

机械设计 C 语言程序设计

张春宜 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是教育部“面向 21 世纪高等教育教学内容和课程体系改革计划”项目的研究成果,是该计划项目中《机械设计》(分上、下两册,徐锦康主编)教材的配套教材,是面向 21 世纪课程教材,也是教育部高职高专规划教材,内容包括平面连杆机构的运动分析与动态静力分析、平面四杆机构、凸轮机构、齿轮传动、蜗杆传动、螺纹联接和螺旋传动、带传动、链传动、轴、轴承、弹簧共十一章及附录。各章均配有例题,对数表进行了公式化处理,对曲线进行了拟合,并可输出设计图形、计算曲线或进行动态演示。本书突出了高职高专的特点,遵循理论联系实际和加强应用性原则,书中程序采用较为流行的 C 语言编写,并均已在 Turbo C 2.0 下运行通过。本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校以及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校等机械类专业的教学用书,也可供本科学校有关专业的师生以及有关的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械设计 C 语言程序设计 张春宜主编. —北京:高等教育出版社,2001

ISBN 7 - 04 - 009347 - 2

机... 张... 机械设计 - C 语言 - 程序设计
.TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 08012 号

责任编辑 赵 亮 封面设计 张 楠 责任绘图 朱 静
版式设计 马静如 责任校对 陈 荣 责任印制

机械设计 C 语言程序设计
张春宜 主编

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号 邮政编码 100009
电 话 010 - 64054588 传 真 010 - 64014048
网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷

开 本 787×960 1/16 版 次 年 月第 版
印 张 18.5 印 次 年 月第 次印刷
字 数 340 000 定 价 15.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

出版说明

教材建设工作是整个高职高专教育教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、学校和有关出版社的共同努力下,各地已出版了一批高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设仍落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育基础课程教学基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。出版后的教材将覆盖高职高专教育的基础课程和主干专业课程。计划先用2~3年的时间,在继承原有高职、高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验,解决好新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专教育教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

“教育部高职高专规划教材”是按照《基本要求》和《培养规格》的要求,充分汲取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的,适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2000年4月3日

前 言

本书是教育部“面向 21 世纪高等教育教学内容和课程体系改革计划”项目的研究成果,是教育部“面向 21 世纪课程教材”。本书与徐锦康主编的《机械设计(上、下册)》教材相配套,全书采用 C 语言编写,内容包括平面连杆机构的运动分析与动态静力分析、平面四杆机构、凸轮机构、齿轮传动、蜗杆传动、螺纹联接和螺旋传动、带传动、链传动、轴、轴承、弹簧共十一章及附录,各章都配有例题。全书程序均已在 Turbo C2.0 下运行通过,对复杂的程序配有框图。书中平面机构的运动分析与动态静力分析采用的是基本杆组法,其运行结果是输出机构各点的位移、速度、加速度值并配有相应的运动线图;平面四杆机构设计分为五种方法,其运行结果是输出所求的各数据和所设计机构的动态演示图;凸轮机构设计程序运行结果是输出轮廓上各点坐标值及凸轮轮廓曲线图;在本书所涉及的传动及强度设计计算中,对数表进行了公式化处理;对曲线进行了曲线拟合;对简单的数表则将数表输入计算机,设计时采用人机对话的方式进行。

本书遵循理论联系实际和“必须、够用为度”的原则精选了内容,加强了应用性,采用较为通行的计算机语言编写,注重计算机图形动态演示及计算机应用能力的培养。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校等机械类专业的教材,也可供本科院校有关专业的师生和工程技术人员参考。

参加本书编写工作的有:哈尔滨理工大学张春宜(第一章),刘敏(第二章、第四章、附录),田荣芝(第三章),华北航天工业学院韩文仲(第五章~第七章)、马秋生(第八章~第十一章)。全书由张春宜任主编,韩文仲任副主编,南京机械高等专科学校徐锦康教授任主审。

