

从实践走向理论： 二战后的自动控制

莎拉·伯格布雷特 (Sarah Bergbreite)

卡内基梅隆大学机械工程系

谢力 译

“小心间隙”——伦敦地铁

在 20 世纪 30 年代，自动控制仍然由工程师主宰。来自不同领域的工程师使用自动控制原理：过程 and 仪表工程师使用控制器调节温度和压力，机械工程师使用调节器控制引擎的转速，电话工程师设计反馈控制器构建线性放大器。尽管自动控制的使用很普遍，但控制工程过程中绝大多数使用的是“试错法”，所涉及的分析有的话也非常之少。A. Ivanoff 在 1933 年指出，“目前，温度自动调节的科学处于一种不正常的状态，在微不足道的理论基础之上建立了一座巨大的实用大厦。”ⁱ 对于许多使用控制器和调节器的行业来说，经济性和实用性要求自动控制学科有一种“足够好”的方法足矣。

如今，自动控制强调数学的严谨性和理论性，而不是 20 世纪 30 年代的实践动手、面向应用的方法。例如，随便一本本科教材要求学生具备拉普拉斯变换、建模和应用微分方程研究动态响应、矩阵代数这些以前的知识——所有这些都是相对先进的数学课程。ⁱⁱ 虽然如何将论文界定为理

论性或应用性仍不明晰，但在 2004 年美国控制会议上提交的常规（非邀请）论文中，只有约 35% 是应用/基于硬件的。ⁱⁱⁱ 学术界/工业领域的另一个极端是，当自动控制用于工业时，新发展的理论罕有使用。超过 90% 的工业控制实践使用最初出现于 1922 年的比例-积分-导数（PID）控制器。^{iv}

到了 20 世纪 60 年代初，控制工程师已经开始认识到一种转变：从以前以实践为目的的学科，转变为抽象、以理论为导向的学科。这一现象甚至被命名为“鸿沟”（The Gap）。作为支持鸿沟存在的证据，IRE 自动控制汇刊的编辑 George Axelby 由计算发现，在 1956 年至 1961 年汇刊的前六年中，200 篇已发表论文中的 57% 可以被归类为“高度理论性”。^v 而从 1959 年开始到 1961 年，Axelby 将 80% 的论文归类为“高度理论性”论文。到了 1965 年，Axelby 为此单独撰写了一篇社论，来描述“鸿沟”。而在 1964 年，一次关于“为理论与实践之间的鸿沟架桥”的特别会议在纽约召开。^{vi, vii}

然而，关于这个“鸿沟”是如何形成、何时形成以及为什么形成的，仍然存在疑问。与任何工程学科一样，学科理论家和实践者之间的协同作用对于该学科理论和实践两方面的发展至关重要。自动控制从一个实验性的学科转变到一个高度理论性的学科，根源有三：二战期间发展起来的研究机构，不久后自动控制作为一门学术学科的形成，以及解决日益复杂问题的新工具的发展。

美国国防研究委员会（NDRC）及其继任者，科学研究与发展办公室（OSRD），召集了20世纪30年代研究自动控制的团体。每个团体以前已经发展了自己的、与特定应用捆绑的专业词汇用语和理论，然而战争带来的思想汇聚、融合与统一揭示了反馈控制的基本理论。战后，当学术界倾心于自动控制时，这些理论从军事和工业最初的应用中抽象出来，这使得新见解更容易分享和发展。同时，工程师们被传授以更多的数学和科学知识，以便在更基础的层面上理解和检验概念。此外，学术界对创新性和严谨性的要求，以及新的复杂应用领域，为自动控制所要解决的问题带来了极大的复杂性。为了应对新出现的复杂性，建模和使用模拟、数字计算机仿真带来的抽象化起到了决定性作用。这看似简单的事件进程，不仅决定了“鸿沟”如何形成，何时形成，而且也决定了为什么理论在一个以前的实践学科中占据了如此突出的地位。

战前控制活动

在第二次世界大战之前，自动控制的发展分散在若干不同的学科里。Stuart Bennett和David Mindell已经深入描述了这一时期的自动控制发展状况，并且他们的研究深入探讨了围绕着努力解决当时战前自动控制问题的相关环境，这些问题

在这段时间塑造了这个领域。^{viii}关注工业的过程控制作为其中的一个问题出现了，进而自动控制被用于以最低的成本，创造最高质量的产品。与此同时，反馈放大器被开发以来，通过保真和廉价地放大沿着电话线传输的语音信号，反馈放大器使得长途电话网络得以实际应用。与上述这些其他发展并行，伺服机构是从麻省理工学院的模拟计算项目发展出来的，它可以通过功率放大器跟踪小信号。每一个领域都提供了不同文化、不同术语和用于解决该领域问题的不同工具。似乎解决这些问题的工程师之间几乎没什么沟通，甚至相互之间几乎不知道其他地方正在进行类似的工作。不同研究团体之间的这种隔离阻碍了相互讨论，而这种讨论对于超越机构的简单设计，进而迈向自动控制理论基础是必要的。

过程控制

过程工业（化工、五金、食品热加工等）在20世纪初为了以较低的成本改善它们的产品质量，开始投资自动控制器。温度控制是许多行业里一个常用的典型例子。例如，化学工业可能希望将反应维持在特定的温度（ $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ）。在自动控制器出现之前，可能会有人在观察温度计的同时，调节其中一种反应物的流速。假设可以通过保持温度在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 范围内来改善反应，但是人类操作员可能无法做出足够快的反应。然而，一个自动控制器既能保持这个温度，又能节省人工操作的成本。

为过程控制行业开发的第一代控制器是简单的开/关控制器，它很像恒温器。一旦达到一定的温度，反应物的流动就会被切断。当温度达到另一个给定点时，反应物流动将重新开启。比例控制通过提供连续增益替代二进制跳变，可以改善开/关控制器。操作员可以用一个旋钮来调节反应

物的流量，而不是人为地拨动开关关闭或启动反应物流。如果所需温度和测量温度之间的差异很大，操作员可能会大幅度地转动旋钮。如果差别很小，较大幅度地转动旋钮就可以了。虽然开/关控制很简单，但它往往存在严重的稳定性问题。常常在打开和关闭某个设备期间，会出现系统对温度的小变化进行过度补偿，这将导致剧烈的温度波动。虽然比例控制仍然是直观的，但也被认为有助于解决这个稳定性问题。比例控制器也可能（使系统）变得不稳定，尽管这样的情况发生可能性较小。^{ix}

第二次世界大战前，对比例控制器最终的改进是给控制器增加积分（重置）和导数（速率）项。利用积分项来消除系统的稳态误差。有时所需温度和测量温度之间的小误差不能提供足够的机械动力来移动阀门。积分控制允许误差累积达到一定程度，使得阀门可以被移动并且误差将变为零。通过使用控制器中的误差变化率项，导数控制可实现更快速的控制。

虽说这些控制器通常是专门设计的机构，用于解决眼前急迫的工业问题，但也有少数人在研究这些控制器背后的理论。早在1922年，Nicolas Minorsky在研究船舶海上自动驾驶时就分析了PID控制器三项（比例、积分和导数）的作用。^x虽然不太复杂，但他的分析使用了微分方程来为船舶和控制器动态建模，并提供了一些约束以确保稳定性。当时Minorsky的研究并不广为人知，到了20世纪30年代初，A. Ivanoff也试图为过程控制器，特别为温度调节提供更多的理论基础。^{xi}他为系统稳定性提供了一个用相移和环路增益描述的一般规则，但后来他文章中一些不准确的假设降低了其分析的普适重要性。

虽然有了理论基础，尽管很少，但战前建造的大多数工业应用控制器使用的是一种更具启发

性的开发方法。^{xii}大多数过程控制工程师认为，控制器正在取代人类操作员，因此它需要被设计成在同一位置能完成一个人将要完成的任务。此外，Bennett认为，由于公司之间的激烈竞争以及出版物或由此而来的共享信息的缺乏，理论上的进展很少。过程工业的低利润率也使得基础研究保持在最低水平。^{xiii}在20世纪30年代，过程控制一直是严重偏向追求实践而不是理论。

反馈放大器

过程控制只是反馈控制器生根发芽的一个行业。贝尔实验室和AT&T在试图建设全国性长途电话网时，对反馈控制器发展产生了重大影响。^{xiv}到1915年，在美国东海岸和旧金山之间已经建立了第一条横穿美国的洲际电话线。虽然这本身是一项重大的成就，但这条线路只提供了极小的带宽，3分钟的通话大约为20美元。显然，需要新的技术将长途电话服务转化为商品。

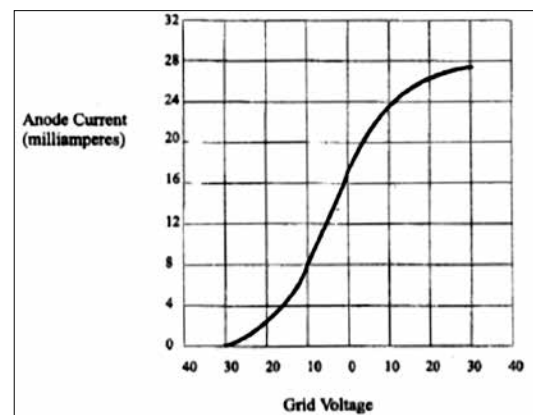


图1 真空管非线性。在线性器件中，阳极电流与栅极电压成正比，这条曲线将成为一条直线^{xv}

第一条洲际电话线需要负载线圈和中继器，以便在传输时，语音信号能维持一定距离。这些器件是必要的，因为任何传输线的固有电阻都会

使信号在通过导线时衰减,这就需要沿着导线使用信号放大器来保持信号。然而,这些放大器有其自身的一系列问题,见图1所示。1915年洲际线路使用的真空管放大器是高度非线性的,这降低了质量,也使得一条线路传输若干不同语音信号的能力下降(需要降低成本)。这种非线性意味着,如果一个人在放大器输入端唱出一个纯C,在输出端的声音会大不相同。为了改进质量并允许在同一线路上发送多个语音信号,需要一个线性放大器。

为了完成这项任务,贝尔实验室系统开发部的Harold Black于1927年研发了第一个负反馈放大器。通过采用器件相对线性的无源反馈网络来减小标准非线性放大器的增益,他可以扩展放大器的线性。虽然还不清楚Black对这一发现的影响有多了解,但他的反馈放大器却成为了长途电话的基本组成部分。^{xvi}然而,尽管线性有了显著的改善,但将输出信号反馈回Black放大器的输入端会产生与过程控制器中出现过的相同的稳定性问题。AT&T和贝尔实验室投入了大量研究人员研究这个问题,其中AT&T研发部的Harry Nyquist很快就设计了一种图形技术来测试特定放大器的设计是否会变得不稳定。Hendrick Bode紧随其后发展了一种图形化设计方法来构建放大器以避免系统不稳定。这两种技术都提供了环路增益和相移测试,类似于Ivanoff在过程控制器中的工作。然而,重要的是要注意,虽然Nyquist和Bode都发展了可普遍用于自动控制的技术,但他们这样做的具体目的只是为了支持真空管放大器,并不一定意识到他们工作的更广泛影响。

伺服机构

在20世纪30年代麻省理工学院的模拟计算机开发中,出现了自动控制的第三个应用。在

Vannevar Bush的网络分析机中,模拟计算机被用来建立更大系统的模型,例如电网。^{xvii}为了解决与这些大型网络相关的数学问题,Bush也开始设计能够计算某些积分的机器。这些机器,如乘积积分仪,通过要求操作者滑动连接到线性电位计上的指针来跟踪给定信号,从而求解积分方程。这项跟踪工作会出现人为错误,而且极其繁琐。为了缓解这个问题,Bush的一个学生Harold Hazen用伺服机构使这个过程自动化。

在他1934年关于伺服机构理论的开创性论文中,Harold Hazen将伺服机构定义为一种装置,其输出元件“……被驱动以使输出和输入指示之间的差异趋于零。”^{xviii}从这个意义上说,伺服机构跟踪或追随一个给定的输入信号。Harzen还把伺服机构描述为一个功率放大器,它的低功率输入可以用来控制高功率输出。虽然这一说法似乎与贝尔实验室的反馈放大器建立了联系,但Harzen并没有原创地建立这种联系。相反,将一个伺服机构描述为功率放大器简单地意味着:如果将一个小旋钮连接到一个取微小电流的电位器上,那么它可以用来控制一个高电流、高力矩电机的位置,如图2所示。

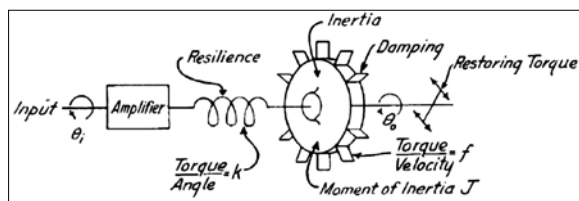


图2 Hazen的通用伺服机构图。输出角 θ_o 跟随输入角 θ_i , θ_o 可以是电机轴的转角,并且输入可以由小旋钮来控制^{xix}

伺服机构成长在一种与过程控制和反馈放大器所处的工业文化截然不同的学术文化中。因此,虽然Harzen主要关注机构本身,但他也花费时间发展了一些相应的理论来支持他的机构。在

《伺服机构理论》一书中，Hazen研究了动态响应和稳定性，这是他实践应用的重要方面。此外，在一篇相对比较全面的文献综述中，Hazen引用了大量关于过程控制和自动驾驶的论文，同时认识到他的工作可能有一个更广阔的前景。^{xx} 尽管如此，他没有发现与Nyquist以前在贝尔实验室发表的论文有联系，这需要一场战争才能使这些研究团体走到一起。

因为用于过程控制器、反馈放大器和伺服机构的硬件和机构是非常不同的，三者之间的联系并不显而易见。然而，这三个应用都试图通过将输出信号反馈给输入端来解决类似的问题。例如，通常设计过程控制器是为了维持某一个测量或参考点，但这样的定点问题只是反馈放大器和伺服机构所完成的信号跟踪问题的一个子集。Hazen在他的理论论文中，将他的工作与以往对陀螺稳定和工业控制器的研究联系起来，但总的来说，这三个独立出现的研究团体之间的交流几乎没有。尽管理论被很大程度地限定在特定的应用或机构中，但每个研究团体都为支持其机构的理论作出了自己的贡献。正因为如此，战前自动控制的工作一直根植于实践而非理论。

二战期间的自动控制

为了超越以往设计自动控制器时使用的直观和简单的技术，在第二次世界大战期间，人们首次发展了自动控制基础理论。总的来说，二战期间是美国科学和工程的变革时期。像曼哈顿计划和麻省理工学院辐射实验室这样的科研规模，远超过了之前科学探究的规模。罗斯福总统在1944年写给Vannevar Bush的一封信里，称赞他“在协调科学研究和将现有科学知识应用于解决战争中最重要技术问题方面，进行了团队合作和协作的独特实验。”^{xxi} 此时，Bush已经接管了战时研

究组织工作。战时研究成果是非凡的，完成这些研究所需的组织和协调也许更不同寻常。

特别是对于自动控制，战争为以前各自为战的研究提供了史无前例的汇聚、融合与统一。战争期间，控制工程师的任务是解决火力控制的具体问题——从陆地或海上击落敌机。战前开发的许多机构在这个项目上得到了进一步的应用。例如，精准控制大型火炮是Hazen伺服机构的一个极好应用，贝尔实验室开发的用于稳定性测试和设计的技术成为镇定这些新型武器的理论的重要组成部分。此外，过程控制工程师提供了之前在模拟仿真和气动元器件方面的专业知识。在描述不同研究团体的融合时，Bissell恰如其分地将其总结为产生了“一次富有成果的思想交融。”^{xxii}

除了简单地在不同的研究团体之间分享想法外，第二次世界大战也为有效地合并这些团体以建立一个完全独立的自动控制学科，提供了动力。此前，该领域缺乏组织机构，但随其他科学探索一起，自动控制被纳入到Bush的国防研究委员会（NDRC）的权力机构。虽然工作在不同应用问题上的团体，以前已经根据自身的应用和应用文化发展了自己的术语，但战争迫使人们为自动控制和统一理论创建了一种可以利用的、新的通用术语体系。为了资助这项早期的自动控制基础研究工作，NDRC和OSRD在战争期间使用了合同系统，它可以确保基础研究不被忽视而有利于自动控制理论的探索。战后，这一合同系统将继续为自动控制工程师提供必要的资金，使他们在未来数年更加注重理论而不是应用。

在美国进入第二次世界大战之前，罗斯福总统于1940年6月27日先发制人地批准成立NDRC，作为一个协调国防研究的组织。该委员会被分为四个部门，以帮助解决迫切的国防问题：A部负责装甲和军械；B部负责炸弹、燃料、毒气和化学；

C部专于通信和运输；而D部致力于雷达、火力控制和仪器。毋庸置疑，正是麻省理工学院辐射实验室的贡献使得D部闻名遐迩，同时火力控制分部，即D-2小组，将为自动控制的发展提供幕后背景。

为了领导D-2，Vannevar Bush很快选择了洛克菲勒基金会的Warren Weaver。^{xxiii}为了充实这个新部门，Weaver随后依次选择了Edward J. Poitras，Thornton C. Fry和Samuel H. Caldwell；Poitras研究过坐落于Pasadena的Palomar望远镜所使用的伺服机构，Fry曾是贝尔实验室的数学部主任，Caldwell领导过麻省理工学院的分析中心，他们每一个人都有很强的数学和理论背景。D-2小组不专注于特定的硬件，而是通过对系统、误差统计分析和模拟电子仿真器的理论研究，立即开始了从数学角度来处理火力的控制问题。^{xxiv}这是历史上第一次以数学和理论来看待和解决火力控制问题，也是自动控制中悠久数学传统的开始。

然而在一年之内，当NDRC发展壮大到需要将其重组为科学研究与发展办公室（OSRD）时，D-2小组就被解散了。先前NDRC的D-2小组变成了现在OSRD的第7部，Warren Weaver加入到应用数学专家小组，而不是直接留在火力控制相关部门内。Harold Hazen接任Weaver，被选为第7部的领导。与D-2成员研究的数学相比，第7部的工作向着更紧迫和更实际的方向发展。^{xxv}随着远离理论关注的转变，第7部的许多新成员与工业有了密切联系，他们是来自Barber Coleman公司的Duncan Stewart、MIT辐射实验室的Ivan A. Getting、Foxboro公司的George Philbrick、麻省理工学院伺服实验室的Gordon Brown、贝尔实验室的Walter Macnair以及福特仪器公司的John D. Tear和John Taplin。^{xxvi}

尽管新的转变朝向更迫切的实际目标，但

是通过为自动控制的学科提供第一个实体组织，第7部或许比D-2将自动控制带向建立一个新的理论基础方面，更具影响力。Foxboro代表过程控制，是过程控制系统的主要经销商，George Philbrick已经建立了最早的电子仿真器来研究过程控制。在战争期间，贝尔实验室的几个成员传播了Bode反馈放大器设计文稿，他们代表了反馈放大器。^{xxvii}通过与麻省理工学院的联系，Hazen、Brown和Poitras对于伺服机构都有丰富的经验。作为一项对自动控制最重要的贡献，第7部将以前独立的研究团体，组织成一个新的统一组织，在这个组织中，交流和讨论最终成为可能。

然而，虽说在第7部的不同团体之间终于可以进行沟通，但这肯定不容易。尽管战时保密，但Mindell认为，D-2小组和第7部在标准化符号和词汇术语方面做了大量工作，以创造“火力控制的一种共同语言”。^{xxviii}一种通用专业术语体系绝对不是仅在战争期间就能被确定下来的，确定它的过程开始于战争之前，一直持续到20世纪50年代。首先行动起来的是美国机械工程师学会（ASME），它在1936年创建了Ed Smith领导下的工业仪器和调节器委员会，开始为过程控制建立专门术语。随着工作的推进，Smith小组在1940年、1944年和1945年发布了临时报告。^{xxix}1946年，ASME进入到了过程控制之外的领域；1946年的一份报告指出，虽然它主要提供处理工业过程控制的术语，但在许多情况下，那些定义“足够宽泛而具有更广泛的应用”。^{xxx}在扩展自动控制语言的另一个重要发展中，英国伺服专门小组（相当于第7部）早在1944年就完成了“控制系统特别是伺服机构所使用的术语表”。^{xxxi}标准化语言对于交流很重要，与此同时它也塑造出那些说这种语言的工程师。在一篇描述自动控制语言演变的文章中，Bissell指出：

战后，已经有工程师熟练地掌握了我们现在所说的“经典控制”和“系统方法”，形成了相对较小的圈子，他们发现许多同事几乎无法理解他们。^{xxxii}

在定义自动控制为一门有别于它多样来源的学科时，开发新的专业词汇被证明是非常重要的。

D-2和第7部的组织，以及开发一种通用语言的努力，都强调现在只有一个问题需要控制工程师解决——准确地将武器对准移动目标。与20世纪20年代和30年代的理论和设备针对特定的应用不同，解决一个单一的问题使D-2小组和第7部不同来源的成员可以采用一种新的方法。Mindell写道：

NDRC的新组织条件使他们能够将火力控制考虑为一般控制问题的一个特殊情况：一个反馈问题、一个稳定性问题和一个使用电气信号在机器上表示现实的问题。^{xxxiii}

作为这种更通用和数学的火控方法的支持者，Weaver后来在战争中承认，“国防研究委员会的某些团体在相当长的一段时间内，热衷于鼓励著书立说，（或者）同时赞助伺服理论数学方法的传播。”^{xxxiv} 尽管重点的转移已远离了D-2数学家最初追求的一般抽象，但第7部并没有完全远离基本理论。事实上，第7部甚至包含了一个单独的火控分析子部门7.5，它与Weaver的应用数学专门小组联系密切。此外，第7部还资助了若干主要侧重于数学和计算的合同。Norbert Wiener和John Bigelow在“预测的一般数学理论”合同资助下，致力于预测飞机未来的位置，以改善射击精度。Stibitz从事建造计算机，以便更准确地表示轨迹，同时在微分分析机方面已有了大量的工作。将自动控制定义为一个一般问题，并发展支持它的一般理论，有助于巩固自动控制新学科赖以建造的基础。

尽管战争期间对自动控制的基本理论进行了研究，但如果没有一个研究资助渠道，这项研究不可能继续下去。与重实践而轻理论一致，战前自动控制的资助主要来自于工业界。Taylor Instruments和Foxboro是参与过程控制和仪表最大的两家公司，并且各自开发了自己的技术。贝尔实验室推进电话线在大陆延伸，决定了对线性放大器的资助，因此Black发现了负反馈放大器。促进Bush和Hazen第一台网络分析机的是研究电网的行为。事实上，当Warren Weaver在洛克菲勒基金会的时候，他相信工程“已足够接近盈利行业来使其支持工程自己。”^{xxxv}

战争期间的一个新发展是NDRC利用合同体系为研究人员提供资金。这一策略与战前政府的基金资助方式大相径庭，后者通常涉及某种形式的采购，因此需要实物结果。虽然总的来说，这些合约人的任务是建造或研究火力系统的一个特定组件，但没有明显硬件要求的项目仍然很常见，特别是在大学，例如麻省理工学院和哥伦比亚大学。Claude Shannon以项目“与火力控制有关的数学研究”获得了基金资助，Norbert Wiener利用D-2小组的合同资金深入研究了数学预测理论。^{xxxvi} 就在战争结束之前，Vannevar Bush向总统呈交了一份报告，主张成立一个新的资助机构，同时引用了由NDRC和OSRD过去资助的成果。他还强调需要资助基础研究，同时他将基础研究定义为“研究……不考虑实际结果”，以及为这个新的奋斗目标，支持大学起到基础性作用。^{xxxvii}

因此，战争为当时研究自动控制的各种团体提供了一个相遇的机会，以讨论新的思想，也提供了自动控制新学科赖以出现的基础。虽然第二次世界大战当然不是一个特定的转折点，但它是一个转折点的开始。NDRC和OSDR支撑的组织包括大多数致力于自动控制的团体，但并非全部。

一个有名的例外是 Sperry 陀螺仪公司，它延续了先前与军队签订的稳定性问题的合同，没有通过 D-2 小组或第 7 部获得任何资金。战争见证了试图合并以前专业词汇用语的努力的开始，并且研究基金的新范式被建立起来。尽管有局限，但共同的理论基础还是聚集了一小群人来发展新的、更一般的理论。组织、专业术语体系、使用数学解决问题以及基金，并没有自动地促使一个突然转变：对理论的强调超过先前对机构和具体应用方法的强调。反倒是，这些因素有助于激励一门新的自动控制学科的出现，在这门学科中，实践与理论的研究比例仍然不清楚。

建立一门学科

在战争期间，作为一门新学科，自动控制的基础被建起，然而战后的努力才有助于真正建立其领域。这些努力的结果是，这门新学科发展成了一个在很大程度上去除了其实验室起源学科的领域。尽管战争期间大学在 D-2 和第 7 部中发挥了很大作用，但战争结束后，他们通过教育新一代科学家工程师和提供基础研究的场所产生了更大的影响。与此同时，战争期间的相互接触和对这一学科知识的广泛扩展导致了不断呼吁建立新学会、新会议和分享观点的新期刊。在这些新组织中所遵循的学术严谨性更加强调理论的精确性，而不是在实际设备上实施理论。

战争期间，D-2 和第 7 部的约 36% 的合同被送到了学术机构。^{xxxviii} 战后，这些机构继续在未来控制工程师的教育以及新的控制工程研究中发挥着主要作用。此外，工程教育同时也经历了自身的革命，特别是它对数学和基础科学的重视。俄亥俄州的一位力学教授 P. W. Ott 将工程教育所必需的数学描述为算术、几何、三角、代数和解析几何，这个例子反映了战前人们对数学教学的普

遍态度。微积分和微分方程被认为很少使用，但有价值。概率、向量分析、傅立叶级数等都要被考虑在产生“递减收益”的课程集合内。^{xxxix} 然而，到 20 世纪 50 年代初，常微分方程作为必修课对于在主要大学接受教育的工程师来说是很常见的。更一般地说，以前的“高级”数学专题，如随机变量、傅立叶级数和大型线性方程组，现在对许多工程学科的学习已经至关重要，包括自动控制。

这种学习更复杂数学的趋势可能部分归因于电气工程师在战争期间对物理学家的嫉妒。Frederick Terman 嫉妒物理学家主宰控制了战时的研究，回到斯坦福后，他立即修改了工程课程设置，将更多科学和数学纳入其中。^{xl} Daniel Abramovitch 和 Gene Franklin 回忆道：

辐射实验室的大部分工作是由物理学家领导的，因为大多数电气工程师的教育不包括这些问题所要求的必要的数学或物理。有人说，也许只是开玩笑，在那个年代的标准美国 EE 课程中， $2\pi f$ 被认为是一个等于 377 的常数；也就是说， f 总是 60 赫兹。^{xli}

电气工程师期望学习通用的数学和科学工具，使他们的职业与电网脱钩，能进入到无线电、通信和自动控制等更新、更令人兴奋的领域。

然而，嫉妒只是需要数学和科学的部分原因。Seely 认为，战后学术工程研究的新趋势也鼓励工程教育向科学原理靠拢，从而远离传统的“实践”教育。^{xlii} 这种学术工程研究在很大程度上受到战后政府基金新角色的影响，而且国家科学基金会甚至在其章程中为资助工程科学基础研究置一席之地。^{xliii} 趋向于需要更多科学和数学还有另一个解释，那就是战后研究生教育的急剧增长。通过将高级论题转移到本科生课堂，大量的研究生影响了本科生的课程，从而研究生能为研

究做更好的准备。^{xlv}

特别是在自动控制方面，在早期的会议、大学校园和教科书中，对什么是向新生介绍这门学科的最佳方法，以便他们为今后的工作做好准备，人们争论得如火如荼。在1957年自动控制职业组（PGAC）非线性控制专题讨论会上的一次公开小组专门讨论中，对话持续不断地回到控制工程教育中的数学议题。如果工程师过于注重数学，解决问题的简单实用方法可能会被忽视。另一方面，如果工程师仍然过于偏向实际，那么由于不够彻底理解手头问题的物理结构，他们的创造力可能会受到限制。^{xlv} 在同一个会议的总结发言阶段，与会者发表了自己的看法：

来自Bower博士……“我认为唯一真正的障碍仍然是我们自己的无知。……工程师……现在意识到他需要大量的数学来充分地处理自动控制问题，那么我赞成让工科学生更容易接近数学的想法。”

来自Holzmann先生……“有时数学类比会成为一种创造性的工具，可能给出解决问题的新途径。但分析并不是取得进展的唯一途径。事实上，对任何过程控制问题，过于精细的分析都有可能达到回报减少的地步。除此之外，人们可能会发现将重点从办公桌转移到车间和实验室更为经济。”

来自West先生……“我觉得非线性控制发展的障碍之一是缺乏足够的数学理论。虽然确实可以使用计算机来预测特定系统的性能，但在有效地利用计算机综合所需的响应之前，需要更好的数学理论。”^{xlvi}

同样的争论也发生在大学校园里。曾是战时第7部成员的Gordon Brown，在20世纪50年代初，担任过麻省理工学院电气工程系主任，他发表了几篇关于电气工程和反馈控制教育的论文。Brown

为麻省理工学院制定了一个新的电气工程课程，它允许电气工程师能够学习“主宰未来技艺的科学”。^{xlvii} 为了使电气工程师远离特定的职业，麻省理工学院的新课程设置着重于数学和科学，而专业课很少，见图3。Brown还给出了关于教育反馈控制工程师的具体任务，他指出：

Table I. Electrical Engineering at MIT, 195-545

Freshman				
Physics.....	Chemistry.....	Mathematics.....	Elective.....	Humanities
Physics.....	Chemistry.....	Mathematics.....	Elective.....	Humanities
Sophomore				
Physics.....	Electric circuits, 6.00	Mathematics.....	Applied.....	Humanities
Physics.....	Electric circuits, 6.01	Mathematics.....	Applied.....	Humanities
Junior				
Electronic circuits 6.02	Fields, materials and components 6.03	Mathematics.....	Thermo.....	Humanities
Applied electronics 6.05	Elec. energy conversion, 6.04	Electives—both out of department		
Senior				
Energy transmission and radiation 6.07	Power modulators, 6.06	Electives—inside or outside department		Humanities
Integration of above courses via free electives influenced by student's aptitudes and interests				
Leads to commencement followed by				
Graduate study and research, SM, SE, ScD		On-the-job training in industry, or self development by the graduate		

Notes: Subjects 6.00 through 6.07 include both classroom and laboratory. Both Junior and Senior subjects are influenced by research of faculty and graduates students.

图3 麻省理工学院新开设的电气工程课程非常重视数学、科学和基础理论^{xlviii}

在反馈控制领域，要取得满意的学术成就，除了接受物理或工程的本科培训，还需要学习数学、物理、化学、测量、通信和电子、伺服机构、能量转换、热力学和计算技术等领域的高等内容。熟悉微分方程的数学、单复变函数、统计学和非线性技术……是课程项目的基础。^{xlix} 作为控制工程教育的领导者，Brown认为控制工程师及通常意义的电气工程师都需要扎实的数学和科学背景，这样才能创造性地思考未来问题。

与此同时，前D-2和第7部的成员们正在出版第一代自动控制教科书，以便将新知识传授给下一代控制工程师。由于战争帮助将先前针对各种

应用的特定工作合并为更广阔的理论基础，战后不久出版的教科书倾向于强调书的通用性，并介绍自动控制的这些新理论方法。例如，在为LeRoy MacColl的《伺服机构的基本理论》一书写的前言里，Warren Weaver称赞了这本书，因为它呈现了数学理论的美。ⁱ另一个例子是辐射实验室丛书之一的《伺服机构理论》，它主要介绍了伺服机构的一般理论，而不是战争期间所做的具体工作。ⁱⁱ但是，并非所有的教科书都指望读者具备学习自动控制所需的数学背景。Ed Smith在其书中也强调了基本理论，他将大约书的一半篇幅作为附录，以此对那些可能的读者提供足够的数学背景。ⁱⁱⁱ

各大学在忙于教育控制工程师去思考自动控制背后的基础理论的同时，也在为这门学科的基础研究营造一个环境。战前，大部分的自动控制研究都是在工业研究实验室进行的，一个有名的例外是麻省理工学院参与开发的伺服机构。如前所述，战争期间发展的新资助方法为支持大学的与特定应用无关的基础研究打开了大门。为了找出这类资助的去向，John Ward于1961年对美国大学进行了调查，以确定自动控制的研究活跃程度。ⁱⁱⁱⁱ如图4所示，问卷调查将研究分为若干子主题，并量化了研究这些主题的研究团体，同时对他们的工作做了理论或应用的大致分类。在一份有说服力的、关于向学术控制理论研究做转变的报告中，三个最活跃的主题是非线性分析、自适应控制和反馈理论，它们在数学和理论上都有坚实的基础。此外，当Ward在1962年2月的一次研讨会上介绍这一问卷调查结果时，许多参会者认为，调查事实上倾向于应用研究，因为“非技术人员或进行‘非重要’研究的学生对这些数据的权重很大。”^{lv}

尽管大学为完成自动控制的基础研究提供了大量的基础设施和人力，但新的组织仍然需要

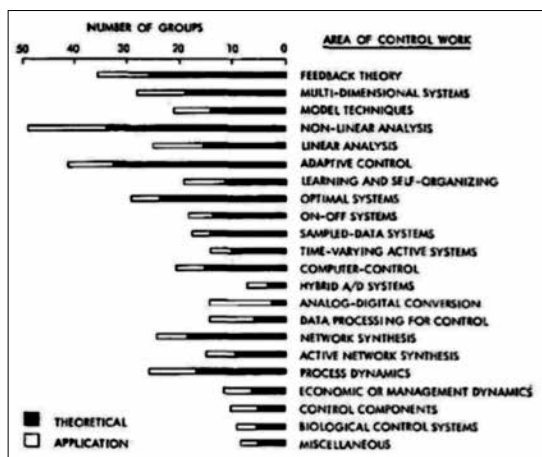


图4 截至1962年的美国大学控制工程研究^{lv}

提供平台来介绍和传播这类研究。战争期间，D-2和第7部通过组织不同领域的自动控制专家完成了这项任务。在民间，美国机械工程师学会（ASME）是第一个通过创建工业仪表和调节器委员会来组织其控制工程师的学会，该委员会于1943年成为ASME的一个部门。同样的趋势也出现在电气工程中，尽管学会结构有点复杂。第二次世界大战后，两个独立的组织涵盖了电气工程的不同主题；它们是无线电工程师学会（IRE）和美国电气工程学会（AIEE）。在AIEE的内部，往重了说，结构复杂，难以理清，不过工业控制器件委员会成立于1944年。^{lv}稍晚，IRE于1951年成立了伺服机构委员会，1952年该委员会更名为反馈控制系统委员会。到1955年，IRE内建立了一个羽翼丰满的自动控制职业组（PGAC），而AIEE直到1961年才成立自动控制技术组，此时两个组织开始酝酿合并。

在组织控制工程师的国际活动中，美国人Rufus Oldenburger和Harold Chestnut于1956年参与建立国际自动控制联合会（IFAC）。^{lvii}IFAC旨在具有与联合国相似的国际代表性，并达成了一项

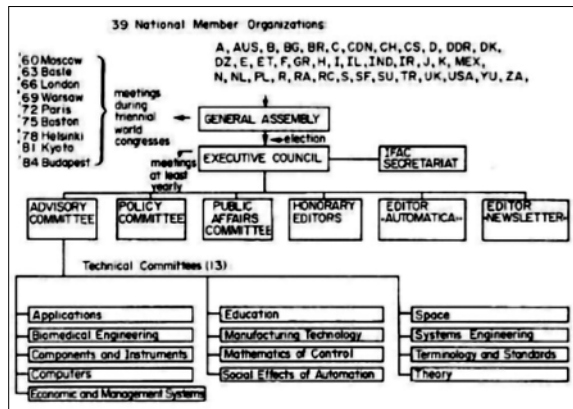


图5 IFAC 组织结构。

由美国人（Chestnut）领导这个组织的协议，该组织于1960年在莫斯科举行了第一次大会。每个参与国都需要一个成员组织，为此美国在1958年成立了美国自动控制委员会。

这些新组织在其成立时，并没有规定理论优先于实践。事实上，图5所示的IFAC初始组织结构表显示它有13个技术委员会，但从名字上看，可以认为只有两个技术委员会：“控制的数学”和“理论”，是基于理论的。同样，这并没有阻止这些组织的成员倾向于理论或应用。Oldenburger回忆说：

……我把IFAC的范围描述得非常广泛。我还进一步设想建立一个非常有利于实践的联合会，并热切地希望自动控制不会像应用力学那样发展，后者不再被应用，而是已经成为一门数学学科。^{lviii}

然而在他的1967年文章里，Oldenburger总结道：

与我预期的相反，IFAC已经持续地越来越致力于控制理论。现在人们倾向于根据数学的优雅来评价论文，而不是根据工业或其他实际需要。我被迫接受了这样一个事实：自动控制已成为一门数学学科。^{lix}

尽管存在各成员的偏好和学会最初的章程，但会议和期刊已被证明在引导自动控制学界远离实践追求方面更有影响力。这些组织的主要目的是通过会议和期刊促进新思想和技术的传播，为其会员提供服务，可是一般来说，这些平台上发表的论文决定了未来提交的论文。一些最早的论文发表在英国会议上，不过美国杰出的控制工程师也参加了会议。战后不久，这些会议仍然发表了大量关于应用自动控制的论文。例如，自动调节器和伺服机构大会于1947年举行，论文分类为杂论、航空应用、电子伺服系统、工业应用、军事应用和海军应用。^{lx}然而，到1951年，在英格兰Cranfield举行的自动和手动控制会议上，明显地出现了转向更多数学方向的小转变。这次会议的主题包括教育问题、一般理论、过程控制、非线性问题、间歇数据作业系统、步进式伺服系统、人类操作员、特殊装置和包括模拟的应用。由于其中许多主题更具数学特征，会议论文集的导言对论文报告中涉及数学提出警告，并在会议论文集中包括了一个简短的数学辅导——“复变量理论的数学记号”。^{lxi}

在美国，早期的会议也倾向于关注自动控制的实际应用，但理论没有被忽视。在1953年，ASME的仪器和调节器部在纽约市举行的ASME年会上，举办了一次频率响应研讨会。^{lxii} 实如其名，本次研讨会的重点是贝尔实验室Bode开发的分析反馈控制系统的技术。这次会议的16篇论文在应用和理论上的分布相对均匀，除此之外还附加了几篇辅导性论文。然而，有趣的是，除了一篇应用文章外，其他所有应用文章都是由行业成员撰写的，而只有一篇理论文章是由一家营利性公司雇佣的工程师完成的。

在电气工程领域，由AIEE反馈控制系统委员会主办的第一次反馈控制系统会议于1951年在

新泽西州Atlantic市举行。虽然这次会议报告的论文从未发表,但1954年举行的第二次会议论文集的前言指出,“反馈控制理论的发展”被讨论过了。^{lxiii}虽然这可能是真的,但第二次会议严重偏向于应用,会议甚至为公司安排了演示,以展示它们的控制相关产品。除了一篇论文外,其他所有论文都来自工业界,唯一的例外来自于Lewis飞行推进实验室(隶属于国家航空咨询委员会)。20世纪50年代初,会议及其组织赞助方仍明显地深深扎根于工业界。

1960年在莫斯科举行的第一次IFAC会议上,自动控制向理论和数学的转变开始变得较明显了。会议提交的论文被分为独立的、据称是地位平等的三个类别——理论、器件和应用。然而,理论论文占据了最终会议论文集的一半,其中包括Rudy Kalman的著名论文“控制系统的一般理论”。Kalman在介绍中说,他期待他的论文能启动“纯粹控制理论的研究……”,人们普遍认为,这篇论文在控制理论的研究与应用的较量上开始了一场革命。^{lxiv}Kalman的论文,以及许多其他在莫斯科会议发表的论文,构成了自动控制研究从实践走向理论的一个非常明显的标志。

在会议开始关注更多的数学问题,而较少关注应用和器件的同时,期刊也经历了同样的争论。在20世纪50年代中期,IRE自动控制汇刊的第一期承诺“将关注简单或复杂的系统组件内部与自动控制相关的抽象或实际的任何主题。”尽管如此承诺,可是第一期只包含了一篇理论论文。^{lxv}第二期里,有四篇理论论文和两篇辅导性文章。这期还包括一篇社论,该社论向读者征询喜欢的理论、实践或教学指导方面论文的比例是多少。^{lxvi}虽然明显地试图将以工业为导向的论文包括在内,但已发表的论文继续发展理论,而很少涉及物理系统。如前所述,汇刊的编辑George Axelby计算

了前六年汇刊发表的“高度理论化”论文的百分比。从1956年到1961年,他将已发表的200篇论文中的57%列为理论类。在第二个三年,即1959年至1961年,80%的论文集中在自动控制的理论方面。^{lxvii}

虽然在学会会议上报告的论文和在学会期刊上发表的论文继续远离实践走向理论,但无明显迹象显示学者们要完全取代新控制学会中的工业成员。不管怎样,在要求和出版更多注重实践的论文方面,工业界的表现肯定是不明显的。当然很可能,工业界成员没那么多时间和动力去发表他们的工作,而学术界填补了空白,这表明论文独创性和精确性这些重要学术特征得到了更多的关注。和其他领域一样,新的发展都建立在先前工作的基础之上,而学会会议和期刊制造了大量早就轻实践重理论的先期工作。

结果,到了20世纪50年代末,教育、研究和由刚刚起步的自动控制学科所产生的早期知识体系,明显地大力强调理论而不是实践,数学而不是应用研究。快速变化的大学课程培养了有较深数学和科学背景的工程师,其中大多数工程师留在学校,这些人创造了一个有利于做更多基础研究的环境。最重要的是,为组织这些研究人员而发展起来的新学会,开始制造出大批忽视应用和实施,而偏好理论进步的作品。在第一次IFAC会议之后的20世纪60年代初,这个“鸿沟”已经开始变得明晰可见了。

行业新工具

虽然学术界已经将自动控制建立为一门理论学科,这不同于它作为应用工程科学的起源,但取得理论上的突破并不容易。为了继续理论上的进步,控制工程师需要开发一套新的数学和计算工具来帮助理论向前发展,而不必等待在真实系统上测试新的理论。例如,人们不会期待导弹控

制理论的新发现，在其他人改善该理论以建立更好的控制器之前，需要先在导弹上进行测试。处理和测试更复杂的问题如导弹控制，需要有能力通过建模和系统辨识来抽象问题，以使问题更易于操纵。作为应对测试和复杂性的另一种方法，模拟和数字计算机与战后自动控制器同时发展。这些计算机提供了完美的平台，理论可以不需要在所讨论的物理系统上实现就可以轻松、廉价地进行测试。然而，这种抽象往往趋于推进理论与系统实现的分离，从而进一步加深实践与理论之间的裂痕。

到第二次世界大战结束时，控制工程师已经认识到，自动控制可以从一个比以前的实践操作方法更一般的角度来看待。代替流体流动和电机力矩，问题可以框定为一般动态系统中的信号处理问题。在此发现之前，分析控制系统的技术是高度特定于应用的。例如，过程控制工程师使用特定于其领域的术语和图表；如图6所示的阀门和储罐。即使右边较通用的框图，通过将测量变量绘制为流，仍然参考使用了左边更具体图中的流控制。为了摆脱这些实践做法，战争期间和战后编写的教科书通过使用图7所示的等效电路和方框图去进一步抽象化系统。在以前的通信工程中，等效电路的使用为滤波器的设计提供了一种更为抽象的手段。通过将每个物理器件与表现类似的等效电气部件关联起来，可以使用电路工具（或电路本身）分析系统，这比直接处理较困难的机械模型来得更简单。抽象化甚至可以更进一步，通过数学输入/输出关系，用方框图对每个器件建模。然后通过代数方式，移动和合并方框来简化这些图。

用于分析自动控制系统的语言和图正在将学科从物理系统转移到由一种不断进化的元语言所简单描述的系统。W. H. P. Leslie先生对这一新语言

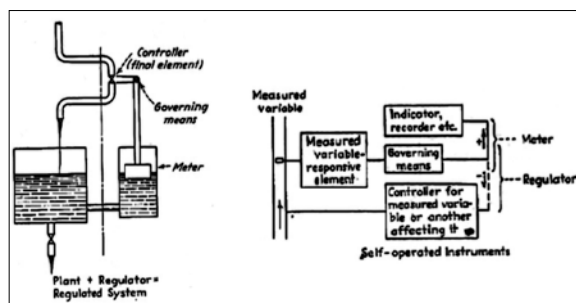


图6 Smith1944年的自动控制教科书所描述的通用调节系统^{lxviii}

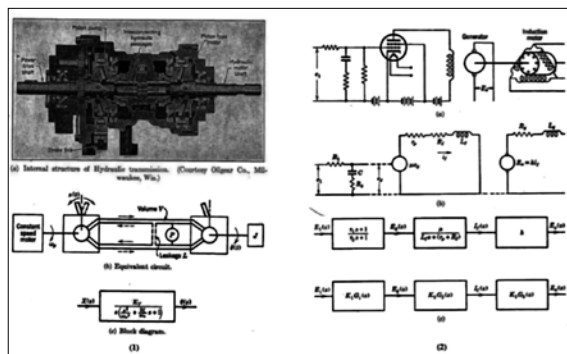


图7 Brown和Campbell1948年书中的等效电路和方框图方法^{lxix}

进行了总结，同时讨论了阅读自动控制不同分支的论文所带来的困难：

当阅读这门学科其他分支的论文时，我不同意某些发言者所说的术语正在给人们带来困难。如果用数学和图的通用语言正确地阐述一篇论文，那么所用的术语一定是显而易见的，并不会造成困难。^{lxx}

方框图和数学抽象在交流中不仅仅提供了简单的帮助。Bissell认为，通过隐藏更复杂的数学，建模使自动控制更容易接近。^{lxxi}然而，也许更重要的是，进入自动控制领域变得更容易，因为现在一个问题可以在纸上解决，而不是在实验室。通过抽象建模，自动控制不再需要物理系统来研究控

制系统的稳定性、优化、鲁棒性、适应性等其他性质的新发展。

通过数学建模，问题被抽象出来，这使得问题远离了物理表示，但故事还没完，现代计算将走完未竟之路。已经有许多历史为计算进化而写，但是对自动控制而言，现代计算起源于19世纪的Charles Babbage和他所构想的一种能够执行用户任何计算要求的“分析机”。^{lxxii} Harvard Mark I首先实现了Babbage的“分析机”构想，然而更重要的实现是二战期间的电子数值积分计算机（ENIAC）。建造ENIAC是与战争期间自动控制并驾齐驱的一个有趣的工作，它通过计算目标轨迹，来帮助解决火力控制问题。与自动控制类似，自动计算将人从环节中移除，以改善准确性、完成时间和成本。

像ENIAC这样的数字计算机最初是在二战期间为执行繁琐的计算而建造的，而模拟计算机作为模拟器在自动控制方面有较早的历史。作为模拟计算机的先驱，George Philbrick在20世纪30年代建造了过程的硬件等效电路，来模拟和测试过程控制器。^{lxxiii} 此外，伺服机构被用于一些最早的模拟计算机中，例如Vannevar Bush的微分分析机，后者后来在战争期间被用于测试火力控制算法。到了20世纪50年代后期，数字计算变得越来越流行，并且发现了除简单计算以外的其他用途。George West主张将数字计算机作为控制系统设计过程中不可或缺的一部分，以降低设计成本。

“无需构建系统硬件并对其进行修改，他（控制工程师）只需要对系统的计算模型进行试验。计算模型的调整通常比实际硬件便宜得多”。^{lxxiv}

选择计算机作为测试新控制系统的简单平台，其好处是显而易见的。利用依据需要可简单或复杂的系统模型，计算机编程使得计算机成为系统的

实现途径，从而使计算机成为理论发展的终点。

因此，诸如建模和计算机等新工具的开发消除了在实际设备上实施的需求，从而扩大了“鸿沟”。在1960年的第一次IFAC会议上，Rudy Kalman在他的论文“控制系统的一般理论”中指出：

……在其方法论中，通信和控制的纯理论与数学非常相似，而不相似于物理学；然而，它不是数学的一个分支，因为目前我们不能（还没有？）在数学模型研究中忽略物理可实现性问题。^{lxxv}

Kalman肯定想象着有那么一天，自动控制的研究与被控制的物理系统完全分离。

尽管在20世纪30年代，自动控制扎实地立足于实践，但到了20世纪60年代初，理论已经成为自动控制的主要研究工作。当然，二战期间参与D-2和第7部的人员首次通过从数学角度去完成他们的火力控制任务，促使了部分改变。然而，大多数对理论的强调是在战后出现的。研究人员从他们的教科书和论文中建立了一个自动控制的知识基础，而这些教科书和论文给出的是理论设计而不是机构。此外，教育工作者还推动了更多数学和科学的学习，以至于学生能够通过更全面地理解基础知识，在研究中走向新的和更具创造性的方向。但这种转变并非没有批评者。事实上，为了迎合大型控制学会中的工业成员，人们已经付出了巨大的努力，同时许多早期研究人员表示，希望该领域依然与它实践中的根保持联系。不幸地是，对于这些批评者中的许多人来说，在开发技术以应对战后正在研究的更复杂的系统上，理论已经变得更加重要了。此外，既然研究人员可以通过模型而不用真实系统来测试理论，建模和计算允许他们完全避开了实验室。的确，这一系列事件使得自动控制出现了“鸿沟”，但

正是研究人员自己影响了他们的学科从实践走向理论。

注释

ⁱ A. Ivanoff, "Theoretical Foundations of the Automatic Regulation of Temperature," *Institute of Fuel—Journal* 7, no. 33 (1934). Quoted in Stuart Bennett, "Development of the PID Controller," *IEEE Control Systems Magazine* 13, no. 6 (1993): 62.

ⁱⁱ Gene F. Franklin, J. David Powell, and Abbas Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, 3rd ed. (Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1994), ix.

ⁱⁱⁱ American Control Conference 2004, (2004, accessed); available from <http://www.mie.uiuc.edu/acc2004/>. This percentage was calculated by counting the conference sessions focusing on applications and not the individual papers themselves. It is interesting that approximately 85% of the invited sessions were hardware or application oriented. I attribute this to a desire to cater more to industrial members at the conference. In contrast, the first IFAC conference (a predecessor to the ACC) held in 1960 presented 144 theory papers, 55 hardware papers, and 79 application papers for approximately 48% hardware/application papers.

^{iv} K. J. Astrom and T. Hagglund, "PID Control," in *The Control Handbook*, ed. W. S. Levine, *The Electrical Engineering Handbook Series* (Boca Raton, Florida: CRC Press, 1996), 198.

^v Harold Chestnut, "Bridging the Gap in Control - Status 1965,"

IEEE Transactions on Automatic Control 10, no. 2 (1965).

^{vi} George Axelby, "The Gap—Form and Future," *IEEE Transactions on Automatic Control* 9, no. 2 (1964).

^{vii} Harold Chestnut, "Bridging the Gap in Control—Status 1965," *IEEE Transactions on Automatic Control* 10, no. 2 (1965).

^{viii} Stuart Bennett, *A History of Control Engineering 1930-1955*, ed. P. J. Antsaklis, D. P. Atherton, and K. Warwick, 47 vols., *IEEE Control Engineering Series*, vol. 47 (London: Peter Peregrinus Ltd, 1993). David A. Mindell, *Between Human and Machine: Feedback, Control, and Computing before Cybernetics* (Baltimore, Maryland: The Johns Hopkins University Press, 2002). Each of these authors has also written several journal articles about this time period although most of this information is also included in their books.

^{ix} Instability from proportional controllers is somewhat less intuitive, but can be partially explained by examining positive feedback similar to when a speaker screeches if too close to the microphone. Instead of subtracting the output signal from the input signal to create an error signal, the two are added. This added signal is amplified and added again and so on. In a more general case, instability results from the output signal's phase shifting 180° so it is being added instead of subtracted. For more information, general feedback control textbooks describe instability in much greater detail. See Franklin, Powell, and Emami-Naeini.

^x Stuart Bennett, "Nicolas Minorsky and the Automatic Steering of Ships," *IEEE Control Systems Magazine* 4, no. 4 (1984). Minorsky's system was actually tested on the New Mexico and while the results were generally successful, the Navy removed the equipment from the ship with the explanation of "...the operating personnel at sea were very definitely and strenuously opposed to automatic steering, and they wished us to have nothing further to do with it...." Bennett, "Nicolas Minorsky and the Automatic Steering of Ships," 13.

^{xi} Ivanoff, described in Bennett, *A History of Control Engineering 1930-1955*, 50-51.

^{xii} This observation is based on general descriptions of process controller technology described in Bennett, *A History of Control Engineering 1930-1955*, 28-69.

^{xiii} Ibid., 61-63.

^{xiv} Much more information on the development of feedback amplifiers and references to Bell Labs may be found in David A. Mindell, "Opening Black's Box: Rethinking Feedback's Myth of Origin," *Technology and Culture* 41, no.3 (2000): 411-412.

^{xv} Ibid.: 417.

^{xvi} Ibid.: 421-426. Black may not have even understood the basic problems of instability that could result from his amplifier.

^{xvii} Much more information on the development of analog computing at MIT may be found in Mindell, *Between Human and Machine: Feedback, Control, and Computing before Cybernetics*, 138-174.

^{xviii} H. L. Hazen, "Theory of Servo-Mechanisms," *Journal of The Franklin Institute* 218, no. 3 (1934). This theory paper was published in conjunction with a separate paper on the design and test of a servomechanism. H. L. Hazen, "Design and Test of High-Performance Servo-Mechanism," *Journal of The Franklin Institute* 218, no. 5 (1934).

^{xix} Hazen, "Theory of Servo-Mechanisms," 317.

^{xx} Ibid.

^{xxi} Vannevar Bush, *Science: The Endless Frontier* (Washington, DC: United States Government Printing Office, 1945), vii.

^{xxii} C. C. Bissell, "Spreading the Word: Aspects of the Evolution of the Language of Measurement and Control," *Measurement and Control* 27, no. 5 (1994): 149.

^{xxiii} Weaver had been a mathematics professor at the University of Wisconsin prior to joining the Rockefeller Foundation. While Mindell describes Weaver as not interested in funding engineering projects, Weaver was heavily involved in the funding of Bush's differential analyzer, a successor to the network analyzer. From Mindell, *Between Human and Machine: Feedback, Control, and Computing before Cybernetics*, 170, 189.

^{xxiv} David A. Mindell, "Engineers, Psychologists, and Administrators: Control Systems Research in Wartime, 1940-45," *IEEE Control Systems Magazine* 15, no. 4 (1995): 92.

^{xxv} From Mindell, *Between Human and Machine: Feedback, Control, and Computing before Cybernetics*, 198. 44% of contracts issued before 1943 went to universities while that number dropped to 18% under Division 7.

^{xxvi} Interestingly, Taplin was an MIT student who was the first

to use Nyquist's methods for a servomechanism in 1937. From Bennett, *A History of Control Engineering 1930-1955*, 90.

^{xxvii} Hendrick W. Bode, *Network Analysis and Feedback Amplifier Design*, The Bell Telephone Laboratories Series (Princeton, New Jersey: D. Van Nostrand Company, Inc., 1945), iii.

^{xxviii} Mindell, *Between Human and Machine: Feedback, Control, and Computing before Cybernetics*, 202.

^{xxix} Bissell.

^{xxx} "Automatic-Control Terms," *Mechanical Engineering* 68, no. 2 (1946). It should be noted that the paper also counted "servo" as a non-standard term for power unit.

^{xxxi} While this glossary was, in fact, a British effort, the commonality of the English language also makes its introduction relevant to control efforts in the United States.

^{xxxii} Bissell: 149.

^{xxxiii} Mindell, *Between Human and Machine: Feedback, Control, and Computing before Cybernetics*, 197.

^{xxxiv} LeRoy A. MacColl, *Fundamental Theory of Servo-mechanisms* (New York: D. Van Nostrand Company, Inc., 1945), xiv.

^{xxxv} Mindell, *Between Human and Machine: Feedback, Control, and Computing before Cybernetics*, 189.

^{xxxvi} Ibid., 328.

^{xxxvii} Bush, 18-19.

^{xxxviii} Mindell, *Between Human and Machine: Feedback, Control, and Computing before Cybernetics*, 203.

^{xxxix} P. W. Ott, "Usefulness of Mathematics to Engineers," *General Electric Review* 38, no. 3 (1935): 139.

^{xl} Ronald Kline, "World War II: A Watershed in Electrical Engineering Education," *IEEE Technology and Society Magazine* 13, no. 2 (1994): 17.

^{xli} Daniel Y. Abramovitch and Gene F. Franklin, "Fifty Years in Control: The Story of the IEEE Control Systems Society," *IEEE Control Systems Magazine* 24, no. 6 (2004): 20. 60 Hz is the frequency used in power lines which was the primary educational track in electrical engineering prior to the 1930s as described in Gordon S. Brown, "Integration Versus Options in Electrical Engineering," *Electrical Engineering* 72, no. 7 (1953).

^{xlii} Bruce Seely, "Research, Engineering, and Science in American Engineering Colleges: 1900-1960," *Technology and Culture* 34,

no. 2 (1993).

^{xliii} Ronald Kline, "The Paradox of Engineering Science"—a Cold War Debated About Education in the U.S., *IEEE Technology and Society Magazine* 19, no. 3 (2000). Of course, "engineering science" was a new concept itself.

^{xliv} Kline, "World War II: A Watershed in Electrical Engineering Education."

^{xlv} "Open Panel Discussion," *IRE Transactions on Automatic Control* 5, no. 1 (1958): 67.

^{xlvi} "Closing Remarks," *IRE Transactions on Automatic Control* 5, no. 1 (1958): 70–71. It should be noted that the author decided that the study of control was not for her after taking her first class in nonlinear control. The math required to understand this is simply extraordinary (for her anyway).

^{xlvii} Gordon S. Brown, "Educating Electrical Engineers to Exploit Science," *Electrical Engineering* 74, no. 2 (1955): 111.

^{xlviii} Brown, "Educating Electrical Engineers to Exploit Science," 112.

^{xlv} Gordon S. Brown, "FeedBack System Engineering—a Challenging Educational Objective," in *Automatic and Manual Control Conference* (Cranfield, England: Butterworths Scientific Publications, 1951), 7.

ⁱ MacColl, xiv-xv.

^{li} Hubert M. James, Nathaniel B. Nichols, and Ralph S. Phillips, *Theory of Servomechanisms*, ed. Louis N. Ridenour, 28 vols., Massachusetts Institute of Technology Radiation Laboratory Series, vol. 25 (New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1947), ix.

^{lii} Ed Sinclair Smith, *Automatic Control Engineering* (New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1944), v.

^{liii} J. Ward, "A Survey of Control Research in U. S. Engineering Schools," *IRE Transactions on Automatic Control* 7, no. 5 (1962). This report contained more interesting information as well including information on annual budgets for controls research as well as the man-power and resulting number of theses involved in the research.

^{liv} *Ibid.*: 129.

^{lv} *Ibid.*: 128.

^{lvi} See Stuart Bennett, "The Emergence of a Discipline: Automatic Control 1940-1960," *Automatica* 12, no. 2 (1976). for more details on AIEE committees involving automatic

control.

^{lvii} Much more information may be found in R. Oldenburger, "IFAC, from Idea to Birth," *Automatica* 5, no. 6 (1969).

^{lviii} *Ibid.*: 699.

^{lix} *Ibid.*: 702.

^{lx} "Proceedings at the Convention on Automatic Regulators and Servo Mechanisms," *The Journal of the Institution of Electrical Engineers, Part IIA* 94, no. 1 (1947).

^{lxi} *Automatic and Manual Control: Papers Contributed to the Conference at Cranfield, 1951*, (London: Butterworths Scientific Publications, 1952), vii.

^{lxii} *Frequency Response Symposium*, (New York City: The American Society of Mechanical Engineers, 1953).

^{lxiii} *The 2nd Feedback Control Systems Conference*, ed. G. S. Axelby (Atlantic City, New Jersey: American Institute of Electrical Engineers, 1954), 4. Italics added by the author.

^{lxiv} R. E. Kalman, "On the General Theory of Control Systems," in *First International Congress of the International Federation of Automatic Control*, ed. J. F. Coales (Moscow: 1960), 481. Kalman goes so far as to compare his paper to Shannon's famous "A mathematical theory of communication" published in 1948. Shannon's paper is regarded as the origins of information theory and the communications revolution. The general agreement referred to here may be found in a number of references including Franklin, Powell, and Emami-Naeini, 13. and Bennett, *A History of Control Engineering 1930-1955*, 203-204.

^{lxv} "Automatic Control and the IRE," *IRE Transactions on Automatic Control* 1, no. 1 (1956).

^{lxvi} "Theory, Practice or Instruction?," *IRE Transactions on Automatic Control* 2, no. 1 (1957).

^{lxvii} Axelby, "Image or Mirage?," 1.

^{lxviii} Smith, 5-6.

^{lxix} Gordon S. Brown and Donald P. Campbell, *Principles of Servomechanisms: Dynamics and Synthesis of Closed-Loop Control Systems* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1948), 112, 137.

^{lxx} "Proceedings at the Convention on Automatic Regulators and Servo Mechanisms."

^{lxxi} C. C. Bissell, "Models and Black Boxes: Mathematics as an Enabling Technology in the History of Communication

and Control Engineering,” *Revue d'Histoire des Sciences* (forthcoming).

^{lxxii} See Martin Campbell-Kelly and William Aspray, *Computer: A History of the Information Machine*, 2nd ed., The Sloan Technology Series (Boulder, Colo.: Westview Press, 2004). and Paul E. Ceruzzi, *A History of Modern Computing*, 2nd ed. (Cambridge, Mass.: The MIT Press, 2003). for a more detailed history of modern computing.

^{lxxiii} Bennett, *A History of Control Engineering 1930-1955*, 55.

^{lxxiv} George P. West, “The Role of Computers in Analysis and Design of Control Systems,” *IRE Transactions on Automatic Control* 5, no. 1 (1958): 65.

^{lxxv} Kalman, 481. It is quite interesting to note George Axelby's recollection of a letter written to him by Rudy Kalman in Abramovitch and Franklin: 34. Kalman congratulated Axelby for writing an editorial exposing “the gap” between theory and practice in automatic control.

参考文献

- [1] The 2nd Feedback Control Systems Conference. ed. G. S. Axelby. Atlantic City, New Jersey: American Institute of Electrical Engineers, 1954.
- [2] Abramovitch, D.Y. and Franklin, G.F. Fifty years in control: The story of the IEEE control systems society. *IEEE Control Systems Magazine*, 2004, 24(6): 19–36.
- [3] American Control Conference 2004. Accessed. Available from <http://www.mie.uiuc.edu/acc2004/>.
- [4] Astrom, K.J. and Hagglund, T. *PID Control*. Control Handbook, ed. W.S. Levine. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1996.
- [5] *Automatic and Manual Control: Papers Contributed to the Conference at Cranfield, 1951*. London: Butterworths Scientific Publications, 1952.
- [6] *Automatic Control and the IRE*. *IRE Transactions on Automatic Control*, 1952, 1(1): 1–2.
- [7] *Automatic–Control Terms*. *Mechanical Engineering* 1946, 68(2): 134–138.
- [8] Axelby, George. Image or Mirage? *IRE Transactions on Automatic Control*, 1962, 7(4): 1.
- [9] The Gap–Form and Future. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1964, 9(2): 125–6.
- [10] Bennett, Stuart. Development of the PID Controller. *IEEE Control Systems Magazine* 1993, 3(6): 58–62, 64–5.
- [11] Bennett, Stuart. The Emergence of a Discipline: Automatic Control 1940–1960. *Automatica*, 1976, 12(2): 113–121.
- [12] Bennett, Stuart. Nicolas Minorsky and the Automatic Steering of Ships. *IEEE Control Systems Magazine*, 1984, 4(4): 10–15.
- [13] Bennett, Stuart. *A History of Control Engineering 1930–1955*. IEE Control Engineering Series, Vol. 47, ed. P. Antsaklis, D.P. Atherton and K. Warwick. Longdon: Peter Peregrinus Ltd, 1993.
- [14] Bissell, C.C. Spreading the Word: Aspects of the Evolution of the Language of Measurement and Control. *Measurement and Control*, 1994, 27(5): 149–155.
- [15] Bissell, C.C. *Models and Black Boxes: Mathematics*

- as an Enabling Technology in the History of Communication and Control Engineering. *Revue d'Histoire des Sciences* (forthcoming).
- [16] Bode, Hendrick.W. *Network Analysis and Feedback Amplifier Design*. The Bell Telephone Laboratories Series. Princeton, New Jersey: D. Van Nostrand Company, Inc., 1945.
- [17] Brown, Gordon.S. *Feed-Back System Engineering—a Challenging Educational Objective*. Automatic and Manual Control Conference, 5–12. Cranfield, England: Butterworths Scientific Publications, 1951.
- [18] Brown, Gordon.S. *Integration Versus Options in Electrical Engineering*. *Electrical Engineering*, 1953, 72(7): 595–597.
- [19] Brown, Gordon.S. *Educating Electrical Engineers to Exploit Science*. *Electrical Engineering*, 1955, 74(2): 110–115.
- [20] Brown, Gordon.S. and Donald P. Campbell. *Principles of Servomechanisms: Dynamics and Synthesis of Closed-Loop Control Systems*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1948.
- [21] Bush, Vannevar. *Science: The Endless Frontier*. Washington, DC: United States Government Printing Office, 1945.
- [22] Campbell–Kelly, Martin and Wiliam Aspray. *Computer: A History of the Information Machine*. 2nd ed. The Sloan Technology Series. Boulder, Colo.: Westview Press, 2004.
- [23] Ceruzzi, Paul E. *A History of Modern Computing*. 2nd ed. Cambridge, Mass.: The MIT Press, 2003.
- [24] Chestnut, Harold. *Bridging the Gap in Control—Status 1965*. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1965, 10(2): 125–126.
- [25] *Closing Remarks*. *IRE Transactions on Automatic Control*, 1958, 5(1): 70–72.
- [26] Franklin, Gene.F., J. David Powell, and Abbas Emani–Naeni. *Feedback Control of Dynamic Systems*. 3rd ed. Reading, Massachusetts: Addison–Wesley Publishing Company, 1994.
- [27] *Frequency Response Symposium*. New York City: The American Society of Mechanical Engineers, 1953.
- [28] Hazen, H.L. *Theory of Servo–Mechanisms*. *Journal of The Franklin Institute*, 1934, 218(3): 279–331.
- [29] Hazen, H.L. *Design and Test of High–Performance Servo–Mechanism*. *Journal of The Franklin Institute*, 1934, 218(5): 543–580.
- [30] Ivanoff, A. *Theoretical Foundations of the Automatic Regulation of Temperature*. *Institute of Fuel—Journal*, 1934, 7(33): 117–130.
- [31] James, Hubert.M., Nathaniel B. Nichols, and Ralph S. Phillips. *Theory of Servomechanisms*. Massachusetts Institute of Technology Radiation Laboratory Series Vol. 25, ed. Louis N. Ridenour. New York: McGraw–Hill Book Company, Inc., 1947.
- [32] Kalman, R.E. *On the General Theory of Control Systems*. *First International Congress of the International Federation of Automatic Control*, ed. J.F. Coales, 1,481–92. Moscow, 1960.
- [33] Kline, Ronald. *World War II: A Watershed in Electrical Engineering Education*. *IEEE Technology and Society Magazine*, 1994, 13(2): 17–23.
- [34] *The Paradox of Engineering Science—a Cold War Debated about Education in the U.S*. *IEEE Technology and Society Magazine*, 2000, 19(3): 19–25.
- [35] MacColl, LeRov A. *Fundamental Theory of Servo–mechanisms*. New York: D. Van Nostrand Company, Inc., 1945.
- [36] Mindell, David A. *Engineers, Psychologists, and Administrators: Control Systems Research in Wartime, 1940–45*. *IEEE Control Systems Magazine*, 1995, 15(4): 91–99.
- [37] Mindell, David A. *Opening Black's Box: Rethinking Feedback's Myth of Origin*. *Technology and Culture*, 2000, 41, no.3: 405–34.
- [38] Mindell, David A. *Human and Machine: Feedback, Control, and Computing before Cybernetics*. Baltimore, Maryland: The Johns Hopkins University Press, 2002.
- [39] Oldenburger, R. *IFAC, from Idea to Birth*. *Automatica*, 1969, 5(6): 697–703.

- [40] Open Panel Discussion. IRE Transactions on Automatic Control, 1958, 5(1): 67–70.
- [41] Ott, P.W. Usefulness of Mathematics to Engineers. General Electric Review, 1935, 38(3): 135–140.
- [42] Proceedings at the Convention on Automatic Regulators and Servo Mechanisms. The Journal of the Institution of Electrical Engineers, Part IIA, 1947, 94(1).
- [43] Seely, Bruce. Research, Engineering, and Science in American Engineering Colleges: 1900–1960. Technology and Culture, 1993, 34(2): 344–386.
- [44] Smith, Ed Sinclair. Automatic Control Engineering. New York: McGraw–Hill Book Company, Inc., 1944.
- [45] Theory, Practice or Instruction? IRE Transactions on Automatic Control, 1957, 2(1): 2.
- [46] Ward, J. A Survey of Control Research in U. S. Engineering Schools. IRE Transactions on Automatic Control, 1962, 7(5): 126–129.
- [47] West, George P. The Role of Computers in Analysis and Design of Control Systems. IRE Transactions on Automatic Control, 1958, 5(1): 65.

华北电力大学控制与计算机工程学院谢力翻译。这篇文章是Bergbreite教授2005年的工作，翻译、投稿经过她的允许。