

学 术 著 作 丛 书

*The Engineering and Theory Problems  
of Man-Machine Systems*

“人 - 机系统” 工程

刘馨宝 编著

国防科技大学出版社

国防科技大学学术  
专著专项经费资助出版

内容简介

# “人—机系统”工程

刘馨宝 编著

国防科技大学出版社

湖南·长沙

## 内容简介

本书是从工程化角度系统地论述“人-机系统”这一多学科交叉新领域中基本共性问题的学术专著。本著以形式多样而广泛的这类系统中人的基本特性及其主要角色作用为主线,系统地论述了“人-机系统”基本原理、有关的工程化实用分析理论与方法以及相应的建模研究与模拟求解问题。书中反映了本作者长期从事“人-机系统”研究的经验与成果、该领域适量重要经典研究与相关新内容,以及面向新世纪的有关新进展。

本专著内容广阔、深入概括,且在论述方法上注重系统性、逻辑性与启发性,不仅可供从事各类“人-机系统”研究、设计及运行的科技工作者以及该类系统的指挥者与操控者们阅读、参考,也可用作高等院校有关“人-机系统”及相关专业方向高年级本科生、硕士生、博士生的相应教材或参考教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

“人-机系统”工程/刘馨宝编著. —长沙:国防科技大学出版社, 2005.5

ISBN 7-81099-170-1

I. 人… II. 刘… III. 人-机系统 IV. TB18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 023444 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

E-mail: gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑:唐卫葳 责任校对:何晋

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

\*

开本:850×1168 1/32 印张:17.25 字数:448千

2005年5月第1版第1次印刷 印数:1-1500册

ISBN 7-81099-170-1/TB·1

定价:45.00元

## 前 言

把人(生命体)与机器(非生命体)的有界组合体看成一个“人—机系统”这种观念的科学基础应源于控制论奠基人维纳(N. Wiener)创导的有关概念,即认为:生命体所特有的“目的性行为”概念可用“反馈”这种概念代替。于是按反馈原理设计成的机器的工作行为也可看成为目的性行为,这就突破了生命体(人)与非生命体(机器)之间的概念隔阂,把生命体“目的性行为”的概念赋于机器,使这两者在此相应概念基础上有界地组合在一起,从而就为“人—机系统”观念的确立奠定了科学的理论依据。

现代各类“人—机系统”的性质、结构与形式各种各样,但其基本的共性特征是这些系统都是由起主导作用的人与各种相应的现代化技术设备——“机器”所组成。近几十年来,由于信息科学、微电子学、计算机科学、人工智能技术、神经生理学、(人工)神经网络理论与技术、指挥控制技术以及各种载人运载技术等的发展,尤其是载人航天技术的不断发展,使得这个由多学科交叉形成的“人—机系统”新领域得到了不断地充实与拓展,并已跻身于现代顶尖高科技领域。由于该系统内含主导者——人,所以这类系统的研制、分析及运行的性能都与这系统中人的作用密切相关。人体虽本质上是物质的,但却具有感知、思维、智慧以及灵活机动的活动能力。由于有关人体感知、思维及智慧等内在神经活动全部机理的研究至今尚处艰辛的探究阶段,这就在很大程度上制约了该领域有关理论及相应实践的研究进程,以致至今尚未形成本领域统一的理论。但现代关于“人—机系统”的客观需求却随着世界各国的科技、经济以及军事的发展而日益高涨,因为在现代社会许多场合的

系统中,不但必需人直接参入的主导作用,并且对于某些场合的这类系统中人的工作行为的要求也更为提高。这就需要从现实的工程化角度大力开展关于“人-机系统”的研究,尤其要开展关于这类系统中人的工作行为的工程化描述研究。

作者于近二十多年来一直从事“人-机系统”有关方面的科学研究,在我国最早开创出“人-机系统”方面的研究生系列课程。本书就是作者长期专门从事“人-机系统”方面的研究、教学与科研工作的学术经验积累及有关科研成果的总结,是国内第一部从工程化角度系统地专门论述“人-机系统”这一多学科交叉新领域主要基本共性问题的学术专著。本书以各类“人-机系统”最基本的共同特征——“含有起主导作用的人”为中心,先描述足以产生人的智能行为的人体主要基本物质体系的基本特性,继而环绕人在这类系统中应起的主要而基本的各种不同智能角色作用与工作行为系统地进行工程化的论述及有关的建模研究,并在以上各种论述的基础上探讨关于“人-机系统”整体性能的研究与模拟求解问题。

