

现 代

洪水预报技术

长江水利委员会水文局 葛守西 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

现代洪水预报技术

长江水利委员会水文局 葛守西 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内
容
提
要

本书以长江流域洪水预报的实践为主体,紧密跟踪国内外七八十年代以来洪水预报技术进步的动向,总结了作者近20年来在推进长江洪水预报技术现代化方面的研究成果,将现代系统理论、计算机技术与洪水预报有机地结合起来,以大量的仿真试验、实际算例及生产上应用的新技术、新方法为素材,深入剖析了在洪水预报中使用的系统预测科学和一系列新技术方法的实质及精髓,介绍了一大批在生产实践中成功应用的实例。主要内容包括:洪水预报应用现代系统理论的基础知识,现代洪水预报基本技术,水情数据处理方法,相关图及产汇流的现代预报技术,CRFPDP模型的研制和应用,以及洪水预报系统的设计,书后附入了现代洪水预报技术常用的核心算法程序,是一部理论性、实用性和可读性紧密结合的、学习和研究新预报技术方法的参考书。

本书可供从事洪水预报的工程技术及研究人员使用,亦可供相关专业的大专院校师生参考。

责任编辑 王志媛

图书在版编目(CIP)数据

现代洪水预报技术/葛守西著. —北京:中国水利水电出版社,1999
ISBN 7-5084-0095-X

I. 现… II. 葛… III. 洪水-水文预报 IV. P338

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第30912号

书 名	现代洪水预报技术
作 者	长江水利委员会水文局 葛守西 著
出版、发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266(总机)、68331835(发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市朝阳区小红门印刷厂
规 格	787×1092毫米 16开本 27.5印张 651千字
版 次	1999年11月第一版 1999年11月北京第一次印刷
印 数	0001—2050册
定 价	78.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序 一

几十年防洪减灾的实践已证明,水文情报预报在防洪非工程措施中发挥了尚无法被替代的极重要的作用。同时,我们也越发体会到,做好水文情报预报工作必须以坚实的暴雨洪水理论、可靠而快捷的水情信息传递和先进的分析计算技术为基础。几十年的实践还告诉我们,作业预报员的经验与主观能动性的充分发挥往往会起着十分重要的甚至是关键性的作用。当今,科学技术高速发展,水文情报预报的技术也应有相应的提高,特别是把数十年积累的丰富的经验,以及人的主观能动作用同先进的高新科学与技术结合起来,开创水文预报的崭新局面,是我国水文情报预报工作者在 21 世纪所面临的历史性任务。

近二三十年来,电子技术、遥感遥测技术、水文模拟技术以及信息论、系统论、控制论等新技术和新理论的发展已改变了水文情报预报的技术面貌;暴雨洪水理论研究的深入开展,微电子技术的不断进步,数学理论的创新等,推动了水文预报工作向联机自动测报系统网络方向发展。在不断汲取当前先进的科学技术与设备的前进道路上,我国水文情报预报技术的质量和水平正发生着重大的变化。

水文情报预报联机自动测报系统的核心是中心站的应用软件功能,主要包括五大部分,即现时水情信息的接收与存贮,数据处理,通过水文模型计算的水文预报,实时校正,预报值的发送。其中,具有优良、快捷、多功能的分析计算软件和实时校正软件非常重要。除了能依据现时水情信息迅速进行分析计算外,还能依据历史的暴雨洪水信息作实时分析处理,把预报员丰富的经验融汇于中。为此,必须深入研制先进的、适合防洪减灾要求的水文预报应用软件。

《现代洪水预报技术》一书的出版,及时地向我们提供了非常丰富和宝贵的经验以及可以操作实施的具体预报方法。

《现代洪水预报技术》一书是葛守西教授级高级工程师在总结 30

余年在长江流域的水文情报预报工作经验以及参加国家级的、部级的多项科学研究课题的基础上,经近 20 年的潜心艰苦研究所取得的开创性丰硕成果。全书以葛守西主持研制成功的我国最早的一套完整的交互式实时洪水预报模型为中心,从基本知识到具体方法,从概念到经验,从理论到技术,深入浅出,内容丰富、充实,系统性好,可读性强,是一本理论性和实用性紧密联系、充分结合的优秀科技专著。

希望《现代洪水预报技术》一书的出版,能更有力地推动和促进我国水文情报预报技术创新向更高更新的方向发展。地理信息系统和雷达定量测雨等技术的应用,水文情报预报计算机网络化建设,干旱、沙漠化的预测,各项水资源量与分布以及水资源承载力的预测,都市化和人类经济活动对水质的影响,以及沿江河的城市防洪等的预报与决策,跨流域(地区)水量最佳调度以及和气候的关系等课题,都亟待认真研究,积极实施,使我国水文水资源学(不仅仅是水文情报预报工作)在 21 世纪能上更高的台阶,迈向新的高峰,为人类社会做出更大的贡献。愿与读者共勉之。

四川大学教授
博士生导师



1998 年 6 月

序 二

洪水预报是预测江河未来洪水要素及其特征值的一门应用技术科学，作为防汛斗争的耳目和参谋，它是在人类与洪水灾害斗争的长期实践中发展起来的。最近 20 年来，随着计算机技术的广泛应用，信息传输和处理手段的自动化程度的提高，以及洪水预报理论、技术与方法的深入研究，使得洪水预报从传统的手段与方法逐步向预报现代化迈进了一大步。

葛守西编写的《现代洪水预报技术》一书是他多年来在洪水预报实践中的经验和理论研究成果的结晶，代表了我国当前洪水预报科学技术和实践方面的水平，具有较高的学术意义和重要的应用价值。它的问世不仅给水文界提供了宝贵的参考材料，也将会推动我国洪水预报技术向更高层次的方向发展。

该书综述了国内外现代洪水预报技术的研究和发展状况，全面论述了系统理论的数学模型、建模理论和洪水预报建模方法，介绍了系统科学中最基本的计算方法。结合洪水预报作业的需要，论述了水情基本数据的处理方法、相关图法的现代预报技术以及产汇流预报技术。最后，作者提出了 CRFPDP 模型和洪水预报系统的研究成果。全书内容新颖，立论正确，结构合理，层次分明，论述深刻，说理清楚，是一部理论根底深厚、实践性很强的优秀专著，其中有三个特点：

1. 在与现代洪水预报技术有关的系统理论的最基本方法方面，论述比较系统和全面，为现代洪水预报技术的数学模拟和方法论打下了基础。

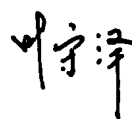
2. 根据洪水的特性和变化规律，无论在相关图的应用，还是产流汇流预报方面，作者均采用了相应的系统建模方法，通过大量的计算，分析了各种方法的优劣和适用性，使洪水预报技术的现代化成为可能，代替了过去长期使用的传统预报方法。

FAA34/01

3. 研制了“使用产汇流两阶段校正及参数动态预测算法”的实时洪水预报模型，成功地设计了洪水预报系统，从而在计算机上实现了联机实时洪水预报作业，体现了洪水预报的现代化水平。

目前，现代系统理论应用于我国洪水预报作业尚未普遍，不同地区对各种模型的适用性如何，有待进一步探讨，特别是水文实时联机预报和水文预报交互式决策系统的研究，更要积极推广和开展，与国外先进科学技术水平相比，尚存在一定的差距。我深信，该书的出版，将会在广阔的大地上生根开花，对水文预报科学技术的发展，起到应有的促进作用。

武汉水利电力大学
教授、博士生导师



1998年2月于武昌

目 录

序 一
序 二

第一章 绪论	1
第一节 现代洪水预报技术发展的回顾	1
一、长江流域传统洪水预报方法的变迁	1
二、系统理论创立简史	3
三、系统理论引入洪水预报的进程	5
四、国外洪水实时预报方法研究概况	6
五、国内现代洪水预报技术研究概况	13
六、洪水预报系统发展的概况	20
第二节 现代洪水预报技术的范畴	23
一、现代洪水预报技术的涵义	23
二、现代洪水预报技术的范畴	24
三、本书编写宗旨和选材原则	24
参考文献	25
第二章 系统理论的基础知识	30
第一节 基本概念	30
一、系统的定义	30
二、常用术语	30
三、系统研究的基本问题	31
四、关于“实时”的概念	32
第二节 系统的数学模型	33
一、概述	33
二、线性系统的三种数学模型	34
三、三种数学模型之间的转换关系	40
四、时间序列模型	44
五、多输入、多输出系统模型	45
第三节 系统建模理论简介	46
一、模型结构和参数识别的基本概念	47
二、系统识别的基本准则	49

