

GUANGDIANCHENGXIANGGENZONGXITONG



光电成像 跟踪系统

张秉华 著
张守辉

386.5



电子科技大学出版社

University of Electronic Science
and Technology of China Press

光电成像跟踪系统

张秉华 张守辉 著

电子科技大学出版社

内 容 提 要

本书论述光电工程领域中有关光电成像跟踪系统分析、设计及应用。重点放在光电成像跟踪系统的控制方面。第一章和第二章介绍了光电成像跟踪系统的发展和典型应用、光电成像传感器性能模型和可见光电视成像及红外成像跟踪系统的总体设计。第三章至第五章介绍了光电成像跟踪伺服系统的设计和某些先进控制策略及应用。第六至第八章介绍了几种典型的实际应用的光电成像跟踪系统的工程设计和仿真设计。本书给出许多实例并结合国际最流行的 MATLAB 工具箱和 SimuLink 仿真工具的使用, 便于工程设计人员掌握光电成像跟踪伺服系统的设计方法。

本书适合于光电工程控制领域的工程技术人员阅读, 也可供从事自动控制设计的工程技术人员和大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP 数据)

光电成像跟踪系统/张秉华, 张守辉著. —成都: 电子科技大学出版社, 2003. 4

ISBN 7-81094-154-2

I. 光... I. ①张... ②张... II. 光学跟踪—自动控制系统 N. TP72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 029118 号

光 电 成 像 跟 踪 系 统

张秉华 张守辉 著

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市建设北路二段四号, 邮编: 610054)

责任编辑: 舒 标 王国兰 陈玉生

发 行: 电子科技大学出版社

印 刷: 成都青羊火炬印刷厂

开 本: 787×1092 1/16 印张 13.5 字数 328 千字

版 次: 2003 年 4 月第一版

印 次: 2003 年 4 月第一次印刷

书 号: ISBN 7-81094-154-2/TP·90

印 数: 1-1000 册

定 价: 25.00 元

前 言

光电成像技术是适应信息社会的需要而迅速发展的光电技术学科中一门新技术分支学科。光电成像技术主要是研究如何实现和优化目标图像信息的接收、转换、处理、存储和显示。光电成像技术，可以扩展人眼对微弱光图像的探测能力和对不可见辐射（红外、紫外、X射线、亚毫米波等）图像的接收能力，可以将超高速现象记录下来。正是由于光电成像技术的这些作用，才逐步发展成为现在的各类光电成像系统。

如同许多高新技术的发展一样，光电成像技术首先在军事领域中得到了应用，各种先进的光电成像系统在国防和军事上发挥重要的作用。例如：用于监视的机载、飞船载以及卫星载光电成像系统；用于夜视的飞机和直升飞机红外成像导航系统、红外成像搜索跟踪系统（IRST）和红外成像导弹制导系统等。

上述这些先进的光电成像系统不仅要求高灵敏度、高分辨率、高响应速率的光电成像器件、高速和大容量的信号处理分系统、高质量的光学分系统、还要求具有捕获、跟踪、瞄准（ATP）功能的控制分系统。这是因为无论是机载的、飞船载的以及卫星载的光电成像系统对于特定目标的成像都存在搜索、捕获和跟踪的过程。对用于导弹制导和激光定向武器的光电成像系统还存在一个精确瞄准问题。相类似地，对于运动目标成像的地基光电成像系统也是如此。因此，光电成像系统的设计和性能评估要求掌握几个技术领域，包括光学、光电成像传感器、噪声理论、信号处理、大气效应、目标特性，此外，还应该包括光电成像系统的控制。虽然，现在已有一些光电系统和光电成像系统的著作，但是，这些著作对于光电成像系统的控制问题，对于控制分系统的设计和性能评估以及对光电成像性能的影响等问题，却涉及不多。本书试图填补这方面的不足，将光电成像跟踪系统的工程设计和性能评估所要求的技术分析综合为本书。

本书分为以下三个部分。第一部分：第一章和第二章。第一章导论给出光电成像跟踪系统的定义和原理，并且通过几个典型的光电成像跟踪系统例子进一步说明其工作原理和应用。第二章光电成像跟踪系统总体设计给出总体设计流程、光电成像光学系统基本参数，在此基础上讨论了电视成像和红外成像跟踪系统总体设计问题。这一章内容对于光电成像跟踪系统的总体设计师来说虽然内容“过于简单”，但是，对于光电成像跟踪系统的控制分系统设计师和工程师来说其内容却是必要而足够了，这些内容为他们从总体设计角度掌握和运用系统分析和设计方法建立了基础。第二部分包括第三章到第五章，这几章内容可以说是本书的基础篇，它主要是为光电成像跟踪系统的控制分系统的设计师和工程师而写的。第三章给出捕获跟踪瞄准（ATP）的基本问题，包括 ATP 基本概念和综述，以及 ATP 性能要求。本章特点是从统计学角度给出了捕获成功概率，跟踪概率和瞄准概率公式，揭示了它们和系统参数以及系统性能指标的关系。第四章光电成像跟踪伺服系统设计给出模拟和采样伺服系统的工作原理和设计方法，并且提供了光电成像跟踪伺服系统和其他高精度跟踪伺服系统几乎普遍采用的力矩电机直接驱动伺服系统设计指导书。第五章给出为满足光电成像跟踪系统的特殊和更高的性能要求所采用的先进

