



# 光电跟踪 控制系统导论

Introduction to  
Opto-electronic  
Tracking and Control System

熊伟 谢剑薇 等著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 光电跟踪控制系统导论

熊伟 谢剑薇 刘德生 赵忠文 著  
曾峦 樊鹏山 杨凌云

国防工业出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

光电跟踪控制系统导论 / 熊伟等著. —北京: 国防工业出版社, 2009. 8

ISBN 978 - 7 - 118 - 06484 - 1

I. 光... II. 熊... III. 光学跟踪 - 自动控制系统  
IV. TP72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 126793 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 880 × 1230 1/32 印张 8¼ 字数 250 千字

2009 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 29.00 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

20 世纪 40 年代开始的火箭发射试验,光学成像技术开始应用于外弹道测量,随着现代光学技术、光电技术和通信技术的发展和综合集成,使得光电测量装置在跟踪、测量以及制导等方面都发挥着巨大的作用。尤其在武器试验靶场和军事应用领域,各种天基、空基、地基以及海基的光电测量平台在目标探测、跟踪、识别方面都显现出独有的优势。

为适应光电平台对目标的精密跟踪、激光高精度的照准、光电对抗中光束的高精度定向等特殊要求,光电平台除了具有靶场动态目标测量的光电经纬仪的基本功能——照准和测量,另外必须具备自动捕获、跟踪、瞄准功能,完成此项功能的光电平台被称为光电跟踪系统。

本书共分为 8 章。第 1 章主要对光电跟踪系统进行简介。具体对跟踪系统的三轴平台、复合轴平台和天基平台的架构及随动系统的结构进行简要描述;第 2 章到第 4 章重点论述控制系统的分析和设计方法;第 5 章研究目标检测模型。采用空间-时间滤波算法,建立基于二元假设检测的三维优化滤波最优检测的对数似然比检测器;第 6 章论述了二元假设与航迹关联的检测技术;第 7 章论述速度回路。简单介绍控制策略为快速定位的单级调速和串级调速,并使用传递函数设计速度回路;第 8 章建立光电跟踪随动系统控制模型。基于速度回路的位置随动系统构成三种跟踪模式:半自动跟踪、引导跟踪和自动跟踪。在此基础上描述了复合轴控

制系统,并通过仿真实验检验了上述控制模型的准确性和性能指标。

在本书的撰写过程中,不少专家审阅了本书的章节内容,提出了许多宝贵的意见,在此谨向他们表示最诚挚的感谢!另外,本书得到了装备指挥技术学院各级领导和机关的大力支持,得到了贾鑫教授、李智教授、李新明教授、孙华燕教授、陈浩光教授、陈勇副研究员、杨凡德副研究员、来嘉哲副研究员、林琪副研究员、宋芳副研究员等专家学者的支持和帮助,在此谨向他们表示衷心感谢!对支持本书出版的各级领导和机关的同志们表示衷心感谢!