三、系统识别信息的选择	50
四、系统识别的三种方式	51
五、系统参数的可识别性问题	52
六、参数识别的可靠性问题	57
七、参数识别算法综述	59
八、系统稳定性问题	61
第四节 系统理论在发展洪水预报技术上的意义	63
一、确立了洪水预报的方法论基础	64
二、实现了水文线性汇流模型的通用化	64
三、实现了水位的数学模型预报	68
四、开创了洪水预报动态化、实时化的新领域	70
参考文献	70
 第三章 现代洪水预报基本技术	 72
第一节 线性最小二乘估计	72
一、离线最小二乘估计	72
二、在线最小二乘估计	75
三、有限记忆最小二乘估计	77
四、衰减记忆最小二乘估计	78
第二节 最大似然估计	82
一、离线估计方法	82
二、在线估计方法	84
第三节 线性无偏最小方差估计	86
一、离线估计方法	86
二、在线估计方法	87
第四节 卡尔曼滤波	89
一、概述	89
二、正规卡尔曼滤波	89
三、几种常用的滤波处理技术	95
四、自适应滤波	100
第五节 实用最优化方法	108
一、网格逐步缩小法	108
二、模式搜索法	109
三、LM (麦夸特) 法	110
四、惩罚函数法	114
第六节 逐步回归方法	119
一、 n 元线性回归方法及其推广	119
二、逐步回归的基本思想	120

三、方差贡献及显著性检验·····	120
四、逐步回归中的矩阵变换方法·····	123
第七节 计算机图形交互技术·····	125
一、概述·····	125
二、常用图形交互技术简介·····	127
参考文献·····	129
第四章 水情基本数据处理方法·····	130
第一节 数据查错·····	130
一、建模数据查错·····	130
二、作业预报数据查错·····	131
第二节 降雨量的时空插补·····	133
一、子流域降雨量时空联合插补法·····	133
二、网格雨量法·····	136
三、插补雨量的交互式校正·····	137
第三节 雨量分布及等值线图的绘制技术·····	138
一、绘雨量等值线图的不规则网格法·····	138
二、分级雨量分布图的绘制·····	145
第四节 泰森多边形权重交互计算技术·····	146
第五节 绳套关系水位流量的转换和预报·····	148
一、用单值化法进行绳套水位流量转换·····	148
二、绳套水位流量关系直接转换的差分模型·····	157
三、绳套水位流量转换的图形交互式处理·····	166
参考文献·····	168
第五章 相关图法的现代预报技术·····	169
第一节 概述·····	169
第二节 相关图的数学模型及建模·····	169
一、现行的相关图形式·····	169
二、洪峰相关图的建模·····	171
三、过程预报相关图的建模·····	175
第三节 相关图模型的实时预报技术·····	182
一、有限记忆递推最小二乘识别·····	182
二、衰减记忆递推最小二乘识别·····	185
三、卡尔曼滤波·····	185
四、实时预报方法的比较·····	190
第四节 相关图的交互式预报技术·····	193
一、概述·····	193

