

在虚拟与现实之间 ——自动化若干发展方向刍议¹⁾

王行愚

(华东理工大学 上海 200237)

(E-mail: xywang@ecust.edu.cn)

摘要 针对自动化发展中存在的一些看法进行了分析和讨论,并对今后的发展提出了意见.结合作者的相关研究工作,重点论述了网络空间中的控制问题和基于脑波信号的人机合作控制等新的发展方向.

关键词 网络空间,虚拟控制,安全控制,脑波信号,人机合作

中图分类号 TP13

AUTOMATIC CONTROL: VIRTUALITY VS. REALITY

WANG Xing-Yu

(East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

(E-mail: xywang@ecust.edu.cn)

Abstract In this paper, several issues are described focusing on the future development of automatic control. New research areas of automatic control on 'control problems in cyberspace' and 'human-computer cooperation control based on electroencephalograph (EEG)' are discussed and the further development of the areas is also pointed out.

Key words Network space, virtual control, security control, EEG, human-computer cooperation

1 引言

近年来,关于自动化未来发展趋势的探讨,已成为学术界日益关注的问题.经过半个多世纪的发展,自动化领域无论在理论还是应用上都成就辉煌.自动化如影随形,渗透到了人类社会的各个层面,无时不在,无处不在.一个国家自动化程度的高低,已经成为衡量其科学技术和经济发展水平的一个重要标志.

1) 国家自然科学基金(69974014)、教育部科学技术研究重点项目(00053)资助

收稿日期 2002-04-19 收修改稿日期 2002-07-09

然而,科学发展的历史告诉我们,一个学科愈是取得成功,愈是趋向成熟,它的进一步发展就愈显得艰难.著名的美国科学历史学家兼科学家库恩对于科学发展曾提出如下模式:前科学—常规状态科学—危机—革命—新常规状态科学—新危机^[1].对于自动化学科而言,在当前新的形势下它的发展应向何处去,是值得我们深入思考和讨论的问题.本文试图对当前自动化发展的一些观念进行讨论,并结合学习和研究中所涉及到的一些发展方向发表一些浅见.

2 关于自动化发展的一些观念

面对当今科学技术和社会经济的新要求,自动化面临着严峻的挑战.自动化学科的工作者在为以往的成就欢欣鼓舞之余,也在清醒地剖析思想上的一些“困惑”:

其一,在学术研究上,一方面新的课题层出不穷,另一方面创新难度日渐提高,与20世纪50年代钱学森、庞特里亚金、贝尔曼和卡尔曼等取得的具有里程碑意义的成就相比,目前的重大突破明显较少;其二,感到自动化与其它学科的界线愈来愈模糊,如何认识自动化学科的内涵成了一个引人深入思考的问题;其三,理论与实际的相互推动显得不够,这也是学科发展中的普遍问题.本文无意全面分析上述问题,仅从方法论的角度谈一些看法.

首先,科学技术的发展,主要受社会需求和科学创新两大基本因素的影响,且两者相互影响,相互促进.从社会经济形态的发展看,知识经济的发展向自动化提出了更高的要求;经济的全球化和信息化也必将刺激自动化学科的进一步发展.作为人类生存和发展的根本保障,物质财富的生产和安全供应,特别是制造业和服务业,将永远是人类社会生活中的支柱,这些领域也仍将是自动化的主战场.从科学发展的角度看,生命科学和数字化、网络化的兴起都将对自动化学科提出新的需求.总之,社会需求和科学创新的推动仍然十分强劲,必将为自动化学科的发展注入新的活力.

其次,面对新形势,应如何推动自动化学科的发展?我以为以下两点是至关重要的.

第一,自动化的内涵必须不断地深化和拓展.控制论奠基者维纳在《控制论》初版13年后的第二版序言指出:“如果一门新的科学学科是真正有生命力的,它的引人入胜的中心就必须而且应该随着岁月而转移……因此,控制论学家应该继续走向新的领域,应该把他的大部分注意力转移到近十年的发展新兴思想上去.”^[2]如今,我们重提这些话,仍然感到意味深长.自动化是以研究自动控制为核心的一门科学技术,面对当前新的挑战 and 机遇,自动化的内涵应该更强调“信息的控制”.物质、能量和信息被公认为人类社会生存发展的基本要素.近年来,与物质和能量的发展相比,信息获取和处理能力的发展突飞猛进,这为基于信息的控制创造了前所未有的条件,也必将促进“信息的控制”的有关理论和方法的深化发展.

第二,自动化学科应当在与其它学科的交流中汲取更多新思想、抓住新机遇、做出新选择.著名德国物理学家海森伯格(W. Heisenberg)曾经说过:“在人类思想发展史中,最富有成果的发展几乎总是发生在两种不同思维方法的交会点上.它们可能起源于人类文化中十分不同的部分、不同时间、不同的文化环境或不同的宗教传统.因此,如果它们真正地汇合,……以至于发生真正的相互作用,那么我们就可以预期将继之以新颖有趣的发展.”^[3]当前一些引人关注的前沿学科,如分子生物学、人类基因破译、生物工程、纳米科学、金融工程和复杂性科学等都与自动化学科交叉,自动化学科都应进入这些领域,在解决新问题的同时发

展自身。

3 自动化若干发展方向刍议

近年来,自动化学科已形成了一系列新的方向.在北京召开的第十四届世界大会上,对这方面的工作给予了充分地反映.中国学者为自动化学科的发展,也做出了突出的贡献.钱学森、戴汝为等提出的关于开放的复杂巨系统及其方法论,为复杂系统的建模、分析、运筹和控制等问题提供了理论基础和方法论依据^[4,5];宋健、郭雷在 IFAC 世界大会上的报告,对我国学者的部分杰出工作进行了总结,并提出了新的方向^[6,7].作者在学习和研究工作中,试图跳出已经较为熟知的研究方向,转而探讨一些新的领域.以下仅从两方面作一些介绍和论述.

3.1 关于网络空间中的控制问题或简称为虚拟控制问题

1991年,美国麻省理工学院出版了一本关于网络空间(Cyberspace)的著作^[8],作者本尼迪克特(Benedikt M)称:“由计算机支持,由计算机进入和由计算机产生的全球网络化,是多维度的、人造或‘虚拟’的真实.它是真实的,每一台计算机都是一个窗口;它是虚拟的,所看到的或听到的,既不是物质,也不是物质的表现,相反它们都是纯粹的数据或信息组成的.”这段话对网络空间的特征作了简明的描述.所谓网络空间是基于全球互联网的,由人、机器和信息源三者共同结合组成的一种新型社会生活和交往的空间.它的基本特征是虚拟性,但同时作为人工科学的产物,它离不开现实空间,因而又具有现实性.因此,确切地说,它是在虚拟和现实之间的特殊空间.网络空间的出现带给人类文明的震撼是巨大的.关于网络的各种学问都应运而生,诸如网络与科技、网络与经济、网络与文化、网络与社会等等^[9],统称为关于网络的自然和社会科学,简称网络科学.

作为自动化领域的工作者,自然会去思考:网络空间给我们带来什么?网络空间中是否也有现实空间中所讨论的控制问题,在现实空间中的控制理论和方法是否也可以“搬上”虚拟空间.简言之,在虚拟空间中,是否存在特殊的控制问题,如果存在,它的理论和方法又是什么?为了便于表达,暂且将这类问题称为虚拟控制问题.这里所说的虚拟控制,与基于网络的控制概念上有所不同,后者主要是将网络作为一个技术手段来实施控制,并未清晰地涉及到网络空间本身的新的控制问题.显然,关于这类问题的研究属于控制、计算机、通讯和数学等多学科的交叉领域.以下仅从三方面作些介绍.

3.1.1 在网络空间中以优化和控制为目的的信息系统分析和建模问题.从系统角度看,国际互联网络是一个人、机、信息共存的极为复杂的巨系统.它具有一些特殊的复杂性:异构性、巨大规模、快速时变性、业务流的自相似性、人机合作性、不可预见的干扰性等.人们可以从不同的目的出发,讨论其建模问题.如:为解决信息拥塞问题建模,为构造基于 Internet 的虚拟企业建模,为解决入侵检测问题建模,为解决基于物流的优化配送问题建模.从数学上看,相当一部分问题可以归结为排队网络问题,因此可以运用排队论来分析和建模.传统的 Poisson 模型不适应因特网数据流量分析,神经网络、演化程序、小波分析、自适应控制、鲁棒控制、混杂系统、对偶优化方法和可拓控制方法等都被用来研究这类特殊信息系统的建模及分析^[10~17].

3.1.2 关于网络信息流的拥塞控制问题.这是一个网络空间中特有的控制问题,网络

上的海量信息是以往任何控制系统中无法比拟的,这必然带来信息流的拥塞现象.为保证网络的正常运行,拥塞现象就成了亟待解决的关键问题.近年来,一些控制和优化理论已经成功地应用于这类问题的研究.Paganini 等设计了一个基于多变量鲁棒控制理论的拥塞控制系统;Hespanha 等和 Li 等均采用混杂控制的理论和方法研究 TCP 拥塞控制问题;Walsh 等采用动态规划方法来分析和处理一类拥塞问题;Low,汪小帆,任立勇等对这方面的研究作了综述^[18~24].

3.1.3 关于网络信息流的安全控制问题.这也是网络空间中特有的虚拟控制问题.网络空间中,由于“黑客”等各种干扰的存在,信息的安全传递就成为十分突出和重要的问题.对于这类问题,计算机、通讯、数学和控制学科的工作者都极为关注,各自从不同的角度加以研究,并愈来愈走向交叉和融合^[25~27].以下从控制的角度结合作者所涉及的工作,作一些介绍和讨论.

图 1 所示为从网络信息流控制角度描述的网络入侵防范控制系统.

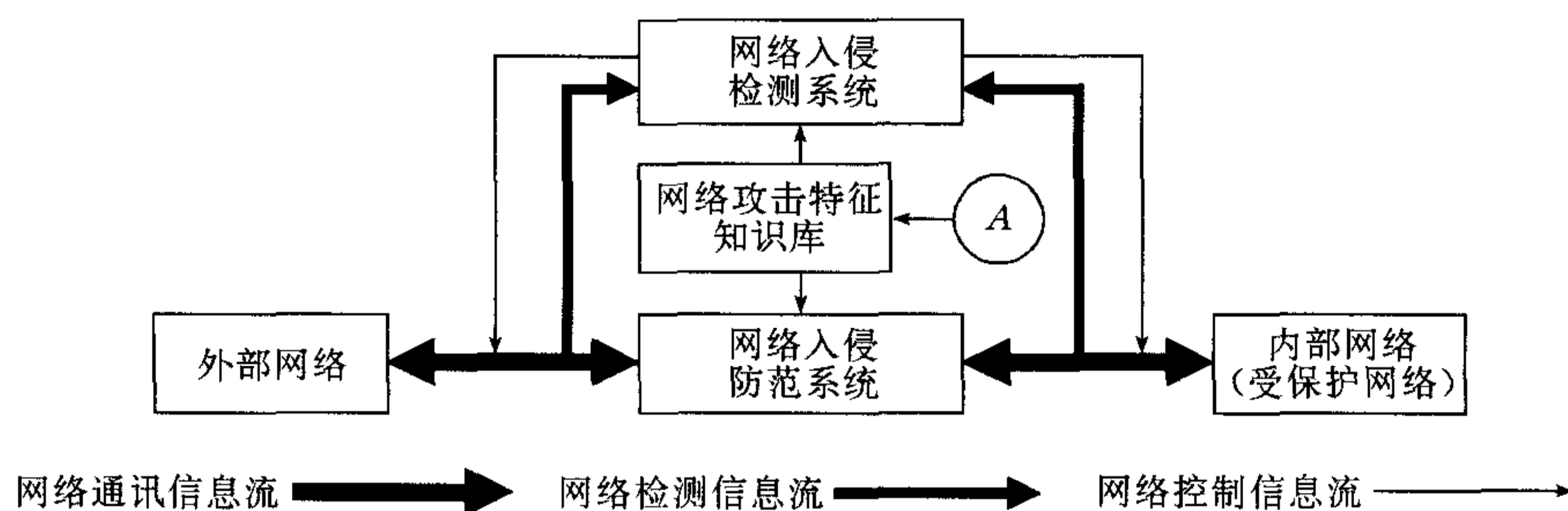


图 1 网络入侵防范控制系统

这是一个典型的关于信息的控制系统.它要处理三种不同内容的信息流,即通讯信息流、检测信息流和控制信息流.通过对这三种信息流的管理和控制,使受保护的网路既能正常、快速的工作,又能保证信息的安全.图中包括三个基本部分:网络入侵防范系统、网络入侵检测系统和网络攻击特征知识库.从控制角度看,上述三个方面都有许多工作可做.

首先,由于网络上不断出现新的攻击方法(或者是已有攻击方法的变种),为了能有效地防范新的入侵方法,就必须不断地对网络入侵的知识库进行更新,系统才能有效地防范和检测新的攻击,保护系统的安全.目前对网络入侵知识库的维护主要通过人工方式进行,由具有丰富经验的专家通过某种方式分析出新攻击的特征,然后把特征加入到入侵知识库中.这种以人力为主的方法已经难以适应实际需要.

为此,我们研究了网络入侵特征的自动挖掘问题,建立了网络入侵特征字符串和特征规则挖掘数学模型,并提供了模型的求解算法^[28].对网络入侵特征字符串的挖掘模型设计了优化的搜索算法和遗传算法,为网络入侵特征规则的挖掘模型应用遗传规划的方法求解.同时,构建了一个真实的网络环境,通过对网络常见的针对 IIS(Internet Information Server)服务器攻击的特征挖掘,验证了所提出模型及算法的有效性,并对遗传算法和遗传规划的演化参数对算法收敛过程的影响做了分析研究.实现了在没有先验知识的情况下,对网络入侵特征进行自动挖掘,使入侵特征知识库具有自动更新的功能,提高了系统的智能化程度.

其次,我们对入侵检测的智能化方法进行了研究.在这方面的的工作中,主要研究了神经

网络在入侵及其变体检测中的应用；自组织特征映射在异常检测中的应用；入侵检测的遗传建模及分布入侵检测系统中的知识表示等^[29]。

可拓控制的方法也被用于分布入侵检测系统。入侵检测系统处理的基本数据来自于审计追踪。通过分析审计事件，判断它属于系统正常运行过程中产生的事件还是异常的入侵事件。对于许多不确定的审计事件，入侵检测系统不能简单的判断，它必须依赖于具体环境或上下文关系。可拓控制是从信息转换的角度来处理控制问题^[30~32]，从上面对审计事件的分析来看，其中存在着不相容问题，相同的审计事件在不同的上下文中会有不同的结果，并且可能相互转化，不同的入侵检测方法也可能得到不同的结果。完整的入侵检测系统需要解决这些矛盾问题。为此，我们利用可拓控制方法，建立了反映审计事件层次特征的高阶复合物元模型，并将入侵事件集映射为可拓集合，将分布入侵问题转化为求解可拓集合的关联函数问题。这为解决入侵检测问题提供了一条新思路。

在关于网络入侵防范系统的研究中，针对网络防火墙的不足，一种基于人工免疫系统 AIS(Artificial Immune System)的方法被用于网络信息安全^[33~36]。生命系统可以看成是一个分布式自治系统，它的巧妙结构和功能，为科学研究提供了许多重要的启迪。免疫系统最大的特点是免疫记忆特性、免疫多样性和抗体的自我识别能力。基于免疫系统机理而建立的人工免疫网络模型和免疫学习算法，都可被用于入侵防范系统。目前，一种基于 AIS 的基因计算机系统已被用于入侵防范系统^[34]。所有出入该系统的数据都被加以基因码的保护，基因计算机通过对基因码的检测来判断数据的合法性，继而才能进行发送端和接收端对数据的加密与解密，由于其分级加基因码是自动执行的，不经人为操作，从而安全性更好。

3.2 关于基于脑波信号的人机合作控制

与控制科学密切相关的另一个学科领域就是生命科学，近年来关于控制科学与生命科学的结合已引起高度关注。许多控制科学的工作者已经深入到生命科学的一些领域。李衍达提出了功能基因组系统学的新方向。关于脑科学与控制科学的结合是维纳在创立控制论时就已提出的思想，半个多世纪过去了，人们对于这个“结合点”研究的追求，始终不渝，取得了一系列杰出的成就。近年来，最令人振奋的消息是在 Nature 杂志上报道的关于利用猴脑遥控指挥 1000 多公里外机器人运行的研究成果^[37]。

据报道，美国麻省理工学院和杜克大学的科学家做了一项实验，他们将电极植入两只猴子脑部，一只猴子脑部 6 个区域植入 96 根导线，另一只脑部 2 个区域植入了 32 根导线。每根导线都极细，只有人的头发丝的一半粗。植入猴脑内的电极对猴脑各个部件在肢体活动时所发出的信号进行了多方面的记录，然后由电脑对这些记录进行分析和研究，识别出指导猴子肢体活动的各种脑部神经活动的模式，随后将这些模式变成数字指令，从而指导机器人的行动。实验表明，机器人所做的手臂活动的简单动作与每只猴子的动作基本一致，但在植入电极多的猴子的控制之下，机器人手臂的三维运动要完成得更好一些。显然，下一个实验的目标将是由猴脑换成人脑，如果能取得成功，那无疑是人类医学和控制科学的巨大突破。这是让瘫痪病人能够重新活动肢体而迈出的重要一步，是世界上数百万残疾人翘首以待的福音。图 2 所示为关于这项试验的示意图。

鉴于这项研究的科学价值和社会效益，世界各国在脑科学和自动控制学科交叉领域的研究如火如荼，取得了大量的基础性研究成果^[38~44]。我们目前正通过国际合作，开展此类研究工作，主要方向是进行脑波控制纯人性化护理机器人的研究工作，下面简要介绍其工作

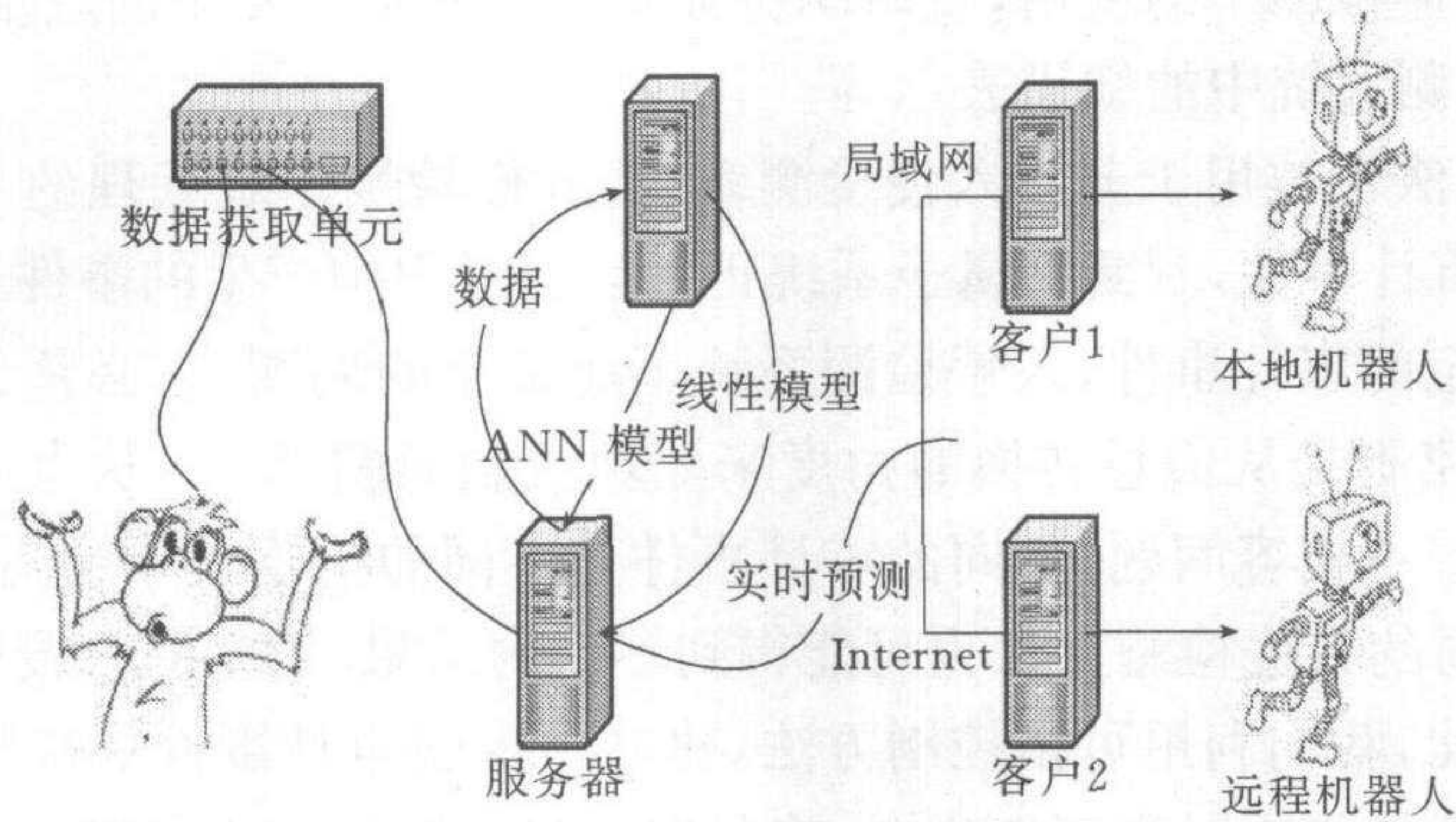


图 2 猴脑与机器人的合作控制

原理.

在人们做动作之前,脑电波会有特殊的波峰出现,可以将信号的特殊形式进行分类,并将其与人的意念联系起来.如果我们能够研制一种可以植入皮肤内的微型芯片作为脑驱动器,微型芯片上的传感器通过人的皮肤测出人的大脑脑电波,这是因为脑的思想会影响神经系统,它的脉动可以影响人的身体.再由该芯片上的信号处理模块对脑波信号进行全面的分析和研究,识别出对应人体肢体活动的各种脑部神经活动的模式,随后将这些模式变为数字指令,从而指导机器人的行动,就可以开发出由脑波控制的纯人性化机器人,机器人根据操纵它的脑波信号指令完成动作,那无疑是人类医学和机器人研究史上的巨大突破.这样,那些脊椎神经和中央神经系统受损的瘫痪病人、使用假肢的残疾人等都可从中大为受益,他们将来只要动脑子,就可以控制机器人实现动如常人的梦想.而那些不能说话的病人也可以靠意念通过机器人发出表达自己意思的声音.对于脑病人,由于他们的脑电波和正常人的脑电波存在差异,因此需要对每一个脑病人的脑波信号进行建模,并从中找出和正常人的差异,进行脑波信号补偿,使其脑波信号变成能够反映其意志的正常人的脑波信号,然后指挥自己的肢体或者驱动机器人按照自己的意志完成任务.

从图 3 中可见,针对脑病人或肢体不健全病人,可通过该系统带动他们完成一些困难的工作.脑波控制纯人性化护理机器人主要研究内容有:脑波控制人性化护理机器人体系结构;脑电波信号采集与数据库建立;脑电波数学建模、信息综合处理和模式提取;肢体运动过程中的脑电波事件相关电位研究;脑电波判读与专家系统建立;脑波控制人性化护理机器人柔性关节控制系统;人的脑波信号与刺激肌肉运动电脉冲的关系;脑波控制人性化护理机器人仿真系统研究等.

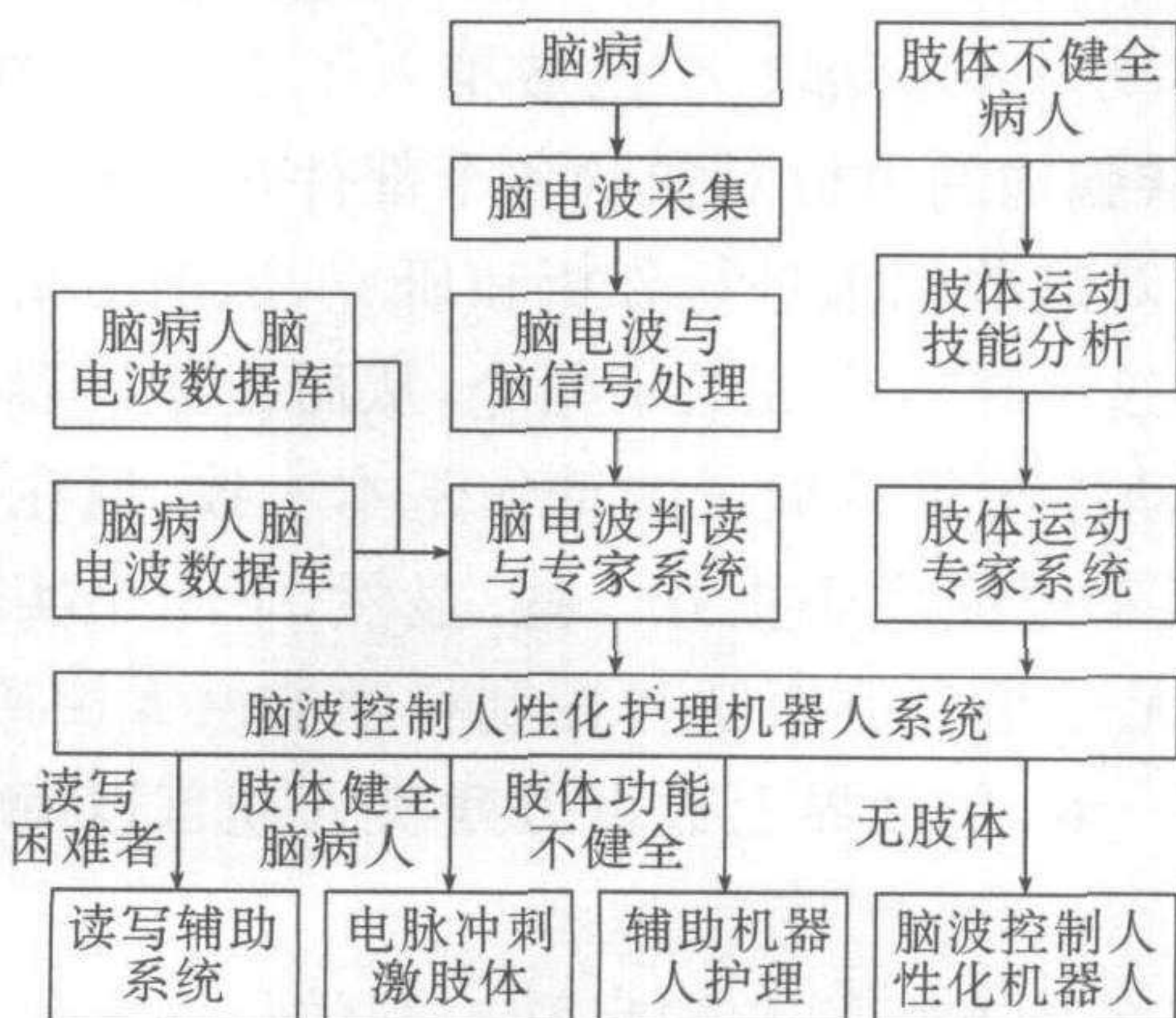


图 3 脑波控制纯人性化护理机器人功能原理框图

目前,这项工作已具有良好的基础.在脑电波自动判读、诱发脑电波信号记录与处理、基于脑电波的视觉目标运动机能分析、人体信号建模与处理、机电一体化伺服控制系统的建模与控制器设计等方面均有一定进展.脑波控制纯人性化护理机器人研究是一项巨大的挑战,需要多学科的交叉来共同研究.

4 结束语

自动化研究的领域在不断地扩展,其内涵也在不断地深化.传统的物质生产和生活领域,如制造业和服务业将仍然是自动化发展的主要推动力和应用领域;网络科学、生命科学等新兴领域为自动化的创新提供了广阔的舞台.在自动化的各种理论和方法中,智能控制仍将是人们追逐的理想目标.从猴脑与机器人的合作控制中,人们似乎看到了一种人机融合智能控制的曙光.在这个令人神往而困难的领域,制造具有人类智能的机器人的种种努力,也许正像追逐天边的彩虹,永远不可能追上它,但是在追逐彩虹的过程中,人们将发现无数奇异的珍宝!

参 考 文 献

- 1 布鲁诺·雅罗森著,张莹译.科学哲学.北京:北京大学出版社,2000
- 2 N·维纳著,郝秀仁译.控制论,第2版.北京:科学出版社,1963
- 3 F·卡普拉著,朱润生译.物理学之道.北京:北京出版社,1999
- 4 北京大学现代科学与哲学研究中心.钱学森与现代科学技术.北京:人民出版社,2001
- 5 戴汝为.从定性到定量的综合集成技术.模式识别与人工智能,1991,4(1):5~10
- 6 宋健.智能控制——超越世纪的目标.见:国际自控联14届世界大会报告.北京:IFAC,1999
- 7 郭雷,黄琳,金以慧.自动控制在近期中国的发展.见:国际自控联14届世界大会报告.北京:1999
- 8 Benedikt M. Cyberspace: First Steps. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1991. 123
- 9 鲍宗豪.网络与当代社会文化.上海:上海三联书店,2001
- 10 汪小帆,卢俊国,王执钐. Internet 业务流的自相似性——建模、分析与控制.控制与决策,2002,17(1):1~5
- 11 赵佳宁,李忠诚.基于模拟的网络流量自相似现象分析.计算机科学,2001,28(11):51~54
- 12 董宇翔,党小骥,严寒冰,杨晓晖. IP 多媒体网络中自相似通信量和网络性能的研究.计算机科学,2001,28(6):68~71
- 13 胡国胜,任震,陈一天.小波方法在因特网数据流量预测建模中的应用.计算机工程与应用,2001,37(23):35~36
- 14 李鸿培,王新梅.基于神经网络的入侵检测系统模型.西安电子科技大学学报,1999,26(5):667~670
- 15 Zhang W, Branicky M S, Philips S M. Stability of networked control systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001,21(1):84~99
- 16 Walsh G C, Ye H. Scheduling of networked control systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1):57~65
- 17 Walsh G C, Beldiman O, Bushnell L G. Asymptotic behavior of nonlinear networked control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001,46(7):1093~1097
- 18 Mascolo S. Congestion control in high-speed communication networks using the Smith principle. *Automatica*,1999,35(12):1921~1935
- 19 Paganini F, Doyle J, Low S. Scalable laws for stable network congestion control. <http://www.ee.ucla.edu/~paganini>,2001-09-20/2001-10-25
- 20 Hespanha J P, Bohacek S, Obraczka K *et al.* Hybrid Modeling of TCP Congestion Control. *Hybrid Systems: Computation and Control*, Berlin: Springer-Verlag, 2001. 291~304

- 21 Li K, Shor M H, Walpole J *et al.* Modeling the transient rate behavior of bandwidth sharing as a hybrid control system. <http://www.cse.ogi.edu/~kangli/>, 2001-10-04/2001-10-25
- 22 Low S H, Paganini F, Doyle J C. Internet congestion control. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, **22**(1): 28~43
- 23 汪小帆,孙金生,王执铃. 控制理论在 Internet 拥塞控制中的应用. *控制与决策*,2002,**17**(2):129~134
- 24 任立勇,卢显良. 可靠组播拥塞控制最新研究进展. *计算机科学*,2002,**29**(2):51~54
- 25 金 波,林家骏,王行愚. 入侵检测技术评述. *华东理工大学学报*,2000,**26**(2):191~197
- 26 夏 煜,郎荣玲,戴冠中. 入侵检测系统的智能检测技术研究综述. *计算机工程与应用*,2001,**37**(24):32~34
- 27 何明耘,戴冠中. 智能入侵检测技术的发展概貌. *计算机工程与应用*,2001,**37**(15):1~4
- 28 Huiyong Huang, Xingyu Wang. The model and algorithm of automatic data-mining of network intrusion characteristics. In: Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation, WCICA' 2002. 2002. 2701~2704
- 29 金 波. 入侵检测智能方法研究[博士学位论文]. 上海:华东理工大学信息学院,1999
- 30 王行愚,李 健. 论可拓控制. *控制理论与应用*, 1994, **11**(1): 125~128
- 31 Shunxi Xu, Xingyu Wang. An extension matter element set schema for analogical reasoning. In: Proceedings of the 14th World Congress of IFAC. Beijing: 1999. 381~386
- 32 Wang Xingyu, Hu Chen. Extension Control. In: Proc Asia Control Conference (ASCC2000). Shanghai: 2000. 1783~1788
- 33 杨晓宋,周佩铃,傅忠谦. 人工免疫与网络安全. *计算机仿真*,2001,**18**(6):83~85
- 34 刘克龙,荣 扬 等. 一种新型的网络安全实现方法——基因计算机. *计算机学报*,2000,**23**(3):324~329
- 35 陈立军. 计算机病毒免疫技术的新途径. *北京大学学报*,1998,**34**(5):581~587
- 36 Jerne N K. The Immune system. *Scientific American*, 1973,**229**(1):52~60
- 37 Sandro Mussa-Ivaldi. Real brains for real robots. *Nature*, 2000, **408**(16):305~306
- 38 Johan Wessberg, Christopher R Stambaugh. Real-time prediction of hand trajectory by ensembles of cortical neurons in primates. *Nature*, 2000,**408**(16):361~365
- 39 Ou Bai, Masatoshi Nakamura, Hiroshi Shibasaki. Compensation of hand movement for patients by assistant force: Relationship between human hand movement and robot arm motion. *Neural System and Rehabilitation Engineering*, 2001,**9**(3):302~307
- 40 Ou Bai, Hiroshi Shibasaki. Visual event-related potentials based brain-computer interface communication for cursor tracking. *Human-Friendly Robotics System*,2001,**3**(3):1~6
- 41 Takenao SUGI, Masatoshi NAKAMURA *et al.* Automatic detection of artifacts for pre-processing of automatic EEG interpretation. *日本医用电子与生体工学*,1995,**33**(3): 21~31
- 42 Shigeto NISHIDA, Masatoshi NAKAMURA. Generalization of estimation method for physiological variability in peak latency of single sweep evoked potentials obtained by use of morphological filter. *日本医用电子与生体工学*, 1997,**35**(4): 77~82
- 43 Masatoshi NAKAMURA, Shiro TAKAKURA *et al.* Quantitative analysis of the slow wave characteristics of rhythmicity by the use of EEG model. *日本医用电子与生体工学*,1997,**35**(4):50~57
- 44 Masatoshi NAKAMURA. Proper data sampling and filters for digital signals: Note on digital processing of biomedical signals. *日本脑波与脑电图*, 1996, **24**(1): 1~10

王行愚 1967年毕业于复旦大学数学系,1984年获华东化工学院工业自动化专业博士学位.现任华东理工大学校长,自动化系教授、博士生导师.著有《块脉冲算子及应用》等专著,主要从事控制理论及应用研究,目前主要研究领域为智能控制.