



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101968542 B

(45) 授权公告日 2012.12.19

(21) 申请号 201010296708.8

G01S 7/02(2006.01)

(22) 申请日 2010.09.29

审查员 卢浩

(73) 专利权人 中国科学院国家天文台

地址 100012 北京市朝阳区大屯路甲 20 号

(72) 发明人 温卫斌 付强 嫣俊洁 王涛

沈勇 王芳 张洪波 苏彦 任鑫  
刘建军 李春来

(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任

公司 11021

代理人 宋焰琴

(51) Int. Cl.

G01C 21/24(2006.01)

G01S 13/66(2006.01)

G01S 13/72(2006.01)

权利要求书 3 页 说明书 11 页 附图 1 页

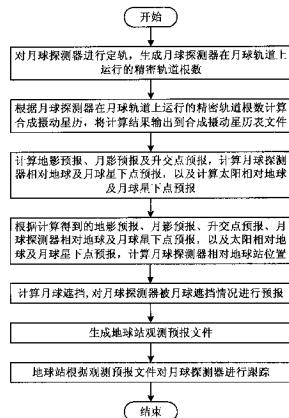
(54) 发明名称

一种利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法

(57) 摘要

本发明公开了一种利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法，该方法包括：对月球探测器进行定轨，生成月球探测器在月球轨道上运行的精密轨道根数；根据月球探测器在月球轨道上运行的精密轨道根数计算合成摄动星历，并将计算结果输出到合成摄动星历表文件；计算地影预报、月影预报及升交点预报，计算月球探测器相对地球及月球星下点预报，以及计算太阳相对地球及月球星下点预报；计算月球探测器相对地球站位置；计算月球遮挡，对月球探测器被月球遮挡的情况进行预报；生成地球站观测预报文件；以及地球站根据观测预报文件对月球探测器进行跟踪。利用本发明，实现了利用地球站对月球探测器的测控跟踪和探测数据的接收跟踪。

CN 101968542 B



1. 一种利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法,其特征在于,该方法包括:  
对月球探测器进行定轨,生成月球探测器在月球轨道上运行的精密轨道根数;  
根据月球探测器在月球轨道上运行的精密轨道根数计算合成摄动星历,并将计算结果输出到合成摄动星历表文件;  
计算地影预报、月影预报及升交点预报,计算月球探测器相对地球及月球星下点预报,以及计算太阳相对地球及月球星下点预报;  
根据计算得到的地影预报、月影预报、升交点预报、月球探测器相对地球及月球星下点预报,以及太阳相对地球及月球星下点预报,计算月球探测器相对地球站位置;  
计算月球遮挡,对月球探测器被月球遮挡的情况进行预报;  
生成地球站观测预报文件;以及  
地球站根据观测预报文件对月球探测器进行跟踪。
2. 根据权利要求 1 所述的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法,其特征在于,所述对月球探测器进行定轨采用统一 S 波和甚长基线干涉测量联合测轨的方法进行。
3. 根据权利要求 2 所述的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法,其特征在于,所述统一 S 波用于测量月球探测器的视向运动信息,所述甚长基线干涉测量用于测量探月飞行器的横向运动信息,通过统一 S 波的测距和甚长基线干涉测量技术的精密测角,并结合月面目标位于月球表面这一几何约束,实现对月球探测器的精确定轨;在定轨结束后,将生成月球探测器在月球轨道上运行的精密轨道根数,作为后续跟踪计算的重要条件。
4. 根据权利要求 1 所述的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法,其特征在于,所述根据月球探测器在月球轨道上运行的精密轨道根数计算合成摄动星历,是将月球探测器在月球轨道上运行的精密轨道根数转换为直角坐标系下位置速度,然后结合 JPL 历表数据计算绕月探测器摄动星历表、太阳星历表和月球星历表的合成文件,然后将计算结果输出到合成摄动星历表文件。
5. 根据权利要求 4 所述的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法,其特征在于,所述计算合成摄动星历的过程中,是使用积分的方式对月球探测器、太阳及月球的星历进行计算;同时,还使用插值方法处理星历文件。
6. 根据权利要求 5 所述的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法,其特征在于,所述使用插值方法处理星历文件,是使用拉格朗日多项式插值法结合 Neville 算法的方法。
7. 根据权利要求 4 所述的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法,其特征在于,所述计算合成摄动星历的过程中,首先得到的计算结果是初始的计算结果,对于该初始的计算结果,该方法进一步包括:  
将已经计算得到的星历数据作为节点,使用插值方法计算出所需步长的星历数据,进而得到最终的计算结果。
8. 根据权利要求 7 所述的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法,其特征在于,所述使用插值方法计算出所需步长的星历数据时,是采用拉格朗日多项式插值法结合 Neville 算法的方法,该方法是一种递推算法,直接计算函数在指定点的值,函数在某点的高次插值的值由前面两个低次插值的值进行线性插值得出,具体包括:  
通过第一次多项式的组合,得到高一次差值多项式,并采用迭代方式进行,并且每一次迭代都给出一个误差校正,使其值更加接近于真实值。

9. 根据权利要求 1 所述的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法，其特征在于，所述计算地影预报、月影预报及升交点预报，是根据得到的月球探测器合成摄动星历文件，计算地影预报、月影预报及升交点预报，作为后续流程的输入条件。

10. 根据权利要求 9 所述的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法，其特征在于，所述计算地影预报，是输入观测时刻及此时刻的月球探测器星历和太阳星历，通过解地影方程，计算月球探测器进出地影时刻和月球探测器对地心幅角限制，用几何法计算月球探测器当前时刻对地心幅角，进而比对判定此时刻月球探测器是否在地影中，并且输出判定标识。

