

DOI: 10.3901/JME.2022.11.001

现代科技创新研究模式探讨*

刘辛军^{1,2} 谢福贵^{1,2} 杨迪¹ 解增辉¹ 孟齐志¹

(1. 清华大学机械工程系 北京 100084;
2. 清华大学摩擦学国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 科技创新是人类社会生产力发展的源泉,是社会进步的重要动力,开展科技创新方法论研究并探索科技创新研究模式,对于推动科技进步具有重大意义。基于古典哲学思想和辩证唯物主义方法论,探讨一种以揭示规律、创造发明、改造世界为指导思想的科技创新研究模式,表现为“寻其道、谋其术、求其魂、索其变、用其精”的辩证统一过程。在该模式的指导下,围绕航空航天等重点领域大型复杂构件的高效高质量加工重大需求,开展了科技创新研究实践,研制了移动式混联机器人并应用于此类大型复杂构件的原位柔性加工中。实践结果表明,该科技创新研究模式遵循了辩证唯物主义思想,在科技创新实践中是有效的,可作为科技创新的一种模式。

关键词: 科技创新模式;辩证唯物主义;古典哲学;移动式混联机器人;创新研究实践

中图分类号: TG156

Discussion on Research Mode of Advanced Scientific and Technological Innovation

LIU Xinjun^{1,2} XIE Fugui^{1,2} YANG Di¹ XIE Zenghui¹ MENG Qizhi¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;
2. The State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Scientific and technological innovation is the source of the development of human social productivity and an important driving force for social progress. Carrying out the research on the methodology of scientific and technological innovation and exploring the research model is of great significance to promote scientific and technological progress. Based on classical philosophy and dialectical materialism methodology, this research discussed a scientific and technological innovation research model with the guiding ideology of revealing laws, creating and inventing, and transforming the world. This model can be summarized as a dialectical unity process of “seeking its way, exploring its method, wondering its soul, investigating its change and using it wonderfully”. Under the guidance of this mode, focusing on the major demands of high-efficiency and high-quality processing of large-scale complex components in key fields such as aerospace, the research practice of scientific and technological innovation has been carried out, and a mobile hybrid machining robot has been successfully developed and applied to the production practice of in-situ flexible processing of such large-scale complex components. The practice results show that the research model of scientific and technological innovation follows the important thought of dialectical materialism and is effective in the practice. It can be used as the research model of scientific and technological innovation.

Key words: scientific and technological innovation mode; dialectical materialism; classical philosophy; mobile hybrid robot; innovative research practice

0 前言

随着人类对自然界的认识日益深刻,科学技术

的发展日新月异。科技创新成为了人类社会生产力发展的源泉,是社会进步的重要动力。科技创新一般指对科学知识以及技术的原创性研究工作,是一种以科学知识或技术为作用对象的创造性实践行

* 国家自然科学基金(51922057, 91948301)资助项目。20211101 收到初稿, 20220210 收到修改稿

为, 科技创新一般以科学思维为指导, 利用新的或现有的知识与物质, 以理想化需要或为满足社会需求为目标, 改进或创造新的科技产品、方法、环境等, 并对科技发展产生一定有益效果。以钱学森开放的复杂巨系统理论为指导^[1], 科技创新通常可以分为三个部分: 知识创新、技术创新以及现代科技引领的管理创新。

知识创新是指通过包括基础研究和应用研究在内的科学研究来获得新的基础科学和技术科学知识的过程^[2], 其目的是探索新的发现、揭示新的规律、创立新的学说、提出新的方法、积累新的知识。知识创新是技术创新的基础, 它为人类认识世界、改造世界的方法论提供新的理论基础, 为人类生产力的发展与社会进步提供源源不断的动力。

技术创新是指开发新技术或者改进已有技术而进行的生产技术创新^[3], 其目的是开发新的技术或改进现有技术从而实现对客观世界的有效改造。技术创新建立在知识创新的基础之上, 它为人类改造世界提供切实有效的载体, 通过技术创新, 才能真正把科技创新落到实处。

管理创新^[4]是指在特定的条件下, 对系统所拥有的资源要素进行再优化配置, 并实现新的目标需求的一种创新活动, 其目的是实现资源的高效配置。现代科技引领的管理创新是在技术创新的支持下建立的, 它可以是项目层面的资源分配模式创新, 也可以是社会发展战略层面的科技战略创新。

习近平总书记在接见嫦娥三号任务参研参试人员代表时指出: “科技创新是提高社会生产力和综合国力的战略支撑, 必须把科技创新摆在国家发展全局的核心位置, 坚持走中国特色自主创新道路, 敢于走别人没有走过的路, 不断在攻坚克难中追求卓越, 加快向创新驱动发展转变。”党的十九大报告中也明确提出, 创新是引领发展的第一动力, 是建设现代化经济体系的战略支撑。因此, 开展科技创新研究模式的探讨, 对于推动科技进步具有重大意义。

本文通过回顾人类科技创新研究发展历程, 结合唯物史观思想, 从辩证唯物主义的方法论出发, 融合本文作者在机构学与机器人领域的研究与实践, 吸收中国古典哲学思想, 对一种科技创新研究模式进行探讨, 并在该模式的指导下开展了创新实践。结果证明, 所提出的模式在科技创新研究中发挥了纲领性作用, 希望本文探讨的内容可以为现代科技工作者的创新实践提供一条途径。

