



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

火力控制原理

HUOLI KONGZHI YUANLI



李相民 孙瑾 谢晓方 王昌金 滕克难 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

内 容 简 介

本书系统地介绍了机载和舰载火力控制系统相关的基本原理,主要包括火力控制系统的发展概况,火力控制问题的基本解法和常用坐标,火力控制滤波原理,反舰、对空、非控武器、轰炸和航空反潜的基本原理以及几种先进的火力控制技术。

本书可作为高等院校有关专业的教材,也可供从事火力控制系统的研究、设计、生产和部队有关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

火力控制原理/李相民等编著. —北京:国防工业出版社,2007.5

ISBN 978-7-118-04894-0

I. 火... II. 李... III. 火力控制系统—理论
IV. TJ03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 145450 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 100044)

腾飞胶印厂印刷
新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17½ 字数 403 千字

2007 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 34.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

自从1923年火力控制系统问世以来,武器系统的射击精度及战斗力大大提高,特别是第二次世界大战以后,随着导弹、鱼雷等高精武器和作战飞机的出现,各国均投入大量的人力财力研制各种性能更好的火力控制系统。在高科技条件下的现代战争,将是多目标、多批次、多层次的立体战,作为武器控制的核心火力控制系统对武器系统的效能乃至作战的成败起着关键的作用。火力控制系统应用到数学、控制论、运筹学、计算机科学、作战系统工程等许多新技术原理,成为应用新技术成就最敏感的学科之一。火力控制原理涉及的基础理论广,作者根据多年来从事火力控制系统教学研究的实践,并尽可能地吸收了近几年来学术和科研的最新成果,编著本教材。力图使本书内容的系统性、知识的深广度和综合性有很大的提高。

本书系统地介绍了火力控制系统相关的基本原理,主要包括火力控制系统的发展概况,火力控制问题的基本解法和常用坐标,火力控制滤波原理,反舰、对空、非制导武器、轰炸和航空反潜的基本原理以及几种火力控制新技术。本书可作为高等院校有关专业的教材,也可供从事火力控制系统的研究、设计、生产和部队有关人员参考。

全书共分10章,其中第1章、第3章、第4章、第5章由李相民编写,第2章、第7章、第8章由孙瑾编写,第6章由滕克难编写,第9章由谢晓方编写,第10章由王昌金编写。全书由李相民主编,范洪达教授主审。

本书编写过程中,参考大量的文献资料和兄弟院校的有关教材,并得到了海军航空工程学院教务处和兵器科学与技术系领导的指导和帮助,在此对参考资料的原作者和给予编著者大力支持的各位领导表示衷心的感谢。

由于编著者经验不足,学术水平有限,书中难免有疏漏和错误之处,敬请读者批评指正。

编著者

2006年10月

目 录

第 1 章 火力控制系统概述	1
1.1 火力控制系统的发展	1
1.1.1 火力控制系统的发展概况	1
1.1.2 航空火力控制系统的发展	2
1.2 火力控制系统的功用和组成	3
1.2.1 火力控制系统的功用	3
1.2.2 火力控制系统的组成	3
1.3 火力控制系统的分类	4
1.3.1 按武器的载体分类	4
1.3.2 按武器的种类分类	4
1.3.3 按功能的综合程度分类	5
1.3.4 按采用的计算机类型分类	5
1.3.5 按目标测量跟踪系统测量的数据分类	6
1.3.6 按目标测量和跟踪系统测量的数据率分类	6
第 2 章 火力控制问题的基本解法	7
2.1 几何法	7
2.2 矢量方程法	8
2.2.1 矢量, 矢量图, 矢量方程	8
2.2.2 矢量方程的几种解法	14
第 3 章 火力控制坐标系	16
3.1 坐标系及其转换	16
3.1.1 直角坐标系	16
3.1.2 球面坐标系	21
3.2 描述和解算火力控制问题的坐标系	23
3.2.1 基本坐标系	23
3.2.2 航空射击火力控制坐标系	26
3.2.3 轰炸火力控制坐标系	31
3.2.4 舰载火力控制坐标系	35
3.2.5 引导坐标系	37
3.2.6 制导武器制导坐标系	42
第 4 章 火力控制滤波原理	45
4.1 最小二乘滤波法	45