11. 根据权利要求 9 所述的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法，其特征在于，所述计算月影预报，是输入观测时刻及此时刻的月球探测器星历、太阳星历及月球星历，通过解月影方程，计算月球探测器进出月影时刻和月球探测器对月心幅角限制，用几何法计算月球探测器当前时刻对月心幅角，进而比对判定此时刻月球探测器是否在月影中，并且输出判定标识。

12. 根据权利要求 9 所述的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法，其特征在于，所述计算升交点预报，是输入某一历元时刻及该时刻对应的月球探测器星历，计算此时刻的圈号；如果此时刻卫星正好处于升交点，则将这个升交点时刻及对应圈号输出至升交点圈号文件，得到升交点预报。

13. 根据权利要求 1 所述的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法，其特征在于，所述计算月球探测器相对地球及月球星下点预报，是已知卫星某一历元时刻精确轨道参数，计算给定时刻卫星的空间位置及其在指定天体表面的投影。

14. 根据权利要求 13 所述的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法，其特征在于，所述在计算月球探测器相对月球及地球星下点预报时，是输入之前计算得到的合成摄动星历预报文件及升交点圈号文件，根据月球探测器、月球和太阳摄动星历数据，分别将月球探测器在 J2000 惯性系下的位置转换为月理坐标和地固系位置，得到月球探测器分别在月球和地球坐标系下的经度、纬度和高度数据，从而计算月球探测器在月球、地球表面投影星下点轨迹，再结合太阳星历使用几何法计算得到月球星下点位置的太阳高度角。

15. 根据权利要求 1 所述的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法，其特征在于，所述计算太阳相对地球及月球星下点预报，是输入合成摄动星历预报文件，根据月球和太阳摄动星历数据计算出太阳相对于地球以及月球的位置，并将结果转换为地心地理坐标系与月心地理坐标系下的太阳所在位置的经度、纬度和高度数据，从而计算太阳在月球、地球表面投影星下点轨迹，输出太阳相对月球及地球星下点预报。

16. 根据权利要求 1 所述的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法，其特征在于，所述计算月球探测器相对地球站位置，是根据计算得到的地影预报、月影预报、升交点预报、月球探测器相对地球及月球星下点预报，以及太阳相对地球及月球星下点预报，并结合输入的地球站在地心地理坐标系下的位置参数，来计算得到月球探测器相对于特定地球站的位置。

17. 根据权利要求 16 所述的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法，其特征在于，所述计算月球探测器相对地球站位置时，是将所有时刻的月球探测器位置数据都转换为相对于地球站的位置后，来得到月球探测器相对于特定地球站的位置预报文件。

18. 根据权利要求 1 所述的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法，其特征在于，所述在计算月球遮挡时，需要输入月球探测器相对地球星下点预报、月球星历及月球探测器星历数据，用几何方法计算月球探测器相对地球星下点与月球探测器连线是否被月球遮挡，并对月球探测器相对地球星下点预报文件进行修改，标注月球遮挡标识。

19. 根据权利要求 1 所述的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法，其特征在于，所述生成地球站观测预报文件，是输入合成摄动星历预报文件、升交点圈号文件、月影预报文件、地影预报文件和月球探测器相对地球星下点预报文件，然后根据这些预报文件计算某一时刻指定的地球站是否能对月球探测器进行跟踪，如果地球站能够对月球探测器进行跟踪，则计算地球站对月球探测器观测的方位角、俯仰角和站星距，并给出地球站可跟踪标识。

20. 根据权利要求 1 所述的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法，其特征在于，所述地球站根据观测预报文件对月球探测器进行跟踪，是地球站在获得跟踪、观测预报文件后，根据预报文件中给出的方位角和俯仰角控制地球站天线对月球探测器进行跟踪。

## 一种利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及利用地球站实现深空探测器跟踪技术领域，特别是涉及一种利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法。

### 背景技术

[0002] 深空探测是人类了解地球、太阳系和宇宙，进而考察、勘探和定居太阳系其它天体的第一步。深空探测主要包括月球探测、行星探测、行星际探测和星际探测。通过深空探测，可以帮助人类研究太阳系及宇宙的起源、演变和现状，进一步认识地球环境的形成和演变，认识空间现象和地球自然系统之间的关系。从现实和长远来看，对深空的探测和开发具有十分重要的科学和经济意义。月球是地球唯一的天然卫星，是距离地球最近的天体，它一直是人类观察研究的对象，是人类开展深空探测的首选目标，因为月球具有可供人类开发和利用的各种独特资源，也是人类向外层空间发展的理想基地和前哨站。因此，实现月球探测具有广泛而重要的意义。

[0003] 目前，国际上掀起了新一轮的月球探测热潮，欧空局、日本、印度以及我国都在近几年向月球发射了绕月探测器，美国也规划了新的月球探测计划。然而，实现月球探测首先需要解决的就是对月球探测器的跟踪问题。现有的月球探测器跟踪方法主要是利用地球站天线接收月球探测器发回的信号，实现对月球探测器的精确定位。再根据定位的结果，计算出月球探测器的运行轨道，之后根据月球探测器的运行轨道计算得出地球站的跟踪计划，从而实现对月球探测器的跟踪。

[0004] 上述通用的地球站对月球探测器的跟踪方法存在一定程度的缺陷。首先，在现有的月球探测器跟踪方法中，基本上都是采用统一 S 波 (Unified S-Band, USB) 测距测速的方法实现对月球探测器的定位，这种无线电技术可直接测量月球探测器相对于观测站的视向距离和视向速度，在传统的地球卫星和深空探测器的跟踪定位上得到广泛的使用。但随着探测器高度的增加，由于测量精度的制约和系统误差的变大，定轨精度也越来越差。例如，欧空局发射的 Smart-1 月球探测器的常规轨道确定主要使用 USB 进行测距和测速，其测距精度约 20m，测速精度约 1mm/s。导致在 Smart-1 探测器执行任务过程中，它的定轨精度并不高，位置精度约为数公里。

