

文章编号 1004 924X(2004)02-0156-05

双电机单元光纤定位机构

韩光宇^{1,3}, 刘伟¹, 周刚², 高云国¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 长春理工大学, 吉林 长春 130022;

3. 长春大学, 吉林 长春 130022)

摘要: 通过对天文观测中光纤定位典型方法的分析, 结合工程的特点和工作要求, 提出了在焦面上进行分区, 并且在单元区域内做直线运动和旋转运动的双电机单元光纤定位机构的方法。该方法能到达区域内的任意一点, 进而多个单元机构可以到达整个焦面上的任意位置, 完成定位光纤的目的。对这一结构进行了原理分析和精度、定位时间的计算, 能够满足工程使用要求。用7根单元机构模拟了4 000根单元的相互关系, 结果表明, 机构的重复性误差和目标点定位误差的均方根值的最大值是22.17 μm 和30.71 μm , 能够满足望远镜快速、准确的定位要求。

关键词: 光纤定位; 双电机单元; 检测

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Optical fiber positioning unit with two electromotors

HAN Guangyu^{1,3}, LIU Wei¹, ZHOU Gang², GAO Yur guo¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;*

3. *Changchun University, Changchun 130022, China*)

Abstract: In the LAMOST (Large Area Multi Object Fiber Spectroscopy Telescope) project, 4 000 optical fibers are mounted on a focal plane of 1.75 m in diameter, the position precision is less than 40 microns, and the positioning time is less than 30 minutes. By analyzing the typical method of positioning optical fibers for astronomic observation and taking into consideration the structural characteristics and the operating requirements of LAMOST, a new plan has been brought forward for positioning of optical fibers in a local plane divided into many unit zones. The unit turns round through 360°, and the locomotive block moves in a linear guide in every unit zone. So the optical fiber can reach everywhere in the focal plane. Experiment results show that the standard deviation of repeat error and positioning error are 22.17 μm and 30.71 μm rms, respectively, and the positioning precision of this system can meet the demand.

Key words: optical fiber positioning; two electromotor unit; detection

1 引言

国家大科学项目 LAMOST 天文望远镜是一架中星仪式大视场、大口径反射施密特望远镜, 它主

要用于大天区面积多目标光纤光谱的观测工作^[1-2]。望远镜接收焦面直径为 1.75 m, 要求每次观测前将 4 000 根光纤接收端精密对准各自观测的星光并定位于接收焦面上, 可以同时观测 4 000 个星像目标进行光谱观测。

收稿日期: 2003-11-02; 修订日期: 2004-01-05.

基金项目: 国家“九五”科学工程资助项目(No. 98BJG001)

1 个多目标光纤光谱系统有 N 根光纤。设想有 M 个待测天体分布在望远镜的视场内, 观测时 N 根光纤要对准其中 L ($L \leq M$) 个目标。对于每次观测, 望远镜所对天体的位置是不一样的, 这就要求每次观测都要重新移动光纤到新的位置。光纤定位的任务是每次观测前将光纤移动到所要求的位置。光纤定位系统有 2 个主要组成部分: 一是把光纤固定在指定位置的光纤保持机构; 二是定位图形变换时, 移动光纤的光纤驱动机构。

2 LAMOST 光纤定位的主要技术指标

(1) 光纤定位的精度要求

光纤入光端在焦面上的定位误差小于 $40 \mu\text{m}$, 离焦量小于 $100 \mu\text{m}$, 星光入射方向与光纤入光面不垂直度小于 1.0° 。

(2) 定位时间小于 30 min。

3 典型光纤定位方法

目前, 世界上已经有许多多目标光纤光谱仪在观测和建造, 其中最具代表性的是 SDSS 和 2df。SDSS 的光谱观测在 2.5 m 望远镜的 3° 视场内使用 640 根光纤, 巡天观测深度 18.7 等星。2df 在 4 m AAT 的主焦面 2° 视场内使用 400 根光纤。它们采用的光纤定位方法分别代表着两种最流行的用于较多光纤的定位方法。下面分别给予简介。

