



〔日〕大中逸雄 著

计算机传热凝固解析入门

铸造过程中的应用

机械工业出版社

71-99
PZY/1

计算机传热凝固解析入门

—铸造过程中的应用

〔日〕大中逸雄 著

许云祥 译

徐性澄 校



机械工业出版社

本书是日本大阪大学大中逸雄教授多年来教学经验和科研成果的总结。全书共分两大部分，第一部分为计算机传热、流动、凝固解析，详细地阐述了传热过程、流动过程、凝固过程的计算机数值解析的原理和方法。第二部分为铸造过程中计算机的应用，详细地阐述了铸造过程的CAD/CAM，以及浇注系统设计、冒口设计、冲天炉熔炼的金属炉料配料计算、炉前试验与热分析中计算机的应用。内容由浅入深，由原理到应用。全书共编入了21个有实用价值的计算机应用程序，书中详细地介绍了这些程序的编制方针和教学模式，并对程序要点作了详细说明，最后还介绍了这些程序的运用情况。

本书可供从事铸造工作的教师、科技人员阅读，也可作为高等院校铸造专业的研究生、本科生学习有关课程的教学参考书，对于其它金属热加工各专业、钢铁冶炼专业以及与传热学、流体力学有关的各专业也有一定的参考价值。

コンピュータ伝熱凝固解析入門

鑄造プロセスへの応用

大中逸雄 著

丸善株式会社

1985

计算机传热凝固解析入门

铸造过程中的应用

(日)大中逸雄 著

许云祥 译

徐性澄 校

责任编辑：劳

机械工业出版社出版（北京阜成门外大街25号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经销

开本 850×1168 1/32·印张15²/₈·字数403千字

1988年3月重庆第一版·1988年3月重庆第一次印刷

印数 0.001—1.900·定价：4.70元

ISBN 7-111 00105-2/TG·41

译 序

本书是根据日本大阪大学工学部大中逸雄教授著“コンピュータ伝熱 凝固解析入門〈鑄造プロセスへの応用〉”一书译成。原书计算机程序使用的是 N₈₈-BASIC(86) 语言(日本 NEC PC-9800 系列计算机用)。为了便于阅读本书中的程序,我们在翻译时已将这些程序中的日文假名译成了中文汉字,因而程序和运行实例有可能不一致。请在使用这些程序时,根据自己使用的计算机机种,参照有关计算机使用说明书以及汉字操作系统进行适当修改。

限于译者水平,书中讹误之处难免,敬请读者批评指正。

原 序

近年来计算机取得了飞速的进展。钢铁工业、机械工业、化学工业等等许多部门由于使用了计算机，从而提高了产品质量，实现了节能、省力，降低了成本。而且今后还期望计算机会得到更广泛地应用。

可是计算机终究是“电子计算机”。名义上看来是计算机自己判断、自己运行，实际上只不过是忠实地执行人们制订的命令而矣。因此，即使说计算机能否实际使用取决于软件是否良好也一点不算过分。

为了在原材料工业、机械工业、化学工业中实现工艺控制和确定操作条件以及研制新工艺和设计新产品方面开发有价值的程序，必须尽量正确地理解研究对象的物理现象，并尽量正确地反映到软件中去。

历来，在计算机算法语言、数值解析法、以及传热学、流体力学、炼钢、铸造等方面已经出版了许多优秀书籍。可是以开发软件为前提的教科书却很少。实际上开发软件确实并非容易之事。所以作者以自己多年来的经验和研究成果为基础，考虑了下述各点之后著作了本书。

(1) 读者对象为与金属加工过程（特别是炼钢、铸造、凝固过程、热处理等）有关的技术工作者、研究人员、学生。而且，占本书一大半的传热和流动解析对于机械工业和化学工业等等很多部门的有关者也有一定参考价值。

(2) 以很多专业中非常重要的传热、流动、凝固现象的说明和解析方法为基本内容，尽量以容易理解的方式著作在2~4章中。另外作为实际应用例，在第5章中叙述了铸造过程的CAD/CAM。编制有实用价值的软件时不仅需要严密地进行解析，而且也需要运用历来的经验知识，有关这样的一些内容，书中也作

了阐述。

(3) 不仅对数值解析法进行了说明,而且对现象和数学模式、程序也进行了说明,因此读者不仅能够说明现象、理解现象,而且能够理解软件的开发手法、以及软件的使用范围和使用上存在的问题。

