

赤道式望远镜指向精度分析

王志臣¹, 王志¹, 赵勇志^{1,2}

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2.中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 赤道式望远镜因其跟踪测量的简单性和可靠性, 在中小口径的望远镜中得到广泛的应用, 本文介绍了赤道式望远镜的特点, 建立了赤道式坐标系, 并阐述了赤道式望远镜的跟踪测量原理。望远镜在制造、装配和安装过程中会产生视轴与纬轴不垂直、纬轴与极轴不垂直和极轴指北高度偏差等误差, 这些误差严重影响望远镜的指向精度, 文中利用球面三角形在赤道式坐标系中推导出制造、装配和安装误差引起的赤道式望远镜指向误差, 此结果可用于实时测量的误差修正, 也可用于结构设计中的误差分配。

关键词: 赤道式望远镜; 指向精度; 球面三角形

中图分类号: TH751

文献标识码: A

文章编号: 1672-9870(2011)01-0009-03

Analysis of Pointing Precision for Equatorial Telescope

WANG Zhichen¹, WANG Zhi¹, ZHAO Yongzhi^{1,2}

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039)

Abstract: Equatorial telescope is applied broadly in small and middle aperture telescope for its simplicity and reliability. The feature of equatorial telescope is presented. The equatorial coordinate is established and the measure principle for equatorial telescope is discussed. The pointing precision for equatorial telescope is severely affected by many errors which are brought in manufacture and assembly process such as non-perpendicularity between optical axis and latitude axis, non-perpendicularity between polar axis and latitude axis and so on. The pointing precision is deduced by the method of spherical triangle based on the equatorial coordinate. The result can be used not only for correction of actual measurement but also for design of equatorial telescope.

Key words: equatorial telescope; pointing precision; spherical triangle

天文望远镜按其结构可分为赤道式(也称极轴式)、地平式和水平式, 在20世纪中叶以前的二、三百年中, 天文望远镜普遍采用赤道式以能简单而十分有效地对天体进行跟踪观测^[1], 进入20世纪70年代, 随着计算机控制技术的不断发展, 综合考虑重量、体积和成本等因素, 此后建造的大型望远镜几乎无一例外地都采用地平式结构, 尽管如此, 由于重量因素对中、小型望远镜的影响并不大, 而赤道式望远镜的简单性和可靠性使其仍被广泛地应用。对口径1米以下的小型天文望远镜, 以采用赤道式居多; 对口径1~1.5米的中型天文望远镜, 由于赤道式和地平式两者利弊相当, 故两者都得到

应用; 而对口径大于1.5米的大型天文望远镜, 则几乎都选用了地平式结构。

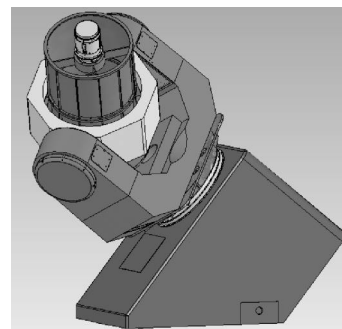


图1 赤道式望远镜

Fig.1 Structure of equatorial telescope

收稿日期: 2010-09-09

基金项目: 国家863计划资助项目

作者简介: 王志臣(1980-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事大口径望远镜结构设计的研究, E-mail: zcwang911@163.com.

赤道式望远镜模型如图 1 所示，一根转动轴与地球自转轴平行，这根轴被称为赤经轴，也称之为极轴，另一根轴与赤经轴垂直，称为赤纬轴，镜筒安装在赤纬轴上实现对空间目标的观测^[2]。赤道式望远镜的最大优点就是天体的视运动可以很容易地利用赤经轴的匀速转动来补偿，在观测天体运动时，它以周日运动方向和速度绕极轴匀速转动，从而抵消了因地球自转而产生的天体的视运动，使它所对准的天体保持在视场当中，且视场中星体位置没有相对转动，这样，就可以进行长时间的观测和照相，同时赤道式望远镜在观察条件最好的天顶位置没有盲区。

1 赤道式坐标系及测量原理

如图 2 所示，原点 O 为地面观测点，NESW 为地平面中的北、东、南、西四个方向，OZ 是天顶方向；OP 是北极方向；过 N、S 和天顶 Z 的大圆（以 O 为圆心的圆）为子午圈，即由北向南过天顶的大圆。

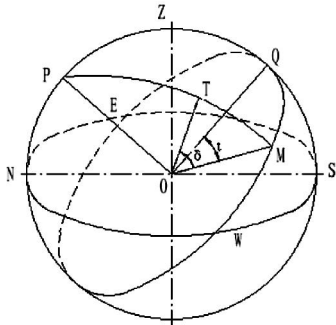


图 2 赤道式坐标系

Fig.2 The equatorial coordinate

赤道坐标系的定义为以观测点 O 为原点，基本平面为赤道面 EQW，主方向为赤道面和子午圈的交点 Q。过空间目标 T 点做赤经圈 PTM 交赤道圈于 M 点，则角 QOM 为时角 t，即空间目标投影到赤道面的平面角，对应于赤经轴的转动，t 的取值范围 $[-12h, 12h]$ ，向西为正，向东为负；角 TOM 为赤纬角 δ ，即空间目标指向与赤道面的空间夹角，对应于赤纬轴的转动， δ 的取值范围 $[-90^\circ, 90^\circ]$ ，向北为正，向南为负，则运动目标在空间某位置 T 可表示为

$$T = f(t, \delta, R) \quad (1)$$

式中：t—时角； δ —赤纬角；R—目标至测量点的距离。

2 赤道式望远镜指向精度分析

2.1 极轴指北高度偏差 k

赤道式望远镜安装时，极轴应与地球回转轴平行，但是由于安装误差，极轴指北高度存在偏差 k。

如图 3 所示，极轴理想位置指向 P，由于存在偏差 k，实际位置指向 P'，赤纬轴与极轴垂直，赤纬轴面 WQ'E 与理想赤纬轴面 WQE 也存在偏差 k，在球面直角三角形 HMW 中，M 角是直角，弧 HM 是由于赤纬面存在偏差 k 导致的赤纬角变化 $\Delta\delta$ ，角 W 等于倾斜偏差 k，弧 $MW=90^\circ-t$ ，则按球面三角形^[4]公式

$$\sin(90^\circ-t) = \tan\Delta\delta \cdot \cot k \quad (2)$$

解出赤纬角误差：

$$\Delta\delta = k \cdot \cos t \quad (3)$$

弧 MM' 是极轴指北偏差 k 引起的时角变化 Δt ，在球面直角三角形 TMM' 中，M 角是直角，弧 $TM = \delta$ ，角 T 未知，在球面三角形 PTP' 中，按正弦公式

$$\frac{\sin k}{\sin T} = \frac{\sin(90^\circ-\delta)}{\sin(180^\circ-t)} \quad (4)$$

得到

$$T = k \sin t / \cos \delta \quad (5)$$

将其代入球面直角三角形 TMM' 中，解出时角误差

$$\Delta t = k \cdot \sin t \cdot \tan \delta \quad (6)$$

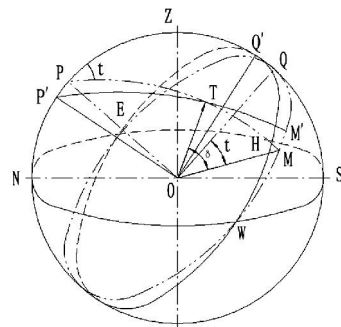


图 3 极轴指北高度偏差引起指向误差

Fig.3 Pointing error due to altitude for pointing polaris

2.2 极轴与纬轴不垂直误差 v

理想情况下极轴与纬轴是垂直的，但是由于制造和装配误差造成极轴与纬轴不垂直，存在偏差 v。

如图 4 所示，极轴指向理想位置 P，目标位置 T，视轴与纬轴垂直，由于极轴与纬轴存在不垂直误差 v，视轴运动弧线为 NT，交理想纬轴面 M'，在球面直角三角形 TMM' 中，M 角是直角， $M'=90^\circ$

$-v$, $MM'=\Delta t$, 按球面三角形公式

$$\sin\Delta t = \tan\delta \cdot \cot(90^\circ - v) \quad (7)$$

解出时角误差

$$\Delta t = v \cdot \tan\delta \quad (8)$$

由于 v 是小量, 弧 NT 与弧 MT 相差无几, 故 $\Delta\delta$ 可以忽略不计。

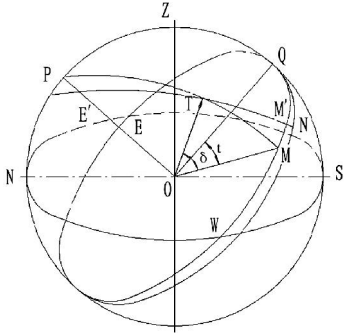


图 4 极轴与纬轴不垂直引起指向误差

Fig.4 Pointing error due to non-perpendicularity between polar axis and latitude axis

