



机械电子工程

■ 颜永年 张晓萍 冯常学 编著



化学工业出版社

415719

机械电子工程

颜永年 张晓萍 冯常学 编著



00415719

化学工业出版社

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

机械电子工程/颜永年等编著. —北京: 化学工业出版社, 1998. 11

ISBN 7-5025-2286-7

I. 机… I. 颜… III. 机电-工程 IV. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 19408 号

机械电子工程

颜永年 张晓萍 冯常学 编著

责任编辑: 周国庆

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

新华书店北京发行所经销

北京市昌平振南印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 12 $\frac{1}{4}$ 字数 298 千字

1998 年 11 月第 1 版 1998 年 11 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—4000

ISBN 7-5025-2286-7/TH·43

定 价: 22.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换

序 言

机械电子学 (Mechatronics) 一词早在 80 年代出现在日本的技术杂志上, 它是由“机械”的英语单词前部——Mecha 与“电子学”的后部——tronics 拼合而成, 目前已流行于一切有关的科技文献中。根据机械电子学的原理及方法所设计、制造的产品, 诸如数控机床、自动化材料加工设备、机器人、集成电路器件、自动化生产设备、激光快速成形设备、激光加工设备、自动化办公设备、自动化家用电器 (照相机、录像机、全自动洗衣机等) 以及自动化物流设备等, 则被国内许多文献称为机械电子产品 (系统) 或机电一体化产品 (或设备)。笔者认为前者较为确切, 本书将以此名称相称。

什么是机械电子学, 其概念到目前为止, 可以说还没有一个统一的定义。大体上有三种观点:

第一种观点认为, 机械电子学本身不存在独立的技术与工程, 即不是一门独立的学科。这是以日本尾谷诚教授为代表的观点。他们认为机械电子学是为具体的需求而择优所形成的综合技术, 是将各种新技术融合于机械电子学这一范畴而形成一体。该观点强调信息与机器的融合而形成机械电子学。

第二种观点认为机械电子学是一门独立的交叉学科, 它是综合机、电、磁、光、声、热、液、气、生物和化学等在现代科学技术发展的基础上形成的。认为应研究多种学科各自的特征参量, 以及在一个功能整体里, 各参量间的物理联系并能正确处理相互间的耦合关系。

第三种观点则强调机械电子产品的设计在很大程度上取决于设计者的技术潜力和创造新概念方面的技巧; 强调要通过软件来描述系统整个过程之间的序列和逻辑关系, 以及如何去完成主功能。

以上任何一种观点都同意机械电子学是机械、电子和信息融合而成的一种高新技术, 只是从不同的侧面讨论了机械电子学的概念。机械电子学是一门新兴的独立的高技术工程学科, 有其深刻的内涵和统一的数学物理模型。笔者在多年教学、科研和机械电子产品设计、制造实践的基础上试图用一种新的基于功能的间接法来定义机械电子学概念。诚然, 机械电子学是机械、电子和信息三方面学科的融合, 然而现有的论著中并未涉及到如何融合。并不是将这三方面的学科内核堆砌在一起就能实现融合的, 这种类似堆砌的观点是引起机械电子学的非独立性观点的根本原因。任何一种机械电子产品都是具有主功能、辅助功能的机器, 如何实现其功能成为判断和定义一般机械产品和机械电子产品的根本出发点。一般机械产品, 其功能实现是依赖于机械本身的功能, 控制和管理是加在这个独立的具有一定功能的客体上而完成的。依赖于能接受信息、通过自动控制实现某一单一功能的“功能细胞”, 通过耦合 (协同) 和信息集成而创造出新的复杂功能的产品, 即机械电子产品。这种“功能细胞”笔者称为机械电子单元。它与“子系统”、“元部件”有相同之处, 即具有输入、输出接口, 具有反馈自动控制和信息处理等能力; 但它们之间有本质的区别, 机械电子单元是单因素控制的单一完整功能实体。

- 单一——单个因素控制单个物理量。
- 完整——具有信息处理、自动控制和执行某一具体功能的一个完整的整体。

功能实体——某一机械电子单元就是为实现某一功能而物理存在的实体。

虽然，这与常规概念中的子系统、功能单元是具有本质的区别的。

机械电子单元通过耦合作用而形成功能更为复杂的机械电子组元，称为耦合；再通过信息集成而成为机械电子产品系统，简称为机械电子系统或机械电子产品。研究机械电子产品的工程学科称为机械电子学，其工程实现的总体为机械电子工程。上述分析表明笔者是从功能定义单元、产品，再从产品定义机械电子学。

机械电子单元的种类是有限的，这是因为涉及到机械电子产品的物理量有有限的，最为重要的有位移单元、力单元、热单元、光单元和结构单元、输入/输出单元等。我们设想一台机械电子产品（机器），应视为它是若干个机械电子单元组成，每一个单元都是由信息处理部分出发，通过驱动部分到其执行部分，这些“粗线条”通过耦合而“编织”起来，形成五彩缤纷的图案——千变万化的功能。这是一种纵向分析观点。另外一种十分流行的思维逻辑，就是一种堆砌的思想：在整个产品的执行体上加上控制部分，再通过信息处理来完成这种自动控制，这是一种堆砌的观点，笔者称之为横向分析的观点。这种观点充分反映在他们的著作和各种示意图表之中，没有将机械、电子、信息处理融合起来，而多是以控制为主，将不同的专业内容编排在一起。显然这种作法最终导致了机械电子学的非独立学科性。