[0005] 其次，在对月球探测器进行跟踪的过程中，需要计算月球探测器精密星历，之后再利用月球探测器精密星历计算得出月球探测器的跟踪计划文件。而在计算月球探测器精密星历时，由于初始计算的精密星历步长较大，需要对精密星历进行插值处理。目前在插值过程中通常使用拉格朗日多项式插值方法，以计算得到的步长较大的数值星历的轨道状态量作为节点，使用插值方法计算出所需任意步长的轨道状态量。然而，在使用拉格朗日多项式插值方法的时候，可能由于插值点选取的不合适，导致随着插值多项式次数增大反而不能更好的近似被插值的现象（即龙格现象），进而影响月球探测器精密星历的精度。

[0006] 上述缺陷会直接导致地球站在跟踪月球探测器的过程中产生偏差甚至发生跟踪不到的错误，影响月球探测工程的成功实施。

[0007] 鉴于上述现有月球探测器跟踪方法的缺陷,本发明人基于从事绕月探测工程业务运行管理设计和运行的经验和心得,并配合卫星跟踪和星历计算的知识运用,积极加以研究创新,以期创设一种准确的、具有一般性和实用性的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法。

## 发明内容

[0008] (一) 要解决的技术问题

[0009] 有鉴于此,本发明的主要内容目的是提供一种利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法,以实现利用地球站对月球探测器的测控跟踪和探测数据的接收跟踪。

[0010] (二) 技术方案

[0011] 为达到上述目的,本发明提供了一种利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法,该方法包括:

[0012] 对月球探测器进行定轨,生成月球探测器在月球轨道上运行的精密轨道根数;

[0013] 根据月球探测器在月球轨道上运行的精密轨道根数计算合成摄动星历,并将计算结果输出到合成摄动星历表文件;

[0014] 计算地影预报、月影预报及升交点预报,计算月球探测器相对地球及月球星下点预报,以及计算太阳相对地球及月球星下点预报;

[0015] 根据计算得到的地影预报、月影预报、升交点预报、月球探测器相对地球及月球星下点预报,以及太阳相对地球及月球星下点预报,计算月球探测器相对地球站位置;

[0016] 计算月球遮挡,对月球探测器被月球遮挡的情况进行预报;

[0017] 生成地球站观测预报文件;以及

[0018] 地球站根据观测预报文件对月球探测器进行跟踪。

[0019] 上述方案中,所述对月球探测器进行定轨采用统一 S 波和甚长基线干涉测量联合测轨的方法进行。所述统一 S 波用于测量月球探测器的视向运动信息,所述甚长基线干涉测量用于测量探月飞行器的横向运动信息,通过统一 S 波的测距和甚长基线干涉测量技术的精密测角,并结合月面目标位于月球表面这一几何约束,实现对月球探测器的精确定轨;在定轨结束后,将生成月球探测器在月球轨道上运行的精密轨道根数,作为后续跟踪计算的重要条件。

[0020] 上述方案中,所述根据月球探测器在月球轨道上运行的精密轨道根数计算合成摄动星历,是将月球探测器在月球轨道上运行的精密轨道根数转换为直角坐标系下位置速度,然后结合喷气推进实验室 (JPL) 历表数据计算绕月探测器摄动星历表、太阳星历表和月球星历表的合成文件,然后将计算结果输出到合成摄动星历表文件。所述计算合成摄动星历的过程中,是使用积分的方式对月球探测器、太阳及月球的星历进行计算;同时,还使用插值方法处理星历文件。所述使用插值方法处理星历文件,是使用拉格朗日多项式插值法结合内维尔 (Neville) 算法的方法。所述计算合成摄动星历的过程中,首先得到的计算结果是初始的计算结果,对于该初始的计算结果,该方法进一步包括:将已经计算得到的星历数据作为节点,使用插值方法计算出所需步长的星历数据,进而得到最终的计算结果。所述使用插值方法计算出所需步长的星历数据时,是采用拉格朗日多项式插值法结合 Neville 算法的方法,该方法是一种递推算法,直接计算函数在指定点的值,函数在某点的

高次插值的值由前面两个低次插值的值进行线性插值得出,具体包括:通过第一次多项式的组合,得到高一次差值多项式,并采用迭代方式进行,并且每一次迭代都给出一个误差校正,使其值更加接近于真实值。

[0021] 上述方案中,所述计算地影预报、月影预报及升交点预报,是根据得到的月球探测器合成摄动星历文件,计算地影预报、月影预报及升交点预报,作为后续流程的输入条件。所述计算地影预报,是输入观测时刻及此时刻的月球探测器星历和太阳星历,通过解地影方程,计算月球探测器进出地影时刻和月球探测器对地心幅角限制,用几何法计算月球探测器当前时刻对地心幅角,进而比对判定此时刻月球探测器是否在地影中,并且输出判定标识。所述计算月影预报,是输入观测时刻及此时刻的月球探测器星历、太阳星历及月球星历,通过解月影方程,计算月球探测器进出月影时刻和月球探测器对月心幅角限制,用几何法计算月球探测器当前时刻对月心幅角,进而比对判定此时刻月球探测器是否在月影中,并且输出判定标识。所述计算升交点预报,是输入某一历元时刻及该时刻对应的月球探测器星历,计算此时刻的圈号;如果此时刻卫星正好处于升交点,则将这个升交点时刻及对应圈号输出至升交点圈号文件,得到升交点预报。

