



面向光电跟踪系统的 先进运动控制

任彦 著



科学出版社

面向光电跟踪系统的先进运动控制

任彦 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

光电跟踪伺服系统的研究具有重要的战略意义,是国内外研究的热点。这类系统中存在视轴能否实现稳定跟踪的问题,这类问题严重影响了成像系统的成像质量和跟踪精度。传统的研究方法对此类问题解决途径相对独立,通用性较低,因此成像和跟踪效果不理想。本书立足于国防技术前沿,以光电稳定平台为研究对象,从伺服控制角度出发,研究先进的面向光电跟踪伺服系统视轴稳定和目标跟踪问题的控制策略。本书内容翔实,覆盖面广,具有系统性和专业性强、著作内容自成体系等特点,并具有一定的实用价值。

本书主要为从事伺服控制专业的科研人员和工程技术人员提供理论和实践指导,也适合作为高等学校自动控制、电子信息、导航、制导与控制等相关专业的大学高年级本科生和研究生的教学参考用书,也可作为相关领域的工程技术人员和科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

面向光电跟踪系统的先进运动控制/任彦著. —北京:科学出版社, 2017.5

ISBN 978-7-03-052178-1

I. ①面… II. ①任… III. ①光学跟踪—自动控制系统
IV. ①TP72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 054635 号

责任编辑:王 哲 霍明亮 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 5 月第 一 版 开本:720×1 000 1/16

2017 年 5 月第一次印刷 印张:12 1/2

字数:247 000

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

以地基（车载、舰载等）、空基（机载）和天基（星载）相机及光电平台为代表的动基座成像系统能够灵活机动并且实时地获取图像信息，在测绘、勘探等民用领域发挥重要作用，对于一个国家的国防而言也具有非常重要的战略意义，是一项国内外争相研究的热点。

成像系统受载体运动的影响会导致成像目标的影像与成像介质之间产生相对运动，而成像系统视轴的摆动，会造成影像在成像介质上发生旋转，影响对图像的判读，因此光电跟踪系统要实现高动态运动目标的稳定成像和高精度跟踪，就要保证在光学设备曝光之前实现视轴的快速稳定跟踪控制，即动态响应快、跟踪误差小、抗干扰能力强。单纯的按照传统的渐近稳定准则设计的控制方案显然难以满足上述要求，本书将以光电稳定平台为研究对象，从伺服控制角度出发，研究先进的面向光电跟踪伺服系统视轴稳定和目标跟踪问题的控制策略。

本书在国家自然科学基金项目（61563041）和内蒙古自然科学基金项目（2015MS0603）的资助下，将光电跟踪系统中关键问题进行剥离，从不同的角度深入研究，提出一系列解决问题的思想和方法。将视轴稳定和目标跟踪归结为两类控制问题，分别以干扰抑制和跟踪控制为突破点进行研究，为这一研究课题的进一步实用化提供了丰富的理论和技术储备。具体包括以下几方面。

（1）在充分研究光电跟踪平台数学模型的基础上，分析了控制系统设计时面临的问题，用加性分解的思路对其进行了处理并给出了分解方法，明确了设计任务。

（2）针对不同干扰源对光电跟踪平台的影响问题，引入了鲁棒内回路干扰补偿的思想。由于传统干扰观测器对于高频域干扰难以有效补偿，本书提出了利用具有快速切换作用的滑模干扰观测器提高光电平台的干扰抑制能力的设计思想，并针对干扰补偿后的系统采用加性分解原理，分离控制任务，对干扰进行精细化补偿。

（3）针对系统在光学设备曝光之前实现视轴稳定的控制需求，提出基于有限时间收敛的非线性扩张状态观测器的设计方法，实现在有限时间内抑制干扰的作用；设计适用于工程应用的离散全局滑模控制，实现对系统的有效跟踪。

（4）为了提高跟踪精度，借助复合轴系统的控制原理，基于有限时间控制的思想，将多个问题从整体上考虑，面向高精度跟踪问题提出新的基于有限时间收敛的虚拟复合轴控制的设计思路，从控制结构角度出发提高光学成像的质量和对高动态运动目标的跟踪精度。并在此基础上研究基于有限时间收敛的控制器的设计方法，拓展了系统的适用范围。