由于编者的能力和水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

熊伟 谢剑薇  
2009年4月12日

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| <b>第 1 章 光电跟踪简述</b> .....    | 1  |
| 1.1 概述 .....                 | 1  |
| 1.2 光电跟踪系统的平台构成 .....        | 2  |
| 1.2.1 三轴平台 .....             | 2  |
| 1.2.2 复合轴平台 .....            | 3  |
| 1.2.3 天基平台 .....             | 4  |
| 1.2.4 光电平台随动系统 .....         | 5  |
| <br>                         |    |
| <b>第 2 章 控制系统的数学描述</b> ..... | 7  |
| 2.1 频率响应法 .....              | 7  |
| 2.1.1 概述 .....               | 7  |
| 2.1.2 传递函数 .....             | 9  |
| 2.1.3 频率特性函数 .....           | 11 |
| 2.1.4 基本单元 .....             | 12 |
| 2.2 线性离散系统 .....             | 15 |
| 2.2.1 模拟数字变换 .....           | 15 |
| 2.2.2 Z 传递函数 .....           | 17 |
| 2.2.3 双线性变换 .....            | 18 |
| 2.3 状态空间和状态方程 .....          | 19 |
| 2.3.1 状态向量和状态空间 .....        | 19 |
| 2.3.2 状态方程和输出方程 .....        | 20 |
| 2.3.3 状态转移矩阵 .....           | 21 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| <b>第 3 章 控制系统的性能分析</b>    | 22 |
| 3.1 系统稳定的基本概念             | 22 |
| 3.2 稳定判据                  | 24 |
| 3.2.1 劳斯判据                | 25 |
| 3.2.2 赫尔维兹判据              | 27 |
| 3.2.3 奈奎斯特稳定判据            | 28 |
| 3.3 性能指标                  | 32 |
| 3.3.1 时间域指标               | 32 |
| 3.3.2 频率域指标               | 33 |
| 3.3.3 各类指标的关系             | 33 |
| 3.4 时域响应                  | 35 |
| 3.4.1 典型输入信号              | 36 |
| 3.4.2 动态性能指标              | 38 |
| 3.4.3 一阶系统的瞬态响应           | 41 |
| 3.4.4 二阶系统的瞬态响应           | 43 |
| 3.5 高阶系统的运动               | 49 |
| 3.6 控制系统的误差分析和计算          | 52 |
| 3.6.1 稳态误差的基本概念           | 52 |
| 3.6.2 控制系统稳态误差的计算         | 53 |
| 3.7 从开环幅频特性研究闭环动态性能       | 63 |
| 3.7.1 截止角频率与通频带           | 63 |
| 3.7.2 开环频率特性中频段与动态性能的关系   | 64 |
| <br>                      |    |
| <b>第 4 章 控制系统的校正和分析方法</b> | 67 |
| 4.1 串联校正                  | 67 |
| 4.1.1 超前校正                | 67 |
| 4.1.2 滞后校正                | 70 |
| 4.1.3 滞后超前校正              | 72 |

|              |                     |            |
|--------------|---------------------|------------|
| 4.1.4        | PID 调节器 .....       | 75         |
| 4.2          | 反馈校正 .....          | 76         |
| 4.2.1        | 反馈校正改变局部结构和参数 ..... | 76         |
| 4.2.2        | 反馈校正的综合方法 .....     | 78         |
| 4.3          | 预期开环频率特性 .....      | 79         |
| 4.3.1        | 预期开环频率特性 .....      | 80         |
| 4.3.2        | 分频段的设计 .....        | 82         |
| 4.4          | 顺馈控制和速度滞后补偿 .....   | 88         |
| 4.4.1        | 顺馈控制 .....          | 88         |
| 4.4.2        | 滞后补偿 .....          | 89         |
| 4.5          | 工程分析方法 .....        | 93         |
| <b>第 5 章</b> | <b>目标检测模型 .....</b> | <b>104</b> |
| 5.1          | 简述 .....            | 104        |
| 5.2          | 空间目标的检测 .....       | 106        |
| 5.2.1        | 目标检测中的图像采样 .....    | 108        |
| 5.2.2        | 目标检测对图像采样的要求 .....  | 109        |
| 5.3          | 小目标检测中的基础理论 .....   | 109        |
| 5.3.1        | 二元假设检测 .....        | 110        |
| 5.3.2        | 假设检测准则 .....        | 111        |
| 5.3.3        | 多帧积累检测 .....        | 112        |
| 5.3.4        | 拟合优度检验 .....        | 113        |
| 5.4          | 目标检测模型 .....        | 114        |
| 5.5          | 背景抑制和噪声滤波 .....     | 118        |
| 5.5.1        | 天空背景的统计特性 .....     | 118        |
| 5.5.2        | 线性估计滤波器 .....       | 120        |
| 5.5.3        | 中值滤波和高通滤波 .....     | 121        |
| 5.5.4        | 形态学滤波 .....         | 123        |
| 5.5.5        | 最优估计匹配滤波 .....      | 124        |