3.1 插板方法

为了实现光纤定位的目的, 最基本的方法是在焦面上放一块焦面板, 其上按要求的位置打 N 个小孔, 将光纤插入其中, 称为插板方法 (Plug-plate, 简称 PP)。最初的多目标光纤光谱仪就是采用此方法, 如 SDSS。插板方法是一个固定点阵的定位系统, 只能实现一种位置图形的光纤定位。对于不同图形的定位是通过更换不同图形的光纤定位板来实现的。焦面板为光纤定位提供了位置基准, 观测不同的天体则更换不同的焦面板, 打了孔的焦面板也是光纤保持机构, 重新定位光纤是通过人力更换光纤定位板实现的。光纤的定位精度依赖于打孔机打孔的位置精度。

3.2 机械手方法

如果在无孔的焦面板上采用一种定位方法能

在焦面上任意位置将光纤定位, 反复使用这种定位方法, 就可以实现一套定位系统多次观测的目的^[3]。最成功的方法是磁扣固定光纤法, 在光纤入光端装一磁扣, 依靠磁力吸附在焦面板上, 每次观测前由人或机械手将各个磁扣放置在要求的位置。用机械手摆放光纤装置 Autofib 系列, 成功地应用于包括 2df 在内的一些系统中, 这种方法称为机械手方法 (或 Autofib, 简称 AF)。这是一种每根光纤可以定位于整个焦面上或焦面上很大的区域内任何位置的光纤定位系统, 使用起来很灵活。磁扣和焦面板是光纤保持机构, 机械手驱动光纤并检测位置。

3.3 分区方法

实际工作中, 并不需要每根光纤都能放在视场内任意一点。可以把视场分成重叠或不重叠的若干小区, 每根光纤只能在一个小区内移动, 每个小区内只有一根光纤。该光纤可以安放在一个机械装置上, 并在这个小范围内做二维运动, 而机械装置排列在焦面上, 这就是所谓的分区方法。由于每根光纤运动范围很小, 并避免了机构之间的相互干涉, 可以显著地增加光纤数目。

4 双电机单元光纤定位方法

根据 LAMOST 工程的特点, 采用插板方法虽然最为简单, 但是 4 000 根光纤更换系统是比较费时费力的, 因此这种方法不宜采用。而机械手顺序摆放的方法, 虽然在当前光纤定位当中技术已比较成熟, 但是 LAMOST 光纤数目众多, 在 1.75 m 直径焦面上最多只能放入 1 200 根光纤, 很难摆放 4 000 根光纤, 所以这种方法也不适用。

基于上述原因, 拟采用分区双电机单元光纤定位方法^[4]。

4.1 光纤定位机构的主要部分

这一定位系统主要由两个部分组成, 即旋转电机驱动部分和直线电机驱动部分。该结构由直线导轨、光纤移动导块、驱动斜块、直线运动减速电机、直线零位挡块、回转运动减速电机、回转零位挡块、转动壳体、固定壳体、光纤、导线和定位板组成。双电机单元 (简称光纤支架) 驱动光纤定位结构见图 1。

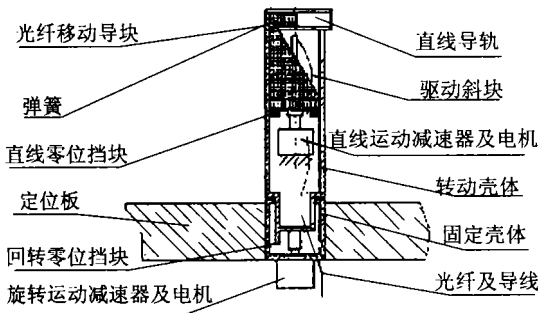


图 1 双电机光纤定位结构

Fig. 1 Positioning machinery of optical fiber with two electric motor

4.2 双电机单元光纤定位原理

光纤支架的定位原理如图 2 所示。光纤定位运动由直线运动和旋转运动组成。光纤支架在单元区域内, 并以此区域的中心为圆心做 360° 的旋转运动, 然后在旋转运动的基础上做直线运动。这样, 光纤移动导块可以到达以中心回转轴为圆心, 直线导轨为半径的圆内任何地方, 光纤放置在光纤移动导块的前端。

