

文章编号: 1000-8349(2009)02-0183-06



三轴无盲区望远镜机架方案

葛志梁, 朱能鸿, 郑义劲

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 该文根据地平式、赤道式、双水平式机架的特点, 提出了一种新型的三轴机架方案, 在相对保持机架结构与力学性能的前提下可克服天顶盲区的问题。文中重点讨论了该机架的结构设计、跟踪模式以及卫星飞出天顶区后方位轴和高度轴的速度问题, 推导了坐标转换和速度、加速度公式, 并对实际卫星进行了计算分析。结果表明, 这种三轴机架方案能够有效克服地平式机架的天顶盲区问题。

关键词: 天文望远镜; 天顶盲区; 三轴机架; 卫星跟踪

中图分类号: P111.2 **文献标识码:** A

1 引 言

当今许多在建和规划中的大口径天文望远镜特别是人卫跟踪仪大多采用地平式机架系统。这种机架力学性能非常好, 而且结构紧凑、体积和重量小, 但它的主要缺点是存在跟踪盲区, 即在天顶附近一个小区域内无法对天体特别是低轨人造卫星进行跟踪观测, 而天顶位置是观测条件最好的区域。赤道式或双水平式机架虽然没有天顶盲区问题, 但是其力学性能是无法与地平式机架相比的, 尤其是当望远镜口径增大时, 对机架的要求将更加苛刻, 采用这两种机架形式的望远镜将变得非常庞大。据评估, 观测室圆顶建筑面积的增长与口径的平方成正比, 望远镜本身重量的增加则是与口径的立方成正比^[1]。因此要建造口径较大、结构紧凑且又无跟踪盲区的望远镜是一个值得研究的课题。

2 三轴机架方案的提出

分析了地平式、赤道式、双水平式机架的特点后, 本文讨论了一种新型的机架结构——三

收稿日期: 2008-05-27; 修回日期: 2009-01-05

轴机架 (如图 1(a) 所示)。该结构的方案最早由朱能鸿院士提出。这一机架本质上仍然是地平式机架, 但增加了第三轴, 即水平的 a 轴。当卫星飞经地平式系统的跟踪盲区 (以下简称盲区) 时, 启动 a 轴, 此时系统成为双水平系统, 可以对盲区内的卫星继续跟踪。由于天顶盲区的范围比较小, 双水平系统跟踪的弧度较短, 主镜端随 a 轴的转动角度很小, 地平式机架的叉臂不会影响主镜端的运行, 因此可以使机架的结构依然非常紧凑 (如图 1(b) 所示)。同时, 这种机架也有利于光学系统的布置, 既可以得到卡氏焦点, 也可以在中间块内安排反射元件, 将光线从高度轴引出得到折轴焦点或耐氏焦点。因此该机架系统兼具了地平式和双水平式的优点, 而复杂性增加有限。

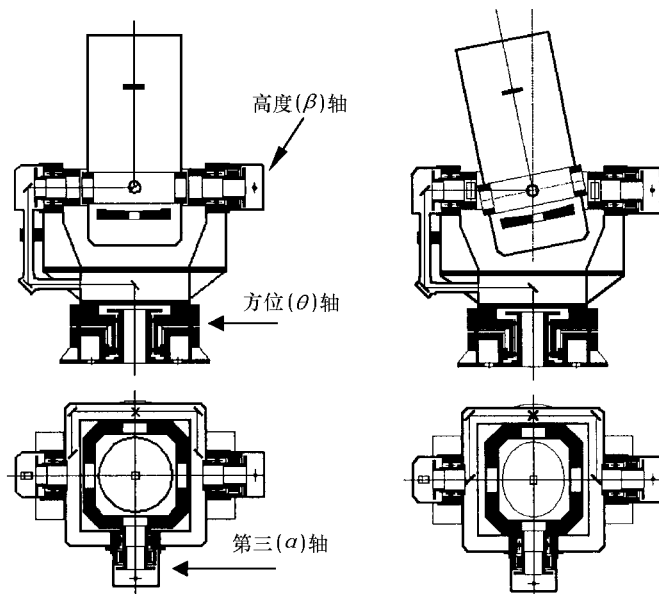


图 1 (a) 三轴机架的轴系; (b) 第三轴转动时的情况

3 三轴系统的运行方式

地平式机架的天顶盲区的特点就是该区域内卫星方位变化非常快, 使望远镜无法跟踪。对于不同高度的卫星, 这一区域范围略有区别^[2](见表 1)。

表 1 卫星在天顶附近的方位角速度 A' 和角加速度 A''