|            |                       |            |
|------------|-----------------------|------------|
| 5.5.6      | 滤波算法的性能分析和比较          | 126        |
| <b>第6章</b> | <b>二元假设与航迹关联的检测技术</b> | <b>133</b> |
| 6.1        | 基于二元假设的检测器            | 133        |
| 6.1.1      | 二元假设检测                | 133        |
| 6.1.2      | 检测模型的仿真实验             | 137        |
| 6.2        | 基于置信水平的分层检测           | 145        |
| 6.2.1      | 累加二元假设检测              | 146        |
| 6.2.2      | 点—轨迹段关联               | 148        |
| 6.2.3      | 轨迹段—轨迹段关联             | 149        |
| 6.2.4      | 仿真实验                  | 150        |
| <b>第7章</b> | <b>速度回路</b>           | <b>153</b> |
| 7.1        | 力矩电机                  | 153        |
| 7.1.1      | 电机的使用                 | 153        |
| 7.1.2      | 电机的传递函数               | 156        |
| 7.1.3      | 驱动                    | 157        |
| 7.1.4      | 物理量的单位                | 160        |
| 7.2        | 测速                    | 160        |
| 7.3        | 速度回路                  | 163        |
| 7.3.1      | 单级调速环控制策略             | 163        |
| 7.3.2      | 单级调速环设计               | 166        |
| 7.3.3      | 串级调速                  | 175        |
| 7.3.4      | 速度调节器                 | 180        |
| <b>第8章</b> | <b>光电跟踪随动系统控制模型</b>   | <b>183</b> |
| 8.1        | 半自动跟踪控制系统             | 183        |
| 8.1.1      | 半自动跟踪控制系统简介           | 183        |
| 8.1.2      | 两类操纵器跟踪性能对比           | 185        |

|             |                         |            |
|-------------|-------------------------|------------|
| 8.1.3       | 系统性能分析 .....            | 186        |
| 8.2         | 引导跟踪控制系统 .....          | 189        |
| 8.2.1       | 简单分析 .....              | 189        |
| 8.2.2       | 实例 .....                | 194        |
| 8.3         | 自动跟踪控制系统 .....          | 200        |
| 8.3.1       | 简单介绍 .....              | 200        |
| 8.3.2       | 自动跟踪 .....              | 202        |
| 8.3.3       | 实例 .....                | 203        |
| 8.4         | 融合控制 .....              | 205        |
| 8.5         | 复合轴控制系统 .....           | 208        |
| 8.5.1       | 简单分析 .....              | 208        |
| 8.5.2       | 实例 .....                | 210        |
| <b>附录 1</b> | <b>常用词语 .....</b>       | <b>217</b> |
| <b>附录 2</b> | <b>坐标系 .....</b>        | <b>222</b> |
| <b>附录 3</b> | <b>光电经纬仪的精度 .....</b>   | <b>230</b> |
| <b>附录 4</b> | <b>光电跟踪随动系统仿真 .....</b> | <b>237</b> |
| <b>附录 5</b> | <b>实验的场景设置 .....</b>    | <b>241</b> |
| <b>参考文献</b> | <b>.....</b>            | <b>244</b> |

# 第 1 章 光电跟踪简述

## 1.1 概述

20 个世纪 40 年代,由于火箭发射试验的需求,将光学成像和胶片记录图像的摄影技术应用在经纬仪上进行目标的观测,形成了后来广泛应用的电影经纬仪,而我国的第一台电影经纬仪诞生在 60 年代。之后,随着靶场试验对光测设备需求的增强,科学技术特别是光学和电子学相互交叉与融合促进了电视技术的飞速发展,从而使电影经纬仪演变成光电经纬仪。20 世纪七八十年代,我国自主研发出用于陆基、海基和空基的光电经纬仪,使得外弹道测量的技术和手段得到了大大加强。90 年代,特别是进入 21 世纪以来,现代光学技术、光电技术和通讯技术的综合集成,使得光电平台不仅仅应用在常规的靶场试验中,更扩大到军用和民用的许多领域,例如地基的大型光电设备对空间目标的监视、对天体的观测、对空间碎片的管理,等等。天基的光电平台也被用来实现对空间目标探测、跟踪、识别,对空间的态势感知发挥了巨大的作用。