现代制造系统本质上都是机械制造系统，但已不是传统的机械制造的概念。它一方面受到系统论、信息论和控制论的影响；另一方面它是在制造过程中机械与电子相融合的产物，为了与机械电子产品（机械电子学系统）相区别，我们称之为机械电子制造系统。机械电子产品（系统）与机械电子制造系统是机械电子学的两个侧面，本书都将进行分析与讨论。对于前者主要结合产品研制与开发来分析，对于后者主要结合设计方法，从系统的角度进行分析。

学习机械电子学，设计机械电子产品，并不是要首先学好系统论、控制论、机械学、数控技术等，这种学习方法是无法适应现代知识、技术发展的速度的，而是根据机械电子学本身的规律，掌握好机械电子制造系统的本质和机械电子单元及其耦合和集成的规律，这就抓住了机械电子学及其产品设计的核心。本书编著的目的就是试图从一个新的角度来描述机械电子学的内涵和本质，从独立学科的角度来分析其系统，帮助读者以较快的速度，深刻地掌握机械电子学的本质、原理和方法，不仅能具体应用到相关的工程实践中，而且能通过自己的实践对其有所发展。本书撰写过程中还考虑到了不同层次读者的背景和需要。

本书分为 11 章，是笔者及其同事和研究生在长期对机械电子学及其产品的研究、开发、教学实践的基础上撰写而成。

其中，林峰、张伟、邹清泽、郭海淀等参加了本书的编著工作，在此表示感谢！

由于作者水平有限，书中不妥之处恳请读者批评指正。

编著者

1997 年 4 月

内 容 提 要

本书共分 11 章，内容包括：机械电子制造系统、机械电子产品系统、机械电子产品的总体设计、位移单元、力单元、温度单元、输入/输出单元、激光单元、解耦与耦合、机械电子系统应用实例（RP 技术）。

本书可供从事机械、电子、机械电子、工业自动化专业研究、开发、设计、制造的工程技术人员使用，也可供有关专业的本科生、研究生、教师参考。

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 从机械到机械电子	1
1.2 机械电子制造系统与机械电子产品系统	2
1.3 从机械产品到机械电子产品	3
1.4 机械电子产品的解耦与耦合	5
1.4.1 机械电子产品是复杂系统	5
1.4.2 工程冲突	5
1.4.3 机械电子产品中的解耦系统与耦合系统	6
第 2 章 机械电子制造系统	7
2.1 引言	7
2.2 三种不同的自动化及有关的制造系统	8
2.3 丰田生产系统	9
2.3.1 丰田生产系统的起源	9
2.3.2 丰田生产系统的两支柱	10
2.3.3 看板系统	11
2.3.4 快速生产准备	19
2.4 精益生产	23
2.4.1 引言	23
2.4.2 MP 的起落与 LP 的奇迹	23
2.4.3 LP 中的设计与制造两大要素	26
2.4.4 产生 LP 与 MP 之间区别的可能因素分析	31
2.5 敏捷制造	33
2.5.1 敏捷制造的产生背景	33
2.5.2 时间的重要性	34
2.5.3 敏捷企业的四要素	35
2.6 同步制造与约束理论	36
2.6.1 约束理论的起源	36
2.6.2 约束理论与 MRP 的区别	37
2.6.3 同步制造的排序方法	38
2.6.4 同步制造的理论基础	39
2.6.5 同步制造的决策程序	43
2.7 全面质量管理	44
2.7.1 质量管理	44
2.7.2 统计过程控制	46
2.7.3 抽样与验收检验	47

2.7.4 质量工程	47
第 3 章 机械电子产品系统	48
3.1 机械电子产品设计中的系统观点	48
3.2 机械电子产品的一体化设计方法	50
3.3 公理化设计原理	52
3.4 机械电子产品设计原理	53
3.5 单元化的设计	61
第 4 章 机械电子产品的总体设计	63
4.1 机械电子系统的组成	63
4.1.1 机械本体部分	63
4.1.2 执行部分	63
4.1.3 传感部分	63
4.1.4 信息处理部分	63
4.1.5 功率驱动部分	63
4.2 机械电子产品的结构层次	64
4.2.1 MEE	64
4.2.2 MEE 的特点	65
4.2.3 典型的 MEE	66
4.3 产品设计总体结构图	66
4.4 设计制造流程分析	67
4.5 目标分析	68
4.5.1 需求分析	68
4.5.2 方法分析	71
4.5.3 输入分析	72
4.5.4 输出分析	73
4.6 参数分析	74
4.6.1 参数种类分析	74
4.6.2 参数的时变性分析	74
4.7 实例	76
4.7.1 需求分析	76
4.7.2 方法分析	78
4.7.3 输入分析	78
4.7.4 输出分析	78
第 5 章 位移单元	79
5.1 位移单元的结构与分类	79
5.2 位移单元的元部件	79
5.2.1 电机	79
5.2.2 电机驱动器及电源	81

