

SYNTAX ERROR

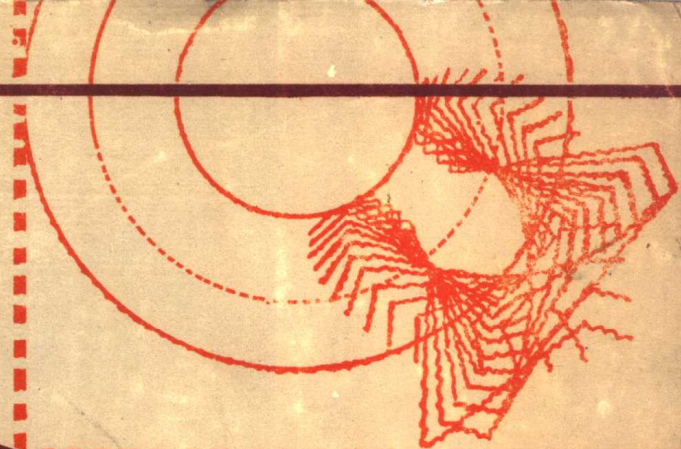
LIST

```
10 REM REAL MOTION OF SLIDER—CRANK MECHANISM
12 DATA 1,36,2,12,0,2,15,1000,0
14 READ J1,J2,M2,L1,L2,S2,T3,T2
16 DATA 0,1,0,0,0,-50,0
18 READ W,W1,D1,H,P2,P3,P,Q
PRINT "INPUT Crank Angle D & S"
(S)=0:PRINT "In cycle; S<0"
PRINT "Step"
22 INPUT D
24 D5=D
26 K=1
28 X=0
30 W0=0
32 O=5926536
34 DIM Y(1),Y(500)
36 D=D*0/180
38 IF D1<0 THEN 48
40 T1=T3
42 F=0
44 X(0)=10^10
46 GOTO 50
48 D1=D1+D
50 GOSUB 276
52 IF R=0 THEN 124
54 Y1=(J0*W0^2+D*(M0+M))/J
56 IF Y1<=1E-8 THEN 202
58 W1=SQRT(Y1)
60 T=-2*D+T1+W1
62 E1=-W0-T
64 TO=T
66 IF S<0 THEN 72
68 IF ABS(COS(D1)-1)<1E-7 THEN 72
70 IF 17<1 THEN 72
72 PRINT "Wk=",W1:GOTO 3000
W1/(0+5)X100 "r.p.m"
EK=E1
```

机械原理 电算程序设计

杨兰生 王永乐 刘国祥 宋继良 黄戈 编著

```
74 PRINT
76 IF H<0 THEN 92
78 IF ABS(COS(D1)-1)/1E-7 THEN 92
80 IF ABS(W1-W)>K THEN 90
82 H=1
```



机械原理电算程序设计

JIXIE YUANLI DIANSUAN CHENGXU SHEJI

杨兰生 王永乐 黄 戈 编著
刘国祥 宋继良

机械原理电算程序设计

中 国 展 望 出 版 社

一九八五年·九月

机械原理电算程序设计

杨兰生 王永乐 黄戈 编著
刘国祥 宋继良

*

中国地质出版社 出版

(北京西城区太平桥大街4号)

黑龙江省文化印刷厂印制

北京新华书店发行

开本787×1092毫米1/16 26.25 印张

620千字 1986年3月 北京第1版

第1次印刷 1—5000册

统一书号: 7271·136 定价: 5.60元

前 言

随着电子计算机被日益广泛地应用于机械设计和制造领域,近年来,在机械原理学科中,用解析法代替古老的图解法进行机构的分析与综合,已经越来越受到人们的重视。这不仅是因为最令人头痛的、繁杂的数学计算可全部由电子计算机来承担,从而大大解放了人的劳动力;更重要的是因为与图解法相比,解析法电算不仅速度快,而且具有前者无法比拟的精确度,提高了设计水平。所以,在设计精度要求越来越高、设计周期要求越来越短的现代机械产品设计中,解析法逐渐取代图解法,并成为机构设计的主要方法,这是设计方法自身发展的必然结果。但解析法也并非十全十美,象它的形式抽象,计算结果难辨真伪,在调试电算程序时,往往要借助于手算或图解法进行校核才行。