控制策略及其应用。虽然这里列举的先进控制策略并不全面，也没有包括当今控制理论和技术发展前沿的智能控制方面的先进控制策略，这主要是因为从实际应用的角度这里介绍的先进控制策略都已经技术发展成熟，并且已经成功地应用于某些光电成像跟踪系统中。第三部包括第六章到第八章。它们是本书的应用篇。它们是根据作者多年来的科研工作实践和成果而提取出来的。

本书包含的光电成像跟踪伺服系统设计的例子，都采用了目前国际以至国内控制领域中最流行的 MATLAB 软件。MATLAB 软件使控制系统和许多工程技术领域的分析与设计以及科学计算变得十分地快捷和简单了，它的各种专用软件包（工具箱）和 SimuLink 仿真工具提供了一个强有力的工具。将 MATLAB 计算机辅助设计工具和光电成像跟踪系统的分析与设计结合起来，是一个发展方向，也是本书的特点之一。

本书主要是面向光电工程控制领域的科技人员，也可以供其他领域从事自动控制的工程技术人员以及大专院校有关专业师生参考。

本书出版得到中国科学院成都光电技术研究所原所长马佳光研究员的支持，在此表示衷心的感谢。

由于作者学识水平有限，书中不免有不妥和错误之处，希望能够得到各研究院所专家和科技人员，以及各高校师生的批评指正。

作 者

2002 年 9 月于成都

目 录

第一章 导 论

1.1 概述	1
1.2 光电成像跟踪系统原理	1
1.3 系统应用举例	2

第二章 光电成像跟踪系统总体设计

2.1 绪言	5
2.2 总体设计流程图	5
2.3 光电成像光学系统基本参数	8
2.4 电视成像跟踪系统总体设计问题	12
2.5 红外成像跟踪系统总体设计问题	17

第三章 捕获跟踪瞄准的基本问题

3.1 绪言	21
3.2 光电跟踪系统 ATP 基本概念和综述	21
3.3 ATP 性能要求	23

第四章 光电成像跟踪伺服系统设计

4.1 绪言	35
4.2 设计方法概述	35
4.3 系统建模	37
4.4 模拟伺服系统的 Bode 图设计方法	40
4.5 采样伺服系统的 Bode 图设计方法	55
4.6 直接驱动伺服系统设计指导书	73

第五章 光进控制策略和应用

5.1 多重积分补偿控制	80
5.2 复合轴控制	90
5.3 自适应控制	97
5.4 顺馈和反馈复合控制	100
5.5 双模控制和非线性控制	106
5.6 基于扰动观测器的控制	114

第六章 地基光电成像跟踪系统应用研究

6.1 绪言	118
6.2 电视成像跟踪望远镜设计	118

第七章 机载光电成像跟踪系统应用研究

7.1 绪言	131
7.2 图像晃动的原因	131
7.3 稳定性能指标	131
7.4 稳定技术	133
7.5 机载红外成像稳定跟踪系统设计例子	134

第八章 空间光通信捕获跟踪瞄准系统

8.1 绪言	142
8.2 瞄准误差源和预算分配	142
8.3 跟踪和瞄准系统设计	144
8.4 小卫星通信模拟仿真技术	149

附录 本书部分 MATLAB 仿真程序

第3章用 MATLAB 仿真程序	183
第4章用 MATLAB 仿真程序	186
第5章用 MATLAB 仿真程序	190
第6章用 MATLAB 仿真程序	195
第7章用 MATLAB 仿真程序	202

参考文献

第一章 导 论

1.1 概 述

光学是一门古老的物理学科，至今已有五千年左右的历史。光学望远镜和光学显微镜把光学成像扩展到观察天空中的星体和物质结构的微观状态。不过，纯光学仪器成像在性能和应用上受到许多方面的限制，它们不能像电子信息那样进行存储、变换、处理、传输和控制。正是在这种需要的背景下，促进了光学和电子学的结合，形成新的光电科学领域。

