

第1章

绪论

1.1 空间轨迹测量

1.1.1 空间轨迹测量的作用和地位

空间轨迹测量含义的范围和内容是非常宽广的。由于人类的生存、活动、发展和进步的需要,为探索、研究、开发和利用之目的,对于人类在地球大气层内、外空间释放的一切人造物体的空间活动都要进行跟踪、测量和监视,并且要求收集、传递服务于人类科学研究、空间探索、国民经济和国防军事等的所有信息(含图像)、数据和资料。

通常人们将人造物体统称为飞行器。根据在地球外空间活动的范围,人类将人造物体分为航空器、导弹与运载火箭、航天器三类。在此所讨论的是弹道式导弹和运载火箭飞行试验的外弹道测量,以及人造地球卫星和航天飞船发射运行的轨道测量,并且主要讨论关于它们的空间轨迹融合测量和数据处理技术,及其测量精度的理论分析和估算方法。

外弹道测量是指利用天地基的光学和无线电外测系统,跟踪测量导弹或运载火箭飞行弹道所获取的数据,并经数据处理后提供导弹或运载火箭飞行试验弹道参数(轨迹)的过程。外弹道测量的主要目的是为导弹或运载火箭技术性能和精度的评定、设计、改进和定型提供其精确的飞行弹道参数,并且为安全控制系统实时地提供安全信息,为各级指挥系统提供监视信息,为应用系统提供有关数据、资料等。导弹从方案设计阶段开始,直到定型生产,需要经过大量的阶段性试验,如重要元器件研制试验、关键技术验证试验、分系统试验、全系统试验等,但最全面、最权威的试验是飞行试验,飞行试验所测量的射程落点和实测弹道数据是导弹设计、改进和定型最有说服力的依据。为配合导弹的研制、改造和定性试验,在发射试验场配备了大量精密的测量设备来测量和监视导弹的发射、飞行和再入过程,遥测系统负责测量导弹内部部件的工作状况以及导弹的飞行环境和制导数据,而光学和无线电外测系统(含卫星导航测量的天基测量系统)负责测量导弹的空间飞行轨迹。

运载火箭用于发射各种不同性能和应用目的的卫星和航天器,将它们送到预定的轨道,其制导系统与导弹基本相同。航天发射场的测控系统主要是监视飞行,确保安全,其外弹道测量数据也是分析、评价和鉴定制导系统精度及性能的重要信息源。

综上所述,外弹道测量是导弹和航天飞行试验工程中不可或缺的重要

组成部分,对于完成飞行试验任务及促进其技术水平的提高和发展具有重要的作用。

航天器轨道测量是利用天地基无线电测轨系统,跟踪测量航天器(人造地球卫星、航天飞船等)运行轨道所获取的测量数据,经处理后提供航天器在空间运行的精确轨道并预报轨道为航天任务提供所需数据的过程。航天器轨道测量和处理的轨道参数主要用于航天器运行时的轨道姿态控制,确保其按正常姿态和预定轨道运行和返回,使航天系统完成规定的航天任务;评定航天器的技术性能和改进设计;为各级指挥系统提供监视、显示和决策信息;为承担航天器轨道测量的测轨系统及时捕获和跟踪目标,提供测量预报和引导信息;为航天应用系统提供实时和事后所需的信息和数据。

在航天器飞行任务的各阶段和整个飞行任务结束后,航天测控系统都需要向航天器各系统提供航天器的精确轨道与姿态数据、遥测数据以及对航天器进行全程控制信息等资料,供各系统进行准实时或事后的详细分析和设计改进使用,也可作为有效载荷应用数据处理的基准信息。

由此可见,航天测轨系统是航天系统不可缺少的重要组成部分,轨道测量与数据处理是航天系统发射任务的重要组成部分,对于完成航天发射任务、促进其技术水平提高和发展具有重要的地位和意义。

1.1.2 空间轨迹测量精度分析

1. 外弹道测量精度分析

远程导弹摧毁目标的能力取决于摧毁目标的爆炸力、将战斗部送到远距离目标的能力和命中(落点)精度三个条件。因此,考核和评定导弹命中精度是飞行试验任务的重要目的之一,也是武器定型和改进设计的重要依据,而导弹命中精度评定的重要依据是外弹道测量数据。