为了扬长避短,哈尔滨科技大学机械原理课题组,经过几年的电算教学和设计实践,研制出了一套“机械原理电算及动态机构图程序”软件系统,于1985年8月份,通过了机械工业部仪器仪表工业局所组织的鉴定。配合这套应用软件,则是编写本书的目的之一。书中除了与同类的其他书一样,系统地介绍机械原理问题的一般程序设计方法外,还着重讲述了有关在APPLE II微型计算机荧光屏上绘制静态图形的指令、语句和程序设计方法。书中所举的程序设计实例均在APPLE II微机上通过,许多程序具有通过计算机屏幕绘图来弥补解析计算之不足的特点。以平面铰链四杆机构的运动分析程序为例,程序运行时就能做到,既能输出计算数据,又能按照数据自动地在荧光屏上绘制机构的位移线图、速度线图、加速度线图,直至最后显示出表现机构真实运转情况的动态图形。这些形象生动的图形,能给人以直观深刻的印象,可用来校验计算结果的正确与否,从而简化了程序调试的过程,保证了程序的可靠性。

在编写本书过程中,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,从内容顺序的安排到例题的选取上,都考虑到教学上的方便与系统性,基本同国内一般采取的《机械原理》教材相一致。作为一本独立的书,它可供讲授机械原理电算课程时使用,这是编写本书的另一个目的。

全书共分八章,第一章由刘国祥编写,第四章由黄戈编写,第五章由宋继良编写,第八章由王永乐编写,其余各章由杨兰生编写。由杨兰生、王永乐负责主编。

书中的全部程序,只要去掉与APPLE II微机绘图有关部分,即可在IBM—PC微机及PC—1500袖珍机上运行。

黑龙江商学院有关领导对本书的编写与出版,给予了热诚的帮助和支持,在此谨致深切谢意。

由于我们水平所限,加之编写时间仓促,遗误之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

1985年9月

内 容 简 介

本书是配合哈尔滨科技大学研制的“机械原理电算及动态机构图形”软件系统编写的。

全书共分八章，包括机构运动分析，机构动力分析，机构设计，机器的真实运动，动态机构图形，机械优化设计等内容。它的突出特点是，对于机构动态图象的研究和程序设计方法，具有独到之处，与常规电算相配合，不仅能够形象生动地反映出机构的真实运动情况，而且还能直接校验计算机输出的计算结果。书中介绍的程序和设计方法，可用于教学和有关机构分析与综合方面的研究，也可在生产实践中进行机构设计时使用。

本书内容丰富，层次清楚，结构严谨，论述通俗，可供大学本科生、教师、研究生和机械工程设计人员阅读参考，也可作为高等工科院校机械原理课程的辅助教材。

目 录

第一章 平面连杆机构的运动分析	(1)
§ 1—1 用解析法进行平面连杆机构运动分析概述.....	(1)
§ 1—2 铰链四杆机构的运动分析.....	(2)
一、数学模型.....	(3)
二、程序设计.....	(4)
三、程序运行及结果.....	(8)
§ 1—3 曲柄滑块机构的运动分析.....	(9)
一、数学模型.....	(10)
二、程序设计.....	(11)
三、程序运行及结果.....	(13)
§ 1—4 导杆机构的运动分析.....	(14)
一、数学模型.....	(15)
二、程序设计.....	(16)
三、程序运行及结果.....	(21)
§ 1—5 铰链四杆机构运动分析及其动态模拟显示.....	(23)
一、数学模型.....	(24)
二、程序设计.....	(25)
三、程序运行及结果.....	(34)
§ 1—6 六杆机构的运动分析.....	(36)
一、数学模型.....	(36)
二、程序设计.....	(38)
三、程序运行及结果.....	(42)
 第二章 平面连杆机构的力分析	(46)
§ 2—1 用解析法进行平面连杆机构力分析概述.....	(46)
§ 2—2 铰链四杆机构的力分析.....	(51)
一、数学模型.....	(52)
二、程序设计.....	(57)
三、程序运行及结果.....	(64)
§ 2—3 曲柄滑块机构的力分析.....	(67)
一、数学模型.....	(67)
二、程序设计.....	(71)
三、程序运行及结果.....	(76)

