

高等学校通用教材

人 机 工 程

袁修干 庄达民 编著

北京航空航天大学出版社

[http:// www .buaapress .com .cn](http://www.buaapress.com.cn)

内容简介

本书为理工科学生学习人机工程基本知识的教材,旨在培养学生树立人机工程的基本思想,用系统科学的理论和方法去处理人、机、环境三大要素间的关系,最终能用所学知识对特定的人机系统进行综合设计和评价。

本书的内容除了有学术和理论意义外,对研究、生产及高等院校有关专业人员有广泛应用价值。本书还适合作为研究生辅助教材。

图书在版编目(CIP)数据

人机工程 / 袁修干等编著 .— 北京 : 北京航空航天大学出版社, 2002 3

ISBN 7-81077-128-0

人... 袁... 人-机系统—高等学校—教材 .TB18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 005332 号

人机工程

袁修干 庄达民 编著

责任编辑 胡晓柏

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

[http:// www .buaapress .com .cn](http://www.buaapress.com.cn)

E-mail: [pressell@publica .bj .cninfo .net](mailto:pressell@publica.bj.cninfo.net)

河北省涿州市新华印刷厂印装 各地书店经销

开本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:14.25 字数:365 千字

2002 年 3 月第 1 版 2002 年 8 月第 2 次印刷 印数:1 001~3 000 册

ISBN 7-81077-128-0 V·004 定价:17.00 元

前 言

人机工程是一门运用系统科学理论和系统科学方法,正确处理人、机、环境三大要素间的关系,研究人、机、环境系统最优组合的工程技术科学。人机工程既是一种设计思想和理论,同时也是一种有效的系统综合设计和评价技术,对后者面向工程应用的研究已经成为工业界普遍关注的问题。

人机工程有关问题的解决必须有心理学、生理学、医学工程、工程技术等多学科的专家协同工作,而直接设计工作往往是由工程技术人员完成的。因此,发展具有一定通用性的人机工程计算机仿真软件是使该学科的研究发展走向工程应用的关键。将人-机-环境系统工程的思想、理论以及工程应用的研究成果,用现代计算机仿真技术综合集成起来,使其成为一种可用于工程问题定量分析、设计及评价的现代技术,必将起到提高工程中人机工程问题的设计效率、及时发现并纠正错误、缩短设计周期、降低研制费用等作用,并且将成为复杂系统人机工程设计的一种必不可少的手段。目前,大型复杂人机系统的设计,比如人机系统功能分配、人机系统界面的工效设计、人体热调节、作业环境预测等,都要经过计算机仿真。本书用较大篇幅论述各种计算机仿真问题,这是本书与其他相关书籍的最大区别之处。

本书的结构及主要章节内容如下所述。

第一章是人机工程概述。论述人机工程学科的形成和发展;人机工程研究内容及举例;人机与环境工程的相关学科等等。

第二章是系统分析。论述建立人、机、环境和全系统的数学模型并进行模拟实验的重要性,分析和研究人、机、环境三大要素对系统总体性能的影响和所应具备的各自功能及相互关系等。系统分析的目的在于不断修正和完善人-机-环境系统的结构方式,最终确保人、机、环境三大要素最优组合方案的实现。

第三章是作业域(工作空间)的计算机辅助设计。论述作业域设计的人体工程学参数,其中包括人体测量学参数及人体测量的方法、作业域的人体工程学参数;显示/控制器布局;座椅设计的人机工程学要求;作业域 CAD 设计评价及人体运动计算机图形模拟等。

第四章是信息显示/控制的人机工程设计与评定。论述人的效应器输出速度和准确性等关系;视觉信息流及相关的测试技术和评价方法等。

第五章是人体热调节系统数学模拟及其应用。论述采用数学系统分析的方法来研究人体热调节系统,将人体热调节控制系统同工程控制系统有机地结合起来,建立感受器、控制器及效应器三种基本控制元件及数学表达式。

第六章是作业环境。论述照明和颜色的一般原理及设计原则,噪声及振动,温热环境及温热指标和热舒适性,室内空气污染等。对航空航天微环境中的照明、噪声及振动问题也作了相应的介绍。

第七章是航空航天特殊作业环境。讨论航空航天微环境中的低压、缺氧和高氧、超重与失

重等对人体的影响及防护措施,航空航天救生技术等。

第八章是座舱与工作室作业环境三维流场的数值模拟。论述解流动和传热问题的基本方程,差分格式,贴体网格技术,两方程式紊流模型及大涡模拟方法, HSMAC 和 SINPUL 数值解法等,并结合具体的解析对象算出了不同室内(舱内)的气流分布。

本书由袁修干和庄达民主编。本书的部分内容参考了由陈信、袁修干主编的《人-机-环境工程计算机仿真》一书和由袁修干主编的《人机与环境工程》一书中的相关内容。在此,对这两书中其他作者陈信、龙升照、沙斌、付世波、魏斌、季白桦、林国华、刘伟、贾司光、欧阳骅、谢宝生、刘建忠、张兴娟、王兴伟等表示感谢。

本书的内容除了有学术和理论意义外,对研究、生产及高等院校的相关专业人员也有广泛应用价值。它将对人机工程的研究成果进入工程应用起到推动作用。

作者

2001年12月

目 录

第一章 人机工程概述

第一节 人机工程学科的形成和发展.....	(1)
第二节 人机工程的研究内容.....	(2)
习题与思考题	(11)
参考文献	(11)

第二章 系统分析

第一节 人-机-环境系统的分类	(12)
第二节 系统分析的目的	(12)
第三节 系统功能分配及评价	(13)
第四节 经济性分析	(15)
第五节 可靠性与安全性分析	(16)
第六节 系统分析的基本步骤	(22)
第七节 系统分析研究举例	(23)
习题与思考题	(26)
参考文献	(26)

第三章 作业域(工作空间)的计算机辅助设计

第一节 作业域设计的人体工程学参数	(27)
第二节 显示/ 控制器布局.....	(44)
第三节 座椅设计的人机工程学要求	(50)
第四节 作业域 CAD 设计评价及人体运动计算机图形模拟	(53)
习题与思考题	(69)
参考文献	(70)

第四章 信息显示/ 控制的人机工程设计与评定

第一节 基于工效学的显示/ 控制器面板计算机辅助设计.....	(71)
第二节 目标拾取运动的特性和仿真	(73)

第三节 视觉与眼动系统	(75)
第四节 红外电视眼动测量系统	(84)
第五节 驾驶舱信息显示/控制的人机工效评定系统.....	(86)
习题与思考题	(91)
参考文献	(91)
第五章 人体热调节系统数学模拟及其应用	
第一节 研究历史和现状	(92)
第二节 人体热调节的生理学基础及其控制系统	(95)
第三节 被控分系统数学模型	(96)
第四节 生物热方程	(98)
第五节 控制分系统数学模型.....	(104)
第六节 人体热调节系统数学模型的工程应用.....	(109)
习题与思考题.....	(112)
参考文献.....	(112)
第六章 作业环境	
第一节 照 明.....	(113)
第二节 色彩环境.....	(121)
第三节 噪 声.....	(126)
第四节 振 动.....	(136)
第五节 温热环境及舒适性.....	(141)
第六节 室内空气污染及控制.....	(153)
习题与思考题.....	(163)
参考文献.....	(163)
第七章 航空航天特殊作业环境	
第一节 低 压.....	(164)
第二节 缺氧和高氧.....	(166)
第三节 压力制度.....	(169)
第四节 压力应急.....	(173)
第五节 超重与失重.....	(175)
第六节 航空航天救生技术.....	(183)
习题与思考题.....	(190)
参考文献.....	(190)

第八章 座舱与工作室作业环境三维流场的数值模拟

第一节	作业环境的气流流动与人体热舒适性.....	(192)
第二节	解流动和传热问题的 N - S 方程	(193)
第三节	差分格式.....	(195)
第四节	贴体坐标下的通用输运方程.....	(198)
第五节	贴体网格生成.....	(199)
第六节	大涡模拟法.....	(209)
第七节	数值解法.....	(210)
第八节	边界条件的设定.....	(214)
第九节	数值仿真结果及分析.....	(214)
	习题与思考题.....	(219)
	参考文献.....	(219)

第一章 人机工程概述

第一节 人机工程学科的形成和发展

人机工程学科的形成可追溯到人类的早期活动,它的形成和发展经历了漫长的历史阶段。

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。在我国两千多年前的“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。

第一次产业革命(1750—1890)和第二次产业革命(1870—1945)时期,人类的劳动进入了机器时代。人们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更复杂的关系。人们用近代科学研究手段,研究人机工程问题。20世纪初,泰勒(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,在美国和西欧得到了推广应用,成为可提高劳动生产率的“泰勒制”。泰勒运用科学方法在研究人机工程方面作出了开拓性贡献。后来,人们对人、机、环境三者之间关系进行了较系统的实验研究,并积累了大量数据。

两次世界大战期间,由于各种新式武器不断出现,相关的人机工程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,是使“人适应机器”(human to machine)的设计思想。在第二次世界大战期间,武器装备的性能大大提高,但由于其设计没有充分考虑人机工程问题,使武器装备的效能得不到充分发挥,甚至常有差错和事故发生。这迫使人们认识到,人机工程是武器装备设计不可忽视的重要问题。到了20世纪50年代,电子计算机的应用迅速发展;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突出。

在欧美工业发达国家,都建立了专门机构研究人机工程问题。先后出现了工效学(ergonomics)、人的因素(human factors)、人体工程学(human engineering)等人机工程的不同命名。不过,它们的研究工作都在“人适应机器”(human to machine)、“机器适应人”(machine to human)以及“环境适应人”(environment to human)三个领域中进行。当今,欧洲对人机工程习惯称作 Ergonomics,美国则习惯称作 Human Factors。英国1950年成立 Ergonomics 研究会,1957年发行了会刊“Ergonomics”;美国于1957年成立 Human Factors 协会,出版了不少书刊。在20世纪60年代始,前苏联、德国、日本、法国、荷兰、瑞士、丹麦、瑞典、芬兰等国也都成立了相应名称的学会或研究机构。1960年正式成立国际人机工程学会(International Ergonomics Association)。

由于人机工程学在工业界的广泛应用,人机工程标准化问题也日益变得重要。所以,国际标准化组织 ISO 于1957年设立了人机工程学术委员会,负责其有关标准化的制定工作。

我国的人机工程研究,在20世纪50年代发展我国航空航天工业中就已兴起。在航空航

天生理学与心理学、飞行器驾驶舱人机工程设计、飞行器作业环境对人体影响及防护等方面,做了大量的研究工作。在 20 世纪 50—80 年代,当时的人机工程研究框架,仍是由“人适应机器”、“机器适应人”以及“环境适应人”三个领域构成。1981 年,在著名科学家钱学森指导下,陈信、龙升照等发表了《人-机-环境系统工程概论》一文,概括性地提出了人-机-环境系统工程的科学概念。人-机-环境系统工程是运用系统科学理论和系统科学方法,正确处理人、机、环境三大要素间的关系,深入研究人-机-环境系统最优组合的一门科学,其研究对象为人-机-环境系统。系统中的“人”是指作为工作主体的人,即参与系统工程的作业者(如操作人员、决策人员、维护人员等);“机”即人所控制的一切对象,即与人处于同一系统中与人交换信息、能量和物质,并为人借以实现系统目标的物(如汽车、飞机、轮船、生产过程、具体系统,计算机……)的总称;“环境”是指人、机共处的外部条件(如外部作业空间、物理环境、生化环境、社会环境)或特定工作条件(如温度、噪声、振动、有害气体、缺氧、低气压、超重及失重……)。研究中,把人、机、环境三者视为相互关联的复杂巨系统,运用现代科学技术的理论和方法进行研究,使系统具有安全、高效、经济等综合效能。

我国人-机-环境系统工程的学术研究团体、机构以及相关重大事件如下:

1980 年,我国成立“中国航空学会人机工程、航医、救生专业分会”;

1984 年 10 月,国防科学技术工业委员会成立“人-机-环境系统工程标准化技术委员会”;

1987 年 4 月,国防科学技术工业委员会成立“人-机-环境系统工程专业组”;

1988 年,北京航空航天大学成立“人-机-环境系统工程研究所”;

1990 年,国务院学位委员会批准北京航空航天大学为我国第一个人机环境工程博士学位授权点;

1993 年 10 月,中国系统工程学会成立“人-机-环境系统工程专业委员会”。

综上所述,20 世纪 40 年代前,是人机工程发展的萌芽期;40 年代至 70 年代是准备期;80 年代进入发展期;现在,它的研究和应用范围,已深入到航空航天、航海、兵器、交通、电子、能源、煤炭、冶金、管理……广泛的领域。它的不断发展和日趋完善,也将在科学技术的发展中发挥积极作用。

第二节 人机工程的研究内容

人-机-环境系统工程的研究内容按承担工作的部门不同,可以划分为两大部分。第一部分是以前工业部门为主承担的研究内容,如人的工作和耐受能力,人员选拔和训练等,它属于人适应人、人适应机器的研究内容。第二部分是以前工业部门为主承担的研究内容,它包括人-机-环境系统工程中除去第一部分研究内容后留下的全部内容,这就是人机工程的研究内容。不过要指出的是,以上这种划分只是为了从人-机-环境系统工程中区别出人机工程的研究内容,实际上两类业务部门的研究工作并不是独立分割,而是相互渗透、协同攻关的,所以才会有人-机-环境系统工程学科今天的蓬勃发展。

人机工程学科的研究内容有两种表述方法。第一种是在国家军用标准 GJB—90“人-机-环境系统工程术语”中表述的方法;第二种是与欧美国家类同的系统工效(system ergonomics)表述方法。

一、研究内容的第一种表述方法

第一种表述方法的研究内容可用图 1.1 来形象描述。它包括 7 个方面:人的特性的研究、机器特性的研究、环境特性的研究、人-机关系的研究、人-环关系的研究、机-环关系的研究、人-机-环系统总体性能的研究。

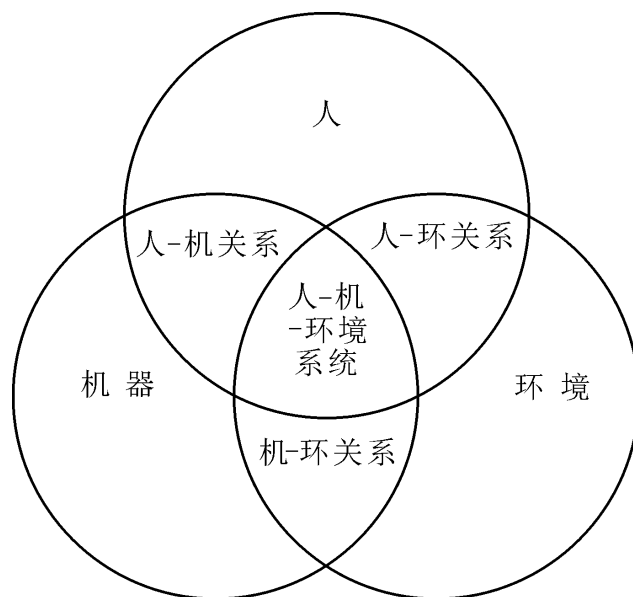


图 1.1 人-机-环境系统研究内容示意图

(一) 人的特性的研究

主要包括人的工作能力研究,人的基本素质的测试与评价,人的体力负荷、智力负荷和心理负荷研究,人的可靠性研究,人的数学模型(控制模型和决策模型)研究,人体测量技术研究,人员的选拔和训练研究。

(二) 机器特性的研究

研究与人机工程相关的机器特性及其建模技术。

(三) 环境特性的研究

研究与人机工程相关的环境特性及其建模技术。

(四) 人-机关系的研究

主要包括静态人-机关系研究、动态人-机关系研究和多媒体技术在人-机关系中的应用三个方面。静态人-机关系研究主要有作业域的布局与设计;动态人-机关系研究主要有人、机功能分配研究(人、机功能比较研究,人、机功能分配方法研究,人工智能研究)和人-机界面研究(显示和控制技术研究,人-机界面设计及评价技术研究)。

(五) 人-环关系的研究

主要包括环境因素对人的影响,个体防护及救生方案的研究。

(六) 机-环关系的研究

主要包括与人机工程相关的机-环关系及特性的研究。

(七) 人-机-环境系统总体性能的研究

主要包括人-机-环境系统总体数学模型的研究,人-机-环境系统全数学模拟、半物理模拟和全物理模拟技术的研究,人-机-环境系统总体性能(安全、高效、经济)的分析、设计和评价,虚拟现实(virtual reality)技术在人-机-环境系统总体性能研究中的作用。

二、研究内容的第二种表述方法

第二种表述方法的研究内容可用图 1.2 来形象描述,其研究内容包括 4 个方面:人的工效、人体工程、环境工效、系统工效。

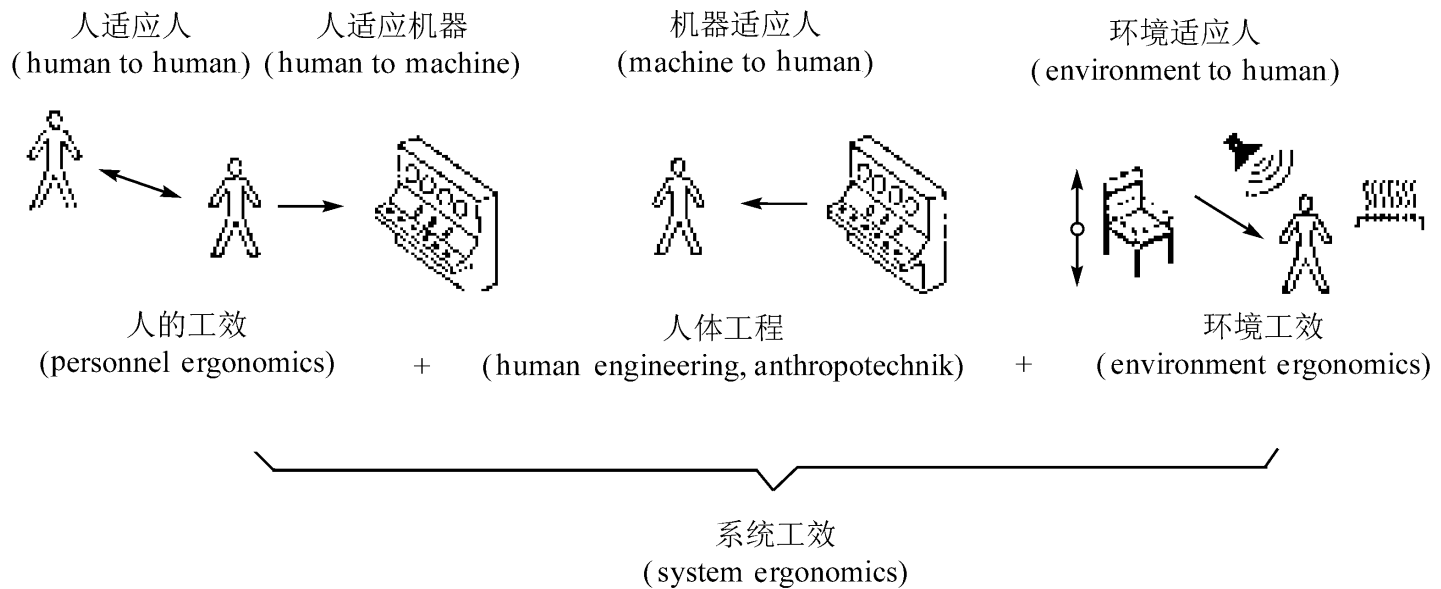


图 1.2 系统工效研究内容示意图

(一) 人的工效

主要研究人员选拔与训练,使其在生理与心理上与职业工作和机器相适应。

(二) 人体工程

研究机器设备与人的适应性,使他们共同工作的效率、安全性、经济性及舒适性达到最佳效果。主要研究内容包括:

(1) 机器适应人的硬件工效问题(hardware ergonomics),主要研究人体测量学、工作域(人的工作姿态、座椅、显示/控制器、环境)工效设计等;

(2) 机器适应人的软件工效问题(software ergonomics),主要研究人-计算机-显示系统最佳匹配的工效规律及设计方法;

(3) 机器适应人的认知工效问题(cognition ergonomics),主要研究人与信息系统之间信息交互、决断的工效规律及系统设计,使信息系统与人的认知过程相适应。

(三) 环境工效

研究环境适应人的生活和工作防护及控制方法,即人与环境或人机系统与人在共处中,研究环境(气候、照明、噪声.....)适应人的生活和工作要求的措施。

(四) 系统工效

研究提高人-机系统效率的途径及系统优化设计方法。研究和设计的依据为:人、机的特点及能力,工效及系统任务要求等。

虽然以上人-机-环境系统工程研究内容的两种表述方法有所不同,但都强调要从系统角度去研究人、机、环境三大要素所构成系统的最优设计问题。

三、人机工程的研究内容举例

图 1.3 所示为航空航天方面的人机工程的研究内容。研究内容可划分为以下 3 个领域:界面(接口)人机工程、环境人机工程、系统人机工程。它们都是以适应人为主题,以高效、安全、舒适、经济为目标进行研究的,使人、机器、环境与设备之间,达到具有合理或最佳匹配关系。

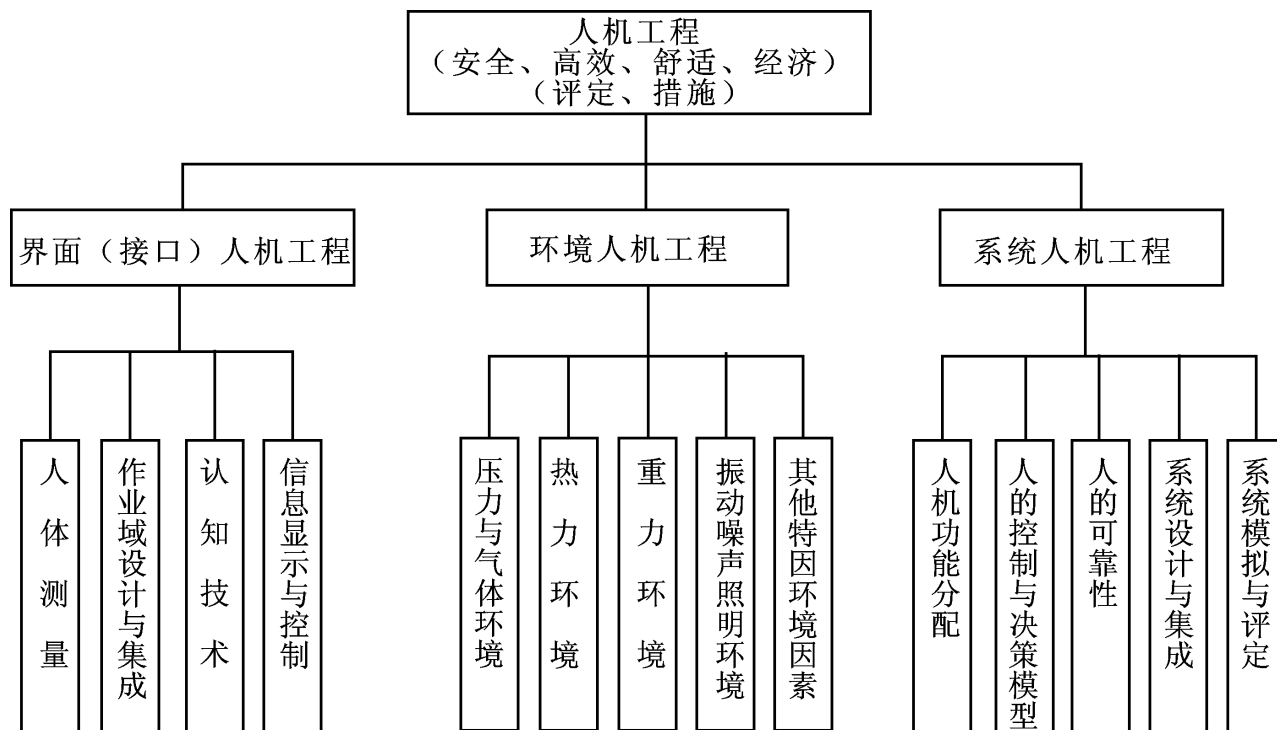


图 1.3 人机工程研究内容示意图

(一) 界面(接口)人机工程

界面(接口)是指人(飞行员、乘员)与机(装备、设备、系统)间信息交互、作业交互的连接部。界面(接口)有硬件和软件两种形式。如作业域的开关、按钮、驾驶操纵杆、脚踏等为硬件人机界面(接口);通过计算机软件和显示器实现的视觉信息交互为软件人机界面(接口)。信息交互界面(接口)包括视觉、听觉、语音等人机交互接合部。作业交互界面(接口)包括手脚体能作业的操纵器和控制器等人机交互接合部。此外,还有作业交互界面(接口)的延伸,包括与飞行员、乘员及航天员的休息、生活设备使用有关的接合部。

界面(接口)人机工程的研究内容包括以下 5 个方面。

1. 人体测量

主要研究作业中人体的几何及力学特性参数测量,包括静态及动态参数测量。影响作业效率及作业域设计的主要人体测量参数有:静态及动态体形参数;视域;四肢作业的位置角、力、力矩及可达域;身体及其节段质心等。

图 1.4 为中国飞行员人体测量侧面样板示意图。我国飞行员人体静态尺寸测量共有 97 个数据。

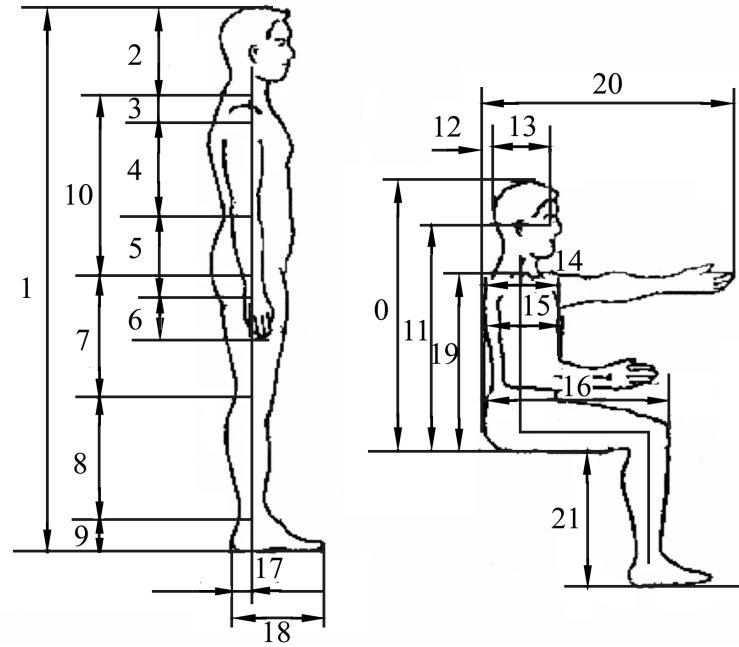


图 1.4 中国飞行员人体测量侧面样板示意图

2. 作业域设计与集成

由操作者、座椅、操纵台、显示仪表台及工作有关设备等构成操作者的作业域,又称为工作空间、作业空间等。主要研究作业空间、作业相关的器件及设备与操作者相适应的设计和评价方法,以达到作业的高效、安全、舒适等要求。作业域布局的人机工程设计及评价,对保证作业效率、安全性、舒适性有决定性作用。所以,它是顶层设计和总体设计中重要的设计任务之一。作业域设计与集成可采用 CAD 技术。作业域的评定方法可采用电子物理混合式仿真技术、VR 技术以及全尺寸样机评价等。前两种评定技术主要用于方案设计阶段及研究发展阶段,全尺寸样机作业域评定用于设计实施阶段。电子物理混合式作业域评定为当前应用的主要方式。

图 1.5 为飞机驾驶舱作业域布局示意图。图 1.6 为飞行员作业域工效设计中要考虑的一些主要几何参数示意图。图 1.7 为作业域工效计算机辅助设计示意图。

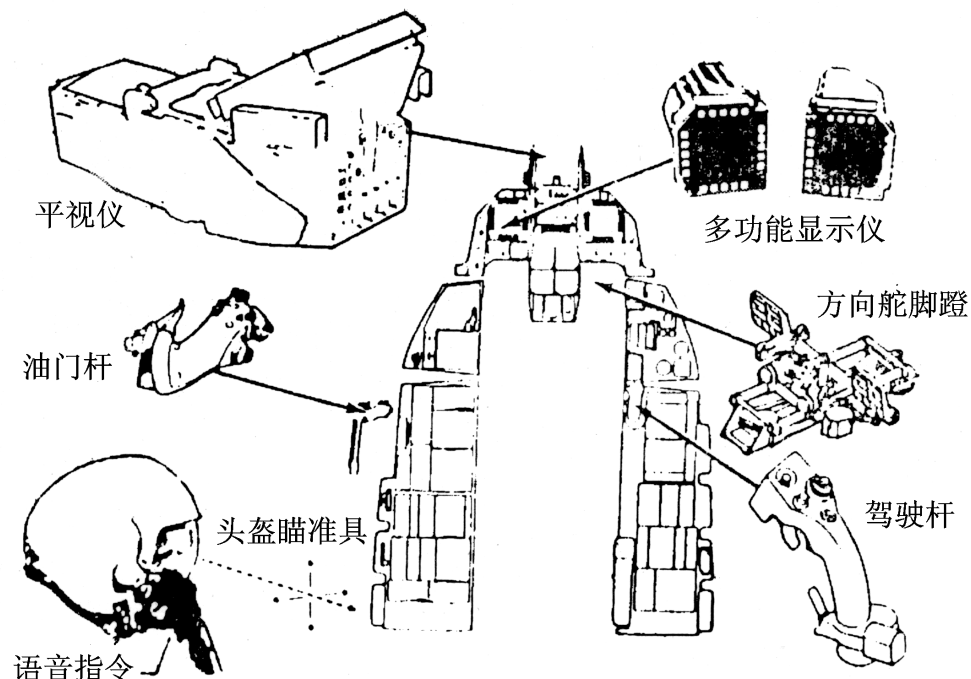


图 1.5 飞机驾驶舱作业域布局示意图

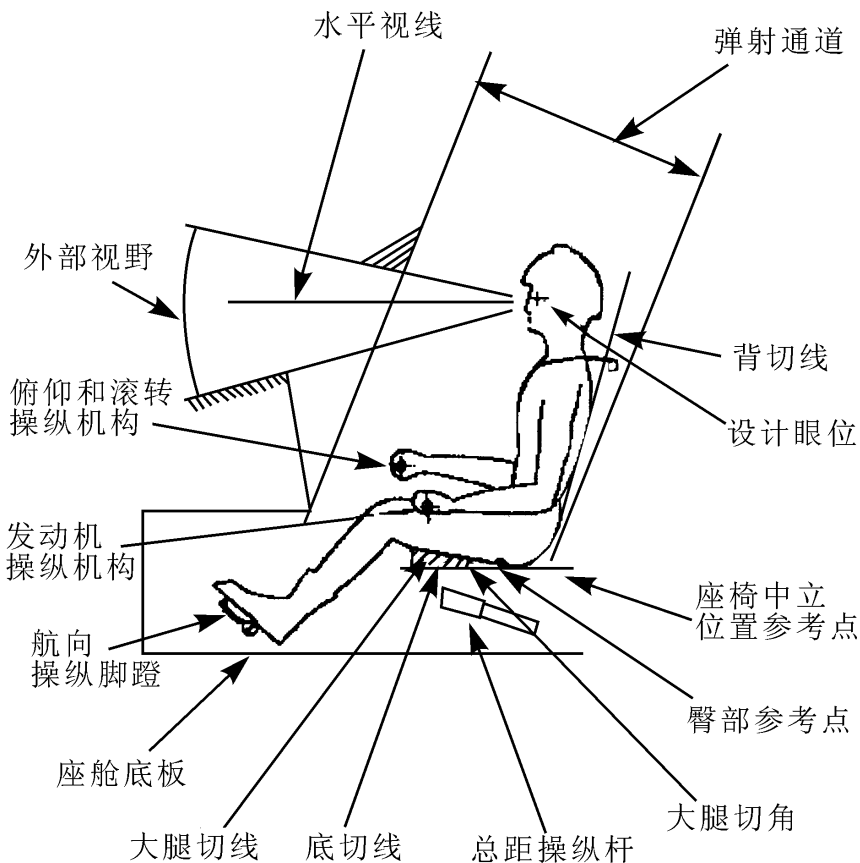


图 1.6 飞行员作业域工效设计几何参数示意图

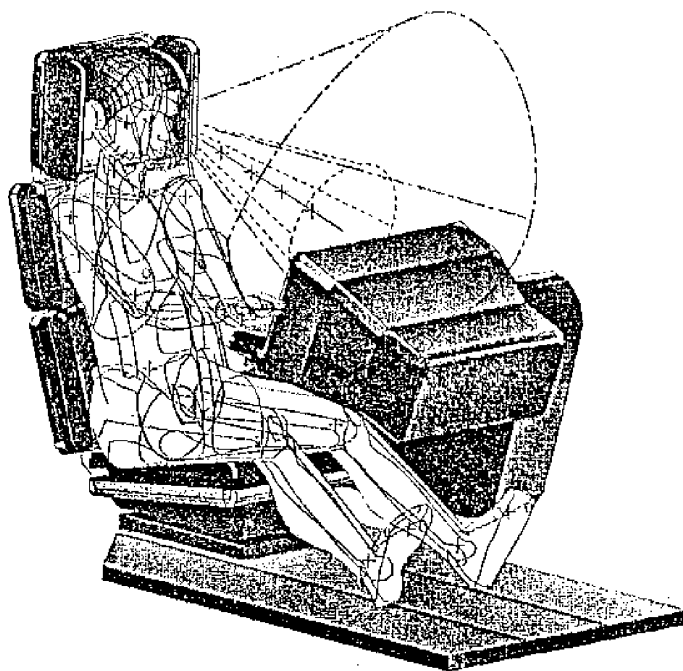


图 1.7 作业域工效计算机辅助设计示意图

3. 认知技术

信息科学与人的特性和行为研究的结合,称为认知技术或认知工程。主要研究人如何感知数据,如何将其转化成综合信息,如何将综合信息作为决策依据。研究旨在揭示人为错误的原因、错误本质以及减少错误的措施。图 1.8 为人与外部信息交互认识过程的示意图。

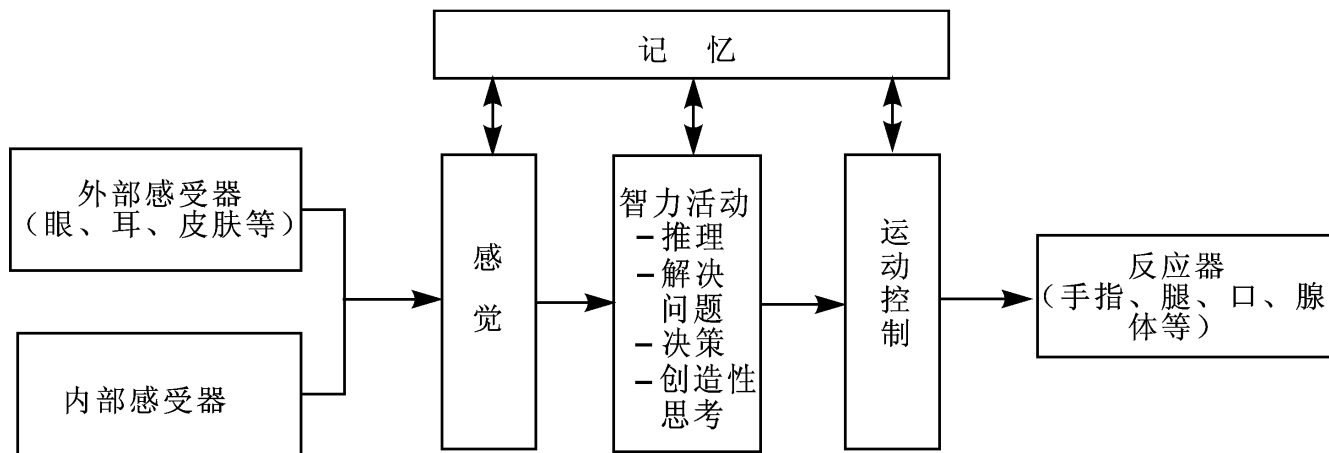


图 1.8 人与外部信息交互认识过程示意图

4. 信息显示与控制

主要研究信息显示与控制符合操作者认知规律的原理、措施及评价方法,以减少工作中的人为错误,保证高效作业和飞行安全。图 1.9 为可用工效评价驾驶舱显示/控制发展研究平台示意图。

(二) 环境人机工程

与航空航天相关的环境人机工程将为微环境工程技术装备研制提供生理技术依据和措施,而微环境工程为实现环境人机工程的要求和措施提供具体技术装备。图 1.10 为环境人机

工程研究内容示意图。

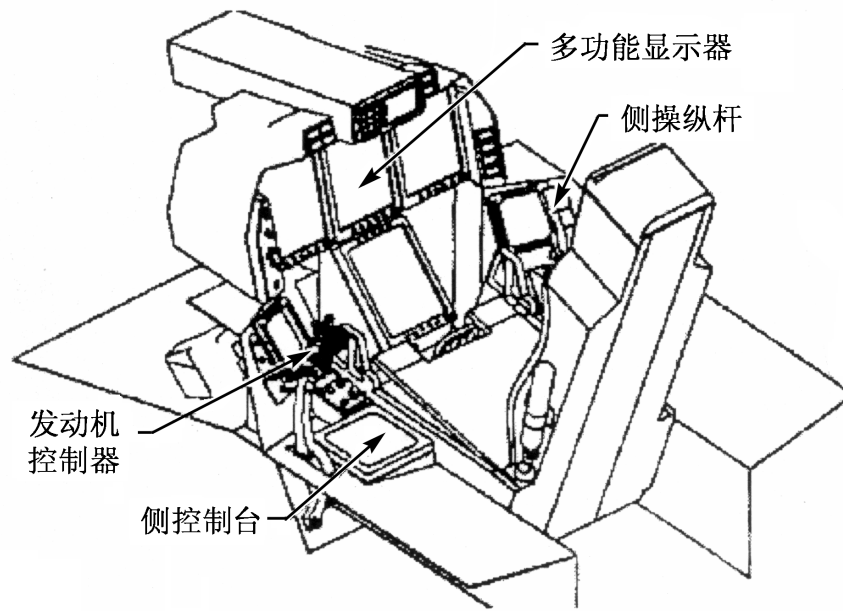


图 1.9 可用工效评价驾驶舱显示/控制发展研究平台

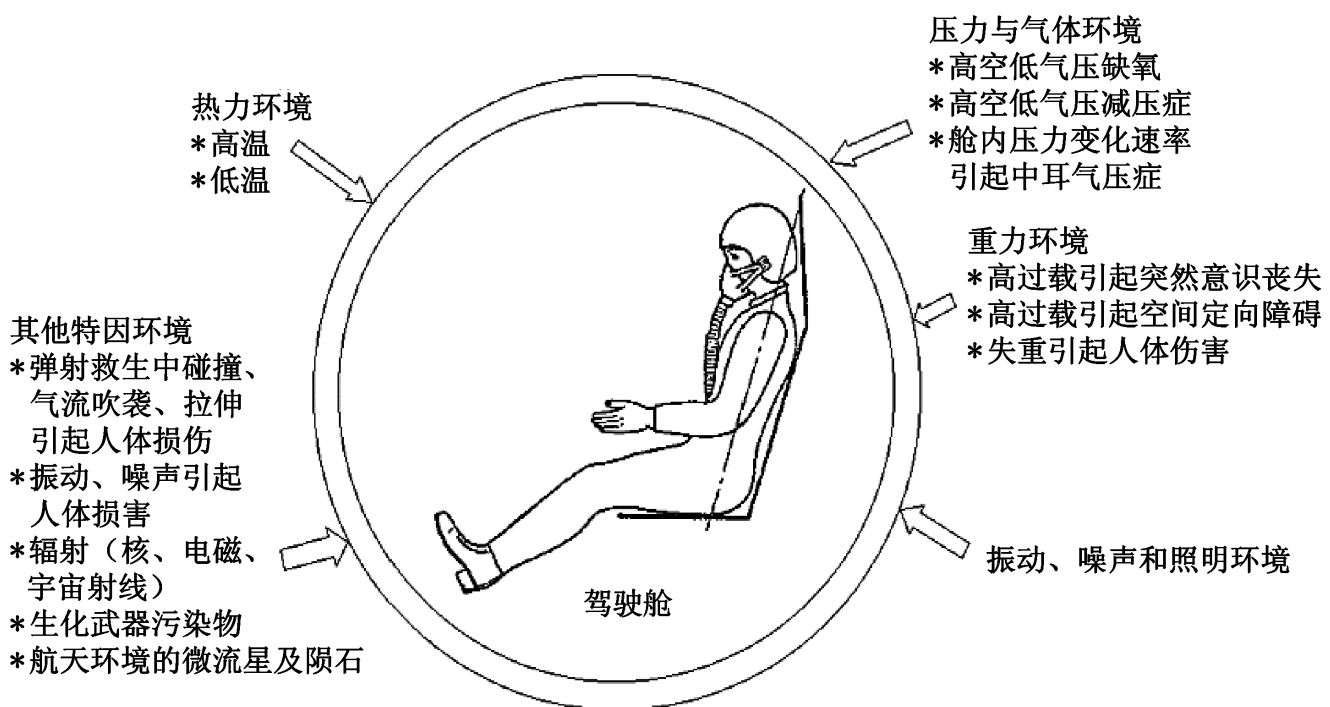


图 1.10 环境人机工程研究内容示意图

1. 压力与气体环境

主要研究高空压力与气体环境对人体的影响,研究对抗高空缺氧、低气压的措施和评价方法。

2. 热力环境

主要研究高温、低温环境对人体的影响,研究人体抗热、抗寒的措施和评价方法。

3. 重力环境

主要研究超重(航空)、失重(航天)环境对人体的影响,研究对抗重力环境对人体危害的措施和评价方法。

4. 振动、噪声、照明环境

主要研究振动、噪声、照明环境对人体的影响,研究相应的防护措施和评价方法。

5. 其他特因环境

主要研究其他特因环境(弹射救生中损伤、生化武器、核武器、电磁辐射、宇宙射线、微流

星、陨石等)对人体的影响,研究相应的防护措施和评价方法。

在此应说明的是,本书在后述章节讨论环境人机工程时,将着眼于地面一般的室内环境同时兼顾航空航天相关的环境人机工程问题。

(三) 系统人机工程

图 1 .11 为系统人机工程研究内容示意图。

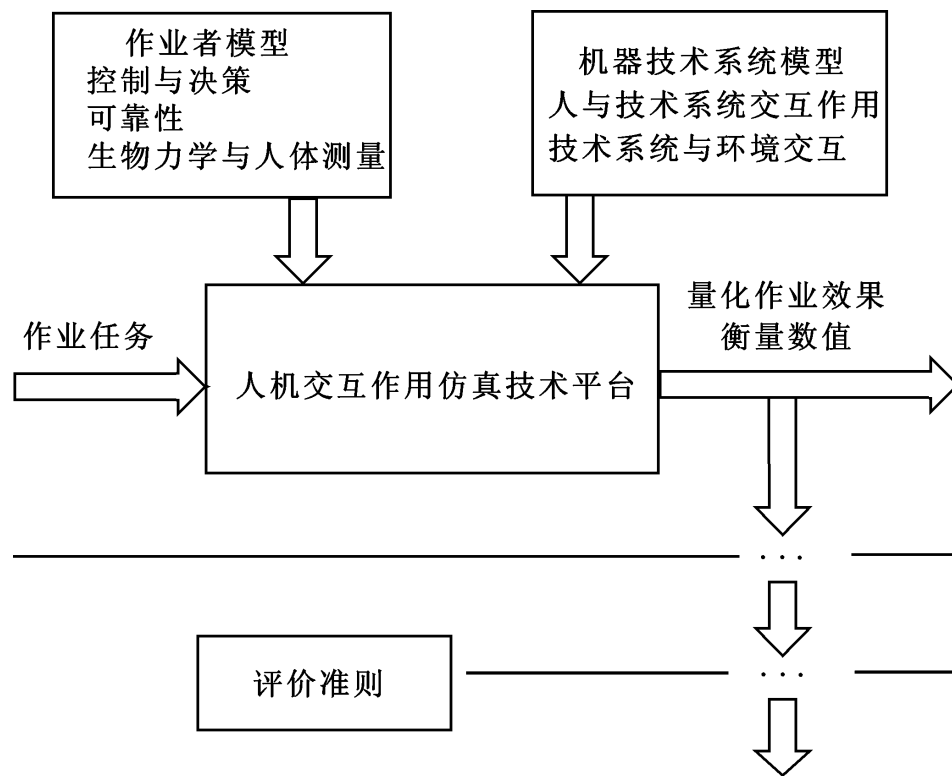


图 1 .11 系统人机工程研究内容示意图

1. 人机功能分配

主要研究人与机器共同完成工作中的任务分工。主要体现在人工作业和机器自动作业(包括计算机的智能辅助)的分工。由于飞行器的作业任务复杂,人机功能分配对保证作业效率及安全显得尤为重要。人机功能分配对控制分系统的设计、评价具有指导意义。图 1 .12 为人工作业与自动化作业分工与任务难度关系示意图。

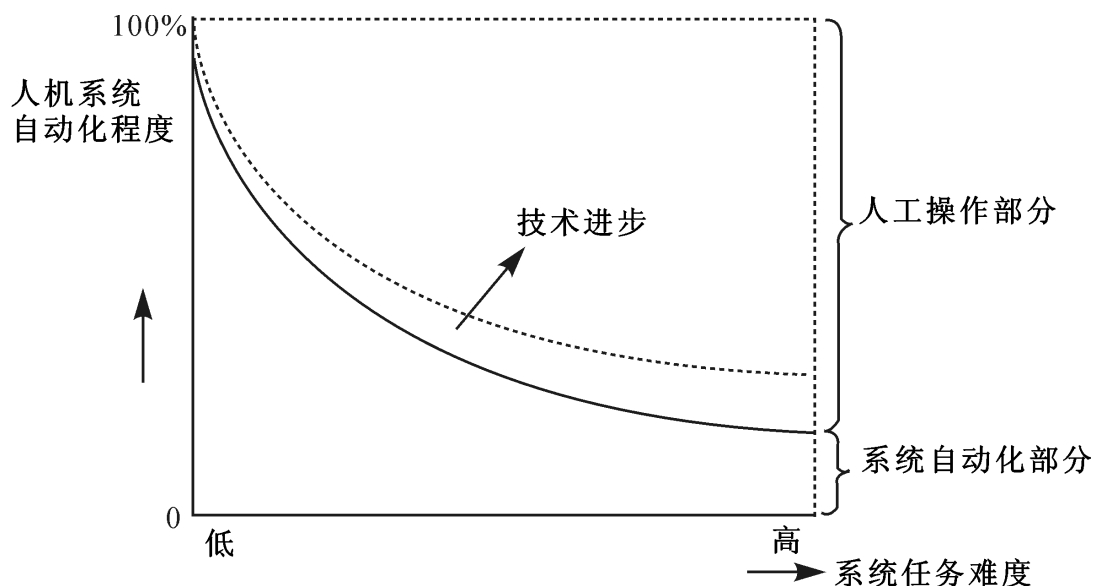


图 1 .12 人工作业与自动化作业分工与任务难度关系示意图

2. 人的控制与决策模型

主要研究在工作回路中操作者的控制与决策能力的数学物理描述,以满足人机系统分析、设计和集成的需要。

3. 人的可靠性

主要研究航空领域人为错误的可能性,对抗人为错误的评价方法,并研究对系统性能影响、危害的措施及衡量方法。

4. 系统设计与集成

主要研究人机系统的设计与集成方法,使人、机、环境三者间,在高效、安全、舒适与经济的目标上具有合理或最佳匹配关系。

5. 系统模拟与评定

主要研究人机系统的模拟与评定方法,并研究人机系统高效和安全性评价的置信度。

四、人机工程的相关学科

从人机工程学科形成的历史看,特别是就航空航天科学技术领域而言,它是生理学、心理学与工程技术科学紧密结合、融合而发展形成的学科。由于科学技术,特别是航空航天技术的迅速发展,当今的人机工程与众多的学科形成如图 1.13 所示的相互交叉、渗透的发展关系。图 1.13 中的学科门类和专业,其主体是参照“中国现代科学全书”的学科名称分类体系确定的。此外,还参照钱学森教授对现代科学技术体系结构及人体科学体系结构的构想,在医学门类中加入脑科学和心理精神学。钱学森教授提出,现代科学技术为一矩阵式结构。从横向看,目前有十大科学技术部门,自然科学、数学、系统科学、思维科学、人体科学等均为十大科学技

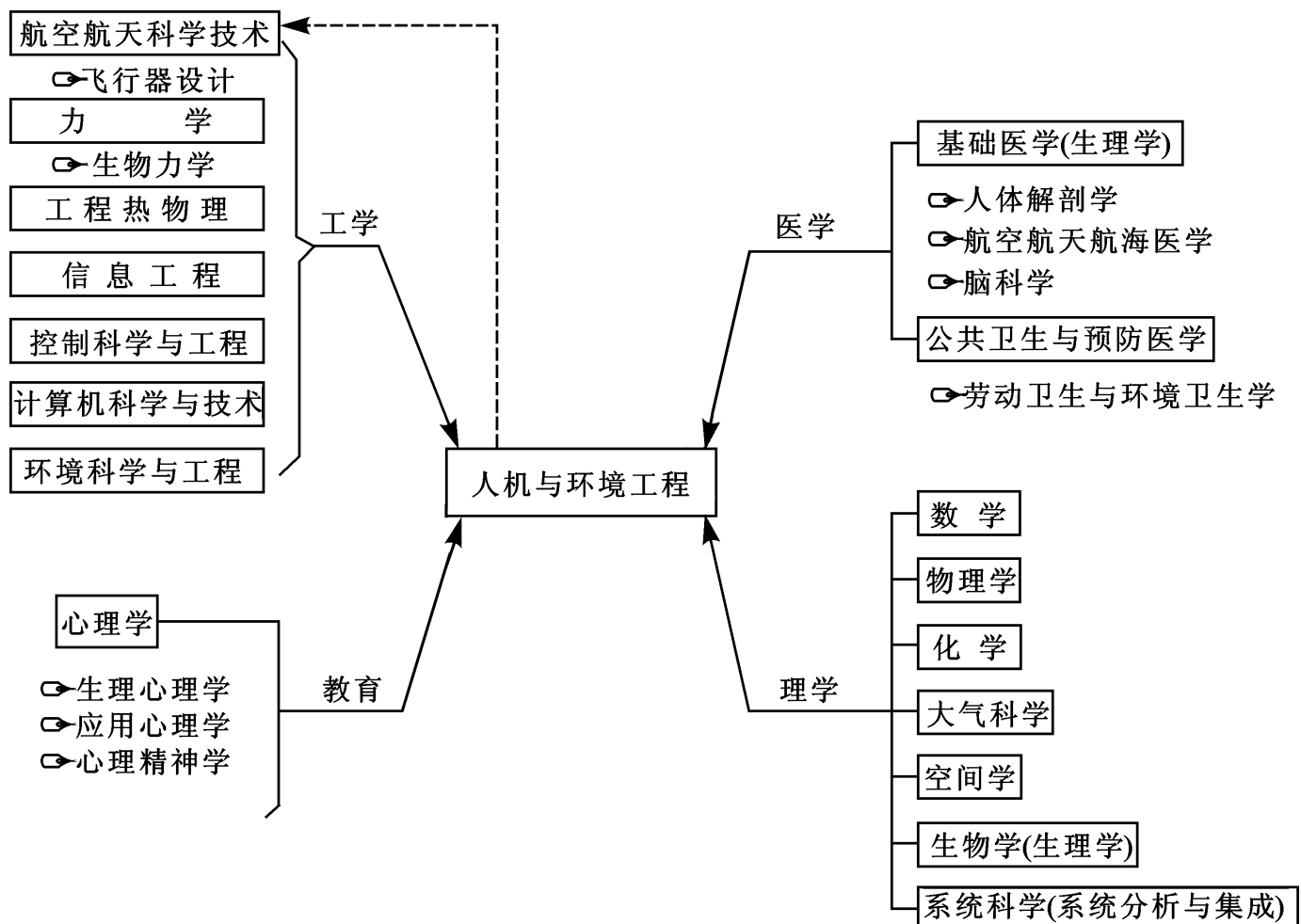


图 1.13 人机工程与其他学科的关系