二、相关图的计算机查算·····	194
三、相关图的交互式预报·····	195
参考文献·····	200
第六章 产流预报技术·····	201
第一节 API 产流模型参数的交互式率定技术·····	201
一、API 产流模型概要·····	201
二、数据环境的建立·····	206
三、流域退水曲线·····	206
四、洪水样本的交互式选择·····	209
五、相关图交互式定线·····	210
六、水量平衡检验·····	211
七、软件包的应用·····	212
第二节 蓄满产流模型参数的率定技术·····	213
一、蓄满产流模型概要·····	213
二、二层水账蓄满产流模型参数率定·····	215
第三节 蓄满产流模型的卡尔曼滤波算法·····	217
一、基本原理·····	217
二、状态空间模型的建立·····	219
三、非线性状态空间方程的线性化处理·····	222
四、推广的卡尔曼滤波器·····	225
五、实测径流深值的采集·····	225
六、分布型蓄满产流模型的卡尔曼滤波·····	227
七、应用实例·····	229
第四节 下渗产流模型的卡尔曼滤波算法·····	234
一、下渗产流模型简介·····	234
二、下渗产流模型卡尔曼滤波算法·····	236
三、算例·····	238
四、讨论·····	238
参考文献·····	239
第七章 汇流预报技术·····	241
第一节 响应函数的识别和预报·····	241
一、响应函数离线识别方法研究的思路·····	241
二、几种基本的离线识别算法·····	245
三、二约束条件下离线识别·····	261
四、动态识别和实时预报·····	263
五、函数逼近识别法·····	265

六、阻尼最小二乘识别法	269
七、三约束条件的识别方法	274
第二节 差分模型的识别和预报	283
一、概述	283
二、基本的识别方法	284
三、一般线性汇流模型的实时预报	308
第三节 超前预报	310
一、方法原理	310
二、应用实例	311
三、简评	312
第四节 谢尔曼单位线的交互式率定	313
一、概述	313
二、暴雨中心位置的量化	313
三、流域等流时线的绘制	314
四、次洪单位线的交互式调整	315
五、单位线交互式分类	316
六、简评	317
参考文献	317
第八章 CRFPDP 模型的研制和应用	319
第一节 基础试验和算法比较	319
一、产流预报实时校正算法的构思	319
二、汇流模型形式的选择	320
三、识别算法的比较	321
四、卡尔曼滤波器用于参数估计时与递推最小二乘法性能的比较	323
五、动态追踪参数算法的预报效果	324
六、参数动态预测	324
七、模糊聚类及模糊模式识别	327
八、关于卡尔曼滤波的一些试验	331
第二节 模型的算法和建模	337
一、模型的结构	337
二、模型的基本算法	338
三、模型参数的率定	341
第三节 模型的应用	350
一、建模情况	350
二、试运行情况	352
三、在江河分洪、截流预报中的应用	354
参考文献	359

第九章 洪水预报系统的设计	360
第一节 概述	360
第二节 洪水预报系统的功能设计	361
一、需求分析及功能目标的确定.....	361
二、数据处理及数据库设计.....	362
三、关于系统通用化的设计.....	365
第三节 长江中下游联机实时预报系统的设计	367
一、系统设计概要.....	367
二、问题讨论.....	370
第四节 长江专家交互式洪水预报系统的研究	371
一、开发专家交互式系统的必要性.....	371
二、长江专家交互式预报系统总体设计.....	373
三、水雨情检索功能设计.....	375
四、交互式预报处理模式的设计.....	377
五、讨论.....	389
第五节 陆水水库遥测预报系统的设计	391
一、开发环境的选择.....	391
二、功能设计.....	392
第六节 三峡工程截流交互式预报系统的设计	396
一、概述.....	396
二、系统组建和信息处理.....	396
三、来水流量的交互式预报.....	396
四、龙口断面的交互式预测.....	398
五、龙口堰流计算的交互式预报.....	399
六、实时跟踪技术的应用.....	401
参考文献	401
 附录 现代洪水预报常用算法程序	402
一、正交分解法最小二乘离线估计程序.....	402
二、衰减记忆递推最小二乘法程序.....	404
三、有限记忆递推最小二乘法程序.....	406
四、正态白噪声生成程序.....	408
五、卡尔曼滤波器.....	409
六、模式搜索法程序.....	411
七、通用逐步回归程序.....	414
八、样条磨光加盈亏修正的曲线生成程序.....	420
后记	424

