

231722

基本書藏

航空渦輪噴氣發動機原理 和計算中小偏差法的应用

А. Я. 契爾凱茲著



國防工業出版社

3
712

5938

5/4712

231722

航空渦輪噴氣發動機原理 和計算中小偏差法的应用

A. Я. 契尔凱茲 著

楊克立等譯 宁槐校



國防工業出版社

本書敘述渦輪噴氣發動機的計算方法，該計算法是以應用小偏差法為基礎的。

當渦輪噴氣發動機構件的某一參數（效率、損失系數、主要幾何尺寸等）發生變化時，利用本方法來求推力、單位燃料消耗量、空氣流量及其它衡量整個發動機的数据所產生的改變量，是很適用的。在解決許多實際問題時，應用小偏差法較通常所用的計算法可大大減少計算工作量，并可保證計算結果足夠準確。

本書列舉了一系列應用小偏差法的例題，對應用本方法可能產生的誤差及應用限度也作了估計。並列出了計算所需的輔助圖表。

本書的主要對象是航空工業的計算工程師及實驗工作人員，亦可供高等航空學校學生參考。

蘇聯 А. Я. Черкас 著

‘Применение метода малых отклонений в теории и расчёте авиационных турбореактивных двигателей’
Обorongиз 1955年

國防·業·社

北京市書刊出版業營業許可証出字第 074 号
機械工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

850×1168^{1/32}·5 印張·123 千字

1959 年 2 月第一版

1959 年 2 月第一次印刷

印數：0,001—1,900 冊 定價 (11) 0.94 元

№ 2266 統一書號 15034·291

目 录

主要符号	5
前言	7
序言	11
第一章 涡轮喷气发动机各构件中工作过程的小偏差方程式	14
1 概論	14
2 压气机中空气压缩过程方程式	15
3 涡轮内气体膨胀过程方程式	19
4 主燃烧室和加力燃烧室中气体加热过程方程式	22
5 喷口排气过程方程式	25
6 由压气机和涡轮特性线所决定的涡轮喷气发动机各参数间的关系	31
第二章 利用小偏差法选择所设计发动机的最有利参数	41
1 概論	41
2 基本方程组的解法。影响系数表	41
3 压气机压缩比和涡轮前燃气温度对推力及单位燃料消耗量的影响	49
4 涡轮和压气机的效率对推力及单位燃料消耗量的影响	51
5 进气管道、燃烧室和喷口内的总压系数对推力及单位燃料消耗量的影响	55
第三章 定型发动机参数的互相影响	58
1 概論	58
2 基本方程组的解法和影响系数表的编制	59
3 进气管道、燃烧室和喷口内的总压损失对定型发动机参数的影响	72
4 压气机的效率及调节对定型发动机参数的影响	78
5 涡轮效率对定型发动机参数的影响	87
6 喷口排气截面积和涡轮导向器面积对定型发动机参数的影响	88
7 喷口内的气体加热量对定型发动机参数的影响	98
8 联系发动机参数改变量的补充条件的计算	104
9 压气机特性线的坡度对涡轮喷气发动机参数间相互关系的影响	112

第四章 换算轉速改变时, 定型發动机参数間的相互关系.....	122
1 概論.....	122
2 發动机参数与轉速及飞行条件的关系.....	123
3 渦輪噴气發动机各构件中的損失系数和主要截面积同时 变化时, 换算轉速的改变.....	135
第五章 应用小偏差法計算渦輪噴气發动机的限度 及計算誤差的估計.....	143
1 小偏差法和渦輪噴气發动机的一般計算法.....	143
2 小偏差法基本关系式誤差的研究.....	145
3 小偏差法应用范围的扩大.....	151
参考文献.....	155