4.1.1	最小二乘法基本原理	45
4.1.2	累加形式的最小二乘滤波	46
4.1.3	矩阵形式的最小二乘滤波	49
4.1.4	加权最小二乘滤波	56
4.1.5	递推格式的最小二乘滤波	58
4.2	卡尔曼滤波	60
4.2.1	状态方程	61
4.2.2	量测方程	63
4.2.3	离散卡尔曼公式系的推导	64
4.3	目标运动模型	74
4.3.1	导数多项式目标运动模型	74
4.3.2	卡尔曼滤波的收敛性	76
4.3.3	随机加速度目标运动模型	78
4.3.4	卡尔曼滤波器的发散	81
4.4	其他滤波器	82
4.4.1	$\alpha - \beta(-\gamma)$ 滤波器	82
4.4.2	简化的卡尔曼滤波器	83
4.4.3	维纳滤波器	83
4.4.4	各种滤波器小结	85
4.5	实时火力控制跟踪滤波器的选择和评价	86
4.5.1	战术技术论证	86
4.5.2	目标运动及量测模型坐标系选择	86
4.5.3	滤波器的初步选择	87
4.5.4	目标机动的统计描述	87
4.5.5	五种滤波器的比较	87
4.5.6	滤波器性能的检验	89
4.5.7	滤波器的选定	89
4.5.8	滤波器精度的限制	90
第5章	反舰导弹火力控制原理	91
5.1	概述	91
5.1.1	反舰导弹火力控制系统的组成	91
5.1.2	反舰导弹火力控制系统的工作过程	94
5.1.3	反舰导弹火力控制系统的射击方式和导弹发射方式	96
5.2	反舰导弹的解命中问题	99
5.2.1	反舰导弹射击条件假设	99
5.2.2	反舰导弹前置点解命中问题	99
5.2.3	反舰导弹现在点攻击的解命中问题	103
5.3	反舰导弹超视距条件下的发射原理	105
5.3.1	超视距目标定位系统应用的基本情况	106

5.3.2	作战舰艇利用直升机作为中继站实现超视距目标定位	107
5.4	反舰导弹的发射前检查与发射控制	110
5.4.1	射前检查	110
5.4.2	发射控制	112
第6章	对空导弹火力控制原理	117
6.1	概述	117
6.1.1	导引规律的相关概念	117
6.1.2	经典导引方法	117
6.1.3	最优导引方法	118
6.1.4	空中目标的描述方法	119
6.2	对空导弹导引方法的基本原理	119
6.2.1	经典导引方法的基本原理	119
6.2.2	最优导引方法的基本原理	123
6.2.3	对空导弹导引方法的基本要求	126
6.2.4	导引方法的动力学误差分析	127
6.3	遥控制导体制的导引方法	129
6.3.1	三点法	129
6.3.2	前置点法	131
6.4	自寻的制导体制的导引方法	135
6.4.1	概述	135
6.4.2	追踪法	137
6.4.3	恒前置角法	141
6.4.4	平行接近法	144
6.4.5	比例导引法	146
6.5	舰空导弹火力控制原理	149
6.5.1	舰空导弹的攻击特点	149
6.5.2	舰空导弹射击条件的假设	150
6.5.3	舰空导弹解命中问题	151
6.6	空空导弹的火力控制问题	160
6.6.1	导弹的纯追踪发射	161
6.6.2	导弹的离轴发射	164
6.6.3	导弹的直线拦射攻击	166
6.6.4	导弹发射条件的确定	170
第7章	非制导武器射击火力控制原理	173
7.1	前置计算火力控制原理	173
7.1.1	计算前置角光学瞄准具的两种结构形式	173
7.1.2	GG型活动炮架的火力控制计算	178
7.1.3	WW系统的机炮火力控制计算	183
7.2	示迹瞄准原理及示迹线计算	193

7.2.1	示迹瞄准原理	193
7.2.2	真实示迹线的理论计算	195
7.2.3	真实示迹线的简化计算	198
7.3	空地射击条件的选择	205
7.3.1	射击方向的选择	205
7.3.2	射击距离的选择	205
7.3.3	进入俯冲高度的选择	206
7.3.4	俯冲角的选择	207
第 8 章	轰炸火力控制原理	208
8.1	轰炸攻击的基本方法	208
8.1.1	水平轰炸	209
8.1.2	垂直面机动轰炸	209
8.1.3	水平面机动轰炸	212
8.2	连续计算命中点瞄准原理	214
8.2.1	基本瞄准公式	214
8.2.2	方位操纵线	216
8.2.3	拉起预警	218
8.3	连续计算投放点瞄准原理	219
8.3.1	简化假设条件	220
8.3.2	飞机到目标距离的测量计算	220
8.3.3	各种攻击方式的方向瞄准、距离瞄准公式	223
8.3.4	其他信息的计算	226
8.4	特种轰炸的火力控制原理	229
8.4.1	投自动操纵炸弹的瞄准原理	230
8.4.2	投远距离操纵炸弹的引导方法	233
第 9 章	航空反潜原理	235
9.1	概述	235
9.2	机载反潜鱼雷武器系统	236
9.2.1	机载反潜鱼雷武器系统组成	236
9.2.2	机载反潜鱼雷武器系统对鱼雷性能的要求	236
9.2.3	机载反潜鱼雷武器系统对弹道的要求	237
9.3	投掷反潜鱼雷的瞄准原理	238
9.3.1	高空鱼雷特点	239
9.3.2	低空投雷特点	242
9.3.3	一般带伞鱼雷投雷瞄准原理	246
第 10 章	先进火力控制技术	250
10.1	多目标攻击火力控制原理及技术	250
10.1.1	多目标攻击的基本概念	250
10.1.2	多目标雷达、火力控制系统和导弹的基本功能和关键技术	251

