

第一章 人-机-环境系统工程概述

第一节 人-机-环境系统工程的形成和发展

人-机-环境系统工程作为一种理论,作为一门科学的出现,是 80 年代初的事,但人-机-环境系统工程的古老根源可以追溯到人类的早期活动,人-机-环境系统工程的形成和发展已经历了漫长的历史阶段。

从远古时代起,人类一代一代地不断改善劳动工具,直至大规模使用机器,以提高人战胜自然、改造世界的能力。当人类最初使用简单工具进行大量的笨重体力劳动时,客观上就提出了人-机-环境系统的最优结合问题。18 世纪、19 世纪的第一次工业革命及其随后的能源革命使人类进入了机器时代。人们所从事的劳动在复杂程度和负荷量上都有了很大变化,开始形成人、机、环境的复杂关系。20 世纪初,英国的泰勒(F. W. Taylor)提出要研究人的操作方法,并从管理的角度制订了相应的操作制度,人们把它称为“泰勒制”。

后来,人们开始有组织地对人、机、环境三者之间的关系进行实验研究,并积累了大量数据。40 年代,特别是第二次世界大战期间,各种新式武器不断出现,性能也日趋复杂;到了 50 年代,电子计算机的应用迅速发展;60 年代,载人航天活动也取得了突破性的进展。这一切,使人、机、环境相互关系的研究显得更为突出,先后出现了人的因素(Human Factors)、人体工程学(Human Engineering)、工程心理学(Engineering Psychology)、工效学(Ergonomics)、人的因素工程(Human Factor Engineering)、人-机系统(Man-Machine System)等学科名称,并从不同的侧面、不同的角度积累了人、机、环境的实验数据和经验,为人-机-环境系统工程的形成创造了条件。但是,在这个时期,研究工作的重点是让人如何适应机器、适应环境;而对于机器设计如何适应人的特点和需要,以及如何改造和控制环境等问题虽然有所认识,但是缺乏用系统的整体观点来全面解决人、机、环境的相互关系问题。虽然有了关于人、机、环境的各种数据,但如何运用这些数据,仍然是凭经验进行,因而难以取得最佳效果。

1980 年末,美国科学院应陆、海、空三军的要求,组成一个专门委员会,着重分析和研究该领域的研究现状,并于 1983 年 1 月提出了题为《人的因素研究需要》的专门报告。该报告承认,70 年代由于单纯依靠过去 20 年的数据而放松基础研究,导致若干设计和研制的重大失误。于是,对科研部署作了一些调整,但仍未摆脱传统框框的束缚。

1981 年,在著名科学家钱学森的指导下,陈信、龙升照发表了《人-机-环境系统工程(学)概论》一文^[1]。该文根据载人航天预先研究的实践,并对国内外情况进行了认真分析,概括性地提出了人-机-环境系统工程的科学概念,标志着一门新兴科学的形成。

人-机-环境系统工程是运用系统科学理论和系统工程方法,正确处理人、机、环境三大要素的关系,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(如操作人员或决策人员);“机”是指人所控制的一切对象(如汽车、飞机、轮船、生产过程……的总称;“环境”是指人、机共处的特定工作条件(如温度、噪声、震动、有害气体……)

人-机-环境系统工程的最大特点是把人、机、环境看作是一个系统的三大要素,在深入研究三者各自性能的基础上,强调从全系统的整体性能出发,通过三者间的信息传递、加工和控制,形成一个相互关联的复杂巨系统,并运用系统工程方法,使系统具有“安全、高效、经济”等综合效能。所谓“安全”是指不出现人体的生理危害或伤害,并尽量减少事故;所谓“高效”是指全系统具有最好的工作性能或最高的工作效率;所谓“经济”,就是在满足系统技术要求的前提下,系统的建立要投资最少,也即保证系统的经济性。此外,人-机-环境系统工程还抛弃了以往把环境作为干扰因素的消极观点,积极主张把环境作为系统的一个环节,并按系统的总体要求对其进行全面的规划和控制。这样一来,人-机-环境系统工程不仅把人的因素、人体工程学、工程心理学、工效学、人的因素工程、人-机系统等学科纳入一个统一的科学框架,避免了概念和术语的混乱,而且从系统的总体高度研究人-机-环境系统各种组合方案的优劣,改变了以往分散、孤立的研究局面,把人们设计和研制人-机-环境系统的实践活动推向一个崭新阶段。应该强调指出的是,人-机-环境工程学的提出,并不是对上述各学科的否定或取代,而是把这些大致相近或相辅相成的研究范畴提到一个更高的层次、更广的视野去分析和综合,从而把该领域的研究工作推进到一个新水平。

人-机-环境系统工程的理论和方法提出后,先后在我国军工及其他有关部门得到了应用和发展。有些国内学术刊物如《自然杂志》和《国际航空》等也发表了本科学的有关论文。在有影响的报刊上如《解放军报》、《中国科技报》、《北京科技报》、《经济日报》和《国防科技要闻》上也有这门科学的内容简介和科技短文。人-机-环境系统工程已逐渐被广大科技界所熟悉。1993年6月出版的《中国军事百科全书》已将“人-机-环境系统工程”作为该书的一个条目^[2]。

人-机-环境系统工程发展的几个重大事件如下:

1981年陈信、龙升照撰写的论文《人-机-环境系统工程(学)概论》在航天医学工程研究所《论文汇编(三)》上首次发表^[1]。该文于1985年在《自然杂志》第一期上公开发表。

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

1986年5月国防科学技术工业委员会将“武器装备人-机-环境系统工程研究”列为国防科技应用和基础研究的重点项目。

1987年4月国防科学技术工业委员会成立了“人-机-环境系统工程专业组”。

1988年4月北京航空航天大学成立了“人-机-环境系统工程研究所”。

1993年10月中国系统工程学会“人-机-环境系统工程专业委员会”成立,并于北京召开了第一届全国人-机-环境系统工程学术会议。会议收到学术论文150余篇,并从中精选出117篇比较优秀的论文编辑成书,定名为《人-机-环境系统工程研究进展(第一卷)》,在全国公开发行^[3]。该书首次公开发表了著名科学家钱学森关于人-机-环境系统工程的重要论述。国防科学技术工业委员会主任、工程院院士丁衡高特别为该书题词——“研究人-机-环境系统工程,为国防现代化服务”。该书内容涉及航空、航天、兵器、电子、能源、交通、电力、煤炭、冶金、体育、康复、管理等众多领域,全面反映了人-机-环境系统工程这门新兴科学在理论和应用方面的最新研究成果。

人-机-环境系统工程问世后,在国际上也引起了很好反响。1984年10月,人-机-环境系统工程理论的论文在第32届国际航空、航天医学会议上发表后,得到了各国学者们的热情关

注和好评^[4]。学者们认为 用人-机-环境系统工程理论来指导研究工作，很有创造性；同时还认为，把人、机、环境作一个系统整体来研究，的确是一个创举，它为实践提供了新的模式。葡萄牙国还把它编入当年的军事医学年鉴；美日学者也很重视这一科学理论，他们说这是中国人的创造，表示愿意与我国在此领域进行宏观上的学术交流；墨西哥一学者将本学科内容向他的学生讲授，引起大学生们极大的兴趣；日本学者斋藤一郎来华访问时，与我国学者进行了这方面的学术交流及参观活动，回国后在日本《宇宙航空环境医学》杂志上发表文章，赞扬本科学在中国的发展。

综上所述 本世纪 40 年代之前 是人-机-环境系统工程的萌芽期；40 年代至 70 年代是准备期；80 年代初 人-机-环境系统工程开始进入真正发展期。目前，人-机-环境系统工程虽处于初期阶段，但其踪迹却已深入到人类生活的各个领域。它的不断发展和日趋完善，必将在科学技术的发展中发挥积极作用。

第二节 人-机-环境系统工程的研究内容

人-机-环境系统工程的研究内容可用图 1-1 来形象描述，它包括七个方面：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-环境系统总体性能的研究。下面简述这七个方面的部分研究要点。

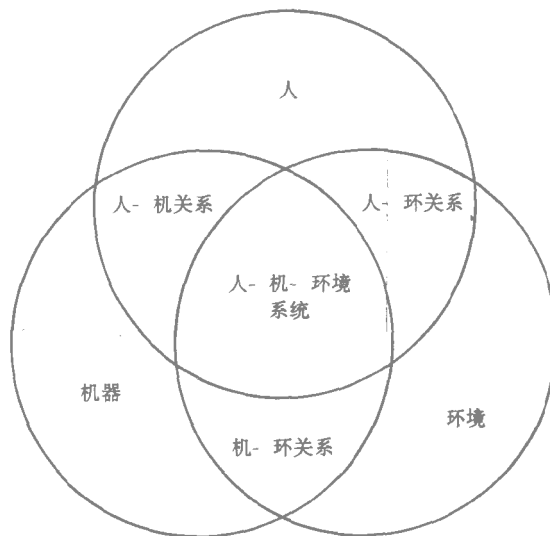


图 1-1 人-机-环境系统工程研究范畴示意图

（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

主要包括被控对象动力学的建模技术, 机器的防错设计研究, 机器特性对系统性能影响的研究。

(三) 环境特性的研究

主要包括环境检测技术的研究, 环境控制技术的研究, 环境建模技术的研究。

(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、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, 个体防护措施的研究。

(六) 机-环关系的研究

主要包括环境因素对机器性能的影响, 机器对环境的影响。

(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, 灵境 Virtual Reality 技术在人-机-环境系统总体性能研究中的应用。

第三节 人-机-环境系统工程的基础理论

人-机-环境系统工程是一门综合性边缘技术科学, 它从一系列基础学科中吸取了丰富营养, 并奠定了自身的基础理论。人-机-环境系统工程的基础理论可以概括为控制论、模型论和优化论。

控制论的根本贡献在于, 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、环境这三个物质属性本是截然不同、互不相关的对象, 使其成为一个密不可分的有机整体。

模型论能为人-机-环境系统工程研究提供一套完整的数学分析工具。显然, 人-机-环境系统工程不仅要求定性而且要求定量地刻划全系统的运动规律。为此, 就必须针对不同客观对象, 引入适当模型, 并通过建模、参数辨识、模拟和检验等步骤, 用数学语言阐明真实世界的客观规律。

优化论的基本出发点是: 在人-机-环境系统的最优组合中, 一般总有多种互不相同的方法

和途径，而其中必有一种或几种最好或较好的，这样一种寻求最优途径的观点和思路是人-机-环境系统工程精髓。优化论正是体现这一精髓的数学手段。

下面对这三个理论作些简述。

一、控制论

控制论是研究各种系统共同的控制规律的一门科学理论。

控制论的诞生是与 1948 年诺伯特·维纳的出色著作《控制论或关于在动物和机器中控制和通讯的科学》的出版分不开的。在该书中，这位杰出的美国数学家清楚地概述了发展一门关于一般的控制理论的必要性和可能性，并为用一个统一观点来考察和研究各种系统的控制与通讯问题奠定了基础。

早在第二次世界大战期间，就出现了控制论的技术雏形。为了对付德国的空中优势，英国和美国急需大力改进防空系统。改进防空系统的实践促进了控制论这门新学科的形成。这是因为，在防空系统中发射炮弹的装置是由人操纵的，射击的目标——飞机也是由人驾驶的，在这种情况下，人和机器组成一个统一系统。为了说明这个系统就必须了解二者的特性，必须对人和机器中的某些控制机制进行类比研究并找出它们在功能上的共同规律。这就需要使用电子学、数学、生理学和心理学等学科的知识，它们是控制论产生的科学前提。与此同时，维纳也亲自参加了改进防空系统的研究实践，并从实践中得到启发，从而能够系统地提出控制论理论。维纳本人是一位数学家，但为了研究生理学问题，他专门到墨西哥国立心脏学研究所进行动物实验，还和生理学家、医生、工程师以及物理学家经常讨论。他在综合各门学科研究成果的基础上终于写成《控制论》这本专著，创立了控制论这门新学科。

通常认为，控制论的基本假设有两个：一切有生命和无生命系统都是信息系统；一切有生命和无生命系统都是反馈系统。控制论的第一个假设使人们对周围世界的成分有了新的看法：世界由物质和能量两种成分组成的古典概念已经让位于世界由物质、能量和信息三种成分组成的新概念。如果没有信息，世界上任何有组织的系统都不可能实现。控制论的第二个假设为人们提供了一个实现控制的手段。所谓反馈，是指当系统将控制信息传出去后，有关控制结果的信息沿着反馈通道又送回系统，并对控制信息的再输出产生影响，从而实现控制的目的。

应该指出，控制论就像其他学科一样，能够而且应当逐步建立一套有效的理论概念、定律和原理，进而形成这门学科的核心。但是，理论本身不会对许多应用问题提供直接解答。为了解决实际问题，必须在理论概念和实用方法之间架一座桥梁，认真考虑某些种类的控制系统的特殊性质。显然，人-机-环境系统作为一般系统的一种特例，控制论的理论价值是不言而喻的，但作为实际应用仍需人们作出不懈的努力。

二、模型论

模型论是研究描述客观事物相似性的一门科学理论。

模型论的最基本概念是模型、对象和相似性。模型与某一对象（或客观事物）之间，存在某种相似性。这里应对“相似性”和“对象”两个词作最广义的理解。首先，对象与模型在外表上也许毫无相似之处，但它们的内部结构却相似；第二，对象与模型在形状和结构上毫无共同之

处，但他们的行为特征却相似。相似性概念适用于自然界非常广泛的一类物质对象，其中包括有生命与无生命对象。如果在两个对象之间可以建立某种相似性，那么在这两个对象之间就存在着原型与模型的关系。

长期以来，人们对某一现象进行理论的和科学的研究，都是集中在一个模型上进行。因为利用模型可以避免或减少对现实世界作昂贵的、不希望或不可能的实验。所以，任何理论的探讨都不是直接与真实世界打交道，而是借助于它的模型来阐明真实世界的客观规律。

对人-机-环境系统工程研究来说，在每个特定的人-机-环境系统建成之前，为了拟定与验证系统的总体方案，估计系统各要素之间的相互适应性，考察系统在实际运行时的各种行为，按照系统工程方法，总是要把与系统有关的各个要素归纳成反映系统性能与机制的模型，以便于用计算机进行全系统的数学模拟。因此，模型论在人-机-环境系统工程研究中处于非常重要的地位。

三、优化论

优化论是研究系统具有最佳功能的一门科学理论。

优化论是一门较新的数学分支，也称为“运筹学”。优化论一般要对一个系统的众多方案进行分析，首先确定一个判别方案优劣的标准，然后才在技术条件允许的范围内寻找一个或几个最好的方案，这就是优化论的研究内容。

优化论是从 40 年代起由于客观上的需要开始发展起来的。虽然历史不长，但发展异常迅速，应用范围愈来愈广，方法也愈来愈多。目前常用的有静态最优化、动态最优化以及大系统最优化等分支。

在人-机-环境系统工程研究中，人们在设计和建立人-机-环境系统时，总希望在安全、高效、经济等方面达到最优化。事实上要同时满足这些要求是不可能的，而必须从总体上对这三个目标进行权衡，使目标函数的总和达到最优化。

总而言之，根据上述三个基础理论，再结合一些具体的学科内容，如生理学、心理学、环境医学、人体科学和工程技术、电子技术等 就能在人-机-环境系统建立之前，从理论的角度来探索该系统的运行规律：根据控制论，就可确立人-机-环境系统的结构组合方式；根据模型论，就能恰当描述人-机-环境系统的模型形式；根据优化论，就能选择人-机-环境系统的最优组合方案。因此，有了这三个基础理论就在理论与现实应用之间架起一座坚实的桥梁。

参考文献

- [1] 陈信, 龙升照人-机-环境系统工程(学)概论. 自然杂志, 1985. 8(1)
- [2] 陈信 龙升照. 人-机-环境系统工程, 见: 中国军事百科全书(军事系统工程分册). 北京: 军事科学出版社, 1993. 124~127
- [3] 龙升照主编, 人-机-环境系统工程研究进展(第一卷)北京: 北京科学技术出版社, 1993
- [4] Chen Hsin, Long shengzhao. Application of Man - Machine - Environment System Engineering Theory to Aerospace Research. In : 32nd International Congress of Aviation and Space Medicine, 1984

第二章 人体是个开放的复杂巨系统

第一节 开放的复杂巨系统

一、系统的分类与开放的复杂巨系统的概念

钱学森教授提出^[1]，现代科学技术体系是一个矩阵式结构。从横向看，目前有十大科学技术部门；从纵向看，每个部门又有三个层次，即工程技术、技术科学和基础科学。系统科学是十大科学技术部门之一，也有三个层次，即系统工程属于工程技术层次，运筹学、控制论、信息论等属于技术科学层次，系统学 (Systemology) 属于基础科学层次，这个科学体系是以系统论为桥梁与辩证唯物主义哲学沟通的。

系统学是研究系统结构和功能（包括演化、协同和控制）一般规律的科学。系统在自然界和人类社会中是普遍存在的。如一个工厂、一个家庭、一个人体、一个社会都是一个系统。为研究方便，按着不同原则可将系统划分为各种不同的类型。如按系统是否有人参与而分为自然系统和人造系统，按照系统与外界环境是否有物质、能量、信息交换而划分为开放与封闭系统。这种分法，比较直观，但它把着眼点过分地放在系统的具体内涵，反而失去系统的本质，而这一点在系统科学研究中又非常重要。钱学森提出根据组成系统的子系统种类的多少和它们之间关联关系的复杂程度，把系统分为简单系统和巨系统两大类。

简单系统是指组成系统的子系统的数量比较少，它们之间的关系比较简单，如一台仪器就是一个小系统。如果子系统的数量相对较多，几十个，上百个，如一个工厂就是大系统。研究这类系统都可以从系统相互间的作用出发，直接综合成系统的运动功能，这是直接的作法，没有什么曲折。若子系统数量非常大（成千上万），这就是巨系统。如果巨系统的子系统种类不太多，子系统之间关联关系又比较简单，则称之为简单巨系统。

复杂巨系统是指子系统的种类非常多，又有层次性，它们之间关联关系又很复杂，在结构、功能、行为和演化方面都很复杂。如果这个系统又与外界有能量、物质、信息的交换那就是开放的复杂巨系统。这类系统到今天为止还有大量问题搞不清楚。人体系统就是个复杂巨系统。

以人为子系统构成的主系统（包括由人制造出来具有智能行为的各种机器）的“开放”“复杂”具有更新更广的含义。在这类系统中的“开放”除指系统与外界有能量、物质、信息的交换之外，还指各子系统通过学习获取知识。由于人的意识作用，子系统之间关系不仅复杂，而且随时间及情况的变化而变化，具有易变性。一个人体本身就是一个复杂巨系统，以大量的人为子系统的巨系统是一种开放的特殊复杂巨系统。人要认识客观世界不单靠现时的实践，而且要用过去由实践而创造出来的精神财富。因此，一个人对知识的掌握与利用是一个重要的问

题。人已经创造出高性能的计算机，包括有智能行为的机器。人与这些机器作为系统中的子系统相互配合和谐地进行工作，这是最大的、最复杂的巨系统。这不仅要用系统中子系统种类多少表征系统的复杂性，而且知识也起着极其重要的作用。这类系统的复杂性可概括为：①子系统之间可以有各种方式的通讯；②子系统种类多，各有其定性模型；③各子系统的知识表达不同，以各种方式获取知识；④子系统的结构随着系统的演变而变化，所以系统的结构不断改变。这个系统叫作开放的、特殊复杂的巨系统，即社会系统。

把系统进行这样分类，能够清晰地刻划系统的复杂性及其层次性，对系统的科学研究具有重要意义。

二、开放的复杂巨系统研究的方法论^[2]

由于系统的类型不同，其研究的方法论也不同^[2]。简单系统可从子系统之间相互作用出发，直接综合成全系统的运动功能，这可以说是直接的作法，没什么曲折，可以借助大型计算机。简单巨系统，因子系统的数量非常多（如激光系统），应用处理简单系统的方法是不行的，就连巨型计算机也无法胜任。因此，人们就应用本世纪初统计力学的巨大成就，把亿万万个分子组成的巨系统的功能略去细节，用统计方法概括起来，这就是 J. Prigogine 耗散结构和 Haken 的协同学自组织理论。

开放的复杂巨系统的研究用还原论的方法是行不通的（对于一个层次的系统，还原论方法还适用），因为从可观测的整个系统到子系统之间的层次很多，中间的层次又不完全清楚，甚至有几个层次都不清楚，即使各个层次都清楚了，整个系统功能也不等于各子系统功能的简单叠加。

在钱学森教授领导下，我国系统科学专家们在科研实践中，以科学理论、经验知识和专家们的判断能力等相结合的方法，提出经验性假设（判断或猜想）。这些经验性假设不能用严谨的科学方法加以证明，往往是定性的认识，但可用经验性数据、资料和具有很多参数的模型，对这个经验性假想进行验证。这些模型必须建立在经验和对系统的实际理解上，经过定量计算，并反复对比，最后形成结论。这样的结论就是我们现阶段认识客观事物所能达到的最佳结论，是从定性上升到定量的认识。

钱学森教授通过这样的科学实践，提炼、概括、抽象出来研究开放的复杂巨系统的方法论，是从定性到定量的综合集成法。这个方法就其实质而言，是专家群体、数据和各种信息与计算机技术的有机结合，把各种科学理论和人的经验知识结合起来。这里包括了感性的、理性的、经验的、科学的、定性的和定量的知识的综合集成。通过人-机交互反复对比逐次逼近最后形成结论，实现从感性到理性、由定性到定量的转变，这是现阶段认识客观事物的科学方法，概括起来该方法有以下几个特点：①把定性研究和定量研究结合起来，并贯穿全过程，从多方面的定性认识上升到定量认识，这就是综合集成定性认识达到整体定量认识的方法。②把科学理论与经验知识结合起来。经验知识不属于科学理论范畴，但对解决复杂问题，只有科学理论还不够，需要经验知识，就是把人们对客观事物的星星点点的知识综合起来。根据复杂巨系统的层次结构，把宏观和微观研究结合起来。大型计算机系统应具备管理信息系统（MIS）、决策支持系统（DSS）功能和综合集成功能。这就需要知识工程、人工智能和信息技术等高新技术。知识工程是人工智能的一个重要分支，着眼于合理地组织与使用知识去解决问题，构成

知识型的系统。专家系统就是一种典型的知识系统。专家的一部分作用可以通过专家系统来实现，所以专家系统也成为系统中的子系统。知识工程的核心工作就是知识的表达和处理，即如何能把各种知识如书本知识、专门领域有关知识、经验知识、常识等表达成计算机能够接受并能加以处理的形式。知识型系统的特点是知识控制的启发式方法求解问题，不是精确的定量处理，因为许多知识是经验性的，难以精确描述。知识型系统，不能建立定量数学模型，而只能采用定性的方法。有许多工作是利用定性物理的概念与建模方法来建立定性模型，进而研究定性推理的。定性建模是一种把深层知识进行编码的方法，只是注重变化的趋势，如增加、减少或不变等。定性推理指的是定性模型上的操作运行，从而得到或预估系统的行为，这里着重指结构、功能行为的描述及其相互关系。实践证明这个方法论是现在唯一有效地处理开放复杂巨系统的方法论。

三、研究开放的复杂巨系统的意义^[2,3]

1. 开放的复杂巨系统的理论与方法论具有广泛应用的意义。现代科学技术探索和研究的对象是整个客观世界。但是从不同角度、不同观点及不同方法研究客观世界的不同问题时，现代科学技术就产生了不同的科学技术部门。例如，自然科学是从物质运动、物质运动的不同层次、不同层次之间的关系等角度来研究客观世界的；社会科学是从人类社会运动对人类发展影响的角度去研究客观世界的。系统科学作为一个科学技术部门，从应用到基础理论研究都是以系统为研究对象的。开放的复杂巨系统无论在宏观、宇观和微观等范畴内都是客观存在的。因此，提出开放的复杂巨系统的理论与方法具有重要的普遍意义。这些理论本来就分布在不同的学科和不同的科学技术部门，均已有很长的历史，也都或多或少地用本学科各自的语言涉及到开放的复杂巨系统的思想。但是，到目前为止都没有更加清晰、更加深刻地理解与应用。因此，开放的复杂巨系统概念的提出及理论研究，必将推动不同学科的理论发展，为这些理论的沟通开辟新的前景。

2. 研究开放的复杂巨系统的方法论是现阶段处理开放的复杂巨系统的唯一可行的方法，用它来处理自然科学和社会科学都是最好用的，是目前任何先进的方法不可比的。它的出现是科学发展史上又一次具有重大意义的贡献，其作用将越来越显示出其重要性。

大家知道，长期以来不同领域的科学家们注意到，在生命系统和非生命系统之间表现出似乎截然不同的规律。非生命系统通常服从热力学第二定律，系统总是自然地趋于平衡和无序，系统的熵达到极大。系统自发地从有序到无序，决不会自发地转变到有序，这就是系统的不可逆性和平衡态的稳定性。但是生命系统与此不同，生物进化、社会发展总是由简单到复杂、由低级到高级，越来越有序，能自发地形成有序的稳定结构。这两类系统的矛盾现象，长期得不到解决。直到 60 年代出现了耗散结构理论和协同学理论，才为解决这个问题提供了科学框架。这些理论认为热力学第二定律发现的是孤立系统（与环境没有物质和能量的交换）在平衡和近平衡态（线性非平衡态）条件下的规律；而生命系统都是开放的系统，系统与环境进行物质和能量的交换，从而引进负熵，尽管系统内部产生正熵，但总的熵在减少，在达到一定程度时，系统就有可能从原来的无序状态，产生一种新的稳定的有序结构，J. Prigogine 称之为耗散结构。这样在不违背热力学第二定律的条件下，耗散结构理论沟通了两类系统的内在联系。这说明两类系统之间并没有真正严格的界限，都是由相同的系统规律所支配。因此，Prigogine

指出复杂性不再仅仅属于生物学了，它正在进入物理学领域。Haken 更进一步指出，一个系统从无序转化为有序的关键，并不在于系统是否平衡，也不在于离平衡有多远，而是由组成系统的各子系统，在一定条件下，通过它们之间的非线性作用，相互协同合作自发产生稳定的有序结构，这就是自组织结构，是现代科学 20 年来的重大成就。因此，近年来以近代科学还原论的定量方法论去解决开放的复杂巨系统，是不会成功的。因为它是解决简单巨系统的可行方法，而用于解决开放的复杂巨系统当然是不会成功的。这应引起人们注意。

从定性到定量的综合集成法，是从整体上考虑和解决问题的方法论。它不同于近代科学沿用的培根式的还原论方法，而是把大量零星分散的定性认识、点滴知识，甚至各方面的意见都汇集成一个整体结构，达到定量的认识，是从不完整的定性到比较完整的定量，是定性到定量的飞跃。当然在一个方面的问题，经过这种研究有了大量的积累，会再一次上升到整个方面的定性认识，达到更高层次的认识，形成认识的又一次飞跃，这就是开放的复杂巨系统的方法论。它是现代科学技术条件下的实践论的具体化，即从感性认识到理性认识的反复飞跃，将使人类认识客观世界的能力登上一个新的台阶。

3. 开放的复杂巨系统理论的提出与方法的建立开辟了新的科学领域，对很多科学领域的开展都会有新的贡献，从而对更全面、更深刻地认识客观世界的物质运动规律具有重要的科学意义。

第二节 人体是个开放的复杂巨系统^[4]

如上节所述，开放的复杂巨系统是子系统种类极多，又有层次结构，子系统之间关联关系很复杂，相互作用样式繁多不一，且与外部环境有交流的系统。

一、人体是个复杂巨系统

1. 人体是具有庞大数量的多层次的子系统。一个人体约有 3.5×10^{13} 个细胞，一个细胞含有数十万到数百万个生物大分子。这些生物大分子为生存需要有一个代谢系统，为完成其生理功能还要有一个功能系统；不同大分子系统组成不同的细胞系统，不同细胞组成不同的器官和生理系统。因此，整个人体是由数十万、数百万的复杂程度不同，功能不同，层次不同的子系统组成的。

2. 人体有完整的人体功能，它的子系统具有复杂性和统一性。人体中这样庞大而复杂的子系统作为整体活动时，不是一个简单的数学关系。子系统之间有加强与拮抗，有延迟与提前，有优势与诱导等复杂活动。但它们是统一于生物目的性的活动，具有高度精细的协调机构和信息处理机构达到人体活动的目的性使人能生存、工作。例如血糖、体温、内环境的恒定以及人动作行为的协调等都是通过人体子系统的一套复杂生理机构而实现的。这样的协调控制功能，如能在工程上实现，那就是非常完善的控制机构了。因此，研究人体的调控系统机制，对研究控制论和自动控制机构会有重要作用。

3. 人体子系统之间的联系有各种方式，有神经性的、体液性的和神经性体液性的，以及经络的联系。各种子系统均具有各自的活动模式和各自的特定功能。随着人体整体的需要，构

成系统的子系统也发生演变, 如有信息传递、各种运动(随意运动和非随意运动)、分泌、运输、排泄、吞噬、物质和能量的吸收转换、储存和释放、体液通透、血液流动及整体运动等等, 使得人成为多种运动形式的综合组合体。这种多种类型、多层次的运动集合在一个整体中, 经过极为复杂的过程而统一于总体的活动目的。

4. 人体子系统之间以及子系统与整体的关系极为复杂。在整体中每个子系统的性能都影响整体的性能, 这种影响可能是每个子系统本身就能产生的, 也可能是通过影响其他子系统而产生的。人体是一个由极多子系统组成的整体, 从而使该系统具有一定的特性和功能, 当然这些并不是一个子系统所具有的。从系统功能来看, 这个系统又是一个不可分割的整体, 如果把各子系统拆开, 那就失去原有的各子系统的性质。

以上所概括的人体系统的特征, 虽不够全面, 但无论在结构、功能、行为和演化方面都足以说明人体系统的复杂和巨大的程度, 因此人体是个复杂巨系统。人脑也是复杂巨系统, 是人体这个复杂巨系统的一部分。人脑约有 1×10^{12} 个神经元, 还有同样多的胶质细胞。神经元之间以及神经细胞群之间的相互作用极为复杂。人脑可以利用过去的信息(记忆)、未来信息(推理)以及当时的输入信息和环境作用, 对输入的信息能够作出各种各样的复杂反应。它的输入输出特性随时间而变化。一个人体活动、行为、动作是由人脑约 1×10^{12} 个神经元及同样多的胶质细胞之间极为复杂的相互作用的结果所支配, 又由参与活动的人体执行机构协调一致的相互作用的结果而实现。

二、人体复杂巨系统与周围环境及宇宙之间的物质、能量和信息交换

人体是开放的复杂巨系统。人与环境及宇宙之间实际上形成一个超巨系统。人体复杂巨系统与整个世界的五个层次彼此相通。

1. 考察人与宏观层次世界的关系。这个领域有它的基本物理概念, 那就是十万光年的物理尺度, 要用广义相对论理论, 它主张人的存在或出现跟宇宙的实际演化有关系。也可以反过来说, 宇宙的实际性质是人存在的必然条件。如果宇宙演化不走现在这个途径, 那么现在世界上的生物(包括人类)就不大可能出现。我们所知道的决定宇宙演化的物理参数和决定物质运动的物理参数都是人的出现所要求的, 也可以说因为实际上人出现了, 所以宇宙的性质也就必然是这样的。这就说明人和太阳系、银河系以及整个宇宙都是相关联的。

2. 考察人与宏观世界层次的关系。这个层次的物理尺度为 10^2m , 相当于一个球场的大小, 要用牛顿力学的理论, 在这个层次上考察人体与环境(10^2m 大小的环境)的关系。在这样尺度下的人环关系在中国的传统医学中很受重视, 也是现代环境医学的重要内容。但它们都是研究环境对人体的影响, 忽视了人体对环境的影响, 忽视了在这样宏观范围内的环境与人体是一个复杂巨系统关系, 更缺乏用系统科学的理论和方法去研究。

3. 考察人体与微观世界层次的关系, 即在量子力学上考察人与环境、人与宇宙的相互关系。微观世界长度是 10^{-17}m , 要用量子力学理论。在这样尺度范围内人认识客观世界时, 人感觉器官内部的神经元以及处理信息的大脑神经元都是在微观水平上量子力学的过程, 这就把人的认识过程深入到微观层次, 即量子力学层次, 可称之为量子力学认识论; 反过来, 人体对客观世界也可在微观层次上, 即在量子力学的层次上相互起作用。

4. 考察人体在渺观世界层次上的相互关系。这个层次大约是 10^{-36}m 的尺度。

5. 考察人体在更大的宇观层次上的关系。

由上述可见，人体不仅是一个复杂巨系统，而且处于宇宙这个超巨系统之中，彼此相通。正如钱学森教授从系统科学的高度充分地论述并明确地指出的：人体是一个开放的复杂巨系统。这个概念极为重要，它对人体这个研究对象的认识作了根本的改变，必将对人体科学的研究，从指导思想和方法论上有新的跃进。

第三节 人体科学的概念与定义^[1,4]

一、人体科学的定义

在上节中，我们较充分地论证了人体是个开放的复杂巨系统。人体科学就是研究人体这个开放的复杂巨系统及其在客观环境中所处的（微观上和宏观上）系统的功能状态和系统的结构以及该系统功能行为效益的一门学问。虽然许多生物也是开放的复杂巨系统，这里把人体科学突出出来不放在生命科学之内原因在于人体是有意识的而其他生物不存在意识这一点已被科学研究所证实。今天的世界是人类出现之后所创造的。没有人类，生物是不可能创造这个世界的而人类的特点就是具有意识。意识又能作用于人体本身是“意识反馈”这也是人体科学区别于一般生命科学的特征。因此，人体科学的研究要把握物质与精神、客观与主观、大脑与意识的辩证关系，这是人体科学的核心之一。人体科学是现代科学技术体系中的一个大部门。

二、研究人体科学的指导思想

由上可见研究这些问题必须用马克思主义哲学——辩证唯物主义哲学为指导。同时，人体科学研究的结果，也会深化和发展马克思主义哲学。马克思主义哲学和人体科学有关的这部分叫人天观。人在宇宙中的关系叫宇观的人天观，主要讲人的存在与宇宙的规律有密切关系，在西方有人称此为人择原理（Anthropic principle）^[5]，这是一个层次；再一个层次是宏观的人天观，也就是中医的哲学思想；第三个层次是微观层次——量子力学的层次。因此人天观是具体的人体科学的哲学指导思想。人体科学的科学指导思想是整体论和还原论辩证统一之后的高一个层次的系统论，这和西方的一般系统论是不一样的。我们指的系统论是既包括宏观的又包括微观的、既包括整体论又包括还原论，而且是整体论和还原论、宏观和微观辩证统一的系统论。它不同于一般只强调整体论不讲还原论的系统论，是我们研究人体科学的科学指导思想。这样就避免了只讲表面系统，不谈实质的说法，既有宏观整体反映又有微观物质基础。

三、人体科学的三个层次

人体科学和其他学科一样，在哲学层次下面分成三个层次。一是基础科学层次。如生理学、心理学以及研究人的意识、思维活动和大脑的意识是如何产生的精神学（Mentalies）等这些都是人体科学的基础理论学科。二是技术科学。它是实际应用或者说直接改造客观世界的

理论，主要是中、西医学的理论。在技术科学里还有一门近几十年发展起来的学科叫作人-机功效学(Ergonomics)，主要是讨论人跟机器怎样有效地配合协同工作。三是实用科学层次，即把技术科学直接跟使用连起来的层次。像工程技术，是直接改造客观世界的科学，叫实用科学；人体科学的实用科学是应用医学。现代应用的医学可以分为治疗疾病的第一医学，防治疾病的第二医学，康复医学是第三医学，还有一种开发人潜在的能力，也就是把人的能力再加发展的医学叫第四医学，它包括提高人的智力，提高人的体力能力以及提高人的适应恶劣环境的能力等，这些都是人体科学的实用科学层次。在这个层次里还有很重要的人-机-环境系统工程^[1]，它与第四医学关系密切。它是在研究人、机、环境各自功能特点的基础上，运用系统工程的理论与方法，着重研究人-机-环境系统的整体性能，使其达到最佳状态的一门技术。这样我们把本书内容即人-机-环境系统工程在现代科学技术的框架中找到了正确的位置，看到了纵横关系和相近学科的内容，进而才能正确地理解和运用本书的科学内容和指导思想去研究对象的性质特征。确立正确的研究方法论将会对人-机-环境系统工程的研究以及人-机-环境系统工程的科学内容有所提高，有所创新。

第四节 人体科学的功能态理论^[4]

一、人体功能态概念与特征

近 20 年来，巨系统理论即系统学的研究，已经历了一般系统论阶段和远离热力学平衡的耗散结构热力学理论阶段，进入了统计力学理论，即协同学的阶段。这些工作证实了复杂巨系统可以有多个相对稳定的功能状态。巨系统每个自由度在系统的相空间上占有一个坐标，在这亿万个自由度的多元相空间中，系统有相对稳定的点或环，系统可以停留在点或环的附近，形成系统的功能态。复杂巨系统有不只一个点或环可以通过内外的作用，可从这一个点或环（即这一种功能态）进入另一个点或环（即另一个功能态）。人体是一个开放的复杂巨系统，可以用功能态的标志描述其特征，即人体的整体功能态。人体的各种功能态是亚稳态。通过调节可以从一种亚稳状态转入另一种亚稳状态。有好几种特别重要的人体功能状态，其特性特点都很明确，并在人们日常生活中经常出现，称之为人体功能态，借用量子力学的名词叫作特殊的功能态(Eigen State)。它的主要代表态就是正常觉醒态和睡眠态等。调节人体功能状态的手段可概括为三种。第一种手段是与外界的物质交换，如药物、饮食、呼吸氧气等，交换物质范围非常广泛。第二种手段是信息交换，外界的信息可以通过声波或电磁波，以非常复杂的形式进行信息交换。第三种手段是人脑自身所产生的意识，通过意识的作用可以调节人体功能态，而且是调节人体功能态的重要手段，只有人才能具备这种手段。

大家都知道任何人在 24 h 内一般总要交替进入两种人体功能态：觉醒功能态和睡眠功能态。在这两种功能态时其生理和心理方面都有明显的不同。还有人在某种伤害或某种应急（如缺氧等）状态时就进入一种危机功能态，这时其生理、心理功能就调节到应急状态，这是一种危机功能态。还有一种人要在短时间内作出超出一般的努力，如体育活动、驾驶飞机、战士的冲锋等，此时，人体就要调到又一种功能态即警觉功能态。上述几种在日常生活中可以观察

到的不同人体功能态是客观存在的。

自 1984 年以来, 航天医学工程研究所余和琫教授等对人体功能态进行了科学研究^[4,6]。他们利用多维数据分析的方法, 把所测得的多项生理指标变量综合成可以代表人体整体系统的变化点。变化点就是在各变量组成的多维空间中的位置, 运动达到相对稳定的点, 即目标点、目标环的位置。他们发现了人体的觉醒、睡眠、警觉等功能态的各目标点、目标环。还有航天医学工程研究所宋孔智副教授用脑电图为指标描述脑的功能态。他们是把人在某种特殊状态下的脑电图记录下来, 用种种办法对上百种脑电曲线及其不同频段进行分析, 选出信息量大且有意义的指标, 即把脑电功率、频率信息和结构信息综合成一个变量 x 再求其导数 x' 作出相平面图。从其相轨迹上可以看此时的相平面上的位置运动达到相对稳定的目标点、目标环。以上这两种科学实验证明了开放的复杂巨系统确实是具有各种不同功能态, 同时也说明了利用功能态的描述使人体科学研究有了科学依据和客观指标。这是十分有意义的工作。这个工作仍需更多的指标, 需要把人的感觉、认识、意识等定性的指标合理处理, 选出有代表性的指标进行定性定量相结合的综合分析。这些工作是很困难的, 但能较准确地描述人体或脑的功能态。

二、功能态理论对人体科学研究的重要意义

功能态理论对人体科学的研究和发展有极为重要的意义, 可能解决一些以前没能解决的重大问题。

中医的“证”就是人体的一种功能态。中医里的名词都不是指人体结构中的哪一部分的, 而是指人体巨系统的某一功能表现, 是宏观参量, 不是微观参量。它和西医的整体反应是同一个层次的反应参量。有可能用人体功能态的理论把中医西医沟通起来。西医是以细胞组织器官相对微观变化分析整体反应去医治疾病, 而中医是以整体反应的宏观变化分析微观变化去医治疾病。两者各有偏重点, 各有长处, 也各有短处。西医强调对病因的诊治极为重要, 认为找到病因了就能治好病, 而中医强调整体。两者应辩证地结合, 不同情况不同处理。用功能态的理论把微观、宏观不同层次的变化归纳在表现人体功能态特征上, 这样可能把中、西医的实质内容统一起来, 是统一中西医的重要理论。人体功能态理论的深入研究可以使诊治疾病过程量化、科学化、现代化, 不但可以准确地诊断疾病, 还可以辩证地、动态地抓住功能态的控制参量医治疾病, 进而可以演示、设计治疗方案, 估计愈后效果。这就可以把现代医学水平提高到现代科学最尖端的程度。人体功能态的理论运用是发展中西医的正确途径, 是从本质上发展新医学的重要方面。

人体科学的中心任务就是研究人体开放复杂巨系统的功能态。研究功能态的规律和机制。人体功能态是处于相对稳定的状态, 既不是绝对不变, 也不是时刻在变。稳定的涵义是指系统的不变性和系统的抗干扰能力或者是当受到干扰而使系统偏离稳定状态时是否能够靠某种作用回到稳定状态。每个人体功能态都可以用状态变量空间来描述(势函数)。当系统处于稳定状态时, 势函数必然要处于某部分的底部。人体功能态的状态变量应是宏观和微观的生理生化变化、人的心理意识的变化以及周围环境的变化。当然, 在选择变量时要用一些先进的理论与技术使其能代表功能态的特点, 借以研究人体功能态的机制。②研究各种功能态的转换过程, 探索改变人体功能态的控制变量。目前如何针对某种特定的功能态来选择合适的控制变量, 也就是选择改变功能态的输入“窗口”是十分重要的工作。近年来所出现的各式各样

的治疗仪都不是从这个方面的研究而得出的，出现了一定的盲目性。根据雷内、托母的突变论的理论，在研究改变功能态时应注意观察其控制变量与改变功能态的类型的关系。这种理论更能深化人体科学研究，开拓生理学及医学内容。研究各种功能态相应产生的物理的、化学的、生物的、人体的各种效应。人体科学研究发现，当人体处于某个功能态时相应地产生各种（包括物理的、化学的、生物的、人体的）效应。这是经典的生理学研究没有涉及到的问题。

人体功能态的意义是深远的，它把人与环境（包括五个层次）以宏观和微观的方式统一于人体之中，对人体巨系统的认识更加深入和全面，并把西医、中医研究纳入到现代科学的前沿地位，有可能成为当代科学的突破口。它可能解决西医中医的各种理论之间的矛盾，并可能沟通和完善西医中医之间的理论与实践，从而发展新医学，造福于人类。

第五节 人体科学研究的方法论与方法学

一、研究人体科学的方法论的又一大进步

如前所述，人体是个开放的复杂巨系统并处于宇宙超巨系统环境之中，因此研究人体科学时，不能孤立地研究人体，必须同时考察人与宇宙的五个层次所构成超巨系统的变化。不仅要探测人体场 还要考察宇宙场 不仅要考察传统的能量、信息传送方式 特别要研究人与环境宇宙的共振耦合的可能性，以及耦合的不同深度和不同层次对人-宇宙系统整体的宏观和微观的状态功能和行为。因此，要注意人体-环境-被测目标物之间的相互关系，把三者作为一个系统来研究，这就需要在做人体科学实验时同时记录三者的各种物理动态参量。再一个重要因素就是意识，意识的作用，既考虑主试者的又要考虑被试者的意识状态，同时也要考虑在整个人-环境-目标物系统中介入者的意识状态。

现代科学面对着具有意识活动的开放的复杂巨系统——人体这一研究对象，其研究方法必须有新的变革，即要有新的方法论、方法学和技术工具。

生命科学（包括人体科学）的研究一直是运用还原论的方法。这个方法对生命科学发展起到了重要作用，促进了分子生物学的发生和发展，在生物学中已取得了重大的成绩，并已应用于生物工程，对人类作出了重大贡献。但是，还原论仍解决不了人体的整体功能。人体的整体功能绝不是搞清了各子系统的功能，加在一起就是整体功能了。系统科学的理论和方法告诉我们，必须用系统科学的方法论来研究人体整体活动。研究人体应以整体论的观点应用还原论，同时在还原论的基础上，完善整体论，也就是在微观基础上研究宏观现象，同时为了研究宏观现象而深入研究微观内容。概括起来说，就是用还原论与整体论辩证统一的系统论来研究人体功能。

近 30 年来，在应用还原论研究人体功能的同时，由于科学技术的进步，研究人体科学的方法也在不断地改善。应用控制论、信息论方法研究人体，开始了用综合方法分析人体功能，建立了不同水平人体功能活动的模型供分析应用，起到了一定的作用，是人体功能研究方面的一个进步。但这个方法也只是认识局部的规律，还不能认识人体整体的活动规律。前面已讲的耗散结构和协同学的理论与方法在处理开放的简单巨系统方面是成功的，解决了不少重要问

题，是有重大贡献的。因此，近年来有人利用协同学的理论和方法研究人体的局部系统、器官功能，似比以前进了一步。但这要严格控制条件，合理简化巨系统的子系统活动特征，使所研究的人体某一器官、系统成为近似的、开放的简单巨系统之后，用该理论方法处理并对处理结果要有明确的、相对真实的认识。这也是研究人体科学方法论的一个进步。但是要慎重，如要硬把这些处理简单巨系统的方法用来处理开放的复杂巨系统——人体 是不会成功的。

现在能用的，唯一处理开放的复杂巨系统的方法就是从定性到定量的综合集成法，这是在人体科学研究发展途径上的又一个重大进步。

二、研究人体功能态的方法原则

现在探讨研究人体这个复杂巨系统的整体功能态的具体方法步骤。

第一，要掌握运用人体各种功能态时的人体诸参量的变化数据。

第二，要掌握人体所处的物理环境和生态环境的参量及其对人体的影响，变化数据大部分属环境医学数据。

第三，将各行的专家和专家群体的理论和经验知识，汇集成专家系统。

第四 要具体测试的人-环境-目标物系统的人体和物理参量，包括人的意识参量。

在上述四个条件具备之后，就可以利用这些数据，依据现代科学医学及中医理论制定出框架模型 并依次进行综合集成分析 其结果再与中 / 西医学家、环境专家、物理专家、工程专家及其他有关专家进行反复讨论，最终判断出人体功能态。利用这种方法可以研究人体巨系统的结构、功能、行为特征，掌握影响功能态的各种因素，找出控制功能态的转换规律，人们当然就可以利用人体活动的各种规律和理论机制，为人类造福。

在结束本章之时，再重复地讲清，人体科学是研究人体开放的复杂巨系统和它在客观环境中所处的系统的功能状态、系统的结构、系统的功能和行为的学问。在马克思主义哲学指导下的人天观是研究人体科学的哲学思想，它的科学指导理论是整体论和还原论辩证统一之后的、更高层次的系统论；它的方法论是系统科学的从定性到定量的综合集成法。这样，对人体科学的研究就从科学指导理论和方法论上有了根本的改变，将会促进人体科学的重大进展。这些理论和方法论无疑对研究、观察人-机-环境系统工程具有重大指导意义，这也是编写本书的原则。