



中国航天科技前沿出版工程·中国航空间信息技术系列

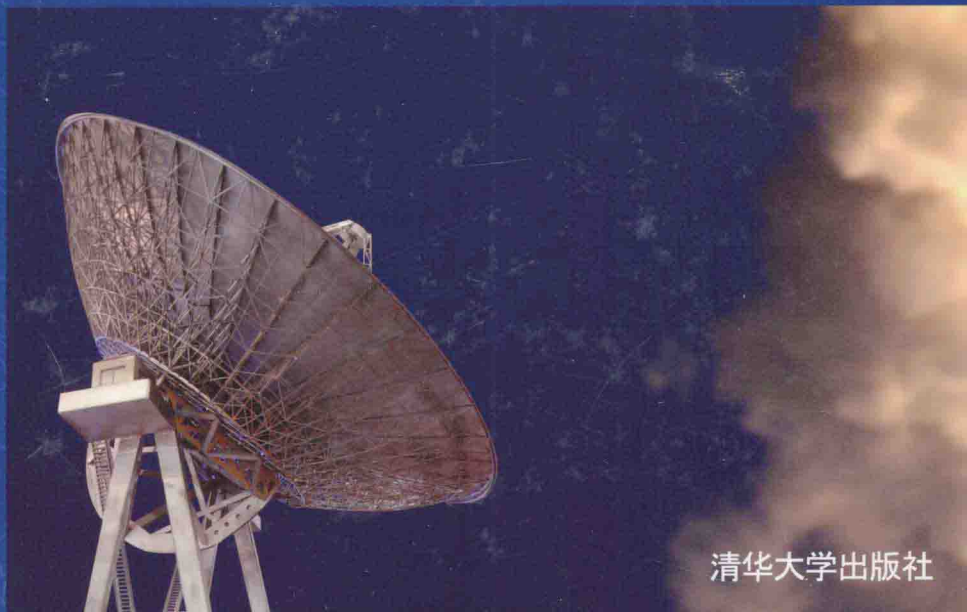
“十二五”国家重点图书出版规划项目



Missile TT&C System Design:
Principles and Algorithms

导弹测控系统 总体设计原理与方法

北京跟踪与通信技术研究所
成求青 李波 余浩章 邓洛凤 著



清华大学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中国航天科技前沿出版工程·中国航天空间信息技术系列

“十二五”国家重点图书出版规划项目

Missile TT&C System Design:
Principles and Algorithms

导弹测控系统 总体设计原理与方法

成求青 李波 余浩章 邓洛凤 著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书概要介绍了靶场导弹测控系统的作用、总体设计要求与基本步骤,系统地说明了导弹飞行试验基本的时空知识,重点阐述了测控系统组成与环境、主要战技指标论证、系统集成与试验鉴定、系统优化等方面的基本原理和方法,综合形成了一个比较完整的测控总体设计专业知识体系。

本书比较系统地总结了多年工程实践经验,理论结合实际,对于开展测控系统设计工作具有实际参考价值,可供从事本专业的工程技术和研究人员参考,也可作为导弹航天试验与测控等相关专业人员和高等院校师生的参考资料。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

导弹测控系统总体设计原理与方法/成求青等著.--北京:清华大学出版社,2014
中国航天科技前沿出版工程·中国航天空间信息技术系列/钱卫平主编
ISBN 978-7-302-38185-3

I. ①导… II. ①成… III. ①导弹试验—试验设计—总体设计 IV. ①TJ760.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 225937 号

责任编辑:石磊 赵从棉

封面设计:傅瑞学

责任校对:刘玉霞

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京雅昌艺术印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:153mm×235mm 印 张:25.5 字 数:443千字

版 次:2014年9月第1版 印 次:2014年9月第1次印刷

印 数:1~1500

定 价:125.00元

产品编号:046118-01

中国航天空间信息技术系列

编审委员会

主任：钱卫平

副主任：董光亮 吴正容 朱天林

委员：孙威 郭军海 李海涛 赵宗印 李平

柳忠贵

秘书：陈凌晖

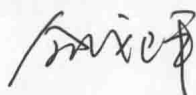
人类探索宇宙的步伐正随着航天技术的发展逐步加快。21 世纪, 航天技术及能力的迅速成熟, 促使其更加深入地渗透到人们生产生活的各个方面, 成为科技、经济领域中强劲的增长点; 同时, 还使其强烈释放出空间力量的效能, 在国家安全领域受到越来越广泛的关注。