(4) 编入了BASIC语言的程序实例。因此读者可以使用微型计算机进行实际计算,知道计算结果,因而加深了理解。而且一部分程序有可能不经修改原封不动地直接使用。

(5) 由于篇幅关系,没有编写计算机的处理方法和BASIC语言的基本知识。但是读者最好具备BASIC语言的初步知识和具备能够读懂计算机使用说明书的计算机知识和高中毕业程度的数学知识。

(6) 实际计算需要的物性值和传热系数编在附录中。

本书估计对于想学习传热学和流体力学开发有实际应用价值软件的读者,对于各种工艺过程的开发、控制,对于想开发铸件和金属型的CAD/CAM软件的读者会有所帮助。但是从基础知识到实际应用的内容很多,由于受到页数的限制,书中某些内容显得说明不足,有些内容不得不忍痛割爱,因此有关这些内容请读者参照有关文献。另外书中也许会有错误之处,也请各位读者指教。

本书是在《综合铸物》杂志于1980年11月~1982年6月连载20期的基础上全面修订而成。连载时曾得到了导师、《综合铸物》编委会委员长千千岩健児先生(东京大学名誉教授,现任千葉工業大学教授)的关照,本书发行时得到了原综合铸物中心常务理事畠山正観氏、现原材料中心的滑川剛三氏、大森正義氏、飯塚玲子氏、以及以丸善書局为首的有关各位的帮助,在此特表示衷心感谢。另外书中一部分程序的编制曾得到大阪大学工学部山内勇氏、大道徹太郎氏以及以长坂悦敬氏为首的一些学生的协助,在誊写和收集资料上得到了菅田幸子氏的协助,在本书著作过程中得到了以大阪大学教授福迫達一先生、早稻田大学教授堤

信久先生为首的诸位前辈的勉励，在此特表示深切的谢意。对于所引文献的诸位作者在此也顺致谢意。

大中逸雄
1984年11月

目 录

1. 计算面积、体积、重心、热模数等图形基本量	1
1.1 平面图形的面积、重心、周长	1
1.1.1 面积	1
1.1.2 重心	8
1.1.3 周长	9
1.2 体积、表面积、重量、热模数	17
1.2.1 简单几何体的体积和表面积	17
1.2.2 复杂几何体的体积和表面积	17
1.2.3 重量、热模数的计算	20
2. 热传导解析	25
2.1 热传导基础	25
2.1.1 傅利叶定律和导热系数	25
2.1.2 热能守恒定律和热传导基础微分方程式	26
2.1.3 初始条件和边界条件	28
2.2 泰勒展开差分法 (有限差分法)	33
2.2.1 泰勒展开	33
2.2.2 基础微分方程式的差分化	34
2.2.3 边界条件的差分化	35
2.2.4 显式解法和隐式解法的比较	53
2.3 直接差分法	56
2.3.1 直接差分法原理	56
2.3.2 热能守恒定律的差分化	58
2.3.3 前进差分法中解的稳定条件	69
2.3.4 与有限差分法的关系	61
2.3.5 直接差分法通用热传导解析程序	81
2.4 边界单元法	108
2.4.1 恒定热传导问题	108
2.4.2 非恒定热传导问题	125
2.5 各种数值解析法的比较	132

3. 流动解析	138
3.1 流动的分类	138
3.2 流体力学的基本计算公式	139
3.2.1 质量守恒定律	139
3.2.2 动量守恒定律	141
3.2.3 理想流体的动能方程和速度势	144
3.2.4 伯努利方程式	144
3.3 流动损失和流体阻力	145
3.3.1 流路的流动损失	145
3.3.2 固体所受流体的作用力	151
3.4 伯努利方程式的应用	162
3.4.1 简单流路系统的解析	162
3.4.2 复杂流路系统的解析	170
3.5 透气性物质内的流动	201
3.5.1 达尔西流动和透过率	201
3.5.2 达尔西流动的数值解析	205
3.6 粘性流的数值解析	218
3.6.1 基本计算公式	218
3.6.2 解法概要	219
3.6.3 推导差分式	220
3.6.4 数值解析上存在的问题	225
3.7 同时发生传热的流动解析	227
3.7.1 解析解	228
3.7.2 对流传热问题的数值解析	231
4. 凝固解析	240
4.1 凝固现象的基理	240
4.1.1 平衡状态图和平衡凝固	241
4.1.2 潜热的放出和熔的变化	244
4.1.3 非平衡凝固和实际合金的凝固	245
4.1.4 凝固形态	247
4.1.5 凝固收缩和液相的流动、铸件的变形	249
4.1.6 吸收气体	250
4.2 凝固现象的解析处理	251

