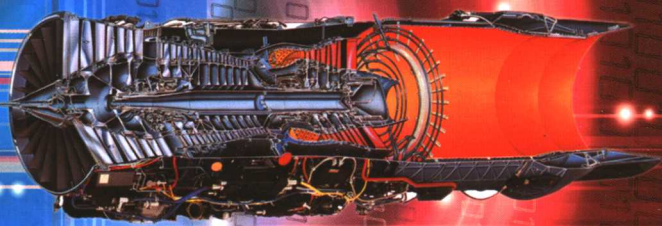


Numerical Methods for Aviation Gas Turbine Engine Simulation

航空燃气涡轮发动机 数值仿真

骆广琦 桑增产 编著
王如根 高坤华



国防工业出版社
National Defense Industry Press

V235.1
375
1=

航空燃气涡轮发动机 数值仿真

Numerical methods for Aviation Gas
Turbine Engine Simulation

骆广琦 桑增产 编著
王如根 高坤华

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 提 要

以燃气涡轮发动机特性计算为目标,本书系统地介绍了燃气涡轮发动机性能计算中的数学基本知识、工质热物理性质的变比热计算方法、发动机稳态性能计算的方法(包括换算法、选配法、坐标法和部件法等)、发动机起动特性计算方法、动态性能的计算方法和使用因素对发动机性能影响的计算方法(包括大气温度、大气湿度、燃油低热值、雷诺数等)。

本书可作为燃气涡轮发动机工程专业硕士研究生的教材,也可供从事燃气涡轮发动机装备研制、论证、监造、使用和维护的工程技术人员、管理干部以及燃气涡轮发动机专业教师在工作中参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

航空燃气涡轮发动机数值仿真/骆广琦等编著.

北京:国防工业出版社,2007.4

ISBN 978-7-118-04997-8

I. 航... II. 骆... III. 航空发动机:燃气轮机—
计算机仿真 IV. V235.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 021488 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 6 $\frac{1}{4}$ 字数 170 千字

2007 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 18.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

燃气涡轮发动机的特性可以用实验方法和计算方法获得。但实验的方法需要研制复杂的设备、投入巨额的资金和消耗巨大的能源,因此实验的方法不可能经常采用。

随着计算机运算能力的不断提高、发动机数学模型研究的不断深入,计算机仿真精度也在不断提高,一定程度上弥补了实验方法的不足,尤其是在发动机型号研制过程中,燃气涡轮发动机计算机仿真技术发挥了不可替代的作用。

燃气涡轮发动机特性计算的基本方法,包括换算法、选配法、坐标法和部件法等。换算法是以发动机地面试车所获得的数据为基础进行的;选配法和坐标法是以压气机通用特性曲线进行计算的;部件法是以发动机各主要部件的特性为前提进行计算的,因此,从本质上讲,这些计算方法仍是以实验方法为基础的,具有一定的精确性。

本书共分八章。第一章介绍了燃气涡轮发动机性能计算用到的基本数学知识;第二章介绍了工质热物理性质的计算模型和方法;第三~五章介绍了发动机性能计

算的换算法、选配法、坐标法和部件法；第六章介绍了发动机动态性能计算的方法；第七章介绍了使用因素对发动机性能影响的计算方法；第八章介绍了发动机起动特性的计算方法。为了使读者更容易掌握，附录中还给出了部件法的相关计算程序。

本书第一、二、五章及附录由骆广琦副教授编写，第三、四章由陆军航空兵学院桑增产副教授编写，第六、八章由空军工程大学高坤华副教授编写，第七章由空军工程大学王如根教授编写。

空军工程大学陶增元教授对本书进行了审阅，并提出了许多宝贵的意见和建议。吴学辉博士制作了本书的全部插图、完成了文稿输入及排版工作，为之付出了艰辛的劳动。在本书出版过程中，得到了空军工程大学工程学院训练部和研究生科的大力支持。编者在此谨向以上同志和单位一并表示衷心的感谢和敬意。

