

机电一体化

系统创新设计

● 李瑞琴 著



科学出版社

www.sciencep.com

机电一体化系统创新设计

李瑞琴 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以机电一体化系统为研究对象,以创新方案的产生、表达、设计过程的计算机实现为主线,阐述了机电一体化系统概念设计阶段的创新设计理论与方法.主要内容包括机电一体化系统概念设计过程模型的建立,机电一体化系统原理方案创新方法,广义执行机构的创新设计方法,机电一体化系统概念设计的符号表达方法,机电一体化系统方案求解知识库的建立及辅助方案创新,机电一体化系统的仿真,机电一体化系统方案评价方法.最后给出机电一体化系统创新设计方法的应用实例.

本书可作为从事机械设计及理论学科研究的学者、博士生的参考用书,也可作为从事机电一体化产品设计、制造、运行的企业界科技人员的参考用书,以及高等院校机械类各专业高年级本科生和研究生的参考用书.

图书在版编目(CIP)数据

机电一体化系统创新设计/李瑞琴著. —北京:科学出版社, 2005
ISBN 7-03-014976-9

I. 机… II. 李… III. 机电一体化-系统设计 IV. TH-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第009112号

责任编辑:田士勇 祖翠娥/责任校对:曾 茹

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencecp.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年4月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2005年4月第一次印刷 印张:12 3/4

印数:1—2 000 字数:234 000

定价:30.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

机电一体化技术的迅速发展已使机电一体化产品的个性化、柔性化、智能化成为机械产品的重要发展方向.面对国际市场日益激烈的竞争,以及对知识产权的高度重视,单纯靠仿制国外产品将使企业失去市场竞争力.只有通过产品创新,才能从根本上解决企业的生存与发展问题.目前研究机电一体化系统的创新设计理论、方法和应用,已成为现代产品设计领域中的热点.

在机电一体化系统的创新设计过程中,设计方案的创新具有较高的创新层次.著者自 2000 年在上海交通大学攻读博士学位起就将这一课题作为研究方向,在导师邹慧君教授的悉心指导下,对机电一体化系统的方案创新设计理论与方法进行了系统的研究,取得了一定的成果.本书是著者近几年在这方面研究成果的集中体现.

著者认为目前机电一体化系统方案设计基本上是依赖于设计者的经验和灵感,并没有形成科学的设计方法.因此在机电一体化系统方案的创新设计中,如何从依赖于设计者的经验设计上升为遵循科学的设计理论和方法的设计是产生创新方案的关键;如何用符号的形式表达这些创新方案,并且使其具有形象、直观和易于计算机识别等特点,是制约机电一体化系统创新设计的技术难点;建立创新设计的辅助平台,实现创新方案的自动生成、评价、优化和仿真的自动化,对扩大候选方案的数目,增加所选方案的创新性具有重要意义.

本书以创新方案的产生、表达、设计过程的计算机实现为主线,提出了以下一些学术观点:

第 1 章综述了机电一体化系统及其设计理论的发展历史和研究现状,由此归纳出机电一体化系统创新设计需解决的关键技术问题;第 2 章提出了机电一体化系统概念设计的过程模型,明确了机电一体化系统的三个子系统的组成、特征,提出了三个子系统集成与融合的若干原则,为机电一体化概念设计提供了理论框架;第 3 章提出了基于 F-P-A-M 求解模型的机电一体化系统原理方案的创新方法,提出了基于功能分析的三个子系统的原理方案的创新思维方法,具有可操作性,解决了多个原理解模块的接口匹配问题,给出了易于操作的基于实例—原理—新原理—新实例的原理方案求解步骤;第 4 章对机电一体化系统的重要组成部分广义执行机构进行了分类研究,提出了广义执行机构的创新设计方法;第 5 章提出了一种新的机电一体化系统设计方案的符号表达方法及其计算机化的生成规则,该表达方法可与知识库相连,为计算机辅助方案创新设计提供有效手段;第 6 章提出了

