

分类号_____

密级_____

UDC _____

编号_____

中国科学院研究生院 博士学位论文

多模态航空数字相机系统高精度 几何成像关键技术研究

刘 学

指导教师 童庆禧 院 士，中国科学院遥感应用研究所 北京
张 兵 研究员，中国科学院对地观测与数字地球科学中心 北京
郑兰芬 研究员，中国科学院遥感应用研究所 北京

申请学位级别 理学博士 学科专业名称 地图学与地理信息系统

论文提交日期 2008 年 5 月 论文答辩日期 2008 年 6 月

培 养 单 位 中国科学院遥感应用研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席：_____

评 阅 人：_____

Ph.D Dissertation

**Study on the Key Technology for
High-accurate Geometric Imagery of
Multi-mode Airborne Digital Camera System**

By

LIU XUE

Supervisor: Prof.TONG Qingxi

Prof.ZHANG Bing

Prof.ZHENG Lanfen

A dissertation submitted in fulfillment

of the requirements for the degree of

Doctor of Philosophy

in

Cartography and Geographical Information System

June 3

本论文的研究得到中国科学院创新项目“大面阵高分辨率、多（高）光谱兼容型数字航空相机系统研制”项目和中国科学院大科学装置改造项目“稳定平台与像移补偿系统建设”项目的联合资助。

中国科学院遥感应用研究所 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

论文作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文使用授权说明

本人完全了解中国科学院遥感应用研究所关于收集、保存、使用学位论文的规定，即：

按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；

研究所有权保存学位论文的印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务；

研究所可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文；

在不以赢利为目的的前提下，研究所可以公布论文的部分或全部内容。

（保密论文在解密后遵守此规定）

论文作者签名：

导师签名：

日期： 年 月 日

摘 要

“十五”期间，在国家“863”计划和中科院创新项目的支持下，中国科学院遥感应用研究所和上海技术物理所于2006年联合研制成功了多模态航空数字相机系统（Multi-mode Airborne Digital Camera System, MADC）。MADC系统在无人机、直升飞机、中低空以及高空飞机等多种平台上进行了二十余架次的航空数字成像飞行实验，获取了大量高分辨率、高质量的图像数据。鉴于航空飞行平台的不稳定性以及MADC系统设计结构方面的考虑，CCD数字相机的高精度几何成像研究始终是该系统发展的一个重要技术环节。

本文从提高MADC系统成像几何精度的角度出发，重点从以下几个方面进行了研究和论述：

1. 分析了在我国发展航空遥感和航空数字相机系统的重要意义；研究和总结了国内外多种成熟航空相机系统的构建模式和几何成像原理；介绍了MADC系统的系统组成、工作原理和试验情况；提出并分析了对MADC系统几何精度影响最大的四个关键因素。
2. 总结并分析了机械加工精度降低和加工误差产生的主要原因、常用解决方法和数控技术对提高加工精度的重要意义。分析了MADC系统旧型安装基座对成像精度的影响；为MADC系统研制了新型安装基座，使系统的加工精度和安装精度提高到能与光学组件的精度相匹配。
3. 对相机机械快门的结构特点、快门延迟和不同步曝光的原理及对系统整体几何成像精度的影响进行了分析。详细介绍了为MADC系统专门研制的快门控制系统的原理和性能。设计了简便可行的实验室测试方案和测试控制程序来对MADC系统各单台相机的快门延迟和多台相机的曝光不同步时间进行测量，基于该实验室测试方案提出了两者的计算方法。经过多次实验室测试实验，确定了MADC系统相机的快门延迟时间在几十毫秒的量级，多台相机的不同步曝光时间在几毫秒的量级。
4. 详细分析和评价了振动对航空相机成像几何精度和质量的影响。研究和总结了国内外机载稳定平台的研究现状。在深入学习和分析航空稳定平台的原理、结构和功能的基础上，提出了MADC系统专用机载稳定平台的设计方案；该方案的设计思路和技术指标经过详细计算和论证后确

定是可行的，正付诸于加工制作阶段。

5. 分析了像移特别是前向像移对航空相机成像质量的影响，研究和学习了几种常用的像移补偿实现方案。针对 MADC 系统的系统组件和硬件构成情况，设计了专用的外置机械式像移补偿模块，使之能够推动系统整体动作来实现对飞机运动引起的前向像移的补偿，提高 MADC 系统的几何成像精度。

通过对以上几个影响 MADC 系统几何成像精度的关键技术进行的重点研究和分析，有利于对系统软硬件做进一步的优化集成，可以大大提高 MADC 系统的几何成像精度，获取更高质量的航空影像。本文的研究十分有利于将 MADC 系统发展成为一套具有我国自主知识产权的成熟的航空数字摄影系统。

关键词：航空遥感、多模态航空数字相机、几何成像、快门延迟、不同步曝光、机载稳定平台、像移补偿。

Study on the Key Technology for High-accurate Geometric Imagery of Multi-mode Airborne Digital Camera System

Abstract

Multi-mode Airborne Digital Camera System (MADC) was developed by Institute of Remote Sensing Applications and Shanghai Institute of Technical Physics in 2006, under the support by State 863 Projects and Innovation Projects of Chinese Academy of Sciences. MADC system has already obtained many high-resolution and good quality images through more than 20 times aerial photography experiments on different flight platforms, such as unmanned aerial vehicle, helicopter and fixed-wing aircraft. Considering the instability of flight platforms and the special structure design of MADC system, we always hold that the high-accurate geometric imagery is an important technique for CCD digital cameras.

In order to improve the geometric accuracy of imaging by MADC system, some important problems are deeply studied in this paper:

1. The significance of developing aerial remote sensing and airborne digital camera system in China was Analyzed; the constructive mode and the principle of geometric imagery according to some airborne digital camera systems at present was researched and summarized; the composition, working principle and aviation experiment of MADC system were introduced; the four key factors which mostly affecting the geometric imagery accuracy of the MADC system were proposed and analyzed.
2. The main cause of the machining precision reducing and the machining error producing and its common solution method were summarized, the significance of improving machining precision using the numerical control technology was analyzed. After the Analyzing of the effect of geometric imagery using the old type installing base, a new type installing base for MADC system was researched and produced, which can match the machining and installing precision to the optical device in a higher level.
3. The effect on the geometric imagery precision which caused by mechanical shutter structure, shutter delay and unsynchronized exposure were studied. After the

introduction of the principle and function of shutter-control system for MADC system, a simple and feasible testing plan in laboratory for measuring the accuracy time of shutter delay and unsynchronized exposure was proposed. the calculation method about this two values was put forward based on the testing plan. The camera shutter delay and the unsynchronized exposure of MADC system were determined through the test. The camera shutter delay is up to several tens milliseconds and the unsynchronized up to millisecond.

4. Vibration has important effect on both the geometric imagery precision and the image quality. The art of the researching of airborne stability platform was studied. Based on the deep understanding and analyzing of the principle of the aerial stability platform, a feasible special design of the platform were put forward. The feasibility is supported by detailed calculation and the design is under-making.
5. After the analyzing of the effect on imaging quality of aerial camera which caused by image smear especially the forward image smear, some common methods for image smear compensation were studied. According to the special structure of MADC system, the external image smear compensation module was designed which can push the whole camera system moving to compensate the image smear and improve the geometric imagery accuracy.

After emphatically analyzing and researching for the key technologies which affect the geometric imagery accuracy of MADC system, the hardware and the software of MADC system should be integrated with optimization. The geometric imagery accuracy of MADC system should be greatly improved, which could help us obtaining more high-quality aerial images. This paper can accelerate the improving of the MADC system and get the system become a developed aerial digital photogrammetry system with independent intellectual property of our country.

Key Words: Aerial Remote Sensing, Multi-mode Airborne Digital Camera System, Geometric Imagery, Shutter delay, Unsynchronized Exposure, Airborne Stability Platform, Image Smear Compensation

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
目 录.....	V
第一章 引言.....	1
1.1 航空遥感的重要性和发展趋势.....	1
1.1.1 航空遥感的重要性和不可替代性.....	1
1.1.2 数字化是航空遥感的发展趋势.....	2
1.1.3 我国自主发展航空数字遥感系统的重要意义.....	3
1.2 航空数字相机系统的发展现状.....	5
1.2.1 国际典型航空数字相机系统介绍.....	5
1.2.2 国内研究与发展现状.....	10
1.2.3 多模态航空数字相机系统介绍.....	12
1.3 影响 MADC 系统成像几何精度的重要因素.....	19
1.4 论文的总体框架及各章的主要内容.....	19
第二章 机械加工精度对 MADC 系统成像精度的影响.....	22
2.1 加工精度与数控技术.....	22
2.1.1 加工精度与加工误差.....	22
2.1.2 数控技术与数控机床.....	25
2.1.3 加工精度对 MADC 系统整体精度的影响分析.....	29
2.2 MADC 系统新型安装基座的设计与加工.....	31
2.2.1 MADC 系统新型安装基座的设计思路.....	31
2.2.2 MADC 系统新型安装基座的具体设计与加工.....	32
2.3 本章小结.....	36
第三章 快门延迟及不同步曝光对 MADC 系统几何成像精度的影响.....	37
3.1 快门、快门延迟和不同步曝光.....	37
3.1.1 快门.....	37
3.1.2 快门延迟.....	38
3.1.3 不同步曝光.....	39
3.2 MADC 系统的快门控制系统.....	41
3.2.1 快门控制系统的原理.....	41
3.2.2 快门控制系统的设计.....	42
3.2.3 快门控制系统的时间精度.....	44
3.3 MADC 系统快门延迟和不同步曝光的实验室测试.....	45
3.3.1 快门延迟的实验室测试.....	45
3.3.2 不同步曝光的实验室测试.....	47
3.3.3 快门延迟不同步曝光测试软件实现及流程.....	48
3.4 实验结果及计算.....	51
3.4.1 单台相机快门延迟时间的计算.....	51
3.4.2 快门延迟和不同步曝光对成像质量的影响分析.....	54

3.5 本章小结.....	55
第四章 MADC 系统专用机载稳定平台的研制	56
4.1 振动对航空相机系统的影响.....	56
4.1.1 振动对航空相机成像质量影响的简单计算.....	56
4.1.2 振动对航空相机成像质量影响的比较与分析.....	59
4.2 机载稳定平台发展概况.....	61
4.2.1 国外发展情况.....	61
4.2.2 国内研究与发展概况.....	65
4.3 MADC 系统专用机载稳定平台的设计.....	67
4.3.1 稳定平台的基本原理.....	68
4.3.2 机载稳定平台的研制思路和设计策略.....	69
4.3.3 机载稳定平台的具体设计.....	70
4.4 机载稳定平台的研制进度.....	80
4.4.1 机载稳定平台的机械结构与加工.....	80
4.4.2 电路设计与电路板制作.....	81
4.5 本章小结.....	82
第五章 MADC 系统像移补偿的实现	83
5.1 像移及其计算.....	83
5.1.1 像移的概念.....	83
5.1.2 前向像移的计算.....	83
5.2 常用像移补偿方法.....	85
5.2.1 像移补偿的要求和效果评价.....	85
5.2.2 像移补偿方法分类及介绍.....	86
5.3 MADC 系统的像移补偿方案.....	94
5.3.1 外置机械式像移补偿模块.....	94
5.3.2 外置式偏摆镜补偿方案.....	100
5.3.3 软件补偿法.....	100
5.4 本章小结.....	102
第六章 总结与展望	103
参考文献.....	105
攻读博士期间参与项目与发表文章情况	110
致 谢.....	113

第一章 引言

1.1 航空遥感的重要性的发展趋势

1.1.1 航空遥感的重要性和不可替代性

进入新世纪以来,空间信息领域的国际竞争日益激烈,航天遥感技术在世界范围内被广泛应用,取得了巨大的经济效益和社会效益。与此同时,先进国家仍然大力地发展着航空遥感及其相关技术,非常重视航空遥感系统的建设与发展。与航天遥感相比,航空遥感仍具有自己的特色和相当大的优势:

(1) 卫星受固定轨道和天气的限制,缺乏机动性,重复周期过长,有效数据获取能力较低;航空遥感则具有较强的灵活性和机动性,可以根据需求在指定的时间对特殊地区进行多方向、多视角观测,可以进行多种专题、专项的应用飞行。能够快速地对突发的自然和人为灾害做出反应。

(2) 卫星在提高空间分辨率后却损失了对地面宽空间覆盖的优势,一般只有几公里到十几公里,而且垂直观测重访周期太长(一般要超过 100 天以上)难于获得大面积或较大区域的数据,航空遥感则可以在一个好天气周期中进行大面积的飞行,获取大范围的数据。在卫星的空间分辨率不断提高以后,其空间覆盖能力却不断降低。在其空间分辨率接近或达到航空遥感水平时,其空间覆盖能力实际上也处于与航空遥感相同的水平,并在很大程度上丧失了卫星遥感的宏观性和持续性;航空遥感要获得与卫星相同的分辨率的数据其技术难度要小得多,而在高空飞行的情况下要获得十公里以上的地面覆盖也并非难事。因此,航天遥感系统更适合于中低分辨率、宽测绘带对地观测数据获取,而航空遥感系统则更适合高分辨率(或超高分辨率)的数据获取。

(3) 遥感数据的成本上进行比较,在同样高分辨率遥感数据的前提下,航空遥感比航天遥感还要低。例如,每平方公里 IKONOS(1 米分辨率)和 QUICKBIRD(0.61 米分辨率)卫星数据价格大约是 280 元(34 美元),而航空遥感数据的价格则估计不超过 100 元。航空遥感获取的数据更有利于作为“商业产品”提供到民用遥感的技术应用中。高分辨率卫星数据价格昂贵,这对于购买小范围数据(数十到 300 平方公里以下)较为有利。面对我国大面积数据的需求,高分辨率卫星遥感不仅数据获取困难,而且价格难以承受。与此相反,航空遥感有利于获取较

大面积的地面影像。

(4) 卫星难于获得立体观测数据,更难于用以解决大范围高分辨率数字地形模型(DEM)和地形测量问题;对此航空遥感则更为有利。

(5) 航空遥感系统不但具有自己特殊的技术优势,它还是发展航天遥感系统的重要技术平台。在发展新空间遥感仪器的初期阶段,需要进行机载原理性试验,需要以机载样机试验结果对卫星遥感系统性能进行预估;在航天遥感仪器进入轨道运行阶段,需要用机载遥感系统获得的遥感数据与卫星遥感数据进行对比分析,检验和评价遥感系统的性能、实用性、技术指标,并进行有效的飞行定标。

所以说,航空遥感和航天遥感是构成空间对地观测系统的两大组成部分,航空遥感系统应该是完整、独立、稳定运行的系统;两个系统各具优势,互为补充,协调发展,可以相互支持,不可相互替代。航空遥感系统除独立发展、开发技术外,在不同程度上都可直接服务于国家和国际的科技开发及社会经济发展。而且航空遥感可作为航天遥感的技术辅助系统,为航天遥感计划的发展开展多高度、多平台、多技术的论证性的综合技术与模拟试验研究。

1.1.2 数字化是航空遥感的发展趋势

航空遥感是由航空摄影发展起来的。在目前的航空遥感中,占主导地位的还是传统的航空胶片摄影,经过多年的发展,已相当成熟,作业流程规范,得到了普及应用。为克服传统的航空胶片摄影存在的成本高、耗时长、工艺复杂、污染环境等缺陷,世界各国争相研究数字摄影系统以弥补其不足。数字化是航空遥感当前的发展趋势。

从提高作业自动化程度的角度来看,遥感技术的发展可以说就是一个不断提高数字化水平的过程。自遥感技术诞生以来,从录入(载入)观测数据到扫描胶片影像,从数据的处理到存储管理,就是在不断地进行数字化,不断地提高数字化的程度。历史表明,只有推动遥感技术向着全面数字化的方向发展,才能大大提高遥感数据获取、处理和管理等方面的作业效率。

当前,遥感技术的全面数字化发展不再满足于以往将航空或航天平台拍摄的胶片扫描,录入计算机形成数字影像的作业模式;而是追求从数据获取到数据预处理、存储、应用及管理的彻底数字化。尤其是在数据获取端,随着电子技术的

不断发展，超长线阵、超大面阵的 CCD 探测器不断被开发出来，促使数字摄影相机的探测性能（分辨率、成像范围等）不断逼近传统量测相机，CCD 航测相机面临着前所未有的发展机遇。由 CCD 航测相机代替传统胶片航测相机的优势是非常显著的：

（1）尽管航摄胶片影像记录了地表地物连续的灰度变化，但是在实际作业时，需要通过扫描仪来将其数字化；而往往囿于数字化仪的性能，降低了能够识别的灰度等级，也引入了不确定的误差因素。数字摄影则可以通过人为设定每个 CCD 探测元对应的数据位数（bit），来提高可能记录的灰度等级，比如将探测单元获取的数据设为 12bit，就能够得到可以记录 4096 个灰度等级的影像。

（2）很多受光线、曝光控制、薄云等干扰所造成的模糊影像，因为胶片化学物质反应成像的限制，记录了下来却无法处理。而数字摄影就可以凭借其记录数据丰富、精细的灰度等级来反映地物间可能的细微灰度差别，从而为识别地物细节、增强模糊影像、反演阴影下面的地物等提供了可能。

（3）由于 CCD 器件感光范围宽、灵敏度高，使得航空数字遥感设备对天气质量的要求相对传统胶片摄影较低。如果结合航空平台的云下飞行，就可以大大降低不良天气的约束，从而大大提高作业效率。

（4）数字摄影直接获取数字影像，符合现代数据处理设备数字化的需求，可以便捷的投入处理和应用。

（5）直接获取数字影像可以摆脱摄影耗材的限制，只要存储空间允许和能源供应充足，就可以源源不断的获取数据，从而可以延长作业时间，提高作业效率，节约作业成本。

不管是传统胶片摄影相机，还是航空数字相机，自身都在不断地改进和发展，而且在今后相当长的一段时间内，二者在航空摄影领域都还将同时存在。但我们相信，随着 IT 行业的快速腾飞，以电子技术和计算机技术为基础的数字航空相机将迎来一个飞跃发展的阶段，并将逐步并完全取代传统胶片摄影相机。所以说，数字化是航空遥感发展的必然趋势。

1.1.3 我国自主发展航空数字遥感系统的重要意义

我国正处于改革开放、经济建设和社会高速发展时期，国家对空间数据和信

息无论在科学发展或经济建设方面均有着十分巨大的需求。当前,国家所开展的一系列大型计划,如国家电子政务、国土资源大调查,城市化和数字城市、森林资源调查与数字林业、西部大开发、能源发展、农业土地资源清查,特别是包括国家公共安全和国防安全在内的国家安全都需要大量、稳定、多类型、高精度空间数据的保障与支持。因此,在发展我国航天遥感技术的同时,也必须同时加大航空遥感技术的发展步伐。

在卫星,特别是我国对地观测卫星以及传统胶片航空遥感不足以满足地理空间数据的巨大需求情况下,发展自主、综合集成的航空数字遥感系统,以创新实现超越,将能保证我国各行各业对空间信息的需求,特别是对于高分辨力(空间分辨力、光谱分辨力)和全天候遥感数据的需求,解决当前基础地理空间信息的供需矛盾。

发展我国拥有自主知识产权的实用型航空数字相机系统具有以下重要意义:

(1) 数字航空摄影系统是当前国际航空遥感及航空摄影测量领域的一项新型技术和一个重要的发展方向,是行业技术发展的大趋势,如果不紧跟技术发展潮流,我们势必在航空遥感领域更落后于发达国家。

(2) 通过发展我们自己的航空数字遥感系统,必将有力的促进我国航空摄影制图行业的技术改造,提高我国航空遥感的水平,实现从光学胶片型航摄和以模拟处理为主体的航空摄影和航空摄影测量向全数字化方向转化。

(3) 可以避免代价高昂的引起国外同类系统。目前国外已经成型的多套同类系统,或对我国禁运,或售价十分昂贵(如 ADS40 和 DMC 等数字遥感系统价格都在 150 万美元以上)。因此,研制成功自主知识产权的航空数字遥感系统将有助于打破西方敌对势力对我国该方面的技术壁垒和封锁,对国家安全、经济建设和社会的可持续发展都有极大的促进作用,是未来我国实现科技强国必须掌握的关键技术之一。

(4) 有利于促进国内数字航空摄影服务产业的形成,形成可推向市场的数字航空数字遥感产品。从而保证获取的地观测数据在信息处理中能充分发挥计算机高速处理的优势,进而发挥其信息量大、分辨率高、处理分析和制图速度快的特点,以适应地形测绘、地理制图以及其它信息领域,特别是国家电子政务、数字城市等方面的对高分辨率遥感空间数据的巨大需求。

(5) 由于航空数字遥感在工艺流程中省去了常规航摄的一些烦琐过程如胶片

冲洗、扫描数字化等，可以加快作业速度，提高成品精度，预计可以提高制图、测图等的速度 2-3 倍以上，从而在测绘、地矿、冶金、石油、森林、地震、水利等领域，特别是对城市、矿山、工程、区域大比例尺制图以及农业、森林、植被资源调查等方面发挥很好的应用。

由此可见，数字航空摄影系统的研发具有巨大的应用潜力、可观的商业前景和重大的社会意义。我们通过对国外先进航空数字遥感系统的分析，可以发现现代航空数字遥感系统要求能接近或达到传统胶片航摄相机系统的幅面、分辨率，并且要考虑多/高光谱摄影和立体成像的能力。因此，我们研制同类系统，应该考虑该系统具有多模态的作业模式，结构简洁，操作简便，易于掌握，与目前广泛使用的常规光学摄影系统相比，价格也应有很大优势。尤其特别的是，除机上系统而外，该系统的数据回放、处理、分析均可与常规计算机系统相联，界面友好，以便于广大用户根据自身的情况选用。

1.2 航空数字相机系统的发展现状

1.2.1 国际典型航空数字相机系统介绍

1、ADS40系统

ADS40 (Airborne Digital Sensor) 数字航测相机由LH System公司于2000年推出。它是一种能够同时获得立体影像和彩色多光谱影像的多功能、数字化航空遥感传感器，是世界上第一台摄影像幅能够与传统航空 $23\times 23\text{cm}$ 胶片相媲美且像质可以达到100线对/mm的航空数字相机系统（外观如图1.1所示）。它可以提供宽覆盖、高分辨率和一致几何精度的航空摄影测量影像用于专题制图、数字地形模型和正射影像图，还可以提供多光谱图像用于图像判读、遥感应用和地学成像等多个方面。



图 1.1 ADS40 系统外观示意

ADS40是使用线阵CCD进行扫描连续成像的，系统中共用到10个12000像元的线阵CCD，其中有6个用于全色成像，其余4个用于RGB和近红外多光谱成像。全色成像时每两个线阵交错排列并分布在焦平面上的不同位置，分别对应前视、后视和垂直俯视扫描成像，用于可选择不同立体角 14° 、 28° 和 42° 的立体像对。这样ADS40就可以同时获取地物的三个角度的全色影像和4个波段的多光谱影像(如图1.2所示)。获取的全色波段和多光谱波段范围为全色(465-680nm)，蓝色(430-490 nm)，绿色(535-585 nm)，红色(610-660 nm)，近红外(835-885 nm)。相机系统使用PAV30航空稳定平台，还集成了GPS和惯性测量与姿态定位装置(POS AV)，可以为每条扫描线提供外方位参数的观测值。ADS40系统的主要参数为：镜头焦距62.77mm，线阵像元大小 6.5×6.5 微米，线阵像元数12000，量化位数12bits，最大视场角 64° ，数据存储容量540GB。

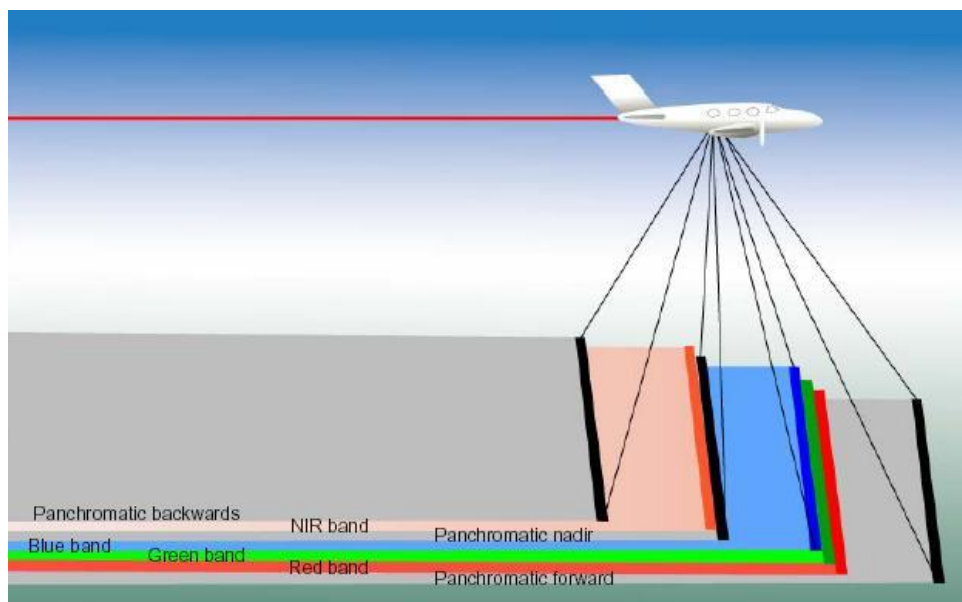


图 1.2 ADS40 影像获取示意图

ADS40系统具有下列独特的优势：

- ✧ 能够同时获取全色、彩色和假彩色图像，并具有较高地面分辨率；
- ✧ 成像视场角大，覆盖范围宽，减少了航线并节省了飞行时间；
- ✧ 光敏动态范围大，降低了对航摄天气的要求，可获得更多的航摄时机；
- ✧ 校正精度高，降低了对地面控制点的依赖；
- ✧ 通过三线阵立体像对得到高精度DTM数据更有保障。

2、DMC 系统

DMC (Digital Mapping Camera) 数字航摄相机是美国 Z/I 影像公司于 2001

年推出的产品，DMC 系统从一开始设计，就把目标瞄准在航空摄影市场上，决心要将 DMC 系统发展为胶片航摄相机的替代品。



图 1.3 DMC 外观图

DMC系统不同于ADS40，它采用面阵CCD传感器以保证图像像元之间严格的几何位置关系。由于目前面阵CCD大小与航摄胶片相差很远，Z/I公司采用了模块化复合CCD面阵的设计方式，将四个幅面为7K×4K的面阵CCD拼接起来，通过组合镜头，构成一个13.5K×8K的大面阵传感器，作为DMC系统的高分辨率全色波段。在DMC系统下部的四个角落，还安装了四个3K×2K的面阵传感器，使它具备多光谱成像能力。多光谱相机的视场角与全色相机的视场角保持一致，后期处理时可以将多光谱图像和全色波段进行融合处理得到高分辨率的多光谱图像。DMC获取的多光谱波段范围为蓝色（400-580nm），绿色（500-650nm），红色（590-675nm），近红外（675-850nm），还有一个近红外波段（740-850nm）可供替换。图4是DMC数字航摄相机系统结构图。DMC配有T-AS陀螺稳定相机平台，具有FMC前向运动补偿功能，还集成了GPS和惯导姿态测量装置。DMC全色模块相机的一些技术参数为：检校焦距120mm，视场角 $69.3^{\circ} \times 42^{\circ}$ ，单个CCD面阵大小4K×7K，像元大小 $12\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$ ，拼接成为一幅虚拟影像的面阵大小近似为 8000×13500 像元。

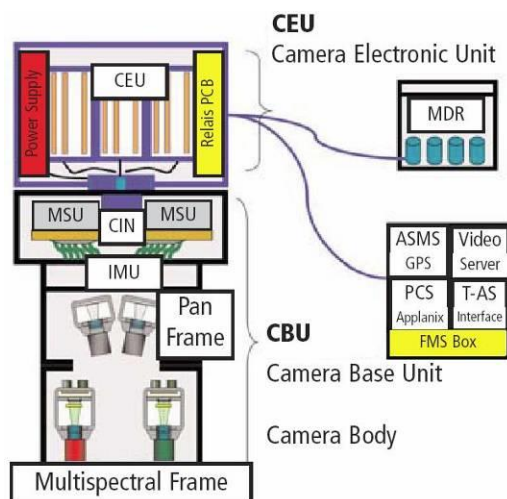


图 1.4 DMC 数字航摄相机系统结构图

从技术和应用这两个方面来看，DMC 的重要特点主要包括：

- ✧ 面阵 CCD 芯片保证了几何性能的稳定与较高的图像辐射分辨率；
- ✧ DMC 可以同步获取全色影像和多光谱影像；
- ✧ FMC 可减轻图像模糊；
- ✧ 12bits 的辐射分辨率使得图像更清晰；
- ✧ 可利用现有的 DPSW 数字摄影测量软件处理中心投影方式的虚拟影像。

3、UltraCam₀ 数码航摄相机系统

UltraCam₀ 数码航摄相机系统作为奥地利 VEXCEL 公司于 2003 年推出的产品，集成精密光学机械加工、高速信号处理、海量数据存储与处理等技术为一体，能够获取高精度、高重叠度的影像。UltraCam₀ 数码航摄相机最突出的特点是运用多镜头同地点延时曝光技术，基本实现了多台组合相机的中心投影。

图 1.5 UltraCam₀ 外观图

为了获取大幅面中心投影的影像，UltraCam₀ 数码航摄相机系统在每个镜头

焦平面上精确安置了不同数量的面阵 CCD：全色波段 4 个镜头对应成 3×3 矩阵排列的 9 个面阵 CCD，其中主镜头第 2 镜头对应四角的 4 个 CCD、第 1 从镜头对应中间 1 个 CCD、第 3 从镜头对应左右 2 个 CCD、第 4 从镜头对应前后 2 个 CCD（如图 6 所示）。多光谱波段的 4 个镜头分别对应另外 4 个 CCD。UltraCam_D 系统所使用的 13 个 CCD 面阵尺寸均为 4008×2672 像素，其中形成全色影像的 9 个 CCD 之间存在一定程度的重叠（航向为 258 像素，旁向为 262 像素），CCD 获取的影像数据通过重叠部分影像精确配准，消除曝光时间误差造成的影响，生成一个完整的中心投影影像。全色影像通过与同步获取的 RGB 和彩红外影像进行融合、配准等处理，生成高分辨率的真彩和彩红外影像产品。UltraCam_D 系统具有 TDI 像移补偿功能，配备有惯导系统（IMU），能够安装在多种通用航空稳定平台上使用。

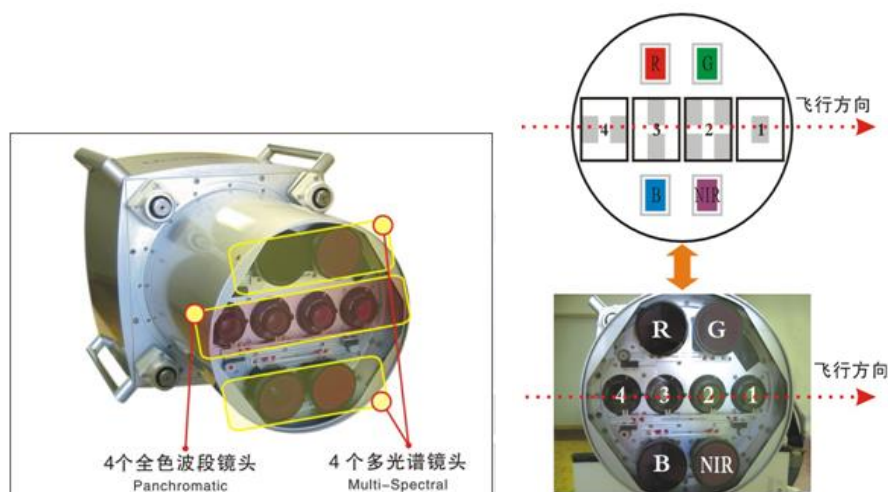


图 1.6 UltraCam_D 系统全色波段 CCD 分布说明

UltraCam_D 系统的总体参数为：CCD 像元大小 9×9 微米，量化位数 14bits，机上数据存储容量 1.5TB，最大图像采集速率 0.75s/幅，影像的最大几何精度小于 2 微米，像移补偿（FMC）TDI 控制最大 50 个像素。全色波段主要参数为：影像大小 7500×11500 像元，单个全色 CCD 大小 4008×2672 像元，镜头焦距 100mm，视场角 $55^\circ \times 37^\circ$ 。

UltraCam_D 系统的特点有：

- ✧ 可以同时获得一组高分辨率全色影像、真彩色影像和假彩色影像；
- ✧ 数字影像具有良好的辐射精度，并提供了较好的立体影像；
- ✧ 更高的几何精度，由多 CCD 阵列合成的整幅影像，是严格精确的单个坐标系统和唯一投影中心的影像；

- ◇ 拍摄的影像完全兼容目前世界上流行的几乎所有的数字摄影测量工作站可保留原工作流程，直接生成 4D 产品。

4、DIMAC 数字航测相机

DIMAC Systems公司于2003年发布的数字模块化航空相机DIMAC (Digital Modular Aerial Camera)，采用Kodak面阵CCD传感器，由4个面阵CCD模块相机组成，记录着RGB和近红外波段影像，影像获取后直接得到真彩色影像。通过1个到4个模块相机的不同组合，获得不同的地面覆盖影像。2005年，DiMAC Systems公司又推出新一代DIMAC航测相机，主要技术参数为系列镜头焦距55 / 80 / 100 / 120 mm，CCD像元大小6.8 mm，面阵大小7216×5412像元，2个模块相机组合的输出影像面阵大小10500×7200像元。



图 1.7 DIMAC 外观图

1.2.2 国内研究与发展现状

我国在上世纪九十年代在航空遥感技术方面取得了突破性进展，它主要表现在机载传感器的研制方面如国家 863 计划 308 主题陆续推出先进机载对地观测系统（AEOS），AEOS 包括五个先进传感器：实用型模块化成像光谱仪（OMIS），宽视场面阵 CCD 超光谱成像仪，高分辨率 CCD 面阵数字航测相机，三维成像仪和 L-SAR 实用系统。其中的高分辨率 CCD 面阵数字航测相机和三维成像仪与航空数字摄影有关。

AEOS 中的高分辨率 CCD 面阵数字航测相机系统的核心是一只具有 4096×4096 像元数的全数字式面阵 CCD 探测器，配以专门研制的大视场、大相对口径、高分辨率、低畸变光学系统组成了航测相机主体。相机并与专门研制的

三轴陀螺稳定平台、高速大容量数据存储系统和 GPS 定位接收系统等共同集成为一套全数字、高分辨率、具有良好适应性的数字化航测相机系统。AEOS 中的机载三维成像仪包括两个分系统：扫描激光测距技术、多波段成像技术、INS/GPS 复合姿态测量技术、全球定位系统（GPS）技术等高度集成的机载信息获取分系统；按三维成像原理设计开发的直接对地定位软件和同步生成准确匹配的地学编码影像和 DEM 等软件组成的信息处理分系统。其主要功能有：一次同步生成地球影像地图，同时还可单独提供等高线图、正射影像图。其二级产品包括：三维显示图（包括城市建筑物）、专题图、各种量算功能等。