10.1.3	多目标攻击技术	254
10.2	越肩发射火力控制原理及关键技术分析	258
10.2.1	背景	258
10.2.2	越肩发射的研究情况	258
10.2.3	前射火力控制原理	258
10.2.4	后射火力控制原理	259
10.2.5	后射火力控制系统的关键技术	260
10.3	智能机载武器火力指挥控制系统	263
10.3.1	引言	263
10.3.2	IA WFCC 的技术背景	264
10.3.3	F-22 的飞行员助手(PA)	265
10.3.4	IA WFCC 的构成	266
10.3.5	IA WFCC 的原理	268
10.3.6	IA WFCC 的关键技术	269
参考文献	272

第 1 章 火力控制系统概述

火力控制系统(Fire Control System, FCS)又简称为火控系统,泛指控制火炮、导弹、鱼雷等武器瞄准和发射的成套设备,是武器系统的重要组成部分。

1.1 火力控制系统的发展

1.1.1 火力控制系统的发展概况

火力控制系统一般由目标跟踪和测量装置、火力控制计算机、接口及系统控制台等组成,其核心是计算机,它为火炮、导弹等武器计算射击诸元和控制信号,控制火炮、导弹等的射击和飞行。因此火力控制系统的发展是随着计算装置的发展而发展的。

1923年英国的“埃里奥特”(Elliott)公司研制成具有摩擦积分器的机械式模拟计算机,分别装在英国的“纳尔森”(Nelson)号和“罗德尼”(Rodny)号舰上,协助火炮射击运动目标。到20世纪30年代,对如何计算火炮射表进行了数学研究,并提高了机械计算机的解题精度,同时光学器材也有了明显的发展,于是光学观测器材和机械计算机相结合,初步组成了机械式火力控制系统,并一直延续到50年代还在使用。

第二次世界大战中,由于海上战斗有了新的特点,主要作战武器除了火炮外,还有鱼雷、飞机等,并逐步使用了新型传感器——雷达和声呐。在第二次世界大战后期,开始研制机电和电子模拟式计算机,并应用于武器系统的控制中,由此而产生了模拟式火力控制系统,直至整个50年代可以说是模拟式火力控制系统占主要地位,特别是1940年前后,柯尔莫哥洛夫和维纳独立总结和研究的维纳滤波的估计方法,经过他们和后人十余年的努力,对有理谱密度过程在有限的观察时间内,得到了最佳重量函数的显式解。这一研究成果,为机电式和电子模拟式火力控制系统的设计奠定了理论基础。加之机电模拟解算装置的问世,电子的器件和应用电路已发展成熟,致使整个20世纪50年代成为这一类火力控制系统发展、完善和装备部队的时代。

在20世纪50年代后期,由于晶体管技术的发展,使电子计算机在体积、质量、耗电和可靠性等方面有了质的飞跃,从而使数字式电子计算机有可能在火力控制系统中得到应用。电子计算机具有记忆功能、逻辑判断能力、综合处理数据能力和强大而又灵活的计算能力。但在火力控制系统中的应用,从50年代中期到70年代初期,数字计算机经过一番激烈的竞争,才战胜了模拟计算机而取得优势地位。这是因为在一开始时,模拟计算机具有理论成熟,元件、工艺较为完善,造价低廉,操作简单,可靠性和可维修性较好,百分级的精度已满足与观察器材配套的要求等优点。但是随着晶体管技术的发展,特别是集成电路的研制成功,使数字机的体积、质量、功耗和可靠性有了非常明显的改善,造价也迅速下降,这就为数字计算机的发展和广泛应用创造了很有利的条件。例如在60年代研制成功

