

# 常规兵器试验 交会测量方法及应用

主编 杨增学



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

# 常规兵器试验 交会测量方法及应用

主 编 杨增学  
编著者 杨增学 杨世宏 宁双侠  
唐自力 李 斌 王 俊  
韩 枫



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

## 内容简介

本书系统地阐述了常规兵器试验外弹道测量的基本知识、交会测量方法和组网测试方法。重点是:推导了用于质点单目标、多目标和刚体目标等外弹道测量系统(如光电经纬仪、弹道相机、姿态测量系统、高速摄像系统、高速摄影系统、炸点经纬仪、弹道测量雷达、GPS 弹道测量系统等)的测量模型和精度分析模型,探讨了各种测试方法的适用范围及应用;紧密结合常规测控系统组网测试的实际,详细地介绍了试验测试方案拟制及辅助决策的方法、数学模型和软件实现。

本书注重理论与实践的紧密结合,系统性和实用性和创新性强,可供从事常规兵器试验外弹道测量、试验测试总体、测控设备研发等工作的技术人员学习参考,也可作为相关领域工程技术人员的参考书。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

常规兵器试验交会测量方法及应用/杨增学主编. —西安:西安交通大学出版社,2010.5

ISBN 978-7-5605-3513-5

I. ①常… II. ①杨… III. ①常规武器—试验 IV. ①TJ06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 070228 号

---

|      |                 |
|------|-----------------|
| 书 名  | 常规兵器试验交会测量方法及应用 |
| 主 编  | 杨增学             |
| 责任编辑 | 邹林              |

---

|      |                                                                 |
|------|-----------------------------------------------------------------|
| 出版发行 | 西安交通大学出版社<br>(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)                         |
| 网 址  | <a href="http://www.xjtupress.com">http://www.xjtupress.com</a> |
| 电 话  | (029)82668357 82667874(发行中心)<br>(029)82668315 82669096(总编办)     |
| 传 真  | (029)82668280                                                   |
| 印 刷  | 西安市新城区兴庆印刷厂                                                     |

---

|      |                                   |     |       |     |        |
|------|-----------------------------------|-----|-------|-----|--------|
| 开 本  | 787mm × 1092mm 1/16               | 印 张 | 21.25 | 字 数 | 514 千字 |
| 版次印次 | 2010 年 5 月第 1 版 2010 年 5 月第 1 次印刷 |     |       |     |        |
| 书 号  | ISBN 978-7-5605-3513-5/TJ·1       |     |       |     |        |
| 定 价  | 39.00 元                           |     |       |     |        |

---

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954

读者信箱:jdgy@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

随着常规兵器向信息化、体系化和远程精确打击方向发展,装备信息化、系统网络化、平台自行化、侦察远程化、弹药制导化、毁伤多样化等趋势和特点日益明显,对常规兵器试验鉴定提出了新的更高要求。而作为试验鉴定的重要组成部分,目标飞行弹道参数测量越来越成为揭示被试武器装备内在品质和固有特性最直接最有效的基本手段,面临着更加严峻的挑战。目前普遍采用的依靠光、电、雷、遥等单一手段获取弹道参数的传统测试模式,已难以满足新型常规兵器多目标、多参数、全弹道、高精度、实时化的试验测试需求,以难以适应被测目标“暗、小、快、多、密、低、高、远”等具体特点。高质量完成实时精准的弹道参数测量,必然要求打破传统测试模式,综合采用多种测试手段,合理配置各种测试资源,融合处理各类测试信息,实现光学、电测、雷达、遥测遥控等系统组网测试,走出一条基于能力的常规兵器试验弹道测量之路,大幅提升弹道综合测试能力,促进靶场试验鉴定水平不断提高,为常规武器装备发展建设提供有力支撑。

针对国内外常规兵器试验组网测试相关资料缺乏的现状,为了使技术人员系统、深入地了解 and 掌握常规兵器试验外弹道测量基本知识、交会测量方法及组网测试方法,提高测试精度、可靠性和综合效能,作者在总结多年工作经验和科研成果的基础上,综合弹道测量的新思想、新理论和新方法,注重理论与实践紧密结合,编写了这本系统全面、理论性强、注重实用的专著。该书可供从事常规兵器试验外弹道测量、试验测试总体、测控设备研发等工作的技术人员学习参考,也可作为相关领域工程技术人员的参考书。