本书为光电跟踪系统的实际应用提供充足的理论和技术保障，光电跟踪系统作为一类典型的高精度伺服控制系统，应用于光电稳定平台的控制方法可以推广到大型数控加工、重型车载设备、雷达及机器人等领域，具有较广泛的实用价值。本书所涉及的研究具有较强的创新性，并且所涉及的知识领域也较为广泛。在本书编撰过程中，作者研读了大量文献，参考融合了国内外专家学者在相关领域的研究成果，在此，对他们表示衷心的感谢。同时，本书的研究和写作得到了北京航空航天大学刘正华教授的指导，在此也向他表示由衷的谢意。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请广大读者批评指正。

作者

2017年1月

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 光电跟踪技术的价值与意义	2
1.2.1 应用需求	2
1.2.2 理论意义	7
1.3 国内外发展与研究现状	8
1.3.1 光电跟踪系统的结构形式与发展	9
1.3.2 光电跟踪系统伺服控制问题	11
1.3.3 已有研究存在的问题	15
1.4 本书内容安排	16
第 2 章 相关预备知识	18
2.1 相关基础数学知识	18
2.2 系统稳定性理论	19
2.2.1 Lyapunov 定义下的稳定	19
2.2.2 Lyapunov 稳定性的判别定理	20
2.3 有限时间稳定系统	21
2.3.1 有限时间稳定的概念	21
2.3.2 齐次系统的概念	22
2.4 加性分解理论	23
2.5 等效输入干扰	26
2.6 本章小结	28
第 3 章 光电跟踪稳定平台的建模与分析	29
3.1 光电跟踪系统的组成及功能	29
3.1.1 光电跟踪伺服系统的组成	29
3.1.2 光电跟踪伺服系统的功能	31
3.2 两轴稳定平台建模与分析	32
3.2.1 坐标系的定义	32

3.2.2	坐标变换	34
3.2.3	两轴稳定平台的运动学模型分析	37
3.2.4	两轴稳定平台的动力学模型分析	39
3.3	机电模型的分析	44
3.3.1	采用直流力矩电机驱动的系统数学模型	44
3.3.2	影响机械谐振模态的主要因素	48
3.4	基于加性分解理论的稳定平台模型分析	52
3.4.1	系统模型描述的等效问题	52
3.4.2	光电稳定平台系统基于加性分解原理的分析	53
3.5	本章小结	55
第 4 章	基于加性分解的鲁棒内回路控制	56
4.1	干扰观测器	56
4.1.1	基本原理	56
4.1.2	滤波器的设计与分析	57
4.2	滑模干扰观测器	60
4.2.1	状态观测器的基本原理	60
4.2.2	滑模干扰观测器的基本原理	60
4.2.3	矩阵 L 和矩阵 K 的求解方法	63
4.2.4	低通滤波器的设计	65
4.2.5	干扰估计的仿真验证	66
4.3	基于模型分解的滑模干扰观测器复合控制策略	70
4.3.1	模型的加性分解	70
4.3.2	系统控制器和辅系统补偿器的设计	71
4.3.3	光滑化的设计	74
4.3.4	状态分解观测器的设计	76
4.4	实验验证	77
4.4.1	实验设置	77
4.4.2	实验结果及分析	79
4.5	本章小结	90
第 5 章	基于 NNESO 干扰补偿的离散滑模控制	91
5.1	扩张状态观测器	91
5.1.1	线性高增益扩张状态观测器	93
5.1.2	非线性扩张状态观测器	96
5.1.3	基于有限时间收敛的非线性扩张状态观测器设计	97

