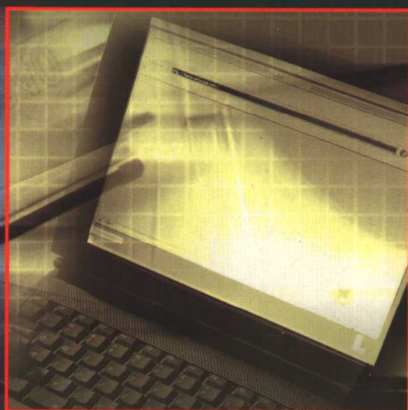


武良臣 郭培红 赵俊伟 等 著

敏捷夹具设计 理论及应用



Agility
Reconfigurability
Reusability
Scalability

煤炭工业出版社

敏捷夹具设计理论及应用

武良臣 郭培红 赵俊伟 朱建安 著
田 坤 王学东 陈国强

煤炭工业出版社

·北 京·

图书在版编目 (CIP) 数据

敏捷夹具设计理论及应用/武良臣等著. —北京: 煤炭工业出版社, 2003

ISBN 7-5020-2313-5

I. 敏… II. 武… III. 夹具—设计 IV. TG75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 048283 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm × 1092mm¹/16 印张 13

字数 295 千字 印数 1—1,200

2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

社内编号 5085 定价 25.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 提 要

敏捷夹具是敏捷制造系统与装备、柔性制造系统、加工中心、计算机集成制造系统中的一个重要基础部件，是为适应敏捷制造而产生的一种新的夹具理念和装夹系统。它对提高制造系统快速响应产品变化的能力，缩短产品设计制造周期，增加制造系统的柔性，降低成本，提高产品质量等，都具有十分重要的意义。

本书比较系统地介绍了敏捷夹具设计的基本理论、基本方法和应用技术，吸收了国内外同行的研究成果，向读者展示了敏捷夹具设计这一新技术的概貌及其前沿发展动态，对从事与制造技术有关的技术人员有一定的参考价值。

序 言

敏捷夹具是敏捷制造系统与装备、柔性制造系统 (FMS)、加工中心、计算机集成制造系统 (CIMS) 中的一个重要基础部件, 是为适应敏捷制造而产生的一种新的夹具理念和装夹系统。与传统的组合夹具、柔性夹具相比, 敏捷夹具所具有的特点和创新之处为: (1) 可重构性 (Reconfigurability), 能直接获取 CAD 与 CAPP 系统的信息, 自动构成适应不同类型产品或零件的装夹系统, 并且有丰富的含有标准接口的装夹元件, 重构粒度高; (2) 可重用性 (Reusability), 能实现夹具设计结果的可存取性, 并可以修改, 加以重用; (3) 可扩充性 (Scalability), 敏捷夹具系统采用标准接口, 可根据生产需要迅速扩充夹具结构和功能, 提供开放式人机接口, 可方便快捷地扩充、更新和修改夹具元件。由此, 敏捷夹具的应用, 对提高制造系统快速响应产品变化的能力, 缩短产品设计制造周期, 增加制造系统的柔性, 降低成本, 提高产品质量等, 都具有十分重要的意义。

《敏捷夹具设计理论及应用》一书, 是作者们总结了多年的研究成果, 结合近期发表的 20 多篇论文, 以及在研究生培养过程中的科学实验和软件设计开发经验, 参阅大量国内外文献, 精心编写, 数易其稿而成的。它反映了本学科国内外的最新成果, 是一部结合敏捷制造系统的实际、研究敏捷夹具的专著。

此书比较系统地介绍了敏捷夹具设计的基本理论、基本方法和应用技术, 吸收了国内外同行的研究成果, 向读者展示了敏捷夹具设计这一新技术的概貌及其前沿发展动态。书中对基本概念、基本理论都叙述得详细透彻。从工程应用角度看, 涉及的面很宽; 数学上避开了较深的概念化的推理, 又不失准确性; 叙述中将泛函分析、集合论、图论、拓扑学、空间解析几何等数学理论应用于虚拟环境下敏捷夹具定位理论之中, 提出了定位夹紧的约束模型、包容问题和混合包容问题, 论述了敏捷夹具可重构、可重用、可扩充系统 (即敏捷夹具的 RRS 系统) 的含义、实现与算法。这些内容对于从事制造业的工程技术人员, 特别是从事工艺装备设计的工程技术人员值得一读, 对于从事与制造技术有关的读者也具有参考价值。

前 言

本书是研究敏捷夹具设计理论的一本专著，是《敏捷夹具制造技术应用基础研究》、《可重构机床机械界面应用基础研究》、《弧齿锥齿轮切削过程虚拟现实技术》等河南省自然科学基金项目研究成果的一部分。

敏捷夹具是指在敏捷制造环境中满足敏捷制造系统要求的夹具，是敏捷制造装备的一个重要组成部分，是实现企业制造敏捷化的硬件条件。它能够根据具体产品的需要快速组合资源配置，使制造系统能够迅速地响应无法预测的用户需要，适应多变市场的需求。由于敏捷夹具具有内部组合和外部扩充的能力，又克服了一般夹具、柔性夹具和组合夹具的可重构性不足、可扩充性小、开放性差和启动时间长等缺点，因而形成了具有可重构性（Reconfigurability）、可重用性（Reusability）和可扩充性（Scalability）的敏捷夹具系统（RRS）。

目前，美国在机床敏捷制造研究项目中设立了敏捷夹具研究课题，由宾夕法尼亚州大学承担，与密西根、伯克利、加利福尼亚大学以及一些科研院所等共同开发；日本、欧美也正在开展敏捷夹具方面的研究。近几年来，我国在国家自然科学基金和“863”高新技术研究计划等的资助下，华中科技大学、清华大学等已分别开发出敏捷夹具计算机辅助构形设计系统、敏捷夹具并行设计系统。此外，浙江大学、南京航空航天大学等也进行了有关方面的研究。尽管如此，敏捷夹具仍处于局部研究阶段，方法也不全面，因此，开展敏捷夹具的理论研究，寻求探索更完善、更深入的理论，仍是一个非常重要的课题。

焦作工学院先进制造技术课题组从 20 世纪 90 年代中期开始，就对敏捷制造，特别是敏捷夹具 RRS 系统进行了研究，先后承担了河南省自然科学基金、河南省教育厅基金和河南省科技攻关等有关项目，开展了大量的课题研究工作，公开发表论文 20 余篇，培养了三届研究生，编写出教材一本。对虚拟环境下敏捷夹具的基本理论，定位夹紧原理及模型，包容、混合包容问题，夹紧的约束模型，RRS 系统的含义、实现与算法，装夹系统及干涉检查，装配建模与约束，装配关系元件库和数据库等都进行了深入探索，并设计开发了应用软件，为敏捷夹具的应用创造了条件。有两项基金课题于 2000 年通过了河南省自然科学基金委员会的验收，为敏捷夹具的深入研究与应用奠定了基础。

本书总结了课题组近年来的研究成果，特别是在敏捷夹具定位夹紧理论及 RRS 系统方面的研究。本书是在焦作工学院武良臣教授、赵俊伟教授主持下完成的，武良臣教授对本书的总体结构和基本框架作了精心安排，其中第一章第一节由武良臣执笔，第一章（第一节除外）、第二章由朱建安执笔，第三章由郭培红执笔，第四章、第五章、第六章由田坤执笔，第七章由赵俊伟、陈国强执笔，第八章由王学东执笔。全书由武良臣、郭培红统一定稿。此外，课题组成员张新民等在课题研究中付出了辛勤劳动，在此一并向他们表示衷心的感谢。

本书在撰写过程中得到了焦作工学院领导和科研处领导的大力支持，对课题的研究工作给予了具体指导，对撰写本书的指导思想和内容提出了许多宝贵意见。中国矿业大学张永忠教授、中原工学院李勇教授和李建华教授、焦作工学院王裕清教授对本书的撰写也给予了有力的支持和帮助，在此一并向他们表示诚挚的谢意。

由于我们水平有限，加上课题仍处在研究阶段，许多理论问题和应用问题有待于进一步研究与探讨，例如，如何将空间推理的理论与方法以及几何构形等引入课题研究中都是亟待解决的问题，因此，书中的谬误与不妥之处，望读者不吝指教，我们表示衷心感谢。

作 者

2002 年 11 月于焦作工学院

目 录

第一章 敏捷制造、敏捷设备和敏捷夹具	1
第一节 敏捷制造概念	1
第二节 敏捷制造及敏捷化的方法	4
第三节 敏捷设备	8
第四节 敏捷夹具	13
第五节 敏捷制造及其设备、夹具的研究概况	16
第六节 无夹具敏捷制造技术	16
第二章 定位夹紧基本理论	24
第一节 定位原理模型	24
第二节 工件无定位和寻位敏捷制造技术	28
第三节 工件寻位问题的算法	29
第四节 夹紧原理	35
第五节 工件在夹具安装过程中的变形	42
第六节 可重组定位与夹紧元件	44
第七节 夹紧力的顺序引起的误差	47
第八节 定位误差矩阵分析与计算	54
第九节 工件定位方案与定位误差分析	56
第三章 敏捷夹具 RRS 结构系统	63
第一节 概 述	63
第二节 敏捷夹具可重构系统	67
第三节 敏捷夹具可重用系统	75
第四节 敏捷夹具可扩充系统	89
第五节 敏捷夹具开放性系统	93
第四章 敏捷夹具计算机构形设计	99
第一节 概 述	99
第二节 计算机辅助构形设计的基本问题	100
第三节 敏捷夹具构形设计方法	105
第四节 敏捷夹具 CAD 系统	108

第五节 并行设计的敏捷夹具系统·····	111
第六节 敏捷夹具构形设计的算法·····	117
第五章 夹具元件库·····	129
第一节 夹具元件的 GT 分类和编码·····	129
第二节 夹具元件的特征化知识表达·····	132
第三节 夹具元件库·····	136
第六章 敏捷夹具的装配建模和约束求解·····	141
第一节 夹具装配模型·····	141
第二节 装配约束的分类及表达·····	144
第三节 装配完备性及其典型完备性约束方案·····	149
第四节 装配约束求解·····	152
第七章 敏捷夹具元件装配关系数据库·····	157
第一节 概 述·····	157
第二节 定位装夹元件间的接口与装配关系·····	161
第三节 装配关系数据库·····	165
第四节 装配算法·····	169
第五节 敏捷夹具的装配过程模拟·····	172
第六节 装配的干涉检验·····	174
第八章 敏捷夹具开发实例·····	180
第一节 系统开发基础·····	180
第二节 元件库的实现和管理·····	182
第三节 装配元件的选择·····	186
第四节 元件装配·····	188
第五节 图形输出·····	190
第六节 敏捷夹具系统界面·····	195
主要参考文献·····	196

第一章 敏捷制造、敏捷设备和敏捷夹具

第一节 敏捷制造概念

一、敏捷化的概念

随着科学技术的迅猛发展,市场需求日趋多样化,市场竞争也日益激烈,工业界出现了商务环境变化的速度超过了企业的跟踪、调整能力的现象,这就要求现代设计和制造系统对无法预测的用户需求能够产生迅速响应。为此,美国学者从本国科学技术发展的战略出发,于1991年提出了敏捷制造的概念。美国、欧洲和日本等发达国家的敏捷化实践证明了它将是21世纪企业赢得竞争的重要战略转移。

敏捷化(Agility)的基本思想是通过把虚拟组织机构(Virtual Organization)、先进的柔性制造技术和高素质的人才进行高度全面的集成,形成一个可重用的(Reusable)、可重构的(Reconfigurable)和可伸缩(Scalable)的系统,来从容应付、快速响应市场变化。它不需要通过直接壮大自己而能做更大的事业,是一个共同赢的概念。由此可见,敏捷化工程并不意味着改变所有过去的生产过程和结构,而是强调如何利用旧的、可靠的生产过程和生产要素构成的系统,生产更多的产品。这对于我国资金相对短缺的中小企业来说,以此摆脱困境有特别重要的意义。

在这种思想的指导下,许多国家对产品与制造过程的信息表达、高层的组织和管理以及其他一些生产环节进行了敏捷化的研究和改造。近几年来,随着敏捷制造研究的不断深入,敏捷夹具已成为敏捷制造系统中的一个重要内容。世界上很多国家都对夹具(特别是组合夹具、柔性夹具)的设计和组装进行了大量的工作,希望制造出适应现代制造业发展的装夹系统,以期缩短夹具设计时间,降低设计和制造成本,提高产品质量。

但是,根据Rock Dove提出的敏捷系统评价准则,柔性夹具和组合夹具在当今的敏捷制造环境中存在以下不足:

(1) 可重构性不足。主要体现在夹具构成设计方面,没有很好地体现封装集成系统的思想,置换兼容性较差,不同的夹具具有不同的构成元素,也就有不同的组合夹具构成元素的装配关系图。

(2) 可扩充性小。扩充性要求夹具具有一定的伸缩范围、冗余单元和可扩充的框架体系结构。装夹系统通过增加或减少一定单元而改变其工作范围,扩大其适应新产品的能力。有可扩充性的敏捷夹具可以很方便地安装到不同的工作环境中,达到最大限度的敏捷性。有的组合夹具和柔性夹具,即使有一定的扩充性,也不能满足敏捷设计与制造的需要。

(3) 开放性差。现有组合夹具和柔性夹具设计系统很难实现与 CAD/CAPP 以及生产调度等应用系统的集成。

(4) 现有夹具启动时间长, 对于不同的产品类型有较长的转换时间, 柔性程度和响应速度都不适应以迅捷为特征的现代制造系统发展的需要。

可见, 在夹具系统方面的非敏捷性已成为制约敏捷制造全面深入发展的瓶颈。要做到高度的协调一致、集成化和敏捷化, 必须研究开发一种与敏捷系统相融合、适应敏捷制造系统环境的夹具系统。

二、敏捷制造产生的背景

敏捷制造的生产模式是在国际生产大环境的变化和美国在制造业中的地位下降而寻求“生存之道”的背景下产生的。

随着生活水平的提高, 人们对产品的需求和评价标准将从质量、功能和价格转为最短交货期、最大顾客满意度、资源保护、污染控制等方面。而在这种商业背景下, 用户的需求是变幻莫测的, 产品的设计也趋于个性化、多样化。现代迅猛发展的科学技术虽为这种变化提供了可能, 但在以往批量大、品种单一的商业环境中的制造企业却难以适应这种形式。因此出现了商务环境变化的速度超过了企业的跟踪、调整能力的现象。可以说, 这种“无法预测的持续、快速变化的竞争环境”, “生存、发展并扩大竞争优势”的商业目标是敏捷制造概念产生的根本原因。

而 20 世纪 70 年代和 80 年代间美国制造业在全球地位的下降, 直接促成了敏捷制造的产生。70 年代和 80 年代期间, 美国由于片面强调第三产业而忽视了发展制造业对国民经济健康发展的保障作用, 逐步丧失了其制造业在世界的霸主地位。在这段时间内, 日本、德国以及后来的东南亚各国都通过发展制造业取得了经济的迅速发展。为了夺回失去的市场, 恢复制造业的霸主地位, 美国政府从 80 年代中期资助了一系列制造业发展战略的研究。其中, 1991 年美国里海大学的 Ioacoca 研究所会同众多工业界的主要决策人一起, 向美国国会提交了一份“21 世纪制造业战略发展报告”。在报告中, 首次提出了敏捷制造 (Agile manufacturing) 的概念, 对敏捷制造的研究内容、研究方法和相关技术作了全面的描述。这份报告是美国先进制造技术乃至全世界制造技术研究和发展的一个重要里程碑。在这份报告中, 根据对当前制造业的形式和发展趋势得出两个重要的结论:

(1) 企业生存、发展面临的共性问题是, 目前竞争环境的变化太快, 而企业自我调整、适应的速度跟不上。

(2) 依靠对现有大规模生产模式和系统的逐步改进和完善不可能实现重振美国制造业雄风的目标。

报告的第一条结论指出了 21 世纪市场竞争的主要态势和企业将面临的基本挑战。第二条结论则进一步指出, 要应付这一挑战, 需要一种全新的战略思想来指导行动, 需要重新寻求生存之道。这种“寻求生存之道”的动机最终使得“敏捷”这一战略思想和概念产生了。正如美国敏捷化协会 (Agility Forum) 的企业部主任尼尔先生形容的: 今天我们面临的竞争环境与我们过去习惯的有着根本的不同, 这是一种新的游戏。在这局游戏中我们需要一组新的规则来指导我们的行动。“敏捷性原则”定义了这样一组新规则。

敏捷性 (agility) 是一种战略竞争能力, 是一种在无法预测的持续、快速变化的环境中生存、发展并扩大其竞争优势的能力。敏捷化追求的目标是在激烈的竞争环境中, “生存、发展并扩大竞争优势”。

三、敏捷制造的概念和特点

敏捷制造强调将柔性的、先进的、实用的制造技术, 熟练掌握技能的、高素质的劳动者, 以及企业之间和企业内部灵活的管理三者有机地集成起来, 实现总体最佳化, 对于千变万化的市场做出快速响应。敏捷制造的关键在于一个“敏捷化 (Agility)”问题, 而可重构、可重用和可扩充的 RRS 结构一起构成了敏捷性的核心。它表示了任何一个公司或企业要解决“商业环境变化速度超过企业跟踪、调整能力”这一问题的杠杆支撑点所在。

此外, “敏捷性是一种战略竞争能力”这一点是非常重要的, 这是区别敏捷制造和其他先进制造概念和模式的关键。大多数有关的先进制造概念和模式都是针对当前的市场需要提出来的, 是战术性的。例如, 即时生产 (Just In Time) 是日本丰田汽车公司在 20 世纪 70 年代末期根据日本资源缺乏和当时国际市场爆发石油危机的挑战而提出的一种管理模式和生产制度。它具有一定的战术局限性。其他如全面质量管理 (Total Quality Management) 和精良生产 (Lean Production) 等等都是一样的。

为了找到这个杠杆支撑点, 实现敏捷化, 敏捷制造企业应具有以下特点:

(1) 重视发挥人的作用。在敏捷制造中, 十分重视发挥人的作用, 将人作为企业一切活动的中心。为此, 要充分尊重职工, 充分调动每个人的主观能动性, 职工也必须将企业视为自己赖以存在的“家”, 企业的兴衰与每一个人都息息相关。另外, 还必须对职工进行即时的、持续的再教育, 使之能应付变化的工作种类和条件, 在一定范围内能胜任各种工作。这与大批量生产中工人只机械地完成一个局部的工作大不一样。在人事方面也要采取一定的改革措施。

(2) 具有良好的工作环境。环境问题将是 21 世纪最重要的问题之一。未来的敏捷制造企业高度重视环境问题。在制造企业内部, 要给全体员工提供一个良好的工作环境, 降低甚至消除制造过程中的一切污染 (如噪声、振动、空气污浊和强光等)。企业本身不能成为污染源, 造成对社会的污染。敏捷制造提供的产品也应是环保型的, 既所谓的绿色商品: 节能、不污染环境、对人体无害、便于回收重用等。

(3) 柔性、并行的组织管理机构。敏捷制造企业淡化宝塔型的管理方式, 强调权利下放, 使团队工作 (Team Work) 小组具有一定的决策权力。这样才能充分发挥每个人的主观能动性, 随时发现问题, 随时解决。

柔性重构也是敏捷制造企业的重要特征之一。为了快速响应市场, 敏捷地完成某一生产任务, 必须可以随时将企业中的人员及设备进行柔性重构。并行的工作方式是敏捷制造企业的重要工作方式, 它需要将企业中产品寿命阶段 (纵向) 和企业各部门 (横向) 的人员组织起来, 采取团队的方式进行工作。

(4) 先进的技术系统。敏捷制造企业应具有领先的技术手段。除了大容量的高速计算机系统外, 还应有完整的、覆盖全企业的数据库和高通过量 (频宽) 的计算机网络, 实现产品设计时的性能仿真和虚拟制造, 以及快速样件生成。

敏捷制造企业还拥有可快速重组的、柔性并不强调完全自动化的设备。

敏捷制造企业还有一套行之有效的质量保证体系,使设计制造出来的产品达到社会 and 用户都满意的程度。

(5) 基于信息高速公路的虚拟公司。所谓虚拟公司是为了快速响应某一市场需求,将产品涉及的不同公司临时组建起来成为一个统一的工商实体。将分布在不同地区、不同公司的人力资源和物质资源结合起来,在共享产品计划的所有信息的条件下,发挥各个公司自己的功能,完成产品的设计制造。

(6) 用户的参与。在敏捷制造方式下,用户参与产品的设计过程,根据自己需求提出设计要求,而且整个过程对用户是透明的。

第二节 敏捷制造及敏捷化的方法

敏捷制造正日益被公认为是一种面向 21 世纪的先进制造模式,即以全球信息网络为基础,建立跨企业的动态(虚拟)企业,实现优势互补,充分利用信息,发挥人的创造性,实现生产和营销的总体敏捷化,从而快速响应市场需求,在竞争中立于不败之地,共同繁荣成长。显然,敏捷制造的实现必须以组成虚拟企业的各实体内部做起,从底层做起,分步实施的策略将是一种更易于取得实效的战略。针对敏捷制造对底层制造过程快速响应能力的要求,20 世纪 90 年代初各国开始对实现基层敏捷制造的理论、方法和实现技术开展了研究,提出一种以“智能寻位加工”、缩短生产准备时间和采用新型敏捷加工装备进行高速高效加工、缩短实际生产时间的基层敏捷制造技术,并在此基础上与企业合作开展了新型基层敏捷制造系统的开发,以期为提高制造企业底层制造过程的敏捷化探索出一条新的途径。

一、基层敏捷制造的关键问题

在一般制造企业中,影响产品制造总工期的因素(除产品设计外)主要有两个,一是生产准备时间,另一个是实际生产时间。因此,要对市场需求变化做出快速响应,对多种小批量产品进行快速生产,必须解决两个关键问题:一是如何缩短生产准备时间,实现生产过程的快速切换,即如何在很短的时间(数天甚至数小时)内,从一种产品的生产转换为另一种产品的生产;二是如何提高制造过程本身的效率,即如何实现高速、高效加工。

目前,我国多数制造企业还很难实现上述目标,重要原因之一是制造企业中广泛采用的常规制造技术一般遵循“定位—加工”这一缺乏快速响应性的制造模式。按该模式对零件进行加工,必须在加工前按设计和工艺要求确定工件在加工过程中应处的状态(工件在机床或托盘上的位置和姿势),并按这一状态预先确定加工时的刀具运动路径或生成加工控制的数控程序。因此,在加工过程中,如何严格按照设计和工艺的要求实现被加工零件的精确定位,以便使其实际状态与预定状态相符合,便成为保证零件加工合格的关键工艺措施。目前实现这一措施的途径主要有两条,一是在加工前为工件设计制造精密夹具,二是靠操作者在加工现场对工件进行精确找正。这就带来了如下问题:在采用夹具的场合,

由于为保证工件在夹具中的精确定位和夹具在机床上的精确定位,对夹具中的定位元件的精度、夹具体的精度和夹具的总体装配精度都有很高的要求;同时为保证夹紧过程中不破坏定位关系,对夹具中支撑装置和夹紧机构均提出了特殊要求。这必然使得夹具成为一种精度很高且结构复杂的机械装置或机械与电、液、气等的复合装置。而生产一种产品往往需要成百上千套夹具,如此大量复杂精密夹具的设计、制造和装调不可避免地大幅度增加产品生产周期,使得用户提出的交货期很难得到满足。此外,产品生产所需的大量夹具的设计制造将耗费数量相当可观的资金,从而大幅度提高了生产成本。如果走另一条路,即靠人工精确找正,则不仅降低了自动化程度,难以保证产品质量,而且需耗费大量的辅助时间,从而大大降低了机床利用率 and 产品生产率。这些问题,最终造成制造敏捷性差,对市场的动态变化响应速度慢,生产效益低,企业竞争能力弱。

影响基层敏捷制造的另一关键问题是许多企业现有生产车间的加工效率普遍较低,所使用的切削速度一般只有先进国家的几分之一。造成这一现状的主要原因之一是以往缺乏对高速、高效加工的研究和成果转化工作,特别是在高速、高效加工装备的开发方面,与发达国家相比,还存在相当大的差距。

为改变上述局面,必须立足国内实际,结合国情勇于创新,大胆探索新的道路。

二、缩短生产准备周期的新途径

为从根本上解决上述第一个问题,必须打破传统“定位—加工”模式的束缚,寻找新的具有快速响应性能的先进制造模式。为此提出“智能寻位加工”这一新的制造概念,并以此为基础研究出一种无需对被加工零件进行定位(简称无定位),但可主动寻位并顺应工件实际位置与姿势进行加工的智能化寻位加工技术。

所谓“无定位”,其具体含义是不需要在工艺设计阶段确定工件在加工时所处的状态(工件在机床或托盘上的位置与姿态),因而也就不需要用精密夹具等来固定工件的状态,以使其实际状态与既定状态相符合。只是需要用简单的低精度、低成本的通用紧固支持元件和装置(如螺栓、压板、台钳等)将工件适当地或随机地固定在机床工作台或托盘上即可进行加工。

无定位环境下的加工过程则按照“寻位—加工”模式运作,其过程是:先主动获取工件实际状态信息,然后根据工件实际状态实时生成刀具运动路径和轨迹,最后控制机床加工出合格的零件。

“寻位—加工”与“定位—加工”的重大差别是:它以主动寻位代替被动定位,以顺应现实灵活加工代替按既定关系强制加工。

为实现“寻位—加工”,必须解决主动寻位和顺应现实加工两个关键问题。“主动寻位”是一种智能行为,以仿人智能的途径来解决这一问题。一是采用现代智能化传感技术,以宏观与微观相结合,无接触与有接触并举的递阶信息获取方法,快速准确获取工件表面信息;二是根据所获得的工件表面信息,利用先进的计算机手段加入人工智能与数学理论相结合的大范围工件寻位算法,精确求解出工件的实际状态。“顺应现实加工”亦不是普通意义下的数字程序控制(NC)加工,而是一种无预定程序的、以工件寻位为基础,实时生成刀具运动与轨迹,并以并行工程原理所实现的位姿自适应加工。为此,具体实施

时采用智能化的刀具路径规划方法和加工轨迹实时生成与控制技术,并利用信息集成环境来对过程进行控制,从而实现灵活地顺应工件实际位姿的智能化加工。

在采用“寻位—加工”新构思所实现的新型制造系统中,由于不是靠精密夹具这类“硬件”装置被动地、硬性地约束工件在托盘或机床上的状态,也不需要操作者按预先确定的关系强制找正工件,而是允许工件自然地或随机地固定于托盘或机床上,转而从信息与控制的角度,通过信息采集分析和自动寻位计算等办法主动、灵活地获取工件的实际状态信息,并以此为基础对加工过程进行控制,加工出合格的零件。这就彻底消除了基于“定位—加工”模式的传统制造技术依赖精密夹具、人工找正所带来的耗资大、响应速度慢等诸多弊端。

由此可见,智能寻位加工这一新的制造技术的主要意义在于,它为消除生产准备中的“瓶颈”,实现快速响应制造开辟了一条有效的新途径。以此为基础可构成具有高度柔性和快速响应性能的底层敏捷制造系统,用其装备我们的制造企业,将可显著提高企业对市场的响应速度,从而大大提高企业的市场竞争。

三、敏捷加工中心

加工过程敏捷化主要是提高机床的加工效率,为此进行了新型敏捷加工中心的研究和开发。

传统数控机床在总体结构上基本是采用工件和刀具共同运动的方案。在这种结构中,由于工件、夹具和工作台的总重量往往比较大,使之难以获得高的进给速度,更难获得高的加速度。此外,传统机床结构是一种串联开链结构,组成环节多(特别是在多坐标机床中),结构复杂,并且由于存在悬臂部件和环节间的间隙,不容易获得高的总体刚度,难以适应高速、高效加工的要求。

为从根本上解决上述问题,在开发新一代敏捷加工中心时,采用了基于 Stewart 平台原理的并联闭链多自由度驱动结构,制定了工件固定、刀具(主轴)运动的适合高速加工的方案,其基本结构如图 1-1 所示。这种机床(有些文献称作“六条腿机床”或“虚拟轴机床”)的主轴单元由六个可变长度驱动杆支撑于工作台上,六驱动杆的另一端固定于基础框架上。六个驱动杆与主轴单元和基础框架的联合均采用可预紧的高刚度滚动结构,这样可使驱动杆不承受弯曲力矩且运动灵活。通过驱动杆的直线电机调节六驱动杆的长度,可使主轴和刀具作六自由度运动,其中包括三个线性轴 X 、 Y 、 Z 的平移运动和沿三个转动轴 A 、 B 、 C 的旋转运动。由于驱动杆在切削力和温度变化作用下的受力变形和热变形主要影响杆的长度,因此通过对杆长进行闭环控制并对测量装置的误差进行实时补偿,可以有效校正杆长位移误差,使机床获得高的加工精度。

为便于机床刀库与主轴间的切换和机床刀库与中央刀库间的刀具交换,该加工中心采用了双刀库主轴参与式的刀具交换,其基本结构如图 1-2 所示。这样,当机床主轴与某

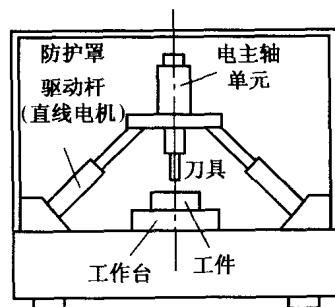


图 1-1 新型敏捷加工中心的基本结构

一刀库交换刀具时,中央刀库可同时与另一刀库交换刀具。在车间和制造单元管理计算机的统一调度和控制下,可将有限数量的刀具最佳地、动态地分配给个机床,从而缩短了刀具准备时间,提高了刀具利用率,有效提高制造系统的快速应变能力。从总体上来看,这种新型敏捷加工中心具有以下优点:

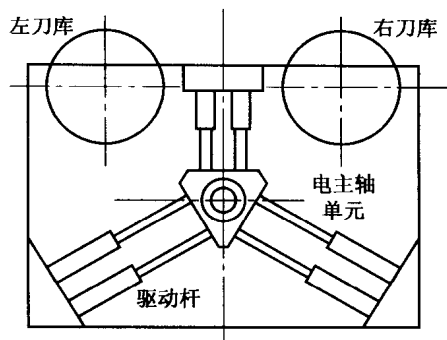


图 1-2 刀具交换系统示意图 (俯视)

(1) 机械结构简单,零部件通用化、标准化程度高,易于经济化批量生产。此外,该机床整体重量轻,约为常规机床的 $1/5 \sim 1/3$,因此原材料消耗少,加工量少,进一步降低了制造成本。

(2) 工件固定而主轴相对于工件作多自由度运动,因此将主轴部件做成电主轴单元,可以有较小的质量,非常有利于获得高的加速度。

(3) 进给机构为空间并联结构,在驱动电机速度相同的条件下可以获得比采用串联结构的常规数控机床更高的进给速度,有利于满足高速高效加工对进给速度的要求。

(4) 六杆平台结构将传动与支撑功能集成为一体,六根驱动杆既是机床的传动部件又兼做主轴单元的支撑部件,这将有效减少工件—机床—刀具链中的环节,从而也消除了这些环节带来的受力变形和热变形,并可减少联接和传动间隙,提高接触刚度,有利于提高机床的综合精度。

(5) 因机床的主体为并联闭链结构,消除了常规机床中悬臂环节,经过合理设计可使各驱动杆和有关部件只承受拉力和压力,而不承受弯曲力矩,因而使机床总体刚度进一步提高,可比一般加工中心高 5 倍左右。如果在传动与控制上处理得当,可以使由此构成的新型机床达到比常规机床高得多的加工精度和加工质量。

(6) 抛弃了传统的固定导轨运动的直线和旋转工作台以及支撑工作台所需的其他部件。因此,工具在空间的定位精度和运动轨迹精度完全由传动、检测和控制来保证,从而彻底消除了导轨、工作台、立柱、横梁等引起的空间几何误差。

(7) 该加工中心的主轴部件可作六自由度高速运动,利用这一特点让主轴直接参与换刀过程,不仅可使刀库配置灵活,而且可减少刀库运动的自由度,显著简化刀库换刀装置的结构,更重要的是,换刀环节的减少和机械结构上的简化将有效提高换刀的可靠性,这在自动化加工系统中是非常重要的。

(8) 加工中心在加工过程中,工件处于固定状态,因而易于实现工件信息的快速获取和基于工件信息的实时轨迹控制,可方便地实现所提出的智能寻位加工。

四、基层敏捷制造系统

基层敏捷制造系统的基本方案如图 1-3 所示,与常规制造系统相比,其主要差别是系统中引入了工件寻位工作站,并采用新型敏捷加工中心作为加工装备。工件寻位工作站的作用是采用智能化信息获取技术,以无接触和有接触相结合的方式,快速捕捉工件宏观轮廓,并以此为引导,获取工件表面上关键点的坐标值。由此获得工件宏、微观信息,并

送入寻位计算机, 由其以人工智能技术、模式识别方法和数学理论相结合的工件寻位算法, 实时求解出实际状态进行六自由度高速高效加工。

首先由装卸站的操作人员根据管理控制系统发出调度指令, 用通用紧固夹持元件(如螺栓、压板等)将工件固定于托盘上(无须进行精确定位), 然后将工件/托盘复合体送往工件寻位工作站。该工作站以智能化方法主动获取工件表面宏、微观信息, 并实时求解出工件的实际状态。然后通过现场总线(一种新型控制局部网络)将工件实际状态信息送往刀具路径实时生成工作站。该工作站将根据设计信息、工艺信息和工件的实际状态信息, 通过实时规划生成工件本次入线在各个敏捷加工中心上加工的刀具运动路径文件, 并通过现场总线将刀具运动路径文件送往相应的机床数控系统, 使其做好准备, 一旦工件由物流系统送达该机床即可进行加工。工件本次入线的所有工序完成后, 由物流将其送往出口装卸站, 有操作人员将工件从托盘上卸下, 托盘则回到系统入口处, 准备装载新的工件(注: ①系统中的装卸站在物理布局上是在一起的, 这里为说明问题方便, 将其分为输入、输出两处。②加工中心对工件顺序由调度系统根据工艺要求和生产计划确定, 物质的运动比较复杂, 图中只给出了示意流向)。

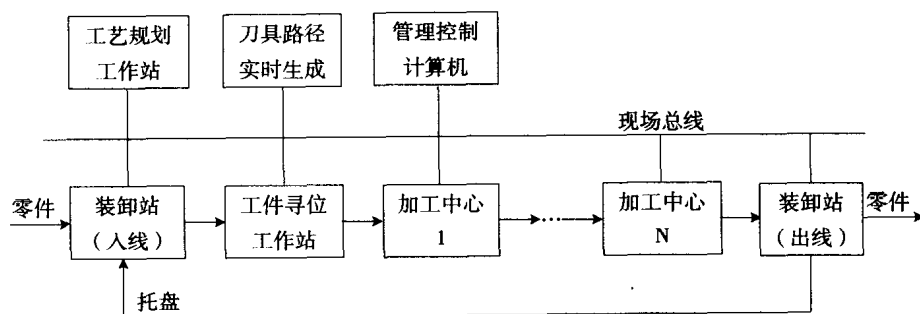


图 1-3 基层敏捷制造系统的实现方案

该系统比常规制造系统具有更大的柔性和快速响应性能, 它接到新任务后, 无需花很多时间为工件准备夹具, 只需要根据 CAPP 给出的工艺要求, 在调度子系统控制下即可启动开始加工, 并且在这一由现场总线网络构成的集成环境下, 工件寻位和加工操作可并行进行。例如, 有若干个工件 $P_1, P_2, P_3, \dots$ 进入系统进行加工, 则加工中心对寻位工作站可同时对后进入系统的工件(如 P_3)装上托盘准备送入系统, 所有这些操作完全是并行进行的, 在调度系统控制下将有条不紊地高效工作。

第三节 敏捷设备

一、概述

敏捷设备是实现企业制造敏捷化的硬件条件, 是能够根据具体生产任务的需要快速组合的资源配置。它针对于企业敏捷制造特点中的先进技术系统, 着重于可快速重组和柔性