早期,中近程甚至中远程导弹飞行试验,因其射程近、命中精度较低,主要通过特征点(主动段关机点、再入点和落点)的外测数据评定它们各自的精度和总精度,即三大段(主动段、自由飞行段和再入段)的精度评定方法。随着导弹技术发展,射程不断地增加,命中精度也不断地提高,有时远程洲际导弹飞行试验采用特殊弹道飞行试验方案,命中精度的评定方法也发生了变化。对于影响导弹命中精度最重要的主动段弹道的精度评定,常采用由全弹道精确测量的外测数据与遥测数据比对分离导弹制导系统工具误差的评定技术。为此需要试验场布置许多精密的外弹道测量系统,对主动段弹道进行高精度测量。相应地,在再入场区也布设了许多光学测量设备和单脉冲雷达对导弹再入弹道进行精密测量。

因此,根据导弹的命中精度和精度评定方法,将它分为三大段弹道精度指标,成为外弹道测量总体方案论证和设计的依据。据此,外弹道测量进行测量体制、设备的数量与组合的论证,综合各种因素要求(跟踪覆盖、跟踪性能、观测几何最优、避开火箭尾焰影响等要求)的测量站址选择,以及测量元素的各误差源(设备误差、电波折射误差、光速不准误差、频率不准误差、时间同步误差和大地测量误差,有时还需考虑数据处理方法误差)对精度影响的分析和指标的分配等一系列外测系统总体设计与论证工作,最后完成外测系统总体方案的制定。这些工作的中心是围绕外测系统进行系统的精度分析和设计,即外弹道测量精度的分析和估算。它是根据外测系统各测量元素的精度、主要误差源的理论指标和解算弹道参数的方法,在设置测站站址的条件下,理论估算所解算弹道参数的精度,这是外测系统总体方案论证、设计和制定的一项极为重要的工作内容,只有经过大量和充分地对外弹道测量精度的估算和分析,才能最终设计和制定出符合外测精度要求的外测系统总体方案。对于不同型号的导弹,因其射程、命中精度、飞行弹道等不同,一般每个型号试验都需要论证、设计和制定相应的外测系统总体方案,以满足该型号试验的测量精度要求。

在外测系统总体方案论证和设计中,最常用的外弹道测量精度估算方法是以误差传播理论为基础的理论估算方法。首先根据各测量系统或设备的主要误差源的理论值,按照与测量元素之间确定的关系式传播成相应的测量元素误差,再由解算弹道参数的方法和表达式计算出传播到弹道参数的误差。在工程中,考虑的是多个变量与多个变量间的转换,因此,常用误差协方差阵的形式来表示它们之间的误差传播关系。

由于工程中测量元素与待解算的弹道参数之间常是非线性的复杂函数关系式,利用前述方法估算理论精度常存在着难以用显著的解析式表示的问题。随着计算机和计算技术的发展,人们有时改用仿真模拟方法来估算拟合分析外弹道测量精度,也就是数值计算分析方法。

本书主要论述试验场外测系统的各种测量体制,以及解算弹道参数方法、外弹道测量精度估算的原理和方法,并详细地推导了对应的精度估算公式;特别地,在外弹道融合测量时推导了融合处理解算弹道参数的方法以及对应的测量精度估算方法和公式。

2. 轨道测量精度分析

精确确定航天器的运行轨道是航天器轨道测量系统的重要任务和工作内容。在航天器运行阶段,要完成航天系统规定的航天任务,必须由测轨系

统提供的航天器轨道参数作为依据。

在航天器发射阶段,由指控中心提供航天入轨点的轨道参数或状态参数,以判别航天器是否按预定的轨道入轨,同时为航天器入轨后运行阶段提供初始轨道参数。在航天器入轨后整个运行阶段,提供航天器运行的精确轨道、姿态和遥测参数,以控制航天器的姿态并按规定的轨道运行;又为航天器测轨系统提供测量预报和引导数据,使它们及时地捕获和跟踪目标。对于具有返回段的航天器,航天测轨系统根据引导数据捕获目标,并完成返回段航天器测控和精确预报着陆点的任务。在航天器飞行任务结束后,航天测控系统为航天器的其他系统提供航天器精确轨道与姿态数据、遥测原始信息和处理结果数据,为航天器和其他系统的技术性能进行评定和改进设计提供依据。

