。

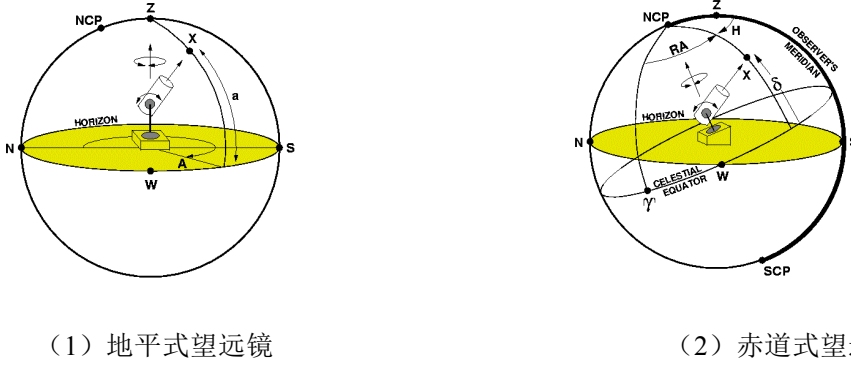
本论文的研究是基于国家自然科学基金重大项目“用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统”（AIMS）的光学设计方案而设计的消旋方案。AIMS 总体构架为赤道式望远镜，入射光需要通过一系列折轴平面反射镜，从而引入到库德房，供傅里叶光谱仪等焦面仪器使用。此设计将导致在望远镜跟踪目标过程中，由于反射镜的相对运动造成视场旋转的问题，进而影响望远镜的空间分辨率和偏振测量灵敏度。为此，分析研究视场旋转规律、设计视场消旋方案成为该项目实施的关键一环。

本论文将通过光线追迹与理论模拟的方法，获得视场旋转与望远镜运动的相互关系，设计研制切实可行的消旋机构，解决视场旋转的技术方法问题，为保证 AIMS 项目的实施提供可靠的理论依据和技术借鉴，也为今后大型光学天文望远镜提供可行的消旋方案和参考意见。

1.2 视场旋转现象及其原因

1.2.1 物方视场旋转原因分析

光学天文望远镜根据机架结构，通常分为地平式望远镜及赤道式望远镜，如图 1.1 所示。地平式望远镜的特点是，具有两个垂直的旋转轴，其一个旋转轴指向天顶，称为方位轴，另一个与方位轴垂直，称为高度轴。而赤道式望远镜的一个旋转轴与地球自转轴平行，称为赤经轴或极轴，另一个与极轴垂直的旋转轴称为赤纬轴。



(1) 地平式望远镜

(2) 赤道式望远镜

图 1.1 两种机架结构不同的望远镜

不同的机架结构具有不同的特点，其对成像也有影响。由于地球自转产生的恒星周日视运动，望远镜需要一套跟踪系统对目标星体进行观测，才能使目标始终位于视场内。天文学中，通常采用赤道坐标系来标识星体的位置，因为它在一天之内不随时间和望远镜的地点变化。赤道坐标系是把地球的经度纬度坐标系在天球上的投影而成的坐标系，所以它其中一个坐标轴与地球的自转轴重合。对于赤道式望远镜来说，只要它的极轴的跟踪速度以一个恒定的恒星移动速度旋转，则望远镜的出射像在视场内就会保持静止，即补偿了天体的视运动。

然而，地平式望远镜两个旋转轴所在的坐标系为地平坐标系，该坐标系与赤道坐标系之间有一个坐标转换关系^[1]，用球面三角形导出，图 1.2 很好地说明了这种关系：

$$\tan A = \frac{\sin t}{-\sin \phi \cos t + \cos \phi \tan \delta} \quad (1.1)$$

$$\cos Z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t \quad (1.2)$$

其中 A 为地平坐标系中的方位角， Z 为地平坐标系中的天顶距， ϕ 为望远镜所在的地理纬度， δ 为被观测目标的赤纬， t 为时角。

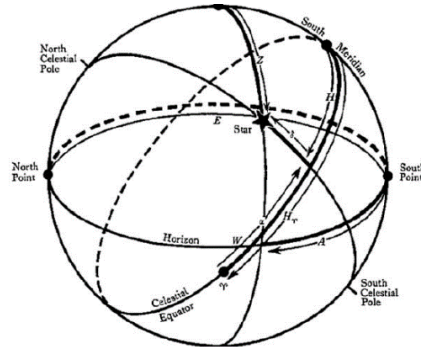


图 1.2 地平坐标系与赤道坐标系的关系图

由于方位角和天顶距这种复杂的函数关系，因此地平式望远镜在跟踪天体周日运动时，方位轴和高度轴均作非匀速运动，其运动速度公式为：

$$\frac{dZ}{dt} = \cos \phi \sin A \quad (1.3)$$

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\sin \phi \sin Z + \cos Z \cos A \cos \phi}{\sin Z} \quad (1.4)$$

同样也可以得到加速度的公式。根据这些公式，计算机就可以控制望远镜实现对目标天体的寻找、定位和跟踪。从以上公式也可以得出，运动速度除了与望远镜所在地理位置有关，还和跟踪的目标在天球上的位置有关。这样，即使地平式望远镜安装了跟踪系统，它只能保证目标天体存在与望远镜视场中，但目标星体仍会出现在视场内旋转的情况，如图 1.3 所示。

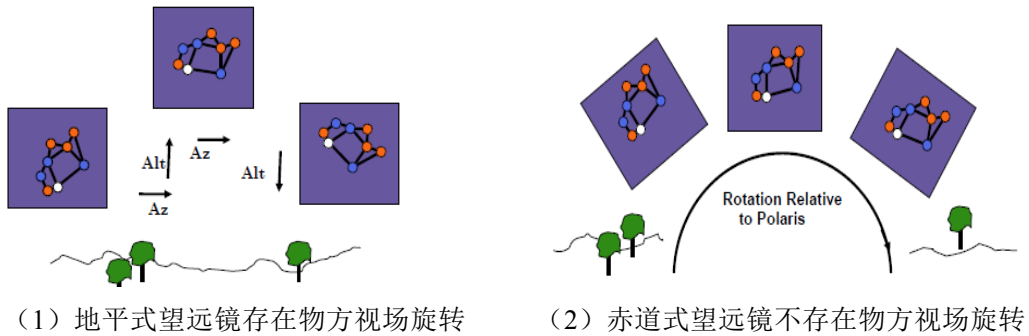
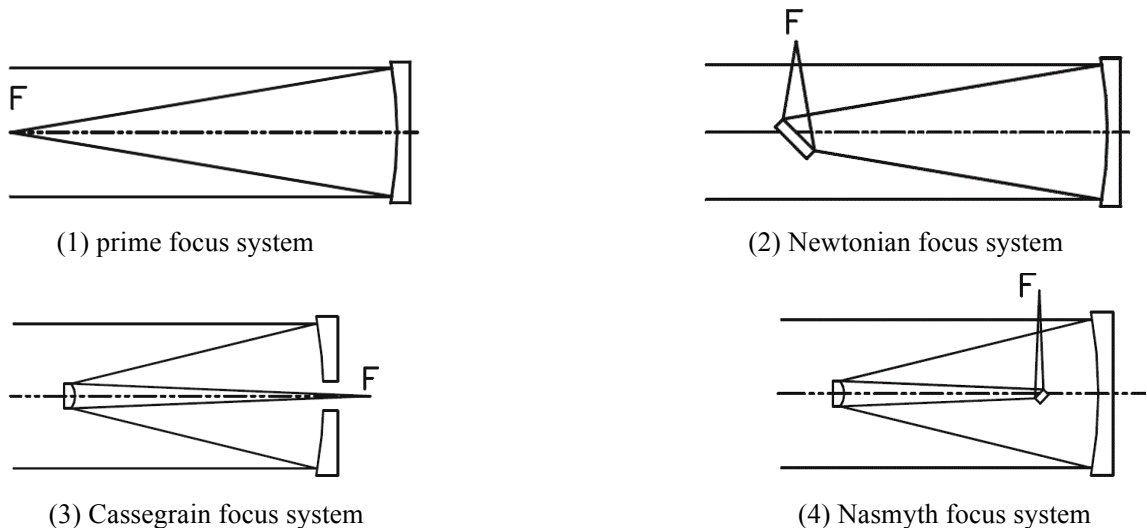


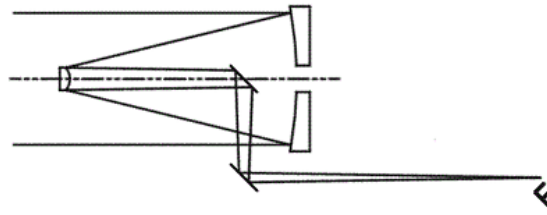
图 1.3 地平式望远镜和赤道式望远镜的物方视场旋转

这种由于地平式望远镜跟踪轴的坐标系和赤道坐标系的差别造成的视场旋转，称为物方视场旋转。物方视场旋转只存在于地平式望远镜中。

1.2.2 像方视场旋转原因分析

由于制造大直径的透镜非常困难，并且透镜对入射光有吸收和色散，所以现在大口径光学望远镜都是由两面反射镜构成的反射式望远镜。这些反射式望远镜的光路系统主要有以下几种：主焦点系统 (prime focus system)、牛顿焦点系统 (Newtonian focus system)、卡塞格林焦点系统 (Cassegrain focus system)、耐式焦点系统 (Nasmyth focus system) 以及库德焦点系统 (Coude focus system) 等。图 1.4 给出了各个系统的光路简图^[1-2]。





(5) coude focus system

图 1.4 反射式望远镜不同光路系统图

这些系统大部分是由一个主镜，一个副镜，加上一系列的折轴反射镜构成。在望远镜跟踪过程中，对于图 1.4 中的（1）至（4）的光学系统中，焦点的位置都会随着旋转轴的运动而发生移动。若是望远镜后端还有很多设备，这些设备随着望远镜一起运动必然会对设备产生影响。所以为了固定图像，可以利用库德光路，在两个旋转轴方向加上和旋转轴一起旋转的平面反射镜。如此，额外加入的折轴反射镜的运动将会导致出射光也随着一起旋转。这种由于折轴反射镜的旋转造成的视场旋转称为像方视场旋转。像方视场旋转在赤道式望远镜和地平式望远镜中都存在。

1.3 三种常见消旋方法

由机架结构产生的物方视场旋转和由光路中添加运动的折轴反射镜产生的像方视场旋转，这两种类型的视场旋转都会导致图像采集时不稳定，降低整个系统的分辨率，以及给后续的目标识别和数据处理工作带来困难。为了而获得稳定的、高质量的星像，必须对视场旋转进行补偿。对于消除视场旋转的方法研究在很早就已经开始了，针对这种图像旋转量的补偿技术主要有三种：电子消旋、物理消旋，光学消旋。

电子消旋是计算机技术和电子技术不断发展的产物，其采用可编程逻辑门阵列（FDGA）和数字信号处理器（DSP）构建数字硬件平台^[3]，基本原理是通过处理实时采集来的图像视频信号，按算法对消旋角进行旋转处理，控制监视器成像来旋正图像。其最大的优点是不依赖硬件设备，所必须的硬件基础是 CCD 相机和高速 DSP 的应用。但是电子消旋增加了图像处理时间，并且本身对图像就进行了一定的处理，将低了图像的质量，例如把像元的坐标化为整数，降低了信噪比，同时无法长时间积分^[4-5]。

物理消旋是利用电机驱动使整个 CCD 平台转动，使平台与像同步旋转，从而补偿视场旋转。这种方法的优点在于没有附加精密的光学元件。若望远镜的成像位置位于 Cassegrain 焦点处，接收器 CCD 可以根据像旋转的角度而进行旋转运动。但如果平台上除了 CCD，还有很多图像处理设备，例如傅里叶光谱仪，偏振，自适应光学等一些比较大的精密设备，这就要求旋转平台也要有一定的面积。对于一个 6 至

8 米级口径的望远镜来说，焦点处悬挂的重量超过两吨，而旋转平台的旋转变化率超过了 $1^\circ/\text{sec}$ 。并且，这种大面积的旋转平台必然带来电机震动等高频噪音，对平台上的设备产生影响^[6]。

光学消旋利用的是一些光学特性与电机结合来补偿消旋角，在成像器件前装入消旋元件，依靠其转动来产生目标光线的转动，从而使图像旋转。这种方法最初是由美国的 Dynascience 公司的研究人员提出^[7]。消旋器件加入了消旋棱镜或反射镜组，控制棱镜或反射镜组的转速为像旋转速度的一半即可在焦面上得到静止的图像。原则上，消旋元件可以放置在成像元件前光路的任何位置，这需要根据整体的光路设计来决定消旋元件的位置。光学消旋由于它具有速度快，结构相对独立等优点，越来越多的天文望远镜消旋方案采用光学消旋的方法。光学消旋器件根据光学元件的类型可以分为反射式和折射式两种。折射式消旋器件通常采用道威棱镜、别汉棱镜。而反射式消旋器件则是由三个平面反射镜组合而成，称为 K 镜。光学消旋方法也有一定的不足，例如加入的消旋器件和驱动设备会增加望远镜的复杂度，同时也对入射光的偏振态产生影响。而且，对于那些视场大于 1arcminute 的望远镜来说，光学消旋器件需要的体积很大，这时候不如采用物理消旋的方法^[8]。

1.4 国内外研究现状

消旋技术在民用和军事领域都具有重要的作用，西方国家很早就开始了对这方面的研究。目前，电子消旋技术发展已经很成熟，但是其大部分应用于不要求高分辨率的视场旋转的情况，例如机载 CCD 的图像消旋。天文望远镜中很少情况采用电子消旋的方案。运用物理消旋的望远镜也有一些，例如国内云南丽江的 2.4m 望远镜，它的 CCD 就是放在一个大的旋转平台上。然而，大部分的光学天文望远镜都是用光学消旋的方法。例如大型双筒望远镜（LBT）、昴星团望远镜（Subaru）、欧洲天文台超大型望远镜（E-ELT）等，见图 1.5。在国外的一些大型望远镜的技术报告里，已经对望远镜的视场消旋原因和规律都进行了详细的分析，而且为其针对的望远镜提供了可靠的消旋方案。

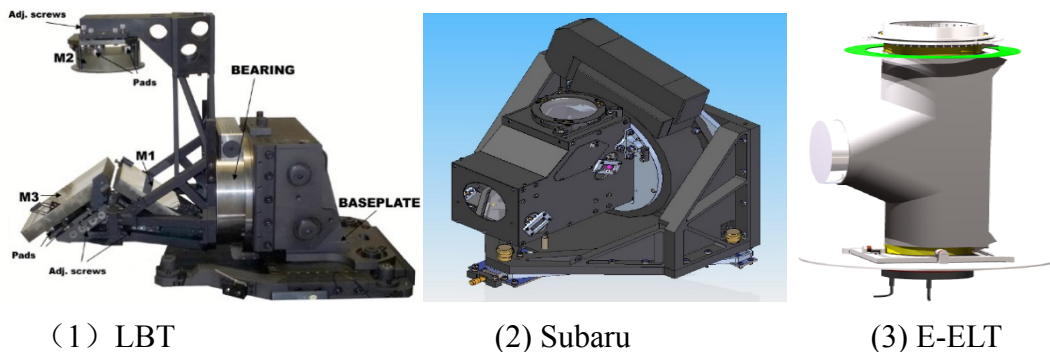


图 1.5 大口径望远镜中的光学消旋器件

即使很多大型望远镜大都采用光学消旋方案，但我国由于没有建造大型望远镜的技术经验，依然很少有关于这方面的比较详细的研究和论文出现。但光学消旋就有应用于卫星等其他领域。在海洋一号卫星上搭载的水色扫描仪和风云三号气象卫星上搭载的光谱成像仪均采用 K 镜消旋机构消除像旋^[9]。在天文望远镜领域，主要是长春光机所和云南天文台的相关研究较为深入，长春光机所的研究成果已经应用于 2m 望远镜中，但其研究方向偏向于机械和控制方面的研究，对于光学部分仍然有些空白。国内大型光学天文望远镜的消旋研究在与国外存在差距，同时也需要为以后的望远镜提供一种可行的技术方案，所以消旋的研究仍然存在很大的研究空间和研究意义。

1.5 本论文的研究内容与论文结构

根据分析视场旋转的原因，比较三种消旋方案以及对比国内外对望远镜消旋采用的方案的基础上，选择光学消旋的方法，并且采用反射式消旋 K 镜来开展本论文的研究，课题内容主要包括以下几个方面：

第一章主要说明本课题的研究目的和意义，分析了大型光学望远镜视场旋转的原因和三种消旋方法的介绍。以及调查了国内外消旋方案的研究，尤其是望远镜消旋方案的选择。

第二章介绍了视场旋转规律分析及计算。针对两种视场旋转分别计算和分析其旋转规律。对于物方视场旋转，需要进行坐标系的转换，从地平坐标系转换到赤道坐标系，从而计算出像在 CCD 上的真正旋转规律。物方视场的旋转规律与观测目标在天球上的位置有密切关系，所以可以根据分析得出的解析式，得到不同位置星体的旋转规律图。而对于像方视场旋转，需要通过光学追迹的方法和矢量矩阵的方法来计算得到旋转规律。通过对旋转规律的分析，可以知道消旋器件旋转的速率如何控制。

第三章是对光学消旋器件消旋原理进行研究。无论是折射式还是反射式消旋器件，它们的消旋原理都类似。本文采用消旋 K 镜的方案来完成课题。通过矢量矩阵的方法可以得到 K 镜的消旋原理，也可进一步分析 K 镜的消旋条件和光学性质。K 镜满足的光学特性可以指导下一步的研究。

第四章根据原因分析设计 K 镜结构。K 镜的整体结构分为两大部分，一个是光学结构，一个是机械结构。光学结构在整合之前得到的 K 镜的消旋条件和光学特性之后，利用 Zemax 光学设计软件来完成。而 K 镜的机械结构。本文中 K 镜机械结构采用组合的形式。在保证整个结构稳定的情况下，用三维平移台实现每面镜子的平移，用三维镜架支撑直径为 30mm 的保护性铝膜反射镜，旋转功能则用一个高精

密电动旋转台实现。K 镜的整个机械结构通过 Solidworks 设计并模拟。

第五章对 K 镜进行误差分析。K 镜的误差来源主要是三面反射镜的倾角和位移误差，还有入射光源主光线、K 镜光轴、K 镜旋转轴不共线产生的误差。通过 Zemax 的蒙特卡罗分析，可以得到这些误差来源的综合效果。同时本章还给出了对称式 K 镜的误差分析的具体解析式，并利用 MATLAB 求出单个误差来源所产生的影响。

第六章是 K 镜装调方案的设计及实验结果。K 镜的装调对整个课题非常重要。为了满足 K 镜的装调在误差范围内，则需要设计一套光路。装调主要是实现旋转台的旋转轴与光源共线、旋转台的旋转轴与 K 镜的光轴共线、K 镜的三面镜子倾角和位移的装调。实验通过分析出射像的运动特点来判断需要装调的位置，出射像的运动特点也可以通过计算和作图分析。

第七章总结了本论文取得的研究成果，分析和讨论了现有的方案和设计仍然存在的问题，同时也指出了进一步的研究方向。

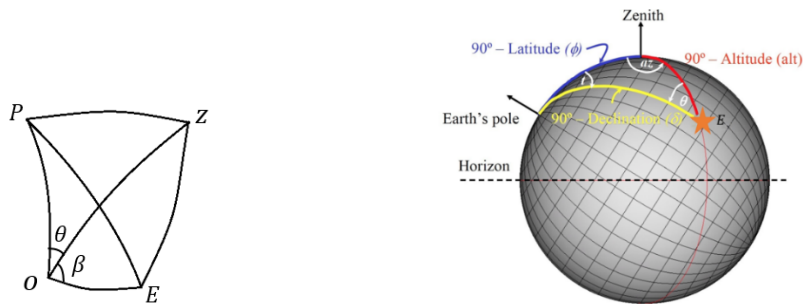
第二章 视场旋转规律计算和分析

物方视场旋转和像方视场旋转产生的机制完全不一样，但是独立且互不影响，而且对于不同望远镜系统，其视场旋转规律也不一样。很多大型的望远镜都针对其各自不同的设计给出了视场旋转的规律。本章对两种像旋产生的原理进行了分析，给出了像旋的具体解析式，便于以后控制系统的研究。本章也利用 AIMS 光路设计分析了其像旋规律。

2.1 物方视场旋转规律

物方视场旋转是由于地平式望远镜的其中一个转轴与地球的自转轴不重合，望远镜在跟踪时无法补偿视场中心以外的星体的周日视运动造成的。这种视场旋转对观测固定位置的恒星，尤其是太阳的观测影响很大。

地平式望远镜是以所在地的地平面为基本平面，这个平面把天球分为了上下两个半球。上半球的极点被称为天顶。地平坐标的天顶距 (Z) 是从天顶开始测量到地平线的球面角，而方位角 (A) 是从北向东测量的球面角。公式 (1.1) 和 (1.2) 给出了用赤道坐标系中的赤纬和时角表示的天顶距以及方位角的关系。从中可以得出高度轴和方位轴的跟踪速度都是非匀速运动。以上这些都是以天球上的球面角变化来描述的。对于真正观测和计算物方视场旋转来说，必须要转换到望远镜的跟踪轴所在球面。



(1) 天球坐标系下望远镜视场

(2) 目标星体 E 在天球上的表示

图 2.1 目标星体 E 的坐标变换

如图 2.1 所示，望远镜视场中心为点 O ，视场中的一目标星体为点 E ，天极为 P ，天顶为 Z 。规定从天球坐标系的北点算起，向东顺时针为正， $0^\circ \leq A \leq 360^\circ$ 。设定由 OZ 转向 OP 的转角为 θ ， OE 到 OZ 的转角为 β （星位角），规定顺时针为正。假设已知望远镜的地理纬度 ϕ 、星体 E 的赤纬 δ 以及时角 t 。目标在天球上的旋转可以由 β 来描述^[10]。

在球面三角形 PEZ 中，根据球面余弦公式可以表示出星体 E 的天顶距和方位

角^[11]:

$$\frac{\sin \theta}{\sin(90^\circ - \phi)} = \frac{\sin(360^\circ - A)}{\sin(90^\circ - \delta)} \quad (2.1)$$

化简得:

$$\sin \theta \cos \delta = \sin A \cos \phi \quad (2.2)$$

同时也可以得出:

$$\sin A \sin Z = \cos \delta \sin t \quad (2.3)$$

根据球面余弦公式有

$$\cos A = \frac{\sin \delta - \cos Z \sin \phi}{\sin Z \cos \phi} \quad (2.4)$$

由公式 (2.2) 和 (2.4) 可得:

$$\tan \theta = \frac{-\sin A \cos \phi}{\sin Z \sin \phi - \cos Z \cos \phi \cos A} \quad (2.5)$$

由公式 (1.1)、(1.2)、(2.3) 可以得到方位轴的运动速度 (由于式中时角对时间的导数也就是恒星的运动速度 -15arcsec/s , 因为速度恒定, 所以这里设为 ω_0):

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\sin \phi \sin Z + \cos Z \cos A \cos \phi}{\sin Z} \cdot \omega_0 \quad (2.6)$$

对公式 (2.2) 微分得:

$$\cos \delta \cos \theta \frac{d\theta}{dt} = \cos \phi \cos A \frac{dA}{dt} \quad (2.7)$$

把公式 (2.6) 代入到 (2.7) 可得:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\cos \phi \cos A}{\sin Z} \cdot \omega_0 \quad (2.8)$$

所以观测目标的像旋速度为:

$$\frac{d\beta}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\frac{\cos \phi \cos A}{\sin Z} \cdot \omega_0 \quad (2.9)$$

根据望远镜的不同的光路系统, β 角所代表的含义也不一样。若成像面选在 Nasmyth 焦点处, 则成像上的旋转角为 $\beta - Z$; 若成像面选在 Cassegrain 或者 Gregorian 焦点处, 则旋转角为 β 。

