

全国高等教育自学考试教材(工业工程专业)

现代制造系统

罗振璧 朱耀祥 编

机械工业出版社

(京)新登字054号

本书系统地介绍了柔性制造技术及其系统的基础知识、基本理论和常用的基本方法,包括制造系统的基本原理、机床数字控制与编程、成组技术基础、柔性制造系统的基本原理、工业机器人及其应用、装配及自动化装配、自动检测与质量保障、制造系统控制基础和计算机集成制造系统。本书是高等教育自学考试工业工程(IE)专业本科段的专业课教材,也可以作为高等院校工业工程专业、机电类专业高年级教材以及机电工程、机械工程技术人员的参考书和培训教材。

现代制造系统

罗振璧 朱耀祥 编

责任编辑:王世刚 特约编辑:吴小帆

封面设计:汪德海

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京市卫顺印刷厂印刷

开本787×1092¹/₁₆·印张16.25·字数390千字

1995年3月北京第1版·1995年3月北京第1次印刷

印数 00 001—10 000册 定价:20.00元

ISBN 7-111-04691-9/TH·601(X)

出版前言

高等教育自学考试教材是高等教育自学考试工作的一项基本建设。经国家教育委员会同意，我们拟有计划、有步骤地组织编写一些高等教育自学考试教材，以满足社会自学和适应考试的需要。《现代制造系统》是为高等教育自学考试工业工程专业组编的一套教材中的一种。这本教材根据专业考试计划，从造就和选拔人才的需要出发，按照全国颁布的《现代制造系统自学考试大纲》的要求，结合自学考试的特点，组织高等院校一些专家学者集体编写而成。

工业工程专业《现代制造系统》自学考试教材，是供个人自学、社会助学和国家考试使用的。现经组织专家审定同意予以出版发行。我们相信，随着高教自学考试教材的陆续出版，必将对我国高等教育事业的发展，保证自学考试的质量起到积极的促进作用。

编写高等教育自学考试教材是一种新的尝试，希望得到社会各方面的关怀和支持，使它在使用中不断提高和日臻完善。

全国高等教育自学考试指导委员会

1995年1月

编 者 的 话

本书是高等教育自学考试工业工程(IE)专业本科段现代制造系统课程的试用教材,也是机械工程师进修学院工业工程(IE)专业继续教育教材。本教材根据全国高等教育自学考试指导委员会颁布的本课程自学考试大纲,通过全国考委机械类专业委员会编审,机械工程师进修学院配合组织编写。

本世纪以来,制造科学与技术有了长足的进步。二次大战前,以刚性自动线为代表的机械自动化已在汽车工业采用,到了战后更是达到高潮。计算机和数控机床的出现使制造业进入了柔性制造的新天地,进一步向柔性自动化发展,由于制造内容的日益丰富和复杂,人们普遍注意到,必须用系统论、控制论和信息论,统一、全面地研究和处理制造中的各种问题,从生产技术、生产组织到经营管理,才能达到制造资源的合理配置和优化,提高生产率、保证产品质量和降低成本。因此,从60年代后期开始,制造系统受到国际上工业界和学术界普遍的关注和青睐。但从90年代以来,仅从系统论等三论也不够,还必须以混沌学、协同论等非线性科学观点来发展制造科学和制造系统,达到占领市场、在全球性的竞争中获胜。

制造是工业工程的基础,制造系统是工业工程的主要工作对象。因此,熟悉和通晓现代制造系统是当代工业工程师必不可缺的重要知识。

本书由清华大学罗振璧(第一、二、四、五、六、七、八章)和北京机械工业学院朱耀祥(第三、九章)编写。

全书由北京机械工业学院蔡端甫教授主审,参加审稿的还有北京机床研究所俞圣梅高级工程师,美国南伊利诺伊大学融亦鸣副教授,清华大学赵长德副教授,北京工业大学陈锡璞教授和机械工程师进修学院刘兴家高级工程师。对提出的宝贵意见,编者表示衷心感谢,同时对机械工程师进修学院教材编辑部为本书编辑出版所做的大量工作,也致以深切的谢意。

由于受到编写时间和编者水平的限制,书中不妥之处,欢迎各方专家和读者批评指正。

作者 1995年1月

目 录

出版前言

编者的话

第一章 制造系统的基本原理	1
第一节 制造系统的基本概念	1
第二节 制造系统自动化的策略	4
第三节 自动化制造系统及其技术分析	12
思考题与习题一	23
第二章 机床数字控制与编程	25
第一节 数字控制 (NC) 的基础	25
第二节 计算机数字控制 (CNC)	42
第三节 自适应控制 (AC)	53
附录 常用资料	58
思考题二	75
第三章 成组技术基础	76
第一节 成组技术的基本概念	76
第二节 零件分类和编码系统	76
第三节 零件的分组(族)方法	83
第四节 成组工艺和成组生产单元的设计	89
第五节 成组技术的应用及经济效益	93
附录 Opitz和JLBM-1零件分类编码系 统表	98
思考题与习题三	112
第四章 柔性制造系统的基本原理	115
第一节 柔性制造系统 (FMS)	115
第二节 FMS工作站与FMC	123
第三节 FMS的物流	128
第四节 FMS 的控制	131
第五节 切削过程监控原理	136
思考题与习题四	144
第五章 工业机器人及其应用	145
第一节 机器人的基本知识	145
第二节 位形描述与空间变换	157
第三节 工业机器人的应用	159