概括地讲,光电平台的基本功能是照准和测量,它采用跟踪技术保证测量功能的实现。跟踪使视轴指向目标,测量是取得视轴指向的极坐标角度量和视轴指向与目标极坐标的偏差,这种偏差又叫脱靶量。

在空间目标的探测与跟踪中,光电平台对目标的探测是重要的探测手段<sup>[3]</sup>,它能够精确探测跟踪地球轨道上各种卫星、航天器,并能给目标识别系统提供判断和决策所需要的数据。

为适应光电平台对目标的精密跟踪、高精度的照准、光电系统

中光束的高精度定向等特殊要求,光电平台除了须具有用于靶场动态目标测量的光电经纬仪的基本功能——照准和测量,另外必须具备自动目标捕获、跟踪、瞄准等功能,许多文献<sup>[4-8]</sup>称之为 ATP(Acquisition、Tracking、Pointing)功能。具备此项功能的光电平台被称为光电跟踪系统。

## 1.2 光电跟踪系统的平台构成

地基光电跟踪系统的平台可以视作地平式跟踪架经纬仪,地平式跟踪架经纬仪可满足测量功能的实现,用两个地平式跟踪架构成的复合轴结构适用于精密照准。应用在近地轨道(LEO)、远地轨道(HEO)和地球同步轨道(GEO)平台上的光电平台对弱小目标的观测,需在复合轴上加装主动电视(Active Television, ATV),一种由激光照明器如增强型 CCD(Charge Coupled Device)摄像系统组成<sup>[1]</sup>,使得零照度目标成像。为了照准和测量需有姿态稳定器和对时器,前者用作测量的基准,后者由时间预推平台在空间的位置,一个是定向,一个是定位。

### 1.2.1 三轴平台

光电平台的基本单元是光学系统,主干是视轴,如图 1-1 所示。图中调光、调焦、变倍是光学系统的子单元。信息发送是在主动成像的条件下作为信息选通的信息控制系统,接收信息指光学传感器接收的光学图像信息。

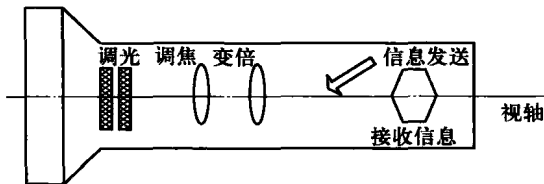


图 1-1 光学系统示意图

三轴平台,又叫地平式跟踪架经纬仪,图 1-2 是示意图。U 形架支撑镜筒,架的特点是相互垂直的两条直线,一条置于水平,镜筒位于其上,称为水平轴;另一条是铅垂直线,由基座承重,称为垂直轴。光学系统的轴称为视轴。视轴绕水平轴的转动,用俯仰角度量;绕垂直轴转动的量称为方位角。两个轴上装有力矩电机,改变视轴在空间的指向,用极坐标  $A$  和  $E$  描述(图 1-2(b)),又分别装有轴角编码器,对  $A$  和  $E$  进行测量。为保证三轴的稳定,除 U 形架的两条直线真的垂直外,需调整基座的水平,保证垂直轴与水平面的垂直,于是就成了地平式跟踪架经纬仪。