第一章 绪 论

我国幅员辽阔，河流水系众多，由于受季风与自然地理条件影响，汛期降雨在年内年际的变化十分剧烈，历史上洪灾频繁发生。长江、黄河、珠江、海河等大江大河中、下游，居住着我国半数以上的人口，地面高程多在江河洪水水位之下，人类的安全依赖河堤保护，洪灾问题的严峻性、紧迫性在国际上亦不多见。

洪水预报科学是人类在与洪水灾害长期斗争的客观需求推动下发展起来的。随着国民经济的飞速发展，作为防洪的非工程措施，日渐受到普遍的重视和关注，作为防汛斗争的“耳目”和“参谋”，准确及时的洪水预报，为正确作出防汛决策提供了科学依据，可以获得减免洪灾损失的巨大经济效益和社会效益。

我国的近代洪水预报是从中华人民共和国成立以后才开始发展的。长江流域从 1951 年汛期开始正式发布长江中游干流、汉江下游控制站的水位预报，是全国之首例。长江洪水预报从点到面、从干流到支流的 40 多年壮大的历程，是全国洪水预报事业的缩影和代表。现代洪水预报是传统洪水预报走向现代化的新的发展阶段。从全国范围来看，目前尚处于演变的进程之中。已经探索成功的技术经验需要不断总结，新的技术问题为数众多，需要进一步研究，它们就是本书准备探讨的课题。

第一节 现代洪水预报技术发展的回顾

一、长江流域传统洪水预报方法的变迁

传统的洪水预报方法是从工程水文学计算方法直接移植的。其间也有众多新创的方法在实践中尝试和应用。40 多年来，洪水预报实践对各种方法进行了客观的考验、筛选和淘汰，只有那些适应报讯资料条件且预报精度可靠的方法，才能保留下来。有些方法虽属可用，但在相比之下略为逊色的，也从第一线逐渐退至第二线。

1994 年，长江水利委员会水文局编辑出版了《长江流域洪水预报方案汇编》，它汇集了长江 132 个预报流域共计 293 个第一线使用的预报方案，这些方案可以分为两大类。

1. 流域降雨径流预报

长江各支流源头地大多数有一个单纯进行降雨径流预报的子流域，上述 132 个预报对象中有 38 个这样的流域。它们共有 89 个预报方案（其中产流 38 个，汇流 51 个）。所使用的预报方法列入表 1-1 中。

从表 1-1 可见，产流阶段以次洪 API（前期雨量指标）模型的降雨径流相关图方法使用最多，产流公式也是对降雨径流相关图的一种数学概化。它是 70 年代为解决用性能简易的计算机代替人工查图而制作的，但存在概化误差，现已被计算机使用二元三点插值算法取代。少数流域采用蓄满产流模型。

表 1-1 长江流域降雨径流预报方法统计表

阶 段	产 流			汇 流				
方法名称	降雨径流 相关图	产 流 公 式	蓄满产 流模型	谢尔曼 单位线	汇 流 系 数	Nash 单位线	非线性 单位线	扩 散 模 型
方案个数	30	4	4	32	13	2	3	1

汇流部分以使用分类的谢尔曼单位线最广泛，少部分流域使用了“华水”、“长办”汇流系数。纳希单位线、非线性单位线、扩散模型的使用则属个别流域。

2. 河道预报

除源头流域外，还有 94 个河段预报对象，它们由河道汇流预报及区间降雨径流预报共同合成，所使用的预报方法列入表 1-2 中。

表 1-2 长江流域河道预报方法统计表

河 道 汇 流		区 间 降 雨 径 流			
方 法 名 称	方 案 个 数	产 流		汇 流	
		方法名称	方案个数	方法名称	方案个数
水位（流量）相关	36	降雨径流相关图	35	谢尔曼单位线	38
马斯京根	44	产流公式	5	扩散模型	1
汇流系数	10	蓄满产流	2	峰量相关	1
调洪演算	3			经验汇流	1
洪峰相关	28				

