

学术楷模 一代宗师

——吴文俊先生与并行机器的发展

■ 汪劲松

吴文俊先生是我国科技工作者的杰出代表，他数十年兢兢业业，执着追求，不断创新，在代数拓扑学和数学机械化领域取得了举世瞩目的卓越成就。自上个世纪七十年代以来，吴先生将数学研究和计算机技术巧妙地结合起来，开创了数学机械化的先河，并在此领域取得了一系列重要成果，成为国际自动推理界的先驱。他所创立的“吴方法”受到国内外学术界高度称赞和广泛重视。在此之后，他又致力于数学机械化理论的应用和推广，在我国迫切需要发展的若干高新技术领域都发挥了至关重要的作用，如机器人、信息技术、计算机图形学、计算机视觉、模式识别、计算机辅助几何设计等。

为继续保持我国在数学机械化领域研究的国际领先地位，进一步深化数学机械化理论与方法的研究成果，扩展现有数学机械化方法的适应范围，提高应用效果，促进相关科学领域的发展，更好地为我国国民经济和社会发展服务，吴先生提出了国家重点基础研究发展规划项目——数学机械化与自动推理平台。在数学机械化方法的应用方面，结合数控、信息、计算机图形学中存在的问题，发展相应的机械化方法，并解决其中若干关键性基础理论问题，为技术创新奠定基础。

当时我正在进行并联运动机器的研究，并有幸成为该973项目的课题“机构学及数控技术中的数学机械化方法”的负责人。我和我的研究团队运用数学机械化方法，解决了大量设计和制造过程中的数学问题，为课题最终取得成功打下了坚实的基础。尽管时间已经过去十几年，当时与吴先生交往的情境及受到的教益，至今仍记忆犹新。

一切工程问题最终都要转化为数学问题，一切数学问题最终都要转化为方程求解的问题。经过了十余年的科研历程，对吴先生的这句话理解得更加深刻。早在1994年美国芝加哥机床博览会时，新一代的并联机床亮相，引起了极大的轰动，被媒体赞誉为“机床结构的重大革命”，“21世纪新一代数控加工设备”。这类机床采用并联机构作为主传动，与传统的串联结构机床相比，结构简单、制造周期短、成本低、多自由度运动能力强，可以实现更高的加速度和速度，有更高的柔性和工艺集成度，它非常适于在航空、航天、汽车等领域完成复杂自由曲面的加工，并且在电子芯片、轻工、食品、医疗等制造行业的快速搬运、插装和加工作业等方面也有着巨大的应用前景。并联机床又被称为是“用数学制造出来的机床”，由于其输入和输出存在很强的非线性，导致其设计、制造和控制都与传统机器存在很大不同，尤其是当中的高维强非线性的方程组求解问题更是让研究者头疼。从1995年开始，我带领我的研究团队开始了并联机器的研究，1997年12月我们的第一台实验样机研制成功，也正是在这个时候，吴先

生亲自带领中科院研究数学机械化的数学工作者们来到样机实验现场，亲自观看了样机的实验和操作状况，并与我们的研究人员对研发过程中存在的若干数学问题进行了深入的探讨。在1998年又邀请我去中科院，就并联机床中研发过程中遇到的数学问题作了一个专题报告，从此之后，我们与中科院数学机械化实验室开始了长达十年的合作。吴先生在不断发展数学机械化方法的同时，敏锐地觉察到制造业的发展动向，并积极推动数学机械化方法在机械领域的跨学科应用，这令我非常佩服和感动。

在合作研究期间，多次当面聆听吴先生的教诲，对吴先生虚怀若谷的大师风范、渊博厚重的学术修养和拳拳赤子般的爱国情怀，都留下了深刻的印象。在每次973项目的全体报告会上，吴先生总是端坐在最前排，仔细听取每一位研究者的报告，遇到不太清楚的地方，都要在报告后向演讲者提问请教；对于来自全国参与研究的每一个成员，不论是否熟悉和相识，都是报以微笑和尊敬。在每次惯常的报告会最后，吴先生都要根据整个报告会的情况，做一个即席发言，题目不拘一格，多为自己的心得体会，讲者似乎是信手拈来，听者均感到受用非浅。记得有一次，吴先生讲到自己的学术渊源时，说到：“很多人都以为我的学术思想来自西方，其实错了，最启发我的数学思想其实来自中国。”然后开始向大家娓娓道来中国古代博大精深的数学思想，吴先生此时脸上洋溢着自豪，让台下后辈无不动容。

自第一个973项目立项以来，在吴先生的带领下，项目专家组和全体研究人员刻苦钻研，勤奋工作，勇于创新，在多个领域取得了突破性进展。在机构学及数控技术领域的实际工程应用中，我们的课题小组围绕并联机床的研制和产品化开发，应用吴先生所提出的数学机械化的思想、理论及方法，对所存在的关键性问题进行了深入系统的研究，取得了重大进展，简单地概括主要包括以下几个方面：

一、机构学基础理论

经过多年的不懈努力，已基本建立起一整套并联机器人的机构学理论基础，在其运动学、静力学、动力学、结构优化和精度分析等方面取得了突破性的创新成果，其中包括：基于空间模型理论的机构设计及创新方法，针对多维非线性方程组的连续法求解和在作业空间、干涉验证与误差估计等方面的应用，基于驱动力非线性而提出的最优控制方法和策略，利用Gough-Stewart平台一阶和二阶微分运动关系式而确定的关节加速度与末端执行器速度之间的关系，应用微分几何解决的机构关节输入与动平台位姿输出之间的非线性特性问题。这些研究为并联机器人的产品化开发提供了重要的理论依据。

二、实用化技术

在并联机器人的实用化技术方面，深入研究了并联机构的精度和标定技术，开发了适用于工业现场环境的并联机构预标定算法，实现了铰链间隙的误差补偿算法，利用少自由度测量信息对多台并联机床进行了标定试验；进行了并联装备产品数字化设计系统关键技术的研究，完成了“并联装备数字化快速开发平台”的设计和研制；在并联机床的控制方法中，研究了基于并联机床的数控核心算法，开发了基于RTLinux的数控系统，建立和开发了后处理算法及功能模块；并开展了基于并联构型的快速可重构装备的研究。

三、并联机器人的设计和制造

1997年第一台并联机床原理样机研制之后，又成功开发了多台具有一定商业应用前景的不同构型的并联装备，并进行了相关制造技

术的研究，包括多种类型并联机床的关键设计技术，以及关键零部件设计、分析和检测方法。在此基础上，建造了多合并联装备的商品化样机，包括：与昆明机床股份有限公司联合研制的6自由度虚拟轴机床XNZ63，与南昌江东机床厂联合开发的4自由度龙门式虚拟轴机床XNZ2010，与大连机床厂联合研制的五轴联动串并联机床DCB-510。以上三台机床均参加了2001年4月第4届北京国际机床展览会，并在展览会期间进行了技术交流会，并于2002年与齐齐哈尔第二机床厂联合开发了大型龙门式五轴混联机床-XNZD2415。

四、并联机器的应用研究

在基础理论研究的基础上，将并联机器的应用扩展到了天文和集成电路制造领域。面向国家大工程项目FAST的预研，开展了馈源精调实验平台的研究。在国家十五“863”计划的重大专项“超大规模集成电路与软件”中，承担了子课题“100nm步进扫描投影光刻机工件台掩模台分系统同步试验”，在此项目中，利用在并联机构研究中的理论基础，提出了基于并联机构的微动工作台结构方案，并设计相应运动机构和结构，为实现光刻机工件台系统的设计与制造打下了基础。

截止到我们第一个973项目结束的2003年，我们的课题组已发表文章175篇，已申请专利21项，其中7项已获授权。主编或参与编写论著7本。

在之后的6年中，我们的团队又积极参加到吴先生领导的第二个973项目中，将数学机械化方法成功地运用到极端制造领域，取得了突出的成果。我们所取得的这一系列成绩，都跟吴先生所开创的数学机械化密不可分，吴先生和他的创造性的数学方法对并联机器的发展功不可没。

吴文俊与中国数学

吴文俊先生作为我国当代最杰出的数学家之一，他的成就和在科学工作中所表现出来的可贵精神都将是我国科技界的宝贵财富，是我们学习的楷模。作为学界后辈，我们会以吴先生为榜样，潜心学问，服务国家和民族。

2009年12月23日

(作者为电子科技大学校长、教授)