机电一体化系统方案求解知识库的构成体系,解决了基本运动功能与载体的多对多的关系,窗体互动及方案自动生成等关键技术问题,开发出了机电一体化系统方案求解知识库;第7章对机电一体化系统的仿真技术进行研究,建立了机电一体化控制系统及执行机构系统的仿真模型;第8章提出了机电一体化系统方案评价的多层次、多目标的评价指标,提出了基于图论工具的三环路法,解决了AHP法中存在的一致性问题,提出了网状图评价法,解决了在综合权值相同情况下的方案优劣排序问题;第9章结合新型家用多功能绣花机等典型机电一体化系统进行了实际应用。

本书的研究成果还得益于上海机床厂周勤之院士,上海交通大学蔡建国教授、冯正进教授,同济大学王玉新教授,大连理工大学王德伦教授等多位专家近几年的悉心指导。在此著者向导师及各位专家表示衷心的感谢!

由于著者学术水平有限,一些学术观点的不妥之处恳请专家、学者指正。书中文法的欠妥之处,恳请读者指正。

本书承蒙山西省自然科学基金项目资助(项目编号:20041070)。

李瑞琴

2005年元月于中北大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 机电一体化系统设计理论的发展	1
1.1.1 机电一体化系统的发展过程	1
1.1.2 机电一体化系统设计理论发展的两个阶段	2
§ 1.2 概念设计理论的发展	4
1.2.1 概念设计的新含义	4
1.2.2 概念设计过程的两个阶段	6
1.2.3 方案设计与概念设计、创新设计及系统设计之间的关系模型	6
1.2.4 现有的概念设计理论与方法综述	7
§ 1.3 机电一体化系统概念设计的研究现状	10
1.3.1 国外研究现状	11
1.3.2 国内研究现状	12
§ 1.4 机电一体化系统创新设计需解决的问题	14
1.4.1 创新方案的产生	14
1.4.2 创新方案的表达	14
1.4.3 创新设计过程的计算机实现	15
第 2 章 机电一体化系统概念设计过程模型的建立	16
§ 2.1 机电一体化系统的特征、结构组成与理论基础	16
2.1.1 机电一体化系统的内涵	16
2.1.2 机电一体化系统的结构组成	17
§ 2.2 广义执行机构子系统的基本特性	19
2.2.1 广义执行机构子系统	19
2.2.2 广义执行机构的种类	20
2.2.3 驱动元件的机械特性和基本特点	21
2.2.4 驱动元件与执行机构的匹配	22
2.2.5 广义执行机构的运动方程式	23
§ 2.3 传感检测子系统的基本特性及设计原则	24
2.3.1 传感检测子系统的基本特性	24
2.3.2 传感器的分类与基本要求	24

2.3.3 传感器与微机的接口	27
2.3.4 传感检测子系统的设计原则	27
§ 2.4 信息处理与控制子系统的基本特性及设计过程	27
2.4.1 信息处理与控制子系统的基本特性	27
2.4.2 信息处理与控制子系统的基本构成	27
2.4.3 信息处理与控制子系统的设计过程	28
§ 2.5 三子系统的集成与融合原则	30
2.5.1 广义执行机构的集成与融合	30
2.5.2 多传感器集成与信息融合系统	30
2.5.3 控制器系统设计原理	35
§ 2.6 机电一体化系统概念设计的过程模型	36
第3章 机电一体化系统原理方案创新方法	40
§ 3.1 原理方案设计的含义及研究现状	40
3.1.1 原理方案设计的含义	40
3.1.2 原理方案设计的研​​究现状	40
§ 3.2 F-P-A-M 原理方案求解模型	41
§ 3.3 基于功能分析的原理方案创新方法	44
§ 3.4 多个原理解模块间的接口匹配策略	47
3.4.1 机电一体化系统原理解的特征模型	47
3.4.2 机电一体化系统原理求解策略	48
§ 3.5 基于实例的原理方案的创新方法	54
第4章 广义执行机构的创新设计方法	58
§ 4.1 广义执行机构的设计理论和方法	58
4.1.1 广义执行机构的运动学	58
4.1.2 广义执行机构的动力学	59
§ 4.2 可控执行机构的分类研究	59
4.2.1 可控执行机构的概念	59
4.2.2 可控执行机构的分类	59
§ 4.3 驱动元件与执行机构的集成	63
4.3.1 驱动元件与执行机构集成系统的数学模型	64
4.3.2 驱动元件与执行机构集成系统的稳态分析	65
§ 4.4 广义执行机构的方案创新	66
4.4.1 工艺动作及其描述	67
4.4.2 动作分组	69
4.4.3 动作结构变型方案创新法	71

第5章 机电一体化系统概念设计的符号表达方法	83
§ 5.1 机电一体化系统的方案表达现状	83
§ 5.2 机电一体化系统的三个子系统的功能模型	83
§ 5.3 广义执行机构子系统的符号表达	84
5.3.1 能量流的标准化	84
5.3.2 输入输出运动功能及运动关系的符号表达	84
5.3.3 广义执行运动功能的符号表达	86
5.3.4 广义执行运动功能的特征属性	87
§ 5.4 传感检测子系统的符号表达	88
§ 5.5 信息处理与控制子系统的符号表达	89
§ 5.6 机电一体化系统功能关系的符号表达	89
5.6.1 三子系统的集成与融合的符号表达	89
5.6.2 功能元之间的相互作用关系的符号表达	90
5.6.3 多个功能元之间的逻辑推理关系	91
5.6.4 功能元产生的有效力与有害效力的符号表达	92
§ 5.7 机电一体化系统方案符号表达的构思规则	92
§ 5.8 机电一体化系统方案表达实例研究	93
5.8.1 实例1:多功能缝纫机方案的符号表达	93
5.8.2 实例2:数控机床方案的符号表达	96
第6章 机电一体化系统方案求解知识库的建立及辅助方案创新	99
§ 6.1 机电一体化系统方案求解知识库的研究现状	99
§ 6.2 机电一体化系统方案求解知识库的总体设计	100
6.2.1 功能元模块求解法	100
6.2.2 机电一体化系统方案求解知识库的构成体系	100
6.2.3 机电一体化系统方案求解知识库应用程序开发方法的选取	100
6.2.4 机电一体化系统方案求解知识库应用程序开发工具的选择	102
§ 6.3 驱动元件库的建立	103
§ 6.4 基本运动功能载体库的建立	104
6.4.1 基本运动功能的分类及其功能特征属性提取	104
6.4.2 基本运动功能载体库的模型	105
6.4.3 基本运动功能载体库的软件实现	106
6.4.4 应用实例研究	106
6.4.5 基本运动功能载体库的特点	108
§ 6.5 传感检测功能载体库的建立	108
6.5.1 传感检测功能载体库的关系结构	108

6.5.2 传感检测功能载体库	108
§ 6.6 计算机辅助机电一体化系统方案的自动生成	109
§ 6.7 机电一体化系统方案求解知识库中关键技术的研究	112
第 7 章 机电一体化系统的仿真	116
§ 7.1 机电一体化系统仿真的意义及仿真软件的选择	116
7.1.1 仿真在概念设计中的作用	116
7.1.2 仿真软件的选择	117
7.1.3 机电一体化系统仿真模型的研究	118
§ 7.2 机电一体化控制系统的仿真	123
7.2.1 机电一体化控制系统的模型特征	123
7.2.2 控制器设计原理与设计规则	125
7.2.3 控制器的控制方案求解	129
§ 7.3 广义执行机构系统的仿真模型	133
7.3.1 驱动元件和执行件集成的广义执行机构库	133
7.3.2 传感器库	134
7.3.3 多功能缝纫机横针机构仿真研究	135
§ 7.4 仿真模型的接口技术	138
7.4.1 面向对象的接口	138
7.4.2 接口类型	139
7.4.3 接口向方框图模型的转换	140
§ 7.5 仿真实例	141
第 8 章 机电一体化系统方案评价方法	145
§ 8.1 概念设计评价方法概述	145
§ 8.2 机电一体化系统方案评价指标的层次结构	145
§ 8.3 基于图论的 AHP 方法中的一致性问题的解决	147
8.3.1 特征矢量法与有向图的对应关系	148
8.3.2 三环路法	149
8.3.3 临界不一致指标值	150
8.3.4 对判断矩阵的一致性影响最大的项	151
8.3.5 不一致度	151
8.3.6 实例研究	152
§ 8.4 网状图方案评价方法	157
§ 8.5 实例研究	158
8.5.1 实例 1	158
8.5.2 实例 2	162

第9章 方案创新设计应用研究	166
§ 9.1 引言	166
§ 9.2 家用多功能缝纫机的常规设计方法及缺陷	167
§ 9.3 新型家用绣花机的系统方案设计	167
9.3.1 新型家用绣花机的功能设计及工艺动作过程构思	167
9.3.2 新型家用绣花机系统的方案设计及符号表达	168
§ 9.4 新型家用绣花机的新设计方案	170
9.4.1 新型家用绣花机设计方案的自动生成	170
9.4.2 关键功能模块的方案设计及动态仿真	170
9.4.3 新型家用绣花机系统的动态仿真	174
9.4.4 实验样机的试制	174
参考文献	177
附录 A	186
附录 B	189

第1章 绪 论

随着机电一体化技术的迅速发展,相应的机电一体化产品的个性化、柔性化、智能化已成为机械产品的重要发展方向。面对国际市场日益激烈的竞争,以及对知识产权的高度重视,单纯靠吸收与仿制国外产品将使企业失去市场竞争力。只有通过产品创新,才能从根本上解决企业的生存与发展问题。研究机电一体化系统的创新设计理论、方法和应用,是关系到我国能否以自主知识产权的产品跨入世界制造业先进行列的关键。

机电一体化系统的创新设计过程中,概念设计阶段设计方案的创新是原创性程度较高的创新。而现行的机电一体化系统方案创新设计基本上依赖于设计者的经验和设计理念,并没有形成科学的设计方法。因此机电一体化系统方案的创新设计中,如何从依赖于设计者的经验设计变成遵循科学的设计理论和方法的设计是产生创新方案的关键。机电一体化系统方案创新设计作为概念设计的重要内容,其理论与方法的研究已引起国际上的重视。

§ 1.1 机电一体化系统设计理论的发展

1.1.1 机电一体化系统的发展过程

自 1971 年日本学者首次提出机电一体化 (mechatronics) 这一概念以来,机电一体化技术经历了 30 多年的发展,其内涵随科技的发展不断更新。20 世纪 70 年代,主要是指机械与电子的简单结合。机电一体化产品也较简单,主要涉及高性能的伺服技术,如自动售货机、自动相机等。在 80 年代,高性能微处理器的出现立即在机电一体化产品中得到应用,大大提高了机电一体化产品的自动化、智能化程度,改善了产品性能。数控机床、工业机器人等是那个时代的典型机电一体化产品。进入 90 年代,计算机网络和通讯技术的迅速发展,使机电一体化系统向着智能化和自动化方向发展。此时,机电一体化已不只是机械装置和电子装置的简单组合,而是机械、电子、控制、光学、信息和计算机等技术的相互交叉和融合。机电一体化产品也更加多样化,应用更加广泛。

21 世纪的机电一体化系统,其输出柔性、运动学与动力学性能能在更高层次上较好地满足人们对产品功能的需求。机电一体化系统设计涉及的学科门类及其应用的深度和广度在不断增加,如需综合运用机械工程、控制系统、电子技

术、计算机技术和人工智能等多种技术. 现代科技的发展对机电一体化系统的发展起着巨大的推动作用, 其中对机电一体化系统影响较大的科技发展有以下五大类: ①微处理器、微控制器及数字信号处理 (DSP) 性能的提高, 增强了机电一体化系统的数据处理能力; ②网络通讯技术的问世使机电一体化系统可实现异地协调设计、异地操作控制等, 如远程控制的自动售货机; ③实时操作系统的发展, 简化并促进了机电一体化系统的时间、空间及资源管理; ④自动控制系统设计、快速原型设计以及软件设计和调试的各种计算机辅助工具的出现, 极大地提高了机电一体化系统的设计能力; ⑤现代机构学的发展, 使得机电一体化系统能利用广义执行机构更好地满足预定的可控运动行为.

1.1.2 机电一体化系统设计理论发展的两个阶段

设计理论与方法对于指导产品设计具有重要作用. 前苏联学者阿切尔康的巨著《机械零件设计》指导了几代人的设计工作, 使机械设计理论化、规范化. 美国学者铁木辛科的巨著《材料力学》也影响了几代人, 奠定了强度设计的基础. 同理, 机电一体化系统设计理论与方法无疑对机电一体化系统设计起重要的指导作用.

机电一体化系统的设计理论与方法随着科技的发展在不断地发展, 较为明显的发展过程可分为以下两个阶段:

20 世纪 90 年代前半期开始, 机电一体化系统设计主要指设计参数的产生与优化, 系统性能及行为的仿真. 各种系统化的设计理论与方法发展迅速, 其实用化程度在不断提高, 各国学者开始从系统的观点和运筹学的角度来研究机电一体化系统. 所涉及的设计理论主要有: ①整体最优化理论. 机电一体化技术要求从系统的观点出发, 综合机械技术、电子技术、信息技术等, 实现整体最优化. 这里强调“整体最优化”, 正是运筹学思想在机电一体化技术中的体现. ②智能化设计理论. 这是机电一体化技术与传统机械自动化技术的主要区别之一, 也是 21 世纪机电一体化技术发展的主要方向之一. ③柔性化设计理论. 由于使用了微电子技术, 可以而且应当尽量用软件功能代替硬件功能. 因为“软化”可以使机电一体化系统近乎完全“贴近”实际情况的需要, 极大地提高产品的性能. 例如, 加工中心机床、汽车的防抱死装置等都广泛地采用了软件控制原理. ④网络化设计理论. 90 年代以来, 计算机技术的突出成就就是网络技术. 由于网络的普及, 基于网络的各种远程控制和监视技术方兴未艾, 而远程控制的终端设备本身就是机电一体化产品. ⑤融合原理. 指产品的各个部分的相互集成与融合. ⑥可靠性原理等.

这些设计理论的应用, 使得整个机电一体化系统的整体性能得到了极大的提高. 但这些设计理论均是针对某些具体指标完成产品局部设计环节的设计理论和

方法。由于机电一体化系统设计的复杂性,单独应用这些设计理论和方法,虽然可以对机电一体化系统的原始创新起到一定的作用,但也易于达到设计的极限,创新的空间有限。

20世纪90年代后半期以来,随着全球经济一体化和中国履行加入WTO的相关承诺,要求我国机电一体化系统必须不断创新,以自主知识产权的产品参与国际市场的竞争。机电一体化产品设计方案的新颖性和创造性程度是反映我国机电一体化产品竞争力的关键,也是企业赖以生存的关键。在方案设计阶段出现的任何缺陷,都很难用后续的优良的细化设计来弥补。因此,产品竞争开始加速由生产阶段前移至概念设计阶段。对机电一体化系统的研究重点也从详细设计阶段、改进设计阶段前移至概念设计阶段。目前对机电一体化系统概念设计阶段的研究已成为国内外学者的研究热点。现有的一般工程领域的概念设计理论等均是针对一般的工程设计领域,或者由多个学科简单组合的工程产品设计,且多为比较抽象的原理,并不适合于机电一体化系统概念设计。探求一套适合机电一体化系统特点的概念设计的理论与方法成为机电一体化系统创新设计的关键。有关对机电一体化系统的新认识及其结构划分也从概念设计的角度进行。

机电一体化系统在物理上的组成方式和逻辑上的构成方式将直接影响到该类系统的设计方法和设计过程。在物理组成上,机电一体化系统总要包含机械结构(structure)、运动系统(motion system)、控制器(controller)、机电接口、驱动器(driver)、制动器(actuator)、计算机等很多机械、电子零部件。物理组成往往显得零乱、琐碎,掩盖了产品的设计思想。因此,物理组成必须抽象为逻辑构成,才可能明确地反映出产品的运行原理和设计思想。

在逻辑构成上,各国不同研究背景的学者有不同的认识。

①德国Darmstadt大学的学者Rolf Isermann^[34]提出机电一体化系统是由控制功能、动力功能、传感检测功能、操作功能和构造功能五大功能模块组成。将机电一体化系统通俗地类比于人的大脑、内脏、五官、四肢及躯体。②丹麦理工大学的学者Jacob Burr^[13]提出机械、电子、软件三个相关圆环,以此表示机电一体化系统的组成和相互关联。“三环论”中,电子含义比较含糊,软件是指实现信息处理和控制的程序。③挪威科技大学的学者Bassam A. Hussein^[44]将机电一体化系统划分为物理系统与控制系统两大子系统。物理系统包括各种驱动装置、执行机构、传感器等,控制系统包括软、硬件。④上海交通大学邹慧君教授^[4]将机电一体化系统划分为广义执行机构子系统、传感检测子系统、信息处理及控制子系统“三子系统”,其中广义执行机构子系统实现机电一体化系统执行运动的核心功能,其他两个子系统起辅助作用。

以上四种对机电一体化系统逻辑结构构成的讨论,对进一步认识机电一体化系统的深刻内涵,进行机电一体化系统的概念设计起到了积极的作用。作者^[1,2]

认为对机电一体化系统逻辑构成的讨论应该有助于这类产品的设计,尤其是概念设计.从概念设计的角度考虑,对机电一体化系统的逻辑构成而不是物理组成的讨论显得更有意义,而且将一个系统划分为各个互相联系的子系统,所划分出的子系统之间的联系越简单越好.按照这种观点来衡量,按功能,将机电一体化系统的组成划分为“三子系统”更合适,即广义执行机构子系统、传感检测子系统和信息处理及控制子系统.三子系统论可以使我们有对机电一体化系统按功能进行树状分解,分别寻求各自的功能载体,通过集成、优化来得到机电一体化系统的概念设计的最佳方案.三子系统中的广义执行机构子系统,突出了机电一体化系统中的机械主体地位,又体现了这种机构的可控性特点.这一概念的提出,有利于设计者应用系统设计的原理和方法进行机电一体化系统的创新设计.目前,对传感检测子系统和控制子系统的研究较多,理论上也较成熟,而对直接完成工艺动作功能的广义执行机构子系统的研究却不够深入,目前处于迅速发展阶段.

§ 1.2 概念设计理论的发展

研究表明:产品的概念设计决定了其成本的 60%~80%,是实现产品创新的关键.因此,对产品的概念设计理论与方法的研究,得到了国内外学者的极大关注,并成为近年来学术研究的热点.人们逐渐认识到概念设计是产品设计中最重要的、最复杂、也是最富有创造性的阶段,是一个从无到有、从上到下、从模糊到清晰、从抽象到具体的过程.特别是近几年来,随着计算机图形学、网络技术、软件技术的发展和 CAD/CAM 的应用的深入,产品概念设计的研究有了新的进展.

1.2.1 概念设计的新含义

1974 年英国学者 M. J. French^[17]首次对概念设计做了系统阐述,提出“概念设计就是确定设计任务和用简图形式表达的广义解”.这里广义解是指设计问题的一个求解轮廓,包含原理方案的空间或结构关系,可确定产品大致的成本、重量或总体尺寸以及在目前环境下的可行性等信息.

1984 年德国学者 Pahl 和 Beitz^[18]从设计方法学的角度将产品的设计过程划分为明确任务、概念设计、具体设计和详细设计四个阶段,并将概念设计定义为“概念设计是在确定任务之后,通过抽象化,拟定功能结构,寻求适当的作用原理及其组合等,确定出基本求解途径,得出求解方案.”

20 多年来,随着对概念设计研究的深化,概念设计的内涵又有新发展.我国学者邹慧君教授^[3~5]在 French, Pahl 和 Beitz 研究工作的基础上,根据机电一

体化系统中广义执行机构的特点, 将产品的设计过程划分为产品规划、概念设计、详细设计和改进设计四个阶段, 并给出了概念设计定义: “概念设计是根据产品生命周期各个阶段的要求, 进行产品功能创造、功能分解以及功能和子功能的结构设计, 进行满足功能和结构要求的工作原理理解和实现功能结构的工作原理载体方案的构思和系统化设计。”

这些关于概念设计的描述虽然有差异, 但实质是相同的, 概念设计的最终结果是设计方案。概念设计具有的主要特性有:

1) 创新性

创新是概念设计的灵魂。概念设计的创新是多层次的, 如从结构修改、结构替换的低层次创新活动到工作原理更换、功能修改或增加等高层次的创新活动都属于概念设计的创新范畴。在众多设计路径所产生的设计结果中, 将产生一组可行的新方案。

2) 多目标性

设计是在多种因素的限制和约束下进行的, 其中包括科学、技术、经济等发展状况和水平的限制, 也包括生产厂家所提出的特定的要求和条件, 同时还涉及环境、社会等因素。这些限制和要求构成了一组边界条件, 形成了设计师进行构思的“设计空间”。只有满足这些约束目标, 才可能得到可行解。

3) 多样性

概念设计的多样性主要体现在其设计路径的多样化。不同的功能定义和功能分解会产生完全不同的设计思路和方法, 从而在功能载体的设计上产生完全不同的求解方案。根据 Douglas 的研究, 对于一个复杂程度一般的机电一体化系统设计问题, 大约存在 $10^4 \sim 10^9$ 种设计方案。

4) 层次性

概念设计是一个从抽象到具体的信息进化过程。一方面, 概念设计分别作用于功能层和载体结构层, 并完成由功能层向结构层的映射。如功能定义、功能分解作用于功能层上, 而结构修改、结构变异则作用于结构层, 由映射关系将两层连接起来。另一方面, 在功能层和结构层中也存在自身的层次关系。例如, 功能分解就是将功能从一个层次向下一个层次推进。功能的层次性也就决定了结构的层次性, 不同层次的功能对应不同层次的结构。

5) 不良结构性

概念设计信息的不完整、不一致、不精确甚至是模糊的特性, 使得难以对该阶段进行准确定量描述, 导致了从问题空间到解空间的映射求解过程的不良结构问题。

6) 反复迭代性

在方案求解的每个过程中, 都是由多个子循环, 即综合、分析和评价组成,

各个子循环多次迭代的结果得到一个全局满意解。

为更好地体现概念设计的创新性、多样性和层次性,作者定义概念设计如下:“概念设计是对市场需求逐渐理解后,确定设计理念、实现广义功能,求得用简图符号形式表达的多种可行方案,选择综合最优方案的设计前期工作过程。”

1.2.2 概念设计过程的两个阶段

概念设计的全过程可划分为前期的设计理念的确定与后期的原理设计及具体的方案设计两大阶段。

设计理念的确定是概念设计的前期阶段,即根据市场需求和机器功用进行设计思想和设计理念的构想。这一阶段属于“形象思维阶段”,但对概念设计十分重要,是概念设计中创新层次最高的一个设计阶段。创新的火花往往产生于这一阶段。这一阶段的设计目前更多的是借助于设计人员的创新思维能力、知识与经验的发挥,缺乏针对这一阶段的程式化的设计理论的研究。

原理设计及方案设计是概念设计的后期阶段,这一阶段属于逻辑思维阶段,其中原理设计是方案设计的核心,方案设计是原理设计的具体化。目前对机械系统方案设计阶段的设计理论与方法的研究较多。

1.2.3 方案设计与概念设计、创新设计及系统设计之间的关系模型

1. 方案设计

由1.2.2节知,方案设计是概念设计的后期阶段,是在设计师的理念、设计思想、设计灵感及设计经验充分发挥的前提下,进行具体组成和功能结果的方案设计。设计方案是概念设计的结果的表现形式。

2. 创新设计

创新设计是通过创新思维、运用创新设计理论和方法设计出原理新颖、结构独特、性能优良、工作高效的新机器。创新设计贯穿于产品设计的各个阶段,而创新性表现最为集中、最为突出的阶段是概念设计阶段。实践表明:产品创新主要来自概念设计阶段所涉及的功能、原理、形态、布局 and 结构等方面的创新。从产品创新的角度看,概念设计过程本质上就是一个产品的创新过程。

3. 系统设计

系统设计是将工程设计任务或机电一体化系统看作一个技术系统,把它作为一个整体的系统来研究。从系统出发分析各组成部分之间的有机联系及系统与外界环境的关系,是方案设计中重要的理论方法。系统设计方法主要有功能分析法、结构方案变形法等。

4. 方案设计与概念设计、创新设计及系统设计之间的关系

概念设计是从产品开发需求到设计方案的映射过程，是工程设计中一个很重要的阶段。而根据设计过程有没有加入新的知识、属性、方法，可将设计分为常规设计（没有加入新的知识、属性、方法，属性的类型也不改变，而仅改变属性值），变形设计（没有加入新的知识，但其属性和方法则不完全相同）和创新设计（设计之前没有先验知识，也没有既定的方法）。事实上，创新设计贯穿于设计过程的各个阶段，而概念设计阶段具有较高的创新层次。系统设计则是一个具体方法的体现。方案设计与概念设计、创新设计及系统设计之间的关系模型如图 1-1 所示，这一关系模型有助于提高对设计方法论的认识。

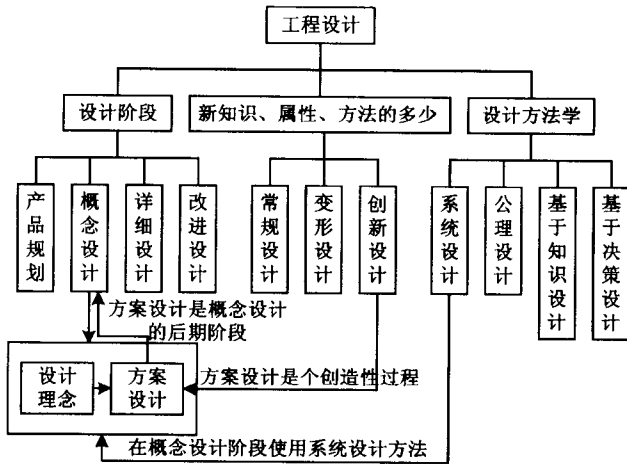


图 1-1 方案设计与概念设计、创新设计及系统设计之间的关系模型

1.2.4 现有的概念设计理论与方法综述

目前较为成熟的概念设计阶段的理论与方法主要有以下几种：①功能方法树方法；②Pahl 和 Beitz 系统设计学；③公理化设计理论；④形态学矩阵法；⑤TRIZ理论；⑥设计目录法；⑦QFD 质量功能配置；⑧键合图法；⑨机械系统设计原理。

下面简要论述这些设计理论与方法：

1) 功能方法树方法 (function-means tree method)

功能方法树是产生多个设计方案的简单实用的方法。功能方法树的建立过程是从确定总功能开始，然后采用自顶向下的方法逐层分解，一直到最底层的方法