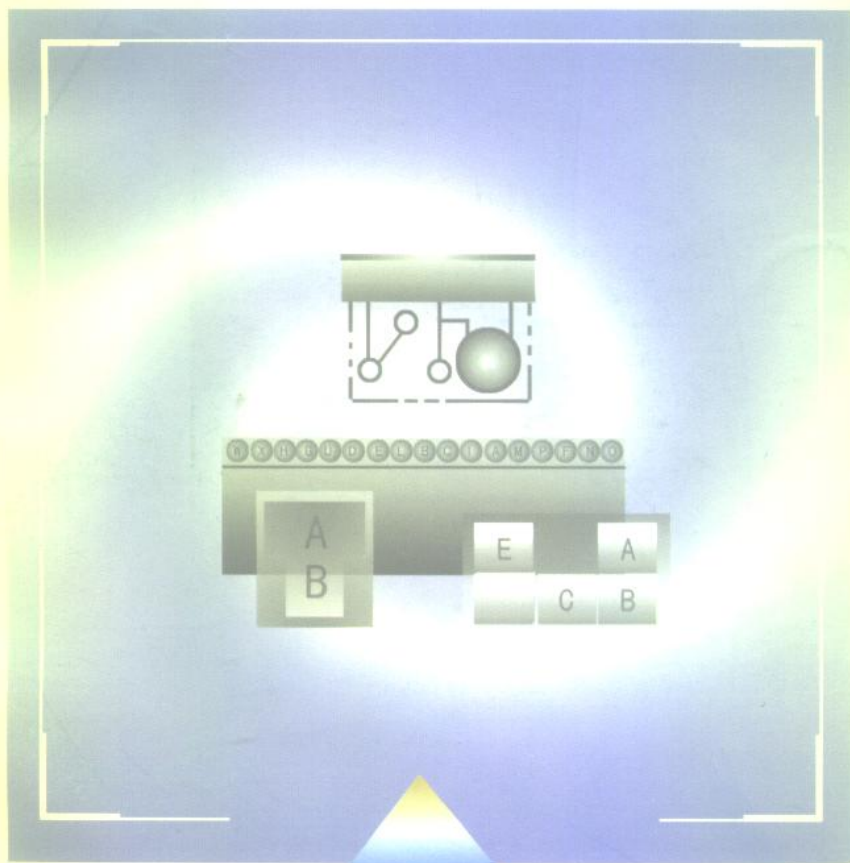


《机电集成技术》丛书

5

机械模块学

施进发 游理华 梁锡昌 编著



重庆出版社

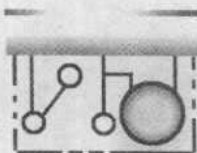
《机电集成技术》丛书

5

TH
553

机械模块学

施进发 游理华 梁锡昌 编著



W X H S U D E L B C I A M P F N O



重庆出版社

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

“机械模块学”是机械工程新理论体系的组成之一，是由本书编著者在总结机械产品模块组合实践的基础上，针对目前机械工业所面临的问题而提出来的。

随着科学技术的发展，社会的进步和经济的繁荣，市场要求机械产品向多品种、小批量方向发展；同时也要求机械产品具有性能齐全、优质可靠和高效率等优良特性；还希望机械产品的供货周期缩短和性能价格比更趋合理等。市场的变化，使得基于传统机械学科理论与方法来设计与制造机械产品的诸多厂家，已无法满足市场在这些方面越来越高的要求，从而导致一些机械工厂，其利润率达不到银行利率，经济效益十分低下。这就是目前机械工业所面临的十分严峻的实际问题。为了改善并克服这一实际问题，有必要在借鉴传统机械学科理论的基础上，重新建立一套有关机械科学的新理论体系，因此机械模块学便应运而生了。

机械模块学是一门研究机械系统中各独立功能部件模块化的科学。它认为机械系统这个大模块是由具有独立功能的一些子模块构成的；这些子模块诸如动力模块、传动模块、执行模块、控制模块以及辅助模块等，通常是指零件等基本元素的集合体（而非单一的零件）；功能部件的模块化包括功能部件的模块化设计、模块化制造和模块化装配等；不同用途的机械，可以根据内部层次结构和功能需要，由相应的模块集合而成。

机械模块学的研究对象十分广泛,包括建立机械模块学理论体系中各名词术语的概念设计;探索模块及其产品系统设计过程自身的规律性;分析模块及产品设计的经济因素;建立模块化设计方案评价的指标和方法;进行模块化制造技术研究;研究模块化装配的流水线方法及技术;探讨模块及其组成产品的标准化、系列化、通用化、集成化、组合化以及经济化的设计技术和制造技术;研究模块的选用原则以及模块间集成与组合的接口技术等等。