空间信息技术作为航天技术的重要组成部分, 其发展水平对航天系统整体技术和能力起着关键的支撑和促进作用, 日益得到国内外航天领域专家与工程技术人员的重视。随着载人航天工程与月球探测工程的圆满完成, 中国已经成为具有独立开展太空探索能力的航天大国。中国在航天技术领域的进步离不开空间信息技术的支持, 航天工程的实施也凝结出一系列空间信息技术的成果与经验。

要满足航天技术迅速发展的需要, 空间信息技术仍面临种种挑战。这些挑战既有认识层面的, 也有理论、技术和工程实践层面的。如何解放思想, 在先进理念和思维的牵引下, 取得理论、技术以及工程实践上的突破, 是我国相关领域科研、管理及工程技术人员必须思考和面对的问题。

北京跟踪与通信技术研究所作为直接参与国家重大航天工程的总体技术单位, 主要担负着导航通信、空间操作等领域的空间信息技术总体规划与设计工作, 长期致力于推动空间信息技术的研究和发展。为及时总结一线科技人员的理论成果、技术创新及工程实践经验, 促进经验向理论的升华, 北京跟踪与通信技术研究所组织策划了“中国航天空间信息技术系列”丛书。本丛书涉及专业面广泛, 既有理论研究的创新突破, 也有实践经验的系统总结, 相信对我国航天领域, 特别是空间信息技术领域的科技工作者和工程技术人员, 一定能够提供有益的帮助与借鉴。

北京跟踪与通信技术研究所



2014 年 6 月

导弹试验靶场测控系统(下面简称测控系统或系统)的设计和实现是一项复杂的系统工程,本书论述的是该系统总体设计的原理和方法,这是随导弹试验逐步发展起来的一个新的专业,从起步到现在尚不足60年。“总体”的含义很广,主要指事物的整体和全局。系统顶层的规划、分析及协调与管理等宏观事项在工程上总称系统总体,20世纪中后期形成的系统工程即是对各类系统总体的科学总结和概括,属系统科学。

系统科学体系涵盖四个科学层次,即系统哲学、系统基础科学、系统方法科学及系统应用科学。系统工程是将系统科学的理论和方法应用于人们的实践活动,属于应用科学层次。因系统工程主要是在理论上研究解决系统性问题的原理和方法,它需与实际工程系统结合起来方能产生实效,所以各具体系统还需有自身的系统总体来实现这种理论与实践的结合。从系统工程角度,可将系统总体视为基于系统工程原理,紧贴工程实体,面向具体工程系统的理论和方法,涵盖系统的顶层规划、分析、设计、综合及协调管理等多方面工作。

“总体”既是观念也是方法,对于复杂大系统的认识和研究,如果没有系统总体,必定会“剪不断,理还乱”。老一辈著名科学家钱学森先生深知靶场测控系统的复杂性和重要性,在事业起步之初即倡导成立专业的研究所,专门主管靶场测控系统总体方面的研究和设计。这个专业经过近半个世纪的发展各方面已基本完善,不仅能全面完成系统规划、设计、研制、试验,即系统工程各个环节的任务,而且解决系统性问题的能力也有长足进步,已完成从定性分析为主到定性定量分析相结合,再到现在的定量分析为主、定性判断为辅的转变,依靠积累的专业知识和工程经验及现代科学技术手段,该领域内的大部分系统性问题均可进行定量分析,保证科学决策。

测控系统总体涉及方方面面,显得事情较“杂”,加之部分系统总体人员工作中有重实操、轻理论的偏向,致使在部分人的眼中总体工作就是一揽子事务。为建立对测控系统总体的正确认识,更主要的是为促进这个专业的进一步发展,有必要对靶场测控系统总体方面的知识和经验进行总结、梳理,以提高理论水平、明确其科学定位,这就是编写本书的初衷。