由于各个飞行段的航天任务不同,对航天轨道测量的内容和精度要求也是不同的。一般地,航天器在轨道入轨后的运行阶段,要求轨道测量系统测量时间长(多达几十天到数年),测轨精度要求也高。对于不同类型的航天系统,由于航天任务和功能的不同,其轨道特征(例如高度、运行空间及轨道参数)也不同,它们对测轨系统的测量精度要求也有很大的差异。因此,每类航天器任务发射前,应根据其运行的各阶段航天任务,相应地对轨道测量提出测量精度要求指标,作为航天器轨道测量总体技术方案论证、设计和制定的依据。据此,设计人员选择测量体制、论证设备数量与组合、综合各种因素选择合宜的测量站址,分析测量元素的各误差源对轨道精度的影响并合理地分配、调整测量误差指标,最后完成轨道测量系统总体方案的制定。在此,还要探讨、研究轨道确定和估算方法,使得在优良的数学方法条件下制定出能够满足航天任务要求的轨道测量总体方案。与弹道测量精度分析工作一样,航天器轨道测量精度的理论分析是其测量系统总体方案设计和制定工作中的一项重要内容。

由测量误差传播原理可知,航天轨道确定与其运动方程和计算方法紧密相关。由于轨道测量数据与轨道根数之间的关系式是一个基于二体运动方程建立的非线性模型,也就是航天器轨道运动方程是比较复杂的非线性方程,假如应用常用的误差传播理论方法推导轨道测量精度分析式,那么其表达式将是极其复杂的。因此,通常应用仿真模拟的方法分析航天器轨道测量精度。然而,这种基于统计分析的方法因仿真计算次数过大,而且不方便分析每种测量误差源对测轨精度的影响,为此将应用非线性模型计算技术,导出非线性模型轨道测量误差传播的理论估算方法及解析公式,以适应和方便于轨道测量系统总体设计和精度分析工作的需要。特别地,还为今

后的航天技术发展和需要,完成和推导了多种测量体制融合处理的非线性误差传播测量精度的理论估算公式。

1.1.3 空间轨迹测量融合处理技术

1. 外弹道测量数据处理技术的发展

随着导弹、运载火箭试验技术和外弹道测量技术的发展和需要,外弹道测量数据处理技术和方法也得到了相应的发展和提高。特别是国内外的参数估计理论、时间序列分析、数字滤波技术和计算方法等发展,使许多新颖的数学方法能够充分应用到外弹道测量数据处理工作中来,为提高外弹道数据处理结果的精度,满足导弹和运载火箭试验技术的需要成为可能和技术支柱。

早期由两台光学经纬仪交会测量目标并应用空间几何关系简单地求解导弹弹道的位置参数;后来逐渐应用 LS 估计(高斯估计)解算多台交会测量导弹弹道的位置参数;随着导弹技术的发展,射程增加和命中精度提高,试验场逐渐发展成以无线电测量设备为主跟踪测量导弹,并且经常由两套或多套无线电测量系统联合测量其飞行试验弹道,也开始了外弹道测量数据处理的多信息融合处理,在试验场称为综合处理。当然,早期的综合(融合)处理的技术、方法比较简单,主要应用加权 LS 估计(马尔可夫估计)在时间域逐点(单点)解算目标的位置和速度参数。但是,经数据处理和分析发现在高精度连续波测量系统定位元素的测量数据中,常含有较大的固定偏倚误差从而影响了弹道参数的测量精度。为此,在远程洲际导弹的精度评定试验中,利用多套测量系统联测具有冗余测量的有利条件,应用了 EMBET 自校准技术(误差模型的最佳弹道估计),有效地估算和校准了测量系统误差,提高了数据处理结果的精度和可信性。该技术不仅融合同一采样时刻的多源测量数据,并且在时间域上(空间域上)融合了多信息源的测量数据,利用巧妙的建模技术和统计估计方法,估算并实现了自校准测量系统误差。

由于远程洲际导弹试验发展,对外弹道测量提出了更高的精度指标。20 世纪后十年,外测数据处理对融合处理技术又作了进一步的改进和提高,利用导弹飞行试验弹道的规律和特性,在时间域上可以用时间多项式描述和逼近它以及弹道速度参数与位置参数之间微分关系的事实,应用了 B 样条函数拟合弹道参数的样条约束 EMBET 自校准技术。该技术大大地浓缩了待估计参数的个数,而有效地增加了测量数据的冗余度,显著地提高了所解算弹道参数的精度和可信度。

外弹道测量数据融合技术的应用和发展,也促进了外弹道测量技术的发展和试验场的建设,例如试验场已用多测速连续波测量系统代替了曾长期使用的复杂的干涉仪测量系统,使它们更加适用于高精度外弹道测量和弹道导弹试验的需要。

