

工业数学, 数学教学, 教学计划, 数值分析 积分方程

数学教育

⑥
80-88

工业数学

Fried., A 叶其孝^v
Avner Friedman, John Lavery

TB11-4

译者注: 本文主要译自美国科学院院士、明尼苏达大学数学及其应用研究所所长 A. Friedman 和美国科学院研究委员会主任 J. Lavery 写的报告“怎样着手建立大学中的工业数学教学计划”中的第二节, 但为了完全起见, 我们把目录、序言及第一节“引言”的一部分也译出供读者参考。参考文献也只列出与本文有关的文献。

目录¹⁾

序言	iii
1. 引言	1
2. 工业数学	7
A. 什么是工业数学?	7
B. 工业数学需要什么样的技艺?	11
C. 为什么工业中没有更多的数学科学家?	13
3. 工业数学硕士教学计划	15
A. 总的特征	16
B. 课程	17
C. 教师	20
4. 大学生、博士生、博士后教学计划及研究课题	23
A. 大学生教学计划	23
B. 博士生教学计划	24
C. 博士后教学计划	25
D. 研究课题	27
5. 工业数学教学计划的建立	29
A. 在大学内的过程	29

原題: How to start an industrial mathematics program in the university. 译自: *How to start an industrial mathematics program in the university*, SIAM, Philadelphia, 1993.

¹⁾ 此处目录中的页码仍为原文中的页码。——校注。

B. 建立与工业的关系	30
C. 建议	32
D. 结论	32
参考文献	35-73

序言

过去四十年来计算能力的异乎寻常的增强大大增加了数学科学家在自然科学、社会科学、工程和技术的一切领域中作出贡献的机会。然而下列事实看起来似乎是自相矛盾的，即正是在这些日益增长的机会中数学科学界却面临着疲软的就业市场的严重挑战。诸如数学科学家的不断增加的产出、移民、呆滞的经济都是造成这种情形的因素。许多人认为就是这些因素造成了疲软的就业市场。另一些人，一方面同意这些因素起了重要作用，但同时建议数学科学界在掌握社会给予她的机会方面要先行一步，应更多地掌握自身的命运，还应（主动）寻求能造福于社会、科学以及数学科学自身的其他途径。本报告正是以这样的精神来编写的。

本报告建议工业数学教学计划是某些数学系应该考虑的教学计划。我们并不建议应该用工业数学教学计划来代替数学科学任何领域中成功的教学计划。更确切地说，我们的目的在于更多的数学系在数学科学方面早已提供的丰富的教学计划中增加工业数学教学计划。正试图建立新的教学计划或正试图改变其教学计划中的某个重点——因为该教学计划的行将毕业的学生将遇到就业困难——的数学系可能会在多种选择中考虑工业数学教学计划。

本报告主要是根据明尼苏达 (Minnesota) 大学的数学及其应用研究所 (IMA) 的经验写成的。我们强调工业数学教学计划可以考虑的一些方向。但是，它们决不是面向应用和工业教学计划的仅有的可能方向。包括 Clemson 大学、Rensselaer 理工学院、华盛顿 (Washington) 州立大学、纽约州立大学石溪分校 (SUNY-Stony Brook)、Harvey Mudd 学院、纽约州立大学 Potsdam 分校 (SUNY-Potsdam)、北卡 (North Carolina) 州立大学、乔治华盛顿 (George Washington) 大学、乔治亚 (Georgia) 理工学院在内的许多教学计划和我们在本报告中提到的教学计划有相当部分是一致的。在本报告中我们不可能描述这些计划以及另外一些与明尼苏达大学的教学计划有许多共同目标和手段的教学计划，但我们确实愿向想更多地知道应用和工业数学教学计划的读者推荐它们。

本报告的主要读者是数学科学系的系主任，特别是那些正计划建立新的研究生教学计划的数学系的系主任。系主任们将发现当和大学行政官员讨论新的工业数学教学计划时向他们提出本报告的某些信息是很有用的。得益于数学科学在技术和管理实践中的不断增加的应用的工业管理人员也将对本报告发生兴趣。联邦资助机构的管理人，联邦政策决策者，以及政府实验室和事务机构的管理人都会觉得本报告对他们有好处，因为他们和大学数学科学系的关系在某些方面类似于工业和这些数学系的关系。

通过引进工业数学教学计划，数学科学系能向其学生提供在自然科学、社会科学、

工程和技术的一切领域中作出更大和更深刻贡献的巨大的机会。通过引进这样的教学计划，数学系不仅为其学生创造了好得多的就业市场，而且在作为整体的社会中创造了一种信任和自信的气氛，即尽管数学科学界有合法理由考虑她自己关心的问题，但她也作好了为解决更大的问题作出贡献的准备。数学科学界的每一部分（包括对工业数学没有直接兴趣的部分）将从工业数学教学计划和许多其他的数学科学教学计划的并存中得益。在我们的数学科学界中应给予工业数学教学计划愈来愈多的认可和奖赏。

编写像工业数学教学计划这样一个主题广泛的报告需要许多人提供建议和信息。作者要感谢 I. Edward Blook, James Glimm, Richard Herman, Donald Kahn, Gary McDonald, Willard Miller, Jerome Sacks 和 Shmuel Winograd, 感谢他们慷慨地让我们使用他们对工业数学教学计划的洞察以及他们对改进本报告所提的建议。

Avner Friedman 明尼苏达大学数学及其应用研究所所长

John Lavery 美国国家研究委员会数学科学委员会主任

1. 引言

国际水平的研究生和大学生数学科学教育对于我国的科学进步和经济竞争力来说是必不可少的。我们的许多研究生和大学生数学科学教学计划提供了这样的教育，而且通过他们的毕业生，这些教学计划对数学科学、科学和技术作出了实质性的贡献。然而，近年来，甚至最优秀的教学计划的毕业生都正在经受着很差的就业前景的折磨。不断培养出来的数学科学方面的学士、硕士和博士，呆滞的经济，为新的学术职位提供专款的财政拮据，公司规模变小 (Corporate downsizing)，由于冷战结束导致的移民，外国的政治变化等等都是对造成现在这种处境起了作用。

.....

工业过程和工业活动的日益增长的复杂性要求愈来愈多的来自数学科学——主要以数学建模和计算形式——的输入。工业中数学家的工作就是要确保模型是正确的以及所用的方法确实能给出精确的解。每当工业的一种主要范例在发生变化的时候工业中的数学家就要做这样的工作。从纯粹科学（包括数学科学）经由应用科学到工程或系统设计最终到达工业的知识流动的传统范例已不再被认为是最佳的范例了。就确保质量和竞争力而言另一种基于配合、相互作用以及合作共存的活动的范例正变得愈来愈重要了（参见 [1]）。在数学科学一切领域中通晓定量方法的人愈来愈被要求在技术和系统研制中作为主动且平等的伙伴作出贡献。

在对数学科学提出新的需求的同时，在数学科学教育中显露出一种——特别是在研究生水平上的——新的思考。在这种思考中，人们想利用数学科学界的多样性来开发许多（在每种情形下都是）基于当地人才和机会的多种教学计划。并非所有的大学都要有相同的教学计划。数学科学的一切领域都有各自的机会，对于不同的数学系 / 教学

计划而言,侧重数学科学的与它们所服务的对象的需要相协调的方方面面都是合适的。

“美国教育制度的主要长处之一就是其多样性。在任何水平——博士 / 博士后,大学、中学和小学——都不能强加单一的教育范例。不同的教学计划都可能达到同样的目标。这种教育制度鼓励创新以及满足专业和国家需要的当地解决办法的研究。然后这种当地解决办法就会传播开从而改进所有地方的教育。”([2], p.vii)

无论是报告 [2](上述引文就摘自该报告) 还是报告 [1] 都建议讨论工业需要的大学教学计划应在研究生水平上引入。这正是编写本报告的框架。本报告的重点是讨论大学数学系中的工业数学教学计划。(因为本报告中对数学科学的理解比对数学的理解广泛,因而使用工业数学科学教学计划这一术语可能比工业数学教学计划合适。但是,为术语简明起见,我们就只说工业数学教学计划。)我们试图描述我们关于建立和执行工业数学教学计划方面的经验。我们也试图为正要建立新的教学计划的数学系在早已有的数学科学的丰富的大学教学计划之外提供另一种选择。

在本报告中,我们将讨论工业数学教学计划的内容以及如何建立这种教学计划。在第二节中我们将讨论什么是工业数学以及工业数学需要什么样的技艺。第三节重点讨论主要的工业数学教学计划,即硕士教学计划。第四节讲述大学、博士、博士后以及研究水平上的工业数学教学计划。第五节综述前面的讨论并提出如何启动的建议。

2. 工业数学

由于计算机能提供日益廉价的计算、文字处理和通讯,现代制造业和服务业中的一场革命正在发生。有效且及时地利用信息是成功的一个重要因素。对于几乎每个层次的工业活动的信息利用而言,数学科学都是关键的因素。在本节中我们首先考察工业中利用数学的某些方式,然后描述在工业中工作的数学科学家所需要的技艺。

A. 什么是工业数学?

为保持竞争力,工业必须不断改进其产品的质量。工业必须缩短从概念 (concept) 到产品的研制时间。当制造业和服务业的过程和产品的复杂程度增加而且物理实验变得又费钱又费时的时候,对数学 / 统计建模和计算机模拟的要求就会增加。计算机能通过建模和模拟来大大减少所需要做的实验。数学 / 统计模型的创造以及为获得工业问题的解决的计算机模拟算法的研究就是在严格意义下所谓的工业数学科学,或简称为工业数学。

更广泛一点说,工业数学可以看作是具有一组原则的过程,该过程开始于从工业中提出的一个问题。最大的挑战常常是怎样适当地确定研究该问题的框架。第一条原则就是:从一开始到以后所有的工作阶段中工业数学必须是其他科学和工程领域的坚强的、

平等的、能进行交流的伙伴。第二条原则是：问题的分析和求解必须对工业有意义，即必须加深对物理模型的理解，以及必须包括为得到问题的解决或至少部分解决的一种可以完成的计算方法。第三原则是：不允许改变问题。为得到数学上精巧的解决，常常会有有一种改变问题的提法的引诱力。然而，如果这种问题的重新形成大大地改变了问题的物理内容，就应予以拒绝。人们不断要求数学科学通过发展新方法和新思想来面对日益复杂的工业问题的挑战。然而，为使工作圆满工业数学除了要吸收数学科学方面的进展外还必须不停地吸收工业产品或过程中的进展。

有的人可能会觉得这种过程意味着只要解决孤立的工业问题，从而认为这不会促使理论得到发展。一般而言这种看法是不对的。事实上，我们的经验表明，来自完全不同的领域的各种问题确实通过数学科学互相联系起来，而且以一种统一的方式解决这些问题也从总体上对数学科学的进展作出了贡献。作为一种专业的数学科学从工业问题的研究工作中得益匪浅。

调研报告《数学科学·技术·经济竞争力》^[3](NRC, 1991; 邓超凡译, 南开大学出版社, 1992) 讨论了在飞机、半导体、计算机和汽车制造业以及石油和电信工业中所用到的数学和计算科学的诸多重要方法。调研报告 [1] 讨论了数学科学对下列六个当代工业制造领域、六个正在出现的制造技术和五个正在出现的管理实践中的应用。六个当代工业制造领域是：先进材料、制造过程、过程控制、统计质量改进、以成本为准的性能度量 (cost-based performance measures) 和基准基点定位 (benchmarking)。六个正在出现的制造技术是：智能制造、立体建模、快速样机技术、分子制造、生物制造以及就环境而言是有益于健康的制造业。五个正在出现的管理实践是：以操作为基础的性能度量、以计算机为基础的信息管理、柔性制造系统、灵活的资本预算和集成制造。

工业中用到的数学科学的范围是很大的。单就制造业而言，数学科学的几乎每个领域都是需要的。

“制造业的广阔天地涉及从非常具体的 (制成产品的材料) 到非常抽象的 (信息管理和组织结构) 诸多领域。对于数学科学在这些领域中为了取得当前水平的成就所给予工业的帮助的种种方式的认识是很不充分的。统计分析把制造过程和系统中的数据化简为有意义的形式，建模把制造问题化归为可以用算法着手处理的定量关系和方程。用计算机代码编写成的数学算法，也就是软件，表达了一种适合于计算求解的定量关系和方程。”([1], p.11)

说一下一种特殊情形，即在快速样机技术中用到的核心数学和应用数学的众多领域：

“快速样机技术的研制需要对寻求复杂结构建模的最优方法作进一步的数学研究。在设计快速样机的设备时最短路径的算法是重要的。过量的运动不仅浪费能量和时间，还导致精确度的损失并降低可重复性。用任何现有的方法生产的样机在付诸使用前既需要冷却又需要矫正。这些过程可能会产生嵌入的残余力学应力，它会降低最终产品的精度以及使用寿命。最终样机尺寸的精度和结构的完整可通过应用对压力的数学建模和计算机模拟而研制成的退火技术来改进。”([1], p. 35)

关于解决工业,特别是制造业中提出的各种问题中所用的数学科学的方法的其他信息可在 [4] 和六卷本的《工业问题中的数学》(见 [5]) 中找到。[4] 讨论了与制造直接有关的四个课题:智能机器、控制理论和快速样机技术、离散事件系统以及模拟 (simulation, 也译为仿真)、质量控制中的统计方法。六卷《工业问题中的数学》包括基于在 (明尼苏达大学的) 数学及其应用研究所 (IMA) 的工业问题讨论班中来自工业部门的报告人提供的工业问题、建模及求解方法的描述。它的每一章都叙述了一个问题的工业动机、物理现象、数学模型、数值结果以及迄今未解决的问题。其中一些问题已经部分或全部解决了,而另一些仍是对数学家的挑战。

工业数学是对工业作出贡献的数学科学诸多领域的总体。核心数学、应用数学、统计、运筹学以及科学计算都对工业作出了贡献。应用数学的许多领域对工业作出了贡献,它们包括

- 均匀化, 固体和流体建模
- 线性和非线性常微分和偏微分方程
- 数值分析, 有限元方法, 自适应方法
- 积分方程, 逆散射, 反卷积 (deconvolution)
- 常微分和偏微分方程的线性和非线性控制问题, 前馈控制, 模糊逻辑
- 动力系统, 分形 (树枝状增长), 混沌

(这些条目以及下面的条目均取自 [1] 的附录 B.) 但不应把工业数学等同于应用数学, 工业需要核心数学的许多领域:

- 微分几何, 计算几何, 形象化, 虚拟实际, 机器人学, 李代数, 拓扑学, 组合数学
- 离散方程
- 网络理论, 图论, 神经网络

工业对统计的需求是无处不在的:

- 实验设计, Monte Carlo 方法, 多元回归分析
- 随机模型, 马尔柯夫链, 排队论, 离散事件模拟
- 模式匹配, 机器视觉中的变分问题和贝叶斯方法

因为工业的目标不仅是分析和理解现象,而且要控制和设计它们,以达到产量最大或性能最好,并且 / 或者成本最低,因此许多问题需要用最优化和运筹学的方法和技巧来阐明。最后,对科学计算这一领域有着巨大的需求,当前的重点是设计序贯算法的平行算法 (parallel versions of sequential algorithms)。

工业中用到的数学科学不是按诸如拓扑学、微分方程等特定的专业领域来分类的,而是按所提出问题的工业内容来分类的。而且,数学科学并不向大多数工业问题提供完全的解答。解答是通过数学科学和自然科学、社会科学以及技术诸多领域的合作提供的。认识到大多数工业问题的解决需要多学科的人员协力合作是决定工业数学需要什么样的技巧以及大学工业数学教学计划的重点是什么的主要因素。

解决工业数学问题包括几个步骤: (i) 识别实验、设计和工业生产中的问题; (ii) 对这些问题的数学建模; (iii) 对模型的数学分析; (iv) 计算方法和计算机编码的研制;

(v) 计算结果和观察实验结果的对比, 若需要的话回到前三步; (vi) 执行并集成解决方法于生产过程或产品。尽管工业数学家和建模、分析以及计算的一切方面有关, 但主要关心的是与问题有关的数学分析的抽象力量, 这是一项只有他 / 她才有资格去完成的任务。更好的分析有助于更好的理解问题和设计更好的计算方法, 分析结果和实验结果的比较仍然是重要的。但是由于和计算模拟相比实验变得日益昂贵和费时, 因此用数学建模和计算来代替更多的实验的压力在增加。

B. 工业数学需要什么样的技巧?

工业为什么要雇用数学科学家? 工业要找的数学家应具备什么条件? 美国工业与应用数学学会 (SIAM) 正在进行一个名为“工业中的数学”的课题, 该课题对在工业中工作的硕士、博士数学家和他们的经理进行了调查。该课题的第一个报告综述在文 [6] 中, Paul Davis 在该文中指出工业中数学的文化和评价大大不同于学术界中数学的文化和评价。协同工作、交流的技巧, 以及广阔的知识面在工业中得到高度的评价。

工业的目标就是要用已有的或新的数学解决工业问题。当人们从事工业数学时, 人们不必指望最完全的解决。人们必须发展对问题足够好的理解并求得某种实时的解法。一般, 工业雇用一位数学科学家是因为要求他 / 她和工程师及经理们一起在一个多学科的小组中工作。有时工业雇用一位数学科学家是因为经理找不到合格的工程师。这位经理可能会觉得公司能和一位优秀的、心胸开阔的并能很快学会所从事工作的工程诸方面的数学科学家一起工作得很好。

要在工业部门工作, 以下条件基本的:

- 数学科学知识的广度加上数学科学某个领域的深度
- 科学和技术知识面广
- 从实际情形抽象出本质性的数学 / 分析特征, 并将其形成对该实际问题而言是有意义的问题的能力
- 能导致求得准确解法的包括数值方法、数据分析、计算实施在内的计算技巧
- 灵活解决问题的技巧, 更重要的是学习的能力
- 交流的技巧, 特别是形成目标和以经理们及同事们可以理解的方式表达结果的能力
- 和别的科学家、工程师、经理和商界人士在一个小组中一起工作的能力
- 愿意化力气去寻求实施后会对企业有相当影响的解决方法
- 乐于彻底查清建模 / 分析对企业产生什么样的真实影响, 也就是乐于回答问题“我的工作起了什么作用?”

在文 [7] 中 Fan Chung 强调交流技巧的重要性, 说明广度有助于加强深度, 并讲到当计算机能力增加时对不断增长的数学科学输入的巨大需求。人们会看到在工业中工作的数学科学家所需要的技巧不仅不同于学术界的数学家所需要的技巧而且要更多的技巧。

为使工业数学 (研究) 取得成功, 除了要能发现新的工具和技巧外, 还要能应用已有的分析工具和计算技巧。工业中的数学科学家一定要有足够广泛的基础知识, 以致当模

型或解法已有人研究过时有识别的能力。但是，对工业中提出的无数问题而言，研制新的模型和解决方法，或发展已有的模型和解决方法的新的变种方面还有许多工作要做。对由于过多的数据和速度要求而在现时尚难于处理的各种问题的新的解法有巨大的需求。新的数学的发展不仅常常受启发于工业问题；事实上，对于不断改进整个企业的效率和质量而言发展新的数学是必不可少的。

由于要求制造出来的产品具有不断改进的性能和低的修理率和损坏率这样的市场压力的驱动，看来对工业数学的需求会继续增加。计算机可以在做一次物理实验的时间内完成上千次不同实验的模拟。数学建模，如果是准确的话将向设计者就所提出的产品或服务的性能、修理率或损坏率提供许多信息，而若通过顾客或修理点的评估来获得这方面的信息的话那就要花很长的时间或大量的钱。对工业中的数学科学家的挑战就是要和自然科学家、社会科学家、工程师、经理及商界人士一起研制关于材料、制造过程、市场、销售以及产品性能的更完善和更准确的模型。

C. 为什么没有更多的数学家在工业中工作？

过去二十年中工业对建模和模拟的不断增长的需求一直在公开号召数学家与工业科学家、工程师进行合作。但是，正如引言中列举的统计数字表明，到（商业和）工业工作的数学家的人数是下降了而不是增加了。正如引言中所说可以引用的数据并不足以对造成这种情形的原因得出结论。然而，我们觉得重要的是要研究一组前提而不是把问题完全置之不理。

问题的阐明、建模和实施中的技巧——工业中取得成功的关键——常常不属于大学中数学科学训练的内容。忙于要求限期完成课题的工业人士常常不可能有足够的时间来清楚地认识到他们需要从数学科学中吸收什么。确实，当他们雇用数学家时，他们常常就是要数学家去识别这些需要。大学的数学科学家和工业科学家间的合作需要跨越文化障碍。这需要很长的时间投资以便他们学习相互的语言。代之以雇用数学科学家，工业常常雇用具有坚实数学和统计基础的训练有素的科学家和工程师来照料涉及数学科学的问题。工业这样做是因为它觉察到这样的科学家和工程师可能更有能力参与工业数学问题的阐明、建模和实施，而且不那么狭窄地注目于可能与工业无关的问题。

工业数学研究的成果常常是跨学科的，通常不为数学科学研究界所赏识。由于来自数学科学研究界及数学科学系的不愿参加跨学科研究的压力，工业界人士常常感到：虽然数学科学可以起重要作用，但数学科学家本身多多少少置身于外——他们不关心真正的应用。直到最近，大学的许多数学科学家还能不太困难地从政府部门得到从事专业研究的研究资助。因此，他们几乎不鼓励到工业中去参与跨学科的工作和研究。当联邦政府对专业研究的资助减少而对跨学科研究的联邦资助增加时这种情况就要改变了。

近年来我们看到下列现象：过去多年中到商业和工业工作的刚毕业的数学科学的博士人数比现在多。作为数学科学界，我们也许应该问问自己，我们现在培养的各专业的博士的比例是否合适。有如下一种广泛的一致意见：社会需要数学科学的每一个专业。但是数学科学不同专业需要的研究生的比例随着时间的推移是在变化的。预测这种需求，即

使是对数学科学的需求的极粗略的预测,也是不成功的. 仅在几年前,就有一种关于十年中将会发生数学科学家(和其他科学家)短缺的预测,然而并未见发生. 理想一点说,某种前馈控制应当引入到学术体系中来,即要花四到十年的时间来培养学士、硕士和博士. 然而前馈有赖于社会需求和学术需求的模式,众所周知,对这种模式的预测在现时是很不可靠的. 因为前馈不可行,数学科学界就应该退而求其次,用以下方式培养大量的学生:他们在更广阔的就业市场上具有很强的竞争条件,从而失业的风险就较小. 工业,数学科学界与之有传统的联系但近年来很少雇用刚毕业的数学科学博士,应该是这种更广阔就业市场的一部分.

如果数学教学计划培养出来的毕业生没有能力找到工作,那么只有小部分新生能招到数学系来,这就会缩小数学系的规模和活动. 如果我们还想要博士和硕士研究生教学计划并招到学生,我们就必须向这些学生提供能找既满足总体市场需要又能发挥其个人条件的工作所需要的教育和技巧. 正因为如此,我们必须重新考察工业数学教学计划所提供的机会.

参 考 文 献

- [1] Friedman, A., J. Glimm, and J. Lavery, The mathematical and computational sciences in emerging manufacturing technologies and management practices, SIAM, 1992.
- [2] National Research Council (NRC), Educating mathematical scientists: Doctoral study and the post-doctoral experience in the United States, National Academy Press, 1992.
- [3] Glimm, J. ed., Mathematical sciences, technology, and economic competitiveness, National Academy Press, 1991; 中译本, 数学科学·技术·经济竞争力, 邓超凡译, 南开大学出版社, 1992.
- [4] Chandra, J. ed., Scientific issues in intelligent manufacturing, Army Research Office, Research Triangle Park, North Carolina, 1992.
- [5] Friedman, A., Mathematics in industrial problems, volume 1 -6, Springer-Verlag, 1988-1993.
- [6] Davis, P., Some glimpses of mathematics in industry, Notices of AMS, v. 40 (1993), 800-802.
- [7] Chung, F. R. K., Should you prepare differently for a non-academic career?, Notices of AMS, v. 38 (1991), 560.

(叶其孝 译 陆柱家 校)