

TM505

M54

287

电器制造技术手册

主 编 孟庆龙
副主编 田 衡 徐懋生 王赞明
牛 骅 梁秀霞



A0934368



机械工业出版社

本书是一本专业性极强的现代电器制造技术工具书。全书共 29 章, 160 余万字。主要内容包括: 冷冲压、焊接、热处理、压铸、压塑、绝缘加工、电镀、涂覆、印制板、粉末冶金、特种加工、弹簧、热双金属、铁心、线圈、机柜、母线、配线、静态电器等传统制造工艺。此外, 还包括: 制造过程自动化、成组技术、CAPP 和工艺管理等现代制造工艺内容。另外, 书中还提供了常用资料、数据和标准, 以便读者查找。

图书在版编目 (CIP) 数据

电器制造技术手册/孟庆龙主编. —北京: 机械工业出版社, 1999.12
ISBN 7-111-07688-5

I. 电… II. 孟… III. 电器-生产工艺-技术手册 IV. TM505-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 69140 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 李振标 版式设计: 冉晓华 责任校对: 申春香
封面设计: 姚毅 责任印制: 何全君

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷
787mm×1092mm $\frac{1}{32}$ ·67 印张·3 插页·2298 千字
0 001—4 000 册
定价: 108.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

前 言

电器制造技术是涉及技术领域十分广泛、技术内容更新很快的一门实用性技术，它对电器产品质量的提高有着举足轻重的作用。广大电器工作者长期渴望能编写一本电器制造技术的工具书，以便在产品设计、科研、教学和生产实践中查阅和参考。由于制造技术在世界各国都是技术秘密的核心，因此参考资料少，编写难度大，一般都望而却步。为了填补电器领域的这一空白，总结我国电器行业 40 余年积累的大量经验和成果，以及改革开放 20 年来引进的先进制造技术，为组织编写这本手册，历经五年多时间，终于完成了该书的编写工作。

电器元件及其成套装置是电站、电力网、工矿企业、国防、交通运输以及尖端科学技术等部门实现电气化和自动化的重要技术装备，是国民经济现代化的基础工业。

电器制造技术是电器制造系统的核心，对新产品开发的决策、保证产品质量、提高劳动生产率、降低生产成本、节约能源、改善劳动条件等具有重要作用，对提高企业和社会经济效益有显著影响。许多新产品从开发研制到批量生产，都是靠采用新的制造工艺和先进的设备与工装才得以实现。

电器制造技术发展到今天，经历了劳动密集型和设备密集型生产方式的传统制造技术时代。由于电子技术和计算机技术的广泛应用，实现了人与机器设备之间的信息交流，机器设备可通过所获得的信息，快速、准确地实现加工，使制造技术向信息密集型生产方式过渡，并且向知识和智能密集型生产方式的现代制造技术方向发展。不难看出，以传统制造技术进行生产时，产品的质量和劳动生产率的提高依赖于大量人力和机械设备的投入，而现代制造技术则强调生产的自动化程度和适应性，强调新工艺方法和新技术的投入。

先进制造技术是在不断吸收机械、电子、信息、材料、能源及现代管理等新技术成果，在改造传统的制造技术中不断发展起来的，不再局限于生产过程中物质流的控制，而是全面协调和控制生产过程中的物质流、信息流、能源流，把制造过程看作是一项系统工程。因此，先进的制造技术不再局限于对工艺方法的研究和设计工艺之间的闭环管理，而是延伸到市场决策和售后服务，成为企业面向市场的一个大的开环系统的重要组成部分。先进制造技术中各种专业界限已经逐渐淡化，设计与工艺、制造与管理、制造与成本已经交汇融合于一体，成为企业活动中与其它活动密不可分的统一整体。

应用现代微电子技术、计算机技术、数控技术、人工智能以及多媒体等先进的技术装备和改造传统的电器制造业，已成为电器行业的迫切任务，也是我国现代电器制造技术研究的方向。

本手册是一本专业性极强的工具书，编好它是一项十分艰巨而严肃的工作。参编人员始终坚持实用性、科学性、先进性的编写原则；力求使手册提供的资料、数据、公式及图表准确、可靠；尽量反映国内外先进制造技术，并指明新技术、新工艺的发展方向；同时尽可能地反映电器工艺与各相关领域技术的内在联系，以适应读者对相关工艺的综合需求，对生产实际有一定的指导意义。

本手册主要适用于高低压电器行业制造企业的广大工程技术人员和中级以上技术工人，还可以作为本行业和相关行业科研、设计、运行等单位的工程技术人员以及大专院校师生参考。

参加本手册编写工作的大部分人员是从事电器设计、制造、科研和教学单位的著名专家、

教授、高级工程师，书中汇总了他们多年来的研究成果和实践中的宝贵经验。参加本手册的编写人员有：

- | | | | | | | | | | |
|------|-----|-----|-----|--|-------|-----|-----|-----|--|
| 第一章 | 孟庆龙 | | | | 第十五章 | 王赞明 | 赵志群 | | |
| 第二章 | 崔芮华 | 高忠良 | | | 第十六章 | 金克奎 | 侯良 | | |
| 第三章 | 杨国翊 | 梁秀霞 | | | 第十七章 | 王希俊 | | | |
| 第四章 | 杨炜 | 田衡 | 李奎 | | 第十八章 | 白佑同 | 王赞明 | | |
| 第五章 | 李建明 | 孟跃进 | | | 第十九章 | 陈宝山 | 高祝耀 | 张玉权 | |
| 第六章 | 刘继汉 | 季明诗 | 胡绍英 | | 第二十章 | 孟跃进 | | | |
| 第七章 | 平凡 | | | | 第二十一章 | 田衡 | | | |
| 第八章 | 印有勋 | 孟跃进 | | | 第二十二章 | 刘静然 | 陈新春 | | |
| 第九章 | 徐宗海 | 梁秀红 | | | 第二十三章 | 田衡 | | | |
| 第十章 | 曹广斌 | 贾文军 | | | 第二十四章 | 陈新春 | 尹学博 | 黄伟红 | |
| 第十一章 | 田长丰 | 梁秀红 | | | 第二十五章 | 孟宪松 | 杨钦 | 季明诗 | |
| 第十二章 | 李风茹 | 高忠良 | | | 第二十六章 | 梁秀霞 | 孟凡中 | | |
| 第十三章 | 周景华 | 田衡 | 梁秀霞 | | 第二十七章 | 孟庆龙 | 崔芮华 | 武兵 | |
| | 王胜初 | 陈根春 | | | 第二十八章 | 孟庆龙 | 武兵 | 周春来 | |
| 第十四章 | 华南铭 | 田衡 | | | 第二十九章 | 赵爱珍 | 田衡 | 孟跃进 | |

此外，高庆荣教授协助制订了编写大纲，并重点审查了有关章节，提出许多宝贵的指导性意见。还有冯其标、马志清、崔盛钊、徐涛、孙义仁、黄健、陈惠芳、黄金陵、刘宏、崔启棕、刘金河等同志或提供资料、或参与编写，此外，马志清同志还做了大量的会议组织工作，在此表示衷心感谢。

本手册编写期间，得到了河北工业大学、天津梅兰日兰有限公司、许昌继电器研究所、许继集团公司、北京开关厂、上海华通开关厂、沈阳高压开关厂、天津航空机电公司、天津低压电器公司、北京第二开关厂、北京低压电器厂、阿城继电器股份有限公司、北京继电器厂、南京电力自动化设备总厂、成都魏德米勒电联接公司、杭州红申电器有限公司、天津开关厂等单位的大力支持，中国电机工程学会继电保护专委会工艺与结构分专委会组织了对本手册的审查，使编写任务得以顺利完成，对此表示衷心的感谢。

本手册涉及技术领域较多，因编者水平有限，错误和不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正，为今后的修订提供依据。

编者
1999年7月

第一章 概 论

一、机电制造业的发展概况

机电制造业的发展过程是一个不断提高机电制造产品的加工精度和表面质量，不断提高和改善产品物理的、电气的和力学的特性，以及不断提高和完善制造过程的自动化水平和不断降低制造成本的过程。因此，推动制造技术发展的一个根本出发点就是在充分利用现有的科学技术最新成果的基础上，优质、高产、快速和低消耗地生产出所需要的产品来。

机电制造业发展到今天，按其生产方式的变化进行划分，大致经历了以下几个阶段：

(1) 劳动密集型生产方式 劳动生产率低、工人劳动强度大、对工人的技术水平要求高、产品精度的一致性差等，是一种落后的生产方式，正逐渐被淘汰。手工制作和早期的工业生产均属这种方式。

(2) 设备密集型生产方式 劳动生产率高，对工人的技术水平要求相对较低，产品的精度一致性较好等，这是一种随着汽车、机床等大工业生产而出现的生产方式。但其生产率的提高来自众多设备的投入，对多品种生产的适应性较差。各种生产流水线均属这种方式。

(3) 信息密集型生产方式 它实现了人与机器设备之间的信息交流，机器设备可通过所获得的信息，快速、准确地实现加工，这是一种较先进的生产方式。因此，这种生产方式的自动化程度和适应性较强。数控机床、加工中心等均属这种生产方式所使用的典型设备。我国电器行业从80年代开始大量采用此类设备，极大地提高了行业的制造水平。

(4) 知识密集型生产方式 这是继信息密集型生产方式之后产生的一种新的生产方式。制造系统不但能与人进行信息交流，而且由于本身具有专家经验的知识库、数据库等必要的解决问题的知识和诀窍，使其在获得较少信息的情况下完成加工要求。因此，这种生产方式的自动化水平和适应性进一步提高。柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(CIMS)均属这种生产方式的典型代表。我国电器行业已开始重视这一新技术的应用，有些企业已经取得开发CIMS的经验。但是，要达到高效、实用的阶段，我国电器行业还需要经过一个不断探索和积累经验的过程，需要由简单到复杂，逐步提高应用水平。

(5) 智能密集型生产方式 它不只是具有某一专一的、有限的知识，而试图使制造系统本身具有人工智能，这是正在研究和实施的全新的一种生产方式。因此，这种制造技术的实施，将使人们实现“无图样加工”、“无人化加工”成为可能。目前正在研究的智能制造系统(IMS)、智能型计算机集成制造系统(I-CIMS)就属于这种生产方式。

上述前两种生产方式是属于所谓的传统制造技术，而后三种则属于现代制造技术。不难看出，以传统制造技术进行生产时，产品的质量和劳动生产率的提高依赖于大量人力和机械设备的投入，而现代制造技术则强调了生产的自动化程度和适应性，强调了新工艺方法和新技术的投入。

二、现代电器制造业在国民经济中的地位

电器产品是一种具有电载荷的机械产品。因此，电器制造工业是属于机械制造工业的范畴，是机械工业的延伸并成为其重要组成部分。电器种类繁多，高压电器、低压电器、继电器、通信设备和计算机用机电元件以及家用电器等，都属于电器的范畴。电器在电能生产、输送、分配和使用的各个过程和环节中，起着开关、控制、保护、调节、变换以及信息传递的重要作用。电器也随着科学技术的发展，其内涵不断丰富和更新。从构成原理和结构上看，电器已和50年代时的概念大不一样，有些电器元件或装置，实际上已由有触点电器与微电子器件相结合的机电一体化电器元件或成套装置和系统所代替。电器元件及其成套装置是电站、电力网、工矿企业、国防、交通运输以及科学技术等部门实现电气化和自动化的重要技术装备，是国民经济现代化的基础元件工业。预计到2000年，我国发电装机容量可达到3.0亿kW，年发电量可达到1.4万亿kW·h，年新增发电机装机容量将为2000万kW，每年与之配套的高压断路器将需要20万台，高压隔离开关约需要40万台；低压电器元件约2亿件，其中，年需要万能式断路器(ACB)约46万台，需要塑壳断路器(MCCB)约440万台、交流接触器(ACC)约3200万台、配电电控装置约80万面，其中智能型配电电控装置约1.5万面，这样为我国电器制造业的发展提供了很好的机遇，但落

后的电器制造技术却制约了国家整体现代化水平的提高。因此,应用现代微电子技术、计算机技术、数控技术、人工智能以及多媒体等先进的技术装备和改造传统电器制造业,已成为我国电器行业和电器制造研究领域的迫切任务。

电器制造工艺(技术)是研究将原材料变成电器产品的全部制造过程和制作技术的总和,即研究从原材料变成零件,直至装配成电器产品的整个制造工艺过程和方法。实施工艺过程必须遵循的三项原则是优质(保证产品质量)、高产(提高生产率)、低耗(降低生产成本)的要求。先进的电器制造技术是传统电器制造技术不断吸收机械、电子、信息、材料、能源及现代管理等新技术成果,将其综合应用于电器制造全过程,实现优质、高效、低耗、清洁、灵活生产,取得理想的技术经济效益。

三、现代电器制造技术的系统构成

我国传统的电器制造技术以劳动密集型和设备密集型的生产方式为主,从总体上看工人劳动强度大,劳动生产率低,即使采用设备密集型的生产流水线,也是一种不可调的刚性系统,对多品种生产情况适应性较差,产品质量和劳动生产率的提高均依赖于大量人力和机械设备的投入。当今世界的制造技术正向信息密集型、知识密集型生产方式转变,进一步将向智能密集型生产方式过渡,它们代表了现代制造技术发展的方向。现代制造技术强调生产的自动化程度和适应性,强调新工艺方法和新技术的不断投入。

现代电器制造技术的含义相当广泛。一般认为,现代制造技术是传统制造技术与微电子、计算机、自动控制等现代高新技术交叉融合的结果,是一个集机械、电子、信息、材料和管理等先进技术于一体的新型交叉学科,它使制造技术的技术内涵和水平发生了质的变化。因此,凡是那些能够融合当代科技进步的最新成果、最能发挥人与设备的潜力、最能体现现代制造水平的制造技术均称为现代制造技术。现代电器制造技术是许多子系统的集成。

按传统概念认为:制造工艺方法是由所用的设备和工艺装备对所加工的对象完成加工过程而体现出来的,实现制造工艺方法必须经历一个过程,这就是制造工艺过程。按传统的概念,在企业内部的制造过程,大致都可以分为三个阶段:毛坯制造、零件加工和产品装配。这三个阶段组成的制造过程,如图 1-1 所示。

50年代以来,随着生产的发展和

科学技术的进步,将系统的概念引入到机械制造中,于是提出了生产系统或机械制造系统的概念。根据这一概念,把机械制造的各个组成部分看成一个有机的整体,是一个具有输入和输出的系统。应用系统的观点进行综合分析与研究,把生产技术和有关组织管理等问题结合在一起,以便对制造过程进行有效的控制,达到大幅度提高加工质量和生产效率的目的。1983年国际生产工程研究会(International Institution for Production Engineering Research)对制造赋予新的定义:制造是制造工业内部的一系列有关活动的过程,其中包括产品设计、材料选择、规划、加工生产、质量保证、管理、销售和服务等。该研究会还从广义上明确了制造系统的定义:制造工业内为进行生产而形成的一种组织。在机械、电器制造工业中,制造系统一般是由许多功能,即设计、制造、销售和发运等功能的集成组合。而研究功能可以为其它一种或数种功能提供服务。制造企业是制造工业群体的组成。因此,从系统的观点看,在企业内可以将生产系统和制造系统加以区别。

(一) 生产系统

用系统的观点来分析机械与电器工厂企业,可将整个企业的生产活动作为一个生产系统,而其生产系统的重要组成部分之一是机电制造系统。一个企业根据国家的政策、市场的需求、新技术的开发应用和企业本身的条件,决定产品种类和产量,制订生产计划,进行产品的开发、设计、制造、包装、储运等生产过程的决策与经营管理,这样就形成所谓企业的生产系统。基本生产系统由决策和经营管理、设计与研究开发及制造三个部分构成。图 1-2 所示的虚线框内就是生产系统,其框外是系统的外界环境,即表征企业产品品种、质量、销售等能适应市场需求的变化及信息反馈能力。

整个生产系统由信息流、物质流、能量流联系起来。信息流主要是指计划、调度、管理、设计、工艺和新技术应用等方面的信息系统,以及线性规划、动态规划等方面的数学模型信息等。物质流主要是指从原材料经过加工、装配到制成成品的过程,还包括储存、运输、检验、包装等过程。能量流主要指动力能

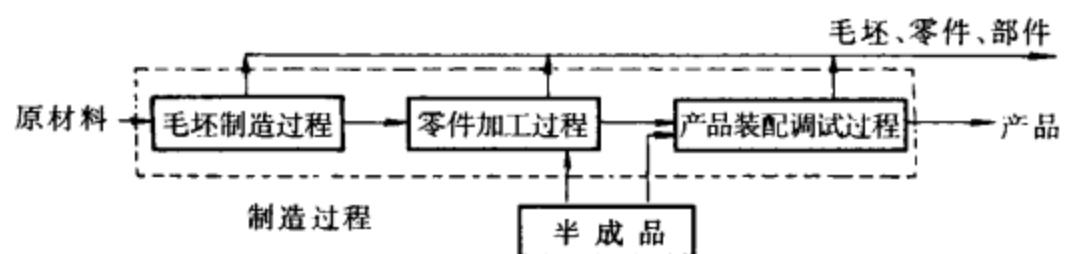


图 1-1 传统的制造工艺过程

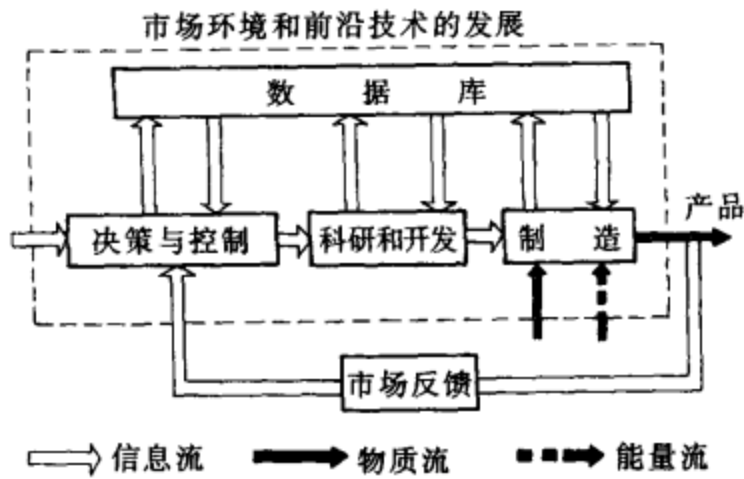


图 1-2 基本生产系统

源系统。因此，任何一个企业都可以看成是一个在能量流的支承下，具有输入和输出、信息流和物质流的生产系统。

利用系统工程学的原理和方法来组织生产，是先进制造技术的要求。它可使企业的生产和管理建立在先进科学技术的基础上，使生产的产品达到优质、高效、低成本，从而得到最佳的技术经济效益和社会效益。

先进的制造技术则贯穿于从市场分析、产品设计、加工制造到产品销售、服务及使用维修等全过程，成为“市场→产品设计→制造→市场”的生产大系统。整个生产过程的实质是一个数据采集、传递和加工处理的过程，最终形成的产品可以看作是数据（信息）的物质表现。

（二）机电制造系统

机电制造系统的任务概括起来说：高效率地制造出高质量低成本的产品。具体地说，该系统是直接将原材料或毛坯转变成一定形状、尺寸和性能要求的零件、部件或产品的一种系统。同时，该系统应能满足成品质量（精度、表面质量以及成品特性）、生产率和成本的要求。因此，机械制造系统作为一个系统，也必然具有输入和输出。其输入就是原材料（毛坯和型材），其输出为加工后的零件、部件或产品，称之为成品。由于零件加工过程往往要经过多道工序、多台机床设备才能完成。因此，如果把零件的整个制造过程看成一个系统的话，这种制造系统称为多级机械制造系统。机电制造系统的基本组成部分是机床设备、工模具和制造过程，其中制造过程是指对输入材料或毛坯的加工、转变过程。机电制造系统框图如图 1-3 所示。

从系统的角度来看，机电制造系统也是由信息系统、物质系统和能量系统等子系统组成，

其相互之间由信息流、物质流和能量流联系起来的综合作用过程。物质流是指物料经过制造过程产生形貌和位置的转变，如工件经过加工改变形状、尺寸，经过运输改变工位等。能量流是指在制造过程中将能量施加于加工对象并产生相应的变换，一般是将电能变成机械能和热能。信息流是将要求得到的形状、尺寸、性能等信息向被加工物料的传递过程，在这一过程中，要对物质流和能量流进行恰当的控制，以获得需要的工件。

机电制造系统也可以看作是若干硬件和软件的集合体。硬件是指机床设备、工模具、物料运输设备和辅助装置等。这些硬件必须有软件的协调配合。软件是指生产信息，它包括工艺方法、加工参数、生产管理和调度等。电器制造系统也是机械制造系统中的一个类型，二者之间的属性基本上是一致的。

先进的机电制造系统以先进的制造技术为基础，使制造技术成为一个能驾驭生产过程中的物质流、能量流和信息流的系统工程。先进的制造技术使机械制造系统从局部自动化走向计算机控制的全局自动化，即由原来局限于产品制造过程的自动化发展到产品设计过程、生产过程和经营管理过程的全局自动化，强调物质流的集成和突出计算机的作用进行信息流的集成，强调总体效益。总之，先进制造技术是提高电器产品市场竞争力的基本保证。

先进的、新型的机电制造系统应该是计算机控制的自动化系统。最基本的机械制造系统是计算机数控（CNC）制造系统，用的是 CNC 机床设备。如果有多台 CNC 机床设备由一台通用计算机进行集中监控，就形成了直接数控（DNC）制造系统。如果把一个工厂的生产系统的三个级，通过集成技术实现计算机控

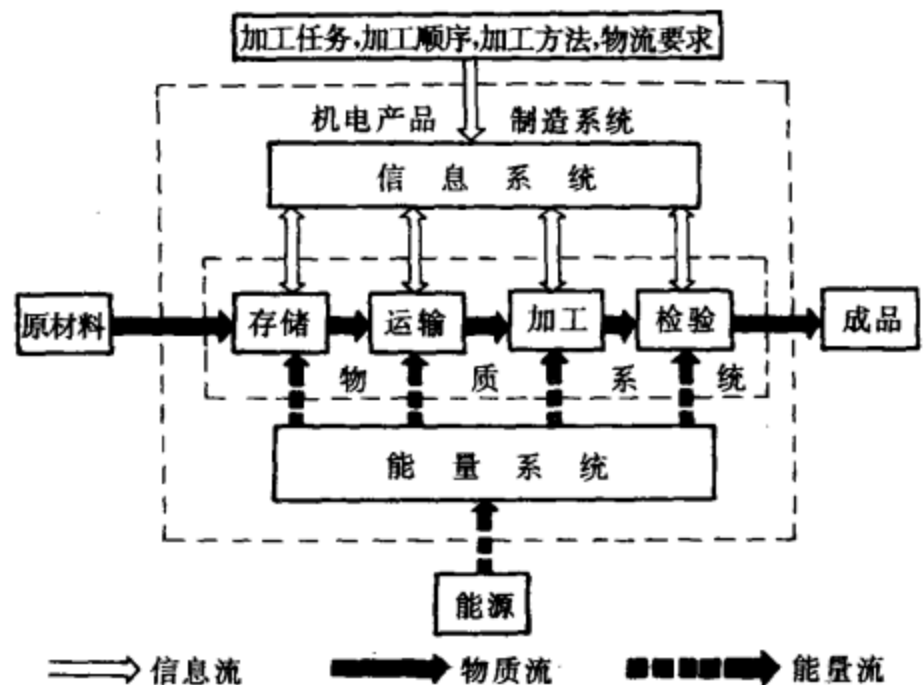


图 1-3 机电制造系统

制的一体化管理，就形成了高效益、高智能化的计算机集成制造系统（CIMS）。

（三）现代制造技术的典型生产制造系统——CIMS

现代制造技术的典型代表是计算机集成制造（CIM），它是一项面向企业生产与制造全过程的高新技术。

1. CIM 技术的含义

美国乔·哈林顿（J.Harrington）博士于 1973 年提出了计算机集成制造的概念：

（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，应统一考虑。

（2）整个生产过程的实质是一个数据采集、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。一般认为 CIM 是一种改进生产过程、提高企业竞争能力的战略技术手段，是一种实现新型生产模式的机制。

CIM 的含义，可以概括如下：CIM 是运用系统工程的整体优化的观点，将现代信息技术结合起来进行综合应用，使信息技术和现代组织管理模式上将生

产过程的各个工作系统和信息系统连接起来，以便有效地提高企业对市场需求的响应能力和生产率，从而保持现代企业的生存和发展。

CIM 指出了基本技术要素及其特点，即信息技术和生产技术的有机结合。其中，人作为信息与生产技术的组织者、决策者和控制执行者，具有首要的核心作用；也应当认真研究生产组织和管理的调整，以使各个环节有机地衔接；产品是企业对市场需求响应的体现，是目标；而技术、管理和人才则是实现 CIM 的不可缺少的三个决定性因素。

2. CIM 与 CIMS

通常，CIM 更多地被理解为一种技术，它包括各项单元技术和集成技术。单元技术如：计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助工艺规程设计（CAPP）、计算机辅助制造（CAM）、数控程序编制（NCP）、计算机辅助质量保证（CAQ）、柔性制造单元（FMC）、柔性制造系统（FMS）等子系统。另外还有网络分系统（NET）、数据管理分系统（DAS）等作为集成技术的支持环境。

通常认为，CIMS 是指 CIM 对一个企业的具体应用，将 CIM 的各项技术综合起来，组成一个实现企业目标的具体系统。

CIMS 是在自动化、信息和制造等各项新技术的基础上，通过计算机及其软件，把企业全部生产活动所需的各种分散的自动化系统有机地集成起来，使之适合于多品种、中小批量生产的总体高效益、高柔性的制造系统。CIMS 的建成可以提高产品质量、生产率和设备利用率，可以减少产品设计和人力的费用，缩短生产周期，提高工程技术人员的综合能力。CIMS 在电器行业中的推广应用，必须结合国情，要花力气解决基础技术和基础实施，要注意软件开发，要立足于企业，尤其要努力提高管理水平，必须产生实效。因此，CIMS 的建设和发展可以分阶段，最好先在一个车间、工段或分厂开始，总结经验逐步推广。

3. 先进制造技术的系统组成

先进制造技术系统的典型代表 CIMS 的组成如图 1-4 所示。它由四大部分组成，即设计与工艺模块、制造模块、管理信息模块和存储运输模块。

（1）设计与工艺模块——它主要包

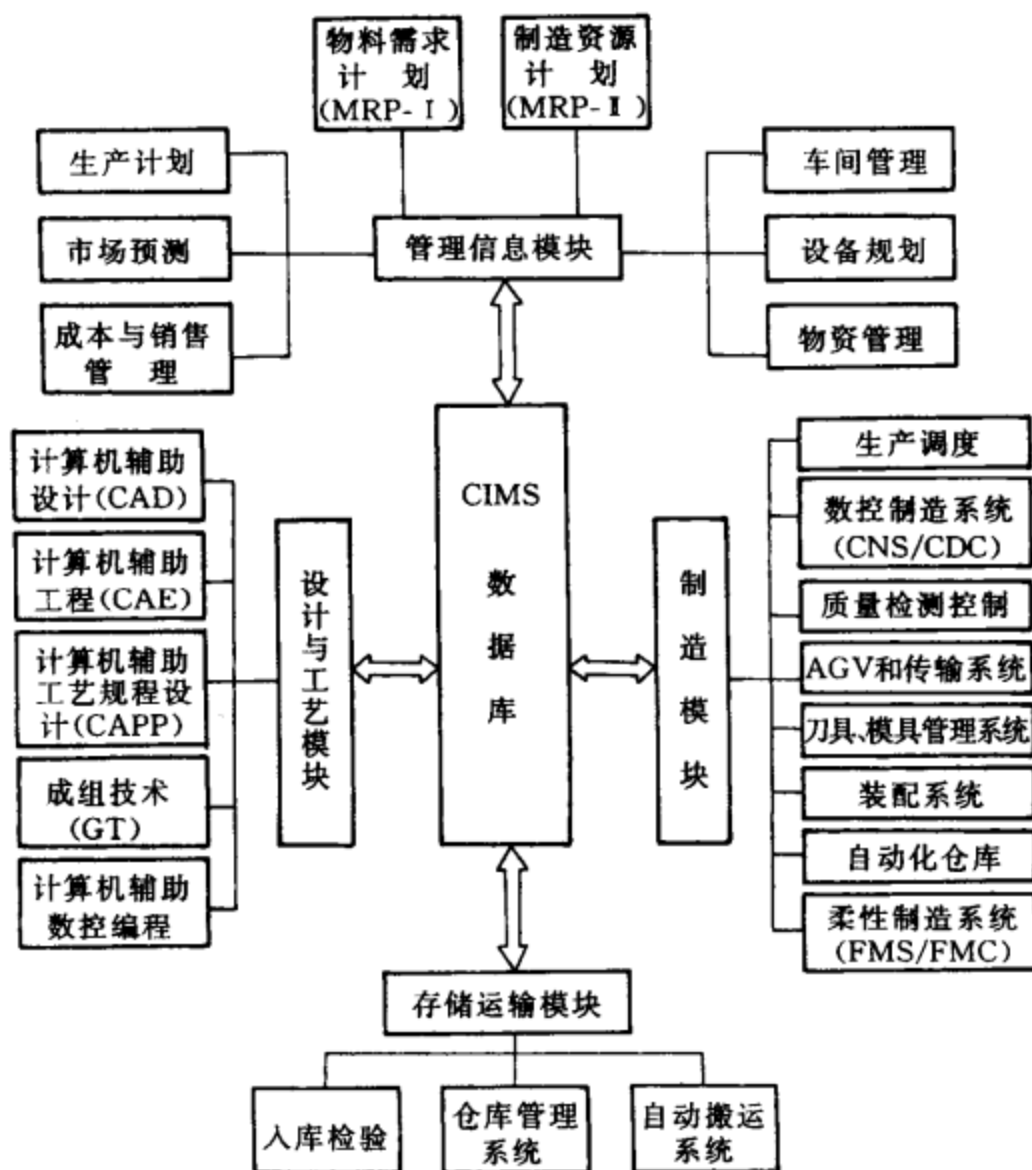


图 1-4 CIMS 的构成

括计算机辅助设计 (CAD)、计算机辅助工程 (CAE)、成组技术 (GT)、计算机辅助工艺规程设计 (CAPP)、计算机辅助数控编程技术。

(2) 制造模块—它主要包括零件的数控加工、生产调度、刀具管理、质量检测与控制、装配、物料及半成品和成品输送与储存、自动化仓库、FMS。

(3) 管理信息模块—它主要包括市场预测、生产计划、物料需求计划 (MRP-I)、制造资源管理 (MRP-II)、成本核算及销售等。

(4) 存储运输模块—它主要包括仓库管理、自动搬运等。

4. 计算机辅助生产管理

计算机辅助生产管理 (CAPM) 是指以计算机为基础的信息处理系统, 它对工厂的管理和运行提供决策支持。

生产管理是生产系统和机械制造系统的重要组成部分。广义的生产管理是指一个企业以输入生产要素开始, 经过企业生产决策经营管理、制造过程管理直至商品输出和为用户服务的全过程管理。狭义的生产管理则指生产过程的管理。

计算机的应用促进了 CAPM 的迅速发展。在生产管理的信息处理系统中, 许多决策过程的软件程序都是以运筹学中的分解模型为基础的。管理信息系统形成了以数据库为核心的集成的计算机辅助管理系统, 必须有一个大容量的数据库来支持。管理信息系统在结构上应该是多层次的, 最高层次制订规划和决策, 具有战略性质; 中层次制订近期工作规划, 具有战术性质; 最低层次处理日常业务, 实施机器操作, 并能将管理、设计、制造、工艺等有机地结合起来, 实现信息的高度共享, 还能自动生成各项工作中的数据、图形和有关文件, 并能自动传递。

物料需求计划 (MRP-I) 是将主作业计划转换成产品的原材料和零件详细计划清单的软件系统。其主要思想是把库存保持在一个最低水平, 同时在需要时, 保证有足够的物料。80 年代, MRP 的功能在不断扩大, 逐渐发展成为一个覆盖经营决策、市场销售、生产制造、物资供应、财务、工程设计和数据处理等各部分的一体化的制造资源计划 (称为 MRP-II)。

制造资源计划 (MRP-II) 是在物料需求计划 (MRP-I) 的基础上研制开发的, 是一种科学的管理方法。它可以对新产品的可制造性进行评估, 对成本进行核算, 对生产周期进行计算, 对库存物资进行反馈, 对市场前景进行预测。

MRP-II 是制造工业通用的现代生产管理方法,

其软件产品已经商品化。美国已有 70% 的企业采用它, 其中 80% 的企业已经取得了显著效益。其它国家也得到广泛应用。

5. 并行工程技术 (Concurrent Engineering Technology)

并行工程 (CE) 是 80 年代末出现的一种新的机制, 其含义是指在产品的市场需求分析、设计制造、销售和售后服务直至产品报废的全过程中, 每一个阶段不是孤立的, 不是串行传递的。它强调了下游对上游工作的参与、评价与反馈, 使整个产品开发研制过程的各个环节处于最佳的技术状态, 最大限度地减少投产后的返工。

并行工程技术实际上是使生产系统与新技术联系起来, 以改善设计与制造间的信息交流, 将产品的设计与制造及其相关过程进行系统的综合, 以期在产品设计的同时就将工艺设计、生产制造、维修的各个环节联系起来考虑, 从而大大缩短产品的生产周期。这项技术的关键是将 CAD、CAPP、CAM、CAT 和管理等技术有机地结合起来, 并改变以往设计、制造、试验的串行环节, 引进动态并行机制, 即将产品生产中的各种因素有机综合、并行处理, 将产品设计、工艺设计、生产计划、加工制造、检验和市场分析等同步进行。在其应用中, 计算机及其网络就成为最核心的基础支持技术。集成工程数据库是这一支持环境中的一个中心环节, 提供了产品设计、制造、管理、销售等各种信息数据交换与共享的媒介。在其未来的发展工程中, 人工智能和专家系统技术必将成为重要的技术基础。

我国机电行业积极开展并行工程的研究, 并推出 CAD/CAPP/CAM 等并行工程系统, 如图 1-5 所示。

并行工程技术的实施将可能取代目前流行的 CAD/CAM 一体化制造系统。

6. 制造系统的计算机仿真技术 (Computer Simulation Technology for Manufacturing System)

产品设计完成之后, 在实际制造之前进行计算机仿真是必不可少的步骤。它可以验证设计的可行性, 减少试验和试制的工作量。计算机仿真技术只需要计算机系统, 不需要其它物理装置, 其经济效益十分显著。

仿真 (Simulation) 的定义是通过系统模型的实验去研究一个存在的或设计中的系统。

计算机仿真是借助计算机, 用系统的模型对真实系统的或设想的系统进行实验的一门综合性技术。

计算机仿真也可称为纯数学仿真, 即它是一种通过建立和实际系统相符合的数学模型, 再运用计算机

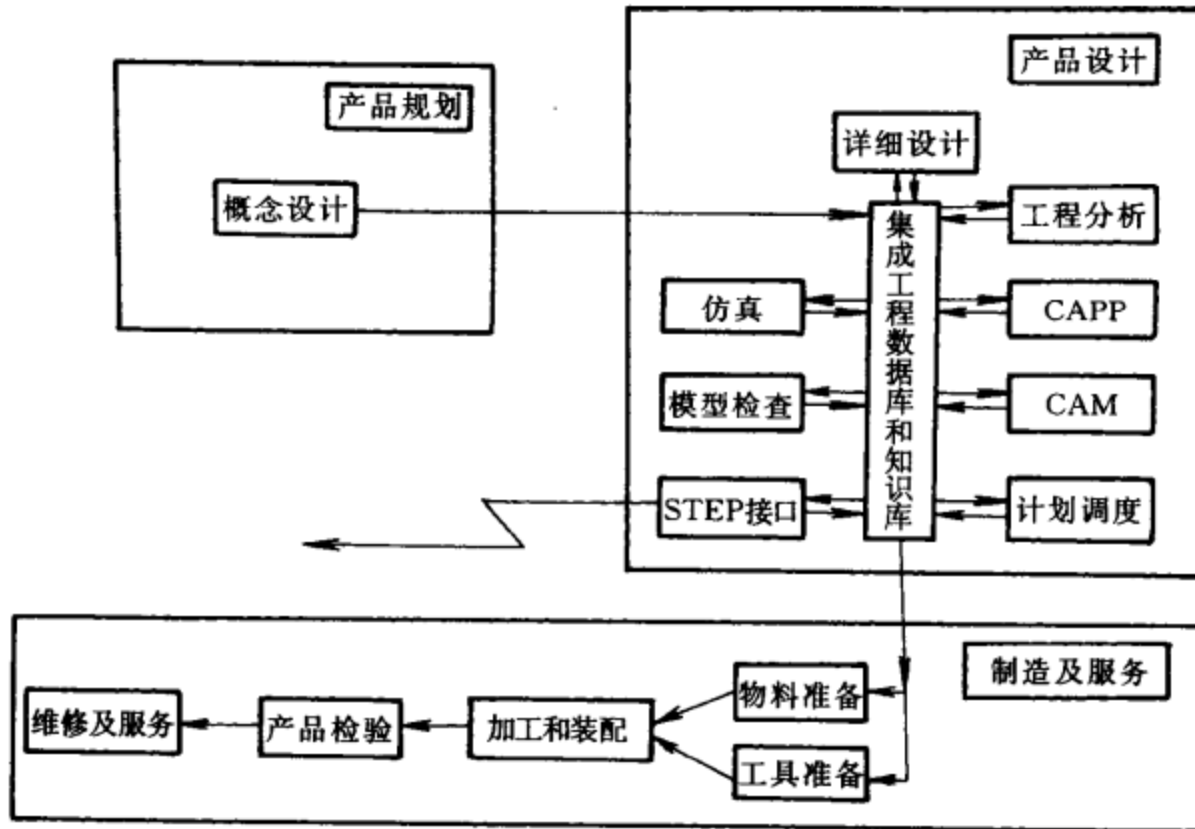


图 1-5 CAD/CAPP/CAM 并行工程系统

进行仿真运行以达到研究系统的目的。因此，计算机仿真是以数学模型为基础，而后借助软件完成的，其核心是求解一组微分-代数方程组。数学模型与实物逼近的程度，直接影响仿真结果的可用性。

通常按仿真系统状态的变化将系统仿真分为连续系统仿真、离散系统仿真和混合系统仿真。制造系统属于离散系统仿真。

制造系统的仿真方法与步骤一般可按以下步骤进行：①定义被仿真系统；②建立系统模型；③搜集数据；④验证模型；⑤运行模型；⑥修改模型重新实验。

仿真技术需要仿真语言和软件，到目前为止，世界上可以用于制造系统的仿真语言有 100 多种。

制造系统仿真的一些新的发展趋势有：

(1) 开发适于 JIT (JUST-IN-TIME) 规则的仿真软件；

(2) 制造系统的实时仿真；

(3) 专家仿真系统；

(4) 数据加工过程仿真。

7. 拟实（虚拟）制造技术（Virtual Manufacturing Technology）

拟实（虚拟）制造技术是近年来出现的新概念。它是指运用计算机通过虚拟模型，而不是通过真实的加工过程，在计算机上预估产品性能和功能以及实际制造过程中可能存在的问题。拟实制造有一系列优点，主要是：①可以在设计过程中实现直接反馈；②产品的设计和测试用软件实现；③实现无图样制造和

全过程的跟踪，还能实现自动建档；④修改和复制均在计算机屏幕上进行；⑤可以模拟在车间加工的全过程；⑥人们可在计算机上学习和了解制造过程。

拟实制造存在一系列的难题有待解决，如制造系统物理模型的建立、设计工程师和软件工程师对实际的了解与经验等。

四、现代电器制造技术（工艺）的发展趋势

现代电器制造技术（工艺）是在应用先进的制造技术改造传统制造技术的基础上发展起来的。我国传统的电器制造技术还很落后，主要表现在装备陈旧、自动化程度低和适应性差，总体上处于单机刚性自动化层次，而国外正向柔性化方向发展。我国机械制造业的固定资产新度系数低于全国工业水平约 6%，现有生产设备中数控、精密、高效设备不足 5%，而电器制造还落后于机械制造的总体水平。新型的、智能化的低压电器的市场占有率较低，约为 20%~30%，这就要求我国不断开发高性能指标的高低电压器产品和扩大品种规格，同时要求电器制造企业采用新设备、新技术，不断提高制造技术水平，以适应国民经济高速增长的需要。电器制造技术的提高只有从采用新技术、新材料、新工艺方面寻找出路。

1. 新材料的发展

先进的制造技术是以不断采用新材料的最新成果为基础。电器制造技术的发展以三种特种材料为基

基础,即磁性材料、绝缘材料、电接触材料。随着电器高性能指标和新结构的研制开发的需要,也必须有新的工程材料供其选择。为了适应我国 500~750kV 超高压电力系统发展的需要,相继研制成功机电破坏强度分别为 210kN 和 300kN 的悬式绝缘子,还研制成了 500kV、8kN 的耐污型户外棒型支柱绝缘子,以保证超高压输变电设备的研制计划。为了提高我国发电机单机容量,开发高效节能的电机、电磁开关等电工产品的需要,先后研制成功高磁感应和高铁损冷轧取向硅钢片、特种硅钢片、电工纯铁、高磁能稀土永磁等磁性材料;同时,研制电机、电器用的 F、H 级漆包线所需要的耐热性、高介电性能、高机械强度、耐化学腐蚀、耐紫外线和耐辐射等具有特殊性能的绝缘漆等电工绝缘材料。聚酰亚胺玻璃纤维塑料、氨基玻璃纤维塑料、酚醛注射塑料、三聚氰胺改性酚醛塑料等高分子材料的研制成功,促进了高低压电器和仪表的更新换代产品的开发研制。

为了提高低压电器的分断能力和电寿命,要不断地研制出新的触头材料。电接触材料已成为现代科学技术和工业发展不可缺少的重要材料。国外特别重视电接触复合材料,它有粒状强化(粉末冶金)、弥散强化、纤维增强和层状复合材料,其中层状复合材料应用广泛。电接触复合材料的发展方向主要是合金多元化、复合多元化、超小型化和性能综合化。

电器新产品的开发在很大程度上依赖于电工绝缘材料和电工合金的新发展,新材料的应用使电工产品的单机输出功率大大提高、功耗降低,同时也极大地缩小了体积,减小了重量,也改善和提高了产品的性能,甚至可以美化外观造型。

2. 新设备的发展与应用

先进的制造技术的制造系统是以现代计算机控制技术、传感技术和自动化技术发展起来的先进加工设备为基础,如数控机床、数控加工中心、柔性制造系统以及 CIMS 等。工程材料的新发展不仅促进了新产品的开发研制,而且促进了制造技术的发展和提高,反之也为新产品的研制提供了保证。制造技术的提高体现在新工艺和新设备采用的比率上。为了迅速提高我国电器制造技术水平,最近 10 余年我国引进了大量的新工艺和新设备。铁心制造工艺的发展趋势是提高硅钢片利用率、提高制造质量、提高尺寸精度、降低铁损、提高装备的自动化程度和效率。国内外的电器生产企业一直致力于提高铁心的自动化水平,广泛采用高速自动压机多工位连续冲压,冲次可达每分钟 200~1200 次,送料精度为 0.01~0.03mm,采用砂带磨床加工极面,超声气相清洗,采用自动装铆机铆

装铁心和装配短路环等,生产率可达每分钟 10~20 件。开关柜(屏)的生产,引进了各种数控冲压中心,能自动更换模具,并配有自动装卸料装置和工件传送机构,可以采用计算机控制,并能自动编程,实现柜体 CAD/CAM 集成生产系统。

电器产品的冲压件约占 50%~70%,其质量依靠模具保证,精密模具的制造技术、模具制造 CAD/CAM 技术的推广应用,对电器的发展起着重要作用。

为了提高先进制造技术的水平,我国近期科技规划提出了开展精密成形技术研究。精密成形技术是生产全部或局部无余量或少余量半成品的工艺方法的统称。该技术主要包括精密凝聚成型技术、精密塑性加工技术、粉末材料构件精密成型技术、精密焊接技术及复合成型技术等。其目的在于使成形的制品达到或接近成品形状和尺寸,并达到提高质量、缩短制造周期和降低成本的效果。其发展方向是精密化、高效化、强韧化和轻量化,并积极开展金属材料精密凝聚成型技术、金属板材塑性加工精密成型技术(如精密冲裁成套技术)、粉末材料构件精密成型技术(如喷射沉积成型技术)、精密焊接(如真空钎焊、扩散焊)及复合成型技术等研究,可以促进电器制造技术水平的提高。

现代电器制造技术广泛采用表面改性、镀膜和涂层技术,它是采用物理、化学、金属学、高分子化学、电学、光学和机械学等技术及其组合技术对产品表面进行改性、镀膜和涂层,赋予其表面减摩、耐磨、耐蚀、耐热、抗疲劳等功能。

线圈和绕组的制造工艺发展趋势是提高线圈和绕组的制造质量,提高装备的自动化程度,广泛应用微电子技术。国外的全自动绕线机有 12 头~24 头等多种规格,绕线速度达 5000~1800r/min,可绕线径为 0.05~4.0mm,装有自动垫层间绝缘、焊引线头、数显匝数、调整张力、包装、传送等功能。采用自粘性高强度漆包线,不需浸漆处理,或用自粘带做层间绝缘代替浸漆处理,简化工艺过程。用环氧包封胶包封线圈,可提高力学强度,增强导热性和防潮性。

绝缘处理工艺至关重要,它对提高产品的电气绝缘性能有直接关系,其发展趋势是广泛采用新型绝缘材料和新工艺,提高绝缘件的电气性能、机械强度和制品的尺寸精度,提高处理设备的自动化水平和生产率。环氧树脂绝缘件在 SF₆ 高压电器中应用越来越广泛。为了保证质量,对环氧树脂的粘度特性、耐裂特性、机械特性和电器绝缘特性都很重视。对一些大型零件,如盆式绝缘子、大套管等均采用真空浇注,对

形状复杂的小型零件,均采用真空加压浇注,即在环氧注射机上进行。随着真空浇注工艺和设备的日臻完善,目前仍致力于改进套管浇注件的质量,采用薄膜脱气搅拌、两级真空系统等措施,工艺过程控制采用数控技术。

热固性塑料成型,目前仍采用注射成型或压膜成型,热固性注射机已实现注射过程自动化。当采用全自动折杆式压机时,一人可看管20~30台。热塑性成型广泛采用高速、精密注射成型工艺和精密注射成型机,重复精度为0.3%。目前氨基塑料、不饱和聚酯材料、环氧塑料等新材料得到广泛应用。

3. 新的加工方法的发展前景

先进的制造技术也必须采用先进的加工方法。机械加工方法(材料切除方法或有屑工艺)在电器制造中应用也很广泛。它是属于重量减少类工艺,其缺点是材料利用率低、能量消耗多、成本增加。近30年

来少切削或无切削工艺(重量不变类工艺)受到重视,然而由于此类工艺的模具和设备费用仍很高,所以在很多情况下,重量减少类工艺(有屑工艺)仍是最经济的工艺。而且切削加工的适应性强,方法比较简便,并且得到的加工精度和表面质量是其它加工方法所难以达到的。

虽然传统的机械加工方法不能被取代,但它的固有加工过程能量利用率低,难于加工新型工程材料,某些特殊性表面(如微小孔、异型孔)无法加工等。因此,近几十年来特种加工方法特别受到重视。由于切削加工与各种特种加工方法应用范围不同,因此难于在相同条件下进行比较。表1-1列出了这几类加工方法的重要参数,以供比较。但是表中所列数据因加工条件变化会有较大的出入,仅供参考。

目前,一些特种加工方法能量转换效率都较低,其能量利用率也较低(表1-1)。

表 1-1 主要几种加工方法的比较

加工方法	最大材料 切除率 /cm/min	典型的功 率消耗 kW/(cm/min)	切削速度 /(m/min)	进给量 /(mm/min)	精度±		典型的 机床功率 /kW
					可达到 /mm	在最大切除率时 /mm	
普通车削	3300	0.064	76	—	0.005	0.13	22
普通磨削	820	0.46	3	—	0.0025	0.05	20
化学铣削	490	0.91	—	0.025	0.013	0.075	—
等离子束加工	164	0.091	15	264	0.5	2.54	150
电解磨削	33	7.28	0.08	—	0.005	0.063	3
电解加工	16.4	1.82	—	12.7	0.013	0.15	150
电火花加工	4.9	9.10	—	12.7	0.004	0.05	11
超声加工	0.82	455	—	0.50	0.005	0.040	11
电子束加工	0.0082	2731	60	150	0.005	0.050	7.5
激光束加工	0.0049	—	—	102	0.013	0.13	15

新材料的发展对机械加工不断提出了新的挑战,一方面迫使传统的机械加工方法革新其设备和工具;另一方面对诸如镍基高强度耐热合金、非结晶金属、硅陶瓷材料、纤维复合材料等的加工,要求应用更多的物理、化学、材料科学的现代知识来开发新的加工制造技术,因此,相继出现许多特种加工方法。我国将特种加工技术开发与应用研究列入“九五”科技规划项目,见表1-2。特种加工是指那些不属于常规加工范畴的加工,如高能束流(电子束、离子束、激光束)加工、电加工(电解和电火花加工)、超声加工、高压水加工以及多种能源的组合加工。考虑到无引线或短引线电子元器件表面贴装技术(SMT)的特殊性,将其也列入特种加工类中。

表 1-2 特种加工技术开发与应用研究项目

序号	特种加工名称	主要研究内容
1	激光加工技术	多坐标数控激光加工中心的研制和激光加工的全数控软件技术;束流模式诊断与品质改进技术;激光加工与光纤的耦合效率研究及传输技术;激光切割、焊接、打孔、熔覆等实用工艺技术等
2	电子束加工技术	大型复杂承力构件精密薄壁部件的电子束焊接技术;电子束打孔技术;大功率电子束连续镀膜装备技术的研制等

(续)

序号	特种加工名称	主要研究内容
3	离子束加工技术	离子辅助镀层设备及工艺研究；等离子切割、焊接及堆焊技术
4	高压水加工技术	高压水切割、清洗及强化技术
5	电解加工技术	复杂结构的电解加工技术以及精密和细微电火花加工技术
6	表面贴装技术 (SMT)	精密漏印技术；精密自动贴装设备及工艺技术；波峰钎焊和再流式钎焊设备及工艺技术

对于高强度、耐磨、耐热等难加工材料的加工，应用特种加工方法的比重在逐年增加。

4. 日益提高的机械加工精度和检测系统

国外电工产品制造企业，为了提高零件机械加工精度、保证质量、提高效率，已广泛采用数控、数显机床和数控加工中心；计算机工艺管理；CAD/CAPP/CAM系统，其机械加工自动化程度有的已达90%。高压SF₆断路器和全封闭高压组合电器 (GIS) 的广泛应用，要求加工零件的密封性能好、绝缘性能好，其中不少零件外形复杂，加工精度和公差配合均要求很高，表面粗糙度要求高。因此，必须采用高效、精密设备，如采用数控机床和数控加工中心。国外，70年代开始利用成组加工技术，为有效地采用CAD/CAPP/CAM系统创造了条件，并通过无人运输车与机器人 (手) 相联系，实现刀具自动更换 (ATC) 和零件自动更换 (APC)，采用计算机集中控制，构成柔性制造单元 (FMC) 或柔性制造系统 (FMS)，以实现计算机集成制造系统 (CIMS)。

生产的发展要求不断提高机电产品工作或运转精度，势必要相应地提高零件的尺寸和几何形状的精度。20世纪初，由于发明了能测量0.001mm的千分表和光学比较仪等，加工精度逐渐向微米级的精密加工过渡。在最近10~20年的时间里使机械加工精度提高1~2个数量级，目前已提高到纳米 (nm) 级 (1nm=10⁻⁹m)，从而进入了超精度加工的时代。现在测量超大规模集成电路所用的电子探针，其测量精度已可达0.25nm。预计到21世纪初将实现原子级尺

寸的加工和测量。精密、超精密加工技术是指对加工表面材料进行去除，使工件的尺寸、表面性能达到产品要求的技术措施。根据加工的尺寸精度和表面粗糙度达到的水平，大致分为三个档次，见表1-3。

表 1-3 精密加工类别

名 称	精密加工 / μm	超精密加工 (亚微米) / μm	纳米加工 / nm
精 度	3~0.3	0.3~0.03	<30
粗 糙 度	0.3~0.03	0.03~0.05	<5

为了使我国精密加工提高到一个新水平，要积极开展超精密CNC复合加工机床、高效小型超精密车床、超精密激光三维形状测量技术、超精密加工工艺及纳米级加工技术等研究。迅速发展的宇航、计算机和自动控制系统等尖端科学技术，促使宇航、航空用电器向微型化发展，例如微型开关单件重量仅0.5g，温度继电器体积只有绿豆大，而这些产品内部的触点、弹簧、结构件等都需要微细加工技术。在加工过程中对加工精度进行的监控技术，应用光学的计量方式已有可能进入实用阶段，如用激光高速扫描的尺寸计量系统。以亚微米级激光精度为计量对象的非接触测量系统的研制和实用，是近些年里实现高度自动化精度生产系统的重大课题。

5. 电器生产对生产环境的要求日益提高

大批量生产的电工产品趋向于装配自动化方向发展。随着高电压、大容量电工产品的出现，为了保证高压电器产品良好的电气绝缘性能，国外都致力于改善装配环境条件，采取相应的防尘、降温、降湿措施。特别是SF₆电器和真空开关的灭弧室的装配、电力电容器芯子的卷制，各国都予以高度重视，对装配车间的尘埃含量以及温度、湿度进行严格控制。国外对生产高压SF₆电器的装配车间有如下规定：日降尘量：<20mg/m²；浮游尘埃：≤0.5 μm ，≤100000粒/t³；温度：冬天15℃以上，夏天28℃以下；在正常大气压下室内应保持正压：98Pa。

对于小型密封继电器的装配车间的洁净度要求也很高。

第二章 理化基础知识

第一节 计量单位与换算

一、我国法定计量单位

我国法定计量单位是以国际单位制的单位为基础，结合我国的实际情况，适当补充了一些其他单位构成的。

第 11 届国际计量大会正式定名为国际单位制，其国际符号为 SI (Le Système International d'Unités)。国际单位制有 7 个基本单位，2 个辅助单位，19 个具有专门名称的导出单位，16 个十进制词头。

1984 年经国务院颁布的我国法定计量单位包括：

- (1) SI 的基本单位；
- (2) SI 的辅助单位；
- (3) SI 中具有专门名称的导出单位；
- (4) 国家选定的非 SI 单位；
- (5) 由以上单位构成的组合形式的单位；
- (6) 由词头和以上单位构成的十进倍数单位。

1. SI 基本单位及其定义

SI 的 7 个基本单位及其定义见表 2-1 所示。

2. SI 辅助单位

SI 的两个辅助单位及其定义见表 2-2。这两个单位既可作为基本单位使用，又可作为导出单位使用。使用上根据需要，可以用弧度或球面度。

3. SI 导出单位

导出单位是用基本单位和（或）辅助单位以代数形式所表示的单位。19 个具有专门名称的导出单位见表 2-3。未给予名称的不能认为是 SI 单位。

4. 国家选定的非国际单位制单位

我国选定了 15 个非 SI 单位作为国家法定计算量单位，见表 2-4。

5. SI 单位的倍数单位

SI 词头的名称及符号见表 2-5。词头用于构成倍数单位，但本身不能单独使用。

6. 组合单位

由两个或两个以上的不同单位，用乘或相除的方法构成一个新单位，称为组合单位。

组合单位可根据需要和习惯按国家标准规定的使用规则构成（参照 GB3100—93）。

表 2-1 SI 基本单位及其定义

量的名称	单位名称	单位符号	定义 (GB3100—93 附录 B)
长度	米	m	米等于光在真空中 299 792 458 分之一秒时间间隔内所经路径的长度
质量	千克 (公斤)	kg	千克是质量单位，等于国际千克原器的质量
时间	秒	s	秒是铯—133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9192631770 个周期的持续时间
电流	安 [培]	A	在真空中，截面积可忽略的两根相距 1m 的无限长平行圆直导线内通以等量恒定电流时，若导线间相互作用力在每米长度上为 2×10^{-7} N，则每根导线中的电流为 1A
热力学温度	开 [尔文]	K	热力学温度开尔文是水三相点热力学温度的 1/273.16
物质的量	摩 [尔]	mol	摩尔是一系统的物质的量，该系统中所包含的基本单元数与 0.012kg 碳-12 的原子数目相等。在使用摩尔时，基本单元应予以指明，可以是原子、分子、离子、电子及其它粒子，或是这些粒子的特定组合
发光强度	坎 [德拉]	cd	坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度，该光源发出频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射，且在此方向上的辐射强度为 (1/683) W/sr

注：1. 圆括号中的名称，是它前面的名称的同义词；

2. 方括号中的字，在不致引起混淆、误解的情况下，可以省略。去掉方括号中的字即为其简称。无方括号的单位名称，简称与全称同；

3. 这里所给的符号，除特殊指明者外，均为国际符号。

表 2-2 SI 辅助单位及其定义

量的名称	单位名称	单位符号	定义 (GB3100—86 附录 B)
[平面]角	弧度	rad	弧度是一个圆内两条半径间的平面角, 这两条半径在圆周上截取的弧长与半径相等
立体角	球面度	sr	球面度是一个立体角, 其顶点位于球心, 而它在球面上所截取的面积等于以球半径为边长的正方形面积

表 2-3 包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位

量的名称	SI 导出单位		
	名称	符号	用 SI 基本单位和 SI 导出单位表示
[平面]角	弧度	rad	1rad = 1m/m = 1
立体角	球面度	sr	1sr = 1m ² /m ² = 1
频率	赫 [兹]	Hz	1Hz = 1s ⁻¹
力	牛 [顿]	N	1N = 1kg·m/s ²
压力, 压强, 应力	帕 [斯卡]	Pa	1Pa = 1N/m ²
能 [量], 功, 热量	焦 [耳]	J	1J = 1N·m
功率, 辐 [射能] 通量	瓦 [特]	W	1W = 1J/s
电荷 [量]	库 [仑]	C	1C = 1A·s
电压, 电动势, 电位, (电势)	伏 [特]	V	1V = 1W/A
电容	法 [拉]	F	1F = 1C/V
电阻	欧 [姆]	Ω	1Ω = 1V/A
电导	西 [门子]	S	1S = 1Ω ⁻¹
磁通 [量]	韦 [伯]	Wb	1Wb = 1V·s
磁通 [量] 密度, 磁感应强度	特 [斯拉]	T	1T = 1Wb/m ²
电感	亨 [利]	H	1H = 1Wb/A
摄氏温度	摄氏度	℃	1℃ = 1K
光通量	流 [明]	lm	1lm = 1cd·sr
[光] 照度	勒 [克斯]	lx	1lx = 1lm/m ²
[放射性] 活度	贝可 [勒尔]	Bq	1Bq = 1s ⁻¹
吸收剂量 比授 [予] 能 比释动能	戈 [瑞]	Gy	1Gy = 1J/kg
剂量当量	希 [沃特]	Sv	1Sv = 1J/kg

表 2-4 我国选定的非国际单位制单位

量的名称	单位名称	单位符号	与 SI 单位的关系
时 间	分	min	1min = 60s
	[小] 时	h	1h = 60min = 3600s
	天 (日)	d	1d = 24h = 86400s
[平面]角	度	(°)	1° = (π/180) rad
	[角] 分	(')	1' = (1/60)° = (π/10800) rad
	[角] 秒	(")	1" = (1/60)' = (π/648000) rad
体积, 容积	升	L, (l)	1L = 1dm ³ = 10 ⁻³ m ³
质 量	吨	t	1t = 10 ³ kg
	原子质量单位	u	1u ≈ 1.6605655 × 10 ⁻²⁷ kg
旋转速度	转每分	r/min	1r/min = (1/60) s ⁻¹
长 度	海里	n mile	1n mile = 1852m (只用于航程)
速 度	节	kn	1kn = 1n mile/h = (1852/3600) m/s (只用于航行)
能	电子伏	eV	eV ≈ 1.602189 × 10 ⁻¹⁹ J
级 差	分贝	dB	
线密度	特 [克斯]	tex	1tex = 10 ⁻⁶ kg/m

- 注: 1. 平面角单位度、分、秒的符号, 在组合单位中应采用 (°), (′), (″) 的形式。例如, 不用 °/s 而用 (°)/s;
 2. 升的两个符号属同等地位, 可任意选用。
 3. [] 内的字, 在不致混淆的情况下, 可以省略。
 4. () 内的字为前者的同义名称。

表 2-5 SI 词头

因 数	词头名称		符 号
	英 文	中 文	
10^{24}	yotta	尧 [它]	Y
10^{21}	zetta	泽 [它]	Z
10^{18}	exa	艾 [可萨]	E
10^{15}	peta	拍 [它]	P
10^{12}	tera	太 [拉]	T
10^9	giga	吉 [咖]	G
10^6	mega	兆	M
10^3	kilo	千	k
10^2	hecto	百	h
10^1	deca	十	da
10^{-1}	deci	分	d
10^{-2}	centi	厘	c
10^{-3}	milli	毫	m
10^{-6}	micro	微	μ
10^{-9}	nano	纳 [诺]	n
10^{-12}	pico	皮 [可]	p
10^{-15}	femto	飞 [母托]	f
10^{-18}	atto	阿 [托]	a
10^{-21}	zepto	仄 [普托]	z
10^{-24}	yocto	幺 [科托]	y

3. 面积单位换算 (表 2-8)

4. 体积和容积单位换算 (表 2-9)

5. 平面角单位换算 (表 2-10)

6. 时间单位换算 (表 2-11)

7. 质量单位换算 (表 2-12)

8. 温度换算 (表 2-13)

9. 线速度单位换算 (表 2-14)

10. 角速度单位换算 (表 2-15)

11. 密度单位换算 (表 2-16)

12. 质量流量单位换算 (表 2-17)

13. 体积流量单位换算 (表 2-18)

14. 力单位换算 (表 2-19)

15. 力矩单位换算 (表 2-20)

16. 转动惯量单位换算 (表 2-21)

17. 运动粘度单位换算 (表 2-22)

18. 动力粘度单位换算 (表 2-23)

19. 压力和应力单位换算 (表 2-24)

20. 功、能和热量单位换算 (表 2-25)

21. 功率单位换算 (表 2-26)

22. 比能单位换算 (表 2-27)

23. 比热容和比熵单位换算 (表 2-28)

24. 热流密度单位换算 (表 2-29)

25. 传热系数单位换算 (表 2-30)

26. 热导率导热系数单位换算 (表 2-31)

27. 热绝缘系数单位换算 (表 2-32)

二、常用单位的换算

1. SI、CGS 制和重力制单位对照 (表 2-6)。

2. 长度单位换算 (表 2-7)

表 2-6 SI、CGS 制和重力制单位对照

单位制	长度 L	质量 M	时间 T	加速度	力	应 力	压 力	能	功 率	温 度
SI	m	kg	s	m/s^2	N	Pa 或 N/m^2	Pa	J	W	K
CGS	cm	g	s	Gal	dyn	dyn/cm^2	dyn/cm^2	erg	erg/s	$^{\circ}C$
重力制	m	$kgf \cdot s^2/m$	s	m/s^2	kgf	kgf/m^2	kgf/m^2	$kgf \cdot m$	$kgf \cdot m/s$	$^{\circ}C$

表 2-7 长度单位换算表

单 位	米	千米	厘米	毫米	英寸	英尺	码	英里	UK 英里	国际海里
	m	km	cm	mm	in	ft	yd	mile	UK mile	n mile
1m	1	0.001	100	1000	39.3701	3.28084	1.09361	6.21371×10^{-4}	5.39612×10^{-4}	5.39957×10^{-4}
1km	1000	1	1×10^5	1×10^6	3.93701×10^4	3280.84	1093.61	0.621371	0.539612	0.539957
1cm	0.01	1×10^{-5}	1	10	0.393701	0.0328084	0.0109361	6.21371×10^{-6}	5.39612×10^{-6}	5.39957×10^{-6}
1mm	0.001	1×10^{-6}	0.1	1	0.0393701	0.00328084	0.00109361	6.21371×10^{-7}	5.39612×10^{-7}	5.39957×10^{-7}
1in	0.0254	2.54×10^{-5}	2.54	25.4	1	0.0833333	0.0277778	1.57828×10^{-5}	1.37061×10^{-5}	1.37149×10^{-5}

(续)

单 位	米	千米	厘米	毫米	英寸	英尺	码	英里	UK 英里	国际海里
	m	km	cm	mm	in	ft	yd	mile	UK mile	n mile
1ft	0.3048	3.048 $\times 10^{-4}$	30.48	304.8	12	1	0.333333	1.89394 $\times 10^{-4}$	1.64474 $\times 10^{-4}$	1.64579 $\times 10^{-4}$
1yd	0.9144	9.144 $\times 10^{-4}$	91.44	914.4	36	3	1	5.68182 $\times 10^{-4}$	4.93421 $\times 10^{-4}$	4.93737 $\times 10^{-4}$
1mile	1609.344	1.609344	1.609344 $\times 10^5$	1.609344 $\times 10^6$	6.336 $\times 10^4$	5280	1760	1	0.868421	0.868976
1UK mile	1853.18	1.85318	1.85318 $\times 10^5$	1.85318 $\times 10^6$	7.296 $\times 10^4$	6080	2026.67	1.15152	1	1.00064
1n mile	1852	1.852	1.852 $\times 10^5$	1.852 $\times 10^6$	7.29134 $\times 10^4$	6076.12	2025.37	1.15078	0.999361	1

表 2-8 面积单位换算表

单 位	平方米	平方厘米	平方毫米	平方英寸	平方英尺	平方码
	m ²	cm ²	mm ²	in ²	ft ²	yd ²
1m ²	1	1×10 ⁴	1×10 ⁶	1550.00	10.7639	1.19599
1cm ²	1×10 ⁻⁴	1	100	0.155000	1.07639×10 ⁻³	1.19599×10 ⁻⁴
1mm ²	1×10 ⁻⁶	0.01	1	0.001550	1.07639×10 ⁻⁵	1.19599×10 ⁻⁶
1in ²	6.4516×10 ⁻⁴	6.4516	645.16	1	6.94444×10 ⁻³	7.71605×10 ⁻⁴
1ft ²	0.092903	929.030	9.29030×10 ⁴	144	1	0.11111
1yd ²	0.836127	8361.27	8.36127×10 ⁵	1296	9	1

注：1. 1ha (公顷) = 10000m²;2. 1acre (英亩) = 4840yd² = 4046.86m²;3. 1mile² (平方英里) = 640acre = 3.0976×10⁶yd² = 2.78784×10⁷ft².

表 2-9 体积和容积单位换算表

单 位	立方米	升	毫升	立方英寸	立方英尺	立方码	英加仑	美加仑 (液)
	m ³	L (dm ³)	mL (cm ³)	in ³	ft ³	yd ³	UK gal	US gal
1m ³	1	1000	1×10 ⁶	6.10237×10 ⁴	35.3147	1.30795	219.969	264.172
1L	0.001	1	1000	61.0237	0.0353147	1.30795 $\times 10^{-3}$	0.219969	0.264172
1mL	1×10 ⁻⁶	0.001	1	0.0610237	3.53147 $\times 10^{-5}$	1.30795 $\times 10^{-6}$	2.19969 $\times 10^{-4}$	2.64172 $\times 10^{-4}$
1in ³	1.63871 $\times 10^{-5}$	0.0163871	16.3871	1	5.78704 $\times 10^{-4}$	2.14335 $\times 10^{-5}$	0.00360465	0.00432900
1ft ³	0.0283168	28.3168	2.83168×10 ⁴	1728	1	0.0370370	6.22883	7.48052
1yd ³	0.764555	764.555	7.64555×10 ⁵	46656	27	1	168.178	201.974
1 (UK) gal	4.54609 $\times 10^{-3}$	4.54609	4.54609×10 ³	277.420	0.160540	5.94606 $\times 10^{-3}$	1	1.20095
1 (US) gal	3.78541 $\times 10^{-3}$	3.78541	3.78541×10 ³	231	0.133681	4.95113 $\times 10^{-3}$	0.832674	1

注：英制容积单位分为干量、液量和药量三类单位。常见的英制容积单位还有：

1quarter (夸特) = 8bushel (薄式耳)；

1bushel (薄式目) = 4peck (泼克)；

1peck (泼克) = 2gal (加仑)；

1gal (加仑) = 4quart (夸脱)；

1quart (夸脱) = 4pint (品脱)；

1pint (品脱) = 4gill (及耳)；

1gill (及耳) = 5fluid ounce (盎司、液)；

1fluid ounce (盎司、液) = 8fluid dram (打兰、液)；

1fluid dram (打兰、液) = 60minim (米宁)。