[0022] 上述方案中,所述计算月球探测器相对地球及月球星下点预报,是已知卫星某一历元时刻精确轨道参数,计算给定时刻卫星的空间位置及其在指定天体表面的投影。所述在计算月球探测器相对月球及地球星下点预报时,是输入之前计算得到的合成摄动星历预报文件及升交点圈号文件,根据月球探测器、月球和太阳摄动星历数据,分别将月球探测器在 J2000 惯性系下的位置转换为月理坐标和地固系位置,得到月球探测器分别在月球和地球坐标系下的经度、纬度和高度数据,从而计算月球探测器在月球、地球表面投影星下点轨迹,再结合太阳星历使用几何法计算得到月球星下点位置的太阳高度角。

[0023] 上述方案中,所述计算太阳相对地球及月球星下点预报,是输入合成摄动星历预报文件,根据月球和太阳摄动星历数据计算出太阳相对于地球以及月球的位置,并将结果转换为地心地理坐标系与月心地理坐标系下的太阳所在位置的经度、纬度和高度数据,从而计算太阳在月球、地球表面投影星下点轨迹,输出太阳相对月球及地球星下点预报。

[0024] 上述方案中,所述计算月球探测器相对地球站位置,是根据计算得到的地影预报、月影预报、升交点预报、月球探测器相对地球及月球星下点预报,以及太阳相对地球及月球星下点预报,并结合输入的地球站在地心地理坐标系下的位置参数,来计算得到月球探测器相对于特定地球站的位置。所述计算月球探测器相对地球站位置时,是将所有时刻的月球探测器位置数据都转换为相对于地球站的位置后,来得到月球探测器相对于特定地球站的位置预报文件。

[0025] 上述方案中,所述在计算月球遮挡时,需要输入月球探测器相对地球星下点预报、月球星历及月球探测器星历数据,用几何方法计算月球探测器相对地球星下点与月球探测器连线是否被月球遮挡,并对月球探测器相对地球星下点预报文件进行修改,标注月球遮挡标识。

[0026] 上述方案中,所述生成地球站观测预报文件,是输入合成摄动星历预报文件、升交点圈号文件、月影预报文件、地影预报文件和月球探测器相对地球星下点预报文件,然后根据这些预报文件计算某一时刻指定的地球站是否能对月球探测器进行跟踪,如果地球站能够对月球探测器进行跟踪,则计算地球站对月球探测器观测的方位角、俯仰角和站星距,并

给出地球站可跟踪标识。

[0027] 上述方案中，所述地球站根据观测预报文件对月球探测器进行跟踪，是地球站在获得跟踪、观测预报文件后，根据预报文件中给出的方位角和俯仰角控制地球站天线对月球探测器进行跟踪。

### [0028] (三) 有益效果

[0029] 从上述技术方案可以看出，本发明具有以下有益效果：

[0030] 1、利用本发明提供的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法，实现了利用地球站对月球探测器的测控跟踪和探测数据的接收跟踪，从而支持月球探测工程的实现；

[0031] 2、利用本发明提供的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法，采用统一 S 波和甚长基线干涉测量联合测轨，实现了对月球探测器的精确定轨，从而保证月球探测器运行轨道计算的准确性，为地球站对月球探测器的跟踪提供有力的支持；

[0032] 3、利用本发明提供的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法，采用拉格朗日多项式插值法结合 Neville 算法计算合称摄动星历的方法，减少了合成摄动星历计算的复杂度，并且避免了拉格朗日多项式插值方法产生的龙格现象，从而提高了合成摄动星历计算的效率和准确性；

[0033] 4、利用本发明提供的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法，采用计算月球探测器相对月球星下点预报的方法，实现了对月球探测器在月球上投影点位置的预报，从而实现基于探测器相对月球的位置，进行对月球探测器科学探测任务的安排；

[0034] 5、利用本发明提供的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法，采用计算月球探测器相对地球星下点预报的方法，实现了对月球探测器在地球上投影点位置的预报，从而可以模拟月球探测器相对地球的飞行轨迹，并安排地球站对其进行跟踪。

### 附图说明

[0035] 图 1 是本发明提供的利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法流程图。

### 具体实施方式

[0036] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白，以下结合具体实施例，并参照附图，对本发明进一步详细说明。

[0037] 如图 1 所示，本发明是针对月球探测器的跟踪提出一种利用地球站对月球探测器进行跟踪的方法，该方法包括以下步骤：对月球探测器进行定轨，生成月球探测器在月球轨道上运行的精密轨道根数；计算合成摄动星历，并将计算结果输出到合成摄动星历表文件；计算地影预报、月影预报及升交点预报；计算月球探测器相对地球及月球星下点预报；计算太阳相对地球及月球星下点预报；计算月球探测器相对地球站位置；计算月球遮挡；生成地球站观测预报文件；以及地球站根据观测预报文件对月球探测器进行跟踪。下面针对上述各步骤进行详细描述：

[0038] 1) 对月球探测器进行定轨

[0039] 该步骤是对月球探测器进行定轨，生成月球探测器在月球轨道上运行的精密轨道根数。对月球探测器进行定轨是对月球探测器进行跟踪首要条件，只有通过精确的定轨才能准确的知道月球探测器的运行轨迹及探测器姿态，从而保证月球探测器上的探测设备获

得精确、可靠的探测数据。在本方法中,使用统一 S 波 (Unified S-Band, USB) 和甚长基线干涉测量 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) 联合测轨的方法对月球探测器进行定轨。

