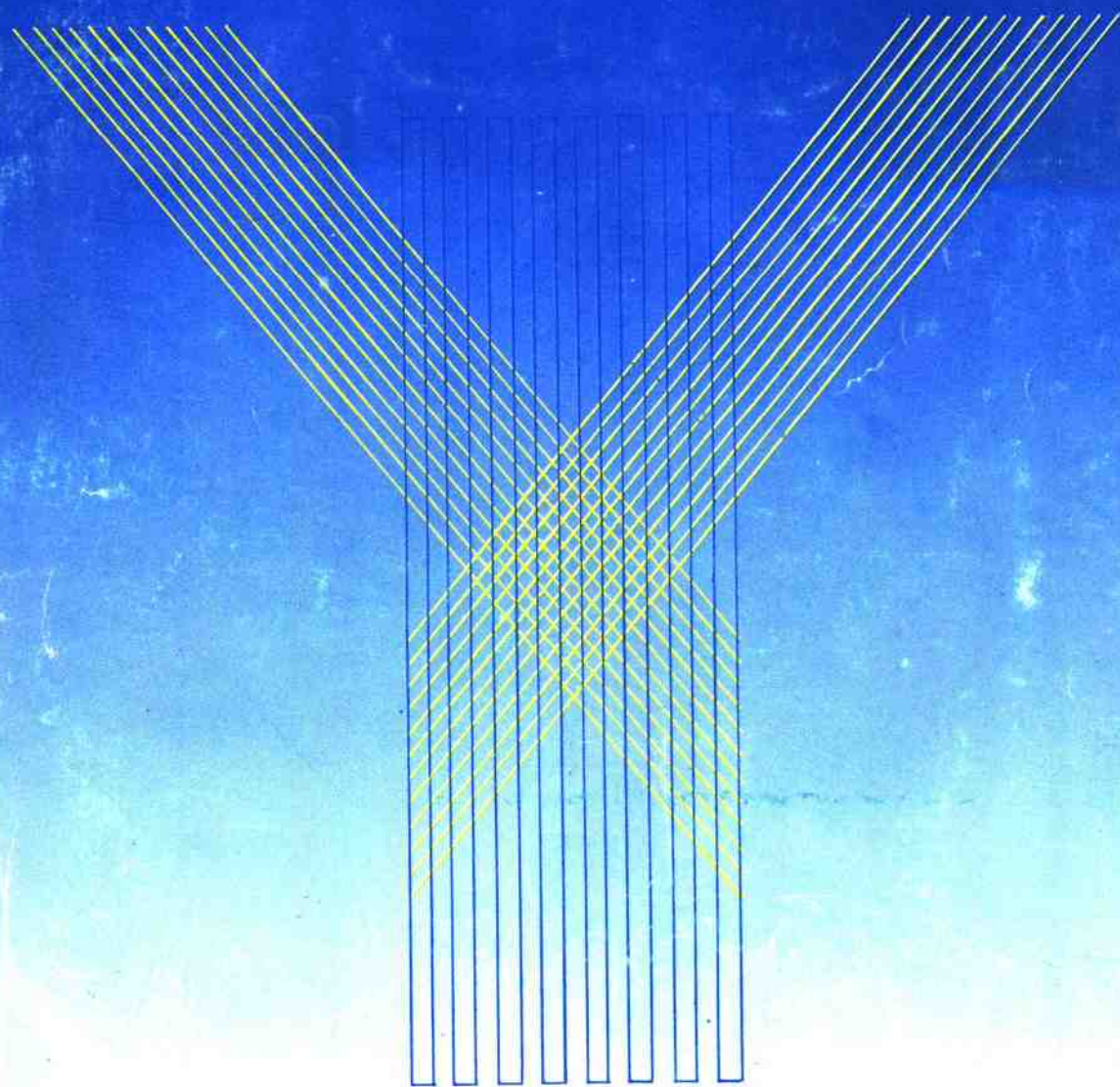


# 桥梁结构实用电算

何雄君 编著



科学出版社

# 桥梁结构实用电算

何雄君 编著

科学出版社

1996

(京)新登字 092 号

## 内 容 简 介

本书根据桥梁结构分析和设计的要求,阐述了各种计算原理及相应的计算机程序。在第一章总论后,分项介绍了桥梁数值分析的常用基本程序、毛断面及净断面和换算断面几何特性的计算原理及计算机程序、平面问题的杆系通用程序、梁桥荷载横向分布系数计算原理及计算机程序、计算活载最不利效应的纵向动态规划加载原理及计算机程序。