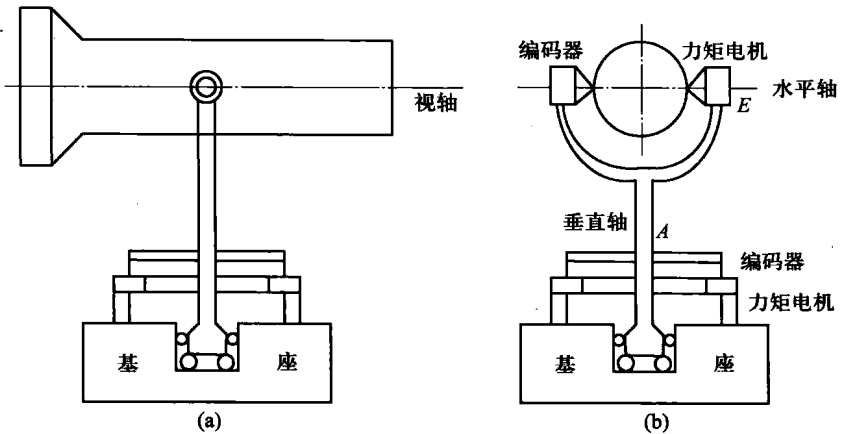


图 1-2 三轴平台示意图

(a) 侧视图; (b) 正视图。

### 1.2.2 复合轴平台

复合轴平台是五轴结构,由两个 U 形架构成,如图 1-3 所示。小 U 形架支撑视轴。小 U 形架的支座安装在大 U 形架的水平轴上。为描述清晰,小 U 形架的垂直轴称为竖轴,小 U 形架的水平轴称为横轴,方位角称为水平角;俯仰角称为高低角,竖轴和横轴均装有力矩电机和轴角编码器。又称小 U 形架为精轴系统;大 U 形架为粗轴系统。视轴在空间的指向仍用极坐标描述为  $(A \pm V, E \pm H)$ , 其中  $V$

和  $H$  是小 U 形架的水平角和高低角。横轴与水平轴的运动轨迹面相互平行, 竖轴的轨迹面平行于垂直轴。

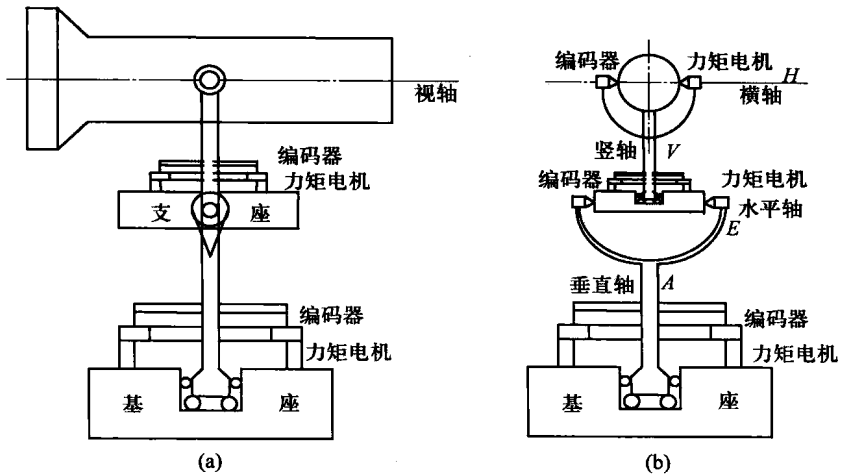


图 1-3 复合轴平台示意图

(a) 侧视图; (b) 正视图。

### 1.2.3 天基平台

天基平台上的光电跟踪系统与地基平台相比,最大的区别有两点:其一地基平台上的光电跟踪系统的基座相对于地球是静止不动的,光电平台稳定。但天基平台上,跟踪系统是运行在卫星轨道上的运动实体,姿态稳定度是影响其跟踪性能的重要因素;其二天基环境下工作的光电跟踪系统跟踪的目标一般是处于零照度的情形,因此必须借助于主动成像的方式来探测跟踪目标。光电跟踪设备素来以“被动”为重要特点,它利用物体反射太阳等自然光和自身辐射,对物体进行探测跟踪,无需主动对被探测物体施照。但在一些特殊的工作环境中,例如天基光电平台对空间目标的监视、远程小暗弱目标探测、深空目标成像等,目标因反射光的能量极弱,常常处于“零照度”的情况,这种“被动”方式的探测跟踪就受到严重限制。如果这时用激光照射小暗弱目标、深空目标等人工照明的“主动”工

