

于靖军 裴旭 宗光华 著

机械装置的 图谱化创新设计

Graphical Approach to
Creative Design of Mechanical Devices



科学出版社

机械装置的图谱化创新设计

Graphical Approach to Creative Design of Mechanical Devices

于靖军 裴旭 宗光华 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

构型是机械装置及装备创新的原始基础。受传统图谱法在平面机构及并联机构运动综合中成功应用的启发,本书建立了一套适用于复杂机构及装备的图谱化构型设计方法。通过将抽象思维与形象思维相结合,以期为工程师提供一种简单实用的创新设计手段。

全书共8章。第1章为绪论;第2章为图谱法的萌芽,定义了自由度线和约束线、自由度线图 and 约束线图、线图等效和冗余等基本概念,导出了自由度线与约束线之间的 Blanding 法则;第3章将 Blanding 法则纳入线几何的理论框架下,进一步推演出自由度与约束之间的广义 Blanding 法则;第4章主要讨论如何利用广义 Blanding 法则实现机械装置的构型设计;第5章是对第3章理论基础的深入扩展,即进一步将图谱法纳入旋量理论的框架内;第6章枚举性地给出了一些典型机械装置(包括经典机构等)的自由度 & 约束线图;第7章对并/混联装置的图谱法创新设计问题进行了深入讨论;第8章对当前国际机构学领域十分热门的柔性机构及其图谱化创新设计问题进行了详细阐述。

本书可作为高等院校机械工程及其相关专业研究生和高年级本科生的教材,也可作为相关领域科研人员的参考用书,尤其可供有关工程设计及技术人员自学使用。

图书在版编目(CIP)数据

机械装置的图谱化创新设计=Graphical Approach to Creative Design of Mechanical Devices/于靖军,裴旭,宗光华著. —北京:科学出版社,2014
ISBN 978-7-03-039912-0

I. ①机… II. ①于… ②裴… ③宗… III. ①机械设计-图谱-研究
IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 038642 号

责任编辑:裴 育 / 责任校对:陈玉凤
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014年3月第一次印刷 印张:24

字数:471 000

定价:95.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

增强自主创新特别是原始创新能力是 21 世纪科学技术发展的战略基点。机械产品设计过程中最能体现原始创新能力的阶段在于概念设计阶段,原始创新往往出现于此。当前,以机器人、数控机床为代表的现代机械装置与装备正在向高速、高加速、高精度、智能化、可重构等方向发展。现代制造业的飞速发展同时也为机械装置的原始创新提供了空前机遇。为满足机械装备或产品向“重大精尖”和“微小精密”等方向发展的需求,机械装置更是不断地推陈出新,具有并联、柔性、变胞等特征的各类新型机械装置正是在这样的背景下应运而生。

构型是机械装置及装备创新的原始基础,构型创新是自主创新的根本。作为构型创新的主要手段之一,构型方法研究已成为现代机构学的热点和难点。而创新设计方法的丰富与完善则大大提高了机构构型的种类与品质。因此,有关机械装置创新设计方法的研究对于提高机械产品的自主设计与创新有着十分重要的意义。

近年来,在平面、并联、柔性等研究方向,先后涌现出了多种构型综合方法,但多建立在复杂的数学工具或符号基础之上,对工程师及初学者而言掌握起来比较困难。在此背景下,建立简单实用的复杂机构创新技法及手段具有重要的学科发展和工程应用意义。

正当机构学者研究构型综合理论与方法如火如荼之际,2008 年,作者在一次偶然的机会看到了美国柯达公司工程师 Blanding 所著的 *Exact Constraint: Machine Design Using Kinematic Principle* 一书以及 MIT 硕士生 Hopkins 的学位论文 *Design of Parallel Flexure System via Freedom and Constraint Topologies (FACT)*,发现旋量的几何特性可能带给构型设计某种便捷性。