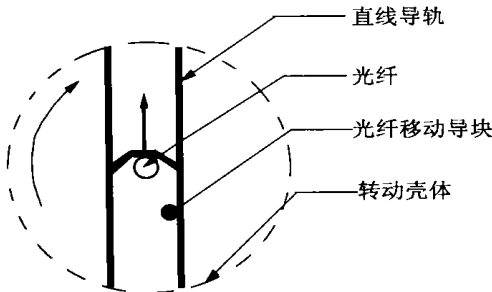


图 2 运动原理

Fig. 2 Principle of movement

将固定壳体安装在定位焦面板上, 旋转电机与固定壳体固定, 并由旋转电机带动转动壳体做 360° 范围内的旋转运动。转动壳体与固定壳体同轴, 轴线与焦面板垂直, 并且通过定位圆区域的圆心。直线电机驱动部分与旋转壳体固定连接, 使得直线电机驱动部分可以随同旋转壳体做旋转运动。直线步进电机带动丝杠推动驱动斜块和光纤移动导块在直线导轨内滑动来实现直线运动。光纤定位时的运动方向是光纤由回转中心朝向远离回转中心方向移动, 旋转电机驱动导轨做顺时针旋转; 回零时, 2 个运动方向与定位时相反。光纤支架在每一次做定位运动时, 都必须保证转动壳

体和驱动斜块处于零点的位置, 这样不仅可以有效地避免在运动过程所产生的积累误差, 同时为运动到目标点的计算提供了方便。

由于 LAMOST 采用分区定位光纤的方法, 即每根光纤都安装在各自的光纤支架上, 并且在各自的分区范围内进行二维运动, 而且 LAMOST 所用光纤比较多, 这样相邻的光纤支架在运动过程中可能发生干涉碰撞的现象。因此, 在光纤定位时, 采用先做旋转运动, 再做直线运动; 回零时则采取先做直线运动, 再做旋转运动的方案。

在单元焦面内, 光纤的运动范围分为超区和不超过区 2 种, 超区范围是半径为 11~20 mm 的圆环, 不超过区范围是半径为 11 mm 的圆面。不超过区工作范围是指各光纤在此范围内工作时, 彼此不会发生碰撞; 超区工作范围是指光纤处于此范围时, 有可能与其他相邻光纤单元机构发生碰撞。超区工作是为避免光纤定位盲区和提高观测效率, 在超区工作的区域, 有 2 个单元甚至有 3 个单元的光纤可以到达。为了避免光纤单元之间的碰撞, 在控制系统中加入了碰撞判断程序。通过这种控制系统, 光纤可以到达焦面板的任意区域。同时, 无论是否超区, 光纤单元之间都不会发生碰撞, 较好地解决了多光纤的定位问题。

4.3 运动精度分析^[5,6]

根据 LAMOST 工程定位精度的需要, 定位运动的分辨率达到精度的 1/5 (即 8 μm), 均能满足要求。

直线运动精度分析: 采用步距角 α 为 18°, 速比 i 为 16:1 的减速步进电机, 丝杠导程 p 为 0.5 mm, 斜面比例 L 为 2:1, 理论进给分辨率 N 为:

$$N = \frac{\alpha}{360} \times \frac{1}{i} \times p \times \frac{1}{L} \times 1000, \quad (1)$$

则分辨率为 0.78 125 μm。

回转运动精度分析: 采用步距角 α 为 18°, 速比 i 为 1 024:1 的减速步进电机, 超区的最大半径是 r, 则分辨率为 6.14 μm, 最大理论进给分辨率 N 为:

$$N = \frac{2\pi\alpha}{360} \times \frac{1}{i} \times r \times 1000, \quad (2)$$