光电科学是光学和电子学相互交叉和融合而形成的，它是现代光学技术、光电技术和激光技术的基础，正是在这些基础之上，研发出许多不同用途的、高性能的光电系统，包括各种不同用途的、先进的光电成像系统，例如，机载和卫星上的高分辨率成像光谱仪，陆基、空基和天基的目标光电成像系统等。

近年来，光电成像系统在许多领域都获得日益广泛和重要的应用，例如，卫星上的遥感装置包括红外和紫外光谱区的光电成像传感器，用来识别地球上的资源和确定其他星球表面物质化合物成分以及大气成分；气象卫星上的光电成像传感器用来探测和传输气象数据；侦察卫星上的高分辨率宽视场光电成像传感器用来获得地面上对方区域内军事装置部署和军队调动的景物图像，地面分辨率可以达到几米甚至几十厘米以内；机载、舰载和车载的光电成像系统是导弹制导武器系统的重要组成部分。

在现代光电成像系统中，有许多是要求对运动的目标进行成像，如上述的光电成像导弹制导武器系统，此外还有靶场动态目标测量的光电经纬仪系统和自由空间卫星之间激光通信系统等。这些光电成像系统必须具有自动捕获、跟踪、瞄准（ATP）功能。将这种具有 ATP 功能的光电成像系统一般称为光电成像跟踪系统，或简称为光电跟踪系统。

本书主要是研究光电成像跟踪系统。由于光电成像原理和各种光电成像器件已经有许多文献和专门著作介绍，所以，本书重点是从控制系统观点来讨论如何满足光电成像跟踪系统的 ATP 性能要求、ATP 系统的原理、设计和实现问题。

1.2 光电成像跟踪系统原理

光电成像跟踪系统的典型结构方框图如图 1-1 所示。从图看出，光电成像跟踪系统的核心是图像跟踪传感器。目前广泛采用电荷耦合器件（CCD）或四象限雪崩光二极管（QAPD）作为光电成像跟踪传感器，它们的性能（等效噪声角 NEA，带宽等）直接影响系统的性能。除了元件的性能之外，光电成像跟踪系统的性能由系统的设计参数（增益、

带宽、频响特性)所决定。系统一般由速度回路和反馈位置回路组成。为了使系统具有足够高的伺服带宽和控制精度,采用和跟踪架方位、俯仰输出轴直接耦合的直流力矩电机机构力矩电机直接驱动伺服系统,这是高性能光电成像跟踪系统的特点之一。

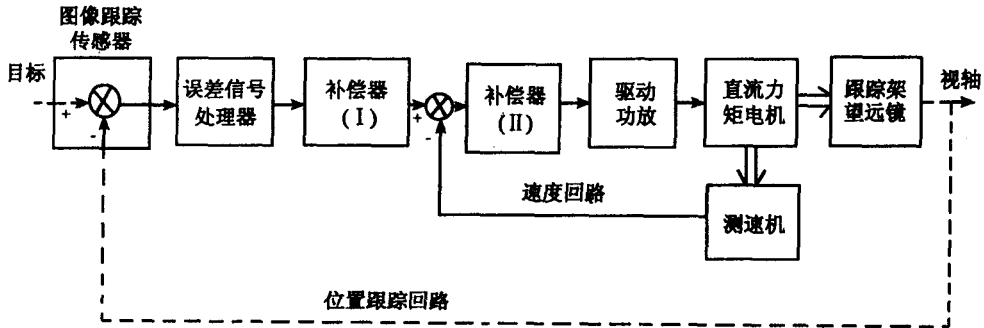


图 1-1 光电成像跟踪系统

1.3 系统应用举例

具有 ATP 功能的闭环光电成像系统在陆基、空基和天基光电系统中都有许多应用,下面举出几个典型的系统应用例子。

1.3.1 光电跟踪经纬仪

光电跟踪经纬仪用于导弹靶场对发射的试验导弹进行跟踪测量,获得其弹道轨迹数据。过去,在没有光电成像传感器时,采用有人参予的半自动方式,操作手通过辅助跟踪望远镜捕获到目标以后,通过操纵单杆使光学望远镜光轴跟踪目标运动,并保持目标图像始终在光学视场内瞄准线中心附近;同时,使用同步摄影机,在靶场时间统一勤务系统(简称时统)的控制下,摄下每一采样瞬间的目标图像,通过事后专用设备—胶片判读仪的处理,得出每一采样瞬间的角度偏差(称为角度脱靶量),而每一采样瞬间角度值由光电跟踪经纬仪方位轴(水平轴)和俯仰轴(垂直轴)上的光电轴角编码器装置产生。这样,由同一采样瞬间的方位角值加方位角脱靶量值和俯仰角值加俯仰角脱靶量值,便分别提供仪器准确的方位角和俯仰角测量数据;而仪器至目标的斜距可由两台光电跟踪经纬仪对目标交汇测量的各自角度测量数据提供,也可由单台光电跟踪经纬仪上安装的激光测距仪提供。知道了每一采样瞬间目标的方位角、俯仰角和斜距的测量数据,便可以给出试验导弹在仪器跟踪其飞行的一段时间内的弹道轨迹。不过,由上述工作过程可以看出:由于没有光电成像传感器,所以,早期的(20世纪60年代)光电经纬仪还不能实现自动跟踪和目标弹道轨迹的实时测量。如果在光学系统焦平面上引入光电成像传感器,它便可以产生目标脱靶量信号,从而可以实现目标的自动跟踪、目标弹道轨迹的实时测量和目标图像的实时显示与存储,如图 1-2 所示。这种具有光电成像传感器(电视 CCD 和 IRCCD),从而具有 ATP 功能和弹道数据实时计算及处理功能的现代光电跟踪