由于“人-机系统”是同时含有生命体与非生命体的特殊系统,与其他系统的本质不同是内有主导作用的人,致使这类系统目前尚无统一的完整理论。本书首次较明确地提出以系统中人的最主要的智能作用即人的控制作用以及作为指挥作用的最基本方面即决策作用、对策作用及排队作用等为主线,并以这个主要智能作用为主线为纽带,运用这些智能作用相应的有关理论与分析方法来尝试形成这类特殊系统的工程化实用理论与分析方法的一些基本模式。作者期望通过这种尝试与可能的不断研究开发,能够在一定程度上使这些有关实用理论逐渐贯统起来,以推动这尚无统一完整理论的特殊系统领域理论与实践研究的进展。

作者在本学术专著的创作撰写过程中曾幸多位前辈指教,曾参阅过刘景伊教授提供的部分生物学有关素材以及国内外专家、

## 前 言

---

学者的有关研究报导,数学专家刘德铭教授还对部分书稿内容提出过宝贵建议(如有关“系统”这词的概念),现于此谨表诚挚的谢意。

由于本书内容涉及多种新兴学科,既专业且面又广,不但涉及到上世纪的某些经典内容以及向新世纪过渡的新内容,而且还涉及进入新世纪后的有关新进展,再则全书篇幅有限,书中难免尚存疏漏,若有不当之处,诚请前辈、同行、读者不吝指正。

作者 刘馨宝

2003年12月

# 目 录

## 前 言

## 第一章 绪 论

- 第一节 何谓“人-机系统”…………… ( 1 )
- 第二节 “人-机系统”中人的主要功能、作用及该系统  
特有共性问题…………… ( 5 )
- 第三节 本著规划及内容提要…………… (13)

## 第二章 人的神经系统、感觉系统 及神经肌肉系统基本特性

- 第一节 神经元、神经系统及神经网络模型 …… (26)
  - 一、神经元及其模型…………… (26)
  - 二、神经系统、神经反射及神经网络中神经元的基本联  
系形式…………… (38)
  - 三、神经网络模型及其学习方式规则及现代著名神经  
网络模型…………… (50)
- 第二节 人的感觉系统及其功能特征…………… (73)
  - 一、人的感觉传导系统类别与特征…………… (73)
  - 二、人主要感觉系统的基本构成及功能特征…………… (75)
- 第三节 人的神经肌肉系统基本特性…………… (85)
  - 一、肌肉的基本生理特征…………… (85)

二、骨骼肌的功能作用与力学特性·····	(91)
三、神经肌肉系统动态模型·····	(96)

### 第三章 “人-机系统”人工控制原理

第一节 人工控制及其建模的基本考虑·····	(99)
一、人工控制原理·····	(99)
二、“人-操控者”的近似线性模型·····	(111)
三、人工控制系统的基本类型·····	(114)
四、人工控制系统中显示的多种方式·····	(117)

第二节 人工控制系统“人-操控者”拟线性模型辨识及其 最优控制行为建模·····	(124)
---	-------

一、“人-操控者”拟线性模型的频域与时域辨识及参数 估计·····	(124)
二、“人-操控者”状态变量最优控制行为建模·····	(144)

第三节 人工控制的断续性与一般非线性及“人-操控者” 的适应性·····	(171)
---	-------

一、“人工控制”中的断续性与一般非线性现象·····	(171)
二、计入断续性或一般非线性的“人-操控者”模型 ·····	(174)
三、“人-机系统”中“人-操控者”的适应性·····	(178)

### 第四章 “人-机系统”有关决策理论 及其人决策行为建模

第一节 决策制定及人决策行为建模工程化考虑·····	(183)
一、“决策制定”问题的提出·····	(183)
二、决策函数及一般决策问题提法·····	(186)

三、人决策行为建模的工程化考虑及一般决策的基本分类	(190)
第二节 确定性情况的决策效用及人-机合作	(193)
一、效用及有关的效用理论	(193)
二、确定性情况决策中的人-机合作	(202)
第三节 有风险情况的决策效用及描述模型	(205)
一、风险决策及效用	(205)
二、风险决策的描述模型	(207)
第四节 平均风险函数最小的决策及最小化最大解	(213)
一、风险函数	(213)
二、平均风险函数最小的决策	(217)
三、使最大风险函数最小化的决策解	(219)
第五节 序贯决策与决策树	(221)
第六节 “人-机系统”主要“动态决策”及其人决策行为建模	(227)
一、单人(多任务选择)动态决策及其决策行为建模	(227)
二、两人分布(多任务选择)动态决策及决策行为建模	(246)

## 第五章 “人-机系统”主要对策运行 有关理论及方法

第一节 基本对策概念	(259)
一、策略对策基本要素	(259)
二、基本的对策表达及一般对策主要类型	(261)
第二节 一般二人零和及非零和对策	(264)
一、二人有限零和对策	(264)

二、二人连续零和对策 .....	(294)
三、二人有限非零和对策 .....	(306)
第三节 多人对策 .....	(320)
一、多人非合作对策 .....	(320)
二、多人合作对策 .....	(326)
第四节 广义型对策 .....	(335)
一、引言 .....	(335)
二、对策树表示 .....	(336)
三、广义型对策的正规化方法 .....	(339)
四、有限广义型对策的平衡策略 .....	(343)
五、用动态规划概念分析有限广义型对策 .....	(344)
第五节 “人-机系统”主要动态对策(微分对策) .....	(350)
一、一般的动态对策(微分对策)表述 .....	(350)
二、定量微分对策的解及“人-机系统”定量微分对策 概例 .....	(354)
三、定性微分对策概念及“人-机系统”定性微分对策 例解 .....	(362)

## 第六章 排队分析及人-机作用

第一节 “人-机系统”排队问题及作为排队系统的一般 特征 .....	(396)
一、“人-机系统”排队问题及作为排队系统的基本模 型框图与特征 .....	(396)
二、排队系统模型的符号表达 .....	(401)
第二节 排队系统的输入输出分布特性及性能度量 .....	(402)
一、负指数分布 .....	(402)
二、确定型分布 .....	(404)

## 目 录

三、Erlang 分布 .....	(405)
四、排队系统的性能度量 .....	(407)
第三节 各类基本(一般服务规则)排队系统模型的分析 解式主要性能指标 .....	(410)
一、引言 .....	(410)
二、(M/M/1):(GD/ $\infty$ / $\infty$ )排队模型性能指标 .....	(410)
三、(M/M/1):(GD/N/ $\infty$ )排队模型性能指标 .....	(416)
四、(M/M/1):(GD/N/N)排队模型性能指标 .....	(422)
五、(M/M/C):类型的排队模型性能指标 .....	(425)
六、其他服务时间分布的排队模型性能指标 .....	(430)
第四节 优先权服务规则的排队系统及人-机作用 .....	(434)
一、优先权排队系统模型及该类“人-机系统”举例 .....	(434)
二、作为排队系统研究时“人-机系统”中人与计算机 相互作用问题 .....	(437)
<b>第七章 “人-机系统”模拟与人-机相互作用 建模考虑及模拟求解问题</b>	
第一节 “人-机系统”整体模拟建模一般方法 .....	(442)
第二节 “人-机相互作用”在建模方面的考虑 .....	(445)
第三节 “人-机系统”的发展及模拟求解问题 .....	(445)
[附例]一个需模拟求解的“人-机系统” .....	(460)
附 录 .....	(467)
中英术语对照 .....	(471)
参考文献 .....	(513)

# 第一章 绪 论

## 第一节 何谓“人-机系统”

唯物主义哲学认为宇宙统一于其物质性,精神或意识是物质的产物。就物质的范畴而言,按最广义的说法,一个“系统”就是“任何一类可界定的现象的整体”。<sup>①②</sup>所以,“人-机系统”就是指人与各种“机器”的有界组合体。<sup>③</sup>

人与机器打交道是从人类早期从事工具操作的劳动生产过程中就开始了。例如人使用一把铁锹起土,但这两者只发生简单的劳动操作关系并不形成一个可界定的组合体。后来当人的起土劳动发展到由人驾驶起土机运作的情况,就有了质的变化。这时,人与起土机就形成一个可明确界定的组合体,所以这种有人驾驶的起土机就是一个(简单的)“人-机系统”,因而使工作的效率与质量都得到了显著提高(这里所说的界定界限有时也可以是无形的

① Rouse, W. B., Systems engineering models of human-machine interaction. Elsevier North Holland, Inc. 1980, PP. 15, (—A system is an arbitrarily bounded phenomenon)

② “系统是由相互联系、相互作用的要素(部分)组成的具有一定结构与功能的有机整体”。引自许国志主编《系统科学大辞典》,1994年

③ 就本质而言,人体也是物质的。关于能产生感知、思维及智能活动的人的神经系统与感觉系统以及神经肌肉系统基本特性等方面的基本描述在本书第二章中进行

但被明确划定的范围,例如某个明确划定的空域范围等)。

由于机械化与电气化的日益发展,不仅使人类逐步摆脱了繁重的体力劳动,而且生产的数量、质量与规模也摆脱了人的体力束缚得以蓬勃地发展。特别是由于生产与操作过程的不断自动化发展使得各种机器或被控制的过程能够不需要人的经常操作而能自动地完成一定的任务,并且这些机器及有关技术设备可以不包括人而自成系统。这样的系统,即可以是所谓的各种自动及自控系统。一方面由于摆脱由人直接操作的各种局限性后便能不知疲劳地准确按照正确设计的要求自动地工作,因而在一定的要求之下可使整个生产或被控制任务的质量得到更大程度的提高;但另一方面由于这种自动系统毕竟出于人的要求与设计,一经设计制成之后,其性能与任务也就基本确定。即使具有某些自适应能力的系统或具有一定智能的具有计算机的系统,它们对于外界环境及任务变化情况的适应能力也远不能与具有高度的现代化科学技能与训练素养的人相比。其中的一个根本原因是因为由人设计制造出来的机器,自动系统或计算机都具有工程化的特点,特别是在设计与生产这种机器、系统或计算机的过程中都只能用机械的方法进行。这些机械的方法与工程化的特点都忽略了许多次要的因素而使问题被简化为用现时已为人们所知的理论(及经验)公式或逻辑形式表达的程度。这些有关的理论(及经验)公式或逻辑形式显然是存在着不同程度的局限性的。因为被忽略的许多次要因素对于若要严格模拟真实的活体变化特性来说可能并不是次要的,而只是由于从某种理论观点出发才被认为是次要的。也许正是这些不应忽视的次要因素的有机综合才能完全体现人所特有的各种功能的真正特性。

正是由于上述原因,随着科学技术的不断发展,一方面在那些不希望或者不必包括人在内的自动系统得到不断的发展(质量要求愈来愈高,规模与复杂程度也愈来愈增加)。另一方面还发展着

另一类系统,这类系统除了应用最现代化的技术设备之外还必须包括具有一定要求的甚至高度的科学技能与训练素养的人在系统中直接进行操作、监控、决策或指挥(在监控或指挥工作中往往也要有一定的决策作用)。这主要是因为这种系统只有当具有高度智能与训练素养的人进行操控或决策等工作,才能认为可确保系统任务无误地完成(例如在一些宇宙飞船的姿态控制系统中往往要考虑到当计算机一旦失灵时要由人操纵飞船的方案)。现代的“通讯、指挥、控制系统”就是上述的后一类系统中较复杂的一类“人-机系统”。这种系统最根本的特征就是它是各种现代化的技术设备与具有高度训练素养人的有界组合。至于现代的各种载人航天系统(如载人宇宙飞船、载人空间站等等)则是集现代各种顶尖高科技于一体的更为复杂的一类“人-机系统”。

由于在“人-机系统”中,人起着各种主导的智能作用,而这系统中的各种机械化、电气化设备(即“机器”)起着辅助并即时实施人想要完成的各种运作,这些动作结果就是这个“人-机系统”具体呈现的状态及结果。因此,要研究设计好这种包括人在内的系统,不仅要正确设计及采用必要的现代技术设备,同时还必须考虑人的各种有关功能特性的研究与应用。只有这样,才能进一步了解人的有关机能与特点以便能更合理地设计所需的被控设备,并充分发挥人的能动性作用,以达到人-机之间更有效的配合。

为了能够用定量分析或实验的方法来研究或设计这种系统,就要求用一致的术语来描述系统中的人与技术设备的工作,以达到系统中人与技术设备之间的良好兼容。因为毕竟不能把人与技术设备完全等同起来,所以实际上只能做到在一定范围内以及在一定程度上的兼容。

由于人是这种系统的不可缺的主要组成部分,所以当我们设计这种系统时,必须把人当成系统中的主要部件之一来考虑。我们所用的设计方法一般都限于工程化的定量分析、计算与实验的

方法;也就是说在设计时,要把这种本来已超出一般工程范围(因为包括人)的系统当成一个近似的工程系统来处置。这是因为在系统尚未设计出来之前无法用真人操控者进行总的系统实验。因此,只能从某类实际任务所要求的角度出发,用具有仿人特性的操控者模型来代替操控的人员。这样,便可以形成一个工程化的系统模型。利用这个模型便可进行试验与设计的修改工作,以求得工程上的最佳结果,从而这种最佳结果便可能预测或提供最佳的仿人操控者特性。这样,既可设计出这种系统的技术设备这部分的必要数据,又可提供出系统中人员为完成某种要求工作任务所应有的工作行为特性,而这种工作行为特性应作为这种系统中的真实工作人员学习与训练的依据。这是因为这种系统中的各级工作人员必须对他要实施的工作行为特性进行学习并接受训练,直至他的工作行为响应特性稳定地达到要求为止。不然,一个未经学习和训练的系统中的人往往会存在一些不希望有的可变因素,致使他的响应特性变动不定。

应该指出,现代的这种包括人在内的“人-机系统”可能是各种各样的,其复杂程度也可能是不同的。这种系统中的人一般是在不同级位上工作的,他们可能要开动各种机器设备,操纵飞机、船舶甚至飞船,或者要发布指挥指令。总之,他们要与各种机器设备、电子装置以至计算机发生相互作用。要使整个系统保证其应有的性能,总的说来要由三个方面来决定:即要由系统中人的训练素养、所用现代技术设备的性能以及人与所用技术设备之间相互的协调配合这三方情况来决定。如果把这种系统中人以外的一切技术设备都划归属于“机器”的范围,则不论系统的规模大小及复杂程度如何,也不论系统性质或功用类别(例如工业的、农业的、商业的、交通的、文教的、医卫的、航天的、军事的等等)如何,只要是包含有主导者——人(不论一人或多人)在内的系统都属于各种形式的“人-机系统”。

本书中不准备泛泛论述人与机器打交道有关的一切方面的课题,而这方面有关的各种名称繁多,很不统一。例如字意相近的学术名称就有如人类工程、人体工程、人作规律、人间工学、人机工程以及工效学等等,它们的内涵是各有侧重、不尽相同的,它们与“人一机系统”的基本问题虽然不能说没有丝毫关系,但也不能说都是完全一样的问题。“人一机系统”尽管不能忽略系统中人的主导作用,但毕竟是属于系统论范畴的问题。由于“人一机系统”是人与“机器”的有界组合,所以它与人及工程技术各学科领域的联系必然是密切的。所以“人一机系统”的研究与分析往往要涉及到人体生理学与工程心理学、人体解剖学与人体测定学、有关人体活动的生物力学、人体环境学、仿生学、机械学、电子学、控制论、概率论、随机过程理论、模糊集理论、粗糙集理论、决策论、对策论、排队论、信息学、运筹学、计算技术、模拟技术、人工智能甚至管理科学等等有关方面的内容。但是,现在还没有形成统一的“人一机系统”理论,因此,正如随后一节指出的那样,目前对于“人一机系统”分析、研究的方法仍是采用工程化的方法。

### 第二节 “人一机系统”中人的主要功能、作用及该系统特有共性问题

如前所述,“人一机系统”是人与有关“机器”的有界组合体。现代各类“人一机系统”的性质、结构及形式各种各样,但其最基本的共性特征是必含有负责相应专门工作任务的人,并且人在这种系统中是处于主导地位、起着主导的作用。因而,关于这类系统的研究、分析、设计以及运行都与该系统中人的有关主要功能与作用密切相关,但为了从工程化的角度分析研究这类系统,又需把人当

成这个系统中的主要部件来考虑。那么,“人-机系统”中人的主要功能特性与作用在实质上有什么特殊之处呢。科学分析表明,“人-机系统”中所要求的人的功能特性与作用恰好就是作为生命体的人所能发挥的功能特性与作用。这样,这类系统就能体现出人可能发挥的优越功能及作用,但同时由于人的一些固有局限性也会给这个系统的设计、运行带来一般无人系统所不必考虑的一些方面的问题。当然,许多实际运用场合,并不会因为人的一些固有局限性,而会全部改用无人系统,这是因为人的许多局限性往往可通过一定的训练得到有限的改善,并且人的许多局限可在很大程度上有效地由这系统中的有关高性能“机器”来弥补、甚至某种程度的克服;而更重要的是人可能发挥的优越功能与作用往往是这类系统值得谋求或充分必需的,甚至是必不可少的。因此,要研究“人-机系统”就必须先分析了解人的有关主要功能与作用。

“人-机系统”中人的主要功能可包括为对各种信息的感知接收、辨认或记忆、对比或分析、归纳或推理、判断或选择、传递输出或发出相应指令(信号或动作)等等。因此,如果在一定程度上把这系统中的人看成是对信息的传递、加工或发令的一种渠道是有意义的。根据科学统计,人从其周围环境中接受信息最多的器官是人的视觉器官(约占整个可接受信息的70%左右)。由此可知,人的视觉功能对于“人-机系统”来说是至关重要的。在接受信息方面占第二位的人体器官是人的听觉器官(约占整个可接受信息的20%左右)。由于人的视觉及听觉这两器官接受的信息占到了人可接受信息的绝大部分,所以人的这两器官的信息运作功能对于“人-机系统”中人的主要功能的影响往往是有决定性意义的。因而有必要对于人的视觉及听觉的基本功能在此先作个总的简要描述。关于人的视觉主要基本功能可概要表述如表1-1所示。