本书共分 10 章和 1 个附录。第 1 章,概要介绍常规兵器试验外弹道测量基础、测控系统、测量体制、测量原理及测试方法等;第 2 章至第 6 章,主要介绍基于光学、雷达、GPS 外测设备的质点单目标弹道测量方法(AE-AE、R-AE 和 3RR 交会测量方法、GPS 测量定位方法)、适用范围、组网测试方法及应用;第 7 章,主要介绍基于光学、GPS 外测设备的质点多目标弹道测量方法、适用范围及应用;第 8 章,主要介绍基于光学设备的飞行体姿态测量的方法、适用范围及应用;第 9 章和第 10 章,主要介绍常规测控系统试验测试方案拟制、辅助决策方法及实现软件;附录,主要介绍光学、雷达设备试验测试应用的基本知识。参加编著的有:杨世宏(第 1 章),杨增学(第 2、7、9、10 章,1.3 节,3.2 节),李斌(第 3 章),王俊(第 4 章),宁双侠(第 5 章),韩枫(第 6 章),唐自力、姚敏(第 8 章),附录由杨增学、杨海龙、柴如兴、何中强共同撰写,主编杨增学负责完成了本书全稿统编工作。

在本书的撰写过程中,中国华阴兵器试验中心领导和有关专家给予了热情支持和大力帮助;常规兵器试验技术领域杰出专家闫章更在百忙中审阅了全书,高勇民、张三喜高工对该书提出了宝贵的修改意见,中科院长春光学精密机械与物理研究所研究员、博士生导师何昕给予了热情指导;王韩毅、王康相、汶迎辉、张军锋、刁小鹏、王文涛、罗成强、田岗岗、张玉伦、韩德智、张治政、邢维艳、刘晓彬、郑荣华、蒋增波、刘刚、胡秋平、曾令贤、刘小玲和唐鑫年同志为本书的资料整理、模型验证、文字编辑和绘图做了大量的工作,在此向他们表示衷心的感谢。由于作者水平所限,书中难免存有不足和错误之处,恳请专家、读者批评指正。

**编 著 者**

2009 年 11 月

|                          |      |
|--------------------------|------|
| 第 1 章 概 论 .....          | (1)  |
| 1.1 概 述 .....            | (1)  |
| 1.2 常规兵器弹道测量基础 .....     | (1)  |
| 1.2.1 试验靶场及目标 .....      | (1)  |
| 1.2.2 弹道特性及常用术语 .....    | (2)  |
| 1.2.3 测试内容 .....         | (8)  |
| 1.3 常规测控系统简介 .....       | (9)  |
| 1.3.1 测控系统的主要组成 .....    | (10) |
| 1.3.2 测控设备分类 .....       | (11) |
| 1.3.3 测控系统的作用 .....      | (13) |
| 1.4 常规兵器弹道参数测量 .....     | (14) |
| 1.4.1 外弹道测量体制 .....      | (15) |
| 1.4.2 外弹道测量原理 .....      | (15) |
| 1.4.3 外弹道测试方法 .....      | (23) |
| 第 2 章 AE-AE 交会测量方法 ..... | (25) |
| 2.1 概述 .....             | (25) |
| 2.1.1 角度交会测量原理 .....     | (25) |
| 2.1.2 角度交会算法分类 .....     | (25) |
| 2.2 共面交会计算方法 .....       | (26) |
| 2.2.1 概述 .....           | (26) |
| 2.2.2 测量模型 .....         | (27) |
| 2.2.3 测量精度分析 .....       | (32) |
| 2.2.4 特殊交会测量方法 .....     | (39) |
| 2.3 异面交会计算方法 .....       | (56) |
| 2.3.1 概述 .....           | (56) |
| 2.3.2 测量模型 .....         | (57) |
| 2.3.3 测量精度分析 .....       | (64) |
| 2.4 适用范围 .....           | (77) |
| 2.4.1 概述 .....           | (77) |
| 2.4.2 算法适用区域 .....       | (77) |
| 2.4.3 异面交会算法讨论 .....     | (79) |
| 2.4.4 各种算法比较 .....       | (80) |
| 2.5 应用 .....             | (81) |
| 2.5.1 基本方法 .....         | (81) |
| 2.5.2 典型应用 .....         | (82) |
| 2.5.3 结论 .....           | (85) |

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 第 3 章 R-AE 交会测量方法 ..... | (86)  |
| 3.1 概述 .....            | (86)  |
| 3.1.1 R-AE 交会测量原理 ..... | (86)  |
| 3.1.2 R-AE 交会算法分类 ..... | (86)  |
| 3.2 R-AE 单站测量方法 .....   | (87)  |
| 3.2.1 单站测量原理 .....      | (87)  |
| 3.2.2 $R_1$ 数学模型 .....  | (87)  |
| 3.2.3 $R_1$ 精度分析 .....  | (89)  |
| 3.3 R-AE 交会测量方法 .....   | (92)  |
| 3.3.1 测量模型 .....        | (92)  |
| 3.3.2 测量精度分析 .....      | (96)  |
| 3.4 适用范围 .....          | (103) |
| 3.5 应用 .....            | (103) |
| 3.5.1 基本方法 .....        | (103) |
| 3.5.2 精度影响因素分析 .....    | (104) |
| 3.5.3 结论 .....          | (108) |
| 第 4 章 3RR 交会测量方法 .....  | (109) |
| 4.1 概述 .....            | (109) |
| 4.1.1 3RR 交会测量原理 .....  | (109) |
| 4.1.2 3RR 交会算法分类 .....  | (110) |
| 4.2 测量模型 .....          | (110) |
| 4.2.1 测量模型的建立 .....     | (110) |
| 4.2.2 测量模型及其推导 .....    | (110) |
| 4.3 测量精度分析 .....        | (116) |
| 4.3.1 主要误差源分析 .....     | (116) |
| 4.3.2 测量精度模型与推导 .....   | (117) |
| 4.4 适用范围 .....          | (119) |
| 4.5 应用 .....            | (119) |
| 4.5.1 基本方法 .....        | (119) |
| 4.5.2 精度影响因素分析 .....    | (120) |
| 4.5.3 结论 .....          | (125) |
| 第 5 章 多站交会测量方法 .....    | (126) |
| 5.1 概述 .....            | (126) |
| 5.2 多站交会最小二乘估计方法 .....  | (126) |
| 5.2.1 测量模型 .....        | (127) |