最近几年来,对样条约束 EMBET 自校准技术作了进一步探讨和研究,可知当不同测量体制应用该技术时,其测量方程呈现出与弹道参数之间具有线性和非线性两类模型,对此采用不同形式模型应用 B 样条函数拟合弹道参数,可以得到灵活多变的样条约束解算弹道参数的模型和方法,又可减少计算误差,为融合处理的表示和计算提供了方便,使它更好地适应于工程的应用。为此本书将花相当分量的篇幅阐述和展现试验场各种测量体制融合测量与处理的方法和表达式,使它的应用和推广具有更好的前景。

2. 轨道测量数据处理技术的发展

通常轨道测量数据处理是基于二体力学的动力学模型和轨道摄动模型来确定和预报轨道,以及计算相应的轨道根数或状态参数。它首先利用二体运动的动力学模型建立测量量与轨道根数(或状态参数)之间的基本关系式(即开普勒椭圆轨道方程),但因航天器在空间长期运行中受到各种摄动力的影响,需要根据航天器运行的轨道高度、空间等变化,加上相应的摄动模型,进行摄动修正,使轨道运动方程成为受摄运动方程(近似于开普勒椭圆轨道方程),并由受摄运动模型来确定和预报航天器的轨道。

目前航天器轨道测量数据处理的精轨计算主要有批处理和递推处理两种方法。前者应用最小二乘估计(高斯-马尔可夫估计)将轨道测量时段由受摄运动模型建立的测量方程,计算某时刻(历元)的轨道根数或状态参数,然后由受摄运动模型计算各瞬时的轨道根数和状态参数;后者利用递推卡尔曼滤波,根据轨道受摄运动模型,将不断增加新时刻(历元)的测量数据,重复计算新时刻(历元)的轨道根数或状态参数。当轨道测量采用单台设备测量或接力式测量时,每个采样时刻(历元)测量数据常少于 6 个,为了保证精轨计算结果的稳定性,在航天器精轨计算时一般采用批处理的最小二乘估计方法。

由于各种航天器类型和运行轨道特点差别很大,当航天器轨道长期运行时,为了精确地获取其瞬时轨道根数,通常人们花很大力量研究各种轨道动力学模型的摄动力变化规律及模型,力求提供航天器运行的轨道精确摄动模型。这种力求从运动学和动力学角度精确研究和描述航天器轨道运动模型,确实是非常重要的和不可缺少的,但是,怎样结合或充分应用统计估计、

时间序列分析和数字滤波等理论和方法来改进和提高精轨确定技术,还略显得有些欠缺。例如,摄动模型能否采用特殊函数的数学模型描述或拟合;又例在影响轨道确定精度的因素中,另一类主要的误差影响——轨道测量系统的系统误差,人们曾应用轨道约束 EMBET 技术,对测量系统误差实现自校准作过许多探讨、研究和尝试,特别在具有多源信息融合处理条件下,应用该技术对于许多航天器轨道(例如 1000km 左右)的精确定轨会有重要意义。

除此,航天器测轨精度的提高,还依赖于测轨系统对轨道测量量的覆盖范围。在国内建成的地基航天测控网,因国土面积和地域的限制,影响了测控网测量航天器轨道的覆盖率;特别当航天器轨道测轨系统是单一测量设备或接力式跟踪测量时,难以用多套设备同时测量和应用多源信息融合处理技术,这些都会影响航天器轨道定轨精度的提高。随着航天技术的发展和需要,进一步完善地基航天测控网,并建立天基测量系统,将会有效地增加对各类航天器轨道测量的覆盖范围,极大地增加多源测量和应用融合处理技术的可能性,这样也会使航天器轨道测量与数据处理技术得到新的发展并达到一个新的阶段。

在此根据发射场轨道测量的主要体制,同样地花较大篇幅阐述了各种测轨系统(含天基测轨系统)联合测量与融合处理轨道的模型、方法和公式。

3. 空间轨迹测量融合处理与精度分析

尽管在高精度导弹飞行试验中已经应用了弹道样条约束 EMBET 自校准的融合处理技术解算精确的弹道参数,并且取得了显著的成果,但是由于建立样条约束融合处理的模型是一个复杂的非线性模型,在许多关于外测系统精度分析工作中,外弹道测量精度分析和估算方法仍然按照常规方法分析,即按单点(逐点)测量数据交会解算弹道参数方法估计外测精度,与实际测量处理的结果会相差很远。而采用理论仿真模拟方法却不为人们所欢迎,一是两者对测量误差的理解和误差源因素分析不完全一致,其次仿真方法计算次数较大,而且人们经常关心的是测量数据中误差源与弹道参数之间的误差统计度量,对仿真解算弹道参数及误差的结果并不感兴趣。因此,数值仿真误差分析方法,对于总体设计工作来说,比较难以推广使用,这样也就难以提高和促进总体设计工作的技术水平。

为了很好地提高和促进外弹道测量技术与总体设计工作的技术水平,更好地完成今后新的导弹飞行试验任务,除了详细地阐述近年来研究的关于弹道测量融合处理技术和方法的成果外,还将详细地叙述它们相应的弹

道测量精度理论分析的估算方法及其解析表达式,以便人们今后方便地应用弹道测量融合数据处理技术和方法来指导总体设计和相关工作,同时也使外弹道测量技术能够得到较好的提高和发展。

由于航天器轨道运动方程是个比较复杂的非线性模型,其模型的线性化又是难以用解析式表示的,因此,在轨道测量系统精度分析工作中,一般也是用理论仿真模拟方法来分析轨道测量精度,同样地存在着与导弹外测系统精度分析设计相似的问题。据此,将根据航天发射场采用的不同测轨体制,用线性的或非线性模型建立测量数据与待估参数之间的关系式,然后利用参数估计方法,推导出解算轨道参数(根数)的方法及其表达式,并且相应地推导出适合轨道测量系统精度分析所需要的误差理论传播估算测轨精度的方法及其表达式;特别是为航天技术今后的发展和需要,推导了主要测量体制融合测量处理(包含天地基测量系统融合处理)确定轨道参数的方法,以及相应的测轨精度分析的方法和表达式。同样地,希望这些成果有助于测轨系统的精度分析和总体设计工作,也有利于航天器轨道测量技术水平的提高。

1.2 测量误差与误差源

1.2.1 测量与分类

利用一个标准单位量的度量值与可以用数值评价的物理量相比较,确定被评价物理量量值的过程称为测量。利用设备仪器对某物理量测量所得的量值,人们常称其为测量数据或观测数据,在天文和航天等测量中,有时称为量测数据。在此按导弹和运载火箭弹道测量的使用习惯统称为测量数据或测量值。

根据测量数据获取的不同方法,通常将测量分为直接测量、间接测量和组合测量三类。

1. 直接测量

由设备或仪器直接测试物理对象所需物理量的过程称为直接测量(direct measurement)。例如,用标准的米尺量桌子的长度或高度,用天平称物体的重量等;在空间目标测量中,常用光学经纬仪和单脉冲雷达直接测量其点位(测站)与空间目标间的方位角 A 和高低角 E 。直接测量是一种比较简单的测量方法和方式。

2. 间接测量

不能直接测量物理对象的物理量数据,而是将直接测量数据经过一定函数和方法的转换,才能得到所需测量数据的过程称为间接测量(indirect measurement)。例如需要得到目标与测站的斜距 R ,可由连续波雷达测量它们之间的电波信号传播时间 t ,然后将时间 t 乘以光速 c 得到斜距。

3. 组合测量

需用多个测量数据经数学方法解算得到所需要物理量的测量过程,称为组合测量(composite measurement)。例如,利用测量数据斜距 R 、方位角 A 和高低角 E ,以及球面坐标的关系计算得到目标在测量坐标系中的位置 (x, y, z) 。在导弹和航天测量中,绝大多数测量是间接测量,而且是组合测量,甚至是复杂的组合测量。

1.2.2 测量误差与分类

1. 测量误差

测量数据 z 与真值(客观存在值)之间总存在偏差,偏差 $\Delta z = z - z_0$ 称为测量数据 z 的测量误差。

在测量过程中任何测量数据都要受到设备仪器、测量方法、测量环境和测量人员等因素的影响,因此,所得到的结果总存在误差。对于复杂的外测系统,它们受到的影响因素更多、更复杂。由于导弹、航天器飞行试验常需要精密的测量要求,因此必须细致地分析引起测量误差的各种因素,并提出克服这些误差相应的数学方法和模型,对测量数据进行加工和处理,以尽量修正、减小或消除这些误差而提高测量数据的质量,使所需的结果数据达到测量精度的要求。

2. 测量误差分类

与通常的误差理论相同,按照误差特性和变化规律来分,外测系统或设备的测量误差常分为随机误差、系统误差和过失误差三大类。

1) 随机误差

在一定测量条件下进行多次重复测量或在时间序列上测量时,它的量值和符号都不固定,也无任何变化规律,但从总体上来说又服从一定统计特性(均值、方差和分布等)的误差,称为随机误差(random error)。

尽管从表面上和个体来看随机误差是无规律和不可预测的,因而是不能消除的,但通过对大量的测量数据分析,可以得到它的统计特性。随机误