思考题与习题五	165
第六章 装配及自动化装配	167
第一节 装配过程与实现自动化装配的 设计要求	167
第二节 自动化装配系统类型	174
第三节 零件送进装置	175
第四节 多站装配机的分析	178
思考题与习题六	181
第七章 自动检测与质量保障	182
第一节 自动检测原理与方法	182
第二节 坐标测量机	187
第三节 质量保障	190
思考题七	194
第八章 制造系统控制基础	195
第一节 线性反馈控制	195
第二节 顺序控制与可编程控制器	207
第三节 计算机过程控制	214
思考题与习题八	221
第九章 计算机集成制造系统	222
第一节 计算机集成制造 (CIM) 的产生 背景及概念	222
第二节 计算机集成制造系统 (CIMS) 的组成和概况	223
第三节 集成制造系统的功能模型 IDEF ₀	228
第四节 CIMS 中的数据通信与局 域网络	230
第五节 CAD/CAPP/CAT/CAM	239
第六节 制造系统的规划	245
思考题九	248
习题答案	250
参考文献	252
后记	

第一章 制造系统的基本原理

自动化是指把机械、电子和计算机系统用于操作和控制生产的技术。制造技术是工程技术中最复杂、最重要的技术。它成为工业自动化技术的重点,在与自动化技术结合的过程中,得到了不断发展。

自动化制造技术的体现是现代制造系统,它包括自动加工机床、自动化装配机、工业机器人、自动化物料传输与存储系统、自动检测与质量控制系统、反馈控制与计算机过程控制和规划、信息(数据)采集与支撑制造活动决策用的计算机系统。本章主要介绍与制造自动化有关的基本概念、基本原理和基本计算,为其它章节的学习打下基础。

第一节 制造系统的基本概念

一、制造与社会

物质资料的生产是人类社会存在和发展的基础,而物质资料的生产主要靠以农业、林业、牧业与渔业为代表的第一产业和以制造为代表的第二产业的生产。可以把制造理解为使用一系列的能源,把原材料的几何、物理和化学性态进行预定变化,获取产品的过程。因此,制造系统是一个以生产要素为输入,以物质产品为输出,创造效益的输入-输出系统。

社会生产力的发展,物质资料的生产(第一、二产业的生产),在国民生产总值和劳动力与资源的投入中所占的比例不断减少,第三产业(指为工农业生产和人民生活提供服务的行业总称)所占的比例不断上升。这一趋势只能说明社会生产的不断进步,社会不断发展,却不能证明第一、二产业在社会中作用的下降。在认识制造与社会的关系中,应该强调:① 物质资料的生产是人类社会赖以生存和发展的基础。推动人类社会的发展,决定人类社会面貌的主要因素仍然是物质资料的生产。人类最基本的经济活动是物质资料的生产。因此,重视和发展物质资料的生产是人类社会任何时候不可忽视的基本观念。② 生产的目的是永远为满足社会与市场(用户)的需求。③ 没有强大、先进的制造业,不可能保持在剧烈的市场竞争中取胜。制造业是国家的支柱产业,没有它不可能提高综合国力和保障改革开放目标的实现。④ 没有强大的制造业,不能保障人民生活水平的不断提高。人类社会的发展史,特别是近20~30年的世界经济发展状况证明了上述几方面结论的正确性。

二、生产类型与制造系统

1. 生产类型及其特征

如前所述,在经济生产中,制造(过程)是将原材料转换为市场商品的物质资料的生产转换过程。制造(过程)可分为三大类,即基础制造、变换和制造。基础制造指的是获取自然资源,并把它们转换成能被其它制造业利用的原材料,如采矿和钢铁冶炼。变换指的是把基础制造的输出转换为工业产品,如把钢锭、铁锭转换成各种铸件、轧制件的生产,把石油产品转换成塑料的生产等。变换制造的特征是其产品的物理形态不完整,且没有加工装配过

程。制造则是指把坯件经加工并装配成最终产品的生产，如各种零件的生产和装配成最终产品的各种制造生产。

根据制作产品的数量，把制造活动分为三种生产类型：单件小批生产、成批（批量）生产和大量生产。生产类型不同，生产率、对劳动技艺的要求、设备、刀具、量具、夹具、生产组织等均有不同的特征，如图 1-1 所示。统计证明，在全部零件制造中有 75%~85% 的生产批量小于 50 件。因此，单件小批生产是主要的制造活动。生产批量对制造工艺方法、制造过程、设备的先进性与专用性、制造的生产率等有决定性影响。

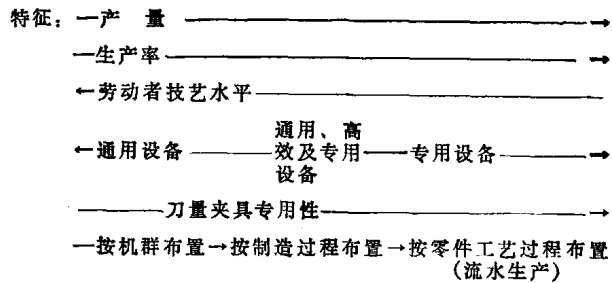
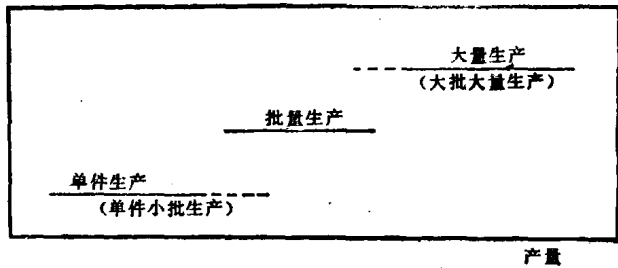


图 1-1 生产类型及其主要特征

2. 制造系统

系统是一个相互关联的某类元素的集合。一切相关联的事物所构成的整体都可以看作系统。一个系统从周围环境介质中接受输入 X_i ，把它转换成输出 Y_i ，再释放回环境介质中。制造系统是可以控制的、能够实现从原材料或毛坯件转换为产品的人工工程系统。

根据系统的结构或静态定义，制造系统是由包括人和生产设备、工具、材料传输设备与其它辅助装置硬件组成的集合体。但制造系统必须有生产信息、生产方法、生产工艺和管理系统等软件的支持，才能使生产对象（原材料或毛坯件）生成有某些规定功能的有用产品，从而创造效益以满足市场（用户）需求。制造系统的结构形成了制造厂或车间或单元的静态空间布置（结构）。

根据系统转变或功能的定义，制造系统可定义为生产要素转变为成品的转变过程。表征制造系统生产性能的技术经济指标有：生产时间、生产成本、设备的利用率等。制造系统在完成坯料（件）到最终产品的转换中有五种基本的功能，即加工与处理、装配、物料输送与存储、检测与检验、控制。它们间的关系如图 1-2 所示。由图可知，制造过程的输入与输出都是多因素的。

3. 制造过程的基本特征

制造过程可以看成是一个在消耗一定能量条件下，把坯件（含原材料、配套件、外购件）转换成产品的时间历程。它有如下基本特征。

(1) 它是一个按规定顺序、定向的转换过程。制造过程是以优良的质量、高的生产率、低的成本与有吸引力（竞争力）的价格、短的交货期为目标，生产满足市场（用户）要求的功能与性能产品，能创造经济与社会效益的特定的转换过程。它的所有制造活动是事先规划设定的。实现这种规定转换过程的前提是：工艺方法成熟、设备运行可靠和制造过程稳定。因此，它是一个有序的转换过程。许多制造过程是由有交互作用（不独立）、串并联组合、有异步特征、在空间分散的子过程组成的集合。这类过程（如机械制造过程）只有把交互作用、串

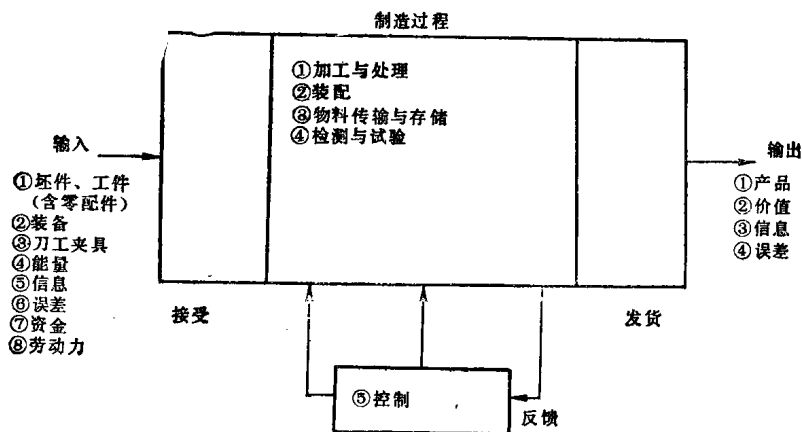


图 1-2 制造的基本功能模型

并行关系、异步特性同空间分散性协调好，才能实现规定的顺序，并实现稳定的转换。此外，许多制造过程（如化工、冶金、切磨削加工等）不仅有序，而且定向（有向）、不可逆。

(2) 它是一个具有非线性、远离平衡态、有耗散特征的动态开放式系统。众所周知，制造过程一定要消耗能量（耗散），存在众多非线性因素（如磨损、热与力）的作用，并与系统外部（环境）有物质与信息交换，故它是耗散的，有非线性特征的开放系统。研究证明，制造过程不在平衡态下进行，远离平衡态，否则制造过程就停止了。同时，许多制造过程不连续，而是离散的。要保持制造过程的动态稳定性是有条件的，例如，输入的坯件误差变动过大会导致系统输出的产品中出现废次品。这说明该系统要保持动态时输出合格的产品必须以输入合格的坯件为前提条件。因此，制造过程的离散性、非线性和动态稳定性成为现代制造科学、控制论和信息论研究的重要课题。

4. 制造过程中的几种流（动）

(1) 物流。制造系统与环境有物质交换，即从系统外部输入原材料、坯件及配套件，输出成品与废弃物（如废品、切屑等）。在物流子系统支撑下，把加工、处理、检测、装配等工作站或设备连接成系统，输入物件按预定顺序流过制造系统，完成规定的转换，输出成品等，称物料的运动与变换过程为物流（动）。在加工系统中，输入物件的形态与性能有以下几种可能的变化：位（置）姿（态）变化，弹性变形或断裂，失去或增加质量，尺寸与误差变换，表面或基体材料的几何、物理、化学性质变化等。此外，还有一类工艺方法和设备或过程要求的辅助物料流，例如，压缩空气，液压系统油，冷却润滑油等。

(2) 能量流。制造过程必须从外界吸取能量，在系统内进行能量转换，同时排除废弃的能量。经传递介质输入系统的能量与物流相互作用实现制造转换。在能量流动中，除了直接用于物件转换的能量外，因为有摩擦磨损效应，材料内部迟滞损耗，热的传导、辐射和对流等能量消耗（耗散）的存在，实际上还要多消耗一部分能量。例如，高速切削时，实现切屑的分离所需的能量与摩擦消耗的能量之比可高达 1:10 000。因此，能量流表征了系统与外界能量的交换，系统内能量的变换和耗散特征。

(3) 信息流。制造系统与外界有信息交换，如设计信息与控制指令的输入，上层控制和管理所需的信息输出。因此，信息流指的是生产组织与管理、生产控制、实现物料转换等所需的各种信息的传递与转换过程。信息流表征了制造系统的信息与系统外部交换，在系统内

信息传递与变换的特性。

(4) 资金流。制造过程是消耗资金和创造财富的过程。资金的转换和劳动的物化使产品增值，故资金的流动情况是制造过程经济学特性的重要评价指标。它覆盖了包括规划、设计、制造和控制及检测、包装等制造活动。因此，资金流可以定义为在完成物料转换、实现经济生产必须投入的资金的运动及其变换过程。

(5) 误差流。误差流又称加工误差流动或制造误差流动。加工误差流指的是输入制造系统的坯（工）件误差转换输出的工（零）件或产品的误差过程。它表征了制造系统过程误差形态的变化。它的稳定性是制造过程质量的重要表征。它是动态质量控制的对象。

第二节 制造系统自动化的策略

制造系统自动化的目的是：提高生产率、提高和稳定产品质量、降低人物力资源的消耗和加工成本、缩短供货时间、改善劳动条件。从 50 年代以来，制造系统自动化的主要目标是单机自动化和局部自动化。但随着社会和科学技术的发展，这种自动化满足不了下述要求：品种多变，产品的功能与性能要求越来越复杂、越来越精密，国内外市场的竞争空前激烈，越来越要求提高制造的柔性（灵活性）。为此，要求进一步探索提高制造系统柔性和加工精度的自动化策略。

一、提高生产率的基本策略

生产率的不断增长是社会经济发展的前提。生产率是生产要素转换为生产财富的转换过程效率的度量指标。生产率可定义为生产所使用的资源（人、物、财力的总称）与在规定时间内产生的输出间的数量关系，可以用生产函数表示。若用 x_i ($i=1, 2, \dots, n$) 表示生产过程的输入， y 表示输出， x_i 与 y 间的生产函数关系可表达为

$$y=f(x_i)=f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-1)$$

根据式 (1-1)，可计算出 $y/x_1, y/x_2, \dots, y/x_n$ ，称为 x_i 的平均生产率，而 $\partial y/\partial x_1, \partial y/\partial x_2, \dots, \partial y/\partial x_n$ ，称为边际生产率。后者表示单位输入量的变化与总输出量间变化的关系。

例 1-1 表达劳动力 L 、资本 K 为输入，产品 P 为输出间关系的 Cobb-Douglas 函数为

$$P=aL^k K^{1-k} \quad (1-2)$$

式中 a, k ——常数， $0 < k < 1$ 。

其边际劳动生产率为

$$\frac{\partial P}{\partial L}=akL^{k-1}K^{1-k}=k\frac{P}{L} \quad (1-3)$$

式中 P/L ——平均劳动生产率。

式 (1-3) 说明，遵循式 (1-2) 时，边际劳动生产率的数值是平均劳动生产率的 k 倍。因为 $0 < k < 1$ ，故按边际劳动生产率计算出的值比平均劳动生产率值小。

不同种类的生产率决定于生产过程的输入与输出的内容及其量值。例如，经济学中劳动生产率通常用劳动者在单位时间内生产产品的数量表示，亦可用生产单位产品耗费的劳动量表示。总之，主要是用生产要素中劳动力（量）来表达。总生产率与生产要素的总和相关联，

它表达了生产要素对生产企业（工厂）总效率的影响程度。

提高生产率的基本策略是：减少生产要素的输入量，提高制造系统的输出量；缩短单件产品的生产时间；延长制造系统的工作时间。根据基本策略，现在常用的提高制造生产率的途径有以下几个主要方面。

(1) 采用高效加工方法和加工设备。

(2) 提高切削用量，减少切削时间，如采用高速、超高速车削与铣削。

(3) 减少辅助时间或使其与加工时间重合。

(4) 采用柔性制造原理，极大地缩短产品品种变换的准备时间，提高多品种小批量生产的有效时间占有率。

(5) 提高机床利用率，减少停机时间。其中，以利用二三班及部分节假日时间最为有效。分析证明：一班制的有效生产时间（真正用于加工、处理或装配工作的时间）只是人的自然总时间的 6%，利用二三班和部分节假日时间后可提高到 65%，即提高机床设备利用率，增加生产的有效时间近 10 倍。

(6) 采用“零理论”，即采取“**三零目标**”——零库存、零安装时间和零废品率。

二、生产的数量指标

在制造生产中，大多由若干个独立的阶段组成，每个阶段定义为制造过程的一个工序，它们包括各种加工、处理和装配工序。组成制造过程的工序是由制造过程规划（工艺过程设计）规定的加工顺序有序排列的。产品（或零件）的一个加工工序在规定的机床设备或加工工作站上进行。工序间还会有非加工工序的制造活动，如物料（件）装卸、输送、存储、检验及其它延时活动。为用数量指标表示生产概念及其数学模型，下面介绍有关的描述指标。

1. 制造时间 (MLT—Manufacturing Lead Time)

制造时间指的是一件给定的产品或零件经过工厂制造所需的总时间。若以 T_0 表示在一台给定机床设备或加工工作站上每个工序的时间， Q 表示产品的批量， $T_{..i}$ 表示该工序相关的非工序时间， $T_{.0i}$ 表示在该加工工序中制造产品（或零件）所需的工（坯）件安装夹紧时间和安装刀具与夹具所需的时间， n_m 表示工序总数， i 表示工序顺序号 ($i=1, 2, \dots, n_m$)，则有

$$MLT = \sum_{i=1}^{n_m} (T_{..i} + QT_{0i} + T_{.0i}) \quad (1-4)$$

但式 (1-4) 表达的 MLT 中不包括坯（工）件的存储时间。若各工序的工序时间 T_{0i} ，安装时间 $T_{.0i}$ 和非工序时间 $T_{..i}$ 分别相等，则式 (1-4) 可变换为

$$MLT = n_m(T_{..i} + QT_{0i} + T_{.0i}) \quad (1-5)$$

对于单件生产， $Q=1$ ，故有

$$MLT = n_m(T_{..i} + T_{0i} + T_{.0i}) \quad (1-6)$$

在大量流水生产中，MLT 表达为

$$MLT = n_m(T_{..i} + T_{0max}) \quad (1-7)$$

式中 $T_{..i}$ ——产品或零件从一台机床或设备或加工工作站到另一台的传输时间；

T_{0max} ——全部加工工序中最长的加工工序时间。它是自动生产线的循环周期，或称之为自动线的节拍。

例 1-2 某工厂生产一种零件，其批量为 50 件，需要经历 8 个工序才能完成，平均每个

工序时间为 6min, 平均安装时间为 3h, 平均非工序时间为 7h。假定该厂每天工作 1 个班, 8h/班, 试求该零件生产中, 每批零件要化多少天?

解 按式 (1-5) 有

$$\begin{aligned} \text{MLT} &= n_s(T_{..} + T_0 + T_{.0}) = 8(3 + 50 \times \frac{6}{60} + 7) \\ &= 120 \text{ h} \end{aligned}$$

按每天一班, 每班 8h 计共需 $120/8=15$ 天。

2. 生产率 R , 与工序时间 T_0 的组成

单个制造或装配工序的生产率通常用每小时生产的件数表示。若 T_s 表示给定机床设备或加工工作站单位产品的平均生产时间, q 表示废品率, 则对于成批 (批量) 生产有

$$R_s = \frac{1}{T_s} \quad (1-8)$$

$$T_s = \frac{T_{..} + QT_0}{Q} = \frac{T_{..}}{Q} + T_0 \quad (1-9)$$

式中 $T_{..}$ ——安装时间;

T_0 ——工序时间;

Q ——产品 (投产) 的批量。

对于单件生产, $Q=1$ 有

$$T_s = T_{..} + T_0 \quad (1-10)$$

对于大量生产, 有

$$T_s = T_s + T_{0max} \quad (1-11)$$

称 T_s 为自动生产线的循环周期 (节拍)。

工序时间 T_0 由每个工件的实际加工时间 T_m 、装卸时间 T_h 和换刀时间 $T_{i,h}$ 组成

$$T_0 = T_m + T_h + T_{i,h} \quad (1-12)$$

$T_{i,h}$ 是每个工件的平均换刀时间。当刀具失效时 (磨钝、破损或刀刃塑变或烧刀时), 更换刀具总时间对工序的平均值就是平均换刀时间 $T_{i,h}$ 。式 (1-12) 所表达的工序时间组成关系, 在进行制造生产率分析和制造过程分析中 useful。

3. 制造能力 (工厂能力) (PC)

在给定的加工条件下, 可用制造 (工厂) 能力 PC 定义一个工厂 (或生产单位) 能够生产的最大输出率。PC 与生产率密切相关。生产输出的产品类型不同时, 生产厂的制造能力 PC 的度量单位可能变化。例如, 钢铁厂以“吨”表示, 汽车制造厂以“辆”表示, 机床制造厂则以“台”表示。

若以 W 表示机床设备或工作站的台 (站) 数 (假定它由一台设备或一个工作站和一个工人组成), H 表示一台设备或一个工作站 (假定它们均只有一个工人) 每班的加工时间 (小时), S_w 表示每周 (或每月等工厂的计算周期) 的班次, 则工厂的制造能力 PC 可表示为

$$\text{PC} = WS_w HR, \quad (1-13)$$

由于存在机床设备的故障停机、维护、修理和操作者的其它延滞时间, 每班加工时间 H 通常小于规定的上下班的每班时数。

例 1-3 一个制造厂的转塔车床组 (工段) 有 6 台机床均加工同样的零件, 该组每周工作

10个班, 每班平均加工时间为6.4h, 测得平均生产率为17件/h, 求该转塔车床组的制造能力PC。

解 按题意有, 设备台数 $W=6$, 每班加工时间 $H=6.4\text{h}$, 每周工作的班次数 $S_w=10$, 平均生产率 $R_r=17$, 根据式(1-13)有

$$PC=WS_wHR_r=6\times 10\times 6.4\times 17=6528 \text{ 件/周}$$

但对于批量生产, 每个产品的坏(工)件都要经过 n_m 台设备或工作站, 故必须对式(1-13)进行修正, 此时为

$$PC=\frac{WS_wHR_r}{n_m} \quad (1-14)$$

为了确定满足每周(或每月)需要配给的资源, 式(1-14)表示的制造能力PC可用另一种方式来应用。设 D_w 为每周(月)要求供给的件数(又称“要求率”), 则可表达为

$$PC=D_w \quad (1-15)$$

由式(1-14)与式(1-15)得

$$WS_wH=\frac{D_w n_m}{R_r} \quad (1-16)$$

在给定生产率的制造过程中, 可以用三种方式调整制造能力, 以保证要求率 D_w 。

(1) 改变加工设备或加工工作站数 W , 如为增大 W , 启用闲置设备, 招收新操作者, 或添置新的设备、新工作站, 或反之减少 W 。

(2) 改变每周(月)班次数 S_w , 如增加班次或休息日加班, 使 S_w 增大。

(3) 改变每班的加工时数 H , 如加班。

在生产率或要求率不同的制造过程中, 式(1-16)应修正为

$$WS_wH=\sum_{i=1}^k \frac{D_{w,i}}{R_{r,i}} n_m \quad (1-17)$$

式中 W ——设备或加工工作站数;

S_w ——每周(月)的班次数;

H ——一台设备或一个工作站每班加工时间(h);

D_w ——要求率(件/周或件/月);

R_r ——生产率;

n_m ——工序数。

为理解式(1-17), 参见例1-4。

例 1-4 某工厂同时生产三种产品, 其相关数据如下, 求满足要求率 D_w 需要的 W 。设

产品	要求率 D_w (件/周)	生产率 R_r (件/时)
1	600	10
2	1000	20
3	2200	40

该厂每周开10班, 每班每个站或设备可利用生产时间为6.5h, 而 $n_m=1$ 。

解 产品1 $D_w/R_r=600/10=60$ 时/周

产品2 $D_w/R_r=1000/20=50$ 时/周

产品3 $D_w/R_r=2200/40=55$ 时/周

由式(1-17)有

$$W = \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{D_{v,i}}{R_{v,i}} n_m}{S_v H} = \frac{60 \times 1 + 50 \times 1 + 55 \times 1}{10 \times 6.5} = 2.54$$

圆整后取 $W=3$ ，故采用三个站或三台设备即可满足要求。

4. 利用率 U

在制造能力的讨论中，没考虑生产中的薄弱环节，认为生产过程是不受阻的平滑连续过程，也没考虑资源的不平衡供应问题，即认为所有加工工序、制造过程被充分利用了。定义利用率 U 为生产输出与制造能力之比，即

$$U = \frac{\text{生产输出}}{PC} \quad (1-18)$$

式 (1-18) 可在整个工厂内单台机床设备或某个生产资源（如劳动力）的场合下应用。通常利用率 U 以百分数表示。

例 1-5 在利用全部制造能力条件下，每台机床设备工作时间为 65 时/周，生产率为 20 件/时，在一周内，该台设备生产了 1000 件成品，其它生产时间为空闲等待时间。求：(1) 该台设备的制造能力；(2) 计算该设备的利用率。

解 (1) 由条件可知，该设备的制造能力

$$PC = 65 \times 20 = 1300 \text{ 件/周}$$

$$(2) \quad U = \frac{\text{生产输出}}{PC} = \frac{1000}{1300} = 76.92\%$$

5. 可靠性指标——工作效率 η

除利用率指标外还需有可靠性作为评价。通常表征制造过程或设备可靠性的指标是工作效率 η 。工作效率可用两个表征可靠性参数比表达

$$\eta = \frac{MTBF - MTTR}{MTBF} \% \quad (1-19)$$

式中 MTBF——两次故障停机间的平均工作（加工）时间；

MTTR——平均修理停机时间。

例 1-6 所给条件同例 1-5，但该设备的空闲等待因故障停机修理而造成，试计算该设备的工作效率 η 。

解 无故障的制造能力 $PC = 65 \times 20 = 1300$ 件/周，因为故障停机的实际制造能力 $PC_1 = 1000$ 件/周。平均故障修理停机时间

$$MTTR = \frac{PC - PC_1}{R_v} = \frac{1300 - 1000}{20} = 15 \text{ 时/周}$$

平均无故障（两次故障间）工作时间

$$MTBF = \frac{PC}{R_v} - MTTR = \frac{1300}{20} - 15 = 50 \text{ 时/周}$$

故

$$\eta = \frac{50 - 15}{50} = 70\%$$

6. 制造过程件 (WIP——Work In Process)

制造过程件又称在制品或工件，其含义是工厂正在加工、处理和装配或在两个加工工序间的制件数量。WIP 是正在由原材料坯件转换成最终产品的在制品的总存有量。WIP 可以

用下式估算

$$WIP = \frac{PC U}{S \cdot H} MLT \quad (1-20)$$

三、自动化的策略

1. 制造中自动化的定义与作用

自动化是为了操作和生产控制，与运用机械、电子和与计算机相关的技术。自动化技术包括生产控制自动化和经营管理自动化两方面。制造技术和系统的自动化是工业自动化技术中最复杂和最重要的领域。制造自动化从 20 年代以来历经了机械自动化、柔性制造系统，现在正面临新的转变，即以制造柔性与人因素发挥为主要特征的新型自动化——柔性自动化。

制造自动化的目的为：(1) 大大提高制造生产率；(2) 提高产品质量，使产品质量更加稳定；(3) 降低资源（包括人、物和财力）消耗；(4) 降低加工成本；(5) 缩短产品的生产周期；(6) 缩短供货时间；(7) 改善劳动条件；(8) 发挥生产人员的积极性。

2. 自动化的类型、特征与选用

自动化生产系统可分为三种类型，即刚性（固定）自动化、可编程自动化和柔性自动化。

(1) 刚性（固定）自动化配置的装备按加工、处理和装配工序的顺序固定不变，其特征是：采用专用设备，生产率高，原始投资高，没有适应产品变化的能力，不适于中小批量生产，主要用于大量大批生产和高要求率的场合，其例子是机械式传输线，机械化装配自动线和由机械传输与装卸工件连接起来的自动加工流水线。

(2) 在可编程自动化中，生产装备设计成能适应不同产品，有改变加工顺序能力的，其工序顺序由程序进行控制。一旦改变控制程序，就可以按新的工序顺序进行产品的生产。它的主要特征是：相对于刚性自动化，生产率低；主要投资用于通用装备购置；有适应产品变化的一定柔性；主要适合于成批生产。例如，数控机床、工业机器人。它的技术根源与 Jacquard 纺机相同。

