

中国科学院生物物理研究所所史丛书



生物的启示

——仿生学四十年研究纪实

中国科学院生物物理研究所 编

 科学出版社
www.sciencep.com

中国科学院生物物理研究所所史丛书

生物的启示

——仿生学四十年研究纪实

中国科学院生物物理研究所 编

科学出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

生物的启示：仿生学四十年研究纪实/中国科学院生物物理研究所编.
—北京：科学出版社，2008

(中国科学院生物物理研究所史丛书)

ISBN 978-7-03-022890-1

I. 生… II. 中… III. 视觉-仿生学-研究 IV. Q811

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 134684 号

责任编辑：王 建 侯俊琳 / 责任校对：张 琪

责任印制：钱玉芬 / 封面设计：陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 9 月第 一 版 开本：B5 (720×1000)

2008 年 9 月第一次印刷 印张：17 插页：4

印数：1—3 000 字数：335 000

定价：35.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换〈双青〉)

大千生物 奥秘无穷
探索思考 造福人类

贝时璋
一九九九年十月



图1 贝时璋院士为有关仿生学的科普书籍所写的题词

视觉信息加工研究室

图2 贝时璋院士为研究室名题字

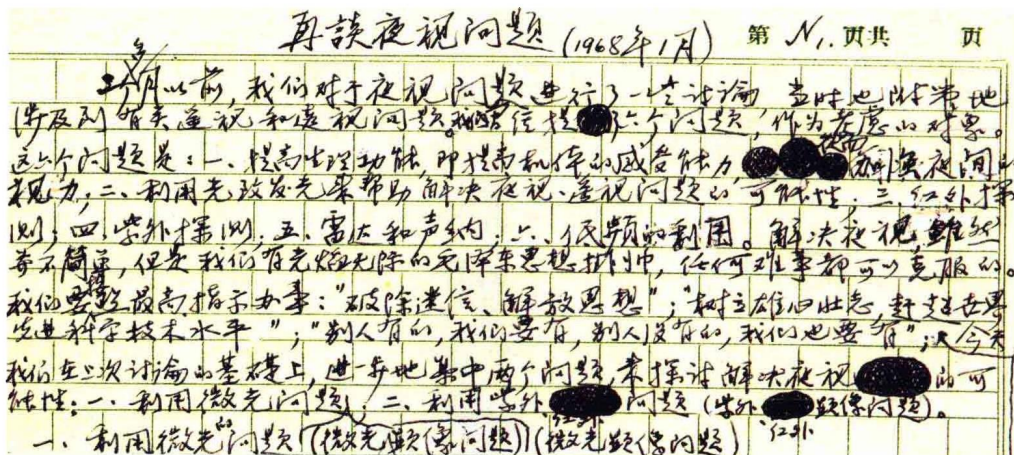


图3 贝时璋所长关于夜视问题的谈话稿手迹 (1968)



图4 105岁的贝时璋院士与本书编委会等人合影 (2008)