向参考文献的作者表示深深的敬意和衷心的感谢！

由于编著者水平有限，书中的错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编者

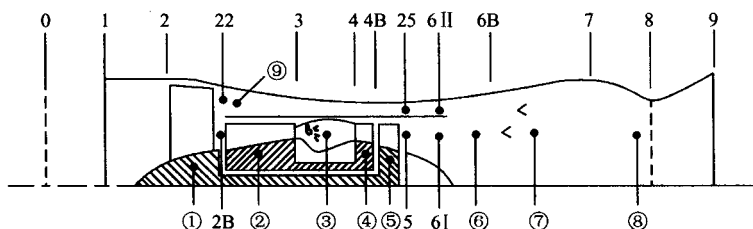
2006年10月

主要符号

A ——面积;系数	R ——气体常数
B ——涵道比	Re ——雷诺数
C ——系数	S ——摩尔熵
C_p ——比定压热容	s ——比熵
c ——气流速度	sfc ——耗油率
d ——含湿量	T ——温度(K)
F ——推力	t ——温度($^{\circ}\text{C}$);时间
f ——油气比	u ——圆周速度
G ——质量	V ——速度
H ——飞行高度	W ——质量流量;流量比函数
H_0 ——燃油低热值	y ——燃气的比热力性质
h ——高度	Z ——压力比函数
K ——系数	z ——级数
L_0 ——理论空气量	α ——余气系数
l ——单位功;长度	γ ——绝热指数;压力比
M ——摩尔质量;扭矩	δ ——相对变化量
Ma ——马赫数	ϵ ——允许误差
N ——功率	ζ ——阻力系数
n ——转子转速;多变指数	η ——效率
p ——压力	θ —— θ 函数

λ —— 气流速度系数	col—— 冷却
μ —— 动力黏性系数	cor—— 换算
ν —— 相对空气流量	d—— 设计
ξ —— 燃烧完全系数	ef—— 有效的
π —— 压比; π 函数	ei—— 理想的
ρ —— 密度	f—— 燃料; 风扇
σ —— 总压恢复系数	g—— 燃气
ϕ —— 当量比	H—— 高压
φ —— 相对湿度; 速度系数; 修正系数	h—— 湿空气
Ψ —— 摩尔熵函数	i—— 进气道
ψ —— 比熵函数	idle—— 慢车
ω —— 角速度	L—— 低压
上标	m—— 转子机械; 平均; 混合
* —— 气流滞止参数	max—— 最大
' —— 燃气	min—— 最小
— —— 平均, 相对	nb—— 涡轮导向器
下标	nz—— 喷管
a—— 轴向方向, 空气, 干空气	st—— 标准的, 恰当的, 级
af—— 加力	T—— 涡轮
b—— 主燃烧室	u—— 圆周方向
C—— 压气机	us—— 应用的
CT—— 起动机	w—— 水蒸气
c—— 参考的; 基准的	S—— 总的
	I —— 内涵
	II —— 外涵

双转子涡轮风扇发动机流路图



双转子涡轮风扇发动机流路图

- ① 风扇(低压压气机); ② 高压压气机; ③ 主燃烧室; ④ 高压涡轮;
⑤ 低压涡轮; ⑥ 混合器; ⑦ 加力燃烧室; ⑧ 喷管; ⑨ 外涵道。

涡轮风扇发动机流路图特征截面符号

- 0—— 发动机远前方未受扰动截面
1—— 进气道与发动机的交界面
2—— 风扇(低压压气机)进口截面
22—— 风扇外涵出口截面
25—— 外涵道出口截面
2B—— 高压压气机进口截面
3—— 高压压气机出口(主燃烧室进口)截面
4—— 主燃烧室出口(高压涡轮进口)截面
4B—— 高压涡轮出口(低压涡轮进口)截面
5—— 低压涡轮出口截面
6 I —— 混合器内涵进口截面
6 II —— 混合器外涵进口截面
6B—— 混合器出口(加力燃烧室进口)截面
7—— 尾喷管进口截面
8—— 尾喷管喉部截面
9—— 尾喷管出口截面

目 录

第一章	基础知识	1
1.1	插值方法	1
1.2	二分法求解方程根	5
1.3	解非线性方程组的 $n+1$ 点残量法	6
1.4	大气环境模型	8
第二章	工质热物理性质的变比热容计算方法	13
2.1	熵函数	13
2.2	p 函数	14
2.3	θ 函数	15
2.4	湿空气燃烧产物热力性质的计算	17
2.5	工质热物理性质的计算	17
2.6	热力过程的变比热容计算	21
第三章	换算法	27
3.1	换算法介绍	27
3.2	换算法的计算步骤	31
第四章	根据压气机通用特性曲线进行计算的方法	33
4.1	选配法	34
4.2	坐标法	44
第五章	部件法	49
5.1	发动机部件特性的录入	49
5.2	耦合系数	51
5.3	发动机主要部件热力计算	58

5.4	试给参数与检验方程	71
5.5	发动机调节规律	75
5.6	发动机共同工作点的寻找	77
第六章	燃气涡轮发动机动态性能计算方法	82
6.1	动态过程中燃气涡轮发动机的共同工作方程	82
6.2	部件容腔气体质量与能量的储存	84
6.3	燃气流与结构部件之间的非定常热交换	86
6.4	动态特性的数字仿真	86
第七章	使用因素对发动机性能影响仿真	92
7.1	安装性能估算方法	92
7.2	引气和功率提取对发动机性能的影响	95
7.3	发动机性能的温度修正	97
7.4	发动机性能的湿度修正	99
7.5	发动机性能的燃油热值修正	113
7.6	发动机性能的雷诺数修正	115
第八章	发动机起动过程计算方法	124
8.1	起动机特性的表示	124
8.2	起动过程的 3 个阶段	126
8.3	起动过程的近似计算方法	128
附录 A	主要子程序	132
附录 B	典型发动机部件特性数据	180
参考文献		190

第一章 基础知识

燃气涡轮增压发动机性能的计算过程比较复杂,不仅包含发动机的专业知识,还涉及大量的数学、物理知识。为了便于读者的学习和理解,本章就计算过程中用到的主要数学、物理知识和模型进行简单的介绍,其中包括插值方法、方程求根方法、非线性方程组求解方法和大气环境模型等,对这些知识比较熟悉的读者也可不必阅读本章内容。

1.1 插值方法

计算机中存储的曲线都是离散化了的曲线,是表格函数,各离散点的值存储于数组之中,对于任意两个离散点之间的自变量,计算机无法直接查找到对应的函数值,这需要一种近似方法来获得这种离散曲线的数学表达式,常用的方法就是插值法。

插值法可以用各种函数来近似原来的函数,由于代数多项式最简单,计算其值只需用到加、减、乘、除等运算,且微分和积分都很方便,所以常用它来近似地表达表格函数。这样的插值方法叫做代数插值法,简称插值法。

1.1.1 插值法的定义

设函数 $f(x)$ 是区间 $[a, b]$ 上的连续函数,已知它在区间 $[a, b]$ 上 $n+1$ 个互不相同的点 $x_0, x_1, \dots, x_n$ 上的取值为 $y_0, y_1, \dots, y_n$, 即

$$y_i = f(x_i) \quad (i = 0, 1, \dots, n)$$

如果有一个次数不超过 n 的代数多项式 $P(x)$, 使得

$$P(x_i) = y_i \quad (i = 0, 1, \dots, n) \quad (1-1)$$

称满足条件式 (1-1) 的 $P(x)$ 为函数 $f(x)$ 的插值多项式, $x_0, x_1, \dots, x_n$ 称为插值结点, 以相距最远的两个插值结点为端点的区间称为插值区间, $f(x)$ 称为被插函数, 条件式 (1-1) 称为插值条件. 插值法的实质就是要求出满足上述条件的多项式 $P(x)$ 。

插值法的几何意义, 就是通过 $n+1$ 个点: $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ 作一条代数曲线 $y = P(x)$, 使它近似于曲线 $y = f(x)$, 如图 1-1 所示。

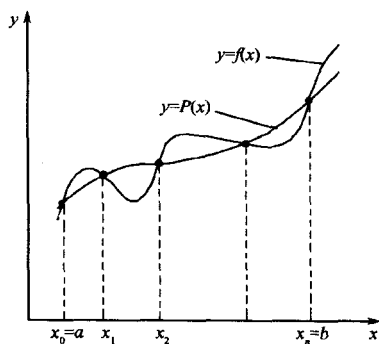


图 1-1 插值函数与被插值函数

由插值法的定义可知: 在区间 $[a, b]$ 上用 $y = P(x)$ 近似 $y = f(x)$, 在插值结点上有 $f(x_i) = P(x_i)$, 而在其它点 x 上就会有误差, 称为插值的截断误差. 令

$$R(x) = f(x) - P(x)$$

$R(x)$ 称为函数 $y = f(x)$ 的插值余项. 它表示用 $P(x)$ 近似 $f(x)$ 的截断误差大小, 一般说来, $|R(x)|$ 值越小, 则近似程度就越好, 插值精度也会相应提高。

