

专著 出版基金 资助项目
ZIZHU XIANJIN MU

西北工业大学专著基金资助

ZHUANZHU

民机驾驶舱人机工效 设计与评估

薛红军 张晓燕 著

ZHUANZHU

西北工业大学出版社

民机驾驶舱人机工效 设计与评估

薛红军 张晓燕 著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书通过对飞机驾驶舱人机工效研究涉及的人(飞行员)、机(驾驶舱的布局等)、环境(驾驶舱的微环境)等三个方面进行深入的阐述与分析,将“以人为中心”的设计理念量化或定性表述成工程人员进行驾驶舱人机工效设计时能够依据的设计准则、设计方法以及评估方法,给出了驾驶舱人机工效从设计到评估的一套完整的方法体系。

本书可供航空类专业的研究生、教师以及从事飞行器设计和研究的相关人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

民机驾驶舱人机工效设计与评估/薛红军,张晓燕著. —西安:西北工业大学出版社,2014.3

ISBN 978-7-5612-3940-7

I. 民… II. ①薛… ②张… III. ①民用飞机—座舱—工效学—设计 ②民用飞机—座舱—工效学—评估 IV. ①V223

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 047407 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电话:(029)88493844 88491757

网址:www.nwpup.com

印刷者:陕西向阳印务有限公司

开本:727 mm×960 mm 1/16

印张:11.625

字数:204 千字

版次:2014 年 9 月第 1 版 2014 年 9 月第 1 次印刷

定价:38.00 元

前 言

民用飞机和飞行员一起构成了和谐的人机系统,承担着安全、快速输送旅客和运输货物的任务。在输送旅客和运输货物的过程中,这个人机系统充分展示出飞行员作为智能体的操纵能力和飞机作为高科技产品的安全、快速的输送转场能力。飞机-飞行员智能人机系统要和谐工作,必须各取所长,充分发挥人的主观能动性和飞机的便捷可控性,从而顺利实现飞机起飞、巡航、着陆及滑行,实现安全、快速地输送旅客和运输货物的目标。

随着科技的不断进步,飞机本体系统的安全性不断得到提高,但是由于人的因素导致的飞行安全事故却没有明显改善。统计数据表明,近年来飞机飞行安全事故的75%以上都是由人的因素导致的,而这其中一大部分是由飞行员与飞机的信息交互不畅导致的,包括飞行员认读失误、判断失误、操纵失误以及驾驶舱设备布局不合理导致的信息丢失、操纵错误、操纵干涉等。这些导致飞行事故的原因,本质上反映了飞机驾驶舱人机工效的潜在缺陷,表明驾驶舱设计未能很好地把握人机交互的本质规律,使得在复杂的运行环境中,在某一特定条件下,激发了潜在缺陷,人机偏离了交互规律,最终导致了飞行事故的发生。

飞机和飞行员是两种性质迥异的系统,要实现这两种系统的和谐工作,必须要有一个良好的人机信息交互界面,在这个界面上飞行员可以快速、准确地获取飞机的各种状态信息并且实现对飞机的实时操纵,飞机要能及时接收飞行员的操纵指令并且实时反馈飞机的当前状态,这种驾驶舱中的人机信息交互能力就是驾驶舱的人机工效。不论是民用飞机还是军用飞机,良好的飞机驾驶舱的人机工效设计水平,都是飞机飞行安全和成功完成任务的重要保证。

航空航天工业水平是一个国家现代化综合国力水平的重要体现,我国在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中把大型飞机规划为重大专项,是建设创新型国家和新时期改革开放的标志性工程。发展大型民用飞机对我国经济建设、社会可持续发展、国家公共安全和科技发展具有重要意义。与民用飞机发达国家相比,发展我国的大型民用飞机面临很多困难,因此要实现民机的跨越式发展,既要有公认的先进性,更要有鲜明的特色性,具有自己的知识产权,这些特征也集中反映在驾驶舱人机工效的设计上。过去由于我国民用飞机发展较少,民

机驾驶舱人机工效的研究几乎处于空白,军用飞机的人机工效与民用飞机的需求差异很大,只能部分借鉴,相关的实验和设计数据仅限于军用飞机的飞行员人体几何测量数据,专门的针对民用飞机飞行员的认知实验数据和设计数据也几乎空白;同时,由于人种的差异,国外民机设计中积累的飞行员生理和心理数据,不能完全照搬照抄,与整个民机项目面临的困难一样,民机驾驶舱人机工效的设计既没有一套完整的可遵循和可操作的设计准则和设计方法,也没有一套完整的可借鉴的设计思路和设计经验。

