

三 锚 三 海军级重点教材



光电跟踪 测量原理

GUANGDIAN GENZONG
CELIANG YUANLI

吕俊伟 何友金 韩艳丽 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

海军级重点教材

光电跟踪测量原理

吕俊伟 何友金 韩艳丽 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书主要介绍光电跟踪测量的基本原理和方法。共分7章,内容包括:光电跟踪测量的概述、轴角测量、跟踪系统、电视跟踪测量技术、红外跟踪测量、激光跟踪测量技术、激光跟踪测量技术、典型光电跟踪测量系统。

本书可作为光电工程、控制与测试专业的本科生教材,也可供相关专业师生和从事跟踪测量专业的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光电跟踪测量原理/吕俊伟,何友金,韩艳丽编著.

—北京:国防工业出版社,2010.1

海军级重点教材

ISBN 978-7-118-06165-9

I. ①光... II. ①吕... ②何... ③韩... III. ①光电检测—教材 IV. ①TN206

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 199106 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 14 $\frac{1}{4}$ 字数 260 千字

2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

光电跟踪测量技术因其精度高、设备简单而被广泛应用于国防和国民经济的各个方面。从火箭和导弹的测控到工业技术的机床加工、精确农业的田间变量施肥、施药等领域都发挥着重大作用。

鉴于目前光电跟踪测量技术已广泛应用于各行各业中,而国内有关光电跟踪测量的书很少,为了满足光电跟踪测量的教学需求,作者在多年教学实践的基础上,参考其他教材,结合靶场光电跟踪测量技术编写了本书。

本书从光电跟踪控制系统的基本分析方法入手,面向实际技术需求,系统地介绍了跟踪测量原理、系统组成、轴角测量技术、电视跟踪测量技术、红外跟踪测量技术、激光跟踪测量技术的主要技术指标和检测方法,最后举例介绍了两个典型光电跟踪测量系统的原理、构成及实现方法。

本书由吕俊伟教授主编,何友金副教授和韩艳丽教授参加部分编写,胡云安教授主审。在编写过程中,得到周晓东教授、陆斌副教授和任建存副教授的指导和帮助,博士生于吉红、郭宁和蒋文涛在文字录入、公式编制、绘图方面做了大量的工作;控制工程系和训练部教务处等领导机关给予了极大支持,在此一并表示衷心的感谢。

在本书的编写过程当中,参考了大量国内外书刊资料和兄弟院校的相关教材,特别是参考了李生良教授等编写的教材,在此对原作者深致谢意。

由于作者水平和时间、资料有限,书中肯定存在不妥之处,敬请读者及时提出问题和建议,以便修订。

作者
2009年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 光电跟踪测量的地位和作用.....	1
1.2 光电跟踪测量系统的组成.....	2
1.3 光电经纬仪与光电跟踪测量设备.....	3
1.4 国内外发展状况.....	8
本章小结.....	10
思考题.....	11
第 2 章 轴角测量	12
2.1 概述	12
2.1.1 轴角测量系统在光测仪器中的作用和地位.....	12
2.1.2 经纬仪测角.....	13
2.1.3 数字测角.....	14
2.1.4 数字显示系统.....	15
2.1.5 轴角编码器的分类及特点.....	15
2.1.6 角度的度量.....	16
2.2 绝对式光电轴角编码器	17
2.2.1 光学码盘.....	18
2.2.2 码盘参数.....	21
2.2.3 组成及主要性能指标.....	22
2.3 增量式光电轴角编码器	24
2.3.1 光栅与莫尔条纹.....	25
2.3.2 光栅盘与指示光栅.....	26
2.3.3 光栅盘参数.....	27
2.3.4 组成.....	28