《中国科学院生物物理研究所 所史丛书》总编审委员会

顾 问 贝时璋 梁栋材 杨福愉 郭爱克 王志珍
 常文瑞 王大成 饶子和 陈 霖 王志新
 陈润生

主 任 委 员 徐 涛

副主任委员 杨星科

委 员 赫荣乔 龚为民

办 公 室 江丕栋 蔡燕红

本书编委会

主 编 汪云九 郑竺英

编 委 （按姓氏笔画排列）

王谷岩 吕克定 江丕栋 金贵昌 蔡燕红

序

当今世界上存在的千万种生物，都是经过亿万年的适应、进化、发展而来的。在自然界的生存竞争中，各自发展出独特的生存形态与方式。当观察鹰击长空、鱼翔浅底时，人们会由衷地感叹大自然创造的万物的神奇，产生出美好的遐想和模仿的冲动。最初，人们发现锋利的茅草叶子会割破手指，便模仿其锯齿型结构，造出木工锯，而这还只是从形态上的模仿。后来，人们模仿鸟的翅膀制造扑翼滑翔机，但是这种原始的模仿屡试屡败。于是进行深入研究，发现了鸟翅翼形的空气动力学原理，人类才进入飞行时代。这些事例说明，外观形态的机械模仿，还只是简单仿生结构。仿生功能还需要进行深入的研究，搞清原理，认知规律，然后用工程技术方法加以实现。大自然永远是我们的老师，鸟类的自由飞翔，启发了人类创造飞行器。但是迄今为止，用现代的空气动力学原理和机电机构还不能创造出像鸟类和昆虫那样轻巧、灵活和节能的飞行器。

进入信息化时代，人们把电子计算机称为电脑，把自动化设备称为机器人。实际上，计算机与人脑有许多原则差别，自动化设备与人体也有着根本差异。2008年 *Science* 上有一期“Robot”专刊，其中有两篇文章专门谈到动物及其大脑在结构和功能上对制造更完美的机器人的启示。其中一篇是 Edelman 所写，他因免疫学上的贡献曾获 1972 年诺贝尔奖，获奖后转而研究神经系统，近年来对脑的意识问题很感兴趣，出版了许多著作。他手下有一帮能干的年轻人，把他的设想用电子硬件实现，设计出 Darwin 机器人，至今已改进到 Darwin X 号，能自主地学习，仿现人脑中海马的作用，显示出模仿人类神经系统若干功能的前景。文章题目是 Learning in and from brain-based devices。大自然是我们人类的老师，它给我们启发、灵感和示范。

大自然中可以模仿和学习的东西实在太多了，但是由于生物系统的多样性和复杂性，从技术上模仿又难度很大，20 世纪 60 年代初，生物科学和技术科学都取得了长足的进步后，才诞生了一门崭新的学科——仿生学。国际和国内，近几年在力学和结构仿生、仿生建筑结构、仿生的船舶造型、仿生红外探测、仿昆虫微型飞行器，甚至纳米尺度上的仿生微系统方面，都已有工程应用和研究探索工作在进行。我在 2003 年关于仿生学的科学意义与前沿的香山会议上邀请国内专





生物的启示——仿生学四十年研究纪实

家研讨了仿生学的进展和美好的未来，就是希望重新引发科技界向自然学习，启示和激励原始技术创新。

由我国著名学者贝时璋先生创建的中国科学院生物物理研究所，一直倡导交叉学科的作用，在国内也是最早从事仿生学研究的单位，1964年就提出视觉仿生学研究方向，并成立一个研究室专门从事这方面的研究。在当时物质条件极其困难的情况下，做出了一些堪与当时国际水平比肩的独特的作品。“文化大革命”后，随着中国科学院科研任务的转型，该实验室及时调整方向，培养人才，在基础研究领域内做出了很好的工作。2005年在此研究室基础上联合研究生院的认知实验室和中国科学院心理所，建立了脑与认知国家重点实验室。我期望这个实验室在探索认知和脑的奥秘上做出新的发现。

生物物理所仿生学研究的发展历程，反映了新中国科技发展的一个侧面和片断，把他们的发展过程总结出来，不仅有利于年轻人了解过去，对生物物理所甚至对中国科学的未来发展也有积极的参考和借鉴意义。

我国目前开展仿生学研究的单位还不多，在某些方面取得了部分进展，但在整体上，与我们的期望还有很大差距。另外，即便是西方发达国家的最新成果，与真实的生物功能相比，在精巧、节能、适应性等方面也有重大差别。特别是大自然进化的最高产物（神经系统和脑）的模仿方面，可以说仅刚刚开始。当今中国正在起飞奔向现代化，我们应该学习动物与环境适应和谐相处，我们应该学习生物的高效节能，我们的研究工作也应当从大自然中获得更多的启示和灵感，做出无愧于时代要求的创新与突破。人类社会和经济的发展对仿生学提出了更高的要求，也为它的发展提供了更多更好的保证。我期待着仿生学在我国有更大发展和贡献。