从表 1-2 可见，水位流量相关的方法（包括合成流量法）再加上洪峰相关（包括总涨差相关法）是长江目前用于河道预报的最普遍的方法。马斯京根法的使用也很普遍。

河道汇流系数法只在少数流域上使用了，从使用效果看，它与马斯京根法没有实质性的差异。在涉及洞庭湖、鄱阳湖的江河站，我们使用了湖泊调洪演算方法。

对于河道的区间降雨来水，则与流域的预报方法相同，仍以降雨径流相关图和谢尔曼单位线法为主。

众所周知，相关图、谢尔曼单位线、马斯京根法（预报员趣称为“老三篇”）是 20 世纪 30 年代产生的。在长江流域从 50 年代开始建立这些预报方案以来，经过实践的淘汰筛选，成为传统预报方法的主流，这种历史变迁的走向，包含着令人深思的内在规律，不是偶然的。

究其原因，至少可以列举三点。

第一，精度可靠。上述实用洪水预报方法的可靠性经受了数十年洪水预报实践的考验。从 60 年代以来，国内外不少学者试图创立新的洪水预报数学模型，有些模型在建模阶段效果也不错，但是一旦用于洪水预报中，则很少有模型能达到这些传统方法的精度，特别是一些参数众多的精细模型，在作业预报资料条件下，精度往往比率定期严重下滑。这证明了，过于依赖对历史资料的精细模拟是这些模型的弱点，而不是优点。

第二，便于使用专家经验校正。前述实用方法经过长期使用，逐步与预报员的经验结

合起来。例如一张洪峰相关图,其上点绘了历年洪水的实际数据,使预报员查图时自然与历史洪水的实况相联系,所以,有经验的预报员就能作出判断,预报出比相关图线条的精度要高的结果来。再如,一张降雨径流相关图,反映了流域产流的径流系数变化规律,而流域一次洪水的径流系数变化是有规律可循的,有经验的预报员也可通过对情况的判断,得到比查图更可靠的结果。同样,单位线所反映的汇流快慢、洪峰高低,一旦与预报员的实践结合,常常可以衍生出许多判断不同洪水不同汇流结果的经验出来。

从长江流域数十年预报实践效果看,有经验的预报员使用这些实用方法进行作业,一般可以获得比方案合格率本身高出 5~15 个百分点的发布结果来。这就是其他数学模型不能相比的一个重要优势。因此,沿用至今的传统洪水预报方法,必然会继续存在和长期发挥其作用。

第三,认识论反映了洪水宏观规律。现代系统理论观念引入洪水预报后证明,洪水作为一种宏观自然现象,非常适用系统理论的原理。相关图方法从整体上把握系统输入与输出的宏观关系,是静态输入—输出模型的图解形式,是认识洪水宏观规律非常有效的手段。现已证明,谢尔曼单位线就是线性系统的响应函数,马斯京根法就是线性系统的一阶隐式差分方程。它们产生的年代与系统理论有关模型的提出几乎是同时的,它们实际上就是用系统观点研究了洪水的宏观规律。所以它们与从研究微观水质点运动规律出发的圣维南方程、各种下渗理论等方法比较,更适宜于处理宏观的洪水现象。

由于方法论问题更带本质性,在第二章第四节还将进一步进行讨论。

二、系统理论创立简史

系统论、信息论和控制论是从不同侧面揭示对象之间相互联系、相互作用的内在运动规律的综合性科学,三论从本质上看都是研究系统的理论,可合称为系统理论或广义系统论。学者们认为^[1]:系统理论是 20 世纪继相对论和量子力学之后,人类又一次彻底改变世界的科学图景和当代科学家的思维方式的重大科学突破。其在科学史上的重要地位,可与 100 年前的三大科学发现(能量守恒、细胞学说与达尔文进化论)相并论。

作为一种认识自然的方法,系统思想由来已久。古代的系统思想源于朴素的对事物联系观察,形态是自然哲学的“整体论”,以亚里士多德的“整体大于部分之和”的命题为代表。近代系统思想从 16 世纪起随近代自然科学、哲学的发展而发展。19 世纪初,黑格尔首先明确地提出:世界是一个有机联系的整体。以后,马克思、恩格斯继承了这一思想,并将它置于唯物主义基础上。在这个阶段中,人们的系统思想主要还是一种哲学认识论范畴的概念。