经纬仪从 20 世纪 70 年代以后在导弹靶场获得广泛应用。

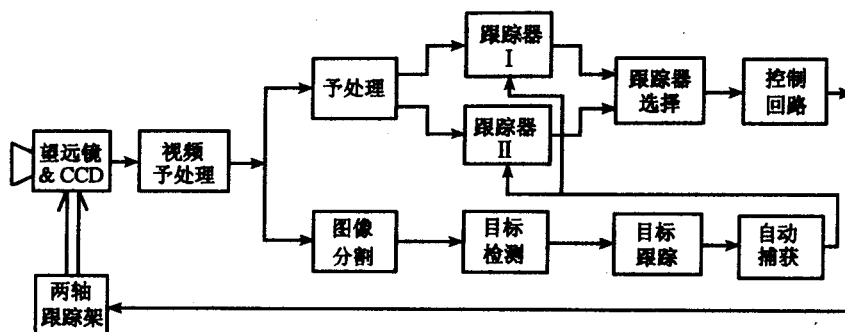


图 1-2 光电跟踪经纬仪 ATP 系统

1.3.2 机载光电成像跟踪系统

机载光电成像跟踪系统用于对地面或空中目标进行跟踪和成像，成像传感器可以是电视固体相机（CCD）或者是凝视型红外焦平面阵列传感器。

机载光电成像跟踪系统和地基光电成像跟踪系统在性能要求上有一个明显的特点即必须采用视轴（Light-Of-Sight）稳定技术。由于飞机本身运动造成它上面安装的光电成像传感器平台的振动，从而引起光电成像传感器视轴的抖动。这种视轴抖动，不仅影响成像的质量，而且影响光电成像传感器提取目标脱靶量的精度，从而影响系统的跟踪性能。因此，机载光电成像跟踪系统除了具有以光电成像传感器为核心的位置跟踪回路之外，还必须具有视轴稳定回路，一般采用惯性陀螺仪做为视轴稳定回路的角振动传感器。机载光电成像跟踪系统的基本组成方框图如图 1-3 所示。

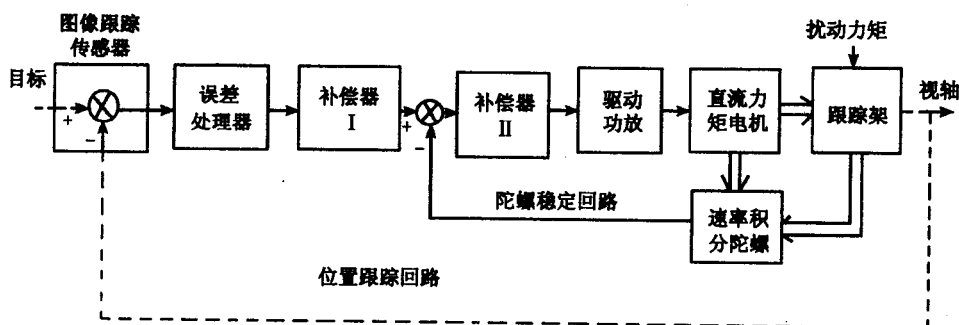


图 1-3 机载光电成像跟踪系统

1.3.3 卫星之间光通信 ATP 系统

卫星之间通信采用激光束做为传送信息的载体，比之目前使用微波通信具有许多优

点：激光波长比微波波长小几个数量级，因此，激光束的衍射极限发散角 ($\theta_B = \lambda/D$) 非常窄，也将比微波波束小几个数量级，由于在相同的发射功率、发射天线孔径和接收天线孔径条件下，接收功率和波束发散角平方成反比，因此，光通信在同样条件下可获得更高的接收功率，或者说更远的通信距离；或者说，在同样的发射功率和接收功率条件下，光通信的发射和接收系统光学孔径可以做得更小，从而使重量、体积和功率更为节省，这对于卫星有效载荷来说是至关重要的影响因素。正由于卫星间光通信具有这些优点和发展潜势，所以，从 20 世纪 70 年代以来，尤其是近十年以来，一些经济发达国家如美国、英国、德国、法国和日本等国，都投入大量人力、物力，竞相开发卫星间光通信技术，并且已经取得突破性的进展。