[0040] USB 测距测速测量系统仅能提供月球探测器的视向运动信息,而 VLBI 则可提供探月飞行器的横向运动信息。同无线电测距测速技术相比, VLBI 技术具有诸多优点:只需观测下行单向信号;测角精度高,且测量精度不随距离增加而降低;对天线的支持要求低等。因此,VLBI 技术是无线电测距测速技术的有益补充,在月球探测器跟踪中具有重要的作用。VLBI 观测的主要误差来源有:天线和接收机的噪声误差;接收系统以及信号处理数据系统产生的仪器延迟误差;观测站的钟误差;电离层和对流层的传播延迟误差。为了消除仪器延迟误差和测站钟差,目前广为采用的是较差 VLBI 测量,其测量原理是月球探测器观测的同时交叉观测月球探测器附近的河外射电源(位置精确已知),以此消除共同的仪器延迟误差和测站误差,电离层和对流层的大气传播误差也部分被消除。目前我国 VLBI 的测轨能力为:时延精度好于  $10\text{ns}$  ( $1\text{ns} = 10^{-9}\text{s}$ ),时延率精度约  $1\text{ps/s}$  ( $1\text{ps} = 10^{-12}\text{s}$ )。

[0041] 通过 VLBI 技术的精密测角和 USB 的测距,结合月面目标位于月球表面这一几何约束,可以实现对月面目标的精密定位。基本的方法是利用一段时间内的 VLBI 单历元精密测角,或者是结合 USB 的距离测量,利用月球转动的相关信息,将单历元的定位结果进行综合平差处理,以获得月面目标在月球坐标系中的精密位置。使用 USB 和 VLBI 联合定轨的精度显著好于 USB 单独定轨的精度,相对于 USB 单独定轨,联合定轨后近地点时刻的轨道预报精度显著的提高。联合定轨相对于 USB 单独定轨,不仅在横向上的精度显著提高(横向位置精度提高约 70%),径向方向的精度同样也提高很多(径向位置精度提高约 50%)。

[0042] 在定轨结束后,将生成月球探测器在月球轨道上运行的精密轨道根数,作为后续跟踪计算的重要输入条件。

[0043] 2) 计算合成摄动星历

[0044] 星历表是从给定历元开始,按一定步长(时间间隔)排列的给定时间区间内空间飞行物(人造卫星或自然天体等)在指定坐标系中的瞬时空间位置列表。而摄动星历则是考虑了非二体问题或非限制性三体问题作用力所引起月球探测器飞行轨迹扰动的星历表。月球探测器摄动星历是进行后续计算的基本输入条件。

[0045] 在计算合成星历时,需要将月球探测器轨道根数转换为直角坐标系下位置速度,然后结合 JPL 历表数据计算绕月探测器摄动星历表、太阳星历表和月球星历表的合成文件,并将计算结果输出到合成摄动星历表文件。

[0046] 在计算合成摄动星历计算过程中,主要使用积分的方式对月球探测器、太阳及月球的星历进行计算。同时,还需要使用插值方法处理星历文件。在本方法中,使用了拉格朗日多项式插值法结合 Neville 算法的方法。

[0047] 在计算合成星历时,初始的计算结果是步长较大的星历数据,如果想得到步长更小的星历文件,就需要将已经计算得到的星历数据作为节点,使用插值方法计算出所需步长的星历数据。由于经常使用的拉格朗日多项式插值方法存在龙格现象,导致数据精度得不到保证。

[0048] 因此,本方法在拉格朗日多项式插值方法的基础上使用 Neville 算法,其基本思想是通过第一次多项式的组合,来得到高一次差值多项式。采用迭代方式进行,并且每一次

迭代都给出一个误差校正，使其值更加接近于真实值。其优点是一种递推算法，不用算出函数具体的表达式，而直接计算函数在指定点的值，函数在某点的高次插值的值由前面两个低次插值的值进行线性插值得出，在很大程度上减少了计算的复杂度，并且避免了拉格朗日多项式插值方法产生的龙格现象。

[0049] 3) 计算地影预报、月影预报及升交点预报

[0050] 该步骤是根据得到的月球探测器合成摄动星历文件，计算地影预报、月影预报及升交点预报，作为后续流程的输入条件。

[0051] 在计算地影预报时，需要输入观测时刻及此时刻的月球探测器星历，太阳星历，通过解地影方程，计算月球探测器进出地影时刻，和月球探测器对地心幅角限制，用几何法计算月球探测器当前时刻对地心幅角，进而比对判定此时刻月球探测器是否在地影中，并且输出判定标识。

[0052] 同样，在计算月影预报时，需要输入观测时刻及此时刻的月球探测器星历，太阳星历及月球星历，通过解月影方程，计算月球探测器进出月影时刻，和月球探测器对月心幅角限制，用几何法计算月球探测器当前时刻对月心幅角，进而比对判定此时刻月球探测器是否在月影中，并且输出判定标识。

[0053] 在计算升交点预报时，需要输入某一历元时刻，及该时刻对应的月球探测器星历，计算此时刻的圈号。如果此时刻卫星正好处于升交点，则将这个升交点时刻及对应圈号输出至升交点圈号文件，得到升交点预报。

[0054] 4) 计算月球探测器相对月球及地球星下点预报

[0055] 该步骤是已知卫星某一历元时刻精确轨道参数计算给定时刻卫星的空间位置，及其在指定天体表面的投影。在工程应用中，通常有两种星下点的投影方式，分别是地心星下点和地理星下点。其中，地心星下点是指卫星与中心天体质心连线与指定天体椭球模型的交点。地理星下点是指对卫星到指定天体参考椭球面作垂线，其垂足即为地理星下点。本方法所使用的是地心星下点。

[0056] 在计算月球探测器相对月球及地球星下点预报时，需要输入之前计算得到的合成摄动星历预报文件及升交点圈号文件，根据月球探测器、月球和太阳摄动星历数据，分别将月球探测器在 J2000 惯性系下的位置转换为月理坐标和地固系位置，得到月球探测器分别在月球和地球坐标系下的经度、纬度和高度数据，从而计算月球探测器在月球、地球表面投影星下点轨迹，再结合太阳星历使用几何法计算得到月球星下点位置的太阳高度角。

[0057] 5) 计算太阳相对月球及地球星下点预报

[0058] 该步骤在计算太阳相对月球及地球星下点预报时，需要输入合成摄动星历预报文件，根据月球和太阳摄动星历数据计算出太阳相对于地球以及月球的位置，并将结果转换为地心地理坐标系与月心地理坐标系下的太阳所在位置的经度、纬度和高度数据，从而计算太阳在月球、地球表面投影星下点轨迹，输出太阳相对月球及地球星下点预报。

[0059] 6) 计算月球探测器相对地球站位置

[0060] 该步骤是根据上述预报结果，并结合输入的地球站在地心地理坐标系下的位置参数，可以计算得到月球探测器相对于特定地球站的位置。由于月球探测器是在不停运动的过程中，因此每一时刻都可以得到一个月球探测器相对于地球站的位置，将所有时刻的月球探测器位置数据都转换为相对于地球站的位置后，就可以得到月球探测器相对于特定地

球站的位置预报文件。在月球探测器运动过程中,会在一段时间内运动到给定地球站观测范围之外,通过月球探测器相对地球站位置预报可以将地球站可观测的时间段标记出来,作为后续流程的输入条件。

[0061] 7) 计算月球遮挡

[0062] 因为月球探测器是围绕月球运行,因此在某一时刻月球探测器可能会运动到月球背面,导致地面站因为月球遮挡而无法对月球探测器进行跟踪,所以需要对月球探测器被月球遮挡的情况进行预报。在计算月球遮挡时,需要输入月球探测器相对地球星下点预报、月球星历及月球探测器星历数据,用几何方法计算月球探测器相对地球星下点与月球探测器连线是否被月球遮挡,并对月球探测器相对地球星下点预报文件进行修改,标注月球遮挡标识。

[0063] 8) 生成地球站跟踪、观测预报文件

[0064] 在生成地球站跟踪、观测预报文件时主要是考虑地球站对月球探测器的可观测时间段,即地球站可以接收到月球探测器发射信号的时间段。在地球站可观测月球探测器的时间段内,将一系列月球探测器相对于地球站的位置参数计算出来,就可以生成地球站对于月球探测器的跟踪、观测预报。其中,月球探测器相对于地球站的位置参数可以表示为月球探测器在地球站坐标系下的方位和仰角等数据。

[0065] 在生成地球站跟踪、观测预报文件时,需要输入合成摄动星历预报文件、升交点圈号文件、月影预报文件、地影预报文件和月球探测器相对地球星下点预报文件,然后根据这些预报文件计算某一时刻指定的地球站是否能对月球探测器进行跟踪。如果地球站可以进行跟踪,则计算地球站对月球探测器观测的方位角、俯仰角和站星距,并给出地球站可跟踪标识。

[0066] 9) 地球站根据观测预报文件进行月球探测器跟踪

[0067] 地球站在获得跟踪、观测预报文件后,就可以根据预报文件中给出的方位角和俯仰角等数据控制地球站天线对月球探测器进行跟踪。但是,在实际工程中,需要根据制定的月球探测器观测预报文件安排地球站执行对探测器的跟踪任务。

[0068] 下面以“嫦娥一号”卫星的数据传输跟踪为例,进一步详细说明本发明的实施步骤。

[0069] 1) 对月球探测器进行定轨

[0070] “嫦娥一号”卫星作为我国首个月球探测器,是我国走向深空探测的第一步。在“嫦娥一号”卫星执行探测任务过程中,主要使用 USB 和 VLBI 两种方式联合定轨,完成对“嫦娥一号”卫星的跟踪。为满足测定轨精度的要求,使用国内 4 个地面站的天线组成 VLBI 网,分别是一部 50m 射电天线、一部 40m 射电天线以及两部 25m 射电天线。同时,还使用两部 25m 天线采用 USB 方式进行测定轨。

[0071] 在月球探测器运行期间,使用上述 6 部天线分别采用 VLBI 和 USB 方式同时对月球探测器运行轨道进行测定,最大程度上保证了月球探测器定轨的精确度。在天线接收到月球探测器信号后,分别对数据进行处理,再综合计算得到月球探测器的轨道参数,并以精密轨道根数的形式发布月球探测器定轨结果。精密轨道根数中包含六个重要的参数,用以确定月球探测器的运行轨迹。分别是:长半轴  $a$ ,偏心率  $e$ ,轨道倾角  $i$ ,升交点赤经  $\Omega$ ,近月点幅角  $\omega$  和平近交点  $M$ 。根据这六个参数,就可以计算出月球探测器的运行姿态和轨迹,是进

行后续跟踪计算的重要输入条件。

[0072] 2) 计算合成摄动星历

[0073] 根据输入的精密轨道根数,就可以计算一定时间段内的合成星历。在“嫦娥一号”卫星合成摄动星历计算过程中,主要完成以下步骤:

[0074] • 输入 / 输出文件合理性检验

[0075] • Repeat until< 计算到预报结束时刻 >

[0076] • 计算卫星摄动星历

[0077] • 计算太阳星历

[0078] • 计算月球星历

[0079] • 将结果输出至合成星历预报文件

[0080] • End Repeat

[0081] • Repeat until< 预报开始时间到预报结束时间 >

[0082] • 读取合成摄动星历表文件中的小于等于当前时刻的卫星 / 太阳 / 月球星历

[0083] • 读取合成摄动星历表文件中的大于当前时刻的卫星 / 太阳 / 月球星历

[0084] • 插值计算当前时刻卫星 / 太阳 / 月球星历

[0085] • 输出计算结果

[0086] • 当前时刻=当前时刻 + 时间步长

[0087] • End Repeat

[0088] 其中,卫星摄动星历计算过程如下:

[0089] • 将根数转换为直角坐标系下位置速度

[0090] • 积分器初始化

[0091] • if( 开始预报时间与根数历元时间不等 )

[0092] • CALL( 积分至开始预报时间 )

[0093] • Repeat until< 到预报结束时间 >

[0094] • CALL( 调用积分器计算星历 )

[0095] • 将计算结果写入输出文件

[0096] • End Repeat

[0097] 太阳及月球卫星星历的计算,主要是读 JPL 星历表计算其在 J2000 惯性系下坐标得到。通过以上步骤,就可以得到合成摄动星历,其中包含卫星、太阳和月球的星历数据,并在接下来的跟踪计算中使用。

[0098] 3) 计算地影预报、月影预报及升交点预报

[0099] 地影预报、月影预报和升交点预报主要是为标识月球探测器轨道的状态,是判断是否能够对月球探测器进行跟踪的重要依据。在“嫦娥一号”卫星跟踪预报中,地影预报的执行过程如下:

[0100] • 输入观测时刻,此时刻的卫星星历,太阳星历

[0101] • 解地影方程,计算卫星进出地影时刻,卫星对地心幅角限制

[0102] • 用几何法计算卫星当前时刻对地心幅角

[0103] • 比对判定此时刻卫星是否在地影中

[0104] • 输出判定标识

- [0105] 计算月影预报的过程与地影预报相似,其过程如下:
- [0106] • 输入观测时刻,此时刻卫星星历,太阳星历,月球星历
- [0107] • 解月影方程,计算卫星进出月影时刻,卫星对月心幅角限制
- [0108] • 用几何法计算卫星当前时刻对月心幅角
- [0109] • 比对判定此时刻卫星是否在月影中
- [0110] • 输出判定标识
- [0111] 升交点预报是判断月球探测器运行状态的另一个重要参数,它可以标识月球探测器运行的圈号,是进行月球探测器跟踪和探测数据处理的重要依据,其计算过程如下:
- [0112] • 输入一时刻,及该时刻对应的卫星星历
- [0113] • 将卫星星历转为月固坐标系下的位置,速度
- [0114] • if(卫星处于升交点)
- [0115] • 计算圈号
- [0116] • 输出结果至升交点圈号文件
- [0117] • end if
- [0118] • 计算输入时刻圈号
- [0119] • 输出计算结果
- [0120] 4) 计算月球探测器相对月球及地球星下点预报
- [0121] 月球探测器相对月球及地球星下点轨迹是进行月球探测器跟踪及探测数据处理的重要依据。只有确定月球探测器的星下点位置,才能进行后续的跟踪计算。月球探测器相对月球星下点预报计算过程如下:
- [0122] • 输入一时刻,及该时刻对应的卫星星历,月球星历
- [0123] • 将卫星惯性坐标系下星历转为月理坐标
- [0124] • 输出计算结果
- [0125] 月球探测器相对地球星下点预报计算步骤如下:
- [0126] • 输入一时刻,及该时刻对应的卫星星历
- [0127] • 将卫星 J2000 惯性系下的位置转为地固系位置
- [0128] • 将卫星地固系位置转为地球坐标系下经度、纬度、高度 • 输出计算结果
- [0129] 5) 计算太阳相对月球及地球星下点预报
- [0130] 太阳相对月球及地球星下点预报的计算方式与月球探测器相对月球及地球星下点的计算方式相似。太阳相对月球星下点预报计算过程如下:
- [0131] • 输入一时刻,及该时刻对应的太阳星历,月球星历
- [0132] • 将太阳惯性坐标系下星历转为月理坐标
- [0133] • 输出计算结果
- [0134] 太阳相对地球星下点预报计算步骤如下:
- [0135] • 输入一时刻,及该时刻对应的太阳星历
- [0136] • 将太阳 J2000 惯性系下的位置转为地固系位置
- [0137] • 将太阳地固系位置转为地球坐标系下经度、纬度、高度
- [0138] • 输出计算结果
- [0139] 6) 计算月球探测器相对地球站位置

[0140] 在执行任务过程中,会使用不同的地球站对“嫦娥一号”卫星进行跟踪,因此需要计算月球探测器相对不同的地球站的位置,从而满足任务执行的需求。在计算月球探测器相对地球站的位置时,计算步骤如下:

- [0141] • 输入地球站在地心地理坐标系下的位置参数
- [0142] • 读月球探测器相对地球星下点预报
- [0143] • 输入一时刻,及该时刻卫星在地球坐标系下经度、纬度、高度
- [0144] • 用几何法计算卫星当前时刻对地球站位置
- [0145] • 输出计算结果
- [0146] 7) 计算月球遮挡
- [0147] 月球遮挡对月球探测器的跟踪有重要的影响,在“嫦娥一号”卫星跟踪计算中,其计算过程如下:
  - [0148] • 输入卫星地球星下点坐标,月球星历,卫星星历
  - [0149] • 用几何法计算卫星地球星下点是与卫星连线是否被月球遮挡
  - [0150] • 输出计算结果
  - [0151] 8) 生成地球站跟踪、观测预报文件
- [0152] 综合上述预报结果,就可以计算出指定地球站跟踪月球探测器的跟踪、观测预报文件。其计算过程如下:
  - [0153] • 读入合成星历文件
  - [0154] • 读入地影预报文件、月影预报文件及升交点预报文件
  - [0155] • Repeat until< 读取合成星历预报文件完成 >
  - [0156] • 读一个时间点的卫星,太阳,月球星历
  - [0157] • Repeat until< 对所用地球站都计算完毕 >
  - [0158] • 设标识位为不可跟踪
  - [0159] • 不考虑月球遮挡情况,计算地球站是否能跟踪
  - [0160] • If< 可跟踪 >
  - [0161] • 计算跟踪是否会被月球遮挡
  - [0162] • If< 不被遮挡 >
  - [0163] • 读入月球探测器相对地球站位置
  - [0164] • 计算地球站天线跟踪参数
  - [0165] • 设标识位为可跟踪
  - [0166] • End Repeat
  - [0167] • If< 测站可跟踪 >
  - [0168] • 计算圈号
  - [0169] • 计算是否在地影中
  - [0170] • 计算是否在月影中
  - [0171] • 输出结果至文件
  - [0172] • If< 此时间点大于预报结束时刻 >
  - [0173] • 跳出循环
  - [0174] • End Repeat