2.2 像方视场旋转规律

研究像旋的变化规律主要是研究入射光的经过主镜和副镜之后的成像情况。副镜之后的反射镜虽然随着望远镜的跟踪轴系一起运动, 但相对于旋转轴系来说它们是静止的。因此跟踪轴系运动的角度与像旋转的角度是相等的^[12]。但是, 由于反射镜会改变成像方向, 需要根据添加反射镜的个数和光路判断成像方向, 从而确定旋

转角度的正负。这里利用 AIMS 望远镜的光路图来说明。

2.2.1 AIMS 望远镜光路简介

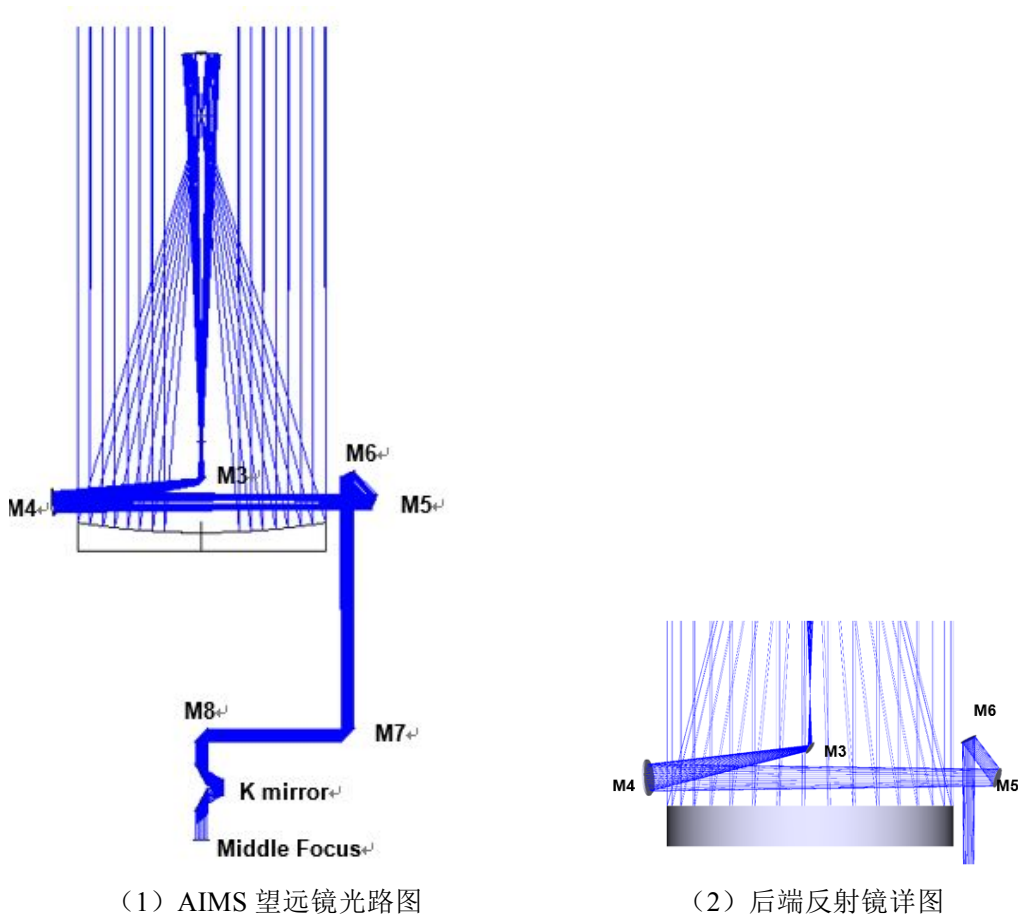


图 2.2 AIMS 望远镜光学系统光路图及后端反射镜示意图

太阳磁场精确测量的中红外观测系统的光学设计见图 2.2 所示。AIMS 望远镜的初期设计是采用同轴光路，为赤道式望远镜的机架结构，Gregorian 系统，有效口径为 1m，其主焦比为 $F/1.6$ ，哥氏焦点焦比为 $F/10$ 。对于该望远镜来说，不存在物方视场旋转，只需考虑加入折轴反射镜的像旋量。其中，M3 为平面反射镜，位置在焦点后 165mm 处。M4 为中继镜，偏轴椭球面。M5-M6 将光束转移到望远镜的赤经转轴。

2.2.2 Coude 焦点处像旋分析

像方视场旋转角度可以通过光学追迹和反射镜变换矩阵来推导，光学追迹法是沿光路对若干光线进行追迹计算来确定像旋角度。反射变换矩阵则需要知道反射镜摆放的位置，从而把所有光线和反射都用矢量矩阵来表示^[13]。而实际上，所有的望远镜的像方视场旋转规律都是相似的，无需把各种情况都计算一遍，只需要判断出射像旋转的方向。

AIMS 的光路设计与 ATST 类似，所有镜子都在一个平面上，这个平面也是随着望远镜跟踪时的运动而运动^[14]。图 2.2 中，M3 和 M4 是随着支撑结构而运动，M5 和 M6 随着望远镜的赤经轴和赤纬轴一起运动。消旋器件 K 镜位于 Coude 光路中，像旋由 K 镜系统之前的各反射镜相对运动决定。规定沿着光轴逆着光线传播方向观察，像逆时针旋转为正。如图 2.3 所示，判断望远镜其中一条光线的成像方向。假定入射光取一个左手直角坐标系，经过一次反射之后，出射像为右手坐标系。通过成像分析，望远镜静止时的像与入射像方向一致。

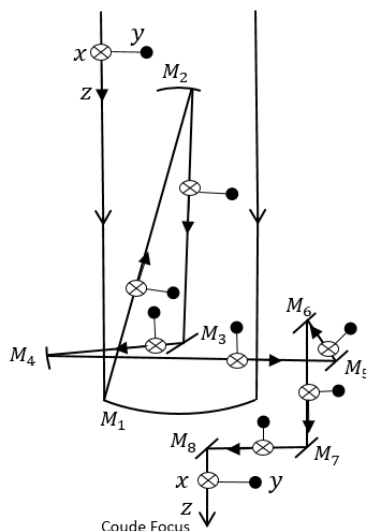


图 2.3 光束经过 AIMS 成像分析

对于地平式望远镜而言，在 Coude 焦平面的旋转角度和上节所说的物方视场旋转的角度是在同一个坐标系下的。这些平面镜运动所产生的共同效果是补偿望远镜在赤经轴（方位轴）和赤纬轴（高度轴）的运动。所以在赤经轴转动的角度和反射镜组旋转的角度相等，也等于像旋转的角度。分析望远镜和反射镜对成像方向的变化，地平式望远镜在库德焦点产生的像旋为：

$$\rho = 90^\circ - Z - A + C \quad (2.10)$$

C 为常数，根据望远镜初始点与天顶的角度。对于 AIMS 望远镜系统，只有上式表示的像方视场旋转。由于 AIMS 是赤道式望远镜，公式 (2.10) 中 Z 与赤道坐标系中的赤纬相同，而 A 则与赤道坐标系的时角等效。AIMS 的最终像旋为：

$$\rho = 90^\circ - t + C \quad (2.11)$$

像旋速度为：

$$\frac{d\rho}{dt} = -\omega_0 = 15 \text{ arcsec/s} \quad (2.12)$$

AIMS 的像旋速度是与地球自转速度相等。实际上，所有的赤道式望远镜的像旋速度都是地球的自转速度。但不同的望远镜需要根据成像前光路的特性来分析成像方

向^[15-16]。对于一些用于观测太阳的地平式望远镜来说，公式(2.10)可以简化一些，因为在非热带地区，太阳的方位角在一天之中几乎不怎么改变。

2.3 本章小结

本章主要计算和研究了地平式望远镜和赤道式望远镜像旋的角度和速度，还介绍了 AIMS 望远镜系统光路，以及其像旋。对于地平式望远镜来说，像旋是物方视场旋转 (Field Rotation) 与像方视场旋转 (Pupil Rotation) 共同作用的结果，像旋是变速运动，计算较复杂。而对所有赤道式望远镜而言，其像旋速度是常数，都为地球自转速度。具体像旋的计算也要考虑到望远镜的光路系统和成像位置，而消旋器件的旋转速率决定于望远镜的视场旋转的规律。

第三章 光学消旋器件发展及消旋原理研究

由于电子消旋和物理消旋一些缺点，尤其是望远镜后端添加了一些精密仪器的情况下，这两种方法就不再适用。故本课题采用光学消旋的方法。光学消旋器件最初是消旋棱镜，后来才发展到反射式 K 镜，它们的消旋原理类似。消旋棱镜一般多用于目视光学系统中，而目前大部分的望远镜都采用 K 镜来消旋。本课题采用消旋 K 镜并对其原理进行研究。

3.1 光学消旋器件介绍和发展

光学消旋是通过在成像器件前装一光学元件，依靠其转动导致目标光线的转动，从而使图像旋转。光学消旋器件是从折射式棱镜到反射镜与棱镜相结合的器件，最后到由三面反射镜组成的消旋 K 镜。最早出现的是消旋棱镜，D. W. Swift 在 1972 年统计了当时所有的图像旋转器件^[17]，这些大部分应用于航空航天领域。D. S. L. Durie 在 1974 年发表了一篇关于 Delta 消旋棱镜，如图 3.1 (1) 所示，它应用于潜望镜中^[18]，这种棱镜的优点是空间和重量上都很紧凑。之后，W. Vanghan 开始研究 Dove 棱镜的光学性质^[19]，H. Z. Sar-EI 对 Dove 棱镜的底角和尺寸进行了优化研究^[20]。后来消旋棱镜主要采用 Dove 棱镜和 Abbe 棱镜，如图 3.1 所示。

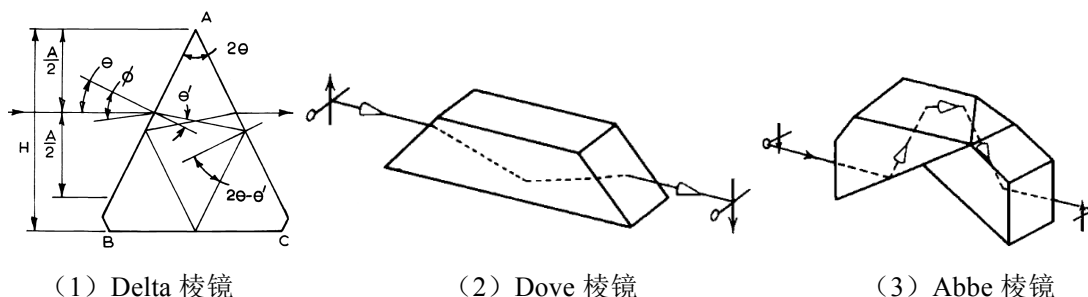


图 3.1 各类光学消旋棱镜

天文望远镜中 Willam Herschel Telescope 的技术方案中提到了很多消旋器件，如图 3.2 所示，这些消旋器件结合了反射镜和棱镜，这种技术改进主要是根据所需观测的波长决定^[21]。棱镜作为消旋器件也有一些缺点：带来光能的损失，并且由于反射角较大，引起的光偏振较大，而且所用棱镜的尺寸也较大。而且由于光学材料的限制，只能用于可见光到近红外波段。现在很多大型的光学天文望远镜都采用反射式 K 镜的形式，美国威尔逊天文台胡克 100 英寸望远镜在 Coude 焦点前就安装有 K 镜消旋装置^[22]，其他的望远镜还有如 AEOS、Hooker、LBT、VLT、Sabutu。K 镜相比于棱镜，有很多优点，例如角度不再受制于折射率，能量损失低，应用的波段范围广，制作更加灵活，没有像散等。

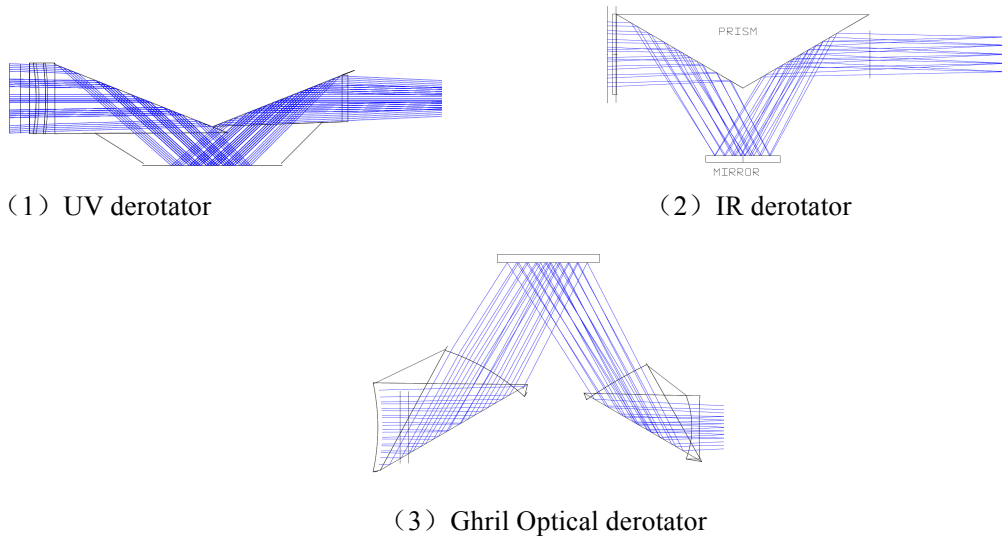


图 3.2 WHT 光学消旋器件

3.2 K 镜消旋原理和光学性质

3.2.1 平面反射镜变换矩阵和旋转变换矩阵

平面反射镜是一块天然完善成像的光学元件，从物点发出的光线经平面反射镜反射后仍相交了一点，物体上点点都是如此成像。平面反射镜在光路中仅起光路转折作用，物像空间具有一一对应关系。像旋分析关心的是物像空间的方向共轭关系^[23]。而且平面反射镜的成像规律为右手直角坐标系经偶数次平面反射镜成像则像一定是右手系，而其经奇数次平面反射镜成像其像为左手坐标系^[24]。

建立空间直角坐标系，把入射光，反射光的单位向量都用矩阵表示，则平面反射镜的反射过程也可以用矩阵表示。在反射镜的两端分别建立物空间坐标系 $oxyz$ 以及像空间坐标系 $o'x'y'z'$ ，如图 3.3 (1) 所示，设在物空间坐标系下，平面镜法线方向的单位向量 \mathbf{N} 的矩阵表示为 $[N_x \ N_y \ N_z]^T$ 。

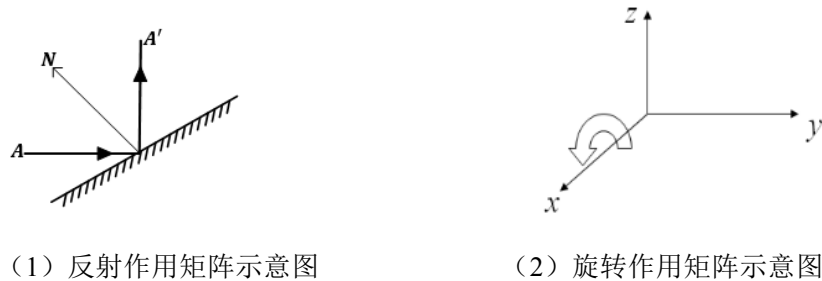


图 3.3 平面反射镜反射作用和坐标系旋转作用示意图

平面镜的反射作用矩阵表示为 \mathbf{M} ，则入射光和反射光有如下关系：

$$\mathbf{A}' = \mathbf{M}\mathbf{A} \quad (3.1)$$

其中 \mathbf{A} 表示入射光单位向量， \mathbf{A}' 表示出射光单位向量。所以只需求出反射作用矩

阵 \mathbf{M} ，就可以得到出射光向量在物空间坐标系下的坐标。反射定律的矢量形式可以表示为^[25]：

$$\mathbf{A}' = \mathbf{A} - 2(\mathbf{A} \cdot \mathbf{N})\mathbf{N} \quad (3.2)$$

由（3.2）式可以求出反射作用矩阵 \mathbf{M} 的形式为^[26]：

$$\mathbf{M} = \mathbf{I} - 2\mathbf{N} \cdot \mathbf{N}^T = \begin{bmatrix} 1-2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_xN_y & 1-2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_xN_z & -2N_yN_z & 1-2N_z^2 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

式中 \mathbf{I} 为 3×3 单位矩阵。

如图 3.3（2）所示，若在物空间中，坐标系绕 x 轴旋转 θ ，则 x 坐标不发生变化，y 坐标和 z 坐标绕 x 轴旋转 θ 度，规定旋转的正方向为顺时针方向（沿着旋转轴负方向向原点看）。(x, y, z)表示变化前的点，(x', y', z')表示变化后的点。则变化前和变化后的关系为：

$$x' = x \quad (3.4)$$

$$y' = y \cos \theta - z \sin \theta \quad (3.5)$$

$$z' = y \sin \theta + z \cos \theta \quad (3.6)$$

所以根据以上公式可以得到绕 x 轴的旋转矩阵 \mathbf{R}_x 为：

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

同理，可以计算出坐标系绕 y 轴旋转的旋转作用矩阵 \mathbf{R}_y 和绕 z 轴旋转的旋转作用矩阵 \mathbf{R}_z ：

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

3.2.2 K 镜消旋原理

曾经使用过的光学消旋器件多为基于 Dove 棱镜或者 Abbe 棱镜原理所设计的消旋棱镜，但棱镜会对会聚或发散的入射图像产生像差。如今使用的 K 型反射镜可以避免这种缺点。K 镜基于 Dove 棱镜设计，Dove 棱镜如图 3.4（1）所示，它作为折射式消旋器件的特点是，当它绕平行于反射面的轴旋转 θ 角时，物体的反射像将转过

2θ 角。K 镜就是把 Dove 棱镜的两个入射面都换成反射面，同时保留底面的反射面。图 3.4 (2) 对 K 镜进行成像分析，图中 K 镜的第一面镜子 KM1 和第三面镜子 KM3 分别有两个底角 β_1 和 β_3 ，第二面镜子 KM2 平行于 K 镜光轴（当光线沿着该轴入射，出射光线与入射光线共线）。

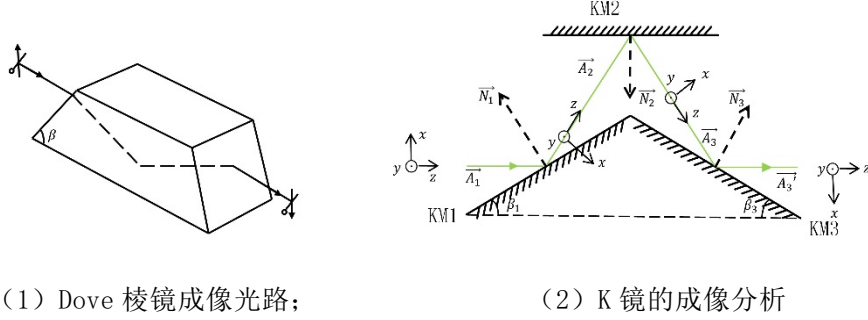


图 3.4 Dove 棱镜与 K 镜的成像光路

下面用矩阵的方法来证明 K 镜具有消旋的作用^[27]。建立如图 3.4 (2) 所示的物空间坐标系为全局坐标系，入射光矢量 \mathbf{A} 与反射光矢量 \mathbf{A}' 的关系由公式 (3.1) 表示。

静止时 K 镜各镜面的法线向量单位矩阵为

$$\mathbf{N}_1 = \begin{bmatrix} \cos \beta_1 \\ 0 \\ -\sin \beta_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N}_2 = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N}_3 = \begin{bmatrix} \cos \beta_3 \\ 0 \\ \sin \beta_3 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

假设一任意方向的入射光的矢量矩阵表示为 $\mathbf{A}_1 = [A_{1x} \ A_{1y} \ A_{1z}]^T$ 。若入射光绕望远镜光轴 (z 轴) 旋转 θ ，同时 K 镜的旋转方向与入射光旋转方向一致，其旋转角度为 $\theta/2$ ，保证望远镜光轴、K 镜旋转轴、K 镜光轴三轴共线，则入射光矩阵变为

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{1x} \\ A_{1y} \\ A_{1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1x} \cos \theta - A_{1y} \sin \theta \\ A_{1y} \cos \theta + A_{1x} \sin \theta \\ A_{1z} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

同时，K 镜各镜面的法线向量变为

$$\mathbf{N}_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta/2) \cdot \cos \beta_1 \\ \sin(\theta/2) \cdot \cos \beta_1 \\ -\sin \beta_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N}_2 = \begin{bmatrix} -\cos(\theta/2) \\ -\sin(\theta/2) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N}_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta/2) \cdot \cos \beta_3 \\ \sin(\theta/2) \cdot \cos \beta_3 \\ \sin \beta_3 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

由此可以得到各镜面的作用矩阵

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} 1 - 2 \cos^2 \beta_1 \cdot \cos^2(\theta/2) & -\cos^2 \beta_1 \cdot \sin \theta & \sin 2\beta_1 \cos(\theta/2) \\ -\cos^2 \beta_1 \cdot \sin \theta & 1 - 2 \cos^2 \beta_1 \cdot \sin^2(\theta/2) & \sin 2\beta_1 \sin(\theta/2) \\ \sin 2\beta_1 \cos(\theta/2) & \sin 2\beta_1 \sin(\theta/2) & \cos 2\beta_1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} -\cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} 1 - 2\cos^2\beta_3 \cdot \cos^2(\theta/2) & -\cos^2\beta_3 \cdot \sin\theta & -\sin 2\beta_3 \cos(\theta/2) \\ -\cos^2\beta_3 \cdot \sin\theta & 1 - 2\cos^2\beta_3 \cdot \sin^2(\theta/2) & \sin 2\beta_3 \sin(\theta/2) \\ -\sin 2\beta_3 \cos(\theta/2) & -\sin 2\beta_3 \sin(\theta/2) & \cos 2\beta_3 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

整个 K 镜的作用矩阵

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_3 \cdot \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

如果 K 镜要发挥像旋的作用(即出射光线与其余参量无关,只与旋转角度有关),则 \mathbf{M} 应该与旋转矩阵 \mathbf{R}_z 具有相似的结构。

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos(\theta/2) & -\sin(\theta/2) & 0 \\ \sin(\theta/2) & \cos(\theta/2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

通过对比可以得出 $M_{13} = \sin 2(\beta_1 - \beta_3)\cos(\theta/2) = 0 \rightarrow \beta_1 - \beta_3 = 0 \rightarrow \beta_1 = \beta_3$ 。满足此条件时

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -\cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\mathbf{A}_3' = \mathbf{M} \cdot \mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} -A_{1x} \\ A_{1y} \\ A_{1z} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

由此可知出射像为入射像的倒像,这与图 3.4(2)的成像分析结果一致,而且出射像是静止的,与旋转角度 θ 没有关系,说明当 K 镜的旋转速度是入射像旋转速度的一半且同向,在满足条件 $\beta_1 = \beta_3$,并且望远镜光轴、K 镜旋转轴、K 镜光轴三轴共线时,K 镜具有消除像旋转的作用。

有一种非对称的情况,如图 3.5 所示,KM2 并非平行于 K 镜光轴。用上述方法可以证明,当三面镜子的倾角满足 $\beta_2 + \beta_3 = \beta_1$ 的情况下,此类型的 K 镜同样具有消旋作用:

静止时时 K 镜各镜面的法线向量单位矩阵分别为:

$$\mathbf{N}_1 = \begin{bmatrix} \cos\beta_1 \\ 0 \\ -\sin\beta_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N}_2 = \begin{bmatrix} \cos\beta_2 \\ 0 \\ -\sin\beta_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N}_3 = \begin{bmatrix} \cos\beta_3 \\ 0 \\ \sin\beta_3 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

各镜面的作用矩阵分别为:

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} -\cos 2\beta_1 & 0 & \sin 2\beta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin 2\beta_1 & 0 & \cos 2\beta_1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} -\cos 2\beta_2 & 0 & \sin 2\beta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin 2\beta_2 & 0 & \cos 2\beta_2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} -\cos 2\beta_3 & 0 & \sin 2\beta_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin 2\beta_3 & 0 & \cos 2\beta_3 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

所以静止时，整个 K 镜的作用矩阵为：

$$M = M_3 M_2 M_1 = \begin{bmatrix} -\cos 2(\beta_1 - \beta_2 - \beta_3) & 0 & \sin 2(\beta_1 - \beta_2 - \beta_3) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin 2(\beta_1 - \beta_2 - \beta_3) & 0 & \cos 2(\beta_1 - \beta_2 - \beta_3) \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

从整个 K 镜的作用矩阵可以看出，要使得最后的出射像与 K 镜倾角无关，则 $\beta_1 - \beta_2 - \beta_3 = 0$ ，即 $\beta_1 = \beta_2 + \beta_3$ 。可以反向证明，当满足上述条件，入射光绕光轴旋转 θ ，而 K 镜也绕光轴旋转 $\theta/2$ 时，这种非对称式的 K 镜也具有消旋作用。但是由于非对称式 K 镜的安装和校准比较复杂，易出现较大的误差，所以大部分的消旋 K 镜采用对称式的结构。

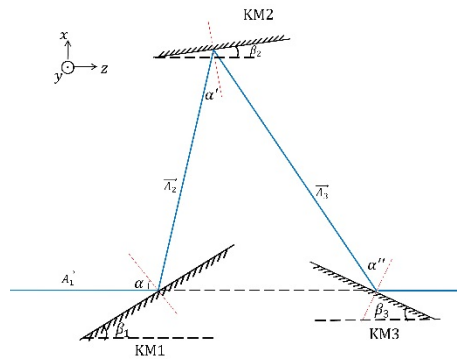


图 3.5 非对称式消旋 K 镜光路图

3.2.3 K 镜成像性质分析

类似反射棱镜，K 镜的转动会引起整个望远镜系统光轴方向和成像方向的变化。根据棱镜转动定理：当物空间坐标系 xyz 不动，棱镜绕转轴 P 转动 θ 角后，像空间坐标系 $x'y'z'$ 首先绕 P' （ P' 为 P 在像空间的共轭向量）转 $(-1)^{N-1} \theta$ ，然后绕 P 转 θ （ N 是棱镜的反射次数）^[24]。

棱镜转动引起的像空间坐标系方位变化情况的矩阵方程

$$\begin{bmatrix} i'' \\ j'' \\ k'' \end{bmatrix} = R_{OP} R_{OP'} \begin{bmatrix} i' \\ j' \\ k' \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

其中， i', j', k' 为坐标系 $x'y'z'$ 的三个单位基向量。 i'', j'', k'' 为像空间坐标系 $x''y''z''$ 绕 P' 轴转动 $(-1)^{N-1} \Delta\theta$ 后再绕 P 轴转 $\Delta\theta$ 所成的新像空间坐标系 $x''y''z''$ 的三个单位基向量。 R_{OP} 为绕 P 轴的转动矩阵， $R_{OP'}$ 为绕 P' 轴的转动矩阵，

$$R_{OP} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta\theta \cos \gamma' & -\Delta\theta \cos \beta' \\ -\Delta\theta \cos \gamma' & 1 & \Delta\theta \cos \alpha' \\ \Delta\theta \cos \beta' & -\Delta\theta \cos \alpha' & 1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$\mathbf{R}_{OP'} = \begin{bmatrix} 1 & (-1)^{N-1} \Delta\theta \cos \gamma & (-1)^N \Delta\theta \cos \beta \\ (-1)^N \Delta\theta \cos \gamma & 1 & (-1)^{N-1} \Delta\theta \cos \alpha \\ (-1)^{N-1} \Delta\theta \cos \beta & (-1)^N \Delta\theta \cos \alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

α, β, γ 分别为 \mathbf{P} 轴与物空间坐标系 x, y, z 轴的夹角, 也为 \mathbf{P}' 轴与像空间坐标系 x', y', z' 轴的夹角, α', β', γ' 分别为转轴 \mathbf{P} 与坐标系 x', y', z' 轴的夹角。

把以上理论应用于 K 镜系统中, 对于 K 镜来说, $N = 3$ 。若假设转轴 \mathbf{P} 为望远镜的光轴, 此时, $\alpha = \alpha' = \beta = \beta' = 90^\circ, \gamma = \gamma' = 0^\circ$ 。所以

$$\mathbf{R}_{OP} \mathbf{R}_{OP'} = \begin{bmatrix} 1 - \Delta\theta & 2\Delta\theta & 0 \\ -2\Delta\theta & 1 - (\Delta\theta)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

在 K 镜旋转前, 整个系统的光轴沿着 \mathbf{k}' 方向, 旋转后光轴沿着 \mathbf{k}'' 方向, $\Delta\mathbf{k}' = \mathbf{k}'' - \mathbf{k}'$ 就为光轴方向的改变。 \mathbf{j}' 为成像方向, \mathbf{j}'' 与 \mathbf{j}' 的差在 \mathbf{i}' 方向分量 $\Delta\mathbf{j}'$ 就是像倾斜。计算得到 $\Delta\mathbf{k}' = \mathbf{0}, \Delta\mathbf{j}' = -2\Delta\theta \mathbf{i}'$ 。这个结果说明, 以望远镜光轴为旋转轴时, 光轴的方向不发生改变, 并且像的旋转速度是 K 镜旋转速度的 2 倍, 这与矩阵方法的结果一致。

另一种情况是, 若转轴 \mathbf{P} 为 x 轴, 即 K 镜系统绕 x 轴旋转的情况。此时 $\alpha = \alpha' = 0^\circ, \gamma = \gamma' = \beta = \beta' = 90^\circ$, 可以得到 $\Delta\mathbf{k}' = \Delta\mathbf{j}' = \mathbf{0}$ 。由此可知 K 镜整体绕 x 轴转动并不会影响整个系统的光轴方向和成像的改变, 这说明在装调时整体在 x 轴的旋转是允许的。

3.3 本章小结

本章主要介绍了常用的光学消旋器件——消旋棱镜和 K 型反射镜, 并介绍了这些器件的发展和优缺点。本课题采用的是 K 镜为消旋器件, 利用矢量矩阵的方法分析了 K 镜的消旋原理, K 镜与消旋棱镜类似, 其旋转的速度是入射光旋转速度的一半且同向。从消旋原理可以得到 K 镜需要满足的消旋条件, 并且 K 镜光轴、旋转轴和望远镜光轴必须共线。同时还推导了平面反射镜的反射作用矩阵以及坐标系的旋转变换矩阵。由于 K 镜是从 Dove 棱镜演化而来, 所以利用研究棱镜的方法可以分析 K 镜的光学成像性质。

第四章 K 镜结构设计及分析

K 镜实现的功能是消除物方视场旋转和像方视场旋转对最终成像所造成的影响。从整体功能系统上看, 一个完整的 K 镜消旋系统分为三个主要部分: 光学结构、机械结构和电控系统。而 K 镜结构主要是光学结构和机械结构两大部分组成。由于本论文只是对消旋原理和消旋方案进行研究, 不涉及具体的 K 镜加工和设计, 关于镜面材料的选择和精密机械方案不做详细讨论。本章的重点是 K 镜的光学结构设计, 并涉及小部分的机械设计, K 镜的大部分结构的实现都是利用商用产品能够实现的功能进行整合, 使其满足总体设计要求, 即达到消旋的功能和一定的精度, 用于实验中检测装调方案的可行性。

本章主要介绍和解释了光学结构设计和部分机械结构设计的方案和设计过程。光学设计方案根据上一章的 K 镜消旋条件, 得到与条件等价的数学解析式, 将其运用到 Zemax 光学设计软件中。K 镜的机械结构则是连接三面反射镜和旋转电机的部分, 在不研究具体的支撑和调节结构方案的情况下, 设计出能够保证足够的刚度、实现角度和位移调节功能的机械结构。

4.1 K 镜光学结构设计

K 镜的光学主体部分是由三面反射镜组合而成, 每面镜子的相对位置、K 镜在望远镜整体光路的位置, 都需要满足一定的条件才能够达到设计要求。K 镜的设计除了需要满足之前得到的倾角条件, 还要方便实际使用时的情况。总的来说, K 镜的光学设计需要考虑到这四种条件: 首先, 在 K 镜放入前后, 整个光路的变化不能影响到望远镜后端成像设备和一些光谱分析设备的位置, 这就要求光束经过 K 镜后方向不变; 同时还要保证中心视场的主光线经 K 镜后高度不变; 其次, 在 K 镜的三面镜子中反射的光线不能被遮挡, 这在一定程度上要求了 K 镜各个面的口径和位置; 最后, 在满足上述两个条件的情况下, 进行优化, 尽量减小 K 镜的口径和体积。

4.1.1 三面镜子的倾角设计

K 镜与 Dove 棱镜都属于消旋器件, 它们在光学结构上有一定的相似性。通过研究 Dove 棱镜的光学结构和光学特性, 也能对 K 镜的结构和特性做出相似的结论。最常见的 Dove 棱镜采用 BK7 材料, 它的折射率为 $n = 1.5170$, 棱镜的底角一般设置为 $\beta = 45^\circ$ 。而实际上, 根据不同折射率的棱镜, 可以得到最优的角度使棱镜的体积最小。利用光在棱镜中经过的光程最小的原则可以对棱镜的体积进行优化。因为棱镜的长度和口径满足^[28-29]:

$$\frac{B}{A} = \frac{1}{\sin(2\beta)} \left(1 + \frac{[n^2 - \cos^2(\beta)]^{1/2} + \sin(\beta)}{[n^2 - \cos^2(\beta)]^{1/2} - \sin(\beta)} \right) \quad (4.1)$$

其中 A 为 Dove 棱镜的通光口径， B 为棱镜的长度， n 为棱镜折射率（见图 4.1 (1)）。当折射率一定时，利用 MATLAB 软件可以模拟出不同底角时，Dove 棱镜长度 B 与通光口径 A 的比值，并求出比值最小处，此时就是棱镜体积最小的情况。图 4.2 (2) 中的 $n = 1.5170$ ，底角 $\beta \approx 32.5^\circ$ 时，棱镜的体积最小。

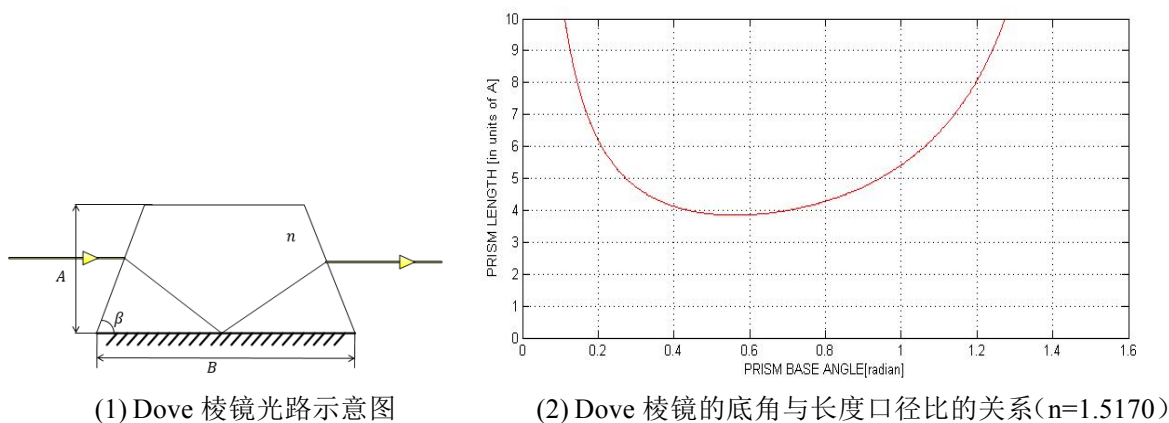


图 4.1 Dove 棱镜底角角度分析

与上述情况不同的是，通常采用的 Dove 消旋棱镜大部分给出的底角为 45° ，国内使用的 K 镜的底角为 30° ，但没有给出具体的解释和分析。而国外大型望远镜的消旋器件的底角都不相同（例如 E-ELT 为 28° [30]，WHT 为 26.1° [21]，GEMINI 为 25° [31]）。所以，为了研究 K 镜的底角需要满足的条件，除了之前所提到的消旋条件 $\beta_1 = \beta_3$ 之外，还需要满足其他条件。

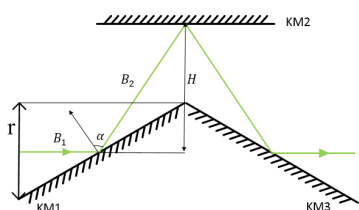
为了同时满足光束经过 K 镜后方向不变和主光线的高度不变的条件，也就是保证焦点位置仍在光轴上（图 3.5），在入射光为会聚光的情况下，要求主光线偏转的角度为 0° ，即 $(180^\circ - 2\alpha_1) - (180^\circ - 2\alpha'_1) + (180^\circ - 2\alpha''_1) = 0$ 。得到 $\beta_3 + \beta_2 + \alpha_1 = 90^\circ$ ，对于主光线 $\alpha_1 = 90^\circ - \beta_1$ ，满足其方向不变的则要达到 $\beta_2 + \beta_3 = \beta_1$ ，而此条件也是 K 镜消旋的条件。当设计对称式 K 镜时，保证所有的光线都能反射到 KM3 上，则 $\beta_{1,3} < \alpha_1$ ，即 $\beta_{1,3} < 45^\circ$ 。

K 镜是反射型消旋器件，所以不存在材料的折射率对倾角的影响，不能利用公式 (4.1) 得到最小体积下底角的值。但仍然可以用光程最小原则计算一种特殊的 K 镜 [32]：在准直光路中的对称式 K 镜。图 4.2 (1) 中的 K 镜为对称式 K 镜，假设 KM1 的尺寸刚好等于入射光的入射范围，则沿着光轴中心的光线与 KM2 的入射点与 KM1 和 KM3 的交点的连线必然垂直于 KM2。所以，

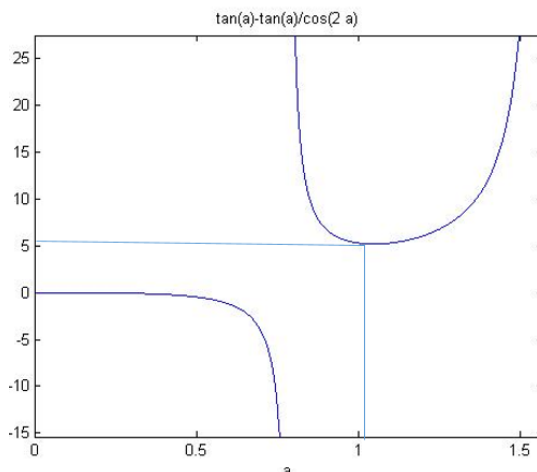
$$B_1 = r \cdot \tan \alpha \quad (4.2)$$

$$B_2 = -\frac{B_1}{\cos 2\alpha} \quad (4.3)$$

根据光程最短原则，即 $y = (B_1 + B_2)/r \rightarrow \min$ 。同样通过 MATLAB 求极值，并画图（图 4.2（2）），得到当 $\alpha = 60^\circ$ 时， y 有最小值。即此种特殊情况下，K 镜底角 $\beta = 30^\circ$ 时，K 镜的体积具有最小值。



(1) 对称式 K 镜光路示意图



(2) 光程与角度 α 的关系 ($\alpha = \frac{\pi}{3}$ 时，

光程最小)

图 4.2 对称式 K 镜在准直光路中的底角角度分析

然而，目前几乎所有的望远镜从副镜出来的光线为会聚光，而非准直光。倾角为 30° 并不能满足最小光程的原则。所以，K 镜的倾角选择需要考虑望远镜系统参数、K 镜在光路中的位置、接收器的位置、设计时 K 镜的体积限制，同时还要考虑到加工和装调的方便性。所以这样并没有一个普遍的绝对的优化角度，但为了加工和装调的准确性，可以尽量设计对称式 K 镜。

4.1.2 K 镜口径和体积设计

KM1 镜的口径可以通过几何光学和空间关系求出具体的解析式，但 KM2 的口径与图 4.2（1）中的 h 有关， h 又决定了 K 镜的体积，这些都是相互关联的。K 镜的体积与光线经过 K 镜折返的光程有关，若要使得 K 镜体积尽可能小，则主光线在 K 镜内部所走的光程要尽可能小，即

$$B = \frac{h}{\sin 2\beta_1} + \frac{h}{\sin\left(\beta_3 + \frac{\pi}{2} - \alpha_1\right)} = \frac{h}{\sin 2\beta_1} + \frac{h}{\sin(2\beta_1 - 2\beta_2)} \rightarrow \min \quad (4.4)$$

要保证主光线的高度不变，在各面镜子倾角固定的情况下，起决定性因素的是三面镜子的相对位置。如图 4.3 建立一个二维直角坐标系来分析，把望远镜的主镜和副镜等同于一个口径为 A ，焦距为 f 的近轴面，面的中心设为原点，光轴所在位置设为 x 轴，与其垂直的方向设为 y 轴。主光线从近轴面到 KM1 的距离为 l_1 ，主光线

在 KM1 的入射点 O_2 与 KM3 的入射点 O_4 的距离为 l ，在 KM2 的入射点 O_3 到光轴的距离为 h 。

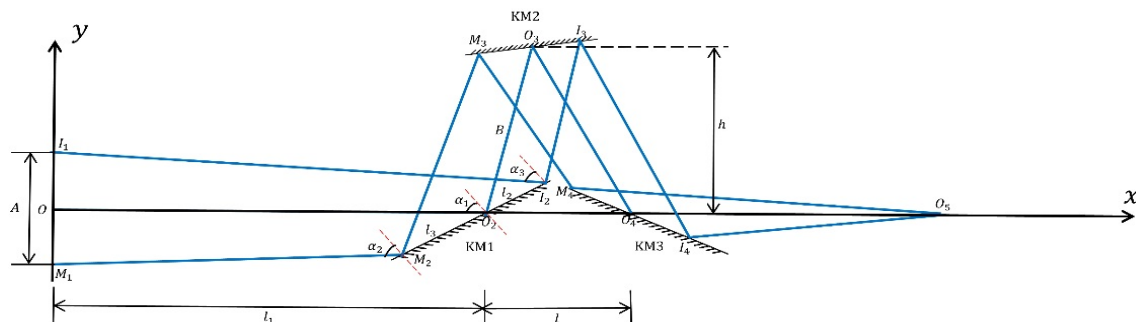


图 4.3 二维坐标系下的消旋 K 镜

通过图 4.3 可以得到一些直线方程和点的坐标，

$$O_3O_4 \text{ 的直线方程: } y-h = -\tan 2(\beta_1 - \beta_2) \cdot \left(x - \frac{h}{\tan 2\beta_1} - l_1 \right), \quad (4.5)$$

$$\text{KM3 的直线方程: } y = -\tan \beta_3 (x - m) \quad (4.6)$$

其中 m 为 KM3 在 x 轴上的截距。主光线的出射光线与入射光线高度一致，说明 KM2 的反射光线 O_3O_4 与 KM3 的交点 O_4 在 x 轴上，所以 m 必须满足

$$m = \frac{h}{\tan 2(\beta_1 - \beta_2)} + \frac{h}{\tan 2\beta_1} + l_1, \quad (4.7)$$

可得 KM1 与 KM3 在光轴上的距离：

$$l = \frac{h}{\tan 2(\beta_1 - \beta_2)} + \frac{h}{\tan 2\beta_1} \quad (4.8)$$

K 镜不遮挡光束的临界情况也就是在刚好满足 K 镜通光口径的情况下，又不会过长而遮挡光束。也就是 KM1 的最上端遮挡了入射光束最下端从 KM2 反射的光线 M_3M_4 ；KM3 的最上端遮挡了入射光束最上端从 KM1 反射的光线 I_2I_3 。即点 I_2 在直线上 M_3M_4 ，点 M_4 在直线 I_2I_3 上。

$$M_2M_3 \text{ 的直线方程: } y + l_3 \sin \beta_1 = \tan(2\beta_1 - \gamma) \cdot (x - l_1 + l_3 \cos \beta_1), \quad (4.9)$$

$$\text{KM1 的直线方程: } y = \tan \beta_1 \cdot (x - l_1). \quad (4.10)$$

其中 $l_2 = \frac{\sin \gamma \cdot (f - l_1)}{\sin(\gamma + \beta_1)}$ ， $l_3 = \frac{\sin \gamma \cdot (f - l_1)}{\sin(\beta_1 - \gamma)}$ ， $\gamma = \arctan \frac{A}{2f}$ ， γ 为视场角。求得临界情况，得到

KM1 与直线 M_3M_4 的交点坐标 (m_1, n_1) ，应该满足，

$$l_1 + l_2 \cos \beta_1 < m_1, \quad l_2 \cos \beta_1 < n_1. \quad (4.11)$$

同理，直线 I_2I_3 与 KM3 的交点 (m_2, n_2) 与 M_4 的坐标 (x_4, y_4) 应满足，

$$x_4 > m_2, \quad y_4 < n_2. \quad (4.12)$$

式 (4.10)、(4.11)、(4.12) 都是针对 K 镜设计要求对 K 镜的倾角、体积和口径进行优化, 给出限制条件。而在设计过程中, 已知望远镜整体光路的情况下, 需要先确定 K 镜各面镜子的倾角, 再根据以上的限制条件得到 K 镜各面镜子之间的距离, 最后 K 镜的口径就根据空间几何关系计算得到。

4.1.3 Zemax 对 K 镜的设计

虽然 K 镜口径的计算并不需要很难的方法, 但其解析式非常复杂, 尤其是多个视场的情况下, 就需要考虑每个视场的光线反射在镜面的情况。所以, 真正的设计都是靠光学设计软件完成的。常用的光学设计软件有 CodeV、Zemax、ASAP、Tracepro。本文采用 Zemax 光学设计软件, 它是一套综合性的光学设计仿真软件, 它能够建模、分析以及辅助光学系统的设计, 将实际光学系统的设计概念、优化、分析、公差以及报表集成在一起。

由于对称式 K 镜在结构和装调方面都较非对称式 K 镜简单, 本课题以设计倾角为 30° 的对称式 K 镜为例来说明 Zemax 对 K 镜的设计方法。为了简化望远镜的设计, 在 Zemax 中把望远镜的主镜和副镜等效于一个近轴面。这里利用 AIMS 望远镜设计方案, 把其主镜和副镜等效为口径 $A = 10^3 \text{mm}$, $f = 10^4 \text{mm}$ 的近轴面, 忽略 K 镜前的各个折轴反射镜, 把 KM1 的中心放在距近轴面 $l_1 = 9200.0 \text{mm}$ 处, KM1 和 KM3 与光轴的夹角 $\beta_1 = \beta_3 = 30^\circ$, KM2 平行于光轴。

在设计前, 需要输入系统数据。在“系统选项”中的系统孔径输入“孔径类型”为“入瞳直径”, 孔径值为 1000.0mm 。若只有一个中心视场 ($X=0.0, Y=0.0, \text{Weight}=1.0$), 则所有的光线都落在每面镜子的局部坐标系的坐标轴上。波长设置为 $0.55 \mu\text{m}$, 权重为 1.0 。设置完这些系统参数后, 在 Zemax “镜头数据”窗口中输入每个光学元件的位置、厚度、材料、口径和倾角, 如表 4.1 所示。

表 4.1 K 镜镜头数据 (中心视场)

表面	类型	标注	曲率半径	厚度	材料	膜层	半直径	圆锥系数	TCE × 1E-6	X轴心	Y轴心	倾斜X	倾斜Y	倾斜Z
0	物面	标准面	无限	无限			0.000	0.000	0.000					
1	光阑	近轴面		0.000			500.000	0.000	0.000	1.000E+004	1			
2		标准面	无限	9000.000			500.000	0.000	0.000					
3		标准面	无限	200.000			50.000	0.000	0.000					
4		坐标间断		0.000	-		0.000			0.000	0.000	60.000	0.000	0.000
5		标准面	无限	0.000	MIRROR		87.585	0.000	0.000					
6		坐标间断		-150.000	-		0.000			0.000	0.000	60.000 P	0.000	0.000
7		坐标间断		0.000	-		0.000			0.000	0.000	-30.000 V	0.000	0.000
8		标准面	无限	0.000	MIRROR		38.643	0.000	0.000					
9		坐标间断		150.000 P	-		0.000			0.000	0.000	-30.000 P	0.000	0.000
10		坐标间断		0.000	-		0.000			0.000	0.000	60.000 V	0.000	0.000
11		标准面	无限	0.000	MIRROR		54.741	0.000	0.000					
12		坐标间断		-500.000 M	-		0.000			0.000	0.000	60.000 P	0.000	0.000
13	像面	标准面	无限	-			1.418E-013	0.000	0.000					

若大概确定 K 镜在光路中的位置和倾角的情况下, 需要不断地调整 K 镜的三面镜子的相对位置和它们的口径大小, 这样做是为了满足不遮挡光束的条件。查看光线追迹和三维视图的结果不断调试镜面之间的相对位置, 即表面 6 和表面 9 的厚度值。同时, K 镜的口径通过 Zemax 自动得到, 即把“半直径”的“求解类型”设置为自动,

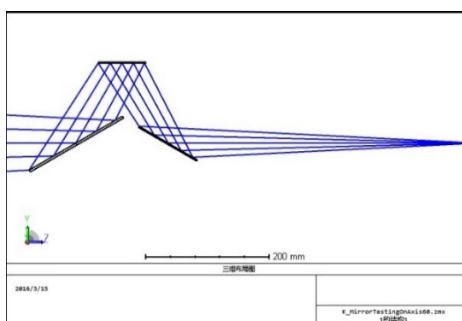
就可以得到由入射光束决定的 K 镜的最小口径。可以设置标准面 5、8、11 的孔径类型根据设计要求设置，这里把它设置为圆形。把表面 7 和表面 9 的倾斜 x 的角度设置为变量，这可根据评价函数的结果进行微调。

评价函数是 Zemax 为了优化光学系统设定的功能，它提供了一些操作数，根据设计需要达到的条件和要求，设定操作数的范围。本课题为了满足光束经过 K 镜后方向不变（各镜偏角转向角之和应为 90° ）和主光线经过 K 镜后高度不变，需要自定义评价函数。角度要求可以通过评价函数操作数“PMVA”和“OSUM”组合来实现，“PMVA”操作数是取参数值，“OSUM”操作数是一个求和运算符，所以把三面镜子的倾角之和要为 90° 。此外，还需要保证主光线的方向，则要求在最开始的入射面和出射面的光线位置始终在中心处，这可用操作数“RAGA”、“RAGB”、“RAGC”、“RAGX”、“RAGY”、“RAGZ”、“DIFF”组合来实现。前六个操作数分别是 X, Y, Z 轴三个方向的余弦值和坐标值，“DIFF”操作数是求差值。评价函数的设置如表 4.2 所示。

表 4.2 K 镜评价函数数据

类型	面	波	Hx	Hy	Px	Py	目标	权重	评估	贡献
1	BLNK	angle 180								
2	PMVA	4					0.000	0.000	60.000	0.000
3	PMVA	7					0.000	0.000	-30.000	0.000
4	PMVA	10					0.000	0.000	60.000	0.000
5	OSUM	2					90.000	1.000	90.000	0.000
6	BLNK	keep direction								
7	RAGA	3	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	RAGB	3	1	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
9	RAGC	3	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000
10	RAGA	3	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	RAGB	3	1	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
12	RAGC	3	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000
13	DIFF	8		11			0.000	1.000	0.000	0.000
14	DIFF	9		12			0.000	1.000	0.000	0.000
15	BLNK	keep position								
16	RAGX	2	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17	RAGY	2	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
18	RAGX	12	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	RAGY	12	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-2.842E...	0.000
20	DIFF	16		18			0.000	0.000	0.000	0.000
21	DIFF	17		19			0.000	1.000	2.842E...	100.000
22	BLNK									

图 4.4 是设计的 K 镜的三维图。通过观察三维图的结果能够确定主光线从 KM1 到 KM2 的最佳光程为 150mm，由于对称性，KM2 到 KM3 的最佳光程也为 150mm，即可以把 Zemax 中 KM1 和 KM2 的厚度设置为 150mm。

图 4.4 Zemax 设计的倾角为 30° 的对称式 K 镜三维图（中心视场）

在望远镜实际应用中，不可能只有中心视场的光入射到 K 镜上，所以多视场的情况是常态。如果是多视场的情况（视场数据如图 4.5 所示），入射在 KM1 上的光线范围比单一的中心视场要大一些，自动设置的口径值也会相应变大，而同样的三面镜子的相对位置也会有所改变，最后的数据如表 4.3 所示。

	X	Y	权重	VDX	VDY	VCX	VCY	VAN
<input checked="" type="checkbox"/>	1	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<input checked="" type="checkbox"/>	2	0.0	0.05	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<input checked="" type="checkbox"/>	3	0.0	-0.05	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<input checked="" type="checkbox"/>	4	0.05	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<input checked="" type="checkbox"/>	5	-0.05	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<input checked="" type="checkbox"/>	6	0.05	0.05	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<input checked="" type="checkbox"/>	7	0.05	-0.05	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<input checked="" type="checkbox"/>	8	-0.05	0.05	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<input checked="" type="checkbox"/>	9	-0.05	-0.05	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<input type="checkbox"/>	10	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<input type="checkbox"/>	11	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<input type="checkbox"/>	12	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0

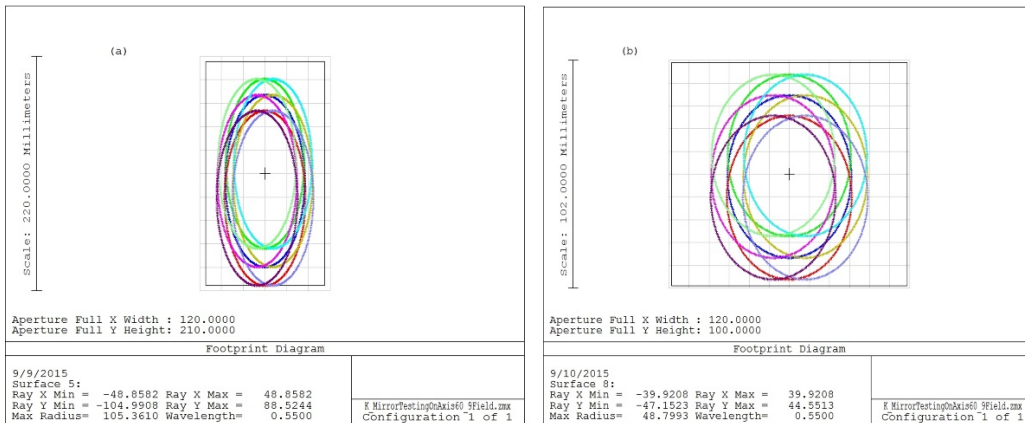
类型: 角度 归一化: 径向
 视场数目: 3 最大视场: 0.0 等面积视场

图 4.5 K 镜视场数据

表 4.3 K 镜在多视场情况下的镜头数据

表面: 类型	标注	曲率半径	厚度	材料	膜层	半直径	圆锥系数	TCE x 1E-6	X 偏心	Y 偏心	倾斜x	倾斜y	倾斜z
0	物面	标准面	无限	无限		无限	0.000	0.000					
1	光阑	近轴面	0.000			500.000	0.000	0.000	1.000E+004	1			
2		标准面	无限	9000.000		500.000	0.000	0.000					
3		标准面	无限	200.000		61.107	0.000	0.000					
4		坐标间断	0.000	-		0.000		-	0.000	0.000	60.000	0.000	0.000
5	(孔径)	标准面	无限	0.000	MIRROR	104.991	0.000	0.000					
6		坐标间断	-170.000	-		0.000		-	0.000	0.000	60.000	0.000	0.000
7		坐标间断	0.000	-		0.000		-	0.000	0.000	-30.000	0.000	0.000
8	(孔径)	标准面	无限	0.000	MIRROR	47.459	0.000	0.000					
9		坐标间断	170.000	F		0.000		-	0.000	0.000	-30.000	0.000	0.000
10		坐标间断	0.000	-		0.000		-	0.000	0.000	60.000	0.000	0.000
11	(孔径)	标准面	无限	0.000	MIRROR	68.477	0.000	0.000					
12		坐标间断	-460.000	M		0.000		-	0.000	0.000	60.000	0.000	0.000
13	像面	标准面	无限	-		12.341	0.000	0.000					

通过自动得到的口径大小和光线在每面镜子上的入射情况可以通过 Zemax 中的光线足迹图查看。光迹图可以显示任意面上叠加的光线的痕迹^[17]，镜面孔径的形状由之前标准面设置的孔径类型确定。图 4.6 是设计的 K 镜在多视场情况下的各面镜子的光迹图及视场数据。光迹图中给出了光线在 x 轴和 y 轴方向的最大最小坐标值，可以根据这个坐标值确定 K 镜中每面镜子的尺寸。



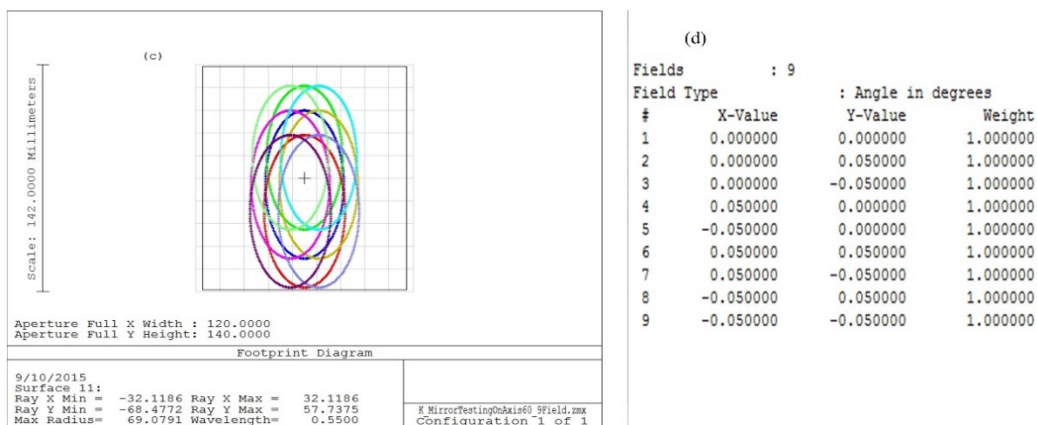
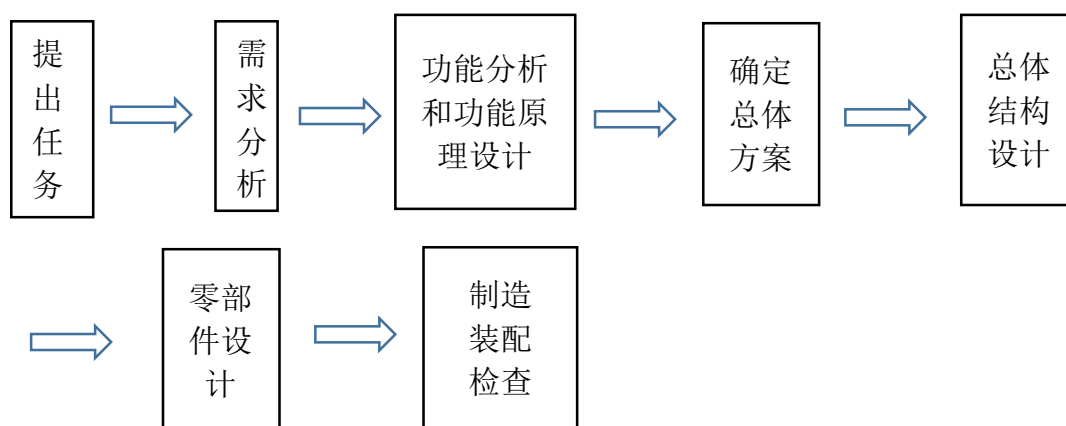


图 4.6 有视场时倾角为 30° 的对称式 K 镜的光迹图及视场数据：(a) KM1 的光迹图；(b) KM2 的光迹图；(c) KM3 的光迹图；(d) 视场数据

总之，利用 Zemax 设计软件设计 K 镜需要给出望远镜的设计方案，并且初步确定 K 镜在整体光路中所处的位置及 K 镜的倾角。把这些数据都输入到镜头数据中，再不断调整 K 镜之间的位置和镜面的尺寸，得到空间体积最优解，最后再利用软件自带的评价函数对 K 镜的倾角进行优化。

4.2 K 镜机械结构设计

光学结构的实现、K 镜的功能的实现和精度的控制都取决于机械结构的设计，所以机械结构占据着十分重要的位置。本文设计的 K 镜并不应用在具体的望远镜中，只是给出消旋方案，所以机械设计的整体布局并不紧凑，也没有为机械结构的功能分模块进行设计，但这里的机械设计方案仍可以为之后具体的有针对性的 K 镜设计提供思路参考。本文采用的 K 镜机械结构设计流程如下：



4.2.1 设计目标

本文的 K 镜设计的目的是研究 K 镜的消旋原理和给出消旋方案，主要针对其光

学结构设计和装调方案的设计。机械设计部分是为了实现装调实验的开展，不涉及详细的机械设计的知识，也没有进行有限元分析和动力学仿真。而且整个机械组成部分都是用已有的商业元件（见图 4.7 所示）构成：

1. K 镜的三面反射镜均为保护铝膜反射镜，其特点是波长范围较宽，反射率高，价格便宜，反射率受波长及入射角变化的影响小，清洁方便，可用含有有机溶剂的棉棒清洁。反射镜都采用圆形镜面，直径为 30mm，厚度为 4mm，面精度为 $\lambda/4$ ，反射率指标见表 4.4。

表 4.4 保护铝膜反射率指标

种类	200-400nm	400-700nm	700-1000nm	1-10um
Al+MgF ₂ (保护铝)	< 85%	≥ 85%	≥ 80	≥ 95%

2. 反射镜的支撑架是三维高稳定光学调整架（封闭压圈式），通光孔径为 28mm，调整角度 $\pm 3^\circ$ 。
3. 反射镜的位移调整用三维（二维）组合平移台实现，每个方向的行程为 13mm，灵敏度为 0.003mm，驱动方式为分厘卡，最小刻度为 0.01mm。
4. 高精度电动旋转台，材料为铝合金，转动比 180:1，8 细分开环分辨率 0.00125°，中心负载 30kg，通光口径 28mm。

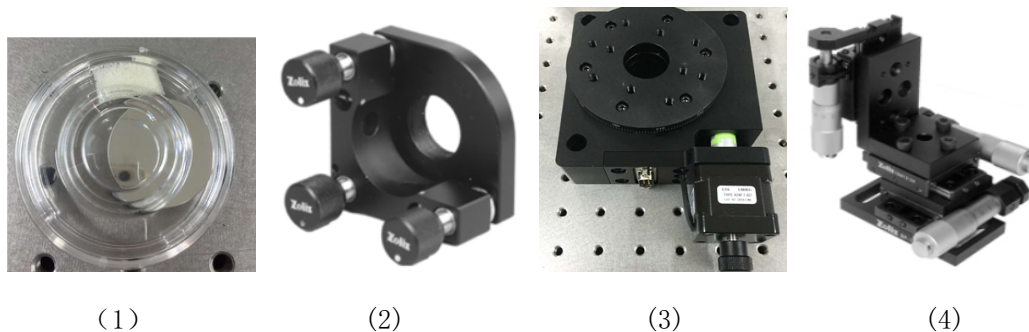


图 4.7 K 镜部分商用元件图 (1) 保护铝膜反射镜；(2) 三维调整架；(3) 电动旋转台；(4) 三维平移台

设计的目标就是在满足 K 镜消旋原理和设计要求的情况下，把这些已有的商用元件组合起来，并且把完成的 K 镜应用于实现后面的装调实验，实验并不与具体的望远镜系统光路相配合。

4.3.1 需求分析

K 镜的最终目的是能够使旋转的入射像经过 K 镜后的出射像保持静止，并且符合 K 镜的旋转速度为入射像旋转速度的一半且同向，实现 K 镜从 0° 到 180° 的旋转。所以全部结构的设计都要符合 K 镜消旋原理、消旋条件和设计要求：

1. K 镜三面镜子的倾角必须满足倾角条件： $\beta_1 = \beta_2 + \beta_3$ ；
2. 光束经过 K 镜后方向不变，即各镜偏角转向角（包括正负）之和应为 90 度；
3. 中心视场主光线经 K 镜后，一般要求高度不变；
4. 不能遮拦光束，特别是有视场的情况；
5. 在满足以上条件下，尽量减小 K 镜的体积。

以上的 K 镜光学设计的要求，决定的是一些固定的角度和距离，但是在实际加工和安装过程中，这些数值都会有一些偏差，所以需要添加一些可调节的结构。需要调节的部分主要有两大块，一个是位移台和底座的调节，二是 K 镜的平面反射镜的调节。若是针对某个具体的望远镜系统设计的 K 镜中，需要保证望远镜的光轴与旋转台的光轴共线，由于望远镜系统的光轴是固定的此时只能调节旋转台的位置。但本论文的 K 镜整体是放在光学平台上的，可以保证底座是水平放置的，所以不需要调节旋转台的角度和位置。

机械结构需要实现的功能有：

1. 保证 K 镜三面镜子的倾斜角度；
2. K 镜三面镜子的三维位移的调节和角度的调节；
3. 镜架和位移台的连接，位移台和旋转台的连接，以及旋转台与底座的连接。

其中，第二个功能可以通过已有的镜架调整架和三维平移台实现。其余的就需要通过机械结构设计来完成。

4.2.3 设计方案研究

机械设计方案决定了整个 K 镜的零部件的设计、加工和组装。K 镜设计首先需要考虑的情况是整个望远镜系统的要求，比如 K 镜放置的位置和所容许的 K 镜的体积。其中最重要的是 K 镜的放置方式。K 镜有两种放置方式：水平放置和立式放置。立式放置解放了 K 镜系统的受力状况，旋转台的轴承只承担了轴向方向的重量，而且随着 K 镜的旋转，旋转台的受力状况是恒定不变的，同时每面反射镜的受力状况也是恒定的。但这种放置方式的缺点是，需要有额外的立式平台支撑 K 镜系统，而且后续 K 镜的装调也会由于位置的关系变得更加困难。水平放置方式需要承担很大的倾覆力矩，反射镜的受力状况也随着 K 镜的旋转而改变。但是水平放置可以直接至于光学平台上，易于 K 镜的安装和调节。由于本论文不涉及具体的望远镜系统 K 镜的设计，只提供消旋方案，所以 K 镜采用水平放置的方式，这样易于 K 镜装调和装调光路的实现。

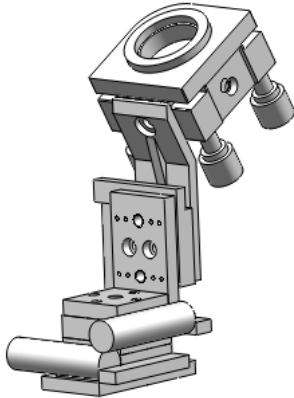
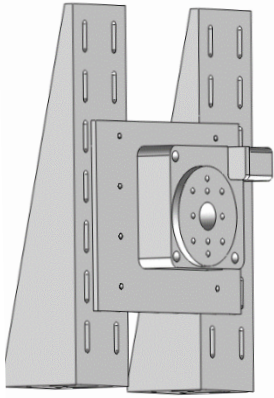
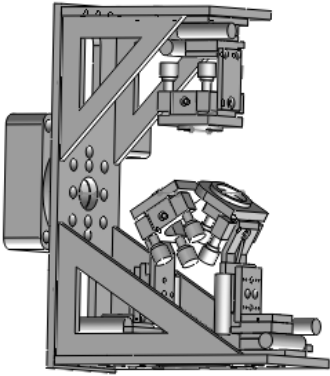
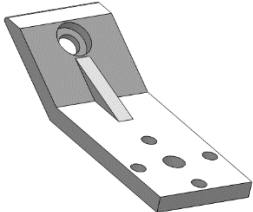
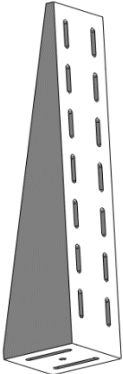
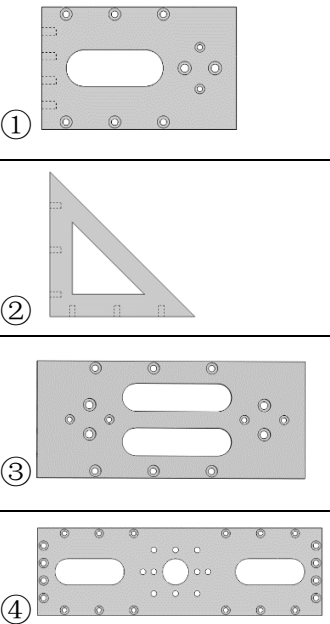
	表面:类型	标注	曲率半径	厚度	材料	膜层	半直径	圆锥系数	TCE × 1E-6	X偏心	Y偏心	倾斜X
0	物面	标准面	无限	无限			0.000	0.000	0.000			
1	光阑	标准面	无限	0.000			7.500 U	0.000	0.000			
2		标准面	无限	100.000			7.500 U	0.000	0.000			
3		标准面	无限	400.000			7.500 U	0.000	0.000			
4		坐标间断		0.000	-		0.000		-	0.000	0.000	60.000
5	(孔径)	标准面	KM1	无限	0.000	MIRROR	15.000 U	0.000	0.000			
6		坐标间断		35.000	-		0.000		-	0.000	0.000	-60.000
7		坐标间断		0.000	-		0.000		-	0.000	60.000	0.000
8		坐标间断		0.000	-		0.000		-	0.000	0.000	90.000
9	(孔径)	标准面	KM2	无限	0.000	MIRROR	15.000 U	0.000	0.000			
10		坐标间断		0.000	-		0.000		-	0.000	0.000	-90.000
11		坐标间断		35.000	-		0.000		-	0.000	-60.000	0.000
12		坐标间断		0.000	-		0.000		-	0.000	0.000	120.000
13	(孔径)	标准面	KM3	无限	0.000	MIRROR	15.000 U	0.000	0.000			
14		坐标间断		100.000	-		0.000		-	0.000	0.000	-120.000
15	像面	标准面		无限	-		8.122	0.000	0.000			

图 4.8 K 镜光学设计镜头数据

由于已有的光学元件的限制，在元件的尺寸、大小已经固定的情况下，再来设计 K 镜的光学结构。镜头数据见图 4.8，K 镜采用对称式结构，KM1 与 KM3 相距 70mm，两面镜子与 K 镜光轴的夹角为 30° ，KM2 平行于 K 镜光轴，距光轴 60mm。

在确定完 K 镜的光学参数之后，机械设计的主要任务就是各个部分的连接和固定。由于已有的光学元件的重量较轻，所以事先不进行力学分析，直接根据工程经验来进行机械设计。机械设计采用三维设计软件来完成，常用的三维设计软件有 AutoCAD、ProE、UG、Solidworks 等。这类软件可以利用一些基本的几何元素，通过一系列几何操作，如平移、旋转、拉伸等来构建复杂的几何物体。鉴于 Solidworks 能够提供不同的设计方案、减少设计过程中的错误，所以本论文选用其来进行机械设计。K 镜各部分机械连接设计方案如表 4.5 所示。

表 4.5 K 镜机械结构方案

功能描述	反射镜镜架与位移台的连接	旋转台底座	平移台与旋转台的连接
设计方案			
连接结构			
结构说明	<p>连接板保证反射镜与 K 镜光轴有 30° 的夹角, 添加支撑筋, 保证角度不易形变。通过 $\phi 4.5$ 的通孔与三维位移台的连接, M6 的螺纹孔与镜架连接。</p>	<p>旋转台固定在一个平板上, 平板作为旋转台与固定支撑架的连接板, 两个固定支撑架分别固定在光学平台上, 支撑架自重 1.75Kg。</p>	<p>连接板连接平移台和旋转台, 使镜面的距离满足光学设计要求。添加多个支撑连接板②, 保证 K 镜不易形变。</p>
材料及其特征	<p>铝合金 2A12(LY12): 密度 $2700\text{kg}/\text{m}^3$, 热导率 $165\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, 比热 $921\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 屈服强度 ($20^\circ\text{C}$) $380/\text{MPa}$, 抗拉强度 (20°C) $520/\text{Mpa}$^[33]。经过表面氧化发黑处理。</p>		

4.4 控制系统

对于地平式望远镜来说，像旋速度是一个变值，而对于赤道式望远镜来说，像旋速度为一常数。K 镜的控制系统与消旋速度密切相关。很多大型望远镜都会在分析完系统的像旋规律后，研究并开发特定的 K 镜消旋控制系统。本论文的控制系统是为研究 K 镜的装调方案而服务的，有效的装调能够达到消旋目的，并尽量减小误差。装调实验中采用 K 镜的运动方式就是绕着其光轴匀速旋转，这样既方便观察像点的运动轨迹，也同样符合赤道式望远镜的消旋 K 镜的运动方式。本课题采用图 4.7 (3) 中的电控旋转台，它通过步进电机驱动，实现角度调整自动化。应用高紧密高刚性轴承保证旋转精度高，而且承载大，运行平稳，竖直使用稳定性好。所以对于水平式放置的 K 镜，旋转台即使垂直方向受力，也不会产生影响。旋转台面外圈雕有刻度，直观方便。具体参数见表 4.6 所示。

表 4.6 电控旋转台技术规格

台面直径	通光口径	传动比	分辨率	重复定位精度
100mm	28mm	180:1	0.00125°	< 0.005°
最大速度	步进电机	中心最大负载	径向跳动	轴向跳动
125° /sec	42M-1.8D	30Kg	15um	15um

旋转台的控制器也采用商用的控制器，为二相步进电机。该控制器的速度、长度和加速度可任意设置。控制器参数采用的单位为脉冲数量。驱动器显示细分数默认为 1600。通过以下计算公式可以得到旋转台实际旋转的角度与控制器显示数值的关系：

$$\text{脉冲当量 (度/脉冲当量)} = 360^\circ / (\text{步进电机每转整步数} * \text{细分数} * \text{传动比})$$

$$\text{实际移动速度 (度/s)} = \text{设置速度 (脉冲当量/秒)} * \text{脉冲当量 (度/脉冲当量)}$$

$$\text{步进机每转整步数} * \text{细分数} = \text{每转脉冲数} = \text{驱动器显示细分数}$$

由于旋转运动单一，也不需要设定加速度，所以对于本课题使用的控制器其旋转台实际移动速度等于设置的脉冲数*0.00125。

4.4 本章小结

本章内容是为 K 镜提供设计方案。K 镜的设计可以划分为三大部分：光学设计、机械设计和控制系统设计。本论文重点研究 K 镜的光学设计。根据 K 镜和消旋棱镜的相似性，通过对消旋棱镜的分析，得到 K 镜光学设计需要满足的条件。同时，实际应用中对 K 镜也有一定的约束条件。在望远镜系统光路设计的基础上，根据这些必要条件和优化条件，并且利用 Zemax 光学设计软件就可以完成 K 镜的光学设计。而机械结构是实现光学目的的重要支撑，角度调节和位移调节的精度、K 镜的镜面

所承受的压力、整个支撑结构的形变都是机械结构需要考虑的问题。但由于本论文并未研究具体的 K 镜的机械结构，其旋转电机和镜面调节都是利用现有的商业元件实现的，所以论文中完成的 K 镜不是针对某一具体的望远镜设计，而是为了验证 K 镜装调方案的准确性。K 镜的控制系统也是采用商用的控制器，实现 K 镜的高精度匀速旋转。K 镜总体设计方案效果如图 4.9 所示。

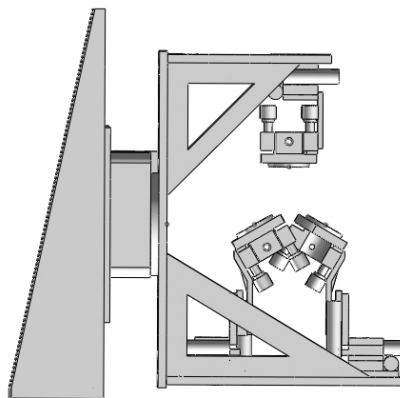


图 4.9 K 镜的 Solidworks 建模示意图

第五章 消旋 K 镜误差分析

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，为整个系统的加工、装调和使用提供了依据^[34-35]。误差分配涉及到每个元件，所以 K 镜作为一个望远镜重要的组成部分，分析其误差也是望远镜整体误差分配时必要的一步工作。而且，文中第四章对 K 镜的设计方案都是理想情况，实际上在 K 镜加工和组装的过程中都会产生误差。这些误差会导致 K 镜没有预期的消旋效果，无法达到使用要求，甚至对整个望远镜光路产生影响，降低望远镜的分辨率。

如果没有 K 镜的误差对成像的影响数据，就无法在加工、装调和使用时进行有针对性的修正。所以，在 K 镜加工装调之前就对其进行误差分析，这样既可以预先知道 K 镜在可允许的范围的的误差值是多少，也可以给出具体的加工精度和装调精度，为之后的工作给出指导意见。

5.1 K 镜误差来源及分析方法

5.1.1 K 镜误差来源

对于一个光机电系统来说，其误差可以分为静态误差和动态误差。静态误差包括加工和装调误差。其中加工误差又包括光学元件的面形、曲率半径、厚度误差，机械结构的加工误差，电控部分所选用的编码器的分辨率和精度、驱动方式。装调误差包括各元件相对之间的偏心、间距、倾斜误差。动态误差包括运动中各个元件偏差、图像抖动误差、周围环境变化所造成的误差。

K 镜也存在静态误差和动态误差，但由于动态误差不可控，所以 K 镜能够分析的误差来源有：（1）各平面反射镜的平面质量和面形精度，其对像质产生影响；（2）各平面反射镜的偏轴误差；（3）各平面反射镜相互间的位置误差；（4）旋转台和控制器的精度。平面反射镜的平面质量、旋转台和控制器的精度都取决于加工生产商，而其面形精度又受制于镜子的支撑结构。本文平面反射镜的支撑结构为三维高稳定镜架。在假设这种镜面支撑结构使得面形精度达到要求的前提下，本章能够分析的误差来源为 K 镜的装调误差，也就是偏轴和位置误差进行分析。装调需要使得 K 镜具有消旋的功能，所以必须满足消旋条件。总的来说，消旋条件可以分为两个，一个是三个平面反射镜的位移和角度达到设计要求，第二个是 K 镜的光轴、旋转轴和望远镜的光轴重合。所以本章从这两方面对 K 镜进行误差分析。

这两种误差可以有两种方法：（1）把 K 镜投影在一个空间直角坐标系中，求出误差的解析式，即计算出位移和角度的偏差所造成的影响；（2）通过 Zemax 光学设

计软件或者 MATLAB 进行误差分析。

5.1.2 K 镜的平移及偏转误差分析

对 K 镜中的每个镜面的平移与偏转误差可采用第一种方法与第二种方法相结合。一个平面镜有六个自由度。在建立如图 5.1 所示的空间直角坐标系后,这六个自由度可以分别描述为在 x 、 y 、 z 轴平移和以 x 、 y 、 z 为轴的旋转(规定方向:顺时针为负)。为了计算方便,本论文只对对称式 K 镜进行误差分析。

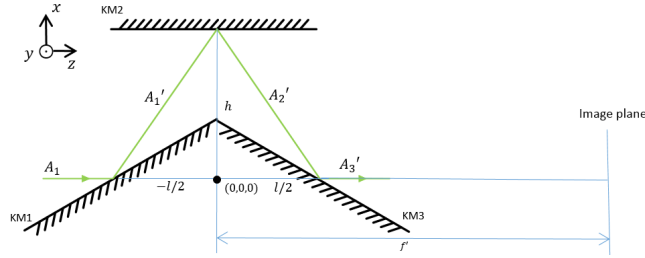


图 5.1 K 镜空间直角坐标系示意图

当 K 镜静止时,可以得到每个镜面所在的直线方程和入射的主光线的方程:

$$\text{KM1 所在的平面方程为: } x \cdot \cos\beta - (z + l/2) \cdot \sin\beta = 0$$

$$\text{KM2 所在的平面方程为: } x - h = 0$$

$$\text{KM3 所在的平面方程为: } x \cdot \cos\beta + (z - l/2) \cdot \sin\beta = 0$$

$$\text{主光线入射在 KM1 的直线方程: } \begin{cases} x = 0 \\ y = 0 \\ z = 1 \end{cases}$$

通过计算得到 A_2' 在 KM3 上的交点坐标 (x_3, y_3, z_3) , 以及 A_3' 的向量矩阵 $[A_{3x} \ A_{3y} \ A_{3z}]^T$, 就可以得到最后出射光线的直线方程, 最后求得直线在像面 f' 处的交点, 即主光线的偏移量:

$$E_x = \frac{f' - z_3}{A_{3z}} \cdot A_{3x} + x_3 \quad (5.1)$$

$$E_y = \frac{f' - z_3}{A_{3z}} \cdot A_{3y} + y_3 \quad (5.2)$$

在建立的空间直角坐标系中,与分析 K 镜消旋原理类似的方法。为了方便计算,可通过分析主光线来计算像的偏移量。跟据旋转矩阵的方法和空间几何关系,可以求出主光线每次反射后的空间直线方程,最后可以得到像面的入射点的坐标。这样就得到了偏差量的具体解析式,最后采用均方根来统计这些误差量产生的影响。在计算角度误差时需要注意:(1)规定角度旋转方向的正负;(2)各平面镜绕各坐标轴方向旋转,确定平面镜的旋转点(旋转点的旋转需要根据平面镜的支撑方式决定),以及 K 镜整体的旋转点,(具体解析式计算见附录 1)。

经过分析可以知道,我们并不需要计算所有的误差,其中一些位置或者角度的变化对最终的图像位置并没有影响。对成像结果不产生影响的误差有 5 个,分别是

(以 Zemax 上默认的全局坐标系为准): KM1 在 x 方向的平移, KM2 在 x 方向的平移, KM2 在 z 方向的平移, KM2 绕 x 轴的旋转, KM3 在 y 方向的平移。

通过解析式, 可以分析单个误差能够看出误差量与像的偏移量的关系。在实际安装过程中, 只有一种误差出现的情况是很少的, 大部分是多种误差一起出现的情况, 这样可能有某两个误差或几个误差相互抵消的情况, 这样需要把所有误差综合在一起考虑。Zemax 软件很好地解决了这个问题, 它提供了敏感度分析和蒙特卡罗分析。敏感度分析可以计算在误差范围中的最大值和最小值对最终结果的影响, 由此可以选出对结果影响较大的误差, 即比较敏感的误差。

单独研究某一误差对整个 K 镜的影响意义不大。因为在实际操作过程中, 误差来源是所有可能误差的一个综合, 例如在 x 方向的平移与 z 方向的平移可能会发生相互减弱的效果。而蒙特卡罗分析能够考虑所有的误差, 这种方法亦称为随机数模拟方法, 有时也称作随机抽样技术或统计试验方法, 它的基本思想是, 为了求解数学、物理、工程技术以及生产管理等方面的问题, 首先建立一个概率模型或随机过程, 使它的参数等于问题的解, 然后通过对模型或过程的观察或抽样试验来计算所求参数的统计特征, 最后给出所求解的近似值^[36]。在 ZEMAX 中, 蒙特卡罗分析是让误差值按一定的分布随机取值, 设置产生模拟的个数, 通过大量的模拟结果可以得到最后像的偏移量的分布情况。

利用求解解析式和 ZEMAX 自带的敏感度分析功能就可以解决 K 镜中每个平移和偏转误差的特征和规律。同时利用蒙特卡罗分析能够更加全面地分析所有平移和偏转误差的综合误差情况。这三种方法可以很好解决 K 镜的平移和偏转误差的误差分析。

5.1.3 K 镜三轴间误差分析

K 镜消旋条件之一是主光路光轴 (望远镜光轴)、K 镜旋转轴与 K 镜光轴三轴合一。K 镜的光轴是指当沿着此轴入射时, 入射光线与出射光线共线, 所以 K 镜的光轴为一平面。望远镜系统的光轴由其光学设计决定。K 镜旋转轴是其机械旋转台的中心轴。研究这类误差, 可以把 K 镜作为一个整体, 所以 K 镜三轴的装调类似于 Dove 棱镜的装调^[37-40]。对于这种误差来源可以分情况来解决: (1) 三轴相互平行, 但是不重合; (2) 三轴不平行, 相互之间有夹角。

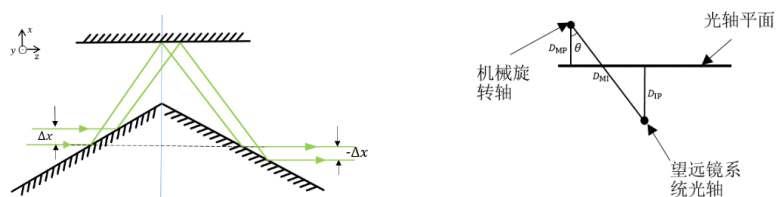


图 5.2 (1) 望远镜主光轴与 K 镜光轴及旋转轴的偏移 (2) 主光轴、K 镜光轴、旋转轴偏移

第一种情况是假设三种之间互相平行，只有平移误差。建立坐标系，如图 5.2 所示。图 5.2 (1) 表示当 K 镜光轴与旋转轴共线，但望远镜的光轴，即主光线与 K 镜光轴发生偏移 Δx ，则出射光线偏移 $-\Delta x$ ，而在 y 轴方向的偏移不变。若仅是入射光 y 坐标的变化不影响出射光线的偏移大小，而只是改变出射光线相对于 K 镜的位置。图 5.2 (2) 表示当三轴都不共线的情况，此时选取 xy 平面分析。可以得到^[41-42]：

$$\cos\theta = (D_{MP} + D_{PI}) / D_{MI} \quad (5.3)$$

由图 5.2 (1) 的分析可以知道出射光线距 K 镜光轴的距离等于入射光线距光轴的距离。所以当三轴平行不重合的情况下，出射光线与入射光线的距离为：

$$\rho = 2D_{PI} = 2(D_{MI} \cos\theta - D_{MP}) \quad (5.4)$$

其中 D_{MI} 为旋转轴与望远镜光轴的距离， D_{MP} 表示旋转轴与 K 镜光轴的距离， θ 表示 K 镜旋转的角度。式 (5.4) 是 Pascal 蜗线数学表达式的一种。

当 D_{MI} 与 D_{MP} 取值不同时，会出现三种特殊调整的情况。图 5.3 所示的曲线表示在这三种情况下像点的运动轨迹。这三种特殊情况在判断和测量特定的平移调整误差时作为判断工具会很有用：

- 当 $D_{MP} = 0$ 时，即 K 镜光轴与机械旋转轴共线，但旋转轴与望远镜光轴不共线。 $\rho = 2D_{MI} \cos\theta$ ，运动轨迹如图 5.3 (1) 所示，当 K 镜旋转一周时，出射光线画的是两圈半径为 D_{MI} 的圆，并且有两次与入射光线共线，最大误差为 $2D_{MI}$ 。这种情况下，应将 K 镜和旋转平台相对于望远镜光轴平移，使出射光线的转动减小到允许的误差范围内。
- 当 $D_{MI} = 0$ 时，入射主光线与旋转轴共线，但 K 镜光轴与它们有平移。 $\rho = 2D_{MP}$ ，此时出射光线的运动轨迹为圆见图 5.3 (2)，中心位于主光线上，半径为 $2D_{MP}$ 。K 镜每旋转一周，出射光线只画一圈，并且与入射光线不共线。
- 当 $D_{MI} = D_{MP}$ 时，旋转轴与望远镜光轴的距离等于其与 K 镜光轴的距离， $\rho = 2D_{MP}(\cos\theta - 1)$ 。出射光线的运动轨迹如图 5.3 (3) 所示。

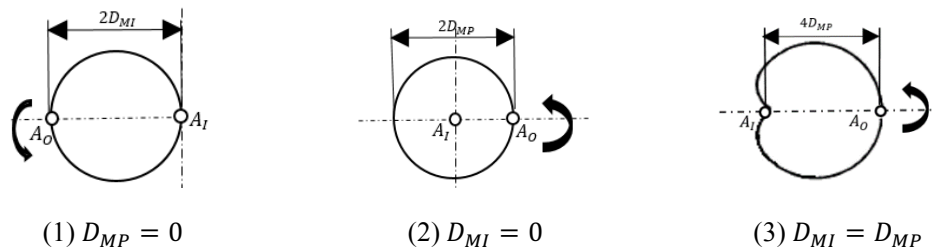


图 5.3 特殊情况下像点旋转轨迹

三轴间的角度偏差产生的影响类似于以上讨论的位移误差，产生类似的转动图

像。只要用角度量代替原来的线性量即可：

- a. K 镜光轴与旋转轴共线，望远镜光轴与旋转轴间夹角为 α ，则主光线的出射光线也为 α ，K 镜旋转一周，出射光线在像平面画两圈。
- b. 望远镜光轴与旋转轴重合，K 镜光轴与旋转轴夹角为 α 。则出射光线与旋转轴夹角为 2α ，K 镜旋转一周，出射光线在像平面画一圈。

实际情况远比以上的情况要复杂得多，往往是多种因素同时影响，各种误差同时出现，所以很难从出射光的轨迹中看出是哪种误差在起作用。在实际曝光时间内（1 小时），对于地平式望远镜而言，望远镜光轴与 K 镜光轴在角度小于 1arcminute，目标星体的地平高度小于 80° 的时候，这个误差产生的影响是可以忽略的^[43]。

5.2 实例分析

利用上述两种方法对图 4.6 中 Zemax 所设计的 K 镜进行误差分析，得到误差的具体解析式如表 1 至表 4 所示（坐标系与 Zemax 默认坐标系一致）。绕轴的旋转误差计算是以主光线在每面镜子的入射点（镜面的几何中心）为旋转点。

表 5.1 图 4.4 中 K 镜的位移误差解析式

Tolerance(mm)	KM1	KM2	KM3
Displacement in x-direction(Δx)	0	0	0
Displacement in y-direction(Δy)	$E_{1y} = 1.5\Delta y$	$E_{2y} = -\Delta y$	$E_{1y} = 1.5\Delta y$
Displacement in z-direction(Δz)	$E_{1y} = -0.866\Delta z$	0	$E_{1y} = 0.866\Delta z$

表 5.2 图 4.4 中 KM1 的旋转误差解析式

Rotation	The Displacement of Chief Ray on Image Plane
Rotation around x-axis(ε_x)	$E_{1y} \approx \frac{259.8 \tan(60^\circ + 2\varepsilon_x) - 450}{3 \tan(60^\circ + 2\varepsilon_x) - 1.732} + \tan 2\varepsilon_x \cdot \left[575 + \frac{150 \tan(60^\circ + 2\varepsilon_x) - 433}{2 \tan(60^\circ + 2\varepsilon_x) - 0.58} \right]$
Rotation around y-axis(ε_y)	$E_{1x} \approx \frac{75 \sin 2\varepsilon_y}{1.5 \cos \varepsilon_y + 0.5 \cos^2 \varepsilon_y - 1} + \frac{\sin 2\varepsilon_y \cdot \left(\frac{112.5 \cos \varepsilon_y + 112.5 \cos^2 \varepsilon_y - 225}{0.75 \cos \varepsilon_y + 0.25 \cos^2 \varepsilon_y - 0.5} + 500 \right)}{3 \cos \varepsilon_y - \cos^2 \varepsilon_y + 2}$
Rotation around z-axis(ε_z)	$E_{1x} \approx \frac{97.4 \cos \varepsilon_y + 97.4 \cos^2 \varepsilon_y - 194.8}{1.5 \cos \varepsilon_y + 0.5 \cos^2 \varepsilon_y - 1} + 216.5$ $E_{1y} \approx \frac{259.8 \sin \varepsilon_z}{1.5 \cos \varepsilon_z - 0.5} + \frac{400.3 \sin \varepsilon_z}{0.75 \cos \varepsilon_z + 0.25}$ $E_{1y} \approx \frac{259.8(\cos \varepsilon_z - 1)}{3 \cos \varepsilon_z - 1} + \frac{800.8(\cos \varepsilon_z - 1)}{3 \cos \varepsilon_z + 1}$

表 5.3 图 4.4 中 KM2 的旋转误差解析式

Rotation	The Displacement of Chief Ray on Image Plane
Rotation around x-axis(ε_x)	$E_{2y} \approx \frac{75 \cos(4\varepsilon_x - 90^\circ) + 500 \cos(4\varepsilon_x - 30^\circ) - 129.9 \sin(4\varepsilon_x - 90^\circ) - 562.92}{\sin(4\varepsilon_x - 30^\circ) - 0.5}$
Rotation around y-axis(ε_y)	0
	$E_{2x} \approx -\frac{\sin 2\varepsilon_z \cdot (779.4 \sin^2 2\varepsilon_z - 2987.7 \cos 2\varepsilon_z + 736.1)}{(3 \sin^2 2\varepsilon_z - 2) \cdot (3 \cos 2\varepsilon_z - 1)}$
Rotation around z-axis(ε_z)	$E_{2y} \approx \frac{64.95 \cdot \cos 2\varepsilon_z - 64.95}{1.5 \cos 2\varepsilon_z - 0.5} - \frac{1.732 \sin^2 \varepsilon_z \cdot \left(\frac{75}{1.5 \cos^2 \varepsilon_z - 0.5} - 575 \right)}{3 \sin^2 2\varepsilon_z - 2}$

表 5.4 图 4.4 中 KM3 的旋转误差解析式

Rotation	The Displacement of Chief Ray on Image Plane	
Rotation around x-axis(ε_x)	$E_{3y} = 500 \tan 2\varepsilon_x$	
Rotation around y-axis(ε_y)	$E_{3x} \approx \frac{125 \sin 2\varepsilon_y - 750 \sin \varepsilon_y}{1.5 \cos \varepsilon_y - 0.5 \cos^2 \varepsilon_y + 1}$	$E_{3y} \approx \frac{433(\cos \varepsilon_y - 1)}{1.5 \cos \varepsilon_y - 0.5 \cos^2 \varepsilon_y + 1}$
Rotation around z-axis(ε_z)	$E_{3x} \approx \frac{433 \sin \varepsilon_z \cdot (1.5 \cos \varepsilon_z - 0.5)}{0.75 \cos \varepsilon_z + 0.25}$	$E_{3y} \approx \frac{433(\cos \varepsilon_z - 1) \cdot (1.5 \cos \varepsilon_z + 1)}{0.75 \cos \varepsilon_z + 0.25}$

由以上误差解析式可以看出平移误差都是线性的。而旋转误差通过作图（见图 5.4）可以看出在设定的误差范围内，像的偏移量也是线性变化的，即镜面的偏转量越小，像的偏移量也越小。并且在 x 轴和 z 轴的偏转造成的像偏移比 y 轴大。因此在 K 镜装调时，应尽量使像点轨迹的半径减小。

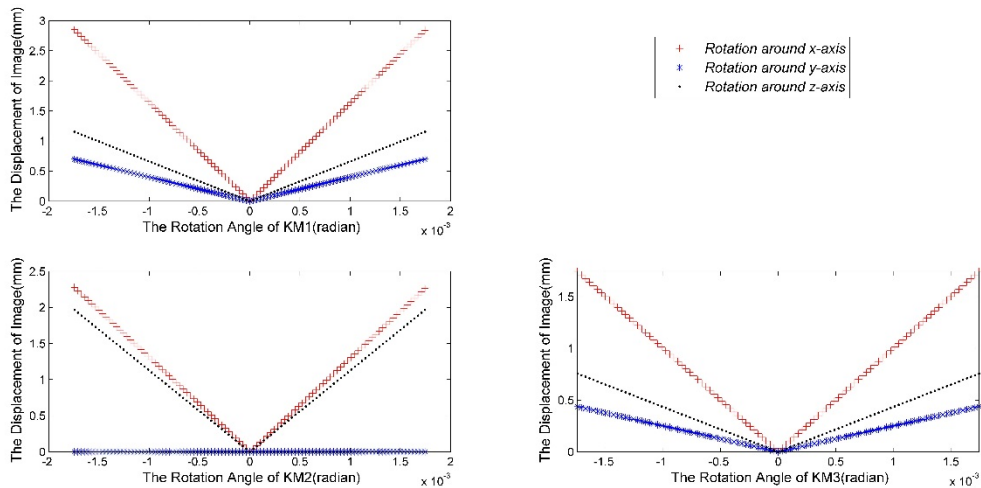


图 5.4 镜面偏转角度与像偏移量的关系

同样，用 Zemax 进行敏感度分析和蒙特卡罗分析，根据天文望远镜的精度要求，平移误差范围设定为 $-10\mu\text{m}$ 至 $10\mu\text{m}$ ，偏转误差范围设定为 $-5''$ 至 $5''$ 。分析结果见表 5.5。误差分析所选用的标准值是主光线偏离视场中心的距离，这可以通过设定评价

函数来作为标准值,评价函数中利用操作数“REAX”、“REAY”和“QSUM”组合完成,也可以用“RAID”计算从 K 镜出射的光线与中心轴的偏移角度。KM1 与 KM3 在 z 坐标轴上的平移可以转化为镜子厚度的变化,所以用操作数“TTHI”代替。而它们在 y 轴上的平移用操作数“TEDY”表示。“TETX”、“TETY”、“TETZ”分别是代表镜子在 x,y,z 方向的偏转。蒙特卡罗的运行次数为 10000 次,误差统计用正态分布。用 Zemax 计算单个误差的结果与解析式的结果经过对比,两者基本是吻合的,这样可以用解析式来验证 Zemax 的分析结果。

表 5.5 关于主光线偏转位移的 Zemax 误差分析结果 (距离单位: mm, 角度单位: degree)

Sensitivity Analysis:						
Type	Surface Number	Minimum		Maximum		
		Value	Criterion	Value	Criterion	
TTHI	3	7	-0.01000000	0.00867082	0.01000000	0.00864969
TEDY	4	6	-0.01000000	0.01498943	0.01000000	0.01501057
TEDY	8	10	-0.01000000	0.01001057	0.01000000	0.00998943
TTHI	11	14	-0.01000000	0.00864969	0.01000000	0.00867082
TEDY	12	14	-0.01000000	0.01498943	0.01000000	0.01501057
TETY	4	6	-0.00138900	0.00969705	0.00138900	0.00969705
TETZ	4	6	-0.00138900	0.01679578	0.00138900	0.01679578
TETX	5	5	-0.00138900	0.03879875	0.00138900	0.03877762
TETY	8	10	-0.00138900	1.0568E-005	0.00138900	1.0568E-005
TETZ	8	10	-0.00138900	0.02729314	0.00138900	0.02729314
TETX	9	9	-0.00138900	0.03150483	0.00138900	0.03152597
TETY	12	14	-0.00138900	0.00606066	0.00138900	0.00606066
TETZ	12	14	-0.00138900	0.01049737	0.00138900	0.01049737
TETX	13	13	-0.00138900	0.02425318	0.00138900	0.02423205

Monte Carlo Analysis:			
Number of trails: 10000			
Initial statistics: Normal Distribution			
Nominal: 1.0568E-005			
Mean: 0.02746723			
Std Dev: 0.01515418			
98% > 0.06432967	90% > 0.04835819	80% > 0.03960656	
50% > 0.02525034	20% > 0.01413718	10% > 0.00978158	2% > 0.00400915

从图 5.5 中看出,敏感度分析的结果可以知道 K 镜的三面镜子在 x 轴和 z 轴的偏转造成的误差较大,这和图 5.4 所示的结果一致。从蒙特卡罗分析中可以得知,有些在叠加之后会加大最后的误差结果,98%的偏差是在 $64.330\mu\text{m}$ 以内,最大的像偏移能达到 $103.018\mu\text{m}$ 左右。从结果可知,K 镜装调精度要求很高。为了消旋精度满足最后在 CCD 的像移达到 2 个像元大小的要求,可以有三种方法:1.不断提高 K 镜机械结构的调节精度;2.在 K 镜与 CCD 之间添加一些缩小成像的准直透镜;3.K 镜

后放置补偿镜子摆动的摆镜。而表 5.6 中给出了出射光线的偏转角度，K 镜的偏转角度可以作为其独立的一个参数，而不需要知道后续设备的具体位置而存在。表中的敏感度分析说明，位移的改变量并不会引起出射光线角度的变化，只是光线产生了平移，而 K 镜的偏转却会引起出射光线偏转，最坏的偏转能达到约 26arcsecond。

表 5.6 关于主光线偏转角度的 Zemax 误差分析结果（距离单位：mm，角度单位：degree）

Sensitivity Analysis:						
Type	Surface Number	Minimum		Maximum		
		Value	Criterion	Value	Criterion	
TTHI	3	7	-0.01000000	0.00000000	0.01000000	0.00000000
TEDY	4	6	-0.01000000	0.00000000	0.01000000	0.00000000
TEDY	8	10	-0.01000000	0.00000000	0.01000000	0.00000000
TTHI	11	14	-0.01000000	0.00000000	0.01000000	0.00000000
TEDY	12	14	-0.01000000	0.00000000	0.01000000	0.00000000
TETY	4	6	-0.00138900	0.00069450	0.00138900	0.00069450
TETZ	4	6	-0.00138900	0.00120291	0.00138900	0.00120291
TETX	5	5	-0.00138900	0.00277800	0.00138900	0.00277800
TETY	8	10	-0.00138900	8.7357E-019	0.00138900	8.7357E-019
TETZ	8	10	-0.00138900	0.00240582	0.00138900	0.00240582
TETX	9	9	-0.00138900	0.00277800	0.00138900	0.00277800
TETY	12	14	-0.00138900	0.00069450	0.00138900	0.00069450
TETZ	12	14	-0.00138900	0.00120291	0.00138900	0.00120291
TETX	13	13	-0.00138900	0.00277800	0.00138900	0.00277800

Monte Carlo Analysis:			
Number of trails: 10000			
Initial statistics: Normal Distribution			
Worst: 0.00732176			
Mean: 0.00222238			
Std Dev: 0.00117470			
98% >	0.00506409	90% >	0.00383069
80% >	0.00317741	50% >	0.00207651
20% >	0.00117847	10% >	0.00081150
2% >	0.00035962		

表 5.7 分别在不同误差范围，给出概率为 90% 以内的像移情况。可以看出，当不改变偏转误差的范围，并且不断增大平移误差的范围，最终的像移几乎是线性增大的。当减小偏转误差的范围，与改变偏转误差相比，它可以使像移量大大减小。所以 K 镜精度的提高主要是在 K 镜镜面角度的装调精度。

表 5.7 误差范围对像移的影响

		The Displacement of Image
	0"	0.01920327mm
Error Range of Rotation(the Error Range of Displacement is $-10\mu\text{m}-10\mu\text{m}$)	-3"—3"	0.03272405mm
	-5"—5"	0.04835819mm
	-7"—7"	0.06544065mm
	-10"—10"	0.08818979mm
Error Range of displacement(the Error Range of Rotation is $-5"-5"$)	$0\mu\text{m}$	0.04442697mm
	$-5\mu\text{m}-5\mu\text{m}$	0.04531713mm
	$-10\mu\text{m}-10\mu\text{m}$	0.04835819mm
	$-15\mu\text{m}-15\mu\text{m}$	0.05223649mm
	$-20\mu\text{m}-20\mu\text{m}$	0.05741672mm

5.3 本章小结

为了提高望远镜的精度，减小由 K 镜补偿后的像转动和平移，对 K 镜的加工和装调均有严格的要求。误差分析时在加工和装调之前很有必要的前提工作。本章都是以主光线为目标对其进行误差分析的。因为主光线是整个望远镜系统的光轴方向。误差分析主要是采用了两种方法，一个是求出主光线在空间直角坐标系下的解析式，然后通过 MATLAB 作图，分别分析不同误差来源的特征。第二种方法是通过 Zemax 光学设计软件得到在所有可能的情况下，K 镜能够产生的误差范围。K 镜的误差来源很多，而且角度误差可以换算成平移误差，三轴间的误差也能与 K 镜的三面反射镜产生的类似，所以很难从运动轨迹中判断是哪类误差产生的。即使利用 MATLAB 对误差来源进行模拟和仿真，但意义不大。但是，本章的误差分析可以为之后设计合理的装调步骤及方法，并且做出初步的判断提供理论依据。

第六章 K 镜装调与检测

在 K 镜整体方案设计完成, 以及加工组装之后, 必须研究具体的装调方案。K 镜的装调需要达到的目的是实现 K 镜光轴、K 镜旋转轴和望远镜光轴三轴共线。对于地平式望远镜来说, 首先需要满足的其实是望远镜的跟踪指向轴与 K 镜的光轴共线, 因为指向轴决定了目标星体的位置, 而目标星体又决定了 K 镜的消旋速度。其次是以 K 镜的光轴 (或旋转轴) 为基准, 调节望远镜的光轴使其与 K 镜光轴共线。而对于赤道式望远镜来说, K 镜的旋转速度与目标星体没有关系, 所以只需要使 K 镜光轴与望远镜光轴共线即可。本章的目的是提供可行且有效的 K 镜装调方案, 并且通过设计完成的 K 镜来检测其消旋作用, 并判断装调方案的可行性。

6.1 装调方案

目前, 有很多关于消旋棱镜的装调方案, 其目的也与 K 镜的装调方案一致, 即棱镜光轴、旋转轴、系统光路的主光轴三轴共线。棱镜本身为一个整体, 其不需要额外的装调, 只需要考虑底角的加工所带来的误差对棱镜光轴位置的影响。然而对于 K 镜来说, 其三面镜子都是可调的, 它们之间的相对位移, 各面镜子的倾角等参数都需要调节到满足消旋条件和视场范围为止, 其实等效于调节 K 镜的光轴的位置。由此看来, K 镜要比消旋棱镜的装调更加复杂。

即使在上一章中对 K 镜进行了详细的误差分析, 并且分析了各个误差来源对最终成像以及像点的轨迹的影响, 但是 K 镜最后的误差结果必然是多个误差来源共同作用, 这可从 Zemax 的蒙特卡罗误差分析方法中看出。同时, K 镜镜面的倾角误差和位移误差可以互相转化, 它们所引起的像点轨迹形状相同。所以 K 镜装调过程中最大的难点在于我们无法通过最终成像的特点来判断具体的误差来源, 从而对误差来源进行控制。

无论是棱镜还是 K 镜, 其装调方案大致可以分为两个步骤: 一是实现入射光主光轴与 K 镜旋转轴共线, 二是实现旋转轴与 K 镜光轴共线。这样分步骤进行可以分别判断和考虑误差来源。美国大型双筒望远镜 (LBT) 针对其设计的 K 镜提供了完整的装调方案^[44], 其利用分束镜把激光光源分成两束光, 一束为参考光, 一束进入到已经安装了反射镜的 K 镜旋转台上, 通过这两束光反射回同一处的像点位置来判断和调节 K 镜旋转轴与入射主光线是否共线的; 然后, 通过 CCD 的成像, 利用像点轨迹的运动规律来判断和调节 K 镜的光轴, 即调节三面镜子的位移和倾角, 使得 K 镜光轴与旋转轴共线。两次调节的基准为 K 镜的旋转轴。这种通过分束镜来搭建的自准直系统, 对于 K 镜的装调十分必要。VLT 望远镜的 MUSE 系统也安装了光学消

旋器件^[45]，其利用瞄准镜和自准直望远镜来判断三轴是否共线。这与 SONG 望远镜的消旋器件的装调方案类似^[46]。从这三个望远镜光学消旋器件的装调方案中可以看出，装调过程有两个必不可少的环节：1. 自准直系统的搭建；2. 用十字刻线或者针孔光阑标识出旋转轴的位置。

若装调方案与某一望远镜系统相配合，则望远镜系统光轴需要与其方位轴（或赤经轴）进行校准装调^[47]，所以首先应该以望远镜方位轴（或赤经轴）为基准。由于本论文的 K 镜并不安装到某个望远镜系统中，所以装调都是在实验室中进行的。通过参考上述几个大型望远镜的光学消旋器件的装调方案，结合实验室现有的设备条件和设计的 K 镜本身的特点，装调实验步骤如下：

第一步调节光源出射方向。光源为氙灯，如图 6.1 所示，光源经过一个俯仰角可调的平面反射镜 1，再经过一个限制光源大小的针孔光阑。在旋转台上用十字刻线标记出旋转轴的位置，即旋转圆台的几何中心。调节出射方向使其平行于光学平台，高度与旋转轴高度一致，使光线通过旋转轴。

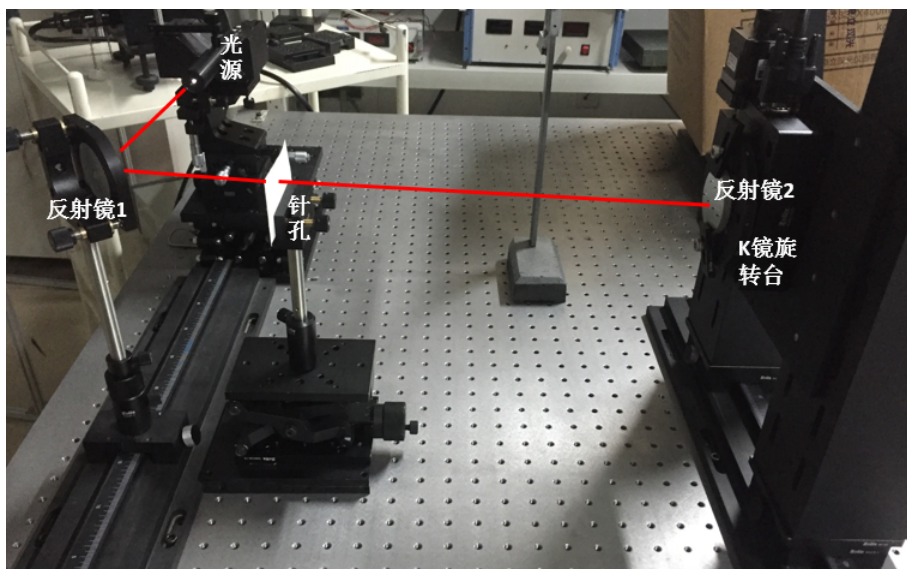


图 6.1 K 镜装调光路（主光线与旋转轴共线装调）

第二步实现入射光主光线与 K 镜旋转轴共线。取下十字刻线，用平面反射镜 2 代替，此时在针孔板上会出现从反射镜 2 反射回来的光斑。开启旋转台控制器，使旋转台匀速旋转。若在从反射镜 2 反射回的光斑，在针孔板上随着旋转台的转动而产生旋转，则说明反射镜 2 的平面与旋转轴不垂直，此时调节反射镜 2，直到光斑不发生旋转为止。然后，调节 K 镜的基座或者旋转台的位置，使得从反射镜 2 反射回的光斑中心与针孔的中心重合。此时，就完成了入射光主光线与旋转轴共线的目的。实现这个目的，还有另外一种方法：把针孔与旋转轴对准，这样就有两个标记点标记旋转轴的位置，然后调节反射镜 1 使得入射经过针孔和十字刻线的中心。

第三步实现 K 镜光轴与旋转轴共线。安装 K 镜的三面反射镜及其调节和支撑部

件，如图 6.2 所示。初步调节 K 镜的三面反射镜的倾角和位移，使光线的反射点在各个反射面的中心处，并且使光线经过旋转轴上十字刻线的中心。每次转动旋转台匀速运动一周，用 CCD 记录像点运动情况，观察像点运动轨迹。并根据像点运动轨迹判断需要调节哪些光学量。

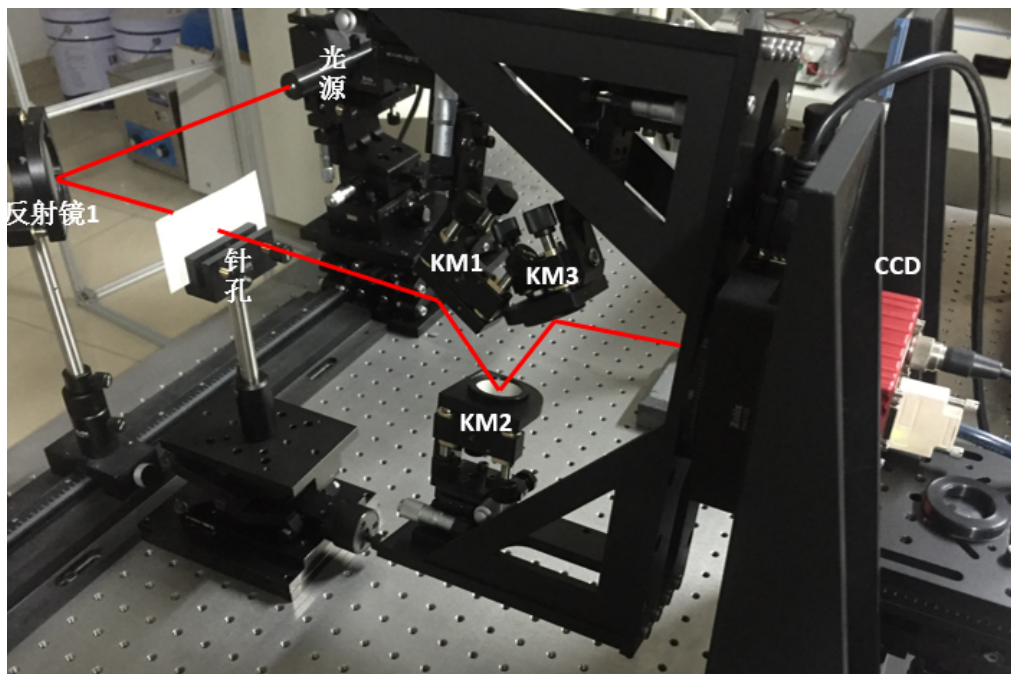


图 6.2 K 镜装调实验 (K 镜光轴与旋转轴共线装调)

6.2 装调结果及其分析

按照以上装调步骤，装调结果可以 CCD 上采集到的像点运动轨迹判断。实验所用 CCD 的有效像素数为 4096×3072 ，其像素大小为 $5.5 \times 5.5 \mu\text{m}^2$ ，每秒钟采集一幅图像，一共采集 60 幅图像，CCD 到 KM3 的距离大约为 19cm，旋转台转速为 $6.25^\circ/\text{s}$ 。利用 MATLAB 求出图像中光斑的重心位置，做出光斑重心的运动轨迹。

还未开始调节 K 镜，K 镜静止时，CCD 采集的光斑位置如图 6.4 (1) 所示，K 镜旋转一周后，光斑的运动轨迹如图 6.4 (2) 所示。从轨迹图中可以知道，此时像点与 K 镜的运动速度没有 2 倍的关系，造成这种结果的来源很多，必须不断地缩小轨迹圆的半径。根据第五章误差分析的结果，对 KM2 和 KM3 的倾角调节，对结果影响较大，所以首先调节 KM2 和 KM3 的倾角。

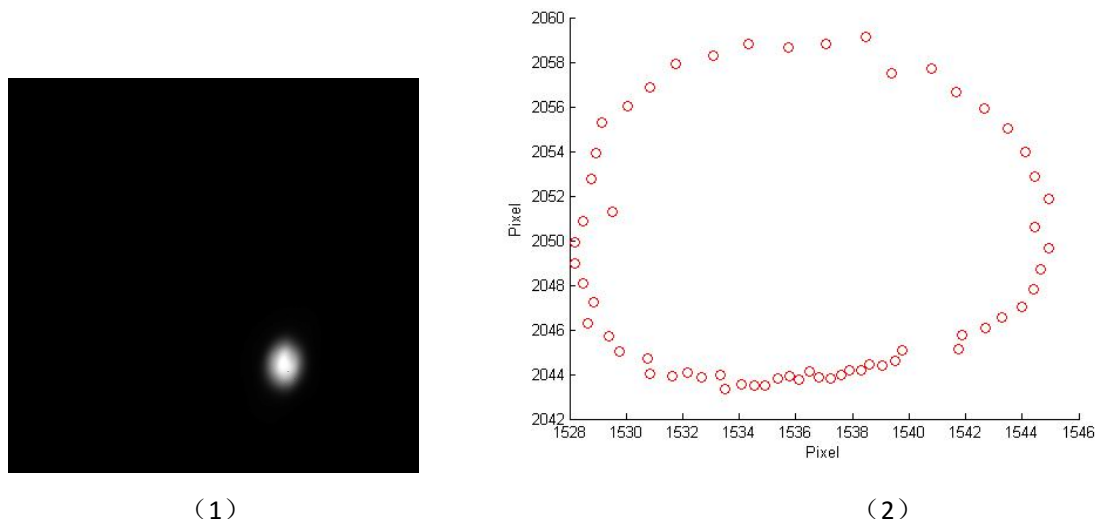


图 6.4 K 镜装调前光斑运动轨迹 (1) K 镜静止时光斑位置；(2) K 镜旋转一周光斑运动轨迹。

装调时分析两种理想的情况：1. K 镜的三面反射镜安装正确且光轴与旋转轴共线，但入射光主光线与旋转轴不重合；2. K 镜安装不正确，即其光轴与旋转轴不重合，入射光主光线与旋转轴共线。对于第一种情况，当旋转轴有 180° 旋转的时候，入射图像会有 360° 的旋转而且像点轨迹旋转 2 周，此时只需要稍微调整入射光线的偏转角度，减小轨迹的大小。对于第二种情况，旋转轴有 180° 旋转的时候，入射图像也是 180° 的旋转，像点轨迹旋转 1 周。如果上述两种情况都不出现，即三轴都不重合，多种误差都存在的情况，则像点的运动轨迹为心脏形 Pascal 曲线，而且曲线所占的空间越大，说明三轴间的差距越大。对于圆形光斑，很难判断光斑图像是否发生旋转，所以可以把针孔光阑换成矩形光阑。K 镜经过调节后的像点运动轨迹图如图 6.5 所示，记录了 80 个像点图，光斑像点的轨迹有 2 周的旋转，并且装调后的 K 镜具有消旋作用。由此也可以计算出装调后的 K 镜对光线的偏转角度为约为 41.8arcsecond 。

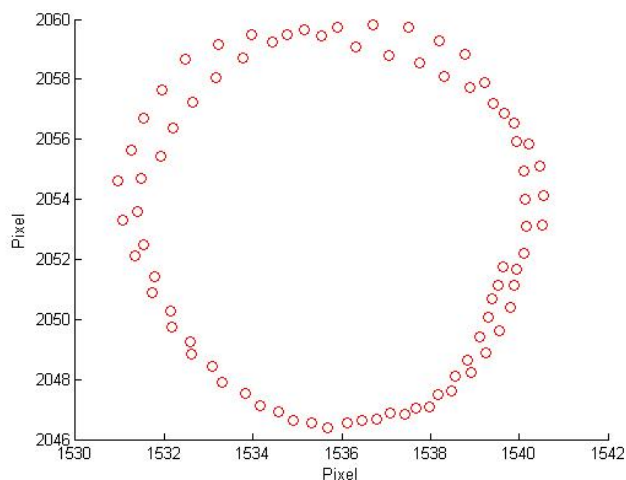


图 6.5 K 镜装调后光斑运动轨迹图 (K 镜旋转 360°)

6.3 本章小结

通过分析很多大型望远镜光学消旋器件的装调方案,以及结合自身 K 镜的特点,建立了一套装调方案实现 K 镜光轴、K 镜旋转轴与入射光源主光线的共线。根据 CCD 接收到的像点的运动情况,可以判断三轴是否共线,也可以用来辅助装调,最终实验得到了比较好的装调结果。

第七章 总结与展望

7.1 论文的研究成果及结论

本文结合地平式望远镜和赤道式望远镜的不同结构，分析其视场旋转并提供消旋方案，研究的内容包括以下几个方面：

(1) 分析大型光学望远镜视场旋转的原因并给出视场旋转规律

对于两种不同机架结构的光学望远镜，其视场旋转的原因稍微有些不同。地平式望远镜由于其跟踪轴系与地轴不平行，导致图像在成像面有非匀速的旋转，即产生物方视场旋转。同时望远镜除了主镜和副镜之外，还添加了一些折轴反射镜，这些反射镜随着跟踪轴系一块旋转，这再一次对出射像产生旋转，即产生像方视场旋转。然而，对于赤道式望远镜来说，只有像方视场旋转。物方视场旋转规律可以用球面三角形的几何关系来求得。像方视场旋转规律需要根据成像面的位置，即随着成像焦点的位置不同而有所不同，求解方法一般是光线追迹。本论文给出了两种旋转原因的规律，并且结合本论文依托的 AIMS 项目所设计的望远镜，计算其像旋规律。

(2) 讨论和比较了三种常见的消旋方法，总结了国内外对于消旋方法的研究，简单介绍了光学消旋器件的发展情况

电子消旋、物理消旋和光学消旋是针对图像消旋的常用的方法。它们具有不同的优缺点，也都在天文望远镜中有应用。比较这三种消旋方法，根据 AIMS 望远镜的结构和应用要求，决定选用光学消旋的方法，这也是望远镜中应用最多的方法。光学消旋器件分为两类：反射式和折射式。折射式消旋棱镜曾经广泛应用于望远镜中，棱镜对光影响很大，所以现在开始使用反射式消旋 K 镜，这也是本论文的研究对象。

(3) 分析 K 镜的消旋原理、光学性质，完成光学结构和机械结构的设计，并对 K 镜进行误差分析

利用矢量矩阵的方法分析了 K 镜的消旋原理，并得到 K 镜满足消旋的必备条件。根据棱镜转动原理同样可以分析 K 镜的光学性质。结合 K 镜的消旋条件和实际工程应用，利用 ZEMAX 光学设计软件，可以很好地完成对 K 镜的光学设计工作，这是本论文研究重点之一。K 镜的机械结构是保证 K 镜光学结构的重要部分，此外，还需要实现可调性，即 K 镜三面反射镜的俯仰和位移的调节，旋转台俯仰和位移的调节。本论文根据现有的商业光学元件，与 Solidworks 机械设计软件，把这些结构很好地组合到一起，初步完成 K 镜的设计。K 镜的误差分析主要采用两种方法：1.

通过求解解析式的方法来分析单个误差来源产生的影响，并结合 MATLAB 做较小误差范围的分析；2. 利用 ZEMAX 的误差分析功能，做敏感度分析和蒙特卡罗分析。通过误差分析的结果可以判定 K 镜的倾角误差对最终结果的影响大，这可以指导装调工作。本论文的误差分析方法可以运用到具体的 K 镜设计中，在规定消旋精度的情况下，设计出满足要求的 K 镜。

(4) K 镜装调和检测试验，及其结果分析

本论文根据设计方案、设计目的及现有条件，设计出了一套 K 镜系统，如图 7.1 所示。该 K 镜系统的目的是为了检验装调方案的可行性及有效性，精度要求不高。通过总结和对比大型天文望远镜的光学消旋器件的装调方案，并结合本论文设计的 K 镜的特点，研究出了 K 镜的装调步骤，并很好地完成了 K 镜的装调。装调结果显示，虽然主光线中心随着 K 镜旋转轴的转动而产生 2 倍的偏转，但偏转角度在角秒量级，具体的允许的中心偏转误差需要根据 K 镜后续设备对入射光的要求来决定。同时，检测试验的结果证明设计的 K 镜具有消旋作用。

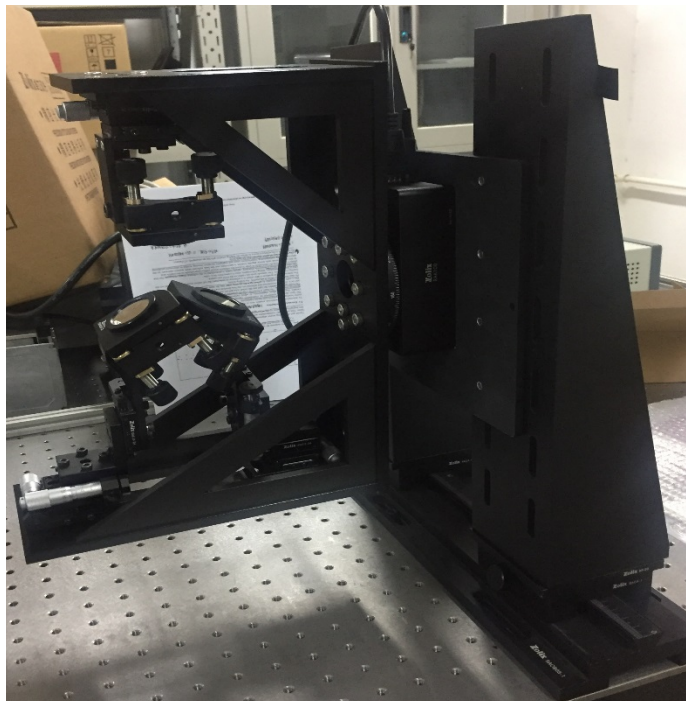


图 7.1 消旋 K 镜实体图

7.2 论文创新点

本论文的创新点包括以下三个方面：

- (1) 总结和比较了大型光学望远镜的消旋方法和装调方法，提出 K 镜装调必须要有自准直和标记旋转轴位置，并利用光斑的运动轨迹的特点来指导装调；
- (2) 分析了 K 镜的消旋原理，从中得出了 K 镜需要满足的消旋条件，并给出实际应用中设计 K 镜时需要满足的条件；

(3) 利用 ZEMAX 光学设计软件完成对 K 镜的光学结构设计，并给出完整的误差分析方法。

7.3 展望

国外关于望远镜消旋的研究已经相对成熟，K 镜也应用于很多大型的光学望远镜中，但我国由于缺少制造大型光学天文望远镜的经验，大部分的望远镜不添加光学消旋设备。但长远来看，消旋 K 镜的技术研究是发展大型光学天文望远镜的必备条件之一，希望本论文能够给予将来望远镜消旋方案一些帮助和指导性意见。

本论文对于消旋 K 镜的工作只开展了一部分，还有很多其他的方向和工作需要完善，其中就包括：

- (1) K 镜反射镜镜面材料的选择；
- (2) K 镜机械结构的完善，尤其是对 K 镜倾角和位移的精细调节，还有 K 镜基座的倾角和位移的调节；
- (3) 添加折轴反射镜对入射光偏振态的影响。因为 AIMS 望远镜是用于对太阳磁场的观测，所以偏振信息尤为重要。

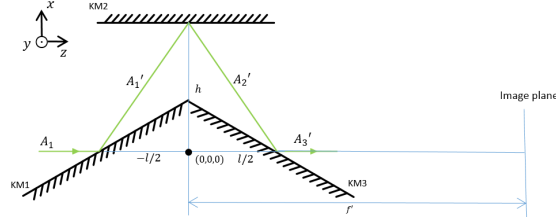
参考文献

1. 程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 北京: 中国科学技术出版社. 2002:89-96.
2. Whitford. A. E. The Construction of Large Telescopes[M]. London: Academic Press, 1966, 42-47.
3. 李洪伟, 黄自力等. 基于 FPGA/DSP 的数字视频消像旋系统设计[J]. 红外与激光工程, 2006, Vol.35, No.2, 222-223.
4. 曾祥萍, 杨涛. 实时图像的电子消旋系统[J]. 光电工程, 2005, 32(10):27~30.
5. 王霆. 机载 CCD 图像消旋控制技术[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2004:2-11.
6. 王岱, 李晓燕, 吴钦章. 某光测设备上消像旋的设计[J]. 光电工程, 2012, 39(1):108-112.
7. 刘彦清, 红外消旋检测装置的光学系统设计[D]. 西安工业大学. 2014
8. Pierre Y. Bely. The Design and Construction of Large Optical Telescopes[M]. New York: Springer, 2002, 126-127.
9. 关敏, 郭强. 光学像消旋系统在 FY-3 MERISI 图像定位中的应用[J]. 应用气象学报, 2008, 9(4): 420-427.
10. 郭鹏. 望远镜消旋系统研究[D]. 中国科学院长春光机所. 2012.
11. W. M. Smart. Textbook on Spherical Astronomy[M]. New York: Cambridge University Press, 1977, 1-40.
12. 胡企千, 姚正秋. 天文望远镜设计[M]. 北京: 中国科学技术出版社. 2013.
13. 鞠青华. 1.2 米地平式望远镜视场旋转研究与消旋[D]. 中国科学院云南天文台. 2008.
14. Robert Hubbard. Image Rotation at the Gregorian and Coude Positions for an Alt-Azimuth Telescope[R]. ATST Technical Note No.0012, 2005.
15. G. Avila, K. Wirestrand. Field and Pupil Rotations for the VLT[R]. VLT Report No.63, 1991.
16. Taras Golota. Etc. Software control and characterization aspects for image derotator of the AO188 system at Subaru[J]. SPIE Vol.7735, 77353W 2010.
17. D.W.Swift, Image rotation devices-a comparative survey[J]. Optics and Laser Technology, 1972(8):175-188.
18. D. S. L. Durie. A Compact Derotator Design[J]. Optical Engineering, Vol. 13, No.1, 1974.
19. W. Vaughan, Dove Prisms Properties and Problems[J]. Opt. Spectra 15, 68-70, 1981.
20. H. Z. Sar-EI, Revised Dove prism formulas[J]. Applied Optics, Vol. 30, No.4, 1991, 375-376.
21. Tibor Agoos, Derotators at the WHT[R]. Technical Report, 2010.
22. 王志臣, 赵勇志, 周超, 地平式望远镜消旋 K 镜的设计[J], 光子学报, 2012, 41(7), 762-765.
23. 连铜淑, 反射棱镜共轭理论[M], 北京: 北京理工大学出版社. 1988.
24. 毛文炜, 光学工程基础(一) [M], 北京: 清华大学出版社. 2013.
25. 郁道银, 谈恒英, 工程光学[M], 北京: 机械工业出版社. 1999.
26. Polasek J. Matrix Analysis of Gimbaled Mirror and Prism System[J]. Optical Society of America, 1967, 57(10):1193-1201.
27. DeBruin J, Johnson D. Line-of-sight Reference Frames: a Unified Approach to Plane-mirror Optical Kinematics[J]. Acquisition, Tracking and Pointing VI, 1992, SPIE(1697):111-129.
28. H.Z.Sar-EI. Revised Dove Prism Formulas[J]. Optical Society of America, 1991, 30(4):375-376.
29. Miles J. Padgett, J. Paul Lesso. Dove Prisms and Polarized Light[J]. Modern Optics, 1999, 46(2):175-179.

30. Mark de Koe. A Design Study of a Cryogenic High Accurate Derotator[D]. Delft: Delft University of Technology, 2013:9-31.
31. Bauman B, Gavel D. Beam Transfer Optics Preliminary Design Report[R]. 2001.
32. Mirzaei S, Abo-Namous O, Beichert G, et al. Developing a new Generation of Optomechanical Derotator for Analysis of the Dynamic Behaviour of Rotating Components[J]. Advances in Optomechanics, 2009,SPIE(7424):1~9.
33. 林钢. 林慧国等. 《铝合金应用手册》[M]. 机械工业出版社, 2006.
34. 明名, 王建立等, 大口径望远镜光学系统的误差分配与分析[J], 光学精密工程, 2009, 17(1), 104-108.
35. Robert H., ATST system error budget[R], Rspec 0009, 2006.
36. 徐钟济. 蒙特卡罗方法[M]. 上海科学技术出版社, 1985.
37. Rex Avana. Image Rotator Alignment[J], Process Development Endeavor No.231.
38. J. Sandoval, G. Paez, and M. Strojnik. Opto-mechanical design of a prism rotator in Infrared Spaceborn[J]. Remote Sensing IX, Proc. SPIE 4486, 170-180(2001).
39. J. B. Houston, and B. H. Walker. Pechan derotation prism application & alignment notes[J]. Opt. Eng. 13(6), G233-G234(1974).
40. E. Gutierrez-Herrera, M. Strojnik. Interferometric tolerance determination for a Dove prism using exact ray trace[J]. Opt. Commun. 2008(281): 897-905.
41. Donald L. Sullivan. Alignment of Rotational Prisms[J]. Applied Optics, Vol.11, No.9, 1972.
42. 蒋世磊. 别汉棱镜的旋像精度分析和装校方法[J]. 光电工程, 1991,18(12): 50-56.
43. Gray D. Schmidt. Pointing/Derotator Coalignment for Alt-Az Telescopes[R]. MMTO Internal Technical Memorandum 04-1, 1992.
44. A. Brunelli etc. Tips & tricks for aligning an image derotator[J]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV. SPIE Vol. 8446, 84464L, 2012.
45. Florence Laurent etc. MUSE Optical Alignment Procedure[J]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV. SPIE Vol. 8446, 84465X, 2012.
46. Anton Norup Sorensen. SONG Alignment of Nasmyth and Coude sections[R]. 2011: 7-8
47. 孙敬伟, 王建立等. 地平式大口径地基望远镜主光学系统装调技术[J]. 激光与红外, 2010, 40(3): 233-239.

附录 1 K 镜误差分析（解析法）

K 镜的整体和每面镜子有 6 个自由度，分别是 xyz 三个轴的平移和三个轴的旋转（顺时针为负）。建立如下图所示的坐标系：



KM1 所在的平面方程为： $x \cdot \cos\beta - (z + l/2) \cdot \sin\beta = 0$

KM2 所在的平面方程为： $x - h = 0$

KM3 所在的平面方程为： $x \cdot \cos\beta + (z - l/2) \cdot \sin\beta = 0$

主光线入射在 KM1 的直线方程：
$$\begin{cases} x = 0 \\ y = 0 \\ z = 1 \end{cases}$$

经过 K 镜成像后的成像面的方程为： $z - f' = 0$

主光线到像面的像点坐标为 $(0,0,f')$

通过计算得到 A_2' 在 KM3 上的交点坐标 (x_3, y_3, z_3) ，以及 A_3' 的向量矩阵 $[A_{3x} \ A_{3y} \ A_{3z}]^T$ ，就可以得到最后出射光线的直线方程，最后求得直线在像面 f' 处的交点，即主光线的偏移量：

$$E_x = \frac{f' - z_3}{A_{3z}} \cdot A_{3x} + x_3 \quad (1)$$

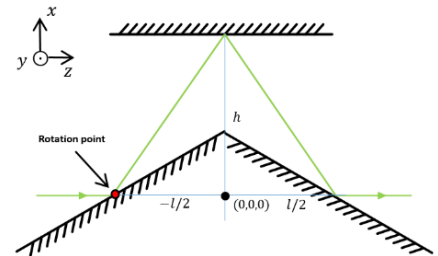
$$E_y = \frac{f' - z_3}{A_{3z}} \cdot A_{3y} + y_3 \quad (2)$$

一、KM1

- KM1 在 x 方向的位移误差： $E_{1x} = \Delta x \cdot 2\cos^2\beta$
- KM1 在 y 方向的位移误差对成像无影响。
- KM1 在 z 方向的位移误差：（类似于在 x 方向的平移） $E_{1x} = -\Delta z \cdot \sin 2\beta$
- KM1 在 x 轴上的偏转

旋转点选在 K 镜光轴与 KM1 的交点处。当 KM1 绕 x 轴旋转时，其法向量绕 x 轴旋转相同角度（规定：从 X 轴往下看逆时针旋转方向为正）。设 KM1 绕 x 轴在如图所示的旋转点 $(0,0,-l/2)$ 旋转 $\varepsilon(-90^\circ \sim 90^\circ)$ ，其旋转矩阵：

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varepsilon & -\sin\varepsilon \\ 0 & \sin\varepsilon & \cos\varepsilon \end{bmatrix}$$



KM1 的法向量变为 $\vec{N}_1' = R_x \cdot \vec{N}_1 = \begin{bmatrix} \cos\beta \\ \sin\beta \cdot \sin\varepsilon \\ -\sin\beta \cdot \cos\varepsilon \end{bmatrix}$, 入射光线 $\vec{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, KM1 作用矩

阵:

$$M_1' = \begin{bmatrix} -\cos 2\beta & -\sin 2\beta \sin \varepsilon & \sin 2\beta \cos \varepsilon \\ -\sin 2\beta \sin \varepsilon & 1 - 2\sin^2 \beta \sin^2 \varepsilon & \sin 2\varepsilon \sin^2 \beta \\ \sin 2\beta \cos \varepsilon & \sin 2\varepsilon \sin^2 \beta & 1 - 2\sin^2 \beta \cos^2 \varepsilon \end{bmatrix}$$

经过 KM1 反射后的出射光线 $\vec{A}_1' = M_1' \cdot \vec{A}_1 = \begin{bmatrix} \sin 2\beta \cdot \cos \varepsilon \\ \sin 2\varepsilon \cdot \sin^2 \beta \\ 1 - 2\sin^2 \beta \cos^2 \varepsilon \end{bmatrix}$

出射光线 A_1' 的直线方程为:

$$\frac{x}{\sin 2\beta \cdot \cos \varepsilon} = \frac{y}{\sin 2\varepsilon \cdot \sin^2 \beta} = \frac{z + l/2}{1 - 2\sin^2 \beta \cos^2 \varepsilon}$$

A_1' 的直线方程与 KM2 所在的平面的交点为 $(h, h \cdot \sin \varepsilon \cdot \tan \beta, \frac{h \cdot (1 - 2\sin^2 \beta \cos^2 \varepsilon)}{\sin 2\beta \cdot \cos \varepsilon} -$

$l/2)$ 。

经过 KM2 反射后的出射光线:

$$\vec{A}_2' = M_2 \cdot \vec{A}_1' = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin 2\beta \cdot \cos \varepsilon \\ \sin 2\varepsilon \cdot \sin^2 \beta \\ 1 - 2\sin^2 \beta \cos^2 \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin 2\beta \cdot \cos(\varepsilon) \\ \sin(2\varepsilon) \cdot \sin^2 \beta \\ 1 - 2\sin^2 \beta \cos^2 \varepsilon \end{bmatrix}$$

A_2' 的直线方程为:

$$\frac{x - h}{-\sin 2\beta \cdot \cos \varepsilon} = \frac{y - h \cdot \sin \varepsilon \cdot \tan \beta}{\sin 2\varepsilon \cdot \sin^2 \beta} = \frac{z - \frac{h \cdot (1 - 2\sin^2 \beta \cos^2 \varepsilon)}{\sin 2\beta \cdot \cos \varepsilon} + l/2}{1 - 2\sin^2 \beta \cos^2 \varepsilon}$$

A_2' 的直线方程与 KM3 所在的平面的交点为

$$x_3 = 2h - \frac{\cos \varepsilon \cdot (4h \cos^2 \beta - l \cdot \sin 2\beta)}{2\cos^2 \beta \cdot \cos \varepsilon + 2\cos^2 \varepsilon \cdot \sin^2 \beta - 1}$$

$$y_3 = \frac{\sin 2\varepsilon \cdot (\frac{l \cos 2\beta}{2} - \frac{l}{2} + h \sin 2\beta)}{2\cos^2 \varepsilon + 2\cos^2 \beta \cos \varepsilon - 2\cos^2 \beta \cos^2 \varepsilon - 1}$$

$$z_3 = \frac{l}{2} - \frac{l \sin 2\beta \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos \beta - 2h \cos \beta + 2h \cos^2 \varepsilon \cdot \sin \beta \cdot \sin 2\beta}{2\cos^2 \varepsilon \cdot \sin^3 \beta - \sin \beta + \cos \varepsilon \cdot \cos \beta \cdot \sin 2\beta}$$

经过 KM3 反射后的出射光线

$$\begin{aligned} \vec{A}_3' = M_3 \cdot \vec{A}_2' &= \begin{bmatrix} A_{3x}' \\ A_{3y}' \\ A_{3z}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos 2\beta & 0 & -\sin 2\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin 2\beta & 0 & \cos 2\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin 2\beta \cdot \cos(\varepsilon) \\ \sin(2\varepsilon) \cdot \sin^2 \beta \\ 1 - 2\sin^2 \beta \cos^2 \varepsilon \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \sin 2\beta \cdot (2\cos^2 \varepsilon \cdot \sin^2 \beta - 1) + \frac{\cos \varepsilon \cdot \sin 4\beta}{2} \\ \sin 2\varepsilon \cdot \sin^2 \beta \\ \sin^2 2\beta \cos \varepsilon - \cos 2\beta \cdot (2\cos^2 \varepsilon \cdot \sin^2 \beta - 1) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

根据公式 (1) 和 (2) 能够计算出主光线在像面的位移。

- KM1 在 y 轴上的偏转

这个误差与 y 轴无关,直接在平面坐标系计算。假设 KM1 偏离了 ε 角 ($\varepsilon \in (0,45^\circ)$ 以顺时针为负, 假设是绕着 KM1 的入射点旋转, 需要在 xz 平面内计算)。

无旋转时, KM1 的直线方程: $x \cdot \cos\beta - (z + l/2) \cdot \sin\beta = 0$

KM2 的直线方程: $x - h = 0$

KM3 的直线方程: $x \cdot \cos\beta + (z - l/2) \cdot \sin\beta = 0$

KM1 旋转 ε 角后的法线向量: $\vec{N}_1' = \begin{bmatrix} \cos(\beta + \varepsilon) \\ 0 \\ -\sin(\beta + \varepsilon) \end{bmatrix}$

KM1 出射光线 A_1' 的矢量矩阵: $\vec{A}_1' = \begin{bmatrix} \sin 2(\beta + \varepsilon) \\ 0 \\ \cos 2(\beta + \varepsilon) \end{bmatrix}$, 其直线方程: $x = (z + l/2) \cdot$

$\tan 2(\beta + \varepsilon)$ 。

A_1' 与 KM2 的交点坐标为: $(h, \frac{h}{\tan 2(\beta + \varepsilon)} - l/2)$

KM2 出射光线向量: $\vec{A}_2' = M_2 \cdot \vec{A}_1' = \begin{bmatrix} -\sin 2(\beta + \varepsilon) \\ 0 \\ \cos 2(\beta + \varepsilon) \end{bmatrix}$

KM2 出射光线 A_2' 的直线方程: $x - h = -\left(z - \frac{h}{\tan 2(\beta + \varepsilon)} + l/2\right) \cdot \tan 2(\beta + \varepsilon)$

A_2' 与 KM3 的交点坐标计算:

$$\begin{aligned} x_3 &= \frac{\tan\beta \cdot [2h - l \cdot \tan 2(\beta + \varepsilon)]}{\tan\beta - \tan 2(\beta + \varepsilon)} \\ y_3 &= 0 \\ z_3 &= \frac{l \cdot \tan 2(\beta + \varepsilon) - 4h + l \cdot \tan\beta}{\tan\beta - 2\tan 2(\beta + \varepsilon)} \end{aligned}$$

这个在角度误差中已经算过最后的出射光线与光轴的夹角为 2ε ,

$$E_{1x} = x + \tan 2\varepsilon \cdot (f' - z)$$

● KM1 在 z 轴上的偏转

规定: 从 z 轴往负方向看逆时针旋转方向为正。KM1 的原法向量为: $\vec{N}_1 = \begin{bmatrix} \cos\beta \\ 0 \\ -\sin\beta \end{bmatrix}$

绕 z 轴旋转的旋转矩阵为: $R_z = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon & -\sin\varepsilon & 0 \\ \sin\varepsilon & \cos\varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

旋转后 KM1 的法向量为: $\vec{N}_1' = R_z \cdot \vec{N}_1 = \begin{bmatrix} \cos\beta \cos\varepsilon \\ \cos\beta \sin\varepsilon \\ -\sin\beta \end{bmatrix}$ 。

$$M_1' = \begin{bmatrix} 1 - 2\cos^2\beta \cos^2\varepsilon & -\cos^2\beta \sin 2\varepsilon & \sin 2\beta \cos\varepsilon \\ -\cos^2\beta \sin 2\varepsilon & 1 - 2\cos^2\beta \sin^2\varepsilon & \sin 2\beta \sin\varepsilon \\ \sin 2\beta \cos\varepsilon & \sin 2\beta \sin\varepsilon & \cos 2\beta \end{bmatrix}$$

经过 KM1 反射后的出射光线 $\vec{A}_1' = M_1' \cdot \vec{A}_1 = \begin{bmatrix} \sin 2\beta \cdot \cos\varepsilon \\ \sin 2\beta \cdot \sin\varepsilon \\ \cos 2\beta \end{bmatrix}$

出射光线 A_1' 的直线方程为:

$$\frac{x}{\sin 2\beta \cdot \cos \varepsilon} = \frac{y}{\sin 2\beta \cdot \sin \varepsilon} = \frac{z + l/2}{\cos 2\beta}$$

A_1' 的直线方程与 KM2 所在的平面的交点为 $(h, h \tan \varepsilon, \frac{h}{\tan 2\beta \cdot \cos \varepsilon} - l/2)$ 。

经过 KM2 反射后的出射光线 $\vec{A}_2' = M_2 \cdot \vec{A}_1' = \begin{bmatrix} -\sin 2\beta \cdot \cos \varepsilon \\ \sin 2\beta \cdot \sin \varepsilon \\ \cos 2\beta \end{bmatrix}$, A_2' 的直线方程为:

$$\frac{x - h}{-\sin 2\beta \cdot \cos \varepsilon} = \frac{y - h \tan \varepsilon}{\sin 2\beta \cdot \sin \varepsilon} = \frac{z - \frac{h}{\tan 2\beta \cdot \cos \varepsilon} + l/2}{\cos 2\beta}$$

A_2' 的直线方程与 KM3 所在的平面的交点为:

$$x_3 = \frac{-2h \cos 2\beta + l \cdot \cos \varepsilon \cdot \sin 2\beta}{2 \cos^2 \beta \cos \varepsilon - \cos 2\beta}$$

$$y_3 = \frac{2 \cos \beta \sin \varepsilon (2h \cos \beta - l \sin \beta)}{2 \cos^2 \beta \cos \varepsilon - \cos 2\beta}, -\frac{l}{2}$$

$$z_3 = -\frac{2h \cos \beta \cos 2\beta - l \sin \beta \cos 2\beta}{\sin \beta \cos 2\beta - \cos^2 \beta \sin 2\beta}$$

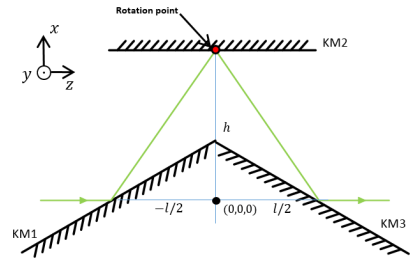
经过 KM3 反射后的出射光线:

$$\vec{A}_3' = M_3 \cdot \vec{A}_2' = \begin{bmatrix} \frac{\sin 4\beta \cdot (\cos \varepsilon - 1)}{2} \\ \sin 2\beta \cdot \sin \varepsilon \\ \sin^2 2\beta \cdot \cos \varepsilon + \cos^2 \beta \end{bmatrix}$$

二、KM2

- KM2 在 x 方向上的平移: $E_{2x} = -2\Delta x \cdot \cos 2\beta$ 。
- KM2 在 y 方向上的平移: 无影响。
- KM2 在 z 方向上的平移: 无影响。
- KM2 在 x 轴上的偏转

旋转点选在 K 镜光轴与 KM2 的交点处。当 KM2 绕 x 轴旋转时, KM2 仍然是在原平面上, 为了平面的对称性, 消除绕 x 轴旋转产生的影响可以把 KM2 做成圆形, 所以无影响。



- KM2 在 y 轴上的偏转

偏离前 KM2 的法向量为: $\vec{N}_2 = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, 偏离后法向量为: $\vec{N}_2' = R_y \vec{N}_2 = \begin{bmatrix} -\cos \varepsilon \\ 0 \\ \sin \varepsilon \end{bmatrix}$, 反

射作用矩阵为 $M_2' = \begin{bmatrix} -\cos 2\varepsilon & 0 & \sin 2\varepsilon \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin 2\varepsilon & 0 & \cos 2\varepsilon \end{bmatrix}$, 入射在 KM2 的入射光 $\vec{A}_1' = M_1 \cdot \vec{A}_1 = \begin{bmatrix} \sin 2\beta \\ 0 \\ \cos 2\beta \end{bmatrix}$ 。

KM1 出射光线 A_1' 的直线方程: $\frac{x}{\sin 2\beta} = \frac{y}{0} = \frac{z + l/2}{\cos 2\beta}$

$$\text{KM2 出射光线向量: } \vec{A}_2' = M_2' \cdot \vec{A}_1' = \begin{bmatrix} -\sin 2(\beta - \varepsilon) \\ 0 \\ \cos 2(\beta - \varepsilon) \end{bmatrix}$$

KM2 出射光线 A_2' 的直线方程:

$$\frac{x - h}{-\sin 2(\beta - \varepsilon)} = \frac{y}{0} = \frac{z}{\cos 2(\beta - \varepsilon)}$$

A_2' 与 KM3 的交点坐标计算:

$$x_3 = \frac{h}{2} - \frac{\frac{l \cdot \cos(3\beta - 2\varepsilon)}{4} + \frac{h \cdot \sin(3\beta - 2\varepsilon)}{2} - \frac{l \cdot \cos(\beta - 2\varepsilon)}{4}}{\sin(\beta - 2\varepsilon)}$$

$$z_3 = -\frac{\cos 2(\beta - \varepsilon) \cdot (2h \cos \beta - l \sin \beta)}{2 \sin(\beta - 2\varepsilon)}$$

经过 KM3 反射后的出射光线:

$$\vec{A}_3' = M_3 \cdot \vec{A}_2' = \begin{bmatrix} -\sin 2\varepsilon \\ 0 \\ \cos 2\varepsilon \end{bmatrix}$$

● KM2 在 z 轴上的偏转:

绕 z 轴旋转的旋转矩阵为: $R_z = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon & -\sin \varepsilon & 0 \\ \sin \varepsilon & \cos \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 旋转后 KM2 的法向量为: $\vec{N}_2' = \begin{bmatrix} -\cos \varepsilon \\ -\sin \varepsilon \\ 0 \end{bmatrix}$, KM2 的反射作用矩阵为:

$$M_2' = \begin{bmatrix} -\cos 2\varepsilon & -\sin 2\varepsilon & 0 \\ -\sin 2\varepsilon & \cos 2\varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A_1' 与 KM2 的交点坐标为: $(h, 0, 0)$

$$\text{KM2 出射光线向量: } \vec{A}_2' = M_2' \cdot \vec{A}_1' = \begin{bmatrix} -\sin 2\beta \cdot \cos 2\varepsilon \\ -\sin 2\varepsilon \cdot \sin 2\beta \\ \cos 2\beta \end{bmatrix}$$

A_2' 的直线方程为:

$$\frac{x - h}{-\sin 2\beta \cdot \cos 2\varepsilon} = \frac{y}{-\sin 2\varepsilon \cdot \sin 2\beta} = \frac{z}{\cos 2\beta}$$

A_2' 的直线方程与 KM3 所在的平面的交点为:

$$x_3 = \frac{-h \cos 2\beta + \frac{l \cdot \cos 2\varepsilon \cdot \sin 2\beta}{2}}{2 \cos^2 \beta \cos 2\varepsilon - \cos 2\beta}$$

$$y_3 = -\frac{\sin 2\varepsilon \cdot \cos \beta \cdot (2h \cos \beta - l \sin \beta)}{2 \cos^2 \beta \cos 2\varepsilon - \cos 2\beta}$$

$$z_3 = -\frac{\cos 2\beta \cdot (2h \cos \beta - l \sin \beta)}{2 \sin \beta \cdot [\cos 2\beta - \cos 2\varepsilon \cdot (\cos 2\beta + 1)]}$$

经过 KM3 反射后的出射光线:

$$\vec{A}_3' = M_3 \cdot \vec{A}_2' = \begin{bmatrix} -\sin 4\beta \cdot \sin^2 \varepsilon \\ -\sin 2\beta \cdot \sin 2\varepsilon \\ 1 - 2 \sin^2 2\beta \cdot \sin^2 2\varepsilon \end{bmatrix}$$

三、KM3

- KM3 在 x 方向上的位移: $E_{3x} = \Delta x \cdot 2\cos^2\beta$ 。
- KM3 在 y 方向上的位移: 无影响。
- KM3 在 z 方向上的位移: $E_{3z} = \Delta z \cdot \sin 2\beta$ 。
- KM3 在 x 轴上的旋转

KM3 旋转的时候只有 KM3 的出射光线有所变化, 其余光线都不变。KM3 的法向量变为 $\vec{N}_3' = R_x \cdot \vec{N}_3 =$

$\begin{bmatrix} \cos\beta \\ -\sin\beta \cdot \sin\varepsilon \\ \sin\beta \cdot \cos\varepsilon \end{bmatrix}$, 反射作用矩阵为:

$$M_3' = \begin{bmatrix} -\cos 2\beta & \sin 2\beta \sin \varepsilon & -\sin 2\beta \cos \varepsilon \\ \sin 2\beta \sin \varepsilon & 1 - 2\sin^2 \beta \sin^2 \varepsilon & \sin 2\varepsilon \sin^2 \beta \\ -\sin 2\beta \cos \varepsilon & \sin 2\varepsilon \sin^2 \beta & 1 - 2\sin^2 \beta \cos^2 \varepsilon \end{bmatrix}$$

A_2' 与 KM3 的交点坐标为: $(0, 0, l/2)$ 。

经过 KM3 反射后的出射光线

$$\vec{A}_3' = M_3' \cdot \vec{A}_2' = \begin{bmatrix} \frac{(\cos \varepsilon - 1) \cdot \sin 4\beta}{2} \\ \sin 2\varepsilon \cdot \sin^2 \beta \cdot \cos 2\beta - \sin^2 2\beta \cdot \sin \varepsilon \\ \sin^2 2\beta \cos \varepsilon - \cos 2\beta \cdot (2\cos^2 \varepsilon \cdot \sin^2 \beta - 1) \end{bmatrix}$$

- KM3 在 y 轴上的旋转

KM3 旋转 ε 角后的法线向量: $\vec{N}_3' = \begin{bmatrix} \cos(\beta - \varepsilon) \\ 0 \\ \sin(\beta - \varepsilon) \end{bmatrix}$

$$M_3' = \begin{bmatrix} -\cos 2(\beta - \varepsilon) & 0 & -\sin 2(\beta - \varepsilon) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin 2(\beta - \varepsilon) & 0 & \cos 2(\beta - \varepsilon) \end{bmatrix}$$

经过 KM3 反射后的出射光线: $\vec{A}_3' = M_3' \cdot \vec{A}_2' = \begin{bmatrix} \sin 2\varepsilon \\ 0 \\ \cos 2\varepsilon \end{bmatrix}$

- KM3 在 z 轴上的旋转

旋转后 KM3 的法向量为: $\vec{N}_3' = R_z \cdot \vec{N}_3 = \begin{bmatrix} \cos\beta \cos\varepsilon \\ \cos\beta \sin\varepsilon \\ \sin\beta \end{bmatrix}$

$$M_3' = \begin{bmatrix} 1 - 2\cos^2\beta \cos^2\varepsilon & -\cos^2\beta \sin 2\varepsilon & -\sin 2\beta \cos \varepsilon \\ -\cos^2\beta \sin 2\varepsilon & 1 - 2\cos^2\beta \sin^2\varepsilon & -\sin 2\beta \sin \varepsilon \\ -\sin 2\beta \cos \varepsilon & -\sin 2\beta \sin \varepsilon & \cos 2\beta \end{bmatrix}$$

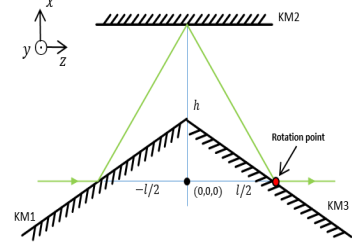
经过 KM3 反射后的出射光线:

$$\vec{A}_3' = M_3' \cdot \vec{A}_2' = \begin{bmatrix} \sin 2\beta \cdot (\cos \varepsilon - 1)(2\cos^2\beta \cos \varepsilon + 1) \\ \sin 2\beta \cdot \sin \varepsilon \cdot (2\cos^2\beta \cos \varepsilon - \cos 2\beta) \\ \sin^2 2\beta \cdot \cos \varepsilon + \cos^2 2\beta \end{bmatrix}$$

四、K 镜整体

- K 镜在 X 方向的位移

根据上面的三面镜子的平移误差所计算的 $E_x = \Delta x_1 \cdot 2\cos^2\beta - 2\Delta x_2 \cdot \cos 2\beta + \Delta x_3 \cdot$



$2\cos^2\beta$ ，只要令 $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_3 = \Delta x$ ，得到

$$E_x = 2\Delta x$$

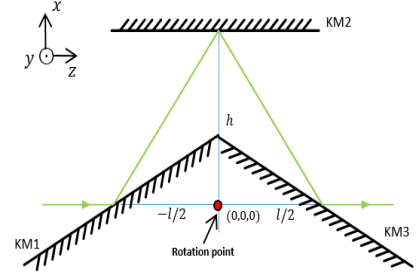
● K 镜在 Y 方向的位移：无影响。

● K 镜在 Z 方向的位移

在论文中写的是没有影响，但它其实把最终成像的焦点位置变了，所以最后的成像是模糊的，即使它不影响像点的位置。

● K 镜在 X 轴上的旋转

选择坐标原点为旋转点，分析的方法与上面每面镜子的分析方法是一样的，只是旋转点的位置变了。入射光与 KM1 的交点也发生了改变。



入射光直线方程： $\frac{x}{0} = \frac{y}{0} = z$

KM1 旋转后的平面方程：

$$\cos\beta \cdot \left(x - \frac{l \tan\beta}{2}\right) + \sin\beta \cdot \sin\varepsilon \cdot y - \sin\beta \cdot \cos\varepsilon \cdot z = 0$$

KM3 旋转后的平面方程：

$$\cos\beta \cdot \left(x - \frac{l \tan\beta}{2}\right) - \sin\beta \cdot \sin\varepsilon \cdot y + \sin\beta \cdot \cos\varepsilon \cdot z = 0$$

KM1 与入射光直线的交点为： $(0, 0, -\frac{l}{2\cos\varepsilon})$

经过 KM1 反射后的出射光线 \vec{A}_1' = $\begin{bmatrix} \sin 2\beta \cdot \cos\varepsilon \\ \sin 2\varepsilon \cdot \sin^2\beta \\ 1 - 2\sin^2\beta \cos^2\varepsilon \end{bmatrix}$

KM1 出射光线 A_1' 的直线方程为：

$$\frac{x}{\sin 2\beta \cdot \cos\varepsilon} = \frac{y}{\sin 2\varepsilon \cdot \sin^2\beta} = \frac{z + \frac{l}{2\cos\varepsilon}}{1 - 2\sin^2\beta \cos^2\varepsilon}$$

A_1' 与 KM2 的交点为：

$$\left(h, \frac{h \cdot \sin 2\varepsilon \cdot \sin^2\beta}{\sin 2\beta \cdot \cos\varepsilon}, \frac{h \cdot (1 - 2\sin^2\beta \cos^2\varepsilon)}{\sin 2\beta \cdot \cos\varepsilon} - \frac{l}{2\cos\varepsilon}\right)$$

对 KM2 来说，其绕 X 轴旋转对光路没有影响，所以 $\vec{A}_2' = M_2 \cdot \vec{A}_1' = \begin{bmatrix} -\sin 2\beta \cdot \cos(\varepsilon) \\ \sin(2\varepsilon) \cdot \sin^2\beta \\ 1 - 2\sin^2\beta \cos^2\varepsilon \end{bmatrix}$

KM2 出射光线 A_2' 的直线方程为：

$$\frac{x - h}{-\sin 2\beta \cdot \cos\varepsilon} = \frac{y - y_2}{\sin 2\varepsilon \cdot \sin^2\beta} = \frac{z - z_2}{1 - 2\sin^2\beta \cos^2\varepsilon}$$

出射光线 A_2' 与 KM3 的交点为：

$$x_3 = l \cdot \sin 2\beta - 2h \cos 2\beta$$

$$y_3 = -2\sin\varepsilon \cdot (l \sin^2\beta - h \sin 2\beta)$$

$$z_3 = \frac{2h \cos\beta - \frac{3l \sin\beta}{2}}{\cos\varepsilon \cdot \sin\beta} - \frac{\cos\varepsilon \cdot (4h \cos\beta - 2l \sin\beta - 4h \cos^3\beta + l \cos\beta \sin 2\beta)}{\sin\beta}$$

$$\text{KM3 出射光线向量: } \vec{A}_3' = M_3' \cdot \vec{A}_2' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

KM3 出射光线的直线方程:

$$\frac{x - x_3}{0} = \frac{y - y_3}{0} = \frac{z - z_3}{1}$$

该直线方程与原成像面的交点为:

$$\begin{aligned} E_x &= x_3 \\ E_y &= y_3 \end{aligned}$$

● K 镜在 Y 轴上的旋转

KM1 旋转后的平面方程: $\cos(\beta + \varepsilon) \cdot x - \sin(\beta + \varepsilon) \cdot z - l \sin \beta / 2 = 0$

KM2 旋转后的平面方程: $-\cos \varepsilon \cdot x + \sin \varepsilon \cdot z + h = 0$

KM3 旋转后的平面方程: $\cos(\beta - \varepsilon) \cdot x - \sin(\beta - \varepsilon) \cdot z + l \sin \beta / 2 = 0$

KM1 与入射光直线的交点为: $(0, 0, -\frac{l \sin \beta}{2 \sin(\beta + \varepsilon)})$

$$\text{经过 KM1 反射后的出射光线 } \vec{A}_1' = \begin{bmatrix} \sin 2(\beta + \varepsilon) \\ 0 \\ \cos 2(\beta + \varepsilon) \end{bmatrix}$$

KM1 出射光线 A_1' 的直线方程为:

$$\frac{x}{\sin 2(\beta + \varepsilon)} = \frac{y}{0} = \frac{z + \frac{l \sin \beta}{2 \sin(\beta + \varepsilon)}}{\cos 2(\beta + \varepsilon)}$$

A_1' 与 KM2 的交点为:

$$\left(\frac{\sin 2(\beta + \varepsilon) \cdot [2h \sin(\beta + \varepsilon) - l \sin \beta \sin \varepsilon]}{2 \sin(\beta + \varepsilon) \cdot \sin(2\beta + \varepsilon)}, 0, \frac{2h \cos 2(\beta + \varepsilon) \sin(\beta + \varepsilon) - l \sin 2(\beta + \varepsilon) \cdot \cos \varepsilon \cdot \sin \beta}{2 \sin(\beta + \varepsilon) \cdot \sin(2\beta + \varepsilon)} \right)$$

$$\text{经过 KM2 反射后的出射光线 } \vec{A}_2' = \begin{bmatrix} -\sin 2\beta \\ 0 \\ \cos 2\beta \end{bmatrix}$$

KM2 出射光线 A_2' 的直线方程为:

$$\frac{x - x_2}{-\sin 2\beta} = \frac{y}{0} = \frac{z - z_2}{\cos 2\beta}$$

同理, 可计算出出射光线 A_2' 与 KM3 的交点为 $(x_3, 0, z_3)$

$$\text{KM3 出射光线向量: } \vec{A}_3' = M_3' \cdot \vec{A}_2' = \begin{bmatrix} \sin 2\varepsilon \\ 0 \\ \cos 2\varepsilon \end{bmatrix}$$

KM3 出射光线的直线方程:

$$\frac{x - x_3}{\sin 2\varepsilon} = \frac{y}{0} = \frac{z - z_3}{\cos 2\varepsilon}$$

该直线方程与原成像面的交点为:

$$E_x = \tan 2\varepsilon \cdot (z - z_3) + x_3$$

● K 镜在 Z 轴上的旋转: 无影响。

读学位期间发表论文

- [1] 魏焯艳, 王东光, 梁明, 侯俊峰, 邓元勇, 张志勇, 孙英姿. 天文望远镜消旋 K 镜光学结构设计及分析[J]. 中国激光, 2016, 43(3)

致 谢

从2013年到2016年，硕士研究生的这三年，我经历很多，成长很多，感触很多，需要感谢很多很多人在这三年的道路上给予我的帮助和鼓励。

首先要感谢的是我的导师王东光研究员。能成为王老师的学生，是缘分也是幸运。王老师把我领进科研这道门，教会我作为一名研究生对待问题的态度和思考方式，这让我对科研产生了兴趣。在课题上，王老师给了我很多指导意见，指明关键性的问题，这对我的课题和研究内容很有帮助。在做课题时，我遇到了三大难点（第一个是不知道如何开始或者研究内容到底分几块，第二个是把设计方案实体化，第三个是实验），每次王老师都给我耐心地分析，让我有信心开展下一步的工作。老师在生活中真的照顾和关心我很多，尤其我在得知自己生病之后，老师第一时间安慰我，给予我帮助。在亲人不在身边的情况下，王老师给了我第一个支撑的力量。手术顺利完成后，老师还专门来探望我，叫我放下学业的压力，好好养身体，然后我就厚着脸皮地在家宅了一个月。文字写得虽然很轻松，但我真的非常非常感谢王老师。

还需要感谢怀柔基地主任邓元勇研究员给我们营造了一个自由宽松的学术氛围，让我们可以专心做自己的课题。还有谢谢站长王蕙老师，一直以来给我鼓励和帮助。感谢张洪起老师、张枚老师、苏江涛老师、林佳本老师，他们在各自研究的领域都很认真严谨，让我觉得做天文是一件特别酷的事情。

我的一帮子师兄师姐同志们，大师兄张志勇、二师兄侯俊峰、大师姐孙英姿、二师姐张洋，还有张小敏、曾真、杨潇、郭晶晶、姜杰、赵翠、陈洁、徐海清、Priya、王绚、孙文君、白先勇、宋永亮、杨尚斌、高裕、刘锁，他们聪明善良热心，在科研上给了我很多意见，让我少走了一些弯路；生活上又一起蹭吃蹭喝，一起跑步，一起探讨人生。自己很幸运能结实这些人，和他们成为朋友，很难得也很感激。

怀柔基地一直给我那种大家庭的感觉，大家互相帮助，努力做好工作，团结完成任务。我很荣幸能成为其中的一员，并贡献自己微不足道的力量。感谢包亚东师傅、张鼎波师傅、汪国萍老师、阮文东师傅、杨桂莲师傅、王立东师傅、靳帅，感谢他们在怀柔的时候给予我的帮助。

感谢毛信杰老师，感谢您给予我的教导和鼓励，关心和支持。毛老师对自己专业的执着、兴趣和热情让我敬佩，对晚辈的关心和教育让我感动。同时感谢梁明老师在课题上给予我的帮助，让我对所做的课题有更深一步的了解，每次邮件来往都很耐心地解答我的问题。也感谢梁老师不厌其烦地帮我寄推荐信。

感谢在国家天文台结识的朋友们：周威萍、谢津津、周丽、王春香、白静、王玉婷、郝巧莉、俞欣颖、何敏、王佳鑫、张驹。感谢你们的陪伴和鼓励。感谢父母、亲人和朋友，感谢他们在我人生低谷、挫折时开导我、帮助我，让我能够走到今天。

我总觉得我上辈子一定是拯救了全宇宙，现在才能遇到这么多好人。无论未来的道路是怎样的，我希望自己还能保持乐观纯真感恩的心走下去，“Per Aspera Ad Astra”。