卫星间光通信技术如同一柄双刃剑，由于它的波长极短、波束发散角极小，带来许多优点的同时，也使波束的捕获、跟踪和瞄准 (ATP) 问题非常复杂而困难。卫星间光通信的波束发散角典型情况下仅为 10 微弧度 (μrad) 左右，两个卫星间的跟踪精度要求 $1\mu\text{rad}$ ，瞄准精度要求 $2\mu\text{rad}$ ，而且还需要解决光束在两个卫星间往返路径上传输延时所产生的瞄准偏差补偿问题，以及视轴稳定问题。此外，由于卫星在轨道上空间位置的不确定性误差远远大于跟踪和瞄准误差，因此，捕获也是一个非常困难的问题。在一定意义上可以说，卫星间光通信的 ATP 课题反映了尖端技术领域对光电成像跟踪系统近于极限的性能要求。

卫星间光通信的 ATP 系统设计和技术问题，本书将专门讨论。

第二章 光电成像跟踪系统总体设计

2.1 绪 言

本章介绍光电成像跟踪系统总体设计的基本问题，内容包括总体设计流程，总体设计过程中应遵循的原则；推导和建立光电成像跟踪系统的一般性能方程，即信噪比方程，并且在此基础上给出光电成像跟踪系统的作用距离、探测概率等系统性能指标。

本章重点放在对可见光成像光电跟踪系统和红外成像光电跟踪系统的总体性能分析综合研究上，对于激光光电成像跟踪系统的信噪比方程及总体性能分析综合在自由空间卫星光通信 ATP 系统专门章节中介绍。

2.2 总体设计流程图

光电成像跟踪系统总体设计流程图如图 2-1 所示。

应该指出，光电成像跟踪系统是由许多分系统组成的，它的性能不仅和系统本身（包括构成它的各个分系统、各种元件）的特性有关，而且还和它要成像的目标特性、传输介质特性、环境因素等有关。因此，光电成像跟踪系统是一个较复杂的工程系统，应该采用工程系统工程的方法进行设计。

所谓工程系统工程方法就是把一个复杂的工程系统看作是一个由各个相互制约、相互联系的部分（分系统、部件、元件）所组成的整体，通过分析、综合、权衡和多次迭代的设计过程，寻求一种整体优化的目标。

总体设计流程图就是采用系统工程方法，对比较复杂的工程系统的设计过程，根据对它们共同特征和规律而制定的，可作为对具体的工程系统设计程序的指南。

光电成像跟踪系统的总体设计首先要根据任务委托方提出的研制要求任务书，通过任务分析将研制要求以总体技术指标形式确定下来。总体技术指标也可能由任务委托方通过预先发展研究后提出，这时，研制方总设计师（组）应该通过任务分析确认总体技术指标是否全面反映了任务目标和性能要求，是否具有合理性、现实性和先进性。因此，在总体技术指标确认过程中，在任务委托方和研制方之间存在一个多次迭代过程，存在一个接口关系。这种接口关系只有在总体方案论证的可行性分析得出结论之后才能冻结。