在本书编写过程中,机械基础课程教学指导委员会的各位委员提出了很好的建议和意见,并给予了大力支持,还得到了很多其他人士的帮助,在此表示十分感谢。

由于时间仓促,加之我们水平有限,本书疏漏与不当之处在所难免,诚恳希望读者批评指正,提出宝贵意见。

作者

1999 年 8 月

目 录

第一章 平面连杆机构的运动分析和动态静力分析	1
§ 1 - 1 平面机构的运动分析	1
§ 1 - 2 平面机构的力分析	20
第二章 平面四杆机构	39
§ 2 - 1 按给定连杆的预定位置设计四杆机构	41
§ 2 - 2 按给定轨迹设计四杆机构	51
§ 2 - 3 按给定连架杆的预定对应位置设计四杆机构	55
§ 2 - 4 按给定函数设计四杆机构	60
§ 2 - 5 按给定行程速度变化系数设计四杆机构	64
第三章 凸轮机构	69
§ 3 - 1 凸轮机构常用运动规律及绘图函数	69
§ 3 - 2 滚子直动从动件盘形凸轮机构	79
§ 3 - 3 摆动从动件盘形凸轮机构	87
§ 3 - 4 平底直动从动件盘形凸轮机构	95
第四章 齿轮传动	99
§ 4 - 1 圆柱齿轮传动	99
§ 4 - 2 直齿圆锥齿轮传动	135
第五章 蜗杆传动	151
第六章 螺纹联接和螺旋传动	162
§ 6 - 1 螺纹联接	162
§ 6 - 2 螺旋传动	175
第七章 带传动	189
第八章 链传动	201
第九章 轴	212
§ 9 - 1 按弯扭组合进行强度计算	212
§ 9 - 2 按安全系数进行强度校核	228
第十章 轴承	242
§ 10 - 1 滚动轴承	242
§ 10 - 2 滑动轴承	255
第十一章 弹簧	261
§ 11 - 1 拉、压圆柱螺旋弹簧	261

§ 11 - 2 扭转圆柱螺旋弹簧.....	272
附录 1 全选主元高斯消去法解线性方程组	280
附录 2 求非线性方程组一组实根的拟牛顿法	283
附录 3 最小二乘法拟合曲线	286
参考文献	290

第一章 平面连杆机构的运动分析和动态静力分析

平面连杆机构的运动分析和动态静力分析的方法有图解法和解析法两种,解析法又有矢量方程法、基本杆组法和复数向量法等数种。本章仅介绍基本杆组法。该方法通用性好,且能满足常见平面级机构运动分析和动态静力分析的需要。

§ 1 - 1 平面机构的运动分析

一、单杆的运动分析

如图 1 - 1 所示,已知:构件 AB 上点 A 的位置坐标 x_A 、 y_A , 速度 \mathbf{v}_A , 加速度 \mathbf{a}_A , AB 的位置角 θ , AM 与 AB 夹角 α , AM 长 s , AB 长 l , 构件角速度 ω 及角加速度 ϵ 。求: AB 上任一点 M 的位置坐标 x_M 、 y_M , 速度 \mathbf{v}_M , 及加速度 \mathbf{a}_M 。

1. 公式

(1) 位置分析

如图 1 - 1 所示, 构件上点 A 、 M 的位置坐标分别为 x_A 、 y_A , x_M 、 y_M 。则 M 点的位置方程为

图 1 - 1 单杆运动分析

$$\begin{aligned}x_M &= x_A + s \cos(\theta + \alpha) \\y_M &= y_A + s \sin(\theta + \alpha)\end{aligned}\quad (1 - 1)$$

(2) 速度分析

将式(1 - 1)对时间求导并整理得 M 点 x 、 y 方向的速度

$$\begin{aligned}v_{Mx} &= v_{Ax} - s \sin(\theta + \alpha) \dot{\theta} = v_{Ax} - \dot{y}_M - y_A \dot{\theta} \\v_{My} &= v_{Ay} + s \cos(\theta + \alpha) \dot{\theta} = v_{Ay} + \dot{x}_M - x_A \dot{\theta}\end{aligned}\quad (1 - 2)$$

(3) 加速度分析

将式(1 - 2)对时间求导得 M 点 x 、 y 方向的加速度

$$\begin{aligned}
 a_{Mx} &= a_{Ax} - \sin(\alpha + \beta) - \omega^2 s \cos(\alpha + \beta) \\
 &= a_{Ax} - (y_M - y_A) - \omega^2 (x_M - x_A) \\
 a_{My} &= a_{Ay} + \omega^2 s \sin(\alpha + \beta) - \omega^2 s \sin(\alpha + \beta) \\
 &= a_{Ay} + (x_M - x_A) - \omega^2 (y_M - y_A)
 \end{aligned} \tag{1-3}$$

