

·科学人物·

## 巡视于此岸与彼岸之间的钱令希

1978—1998年,笔者在大连理工大学担任钱令希先生在结构优化方面进行科研、教学和指导博士生的科研助手,通过在钱老身边20年的工作,笔者领悟到:桥梁,是力学家钱令希院士的特殊情结,那是他青年、中年乃至老年,终生在心中连接“此岸”与“彼岸”的有形“构筑物”。在2017年8月召开的中国力学大会的力学史与方法论分会场上,笔者在《钱令希院士的毕生学术成果》特邀报告中,谈到“桥梁”这一特殊情结,应《科技导报》的约请,把相关内容整理成本文,分享给更多的读者朋友。

### 学术源头:桥梁工程

追溯钱令希先生的学术源头,那就是桥梁工程,也是他留学、工作和终生思考的对象之一。

1938年,时年22岁的钱令希于比利时布鲁塞尔自由大学以桥梁工程研究生毕业,获比利时最优等工程师学位。他婉然谢绝了导师的挽留,毅然回国投身抗日救亡,回国后从事桥梁的设计与施工,在昆明刚成立的叙昆铁路局任铁路桥梁工程师。他和一位老工程师一起在人烟稀少的西南边陲翻山越岭,风餐露宿,进行桥梁踏勘,为上百个大小桥梁、涵洞定位定型。这段经历,为他今后热心为工程建设服务,打下了一个良好的基础。1938—1943年,先后在川滇铁路公司、云南大学和茅以升领导的交通部桥梁设计工程处工作。

虽然钱令希于1943年11月应邀到浙江大学任教,又于1952年1月应邀去大连工学院任教,可是他终生没有减弱自己对结构工程的关注和渗入,尤其在桥梁工程、水利工程、舰船工程、港湾工程等领域,作出了重要贡献。

《A simplified method of analyzing suspension bridge》,钱先生这篇阐述悬索桥分析简化方法的50页论文于1948—1949年在《Journal of Bridge Engineering, ASCE》(ASCE为美国土木工程学会)上发表。1951年,被ASCE提名拟授结构力学的Moisseiff奖。该方法适于跨度大于200 m的吊桥大挠度分



晚年的钱令希先生(作者供图)

析,属于非线性挠度理论的研究范围。钱先生发现了两点:一是非线性因素对悬索的水平拉力的数值大小固然有影响,但是对其在桥梁活载下的变化规律却影响极小;二是非线性因素对加筋梁的影响,可以用一个柔度系数来表征,而这个系数在给定的恒载与活载比例下是相对稳定的。钱先生推演出了一套完全显式的计算公式和供工程实用的曲线,在那个没有电子计算机的时代,设计者使用计算尺便能在几个小时内完成一个设计方案的近似非线性分析。

1954年,钱先生担任武汉长江大桥工程顾问,参加桥梁的规划和科学研究。1955年,作为负责人之一参与了武汉长江大桥的设计,并于下半年亲临现场,解决施工中的具体问题。1958年,武汉长江大桥竣工后,他又以南京长江大桥工程顾问的身份,参与这座桥的规划、设计和科学研究工作。

1974年11月,钱先生领导了我国第一个现代化油港——大连新港主体工程的设计任务,提出了“百米跨度空腹桁架全焊接钢栈桥”的方案。他论证了该桥型对于大连新港的海上栈桥是十分有利的。他找到了以柔克刚的办法来降低节点的应力集中。同时他组织认真检验使用的钢材,组建且培训优秀的焊接技工,集中了技术人员和老工人的经验,制订了加工程序和海上架桥方案。1975年夏

天,在栈桥第一跨组装的日子里,钱先生一连20多天没有离开现场,和工人、青年教师一起住工棚,吃玉米面饼子和几分钱的蔬菜。为了把自重405 t的桥架安全、准确地整体吊装到桥墩上,他冒着炎炎烈日,带着疾病,四处奔波,寻计觅策。为了等第二天早晨赶潮起吊,他整整一个晚上都与工人在一起做准备工作,栈桥于1976年建成。设计小组编写的《全焊空腹桁架钢桥》一书于1982年由人民交通出版社出版。1978年此项目获全国科学大会奖和国家1970年代优秀设计奖

1987年,钱先生以弹塑性分析方法计算了隋朝工匠李春领导建造的赵州桥的受力状况。分析结果令人瞠目结舌:1400年前的石拱桥,压力线和拱轴线是重合的,李春等人设计的桥竟然符合现代力学的原理!他以《1400年前的赵州石拱桥的新见解》为题,在国际期刊《International Journal of Mechanical Sciences》上发表文章。受钱先生启发,笔者让博士生用自己提出的ICM方法按赵州桥的环境和载荷,计算了连续体结构拓扑优化的构型,竟然同赵州桥十分相近!钱先生得悉,十分振奋。他当时恰好要去新加坡领取何梁何利基金科学与技术进步奖,对方要他作一个学术报告,钱先生叮嘱笔者,务必把这连同压力线和拱轴线重合的两个奇妙结果,同时做到展示大工工程力学研究所成果的幻灯片中。果然不出钱先生的预料,国外学者听了报告,对于赵州桥经得起两种不同力学方法的验证而感到万分吃惊。

### 从工程到力学之间的游走

桥梁是小土木,土木是大桥梁,二者的共性在于都是结构工程,而结构工程最重要的基础则是力学。钱先生的可贵之处,也是他与学工程结构出身不同之处,不仅在于他重视作为工程根基的力学,而且对于力学自身的发展具有浓厚兴趣,从“运用力学解决工程问题”渐渐过渡到“为了解决工程难题而研究力学方法”。不知不觉地,他本人也顺其自然地由喜爱力学的工程师变成了娴熟解决

工程难题的工程力学家。

前述20世纪40年代末期,钱先生关于悬索桥分析简化的文章,现在看来,同样解决了一个高难度的应用力学问题,那时他才刚过30岁。很快地,他就进入了力学研究的殿堂,代表工作是他34岁时于1950年在《中国科学》第1、2期上连续发表的《余能理论》,该论文开启了我国对力学变分原理的研究,受此文影响,出现了一批有国际影响的变分原理研究成果。其中一项成果发表在1954年,是由他的学生胡海昌提出的三类变量变分原理。这项成果国际上称为“胡—鹭津”变分原理,推动了国内外对力学变分原理的深入研究。钱先生《余能理论》在国内外力学界堪称为一个重大的成果。

从那时开始,钱先生一直在结构工程和工程力学之间游走,从来没有在两点之一停留。在他的心中,结构工程代表了有形的、具象的桥,还有一个无形的、抽象的桥,那就是工程力学。他的一生,就借助于具象的桥和抽象的桥,巡视于此岸与彼岸之间。

此岸与彼岸又是什么呢?此岸——工程,彼岸——力学。钱先生的此岸不仅是桥梁工程,还有水利工程、舰船工程、港湾工程等领域。在计算机时代到来之前,钱先生借助于自己独有的工程直觉,解决国家重大工程涉及的力学难题,从而也一次次地发展了工程力学;他比那些应用力学家更主动、更有兴趣关心工程实际,更瞄准工程难题的解决。他能够游刃有余地简化问题、提炼模型、抓住难点。

娴熟地抓住问题的本质予以模型化处理,又跨越到彼岸,运用他擅长的能量方法进行推演,巧妙地解决了难题,同时又发展了能量原理。例如,1960年代初,为制订我国潜艇结构的强度计算规则,钱先生承担了锥、柱结合壳在静水压力下的稳定分析的任务。钱先生和他的助手们利用最小势能原理、极限承载能力理论解决了问题,研究成果成功地应用于我国核潜艇的研制,并被纳入国家设计规范。同时,发展了固体力学中的极限分析理论。

1960年代初,钱先生已敏锐地觉察

到电子计算机的作用,认为它的应用将会影响到各门学科的进程,会给科学技术的发展带来深刻的变革。1970年代,钱先生开始考虑发展计算力学,委托钟万勰带领青年教师去上海,在工程界的服务中,研发用于工程设计的应用软件,培养了计算力学的队伍。

在1973年中国科学院力学规划座谈会上,钱先生阐述了一些设想,倡导发展计算力学,他还提出力学要突破仅作分析的老传统,要综合研究工程优化设计的理论和方法为工程服务。1977年,他委托钟万勰带领团队,研制出了通用性很强的大型组合结构分析程序JIG-FEX。1978年,在制订全国力学学科发展规划时,他极力提议把“计算力学”列为力学发展的重要方向之一。

在1982年召开的全国力学学会大会上,中国力学学会第一届理事长钱学森推荐钱令希为第二届理事长。1983年,中国力学学会正式成立了计算力学专业委员会。1984年2月,钱先生创办了《计算结构力学及其应用》杂志,并担任主编。1986年9月,国际计算力学协会正式建立,钱先生是发起人之一。

### 倡导重大方向的帅才

如果说早年的钱先生在工程力学领域里独自研究展露了青年“将才”的风采,步入中年,他带领团队研究,不难看出,他原本就是“将帅合一”的人才。就在1970年代之后,他由中年进入老年之际,从大连理工大学力学的“帅才”成为立足中国、面向世界的“帅才”,他不辱使命地担当了计算力学和结构优化两个至今仍不过时的重大方向倡导者。

作为我国结构优化研究的发起人,钱先生采用点面相合、走出去和请进来相辅、培养人才与研发成果相成的做法,迅速打开局面,很快促使我国结构优化研究的学术与产业的综合水平在1970—1990年初于亚洲领先。在钱先生的带动下,当时出现了一批著名老学者投身结构优化研究的现象。钱先生在1983年出版了专著《工程结构优化设计》(水利电力出版社),于同年获得全国优秀科技著作一等奖。该书特别注重实用可行的

结构优化建模和求解方法。在此基础上,他委托笔者开发了DDDU程序系统。这个系统逐步从研究性的优化程序发展到切实面向工程应用的程序,在工程应用上为国家节省了大量钢材。钱先生领导的这项成果于1985年获得了国家级科技进步三等奖。1990年,钱先生领导的工程结构优化设计研究工作获国家教委科技进步一等奖,又于1991年获国家自然科学二等奖。

工程力学是钱令希先生终生巡视于此岸与彼岸之间的桥梁,它明显地表现为两个阶段——前电子计算机阶段和电子计算机阶段。钱先生身处两个阶段的更迭时期,他在“知天命”之前的前半生恰处于前电子计算机时期,当时工程力学问题靠手算,或用计算尺、手摇计算器去算。锐意为工程服务的钱先生在这个时期于工程设计的各个领域,努力探索方便于工程师计算的精而简的力学方法,研究出了大量的工程力学成果。当电子计算机阶段到来之时,他相信工程力学将在计算工具进化的影响下会发生一个飞跃。

他终生巡视于此岸与彼岸之间,而且从将才到将帅兼顾,直至帅将兼任。而这座桥梁也随时代发生着变化——由传统的工程力学让位于计算机化的工程力学。钱先生倡导计算力学和结构优化的实践表明,计算力学学科的出现使计算机化的应用力学和计算机化的工程力学消弭了界限,或者说,计算力学实现了计算机化的应用力学和计算机化的工程力学的合二为一。作为工程“此岸”和力学“彼岸”之间抽象的桥——工程力学,其使命可以用计算力学和计算化的结构优化予以实现。

钱令希先生不同凡响之处在于:他终生既不停留于此岸也不停留于彼岸,而且,他不断地为两岸间的桥梁加固做出自己独特的贡献。因此,称他为一位罕见的在工程与力学领域的“两栖人”,此种说法并不为过。

### 文/隋允康

作者简介 北京工业大学工程力学系,教授。

(责任编辑 李娜)