1 科技创新研究发展历程

科技创新的关键在于以新的视角来认识客观世界, 并通过新的有效手段去改造客观世界。从历史发展角度看, 人类对自然的认识经历了深刻的变化, 这种认识历程生动地展现了人类社会由原始文明向现代文明演进的轨迹。凡皮尔在《科学史》^[5]中这样形象地描绘早期人类对世界的认知: “从此, 在混沌一团中, 字谜画的碎片就渐次展现; 人们摸透了大自然的脾气, 服从大自然, 又能控制大自然。”从科技创新研究发展历史来看, 人类的知识水平以及对创新的需求动力很大程度上影响了人类对自然规律的认知程度。

古希腊时期, 人们在认识世界的过程中, 自然哲学的理性自然观开始形成: 人们开始把自然界看作一个有规律且可以被认识的独立于人的整体对象, 并且为了揭示自然界的规律, 创造了一套哲学的或数学的语言。其中以毕达哥拉斯学派为代表, 提出了“数即万物, 万物皆数”的概念^[6], 试图从数学的角度去认识世界、解释世界。古希腊朴素自然观为后世提供了本质正确世界观的雏形, 但其唯心主义的一些思想不利于物理、数学等学科的发展。

中国古代也产生了许多科学技术的创新。春秋战国时期的百家争鸣初步奠定了中国古代知识体系, 其中以儒、道两家的影响最为深刻。儒家提出了“生生之谓易也”^[7], 其表达的“生生不息、循环往复、革故鼎新是万事万物产生的本源”中便蕴含了创新的思想。道家提出的“道”的概念, 也昭示着人们对于万物的自然规律的追求, “道生一, 一生二, 二生三, 三生万物”描述了老子对宇宙生成的观点。秦汉时期, 科学技术的许多门类都取得了重要成就。到了南北朝时期, 则形成了具有中国特点的实用科学体系, 唐宋时期的科学技术发展更是达到鼎盛。

随着文艺复兴运动与天文学等学科的发展, 近代科学伴随着机械论自然观诞生了^[8]。伽利略在力学和天文学等学科及其科学方法的研究中, 把实验方法、归纳方法与数学演绎方法结合起来, 为机械论自然观的科学研究提供了发展基础。牛顿在《自然哲学之数学原理》^[9]中解释道: “自然界存在着规律, 而且规律是能够被认识的。”牛顿发现了万有引力定律、运动定律, 并形成了牛顿力学体系, 这成为了近代天文学和力学发展的基础, 极大促进了机械、建筑等工程技术的发展。

展,并影响了后来机械论自然观对自然科学的统治。由于伽利略、牛顿等人的工作,力学领域发生了翻天覆地的变化,取得了极其显著的进步。如培根、笛卡儿等许多哲学家也都开始试图用物质和运动来解释物理世界^[10]。牛顿的机械论自然观主宰了当时的文化观念近 200 年,其中运用还原论研究自然获得知识,再将知识纳入公理化演绎体系加以表达成为主流的科学研究方法。但是,机械论自然观中的部分形而上学的思维方式阻碍了科技创新的发展,使得当时的部分研究最终不得回归神学的上帝。

19 世纪,随着自然科学的发展,人们对机械论自然观的认识有了突破。科学研究也进入到对所获经验材料进行综合整理并从理论上加以概括说明的阶段。马克思和恩格斯通过概括和总结自然科学的研究成果,批判地吸收德国古典哲学中的合理成分,建立了辩证唯物主义的自然科学^[11]。辩证自然观的基本观点认为:“自然界的一切事物都是处在永久的产生和消亡之中,处于不断运动、变化过程之中。”侧面反映了人类通过对物质世界的利用和再创造,制造新的矛盾关系,形成新的物质形态的需求,即创新的需求。

马克思把辩证唯物主义的自然科学和辩证唯物主义的历史观统一起来,创立了历史唯物主义。历史唯物主义指出,历史的所有事件发生的根本原因是物质的丰富程度,社会历史的发展有其自身固有的客观规律^[12]。伴随社会生产力的进一步提高,在近现代也诞生了许多关于科技创新的方法论研究。前苏联发明家、教育家 ALTSHULLER 提出了 TRIZ 理论^[13],即“发明问题解决理论”。TRIZ 理论成功地揭示了创造发明的内在规律和原理,提供了丰富的方法体系,大大加快了人们创造发明的进程,诞生了许多高质量的创新产品。1960 年 9 月,仿生学作为一门独立的学科被正式提出^[14],它是一门在工程上实现并有效地应用生物功能的学科。仿生学根据对生物系统的研究,在工程技术方面为设计和建造新的技术设备提供了新原理、新方法和新途径。

综上所述,人类对自然规律的认知、对科技创新方法的研究是永无止境的,也是不断迭代发展的过程,其目的是通过遵守自然规律,发现或创造出对人类有价值的知识,并应用于实践,推动人类的进步。本文在前人探索的基础上,探讨一种科技创新研究模式,并应用于工程实践,希望对现代科技工作者的创新研究有一定的借鉴作用。

2 科技创新研究模式构思

早在先秦时期,儒家就在《中庸》篇^[15]中提到:“唯天下至诚,为能尽其性,则能尽人之性;能尽人之性,则能尽物之性;能尽物之性,则可以赞天地之化育;可以赞天地之化育,则可以与天地参矣。”这段话指出人类的技术活动应遵循客观自然规律,使之产生有利于人类社会发展的结果。其中便产生了揭示规律、创造发明、改造世界的思想萌芽。在 1993 年, DUGGER 对科学、技术、工程、数学进行了定义^[16]:“科学是对我们的自然世界和宇宙的研究;技术是对我们人类创造和加以控制的世界和宇宙的研究;工程是通过学习、经验和实践获得的数学与自然科学知识被应用于判断,以经济地开发利用自然界的材料和力量来造福人类的方法;数学是对所有可以想象的抽象模式和关系的研究。”结合定义,我们知道,数学提供了一种表述科学和技术的语言,而工程则是科学技术改造客观世界的载体。因此,科学和技术只有通过工程,才能对人类社会产生推动作用。数学、科学、技术与工程的关系,指导了我们对于科技创新研究模式的构思。