每个程序都按原理、程序说明、程序及算例的步骤来组织,以适应不同层次的要求。

本书是笔者多年从事桥梁设计及教学工作的总结,大多产生于工程实践,并得到实际考验,因此有助于提高设计速度和质量,实现桥梁设计自动化。

本书可作为路桥专业的教材或参考书,亦可供有关专业技术人员参考。

## 桥梁结构实用电算

何雄君 编著

责任编辑 米建荣



学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码 100717

中南治勘局大业公司印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1996年6月第一版 开本:787×1092 1/16

1996年6月第一次印刷 印张 16 1/2

印数:1—3000 字数:386 000

ISBN 7-03-005420-2/TU·51

定价:25.00元

## 序

完成一座现代桥梁的设计与施工,离不开计算机的应用。

目前,在桥梁设计、施工理论与技术方面,在结构分析数值方法、计算机编程方面,已出版了不少优秀著作和教材。然而,要写好一本用计算机软件去解决桥梁设计、施工中各种力学计算问题的书,则具有特殊的难度。它不仅要求作者具有较深入的专业理论、较丰富的实践经验,而且还需要一定水平的计算机编程技术,达到专业理论、工程经验与计算机技术的融合。也许正是这个缘故,迄今为止,较完整地阐述桥梁结构设计、施工计算机程序,从而使读者用不太多的时间把计算机技术与桥梁工程结合起来,完成从理论到应用这一过渡的著作还不多见。

这里,展现在读者面前的《桥梁结构实用电算》一书,便是一本较全面、系统介绍桥梁结构静力分析的计算机程序及其应用的书籍。这本书以计算机程序为主线,介绍桥梁设计、施工中一些重要计算的基本原理,从基本的数值分析常用程序入手,接着介绍截面几何特性、结构与基础的静力分析、荷载横向分配、影响线及公路活载加载的计算机程序及其使用,既有理论、方法,也有完整的源程序及应用实例。理论有的放矢;应用有据可依。读者学习之后,可将书中的源程序直接用于桥梁设计、施工中去。就此而言,这是一本适合于从事桥梁工程技术的专业人员阅读的参考书。这本书也可作为大专院校有关专业师生,以及研究生的教学参考书。

本书作者根据自己在桥梁设计、教学中积累的知识和经验,在把桥梁理论、方法与近代计算技术结合起来,缩短理论与应用之间的距离方面做出了很大努力。我相信,本书的出版,对于从事桥梁工程设计、施工、教学与研究的广大读者是一件十分有益的事情。

唐家祥

1996年4月于华中理工大学

## 前 言

桥梁结构设计的基本步骤是:首先凭借经验或相近设计资料确定初始方案,并进行分析校核,决定是否需修改方案。如需进行修改(局部或整体),则需重新进行分析校核,这样循环几次,直至较好地满足规范的要求。桥梁结构设计的难点在于每次修改设计后的分析计算,因此较系统介绍桥梁结构分析计算机程序和应用是必要的。

本书是作者在参考和学习有关著作和文献的基础上,对多年从事桥梁设计、科研和教学的总结,内容编著思想如第一章总结所述,按桥梁结构设计的思路,尽量将主要的设计计算过程电算化,以提高设计质量和缩短设计周期。

本书的宗旨是尽量实用。书中所有程序都经过实际计算的检验,并且按计算原理、程序说明、源程序及算例的步骤来组织,以适应不同层次的要求。

本书承蒙我国著名力学、桥梁专家,华中理工大学唐家祥教授审阅,得到河海大学胡维俊教授、杨仲侯教授,武汉交通科技大学沈成武教授、丘作中教授、冉一元教授、唐小兵副教授及武汉城市建设学院张海龙教授的关心和指导,在此表示衷心感谢。在出版过程中得到铁道部大桥局桥梁科学研究院文武松,长江水利委员会林绍忠、吕国梁、胡中平、曹去修、彭定,华中师范大学郑小平,武汉交通科技大学土木建筑工程系领导及桥梁教研室同事们的帮助,特表谢意。

