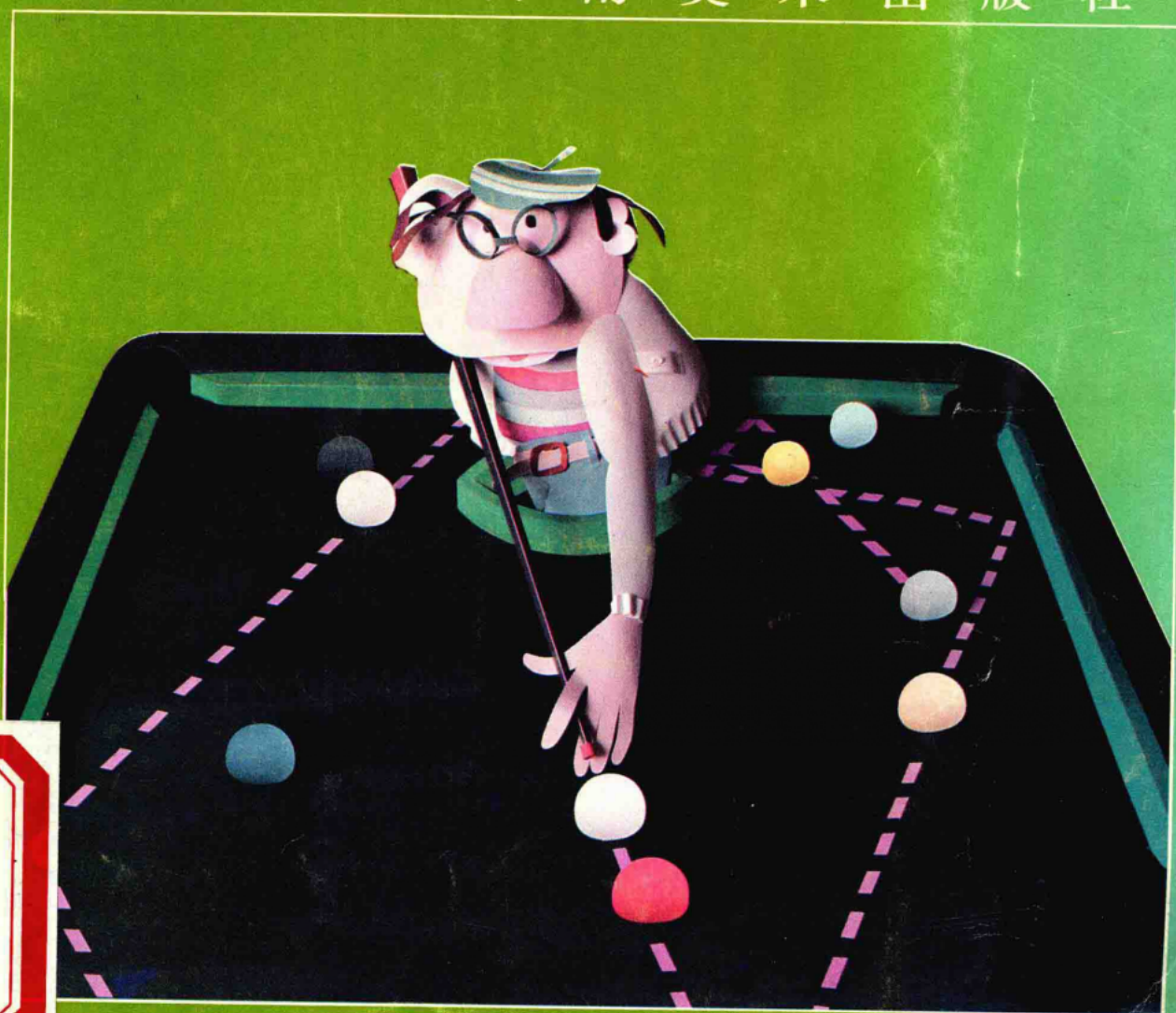


当代新思维新学科系列画库

控制论

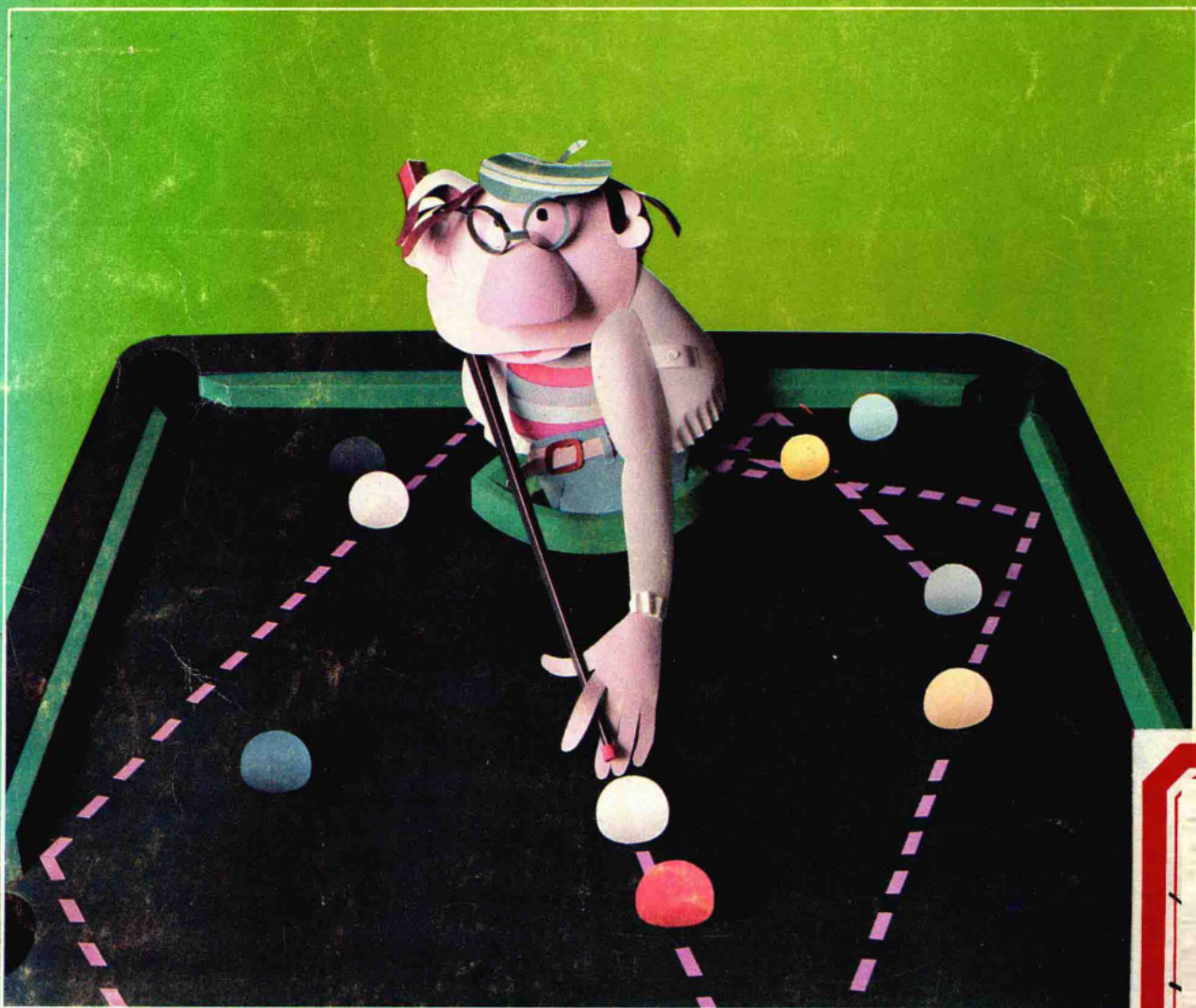
民盟北京市委图象传播研究所编
河南美术出版社



控制论

控制论是美国数学家N·维纳创立的一门横断科学。本书向广大读者揭示了这位昔日神童创立控制论成功的奥秘；通俗地介绍了该学科的主要思想、方法及其在各个领域中所取得的成就；着重介绍了它在科学研究和科学管理中的应用。本书对广大青少年读者富有启迪，激励他们勇于进行科学探索；对所有具有中等水平的管理干部来说，亦是一本难得的入门书。

《当代新思维新学科系列画库》第一辑书目包括：
管理学、系统论、信息论、控制论、未来学、传播学、
人工智能、公共关系学。



当代新思维新学科系列画库

控 制 论

魏 宏 森 著
田 广 华 绘

民盟北京市委图象传播研究所编
河 南 美 术 出 版 社 出 版

当代新思维新学科系列画库

控 制 论

魏宏森 著	河南美术出版社出版
田广华 绘	北京人民美术印刷厂印刷
	新华书店北京发行所发行

开本16 印张2.75 印数 1—5,000册

1991年11月第1版 1991年11月第1次印刷

书号: ISBN 7-5401-0203-9/J₂·138 定价: 3.20元

总 序

历史发展到今天，人类正面临着跨越世纪的转换。世界范围内的变革与发展以及科技革命浪潮，对处于九十年代的中国人既是机遇，也是挑战。

当代科学技术的发展与社会的进步，使自然科学与社会科学紧密结合，并已成为不可抗拒的历史洪流。在这种背景下，二者的互相渗透、融合、交叉，诞生了一系列新思维、新学科。它不仅开拓了人们的视野、带来了观念性的变革，而且也极大地提高了社会生产力。

发展科技、振兴经济、造福人民是我们最高和最终目标。为了向亿万群众普及传播新学科、新知识，使我们民族的科学文化素质和现代科学技术同步前进，民盟北京市委图象传播研究所组织编辑了这套图文并茂的《当代新思维新学科系列画库》，愿它引起广大学生、群众、干部的兴趣，并成为大家进一步探索科学新天地的桥梁。

这套画库是编辑者的初次尝试，还要陆续出下去。希望得到广大读者的关心和指正，使之不断完善。

钱伟长

1991年12月

顾 问：钱伟长 冯之浚
 程述武 叶家铮

主 编：王效池 刘立宾

编 委：闵惠泉 张世德
 孙肃显 姜吉维
 钱 炜

责任编辑：孙肃显 赵智文

封面设计制作：沈小川

第一章 控制论的创始人

——诺伯特·维纳

一、昔日神童——诺伯特·维纳

美国哥伦比亚有一位神童名叫诺伯特·维纳。他1894年11月26日出生(图1)于美国密苏里州,后来成为美国著名的数学家,1948年因创立控制论而闻名于全世界。1964年3月18日在瑞典斯德哥尔摩逝世。



他的父母都是犹太人,父亲列奥·维纳出身于俄国彼耶罗斯克的一个犹太学者的家庭,早在中学当学生时,就当私人教师,以此维持生计,时年13岁。当18岁时,就只身来到美国,身无分文,后经自己努

力,成为哈佛大学斯拉夫语教授(图2),他懂得几十种语言。是哈佛大学知名的语言学教授。N·维纳从小聪明过人,父亲决心把他培养成非凡的人。于是给维纳从小以极为严格的训练和教育,维纳认为,在他的一生中,父亲对他的影响最大,他说他父亲是“结合了德国的思想,犹太的智慧和美国的精神三者最优良的传统。”在1951年维纳写了一本自传《昔日神童——我的童年和青年时代》,描述他如何在父亲的严厉管辖下被培养成神童的经历。他3岁开始读书(图3),就能写字,从小就有一种无法满足的





七岁



好奇心，因而漫无边际地博览群书。他对自然科学发生了兴趣，从小就想当科学家，7岁时就读了达尔文的进化论(图4)和大部头的心理学。11岁就写了一篇哲学论文《关于无知的理论》，11岁高中毕业，进入塔夫茨大学。14岁大学毕业，以优异成绩取得学士学位。他在不到15岁时就考上哈佛大学生物学博士，后即攻数理逻辑，18岁取得了博士学位(图5)。可见他的童年就显示了非凡的天资。

然而，维纳本人对他的童年生活，却并不感到愉快。1951年在他写的《昔日神童》这本著作中，他认为自己那时片面地发展、精神状态不够健康、生活压抑，带来了许多痛苦。他在书中写道：再一次体验我在童年作为神童所过的种种严酷的经历，乃是一种繁重的精神负担，而把它写出来，也是一种最好的精神治疗的方法。在美国心理学界对一个神童的研究是认真的，必须跟踪研究，不仅研究本人的一生，而且研究父辈的成功之路，同时还要研究他下一代和后代的奇才。维纳就是美国心理学界研究的典型神童之一。他的自传以自己神童的亲身感受，生动地说明了一个真理：“天才出自勤奋”；“神童不神，贵在勤奋”。他

自己说：我是在一种虽慈爱但又极端严厉的压力下非常勤奋学习的，以致难以相信自己会成功。他自认为在父亲严格纪律和训练下学到了大量有益的东西，而别的孩子却在做微不足道的事情。我曾遇到过许多有才能的人由于学习松懈而一事无成。但是他又完全知道：“神童的道路是布满陷阱和圈套的，我完全晓得我的纯智力比一般水平高，但我也同样晓得衡量我的标准将更高，如果我取得的不是杰出的成就，而是一般的成就，那末，这些成就，也会以失败的面貌呈现在人们的心目中”。他自己感到经常处在神童的压力之中，精神压力很大。例如，他大学毕业成绩优异，但并没有被选入美国优秀生联谊会。因为人们怀疑他以后是否会取得成就。美国当时对神童的看法是，认为神童是预先在智能上支付了他一生的资本和精力，因而注定要失败。他自己亦无信心。



二、哈佛大学的哲学博士——N·维纳

1911年9月，维纳以哲学博士的候选人的身份来到哈佛大学——。从此他便与哈佛哲学系的名流学者济济一堂，虽然威廉·詹姆士已故，这是当时的哲学权威，但还有一些名家尚在。他学习了教育学、心理学和数理逻辑、科学方法等课程。

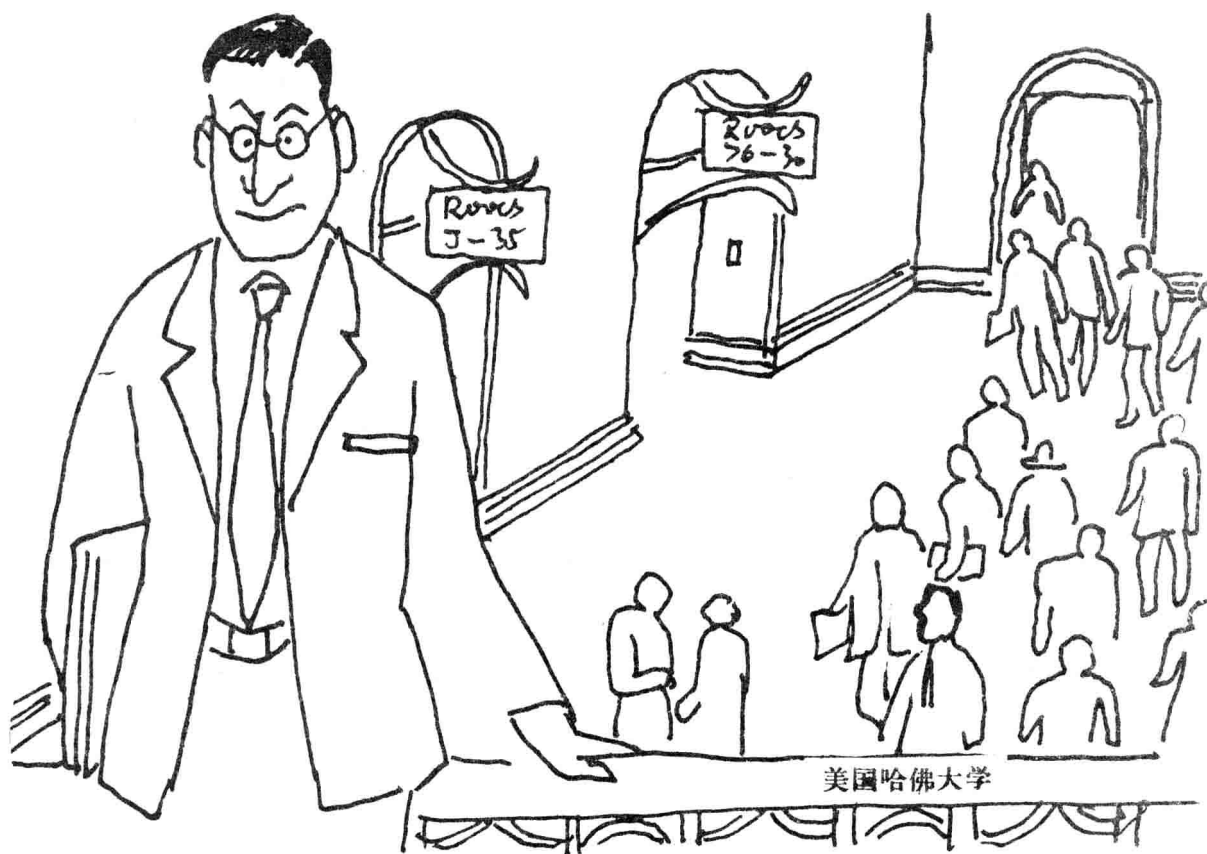
科学方法这门课是罗伊斯教授讲授的，这种既注意过去又着眼未来的立场很吸引人，他上了两年这样的课程，他认为是受到了一些从来没有受到过的最有价值的训练。

1912年他先获得了硕士学位。在争取博士学位的道路上，硕士并不是任何特定的阶级。但是，一旦他在下一年遇到障碍，有这个学位就显得方便了。他很早就通过了各种专题考试，这时他有更多的时间与同学们接触和交往。

他为了获得博士学位，决定专修罗伊斯的数理逻辑。后来塔夫茨大学的卡尔·施米特教授给他选定了博士学位论文题目《施罗德与罗素的相对数代数的比

较》。并以此通过了论文答辩，获得哲学博士，这年他还不足18岁（1913年）。

后来他去罗素那里学习才知道，在这篇论文中，几乎将每一个真正有哲学意义的争论论点都遗漏了。所以维纳认为：“人们时常认为，一个人的博士论文应该是一生中最精彩的作品之一，应该成为这个人的全部标准。我是不相信这个说法的，一篇博士论文，不过是一个工匠取得本行业师傅的资格的一项指定的工作而已；而在他的一生中，如果他没有多次做到超过这个水平，那他只是一个非常拙劣的师傅罢了”。“只有当一个人把他的论文丢诸脑后，不必为满足将来一些形式上的要求而烦恼时，他作为一个自由的人，以他的任务本身为目标，而不是以某种学术和社会地位为虚伪的目标，才能作出最好的成绩来。论文应该具有一定的水平，但如果，这位学者的工作并非很快超过他论文的水平，他就很快成为我们在第三流大学教授会议上看到的那些干巴巴的人当中的一个。”在他看来，博士论文是使他受到组织科学材料的训练，从而为以后二年所写出的论文的基础，而这些亦不过是作为他步入学生生涯的入门券而已。



三、数理逻辑大师伯特兰·罗素的高徒——N·维纳

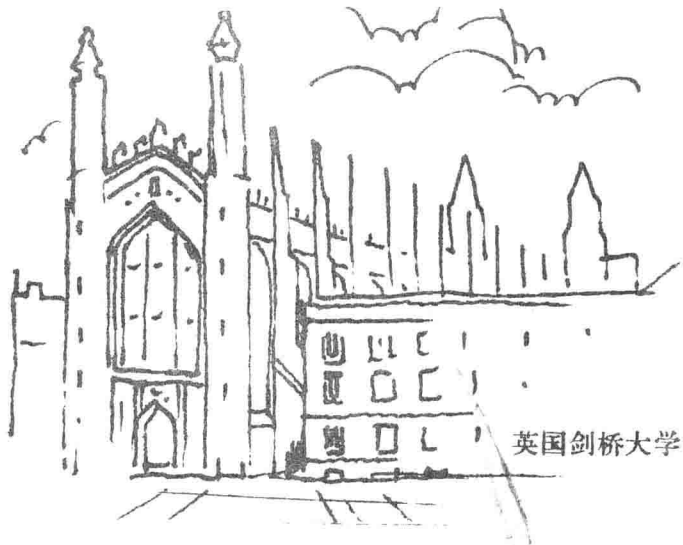
在哈佛大学的最后一年，他申请了访问（旅行）奖学金去国外深造，当获得批准后，他极为激动。那时罗素在剑桥大学的威望已发展到最高峰，而且那里是学习数理逻辑学最适当的地方。于是他写信给罗素，因为在开始此项学习以前，需要得到老师的许可。

1913年夏天，全家旅行乘船横渡大西洋到达英国。父亲陪他到剑桥大学——，在三一学院罗素的房间里拜访导师。由于哈佛与剑桥大学之间，有过某些关于研究生优待的协议，所以他无须考试就可以入学。在校外找了寓所住下。

罗素帮助他熟悉环境，并在布置课程时提了一个很好的意见：一个专攻数理逻辑的和数学哲学的人最好能懂得一些数学。因此，在不同的时间，他选读了许多数学课程，其中哈迪的课对他有很大的启发，他认为自己从未听到像哈迪讲课，讲得那样清晰、有趣和发人深恩。他说如果要我讲出谁是我数学训练的老师的名字，那就是哈迪。哈迪后来成为他的好朋友。罗素还要求他学习爱因斯坦的相对论和电子理论。这些课程为他打下了深厚的数理基础。包括那时最新的数学如：集合论、勒贝格积分、突变函数、复变函数等等。

选了罗素的两门课，一是对感觉资料的见解，二是《数学原理》。在这里他第一次充分意识到关于类型的逻辑理论以及它所代表的深刻的哲学思想。他对自己的博士论文中的缺点感到惭愧。他写了一篇小小论文，在他刚满18岁时，刊登在剑桥《哲学学会会刊》上，这是他从事数学研究和数学写作的正式开始。

他在跟随罗素学习阶段得益很深。不仅在学术上，而且在社交方面，罗



素与剑桥其他知名教授一样，每周总要举行一个晚会，他是定在每星期四晚上，到时，有许多人都来参加这称“人群”的晚会——，与会的都是一群赫赫有名的人物，有数学家哈迪，有《中国人约翰的来信》和《现代专题讨论会》的作者——哈斯·迪金森，还有当时许多名人，他们谈话风趣，富有哲理性。在此可以听到许多闻所未闻的事。

本来，维纳计划在罗素那里学习一年，但由于第二学期罗素接受了哈佛大学的邀请，于是罗素推荐维纳到哥廷根大学去读完那一学年的功课，即希尔伯特和兰道教的数学及胡塞尔教的哲学。



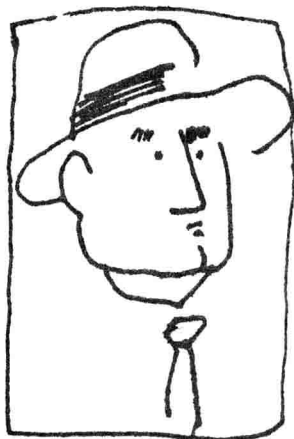
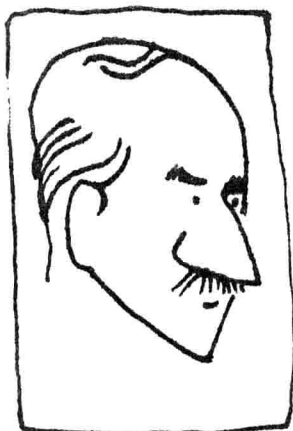
四、哥廷根大学的访问学者—— N·维纳

1914年初，他到了德国哥廷根大学学习。他上了兰道的群论课程，并在著名的数学大师希尔伯特教授指导下，上了一门微分方程课。他回忆道：“在以后的一段时间，当我熟悉了数学文献和数学研究的技巧后，我才对这两位大师有了更深的理解。希尔伯特是我所遇到的唯一真正样样精通的天才数学家。他所涉足的学术研究，从数论到代数学，从积分方程到数学基础，范围涉及到已知数学的大部分。我们从他的著作中可以看出一种对工具和技术全面理解，可是，他从来没有把这些工具和技术的基础理论摆进去。与其说他是一位运算专家，还不如说他是一个伟大的数学思想家。他著作内容的广博，是因为他的视野广阔。他几乎一点也不靠什么诀窍。”

在这所欧洲大陆上高等学府的学习，对维纳智力发展和科学研究工作和方法的培养影响极深。他说：“在我的智能训练过程中，数学阅览室和数学学会比上课更重要。阅览室不仅收集了可以说是全世界最齐备的数学书籍——，而且还有费利克斯·克莱因多年收集的已经绝版或重印的书籍。细细咀嚼这些书籍和重印本，真是受益匪浅。”那时由希尔伯特亲自主持的数学学会，经常在研究班的一个教室内集会，这里有世界各地最近出版的数学刊物。希尔伯特等教授们与研究生共聚一堂。学生与教授都一样宣读论文，讨论是自由而富有启发性的。

会后，他们漫步穿过市镇，到罗恩氏咖啡馆去。它开设在一个美丽的公园的山顶上，俯瞰全城。在那里他们喝一杯淡啤酒或咖啡，讨论各种各样的数学思想，有的是他们自己的，有的是从文献中看来的。在这样的交流中，他结识了不少有思想的青年学者。在这咖啡馆举行的科学和社交相结合的会后座谈，对他具有很大的吸引力。通过这些活动，使他不断爆发出不少新思想、新观点，他的《综合逻辑研究》就是此时的得意之作。正是在这里激起了他的强烈的创造欲望。这种社交



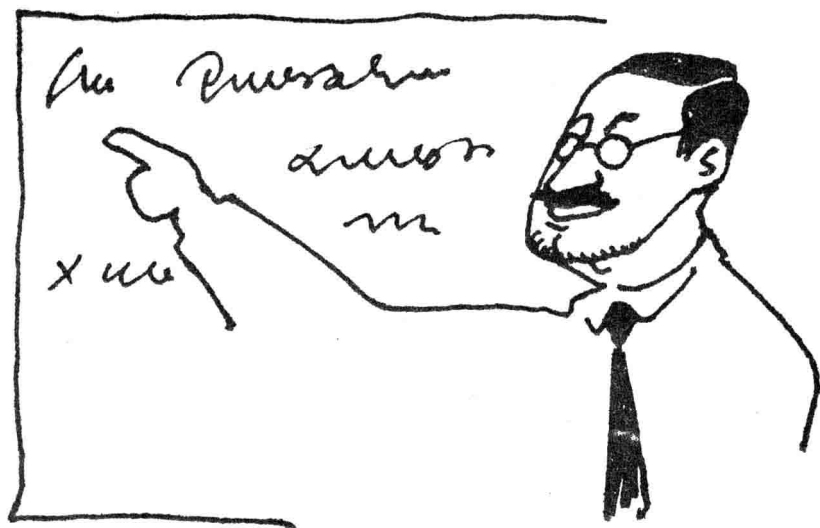


活动使他认识到：“数学不仅是在书房中学习的一个学科，而且是必须加以讨论，并把自己的生命投入其中的一个学科。”

总之，在剑桥和哥廷根的时间里，是对维纳的一次解放。所以他在自传中专用两章回顾了这一段难忘的生涯，而且其中一章的标题就用了



《解放》。他说：“是在剑桥和哥廷根的那一年，我才获得了我的解脱。我生平第一次能和那些比我年龄大得不多、但事实上是欧洲、乃至全世界知识成果精华的一类人物，作智力上的较量。我也受到第一流人物，如哈迪、罗素、穆尔等对我的考查。他们观察我的时候，没有因为我的早熟而迷惑，没有被我的那个混乱时代的谴责所支配。我不知道我在他们的眼里是不是一个出类拔萃的人，但是，他们（或者他们中间的一些人）至少是认为我有可能取得成功。我那时没有在我父亲的直接指导下，因而无须用我父亲做过手脚的天平衡量自己。总之，我已正式加入伟大的国际科学界——，而且看来我在国际科学界取得一些成就并非毫无希望。”



了使教师难堪，有时故意捉弄。考试作弊和抄袭作业已成了习惯。维纳管教严格，对这些现象进行揭发，可是后来发觉，揭发的后果对他要比那些犯错误的学生严重得多。由于他对这种小型大学的社会风气的无知和不关心，由于他的早熟和对知识的自负，引起了系内外同事们的不满以至怀恨。终于被挤出了学校。

1919年的春天，维纳拜访了麻萨诸塞理工学院数学系主任泰勒教授。他建议维纳从事应用数学的研究。从此他的纯数学研究带上了实用的色彩。在此维纳走上

五、从哈佛大学到麻省理工学院。

1915年夏秋，维纳来到哈佛大学任教，除了独自担当逻辑学课程以外，他还在一二年级学生的哲学课大班里担任一个分班的讲师。在给肄业生上课的同时，他还得作缺课记录，为一两位教授阅卷，在哈佛大学和拉德克利夫学院的分班讲哲学基础课。第二年，为谋取哈佛大学讲师职位，由于当时的系主任对他不感兴趣，也许是嫌他年纪太轻，而拒绝推荐他受聘。他们不愿意把这一职位授予一个难以驾驭和前途希望尚难预料的人。最后，在父亲的压力下，他决定向数学界而不是哲学界寻觅工作。终于在缅因大学找到了一个数学讲师的职位。

可是在缅因大学是很不顺心的。在那里一些老的和常任的绝大多数，是些绝望的人，他们很久以前就已经放弃在学术上取得任何成绩和升级的希望。多数人甘心他们的失败。年青人几乎像他一样是匆匆的过客，唯恐在此久留而失去好机会。学生们都是来自农村的强壮青年和伐木工人。他们唯一的兴趣是踢足球和吹毛求疵，把教授们弄得烦死。大多数课程对他们来说只是无聊的例行公事。他们在课堂里讲的许多无聊的话，都是为

了稳定发展时期，他的重大的学术成就就是在这个乐园中取得的。

1925年，他结识了一位年轻美貌的女子，她的名字叫玛格丽特·恩格曼。是德国人。他们结成了终生伴侣——。后来生了两个女儿。

30年代他已是闻名于数学界的数学家，1931年成为美国数学学会副会长，后为美国科学院院士，1964年获美国科学勋章。





六、维纳来中国——清华大学的客座教授

1935年夏，维纳应清华大学邀请，携夫人和两个女儿，从美国经洛杉矶、日本神户、中国天津，8月15日由李郁荣教授专程接来北京。住清华大学新盖好的教授公寓，新南院（即新林院）63号。

维纳来清华，是有多方面原因促成的。早在哈佛大学教书时，他担任了中国和日本文化的哲学课辅导，发现这项工作激起了他研究东方文化的兴趣，再加上他受歧视，更使他亲近中国人和东方文化。他在美国麻省理工学院教书，接触了不少中国学生，这些学生的勤奋好学的精神给他留下了深刻印象。李郁荣就是他在美时指导的一个，是他多年亲密合作的同事。30年代初，他俩合作搞电网的研究，发表过许多论文，其中有两项研究成果，作为当时的重大发明而获得专利。1934年李郁荣回国后，在清华大学电机工程系当教授，由于他与维纳之间的特殊关系，学术上一直有合作，回国后从未间断他们的交往。当



李郁荣在搞电网研究，试图用电阻、电感、电容来解微积分方程遇到困难时，迫切希望维纳来中国帮助他。同时数学系熊庆来亦希望邀请维纳来校讲学，因此，由学校聘请委员会讨论，以学校校长名义正式聘任维纳为电机系与数学系的客座教授。任期一年。

维纳来校后主要从事教学活动，他给教师和高年级的学生开设付立叶级数和付立叶积分、勒贝格积分，以及数学专题讲座。当时在科学馆306室上课，听课者除本校教师外，还有北京师大、燕京大学的教师。赵访熊、华罗庚、徐建修、吴新谋、段学复、徐献瑜都听过他的课。他亲自编写了讲义。在清华他从未间断科研工作，在清华大学理科学报上，曾发表了他的两篇论文。在校期间对学校的科研与教学工作起了积极作用，深受欢迎。当时是华罗庚当他的助教。后来为了进一步深造，华罗庚准备去英国剑桥大学进修。维纳为他出了不少力，他亲自写信给他的老师和好友哈迪教授推荐，称华是中国的数学天才，很有培养前途。

1936年7月，在挪威首都奥斯罗举行国际数学大会，维纳作为清华大学代表出席会议。他5月14日从北京出发南下，由顾毓琇陪同前往上海，途中到南京下车专程拜访了他的好朋友赵元任。19日从上海启程去伦敦，再转到挪威。开完会后又到欧洲进行了访问，最后回到了美国波士顿。他把这一年的经历称作是周

游世界。在他的另一本自传《我是一个数学家》中，他专门写了一章《中国与周游世界》描写了这段历史。这是他一生的重大转折点。他自己认为这是区分作为数学家的维纳和作为控制论创始人的维纳的分界线，是创立控制论的起点。

第二章 控制论的创立与发展



一、什么是控制论

控制论是美国数学家N·维纳于1948年创立的一门研究机器、生命和社会中控制和通讯一般规律的科学。它是自动控制、电子技术、无线电通讯、神经生理学、生物学、心理学、医学、数理逻辑、统计力学等多种学科相互渗透的边缘学科。不仅是一门技术基础学科，而且具有浓厚的方法论特征。

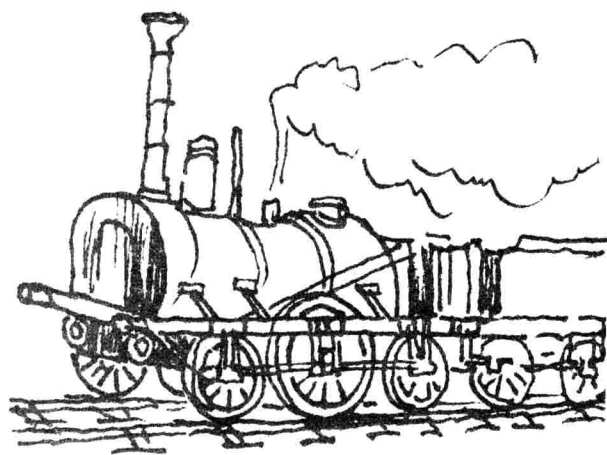
控制论这个词来源于希腊文，原意为驾船术“操舵术”就是掌舵的方法和技术的意。在柏拉图的著作中——，经常用它来表示管理人的艺术。1834年法国物理学家安培写了一篇论述科学哲理的文章。他在研究科学分类时亦按古例把管理国家的科学称为控制论。维纳受安培等人启发，把他创立的这门新的综合性学科命名为“控制论”。在这以前，人们已对这个词赋予三种理解：一是控制机器的调节器；二是控制机器的人；三是管理人的社会。维纳的“控制论”打破了机器、生命、社会的界限，揭示出其中存在着的共同的控制和通讯的一般规律，对当时学术界是极大震动。经过三十多年的发展，控制论思想已渗透到各个学科、各个领域，有人说在科学史上就其意义来说，可以与哥白尼的日心说、达尔文进化论和爱因斯坦的相对论相比美。苏联学者茹科夫称：控制论和系统论是继相对论和量子力学之后，又一次“彻底地改变了世界的科学图景和当代科学的思维方式”。



二、控制论思想的萌芽

控制论的思想发展大致经过三个时期，这就是萌芽时期、创立时期、发展时期。

从古代开始，人们从各自的生产实践中，时而迸发出一些控制论思想的火花，那时这种思想往往是与具体的装置直观地联系在一起，只是一种萌芽。例如古希腊的泰斯比斯制造了一个小力钟，利用浮阀的反馈来调节水流。公元9世纪，阿拉伯的柏鲁缪斯三兄弟写了一本关于浮阀的书，介绍了八种具有浮阀反馈的水力装置。公元17世纪，丹麦工程师德贝尔在从事炼丹术的时候发明了一种温度反馈调节器。我国古代亦是控制论思想萌芽最早的，早在3000多年前就有了



被拉美特利发展成“人即机器”。这显然是机械唯物论的观点，不过这里却提出了一个富有启发的值得讨论的问题。即无生命和生命之间有无共同规律？而莱布尼茨则用单子论来代替笛卡尔的机械观，不过他也是按照时钟模式来考察事物，他把整个世界运动比作是一台自动机，不过是由上帝预先上好的发条有节奏地运动而已。显然这是从一个极端走向唯心主义，但他亦启发人们去寻找共同的控制规律，20世纪，苏联生理学家巴甫洛夫提出了条件反射和反射作用——的自然体概念，他认为自然体的活动服从于某种操作规则。二三十年代，人们对动物组织的闭环反环行为进行了许多研究。

用来自动计时的“铜壶滴漏”装置。这个装置的水位调节是一个参数恒定的控制系统。从三国开始就有记里鼓车和指南车的记载，蒸汽机的发明和应用——，导致蒸汽调节器的发明，这使得控制论思想进入了一个重要时期。

19世纪中麦克斯韦对控制理论有特殊贡献：他已经认识到学科之间渗透的重要性，他把学科之间的系统比作蜜蜂在植物中异花受粉——。所以有人甚至称麦克斯韦为控制论的先驱者。

从历史上看，控制论的思想除来自以上工程控制领域提出的问题以外，同时在生物学领域内对动物，特别是对人体的活动和控制的研究是这一思想的重要来源。早在17世纪笛卡尔就把动物的有目的活动与机器加以类比，得出“动物即机器”的错误结论。后

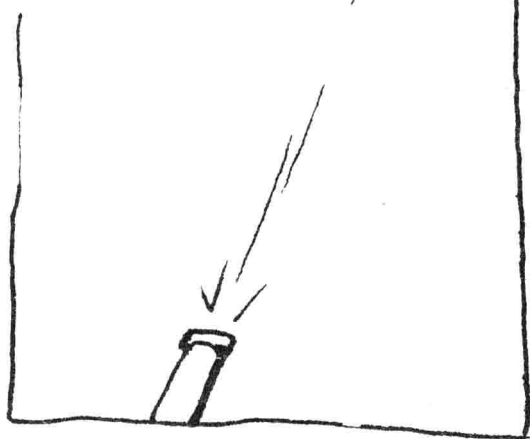




三、控制论的诞生

控制论这门学科真正创立是经过二次大战前后十多年的酝酿，于1948年维纳完成的。它是当时生产发展和战争的需要。有两件事直接导致维纳创立这门新学科。一件就是电子计算机的设计和制造。由于生产和战争的迫切需要，要求突破人脑的局限性，提高计算的速度和可靠性，需要制造计算机。二是自动火炮的研究。例如，当时打靶场要为炮兵制作计算用的火力表，每张表要计算几百条弹道，而一个熟练的计算员用台式计算机每算一条弹道要花20小时，这同当时战争的紧迫需要极不适应，这就要求有高速计算工具。从维纳本人对该学科形成的历史叙述中，我们可以把它的形成大致分为三个阶段：1942年以前是酝酿阶段，1943年到1947年是形成阶段，1948年以后是发展阶段。

我们知道，维纳从1919年研究勒贝格积分时，就已经开始接触到控制论的思想。接着他又研究了随机现象中的布朗运动，以及大批的统计力学问题，找到了吉布斯统计力学为从几率观点来研究随机物理现象的工具。后来正是在这些工作的基础上，维纳批判并改造了吉布斯的古典统计力学，把控制论建立在统计理论的基础上，维纳回顾和总结了自牛顿以来科学思想和科学方法论发展的趋势，发现统计和进化的观点正在渗透到科学的各部门，而控制论所面对的是解决自动控制系统的问题，这个系统的特点是要根据周围环境的某些变化来决定和调整自己的运动，这是牛顿力学的传统方法所无法解决的。建立自动控制理论就必须突破传统的力学方法，摆脱拉普拉斯的机械决定论，所以维纳说：“我接触控制论思想要追溯到1919年。”



从20年代末到30年代，这十多年中，由于他在麻省理工学院工作，接触到许多工程学问题，尤其是与万尼伐·布希合作写了关于电工运算方法的书，还一起在微分分析器上研究运算微积，引起了他对机器运算的兴趣。他作出了用光学方法获得付里叶换算器的设计，进而产生了用数学计算机代替模拟计算机的观念。1940年他提出了数字电子计算机设计的五点建议和实施计划，可惜当时布希认为这是未来才考虑的事而没有付诸实施。可贵的是他在研究计算机时，认识到数字计算机与人脑有相似之处，神经系统中的刺激似乎是具有有和无的性质，即有二个数字的可能，而且这种二值运算可以运用逻辑代数来实现。

另一件是当时火炮对飞机的命中率太低——，3000发炮才能打下一架飞机。战争期间，维纳参加了火炮自动控制的研制工作，这是继续研究计算机代替人实现复杂计算后，又一项用于特殊功能的机械电学