

- FOM=FO
- R=R*C
- GO TO IB
- CALL FX(N,X,F)
- RETURN
- END

高等学校教学参考书

机械原理 电算程序



内 容 提 要

本书共十一章,包括平面连杆机构分析、平面连杆机构综合、空间连杆机构运动分析与综合、平面高副机构设计基础、凸轮机构、齿轮机构、轮系、组合机构、摩擦、机械动力学以及机构优化设计中应用的计算机程序。此外,在附录中还给出了矩阵运算、线性和非线性代数方程的求解、微分方程的数值求解等常用数学方法的程序。所有程序均以子程序方式提供。程序用 BASIC 和 FORTRAN 两种语言编写,具有较好的通用性。为了便于读者掌握子程序的调用方法,各章均有简要的方法概述及足够的例题。

本书可作为高等工业学校机械原理课程教学参考书,供学生完成解析法作业、课程设计及毕业设计时使用,也可供机械设计人员和有关工程技术人员进行机构设计和分析时应用,还可供学习计算机语言的学生和工程技术人员参考。

高等学校教学参考书

机械原理电算程序集

《机械原理电算程序集》编写组 编

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

商务印书馆上海印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 80 字数 687,000

1987年11月第1版 1987年11月第1次印刷

印数 0,001—3,750

书号 15010·0881 定价 5.75 元

前 言

由于高速、精密、自动化机械的需要、计算技术的飞速发展以及计算机的日益普及,在近一、二十年内机械原理学科有了很大发展。在机构设计和分析中更广泛地使用着解析法和采用计算机辅助设计(CAD)方法。这些发展和要求也必然会逐渐反映到机械原理教学中来。从80年代开始,机械原理课程中的解析方法比重有了提高。在教学过程中,特别是在课程设计中,相当多的学校已经使用了电子计算机。为了提高教学质量,使学生更快地掌握和应用解析方法并在教学中推广计算机的应用,高等学校工科机械基础课程教学指导委员会机械原理教学指导小组决定于1982年11月成立电算小组,着手编写一本适用于教学、且可供其他设计人员参考的机械原理电算程序集。经过三年多的程序编制和试用,并于1984、1985年两次会审后于1986年定稿。

本程序集包括了机械原理教学内容的绝大部分章节。考虑到机械原理学科的发展以及高年级学生选修课和研究生的需要,与现行教学大纲相比,本书还增加了平面高副机构设计基础、空间机构、机构优化设计等内容,对其他一些章节内容也作了些增补。

考虑到各校学生学习的计算机语言的不同,本书使用了BASIC和FORTRAN两种语言以供选用。各程序均以子程序方式提供,且具有较好的通用性。学生将自编主程序、调用有关子程序来完成作业及课程设计。这样,既可使学生掌握计算机编程方法,又可避免为编制子程序花费过多时间而影响机械原理课程本身内容的掌握。为了帮助学生较快地掌握程序的使用,各章均有简明的方法概述,并配有必要的例题。有些在现行教科书中没有的内容,则给以较详细的说明和给出相应的参考书目。所有程序都经过试算。可在类似APPLE-II型微机上使用,也可用于其他类型的计算机(如IBM-PC及其兼容机)。必要时读者可根据所用机器的专用操作方式,对程序作微小改变。

本书中BASIC程序语句号由四位数字组成。首位数字同章号(第十章的首位数字为零,因而略去)。因此在全部程序中除确认不会同时调用者外,语句号均不重复,以便读者随意调用各子程序。考虑到其他章节较少调用到第三章的子程序,故把附录的语句号的首位数字也定为3。

为使用方便,在本书末编有程序索引。按英文字母及数字大小先后顺序排列,并在索引中列出了BASIC程序的语句号以备查找。

本书第一章§1~§3由西南交通大学王婉、谢泗淮编写;§4~§6由北京邮电学院阮平生、梁崇高编写;第二章由重庆大学黄茂林编写(其中胡克勤参加了部分程序的编制和调试);第三章由华南工学院汪凯编写;第四章由哈尔滨工业大学李琰贤编写;第五章由上海交通大学曹志豪、许有恒编写;第六、十一两章由内蒙古工学院汪萍、侯慕英编写;第七章由清华大学黄靖选、申永胜、杨向宇编写;第八章由西安交通大学蒋希成、徐曾荫编写;第九章由河北工学院

柏朋燕编写；第十章由清华大学唐锡宽编写；附1~附3由西南交通大学王婉、谢泗淮编写；附4由重庆大学黄茂林编写；附5~附8由西安交通大学蒋希成编写；附9~附11由清华大学唐锡宽编写；附12由内蒙古工学院汪萍、侯慕英编写。全书由唐锡宽、梁崇高、许有恒统稿主编。

本书为高等工科院校机械原理教学参考书，供学生在完成解析法作业、课程设计和毕业设计时使用。中等专业学校的师生也可在机械原理教学中参考使用。本书也可供机械设计人员和其他有关工程技术人员在分析和设计机械时应用，还可供学习计算机语言的学生和工程技术人员参考。

在本书编写过程中曾得到机械原理教学指导小组的关心和支持；得到参加编写本书的十所高等院校的领导和机械原理教师的支持；此外参加过本书审稿会的还有张启先、王知行等老师，编者对此表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，遗漏和错误之处在所难免，恳切希望广大读者给以批评指正，并把使用中发现的问题及时告诉我们，以便进一步完善本程序集。