飞机驾驶舱人机工效本质上是解决飞行员和飞机之间的人机融合问题,是提高人机系统性能的重要环节。驾驶舱人机工效不仅涉及设计准则和设计方法,更重要的是要解决设计理念问题。以民用飞机两大巨头——波音和空客——为例,它们在民机驾驶舱的设计中,为了提高人机工效水平,都确定了“以人为中心”的设计理念,但却给出了不同的理解,波音强调人的主观能动性,而空客强调飞机系统的可靠性,这种不同的理解导致了驾驶舱人机工效的设计出现了很大的差异,特别是应急情况下的处置权问题等。大量的飞行实践表明,基于这两种理解的设计理念所设计的驾驶舱,尽管明显地改善了驾驶舱人机工效水平,保证了飞行安全,但仍然有大量的飞行安全事故。为了提高我国的民机安全水平,就迫切需要一种更完善的“以人为中心”的设计理念,通过借鉴波音和空客的理念,发展出一种基于飞行员特性的人机功能合理分配的设计理念,并在此基础上,结合安全科学、环境科学、生物学、心理学、信息论、控制论、飞行力学、计算机数字仿真等领域交叉学科的综合研究,建立易于理解的驾驶舱人机工效设计准则,完善可操作的驾驶舱人机工效设计方法,开发可用于工程实际的驾驶舱人机工效设计工具,以便于推进驾驶舱人机工效的设计理论、设计体系和设计方法的工程转化。同时,由于人机工效贯穿于产品的始终,涉及产品的方方面面,帮助设计人员树立正确的设计理念,使之理解设计准则、掌握设计方法、使用设计工具是保证产品最终获得满意的人机工效水平的必经之路和重要保证。

自从 2008 年国内启动大型民机研制工作以来,在国家科学技术部和工业和信息化部支持下,在中国商用飞机有限责任公司上海飞机设计研究院的通力协调和国内相关研究单位的大力配合下,民机驾驶舱人机工效研究已经取得了很大的进步。西北工业大学、北京航空航天大学、南京航空航天大学、中国民航大学等高校在驾驶舱人机工效设计理论、设计方法体系和仿真评估理论与方法等方面进行了有效的探索,很多研究成果已经成功地应用到支线客机 ARJ21 和大型民机 C919 的驾驶舱设计中,部分地改善和提高了驾驶舱的人机工效水平,改变了驾驶舱人机工效的设计无所适从的局面。但是,这些研究成果距离国际先进水平的驾

驾驶舱人机工效设计要求还有较大的差距和不足,国内甚至还没有一本系统介绍驾驶舱人机工效设计的教科书或者论著。

本书是笔者结合国家重大基础研究 973 项目课题和工信部十二五专项以及多个科研院所多项驾驶舱人机工效相关的研究成果,试图系统地介绍民机驾驶舱人机工效的设计准则、设计方法和仿真评估的方法等内容,通过对驾驶舱人机工效研究涉及的人(飞行员)、机(驾驶舱的布局等)、环境(驾驶舱的微环境)等三个方面进行系统、深入的阐述与分析,将“以人为中心”的设计理念量化或定性表达为设计人员可遵循的设计理论、设计准则以及评估方法,是驾驶舱人机工效从设计到评估的一套完整的方法体系,希望本书能起到抛砖引玉的作用,对我国民机驾驶舱人机工效的发展起到一定的推动作用。

本书的第 1 章主要讲述驾驶舱人机工效设计与评估的基本概念以及驾驶舱人机工效设计的发展历程;第 2 章主要从飞行员的认知特性、操纵特性以及失误等特性出发,阐述“以人为中心”的设计中“人”的特性,作为驾驶舱人机工效设计与评估的出发点与依据;第 3 章主要分析驾驶舱设备的功能、环境的特点及其对飞行员的影响;第 4 章从驾驶舱设计的角度结合飞行员以及驾驶舱环境的特点,给出驾驶舱人机工效设计的相关准则与方法,包括驾驶舱的布局设计、显控系统设计、座椅设计等;第 5 章给出驾驶舱人机工效的评估方法和评估指标。第 6 章介绍了未来民机驾驶舱人机工效设计相关的新概念、新技术及需要开展研究的新领域和新方向。

本书的相关内容得到了国家重点基础研究计划(973 计划,编号:2010CB734101)和十二五民用飞机专项科研项目的支持。本书在写作过程中得到了上海飞机设计研究院副院长、科技委主任、973 项目首席科学家陈迎春常务副总师的大力支持,在此特别表示感谢!