下面, 分别介绍最常用的两种插值法: 线性插值和拉格朗日一元三点插值。

1.1.2 线性插值

已知函数 $f(x)$ 在两个互不相同点 x_0, x_1 上的值为 y_0, y_1 , 要求一个多项式函数 $P(x)$ 满足条件

$$P(x_0) = y_0, \quad P(x_1) = y_1$$

作为 $f(x)$ 的近似表达式。其几何意义是要求通过两点 $A(x_0, y_0)$ 与 $B(x_1, y_1)$ 的一条直线, 如图 1-2 所示。

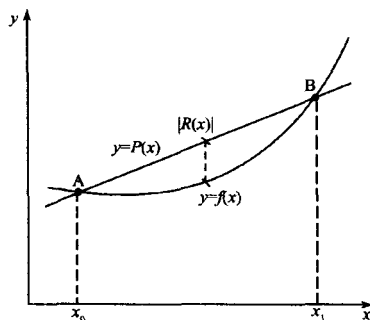


图 1-2 线性插值

由解析几何可知, 通过 A、B 两点的直线方程为

$$y = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}(x - x_0) = P(x) \quad (1-2)$$

将上式整理, 可改写为

$$P(x) = \frac{x - x_1}{x - x_0} y_0 + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} y_1 \quad (1-3)$$

这样, 插值多项式 $P(x)$ 为一次多项式, 即一次函数, 这种插值方法称为线性插值。

线性插值只需要已知两个点 A、B 处的数值, 计算方法非常简单。其不足之处是截断误差较大, 为了提高插值精度, 有两种方法: 一是采用线性插值, 但要适当提高已知点的密度, 减小截断误差; 二是采用其它插值方法, 如拉格朗日一元三点插值。

1.1.3 拉格朗日一元三点插值

拉格朗日一元三点插值又称为抛物线插值。已知函数 $f(x)$ 在 3 个互不相同点 x_0, x_1, x_2 上的值为 y_0, y_1, y_2 , 要求一个多项式函数 $P(x)$ 满足条件

$$P(x_i) = y_i \quad (i = 0, 1, 2)$$

作为 $f(x)$ 的近似表达式。从几何上看, 就是要求通过三点 $A(x_0, y_0), B(x_1, y_1), C(x_2, y_2)$ 的抛物线以近似代替曲线 $y = f(x)$, 如图 1-3 所示。

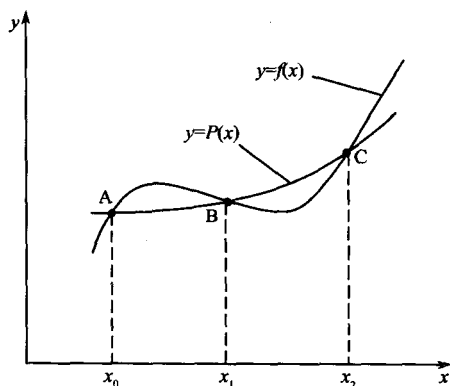


图 1-3 一元三点插值

通过简单推导可得, 通过 A、B、C 三点的抛物线方程的拉格朗日形式为

$$y = \sum_{j=0}^2 \left(\prod_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^2 \frac{x - x_i}{x_j - x_i} \right) y_j = P(x) \quad (1-4)$$

式(1-4)即为拉格朗日一元三点插值多项式。

给定 $n+1$ 个互不相同的点 $x_0, x_1, \dots, x_n$ 对应的函数值分别为 $y_0, y_1, \dots, y_n$, 要计算点 x 处的函数 $y(x)$, 可以取 3 个点 x_{i-1}, x_i, x_{i+1} 进行分段抛物线插值, 即按下式计算插值点 x 的函数值 y

$$y = \sum_{k=i-1}^{i+1} \left(\prod_{\substack{j=i-1 \\ j \neq k}}^{i+1} \frac{x - x_j}{x_k - x_j} \right) y_k \quad (1-5)$$

为了减小插值误差、要求选取的 3 个插值结点距离插值点 x 最近。为此,确定插值结点的方法如下:设 x 位于 x_{s-1} 和 x_s 之间,如果 x 靠近 x_{s-1} ,即 $x - x_{s-1} \leq x_s - x$,那么选择 x_{s-2} 为第三插值结点;如果 x 靠近 x_s ,即 $x - x_{s-1} > x_s - x$,那么选择 x_{s+1} 为第三插值结点。特殊情况下,如果 $x \leq x_1$,选择 x_0, x_1, x_2 为插值结点;如果 $x > x_{n-1}$,选择 x_{n-2}, x_{n-1}, x_n 为插值结点。总结如表 1-1 所列。

表 1-1 拉格朗日一元三点插值结点的选取

插值点 x	$x \leq x_1$	$x - x_{s-1} > x_s - x (s > 2)$	$x - x_{s-1} > x_s - x (s > 2)$	$x > x_{n-1}$
插值结点	x_0, x_1, x_2	x_{s-2}, x_{s-1}, x_s	x_{s-1}, x_s, x_{s+1}	x_{n-2}, x_{n-1}, x_n

1.2 二分法求解方程根

假设方程 $y = f(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上是单调的、连续的,要求解当 $y = y_0$ 时方程的解 $x_0 \in [a, b]$ 。给原方程等式两边各减去 y_0 ,即

$$y - y_0 = f(x) - y_0$$

令 $g = y - y_0, g(x) = f(x) - y_0$,则原问题变为求解方程 $g = g(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上的根 x_0 。可以证明,此方程在区间 $[a, b]$ 上依然是单调的、连续的。

方程求根的方法很多,有二分法、迭代法、牛顿法、弦割法、抛物线法等,其中二分法较为简单、可靠,程序设计也比较容易。

二分法求解方程根的原理如图 1-4 所示,取 $x_1 = \frac{a+b}{2}$,如果 $g(x_1) = 0$,则方程根 $x_0 = x_1$ 。若 $g(x_1) \neq 0$,且 $g(x_0)f(a) < 0$,则令 $a_1 = a, b_1 = x_0$,否则令 $a_1 = x_0, b_1 = b$ 。这样就得到新的有根区间 $[a_1, b_1]$,此区间的长为区间 $[a, b]$ 的一半。如此继续下去,可得到一组不断缩小的有根区间 $[a, b], [a_1, b_1], [a_2, b_2], \dots$ 。当区间

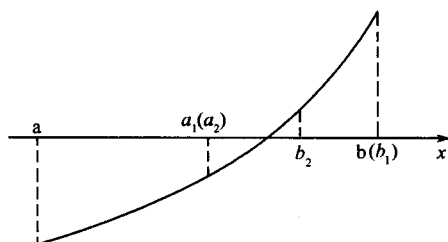


图 1-4 二分法求解方程的根

$[a_k, b_k]$ 的长度小于某一误差限制值时,可近似认为 $x_k = \frac{a_k + b_k}{2}$

即为方程的根。此时,方程根的绝对误差

$$|x_0 - x_k| \leq \frac{b_k - a_k}{2} = \frac{b_{k-1} - a_{k-1}}{2^2} = \dots = \frac{b - a}{2^{k+1}}$$

由上式可见,若 x_k 为方程根的近似值,又要求其绝对误差不超过 ϵ ,则区间分次数 k 由不等式 $\frac{b-a}{2^{k+1}} \leq \epsilon$ 来确定。

1.3 解非线性方程组的 $n+1$ 点残量法

对于有 n 个变量的非线性方程组:

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \dots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad (1-6)$$

记 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 则式(1-6)可写为

$$f_i(\mathbf{x}) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1-7)$$

把某一组近似解 $\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ 代入式(1-6)的左边各式,就得到

$$\begin{cases} f_1(\mathbf{x}^*) = e_1^* \\ f_2(\mathbf{x}^*) = e_2^* \\ \dots \\ f_n(\mathbf{x}^*) = e_n^* \end{cases} \quad (1-8)$$

记 $e^* = (e_1^*, e_2^*, \dots, e_n^*)^T$, 称之为方程组(1-6) 或(1-7) 关于近似解 x^* 的一个残量(列矢量)。

假定方程组(1-6) 已有一个近似解 $x^{(0)}$, 可用如下方法构造 $N+1$ 个近似解:

$$\begin{cases} x^{(0)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ x^{(1)} = (x_1^{(0)} + \delta, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ x^{(2)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \delta, \dots, x_n^{(0)}) \\ \dots \\ x^{(n)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \delta) \end{cases} \quad (1-9)$$

式中, δ 为一微小增量。

它们对应的残量为 $e^{(0)}, e^{(1)}, \dots, e^{(n)}$, 解如下的线性方程组

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e_1^{(0)} & e_1^{(1)} & \dots & e_1^{(n)} \\ e_2^{(0)} & e_2^{(1)} & \dots & e_2^{(n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_n^{(0)} & e_n^{(1)} & \dots & e_n^{(n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1-10)$$

利用式(1-10) 的解 $y_0, y_1, y_2, \dots, y_n$ 可构造非线性方程组(1-4) 的一个新解 $x^{(n+1)}$:

$$\begin{cases} x_1^{(n+1)} = \sum_{j=0}^n y_j x_1^{(j)} \\ x_2^{(n+1)} = \sum_{j=0}^n y_j x_2^{(j)} \\ x_3^{(n+1)} = \sum_{j=0}^n y_j x_3^{(j)} \\ \dots \\ x_n^{(n+1)} = \sum_{j=0}^n y_j x_n^{(j)} \end{cases} \quad (1-11)$$