限于作者的水平,书中难免有错误之处,恳请读者批评指正。

作者地址:430063(邮编),武汉交通科技大学土木建筑工程系。

作 者

1996年4月

# 目 录

第一章 总论	1
1.1 桥梁结构设计的一般方法	1
1.2 设计荷载及荷载组合	1
1.3 控制断面、控制断面各荷载内力及其组合	2
1.4 设计内力的确定与施工方法的关系	2
1.5 后续各章概述	3
第二章 桥梁数值分析常用基本程序	5
2.1 插值	5
2.1.1 线性插值	5
2.1.2 拉格朗日插值	7
2.1.3 三次样条函数插值	12
2.1.4 埃尔米特插值	17
2.1.5 埃特金逐步线性插值	19
2.2 曲线拟合	22
2.2.1 基本原理	22
2.2.2 程序功能及说明	23
2.2.3 程序及算例	24
2.3 数值积分	27
2.3.1 变步长辛卜生求积法	27
2.3.2 龙贝格求积法	30
2.4 线性方程组的求解	32
2.4.1 列主元法	33
2.4.2 追赶法	38
2.4.3 大型稀疏正定对称方程组的求解	41
2.5 矩阵运算——逆矩阵的计算	45
2.5.1 全选主元高斯-约当(Gauss-Jordan)法	45
2.5.2 程序功能及说明	45
2.5.3 程序及算例	46
2.6 打印机作图	48
2.6.1 基本格式	48
2.6.2 程序功能及说明	49
2.6.3 程序及算例	49
第三章 断面几何特性的计算	56
3.1 梯形分块法求断面几何特性	56
3.1.1 梯形块的形成	56
3.1.2 计算公式	57
3.2 毛、净、换算断面几何特性计算程序说明	58
3.2.1 控制变量及控制数组	59

3.2.2	子程序功能说明 .....	60
3.2.3	程序输入数据文件格式说明 .....	60
3.3	毛、净、换算断面几何特性计算源程序 .....	61
3.4	算例 .....	69
√第四章	平面问题的杆系通用程序 .....	72
4.1	几个重要点 .....	72
4.1.1	整体坐标系与局部坐标系 .....	72
4.1.2	未知量、约束特征数与特殊节点 .....	73
4.1.3	单元定位向量 .....	74
4.1.4	单元刚度矩阵 .....	74
4.1.5	有刚臂的单元刚度矩阵 .....	75
4.1.6	各种单元连接 .....	77
4.1.7	单元荷载 .....	78
4.1.8	支座位移 .....	78
4.1.9	结构内力和反力的计算 .....	79
4.2	基本计算图式 .....	80
4.2.1	结构离散化的基本原则 .....	80
4.2.2	常见带刚臂单元的具体形式 .....	80
4.2.3	地基与基础的处理 .....	81
4.2.4	箱形断面桥梁横向计算 .....	84
4.2.5	结构体系形成过程中计算图式的生成 .....	84
4.3	程序及其使用 .....	84
4.3.1	程序说明 .....	84
4.3.2	源程序 .....	88
4.3.3	算例 .....	122
√第五章	梁桥荷载横向分布系数计算 .....	132
5.1	荷载横向分配系数计算的刚性横梁法 .....	132
5.1.1	适用条件及计算公式 .....	132
5.1.2	程序说明 .....	133
5.1.3	刚性横梁法计算荷载横向分布系数源程序 .....	134
5.1.4	例算 .....	141
5.2	荷载横向分配影响线计算的刚(铰)接梁(板)法 .....	145
5.2.1	计算原理 .....	145
5.2.2	计算图式 .....	145
5.2.3	力法正则方程 .....	145
5.2.4	柔度矩阵[A]及荷载变位列阵{B}的计算 .....	146
5.2.5	各种影响线的计算 .....	148
5.2.6	程序说明 .....	149
5.2.7	源程序 .....	150
5.2.8	算例 .....	160
5.3	动态规划加载的一般原理 .....	168

5.4	横向影响线加载 .....	169
5.4.1	加载原理 .....	169
5.4.2	程序说明 .....	170
5.4.3	源程序 .....	172
5.4.4	算例 .....	182
第六章	计算活载最不利效应的纵向动态规划加载 .....	187
6.1	纵向影响线计算 .....	187
6.1.1	计算纵向影响线程序说明 .....	187
6.1.2	纵向影响线计算源程序 .....	189
6.1.3	算例 .....	211
6.2	动态规划法进行纵向影响线加载 .....	213
6.2.1	加载方法 .....	214
6.2.2	计算公式 .....	216
6.3	纵向动态规划加载程序说明 .....	217
6.3.1	控制变量及控制数组 .....	217
6.3.2	子程序功能说明 .....	219
6.3.3	数据文件格式说明 .....	219
6.4	纵向动态规划加载源程序 .....	221
6.5	算例 .....	247
	参考文献 .....	253



# 第一章 总 论

现代桥梁设计及施工控制技术的三个关键方面是：一为设计内力的确定；二为各施工阶段理想施工状态的确定；三为实际施工的过程控制。

在这三个方面中，无一不是与电算连在一起的。编制一个适应性好的计算机程序不是一件非常容易的事情，而一个适应性好的计算机程序恰恰是分析手段所要求的，桥梁设计及施工控制技术中的难点亦在于此。

下面针对第一个方面谈几点体会。

## 1.1 桥梁结构设计的一般方法

桥梁结构设计的一般方法是，首先凭借经验或修改已有设计作出初始方案。对于现行公路桥梁用得较多的普通钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土结构，先应找出控制断面，求出各控制断面的内力并绘出包络图，然后进行配筋设计。接着就是看是否满足规范的要求，如不满足规范的要求，则应修改设计。

设计的过程是：设计、校核、修改设计、再校核，反复进行几次，直至较好地满足规范的要求。

设计的质量和速度与每次修改设计的快速有效的分析密切相关。

## 1.2 设计荷载及荷载组合

在桥梁设计的荷载等级（如按汽车-20级设计、挂车-100验算的等级设计）确定后，就应根据设计计算内容（如上构或下构）分析并定出可能同时出现的作用荷载，如永久荷载中有哪几种，可变荷载中有哪几种，偶然荷载中有哪几种。

荷载可以根据不同的观点分类，可以分为主要荷载、次要荷载及特殊荷载。主要荷载为结构设计中必须考虑的经常起作用的荷载；次要荷载为设计结构主要部分时虽非经常起作用，但在荷载组合时必须考虑的荷载；特殊荷载指根据桥梁结构特性、建桥地点具体情况和施工方法等，要特别加以考虑的荷载。

荷载分析是至关重要的。随着科学技术的进步和桥梁工程的发展，实际与可能作用在桥梁结构上的荷载越来越复杂。如大跨径桥梁结构的风荷载、地震荷载的重要性较中小跨径桥梁更为突出。又如预应力混凝土结构，近代各国规范都将预应力、混凝土徐变与收缩的影响、温度变化的影响等都列入荷载考虑。

荷载确定后，就要按规范（参考文献[1]）第2.1.2条根据所要计算的内容确定荷载组合。

接着就是按规范（参考文献[3]）第1.0.4条要求的承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计计算和有关验算。

### 1.3 控制断面、控制断面各荷载内力及其组合

在荷载的各种组合确定后,就要确定结构的各控制断面,并求出各控制断面的包络(最大、最小)内力值。

对于普通钢筋混凝土或预应力混凝土结构,在按承载能力极限状态设计时,荷载组合各荷载安全系数按规范(参考文献[3])第4.1.2条规定,将各类荷载引起的最不利内力分别乘以相应的荷载安全系数而进行组合。

将各控制断面内力的最大、最小值都求出后,即可求得该内力的包络图,从而为配置预应力束、纵向主筋、斜筋和箍筋等提供依据,并进行各种验算。

确定控制断面是一个重要的步骤,不论是简支梁(板)、连续梁(板)、T型刚构、连续-刚构、斜拉桥以及各类拱桥等都有这一步。在求出各控制内力后,就是结构复杂的桥梁,也可拆成结构设计原理中的基本构件,从而使问题变得简单。

### 1.4 设计内力的确定与施工方法的关系

设计内力与施工方法有没有关系,这要看是什么桥型及所采用的施工方法。

尤其是大跨径桥梁,从施工开始到成桥一般是经过各施工阶段逐步算到成桥后的运营状态,才能求得最后的设计内力。

对于梁桥主梁的设计内力来说,主梁内力包括恒载内力、活载内力和附加内力(如风载等引起的内力)。对于超静定问题,还应包括预加力、混凝土徐变、收缩和温度变化等引起的内力。