同时感谢相关科研院所的科研和设计人员在项目合作中的讨论与建议,包括中航工业第一飞机设计研究院、上海飞机设计研究院、成都飞机设计研究所、西安飞机工业(集团)有限责任公司、中国飞行试验研究院、中航工业航宇救生装备有限公司、洪都航空工业有限责任公司等,他们对本书的立题、内容安排、探讨重点给予了很大的启示。

希望本书的出版能够为推动我国民机驾驶舱人机工效设计与评估的研究及发展做出力所能及的贡献。

由于水平有限,不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正!

著 者

2014 年 3 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 基本概念	1
1.2 民机驾驶舱人机工效的发展历程	2
1.3 人机工效学的理论体系	6
1.4 驾驶舱一般设计流程	23
1.5 驾驶舱人机工效的研究内容	28
第 2 章 飞行员特性	32
2.1 飞行员几何特性	32
2.2 飞行员认知特性	51
2.3 飞行员操纵特性	64
2.4 飞行员失误	80
第 3 章 驾驶舱布局与环境	99
3.1 驾驶舱布局	99
3.2 驾驶舱微环境对人体的影响	113
第 4 章 驾驶舱人机工效设计原则	123
4.1 总体要求	123
4.2 操纵设备设计要求	124
4.3 显示界面设计要求	126
4.4 微环境设计要求	135
4.5 飞行员座椅设计要求	139
第 5 章 民机驾驶舱人机工效评估方法	143
5.1 模糊综合评判法	143

5.2 专家打分法(德尔菲法)	147
5.3 虚拟人机工效评估法	159
第6章 驾驶舱人机工效设计中的新概念与新技术	165
6.1 语音交互控制	165
6.2 视景增强系统	167
6.3 综合视景系统	168
6.4 无纸驾驶舱	169
6.5 新技术的应用	170
参考文献	171

第1章 绪 论

1.1 基本概念

工效学是研究人在某种工作环境中的解剖学、生理学和心理学等方面的各种因素;研究人和机器及环境的相互作用;研究在工作中、家庭生活中和休假时怎样统一考虑工作效率、人的健康、安全和舒适等问题的学科。由于该学科研究和应用的范围极其广泛,它所涉及的各学科、各领域的专家、学者都试图从自身的角度来给本学科命名和下定义,因而世界各国对本学科的命名不尽相同,即使是同一个国家,对本学科名称的提法也很不统一,甚至有很大差别。该学科在美国称为 human engineering(人类工程学)或 human factors engineering(人的因素工程学),欧洲国家多称为 ergonomics(工效学),而其他国家大多引用欧洲的名称,日本称为人间工学。工效学在我国起步较晚,目前该学科在国内的名称尚未统一,除普遍采用人机工程学名称外,常见的名称还有人-机-环境系统工程、人体工程学、人类工效学、人类工程学、工程心理学、宜人学、人的因素等。

尽管“human factors”和“ergonomics”经常被认为是可以互为替代的表达,但是在科学研究中也有各自的偏重。“human factors”更加关注提高机器的工作效率或是改进人的健康、安全等方面的问题;而“ergonomics”则更加关注设备、操作和系统对用户的影响,主要包括任务需求以及振动、噪声等环境问题。本书主要是以保障民航飞行安全性为前提,探索提高飞行员-驾驶舱-微环境这一人机系统性能的设计和评估方法,因此本书采用“工效学(ergonomics)”这一说法。

飞机驾驶舱是飞行员获取飞行信息、控制飞机完成飞行任务的工作场所,是人机交互的节点。与其他人机系统的设计一样,飞机驾驶舱设计是一个复杂的设计过程,驾驶舱里涉及多种不同类型的作业和人机交互活动。飞机驾驶舱工效学设计就是结合人(飞行员)的生理和心理因素,根据飞机的总体指标去规划并协调飞机的操纵、控制(人工/自动)、通信和导航等机载系统设备的布局和布置,使飞行员在舒适的状态下,迅速、准确地获取各种反映飞机工况的视觉、听觉和触觉信号,并按需做出正确无误的操纵和发出控制指令,以完成飞行任务。

