

钱学森系统思维思想在大学课堂教学中的实践

——试论大学专业基础课程教学中系统思维能力的培养

李国辉, 唐国明, 崔 婧

(国防科技大学 系统工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 在系统工程和管理工程学科人才培养方面, 系统思维能力的培养非常重要。如何把系统思维贯彻到人才培养的具体行动中去值得思考。重温钱学森的系统工程人才培养教育思想, 本文从系统学习的整体观、系统的优化观、系统思维能力训练三个方面, 结合大学课程“信息检索导论”的专业基础知识教学, 探索对学生的系统思维能力进行潜移默化地培养和训练的方法。多样化考评设计和学习效果分析表明学生的系统思维能力得到了有效的提升。

关键词: 钱学森; 系统工程; 系统思维能力; 大学; 专业基础课

中图分类号: G640 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-8874 (2019) 04-0013-07

Application of Qian Xuesen's Thoughts of Systems Thinking in College Classroom Teaching: The Cultivation of Systematic Thinking Ability in Teaching Subject Foundation Requisites

LI Guo-hui, TANG Guo-ming, CUI Jing

(College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The cultivation of systematic thinking ability is of great importance in training talents majoring in systems engineering and management engineering. It is worth thinking about how to apply systematic thinking in talent training. This paper revisits Qian Xuesen's education thoughts on how to cultivate systems engineering talents and explores the way of implicitly developing and training students' systematic thinking ability in the course of a subject foundation requisite, Introduction to Information Retrieval, from three aspects: the holistic view of studying systems, optimization of systems and systematic thinking ability training. Diversified assessment and analysis of learning effects show that students' systematic thinking ability has been effectively promoted.

Key words: Qian Xuesen; systems engineering; systematic thinking ability; college; subject foundation requisite

一、引言

系统工程和管理工程学科群的人才培养特点之一是强调系统思维能力的培养, 系统思维是从

系统及其组件关联的角度看问题, 强调全局优化的观念。钱学森院士作为中国系统工程学科专业的开创者, 他的系统工程教育思想培养了一大批系统工程的理论创新和应用人才, 取得了巨大的人才培养效益和社会主义建设效益^[1]。

近年来国际工程教育中的 CDIO 和 OBE 的理念得到推广,在国际工程教育的能力大纲第 2.3 条中专门列出了“系统思维”能力的培养要求^[2]。在教学和人才培养的研究方面,有提出“点-线-面-体”的培养模式,以提升军校系统工程专业学员系统思维的能力^[3],有从科研和导师的角度提出系统思维与创新能力培养的方法措施,构建创新型的军队研究生培养模式^[4],还有具体的在数字电路技术实验课程^[5]和细胞生物学课堂教学^[6]中探讨如何培养学生的系统思维能力。国外的教学活动侧重于开设专门的系统思维教育和培训课程,例如大学和大学继续教育部门开展系统思维教育和培训的多种类型的课程^[7-8],对系统思维能力进行专门培训。在著作论述方面,刘长林的《中国系统思维》介绍了中国传统哲学、管理学、医学等文化领域的系统思维认识^[9],王世民的《思维力》介绍系统思维的理论 and 具体实践^[10]。在归纳钱学森系统思维的研究方面,早期马育远发表的文章,探讨了钱学森的系统思维思想的产生条件、形成标志和显著特征^[11]。

从以上研究文献看,与创新思维、批判思维、计算思维能力培养等方面的研究和实践比起来,教学过程中的系统思维能力培养方面的研究还比较粗浅,存在的问题包括:系统思维在专业基础课程的教学中如何具体化,如何结合知识的教学去培养学生的系统思维观,以及培养什么样的系统思维。其实,作为中国系统科学与系统工程学科的开创者,钱学森的有关系统思维和系统工程学科的人才培养思路,早就反映在其各阶段发表的许多文章中,这些文章汇编为钱学森《论系统工程》^[12]。现在重温钱学森有关系统辩证观方面的论述,就能找到对上面问题的解决思路。

本文探索在大学课程“信息检索导论”的教学过程中,结合专业基础知识和技能中的问题分析过程和方法,贯穿对学生的系统思维培养和训练。我们认为,学习一门课程,对课程内容的整体把握是非常重要的,有利于建立系统的知识体系。工程和管理学科的学生,需要建立系统的优化观而不仅仅是单项技术的优化。本文首先从钱学森《论系统工程》著作中提炼出有关系统工程和辩证的系统思维思想,然后从教与学的角度,结合本课程的知识体系和技能教学,提出在系统学习的整体观、系统的优化观、系统思维能力训练三个方面,培养学生的系统思维能力。我们还

设计了多样式过程考评模式,合理设置了能够反映系统思维能力水平的测试题目,评价学生的系统思维能力。结果表明,学生的系统思维能力得到有效的提升。

二、系统思维的理解

系统思维涉及系统和系统工程诸多概念。钱学森文集《论系统工程》中对系统和系统工程有过详细的阐述,认为“系统”是“是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成的具有特定功能的有机整体。这些组成部分称为分系统。”“我们把极其复杂的研制对象称为‘系统’,即由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成的具有特定功能的有机整体,而且这个‘系统’本身又是它所从属的一个更大系统的组成部分。”表述了系统、分系统、大系统及其之间的关系。同时深刻地指出,“不能光空谈系统,要有具体分析一个系统的方法,要有一套数学理论,要定量地处理系统内部的关系。”因此,谈“系统”要具体化,例如在信息检索导论课程的教学中,要结合具体的信息检索系统,分析其中的向量和概率检索数学模型,才能让学生深入理解“系统”的具体含义。

钱学森是控制理论方面的专家,谈到系统就少不了反馈的要素。“1940 年以后,由于工程技术的发展,人们对于系统的一个重要属性—信息反馈,逐渐加深了认识。”“任何一个决策都或多或少地牵涉到某一分系统的信息反馈。”

图 1 是我们根据以上论述绘制的一种系统框图。系统本身具有结构和目标,以及空间和时间边界,向外界表示其功能。系统的各个组件是相关的,设计为作为相干组件协调工作,否则它们属于两个或多个不同的系统。开放系统可以被看作是一个有界的转换过程,将输入转换成输出的过程或过程集合,过程由系统的组件来实现。反

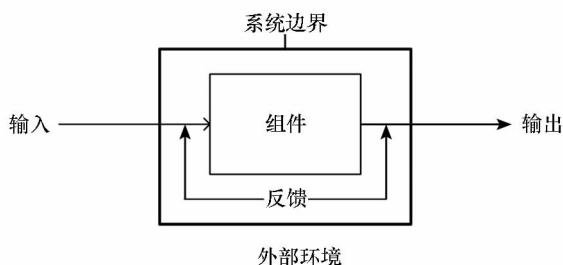


图 1 系统及其输入、输出、反馈和环境

馈可以是正或负反馈。就系统的效用而言, 如果一个系统表现出协同增效作用或涌现行为, 那么其效应就可以超过其各组件效用的总和。

钱学森对“系统工程”学科及其人才培养有过深入的研究, 认为“系统工程是组织管理的技术”, “是处理系统的工程技术”, “是组织管理‘系统’的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法, 是一种对所有‘系统’都具有普遍意义的科学方法。”

早在二十多年前, 钱学森就在其著作中提到信息检索系统与系统工程的关系。例如, 系统工程“也还可以再以专门工作方面来分, 如档案资料的组织管理叫资料库系统工程。”“信息编码、传输、存贮、检索、读出显示系统的组织管理叫信息系统工程。”“信息系统工程特有的专业基础是信息科学和情报科学。”对于大系统理论及其研究对象的解释中, 举例提到“大规模情报自动检索系统”。当时在定义“系统”的六个要素时, 就包含“信息”要素。“人、物资、设备、财、任务和这六个要素, 都要满足一定的制约, 进行经营管理首先要认识这种制约, 并从而能动地求得在制约下的系统的最优运转。”系统要素之间具有约束, 在约束条件下最优化。而系统自动化的“信息处理包括信息加工、传输、存储、检索, 以及各式各样大大小小的决策。因此信息这一因素日益受到重视, 成为经营管理科学研究的中心课题之一。”

钱学森在谈到系统思维和系统思想方法时, 认为“人类在知道系统思想、系统工程之前, 就

已在进行辩证地系统思维了。”把系统思维看成是人类社会自然形成的思维。科学技术“使系统思想方法定量化, 成为一套具有数学理论、能够定量处理系统各组成部分联系关系的科学方法。”并“为定量化系统思想方法的实际应用提供了强有力的计算工具—电子计算机。”“一旦取得了数学表达形式和计算工具, 系统思想方法从一种哲学思维发展成为专门的科学。”

系统思维不同于简单的直接思维。例如, 人口出生率下降与经济发展的关系问题, 简单思维就是放开二胎, 但是效果并不好。促进经济发展不仅仅是增加人口问题, 用时髦的话来讲, 这是一个系统工程问题。这就是系统思维的观点, 对事务进行全面思考, 不只是就事论事。要把想要达到的结果、实现该结果的过程、过程优化以及对未来的影响等一系列问题作为一个整体进行系统研究。

三、系统思维的培养

钱学森的系统思维内涵非常丰富。根据“信息检索导论”课程的特点, 主要从系统学习的整体观、系统的优化观、系统思维能力培养三个方面, 探索在课程教学中培养学生的系统思维能力。

(一) 系统学习的整体观

根据系统思维的整体观, 在课程学习的开始, 首先要让学生对课程建立一个信息检索系统的整体认识。让学生先见到“森林”(整体), 然后看森林中包含哪些“树”(知识点)。图2是在第一

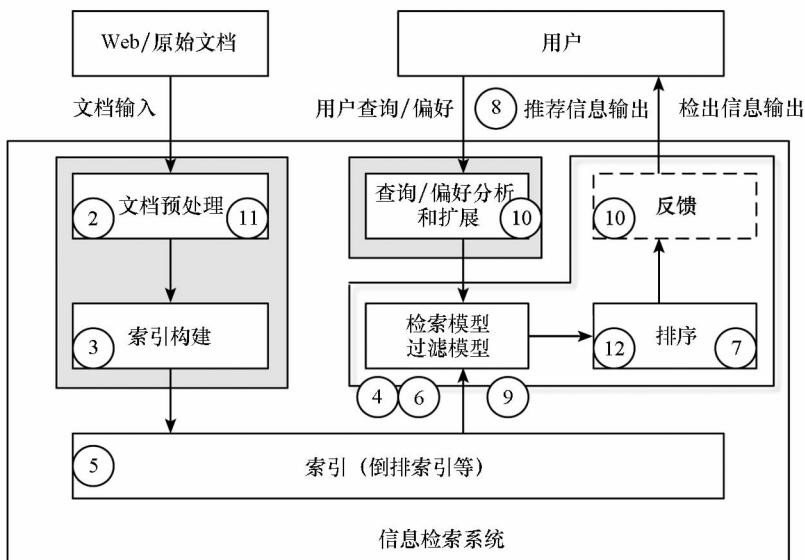


图2 信息检索系统及其主要模块组件

讲就向学生呈现出的信息检索系统框架图。这是教师从系统框架的角度来设计课程内容,让学生一开始就按照自顶向下的思维去认识“信息检索系统”及其组件。

系统由相互关联的组件构成。为了清楚地通过组件方式让学生理解信息检索系统的功能性,我们进一步划分出多个逻辑模块(子系统),如图2中的“文档预处理”和“索引构建”组成的索引构建模块;“查询/偏好分析和扩展”的用户信息需求表示模块;“检索模型、过滤模型”“排序”和“反馈”组成的信息搜索模块。

对一个系统的认识可以从多个视角(视图)去看,从而实现系统的不同功能。图3是一个例子,从用户主动信息获取(拉)的视角去看,信息检索系统为用户提供信息搜索功能。从用户被动接受信息的视角去看,信息检索系统根据用户偏好主动推送(推)信息给用户,信息检索系统就实现了信息推荐功能。“拉”和“推”视图的认识,建立了一个统一的信息检索系统的信息服务体系结构。这样让学生看到,系统体系结构使用一个单一的集成模型来描述多个视图,构建统一的系统模型。

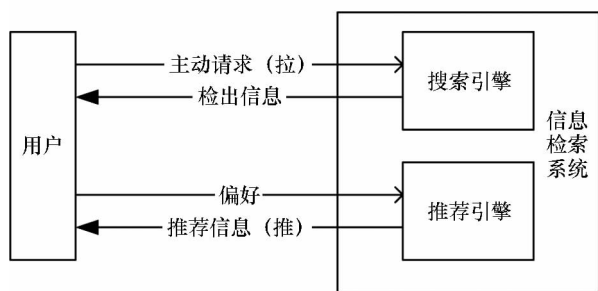


图3 从“推”和“拉”视角看信息检索系统

进一步,让学生去观察,系统是有结构的。系统内部组件按照一定的层次、逻辑或网络结构组成了一个系统。例如,在图2中,从层次结构看,底层是数据和索引层;之上是索引构建层、检索模型和过滤模型层;最上面是信息服务(访问)层,为用户提供信息搜索或信息推荐的两种访问服务。从逻辑结构看,输入原始文档、文档预处理、索引构建、索引过程构成了信息检索系统的索引构建逻辑流程;用户查询/偏好、查询/偏好分析和扩展、检索模型/过滤模型、排序、反馈过程,构成了信息检索系统的信息搜索和信息推荐逻辑流程。另外,细分下去,系统组件也是有结构的。例如,排序组件,如果用神经网络实

现,就是一种网络结构。

关键部件决定系统的性能,抓重点是系统思维能力的一个要点。在信息检索系统中,信息检索模型和排序算法是系统的重要部件,直接影响信息检索系统的性能。但是系统的内部组件之间是互相关联和牵制的。信息检索系统中的其他部件,例如词向量的表示,也对检索系统的性能或多或少起到一定的作用。系统与关键部件的观念,让学生学会抓重点,但是也不能忽视系统中的其他细节。

对于系统与外部环境的交互,从两个方面让学生去理解。一个方面是从信息检索系统本身与外部环境的交互去理解,让学生理解信息检索系统的输入和输出是什么,原始文档数据的输入质量会对系统的输出性能造成什么影响,用户与系统的交互是否会提升系统的性能?另一个方面是系统的外延性,在教学过程中交代本课程内容与学科体系的其他课程内容的关系,让学生从开始就能在整体上了解本课程在学科中的地位,以及与其他课程的关系,这样有利于学生在学习过程中融会贯通。信息检索是数据科学和信息系统的核心问题之一,如果从数据、信息、知识层次的角度看,“信息检索导论”课程属于“信息”层次的课程,而“数据挖掘”属于知识层次的课程。信息检索系统主要实现“非结构化”数据的索引和信息访问,而数据库系统主要实现“结构化”数据的查询。

(二) 系统的优化观

从系统思维的角度看,针对系统的目标,考虑的是整体最优,而不是部分组件的性能最优。我们在以下的例子中,与学生共同感受和理系统整体优化、系统的反馈优化和系统灵活性的观念。

信息检索系统的排序结果直接呈现给用户,反映了检索系统的效果。为了提供用户满意的排序,需要考虑的因素非常多。从经典的余弦相似度和 BM25 值,到查询词项在文档中出现的最小窗口值、网页的 PageRank 值等,而商用搜索引擎的排序因子有数百个之多。这些排序因子谁重要谁不重要,要服从系统的整体排序的要求,要服从用户对信息需求的整体要求。为了做到集成这么多因子的系统整体优化,目前一种好方法就是把这些数百的因子用向量表示,以整体排序最优为目标函数,用机器学习去学习每个因子对总体排

序评分的权重, 从而为用户的查询返回满意 (整体优化) 的排序结果。

在图 1 中我们看到一个重要的控制流: 反馈。反馈在系统的优化提升方面起到重要的作用。系统与用户交互, 提供查询结果的反馈, 通过反馈, 优化排序结果。从系统反馈的观点看, 有对直接命令和间接触发方式的反馈, 分别对应于信息检索系统中的显式反馈、隐式反馈和伪反馈。显式反馈产生的效果明显, 但是来得快, 消失得也快, 有一定效果, 但是要求用户干预。隐式反馈和伪反馈结合了用户与系统交互中的自然行为和模型假设作为反馈, 平衡了反馈优化与用户的使用便捷性, 反而是一种好的反馈方法。这也符合系统反馈中“寻找共识”的机制, 即综合了多种反馈方法, 正反馈抵消负反馈, 达到系统整体优化的效果。在著名的信息检索顶级国际会议 ACM SIGIR 2018 上, 时间检验奖授予了 Eugene Agichtein, Eric Brill 和 Susan Dumais 于 2006 年发表的论文“Improving Web Search Ranking by Incorporating User Behavior Information”。这篇论文将用户行为引入搜索引擎的排序中, 提升了搜索排序的效果^[13]。

系统优化的另一个原则是灵活性, 在满足整体优化和约束的前提下, 具体部件可以灵活实现, 开放创新。例如每个因子的相似度计算算法, 相关反馈机制、内容和结构索引的结合、网页权威度计算等具体的理论和方法, 都可以灵活设计和优化实现, 从而对信息检索系统的整体排序优化做出相应的贡献。

(三) 系统思维能力培养

在课程教学当中, 我们从教与学两个侧面对学生的系统思维能力进行培养。“教”方面主要体现在教师对教学内容和环节进行系统的教学设计; “学”方面主要体现在学生在学习环节中获得系统思维能力的过程。

在“教”方面, 我们在“信息检索导论”课程的教学内容和教学环节的设计上贯穿了系统性。内容系统性, 就是按照图 2 的系统框架铺开内容, 第一讲的内容首先给出了信息检索系统的框架, 为学生建立了对信息检索概念的系统认识。之后的每一讲内容, 都是从这个框架分解出去的。图中圈中的数字表示的对应课程的第几讲。第 2 讲是文档预处理 (包括自然语言处理基础), 第 3 和第 5 讲是索引构建、词典和容错检索, 第 4、6 和 9 讲分别是布尔检索模型、向量检

索模型、概率检索模型, 第 7 讲是排序, 第 8 讲是系统评价, 第 10 讲是反馈, 第 11 讲是 XML 检索, 第 12 讲是链接分析。每一讲都与系统的框架对应起来, 每一讲教学的开始, 都为学生呈现系统框架图, 使得学生在学习过程中, 一直有系统的观念。

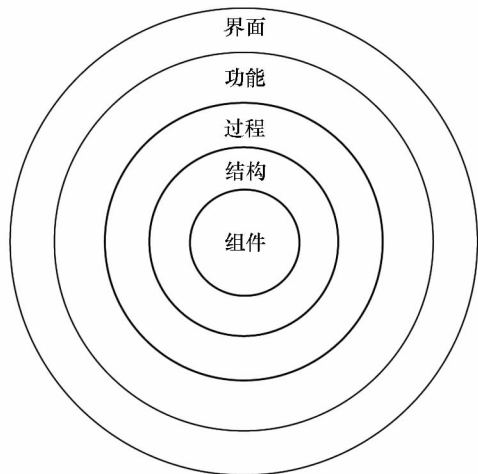


图 4 系统的环形思维理解

在“学”方面, 从课程教学的讲授和实践环节中有意培养学生的系统思维能力。如图 4 所示是用环形思维形式让学生思考信息检索系统的一种方式, 而区别于简单的直线思维。环形表示整体性思维。系统最基础的构成要素是信息检索系统的组件。通过系统的结构来连接组件, 系统结构有横向、纵向、层次、正反向链、交叉 (例如知识图谱)、时空 (多媒体文档数据) 结构等。通过连接的组件可以实现各种处理过程 (例如检索和推荐), 实现数据流、控制流的交换、交互、反馈和传递。过程反映系统的动态的, 从无序到有序, 从随机到稳定状态 (例如 PageRank 建模获得网页权威值计算), 通过过程, 实现系统的功能。通过输入和输出界面为其他用户和系统提供服务, 或进行交互。学生从图中的环形视图层次, 理解到系统分析的逐层分解 (从外向内) 和优化综合 (从内向外) 的系统思维方式。

按照工程教学中的 CDIO 框架, 我们还把学生系统思维能力的培养放到实践中去训练。从某类信息检索系统的构思和设计, 到程序实现和评价, 把学生放到较为现实的 CDIO 环境中去实践, 动手实验和检验课堂上学到的知识。我们借鉴斯坦福大学同类课程的实验设计, 让学生独立完成“索引构建”和“排序”两个实验。在“索引构建”

实验中,要求学生根据某网络域中网页的语料,构建一个非压缩索引,并实现布尔合取查询的检索。进一步,在相同语料上构建一个压缩的索引,用变长编码进行压缩,并实现布尔合取查询。在“排序”实验中,学生编写排序函数,对给定数据集中的查询及其对应的搜索结果进行排序。要求学生实现三个不同的排序算法,并用 NDCG 度量去评价排序算法的有效性。通过以上两个典型的实验,让学生实现了一个简化的信息检索系统,不仅实现了系统中的重要排序算法,而且要对结

果进行评价和分析,使得学生在 CDIO 理念过程中得到系统思维能力的训练。

我们在课程教学中,还进一步为学生介绍信息检索系统的新发展,培养学生的系统持续发展观。信息检索系统持续发展,产生了一些与信息检索紧密相关的系统和创新的理论和方法,包括问题应答 Q-A 系统、信息推荐和分发系统、基于知识图的信息检索系统、信息检索中的文本分类和聚类、信息检索系统与数据挖掘融合、大数据和跨媒体信息检索系统等。

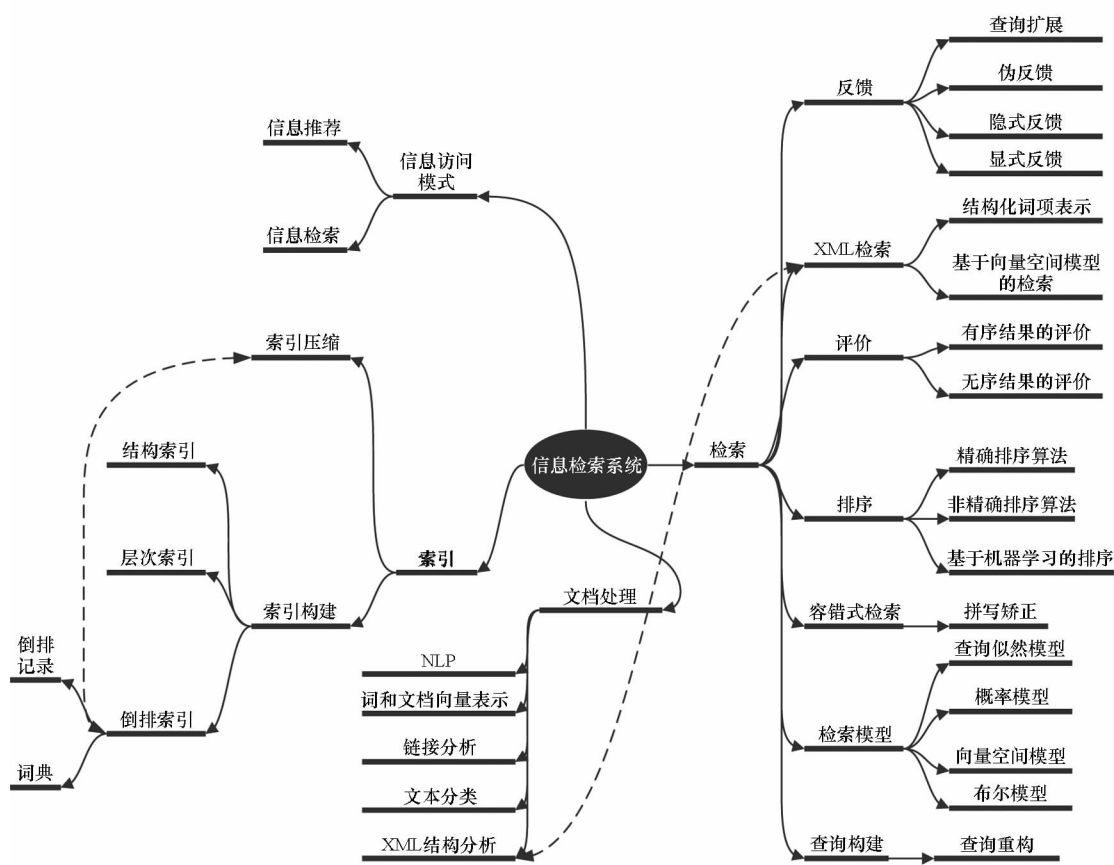


图5 信息检索系统框架的思维导图

图5是在以上课程教与学的过程中,与学生一起,每次课逐步添加、修改和规整的信息检索系统框架的思维导图。课程结束的时候,让学生再从整体上总结和回顾全课程的知识点,迎接课程在知识和推理(基本概念和原理)、专业技能(知识运用)、团队协作和系统实现(实验设计、实现和评价)方面的综合评测。

四、多样式考评及其结果讨论

过去传统上多是单纯用期末闭卷考试方式来

检验课程的学习效果,有时也加上作业和平时成绩,这种简单的考评方式不能充分测评学生的学习效果。我们采用了多样式的课程学习成果测试和检验,如表1所示。其中,“系统整体认识”测评主要包括本文第三节中的“系统学习的整体观”的内容,“系统优化和实现”主要包括第三节中的“系统的优化观”的内容。第三节中的“系统思维能力培养”的内容贯穿在系统学习的整体观和优化观的训练当中。

QUIZ、思辨题和课外作业属于每次课都布置的测评项目,属于过程性测评,它们包含系统思

维类型的测评题目大约占比分别为 35%、40% 和 35%。实验项目主要让学生动手编程,在信息检索系统框架下实现索引优化、排序和评价,系统实现及其核心优化的内容占比 90% 以上。除了期末闭卷考试,我们增加了期中的开卷测试部分,进一步加强考评的强度,使得学生边学边练,得到全面的学习效果检验。

表 1 多样式测试考评中系统思维能力相关内容的比例

评测要点	QUIZ	思辨题	课外作业	实验项目	期中测试	期末考试
系统整体认识	30%	30%	15%	20%	20%	25%
系统优化和实现	5%	10%	20%	70%	25%	20%
合计	35%	40%	35%	90%	45%	45%

通过对学生的采样访谈,进一步分析学习效果。学生普遍反映,面对专业领域中的问题,从系统思维角度去看问题和分析问题的能力得到明显提高。与没有采用系统思维能力训练以前的教学效果相比,学生普遍反映系统思维的认识在本课程的学习中落地了、具体化了,以前基本上是模糊听说过“系统思维”,或偶尔读过系统思维的小帖子,没有实际操作过,认识肤浅。现在通过高强度的学习及其考评,对系统的设计和 optimization 观念有了具体的实践。对课程中的掌握的 PageRank、系统评价指标、机器学习排序等内容,可以融会贯通到其他课程中去。

从学生历年考评的成绩看,引入多样式过程考评模式之后,成绩分布仍然服从正态分布,但是有明显变化。最明显的是高分少了,要获得总评 90 分以上很难,必须每次测试和考评都要在 90 分附近或以上。不及格和低分的减少了,反映出多样式考评的过程性、能力性和综合性测评的特点,学生有弱项也有强项,综合起来,成绩就不会差。密集而有强度的考评,强化了学生的自主学习能力,学生的专业基础知识和技能、系统分析和运用、问题分析和优化等方面的能力得到明显的提升。

学生受到系统思维的培养,整体性对课程的内容理解和把握得到显著的提高,能够更好地抓住信息检索系统中的核心知识内容,并运用到其他相关的科研活动中去。我们在研究生开题和答

辩中,经常看到研究生们把学到的信息检索系统的知识和技能运用到大数据和数据科学相关的研究中,包括典型的查准率、回调率、F1 评价指标;信息分发和推送系统;词和文档向量表示;相似度算法;倒排索引机制等。

五、结语

钱学森系统思维的思想博大精深,系统思维的辩证逻辑意义广泛。本文主要探索在教学活动中如何运用系统思维进行课程内容的整体性设计,如何在教学活动中结合课程内容的教学,潜移默化地培养学生的系统优化和系统思维能力。未来可以进一步加强信息检索系统的综合设计和实践的研究,与相关课程的教学建立起数据科学和大数据课程体系,教学内容和实验设计协同开展。并开展详细的教学效果的定量评价和分析。教学效果是主观性很强的事情,本文已经讨论了从课程考评的角度去测评学生对课程知识和技能的掌握情况,以及初步采用随机采样访谈的方式,对毕业生(读研究生的学生)运用本课程知识和技能的情况进行了分析,今后可以通过在校和毕业生问卷调查和访谈的方式,进一步对课程改革的成效进行详细评价。

参考文献:

- [1] 谭跃进,覃炳庆. 钱学森的系统工程学科专业教育思想——国防科技大学系统工程学科专业建设的体会[J]. 高等教育研究学报,2007(12):2-4.
- [2] Edward F. Crawley, Johan Malmqvist, William A. Lucas. The CDIO Syllabus v2.0 - An Updated Statement of Goals for Engineering Education[C]//Proceedings of the 7th International CDIO Conference, Copenhagen: Technical University of Denmark,2011.
- [3] 周春华,刘诚,沈建京,等. 系统工程专业学员系统思维能力培养模式探析[J]. 学周刊,2015(33):8.
- [4] 胡文华,刘利民,朱晓秀. 军队研究生系统思维与创新能力的培养模式研究[J]. 教育教学论坛,2018(27):167-168.
- [5] 蓝波,张晓燕,晏涌. OBE 教育模式下的系统思维能力培养——以数字电子技术实验为例[J]. 大学教育,2018(8):6-8.
- [6] 祝嫦巍. 利用多角度论题培养学生系统思维能力——探讨本科细胞生物学课堂讲授内容整合[J]. 大学教育,2018(6):13-17.