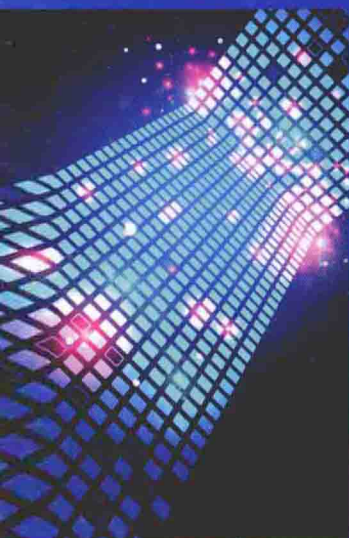




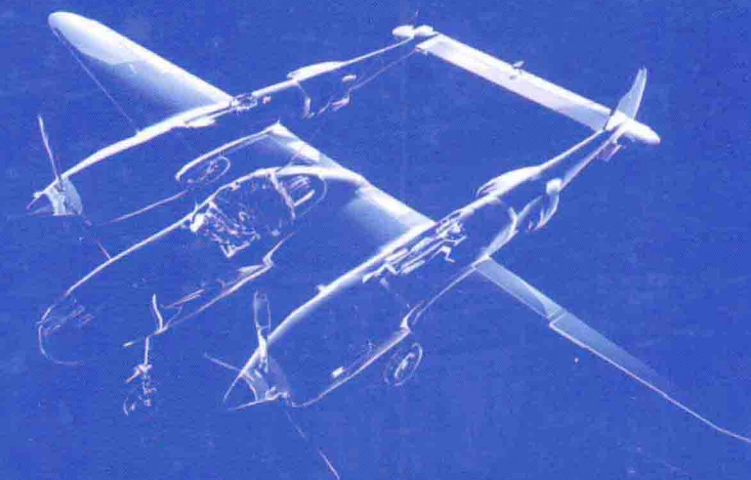
国防科技图书出版基金



航空飞行试验光电 测量理论与方法

Optical-Electronic Measurement Theory
and Methods in Flight Test

杨廷梧 张正中 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

航空飞行试验光电测量 理论与方法

Optical-Electronic Measurement Theory and
Methods in Flight Test

杨廷梧 张正中 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

航空飞行试验光电测量理论与方法/杨廷梧,张正中编著.
—北京:国防工业出版社,2014.1
ISBN 978-7-118-08840-3

I. ①航... II. ①杨... ②张... III. ①航空器—
飞行试验—光电检测—研究 IV. ①V217

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第294997号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 21½ 字数 418千字
2014年1月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 88.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟 甘茂治
(按姓氏笔画排序)
甘晓华 卢秉恒 邬江兴 刘世参 芮筱亭
李言荣 李德仁 李德毅 杨 伟 肖志力
吴有生 吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠
陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起 崔尔杰
韩祖南 傅惠民 魏炳波

前 言

苏联著名科学家门捷列夫说：“科学始于测量”。我国著名科学家钱学森也指出：“信息技术包括测量技术、计算机技术和通信技术，测量技术是关键和基础”。同样，航空科学技术的发展离不开测量。

航空飞行试验光电测量是一门涉及光学、电子学、通信、计算机科学、摄影测量学、工程测量学、工程数学、飞行力学、数理统计学及系统仿真、软件工程等多种学科知识综合应用的测量与数据分析处理技术。

本书以航空飞行试验光电测量工程为背景，从理论与方法上系统地描述航空飞行器飞行试验光电测量理论与方法。航空飞行试验与航天飞行试验相比既有相同之处，也有很大的不同之处。航空飞行试验的试验对象既有各种类型飞机、直升机、无人机，每一种航空飞行器又包含有不同类型的航空机载设备、武器系统、航空器缩比模型、外挂物投放、座椅弹射试验等；航空飞行试验中的测试内容和参数众多，仅一架飞机的测试参数就数以万计。航空飞行试验光电测试的主要内容有飞机起飞着陆、飞机飞行、武器系统中各种弹试验、飞机外挂物投放、救生弹射座椅试验、飞机模型（自由飞）、飞机失速尾旋、直升机悬停等飞行轨迹和相应的运动参数，还有机载电子设备、航空仪表、救生伞空中试验、模拟空降伞兵试验、空中货物投放、结冰测量、目标隐身特性、电子对抗等试验的航迹测量，此外，还包括在飞机内各种视频、平视显示器的记录、存储与处理。航空飞行试验光电测量过程中获取大量的目标与背景图像，直观、可靠、清晰，有利于试验对象的定性观察与定量分析。

第1章介绍了航空飞行试验光电测量概念、内容以及任务。第2章介绍了测量误差与测量不确定度的基本概念，并对参数估计方法以及测量的基本知识作了简要介绍。第3章介绍了航空飞行试验中的几种常用坐标系，以及坐标系之间的转换，最后以实际应用说明坐标转换所引起误差的计算方法。第4章首先介绍了在航空飞行试验中应用的主要测量设备、摄影测量图像解析理论，然后重点介绍了单站测量与多站（含双站）交会测量的理论模型、空间后方交会模型、（空中和地面）航带测量模型与求解方法，最后介绍了两种特殊条件下的测量方法以及误差椭圆求解方法。第5章对光电图像跟踪与测量进行了介绍。首先介绍了跟踪图像的预处理方法，然后介绍了基于小波金字塔特征点跟踪测量模型，最后介绍了基于光电跟踪图像的姿态测量理论与方法。第6章系统地描述了光电测量数据处理中常用的四类方法。首先介绍了处理观测数据中异常值的两种常用方法；其次描述

了随机误差(含系统误差残差)的滤波方法与传感器分组模型;介绍了在分布式多传感器系统中,观测数据批处理与序贯处理的两种典型的融合方法:加权融合与卡尔曼滤波方法;最后简要介绍了观测数据回归理论、方法与应用,分别对多元线性回归与非线性回归、偏最小二乘回归方法进行了描述。第7章是针对分布式多传感器,从结构分析、系统模型、辅助支持、系统性能评估等方面描述了分布式多传感器系统设计与实现应考虑的问题。第8章引入测量不确定度评价方法,并对单站空间极坐标测量模型和空间交会测量模型分别进行了测量不确定度的分析。

本书是在系统地查阅、研究了国内外大量的专业文献资料和总结了近20多年来承担的航空飞行试验光电测量及数据处理的实践经验基础上完成的。书中所介绍的理论与方法均在飞行试验中多次应用,实践验证了其有效性和正确性。

本书在编著过程中,得到了任林舟研究员、李宏研究员、贾浩正高级工程师、张虎龙高级工程师和何红丽高级工程师的大力帮助,同时周占庭研究员、乔建军研究员也对本书提出了有益的改进意见。在此,对他们的关心和帮助一并表示衷心的感谢!

本书编著工作得到了国防工业出版社的悉心指导和大力支持,并由国防科技图书出版基金资助出版,在此表示衷心感谢!

由于本书内容涉及专业面宽,加之作者水平有限,难免有不妥或错误之处,敬请读者批评指正。

编著者
2012年秋

目 录

第0章 术语及定义	1
0.1 设备术语	1
0.2 摄影测量术语	1
0.3 航迹测量术语	2
0.4 测量误差与测量不确定度术语	3
第1章 概论	5
1.1 概述	5
1.2 航空飞行试验	5
1.3 航空飞行试验测量	6
1.4 航空飞行试验光电测量	6
1.4.1 航空飞行试验光电测量的基本概念	6
1.4.2 航空飞行试验光电测量的作用	7
1.4.3 航空飞行试验光电测量的特点	8
1.4.4 航空飞行试验光电测量使用的主要设备	8
1.4.5 航空飞行试验光电测量目前涉及的主要技术	9
1.4.6 航空飞行试验光电测量一般工作流程	12
参考文献	13
第2章 航空飞行试验光电测量理论基础	14
2.1 测量误差及其性质	14
2.1.1 测量误差	14
2.1.2 随机误差的统计特性	16
2.1.3 精度指标——方差、平均误差、极限误差、相对误差	17
2.1.4 方差估计方法	19
2.1.5 系统误差指标——准确度	22
2.1.6 测量精度有关术语之间相互关系	23
2.2 测量不确定度	24
2.2.1 测量不确定度的提出	24

2.2.2	标准不确定度的评定	25
2.2.3	自由度及其确定	27
2.2.4	测量不确定度与误差	29
2.2.5	测量不确定度传播律	29
2.3	最小二乘误差估计	31
2.3.1	最小二乘误差估计原理	31
2.3.2	最小二乘误差估计变量扩展	31
2.3.3	最小二乘误差估计统计特性	32
2.3.4	最小二乘估计量的几何意义	33
2.4	最小均方误差估计	33
2.4.1	动态系统模型	33
2.4.2	线性最小均方误差估计算法	35
2.5	最大似然估计	36
2.6	无约束最优计算方法	39
2.6.1	最速下降法	39
2.6.2	牛顿法	40
2.6.3	共轭方向法	41
2.6.4	共轭梯度法	42
2.6.5	变尺度法	43
2.7	数字图像处理	45
2.7.1	数字图像处理有关术语	45
2.7.2	数字图像灰度直方图	46
2.7.3	数字图像点运算	47
2.7.4	数字图像代数运算	49
2.7.5	数字图像几何运算	51
	参考文献	52
第3章	常用坐标系及其坐标转换	54
3.1	常用坐标系	54
3.1.1	影像坐标系与像空间坐标系	54
3.1.2	空间极坐标系	54
3.1.3	空间直角坐标系	55
3.1.4	机体坐标系	55
3.1.5	辅助坐标系	55
3.1.6	地心坐标系	56

3.2	坐标转换	57
3.2.1	大地坐标转换为地心直角坐标	57
3.2.2	地心直角坐标转换为大地坐标	58
3.2.3	大地坐标转换为切平面直角坐标	59
3.2.4	垂线直角坐标转换为 WGS-84 地心直角坐标	59
3.2.5	影像平面坐标系与像空间坐标系的关系	60
3.2.6	空间极坐标转换为空间直角坐标	60
3.2.7	辅助空间直角坐标转换为空间直角坐标	61
3.3	高程系统	61
3.3.1	水准面和大地水准面	61
3.3.2	高程系统与高程基准	62
3.3.3	高程系统的选用与转换	63
3.4	坐标转换误差	64
3.4.1	坐标转换误差模型	64
3.4.2	空间极坐标转换为空间直角坐标误差模型	65
3.4.3	辅助空间直角坐标转换为空间直角坐标误差模型	66
	参考文献	69
第 4 章	空间定位测量	70
4.1	光电测量系统	71
4.1.1	光电经纬仪测量系统	71
4.1.2	雷达测量系统	73
4.1.3	数字高速摄影系统	76
4.1.4	航空摄影系统	77
4.2	图像解析摄影测量	79
4.2.1	空间坐标系	79
4.2.2	摄影内外方位元素	81
4.2.3	共线条件方程	84
4.2.4	旋转矩阵	86
4.3	单站定位测量	89
4.3.1	数学模型	89
4.3.2	线性最小均方差机动目标位置估计	92
4.3.3	全局最小二乘机动目标位置估计	94
4.3.4	地球曲率对高程的影响	95
4.3.5	地球曲率对距离测量的影响	96

4.4	空间前方交会	96
4.4.1	两站前方交会	96
4.4.2	多站前方交会	110
4.5	空间后方交会	115
4.5.1	直接线性变换	116
4.5.2	光线束角锥体模型	119
4.5.3	模型不定性问题	124
4.6	航带测量	125
4.6.1	地面观测带测量模型	126
4.6.2	空中观测航带测量模型	128
4.7	特殊条件下的测量	135
4.7.1	系数测量法	135
4.7.2	附有平面约束条件测量法	137
4.8	误差椭圆	138
4.8.1	点位误差	139
4.8.2	误差椭圆	141
4.8.3	相对误差椭圆	142
	参考文献	143
第5章	光电图像跟踪与测量	145
5.1	数字图像预处理	145
5.1.1	图像恢复	145
5.1.2	图像分割	150
5.2	特征点线检测	151
5.2.1	图像边缘检测	151
5.2.2	特征标志中心检测	153
5.2.3	序列图像中特征点检测	157
5.2.4	快速跟踪算法	157
5.3	基于小波金字塔的模板匹配算法	158
5.3.1	模板匹配原理	158
5.3.2	图像金字塔	159
5.3.3	金字塔模板匹配	162
5.3.4	仿真与分析	165
5.4	机动目标姿态测量	166
5.4.1	基于单像后方交会的姿态解算	166

5.4.2	基于轮廓匹配的姿态求解	167
5.4.3	摄像机初始参数标定	174
5.4.4	基于灭点理论的飞机起飞着陆姿态解算	175
5.4.5	基于透视几何原理的飞机起飞着陆姿态解算	181
	参考文献	185
第 6 章	多传感器数据处理	186
6.1	观测异常值滤波	186
6.1.1	观测异常值及其性质	187
6.1.2	多项式滑动模型	189
6.1.3	观测异常值自适应滤波	195
6.2	数据滤波与动态分组	202
6.2.1	K-L 模型	202
6.2.2	IMM-UKF 滤波模型	207
6.2.3	多传感器动态分组	216
6.3	分布式多传感器数据融合	224
6.3.1	概述	224
6.3.2	多传感器加权融合模型	225
6.3.3	离散卡尔曼滤波模型	233
6.3.4	多尺度卡尔曼滤波模型	242
6.4	多元回归分析	250
6.4.1	多元线性回归模型	250
6.4.2	非线性回归模型	255
6.4.3	偏最小二乘回归模型	258
6.4.4	多元回归模型仿真	264
	参考文献	266
第 7 章	分布式多传感器光电跟踪测量系统设计	269
7.1	分布式多传感器跟踪系统结构分析	269
7.1.1	原始观测信号	273
7.1.2	传感器本地处理单元	274
7.1.3	融合中心处理单元	276
7.2	分布式多传感器融合估计	279
7.2.1	系统模型	279
7.2.2	优化准则	280

7.2.3	最优化方法	281
7.2.4	算法分析	281
7.2.5	算法选择过程分析	284
7.3	系统支持功能	285
7.3.1	传感器系统管理	285
7.3.2	航迹管理	287
7.3.3	数据库管理	287
7.4	分布式多传感器跟踪系统性能评估	288
7.4.1	系统的跟踪性能	288
7.4.2	系统综合性能	289
7.4.3	跟踪成功率分析	289
7.5	分布式多传感器跟踪系统的发展	290
7.5.1	开展 TENA 技术与标准研究	291
7.5.2	开展先进分布式仿真试验与鉴定技术研究	292
7.5.3	开展大武器系统、多靶场与鉴定技术研究	292
	参考文献	292
第 8 章	光电测量不确定度分析	295
8.1	测量不确定度的应用	295
8.1.1	合成标准不确定度	295
8.1.2	扩展不确定度	296
8.1.3	不确定度的报告	297
8.1.4	测量设备精度表示方法	298
8.1.5	测量数据处理	299
8.1.6	测量设备系统误差估计与评定	300
8.1.7	测量设备偶然误差估计与评定	301
8.1.8	极限误差估计与评定	301
8.1.9	测量设备标准差估计与评定	302
8.2	典型测量模型的不确定度分析	302
8.2.1	单站空间极坐标测量模型不确定度分析	303
8.2.2	空间交会测量不确定度分析	305
8.2.3	测量不确定度分析的作用	308
	参考文献	309
附录 A	时间系统	310
附录 B	坐标系统	313

CONTENTS

Chapter 0	Terms and Definitions	1
0.1	Equipment and System	1
0.2	Photogrammetry	1
0.3	Theodolite Measurement	2
0.4	Measurement Error and Measurement Uncertainty	3
Chapter 1	Outline of Optical-Electronic Measurement in Flight Test	5
1.1	Introduction	5
1.2	Flight Test	5
1.3	Measurement in Flight Test	6
1.4	Optical-Electronic Measurement in Flight Test	6
1.4.1	Basic Concepts	6
1.4.2	Function of Optical-Electronic Measurement	7
1.4.3	Characteristics of Optical-Electronic Measurement	8
1.4.4	Main Equipments	8
1.4.5	Technologies Involved	9
1.4.6	General Workflows	12
	References	13
Chapter 2	Basic Theory of Optical-Electronic Measurement in Flight Test	14
2.1	Measurement Error and its Character	14
2.1.1	Measurement Error	14
2.1.2	Statistic Characteristics of Random Error	16
2.1.3	Error Index Including Squared Error, Mean Error, Utmost Error and Relative Error	17
2.1.4	Squared Error Estimation Methods	19
2.1.5	Accuracy Index	22

2.1.6	Correlation of Glossaries of Measurement Accuracy	23
2.2	Measurement Uncertainty	24
2.2.1	Proposed of Measurement uncertainty	24
2.2.2	Evaluation of Standard Uncertainty	25
2.2.3	Degrees of Freedom and its Determination	27
2.2.4	Measurement Uncertainty and Error	29
2.2.5	Law of Measurement Uncertainty Propagation	29
2.3	Least-Squared Error Estimation	31
2.3.1	Principle of Least-Squared Error Estimation	31
2.3.2	Variable Extension in Least-Squared Error Estimation	31
2.3.3	Statistic Characteristics of Least-Squared Error Estimation	32
2.3.4	Geometric Meaning of Least-Squared Error Estimation	33
2.4	Minimum Mean Squared Error Estimation	33
2.4.1	Dynamical Systems Model	33
2.4.2	Linear Minimum Mean Squared Estimation Algorithm	35
2.5	Maximum Likelihood Estimation	36
2.6	Unconstrained Optimal Calculation Method	39
2.6.1	Steepest Descent Method	39
2.6.2	Newton Algorithm	40
2.6.3	Conjugate Direction Algorithm	41
2.6.4	Conjugate Gradient Algorithm	42
2.6.5	Variable Scale Algorithm	43
2.7	Digital Image Processing	45
2.7.1	Glossaries Related to Digital Image Processing	45
2.7.2	Gray-Scale Histograms of Digital Image	46
2.7.3	Digital Image Point Operation	47
2.7.4	Digital Image Algebra Operation	49
2.7.5	Digital Image Geometry Operation	51
	References	52

Chapter 3 Common Coordinate Systems and Coordinate

Transformation 54

3.1 Coordinate Systems in common use

 54

- 3.1.1 Image Plane Coordinate System and Image
Space Coordinate System

3.1.2	Space Polar Coordinate System	54
3.1.3	Space Rectangular Coordinate System	55
3.1.4	Airborne Coordinate System	55
3.1.5	Auxiliary Coordinate System	55
3.1.6	Geocentric Coordinate System	56
3.2	Coordinate Transformation	57
3.2.1	Transformation of Geographic Coordinates to Geocentric Rectangular Coordinates	57
3.2.2	Transformation of Geocentric Rectangular Coordinates to Geographic Coordinates	58
3.2.3	Transformation of Geographic Rectangular Coordinates to Tangent Plane Coordinates	59
3.2.4	Transformation of Vertical Rectangular Coordinates to WGS-84 Geocentric Rectangular Coordinates	59
3.2.5	Image Plane Coordinates in Relation with Image Space Coordinates	60
3.2.6	Transformation of Polar Coordinates to Space Rectangular Coordinates	60
3.2.7	Transformation of Auxiliary Space Rectangular Coordinates to Space Rectangular Coordinates	61
3.3	Height System	61
3.3.1	Level Plane and Geoid	61
3.3.2	Height System and Height Datum	62
3.3.3	Height Systems Selection and Transformation	63
3.4	Transformation Error of Coordinates	64
3.4.1	Model Error of Transformation of Coordinates	64
3.4.2	Model Error of Transformation of Polar Coordinates to Space Rectangular Coordinates	65
3.4.3	Model Error of Transformation of Auxiliary Space Rectangular Coordinates to Space Rectangular Coordinates	66
	References	69

Chapter 4 Space Position-Fixing Measurements 70

4.1	Optical-Electronic Measurement Systems	71
4.1.1	Theodolite measurement system	71

4.1.2	Radars measurement system	73
4.1.3	Digital High Speed Camera	76
4.1.4	Airborne Photographic Camera	77
4.2	Image Analytical Phtogrammetry	79
4.2.1	Space Coordinates	79
4.2.2	Elements of Exterior Orientation	81
4.2.3	Collinearity Condition Equations	84
4.2.4	Orientation Matrices	86
4.3	Single-Site Location	89
4.3.1	Mathematics Models	89
4.3.2	Maneuvering Target Location Based on Linear Minimum Mean Squared Estimation	92
4.3.3	Maneuvering Target Location Based on Total Least-Squared Estimation	94
4.3.4	Effect of Height by the Earth Curvature	95
4.3.5	Effect of Space Interval by the Earth Curvature	96
4.4	Space Intersection	96
4.4.1	Two-Site Forward Intersection	96
4.4.2	Multi-Site Forward Intersection	110
4.5	Space Resection	115
4.5.1	Direct Linear Transformation	116
4.5.2	Pyramid Model of Bundle of Rays	119
4.5.3	Uncertainty of Model	124
4.6	Strip Analytical Triangulation	125
4.6.1	Ground Strip Analytical Triangulation	126
4.6.2	Aerial Strip Analytical Aerotriangulation	128
4.7	Triangulation Under Certain Conditions	135
4.7.1	Coefficient Method	135
4.7.2	Triangulation with Condition of Plane Restriction	137
4.8	Error Ellipse	138
4.8.1	Position Error	139
4.8.2	Error Ellipse	141
4.8.3	Relative Error Ellipse	142
	References	143