综上讨论,科技创新研究可总结为揭示规律、创造发明、改造世界三个阶段。关于人们认识世界、改造世界方法的理论称为方法论,辩证唯物主义方法论有以下几点重要思想:强调在实践中检验、丰富和发展认识,又要将已有的知识运用于实践,去指导实践;强调要随着历史条件的变化而丰富、发展和完善真理;强调与时俱进,开拓创新,在实践中认识和发现真理,在实践中检验和发展真理。将科技创新研究的“揭示规律、创造发明、改造世界”三个阶段与古典哲学思想、辩证唯物主义方法论重要思想相结合,本文把科技创新研究模式概括为“寻其道、谋其术、求其魂、索其变、用其精”的辩证统一过程,并且具有图 1 所示的内在联系。

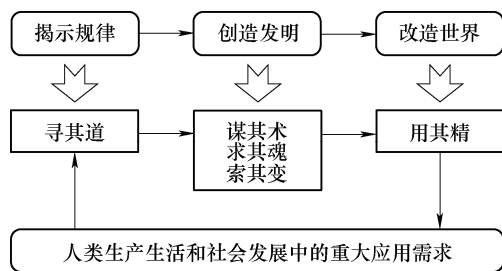


图 1 科技创新研究模式

下面具体阐释“寻其道、谋其术、求其魂、索其变、用其精”的具体含义。

(1) 寻其道。道,是中华民族为认识自然并使其为己所用而提出的一个名词,蕴含了认识万事万物的道理,即规律。老子在《道德经》中说:“人法地,地法天,天法道,道法自然。”便包含了人对自然界的效法的思想。“寻其道”意为寻找研究目标的道理、规律,进行知识的创新。“寻其道”的本质是科学观察与科学认识,是一种好奇探索,是人天性的表现。科学观察包含了接受信息的过程与加工信息的过程,为了保证其客观性,科学观察要求研究者拥有严谨的求是态度,以先进的观测技术和仪器为物质基础,以正确反映客观事物本质的理论作为指导。科学认识则是运用科学思维把握客体本质的活动,其中科学思维包括逻辑思维和非逻辑思维两类基本形式,逻辑思维讲究分析、综合、归纳、演绎、类比等科学方法,非逻辑思维则包含了形象思维和直觉思维,非逻辑思维虽然具有局限性和不可靠性,但其作用在科技创新中仍然不可缺少。

(2) 谋其术。术,即方法、策略。“谋其术”意为设法求得方法或策略以产生发明创造。“谋其术”的本质是以创造发明为目标的一种技术应用,可以是对已有技术的应用,也可以是技术创新并应用。技术应用是由理论到事实的下行过程,它应该遵循科学规律,并且具备明确的使用范围以及可以被认知的形式和载体,如输入、输出、工艺等。“谋其术”的结果应该是发明创造或发明创造的雏形。

(3) 求其魂。魂,即灵魂。“求其魂”是要探求发明创造中起主导和决定作用的因素,评价其固有的性质或特性,并通过方法或策略将这些性质或特性中有利于人类活动的部分加以表达或改进。“求其魂”的本质是以改进发明为目标的一种技术应用,它主要包含评价方法和改进方法,体现了人的品性。在这里,评价方法应以发明为研究主体,通过科学的手段对其性质或特性进行判断、分析,得到具有客观性的结论。改进方法则是以发明为研究主体,通过一定的科学手段使其评价结论得到提高的方法。检验评价方法和改进方法的有效性时,有必要开展一定的实践工作,在实践中检验和发展提出的理论与方法。

(4) 索其变。变,此处意为变通的结果。“索其变”即去探索发明创造因地、因时制宜而进化改变的结果。“索其变”的本质是以实现应用变通为目的

的科技创新实践,是对发明主体、作用客体与所处确定场间的矛盾的合理解决,是利用科学思维在原有科技创新基础上实现再次创新的体现,实践的结果可以是知识的创新、技术的创新或管理的创新,体现了人的悟性。

(5) 用其精。精,此处指精华、精髓。“用其精”是要在实践中尽可能好地使发明创造的精华部分表现出来,创造有用的价值,完成其改造客观世界、推动社会发展的使命,体现了人的习性。“用其精”的本质是利用发明创造以改造世界为目的、以理论技术为指导开展的实践活动,并且在实践过程中能够发挥发明主体的有利性质或特性,实践的结果对工程应用的发展应具有推进作用,同时实践的结果对理论技术的进步也应有指导和促进。

现代社会的科技创新研究通常面向了某个领域的重大应用需求,而科学问题也往往从这个重大需求中诞生,从而牵引出整个科技创新研究。在揭示规律阶段,科技工作者面向科学问题,以知识创新为目的,以“寻其道”的思想为向导,对自然界中的规律进行探索与揭示,实现知识的创新。在创造发明阶段,科技工作者分别以“谋其术”、“求其魂”、“索其变”为向导开展研究工作,提出发明,改进发明,实现创新。“谋其术”是创造发明的重要一步,“术”是对“道”的应用,而“道”反映着客观世界的规律,研究者通过具有科学性的“术”产生发明创造或其雏形。“求其魂”是改进发明的关键,研究者通过科学方法评价并改进发明具有的某些性质或特性,从而发挥其应有的性能。“索其变”是基于发明实现进一步创新的步骤,研究者探索发明创造的应用变通,从而实现发明的因地、因时制宜。在改造世界阶段,科技工作者以发明创造为载体,以“用其精”的思想为向导,体现发明创造的精华,开展应用实践,创造价值。基于辩证唯物主义方法论的思想,在应用实践中检验并发展理论成果。最终,经过在“寻其道、谋其术、求其魂、索其变、用其精”这一过程中的认识与实践,解决重大需求应用中的科学问题进而实现改造世界的目的。