- [0175] • 输出结果至跟踪、观测预报文件
- [0176] 在跟踪、预报文件中给出了地球站天线跟踪月球探测器时某一时刻的
- [0177] 方位角和俯仰角。天线在跟踪月球探测器的过程中,只要随着时间的变化
- [0178] 按照文件中给出的角度转动,就可以实现对月球探测器的跟踪。
- [0179] 9) 地球站根据观测预报文件进行月球探测器跟踪
- [0180] 在“嫦娥一号”卫星数据传输跟踪中,同时使用两个地球站对“嫦娥一
- [0181] 号”卫星进行跟踪。因此需要同时计算两个地球站的跟踪、观测预报文件,
- [0182] 然后再结合科学计划的安排,实现数据接收的目标。
- [0183] 以上所述的具体实施例,对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施例而已,并不用于限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

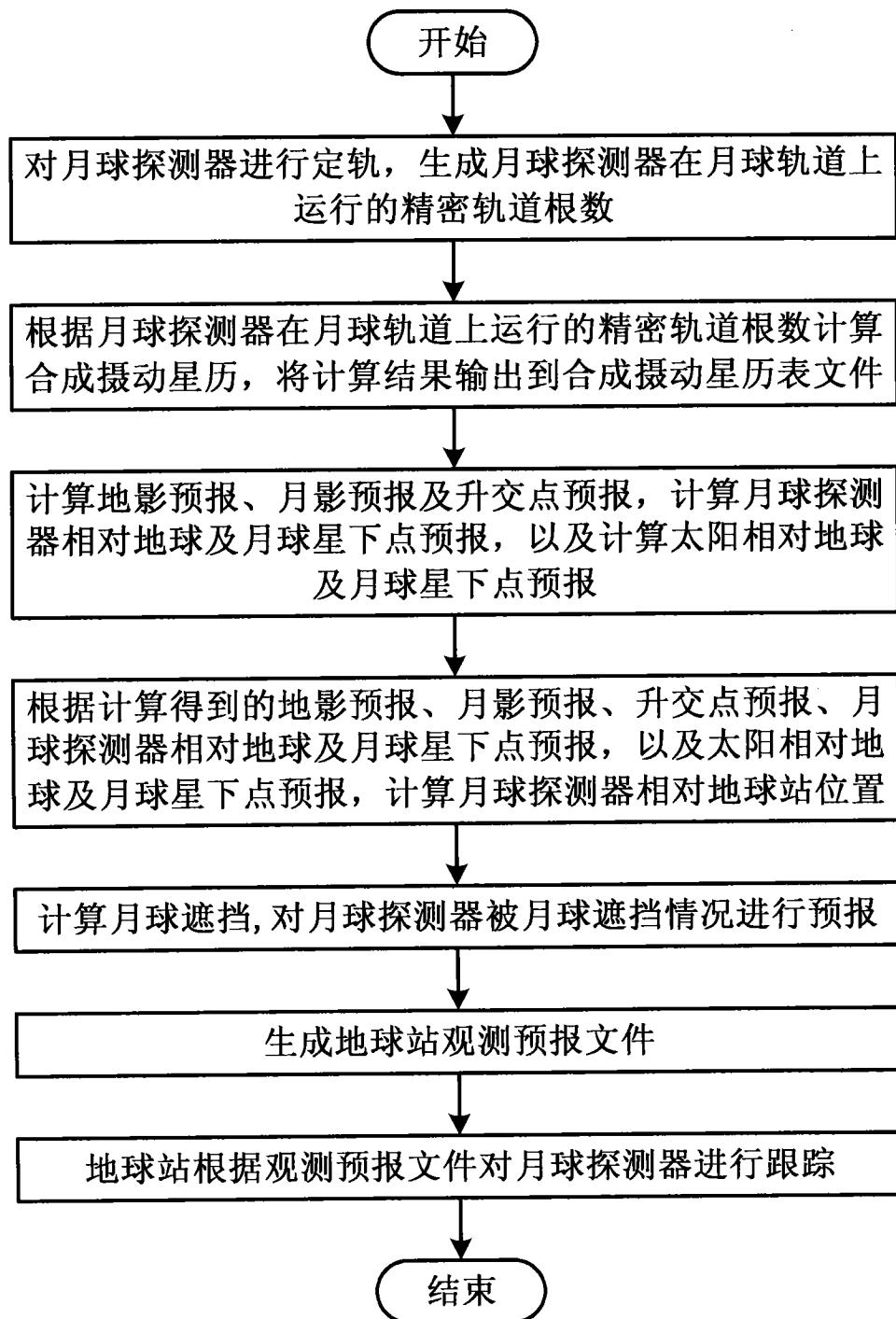


图 1