由于机械模块学是一门新提出来的学科,涉及的研究内容十分广泛,本书在总结前人思想的基础上,融入我们自己的一些观点和看法,以起到抛砖引玉的作用。全书共分七章,分别讲述机械工业的现状与出路、机械模块学基本理论及其应用、动力模块、机械传动模块、流体传动模块、控制装置模块、机械系统的模块集成技术。

本书在编著过程中力求文字通顺,图文并茂,内容深入浅出,便于有兴趣者自学。本书既可作为机械工程技术人员的培训或自学教材,又可作为高等院校机械专业的选修教材或参考书。

具体参加本书编著工作的有工学博士游理华副教授(第三和四章)、博士后施进发(第一、二、五、六和七章)。梁锡昌教授对本书编著工作做了具体指导。

本书中许多内容和示例直接取材于一些国内专家、学者所发表的有关机械模块化理论与技术的研究文献,如哈尔滨工业大学贾延林老师主编的《模块化设计》、清华大学黄纯颖老师主编的《设计方法学》等等。

由于机械模块学理论还不很成熟,加之作者的理论水平和所掌握的资料有限,书中缺点和错误在所难免,敬请有关专家和广大读者批评指正。

编著者

1994年11月3日

目 录

丛书序	(1)
序言	(1)
第 1 章 机械工业的现状与出路	(1)
1. 1 机械工业具有战略意义	(2)
1. 2 机械工业面临的挑战	(4)
1. 3 机械工业中的模块化现状	(50)
1. 4 建立机械模块学理论, 发展模块化机械产品是振兴 机械工业的根本出路之一	(70)
第 2 章 机械模块学基本理论及其应用	(75)
2. 1 传统机械系统组成模型	(76)
2. 2 机械模块学有关基本理论	(86)
2. 3 机械模块学的研究对象与学科特点	(111)
2. 4 机械模块化设计的分类	(117)
2. 5 机械模块化设计方法及其应用分析	(121)
2. 6 机械模块化设计的未来及需要克服的问题	(137)
第 3 章 动力模块	(140)
3. 1 原动机概述	(140)
3. 2 原动机模块的模块化设计	(161)
3. 3 动力模块库	(168)
第 4 章 机械传动模块	(178)

4. 1	机械传动概述·····	(178)
4. 2	机械传动模块的模块化设计·····	(204)
4. 3	机械传动模块库·····	(217)
第 5 章	流体传动模块·····	(236)
5. 1	流体传动简介·····	(236)
5. 2	流体传动装置的模块化设计·····	(248)
5. 3	流体传动模块库·····	(267)
第 6 章	控制装置模块·····	(277)
6. 1	控制方式简介·····	(277)
6. 2	控制装置的模块化设计·····	(285)
6. 3	控制装置模块库·····	(289)
第 7 章	机械系统的模块集成技术·····	(296)
7. 1	模块库及其管理·····	(296)
7. 2	模块的集成·····	(311)
7. 3	模块集成的智能专家系统·····	(318)
7. 4	机械系统模块集成技术的应用·····	(327)
	参考文献·····	(331)

第一章 机械工业的现状与出路

18 世纪以纺织机和蒸汽机为主要标志的产业革命，使人类社会从农业文明步入工业文明。这是机械工业为人类带来丰富的物质文明的开端。因此，有人称那次产业革命为“机械文明”。到了 20 世纪 20 年代，随着福特汽车大量机械化生产，将世界机械工业推向了顶峰。

我国的机械工业是建国后从无到有逐渐发展起来的。它在我国加速发展社会主义经济建设，不断改善人民物质文化生活水平的进程中，起到了举足轻重的作用。

随着社会的不断进步，人们的消费观念、消费意识不断发展，导致了市场的需求结构亦随之动态地变化着。从 20 世纪 60 年代开始，世界机械产品市场需求结构便逐渐向多、快、短、小、高等方向演化。其中，多是指产品的品种、规格和式样等越来越多；快是指产品更新换代越来越快；短是指交货期限越来越短；小是指产品批量越来越小；高是指产品的技术含量及附加值越来越高。面对市场需求结构发生的上述深刻变化，传统的机械工业正面临着十分严峻的挑战。

根据有关经济学学说，当某一工业部门的利税达不到银行利率时，即被划分为夕阳工业。据此标准，目前国内外的众多机械企业已没落为夕阳工业。然而，机械工业毕竟是一个国家的基础产业，是为其它产业提供基础装备的，是国民经济赖以发展的基

础。因此，不能将机械企业出现上述利税达不到银行利率的现象，笼统地归为夕阳工业，必须正确地区别对待。

为使机械工业得到振兴，以促进整个社会经济的发展，世界各国的机械专家们正在分析研究问题的原因，以便谋求出路。有关的研究动向表明，从探索产品新的设计方法、制造方法和管理方法等着手，来寻求机械工业的出路，是行之有效的途径。

下文将在分析、总结目前机械工业状况的基础上，提出机械模块化是振兴机械工业根本出路之一的设想。

1. 1 机械工业具有战略意义

现代科学技术革命的发展，使一批新兴产业迅速建立和发展起来，传统产业日渐衰弱，其中世界性机械工业疲软现象更为明显，这种趋势首先在工业发达国家表现出来，然后又蔓延到发展中国家。尽管如此，传统的机械工业无论对于工业发达国家还是对于发展中国家，决非是所谓的“夕阳工业”。因为机械工业是国民经济的装备工业，其产品的技术水平、寿命、可靠性及市场满足度等直接影响整个国民经济的发展。任何行业、工厂都离不开设备，就是农业、服务业也必须有大量的设备作为生产和经营工具。设备占一个工厂固定资产的 $2/3 \sim 3/4$ ，离开了设备就只剩下流程，不能解决任何问题。可见，任何行业的进步都离不开机械工业的进步。

随着经济的不断发展，世界性产业结构、商品市场和消费观念等发生巨大变化，机械工业的发展状况对国民经济其它部门的生产技术水平的影响日益加重。首先，世界各国为了振兴各自的经济，扩大出口，提高商品附加价值以及增强竞争能力，都在不失时机地调整各自的产业结构，而产业结构的调整必然依赖于装备结构的调整，也即必然依赖于机械工业结构的调整。其次，变

化的市场极大地冲击了传统的设计、生产和管理方式。如何适应市场的变化，增强产品的竞争能力，最大限度地满足用户的要求，是摆在各生产企业、设计部门和行业主管部门面前的一个重要而又实际的课题。显然，作为基础工业的机械工业必须率先发展适时并科学的设计方法、生产方式以及经营管理模式，以使机械产品率先适应变化的市场，然后带动以机械产品为装备手段的其它行业的产品也逐步适应变化的市场。再次，随着社会的进步和经济的不断繁荣，人们的消费观念亦随之发生了巨大的变化。用户不再满足于市场上现有的产品，他们根据自己的意愿，对所期望的产品，不仅提出实用性、可靠性、耐久性、经济性等要求；而且还希望有更多的品种、规格、式样和档次；同时还希望操作简单、省力、舒适、外形美观等。用户消费观念的如此变化，促使工业企业与用户在利益上的分歧加大，企业试图减少品种、规格、式样和档次，以扩大批量、降低成本、提高质量和经济效益，而用户在订货时，实际上是要求企业提供所需的特殊产品和服务。在当今充满市场竞争的形势下，企业与用户之间在利益上日见分歧的局面最终导致企业必须最大限度地满足用户的要求，否则企业会因产品不受用户欢迎而出现亏损甚至倒闭的现象。因此，消费市场、消费观念的变化，迫使机械产品以及以此为基础的其它行业的产品，必须向更小批量、更多品种、更机动灵活、多样化以及短周期等方向转变。可见，机械工业的发展状况在一定程度上影响和制约着其它行业的发展步伐。

对于发展中国家，尤其象我国这样一个人口多、底子薄、经济实力相对薄弱、文教科技水平比较低而且经济发展很不平衡的国家，机械工业更是物质生产的基本组成部分之一，是人民生活提高所依赖的物质基础。诸如汽车及其零部件；专用汽车和改装汽车；中小型柴油机及其配件；起重运输机械；焊接材料与焊接设备；通用机械；锻压设备；电机；电站锅炉；数控机床和数控

装置；轴承及其加工设备；中小型拖拉机；农用运输车；农副产品加工及禽畜饲养机械等机械工业产品，都是我国经济发展的基础装备。

1. 2 机械工业面临的挑战

科学技术发展到 90 年代，已经是创造性设计和高科技相互有机结合的年代，是知识和价值革命的年代，是工业产品高附加值不断出现的年代，是世界性商品经济竞争十分激烈的时代，然而，也是世界机械工业呈现衰弱的时代。面对机遇和挑战，必须抓住机会振兴机械工业，进而促进整个社会经济与文化的发展。

1. 2. 1 机械工业的现状

工业发达国家如美、日、德、法、意等，为了继续保持它们在世界市场上的垄断地位，针对目前机械工业产品市场上需求向着增加品种和花样，以提高商品附加值进而增加其商品魅力方向发展的客观实际，正努力将它们的已经出现衰落的机械工业逐渐推向高科技产业的行列，以摆脱机械工业所面临的日益加重的滑坡的危机。它们充分应用 20 世纪后期诞生的各种高新技术诸如微电子技术、计算机及自动控制技术、机器人、柔性设计与制造技术等。电子技术与机械的结合，使机械工业本身出现了革命性的变化，数控机床、加工中心不是一般意义的机床所能相提并论的。微电子技术促进了微型机械的诞生，它使机械的自动控制机构彻底简化，使机械的自动化和柔性大大提高。机器人不是一般意义的机器，而是高科技机械产品最典型的代表，它是有“脑”，有“感官”的机器，它不仅是人类体力的延伸，而且还具有仿人类思维的能力。发达国家在发展当今机械工业的进程中，旨在最大限度地实现在任何情况下任何一台生产设备均可生产多种产品，并

使更换产品的调整时间缩短到几乎为零，从而使生产单件产品与大批量产品的生产成本几乎相同。这就是确保其机械工业站在世界最前沿及使其产品在世界的商品竞争中立于不败之地的关键。

我国目前的机械工业，一方面，其产品的质量、寿命以及性能价格比等都比不上工业发达国家。例如，我国单台机床生产的平均产值不及发达国家的 $1/10$ ；数控机床等柔性加工设备仅占 2% （日本为 28.3% ）；工程机械、拖拉机等设备的寿命是发达国家同类产品的 $1/2 \sim 1/3$ ；汽车无故障行驶里程只有国外汽车的 $1/10$ 等。另一方面，也正处于疲软时期。以西南地区某大城市机械工业为例，80 年代以来，机械工业的经济效益不断下降，全员劳动生产率和资金利税率始终低于全市工业平均值。机械行业的资金利税率由原来的 11% 左右降至 $4\% \sim 5\%$ ，企业留利由 1985 年的人均 700 多元降至 1989 年的 418 元。具体而言，目前我国的机械工业面临的现状有以下几点：

（1）技术进步不快，总体水平不高

建国初期，国家在机械工业的投资和引进技术等方面给予了重点支持，组建了一批骨干企业，为我国机械工业的发展奠定了一定的基础。但在“大跃进”和“十年动乱”期间，机械工业的产品结构、产业结构、科技与生产结构、劳动力结构等方面都出现了严重的失控和失调，加上当时报喜不报忧以及脱离实际的舆论宣传，掩盖了技术落后和虚弱的本质，从而国家放松了必要的技术攻关、技术改造和投入。在“六五”和“七五”期间，虽然国家已意识到了这个问题并进行了适当的投资和改造，但因当时国家财政十分困难，没能根本改变机械工业技术落后的本质。所以，目前机械工业普遍存在工艺装备落后、技术状态严重老化以及役龄过长等问题。近年开发的具有 80 年代水平的一些机械工业产品，大多是引进合作产品，真正靠国内力量独立开发的高新技术产品，数量极少。

(2) 追大求全，固步自封

建国几十年来，我国的机械工业生产模式没有发生多大变化，主要还在崇尚和追求大而全的生产模式。这种现象在生产整台仪器设备的厂家，显得尤为突出。这种大而全的生产模式的特点是：按照某种产品的完整性来组织企业的各生产单元，包括从毛坯的制造到粗、细加工；从零部件的生产到整机装配等，并力求使这些生产过程在同一生产企业内部进行。这种大而全的生产模式，看起来十分全面，实际上是封闭的，是在作茧自缚。它导致了人们目光短浅，固步自封。既妨碍了机械工业的发展与进步，又影响了工业生产的发展进程。近几年来，尽管有关部门已经意识到了这种传统生产模式有碍于机械工业科学技术的进步，并提出了有关振兴机械工业的改革措施，例如借鉴先进工业国家的经验，调整产业结构和整顿生产秩序等等，旨在尽快使我国机械工业大而全的生产模式向高效、标准 and 专业化协作等方向发展。但由于传统的生产模式根深蒂固，人们难以在短时间内摆脱其影响，因此目前我国机械工业生产模式的变革，进展甚微。

(3) 基础机械性能差质量低，很难确保机械产品的制造质量

有关资料表明，国内许多主要基础机械产品诸如金属切削机床、冲压机械和铸造机械等，其总体技术水平比工业发达国家先进产品落后至少15年，作业精度相差至少一个数量级，精度稳定性及寿命相差一半，个别的可靠性指标相差数倍等。可见，这种落后的机械工业基础机械，将会严重地影响机械工业制造产品的性能和质量。

(4) 重量轻质，重产轻销

几十年来，国内企业对产品的质量总是“说起来重要，做起来次要，忙起来不要”。其中机械工业企业也不例外。而重量轻质又是长期以来把企业产值的增长与否作为衡量其经济效益好坏的主要标准所形成的。由于只要产值增长了，即使产品卖不出去，