光电成像跟踪系统的总体技术指标根据任务目标的不同而有所不同。不过，一般都包括以下各项技术指标：

(1) 光谱域指标

目标辐射光谱范围，光谱中心，光谱带宽。

(2) 空间域指标

仪器方位和俯仰角范围，目标视场，目标空间分辨率。

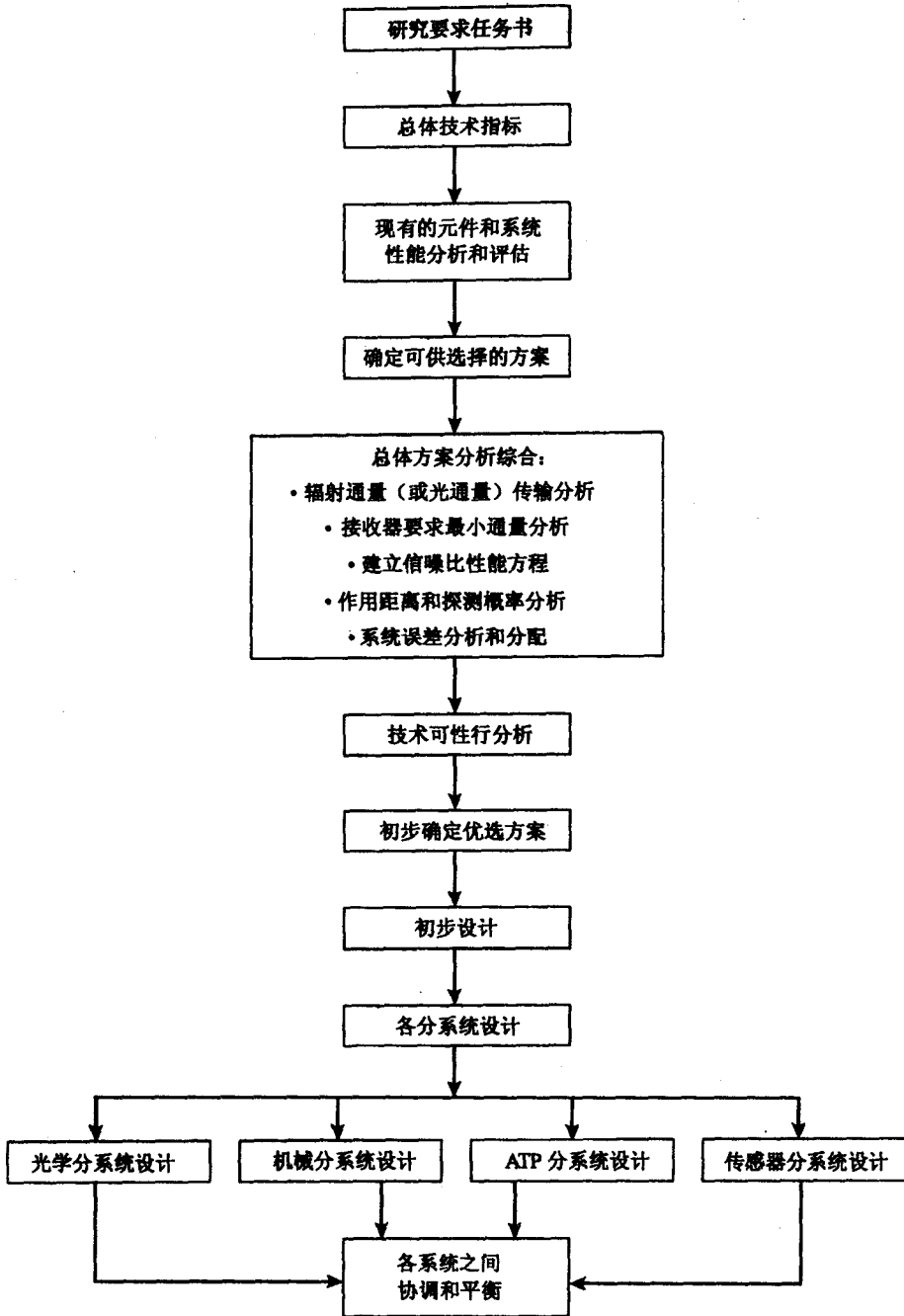


图 2-1 光电成像跟踪系统总体设计流程图

(3) 时间域指标

捕获时间, 响应时间, 数据率或图像采样率。

(4) 信噪比或探测概率指标

(5) 作用距离指标

(6) 精度指标

(7) 动态范围指标

总体技术指标是第一层次的设计指标。总体设计师要选择可能满足总体技术指标的几种方案, 对它们每一种方案从性能上、实现难易上、成本上和整体优化目标考虑上分别做出评估。一个好的总体设计方案, 应该尽可能利用现有的器件和系统, 通过综合和集成, 满足新的要求, 因此, 综合和集成是一个思维创新和技术创新的活动, 是一个总体设计师或集体运用丰富的知识、经验和现有科学技术成果、发挥创造力进行技术创新的活动。例如, 在微波雷达上安装一个光电成像跟踪头, 它们虽然利用现有的雷达技术和光电成像技术, 但是却生成一种新的仪器系统, 使微波雷达和光电成像两者相辅相成, 各自发挥本身的优点和弥补对方的缺点, 既具有微波雷达全天候工作的性能, 又具有光电成像可提供目标清晰图像增强识别本领的性能。因此, 在选择总体方案时, 要首先寻求是否可利用现有的某些系统通过综合和集成, 或者局部的改进, 来满足新系统的总体技术指标要求。

总体方案分析综合其中一个主要内容是对目标辐射通量(或光通量)在传输路径上的增益和损耗过程进行分析, 以获得在接收探测器上所能接收到的有效功率值。然后, 对接收探测器的等效噪声功率(NEP), 或称接收器灵敏度进行分析。在此基础上建立信噪比性能方程式。信噪比定义光电成像系统探测器实际接收到的目标入射信号功率和探测器等效噪声功率(NEP)之比。系统的信噪比方程既包括系统外部参数(目标特性、传输距离、传输介质特性、背景特性、外部干扰源特性), 又包括系统内部参数(光学系统参数、光电探测器参数和前置放大器参数)。其中有些参数是给定的, 不能由设计者驾驭的, 而有些参数是可以由设计者驾驭的。总体设计师的任务就在于: 通过分析、综合、权衡来合理地调正这些可改变的参数, 以得到合适的信噪比, 进而达到和信噪比有关的其他总体技术指标(探测概率、作用距离)要求。

光电成像跟踪系统不管是作为动态目标测量系统, 还是作为光电成像制导系统, 或作为自由空间光通信系统的重要组成部分, 它的测量精度或瞄准精度也是一项重要的总体技术指标。在总体设计中要对精度指标进行分析和估算, 一般采用树状结构方法找出影响总精度的所有误差源, 并且对它们进行分配。

除了信噪比和精度指标之外, 总体技术指标还可能包括其他一些指标, 如对于红外成像系统, 可能要求噪声等效温差(NETD)和最小可分辨温差(MRTD)等性能数据。

在总体方案分析综合基础上, 进行技术可行性论证和确定优选方案。这是一个迭代过程, 有可能经过几次迭代才进入初步设计阶段。

进入初步设计阶段之后, 总体设计师的工作并未完结, 需要在各个分系统的技术指标之间进行协调和平衡, 明确确定各分系统和总体之间以及各分系统之间的接口关系。直到各分系统设计完成和技术可行性论证通过之后, 总体设计才能冻结。

2.3 光电成像光学系统基本参数

2.3.1 视场 (FOV)

视场代表光电成像传感器所能收集的入射辐射的角范围。视场可以分解为它的水平分量 (HFOV) 和垂直分量 (VFOV)。在上述两种情况, FOV 可以由透镜的焦距 f 和场栏的直径 D_F 一起确定。视场的几何表示如图 2-2 所示。

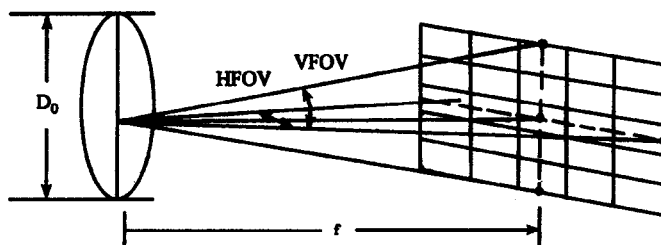


图 2-2 视场 (FOV) 几何表示

2.3.2 焦距 (f)

透镜的透距是从透镜中心到焦点的距离, 从位于无限远处的一个光源的所有入射辐射 (或光线) 都将会聚在这个焦点上。

图 2-3 表示光学系统焦距几何关系。

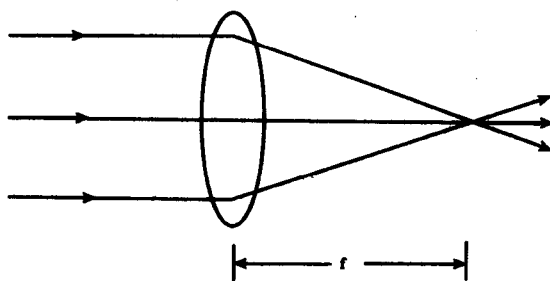


图 2-3 焦距几何示意图

2.3.3 场栏 (field stop)

场栏是一种将超出它的孔径尺寸的人射光线都阻挡住使之不能到达成像传感器靶面的器件。成像传感器放在焦平面位置上, 焦平面通常并不和焦点在相同位置上。焦平面位置确定目标被聚焦的距离。场栏应该正好放在焦平面的前面。如果没有实际的场栏, 那么成像传感器的边界就决定场栏的大小。

图 2-4 表示场栏几何示意图。

由上面图 2-4 可见：场栏直径 $D_{F.S}$ 影响 FOV 的大小。如果场栏做得较小，那么 FOV 将相应地减小。相类似，瞬时视场 (IFOV) 将受到单个探测元 (CCD 像元)， d 的影响。IFOV 就是焦平面上单个探测元所观察到的人射角范围。

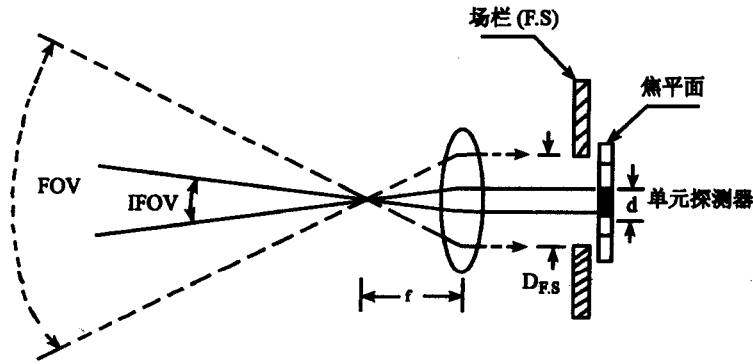


图 2-4 场栏的几何表示

IFOV 和 FOV 可以采用下面公式计算：

$$\text{IFOV} = 2 \tan^{-1} \left(\frac{d}{2f} \right) \quad (2.1)$$

$$\text{FOV} = 2 \tan^{-1} \left(\frac{D_{F.S}}{2f} \right) \quad (2.2)$$

对于 $\text{IFOV} < 20^\circ$ 情况，一般都如此， $\tan^{-1}(x)$ 函数可以足够精确地由 x 来近似。这时 IFOV 可由下式计算：

$$\text{IFOV} = \frac{d}{f} \quad (2.3)$$

例 数字相机，找出 35mm 数字相机的 FOV 和 IFOV，该数字相机具有 50mm 透镜，采用 1152×864 分辨率。

首先说明一下术语的含意：

50mm 透镜表示焦距 $f = 50\text{mm}$ 。

35mm 表示场栏 $D_{F.S} = 35\text{mm}$ (对于普通胶卷相机这就是胶片的尺寸)。

1152×864 分辨率表示在水平方向有 1152 个像元，在垂直方向有 864 个像元。

因此，FOV 采用式 (2.2) 计算：

$$\text{FOV} = 2 \tan^{-1} (35/2 \times 50) = 38.5^\circ$$

IFOV 可以由式 (2.1) 计算，也可以由 FOV 除以像元数来得到：

$$\text{HIFOV} = \text{FOV}/1152 = 0.03^\circ$$

$$\text{VIFOV} = \text{FOV}/864 = 0.045^\circ$$

2.3.4 焦深 (Depth of Focal)

焦平面放置的位置应该使在所希望距离上的目标被聚焦。对于任意目标距离，来自

目标的所有光线都将会聚在透镜后面惟一的位置上。如果目标在非常远的距离上，入射光线将会聚在焦点上。当目标距离越来越近时，入射光线会聚点将离透镜越来越远。

在透镜前面目标的距离， S_0 和在透镜后面聚焦图像的位置 S_1 ，它们之间的关系由迈克尔 (Maker's) 方程确定：

$$\frac{1}{S_0} + \frac{1}{S_1} = \frac{1}{f} \quad (2.4)$$

如图 2-5 表示。

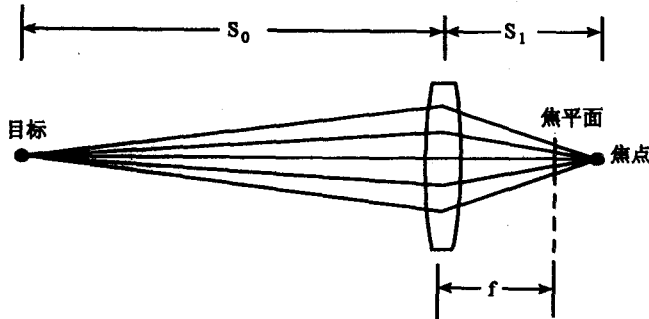


图 2-5 目标聚焦几何示意图

如果焦平面放置使目标处于理想聚焦状态，就意味着目标和图像距离满足方程 (2.4)，这就提出一个问题：目标在多远距离上使图像变成明显地失去聚焦？当目标距离变化时，它在焦平面上的图像将会发生弥散。当图像弥散到它覆盖住相邻的探测像元时，整幅图像就会发生畸变。这样，探测像元的大小就确定了图像被认为丢失聚焦的极限。满足图像良好聚焦判据的对应目标距离范围就称之为焦深。焦深首先决定于探测像元尺寸和焦距。实际上，焦深是可以控制的，只要采用一个孔径光栏 (A. s) 就可以达到此目的，如图 2-6 所示。

孔径光栏将会限制所收集的总通量。因此，可能会以为使孔径光栏做得尽可能大最为有利。不过，孔径光栏越大，焦深越短。这可由图 2-6 的另一幅图说明。

通过限制入射光线可以进入光学系统的角范围，孔径光栏才能真正地改善焦深。不过，减小孔径光栏虽然会改善焦深，但是也减少了探测系统可能收集的总通量，因此，为达到相同的最大探测距离将要求更灵敏的探测器件。这就是为什么在普通的照相摄影中孔径越小，要求曝光时间越长的道理。

2.3.5 光学系统相对孔径 (F -number, $F/\#$)

光学系统相对孔径，又称 F 数，定义为

$$F/\# = f/D_0 \quad (2.5)$$

式中 D_0 ——入瞳孔径。

2.3.6 光学系统数值孔径 (NA)

光学系统数值孔径表示为