5.2	离散滑模控制	117
5.2.1	问题描述	117
5.2.2	离散全局滑模控制的设计和分析	118
5.2.3	仿真实验与结果分析	123
5.3	基于 NNESO 干扰补偿的离散滑模控制	127
5.3.1	控制系统的组成结构	127
5.3.2	实验验证	128
5.4	本章小结	136
第 6 章	基于有限时间收敛的虚拟复合轴控制	138
6.1	虚拟复合轴控制的基本理论	138
6.1.1	复合轴控制系统	138
6.1.2	虚拟复合轴控制结构	139
6.1.3	虚拟复合轴伺服系统的实现	140
6.2	基于虚拟复合轴的干扰补偿方法	142
6.2.1	速度干扰观测器的实现方法	142
6.2.2	近似微分法	144
6.3	虚拟复合轴主、子系统控制器的设计	146
6.3.1	设计目标	146
6.3.2	子系统设计	147
6.3.3	主系统设计	148
6.4	实验验证	159
6.4.1	实验设置	159
6.4.2	实验结果及分析	160
6.5	本章小结	174
结束语		175
参考文献		178

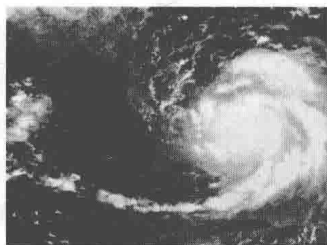
第 1 章 绪 论

高动态光电跟踪伺服系统的研究具有重要的战略意义，是国内外研究的热点。这类系统中存在视轴能否实现稳定和跟踪的问题，这类问题严重影响了系统成像质量和跟踪精度。传统的研究方法对此类问题解决途径相对独立，通用性较低，因此成像和跟踪效果不理想。本书以光电跟踪系统的稳定和跟踪问题为背景，以提高光电设备成像质量和跟踪精度为目的，从运动控制的角度出发，针对光电跟踪伺服系统研究干扰抑制、跟踪控制及先进控制结构等关键技术问题，从而实现提高光电跟踪系统的运动精度、动态性能和鲁棒稳定性。

1.1 概 述

以地基（车载、舰载等）、空基（机载）和天基（星载）相机及光电平台为代表的动基座成像系统能够灵活机动并且实时地获取图像信息，不仅在测绘、勘探等民用领域发挥重要作用，对于一个国家的国防而言也具有非常重要的战略意义，是一项国内外争相研究的热点^[1-4]。

航空光学成像与测量技术具有悠久的历史，1915 年末开始有专用的航空摄影机用于航空侦察。第二次世界大战中，飞机照相侦察成为主要的航空侦查手段，航空相机成为机载平台的一种^[5,6]。第二次世界大战后，由于航空相机不能实时获取数据信息，战场实时性的要求得不到满足，自此之后，开发新型的机载光电平台成为人们研究的目标，机载光电平台也由单一的光学照相向多光谱照相、红外成像、微波成像和可见光成像等多方面延伸。随着科技进步，光电跟踪平台设备各方面性能都有很大的改善与提高，例如，时效性强、准确度高、侦察范围广、机动灵活、针对性强，这些特点决定了光电平台在航空成像测量装备中具有不可取代的地位，光电平台应用如图 1.1 所示。



(a) 大气环境监控



(b) 地形勘探



(c) 资源探测



(d) 民用测绘



(e) 抢险救灾定位



(f) 武器系统精确打击

图 1.1 光电平台应用

1.2 光电跟踪技术的价值与意义

进入 21 世纪后,在民用方面,对于卫星通信、环境监控、航空拍摄等多领域光电跟踪技术都有着重要的应用背景。汶川大地震发生后,当地面救灾部队因道路堵塞、交通不畅时,利用飞机航空遥拍让群众和救灾指挥部的人员及时地了解受灾地区的情况,为顺利制定救灾方案提供了大量的数据信息^[7]。在军事方面,随着战争形态的变化,军事技术变革提高了武器的命中率,这大大缩短了战争的进程。纵观 20 世纪越南战争、海湾战争、伊拉克战争以及 2011 年的利比亚战争,许多国家的实地侦察工具都采用了不同型号的无人机,利用无人机收集情报、向战斗机提供目标信息以及低空袭击重要军事目标。光电装备在战争中的威力已经有所体现,在海湾战争中,光电制导武器以 5% 的投放量占据了 75% 的战绩比例。在此背景下,光电探测技术得到了蓬勃发展,而且近几十年来光电探测技术和光电设备也已成为各国军事技术发展的热点之一。