4.4 定位时间的计算

回转运动定位时间: 定位步进电机频率 f 为 1 500 Hz, 步距角 α 为 18°, 减速器的速比 i 为 1 024:1, 电机驱动转动壳体一周的时间 t 为:

$$t = \frac{1}{f} \times \frac{360}{\alpha} \times i, \quad (3)$$

则转动一周的时间为 13.65 s。

最大定位时间为(回零加定位):

$$13.65 \times 2 = 27.3 \text{ s}$$

直线运动定位时间:定位步进电机频率 f 为 1500 Hz, 步距角 α 为 18° , 减速器的速比 i 为 16:1, 丝杠导程 p 为 0.5 mm, 斜块比 L 为 2:1, 最大半径 r 时的定位时间 t 为:

$$t = L \times \frac{360}{\alpha} \times i \times \frac{1}{f} \times \frac{1}{p} \times r, \quad (4)$$

总的最大定位时间是:

$$27.3 + 34 = 61.3 \text{ s}$$

所以在最大半径为 20 mm 时的定位时间为 17 s,

则最大定位时间(回零加定位)为:

$$17 \times 2 = 34 \text{ s}$$

这样光纤定位时间远小于 30 min 的定位要求,可以极大地提高望远镜的使用效率。

5 实验结果

为了检测双电机单元光纤定位机构的定位精度,搭建了光学检测装置,主要由 SF8 探测器,NIKKOR 定焦距光学镜头,标准靶和光源等组成。

检测原理:用 SF-8 探测器给光纤拍照,对照片进行图像处理,从而得到光纤在空间中准确的二维位置。

检测方法:在这个检测过程中,SF-8 探测器中 CCD 芯片上的像素就是测量的尺子^[7]。在暗室条件下,首先对标准靶进行拍照,拍得的照片作为基准。然后,让光纤支架在焦面上做二维运动,带动光纤到某一位置,用相机对光纤的输出端拍照,在黑白照片上,得到白色光斑,通过与标准靶进行比较,经过图像处理得出照片上点的位置数据,就可以得到光纤测量位置。

为了检测光纤定位机构在执行单一任务时的稳定性和准确性以及运动到某一目标点的准确性,进行了重复性检测和定位检测。

5.1 重复精度检测

为了检测本系统的重复精度^[8],对 7 根光纤支架进行了检测。检测方法为:为各光纤给定一个目标位置,检测光纤到位后的位置坐标,然后回零,再给定同样的目标位置,检测到位后的光纤坐

标,如此连续做 20 次,以第 1 次为基准,计算和后面每次检测的位置坐标的距离。该距离为重复性定位误差值,对于 k ($k = 1, 2, \dots, 7$) 号光纤单元第 i 次 ($i = 2, \dots, 20$) 所测值与第 1 次所测值的距离设为 L_{ki} , 则其误差平均值 μ_k 和均方根误差 σ_k 分别为:

$$\mu_k = \frac{1}{19} \sum_{i=2}^{20} L_{ki}, \quad (5)$$

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{19} \sum_{i=2}^{20} (L_{ki} - \mu_k)^2}, \quad (6)$$

表 1 给出了检测结果。

表 1 重复性误差(单位: μm)

| Tab. 1 Error of repeat positioning (Unit: μm) | | | | | | | |
|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 单元 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 均方根误差 | 21.8 | 11.42 | 14.53 | 19.88 | 22.17 | 12.49 | 12.69 |

5.2 定位精度检测

同样是利用上面的光学检测装置。检测方法:首先采用三点定心的方法,标定每根光纤支架的实际中心,然后确定任意目标点。计算出光纤从中心到目标点时,直线运动和旋转运动所需的直线距离与旋转角度。运动到目标点后,读出实际目标点坐标,与理论坐标值进行比较,所计算出径向距离即为目标点定位误差。

