

轮系拓扑理论的综合研究

史晓影 著



科学出版社

轮系拓扑理论的综合研究

史晓影 著

渭南师范学院教育教学改革研究重点项目(JG201508)

渭南师范学院重大科研项目(2015ZD002,2015ZD003)

渭南师范学院特色学科建设项目(14TSXK06)

科学出版社

北京

内 容 简 介

周转轮系机构结构创新是推动机械产品不断更新换代的源泉,机构的运动学和动力学分析是机械产品进行优化选择和对现有机构的机械性能进行研判的保障。随着数学工具“拓扑学”和计算机技术的发展,将拓扑理论应用于周转轮系,进而使实现轮系机构创新设计、运动学和动力学分析成为可能。本书共12章,首先建立了周转轮系拓扑模型并给出了便于计算机实现拓扑同构判断算法;然后建立了基于拓扑基本单元的拓扑组合及拓扑拆分理论,利用 Visaul Basic 6.0 软件、Pro/Engineer 软件和 Automation Gateway 软件实现了三维虚拟装配,即对 Pro/Engineer 进行了二次开发;最后实现了拓扑基本单元和复杂拓扑的计算机自动装配,提出了运动学与动力学分析的方法,并对周转轮系拓扑研究进行了展望。

本书体系合理,讲解详尽,深入浅出,可作为基于 Visual Basic 6.0 的 Pro/Engineer 二次开发参考书,也可以为从事轮系拓扑研究的科技工作者提供理论学习基础,作为研究轮系拓扑理论的重要资料。

图书在版编目(CIP)数据

轮系拓扑理论的综合研究/史晓影著. —北京:科学出版社, 2016. 6
ISBN 978-7-03-048415-4

I. ①轮… II. ①史… III. ①拓扑-研究 IV. ①O189

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 119789 号

责任编辑:祝 洁 李 萍/责任校对:赵桂芬

责任印制:徐晓晨/封面设计:红叶图文

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>

北京厚德则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016 年 6 月第一次印刷 印张:10 1/2

字数:212 000

POD 定价:65.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

机构创新是推动机械产品不断更新换代的源泉。机构创新设计方法层出不穷，其中通过机构综合理论的创新是一个重要途径。随着 Pro/Engineer 软件在制造业的普及，其应用水平也越来越高。如果可以利用 Pro/Engineer 软件平台，开发出专用的建模、分析、仿真模块，则可以在很短的时间内完成虚拟常规设计和工程分析，而基于 Pro/Engineer 软件的二次开发很好地解决了这个问题。因此，二次开发在提高 Pro/Engineer 软件的应用效率、专业性能和应用能力方面有广阔的发挥舞台，充分发挥专用软件的使用效益，可节省大量的人力、物力和财力，缩短开发设计周期，提高开发效益。然而，要想实现虚拟环境下的机构创新、常规设计、机构优选和工程分析，都必须首先建立产品的数学模型，即齿轮或轮系的三维模型，这就是基于拓扑理论的周转轮系的虚拟仿真装配。现有的 Pro/Engineer 软件不具备这样的功能，而且基于 VB 语言的 Pro/Engineer 软件下的拓扑模型的三维化处理方面的教材或专著很少，实用性也不强，不能构成完整的体系结构。

Visual Basic 程序设计语言简单易学，是界面开发的有效工具，利用 Automation Gateway 4.0 软件为接口工具，可以实现在 Visual Basic 界面下打开 Pro/Engineer 环境，并可以利用编写的程序实现 Pro/Engineer 环境仿真轮系的计算机自动装配，进一步可以实现仿真装配轮系的各项性能指标的仿真分析。本书的目的是使广大读者能系统了解周转轮系拓扑学知识，并能够对拓扑演化、反演规律及计算机自动装配算法有一定的认识，希望为正在开展此方面研究的学者提供思路。

本书基于作者读研期间的研究课题，此期间在国内外重要刊物上发表了几篇论文，收到了一些读者的信件咨询相关问题。鉴于此，作者将毕业设计期间所做的相关内容做了整理，希望为从事此方面研究的学者提供一些帮助。轮系拓扑理论以全新的思维和角度分析了拓扑学在周转轮系上应用的可行性及拓扑理论应用在周转轮系机构创新上的优势。

本书共 12 章，提出了基于拓扑理论的轮系机构创新及优化方法，实现了三维仿真环境下拓扑模型的可视化处理。这种虚拟环境下的设计与装配有别于手工设计和真实工程设计开发环境下的装配和机构创新，是从“概念化设计”到“可视化处理”的一个跨越，使机构创新及参数化设计有了实际意义。本书的第 2 章和第 4 章由西安理工大学的薛隆泉教授和西安邮电大学的汪友明副教授共同撰

写,最后由作者整理定稿。在撰写本书的过程中,导师薛隆泉教授、崔亚辉教授、汪友明副教授、陈良钰及刘相蕊都给予了大力帮助和支持,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,本书可能在理论描述、算法讲解等方面有不足之处,真诚希望广大读者能够不吝指正。

作 者

2016年1月于渭南

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 行星轮系简介	1
1.2 图论概述	2
1.3 图论理论的发展	3
第 2 章 周转轮系拓扑模型的建立	7
2.1 轮系的拓扑描述	7
2.1.1 几种轮系图	7
2.1.2 轮系拓扑图	10
2.2 轮系基本结构的合成	12
2.3 小结	13
第 3 章 拓扑图和结构图同构判定	14
3.1 拓扑图同构判定	14
3.2 周转轮系拓扑图矩阵的建立	15
3.2.1 关联矩阵和邻接矩阵	15
3.2.2 周转轮系拓扑图建立矩阵存在的问题	15
3.2.3 拓扑缩微变换判断同构	16
3.2.4 周转轮系拓扑同构判定	16
3.3 机构图同构判定	18
3.4 拓扑同构的计算机自动判定	19
3.4.1 计算机同构判定简介	19
3.4.2 计算机同构判定程序	21
3.5 小结	24
第 4 章 拓扑图组合	25
4.1 少齿差周转轮系的组成	25
4.2 基本单元的组合	25
4.3 基本单元的复式组合	26
4.4 基本单元组合的封闭形式	27
4.5 特殊周转轮系	28
4.6 小结	29

第5章 拓扑演化	30
5.1 定义	30
5.2 拓扑进化	30
5.3 拓扑退化	32
5.4 拓扑蜕变	33
5.5 拓扑重生	34
5.6 轮系设计图库	34
5.6.1 周转轮系进化和退化图库	34
5.6.2 行星轮系蜕变和重生图库	35
5.7 小结	36
第6章 拓扑反演	37
6.1 齿轮的反演	37
6.2 系杆的反演	38
6.3 转轴的反演	39
6.4 辅助条件	39
6.5 行星轮系反演图库	40
6.6 周转轮系的组成	42
6.7 小结	42
第7章 周转轮系的综合	43
7.1 轮系分类	43
7.1.1 定义	43
7.1.2 轮系分类新标准	43
7.2 一般轮系的综合	45
7.2.1 说明	45
7.2.2 基本单元组合	46
7.2.3 拓扑图演化	46
7.2.4 拓扑图谱	48
7.2.5 拓扑图反演	54
7.2.6 结构图谱	55
7.3 重叠式轮系的综合	55
7.3.1 综合步骤	56
7.3.2 拓扑图和结构图实例	57
7.3.3 混合重叠	59
7.3.4 说明	59
7.3.5 图谱实例	60

7.4 小结	62
第8章 拓扑映射图的建立	64
8.1 拓扑基本单元的映射图	64
8.1.1 齿轮的反演	64
8.1.2 拓扑映射图的形成	66
8.2 复杂拓扑的拓扑映射图的建立	68
8.2.1 拓扑基本单元的组合形式	68
8.2.2 K-H与2K-H的组合	68
8.2.3 2K-H与2K-H的组合	70
8.3 小结	71
第9章 拓扑反演的 Pro/Engineer 二次开发	72
9.1 Pro/Engineer 二次开发简介	72
9.1.1 基于 Pro/Toolkit 的二次开发过程	72
9.1.2 基于 Automation Gateway 的二次开发过程	74
9.2 Automation Gateway 的安装	75
9.2.1 Automation Gateway 软件的安装	75
9.2.2 Automation Gateway 软件与 Pro/Engineer 连接	77
9.2.3 Automation Gateway 软件安装测试	78
9.3 基于 VB 6.0 的 Pro/Engineer 二次开发工程文件的建立	79
9.4 简单的开发实例	82
9.5 小结	89
第10章 拓扑映射图的计算机仿真装配	90
10.1 软件的功能分析及系统模块设计	90
10.1.1 用户需求及软件功能分析	90
10.1.2 开发工具的选择	91
10.2 界面开发的关键技术	92
10.2.1 对象	92
10.2.2 对象属性	93
10.2.3 对象事件过程及函数	94
10.3 绘图界面的开发	95
10.3.1 绘图初始界面	95
10.3.2 拓扑图绘制实例	102
10.4 拓扑基本单元的计算机自动装配	104
10.4.1 Automation Gateway 软件	104
10.4.2 自动装配的关键命令及函数	105

10.4.3 装配文件的建立与打开	109
10.5 周转轮系的计算机自动装配	113
10.5.1 装配方法及核心思路	113
10.5.2 装配实例	120
10.6 复杂周转轮系的生成	122
10.6.1 复杂拓扑绘图界面	122
10.6.2 复杂周转轮系的装配	129
10.7 小结	131
第 11 章 周转轮系运动学和动力学分析	132
11.1 轮系基本单元的运动学分析	133
11.2 轮系基本单元的动力学分析	134
11.3 信号流图	135
11.4 拓扑图和信号流图的对比及算例	137
11.5 应用电网论理论分析行星轮系	140
11.5.1 基尔霍夫定律和轮系的对应关系	140
11.5.2 应用电网论理论分析行星轮系	142
11.6 小结	146
第 12 章 周转轮系拓扑研究的总结与展望	147
参考文献	149
附录	152

第 1 章 概 述

1.1 行星轮系简介

齿轮传动是一种常见的机械传动，具有结构紧凑、传动比准确、传递功率范围大、传动效率高等特点，因而齿轮机构广泛应用于各种机器和机械设备中，如工程机械、纺织机械、机床、汽车、仪表等。随着近代工业技术的进步和发展，对齿轮传动的速度、效率、承载能力、可靠性以及体积、重量等技术经济指标提出了更高的要求。行星齿轮传动的研究与应用正是基于这些要求发展起来的。行星齿轮传动与普通齿轮传动相比，具有其特殊的结构和优良的性能。

与普通齿轮传动相比，其特殊的结构表现在以下几个方面^[1]。

(1) 同轴线传动，即周转轮系结构布置上其输入轴与输出轴共轴线。

(2) 对称的分流传动，即用几个完全相同的行星轮均匀分布在中心轮的周围共同分担载荷。

(3) 内啮合利用，即利用内啮合承载能力高和内齿轮的空间容积，缩小径、轴向尺寸，使结构紧凑。通常情况下，当传递功率和传动比相同时，行星传动的体积和重量为普通齿轮传动的 $1/2 \sim 1/6$ 。

其优良的传动性能表现在以下几个方面。

(1) 易实现大传动比、变速传动、运动的合成和分解。当周转轮系用于传递运动时，其最大传动比可达几万或数十万以上；作为动力传动时，其最大传动比可达几十或数百。若采用差动行星传动，可实现两个运动的合成和分解。在某些情况下，适当选择行星传动的类型，可实现各种变速的复杂运动。

(2) 效率高、功率损失小。行星传动采用数个行星轮均匀分布在内、外中心轮之间，可平衡作用于中心轮与行星架轴承的惯性力。采用这种对称结构，有利于提高传动系统的效率。适当选择传动类型，设计合理的结构，可使行星传动的效率达到 $97\% \sim 99\%$ 。

(3) 传动平稳，抗冲击振动能力强。采用数个行星轮均匀分布在两个中心轮之间，同时用均载装置保持各行星轮间载荷均匀分布和功率均匀分流，不仅可平衡各行星轮和转臂的惯性力，而且显著提高了行星传动的平稳性以及抗冲击、振动的能力。

由于上述的优良特性，周转轮系被各种机械传动系统广泛采用。而机械传动装置是机器的重要组成部分，机器的工作性能、使用寿命、能源消耗、振动噪声，在一定程度上都取决于传动装置的质量。因此，行星传动技术成为现代传动

技术中不可缺少的技术之一。

近年来国内外一直将对周转轮系传动结构的研究列为重点,涌现出多种新型行星传动机构^[2],常见的行星传动类型如下。

(1) 摆线针轮行星传动。它属于一种 K-H-V 行星传动,由减速机构和输出机构两部分组成,与渐开线行星传动相比具有许多独特的优点。例如,由于摆线针轮传动同时啮合的齿数要比渐开线齿轮传动同时啮合的齿数多,因而承载能力较大、啮合效率高;若功率不大时,可取代蜗杆减速器或二、三级普通齿轮减速器;由于摆线轮和针轮的轮齿均可淬硬、精磨,比渐开线少齿差传动中内齿轮的被加工性能要好、齿面硬度更大,因而使用寿命长。目前,摆线轮已纳入国家专业通用件,摆线针轮传动的减速器当前已广泛应用。

(2) 谐波齿轮行星传动,又简称为谐波传动。一般由刚性齿轮、柔性齿轮、激波器和柔性轴承等组成,具有质量轻、体积小、传动比范围大、运动精度高、效率高、承载能力强、运动平稳、同轴性好且可实现向封闭空间传递运动等特点。谐波传动在大传动比的减速装置、分度机构、伺服装置、雷达装置和自动控制等高精度传动系统中得到日益广泛的应用。

(3) 活齿行星传动,它是 K-H-V 少齿差传动的一种特殊形式。按活齿形状的不同,活齿行星传动有推杆、滚柱、钢球、摆块和套筒等多种形式。偏锥差行星传动,此类型可获得很大的传动比,而且体积小,承载能力大,又无需输出机构。其传动原理是:当输入轴转动时,内锥齿轮在偏角轴头上作循环偏摆运动,迫使外锥齿轮相对于内锥齿轮作有规律的错齿运动,并带动输出轴作低速转动。该型传动在国外已用于偏摆齿轮马达上,并运用在多种形式的偏摆锥差减速器中。

另有新型行星传动,如三环少齿差行星传动、环板针摆传动、K-H 型同轴平动行星齿轮传动等,这里不再一一细述。以上类型均是近年国内外在周转轮系应用机构方面的创新。

1.2 图论概述

图论起源于著名的“哥尼斯堡七桥问题”^[3]。如图 1-1 所示,图中 A、B、C、D 代表陆地,问题是:能否从任一陆地出发,不重复地走过各个桥梁,最后回到原地?这一问题经过众多的爱好者实际操练一番后,结果是不可能完成的。但是,从理论上一直没有人能够阐释清楚。

瑞士数学家欧拉(Euler)于 1736 年首次从理论上成功论述这个问题。他在理论研究中将“七桥问题”归结为一个由点、线构成的图形,其中点代表“陆地”,线代表“桥梁”,抽象成“图形”后就将一个实际问题转变成一个画画中的

“一笔画问题”，如图 1-2 所示。

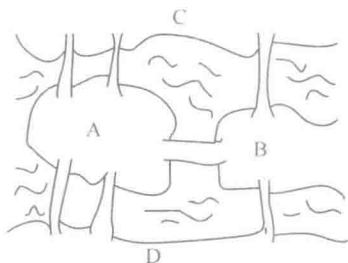


图 1-1 哥尼斯堡七桥问题

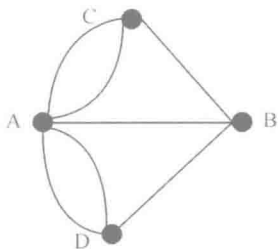


图 1-2 拓扑图

经过许多科学家的努力，如克希霍夫（Kirchhoff）提出的树理论，凯莱（Cayley）将树理论应用于有机化学，古特里（Guthrie）提出的四色问题，哈密顿（Hamilton）提出的周游世界问题，特别是近二十年来，由许多数学家和工程师，如 Whitney、Tutte、Edmonds、Harary、Biggs、Berge 等在一般图论和拓扑图论上的突出贡献，加之计算机科学的发展带来的巨大的推动作用，图论发展十分迅速，应用非常广泛。在许多领域，如物理、化学、生物学、地理学、运筹学、计算机科学、信息论、系统论、控制论、网络理论、社会科学以及经济管理等，图论都有着广泛的应用。因此，一方面图论受到了全世界数学界和工程技术界乃至经营决策管理者越来越广泛的重视；另一方面，图论与数学的其他分支，如群论、矩阵论、概率论、拓扑学、数值分析和组合数学等都有着密切的联系。事实上，图论为任何一个包含了一种二元关系的系统提出了一个数学模型。由于它使用了图解式的表示法，图就具有直观美观的特点。

1.3 图论理论的发展

随着现代计算机技术的迅猛发展，图论已成为研究工程技术、自然科学甚至社会科学的一种有效的分析工具。这得益于图论中的图形一方面能够简洁直观的描述和分析任何一种包含某种二元关系的系统；另一方面图论中的图形也很好地为研究二元系统提供了图形模型。缘于此，众多研究者将图论思想应用于机械系统的轮系，并试图用图论方法研究轮系。

1. 周转轮系的表达问题

首先将图论引入机构学研究是在 1967 年，使机构类型综合理论与方法取得了极大的进展。随后在 1970 年，Buchsbaum 和 Freudenstein^[4,5] 首先将图论思想引入轮系，提出轮系运动结构的图形表示法（graph representation），目的是由

“图”研究轮系结构综合。图形表示法能够简洁直观地反映轮系结构系统的拓扑关系,但图形在构件数较多时,不能够解决同构问题,而且图中尚未明确轮系的整体结构特点。同时,提出功能表示法(functional representation)和示意表示法(schematic representation)。后来 Freudenstein 针对同构问题提出旋转图(rotation graph),并利用布尔算法成功解决图与轮系结构的映射关系。1987年,Tsai 等建立链接特征多项式判定旋转图同构,并成功解决了二自由度周转轮系的结构综合问题,得到许多新颖的周转轮系机构^[6,7]。至此,在引入图论思想后,前人的研究思想集中于:如何更好地解决图的同构问题,进行轮系结构的创新与综合研究。

此后,在图形的表示方面,研究者注意到周转轮系的更多结构特征,使得“图形”表示渐渐趋于完善。在 1991 年,Olson 等^[8]提出基于图形表示法的复接头运动链图(coincident-joint graph),即图中用复接头多边形表示复接头回转副,能够较好反映图形与轮系结构的映映关系,但是仍不能明确反映轮系的整体结构特点。Hsu 等^[9,10]总结了前人轮系图的优缺点,提出了规范带换图和旋转图,其特点是可利用图做运动学分析。至 1996 年,Chatterjee 和 Tsai^[11]在图形表示法的基础上,基于运动单元提出规范图(canonical graph)。在规范图中注意到轮系的整体结构特点,并能够依据规范图较好地进行运动分析,但是规范图对轮系的构件性质并未做到明确清楚表示,特别是周转轮系中“系杆”对轮系结构及传动上的重要性并未在图形中反映。2000 年,Liu 等^[12,13]提出基于运动分离的轮系图(kinematic fractionated graph)。轮系图抽象过程着眼于运动的输入、输出,对于轮系的整体结构特点没有提及;此图更有利于轮系的结构创新及综合。其他的综合方法有:①基于回路的图论法^[14-16],此方法应用回路代码解决周转轮系的同构问题,同时给出了一种新的周转轮系的构建方法,构建过程较繁琐但较直观;②遗传算法^[17],此算法的特点是同时解决了图的综合问题及运动学和动力学分析,具有机构最优化的作用,且易判定机构同构;③结构链法^[18],此方法将周转轮系划分为 2K-H 和 3K 单元,着重讨论单元之间的联系,如并联、串联等关系。

国内关于图形表示方面的研究主要有:①基于单铰运动链综合法^[19],此方法利用高副与低副的替代,单铰与复铰运动链的演化等规律,选用六杆以上的单铰运动链,根据周转轮系和运动链的对应关系,可构建许多新型的周转轮系,但此方法具有发散性,且综合过程中无规律可循,因而不易总结出完整的图谱;②基于运动副替代综合法^[20],利用运动链的无向双色拓扑图及拓扑胚图,在运动链构件数与自由度数一定的情况下,用胚图插点法获得所有可能的基于该复铰运动链的并且满足轮系创新综合要求的运动链结构型;③基于轮系分解的计算机综合法^[21],此方法将周转轮系分解若干个基本周转轮系,根据基本周转轮系的

运动学和动力学特性,利用VB语言开发了一个周转轮系计算机辅助运动分析和运动综合的软件,该软件操作简便,具有良好的人机界面;④基本单元组合法^[22],分析了基本周转轮系的功率流、三个基本构件之间的传动比和结构参数之间的关系,并将这种关系制成模块图然后用这些模块图组合新轮系,该方法具有直观的特点;⑤改进的复接头运动链图法^[23],改进了一些表示方法和相关规则,推导了一种新的运动学分析方法,更具有系统性。此外,这些方法均应用到图形学的理论,揭示了行星轮系内在的特点(如拓扑特性、构件结构特点等),指出了一定约束条件下可能存在的各种行星轮系图,并列成行星轮系图谱。对于自由度、构件数等较大时,轮系图形的绘制较复杂,且无规律可循。

2. 周转轮系的分类问题

现有的几种分类标准,如依据行星齿轮传动组成的基本构件^[18]、齿轮啮合方式^[24]、传动机构的自由度数^[24]等都是根据行星传动的特点及传动构件的特性来分类,忽略了行星机构在整体结构特点及组合规律。

3. 周转轮系的动力学分析

由于行星轮系是由基本轮系(2K-H, 3K, K-H, K-H-V四种行星轮系)组合构成的,所以对基本轮系的动力学特性的研究尤为重要,现有的文献提出的研究方法有:离散图法^[25-27]、复铰图法^[28]、信号流程图法^[29-30]、行列式法^[31-32]、表格分析法^[33-34]等。其中,前三种方法较直观简洁,特别是可利用离散图法明确地分析基本行星轮系内部的功率流向及循环功率产生的条件,而后两种方法较简洁,计算直接准确。

对于复杂行星轮系的分析,许多专家学者做出了大量的工作,有不少的研究成果。Ettore等^[35]回顾了过去几十年来的轮系效率的计算公式,文献^[18]通过深入的分析得出功率流方案和传动比之间的关系,并提出了图解法分析功率流向和效率。Hsieh等^[36]以基本的行星轮系单元分析了轮系的传动比和系统特性。基本轮系的五种分析方法中,离散图^[37-38]和信号流程图^[39-40]比较适用于复杂轮系的分析。除此之外,复杂行星轮系的分析方法有:功率流图法^[41]、节点分析法^[42]、图画表示法^[43]、三角结构图法^[44]等。对于行星轮系的传动比、效率、自锁等方面的分析,大量的文献提出了很多的分析计算方法,卢存光^[45]总结了四种不同的传动比计算方法,文献^[46]总结了近些年来的三种效率计算方法,包括啮合功率法、传动比法、结点功率法等。关于自锁的判定,王述彦^[47]、杨实如等^[48]通过行星轮系效率的计算,并根据行星轮系的效率小于0时,讨论了行星轮系发生自锁的现象。由于行星轮系的动力学分析不能孤立地分析某一个方面,而齿轮机构的类型众多,其动力学特性复杂,计算方法繁多,因此针对周转轮系综合问

题,必须提出一种简捷有效的运动学和动力学计算方法。

近年来,国内将图论理论应用于传动性能系统方面的研究,散见于众文献,其中具有代表性的有:信号流图法、离散图法、功率流图法、节点分析法等。这几种研究方法的出发点是基于轮系传动性能系统而构造的图形,是一种用于动态研究轮系的模型。在周转轮系设计方法方面,当前的发展趋势是应用摩擦学、现代计算力学等新的科学理论和技术进行分析计算,并引入可靠性设计、动态设计等现代设计方法以提高分析计算的科学性和可信度。而对于周转轮系的具体设计过程,也从以前的仅静态设计变为现今的静态设计加动态设计。但由于国内是在20世纪60年代以后,才对周转轮系有比较深入的研究与制造,与国外同时期研究开发应用水平相距较大。在基础研究方面,具体的差距主要表现在,国外有名厂家普遍采用CAD和CAM技术,而我国有关研究多未达到实用化的程度。因此,进一步丰富和完善周转轮系的基础理论、加快理论研究的实用化进程,即静态设计与动态设计的自动化完成是非常重要的研究工作。

第2章 周转轮系拓扑模型的建立

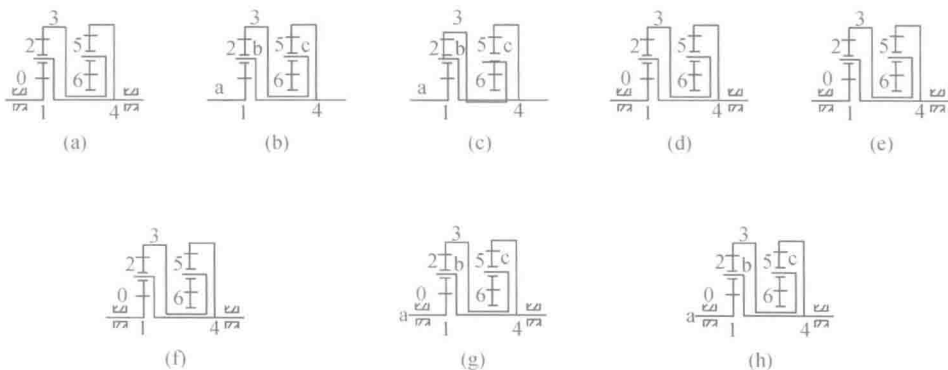
运用拓扑图描述周转轮系是研究周转轮系综合问题的一种简捷的方法，寻求一种简便有效的拓扑图来解决周转轮系的综合问题是本章的重点。

2.1 轮系的拓扑描述

下面先讨论前人提出的几种拓扑图，总结其优缺点，在此基础上提出一种基于功能离散法的拓扑图。

2.1.1 几种轮系图

图论是拓扑学的一个分支^[49,50]，是研究由一组点和连接着点的一组线所组成图的问题的一门学科。图论的第一篇论文，即著名的“哥尼斯堡七桥问题”，由瑞士数学家欧拉于1736年提出。图论的基本思想是：研究某一类事物和它们之间的某种关系，若用点表示某一类的若干事物，用线表示它们之间的某种关系，这样就可以把要研究的问题抽象成为由一组点和连接着点的一组线所构成的图，从而用图论方法，即一些特定的方法研究，使其获得解决。根据周转轮系的构件和构件之间的联系，可采用图论的方法来研究。这一思想在周转轮系中综合得到应用，在最近几十年中，许多图及综合方法相继提出，从不同角度和程度上解决了周转轮系综合问题。图2-1(a)~(h)是某一周转轮系的结构简图，图2-1(A)~(H)是周转轮系的几种表示方法。



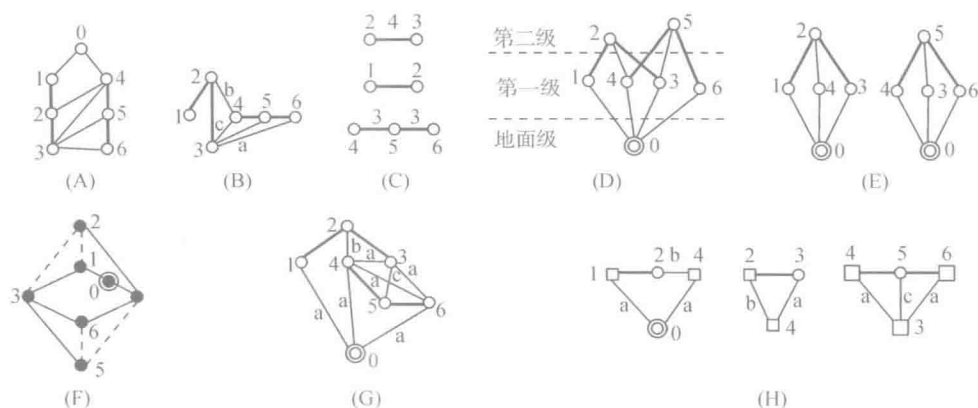


图 2-1 周转轮系结构简图和表示法

注：数字编号表示构件，英文字母表示回转轴线

下面分别对这些表示方法进行讨论。

(1) 图 2-1 (A) 是由 Buchsbaum 和 Freudenstein 首先提出的，他们指出轮系运动结构的表示方法有三种：功能表示法 (functional representation)、示意表示法 (schematic representation)、图形表示法 (graph representation，又称为一般图)。功能表示法是绘制轮系结构的剖面图，为简洁起见，剖面图一般只画重要部件。由于剖面图的具体化和简略性，存在不同的功能图表示不同的设计形式而结构却是相同的，从而造成了在同构判定上难以解决的问题。示意表示法是将构件表示成多边形的方法，示意表示法中每一个构件用多边形表示，其中顶点表示运动副，表示转动副的顶点为空心顶点，表示齿轮副的顶点为实点。图表示法无灵活性，一个链的示意图可能有多种功能表示图。图形表示法是应用图论中的方法，连接件用顶点表示，连接的关系用边表示，并依据类型编码，而顶点之间边的连接对应于连接件之间形成的副。此表示法比较简洁直观地反映了周转轮系的构件特点，是应用图论研究周转轮系拓扑综合问题的一个重要方法，Buchsbaum 等提出的图形表示法是此后三十多年的周转轮系拓扑综合研究的一个重要基础，也是这类研究的一个里程碑。通过表达方法的对比，不难发现图形法在拓扑综合研究具有一定优势。图 2-1(A) 即是运用图形表示法表示周转轮系，其中粗实线表示齿轮副，细实线表示回转副。此图形表示法的缺点是当构件数较大时，不易判断轮系图的同构。

(2) 图 2-1 (C) 是由 Freudenstein 于 1971 年提出的旋转图 (rotation graph)，此旋转图是由图 2-1(B) (图中省略了机架或地面，并标上了回转轴线，实质是一个简略的一般图) 经一定的变换准则得到的，即消除回转副 (细实线) 和转接顶点，并在齿轮副对应的粗实线标明相应的转接顶点。图 2-1(C) 中的构件 2 和 3 之间的数字 4 即是转接顶点。由于旋转图对传统的图画作了简化，复杂的