

燃气涡轮发动机调试 和设计的最优化方法

〔苏〕A.П. 图纳柯夫 著

张津 译 陈大光 校

693029

国防工业出版社

692029

V235.1/08

燃气涡轮发动机调试和设计 的最优化方法

〔苏〕 A. П. 图纳柯夫 著

张 津 译
陈 大 光 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书阐述了燃气涡轮发动机的参数优化方法及其在自动化设计系统中的应用。提出了燃气涡轮发动机及其部件的通用数学模型,它可保证在不同调节规律下对多种工作状态进行优化计算。同时也介绍了提高发动机数学模型精度的方法及其应用举例。

本书可供从事燃气涡轮发动机及其部件的计算、设计、试验和调试等方面工作的工程技术人员和有关高等院校的师生参考。

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ДОВОДКЕ И ПРОЕКТИРОВАНИИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А. П. ТУНАКОВ

Издательство «Машиностроение», 1979г.

*

燃气涡轮发动机调试和设计的最优化方法

[苏] А. П. 图纳柯夫 著

张 津 译

陈 大 光 校

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/32 印张 7 3/8 160千字

1988年6月第一版 1988年6月第一次印刷 印数: 0,001—21,880册

ISBN 7-118-00169-4/V12 定价: 1.95元

译 序

随着科学技术的发展，近十几年来计算机辅助设计、最优化方法、自动化设计系统等在各个领域内都得到了广泛的采用。本书专门阐述燃气涡轮发动机在设计和调试中的最优化方法及其在发动机自动化设计系统中的应用。介绍了这些新技术、新方法在燃气涡轮发动机及其部件的计算、设计、试验、调试、故障诊断等方面的应用。本书内容新颖、文字精炼，有理论、有方法、有实例，很有实际参考价值。

由于水平所限，翻译难免有错误之处，欢迎批评指正。

目 录

序	1
符号	2
前言	9
第一章 数学模型	19
1.1 第Ⅰ级复杂程度的燃气涡轮发动机模型	19
1.2 第Ⅱ级复杂程度涡轮模型的特点	47
1.3 第Ⅲ级复杂程度压气机模型的特点	49
1.4 截面堵塞时气体通道的计算	50
1.5 质量和外廓尺寸计算	59
1.6 设计产品的工艺性	69
第二章 设计产品参数的最优化	76
2.1 优化方法	76
2.2 燃气涡轮发动机	94
2.3 燃气涡轮	96
2.4 轴流压气机	101
2.5 涡轮和压气机盘	105
第三章 提高数学模型的精度	115
3.1 提高数学模型精度的途径	115
3.2 校正模型的原理	116
3.3 初始信息的准备	117
3.4 用最小二乘法的校正算法	140
3.5 按试验结果校正数学模型的示例	158
3.6 校正和优化在燃气涡轮发动机试制调整中的应用	172
3.7 在燃气涡轮发动机技术诊断中的应用	176

3.8 校正数学模型的补充方法.....	181
第四章 关于自动化设计系统的问题	186
4.1 自动化设计的目的.....	186
4.2 分层模型中的信息传递.....	189
4.3 传递数学模型.....	194
4.4 应用传递模型时设计工作的组织.....	203
4.5 影响系数.....	207
4.6 重新计算不同调节规律的线性传递模型.....	216
4.7 传递模型举例.....	219
附录	223
1. 双函道燃气涡轮发动机的影响系数表.....	223
2. 燃气涡轮的影响系数表.....	223
3. 轴流压气机的影响系数表.....	225
参考资料	228

序

科学技术的迅速发展是现代主要特点之一。对任何产品技术特性的要求都在不断地提高，飞机和发动机也是一样。所用的设计方法对技术特性和竞争能力具有重大影响。传统的设计方法已经是很不够的，所以近几年来开始广泛采用了发动机及其部件的优化方法，发动机及其部件都是用数学模型表示。

在传统的设计方法中，通常对每个产品拟定几个方案，设计员从全面观点出发，选出一个最好的方案，即他为一个复杂的方案选择任务寻求合理的解。当利用优化方法时，在数字电子计算机的计算过程中实现方案选择。这时应该按数学模型计算每个产品的设计方案的全部特性。由这些特性组成优化准则，它可以从全面的观点来评价所设计的产品并选出折衷方案。选择最佳方案的可靠性主要取决于数学模型的精度。组织工作和解决各种优化课题的顺序具有重大意义。

很多单位都进行了类似的工作。喀山航空学院从1962年起就进行这方面工作，在这本书中叙述了他们积累的建立数学模型和求解各种优化课题方面的经验。主要的注意力放在燃气涡轮发动机的数学模型和提高它们的精度方面。为使叙述紧凑，只给出了复杂公式的结论，而没有证明它在逐步逼近过程的收敛性，只是在计算过程中检查了收敛性。

所描述的全部电子计算机程序都是由喀山航空学院编制的，其中的大部分程序用两种方式编写，即用ALGOL-60和FORTRAN-IV算法语言。计算主要在M-220M、M-222、БЭСМ-4和EC-1022型数字电子计算机上进行的。

符 号

- A**——矩阵；
- A⁻¹**——逆矩阵；
- a**——A矩阵的元素；
- a_r**——涡轮和压气机叶片通道间的喉道；
- B**——矩阵；
- b**——叶片弦长，B矩阵元素；
- b_m**——叶片宽度；
- C**——燃油中碳的含量；
- C**——矩阵；
- C_{yx}**——单位燃油消耗率；
- cov**——协方差；
- c**——燃气绝对速度，拟合系数；
- c_p**——定压比热容；
- D**——影响系数矩阵；
- $\tilde{D}$** ——样本方差；
- d**——气流通道的平均直径，影响系数；
- E**——动能，弹性模数；
- F**——通道截面积，函数；
- F_i**——费歇准则；
- F**——矩阵；
- f**——函数，自由度的数目；
- G**——燃气或空气的质量流量；

- $\mathbf{G}$ ——加权矩阵;
- $\bar{G}$ ——折合流量;
- g ——可调参数的权;
- H ——燃油中氢的含量;
- H ——飞行高度;
- H_u ——低热值;
- J ——惯性矩;
- i ——可调参数或被测参数的号码, 焓, 攻角;
- j ——第Ⅱ类限制的号码, 试验点的号码;
- $\mathbf{K}$ ——协方差矩阵;
- K_y ——压气机稳定裕度;
- k ——空气或燃气的绝热指数, 相关系数;
- L ——产品的长度;
- $\mathbf{L}$ ——矩阵的符号;
- l ——叶片高度, $\mathbf{L}$ 矩阵的元素;
- M ——轴上的扭矩, 动量矩;
- M ——马赫数;
- m ——质量, 第Ⅱ类限制的数目, 条件方程式的数目,
函道比, 直径比;
- N ——燃油中氮的含量;
- N ——功率;
- $\bar{N}$ ——折合功率;
- n ——变量的数目, 各种向量的分量数目, 可调参数的
数目, 转子的转速;
- $\bar{n}$ ——折合转速;
- O ——燃油中氧的含量;
- P ——重要性水平, 置信概率;

- p —— 静压, 减少的方次;
 p^* —— 总压;
 q —— 流量的气动函数;
 q_r —— 相对燃油流量;
 R —— 气体常数, 推力;
 R —— 气流通道的几何尺寸向量;
 Re —— 雷诺数;
 r —— 向量 R 的半径分量, 容积百分比;
 S —— 熵;
 T —— 静温;
 T^* —— 绝对运动中的总温;
 T_{*p} —— 临界温度;
 T_z^* —— 相对运动中的总温;
 t —— 缩尺后的温度, 栅距;
 U —— 外界条件向量 (状态参数);
 u —— 圆周速度, U 向量的分量;
 v —— 飞行速度;
 w —— 相对速度;
 X —— 方案参数向量, 可调参数向量;
 x —— 坐标, 可调参数, X 向量的分量;
 Y —— 常数向量, 列向量, 被研究的函数 (向量);
 y —— Y 向量的分量, 坐标, 常数;
 Z —— 参数向量;
 z —— Z 向量的分量, 叶片数目, 燃气涡轮发动机的通道数目, 方程式数目, 坐标, 截面或叶片环号码;
 $\bar{z}$ —— 加权的测量;
 α —— 绝对运动中叶栅的气流进口角和出口角, 燃烧室

中的余气系数;

β ——相对运动中叶栅的气流进口角和出口角;

γ ——速度向量和它在平面上投影之间的夹角;

Δ ——增量或差值的符号;

δ ——相对误差或残差, 相对漏气量或抽气量, 径向间隙;

ε ——残差, 给定的计算精度;

$\bar{\varepsilon}$ ——加权的残差;

η ——效率;

η_r ——燃烧完全系数;

ϑ ——涡轮平均直径与叶片长度之比, 叶型安装角;

θ ——角坐标 (采用极坐标时);

χ ——漏气系数;

λ ——速度系数;

λ_* ——涡轮叶栅出口截面堵塞时的速度系数;

λ_u ——圆周速度的速度系数;

μ ——分子量, 随机数的中心矩;

ν ——随机数的非中心矩;

ξ ——损失系数;

Π ——被研究的参数, 标志;

π ——增压比或落压比;

ρ ——反力度, 密度;

σ ——均方差, 压力恢复系数, 法向应力;

σ_0 ——权等于一时的均方差;

τ ——温度的气动函数, 时间;

φ ——喷管或涡轮导向器的速度损失系数;

ψ ——涡轮工作轮的速度损失系数;

- Ω ——查询范围；
 ω ——转动的角速度。

上 标

- *——总参数；
 $\sim$ ——经验估计；
 $-$ ——折合参数，相对参数或加权的参数；
 $=$ ——相对折合参数。

下 标

- 0——进气道或扩压器后的参数，压气机进口导流器
 (BHA) 前的参数，涡轮导向器前的参数；
 1——压气机和涡轮工作轮前的参数和尺寸；
 2——压气机和涡轮工作轮后的参数和尺寸；
 3——压气机整流器后的参数和尺寸；
 I——涡轮风扇发动机内涵道；
 II——涡轮风扇发动机外涵道；
 a ——轴向分量；
 H ——高度 H 上未受扰动的气流；
 i ——被测参数的顺序号，矩阵行的顺序号；
 j ——试验点的顺序号，矩阵列的顺序号；
 n ——顺序号；
 S ——对于熵的；
 u ——周向分量；
 w ——相对运动的；
 a_{II} ——绝热的，相等的；
 B ——对于空气的，压气机进口截面，内部的；

- г — 对于叶栅喉道的, 燃烧室出口截面;
 г — 燃气的;
 зад — 给定的;
 изм — 测量的;
 исх — 初始的;
 к — 压气机的;
 л — 叶片的 (几何的或计算的);
 н — 外部的;
 ном — 额定的;
 оср — 平均的;
 отб — 抽气;
 п — 喘振, 完全膨胀时;
 р — 对应于设计条件;
 расч — 设计的;
 с — 喷管出口截面;
 см — 气流混合后;
 ср — 算术平均或在气流的平均表面上 (只当可能引起混淆时才用, 其他情况下略去);
 т — 表格的, 涡轮后截面;
 топл — 燃油的;
 тр — 移位探测;
 уд — 单位的;
 ф — 加力。

缩 写

- ВД — 高压;
 ВНА — 压气机进口导流器;

BCA——压气机出口整流器；

ГТД——燃气涡轮发动机；

ДФЭ——部分因素试验；

КС——燃烧室；

НД——低压；

ПРТУ——求解超越方程的程序；

ПФЭ——完全因素试验；

РК——工作轮；

РУД——发动机油门杆；

СА——整流器或导向器；

ЭЦВМ——数字电子计算机。

前 言

0.1 优化任务的提出

研制燃气涡轮发动机时，最重要的任务之一就是选择发动机及其部件的最佳参数。它应该满足一些通常是互相矛盾的要求，其中有些要保证最小，而另一些要保证最大。这种任务经常不是单一解，可行方案的数量可能很多。如果在数字电子计算机上只计算用于比较的方案的特性，然后人工进行选择，那么只需要计算被认为是最有希望的那部分方案，并引入各种简化。作了这样的选择分析后永远也不能有把握地认为：从全面的观点看所选择的方案实际上是最佳的。用人工方法来解决这样复杂的逻辑课题简直是不可能的，现代数字电子计算机成功地承担了这类任务，尽管这时要求更复杂的方法和程序。它的一般名称为“计算机优化方法”。可以断言，现代优化问题仍是科学技术上的主要问题之一，它发展迅速，所以无论在理论上还是在实用上都出现了大量的成果。

优化过程从选择最佳准则开始，最佳准则应和上一级模型（从飞机模型到发动机）协调一致。它可以是标量或者是向量，即它是可以用来评价所设计产品完善程度的参数或参数组合。在资料中采用了很多术语来表示这个概念，其中有目标函数值（或目标函数）、质量函数、收益、评价函数（或评价表面）、最佳准则、有效性、质量、最佳性、优化参数等。其中用得最广泛的是目标函数，以后将采用目标函数这一术语。当对一个题目作几何上的说明时还将采用“评价表

面”这一术语，它是在多维空间中对目标函数的几何描述。向量目标函数常常用这种或那种方法转换为标量（参见2.1.6节）。标量目标函数的最大值或最小值应该对应于最佳解，即所设计产品的最佳方案。查询这个最佳解的过程就是优化。在燃气涡轮发动机中，目标函数的表达式可以在分析飞机数学模型时得到。在飞机数学模型中应该引入这样一些参数，例如燃油流量（单位的或总的）、发动机质量、外廓尺寸、起飞状态和加力状态的推力等。在优化个别零件的型面时，例如涡轮盘，目标函数通常是它的质量，在给定的约束条件下使质量最小。

选择在优化过程中可以调整的几个参数，它们形成向量 $X \equiv (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。在燃气涡轮发动机中这个向量的分量是函道比、压气机的增压比、涡轮前燃气温度等。在设计发动机部件时，若没有利用相近的原准机和现有的零件时，那么可调参数将是气流通道的全部主要尺寸。若有相近的原准机，则部分尺寸可取自原准机。对每个可调参数给定合理的变化范围，把它们称为第Ⅰ类限制： $x_{i, \min} \leq x_i \leq x_{i, \max} (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

第Ⅱ类限制或函数限制——这个参数值不是可调整的数值，而是只和可调参数呈单值关系，它保证所有同时满足它的产品方案是可以接受的，但并非最佳的。第Ⅰ类限制可以是最多种多样的，例如不同状态下的稳定性裕度，没有放到目标函数中的次要状态推力、各种零件的强度储备等。第Ⅱ类限制通常表示为同一种形式： $f_j(X) \geq 0 (j = 1, 2, \dots, n)$ 。它和第Ⅰ类限制一起划出了 n 维空间的可行解范围 Ω （查询范围）。

求解非线性优化[●]课题的结果可找到最佳值, 这一课题可理解为: “如果函数或者限制是非线性的, 或两者一起都是非线性的, 在这种情况下用于找出服从给定限制的变量函数最大值或最小值的任何一种程序”^[5]。在查询最小值的情况下, 这个任务可写为

$$F(X_{opt}) = \min_{X \in \Omega} F(X) \quad (0-1)$$

有时可采用其他写法:

$$\min \{F(X) / X \in \Omega\} \quad (0-2)$$

$$\Omega = \{X / f_j(X) \geq 0 \quad \text{对于全部 } j\}$$

目标函数 F 和第Ⅰ类限制 f_j 随可调参数 X 变化关系的总和称为该产品的数学模型[●]。获得复杂产品的模型是很麻烦的。它包括大量的公式、方程式、逻辑条件, 通常在数学模型中还有一些迭代循环, 即用逐步逼近法计算。

已经提出了大量求解非线性优化课题的方法, 它们的大部分已经编成程序, 某些这种程序已放入数字电子计算机的数学库中。如果所得到的数学模型不复杂, 而且可调参数的数量中等 ($n < 10 \sim 15$), 那么求解非线性优化的课题不会引起什么困难。如果试图把这些方法用到燃气涡轮发动机的实际设计中去, 则会发生相当多的困难。其原因如下: 数学模型很复杂, 以致很难把它放入现代数字电子计算机的内存中去; 由于不得不常常转到外存而使计算时间大大增加, 以

● 用得较广泛的术语“非线性规划”歪曲了课题的意思, 也是很 不方便的。它是由于草率地翻译了罗勃特·多尔夫曼 (Роберт Дорфман) 约在 1950 年所提出的英文术语“数学规划”所引起的。“数学规划”的正确翻译没有得到推广, 所以采用了国际术语字典^[5]中所推荐的术语“非线性优化”。

● 数学模型更严格的定义见 0.2 节。