5.2.3 运动控制器	81	7.2.1 性能价格比	98
5.2.4 传动机构	82	7.2.2 组装性	98
5.2.5 导向机构	82	7.2.3 变送器的性能指标	98
5.2.6 反馈部分	82	7.2.4 控制器的仪表精度	98
5.3 位移单元的主要技术指标	82	7.2.5 控制指标	98
5.3.1 最大行程	82	7.2.6 无故障工作时间	99
5.3.2 最大运动速度	83	7.3 特殊问题	99
5.3.3 最大运动加速度	83	7.4 控制器设计原则	99
5.3.4 分辨率	83	7.5 控制算法的选择	100
5.3.5 精度(定位精度和重复精度)	83	7.5.1 PID 控制算法	100
5.3.6 承载能力	83	7.5.2 理想微分 PID 控制	100
5.3.7 共振点	83	7.5.3 实际微分 PID 控制	101
5.4 位移单元的设计原则	83	7.5.4 数字 PID 控制算式的改进	102
5.4.1 元部件尽量选用现成产品	83	7.5.5 数字 PID 算法的参数整定	102
5.4.2 最佳搭配原则	84	7.5.6 数字 PID 控制参数的自整定	103
5.4.3 尽量采用开环系统	84	7.5.7 模糊控制	104
5.5 设计应用实例	84	7.5.8 PID-模糊控制	104
5.5.1 多点定位单元	84	7.6 传感器的选择、封装和安装	104
5.5.2 实验用回转台单元	85	7.6.1 精度要求	105
5.5.3 激光快速原型制造系统的扫描系统	85	7.6.2 安装要求	105
第 6 章 力单元	87	7.6.3 响应速度的要求	105
6.1 力单元的典型结构	88	7.6.4 接口要求	105
6.2 力单元的分类	89	7.6.5 成本要求	105
6.2.1 按加载时间函数分类	89	7.6.6 特殊要求	105
6.2.2 按加载位移函数分类	90	7.7 驱动器的选择	105
6.2.3 按力值产生的方式分类	92	7.7.1 加热元件的功率	105
6.3 主要性能指标	93	7.7.2 响应速度	105
6.3.1 力值	93	7.8 加热方式和元件的选择	106
6.3.2 精度	93	7.9 主要部件和产品介绍	106
6.3.3 幅值与平均值	93	7.9.1 温度传感器	106
6.3.4 行程	94	7.9.2 温度控制器	109
6.3.5 速度	94	7.9.3 其他温控器	112
6.3.6 保压-卸压时间和载荷稳定性	94	第 8 章 输入/输出单元	113
6.4 设计原则	94	8.1 输入/输出单元的结构与分类	113
6.4.1 选择适合的力单元	94	8.2 输入/输出单元的元部件产品	113
6.4.2 最短载荷传递链原则	95	8.2.1 传感器	113
6.4.3 剖分组合原理	95	8.2.2 信号变换	117
第 7 章 温度单元	97	8.2.3 信号匹配	121
7.1 结构与分类	97	8.3 输入/输出单元的抗干扰技术	125
7.1.1 温度单元的定义	97	8.3.1 外来干扰及抑制	125
7.1.2 温度单元的结构	97	8.3.2 内部干扰及其消除	125
7.1.3 温度单元的分类	98	8.4 输入/输出单元的主要性能指标	125
7.2 主要性能指标	98	8.4.1 抗干扰性能	125
		8.4.2 输入输出路数	126

8.4.3	信号变换精度	126	10.2.6	各种耦合的比较	154
8.4.4	动态响应速度	126	10.2.7	耦合设计实例	155
8.4.5	输出驱动能力	126	第 11 章 机械电子系统应用实例		
8.5	输入/输出单元设计原则	126	(RP 技术)	164	
8.5.1	信号匹配原则	126	11.1	现代成型学	164
8.5.2	隔离原则	127	11.2	材料成型方法	164
8.5.3	提高抗干扰能力	127	11.2.1	受迫成型	165
8.5.4	减小对外干扰	127	11.2.2	去除成型	165
8.6	输入/输出单元设计实例	127	11.2.3	堆积成型	165
8.6.1	F-260 熔积成型系统输入/输出单元设计基本需求	127	11.3	RPM 的原理	166
8.6.2	F-260 熔积成型系统输入/输出单元设计	127	11.3.1	基本概念	166
第 9 章 激光单元	129	11.3.2	背景	166	
9.1	激光单元的定义	129	11.3.3	发展	166
9.2	激光器分类	129	11.3.4	主要技术方法	167
9.3	激光单元的结构	130	11.4	RPM 的应用	170
9.3.1	激光单元的执行体	130	11.4.1	RPM 是现代产品开发技术中的核心技术	170
9.3.2	控制器	131	11.4.2	RPM 的应用领域	172
9.3.3	激光电源	131	11.5	RPM 设备	176
9.3.4	反馈器	131	11.5.1	分层实体制造 (SSM) 快速原型/零件制造系统	176
9.4	激光单元的主要性能指标	132	11.5.2	熔融沉积制造 (MEM) 快速原型/零件制造系统	176
9.4.1	模式	132	11.5.3	M-RPMS 多功能快速原型/零件制造系统	177
9.4.2	光束直径	132	11.5.4	批量生产的 3New 多功能激光快速成型系统	178
9.4.3	激光电源的性能指标	133	参考文献	182	
9.4.4	激光光路中光学器件的性能指标	133			
9.4.5	控制体的性能指标	133			
9.5	激光单元的设计原则	135			
9.6	应用实例——激光单元输出功率与其他参数的匹配问题	136			
第 10 章 解耦与耦合	137				
10.1	解耦	137			
10.1.1	平面扫描机构的分析	137			
10.1.2	自动多向模锻液压机	139			
10.1.3	激光分层实体制造设备	141			
10.1.4	自动导引车	143			
10.1.5	小结	144			
10.2	耦合	145			
10.2.1	耦合的目的	145			
10.2.2	跟踪耦合	145			
10.2.3	分配耦合	147			
10.2.4	协同耦合	150			
10.2.5	顺序耦合	153			

第 1 章 概 论

1.1 从机械到机械电子

人类科技发展史经历了从简单手工工具到复杂的机械设备的漫长历程，当前正经历着从机械到机械-电子的过渡。1769 年瓦特发明的蒸汽机，是人类进入了机械化新时期的标志，它将 18 世纪初期开始的以纺织机的发明和应用为先导的第一次技术革命推向高潮。人们生活在物质世界里，任何生产和生活都离不开物质手段。物质手段与机械密切相关。人类任何新技术的产生和发展，都不同程度地反映在新机械、新机构的产生上。机械技术在其漫长的发展过程中始终充满着活力，不断地吸收当时的最新技术。

如在动力方面，古代的机械利用畜力、自然力（水力、风力）；瓦特发明的蒸汽机迅速成为机器的动力；电的发现，使轻便、灵活的电动机成为机械的主要动力源。

在材料方面，最初机械使用自然材料，如木、石等；后来采用铁和少量钢；当钢的冶炼技术突破以后，钢材被大量使用来制造机械；随着材料技术的发展，各种优质材料，如铝、工程塑料、合金等，应用到机械当中，极大地提高了机械的性能。

在控制方面，早期机械由操作者进行控制。操作者通过眼、耳等感觉器官观察机械的运行，同时运用其知识和经验进行分析、判断，通过手、脚操纵机械。后来一些简单的控制机构代替了操作者的部分劳动，如蒸汽机汽压控制装置。随着对自动化、快速响应、复杂、高精度控制的需要日益增加，简单的控制机构不再能满足需要。此时使用传感器技术、微电子技术、微处理器技术等信息技术来处理机械中的控制问题，已成为必然选择。见图 1-1。

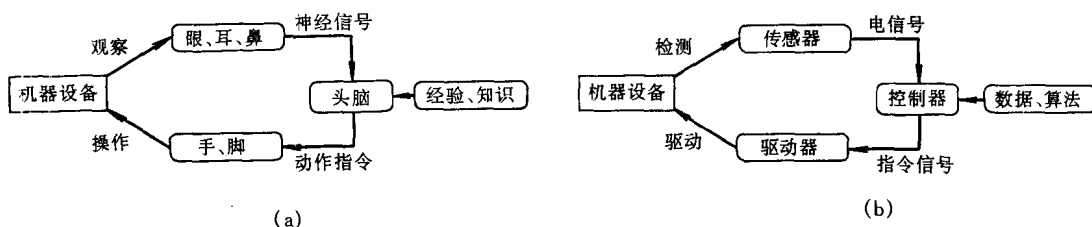


图 1-1 机械的控制流程
(a) 操作者的控制流程；(b) 控制器的控制流程

如果说工具起到了传递人类自身体能的作用，那么机械则起到了延长与扩大自身体能的作用，它使人类达到自身所望尘莫及的速度、高度、力量、距离和耐久性，实现了人类巨人化的梦想。

电子技术的后来居上以及机械与电子的深度结合是当今机械技术发展的明显特点，也是自古以来机械发展最辉煌的时代。

1800 年伏打发明的第一个电池，及随后贝尔发明的电话，爱迪生发明的电灯等等又掀起了以电力技术为标志的第二次技术革命的高潮。

19 世纪末到 20 世纪初，以核能和电子技术为标志的第三次技术革命极大地推动了社会生产的发展与人们观念的改变，并成为第四次技术革命的前奏。今天，信息技术、激光技术、

新材料技术、生物工程、宇航与空间技术、新能源等一大批高新技术争光斗艳，迅猛发展，把人类带入了空前多姿多彩的世界。

如果说机械是人类体能的延伸，微电子技术则是人类智能的强化与延伸。在电子技术的支持下，人类可以实现许多神话般的梦想。

电子，在它产生的初期，与机械相比，真好比巨人旁的一个柔弱婴儿。在隆隆奔跑的火车、日出万匹的织布机、钢打铁铸的大型机床等所带给人们的繁荣与巨变面前，电灯的光亮显得那么微弱。然而，人们所始料不及的是，仅仅相隔几十年，电子就无处不在了。现在的电子真是今非昔比，尤其是电子计算机的产生与发展更令人们刮目相看。电子计算机早已不再仅是“计算的机器”，它愈来愈广泛的使用，正在改变着科技，改变着工业，改变着农业，改变着商业，……，同时也改变着人类的生活方式、人们的思维方式、甚至人们的观念。可以毫不夸张地说，电子计算机与微电子技术正在造就着一个崭新的时代。

在电子工业日益壮大，电子计算机日益发展的今天，机械再也不能以老大自居了。然而机械技术的发展在人类技术的发展历史中仍然占有重要的一席之地。从早期人类发明的最简单机械，圆滚、杠杆、弓等，到后来的水车、钟表，一直到近代的蒸汽机、发电机、电动机、机床等机构、机器，其进步始终反映着当时人类的技术水平和科学水平。即使是信息技术飞速发展的今天也是同样。因为无论高新技术如何五彩斑斓，机械仍是现代科学技术发展的基础。因为任何高新技术的发展都依赖于机械的发展与支持。

高新技术注入传统产业，引起传统产业的深刻变革，这是近代科学和生产发展的一个重要特征。作为所有工业基础的机械工业其发展的最显著特点是机械与电子的结合，或者说电子技术向传统机械工业的渗透。据此，70年代人们提出了机械电子或机电一体化新概念。这种渗透迅速并全方位地向整个传统机械工业的深度与广度方向扩展。机械工业的变革一方面是机械产品的机电一体化革命，另一方面，机械生产制造系统也发生了巨大的变化。微电子技术、微电子计算机技术使信息和智能与机械装置和动力设备有机结合，不但极大地提高产品性能和产品竞争性，同时又极大地提高了产品生产系统的生产效率和企业的经济竞争能力，促使机械工业开始了一场大规模的机电一体化技术革命。

如今的机械工业在产品结构、设计方法、制造工艺、生产系统结构等方面都发生了质的飞跃。在现代机械生产中，大量应用电子计算机进行经营和生产管理，利用CAD进行产品设计，使用数控机床和柔性生产线进行零部件加工，使用机器人从事喷漆、焊接、组装、搬运等工作。

机械与电子的融合已逐步形成一门新的学科——机械电子学。在机械电子学里既有“机械”的内涵，又有“电子”的本质，这是无疑的。然而，无论是机械还是电子，在机械电子学中都已不再是独立存在着的学科了，它们融合成的新体系具有与机械学和电子学都不相同的自身特点。只有从这一认识出发，才能脱离电子或机械背景的局限性以及抹去将机械与电子简单拼凑的痕迹，深入挖掘机械电子学的本质，才能从一个新的角度认识和阐述机械电子学独特的体系结构、原理、技术与方法。

1.2 机械电子制造系统与机械电子产品系统

现代机械工程的发展表现出两种趋势。一方面由系统论、信息论和控制论所形成的系统科学与方法论开始在机械制造领域产生越来越大的影响，这种方法论着重从整体与部分、整体与外部环境之间的相互联系、相互作用和相互制约的关系中来考察对象，由此产生了现代

制造系统的概念。现代制造系统所包含的内容比传统的制造系统更加复杂，也更加广泛，可称为机械电子制造系统，它是在制造系统和制造过程中机械与电子融合的产物。另一方面随着电子技术与机械越来越深层次的结合，从功能出发形成了结构简单，功能单一，由单因素控制的，可以灵活组合的各种机械电子单元，它们的耦合形成了具有各种功能千变万化的新型机械产品，它们使机械变得结构更加简单，功能更加强大，并具有更高的柔性和智能性，可称为机械电子产品系统，简称为机械电子产品或机械电子系统，它是机械与电子在产品上融合的产物。机械电子工程系统和机械电子产品（系统）是机械电子学的两个侧面。关于机械电子制造系统，本书将结合设计方法从系统的角度进行分析，而与机械电子产品系统有关的内容，将结合产品来研究和分析。

1.3 从机械产品到机械电子产品

机械电子产品是从机械产品发展而来的。机械电子产品（即机电一体化产品）是指具有信息处理能力，通过自动控制软硬件，实现一定功能的机械产品或系统。研究其原理、方法和技术的科学为机械电子学，其工程实现的技术总称为机械电子工程。

简单机械可以完成单一的、简单的功能，由许多简单的机械所组成的复杂机械则用来完成复杂的工作。经过几十年的发展，机械已形成了基本固定的、比较完善的、系列化的单元，如联结单元（联轴节、法兰、螺钉等）、承载支撑单元（轴承、机架、箱体等）、传动单元（各种轮、轴、杆等）、储能单元（蓄势器、轮等）等等。纯机械的操作装置和系统由人们根据工作对象，预先设计并制作了专用的机械。这种机械虽然可以按预定的要求完成工作，但它是一个刚性很强的系统，一旦要求改变，就要将原系统重新设计、改制。换句话说，一种刚性的机械系统通常只能体现人们的一种愿望，而当人们的要求灵活多样起来时，因受到机械刚性化的限制，要求与现实就形成了时空脱离。在机械产生与发展的初期，人们主要致力于如何设计出各种机械单元来完成预想的功能。随着机械功能的日趋完善，系列化机械单元已经十分齐全。然而在竞争日益激烈的今天，产品功能的多样性，其变化的灵活性和快速性开始成为人们新的追求目标。人们希望机械不仅能够实现预想的某一功能，而且可以实现功能的变化，并且变化要快速。生产的着眼点已不再停留在设计和制作机械单元或组装机械系统上，而是开始突破传统机械的边界，向新的领域转移。机械电子产品成为新的热点。

机械电子产品，是随着微电子技术的发展和机电结合深度的发展而发展起来的。机械电子学不是单纯的电类科学，也不再是单纯的机械类科学，它是信息过程与物理过程相结合的产物。物质生产实质上是物质、信息和能量变换、处理和转换的过程。前面提到的纯机械，是由人操作简单的机械做功，完成一定的功能要求，此时所有的分析、判断全由人来完成，它融合在人的操作技能中，机械完全不具有自动控制和信息处理能力。随后的机械与电子的初期结合只是在原有机电产品的基础上增加和采用一些电子器件，例如在机械上加上控制器，以增加机械结构的可控性；增加传感器以增加信息采集和反馈的能力等。这种复杂一些的机器不但可代替人类的体力，而且具有自动控制的能力，已能根据信息（位移、载荷、速度、加速度和强度等）完成简单的逻辑控制，具有了最初步的信息处理能力，对人的操作技能要求有所下降。然而，尽管这种复杂系统的性能有所提高，功能有所加强，但是电子与机械的结合还仅仅是功能附加型的，电子只是机械的附庸。因为主要功能要求仍由单纯机械或主要依靠机械来完成，其主要信息过程仍然是由人来完成的，因此还不能称之为真正的机械与电子的结合。到了70年代初，机械与电子开始从外部的结合逐渐发展到底层的结合，电子所占比

例越来越大,除了早期的控制器、驱动器和传感器外,信息处理器的增加是机械与电子结合产生飞跃的主要标志。这主要依赖于电子计算机性能价格比的提高及其向传统机械的渗透。电子计算机一方面作为硬件代替了原有机系统中的机械控制功能,使控制系统的硬件结构大大简化,同时软件的使用更增加了柔性控制功能,使产品具有了一定的智能化。电子计算机实现信息处理与分析、控制(直接和间接)、监测、使产品趋于微型化、多功能化、智能化、安全可靠、低价和易于操作。机械电子产品脱离了在主要功能方面单纯依靠机械或主要依靠机械的发展方向,而转向通过自动控制单元将电子计算机的数据处理能力与机械的物理实践相结合,从而转向信息过程与物理过程相结合的方向。机器不但代替人类的体力劳动,而且在一定程度上代替了人类的脑力劳动,这种转变不仅将引起生产方式深刻而巨大的变化,而且将引起生产关系的巨大变化。在工农业生产中,人从机器的“体力操作者”而转变为智力操作者。具有智能的、信息过程与物理过程相结合的自动机械是生产第一线的“主角”,真正改变人类体力劳动与脑力劳动脱离的时代也随之而来,建立在体脑分离的人类社会的哲学体系也因上述转变而向更高的形态发展。

毫无疑问,电子计算机技术是机械电子产品中最活跃、影响最大的关键技术。机械电子产品是以电子计算机技术为主导,以机械技术为基础,综合应用自动控制技术、信息技术、传感测试技术、电力电子技术、接口技术、信号变换技术以及软件编程技术等群体技术,使之相互协调,有机融合和集成,实现物质流、信息流和能量流的有序规则运动,从而形成的具有特定功能和价值的高功能、高质量、高柔性、高可靠性和低能耗的产品。

机械与电子在深层次上结合所产生的机械电子产品,其结构、信息处理方式、控制方式等的改变导致了产品功能、产品性能、甚至产品设计方法的极大变化。从纯机械产品到机械电子产品的发展经历了一个质的飞跃。表1-1对纯机械产品、机械电子产品和电子产品进行了比较。

表 1-1 纯机械产品、机械电子产品和电子产品的比较

产品类型	输入	输出	能量转换	单元连接	功能目标	重组性	信息处理	可控性
纯机械产品	物理量、(位移、力、速度)、电量、物质	物理量、电量及物质	多次机械能的传递及转换	刚性、线性、纯机械组合	有明确的物理执行功能,变革物质	差	无信息处理	差
机械电子产品	电量及物质	物理量、电量及物质	电能、机械能、热能之间的转换	柔性、非线性、机电耦合	有明确的物理执行功能,变革物质	好	有信息处理	好
电子产品	电量	电量及物理量	多次电能之间的转换	柔性、电耦合	无明确的物理执行功能,不变革物质	好	有信息处理	好

从表1-1中可以看出,机械电子产品与纯机械产品的相同之处在于,它们都具有鲜明的机械含义:有明确的物理的执行功能,需要变革物理世界中的具体物质,具有能量的输入和输出;其不同之处则在于,纯机械系统是一种“刚性”极强的系统,若干机械单元(零件)纯机械地连接在一起,只有借助于人的干预才能实现复杂的逻辑和运作。由于单元是刚性的,连

接也是刚性的，每种连接对应于一种功能需求，因此当功能需求改变时，就需要重新组合各个基本单元，建立一种新的连接来实现之。显然其功能的适应性较差，即柔性较差。而机械电子产品（系统）各部分间并非纯机械连接，是一种通过信息、指令、数据关系的连接（也可以是部分机械连接），通过各单元的控制体将各部分连接（耦合）成一个整体。它将信息处理能力与机械执行能力融于一体，构成了一个完整的复杂系统。这一点既具有电子产品的特征，同时也具有系统动力学研究的系统的某些特征。系统动力学研究的系统，如生物生态系统、动物神经系统、社会系统和交通系统等等是完全无机械意义的系统，是典型的“高阶次、多回路和非线性”的反馈系统。这种系统（系统动力学系统）不存在机械的、物理的执行功能，一般无需变革物质，它只有信息的输入、传递、处理和输出等，具有极其强大的逻辑处理能力。由于机械电子产品各单元之间的连接不再是纯机械的连接，若干个可实现一种功能的基本单元通过改变相互之间的信息联系，构成新的功能适应性，以创造出更强大的功能。尽管机械电子产品的基本形态还保留了纯机械产品的某些特征，但其功能和性能已远远超过了纯机械产品。

1.4 机械电子产品的解耦与耦合

1.4.1 机械电子产品是复杂系统

从以上分析可以看出，机械电子产品与一般机械产品不同，是一种复杂系统。它的设计方法与传统机械的设计方法也不同。传统的机械设计方法（静力学、运动学、动力学、机械学、摩擦学和疲劳设计、可靠性设计等）适合于纯机械系统设计。它主要解决机械零件与零件、零件与部件、部件与部件等在空间（如装配和运动关系）和时间（时序配合及主从运动关系）上的关系，以及强度、刚度、振动和寿命问题。归纳起来，机械电子产品有以下特点：

①机械电子产品（系统）是一个高阶系统，耦合在一起的多维参数对应（控制）多种物理功能。

②它是一个多回路的反馈系统，与执行体有关的各种信息通过各反馈回路传输到驱动体或控制体，完成实时信息处理和控制在。

③它是一个非线性系统，主要表现在机械电子单元的非线性和滞后现象。许多情况下，单元的输入与输出并非简单的比例关系而是复杂的非线性关系。

机械电子产品（系统）的上述情况导致了它不同于一般纯机械系统，也不同于系统动力学所研究的系统，不同于这两种系统的研究、分析和设计方法。解耦和耦合就是机械电子产品独特的分析方法。

1.4.2 工程冲突

引起机械电子产品复杂性的主要原因是所谓的高阶性；而引起高阶性的根本原因在于此种系统所具有的复杂功能。功能越复杂，控制参数越多（且相互耦合），其阶数越高。它的物理表现为，存在时序上和空间上的冲突以及各功能间此涨彼消的现象——工程冲突。

工程冲突是前苏联学者 Grenrikh Altshuller 在其创造性设计理论（Theory of Inventive Problem Solving），简称 TIPS（英文缩写）和 TRIZ（俄文缩写）中提出的一个观点。Grenrikh 在分析了近乎 40 万个各个工程领域中的发明专利后，认为工程进化不是一个随机的过程，而是受客观规律所支配的过程。Grenrikh 还强调指出，工程冲突是导致创造性设计出现的原因。

所谓工程冲突，是指用原来方法修改某一个系统参数将导致其他参数变化的现象。这说明孤立地改变某一个参数是无法解决耦合在一起的复杂系统中存在的参数间的不协调问题。

TIPS 理论认为如果能找到一个方案解决这种工程冲突, 此设计就是一个创造性设计。

工程冲突是普遍存在的。如汽车的舒适性、安全性和经济性就构成一种工程冲突, 这种工程冲突的不断解决就是汽车设计进步的过程。自动导引车既要跟踪预定的轨迹, 又要控制随轨迹变化的速度, 还要接受地面控制站发来的各种指令, 依据这些指令作出控制上的修改。反映这些功能的参数和指令耦合应协调一致, 以解决空间和时序上的矛盾, 也就是要解决工程冲突。熔融沉积制造是一种先进的成型工艺。喷头在作 X-Y 扫描的同时需要将丝状材料熔化到熔融状态, 在压力的作用下从喷嘴中喷出来以堆积成型。以下因素对成型质量影响很大:

- ① X-Y 扫描速度 (v_c), 它是不断地从零到最大值再到零反复地变化着;
- ② 丝材咬入液化器的速度 (v_l), 它应随 X-Y 扫描相应地实时地变化;
- ③ 熔滴喷离喷头的数量和速度 (v_g)。

由于 v_l 和 v_g 的非线性关系, 即熔融材料的粘弹性问题影响, 使得 v_l 和 v_g 的实时匹配变得十分复杂, 孤立地调整 v_l 、 v_c 和 v_g 都是无法解决堆积质量问题的。这是该工艺的工程冲突表现。上述例子说明了工程冲突在机械电子产品中存在的普遍性。

1.4.3 机械电子产品中的解耦系统与耦合系统

机械电子产品各部分间存在“机械”上的弱联系, 而又在“电”方面存在联系渠道, 为解决其工程冲突提供了一个极其主要的途径。利用机械上弱联系之特点, 根据所设计系统之功能域、主功能和辅助功能的主线, 将系统降阶为多个单因素控制的单个功能的机械电子单元之组合——解耦系统。其目的在于发现工程冲突, 发现冗余单元, 并为耦合做好系统上的准备, 解耦系统是一个虚拟的系统, 它是解耦过程的结果。

耦合是解耦的逆过程。将多个机械电子单元耦合成一个完整的系统, 创造出单个机械电子单元所不具备的功能, 并解决工程冲突问题之过程称为耦合。耦合过程在解决工程冲突的基础上建立各参数之间的正确耦合关系。解耦与耦合是对立的统一, 是机械电子产品发展和进化的原动力。通过解耦发现工程冲突, 通过耦合解决工程冲突, 都是创造性的过程, 是机械电子产品分析、研究、设计和开发的主要方法。

在后面的章节中将对解耦与耦合的具体方法与过程进行详细论述。

第2章 机械电子制造系统

2.1 引言

随着机械与电子产品和学科的相互渗透,其制造系统也经历了相应的演变过程,结果是人机的交互作用越来越强,硬件和软件的交互作用越来越强,管理、信息和控制的交互作用也越来越明显。

本章试图以机械电子制造系统与技术的演变过程,简要地介绍目前比较有代表性的先进制造技术与系统,给读者一个粗略的线条和总体的体验。

正如日历中的时间每年、每月、每周、每日都在重复一样,制造系统和与其相应的管理理论也出现了惊人的重复。但正象每日都在向前进,制造系统和管理理论每个阶段的内容也越来越高级。

现代制造起源于单件小批的手工作坊式生产。埃尼·惠特利(Eli Whitney)于上世纪末本世纪初提出的互换性概念,使经济性的批量和互换性组装成为可能。事实上,亨利·福特(Henry Ford)正是基于惠特利的发现和对芝加哥一家羊肉传送带的观察,才在其他工程师们的帮助下,实现了第一条流水装配线的。由此,使原来只能由少数富人才能享受的汽车进入了西方发达国家和日本的每个中等家庭,改变了人们的生活和思维方式。大批量生产起源于机械式的自动化(当时的装配流水线),但也促进了机械式自动化向其他领域扩展,如自动机加工线、自动铸造线等,它反过来又进一步完善了大批量生产。

正当西方继续享受大批量生产(Mass Production,简称MP)方式带来的优势时,日本人已经悄悄和不自觉地开始酝酿了制造史上的又一次革命,这就是所谓的“及时制造”(JIT——Just in Time),本书称为“丰田生产系统”。丰田的第二代领导人于1950年到大批量生产的祖师爷福特公司取经,从而开始生产家用汽车。丰田公司从美国的超级市场得到启迪,经历了从1953年到1963年10年时间,才由开始一个车间到全公司实行了看板系统,即及时制造的核心技术之一。在1973年开始的中东石油危机的严峻经济形势考验下,丰田生产系统才开始引起日本人注意,并随后慢慢使用到除汽车以外的各行各业。

直到80年代初日本的小汽车、家用电器(计算器、照相机、电视机、摄像机等)和工业用机电产品(如数控系统、机器人、可编程序控制器等)走向美国和西方发展国家的市场时,人们才开始有了紧张感。以美国为主的西方国家先是惊奇、气愤、后是好奇,然后才决定静下心来仔细观察和思考,以弄清楚到底发生了什么。结果,及时制造一下子风靡整个世界,丰田制造系统成了大学和工业界必谈的话题,现在以至家喻户晓。成千上万的工业咨询人员、大学教授和公司研究管理人员可以由此来养家糊口。

同日本的JIT差不多同时发展起来的制造技术是基于数控、机器人、可编程序控制器、自动物料搬运系统、工厂局部区域通讯网络(LAN)及成组技术的柔性制造系统(FMS)。JIT起源于减少制造系统中的所有浪费,并将减少库存作为着眼点;而FMS则在提高多件产品加工的重复精度,以及减少成本的同时,利用成组技术将相同或相似产品组合起来加工,以利用大批量生产的优点。

FMS 强调的是制造系统可加工多种相似产品的柔性,但却忽略了对市场的反应速度,忽略了由于结合相似产品以减少生产准备而造成的可能的库存增加而带来的成本增加。后者正是及时制造、精益和敏捷制造与 FMS 最基本的不同点。因此,一个 JIT、精益和敏捷制造系统可能是以 FMS 为依靠的制造系统,而一个 FMS 则不一定是一个 JIT、精益或敏捷制造系统。另一个区别是, FMS 是一种制造技术或系统,而 JIT、精益与敏捷制造已上升为一种制造管理哲学、管理方法。

最近开始受到重视的同步制造 (Synchronous Manufacturing) 或约束理论 (The Theory of Constraints) 在制造系统组成与过程排序方面与 JIT 并没有根本区别,但它对于传统会计体系给制造系统带来的不良影响的批判却给人们带来了很大的启迪。同步制造的创始人伊利亚胡·戈德拉特 (Eliyahu Goldratt) 博士将他自己的约束理论与 JIT 和全面质量管理 (TQM) 的影响相提并论,所以本章在介绍完 JIT、精益和敏捷制造及同步制造后,专门利用一节介绍 TQM 的主要内容及关键技术。

其他一些先进制造技术本章没有介绍,并不是它们不重要,而是受到篇幅的限制。这些技术与系统为:智能制造,供产销链管理,精微与纳米加工技术,同步工程等等。

2.2 三种不同的自动化及有关的制造系统

自动制造系统可分为自动装配线和自动加工线。自动加工线又可分为自动机加工线、自动焊接线、自动铸造线、自动锻压线等。根据里海大学 (Lehigh University) 工业及制造系统工程系的 Mikell Groover 教授和他的同事们的分类,自动制造系统可归纳为固定式 (或机械式)、可编程式及柔性三类 (图 2-1)。

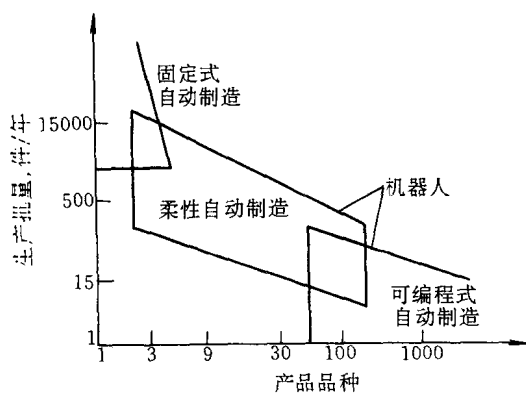


图 2-1 三种不同自动化生产系统与生产批量及产品品种数量的关系

固定式 (Fixed) 或机械式 (Mechanical)

自动制造系统是以最早的底特律汽车自动生产线为代表的自动化。它以行程开关、继电器、定时器等机械电子学装置为典型控制部件,主要适合于大批大量生产。这种系统采用各种专用机床、专用工夹量具和传送装置来提高生产率。我国汽车制造业就曾经采用这种生产形式生产几十年不变的车型。实施这种自动制造系统的先决条件是生产的产品必须具有巨大批量并长销不衰。这两个条件缺一不可都会给这种生产系统的效益带来极大损害。显然长销不衰的机械电子产品很少存在,因为市场竞争越来越激烈,用户的胃口也不断提高。

可编程式 (Programmable) 自动制造系统适用于批量较机械式自动制造系统小,但产品品种较多的情形。这种自动化制造系统是以数控机床和可编程序控制器等机械电子学装置为控制部件的。由于早期计算机技术还只是采用穿孔带,每更换一种产品必须重新编程,或重新安装更换新的穿孔带,且整个系统还没有由计算机控制、协调。各台数控机床之间还没有协调,而只能独立工作。另外,由于以上限制,在同一段时间内,该系统只能生产同一种产品。