|              |                         |              |
|--------------|-------------------------|--------------|
| 5.2.2        | 测量精度分析 .....            | (130)        |
| 5.3          | 多站交会递推最小二乘估计方法 .....    | (131)        |
| 5.3.1        | 测量模型 .....              | (131)        |
| 5.3.2        | 测量精度分析 .....            | (132)        |
| 5.4          | 适应范围 .....              | (133)        |
| 5.4.1        | 公式讨论 .....              | (133)        |
| 5.4.2        | 两种方法比较 .....            | (133)        |
| 5.5          | 应用 .....                | (134)        |
| 5.5.1        | 基本方法 .....              | (134)        |
| 5.5.2        | 精度影响因素分析 .....          | (134)        |
| 5.5.3        | 结论 .....                | (136)        |
| 5.6          | 组网测试方法 .....            | (137)        |
| 5.6.1        | 多站交会测量方法 .....          | (137)        |
| 5.6.2        | 多站接力测量方法 .....          | (141)        |
| <b>第 6 章</b> | <b>GPS 测量定位方法 .....</b> | <b>(143)</b> |
| 6.1          | 概述 .....                | (143)        |
| 6.1.1        | GPS 定位原理 .....          | (143)        |
| 6.1.2        | GPS 定位方法分类 .....        | (143)        |
| 6.1.3        | 差分定位原理 .....            | (143)        |
| 6.2          | GPS 测量定位 .....          | (144)        |
| 6.2.1        | 伪距测量定位 .....            | (144)        |
| 6.2.2        | 载波相位测量定位 .....          | (145)        |
| 6.2.3        | 差分 GPS 定位 .....         | (147)        |
| 6.3          | 坐标转换 .....              | (149)        |
| 6.3.1        | 大地坐标与平面直角坐标的换算 .....    | (149)        |
| 6.3.2        | 平面坐标转换法 .....           | (150)        |
| 6.4          | 测量定位精度分析 .....          | (152)        |
| 6.4.1        | 主要误差源分析 .....           | (152)        |
| 6.4.2        | 测量定位精度模型建立 .....        | (152)        |
| 6.4.3        | 测量定位精度模型推导 .....        | (153)        |
| 6.5          | 适用范围 .....              | (153)        |
| 6.5.1        | GPS 测量定位的优越性 .....      | (153)        |
| 6.5.2        | GPS 测量定位的应用限制 .....     | (154)        |
| 6.5.3        | GPS 测量定位的适用范围 .....     | (154)        |
| 6.6          | 应用 .....                | (155)        |
| 6.6.1        | 机载多目标航迹的测量 .....        | (155)        |
| 6.6.2        | 雷达测量系统精度鉴定 .....        | (157)        |

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| <b>第 7 章 多目标交会测量方法</b> .....       | (161) |
| 7.1 概述 .....                       | (161) |
| 7.2 AE - AE 多目标交会测量方法 .....        | (161) |
| 7.2.1 概述 .....                     | (161) |
| 7.2.2 多目标弹道识别算法 .....              | (162) |
| 7.2.3 多目标交会处理 .....                | (174) |
| 7.3 GPS 多目标定位方法 .....              | (176) |
| 7.4 适用范围 .....                     | (176) |
| 7.4.1 假目标剔除 .....                  | (176) |
| 7.4.2 多目标弹道识别 .....                | (177) |
| 7.5 应用 .....                       | (177) |
| <b>第 8 章 飞行体姿态光学测量方法</b> .....     | (182) |
| 8.1 概述 .....                       | (182) |
| 8.2 AE 单站飞行体姿态测量方法 .....           | (183) |
| 8.2.1 基于特征点的 AE 单站飞行体姿态测量方法 .....  | (184) |
| 8.2.2 基于模型的 AE 单站飞行体位置姿态测量方法 ..... | (189) |
| 8.3 AE 双站飞行体姿态测量方法 .....           | (194) |
| 8.3.1 基于中轴线的 AE 双站飞行体姿态测量方法 .....  | (194) |
| 8.3.2 基于模型的 AE 双站飞行体位置姿态测量方法 ..... | (204) |
| 8.4 应用及适用范围 .....                  | (215) |
| 8.4.1 基本方法 .....                   | (215) |
| 8.4.2 精度影响因素分析 .....               | (216) |
| 8.4.3 适用范围 .....                   | (222) |
| <b>第 9 章 测试方案拟制及辅助决策方法</b> .....   | (223) |
| 9.1 概述 .....                       | (223) |
| 9.1.1 测试方案拟制的依据及主要原则 .....         | (223) |
| 9.1.2 测试方案拟制及辅助决策的一般步骤 .....       | (223) |
| 9.2 数学模型的建立 .....                  | (224) |
| 9.2.1 设备初始方向角模型 .....              | (224) |
| 9.2.2 设备测量交会角模型 .....              | (226) |
| 9.2.3 设备成像能力模型 .....               | (226) |
| 9.2.4 设备探测能力模型 .....               | (229) |
| 9.2.5 设备跟踪能力模型 .....               | (236) |
| 9.2.6 设备测量精度模型 .....               | (238) |
| 9.2.7 实时引导预测模型 .....               | (239) |
| 9.2.8 目标与太阳夹角模型 .....              | (242) |