		天顶距 $Z/(\circ)$	20	15	10	5	4	3	2	1
高度 H/km	500	$A'/(\circ)\cdot\text{s}^{-1}$	2.55	3.37	5.02	10	12.5	16.66	24.99	49.96
		$A''/(\circ)\cdot\text{s}^{-2}$	0.07	0.13	0.28	1.13	1.77	3.15	7.08	28.32
1000		$A''/(\circ)\cdot\text{s}^{-1}$	1.23	1.63	2.42	4.83	6.04	8.04	12.06	24.12
		$A''/(\circ)\cdot\text{s}^{-2}$	0.017	0.029	0.066	0.26	0.41	0.73	1.65	6.6
2000		$A''/(\circ)\cdot\text{s}^{-1}$	0.58	0.77	1.14	2.27	2.84	3.78	5.67	11.35
		$A''/(\circ)\cdot\text{s}^{-2}$	0.0037	0.0065	0.015	0.058	0.09	0.16	0.37	1.44

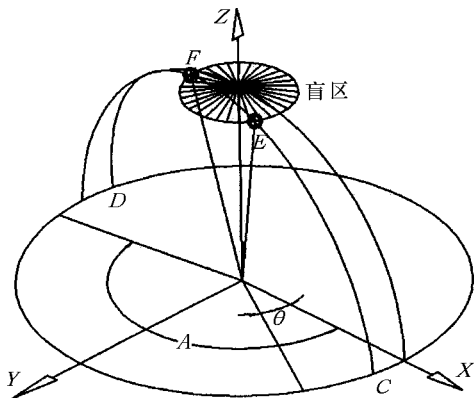


图 2 经过盲区的卫星飞行轨迹

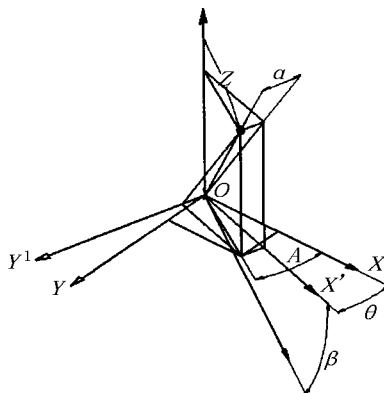


图 3 三轴转动角度变化示意图

本文规定天顶距 $\pm 10^\circ$ 的区域为盲区。卫星飞经该区域时的方位变化的角速度和角加速度相对最快, 因此也可以称为高速区, 盲区之外则称为低速区。如图 2 所示, 卫星由点 C 出联, 点 D 入联, 其中 EF 段在天顶盲区内。三轴系统的跟踪方式是: 在 CE 和 FD 段 (低速区) 采用地平式跟踪系统, EF 段 (高速区) 采用双水平跟踪系统。在每个弧段都只有两根轴在旋转, 引导光轴始终指向卫星, 因此在跟踪过程中就存在转动轴的切换问题。设 (A, Z) 为卫星的方位角和天顶距, θ 、 β 、 α 分别为方位轴、高度轴和第三水平轴的转动角度。建立如图 3 直角坐标系, 其中 Z 指向天顶, X 指北, Y 指东。则得:

$$\begin{cases} \tan \beta = \tan Z \cos(A - \theta) & (1) \\ \sin \alpha = \sin Z \sin(A - \theta) & (2) \\ \tan(A - \theta) = \frac{\tan \alpha}{\sin \beta} & (3) \\ \cos \beta = \frac{\cos Z}{\cos \alpha} & (4) \end{cases}$$

式 (1)~(4) 中只有两个是线性独立的, 即 θ 、 β 和 α 的解并不唯一。显然, 为实现对卫星连续而平滑地跟踪, 同一时刻只能允许两根轴转动, 望远镜需根据卫星的位置在地平式和双水平式系统之间切换。

(1) 当 $\alpha=0$ 时, 表明卫星尚未进入盲区, 采用的是标准的地平式跟踪系统。

(2) 当 θ 为常数时, 表明第三轴启动, 卫星已经进入盲区, 采用的是标准的双水平式跟踪系统。

(3) 当 α 是一个不为 0 的常数时, 也是一个地平式系统, 表明卫星已经飞出盲区, 但光轴与高度轴已不再正交 (见图 1(b)), 可以称之为“非标准地平系统”。