靶场测控系统总体既包括技术方面的工作,也包括组织与协调管理方

面的工作,本书旨在论述技术内容,即围绕测控系统总体设计,阐述其原理和方法。全书共分11章,按内容可归纳为四大部分:第一,说明测控系统在导弹试验中的地位和作用,总体设计的主要任务、要求与实现过程,以及基本的步骤和方法;第二,介绍与总体设计分析相关的基础知识,包括导弹测控中常用的坐标系统和时间系统、测控目标与环境;第三,介绍外测、遥测与安控及其他一些主要测控设备的基本原理特征与主要指标的设计分析方法;第四,论述系统的系统集成与关键技术指标的分析方法,包括系统接口设计与集成、关键性能计算分析、试验鉴定及优化设计等方面的内容。四部分内容相互衔接,既概要介绍了测控系统总体设计的基本原理,又系统地说明了导弹飞行试验所需的时空知识,重点阐述了测控系统组成与环境、主要战技指标论证、系统集成与试验鉴定、系统优化等方面的原理和方法,试图综合形成一个完整的专业知识体系。本书比较系统地总结了多年工程实践经验,理论结合实际,对于开展测控系统设计工作具有实际参考价值,可供从事本专业的工程技术和研究人员参考,也可作为导弹航天试验与测控等相关专业人员和高等院校师生的参考资料。

本书由成求青研究员、李波研究员、余浩章和邓洛凤工程师合作而成,其中,李波参与完成了本书第1、2、5、8、10章的编写及全书的修改校对;余浩章参与完成了本书的第4章;邓洛凤参与完成了本书的第3章;成求青负责其余章节的编写与全书统稿。本书是在北京跟踪与通信技术研究所领导和有关部门的大力支持与帮助下完成的,在编写过程中得到了许多同事的帮助。钱卫平、董光亮、吴正容和朱天林4位研究员对本书的编写和出版给予了极大的关心和支持,孙威副研究员、马岩副研究员、陈凌晖工程师给予了具体的指导,做了大量的组织工作,郭军海研究员、白广周研究员、李巍研究员、王青伟研究员、杜曼高级工程师等提出了许多宝贵意见和建议,李玉书研究员、王海芳副研究员、赵华工程师、苑刚工程师等提供了一些宝贵的参考资料,陈宜稳工程师、党宏杰工程师、余文广工程师分担了作者的大量烦琐工作。在此,对他们们的热情帮助和辛勤劳动表示衷心的感谢。

由于编者理论和学术水平有限,书中难免有疏漏或错误之处,敬请读者不吝赐教。

作 者

2014年7月于北京

第 1 章 绪论	1
1.1 导弹的分类及飞行试验任务	2
1.2 试验靶场的组成与功能	4
1.3 测控系统的地位和作用	4
1.4 测控系统的规划与建设	7
1.5 导弹测控技术的发展	8
1.6 本书内容结构	11
第 2 章 测控系统总体设计概要	13
2.1 系统与总体设计	14
2.2 总体设计主要任务	16
2.3 总体设计主要问题	18
2.4 总体设计的实现	19
2.4.1 测控需求论证	19
2.4.2 系统的综合与分析	21
2.4.3 台站布局与配置	23
2.4.4 系统集成	25
2.4.5 系统分析评估	26
2.4.6 总体方案拟定	26
2.4.7 设计方案落实	27
2.4.8 试验验证	28
2.5 对总体设计的要求	29
第 3 章 测控时空基准及参数换算	33
3.1 常用时间系统的定义与转换计算	34
3.1.1 常用时间系统的定义	34
3.1.2 时间系统的转换计算	37
3.2 常用坐标系的定义与转换计算	38
3.2.1 常用坐标系的定义	38

3.2.2	坐标系的转换计算	44
3.2.3	相关参数的转换计算	58
3.2.4	坐标系间相关欧拉角的计算	65
第4章	大气与目标特性对测控的影响	71
4.1	大气影响及其参数估算	72
4.1.1	光信号的大气传输损耗	72
4.1.2	电信号的大气传输损耗	73
4.1.3	大气折射误差	75
4.2	光学目标特性参数估算	77
4.2.1	阳光目标有效反射面积	77
4.2.2	激光目标有效反射面积	86
4.2.3	目标有效辐射面积	87
4.3	雷达目标散射截面积估算	90
4.3.1	简单形体的 RCS	90
4.3.2	组合形体的 RCS	93
第5章	外测分系统	101
5.1	光学外测	102
5.1.1	光电经纬仪	102
5.1.2	激光测量雷达	107
5.2	无线电外测	111
5.2.1	单脉冲测量雷达	111
5.2.2	中长基线干涉仪系统	121
5.2.3	短基线干涉仪系统	126
5.2.4	非相参测速定位多站系统	128
5.2.5	多站联用	129
5.2.6	多测速系统	129
5.3	GNSS 外测	131
5.3.1	GNSS 基本情况	131
5.3.2	GNSS 外测系统组成与功能	137
5.3.3	弹载转发器系统弹道参数解算	139
5.4	实况景象记录	143

