

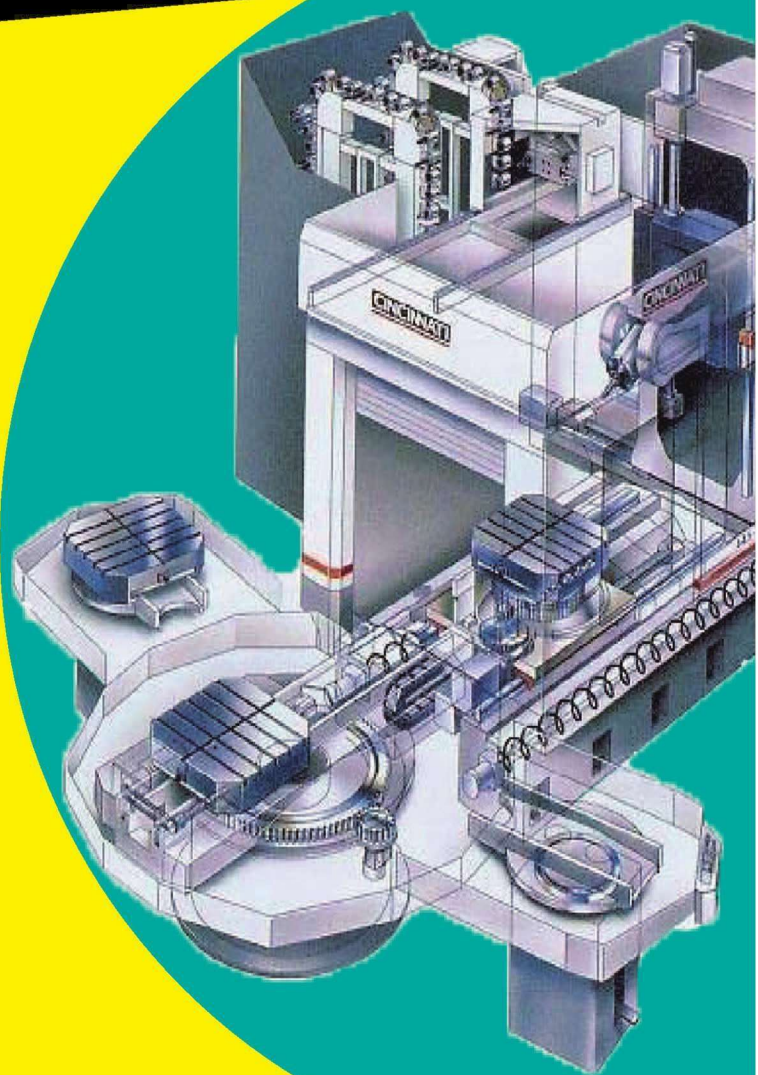
机械制造技术基础

JIXIE ZHI ZAO JISHU JI CHU

主 编 卢 波 董星涛

胡夏夏 翁泽宇

主 审 赵升吨 张 澄



机械制造技术基础

主编 卢 波 董星涛
胡夏夏 翁泽宇
主审 赵升吨 张 澄



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

机械制造技术基础 / 卢波等主编. —杭州: 浙江大学出版社, 2012.2

ISBN 978-7-308-09599-0

I. ①机… II. ①卢… III. ①机械制造工艺—高等学校—教材 IV. ①TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 016035 号

机械制造技术基础

卢 波 等主编

责任编辑 邹小宁

文字编辑 徐金仙 王 蕾

封面设计 王聪聪

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州大漠照排印刷有限公司

印 刷 浙江云广印业有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 20.5

字 数 512 千

版 印 次 2012 年 2 月第 1 版 2012 年 2 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-09599-0

定 价 36.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

前 言

“机械制造技术基础”课程是机械工程及自动化、过程装备及控制、工业工程等专业的学科基础必修课,为适应 21 世纪科技、经济与社会的飞速发展和日趋激烈的竞争,配合适应高等教育改革和“宽口径、重基础”的人才培养模式的需要,根据浙江工业大学教学改革和课程建设计划我们编写了本书。

目前,以先进制造技术为代表的新一代制造技术,及其相关的现代制造的战略、理念和模式,已经逐步成熟,并开始大举进入生产领域。机械制造已经不再局限于以局部工序和工艺技术问题为主要内容的传统的机械制造范畴,机械制造的范围已经覆盖到了从市场分析、产品开发、产品的生产技术准备(含产品设计、编制产品工艺、设计和制造工艺装备等),到产品的生产(指产品的零件加工和产品的装配过程)、产品的生产组织与计划管理(含物流控制和仓储)、产品的质量保证金以及产品的包装和发送等的全部活动过程。先进制造技术是传统制造技术、信息技术、计算机技术、自动化技术与管理科学等多学科先进技术的综合,并应用于制造工程之中所形成的一个学科体系,并向精密化、柔性化、网络化、虚拟化、智能化、清洁化、集成化、全球化的方向发展,先进制造技术已成为世界各国制造业发展的核心。

本书在编写中广泛收集国内外资料,力求总体上把握和反映机械制造发展基础上突出本科学习的关键知识点,做到点面结合,合理控制教材难度,达到“宽口径、重基础”教学要求。

本教材第一章由卢波、胡珏编写,第二章由浙江工业大学之江学院胡夏夏、毛亚郎编写,第三章由卢波编写,第四章由翁泽宇编写,第五章由董星涛编写,全书由西安交通大学赵升吨教授及浙江工业大学张澄教授主审。

由于参编老师的水平所限,教材中一定存在许多不足,欢迎读者指正。

编者

2011 年 11 月

目录

CONTENTS

第一章 机械制造技术基础概述	1
第一节 机械制造	1
第二节 机械制造技术及其发展	5
第三节 21 世纪制造业的主要特点与挑战	17
第四节 中国机械制造业的发展状况和战略	21
第五节 本课程学习目的、内容和方法	25
第二章 金属切削原理与刀具	28
第一节 金属切削的基本概念	28
第二节 刀具切削部分的几何角度	30
第三节 刀具材料	33
第四节 金属切削过程及切削参数选择	45
第五节 金属切削刀具的主要种类及应用	65
第六节 先进切削加工技术	75
第三章 金属切削方法及装备	90
第一节 金属切削的常用方法及典型普通机床	91
第二节 数控机床	122

第三节 机床夹具设计基础	158
第四章 机械零件加工质量及其控制	197
第一节 机械加工精度	197
第二节 机械加工表面质量	232
第五章 机械加工及装配工艺规程设计	253
第一节 机械加工工艺规程制定中的基本概念	253
第二节 机械加工规程制定中的主要技术问题	262
第三节 工序尺寸和工艺尺寸链计算	280
第四节 计算机辅助工艺规程设计(CAPP)	288
第五节 机械产品装配工艺规程设计	290
参考资料	320

第一章 机械制造技术基础概述

第一节 机械制造

一、制造的概念

在传统狭义上我们一般将“制造”理解为从原材料转变为产品的工艺过程,人类文明进步与制造技术发展相随相伴,所以人类的活动离不开制造。虽然“制造”(Manufacturing)由来已久,但制造往往被简单地理解为加工和工艺,随着社会的发展,制造概念的内涵不断丰富,由狭义到广义,由局部到整体,由断续零散到成套系统,制造的概念在“范围”和“内涵”两个方面逐步演变成为包含整个过程,将设计、工艺、市场和管理紧密联系在一起,形成一个整体以适应市场经济发展的要求。国际生产工程界在经历了十余年的论证后,就“制造”概念及其内涵取得了一致的认识,于1990年由国际生产工程学会(CIRP)定义如下:

制造是指从市场分析、产品开发、产品的生产技术准备(含产品设计、材料选择、编制产品工艺、设计和制造工艺装备等)、到产品的生产(指产品的加工、装配和质量控制)、产品的生产组织与计划管理(含物流控制和仓储)、产品的质量保证以及产品的包装和发送等的全过程。

这个“制造”的定义也称为广义“制造”。广义制造是20世纪制造概念的重要发展。现代社会发展和科技进步,需要综合、融合和复合多种技术去研究和解决制造所涉及的问题,特别是集成制造技术的问世,提出了广义制造的概念,亦称之为“大制造”的概念,它体现了制造概念的扩展,将产品的整个生命周期作为一个系统纳入制造的研究范畴,用系统观点看待现代的制造过程,制造已不再局限于制造的工艺阶段,即是传统意义上的“生产(Production)”,“生产”仅是产品制造活动中的一个组成部分,体现了当今市场对产品竞争的要求,是现代机械制造的特点之一。

在全球产业链的视角下,任何行业的产业链,除了加工制造,还有6大环节:产品设计、原料采购、物流运输、订单处理、批发经营、终端零售,这6大环节才是产业链里面最有价值、附加值最高的部分,谁控制这6大环节才能真正的掌握制造。若是继续停留在加工制造,就无法完成整体的产业升级和发展。

二、制造系统的概念

系统是人类历史上较为古老的概念,《辞海》中将系统定义为“自成体系的组织,相同或

相类似的事物按一定的秩序和内部联系组合而成的整体。”在科技领域中系统概念可以帮助研究人员将研究对象从环境中“分离”出来,准确地界定研究工作的边界和主题,全面地分析与归纳系统内各部分之间的关系,加强局部之间的联系与协调。制造业要有两个关键点:一是技术,二是产业链。

制造产业具有设计、生产、发运和销售等多项功能,为了有效地完成特定的制造任务,制造公司必须将制造过程及其所涉及的硬件包括人员、生产设备、材料、能源和各种辅助装置以及有关软件包括制造理论、制造技术(制造工艺和制造方法等)和制造信息等组成了一个具有特定功能的有机整体,称之为制造系统(Manufacturing System),而产品的制造则可看作是制造系统中各种因素组合并协同操作的结果。在很多工业发达国家中所出现的制造问题大多以“大制造”问题进行研究和处理。这是制造技术从整体发展到分工,从分工又螺旋上升到整体的过程,反映了事物发展的客观规律。

在工业化发展的很长一段时间里,制造往往被理解为加工工艺,这是由于设计和工艺长期分工的影响,“大制造”的概念将设计和工艺紧密联系在一起,形成一个整体,以适应市场经济发展的要求。在市场经济下,商品的上市时间十分关键,并行工程和虚拟制造的模式可使产品在开发初期就考虑后续阶段的问题,从而使设计、工艺、生产、组织(包括动态联盟和虚拟企业等)、供应、销售、报废回收等密切结合,通盘考虑产品的全生命周期。特别是当信息技术的发展并引入到制造技术,使制造技术产生了革命性的变化,出现了制造系统和制造科学,从此制造就以系统的新概念问世,它由物质流、能量流和信息流组成,物质流是本质,能量流是动力,信息流是控制,制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科,即制造系统工程学,制造系统是制造技术发展的新里程碑。

制造技术的综合性还表现在与管理的密切关系上,制造与管理不可分割,计算机集成制造系统、并行工程、敏捷制造、虚拟制造和动态联盟等都体现了制造与管理的结合,甚至有时管理往往成为关键。自泰勒的科学管理后,人们寻求各种优化生产与运作的方法,出现了订货点法、经济生产批量法、物料需求计划方法、准时生产制等。其中,最具代表性的是计算机集成制造系统(CIMS)。1974年,美国的约瑟夫·哈林顿博士在Computer Integrated Manufacturing一书中首次提出计算机集成制造的概念,其中有两个基本观点:

(1) 企业生产的各个环节,即从市场分析、产品设计、加工制造、经营管理到售后服务的全部生产活动是一个不可分割的整体,要紧密联系、统一考虑。

(2) 整个生产过程实质上是一个数据的采集、传递和加工处理的过程。最终形成的产品可以看作是数据的物质表现。

以系统论的观点,现实社会中的制造型企业就是一个制造系统,可以抽象为一个利用系统资源,在满足系统约束和目标的前提下,从系统环境中获得的输入转换为输出的系统过程。制造型企业根据订单和市场预测安排的生产计划,利用制造资源(包括人员、机床设备、刀量夹辅具、技术、相关的产品数据和计算机软、硬件等),在生产过程中采用相应技术实现产品的生产,以最适当的制造成本,在最适当的时间生产出客户需要的产品,以获取最大利润。为此,就必须对制造系统这个复杂大系统中各个过程或子系统所面临的各种复杂的决策问题实施最优决策,达到制造过程整体优化和提高制造企业综合效益的目的,可以这样讲现代产品的竞争是制造系统层次上的竞争,既不同制造系统之间的竞争。

三、机械制造在国民经济中的作用

制造是人类社会的最基本活动之一,也是国家经济实力的基础。在工业化国家中约70%~80%的物质财富来自制造业。制造技术的涉及面非常广,冶金、建筑、水利、机械、电子、信息、运载、农业等各个行业都要有制造业的支持。冶金行业需要冶炼、轧制设备,建筑行业需要塔吊、挖掘机和推土机等工程机械,因此,制造业是一个支柱产业,在不同的历史时期有不同的发展重点,但需要制造技术的支持是永恒的。当然,各个行业有其本身的主导技术,如农业需要生产粮、棉等农产品,有丰富的农业生产技术问题,但现代农业少不了农业机械的支持,制造技术成为其重要的组成部分。因此,制造技术既有普遍性、基础性的一面,又有特殊性、专业性的一面。例如,机械制造工程学是具有普遍性的学科,而汽车制造工程学、燃气轮机制造工程学、集成电路制造工程学等则带有强烈的专业性,它们有很多独特的制造技术。制造技术具有共性,又有个性,我国在20世纪50年代,机械工业就分为通用、核能、航空、电子、兵器、船舶、航天和农业等8个部门。现代制造技术已经不是一门单纯的机械学科,而是一门以机械为主体的交叉学科,它与光学、电工、电子、材料、管理、艺术及社会科学等均有密切关系,具有很强的综合性。

美国把制订制造业的发展战略列为重中之重。但在20世纪70年代,美国一度不重视制造业,知识经济的出现经历了一个发展演变过程。1962年,美国经济学家马克卢普发表了《美国知识的生产和分布》,他指出,以信息技术为代表的新兴产业将成为现代产业的核心,这类产业的特点是源于研究与开发,因此是知识产业。这是最早关于知识经济的表述。1973年,美国社会学家丹尼尔·贝尔出版了《后工业社会来临》,他把社会分为前工业社会、工业社会和后工业社会三个阶段。他认为,后工业社会是以知识为核心的社会,知识的积累和传播是发展社会经济的直接力量。1980年,未来学家阿尔温·托夫勒发表了《第三次浪潮》(图1-1),指出人类经历了农业文明时期、工业文明时期,目前面临的是第三次浪潮,即信息化的浪潮。10年后,在其新作《权力的转移》中,他提出知识的权力正在代替财富的权力,社会的主宰力量将实现由金钱向知识转移。1982年,约翰·奈比斯特发表了《大趋势:改变我们生活的十个趋向》,他认为,“知识是我们经济生活的驱动力”。1983年,美国经济学家保罗·霍肯(P. Hawken)在他的《未来的经济》中进一步指出,信息经济是一种以新技术、新知识和新技能贯穿于整个生活活动的新型经济形式。美国社会学家托夫勒1980年在《第三次浪潮》中提出“后工业经济”(Post-Industrial Society)概念,认为他们已进入“后工业时代”,把制造业列为“夕阳工业”,主张经济重点应当由制造业转向信息、生物等高科技产业和第三产业,其结果导致美国20世纪80年代的经济衰退,许多产品的质量和性能落后于德国、日本等其他发达国家。

20世纪80年代后期,美国政府认识到问题的严重性,一些国会议员、政府要员也纷纷要求政府出面协调和支持制造产业的发展,于是在1988年美国投资开展了大规模“21世纪制造业战略”研究,提出了“先进制造

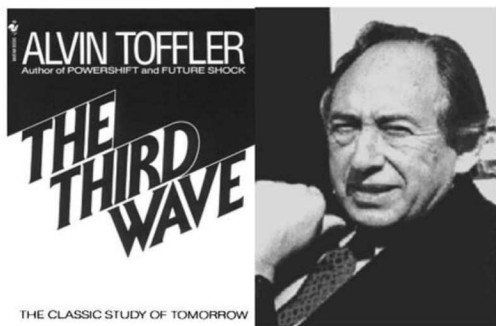


图1-1 托夫勒与《第三次浪潮》

技术的发展目标”,制定并实施了“先进制造技术计划”和“制造技术中心计划”。为提高和保持美国的国际竞争力,美国的国家专家组分析了世界经济和技术发展情况,结合美国实际,把机床与半导体、生物技术、新材料、航空技术、远程通信和软件一起作为 21 世纪美国的七个关键工业之一而受到重视。20 世纪 90 年代初,美国空军答应为开展机床项目研究提供资助。现在,美国国家科学基金会(NSF)是支持机床技术研究的唯一的联邦机构。

1991 年乔治·布什政府期间,美国白宫科学技术政策办公室发表了总数为 22 项的“美国国家关键技术”,其中制造技术占 4 项,标志着美国科技政策的转变,确立了制造工业的地位,引发了美国与欧洲、日本在制造技术上的新一轮竞争。

克林顿执政后,对制造业大力支持,把先进制造技术列为六大国防关键技术之首,结果美国在机械工业、汽车工业、航空工业及信息产业等方面取得了明显的进展,使美国的经济连续 8 年取得了 2%~3% 的增长率,而且还同时保持低通胀率和低失业率。

在 20 世纪 70—80 年代,日本非常重视制造业,在某些领域,日本已经掌握了世界最尖端技术,特别是汽车制造和微电子制造。实现了以制造业为基础,尖端技术为前导,如超导技术、材料技术、纳米技术和 MEMS 等,可以确保日本在未来几十年继续保持经济领域的领先地位。日本的汽车和家用电器占领了全世界的市场,特别是大举进入了美国市场。日本的微电子芯片已成为美国高技术产品的关键元件。制造高质量的产品,长久以来被认为是日本人的特征。

一般认为,新技术从研究到成熟是一个阶段,从成熟到应用是第二阶段。第二个阶段的时间 10~15 年。换句话说,如果现在想应用一项新技术,它必须在 10 年之前就已经成熟了,否则不能应用。日本正在计划建设超导新干线,也就是说,他在超导方面的研究,在十年前就已经成熟了。

1998 年爆发的东南亚经济危机,从另一个侧面反映了一个国家发展制造业的重要性。一个国家如果把经济的基础放在股票、旅游、金融、房地产、服务业上,而无自己的制造业,这个国家的经济就容易形成泡沫经济,一有风吹草动就会产生经济危机。而新加坡、中国台湾都有自己的制造业,因此受经济危机的影响相对来说小一些。

瑞士是一个仅 700 万人口的小国,但瑞士的制造业十分发达,瑞士的精密机械产品的出口量是我国的 8 倍,瑞士的手表居世界第一,连小小的军刀,也风靡全世界,在机械制造中瑞士机床和刀具制造技术也是居世界一流的。现在瑞士的年人均国民生产总值达到 4.3 万美元以上,居世界第一。“小、精、难”是瑞士制造业特点,也是对制造业的挑战,被称之为“瑞士式加工”。

2001 年中国工程院的调查结论表明中国制造业已占国民生产总值的 1/3,占整个工业生产的 4/5,为国家财政提供 1/3 以上的收入,贡献出口总额的 90%,就业人员 8043 万。在中国的制造业构成中,机械制造业占有特别重要的地位(图 1-2),它一方面创造价值,产生物质财富和新的知识,另一方面为国民经济各个部门提供机械装备,为国防和科学技术的进步与发展提供先进的手段和装备,是整个制造业的主要支柱,国民经济各部门的生产水平和经济效益在很大程度上取决于机械制造业所提供装备的质量和可靠性。因此,提高国家机械制造业的生产力具有重要意义。

从曾经的日不落帝国英国,到当今世界的唯一超级大国美国,从挑起两次世界大战的德国到创造第一个东亚奇迹的日本,无一不是靠制造业崛起的。即使后来者如亚洲四小龙、东

盟诸国,也同样是靠制造业的强劲扩张提升自己的国际地位的。而与此相对应,一些经济大国所以未能创造新的辉煌,一个重要的原因,就是制造业的竞争力不再像其强大时那么强大。大国的兴衰印证的是制造业的兴衰,没有强大的制造业,就不可能有经济大国和强国。因此,我们在经济发展的战略产业选择上,应当毫不犹豫地把振兴制造业作为一个重要的发展战略,采取多种措施,坚决把制造业做大做强,这是实现经济强国梦想的必由之路。

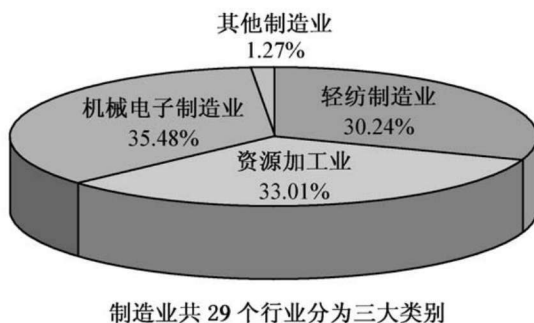


图 1-2 2002 年中国制造业构成

第二节 机械制造技术及其发展

制造技术(Manufacturing Technology)就是按照人们所需的目的,运用知识和技能,利用客观物质工具,使原材料转变为产品的技术总称。制造技术是制造业的一个永恒的主题,是设想、概念、科学技术物化的基础和手段。

制造技术的水平和实力反映一个国家的制造业的生产力水平,是产品革新、生产发展、经济竞争的重要手段,经济的竞争归根到底是制造技术和制造能力的竞争。历史的经验表明,国家制造业的繁荣要依靠有竞争力的生产力,这个生产力不仅要有效率而且要有创新,对提高生产力的追求让人们创新了大量的制造技术,世界上各个国家的经济竞争主要反映为制造技术的竞争,因此,制造技术是制造系统中最核心的组成部分,在制造系统生产力构成的诸多因素中,制造技术的作用一般占了 60% 左右,是提高产品竞争力的关键,是制造业赖以生存和发展的主体。

纵观国际上各个行业,核心技术似乎都掌握在各个行业的几家跨国公司手里。只有这些公司具有研究开发的实力。大家都觉得:中国的企业应该掌握核心技术。实际情况是中国目前还没有多少企业具有这样的实力。这种实力可不是搞点优惠政策,弄上几个回国博士,投入几亿元,干上一年两年,就可以轻松做出来的;要做出真正成熟的、具有商业化前景的核心技术,需要长期的投入、长期的研究开发积累过程。

人类的发展与制造技术是不可分的,随着制造技术的发展,人类的工作、生活水平不断提高。例如就交通工具而论,随着制造技术的进步,人类制造了飞机、飞船,继而出现了喷气飞机、水翼船、高速列车等先进交通工具,而且已不满足于局限在地球上,又发展了星际交通,出现了空间站、卫星和航天飞机。可以肯定,随着制造水平的不断提高,人类将会有更大的进步。

人类文明的发展是与机械制造活动及机械制造技术水平的发展密切相关的。制造是紧随着人类社会的产生与发展而产生与发展的,经历了原始制造、手工制造、机器生产、机械化生产、流水线生产、自动生产线并发展到今天的数字化制造、柔性制造、智能制造等模式。

石器时代的各种石斧、石锤、木质和皮质的简单粗糙的工具是后来出现的机械制造的先驱,从制造简单工具和武器演进到制造由多个零件、部件组成的现代机械,机械制造技术的发展经历了漫长的过程。

15—16 世纪以前,机械制造技术发展缓慢,为了生存,制造了石器,以便于狩猎,此后,出现了陶器、铜器、铁器和一些简单的机械,如刀、剑、弓、箭等兵器,锅、壶、盆、罐等用具,犁、磨、碾、水车、风车等农具,这些工具和用具的制造过程都是简单制造过程,主要围绕生产必需和存亡征战,制造资源、规模和技术水平都非常有限。但在以千年计的劳动实践中,已积累了相当多的经验和知识,成为后来机械制造发展的重要潜力。

中国的金属切削加工工艺,从青铜器时代开始萌芽,并逐渐形成和发展。其中冶金铸造技术比西欧早一千多年,从殷商到春秋时期已经有了相当发达的青铜冶铸业,出现了各种青铜工具,如:青铜刀、青铜锉、青铜锯等。有记载表明早在 3000 多年前的商代已经有了旋转的加工工具,这也就是金属切削机床的前身,20 世纪 70 年代在河北满城一号汉墓出土的五铢钱,其外圆上有经过车削的痕迹,刀花均匀,切削振动波纹清晰,椭圆度很小,有可能是将五铢钱穿在方轴上然后装夹在木质的车床上,用手拿着工具进行切削。同时,有出土文物与甲骨文记录表明,这个时期的生产的青铜工具和生活工具,在制造过程中大都要经过切削加工或研磨。

早期金属制造技术最重要的应用之一就是武器制造,如青铜剑的铸造。由于青铜材料容易折断,所以青铜剑一般都是短剑,形状普遍宽而短,60cm 似乎是青铜剑的极限。春秋战国时期,最负盛名的越王勾践剑,全长不过 55.6cm。但在 1974 年陕西兵马俑坑的黄土中,考古人员发现了一把完全不同的青铜剑,这把剑的长度竟然超过了 91cm(图 1-3)。人们猜想秦人用什么方法让长剑不易折断呢?根据现代金属工艺理论,铸剑的关键是掌握铜锡的比例,冶炼时向铜里加入多少锡。锡少了,剑太软,锡多了,剑太硬,容易折断。对秦剑所做的化学定量分析显示:秦剑的铜锡配比让青铜剑的硬度和韧性结合得恰到好处,含锡量为 21.3%,使得剑不仅韧性好,而且硬度接近调质后的中碳钢的硬度,所以非常锐利。19 世纪英国古兵器学者理查·伯顿认为,在短兵器格斗中,刺要比砍更有优势,因为它更逼近对手。古罗马军团在血战中总结出一条规律:以相同的力,刺比砍更致命。显然比对手的剑长出大约 30cm 的秦剑,在格斗中显然更容易刺到对方,这就是使秦剑加长的主要原因,长青铜剑增强了秦人在战斗中的攻击性。并且这些兵器大部分表面都经过了铬盐氧化处理,厚度深为 10~15 μm ,增强了武器的防腐抗锈能力,虽然经过两千多年的地下埋藏,但出土时仍异常锋利。秦剑是青铜剑铸造工艺的顶峰,它的长度、硬度和韧性达到了几乎完美的结合,尤其是秦俑坑中兵器的防锈技术,一直被人们津津乐道,成为中华民族的又一骄傲,但在汉朝之后似乎就失传了,西方国家是到了 20 世纪 30 年代才有了这项技术的专利。

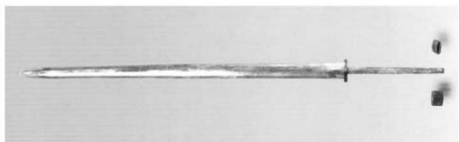


图 1-3 西安秦俑坑中出土的青铜秦剑

同样,大马士革钢宝刀的历史故事可能向我们揭示了古阿拉伯文明的铁器制造技艺水

平。早在 11 世纪末到 13 世纪末的 200 年里,剽悍的阿拉伯骑兵那闪闪发光、锋利无比的大马士革宝刀曾使东征的十字军闻风丧胆。锻打宝刀的铁坯原产于印度,在叙利亚可被工匠锻造成削铁如泥的宝刀,但运至欧洲让最高明的工匠锻造时,却脆得无法成形,这是因为当含碳量高达 1.5% 时,虽可显著提高钢的强度和硬度,却因形成大量脆性的渗碳体网状组织而无法锻打。

直到 20 世纪 60 年代,美国斯坦福大学的两位教授揭开了大马士革宝刀的秘密,原来高含量碳虽会导致脆性,但也能阻止晶粒长大而获得超细晶粒(平均直径为 $9\mu\text{m}$),从而在一定条件下使它处于超塑性状态。目前,采用这种新的经过超塑性加工的钢刀钢剪已在美国和日本上市,人们在自己的厨房里就可一试大马士革宝刀的锋芒了。

标准化是现代机械制造工业的基础,标准化生产使不同的供应商生产的零部件可以组装在一起,也使大规模的生产成为可能,从而实现了专业化生产。但在两千年前农业文明刚刚开始成熟的时代,中国古代的秦朝可能已开始将标准化的概念引入了军事兵器的生产。

秦国在消灭了中原六国之后,北方的游牧民族匈奴人就成了秦军主要对手。当匈奴骑手高速冲锋的时候,传统的步兵很难抵挡。从历史记录来看,一种叫弩(图 1-4)的远射兵器很可能在秦军击溃匈奴的战斗中发挥了主导作用。在陕西兵马俑坑中,由于时间太过久远,弩的木制部分已经朽烂,在弩腐烂后留下的痕迹中,考古人员发现了青铜制作的小机械,这些小小的青铜构件就是弩用来发射的扳机,称为弩机(图 1-5)。秦军的弩机是通过一套灵巧的机械传递,让勾牙在放箭瞬间突然下沉,扣动扳机变得异常轻巧,从而保证了弩射击的准确性。这恰恰是弩对弓的优势之一,秦军使用的弩机设计得非常精巧,制作的十分标准,使得它的部件是可以互换的。在战场上,秦军士兵可以把损坏的弩机中仍旧完好的部件重新拼装使用。青铜弩机的设计在当时是秦国一个惊人的成就,对于匈奴人而言,这种机械装置太复杂了,他们很难装配或仿制,从而保证了秦军在军事武器上的技术领先。



图 1-4 弩



图 1-5 西安秦俑坑中出土的弩机

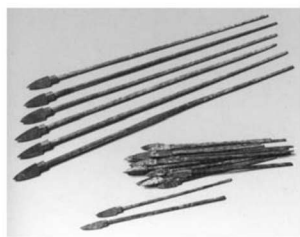


图 1-6 西安秦俑坑中出土的铜镞

此外,秦军的其他兵器也依然施行标准化制造。在兵马俑坑中发现的三棱箭头(铜镞)有 4 万多支(图 1-6),它们都制作得极其规整,箭头底边宽度的平均误差只有正负 0.83mm。重要的是若让某些天才的工匠制造出几件这样的兵器是可能的,但实际情况是,兵马俑坑中几万件铜镞几乎都是同样的质量。对箭头的金相分析的结果也显示它们的金属配比基本相同。数以万计的箭头是按照相同的技术标准铸造出来的,使得不论是在北方草原,还是在南方丛林的各个战场,秦军射向对手的所有箭头,都具有同样的作战质量。这说明在两千多年前,秦人执著于统一的武器制造标准,从而保证所有秦军战士使用的都是当时最优秀的兵器,在战场上应该有优异的表现。这些优秀的武器很可能是秦军从几百年的战争实践中优选出来的。专家推测,秦人很可能是在有意识地将优选兵器的技术标准固定,国家再通过法

令将这些技术标准发放到所有的兵工厂,强制性地按照这个固定的技术标准生产兵器。可见中国秦朝的机械制造技术远远地超越了自己的时代。

早在西汉时期,中国就掌握了炼钢、淬火和渗碳技术,为制造坚硬锋利的工具提供了便利的条件。西汉(公元前206—公元24年)中山靖王墓中出土的宝剑芯部含碳量为 $0.15\% \sim 0.4\%$,而表面含碳量却达 0.6% 以上,说明已应用了渗碳工艺,但当时作为个人“手艺”的秘密,不肯外传,因而发展很慢。

在西方工业革命以前,机械大都是木结构的,由木工用手工制成。金属(主要是铜、铁)仅用于制造仪器、锁、钟表、泵和木结构机械上的小型零件。金属加工主要靠机匠的精工细作,以达到需要的精度。在17世纪以后,资本主义在英、法和西欧诸国出现,商品生产开始成为社会的中心。许多高才艺的机械匠师和有生产观念的知识分子致力于改进各种产业所需的工作机械和研制新的动力机械。

18世纪从英国发起的技术革命是制造技术发展史上的一次巨大革命,从生产技术方面来说,它开创了以机器代替手工工具的时代。这场革命是以工作机的诞生开始的,以蒸汽机作为动力机被广泛使用为标志的。这一次技术革命和与之相关的社会关系的变革,被称为第一次工业革命或者产业革命。工业革命从英国开始是有深刻科学技术前提的。英国工场手工业的高度发展,培养了大批富有实践经验的熟练工人,为机器的发明和应用创造了条件;自然科学的发展及其成就,特别是牛顿的力学和数学,为机器的产生奠定了科学理论基础。

第一次工业革命后,机械制作机械的主要材料逐渐从木材改用更为坚韧,难以用手工加工的金属,需要成形加工和切削加工的金属零件越来越多,越来越大,要求的精度也越来越高,加工的金属材料也从铜、铁发展到以钢为主,从而促进了以机械加工技术,如切削加工、铸造、锻压、钣金、焊接、热处理等及其装备工业(如机床、刀具、量具等)的发展。此时,机械制造工业开始形成,成为一个重要产业。机械制造技术逐步从分散性的、主要依赖匠师们个人才智和手艺的一种技艺,逐渐发展成为一门有理论指导的、系统的和独立的制造工程技术,并成为18—19世纪的工业革命以及资本主义机械大生产的主要技术因素。

同时,科学技术的发展突飞猛进,各种新技术、新发明层出不穷,并被迅速应用于工业生产,大大促进了经济的发展。科学技术的突出发展主要表现在三个方面,即电力的广泛应用、内燃机和新交通工具的创制、新通讯手段的发明。这就是第二次工业革命。

第二次工业革命以电力的广泛应用为显著特点。从19世纪六七十年代开始,出现了一系列电气发明。德国人西门子制成发电机,比利时人格拉姆发明电动机,电力开始用于带动机器,成为补充和取代蒸汽动力的新能源。电力工业和电器制造业迅速发展起来。人类跨入了电气时代。

19世纪早期,人们发现了电磁感应现象,根据这一现象,对电作了深入的研究。在进一步完善电学理论的同时,科学家们开始研制发电机。1866年,德国科学家西门子制成一部发电机,后来几经改进,逐渐完善,到19世纪70年代,实际可用的发电机问世。电动机的发明,实现了电能和机械能的互换,并装在机床上,成为机床动力源。随后,电灯、电车、电钻、电焊机等电气产品如雨后春笋般地涌现出来。

第二次工业革命的又一重大成就是内燃机的创制和使用。19世纪七八十年代,以煤气和汽油为燃料的内燃机相继诞生,90年代柴油机创制成功。内燃机的发明解决了交通工具

的发动机问题。1885年,德国人卡尔·本茨成功地制造了第一辆由内燃机驱动的汽车。内燃机车、远洋轮船、飞机等也得到迅速发展。内燃机的发明,还推动了石油开采业的发展和石油化工工业的产生。

第二次工业革命期间,电讯事业的发展尤为迅速。继有线电报出现之后,电话、无线电报相继问世,为快速地传递信息提供了方便。从此,世界各地的经济、政治和文化联系进一步加强。

第二次工业革命同第一次工业革命相比,具有以下三个特点:首先,在第一次工业革命时期,许多技术发明都来源于工匠的实践经验,科学和技术尚未真正结合;而在第二次工业革命期间,自然科学的新发展,开始同工业生产紧密地结合起来,科学在推动生产力发展方面发挥了更为重要的作用,它与技术的结合使第二次工业革命取得了巨大的成果。其次,第一次工业革命首先发生在英国,重要的新机器和新生产方法主要是在英国发明的,其他国家工业革命发展相对缓慢;而第二次工业革命几乎同时发生在几个先进的资本主义国家,新的技术和发明超出了一国的范围,其规模更加广泛,发展也比较迅速。第三,第二次工业革命开始时,有些主要资本主义国家如日本尚未完成第一次工业革命,对它们来说,两次工业革命是交叉进行的。它们既可以吸收第一次工业革命的技术成果,又可以直接利用第二次工业革命的新技术,因此,这些国家的经济发展速度也比较快。

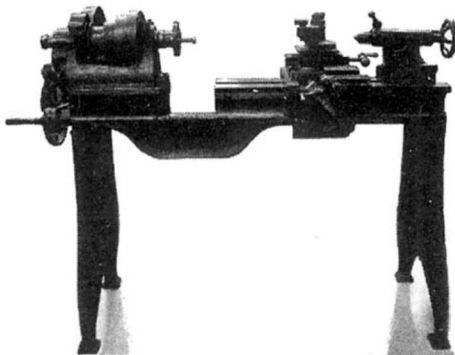


图 1-7 19 世纪早期车床

第一次产业革命后,英国的国力超过中国,这是因为蒸汽机的使用创造了生产财富的新手段。同时工业品消费进入了普通家庭,老百姓的纺织品消费迅速增长,刺激了纺织业、服装业和染料业等工业的发展。第二次产业革命,美国国力超过英国,电力和内燃机开创了批量生产方式。福特汽车公司把轿车定位为大众消费产品,生产流水线技术也应运而生。第三次产业革命,美国仍然是世界经济强国,靠的是电脑和互联网在家庭的普及。为了适应消费个性化的新趋势,数字化技术被应用于制造业,刺激了经济发展。

在机械制造技术发展过程中,机械制造装备工业的形成和发展有非常重要的作用。在欧洲,机械加工技术的改进从 17 世纪就已经开始,到 18 世纪时,车床逐渐由木结构改为金属结构。1750 年,法国 A. 蒂奥在车床上安装了一个刀架,用丝杠驱动作纵向移动,比过去手握车刀前进了一大步,提高了加工尺寸的精度及其稳定性。1774 年 J. 威尔金森制造了一台新的炮筒镗床,可以加工直径达 1.83m 的内圆孔。1775 年他曾为瓦特成功地制造出蒸汽机汽缸。1770 年英国 J. 拉姆斯登首先用车床制造螺丝。1784 年 J. 布拉默和 H. 莫兹利共同改进和制造了几种机床,莫兹利在机械制造方面的主要贡献是于 1797 年在车床上安装了丝杠、光杠和滑动刀架,能加工精密平面和精密螺丝,使机械制造技术的精度水平大为提高。1836 年 J. 内史密斯制成刨床。这台刨床已经具备了现代牛头刨床的基本结构。1830—1850 年, J. B. 惠特沃思利用螺纹微调原理制造的测量装置,使机械产品质量进一步提高,为后来的互换性生产创造了条件。1845 年美国制造出转塔车床,用 8 个刀具装在可旋转塔形支架上,由一人操作轮流完成 8 种不同工种的加工,1861 年又实现了转塔的自动转动。

19 世纪早期车床如图 1-7 所示。英国大约用了半个世纪的时间完成了机械制造技术方面的革命,到 1861 年所有的机械和机器基本上都可以用机器来制造。

19 世纪 40 年代,英国将工作母机用在制造火炮方面,先将火炮铸成实心圆柱金属铸件,然后用一种配用超长钻头的大型钻床钻出一个孔,接着到镗床上将这个孔逐步镗削成型,加工成火炮。此法可使炮身较模铸法更加均匀、对称、光洁,各种尺寸比例和火门的设计较合理、射击精确度高,既提高了铸炮的精度,又节省工时、坚实耐用(图 1-8)。鸦片战争时期,英军的重型火炮,其有效射程在 3 华里(1500 米)左右,最大射程 9 华里之内。

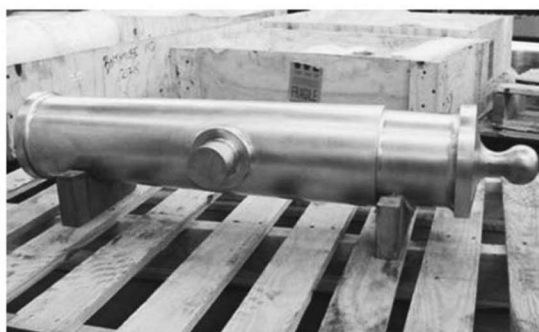


图 1-8 鸦片战争时期,英军当时装备的 12 磅火炮



图 1-9 鸦片战争时期,清军火炮

与英军相比,清军火炮(图 1-9)制作工艺低劣、射程较近、炮弹种类较少。在火炮制作上,清朝墨守成规、坚守祖制。在鸦片战争时期,炮样竟然还是康熙时期留下的。由于当时中国冶炼技术落后,所造大炮往往管壁厚而口径小,结果发射炮弹比较轻而火炮笨重,不利于战时调整,转向困难、射界有限、调整射程不易。因钢材冶炼不纯,气孔多、易炸裂,质量极差。仅在道光十五年(1835)的试射中,就炸坏了 13 门火炮,炸裂损坏率竟然占 59 门新炮的 22% !而演习实战中,也屡屡造成人员伤亡,比如道光十九年(1839 年)在广州官涌的作战中:“有大鹏营一千斤大炮放至第四出,铁热火猛,偶一炸裂,致毙顺德协兵丁二名。”同样的情况还发生在浙江等地。

第二次世界大战后,面对市场激烈竞争,不断变化的多产品变批量,企业无法沿用传统制造技术去面对严峻的生存环境的挑战。因此,必须研究和探索新的制造技术和新的制造模式,随着现代数学、系统论、控制论和信息论等理论和学科的创建和进展,新材料技术、数控技术、微电子技术、自动化技术和信息技术的提出和发展,20 世纪 70 年代开始,世界市场发生了重大的变化,即“3C”。通信(Communication)、计算机(Computerization)和自动控制(Control)。使传统机械制造及其技术体系在 20 世纪开始向先进制造技术(Advance Manufacturing Technology, AMT)及其技术体系发展,在过去 20 年间,比尔·盖茨充当了亨利·福特曾经的角色。Windows 在 1986 年的首发式,与 1914 年 T 型车的推出具有相似之处。比尔·盖茨将我们的世界从工业化时代拖入了信息时代。机械制造技术发展进入了新的发展阶段。1952 年美国研制成第一台 NC 机床,60 年代中期正式上市;1967 年世界第一套 FMS 在英国首先研制,美国成功生产,70 年代初逐渐形成工业应用产品;1963 年美国推出几何造型 CAD 系统,60 年代末开始研制 CAPP;1968 年 IBM 公司提出生产信息和管理系统“PICS”,其后出现了功能日益完善的制造信息系统;70 年代以来,为了提高生产准备和生产过程的效率和效益,充分利用信息技术,实现单元技术间的集成,先后实现了

CAD/CAM、CAD/MIS、CAPP/MIS 等局部系统的集成。先进制造技术体系的建立满足了当代以知识为基础、以创新为动力的新经济体系中,迅速多变的市场需求和日趋激烈的市场竞争的需要。在 80 年代至 90 年代,计算机技术及信息技术全面进入机械制造业,在多个层面融入机械制造过程之中,推动了制造过程的柔性和敏捷性。图 1-10 为汽车零件柔性制造生产单元。迅速推动了以汽车工业、飞机工业和其他相关产业代表的机械制造业的发展,并使机械制造成为全球经济的重要组成部分。



图 1-10 柔性制造单元

总结近几十年机械制造的发展,可以发现在全球经济形势下,产品的市场竞争将更加激烈,机械制造技术也将面临越来越高的挑战,促使了机械制造技术向高精度、极限化和自动化的方向继续发展,归纳起来有五个方面,它们是:

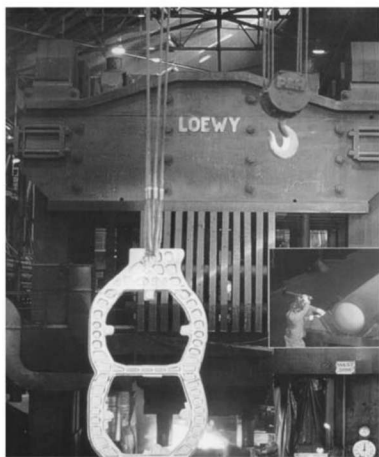


图 1-11 4.5 万吨超精密模锻机床



图 1-12 整体模锻后的波音 747 飞机框架

1. 产品大型化

由于航天航空等技术的发展,大型光电子器件要求大型超精密加工设备,如美国研制的加工直径为 2.4~4m 的大型光学器件超精密加工机床。20 世纪 70 年代大型的工件已重达