4 三轴机架的跟踪速度

对三轴机架跟踪速度的讨论主要针对卫星飞出盲区后, 方位轴和高度轴的速度变化情况。

根据式 (1)~(4) 推导出速度和加速度公式如下:

$$\begin{cases} \dot{\beta} = \frac{\tan Z}{\tan \beta} \dot{Z} & (5) \\ \dot{\theta} - \dot{A} = \frac{\tan(A - \theta)}{\tan Z} \dot{Z} & (6) \\ \ddot{\beta} = \frac{\tan Z}{\tan \beta} \ddot{Z} + \frac{(\sin \beta)^2 - (\sin Z)^2}{(\sin \beta \cos Z)^2 \tan \beta} \dot{Z}^2 & (7) \\ \ddot{\theta} - \ddot{A} = \frac{\tan(A - \theta)}{\tan Z} \ddot{Z} - \frac{(\cos Z)^2 + [\cos(A - \theta)]^2}{[\sin Z \cos(A - \theta)]^2} \tan(A - \theta) \dot{Z} & (8) \end{cases}$$

\dot{A} 和 \dot{Z} 分别为卫星的方位和天顶距的变化速率, $\dot{\theta}$ 和 $\dot{\beta}$ 分别为地平系统的方位轴和高度轴转速, 在标准地平系统中 $\dot{A} = \dot{\theta}$, $\dot{Z} = \dot{\beta}$ 。当卫星飞出盲区后, \dot{A} 和 \dot{Z} 入低速区, 但式 (5) 和式 (6) 的结果表明, $\dot{\beta} > \dot{Z}$, $\dot{\theta}$ 也可能大于 \dot{A} , 即方位轴和高度轴转速并不一定会降低, 这是因为光轴与高度轴非正交引起的, 因此有必要讨论非标准地平系统中方位轴和高度轴的速度变化情况。

由公式可以看出, 卫星在飞出盲区的瞬间, 系统的方位轴和高度轴的速度和加速度最高, 在这个位置 $A - \theta$ 表示卫星进出盲区时的方位差:

(1) 当 $A - \theta = 0^\circ$ 时, 表明卫星没有进入盲区, 无需启动双水平系统便能对卫星进行连续跟踪, 此时 $\alpha = 0$ 。

(2) 当 $A - \theta = \pm 180^\circ$ 时, 表明卫星直接飞过头顶, 在盲区内第三轴也可以不起作用, 即 $\alpha = 0$ 。

(3) 当 $A - \theta = \pm 90^\circ$ 时, 方位轴和高度轴的速度与加速度都将趋于无穷, 此时 $\alpha = Z$ 。

显然在实际过程中, 后两种情况不可能出现, 但当 α 由 $0 \rightarrow Z$ 时, 方位轴和高度轴的速度和加速度都将由最小 $\rightarrow \infty$, 因此卫星进出盲区时的方位差非常重要。一般越接近天顶的卫星, 其 $A - \theta$ 越接近 $\pm 180^\circ$, 因此高速区的范围不能设得过大, 取天顶距 $\pm 10^\circ$ 的范围比较合适。

5 实 例

分别设盲区范围为 $\pm 20^\circ$ 和 $\pm 10^\circ$, 对卫星 S1 和 S2 进行计算, 并模拟跟踪, 结果见表 2。

表 2 卫星 S1 和 S2 的最大方位角速度及出盲区时刻方位轴的速度

盲区范围	卫星	最小天顶距 / ($^\circ$)	最大方位角速度 / ($^\circ$)·s $^{-1}$	进出盲区时的方位差 / ($^\circ$)	出盲区时的 α / ($^\circ$)	出盲区时方位轴的加速度 / ($^\circ$)·s $^{-2}$	出盲区时方位轴的速度 / ($^\circ$)·s $^{-1}$
$\pm 20^\circ$	S1	3.759	-7.09	-161.688	-6.52	0.036	0.178
	S2	16.445	-1.65	-63.089	-18.729	-0.55	-2.75
$\pm 10^\circ$	S1	3.759	-7.09	-147.152	-6.608	0.179	0.894
	S2	16.445	-1.65	0	0	0	0

模拟与计算的结果表明:

(1) 卫星 S1 方位变化最高角速度为 $-7.09^\circ \cdot s^{-1}$, 采用三轴系统后, 方位轴在盲区内的速度为 0, 出盲区的最高速度为 $0.894^\circ \cdot s^{-1}$, 有效地解决了盲区跟踪问题。