如 *Exact Constraint: Machine Design Using Kinematic Principle* 的前言所述,“通过全面系统地探索那些历史悠久但有些抽象晦涩的运动学设计原理,读者可以从中获取一组独特而功能强大的法则和技巧。所有技巧的核心在于约束线图分析法则的运用。该方法可将机械连接的约束及自由度用一组空间线图来表示,以达到可视化的目的。任何机械装置中都可找到这类线图。一旦学会识别机器中的这些线图,机械设计工程师就能以全新的视角来了解机器的工作原理。这些原理集成在一起,就是精确约束设计原理。它将让设计者对机器的性能产生更为深层的理解,从而有助于设计者更容易地设计质优价廉的新装置”。为了规避晦涩难懂的数学理论及数学公式,该书提供了一套简单规则。优点于此,缺点亦然。无论在线图表达还是多样性设计方面该书仍存在几多不足。Hopkins 认识到了旋量理论与精确约束设计原理之间存在相关性,于是在引进 Blanding 线图表达的同时,

着手开展旋量系几何图谱化的研究,提出了自由度与约束拓扑综合(FACT)方法,并将其用在柔性设计中。然而,Hopkins 在整个研究中均未考虑 FACT 在刚性机构中的潜在作用。

受传统图谱法在平面机构及并联机构运动综合中成功应用的启发,结合旋量理论特有的代数几何双重特性,在 Blanding、Hopkins 等的前期研究成果基础上,作者近年来系统开展了图谱化的机械装置创新设计方法研究,建立了一套同时适用于刚性、柔性复杂机构及装备的构型设计方法;通过将抽象思维与形象思维相结合,以期为工程师和初学者提供一种简单实用的创新设计手段。

五年来,无论作者本人还是指导的博士、硕士研究生都在尝试将图谱法用于柔性、刚性机构的构型设计与分析中,确实受益颇多。一次与裴旭的讨论中产生了写本书的想法,希望使 Blanding、Hopkins 等的研究在理论上更加严谨,在应用上进一步拓展,使这种方法给更多人有益的启示。

作者撰写本书的目的就是将有关机器设计的运动学法则与技巧和数学工具(旋量理论)融合在一起,形成一本让科研人员和处于工程实践第一线的工程师都能受益的系统实用教程,将一种可视化的创新设计方法应用到解决机械概念设计问题的方方面面。

在对图谱法的阐述过程中,本书首先介绍基本概念,然后在这些基本概念的基础上提出设计原理、法则与方法,辅以由浅入深的数学解释和大家所熟悉的硬件实例。此举希望将抽象的概念变得更加形象具体。另外,尽管书中包含大量经典的机械装置实例,但并不是一本充斥着机构及机械装置的图册。为便于读者迅速掌握本书的方法,作者还可提供一组模块化可重构的柔性教具,有意使用者,可与作者联系。这里只有一个目的:更加形象地阐述一种简单实用的创新设计方法——图谱法。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金(51175010,51175011,51275552,51305007)、教育部博士点基金(20111102130004)、高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资金以及北京航空航天大学研究生精品课程建设项目的资助。感谢清华大学刘辛军教授和谢富贵博士,北京航空航天大学贾明博士以及李守忠、吴杭、东昕、李伟、李振国、旷静、余家柱、陆登峰等博士、硕士研究生对本书成果作出的贡献。同时,对参与本书部分内容研究的国际学者戴建生教授、Hopkins 教授、苏海军教授以及孔宪文博士等致以由衷的敬意!

本书的出版得到了科学出版社的大力支持,在此表示诚挚的谢意。

由于作者的水平有限,书中难免有疏虞之处,敬请读者和专家批评指正。

于靖军

jjyu@buaa.edu.cn

2013年10月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 创新设计	1
1.2 基本概念	5
1.2.1 机械装置的基本组成元素:构件与运动副	5
1.2.2 运动链、结构与机构	9
1.2.3 机械装置的简化表达	10
1.2.4 自由度与约束	11
1.2.5 结构分析与结构综合	11
1.3 典型的机械装置	12
1.4* 几种常用创新设计方法的比较	16
1.5 本书内容	20
参考文献	21
第 2 章 图谱法的雏形——精确约束设计原理	24
2.1 自由度线与约束线	24
2.1.1 自由度线	25
2.1.2 约束线	25
2.1.3 自由度(或约束)线图	27
2.2 自由度(约束)的等效线	28
2.3 冗余线	35
2.4 自由度线图与约束线图之间的对偶关系——图谱法的萌芽	39
2.5 基于图谱法的瞬时自由度分析	46
2.5.1 自由度计算的基本公式	46
2.5.2 自由度分析的图谱法	47
2.5.3 实例分析	49
2.6 本章小结	53
参考文献	54
第 3 章 线图分析法的数学基础	55
3.1 自由度线与约束线的数学描述	55
3.1.1 直线与 Plücker 坐标	55

3.1.2 偶量与 Plücker 坐标	57
3.1.3 直线与偶量的物理意义	58
3.2 自由度线与约束线之间对偶关系的数学描述	60
3.2.1 两直线的互易积	60
3.2.2 直线与偶量的互易积	61
3.2.3 两偶量的互易积	61
3.3 自由度(约束)线图的数学描述	62
3.3.1 线集、线簇及分类	62
3.3.2 不同几何条件下的线集相关性判别	64
3.3.3 线空间	72
3.3.4 偶量空间	77
3.3.5 自由度(或约束)等效线的数学解释	79
3.3.6 子空间	83
3.4 自由度线图与其对偶约束线图之间几何关系的数学描述	84
3.4.1 线簇及偶量集的互易积	84
3.4.2 Blanding 法则的广义化	85
3.4.3 对偶线(子)空间的求解	86
3.5 自由度与对偶约束图谱	89
3.5.1 自由度 & 约束线空间图谱(只含直线及偶量)的绘制	89
3.5.2 实例分析	100
3.6 本章小结	103
参考文献	103
第4章 图谱法创新设计初探	105
4.1 两个简单的构型设计实例	106
4.2 同维子空间	111
4.3 常见运动副的自由度 & 约束线图	117
4.3.1 简单运动副的自由度 & 约束线图	117
4.3.2 运动子链的自由度 & 约束线图	119
4.3.3 复杂铰链的自由度 & 约束线图	122
4.4 图谱法构造运动链	126
4.4.1 特定约束作用下的运动副空间	126
4.4.2 利用约束 & 自由度线图构造运动链	130
4.4.3 不同自由度 & 约束线图下所对应的常用运动链	132
4.5 运动副(或约束)空间的分解	145
4.6 一个稍复杂的设计实例	147

4.7 本章小结	149
参考文献	150
第5章 图谱设计的旋量解析	151
5.1 旋量及其互易性	152
5.1.1 旋量	152
5.1.2 运动旋量和力旋量	154
5.1.3 旋量的互易积	157
5.1.4 特殊几何条件下的互易旋量对	159
5.2 旋量系及其互易性	163
5.2.1 旋量系的定义	163
5.2.2 旋量系维数(或旋量集的相关性)的一般判别方法	166
5.2.3 特殊几何条件下旋量系(旋量集)的维数——特殊旋量系	168
5.2.4* 旋量系的分类及其线图表达	172
5.3 互易旋量系——自由度空间与约束空间	187
5.3.1 互易旋量系	187
5.3.2 旋量系与其互易旋量系之间的几何关系	188
5.3.3 互易旋量空间线图表达及图谱绘制	189
5.3.4 自由度空间与约束空间	190
5.4 旋量空间中包含同维线子空间的条件	192
5.4.1 理论基础	192
5.4.2 设计实例	194
5.5 本章小结	196
参考文献	196
第6章 典型机械装置的自由度 & 约束线图	199
6.1 机构自由度分析中的困难与困惑	199
6.2 经典机构及其自由度 & 约束线图	208
6.3 可提供刚性约束的可拆连接	218
6.4 一些典型的单自由度机械约束装置	221
6.5* 位移子群 & 子流形与自由度 & 约束线图之间的映射	223
6.6 本章小结	231
参考文献	232
第7章 并/混联机械装置的创新设计	235
7.1 并/混联机器及其应用	235
7.2 并联机构中的旋量系及旋量空间	239
7.3 并联机构的图谱化构型综合	244

7.3.1	实用型并联机构的构型分布特征	244
7.3.2	一般综合过程	246
7.3.3	并联机构驱动副的选取	248
7.3.4	构型综合实例	250
7.4	混联装置的图谱化创新设计	275
7.4.1	五轴混联机械装置的结构特点	276
7.4.2	一种高灵活性五轴混联机床的构型综合实例	280
7.5	本章小结	285
	参考文献	285
第8章	柔性设计	288
8.1	柔性机构及其应用	288
8.2	与柔性有关的基本术语及主要性能指标	290
8.3	材料选择	292
8.4	加工方法概述	293
8.5	基本柔性单元及其等效自由度(或约束)模型	295
8.5.1	基本柔性单元	295
8.5.2	基本柔性单元(对称结构)的等效自由度或约束模型	295
8.6	常见柔性铰链及柔性机构的分类	299
8.6.1	柔性铰链的分类与枚举	299
8.6.2	常用柔性模块(机构)的分类	305
8.7	柔性机构自由度分析的图谱法和解析法	308
8.7.1	柔性机构自由度分析的图谱法	309
8.7.2	柔性机构自由度分析的解析法	310
8.8	柔性机构构型综合的图谱法	314
8.8.1	构型综合的基本思路	315
8.8.2	并联式柔性机构的构型综合	320
8.8.3	串/混联式柔性机构的构型综合	328
8.9	并/混联柔性机构构型设计的深层考虑	329
8.9.1	简单全并联的实现条件	329
8.9.2	柔性机构的混联实现	335
8.9.3	柔性机构的驱动空间	341
8.9.4	大行程柔性精微机构的构型综合	345
8.10	柔性装置图谱化创新设计的应用实例	348
8.10.1	一种模块化、可重构柔性教具的设计与使用	348
8.10.2	柔性重力梯度敏感机构的概念设计	353

8.11* 柔性机构创新设计的几种主要方法概述	355
8.11.1 与图谱法相关的几种设计方法	355
8.11.2 其他几种构型设计方法	358
8.12 本章小结	361
参考文献	361
附录 A 柔度矩阵的建模与坐标变换	367
A.1 柔度的坐标变换	367
A.2 空间柔度矩阵的建模	369
A.3 实例	372
参考文献	374

第 1 章 绪 论

增强自主创新特别是原始创新能力是 21 世纪科学技术发展的战略基点。机械产品设计过程中最能体现原始创新能力的阶段要属概念设计阶段,原始创新往往出现于此。当前,以机器人、数控机床为代表的现代机械装置与装备正在向高速、高加速、高精度、智能化、可重构等功能特异型方向发展。现在制造业的飞速发展同时也为机械装置的原始创新提供了空前的机遇。为满足机械装备或产品向“重大精尖”和“微小精密”等方向发展的需求,机械装置更是不断地推陈出新,具有并联、柔性、变胞等特征的各类新型机构正是在这样的背景下应运而生。

创新设计(creative design)决定了机械产品的生命力。如果设计有缺陷,则制造出的将会是有先天不足的产品或“有残疾的机械”。对产品创新而言,机械装置的创新设计具有原创的特征性质,是机械发明中最具有挑战性和发明性的核心内容。而创新设计方法的丰富与完善则大大提高机构构型的种类与品质。因此,有关机械装置创新设计的研究对提高机械产品的自主设计、创新有着十分重要的意义。

1.1 创 新 设 计

谈起“设计”,人们并不陌生。因为在各行各业甚至日常生活中,人们总是和设计打交道。哪怕是孩提时在草纸上的涂鸦也能体现出某种设计思想。一方面,我们惊叹自然设计的伟大(图 1-1);另一方面,我们醉意于蒙娜丽莎等人工设计的奇思妙想;而在工程领域,源于工程师的设计同样十分重要,因为设计结果往往产生各种物化的生产力、新产品等,直接造福于人类(图 1-2)。



图 1-1 自然设计与黄金分割率

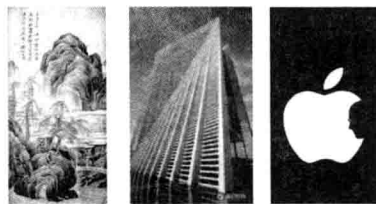


图 1-2 人工设计实例

机械工程是工程的一个重要领域,机械设计(mechanical design)在其中的作用不可或缺。它的主要任务是设计与机械相关的装置、产品与系统等。机械是机器与机构的总称。其中,机器(machines)是一种根据某种任务要求而设计的通过部件变换来传递运动、能量、物料及信息的装置,如我们所熟悉的汽车、机器人等都属于典型的机器。尽管机器的表现形式多种多样、千差万别,但就其功能实现而言,都是通过“机械运动”来实现各物理量的传递和变换,而这种能实现特定运动传递与变换的子系统就是机构(mechanisms)。常见的机构包括齿轮(系)机构、凸轮机构、连杆机构等,其组成元素是构件和运动副。图 1-3 以单缸发动机为例,示意了机器与机构的差别。机构设计(mechanism design)的主要任务是确定机构的类型和自由度、决定构件及运动副的数目和种类、确定机构结构参数,以产生所期望的运动。因此,机构设计是机械设计的重要组成部分,位于设计过程的前端,属于概念设计(conceptual design)阶段。何为概念设计?概念设计是指在确定任务之后,通过抽象化,拟定功能结构,寻求适当的作用原理及其组合,确定出基本求解途径,得出求解方案。概念设计本质上是一个创造过程,同时也是最具难度的环节。

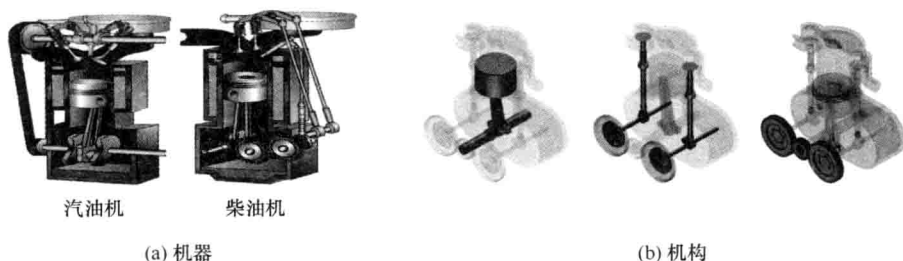


图 1-3 机器与机构

机械装置的概念设计过程一般包括前期阶段的功能设计、原理设计及结构方案设计,以及后期阶段的运动学设计及动力学设计(如有必要)两个设计阶段(一般设计流程如图 1-4 所示)。前期设计阶段偏重于形象思维,最具创造性,设计难度也最大,相当部分的设计工作是非数据性、非计算性的,必须依靠知识和经验的积累和创新思维方法,创新的火花往往产生于这一阶段;后期设计阶段偏重于逻辑思维,着重改善机械的运动性能与动力性能。

纵观整个人类文明史,可以看到机械概念设计经历了以下四个阶段:

(1) 直觉设计阶段:人类祖先为了生存或更加有效地保护自己,学会了制作弓箭、杠杆、辘轳、风车以及水利机械等。那时人们或是从自然现象中得到启示或是凭直觉设计机械,但并不知道其所以然,从而驱使人们去分析研究这些机械的工作原理,并将其与数学结合起来,逐渐产生了力学与机构学雏形。

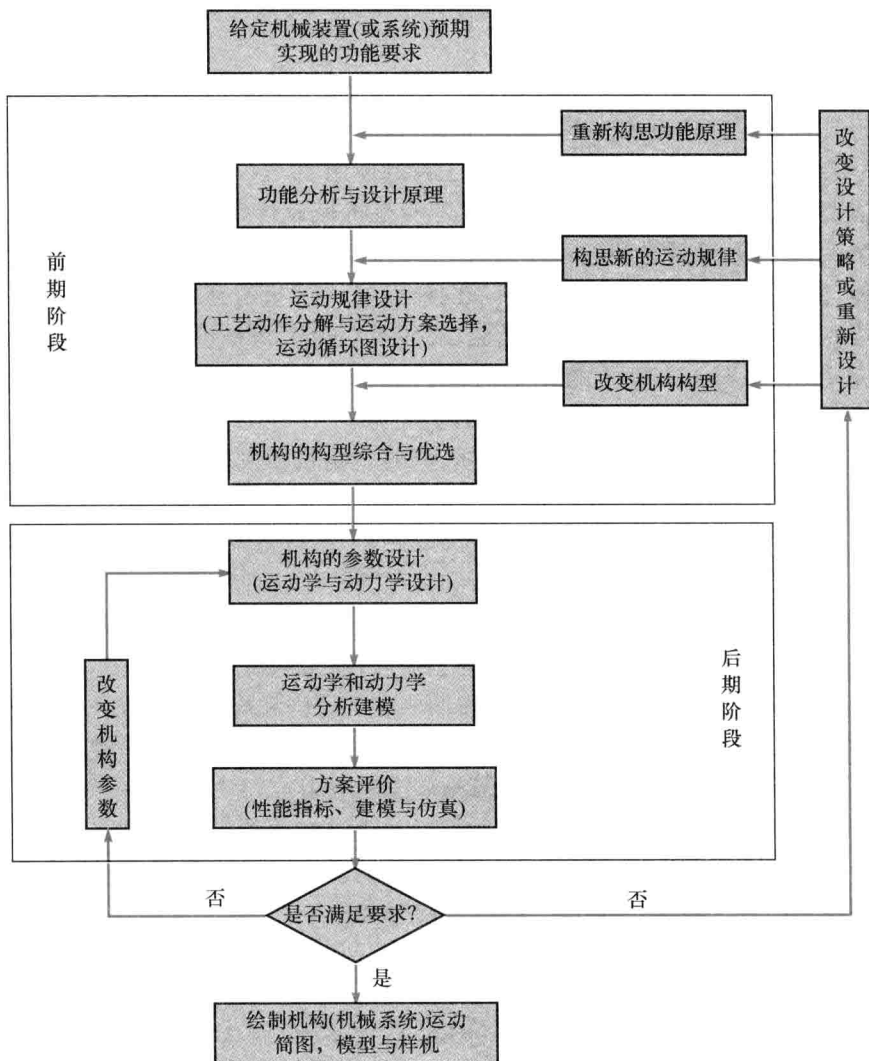


图 1-4 机械装置概念设计(即机构设计)的一般流程

(2) 经验设计阶段:自 17 世纪数学与力学结合后,人们开始应用数学及力学公式来解决机械设计中的一些问题。18 世纪工业革命后,有关机械的创造发明如雨后春笋般不断涌现。19 世纪成为科技发展史上一个重要时期,但这个时期的人们还不能提出更多的设计理论与方法指导机构设计。

(3) 传统设计阶段:进入 20 世纪的前半个世纪,图纸和图谱设计大大提高了设计效率和质量,同时设计基础理论和各种专业设计机理的研究也逐渐加强。通过建立百科全书式的机构图册、图谱,为设计者提供了大量的信息。至今这种设计

方法仍然广泛采用,但其静态性、经验性及手工式的特点与经验设计阶段没有本质的区别。

(4) 现代设计阶段:随着系统论、信息论和计算机技术的发展,20 世纪 60 年代机械设计进入了现代设计阶段。其特点体现在:突出设计的程式化、自动化与创造性,注重设计方法的系统性与先进设计工具的使用。

需要指出的是,机构创新与新装置发明是机械设计领域中永恒的研究主题。在人类改造环境、解放自我的不断需求中,源源不断地设计出各种新颖、合理、实用的机械,同时也有效地促进了机械科学向前发展。18 世纪瓦特时代对于直线机构等的强烈需求开启了对平面连杆、凸轮、齿轮等“传统”机械设计及应用的研究,到 19 世纪勒洛(Reuleaux)时代逐渐架构起了机构符号表达与构型综合的理论框架,20 世纪则掀起了空间机构及机器人的研究热潮。

鉴于机构构型创新具有原创的特质,同时也是机械发明中最具有挑战性和发明性的核心内容,因此有关构型设计的研究对提高机械产品的自主设计、创新有着十分重要的意义。而有关机构创新设计方法的丰富与完善则会大大提高机构构型的种类与品质,因此一直以来都是学者和工程师关注与研究的热点。

具有普适意义的机械创新设计方法主要包括以下几种:基于直觉和经验的设计方法;组合创新法(模块化设计);变异创新法;原始创新法等。

组合创新法是指将若干基本机构按照一定的原则和规律组合成一个复杂机械系统,往往可以实现某些复杂运动功能。从目前的研究来看,这是一类可应用各类机械装置构型设计的普适方法,有着极为广泛的应用。

变异创新法是指以某种机构为原始机构,通过对原始机构的构件和运动副进行某种性质的改变或变换,演变发展出新机构的设计方法。常用的变异创新法有机构倒置与扩展、等效运动置换、改变局部结构等。

原始创新法是指通过引入先进的数学工具、力学及生物学原理等设计理念,有效实现机械装置的原始创新。

机构创新是实现机械装置创新设计的基本条件,而具有普适意义的机构创新方法研究无疑是机构创新走向工程化的基本保障。未来机械产品亟须蕴含更高的技术附加值以及更强的市场竞争力。因此,研究机构的创新设计方法不仅具有重要的理论学术价值,而且具有较大的经济效益和社会效益。然而,较之只针对某种特异机构的创新设计方法,建立普适性的机构创新设计原理及理论体系更为困难。

传统机构的创新设计方法集中体现在构型研究上。勒洛是最早进行机构构型研究的学者,其最大贡献莫过于提出了机构的符号表达。俄国阿苏尔(Assur)提出的平面机构构型“杆组法”则是早期构型理论研究方面最重要的发现。但人类对复杂平面机构的构型综合取得重大突破是在 20 世纪 60 年代以后。其中的代表人

物是美国哥伦比亚大学的弗洛丹斯坦(Freudenstein)教授,他提出了结构与功能分离的原则并采用图论来研究平面机构的拓扑综合。纵观20世纪60年代以来平面机构学的研究进展,衍生了很多行之有效的平面机构综合方法,具有代表性的方法有:图论法、阿苏尔杆组法、对偶数法等。运用这些方法,系统地综合出了许多新型的平面机构,相继解决了复杂的十杆以上平面机构的拓扑综合及同构问题。运用这些平面机构的综合方法,已经建立起平面机构拓扑结构综合较为完善的方法体系。一个重要标志是创立了完整的平面机构拓扑结构图谱,为平面机构概念设计的选型提供了强有力的保障。随着杆数的增多,拓扑结构中的同构问题越发复杂,对数学工具及方法的依赖性也越大,但可以为与其他学科交叉建立理论基础。

同样,从20世纪60年代开始,有关机构组合系统的自动化设计理论初露端倪。随着产业机械及其他各类机械产品的功能需求日益增强,基于元机构的模块化设计显现出越来越多的优势,相关的设计技法也成为学界的研究热点。利用计算机辅助概念设计进行机构计算综合(computational synthesis)成为当时机构学颇具代表性的研究方向。这种创新方法也是机构学界近40年来的研究热点,并取得了一定的研究成果。计算综合中比较典型的方法有:图论法、矩阵法、旋量理论、再生运动链法等。这种基于已知机构模块进行组合的设计方法,其共同特点在于:具有存储大量知识的成熟的机构运动方案知识库,且为开放式的。设计人员无须掌握太多的相关学科的背景知识就可利用计算机进行设计。计算机可根据机构的运动行为或功能需求,枚举机构的所有类型,识别满足结构要求的图形,绘制机构简图,甚至还可进行动态仿真。研究人员利用这种技法实现了对多种实用机构的创新设计,如长间歇机构、夹持机构、机车悬挂机构、窗槛锁紧机构等。然而,这种创新设计方法目前仍处于发展阶段,与实用化还有一定的距离。

1.2 基本概念

1.2.1 机械装置的基本组成元素:构件与运动副

构件(link):机械装置中能够进行独立运动的单元体。构件可以是常见的刚体,如杆、齿轮、凸轮等;也可以是挠性体(如带、绳、链)或弹性体(如弹簧),甚至还可以是流体(如油、气体等)。图1-5列举出了一些常用的构件及其结构示意图。机器人中的构件多为刚性连杆。但在某些特定应用中,构件的弹性或柔性不可忽视,或者本身即为弹性构件或柔性构件。

运动副(kinematic pair,简称关节或铰链):是指两构件既保持接触又有相对运动的可动连接。

下面给出运动副的几种不同分类形式:

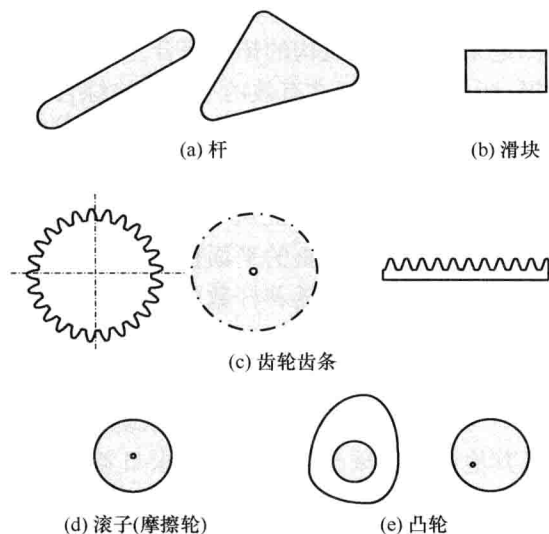


图 1-5 常用构件功能及结构示意简图

(1) 低副/高副:两构件为面接触/两构件为点、线接触。

(2) 根据运动副引入的约束数目不同,可分为Ⅴ级副、Ⅳ级副、Ⅲ级副、Ⅱ级副、Ⅰ级副等;还有一种特殊的约束——刚性约束,可完全约束两个刚体之间的相对运动。从机械连接角度来看,是种固定连接,如焊接、铆接、螺纹连接等。

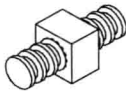
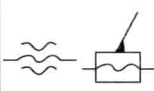
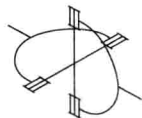
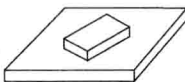
(3) 根据低副所具有的运动性质,可细分为转动副、移动副、螺旋副、球销副、圆柱副、球副、平面副等。

19 世纪末期,勒洛发现并描述了 6 种可能的低副(表 1.1,不含虎克铰)。这些运动副能够在保持表面接触的同时相对运动,他把这些当作机械关节中最基本的理想运动副。在机械工程中,通常又称运动副为关节或者铰链。其中转动副与移动副是机械装置中最常用的两种运动副类型。

表 1-1 常见运动副的类型及其代表符号^[1]

名称	符号	类型	自由度	图形	基本符号	简化符号
转动副	R	平面Ⅴ级低副	1R			
移动副	P	平面Ⅴ级低副	1T			

续表

名称	符号	类型	自由度	图形	基本符号	简化符号
螺旋副	H	平面Ⅴ级低副	1R 或 1T			
圆柱副	C	空间Ⅳ级低副	1R1T			
虎克铰	U	空间Ⅳ级低副	2R			
平面副	E	平面Ⅲ级低副	1R2T			
球面副	S	空间Ⅲ级低副	3R			

■ 转动副(回转副或旋转副,简写 R)是一种使两构件发生相对转动的连接结构。它具有 1 个转动自由度,约束了刚体的其他 5 个运动,并使得两个构件在同一平面内运动,因此转动副是一种平面Ⅴ级低副。

■ 移动副(滑动副,简写 P)是一种使两构件发生相对移动的连接结构。它具有 1 个移动自由度,约束了刚体的其他 5 个运动,并使得两个构件在同一平面内运动,因此移动副是一种平面Ⅴ级低副。

■ 螺旋副(简写 H)是一种使两构件发生螺旋运动的连接结构。它同样只具有 1 个自由度,约束了刚体的其他 5 个运动,并使得两个构件在空间某一范围内运动,因此螺旋副也是一种空间Ⅴ级低副。

■ 圆柱副(简写 C)是一种使两构件发生同轴转动和移动的连接结构,通常由共轴的转动副和移动副组合而成。它具有 2 个独立的自由度,约束了刚体的其他 4 个运动,并使得两个构件在空间内运动,因此圆柱副是一种空间Ⅳ级低副。

■ 虎克铰(简写 U)是一种使两构件发生绕同一点二维转动的连接结构,通常采用轴线正交的连接形式。它具有 2 个相对转动的自由度,相当于轴线相交的两个转动副。它约束了刚体的其他 4 个运动,并使得两个构件在空间内运动,因此虎