3 科技创新研究模式实践

在航空航天、能源和国防等领域,大型航空薄壁件、空间站大型舱体结构件、重型燃气轮机组件、大型风电叶片、船舰螺旋桨等大型复杂构

件有着广泛应用。这些大型复杂构件通常具有尺寸大、形状复杂、位置精度和表面质量要求高并伴有弱刚性薄壁结构等共性特征。当前,随着我国相关产业的蓬勃发展,对此类大型复杂构件的高效高质量加工需求愈加旺盛,研究的重要性日渐凸显。

对于此类大型复杂构件的加工,由于加工件尺寸大,传统加工装备如机床面临行程不足、设备结构性差、加工效率低等问题,难以满足此类零件的加工需求,若增大传统加工装备尺寸,将导致设备极其庞大进而造成制造成本大幅提高。对此,以串联机械臂为加工核心的移动式加工机器人成为加工大型复杂构件的新选择,但在实际应用中却面临着串联机械臂刚度差、在工作空间内刚度变化范围大等问题,导致其精度一致性差,不适宜应用于承受铣削力等交变载荷工况。在实际应用中,这类移动机器人系统往往应用于磨抛、喷涂、焊接、抓取等非接触/小接触力或重载低精度的作业工况,难以用于实际铣削加工。因此,急需变革性的技术及装备,解决此类大型复杂构件的高质量制造难题。

3.1 寻其道

“寻其道”的本质是科学观察与科学认识,是一种好奇探索,是人天性的表现。自然界中的各种生命体在进行生命活动时,总是遵循着一定的规律,这为我们从事科技创新研究提供了一定的依据。例如:长颈象鼻虫是一种生活在马达加斯加岛上的奇特昆虫,它们具有长长的颈部,特殊的颈部结构可以提升它们头部可触及的范围并有力地支撑头部以进行精细啃食,非常有利于撕咬树叶、构建巢穴;啄木鸟在敲击树木的时候,往往会先攀缘在直立的树干上,利用两爪抓紧树干、楔形尾部支撑身体,依靠颈部发达而强有力的肌肉高速精细地啄木;在人类社会,一些手工艺师在雕刻作品时,会通过腕部的灵巧定位,借由手指的精细动作完成精雕细琢的工作。上面列举例子中的生命活动都存在共同的特征,即:大范围移动定位、局部精细化作业。那么人类创造发明的机器是否应该遵守这个行为规律呢?受自然界中生命体作业特征和长颈象鼻虫的外形启发,面向航天器舱体、卫星结构等大型复杂构件的原位加工需求,我们提出了基于“全向移动平台+高刚度机械臂+高灵活高精五轴加工部件”的大型复杂构件原位柔性加工解决方案^[17],设计了一

种移动式加工机器人,图2展示了自然界中的长颈象鼻虫与设计的移动加工机器人,这种移动加工机器人具有大范围定位、局部精细化加工等特性。



图2 自然界生命体及受其启发的机器人设计

3.2 谋其术

“谋其术”的本质是以创造发明为目标的一种技术应用。在认知并揭示了事物发展规律的基础上,若要产生发明创造,便要“谋其术”,即寻找合适的方法。在自然界中,机构扮演着重要的角色,例如大多数脊椎动物的关节运动是通过多根肌肉并联牵拉产生的,部分节肢动物的关节外骨骼也构成了四连杆机构,生命体总体上呈现出串联和并联相结合的混联结构形式。设计的移动式加工机器人的骨架就是一种混联机构,其中的末端(相当于长颈象鼻虫的头部)是一个并联机构,该机构的设计是至关重要的一环,也是难点,“术”将发挥核心作用。线几何(Line Geometry)原理是探讨空间线簇几何特性的一种数学理论,将线矢量的相关性用线簇的维数进行分类表达,GRASSMANN研究了一些典型线簇的几何特性,后人称之为Grassmann线几何。在机构学领域,Grassmann线几何已被应用在机构的奇异性分析以及机构的构型综合之中。基于Grassmann线几何,可将空间线簇赋予相应的物理意义,通过(线矢量和偶量)线图的方式来描述机构的运动与约束。采用自由度或约束空间线图描述机构的运动或约束的方法称为线图法。该方法直观、明了且物理意义明确,能够以直观的方式对机构的运动和约束进行定性分析。

这里,我们采用前期研究的基于Grassmann线几何和线图法的构型综合方法^[18-19]这一“术”开展机器人的并联机构构型设计。为了适应复杂空间曲面的加工需求,设计的图2b所示机器人的末端并联机构需要具备五自由度运动能力,因此可采用“两移三转”(2T3R)或“三移两转”(3T2R)的自由度形式。如图3所示,根据对偶法则,对于2T3R自由度形式可得机构约束空间为一维力约束,对于3T2R

自由度形式可得机构约束空间为一维力偶约束。根据支链设计目标,重点探讨图 4 所示的几种 UPU 支链。图 4a 所示支链可以提供一维力约束,但是约束力空间位置随末端位姿变化。图 4b 所示支链可提供一维力偶约束,但是这种约束要求两个 U 铰轴线互相平行,这样的约束在实际设计中难以保证,约束具有瞬时性。图 4c 所示支链可以提供一维力约束,其本质是图 4a 所示支链的特殊情况,此时,约束力的作用点为定平台上的固定点,便于进行力学设计,但此约束仍具有瞬时性,为了解决该问题,将转动副 ω_4 与移动副 ν 进行了固化设计,即将 UPU 支链通过 UCR 支链实现。




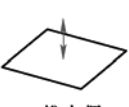
五自由度空间图谱	约束空间图谱	支链设计需要
 2T3R 机构	 一维力	1. 约束力位置明确 2. 与动平台连接运动副简单
 3T2R 机构	 一维力偶	

图 3 五自由度并联机构支链设计路线

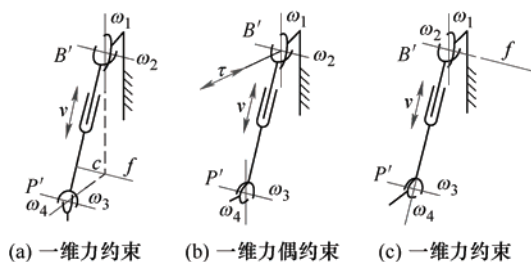


图 4 五自由度并联机构 UPU 支链

对于目标五自由度并联机构,将第 1 支链分配一维力约束,采用设计得到的 UCR 支链形式,第 2~5 支链设置为无约束支链,采用典型 UPS 支链并通过 UCU 支链形式实现。因此,通过构型综合得到的五自由度全并联机构可描述为 UCR-4UCU 机构,如图 6 所示。经过验证,所设计的机构可以实现五自由度运动,具有结构紧凑、轻量化、高灵活性等特性,并且其单方向转动能力大于 90° 。

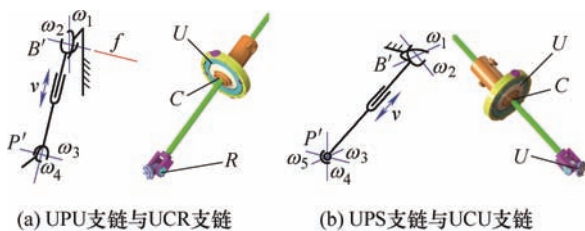


图 5 五自由度并联机构支链简化

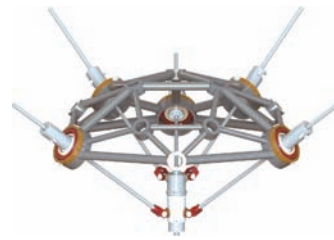


图 6 UCR-4UCU 并联机构

3.3 求其魂

“谋其术”让我们获得产生发明创造的方法,“求其魂”则是让我们了解发明创造中起主导和决定作用的因素,从而发挥发明创造的最佳性能、实现最佳效果。“求其魂”的本质是以改进发明为目标的一种技术应用,它主要包含评价方法和改进方法,体现了人的品性。

自然界中的生物常借助过人的力量或速度等特性谋求生存。例如螃蟹的蟹钳内部结构具有四连杆闭环机构特征,该结构通过力增益方式使螃蟹拥有巨大的夹持力。又如蜂鸟的翅膀关节构成了一个四连杆增速机构,使其翅膀振动频率能够达到 80 Hz ,从而具备丰富的飞行模式。从自然界我们了解到机构的本质功能是传递运动和力,可以对力或运动产生放大增益的作用,运动和力的交互作用机理也是领域内的一个关键基础理论问题。对于该问题,我们前期采用旋量理论揭示了广义传递力、约束力以及许让运动、受限运动之间的相互作用机理,基于能效系数概念,建立了局域及全域性能评价数学模型,提出并建立了运动/力传递和约束特性局域和全域性能评价体系^[20-24]。基于该评价方法,采用提出的一种分层递阶式优化方法,实现了基于图 6 所示机构的机器人装备尺寸参数及结构参数优化。再结合轻量化设计,研发了一台五自由度并联加工机器人,如图 7 所示,该机器人的五轴部件重量仅为约 800 kg ,远低于传统五轴加工机床动辄十几吨的重量。这种机构性能评价方法,符合自然界生命体的运动和力传递有效性法则,是机构设计中性能评价“求其魂”的体现。



图 7 五自由度并联加工机器人

这种五自由度并联加工机器人,通过第三方机构检测,移动工作空间为 $600\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 400\text{ mm}$,转动工作空间为 30° A/B 联动,可实现立卧转换,末端重复定位精度为 0.012 mm ,末端定位精度为 0.018 mm ,转角精度为 0.009° 。如图 8 所示,加工了 ISO10791-7 三轴试件,检测平面度、圆度、平行度、垂直度等误差,平均误差为 0.015 mm ,标准差为 0.013 mm ;对于加工的 S 形五轴标准试件,在 S 缘条上取 100 个测点进行误差检测,平均误差为 0.029 mm ,标准差为 0.023 mm 。

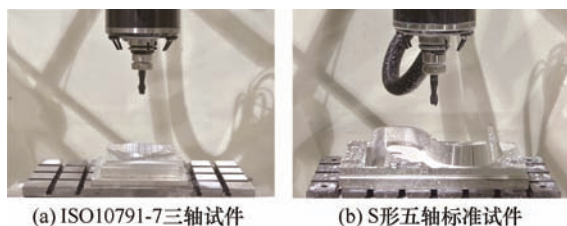


图 8 标准试件加工验证

我们知道,自然界中的结构/机构形式大多数是混联的,但是受相关领域知识技术发展水平的限制,许多人造机构仍是简单的串联机构。例如在加工装备领域,传统摆角头的两个回转运动是两个串联摆动轴的合成运动,姿态工作空间内部存在奇异区域,当刀具在奇异域内进行姿态调整时,即使是姿态的小幅度变化也可能会引起摆动轴的大范围运动。采用此类机床加工曲面零件时,在开闭角转换区域会面临加工精度和效率的大幅下降问题,甚至铣伤零件表面。而图 7 所示的五自由度并联加工机器人的动平台同时与五个支链相连接,全并联的设计使得动平台的运动受五个支链的直接控制,加工摆角头的运动为五个支链共同作用的耦合运动,而非串联式机构的合成运动,这使得我们设计的加工机器人能够实现姿态耦合运动,在姿态工作空间内部无奇异,可以实现高效灵活的姿态调整。该五轴并联加工机器人的姿态耦合运动,是一种典型的仿生运动(例如:人手腕、动物脖子的姿态调整运动),是该机构设计中耦合调姿“求其魂”的体现。

有了基于“求其魂”的性能评价的参数优化设计和姿态耦合调整能力设计,通过提出的刀具路径规划方法^[25]、动力学前馈与进给速度规划的综合控制方法^[26],采用该加工机器人成功加工出了壁厚 2 mm 、壁高 48 mm 、含多处直面与曲面特征拼接的框架类零件,如图 9 所示。得益于姿态耦合运动规

划方法,该零件的加工效率提升了 51% ,并且消除了刀具通过开闭角转换处所造成的表面缺陷。检测结果表明:零件表面 67 个测点的平均误差为 0.0224 mm 、最大误差为 0.0629 mm 。零件的加工精度远高于航空框架类结构件 $\pm 0.15\text{ mm}$ 的精度要求。进一步,采用该机器人完成了飞机框架类结构件、盖板、加强框、连接板等关键零件的高效加工,如图 10 所示,其精度均满足制造需求,五轴并联加工模块的综合加工能力得到有效发挥与体现。这些零件的高效、高质量加工,是“求其魂”的性能评价和姿态耦合运动设计起了核心作用。

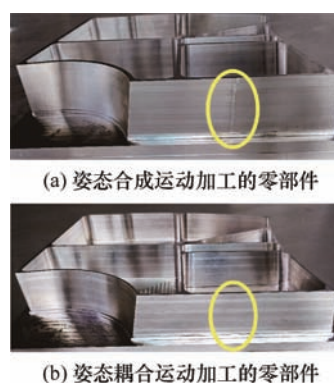


图 9 姿态合成与姿态耦合运动加工航空框架零件

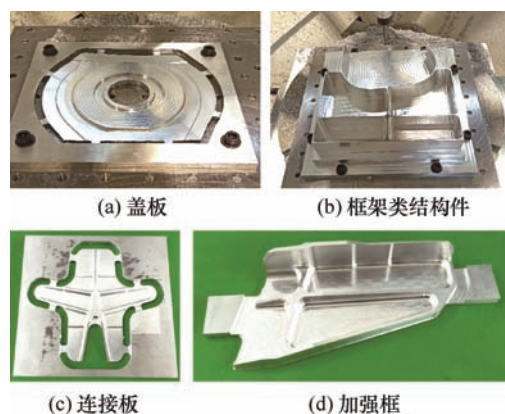


图 10 并联加工机器人加工的关键零件

3.4 索其变

“索其变”的本质是以实现应用变通为目的的科技创新实践。要实现对研究目标的进一步创新,需要发挥人的悟性,通过“索其变”,探索五自由度并联加工机器人的变通形式,应对更为复杂的加工需求,从而实现柔性制造。在“谋其术”和“求其魂”环节,通过构型设计“术”的运用以及性能评价、姿态耦合运动“魂”的实现,设计的并联机器人具

有轻量化的特点,切削实验表明其具有高效、高质量加工的优点。由此,我们可以想象把这种具有五轴运动功能的并联机构变通为一个类似于人手的功能模块,从而发明出“全向移动平台+高刚度机械臂+轻量化五轴加工功能部件”形式的移动式混联加工机器人,以满足如图 11 所示的大型复杂构件原位柔性加工需求。全向移动平台配备稳定支撑装置与定位系统,能够实现移动式混联机器人的加工状态稳定支撑以及在大场景下的定位和自主导航,相当于人腿的功能。全向移动平台到达工作位置并稳定支撑后,高刚度机械臂将轻量化五轴加工功能部件定位到大型复杂构件的待加工面附近,相当于人手臂的功能。之后机械臂保持锁定状态,轻量化五轴加工功能部件对局部结构进行精细加工,相当于人手的功能。由此可见,通过“索其变”而创新的这种移动式混联加工机器人,与自然界生命体的作业模式类似,可实现大范围定位与局部精细化作业的功能。

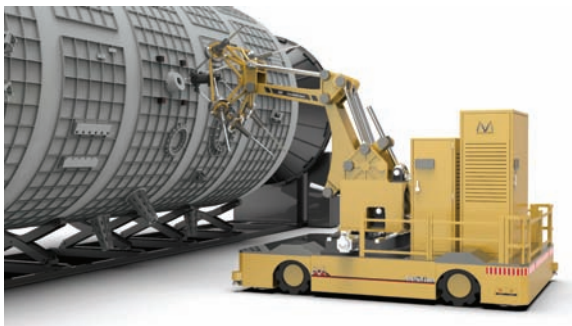


图 11 移动加工示意图

新装备与新模式的提出,使得大型复杂构件的制造模式产生了颠覆性的变化,这种把“机床”举起来对大型复杂构件进行原位加工的构想得以实现,将“铁打的机床、流水的工件”的传统加工模式变革为“铁打的工件、流水的机床”模式。这样的加工装备与模式创新,融合了传统机床与串联机械臂等加工装备的优点,具有灵活性好、效率高、精度高的优势。为了适应复杂的生产加工情况与不同的加工需求,高刚度机械臂末端的五轴加工功能部件还可更换为铣削模块部件、磨抛模块部件等。通过加工模块的变通,使加工机器人得以适应各种复杂的生产情况,从而实现机器柔性扩展柔性。如图 12 所示,通过搭载六维力传感器,可实现机器人位置控制模式与力觉伺服控制模式之间的切换,且具备高精度接触力控制功能,适应复杂场景的不

同需求,保证了磨抛等加工作业的工作表面加工效果。

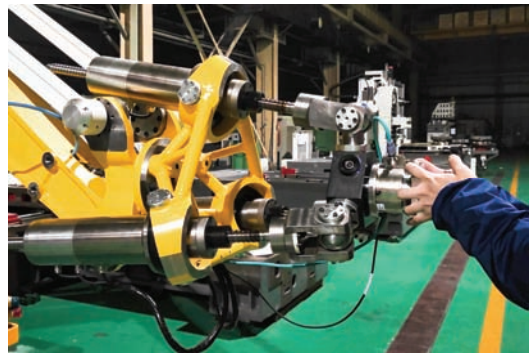


图 12 机器人柔顺运动控制测试

3.5 用其精

“用其精”的本质是利用发明创造以改造世界为目的、以理论技术为指导开展的实践活动。通过上述的“寻其道、谋其术、求其魂、索其变”,设计了一种五自由度全并联机构,基于该机构研制的五自由度并联加工机器人具有轻量化、高效高质量加工的特性,把该机构变通为一种五轴加工功能模块,创新性地研发了一种移动式混联加工机器人,以应对大型复杂构件的原位柔性加工需求,颠覆了此类构件的加工制造模式。在上述工作的基础上,还需要对提出的装备与模式进行合理应用,发挥其优势,达到“用得好”的目的,即“用其精”,最终实现大型复杂构件的高效高质量加工。

采用设计的移动式混联加工机器人,结合自主导航(全向移动平台走位)和双目视觉准确定位(确定主轴与被加工特征的相对位姿关系),进行了直径 3.5 m 的航天器舱体设备安装支架端面的原位铣削应用验证,如图 13 所示,加工后检测支架安装面的最大误差为 0.040 mm,优于 0.2 mm 的精度要求,大型复杂构件加工技术与装备的变革得以实现。



图 13 原位铣削加工验证

由此, 可以想见, 大型航空薄壁件、空间站大型舱体结构件、重型燃气轮机组件、大型风电叶片、船艉螺旋桨等大型复杂构件的原位柔性高效高质量加工需求将通过此类移动式混联加工机器人装备和加工模式的创新得到解决。

所提出的移动式混联加工机器人及原位加工模式可以实现大型复杂构件的柔性加工, 但若更好地发挥其性能实现高效高质量制造, 实现真正的“用其精”, 仍然面临诸多挑战, 例如实现加工特征局部高精度扫描测量技术、位姿在线高效高精导引技术、面向超大空间的全局实时定位技术、跨尺度组合测量场的基准传递与误差补偿技术等, 通过多学科交叉融合的技术创新, 有助于进一步攻坚重大需求中的复杂难题。科学研究中的多学科交叉与融合也将促进相应技术的交叉与集成, 通过多学科思维碰撞与多学科技术融合, 有助于推动科技创新研究领域新原理、新方法、新机制、新体系的建立, 能为创新性工作的诞生提供更多的可能性, 为人类社会创造更大的贡献与价值。

4 结论

科技创新方法论研究的开展与研究模式的探索对于推动人类社会科技进步具有重大意义。面向重大需求应用, 本文基于古典哲学思想和辩证唯物主义方法论, 探讨了一种以揭示规律、创造发明、改造世界为指导思想的科技创新研究模式, 并将其总结为“寻其道、谋其术、求其魂、索其变、用其精”的辩证统一过程, 体现了探索、求真、谋变、务实的科技创新魅力, 是人的天性、品性、悟性、习性的综合表现, 通过在这一过程中的认知与实践, 谋求解决重大应用需求中的科学和技术问题。在该模式的指导下, 围绕航空航天等重点领域大型复杂构件的高效高质量加工的重大需求, 开展了科技创新研究实践, 成功研制了移动式混联加工机器人, 并提出了原位加工模式, 最终将其应用于此类大型复杂构件的原位柔性加工生产实践中。实践结果表明, 该科技创新研究模式遵循了辩证唯物主义重要思想, 在科技创新实践中是有效的, 可作为现代科技创新的一种模式, 在工程科学实践中正确运用科技创新研究模式对于技术发展和社会进步具有长远意义。

参 考 文 献

[1] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志, 1990(1): 3-10.

- QIAN Xuesen, YU Jingyuan, DAI Ruwei. Open complex giant systems and their methodology[J]. Journal of Nature, 1990(1): 3-10.
- [2] 霍明远. 浅谈知识创新工程中的科技政策保证[J]. 科学新闻, 1999(13): 5.
- HUO Mingyuan. On science and technology policy guarantee in knowledge innovation project[J]. Science News, 1999(13): 5.
- [3] 傅家骥. 技术创新学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- FU Jiaji. Technological innovation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.
- [4] 肖沛. 基于知识管理的组织创新研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2004.
- XIAO Pei. Research on organizational innovation based on knowledge management[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2004.
- [5] 凡皮尔. 科学史[M]. 北京: 商务印书馆, 1975.
- VAN P. History of science[M]. Beijing: Commercial Press, 1975.
- [6] 若-弗·马泰伊. 毕达哥拉斯和毕达哥拉斯学派[M]. 北京: 商务印书馆, 1997.
- JEAN-FRANCOIS M. Pythagoras and pythagorean school[M]. Beijing: Commercial Press, 1997.
- [7] 林风. 生生之谓易: 哲学诠释学视域下西方《易经》译介研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2017.
- LIN Feng. A study on the translation and dissemination of Yijing in the west from the perspective of philosophical hermeneutics[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2017.
- [8] 胡光利. 文艺复兴运动与近代科学的兴起[J]. 辽宁大学学报(哲学社会科学版), 2002, 30(2): 32-35.
- HU Guangli. Renaissance and the rise of modern science[J]. Journal of Liaoning University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2002, 30(2): 32-35.
- [9] 伊萨克·牛顿. 自然哲学之数学原理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006.
- ISAAC N. Mathematical principles of Natural Philosophy[J]. Beijing: Peking University Press, 2006.
- [10] 埃德温·阿瑟·伯特, 张卜天. 近代物理科学的形而上学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.
- EDWIN A B, ZHANG Putian. Metaphysical basis of modern physical science[M]. Beijing: Peking University Press, 2012.
- [11] 弗里德里希·恩格斯. 路德维希·费尔巴哈和德国古典哲学的终结[M]. 北京: 人民出版社, 1972.
- FRIEDRICH E. Ludwig Feuerbach and the end of

- German Classical Philosophy[M]. Beijing: People's Publishing House, 1972.
- [12] 中共中央马克思恩格斯列宁斯大林著作编译局. 马克思恩格斯选集. 第四卷[M]. 北京: 人民出版社, 1995.
- Compilation Bureau of works of Marx, Engels, Lenin and Stalin of the CPC Central Committee. Selected works of Marx and Engels. Volume IV[M]. Beijing: People's Publishing House, 1995.
- [13] 檀润华, 王庆禹, 苑彩云, 等. 发明问题解决理论: TRIZ——TRIZ 过程、工具及发展趋势[J]. 机械设计, 2001(7): 7-12.
- TAN Runhua, WANG Qingyu, YUAN Caiyun, et al. Theory for solving the inventive problems (TRIZ) —— The process, tools and developing trends of TRIZ[J]. Mechanical Design, 2001 (7): 7-12.
- [14] 路甬祥. 仿生学的意义与发展[J]. 科学中国人, 2004(4): 24-26.
- LU Yongxiang. Significance and development of bionics[J]. Scientific Chinese, 2004(4): 24-26.
- [15] 阮元. 十三经注疏清嘉庆刊本[M]. 北京: 中华书局, 2009.
- RUAN Yuan. Annotation of the thirteen classics and Qing Jiaqing edition[M]. Beijing: Zhonghua Book Company, 2009.
- [16] DUGGER W. The relationship between technology, science, engineering, and mathematics[J]. Technology Teacher, 1993(1): 18.
- [17] 谢福贵, 梅斌, 刘辛军, 等. 一种大型复杂构件加工新模式及新装备探讨[J]. 机械工程学报, 2020, 56(19): 70-78.
- XIE Fugui, MEI Bin, LIU Xinjun, et al. Novel mode and equipment for machining large complex components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(19): 70-78.
- [18] XIE Fugui, LIU Xinjun, YOU Zheng, et al. Type synthesis of 2T1R-type parallel kinematic mechanisms and the application in manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, 30(1): 1-10.
- [19] XIE Fugui, LI Tiemin, LIU Xinjun. Type synthesis of 4-DOF parallel kinematic mechanisms based on Grassmann line geometry and atlas method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(6): 1073-1081.
- [20] WANG Jinsong, WU Chao, LIU Xinjun. Performance evaluation of parallel manipulators: Motion/force transmissibility and its index[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(10): 1462-1476.
- [21] LIU Xinjun, WU Chao, WANG Jinsong. A new approach for singularity analysis and closeness measurement to singularities of parallel manipulators[J]. Journal of Mechanisms and Robotics-Transactions of the ASME, 2012, 4(4): 4007004.
- [22] LIU Xinjun, CHEN Xiang, MEYER Nahon. Motion/force constrainability analysis of lower-mobility parallel manipulators[J]. Journal of Mechanisms and Robotics-Transactions of the ASME, 2014, 6: 0310063.
- [23] XIE Fugui, LIU Xinjun, LI Jie. Performance indices for parallel robots considering motion/force transmissibility[C]// Intelligent Robotics and Applications. The 7th International Conference on Intelligent Robotics and Application, Guangzhou: Springer, 2014: 35-43.
- [24] MENG Qizhi, XIE Fugui, LIU Xinjun, et al. An evaluation approach for motion-force interaction performance of parallel manipulators with closed-loop passive limbs[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 149: 103844.
- [25] XIE Zenghui, XIE Fugui, LIU Xinjun, et al. Global G^3 continuity toolpath smoothing for a 5-DoF machining robot with parallel kinematics[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 67: 102018.
- [26] XIE Zenghui, XIE Fugui, LIU Xinjun, et al. Tracking error prediction informed motion control of a parallel machine tool for high-performance machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 164(3): 103714.

作者简介: 刘辛军, 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师, 国家杰出青年科学基金获得者, 教育部“长江学者”特聘教授, 国家“万人计划”领军人才, 现任 IFToMM 中国委员会主席。主要研究方向为机构学与机器人、先进与智能制造装备。

E-mail: xinjunliu@mail.tsinghua.edu.cn