中科院遥感所在完成“九五”院重大项目的过程中，研制过一套“数字多光谱相机实验系统”，采用三个相机获取三个波段，面阵 1024×1024 像元，并研制了相应的控制电路，是在航空数字多光谱相机研究领域的一个很好的尝试，取得了一定的成功，积累了一些很宝贵的经验。中科院遥感所 2002 年与中科院动物所合作，研制成功了一套航空多光谱数字遥感监测系统。图 1.8 所示为系统相机部分及安装在飞机舱内的情况。该系统采用了不同结构数字相机组合的系统总体设计方案，包括三种不同类型的相机系统：多相机加滤光片系统（五波段 $1.3K \times 1K$ ）、单镜头分光式相机系统（三波段 $1.9K \times 1K$ ）和专业单反型数字相机系统（彩色 $3K \times 2K$ ）。三套系统具有独立的硬件和控制软件，既可以分开独立工作，也可以组合在一起同时使用；专门设计了完善的控制电路及软件，并将三种相机系统与 GPS、图像采集系统集成在一起，融合成为一个整体系统。



图 1.8 航空多光谱数字遥感监测系统（中科院遥感所）

由中科院光电技术研究院和信息工程大学测绘学院共同承担的国家863计划项目“大面阵彩色CCD航测相机系统的研制”，设计了一种“3+1”CCD航测相机系统，相机采用1个 $9K \times 9K$ 像元的面阵CCD记录全色影像，有利于对保证大比例尺

航空摄影测量的精度；3路独立光学系统的3个 $2\text{ K}\times 2\text{ K}$ 像元的面阵CCD分别记录R、G、B分波段的彩色影像，在后续的数据处理过程中，利用彩色合成与融合技术，获得 $9\text{ K}\times 9\text{ K}$ 的高分辨率彩色影像。这一技术路线的特点是可以获得单一投影中心的大幅面原始影像，保证了定位精度和应有的作业效率，同时保证了与已有测绘软件资源的衔接。



图 1.9 彩色大面阵 CCD 数字航测相机系统（中科院光电院）

中国测绘科学院刘先林院士的团队和北京四维远见信息技术有限公司合作研制的数字航空摄影仪（Siwei Digital Camera, SWDC）也于 2007 年 5 月通过了国家鉴定。

上述国内这些有关航空遥感系统数字化的有益研究，以及利用国外先进设备进行的生产实践，紧密的跟进了国际最新研究方向，大大推进了我国在数字航空遥感系统方面的研究水平，为进一步深入提高新型数字航空遥感系统奠定了良好的基础。在此基础上，中科院遥感所于 2003 年底提出了多模态大面阵航空数字相机系统的设计构想，并经过近 2 年的时间与上海技物所联合集成研发了一套集宽视场、多光谱和立体成像等多种模态为一体的多模态航空数字相机系统（Multi-mode Airborne Digital Camera, MADC）。目前，这套系统正处于进一步的改进、固化和完善阶段。一旦 MADC 系统样机发展成为独立的成熟的系统，将标志着我国能自主研发真正意义上的航空数字遥感系统，将极大的提升我国在航空遥感领域的研究地位；并通过其中关键技术的突破，促进与航空数字摄影相关的基础理论研究，大大推进我国航空遥感影像数据获取和处理的能力。

1.2.3 多模态航空数字相机系统介绍

1、系统组成和主要特点

多模态数字相机系统（MADC）以 3 台或 4 台 4k×4k 大面阵 CCD 数字相机为基本组成单元，包含高分辨率、宽（多）视场、多（高）光谱、立体观测等多种成像模态，可以根据不同的遥感科学实验目的和应用需求，快速灵活地设置成不同的工作模态，可选择性地获取具有多种优良几何特性、多种覆盖宽度和多种光谱分辨率及波段组合的数字影像，做到一机多能，高效率地为遥感科学基础实验以及多种遥感应用提供高质量的航空遥感数据和应用产品。系统样机如图 1.10 所示。

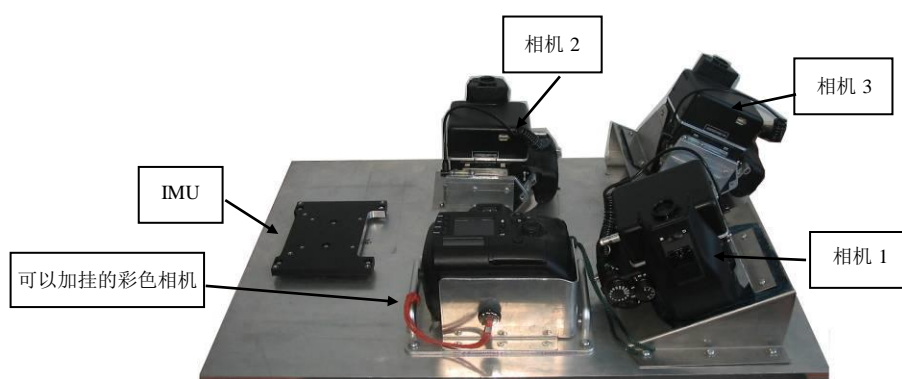


图 1.10 MADC 系统原理样机实物图

多模态航空数字相机系统具有多模态成像的特点，可以支持遥感科学中的地物波谱特性和遥感通道波段选择、光谱分辨率对地物探测的效能与精度、空间分辨率对地物探测的效能与精度、地物的遥感角度效应等基础理论与方法问题研究。另外，在应用模型驱动下的专题遥感，如精准农业、林业监测、城市监测、地质灾害监测等方面，也可以发挥很大的实际作用。

多模态航空数字相机系统样机的组成部分主要包括：（1）由 4 台大面阵 CCD 相机组成的可变模态的航空数字相机系统；（2）高精度、可变模态的系统安装基座；（3）多相机控制系统，包括机上操作、监视、控制系统，相机摄影模式调整、同步摄影控制、航线监视以及与高精度定位与姿态测量系统（POS）的接口等；（4）高速的采集和存储系统；（5）多功能、兼容性电源系统；（6）快速的影像预处理软件系统。

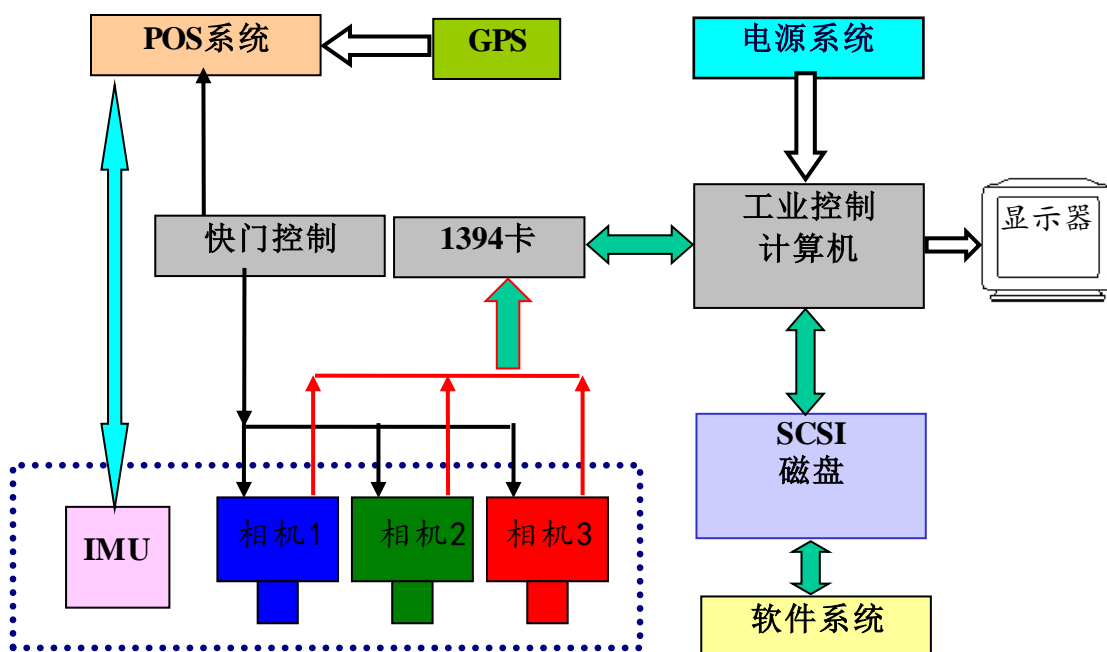


图 1.11 MADC 系统总体框图

2、MADC 三种成像模态简介

多模态航空数字相机系统的主要功能是将高分辨率、宽视场、立体成像与多（高）光谱遥感等模态集成于一体。当以 3 台数字相机组成 MADC 系统时，可形成如下三种可改变的模式：

（1）高效率宽视场航空数字摄影模态

这是提高航空摄影效率的发展方向和对现有传统胶片摄影的替代技术途径。本系统所组成的高分辨率宽视场模式有效地将类似长线阵宽覆盖的推扫式的高效率与大面阵画幅式的高稳定性和高精度影像结合起来，其目标是提高数字航空摄影测量的效率。本系统以大面阵为主体的宽视场成像技术为基础，该技术创新提高了航摄影像的空间和几何稳定性，有利于快速处理、纠正和与各种影像的匹配以及地学编码图的生成。3 台 $4K \times 4K$ 的数字相机经过通过精确装校和拼接，可以形成约 $4K \times 11.5K$ 的宽视场模式。

（2）多（高）光谱遥感数据获取模态

多光谱和高光谱成像技术在地质、植被生态、海洋与内陆水色、城市土地利用、土壤和大气等方面都有很强的应用潜力，已经成为遥感的一个重要方面。本系统在实现宽视场、高空间分辨率数字成像的同时，还能灵活地组成多（高）光谱遥感系统，获取光谱分辨率为 $30 \sim 50nm$ （在特定条件下可高达 $10 \sim 20nm$ ）的高光谱分辨率航空数字影像，根据遥感应用目的有针对性地选择中心波段和波段

宽度，能够满足多种遥感应用。

(3) 前-后视立体摄影模态

相机按前后视组合可获得 $\pm 40^\circ$ 的前后视场，有利于获取全幅面的立体影像和多方向性的遥感影像数据。将三台相机按飞行的前后方向纵向排列，形成飞行方向的大视场，并构成一定夹角，从而获取连续的多角度图像，调整摄影间隔，通过大重叠影像的获取可形成对地物的立体观测或多角度模式。

3、MADC 系统主要技术指标

(1) 系统总体参数：

- ✧ 单个 CCD 像元面积： 4096×4096
- ✧ CCD 像元大小：9 微米 \times 9 微米
- ✧ 量化位数：12bits
- ✧ 相机快门：1/4000-32s
- ✧ 目前配套镜头焦距：80mm, 45mm
- ✧ 机上数据存储容量：0.5TB
- ✧ 最大图像采集速率：3s/幅

(2) 高效率宽视场航空数字摄影模态：

- ✧ 镜头标准焦距：80mm
- ✧ 沿航线视场（FOV=26°）
- ✧ 垂直航线视场（FOV=75°）
- ✧ 全幅影像像元数 $\approx 4K \times 11.5K$

(3) 多(高)光谱遥感数据获取模态：

✓ 标准视场模式：

- ✧ 镜头焦距：80mm
- ✧ FOV：26° x 26°
- ✧ 多光谱影像数据模块：4Kx4Kx3(波段)

✓ 宽视场模式：

- ✧ 镜头焦距：45mm
- ✧ FOV： $\sim 42^\circ$ x 42°
- ✧ 多光谱影像数据模块：4Kx4Kx3(波段)

✓ 光谱配置：

◇ 标准彩色+假彩色（R、G、B、IR）

◇ 可变波段：可根据需要形成任意组合的 3 个波段，形成：

标准多光谱模式：光谱带宽：50-100nm

高光谱模式：光谱带宽：20-30nm（特殊条件下可达 10nm）

（4）前-后视立体摄影模式：

✓ 标准视场模式

利用 $f=80\text{mm}$ 焦距的标准镜头，形成 $+23^\circ$ 夹角的前后立体摄影模式。

✓ 宽视场模式

以 $f=45\text{mm}$ 焦距镜头为基础，形成 $+43^\circ$ 夹角的前后宽视场立体摄影模式。

4、MADC 系统样机已获取的航空遥感影像示例

MADC 系统样机在多种飞行平台（包括直升飞机、固定翼飞机和无人驾驶飞机）进行了超过 20 架次的飞行试验，获取了多个地区不同分辨率的全色和多光谱遥感影像。图 1.12 至图 1.16 为部分试验所获取的原始影像和处理后的影像示例。



图 1.12 宽视场模式拼接图（北京沙河）

石河子世纪广场彩色红外航空遥感影像图

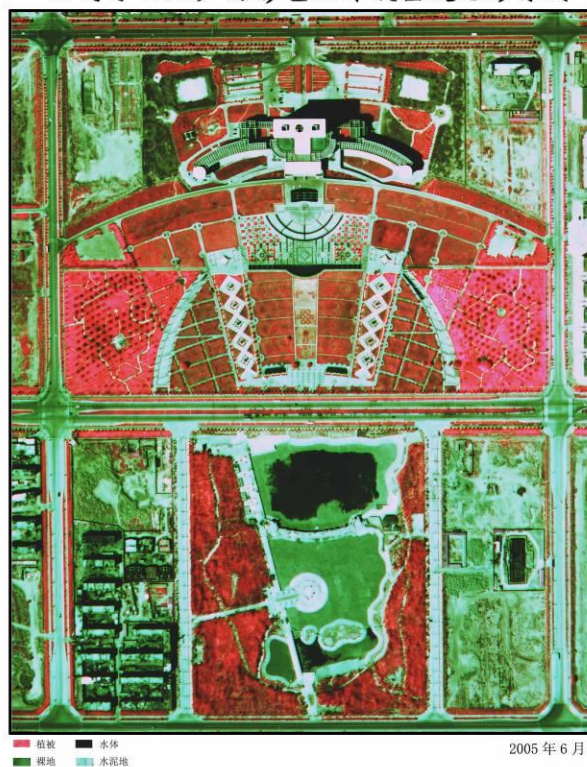


图 1.13 彩红外航空影像图（新疆石河子）

无人机试飞MADC系统航摄影像



成像时间: 2005-8-8

飞行速度: 150km/h

相对航高: 约 200m

地面分辨率: 2.25cm

0 10 20 30 40 50 60m

图 1.14 在无人机平台上试飞的影像（贵州安顺）



图1.15 北京沙河某地真彩色合成影像

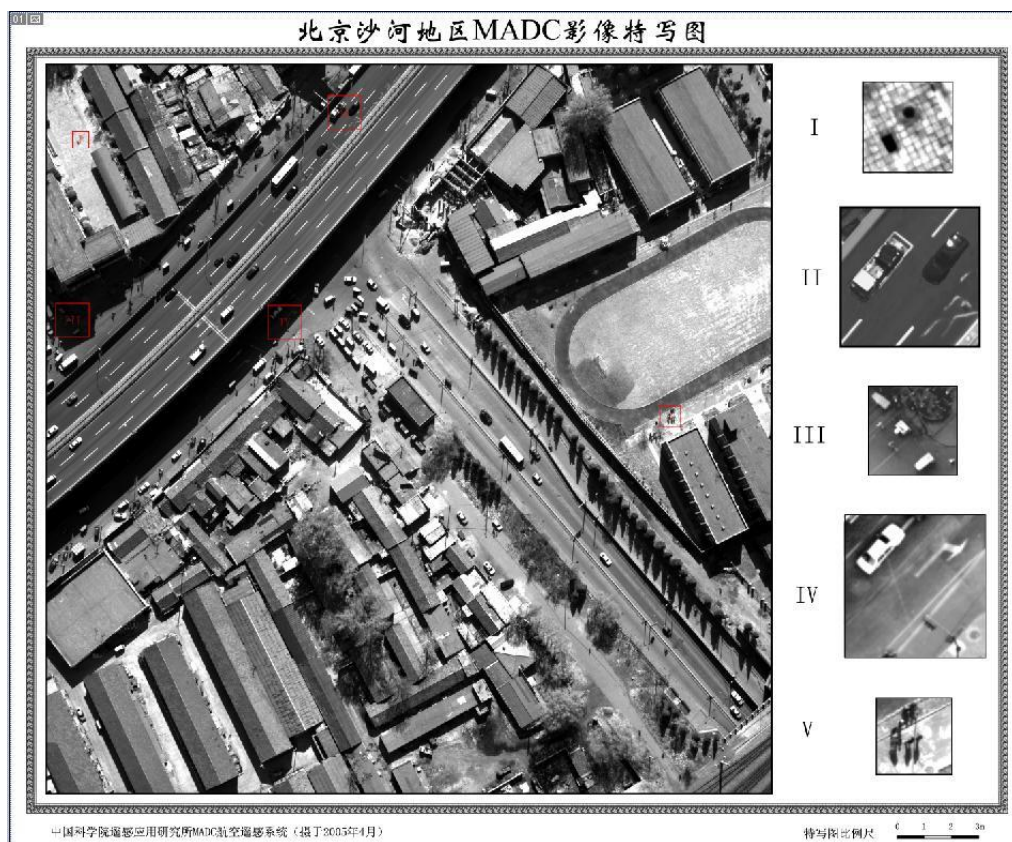


图 1.16 北京沙河某地航拍特写图

1.3 影响 MADC 系统成像几何精度的重要因素

把多模态航空数字相机系统发展成为一套具有我国自主知识产权的航空数字摄影系统,使之能够稳定地获取高质量的航空遥感影像而为我国的科学研究和国民经济建设服务,是我们目前和下阶段的主要工作方向。为了达到这个目标,就需要我们在 MADC 系统样机的基础上进一步完善系统的功能,增强系统面向不同应用需求的实用性与兼容性,提高所获取航空遥感数据的分辨率和稳定性。其中,对相机系统高精度几何成像关键技术方面的研究对改善图像质量尤为重要,这需要在理论研究、系统硬件设计与加工、配备专用的稳定平台与像移补偿系统、算法模型与处理软件等多方面进行改进和创新。本文将从影响 MADC 系统成像几何精度的以下几个关键点展开分析与论述:

- ✧ 机械加工精度和系统安装精度对提高 MADC 系统整体精度的影响。
- ✧ 确定快门延迟时间和多相机快门时间差异对提高 MADC 系统成像几何精度的影响。
- ✧ 增加稳定平台对提高 MADC 系统成像几何精度的影响。
- ✧ 配备像移补偿装置对提高 MADC 系统成像几何精度的影响。
- ✧ 改进图像处理的模型与算法对提高 MADC 系统成像质量的影响。

1.4 论文的总框架及各章的主要内容

本文在充分认识到发展航空遥感和航空数字相机系统对我国具有重要意义的基础上,通过对国内外航空数字相机系统进行的详细了解与学习,立足于提高中科院遥感应用研究所与上海技术物理研究所联合研制的多模态航空数字相机系统(MADC)原理样机的成像质量,重点对影响 MADC 系统成像几何精度的几个关键因素进行了分析与研究。然后,本文对这几项关键因素对提高 MADC 系统成像几何精度的作用进行了综合评价,并从中提炼出几个关键技术与创新点。最后,对全文进行总结,并对下一步的研究工作进行了展望。图 1.17 是本论文的总框架图。

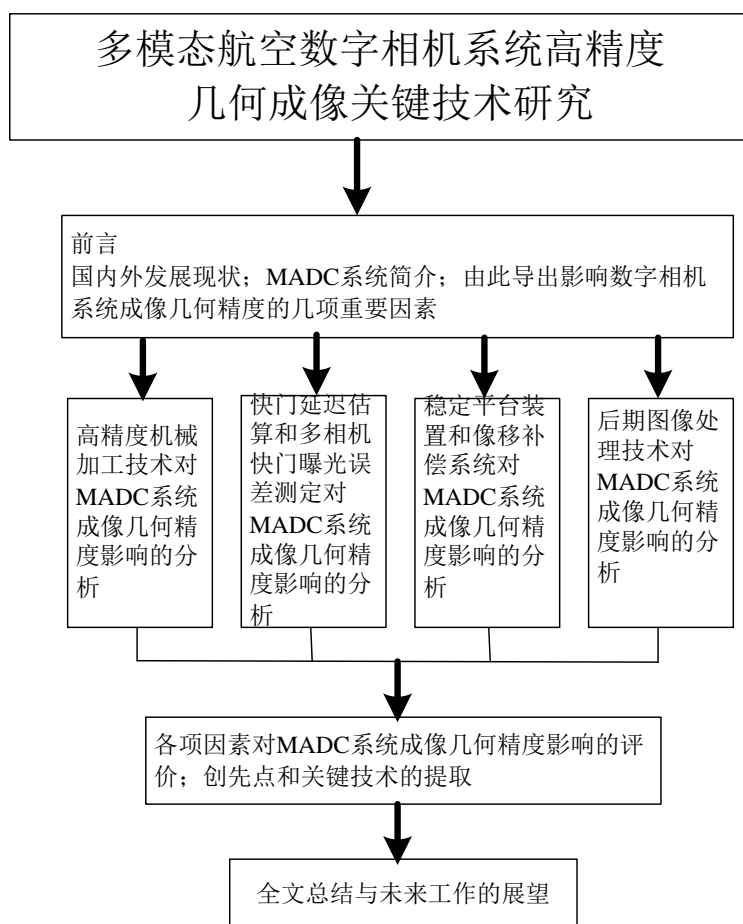


图 1.17 论文总体框架图

本文基于 MADC 系统原理样机，从系统设计、组装、工作流程及图像处理等过程中影响成像质量的环节出发，详细分析了对 MADC 系统几个关键点进行改进对系统成像几何精度提高的影响。从而达到使 MADC 系统原理样机的性能得以优化，系统工作更加稳定，更加接近国际同类产品先进水平的目标。本论文安排总体结构如下：

第一章，首先分析在我国发展航空遥感及航空数字相机系统的重要意义；接着对航空数字相机系统的国内外发展与研究现状进行了介绍，包括目前国际上几种比较成熟的航空数字相机系统和我国的相关研究与发展情况，其中对多模态航空数字相机系统（MADC）的设计思路、系统组成、试验情况、航拍图像等进行重点介绍；然后引导出影响 MADC 系统成像几何精度的几个主要因素，其主要内容和关键技术留待后面分章详述；最后给出了本篇论文的总体框架。

第二章，首先分析机械加工精度和安装精度对提高成像质量和减小系统误差的影响；然后介绍针对 MADC 系统重新设计的高精度安装底座的具体情况；最后对运用新型安装底座后 MADC 系统成像质量的变化用实例说明。

第三章，首先对构成相机系统的机械快门的性能进行介绍；然后对 MADC 系统所用单个相机快门延迟进行测试和估算；再对构成 MADC 系统多个相机同步曝光时快门时间差异进行实验室测定与分析；最后对确定单个相机快门延迟和多相机曝光时间差异后对提高 MADC 成像几何精度的作用进行分析。

第四章，首先分析振动对航空拍摄成像质量的不利影响；再介绍常见的消除或减弱振动的方法；然后提出针对 MADC 系统所设计的专用航空稳定平台的解决方案；最后设计航空试验对使用航空稳定平台能提高 MADC 系统成像几何精度的效果进行验证。

第五章，首先对像移的概念和分类进行介绍；再对像移补偿常用方法进行分类介绍，重点介绍几种成熟的像移补偿方案；然后对针对 MADC 系统设计的外置式像移补偿模块进行详细说明；最后对使用软件补偿法对图像精度的提高进行实例分析。

第六章，简单总结全文；提取创新点；展望今后的研究与工作。

第二章 机械加工精度对 MADC 系统成像精度的影响

2.1 加工精度与数控技术

2.1.1 加工精度与加工误差

1、概念

加工精度是指零件加工后的实际几何参数(尺寸、形状和位置)与理想几何参数的符合程度。研究机械加工精度的方法主要有分析计算法和统计分析法。

实际加工不可能做得与理想零件完全一致,总会有大小不同的偏差,零件加工后的实际几何参数对理想几何参数的偏离程度,称为加工误差。

2、加工误差的分类

由机床、夹具、刀具和工件组成的机械加工工艺系统(简称工艺系统)会有各种各样的误差产生,这些误差在各种不同的具体工作条件下都会以各种不同的方式(或扩大、或缩小)反映为工件的加工误差。工艺系统的原始误差主要有工艺系统的几何误差、定位误差、工艺系统的受力变形引起的加工误差、工艺系统的受热变形引起的加工误差、工件内应力重新分布引起的变形以及原理误差、调整误差、测量误差等。

(1) 机床和刀具的几何误差

加工中刀具相对于工件的成形运动一般都是通过机床完成的。因此,工件的加工精度在很大程度上取决于机床的精度。机床制造误差对工件加工精度影响较大的有:主轴回转误差、导轨误差和传动链误差。机床的磨损将使机床工作精度下降。

机床主轴是装夹工件或刀具的基准,并将运动和动力传给工件或刀具,主轴回转误差将直接影响被加工工件的精度。主轴回转误差是指主轴各瞬间的实际回转轴线相对其平均回转轴线的变动量。它可分解为径向圆跳动、轴向窜动和角度摆动三种基本形式。

导轨是机床上确定各机床部件相对位置关系的基准,也是机床运动的基准。车床导轨的精度要求主要有以下三个方面:在水平面内的直线度;在垂直面内的直线度;前后导轨的平行度(扭曲)。除了导轨本身的制造误差外,导轨的不均匀磨损和安装质量,也是造成导轨误差的重要因素。导轨磨损是机床精度下降的主

要原因之一。

传动链误差是指传动链始末两端传动元件间相对运动的误差。一般用传动链末端元件的转角误差来衡量。

任何刀具在切削过程中,都不可避免地要产生磨损,并由此引起工件尺寸和形状地改变。正确地选用刀具材料和选用新型耐磨地刀具材料,合理地选用刀具几何参数和切削用量,正确地刃磨刀具,正确地采用冷却液等,均可有效地减少刀具地尺寸磨损。必要时还可采用补偿装置对刀具尺寸磨损进行自动补偿。

(2) 定位误差

✓ 基准不重合误差

在零件图上用来确定某一表面尺寸、位置所依据的基准称为设计基准。在工序图上用来确定本工序被加工表面加工后的尺寸、位置所依据的基准称为工序基准。一般情况下,工序基准应与设计基准重合。在机床上对工件进行加工时,须选择工件上若干几何要素作为加工时的定位基准(或测量基准),如果所选用的定位基准(或测量基准)与设计基准不重合,就会产生基准不重合误差。基准不重合误差等于定位基准相对于设计基准在工序尺寸方向上的最大变动量。

✓ 定位副制造不准确误差

工件在夹具中的正确位置是由夹具上的定位元件来确定的。夹具上的定位元件不可能按基本尺寸制造得绝对准确,它们的实际尺寸(或位置)都允许在分别规定的公差范围内变动。同时,工件上的定位基准面也会有制造误差。工件定位面与夹具定位元件共同构成定位副,由于定位副制造得不准确和定位副间的配合间隙引起的工件最大位置变动量,称为定位副制造不准确误差。

(3) 工艺系统受力变形引起的误差

✓ 工件刚度

工艺系统中如果工件刚度相对于机床、刀具、夹具来说比较低,在切削力的作用下,工件由于刚度不足而引起的变形对加工精度的影响就比较大,其最大变形量可按材料力学有关公式估算。

✓ 刀具刚度

外圆车刀在加工表面法线方向上的刚度很大,其变形可以忽略不计。镗直径较小的内孔,刀杆刚度很差,刀杆受力变形对孔加工精度就有很大影响。刀杆变形也可以按材料力学有关公式估算。

✓ 机床部件刚度

机床部件由许多零件组成,机床部件刚度迄今尚无合适的简易计算方法,目前主要还是用实验方法来测定机床部件刚度。变形与载荷不成线性关系,加载曲线和卸载曲线不重合,卸载曲线滞后于加载曲线。两曲线间所包容的面积就是在加载和卸载循环中所损耗的能量,它消耗于摩擦力所作的功和接触变形功;第一次卸载后,变形恢复不到第一次加载的起点,这说明有残余变形存在,经多次加载卸载后,加载曲线起点才和卸载曲线终点重合,残余变形才逐渐减小到零;机床部件的实际刚度远比我们按实体估算的要小。

(4) 工艺系统受热变形引起的误差

工艺系统热变形对加工精度的影响比较大,特别是在精密加工和大件加工中,由热变形所引起的加工误差有时可占工件总误差的40%~70%(徐嘉志,2007)。机床、刀具和工件受到各种热源的作用,温度会逐渐升高,同时它们也通过各种传热方式向周围的物质和空间散发热量。当单位时间传入的热量与其散出的热量相等时,工艺系统就达到了热平衡状态。

3、保证加工精度、减小加工误差常用的方法

生产实践中采用更多的工艺技术措施和控制加工误差的方法或现代主动适应方法来保证加工精度。

(1) 减少原始误差

提高零件加工所使用机床的几何精度,提高夹具、量具及工具本身精度,控制工艺系统受力、受热变形、刀具磨损、内应力引起的变形、测量误差等均属于直接减少原始误差,它是生产应用较广的一种基本方法。为了提高机械加工精度,需对产生加工误差的各项原始误差进行分析,根据不同情况对造成加工误差的主要原始误差采取不同的措施解决。对于精密零件的加工应尽可能提高所使用精密机床的几何精度、刚度和控制加工热变形;对具有成形表面的零件加工,则主要是如何减少成形刀具形状误差和刀具的安装误差。

(2) 误差补偿法

对工艺系统的一些原始误差,若无适当措施使其减少时,则可采取误差补偿的方法以控制其对零件加工误差的影响。

✓ 误差补偿

这种方法就是人为地造出一种新的原始误差,去补偿或抵消原来工艺系统中

固有的原始误差，从而达到减少加工误差，提高加工精度的目的。

✓ 误差抵消

利用原有的一种原始误差去部分或全部地抵消原有原始误差或另一种原始误差。

(3) 分化或均化原始误差

为了提高一批零件的加工精度，可采取分化某些原始误差的方法。对加工精度要求的零件表面，还可以采取在不断试切加工过程中，逐步均化原始误差的方法。

✓ 分化原始误差(分组)法

根据误差反映规律，将毛坯或上道工序的工件尺寸经测量按大小分为 n 组，每组工件的尺寸范围就缩减为原来的 $1/n$ 。然后按各组的误差范围分别调整刀具相对工件的准确位置，使各组工件的尺寸分散范围中心基本一致，以使整批工件的尺寸分散范围大大缩小。

✓ 均化原始误差

均化原始误差的过程，就是通过加工使被加工表面原有误差不断缩小和平均化的过程。均化的原理就是通过有密切联系的工件或工具表面的相互比较和检查，从中找出它们之间的差异，然后再进行相互修正加工或基准加工。

(4) 转移原始误差

这种方法的实质就是将原始误差从误差敏感方向转移到误差非敏感方向或非主要方向上去。

✓ 转移原始误差至非敏感方向

各种原始误差反映到零件加工误差上的程度与其是否在误差敏感方向上有直接关系。若在加工过程中设法使其转移到加工误差的非敏感方向(即加工表面的切线方向)，则可大大提高加工精度。

✓ 转移原始误差至其他对加工精度无影响的方面。

2.1.2 数控技术与数控机床

1、数控技术的概念

数控技术是数字控制技术的简称，即用数字指令来控制机械的动作。在机械

制造业中，讲到数控技术，一般是指机床的数字控制及其加工。

数控技术是实现机械制造自动化的关键，直接影响到一个国家的经济发展和综合国力，关系到一个国家的战略地位。作为制造系统最基本的加工单元，以数控技术为核心的数控机床的生产和应用已成为衡量一个国家工业化程度和技术水平的重要标志。

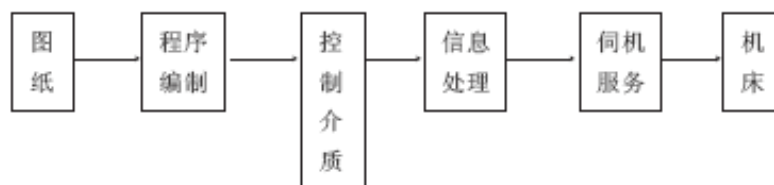


图2.1 利用数控机床进行零件加工的工作过程框图

2、数控技术的发展趋势

随着生产方式的变革和科技的发展，数控技术也发生了很大的变化，出现了一些新的发展趋势。关注这些新趋势，制定正确的对策，对促进我国数控技术的发展具有重要的战略意义。

归纳起来，现代数控技术的发展具有下列一些特点：

✓ 高速、高效、高精度

质量、效率是先进制造技术的核心目标。机床向高速化方向发展，可大幅度地提高效率，提升产品的质量和档次，缩短生产周期和增强市场竞争能力。

✓ 网络化、智能化

现代化生产系统呈现分散化、网络化制造的特点。在网络制造的模式下，数控机床就成了网络中的一个节点，这就要求数控系统具有联网通讯的能力，因此，网络化也是数控系统的研究热点之一。数控系统的网络化，将满足生产线、制造企业、制造系统对信息集成的需要，也为实现新的制造模式如敏捷制造、虚拟制造、并行工程等提供了有利条件。

数控系统的智能化就是应用各种人工智能的方法和技术去控制制造过程。具有智能的数控系统可以更深入地解决加工中的技术问题，优质高效地完成加工任务。随着当今科学技术的发展，智能化已渗透到数控系统的各个方面。智能数控系统不但具有自动编程、前馈控制、模糊控制、自适应控制、工艺参数自动生成、三维刀具补偿、运动参数动态补偿等功能，而且人机界面更为友好，智能化的伺服系统能自动识别负载并自动优化调整参数，故障诊断专家系统使自诊断和故障监控功能更趋完善。

✓ 数控系统开放化

长期以来,数控系统都是在专有设计的基础上完成的,是一种封闭式的系统。这种封闭体系结构已经不能适应现代化生产的变革,不适应未来车间面向任务和定单的生产模式。因此,开放式数控系统应运而生。开放式数控系统具有模块化、标准化、平台无关性、可二次开发、适应网络操作等特点,它面向机床厂家和最终用户,使其可以自由地选择数控装置、驱动装置、伺服电机等数控系统的各个构成要素,并可方便地将自己的技术诀窍和特殊应用集成到控制系统中,快速组成不同品种、不同档次的数控系统。目前开放式数控技术的研究和开发方兴未艾,已成为数控机床不可逆转的发展趋势。

✓ 并联机床

传统机床为串联结构,存在悬臂部件,不易获得高的结构刚度;另外,其组成环节多,结构复杂,限制了加工精度和速度的提高。在20世纪90年代中期间世的并联机床,正是为解决传统机床存在的问题而进行的一种新的尝试。并联机床是机器人技术、机床结构技术、现代伺服驱动技术和数控技术相结合的产物,被称为“21世纪的机床”,具有很大的开发潜力和广泛的应用前景。

并联机床的主轴(动平台)与机座(静平台)之间采用并联结构。它没有滑台,没有导轨,而只用几根可自由伸缩的驱动杆带动主轴箱、带着刀具(或工件)在空间运动,由计算机通过复杂的数学运算完成加工任务。并联机床具有承载能力强、响应速度快、精度高、机械结构简单、适应性好等优点,是一种“硬件”简单、“软件”复杂、技术附加值高的产品。因此,各国学术界和机床制造企业对并联机床的研究开发都非常重视,并先后推出多种结构形式的样机,为数控机床的发展开辟了新的领域。

3、影响数控机床加工精度的主要因素

数控机床是按照加工程序自动加工零件,它具有加工精度高、生产效率高、产品品质稳定、加工过程柔性好、加工功能强等特点。加工过程中,只要改变加工程序就能达到加工不同形状、不同精度零件的目的。但并不是每个数控操作人员都能在规定的时间内保证工件的加工精度,提高机床效率,确保产品合格。

(1) 工件坐标系设定对加工精度的影响

工件坐标系是编程人员在编写程序时,在工件上建立的坐标系,其原点即为工件原点(也称工件零点或编程原点)。理论上是由编程人员任意设定的,但实际

上它是编程人员根据零件特点为了编程方便以及尺寸的直观性而设定的。选择工件坐标系时一般应遵循如下原则：

- ✧ 尽可能将工件原点选择在工艺定位基准上，这样有利于加工精度的提高；
- ✧ 尽量将工件原点选择在零件的尺寸基准上，这样便于坐标值的计算，减少错误率(当尺寸基准与工艺基准不重合时，则要考虑由基准不重合产生的误差)；
- ✧ 尽量选在精度较高的工件表面上，以提高被加工零件的加工精度；
- ✧ 对于对称零件，应设在对称中心上，一般零件应设在工件轮廓某一角上，且Z轴方向上原点一般设在工件表面；
- ✧ 对于卧式加工中心最好把工件原点设在回转中心上，即设置在工作台回转中心与Z轴连线的适当位置上；
- ✧ 应将刀具起点和编程原点设在同一处，这样可以简化程序，便于计算，提高加工精度。

对一般零件，仅按上述原则确定工件坐标系，即能保证其加工精度。但对于复杂、特殊零件，就要综合考虑各种因素对加工精度的影响。

(2) 气温及工艺系统热变形对加工精度的影响

物体，特别是金属材料具有热胀冷缩性质，温度的变化会引起零件尺寸的改变。虽然零件的尺寸变化微小，但对于数控机床（很多数控车间并不能保证标准室温条件）加工的高精度零件却不容忽视，否则会出现在某一温度条件下加工的零件合格，而在另一温度条件下测量就不合格。如一精度要求较高的尺寸，在夏季加工与冬季加工就不一样，夏季因温度较高，机床工艺系统、刀具、工件变形较大，为保证零件在其他温度条件下也合格，加工好测量时就应使实际偏差靠近上偏差，这样即使在冬季测量时，就不会因温度较低尺寸变小而超差。同理，冬季加工零件时，就应使实际偏差靠近下偏差，春秋季节应使实际偏差靠近上下偏差的中间位置，孔或轴类零件高精度尺寸皆应如此。

(3) 工艺系统热变形对加工精度的影响

在机械加工过程中，由于切削热、摩擦热等影响，使工艺系统各部分的温度升高不等，产生复杂的变形，从而改变了工件、刀具及机床之间的相互位置，破坏了工件和刀具之间相对运动的准确性，改变了已调整好的加工尺寸，严重影响了零件的加工精度。

据此，数控机床在设计制造时已考虑了这些因素的影响，使数控设备的传动系统和机床结构都具有很高的刚度和热稳定性，并对反向间隙与丝杠螺距误差等由计算机软件实现自动补偿，大大提高了加工精度。但引起的工件及刀具的热变形不易克服，特别是对于开环或半闭环数控机床，有时由于切削热引起的误差达 0.1mm 以上（王美姣，2003）。因此要提高加工精度必须在加工过程中来控制，采取适当措施：

- ✧ 定时测量关键尺寸是否超差；
- ✧ 根据测量结果适当调整刀径补偿；
- ✧ 对于不易测量的尺寸应适时与配合件试配；
- ✧ 定时检查刀具磨损情况。

（4）指令选择对加工精度的影响

对于同一种工件，加工时选择的指令集、程序段、起始位置、回转半径及方向、自动补偿精度等指令不同时，实际加工出来的工件的精度也会有所偏差。因此，应该根据工件的具体结构、轮廓及使用要求进行不同的编程来保证加工精度。

2.1.3 加工精度对 MADC 系统整体精度的影响分析

1、MADC 系统旧安装基座

作为原理样机，MADC 系统样机的旧安装基座是由多个分散部件经螺钉固定和组装而成的，主要部件包括：与飞行平台的连接安装板、多相机安装基座板、单相机固定安装板（全色和彩色）、宽视场模式倾角安装板、系统外罩等等。相机系统安装板的平面设计示意图如图 2.2 所示，各部件组装后的示意图如图 2.3 所示。

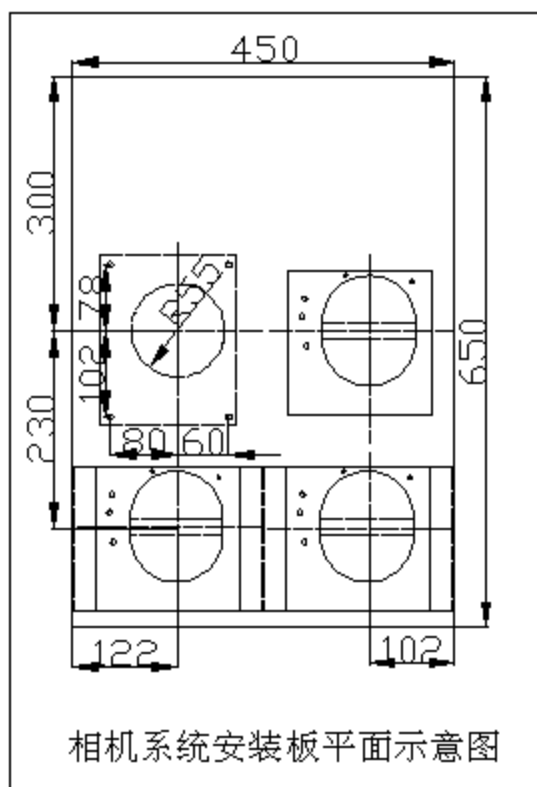


图 2.2 MADC 系统旧安装基座平面设计示意图

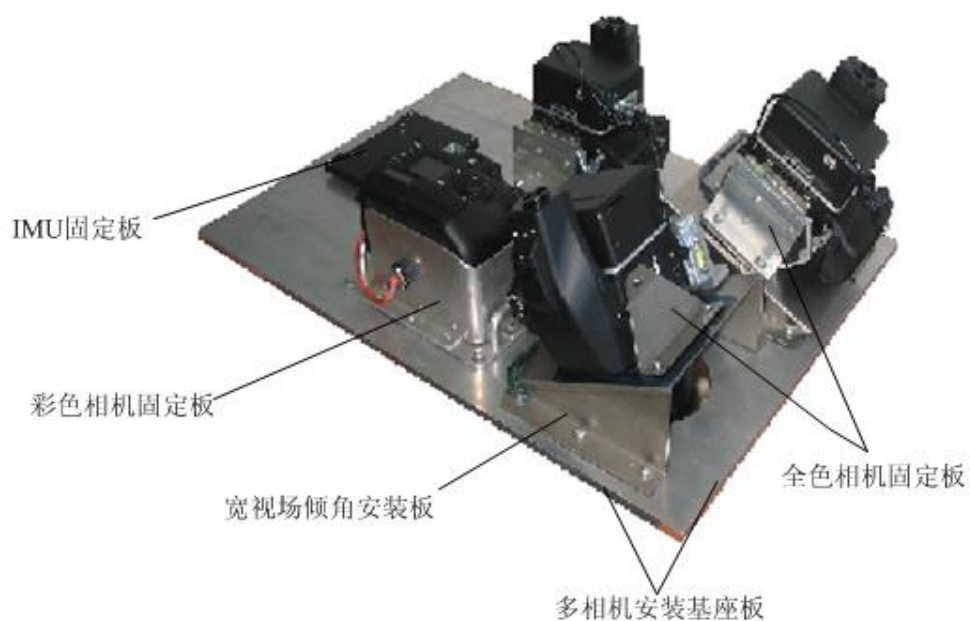


图 2.3 MADC 系统旧安装基座示意图（宽视场模式）

（2）旧安装基座对 MADC 系统整体精度的影响

旧安装基座各组件均采用传统机床加工制作，然后各分体式组件用螺钉组装连接成整体系统。因此，旧安装基座会在加工精度和安装精度两方面对 MADC 系统整体精度造成影响，同时也影响了 MADC 系统的几何成像精度，降低了所

获取航空影像的质量。

✓ 加工精度

早期,作为设计的多模态航空数字相机系统的原理样机,主要目的是为了验证设计方案的正确性、检验其功能的拥有性和完备性、测试系统软硬件的可用性。因此,在部件的加工精度方面的要求就放得比较低。

MADC 系统原理样机各机械组件均采用传统机床加工,机械部件的加工精度受加工机床的制约(>100 微米),而达不到与光学系统的精度(<10 微米)的要求。MADC 系统原理样机各机械组件材料主要为不同厚度尺寸的硬铝板,没有进行特殊的表面处理和热处理,由此产生的加工误差也会影响系统的整体精度。

✓ 安装精度

由于 MADC 系统原理样机各机械组件是分散的,必须要组装起来才能构成 MADC 系统的机械部分。MADC 系统旧安装基座采用的是传统的简单螺钉连接方式,将各部分用不同规格的螺钉进行刚性连接或固定。这种安装方式将会产生很大的安装误差,并且这种误差会随着每次的拆卸和安装者的不同而改变。也就是说,单纯用螺钉来把各分散部件固定和安装在一起的安装方式,会产生比加工误差更大的随机误差,由此扩散而成的系统安装误差将会对 MADC 系统的整体精度造成及其严重的影响,并难以对此误差进行较准确的统计或估算。

2.2 MADC 系统新型安装基座的设计与加工

2.2.1 MADC 系统新型安装基座的设计思路

1、高精度

机械加工精度能达到像素级别--10 微米(方俊永,2005),基本与光学器件的要求相匹配;多台相机成像面中心在加工成型时就固定在一个相同高度的平面上;减少了机械加工误差和人为安装误差对系统整体精度的影响。

2、小型化

相机座架采用整体设计和一体化数控机床加工成型,在保证使用功能的基础上使基座的体积、重量尽可能减小,便于在飞行平台上的安装固定且显得美观。

3、多功能

相机基座可安装在不同的飞行平台上工作；相机基座可方便地与常用的航空稳定平台连接；更换 MADC 系统工作模态时只需要对基座做少量的安装改动就可迅速实现。

2.2.2 MADC 系统新型安装基座的具体设计与加工

1、MADC 系统新型安装基座的设计方案

MADC 样机系统的新型安装基座主体由一块方形铝锭在高精度大型数控机床上一体成型加工而成。这种设计将多台相机的成像面中心固定在同一个高度，降低了后期对图像进行几何纠正的难度，还大大减少了需要螺钉手工连接固定的地方。总的来说，新型相机安装基座不仅在外形上简朴美观、便于安装与操作，而且由于加工精度与安装精度的提高、多台相机成像面中心的固定，将大大提高 MADC 系统的整体精度。MADC 系统新型基座、单相机安装板和外罩的机械设计的示意图如下所示。

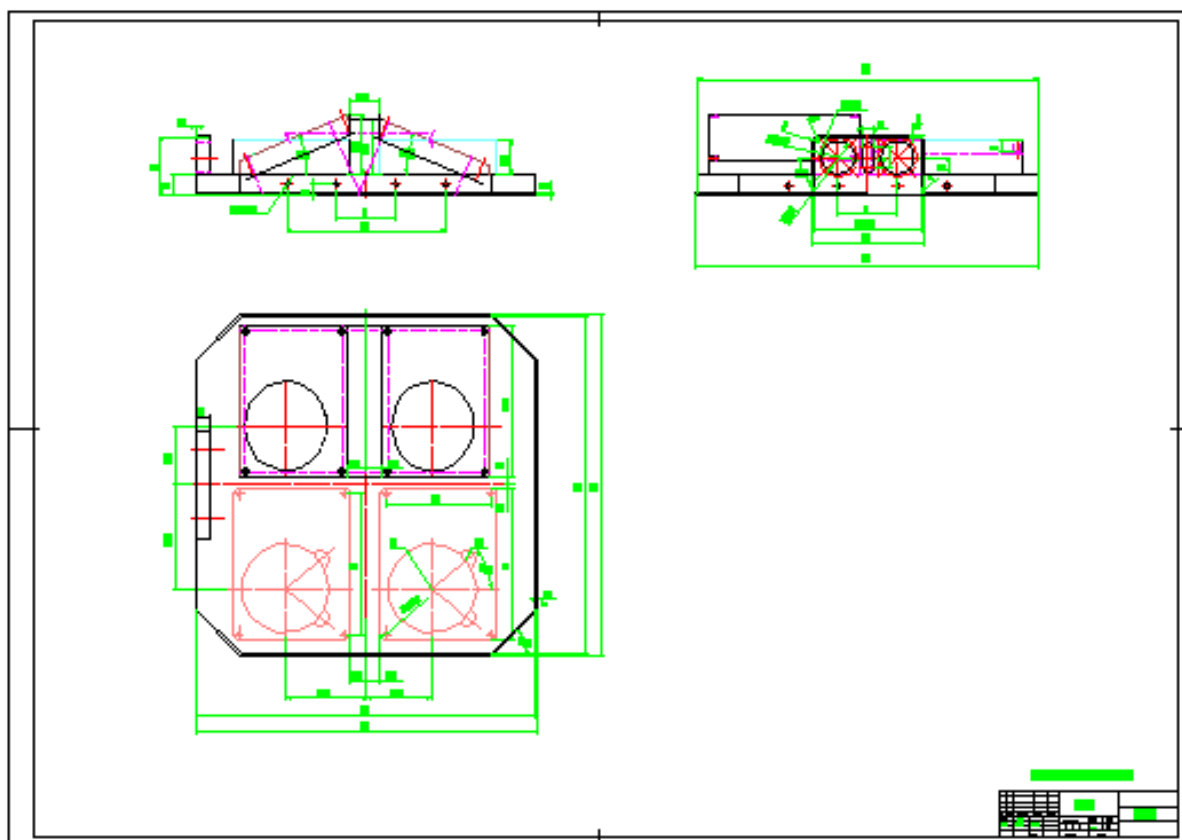


图 2.4 MADC 系统新型安装基座机械设计示意图

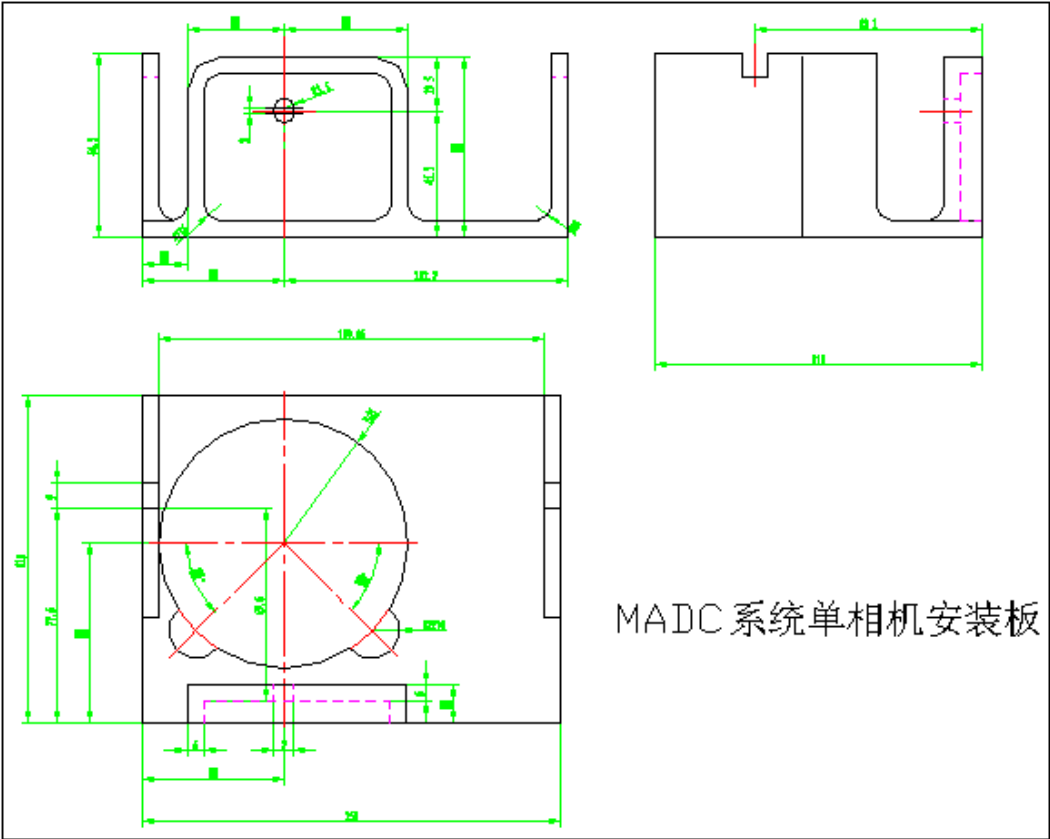


图 2.5 MADC 系统单相机安装板设计图

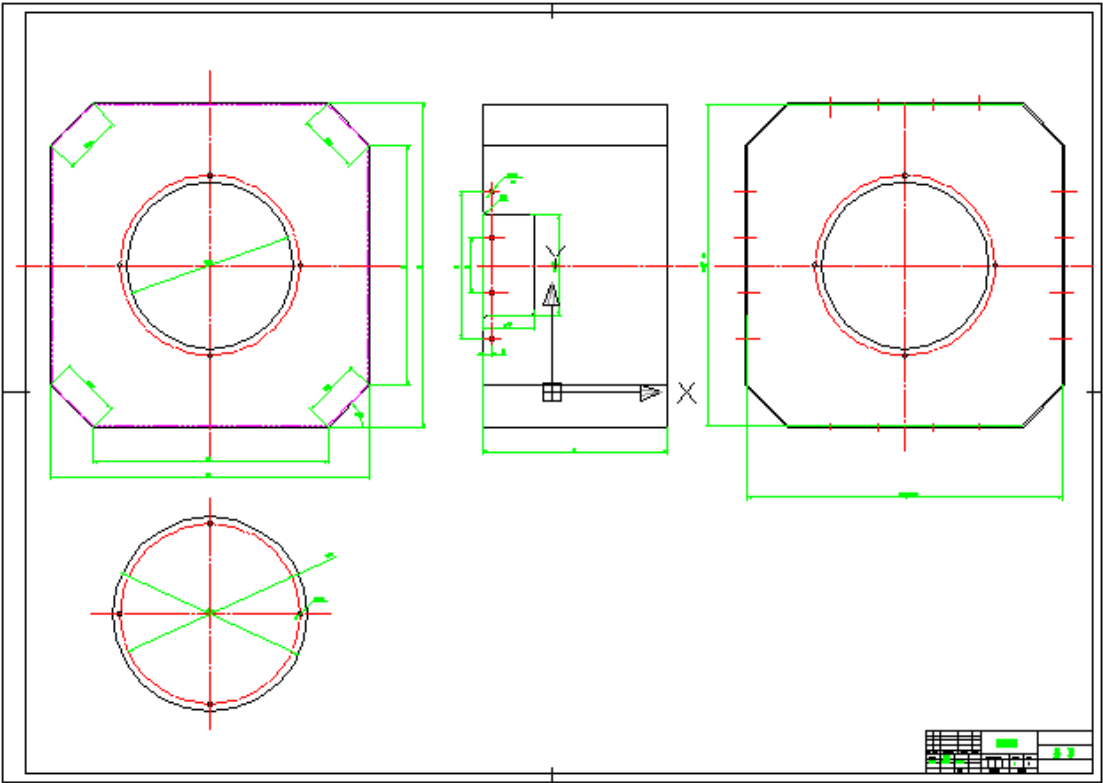


图 2.6 MADC 系统外罩设计图

进行以上机械设计时 MADC 系统还没有配备航空稳定平台和像移补偿装置，所以在尺寸和结构上并没有考虑这两个部件。在为 MADC 配备专用的航空稳定平台和像移补偿装置后，相机系统安装基座还应该做相应的设计改动：如基座在稳定平台上摆放方式及空间占用的考虑；基座与稳定平台安装接口的连接方式；基座与像移补偿装置的连接与联动问题的考虑等等；设计好后再通信投料进行加工制作。图 2.7 为考虑稳定平台与像移补偿装置时新型安装基座的设计草图

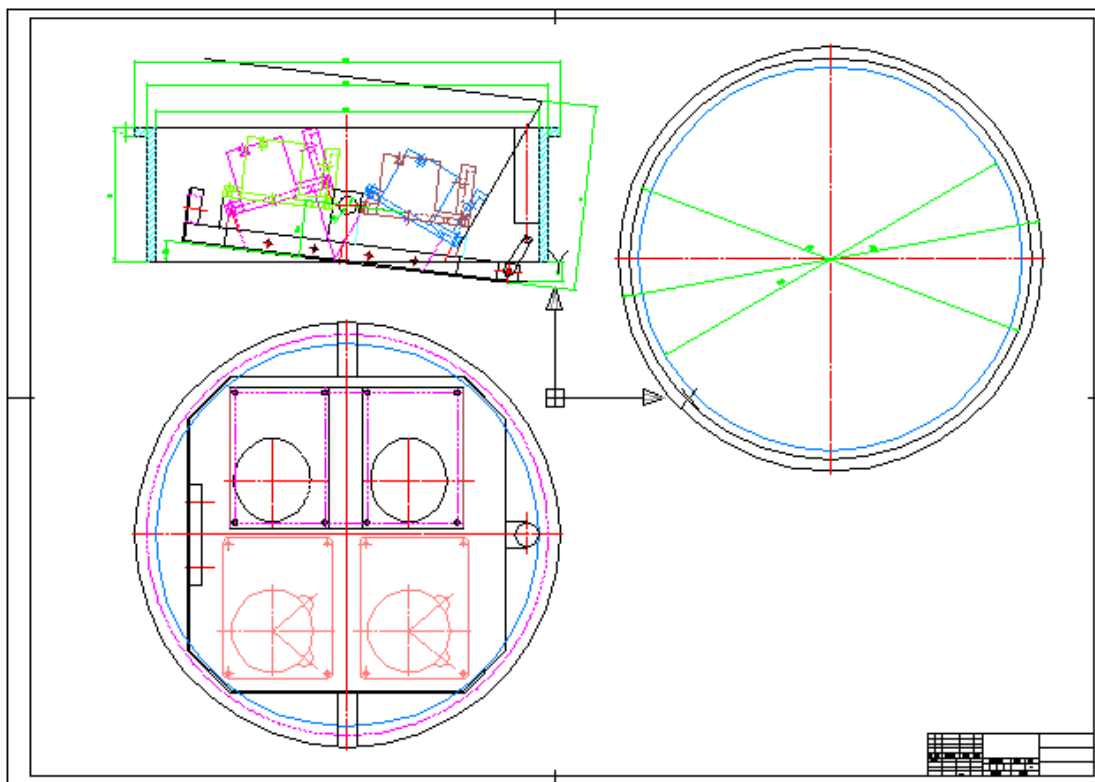


图 2.7 MADC 系统新型安装基座考虑稳定平台与像移补偿装置时的设计草图

2、MADC 系统新型安装基座的加工

MADC 系统新型安装基座（不考虑稳定平台与像移补偿装置）经过构思、设计和修改定稿后，提交到加工部门进行加工。MADC 系统新型安装基座主体及相关配件的所有机械加工均由天津中西机床技术培训中心完成。该中心是一家由中西、中德合资的，集培训与生产任务于一体的大型机械加工单位，配备有多台能完成各种机械加工功能的大型传统机床和高精度数控机床。该中心的机床、模具和测量设备所能达到的精度均处于国际先进水平（该中心的多套数字加工中心和多台数控机床的加工精度能达到 1 微米，达到 0.1 像元的加工精度）。图 2.8、图 2.9 和图 2.10 分别为 MADC 系统新型安装基座主体的外观图、使用新型安装基座的 MADC 系统外观图及带外罩的 MADC 系统外观图。



图 2.8 MADC 系统新型安装基座主体外观图

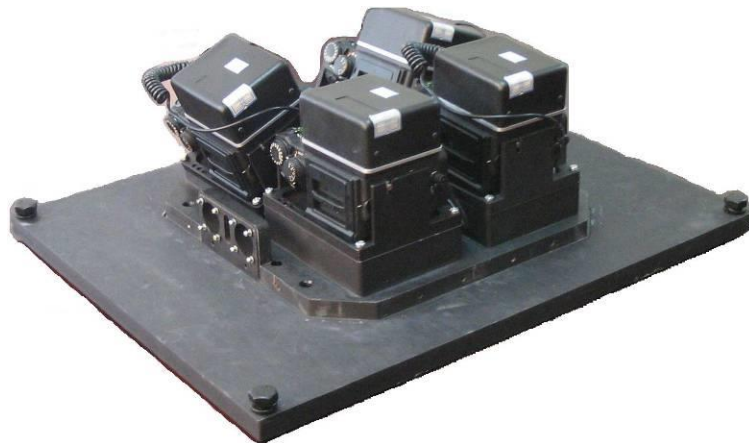


图 2.9 使用新型安装基座的 MADC 系统外观图（宽视场模态）



图 2.10 使用新型安装基座的 MADC 系统外观图（含外罩）

2.3 本章小结

本章先从机械加工精度和加工误差的概念出发,介绍了加工误差的分类及不同类型加工误差产生的主要原因,随之介绍了常用的减小加工误差来保证加工精度的方法。然后,对数控技术和数控机床进行了简单的介绍,从数控技术的概念、发展趋势而引出对影响数控机床加工精度主要因素的分析。接着转到对 MADC 系统旧安装基座的介绍及其对系统整体精度影响的分析。

接下来就是对 MADC 系统新型安装基座的设计思路和具体设计方案的介绍,最后给出了已经制作加工完成的新型安装基座及其应用在 MADC 系统中的外观图。

通过本章的分析我们可以知道,机械加工和安装引起的误差对 MADC 系统整体精度有着很大的影响。通过新型安装基座的设计与使用,能够有效地降低这种由机械加工及人工安装而引起的影响系统整体精度的随机误差,从而达到提高系统整体精度,提高 MADC 系统几何成像精度的目标。

第三章 快门延迟及不同步曝光对 MADC 系统几何成像精度的影响

3.1 快门、快门延迟和不同步曝光

3.1.1 快门

快门 (Shutter)，是相机上控制感光片或传感器有效曝光时间的一种装置。快门的工作原理是这样的：为了保护相机内的感光器件不至于曝光，快门总是关闭的；当相机拍摄时，调整好快门速度后，只要按住照相机的快门释放钮（也就是拍照的按钮），在快门开启与闭合的间隙间，让通过摄影镜头的光线使照相机内的感光片或传感器获得正确的曝光，光穿过快门进入感光器件，成像后存入存储介质中。目前的相机（包括传统相机和数码相机）的快门主要有机械快门和电子快门两种类型。

快门在摄影上的作用可以归纳为两方面：第一是控制进光时间，这是快门的基本作用；它与光圈的配合，解决摄影上的曝光量。第二是影响成像清晰度，这是快门不可忽视的作用。快门时间开启时间的长短，不仅影响进光量，而且影响成像清晰度。

电子快门 (Electronic shutter) 依靠晶体管或电容器的功能来控制快门速度。因为可与组装在照相机里的电曝光计联动，为自动曝光相机或电眼所采用。电子快门的优点是，要求时控的精度好，可获得连续的速度，容易做到数秒以上的长时间控制。由于电子快门的开发，才完成了光圈优先的 TTL-AE 照相机。电子快门可以分为半自动快门和全自动快门两种。

机械快门 (Mechanical shutter) 是指用弹簧、凸轮、齿轮或电磁手段，控制几片叶片的开闭或是两层帘幕左右或上下以一定宽度的缝隙“划过”成像像场窗口，让窗口获得指定时间长短的接触外部光线的快门。机械快门又分为镜间快门和帘幕快门（焦平面快门）。由于机械快门不需要用电池，在寒冷的天气条件下仍然能够使用，而且坚固，不易出故障，维修方便，所以机械快门广泛应用于多种传统相机和数字相机中。

镜间快门，又称“镜中快门”，位于镜头中间，由若干片金属叶片组成。它是借助弹簧的弛张，使叶片从中心开启后，孔洞由小到大；全开启后，再由大到

小而闭合。镜间快门的主要优点是在闪光摄影时，快门速度不受限制。它的主要缺点是快门速度偏低（高速档难以快于 1/500 秒）。

帘幕快门，又称“焦平面快门”，位于紧贴相机焦点平面处，由前后两块帘幕组成。它是通过两块帘幕启动产生的裂缝大小来决定不同的快门速度。帘幕快门的主要优点是能达到 1/1000 秒以上的高速档；主要缺点是闪光摄影时的快门速度有所限制，只能按设定的档进行选择。帘幕快门中又有“橡胶布帘幕”与“金属帘幕”之分，前者为横向运动；后者为纵向运动。金属帘幕具有精确度高、强度大、不易老化、耐高温、使用寿命长以及能取得较高的闪光同步速度等优点。

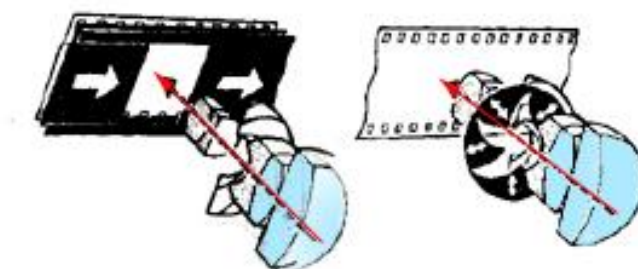


图 3.1 帘幕快门与镜间快门示意图

MADC 系统所用的 contax645 相机采用的是帘幕式金属快门，其与快门相关的参数见下表：

表3.1 Contax 645相机快门相关参数表

相机类型	6×4.5cm中画幅焦平快门自动对焦单反相机
快门系统	电子控制焦平快门；自动：32-1/4000秒，手动：X,B,T, 8-1/4000秒
配套镜头	Carl Zeiss 35, 45, 55, 80, 120, 140, 210, 350, 45-90mm
自拍延时	10秒或2秒
X闪光同步	自动1/125秒、手动 1/90秒
曝光方式	光圈优先、快门优先及手动
测光方式	TTL全开光圈测光，中央重点平均测光 / 点测光、预闪测光
测光范围	中央偏重测光（ISO 100 f/2） EV1-21，点测光（ISO 100 f/2） EV3-21
曝光补偿	±2（1/3级调校）
自动对焦系统	TTL相位自动对焦系统，可单次对焦及连续对焦

3.1.2 快门延迟

快门延迟是指从摄影者按下快门到相机真正曝光开始拍摄的这段时间。这是

因为当相机快门被按下时，相机对焦、测光、计算曝光量、选择合适曝光组合、进行数据计算和存储处理等都需要花费一定的时间。快门延迟是相机本身的一个不确定性因素，采用不同相机拍摄或用同一相机的不同次拍摄其快门延迟的时间也是不一样的。

对于 MADC 系统来说，快门延迟是指相机曝光控制盒发出曝光触发脉冲到 contax645 相机和 contax645 相机打开快门开始曝光之间这段时间。其示意图如图 3.2 所示。

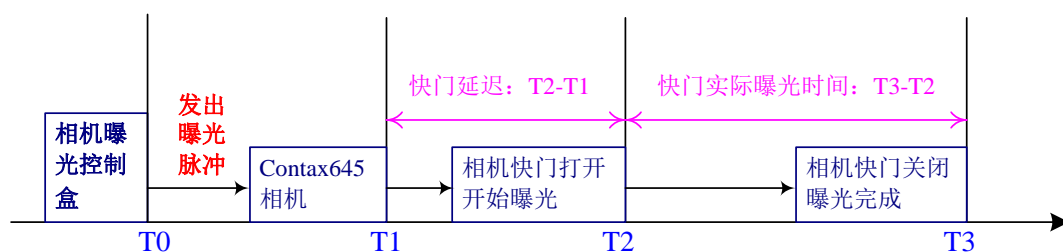


图 3.2 MADC 系统相机快门延迟示意图

3.1.3 不同步曝光

所谓不同步曝光是针对多台相机而言的，它是指使用多台相机同步曝光（相机快门打开时刻、曝光持续的时间和快门关闭的时刻均相同）来同时获取图像进行工作的相机系统在实际拍摄时，多台相机实际曝光的时间与设定的理论时间会存在一定的误差，从而使多台相机并不是绝对同时地获取到图像。我们把这种多台相机系统理论设定完全同步曝光而实际曝光时各相机之间存在差异的现象称作不同步曝光。

产生不同步曝光的原因有很多，但最主要的还是和快门本身的性能有关。各相机快门延迟的差异和相机曝光时快门实际持续的时间与标称的快门时间之间的误差直接导致了多相机系统的不同步曝光。由于快门延迟和快门实际曝光时间的误差在理论上来讲都是一个不确定的随机值，所以不同步曝光时间差异也不是固定不变的。

MADC 系统是采用 3 台（或 4 台）相机组成不同工作模态同时工作来完成图像获取的，所以实现多相机的同步曝光的精确性就显得非常重要。下图是 MADC 系统快门不同步曝光的示意图。

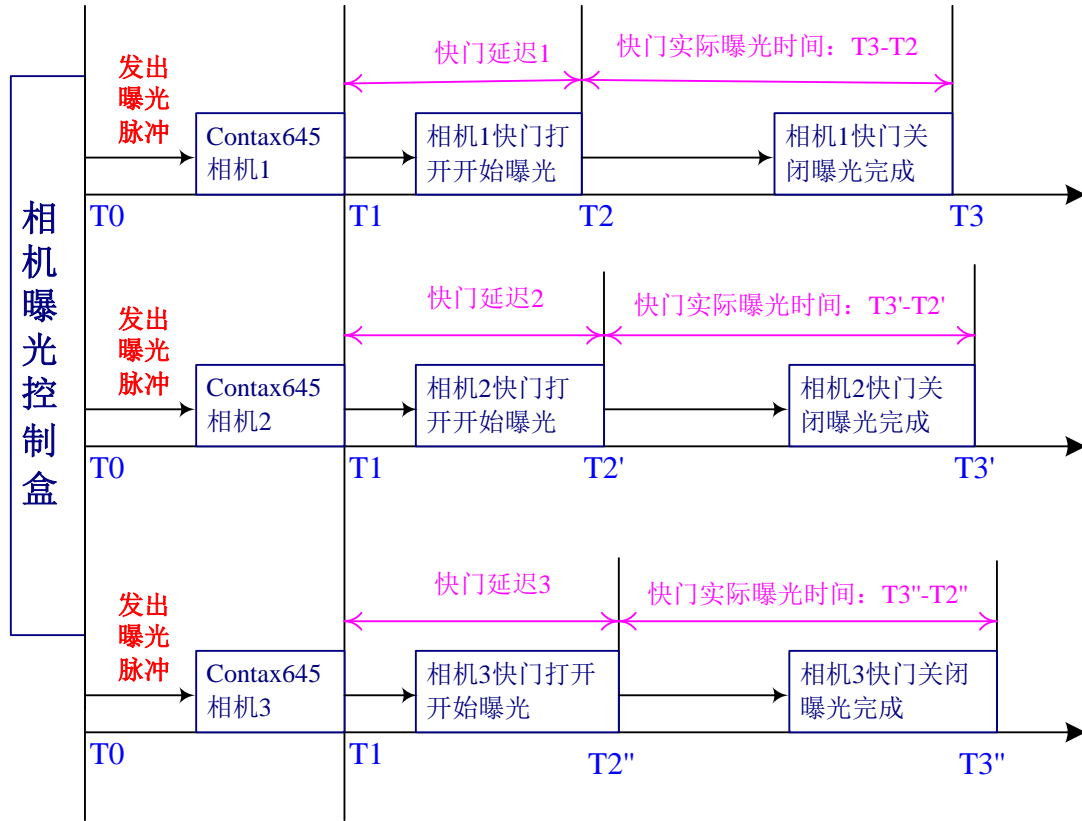


图 3.3 MADC 系统多相机快门不同步曝光示意图

由上图可知，假设三台相机的快门收到触发脉冲的时间是相同的（均为 T_1 时刻），而最后完成曝光后快门关闭的时间分别为 T_3 、 T_3' 和 T_3'' 。则可知道：

相机 1 的快门延迟为： $T_2 - T_1$ ；

相机 1 的快门实际曝光时间为： $T_3 - T_2$ ；

相机 1 的快门从接收到触发脉冲到完成曝光花费的时间为：

$$(T_2 - T_1) + (T_3 - T_2) = T_3 - T_1;$$

该时间与我们设置的快门曝光档时间 (t) 总是会存在差异。同理可得：

相机 2 的快门从接收到触发脉冲到完成曝光花费的时间为：

$$(T_2' - T_1) + (T_3' - T_2') = T_3' - T_1;$$

相机 3 的快门从接收到触发脉冲到完成曝光花费的时间为：

$$(T_2'' - T_1) + (T_3'' - T_2'') = T_3'' - T_1;$$

于是，可用公式直观地表示 3 台相机的不同步曝光为：

$$(T_3 - T_1) \neq (T_3' - T_1) \neq (T_3'' - T_1) \neq t \quad (3-1)$$

3.2 MADC 系统的快门控制系统

3.2.1 快门控制系统的原理

MADC 系统中使用多台相机同时工作, 获取的影像在后期需要拼接、配准。为保证拼接和配准的精度, 要求几台相机同一次拍摄的影像是同一时刻拍摄的, 这样获取的影像具有相同的定位和姿态参数。如果曝光时刻不同步, 则同一次拍摄的影像的位置和姿态有可能相差很多, 根本无法保证精度, 甚至无法拼接和配准。因此保证多相机的同步曝光对 MADC 系统十分重要。

为了使多台相机能同步曝光, 并获取曝光时刻的定位和姿态数据, 我们研制的快门控制系统预留了与 POS 系统的接口。POS 系统是姿态及定位系统, 属于辅助 MADC 系统进行航空拍摄的仪器设备。POS 系统是由高精度惯性感应器 (高精度陀螺仪)、GPS 技术和相应控制与处理软件集合而成的, 可以获取丰富、精确的飞行姿态和空间位置参数。与地面 GPS 基准站配合使用可以提高 POS 系统的定位精度。

POS 系统的 DIO (Data Input/Output) 端口可以对外部输入事件的时刻进行时间标记, 经飞行后的地面 POS 数据处理可得到 DIO 端口输入事件对应的各个定位和姿态参数。MADC 系统正是利用了 POS 系统的这个功能来获得 CCD 相机快门触发时的飞行姿态和空间位置, 由此得到每一张图像的姿态和定位参数 (刘学, 2005)。

快门控制系统的主要功能是实现设定的固定时间间隔的同步拍摄并将快门触发的脉冲发送到 POS 系统的 DIO 端口, 由 POS 系统对每一个快门触发的时刻做相应的时间标记。快门控制系统最重要的就是保证 3 台相机快门的同步触发。通过分析研究 MADC 系统研制集成的 CCD 相机的快门结构和触发机制, 设计出一个利用单片机控制超灵敏小型电磁继电器触发相机快门的电子装置。

MADC 系统的数码后背中采用的是全帧型 CCD, 在工作过程中必须和机械快门配合使用。快门打开时, CCD 曝光, 快门关闭之后 CCD 开始电荷转移, 数据读出。也就是说 CCD 数据读出时快门必须是关闭的, 这就是机械快门不同于电子快门的部分。

MADC 系统采用的 contax645 相机的快门触发原理如图 3.4 所示。B、C 两

点短路时相机就对焦，A、C 两点短路则相机拍摄。在进行航空拍摄时，一般选用手动模式，并且将焦距设定为无穷远，无需相机调焦，即可去掉快门线的调焦功能，为此制作了专门的快门线来实现相机的曝光。这时只需短接快门线的 A 点和 C 点就可使快门打开而相机曝光。也就是说，只要给快门线一个触发脉冲让快门线的 A、C 两点短路一次，与此同时相机就相对地就曝光一次。因此可以利用电磁继电器触点的吸合来控制脉冲的输出，从而控制快门线传输脉冲，达到控制相机快门打开完成曝光的功能。

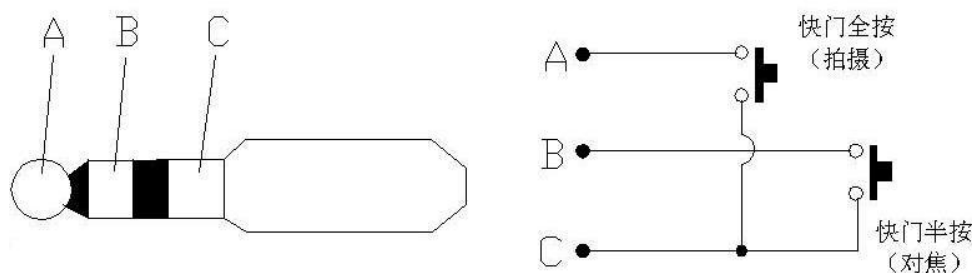


图 3.4 相机快门触发原理示意图

3.2.2 快门控制系统的设计

研制的多相机同步触发控制盒利用单片机 AT89C51 中 P3 口的 T0 (P3.4)、T1 (P3.5) 这两个管脚输出脉冲来分别控制两个电磁继电器；与此同时 CLK (P3.1) 管脚也输出一个脉冲（称为事件脉冲）到 POS 系统的 DIO 端口。这三个脉冲是同时由单片机内部电路产生和输出的同步脉冲，因此两个继电器和 POS 的 DIO 端口也是同步接收到脉冲；然后，继电器动作而使相机快门线短路，触发快门打开而相机曝光；POS 在接收到事件脉冲的时刻在记录的 POS 数据对应处作一个时间标记。快门控制系统的原理如图 3.5 所示。多相机同步触发控制盒由单片机 AT89C51 控制，运行的程序采用 C 语言编写而成，并用专用编程器写入，如果需要修改程序，可擦除单片机后重新写入。

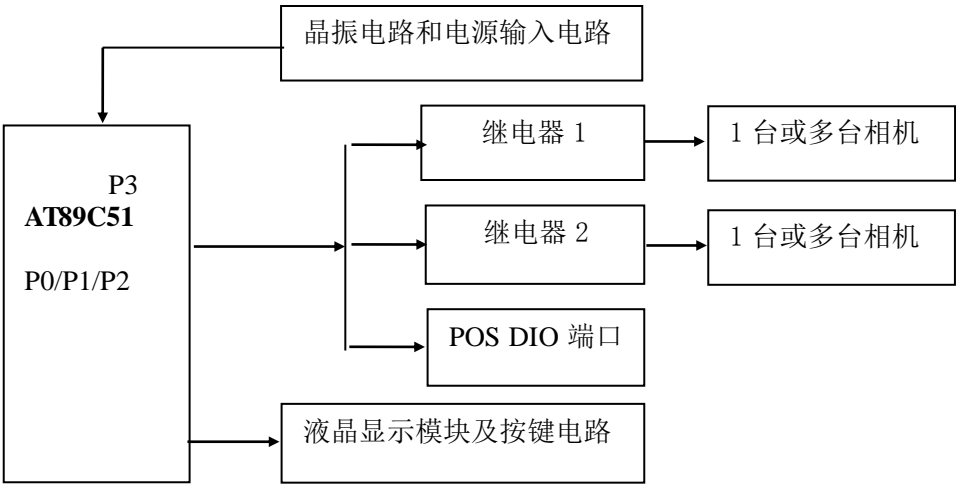


图 3.5 MADC 系统快门控制盒原理框图

为了能适用于飞行试验，实际应用中多相机同步触发控制盒增加了按时间间隔触发的功能，能够实现从 2.0~99.9 秒范围内可调，步长为 0.1 秒。为了增强可用性，还增加了时间间隔加、减、暂停和复位等功能。曝光时间间隔采用 4 位液晶显示模块进行显示，小数点后显示 1 位。

为了保证多相机同步触发的精度，选用的 JRC-23F 是超小型高灵敏电磁继电器，采用镀金触点，线圈功耗低，动作时间可达到毫秒级（JRC-23F 的性能参数见表 3.1）。

表 3.2 JRC-23F 性能参数

绝缘电阻		1000M Ω 500VAC
介质耐压	触点与线圈间	1000VAC 1 分钟
	断开触点间	400VAC 1 分钟
动作时间		5ms
释放时间		5ms
回跳时间		5ms
线圈温度（额定电压下）		$\leq 55^{\circ}\text{C}$
冲击		100m/s ²
振动		10~55Hz 3.3mm
湿度		35%~85%
温度范围		-30 $^{\circ}\text{C}$ ~+70 $^{\circ}\text{C}$
重量		2.2g
引出端形式		印制板引出端
封装形式		塑封型

研制开发的快门控制系统实物如图 3.6 和 3.7 所示。

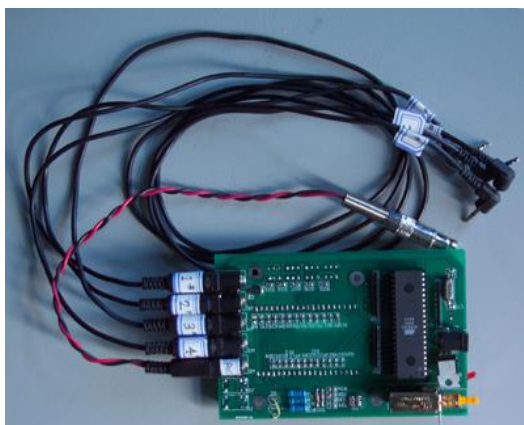


图 3.6 快门控制电路背面

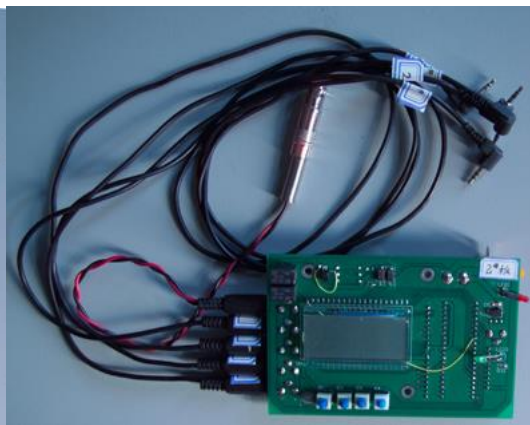


图 3.7 快门控制电路正面

3.2.3 快门控制系统的时间精度

与快门相关的技术指标有多个，由相机机身决定的有快门曝光时间准确性、快门重复性、快门延迟等，此外由于是多相机同步触发拍摄，快门控制系统的精度也是指标之一。在这里只讨论所研制的快门控制系统的时间精度。

从 3.2.1 小节和 3.2.2 小节得知，所研制的快门控制系统在同步触发继电器控制快门的同时给 POS 系统的 DIO 端口发送脉冲，由 POS 系统为该脉冲做时间标记。快门控制系统一个重要的指标就是所实现的时间间隔准确性。这关系到 MADC 系统是否能得到规定航向重叠率的影像。

2005 年 6 月 17 日下午在新疆石河子进行航空试验时连续拍摄将近 500 幅影像，从 POS 记录的相应时间标记可得到两次拍摄的时间间隔，当时设置的拍摄时间间隔为 4.0 秒。图 3.8 和图 3.9 分别是触发脉冲时间间隔曲线和相邻两个时间间隔之差的曲线图。

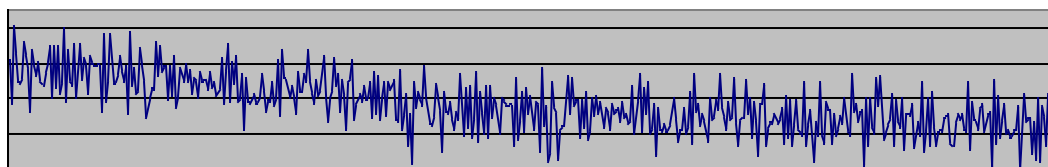


图 3.8 触发脉冲时间间隔曲线

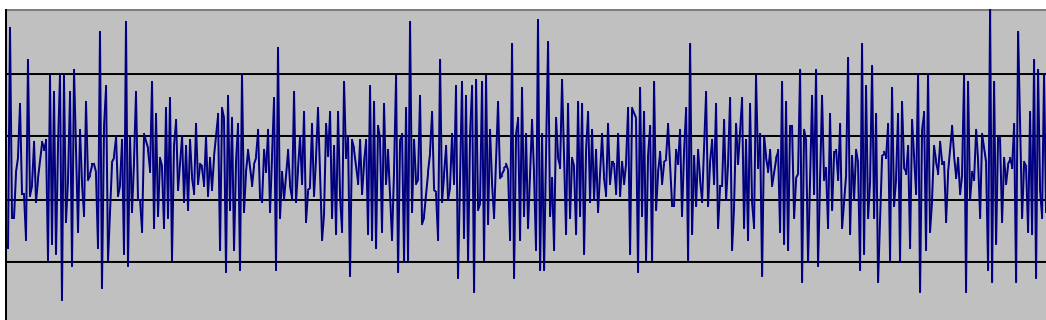


图 3.9 相邻两个时间间隔之差曲线图

通过对近 500 个时间间隔的统计可知, 平均时间间隔为 4.05267 秒, 最大值为 4.05272 秒, 最小值为 4.05264 秒, 方差为 1.53×10^{-5} ; 而相邻两次时间间隔之差均不超过 50 微秒。与设计时间间隔的最大差为 0.05272 秒, 由此引起的航向重叠率变化微乎其微, 可忽略不计。上述数据表明为 MADC 系统研制的多相机快门同步触发控制盒产生的时间间隔虽与设计要求有些许差别, 但脉冲是稳定而精确的, 完全能满足航空拍摄的需要。

3.3 MADC 系统快门延迟和不同步曝光的实验室测试

在进行普通静态摄影或低分辨率航空摄影时, 相机快门存在的快门延迟和不同步曝光时间误差对成像质量的影响并不明显。但是, 在进行高分辨率航空拍摄时, 特别是对于 MADC 系统这种需要多相机进行同步拍摄并拼接成图的相机系统时, 各相机曝光时快门打开的时间和快门打开后曝光所持续实际时间的不一致将对所拍摄图像的质量产生重要影响。因此, 对 MADC 系统各相机曝光时机械快门的快门延迟和多相机不同步曝光的时间差异进行较为精确的测量和估算, 将大大有利于提高 MADC 系统成像几何精度和系统整体精度的提高。下面将介绍对此采取的实验室测试方案, 以及对时间误差的相关计算。

3.3.1 快门延迟的实验室测试

为了比较准确地测得 MADC 系统每个相机曝光时快门延迟的具体时间, 我们根据 MADC 系统和 contax645 相机机械快门自身的特点, 设计了一套软硬件相结合的单台相机快门延迟时间的实验室测试方案。该方案的主要原理是:

计算机开始运行控制程序, 控制程序同时调用屏幕打点子程序和相机触发控制子程序; 屏幕打点子程序从左至右、从上到下按照设定的数目在计算机屏幕

上依次打点形成点阵，屏幕与投影仪相连后投影到墙上；与此同时，相机触发控制子程序发送触发脉冲到 contax645 相机；相机快门接收到触发脉冲的同时就打开，对着墙上经投影仪放大后的点阵曝光成像；所成图像经图像采集和传输后存储到计算机硬盘上。

由于相机快门打开的时间（曝光时间）和接收到触发脉冲的时间会有一个不确定的延迟，这种时间延迟反映在相机所成图像上就是拍摄到的并不是点阵的起点而是已经有一定点数的点阵。而屏幕打点子程序每打一个点的时间是确定的，由此根据拍摄到的点的数目就可以算出时间，也即该相机在此次拍摄中快门延迟的时间。对该台相机进行多次反复测试，对多次快门延迟时间取平均值，可近似认为这个值就是这台相机快门的快门延迟时间。

图 3.10 是单相机快门延迟实验室测试方案的示意框图。

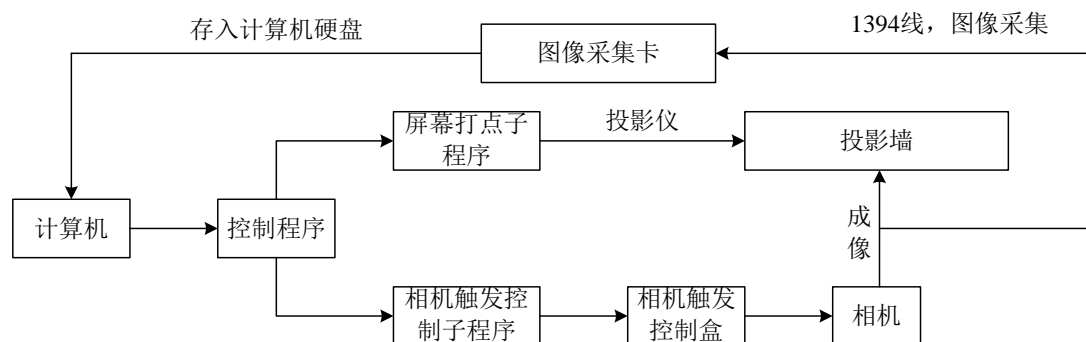


图 3.10 单相机快门延迟实验室测试方案示意图

该测试方案的主要流程如下：

(1) 准备好所有实验器材：MADC 系统（包括相机、控制盒、图像采集卡、1394 电缆等）、计算机、显示器、三脚架、投影仪。

(2) 在计算机中运行控制主程序，主程序会同时调用屏幕打点子程序和相机触发控制子程序。

(3) 屏幕打点子程序会在计算机显示器整个屏幕内按照设置的大小、顺序、行数、列数打点；计算机显示器与投影仪相连，有不同数目点数点阵的显示器屏幕投影到投影墙上。

(4) 与此同时，相机触发控制子程序会发送一路触发脉冲到相机触发控制盒，控制盒触发相机，相机的快门打开曝光，对着投影墙进行成像。

(5) 相机成像完成后快门关闭；获取的图像经过 1394 线和图像采集卡存储到计算机的硬盘中。

(6) 对获取的图像进行分析和计算，算出这台相机快门延迟的时间值。

3.3.2 不同步曝光的实验室测试

对于 MADC 系统这种需要多相机同时进行拍摄并拼接成图的摄影系统，各相机曝光时快门打开所持续实际时间的不一致将对所拍摄图像的质量产生非常重要影响。

为了准确地测得 MADC 系统每个相机曝光时快门时间的误差，我们根据 MADC 系统和机械快门自身的特点，设计了一套软硬件相结合的实验室试验方案。其主要原理是：屏幕打点程序从左至右、从上到下按照设定的数目在计算机屏幕上依次打点，屏幕与投影仪相连后投影到墙上；此时，三台面阵数字相机同时对着墙上经投影仪放大后的点阵成像；所成图像经图像采集和传输后存储在硬盘上。由于三台相机的快门打开后持续的时间（曝光时间）和选择的标准时间并不绝对一样，于是这种时间差异将导致这三台相机所成图像上点的数目并不相同；比较三台相机所成图像上点数的差异就可以计算出三台相机快门曝光实际时间的差异（因为每打一个点所花费的时间可以根据程序设置计算出来）。

在 MADC 系统 3 台相机同步曝光时，其快门时间误差实验室测量试验的框图如图 3.11 所示。

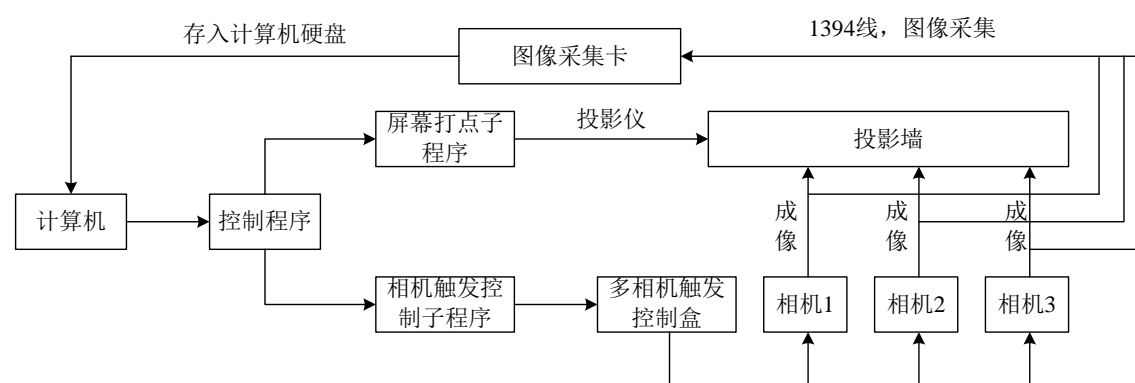


图 3.11 多相机不同步曝光实验室测试方案示意图

该测试实验的主要流程如下：

(1) 准备好所有实验器材：MADC 系统（包括相机、控制盒、图像采集卡、1394 电缆等）、计算机、显示器、三脚架、投影仪。

(2) 在计算机中运行控制主程序，主程序会同时调用屏幕打点子程序和相机触发控制子程序。

(3) 屏幕打点子程序会在计算机显示器整个屏幕内按照设置的大小、顺序、行数、列数打点；计算机显示器与投影仪相连，有不同数目点数点阵的显示器屏幕投影到投影墙上。

(4) 与此同时，相机触发控制子程序会同时发送三路触发脉冲到多相机触发控制盒，控制盒同时触发三台相机，三台相机的快门都打开曝光，对着投影墙进行成像。

(5) 三台相机成像完成后快门均关闭；获取的三幅图像经过三条 1394 线和三块图像采集卡均存储到计算机的硬盘中。

(6) 对获取的图像进行分析和计算，可得到三台相机在此次拍摄中不同步曝光的时间差异；再结合原先测出的每个相机快门延迟的时间，可以算出本次拍摄中每台相机的快门实际曝光持续的时间（从打开到关闭）。

3.3.3 快门延迟不同步曝光测试软件实现及流程

为测量多台相机快门的延迟时间及不同步精度，需同时执行屏幕打点子程序及同步触发多台相机，这包括 2 方面的内容：一是实现微秒级精度的时间测量，二是采用软件触发方式同步触发多台相机曝光。

1、微秒级精度时间控制

利用高精度的时间控制主要是测量屏幕打点子程序的执行时间，每个屏幕点的时间就是执行时间与屏幕点数的比值；而根据每个相机所拍摄到的不同屏幕点数及多个相机之间所拍摄的屏幕点数之差就可计算得到每个相机的快门延迟及多个相机的不同步误差。

高精度的计时函数，采用 `QueryPerformanceFrequency()` 函数和 `QueryPerformanceCounter()` 函数。这两个函数是 VC 提供的仅供 Windows 9X 使用的高精度时间函数，并要求计算机从硬件上支持高精度计时器。`QueryPerformanceFrequency()` 函数和 `QueryPerformanceCounter()` 函数的原型为：

```
BOOL QueryPerformanceFrequency(LARGE_INTEGER *lpFrequency);
```

```
BOOL QueryPerformanceCounter(LARGE_INTEGER *lpCount);
```

数据类型 `LARGE_INTEGER` 既可以是一个作为 8 字节长的整型数，也可以是作为两个 4 字节长的整型数的联合结构，其具体用法根据编译器是否支持 64 位而定。该类型的定义如下：

```
typedef union —LARGE—INTEGER
{
    struct
    {
        DWORD LowPart; // 4 字节整型数
        LONG   HighPart; // 4 字节整型数
    };
    LONGLONG   QuadPart;
    // 8 字节整型数
}LARGE_INTEGER;
```

在进行计时之前，应该先调用 `QueryPerformanceFrequency()` 函数获得机器内部计时器的时钟频率。接着，在需要严格计时的事件发生之前和发生之后分别调用 `QueryPerformanceCounter()` 函数，利用两次获得的计数之差和时钟频率，就可以计算出事件经历的精确时间。

2、软件同步触发多台相机曝光

通过控制并口的数据端口产生同步触发脉冲，进而控制多台相机同步触发。

并口的数据端口或称数据寄存器（D0～D7）保存了写入数据输出端口的一字节信息。数据端口可以写入数据，也可以读出数据（即可擦写）；写进去的当然是我们希望从数据端口引脚输出的数据，不过读进来的也只是我们上次写进去的数据，或是原来保留在里面的数据，并不是从端口引脚输入 PC 的数据。数据端口引脚是 PIN2～PIN9。

通用并口各引脚定义如表 3.3 所示：

表 3.3 并口各引脚定义

数据寄存器（即数据输出端口） 可擦写、基地址				
bit	引脚：D-sub	信号名	信号源	是否在连接器处倒相
0	Pin2	D0	PC	否
1	Pin3	D1	PC	否
2	Pin4	D2	PC	否
3	Pin5	D3	PC	否
4	Pin6	D4	PC	否
5	Pin7	D5	PC	否
6	Pin8	D6	PC	否
7	Pin9	D7	PC	否

如果把这 8 支脚当成一般的数字输出的脚位看待，上述 8 支脚就相当于 8 个数字输出的位置，可以当成是 8 个可以自由控制的输出点。当通过数据端口传送数据时，就是改变这 8 支脚的电平状态；而接受方也按照相同的编码原则解释，就可以获得传送的数据。将端口的电平设置为高地电平，按一定的顺序写数据，有规律的改变端口电平状态，则可实现从端口输出方波。该输出方波作为后续控制电路的脉冲输入既可实现多台相机的软件同步触发。

以下函数把并口的数据端口设置为高电平，其中 888 代表并口的数据端口地址，m_nValue 为所选择的 8 个管脚代表的十进制数值。m_nValue 设置为 0，则相当于将数据端口设置为低电平。

```
SetPortVal(888, m_nValue, 1); //write a BYTE value to an I/O port
```

该测试软件的整体流程如下：

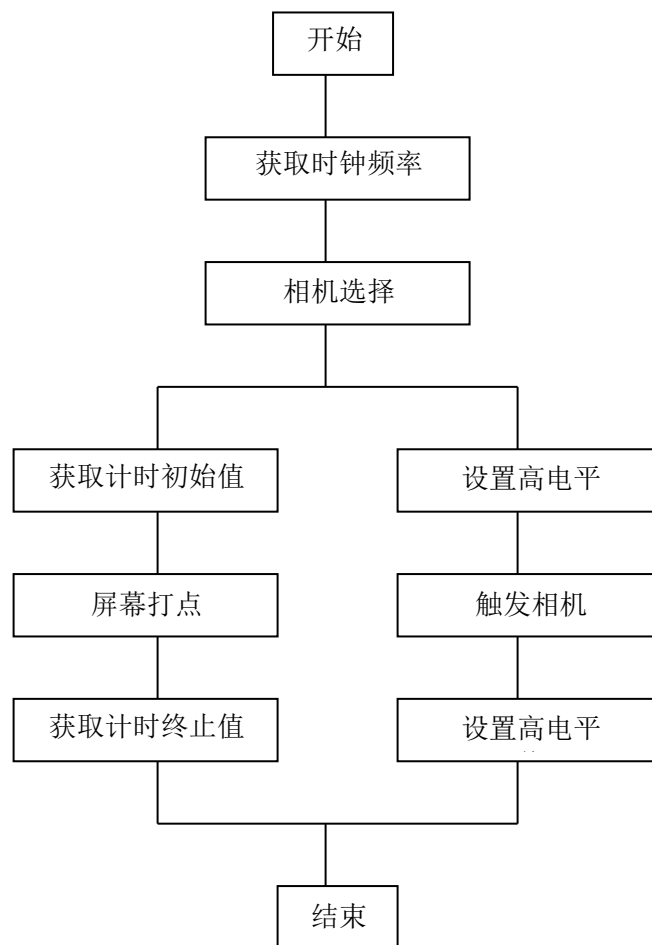


图 3.13 测试软件的流程框图

3.4 实验结果及计算

由以上分析可知，只要知道了 MADC 系统中每台相机的快门延迟时间；然后采用图 3.11 所示的多相机不同步曝光测试方案，结合公式 (3-1)，就可以评价 MADC 系统的 3 台相机不同步曝光的时间精度和对成像精度的影响。所以，具体实验仅对单相机快门延迟进行计算和分析。

3.4.1 单台相机快门延迟时间的计算

由本章 3.3.1 节和 3.3.3 节的分析可知，测试软件运行后计算并显示出来的时间 T 应该由程序执行时间 T_e （调用打点子程序之前的程序段）和打点花费的时间 T_p 两部分组成。又因为控制程序给出相机触发脉冲的时间与调用打点子程序的时间是同步的，所以快门延迟的具体时间就反应为相机拍摄到的打的一定数目的

点所花费的时间。由于 T 是由计算机调用函数自动计算给出的，所以可以认为是已知量（当计算机配置和工作环境不变时）；程序执行时间 T_e 和打点函数每打一个点花费的时间可以计算出来；于是通过计算快门曝光初始时刻照到的点的数目就可以计算出单相机快门延迟的具体时间值了。该计算方法的示意图如图 3.14 所示。

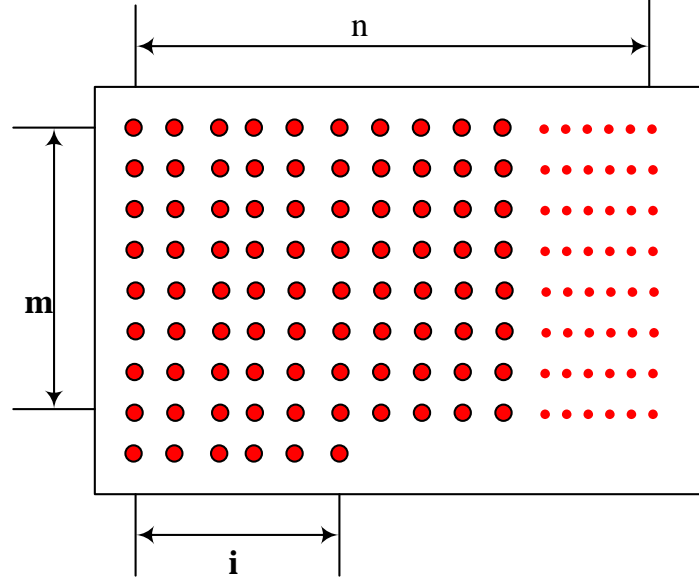


图 3.14 点阵法快门延迟计算示意图

如上图所示，相机快门曝光时拍摄到的总点数 N 为：

$$N = m \cdot n + i \quad (i \leq n) \quad (3-2)$$

由上段讨论可知：

$$T = T_e + T_{pN} = T_e + t \cdot N = T_e + t \cdot (m \cdot n + i) \quad (3-3)$$

式中， T 为程序执行和拍摄完成所花费的总时间， T_e 为程序执行时间， T_{pN} 为打点程序打 N 个点需要的时间， t 为每打一个点所要的时间。

由于 t 很小（在微秒量级），所以可以认为 $T_e + T_{p1} = T_e$ ，由此经过多次实际测量可以算出程序执行时间 T_e 。

当 T_e 已知后，由公式（3-3）可算出每打一个点所花费的时间 t ：

$$t = \frac{T - T_e}{N} = \frac{T - T_e}{m \cdot n + i} \quad (3-4)$$

假定在相同实验条件下打点程序每打一个点的时间 t 是保持不变，则由相机实际拍摄到的点数可以算出相机快门延迟的时间：

$$T_{\text{delay}} = T_{pN} = T - T_e = t \cdot (m \cdot n + i) \quad (3-5)$$

例如，在某次实验室测试中，MADC 系统的 contax645 相机快门设为 1/1000

秒，焦距 f 调到 2.0 米，光圈设为 $F=4.0$ 。实际测试操作的情形图下图所示。



图 3.15 快门延迟实验室测试示意图

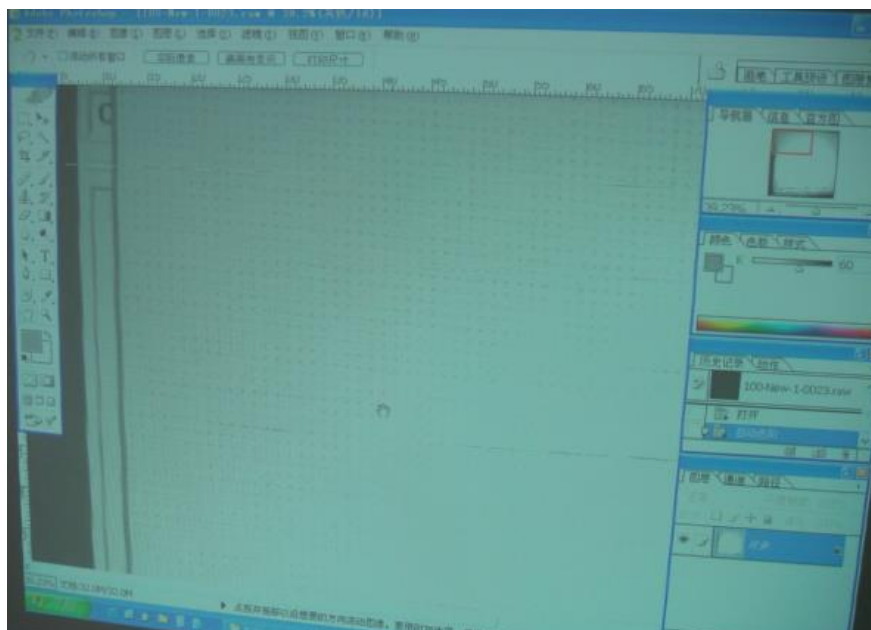


图 3.16 相机拍摄的投影墙上的点阵

此次测试实验中，经过多次拍摄取平均值后可算得程序执行时间为 240ms；打点程序每打一个点花费的时间为 $1.8 \mu s$ ；用作测试的 1 号相机的快门延迟时间为 36ms（10 次测试算得的平均值）。这个结果与通过图像分析法估算的快门延迟时间为 40ms 左右（方俊永，2005）的结果非常接近。

3.4.2 快门延迟和不同步曝光对成像质量的影响分析

从本章中前面的内容知道,快门控制系统能做到同时给多台相机快门发送触发信号,但相机快门曝光往往还不是同步的,这是由于所使用的相机机械快门的固有特性决定的。快门时延是相机本身的一个不确定性因素,是指从快门触发到打开快门会占用一定的时间。而不同相机或不同次拍摄的快门时延也是不一致的,这就造成多相机之间曝光的不同步。对于不同的相机快门延迟的时间也有很大区别,从几十毫秒到几百毫秒不等。经实验室测试和据图像估算, MADC 系统所用的 Contax 645 的快门延迟应在几十毫秒的量级。在多台相机都存在几十毫秒快门延迟的情况下,其同步误差一般在毫秒量级上。

快门延迟造成的相机曝光不同步主要影响多台相机曝光时的投影中心和姿态参数不一致,这样若使用一组定位和姿态参数对多台相机获取的影像做纠正的时候就存在偏差。

以 2005 年 6 月在新疆飞行试验的姿态数据为例说明快门延迟的具体影响。飞行时,每 4 秒拍摄一次,表 4-8 列出了相邻两次拍摄时其姿态变化的最大值、最小值和平均值,以此表明飞行姿态变化的剧烈程度。假定在两次拍摄间,姿态变化是线性的,再假定相机间的曝光同步误差为 50 毫秒,则相机曝光的不同步造成的航高和姿态最大变化如表中最后一行所示。

表 3.4 相邻两次拍摄姿态变化

	航高	ω	φ	κ
相邻最大差	1.7250m	2.83532°	0.53652°	1.44183°
相邻最小差	0.0020m	0.04150°	0.00087°	0.02168°
相邻差平均值	0.5867m	0.60370°	0.10627°	0.48164°
50 毫秒姿态最大变化值	0.0215m	0.03545°	0.00671°	0.01802°

上表中, ω , φ , κ 是测量系统外方位元素中的三个角元素。

上述分析都是根据一定的假设情况得出的,即假定姿态变化是线性的和曝光同步误差为 50 毫秒。实际上姿态变化和曝光同步误差都是随机不确定的,应当使用记录频率高的姿态数据来分析姿态变化,目前是 4 秒一个姿态数据,下一步准备采集 1 秒一个姿态数据的来分析曝光不同步期间造成的影响。

另外一个方面,相机的快门延迟造成的相机曝光不同步误差也需要测定,一

个方法是比较三台相机同一次拍摄的图像,根据其不重叠部分的像素数估计 3 台相机间的同步误差。但图像的不重叠是由多种因素引起的,相机安装时相互间的角度误差将对获取图像的重叠区域产生很大的影响, 0.2° 的误差引起的最大像素数差为 128 个,远远大于因曝光不同步造成的影响。在评价相机的曝光同步误差时,应先消除由于安装误差造成的图像不重叠部分。

3.5 本章小结

本章先对快门、快门延迟和不同步曝光的基本概念做了简单介绍。快门是相机中的一个重要部件,快门性能的好坏直接影响着相机的性能。快门延迟是机械快门本身的一个固有特性,它是一个不容易精确测定的随机量。不同步曝光是针对由多台相机构成的摄影系统而言的,多台相机理论设定完全同步曝光而实际曝光时存在差异的现象就是不同步曝光。

由于 MADC 系统是多相机组成的摄影系统,对多相机快门触发的控制有着很严格的要求,于是专门为 MADC 系统设计了快门控制系统。本章对快门控制系统的原理级和设计方案都进行了具体的分析,还结合实际航空试验对快门控制系统的时间精度进行了分析和评价。

本章对快门延迟和不同步曝光的实验室测试方案的原理和流程进行了详细介绍,还对测试软件的主要函数和流程框图进行了说明。并结合实验结果给出了单相机快门延迟和多相机不同步曝光具体时间的估算公式。MADC 系统所用的 Contax 645 的快门延迟应在几十毫秒的量级。在多台相机都存在几十毫秒快门延迟的情况下,其同步误差一般在毫秒量级上。

最后,结合具体航空试验的结果,利用对应的 POS 数据,对快门延迟和不同步曝光对 MADC 系统成像质量的影响进行了简单分析。

第四章 MADC 系统专用机载稳定平台的研制

4.1 振动对航空相机系统的影响

航空相机是装载在航空飞行平台上（如飞机、飞艇、热气球等）以拍摄地表景物来获取地面或大气层信息的光学仪器。飞行平台的振动会通过航空相机的座架固定点传递到航空相机光学系统上，影响相机的成像质量。

航空相机的振动环境十分复杂，其运动规律与飞行器载体、相机参数、安装方式有十分密切的关系，在理论上准确地描述这一运动规律十分困难，但是在做出符合工程实际的假设前提下，可以得到振动对像点影响的一般规律。将这些规律用以指导航空相机减震装置的设计，可以减小或消除振动对成像质量的影响，从而提高航空图像的清晰度。

4.1.1 振动对航空相机成像质量影响的简单计算

为了分析振动对航空相机的影响，可认为相机的载体在空中的飞行速度为零（飞行速度引起的图像质量降低将由像移补偿装置来解决，留到下章讨论），建立一个以相机光学系统节点为坐标原点，以光轴方向为Z轴的直角坐标系（如图4.1所示），把振动分解成为三个坐标轴的基本运动，即沿三个轴的平动和绕三个轴的转动。这些运动会使被拍摄目标的物点在相机曝光成像过程中，成像在航空相机焦平面的不同位置上，这种光学影像的相对位移会使航空相机成像精度降低，图像质量下降。下面就对振动分解成的各种运动对航空相机的影响进行简单分析和计算。

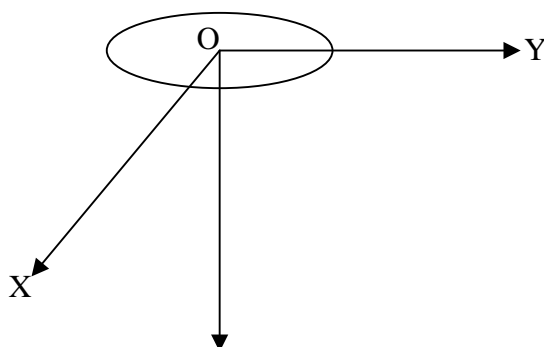


图4.1 航空相机直角坐标系

1、线位移对成像质量影响的计算

航空相机振动的复合运动中包含了三种线位移：OX、OY、OZ向的平动，由于坐标轴Z轴方向与光轴重合，对于一般的航空相机而言，多采用的是共轴球面光学系统，可认为其光学系统在坐标轴OX、OY方向是对称的，所以其运动规律是一致的。航空相机OX方向和OY方向的移动实际是相机与所摄目标的相对移动，可以等效为相机不动，而地面物点反方向移动。这时像点在焦面上的移动距离可由下式表示(以OX方向为例进行计算)：

$$\Delta x = t_e \times v_x \times (1/m) = t_e \times v_x \times (f_B / H) \quad (4-1)$$

上式中， t_e 为相机曝光时间， v_x 为在OX方向的振动的线速度， $m=H/f_B$ 是相机的航空比例尺， H 为航高， f_B 为相机的后焦距。由此可以看出，OX、OY方向上的线位移在整个像面内所造成的不清晰是一致的，与相机曝光时间和振动速度成正比，如图4.2所示。同理可得在OY方向振动引起的像点的移动距离：

$$\Delta y = t_e \times v_y \times (1/m) = t_e \times v_y \times (f_B / H) \quad (4-2)$$

公式(4-2)中， t_e 为相机曝光时间， v_y 为在OY方向的振动的线速度， H 为航高， f_B 为相机的后焦距。

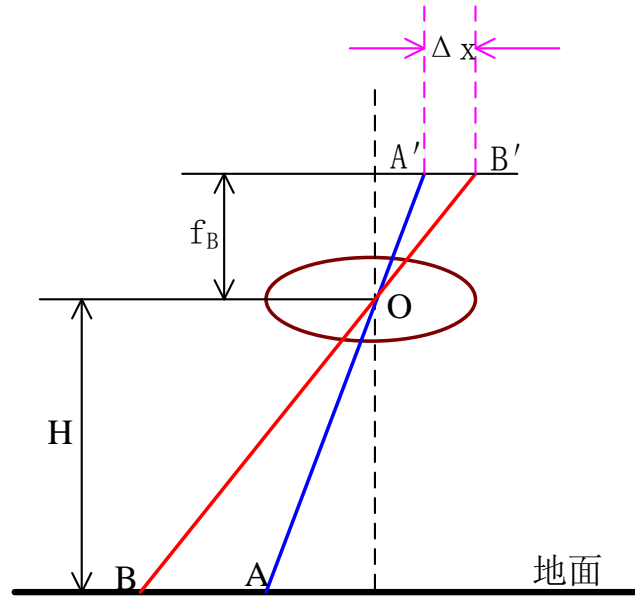


图4.2 OX方向振动对像点变化影响示意图

在OZ方向振动引起的像点的移动距离和OX、OY方向稍有不同；OZ方向的线位移所造成的不清晰与像点到主光轴中心像点的距离成正比，与曝光时间和振动速度也成正比。

$$\Delta z = (r_1 / f_B) \times t_e \times v_z / m \quad (4-3)$$

上式中, r_1 为相机曝光开始时某物点对应的成像点到主光轴中心像点的距离, v_z 为在OZ方向的振动的线速度, t_e 为相机曝光时间, f_B 为相机的后焦距, $m=H/f_B$ 是相机的航空比例尺。

对于一般情况, 任意振动都可以分解成为各阶简谐振动的合成, 所以用简谐振动来作为机理研究其响应可以得到振动影响的一般规律。当航空相机的固定点在相位、振幅相等时, 产生沿三个轴的线位移(赵鹏, 2001)。

$$s = s_0 \sin(\omega t + \psi); \quad v = ds/dt = \omega s_0 \cos(\omega t + \psi) \quad (4-4)$$

上式中, s 、 v 为振动的位移和速度; s_0 、 ω 、 ψ 分别为振动的振幅、角频率和相位角。把公式(4-4)分别代入前三式, 可得到在三个坐标轴的简谐振动的位移量:

$$\Delta x = (\omega t_e s_{0x} / m) \cos(\omega t + \psi_x) \quad (4-5)$$

$$\Delta y = (\omega t_e s_{0y} / m) \cos(\omega t + \psi_y) \quad (4-6)$$

$$\Delta z = [(\omega t_e s_{0z} / m \times (r_1 / f_B))] \cos(\omega t + \psi_z) \quad (4-7)$$

其极限值分别为: $\Delta x = \omega t_e s_{0x} / m$; $\Delta y = \omega t_e s_{0y} / m$; $\Delta z = \omega t_e s_{0z} / m \times (r_1 / f_B)$ 。

2、角位移对成像质量影响的计算

航空相机角位移是由于相机各个固定点的振动的相位和振幅不一致所造成的, 现在将这些转动分解成围绕垂直于光轴平面内任一直线的转动和绕光轴的转动, 分别进行讨论。

绕垂直于光轴平面内任一直线的转动都可以认为是绕X轴和Y轴转动的合成, 由于大部分航空相机采用的共轴球面光学系统的对称性, 可以认为绕X轴转动和绕Y轴转动的形式与规律是一致的。当绕X轴转动时, 光轴转动角度为:

$$\alpha_x = \Delta S_z / L_y \quad (4-8)$$

上式中, ΔS_z 为Y轴上两固定点Z向距离差; L_y 为Y轴上两固定点Y向距离差。仍然以简谐振动的形式代入, 并且认为两个固定点上的振幅相同, 则可得:

$$\alpha_x = \frac{S_z \sin(\omega t + \varphi_1) - S_z \sin(\omega t + \varphi_2)}{L_y} \quad (4-9)$$

当两个固定点相位相差 180° 时转角最大, 其规律为:

$$\alpha_x = \frac{2S_z \sin(\omega t + \varphi_1)}{L_y} \quad (4-10)$$

同理，可得绕Y轴的转角：

$$\alpha_y = \frac{2S_z \sin(\omega t + \varphi_1)}{L_x} \quad (4-11)$$

对于振动而引起的相机转动，其回转中心的位置是由相机安装座架与飞行平台连接点的多少及其相对位置所决定的，可认为三个轴的回转中心都通过相机的主节点，这时相机的转动没有引起光学系统的主光轴平移，转动量最大地反映了像点在成像面的位移，故而认为此时振动引起的转动对成像质量影响最大。

经过分析，我们可以得到在整个曝光时间内像点的移动距离的计算公式：

$$\Delta r = \frac{f_B^2 + r^2}{f_B} \cdot \frac{2\omega S_z \cos(\omega t + \psi_1)}{L} \cdot t_e \quad (4-12)$$

对于上式，工程分析时只考虑其影响最大的情况：

$$\Delta r_{\max} = \frac{f_B^2 + r^2}{f_B} \cdot \frac{2\omega S_z}{L} \cdot t_e \quad (4-13)$$

以上两个公式中， r 为像点到像面中心的距离（ $r = f_B \tan \beta$ ）， β 为物点主光线与光轴的夹角。

对于绕Z轴的转动，是由于各个固定点在垂直于光轴平面的平动引起的，其像点的变化量与振动的角频率、X方向上的振幅和固定点的间距有关，计算起来比较复杂，这里就不详细讨论了。

4.1.2 振动对航空相机成像质量影响的比较与分析

从线位移对像质的影响公式(4-5)、(4-6)、(4-7)和角位移的影响公式(4-13)中可以看出，除了振动本身的运动参量（角频率、振幅等）的影响外，振动对航空相机像质的影响程度还与飞行平台的飞行高度、航空相机的焦距长度、相机拍摄时选定的曝光时间、相机安装基座的固定位置等系统设计参数有直接的关系。因此，减小或消除振动对成像质量的影响需要对整个系统进行整体优化设计，下面就对工程中应考虑的主要问题进行比较分析。

从线位移影响像质的公式(4-5)和(4-6)中可以看出对于垂直于光轴平面内的移动，在像面上的影响是一致的，其振幅都要缩小 m 倍。一般情况下，飞行高

度是相机后焦距的几千倍以上，航空比倒尺从几千到几万不等。所以，像点振动的振幅为振动输入的千分之一或万分之一，其绝对量比较小，这种运动对像质清晰度的影响在多数情况下并不显著。从公式(4-7)可以看出，沿着光轴方向的平动对像面清晰度的影响程度是不一致的，对于像面边缘的影响远远大于像面中心，即振动使图像边缘像质下降得更多。但是由于像点运动振幅的绝对值很小，实践航拍过程中，主要对低空飞行的高分辨、大幅面的航空相机考虑这一振动形式的影响，并进行适当地校正。

从角位移的影响公式(4-13)中可以看出，这一影响与相机固定点跨度有直接关系，而固定点跨度的大小是由相机的固定形式决定的，固定点跨度较大则影响较小。而在实际航拍试验中，由于航空相机与产生振动的飞行器载体相比较，体积比较小，其固定点跨度也很小，可以认为其安装固定的局部振动幅度变化不大，所以可认为各固定点的振幅都相等。比较绕X轴与绕光轴的转动影响，可知相机绕垂直于光轴平面内转动的影响大于绕光轴转动的影响。

根据公式(4-5)式和(4-13)，把沿光轴的移动影响与绕X轴的转动的影响公式相比：

$$\Delta r_{\max} / \Delta x = 2(H/L) \cdot [2(f_B^2 + r^2) / f_B^2] \geq 2H/L \quad (4-14)$$

由于航高H远大于相机安装基座固定点的距离L，所以角振动对航空相机成像质量的影响远远大于线振动的影响。而角频率又与其振动周期密切相关，对于不同周期的振动，像点的响应幅度因子是不同的，如果振动在各阶频率的振幅相等的情况下，高频影响大于低频。所以在设计减震装置时，要重点考虑高频的衰减能力。

- ✓ 低频振荡：频率为0.01Hz~2Hz，为振幅为几个弧秒，并且按正态分布率变化。
- ✓ 高频振荡：频率为几十赫兹到几百赫兹，振幅为0.3"~1.0"。

综上所述，振动所引起的像质变化，角振动大于线振动，尤其是在垂直于光轴的平面内尤为严重(苏陶，2007)。所以在设计减震器（如航空稳定平台）时，应使航空相机不因飞机机体的振动而产生角振动，即排除固定点线振动所引起的角振动，还要重点考虑减震装置对高频振荡的隔离能力。

4.2 机载稳定平台发展概况

4.2.1 国外发展情况

稳定平台技术是在上个世纪 40 年代前后的惯性元件技术基础上发展起来的。20 世纪 40 年代末,为了减少车体振动对行进间射击的影响,在坦克上开始安装火炮稳定器。从 50 年代起,双稳定器在坦克中得到了广泛的运用。20 世纪 60 年代,美、英、法、加等国家已相继开始研制用于军事目的的机载稳定平台。

在英、美等国的先进武器系统中,基于微惯性传感器的稳定平台得到了广泛的应用,如美国的 M1 坦克、英国“挑战者”坦克、俄罗斯 T-80 坦克、英国“标枪”导弹海上发射平台和“海枭”船用红外跟踪稳定平台等,都采用了不同类型的稳定跟踪平台。美国海军采用 BEI 电子公司生产的 QRS-10 型石英音叉陀螺,研制出 WSC-6 型卫星通讯系统的舰载天线稳定系统,工作 12 万小时尚未出现故障;Honeywell 公司以红外传感器平台稳定为应用背景,研制的以 GG1320 环形激光陀螺为基础的惯性姿态控制装置,很好的满足了稳瞄跟踪系统的要求。美军配装的 Honeywell 公司采用激光陀螺技术研制的自行榴弹炮组件式方位位置惯性系统(MAPS6000),由 H-726 动态基准装置、控制-显示装置、车辆运动传感器组成,是一种采用激光陀螺技术的捷联式惯性系统,在工作时可连续提供高精度的方位基准、高程、纵摇、横摇角速率、经度和纬度输出,性能大大高于美军 MAPS 系统规范的要求。在导弹制导方面俄罗斯的 X-29T、美国的“幼畜”AGM-65、以色列的“突眼”等成像制导导引头中,都采用了陀螺稳定跟踪平台。美国在越南战场上用机载电子对抗吊舱干扰越南地对空导弹对飞机的攻击;在数次海湾战争中,美军用无人机吊舱实时侦察伊拉克军事设施和评估打击效果;美 FLIR 公司相继研制出搭载不同光学探测器的两轴两框、两轴三框、三轴三框和三轴五框可由不同载机搭载的吊舱;美军埃格林空军基地有 8 个红外测量吊舱系统,其中 3 个是安装在 F-4 飞机上的超音速吊舱系统分别安装有红外热像仪、红外辐射计和红外光谱仪,分别用于测量飞机、导弹和红外干扰弹等目标的红外辐射特性;美国洛克希德·马丁公司生产的 LANTIRN 吊舱至 2001 年 1 月中旬已经销售了 1780 个瞄准吊舱和 1664 个导航吊舱;瑞典 POLYTECH 公司相继研制出了搭载高分辨率红外热像仪和可见光电视的不同用途的机载吊舱;2001 年 2 月,诺斯罗普·格

鲁曼公司研制的 LiteningH 第三代前视红外 (FLIR) 目标指示吊舱由波音公司利用一架 F-15E 战斗机进行了试验飞行。

图 4.3 为以色列 CONTROP 公司研制的一系列机载光电稳定平台产品。它们在 UAV (Unmanned Air Vehicle, 无人驾驶飞行器)、侦察直升机等航空侦察摄影时得到广泛应用。图中的 ESP-600C 型无人机载光电侦察平台采用两轴平台, 其方位转动范围 $360^{\circ} \times N$ 、俯仰 $+10^{\circ} \sim -10^{\circ}$ 、最大角速度 $50^{\circ}/s$ 、最大角加速度 $60^{\circ}/s$, 其稳定精度达到 $15\mu rad$, 所达精度代表了国际先进水平。

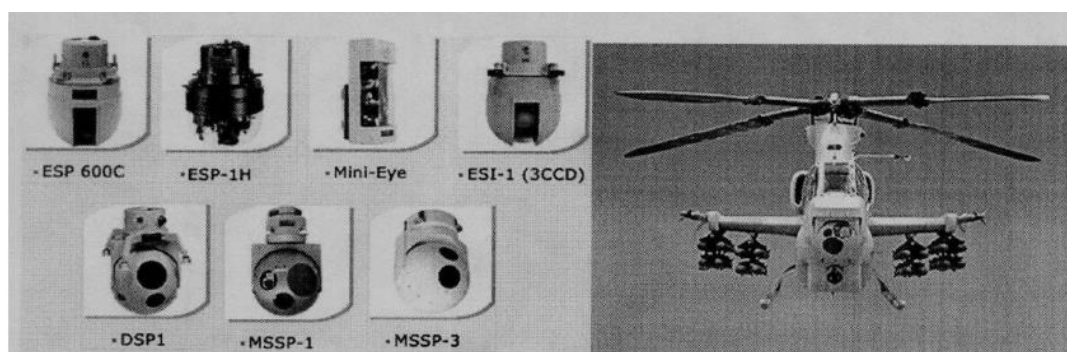


图 4.3 ESP-600C 型无人机载光电侦察平台 (以色列)

国外机载吊舱特点主要有:

- ✧ 陀螺稳定动态精度一般约为 0.1 毫弧度 (约 20 角秒);
- ✧ 同时搭载探测器数量为 1-4 个;
- ✧ 搭载探测器不置换安装;
- ✧ 使用价钱昂贵的新型结构材料 (如碳纤维), 使吊舱重量轻;
- ✧ 采用高性能红外热像仪, 既可进行红外跟踪, 又可进行红外测量。

下面则列出两个有代表性, 可用于机载遥感的国外稳定平台的指标。

- ✓ 美国 Wehrli & Associates Inc 生产的 ASP-1 稳定平台

图 4.4 是 ASP-1 稳定平台的外观示意图, 表 4.1 列出了 ASP-1 的主要技术指标。

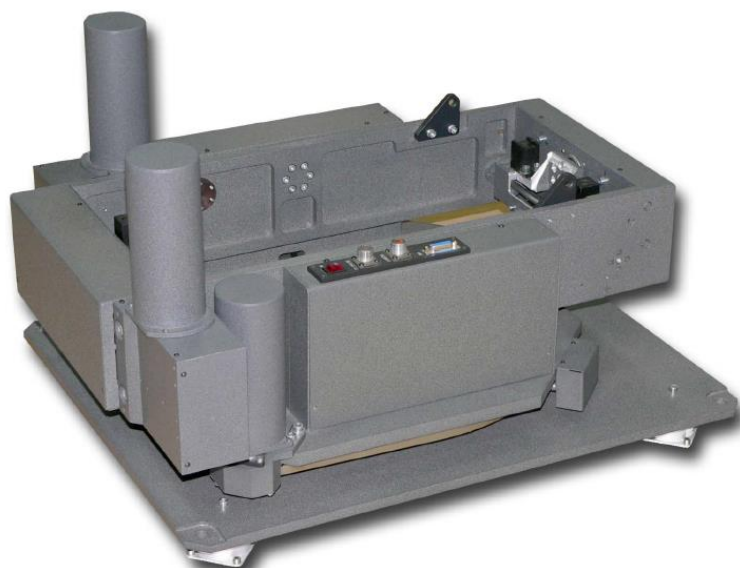


图 4.4 美国 Wehrli & Associates Inc 生产的 ASP-1 稳定平台

表 4.1 ASP-1 的主要技术指标

<i>Technical Data</i>	
Payload	<50Kg
Adapter Plate	Camera Specific < 260mm
Stabilization Range	$\omega \pm 5^\circ$ (pitch) $\phi \pm 5^\circ$ (roll) $K \pm 30^\circ$ (yaw)
Max residual angle	$\pm 0.1^\circ$ pitch/roll $\pm 0.2^\circ$ yaw
Rate	± 10 degrees/second
Acceleration	± 40 degrees/second
Bandwidth	> 10 Hz
Command	Analog position or rate Digital command 0 to 10V Interface via RS485
Read Out	Position, Rate-command Angle of ω and ϕ axis ± 0.0002 degrees (resolution)
Voltage	28 ($\pm 20\%$) VDC
Power	200W average (300W peak)
Temperature	0° - 50°C - operating -25° - 50°C - storage
Dimensions	672x555x440 mm
Weight	52 Kg.
Airworthiness	FAR 25.561

✓ 瑞士 Leica 公司生产的 PAV30 机载稳定平台

PAV30 是 Leica 公司为其航空摄影相机系统研制的机载陀螺稳定平台，目前已经广泛应用于该公司的多种航空摄影相机系统中(如传统型胶片摄影相机 RC30

和线阵数码 CCD 摄影系统 ADS40)。同时,一些别的航空摄影相机系统的研制机构和生产厂家,也多数预留了与 PAV30 的接口,使得 PAV30 成为了。一种比较通用的机载航空稳定平台。其外观图如图 4.5 所示。



图 4.5 瑞士 Leica 公司生产的 PAV30

PAV30 的主要技术数据如下:

- 自动稳定的特性 (适用于航拍飞行状态)
 - ✧ 俯仰和翻滚的稳定范围: $\pm 5^\circ$
 - ✧ 偏航的稳定范围: $\pm 30^\circ$
 - ✧ 角运动的典型残余误差: $< 0.3^\circ / \text{s}$
 - ✧ 垂直方向的典型残余误差: $< \pm 0.5^\circ$
- 电源
 - ✧ 操作电压: 23.5-29.5VDC
 - ✧ 最大电压波动: 2VPP (peak/peak)
- 能耗
 - ✧ 平均: 150W
 - ✧ 三个运动同时发生时的最大能耗: 400W
- 尺寸与重量
 - ✧ 无护罩时: 665mm×535mm×150mm
 - ✧ 带护罩时: 680mm×565mm×155mm
 - ✧ 支架 (可选): 660mm×535mm×155mm
 - ✧ PAV30: 36kg
 - ✧ 运输箱: 26kg

● 环境

- ✧ 运行温度范围：-25℃--50℃
- ✧ 储藏温度范围：-40℃--70° /℃
- ✧ 最高运行高度：50, 000feet/15, 200m（无压力舱）

4.2.2 国内研究与发展概况

国内早在二十世纪八十年代中期中国飞行试验研究院就开始考虑用机载吊舱对空中飞行目标的红外辐射特性进行测量，1992 年航空航天部 618 所为西北工业大学研制成功了安装可见光 CCD 摄像机的单通道无人机吊舱。1994 年航空部 613 所开始研制亚音速机载瞄准吊舱(2001 年试飞成功)；1995 年电子部 209 所与俄罗斯联合研制亚音速机载激光照射吊舱(2001 年左右试飞成功)；1996 年中科院西安光机所开始为中国飞行试验研究院研制超音速机载红外测量吊舱(2002 年试飞成功)；1999 年长春光机所给总装 20 基地研制亚音速机载巡航弹测量吊舱(2003 年左右成功)；1994 年左右成都光电所为总参研制了一台直升机小型三轴机载吊舱，1998 年开始为总装 33 基地研制直升机吊舱；另外西安光机所、长春光机所、014 基地等单位先后为有关单位的无人机上研制成功了用途单一，搭载设备较少的小型吊舱。研究机载稳定平台的单位还有中国电子科技集团所 38 所、14 所、26 所、成都电子科技大学、西安电子科技大学等。这些研究机构研究稳定平台的目的是要保证高精度地、稳定地观察目标。

对稳定平台研究得比较多的另一类机构是航天部各研究院和卫星制造商，因为稳定平台有利于保持卫星的各种姿态的稳定，从而保持可靠稳定的通信。从事这方面研究的有航空工业总公司 618 所、中国通信广播卫星公司、西安飞行自动控制研究所等。

在机载遥感领域的稳定平台应用方面，中科院遥感应用研究所、中科院地理研究所、北京农林科学院、中国人民解放军相关部队以及中科院上海技术物理研究所等单位都做了很多研究工作及相关验证实验。

表 4.2 则反映出一些国内外陀螺稳定平台的研究情况。从表中可以看出，国内在精密稳定平台的研究方面与国际先进水平相比还有很大差距。

表 4.2 陀螺稳定平台产品性能比较

产 品 型 号	平台 稳定结 构	旋 转 范 围		最 大 角速度	最 大 角加速 度	稳 定 精 度
		方 位	俯 仰			
ESP-600C 以色列	二轴 三框架	360° *N	+10° ~ -110°	50° /s	60° /s ²	15 μrad
MOSP 以色列	二轴 四框架	360° *N	+15° ~ -110°	30° /s		25 μrad
ESP-1H 以色列	二轴	360° *N	+10° ~ -110°	50° /s	60° /s ²	50 μrad
COMPASS 以色列	二轴 四框架	360° *N	+35° ~ -85°	60° /s		20 μrad
Skyball— SA-144/18 美国	四框架	360° *N	+8° ~ -75°	2rad/s	4rad/ s ²	35 μrad
维吉-105 法国	二轴	±30°	±10°	50° /s	60° /s ²	0.1mrad
14QS 加拿大	四框架 三自由 度减振	360° *N	+90° ~ -120°	90° /s		35 μrad
Caselle-Torinese 意大利	二轴	0° ~ 360°	0° ~ -360°	60° /s		0.4mrad
T6 (我国 618 所)	二轴	±270°	0° ~ 150°	60° /s	60° /s ²	0.1mrad
轻型陀螺稳定平 台(长春光机所)	二轴	360° *N	+60° ~ -60°	60° /s	60° /s ²	0.3mrad

国内也研制出一些比较成熟的产品,比如:航天北控集团公司研制的船用卫星天线稳定跟踪平台。该平台用于我国南极考察船“雪龙号”上的“船载气象卫星云图接收系统”,该平台属于捷联式有源陀螺仪稳定平台,采用混合装架的三轴伺服机构,把驱动天线跟踪卫星的伺服机构和隔离船摇的伺服机构融为一体,通过高精度、高灵敏度的惯性测量元件敏感船摇,通过罗经变化和坐标变化计算得到船摇和方位的补偿角,利用天线本身的伺服机构改变天线指向。该平台的特点是响应速度快,船摇隔离比高,体积小,重量轻,稳定耐用。

电子科技集团 26 所研制的 CJWP 系列稳定平台是两轴(摄像机的纵轴、模轴)自稳定系统,由方位、俯仰、翻滚三轴及安装平台组成。包括两部分:伺服系统和电器控制柜。伺服系统设备主要包括平台伺服机械执行系统、平台转动机械执行系统、惯性传感器等;电器控制柜主要包括各传感器接口、信号采集、控制器、数据通讯设备以及主控计算机。二者之间通过采用双绞屏蔽电缆连接。安装在稳定平台纵轴、横轴(即摄像机纵轴、横轴)的纵横摇惯性组合传感器实时检测出

监视（摄像）机纵轴、横轴的摇摆倾斜角和摇摆角速率变化，模数转换器将其变化转换成数字信号，计算机计算出所对应倾斜角度的脉冲量经光电隔离送入相应的电机驱动器，使伺服机械转动机构作相反的转动，整个平台可以稳定在纵倾范围内的任何倾角上(摄像机俯仰角)，还可以进行手动方位回转，保证 360 度全方位的摄像。实物图与性能指标如图 4.6 和表 4.3 所示：



图 4.6 CJWP 系列监视稳定平台系统

表 4.3 CJWP 机载稳定跟踪平台系统性能简介

性 能	技 术 指 标
平台负载能力	$\leq 5\text{Kg}$
平台尺寸	$\leq \Phi 300 \times 250\text{mm}$
适应航速	$\leq 360\text{Km/h}$
转向速度	$\leq 10^\circ / \text{s}$
纵横摇范围	$\leq \pm 15^\circ$
俯仰角控制范围	$\leq \pm 15^\circ$
摇摆频率	$< 0.5\text{Hz}$
方位回转范围	$0^\circ \sim 360^\circ$
水平稳定精度	$\leq 0.3^\circ$
环境适应性	机载环境
供电	机载电源

但是与国外先进水平相比，在稳定跟踪平台的研制方面，我国仍处于起步阶段。特别是适用于机载遥感设备的稳定平台，国内市场主要还是瑞士 Leica 公司的 PAV30 占主导地位。

4.3 MADC 系统专用机载稳定平台的设计

多模态航空数字相机系统 (MADC, Multi-mode Airborne Digital Camera System) 的样机已于 2006 年 3 月通过了专家鉴定，系统的改进、测试及应用分析

评价还在继续进行，正进入系统的优化集成和完善阶段。

为了进一步获取实用性更强、精度更高、稳定性更好的航空数字图像，一个重要方向是要想办法克服或降低飞行平台（如飞机、飞艇、热气球等）在飞行时的振动对影像所带来的影响及产生的误差，提高 MADC 系统的成像精度和实用性，缩短 MADC 系统同国外同类产品的差距。

因此，急需为 MADC 系统研制和设计一套配套的机载航空稳定平台，使其可与遥感所“奖状”飞机等为代表的遥感航飞平台相匹配，从而提高相机系统几何成像的精度，获取更高质量的航空影像数据。在国外对我国 POS 系统以及精密陀螺仪等设备严格禁运的情况下，为满足 MADC 系统成熟化和产品化的要求，主要是通过购买关键部件（如高精度陀螺仪）后联合有关单位研制具有自主知识产权的机载航空稳定平台，使之能成为 MADC 系统的配套组件。

4.3.1 稳定平台的基本原理

在航空相机航空摄影作业过程中，飞机的飞行受气流、风向等影响，飞机会产生振动、滚动、俯仰、偏流，致使所摄图像模糊，利用稳定平台可以隔离和减弱这些不利因素对航空相机系统本身的影响，保持相机与飞机平台的相对稳定。而且稳定平台还可与 GPS 或 POS 系统连接来采集拍摄点位置信息，供后期影像处理和航测内业使用。

稳定平台是任何指向传感器，包括航空和卫星照相机、扫描仪、军事上的精确跟踪和精确制导仪器等的关键部件。稳定平台系统由于在军事领域应用广泛，所以一般高精度稳定平台国外对我国是严格禁运的，所以高精度稳定平台的自主研制具有重要的意义。

目前，国际上比较先进和成熟的机载航空稳定平台大多为陀螺稳定平台。陀螺稳定平台，又称惯性平台，是以陀螺仪为核心元件，使被稳定对象相对惯性空间的给定姿态保持稳定的装置。稳定平台通常利用由外环和内环构成的万向支架支承，根据不同原理方案使用各种类型陀螺仪为元件。其中利用陀螺旋进产生的陀螺力矩抵抗干扰力矩，然后输出信号控制平台框架轴上的力矩器以产生力矩与干扰力矩平衡使陀螺仪停止旋进的稳定平台称为动力陀螺稳定器。陀螺稳定平台根据对象能保持稳定的转轴数目分为单轴、双轴和三轴陀螺稳定平台。陀螺稳定

平台可用来稳定那些需要精确定向的仪表和设备，如测量仪器、天线等，并已广泛用于航空和航海的导航系统及火控、雷达、照相系统。其基本工作原理如下：

如图 4.7 的装置中，平台 P 水平。当有干扰力 F 作用时，陀螺主轴以 β 角速度进动，产生 β 角后，稳定电机发出稳定力矩与干扰力矩平衡，因而平台 P 永保水平。

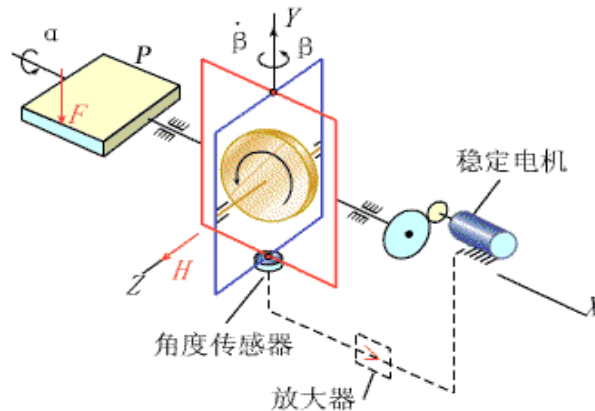


图 4.7 陀螺稳定平台工作原理示意图

陀螺稳定平台多用于稳定运动载体（飞机、舰船、坦克等）上面的武器装备（炮、鱼雷发射器、导弹发射器等），近来又广泛应用于航空和航天领域。它分两轴和三轴，三轴式主要使用在航空、航天、军事等领域，它稳定性更好，技术难度更大，而两轴式的要相对更容易实现得多。

4.3.2 机载稳定平台的研制思路和设计策略

1、研制思路分析

从国内外稳定平台的发展状况来看，再结合 MADC 系统本身的特点，我们研制机载稳定平台的基本方法和技术路线如下：

- ✓ 通过惯性元件敏感载体的姿态角的变化，典型的惯性元器件有：速率陀螺、倾角计、加速度计。一般来说，惯性传感器是整个信号处理的前端，传感器的指标基本上决定了系统的性能。
- ✓ 飞机在运动过程中的姿态、航向是任意变化的，需要在运载体内部建立起导航坐标系。导航坐标系可通过两种途径建立起来：一种途径是将陀螺和加速度计直接固联在运载体上，通过对惯性传感器的输出作解算来获得姿态矩阵，并作导航解算，这类系统就是捷联式惯导系统，导航坐标系以数学平台形式体现。另一种途径是将惯性传感器安装在用三个环架支承起来的平台台

体上，通过控制台体的旋转使传感器的敏感轴始终与要求的导航坐标系重合，这类系统属于平台式惯导系统，导航坐标系以物理平台形式体现。

- ✓ 通常平台式稳定可分为双轴陀螺稳定平台、三轴陀螺稳定平台和四轴陀螺稳定平台。其中双轴陀螺稳定平台又分为两轴二环和两轴四环两类；由于两轴稳定平台固有的原理误差，它不可能完全隔离载体的扰动力矩。要完全隔离须采用三轴的陀螺稳定平台。还有一种方法是采用两轴四环的稳定平台，这两种方法在原理上可以完全隔离载体的扰动。
- ✓ 三轴平台是由单轴平台复合而成的，单轴平台的一些设计理论也适用于三轴平台，但也出现了许多特殊问题，如平台驱动信号的合理分配、基座角运动的耦合和隔离、陀螺输出轴的交叉耦合、三轴平台系统的交叉耦合等。
- ✓ 稳定平台的发展趋势主要有：进一步数字化；更精确、更灵活、体积能耗更小、价格更低、更易于操作；可靠性验证和研究尚需进一步加强。

2、拟采取的设计策略：

- ✓ 稳定平台的种类有很多，由于 MADC 系统是一套机载航拍系统，我们将从用于机载遥感的陀螺稳定平台入手。另外，我们也有相应的国外样机可以做设计参考（如瑞士徕卡公司的 PAV30 航空稳定平台）。
- ✓ 虽然感受姿态的传感器基本上决定了稳定平台的精度，但并不意味着就一定要去买精度最好的惯性器件。一是因为精度高的惯性器件往往价钱太高将导致研制成本的大幅增加；二是只要所用器件能满足实际所需要的技术指标即可，没有必要一味地去追求器件的高指标，从而保证有较好的性价比。而在实际应用中，航拍飞行的飞行条件往往会保证得比较好（尽量避开恶劣飞行条件的影响），这种条件下的机载稳定平台选用精度合适的传感器即可满足设计要求。
- ✓ 尽量做到较高程度的数字化、模块化、小型化和实用化。
- ✓ 基本指导思想：安全优于可靠，可靠优于性能，性能优于成本。即是在保证安全、可靠、性能指标的前提下，尽量降低研制成本。

4.3.3 机载稳定平台的具体设计

1、设计目标和基本技术指标

我们的设计目标是：研制一台能与 MADC 系统配套使用而满足航空拍摄实用的小型三轴机载陀螺稳定平台。该三轴机载稳定平台工作时，其稳定回路依靠惯性器件实时敏感载体相对惯性空间的偏离，通过稳定控制器进行实时纠正，保证成像传感器视轴和引起它抖动的各种干扰源相隔离，使其在惯性空间保持相同的角度瞄准方向而和载体的振动无关或者使其残余的晃动量保持在所允许的范围内，为 MADC 系统的面阵数字相机提供一个能获取稳定图像的平台，属于典型的机电控制系统。

拟研制的三轴机载稳定平台的基本技术指标如下表：

表 4.4 拟研制的机载稳定平台的基本技术指标

项目	技术指标		
	纵摇	横摇	航向
转动范围	$\pm 5^\circ$	$\pm 5^\circ$	$\pm 30^\circ$
最大角速度	$10^\circ /s$	$10^\circ /s$	$10^\circ /s$
定位精度	$\pm 0.5^\circ$	$\pm 0.5^\circ$	$\pm 0.5^\circ$
操作电压	23.5--29.5VDC		
最大电压波动	2VPP (peak to peak)		
最大功耗	400W		
平均功耗	150W		
在效载荷	20 kg~30kg		
平台自重	$\leq 34\text{kg}$		
机械外形尺寸	$\leq 665\text{ mm} \times 535\text{ mm} \times 150\text{ mm}$		
工作温度	$-20^\circ\text{C} \sim +50^\circ\text{C}$		
最高工作高度	15000 米		
初始化时间	$\leq 120\text{s}$		

2、 关键问题及解决方法

经过原理研究及与同类产品的对比分析，发现机载稳定平台设计的主要难点将体现在陀螺与倾角计信号漂移问题处理、动态环境下俯仰角、翻滚角、偏航角的高精度解析技术、适合机载稳定平台的控制算法设计及其实现、环架信号分配等几个方面。

(1) 陀螺信号漂移问题

速率陀螺输出信号的不稳定及噪声污染对系统的过渡过程和稳定精度会造

成严重的影响,因此对陀螺仪输出漂移误差和噪声的有效抑制是保证平台稳定性能的关键。陀螺的随机漂移往往是弱非线性、非平稳、慢时变的,且受到外部环境等多种不确定因素的影响,因此无法建立其精确系统模型,陀螺信号的输出受环境影响较大,事先不可能得到准确的统计特性,所建立的漂移模型也是时变的,必须在线地实时拟合其模型、辨识参数才能达到补偿效果,这在实时控制系统中难于实现;必须寻求简单实用的信号处理方法。

拟采取的解决方法:

陀螺随机漂移中含有较多的有色噪声,而小波分析特别适合于非平稳信号的处理,且具有较好的去噪效果,可以尝试用于陀螺信号滤波。

(2) 动态环境下俯仰角、翻滚角、偏航角的高精度获取问题

基于成本与体积的考虑,拟选取 MEMS 陀螺仪和倾角计。倾角计实质上是一个加速度计,用于静态环境下倾角测量,它以重力作为输入矢量来决定物体在空间的方向,利用重力加速度在各个测试轴上的投影来实现倾斜角的测试。当倾角计跟随被测物体处于非匀速运动状态时且有倾角,必然有运动加速度在重力加速度方向有投影。这必将使得倾角计测得的角度并不是纯粹重力加速度所导致,所以测量结果不准,增加了被测物体运动加速度在重力方向上的投影所带来的干扰。陀螺仪可以通过测量角运动速率来帮助纠正倾角计测量。但是,角速率陀螺有自己的弱点。角速率陀螺测量的是角速率,而不是旋转多少角度,需要通过随时间积分才能得到角度。角速率测量时的误差将会通过积分而得到积累、变大,直到大到不可以接受的程度。二者需要怎样配合起来,才能得到想要的动态环境下高精度角度测量结果,是研制机载陀螺稳定平台的一大难题。

拟采取的解决方法:

针对 MADC 系统的正常飞行航拍,我们设计的技术指标中俯仰翻滚的范围为 5 度,对应的重力加速度为 0.1g。所以要求测量俯仰、翻滚角度的两个加速度计的测量范围需大于 0.1g 即可。对角速率陀螺进行积分得到一个粗角度,将倾角计所得的角度乘上校正系数加到刚才角速率陀螺所得到的粗角度上实现校正。关键的地方在于校正系数的准确程度,需要通过实验来确定。它与要求的测量响应时间,以及角度的采样频率等参数都有关联。

(3) 适合机载稳定平台的控制算法设计及其实现

陀螺稳定跟踪平台属于快速伺服控制系统,其响应时间一般在毫秒级,对于

具有较大转动惯量的机械装置，如何解决先进算法应用和系统控制的实时性、快速性问题。

拟采取的解决方法：

首先通过比较成熟的 PID 控制算法来掌握整个系统的控制特性，再根据实验得出的结论进行分析，从而调整相应控制方法。另外，在飞机平台上安装惯性传感器进行动态预测也是用来提高精度的一种创新尝试。

(4) 环架信号分配

在传感器已能给出精确或是满足要求的角度信号的前提下，信号处理与控制部分要能使传感器信号得到正确的处理，使执行机构合理地执行。

假设飞机朝北飞行改向朝东飞行，由于几何约束关系，俯仰和横滚环均被顺时针带过 90 度，而方位环伺服控制回路隔离了这一转动而保持原来方位，于是俯仰陀螺现在感应的是横滚角度，横滚陀螺现在感应的是俯仰角度。如果此时飞机发生横滚，则俯仰陀螺感应到了，并发出控制信号，使俯仰环动作，而不是使横滚环动作，于是该纠正的没纠正，不该纠正的受到了扰动。环架结构示意图 4.8 所示。

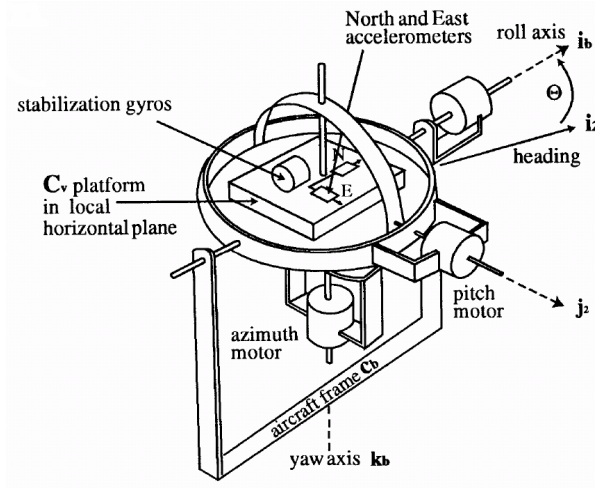


图 4.8 环架结构示意图

拟采取的解决方法：

方法 1：建立三轴陀螺信号分配矩阵，三轴信号分配应是偏航角信号、俯仰角信号以及横滚角信号的函数，根据内环、中间环，外环，与方位环、俯仰环、横滚环的对应关系建立的，函数应是不同的。这种方法建立的函数会有解，但算法复杂，适用于大角度转动范围的情况，如无人机、火箭等。

方法 2：横滚陀螺装在横滚环上（定为外环），将俯仰陀螺装在俯仰环上（定

为中间环)，方位陀螺装在方位环上（定为内环）。这种算法简单，正好适用于对横滚、俯仰只要求正负 5 度范围，方位只要求正负 30 度范围的我们拟研究的机载稳定平台的情况，从而会大大简化算法。

3、基本功能与总体方案

作为为 MADC 系统配套设计研制的专用航空稳定平台，在航拍时需要强调以下两点：

- ✓ 航空相机的角度摇摆要尽可能地小，以防在曝光时产生拖尾效应。
- ✓ 各相机光轴应尽可能地垂直。

无稳定平台和有稳定平台自动对准的效果对比如图 4.9 所示。

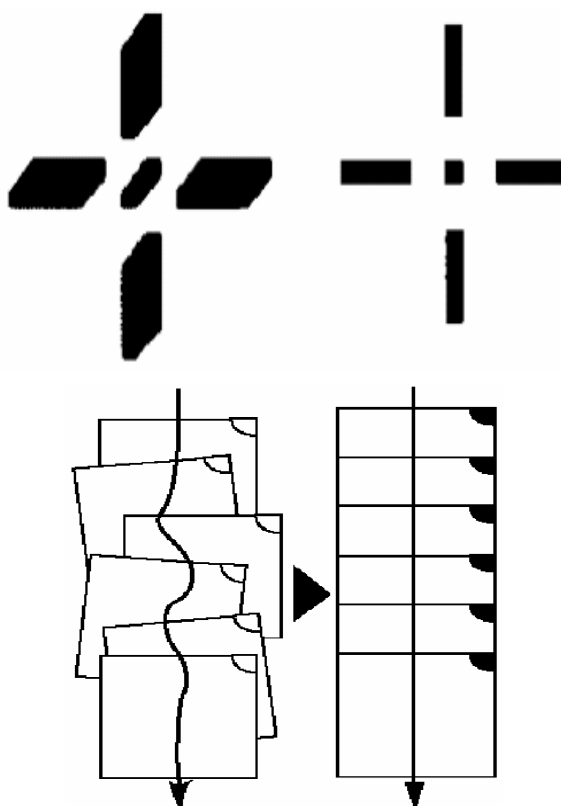


图 4.9 无稳定平台和有稳定平台自动对准的效果对比

设计的航空稳定平台系统基本功能如下：

- ✧ 保持在航向、纵摇、横摇三轴的稳定；
- ✧ 对高频振动有较好的隔离作用；
- ✧ 具有动态初始对准功能；
- ✧ 不正常状态下声光报警及其它安全保障措施；
- ✧ 安装，使用，维修方便；

◇ 系统总体希望尽量做到模块化与数字化。

模块化的好处是：提高兼容性，易于维护、扩展、升级和集成，使得系统的生命周期延长；减少稳定平台系统中机械部分、软件部分与硬件系统的关联性，以缩短后续产品的研制周期，降低升级成本，增加快速定制的可能性；更容易做到紧凑的高性能硬件、灵活的开发软件。可通过划分独立性较强的模块来实现模块化。

数字化的好处是：易集成化；易调试，易进行逻辑运算和判断，易更改控制算法与思想；抗干扰能力强，可靠性高，精度高；便于长期存贮；通用性强，成本低，系列多；保密性好。通过采用 DSP 芯片来实现信号处理与控制大量模块的数字化。

我们为 MADC 系统设计的机载稳定平台的工作条件是航拍飞行，其定义一般为：所有发生的角运动都小于或等于 $10^\circ / \text{s}$ 。角运动频谱特性如下图所示：

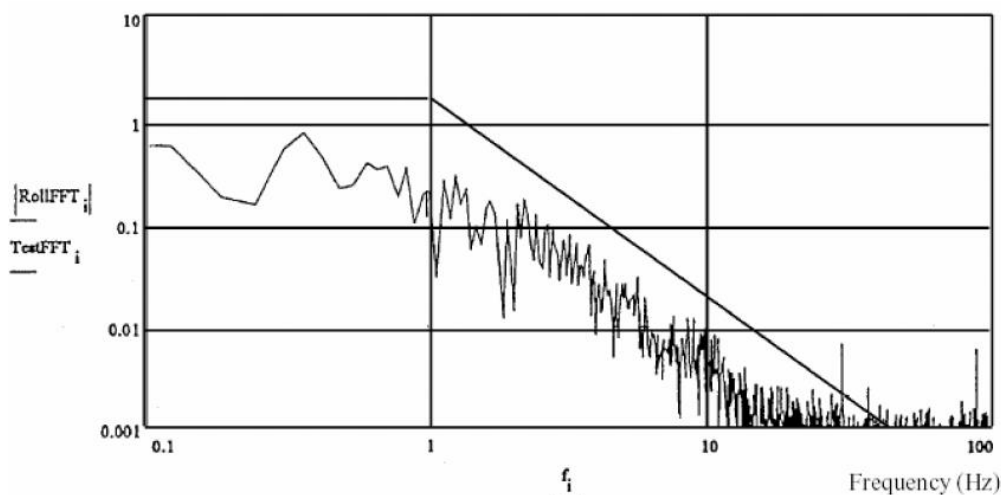


图 4.10 典型航拍飞行翻滚角运动频谱特性

从图 4.10 可以看出，由于航拍飞行对航拍相机带来的扰动主要还是在很低的频率范围。但这并不意味着稳定平台就没有较高频率的振动，因为相机系统安装基座、平台环架及其上的惯性仪表与负载是一个多自由度的弹簧-质量-阻尼系统，当激励频率和系统某阶固有频率相当时，将引起共振，所以仍需要隔振。

对于较高频率的振动，难以通过传感器感应，再将信号放大发给执行机构来消除；主要的解决办法还是通过弹簧和减震系统被动地吸收。值得注意的是基础激励频率和系统无阻尼固有频率之比要取得合适：太大，就意味着隔振装置要设计得很软，静扰力度很大，相应的体积很大，装置的稳定性差，容易受外界干扰

而摇晃；太小，则隔振效果不明显。阻尼的选择也要兼顾两方面，一方面要保证系统共振时振幅放大不多，另一方面又要有满意的隔振效果。

对于 MADC 系统工作时的一般情况（频率在 20Hz 以下），由飞机俯仰、翻滚、偏航带来的扰动，解决途径是通过陀螺仪传感器和马达构成的机电控制系统反向减小低频的俯仰、翻滚、偏航的角度摆动。

由此设计的机载稳定平台的电路实现框图如下：

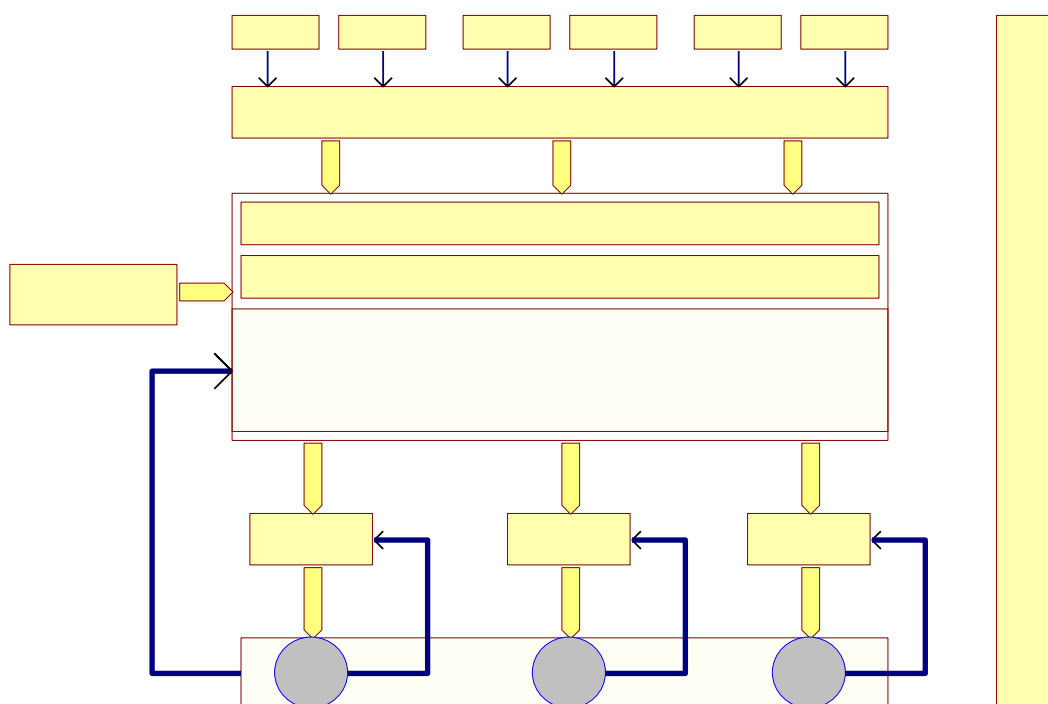


图 4.11 机载稳定平台的电路实现框图

4、系统模块功能划分

整个系统分为三轴稳定机构、信号处理、电机驱动、安全保障、电源五个功能模块。各个功能模块的功能定义说明如下：

（1）三轴稳定机构

- ✧ 纵摇轴运动范围 0-5 度，提供限位信号；
- ✧ 横摇轴运动范围 0-5 度，提供限位信号；
- ✧ 航向轴运动范围 0-30 度，提供限位信号；
- ✧ 能够提供绝对纵摇、横摇、航向角度信号；
- ✧ 提供弹簧和减震系统被动地吸收飞机的较高频振动
- ✧ 具有锁定机构；

- ✧ 提供三轴零位基准线及航向刻度指示线;
- ✧ 提供陀螺及水平仪安装其准面;
- ✧ 执行机构驱动;
- ✧ 合理的电气接口。

(2) 信号处理模块

- ✧ 传感器信号调理;
- ✧ 调理后的信号做 A/D 变换;
- ✧ 数字滤波;
- ✧ 数字 PID 控制;
- ✧ 位置修正、误差补偿与零敏度设定;
- ✧ D/A 变换后送执行机构。

(3) 电机驱动模块

- ✧ 正反转控制;
- ✧ 转速控制;
- ✧ 离合器控制;
- ✧ 编码器与霍尔元件接入;
- ✧ 自动、手动转换。

(4) 安全保障模块

- ✧ 电源监控: 监视电源是否在合适范围, 如果超出本平台调节能力, 自动断电并转为手动;
- ✧ 一定范围的故障诊断能力, 判断系统是否发生故障;
- ✧ 过流保护。

(5) 电源模块

输入 23.5V~29.5V 范围直流电压, 输出提供+5V, +12V 与-12V 直流电压供给系统各个部份, 带基本保护功能。

5、关键元件选择

(1) 高精度微机械陀螺仪 (HORIZON HZ1-100-100C)



图 4.12 微机械陀螺仪 HORIZON HZ1-100-100C

表 4.5 HORIZON HZ1-100-100C 性能指标

Power Requirements	HZ1-90-100A	HZ1-100-100	HZ1-100-100C (100B)
Input Supply Voltage	+8 to +15 VDC	+8 to +15 VDC	+8 to +15 VDC
Input Supply Current (max)	< 20 mA	< 20 mA	< 20 mA
Performance			
Range	±90°/sec	±100°/sec	±100°/sec
Scale Factor (±2%)	22.2 mV/°/sec	20.0 mV/°/sec	20.0 mV/°/sec (±1%)
S.F. Over Operating Temperature	< 0.08%/°C	< 0.08%/°C	< 0.08%/°C
Bias (initial offset)	+2.5 ±0.045VDC	+2.5 ±0.045VDC	+2.5 ±0.01VDC
Bias Stability			
Short-term (100 sec, constant temp)	< 0.05°/sec	< 0.05°/sec	< 0.05°/sec typical
Long-term (one year)	< 1.0°/sec	< 1.0°/sec	< 1.0°/sec
g Sensitivity (all axes)	< 0.06°/sec/g	< 0.06°/sec/g	< 0.06°/sec/g
Over Operating Environments	< 4.5°/sec	< 4.5°/sec	< 4.5°/sec
Linearity Error	< 0.05% of F.R	< 0.05% of F.R	< 0.05% of F.R
Output Noise (to 100 Hz)	< 0.025°/sec/√Hz	< 0.025°/sec/√Hz	< 0.025°/sec/√Hz
Bandwidth (-90° Phase shift)	> 18 Hz	> 50 Hz	> 50 Hz
Resolution and Threshold	< 0.004°/sec	< 0.004°/sec	< 0.004°/sec
Start-up time	< 1.0 sec	< 1.0 sec	< 1.0 sec
Operating Life	10 years typical	10 years typical	10 years typical
Environments			
Operating Temperature	-25° C to +70° C	-40° C to +71° C	-40° C to +71° C
Storage Temperature		-55° C to +100° C	
Vibration Operating		2 g _{rms} 20 to 2K Hz random	
Vibration Survival		10 g _{rms} 20 to 2K Hz random, 5 min/axis	
Shock		200 g pk, 2 ms, ½ sine	
Weight		< 60 grams	

(2) 水平传感器 (HLPLANNAR NS-15/E)

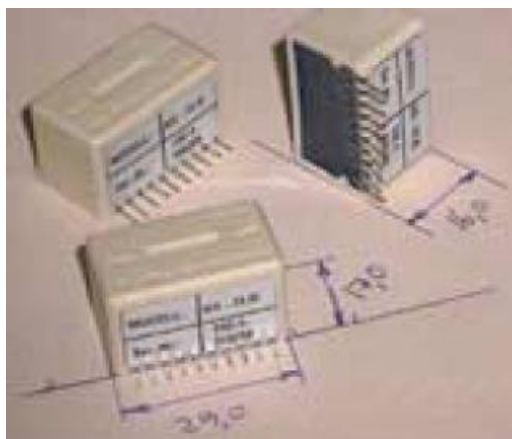


图 4.13 拟用的水平传感器 HLPLANNAR NS-15/E

表 4.6 水平传感器 HLPLANNAR NS-15/E 性能指标

Measurement range:	$\pm 5^\circ$	$\pm 15^\circ$
Scale factor:		1mV/0,01° $\pm 10\%$ (external adjustment is possible with Potentiometer)
Repeatability:		0,02°
Linearization Error:		
Range $\pm 5^\circ$		< 0,5%
Range $\pm 10^\circ$		< 1,5%
Symmetry Error:		< 1%
Zero point offset :		< 0,5° (external adjustment is possible with potentiometer)
Response time :		$t_{90} = 3,0s$
Cross axis sensitivity:		< 0,1° to $\pm 20^\circ$
Temperature coefficient:		
Zero point		< $5 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ/\text{K}$
Sensitivity		< $6,5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{K}$
Working temperature:		-25...+85°C
Storage temperature:		-40...+85°C
Weight:		20g
Supply voltage:		+5...24VDC
Current consumption:		ca. 5mA
Output voltage:	$\pm 3 \text{ V}$	$\pm 1,5 \text{ V}$

(3) 主控芯片 (TMS320F2812)

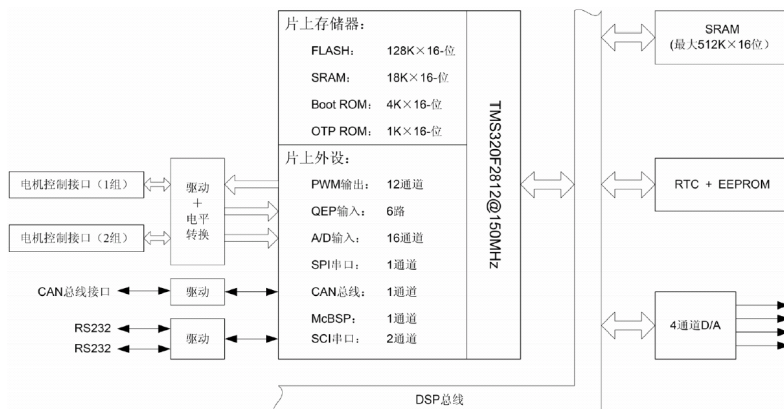


图 4.14 主控芯片 TMS320F2812



图 4.15 TMS320F2812 的开发板

4.4 机载稳定平台的研制进度

4.4.1 机载稳定平台的机械结构与加工

目前,为 MADC 系统配套研制的机载航空稳定平台的机械结构的设计工作已经基本完成,铸件初坯加工也已基本完成,正进入机械部件的精加工和设计电机的传动组件阶段,然后就是机械组装与调试。

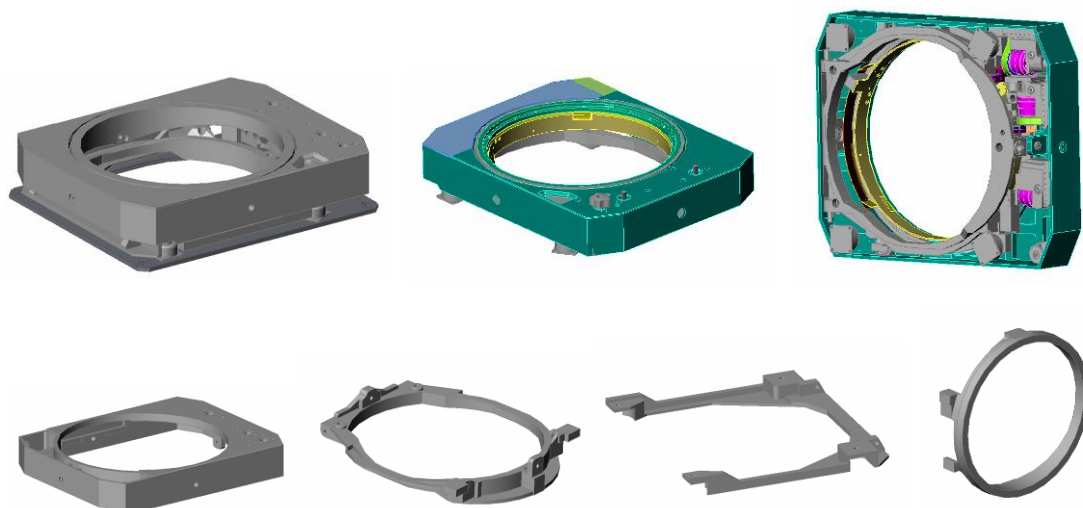


图 4.16 机载航空稳定平台已加工好的机械铸件初坯

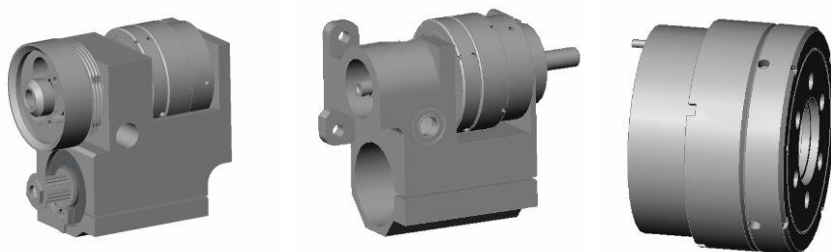


图 4.17 为机载航空稳定平台设计的电机传动组件

4.4.2 电路设计与电路板制作

在电路设计方面，已经完成设计和制作的有：电机驱动板、采集板、二级电源板、传感器板、电源接入板和开关面板的设计与制作。

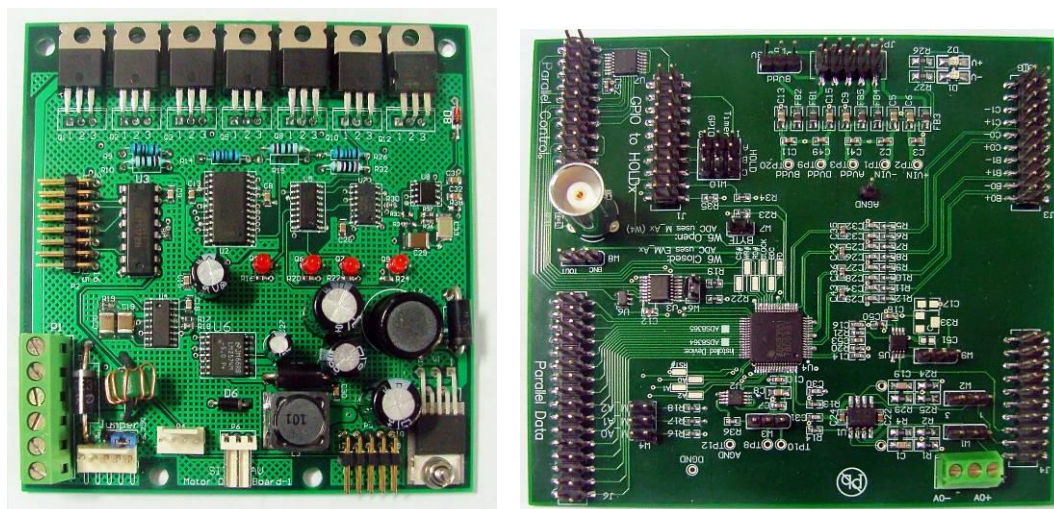


图 4.18 电机驱动板与采集板外观图

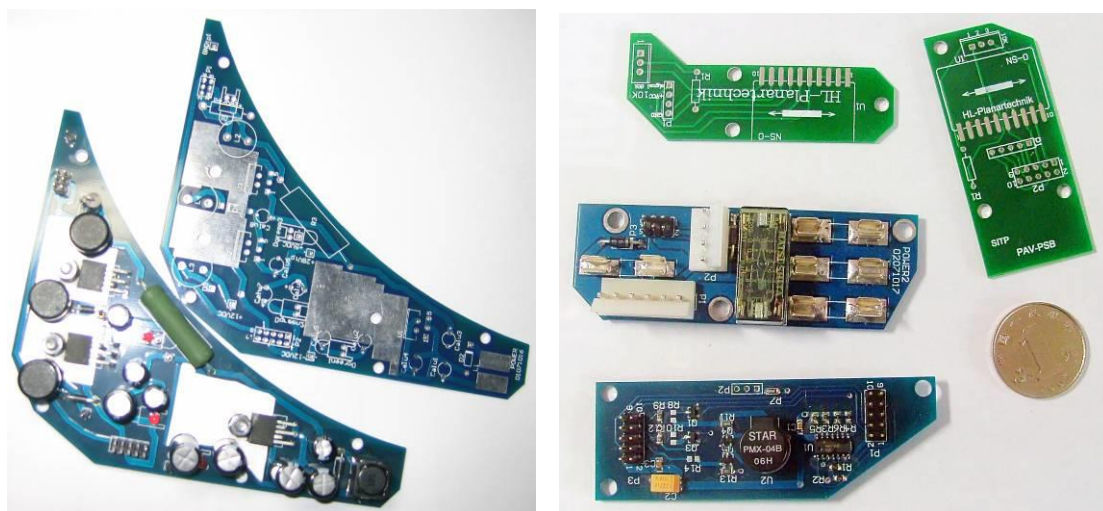


图 4.19 二级电源板、传感器板、电源接入板、开关面板外观图

4.5 本章小结

航空相机是装载在航空飞行平台上来进行航空拍摄的光学仪器。飞行平台的振动会通过航空相机的座架固定点传递到航空相机光学系统上而影响相机的成像质量。航空相机的振动环境十分复杂，在做出符合工程实际的假设前提下，可以得到振动对像点影响的一般规律，由此设计航空相机减震装置来减小或消除振动对相机成像质量的影响，能获得更清晰的航空影像。

机载稳定平台是装载在飞行平台上来对航空光学系统进行减振的装置，一直以来国内外对此都在进行着持续的研究和发展。我们为 MADC 系统配套研制和设计的航空稳定平台，使其在航拍工作时能够尽量减小飞行平台的振动对 MADC 系统成像质量的影响，获取更高精度的航空影像数据。在国外对我国 POS 系统以及精密陀螺仪等设备严格禁运的情况下，为满足 MADC 系统成熟化和产品化的要求，主要是通过购买关键部件后联合有关单位进行集成创新，发展具有自主知识产权的机载稳定平台。

本章还对机载稳定平台设计的基本原理、主要策略都进行了分析，并对具体设计时的技术指标、技术难点各功能模块功能、关键部件的选择以及目前的进展情况均作了详细描述。

第五章 MADC 系统像移补偿的实现

5.1 像移及其计算

5.1.1 像移的概念

在航空拍摄过程中，由于飞行器运动、振动和相机摆动等原因，使感光介质（如胶片、CCD 器件感光面）在曝光时被照物影像与感光介质间存在相对运动而带来的成像模糊即是像移（刘明，2004）。

飞机前向飞行产生的像移通常称为前向像移。除了前向像移外，在航空拍摄过程中，同时伴随有飞机姿态不同带来的随机像移，相机及其平台运动中受到震动产生的震动像移等。

像移是航空摄影中普遍存在的问题，像移的存在极大影响航空相机的成像质量，像移会使不同目标的影像相互混叠，影像的形状和色调发生变化，从而使图像边缘模糊，灰度失真，对比度和分辨率都下降。为了使 MADC 系统能获取质量更高、稳定性更好的航空数字图像，就需要采取合理有效的措施来进行像移补偿以消除或减小像移，提高系统的几何成像精度。

5.1.2 前向像移的计算

对于垂直拍照的航空相机来说，在其产生的诸多像移中，前向像移的影响最大；MADC 系统是垂直对地光侧。因此，下面章节将主要对前向像移进行讨论。

图 5.1 为前向像移的示意图。

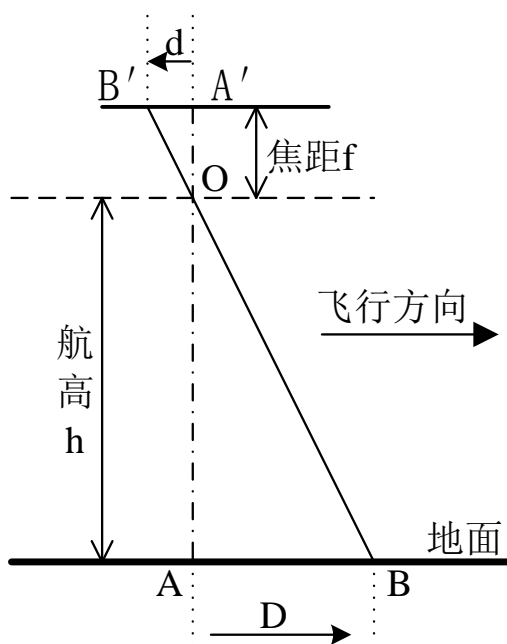


图 5.1 前向像移示意图

上图中，O 为镜头中心点， v 为飞机的航速， f 为相机镜头焦距， h 为飞行高度。
在曝光时间 t_0 内：

飞机飞行的距离： $D = |AB| = v \cdot t_0$

对应 D 的影像的位移： $d = |A'B'| = D \cdot f/h = v \cdot t_0 \cdot f/h$

于是，可得前向位移的计算公式：

$$d = f \cdot t_0 \cdot (v/h) = (f/h) \cdot t_0 \cdot v \quad (5-1)$$

式中 f 为相机镜头焦距， v 为飞机飞行速度， h 为飞行高度， t_0 为相机拍照时间（即相机快门曝光时间）， v/h 又被称作速高比， f/h 又被称作航摄比例尺。

由上述公式可知：前向像移的大小与镜头焦距、相机曝光时间、速高比是成正比的。在航空摄影时，如果保持摄影比例尺（ f/h ）不变，我们可利用飞行速度和曝光时间来控制影像位移量；飞行速度由飞机型号及空中风速决定，曝光时间由相机型号、光圈、天气光照条件、季节、不同区域、不同地物反射率及感光度等多因素来进行合理设定。

对于 MADC 系统，利用公式（5-1），在镜头焦距固定为 80mm 时，针对飞行时不同的速高比，可算得在几种典型飞行平台上的像移量：

表 5.1 MADC 系统前向像移计算表

(CCD 像元数: 4096×4096 ; 像元大小: $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$; 镜头焦距: $f=80\text{mm}$; 像移单位: μm)

速高比	曝光时间				备注	
	t=1ms	t=2ms	t=4ms	t=8ms		
1/10	8	16	32	64	直升机: $v=180\text{km/h}$, $h=500\text{m}$	飞机特殊 情况下飞 行产生较 大像移
1/12	6.7	13.3	26.7	53.3	奖状: $v=600\text{km/h}$, $h=2000\text{m}$	
1/15	5.3	10.7	21.3	42.7	运12: $v=240\text{km/h}$, $h=1000\text{m}$	
1/18	4.4	8.9	17.8	35.6	运5: $v=200\text{km/h}$, $h=1000\text{m}$	
1/20	4	8	16	32	运5: $v=180\text{km/h}$, $h=2000\text{m}$	飞机正常 飞行时像 移较小
1/24	3.3	6.7	13.3	26.7	直升机: $v=150\text{km/h}$, $h=1000\text{m}$	
1/30	2.7	5.3	10.7	21.3	运12: $v=240\text{km/h}$, $h=2000\text{m}$	
1/36	2.2	4.4	8.9	17.8	奖状: $v=500\text{km/h}$, $h=5000\text{m}$	

5.2 常用像移补偿方法

5.2.1 像移补偿的要求和效果评价

1、像移补偿系统的要求

为成像系统（如航空相机）设计像移补偿系统时，通常应考虑满足以下几方面的要求（谢尔巴科夫，1985）：

- ✓ 保证像面上各点的补偿精度即像移补偿残差在允许范围内（通常为 0.3 像元）；
- ✓ 像移补偿系统不能影响成像系统其他部分的工作；
- ✓ 不能降低成像系统总的成像质量，即不能导致离焦、降低透光率等现象的发生；
- ✓ 在像移补偿速度范围内，尽可能采用不需外加设备或复杂人工干预的简单补偿方法，以利于安装、操作与维护。

2、像移补偿效果的评价

像移对成像系统像质的影响可以用像移量的大小来衡量；像移量越大，则表明图像退化越严重。假设像移的速度 v_i 为匀速， t_0 为曝光时间，则曝光时间内的像移量大小 s 可用下式进行计算：

$$s = v_i \cdot t_0 \quad (5-2)$$

衡量像移对像质影响的另外一个指标是像移调制传递函数 MTF_v 。 MTF_v 可以表示为:

$$MTF_v = \sin c(fs) = \sin(\pi f v_i t_0) / (\pi f v_i t_0) \quad (5-3)$$

其中, f 为图像的空间频率。

MTF_v 的值越大, 则说明运动像移对图像质量的影响越小, 图像越清晰。如果航空相机和地面目标之间相对静止, 此时没有像移 (即 $s=0$), MTF_v 取得最大值1。多数成像系统都要求 $MTF>0.64$ (Wulich D, 1987), 由公式 (5-3) 可得 $f<2/s$ 。这说明如果像移量为 s , 那么系统就不能正确分辨空间频率超过 $2/s$ 的图像。

5.2.2 像移补偿方法分类及介绍

1、像移补偿方法的分类

由不同原因引起的像移一般会采用不同的补偿方法, 不同的补偿方法有各自的特点及应用范围。按照像移补偿系统重点装置或方法构成性质可以分为以下几类:

(1) 机械式像移补偿法

利用机械结构在曝光时随影像运动方向移动感光介质的补偿法称为机械式像移补偿法。它要求介质运动矢量与光学影像运动矢量的大小、方向一致且系统的制作精度要求非常高、运行必须稳定可靠。该补偿法适用于地球转动、飞行器横滚、俯仰和相机扫描引起的像移, 主要用在胶片式垂直照相相机上。美国的 KA-112A 航空侦察相机用移动胶片法消除扫描和横滚造成的像移; 我国某航天飞行器上的相机也用到了此方法减小像移。机械补偿法优点是感光面上各点的补偿速度一样且没附加系统, 但对结构的运行及制作精度要求高、需大功率传动装置, 限制了它在航相机特别是广角镜头相机上的应用。

(2) 光学式像移补偿法

按照与相机焦面上像移速度一致的原则旋转或移动光路元件以改变光线方向的补偿法即光学式像移补偿法。目前常用旋转物镜前方的回转反射镜补偿前向像移。此补偿法的反射镜体积小、重量轻且易控制, 除补偿前向像移外还能补偿俯仰和偏航引起的像移, 主要用在长焦距全景相机上。上述 KA-112A 航空侦察相机和美国芝加哥航空工业公司 20 世纪 80 年代初研制的 KS-146 长焦航空相机

都采用了这种补偿方法，该补偿法目前已经广泛应用于多种成像系统中。

(3) 电子式像移补偿法

电子式像移补偿方法主要是针对 CCD 相机利用一系列 CCD 电荷转移驱动技术来控制 CCD 曝光的补偿法。目前国内外采用的电子式像移补偿法有真角度像移补偿法和阶梯式像移补偿法等。阶梯式像移补偿法的组合列划分得越多，像移补偿精度越高；反之精度越低。该方法除已应用在美国 CA.260、CA.270、CA-290 等电光分幅式航空侦察相机上之外，还大量应用于面阵 CCD 数字相机系统的像移补偿中。

(4) 图像式像移补偿法

图像式像移补偿通常又叫做软件补偿法，其基本原理是：

令对应坐标点 (x, y) 的原始图像灰度为 $g(x, y)$ ，退化函数是 H ，噪音为 $n(x, y)$ ，退化后灰度为 $f(x, y)$ ，则可建立像移导致图像退化的数学模型,表达式为

$$f(x, y) = H \cdot g(x, y) + n(x, y) \quad (5-4)$$

依据以上公式，可设计程序由退化图像来进行图像恢复而完成像移补偿。图像式像移补偿法是对已有数字图像的处理，所以一般应用在 CCD 数字相机上，且因为目前解算的实时性不好而只用在事后图像复原和分析上。但随着 DSP 等快速高效器件的推广使用，这种方法有望很快用于准实时地对 CCD 数字相机进行像移补偿。

2、几种常用的像移补偿方案

(1) 缩短曝光时间补偿法

为了进行像移补偿，最早使用了最直接的缩短曝光时间的方法。由公式 (5-3) 可知，在实际应用的时间范围内，缩短曝光时间可以使像移量 s 减小，像移调制传递函数 MTF_v 增大，图像更为清晰。

缩短曝光时间对沿飞行方向和垂直于飞行方向的像移都有补偿作用，但带来的负面影响是使输出信号的信噪比降低。一个 CCD 像元在积分时间 t 内的有效信号振幅 ΔN_s (蔡文贵，1992) 为：

$$\Delta N_s = CHAS t / q$$

总噪声 N_n 为：

$$N_n = (HAS t / q + N^2)^{1/2}$$

则信噪比 SNR 为:

$$SNR = \frac{\Delta N_s}{N_n} = \frac{CHASt}{q \cdot (HAS t / q + N^2)^{1/2}} \quad (5-5)$$

其中, H 为辐照度; A 为像元面积; S 为 CCD 的光响应度; C 为场景的反差比; N 为该像元中除了散粒噪声以外的其它噪声源引起的有效均方根噪声; q 为电子电荷量。

由公式 (5-5) 可知, 缩短曝光时间, 有效信号幅值和总噪声都将减小, 但有效信号幅值减小更快, 故信噪比随之降低。受到系统最小信噪比的限制, 曝光时间不能无限缩短 (童子磊, 2005), 所以采用这种方法来进行像移补偿对像质的改善是有限的, 很多时候, 很多时候达不到像移补偿要求的精度。

(2) TDI CCD 补偿法

Carl Zeiss Jenda 于 1982 年提出前向运动补偿 (Forward Motion Compensation, FMC) 技术。FMC 技术采用 TDI CCD 器件, 多级像元对同一目标多次曝光, 并将信号电荷进行累加以提高信号强度。

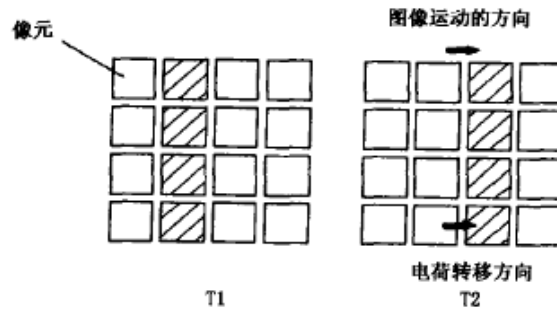


图 5.2 TDI CCD 补偿原理图

TDI CCD 补偿的原理如图 5.2 所示。在 T1 时刻对地面目标曝光, 目标成像在 CCD 阴影所示的像元上 (左图)。曝光结束后的 T2 时刻, 由于相机随飞机一起运动, T1 时刻目标所成的像移动到右图所示阴影部分的下一级像元上, 同时控制时钟使 T1 时刻的成像电荷包也移动到下一级像元, 对同一目标继续曝光。依此类推, 当最后一级像元曝光结束后, 输出的信号为全部 TDI 像元对同一目标的积分电荷之和。普通 CCD 的输出信号 S_0 的大小正比于输入照度 H 和积分时间 t:

$$S_0 \propto Ht$$

而 M 级 TDI CCD 的输出信号 S_{m0} 为:

$$S_{m0} \propto MHt$$

由此可知M级TDI CCD的输出信号提高了M倍，而其几何分辨能力保持不变。用TDI CCD进行像移补偿时，必须使目标图像在像平面上的移动速度与电荷包的转移速度同步，只有这样才能保证各级TDI像元对同一目标依次曝光，并最终输出同一目标的累加电荷信号，从而提高光电灵敏度和图像质量。若目标图像在像平面上的移动速度不等于电荷包的转移速度，将引起像移调制传递函数MTF的退化。设一次TDI转移的时间为 t ， d 为TDI CCD相邻两级像元的中心距， v_e 为电荷包的平均速度， v_i 为目标在像平面上移动的平均速度，则一次电荷转移的速度失配可表示为：

$$\Delta v = |v_e - v_i|$$

经过 M 次 TDI 转移后像移量为：

$$s = M \cdot \Delta v \cdot t = M \cdot \Delta v \cdot d / v_e \quad (5-6)$$

将上式带入公式（5-3）式可得由非同步效应引起的MTF退化为：

$$(MTF)_{\Delta v} = \frac{\sin(\pi f d M \frac{\Delta v}{v_e})}{\pi f d M \frac{\Delta v}{v_e}} \quad (5-7)$$

由于图像的移动是连续的、两维的，而TDI CCD的电荷转移是离散的、一维的，它也只能对图像作一维的离散像移补偿。因此即使在速度完全同步的条件下仍然存在像移问题。对于P相TDI CCD，在连续两次电荷转移之间像运动的距离为 d/p ，由此引起的MTF退化为：

$$MTF_{disc} = \frac{\sin(\pi f \frac{d}{p})}{\pi f \frac{d}{p}} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2} \frac{f}{f_n} \frac{1}{p})}{\frac{\pi}{2} \frac{f}{f_n} \frac{1}{p}} \quad (5-8)$$

其中， $f_n=1/(2d)$ ，称为Nyquist极限频率。

此外，由于TDI CCD的级数是有限的，使得信噪比的提高也受到限制。

（3）全帧转移/帧转移补偿

这种像移补偿方式是采用面阵全帧转移CCD或帧转移CCD器件对像移进行补偿。全帧转移CCD补偿最先由Andre G. Lareau等人1992年在其专利中提出，该方法可以针对不同的像移速度进行补偿。美国的F14战机曾用此方法做过军事侦察实验，取得了较好的结果。全帧转移CCD补偿的原理如下图所示：

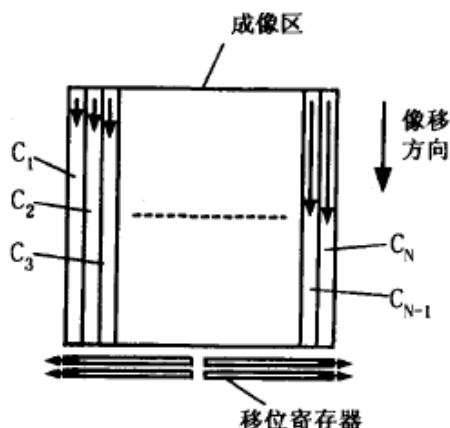


图5.3 帧转移CCD像移补偿原理图

CCD的成像区由二维排列的光敏单元组成，将所有光敏单元按列分成若干组，每组由若干列光敏单元组成。假设分成 N 组，如图5.3中的 $C_1 \sim C_N$ 。又假设在对运动目标成像时，所成的像在成像区有沿图示方向的运动。如果使成像电荷包在驱动时钟的驱动下与像移同步运动，就可消除像移的影响。如果不同组的像移不同，可以对不同的组设置各自的控制及时钟驱动电路（同一组内各列的控制和时钟驱动电路是相同的），使电荷包转移速度与像移速度同步，以消除像移影响。组划分得越多，补偿效果越好，但系统越复杂。一般对5000列左右的光敏元，划分为16组就可以取得较好的补偿效果。图5.4以三相CCD为例，说明了上述补偿方式的电路原理。

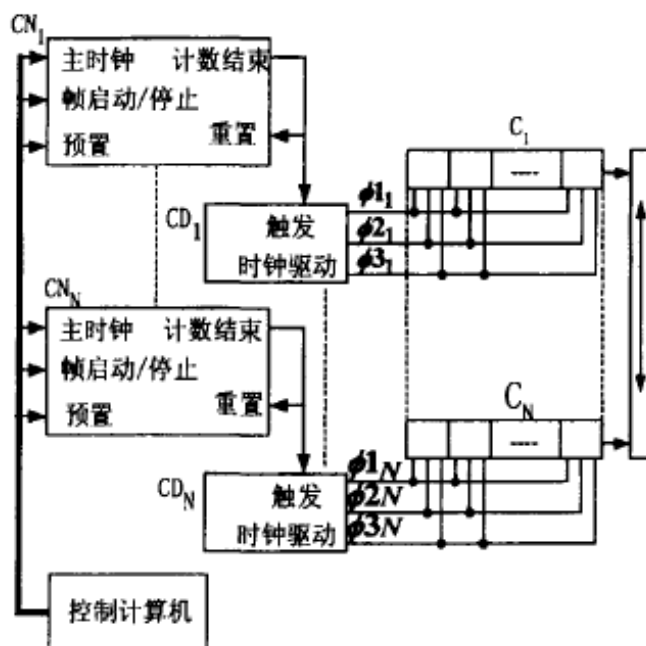


图5.4 帧转移CCD像移补偿方法的驱动时钟图

每一组光敏元 C_i ($i=1 \sim N$) 都有一个计数器 CN_i 和一个时钟驱动器 CD_i 。控制计算机产生主时钟信号、帧启动/停止信号、预置数信号。相机曝光期间，计数器

对主时钟信号计数。当计数值和预置数的值相等时，则产生一个触发信号，启动时钟驱动电路产生三相驱动脉冲 Φ_1 、 Φ_2 和 Φ_3 ，使该组的电荷包沿像移方向转移一行。转移结束后，时钟驱动电路重置计数器的计数值，准备下一轮转移。改变计数器的计数值，就可以改变电荷包转移的速度，使之保持和像移速度尽量同步。

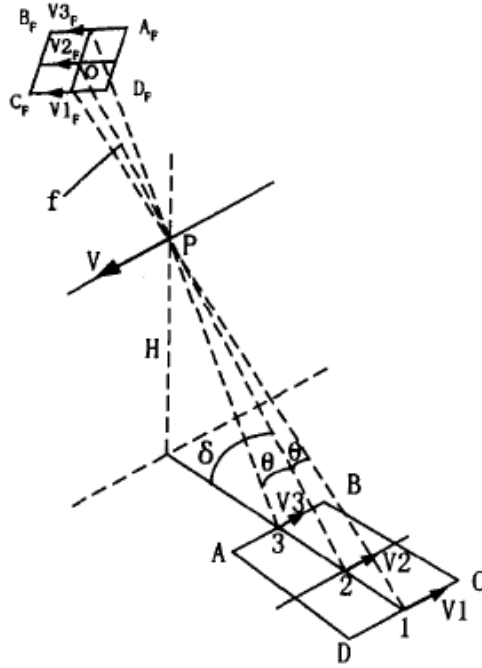


图5.5 帧转移CCD的像移

在图5.5中，设飞行高度为 H ，飞行速度为 v ，成像系统的焦平面为 $A_F B_F C_F D_F$ ，焦距为 f ，焦平面的法线 OP 和水平面之间的夹角为 δ ，焦平面在地面的成像区域为 $ABCD$ 。成像区域的任意一点 I 在焦平面上的像移 v_{iF} 可用下面的公式计算出来：

$$v_{iF} = f \frac{v}{H} \frac{\sin(\delta \pm \theta)}{\cos \theta} \quad (5-9)$$

其中， θ 是 IP 和 OP 之间的夹角。例如图中点2的像移为：

$$v_{2F} = f \frac{v}{H} \sin \delta$$

点3的像移为：

$$v_{3F} = f \frac{v}{H} \frac{\sin(\delta + \theta)}{\cos \theta}$$

设CCD光敏元的中心距为 d ，则为了补偿像移，单位时间内CCD需要转移的行数（即时钟驱动器 Cd_i 的触发次数） M_i 为：

$$M_i = v_{iF} / d \quad (5-10)$$

若主时钟的频率为 f_m ，则计数器 CN_i 的计数值 N_i 为：

$$N_i = f_m / M_i \quad (5-11)$$

曝光结束后，根据曝光期间各组CCD转移行数的不同，采用不同的转移速度（即各计数器采用不同的计数值），使同一行CCD同时到达移位寄存器后读出。

2002年，Gaylord G Olson又提出了一种用帧转移CCD进行像移补偿的方法。全帧转移CCD或帧转移CCD像移补偿的原理类似于TDI CCD，而且和TDI CCD补偿类似，帧转移CCD补偿只能对一维像移作离散补偿。

（4）光机补偿

光机补偿通过调整CCD相机的光学零部件、焦平面或整个相机的位置，使CCD在曝光时间内始终对同一地面目标成像，从而消除运动产生的像移。

✓ 摆镜补偿法

摆镜补偿方法在1998年由K. Briel3等人在其专利中提出。摆镜补偿的系统原理如图5.6所示。

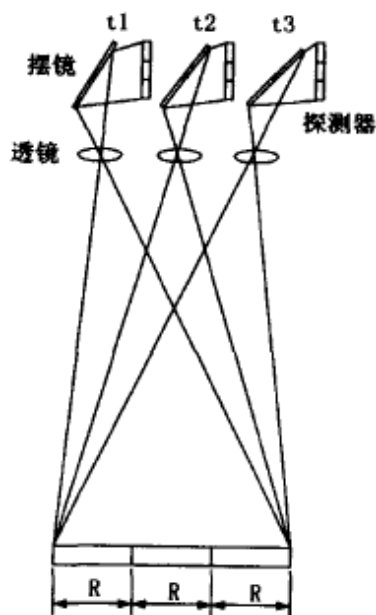


图5.6 摆镜补偿原理图

设补偿系统采用 n 线阵CCD(图中 $n=3$)，每个单线阵CCD对应地面区域 R 成像， n 线阵CCD的成像区域为 nR 。在CCD和透镜之间放置一摆镜。在 T_1 时刻，摆镜使CCD对地面的 nR 区域成像；在 T_2 时刻，成像系统沿航迹方向前移动了距离 R ，同时摆镜转过一个角度，使CCD仍然对地面相同的 nR 区域成像。在 T_3 时刻，根据系统在航迹方向的运动，摆镜又转过一个角度，成像区域仍保持不变。这样采用 n 线阵

CCD成像系统的曝光时间为单线系统的 n 倍。曝光结束后，图像信号被读出，摆镜返回 T_1 时刻的初始位置，开始下一轮 nR 区域的成像。

假设飞机飞行的速度为 v ，飞行高度为 H ，相机的焦距为 f ，曝光时间为 t ，则曝光时间内的飞机的位移 L 为：

$$L = v \cdot t$$

如果在扫描方向上摆镜由前向后扫描(和飞行的方向相反)，摆镜摆动的角度 θ 由下式确定：

$$\tan \theta = v \cdot t / H$$

一般 θ 比较小，故：

$$\theta \approx v \cdot t / H \quad (5-12)$$

因此摆动角速度：

$$\omega = \theta / t \approx v / H \quad (5-13)$$

这样，就可以使飞机飞行所造成的前向像移与摆镜摆动所产生的后向像移相互抵消，达到提高成像精度的目的。

上述系统的补偿运动是依据设定的飞行高度、飞行速度进行控制的。由于设定值和实际值存在误差，而且只能对飞行方向的像移（前向像移）作一维补偿，这种措施并不完全适用于高分辨率成像系统。要想进一步提高和改善补偿效果，可以用POS等测量系统测出飞行器的高度和速度，对摆镜进行闭环控制，但这样会大大增加系统的复杂程度和成本。

✓ 移动焦平面补偿

2001年，K. Janschek等提出了一种根据图像反馈信号来控制焦平面的位置，从而对像移进行补偿的装置，如图5.7所示。

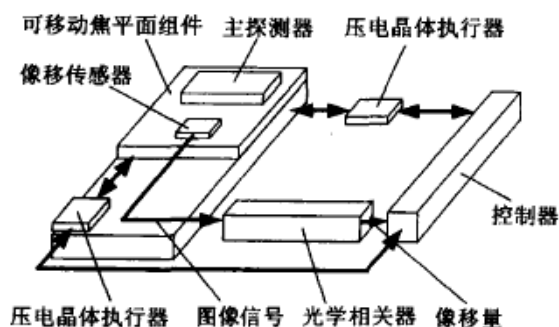


图 5.7 移动焦平面像移补偿示意图

在上图所示的移动焦平面补偿系统中，主探测器焦平面是两维运动的，可以

对像移进行两维补偿。像移传感器由较小的CCD或CMOS器件构成，装在成像系统的焦平面上。它对目标成像后，能够以很高的帧频输出。为了防止图像模糊，像移传感器获取图像的曝光时间很短，因此图像较暗，噪声也比较大。像移传感器输出的图像信号由光学相关器进行实时处理，测出相邻图像之间的位移并送给控制器。控制器根据图像位移值和位移传感器测得的焦平面位置值来驱动压电晶体，进而驱动焦平面运动，对像移进行补偿。这种补偿系统允许主图像传感器有较长的曝光时间，可以获得较高的信噪比，图像模糊和畸变均很小，同时降低了相机对高度变化的敏感性。

移动焦平面补偿后的像移量，等于光学相关器对图像位移的检测误差与可移动焦平面的位置控制误差之和。由于像移补偿的执行元件直接由图像运动传感器提供的图像信号进行反馈控制，补偿效果较好，能将像移量补偿到为0.5个像素之内。

5.3 MADC 系统的像移补偿方案

结合现已研制成功的多模态航空数字相机系统样机的实际情况来看，由于我们选用的 CCD 数码后背是封装好的定型产品，故不能采用内置式的光学式像移补偿方法（如推动焦平面补偿）和电子式像移补偿方法（如 TDI CCD 补偿和帧转移补偿）来对 MADC 系统进行像移补偿，于是为 MDC 系统设计像移补偿的方案时重点考虑的就是针对整套相机系统的外置式机械补偿法和针对所获取图像来进行后期处理的软件补偿法。

5.3.1 外置机械式像移补偿模块

1、外置机械式像移补偿模块方案的设计

国际上成熟的航空数字摄影系统均配备有相应的像移补偿装置，但它们采取的多是基于光学器件或电子器件的像移补偿方法，均是固化在数字相机内部的。MADC 系统样机还没有配套的像移补偿装置，并且由于我们采取的是购买整机进行系统集成的方式，所以在考虑像移补偿方案时确定采用外置部件来实现。

由于 MADC 系统的相机加上安装板约有 20 公斤重，故在参考摆镜式像移补偿法和凸轮旋转式像移补偿法的基础上，我们确定了与 MADC 系统配套的外置机械

式像移补偿模块的初步设计方案。该方案的主要的特点

- ✧ 利用外置式机械装置来推动整套相机系统的移动以实现像移补偿；
- ✧ 将线运动（像移）转化为角运动（转动整套系统），避开了系统总体重量偏大的难点；
- ✧ 利用高精度微米促动器作为核心器件，保证了补偿精度和控制精度；
- ✧ 器件和配件购买、加工、安装简单，成本预算合理。

该方案的基本原理可描述为：

将 4 台相机和 POS 系统的惯导装置（IMU）一起刚性安装固定在一块大的安装板上，沿安装板中心做一条转轴；将精密直线微米触动器通过促动头装在安装板一端靠近边缘处，微米促动器的另一端固定在机舱地板上。在 MADC 系统航拍作业过程中，对于飞机前向运动产生的前向位移，可以通过控制器控制电压的变化来控制微米触动器促动头伸缩对应的长度，以此产生的推/拉力来转动安装板，使之绕转轴旋转一定的角度；该角度变化折算到相机成像面的方向位移变化可以抵消前向像移，从而完成了对前向像移的补偿。由于 MADC 系统成像部分（相机整体）安装在这块大的相机系统安装板上，所以转动该安装板即等效于推动相机整体。

当为 MADC 系统配备该像移补偿装置后，其航拍作业的流程是这样的：

机载稳定平台与飞机对地光侧舱口紧密固定，这块大的安装板整个放在机载稳定平台之上。当 MADC 系统在某条航线中执行拍摄任务时，在相机接收到相机控制盒发出的曝光触发脉冲后，稳定平台先锁定然后再启动像移补偿系统进行反向旋转，像移补偿装置动作完成后相机快门才曝光拍摄；曝光完成后，像移补偿系统回拉安装板至正常位置，稳定平台解锁并为该航线中相机的下一次曝光拍摄作好准备。

图 5.8 和图 5.9 是外置式微米促动器补偿方案的原理示意图，图 5.10 是该方案安装方式示意图。

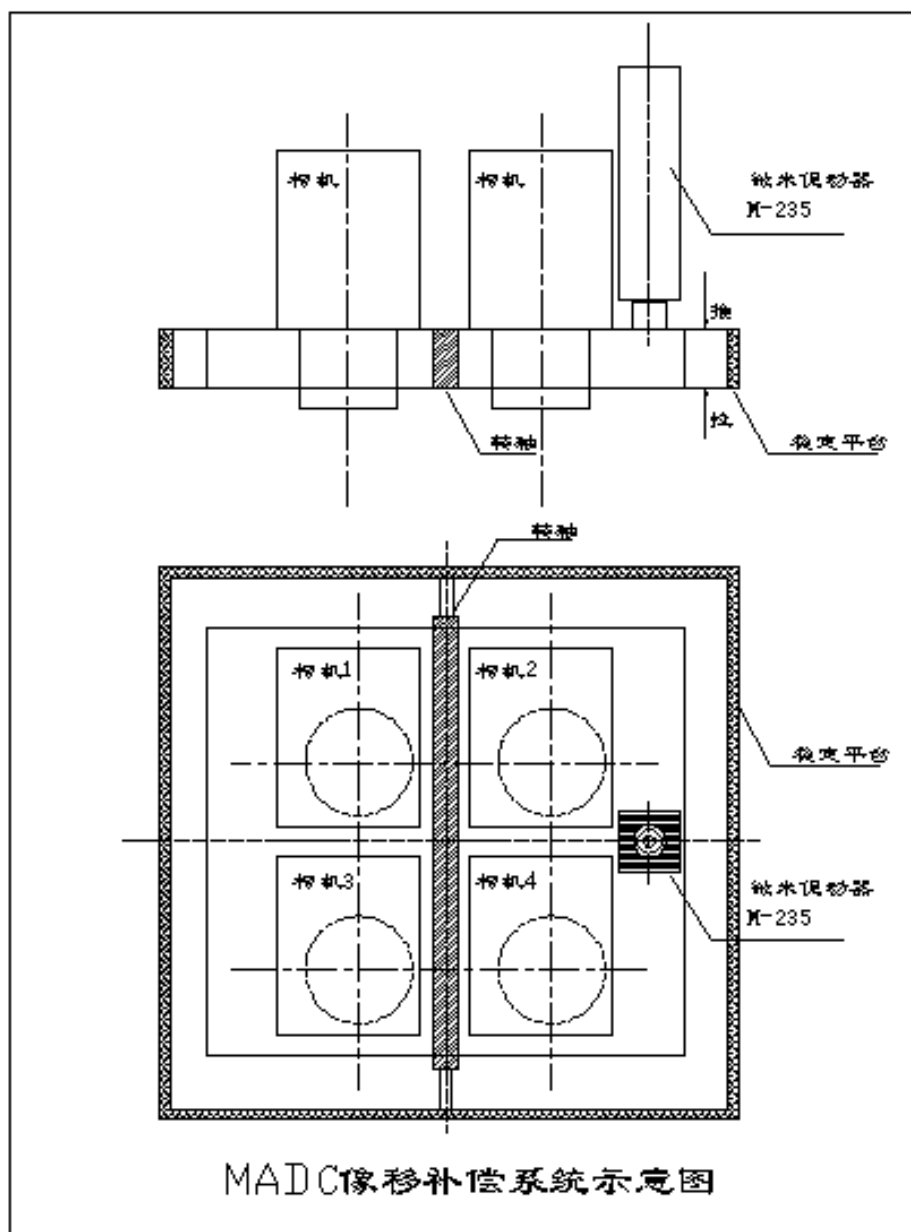


图 5.8 外置式像移补偿装置设计方案示意图

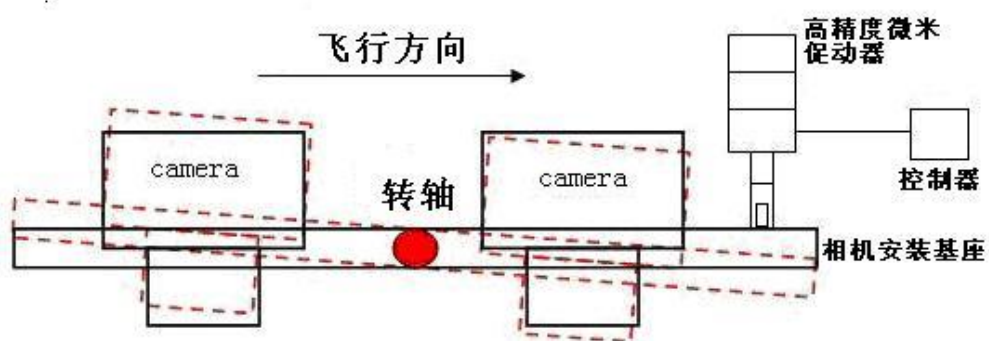


图 5.9 外置式像移补偿装置原理示意图

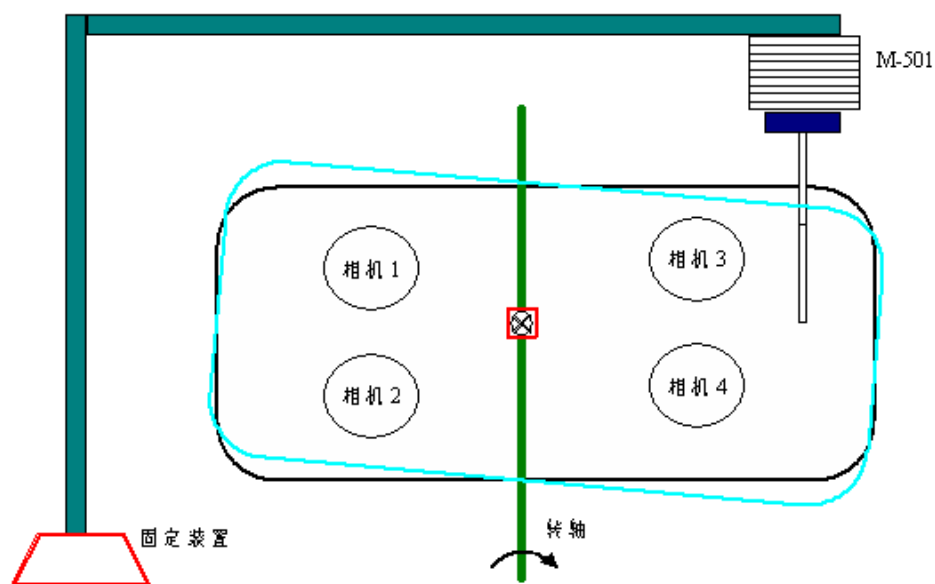


图 5.10 外置式像移补偿装置安装示意图

2、指标计算

(1) 主要设计指标

外置机械式像移补偿装置的设计指标为：

- ✧ 最大补偿距离：640 微米；
- ✧ 补偿速度：2-25 毫米/秒；
- ✧ 重复定位精度：0.5 微米；
- ✧ 像移补偿精度：0.5 像元。

(2) 补偿装置旋转角度的计算

MADC 系统安装基座的尺寸约为 340mm，假设转轴安装在基座的中心，微米促动器的促动头固定于基座某一端的边缘，则可认为旋转半径为 170mm。

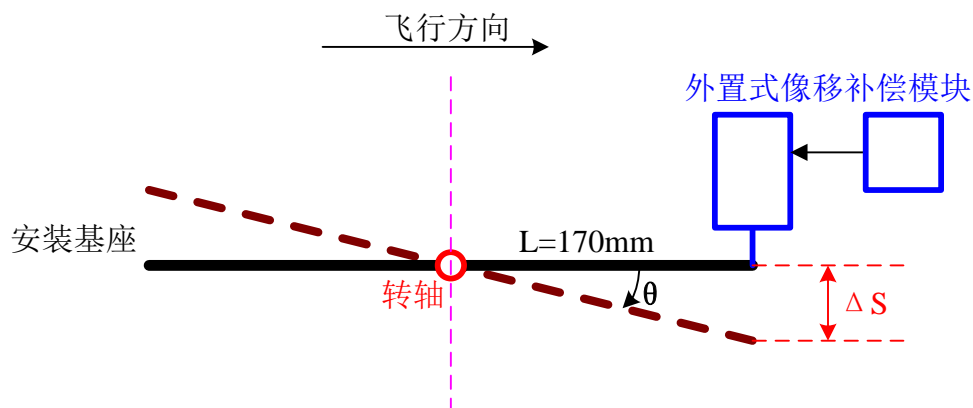


图 5.11 像移补偿装置旋转角度计算示意图

参照图 5.11，可以得到像移补偿装置需要旋转角度的计算公式：

$$\tan \theta = \frac{\Delta S}{L}$$

而 ΔS 就是曝光时间内焦平面的前向像移，用公式 (5-1) 带入可得：

$$\tan \theta = \frac{\Delta S}{L} = \frac{v}{h} \frac{f \cdot t_0}{L} \quad (5-14)$$

一般情况下，像移大小与旋转半径都相差几个数量级，所以 θ 一般都很小，可近似认为 $\tan \theta$ 就是 θ ，于是补偿角度的计算公式为：

$$\theta = \tan \theta = \frac{v}{h} \frac{f \cdot t_0}{L} \quad (5-15)$$

例如，参照表 1 的像移计算，当速高比为 1/10、 $t=4\text{ms}$ 、 $f=80\text{mm}$ 时的像移为 $32 \mu\text{m}$ 。此时，需要外置式像移补偿模块推动整套相机安装板旋转的角度越为 $38.8''$ (0.188 毫弧度)。

(3) 补偿速度的分析

对于外置式像移补偿模块所需要的补偿速度 v_{com} 可计算如下：

$$v_{\text{com}} = \Delta S / t_0 = f \cdot \frac{v}{h} \quad (5-16)$$

由此可以看出，当相机系统的镜头焦距一定时，补偿速度只与速高比的大小有关。例如，参照表 1 的像移计算，当速高比为 1/10、 $t=2\text{ms}$ 、 $f=80\text{mm}$ 时的像移为 $16 \mu\text{m}$ ，此时的补偿速度为 16mm/s 。

3、关键部件的选择

为了实现对 MADC 系统成像时的前向像移进行高精度的补偿，选择了高精度微米促动器 (M-235.5DD) 作为外置机械式像移补偿模块的核心器件。该器件的外观图和主要参数如下：



图 5.12 高精度微米促动器 (M-235.5DD) 外观图

表 5.2 M-235.5DD 主要参数表

最大行程	设计精度	最小移动量	重复定位精度	最大速率	最大推/拉力	最大切向力	编码器精度	电机额定功率
50mm	0.5 μm	0.5 μm	0.5 μm	30mm/sec	>50N	100N	2048counts/rev.	17W

与高精度微米促动器配套使用的核心部件还有控制器 (C-862)，其主要参数及外观如下：



图 5.13 控制器 C-862 外观图

表 5.3 C-862 主要参数表

功能描述	伺服特性	输出功率	编码器输入	电机制动输出	通讯接口	电机连接器
单机直流伺服电机控制器	31 位速度、加速度和位置计数器；16 位可编程 PID 控制器	单板： PWM15W	A/B 正交 TTL 信号；或 RS-422 差分模式；最大： 10^6 counts / sec	5V TTL	RS-232, 9-pin (m)	15-pin (f) sub-D

所选核心器件关键指标的分析：

- ✧ 行程：当曝光时间快于 4 秒时像移补偿要求的最大行程一般低于 40mm（见表 5.1）；M-235.5DD 最大行程可达 50mm，能满足要求。
- ✧ 移动速度：MADC 系统像移补偿要求器件补偿速度在 20mm/s 以上（绝大部分情况下）；M-235.5DD 移动速度可达 30mm/s，能满足要求。
- ✧ 精度：MADC 系统像移补偿要求精度 0.3 像元 ($\approx 3 \mu\text{m}$)，M-235.5DD 精度可达 0.5 μm ，精度指标远远高出。

5.3.2 外置式偏摆镜补偿方案

在航拍作业过程中，在相机曝光时间内，MADC 系统随着飞机前向移动而使被拍摄物产生相对移动，运用放置在镜头前的偏摆镜来改变入射光线的角度以保证相机镜头所获取的观测目标的图像是相对不动的，从而实现像移补偿的功能。该方案的示意图如下：

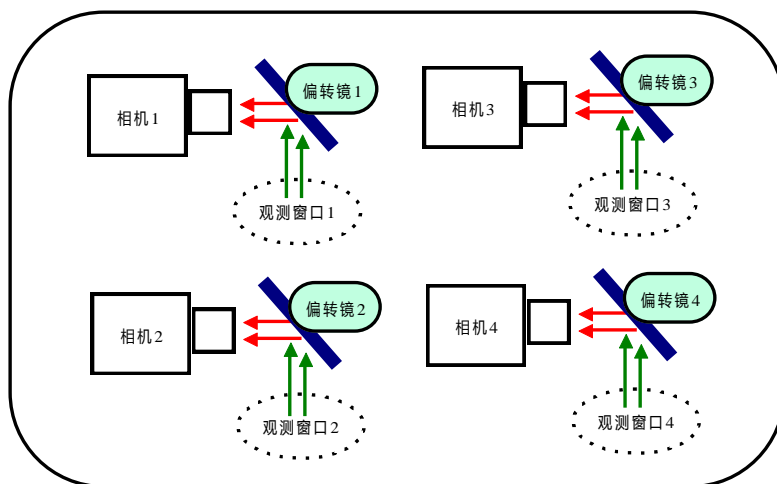


图 5.14 偏摆镜像移补偿方案示意图

该方案的主要器件包括偏摆镜、控制器机箱、放大模块、闭环控制模块、通道借口模块等。这种补偿方案的成本偏高，且研制起来存在相对较多的技术难点。所以，目前只是作为解决 MADC 系统像移补偿问题的备用方案来考虑。

外置式偏摆镜补偿方案的技术难点有：

- ✧ 偏摆镜在飞机上的摆放、安装与固定方式要求较高；
- ✧ 单台相机和整套系统的安装及固定方式将随之产生较大改动：如相机镜头垂直向下将改为相机镜头平放对准偏摆镜；相机系统安装板将扩大，两台相机之间必须留够偏摆镜安装的位置；增加了扩大后的总体安装板是影响下方的机载稳定平台设计的可能性；
- ✧ 导致系统结构变得更加复杂，制作成本增大。

5.3.3 软件补偿法

在 MADC 系统获取图像时可以使用外置式机械式像移补偿模块来对系统产生的前向像移进行补偿，在得到图像之后还可以采用软件补偿法来对一些像质下降严重的图像进行像移补偿。以获取图像时的同步硬件补偿法为主，以图像后处理

的软件补偿法为辅，硬件补偿法与软件补偿法相结合，将是今后我们解决多模态航空数字相机系统像移补偿问题的主要思路。

如 5.2.2 节所述，软件补偿法的技术难点在于退化函数 H 和噪音函数 $n(x, y)$ 的建立，这需要通过大量的实测数据并结合具体的数据获取环境来进行反演。编写实用的、适用的和通用的图像式像移补偿软件也是多模态航空数字相机系统产品化和成熟化的关键技术之一，决定着整套系统的推广和应用前景。

与硬件补偿方法相比有优势的是，国内外现在已经有很多相关软件和相关研究可以作为参考与借鉴，这将加快和促进与我们系统配套的图像式像移补偿法的编写及发展。同时要想实现准实时的像移补偿，DSP 等快速高效器件的发展趋势也是需要关注和研究的焦点。

目前，对 MADC 系统像移严重的典型图像的软件补偿工作，我们还主要是利用成熟的第三方图像处理软件（如 Envy、Erdas 和 Matlab 等）来进行的。随着针对 MADC 系统所获取的大像移航空影像的处理分析工作量的加大，迫切要求提炼和建立针对 MADC 系统航空影像的专用的大像移影像处理模型，从而进一步发展为成熟的像移补偿专用算法和软件。图 5.15 和图 5.16 是一幅利用 MADC 系统在汽车上获取的具有较大像移的图像经软件补偿法补偿前后的对比。可以看出，大像移图像经软件处理后，像移大量减小（已补偿到 0.5 像元），图像质量明显提高。

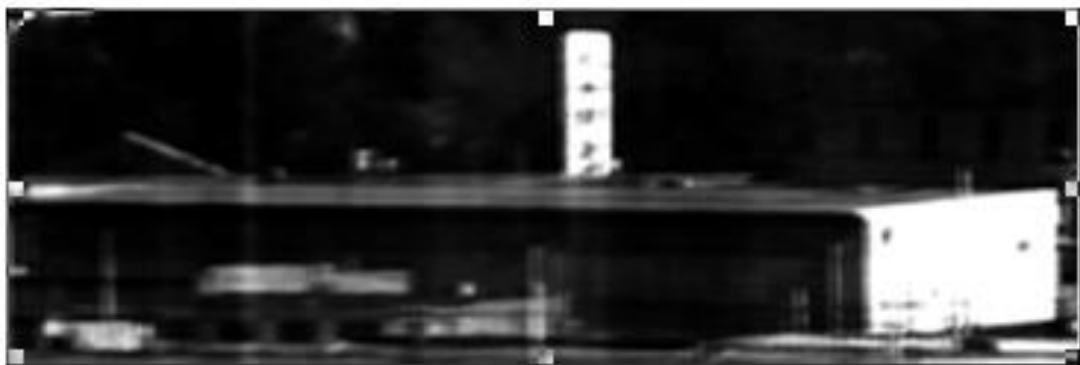


图 5.15 MADC 系统在汽车上获取的大像移图像未补偿时
($f=80\text{mm}$, $v=100\text{km/h}$, $h=100\text{m}$, $t=2\text{ms}$; 像移= $44.4\mu\text{m}$, 约 5 个像元)



图 5.16 MADC 系统在汽车上获取的大像移图像经软件补偿后
(经过软件补偿法补偿处理后, 像移减小到 0.5 个像元, 像质提高)

5.4 本章小结

像移是航空摄影中普遍存在的问题, 像移的存在会很大程度影响航空相机的成像质量。虽然像移的种类很多, 但是由飞机向前飞行产生的前向像移对垂直摄影的航空相机影响最大。像移补偿就是利用机械、电子、光学或软件等多种手段消除或减小像移。本章先简单介绍了像移补偿方法的分类, 然后较为详细的介绍和分析了几种目前常用的像移补偿方法。

MADC 系统是一种垂直对地观测的航空相机系统, 前向像移对系统成像精度和质量都有着严重的影响。为了统能获取质量更高、稳定性更好的航空数字图像, 就需要采取合理有效的措施来进行像移补偿以提高系统的成像精度。基于 MADC 系统样机的实际情况, 设计了利用高精度微米促动器结合控制器来构成外置机械式像移补偿模块的方案, 来实现对 MADC 系统的像移补偿。对该方案的基本原理、工作流程、重要指标设计和关键器件的选择都进行了详细的论述。最后, 还对利用软件法来对已经获取的航空影像中大像移典型图像进行补偿进行了分析。

第六章 总结与展望

多模态航空数字相机系统(MADC)是我国自行研制的具有自主知识产权的航空大面阵 CCD 数字遥感系统,它的成功研制对于我国的航空数字遥感技术的发展有着重要的意义。在已进行的多次航空遥感拍摄试验中,MADC 系统原理样机的硬件系统和软件系统都能够稳定持续地实现设计的各项功能,获取了大量高质量的航空遥感影像,系统所获取的多模态影像已经初步应用于制图、农业、城市和无人机遥感等多个方面。

本论文以 MADC 系统原理样机为基础,详细分析了系统机械设计与安装、航空摄影工作流程及图像处理等环节中影响系统成像几何精度的多个关键因素,并提出或设计了切实可行的解决方案来消除或降低这些不利因素的影响,以实现提高系统几何成像精度和改善图像质量的目的。主要包括:

- 1、为 MADC 系统设计了兼顾高精度和小型化的新型相机安装基座,采用高精度数控加工技术来提高相机安装基座的机械加工精度,采用一体化成型减少机械连接点来提高相机安装基座的安装精度,从而保证了系统几何成像精度的提高。
- 2、设计专门的实验室测试方案、编写专门的测试程序来测量和计算 MADC 系统相机的快门延迟和不同步曝光时间。在确定了相机快门延迟和不同步曝光的准确时间之后,结合 POS 数据提供的外方位元素就可以更精确地得到每幅图像成像时刻的对应参数,从而提高相机系统的几何成像精度。
- 3、为 MADC 系统研制了配套的机载稳定平台来隔绝或降低飞行器振动对相机成像的影响,保证了相机在成像时刻的相对稳定,大大提高了相机系统的几何成像精度。
- 4、提出了利用高精度微米促动器来构建外置机械式像移补偿模块的像移补偿方案;并分析了利用软件对图像像移进行事后补偿的可行性。硬件补偿与软件补偿相结合,能有效地减小飞行平台前向运动产生的前向像移对相机系统几何精度的影响,获得更清晰的图像。

MADC 系统经过进一步的改进和定型后,将可以广泛应用于农业、环境、灾害、城市等各类小面积大比例尺专业遥感测量技术市场,满足制图、测绘等多方

面应用的需求；更可以作为各种地理信息系统的数据源，为各地数字城市、数字流域等数字化的建设提供基础地学数据。而且，该系统的研制加强了我国对国际先进航空摄影关键技术的技术跟踪，加速了国内自行研制航空数字摄影系统的速度，促进了航空遥感与数字化技术和信息化技术的结合。

通过上述研究工作，本论文取得了以下两个方面的创新成果：

1. 针对 MADC 系统单台相机的快门延迟和多台相机的不同步曝光问题，设计了新型的精确的实验室测量方案来对两者的准确时间进行测量。基于多次实验室测试实验取得的高精度数据，提出了对相机机械快门和多相机不同步曝光确切时间的计算方法。
- 2、针对 MADC 系统的组建方式和结构特点，设计了外置机械式补偿装置，以推动整个相机系统运动来实现前向像移的补偿。利用控制器控制高精度微米触动器动作可使相机系统位移精度达到 1 微米，前向像移的补偿精度优于 0.5 像素，对恶劣条件下 MADC 系统的几何成像精度可以大幅提升。

基于本文所论述的研究基础与内容，在保证完成现有研究目标的基础上，接下来还应该进一步加强以下几个方面的工作：

- ✧ 进一步改善 MADC 系统本身的硬件加工水平和组装方式，减小机械加工和安装误差对系统误差的影响；
- ✧ 加强对系统中光学器件的检校和精度的评价；
- ✧ 改进图像处理算法和模型，增大专用图像处理软件的开发力度；
- ✧ 加大 MADC 数据应用处理的研究，推进所获取图像与实际应用的结合；
- ✧ 对改进的 MADC 原理样机系统要设计多种实验室和航空飞行的调试和验证方案，对其原有功能组件和新增功能模块进行反复的校验与论证；
- ✧ 对系统进行整体包装和宣传，促进科研成果向产业化的转变。

参考文献

1. 陈述彭,《地球信息科学》,北京:高等教育出版社,2007
2. 陈述彭,童庆禧,郭华东,《遥感信息机理研究》,北京:科学出版社,1998
3. 崔廷伟,马毅,张杰,航空高光谱遥感的发展与应用,遥感技术与应用,Vo.18, No.2, 2003
4. 丁福建,李英才,CCD相机像移的补偿,光子学报,27(10), p948-951, 1998
5. 丁文镜,减振理论,北京,清华大学出版社,1998
6. 杜云飞,刘波,胡炳,一种全帧型CCD航空相机像移补偿方法,光子学报,Vol.36, No.12, 2007
7. 樊尚香,吕俊芳,张庆荣等,《航空测试系统》,北京:北京航空航天大学出版社,2005
8. 方俊永,陈正超,张兵,郑兰芬,多模态大面阵航空数字相机系统,遥感学报,2003, Vol.7, 增刊, p22-27
9. 方俊永,多模态航空数字相机系统研究,博士后出站报告,中科院遥感应用研究所,2005
10. 方俊永,刘学,卫征,张兵,郑兰芬,童庆禧,多模态航空数字相机系统研制和试验,第十五届全国遥感技术学术交流会,贵阳,2005
11. 方俊永,刘学,卫征,张兵,郑兰芬,童庆禧,宽视场模态航空数字相机系统设计和分析,第十五届全国遥感技术学术交流会,贵阳,2005
12. 韩心志编,航天多光谱遥感,北京:宇航出版社,1991
13. 何欣年,航空数字相机的发展与应用,遥感技术与应用,Vol.15, No.2, p124-129, 2000
14. 何欣年,航空遥感CCD数字图像应用潜力分析,遥感技术与应用,Vol.10, No.3, p66-70, 1995
15. 黄世德,《航空摄影测量学》,北京:测绘出版社,1987
16. 库祥臣,王润孝,雷建,数控技术的发展趋势及对策,机床与液压, No.9, 2004

17. 李德葆, 振动测量与试验分析, 北京, 国防工业出版社, 1974
18. 李德仁, 周月琴, 金为铨, 摄影测量与遥感概论, 北京: 测绘出版社, 2001
19. 李玉平, 机械加工误差的分析, 新余高专学报, Vol.10, No.4
20. 刘团结, 航空多光谱数字相机系统关键技术及应用研究, 中国科学院遥感应应用研究所博士学位论文, 2002
21. 刘学, 方俊永, 张兵, 郑兰芬, 童庆禧, 多相机自动同步触发的一种实现方法, 第十五届全国遥感技术学术交流会, 贵阳, 2005
22. 刘扬, 影响航空摄影质量的几个关键因素, 影像技术, No.1, p46-48, 2006
23. 秦永元, 《惯性导航》, 北京: 科学出版社, 2006
24. 舒陶, 任宏光, 陈祖金, 机载光电设备减振机构的振动分析及实现, 航空兵器, No.4, 2007
25. 孙宾, 张德明, 刘世红, 数控技术与数控机床浅说, 技术集市, No.5, 2003
26. 汤国安, 张有顺, 刘咏梅等, 《遥感数字图像处理》, 北京: 科学出版社, 2004
27. 唐明, 谈机械加工精度的提高, 科技信息, No.21, 2007
28. 童庆禧, 张兵, 郑兰芬, 《高光谱遥感的多学科应用》, 北京: 电子工业出版社, 2006
29. 童庆禧, 周上益编, 遥感应用的实践与创新, 北京: 测绘出版社, 1990
30. 童庆禧, 张兵, 郑兰芬, 《高光谱遥感-原理、技术与应用》, 北京: 高等教育出版社, 2006
31. 王凤娟, 提高机械加工精度的主要途径, 石家庄职业技术学院学报, Vol.15, No.4, 2003
32. 王慧, 吴云东, 梁红, 数字航测相机系统研究现状, 测绘科学技术学报, Vol. 24 No.3, p171-174, 2007
33. 王美姣, 数控机床加工精度分析与应用, 机械制造与研究, 167125276, 2004
34. 卫征, 多模态 CCD 相机系统 (MADC) 构像方式和数据处理研究, 中国科学院博士论文, 2006
35. 吴传庆, 基于 POS/DG 的无稳定平台机载高光谱图像几何校正, 中国科学院硕士论文, 2002
36. 谢尔巴科夫, 航空照相机的设计与计算, 孙振洲, 周桂琴, 吉林省科技翻译协会, 1985

37. 徐嘉志, 机械加工精度浅析, 科技咨询导报, No.20, 2007
38. 徐鹏, 黄长宁, 王涌天, 郝群, 卫星振动对成像质量影响的仿真分析, 宇航学报, Vol.24, No.3, p259-263, 2003
39. 颜昌翔, 王家骐, 航相机像移补偿计算的坐标变换方法, 光学精密工程, 8(3): 203-207, 2000
40. 俞儒庆, 廖健, 摄影照相机快门时间的测定(完)[J], 仪器仪表标准化与计量, 2003, (01)
41. 俞儒庆, 廖健, 摄影照相机快门时间的测定(续1)[J], 仪器仪表标准化与计量, 2002, (06)
42. 俞儒庆, 廖健, 摄影照相机快门时间的测定[J], 仪器仪表标准化与计量, 2002, (05)
43. 袁路晴, 潘学英, 航空数码摄影系统的应用与展望, 铁道勘察, No.5, p30-34, 2004
44. 袁修孝, 傅建红, 左正立, 机载 POS 系统用于航空遥感直接对地目标定位的精度分析, Vol.31, No.10, 2006
45. 翟林培, 刘明, 修吉宏, 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算, 光学精密工程, vol.14 (3) :490-494, 2006
46. 张葆, 贾平, 黄猛, 动载体成像系统底座无角位移减振器的设计, 光学技术, 29 (4) : 464 – 466, 2003
47. 张树青, 丁亚林, 于春风, 凝视模式下的画幅相机两轴像移补偿, 光学精密工程, Vol.15, No.11, 2007
48. 张勇, 航空相机快门速度测试仪, 西北工业大学硕士学位论文, 2005
49. 张勇, 航空相机快门速度测试仪, 西北工业大学硕士学位论文, 2005
50. 张祖勋, 张剑清, 《数字摄影测量学》, 武汉: 武汉大学出版社, 2001
51. 赵鹏, 振动对航空相机成像质量影响的分析, 激光与红外, Vo1.31, No.4, 2001
52. 赵鹏, 振动对航空相机成像质量影响的分析, 激光与红外, Vol.31, No.4, p240-242, 2001
53. 振动计算与减振设计组, 振动计算与减振设计, 北京: 中国建筑工业出版社, 1976

54. 中国地理学会环境遥感分会等编, 遥感新进展与发展战略, 北京: 中国科学技术出版社, 1996
55. 邹勇平, 宋辉, 航摄相机陀螺座架的原理、使用及维护, 测绘技术装备, No.2, 2004
56. Argon ST. "AMDC Airborne Multispectral Digital Camera. Environmental Remote Sensing Technology", Rev. 3-Nov. 2004.
57. Changb Y, "Forward motion compensation for digital aerial photogrammetric camera" [J], Journal of the PLA Institute of Surveying and Mapping, Vol.15 (2): (105-108), 1998.
58. D wulich, "Image resolution limits resulting from mechanical vibrations"[J], Optical Engineer, Vol.26(6): (529-533), 1987.
59. Farrier M, Kama SZ SR, Ma F, "Megapixel image sensors with forward motion compensation for aerial reconnaissance applications"[J], SPIE, 2023:80-92, 1993.
60. Felix Zuberbtihler, "Introduction to contrast and color handling of ADS40 images" [A], Leica Geosystems Airbrone Sensor Workshop Denver[C], 2004.
61. Gaylord G Olson, "Image motion compensation with frame transfer CCDs"[A], Pro, SPIE, 4567: (153-160), 2002.
62. HadarO, "Image Resolution Limits Resulting from Mechanical Vibrations" [J], Optical Engineering, 31 (3), 1992.
63. Hinz A, "The Z/I Imaging Digital Aerial Camera System"[A], Fritsch D, Spiller R. Photogrammetric Week'99[C], Wichmann Verlag, Heidelberg, 109-115, 1999.
64. <http://gis.leica-geosystems.com>
65. <http://www.pi-china.cn/index.html>
66. <http://www.vexcel.co.at>
67. <http://www.ziimaging.com>
68. Ingo Walter, "Application of micro-mechanic devices for motion compensation of space-borne CCD imaging systems" [J], Acta Astronautica, 46(2-6): (269-277), 2000.
69. Jacobsen K, "Calibration Aspects in Direct Georeferencing of Frame Imagery"[C], Pecora, 15/Land Satellite Information, Denver, USA, 2002.
70. Junyong Fang, Xue Liu, Zheng Wei, "A novel airborne digital camera system", Proc. SPIE 6200, 620007, 2006.
71. King D., "Airborne Multispectral Digital Camera and Video Sensors: A Critical

- Review of System Designs and Applications”, Canadian Journal of Remote Sensing. Special Issue on Aerial Optical Remote Sensing, Vol.21, No.3, p245-273, 1995.
72. LAREAU A G, “Electro-optical imaging array with motion compensation [J]”,
 73. OLSON Gaylord, “Image motion compensation with frame transfer ccd’s[J], SPIE, 4567:153-160, 2002.
 74. Pfister W., J. Steele, M. Farrier, C. Smith, “Fifty-Megapixel CCD Image Sensor With Motion Compensation” . Proc. SPIE Conference on Airborne Reconnaissance XXII, Vol. 3431, p161-169, 1998
 75. Quanjun Jiao, Xue Liu, Bo Liu, “Study on the predicted model of crop leaf water status by the NIR band of ground reflectance and spaceborne hyperspectral images”, Proc. SPIE 6835, 68351H, 2007.
 76. Rainer Sandau, Bernhard Braunecker, Design Principles of The LH Systems ADS 40 Airborne Digital Sensor[A], IAPRS, (Vol. XXXII1)[C], Amsterdam, 2000.
 77. Roberts C., “An airborne real-time multispectral video processor”[C]. Proc. Soc. Phot-opt. Inst. Engineers (SPIE), Vol. 36: Military Airborne Video Recording, Dayton OH, 225-229, 1973.
SPIE, 2023:65-79, 1993.
 78. Steven L. Smith, “Understanding image quality losses due to smear in high-resolution remote sensing imaging systems [J]”, Optical Engineering, Vol. 38(5), 1999.
 79. Xue Liu, Quanjun Jiao, Junyong Fang, “Study on multispectral mode of multi-mode airborne digital camera system”, Proc. SPIE 6830, 68301J, 2007.
 80. Xue Liu, Wenjuan Zhang, Junyong Fang, “Realization of image smear compensation for multi-mode airborne digital camera system”, Proc. SPIE 6789, 67891U, 2007.

攻读博士期间参与项目与发表文章情况

参与项目情况:

- 1、2004.9-2006.3, 参与中科院创新项目“大面阵高分辨率、多(高)光谱兼容型数字航空相机系统研制”项目, 主要负责系统的电子设计、机械设计、系统调试和航飞试验。
- 2、2005年6月, 参加了北京大学“新疆建设兵团土地利用”航空遥感试验。
- 3、2005年8月, 参与了北京大学“985”课题“无人机航空遥感试验”项目在贵州安顺的试验, 主要负责相机系统的安装、操作及影像的预处理。
- 4、2005.10- 2005.12, 参与国家“863”课题“环境遥感监测软件平台与业务运行示范”, 负责软件测试和文档整理。
- 5、2005.12-2006.04, 参与“北京一号卫星图像质量评价”项目, 负责北京1号多光谱相机图像光谱性能与应用评价部分, 共同完成《北京一号卫星多光谱相机图像光谱性能测试报告》。
- 6、2005年10月、2006年1月、2006年10月和2007年4月, 江苏省无锡市太湖水面试验, 负责航空 WHI 数据获取、大气光学参量测量和水上光谱测量。
- 7、2006年1月至今, 参与中科院大科学装置改造项目“稳定平台与像移补偿系统建设”项目, 主要负责像移补偿系统的设计和系统总体调试。
- 8、2007年9月起, 正参与中科院重大科研装备研制项目“地面成像光谱辐射计研制”, 已完成前期项目申请和设备总体方案的初步设计。
- 9、2007年10月, 完成了大连海上油膜热像试验, 负责对热成像仪的操作。
- 10、2007.11-12, 完成了北京奥运村地区航空飞行试验和影像数据处理。
- 11、2008.5, 参加了对四川地震灾区的航空遥感监测飞行。

参与编写的专著：

- 1、童庆禧，张兵，郑兰芬，《高光谱遥感——原理、技术与应用》，2006，北京：高等教育出版社，参与第8章“多源信息辅助高光谱分析”的编写；
- 2、童庆禧，张兵，郑兰芬，《高光谱遥感的多学科应用》，2006，北京：电子工业出版社，参与第4章“高光谱遥感在林业方面的应用”的编写。

发表文章情况:

- 1、 Realization of image smear compensation for multi-mode airborne digital camera system Xue Liu, Wenjuan Zhang, Junyong Fang, Zheng Wei, Bing Zhang, Lanfen Zheng, and Qingxi Tong, Proc. SPIE 6789, 67891U (2007)
- 2、 Study on multispectral mode of multi-mode airborne digital camera system, Xue Liu, Quanjun Jiao, Junyong Fang, Bing Zhang, Lanfen Zheng, and Qingxi Tong, Proc. SPIE 6830, 68301J (2007)
- 3、 Study on the predicted model of crop leaf water status by the NIR band of ground reflectance and spaceborne hyperspectral images, Quanjun Jiao, Xue Liu, Bo Liu, Xia Zhang, and Bing Zhang, Proc. SPIE 6835, 68351H (2007)
- 4、 A novel airborne digital camera system, Junyong Fang, Xue Liu, Zheng Wei, Bing Zhang, Lanfen Zheng, and Qingxi Tong, Proc. SPIE 6200, 620007 (2006)
- 5、 Information reconstruction in the cloud removing area based on multi-temporal CHRIS images, Quanjun Jiao, Wenfei Luo, Xue Liu, and Bing Zhang, Proc. SPIE 6790, 679029 (2007)
- 6、 Characteristics of Simulation of Hyperspectral Images Based on Imaging Fourier Transform Spectrometer, Wenjuan Zhang, Bing Zhang, Lianru Gao, Quanjun Jiao, Xue Liu, 3rd International Symposium on Future Intelligent Earth Observation Satellites, (2006)
- 7、 刘学, 方俊永, 张兵, 郑兰芬, 童庆禧, 多相机自动同步触发的一种实现方法, 第十五届全国遥感技术学术交流会, 贵阳, 2005。
- 8、 方俊永, 刘学, 卫征, 张兵, 郑兰芬, 童庆禧, 多模态航空数字相机系统研制和试验, 第十五届全国遥感技术学术交流会, 贵阳, 2005。
- 9、 方俊永, 刘学, 卫征, 张兵, 郑兰芬, 童庆禧, 宽视场模态航空数字相机系统设计和分析, 第十五届全国遥感技术学术交流会, 贵阳, 2005。

致 谢

时光荏苒，从 2003 年踏进遥感所至今不觉间已经五年过去。在这一千多个日日夜夜中，师长的教诲、家人的支持、同学和朋友们的鼓励时刻都萦绕在我身边，使我能够坚持学习而不懈怠，直至今天能够顺利完成学业。

衷心感谢我的导师童庆禧院士。童老师是我人生旅途中永远的指路明灯，指引和照耀着我们不断前行而不会迷失方向。童老师博大宽广的胸怀、渊博精深的学识、高屋建瓴的观察力、忘我投入的工作热情和不断创新的科研精神永远都是我学习的榜样，也将激励我在未来的工作和生活中不断进取！

衷心感谢我的导师张兵研究员。从入学开始，张老师就在学习、生活的各个方面对我给予了细心的关怀、指导与帮助，使我获益良多、终身难忘！他严谨的学术作风、扎实的专业知识、勤勉的工作态度和严格的治学风范无不深深的影响着我们。本论文从选题、实施、写作、编修到最后定稿，张老师均投入了巨大的精力进行指导和修改。张老师教给我们的不仅是知识，更是科研治学与为人处事的道理。

衷心感谢我的导师郑兰芬研究员。郑老师不仅在学习上经常指导与启发我们，而且在生活中总是给予我们无微不至的关怀与照顾。您对学生如慈母般的关怀将永远温暖着我们的心田。

衷心感谢中科院上海技术物理所的薛永琪院士。本论文是在薛老师的指导下完成的，并参考他的重要建议进行了修改。薛老师渊博的知识、严谨的治学态度、风趣幽默的谈吐、提纲挈领的归纳与总结能力总是能给人以强烈的引导与促进；薛老师老当益壮的科研精神将激励我们充满活力地去思考和工作。

衷心感谢高光谱研究室的王晋年老师、张霞老师和张立福老师。你们长期以来对我的教诲、指导与帮助使我受益良多。衷心感谢方俊永师兄和卫征师兄，你们不仅在学习和科研中不遗余力地帮助我，而且在日常生活中尽其所能地关心我；你们对工作的勤恳钻研和忘我投入就是我学习的好榜样！

感谢中科院遥感所的苏林老师和李紫薇老师；感谢中科院对地观测与数字地球科学中心的刘良云、陈正超、李俊生、高连如、左正立、刘建明、刘彤、张云

峰、邱文、赵海涛等老师；感谢中科院上海技术物理所的杨一德、肖公海、亓洪兴、杜衡老师；感谢北京大学遥感所的秦其明、晏磊、曾琪明、焦健老师和金川、高鹏琪、何定州等同学。你们对我研究工作和论文撰写的大力支持我将铭记于心。

感谢所办余琦、人教处吴晓青和刘戈平三位老师在日常学习和生活方面给我的关心和帮助，你们热情的工作和对学生认真负责的态度是我们能够完成学业的最好保证。

感谢同年进入高光谱室进行学习的焦全军和张文娟同学。你们对学习的热情、对科研的执着、对未来的不懈追求时刻感染和鼓励着我。我们互相勉励，共同进步，今天又共同迎来了毕业这一重要时刻。年轻上进且充满激情的你们就是我追赶的目标。

感谢高光谱室所有兄弟姐妹们对我的关心、支持与帮助，在这样一个温暖、热情、团结、真诚、进取和友爱的集体中学习、生活和工作是一种享受，每天都充满着快乐。他们是：罗文斐、刘翔、申茜、张浩、张靓、李庆亭、和海霞、温健婷、刘波、李儒、吴頔、孙旭。还要特别感谢周丽萍女士在日常生活方面对我的关心与帮助。

在这五年的学习、生活和工作中，还有许多的领导、老师、同学和朋友给予了我诚挚的关心和帮助，在此一并向他们表示衷心的感谢。

感谢养育我的父母及所有亲人，一直以来你们对我的关心和鼓励都是促使我克服各种困难，不断前行的最大动力。

谨以此文献给我的爱人刘爱芳女士。您对我的理解、信任与鼓励是我前进的不竭动力，本文的顺利完成乃至我所取得的所有成绩都与您的全力支持与无私奉献密不可分。能与你并肩前行，是我这一生最大的收获！

刘 学

2008 年 6 月 3 日