的 31 种火力控制系统产品中有 17 种是数字式的,占 55%,而在 70 年代研制成功和正在研制的 76 种火力控制产品中,有 61 种是数字式的,约占 80%,可见 70 年代以后数字式火力控制系统已占绝对优势,并随着时间的推移而进一步增强,时至今日,几乎所有研制成功和正在研制的火力控制系统都是数字式的。

在第二次世界大战后,尤其是 20 世纪 50 年代末期,传感器和武器的类型与性能都有显著的变化,形成了现代海战的一系列新特点:多目标、多批次、多方向、空海潜立体战的攻击形式;攻击的隐蔽性、突然性、破坏性都比过去大大增强。因而就要求我们先敌发现、反应迅速、指挥得当、打击有力,为此对来自各个传感器的目标信息,要求能迅速地识别、分类,向指挥员提供清晰、全面的作战态势,并且能协助指挥员迅速、准确地制定作战方案,控制各种武器打击目标。显然,仅仅以火力控制系统是不能完成该使命的,必须有一套以计算机为核心进行必要的情报处理和辅助作战指挥的系统,即综合火力控制系统。

从火力控制系统本身来讲,综合火力控制系统是其发展方向。综合火力控制系统,是指综合使用观察器材,综合控制多种同类型和不同类型的武器,且能自行做出目标指示的火力控制系统。此处所谓“能自行做出目标指示”,是指这种系统具有简单的战术处理能力,即在一定程度上可以完成敌我识别、威胁判断和(或)武器分配的功能,从而使系统具有简单的战术处理能力。

1.1.2 航空火力控制系统的发展

航空火力控制系统是随着军用飞机的发展而发展的,由于飞机的特殊性,其火力控制系统有其自身的特点。20 世纪 60 年代以前,在军用飞机上火力控制系统这一称呼还不普遍,统称为瞄准具,英美国家称为 Sight,苏联称为 ПРИЦЕЛ,后来美国将“瞄准具+雷达”称为火力控制系统,因此说瞄准具是第一代航空火力控制系统。早期的瞄准具是机械固定环瞄准具(Iron Sight),它只是一个简单的机械装置,靠飞行员心算瞄准,之后有了半自动、自动的机电式光学瞄准具,按照其功能又分为射击瞄准具(Gun Sight)、轰炸瞄准具(Bombing Sight)。它们采用机械、机电、电子模拟计算机完成火力控制计算,瞄准显示装置为视准式光学系统或望远镜光学系统,用普通的膜盒式传感器测量载机飞行高度、速度,采用外基线光学测距或雷达测量目标距离,可以和红外线观察仪、雷达等交联工作,实现夜视或复杂气象条件下对目标的瞄准。

20 世纪 60 年代末到 70 年代,应用计算机技术和光电技术,出现了将火力控制计算、显示计算由一台计算机完成,从而取代光学瞄准具与传统的航行仪表的,既可观察到外界目标景物,又可观察到仪表指示、瞄准标志的平视显示/武器瞄准系统(HUD/WAS, Head Up Display/Weapon Aiming System),在歼击机、强击机、战术轰炸机上广泛装备。进而又把惯性导航系统(Inertial Navigation System)与火力控制系统综合在一起,形成了以射击为主的导航/攻击系统(NAS)和以轰炸为主的导航轰炸系统(NBS)。它们可以称之为第二代火力控制系统,装备在第二代军用作战飞机上使用。

20 世纪 70 年代到 80 年代,形成了第三代火力控制系统。将由脉冲多普勒雷达和红外激光等光电传感器组成的目标探测系统,惯性导航系统和大气数据计算机、无线电高度表等组成的引导和载机信息传感系统,平视显示器、下视显示器、多功能显示器、握杆操纵

(HOTAS)组成的任务显示控制系统,管理武器弹药投射的外挂物管理系统以及任务计算机、数据传输系统、视频记录系统等,用串行数字多路数据总线联网组成综合火力控制系统(Integrated Fire Control System, IFCS)。

20世纪80年代后期以来,在综合火力控制系统的基础之上,更进一步将联合战术分配系统、全球定位/导航星系统等组成的通信导航识别系统,即作战C³I(Command Communication Control and Information)系统,飞行控制系统,电子战系统,非航空电子系统(如推力控制)等综合在一起,使之在作战阶段处在最佳匹配状态,形成了统一控制、管理与显示的高度综合化、自动化、数字化、智能化的航空电子系统(Avionics)。该系统的功能仍以火力控制为核心,在对目标实施攻击时,系统处于火力控制状态;导航飞行时,又转而处于导航状态。因此原有的火力控制系统概念的内涵有了很大的扩展,从功能上说来是综合火力控制系统,而从技术学科范畴上说这是航空电子系统。

1.2 火力控制系统的功用和组成

1.2.1 火力控制系统的功用

火力控制系统的主要功能是控制武器装备实施对目标进行攻击。实际的火力控制系统可能各不相同,但其功用是基本相同的,归纳起来有以下几点:

- (1) 接收目标指示信息和载体参数测量装置的信息,对目标进行定位跟踪;
- (2) 预测武器的战斗部或弹丸与目标的相遇点,解算为命中目标所需要的射击(引导)诸元;
- (3) 完成发射瞄准和适时开火,控制发射全过程。

1.2.2 火力控制系统的组成

火力控制系统有多种类别,广泛应用于陆、海、空三军各种兵器中,但归纳起来,每一个火力控制系统都可划分为5个子系统组成,如图1-1所示。

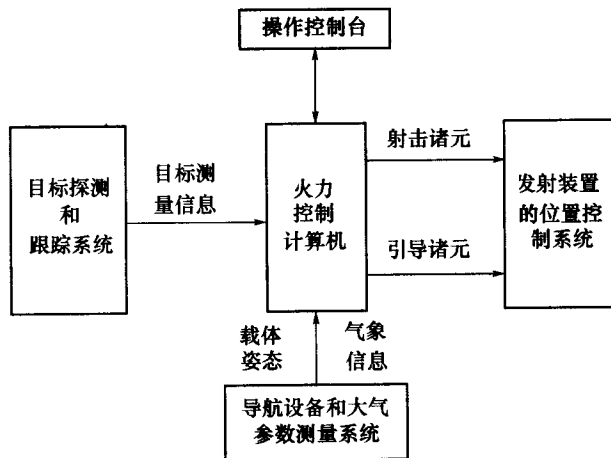


图 1-1 火力控制系统组成框图

1. 目标测量和跟踪系统

该系统包括测量和跟踪目标的设备,其任务是测量目标的距离、方位、高低角(俯仰角)或其各阶变化率,目标的速度、航向或距变率和横移率,并将这些数据送至火力控制计算机。常见的测量跟踪装置有光学瞄准镜、红外跟踪装置、被动雷达、测距机、雷达、激光雷达等。

2. 导航设备和大气参数测量系统

导航设备实时测量武器载体的姿态参数和运动参数,大气测量系统测量风速、风向、大气温度、大气压力等参数,并将这些测量参数送至火力控制计算机。

例如,舰艇速度的测量装置有计程仪,舰艇航向的测量装置有电罗经、磁罗经、方位水平仪、平台罗经,测量舰艇横摇、纵摇的装置有方位水平仪、平台罗经;飞机姿态及运动参数的测量装置有惯导测量系统。对于陆用火力控制系统,不包括该子系统。

3. 火力控制计算机系统

其主要任务是接收测量和跟踪装置测量的目标数据(敌我距离、方位、高低角或其各阶变化率),接收导航设备和大气测量系统测量的武器载体的姿态参数、运动参数及大气参数;计算目标速度、位置、加速度和武器射击诸元,如导弹自控时间,武器的发射架瞄准角等。

4. 发射装置的位置控制系统

该系统的任务就是接收火力控制计算机计算的射击诸元,定位发射装置或直接给武器装定某些射击诸元。

5. 操作控制台

火力控制计算机靠人进行操作,通过操作控制台按钮、开关、键盘使火力控制计算机完成相应的计算和控制动作,操作控制台还通过数码管、指示灯或显示器把文字、图像、声音等以多媒体手段直观形象地将交互信息提供给操作员。操作员可通过控制台控制武器发射,还可以实现显示设备自控状态,指示故障部位,指导模拟训练等功能。

1.3 火力控制系统的分类

火力控制系统有多种分类方法,不同分类方法的依据是不同的,它们只是反映了火力控制系统的某些方面的特征。

1.3.1 按武器的载体分类

按被控武器的载体进行分类时,可以将火力控制系统分为:机载火力控制系统、舰载火力控制系统、车载火力控制系统、岸基火力控制系统等。

1.3.2 按武器的种类分类

按被控武器的种类进行分类时,可以将火力控制系统分为:火炮火力控制系统、导弹火力控制系统、鱼雷火力控制系统、反潜深弹火力控制系统等。对于同一类武器还可以区分为:主炮火力控制系统、副炮火力控制系统,舰舰导弹火力控制系统、舰空导弹火力控制

系统等。

1.3.3 按功能的综合程度分类

这种分类方法直接反应了武器系统的结构特点,此时可以将火力控制系统分为三大类。

1. 单机单控式火力控制系统

这类火力控制系统只能控制单一型号的武器对目标进行攻击,目标的类型可以不同,但一次只能对一个目标进行攻击。由于它的任务比较单一,针对性强,因此结构比较紧凑,反应时间也短。它是出现最早,也是目前应用最为广泛的一种系统。

2. 多武器综合火力控制系统

这类火力控制系统的特点是能够控制多种同类型或不同类型的武器对多个目标进行攻击。例如,美国的 WSA4 系统,它能同时控制 114mm 舰炮和“海猫”舰空导弹对付两个空中目标或者一个空中目标和一个海上目标。

3. 多功能综合火力控制系统

这类火力控制系统的特点是除了一般的火力控制系统的功能外,还具有一定的对目标搜索、敌我识别、威胁判断、武器分配和目标指示等作战指挥功能,因此它是一种“自备式”的系统,具有很强的独立作战能力。

1.3.4 按采用的计算机类型分类

计算机是火力控制系统的核心设备,火力控制系统的发展和计算机的发展是密不可分的。按火力控制系统采用的计算机类型进行分类,火力控制系统可以分为三大类。

1. 模拟火力控制系统

模拟火力控制系统按采用元件不同分为机械模拟火力控制系统、机电模拟火力控制系统、电子模拟火力控制系统、机电—电子模拟混合火力控制系统。

模拟火力控制系统的特点:

(1) 参与运算的数字量全是相应的物理量表示,这些量是连续的,故能连续迅速计算射击诸元并满足一定的精度;

(2) 结构简单,可靠性好:在雷达、计算机、发控装置之间的数据传递直接用连续量,不需要转换。

2. 数字火力控制系统

数字火力控制系统的特点:

(1) 计算精度高;

(2) 有逻辑判断能力和记忆能力;

(3) 有一定故障自检及修复能力;

(4) 易实现一机多用或多机连用。

3. 模拟电子混合式火力控制系统

在火力控制系统中兼用模拟和数字两种技术以发挥二者的特长。

1.3.5 按目标测量跟踪系统测量的数据分类

(1) 距离、角度和/或各阶变化率系统。如配用雷达、激光和红外测量装置的火力控制系统中同时测量距离方位和/或各阶变化率系统作为约束输入系统称为第一类火力控制系统。二维距离方位系统是其特例。

(2) 纯角度和/或各阶变化率系统。如配用噪声站,红外等测量装置的火力控制系统。特将测量的角度和/或各阶变化率作为约束,再附之距离的有限个测量值作为约束输入之系统为第二类火力控制系统。

(3) 纯距离和/或各阶变化率系统。如配用测距仪和激光测距仪等测量装置的火力控制系统。特将测量的距离和/或各阶变化率作为约束,再附之角度的有限个测量值作为约束输入之系统为第三类火力控制系统。

1.3.6 按目标测量和跟踪系统测量的数据率分类

(1) 连续测量的火力控制系统。如配用雷达、噪声测向站的火力控制系统。

(2) 断续测量的火力控制系统。如配用回声站的火力控制系统。

后两类分类对于火力控制计算机原理方案的选择,对估值方法的探讨,对计算机实现手段的选定,均有益处。

第 2 章 火力控制问题的基本解法

解算火力控制问题有两种基本解法,即几何法和矢量方程法。在武器载体向目标空域的引导,以及控制武器弹丸投射方向、时机、密度和持续时间,制导武器向目标制导的整个过程中,武器载体、目标和武器弹丸三者之间的相互运动关系非常复杂,采用几何的方法去解算,需要多次投影分解、综合、换算,势必十分烦琐。因此,目前解算火力控制问题,除了十分简单的情况外,大多摒弃了几何法而采用矢量方程法。矢量方程法推导严密、简明扼要,适宜解算任意复杂的火力控制问题。

2.1 几何法

所谓几何法,就是在画出攻击过程的几何图的基础上,应用几何学的方法来确定武器载体、目标和武器弹丸三者之间正确的相互运动和位置关系,从而导出瞄准原理的一种简单方法。

下面,通过举例来说明如何利用几何法来解算火力控制问题。

【例 2.1】 如图 2-1 所示,在机械固定环瞄准具中,用几何法推导绝对坐标系中的提前角 Ψ_{jd} 的原理公式。载机在原点 O 处用航炮射击 M 点处的目标。

在提前角三角形 OMN_{jd} 中,由正弦定理可得

$$\frac{\sin \Psi_{jd}}{MN_{jd}} = \frac{\sin q_j}{ON_{jd}}$$

$$\sin \Psi_{jd} = \frac{v_{mjd} T_y}{v_{pj}} \sin q_j = \frac{v_{mjd} \sin q_j}{v_{pj}}$$

由于 Ψ_{jd} 为小角度,则得

$$\Psi_{jd} \approx \sin \Psi_{jd} = \frac{v_{mjd} \sin q_j}{v_{pj}}$$

在早期的机械固定环瞄准具中,由飞行员根据目标类型和运动情况,估计出目标绝对速度 v_{mjd} ,再根据实际所看到的目标形状,估计出目标投影比 $\sin q_j$,将弹丸平均速度 v_{pj} 取为定值,用上述公式即可算出绝对提前角 Ψ_{jd} 。

【例 2.2】 如图 2-2 所示,轰炸机 O 在无风条件下,对目标 M 实施水平轰炸,已知飞机高度为 h ,速度为 v_1 ,所投下炸弹的落下时间是 T ,受到空气阻力会产生 Δ 退曳长,投弹时,目标线与飞机纵轴之间应夹有目标俯仰角 μ_m ,求 μ_m 的表达式。

轰炸机 O 点在地面上的投影点为 O' ,在 $\triangle OO'M$ 中有

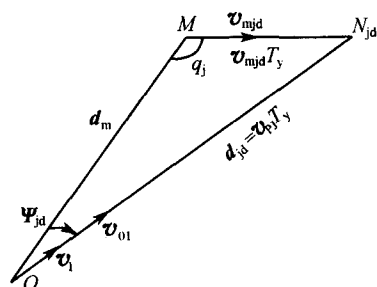


图 2-1 用几何法确定提前角
 d_m —目标距离; q_j —目标进入角; N_{jd} —目标前置点; d_{jd} —目标前置距离; v_{mjd} —目标绝对速度; v_{pj} —弹丸平均速度; T_y —弹丸飞行时间。

$$\tan \mu_m = \frac{h}{O'M} = \frac{h}{v_1 T - \Delta}$$

用上述方法,即可计算出目标俯仰角 μ_m 的大小和方向。

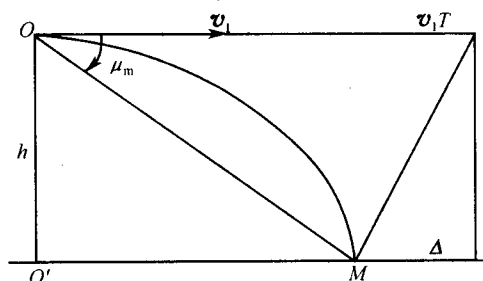


图 2-2 目标俯仰角 μ_m

通过以上示例,可以看出几何法简单易懂,物理意义清楚,特别适用于初学者用以解算简单的火力控制问题。但是应当指出,对于武器载体、目标和武器弹丸复杂的空间位置和运动关系,如果采用几何法,就需要多次投影分解、综合和换算,这是十分烦琐的。此外,采用几何法一般都需要对具体的火力控制问题进行简化,或者略去一些次要因素,或对复杂运动景象简化假设,或近似处理,或不考虑各种运动的关联等,总之会带来原理误差,降低解算精度。有鉴于此,只有在解算一些简单的火力控制问题时才用几何法。

2.2 矢量方程法

2.2.1 矢量,矢量图,矢量方程

1. 矢量

矢量是既有大小又有方向的物理量,矢量的大小方向都可变化。如果对应于某一变量 t 的每一值,都对应一个大小方向都确定的矢量 \mathbf{R} ,则称矢量 \mathbf{R} 是 t 的矢量函数,记为 $\mathbf{R}(t)$ 。大小和方向都不变的矢量称为常矢量。在火力控制问题中,许多量都可以用矢量来表示。例如,目标的位置可以用目标距离矢量 \mathbf{d}_m 来表示;目标速度可以用目标空速矢量 \mathbf{v}_m 来表示;攻击机速度可以用飞机空速矢量 \mathbf{v}_1 表示等。矢量有多种表达形式,火力控制问题中常用以下 3 种:

(1) 矢量 \mathbf{R} 可表示为它本身大小(模) R 与沿其自身方向的单位矢量 \mathbf{R}^0 的乘积,即

$$\mathbf{R} = R\mathbf{R}^0 \quad (2-1)$$

(2) 矢量 \mathbf{R} 可用三维坐标系中的分矢量来表示,即

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_x + \mathbf{R}_y + \mathbf{R}_z = R_x \mathbf{i} + R_y \mathbf{j} + R_z \mathbf{k} \quad (2-2)$$

式中: $\mathbf{R}_x, \mathbf{R}_y, \mathbf{R}_z$ 为矢量 \mathbf{R} 在所选坐标上 $Oxyz$ 三轴上的分矢量; R_x, R_y, R_z 为分矢量的模; $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 为分矢量的单位矢量。

(3) 矢量 \mathbf{R} 可用矩阵表示,即

$$\mathbf{R} = [R_x \quad R_y \quad R_z] \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

式中： R_x, R_y, R_z 是矢量 \mathbf{R} 在坐标系 $Oxyz$ 三轴向的投影值； i, j, k 是坐标系 $Oxyz$ 三轴向的单位矢量。

矢量的分量表达式还可以用长度和角度，或仅仅用角度表示其分量。当然单纯用角度来表示分量时，只能表明矢量的方向而不能表示其大小。矢量的变化可以归结为大小的变化和方向的变化，方向的变化是该矢量相对于某一基准矢量的旋转运动。用角速度矢量描述旋转运动，角速度矢量的大小表示旋转运动的速度，角速度矢量的方向表示旋转运动的方向。

由式(2-1)得

$$\mathbf{R}^0 = \frac{\mathbf{R}}{R}$$

单位矢量 \mathbf{R}^0 是模为 1 的无量纲量，其方向代表了矢量 \mathbf{R} 的方向，因此矢量 \mathbf{R} 的方向变化，就可以用单位矢量 \mathbf{R}^0 的旋转运动来代表。角速度矢量表示了单位矢量 \mathbf{R}^0 的旋转运动时的方向变化率。角速度矢量沿旋转运动的转轴，其方向用右手定则确定，其大小代表了单位矢量旋转运动的速度。例如，当火力控制系统的目标跟踪装置稳定跟踪目标 M 时，目标位置可以用目标距离矢量 \mathbf{d}_m 来确定。由于这时跟踪线坐标系 $(Oxyz)_G$ 的 x_G 轴始终指向目标，因此 x_G 轴的单位矢量 i_G 与目标距离矢量 \mathbf{d}_m 的单位矢量 \mathbf{d}_m^0 相等， \mathbf{d}_m 方向的变化就可以用 i_G 的旋转运动来表示。角速度矢量 ω_G 表示了 i_G, \mathbf{d}_m^0 的方向变化率(图 2-3)。 ω_G^0 是跟踪线角速度矢量 ω_G 的单位矢量。

角度是由一个矢量相对于某一基准矢量旋转而得，借助于以上关于角速度矢量的概念，引出角矢量的概念。根据旋转运动的方向，用右手定则确定该矢量旋转角的角矢量方向，即单位矢量。角矢量的大小，表示了旋转角的大小。角矢量与矢量相对于基准矢量旋转所经过的路径无关，而与其最终矢量和基准矢量所处的平面相垂直。通过上述处理，角度就可以用矢量来处理了(图 2-4)。例如，某一矢量 \mathbf{R}_2 相对于基准矢量 \mathbf{R}_1 旋转了角度 φ ，则可以用矢量 $\boldsymbol{\varphi}$ 来表示其旋转方向和旋转角度大小， $\boldsymbol{\varphi}^0$ 是角矢量 $\boldsymbol{\varphi}$ 的单位矢量。

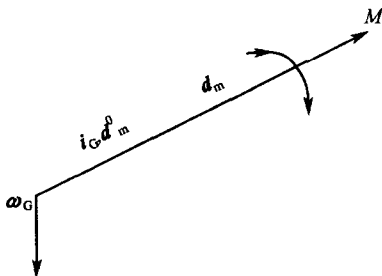


图 2-3 跟踪线角速度矢量 ω_G

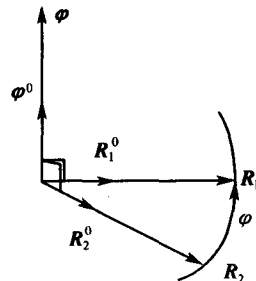


图 2-4 角矢量 $\boldsymbol{\varphi}$

严格地说，角度并不是真正的矢量，只是在角度值很小的时候，在允许有一定误差的条件下，可以将角度近似处理成角矢量，这样将有助于简化火力控制问题。在图 2-4 中，