1.2.1 应用需求

光电跟踪设备是近几十年来发展极为迅速的一种新型实时图像侦察设备,以光电探测器为载荷的光电稳定跟踪平台,在保证光电探测器的视轴 (line of sight, LOS)、光轴 (optical axis) 等与载体运动相隔离的同时实现跟踪、捕获等功能。高精度的光电跟踪系统直接影响了武器装备性能的提高。

多年来,各国一直致力于光电稳定跟踪平台的研究,欧美等发达国家和地区对此的研究始于第一次世界大战,在元器件、单元技术和系统设备等方面均处于全球领先地位。其中,以美国、以色列、法国、英国等国在光电稳定跟踪技术方面的研究较为突出,发展比较迅速,典型代表有美国的 FLIR 公司、Lockheed Martin 公司、以色列的拉斐尔公司、CONTROP 精密技术公司和以色列航空航天工业公司 (IAI) 等,并有多种型号产品装备部队。

如图 1.2 所示,美国 FLIR 系统公司研制的 SAFIRE 系列产品已成功应用在 35 种型号的旋转翼和固定翼飞机上,美国目前用于阿帕奇改进型 AH-64D 的“箭头”(M-TADS/PNVS)(图 1.3)采用的就是美国 Lockheed Martin 公司新式的 TADS/ PNVS 系统产品,该系统中安装了中波大型凝视前视红外系统,扩展了可视范围,提高了可视范围的清晰度和可靠性。美国第五代隐形战斗机 F-35 上的光电瞄准系统(electro-optical targeting system, EOTS)(图 1.4)是建立在 Lockheed Martin 公司的先进瞄准吊舱基础之上的,它具有高分辨率成像系统,可提供自动目标跟踪、红外探测和跟踪、激光指示、激光识别跟踪等。CONTROP 精密技术公司生产的稳定平台设备 ESP-600C 采用三框架两轴稳定,其稳定精度为 $15\mu\text{rad}$,被广泛用于具有侦察功能的直升机、航空器和无人机等场合;四框架陀螺稳定系统 MSSP-3 型海事观察平台主要用于海事巡逻飞机和巡逻船,其具有高分辨力前视红外相机、高性能 CCD(charge coupled device)相机和激光测距仪(图 1.5)。以色列 IAI 公司生产的多用途光电稳定平台 MOSP(multi-mission optronic stabilized payload)系列,被用于无人侦察机、直升机或固定翼飞机昼夜观察等场合,视轴稳定精度可以达到 $25\mu\text{rad}$ (图 1.6)。以色列的拉斐尔公司研制的 Toplite 稳定多传感器光电定位和观测载荷装置是在 Litening 机载导航和定位吊舱的基础上开发的,Toplite 系统既适用于舰载也适用于机载。法国萨基姆公司生产的侦察与武器瞄准系统 STRIX 被用于“支援护航”的直升机上,STRIX 可以随动于直升机乘员的头盔,或射手直接用手控制 STRIX 转动^[8-11]。



图 1.2 FLIR 公司研制的 SAFIRE 系列产品



图 1.3 阿帕奇 AH-64D 武装直升机上的“箭头”