主要符号

p_H, T_H ——大气压力和温度;

p_0, T_0 ——发动机入口滞止气流的总压和总温;

p_B, T_B ——压气机前滞止气流的总压和总温;

p_K, T_K ——压气机出口滞止气流的总压和总温;

p_T, T_T ——涡轮前滞止气流的总压和总温;

p_T, T_T ——涡轮后滞止气流的总压和总温;

p_c, T_c ——喷口出口处滞止气流的总压和总温;

$$\pi_V = \frac{p_0}{p_H} \text{——流速动压增压比;}$$

$$\pi_K = \frac{p_K}{p_B} \text{——压气机内空气总压增压比;}$$

$$\pi_T = \frac{p_T}{p_T} \text{——涡轮内总压降压比;}$$

$$\pi_c = \frac{p_c}{p_H} \text{——喷口内外压力比;}$$

$$\sigma_B = \frac{p_B}{p_0} \text{——压气机前进气管道(扩压管)内的总压系数;}$$

$$\sigma_T = \frac{p_T}{p_K} \text{——燃烧室内的总压系数;}$$

$$\sigma_c = \frac{p_c}{p_T} \text{——喷口内的总压系数;}$$

$$\theta = \frac{T_0}{T_T} \text{——涡轮与喷口间的升温比(加力燃烧室内的加热比);}$$

η_K, η_T ——分别为按滞止气流参数计算的压气机及涡轮效率;

η_T ——放热系数(燃烧室效率);

F_c ——喷口出口截面积;

$F_{c,1}$ ——涡轮第一级导向器叶栅的最小截面积;

G_K ——通过压气机的每秒空气流量;

G_T ——通过涡轮和喷口的每秒燃气流量;

G_T ——主燃烧室每小时燃料消耗量;

$G_{T,\Phi}$ ——加力燃烧室每小时燃料消耗量;

n ——发动机轴转速;

$$\overline{G_B} = \frac{G_B \sqrt{T_B}}{p_B} \text{——通过发动机的每秒换算空气流量;}$$

$n = \frac{n}{\sqrt{T_B}}$ ——發動機軸的換算轉速；

λ ——速度係數（氣流速度與臨界速度之比）；

$q(\lambda), f(\lambda)$ ——速度係數的氣動函數（ λ 的注腳表示截面）；

V ——飛行速度（公尺/秒）；

M ——飛行馬數；

σ_0 ——發動機前激波系的總壓恢復係數；

$J_{\text{BAX}}, J_{\text{HX}}$ ——分別為氣流的排氣總沖量和進氣總沖量；

R ——反作用推力；

C_R ——單位燃料消耗量；

δ 表示參數的相對偏差率，即 $\delta\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\alpha_0} = \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha_0}$ 。

前 言

目前，从事研究、設計和改进航空燃气渦輪發動机的工程师已經可以得到相当完善的燃气渦輪發動机及其各构件工作过程的理論以資应用。

在B. C. 斯杰契金、И. И. 庫拉金、H. B. 依諾捷姆采夫及其他苏联学者和外国学者的有名著作中，另外在无数杂志的論文中都敘述了燃气渦輪發動机理論的現况和計算方法。因此，当前燃气渦輪發動机的气动計算，即計算發動机工作过程的参数可以达到相当高的精确度。

但是，在实际应用上往往会遇到这样的問題，如用普通的詳細气动計算法求解，显得太麻煩。为了减少計算工作量并便于分析所得結果起見，因而創造了簡化的計算法。这些方法在文献中都有敘述。

本書所談的是在不同場合下，發動机各部件参数的改变对于整台發動机参数的影响。或簡言之，是关于發動机参数相互影响問題的計算与分析方法。

現举例說明已知的此类問題：

1) 若压气机效率比發動机設計时所选定数值低些；那么發動机的推力和經濟性会發生怎样的变化呢？应怎样修正工作过程的其它参数才能保証發動机所要求的数据呢？

2) 由于施工过程不可避免的誤差积累，發動机在試車时推力全不符合技术規程的要求；应怎样改变噴管的截面积并改变多少，才能得到所需的推力？截面积的改变对工作过程其它参数——空气流量、燃气温度等——将有什么影响呢？

3) 根据發動机装在飞机上的情况，空气往往是要通过長長的进气道才进入压气机，这就会产生附加的压力损失。这种损失对發動机参数有什么影响，怎样最簡便地使这些参数的改变量为最

小呢？

在本書中舉出了許多類似這樣的問題作為例子，其目的並不是計算新發動機的參數，而是計算與已知（已設計的或已定型的）發動機比較偏差量不大的發動機參數。

用通常的氣動力計算法來解決這類問題到底怎樣麻煩呢？麻煩在於預先很難估計因個別數值（譬如壓氣機或渦輪的效率、發動機某一截面積等）改變所引起的工作過程參數的偏差量，因此，只好按不同情況計算一系列發動機的參數，從中選出能滿足本題條件的一種，但這是相當麻煩的解法，特別是在研究定型的發動機時和在計算中必須考慮壓氣機和渦輪特性的情況下。

解決這類問題的第二種方法就是求各參數改變量間的直接關係，即所計算的不是推力、燃料消耗量等的絕對值，而是這些參數對原始數值的偏差量。各參數偏差量的合理計算法可使這一類問題的求解大大簡化。這一點不止一次地引起研究人員的注意，譬如，從國外文獻中得知，有許多應用這種方法分析燃氣渦輪發動機及其構件原理個別問題的成功經驗●。

本書所介紹的這種計算與分析法，適用於目前應用最廣的航空燃氣渦輪發動機——單軸的渦輪噴氣發動機。

這種方法稍加變更也可用來分析較複雜的燃氣渦輪發動機——渦輪螺旋槳發動機、双流路式發動機等。

本書分五章。

在序言中敘述了本書所用近似計算法——小偏差法——的數學實質。

第一章列出燃氣渦輪發動機主要構件（壓氣機、渦輪、燃燒室和噴管）內工作過程參數的改變量之間的必要解析關係式。

第二章研究在設計渦輪噴氣發動機時選擇工作過程主要參數的有關計算中，小偏差法的應用。

● K·梅叶尔和Г·福赫特，渦輪噴氣發動機特性綫作法。“火箭技術問題”論文集第一集。外文書籍出版社1952年。

在第三章內，用小偏差法分析定型發動機參數之間的相互關係。本章計算公式可以相當簡便地求出，當換算轉速不變時，推力、單位燃料消耗量及其它衡量整台渦輪噴氣發動機的性能指標隨構件的效率、特性和幾何尺寸的变化而改變的情況。這一章的實用意義最大。

渦輪噴氣發動機各構件參數改變，同時又須考慮換算轉速或飛行速度也改變，這一類問題的解決方法在第四章中介紹。因此，這一章是研究定型的渦輪噴氣發動機參數間的相互關係的最普遍情況。所得結果可用來分析發動機的試車特性、高度特性及速度特性。

第五章研究本書所介紹計算法的誤差及應用限度。

本書各章都列舉了計算例題，以說明如何應用小偏差法來解決渦輪噴氣發動機原理與計算中的具體問題。

在研究渦輪噴氣發動機參數改變量間的相互關係時，注意到現象的物理意義，雖不嚴格，但卻簡明介紹了公式的性質分析法。工廠工作人員通常只搞某種型號的發動機。對於他們來說，書中所介紹的利用所謂影響系數數值表的計算法是很重要的。一旦作出了這種表格，以後不必計算就可以解決分析該型發動機的各种問題。

本書中列有進行計算所需的輔助圖表。

書中所陳述的材料是假定讀者已熟悉了氣體動力學及燃氣渦輪發動機原理。

作者對審閱者 Л. И. 謝多夫院士，Н. Г. 杜勃拉夫斯基技術科學碩士，Ю. И. 圖留波夫工程師，Е. М. 貝爾莽特科技碩士，В. В. 葛利遜工程師，В. П. 道勃路杰耶夫和 В. В. 菲什戈伊特工程師在校對時所提出的寶貴意見和指正深表感謝。

作者對關心本書出版的 Г. Н. 阿勃拉莫維奇教授和 В. А. 道勃雷寧講師表示由衷的謝意。

序 言

小偏差法，或小干扰法在各門科学中用得很广。这是一种近似計算法，用来确定某一过程或物理現象的参数的微小改变量之間的相互关系。这种方法的原理是，当过程的某些参数与原始数值偏差不大时，利用已知的微分关系式可以相当准确的求出这些偏差量之間的关系。譬如，若表示某一过程的两个变量之間有下列函数关系

$$y = f(x)$$

当 $x = a$ 时， $y = b$ ；若 x 的改变量为 Δx 时，因 x 的变化而引起 y 与其初值 b 的偏差 Δy 用下式表示

$$\Delta y = f'(a) \Delta x \quad (1)$$

或用公式

$$dy = f'(a) dx \quad (2)$$

表示也一样，該式表示函数增量的主要部分（函数的微分）与函数自变量微量变化的关系。

把函数展开成泰勒无穷級数：

$$\Delta y = f'(a) \Delta x + \frac{1}{2!} f''(a) \Delta x^2 + \frac{1}{3!} f'''(a) \Delta x^3 + \dots \quad (3)$$

与 (1) 相比較，很容易看出 (1) 式是近似式。我們利用 (1) 式，也就是略去 (3) 式右边从第二項起的以后各項。換式 (1) 以及总的來說，小偏差法的近似性就表現在这里。所得誤差的大小与增量 Δx 的值及函数 $f(x)$ 的形式有关。当 Δx 相当小时，級数的第二項及以后各項与第一項——函数的微分，从微分学中我們知道，它是函数增量的主要部分（圖 1）——比起来是很小的。当函数 $f(x)$ 在点 $x = a$ 的二阶导数及更高阶导数的值很小，即函数 $f(x)$ 在点 $x = a$ 附近接近于綫性关系时，誤差也是不大的；导数 $f'(x)$ 在 x 值的上述变化範圍內可以取为不变值：

$$f'(a + \Delta x) \approx f'(a)。$$

若函数 y 不仅取决于一个变量, 而取决于几个变量 x, t, r , 且过程由一系列函数关系 $y = f(x, t, r)$; $z = f(x, t, r, y)$ 等决定, 则不管这些关系的形式与复杂性怎样, 与前一一样, 可列出联系各改变量 $\Delta y, \Delta x, \Delta t, \Delta r, \Delta z$ 的齐次线性方程组:

$$\Delta y = \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)\Delta x + \left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)\Delta t + \left(\frac{\partial y}{\partial r}\right)\Delta r,$$

$$\Delta z = \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)\Delta x + \left(\frac{\partial z}{\partial t}\right)\Delta t + \left(\frac{\partial z}{\partial r}\right)\Delta r + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)\Delta y.$$

式中 $\frac{\partial y}{\partial x}, \frac{\partial y}{\partial t}, \frac{\partial z}{\partial x}$ 等是数值系数, 代表在点 (x_0, t_0, r_0, y_0) 相应的偏导数。

因此小偏差法是使表示某种现象的关系式线性化的一种方法, 此法用来简化复杂方程组的求解及分析。我们知道, 在误差理论、振动理论、调节理论及其他方面, 这种方法用得很有成效。

燃气涡轮发动机的工作过程是一系列互相密切联系复杂过程的总合。那怕只有一个工作过程参数——压力、温度、截面积、损失系数或效率——发生变化, 也差不多会使其它所有参数发生变化。由于工作过程的基本方程

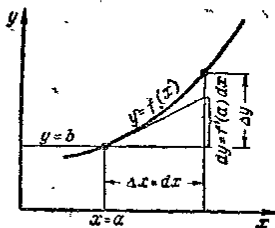


圖1 函数 $y = f(x)$ 的微分和增量

式很复杂, 分析涡轮喷气发动机参数的相互关系是比较困难的。

此外, 在研究、设计和修正涡轮喷气发动机时以及在实际生产中, 时常碰到要估计几何尺寸、效率、损失系数, 强度和工作过程其它参数发生不大的变化 (通常在初值的3~4%以下, 偶而达10~15%) 所起的影响。在本书中将可看到, 应用小偏差法除了使分析与计算简化以外, 还能在上述的数值变化范围内[●] (有时, 甚至在更大的变化范围内) 保证所得结果的高度精确性。

● 应指出, 在许多关于转速变化所引起的实际问题中, 小偏差法的应用范围常常不够, 需要扩大 (见第五章)。

所以，在較大的偏差範圍內（能滿足關於渦輪噴氣發動機參數互相影響的大多數實際問題的要求），都可以利用書中的公式和表格。因此，“小偏差”這個術語也只是假設的。讀本書時，這一點必須加以注意。下面在第五章，將更詳細地討論小偏差法的应用限度問題。

第一章 渦輪噴氣發動機各構件中 工作過程的小偏差方程式

I 概 論

本章研究渦輪噴氣發動機每一主要構件——壓氣機、渦輪、燃燒室、噴口——工作過程參數之間的關係。為此，利用渦輪噴氣發動機原理中已知的工作過程基本方程式（以後稱為普通方程式），得到所謂小偏差方程式，即聯系工作過程各參數偏差量的綫性關係式。在這些簡化了的近似方程式中，各參數之間的關係表現得很明顯。利用這些方程式既便於分析所研究的渦輪噴氣發動機構件的工作情況，又易於找出該構件在發動機系統內工作的規律性。

我們針對最簡單的單流路單軸渦輪噴氣發動機列出方程式。圖2-上注有發動機各截面上空氣和燃氣參數的符號。由於本書內只用滯止氣流參數，所以不再加任何專用符號或注腳。按渦輪噴氣發動機原理慣例，不管溫度高低，都假設空氣的比熱比值 $k = \frac{c_p}{c_v}$ 等於1.40，而燃氣的 $k = 1.33$ 。

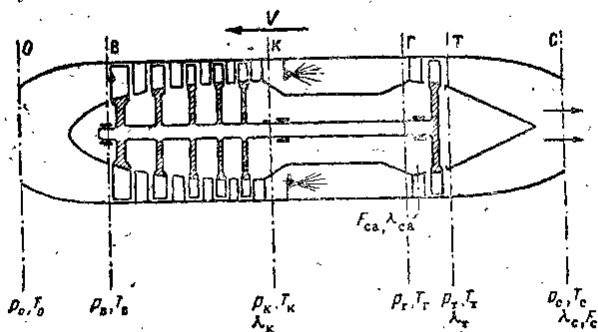


圖2 渦輪噴氣發動機沿流路各截面氣體參數的主要符號

下面列出必要的方程式。

2 压气机中空气压缩过程方程式

下面詳細說明，怎样从工作过程的基本方程式得到小偏差方程式。

压气机内压缩每 1 公斤空气所消耗的功用下式表示

$$L_K = \frac{k}{k-1} RT_B (\pi_K^{0.286} - 1) \frac{1}{\eta_K} \quad (4)$$

式中 T_K ——压气机前滞止气流的温度；

π_K ——压气机内总压增压比；

η_K ——按滞止气流计算的压气机絕热效率。

用微分法可求得 L_K 、 T_B 、 π_K 、 η_K 值的无限微小改变量之间的关系

$$dL_K = \frac{\partial L_K}{\partial T_B} dT_B + \frac{\partial L_K}{\partial \pi_K} d\pi_K + \frac{\partial L_K}{\partial \eta_K} d\eta_K$$

$$\text{或} \quad dL_K = \frac{k}{k-1} R \left[\frac{\pi_K^{0.286} - 1}{\eta_K} dT_B + \frac{T_B}{\eta_K} 0.286 \pi_K^{-0.714} d\pi_K - \frac{T_B}{\eta_K^2} (\pi_K^{0.286} - 1) d\eta_K \right]$$

这一方程式近似地可以認為也适用于有限增量，即設

$$\Delta L_K = \frac{k}{k-1} R \left[\frac{\pi_K^{0.286} - 1}{\eta_K} \Delta T_B + \frac{T_B}{\eta_K} 0.286 \pi_K^{-0.714} \Delta \pi_K - \frac{T_B}{\eta_K^2} (\pi_K^{0.286} - 1) \Delta \eta_K \right]$$

后一关系式表示绝对改变量 ΔT_B 、 $\Delta \pi_K$ 、 $\Delta \eta_K$ 与压缩功改变量 ΔL_K 之间的关系。增量系数中的值 T_K 、 π_K 和 η_K 相当于某一起始状态（零状态），增量就是针对这一状态求得的。将其数值代入后，使方程式化为下面的形式

$$\Delta L_K = a \Delta T_B + b \Delta \pi_K + c \Delta \eta_K$$

式中 a 、 b 、 c ——与 π_{K0} 、 T_{B0} 、 η_{K0} 有关的数值系数。但是，比較方便的办法是列出联系相对偏差量的方程式并加以利用。最簡單的做法如下。

方程式 (4) 的两边取对数, 得

$$\ln L_K = \ln \left(\frac{k}{k-1} R \right) + \ln \gamma_b + \ln (\pi_K^{0.286} - 1) - \ln \eta_K.$$

再将所得方程式微分, 并引用 $d(\ln x) = \frac{dx}{x}$:

$$\frac{dL_K}{L_K} = \frac{dT_b}{T_b} + \frac{0.286\pi_K^{0.286}}{\pi_K^{0.286}-1} \cdot \frac{d\pi_K}{\pi_K} - \frac{d\eta_K}{\eta_K}, \quad (5)$$

得相对偏差量之间的关系式, 相对偏差量采用符号

$$\frac{\Delta L_K}{L_K} \approx \frac{dL_K}{L_K} = \delta L_K; \quad \frac{\Delta T_b}{T_b} \approx \frac{dT_b}{T_b} = \delta T_b \text{ 等}$$

須指出, 在关系式 (5) 中没有原方程的常数系数。显然, 方程式 (5) 右边 $\delta\pi_K$ 的系数, 对于 π_K 的每个初值都将是数值。我们把这个数值叫做 π_K 对 L_K 的影响系数, 并用 K_1 表示。这样, 方程式 (5) 可写成下式

$$\delta L_K = \delta T_b + K_1 \delta\pi_K - \delta\eta_K, \quad (6)$$

$$\text{式中} \quad K_1 = \frac{0.286\pi_K^{0.286}}{\pi_K^{0.286}-1} \quad (7)$$

这就是以小偏差表示的压缩过程方程式的最后形式。应这样来理解以小偏差表示的方程式 (6): 假使压气机进口空气温度提高 1%, 则当其他条件不变时 ($\pi_K = \text{常数}$, $\eta_K = \text{常数}$, $\delta\pi_K = \delta\eta_K = 0$) 压缩功也增加 1%。同样, 当效率 η_K 增加 1% 时, 不论 π_K , T_b , η_K 的初值为何, 压缩功减小 1% (右边为负号)。

当 π_K 增大 1%, 则压缩功增加 $K_1\%$, 即压缩功的增量不仅与 π_K 的改变量, 而且与 π_K 的绝对值有关。圖 3 是按照公式 (7) 计算出的 $K_1 = f(\pi_K)$ 的圖綫。从圖中可以看出, 在 π_K 的低值区内影响系数 K_1 值要大于其在高值的 π_K 区的值, 即随着压气机增压比的增加, 增压比的变化对压缩功的影响减小。譬如, 当 $\pi_K = 2$ 时, 若 π_K 增大 1% 可增加压缩功大約 1.6%; 而当 $\pi_K = 10$ 时, 只不过提高 0.6%。用方程式 (6) 可以算出当 T_b , π_K , η_K 同时發生变化时功 L_K 的改变量, 并可求出当 $\delta L_K = 0$, 即 $L_K = \text{常数}$ 时, π_K , T_b 和 η_K 之间的关系。在后一种情况下