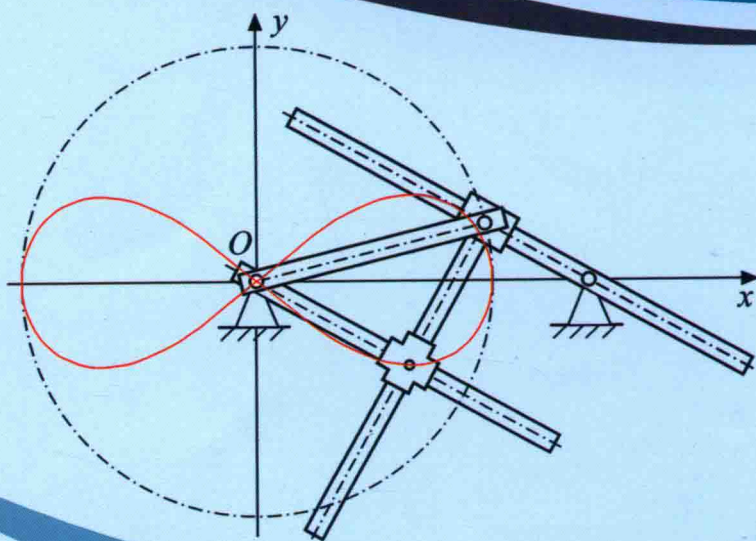


机械原理数值计算与仿真

李允旺 王洪欣 代素梅 著



机械原理数值计算与仿真

李允旺 王洪欣 代素梅 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

利用计算机技术与计算数学相关知识与方法进行机构学的研究是机构学研究领域及“机械原理”教学改革的一个重要方向。本书共分10章,分别是多叶线与桃形线机构、尖点轨迹机构、二重点轨迹机构、拐点轨迹机构、齿轮的共轭曲线与传动、变胞机构、抓取与夹持机构、机器人机构、工程机械的机构设计与分析、矿山机械的机构设计与分析,利用解析方法与数值分析方法对机构进行了分析研究。本书相对完整地研究了机器的传动与执行机构的类型、机构的解析和数值分析方法、同一工程问题的机构创新设计历程以及通过参数化的仿真实验展示这些传动与执行机构在一个周期内的传动性能与改进方法。本书一方面为利用计算机开展机构分析与设计提供了范围广泛的素材与引导,另一方面为大量的非线性方程组的数值求解提供不同的计算方法。同时,为进一步认识机械在生产与生活中的应用奠定了理论基础,为机器的创新设计提供基础理论与计算方法。

本书可作为高等院校工科机械类专业机械原理课程的补充教材,可满足机械原理课程上机实验与关于机构设计与分析的仿真实验需要,也可供机构学研究者、机械专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械原理数值计算与仿真 / 李允旺, 王洪欣, 代素梅著. —北京: 科学出版社, 2017.12

ISBN 978-7-03-055838-1

I. ①机… II. ①李… ②王… ③代… III. ①机械原理-数值计算
②机械原理-计算机仿真 IV. ①TH111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 301023 号

责任编辑: 惠 雪 曾佳佳 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 张克忠 / 封面设计: 许 瑞

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>

保定市中华美凯印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年12月第一版 开本: 787×1092 1/16

2017年12月第一次印刷 印张: 21

字数: 500 000

定价: 79.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

机器几乎都是由动力部件、传动机构、执行机构以及测控系统组成，其中动力部件把其他形式的能量转化成机械能；传动机构将动力部件的运动和力进行变换并传递给执行机构；执行机构完成规定的动作与工作任务；测控系统检测感知机器的运行状态，并对机器的运行进行调整与控制，保证机器的正常运行与工作。机器通常是由一些常见的基本机构组合而成，尽管其传动与执行机构的结构和用途千差万别，但只要对这些常见机构进行分析与研究就可为机器的分析与设计打下坚实的基础。机械工程专业设置的“机械原理”课程研究了常见机构的结构组成以及机构的分析与设计的基本理论、方法，但该课程只涉及机器中共性问题的基本知识、基础理论与基本方法，对机构类型的多样性介绍不足，对机构设计方法的多样性展开不够，对机构的特性与在工程上的应用结合不紧密，对机构在一个周期内的运动学与力学行为的研究不够深入，对解决同一工程问题的机构创新设计历程缺乏展示与启发；而且目前大多教材采用图解法作为研究机构的主要手段，虽然图解法具有直观简明的优点，但存在着精度差、难以建立运动参数与尺寸参数间的关系等缺点，很难满足工程设计的需要。

本书的撰写目的就是为了解决这些不足，相对完整地展示机器的传动机构与执行机构的类型、同一工程问题的机构创新设计历程，研究机构的解析和数值分析方法以及通过参数化的仿真实验展示这些传动与执行机构在一个周期内的传动性能与改进方法，以期扩展“机械原理”课程中的机构的类型，探索机构尺寸设计、运动与力学分析方法；本书一方面为利用计算机开展机构分析与设计提供范围广泛的素材与引导；另一方面为大量的非线性方程组的数值求解提供不同的计算方法；同时，为进一步认识机械在生产与生活中的应用奠定了理论基础，为机器的创新设计提供基础理论与计算方法。也可让读者深化对机构的多样性与独特性、设计方法与分析方法的复杂性与选择性、采用数值计算方法的必要性、仿真研究的优越性的认识。本书可作为高等院校工科机械类专业机械原理课程的补充教材，可满足机械原理课程上机实验与关于机构设计与分析的仿真实验需要，也可供机构学研究者、机械专业工程技术人员参考。

本书共分 10 章，分别是：多叶线与桃形线机构，介绍了规则封闭单环与多环曲线的机构实现方法；尖点轨迹机构，介绍了数学上的尖点概念与机构实现方法；二重点轨迹机构，介绍了数学上的二重点概念与机构实现方法；拐点轨迹机构，介绍了数学上的拐点概念与机构实现方法；齿轮的共轭曲线与传动，介绍了数学上的共轭概念与齿廓法线法设计方法；变胞机构，介绍了变胞的概念与设计方法；抓取与夹持机构，介绍了常用的抓取与夹持机构；机器人机构，介绍了机器人典型机构的基本问题与研究方法；工

程机械的机构设计与分析,介绍了典型的工程机械中的机构设计与分析方法;矿山机械的机构设计与分析,介绍了常用的矿山机械中的机构设计与分析方法。本书利用解析方法与数值分析方法对上述机构进行了分析研究,通过计算机编程获得机构运动学与动力学特征曲线,并采用 VB 编程制作了部分机构的演示动画;对各机构进行理论分析后设置了计算机编程分析的实践环节,有利于读者进行编程验证,也便于高校作为机械原理课程上机实验教材使用。

本书作者在机构学的教学与科研活动中潜心于机构的工程应用与设计方法的研究与实践,承担了国家自然科学基金项目 2 项、中国博士后科学基金会项目 1 项,参与国家“863”项目 2 项,承担了多项校企合作项目。本书作者在高阶停歇机构的设计原理、近似等速比传动机构的非迭代设计以及机器人机构尤其移动机器人行走机构设计等方面取得了一定的理论研究成果,在机构创新设计方面获得国家发明专利 20 余件,形成了本书关于机构的基本理论与工程应用相结合的体系。本书由中国矿业大学的李允旺、王洪欣及徐州工程学院的代素梅共同撰写,全书由李允旺统稿,本书凝聚了作者在教学科研活动中的研究成果。

本书所进行的研究也得到了国家自然科学基金面上项目(51675518)、江苏高校优势学科建设工程项目、江苏高校品牌专业建设工程项目的资助,作者在此表示衷心的感谢。

在本书的出版过程中,科学出版社的有关领导与编辑给予了大力的支持,并付出了辛勤的劳动,作者在此表示真挚的谢意。由于作者水平有限,不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2017 年 12 月

目 录

前言

1 多叶线与桃形线机构	1
1.1 双曲柄双叶线生成机构	1
1.2 曲柄摇块双叶线生成机构	4
1.3 平面八杆双叶线生成机构	5
1.4 平面八杆三叶线生成机构	6
1.5 平面六杆双叶线生成机构	7
1.6 平面六杆四叶线生成机构	8
1.7 内行星轮系多叶线生成机构	9
1.8 钉形曲柄平面四杆桃形线生成机构	11
1.9 十字导杆形平面四杆桃形线生成机构	12
2 尖点轨迹机构	15
2.1 曲柄摇杆机构连杆上的双尖点轨迹	15
2.2 偏置曲柄滑块机构连杆上的双尖点轨迹	19
2.3 曲柄摇块机构导杆上的双尖点轨迹	20
2.4 曲柄滑块机构连杆上的单尖点轨迹	22
2.5 双摇杆机构中的尖点与拐点轨迹	24
2.6 内行星轮系任意个尖点轨迹生成机构	26
2.7 外行星轮系任意个尖点轨迹生成机构	27
3 二重点轨迹机构	28
3.1 曲柄摇杆机构连杆上的第一类二重点轨迹	28
3.2 曲柄摇杆机构连杆上的第二类二重点轨迹	33
3.3 偏心曲柄滑块机构连杆上的二重点轨迹	35
3.4 对心曲柄滑块机构连杆上的二重点轨迹	39
3.5 曲柄摇块机构导杆上的第一类二重点轨迹	42
3.6 曲柄摇块机构导杆上的第二类二重点轨迹	44
3.7 反向双曲柄机构连杆上的二重点轨迹	45

4	拐点轨迹机构	48
4.1	平面机构连杆曲线上的拐点与拐点圆以及轨迹曲率	48
4.2	曲柄摇杆机构连杆上拐点轨迹的设计与分析	52
4.3	双摇杆机构连杆上的拐点与吊机设计	56
4.4	对心曲柄滑块机构连杆上拐点轨迹的设计与分析	59
4.5	偏置曲柄滑块机构连杆上拐点轨迹的设计与分析	62
4.6	曲柄摇块机构导杆上拐点轨迹的设计与分析	66
4.7	I型曲柄摇块机构导杆上拐点轨迹的设计与分析	70
4.8	II型曲柄摇块机构导杆上拐点轨迹的设计与分析	71
4.9	I型曲柄滑块机构连杆上拐点轨迹的设计与分析	72
4.10	II型曲柄滑块机构连杆上拐点轨迹的设计与分析	73
4.11	曲柄导杆机构滑块上拐点轨迹的设计与分析	74
4.12	内行星轮上鲍尔点轨迹的设计与分析	78
4.13	外行星轮上鲍尔点轨迹的设计与分析	80
4.14	中心轮固定内置时行星轮上鲍尔点轨迹的设计与分析	82
4.15	拐点与六杆机构钳子	85
5	齿轮的共轭曲线与传动	91
5.1	蜗线齿轮机构	91
5.2	椭圆齿轮机构	93
5.3	非圆行星轮的节曲线	95
5.4	活齿传动的齿廓包络法	98
5.5	摆线针轮行星传动	101
5.6	梯形齿轮与共轭齿形传动	104
5.7	销齿与共轭齿形的转化求解法	110
5.8	销齿与共轭齿形的齿廓法线求解法	112
5.9	渐开线齿轮的过渡齿廓曲线	113
5.10	矩形齿条与渐开线齿轮传动	117
6	变胞机构	120
6.1	辊式破碎机传动机构	120
6.2	变结构增力剪切机构	123
6.3	车载式轮椅平移升降机构	126
6.4	径向闸瓦制动器机构	128
6.5	折叠式担架车机构	133
7	抓取与夹持机构	137
7.1	摆动输入连杆夹持机构	137

7.2	移动单点输入连杆夹持机构	139
7.3	移动双点输入连杆夹持机构	141
7.4	移动输入平动连杆夹持机构	142
7.5	移动输入连杆直接夹持机构	144
7.6	摇块式抓取机构	145
8	机器人机构	148
8.1	平面关节型机器人	148
8.2	平面关节型机器人动力学	151
8.3	下肢助行器机构	156
8.4	直角坐标机器人中的升降伸缩机构	162
8.5	组合连杆型机器人中的力矩平衡	164
9	工程机械的机构设计与分析	169
9.1	高空作业车九杆机构	169
9.2	高空作业车十杆机构	172
9.3	高空作业车索约束举升机构	177
9.4	自立塔式起重机中的平面四杆机构	183
9.5	公共汽车自动门机构	187
9.6	电梯轿厢外侧自动门机构	190
9.7	连杆压力机工作机构	192
9.8	肘杆压力机工作机构	197
9.9	平面十杆冲压机工作机构	201
9.10	石油抽油机中的平面六杆机构	208
9.11	单剪叉式升降平台机构	218
9.12	六杆液压升降平台机构	220
9.13	十杆液压升降平台机构	222
9.14	挖树机摆动翻转机构	226
9.15	农膜回收机的执行机构	228
9.16	割草机中的自动避障机构	230
9.17	揉面四杆搅拌机构	235
9.18	窗户开闭六杆机构	238
9.19	织机开口机构	240
9.20	载重水平变幅的绳索补偿机构	244
10	矿山机械的机构设计与分析	252
10.1	简摆颚式破碎机的平面六杆机构	252
10.2	复摆颚式破碎机的曲柄摇杆机构	258

10.3	液压支架的双摇杆机构	261
10.4	挖掘机的铲斗双摇杆机构	266
10.5	挖掘机的转斗曲柄摇块机构	269
10.6	挖掘机小臂相对于大臂动作的曲柄摇块机构	272
10.7	挖掘机大臂相对于回转支撑动作的曲柄摇块机构	274
10.8	装载机铲斗平举四杆机构的迭代法设计	275
10.9	装载机铲斗平举四杆机构的最小二乘法设计	281
10.10	装载机转斗四杆机构的最小二乘法设计	284
10.11	汽车自卸与车门联动开闭机构	286
10.12	汽车转向等腰梯形机构双变量迭代法设计	290
10.13	汽车转向等腰梯形机构单变量迭代法设计	296
10.14	汽车转向前轮平面六杆机构的迭代法设计	300
10.15	汽车转向后轮平面六杆机构的迭代法设计	307
10.16	汽车转向前后联动平面四杆机构的迭代法设计	311
10.17	曲柄摇杆型双腔复摆颚式破碎机的运动学与力学分析	316
10.18	凿岩台车双摇块组合机构	323
参考文献		326

1 多叶线与桃形线机构

多叶线与桃形线在图案制作上得到了广泛应用，其图形的对称性给人们带来美感。

在使用 VB 编写机构的位置分析时，机构中的角度求解会出现形如 $\arctan(Y/X)$ 的反正切函数，VB 中为 $\text{Atn}(Y/X)$ ，其中 Y 为一个关于机构尺寸的相当于 xOy 坐标系中 Y 方向分量的表达式， X 为另一个关于机构尺寸的相当于 X 方向分量的表达式，数学上的 $\arctan(Y/X)$ 与 VB 中的 $\text{Atn}(Y/X)$ 函数的值域都为 $[-\pi/2, \pi/2]$ 。当构件的角位移在该值域内时，可以直接使用 VB 中的 $\text{Atn}(Y/X)$ 函数；当构件的角位移超出该值域时，不能直接使用 $\text{Atn}(Y/X)$ 函数。譬如，当 $X=Y \neq 0$ 与 $-X=-Y \neq 0$ 时，VB 中的 $\text{Atn}(Y/X)$ 解是一样的；当 $X_1 > 0, Y_1 < 0, X_2 < 0, Y_2 > 0, X_1 = |X_2|, |Y_1| = Y_2$ 时，VB 中的 $\text{Atn}(Y/X)$ 解也是一样的，但是，以上条件所对应的机构处于不同的位置，所以，使用 $\text{Atn}(Y/X)$ 函数是得不到正确解的。为了使用 $\text{Atn}(Y/X)$ 函数而又能得到正确的解，本书定义数学上的双变量函数为 $\arctan 2(Y/X)$ ，VB 中的双变量函数为 $\text{atn2}(Y,X)$ ， $\text{atn2}(Y,X)$ 在 VB 中的 Function 函数过程为

```
Private Function atn2(Y As Double, X As Double) As Double
    If X > 0 And Y > 0 Then atn2 = Atn(Y / X)
    If X > 0 And Y < 0 Then atn2 = Atn(Y / X) + 2 * 3.14159265
    If X < 0 Then atn2 = Atn(Y / X) + 3.14159265
```

```
End Function
```

当需要使用 $\text{atn2}(Y,X)$ 时，在 `Private Sub Form_Activate()` 的语句体内直接调用即可，比如 Y_1 与 X_1 分别是两个已知的表达式，数学上的 $\theta = \arctan(Y_1/X_1)$ 在 VB 中为 $\theta = \text{atn2}(Y_1, X_1)$ 。

为了绘制曲线的方便，本书定义类速度、类加速度、类角速度与类角加速度等概念，设位移 $S=S(\varphi)$ ， φ 关于时间 t 的导数等于常数 ω ，则类速度 $V_L=dS/d\varphi$ ，类加速度 $a_L=d^2S/d\varphi^2$ ；设角位移 $\psi=\psi(\varphi)$ ， φ 关于时间 t 的导数等于常数 ω ，则类角速度 $\omega_L=d\psi/d\varphi$ ，类角加速度 $\alpha_L=d^2\psi/d\varphi^2$ 。这样做是为了避免在速度与角速度表达式中出现系数 ω ，加速度与角加速度表达式中出现系数 ω^2 。

在 C 语言与 C++ 语言中，既有单变量函数 $\text{atan}(Z)$ ， $\text{atan}(Z)$ 等于数学中的 $\arctan(Z)$ ，值域为 $-\pi/2 \leq \text{atan}(Z) \leq \pi/2$ ，也有双变量函数 $\text{atan2}(Y,X)$ ， $\text{atan2}(Y,X)$ 等于数学中的 $\arctan(Y/X)$ ，值域为 $0 \leq \text{atan2}(Y,X) \leq 2\pi$ 。

1.1 双曲柄双叶线生成机构

图 1-1(a) 为一个双曲柄机构，其连杆上的一点能够生成双叶线。曲柄 1 的杆长 a 与

曲柄3的杆长 c 相等,连杆2的杆长 b 与机架4的杆长 d 相等,当曲柄1做匀速转动时,曲柄3做反向变速转动,连杆2上 P 点的轨迹为一条双叶线,曲柄1的角位移为 φ ,曲柄3的角位移为 δ ,连杆2的角位移为 β ,当连杆2上的 P 点在 b 的中点时,即 $r = AP = 0.5b$,生成两瓣对称的双叶线,如图1-1(b)所示;当 $r = AP \neq 0.5b$ 时,生成两瓣非对称的双叶线。

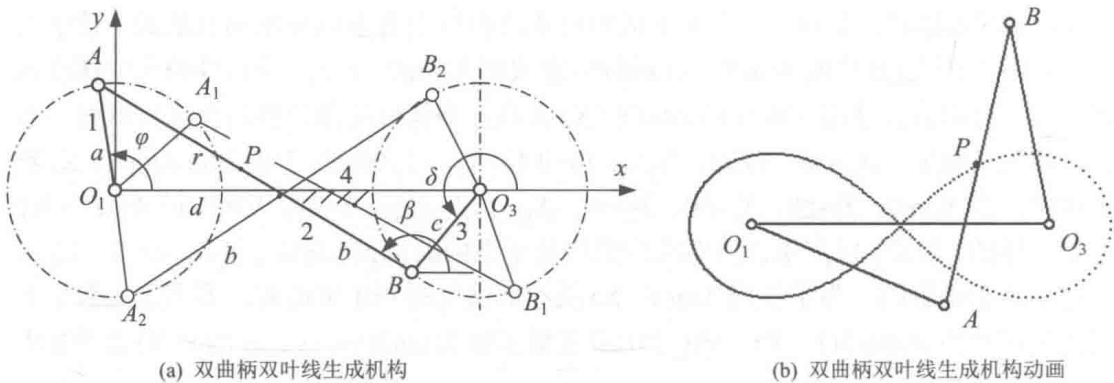


图 1-1 双曲柄双叶线生成机构与动画

1.1.1 双曲柄双叶线机构的运动分析

在图1-1(a)所示的坐标系中, A 、 B 两点的坐标分别为 $x_A = a \cos \varphi$, $y_A = a \sin \varphi$; $x_B = d + c \cos \delta = b + a \cos \delta$, $y_B = a \sin \delta$, 该机构的位移方程为 $(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 = b^2$, 即

$$(a \cos \varphi - b - a \cos \delta)^2 + (a \sin \varphi - a \sin \delta)^2 = b^2 \quad (1-1)$$

令 $k = b/a > 1$, 展开式(1-1)得

$$\begin{aligned} (\cos \varphi - k - \cos \delta)^2 + (\sin \varphi - \sin \delta)^2 &= k^2 \\ \cos^2 \varphi + k^2 + \cos^2 \delta - 2k \cos \varphi + 2k \cos \delta - 2 \cos \varphi \cos \delta + \sin^2 \varphi + \sin^2 \delta - 2 \sin \varphi \sin \delta &= k^2 \\ 2 - 2k \cos \varphi + 2k \cos \delta - 2 \cos \varphi \cos \delta - 2 \sin \varphi \sin \delta &= 0 \\ 1 - k \cos \varphi + k \cos \delta - \cos \varphi \cos \delta - \sin \varphi \sin \delta &= 0 \\ -\sin \varphi \sin \delta + (k - \cos \varphi) \cos \delta + 1 - k \cos \varphi &= 0 \end{aligned} \quad (1-2)$$

由于 $\sin \delta = 2 \tan(\delta/2) / [1 + \tan^2(\delta/2)]$, $\cos \delta = [1 - \tan^2(\delta/2)] / [1 + \tan^2(\delta/2)]$, 令 $z = \tan(\delta/2)$, 于是, 式(1-2)进一步转化为

$$\begin{aligned} -\sin \varphi (2z) + (k - \cos \varphi)(1 - z^2) + (1 - k \cos \varphi)(1 + z^2) &= 0 \\ -2 \sin \varphi \cdot z + (k - \cos \varphi) - (k - \cos \varphi)z^2 + (1 - k \cos \varphi) + (1 - k \cos \varphi)z^2 &= 0 \\ 2 \sin \varphi \cdot z + (k - \cos \varphi)z^2 - (1 - k \cos \varphi)z^2 - (k - \cos \varphi) - (1 - k \cos \varphi) &= 0 \end{aligned}$$

$$[k(1 + \cos \varphi) - (1 + \cos \varphi)]z^2 + 2 \sin \varphi \cdot z - k + \cos \varphi - 1 + k \cos \varphi = 0$$

$$[k(1 + \cos \varphi) - (1 + \cos \varphi)]z^2 + 2 \sin \varphi \cdot z - (k + 1) + (1 + k) \cos \varphi = 0$$

$$(1 + \cos \varphi)(k - 1)z^2 + 2 \sin \varphi \cdot z + (1 + k)(\cos \varphi - 1) = 0$$

$$[(1 - k)(1 + \cos \varphi)]z^2 - (2 \sin \varphi)z + (1 + k)(1 - \cos \varphi) = 0 \quad (1-3)$$

$$\begin{aligned} 2 \sin \varphi \pm \sqrt{4 \sin^2 \varphi - 4(1 - k)(1 + \cos \varphi)(1 + k)(1 - \cos \varphi)} &= 2 \sin \varphi \pm 2 \sqrt{\sin^2 \varphi - (1 - k^2)(1 - \cos^2 \varphi)} \\ &= 2 \sin \varphi \pm 2 \sqrt{\sin^2 \varphi - 1 + \cos^2 \varphi + k^2 - k^2 \cos^2 \varphi} = 2 \sin \varphi \pm 2k \sin \varphi = 2(1 \pm k) \sin \varphi \end{aligned}$$

“+”对应反平行四边形，当 $0 \leq \varphi \leq \pi$ 时， δ 的解为

$$\delta = 2 \arctan 2 \left[\frac{(1 + k) \sin \varphi}{(1 - k)(1 + \cos \varphi)} \right] \quad (1-4)$$

当 $\pi < \varphi < 2\pi$ 时， δ 的解为

$$\delta = 2 \arctan 2 \left[\frac{-(1 + k) \sin \varphi}{(k - 1)(1 + \cos \varphi)} \right] \quad (1-5)$$

连杆 2 的角位移 β 为

$$\beta = \arctan 2[(\sin \varphi - \sin \delta) / (\cos \varphi - \cos \delta - k)] \quad (1-6)$$

设连杆 2 上 P 点的坐标 x_P 、 y_P 分别为

$$\left. \begin{aligned} x_P &= a \cos \varphi + r \cos(\beta + \pi) \\ y_P &= a \sin \varphi + r \sin(\beta + \pi) \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

由式(1-2)得曲柄 3 的类角速度方程及其解 $\omega_{L3} = d\delta/d\varphi = \omega_3/\omega_1$ 分别为

$$-\cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cdot \omega_{L3} + \sin \varphi \cos \delta - (k - \cos \varphi) \sin \delta \cdot \omega_{L3} + k \sin \varphi = 0$$

$$[\sin \varphi \cos \delta + (k - \cos \varphi) \sin \delta] \omega_{L3} = k \sin \varphi + \sin \varphi \cos \delta - \cos \varphi \sin \delta$$

$$\omega_{L3} = [k \sin \varphi + \sin(\varphi - \delta)] / [\sin(\varphi - \delta) + k \sin \delta] \quad (1-8)$$

从动曲柄 3 与主动曲柄 1 的角速度比值 ω_3/ω_1 是 φ 的函数，当 $\varphi = 0$ 时， $\delta = 2\pi$ ， $(\omega_3/\omega_1)_{\min} = (b + a)/(a - b)$ ， $(\omega_3/\omega_1)_{\max} = (a - b)/(b + a)$ ，双叶线在 x 轴上的最大长度 $L_{x\max} = (a + r) - (-a + r) = 2a$ ，双叶线在 y 轴方向上的最大长度 $L_{y\max} \approx 0.6a$ 。

1.1.2 计算机编程分析内容与要求

(1) 设计参数化的界面，以一组默认参数作为预设计，即 $a = 0.300 \text{ m}$ ， $b = 0.500 \text{ m}$ ， $r = 0.250 \text{ m}$ ， $\omega_1 = d\varphi/dt = 1$ ，显示机构的动画与 P 点的轨迹；显示 ω_{L3} 关于 φ 的速比曲线；为了避免式(1-4)、式(1-5)的分母出现零， φ 从 0.2° 开始， $\varphi_i = 0.2\pi/180 + (i - 1)\pi/180$ ， $i = 1, 2, \dots, 361$ ；

(2) 以滚动条的方式改变 r 的大小， $-0.2b \leq r \leq 1.2b$ ，显示新点的轨迹与机构的动画；

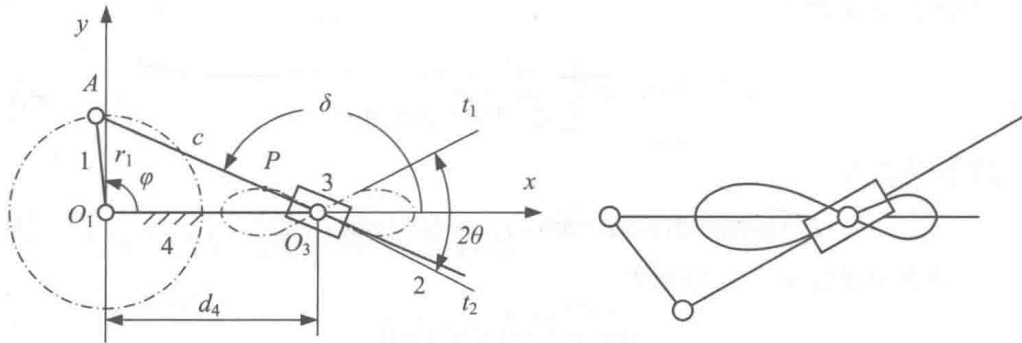
(3) 生成 $P(x_P, y_P)$ 点轨迹的 Excel 数据文件， $\varphi_i = 0.2\pi/180 + (i - 1)\pi/180$ ， $i =$

1,2,⋯,361;

(4) 生成 ω_{L3} 的 Excel 数据文件, $\varphi_i = 0.2\pi/180 + (i-1)\pi/180$, $i = 1,2,\dots,361$ 。

1.2 曲柄摇块双叶线生成机构

图 1-2(a)为曲柄摇块双叶线生成机构, 设曲柄 1 为主动件, 杆长为 r_1 , 角位移为 φ , 角速度为 ω_1 ; 导杆 2 做平面运动, AO_3 的长度为 S_1 , AP 的长度为 c , 角位移为 δ ; 机架 4 的长度为 d_4 , $r_1/d_4 = k$ 。当 $c = AP = \sqrt{d_4^2 - r_1^2} = d_4\sqrt{1 - k^2}$ 时, P 点的轨迹为双叶线, 如图 1-2(b)所示, 交叉点位于固定转动中心 O_3 , 双叶线在 O_3 点的切线 t_1 、 t_2 之间的夹角 $2\theta = 2\arctan(r_1/\sqrt{d_4^2 - r_1^2}) = 2\arctan(k\sqrt{1 - k^2})$ 。



(a) 曲柄摇块双叶线生成机构

(b) 曲柄摇块双叶线生成机构动画

图 1-2 曲柄摇块双叶线生成机构与动画

1.2.1 曲柄摇块双叶线机构的运动分析

曲柄摇块双叶线机构的位置方程及其解分别为

$$r_1 \cos \varphi - d_4 = S_1 \cos \delta \quad (1-9)$$

$$r_1 \sin \varphi = S_1 \sin \delta \quad (1-10)$$

$$\delta = \arctan 2[r_1 \sin \varphi / (r_1 \cos \varphi - d_4)] = \arctan 2[k \sin \varphi / (k \cos \varphi - 1)] \quad (1-11)$$

$$S_1 = \sqrt{(r_1 \sin \varphi)^2 + (r_1 \cos \varphi - d_4)^2} = d_4 \sqrt{k^2 - 2k \cos \varphi + 1} \quad (1-12)$$

P 点的坐标 x_P 、 y_P 分别为

$$x_P = r_1 \cos \varphi - c \cos \delta = k \cdot d_4 \cos \varphi - c \cos \delta \quad (1-13)$$

$$y_P = r_1 \sin \varphi - c \sin \delta = k \cdot d_4 \sin \varphi - c \sin \delta \quad (1-14)$$

由式(1-11)得摇块 3 的类角速度方程及其解 $\omega_{L3} = d\delta/d\varphi = \omega_3/\omega_1$ 分别为

$$\tan \delta = k \sin \varphi / (k \cos \varphi - 1)$$

$$\tan \delta (k \cos \varphi - 1) = k \sin \varphi$$

$$\omega_{L3} / \cos^2 \delta \cdot (k \cos \varphi - 1) - k \tan \delta \sin \varphi = k \cos \varphi$$

$$\omega_{L3} = (k \cos \varphi + k \tan \delta \sin \varphi) \cos^2 \delta / (k \cos \varphi - 1) \quad (1-15)$$

双叶线在 x 轴上的最大长度 $L_{x\max} = (r_1 + c) - (-r_1 + c) = 2r_1$, 双叶线在 y 轴方向上的最大长度 $L_{y\max} \approx 0.6a$ 。

1.2.2 计算机编程分析内容与要求

- (1) 设计参数化的界面, 以一组默认参数作为预设计, $d_4 = 500 \text{ mm}$, $k = 0.5$, $r_1 = k \cdot d_4$, $\omega_1 = 1$, 显示机构的动画与 P 点的轨迹;
- (2) 以滚动条的方式改变 k 的大小, $0.2 \leq k \leq 1.2$, 显示新点的轨迹与机构的动画;
- (3) 生成 $P(x_P, y_P)$ 点轨迹的 Excel 数据文件, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ 。

1.3 平面八杆双叶线生成机构

1.3.1 平面八杆双叶线机构的尺寸设计

图 1-3(a) 为平面八杆双叶线生成机构。杆 4、6、7 的长度相等, 即 $CP = AB = OC = b$; 杆 5、8 的长度相等, 即 $BC = OA = d$; $OABC$ 组成反平行四边形, $ABPC$ 组成平行四边形, OCP 组成等腰三角形。

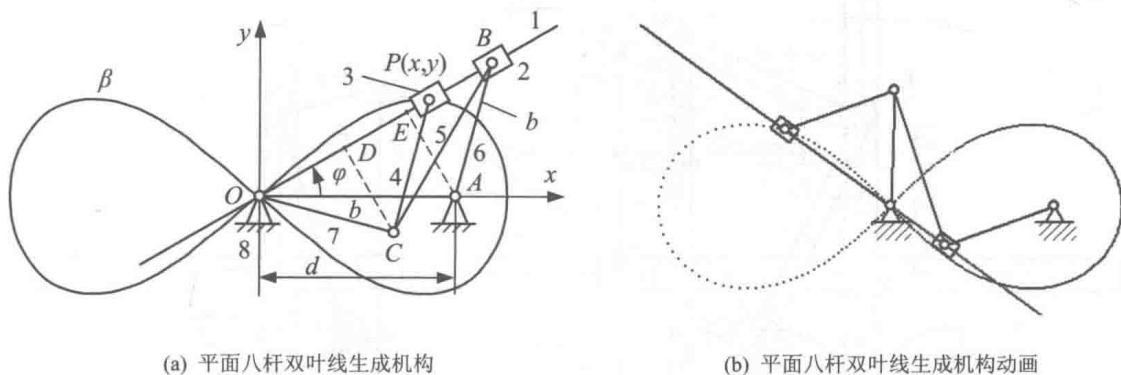


图 1-3 平面八杆双叶线生成机构与动画

在 xOy 坐标系中, 引入参考点 D 、 E , $CD \perp OP$, $AE \perp OP$, $AE = CD = OAsin\varphi = d\sin\varphi$, 令 $k = b/d \leq 1$, $\rho = OP = 2OD = 2\sqrt{(OC)^2 - (CD)^2} = 2\sqrt{b^2 - d^2 \sin^2 \varphi}$ 。当 $d = \sqrt{2b}$ 时, $\rho = 2b\sqrt{1 - 2\sin^2 \varphi}$, 于是, P 点的轨迹为双叶线, 其极坐标方程为 $\rho = 2b\sqrt{|\cos(2\varphi)|}$, P 点的轨迹曲线 β 如图 1-3(a) 所示, 平面八杆双叶线生成机构的动画如图 1-3(b) 所示。

P 点的坐标 x_P 、 y_P 分别为

$$\left. \begin{aligned} x_P &= \rho \cos \varphi \\ y_P &= \rho \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

1.3.2 计算机编程分析内容与要求

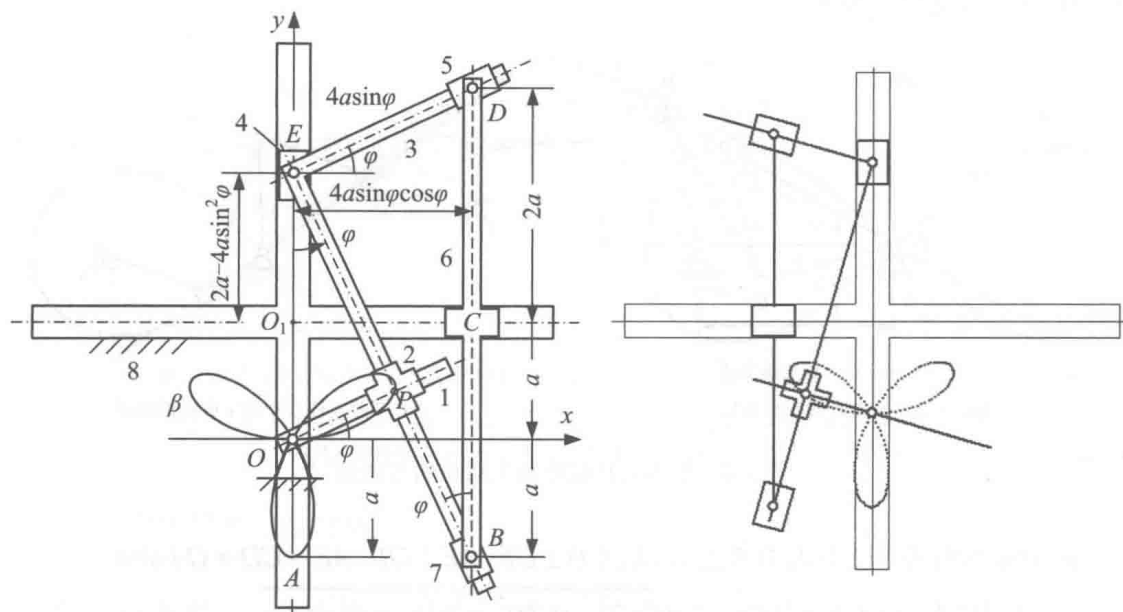
设 $b = 300 \text{ mm}$, $d = \sqrt{2}b$ 。

- (1) 制作机构的动画, 显示 P 点的轨迹, $\varphi_i = 0 + i\pi/180$; $i = 0, 1, 2, \dots, 360$;
- (2) 计算并输出 x_P 、 y_P 的 Excel 数据表, $\varphi_i = 0 + i\pi/180$; $i = 0, 1, 2, \dots, 360$ 。

1.4 平面八杆三叶线生成机构

1.4.1 平面八杆三叶线机构的尺寸设计

图 1-4(a) 为平面八杆三叶线轨迹生成机构。在 xOy 坐标系中, $O_1O = OA = a$, $BD = 4a$, $O_1E = 2a - 4a\sin^2\varphi$, $OE = O_1E + a = 3a - 4a\sin^2\varphi$, $ED = 4a\sin\varphi$, 直角 $\triangle EPO \sim \triangle BED$, $OE/BD = OP/DE$, 令 $\rho = OP$, 于是, P 点轨迹的三叶线极坐标方程为 $\rho = OE\sin\varphi = (O_1E + O_1O)\sin\varphi = [(2a - 4a\sin^2\varphi) + a]\sin\varphi = 3a\sin\varphi - 4a\sin^3\varphi = a\sin(3\varphi)$, 当主动杆 1 做整周转动时, P 点的轨迹曲线 β 如图 1-4(a) 所示, 平面八杆三叶线生成机构的动画如图 1-4(b)



(a) 平面八杆三叶线生成机构

(b) 平面八杆三叶线生成机构动画

图 1-4 平面八杆三叶线生成机构与动画

所示。

在 xOy 坐标系中, P 点的坐标 x_P 、 y_P 分别为

$$\left. \begin{aligned} x_P &= \rho \cos \varphi \\ y_P &= \rho \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

1.4.2 计算机编程分析内容与要求

(1) 已知 $a = 300$ mm, 制作机构的动画, 显示 P 点的轨迹, $\varphi_i = 0 + i\pi/180$; $i = 0, 1, 2, \dots, 360$;

(2) 计算并输出 x_P 、 y_P 的 Excel 数据表, $\varphi_i = 0 + i\pi/180$; $i = 0, 1, 2, \dots, 360$ 。

1.5 平面六杆双叶线生成机构

1.5.1 平面六杆双叶线生成机构的尺寸设计

图 1-5 为平面六杆双叶线轨迹生成机构。 $OA = a$, 为双叶线长轴的长度, $OB = d = \sqrt{a^2 + b^2}$, b 为双叶线短轴的长度, $k = d/a > 1$, $AP = d \sin \varphi$, $\rho = OP = \sqrt{a^2 - d^2 \sin^2 \varphi}$, 当 $k = d/a = \sqrt{2}$ 时, $\rho = a\sqrt{1 - 2 \sin^2 \varphi} = a\sqrt{\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi} = a\sqrt{|\cos 2\varphi|}$ 。

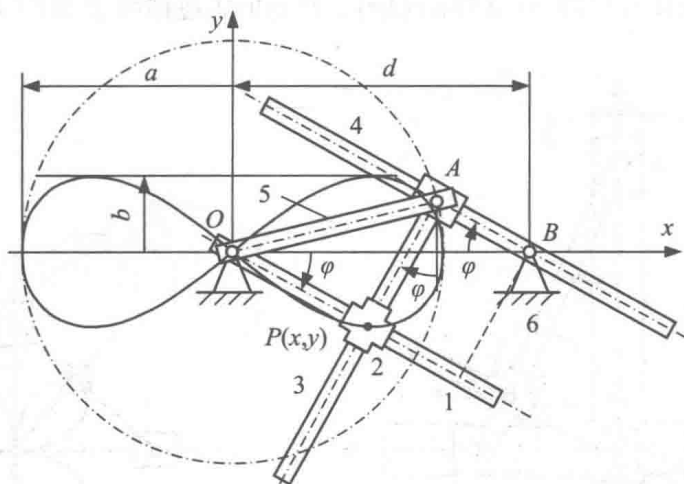


图 1-5 平面六杆双叶线生成机构

A 点的坐标为 $x_A = \rho \cos \varphi + AP \sin \varphi = \rho \cos \varphi + d \sin^2 \varphi$, $y_A = -\rho \sin \varphi + AP \cos \varphi = -\rho \sin \varphi + d \sin \varphi \cos \varphi$ 。

在 xOy 坐标系中, 当 $0 \leq \varphi < 360^\circ$ 时, P 点的坐标 x_P 、 y_P 分别为

$$\left. \begin{aligned} x_P &= \rho \cos(2\pi - \varphi) \\ y_P &= \rho \sin(2\pi - \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

1.5.2 计算机编程分析内容与要求

已知 $a=0.200 \text{ m}$, $d=0.282 \text{ m}$ 。

- (1) 制作机构的动画, 显示 P 点的轨迹, $\varphi_i = 0 + i\pi/180$; $i = 0, 1, 2, \dots, 360$;
- (2) 计算并输出 x_P 、 y_P 的 Excel 数据表, $\varphi_i = 0 + i\pi/180$; $i = 0, 1, 2, \dots, 360$ 。

1.6 平面六杆四叶线生成机构

1.6.1 平面六杆四叶线机构的尺寸设计

图 1-6(a)为平面六杆四叶线生成机构。滑块 2 具有相互垂直的导槽, 主动导杆 1 与机架 6 组成转动副 A 、与滑块 2 组成移动副, 连杆 5 的长度为 b , 连杆 5 与垂直运动的滑块 3、水平运动的滑块 4 分别组成转动副 B 、 C , 连杆 5 与滑块 2 组成移动副。在 xAy 坐标系中, 当主动导杆 1 做定轴整周转动时, 滑块 4 的水平位移 $AC = b \sin \varphi$, C 点到滑块 2 上 P 点的长度 $PC = AC \sin \varphi = b \sin^2 \varphi$, 令 $AP = \rho$, $\triangle APC$ 与 $\triangle BAC$ 相似, 由 $PC/AC = AP/BA$, 即 $b \sin^2 \varphi / (b \sin \varphi) = \rho / (b \cos \varphi)$, $\rho = b \sin \varphi \cos \varphi$, 于是, P 点轨迹的四叶线极坐标方程为 $\rho = 0.5b \sin(2\varphi)$, P 点的轨迹曲线 β 如图 1-6(a)所示, 平面六

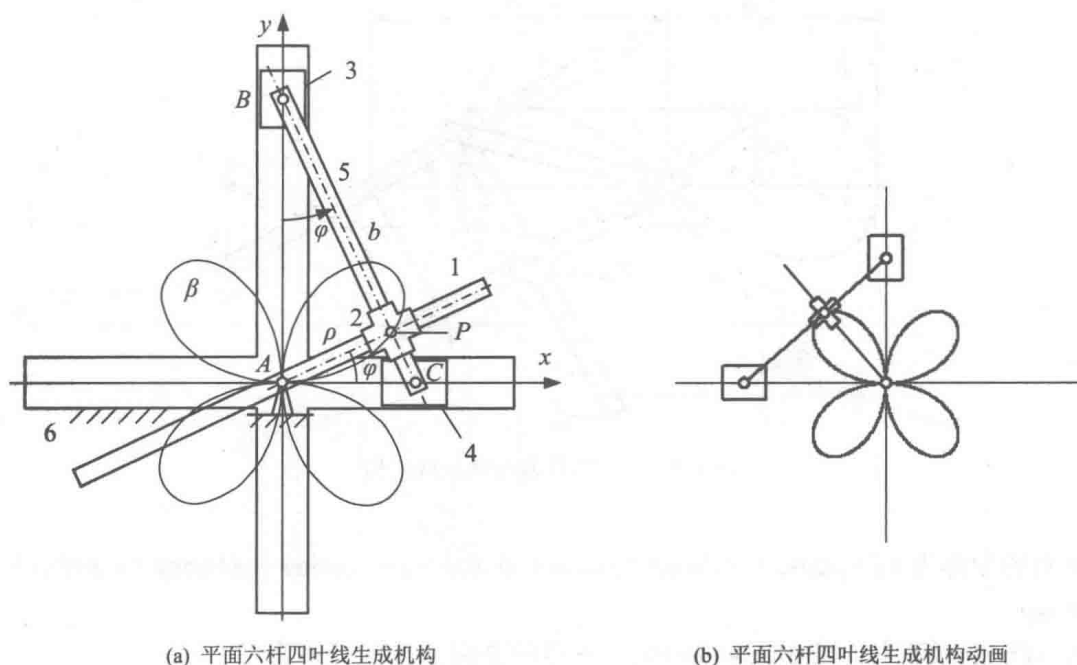


图 1-6 平面六杆四叶线生成机构与动画