2.3 视轴与纬轴不垂直误差 c

理想情况下视轴与纬轴垂直, 但是由于制造装配误差造成视轴与纬轴不垂直, 存在误差 c 。

如图 5 所示, 极轴指向理想位置 P , 纬轴面为理想纬轴面 EQW , 目标位置 T , 视轴的理想运动弧线为 MT , 由于存在照准差 c , 视轴的实际运动弧线为 $M'T'$, 弧 TT' 为照准差 c , 弧 MM' 为时角误差 Δt , 弧 TM 为纬度角 δ , 按正割补偿原理^[5]有

$$\Delta t = c \cdot \sec\delta \quad (9)$$

由于 c 是小量, 弧 MT 与 $M'T'$ 相差无几, 故 $\Delta\delta$ 可忽略不计。

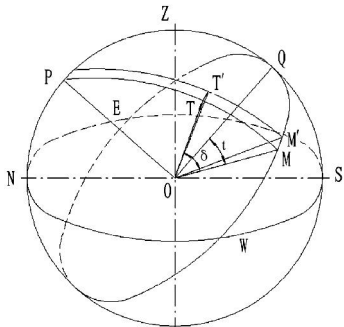


图 5 视轴与纬轴不垂直引起指向误差

Fig.5 Pointing error due to non-perpendicularity between optical axis and latitude axis

2.4 时角的零点差 g

时角的零点差是由于极轴的方位角与正北存在偏差造成的, 假设极轴的方位偏差为 α , 时角的零

点差为 g , 由极轴坐标和地平坐标的关系^[6]:

$$\sin t \cdot \cos\delta = -\sin\alpha \cdot \cos H \quad (10)$$

$$\cos t \cdot \cos\delta = \cos\varphi \cdot \sin H - \sin\varphi \cos H \cdot \cos\alpha \quad (11)$$

$$\sin\delta = \sin\varphi \cdot \sin H + \cos\varphi \cdot \cos H \cdot \cos\alpha \quad (12)$$

得出

$$t \cdot \cos\delta = \tan\alpha \cdot \sin(\delta - \varphi) / \cos\delta \quad (13)$$

在调整零点时, 视轴指向北极星, 此时 $\delta = 90^\circ$, α 和 t 为小值, t 用 g 代替, α 用 α 代替, 则简化得:

$$g = \alpha \cdot \cos\varphi \quad (14)$$

2.5 赤纬的零点差 h

赤纬的零点差是望远镜极轴相对北极的高度偏差引起的, 假设高度偏差为 β , 赤纬的零点差为 h , 则极轴指北高度偏差 β 引起的赤纬零点差的计算方法为

$$h = \beta \cdot \cos t \quad (15)$$

综上, 可得出制造、装配和安装造成的赤道式望远镜指向误差为

$$\Delta t = k \cdot \sin t \cdot \tan\delta + v \cdot \tan\delta + c \cdot \sec\delta + \alpha \cdot \cos\varphi \quad (16)$$

$$\Delta\delta = (k + \beta) \cdot \cos t \quad (17)$$

3 结论

由于赤道式望远镜跟踪模式的简单性和可靠性, 使其在中小口径的望远镜中被广泛的应用。文中通过赤道坐标系的建立, 利用球面三角形推导出极轴指北高度偏差、极轴与纬轴不垂直、视轴与纬轴不垂直等制造和安装误差对望远镜指向精度的影响, 此结构既可应用于跟踪测量的实时修正, 也可用于结构设计时误差分配的指导。

参考文献

- [1] King. The History of the telescopes[M]. Dover Publications, Inc. NY, 1979.
- [2] 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, 2003: 90-95.
- [3] 王志臣, 张艳辉, 乔兵. 望远镜跟踪架结构形式及测量原理浅析[J]. 长春理工大学学报, 2010, 33(1): 18-21.
- [4] 夏一飞, 黄天衣. 球面天文学[M]. 南京: 南京大学出版社, 1995.
- [5] 吉桐伯, 陈娟, 杨秀华, 等. 地平式光电望远镜天顶盲区影响因素[J]. 光学精密工程, 2003, 11(3): 296-300.
- [6] 赵金宇, 王建立. 极轴式望远镜轴系误差分析[J]. 光学精密工程, 2008, 16(专辑): 173-176.