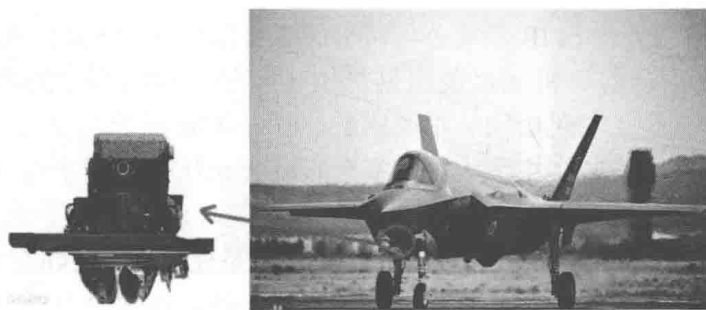


图 1.4 美 F-35 上的光电瞄准系统(EOTS)AN/AAQ40

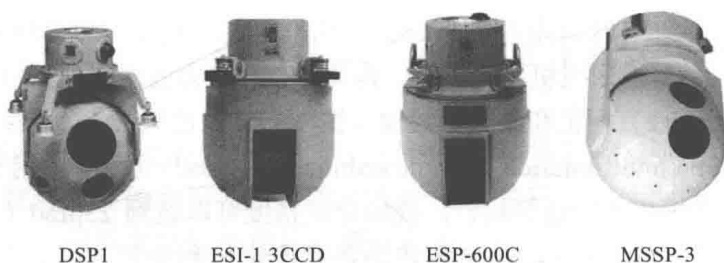


图 1.5 CONTROP 精密技术公司的主要产品

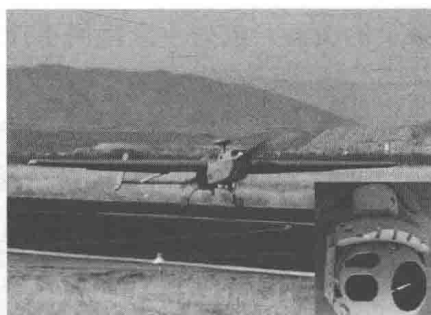


图 1.6 IAI 公司生产的 MOSP3000

随着微电子学的发展,无人侦察机的研制呈现出新高潮^[12],光电稳定设备是无人机的重要装备之一,其主要完成侦察和监视,捕获目标并进行识别测距,在武器投放时进行目标的指示,如图 1.7(a)所示的美国“捕食者”中远程战略无人机就是一个典型的例子,光电跟踪设备采用常平架直径为 35.5cm 的陀螺稳定,其指向精度为 $\pm 0.5^\circ$,瞄准线稳定度可达到 10~20 μ rad。奥地利 Schiebel 公司研制的 S-100 无人机也是值得一提的多功能无人直升机,可以带 200kg 负载,飞行 6 小时,最大速度为 220km/h。用于航空拍摄的无人机近几年也得到了快速的发展,德国 Microdrones 公司研制的 MD4-200 无人机航拍系统是一种全球领先的垂直起降微型自动驾驶无人飞行器系统,系统中集成了 GPS、陀螺仪、磁方位计、加速度计、气压计等多种

高精度传感器和卓越的控制算法，可用于执行资料收集、协调指挥、搜索、测量、侦查等多种空中任务。此外，在无人机机载光电系统的研制上西欧国家也具有较强的实力，在光电系统市场上具有举足轻重的地位的公司还有英国的 BAE 公司、法国的 Thales 公司等^[13]。



图 1.7 光电跟踪稳定平台在无人机上的应用

由于光电稳定跟踪系统在国防和军事上的特殊地位，从 20 世纪 80 年代开始，我国开始全面分析和研究陀螺稳定装置，而对机载陀螺稳定平台的研究是从 20 世纪 90 年代初开始的。因此，我国整个光电设备的发展水平落后于国外，空中侦察设备短缺，红外技术与电机技术都比较落后，大力发展我国光电跟踪测量设备具有十分重要的意义^[14,15]。

经过多年的努力，国内光电稳定伺服机构的研究已经从简单引进、仿制走向了自主设计的阶段，并取得了一定的成绩。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所较早开始进行机载吊舱和光电平台的研制，其研制的用于无人机的两框架两轴陀螺稳定装置的稳定精度为 $100\mu\text{rad}$ ^[16]，用于民用 737 飞机的四框架两轴陀螺稳定装置的稳定精度为 $20\mu\text{rad}$ 。航空工业总公司第 613 所研制的某型号吊舱系统，激光照射距离大于 10km，测距距离 15km，稳定/跟踪系统的瞄准线稳定精度为 $100\mu\text{rad}$ ^[17]。

迫于应用的需求，国内其他单位也积极地开展了针对光电吊舱、红外成像制导及航空摄影稳定平台等装置的研究工作，其中包括中国科学院光电技术研究所、中航工业光电所、北京航空航天大学 and 国防科学技术大学等单位，并取得了一系列的成果。中航工业光电所，瞄准新一代机载“综合光电系统”开展研究，并取得了突破，机载红外搜索与跟踪系统应用于国产歼-11B 型战斗机上，它属于光电技术的一部分，在空战中具有很重要的位置（图 1.8）。图 1.9 是由潍坊天翔航空工业有限公司携手中航工业西安飞行自动控制研究所及中国电子科技集团共同研制的 V750 多用途无人直升机，V750 装有光电稳定跟踪平台设备，可针对特定地面及海域的固定和活动目标实施侦察。图 1.10 是重庆邮电大学与中国电子科技集团第 26 研究所共同研制的小型机载摄影稳定平台，其采用微机械陀螺、直流伺服电机和减速器的三框架结构设计，改善了现有机载摄影稳定平台存在的结构笨重、适应性差等特点^[18]。