编 者

1986年6月

目 录

第一章 平面连杆机构分析	1	§ 2-8 平面四杆机构综合结果的检查	105
§ 1-1 连杆机构运动分析的直角坐标法	1	一、机构是否具有曲柄的检查	105
一、角运动已知的构件	4	二、机构传力特性的校验	108
二、可变杆长二杆组	5	三、机构通过顺序的检查	109
三、两点运动为已知的构件	8	第三章 空间连杆机构运动分析及综合	113
四、三点共线导杆	9	§ 3-1 空间连杆机构运动分析	113
五、输入导杆	11	一、RSSR 机构运动分析	113
六、摆动导杆	15	二、RSSP 机构运动分析	119
七、偏置导杆	16	§ 3-2 空间连杆机构运动综合	122
§ 1-2 高级组运动分析的直角坐标法	20	一、RSSR 机构的综合	122
一、位置迭代方程的系数和右端项	21	二、RSSP 机构的综合	133
二、速度方程右端项	24	第四章 平面高副机构的设计基础	150
三、加速度方程右端项	25	§ 4-1 瞬心线机构	150
§ 1-3 连杆机构力分析的直角坐标法	26	一、已知中心距和一条瞬心线, 求另一条瞬心线	150
一、转动副反力系数单元矩阵	31	二、已知中心距及主、从动件的运动规律(或传动比的变化规律), 求两构件的瞬心线	156
二、移动副反力系数单元矩阵	33	§ 4-2 共轭曲线机构	160
三、平衡力系数单元矩阵	35	一、用包络法求凸轮轮廓曲线	160
四、平衡力矩系数单元矩阵	36	二、用内解法线法求共轭曲线	165
五、已知力单元	37	第五章 凸轮机构	172
§ 1-4 连杆机构分析的基本组法	42	§ 5-1 从动件运动规律	173
一、平面运动构件上某点的运动分析	43	一、等速运动规律	175
二、第一种 II 级组的分析	46	二、等加等减速运动规律	176
三、第二种 II 级组的分析	51	三、正弦加速度运动规律	178
四、第三种 II 级组的分析	56	四、余弦加速度运动规律	179
§ 1-5 用基本组法对有源组的分析	63	五、改进正弦加速度运动规律(升程)	180
一、有源 II 级组的分析	63	六、改进梯形加速度运动规律(升程)	183
二、有源 III 级组的分析	68	七、3-4-5 次多项式运动规律	184
第二章 平面连杆机构综合	81	§ 5-2 盘形凸轮廓线及刀具中心轨迹线设计	185
§ 2-1 铰链四杆机构综合	82	一、包络线计算	185
一、实现刚体若干给定位置的机构综合	82	二、移动滚子从动件盘形凸轮设计	187
二、实现预期轨迹的机构综合	93		
§ 2-2 曲柄滑块机构函数发生器综合	102		

三、摆动滚子从动件盘形凸轮设计	190	十二、求内齿轮的主要参数	265
四、移动平底从动件盘形凸轮设计	194	十三、单排 $2K-H$ 行星轮系设计	266
§ 5-3 盘形凸轮的曲率半径	196	十四、双排 $2K-H$ 行星轮系设计	269
一、移动滚子从动件盘形凸轮的曲率半径	196	十五、单、双排 $2K-H$ 行星轮系综合设计	271
二、摆动滚子从动件盘形凸轮的曲率半径	199	§ 7-2 效率计算	273
§ 5-4 圆柱凸轮机构设计	201	一、行星轮系效率	273
一、移动滚子从动件圆柱凸轮设计	201	二、轴标号变换	276
二、摆动滚子从动件圆柱凸轮设计	204	三、轴力矩计算	279
§ 5-5 输出格式及其它	208	四、轴功率及传动效率计算	281
§ 5-6 应用实例	211	五、差动轮系效率	286
一、移动滚子从动件盘形凸轮设计	211	六、 $3K$ 轮系效率	292
二、摆动滚子从动件盘形凸轮设计	214	第八章 组合机构	297
三、移动平底从动件盘形凸轮设计	218	§ 8-1 导向 II 级组的设计	297
四、摆动滚子从动件圆柱凸轮设计	219	一、导向 II 级组综合	297
第六章 齿轮机构	222	二、导向 II 级组连杆上两点的对应关系	303
§ 6-1 反渐开线函数及渐开线坐标计算	223	§ 8-2 齿轮-连杆组合机构的综合	306
一、反渐开线函数	223	§ 8-3 凸轮-连杆组合机构的综合	308
二、渐开线坐标计算	224	§ 8-4 具有瞬时停歇运动的四杆-齿轮组合机构的分析与综合	314
三、渐开线直角坐标计算	227	第九章 摩擦	323
§ 6-2 齿轮的参数选择与设计计算	230	§ 9-1 凸轮机构的力分析及效率计算	324
一、按等滑动系数原则选择变位系数	230	一、偏置直动滚子从动件盘形凸轮力分析及效率计算	324
二、圆柱齿轮传动的尺寸计算	233	二、摆动滚子从动件盘形凸轮力分析及效率计算	331
三、齿轮传动质量指标计算	237	三、平底从动件盘形凸轮力分析及效率计算	337
四、螺旋齿轮传动参数选择	242	§ 9-2 连杆机构的力分析及效率计算	342
第七章 轮系	248	一、摩擦力矩计算	342
§ 7-1 行星轮系中各轮齿数的确定	248	二、摩擦力计算	343
一、确定行星轮系中各轮的齿数	250	第十章 机械动力学	349
二、求行星轮系中外齿轮的变位系数	253	§ 10-1 已知等效力矩、等效转动惯量求机构等效构件的运动规律	351
三、求行星轮系中内齿轮的变位系数	254	一、等效构件角速度 ω 为角位移 φ 的已知函数时, 求 φ 和时间 t 的关系	351
四、求单排 $2K-H$ 行星轮系中行星轮的变位系数	257	二、确定机械系统稳定运动期间内最大、最小和平均角速度以及速度不均匀系数	353
五、求双排 $2K-H$ 行星轮系中行星轮的变位系数	259		
六、按接触条件	260		
七、验算内齿轮和刀具干涉	260		
八、验算内、外齿轮的干涉	261		
九、求外啮合传动的重合系数	262		
十、求内啮合传动的重合系数	263		
十一、根据渐开线函数求角度	264		

三、等效驱动力矩 M_d 、等效阻力矩 M_r 和等效转动惯量 J 均为等效构件角位置 φ 的已知函数时, 求等效构件的运动规律	354
四、等效力矩为等效构件角速度 ω 的函数、等效转动惯量为常数时, 求解等效构件的运动规律	363
五、等效驱动力矩为角速度 ω 的函数、等效阻力矩为角位置 φ 的函数以及等效转动惯量为角位置 φ 的函数时, 求等效构件的运动规律	366
六、求解函数 $f(\varphi, \omega)$ 及 $f(t, \varphi, \omega)$	376
七、等效力矩为角速度和时间的函数、等效转动惯量为角位置函数时, 求解等效构件的运动规律	381
八、打印函数曲线	389
§ 10-2 飞轮转动惯量的确定	391
一、等效驱动力矩为角位置函数、等效阻力矩为常数情况下飞轮转动惯量的计算	391
二、等效驱动力矩为角速度的一次函数, 工作行程和空行程中等效阻力矩为不等的常数情况下飞轮转动惯量的计算	396
三、等效驱动力矩为角速度的二次函数、工作行程和空行程中等效阻力矩为不等的常数情况下飞轮等效转动惯量的计算	402
第十一章 机构优化设计	409
§ 11-1 几种常用优化方法	410
一、黄金分割法	410
二、约束随机法	413
三、内点惩罚函数法	417
§ 11-2 优化方法在机构设计中的应用示例	423
附录	433
附录 1 反正切函数	433
附录 2 矩阵相乘	434
附录 3 矩阵求逆	434
附录 4 矩阵最小二乘法	437
附录 5 一元四次方程求根	443
附录 6 一元三次方程求根	444
附录 7 一元二次方程求根	446
附录 8 解线性方程组	447
附录 9 辛普生积分	449
附录 10 一元三点拉格朗日插值	455
附录 11 常微分方程数值解法: 四阶龙格-库塔法	457
附录 12 弦线法求根	463
程序索引	467
参考文献	472

第一章 平面连杆机构分析

本章采用两种分析方法: § 1-1 至 § 1-3 介绍了直角坐标法; § 1-4 至 § 1-6 介绍了基本组法。

直角坐标法的要点是以点的运动为基础贯穿整个分析过程。作运动分析时先求机构中某些特殊点的运动,再根据点的运动计算构件的角运动。动态静力分析也以点的位置坐标为依据建立作用力之间的关系。力分析方法具有通用性,对由各种级组组成的机构都能适用。

基本组法的要点是按每一种基本组建立封闭矢量方程式,先求解基本组中构件的角运动,然后再计算构件上某些点的运动。动态静力分析也是以基本组为基础进行的。

两种方法都给出了求解各类 II 级机构及某些 III 级机构的计算机子程序。直角坐标法给出的程序采用 BASIC 及 FORTRAN 两种语言,基本组法仅有 FORTRAN 语言程序。

§ 1-1 连杆机构运动分析的直角坐标法

将机构放在直角坐标系中,选择其上的某些特殊点如铰链点、几何关节、构件质心等作为考察对象。其中需求解的点称为待求点,其他与之有约束关系的点称为参考基点,通过在待求点与参考基点之间根据约束条件建立约束方程来求解待求点的运动参数。

平面机构中点与点之间的位置约束关系主要有两种:一种以杆长为约束条件;另一种以转角为约束条件。图 1-1 表示了这两种关系。

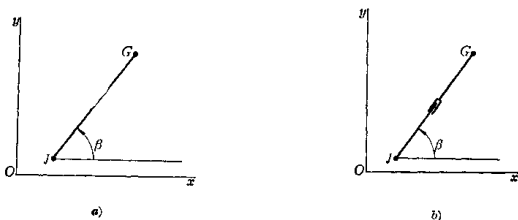


图 1-1

以杆长为约束条件所建立的约束方程式为

$$(x_G - x_J)^2 + (y_G - y_J)^2 - g^2 = 0 \quad (1-1)$$

式中 x_G 、 y_G 及 x_J 、 y_J 分别为 G 、 J 两点的坐标, g 代表 G 与 J 两点间的距离,也称杆长。上式可用来描述两种情况:一种情况如图 1-1a 所示,为常见的二铰链杆。另一种如图 1-1b 所示,

G 与 J 分别在以移动副相联结的两个构件上, 但当其间距离及变化率为已知时, 可将它们合并看作一个具有变长度的构件进行运动分析, 这时以 q 表示两点间的距离, 称为变杆长。对于有些机构(如液压缸机构), 这样处理将使分析过程简化。

以转角为约束条件所建立的约束方程式为

$$(x_G - x_J) \sin \beta - (y_G - y_J) \cos \beta = 0 \quad (1-2)$$

或写成参数方程

$$\left. \begin{aligned} x_G &= x_J + q \cos \beta \\ y_G &= y_J + q \sin \beta \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

其中点 J 为基点, β 为 JG 杆的角位置, 是指 JG 标线与 x 轴的夹角。其符号为自 x 轴量至 JG 线逆时针方向为正, 顺时针方向为负。不论杆长是否变化, 式(1-2)及式(1-3)均可适用。

约束方程用于求解位置问题, 故又称位置方程。不难看出, 位置方程是不超过二次的非线性方程。

位置方程对时间求导得速度方程, 速度方程对时间求导得加速度方程, 速度及加速度方程都是线性方程。

一个机构的运动约束条件可用若干个上述约束方程联立表示, 联合求解便得到各待求点的位置坐标。因方程是非线性的, 为减少计算量宜分组进行。对于 II 级机构, 全部约束方程可划分为若干个只含一个或两个方程的分组, 称之为基本单元。求解时自主动件开始依次逐组进行, 每一步都能找到解的解析式, 从而整个过程可用代数方法进行。

本节内容仅限于 II 级机构, III 级以上机构的运动分析将在 § 1-2 中介绍。

对于 II 级机构, 可以用图 1-2 所示的六种构件(组)作为运动分析的基本单元, 它们是: a) 角运动已知的构件; b) 可变杆长二杆组; c) 两点运动为已知的构件; d) 三点共线杆组; e) 输入导杆; f) 摆动导杆。

图中 G 为待求点; J 、 K 为参考基点; r 为固定杆长; q 为可变杆长; β 为输入角; φ 为输出角。本节将给出这六种基本单元的计算子程序。有些机构的结构形式与基本单元不完全相同, 但经过处理可以转化为基本单元的形式, 从而可应用所给子程序进行计算。本节以偏置导杆作为例子说明上述转化方法, 同时也将偏置导杆的计算程序作为第七个子程序。

在调用本节程序时应注意:

- (1) 解题时首先将机构分解为上述基本单元; 对构件及点等进行编号, 选定坐标系。
- (2) 调用子程序前要对机构所有几何尺寸及固定铰链坐标赋值, 对固定铰链点的速度及加速度要预先赋零。
- (3) 调用某一程序前, 要对参考基点的各运动量及已知的构件角运动量赋值。
- (4) 若使用 BASIC 语言程序, 在调用每一个子程序之前, 要用 DATA 语句输入与该程序中 READ 语句相对应的编号。
- (5) FORTRAN 子程序中的虚元 MP 为选项系数, 供计算时选择计算内容之用, MP 取 1 时只计算位置; 取 2 时计算位置及速度; 取 3 时计算位置、速度及加速度。

本节各程序采用统一变量及标识符, 现将其中主要的列表如下:

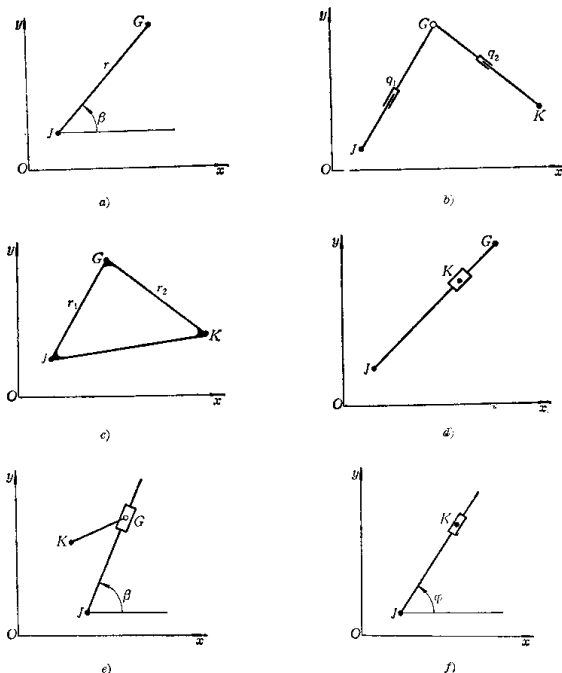


图 1-3

对表 1-1 需作如下补充说明:

(1) 应用 BASIC 程序时, 要求对点、构件及构件尺寸(杆长)进行编号。因有些构件不止一个尺寸, 故构件尺寸编号可能不同于构件编号。点的位置、速度及加速度, 构件的角位置、角速度及角加速度以及构件尺寸均取数组形式, 以编号作为各有关变量的下标。所有数组均应在主程序中加以定义。

(2) 应用 FORTRAN 程序时, 只要求对点进行编号。以编号为下标, 将点的位置、速度及加速度分量分别编成六个数组, 存放于无名公用区内。构件尺寸及构件角运动量在子程序中均取简单变量形式。因此, 作运动分析时构件及构件尺寸编号不是必需的。但后面将看到, 在作力分析时构件也需编号。在所有子程序中, 点的运动量数组的下标上界均取为 30, 因此