2. 程序中主要符号说明

表 1-1 单杆运动分析程序中主要符号说明

程序中变量	公式中符号	意义	单位
xa, ya	x_A, y_A	A 点坐标	m
xm, ym	x_M, y_M	M 点坐标	m
citl		AM 与 AB 夹角	rad
fil		AB 与 x 轴正向夹角	rad
s, l	s, l	AM、AB 的长度	m
vax, vay	v_{Ax}, v_{Ay}	A 点 x、y 方向速度	m/s
omigl		构件角速度	rad/s
vmx, vmy	v_{Mx}, v_{My}	M 点 x、y 方向速度	m/s
amax, amy	a_{Mx}, a_{My}	M 点 x、y 方向加速度	m/s ²
aaax, aay	a_{Ax}, a_{Ay}	A 点 x、y 方向加速度	m/s ²
el		构件角加速度	rad/s ²

3. 源程序(文件名:01 - 01 - 01 .h)

SMF(pmx, pmy, xa, ya, citl, fil, s) * M 点的位移函数 *

double * pmx, * pmy, xa, ya, citl, fil, s; * xa, ya, citl, fil, s 由主函数传值 *

```

{ double xm, ym;
  xm = xa + s * cos(citl + fil); * 计算 M 点的 x 坐标, 其中 citl = ; fil = *
  ym = ya + s * sin(citl + fil); * 计算 M 点的 y 坐标, 其中 citl = ; fil = *
  * pmx = xm; * 将求得的值传给主函数 *
  * pmy = ym; }

```

VMF(pvmx, pvmy, vay, vax, s, omigl, citl, fil) * M 点的速度函数 *

double * pvmx, * pvmy, vax, vay, s, omigl, citl, fil; * 定义指针变量 *

```

{ double vmx, vmy;
  vmx = vax - s * omigl * sin(citl + fil); * 计算 M 点 x 方向速度, 其中 omigl = *
  *
  vmy = vay + s * omigl * cos(citl + fil); * 计算 M 点 y 方向速度 *
  * pvmx = vmx;
  * pvmy = vmy; }

```

```

AMF(pamx, pamy, aax, aay, el, s, citl, fil, omigl) * M 点的加速度分析函数 *
double * pamx, * pamy, aax, aay, el, s, citl, fil, omigl;
{double amx, amy;
amx = aax - el * s * sin(citl + fil) - omigl * omigl * s * cos(citl + fil); * M 点 x 方
向加速度,其中 omigl = *
amy = aay + el * s * cos(citl + fil) - omigl * omigl * s * sin(citl + fil); * M 点 y 方
向加速度 *
* pamx = amx;
* pamy = amy;}

```

二、RRR 级杆组的运动分析

如图 1 - 2 所示 RRR 级杆组由构件 2、3 及三个转动副 B、C、D 组成。已知:外部运动副 B、D 的位置坐标 x_B 、 y_B , x_D 、 y_D , 速度 \mathbf{v}_B 、 \mathbf{v}_D , 加速度 \mathbf{a}_B 、 \mathbf{a}_D 及杆长 l_2 、 l_3 。求:内部运动副 C 的位置坐标 x_C 、 y_C , 速度 \mathbf{v}_C , 加速度 \mathbf{a}_C , 构件 2、3 的位置角 θ_2 、 θ_3 , 角速度 ω_2 、 ω_3 及角加速度 α_2 、 α_3 。

1. 公式

(1) 位置分析

如图 1 - 2 所示, BD 的距离为

$$d = \sqrt{(x_D - x_B)^2 + (y_D - y_B)^2} \quad \text{图 1 - 2 RRR 级杆组的运动分析} \quad (1 - 4)$$

若 $d > l_2 + l_3$ 或 $d < |l_2 - l_3|$, 则构件 2、3 无法组装。此时该 RRR 级杆组不成立。 d 与 x 轴的夹角

$$\theta_d = \arctan \frac{y_D - y_B}{x_D - x_B} \quad (1 - 5)$$

d 与 l_2 的夹角

$$\theta_{dl_2} = \arccos \frac{d^2 + l_2^2 - l_3^2}{2dl_2} \quad (1 - 6)$$

构件 2 的位置角

$$\theta_2 = \theta_d + \theta_{dl_2} + m \quad (1 - 7)$$

当 B、D 的位置、杆长 l_2 、 l_3 确定以后, 该 RRR 级杆组有两种装配形式, 如图 1 - 2 中 BCD 和 BCD。当 RRR 级杆组在图示实线位置 BCD 时, 式(1 - 7)中 $m =$

+1; 当 级杆组在虚线位置 BCD 时, 式(1-7)中 $m = -1$ 。一般机构初始位置确定后, 级杆组 BCD (或 BCD)的顺序不变, 所以在编写程序时, 应预先根据机构的初始位置, 确定式(1-7)中 m 的值。

因点 C 、 B 在同一构件上, 由式(1-1)可得点 C 的位置方程

$$\begin{aligned}x_C &= x_B + l_2 \cos \theta_2 \\y_C &= y_B + l_2 \sin \theta_2\end{aligned}\quad (1-8)$$

构件 3 的位置角

$$\theta_3 = \arctan \frac{y_C - y_D}{x_C - x_D} \quad (1-9)$$

(2) 速度分析

a. 角速度

$$\begin{aligned}\omega_2 &= \frac{(v_{Dx} - v_{Bx})(x_C - x_D) + (v_{Dy} - v_{By})(y_C - y_D)}{(y_C - y_D)(x_C - x_B) - (y_C - y_B)(x_C - x_D)} \\ \omega_3 &= \frac{(v_{Dx} - v_{Bx})(x_C - x_B) + (v_{Dy} - v_{By})(y_C - y_B)}{(y_C - y_D)(x_C - x_B) - (y_C - y_B)(x_C - x_D)}\end{aligned}\quad (1-10)$$

b. 速度

$$\begin{aligned}v_{Cx} &= v_{Bx} - l_2 \omega_2 \sin \theta_2 = v_{Bx} - \omega_2 (y_C - y_B) \\ v_{Cy} &= v_{By} + l_2 \omega_2 \cos \theta_2 = v_{By} + \omega_2 (x_C - x_B)\end{aligned}\quad (1-11)$$

(3) 加速度分析

a. 角加速度

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= \frac{E(x_C - x_D) + F(y_C - y_D)}{(x_C - x_B)(y_C - y_D) - (x_C - x_D)(y_C - y_B)} \\ \alpha_3 &= \frac{E(x_C - x_B) + F(y_C - y_B)}{(x_C - x_B)(y_C - y_D) - (x_C - x_D)(y_C - y_B)}\end{aligned}\quad (1-12)$$

式中:

$$\begin{aligned}E &= a_{Dx} - a_{Bx} + \omega_2^2 (x_C - x_B) - \omega_3^2 (y_C - y_D) \\ F &= a_{Dy} - a_{By} + \omega_2^2 (y_C - y_B) - \omega_3^2 (x_C - x_D)\end{aligned}$$

b. 加速度

$$\begin{aligned}a_{Cx} &= a_{Bx} - \omega_2^2 (y_C - y_B) - \alpha_2 (x_C - x_B) \\ a_{Cy} &= a_{By} + \omega_2^2 (x_C - x_B) - \alpha_2 (y_C - y_B)\end{aligned}\quad (1-13)$$

2. 程序中主要符号说明

表 1-2 RRR 级杆组运动分析程序中主要符号说明

程序中变量	公式中符号	意义	单位
x _d 、y _d	x_D 、 y_D	D 点坐标	m
x _b 、y _b	x_B 、 y_B	B 点坐标	m

续表

程序中变量	公式中符号	意义	单位
xc、yc	$x_C、y_C$	C点坐标	m
l2、l3	$l_2、l_3$	2、3 构件 BC、DC 长度	m
fi2、fi3	$\alpha_2、\alpha_3$	2、3 构件与 x 轴正向夹角	rad
m	m	正负号代号	+ 1、- 1
delta		BD 与 x 正向夹角	rad
gama		BD 与 BC 的夹角	rad
vdx、vdy	$v_{Dx}、v_{Dy}$	D 点 x、y 方向速度	m s
vbx、vby	$v_{Bx}、v_{By}$	B 点 x、y 方向速度	m s
vcx、vcy	$v_{Cx}、v_{Cy}$	C 点 x、y 方向速度	m s
vc	\mathbf{v}_C	C 点全速度	m s
omig2、omig3	$\omega_2、\omega_3$	2、3 构件角速度	rad s
abx、aby	$a_{Bx}、a_{By}$	B 点 x、y 方向加速度	m s ²
adx、ady	$a_{Dx}、a_{Dy}$	D 点 x、y 方向加速度	m s ²
acx、acy	$a_{Cx}、a_{Cy}$	C 点 x、y 方向加速度	m s ²
e2、e3	$\epsilon_2、\epsilon_3$	2、3 构件角加速度	rad s ²

3. 源程序(文件名:01 - 01 - 02 .h)

SCRRLF(pcx, pcy, p - fi2, p - fi3, xd, yd, xb, yb, l2, l3, fi2, fi3, m) * C 点位移分析函数 *

```
double * pcx, * pcy, * p - fi2, * p - fi3, xd, yd, xb, yb, l2, l3, fi2, fi3, m;
{ double d, delta, gama, xc, yc;
  d = sqrt((xd - xb) * (xd - xb) + (yd - yb) * (yd - yb)); * 中间导出量 *
  if (d > (l2 + l3) || d < (l2 - l3)) printf( 不能组装 ); * 判断 2,3 构件能否组
  装 *
  else
    { delta = atan((yd - yb) / (xd - xb));
      gama = acos((d * d + l2 * l2 - l3 * l3) / (2 * d * l2));
      fi2 = delta + m * gama; * m 值为 + 1 或 - 1,应在主函数之前给定 *
      xc = xb + l2 * cos(fi2); * 求 c 点 x 坐标,fi2 =  $\alpha_2$  *
      yc = xb + l2 * sin(fi2); * 求 c 点 y 坐标 *
      fi3 = atan((yc - yd) / (xc - xd)); * 3 构件与 x 轴正方向夹角 fi3 =  $\alpha_3$  *
      * pcx = xc; * pcy = yc; * p - fi2 = fi2; * p - fi3 = fi3;
    }
}
```

```

}
VCRRRF(pvcx, pvcy, pvc, p- omig2, p- omig3, vdx, vdy, vbx, vby, xc, yc, xb, yb,
xd, yd, l2, fi2) * C 点速度分析函数 *
double * pvcx, * pvcy, * pvc, * p- omig2, * p- omig3, vdx, vdy, vbx, vby, xc, yc,
xb, yb, xd, yd, l2, fi2;
{ double A, B, C, D, omig2, omig3, vcx, vcy, vc;
A = (vdx - vbx) * (xc - xb) + (vdy - vby) * (yc - yd);
B = (yc - yd) * (xc - xb) - (yc - yb) * (xc - xd);
omig2 = A / B;          * 2 构件的角速度 omig2 =  $\omega_2$  *
C = (vdx - vbx) * (xc - xb) + (vdy - vby) * (yc - yb);
D = (yc - yd) * (xc - xb) - (yc - yb) * (xc - xd);
omig3 = C / D;          * 3 构件的角速度 omig3 =  $\omega_3$  *
vcx = vbx - l2 * omig2 * sin(fi2); * 求 C 点 x 方向速度 *
vcy = vby + l2 * omig2 * cos(fi2); * 求 C 点 y 方向速度 *
vc = sqrt(vcx * vcx + vcy * vcy); * 求 C 点全速度 *
* pvcx = vcx; * pvcy = vcy; * pvc = vc;
* p- omig2 = omig2; * p- omig3 = omig3;
}
ACRRRF(pe2, pe3, pacx, pacy, pac, adx, abx, ady, aby, yc, xc, xb, yb, xd, yd,
omig2, omig3) * C 点加速度分析函数 *
double * pe2, * pe3, * pacx, * pacy, * pac, adx, abx, ady, aby, yc, xc, xb, yb, xd,
yd, omig2, omig3;
{ double E, F, G, H, J, e2, e3, acx, acy, ac;
E = adx - abx + omig2 * omig2 * (xc - xb) - omig3 * omig3 * (xc - xd);
F = ady - aby + omig2 * omig2 * (yc - yb) - omig3 * omig3 * (yc - yd);
G = E * (xc - xd) + F * (yc - yd);
H = (xc - xb) * (yc - yb) - (xc - xd) * (yc - yb);
J = E * (xc - xb) + F * (yc - yb);
e2 = G / H; e3 = J / H;
acx = abx - e2 * (yc - yb) - omig2 * omig2 * (xc - xb);
acy = aby + e2 * (xc - xb) - omig2 * omig2 * (yc - yb);
ac = sqrt(acx * acx + acy * acy);
* pe2 = e2; * pe3 = e3; * pacx = acx; * pacy = acy; * pac = ac;
}

```

三、RRP 级杆组的运动分析

RRP 级杆组如图 1 - 3 所示,它由构件 2、滑块 3、两个转动副 B 、 C 及移动副(外部运动副其回转中心 D 在无穷远处)组成。已知:点 B 的位置坐标 x_B 、 y_B ,速度 \mathbf{v}_B ,加速度 \mathbf{a}_B ;滑块导路上参考点 P 的位置坐标 x_P 、 y_P ,速度 \mathbf{v}_P ,加速度 \mathbf{a}_P ;构件 2 的长度 l_2 ;滑块 3 的位置角 θ_3 、角速度 ω_3 及角加速度 α_3 。求: C 点的位置坐标 x_C 、 y_C ,速度 \mathbf{v}_C ,加速度 \mathbf{a}_C ;滑块相对参考点 P 的位移 s_r ,速度 \mathbf{v}_r ,加速度 \mathbf{a}_r ;构件 2 的位置角 θ_2 ,角速度 ω_2 ,角加速度 α_2 。

图 1 - 3 RRP 级杆组

1. 公式

(1) 位置分析

$$l_2^2 = (x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2 \quad (1 - 14)$$

用

$$x_C = x_P + s_r \cos \theta_3$$

$$y_C = y_P + s_r \sin \theta_3$$

$$d^2 = (x_B - x_P)^2 + (y_B - y_P)^2$$

代入式(1 - 14)整理后得

$$s_r^2 + E s_r + F = 0$$

式中

$$E = 2(x_P - x_B) \cos \theta_3 + 2(y_P - y_B) \sin \theta_3$$

$$F = d^2 - l_2^2$$

解上述关于 s_r 的二次方程得

$$s_r = \frac{-E + m \sqrt{E^2 - 4F}}{2} \quad (1 - 15)$$

在式(1 - 15)中,若 $E^2 < 4F$,此时 级杆组不成立;若 $E^2 = 4F$,则上述圆弧与导路 PN 相切,如图 1 - 4a 所示,这时 s_r 有唯一解。若 $E^2 > 4F$,则有两种情况:1)当 $l_2 < d$ 时,上述圆弧与导路有两个交点 C 与 C' (如图 1 - 4b),这时 s_r 有两个解 s_r 与 s_r' ,即该 级杆组有两种装配形式,其中解 s_r 对应于图中实线位置 BC ,式(1 - 15)中根号前 $m = +1$;解 s_r' 对应于图中虚线位置 BC' ,式(1 - 15)中根号前 $m = -1$ 。2)当 $l_2 > d$ 时,上述圆与导路也有两个交点,但分别位于参

考点 P 的两侧,且 s_r 应为负值,如图 1 - 4c 所示。

解出 s_r 以后, C 点的位置坐标为

$$\begin{aligned}x_C &= x_P + s_r \cos \theta_3 \\y_C &= y_P + s_r \sin \theta_3\end{aligned}\quad (1 - 16)$$

图 1 - 4

构件 2 的位置角

$$\theta_2 = \arctan \frac{y_C - y_B}{x_C - x_B} \quad (1 - 17)$$

(2) 速度分析

将 s_r 、 θ_2 对时间求导得角速度和相对速度

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_2 &= \frac{F_1 \cos \theta_3 - E_1 \sin \theta_3}{(y_C - y_B) \sin \theta_3 + (x_C - x_B) \cos \theta_3} \\v_r &= \frac{F_1 (y_B - y_C) + E_1 (x_B - x_C)}{(y_C - y_B) \sin \theta_3 + (x_C - x_B) \cos \theta_3}\end{aligned}\quad (1 - 18)$$

式中

$$\begin{aligned}E_1 &= v_{Px} - v_{Bx} - s_r \dot{\theta}_3 \sin \theta_3 \\F_1 &= v_{Py} - v_{By} + s_r \dot{\theta}_3 \cos \theta_3\end{aligned}$$

又由(1 - 2)式可得 C 点的速度

$$\begin{aligned}v_{Cx} &= v_{Bx} - l_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\v_{Cy} &= v_{By} + l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2\end{aligned}\quad (1 - 19)$$

(3) 加速度分析

将式(1 - 18)、(1 - 19)分别对时间求导得

$$\begin{aligned}\ddot{\theta}_2 &= \frac{F_2 \cos \theta_3 - E_2 \sin \theta_3}{(y_C - y_B) \sin \theta_3 + (x_C - x_B) \cos \theta_3} \\a_r &= \frac{(y_B - y_C) \dot{F}_2 + (x_B - x_C) \dot{E}_2}{(y_C - y_B) \sin \theta_3 + (x_C - x_B) \cos \theta_3}\end{aligned}\quad (1 - 20)$$

$$\begin{aligned} a_{Cx} &= a_{Bx} - \omega_2^2 (y_C - y_B) - \omega_3^2 (x_C - x_B) \\ a_{Cy} &= a_{By} + \omega_2^2 (x_C - x_B) - \omega_3^2 (y_C - y_B) \end{aligned} \quad (1 - 21)$$

式中

$$\begin{aligned} E_2 &= a_{Px} - a_{Bx} + \omega_2^2 (x_C - x_B) - 2\omega_2\omega_3 v_r \sin \theta_3 - \omega_3^2 (y_C - y_P) - \omega_3^2 (x_C - x_P) \\ F_2 &= a_{Py} - a_{By} + \omega_2^2 (y_C - y_B) + 2\omega_2\omega_3 v_r \cos \theta_3 + \omega_3^2 (x_C - x_P) - \omega_3^2 (y_C - y_P) \end{aligned}$$

2. 程序中主要符号说明

表 1-3 RRP 级杆组运动分析程序中主要符号说明

程序中变量	公式中符号	意义	单位
xp、yp	$x_P、y_P$	P 点坐标	m
vp _x 、vp _y	$v_{Px}、v_{Py}$	P 点 x、y 方向速度	m/s
vs	v_r	相对速度	m/s
ap _x 、ap _y	$a_{Px}、a_{Py}$	P 点 x、y 方向加速度	m/s ²
e ₂ 、e ₃	$\omega_2、\omega_3$	2、3 构件角速度	rad/s
ac	a_C	C 点全加速度	m/s ²
ar	a_r	相对加速度	m/s ²
sc	s_C	P 点到 C 点距离	m

3. 源程序(文件名:01 - 01 - 03.h)

```

SCRRPF(pxc, pyc, p - fi2, psc, xp, yp, xb, yb, fi3, l2, m) * C 点位移分析函数 *
double * pxc, * pyc, * p - fi2, * psc, xp, yp, xb, yb, fi3, l2, m;
{ double E, F, sc, xc, yc, fi2, l3 = 0;
  E = 2 * (xp - xb) * cos(fi3) + 2 * (yp - yb) * sin(fi3); * xp 是 P 点 x 方向坐标 *
  F = (xp - xb) * (xp - xb) + (yp - yb) * (yp - yb) - l2 * l2; * l2 是 2 构件长度, l3 是 3 构件长度 *
  if (E * E < 4 * F) printf( 无解 );
  else
    { sc = (m * sqrt(E * E - 4 * F) - E) / 2; * BCD 顺时针 m = +1, 否则 m = -1,
      在主函数前赋值 *
      xc = xp + sc * cos(fi3) - l3 * sin(fi3);
      yc = yp + sc * sin(fi3) + l3 * cos(fi3);
      fi2 = atan((yc - yb) / (xc - xb));
    }
}

```

```

* pxc = xc; * pyc = yc; * p - fi2 = fi2; * psc = sc;
}
VCRPF(pvcx, pvcy, pvc, pvs, p - omig2, p - Q3, vpx, vpy, vbx, vby, s, fi2, l2, fi3,
omig3, l3) * C 点速度分析函数 *
double * pvcx, * pvcy, * pvc, * pvs, * p - omig2, * p - Q3, vpx, vpy, vbx, vby, s,
fi2, l2, fi3, omig3, l3;
{ double Q1, Q2, Q3, omig2, vs, vcx, vcy, vc;
Q1 = vpx - vbx - omig3 * (s * sin(fi3) + l3 * cos(fi3));
Q2 = vpy - vby + omig3 * (s * cos(fi3) - l3 * sin(fi3));
Q3 = l2 * sin(fi2) * sin(fi3) + l2 * cos(fi2) * cos(fi3);
omig2 = ( - Q1 * sin(fi3) + Q2 * cos(fi3)) / Q3;
vs = - (Q1 * l2 * cos(fi2) + Q2 * l2 * sin(fi2)) / Q3;
vcx = vbx - omig2 * l2 * sin(fi2); vcy = vby + omig2 * l2 * cos(fi2);
vc = sqrt(vcx * vcx + vcy * vcy);
* pvcx = vcx; * pvcy = vcy; * pvc = vc; * pvs = vs;
* p - omig2 = omig2; * p - Q3 = Q3;
}
ACRRPF(pe2, pacx, pacy, pac, apx, apy, abx, aby, vs, l2, omig3, omig2, fi2, fi3, s,
Q3, l3, e3) * C 点加速度分析函数 *
double * pe2, * pacx, * pacy, * pac, apx, apy, abx, aby, vs, l2, omig3, omig2, fi2,
fi3, s, Q3, l3, e3;
{ double Q4, Q5, e2, ar, acx, acy, ac; * vs 是由速度分析得出的相对速度 *
Q4 = apx - abx + omig2 * omig2 * l2 * cos(fi2) - e3 * (s * sin(fi3) + l3 * cos
(fi3))
- omig3 * omig3 * (s * cos(fi3) - l3 * sin(fi3)) - 2 * omig3 * vs * sin(fi3);
Q5 = apy - aby + omig2 * omig2 * l2 * sin(fi2) + e3 * (s * cos(fi3) - l3 * sin
(fi3))
- omig3 * omig3 * (s * sin(fi3) + l3 * cos(fi3)) + 2 * omig3 * vs * cos(fi3);
e2 = ( - Q4 * sin(fi3) + Q5 * cos(fi3)) / Q3;
ar = ( - Q4 * l2 * cos(fi2) - Q5 * l2 * sin(fi2)) / Q3; * 相对加速度 *
acx = abx - e2 * l2 * sin(fi2) - omig2 * omig2 * l2 * cos(fi2);
acy = aby + e2 * l2 * cos(fi2) - omig2 * omig2 * l2 * sin(fi2);
ac = sqrt(acx * acx + acy * acy);
* pe2 = e2; * pacx = acx; * pacy = acy; * pac = ac; }

```

四、RPR 级杆组

如图 1 - 5 所示 RPR 级杆组由滑块 2、导杆 3 及两个外部运动副(转动副

图 1 - 5 RPR 级杆组

B 、 C)和一个内部运动副(移动副)组成。已知:点 B 、 C 的位置坐标 x_B 、 y_B 、 x_C 、 y_C , 速度 \mathbf{v}_B 、 \mathbf{v}_C 加速度 \mathbf{a}_B 、 \mathbf{a}_C ; 尺寸参数 k 、 l_3 。求:导杆上 E 点的位置坐标 x_E 、 y_E , 速度 \mathbf{v}_E , 加速度 \mathbf{a}_E ; 导杆的位置角 θ_3 、角速度 $\dot{\theta}_3$ 、角加速度 $\ddot{\theta}_3$; 滑块相对导杆的位置 s_r 、速度 \mathbf{v}_r 及加速度 \mathbf{a}_r 。

1. 公式

(1) 位置分析

在图 1 - 5 中

$$s_r = \sqrt{(x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2} - k^2 \quad (1 - 22)$$

$$\theta_3 = \arctan \frac{k}{s_r} \quad (1 - 23)$$

$$\theta_3 = \arctan \frac{y_C - y_B}{x_C - x_B} + m \quad (1 - 24)$$

$$\dot{\theta}_3 = \dot{\theta}_3 + m \quad (1 - 25)$$

该 RPR 级杆组在相同的几何参数条件下,有两种装配形式。图 1 - 5 中实线位置 BQC 对应于 $m = +1$; 图中虚线位置 $BQ'C$ 对应于 $m = -1$ 。 m 由机构初始位置确定。点 E 的位置方程可表示为

$$\begin{aligned} x_E &= x_B + k \sin \theta_3 + l_3 \cos \theta_3 \\ y_E &= y_B - k \cos \theta_3 + l_3 \sin \theta_3 \end{aligned} \quad (1 - 26)$$

(2) 速度分析