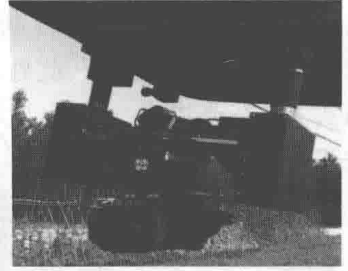
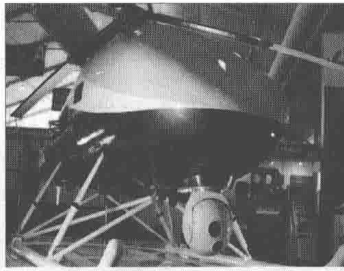
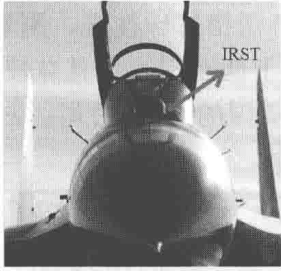


图 1.8 国产歼-11B 型战斗机

图 1.9 V750 无人直升机

图 1.10 航空摄影稳定平台

光电稳定跟踪技术在各个领域都有着巨大的应用价值,从表 1.1 可以看出,国内机载光电稳定跟踪平台与国外相比,精度偏低,总质量偏大,由于检测元件、精密加工等单元技术不过关,致使国内整体研究水平不高,为了缩短与国外先进水平的差距,国内学者针对光电稳定跟踪平台的研究工作正在努力进行着。

表 1.1 国内外几种型号机载光电平台的主要性能^[19,20]

型号/国家或机构	结构	稳定精度/ μrad	旋转范围/ $^{\circ}$	体积 $d \times h/\text{mm}$	质量/kg
Westing house/美国	两轴两框架	25	方位 $-170 \sim +170$ 俯仰 $-75 \sim +30$	596×384	24
Skyball Model/美国	四框架	10	方位 360 俯仰 $-120 \sim +90$	360×420	34
ESP-600c/以色列	三轴三框架	15	方位 360 俯仰 $-110 \sim +10$	300×435	12
TOPLITE/以色列	两轴四框架	25	方位 360 俯仰 $-85 \sim +45$	406×662	53
MOSP/以色列	两轴四框架	25	方位 360 俯仰 $-90 \sim +60$	380×500	10
POP-200/以色列	两轴两框架	40	方位 360 俯仰 $-110 \sim +40$	254×380	16.5
Wescam/加拿大	三框架三轴	5	方位 360 俯仰 $-120 \sim +90$	356×548	30
EOP380/中国	两轴四框架	25	方位 360 俯仰 $-110 \sim +20$	380×585	35
EO260/中国	两轴两框架	50	方位 360 俯仰 $-120 \sim +15$	260×420	18
陀螺稳定平台/光机所	两轴四框架	25	/	490×650	80
T6/中国	三轴三框架	100	方位 $-270 \sim +270$ 俯仰 $0 \sim 150$	280×455	25
西安应用光学所	两轴四框架	30	/	450×700	60
西安应用光学所	两轴两框架	100	/	280×360	12

综上所述,高精度的光电跟踪技术是一项具有强烈应用需求和发展前景可观的研究课题。

1.2.2 理论意义

在飞行器飞行过程中,载体飞行姿态的变化、载体的发动机和飞行中的风阻力矩等外界扰动会给航空光电成像与测量设备的成像和测量能力带来严重影响,如光学成像系统载体的运动会导致成像目标的影像与成像介质之间产生相对运动,即像移^[21];由于成像系统视轴的摆动,影像在成像介质上会发生旋转^[22];当两帧图像之间存在像旋时,则图像无法很好地拼接为一个整体,从而影响对图像的判读,像移和像旋的影响如图 1.11 所示。总之,如果光轴晃动现象出现在设备曝光时间内,获取到的图像信息将变得模糊,这必将直接降低图像的分辨力。随着技术的发展,载体的运动速度越来越高,成像扫描的速度越来越快,从而使得物像运动的影响越来越严重,制约了当今航空、航天相机等各种动基座成像系统的发展,也进一步制约光电跟踪系统的跟踪精度,因此保证稳定成像与提高跟踪精度已成为提高光电跟踪系统性能密不可分的两方面。