驾驶舱符合工效学设计,才能达到人机匹配,提高飞行员的情景意识,降低其

工作负荷,从而使飞行员安全、高效、舒适地完成驾驶任务。

另外,对飞机驾驶舱人机工效进行评价也至关重要,在评价过程中能够系统地评价驾驶舱与现有标准和准则的符合情况,其目的是确保驾驶舱中没有与标准/准则不符的问题存在,这些问题会对驾驶过程中的操作工效、人身健康和 safety 造成不利影响。将评估结果与设计反复迭代,最终设计出符合工效学要求的驾驶舱。

目前驾驶舱工效学的主要研究方法有以下几种:

- 1) 实测法,主要指人体尺寸的实测法、心理实测法等;
- 2) 实验法,当实测法受到限制时,可采用实验的方法,是指在实验室或其他实验条件下,对实验的边界条件进行控制,以引起研究对象相应变化来做出因果推论和变化预测的一种方法;
- 3) 分析法,一般是在前两种方法的基础上进行的,对上述数据进行分析后得出研究规律;
- 4) 调查研究法,主要是通过采取问卷调查、访问等方式得到使用对象的主观意见和建议;
- 5) 计算机仿真法,由于人机系统中的操作者是具有主观意志的有机生命体,采用传统的方法往往会受到很多限制,不能获得更为充分、有效的数据,因此研究者可以在计算机上利用系统的数学模型进行仿真性研究;
- 6) 图示模拟和模型试验法,是指运用图形对系统进行描述,直观反映各要素之间的关系,从而揭示系统本质及其内在联系的一种方法,例如在模拟器上进行飞行试验;
- 7) 感觉评价法,是运用人体主观感受对系统的性质、质量等特征进行判断和评价,如对内饰、光环境等与人的主观感受直接相关的项目即可采取此种方法。

1.2 民机驾驶舱人机工效的发展历程

人类使用简单劳动工具时,客观上就存在人、机、环境三者的最优组合问题。在我国 2000 多年前的《冬官考工记》中,就有按人体尺寸设计工具和车辆的论述。这就是当今人机工程中人、工具、机器设计中的“机器适应人”(machine to human)的思想。现代人机工效的发展经历了 3 个阶段,经验人机工效、科学人机工效以及现代人机工效。

第一次产业革命(1750—1890 年)和第二次产业革命(1870—1945 年)时期,人类的劳动进入了机器时代,人的劳动作业在复杂程度及负荷量上均有了很大变化,人、机、环境三者也相应形成了很复杂的关系。人们可用近代科学研究手段研究人

机工效问题。20 世纪初,美国学者 F. W. Taylor 用近代科学技术方法,对生产领域中工作能力和效率进行了研究。他的研究成果在美国和欧洲得到了推广应用,成为可提高劳动生产率的“泰勒制”。F. W. Taylor 为科学方法研究人机工程做出了开拓性贡献。后来,人们开始对人、机、环境三者之间的关系进行较系统的试验研究,并积累了大量数据。

第二次世界大战期间,各种新武器不断出现,相关的人机工效问题的研究及解决显得更为迫切。第一次世界大战中,各参战国几乎都有心理学家去解决战时兵种分工、特种人员的选拔训练及军工生产中的疲劳等问题。其研究特点是选拔和训练人,是“人适应机器”(human to machine)的设计思想。在二次世界大战期间,武器装备的性能大大提高,但由于其设计时没有充分考虑人机工效问题,使武器装备的效能得不到充分发挥,常有差错和事故发生。这些使人们认识到,人机工效是武器装备设计不可忽视的重要问题。到了 20 世纪 50 年代,电子计算机应用迅速发展;60 年代,载人航天活动取得了突破性进展。这一切使得人、机、环境相互关系的研究显得更为迫切,人们开始重视工业与工程设计中“人的因素”,力求使机器适应人。

现代的人机工效学将人-机-环境系统当做一个统一的整体来研究,以创造最适合人操作的机械设备和作业环境,使人-机-环境系统相协调,从而获得系统的最高综合效能。

飞机驾驶舱的发展历程与人机工效的发展历程息息相关。

飞机驾驶舱的发展历程大致可分为两个阶段(见表 1-1)。20 世纪 70 年代以前沿着从简单到复杂的道路发展,驾驶舱内的各类仪表和开关不断增多,且渐趋饱和;70 年代末期开始,随着航空电子技术的不断发展,又开始由复杂趋向简明;进入 90 年代,玻璃驾驶舱达到全盛时期,目前仍在继续扩大成果;世纪之交,驾驶舱向工作站方式推进,反映了航空电子和显示技术上的进步。图 1-1 所示为波音系列飞机驾驶舱的发展历程。

