Three Kinds of Displacement Sensor for Segmented Mirror Co-focus

WANG Haitao　LUO Qiufeng　XU Xingqi　ZHANG Zhengchao
(Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology/National Astronomical Observatories, Nanjing, 210042 P. R. China)

Abstract: Segmented mirror method is widely adopted nowadays in the world. There are many segment mirrors to make up a large mirror which requires the segment mirrors co-phase or co-focus. It needs piston actuators to make the segmented mirror move and correspond displacement sensor to measure. Now there are three kinds of sensor which can be used for this task: capacitance style, inductance style and opto-electronic style. The capacitance style is the maturest one, but the most expensive one. Opto-electronic style is the most potential one. The character and work theory of these three kinds of sensor are discussed in this paper. Some detail thoughts are pointed to the next generation of giant optical astronomical telescope.

Key words: capacitance; inductance; optical fiber; displacement sensor; segmented mirror; giant optical telescope

用于拼接镜面共焦测量的三种位移传感器①

王海涛　罗秋凤　徐欣圻　张振超
(国家天文台南京天文光学技术研究所, 南京, 210042)

摘要: 目前国际上大型光学望远镜大都采用拼接镜面的方法, 用许多小口径的子镜拼成大口径的主镜。在拼接成大型主镜时要求各子镜镜面共面或共焦, 这就要求子镜在镜面方向有位移促动器动作的同时, 有相应的位移传感器来检测和控制。目前可用来测量这种位移的传感器有三种类型: 电容式、电感式和光电式, 其中电容式位移传感器是最成熟的一种, 价格也最贵; 光电式是最有潜力的一种。文中给出了这三种位移传感器的原理和特点。最后, 指出了下一代大型拼接镜面光学望远镜中所用传感器的考虑。

关键词: 电容; 电感; 光纤; 位移传感器; 拼接镜面; 大型光学望远镜
中图分类号: TP212.9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1004-1699(2003)01-0009-04

目前国际上已经投入和即将投入使用的口径 8 m 及 8 m 以上的大型天文光学望远镜超过了 11 台。从主镜的建造、磨制、运输和成本等方面来看, 单块主镜望远镜的口径极限为 8 m。超过 8 m, 无论从哪个方面来说都是及其困难的。在研制大型天文光学望远镜的过程中, 有人提出了用小镜面拼接成大镜面的方法, 从上世纪 70 年代中期[1]开始便有人开始尝试。这种拼接镜面的方法需要解决许多新的技术问题: 如子镜的面形磨制和切割, 子镜拼接成大镜面时面形的测量、大动程到微动程的位移促动器和相应的位移测量等等。1993 年, 由 36 块对角线 1.8 m 正六边形子镜拼接成 10 m 口径的 Keck I 交付使用说明拼接镜面技术已经成熟。仿 Keck、低造价的口径为 9.2 m 的 HET 也于 1997 年 10 月交付使用。目前国际上正在筹建和研究中的超大型天文光学望远镜有加州理工大学的 30 m 望远镜(CELT)[2], 美国天文光学中心的 30 m 望远镜(GSMT)[3]和欧洲南方天文台(ESO)的 100 m 望远镜(OWL)[4]。所需要子镜的数量是 Keck 的 2～3 个数量级, 如 CELT 计划用 1 080 个对角线为 1 m 的正六角形子镜拼接而成。这就要求在子镜的磨制方面寻求突破的同时相应的促动器和检测器件也应该有更加严格的选择。

来稿日期: 2002-08-07
基金项目: 中国科学院留学经费择优支持回国工作基金(20010513093509)
①作者简介: 王海涛(1968-)男, 博士, 副研究员。从事光电检测, 恒星光干涉技术和计算机控制的工作

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

本文就位移传感器方面已有的和可能被应用的三种传感器作一介绍。

1 电容式位移传感器

电容式位移传感器是用于拼接镜面望远镜中位移检测最成功的一种。它的原理是电容板之间距离 l 与该电容传感器的电容值 C 有一定的关系。当 l 有 Δl 的变化时, 电容就有 ΔC 的变化, 测量出该变化也就可以推算出 Δl。