2.4	其他类型的轴角编码器	29
2.4.1	电刷式轴角编码器	29
2.4.2	电容传感器轴角编码器	29
2.4.3	旋转变压器轴角编码器	31
	本章小结	32
	思考题	33
第3章	跟踪系统	34
3.1	概述	34
3.1.1	自动控制系统	34
3.1.2	跟踪系统	36
3.1.3	光电跟踪系统	37
3.1.4	系统主要性能指标	41
3.2	跟踪系统中的电动机	43
3.2.1	直流电动机	43
3.2.2	直流伺服电动机	47
3.2.3	直流力矩电动机	51
3.2.4	无刷直流电动机	54
3.2.5	直流测速发电机	55
3.2.6	交流测速发电机	57
3.2.7	交流伺服电动机	58
3.2.8	步进电动机	58
3.3	调速系统	59
3.3.1	调速的含义和调速指标	59
3.3.2	脉宽调制(PWM)调速方式	61
3.3.3	脉冲宽度调制器电路	67
3.3.4	典型调速系统	68
3.4	引导跟踪系统	74
3.4.1	地位和任务	74
3.4.2	系统的构成和工作	74
3.4.3	控制部分	75
3.5	半自动跟踪控制系统	78

3.5.1	半自动跟踪控制系统简介	78
3.5.2	两类操纵器跟踪性能对比	80
3.5.3	系统性能分析	81
3.6	自动跟踪系统	83
3.6.1	红外自动跟踪控制系统	83
3.6.2	激光自动跟踪控制系统	84
3.6.3	电视自动跟踪控制系统	85
3.7	数字跟踪系统	87
3.7.1	数字调速回路	88
3.7.2	数字测速	88
3.7.3	数字控制系统的新问题	91
3.7.4	典型数字调速回路	92
3.7.5	数字控制系统中的具体问题	94
3.8	复合控制	95
3.9	提高跟踪系统跟踪精度的一些途径	99
	本章小结	101
	思考题	102
第4章	电视跟踪测量技术	103
4.1	概述	103
4.2	电视脱靶量测量的几个基本问题	104
4.2.1	电视脱靶量测量系统的基本组成	104
4.2.2	图像	105
4.2.3	几何成像	106
4.2.4	图像的分解	107
4.3	闭路电视基本原理	108
4.3.1	闭路电视的组成及工作原理	108
4.3.2	电视摄像机的组成与工作原理	109
4.3.3	电视摄像机的种类与特性	109
4.3.4	电视扫描原理	112
4.4	电视脱靶量测量原理	115
4.4.1	电视摄像管脱靶量测量原理	115

4.4.2	CCD 摄像机脱靶量测量原理	116
4.5	电视自动跟踪原理	117
4.5.1	基本原理	117
4.5.2	某电视跟踪系统分析	118
4.6	主要技术指标与检测	120
4.6.1	电视视场与检测	120
4.6.2	电视探测距离与分辨力关系	121
4.6.3	脱靶量测量精度	122
4.7	电视测量技术的发展方向	124
	本章小结	125
	思考题	125
第 5 章	红外跟踪测量技术	126
5.1	红外自动跟踪控制原理	126
5.2	红外探测器	127
5.3	红外成像	129
5.4	红外成像脱靶量测量	132
5.4.1	红外成像跟踪基本知识	132
5.4.2	形心跟踪	135
5.4.3	相关跟踪	136
5.4.4	平均绝对差分算法	137
5.4.5	序列相似性检测算法	139
5.4.6	目标图像边缘检测	142
5.4.7	目标图像识别	144
5.4.8	目标图像捕获	148
5.4.9	图像跟踪器	149
5.5	非成像式脱靶量测量原理	159
5.5.1	非成像式脱靶量测量系统组成	159
5.5.2	调制盘式跟踪器	160
5.5.3	非调制盘式跟踪器	161
5.5.4	非调制盘型红外脱靶量测量系统简介	162
5.6	红外测量系统主要技术指标	165

5.6.1	红外探测器的特性参数	165
5.6.2	作用距离 R	166
5.6.3	跟踪测量视场	166
5.6.4	脱靶量测量精度	167
5.6.5	跟踪性能	168
5.7	主要技术指标检测方法	171
5.7.1	室内检测方法	171
5.7.2	室外技术性能指标检测方法	173
5.8	红外跟踪测量技术的发展方向与应用前景	174
	本章小结	176
	思考题	177
第 6 章	激光跟踪测量技术	178
6.1	激光自动跟踪控制原理	178
6.2	激光测距基本原理	179
6.3	激光目标角度测量系统	181
6.3.1	激光角跟踪系统的构成	181
6.3.2	激光目标角误差检测方法	182
6.4	测距能力估算	184
6.4.1	脉冲式激光测距方程式	184
6.4.2	激光在大气中的透过率	187
6.4.3	探测器的探测概率与最小可探测功率	188
6.4.4	最大测程计算举例	189
6.4.5	测距精度分析	190
6.5	激光雷达	194
6.5.1	激光跟踪定位雷达	194
6.5.2	激光跟踪定位测速雷达	196
6.5.3	激光成像雷达	196
6.6	激光跟踪测量的未来发展	197
	本章小结	199
	思考题	199

第7章 典型光电跟踪测量系统	200
7.1 典型红外跟踪测量系统.....	200
7.1.1 概述	200
7.1.2 系统组成	200
7.2 典型数字跟踪系统.....	204
7.2.1 概况	204
7.2.2 软件的任务	206
7.2.3 程序举例	207
本章小结	213
思考题	214
参考文献	215

第1章 绪 论

1.1 光电跟踪测量的地位和作用

导弹测控系统是导弹试验靶场中用于完成飞行目标弹道测量(包含弹道参数测量和目标特性参数测量)、遥测、安控(试验指挥监控)三大任务的专用系统,它是导弹试验靶场中与测试发射系统并列的独立系统。导弹测控系统是由光电测量系统、无线电外测系统、遥测系统、试验指挥监视显示系统、遥控系统、时间统一系统、通信系统、实时和事后信息处理系统等部分组成的。

光电测量系统是采用光学原理采集飞行目标信息,经处理得到所需的弹道参数与目标特性参数,并获取飞行实况图像资料的专用测量系统,是导弹测控系统的重要组成部分。

在导弹等目标的飞行过程中,地面需要随时对导弹等目标进行跟踪并测量它们的飞行轨道和了解其飞行状态,初步评价其飞行任务完成情况,及时掌握其飞行是否正常的安全信息。能够对导弹等飞行目标进行跟踪测量的光电系统称为光电跟踪测量系统。目前,在导弹试验靶场中,大部分光电测量设备是光电跟踪测量设备。光电跟踪测量技术和设备在导弹测控系统中占重要地位。

在光电跟踪测量系统中,承载光电测量设备的机架(或平台)能够随着导弹等飞行目标运动而运动,机架(或平台)的随动和机架上的光电测量设备相互配合,从而完成对导弹等飞行目标的弹道、飞行状态和目标特性的跟踪测量。而控制这个随动装置(机座或机架)跟随飞行目标的运动而改变其速度和位置的系统称为跟踪系统。在跟踪系统中,这个随动机架(机座或平台)是被控制对象。光电跟踪测量系统主要包括两大部分:跟踪系统和光电测量系统。

光电跟踪测量系统的作用如下:

(1) 弹道测量 在导弹航天飞行器试验中,实时弹道测量参数是实现安全控制的重要信息源。光电跟踪测量系统采用多站交会或单站定位均可获得高精度的弹(轨)道参数,并可鉴定与校准无线电外测设备的精度。光电跟踪测量主要用于战略弹主动段与再入段、战术弹全程及其遭遇段测量。光电跟踪测量得

到的摄影胶片,经事后判读处理,并根据误差修正模型,将脱靶量(目标偏离视准轴的角偏差量)误差、轴系误差、零位差、定向差及大气折射误差等进行精确修正,则可获取比实时测量更高精度的测量数据。高精度弹道测量数据是评定武器系统性能指标、分析制导误差与分析飞行器故障的重要依据。

(2) 飞行实况记录 光电跟踪测量系统把导弹点火、起飞、离架、程序转弯、级间分离、再入现象及遭遇时的实况以摄录图像的方式记录下来,简称飞行实况记录。摄影与摄像系统拍摄和记录下来的导弹或飞行器的发射过程、飞行状况、分离过程、再入现象及飞行过程异常现象可供实时监视显示与事后复现,为飞行器性能评定和故障分析提供形体逼真的实况资料。借助某些光测设备和弹体上的特殊标记还可以测量导弹起飞时的离架漂移量和姿态滚动量。

(3) 物理特性参数测量 光电跟踪测量系统还用于对飞行目标的红外辐射特性、火焰光谱和发光亮度等光学物理特性参数测量。飞行目标的物理特性参数测量不但为分析研究提供真实的试验数据,为再入突防和战略防御提供科学依据,而且也为目标探测提供了依据,用于真假弹头识别和战略导弹突防性能鉴定。

1.2 光电跟踪测量系统的组成

一般而言,光电跟踪测量系统主要包括跟踪系统和光电测量系统两部分。但是由于对系统的作用和功能要求不同,不同种类的光电跟踪测量系统,其组成有所不同,即使是同一种类的光电跟踪测量系统,由于用途不同,要完成的测量任务的差别,其组成也会有所差异。就大多数光电跟踪测量系统而言,其组成一般包括以下几个部分:

(1) 机架 机架也称跟踪机座,它是一个地平式二维运动的精密转动平台,用以承载主摄影系统、瞄准系统、测角系统、记录系统及其跟踪系统、激光测距系统、电视与红外跟踪测量系统等。机架要求刚度好,轴系精度高,能确保光电跟踪测量系统对飞行目标具有快速捕获、高速平稳跟踪的功能,以获取高精度弹道测量数据和清晰的飞行实况记录。

(2) 跟踪系统 跟踪系统也称传动系统或伺服系统,主要由力矩电机、测速机、跟踪器、编码器、微型计算机和传动放大器等组成。它驱动光电经纬仪完成对飞行目标的跟踪任务。跟踪方式有:操作单杆(或手轮)进行的半自动(或人工)跟踪、接收引导信息进行随动跟踪、接收电视、红外或激光测角信息进行自动跟踪。

(3) 轴角测量系统 轴角测量系统由方位测角系统和俯仰测角系统组成。每个测角系统又由光机和电控两部分组成。光机主要由基板、光源、分光系统、码盘、狭缝、光电器件组成,完成机械轴角到电代码的变换。电控由单板机(或微型计算机)、处理电路组成,完成电代码的采样、放大、码型变换、细分校正及输出与显示。

(4) 计算机控制与处理系统 计算机控制与处理系统一般由机上微型计算机、机下系统微型计算机、机上接口和机下接口组成。其作用是完成跟踪测量系统的数据交换、信息处理与控制检测等任务。对外与靶场测控中心计算机进行信息交换。对内将外来的信息经处理后分别送到光电跟踪测量系统各相关分系统,同时还可产生模拟时统及控制信号,供本系统自检或调机用。计算机控制部分是跟踪测量系统的控制中心,各分系统的协调、数据采集与传输、工作方式的切换及其检测处理等均在计算机系统控制下进行。

(5) 激光跟踪测量系统 激光跟踪测量系统通常指激光跟踪测量和测距系统,由激光器、激光发射装置、激光接收装置及处理电路等组成。它可完成飞行目标偏离电轴的角偏离量的测量。其测量结果实时输出,并送给传动系统,实现对目标的自动跟踪。同时还可测量飞行目标到测站的距离,实现实时单站定位。

(6) 电视跟踪测量系统 电视跟踪测量系统由光学镜头、可见光视频探测器、信号处理系统、监视器等组成。当目标成像在探测器上时,对目标像进行光电转换,完成目标成像及偏离电轴的角偏离量测量。其测量结果实时输出,并送给传动系统,实现对目标的自动跟踪。

(7) 红外跟踪测量系统 红外跟踪测量系统由光学镜头、红外探测器、信号处理及控制电路组成。它完成目标探测及目标偏离电轴的角偏离量测量。其测量结果实时输出,并送给传动系统,实现对目标的自动跟踪。

此外,光电跟踪测量系统需要与引导、时统、通信和气象测量等系统密切配合,方能完成跟踪测量任务。根据需要光电跟踪测量系统还需配备一些专用装置,如弹上激光合作目标、闪光源或连续光源、专用信号接收仪等。

1.3 光电经纬仪与光电跟踪测量设备

在靶场测量设备中,光电跟踪测量设备有很多种类,如光电(电影)经纬仪、电影(电视)跟踪望远镜、光学跟踪架等,其中光电经纬仪应用最为普遍,也最常见。光电经纬仪是一种典型的光电跟踪测量设备,其功能比较全面、组成也比较完整,具有光电跟踪测量系统所有的组成部分和功能。

本书以光电经纬仪的跟踪测量系统为剖析对象,分析和介绍光电跟踪测量

系统的基本原理、基本组成和基本工作方式。如果掌握了光电经纬仪的跟踪测量原理,对其他种类的光电跟踪测量设备的原理就会触类旁通。

学习本书,首先应该对光电经纬仪的结构和适用背景有所了解。

光电(电影)经纬仪,是大地测量光学经纬仪、跟踪系统与光电摄影机(摄像机)相结合而成的仪器,它能自动跟踪飞行中的导弹。多个地面站在统一时间控制下对飞行中的导弹同步摄影,一般以 10 次/s~20 次/s 拍摄导弹飞行中的目标,并用传感器测量随动机座的方位角与俯仰角,再将数据送入计算机进行处理,就可得到导弹的飞行轨道参数。光电经纬仪能记录飞行中导弹和火箭的图像,但它受光照的限制,不能全天候工作。

光电经纬仪除了具有上述光电跟踪测量系统所有的组成部分外,还具备以下部分:

1) 主摄影(摄像)系统

主摄影系统也称望远摄影物镜系统,一般由主光学系统、调光调焦系统、十字丝投影系统、摄影机、输片机构、摄影控制系统等组成。主摄影系统使远距离的目标成像图像清晰,并对飞行目标及点阵信息进行同步摄影记录。调光调焦系统确保摄影成像质量。

2) 瞄准系统

瞄准系统又称瞄准望远镜系统。一般由两种放大倍率的望远镜组成。小倍率大视场望远镜用于搜索捕获目标;大倍率小视场望远镜用于瞄准或跟踪远距离目标。

3) 记录系统

记录系统可由胶片或其他存储介质(硬盘、软盘、视频录像带等)将目标图像和测量信息进行记录,以供事后处理。

在光电经纬仪中,共有方位角、高低角两套相互独立的跟踪系统,用于在一定精度范围内实现光轴对空中飞行目标的跟踪。从控制工程角度讲,两套系统的结构基本相同,是带有速度内回路的双闭环自动控制的随动系统。通常把由速度调节器、功率放大、转速反馈等部分所构成的回路称为速度回路或内回路;把由位置回路校正、放大、内回路及位置信息反馈单元构成的回路称为位置回路或外回路。这就是把光电经纬仪的跟踪系统叫双回路,或双闭环控制系统的缘由。

综合不同类型光电经纬仪,其跟踪方式可有:

(1) 手动跟踪 手动跟踪是由人工直接操作机械传动机构,控制跟踪架跟踪目标。由于这种方式只能跟踪慢速目标,操作人员劳动量大,实践中很少应

用,目前一般只用于设备的检查。

(2) 半自动跟踪 半自动跟踪是操作手用操纵器给出跟踪架的方位和高低角,从而实现对跟踪架的控制,使光轴对准目标。操纵器有两种:手轮和单杆,前者由两名操作手分别控制跟踪架的方位、高低跟踪系统;后者由一人同时控制两个系统,实现对目标的跟踪。这种方式的精度可以很高,但不同的操作手存在一定的精度离散性,目前采用得较为普遍。

(3) 自动跟踪 这种方式不需人参与工作,而是自动获取目标信息,由控制装置来自动控制跟踪架的光轴对准目标。这种方式有三种类型:红外跟踪、激光跟踪和电视跟踪。

(4) 引导跟踪 引导跟踪是由外部其他设备将目标运动的信息送给光电经纬仪,光电经纬仪按该信息控制跟踪架的光轴对准目标。该信息被称做引导信息。引导跟踪可有程序引导跟踪、雷达引导跟踪和计算机引导跟踪。由于在传递信息时,均采用数字通信方式,这种方式也称数字跟踪控制系统。

在光电经纬仪中,为了提高设备的自动化程度,确保跟踪目标,一般都配备半自动跟踪、自动跟踪和引导跟踪。在使用中,按不同任务选择,互相补充。

近些年来,光电经纬仪不断采用新技术,不断提高其自动化程度和增强其相应功能。随着微电子技术的发展,光电经纬仪的跟踪系统(随动系统)经历了电子管、晶体管、中小规模集成电路、大规模集成电路等阶段。在系统构成上,光电经纬仪的跟踪系统有三种形式:模拟式随动系统、混合式随动系统和全数字式随动系统。

模拟式随动系统如图 1.1 所示,早期光电经纬仪采用过这类系统。系统采用双闭环结构,系统的校正、放大等功能均由模拟元件组成的硬件来实现。系统工作方式有引导和半自动跟踪方式。这类系统的特点是各环节状态的信号全是模拟量。尽管这类系统起到过它的作用,但由于模拟系统自身存在的缺点:直流漂移量大、可靠性差、体积大、成本高、调试不方便、不易改变控制方式、性能低等,使得这类系统已被另外两种系统所取代。

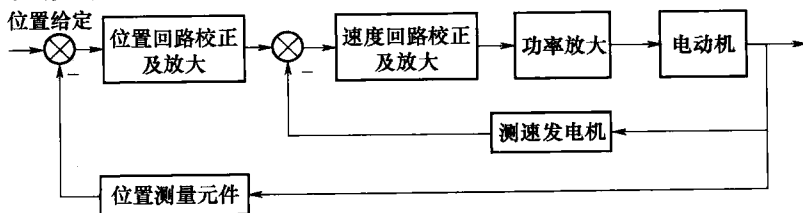


图 1.1 模拟式随动系统

混合式随动系统,这类系统的特点是系统中既有模拟器件,又有数字器件。目前有很多光电经纬仪采用的是这类系统。系统中内回路由模拟器件构成;外回路由数字电路完成角度误差的测量和捷径选择。计算机技术的应用使得外回路很多工作由微型计算机完成:位置回路数字校正运算、速度前馈量的给定、半自动控制信号的采集及数据推算、半自动信号的 PD 和 PID 运算以及几种信号的迭加处理等工作。由于计算机的应用,使得位置回路的校正及放大消除了直流漂移,受噪声及扰动的影响变小,并且校正形式及参数容易改变,容易实现高精度运算以及不同控制方式的自动切换。但是,由于混合系统的内回路仍然是模拟系统,模拟系统的一些缺点仍然存在。特别是在半自动跟踪工作方式中,仪器处于等待状态时,内回路的元件漂移常引起系统“爬行”。除了这些缺点以外,混合式随动系统的性能基本能够满足跟踪目标的设计要求,图 1.2 给出了这类系统的方框图。

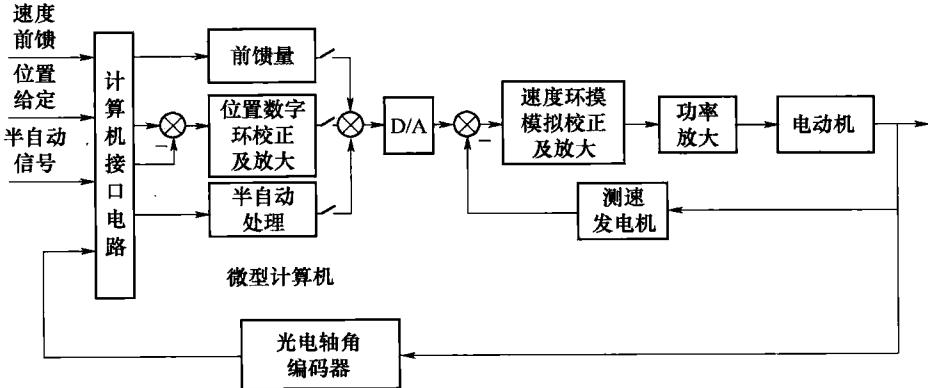


图 1.2 混合式随动系统

全数字式随动系统,系统中全部元件均为数字元件的系统称为全数字式系统。它是在混合式随动系统的基础上,对速度内回路进行数字化。计算机进行全部控制运算,它使速度回路也具有数字系统优点的同时,并省略了位置随动系统中通常用作测速元件的高灵敏度直流测速发电机,充分利用轴角编码器进行数字测速,从而缩小了仪器体积,增加了可靠性,降低了成本,图 1.3 为其方框图。就目前而言,光电经纬仪跟踪系统主要有两大类,即数字模拟混合式跟踪系统和全数字跟踪系统,图 1.4 和图 1.5 给出这两类系统比较完整的方框图。

这两类系统相比较,全数字随动系统有以下优点:

- (1) 由于取消了测速机和系统数字化,可靠性大大提高。

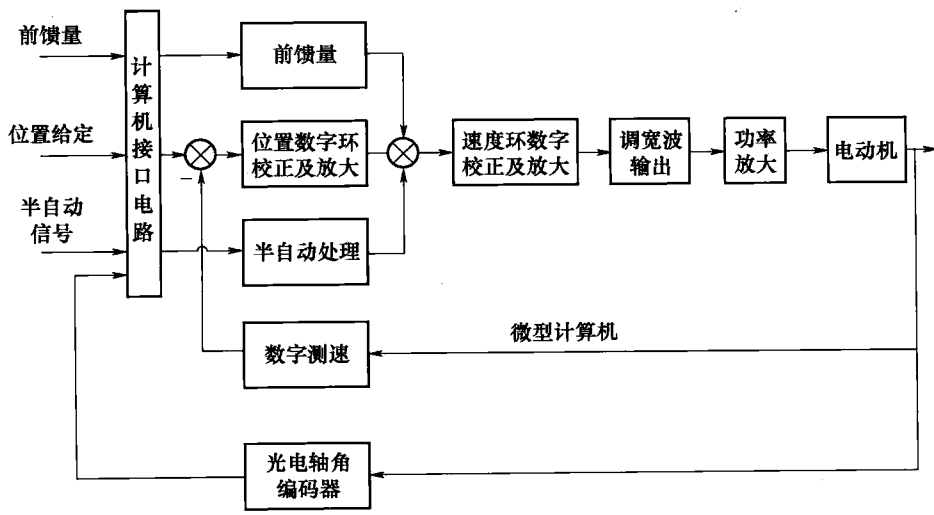


图 1.3 全数字式随动系统

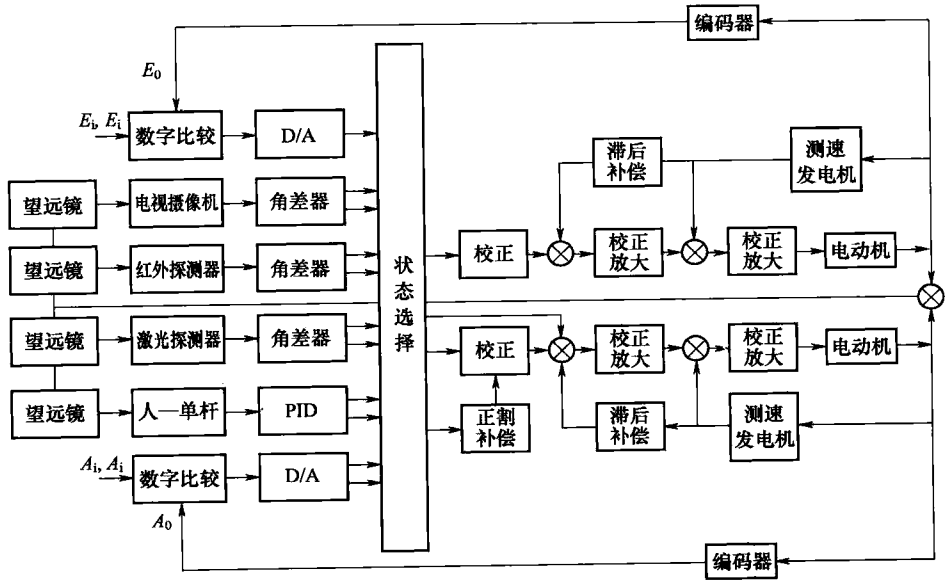


图 1.4 混合式跟踪系统