§ 2—4 虚位移法求平衡力	(77)
一、方法介绍	(77)
二、虚位移法进行力分析实例	(79)
三、虚位移法求平衡力实例	(87)
§ 2—5 导杆机构的力分析	(93)
一、数学模型	(94)
二、程序设计	(98)
三、程序运行及结果	(105)
§ 2—6 六杆机构的力分析	(106)
一、数学模型	(107)
二、程序设计	(113)
三、程序运行及结果	(120)
第三章 平面连杆机构及其设计	(124)
§ 3—1 铰链四杆机构的类型判断	(124)
一、数学模型	(124)
二、程序设计	(126)
三、程序运行输出数据	(128)
§ 3—2 几何法按连杆上铰链的已知运动位置设计平面四杆机构	(130)
一、连杆通过两个预定位置的四杆机构设计	(130)
二、连杆通过三个预定位置的四杆机构设计	(136)
§ 3—3 相对运动法按连杆面和连杆上某定点的已知运动位置设计平面四杆机构	(145)
一、数学模型	(145)
二、程序设计	(146)
三、程序运行结果	(154)
§ 3—4 迭代计算逼近法解未知铰链中心位置	(155)
一、方法简介	(155)
二、按连杆预定位置综合四杆机构	(157)
三、用下降法解连杆面通过预定三位置的平面四杆机构综合问题实例	(159)
四、用下降法解连杆面通过预定四位置的平面四杆机构综合问题实例	(164)
§ 3—5 按两连架杆或曲柄滑块的对应位置设计平面四杆机构	(169)
一、数学模型	(169)
二、设计铰链四杆机构	(172)
三、设计曲柄滑块机构	(177)
§ 3—6 按行程速比系数及有关参数设计四杆机构	(180)
一、数学模型	(180)
二、程序设计	(185)

三、程序运行及结果	(194)
第四章 凸轮机构及其设计	(198)
§ 4—1 从动件的常用运动规律	(198)
一、等速运动规律	(198)
二、等加速等减速运动规律	(199)
三、余弦加速度运动规律	(200)
四、正弦加速度运动规律	(200)
§ 4—2 建立平面凸轮轮廓的数学模型	(201)
一、用极坐标表示平面凸轮轮廓	(201)
二、用直角坐标表示平面凸轮轮廓	(203)
§ 4—3 程序设计实例	(206)
一、对心直动滚子从动件盘形凸轮轮廓设计	(206)
二、偏置直动滚子从动件盘形凸轮轮廓设计 (极坐标)	(212)
三、滚子摆动从动件盘形凸轮轮廓设计	(219)
四、偏置直动滚子从动件盘形凸轮轮廓设计 (直角坐标)	(228)
五、对心直动平底从动件盘形凸轮轮廓设计	(239)
第五章 齿轮机构及其设计	(246)
§ 5—1 关于渐开线函数计算的程序设计	(246)
一、由压力角计算渐开线函数	(246)
二、由渐开线函数值求压力角	(247)
§ 5—2 直齿与斜齿圆柱齿轮传动的几何尺寸计算	(251)
一、数学模型	(251)
二、程序设计	(252)
三、程序运行及结果	(259)
§ 5—3 蜗杆蜗轮传动的几何尺寸计算	(261)
一、数学模型	(261)
二、程序设计	(263)
三、程序运行及结果	(266)
§ 5—4 圆锥齿轮传动的几何尺寸计算	(267)
一、数学模型	(267)
二、程序设计	(272)
三、程序运行及结果	(275)
§ 5—5 渐开线齿轮范的微机演示	(275)
一、数学模型	(275)
二、程序设计	(276)
三、程序运行及结果	(285)

第六章 机器的运转及其速度波动调节	(288)
§ 6—1 机器真实运转中能量变化和速度波动的关系	(288)
§ 6—2 等效力、等效力矩、等效质量和等效转动惯量的计算	(289)
一、计算等效力和等效力矩子程序	(289)
二、计算等效质量和等效转动惯量子程序	(290)
三、综合计算实例	(292)
§ 6—3 在已知力作用下机器的真实运动	(295)
一、求机器运动任意时刻等效构件的角速度	(296)
二、模拟机器的运转全过程	(302)
§ 6—4 机器周期性速度波动的调节	(311)
一、数学模型	(311)
二、程序设计	(313)
三、程序运行及结果	(319)
第七章 动态机构图形的显示方法及程序设计	(323)
§ 7—1 概述	(323)
§ 7—2 APPLE-Ⅱ的绘图功能	(323)
一、用画点、线的方法绘图	(324)
二、用造形的方法绘制图形	(326)
§ 7—3 高解析度造形	(328)
一、造形表及其建立	(328)
二、造形表的输入和保存	(334)
三、造形表的使用	(336)
§ 7—4 动态图形的显示方法	(339)
一、单页屏幕上显示动态画面的方法	(339)
二、双页屏幕显示一个动态图形的方法	(341)
§ 7—5 机构动态图形的程序设计	(343)
一、制备造形表	(343)
二、数学模型	(344)
三、程序设计	(345)
四、程序运行及结果	(352)
第八章 机构优化设计	(354)
§ 8—1 机构优化设计方法概述	(354)
一、机构优化设计的步骤	(354)
二、数学模型	(354)
§ 8—2 非线性规划问题数学模型的构成与几何描述	(358)

一、设计变量	(358)
二、目标函数	(359)
三、约束条件	(360)
四、非线性规划问题的几何描述	(361)
五、机构优化设计的特点	(363)
§ 8—3 最优化计算方法简介	(363)
§ 8—4 约束随机方向搜索法	(366)
一、方法简介	(366)
二、程序设计	(368)
三、程序运行及结果	(372)
§ 8—5 复合形法	(373)
一、方法简介	(373)
二、程序设计	(375)
三、程序运行及结果	(381)
§ 8—6 连杆机构再现函数的优化设计实例	(382)
一、数学模型	(382)
二、程序设计	(384)
三、程序运行及结果	(388)
四、提高程序运行速度的措施	(389)
§ 8—7 连杆机构再现轨迹的优化设计实例	(391)
一、数学模型	(395)
二、程序设计	(396)
三、程序运行及结果	(400)
四、用设计机构的动态图形进行程序自检	(401)

第一章 平面连杆机构的运动分析

§ 1—1 用解析法进行平面连杆机构运动分析概述

平面连杆机构运动分析的方法，分为图解法和解析法。其中图解法又有速度瞬心法、相对运动法和线图法。用图解法作机构运动分析，几何意义比较清楚，易于发现错误，也能满足一般工程实际的精度要求，并能应用于一些较复杂的机构。但做图工作繁琐，做图误差难于控制，不仅费时较多，也不便于把机构的分析问题和机构的综合问题联系起来，以选择最佳的综合方案。对于准确度要求很高的机构，精度要求更难于保证。所以，近年来随着电子计算机技术的发展与应用，许多原在理论上已经解决，但因计算手段的限制，长时间未能应用于工程实践的解析法获得了新生，有了工程实用的价值，并且已经成为机构设计方面一个十分活跃的因素，而重新受到工程界学者们的重视。在机构分析和机构综合中，现在人们已广泛地采用解析法取代图解法。

机构的运动分析包括机构的位置分析、速度分析和加速度分析三方面内容。而用解析法进行机构运动分析时，首先是建立机构的位置方程，然后就位置方程式对时间求出一次、二次导数，即可求得机构的速度方程和加速度方程。在一般情况下，用解析法求构件位置问题可归结为求解非线性方程组，而求机构构件上任意点的速度和加速度的问题则不同，它总可归结为求解线性方程组。尽管求解机构构件位置问题的非线性方程组有时要花费较多的时间，但基本上可以认为，确定机构构件位置问题，目前已完全得到解决，而且利用现代的计算工具可使求得的解，达到所需的精度。至于求解线性方程组的构件上点的速度和加速度问题，并不复杂。由此可见，用解析法进行机构运动分析的关键是位置方程的建立与求解，而其速度分析和加速度分析只不过是对其位置方程作进一步的数学运算而已。

目前，确定机构构件位置问题的解析法，如果不考虑计算方程的表示形式，其通用解法有座标变换法和封闭向量多边形法。对平面机构进行运动分析时，可用有关的向量形成首尾相联的一个或几个封闭的多边形，来确定各个构件的位置。在平面机构中，向量多边形封闭的条件，可以提供足以求未知量的方程数。对空间机构，在一般情况下，一个刚体的空间位置决定于两个向量，而不是决定于一个向量，因而除了封闭向量多边形的方程外，还必须增添一些方程。因此，一般常采用座标变换法。

作为确定构件起始位置或检验计算正确性的一种方法，图解法目前仍起着辅助作用。用图解法校核计算机输出的计算结果，通常要在每个象限内至少选一个点，另外还要确定若干个特殊点进行图解，将其结果与计算机输出的对应点的计算结果进行比较核对，从而确认计算数据的可靠性。

解析法不仅一直被认为不如图解法直观形象,而且一个“开环控制系统”式的程序本身,并不能校核计算机运行所输出的计算结果。为此,可采用“准闭环控制系统”式的程序设计。即用计算机计算出来的各项数据,绘制出运动线图和机构运动时的动态模拟图形;通过在屏幕上显示出的静态或动态图形来校验计算机输出结果的正确性。这种形、数结合的程序设计,既保证了计算机辅助平面连杆机构运动分析结论的可靠性,又产生了几何意义比较清楚的、生动而直观形象的设计效果。

本章主要讨论平面连杆机构运动分析中电算程序设计的有关问题。选用 Apple II 作为主要机型,采用 BASIC 为编程的基本语言,用封闭向量多边形法,对铰链四杆机构、滑块机构、导杆机构和六杆机构等的运动分析,分别进行电算程序设计,并以铰链四杆机构为例,说明“准闭环控制系统”式的程序设计及其动态模拟显示。

§ 1—2 铰链四杆机构的运动分析

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其他构件的运动。它的具体任务:一是求构件的位置,包括求构件上个别点的轨迹;二是求速度;三是求加速度。在求解这些问题时,假定起始构件的运动规律和机构的各构件尺寸均为已知。一般说来,这个问题的解决,可有如下几个过程:

第一,绘出机构运动简图,并充分理解问题,确定构件的起始位置。

第二,建立数学模型。平面连杆机构属闭环机构,采用封闭向量多边形法求解较为简便。首先选定闭廓机构各构件所构成的封闭多边形各边的矢量方向,即形成一向量封闭多边形。根据此形,可写出该机构的向量方程式。其次是选取一直角坐标系。为了求解问题的方便,一般都自行选取。因为直角坐标系和各构件矢量方向的选取均与解题结果无关。有了直角坐标系,即可将封闭向量方程式分别向 x 轴和 y 轴上投影,又可写成两个分量形式的代数式。

为了对机构作深入的系统研究和满足电子计算机的运算要求,需要对两个分量形式的代数式,进行一些数学运算,推导出一个适合要求的函数式 $y = f(x)$ 作为数学模型。

当然也可以用坐标变换法,如果考虑到方程的表示形式,还可以采用复数法、矩阵法等等。对于复杂的、多自由度平面连杆机构的运动分析,可根据杆组的型转化理论,应用优化技术来解决。

第三,进行程序设计。根据数学模型,将已知的数值代入并求解。其程序有“开环控制系统”式、“准闭环控制系统”式和“闭环控制系统”式三种。这里只讨论前两种的程序设计。

第四,校验和分析计算机输出的运算结果。由于程序中有“笔误”,如对三角函数或反三角函数取值未注意判断象限、存在增根或丢根等等,计算机给出一些错误的结果,所以必须对计算机输出的计算结果进行校验。对“开环控制系统”式的程序,不可忽略用图解法进行校验,否则其结果是不可靠的。

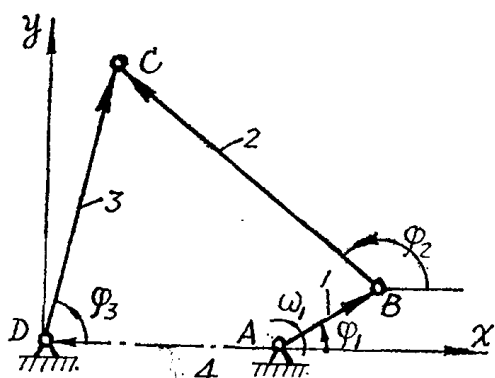


图 1—1

时针为正，反之为负。

下面先以铰链四杆机构为例，对这种运动分析的方法及其程序设计加以讨论。

在图 1—1 所示铰链四杆机构中，主动杆 AB 以 $\omega_1 = 10.4721/\text{秒}$ 等角速度逆时针旋转，各杆长度分别为 $l_1 = 1$, $l_2 = 3$, $l_3 = 2.5$, $l_4 = 2$ 。选定直角坐标系如图所示，其中 x 轴选得与固定铰链 D、A 的连线一致，求当曲柄 1 与 x 轴正向夹角为 $\varphi_1 = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, \dots, 360^\circ$ 时，连杆 2 和摇杆 3 所转过的角度 φ_2, φ_3 ，以及它们的角速度 ω_2, ω_3 和角加速度 $\varepsilon_2, \varepsilon_3$ 。规定 φ 角从 x 轴正向测量时逆

一、数学模型

如图 1—1 所示，将四杆机构 ABCDA 看作一封闭向量多边形，两连架杆矢量 $\vec{AB}$ 和 $\vec{DC}$ ，分别视为从固定铰链 A 和 D 点向外引出，其余矢量的方向任取（如图上箭头所示），则该机构的封闭向量方程式为

$$\vec{AB} + \vec{BC} + \vec{DA} - \vec{DC} = 0 \quad (1-1)$$

将式(1-1)各项分别投影到 x 轴和 y 轴上，则得投影方程式

$$\left. \begin{aligned} l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 + l_4 \cos \varphi_4 &= l_3 \cos \varphi_3 \\ l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 + l_4 \sin \varphi_4 &= l_3 \sin \varphi_3 \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

注意到机架 DA 与 x 轴正向夹角 $\varphi_4 = 0^\circ$ ，并令 $l_1 \cos \varphi_1 + l_4 = a$, $l_1 \sin \varphi_1 = b$ ，则式 (1-2) 为

$$\left. \begin{aligned} a + l_2 \cos \varphi_2 &= l_3 \cos \varphi_3 \\ b + l_2 \sin \varphi_2 &= l_3 \sin \varphi_3 \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

将式(1-3)两端平方后相加，并整理得

$$\frac{a^2 + b^2 + l_2^2 - l_3^2}{2al_2} + \cos \varphi_2 + \frac{b}{a} \sin \varphi_2 = 0 \quad (1-4)$$

$$\text{又令 } \frac{a^2 + b^2 + l_2^2 - l_3^2}{2al_2} = A, \quad \frac{b}{a} = B$$

则式(1-4)简化为

$$A + \cos \varphi_2 = -B \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2} \quad (1-5)$$

将式(1-5)两端平方，移项整理得

$$(1 + B^2) \cos^2 \varphi_2 + 2A \cos \varphi_2 + (A^2 - B^2) = 0 \quad (1-6)$$

此为关于 $\cos \varphi_2$ 的一个一元二次方程，其根为

$$\cos \varphi_2 = \frac{-2A \pm \sqrt{4A^2 + 4(1+B^2)(A^2 - B^2)}}{2(1+B^2)} \quad (1-7)$$

因一般微机的内部标准函数只装有反正切，故由

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2}}{\cos \varphi_2} \quad (1-8)$$

的反正切，便可求得对应于 φ_1 的角位移 φ_2 的值。再由式(1-3)，立即可得

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{b + l_2 \sin \varphi_2}{a + l_2 \cos \varphi_2}$$

的反正切，便可求出对应于 φ_1 的角位移 φ_3 的值。

在曲柄做整周回转的计算中，要注意判断各角度所在的象限及式(1-7)中 $\cos \varphi_2$ 的两个根都是如何取得的，否则极易得到错误的输出数据。

将式(1-2)中的第一式对时间 t 求导，并注意到 $d\varphi_1/dt = \omega_1$, $d\varphi_2/dt = \omega_2$, $d\varphi_3/dt = \omega_3$ 则有

$$\omega_1 l_1 \sin \varphi_1 + \omega_2 l_2 \sin \varphi_2 = \omega_3 l_3 \sin \varphi_3 \quad (1-9)$$

将坐标系 xoy 按相反方向（即顺时针）转一个角度 φ_2 ，则式(1-9)中的 ω_2 可被消去，于是得

$$\omega_3 = \omega_1 \frac{l_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{l_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_2)} \quad (1-10)$$

同理，又将坐标系 xoy 按相反方向（即顺时针）转一个角度 φ_3 ，式(1-9)中的 ω_3 可被消去，于是得

$$\omega_2 = -\omega_1 \frac{l_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_3)}{l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)} \quad (1-11)$$

这样，杆2、杆3的角速度 ω_2 和 ω_3 均已求得。

再将式(1-9)对时间 t 求导，并注意到 $\omega_1 = \text{常数}$, $\varepsilon_1 = 0$, $d\omega_2/dt = \varepsilon_2$, $d\omega_3/dt = \varepsilon_3$ ，则有

$$\omega_1^2 l_1 \cos \varphi_1 + \omega_2^2 l_2 \cos \varphi_2 + \varepsilon_2 l_2 \sin \varphi_2 = \omega_3^2 l_3 \cos \varphi_3 + \varepsilon_3 l_3 \sin \varphi_3 \quad (1-12)$$

将坐标系 xoy 分别向相反方向转过 φ_2 和 φ_3 角，则由式(1-12)分别可求出杆3与杆2的角加速度：

$$\varepsilon_3 = \frac{\omega_1^2 l_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \omega_2^2 l_2 - \omega_3^2 l_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_2)}{l_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_2)} \quad (1-13)$$

$$\varepsilon_2 = -\frac{\omega_1^2 l_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) + \omega_2^2 l_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) - \omega_3^2 l_3}{l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)} \quad (1-14)$$

二、程序设计

1. 框图

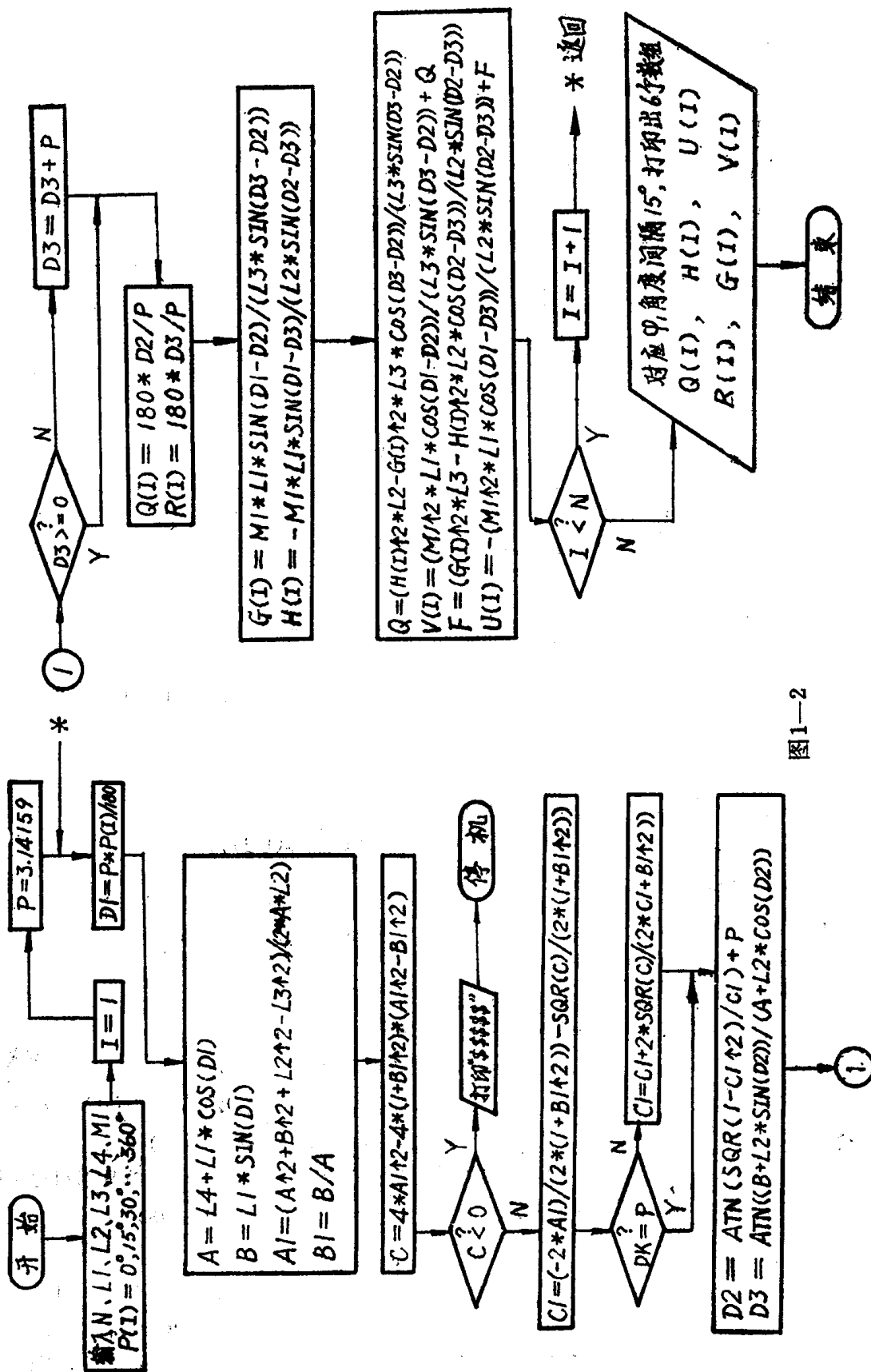


图1-2

2. 源程序

LIST

```
10 REM KINEMATIC ANALYSIS
20 READ N, L1, L2, L3, L4, M1
30 DATA 24, 1, 3, 2.5, 2, 10.472
40 DIM P(N), Q(N), R(N), U(N), V(N), H(N), G(N)
60 FOR J=0 TO 360 STEP 15
70 P(J/15)=J
60 NEXT J
120 FOR I=0 TO N
125 P=3.14159
130 D1=P*P(I)/180
140 A=L4+L1*COS(D1)
150 B=L1*SIN(D1)
160 A1=(A*A+B*B+L2*L2-L3*L3)/(2*A*L2)
170 B1=B/A
180 C=4*A1*A1-4*(1+B1*B1)*(A1*A1-B1*B1)
190 IF C<0 THEN 550
200 C1=(-2*A1)/(2*(1+B1*B1))-SQR(C)/(2*(1+B1*B1))
210 IF D1<=P THEN 220
215 C1=C1+2*SQR(C)/(2*(1+B1*B1))
220 D2=ATN(SQR(1-C1*C1)/C1)+3.14159
230 D3=ATN((B+L2*SIN(D2))/(A+L2*COS(D2)))
235 IF D3>=0 THEN 240
237 D3=D3+P
240 Q(I)=180*D2/P
250 R(I)=180*D3/P
260 G(I)=M1*L1*SIN(D1-D2)/(L3*SIN(D3-D2))
270 H(I)=-M1*L1*SIN(D1-D3)/(L2*SIN(D2-D3))
280 Q=(H(I)*H(I)*L2-G(I)*G(I)*L3*COS(D3-D2))/(L3*SIN(D3-D2))
290 V(I)=(M1*M1*L1*COS(D1-D2))/(L3*SIN(D3-D2))+Q
300 F=(G(I)*G(I)*L3-H(I)*H(I)*L2*COS(D2-D3))/(L2*SIN(D2-D3))
310 U(I)=-(M1*M1*L1*COS(D1-D3))/(L2*SIN(D2-D3))+F
330 NEXT I
340 PRINT "Q(I):";FOR I=0 TO 21;PRINT Q(I);",",;NEXT I;PRINT
360 FOR I=22 TO N; PRINT Q(I);",",; NEXT I; PRINT; PRINT
370 PRINT "R(I):";FOR I=0 TO 6;PRINT R(I);",",;NEXT I;PRINT
```

```

390 FOR I=7 TO N: PRINT R(I);",",:NEXT I: PRINT: PRINT
400 PRINT "H(I):"; FOR I=0 TO 13:PRINT H(I);",",:NEXT I:PRINT
420 FOR I=14 TO N: PRINT H(I);",",:NEXT I: PRINT:PRINT
430 PRINT "G(I):";FOR I=0 TO 20:PRINT G(I);",",:NEXT I:PRINT
450 FOR I=21 TO N: PRINT G(I);",",:NEXT I:PRINT :PRINT
460 PRINT "U(I):";FOR I=0 TO 12:PRINT U(I);",",:NEXT I:PRINT
480 FOR I=13 TO N:PRINT U(I);",",:NEXT I:PRINT:PRINT
490 PRINT "V(I):";FOR I=0 TO 6:PRINT V(I);",",:NEXT I:PRINT
510 FOR I=7 TO N:PRINT V(I);",",: NEXT I: PRINT: PRINT
520 PRINT
530 PRINT
540 GOTO 560
550 PRINT "$ $ $ $ $"
560 END

```

3. 程序说明

该程序，由变量和数组的设定、数据读入、计算及打印输出结果等三部分组成。

第一，10号语句是程序说明。从20号语句到80号语句、125号语句，是有关变量、数组设定及已知数据读入部分。

第二，从120号语句到330号语句是计算部分。其中190号语句里的C表示关于 $\cos\varphi_2$ 的一元二次方程根的判别式，故当 $C<0$ 时，计算失败；210号语句是该方程的两个根的适用条件。另外对反三角函数的取值要注意判断象限（见220、235、237各号语句）。

第三，从340号语句以后为打印输出部分。为节省打印用纸，要求打印出的数据间只用“，”号隔开，最好不间断。但APPLE II机一次连续打印超过256个字元时，会自动换行，故将每个输出打印的数组，分成均不超过256个字元的两个循环语句输出，如340号语句和360号语句即是。

4. 变量符号说明

算式中符号	程序变量符	含 义	单 位
l_1	L1	AB杆长度	
l_2	L2	BC杆长度	
l_3	L3	CD杆长度	
l_4	L4	DA杆长度	
ω_1	M1	AB杆角速度	
a	A	中间变量 $a=l_4+l_1\cos\varphi_1$	
b	B	中间变量 $b=l_1\sin\varphi_1$	
A	A1	中间变量 $A=\frac{a^2+b^2+l_2^2-l_3^2}{2al_2}$	