第 6 章 遥测与安控分系统	147
6.1 遥测分系统设计	148
6.1.1 系统组成	148
6.1.2 设计分析	157
6.2 安控分系统设计	165
6.2.1 主要故障及安控方式	165
6.2.2 安控系统的组成与功能	168
6.2.3 系统设计	171
6.2.4 主要指标分析	181
第 7 章 弹载测控与配套分系统	187
7.1 弹载测控分系统	188
7.1.1 无线电设备	188
7.1.2 激光合作目标	199
7.1.3 光信标与雷达角反射器	202
7.2 引导分系统	204
7.2.1 概述	204
7.2.2 引导误差分析	205
7.2.3 引导概率估算	206
7.3 通信系统	207
7.3.1 通信在测控中的作用及要求	207
7.3.2 系统组成与功能	208
7.3.3 几种基本系统的原理与应用	209
7.4 时统分系统	218
7.4.1 时统在测控中的作用及要求	219
7.4.2 系统组成与功能	220
7.4.3 时统设备	223
第 8 章 系统集成与接口设计	225
8.1 测控台站组成与配置	226
8.1.1 台站整合	226
8.1.2 布局优化	227
8.1.3 台站配置	229
8.2 站址勘选与测量	236

8.2.1	站址勘察	236
8.2.2	站址坐标测量	237
8.3	系统接口设计	240
8.3.1	信息交换关系	241
8.3.2	信息传输结构与接口	241
8.3.3	信息传输协议	247
8.3.4	信息传输内容与格式	250
8.4	设备安装标校	250
8.4.1	地面站设备的安装标校	251
8.4.2	船载测控设备的安装标校	256
8.4.3	机载测控设备的安装标校	258
8.4.4	星体标校	259
8.5	系统连接匹配	261
8.5.1	测控信息连接	261
8.5.2	指挥调度信息连接	266
8.5.3	时统信号的连接	267
8.5.4	引导信息的连接	271
第9章 关键技术性能计算分析		273
9.1	视见距离计算	274
9.2	跟踪性能计算	274
9.2.1	地面站跟踪性能	275
9.2.2	机载站跟踪性能	276
9.2.3	船载站跟踪性能	280
9.3	非跟踪设备视见范围计算	285
9.3.1	地面固定设备视野范围	285
9.3.2	机载固定设备视野范围	286
9.3.3	船载固定设备视野范围	287
9.4	作用距离估算	288
9.4.1	光电设备作用距离	288
9.4.2	雷达设备作用距离	294
9.4.3	激光雷达作用距离	297
9.5	测量精度分析	299
9.5.1	基本概念	299

9.5.2	误差源分析	300
9.5.3	各种体制的精度估算方法	308
9.6	测量可靠性分析	321
9.6.1	基本概念	321
9.6.2	系统可靠度预估	324
9.6.3	可靠性指标分配	325
第 10 章	设计验证试验	329
10.1	系统仿真试验	330
10.1.1	仿真概述	330
10.1.2	系统建模	332
10.1.3	仿真运算	338
10.2	系统联调试验	358
10.2.1	传输正确性检查	359
10.2.2	传输误码和时延测试	360
10.2.3	系统总联测试	361
10.3	系统校飞试验	362
10.3.1	系统性能校飞	363
10.3.2	精度鉴定校飞	363
10.3.3	作用距离鉴定校飞	365
第 11 章	系统优化设计	367
11.1	概述	368
11.2	优化设计的一般过程	368
11.3	主要模块的设计	369
11.3.1	设计变量	369
11.3.2	数学模型	370
11.3.3	约束条件	370
11.3.4	目标函数	370
11.3.5	优化方法	371
11.4	优化设计的实现	372
11.4.1	一般原则	372
11.4.2	设计工具	373
11.4.3	测控总体设计专家系统	375

00E	.....	附录 A 正交多项式最小二乘法拟合参数计算	379
15E	.....	参考文献	390
15F	.....	名词索引	392
252	.....	.....	.....
253	.....	.....	.....
254	.....	.....	.....
255	.....	.....	.....
256	.....	.....	.....
257	.....	.....	.....
258	.....	.....	.....
259	.....	.....	.....
260	.....	.....	.....
261	.....	.....	.....
262	.....	.....	.....
263	.....	.....	.....
264	.....	.....	.....
265	.....	.....	.....
266	.....	.....	.....
267	.....	.....	.....
268	.....	.....	.....
269	.....	.....	.....
270	.....	.....	.....
271	.....	.....	.....
272	.....	.....	.....
273	.....	.....	.....
274	.....	.....	.....
275	.....	.....	.....
276	.....	.....	.....
277	.....	.....	.....
278	.....	.....	.....
279	.....	.....	.....
280	.....	.....	.....
281	.....	.....	.....
282	.....	.....	.....
283	.....	.....	.....
284	.....	.....	.....
285	.....	.....	.....
286	.....	.....	.....
287	.....	.....	.....
288	.....	.....	.....
289	.....	.....	.....
290	.....	.....	.....
291	.....	.....	.....
292	.....	.....	.....
293	.....	.....	.....
294	.....	.....	.....
295	.....	.....	.....
296	.....	.....	.....
297	.....	.....	.....
298	.....	.....	.....
299	.....	.....	.....
300	.....	.....	.....

第1章

绪论

对物体的运动变化过程进行测量和控制的技术手段和方法总称为测控系统。测控对象和任务不同,系统的组成与功能也不同。导弹是高技术、高价值装备,其设计、研制、改进与定型需要经过一系列试验,而飞行试验作为综合性系统试验,其主要目的就是在尽可能真实的环境下考核和评估试验对象,具有全面性和接近实战的特点,是导弹考核的主要手段和研制定型的关键环节,也是导弹作战能力产生和发展的源泉。本书所述导弹测控系统是指在导弹飞行试验中对试验过程进行观测和控制的整套手段和方法,建立在导弹试验靶场,是导弹试验靶场的一个重要组成部分。

导弹测控系统监控导弹飞行试验进程,获取飞行试验数据,为导弹性能的分析、评估与改进提供科学依据,它在飞行试验中的作用极其重要。导弹测控系统涉及天、地、海、空等诸多环节,是一类典型的复杂大系统,其设计和使用涉及导弹研制与试验、靶场规划与建设、自身的规划与实现等。总体设计必须着眼全局,正确理解和理清这些关系是做好设计的基础,为此,先就有关问题进行概要论述。

1.1 导弹的分类及飞行试验任务

1. 导弹组成及主要类型

导弹是一类依靠自身动力推进、能进行飞行控制、将弹头导向并毁伤目标的武器,在导弹与航天工程上简称为“型号”或“产品”。导弹通常由弹头、弹体、制导系统和推进系统等部分组成。

导弹按弹道特征或飞行轨迹,可分为弹道式导弹和飞航式导弹;按作战任务,可分为战略导弹、战役导弹和战术导弹;按发射点和目标点的不同,又可分为地对地导弹(简称为地地导弹,余同)、地对空与空对地导弹、空对空导弹、舰对舰导弹、地对舰与舰对地导弹等,如图 1.1 所示。

2. 导弹飞行试验任务

导弹研制是个复杂的系统工程过程,从研制任务下达到产品问世一般需要经过反复的设计改进和试验验证。就其试验而言,需从局部到整体、从室内到室外、从地面到靶场,从数学仿真到实弹发射等多种场合和多种方式进行检验。其中飞行试验是最高形式,也是对被试导弹最逼真、最全面的考核,包括研制性飞行试验、鉴定性飞行试验和产品批抽检飞行试验等。

研制飞行试验贯穿于导弹研制全过程,主要是验证在真实飞行条件下各分系统方案的科学性与合理性、各分系统之间的兼容性与工作的协调性,

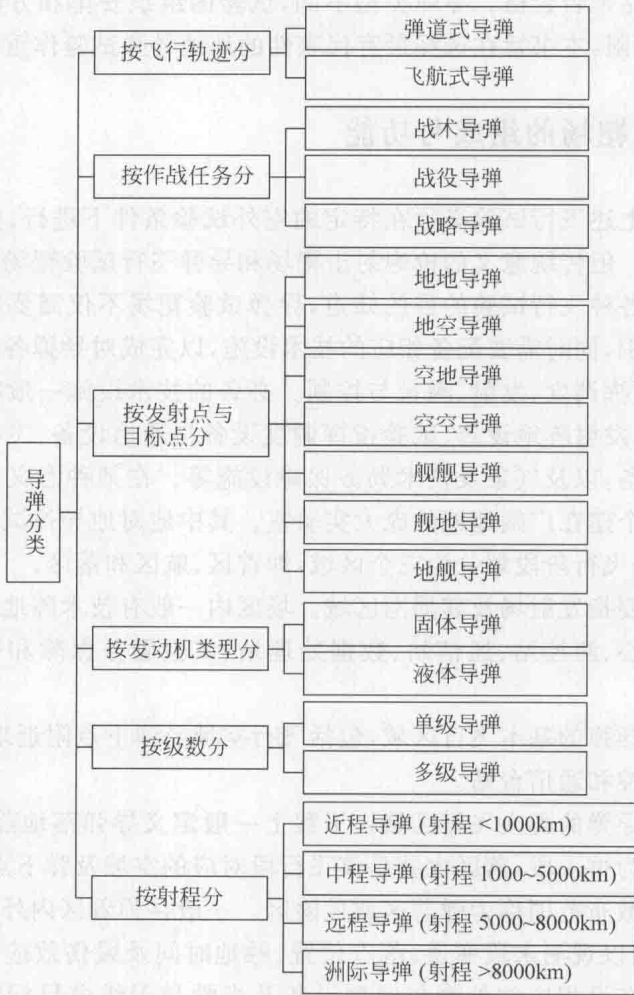


图 1.1 导弹的分类

以及武器系统的主要战术技术指标。

鉴定飞行试验是在导弹武器系统的研制工作已经完成,为对其进行全面考核而安排的试验,通常称为“定型”飞行试验。定型试验着重于对武器系统的战术技术指标及使用维护性能等进行全面检查,包括整个武器系统配置的完整性及工作的协调性、制导控制精度、杀伤概率、毁伤效能、突防性能,以及武器系统的可靠性与可维修性等。

批抽检飞行试验是在导弹武器系统已经定型投入批量生产以后,从每个批次中抽取少量导弹作为样品进行的飞行试验检查,根据试验结果评定

相应批次产品是否合格。导弹类型不同,试验的组织安排和方法也有所不同,因篇幅所限,本书旨在选择最有代表性的地地导弹试验作重点说明。

1.2 试验靶场的组成与功能

导弹的上述飞行试验必须在特定的室外试验条件下进行,整个试验场所称为靶场。但传统意义的枪炮射击靶场和导弹飞行试验靶场是无法相比的。由导弹各种飞行试验的目的知道,导弹试验靶场不仅需要较大的地面和空间范围,同时需要配备相应的技术设施,以完成对导弹各系统的测试检查、试验指挥调度、发射、测量与控制。必备的技术设施一般有测试设备和厂房、导弹发射阵地设施、试验指挥调度设备与通信设备、飞行过程的监测与控制设备,以及气象及技术勤务保障设施等。在某种意义上导弹试验靶场就是一个建在广阔地域的庞大实验室。其中地对地导弹试验靶场的范围最大,常按飞行阶段划分为三个区域,即首区、航区和落区。

首区主要指发射场及其周围区域。场区内一般有技术阵地、发射阵地、指挥控制中心、测控站、通信站、数据处理站、试验勤务保障和行政管理机构等。

航区是导弹的基本飞行区域,包括飞行空域及弹下点附近地区,航区内配置各种测控和通信台站。

落区是导弹的再入飞行区域。工程上一般定义导弹落地前高度 80km 以下的弹道为再入段,落区也就是该飞行段对应的空域及弹下点附近地区。其中的落点散布范围称为弹着区或危险区。一般在弹着区内外布设相应的测量设备,用以观测末段弹道、落点位置、触地时间及毁伤效应等。在落区的其他位置布设相应的外测与遥测设备及光学与无线电目标特性测量设备,用以获取再入段的外测与遥测数据及目标特性数据。如果落区在海上,则需将上述观测设备装船,在测量船上进行观测。

1.3 测控系统的地位和作用

测控系统(Tracking Telecommunications and Control System)和导弹及试验靶场有不可分割的联系,它既是试验靶场的组成部分,也是导弹试验体系的组成部分。对靶场而言,因测控是试验靶场必备的功能,故必须配备一定的测控设备,并且一般是作为靶场的基础设施,需列入靶场建设规划,制订测控系统建设规划方案,统一设计,统筹安排。对导弹试验而言,为达