是为序。

2008年4月

目 录

序 / i	路甬祥
-------------	-----

历史回顾

视觉仿生四十年发展历程 / 1	汪云九、郑竺英
贝时璋先生与仿生学 / 22	王谷岩
历任研究室主任简历 / 29	

专题文章

目标运动方向、形状和角速度检测的模型 / 34	汪云九、刘守忠
动物与地震的关系 / 42	蒋锦昌
地震前动物的异常反应 / 58	伊虎英
人的双眼立体视觉 / 66	郑竺英
立体视觉的奥秘与演示 / 79	金贵昌
感受野的矩阵模型和 Gabor 模型 / 88	汪云九
萤眼微光电视 / 97	吴新年
看动不看静的仿生眼——运动目标检测 / 103	陆惠民
昆虫复眼透镜的综合成像 / 112	张少吾、朱 宏
视觉激光防护和夜视仿生 / 117	蔡浩然
夜视仪与人眼的匹配 / 122	徐智敏
人眼的生理光学参数 / 128	杨俭华
紫膜的光电转换 / 135	胡坤生

重大进展

果蝇也会思考 / 142	科学世界
--------------------	------





生物的启示——仿生学四十年研究纪实

以果蝇为模式,探索学习记忆与抉择的脑机制 / 147	郭爱克
果蝇记忆两种图形参数的生物学基础 / 151	基金委 2006 年度报告
眼睛扫视抑制的脑内神经回路被发现 / 152	科学时报
凹耳蛙声通讯研究获得重要进展 / 154	沈钧贤

深情回忆

五十年回眸 / 157	郑竺英
半世纪探索的个人经验——随笔 / 171	汪云九
回忆理论组 / 183	顾凡及
在生物物理研究所理论组的五年 / 187	王湘生
赴邢台地震灾区工作的回忆 / 190	陈涤明
在生物物理所从事仿生学研究的回忆 / 194	张少吾
莱夏特教授与我的早期仿生学研究 / 201	郭爱克
科研工作的回顾 / 203	金贵昌
聂帅批准我们“归队” / 206	王谷岩
为研究所的蓬勃发展添砖加瓦 / 209	刘力

附 录

附录一 大事记 / 213	汪云九等
附录二 出版物 / 237	汪云九
附录三 学术交流 / 241	汪云九等
附录四 学术团体及学术会议 / 253	汪云九等
附录五 人才培养 / 257	金贵昌等
附录六 重大任务及项目 / 260	汪云九等
附录七 人员名录 / 263	金贵昌等
编后记 / 265	

历史回顾

视觉仿生四十年发展历程

仿生学在中国科学院生物物理研究所的发展,从最初的两三个人,到1968年拟建军事仿生学研究所时,已有上百人的规模。改革开放后,在中国科学院生物物理研究所建立了一个开放研究实验室,在此基础上于2005年联合中国科学院心理研究所和中国科学院研究生院认知实验室成立“脑和认知国家重点实验室”,成为我国最高层次的实验室之一,其间经历了40余年的发展过程。我们是这个发展探索过程的最初参与者,选择和确定了仿生学作为我们的研究目标,明确视觉信息加工作为研究方向,直接参与了仿生学在我国进行的最初一些具体研究项目。因为我们在建室初期负责室学术领导,经历了初创阶段的艰辛和迷茫,也体会到科学研究的喜悦和乐趣。1984年后我们先后从室主任的领导岗位上卸任,所以我们在本文中只能采取厚古薄今的方式,主要讲述初创阶段的经历。另外,当时我们都还未入党,一些政治、组织人事方面的考虑,也不甚了了。本书的附录收录了本室发展过程的编年史式的一些素材和其他资料,无需我们在此重复,我们只想作为经历者写出我们的回忆、心得体会,可资借鉴。其他方面的发展情况可参看本书的其他章节。