20 世纪 70 年代以前,驾驶舱设备从全机械仪表、手柄开关发展成为较复杂的机电仪表、灯光音响信号和旋钮。这一阶段的飞机驾驶舱布局缺点一方面在于传达给飞行员的信息有限,缺乏综合信息;另一方面控制能力有限,大部分都是分散控制和开环控制,缺乏自动化的闭环控制和综合控制。其布局特点是使用“表”和“操作开关”向飞行机组人员传达和交互信息,先由系统(表)提供原始数据给飞行机组人员,然后由飞行机组人员整合数据,变成机组人员可用的关于飞机、环境和任务等有关的信息,该信息获取的方式是机组人员基于当前的工作或任务,由机组人员通过眼睛、耳朵或触觉等获取数据或感知飞机态势。主要反映人机工效水平

的设计,即空间、灯光、环境(振动、噪声)、可达性、易达性等。

表 1-1 驾驶舱发展历程及代表机型

按时间阶段划分和对应的典型飞机和驾驶舱		
时间阶段	驾驶舱及其设备	年份和典型飞机
早期的驾驶舱从简单到复杂	机电式驾驶舱 以机电设备为主	20 世纪 40—60 年代: C46, C47, DC-4
	模拟电子驾驶舱机电+模拟电子设备(ARINC-400/500 系列规范)	20 世纪 60—80 年代: 子爵, 三叉戟, 三星 L-1011, 大力神 C-130, VC-10, DC-9, MD-80, MD-82, B-707, B-727, 早期 B-737 和 B-747, A-300, A-310, 伊尔-18, 伊尔-62, 伊尔-96, 安-24, 安-26, 图-114, 图-154, 图-204, 运七, 运八, 运十
近期的驾驶舱从复杂到简便	玻璃驾驶舱 数字电子设备(ARINC-600/700 系列规范)	20 世纪 80—90 年代: 后期 B-737 和 B-747, B-757, B-767, MD-90, MD-11, A-319, A-320, A-321, A-330, A-340, 伊尔-96M, 图-204-120, 图-224, 图-334, 雅克-242
	工作站驾驶舱综合模块电子设备	20 世纪 90 年代起到 21 世纪: 从 B-777 开始



图 1-1 波音系列飞机驾驶舱的发展历程

20 世纪 70 年代末期开始,随着航空电子技术的不断发展,驾驶舱布局又开始由复杂趋向简明。集成电路和微处理器的普及应用, CRT 开始进入驾驶舱,出现了利用 CRT 的电子姿态指引仪(EADI)和电子水平状态指示器(EHSDI),并组成为综合的电子飞行仪表系统(EFIS)。这场驾驶舱的巨大变革,其主要特征为从指示到显示、从复杂到简明。其特色可概括为,显示技术应用、信息综合利用、自动控制

升级、实现综合管理、实现双乘制。

进入 20 世纪 90 年代,玻璃驾驶舱达到全盛时期,目前仍在继续扩大成果。进入 21 世纪,驾驶舱向工作站方式推进,主要表现在:显示器件平板化、继续发展固态传感器、扩展信息源和信息综合的深度和广度、从话音到数据通信、卫星技术应用、开放系统结构、鼠标控制器的应用、发展共同性机型系列、玻璃驾驶舱的普及。这其中值得一提的是波音 777 飞机。在波音 777 飞机的新型驾驶舱中采用了鼠标控制的输入方式,借此把计算机操作环境全面搬进了飞机驾驶舱。波音 777 飞机驾驶舱在照明设计、遮光罩设计、色彩的选用、美学和耐久性设计、飞行员安全保护及减少疲劳、间隙填充和流线型设计等方面都令人赏心悦目,是一架成功应用人机工效方法设计的飞机驾驶舱,值得借鉴。此外,近期研制的空客 A380 飞机的驾驶舱更是体现了以人为本的指导思想,采用了大量人机工效研究方面取得的新成果,取得了良好的效果。

在飞机驾驶舱设计方面,国内对人、机、环境诸要素开始研究始于 20 世纪 80 年代后期,其中驾驶舱几何设计、仪表及照明工程心理学等方面研究较快,已取得大量技术成果和经验,并应用到型号设计中。而航空电子技术、智能技术、生物力学、信息控制技术及新环境下的工效研究落后于西方国家。目前,国内相关研究单位在飞机驾驶舱人机工效领域的研究也取得了一定的进展,西北工业大学、北京航空航天大学等高校在驾驶舱人机工效设计、仿真与评估理论方面进行了有效的探索,上海飞机设计研究院等在支线客机 ARJ21 飞机驾驶舱的设计中已部分采用了人机工效的成果并积累了一定的经验,探索并研究了相关的理论基础,目前在大客 C919 驾驶舱的设计中正在探索和发展急需的驾驶舱人机工效设计关键技术。

由此可以看出,随着驾驶舱的发展,驾驶舱的人机工效要求在不断提高,可以说,驾驶舱以飞行员为中心的设计理念越来越多地被重视起来,驾驶舱人机工效水平的高低就是驾驶舱设计和布置是否先进的体现。

人为因素在航空安全中的应用始于 20 世纪 70 年代,其研究也经历了两个阶段:20 世纪 70 年代初到 80 年代后期,对人为因素的研究主要是基于“技术驱动”,将人机工效学作为研究的理论基础,改善飞机、驾驶舱及各部件的设计,使之达到人机匹配;20 世纪 80 年代后期,人们认识到人为因素已经成为飞行事故的主要原因,并将人为因素的研究扩展到人与一切资源的搭配利用,其中最著名的就是机组资源管理(CRM)。20 世纪 90 年代以来,人为因素研究已经发展到系统安全的阶段,其中主要标志就是 Reason 模型的应用及其成果,以及 Reason 教授提出的组织因素理论。

1.3 人机工效学的理论体系

人机工效学在我国也称为人-机-环境系统工程,是一门综合性边缘技术科学,为了形成其本身的理论体系,它从一系列基础学科中汲取了丰富营养,并奠定了自身的基础理论。人-机-环境系统工程的3个主要基础理论为控制论、模型论和优化论。

1.3.1 控制论

控制论对人-机-环境系统工程的根本贡献在于,它用系统、信息、反馈等一般概念和术语,打破了有生命与无生命的界限,使人们能用统一的观点和尺度来研究人、机、环境这3个物质属性本是截然不同、互不相关的对象,并使其成为一个密不可分的有机整体。控制论与下面介绍的模型论、优化论是密不可分的。在控制系统的分析研究中,总是通过使用数学模型这个工具,用建立系统模型方法来进行系统的分析、设计、试验。

在现代控制理论中最优控制系统的设计,是通过建立一定的优化目标函数,使其达到最小或最大。在最优化方法中,实际上也是使用各种各样的优化模型。因此,最优化方法也要采用建模的方法,只不过它不是系统的物理化学过程或特性模型,而是各式各样的目标与约束条件模型。图1-2是一般的控制系统概念结构图。

控制系统

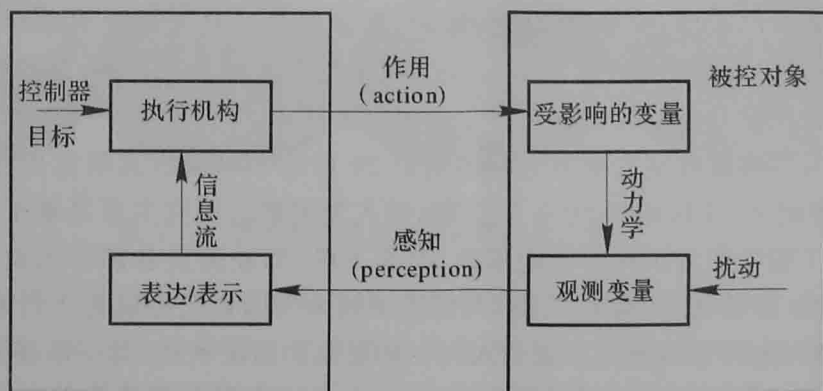


图 1-2 一般的控制系统概念结构图

现代控制理论主要研究以状态空间法为基础的系统分析、最优控制、最优状态

估值、最优自适应控制、系统识别与参数估计、自学习与自组织系统等。下面只对与人机工效相关的一些基本概念做些介绍。

1. 状态空间法

为了确定系统的最优控制规律即人机工效的最佳状态,首先要知道被控对象的动态特性。在现代控制理论中,动态系统特性(系统动力学)的数学描述采用状态空间法。一个动态系统可以用图1-3来表示。状态空间法深入到动态系统的内部,描述被控系统控制输入 $U(t)$ 、状态 $X(t)$ 和输出 $Y(t)$ 之间的关系。动态系统被分成性质不同但又相互紧密联系的两部分:系统动力学部分与测量部分。前者反映了控制输入 $U(t)$ 与系统状态 $X(t)$ 之间的相互关系,它用微分方程来描述;后者反映了系统状态 $X(t)$ 与输出 $Y(t)$ 之间的相互关系,它用代数方程来描述。

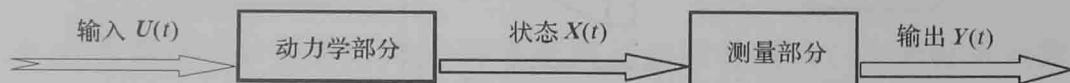


图 1-3 一般动态系统

这时,动态系统状态 $X(t)$ 是由一组 n 个状态变量 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 组成的,全面确定动态系统运动状况的最少数目的一组 n 维向量, $X(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_n(t)]^T$,并称之为系统状态向量。状态向量所张成的 n 维向量空间,称为状态空间, n 称为系统的维数或阶数。系统的控制输入 $U(t)$ 是由 r 个输入变量 $[u_1(t) \ u_2(t) \ \dots \ u_r(t)]$ 组成的 r 维向量, $U(t) = [u_1(t) \ u_2(t) \ \dots \ u_r(t)]^T$,称为 r 维输入向量,它表示加到该系统上的外部作用或影响。系统的输出 $Y(t)$ 是由 m 个输出变量 $[y_1(t) \ y_2(t) \ \dots \ y_m(t)]$ 组成的 m 维向量, $Y(t) = [y_1(t) \ y_2(t) \ \dots \ y_m(t)]^T$,称为 m 维输出向量,它是体现控制目的的量,是可以测量的外部变量。

一个动态系统,根据其实际构造,借助于物理、化学或其他学科定律,可以得到系统的状态方程与输出方程。系统在 $t \geq t_0$ 时的状态 $X(t)$ 是由 t_0 到 t 这段时间的输入 $U(t_0, t)$ 唯一确定的。

一般的非线性时变动态系统可用状态变量形式的一个微分方程和一个测量方程来描述:

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}(t) &= F[X(t_0), U(t), t] \\ Y(t) &= H[X(t_0), U(t), t] \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中, $F[\cdot]$ 和 $H[\cdot]$ 是状态 $X(t)$ 与控制输入 $U(t)$ 的向量值函数。

若动态系统是线性时变系统,则方程变为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}(t) &= \mathbf{A}(t)\mathbf{X}(t_0) + \mathbf{B}(t)\mathbf{U}(t) \\ \mathbf{Y}(t) &= \mathbf{C}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{U}(t) \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中, $\mathbf{X}(t)$ 是 n 维状态向量; $\mathbf{U}(t)$ 是 r 维输入(或控制)向量; $\mathbf{Y}(t)$ 是 m 维输出(或测量)向量; $\mathbf{A}(t)$ 是 $n \times n$ 阶的状态矩阵; $\mathbf{B}(t)$ 是 $n \times r$ 阶的输入(或控制)矩阵; $\mathbf{C}(t)$ 是 $m \times n$ 阶的输出(或测量)矩阵; $\mathbf{D}(t)$ 是 $m \times r$ 阶的传递(或输入/输出)矩阵。线性系统的结构图如图 1-4 所示。

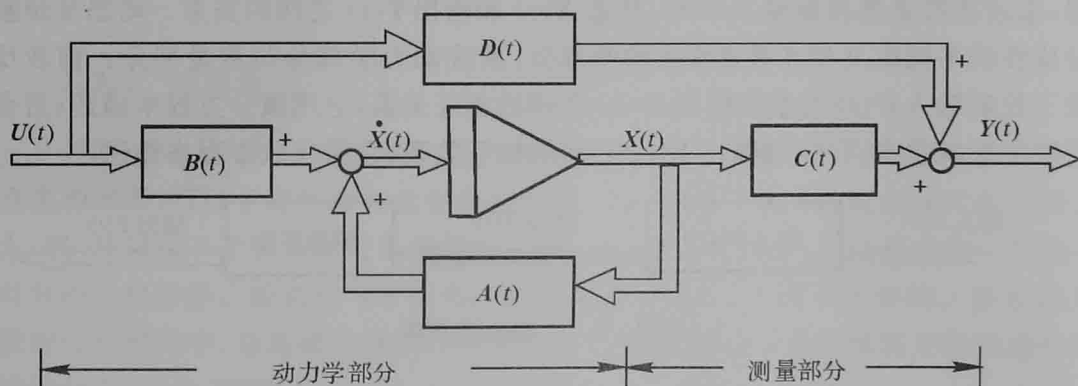


图 1-4 线性系统结构图

若是线性时不变系统,则 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ 均是常数矩阵,式(1-2)变为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) \\ \mathbf{Y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{X}(t) + \mathbf{D}\mathbf{U}(t) \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

2. 线性系统可控性、可观性

在最优控制与最优估值中,线性系统的可控性与可观测性非常重要。在设计一个最优控制系统或最优估值器之前,必须知道系统是否可控和可观测。如果一个系统不是完全可控的,也就是说系统的控制输入不足以控制和影响系统内部状态的变化,则系统的最优控制问题的解往往是不存在的。同样,若一个系统不是完全可观测的,即一个系统的输出不足以充分反映系统内部状态的变化,则不存在系统状态最优估值问题的解。

3. 最优控制

所谓最优控制,就是在给定的约束条件下,寻求一种控制(或决策),使系统的某种性能指标具有最优值(在数学上有最小或最大值)。值得注意的是,最优控制的“最优”一词指的仅是系统中某一性能指标最优,而不是系统的任何性能指标都是最优的。例如,对飞行器的控制系统来说,有可能要求燃料消耗最少,也可能是要求交汇对接过程时间最短,还可能是要求着陆点精度最高,等等。也就是说,根

据系统的不同要求,提出系统不同的性能指标。性能指标是衡量与设计最优控制系统的依据与标准。

在数学上,一个系统最优控制问题可用如下的形式来表达。设系统的状态方程为

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}\{\mathbf{X}(t), \mathbf{U}(t), t\} \quad (1-4)$$

式中, $\mathbf{X}(t)$ 为 n 维状态向量; $\mathbf{U}(t)$ 为 r 维控制向量, $\mathbf{F}\{\cdot\}$ 为 n 维向量函数。若给定的初始状态为

$$\mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0$$

则系统的性能指标函数一般如下:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} G\{\mathbf{X}(t), \mathbf{U}(t), t\} dt \quad (1-5)$$

式中, t_0 为系统初始控制时刻, t_f 为系统终了控制时刻; $G\{\cdot\}$ 为标量函数, $G[\mathbf{X}(t), \mathbf{U}(t), t] = G[x_1(t) \ x_2(t) \ \cdots \ x_n(t) \ u_1(t) \ u_2(t) \ \cdots \ u_r(t) \ t]$ 。

显然,性能指标函数 J 亦为标量函数,是一个泛函。

因此,从数学上看,最优控制系统的设计就是选择最优控制 $\mathbf{U}(t)$,使其性能指标 J 为最优,也就是说,最优控制问题在数学上就归结为求泛函的极值问题。解最优控制问题的数学方法有变分法、极值原理和动态规划等。需要进一步了解的读者可以参考相关文献。

最优控制可以采用开环控制与闭环控制两种控制方式,其控制结构图如图 1-5 所示。从图中可以看出,开环最优控制系统,其控制策略 $\mathbf{U}^*(t)$ 只与系统的输入信号 $\mathbf{R}(t)$ 和初始状态 $\mathbf{Y}(t_0)$ 有关,即

$$\mathbf{U}^*(t) = \mathbf{U}^*[\mathbf{Y}(t_0), \mathbf{R}(t), t]$$

而闭环控制系统的 $\mathbf{U}^*(t)$ 与系统的输入信号 $\mathbf{R}(t)$ 和系统的实时状态 $\mathbf{Y}(t)$ 有关,即

$$\mathbf{U}^*(t) = \mathbf{U}^*[\mathbf{Y}(t), \mathbf{R}(t), t]$$

因此,闭环最优控制系统可以在任何扰动情况下实现最优控制,而开环控制系统一旦出现扰动,则最优控制便被破坏。

4. 自适应、自学习和自组织控制

当系统的特性随时间和外部环境变化而变化,或系统的工作条件发生不确定性变化时,显然,只有改变系统的参数或控制策略,才能使系统达到原定的最优控制目标。自适应控制系统就是模仿生物体具有适应环境变化的能力,它通过不断获得系统本身的工作情况以及环境条件变化的信息,用相应的系统调整自己的参数或改变控制策略的办法,使系统某指标始终保持最优的性能。