

基于系统工程的产品综合设计理论与方法

# 产品的使用性能 及智能优化设计

闻邦椿 赵春雨 任朝晖 编著



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

---

基于系统工程的产品综合设计理论与方法

# 产品的使用性能 及智能优化设计

闻邦椿 赵春雨 任朝晖 编著



机械工业出版社

本书是对“基于系统工程的产品综合设计理论与方法”进行系统叙述的六部系列著作中的第四部。该系列著作分别是：①《产品全功能与全性能的综合设计》；②《产品的主辅功能及功能优化设计》；③《产品的结构性能及动态优化设计》；④《产品的使用性能及智能优化设计》；⑤《产品的制造性能及可视优化设计》；⑥《机械产品设计质量的检验与评估》。

该系列著作是本书第一作者领导的科研团队长期从事机械产品研究、设计和开发的成果总结，是机械产品设计领域内一套内容比较系统、全面和独具特色的系列著作。书中也吸取了国内外学者在该领域的一些主要研究结果。

本书共分九章，第1章为概论；第2章讲述产品智能优化设计的目标、内容与方法；第3、4、5章分别叙述智能优化设计的理论基础——传统的和智能的控制理论与方法及控制系统的优化；第6、7、8、9章分别讨论机械产品操纵系统的设计、检测系统的设计、控制系统的设计和机械系统的故障诊断。

本书可供从事现代机械产品研究与开发、设计与制造及管理的科技人员阅读、参考，也可作为大专院校的师生、高年级学生、研究生和从事现代机械设计理论与方法研究的科技工作者的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

产品的使用性能及智能优化设计/闻邦椿等编著. —北京：机械工业出版社，2009.6

(基于系统工程的产品综合设计理论与方法)

ISBN 978-7-111-27179-6

I. 产… II. 闻… III. 产品 - 设计 IV. TB472

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 076405 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：沈红 版式设计：张世琴 责任校对：李秋荣

封面设计：鞠杨 责任印制：邓博

北京机工印刷厂印刷 (北京蓝海印刷有限公司装订)

2009年8月第1版第1次印刷

169mm × 239mm · 20.25 印张 · 392 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-27179-6

定价：39.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：(010) 68326294

购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：(010)

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

“机械产品的设计理论与方法”是一门综合性课程，又是一门实践性课程，是机械专业学生必须学习和掌握的一门基础性和技术性课程。对于从事机械产品设计的工程师和这一专业的大学本科生或研究生，如果要从事新产品研究和开发工作，都必须认真学习和掌握这一课程，否则，就很难胜任高质量机械产品的研究、开发和设计的任务。

众所周知，机械产品在国内外市场中竞争力的强弱，在很大程度上取决于产品的质量，产品的质量是通过精心设计、精密制造和严格管理而获得的。产品的设计工作对其质量有十分重要的影响，这是因为产品的设计可赋予产品“先天性优劣”这种至关重要的本质特性。因此，对于绝大多数产品来说，产品的设计在保证其质量的过程中起着十分重要的作用。

产品的设计质量包括用户、企业及社会对产品设计工作提出的所有质量要求，即包括产品全部功能和性能。为了满足产品设计质量的要求，科技工作者已提出并深入研究了数十种设计方法，这些设计方法能够在不同程度上满足产品某一方面或某些方面设计质量的要求。

综合设计法明确地提出了它是以用户需求为驱动，以产品的设计质量为目标，以多种学科的理论与技术为基础，以功能设计、动态设计、控制系统设计和智能设计及可视化设计为内容，以广义优化、现代仿真技术和数字化技术为手段，不仅研究了以线性理论为基础的一般综合设计法，还讨论了以非线性理论为基础的深层次的综合设计法。因此，该书提出的方法对于各类机械设备的设计均具有较好的适用性。

为了较全面地满足用户、企业及社会对产品设计质量提出的要求，该书构建了基于系统工程的产品设计总体规划理论模型，即7D总体规划模型，其中包括设计思想、设计环境、设计过程、设计目标、设计内容、设计方法及产品设计质量检验七个方面的内容，阐明了它们的内涵。并将产品设计工作划分为7D规划、1+3+X实施和3A检验三个阶段。该法将几种对产品质量有决定性影响的设计方法有机地结合在一起对产品进行设计，我们把这种设计方法称为综合设计法。

综合设计法的主要内容是功能优化设计、动态优化设计、智能优化设计和可视优化设计，因此也可以称它为四优设计法，或面向产品全部功能和性能的综合设计法。该书把这种设计法概括为1+3+X设计法，1即为功能优化设计，3为“动态优化、智能优化和可视优化”融合在一起的三化设计或三优设计，X为对某种产品有特殊要求的设计方法。随着科学技术的快速发展，综合设计法

的内涵也将随着科学技术的进步和发展不断得到补充和完善。

综合设计法主要内容之一：产品的7D总体规划模型及1+3+X综合设计的理论框架。

综合设计法主要内容之二：产品的功能优化设计，从产品所要实现的功能和用户所提出的基本要求出发，选定产品的设计方案，即确定产品机构的形式、各种系统和结构的组成，计算与选择产品的主要参数等。

综合设计法主要内容之三：产品的动态优化设计，将在已完成产品方案设计（初步方案）的基础上，进一步分析和计算机械设备及其系统的运动学和动力学参数等，计算零部件的刚度、强度及工作耐久性等，进而确定机械设备及其零部件的尺寸；通过理论分析，并在可能进行的结构或其模型试验的基础上，对初步设计阶段的图样和方案进行修改。该书研究并提出了基于非线性动力学理论的、深层次的动态设计理论与方法。

综合设计法主要内容之四：产品的智能优化设计，它有两种不同的含义，一是采用智能化手段来完成产品设计；二是对所设计的产品的主要参数和工作过程实现智能控制和优化，使机械设备具有更高的工作性能及智能化程度，该书提出的智能优化设计是对机器的主要参数和工作过程实行智能控制和优化，其主要目标是提高产品的工作性能。

综合设计法主要内容之五：产品的可视优化设计，也是局部范围内的虚拟设计，在设计过程中采用三维造型和各种先进的可视化技术和手段，将机械设备的结构、制造和装配过程、工作过程的特征形象地表现出来，并通过可视化来检验产品各种工作过程的可行性和合理性，发现产品设计中的不足，进而对产品的设计进行修改，以便提高产品的设计质量。

综合设计法主要内容之六：产品设计质量的3A检验与评估，可以采用三种方法：一是采用理论方法或已有经验进行评估，二是通过模型试验检验产品设计质量，三是通过用户使用检验产品设计质量。

这六个方面的内容组成了一个完整的设计系统。从系统工程的角度来看，它是一个完整的技术系统。为了系统地讲述提出的理论与方法，特分为六个分册出版。

本专著是闻邦椿教授及他所领导的科研团队，对30余年从事产品设计实践的经验和对设计理论与方法进行系统研究所取得的科研成果的总结，本书所提出的创新点有：

1) 目前科技界对已提出的数十种设计理论与方法还未进行分类，从宏观角度来看，对设计理论与方法的研究和讲述尚处于零散、无序、缺乏整体性和完整性的散乱状态。对它们进行分类有利于找出它们的共性与特性，并促进其进一步的快速发展，因此，本书首先对数十种机械产品的设计理论与方法的分类进行了有益的尝试。

2) 提出并阐明了基于系统工程的产品设计7D(设计思想、设计环境、设计过程、设计目标、设计内容、设计方法、设计质量评价)规划模型。

3) 阐明了产品功能和性能的概念,明确地把产品的设计质量具体化为产品的主辅功能和三大性能,详细地论述了产品的总功能和产品三大性能的内涵。

4) 给出了产品质量和设计质量的定义。

5) 研究并提出了面向产品全部功能与性能的综合设计理论与方法。

6) 给出了1+3+X综合设计法简洁的公式。

7) 研究并提出了深层次的,即考虑机械系统的非线性、非稳态、高维、强耦合、不确定等的综合设计理论与方法。

8) 从产品设计质量出发,对产品设计质量的3A检验与评估方法进行了研究。

9) 用综合设计方法研究了典型机械的设计问题。

本书是“基于系统工程的产品综合设计理论与方法”系列著作中的第四部《产品的使用性能及智能优化设计》,另外五部著作分别是《产品全功能与全性能的综合设计》、《产品的主辅功能及功能优化设计》、《产品的结构性能及动态优化设计》、《产品的制造性能及可视优化设计》和《机械产品设计质量的检验与评估》。

本书共分九章,第1章为概论;第2章讲述产品智能优化设计的目标、内容与方法;第3、4、5章分别叙述智能优化设计的理论基础——传统的和智能的控制理论与方法及控制系统的优化;第6、7、8、9章分别讨论机械产品操纵系统的设计、检测系统的设计、控制系统的设计和机械系统的故障诊断。

本书由闻邦椿教授及赵春雨、任朝晖副教授撰写。书中吸取了科研组其他同志的一些研究成果,他们是佟杰新、张国忠、任立义、纪盛青、刘树英、柳洪义、刘杰、张天侠、张义民、李奎贤、袁惠群、李以农、何勍、宋伟刚、韩清凯等教授,林文强、李东升、王凤兰、宿苏英等副教授,罗忠、张晓伟、李鹤、李小彭、陈宏、姚红良、孙伟、刘杰博士等。在编写过程中参阅了国内外一些重要技术文献中的成果,并且东北大学机械设计及理论研究所及有关兄弟单位给予了支持和帮助。

特别应该指出的,本书是东北大学“985”工程建设项目“重大机械装备设计制造关键共性技术”创新平台建设的一部分成果之一,也是本课题组正在执行的“现代机构创新及机械系统动态优化设计理论与方法的研究”国家自然科学基金重点基金项目(50535010)和“面向先进装备制造的现代设计方法与示范应用”沈阳市重大科技攻关项目研究的部分成果。

本书会有许多不妥之处,望读者给予指正。

作 者

2009年6月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 概论</b> .....	1
1.1 智能设计的概念及研究的意义 .....	1
1.2 智能系统的结构与特点 .....	3
1.3 机电一体化设计及智能设计的发展 .....	9
1.4 机电系统的控制方法 .....	11
1.5 机电一体化设计及智能设计的一些理论基础 .....	11
1.6 结语 .....	15
参考文献 .....	16
<b>第 2 章 产品智能优化设计的目标、内容与方法</b> .....	17
2.1 概述 .....	17
2.2 机电一体化设计及智能优化设计的目标 .....	19
2.3 机电一体化设计及智能优化设计的内容 .....	27
2.4 机电一体化设计及智能优化设计的方法 .....	31
2.5 智能优化设计的目标、内容与方法的关联方程式 .....	32
2.6 智能优化设计对产品设计质量的影响 .....	32
2.7 结语 .....	35
参考文献 .....	35
<b>第 3 章 传统控制理论与方法</b> .....	36
3.1 概述 .....	36
3.2 PID 控制 .....	36
3.3 最优控制 .....	47
3.4 滑动模态变结构自适应控制 .....	57
3.5 $H_2$ 控制 .....	71
3.6 结语 .....	73
参考文献 .....	73
<b>第 4 章 智能控制理论与方法</b> .....	74
4.1 概述 .....	74
4.2 智能控制的概念与方法 .....	75
4.3 模糊控制 .....	78
4.4 神经网络控制 .....	91



4.5 专家控制 .....	102
4.6 其他智能控制方法简介 .....	110
4.7 结语 .....	114
参考文献 .....	114
<b>第5章 控制系统的优化 .....</b>	<b>115</b>
5.1 概述 .....	115
5.2 模拟退火算法 .....	116
5.3 遗传算法 .....	119
5.4 禁忌搜索算法 .....	131
5.5 结语 .....	138
参考文献 .....	138
<b>第6章 操纵系统的设计 .....</b>	<b>139</b>
6.1 概述 .....	139
6.2 操纵系统的主要功能 .....	140
6.3 筛机启动时的同步跟踪操纵系统 .....	142
6.4 振动沉拔桩机沉拔桩工作过程的操纵及控制 .....	144
6.5 结语 .....	153
参考文献 .....	153
<b>第7章 检测系统的设计 .....</b>	<b>154</b>
7.1 概述 .....	154
7.2 传感器的分类及性能指标 .....	156
7.3 信号处理电路 .....	165
7.4 测控系统的计算机接口 .....	172
7.5 干扰及其抑制技术 .....	201
7.6 结语 .....	203
参考文献 .....	203
<b>第8章 控制系统的设计 .....</b>	<b>205</b>
8.1 概述 .....	205
8.2 机械系统控制的主要技术内容 .....	207
8.3 PID 控制系统的设计 .....	219
8.4 最优控制理论及应用 .....	233
8.5 双机传动机械系统的变结构同步控制 .....	242
8.6 微波催化连续反应实验系统模糊控制设计 .....	246
8.7 材料实验机电液伺服系统的模糊神经网络控制系统设计 .....	251
8.8 结语 .....	259
参考文献 .....	260
<b>第9章 机械系统的故障诊断 .....</b>	<b>262</b>
9.1 概述 .....	262





9.2	机械故障诊断的发展 .....	263
9.3	机械故障诊断技术的内容与方法 .....	265
9.4	灰色系统理论诊断 .....	267
9.5	神经网络诊断 .....	279
9.6	专家系统诊断 .....	292
9.7	小波诊断 .....	296
9.8	递阶遗传算法优化的模糊神经网络在故障诊断中的应用 .....	307
9.9	结语 .....	312
	参考文献 .....	313

# 第1章 概 论

## 1.1 智能设计的概念及研究的意义

现代机械的组成除了机械部分之外，常常包含有电动机、电器和电控部分，因此，在机械产品设计过程中，还涉及电动机、电器及电控方面的设计工作，这类设计通常称为机电一体化设计，如果从更高的水平来要求，可称这类设计为智能优化设计。机电一体化设计或智能优化设计是在产品研究、开发和设计过程中，采用各种有效的方法，如优化设计、数字化设计、可视化设计、智能设计和试验等方法，对机器的操纵系统、监测系统、控制系统和诊断系统等具体内容，开展研究和设计工作，以使所研究和开发的设备具有良好功能的同时，获得优良的使用性能和其他相关性能（设备的部分结构性能和制造性能）等。

机电一体化设计或智能优化设计是产品设计的核心内容之一，它既有广度，又有深度，而且也有一定的难度。产品设计工作者应该全面和系统地予以掌握，并加以灵活地运用。对于一些设计难度较大的产品，这项工作最理想的是通过生产、教学、科研三方的密切结合加以完成。

在现代机械产品设计中，机电一体化设计或智能优化设计占有十分重要的地位。这是因为绝大多数现代机械设备都处在连续运转过程中，其工作速度越来越高，结构越来越复杂，尺寸越来越大（或越来越小），精度越来越高，功能越来越齐全。因此，对其自动化、网络化、数字化和智能化的程度的要求也越来越高。更具体地说，对设备在使用过程中工效是否实用、指标是否优越、运行是否稳定、动力性能是否良好、监控及诊断是否精确、操纵是否灵便、乘坐是否舒适，以及使用与运行过程是否经济等，都提出了越来越高的要求。

近半个世纪以来，由于信息技术，即多媒体技术、传感技术、集成电路技术、网络技术和光导纤维技术等得到快速的发展，并在各个部门中得到成功应用。在产品设计中采用这些高技术的多少及信息化的程度，已成为衡量某一设备技术含量高低的重要指标之一，且这一指标已引起了科学技术界和用户的高度重视和密切注意。下面将对信息技术五方面的内容作简要介绍。

### 1. 多媒体技术

多媒体技术也是人们工作中经常使用的计算机技术，这一技术已广泛应用于产品设计过程中及产品运行过程中，并成为产品设计过程中必不可少的手段之一，

如 CAD、CAPP、CAM、CAE 是产品设计和制造中强有力的手段和工具。此外，在产品中也常常附有计算机的软件和硬件，用来对产品实行操纵、监测、控制和诊断。在特殊场合，还要求产生相应的信号或图形指示，以及用来指导工作的语言等。因此，多媒体技术已成为产品研究和开发、设计和控制、决策和管理等重要的手段和“利器”。

## 2. 传感技术

传感技术是将机器工作过程中的各种信息，包括其运行中的各类参数、设备工作状态、运动学和动力学特性、控制状况、故障信息等，通过各类传感器检测，转换成实时信号（电或光等），再对实时信息通过一定的方式进行转换和处理，并输入到记录仪器或显示装置进行记录或显示。最常见的传感器是通过电和光等的度量予以表示，而其处理、储存和显示，通常是由计算机来完成的。

目前传感技术已由有线逐渐向无线，即遥测方向发展，通过无线电波进行传送。

## 3. 集成电路技术

集成电路和大规模集成电路技术是多媒体技术的核心内容，计算机都装有包含有集成电路的集成块，数控机床和机器人的控制系统通常由这些集成块所组成。有许多机器，如数字化医疗设备中常常装有软件嵌入系统。在机器工作时，这些软件将按照事先设计好的程序进行工作。这些集成电路执行对工作信息的传输、处理、储存、显示等各方面的工作任务。

## 4. 网络通信技术

网络技术已在产品设计和制造过程中得到广泛应用，如网络设计与制造、协同设计与制造、平行设计与制造、设备工作状态的检测及故障的诊断、多台设备的集中操纵、控制与管理、运行信息的集中显示、管理信息的发布和传输等，都依赖网络技术来完成。

由于网络技术的发展，上述各项工作已在全球范围内开展和实施，甚至通过无线通信可以到达遥远的宇宙空间。

## 5. 光导纤维技术

由于光导纤维技术的发明和应用，代替了以往在通信领域中一直沿用的通过电导线传输信息的传统技术。光导纤维技术的特点是：一根导线可以传输多个信息；尺寸小，质量轻；输出信号抗干扰能力强。由于这一技术具有这些优点，它的出现促进了通信技术的革命。

光导纤维技术与网络通信技术、传感技术、多媒体技术、集成电路技术等组合，形成了信息技术的核心内容，将世界带入了信息技术时代，为科学技术和经济的发展做出了重大贡献。这些技术为在设备中高度自动化、网络化、数字化和智能化的实现，提供了方便性和可能性。

信息技术的推广与应用可以在产品设计工作中及产品本身等两个方面发挥其积极作用:

1) 在机电产品设计过程中广泛采用相关的设计技术。即采用 CAE、网络设计、虚拟设计、数字化设计、智能设计等,以使产品的质量  $Q$  得以提高,成本  $C$  得以降低,设计与生产周期  $T$  得以缩短,环境保护  $E$  得以改善,售后服务  $S$  的工作量得以减轻等。

2) 机电产品本身的自动化、网络化、数字化和智能化程度得到提高。目前产品中的信息技术含量,即产品的自动化、数字化与智能化程度常常是衡量产品实用性和先进性的重要指标之一。因此,国内外科技工作者对上述问题进行了大量的研究。

机电一体化设计或智能优化设计不仅要将信息技术应用于产品设计过程中,使产品设计工作得以快速而有效的开展,而且在某些情况下可将信息技术融入产品中,使产品具有良好的功能和性能。

## 1.2 智能系统的结构与特点

智能系统是机电一体化系统中较高级别的系统,它是一种类似于人脑的具有一定智能程度的系统。智能系统对环境具有感知能力,对感知得到的信息具有记忆能力、学习能力和处理能力,以及进行逻辑推理、判断和决策的能力等,而一般的或低级的机电一体化系统缺乏上述能力。

### 1. 智能系统的结构

智能优化设计的主要目标是使产品具有优良的使用性能。具体内容是对机械产品完成四大系统的设计,即“操纵系统、监测系统、控制系统和诊断系统”的设计,其中核心内容是控制系统的设计。具体方法与手段是采用“机电一体化及智能优化”设计方法。

智能系统的核心内容是控制系统,而控制系统所采用的控制方法可分为传统控制方法和智能控制方法。传统的控制是指常规的控制方法,如 PID 控制、最优控制、自适应控制和  $H_{\infty}$  控制等。智能控制方法有模糊控制、神经网络控制和神经元控制等,其目标是使产品获得良好的使用性能。设计者要根据使用者的要求选用适当的控制方法,要考虑工作的必要性、实现的可能性和方便性、设备的经济性等诸多影响因素,而最后确定是采用传统的控制方法还是智能控制方法,并确定设备的智能化程度。一般来说,智能化设备的制造成本要比常规的设备高,甚至高得很多。从目前情况来看,如果没有特殊要求,往往采用常规或一般控制方法的设备。

智能控制系统就像人的大脑一样,它能根据工作任务和环境的变化或系统

自身情况的变化，独立地进行分析、推理、判断和决策，具有处理和适应情况变化的能力。因此智能控制系统必须具有实时监测、分析、决策和执行等能力。很明显，设计完善的且具有一定智能程度的控制系统是实现智能优化设计目标的关键。

智能优化设计的核心是智能控制，智能控制是现代科学技术发展的综合产物，具有多学科交叉的特点。为了描述这种多学科交叉的结构特点，将智能控制表达成其他相关学科的交集形式。蔡自兴提出了四元智能控制结构，把智能控制看作自动控制、人工智能、信息论和运筹学四个学科的交集，如图 1-1 所示。此结构在三元结构的基础上加入了信息论，其特点是强调了三元论中三级间的信息流通。信息在智能控制系统中的流通就像人类身体中的神经

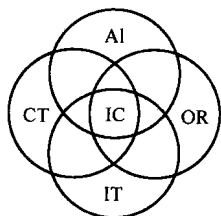


图 1-1 智能控制的四元结构

一样。智能控制也是靠信息将系统的各个部分连接起来成为一个智能整体。所以，四元结构更完整地描述了智能控制的特点，其关系用下式表示：

$$IC = AI \cap CT \cap IT \cap OR \quad (1-1)$$

其中，各子集的含义如下：

IC——智能控制 (Intelligent Control)；

AI——人工智能 (Artificial Intelligence)；

CT——控制论 (Control Theory)；

IT——信息论 (Information Theory)；

OR——运筹学 (Operation Research)；

$\cap$ ——交集。

人工智能是一个知识处理系统，具有记忆、学习、信息处理、形式语言、启发式推理等功能，让机器帮助人做那些需要具有人的智慧的工作。这些功能都是通过人工智能应用程序完成的。无论是推理、学习、决策还是规划，这些人工智能子程序都是用来模仿人类智能的某个方面。所有这些方面的人类智慧都体现于知识库的设计。知识库必须像人脑一样，具有知识更新和扩充的能力。智能控制程序还必须具有自适应性，能对系统开发者未预见的事件做出响应。人工智能程序既不同于从表中查询信息的数据库程序，也不同于按照物品类别计算销售总额的电子表格程序，还不同于用来编写和发送电子邮件的程序。所有这些程序都遵循由用户需求确定的、明确定义好的指令序列。在用传统方法编程的系统中，根据用户的要求发出指令而进行编程。而人工智能编程的系统则不是如此，虽然其程序仍然由编程人员进行编制，但实现的程序必须能够以一种高度灵活的方式，即自动地适应外部环境的变化，并予以执行。如野外自主车具有人类的智能，在前进的路上所遇到的情况是完全未知的，它必须能够

判断前面的障碍是否能够跨越、是否需要绕行，甚至需要请求人给出进一步的指令。

运筹学是近几十年发展和形成的一门新兴的应用性科学。通过运用数学方法和数学技术，研究出系统和实际问题的优化设计、决策、控制和管理的途径及策略，为决策者或控制系统的决策器提供科学决策的理论依据和实际操作的手段与方法。主要研究目的是针对所研究系统的实际需求，获得一个合理运用各种资源的最佳方案，充分发挥和提高系统的效率和效果。在智能控制系统中应用运筹学的目的是构造一个对两个以上可供抉择的实施方案作出决策。例如一个自主行走机器人系统，为了避开某一障碍物，可能有好几条路径供它选择。有的路径远，但相对省力；有的路径近一些，但相对费力。针对这种情况，就需要用到运筹学的知识，考虑对不同路径的需要消耗能量的比较。假如路径近的方案消耗能量最小，但其输出功率要求高，要考虑系统是否具有足够的功率输出能力。

控制论描述系统的动力学特性，通过前馈、反馈和各种对控制器的设计方法来改善系统性能。

无论是人工智能、控制论或系统论，都与信息论息息相关。例如，一台具有高度自主制导能力的智能机器人系统，它对环境的感受，对信息的获取、存储与处理，以及为适应各种情况而做出的决策、优化和动作等，都需要“三论”参与作用，并相互渗透。信息论的思想和观点已成为知识控制中必不可少的思维方式。图 1-2 是钱学森提出的系统科学体系图的一部分。从图可见，与系统论、控制论和运筹学一样，信息论也是系统论的重要组成部分。智能控制系统中的通信，更离不开信息论的理论指导。

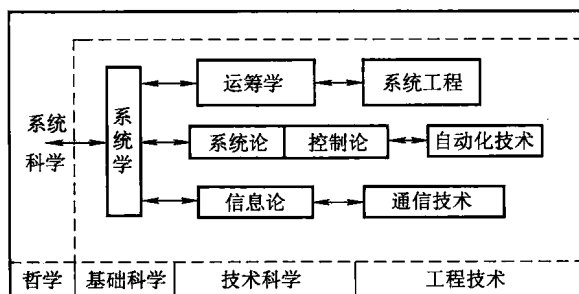


图 1-2 钱学森提出的系统科学体系图（部分）

我们根据 G. N. Saridis（美国）等人提出的分层递阶智能控制理论，将智能系统的结构用图 1-3 表示，它是由人、组织级、协调级、执行级和对象（工作环境）等五个层次级别所组成。

智能系统分层递阶结构的第一层是人。基于目前智能机器发展的程度，即

使是最高级别的智能系统，也需要人对它发出完成某项工作任务的指令。智能化级别不同，人参与的工作性质和任务量也不一样。智能化程度越低的机器，人参与的工作越具体，任务越重；而智能化程度高的机器，人只需发出高层次的指令，工作量很少。

第二层是组织级。该层的作用是针对给定的外部命令和任务，组织确定能够完成该任务的各项子任务，再将这些子任务送到下一级，即协调级。通过协调级处理，最后将具体的执行动作要求送至执行级去完成。

第三层是协调级。采用人工智能和运筹学的理论与方法，协调各个子任务的执行。协调级的任务是处理对控制器的控制和通信，即由组织级为某些特定作业给定一系列基本事件

(任务)后，应该由哪些控制器来执行任务，这些控制器工作的先后顺序应该是怎样的。协调器需要有以下功能：①通信能力。协调器具有接收和发送信息，沟通组织级与控制器之间的联系。②数据处理能力。描述组织级的命令信息和控制器的反馈信息，为协调器的决策单元提供信息。③任务处理能力。辨识要执行的任务，为相应的控制器选择合适的控制程序。④学习功能。当获得更多的执行任务经验时，减少信息处理过程，改善协调器的任务处理能力。

第四层是执行级，从控制的角度讲，该层是智能控制系统的最低层次，要求具有最高的控制精度，并由常规控制理论进行设计。智能控制是按照自上而下精确程度渐增、智能程度递减的原则进行功能分配的。

最后一层是工作对象（工作环境），智能系统的最大特点就是具有适应各种未知的工作环境和时变的工作状况的能力，所以工作对象或工作环境也是智能化系统的重要组成部分，工作对象发生变化，上面各层都会做出相应的反应和变化。

根据智能机器的智能化程度分级和智能系统的分层递阶结构，绘出一个典型的总任务级智能机器分层递阶结构图，如图 1-4 所示。

把智能化机器与人相比拟，智能化机械设备的组成又可以分成感知系统、控制系统和执行系统三部分。其中，感知系统就像人的“五官神经”，随时对系统本身以及外界环境的基本状况进行监测；控制系统好比人类的“大脑”，根据感知系统反馈回的状态信号作出决策；而执行系统却如受大脑指挥工作的“手”和“脚”，完成必要的动作。

## 2. 智能控制系统的特点

总的来说，智能控制系统具有以下特点。

1) 智能控制系统不但对自身的状态具有监测功能，而且对工作对象以及环

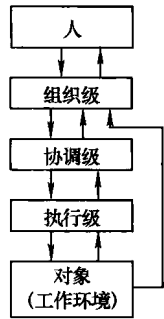


图 1-3 不同级别的智能系统的分层递阶结构



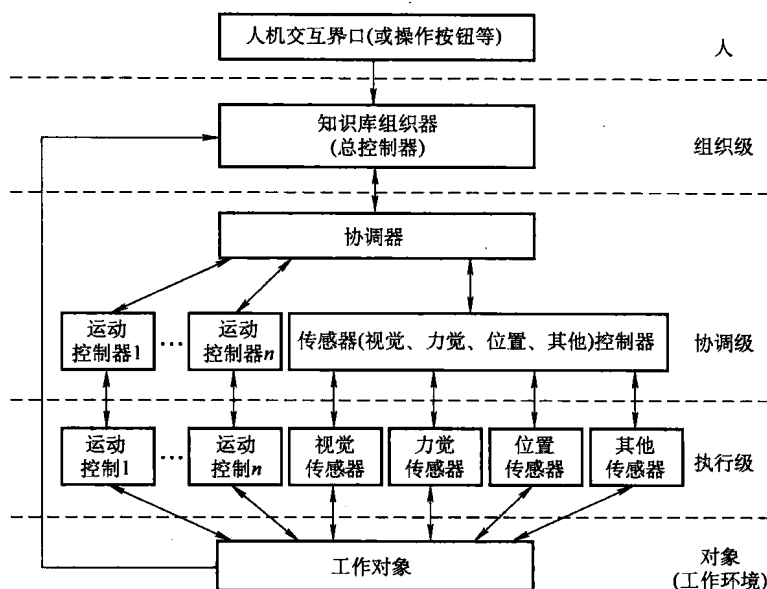


图 1-4 总任务级智能机器分层递阶结构图

境的变化具有感知功能。

为了实时地监控系统的运行状态，必须采用各种传感器。

传感器将感受的物理量、化学量等信息，按比例转换成便于测量和传输的电信号。电信号易于传输和处理，所以大多数传感器的变送器将被测信号转换成电信号输出。如电感式位移传感器能感受位移量的变化，并把它转换成相应的电压或电流信号。传感器性能好坏直接影响系统的性能，就像人的视觉和听觉不好就不能够很好的工作一样。现代传感器的输出信号除了标准的电压信号和电流信号，还有便于与计算机通信的数字信号。高档传感器常常可以由用户根据需要选择传感器的输出信号。

传感器的种类很多，分类的方法也不同。常用的分类法有两种：一种是按照传感器的用途区分，如位移传感器、力传感器、视觉传感器、触觉传感器、速度传感器、振动传感器、压力传感器、温度传感器、湿度传感器和密度传感器等；另一种分类法是按传感器的工作原理区分，如电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、电涡流式传感器、磁电式传感器、压电式传感器、光电式传感器、磁弹性式传感器、振频式传感器和电化学式传感器等。有时也常把原理和用途结合起来命名，如电感式位移传感器和电容式压力传感器等。

2) 适应各种未知环境的变化，具有智能化的逻辑判断、推理和决策的功能。

智能机器与非智能机器的根本区别就在于，当自身的结构参数和环境状态变化的时候，能否像人一样做出判断、推理和决策。这里的判断主要表现在智能机器通过智能监测系统对系统自身或环境的变化具有认知的能力；推理和决策表现在系统能灵活运用智能算法，对所发生的状况变化采取正确的应对措施。如模糊控制算法、人工神经网络控制算法以及遗传算法等，都具有对知识表示的非数学广义模型和以数学描述相结合的混合模型起有效的控制作用。智能控制系统融入人的知识和思维特性，拟人的逻辑判断、推理和决策的能力在控制中起着重要的作用。

### 3) 具有自诊断和自修复的功能。

高级的智能机器应该拥有人一样的智慧。在系统运行过程中，必须实时监测系统运行和工作的状态，具备自诊断和自修复的能力。如发现异常状况，能根据具体情况作出相应的决策。智能故障诊断系统模仿人类专家在进行故障诊断时的思维逻辑过程：观察症状→利用知识和经验推断故障→分析原因→提出对策。例如固体发动机壳体智能贴片系统，其胶片粘贴原理如图 1-5 所示。程序运行到该在压辊上放置胶片时，假如操作人员失误，没放胶片而直接选择进入下一步

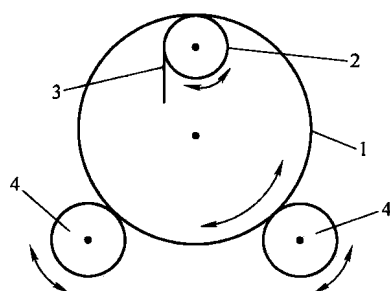


图 1-5 智能贴片系统胶片粘贴原理

1—细长壳体 2—压辊  
3—绝热胶片 4—托辊

工序，系统就马上声光报警，提示应该放胶片。再假如贴片系统在工作过程中突然断电，UPS 会马上给控制系统供电，以便能保存当前的数据。

智能优化设计对设计者有很高的要求，因为每一项产品的设计都有一项或几项关键技术。能否突破这些关键技术，在很大程度上取决于设计者本身是否有扎实的设计理论基础、是否有类似的参考资料、是否有丰富的经验以及不断创新的精神。

智能控制方法的选择主要取决于智能优化设计的目标，也就是取决于智能机器应具有的功能和性能。智能优化设计内容主要包括：工作参数智能控制与优化，工作过程智能控制与优化，状态监测和故障诊断等方面。不同的工作任务，需要考虑的侧重点也不一样。例如对于车削、铣削或磨削等各种需切削参数优化的智能系统，往往是以生产率最高、加工质量好为目标。它们的设计内容重点为工作参数智能控制与优化。再如参加表演的舞蹈机器人，它的设计重点自然是舞姿优美、动作协调等，即工作过程智能控制与优化。又如在相对恶劣的工作环境下工作的智能机器，状态监测和故障诊断一定是其设计的重点内容。