(3) 柔性自动化是编程自动化的扩展。

① 柔性制造。它是在成组技术和计算机控制技术基础上发展起来的。60 年代提出制造柔性这一概念。首先在英国（1967 年）后在美国（1968 年）建成硬软件结合、计算机控制的初期柔性制造系统（FMS），英国 Molins 公司的 System 24，美国 Cincinnati 公司的可变任务系统。刚性制造系统不能适应产品的变化，是不可变的制造系统。“柔性”尚无统一的定义，但可以把它理解为：制造系统对外部因素变化的顺应能力和对内部因素变化的适应能力。前者指对多变市场用户需求变化作出有效响应（应变）能力，后者指的是系统稳定性、容错能力与可靠性。因此，柔性制造系统应该是具有顺应能力与（自）适应能力的制造系统。但是，工业统计证明，现有的柔性制造系统中 90% 只能加工一类零件，65% 只能加工 2~10 个品种规格。因此，理想的柔性制造仍在研究开发中。应该明确，制造柔性应成为系统的一部分，它必须包括设备仪器、人员和软件三方面柔性；为跳出柔性与系统复杂性同时增加的怪圈，必须重新研究柔性的定义与度量指标，应该以对用户需求作出灵敏快速反应能力作为柔性评定的唯一指标。在这种理解下，自动化的三种类型随具体条件灵活选用，并非刚性自动化一定“落后”，柔性自动化也并非处处可用。

② 在更换产品时，柔性自动化系统要求重新编程，进行必要的物理调整，如刀具、夹具和工件安装的变换。由于这些工作可离线进行，故不影响系统现行工作，减少更换产品的准备时间。

③ 柔性制造系统的特征有：高投资，按成组技术原理成组地进行零件的制造，可达到中等生产率（使单件小批生产达到或接近成批生产水平），相对于产品设计的变化有柔性。

与可编程自动化相比，柔性自动化有如下特点：① 可达到改变加工顺序而无生产时间的损失；② 利用可变的物理装备变换的能力使生产线进行高效率生产。因为，在柔性自动化系统中，可以在不停机的条件下，离线并行地完成加工顺序、控制程序和工艺装备变更的各项准备工作，使产品变化时以相当短的时间完成生产线的调整，快速地进行新的产品生产。例如，美国通用汽车公司在采用高柔性制造工程以后，可在三天内实现换产品品种并出新汽车。

3. 制造系统自动化的策略

全面评价制造的指标有质量、生产率、柔性和成本。为提高制造生产率、质量、柔性和降低成本的一种有效手段是借助于自动化技术。因此，自动化的策略有：

(1) 工序专门化。利用专机尽可能提高生产率。

(2) 工序集中（组合）。制造按工序顺序进行，有的复杂零件其制造工序可多达数百个。工序集中是在一台设备或工作站上完成一个以上的工序。进行工序组合的优点是可减少设备台数，节约安装时间和非工序占用时间，提高生产率与加工精度（减少安装误差的影响）。

(3) 工序同步化。它是工序组合的扩展，其含义是在同一工作站或设备上同时完成几个工序的加工任务，利用时间重叠提高生产率。工序集中是工序串行，工序同步化是工序并行，两种方法都力求减少设备或工作站的台数。

(4) 工序集成。它是利用自动化物料传输装置、工业机器人或无轨自动导向小车，把几台设备或几个工作站连接起来形成集成单元，实现同时加工，提高产量，减少总的制造时间。

(5) 增加柔性。在产品变化的单件、中小批量生产中，采用这一策略可以提高设备的利用率，缩短制造时间，达到提高生产率的目的。

(6) 改进物料传输、装卸与存储。减少非工序时间的最大可能性是采用自动化物料传输、装卸与存储系统。其主要优点是缩短制造时间和在制时间。

(7) 在线检测。传统的做法是在加工过程完成后进行质量检测。因此，检测结果只能对以后生产的过程有指导意义。执行在线检测可以尽快地把检测信息反馈给加工过程，有利于减少废次品，提高质量。一种更有效的检测策略是实时检测，并利用实时检测的信息反馈控制过程，随时修正误差，达到相当低的废次品率，提高生产率与质量。传统的离线检测法，检测滞后于加工。在线检测策略减少时间延滞，而实时检测策略则几乎与加工过程同步进行，故其时间延滞很少。

(8) 制造过程控制与优化。这一策略利用反馈闭环控制制造过程（或加工过程），并使其优化，从而减少废次品率，降低成本，提高产品质量和产量。

(9) 工厂级控制。从工厂全局把管理与制造活动集成起来，更有效地进行生产。

(10) 计算机集成制造（CIM——Computer Integrated Manufacturing）。它是利用计算机及其系统把制造的工程规划、设计、制造活动、管理和公司的商业功能一体化集成起来。

有关介绍详见第九章。

应该指出，有关自动化的策略还在不断地发展和探索中。

4. 自动化方案的评价

确定自动化的方案不能仅仅以技术先进性为评价标准，而应该在满足用户需求的前提下，把产品的性能、功能与可靠性，高效、高质量与低成本的加工，管理，产品交货期与售后服务和经济与社会效益同技术先进性协调统一起来，进行综合评价。

制造系统自动化有多种可能的方案。为达到上述要求，有必要对自动化方案进行评价。

(1) 可行性研究

在自动化方案实施前，通过对技术、经济和财务等方面的评估，为自动化方案的确定和项目的投资提供决策依据。它包括下列内容。

① 背景条件的了解。项目的重要性与必要性，与国家或地方、部门发展规划与战略的联系，有关政策法规和规定及技术政策，实施环境条件与限制因素的调查研究。

② 预测要求。市场及市场前景预测，产品的市场销售寿命等。

③ 生产纲领、品种与规格、质量标准的确定。

④ 方案及其分析。可能的技术方案与工艺方法，加工方法与工艺流程的成熟程度与稳定性，方案的硬件成套性与底层设备和物料传输及配套设备，控制系统硬件可靠性、稳定性与兼容性，多方案优缺点分析。

⑤ 方案设计与优选。进行方案设计，并根据经济生产优化的基本评价标准——最大生产率或最少时间，最低成本与最大利润原则和其它判据，如加工精度、污染等一个或几个组合标准进行优化，选取最优或相对最优方案。