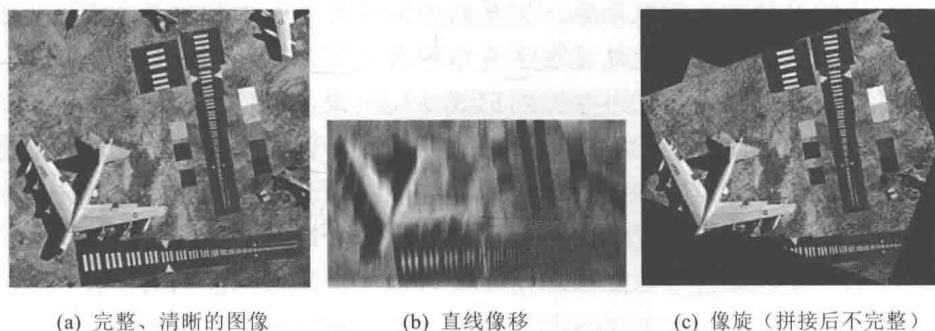


图 1.11 像移和像旋对成像影响的示意图

光电跟踪平台也是一个典型的伺服跟踪系统,影响其跟踪精度的主要因素除了平台机械结构与成像系统,还有伺服控制系统性能。光电跟踪平台在低速运动的工作方式下,扰动力矩会增大视轴的晃动动量,直接导致成像质量下降,甚至造成跟踪任务的失败。这就要求光电跟踪系统必须具有良好的干扰抑制能力。此外,影响视轴稳定跟踪精度的光电跟踪平台内部因素也是不容忽视的,这些因素主要表现为以下几方面。

(1) 轴系间的摩擦力矩扰动。

摩擦力产生于具有相对运动或相对运动趋势的两个物体接触面上,它是影响伺服控制系统精度及性能的最主要因素。摩擦力矩具有高度的非线性,在光电稳定平台内部的各轴系间都可能产生轴系摩擦力矩扰动,在实现光电平台的视轴相对惯性空间稳定的目标时,这种摩擦通常又表现为静摩擦、库仑摩擦和黏滞摩擦等多种形式^[23,24]。

(2) 平台内部的不平衡力矩、轴间耦合及导线扭转转矩。

在平台框架发生旋转时,如果内部质量块的质心与设备旋转中心不重合就会产

生一个非非常数的质心扰动力矩。受机械加工水平的限制,各个框架之间无法实现完全垂直正交,轴间耦合是无法避免的^[25]。光电跟踪平台工作时,轴系转动会带动穿轴部分的导线发生扭绕,而扭转带来的扰动力矩比较复杂,但如果采用良好的布线工艺和软线,可改善导线扭绕转矩,使其远远小于电机驱动能力。

(3) 电机力矩波动。

齿槽效应和电刷摩擦是引起电机力矩波动的主要原因。由换向、绕组的非均匀分布引起的齿槽效应可以产生一个与摩擦力矩类似的齿槽效应转矩,它具有周期性。

(4) 传感器测量噪声。

系统控制算法中为了解算出各个框架电机的控制量,需要采集各种传感器的测量信号,这样测量噪声势必会带入到控制回路中,将形成干扰而影响系统的稳定跟踪^[26]。

面对上述的因素,有些可以在机械设计、加工、元器件的选择、布线工艺选择以及安装时加以抑制或消除,在伺服系统中,电机波动力矩也可以视为外部干扰力矩,通过适当的补偿方法加以消除,但系统中的摩擦力矩对视轴稳定跟踪的影响却很难有效的抑制,由于载体运动施加于光电平台的角速度是由摩擦传递的,即载体的运动给平台带来的扰动是通过摩擦的形式体现出来,所以摩擦力矩的存在严重影响系统的隔离扰动的能力。同时在光电跟踪系统中,伺服控制机构的建模误差以及外界干扰的存在都严重地限制了系统性能的提高,因此视轴稳定控制的重点就是研究如何抑制轴系摩擦力矩等扰动力矩的扰动问题^[27,28]。

