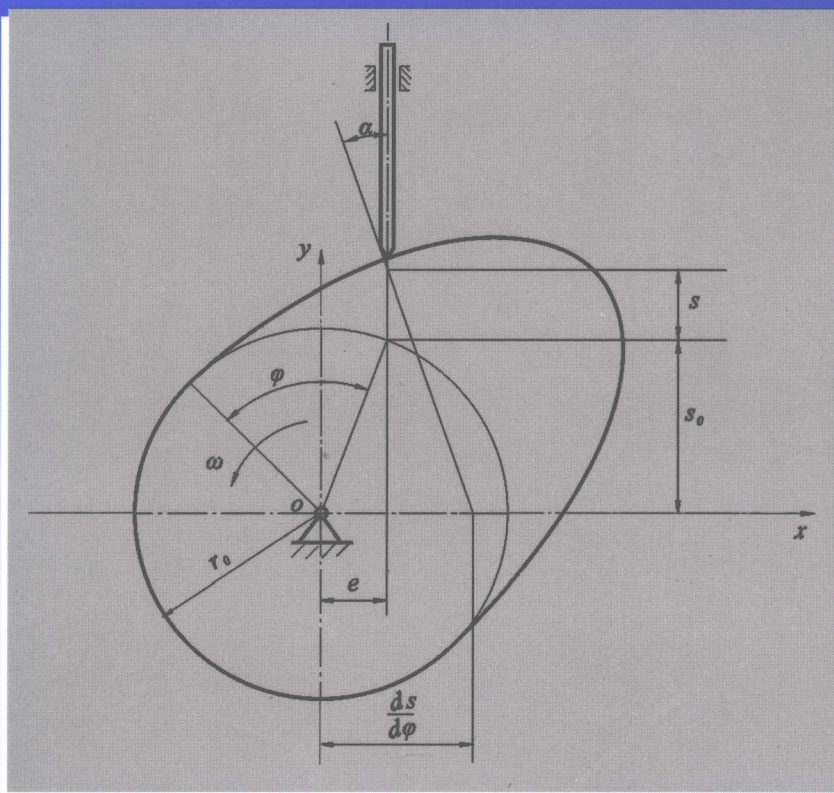


■ 高 等 学 校 教 材 ■



MATLAB

◎ 李滨城 徐超 编著

机械原理 MATLAB

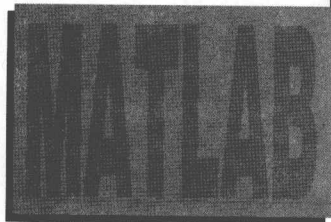
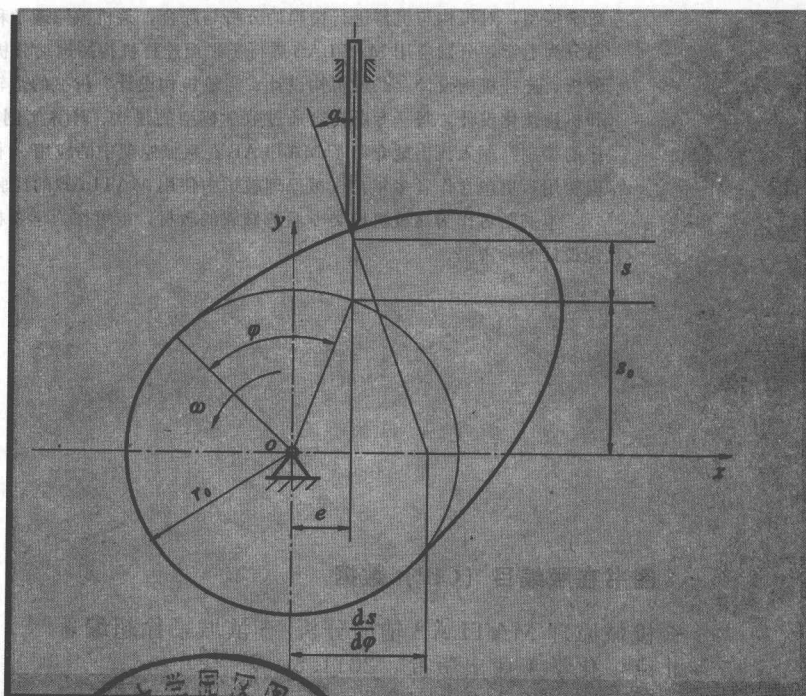


辅助分析



化学工业出版社

■ 高 等 学 校 教 材 ■



李宾城 徐超 编著

机械原理 **MATLAB**



NLIC 2970645372

辅助分析



化学工业出版社

北京 · 100000

· 北京 ·

元 00.25 / 角 3 家

本书介绍了数学软件 MATLAB 辅助机械原理分析的方法。运用解析法,通过建立数学模型,对机构与机器进行精确的分析与综合,是机械原理学科发展的重要方向。全书分为七章,分别应用 MATLAB 进行了平面连杆机构的运动分析、平面连杆机构的力分析、连杆机构设计、凸轮机构设计、齿轮机构设计、机械的运转及其速度波动的调节和机构优化设计,每一专题内容通过数学模型的建立、计算实例的介绍、MATLAB 程序的编制,深入浅出地介绍了 MATLAB 在机械原理中的应用。书中大量的程序实例不但实用,更包含作者多年在机械原理教学中使用 MATLAB 的经验。

本书既可作为高校机械类专业选修课的教材,也可作为学习机械原理和机械原理课程设计的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械原理 MATLAB 辅助分析/李滨城,徐超编著.
北京:化学工业出版社,2011.5
ISBN 978-7-122-10596-7

I. 机… II. ①李…②徐… III. 机构学-计算机
辅助分析-软件包, MATLAB IV. TH111-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 026200 号

责任编辑:杜进祥 周永红 装帧设计:韩 飞
责任校对:边 涛

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 刷:北京市振南印刷有限责任公司
装 订:三河市宇新装订厂
710mm×1000mm 1/16 印张 11 $\frac{1}{4}$ 字数 227 千字
2011 年 7 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: 25.00 元

版权所有 违者必究

前 言

FOREWORD

机械原理 MATLAB 辅助分析

现今, 计算机辅助设计在机械原理学科中得到了广泛的应用。为了在教学中培养学生利用计算机先进软件解决实际问题的思维方法和动手能力, 我们从 2007 年开始尝试在机械原理教学中应用 MATLAB 辅助机械原理分析与综合, 在多年教学改革实践的基础上, 编写了这本《机械原理 MATLAB 辅助分析》。

本书运用科学与工程计算语言 MATLAB 进行编程计算, 它是一种数值计算的优秀工具, 易学易用, 一般学生只要经过 10 多个小时的练习就能够用它完成所需要的计算。

本书在内容编写上首先是应用解析法建立分析或综合的数学模型, 然后通过具体的计算实例来说明数学模型的使用方法, 接着用 MATLAB 进行编程计算。书中所附程序全部在计算机上调试通过, 有些实例还根据运算结果绘制出了相应的分析曲线图和设计仿真图。其目的—方面可加深学生对课程内容的理解, 提高分析问题和解决问题的能力; 另一方面, 意在培养学生独立编程能力, 掌握 MATLAB 编程方法和技巧。

在编写本书过程中, 编者参考了高等院校理工科机械类专业机械原理课程的现行教学大纲, 也参照了兄弟院校编写的《机械原理》有关教材。

江苏科技大学有关领导和机械原理学科组对本书的编写和出版给予了热情的帮助和支持, 在此谨致深切的谢意。

由于编者水平有限, 加之编写仓促, 书中定有不妥之处, 恳请读者批评指正。

编者

2010 年 10 月

目 录

CONTENTS 机械原理 MATLAB 辅助分析

第一章 平面连杆机构的运动分析	1
第一节 平面连杆机构运动分析概述	1
第二节 铰链四杆机构的运动分析	2
第三节 曲柄滑块机构的运动分析	8
第四节 导杆机构的运动分析	14
第五节 六杆机构的运动分析	19
习题	30
第二章 平面连杆机构的力分析	35
第一节 平面连杆机构力分析概述	35
第二节 铰链四杆机构的力分析	37
第三节 曲柄滑块机构的力分析	44
第四节 导杆机构的力分析	51
第五节 六杆机构的力分析	58
习题	68
第三章 连杆机构设计	72
第一节 铰链四杆机构类型判断	72
第二节 几何法按连杆上活动铰链已知位置设计四杆机构	77
第三节 位移矩阵法按连杆预定位置设计四杆机构	88
第四节 解析法按连杆预定位置设计四杆机构	93
第五节 按预定的运动规律设计四杆机构	97
第六节 按行程速比系数及有关参数设计四杆机构	102
习题	112
第四章 凸轮机构设计	117
第一节 推杆常用的运动规律	117
第二节 凸轮轮廓曲线的设计	118
第三节 程序设计实例	122
习题	130
第五章 齿轮机构设计	133

第一章 平面连杆机构的运动分析

第一节 平面连杆机构运动分析概述

机构的运动分析，就是按照已知的起始构件运动规律来确定机构中其他构件的运动。它的具体任务：一是求构件的位置；二是求构件的速度；三是求构件的加速度。

一、数学模型的建立

平面连杆机构属闭环机构，在用解析法进行机构运动分析时，采用封闭矢量多边形法求解较为简便。首先建立机构封闭矢量方程式，然后对时间求一阶导数得到速度方程，对时间求二阶导数得到加速度方程。

二、程序设计

每个平面连杆机构运动分析 MATLAB 程序都由主程序和子函数两部分组成，其程序设计流程如图 1-1 所示。

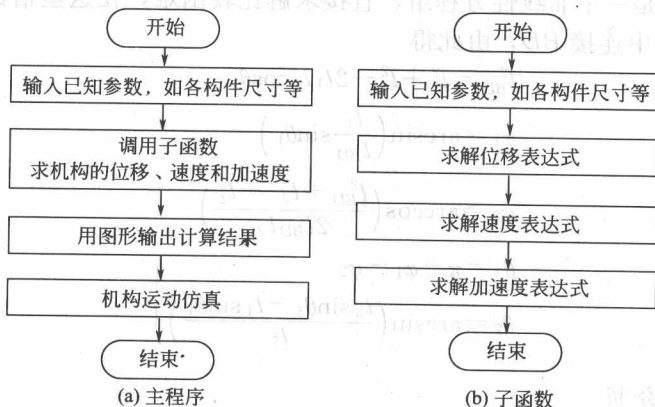


图 1-1 平面连杆机构运动分析程序设计流程

子函数的任务是求机构在某一位置时，各构件的位移、速度和加速度；主程

序的任务是求机构在一个工作循环内各构件的位移、速度和加速度的变化规律，并用线图表示出来，同时进行机构运动仿真。

第二节 铰链四杆机构的运动分析

在图 1-2 所示的铰链四杆机构中，已知各构件的尺寸及原动件 1 的方位角 θ_1 和匀角速度 ω_1 ，需对其位置、速度和加速度进行分析。

一、数学模型的建立

为了对机构进行运动分析，先如图 1-2 建立直角坐标系，并将各构件表示为杆矢，为了求解方便，将各杆矢用指数形式的复数表示。

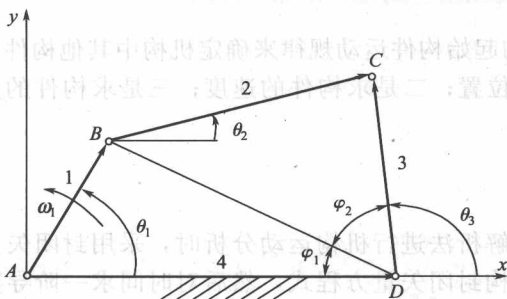


图 1-2 铰链四杆机构

1. 位置分析

如图 1-2 所示，由封闭图形 ABCDA 可写出机构各杆矢所构成的封闭矢量方程

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{l}_3 + \vec{l}_4 \quad (1-1)$$

其复数形式表示为

$$l_1 e^{i\theta_1} + l_2 e^{i\theta_2} = l_3 e^{i\theta_3} + l_4 \quad (1-2)$$

将上式的实部和虚部分离，得

$$\left. \begin{aligned} l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos\theta_2 &= l_3 \cos\theta_3 + l_4 \\ l_1 \sin\theta_1 + l_2 \sin\theta_2 &= l_3 \sin\theta_3 \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

由于式(1-3)是一个非线性方程组，直接求解比较困难，在这里借助几何方法进行求解，在图中连接 BD，由此得

$$l_{BD}^2 = l_1^2 + l_4^2 - 2l_1 l_4 \cos\theta_1$$

$$\varphi_1 = \arcsin\left(\frac{l_1}{l_{BD}} \sin\theta_1\right)$$

$$\varphi_2 = \arccos\left(\frac{l_{BD}^2 + l_3^2 - l_2^2}{2l_{BD}l_3}\right)$$

$$\theta_3 = \pi - \varphi_1 - \varphi_2$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{l_3 \sin\theta_3 - l_1 \sin\theta_1}{l_2}\right) \quad (1-4)$$

2. 速度分析

将式(1-2)对时间 t 求一次导数，得速度关系

$$l_1 \omega_1 e^{i\theta_1} + l_2 \omega_2 e^{i\theta_2} = l_3 \omega_3 e^{i\theta_3} \quad (1-5)$$

将上式的实部和虚部分离, 得

$$\left. \begin{aligned} l_1 \omega_1 \cos \theta_1 + l_2 \omega_2 \cos \theta_2 &= l_3 \omega_3 \cos \theta_3 \\ l_1 \omega_1 \sin \theta_1 + l_2 \omega_2 \sin \theta_2 &= l_3 \omega_3 \sin \theta_3 \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

若用矩阵形式来表示, 则上式可写为

$$\begin{bmatrix} -l_2 \sin \theta_2 & l_3 \sin \theta_3 \\ l_2 \cos \theta_2 & -l_3 \cos \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \omega_1 \begin{bmatrix} l_1 \sin \theta_1 \\ -l_1 \cos \theta_1 \end{bmatrix} \quad (1-7)$$

解上式即可求得二个角速度 ω_2 、 ω_3 。

3. 加速度分析

将式(1-2)对时间 t 求二次导数, 可得加速度关系表达式

$$\begin{bmatrix} -l_2 \sin \theta_2 & l_3 \sin \theta_3 \\ l_2 \cos \theta_2 & -l_3 \cos \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_2 l_2 \cos \theta_2 & \omega_3 l_3 \cos \theta_3 \\ -\omega_2 l_2 \sin \theta_2 & \omega_3 l_3 \sin \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \omega_1 \begin{bmatrix} \omega_1 l_1 \cos \theta_1 \\ \omega_1 l_1 \sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

解上式即可求得二个角加速度 α_2 、 α_3 。

二、计算实例

【例 1-1】 如图 1-2 所示, 已知铰链四杆机构各构件的尺寸为: $l_1 = 101.6\text{mm}$, $l_2 = 254\text{mm}$, $l_3 = 177.8\text{mm}$, $l_4 = 304.8\text{mm}$, 原动件 1 以匀角速度 $\omega_1 = 250\text{rad/s}$ 逆时针转动, 计算构件 2 和构件 3 的角位移、角速度及角加速度, 并绘制出运动线图。

三、程序设计

铰链四杆机构 MATLAB 程序由主程序 `crank_rocker_main` 和子函数 `crank_rocker` 两部分组成。

1. 主程序 `crank_rocker_main` 文件

```
*****
```

```
%1. 输入已知数据
```

```
clear;
```

```
l1=101.6; l2=254; l3=177.8; l4=304.8;
```

```
omega1=250;
```

```
alpha1=0;
```

```
hd=pi/180; du=180/pi;
```

```
%2. 调用子函数 crank_rocker 计算铰链四杆机构位移, 角速度, 角加速度
```

```
for n1=1:361
```

```
    theta1=(n1-1)*hd;
```

```
    [theta, omega, alpha]=crank_rocker(theta1, omega1, alpha1, l1, l2, l3, l4);
```

```
    theta2(n1)=theta(1); theta3(n1)=theta(2);
```

```

omega2(n1)=omega(1);omega3(n1)=omega(2);
alpha2(n1)=alpha(1);alpha3(n1)=alpha(2);
end

```

例3. 角位移、角速度、角加速度和四杆机构图形输出

```

figure(1);
n1=1:361;
subplot(2,2,1); % 绘位移线图
plot(n1,theta2*du,n1,theta3*du,'k');
title('角位移线图');
xlabel('曲柄转角 \ theta_1 / \ circ');
ylabel('角位移 / \ circ');
grid on; hold on;
text(140,170,' \ theta_3');
text(140,30,' \ theta_2');

```

```

subplot(2,2,2); % 绘角速度线图
plot(n1,omega2,n1,omega3,'k');
title('角速度线图');
xlabel('曲柄转角 \ theta_1 / \ circ');
ylabel('角速度 / rad \ cdots ^{-1}');
grid on; hold on;
text(250,130,' \ omega_2');
text(130,165,' \ omega_3');

```

```

subplot(2,2,3); % 绘角加速度线图
plot(n1,alpha2,n1,alpha3,'k');
title('角加速度线图');
xlabel('曲柄转角 \ theta_1 / \ circ');
ylabel('角加速度 / rad \ cdots ^{-2}');
grid on; hold on;
text(230,2e4,' \ alpha_2');
text(30,7e4,' \ alpha_3');

```

```

subplot(2,2,4); % 铰链四杆机构图形输出
x(1)=0;
y(1)=0;
x(2)=l1*cos(70*hd);
y(2)=l1*sin(70*hd);
x(3)=l4+l3*cos(theta3(71));
y(3)=l3*sin(theta3(71));

```

```

x(4)=l4;
y(4)=0;
x(5)=0;
y(5)=0;
plot(x,y);
grid on;hold on;
plot(x(1),y(1),'o');
plot(x(2),y(2),'o');
plot(x(3),y(3),'o');
plot(x(4),y(4),'o');
title('铰链四杆机构');
xlabel('mm')
ylabel('mm')
axis([-50 350 -20 200]); %
subplot(2,2,4); % 铰链四杆机构图形输出
x(1)=0;
y(1)=0;
x(2)=l1*cos(70*hd);
y(2)=l1*sin(70*hd);
x(3)=l4+l3*cos(theta3(70));
y(3)=l3*sin(theta3(70));
x(4)=l4;
y(4)=0;
x(5)=0;
y(5)=0;
plot(x,y);
grid on;hold on;
plot(x(1),y(1),'o');
plot(x(2),y(2),'o');
plot(x(3),y(3),'o');
plot(x(4),y(4),'o');
title('铰链四杆机构');
xlabel('mm')
ylabel('mm')
axis([-50 350 -20 200]);
%4. 铰链四杆机构运动仿真
figure(2)
m=moviein(20);
j=0;

```

```

for n1=1:5:360
    j=j+1;
    clf;
    x(1)=0;
    y(1)=0;
    x(2)=l1*cos((n1-1)*hd);
    y(2)=l1*sin((n1-1)*hd);
    x(3)=l4+l3*cos(theta3(n1));
    y(3)=l3*sin(theta3(n1));
    x(4)=l4;
    y(4)=0;
    x(5)=0;
    y(5)=0;
    plot(x,y);
    grid on;hold on;
    plot(x(1),y(1),'o');
    plot(x(2),y(2),'o');
    plot(x(3),y(3),'o');
    plot(x(4),y(4),'o');
    axis([-150 350 -150 200]);
    title('铰链四杆机构'); xlabel('mm'); ylabel('mm')
    m(j)=getframe;
end
movie(m);

```

2. 子函数 crank_rocker 文件

```

*****
function [theta,omega,alpha]=crank_rocker(theta1,omega1,alpha1,l1,l2,l3,l4)
%1. 计算从动件的角位移
L=sqrt(l4*l4+l1*l1-2*l1*l4*cos(theta1));
phi=asin((l1./L)*sin(theta1));
beta=acos((-l2*l2+l3*l3+L*L)/(2*l3*L));
if beta<0
    beta=beta+pi;
end
theta3=pi-phi-beta;
theta2=asin((l3*sin(theta3)-l1*sin(theta1))/l2);
theta=[theta2;theta3]

%2. 计算从动件的角速度
A=[-l2*sin(theta2), l3*sin(theta3)];

```

% 机构从动件的位置参数矩阵

```

l2 * cos(theta2), - l3 * cos(theta3)];
B=[l1 * sin(theta1); - l1 * cos(theta1)]; % 机构原动件的位置参数列阵
omega=A \ (omega1 * B); % 机构从动件的速度列阵
omega2=omega(1); omega3=omega(2);

```

%3. 计算从动件的角加速度

```

A=[ - l2 * sin(theta2), l3 * sin(theta3);
    l2 * cos(theta2), - l3 * cos(theta3)];
At=[ - omega2 * l2 * cos(theta2), omega3 * l3 * cos(theta3);
     - omega2 * l2 * sin(theta2), omega3 * l3 * sin(theta3)];
B=[l1 * sin(theta1); - l1 * cos(theta1)]; % 机构原动件的位置参数列阵
Bt=[omega1 * l1 * cos(theta1); omega1 * l1 * sin(theta1)]; % Bt=dB/dt
alpha=A \ ( - At * omega + alpha1 * B + omega1 * Bt); % 机构从动件的加速度列阵
*****

```

四、运算结果

图 1-3 为铰链四杆机构的运动线图和机构运动仿真图。

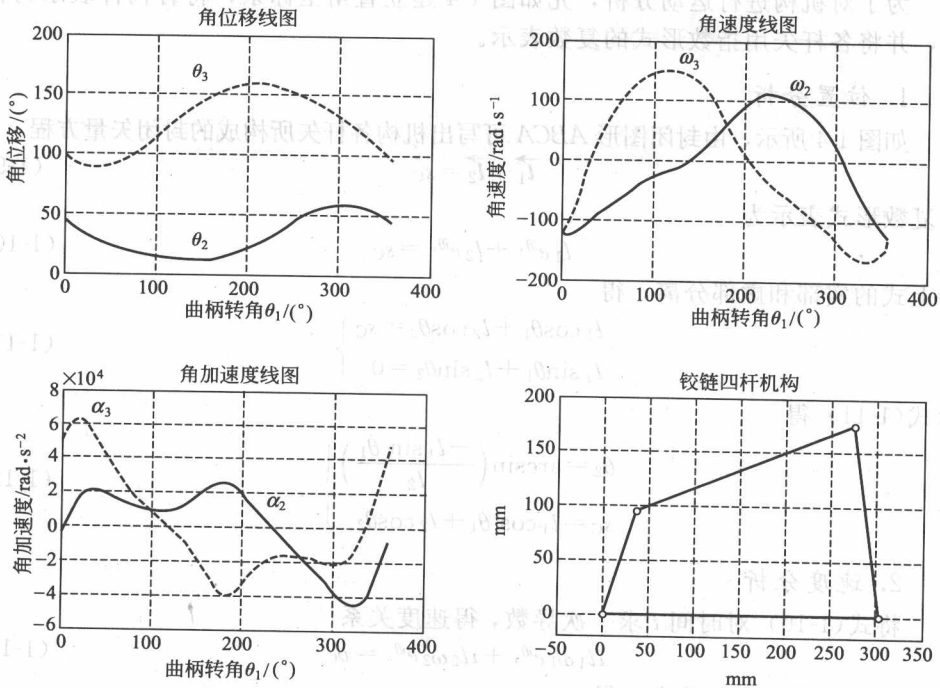


图 1-3 铰链四杆机构运动线图和机构运动仿真

第三节 曲柄滑块机构的运动分析

在图 1-4 所示的曲柄滑块机构中, 已知各构件的尺寸及原动件 1 的方位角 θ_1 和角速度 ω_1 , 需对其位置、速度和加速度进行分析。

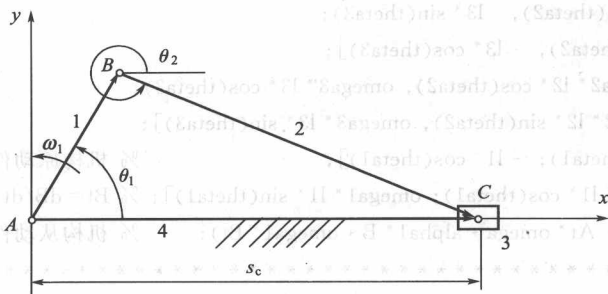


图 1-4 曲柄滑块机构

一、数学模型的建立

为了对机构进行运动分析, 先如图 1-4 建立直角坐标系, 将各构件表示为杆矢, 并将各杆矢用指数形式的复数表示。

1. 位置分析

如图 1-4 所示, 由封闭图形 ABCA 可写出机构各杆矢所构成的封闭矢量方程

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{s}_C \quad (1-9)$$

其复数形式表示为

$$l_1 e^{j\theta_1} + l_2 e^{j\theta_2} = s_C \quad (1-10)$$

将上式的实部和虚部分离, 得

$$\left. \begin{aligned} l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos\theta_2 &= s_C \\ l_1 \sin\theta_1 + l_2 \sin\theta_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

由式(1-11)得

$$\left. \begin{aligned} \theta_2 &= \arcsin\left(\frac{-l_1 \sin\theta_1}{l_2}\right) \\ s_C &= l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos\theta_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

2. 速度分析

将式(1-10)对时间 t 求一次导数, 得速度关系

$$il_1 \omega_1 e^{j\theta_1} + il_2 \omega_2 e^{j\theta_2} = v_C \quad (1-13)$$

将上式的实部和虚部分离, 得

$$\left. \begin{aligned} l_1 \omega_1 \cos\theta_1 + l_2 \omega_2 \cos\theta_2 &= 0 \\ -l_1 \omega_1 \sin\theta_1 - l_2 \omega_2 \sin\theta_2 &= v_C \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

若用矩阵形式来表示, 则上式可写为

$$\begin{bmatrix} l_2 \sin\theta_2 & 1 \\ -l_2 \cos\theta_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_2 \\ v_C \end{bmatrix} = \omega_1 \begin{bmatrix} -l_1 \sin\theta_1 \\ l_1 \cos\theta_1 \end{bmatrix} \quad (1-15)$$

解上式即可求得角速度 ω_2 和线速度 v_C 。

3. 加速度分析

将式(1-10) 对时间 t 求二次导数, 可得加速度关系表达式

$$\begin{bmatrix} l_2 \sin\theta_2 & 1 \\ -l_2 \cos\theta_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_2 \\ a_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_2 l_2 \cos\theta_2 & 0 \\ \omega_2 l_2 \sin\theta_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_2 \\ v_C \end{bmatrix} = \omega_1 \begin{bmatrix} -\omega_1 l_1 \cos\theta_1 \\ -\omega_1 l_1 \sin\theta_1 \end{bmatrix} \quad (1-16)$$

解上式即可求得角加速度 a_2 和线加速度 a_C 。

二、计算实例

【例 1-2】 在图 1-4 所示的曲柄滑块机构中, AB 为原动件, 以匀角速度 $\omega_1 = 10 \text{ rad/s}$ 逆时针旋转, 曲柄和连杆的长度分别为 $l_1 = 100 \text{ mm}$, $l_2 = 300 \text{ mm}$ 。试确定连杆 2 和滑块 3 的位移、速度和加速度, 并绘制出运动线图。

三、程序设计

曲柄滑块机构 MATLAB 程序由主程序 slider_crank_main 和子函数 slider_crank 两部分组成。

1. 主程序 slider_crank_main 文件

```
*****
%1. 输入已知数据
clear;
l1=100;
l2=300;
e=0;
hd=pi/180;
du=180/pi;
omegal=10;
alpha1=0;

%2. 调用子函数 slider_crank 计算曲柄滑块机构位移,速度,加速度
for n1=1:720
    theta1(n1)=(n1-1)*hd;
    [theta2(n1), s3(n1), omega2(n1), v3(n1), alpha2(n1), a3(n1)] = slider_crank(theta1
(n1), omegal, alpha1, l1, l2, e);
end
```

%3. 位移,速度,加速度和曲柄滑块机构图形输出
figure(11);

n1=1:720;

subplot(2,2,1); % 绘位移线图

[AX, H1, H2]=plotyy(theta1*du, theta2*du, theta1*du, s3);

set(get(AX(1), 'ylabel'), 'String', '连杆角位移/\ circ');

set(get(AX(2), 'ylabel'), 'String', '滑块位移/mm');

title('位移线图');

xlabel('曲柄转角 \ theta_1/\ circ');

grid on;

subplot(2,2,2); % 绘速度线图

[AX, H1, H2]=plotyy(theta1*du, omega2, theta1*du, v3)

title('速度线图');

xlabel('曲柄转角 \ theta_1/\ circ');

ylabel('连杆角速度/rad \ cdots^{-1}');

set(get(AX(2), 'ylabel'), 'String', '滑块速度/mm \ cdots^{-1}');

grid on;

subplot(2,2,3); % 绘加速度线图

[AX, H1, H2]=plotyy(theta1*du, alpha2, theta1*du, a3)

title('加速度线图');

xlabel('曲柄转角 \ theta_1/\ circ');

ylabel('连杆角加速度/rad \ cdots^{-2}');

set(get(AX(2), 'ylabel'), 'String', '滑块加速度/mm \ cdots^{-2}');

grid on;

subplot(2,2,4); % 绘曲柄滑块机构图

x(1)=0;

y(1)=0;

x(2)=l1*cos(70*hd);

y(2)=l1*sin(70*hd);

x(3)=s3(70);

y(3)=e;

x(4)=s3(70);;

y(4)=0;

x(5)=0;

y(5)=0;

x(6)=x(3)-40;


```

y(6)=y(3) + 10;
x(7)=x(3) + 40;
y(7)=y(3) + 10;
x(8)=x(3) + 40;
y(8)=y(3) - 10;
x(9)=x(3) - 40;
y(9)=y(3) - 10;
x(10)=x(3) - 40;
y(10)=y(3) + 10;

i=1:5;
plot(x(i),y(i));
grid on;
hold on;
i=6:10;
plot(x(i),y(i));
title('曲柄滑块机构');
grid on;
hold on;
xlabel('mm');
ylabel('mm');
axis([- 50 400 - 20 130]);
plot(x(1),y(1),'o');
plot(x(2),y(2),'o');
plot(x(3),y(3),'o');

```

%4. 曲柄滑块机构运动仿真

```

figure(2)
m=moviein(20);
j=0;

```

```

for n1=1:5:360

```

```

    j=j + 1;

```

```

    clf;

```

```

    %

```

```

    x(1)=0;

```

```

    y(1)=0;

```

```

    x(2)=l1 * cos(n1 * hd);

```

```

    y(2)=l1 * sin(n1 * hd);

```

```

    x(3)=s3(n1);

```