表 1-1 主要标识符说明

标 识 符		公式中符号(单位)	说 明
BASIC	FORTRAN		
X(I), Y(I)	X(I), Y(I)	$x, y(\text{m})$	点的坐标分量
VX(I), VY(I)	VX(I), VY(I)	$\dot{x}, \dot{y}(\text{m/s})$	点的速度分量
AX(I), AY(I)	AX(I), AY(I)	$\ddot{x}, \ddot{y}(\text{m/s}^2)$	点的加速度分量
G	G	G	待求点编号(II级机构)
J, K	J, K	J, K	参考基点编号(II级机构)
	R	$r(\text{m})$	固定杆长
L(I)	Q/RS	$q/h(\text{m})$	(输入/输出)可变杆长
VH(I)	VQ/VRS	$\dot{q}/h(\text{m/s})$	(输入/输出)杆长变化速度
AH(I)	AQ/ARS	$\ddot{q}/h(\text{m/s}^2)$	(输入/输出)杆长变化加速度
P, Q			构件尺寸编号
Z			构件编号
PH(Z)	BETA/PH	$\beta/\varphi(\text{rad})$	构件(输入/输出)角位置
VPH(Z)	VB/VPH	$\dot{\beta}/\dot{\varphi}(\text{rad/s})$	构件(输入/输出)角速度
APH(Z)	AB/APH	$\ddot{\beta}/\ddot{\varphi}(\text{rad/s}^2)$	构件(输入/输出)角加速度
MD	M MP	M	模式系数 选项系数

在一个机构中点的数目不能超过 30。如若超过,需修改子程序,将有关数组的下标上界相应提高。

(3) 编号顺序不影响计算结果,故对编号顺序无要求。但因力分析子程序的需要,编号时宜遵循下列规则:

(a) 构件编号时机架取为零号,活动构件编号从 1 开始,每一件一号,按自然数递增,不要断号。

(b) 作点编号时建议先给运动副所在点编号,然后再编其它点。编号要从 1 开始,每点一号,无间断地递增。

一、角运动已知的构件

1. 程序名 BAR

2. 功用

本程序用于计算绕定轴转动构件上点的运动。也可用于计算任何作平面运动构件上的点运动。

3. 方法概要

给定构件的角运动量 $\beta, \dot{\beta}$ 及 $\ddot{\beta}$, 取 J 为参考基点, 计算 G 点的运动。

G 点的位置、速度、加速度由下式得出(图 1-3)

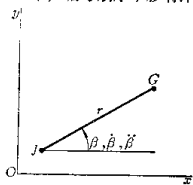


图 1-3

$$\left. \begin{aligned} x_G &= x_J + r \cos \beta \\ y_G &= y_J + r \sin \beta \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_G &= \dot{x}_J - r \sin \beta \cdot \dot{\beta} \\ \dot{y}_G &= \dot{y}_J + r \cos \beta \cdot \dot{\beta} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_G &= \ddot{x}_J - r \cos \beta \cdot \ddot{\beta} - r \sin \beta \cdot \dot{\beta}^2 \\ \ddot{y}_G &= \ddot{y}_J - r \sin \beta \cdot \ddot{\beta} + r \cos \beta \cdot \dot{\beta}^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

4. BASIC 程序

```

1000 REM SUB BAR
1002 READ Z, J, G, Q
1004 PH=PH(Z)
1006 X(G)=X(J)+L(Q)*COS(PH)
1008 Y(G)=Y(J)+L(Q)*SIN(PH)
1010 VX(G)=VX(J)-L(Q)*VPH(Z)*SIN(PH)
1012 VY(G)=VY(J)+L(Q)*VPH(Z)*COS(PH)
1014 AX(G)=AX(J)-L(Q)*VPH(Z)^2*COS(PH)-L(Q)*APH(Z)*SIN(PH)
1016 AY(G)=AY(J)-L(Q)*VPH(Z)^2*SIN(PH)+L(Q)*APH(Z)*COS(PH)
1018 RETURN

```

5. FORTRAN 程序

```

SUBROUTINE BAR(MP, G, J, R, BETA, VB, AB)
INTEGER G
COMMON X(30), Y(30), VX(30), VY(30), AX(30), AY(30)
SI=SIN(BETA)
CO=COS(BETA)
X(G)=X(J)+R*CO
Y(G)=Y(J)+R*SI
IF (MP.EQ.1) GOTO 10
VX(G)=VX(J)-R*SI*VB
VY(G)=VY(J)+R*CO*VB
IF (MP.EQ.2) GOTO 10
AX(G)=AX(J)-R*CO*VB*VB-R*SI*AB
AY(G)=AY(J)-R*SI*VB*VB+R*CO*AB
10 RETURN
END

```

二、可变杆长二杆组

1. 程序名 DYAD

2. 功用

本程序用于分析铰链二杆组或刚体上不共线的三点间的运动问题，也可用于分析摆动油缸机构或其它具有变杆长的运动问题。

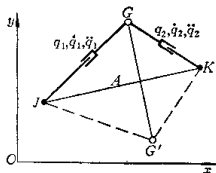
3. 方法概要

这种单元的结构如图 1-4 所示，其中两参考基点 J 、 K 的运动是已知的，并给定两杆长度及其一、二次变化率，要求计算连接点 G 的运动。

(1) G 点的位置 二杆组的运动约束条件可用一对形式(1-1)的方程来表示，两式可合写如下：

$$(x_G - x_{J,K})^2 + (y_G - y_{J,K})^2 - q_{1,2}^2 = 0 \quad (1-7)$$

其中双下角中前一下角属于 JG 杆，后一下角属于 KG 杆。两式联立求解得出以下结果：



式中

$$x_G = x_J + B(x_K - x_J) - MO(y_K - y_J) \quad (1-8)$$

$$y_G = y_J + B(y_K - y_J) + MC(x_K - x_J)$$

$$B = \frac{A^2 + q_1^2 - q_2^2}{2A^2}$$

$$A = \sqrt{(x_J - x_K)^2 + (y_J - y_K)^2}$$

$$C = \sqrt{D}$$

$$D = \left(\frac{q_1}{A}\right)^2 - B^2$$

图 1-4

式(1-7)有两组解，以模式系数 M 相区别。 $M = +1$ 对应 $J-G-K$ ，字母按顺时针方向排列，如图中实线所示； $M = -1$ 对应 $J-G'-K$ ，字母按逆时针方向排列，如图中虚线所示。模式系数由机构初始位置确定，运动过程中不变。

若 $D=0$ 则 $B = \frac{q_1}{A}$ ，进一步可得出 $q_1 + q_2 = A$ ，或 $|q_2 - q_1| = A$ ，此时 J, G, K 三点成一直线，机构处于运动不定点，不能进行速度及加速度计算。当 $D < 0$ ，则 $q_1 + q_2 < A$ ，或 $|q_1 - q_2| < A$ ，表示机构不能装配。

(2) G 点的速度 将式(1-7)对时间求导，得到一对速度方程式：

$$(x_G - x_{J,K})(\dot{x}_G - \dot{x}_{J,K}) + (y_G - y_{J,K})(\dot{y}_G - \dot{y}_{J,K}) - q_{1,2} \cdot \dot{q}_{1,2} = 0 \quad (1-9)$$

解之得

$$\begin{aligned} \dot{x}_G &= \frac{\begin{vmatrix} B_1 & y_G - y_J \\ B_2 & y_G - y_K \end{vmatrix}}{\Delta} \\ \dot{y}_G &= \frac{\begin{vmatrix} x_G - x_J & B_1 \\ x_G - x_K & B_2 \end{vmatrix}}{\Delta} \end{aligned} \quad (1-10)$$

式中

$$B_{1,2} = (x_G - x_{J,K})\dot{x}_{J,K} + (y_G - y_{J,K})\dot{y}_{J,K} + q_{1,2} \cdot \dot{q}_{1,2}$$

$$\Delta = (x_G - x_J)(y_G - y_K) - (x_G - x_K)(y_G - y_J)$$

当 $\Delta=0$ 时，可得 $\frac{y_G - y_J}{x_G - x_J} = \frac{y_G - y_K}{x_G - x_K}$ ，表示 GJ 与 GK 斜率相同， J, G, K 在一直线上，它与 $D=0$ 是等价的。

(3) G 点的加速度 将式(1-9)对时间求导，得到一对加速度方程式：

$$\begin{aligned} (x_G - x_{J,K})(\ddot{x}_G - \ddot{x}_{J,K}) + (y_G - y_{J,K})(\ddot{y}_G - \ddot{y}_{J,K}) + (\dot{x}_G - \dot{x}_{J,K})^2 \\ + (\dot{y}_G - \dot{y}_{J,K})^2 - q_{1,2} \cdot \ddot{q}_{1,2} - \dot{q}_{1,2}^2 = 0 \end{aligned} \quad (1-11)$$

解出 G 点的加速度为

$$\ddot{x}_G = \frac{\begin{vmatrix} B'_1 & y_G - y_J \\ B'_2 & y_G - y_K \end{vmatrix}}{\Delta} \quad (1-12)$$

$$\ddot{y}_G = \frac{\begin{vmatrix} x_G - x_J & B'_1 \\ x_G - x_K & B'_2 \end{vmatrix}}{\Delta}$$

式中

$$B'_{1,2} = (x_G - x_{J,K}) \ddot{x}_{J,K} + (y_G - y_{J,K}) \ddot{y}_{J,K} - (\dot{x}_G - \dot{x}_{J,K})^2 - (\dot{y}_G - \dot{y}_{J,K})^2 + q_{1,2} \ddot{q}_{1,2} + \dot{q}_{1,2}^2$$

4. BASIC 程序

```

1030 REM SUB DYAD
1032 READ J, K, G, Q, P, MD
1034 REM POSITION ANALYSIS
1036 X=X(K)-X(J)
1038 Y=Y(K)-Y(J)
1040 A=SQR(X^2+Y^2)
1041 IF A=0 THEN PRINT "COINCIDE": STOP
1042 B=(L(Q)^2-L(P)^2)/(2*A^2)+5
1044 D=(L(Q)/A)^2-B^2
1046 IF D<0 THEN PRINT "MECHANISM CAN NOT BE ASSEMBLED": STOP
1048 C=SQR(D)
1050 X(G)=X(J)+B*X-MD*C*Y
1052 Y(G)=Y(J)+B*Y+MD*C*X
1054 REM VELOCITY ANALYSIS
1055 IF D=0 THEN PRINT "MOTION UNDEFIND": STOP
1056 G(1,1)=L(Q)
1058 G(1,2)=VH(Q)
1060 G(2,1)=L(P)
1062 G(2,2)=VH(P)
1064 FOR I=1 TO 2
1066 IF I=1 THEN L=J
1068 IF I=2 THEN L=K
1070 A(I,1)=X(G)-X(L)
1072 A(I,2)=Y(G)-Y(L)
1074 A(I,3)=A(I,1)*VX(L)+A(I,2)*VY(L)+G(I,1)*G(I,2)
1076 NEXT I
1078 C=A(1,1)*A(2,3)-A(1,2)*A(2,1)
1080 VX(G)=(A(1,3)*A(2,2)-A(1,2)*A(2,3))/C
1082 VY(G)=(A(1,1)*A(2,3)-A(2,1)*A(1,3))/C
1084 REM ACCELERATION ANALYSIS
1086 A(1,3)=A(1,1)*AX(J)+A(1,2)*AY(J)-(VX(G)-VX(J))^2-(VY(G)-VY(J))^2
  +L(Q)*AH(Q)+VH(Q)^2
1088 A(2,3)=A(2,1)*AX(K)+A(2,2)*AY(K)-(VX(G)-VX(K))^2-(VY(G)-VY(K))^2
  +L(P)*AH(P)+VH(P)^2
1090 AX(G)=(A(1,3)*A(2,2)-A(1,2)*A(2,3))/C
1092 AY(G)=(A(1,1)*A(2,3)-A(2,1)*A(1,3))/C
1094 RETURN

```

5. FORTRAN 程序

```

SUBROUTINE DYAD(MP, M, J, G, K, Q1, Q2, VQ1, VQ2, AQ1, AQ2)
INTEGER G
DIMENSION S(2, 3)
COMMON X(30), Y(30), VX(30), VY(30), AX(30), AY(30)
A=(X(K)-X(J))*2+(Y(K)-Y(J))*2
IF (ABS(A)-1E-7) 10, 10, 20
10  WRITE(2, 100)J, K
100  FORMAT(2X, I2, 1X, I2, 1X, 'COINCIDE')
GOTO 500
20  B=(Q1*Q1-Q2*Q2)/(2.0*A)+0.5
D=Q1*Q1/A-B*B
IF (ABS(D).LT.1E-7) D=0.0
IF (D) 30, 40, 40
30  WRITE(2, 200)G
200  FORMAT(2X, I2, 1X, 'CAN NOT BE ASSEMBLED')
PAUSE
40  C=SQRT(D)
X(G)=X(J)+B*(X(K)-X(J))-M*C*(Y(K)-Y(J))
Y(G)=Y(J)+B*(Y(K)-Y(J))+M*C*(X(K)-X(J))
IF (D.GT.0.0) GOTO 50
WRITE(2, 300)J, G, K
300  FORMAT(2X, I2, 1X, I2, 1X, I2, 'ON A LINE')
PAUSE
50  IF (MP.EQ.1) GOTO 500
S(1, 1)=X(G)-X(J)
S(1, 2)=Y(G)-Y(J)
S(2, 1)=X(G)-X(K)
S(2, 2)=Y(G)-Y(K)
S(1, 3)=S(1, 1)*VX(J)+S(1, 2)*VY(J)+Q1*VQ1
S(2, 3)=S(2, 1)*VX(K)+S(2, 2)*VY(K)+Q2*VQ2
C=S(1, 1)*S(2, 2)-S(1, 2)*S(2, 1)
VX(G)=(S(1, 3)*S(2, 2)-S(1, 2)*S(2, 3))/C
VY(G)=(S(1, 1)*S(2, 3)-S(2, 1)*S(1, 3))/C
IF (MP.EQ.2) GOTO 500
S(1, 3)=S(1, 1)*AX(J)+S(1, 2)*AY(J)-(VX(G)-VX(J))*2-(VY(G)-VY(J))*2+Q1*AQ1+VQ1*2
1  S(2, 3)=S(2, 1)*AX(K)+S(2, 2)*AY(K)-(VX(G)-VX(K))*2-(VY(G)-VY(K))*2+Q2*AQ2+VQ2*2
1  C=S(1, 1)*S(2, 2)-S(1, 2)*S(2, 1)
AX(G)=(S(1, 3)*S(2, 2)-S(1, 2)*S(2, 3))/C
AY(G)=(S(1, 1)*S(2, 3)-S(2, 1)*S(1, 3))/C
500  RETURN
END

```

三、两点运动为已知的构件

1. 程序名 GID

2. 功用

本程序用于在一个构件上已知两点的运动，求解任一其它点的运动。这种型式只提供

FORTRAN 程序。

3. 方法概要

结构形式与 DYAD 相似,其区别在于三个点 J 、 G 、 K 之间距离均为固定长度。

(1) G 点的位置 与 DYAD 中相同,用式(1-8)计算。

(2) G 点的速度 因为是刚体,式(1-8)中的参数 q_1 、 q_2 、 A 、 B 、 C 及 D 均为常数,可直接将该式对时间求导而得到速度计算公式,这与我们熟知的速度影象方法在原理上是一致的。

$$\begin{aligned}\dot{x}_G &= \dot{x}_J + B(\dot{x}_K - \dot{x}_J) - M \cdot C(\dot{y}_K - \dot{y}_J) \\ \dot{y}_G &= \dot{y}_J + B(\dot{y}_K - \dot{y}_J) + M \cdot C(\dot{x}_K - \dot{x}_J)\end{aligned}\quad (1-13)$$

(3) G 点的加速度将式(1-13)对时间求导,即得加速度计算公式:

$$\begin{aligned}\ddot{x}_G &= \ddot{x}_J + B(\ddot{x}_K - \ddot{x}_J) - M \cdot C(\ddot{y}_K - \ddot{y}_J) \\ \ddot{y}_G &= \ddot{y}_J + B(\ddot{y}_K - \ddot{y}_J) + M \cdot C(\ddot{x}_K - \ddot{x}_J)\end{aligned}\quad (1-14)$$

4. FORTRAN 程序

```
SUBROUTINE GID(MP, M, J, G, K, R1, R2)
  INTEGER G
  COMMON X(30), Y(30), VX(30), VY(30), AX(30), AY(30)
  A = (X(K) - X(J))**2 + (Y(K) - Y(J))**2
  B = (R1*R1 - R2*R2)/(2.0*A) + 0.5
  D = R1*R1/A - B*B
  IF (ABS(D).LT.1E-7) D = 0.0
  IF (D) 10, 30, 20
10  WRITE(2, 100) G
100  FORMAT(2X, I2, 1X, 'NOT REAL')
20  C = SQRT(D)
  X(G) = X(J) + B*(X(K) - X(J)) - M*C*(Y(K) - Y(J))
  Y(G) = Y(J) + B*(Y(K) - Y(J)) + M*C*(X(K) - X(J))
  IF (MP.EQ.1) GOTO 400
  VX(G) = VX(J) + B*(VX(K) - VX(J)) - M*C*(VY(K) - VY(J))
  VY(G) = VY(J) + B*(VY(K) - VY(J)) + M*C*(VX(K) - VX(J))
  IF (MP.EQ.2) GOTO 400
  AX(G) = AX(J) + B*(AX(K) - AX(J)) - M*C*(AY(K) - AY(J))
  AY(G) = AY(J) + B*(AY(K) - AY(J)) + M*C*(AX(K) - AX(J))
400  RETURN
  END
```

四、三点共线导杆

1. 程序名 LINE

2. 功用

当导杆及滑块上各有一点的运动为已知时,用本程序计算导杆上另一个位于上述两点连线上的点的运动。此程序也适用于刚体上有三点共线时,由两已知点求第三点运动的问题。

3. 方法概要

三点共线导杆有两种情况如图 1-5a、b 所示,图 1-5a 中 K 与 G 两点在参考基点 J 的同侧;图 1-5b 中 K 、 G 两点分别在点 J 的两侧。引入模式系数 M ,令在 a 中 $M = +1$,在 b 中 $M = -1$,以便两种情况使用同一计算公式。

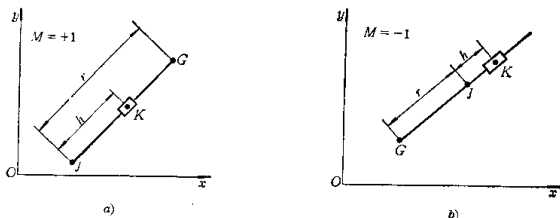


图 1-5

(1) G 点的位置 在图 1-5 中, 令 r 为 JG 杆长, h 为滑块点 K 到 J 的距离

$$h = \sqrt{(x_K - x_J)^2 + (y_K - y_J)^2} \quad (1-15)$$

根据长度比例关系可得 G 点坐标为

$$\begin{aligned} x_G &= x_J + M(x_K - x_J)r/h \\ y_G &= y_J + M(y_K - y_J)r/h \end{aligned} \quad (1-16)$$

(2) G 点的速度及滑块在导杆上的相对滑动速度 将式(1-16)对时间求导便得到 G 点速度:

$$\begin{aligned} \dot{x}_G &= \dot{x}_J + M(\dot{x}_K - \dot{x}_J)r/h - M(x_K - x_J)r\dot{h}/h^2 \\ \dot{y}_G &= \dot{y}_J + M(\dot{y}_K - \dot{y}_J)r/h - M(y_K - y_J)r\dot{h}/h^2 \end{aligned} \quad (1-17)$$

其中 $\dot{h}$ 为滑块在导杆上的相对滑动速度, 方向以背离 J 点为正, 朝向 J 点为负。 $\dot{h}$ 可由式(1-15)对时间求导得出:

$$\dot{h} = [(x_K - x_J)(\dot{x}_K - \dot{x}_J) + (y_K - y_J)(\dot{y}_K - \dot{y}_J)]/h \quad (1-18)$$

(3) G 点的加速度及滑块在导杆上的相对滑动加速度 将式(1-17)对时间求导得 G 点的加速度计算公式:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_G &= \ddot{x}_J + M(\ddot{x}_K - \ddot{x}_J)r/h - 2M(\dot{x}_K - \dot{x}_J)r\dot{h}/h^2 \\ &\quad - M(x_K - x_J)r\ddot{h}/h^2 + 2M(x_K - x_J)r\dot{h}^2/h^3 \\ \ddot{y}_G &= \ddot{y}_J + M(\ddot{y}_K - \ddot{y}_J)r/h - 2M(\dot{y}_K - \dot{y}_J)r\dot{h}/h^2 \\ &\quad - M(y_K - y_J)r\ddot{h}/h^2 + 2M(y_K - y_J)r\dot{h}^2/h^3 \end{aligned} \right\} \quad (1-19)$$

其中 $\ddot{h}$ 为滑块在导杆上的相对滑动加速度, 方向以背离 J 点为正, 朝向 J 点为负。 由式(1-18)对时间求导可得出:

$$\begin{aligned} \ddot{h} &= [(x_K - x_J)(\ddot{x}_K - \ddot{x}_J) + (y_K - y_J)(\ddot{y}_K - \ddot{y}_J) + (\dot{x}_K - \dot{x}_J)^2 \\ &\quad + (\dot{y}_K - \dot{y}_J)^2 - \dot{h}^2]/h \end{aligned} \quad (1-20)$$

4. BASIC 程序

```
1110 REM SUB LINE
1112 READ J, K, G, Q, MD
1114 X=X(K)-X(J)
1116 Y=Y(K)-Y(J)
1118 VX=VX(K)-VX(J)
```