学科介绍

生物物理学

生物物理学(biophysics)是生命科学与物理科学的交叉边缘学科,按最初的定义,它通过物理学原理和方法研究生命系统,或者研究生命现象的物理本质。意大利解剖学家伽伐尼用电刺激青蛙腿引起收缩,应该说是最早的生物物理研究。但是当时(1780年)还未形成一门学科。直到20世纪中期才在科学文献中出现生物物理学一词。早期生物物理学研究集中在:利用X射线衍射技术分析蛋白质的结构;核酸的结构和功能;光合作用的机理;感官(视、听、触等)的生物物理原理,包括神经传导的膜和离子通道;以及一些相当抽象的研究,如量子生物学、理论生物学。到了21世纪,国际生物物理学研究议题有所发展和深化。因为生物物理学研究需要使用高精尖的仪器设备和大量经费的资助,所以在国际学术界中专门从事生物物理研究的单位和机构不多,从事这项研究的人才素质要求也高,国际会议的人数也不太多,给人的印象是生物物理学是一门象牙塔内的学问。



我国的生物物理学研究散布在一些大学和医学院内，如北京大学、复旦大学、北京医科大学、清华大学等高校都有生物物理专业和教研组。但我国专门从事生物物理学研究的单位只有一个，就是中国科学院的生物物理研究所，它是我国著名学者贝时璋先生于1958年创建的。贝时璋先生是我国学科交叉的倡导者，也重视理论联系实际。生物物理所建所初期有四个研究室和一个理论组。第一研究室从事放射生物学研究，第二研究室从事宇宙生物学研究，这两个研究室都是与当时的国际环境和国民经济的发展密切相关的。第三研究室从事基础性研究（如生物物理化学等），第四研究室称为仪器设备研究室。而理论组的任务是为整所的发展方向作探索性研究。到了21世纪，中国科学院生物物理所发展成为两个国家实验室的支撑单位：一是生物大分子国家实验室；二是脑与认知国家实验室。

（汪云九）

名词解释

仿生学

1960年在美国Ohio州的一个空军基地Wright field，召开了由各方面专家、学者和工程师参加的会议，讨论命名了一个新的学科——仿生学（bionics）。它的宗旨是研究生物的结构和功能等原理，目的在于将这些原理用到工程技术思想中，使工程技术的开发获得新启发。这一想法是有卓识的。因为生物在35亿多年的进化中受到自然界物竞天择、自然淘汰的作用，已在自身结构、性状、生活原理、行为等方面趋于十分完善。这是自然界赋予我们的一种启示。当我们将有意识地去发掘、模仿、应用时，它将成为我们人类科学技术创新的源头，而且不论是在结构上、行为上、原理上，尤其是在控制系统上，将会成为一种难以想象的，影响人类文明进步的重大举措。无怪乎这一学科的出现立即引起世界各国的重视。

日本、苏联等国纷纷出版有关杂志和书籍，我国也有不少报道。中国科学院图书馆、生物物理所资料室及有关同志亦专门为此学科收集、编排了多本资料。我们于20世纪60年代初开始从事仿生学的研究。因为是从生物控制论的课题转入仿生学，因此考虑控制系统偏于大脑多些，而当时对大脑又感到难以下手，只能从脑的外围——视觉系统的信息加工开始。不过在仿生学的这一广阔内容的学科下，亦曾对与军事上有关的水下通讯、航速等问题有过考虑。当时国际上对海豚皮肤能减少行进中的涡流作用有过大量研究。据说有仿造海豚皮肤用在潜水艇上使潜艇航速在同样马力下增快不少的报道。而对于生物间的捕杀逃避也有报道，如蝙蝠用超声寻找飞蛾为食物，而蛾子身上的鳞片有吸收超声的作用，当飞蛾一旦感到受到超声的探索时，会立即滚下地面装死。这些都由红外线照相得知。苍蝇能垂直起飞且能在空中同一位置停留是由于它的一对翅已进化成“平衡棍”，实际上已是一对陀螺仪。这些生物的优越性在军事、国防上的应用例子不胜枚举。