目前, 电容式位移传感器已经成功应用于 Keck 望远镜。该传感器的大小为 $150\,mm^3 \times 100\,mm^3 \times 75\,mm^3$, 重量为 2 kg, 在+ /- 12 μm 范围内, 分辨率为 3 nm[5]。该电容传感器的结构如图 1 所示, 安装在望远镜中的照片如图 2 所示。图 2 中左边是电容式位移传感器的传感部分, 右边是该传感器的活动部分。

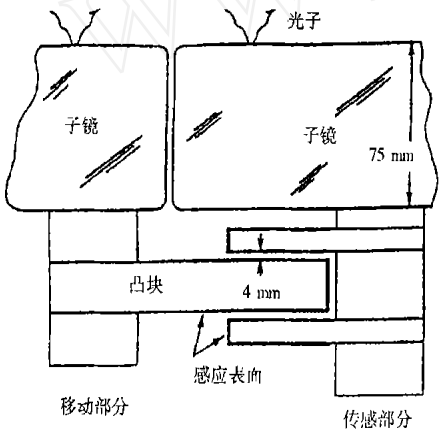

图 1 子镜背面的位移传感器的位置

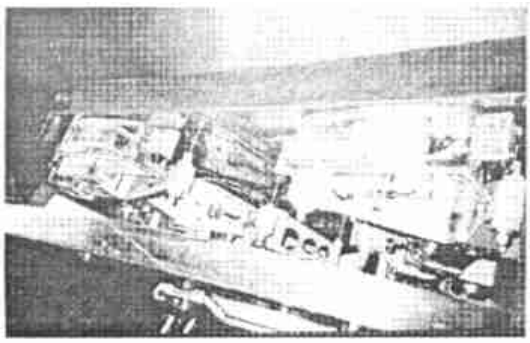

图 2 传感器实际安装的位置照片

它们安装在子镜的一条边上, 与相邻子镜的另一条边上对应的活动部分和传感部分一起, 组成拼接镜面的一条拼缝上的两个位移传感器。Keck 使用了 168 个电容位移传感器, 研究中的 CELT 计划使用 6 204 个位移传感器[2]。Keck 望远镜中使用的这种传感器单个造价是$ 5 000。如果 CELT 建造使用的话, 这么大的量, 估计造价将大大降低。

2 电感式位移传感器

电感式位移传感器是继电容式位移传感器之后新开发的一种传感器。这种位移传感器最显著的特点就是体积小, 重量轻, 做在线路板上的电感线圈只有人民币一角硬币大小, 易于安装。它与电容式位移传感器相比, 测量范围+ /- 300 μm 内, 分辨率较低, 为 20 nm。这种位移传感器已经在 HET 的七块子镜的中间实验 SAMS 中获得成功[6], 目前正在 HET 上联调。它的原理是通过测量线圈对之间的电感变化来测量相应位移的变化。图 3 是电感式位移传感器的安装在子镜背后的照片。图中是三块子镜拼成一个面中所用的三对传感器。

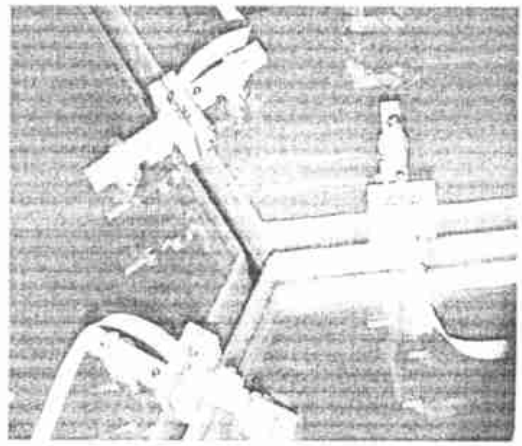

图 3 子镜背面的位移传感器的位置

3 光纤位移传感器

光纤传感器技术是目前发展最快的一种。光纤位移传感器已经有许多成熟的应用, 如能够测量牙齿咬合运动[7]和物体面形[8]等等。近几年来, 这种传感器在拼接镜面共焦用测量方面的应用也有不少探讨和研究。在我们和国外的交流中得知, 欧洲南方天文台(ESO)的 100 m 望远镜 OWL 的位移传感器考虑选用这种传感器。

反射式光纤微位移传感器的测量原理见图 4 所示, 光缆和连接的光纤头是由两束多股光纤组成, 其中一束是将激光经光缆引导至光纤头的出射端面, 以一定的散射角出射, 照射到被测物的表面上, 部分反射光经邻近光纤头中另一股光纤束接收, 经光电转换并放大, 使得测量输出范围在 0～5 V 之间。而

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

输出电压的大小与光纤头端面到被测物面之间的距离有关。经校准, 可得该种光纤传感器的输出相应于被测距离的特性曲线(图 5 所示), 并且可以拟合出两者的曲线表达式。在实际测量时, 通过此表达式, 将实测的输出电压值代入, 即可知被测量的距离。因而只要测得位移前光纤头端面到被测物表面之间的距离 D_1 和位移后的 D_2, 两者之间的差就是要测量的值。光纤位移传感器的测量精度与量程有关, 量程越大, 光纤束越粗, 精度也就相对较低; 反之, 光纤束越细, 精度就高。

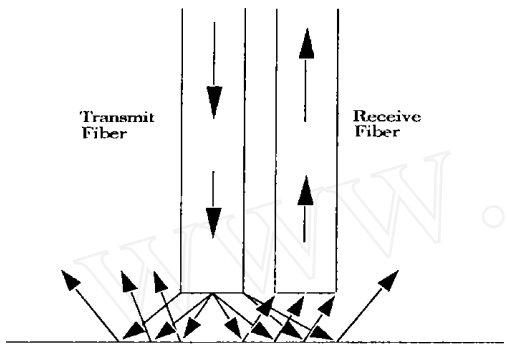

图 4　反射式光纤位移传感器工作原理

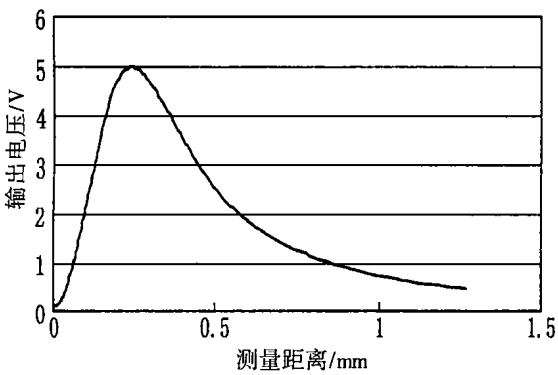

图 5　光纤微位移传感器的输出特性曲线

光纤位移传感器具有测量精度高和非接触测量的特点, 尽管在许多领域有成功应用的例子。但是由于在拼接镜面共焦测量方面的特殊性, 即大批量地使用以及使用场合的温差相当大等特殊的条件, 因而光纤位移传感器在此方面的应用存在四个有待解决的问题:

① 光源的稳定性(主要指长时间的稳定性)没有解决, 因此, 依赖光强的输出信号不可信(指长时间方面);

② 光纤位移传感器工作范围, 测量距离的波动超过特征曲线的极值时(即工作在近端和远端范围的判断), 在大量传感器工作时, 尚无好的判别的方法;

③ 大量传感器工作时以及工作过程中, 传感器位置变化, 导致出射光与反射面之间夹角的不稳定(指不垂直性)引起输出结果的不可靠;

④ 尚未试验证明, 长时间所造成反射面与光纤端面之间由于端面的氧化或表面灰尘堆积的问题不影响结果输出的准确性。

有了这些问题并不是说光纤位移传感器不可能应用在拼接镜面的共焦测量方面。事实上这四个方面的问题是有解决的途径的[9]。例如第一点的光源稳定性问题, 可以考虑用光源分幅和增加参考臂的方法加以解决。

由于光纤位移传感器有着测量精度高, 非接触的特点, 同时价格较 Keck 的电容式的低: 单件传感器加电源、电子控制盒等才 3 000 马克一套, 同时测量范围较电容式传感器大得多。如果能大批量应用在这方面, 则价格将会更低。

4　拼接镜面共焦用位移传感器的发展方向

拼接镜面是今后大型光学望远镜的方向。有了拼接镜面技术, 10 m 的 Keck 才能成为现实; 有了该项技术, 30 m、100 m 乃至更大的光学望远镜的建造不再是空谈。而拼接用的子镜都采用小口径, 例如 10 m 口径的 Keck 采用 1.8 m 大小的子镜, 而筹建中的 30 m CELT 才采用 1 m 大小的子镜, 这是因为镜面越小, 成本越低, 越易加工。这样子镜数目随口径的增大而成几何量级的增大, 同时所需的检测器件也成几何量级地增大。对于位移传感器而言, 首先要求造价降低, 象 Keck 用了 168 个单价为 $ 5 000 的电容式位移传感器已经难以承受了, CELT 需用 6 204 个, 如果还是这么贵, 那将无法想象; 传感器的个体要求小, 重量要轻。象电容式的位移传感器大小为 150×100×75(单位: mm^3), 在子镜背面要求预留位置, 并且要求对预留位置进行加工磨制。现在大型光学望远镜有的还采用了薄镜面主动光学技术, 在子镜背面加上许多力促动器, 这样子镜背面的空间就会很拥挤, 对于每边采用两个位移传感器来说, 每个子镜要求 12 个大小为 150×100(单位: mm^2)的空间(假设子镜都是正六边形)将会很困难; 易于安装和拆卸, 便于更换; 在望远镜长时间的工作期间输

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

出要求稳定。

电容式位移传感器成功地应用于 Keck, 它是拼接镜面位移传感器的标志。但是它体积大, 重量大, 测量范围小, 不易安装和拆卸, 占的空间大等缺点。电感式的位移传感器与电容式的相比有许多突出的优点: 体积小, 重量轻, 易于安装和拆卸等等。但是电感式位移传感器的缺点是测量精度低, 到现在在拼接镜面共焦用望远镜中尚未得到成功(正在调试)。光电式位移传感器集前面两者的优点, 但是有着自身的许多问题有待解决。

5 小 结

本文详细介绍国际上开展大型光学望远镜研制过程中可以应用的三种位移传感器技术, 给出了三种位移传感器的性能价格比, 指出了拼接镜面共焦用的位移传感器发展方向, 即发展高稳定性, 低价格, 体积小, 重量轻, 易于安装和拆卸的传感器。对光纤位移传感器作了详细的分析, 指出了这种位移传感器在拼接镜面共焦测量方面应用的潜力。

参 考 文 献

[1] 黄佑然, 许敖敖, 唐玉华等, 实测天文物理学[M]. 科学出版社, 1987

[2] Mast T, Nelson J, Segmented Mirror Control System Hardware for CELT[C]. 2000; 4003: 226- 240

[3] Boroson T. Workshop on the Science Case for the GSMT[J]. September 2000; NOAO Newsletter: 11 - 12

[4] DierickxP, Delabre B, Noethe L. OWL optical design, active optics and error budget[J]. Proc. of SPIE, 2000; 4003: 203- 209

[5] Email communication from Dr. Bob Minor (researcher and designer of Keck displacement sensor), 2002. 4. 9

[6] Booth J A, Adams M T, Ames etc G, et al. Development of the segment alignment maintenance system (SAMS) for the Hobby- Eberly Telescope[J]. Proc of SPIE, 2000; 4003: 176- 187

[7] 王海涛, 罗秋凤, 周必方等, 反射式光纤位移传感器在测量牙齿咀嚼过程中的应用[J]. 光学精密工程, 2002; 8(1); 10(1): 61- 65

[8] 曾毅, 侯国章, 一种新型光纤传感器在精密产品加工中的应用研究[J], 光学精密工程, 9(2) 139- 141

[9] 王海涛, 张振超, 徐欣圻等, 光纤位移传感器在共焦用拼接镜面测量中的考虑[C]. 见: 中国天文望远镜及仪器学术交流会, 重庆, 2002 年 9 月

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net