由此可见,要保证视轴稳定跟踪精度,可以从伺服运动控制的角度出发,解决影响系统性能的“拦路虎”。结合实际工程需要,针对如何实现系统的干扰抑制,给出性能良好的位置闭环控制器和鲁棒内回路控制器的设计方案。同时,该方案的研究将扩大理论的应用范围,为如何使用线性化方法分析讨论具有强非线性因素的系统提供一定的理论依据和启发。上述问题不仅仅存在于光电跟踪系统中,在一般的运动控制领域中也不同程度存在上述的问题,如机器人、绘图仪、磁/光盘驱动器、高精度机床与加工中心等运动控制系统。因此,研究面向光电跟踪系统的运动控制问题对于充实运动控制理论同样有着积极的意义。

1.3 国内外发展与研究现状

随着光电跟踪系统的稳定跟踪技术日趋成熟,光电设备的稳定跟踪性能也在不断提高。从机械角度讲,要保证被摄图像的稳定,首先就要保证光学系统的视轴稳定,也就要对承载光学系统的平台进行稳定控制与高精度跟踪控制。

影响视轴稳定跟踪精度的因素大体可以概括为两大类:硬件条件和控制方法,硬件方面包括机械安装不平衡、机械结构谐振和传感器测量噪声等。基于我国目前

器件水平和加工精度受限的现状,上述硬件条件只能在某种程度上进行改进。因此,在已有硬件条件之下,从什么样的角度出发,采用什么样的控制方法,来提高光电伺服系统的高稳定跟踪精度就显得更为实际和重要。运动控制技术经历了经典传统控制技术向现代控制技术、智能控制技术的发展,控制方式也由单一化向多元化发展,但应用的条件与背景有所不同。因此在控制器设计时,需要考虑运动系统的结构形式、控制对象的特点以及工程应用环境的限制^[29-31]。本节面向光电跟踪系统干扰抑制与高精度跟踪这两大问题,在分析光电系统机理结构特点的基础上,按照设计时不同的着眼点,对运动系统控制方法的国内外发展与研究现状进行综述。

1.3.1 光电跟踪系统的结构形式与发展

为了克服载体飞行姿态变化、振动及大气湍流等扰动对光电平台视轴的影响,需要建立一个用来实现视轴稳定功能的分系统,从而隔离系统中光学传感器的视轴与载机的运动,使视轴在惯性空间中实现稳定跟踪。因此,从“伺服控制”的角度看,光电平台实质上就是一个“视轴稳定跟踪伺服系统”。

目前针对不同的应用环境与功能性能的要求,稳像方法呈现了多元化的发展,如图 1.12 所示稳像方法主要分为电子稳像、光学稳像、被动隔振稳像、平台稳像和振动主动控制技术等^[32]。电子稳像法是一种光电成像图像稳定的新型方法,受现阶段技术水平限制,只能做到近实时输出,且对大幅度振动难以实现稳定^[33,34];光学稳像是在光路中通过光学元件对不稳定图像进行补偿,它是一种通过光学方法实现图像稳定的方法,该方法不需要将整个系统进行稳定,虽然减轻了被稳定系统的重量,但稳定效果同时也受到光学元件和载体运动的限制,目前该方法多被应用于光学仪器的稳定^[35,36];被动隔振稳像是通过减震器隔离载体的高频振动,常与平台稳像结合使用^[37,38]。平台稳像是利用陀螺稳定平台这种机电框架实现的,即惯性稳定平台,它通常采用直接稳定的方法实现,在光电成像设备内部安装惯性陀螺,陀螺的敏感轴与光电设备的视轴坐标系重合,陀螺感知设备视轴的运动角速率,通过伺服控制算法解算出电机驱动控制量以反向补偿引起陀螺敏感量的外界扰动力矩,从而使视



图 1.12 稳像方法分类