在近50年的发展中，如果在网上查bionics，则可知道许多视听装置已根据人的眼睛和耳朵的功能被开发出来；也有空军飞机和海军军舰是根据鸟和鱼的结构来设计的；并已将神经系统原理渗入到数据处理系统中；正在开发的另一应用是用人的意志控制的实验性假肢。

2003年12月11~13日,中国科学院召开了第220次香山科学会议“仿生学的科学意义与前沿”,各有关研究机构、工程部门、高等院校共有70多位专家参加。会议分设6个中心议题:①仿生结构与力学;②仿生材料与微系统;③仿生功能器件及控制;④分子仿生;⑤人工智能与认知;⑥我国仿生学研究及应用的发展战略。路甬祥院士在会上以题为“仿生学的意义及发展”作了主题评述报告。相信通过这次会议仿生学将为我国科学技术创新提供新思路、新原理和新理论,并为适应我国科学技术源头创新的需要,进一步推动我国经济和社会实现跨越式发展,以积极姿态迎接全球性竞争和挑战。(郑竺英)

一、理论组的成立和发展 (1959 ~ 1964)

1959年秋的一天,贝老(贝时璋先生)让人通知郑竺英去他办公室开会(郑竺英系他过去执教浙江大学生物系时的学生,1955年又考入他门下为研究生)。当时在他办公室已到了所党委书记康子文副所长和两位刚从大学毕业来所工作的年轻人:汪云九(山东大学数学系毕业)和郁贤章同志(北京大学理论物理专业毕业)。贝老兴致勃勃地说明了召开这个会的目的:让我们三个组成一个直属的理论组,为我们研究所的发展站岗放哨当侦察兵,探索生物物理学的生长点。研究内容可以先设定为生物控制论、生物信息论和量子生物学三者之一,由我们三人讨论决定。接着贝老谈到了边缘学科的前途是广阔的……是一片未开垦的处女地,要求我们三人通力合作,共同作战……近50年后的今天,我们深感贝老是一位有战略眼光的科学家,在生物物理所建立的第二年,就派出侦察兵,为日后的长远发展做出部署,并且预感到学科之间的交叉的趋势即将到来。贝老最后任命郑竺英为组长,郑竺英虽年龄比另外两位成员大近一轮(12岁),但毕竟才三十出头,这是她第一次独自领导一个小组,要去从事一个崭新的、从来没有听说过的学科,不免有些胆怯,可又推辞不掉。在贝老的一再鼓励下,只得满怀一腔热忱,硬着头皮把这个任务应承下来。贝老向我们承诺,会经常关注我们的活动。大概因贝老在会上多次引用维纳的思想,我们讨论决定以生物控制论为目标。

学科介绍

控制论

控制论(cybernetics)是美国数学家维纳(Wiener)在其1949年出版的《控制论:或关于在动物和机器中控制和通讯的科学》一书中提出的。维纳是位数学天才,18岁获得哈佛大学数学博士学位。但他对社会上有特殊才能儿童的看法有切身的感受,不主张对他们另眼相看,给予过高的期望。

