

柴树峰 张学玲 主编

机构设计 及 运动仿真分析实例

JIGOU SHEJI JI
YUNDONG FANGZHEN
FENXI SHILI



化学工业出版社

014013044

TH122
1240

柴树峰 张学玲 主编

机构设计及 运动仿真分析实例

JIGOU SHEJI JI
YUNDONG FANGZHEN
FENXI SHILI



化学工业出版社

· 北京 ·



北航

C1699879

TH122

1240

440810310

本书综合介绍了机械机构设计理论与 Pro/ENGINEER 软件应用的相关知识,是一本兼顾理论与实践的机构设计参考书。编者结合多年的机械设计教学经验与 Pro/ENGINEER 软件实际应用体会,从便于机械机构设计者自学的角度出发,融经验及技巧于一体的典型实例进行讲解,使读者能够对机构设计理论及其在 Pro/ENGINEER 软件平台上进行运动仿真分析的实际应用都有全面的掌握。

全书强调理论知识和应用实例相结合,使读者轻松地掌握机械机构设计理论,熟练应用 Pro/ENGINEER 软件进行机构运动仿真分析。在内容结构上,本书从常用机构的设计理论入手,以典型机构设计为实例,由浅入深、循序渐进地讲解了从基本零件的设计、装配到机构运动仿真分析的整个流程。读者只需按照书中的步骤进行设计、操作,就能理解并掌握机构设计及其在 Pro/ENGINEER 软件下运动仿真分析的方法。本书中附赠所有的机构运动仿真分析实例所需的零件(.prt)文件及最后生成的装配(.asm)文件(利用二维码或网址进行下载),可供读者练习使用。

本书适合机构研究和设计人员以及高等工科院校机械类和近机类专业的师生参考使用,也可作为学习掌握 Pro/ENGINEER 基本操作的机械工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

机构设计及运动仿真分析实例/柴树峰,张学玲主编.
—北京:化学工业出版社,2013.11
ISBN 978-7-122-18598-3

I. ①机… II. ①柴…②张… III. ①机械设计-计算机仿真 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 237561 号

责任编辑:张兴辉
责任校对:宋 玮

加工编辑:张绪瑞
装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$ 字数 313 千字 2014 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:49.00 元

版权所有 违者必究

前

言

FOREWORD

在《机械设计基础》课程教学中,面对各类机构的复杂设计方法,学生经常会感觉到理论知识太枯燥、计算过程太复杂、设计出的计算结果不直观而且无法对其进行验证。如果能提供一个便捷的机构设计及分析工作平台并且能对机构设计结果进行验证,设计者就能很直观、有效地解决各类复杂的机构设计问题。《机构设计及运动仿真分析实例》就是一本适应当前机械设计基础的教学改革而编写的图书。

Pro/ENGINEER(以下简称 Pro/E)是当今最有影响的面向工业设计 CAD/CAM/CAE 类软件之一,能提供全方位的产品开发功能,是集零部件设计、产品组装、机构设计与分析、模具设计与数控加工等功能于一体的便捷的设计及分析工作平台,可以解决大量复杂的机械设计问题。Pro/E 软件中的机构仿真模块 Mechanism,还可以进行机构设计的运动学分析,使得原来在图纸上难以表达和设计的运动变得非常直观、易于修改,能够大大简化机构设计开发过程,缩短开发周期,减少开发费用,提高产品质量。

《机构设计及运动仿真分析实例》全书分为 6 章,分别介绍各类常用机构如连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、轮系及间歇机构的设计与运动学仿真分析方法。本书所选实例均紧密联系机械设计原理以及 Pro/E 仿真软件应用,从工程设计的角度提供了机构组件的约束条件,实现了机构运动仿真,具有较强的专业性和实用性。

本书凝结了高校一线教师的经验与体会,融合了最新的教学理念,希望能给广大读者提供一个学习捷径。书中的全部命令和操作步骤均结合实例介绍,并且每一个实例都是从最基本的操作开始讲解,使读者可以轻松掌握操作方法。即使从未接触过 Pro/E 软件,只要认真研读本书,也可以在较短的时间内掌握利用该软件进行机构设计的能力和操作技巧。

本书所选的全部实例都是在 Pro/E 5.0(M90)中文版本软件下完成,非常具有代表性。每个机构设计实例都配有详细的理论说明和运动学仿真分析操作步骤,图文并茂,可引导读者熟练地掌握机构设计方法并学会使用 Pro/E 软件进行机构运动学仿真分析。所有实例的相关文件请利用二维码或网址下载使用,其中的动画演示文件可以帮助读者更好地理解机构设计过程,以备操作练习后对照检查。

本书适合高等工科院校机械类和近机类专业的师生以及工程设计人员作为机械机构设计、机构运动学仿真分析的实践与提高。

本书由军事交通学院柴树峰、张学玲任主编。冯晓梅、张丽杰、郝振洁、马超任副主编。参加本书编写工作的还有李文长、李玉兰、白丽娜、孙燕、刘宁、李改玲、张文彬、董帅、张镭于、石小屿、马雅丽、王文照、高岩、陈小凡。全书由骆素君、郭爱东主审。

限于编者水平,书中难免有不妥、疏漏之处,真诚希望广大读者给予批评指正,编者在此深表感谢。

编者

目 录 CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 机构设计概述	1
1.1.1 机构设计的发展趋势	1
1.1.2 典型机构研究意义	1
1.2 机构系统仿真分析概述	2
1.2.1 机构运动仿真分析应用及意义	2
1.2.2 机构运动仿真分析过程	2
1.2.3 运动仿真分析方法和软件介绍	2
1.3 Pro/ENGINEER 软件概述	3
1.3.1 Pro/ENGINEER 的特点和优势	3
1.3.2 Pro/ENGINEER 软件的机构运动仿真功能	4
1.3.3 Pro/ENGINEER 软件的运动仿真分析方法	4
第 2 章 平面连杆机构	8
2.1 平面连杆机构概述	8
2.1.1 平面连杆机构的应用和特点	8
2.1.2 平面连杆机构的类型	9
2.2 铰链四杆机构	9
2.2.1 铰链四杆机构的特性	9
2.2.2 铰链四杆机构的设计	11
2.2.3 铰链四杆机构的运动仿真分析实例	12
2.3 曲柄滑块机构	22
2.3.1 曲柄滑块机构的设计	22
2.3.2 曲柄滑块机构的运动仿真分析实例	22
2.4 导杆机构	29
2.4.1 导杆机构的设计	29
2.4.2 导杆机构的运动仿真分析实例	29
2.5 平面连杆机构运动仿真分析方法拓展	34
第 3 章 凸轮机构	37
3.1 凸轮机构概述	37
3.1.1 凸轮机构的结构与特性	37
3.1.2 凸轮机构的类型	37
3.1.3 凸轮机构从动件的运动规律设计	38
3.1.4 各类凸轮传动的基本设计过程	40
3.2 盘形凸轮机构	41
3.2.1 盘形凸轮机构的设计	41
3.2.2 盘形凸轮机构的运动仿真分析实例	43
3.3 移动凸轮机构	51
3.3.1 移动凸轮机构的设计	51

3.3.2 移动凸轮机构的运动仿真分析实例	51
3.4 圆柱凸轮机构	59
3.4.1 圆柱凸轮机构的设计	59
3.4.2 圆柱凸轮机构的运动仿真分析实例	60
3.5 凸轮机构运动仿真分析方法拓展	67
第4章 齿轮机构	69
4.1 齿轮机构概述	69
4.2 渐开线直齿圆柱齿轮机构	73
4.2.1 渐开线直齿圆柱齿轮机构的设计	73
4.2.2 渐开线直齿圆柱齿轮机构的运动仿真分析实例	79
4.3 渐开线斜齿圆柱齿轮机构	92
4.3.1 渐开线斜齿圆柱齿轮机构的设计	92
4.3.2 渐开线斜齿圆柱齿轮机构的运动仿真分析实例	94
4.4 渐开线直齿圆锥齿轮机构	106
4.4.1 渐开线直齿圆锥齿轮机构的设计	106
4.4.2 渐开线直齿圆锥齿轮机构的运动仿真分析实例	109
4.5 渐开线齿轮齿条机构	129
4.5.1 渐开线齿轮齿条机构的设计	129
4.5.2 渐开线齿轮齿条机构的运动仿真分析实例	129
4.6 齿轮机构运动仿真分析方法拓展	135
第5章 轮系机构	138
5.1 轮系机构概述	138
5.1.1 轮系分类	138
5.1.2 轮系的应用	140
5.2 定轴轮系设计及运动仿真实例	143
5.2.1 传动比计算	143
5.2.2 定轴轮系的设计	143
5.2.3 定轴轮系运动仿真分析实例	144
5.3 周转轮系设计及运动仿真实例	153
5.3.1 传动比计算	153
5.3.2 周转轮系的设计	154
5.3.3 周转轮系运动仿真分析实例	156
5.4 轮系运动仿真分析方法拓展	166
第6章 间歇运动机构	167
6.1 间歇运动机构概述	167
6.2 槽轮机构	171
6.2.1 槽轮机构的设计	171
6.2.2 槽轮机构的运动仿真分析实例	172
6.3 棘轮机构	183
6.3.1 棘轮机构的设计	183
6.3.2 棘轮机构的运动仿真分析实例	184
参考文献	197

第1章 绪论

1.1 机构设计概述

1.1.1 机构设计的发展趋势

近年来由于机电一体化高技术科学特别是工业机器人与特种机器人的发展对机构学理论和技术上的要求,使机构学学科达到了一个崭新的阶段。机构设计的发展将直接影响到机械工业各类产品的工作性能以及许多行业生产设备的机械化和自动化程度。

机构学一方面由简单的运动分析与综合向复杂的运动分析与综合方面发展,另一方面也由机构运动学向机构动力分析与综合方向发展,研究机构系统的合理组成的方法及其判据,分析研究机器在传递运动、力和做功过程中出现的各种问题。

机械产品设计过程的一个重要环节是分析、计算。其中包括对产品几何模型进行分析、计算,通过运动或力分析对机构功能和性能进行分析,对设计方案进行评价等。传统的分析方法采用手工计算,过程繁琐,效率低,有时为了计算方便,往往需要对原型进行较大的简化并引入更多的假设,因此传统的分析方法一般比较粗略,分析结果不够可靠,只能用来对产品设计作定性的比较分析,而不能作出定量的评价。

1.1.2 典型机构研究意义

绝大多数现代机构为组合机构,是由多种、多个构件组成的机构。组合机构与机构系统组成理论的发展使机构学已成为重型、精密及各种复合机械和智能机械、仿生机械、机器人等高新技术科学的设计基础理论学科。

现代机构分析设计的趋势之一就是典型机构的运动分析与综合研究。传统的典型机构至今仍然在各种各样机器中广泛应用,发展和完善它们的机构综合方法、建立基于功能需要的机构设计新方法,都将大大有利于典型机构更加广泛的应用。例如,考虑速度因素的实现轨迹的连杆机构设计、摆动从动件盘状凸轮机构的通用设计方法、圆柱凸轮机构的 CAD/CAM、组合机构的类型和设计方法等都是值得研究的。对典型的传统机构进行深入研究,有利于推动现代机构学的发展。

而平面机构的运动分析是机构学中最基本、最典型的运动分析之一,进行机构运动分析是设计机构、研究机构的速度和加速度的变化规律以及进行受力分析的基础。

在这里,挑选了机械原理研究常用的典型机构进行设计和运动学仿真,以做到由浅入深、举一反三的作用。这些机构分别是:①平面连杆机构;②凸轮机构;③齿轮机构;④轮系机构;⑤间歇运动机构。

基于这些典型机构,随着机构设计领域的不断发展,各门学科不断交叉,机构的形式和种类迅速拓展和延伸。突破传统机构学的老框架、老观念,创造各种各样新型机构是机械创新设计的需要。例如在构件相对运动微小的夹持机构采用弹簧片作为运动副连接的柔顺机构,利用固定模板的复杂成型运动的机构,利用传动带和凸轮传递复杂运动的带式凸轮机

构, 利用各类动物的行走和游动形态创造出游鱼机构、蛇行机构、飞行机构等, 利用步进电机或伺服电机创造出电子凸轮、电子齿轮等。

1.2 机构系统仿真分析概述

仿真是近几十年发展起来的一门综合性技术学科, 它为系统分析、综合、研究和设计以及对专业人员的培训提供了一种先进技术手段。机构学主要研究内容包括几何运动和力学分析两部分, 用仿真方法进行机构设计, 是现代设计的方向。

一种新产品的开发总要经历设计、分析、计算、修改的反复过程。传统的设计通常需要制造样机, 进行试验, 检测产品性能指标, 以此来确定设计方案的优劣。如果发现问题, 则要修改设计方案或参数, 重新制造样机和试验, 致使产品的开发成本高、周期长。而仿真技术使得设计过程在计算机数据空间再现, 从产品的方案设计阶段开始, 按照实际使用的条件进行仿真和结构分析, 评价设计结果, 避免了样机制造的成本和时间耗费。

计算机辅助仿真设计技术可以帮助设计人员进行产品结构的几何模型(二维、三维)设计与分析; 可以方便、快捷地进行产品结构的几何外形的设计与修改; 可以立体地、多角度地、直观地观察产品的外形、颜色是否符合消费者的审美观, 操作部件是否符合人机工程学等。

计算机仿真的实现可以独立于真实过程, 不干扰真实过程的运行, 可以随时研究仿真对象的随机状况, 观察复杂系统运行的瞬时变化。其基本方法是将实际系统抽象为数学模型, 再进一步转化为计算机求解的仿真模型, 然后编制程序, 上机运行仿真模型, 进行仿真实验并显示结果。

1.2.1 机构运动仿真分析应用及意义

运动学仿真对于机构设计、分析、优化以及综合诸问题的研究起着重要作用。它可以把人们从大量复杂繁琐和重复的计算工作中解脱出来, 并且用一种直观的、动态的方式表达运动过程。甚至将仿真与优化配合使用, 由于人机界面的直观性, 通过观察常常可以获得优化方面的新信息, 利用优化后的新参数调整仿真模型, 开始一个新的仿真活动周期, 直到获得满意结果为止。

通过仿真可以确定某些构件运动所需空间, 校验它们运动是否干涉, 而且运动轨迹仿真动画更为形象直观; 速度分析可以确定机构从动件的速度是否合乎要求; 加速度可以为惯性力计算提供数据。因此, 机构运动学分析既是机构综合的基础, 又是力分析的基础。机械系统的运动仿真, 不但可以对整个机械系统进行运动模拟, 以验证设计方案是否正确合理, 运动和力学性能参数是否满足设计要求, 还可以及时发现设计中可能存在的问题, 并通过不断改进和完善, 对分析机构的工作性能, 优化新机械, 仿真都是十分重要的。

1.2.2 机构运动仿真分析过程

机构运动仿真就是根据给定的原动件规律, 求出机构中其他机构的运动参数。

机构仿真周期主要由总体方案设计、建立模型、求解模型、输出结果和调整模型重新设计几部分构成。机械运动仿真过程如图 1-1 所示。

1.2.3 运动仿真分析方法和软件介绍

目前, 市场上可以进行运动仿真的商业软件很多, 常用的有 Pro/E、MATLAB、UniGraphics、CATIA、ADAMS 和 SolidWorks 等。这些各具特色, 应用操作不同, 但采用基本理论相同, 仿真步骤都如同图 1-1 所示的过程一致。

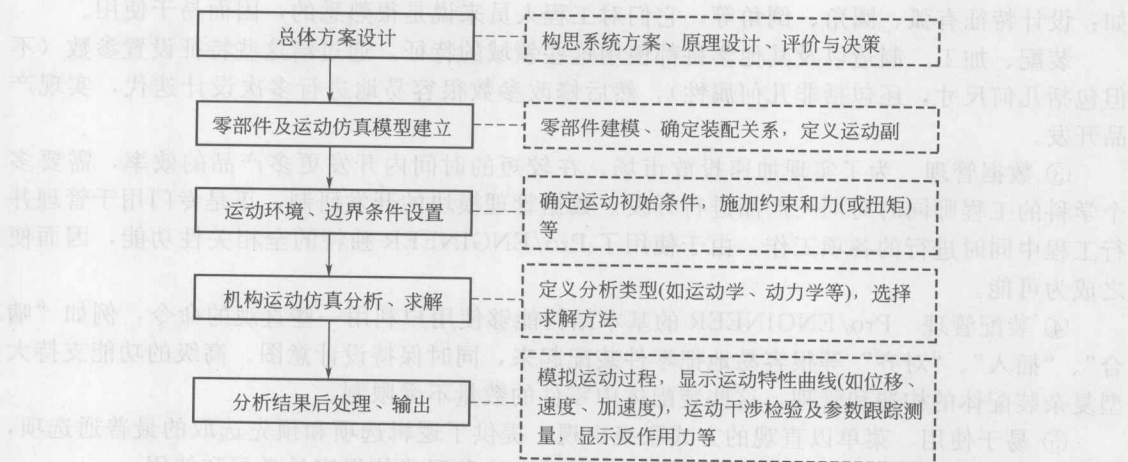


图 1-1 机械运动仿真过程示意图

MATLAB 软件是功能强大的科学计算软件, 被国内外高校和科研单位所使用。尤其是基于矩阵运算的数据处理, 可用符号运算计算解析解; 还可以实现数值分析、图像处理等若干个领域的计算和图形显示功能。

UniGraphics 有很强的曲面建模功能, 且具有自带的运动仿真功能, 它能对任何二维或三维机构进行复杂的运动学分析、动力分析和设计仿真。UG 的运动仿真功能可以对运动机构进行干涉检查、轨迹包络等运动合理性分析工作, 得到运动机构的运动参数。

CATIA 在复杂曲面、高阶曲面建模、运动分析方面做得很好, 其运动仿真可以实现运动副运动规律分析、运动参数测量、机构运动轨迹分析、包络体扫掠、空间的运动干涉分析等。

ADAMS 是虚拟样机分析的应用软件, 用户可以运用该软件非常方便地对虚拟机械系统进行静力学、运动学和动力学分析。ADAMS 自带三维建模系统, 其运动分析模块可以做比较复杂的运动仿真。

SolidWorks 是基于 Windows 开发的三维 CAD 系统, 具有功能强大、易学易用特点, 同样可以进行相似功能的运动仿真分析。

1.3 Pro/ENGINEER 软件概述

1.3.1 Pro/ENGINEER 的特点和优势

Pro/ENGINEER 软件模块功能较多, 主要有概念设计、高级装配、交互式曲面设计、逆向工程、机构动力学、结构和热传导分析、疲劳分析模块、模具型芯和型腔设计、模架设计、棱柱和多曲面铣削、生产加工、框架结构设计专家等。

Pro/ENGINEER 软件有以下特点。

① 全相关性 Pro/ENGINEER 的所有模块都是全相关的。这就意味着在产品开发过程中某一处进行的修改, 能够扩展到整个设计中, 同时自动更新所有的工程文档, 包括装配体、设计图纸以及制造数据。全相关性鼓励在开发周期的任一点进行修改, 却没有任何损失, 并使并行工程成为可能, 所以能够使开发后期的一些功能提前发挥其作用。

② 基于特征的参数化造型 Pro/ENGINEER 使用用户熟悉的特征作为产品几何模型的构造要素。这些特征是一些普通的机械对象, 并且可以按预先设置很容易地进行修改。例

如：设计特征有弧、圆角、倒角等，它们对工程人员来说是很熟悉的，因而易于使用。

装配、加工、制造以及其他学科都使用这些领域的特征。通过给这些特征设置参数（不但包括几何尺寸，还包括非几何属性），然后修改参数很容易地进行多次设计迭代，实现产品开发。

③ 数据管理 为了实现加速投放市场、在较短的时间内开发更多产品的效率，需要多个学科的工程师同时对同一产品进行开发。数据管理模块的开发研制，正是专门用于管理并行工程中同时进行的各项工作，由于使用了 Pro/ENGINEER 独特的全相关性功能，因而使之成为可能。

④ 装配管理 Pro/ENGINEER 的基本结构能够使用户利用一些直观的命令，例如“啮合”、“插入”、“对齐”等很容易地把零件装配起来，同时保持设计意图。高级的功能支持大型复杂装配体的构造和管理，这些装配体中零件的数量不受限制。

⑤ 易于使用 菜单以直观的方式联级出现，提供了逻辑选项和预先选取的最普通选项，同时还提供了简短的菜单描述和完整的在线帮助，这种形式使得容易学习和使用。

1.3.2 Pro/ENGINEER 软件的机构运动仿真功能

本书采用的机构运动仿真分析工具是 Pro/ENGINEER 软件，其中的机构分析模块 (Mechanism) 是一个集运动仿真和机构分析于一身的功能强大的模块，可以进行机构的运动学、动力学仿真分析。使得原来在二维图纸上难以表达和设计的运动，变得直观和易于修改，并且能够简化机构的设计开发过程，缩短其开发周期，减少开发费用，提高产品质量。

利用机构分析模块，当各个零部件通过装配模块组装成一个完整的机构以后，设计者就可以根据设计意图定义机构中的连接、设置伺服电动机，然后运行机构分析，观察机构的整体运动轨迹和各零件之间的相对运动，以检测机械的干涉情况。而且，可以进行各种测量工作，并把分析结果保存成影片形式。

机构仿真的结果不但可以动画的形式表现出来，还能以参数的形式输出，从而可以获知零件之间是否存在干涉，干涉的体积有多大等。根据仿真结果可以对所设计的零件进行修改，直到不产生干涉为止。

当分析运动时，可观察并记录分析，或测量位置、速度、加速度、力等量，然后以图形表示这些测量。也可以创建轨迹曲线和运动包络，以用物理方法描述运动。

总之，Pro/ENGINEER 软件可以根据设计需要而创建参数化机构模型并进行机构运动学仿真分析，减轻了机械设计人员的工作，也及时反映出机械设计中的不合理因素，从而减少了设计费用和周期。

1.3.3 Pro/ENGINEER 软件的运动仿真分析方法

(1) 机构装配与运动仿真的操作环境

单击菜单栏中的【文件】→【新建】命令，或者单击【文件】工具栏中的【新建】按钮，弹出【新建】对话框。在【类型】选项组中选择【组件】单选钮，给出组件名称及相关设置，即可进入机构装配环境。

当机构装配完成后，单击菜单栏中的【应用程序】→【机构】命令，就进入机构运动仿真环境。

(2) 机构装配方法

机构是由构件组合而成的，而每个构件都以一定的方式与其他构件相连接。这种连接，既能使两个构件直接接触，又能使两个构件产生一定的相对运动。进行机构运动仿真的前提是创建机构。

零件装配与机构运动仿真都在组件模式下进行。单击菜单栏中的【插入】→【元件】→【装配】命令，调入元件后，弹出【元件放置】操控板。创建机构是利用操控板的【预定义的连接集】下拉列表中的各种连接方式，来进行机构的创建。而零件装配是利用操控板中的【约束类型】下拉列表中的各种约束方式，来安装各个零部件。由零件装配得到的装配体，其内部的零部件之间没有相对运动；而由连接得到的机构，其内部的构件之间可以产生一定的相对运动。

在 Pro/ENGINEER 的装配环境中，对机构组装与运动仿真提供了两种装入元件的方式：约束装配与接头装配。

约束装配与接头装配的相同点：都使用 Pro/ENGINEER 的约束来放置元件，组件与子组件的关系相同。

约束装配与接头装配的不同点：约束装配使用一个或多个单约束来完全消除元件的自由度，接头装配使用一个或多个组合约束来约束元件的位置。约束装配的目的是消除所有自由度，元件被完整定位；接头装配的目的是获得特定的运动，元件通常还具有一个或多个自由度。

① 约束装配 当进行机构装配时，如果不考虑机构运动，或者机构中某些元件是固定不动的，那么可采用约束装配方式。Pro/ENGINEER 提供了 11 种约束装配方式，如图 1-2 所示，含义如下。

a. 自动。此约束方式为默认选项，即只需在现有的装配组件和要进行装配的元件上选取点、线、面等几何图元，系统自动给出约束的类型进行装配。

b. 配对（也可以理解为“贴合”）。配对就是两个平面重合，且两个平面法线方向相反。使用时，其偏移选项可有三种形式：

重合：两个平面面对面且互相重合，这是配对约束的默认设置。

偏距：两个平面面对面安装，且中间有间隔距离。

定向：两个平面面对面，但不设置平面之间的间隔距离。

c. 对齐。对齐可以是面对齐、轴线或边对齐、点对齐。当面对齐时，此两个平面同向。对齐约束也可设置间隔距离、定向及重合的三种偏移形式，设置方法与配对的偏移设置相同。

d. 插入。插入就是轴与孔的配合约束。

e. 坐标系。选取两个配合件的坐标系进行装配。

f. 相切。将两个曲面或基准平面以相切的方式进行装配。

g. 直线上的点。此约束方式要求在装配的零件上选取一个点或顶点，使其落在组件上的一条边、轴或基准曲线上。

h. 表面上的点。在要装配的零件上选取一个点或一个顶点，在组件上选取一个曲面，使点落在表面上。

i. 表面上的边。在要装配的零件上选取一个边，在组件上选取一个曲面，使边落在表面上。

j. 固定。直接将元件固定在当前位置上。

k. 缺省。将元件以默认的方式进行装配。

② 连接装配 当进行机构运动仿真时，其组装必须考虑机构中哪些元件是运动的，哪些元件是固定不动的，对于运动的元件要采用连接条件进行装配。Pro/ENGINEER 提供了 11 种连接装配方式，就在【预定义的连接集】下拉列表中，如图 1-3 所示。

每一种连接类型的一组约束都与指定的自由度相关，平移和旋转自由度用来指定机构的运动方式。每种连接类型的含义如下。

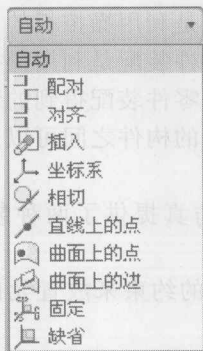


图 1-2 约束类型

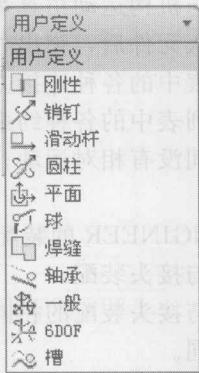


图 1-3 连接类型

- a. 刚性。刚性连接相当于一个固定约束，是将两个零件粘接在一起，它的旋转自由度和平移自由度都为零，完全固定，一般是机架或机座等。
- b. 销钉。采用销钉连接的构件旋转自由度为 1，平移自由度为 0，构件只能绕固定的轴旋转。设置时需要提供一个旋转的轴和一个限制元件移动的面，保证元件绕轴在指定的面上旋转，提供元件 1 个旋转自由度。
- c. 滑动杆。滑动杆连接，构件只能沿直线方向平移，平移自由度为 1，旋转自由度为 0，该直线是指定的轴或边。设置时需要提供一个移动的轴或边和一个限制元件移动的面，保证元件在指定的面上沿所选的轴或边平移，提供元件 1 个旋转自由度。
- d. 圆柱。圆柱连接，构件可以沿指定轴平移并绕该轴旋转，所以总自由度为 2，旋转和平移自由度分别为 1。设置时需要提供一个旋转和平移的轴，保证元件既绕轴旋转又沿轴平移，提供元件 1 个旋转自由度和 1 个平移自由度。
- e. 平面。平面连接时构件可以通过平面接头连接的主体在一个平面内相对运动并相对于垂直该平面的轴旋转。故平面连接的总自由度为 3，其中旋转自由度为 1，平移自由度为 2。设置时需要提供一个面，保证元件在面上移动并绕垂直于面的轴线旋转，提供元件 1 个旋转自由度，2 个平移自由度。
- f. 球。球连接的构件可以在任何方向上旋转，其旋转自由度为 3，平移自由度为 0。设置时需要提供 2 个匹配的点或顶点或曲线端点，以保证元件只有旋转而无移动，提供 3 个旋转自由度。
- g. 焊缝。焊缝连接是将两个主体粘在一起，两个构件完全固定。此时，构件的自由度为 0，类似于刚性连接。设置时需要提供一个匹配的坐标系，将两个元件粘在一起，元件的自由度数 0。
- h. 轴承。轴承连接是组合球形接头及滑块接头，构件可以在 3 个轴向任意旋转，同时也可以沿指定轴方向平移，故其旋转自由度为 3，平移自由度为 1。设置时需要提供元件上的一个点或顶点或端点和组件上的一个轴或反之，保证元件绕点旋转并沿轴移动，提供元件 3 个旋转自由度，1 个平移自由度。
- i. 一般。该连接方式使用用户在已有的组件和要装配的元件上选取任意图元，提供的运动功能和所选图元有关，元件的自由度数也和所选图元有关。
- j. 6DOF。6DOF 连接构件在任何方向上平移及旋转，具有 3 个旋转自由度和 3 个平移自由度，可用 6DOF 连接建模具有 3 根旋转运动轴和 3 根平移运动轴的接头。该接头不影响模型元件之间的相对运动，6DOF 连接可应用伺服电动机或建模任何所需类型接头的位置。设置时只需要给出元件和已有组件的坐标系，保证元件在坐标系内可沿 X、Y、Z 轴移动，

也可绕 X、Y、Z 轴旋转，提供元件 6 个自由度。

k. 槽。槽连接是两个主体之间的一个点与曲线连接。从动件上的一个点，始终在主动件上的一根曲线（3D）上运动。槽连接只使两个主体按所指定的要求运动，不检查两个主体之间是否干涉，点和曲线可以是零件实体以外的基准点和基准曲线，也可以在实体内部。包含一个点对齐约束，允许沿一条非直轨迹旋转。

设置时需要提供元件上的一个点或基准点或端点，以及已有组件上的一个边或轴或曲线，保证元件沿着所选取的边或轴线或曲线滑动。

(3) 机构装配与运动仿真的一般步骤

① 使用约束条件将固定不动的零件或组件装配进来。

② 使用连接条件将运动的零件装配进来。

③ 进入机构模块。当以约束和连接条件将元件组装在一起后，即可通过下拉式菜单“应用程序/机构”进入机构设计模块。

④ 手工拖曳元件运动。进入机构模块后，可手工拖曳运动元件，使元件按预定运动方式运动，以测试元件装配是否正确，机构运动方式是否合乎理想。如果元件装配正确，机构运动合乎理想，则进行下一步，否则回到组装环境重新组装。

⑤ 设置齿轮副、凸轮从动机构。如果机构中含有齿轮副或凸轮从动机构，则在机构组装并测试正确后，进行齿轮副或凸轮从动机构的设置，建立机构各元件连接条件之间的关系，以便驱动。

⑥ 添加伺服电动机。当连接设定完成后，即可设置伺服电动机，以作为机构的动力来源。

⑦ 其他设定。如果机构运动复杂，还需要添加其他设置，如弹簧、力、转矩等。

⑧ 分析和仿真。当机构设置完成后，可进行各种分析，如位置、运动学、动态等，并可根据分析获得结果报告。

第2章 平面连杆机构

平面连杆机构构件运动形式多样,可以实现转动、摆动、移动和平面复杂运动,制造方便,可以靠本身的几何封闭来维系运动,因此平面连杆机构在各种机械、仪表和机电一体化产品中得到广泛的应用。近年来,随着连杆机构设计方法的发展,电子计算机的普及及相关设计软件的开发使用,机构的设计速度和设计精度均得到极大提高,连杆机构的结构设计过程大为简化,使用范围更加广泛。平面连杆机构设计通常包括选型和机构尺寸设计两个方面,前者确定连杆机构的结构组成,后者确定机构运动简图的参数。

本章主要内容包括平面连杆机构的基本形式及基本演化机构,即曲柄摇杆机构、双摇杆机构、双曲柄机构、曲柄滑块机构和摆动导杆机构,这五种比较常用连杆机构的设计方法,以及基于 Pro/ENGINEER5.0 软件平台的运动仿真分析过程。

希望读者掌握常用平面连杆机构的设计方法,能够设计出符合工作要求和客户需求并能可靠传动的连杆机构。由于组成连杆机构的构件形状多样,在具体设计时会出现各种各样的问题,因此本章主要研究将构件抽象为杆状的情况,希望大家掌握并熟练运用这种抽象的机构设计方法,从而达到触类旁通的效果。设计平面连杆机构所涉及的主要参数有:极位夹角 θ , 摆角 ψ , 各杆长度,行程速比系数 K 。

2.1 平面连杆机构概述

2.1.1 平面连杆机构的应用和特点

平面连杆机构是由一些刚性构件用低副(转动副、移动副)相互连接而成的在同一平面或相互平行平面内运动的机构,又称低副机构。由于平面连杆机构易于制造,能获得较高的运动精度,还可用作实现远距离的操作控制。因此,平面连杆机构在各种机械、仪器中获得了广泛应用,如剪床、冲床、颚式破碎机、内燃机、缝纫机、人体假肢、挖掘机、公共汽车开关门机构、车辆转向机构以及机械手和机器人等都巧妙地利用了各种连杆机构。

平面连杆机构的应用主要体现在以下几个方面:通过变换运动形式,把转动转变为移动;实现较复杂的平面运动;能够把传动放大。

连杆机构的主要优点如下:

- ① 运动副为面接触,压强小,承载能力大,耐冲击,易润滑,磨损小,寿命长;
- ② 运动副元素简单(多为平面或圆柱面),制造比较容易;
- ③ 运动副元素靠本身的几何封闭来保证构件运动,具有运动可逆性,结构简单,工作可靠;
- ④ 可以实现多种运动规律和特定轨迹要求;
- ⑤ 可以实现增力、扩大行程、锁紧等功能。

连杆机构也存在一些缺点:

- ① 由于连杆机构运动副之间有间隙,因而当使用长运动链(构件数较多)时,易产生较大的积累误差,同时也使机械效率降低;
- ② 连杆机构所产生的惯性力难于平衡,因而会增加机构的动载荷,不易高速转动;

③ 受杆数的限制，连杆机构难以精确地满足很复杂的运动规律。

2.1.2 平面连杆机构的类型

根据连杆机构的构件运动范围可以将其分为平面连杆机构和空间连杆机构。在一般机械中较常用的是平面连杆机构，它在结构上和运动形式上相对比较简单，已形成了一套完整的分析和综合理论，同时，它也是研究连杆机构的基础。

平面连杆机构的构件形状是多种多样的，但大多为杆状的，最常用的是四根杆，也就是四个构件组成的平面四杆机构。

平面连杆机构按照运动副类型分类，可分为：铰链四杆机构；含一个移动副的四杆机构，如曲柄滑块机构、导杆机构、摇块和定块机构；含两个移动副的四杆机构，如双滑块机构。

2.2 铰链四杆机构

运动副均为转动副的四杆机构称为铰链四杆机构，它是平面四杆机构的基本形式。在铰链四杆机构中，固定不动的构件 4 称为机架，直接与机架相连的构件 1 和 3 称为连架杆，不与机架直接相连的中间构件 2 称为连杆，如图 2-1 所示。

连架杆 1 和 3 通常绕自身的回转中心 A 和 D 回转，杆 2 作平行运动。能作整周回转的连架杆称为曲柄，仅能在一定范围内作往复摆动的连架杆称为摇杆。能够作整周转动的转动副称之为整转副，不能够作整周转动的转动副称之为摆转副。

2.2.1 铰链四杆机构的特性

铰链四杆机构是最简单的四杆机构。四杆机构的基本特性包括运动特性和传力特性，这些特性是四杆机构设计的依据。

(1) 铰链四杆机构类型的判断方法

铰链四杆机构共有三种基本型式：曲柄摇杆机构、双曲柄机构、双摇杆机构。通常用“格拉斯霍夫定理”对铰链四杆机构进行分类。

在铰链四杆机构中，假设 l 为最长杆的长度； s 为最短杆的长度； p, q 为中间杆的长度。若 $s+l \leq p+q$ 为真，则机构存在整转副，即至少有一个杆为曲柄。

若 $s+l > p+q$ 为真，则不存在整转副，即不存在曲柄。

若铰链四杆机构的两个连架杆一个是曲柄，另一个是摇杆，则该四杆机构称为曲柄摇杆机构，如图 2-2 所示。

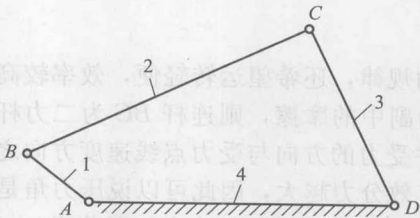


图 2-1 铰链四杆机构

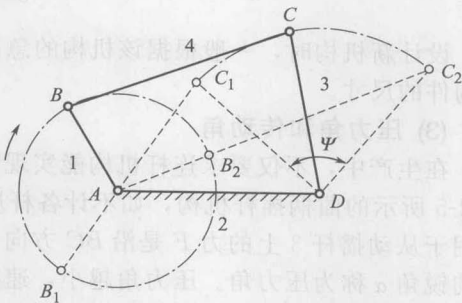


图 2-2 曲柄摇杆机构

若铰链四杆机构的两个连架杆都是曲柄，则该四杆机构称为双曲柄机构，如图 2-3

所示。

若铰链四杆机构的两个连架杆都是摇杆，则该四杆机构称为双摇杆机构，如图 2-4 所示。

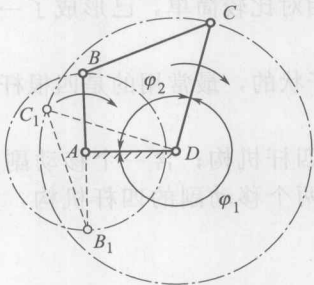


图 2-3 双曲柄机构

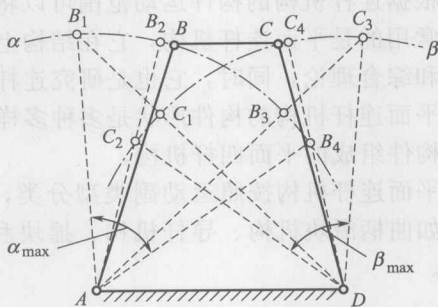


图 2-4 双摇杆机构

(2) 急回运动

图 2-2 所示的曲柄摇杆机构，其曲柄 1 在转动一周的过程中，有两次与连杆 4 共线，在这两个位置，铰链中心 A 和 C 之间的距离 AC_1 和 AC_2 分别为最短和最长，因而摇杆 3 的位置 C_1D 和 C_2D 分别为其左、右极限位置。摇杆在两极限位置间的夹角 Ψ 称为摇杆的摆角。当曲柄由位置 AB_1 顺时针到位置 AB_2 时，曲柄转角 $\varphi_1 = 180^\circ + \theta$ ，这时摇杆由左极限位置 C_1D 摆到右极限位置 C_2D ，摇杆摆角为 Ψ ；而当曲柄顺时针再转过角度 $\varphi_2 = 180^\circ - \theta$ 时，摇杆由位置 C_2D 摆回到位置 C_1D ，其摆角仍然是 Ψ 。虽然摇杆来回摆动的摆角相同，但对应的曲柄转角不等 ($\varphi_1 > \varphi_2$)；当曲柄匀速转动时，对应的时间也不等 ($t_1 > t_2$)，从而反映了摇杆往复摆动的快慢不同。令摇杆自 C_1D 摆到 C_2D 为工作行程，这时铰链 C 的平均速度是 $v_1 = C_1C_2/t_1$ ；摆杆自 C_2D 摆回 C_1D 是其空回行程，这时 C 点的平均速度是 $v_2 = C_1C_2/t_2$ ，显然 $v_1 < v_2$ ，它表明摇杆具有急回运动的特性。

急回运动特性用行程速度变化系数 K 来表示，即

$$K = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\frac{C_1C_2}{t_2}}{\frac{C_1C_2}{t_1}} = \frac{t_1}{t_2} = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{180^\circ + \theta}{180^\circ - \theta}, \tag{2-1}$$

式中， θ 为摇杆处于两极限位置时，对应的曲柄所夹的锐角，称为极位夹角。

将上式整理后，可得极位夹角的计算公式

$$\theta = 180^\circ \frac{K - 1}{K + 1} \tag{2-2}$$

设计新机构时，一般根据该机构的急回要求先给出 K 值，然后算出极位夹角 θ ，再确定各构件的尺寸。

(3) 压力角和传动角

在生产中，不仅要求连杆机构能实现预定的运动规律，还希望运转轻便，效率较高。如图 2-5 所示的曲柄摇杆机构，如不计各杆质量和运动副中的摩擦，则连杆 BC 为二力杆，它作用于从动摇杆 3 上的力 F 是沿 BC 方向的。从动件受力的方向与受力点线速度方向之间所夹的锐角 α 称为压力角。压力角越小，速度方向的有效分力越大，因此可以说压力角是判断机构传动性能的标志。在连杆机构设计中，为了便于度量，习惯用压力角 α 的余角 γ （即连杆和从动摇杆之间所夹的锐角）来判断传动性能， γ 称为传动角。因 $\gamma = 90^\circ - \alpha$ ，所以 α 越小， γ 越大，机构的传动性能越好；反之， α 越大， γ 越小，机构的传动越费劲，传动效率

越低。

(4) 死点位置

在从动曲柄与连杆共线的两个位置之一时，出现机构的传动角 $\gamma=0^\circ$ 、压力角 $\alpha=90^\circ$ 的情况，这时连杆对从动曲柄的作用力恰好通过其回转中心，不能推动曲柄转动，机构的这种位置称为死点位置。按生产要求或使用要求，设计中有时需要避免死点位置，如缝纫机的踏板机构，需要利用惯性来通过死点位置实现连续传动，有时需要利用死点位置，如工件夹紧机构和飞机起落架机构都是利用死点位置来实现特定的工作要求。

2.2.2 铰链四杆机构的设计

平面四杆机构的设计，主要是根据给定的运动条件，确定机构运动简图的尺寸参数。有时为了使机构设计得可靠、合理，还要考虑几何条件和动力条件（如最小传动角等）。

生产实践中的要求是多种多样的，给定的条件也各不相同，归纳起来，主要有下面两类问题：①按照给定从动件的运动规律（位置、速度、加速度）设计四杆机构；②按照给定点的运动轨迹设计四杆机构。

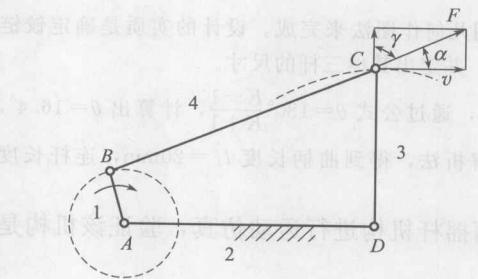


图 2-5 连杆机构的压力角和传动角

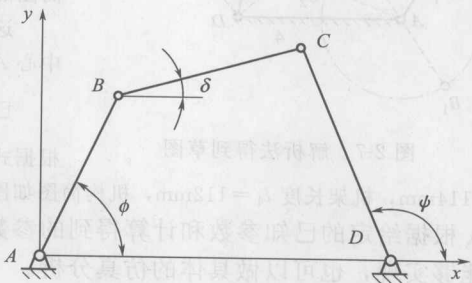


图 2-6 机构封闭多边形

在图 2-6 所示的铰链四杆机构中，已知连架杆 AB 和 CD 的三对对应位置 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 ，要求确定各杆的长度 l_1 、 l_2 、 l_3 和 l_4 。现以解析法求解。此机构各杆长度按同一比例增减时，各杆转角间的关系不变，故只需确定各杆的相对长度。取 $l_1=1$ ，则该机构的待求参数只有三个。

该机构的四个杆组成封闭多边形。取各杆在坐标轴 x 和 y 上的投影，可得以下关系式

$$\left. \begin{aligned} \cos\phi + l_2 \cos\delta &= l_4 + l_3 \cos\psi \\ \sin\phi + l_2 \sin\delta &= l_3 \sin\psi \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

将 $\cos\phi$ 和 $\sin\phi$ 移到等式右边，再把等式两边平方相加，即可消去 δ ，整理后得

$$\cos\phi = \frac{l_4^2 + l_3^2 + 1 - l_2^2}{2l_4} + l_3 \cos\psi - \frac{l_3}{l_4} \cos(\psi - \phi)$$

为简化上式，令

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= l_3 \\ P_1 &= -l_3/l_4 \\ P_2 &= \frac{l_4^2 + l_3^2 + 1 - l_2^2}{2l_4} \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

则有
$$\cos\phi = P_0 \cos\psi + P_1 \cos(\psi - \phi) + P_2 \quad (2-5)$$

上式即为两连架杆转角之间的关系式，将已知的三对对应转角 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 分别代入式(2-5) 可得到方程组