

《“数控一代”机械产品创新工程》的战略意义和技术路线

周 济^{1,2} 邵新宇² 周艳红²

1. 中国工程院,北京,100088 2. 华中科技大学,武汉,430074

摘要:加快转变经济发展方式,中心是产业结构的调整优化,关键是产品的升级换代。数控化是创新机械产品的有效途径,其技术路线是用伺服电机驱动系统取代传统机械中的动力与传动装置,并用计算机数控系统对机械运动与工作过程进行控制,从根本上提高产品功能和性能,提高产品市场竞争力。《“数控一代”机械产品创新工程》既是数控技术应用工程,更是机械产品创新工程;既有机械工业发展强大需求的推动,又有成熟数控技术的支撑;要充分发挥我国的制度优越性,总体规划、分步实施、重点突破、全面推进,实行有组织的创新;采取“企业为主体、市场为导向、政产学研用相结合”的协同创新和集成创新技术路线;目标是推广和应用数控技术,在 10 年内实现各行各业各类各种机械产品的全面创新升级换代,为我国从“制造大国”到“制造强国”的跨越式发展建功立业。

关键词:数控技术;机械产品创新;“数控一代”机械产品;有组织创新;集成创新;协同创新

中图分类号: TG659; TP27

DOI:10. 3969/j. issn. 1004—132X. 2012. 01. 001

Strategic Significance and Technical Route of “NC Generation” Mechanical Product Innovation Project

Zhou Ji^{1,2} Shao Xinyu² Zhou Yanhong²

1. Chinese Academy of Engineering, Beijing, 100088

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

Abstract: To accelerate the transformation of economic growth pattern, efforts should be centered on adjustment and optimization of industrial structure with the key being upgrading of products. Numerical control is an effective approach to the innovation of mechanical products. The technique route is to replace power unit and gear of traditional machinery with servo motor driving system and to control mechanical movement and working process with CNC system, thus fundamentally improving product function and performance, and enhancing product market competitiveness. The “NC Generation” mechanical product innovation project, involving NC technology applications and innovation of mechanical products, is one that is driven by huge demands from development of machinery industry and boosted by mature NC technology. The execution of this project should fully harness the nation’s superiority in system by carrying organized innovation. Following an integrated, collaborate innovation technology route with “enterprise as the dominant force, market as the guidance, and featured by combination of governments, producers, schools, research institutes and users”, the project should be planned comprehensively, implemented step by step and with focuses, and advanced in an all-around way. The objective is to popularize and apply NC technology, to realize the overall innovation and upgrading of China’s mechanical products in ten years and ultimately to contribute to China shifting from a giant manufacturing force to a powerful nation.

Key words: numerical control technology; innovation of mechanical product; “NC Generation” mechanical product; organized innovation; integrated innovation; collaborative innovation

1 《“数控一代”机械产品创新工程》的战略意义

1.1 机械产品创新是机械工业科学发展的关键

我国今后的发展,要以科学发展为主题,以加快转变经济发展方式为主线。加快转变经济发展方式,必须加快推进产业结构的调整优化,关键是产品的技术创新和升级换代。

经过新中国 60 多年特别是改革开放 30 多年

的奋斗,中国机械工业实现了历史性的跨越式发展,制造业生产总产值成为世界第一,我们国家已经成为“制造大国”。但是,我们还不是“制造强国”,机械工业还没有摆脱粗放型、外延式发展的模式,核心技术和关键技术掌握得不多,自主创新的产品少,附加值不高,核心竞争力不强。中国制造既面临大好发展机遇,又面临极为严峻的挑战。面临的挑战很多,问题主要有两个:产品质量问题和产品创新问题。因而,产品创新和产品质量应该成为今后一段时期机械工程科技进步的主要

方向。

应用数控技术实现我国机械产品的全面创新和升级换代,非常必要,完全可能,对于我国机械工业的科学发展,具有重要的战略意义。

1.2 数控化是全面创新机械产品的有效途径

机械产品的创新可以有多种途径,其中主要有两种方法:一是创新工作原理或者说工作装置;二是创新运动的驱动和控制系统。传统机械产品的构成如图 1 所示,包括动力装置、传动装置、工作装置。工作装置的创新是根本性的,极为重要。千百年来,人们一直在不断创造出各种新的机械,形成了适用于完成各种不同任务的成千上万的机械产品。数控化则是对于机械运动的驱动和控制系统的创新,数控机械产品的构成如图 2 所示。

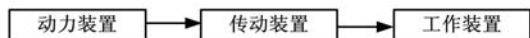


图 1 传统机械产品的构成

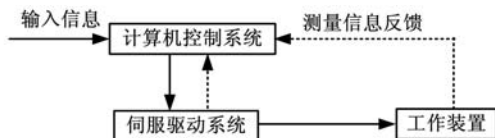


图 2 数控机械产品的构成

数控化是创新机械产品的有效途径,其技术路线是用伺服电机驱动系统取代传统机械中的动力装置与传动装置,更为重要的是用计算机控制系统对机械运动与工作过程进行控制。数控技术是机械产品创新的使能技术,是先进的信息技术与自动控制、机械制造技术相结合的集成技术,其核心是数字化。数控技术的应用引起机械产品本身的内涵发生根本性变化,使机械产品的功能极大丰富,性能发生质的变化,可以从根本上提高机械产品的水平和市场竞争力。

综观全球实现产业结构调整和机械产品升级的历程(图 3):蒸汽机技术使机械工业由人力制作时代进入机械化时代;电气技术使机械工业由机械化时代进入电气化时代;数控技术正在使机械工业由电气化时代跃升为数字化时代;在可预见的将来,机械工业将由数字化时代进入智能化时代。



图 3 机械产品的升级换代

“蒸汽一代”机械产品的核心推动力是由于蒸汽机技术这一使能技术带来的一场动力革命;“电气一代”机械产品的核心推动力则是由于电机技术这一使能技术带来的另一场动力革命;而数控

技术这一使能技术对机械产品带来的革命则更加深刻,一方面,用伺服电机取代普通电机可极大简化机械结构、提升控制能力、节省能源与材料,更本质的是数控化机械拥有一个具有强大信息处理与控制能力的计算机控制系统,可使机械产品的功能与性能产生质的飞跃,并为各种先进信息技术的进一步应用乃至将来实现智能化奠定了基础。因此,“数控一代”机械产品是信息化与工业化深度融合的产物,其实质是信息化技术引起的一场深刻变革。可以看到,机械产品的数控化创新具有鲜明的特征,具有本质的规律,可以普遍运用于各种机械产品创新,可以引起机械产品的升级换代,引起机械工业的深刻变革。这也是我们提出“数控一代”这样一个概念的理由和根据。

1.3 当前是中国机械产品升级换代的最佳机遇期

当前,我国机械工业正处于产品数字化发展时期,全世界的机械工业也正处于产品数字化发展时期。由“电气一代”到“数控一代”是一场深刻的变革,必然要经过艰难的攀登过程。在这方面,西方发达国家已经先行了 60 年,还要经过数十年才能完成这样一个历程。对于中国机械工业来说,经过我们大家的艰苦奋斗,一定能够在较短时间内完成这一场变革,完成向“数控一代”的进军,这是中国机械产品升级换代的最佳机遇,是中国机械工业跨越式发展的最佳机遇。主要理由是:

(1)需求强大。需求是最强大的发展动力。由于国民经济持续快速发展以及国际国内市场的激烈竞争,数控机械产品的市场需求越来越旺盛,企业产品创新积极性越来越高。我们现在面临的形势是:一是要将数控技术广泛应用于中、低档机械产品,以提升产品的市场竞争力;二是要攻克高端数控机械产品,以满足经济、社会、国防等方面日益提高的需求。

(2)技术支持。数控技术的落后是长期以来制约我国机械产品创新与质量提升的一个重要因素。经过多年来对数控技术的持续攻关,特别是电机技术、功率器件技术、控制技术、计算机技术的突破性进展,我国的数控产业已经基本形成,国产经济型数控系统已主导国内市场,中档数控系统形成了产业规模,高档数控系统也已经掌握了关键技术。我国的数控技术已发展到了技术成熟、质量可靠的阶段,全面推广应用的条件已经成熟。

(3)人才队伍与应用示范带动。数控机械产品的创新需要有掌握数控技术、机械设计与制造

技术、产品领域知识等复合型知识结构的人才,这也是长期以来影响我国机械产品创新的一个重要原因。经过多年努力,我们在人才队伍和应用示范方面已具备了良好的基础。

1.4 《“数控一代”机械产品创新工程》的战略目标

2011年初,18位院士提出了关于实施《“数控一代”机械产品创新工程》的建议,中央领导同志高度重视、亲切关怀,科技部、工信部、发改委等深入调研、认真部署,已于近日正式启动了《“数控一代”机械产品创新应用示范工程》。

《“数控一代”机械产品创新工程》既是数控技术应用工程,更是机械产品创新工程;既有机械工业发展强大需求的推动,又有成熟数控技术的支撑。要充分发挥我国的制度优越性,采取协同创新技术路线,在整个机械行业推进有组织的创新。

《“数控一代”机械产品创新工程》的战略目标是:在机械行业全面推广应用数控技术,在10年内,实现各行各业各类各种机械产品的全面创新,使中国的机械产品总体升级为“数控一代”,为我国机械工业从“大”到“强”的跨越式发展做出重大贡献。

2 应用数控技术实现机械产品创新的技术路线

2.1 从 X52K 到 XK714 到 XHK714 到 XHK714/3-5

数控机械产品的出现是以数控加工机床的诞生为标志的。20世纪40年代末,美国帕森斯公司提出了应用计算机控制机床加工样板曲线的设想,并与麻省理工学院合作,于1952年研制成功世界上第一台三坐标立式数控铣床。它的诞生标志着机械制造数字控制时代的开始。

(1)X52K 立式铣床。图4表示的是X52K普通立式铣床传动系统图,为实现不同的刀具切削速度,X52K立式铣床设计了复杂的主传动和进给传动变速系统。

(2)XK714 数控立式铣床。应用数控技术对X52K立式铣床进行产品升级得到数控立式铣床XK714,如图5所示。XK714数控立式铣床采用计算机数控系统对机床运动和工作过程进行控制,进给运动和主轴运动均用速度精确可控的伺服电机取代原普通电机和机械传动机构(图6)。XK714数控立式铣床具有(X、Y、Z)三坐标联动的功能,适合加工形状复杂的零件(如箱体、壳体、曲线曲面轮廓等),同时,可有效节省工艺装备与

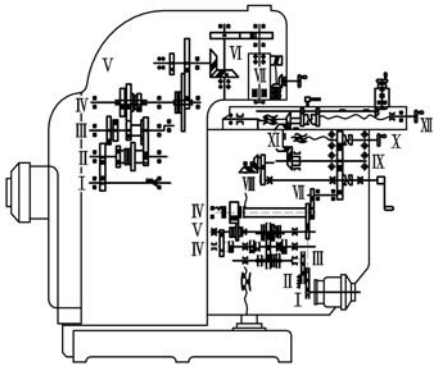


图4 X52K 立式铣床传动系统



图5 数控立式铣床 XK714 整机

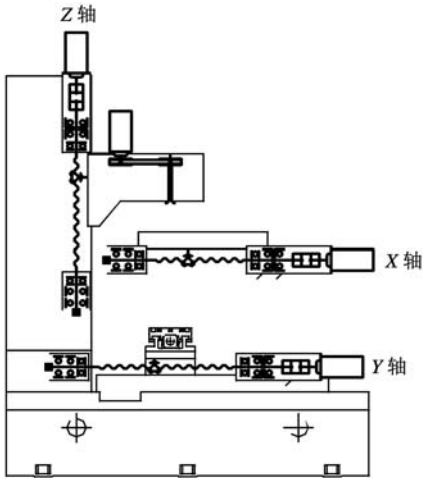


图6 数控立式铣床 XK714 传动系统图

缩短生产准备周期,提高零件加工质量与生产效率。

(3)XHK714 三坐标立式加工中心与XHK714/3-5五坐标立式加工中心。在XK714数控立式铣床的基础上,增装刀库和自动换刀装置,升级为三坐标立式加工中心XHK714。由于具备自动换刀功能,XHK714的自动化程度有显著提升,适宜于加工形状复杂、工序多、需用多种类型普通机床和刀具夹具且经多次装夹和调整才能完成加工的零件。

进一步在工作台上增加一个两坐标(θ 、 Φ)数控转台,即升级为五坐标联动的立式加工中心

XHK714/3-5(图 7)。与三坐标相比,五坐标联动机床可使刀具相对于工件呈任意姿态,从而可给加工更大的自由度,可以加工在三坐标机床上由于存在刀具干涉而难以完成的复杂曲面零件,例如发动机叶轮;可以选择更有效的刀具和采用最有效的刀具相对工件的姿态进行加工,有效提高加工效率与质量。

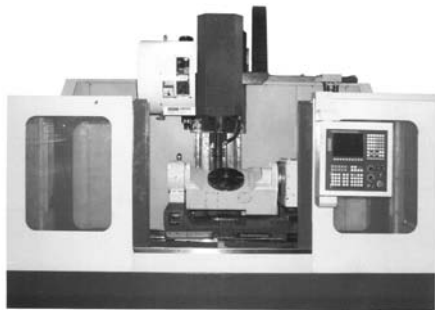


图 7 XHK714/3-5 五坐标立式加工中心

进而,通过传感、控制、信息处理、人工智能等技术的升级,可使机床性能和智能化程度不断提高,如实现智能编程、自适应控制、机械几何误差补偿、热变形误差补偿、三维刀具补偿、运动参数动态补偿、故障监控与诊断等。

2.2 应用数控技术创新机械产品的技术路线

总结从 X52K 到 XK714 到 XHK714 和 XHK714/3-5 的产品创新升级过程,比较图 1 和图 2,数控机械产品与传统机械产品之间存在一个相同点和两个不同点。

(1)相同点:两者的工作装置基本相同。

(2)不同点之一在于动力传动系统。在数控机械产品中,传统机械中作为动力源的普通电动机被具有动力与变速功能的伺服电动机取代,使传统的机械变速机构得以取消或极大简化;同时,每个机械运动由单独的伺服电机驱动,并由计算机控制系统进行协调和控制,使机械产品的运动和跟踪过程控制能力极大提高。

(3)不同点之二是数控机械产品拥有一个计算机控制系统,也可以说是增加了一个“大脑”。计算机控制系统使数控机械的运动和工作过程可以根据需要进行相应的控制,从而使数控机械具有多功能、高柔性、高精度、高效能、高可靠性和操作方便等特征;进一步,可使机械产品智能化成为可能。

归纳起来,应用数控技术创新机械产品的设计内容如图 8 所示。先是进行总体方案设计,确定运动与控制方案,再是进行四个方面的设计,这四个方

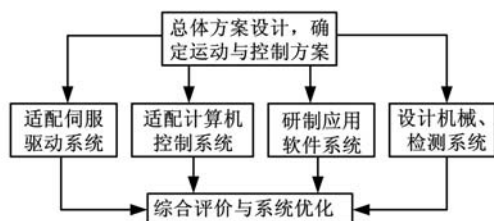


图 8 应用数控技术创新机械产品的设计内容

(1)适配伺服驱动系统。根据被控对象的要求确定系统的组成、控制方式(开环、半闭环、全闭环、混合闭环)、驱动电机类型(步进电动、直流伺服电机、交流伺服电机)与大小、功率驱动装置、检测装置以及校正方式及其参数。

(2)适配计算机控制系统。首先根据数控机械产品的性能指标确定其控制系统需要具备的功能,包括运动控制、逻辑控制、测量、人机交互、编程、补偿、保护、通信、监测与诊断等方面的功能以及其他可能需要实现的特殊功能;然后确定系统的实现方案,从数控机械产品开发者的角度,其控制系统的实现可选择直接购买市场上的产品、委托控制系统生产商进行开发或联合开发等方式。

(3)研制应用软件系统。从数控机械产品的使用角度,一般需要通过一个编程软件系统来有效获得控制数控机械运行的工作程序。数控编程系统的性能直接决定数控机械产品的可使用性与柔性,影响产品的工作质量和效率;而且,由于数控机械产品种类繁多,具体任务各不相同,其编程系统也千差万别,对于产品的领域知识有很高要求。

(4)设计机械、检测系统。机械系统的高刚度、低摩擦、低惯量化设计;选配合适的传感检测装置等。

3 机械产品的全面创新与升级换代

应用数控技术进行机械产品创新的技术路线具体、明确,相关技术成熟可靠,适用于各行各业机械产品的全面创新。机械产品种类很多,大都可以通过数控化实现创新,提升到“数控一代”的水平,从根本上提高产品的功能、性能和竞争力。

3.1 制造装备类机械产品的数控化升级换代

制造装备是发展国民经济与国防建设的基础装备,其技术水平决定着整个国民经济和国防现代化的水平。各种制造装备均可以通过数控化以创新升代,如各种切削机床、成形机床、切割及焊接等各种金属加工设备;塑料、玻璃、木材、陶瓷等各种非金属加工专用设备;食品、饮料、农副产品、日用化工、制药等制造行业专用设备。

例 1 注塑机的数控化创新升代

注塑成形是最有效的塑料成形方法之一。我国是全球最大的注塑机生产国,产量占世界年产量的 70% 以上。

与传统的液压式注塑机相比,数控注塑机的工作装置基本不变,其主要变化在于:

(1) 采用伺服电机驱动配合滚珠丝杠和同步齿形带传动取代了液压注塑机的液压泵、液压缸、液压马达等构成的液压驱动系统;

(2) 采用计算机数控系统取代了液压注塑机的模拟量电液控制系统。

与液压注塑机相比,数控注塑机具有如下优点:

(1) 提高精度及稳定性。可实现复杂的控制功能,柔性好,具有优良的控制精度和稳定性,生产的产品质量好且稳定。

(2) 提高生产效率。伺服电机有优良的高速性,且其控制系统容易实现复杂的同步重叠动作,可大大提高生产效率;同时,数控系统可“智能”设置、调整和优化工艺参数,使生产效率与质量进一步提高。

(3) 节能与环保。消耗电力可以减少 40% 左右,噪声低、无油污染。

3.2 其他机械产品的数控化升级换代

除制造装备外,国民经济各行业以及国防军工中的众多其他机械产品也可以数控化以实现创新升代,如汽车、火车、飞机、轮船等交通运输设备,火炮、雷达、坦克等武器装备,工程机械、农业机械、建筑机械、港口机械、印刷机械、医疗机械等。

例 2 火箭炮的数控化创新升代

火箭炮的高精度自动操瞄是提高火箭炮机动性能和打击能力的关键,操瞄装置可以通过伺服电机驱动和计算机控制以实现数控化创新升级。

新一代火箭炮可以大大提高其机动性能,缩短战斗反应时间,提高射速和射击准确性;并且可以与先进的战场管理系统一道,通过“群控”以形成精确而强大的火力网。

3.3 全面创新、升级换代

《“数控一代”机械产品创新工程》需要克服许多困难,最突出的还是要克服人们思想认识上的困难。畏难情绪严重者有之,认为数控化创新很神秘、很难搞,缺乏勇气,缺乏信心;看不起推广应用工作者有之,觉得不上档次,没有水平,缺乏兴趣,缺乏热情。我们要解放思想,勇于创新,坚持“顶天立地”的正确方向,尽好尽快地推进各种机械产品的数控化创新,同时创造一大批高端数控

机械产品。

东莞华中科技大学制造工程研究院与企业密切结合,研制出数十种数控机械产品,大大提高了产品的水平和竞争力,产生了良好的经济效益与社会效益。这里介绍两个创新产品实例。

例 3 编织机的创新升代

我国是毛纺编织大国,仅东莞大朗镇每年生产毛衣就超过 3 亿件。目前,国内毛衣生产主要依靠手动编织机(横机)完成,其效率低下,操作工人的劳动强度很大。

数控编织机(图 9)的单机编织速度比手工横机提高 5~8 倍;每个工人可同时操作 5 台设备,大大提高生产效率;与毛衣设计 CAD/CAM 系统集成,大大提高了毛衣花色品种、质量与市场竞争力。



图 9 数控编织机

例 4 木工机械的创新升代

传统木工机械功能单一,效率低下,污染严重。

数控木材加工中心(图 10)的加工精度高、生产柔性好,工序复合,具备很高的生产效率,并且安全可靠,粉尘、噪声污染低,具有很强的市场竞争力。



图 10 数控木工机械

数控化使机械产品装备了“大脑”,开辟了机械产品创新的广阔空间,不断引领机械产品攀登新的高峰;进而,可以在机械设计理论上和学术上

做出高水平的贡献。这里举一个高端创新的实例。

例 5 光刻机精密工作台

光刻机是 IC 制造中最关键、最复杂和最昂贵的设备。超精密工作台是光刻机核心关键装置,要求实现加速度高至 $2g$ 、速度 1m/s 以上、精度为纳米级的六自由度运动;对于 100nm 线宽的扫描曝光,要求定位精度小于 10nm 、硅片台和掩模台间的同步平均误差小于 5nm 、均方误差小于 12nm ,几乎接近物理极限,常规机械制造工艺无法实现。

要实现光刻机的高速、大行程、六自由度纳米级精度运动,除合理的运动结构与精密检测技术外,关键在于控制,核心在于补偿。其补偿的内容包括台体质量与质心位置误差、六自由度运动耦合干扰误差、粗微动耦合干扰、电机与驱动非线性误差、电路噪声与延时误差、测量干扰误差、环境与温度变化误差等。通过补偿控制,我国研制的 100nm 光刻机工作台实现了高速高精的技术要求。

4 实施《“数控一代”机械产品创新工程》的技术路线

《“数控一代”机械产品创新工程》既是技术推广工程也是产品创新工程;对数控技术而言是技术推广工程,对于各行各业的机械产品而言是产品创新工程。《“数控一代”机械产品创新工程》是一个复杂的大系统工程,必须依靠有组织创新、集成创新和协同创新。

4.1 有组织创新

充分发挥我国制度的优越性,总体规划、分步实施、重点突破、全面推进,动员千军万马,实行有组织的创新。

(1)总体规划、顶层设计。制定国家与各行业、各地方、各企业的数控化机械产品创新升级的总体规划 and 推广计划(路线图)。国家和行业主管部门与地方科技部门联动,行业和地方组织企业实施。

(2)重点突破、典型示范。从全国范围内筛选代表性区域、行业和企业,由国家重点支持实施示范工程,然后进一步在全国范围内全面推广。

(3)技术攻关、推广应用。加强对数控机械产品共性关键技术的技术攻关,进而在行业内和地区内进行全面推广应用。

(4)人才培养、技术服务。学校、科研机构全面动员,大力开展数控机械产品创新设计的人才

培养与专业培训,特别是要广泛动员与强力组织广大企业家和设计工程师的培训。组织各方面力量,努力以几种模式提供数控机械产品创新设计的技术服务:①企业委托设计;②与企业联合设计;③为企业进行人员培训,由企业自主设计。

4.2 集成创新

数控机械产品的创新是数控技术、机械设计与制造技术以及产品领域工艺技术的有效集成,需要数控、机械设计、产品工艺等多方面工程师的密切合作,管理、设计、制造和市场等各方面人才的密切合作,必须采取有效措施进行集成创新。

4.3 协同创新

以企业为主体、市场为导向,政产学研用紧密结合,推进协同创新。

(1)科技部、工信部等国务院有关部门将实行强有力的领导,建立领导机构,推进顶层设计,加强宏观管理。各行业主管部门和地方科技部门将加强组织管理,制定行业规划和推广计划,落实各方面保障措施。

(2)建立各个层面的产学研用创新联盟,将各行业、各地方具有技术优势的生产企业、高校、科研院所、用户企业组织起来,形成数控机械产品创新联盟。

(3)企业是面向市场的主体,是财政投入的主体,当然是技术创新的主体。市场的驱动和企业的积极性是产品创新成功的关键,必须从根本上调动企业家、管理者和工程师的积极性。同时,高校和科研院所中蕴藏着为我国机械工业贡献力量的巨大积极性,要采取有力措施,动员他们、组织他们、依靠他们。政产学研用协同创新,形成中国特色的“数控一代”机械产品创新体系,团结奋斗,努力完成这样一个伟大的创新工程。

我们有一个共同的奋斗目标:经过 10 年的时间,中国的机械产品全面应用数控技术,总体升级为“数控一代”;再经过 10 年左右的时间,到 2030 年,中国的机械产品全面升级为“智能一代”,整体上走到世界前列,为中国的现代化做出基础性、战略性的贡献。

(编辑 郭伟)

作者简介:周 济,男,1946 年生。中国工程院院长、院士,华中科技大学教授、博士研究生导师。研究方向为机械设计与数控技术。邵新宇,男,1968 年生。华中科技大学副校长、教授、博士研究生导师,制造装备数字化国家工程研究中心主任,教育部长江学者特聘教授,国家杰出青年科学基金获得者。周艳红,男,1966 年生。华中科技大学教授、博士研究生导师。