从 19 世纪末到 20 世纪,随着自然科学的飞速进展,以自然科学形式表达的这种当代系统理论经过几十年的酝酿,在 20 世纪三四十年代终于诞生了“一般系统论”、“控制论”和“信息论”这三门科学。这一历史进程,扼要地叙述如后。

1632 年,盖里莱(Galilei)提出^[2],可以用误差函数的大小,作为估算好坏的客观标准,这就是现代估计理论的起点。

1795 年,高斯(Gauss)在天文学研究中创造了最小二乘法,总结这一方法的经典著作^[5]是在 1809 年正式发表的。

1868年,麦克斯韦尔(Maxwell)在研究调速器—汽机—负载系统中,提出^[3]用常微分方程来描述该系统。这是最早的系统数学模型。

1895年,数学家劳斯(Routh)和赫尔维茨(Hurwitz)引伸了麦克斯韦尔的工作,提出^[3]可以用高阶常微分方程描述任意线性系统,他们还提出了采用不同的代数判据来判断系统的稳定性。

1915年,采果(Szego)提出了^[2]预测误差的概念和计算公式。

1930年,维纳(Wiener)和辛钦提出了维纳—辛钦定理^[6],指出对于平稳时间过程在满足各态历经性时,其自相关函数为其功率谱密度的傅里叶反变换,奠定了以相关函数处理系统传递、响应函数的基础。

1930年,美国雷德无线电公司在研究电视广播中,正式使用了“系统途径”和“系统化处理”的概念和方法^[4]。

1931年,维纳和霍夫提出^[8],利用 δ -函数可求出维纳—霍夫方程的解析解,首次得到系统(滤波器)脉冲响应函数的数学表达式,创立了线性系统分析的传递函数(响应函数)方法。

1932年,奈魁斯特(Nyquist)提出了^[3]著名的奈魁斯特判据,对根轨迹法求解系统传递函数的稳定性作出判断,完善了频域系统分析方法。

1933年,奥地利生物学家、公认的现代系统理论创始人贝塔郎菲(Bertalanffy)发表了著名专著《近代发展理论》,针对当时生物学中盛行的机械论方法、肢解对象、见木不见林的倾向,提出了“整体不能用部分来说明、整体具有部分所没有的性质”,应把生物及其环境当作一个大“系统”来研究。起初,他的这一理论称为“理论生物学”,以后他与其他学者都认为这种系统观点不仅适用生物研究,也适用于其他学科,这就成为“一般系统论”。

1938年,沃尔德(Wold)提出^[9],从时间序列的过去值能够预测未来值。方法是以一个等价的不相关变量序列代替相关随机变量序列。在此基础上,1941年,柯尔莫格洛夫(Колмогоров)完整地提出了将高斯最小二乘法用于离散随机单变量序列估计和预测的算法^[10]。这一工作在1942年维纳^[11]也独立完成了。

1942年,维纳在第二次世界大战的火炮研究中获得重大理论突破,编写了著名论文——“平稳时间序列的外推、内插和平滑及其工程应用”。由于战争时期保密,此文公开发表在1949年^[11],这是公认的经典控制论的创立之著。维纳将数理统计理论用于控制系统的研究。他证明了:在一定条件下,处于统计平衡的时间序列的时间平均等于相平均。这样,依据时间序列的过去数据预测未来值就成为可能。他的方法建立在频域中对系统传递函数(响应函数)的数学解析基础上。

1944年,杜蒲(Doop)^[14]运用状态空间概念提出了有理谱密度的随机过程的状态空间的线性系统模型。1950年,伯莱凯特(Plackett)首先提出,不久后,舍格(Sage)和梅尔莎(Melsa)也各自提出了最小二乘估计的递推算法。估计理论的快速发展,成为卡尔曼滤波诞生的催生剂。

1949年,随着雷达、无线电通信研究的进展,信息科学理论研究也获得突破,申农(Shannon)的名著《通信的数学理论》问世^[12],他运用统计理论解决了信息“不确定性”这