

《机电集成技术》丛书

1

机械系统学

黄天铭 邓先礼 梁锡昌 编著



重庆出版社

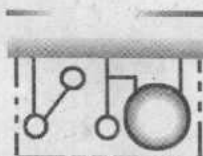
《机电集成技术》丛书

1

TH
H92

机械系统学

黄天铭 邓先礼 梁锡昌 编著



W X H G U D E L E C I A M P N Q



重庆出版社



责任编辑 王 梅
封面设计 吴庆渝
技术设计 刘黎东

JIXIE XITONGXUE

机 械 系 统 学

机电集成技术丛书之一

黄天铭 邓先礼 梁锡昌 编著

重庆出版社出版、发行（重庆长江二路 205 号）

新华书店经销 陕西安康印刷厂印刷

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 9 插页 4 字数 223 千

1997 年 12 月第一版 1997 年 12 月第一版第一次印刷

印数：1 - 3 000

*

ISBN 7 - 5366 - 3583 - 4/TH·5

科技新书目 425 - 327

定价：13.00 元

0757

丛 书 序

早在 18 世纪,以纺织机和蒸汽机为代表的机械的出现,推动了人类社会发展的第二次产业革命。作为工业革命先锋的机械,曾经对人类经济和社会发展作出过巨大的贡献。但是,世间一切事物的发展规律,总是从产生、发展、壮大,到达鼎盛时代,然后逐渐衰亡。机械工业的历史也是如此,机械工业产生后,逐渐发展,直至 20 世纪三四十年代以汽车广泛进入家庭为顶峰,之后,机械本身的许多零部件,如传动、控制、计算机等,逐渐被其他技术代替,机械产业在国民生产总值中的比重逐渐下降,发展到 90 年代,国内外许多机械工厂的经济效益低下,相当多的工厂,其百元利税已低于银行贷款利率,而无利可图,机械工业被某些经济学家视为夕阳工业。

我国是一个社会主义的大国,必须从经济及社会的协调发展的角度,来确定机械产业的地位。机械产业的任务是向国民经济各个部门提供现代化装备(即硬件),如冶金需要冶金设备,发电需要发电设备,交通需要火车、汽车、飞机,建筑需要工程机械,造纸需要造纸机械,电视机厂需要各种装配机械,农业需要拖拉机,国防需要飞机、大炮等。概括起来看,可以说现代文明社会的任何工业生产、农业生产、第三产业、国防建设都是由现代化的机械设备所支撑的。另外,作为国家财富,如工厂、矿山等,都是由厂房和设备组成的,其中设备投资占一半以上,也就是说,机

机械设备占国家财富的比重在一半以上。由此看出,机械设备产业又是国家基础产业,必须与社会协调发展,制造出更好的机械设备满足国民经济各个部门的需要。以我国目前的外贸为例,机电产业是我国出口的第二大产业,这说明它给我国创造了大量外汇;但另一方面,它又是我国进口的第一大产业,消耗了我国大量的外汇,表明我国的机电产业远不能满足我国社会经济发展的需要,急需加快发展,尤其是发展更高精尖、智能的现代产品。

前面谈了机械产业的发展历史,它的基础地位。现在来讨论一下机械的定义和内涵。我们翻阅了各种辞典,却没有找到一个对机械的满意的定义。这里,我们试着归纳机械专家们的意见,将机械定义为:机械是由动力模块、传动变换模块、执行模块、电脑模块、控制模块组成的,能完成一定工作的装备。首先,任何机械都应该能作某种工作,如提升物体、收割、代步、包装、制造零件等,目前机械完成的工作,主要指运动、操作类的工作。而要完成一定的工作,就得有执行部件,如抓具、收割刀、车轮、包装手、刀具等,从模块化的思想出发,统称为执行模块;机械要动作,就得有动力源,即能量变换模块;要将标准动力传递并变换到适合执行部件的需要,都得有传动变换模块;机械要具有自行工作的智能,就得有运算、存储、学习等功能的电脑模块;要完成电脑与机械各模块的信息通讯控制,就得有控制模块。这就是多数现代机械的基本组成,也可以说,现代机械是由机类模块(原动力模块、传动变换模块及执行模块的总称),电脑类模块和电子控制类模块组成的,能完成一定工作的系统。机械是一个 mechanical cell, electron cell and computer cell integrated system,即机械是一个机电集成系统(MECIS)。例如,一台国产三坐标数控铣床,它的机械部分,包括电动机、变速箱、伺服电机、机座等,统属机类的模块,值10多万元;它的计算机值10多万元;数控箱值20多万元,总售价约50万元。一架国产的战斗机,它的发

动机、机翼、机身等机类模块，值约 2000 万元；它有 300 多个计算机，值 3000 万元；它的电子控制模块值 4000 万元，总售价 1 亿元。从成本分析可以大致看出，现代机械类产品的成本构成中，机类模块、电脑模块、电子控制模块已达到三分天下的局面。其他两类模块和机类模块比较起来，其技术难度和复杂性上，也毫不逊于机类模块，也就是说，从机电集成机械的技术构成上讲，也是三分天下的局面了。好在这些集成设备的总体设计、评价，非原机类专家莫属，总工程师仍须由机械专家担任。上面讲到一台现代机械是一个机电集成系统，因此，机械也可以定义为由电脑模块、控制模块、各种机构模块组成的，能完成某种任务的机电集成系统。推广来看，一条生产线是一个机电集成系统，一个生产厂也是一个机电集成系统。

近 20 年的发展表明，纯粹由机构组成的机械正在消亡，代之以机电集成系统构成的新型机械正在兴起。作为反映生产的机械科学必须更新，并采用新的机电集成理论代替。这就是机械科学面临的挑战，传统的纯机械专家和工程师面临的挑战。以机床厂为例，如果生产老式车床，每台售价只有几万元，工厂必然垮台，而生产数控车床，每台售价猛增为几十万元，如能转产，将推动工厂向高科技产业转移。

撰写本丛书的构思之一是，工程类学科的理论是产业或一大类产品（如汽车）的反映，既然生产实践已由纯机械发展到机电集成装备，则像现在这样的纯机械理论就理应予以更新，及时地发展为机电集成学科理论。在机电集成装备已差不多三分天下的局面下，在机电集成理论的内容比例上，对三者也差不多应是三分天下，给予同等重视。采用机电集成理论培养出来的专家，是三者皆懂行的专家，才能担任整个机电设备的总工程师，否则只能是只懂某一行的部件工程师。

撰写本丛书的构思之二是，由于机械产业起源很早，当时的

文明程度、基础研究和一般工程方法均不发达，因此，各种机械的著述多是产品的直接反映，如汽车、机床、飞机等。随着产品种类的增多，机械著述门类跟着增多。其研究方法，仍多沿用经验总结，实验找规律的方法，内容多而庞杂，很难掌握。总之，缺乏科学性和系统性，至今尚没有提出反映各种机械共同规律的，只要掌握了它，就能对各类机械一通百通的理论体系。现代工程的共同基础是系统论、信息论、控制论和智能论。我们用系统论的观点来分析机械，将不难发现，不论是哪种机械，如汽车、轧钢生产线、纺织机……，不论它们的用途或外观有多大的不同，它们内在的共同性，都是由整机、部件和元件几个层次构成；都是由运动传递、能量传递、信息传递，以及润滑、控温等系统构成的。采用现代系统论来分析机械，很容易讲清楚机械的内部规律，共同规律。采用信息论的方法，我们更容易认清机械信息的产生、变换、传递、处理、控制、显示的共同性，将可统一目前分布于测试、诊断、监控等各种专著中的零星、局部的叙述。采用现代控制论来研究机械的共同控制原则、方法、系统，亦有统一和提高各种控制著述的作用。现代机械的发展，正在走向智能化，机器人的迅猛发展充分证明了这一点，今后的车床自带车工、汽车自带司机的时代正在到来。理论总是要先导于实践的，因此，必须用智能论的基础来牵引机械产业向智能机械、生产流程向智能制造迈进。为此，我们采用了新的系统，即用机械系统学、机械信息学、机械控制学、机械智能学来分析、认识机械，试图找到机械的共性理论。

撰写本丛书的构思之三是模块化。我们的目标是希望找到机电集成的共性理论，掌握这套理论就能成为掌握宏观机电集成技术的人才。这要涉及计算机、自动化、机械三个大学科的浩瀚知识，涉及到知识量过多的处理问题。现在国内外从事机电一体化的专家均为此不得其解。我们记得在 60 年代时，学习工业电子学

得从设计放大器的元件讲起，后来集成电路的出现，把自动化专家们从元件设计中解放出来，发展到功能模块的选用，因此，我们这些外行也能拼凑控制电路了。借鉴这种思想，我们认为机械也应当可以由零件设计发展成为部件的选用、模块化选用。用模块来构成机电装备。于是，任何机械都是由机械类模块、控制类模块、电脑模块所组成，将模块的功能和选用讲清楚了，组成机械的单元就掌握了。从而将机械专家从模块中的元件设计中解放出来，只要懂得选用各种机、电、计算机模块就行了。因此本丛中《机械模块学》、《机械控制模块学》、《机械控制计算机》三个分册专门讲述模块化、标准化、系列化和选用原则等问题。

由以上四大理论认识机械的共性，由三种模块认识机械的单元，由此便构成了机械工程新理论体系。我们希望，通过此新体系来造就一代掌握现代机电集成机械的宏观人才。

本丛书的理论意义在于，使机械理论及时地反映生产现实，因而能指导生产发展，解决当前机械工业面临的经济效益低下问题。从长远看，它将引导机械工业向机电集成的高新产业发展。

本丛书的实际意义在于，它解决了当前机械工厂总工程师无法掌握机电集成产品所需具备的机械、电子、计算机三个学科知识的问题，它还解决了大学本科机械工程师一个人在四年学习期间无法全面掌握机械、自动化、计算机三个方面的知识问题。

《机电集成技术丛书》编委会

1994年4月

序 言

当今，自然科学的高速发展呈现了由分化走向统一的趋势。

纵观人类对自然界事物的研究，可以概括为三个阶段：即古代综合发展阶段——近代分析发展阶段——现代综合发展阶段。

在近代科学发展过程中，专门化的倾向日益明显，综合的观点逐渐被扬弃，而代之以分化研究的方法，这虽曾使科学向纵深方向前进了一大步，但却使科技工作者的视野越来越窄，问题越搞越专，客观上本是有机的整体却被人为地分割开来，使许多具有共性的问题无法被全面研究、交流、推广，相同或类似的原理被多次重复研究，造成对事物的片面认识，并导致人力、物力、时间的浪费，阻碍了科学的迅速发展。

现代科学各学科、门类之间多已互相联系，互相渗透，出现了许多边缘学科，客观上要求在复杂的多元现象中寻求统一。以振动为例，水波、声波、电磁波、固体波等都是振动，虽是不同质的振动，但却可总结出它们的共同规律——波长、振幅、频率、相位。

当前，随着科技的高速发展，特别是控制及计算机技术的发展和应用，现代机械已渗透和兼容着机、电、电子、理、化、控制、计算机及生物等众多领域的科学技术，可以说已无纯机械可言。因此，在机械领域同样也面临着重新建立机械科学理论体系、从重视单元技术研究转向重视系统研究这一迫切问题。

长期以来由于原有的学科体系是建立在分析研究这一观念的

基础上,学科越分越细,已难以适应渗透、交叉着多门学科领域科技成果的现代机械学科的要求。主要矛盾是需要学习、掌握的科学知识极多,而人们的时间精力却有限。机械系的学生必须从物理、力学、机械原理、零件……一一学起,大量的时间和精力花在零件的设计问题上,这正如以往学习工业电子学一样,从放大器的原理、元件、线路学起,而今在进化到集成电路后,专家们仅需掌握其功能及正确选用即可。在机械领域也有类似的实例,组合夹具、组合机床、数控系统等,并不要求对每个零件、部件重新设计、计算,而仅需了解其功能和正确地选用、组合。这样,不仅将节省人们大量的时间、精力,而且也有助于机械各主要部件的专业化、标准化生产,从而推动机械工业的发展和提高产品的经济性。

从系统论的原理和观点看,任何机械基本上都是由动力系统、传动系统、执行系统、操纵和控制系统、物料输入输出系统、框架支承系统等所组成。这就是机械的共性,它为建立“机械系统论”提供了科学依据。

本书的特点是从机械系统的整体性、功能性出发,着重讨论整机的模式、功能、结构等共同规律及各子系统的功能、选用等方面的问题,即系统的分析与综合问题,使学生具有较宽广的视野和知识,具备对各类机械进行整机设计的初步能力。

本书第六章的初稿由戴政远同志编写。

目 录

丛书序	(1)
序言	(1)
第一章 工程系统论基本原理	(1)
1.1 工程系统的定义	(1)
1.2 工程系统的功能与结构	(3)
1.3 工程系统的稳定性	(6)
1.4 工程系统的环境	(9)
1.5 系统学基本定律	(13)
1.6 工程系统的部分与整体关系	(19)
1.7 工程系统之间的关系	(21)
1.8 系统方法	(25)
1.9 系统的模型化	(28)
1.10 工程系统的优化设计概述	(31)
1.11 优化设计的案例	(39)
1.12 优化设计的分析方法简介	(45)
第二章 工程系统的评价	(49)
2.1 系统评价的目的与任务	(49)
2.2 系统评价的原则与步骤	(51)
2.3 评价指标体系	(54)

2.4	评分法	(57)
2.5	层次分析法	(64)
2.6	模糊综合评价法	(73)
2.7	机械系统的评价实例	(77)
第三章	机械及机械系统概论	(83)
3.1	机械的定义	(83)
3.2	机械的分类	(84)
3.3	机械系统的基本概念	(85)
3.4	机械系统的组成	(87)
3.5	机械系统的功能	(90)
第四章	机械系统设计概论	(99)
4.1	设计的概念	(99)
4.2	机械系统设计的类型与程序	(100)
4.3	机械系统设计的基本原则	(108)
4.4	机械系统设计的任务	(111)
4.5	机械系统模块化	(115)
第五章	机械系统的原理方案设计	(124)
5.1	方案设计步骤	(124)
5.2	设计任务抽象化——确定总功能	(125)
5.3	机械系统输入输出转换的技术原理	(127)
5.4	总功能的分解	(130)
5.5	原理方案的确定	(132)
5.6	原理方案设计实例 ——挖掘机原理方案设计	(135)
第六章	机械系统的结构设计	(140)
6.1	结构设计的基本原则和步骤	(140)
6.2	提高构件可靠性的途径	(145)
6.3	结构设计中提高精度的途径	(157)

6.4	机械零部件的结构工艺性	(166)
6.5	减小噪声的结构设计	(167)
第七章	机械系统总体方案设计	(170)
7.1	总体设计任务、要求与内容	(170)
7.2	总体参数的确定	(171)
7.3	系统的总体布置	(173)
第八章	机械系统的动力系统	(183)
8.1	机械系统中的载荷	(183)
8.2	动力机的种类及其选用依据	(188)
8.3	动力机械的选择	(195)
第九章	机械系统的执行系统	(203)
9.1	执行系统的组成与分类	(203)
9.2	执行系统的基本动作	(205)
9.3	执行运动的基本形式及常用机构	(211)
9.4	执行系统的设计步骤	(213)
第十章	机械系统的传动系统	(216)
10.1	传动系统的作用及组成	(216)
10.2	传动系统的类型及选择	(224)
10.3	传动机构的安排顺序	(231)
10.4	传动系统的润滑	(232)
第十一章	机械系统的操纵系统和控制系统	(236)
11.1	操纵系统	(236)
11.2	控制系统	(250)
参考文献		(270)

第一章 工程系统论基本原理

1.1 工程系统的定义

系统，是一个既古老又时髦的词汇。早在古希腊及古代中国，就产生了系统的概念。从本世纪的 30、40 年代起，美籍奥地利生物学家贝塔朗非创立一般系统论之后，系统论就日益受到人们的重视。尤其是在 70 年代以来，世界各国掀起了对“系统”的研究与应用的热潮。系统论改变了当代科学家、工程技术人员及各级领导、决策人员的思维方式，推动了各个学科及社会工作的深入发展。

1.1.1 工程系统的定义

系统，就是由两个以上相互联系的部分所构成的具有一定结构和功能的有机整体，系统的各个组成部分称之为该系统的要素。

系统是无时不在，无处不有的。一个国家、一个地区、一个企业是系统；森林、海洋、生物圈、大气层是系统；交通、邮电、电网是系统；一条生产线、一台机床、甚至一个小小的五金工具也是系统。按不同的分类标准，可以把系统划分为不同类别。例如，按要素的自然属性划分，有自然系统（如动物系统、

气象系统、地质系统)、人造系统(如工程系统、管理系统及科学技术系统);按系统的发展层次,可分为无机系统、有机系统及社会系统;按系统与环境的关系,可分为封闭系统、开放系统。另外,还可划分为闭环(反馈)系统与开环系统、自调整系统、自学习系统、自组织系统及自繁殖系统等等。而工程系统,则是一类特殊的人造系统。

所谓工程系统,指的是由人类对自然资源加工改造的产物组成的具有特定目的的系统。例如,运河、水库、大楼、流水线、运输机械、机器装备、工作母机、冶炼设备、电器设备、仪器仪表及日用器具等等都是各种形形色色的工程系统。

工程系统是由人来操作使用管理的,工程系统及其使用者、管理者组成复杂的复合系统,如企业。这是工程系统的一个重要特点。

1.1.2 工程系统的层次

从系统论的观点,系统与要素是相对的。任何一个系统,都是更高一级系统的要素;而系统的每个要素,又是相对该系统低一级的系统。对于工程系统,当然也不例外。当我们把机床作为一个整体进行分析时,机床是一个由动力机构、传动机构、执行机构、操作机构、控制机构、辅助机构及床身等要素构成的工程系统;但当我们着眼于整条生产线时,机床又是生产线这个高级工程系统的要素。即使是单个机床,也与操作者一起组成高级的人—机复合系统。另一方面,变速箱是机床的要素,但同时又是由箱体、若干齿轮副及转轴等要素构成的低一级的工程系统;而齿轮副则是由主动轮、从动轮所组成的更低一级的工程系统,甚至单个齿轮也是由基圆、轮齿等组成的更低级的工程系统。系统与要素、上级系统与下级系统之间的这种关系称为系统的层次。为了强调系统的层次关系,人们常常把系统的组成要素称为

该系统的子系统。

系统的层次性是事物由低级到高级、由简单到复杂发展的必然结果。低层次系统是高层次系统的基础，高层次系统统驭低层次系统，且具有其所属的所有子系统不具备的功能。

正确掌握及自觉应用系统的层次性有着十分重要的意义。工程系统的设计与开发者的着眼点应主要在系统整体这一层次，而不应在低层次的子系统。例如，组合机床的子系统之一是变速箱，而制造变速箱则需要各种优质钢材，钢材则由多种元素按一定数量比例及结构而形成。显然，不可能也没有必要要求组合机床的设计者全面深入掌握金属的内部结构，甚至还不必掌握变速箱内部齿轮的齿形、压力角及模数等等细节。在组合机床设计者的眼里，变速箱仅仅是组成机床的一个要素，只需根据设计的要求，选用外形尺寸、传动功率及变速范围等参数都适合的成品变速箱就可以了，而精力主要放在机床的整体功能设计及各部分的关系上。而对于变速箱制造专业厂，变速箱则是他们所关注的系统一级的对象，其主要精力就集中在研究变速箱的内部结构与功能，以便制造出各种高性能、低成本的变速箱供社会使用。又例如，照明系统由灯具、输电线、控制开关等要素构成，设计者只需选用在外观上及功率上都适用的现成灯具，而不必深入了解灯管的内部结构。这样，既可以减轻系统设计开发者的负担，又能提高工程系统的总体功能与质量，还可以使开发设计者解放思想，扩展视野，设计开发出更新更好的新产品。

1.2 工程系统的功能与结构

1.2.1 工程系统的功能

现代科学的世界观认为，世界是由物质、能量及信息组成

的。这里所说的信息，是广义的信息，不仅包含人们通常所理解的情报、消息、指令及数据，还包含事物存在的方式、运动状态及事物之间的相互关系。物质、能量与信息是密切相关的，物质、能量是信息产生的基础，又是信息传递与存贮的载体，信息则是物质和能量存在、发展与变化的前景与反映，并起着积极或消极的影响。

任何工程系统的功能，从本质上讲，都是接收物质、能量和信息，经过加工转换，输出新形态、新数量的物质、能量和信息。

车床，接收了被加工的工件毛胚、输入的动力以及工件的设计尺寸、电机转速、功率、操作指令等之后，经过各子系统的配合工作，输出切削加工后的工件及其质量信息。电视机，接收到电力及无线电信号，经过滤波、放大、信号识别与转换，输出新形式的信息——图像与声音，新形式的能量——光能与声能。

1.2.2 工程系统的结构

工程系统的各要素之间数量上的比例以及在空间上和时间上的联系方式称之为该系统的结构。

即使组成系统的要素完全相同，不同的结构也往往产生截然不同的系统。金刚石与石墨的组成要素完全相同，都是碳原子，它们的区别仅仅在于空间联系方式不同。当碳原子以空间点阵的方式排列时，就成为金刚石，坚硬无比，光彩夺目，价值连城；而当碳原子以平行的层状方式排列时，就成为石墨，又黑又软，用指甲也可以划出痕迹。类似的例子在工程系统中比比皆是，例如，可以采用完全相同的构件，按不同的结构，拼装出大衣柜、写字台、书架等不同的类型及用途的板式组合家具。有的系统，即使组成的要素及空间结构完全相同，也有可能仅仅由于要素之间在时间上的联系方式不同而面目全非。让我们来观察电动机的输电线与转轴在时间上的顺序关系：电能首先通过输电线进入电