这几部分内力中,恒载、活载内力是主要的,一般占整个设计最大内力的80~90%以上。

以恒载内力来说,后期恒载(如桥面铺装、人行道、栏杆、灯柱等)作用于桥梁结构的最终体系,与施工方法无关;前期恒载(主梁自重)是在结构逐步形成的过程中作用的,因此主梁自重荷载内力的计算与施工方法有关。

下面以主梁自重荷载内力的计算说明其与施工方法的关系。

图1-1所示为按平衡悬臂施工法施工的三跨连续梁,各施工阶段如下:

阶段 I,无论采用悬臂浇筑还是悬臂拼装施工,都是从1<sup>#</sup>与2<sup>#</sup>墩开始,对称向两边逐段悬出,如图1-1(b)所示。

阶段 II,因1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>墩为单排支座,为保证平衡悬臂施工的安全,在墩上设临时锚固,边孔合拢段合拢后拆除支架时的情况如图1-1(c)所示。

阶段 III,拆除临时锚固,支座受力。临时锚固中的力被“释放”,相当于对主梁施加一对方向相反的力 $R$ ,如图1-1(d)所示。

阶段 IV,当中孔梁段合拢时,现浇合拢段的自重由吊杆传至单悬臂梁的悬臂端,如图1-1(e)所示。

阶段 V,当跨中合拢段混凝土凝固并与两边单悬臂梁相连形成连续梁后,吊杆拆除,就相当于对主梁施加一对方向相反的力 $R_0$ ( $R_0$ 包括合拢段自重与吊杆模板等重量)。合拢段的自重则作用于最后的结构上,如图1-1(f)所示。

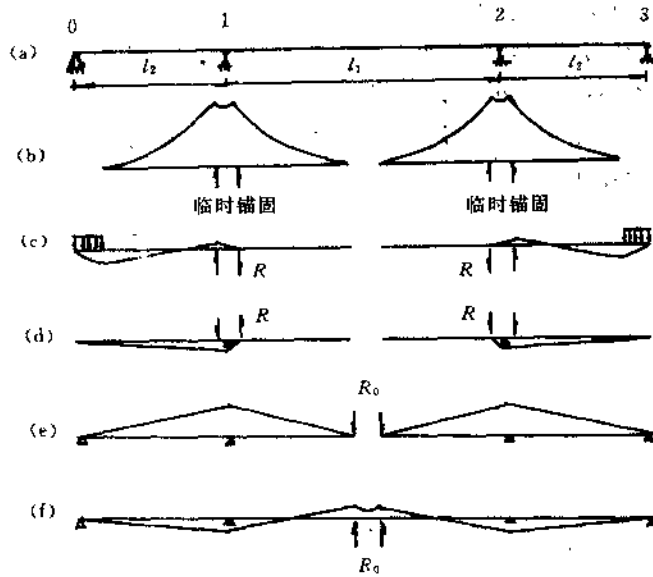


图 1-1 平衡悬臂法施工连续梁主梁自重内力计算图示

主梁自重内力应由这五个阶段叠加而成。

上面是施工过程中有体系转换的情况。如在施工过程中结构不发生体系转换,则情况就不一样。如在满堂支架现浇、整孔吊装或在静定结构(如 T 型刚构)中采用悬臂施工方法等场合,则主梁自重按最终结构体系计算。

大跨径预应力混凝土结构的预加力、混凝土收缩、徐变的影响等同样应按具体的施工方法来考虑。

### 1.5 后续各章概述

讲以上几点的目的是为了更好地了解后续各章,以便根据桥梁结构分析或设计计算的内容,进行有效的综合和组织。

第二章为桥梁设计、施工和科研中常用的数值分析电算程序。可根据不同的需要选用,以方便各种分析计算。

第三章为断面几何特性的计算,可计算毛断面、净断面及换算断面等各种断面的几何特性,以满足普通钢筋混凝土或预应力混凝土桥梁各施工阶段的计算或验算的需要。尤其对于后张预应力混凝土桥梁,这几种断面几何特性的计算是不能缺少的(最简单的简支梁桥算例请参看文献[11])。

第四章为平面问题的杆系通用程序。现今桥梁结构的设计计算大多按平面杆系进行。该程序允许杆件带任意刚臂,杆件之间可任意连接,以适应各种桥型进行模拟计算的需要。该程序只针对线弹性问题,对超长跨桥梁,宜考虑非线性,尤其是几何非线性,如现今修建的主跨 400 米以上的斜拉桥皆考虑了斜拉索及主梁的几何非线性。

第五章为梁桥荷载横向分布系数的计算,针对梁桥解决空间理论的实用计算方法,将空间问题合理地简化为平面问题来解决,分别介绍了刚性横梁法、刚(铰)接梁(板)法以及横向

影响线加载一般方法的动态规划法。

第六章为计算活载最不利效应的纵向动态规划加载,可以根据不同桥型设计计算的要求,求各种活载的最不利效应及相应值。程序不但可进行内力、反力的影响线加载,而且可进行位移影响线加载,以满足规范(参考文献[3])两种极限状态(承载能力极限状态和正常使用极限状态)的各种计算和验算的需要。

## 第二章 桥梁数值分析常用基本程序

这一章介绍在桥梁设计计算中经常碰到的一些有用的计算程序。

### 2.1 插值

第五章和第六章将涉及到影响线的计算。简支梁的影响线可用一个函数式来表示,但大多数的影响线不能用一个简单的函数式来表示,通常总是用离散化的方式来描述。这时要求未知点的值,这就需要按一定的方法进行插值。

#### 2.1.1 直线插值

##### 2.1.1.1 基本原理

直线插值或称一维线性拉格朗日(Lagrange)插值函数公式为(见图 2-1)

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{x-x_2}{x_1-x_2}y_1 + \frac{x-x_1}{x_2-x_1}y_2 \\ &= l_1(x)y_1 + l_2(x)y_2 \end{aligned} \quad (2.1)$$

其中  $l_1(x), l_2(x)$  分别为插值节点  $x_1$  与  $x_2$  点的插值基函数。 $l_1$  在  $x_1$  点为 1, 在  $x_2$  点为 0;  $l_2$  在  $x_1$  点为 0, 在  $x_2$  点为 1。

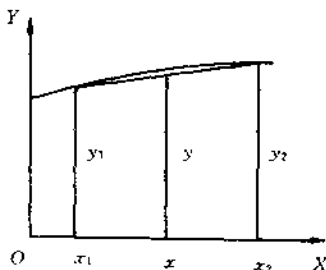


图 2-1 直线插值

##### 2.1.1.2 程序功能及说明

###### 1) 功能

根据已知点  $x_1, x_2$  函数值  $y_1, y_2$ , 求未知点  $x$  的函数值  $y$ 。

###### 2) 控制变量说明

$x_1, x_2$ : 已知函数值的节点;

$y_1, y_2$ : 分别为  $x_1, x_2$  点的函数值;

$x$ : 要求函数值的点;

$y$ : 所求  $x$  点的函数值。

###### 3) 子程序说明

lin\_ins;根据上面所讲原理求  $y$  值。

### 2.1.1.3 程序及算例

例 2-1 为考核程序起见,利用线性插值计算 $[0,\pi]$ 的一正弦函数值。已知  $x_1=0.3\pi=0.942478$ ,  $y_1=\sin(x_1)=0.809017$ ;  $x_2=0.44\pi=1.382301$ ,  $y_2=0.982287$ 。求  $x=0.37\pi=1.162389$  时的  $y=\sin(x)$  值。主程序、子程序以及输出结果分别如下(利用正弦函数可求得精确值为  $y=0.917755$ ,线性插值结果  $y=0.895652$  的偏差较大。一般来说在非线性的情况下,线性插值结果的误差较大些):

```

program c21xxcz
!  +-----+
!  |
!  |                               Main program C21XXCZ
!  |                               ( Ver:5.0 )
!  |
!  +-----+
!  |
!  |                               Computer room of civil engineering department /1995.05.03
!  |
!  +-----+

open (11,file='c21xxcz.out',status='unknown')
x=1.162389
x1=0.942478
y1=0.809017
x2=1.382301
y2=0.982287
call lin_ins (x1,y1,x2,y2,x,y)
write(11,'(10x,a)')
+-----+
write(11,'(10x,a)')
+-----+
write(11,'(10x,a)')
+-----+
write(11,'(10x,a)')
+-----+
write(11,'(10x,a)')
+-----+
write(11,'(10x,a)')
+-----+
write(11,'(10x,a)')
+-----+
write(11,'(15x,a,f15.6,10x,a,f15.6)') 'X=',x,' Y=',y
close (11)
write(*,'(//)')
write(*,'(a\)' )
The program C21XXCZ is executed !
end