以实际中心为基础,计算理论目标点与实际目标点坐标值的误差,连续选 20 个目标点作为被测对象,计算其误差,并计算误差的均方值。

表 2 给出了各单元目标点误差的均方值。

表 2 定位误差(单位: μm)

| Tab. 2 Error of positioning (Unit: μm) | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 单元 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 均方根误差 | 29.48 | 24.50 | 18.83 | 30.71 | 23.16 | 29.11 | 27.22 |

根据表 2 中所给出的数据,定位误差总体上大于重复性误差。经分析可知有三点原因:一是标定光纤支架的实际中心有误差。因为在定位运动中有旋转运动,若存在回转中心偏移误差,对最后的定位误差影响比较大;二是光学镜头与焦面板有不垂直差,导致检测装置存在系统误差,这一误差对重复性误差没有影响,但是对于每个单元区域的不同位置,则存在着不同的影响;三是光纤

移动导块与直线导轨之间存在间隙误差, 会对定位精度有影响。

从上述 2 个实验检测结果看, 本系统所有的光纤单元机构都能满足性能指标要求。

6 结构特点

(1) 在每个单元区域内, 可同时观测几颗星。每根光纤的工作区域为半径 20 mm 的圆, 扩大了单元的覆盖面积, 覆盖率为 209% ;

(2) 光纤定位单元定位时间短, 可以提高望远镜的使用效率;

(3) 光纤单元直接安装在焦面上, 并且垂直安装, 所以没有原理性离焦;

(4) 光纤定位单元结构简单, 易于制作, 可实现模块化组装, 便于安装和维修;

(5) 光纤支架具有很高的稳定性和定位精度。

7 结束语

本文根据多光纤单元的工作要求, 提出了新的光纤定位方案, 并对这一方案的原理进行了说明, 同时对光纤定位精度进行了分析。对光纤单元进行了重复精度和定位精度检测, 误差均在 $\pm 40 \mu\text{m}$ 之内。该结构不仅为多光纤定位提供了新的方案, 而且为小范围内定位系统提供了成功的范例。

参考文献:

- [1] 高云国. 多光纤密集排列精密定位方法研究[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(5): 470-472.
GAO Y G. Accurate positioning scheme for close range of multi optical fibers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(5): 470-472. (in Chinese)
- [2] 王刚. LAMOST 技术报告[R]. 北京: 北京天文台, 1998: 3-12.
WANG G. *Technique report for LAMOST* [R]. Beijing: Beijing Astronomical Observatory, 1998: 3-12. (in Chinese)
- [3] GAO Y G. The scheme of a not blind positioning structure with parallel adjusting tables and swing rods for 4000 optical fibers of LAMOST[J]. *Astrophysics Reports*, 1996, 29: 94-103.
- [4] 高云国. 双电机单元光纤定位中间实验项目设计报告[R]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2000.
GAO Y G. *Experiment design report of optical fiber positioning unit device with two electromotors* [R]. Changchun: Sponsored by Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2000. (in Chinese)
- [5] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
FEI Y T. *Measuring theory and data processing* [M]. Beijing: Machine Industries Press, 2001. (in Chinese)
- [6] 赵松年, 张奇鹏. 机电一体化机械系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
ZHAO S N, ZHANG Q P. *Mechatronics machine system design* [M]. Beijing: Machine Industries Press, 1996. (in Chinese)
- [7] 周一览, 黄傲, 殷浩. 一种 CCD 显微测量系统[J]. 计量技术, 2000, 6(2): 12-14.
ZHOU Y L, HUANG A, YIN H. CCD microscope measurement system[J]. *Measurement Technique*, 2000, 6(2): 12-14. (in Chinese)
- [8] 周刚, 高云国, 刘伟, 等. 多单元光纤定位系统控制模式研究[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(6): 53-59.
ZHOU G, GAO Y G, LIU W, et al. Research of control mode for multi-optical fiber units positioning system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(6): 53-59. (in Chinese)

作者简介: 韩光宇(1972-)男, 吉林梨树人, 长春大学机械工程学院教师, 现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所读硕士研究生, 研究方向为机械制造及其自动化。E-mail: hanlamost@yahoo.com.cn