4.2.1	严密解	251
4.2.2	近似解	253
4.3	数值解析 (预测温度分布、固相率分布)	276
4.3.1	纯金属、共晶合金的凝固解析	277
4.3.2	合金的凝固解析	280
4.4	缩孔的预测	299
4.4.1	缩孔的分类和产生机理	299
4.4.2	预测缩孔的方法	304
5.	铸造过程中计算机的应用	320
5.1	铸造过程的 CAD/CAM	320
5.2	浇注系统的设计	324
5.2.1	浇注系统设计概述	324
5.2.2	浇注系统设计的综合程序例	343
5.2.3	浇注系统设计中存在的问题	350
5.3	冒口设计	363
5.3.1	冒口设计概要	363
5.3.2	计算机决定冒口尺寸方法 I (冒口方程式的解法)	375
5.3.3	计算机决定冒口尺寸方法 II (Johns法)	393
5.3.4	球墨铸铁的冒口设计	410
5.3.5	冷铁及壁厚斜度和冒口的省略	412
5.4	冲天炉熔炼的金属炉料配料计算	422
5.4.1	冲天炉熔炼概要	422
5.4.2	冲天炉熔炼用金属炉料及其化学组成	423
5.4.3	配比计算	424
5.5	炉前试验和热分析	437
5.5.1	热分析概要	437
5.5.2	温度测定	440
5.5.3	温度变化的解析	446
附录		455
A.1	典型金属材料的常温密度	455
A.2	各种物质的物性值	455
A.3	凝固过程的各种传热系数	466

程序一览表

程序1.1	三角形的面积计算	3
程序1.2	计算平面图形的面积、重心、周长	12
程序1.3	计算任意形状图形的面积	16
程序1.4	计算物体的体积、表面积、重量、热模数	23
程序2.1	表面温度为定值的半无限物体的温度解析(差分法)	43
程序2.2	前进差分法二维空间温度解析	71
程序2.3	内节点前进差分法二维空间热传导解析	91
程序2.4	边界单元法二维恒定热传导解析	116
程序3.2	复杂浇注系统的解析	183
程序3.3	达尔西流动的解析	209
程序4.1	纯金属的凝固解析(牛顿-拉卜生法)	258
程序4.2	纯金属的定向凝固解析(积分-龙格库塔法)	269
程序4.3	外节点直接差分法凝固解析	291
程序4.4	计算温度梯度、固相率梯度	314
程序5.1	计算浇注时间(铸钢)	337
程序5.2	浇注系统断面积的计算	340
程序5.3	采用Kotschi法设计浇注系统	350
程序5.4	冒口尺寸的计算	380
程序5.5	铸钢件的冒口设计	399
程序5.6	冲天炉熔炼的金属炉料配比计算	428
程序5.7	测定温度用程序例	445

1. 计算面积、体积、重心、热模数 等图形基本量

在进行估算、强度设计、冒口与浇注系统设计、熔化工计算等等时必须知道铸件和铸型的体积、重量、重心、热模数、惯性矩等值。历来，这些数值可以利用数学用表、计算器、测面仪求得¹。可是如果采用计算机来计算的话，则不但容易，而且正确。本章的目的是介绍一些有关图形基本量的计算方法，同时也学习一些程序的基本知识。

1.1 平面图形的面积、重心、周长

实际生产过程中必须知道物体的体积、重量，而对于回转对称物体和柱状形物体，则首先必须求出断面（平面图形）的基本量。

1.1.1 面积

(1) 简单图形的面积

表1.1的No. 1~8是简单几何图形的面积计算公式。让我们利用这些公式编制计算机计算程序。

〔例题1.1〕 已知三角形底边长为 a 、高度为 h ，或者已知3个顶点的坐标 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) ，试编制计算这个三角形面积的程序。使用此程序时，希望能自由选择是给出边和高呢还是给出顶点的坐标。

〔解〕

〔基本方法、流程图〕 图1.1所示为流程图。首先是显示标题。如果没有标题，那么经过一段时间后会记不清楚这是什么程序。其次要确定是已知底边和高呢还是已知3个顶点的坐标指数ID，并从键盘输入ID。ID为1时表示已知底边和高，ID为0时

表示已知顶点坐标。接着采用表1.1的No. 1公式计算面积。之后显示计算出的面积值。运行结束。

[程序] 程序1.1是根据图1.1的流程图编制的程序。(显示这些程序内容的指令叫做LIST。)

程序解说

1000~1030行：这一部分是REM语句，由于不运行，所以也可以省略。可是如果不加入程序的名字，将来就会不清楚是什么程序。

1040行：用PRINT语句显示标题，由此可以使操作者知道正在运行的是什么程序。这一行也可以省略，可是通常由于操作者不看程序的目录，所以如果预先这样做，就可使操作者核实一下程序的内容而放心。

1050行：首先让操作者知道选择面积计算法的输入方法，之后要操作者输入选择的计算方法指数（如按下键盘上的0或1，则指数ID就是0或1）。

1070行：使用IF~THEN语句。ID若是1，就移到1160行运行。

1080~1100行：ID不是1时，从键盘输入3个顶点的 x 、 y 坐标。另外这几行的INPUT语句是在显示了用双引号(“)围起的字符之后，催促输入。(参照实行例1.1。)

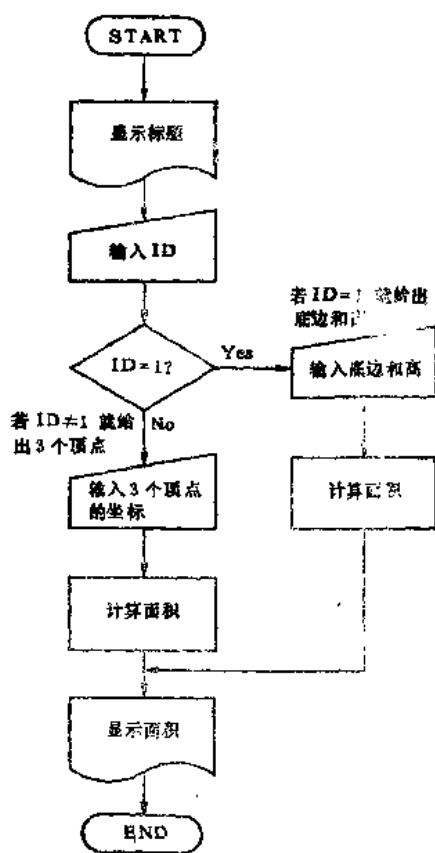


图 1.1 求三角形面积的程序的流程图

1110~1130行：由3个顶点的坐标值算出表1.1的三角形面积计算公式中的 a_1 、 a_2 、 a_3 。（ a_1 、 a_2 、 a_3 不允许为变数，所以各自置换为 A_1 、 A_2 、 A_3 。）

1140行：求 $S = \frac{1}{2} |a_1 + a_2 + a_3|$ 。采用内部函数ABS表示绝对值。另外，0.5比1.0/2.0的计算时间短，所以采用0.5。0.5也可以表示为.5。

1150行：为了显示计算结果，移至1180行运行。

1160行：由这一行给出底边和高度尺寸，之后求面积。此处采用INPUT语句，由键盘输入 a 和 h 。

1170行：计算面积。

1180行：显示面积。

1190行：全部运行结束。

程序1.1 三角形的面积计算

```

1000 REM
1010 REM
1020 REM
1030 REM
1040 PRINT"-- 三角形的面积--"
1050 INPUT"高×底边: (1),3顶点: (0)",ID
1070 IF ID=1 THEN 1160
1080 INPUT "X1, Y1", X1, Y1
1090 INPUT "X2, Y2", X2, Y2
1100 INPUT "X3, Y3", X3, Y3
1110 A1=X1*Y2-X2*Y1
1120 A2=X2*Y3-X3*Y2
1130 A3=X3*Y1-X1*Y3
1140 S=.5*ABS(A1+A2+A3)
1150 GOTO 1180
1160 INPUT "高, 底边", H, A
1170 S=.5*A*H
1180 PRINT "三角形的面积=", S
1190 END

```

〔实行例〕 实行例1.1是程序1.1的运行实例。运行一开始，如果给计算机以指令RUN，显示器屏幕上就显示出“三角形的面积”，接着显示出“高×底边：(1).3 顶点：(0)?”，询问是已知底边 a 和高 h 呢还是已知顶点坐标的指数ID。此时如果从键盘输入1，则接着询问三角形的 a 和 h 。如果输入2.0和5.0，则面积 $S=2 \times 5 / 2 = 5$ 便在显示器上显示出来。