|        |                       |       |
|--------|-----------------------|-------|
| 9.3    | 测试方案拟制及辅助决策方法 .....   | (242) |
| 9.3.1  | 测试要求分析 .....          | (242) |
| 9.3.2  | 测试方案拟制 .....          | (243) |
| 9.3.3  | 测试方案仿真 .....          | (246) |
| 9.3.4  | 测试方案决策 .....          | (248) |
| 9.3.5  | 应急处理预案制订 .....        | (250) |
| 9.3.6  | 其它问题 .....            | (251) |
| 第 10 章 | 测试方案拟制及辅助决策系统简介 ..... | (252) |
| 10.1   | 概述 .....              | (252) |
| 10.2   | 系统的组成 .....           | (252) |
| 10.2.1 | 测试方案拟制决策分系统 .....     | (254) |
| 10.2.2 | 测试方案信息管理分系统 .....     | (254) |
| 10.2.3 | 系统帮助分系统 .....         | (255) |
| 10.3   | 系统主要功能 .....          | (255) |
| 附录     | 基本知识 .....            | (256) |
| A.1    | 摄影测量相关知识 .....        | (256) |
| A.1.1  | 摄影测量概述及原理 .....       | (256) |
| A.1.2  | 交会测量布站基础 .....        | (261) |
| A.1.3  | 测量站数与精度的关系 .....      | (279) |
| A.1.4  | 目标与背景对比度计算 .....      | (281) |
| A.1.5  | 目标与太阳夹角计算 .....       | (294) |
| A.2    | 光学设备测角数据修正 .....      | (297) |
| A.2.1  | 脱靶量修正 .....           | (297) |
| A.2.2  | 系统误差修正 .....          | (301) |
| A.2.3  | 地球曲率误差修正 .....        | (305) |
| A.2.4  | 光波折射误差修正 .....        | (309) |
| A.3    | 雷达测量相关知识 .....        | (312) |
| A.3.1  | 概述 .....              | (312) |
| A.3.2  | 雷达的分类 .....           | (313) |
| A.3.3  | 雷达基本工作原理 .....        | (314) |
| A.3.4  | 雷达距离方程 .....          | (315) |
| A.4    | 弹道测量雷达简介 .....        | (316) |
| A.4.1  | 系统组成及功能 .....         | (316) |
| A.4.2  | 测量原理及方法 .....         | (318) |
| A.4.3  | 测量精度分析 .....          | (323) |
| 参考文献   | .....                 | (329) |

## 第①章

# 概 论

### 1.1 概 述

随着常规兵器向信息化、体系化和远程精确打击方向发展,装备信息化、系统网络化、平台自行化、侦察远程化、弹药制导化、毁伤多样化等趋势和特点日益明显,对常规兵器试验鉴定提出了新的更高要求。而作为试验鉴定的重要组成部分,目标飞行弹道参数测量越来越成为揭示被试武器装备内在品质和固有特性最直接最有效的基本手段,面临着更加严峻的挑战。目前普遍采用的依靠光、电、雷、遥等单一手段获取弹道参数的传统测试模式,已难以满足新型常规兵器多目标、多参数、全弹道、高精度、实时化的试验测试需求,以难以适应被测目标“暗、小、快、多、密、低、高、远”等具体特点。高质量完成实时精准的弹道参数测量,必然要求打破传统测试模式,综合采用多种测试手段,合理配置各种测试资源,融合处理各类测试信息,实现光学、电测、雷达、遥测遥控等系统组网测试,走出一条基于能力的常规兵器试验弹道测量之路,大幅提升弹道综合测试能力,促进靶场试验鉴定水平不断提高,为常规武器装备发展建设提供有力支撑。

目前,常规武器试验靶场测控系统(以下简称常规测控系统)基本形成了光学、电测、雷达、遥测等测试体系,测试手段日趋完善。常规测控系统由光学测量设备、雷达测量设备、遥测遥控设备、指挥控制设备、声学和时间测量设备、其他设备(包括时统、通信、校飞、大地测量和气象勤务保障等设备)组成,主要用于完成火炮、火箭、导弹、特种飞行器等飞行目标弹道测量(包括坐标、速度、姿态、特征量等)、遥测遥控、飞行体实况记录、目标特性参数测量、试验指挥控制与显示等任务。采用测控设备组网测试方法,可以极大地发挥测控设备作用,使其在高精度测量、远距离测量和高可靠性测试等方面最大限度地满足武器装备试验的测试需求。

### 1.2 常规兵器弹道测量基础

#### 1.2.1 试验靶场及目标

常规武器试验靶场或基地是供常规武器试验和作战训练的场所,拥有广阔的场地,并布有大量试验设施设备。靶场通常分为发射区(首区)、航区和弹着区(落区)。首区位置一般是固定的,航区和落区将随着弹道的改变而改变。测控系统的台站就布设在靶场的相应区域。常

规武器试验设施一般包括发射阵地、实验室、测试工房、飞机起降平台、测试点位、测量基准(标志)、立靶塔架等;其试验设备一般包括测试、测控、通信、时统、指挥调度及气象、大地测量等分系统。

被测目标就是靶场测控的对象。主要包括压制武器:地炮、海炮、火箭炮等;装甲突击武器:坦克、步兵战车、反坦克武器等;防空反导武器:高炮、导弹、高射机枪等;弹药:普通弹药、制导弹药和各种特殊弹药(含引信)等;无人机:侦察型无人机、攻击型无人机等;机载武器:机载火炮、弹药及火控装备等;侦察校射装备:雷达、军用光学装备等;轻武器:枪械、枪弹、防暴武器等。

## 1.2.2 弹道特性及常用术语

### 1. 研究弹道特性的意义

弹道是指弹丸或导弹质心运动的轨迹。研究各种弹丸或导弹在发射全过程中的运动规律及伴随发生的有关现象的学科,称为弹道学。根据研究的对象不同,弹道学又分为枪炮弹道学、火箭弹道学和导弹弹道学。根据发射过程不同阶段的物理现象,又将弹道划分为内弹道、中间弹道、外弹道和终点弹道,并形成了各自的分支学科。

枪炮与火箭外弹道学是研究枪弹、炮弹、航空炸弹及火箭弹在空中运动规律及有关问题的科学。它分为质点弹道学与刚体弹道学两大部分。质点弹道学就是在一定的假设下,略去对弹丸运动影响较小的一些力和全部力矩,把弹丸当成一个质点,研究其在重力、空气阻力和火箭推力作用下的运动规律。刚体弹道学就是考虑弹丸所受的一切力和力矩,把弹丸当作刚体,研究其围绕质心的运动(亦称角运动)及其对质心运动的影响。

研究弹体飞行的弹道特性,对试验鉴定、测试技术人员来说具有重要的意义,其目的在于:

- (1) 掌握弹体的飞行速度、飞行高度、射程、落点(或脱靶量)散布等飞行特性;
- (2) 研究分析弹体飞行过程中的各种干扰因素对飞行性能造成的影响;
- (3) 根据试验目的和弹道特性设计试验方案和测试方案;
- (4) 实施飞行试验的安全控制;
- (5) 对飞行故障进行分析,判断;
- (6) 根据弹道特性有针对性地处理测试数据,以评价弹体的弹道性能;
- (7) 进行弹道仿真;
- (8) 编制射表。

### 2. 常用坐标系

在分析武器系统飞行性能及建立射表弹道模型时,需要建立坐标系,其中常用四种坐标系:地面坐标系、弹体坐标系、弹道坐标系和速度坐标系。

#### (1) 地面坐标系 $O\text{-}XYZ$

与地球固连的右手直角坐标系。坐标原点取在火炮膛口中心,或导弹与火箭的发射筒出口中心,或取在导弹待发状态时的质心位置; $OX$ 轴与过原点 $O$ 的水平线重合,顺射向为正; $OY$ 轴在射击面内与 $OX$ 轴垂直,指向上方; $OZ$ 轴按右手法则确定。

此坐标系是外弹道计算的参考系。

#### (2) 弹体坐标系 $O'\text{-}X_1Y_1Z_1$

与弹体固连的右手直角坐标系。原点 $O'$ 取在弹体的质心上; $O'X_1$ 轴与弹体几何纵轴重

合,指向头部为正; $O'Y_1$ 轴在弹体纵向对称平面内,垂直于 $O'X_1$ 轴,指向上方为正; $O'Z_1$ 轴垂直于 $O'X_1Y_1$ 平面,方向按右手法则确定。

此坐标系表示弹体在空间的姿态,用于建立弹体的一般转动运动方程。

### (3) 弹道坐标系 $O'-X_2Y_2Z_2$

坐标原点 $O'$ 在质心的右手直角坐标系。其中 $O'X_2$ 轴与质心速度方向重合(弹道切线方向); $O'Y_2$ 轴垂直 $O'X_2$ 且位于过速度矢量的铅直面内,向上为正; $O'Z_2$ 轴按右手法则确定。

此坐标系是运动参考系,用于建立运动方程。

### (4) 速度坐标系 $O'-X_3Y_3Z_3$

坐标原点 $O'$ 在质心的右手直角坐标系。其中 $O'X_3$ 轴与质心速度方向重合; $O'Y_3$ 轴位于弹体纵向对称面内与 $O'X_3$ 轴垂直,指向上为正; $O'Z_3$ 轴按右手法则确定。

几种坐标系的相互关系如图 1-1 所示。

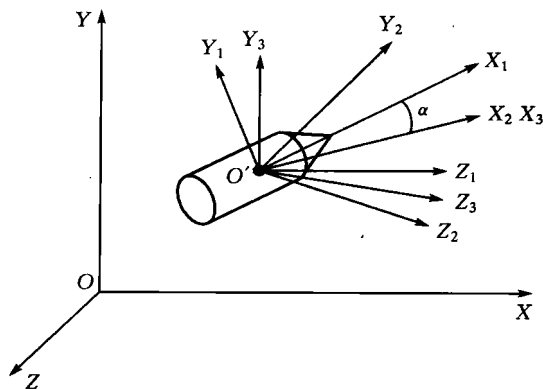


图 1-1 几种坐标系的相互关系示意图

## 3. 火炮与火箭试验常用术语

### (1) 弹丸运动的几个时期

在弹丸运动过程中,根据其受约束的情况,可分为以下三个时期:

①约束期。弹丸前定心部没有脱离炮口之前,由于炮管与定心部的间隙很小,故弹丸的角运动受到严格限制,此期间称为约束期;

②半约束期。从弹丸前定心部出炮口到后定心部(或弹带)脱离炮口之前,弹丸可以绕后定心部转动,但后定心部仍受一定限制,此期间称为半约束期(枪弹的约束期与半约束期无明显界限);

③自由飞行期。从弹丸后定心部出炮口之后在空中飞行的整个过程,其角运动和质心运动都不受任何限制,此期间称为自由飞行期。

### (2) 火箭弹运动的几个阶段

根据火箭弹的受力情况分为三个阶段:

滑轨段——弹丸后定心部离开发射筒前的弹道段;

主动段——发动机工作期间所经历的弹道段;

被动段——发动机停止工作后的弹道段。

还有一种用火炮发射的火箭称为增程弹,或称火箭增程弹。它的飞行过程也可分为三个

阶段:

起始段——从弹丸脱离炮口到发动机点火之前的弹道段;

增速段——亦称主动段,即发动机工作期间所经历的弹道段;

被动段——发动机停止工作后的弹道段。

### (3) 地面坐标系

地面坐标系,与地面固连的坐标系,用  $O-XYZ$ ,以弹道起点为坐标原点,以射击面和弹道起点水平面的交线为  $X$  轴,沿射向为正, $Y$  轴铅直向上为正, $Z$  轴方向按右手法则确定,如图 1-2 所示。

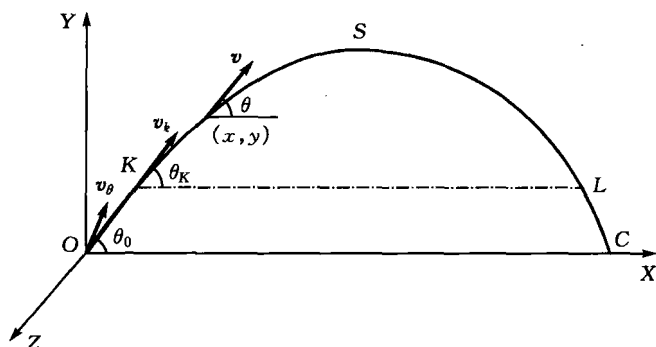


图 1-2 火炮、火箭地面坐标系

### (4) 外弹道及其诸元

①外弹道。外弹道是指在弹丸脱离炮口飞到弹着点或落点的过程中,质心所经历的路线。如果弹丸在真空中运动,弹道是比较简单的。但当弹丸在空气中运动时,由于空气动力等因素的作用,其弹道是一条复杂的曲线。在外弹道学的研究中,弹道上的一些特征点有着特别重要的意义。这些特征点包括:起点、主动段终点、顶点、升弧、降弧、落点。弹丸离开起点后处于上升状态的弹道  $OS$  称为升弧段,处于下降状态的弹道  $SC$  称为降弧段,如图 1-2 所示。

②弹道诸元。弹道诸元是指弹丸在飞行时各个时刻所对应的质心坐标、速度、弹道倾角、弹道偏角等。对于弹道特征点,其弹道诸元包括的一些术语如下:

a. 射出点诸元。如图 1-3 所示,弹道起点对于炮弹就是射出点(半约束期结束瞬间弹丸质心所在位置,为方便起见,对炮弹常近似将炮口当作射出点,射出点以  $O$  表示),对于火箭将开始运动时质心所在位置作为弹道起点。

射出点诸元包括下列内容:

初速——弹丸在起点处的速度,初速以  $v_0$  表示;

炮口水平面——通过起点的水平面,即图 1-2 中的  $XOZ$  平面;

射线——通过初速向量的方向线,弹丸脱离炮口瞬间的弹道切线;

仰线——弹丸射出前的炮身轴线;

射面——通过仰线的铅直面,即图 1-2 中的  $XOY$  平面;

仰角——仰线与水平面的夹角;

射角——射线与水平面的夹角;

炮目高低角——起点与目标的连线与炮口水平面的夹角;

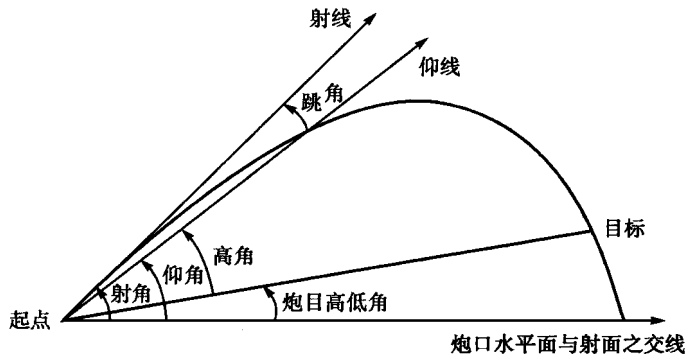


图 1-3 起点诸元

跳角——仰线与射线的夹角；

高角——仰角与炮目高低角的差。

火箭滑轨段诸元包括离轨时间和离轨速度。离轨时间指点火开始到火箭后定心部离开发射筒的这段时间；离轨速度指火箭后定心部离开发射筒的瞬时速度。

b. 主动段终点诸元。主动段终点指火箭发动机停止工作时的质心位置，以  $K$  表示。

如图 1-2 所示，主动段终点诸元包括下列内容：

熄火点时间——火箭点火开始到熄火的时间，以  $t_K$  表示；

坐标——发射坐标系坐标，以  $x_K$ 、 $y_K$ 、 $z_K$  表示；

速度——弹道切线方向的速度，以  $v_K$  表示；

弹道倾角——弹道切线与水平面的夹角，以  $\theta_K$  表示；

弹道偏角——弹道切线到水平面的投影与射向到水平面投影的夹角，以  $\varphi_K$  表示。

c. 顶点诸元。顶点诸元只包括最大弹道高，以  $S$  表示，如图 1-2 所示。最大弹道高指的是弹道顶点到炮口水平面的高度。

d. 落点诸元。如图 1-4 所示，落点诸元包括下列内容：

落速——弹丸到达落点时的速度；

落点弹道切线——通过落点的弹道切线；

落角——落点弹道切线与炮口水平面之间的夹角；

射程——落点和起点之间的距离；

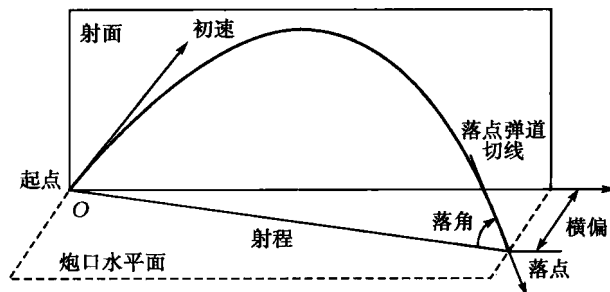


图 1-4 落点诸元

横偏——落点到射面的距离。

#### (5) 弹道分类

弹道可分为真空弹道和空气弹道两类。

①真空弹道。真空弹道是指弹丸在真空条件下运动的弹道。在真空中,弹丸仅受重力的影响,弹道的特点是:全弹道是一条对称于过顶点垂线的抛物线;全弹道位于射击平面内;当射角小于 $45^\circ$ 时,射程随着射角的增大而增大;射角为 $45^\circ$ 时,射程最大;射角为 $90^\circ$ 时,射程为0,此时射高最大,弹丸飞行时间也最长,落速与初速的大小相同,在弹道顶点处的速度最小;弹道与弹丸本身的特性无关。

②空气弹道。空气弹道是指弹丸在空气中运动的弹道。空气弹道相当复杂,其复杂性主要是由于弹轴与弹道切线间存在着一个随时间变化的夹角(称之为攻角)引起的。由于这个攻角的存在,出现了形式复杂的空气动力系的力矩系,此时弹丸的运动不再是简单的质点运动,而是复杂的空间刚体运动,除了质点运动外,弹轴还将围绕质心作角运动。当攻角很小时,弹丸围绕质心角运动对质心弹道的影响比较小。但当攻角较大时,其影响就非常明显,严重时将使弹丸偏离正常的弹道。

空气弹道与真空弹道相比较有下列特点:升弧段长度大于降弧段,降弧比升弧弯曲;最大弹道高不在全弹道中央,而是靠近落点一侧;落速小于初速,落角大于射角;全弹道的最小速度点并不在弹道的最高点,而在降弧段的某一点上;最大射程的射角并不都是 $45^\circ$ 。对弹丸的弹道进行研究时主要针对空气弹道进行研究。

### 4. 导弹试验常用术语

#### (1) 弹道段划分

制导武器飞行弹道通常可划分为无控弹道、导入段弹道和稳定导引段弹道。

①无控弹道。无控弹道是指无控制力作用的弹道,弹体靠发射器提供的速度进行惯性飞行。

开始对弹体进行大回路闭环制导的弹道点称为“启控点”。在从发射到启控这一段时间内,由于存在各种随机扰动的作用,形成“起控点散布”。启控点散布包括启控点的位置及起控时的速度方向的随机分布。通常情况下,在影响无控弹道散布的诸因素中,初始扰动和推力偏心是两个主要因素。在弹体不滚转的情况下,推力偏心往往表现为支配的因素(无控段有发动机工作时);在低速滚转的情况下,初始扰动可能上升为支配作用。

启控点的弹道参数是控制弹道的起始条件,直接影响到以后的控制弹道的品质。因此在设计时应尽量减小起控点散布,试验时应对启控点散布进行测试。

②导入段弹道。由于弹体在启控点处具有位置偏差及角偏差,所以导弹在启控点处不可能正好在瞄准线上,必须有一个调节引导过程,将导弹制导到瞄准线上来,这个过程的弹道就是导入段,如图1-5所示。

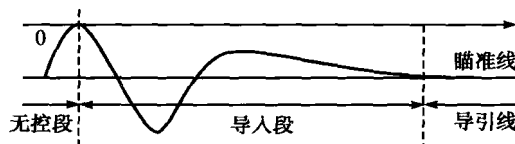


图 1-5 导弹的飞行弹道

在导入段上,导弹不可能有足够高的命中概率,因此导入段愈短愈好。衡量导入段弹道品质的是导入段长度、时间和超调量的大小。

③稳定导引段弹道。导入段以后直至命中点的弹道称为稳定导引段。在这一弹道段,导弹按设计的规律飞行,弹道波动很小,因此导弹对目标的命中概率很高。

影响这一段弹道性能的主要因素有:制导系统性能、弹体参数、外界条件和目标条件。

## (2) 导弹过载系数

导弹过载系数定义:作用在导弹上的全部表面力的合力  $\sum \mathbf{F}$  与导弹的瞬态质量  $m$  在地面上的称重值  $mg_0$  之比值 of 导弹过载系数,用  $n$  表示,即

$$n = \frac{\sum \mathbf{F}}{|mg_0|} \quad (1-2-1)$$

式中  $g_0$  为地球表面的重力加速度值。

由于  $\sum \mathbf{F}$  是矢量,  $|mg_0|$  是标量,所以过载系数  $n$  是矢量,它的方向与表面力合力的方向一致。因而它可以在所处的坐标系内分解。例如,将表面力  $\sum \mathbf{F}$  在导弹的速度坐标系  $O-X_3Y_3Z_3$  中分解为  $\sum F_{x3}$ 、 $\sum F_{y3}$ 、 $\sum F_{z3}$  三个分量,则可以写出过载系数在速度坐标系的分量形式

$$\begin{cases} n_x = \frac{\sum F_{x3}}{|mg_0|} \\ n_y = \frac{\sum F_{y3}}{|mg_0|} \\ n_z = \frac{\sum F_{z3}}{|mg_0|} \end{cases} \quad (1-2-2)$$

在分析导弹结构强度时,常把  $n$  投影在弹体坐标系  $O-X_1Y_1Z_1$  上,而得到  $n_{x1}$ 、 $n_{y1}$ 、 $n_{z1}$ ,如图 1-6 所示。

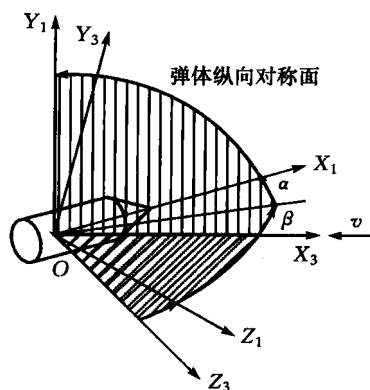


图 1-6 速度与弹体坐标系关系示意图

由图 1-6 可以求出  $n_x$ 、 $n_y$ 、 $n_z$  与  $n_{x1}$ 、 $n_{y1}$ 、 $n_{z1}$  的关系如下: