



 国防电子信息技术丛书

实用探测制导系统 数据处理教程

蔡庆宇 刘德忠 宋 洁 王淑敏 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

国防电子信息技术丛书

实用探测制导系统 数据处理教程

蔡庆宇 刘德忠 宋 洁 王淑敏 著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍探测制导系统的数据处理方法和基本理论,阐述了线性系统滤波的基本理论及其在工程实际应用中需要注意研究和解决的问题。全书共 9 章和 8 个附录,正文内容具体包括绪论、线性系统滤波的基本理论、卡尔曼滤波模型的推广及其在探测系统中的应用、机动目标跟踪、卡尔曼滤波器在非线性系统中的应用、复杂战场环境下的目标跟踪、相控阵雷达中的数据处理技术、卡尔曼滤波在末制导探测系统中的应用、末制导探测制导总体设计与状态估计;附录内容具体包括线性系统和非线性系统滤波理论习题及解答、国际标准大气参数表、国际单位制的基本单位、MATLAB 基础、分贝转换表、拉普拉斯变换的基本性质、常用函数的拉普拉斯变换和 Z 变换表、雷达频段表。

本书可作为电子与通信工程专业、导航制导与控制专业研究生的教材,也可作为从事雷达数据处理、末制导探测总体、飞行器设计总体工作的工程技术人员开展培训和设计的参考资料。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

实用探测制导系统数据处理教程/蔡庆宇等著. —北京:电子工业出版社, 2019.7

ISBN 978-7-121-35809-8

I. ①实… II. ①蔡… III. ①制导系统—数据处理—高等学校—教材 IV. ①TJ765

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 292032 号

责任编辑:谭海平 特约编辑:王 崧

印 刷:三河市华成印务有限公司

装 订:三河市华成印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱

邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:25

字数:820 千字

版 次:2019 年 7 月第 1 版

印 次:2019 年 7 月第 1 次印刷

定 价:118.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010) 88254552, tan02@phei.com.cn。

序

本书是一本由科研机构研究人员编写的研究生教材。作为国内最早开展学位与研究生教育工作的科研单位之一，中国航天科工集团第二研究院自 20 世纪 80 年代初开始进行研究生培养，迄今为止已培养千余名博士、硕士研究生，其中的佼佼者已成长为航天科研生产战线上的骨干力量，他们为祖国航天事业的发展做出了重要贡献。

在多年的研究生培养过程中，中国航天科工集团第二研究院的导师们深感迫切需要一整套能充分体现航天科研工作工程性、系统性、理论与实践紧密结合的研究生教材。为此，中国航天科工集团第二研究院研究生院于 2011 年启动研究生教材的建设工作，鼓励由经验丰富的科研人员编写教材，进一步提升自培研究生的质量。

本书主要介绍探测制导系统的数据处理方法和基本理论，阐述线性系统滤波的基本理论及其在工程实际应用中需要注意研究和解决的问题。全书内容深入浅出，具有很好的基础性和系统性，同时具有很强的工程性和实用性，已经过中国航天科工集团第二研究院研究生院多年的教学实践，得到了同学们的充分认可。

本书作者从事航天科研工作及研究生培养工作多年，学术造诣深厚、治学态度严谨。本书是他们多年科研及教育工作的成果结晶，特别是蔡庆宇老师虽已逾耄耋之年，却仍然笔耕不辍，将多年的科研工作精华以教材的形式加以总结提升、无私传授。在此，中国航天科工集团第二研究院研究生院向各位老师致以崇高敬意，并表示衷心的感谢！

中国航天科工集团第二研究院研究生院

二〇一九年三月

前 言

中国航天科工集团第二研究院（以下简称二院）是国内最早开展学位与研究生教育工作的科研单位之一，1981 年经国务院学位委员会批准获得第一个硕士学位授权点，1984 年获得第一个博士学位授权点。三十多年来，二院的学位与研究生教育作为祖国的航天事业培养和造就了一大批优秀科研人才，为祖国航天事业的发展做出了重要贡献。

为进一步提高二院的人才培养质量，提升电子与通信工程及控制科学与工程专业研究生的专业水平，我们撰写了本书。本书突出理论和实践，在取材和阐述方式上，既注重理论的完整性和系统性，又强调工程的实用性，是作者从事航天科研工作几十年来研究成果的总结和展示。全书由四部分组成，第一部分介绍线性系统滤波的基本理论，是探测制导系统数据处理中卡尔曼滤波器设计的基础。第二部分介绍卡尔曼滤波模型的推广及其在探测制导系统中的应用。第三部分介绍卡尔曼滤波在末制导探测系统中的应用，末制导探测系统的状态估计为制导律的实现提供了好的信息源，为最优制导律的设计奠定了一定的理论基础。第四部分介绍以最优制导律实现为背景的探测制导系统的数据处理仿真与验证。

需要说明的是，书中公式繁多，为降低出错的概率，向量和矩阵全部使用白斜体表示，而未按照国标要求使用黑斜体，请读者阅读时根据上下文加以判断。

本书是为电子与通信工程专业的研究生撰写的，也可作为从事雷达、制导系统工作的工程技术人员的参考书。本书的撰写工作得到了二院研究生院的大力支持与热情帮助，也得到了秦忠宇研究员和历届自培博士和硕士研究生提供的相关帮助。在此，作者一并表示衷心感谢！

由于作者水平有限，本书难免有疏漏和不当之处，敬请广大读者批评指正。

作者

二〇一九年三月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 数据处理在典型低空防空导弹武器系统中的应用简介	1
1.1.1 作战任务与系统组成	2
1.1.2 作战过程与计算机软件的应用	3
1.1.3 目标探测雷达计算机系统及其软件的体系结构	4
1.1.4 导弹制导雷达计算机系统及其软件的体系结构	6
1.2 数据处理在弹上末制导探测系统中的应用简介	8
1.2.1 典型战术弹道导弹的威胁及其目标特性	8
1.2.2 高精度弹目相对运动参数的最优状态估计	9
1.2.3 正弦机动最优制导律实现所需目标参数的获取	11
1.2.4 弹目接近加速度鲁棒 H_∞ 滤波器设计	12
1.2.5 数据处理算法在制导控制计算机系统软件与硬件上的实现	13
1.3 本书各章节简介	13
参考文献	14
第 2 章 线性系统滤波的基本理论	15
2.1 卡尔曼滤波基本理论	15
2.1.1 维纳-霍泊甫方程和线性无偏最小方差估计	15
2.1.2 时间连续的卡尔曼滤波	17
2.1.3 时间离散的卡尔曼滤波	20
2.2 维纳滤波、平稳卡尔曼滤波及其相互关系	26
2.2.1 多维维纳滤波	26
2.2.2 平稳卡尔曼滤波	30
2.2.3 平稳卡尔曼滤波与维纳滤波的关系	32
2.2.4 采用均匀分布目标机动模型的三阶跟踪滤波器	37
2.3 线性系统的状态方程描述及其伴随系统	39
2.3.1 线性系统的纯量微分方程描述	39
2.3.2 确定变参数线性系统传递函数的近似方法	41
2.3.3 慢变参数系统脉冲响应函数的近似求法	44
2.3.4 线性系统的状态方程描述	48
2.3.5 齐次和非齐次向量微分方程的解与脉冲响应矩阵	50
2.3.6 线性系统的伴随(对偶)系统	51
2.4 卡尔曼滤波的可观测性、可控性和误差分析	54

2.4.1 线性系统的可观测性和可控性	54
2.4.2 线性系统滤波器的稳定性	60
2.4.3 线性系统滤波器的误差特性	64
2.4.4 滤波器的真实发散和误差补偿技术	67
2.5 调节卡尔曼滤波的协方差矩阵 Q 和 R	72
参考文献	73
第 3 章 卡尔曼滤波模型的推广及其在探测系统中的应用	75
3.1 线性卡尔曼滤波模型的推广	75
3.1.1 引言	75
3.1.2 有作用力的系统	75
3.1.3 关于噪声模型	77
3.2 雷达常用的几种跟踪飞机的运动模型及其滤波器	82
3.2.1 连续时间系统的连续描述与离散描述的关系	82
3.2.2 常速度模型和常加速度模型及其常增益滤波器的参数制约关系	83
3.2.3 建立在 CV、CA 模型上的 $\alpha-\beta$ 、 $\alpha-\beta-\gamma$ 滤波器的性能分析	88
3.3 10 阶库金积分表	106
3.4 引入速度量测的二阶滤波器的稳态性能分析	109
参考文献	112
第 4 章 机动目标跟踪	113
4.1 引言	113
4.2 新息序列的基本性质	113
4.3 单模型方法	116
4.3.1 相关噪声模型——Singer 模型	116
4.3.2 机动目标的截断正态概率密度模型	127
4.4 串行多模型方法	136
4.4.1 调整过程噪声的方法	136
4.4.2 输入估计方法	136
4.4.3 变维数滤波方法	137
4.4.4 检测及状态自适应调整滤波器	140
4.4.5 修正的常增益自适应滤波方法	146
4.5 并行多模型方法	152
4.5.1 方法描述	152
4.5.2 静态多模型估计器	152
4.5.3 动态多模型估计器	153
4.5.4 GPB1 多模型估计器 (切换模型)	155
4.5.5 GPB2 多模型估计器 (切换模型)	156
4.5.6 交互式多模型估计器 (IMM)	158
4.6 多模型自适应估计	161

4.6.1 目标正弦机动跟踪的三态卡尔曼滤波器	162
4.6.2 目标正弦机动跟踪的四态卡尔曼滤波器	162
4.6.3 包含目标机动频率状态的五态卡尔曼滤波器	163
4.6.4 卡尔曼滤波器组的目标机动频率估计方法	164
4.7 小结	165
思考题	166
参考文献	166
第 5 章 卡尔曼滤波器在非线性系统中的应用	167
5.1 引言	167
5.2 近似高斯化的卡尔曼滤波算法	167
5.2.1 扩展卡尔曼滤波与弹道系数估计	167
5.2.2 转换观测卡尔曼滤波	182
5.2.3 无迹卡尔曼滤波	185
5.3 EKF 在相控阵雷达目标跟踪中的应用实例	187
5.3.1 坐标系、测量模型及状态模型	187
5.3.2 混合坐标系下 EKF 滤波和 UKF 滤波	189
5.3.3 笛卡儿坐标系下的 CMKF 滤波	189
5.4 非高斯分布的直接估计（粒子滤波）	190
5.5 转换测量卡尔曼滤波及扩展卡尔曼滤波有关公式推导	191
5.5.1 真实偏差和协方差	191
5.5.2 平均偏差和协方差	196
5.5.3 球坐标系下对应的扩展卡尔曼滤波（EKF）	201
5.5.4 阵面余弦量测和阵面直角滤波	202
5.6 小结	204
思考题	204
参考文献	205
第 6 章 复杂战场环境下的目标跟踪	206
6.1 引言	206
6.2 测量的证实	206
6.3 干扰环境中的单目标跟踪	207
6.3.1 最近邻域滤波法（NNF）	207
6.3.2 概率数据关联滤波器（PDAF）	208
6.4 干扰环境下的多目标跟踪	211
6.5 模糊子集理论在多目标跟踪中的应用	213
6.5.1 模糊最小方差估计	213
6.5.2 多目标跟踪的模糊滤波算法	214
6.5.3 模糊关系矩阵和隶属矩阵	216
6.5.4 仿真实验结果	217

6.6 编队飞行目标群的跟踪逻辑	217
6.6.1 问题的提出	217
6.6.2 群目标数据处理系统的逻辑功能	218
6.7 运动载体环境下的目标跟踪问题	224
6.7.1 舰载雷达跟踪问题概述	224
6.7.2 参照系及坐标系	225
6.7.3 相对速度与相对加速度的推导	229
6.7.4 舰载雷达跟踪系统框图和仿真试验	231
6.8 小结	233
思考题	234
参考文献	234
第 7 章 相控阵雷达中的数据处理技术	235
7.1 稠密多目标航迹初始化方法	235
7.1.1 分群处理	235
7.1.2 航迹初始化	237
7.1.3 一个工程应用实例	239
7.2 相控阵雷达工作方式的调度策略	241
7.2.1 概述	241
7.2.2 影响调度策略的主要因素	241
7.2.3 自适应调度策略	243
7.2.4 调度程序的设计方法	244
7.2.5 仿真实验结果	248
7.3 专家系统及其在相控阵雷达数据处理系统中的应用	248
7.3.1 专家系统发展概况	249
7.3.2 专家系统的研究对象和结构	249
7.3.3 一个相控阵雷达工作方式调度的专家系统——SOMPAR 专家系统	250
7.3.4 人工智能及其在相控阵雷达数据处理系统中的应用	253
7.4 一个简单的相控阵雷达系统仿真实例	254
7.4.1 目标运动模型的仿真	254
7.4.2 测量过程的仿真	256
7.4.3 跟踪滤波及航迹管理	260
7.4.4 噪声协方差矩阵 $R(k)$ 与初始协方差矩阵 $P(0/0)$ 的计算	265
7.5 小结	270
思考题	271
参考文献	271
第 8 章 卡尔曼滤波在末制导探测系统中的应用	272
8.1 末制导探测系统总体设计	272
8.1.1 关于比例导引制导律指令加速度的方向	272

8.1.2 改进比例导引制导律问题的提出	273
8.1.3 对目标机动和弹体动力学滞后进行补偿的必要性	273
8.1.4 一阶最优制导律	276
8.1.5 二次型性能指标的最优制导律的重要通式	277
8.2 一阶最优制导律的四种推导方法	277
8.2.1 应用极小值原理推导一阶动力学最优制导律	278
8.2.2 应用柯西不等式推导一阶动力学最优制导律	283
8.2.3 应用 Rusnak 方法推导一阶动力学最优制导律	284
8.2.4 应用数值方法推导一阶动力学最优制导律	287
8.2.5 关于零控脱靶量	287
8.3 三回路自动驾驶仪的设计与应用	291
8.3.1 线性化气动传递函数	291
8.3.2 三回路自动驾驶仪的增益的解析求法	293
8.3.3 三回路自动驾驶仪增益的极点配置法	293
8.3.4 三回路自动驾驶仪设计小结	295
8.4 导引头跟踪解耦性能的设计与应用	297
8.4.1 探测器模型	297
8.4.2 导引头参数对稳定性的影响	300
8.4.3 解耦方案	301
参考文献	303
第 9 章 末制导探测制导总体设计与状态估计	304
9.1 一阶最优制导律的实现与仿真	304
9.1.1 目标跟踪状态模型	305
9.1.2 剩余飞行时间的计算	317
9.1.3 目标机动加速度的主辅滤波器估计算法	320
9.1.4 最优制导律的实现与仿真	321
9.2 高阶最优制导律及其滤波实现研究	322
9.2.1 对应二阶飞控系统的最优制导律	322
9.2.2 对应三阶飞控系统的最优制导律	324
9.2.3 对应四阶系统的最优制导律	327
9.2.4 单边最优制导律小结	327
9.3 末制导探测系统仿真试验设计	328
9.3.1 基于脱靶量的末制导控制精度建模与验模	328
9.3.2 基于导引头天线罩的末制导探测建模与验模	328
9.3.3 状态估计滤波器对末制导性能影响的仿真分析与评估	328
9.3.4 小结	329
思考题	329
参考文献	329

附录 A 线性系统和非线性系统滤波理论习题及解答	330
附录 B 国际标准大气参数表 (0~91km)	374
附录 C 国际单位制的基本单位	378
附录 D MATLAB 基础	379
附录 E 分贝转换表	381
附录 F 拉普拉斯变换的基本性质	382
附录 G 常用函数的拉普拉斯变换和 Z 变换表	387
附录 H 雷达频段表	388

第1章 绪 论

早在20世纪70年代初,我们就看到并学习了由《船舶导航译丛》(1970年第1期)翻译的R. E. Kalman的几篇重要论文^[1, 2],此后我们邀请长沙工学院的张最良教授作了“最佳线性滤波方法”的报告^[3],继而邀请以王寿仁先生为首的中国科学院数学研究所概率组的学者们来我单位举办了“离散时间系统滤波的数学方法”^[4]的学习班,在此期间又邀请R. E. Kalman教授到中国来亲自讲学,因此奠定了我们后来开展该领域工作的基础。

与此同时,上海复旦大学计算机系的徐建华、卞国瑞老师也在从事“状态估计和系统识别”的研究工作^[5],我们也向他们学习和借鉴了一些有关线性系统滤波的基本理论。

具备这些基本知识后,在以后近四十余年时间里,本书的作者们在从事有关探测制导系统的研制过程及在对研究生的教学过程中,都获得了不少的具体体会和经验。

大家知道,在探测制导系统理论发展的初期,航空航天工业是该领域问题和学术思想的主要来源之一,其中非线性系统和稳定性分析理论最重要的研究成果就是基于航空航天工业的需求应运而生的。21世纪,虽然航空航天领域的专家们熟知最优状态估计与控制理论的最新成果,并把它们用到了系统设计中,但是传统的状态估计与控制方法——如常增益卡尔曼滤波、比例导引方法、PID控制器、三回路自动驾驶仪等,依然在各种搜索、跟踪雷达和寻的制导系统中得到了最为广泛的应用。本书旨在总结和归纳这些经典的设计方法,让读者全面了解这方面的知识,进而设计出更为先进的系统。

因此,本书可以说是作者们科研和教学工作的总结!本书最大的特点是理论紧密联系工程实践,书中有关章节的理论都具有工程实际背景,且经过了实践的验证,譬如有些参数的调整理论上说不清楚,但我们会给出选择的范围,因此读者可以放心使用!这是工程师必须解决的问题。另一方面,为便于工程技术人员使用和初学者学习,我们会尽量详细描述计算方法,并给出必要的推导过程。

谈到数据处理时,人们总会联想到卡尔曼滤波理论,其实它与其他著名理论如傅里叶变换、泰勒级数一样,是一种以人名来命名的数据处理与分析方法。鲁道夫·卡尔曼(Rudolf Emil Kalman)可以说是20世纪以来最著名的数据处理与分析专家,1930年出生于匈牙利首都布达佩斯,1957年到1958年任职于纽约波基普西的IBM研究实验室,在纽约的那段时间里,他对线性数据采样控制系统采用二次型性能标准的设计及控制系统分析与设计的Lyapunov理论的运用做出了重大贡献,当时他已预见到大规模数字计算机系统的重要性;卡尔曼是现代控制理论三个标志性成果的创立者之一,这些成果分别是Richard E. Bellman(1920—1984年)的动态规划(1956)、Lev S. Pontryagin(1908—1988年)的极大值原理(1956)和Rudolf E. Kálmán(1930—2016年)的卡尔曼滤波或线性最优调节(1959)。卡尔曼让我们能够有幸使用能控、能观的优美概念和结构分解、线性二次最优等工具。本书主要介绍的卡尔曼滤波器,源于卡尔曼的博士论文及其于1960年发表的论文*A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*^[1]。

在战略和战术导弹滤波与数据处理方面,Paul Zarchan(扎尔臣^[6])在相关方面做了持续而深入的研究,其中*Tactical and Strategic Missile Guidance*至今已发行六版,他也是*Fundamentals of Kalman Filtering, A Practical Method*的第一作者,此书至今已发行四版。他拥有40多年探测制导数据处理、导弹制导与控制方面的经验,其与导弹防御问题相关的研究工作可参考文献[6]~[15]。

1.1 数据处理在典型低空防空导弹武器系统中的应用简介^[7]

防空导弹武器系统(Air Defense Missile Weapon System)是用以截击空中飞行目标的防空导弹及为防空导弹服务的全部技术装备。防空导弹武器系统包括搜索、识别、跟踪和指示系统,制导系统,指挥控制系统,防空导弹,发射系统和技术保障设备。防空导弹武器系统于20世纪50年代开始发展,到70年代已构成远程、中程、近程和高空、中空、低空相结合的防空体系。

防空导弹武器系统按作战使命分为国土防空、野战防空和舰艇防空三种;按地面机动性分为固定式、

半固定式和机动式三种,其中机动式又分为牵引式、自行式和便携式三种;按同一时间截击目标的数量分为单目标信道和多目标信道防空导弹武器系统。

国土防空系统采取相对稳定的部署方式,这种方式对导弹机动能力、外形尺寸、重量和有关设备的要求不甚严格。

野战防空系统要求系统具有良好的机动性能,能迅速由行军状态转入战斗状态,能在短暂的停留时间内发射导弹并快速撤离。

舰艇防空系统通常是固定式的,采用水平稳定装置来稳定姿态,舰艇上装有弹库及把导弹输送到发射装置上的设备与发射设备。

搜索、识别、跟踪和指示系统中的搜索设备多是专用雷达,也使用光学设备,用于搜索目标和测定目标的参数。识别设备用于确定目标的敌我属性。在没有雷达识别设备的系统中,目标属性由目视判定。

跟踪设备截获和跟踪目标,不间断地测量目标的运动参数(坐标、速度等)并输入计算机。

指示设备处理和分析搜索设备发来的空中情报,供指挥决策使用。指挥控制系统发出使发射装置转到所需方位和发射导弹的指令。

传动装置根据指令将装有导弹的发射装置转向目标。自动发射装置在规定时间内自动发射防空导弹,也可由操作者手控发射导弹。

制导系统由地面和导弹上的制导设备组成,或者全部由导弹上的制导设备组成。制导系统的组成和各种制导设备的配置形式随制导方式的不同而有很大差异。制导系统的作用是测定目标和导弹的位置及其运动参数,按导引规律确定的飞行弹道形成修正航迹的指令,指引导弹飞向目标。

防空导弹常用的制导方式是遥控制导(无线电指令、波束)、寻的制导(主动、半主动和被动寻的)、复合制导等。

发射系统用于装退、支撑和发射导弹,主要由发射装置和发射控制设备组成。防空导弹常用变角倾斜发射方式,也用垂直发射方式。

技术保障设备用于检查、维修和安装各种设备与装置,保证导弹的对接装配、测试、运输和装填,实施模拟训练等。

未来,各国在提高防空导弹武器系统作战效能的同时,也在探索、研制和完善各种多功能的、多用途的防空导弹武器系统,以及防空导弹与其他防空武器相结合的综合武器系统。随着防空导弹武器系统信息化和协同化的发展,其对探测制导系统在功能、性能诸方面不断提出了的新需求,促使计算机在武器系统中的作用发挥愈来愈大,可以说一个先进的探测制导系统几乎无处不在计算机的控制之下工作。像当今任何具有嵌入计算机的大型的、复杂的实时系统一样,现代探测制导系统已不再是硬件的组合物,而是硬件和软件的组合物。鉴于计算机及其软件在系统中所起的非凡作用,人们不得不彻底改变以往把系统视为“电气”和“机械结构”两大组成部分的习惯,而将现代探测制导系统全新地分解为“系统硬设备”和“系统控制器”两大组成部分。这里的“系统硬设备”是指诸如雷达、导弹等设备的物理实体,而“系统控制器”是指嵌入到探测制导系统的计算机系统及实现整个系统多功能操控的各种算法与软件。如大家所了解的那样,对于探测制导系统,譬如说各种体制工作下的雷达设备、末制导导引头等,国内外已出版了大量专著,但从“系统控制器”的角度来探讨整个系统功能的专著可能要少一些,本书旨在为读者提供一些这方面的材料。

随着现代科学技术的蓬勃发展,一方面空中目标的种类及目标所处的环境日趋多样化、复杂化,并且高动态性能对整个探测系统提出了许多新的要求;另一方面,随着大规模集成电路、计算机软件技术及各种先进控制算法的飞速发展,“系统控制器”方面的研究领域也愈来愈大,得到了很多领域的专家和学者的关注。譬如,如何对付来自空中、海上的多批目标的进攻,用什么算法好,单个目标随机机动飞行使用什么滤波数学模型,在低信噪比和强杂波干扰情况下用什么跟踪模型来保证稳定地跟踪目标等,都是摆在我们面前的课题。为适应这一发展的需要,本书试图系统地总结并概括作者多年来从事这方面研究与设计的工作实践经验,明确“系统控制器”中的哪些数据需要处理。下面以一种典型的低空防空导弹武器系统来阐述数据处理在其探测制导系统设计中的应用。

1.1.1 作战任务与系统组成

在一个国家或其某一战区的防空武器配置中,低空防空导弹武器系统的作战任务是:对付由低空进入的飞机或巡航导弹等敌方目标,保护诸如军事指挥中心、桥梁、机场、兵站和仓库等要害部位或小面积目标。

如图 1.1.1 所示, 此处介绍的典型低空防空导弹武器系统由目标探测和导弹制导两部雷达组成, 它们之间通过高速数字数据链路连接。其中, 目标探测雷达的功能是搜索、截获并跟踪进入被监视空域的目标, 为导弹制导雷达提供待拦截的目标信息; 而导弹制导雷达则根据这些信息继续跟踪目标, 发射、制导导弹拦截并摧毁目标。

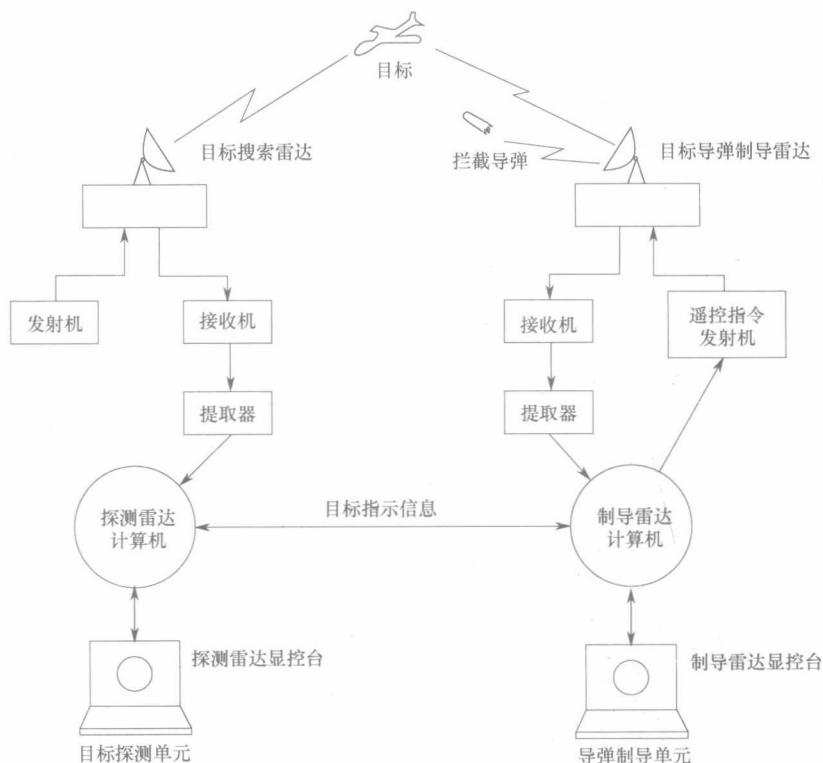


图 1.1.1 典型低空防空导弹武器系统的组成

1.1.2 作战过程与计算机软件的应用

由目标探测和导弹制导两部雷达组成的典型低空防空导弹武器系统按下述过程协同完成作战任务。

1. 目标探测雷达的工作过程

机械扫描雷达周期性地对空搜索目标。检测到目标时, 再由敌我识别系统给出目标的“敌”或“我”识别标志。

目标回波经由信号处理设备——雷达提取器提取和分析, 获得如下目标的“点迹”信息: 位置坐标和识别标志。“点迹”信息自动存入计算机, 供综合视频显示使用。计算机通过数据处理软件将点迹平滑为“航迹”, 即给出目标的速度和位置坐标, 这里采用的滤波算法可能是 $\alpha-\beta$ 滤波算法或卡尔曼滤波器。依据估算出的航迹信息, 计算机就能对目标威胁进行评估, 并把它们分为几类: 第一类称为缓松目标, 即在系统作用距离以外或已识别为“友”的目标; 第二类称为正常目标, 它们处在系统的最佳作用距离内; 第三类称为紧急目标, 即要求立即予以拦截的目标。由此形成目标威胁队列。

计算机根据目标威胁队列向导弹制导雷达传送优先拦截的目标信息。

2. 导弹制导雷达的工作过程

对于如图 1.1.1 所示的典型低空防空导弹武器系统, 导弹制导雷达的工作过程由目标探测雷达传送过来的目标信息启动, 然后雷达依次进入如下 3 个工作阶段。

1) 制导雷达调转

在收到目标探测雷达的目标信息后,计算机自动计算出制导雷达的天线方位角、仰角指向和测距信号。雷达伺服系统和测距系统根据这些信号,把制导雷达天线调转到给定的目标方位角和仰角方向上,同时测距回路开始工作。

2) 搜索与跟踪

雷达波束遇到目标时,产生一个“距离截获”信号。计算机用此信号控制测距系统在距离上锁定目标。在自动跟踪过程中,计算机根据跟踪角误差信号,经滤波外推等算法,控制雷达精确跟踪目标。

3) 导弹发射和制导拦截

一旦时机成熟,雷达操作手就会按下“发射”按钮,启动导弹发射过程。刚刚发射的导弹是无控的。由“导弹发射”信号启动的计数器控制系统转入对导弹的初制导阶段。

初制导经历规定时间并把导弹引入雷达波束后,转入正常制导阶段。在正常制导阶段,计算机根据制导雷达提供的导弹-目标相对角偏差,分析导弹-目标的相对距离,并按正常制导律产生制导指令,引导导弹逐步接近目标。

1.1.3 目标探测雷达计算机系统及其软件的体系结构

1. 计算机系统的主要任务

目标探测雷达计算机系统除控制目标探测雷达完成对空监视、搜索和跟踪目标外,还向导弹制导雷达计算机发送目标指示信息。主要包括以下几个方面:

- (1) 指挥目标探测雷达完成边扫描边跟踪操作,产生目标航迹。
- (2) 显示目标信息,使操作手和指挥员掌握空情,以便进行决策判断。
- (3) 向导弹制导雷达计算机发送决定拦截的目标信息,包括目标的距离、方位角和类型信息。
- (4) 接收并处理操作手通过显控台输入的请求信息。
- (5) 接收并处理由导弹制导雷达计算机传来的信息,包括雷达状态和导弹发射请求等信息。

2. 硬件组成与信息关系

如图 1.1.2 所示,目标探测雷达计算机系统的硬件由一台专用的主控计算机、一个序列发生器、一个提取器和一个显控台组成,其中提取器完成对信号处理系统接收信号的预处理,由信号提取数据;序列发生器则控制计算机有序地分批处理这些数据。

各种信息的交换关系如下:

- (1) 由提取器输入到计算机的信息:目标距离、敌我标识、目标方位角估计值,以计算机字的形式传送。
- (2) 由显控台输入到计算机的信息:操纵手柄控制字和状态控制字。
- (3) 由计算机输出到显控台的信息:跟踪状态字、敌我识别和目标指示字。
- (4) 计算机输出到数据链路的信息:目标指示字和同步信号(如时钟脉冲)。

3. 软件的体系结构

目标探测雷达计算机软件由中断系统和工作软件组成。

由于只有中央处理单元(CPU),而计算机必须响应多种外部激励(如提取器数据输入、显控台输入和数字数据链路输入等),并产生多种输出信息和数据(送往显控台的、送往数字数据链路的),因此计算机处于多道程序并行状态。为保证不丢失外部激励信息并及时输出信号或数据,计算机应配置一个中断系统。

在中断系统中设置的中断分为两大类:第一类称为绝对中断,即可在任何情况下中断计算机操作的中断,如掉电保护中断等;第二类称为相对中断,即可被任何具有更高优先级的中断取代的中断。相对中断级别的数量及各自优先级的选择对系统的实时能力有决定性影响,这类中断有提取器数据输入、显控台控制字输入、计算机内存输出等。

目标探测雷达的工作软件在中断系统的激励下运行,其组成框图如图 1.1.3 所示。

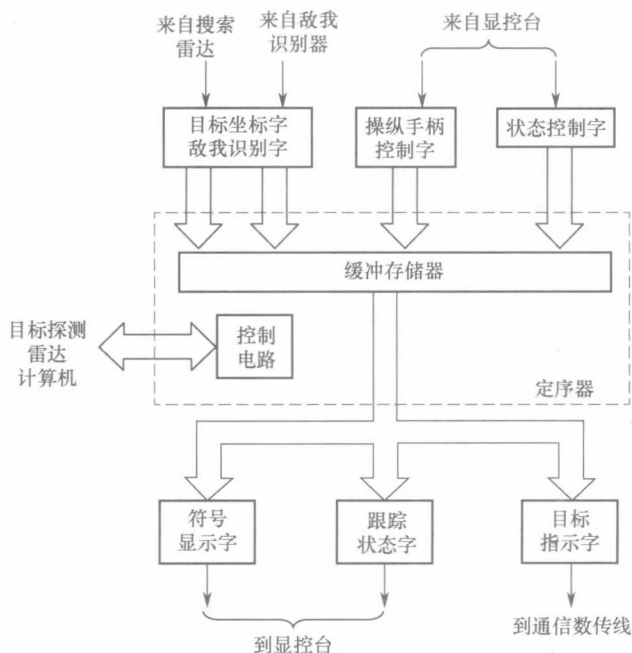


图 1.1.2 目标探测雷达计算机系统体系结构

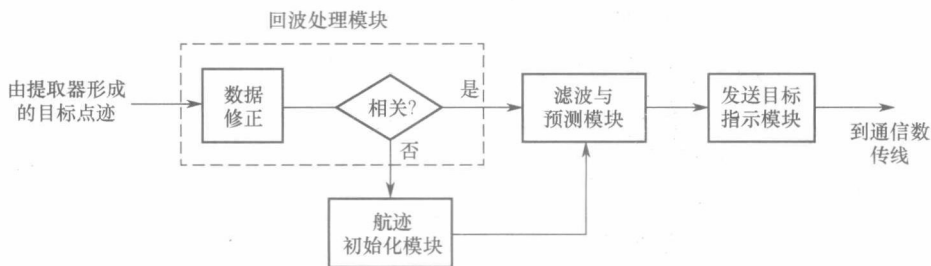


图 1.1.3 目标探测雷达工作软件的组成

由图 1.1.3 可知，它主要由四大模块组成，即回波处理模块、航迹初始化模块、滤波与预测模块和发送目标指示模块。

1) 回波处理模块

回波处理模块首先修正来自提取器的数据，计算回波信息的直角坐标，给出回波显示字符，以供显示使用。接着，回波处理模块完成点迹-航迹的粗相关处理，即完成新回波信号与已建立跟踪回路的航迹的配对处理。

新回波信号与已建立跟踪回路的任何航迹都不相关时，意味着它是来自一个新目标的回波，此时应将它送入一个预分配的数据缓冲区，以备后用。

所谓“粗相关”，是指在进行相关处理时，所使用的相关门的大小是按如下方法计算得到的：在航迹外推值的每个坐标上各加一个预置的常数值。因此，这种相关门判断是粗糙的（参见本书有关章节的论述）。

2) 航迹初始化模块

航迹初始化模块的主要功能是，根据目标探测雷达两次扫描所得的关于同一新目标的回波数据，通过点迹-点迹的相关处理建立一条新航迹。

当已被跟踪的目标数大于允许跟踪的目标数，并且操作手认为新目标应被优先跟踪时，航迹初始化模块还有如下功能：逐个比较目标的威胁程度，剔除威胁程度最小的目标，并让新航迹占据被剔除目标航迹的跟踪回路。在威胁程度判断逻辑中，要综合评估已分配给跟踪制导雷达的目标数、每个目标的航路快捷

方式与紧急程度。

3) 滤波与预测模块

滤波与预测模块的作用是根据点迹-航迹的配对信息,利用点迹信息校正航迹,给出目标状态的最新估计值和预测值,供确定相关门大小和计算目标指示使用。

在进行航迹校正时,既可应用最优线性递推滤波(卡尔曼滤波),又可应用较为简单的 α - β 或 α - β - γ 滤波,算法选择方案根据系统要求的目标状态估计精度和可用计算资源的多少而定(详细讨论见本书的有关章节)。

当有关信息进入滤波与预测模块后,首先判断目标的丢失情况。若目标的丢失次数多于规定次数,则从有关资料缓冲区中删除该目标;否则,接着做精相关处理。若出现一个回波与多条航迹相关,或多个回波与一条航迹相关,则按最近邻域滤波法实现点迹-航迹配对,详见后续相关章节。

滤波与预测模块还依据最新目标状态估计值计算目标的航路快捷方式、径向速度,并判断目标是接近还是背离目标探测雷达,据此重新对目标进行紧急程度分类。

4) 发送目标指示模块

发送目标指示模块根据目标的紧急程度将应优先拦截的目标状态数据(包括目标斜距、方位角)连同其紧急类别标志一同发送到导弹制导单元计算机。

由于从目标探测雷达获得目标点轨迹数据到向导弹制导雷达计算机发送数据已经历一段时间,因此在发送目标指示数据前,必须修正由滤波与预测模块得到的数据。

1.1.4 导弹制导雷达计算机系统及其软件的体系结构

1. 计算机系统的主要任务

导弹制导雷达计算机系统的任务是指挥制导雷达跟踪目标、截获并制导导弹拦截目标。具体地说,主要包括如下几个方面:

- (1) 接收由目标探测雷达计算机送来的目标指示数据并进行坐标变换。
- (2) 处理导弹制导雷达测量的目标角偏差数据,向角跟踪伺服系统发出控制信息,使角跟踪回路闭合,实现对目标的自动跟踪。
- (3) 计算有关参数,估计拦截目标的可能性。
- (4) 控制发射架对准目标并发射导弹。
- (5) 根据导弹制导雷达与导弹的相对坐标偏差,计算对导弹的制导控制指令,引导导弹拦截目标。
- (6) 显示目标坐标数据。
- (7) 接收并处理操作手通过显控台输入的请求信息。
- (8) 向目标探测雷达计算机发送本雷达的状态数据和执行目标探测雷达命令的回送信息。

2. 硬件的组成与信息交换

如图 1.1.4 所示,导弹制导雷达的计算机硬件由一台专用数字计算机、一个序列发生器、一对 A/D 与 D/A 转换器和一个显控台组成。

图中的序列发生器是计算机与外设之间的接口,用于控制计算机与外设之间的信息交换。它还产生同步脉冲信号,用于控制计算机与导弹制导雷达的同步操作。

与目标探测雷达计算机相似,导弹制导雷达计算机也以计算机字的形式与外部设备交换信息。

1) 输入信息

输入信息分为以下三类:

- (1) 由目标制导雷达送来的模拟数据,包括雷达波束轴线与雷达-目标视线的角偏差、目标与导弹的相对坐标偏差、目标斜距、导弹斜距等。
- (2) 由目标探测雷达计算机送来的目标指示数据,包括目标斜距、目标方位角与高低角等。
- (3) 由操作手通过显控台输入的命令数据,包括操纵字、检查字等。