⑥ 经济与财务分析。不仅要进行投资分析，而且要进行成本、价格、效益的预测和最佳投资规模与投资时间分析及敏感度分析（研究影响投资和效益的因素变化的影响，包括市场环境变动，如汇率变动的的影响）与风险分析（研究相互独立的影响因素的加权收益率，避免超时、超投资、过低的效益与过短的系统服务寿命，消除引起失败的重要因素等）。

⑦ 实施计划及其可操作性分析。

⑧ 资源需求分析。

⑨ 可行性结论与建议。

(2) 方案评价

① 可行性结论与建议的复审与评价。

② 技术评价。a. 工艺方法与流程可靠性与稳定性及主要技术指标保障的评价；b. 制造系统自动化方案，硬件系统的成套性审查；c. 机电硬件故障率、容错能力及兼容性，维护可行性与方便性审查和验证；d. 功能与柔性验证；e. 软件有效性、可变性与兼容性审订；f. 资源利用率评估；g. 技术管理评估；h. 技术先进性与有效寿命评估；i. 仿真分析验证；j. 可扩展性评估。

③ 技术经济评价。

④ 财务评价，包括投资回收、效益评估、投标审查等。

⑤ 敏感度与风险性审查。

⑥ 其它因素的评价，如实施新的自动化方案对人材素质及其培训要求，实施可能性的评价，汇率与国际形势变化的影响等。

⑦ 确定应进一步调查、试验和论证的问题及改进的建议等。

⑧ 评价结论。

第三节 自动化制造系统及其技术分析

一、自动化制造系统的组成和类型

一条自动化制造系统（自动线）是由物料传输设施与装卸装置组成的物流系统将实现专门加工或装配任务的若干台设备与工作站连接起来，能自动完成坯（工、零）件传输和转换成最终产品（或零件）的制造系统。该系统的输入是坯件或零件，输出是产品。它由物流系统和按工序加工要求、以工艺顺序安排的制造设备或工作站组成，其设备和设施装置是机械式的集成结果。自动线上的设备除了各种实现规定加工功能的机床（多为专机或组合机床）外，还可以是各种处理设备或装配设备，工作站中也可以包括自动进行工件质量检测的检验站等。

这种自动线实质上就是刚性自动化制造系统。它适用于稳定产品的大批大量生产，可以获得高生产率，运行可靠而稳定。对难于实现自动化或自动化后不经济的操作或工序可以由人进入工作站来完成，如手工装配、校准、检测等。

自动线经常采取的布局方式一般有以下两类。

1. 直线型

这类自动线按工序顺序呈直线排列。为使工件（坯件）重新取向，或为了适应现场生产面积的限制，在这种布局中允许工件的流动在某些位置上进行转动。图 1-3 是进行机械加工的直线型自动线示例。这条自动线加工的零件是汽车后桥齿轮箱。它由 20 个加工工作站组成。采取矩形布局的传输线是为了在一次流过后，由装夹工件的托盘完成转向运动而重新进

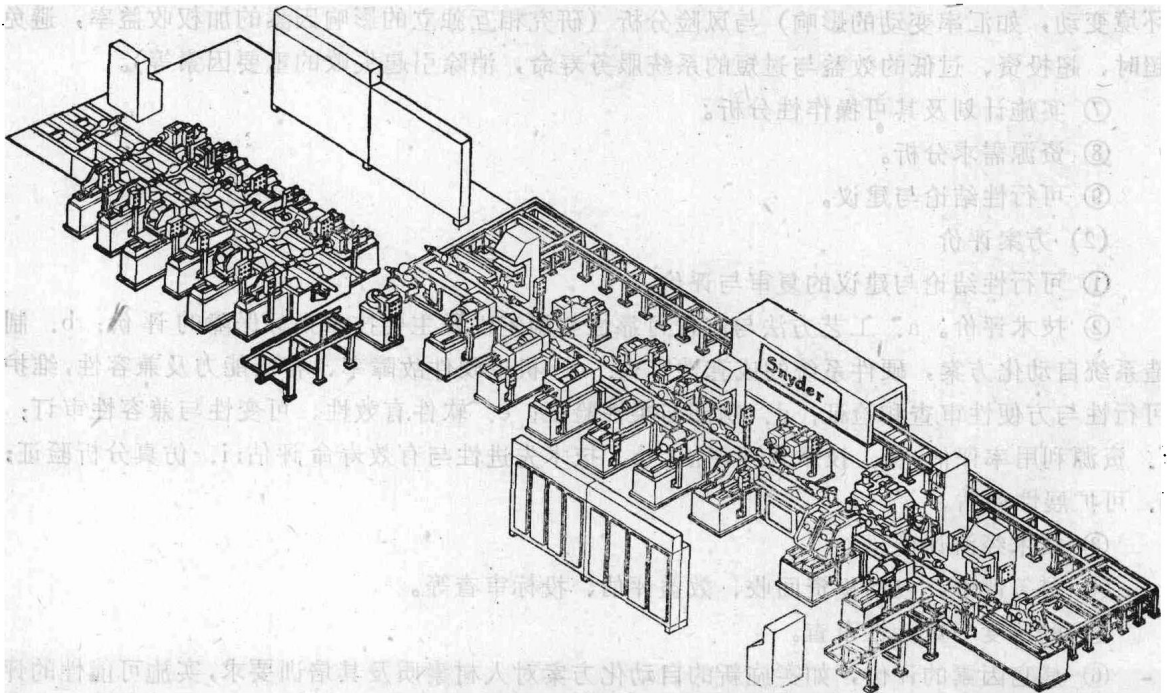


图 1-3 直线型汽车后桥齿轮箱加工自动线