(2) 卫星 S2 方位变化最高角速度仅为 $-1.65^\circ \cdot s^{-1}$, 无需启用 a 轴。因此, 当天顶盲区范围设置过大时, 将启动 a 轴, 方位轴转速可达 $-2.75^\circ \cdot s^{-1}$, 跟踪效果反而变差。

(3) 在盲区内 a 轴转速比较低, 卫星飞出盲区后, 高度轴的转速仅略高于卫星天顶距变化角速度, 因此三根轴的转速完全可以满足跟踪要求。

6 结 论

三轴机架兼具地平式和双水平式机架的优点, 有效地解决了天顶盲区的跟踪问题, 在系统控制和结构设计等方面的复杂性增加有限, 容易控制成本。该机架跟踪卫星进出盲区时, 由于跟踪模式切换的原因, 方位轴和高度轴的速度会有跳动现象, 但只要盲区范围设定合理, 对跟踪的影响并不大, 因此这是一种可行的机架方案。

参考文献:

- [1] Bruce H R. In: Richard M W ed. ESO/CERN Conference on Large Telescope Design. Geneva: ESO, 1971: 285
- [2] 谢 强, 朱能鸿. 中国科学院上海天文台年刊, 2003, 24: 126
- [3] 程景全. 天文望远镜原理和设计. 北京: 中国科学技术出版社. 2003: 89
- [4] 夏一飞, 黄天衣. 球面天文学. 南京: 南京大学出版社. 1995

The Design of a 3-axis Mount Without Blind Area

GE Zhi-liang, ZHU Neng-hong, ZHENG Yi-jing

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: Alt-azimuth mount is often used for most of the state-of-the-art large telescopes especially satellite trackers. It has compact structure and excellent mechanical performance, but the blind area near the zenith makes it difficult to obtain continuous observing data. Although equatorial or ALT-ALT mount hasn't this deficiency, it is relatively larger than alt-azimuth mount with the same aperture size. Meantime dome diameter goes up as the square of the aperture for equatorial mount, which will great increase the manufacturing cost.

A new design of 3-axis mount brought forward here is based on the alt-azimuth mount in which another altitude axis is added. It is simply as an alt-azimuth mount while the satellite isn't in the blind area. The additional axis will start only when the satellite flies into the blind area and the mount is converted to the ALT-ALT one immediately. The ALT-ALT mount works just in a small range since the blind area is very small. Thus the mount integrates the advantages of the alt-azimuth and ALT-ALT mount.

Laying out the sketch of this design, the paper mainly discusses its tracking method and deduces the coordinates converting equation. It also analyzes the rotating velocity and acceleration of the 3 axes when the satellites fly off the blind area. Two real examples are given finally. It proves that the 3-axis mount is a feasible design in constructing telescopes of 2 meters or larger.

Key words: astronomical telescope; blind area; 3-axis mount; satellite tracking

* * * * *

《天文学进展》 征稿启事

1. 本刊刊登反映国内外天文学研究的最新进展和作者见解的述评、研究论文、前沿介绍、专题讲座、研究快报 (应少于 5000 字)、学术活动报导和短评 (均应少于 1500 字)。反映新思路、新手段、新成果的短评优先发表。

2. 来稿须包括: 题名、作者署名、作者单位及所在地与邮政编码、摘要、关键词、正文、参考文献、英文摘要、英文关键词等。

3. 来稿应论点明确、叙述精练、条理清晰、深入浅出, 以利非本分支学科的读者阅读。

4. 摘要应简明扼要地概括正文中的主要信息。采用第三人称的写法, 不用“本文”、“作者”等作主语。稿件如果不以英文发表, 英文摘要不宜太短。

5. 必须在摘要后列出不少于 3 个关键词, 但不应多于 8 个。

6. 稿件中引用论点、公式、图、表均需注明参考文献 (按文中出现顺序编码, 在右上角用小方括号标出)。正文后则按编码次序依本刊要求的编排格式列出相应的参考文献。

7. 图、表务求精、简、规范, 以配合文字阐明观点。公式务求精约, 杜绝公式推导过程。

8. 来稿请注明作者的详细地址和邮政编码、电话、电子信箱。

9. 请勿一稿两投。来稿请一式两份寄至本部, 另请同时提供电子文本 (稿件的所有内容请置于同一文件中)。来稿请寄: 上海市南丹路 80 号《天文学进展》编辑部; 邮编: 200030; E-mail: twxjz@shao.ac.cn。电话: (021)64386191×345; 传真: (021)54592244。