此实行例的后一部分是表示输入三角形顶点坐标数据时的运行情况。

实行例1.1 程序1.1的运行实例

run

---三角形的面积---

高×底边：(1).3 顶点：(0)? 1

高，底边? 2.0, 5.0

三角形的面积=5

OK

run

---三角形的面积---

高×底边：(1).3 顶点：(0)? 0

X1, Y1? 0.0, 0.0

X2, Y2? 2.5, 2.0

X3, Y3? 5.0, 0.0

三角形的面积=5

OK

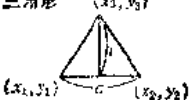
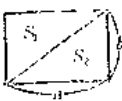
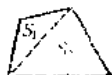
(2) 复杂图形的面积

由任意曲线围成的复杂图形的面积如图1.2所示，可以用下列方法求得。

(1) 积分法

首先在外形曲线上取 $1 \sim n$ 个点，将曲线分割为 $1 \sim n$ 段线段(如图1.2a)。如果假定线段 i 用下式表示

表 1.1 各种平面图形的面积计算公式

形状 No.	图 形	计 算 公 式
1	三角形 	$S = \frac{1}{2} a \cdot h \text{ 或 } S = \frac{1}{2} a_1 + a_2 + a_3 $ 式中 $a_1 = x_1 y_2 - x_2 y_1$; $a_2 = x_2 y_3 - x_3 y_2$; $a_3 = x_3 y_1 - x_1 y_3$
2	长方形 	$S = a \cdot b \text{ 或 } S = S_1 + S_2$
3	梯形 	$S = \frac{1}{2} (a + b) h \text{ 或 } S = S_1 + S_2$
4	四边形 	$S = S_1 + S_2$
5	圆 	$S = \pi R^2$
6	圆环 	$S = \pi (R_2^2 - R_1^2) = \pi (2R_2 - t)t = \pi (2R_1 + t)t$ 或 $S = S_2 - S_1$ 式中, $t = R_2 - R_1$
7	扇形 	$S = \frac{\theta R^2}{2} \text{ (式中 } \theta \text{ 的单位为弧度)}$ 或 $S = \frac{\pi R^2}{360} \text{ (式中 } \theta \text{ 的单位为度)}$
8	弓形 	$S = \theta R^2 / 2 - R^2 \sin \theta / 2 \text{ (式中 } \theta \text{ 的单位为弧度)}$ 或 $S = \pi R^2 \theta / 360 - R^2 \sin \theta / 2 \text{ (式中 } \theta \text{ 的单位为度)}$

$$y_i = f_i(x) \quad (1.1)$$

则积分

$$S_i = \int_{x_i}^{x_{i+1}} |f_i(x)| dx \quad (1.2)$$

就是在图1.2a所示场合($x_{i+1} < x_i$)从线段 $\bar{i}$ 的两端向下所作垂线和 x 轴所围图形的面积加负号。在 $x_i < x_{i+1}$ 时 S_i 为正值。因此如果能求出线段 $\bar{1} \sim \bar{n}$ 的积分和

$$A = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n \int_{x_i}^{x_{i+1}} |f_i(x)| dx \quad (1.3)$$

则 A 就是被封闭曲线包围领域的面积。

在运算式(1.3)时, 必须知道线段的方程式 $f_i(x)$ 。容易积分的函数是1次式(直线)、2次、3次多项式等等。选择适当的高次多项式可以减少线段的分割数, 从而可以减少输入数据。可是1次式可以容易地求出重心, 而且非常方便(参照1.1.2项及例题1.2)。

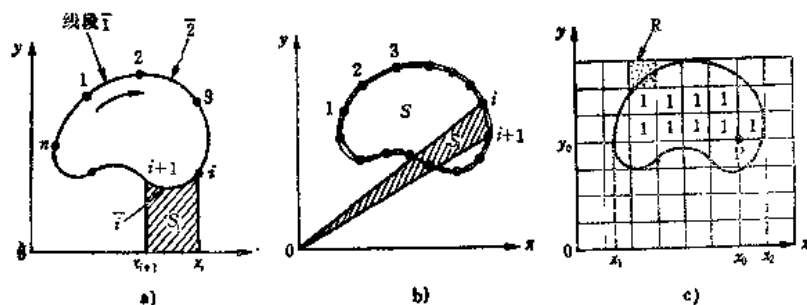


图 1.2 被曲线包围领域的面积计算方法

a) 积分法 b) 直线分割三角形法 c) 蒙特卡罗法

在积分法不能解析的场合, 可以利用下列的数值积分法。

辛卜生积分公式:

$$S = \int_a^b f(x) dx = \frac{h}{3} [f_0 + f_n + 4(f_1 + f_3 + f_5 + \cdots + f_{n-1}) + 2(f_2 + f_4 + \cdots + f_{n-2})] \quad (1.4a)$$