```

```

subroutine lin_ins (x1,y1,x2,y2,x,y)
!
! linear insertion
!
y=y1*(x-x2)/(x1-x2)+y2*(x-x1)/(x2-x1)
y=(y1*(x-x2)-y2*(x-x1))/(x1-x2)
end

```

```

+-----+
|
|
|                               C 2 I X X C Z   print file
|
|
+-----+

```

X= 1.162389      Y= .895652

### 2.1.2 拉格朗日(Lagrange)插值

先介绍全区间拉格朗日插值。如果插值节点为  $x_1, x_2, \dots, x_n$  时, 则插值基函数为  $(n-1)$  次多项式。在插值节点较多时, 插值函数可能振荡, 使得结果不对。这就说明并非插值节点越多越好。因此, 接着介绍三点拉格朗日插值, 即所谓抛物线插值, 它是一种取最靠近指定插值点的三个点进行插值的方法。

#### 2.1.2.1 全区间拉格朗日插值

##### 1) 基本原理

设一序列插值节点及相应函数值为  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_k, y_k), \dots, (x_n, y_n)$ 。

按 2.1.1 节同样的道理, 可写出  $n$  个插值节点时插值函数计算公式为

$$\begin{aligned}
 f(x) &= y_1 l_1(x) + y_2 l_2(x) + \dots + y_k l_k(x) + \dots + y_n l_n(x) \\
 &= \sum_{k=1}^n y_k l_k(x)
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

其中

$$l_k(x) = \frac{(x-x_1)\dots(x-x_{k-1})(x-x_{k+1})\dots(x-x_n)}{(x_k-x_1)\dots(x_k-x_{k-1})(x_k-x_{k+1})\dots(x_k-x_n)}, \quad k=1, 2, \dots, n \tag{2.3}$$

##### 2) 程序功能及说明

###### i) 功能

根据所给的一序列插值节点及相应的函数值, 用 Lagrange 插值公式, 求指定插值点处的函数值。

###### ii) 控制变量及控制数组

$n$ : 插值节点的个数;

$x_0(n), y_0(n)$ : 已知的  $n$  个插值节点及相应函数值数组;

$x, y$ : 指定插值点及相应函数值。

###### iii) 子程序说明

Lagrange: 根据上面所讲原理求  $y$  值。





```

close (11)
write(*, '(//)')
write(*, '(a\)\')'          The program C21QQJLG is executed !'
end

subroutine lagrange (n,x0,y0,x,y)
lagrange insertion
dimension x0(n),y0(n)
y=0.0
do j=-1,n
  vi 1.0
  do i=1,n
    if (i.ne. j) then
      vi--vi*(x-x0(i))/(x0(j)--x0(i))
    end if
  end do
  y  y+vi*x y0(j)
end do
end

```

C 2 1 Q Q J L G print file

X= 1.162389            Y= .917754

### 2.1.2.2 三点拉格朗日插值

#### 1) 基本原理

其基本原理为二次 Lagrange 插值,即按抛物线插值。其关键点为选取最靠近指定插值点的三个插值节点。

#### 2) 程序功能及说明

##### i) 功能

根据所给的一序列插值点及相应函数值,选取最靠近指定插值点的三个插值节点按抛物线插值计算指定插值点的函数值。

##### ii) 控制变量及控制数组

$n$ : 插值节点的个数;

$x_0(n), y_0(n)$ : 已知的  $n$  个插值节点及相应函数值数组;

$x, y$ : 指定插值点及相应函数值。

##### iii) 子程序说明

par\_ins: 根据上面所讲原理求  $y$  值。

#### 3) 程序及算例

**例 2-3** 用三点 Lagrange 插值计算例 2-2。主程序、子程序以及输出结果分别如下: