

# 航空动力装置控制 规律与特性

[俄]Ю.Н.聂恰耶夫 著  
单凤桐 程振海 译  
单凤桐 校



国防工业出版社

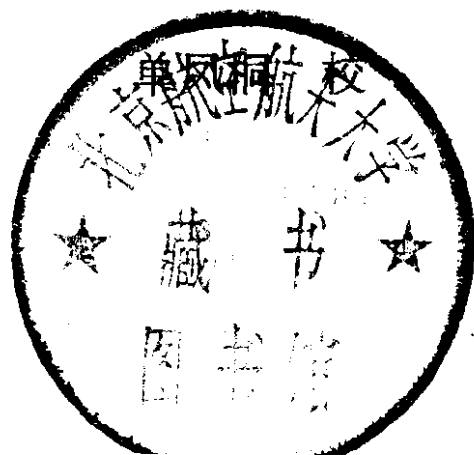
09902137

中国人民解放军总装备部专项资金资助出版

HK59/27  
航空动力装置控制  
规律与特性

[俄]Ю.Н. 聂恰耶夫 著

单凤桐 程振海 译



C0466325

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军—1998—019 号

图书在版编目(CIP)数据

航空动力装置控制规律与特性/[俄]涅恰耶夫著;单凤桐,程振海译.—北京:国防工业出版社,1999.5

ISBN 7-118-02000-1

I. 航… II. ①涅… ②单… ③程… III. 航空发动机:燃气轮机-控制规律 IV. V235.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 25636 号

ЗАКОНЫ УПРАВЛЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ  
АВИАЦИОННЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

Ю. Н. Нечаев

Издательство "Машиностроение" Москва 1995

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)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850 × 1168 1/32 印张 14 363 千字

1999 年 5 月第 1 版 1999 年 5 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:26.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)



Ю.Н. 聂恰耶夫 像

## 译者的话

本书作者 Ю. Н. 聂恰耶夫是俄罗斯著名的学者。他长期从事航空动力装置和发动机的科学研究和教学工作。现为俄罗斯宇航科学院院士、空气气体动力学和热交换基础与应用问题学部负责人、茹柯夫斯基军事航空工程学院教授。他撰写过许多著作,其中早期与他人合著的《喷气发动机原理》、《航空燃气涡轮发动机原理》已译成中文出版,为我国广大航空科技工作者享用。80~90年代,他在大量科学研究的基础上撰写了多部对航空航天科技发展有重要影响和实用价值的书籍,其中本书就是他的代表作。

本书是为新一代航空动力装置研制的需要而著的。全书较系统全面地阐述了航空燃气涡轮发动机工作过程的控制规律问题和飞机特征飞行状态下动力装置特性的最佳化问题;详尽地解释了发动机中流路部件被控情况下出现的流动过程的物理实质;根据动力装置发展中存在的问题,提出了解决问题的方法和应开展的课题研究。总之,本书在阐述此领域的技术问题,运用了许多新的概念、新的设计方法,总结了大量极有价值的经验数据。

本书的叙述始终注意到理论与设计研制的实际、与使用的结合,它对航空发动机和飞机动力装置的设计研制、试验调整的科研设计人员、航空航天大专院校发动机专业的教师、研究生都是一本难得的、极有参考价值的书。

在本书的翻译过程中,得到了航空工业总公司发动机系统工程局、中国飞行试验研究院、沈阳航空发动机研究所、西安飞机设计研究所等单位的领导和同志的支持和帮助;张永和与樊寄松等

同志为本书的出版,不辞辛劳地做了许多工作,译者在此一并表示衷心的感谢。

书中如有不当和错误之处,恳请读者批评指正。

译 者

# 前 言

## ——为中译本出版而写

本书是作者在多年从事科学研究和在茹柯夫斯基军事航空工程学院讲学的基础上撰写而成。在我的学生中曾有许多中国留学生,他们于五六十年代在苏联接受了工程师的基础教育。岁月流逝,如今他们已在中国的航空航天工业部门和空军的重要科学技术岗位上工作,我为他们所取得的成就和为自己国家所做出的贡献而感到高兴。在此我要特别感谢我的一位学生——单凤桐,他为本书译成中文而介绍给中国同事付出了辛勤的劳动。

本书阐述了航空燃气涡轮发动机工作过程控制的理论基础和从实际出发解决问题的方法。对这些知识的需求是最近几年由于俄罗斯研制新一代航空发动机——“改变工作过程发动机(ДИП)”才提出的。

研制改变工作过程发动机的必要性,是由现代高机动性飞机完成任务的多状态性所决定。这种飞机要在各种不同飞行状态下完成不同的任务,所以,在每个飞行段上对发动机的参数和特性必须提出自己特殊的要求。例如,在巡航飞行状态下,发动机装置应有良好的耗油经济性;在起飞、加速和爬升过程中,推力余量要大;在大攻角和侧滑角下应能稳定地工作;在飞机机动飞行状态下应具有高的动态特性。与此同时,对发动机的可靠性和寿命的要求也更高了。若要满足所有这些要求,一般型式的航空燃气涡轮发动机是不可能达到的。

可变工作过程发动机的突出特点,是具有可增加控制因素数目,从而增加被控参数的附加被控部件。这种控制特点能主动影

响发动机的工作过程,并对飞机的每个特征飞行状态实现发动机(和整个动力装置)的最佳调整。通过对其极限参数和特性控制,能更有效地利用发动机,即对飞机在不同飞行条件下实施发动机工作过程的自适应。

书中对发动机最佳控制规律的生成和动力装置在飞机主要特征飞行状态下的高度-速度特性和节流特性的最佳化给予特别的关注。

作者相信,本书会给从事科研工作和实际工作的中国航空工业、民用航空和空军的专家带来兴趣,同时对高等航空院校的教师、研究生和学生也将有所裨益。

俄罗斯宇航科学院院士

俄罗斯空军少将

**Ю.Н. 聂恰耶夫**

1998年1月3日



## 序 言

本书是根据作者一系列研究结果和取得的结论,以及综合国内外最新文献资料撰写而成。在编写本书中,作者利用了自己在茹柯夫斯基军事航空工程学院为培养研究员-工程师专业讲课的材料。本书编写时完全融进了现代航空发动机设计和研制的新方法。这就是组件设计原理;利用电子计算机控制工作过程;在同一型式的燃气发生器的基础上发展新一代发动机系列等。

不同结构型式的航空发动机的热力循环,是以普遍的观点进行叙述的。为便于说明发动机内部过程的性质,引用与工作过程参数有函数关系的,且对所有类型的燃气涡轮发动机都是相同的循环功的概念。在研究循环功变换为有效功时,再考虑发动机结构型式的差异,这样对各种不同结构型式的发动机的热力有效性,就能用概括的和便于比较的形式来进行评定。

把发动机分为功能部件和功能组件。对各功能部件的特性进行归纳,并以研究这些部件在不同结构型式的发动机系统中的共同工作条件最为方便的准则关系式形式来表示。一组功能部件可为不同的燃气涡轮发动机组合成同一型别的功能组件。燃气发生器就是一个基本的功能组件。为此,采用燃气发生器和发动机(涡轮压气机)组件特性的概念,用准则关系式的形式给出这些特性的表示方法。本书中不仅证明了确定条件下的燃气发生器(发动机组件)的特性和属性,在不同条件下利用时,仍保持不变,而且还详细地分析了各种原始数据,对燃气发生器特性和属性的影响,进而把燃气发生器作为控制对象来研究,制订了不同结构型式的现代燃气涡轮发动机的燃气发生器的控制规律。在建立燃气涡轮发动机的数学模型时,特别是用于诊断目的的数学模型,装入模型中的

不是单个部件的特性,而是功能组件的特性,这就可获得非常简单的数学模型来适于机载数字计算机中的使用,并可生成燃气涡轮发动机燃气发生器的最佳控制规律。

书中用的不是发动机的内部特性,而是动力装置的有效特性。这种特性的计算方法是运用功能组件特性为基础的。

不同用途飞机动力装置的可能控制规律和有效特性,是利用所有功能组件的特性来确定的。书中阐明了生成最佳控制规律的各项原则,并给出了配有不同类型航空发动机的动力装置有效特性的原理和计算方法。

对流路各部件控制已经成熟的发动机的高度-速度特性和节流特性最佳化问题进行了研究。确定了配有这种发动机的动力装置的最佳控制规律,并对采用这些控制规律可期待的优越性作出了相对的定量的评价。

书中,对发动机流路部件被控制情况下发动机中出现的流动过程的物理实质的叙述给予更多的关注。因为,这对正确选择最佳控制规律具有首要意义。

本书可供航空工业、民航和空军中从事航空动力装置研究、研制和使用的专家,以及航空院校和空军高等工程院校的教师和研究生使用。

作者向曾对本书手稿提出宝贵意见的 C. M. 什利亚赫钦科教授和 B. M. 库德里亚符采夫教授,以及莫斯科 C. 奥尔忠尼启则航空学院和莫斯科 H. Э. 巴乌曼国立技术大学的发动机原理教研室表示衷心的感谢!

**Ю. Н. 聂恰耶夫**

# 目 录

## 符号说明

### 第一章 航空动力装置及其部件中过程的相似和物理

模拟..... 5

1.1 气体运动方程 ..... 5

1.2 发动机部件中过程的相似和物理模拟 ..... 12

1.3 物理现象的相似准则 ..... 15

1.4 准则方程 ..... 20

1.5 主要起决定作用的相似准则的挑选、自模化现象 ..... 22

### 第二章 不同型式燃气涡轮发动机的热力学有效性分析 ..... 24

2.1 动力装置型式及其主要参数 ..... 24

2.2 燃气涡轮发动机的工作过程和热力循环 ..... 32

2.3 燃气涡轮发动机的能量平衡 ..... 49

2.4 涡轮风扇发动机涵道之间循环功的最佳分配 ..... 51

2.5 燃气涡轮发动机单位参数与工作过程参数的关系 ..... 55

### 第三章 压气机的特性与调节 ..... 69

3.1 压气机的级及其级组的基本参数 ..... 69

3.2 燃气涡轮发动机压气机中过程的相似和物理模拟 ..... 73

3.3 轴流式压气机级的特性 ..... 78

3.4 轴流式压气机级的不稳定工作状态 ..... 83

3.5 赋予压气机特性准则形式, 及其特性曲线变化  
性质的解释 ..... 86

3.6 多级轴流式压气机中级的不匹配 ..... 89

3.7 多级轴流式压气机的不稳定工作状态 ..... 95

3.8 燃气涡轮发动机压气机的调节 ..... 102

<b>第四章 燃气涡轮的特性与调节</b> .....	115
4.1 涡轮级组的基本参数 .....	115
4.2 燃气涡轮中过程的相似和物理模拟 .....	124
4.3 涡轮级组特性变化的规律性 .....	128
4.4 多级涡轮特性的特点 .....	142
4.5 燃气涡轮的调节 .....	144
<b>第五章 燃气涡轮发动机燃烧室和混合室的特性</b> .....	147
5.1 燃气涡轮发动机燃烧室的基本参数 .....	147
5.2 燃气涡轮发动机燃烧室的特性 .....	149
5.3 混合室型式和参数 .....	153
5.4 混合室特性 .....	157
5.5 混合排气的涡轮风扇发动机中混合室、涡轮和 喷管的共同工作 .....	159
5.6 燃气涡轮发动机燃烧室与混合室的调节 .....	162
<b>第六章 进气装置的特性与调节</b> .....	165
6.1 进气装置的主要参数 .....	165
6.2 进气装置的外部阻力 .....	176
6.3 不可调超声速进气装置的节流特性 .....	178
6.4 超声速进气装置不稳定工作状态——喘振和 “淬振” .....	182
6.5 超声速进气装置调节的任务与方法 .....	186
6.6 可调超声速进气装置的特性及其控制规律 .....	190
6.7 攻角和侧滑角的改变对超声速进气装置特性 的影响 .....	197
6.8 进气装置的调节系统 .....	203
<b>第七章 排气装置的特性与调节</b> .....	206
7.1 排气装置的型式与主要参数 .....	206
7.2 不可调排气装置的特性 .....	214
7.3 燃气涡轮发动机超声速喷管的调节规律与方法、 可调排气装置的特性 .....	219

<b>第八章 燃气涡轮发动机燃气发生器部件的共同工作与</b>	
<b>控制规律</b> .....	223
8.1 接单参数控制的燃气涡轮发动机单轴燃气发生器	
部件的共同工作 .....	225
8.2 接单参数控制的单轴燃气发生器的特性分析 .....	236
8.3 接单参数调节的单轴涡轮喷气发动机可能的控制	
规律 .....	248
8.4 按双参数调节的单轴涡轮喷气发动机部件共同	
工作与可能的控制规律 .....	253
8.5 按双参数调节的单轴燃气发生器的特性 .....	256
8.6 接单参数调节的双轴燃气发生器(双轴涡轮喷气	
发动机)部件共同工作与控制规律 .....	262
8.7 按双参数调节的双轴涡轮喷气发动机部件共同	
工作与可能的控制规律 .....	272
<b>第九章 涡轮风扇发动机部件的共同工作与控制规律</b> .....	275
9.1 非加力状态下混合排气的加力式涡轮风扇发动机	
部件的共同工作 .....	276
9.2 非加力状态下混合排气的涡轮风扇发动机控制	
规律的生成 .....	291
9.3 分开排气的涡轮风扇发动机部件的共同工作和	
控制规律 .....	301
9.4 直接反作用式燃气涡轮发动机在加力状态下的	
控制规律 .....	308
<b>第十章 燃气涡轮发动机特性的一般概念及其获得的方法</b> .....	314
10.1 被控参数和控制因素。发动机和动力装置的控制	
规律 .....	314
10.2 航空燃气涡轮发动机特性的概念 .....	316
10.3 燃气涡轮发动机特性的获取方法 .....	317
10.4 用相似参数表示的特性 .....	319

<b>第十一章 直接反作用式涡轮喷气发动机的特性</b> .....	327
11.1 结构形式、参数和使用范围 .....	327
11.2 高度-速度特性和节流特性的计算 .....	332
11.3 直接反作用式燃气涡轮发动机的高度-速度特性 分析 .....	340
11.4 直接反作用式燃气涡轮发动机节流特性的分析 .....	358
<b>第十二章 动力装置的特性</b> .....	369
12.1 直接反作用式燃气涡轮发动机与进气装置和排气 装置的共同工作 .....	369
12.2 由直接反作用式燃气涡轮发动机特性向动力装置 特性的转换 .....	372
12.3 对动力装置部件迎面阻力系数与各种因素的关系 分析 .....	373
12.4 各种因素对动力装置相对外部阻力的影响 .....	379
12.5 有流路可调节部件的动力装置特性的最佳化 .....	385
<b>第十三章 涡轮轴发动机的控制规律与特性</b> .....	413
13.1 涡轮轴发动机部件的共同工作 .....	414
13.2 涡轮轴发动机控制规律的生成 .....	417
13.3 涡轮轴发动机考虑使用限制的高度特性 .....	422
13.4 涡轮轴燃气涡轮发动机节流特性和气候特性 .....	425
<b>参考文献</b> .....	430

# 符号说明

## 1. 主要符号与缩写

$V$ ——飞行速度

$H$ ——飞行高度

$M_H$ ——飞行马赫数

$P$ ——发动机推力, N

$P_{y\mu}$ ——发动机单位流量推力,  $N \cdot s/kg$

$C_{y\mu}$ ——燃油耗油率,  $kg/(N \cdot h)$

$P_{\text{эф}}$ ——动力装置有效推力, N

$C_{y\mu, \text{эф}}$ ——动力装置的有效燃油耗油率,  $kg/(N \cdot h)$

$N_e$ ——轴功率, W

$C_e$ ——燃油耗油率(按功率),  $kg/(kW \cdot h)$

$G_{\text{дв}}$ ——发动机质量, kg

$\gamma_{\text{дв}}$ ——发动机推力重量比,  $kg/N$

$L_u$ ——循环功, J/kg

$L_e$ ——发动机轴功, J/kg

$L_B$ ——螺旋桨轴功, J/kg

$L_K(L_T)$ ——压气机(涡轮)功, J/kg

$L_r$ ——摩擦功

$l_K = L_K/c_p T_B^*$ ——压气机换算功

$l_T = L_T/c_p T_r^*$ ——涡轮换算功

$G_{r, \text{ч}}$ ——小时燃油耗油量,  $kg/h$

$Q$ ——输送给 1kg 工质的热量, J/kg

$Q_0$ ——由燃油带给 1kg 工质的热量, J/kg

$m$ ——涵道比

$n$ ——转速, 1/s

$G_B (G_r)$ ——空气(燃气)流量, kg/s

$\pi_K^* (\pi_B^*)$ ——压气机(风扇)增压比

$\pi_{K\Sigma}^*$ ——压气机总和增压比

$\pi$ ——循环总增压比

$\pi_T^*$ ——涡轮膨胀比

$\pi_{c.p}$ ——尾喷管可用膨胀比

$\eta_K^* (\eta_T^*)$ ——压气机(涡轮)效率

$\eta_r$ ——燃烧效率

$\eta_{BH}$ ——循环内(有效)效率

$\eta_{TBF}$ ——推进(飞行)效率

$\eta_{\Pi}$ ——发动机全(总)效率

$\sigma_{BX}$ ——进气装置压力恢复系数

$\sigma_{K.C}$ ——燃烧室压力恢复系数

$\varphi$ ——进气装置流量系数

$\varphi_c$ ——尾喷管速度系数

$\bar{R}_c$ ——尾喷管推力系数

## 2. 发动机类别

ТРД——涡轮喷气发动机

ТРДΦ——加力式涡轮喷气发动机

ТРДД——涡轮风扇发动机

ТРДД(Φ)——加力式涡轮风扇发动机

ТРДД(Φ)<sub>см</sub>——混合排气的加力式涡轮风扇发动机

ТРДД<sub>см</sub>——混合排气的涡轮风扇发动机

ТВД——涡轮螺旋桨发动机

ТВВД——涡轮螺旋桨风扇发动机(涡轮桨扇发动机)



### 3. 发动机部件

КВД(ТВД)——高压压气机(高压涡轮)  
 КНД(ТНД)——低压压气机(低压涡轮)  
 ТКМ——涡轮压气机组件  
 ДМ——发动机组件  
 ГГ——燃气发生器  
 ГГК——燃气发生器涵道  
 ВУ——进气装置  
 СВ——超声速进气道  
 СУ——动力装置  
 КС(ФК)——主燃烧室(加力燃烧室)  
 РУД——发动机操纵杆

### 4. 发动机状态

М——最大状态  
 ПФ——全加力状态  
 ЧФ——部分加力状态  
 МФ——最小加力状态  
 МП(Н)——最大持续(额定)状态  
 Кр——巡航状态  
 МГ——慢车  
 ПМГ——飞行慢车

### 5. 注角

В——发动机进口  
 ВД——高压级组  
 ВХ——进气装置  
 Г——燃烧室出口  
 ГГ——燃气发生器  
 ДВ——发动机组件  
 К——压气机出口  
 Кр——尾喷管临界截面