维纳在第二次世界大战中参加了高射炮瞄准问题的研究,这对他的控制理论思想的产生有重要的影响。第二次世界大战中使用的飞机,速度越来越快,高射炮直接瞄准射击肯



定打不着飞机，所以需要根据飞机的飞行轨道和速度，算出一个提前量然后发射才有可能命中目标。这个过程牵涉到数学中的预测方法，所谓预测就有一个概率的大小问题。维纳把这个实际问题抽象成为一个数学问题，并用最优预测理论加以解决。在这个预测过程中信息是非常重要的一个因素。维纳也是一位兴趣十分广泛的科学家，他对生物学也很有兴趣。他有一个好朋友，墨西哥心脏病专家 Rosenblueth，有一段时期每隔半年到 Rosenblueth 实验室工作。维纳在研究有机体的控制调节过程中发现反馈（feedback）是一个重要概念。所谓反馈就是把效应器与目标之间的差距信息，告诉中央控制器。例如，用手去拿一个杯子，眼睛需要把手的位置与杯子之间的距离不断地向大脑汇报。反馈是任何一个控制调节系统中所必需的环节。维纳还结识许多各行各业的专家，有搞心理学的，有搞电子工程的，有搞数学的，也有搞人工智能的。维纳还组织了一个讨论班，参加者各抒己见，听众可以提出各种的问题，有时讨论十分激烈，受不了这种气氛的人下次不会再来了，但是这个讨论班坚持了相当长时间。

维纳从他个人的已有经历，从他与朋友的学术交往以及讨论班上的争论中，逐渐形成其控制论思想。他认为一个控制或调节系统，不论是机械工程中的，还是生物系统中的，信息的传递和加工十分重要。为了维持系统的稳定性，反馈是一个十分重要的环节。

控制论提出于 20 世纪中叶，它与信息论和系统论被称为系统的三大理论，影响当时的科学观点和技术的发展。钱学森把它称为横向的交叉的学科。仿生学也是一个与控制论在学术观点上有关的学科。

控制论提出后，逐渐分化出许多分支，如工程控制论、生物控制论、社会控制论、经济控制论等。我国著名学者钱学森出版的《工程控制论》一书极大丰富和发展了控制论思想。维纳本人对生物控制论情有独钟，晚年专门从事生物控制论研究，出版若干册书籍。

（汪云九）

建所初期，我所第一研究室是研究放射生物学的，第二研究室是研究宇宙生物学的，这两个室都是由当时国际形势决定的。第三研究室研究生物物理化学，比较基础一点。第四研究室是搞仪器设备的。另外就是理论组了。当时研究所分配给我们一间办公室，我们从后勤部门领来三张桌子，除此以外便一无所有了，没有一分经费，没有实验设备仪器，没有研究题目，更没有研究方向。只有贝老托付给我们的研究任务。对于我们初入研究所的青年人而言，无疑需要白手起家，开拓和探索新的研究方向，而且要为生物物理学的发展当侦察兵，所以必须有高的起点，进入国际科学研究的前沿。命运取决于起点，贝老的要求和任务进入了我们的潜意识，支配和决定了我们日后的科学生涯。

成立理论组以后，我们第一项任务是要去读点书，了解什么叫控制论、为什么它处于当时世界科学的前沿，以及它是如何产生的。维纳所写的《控制论》一书，副标题为“关于在动物和机器中控制和通讯的科学”，是一本首选的书籍。维纳是一位数学神童，18 岁就获得哈佛大学博士学位。他在随机过程的理

论研究方面有杰出贡献，第二次世界大战时参与军事工程，为设计自动高炮而提出过一种最优滤波理论，现在称维纳滤波。同时他悟出控制系统中信息的重要性。《控制论》一书的导言，给我们留下极其深刻的印象，它描述了控制论的创立过程，不同学科之间的交融激荡，以及自由、活跃的学术交流气氛。当时在书店可买到影印本的 W. R. Ashby 的 *An Introduction to Cybernetics* 一书。此书虽是薄薄的一小本，影印在灰黑色的纸上，但内容却非常难于理解，像天书一样。研读以后说不上有多少收益，但查阅了一些文献后，多少知道了一些生物控制论的内容。苏联 Conoleb 认为有三个方向：①信息论；②以工程上的调节原理（servo-mechanism）描述生物的自控系统；③大脑和计算机类比。由于贝老希望我们做一些试验，不要纯粹搞理论研究，故选择第二项，这有助于将生物学定量化。我们选择了用工程上的自动调节原理去描述小白鼠的体温调节系统，希望写出其传递函数。之所以选择体温调节系统是因为输入/输出的变量是温度，便于实时记录。我们去中国科技大学旁听了自动调节原理，但要实际用其去描述一个生物的自控系统还有许多不清楚的地方，于是到自动化所请教童世璜先生，也请自动化所的涂序彦同志来我们所普及自动调节系统等知识。我们想写出体温调节系统的传递函数需要用频率特征的方法，当时在所查到的文献中，最让我们信服的是美国 Lawrance Stark 所进行的瞳孔对光的调节系统的传递函数实验。他的实验和分析堪称当时的典范。于是将他的文章一句句翻译下来，希望能照样模仿。其实即便是照样，也是非常难于全部理解，因为毕竟基础不够。不过我们是一定要照此做一做的。在一无所有的情况下，要真的动手，就得白手起家了。汪云九到上海找到半导体点温计厂订购了点温计以及实时的记录仪。这种工业用的连续记录仪可以把输入/输出的温度实时地记录下来。我们还设计了一个两边开口的双层玻璃管，中间夹层水流可以循环，水温可以控制，将直肠内插入点温计的小白鼠送进玻璃套管内。在这个实验设计中水温即环境温度是输入的变数，输出是小白鼠直肠内的温度，输入/输出的变量都可以记录下来。问题又来了，频率特征的方法要求系统工作在线性区，所以我们首先要找出小白鼠体温调节的线性区。经过多次实验发现环境温度在 $28 \sim 32^{\circ}\text{C}$ 是它的线性工作区。然后，自动调节原理告诉我们，求一个系统频率特性时输入应为正弦变化的，而我们只有一个恒温水浴，它泵出的水温难以成为正弦式的变化，幸而自动化所童世璜先生说只要是周期性的即可。汪云九和赵冠美又找到一本书，可从各种波形换算成正弦波的公式。这样我们就将恒稳水浴的温度，改为三角波式的。用人为方法调节它的温度，打开电路，将水加温，当看到自动记录仪上水温缓缓上升到 32°C 时，则即刻关闭电路，让水浴加入冷水，这样水温就又缓缓下降到 28°C ，每小时变换几次。一个实验要做两个小时左右。我们排了值班表轮流做实验，而对于实验人员来说每做



一次实验都是非常辛苦的。数学专业毕业的汪云九，第一次动手做上生物学实验，使他体会到实验的艰辛。我们这样一直做了两三年时间。我们不仅求得正常情况下小白鼠体温调节的频率特性，还将一批养在室温下，一批养在低温下经过冷适应的两批小白鼠，进行了比较研究，发现它们有显著的差别，也看到了冷适应过的小白鼠的调节比未经过适应的小白鼠要优越。

名词解释

瞳孔对光调节

人的瞳孔大小随环境光照强度而改变，白天瞳孔缩小，黄昏则放大。猫的瞳孔在白天缩成一条窄缝。瞳孔大小是植物性神经控制下的自动调节过程，一般讲不受人主观意识的控制，因此是生物控制论研究的一个好题目。L. Stark 最先对它进行了详尽研究，搞清了实现这个调节过程的许多组成环节以及它们的特性，发现瞳孔调节中有许多与工程控制中不同的地方。例如，瞳孔对光线增加的反应速度大于光亮变暗的反应速度。我国科学家孙复川也在这一领域做出许多好的工作。

(汪云九)

名词解释

传递函数

一个系统（或环节）的传递函数，是描述这个系统（或环节）的输入/输出关系的函数。有了这个函数以后，可以在任何一个输入情况下计算出它的输出情况，因而这个函数可以用来描述这个系统（或环节）的特性。对于一个线性系统而言，传递函数可以用它的拉普拉斯变换 $H(s)$ 来表达。那么这个系统（或环节）的输入（它的拉普拉斯变换 $I(s)$ ）和输出（它的拉普拉斯变换 $O(s)$ ）关系，可以用下式简单表达：

$$O(s) \equiv H(s) I(s)$$

(汪云九)

我们还用 X 射线照射小白鼠，发现照射严重损害了小白鼠的体温调节系统。虽然我们使用的描述工程调节系统的方法来描述一个非常复杂的生物体温调节系统得出的传递函数是近似的，也可以说是不完善的，大家还是从这次工作中得到了更为深切的理解。

同时，理论组内在进行这方面工作的另一个小组则是由顾凡及、王湘生、陈传涓、石淑珍所组成的，他们进行的是青蛙肌梭单个神经的传递函数试验。也是从无到有，自力更生的。王湘生同志是医学院毕业的，他去了上海生理所学习，回来就动手制作金属微电极、玻璃微电极、生物电放大器。石淑珍同志装电子管的阴极跟随器以便记录神经脉冲。顾凡及和陈传涓虽是数学出身但也动手剥制神经标本。他们共同协作，终于写出了传递函数。

理论组阶段只能说是我室发展的初期、萌芽阶段，尝试着找一些具体题目来做，这些题目都是生物学中的老问题，只不过我们想从另一个角度，设计实验分析结果。例如，体温调节、感受器特性等都是生理学中老问题，但用黑箱理论，自动调节理论来考虑和设计实验，也取得一些用传统观点无法获得的结果。例

如，饲养在冷环境下的小白鼠，静态调节水平与一般小白鼠没有差别，但是频率特性有显著不同。另外，X 射线照射后的白鼠也能维持正常体温，但对阶跃式环境温度的变化，表现出适应能力显著下降。关于肌梭牵张感受器的试验工作及数学描述，也是国内当时第一个这方面的工作，这些结果发表在国内高级学术刊物《科学通报》上。成对感受器在调节系统中的作用，是一个很好的想法，可以解释生理系统中多种体内稳态的设定值问题。例如，人的体温维持在 37°C 是由什么“设备”给定的？这些问题是很有启发的。我们理论组郑竺英、顾凡及同志给出一个符合情理的解释，并从理论上加以说明。由于当时的国内状况和国际形势，未能与国外同行交流，取得国际学术界的首肯，实在是件遗憾的事。总之，理论组在成立四、五年时间内，白手起家，找到了一些具体课题，动手安装制作实验设备，用全新的观点设计实验，取得一些新的结果，验证了一些新的想法。但是，当时正值困难时期，冬天在实验室内生个煤炉取暖，许多人因营养不良而浮肿，组内成员没有一个出过国，获得过学位。但是，大家却毫无惧色，充满热情和信心，整天讨论的是业务内容，兴趣盎然，通力协作取得一些成果，现在回忆起来是一段难忘的时期。

那时贝老的办公室就在我们实验室的斜对面，他一有空就到我们实验室来看看，谈一谈他的一些想法，看文献的评论和读书心得。这也是对我们的鼓舞和支持。对郑竺英来说相当于继续她研究生学历，对汪云九和郁宪章来说进入了未经招生的研究生学程。当我们的研究工作有了结果，或写出总结草稿，也首先请他审阅提意见。贝老对我们的文稿必作逐字逐句的修改。

二、仿生学的引入和军事仿生所的筹建（1960 ~ 1977）

当时控制论在苏联和民主德国被批判，我们也被社科院拉去听批判，科学院本身强调联系实际，我们又是理论组感到有点压力，所以当我们看了美国在 1960 年于一个空军基地召开了由各种学科人员组成的会议命名了一个新的学科仿生学，它的目标是研究生物中的原理为工程技术提出新的设计思想时，我们心动了，想转入搞仿生学，因为它有明确为实际服务的目的。英文 bionics 一词，最初有人认为是从 biological electronics 取其头尾合并而成，故在文献中译成“生物电子学”，我们感到不甚妥当，认为从学科的宗旨来看，译成仿生学较贴切，从此在国内仿生学一词就通行起来。

仿生学应当说是典型的交叉科学，把生物学与数理科学乃至工程技术连接起来（图 1），符合贝老当初建所的想法。仿生学又有明确的应用目标，符合 20 世纪 60 年代我国的科技政策，所以仿生学在当时迅速发展起来，生物物理所在这