作方式,再辅以光电信息处理技术和精密跟踪技术,就会为这些难题的解决提供一个好的方法<sup>[14,67,68]</sup>。

天基平台上的光电跟踪系统的结构是在复合轴基础上加一个主动成像单元,如图 1-4 所示。在光轴上加装一个光学开关器件,采用主动发射激光于被探测的目标上,接收目标后向反射的激光进行测量。另外还需要姿态稳定器,用于稳定平台和定向器,作为极坐标测量的基准;还需要时统对时器,用于测算平台在轨道上的时间与位置。

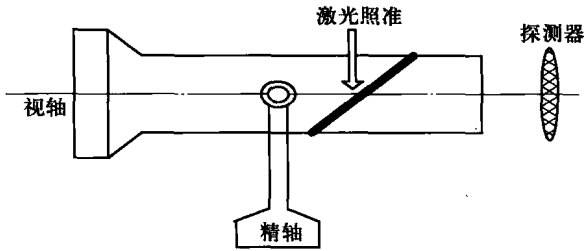


图 1-4 天基平台的主动成像单元示意图

机载和船载的平台使用条件与地基平台也不相同,不同点是飞机轮船也为运动实体。空基和海基平台均需要定向和定位。

### 1.2.4 光电平台随动系统

光电平台的随动系统的总体结构框图如图 1-5 所示。

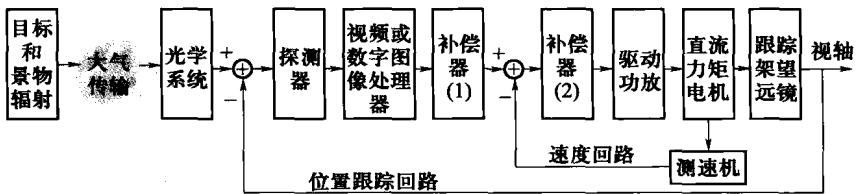


图 1-5 光电随动系统

典型的光电平台随动系统包含了两个部分:目标检测和跟踪控制。图 1-5 中,目标经过大气和光学系统成像在探测器,探测器完成目标的光电信号转换,并将视频信号或者离散数字图像信息送入

图像处理器,完成目标的检测和目标位置脱靶量的测量,这个过程完成了目标检测;得到脱靶量后,根据轴角编码器的输出就能得知目标的视轴指向角度坐标,送入补偿器后开始随动系统的控制。

光电平台的随动系统分三轴系统和复合轴系统,每个系统都有三个工作模式:随动、自动和手动,共用一个速度调节回路。基于速度回路构成三种模式的随动系统:随动跟踪、自动跟踪和手动跟踪。



## 第 2 章 控制系统的数学描述

### 2.1 频率响应法

#### 2.1.1 概述

对于一个控制系统,可从两方面去研究:加给一定的输入时,从动态过程和稳态状况了解系统行为的规律;反过来,给定一个系统应该具有的性质和特征,然后将系统设计出来。这两个问题是控制理论需要解决的主要方面。在系统分析、综合、设计和仿真中都要针对系统的这种行为进行,在进行的过程中常用一些物理量进行描述。这些物理量的变化、相互作用关系以及各自变化规律可用数学形式表示,这就是常说的建立数学模型。其中,微分方程是最基本的数学模型,工程上使用傅里叶变换和拉普拉斯变换求解微分方程。在控制系统领域,建立的数学模型一般指传递函数、状态空间方程。

数学模型中的量是控制系统中物理量的抽象,不再考虑量的物理意义,仅看作抽象的变量。把引起控制系统变化的原因称为输入量,把表征系统变化的量称为受控量。受控量中,备受关注的、或对其有专门要求的、或能直接表征控制效果的量称为输出量。余者称为中间变量。

描述系统行为的数学表达式称作运动方程。表示输出量、中间变量和输入量之间关系的数学表达式称作输出方程。受控量的变化称为系统的运动。列写运动方程本质上是把系统当作由多个分系统构成的数学表达,把这些分系统称为环节。运动方程是按照每