

相似理论在燃气涡轮发动机
调节系统设计中的应用

371494

国防工业出版社

相似理论在燃气涡轮发动机 调节系统设计中的应用

〔苏〕 IO. B. 柳鲍穆德罗夫

陈 琴 王金瑞 译
邢家瑞 米鹤颐 校

国防工业出版社

1975

出版说明

遵循伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，我们将俄文本《相似理论在燃气涡轮发动机调节系统设计中的应用》一书译成中文出版，供从事燃气涡轮发动机调节系统设计工作的同志们参考。

本书将航空发动机“相图”作为调节系统设计方法的基础。

航空发动机“相图”实际上是发动机静态特性和动态特性的图解表示，而且图上的参数都是发动机的气动相似参数（即换算参数），它描述了发动机特性与外界条件之间的本质关系，以相图为工具将相似理论应用于调节系统设计，作为例子，书中还对斯贝、J-79 等几种英美发动机调节系统和调节规律作了简述，此外简要介绍了涡轮泵供油系统。这些方面都可作为航空发动机调节系统设计（主要是方案设计）时的参数。因为在发动机工作外界条件变化范围日趋扩大的今天，运用相似理论设计适应发动机需要的调节系统无疑是必要的。

书中的设计方法多是取简单情况来讨论的，在设计发动机调节系统时，还有不少实际问题需要进一步解决。

对于本书中的错误，欢迎读者给予指正。

目 录

绪论	7
第一章 调节对象 (涡轮喷气发动机) 的动态特性	9
1.1 作为调节对象的燃气涡轮喷气发动机	9
1.2 涡轮喷气发动机相似规律和动态方程	10
1.3 涡轮喷气发动机的动态特性	14
1.4 作为涡轮喷气发动机“相图”的动态特性	17
1.5 动态特性的线性化	19
1.6 动态特性曲线族的稳定条件和确定特性的方法	20
1.7 双转子涡轮喷气发动机	24
1.8 各种不同类型的燃气涡轮发动机	33
第二章 调节规律	34
2.1 动态特性和调节任务	34
2.2 调节线和调节规律	37
2.3 有差和无差调节规律	41
第三章 调节器公式	45
3.1 调节规律和调节器公式	45
3.2 调节器公式的相似条件	47
3.3 组合及其选择和估计	50
3.4 调节器公式和调节器原理图	52
3.5 调节器的合理公式	56
第四章 状态调节	59
4.1 状态调节的任务	59
4.2 调节规律的解析表示	60

4.3	对某些组合的评价	63
4.4	状态调节器的综合公式	67
4.5	有差和无差状态调节	69
4.6	状态调节 (线性近似)	72
4.7	调节器的静差, 按状态的最佳化	75
4.8	某些状态调节器系统图	78
第五章 加速调节		82
5.1	加速调节的任务	82
5.2	加速轨迹的保证	83
5.3	加速调节规律	84
5.4	调节器公式的可能简化	87
5.5	组合	91
5.6	对组合的估价	94
5.7	双变量 (y 和 T) 函数的确定方法	98
5.8	按照组合的不变性分析有差调节线	102
5.9	实现无差加速调节规律的可能性及柔性的分析	107
5.10	按参数组合的恒定性而工作的时间加速调节器 柔性的分析和系数的选择	108
5.11	在时间加速调节器中燃油的初始突增	112
5.12	给定发动机的有差、无差和时间加速调节器的比较	114
5.13	对现有调节器的评论及其改进的可能性	116
5.14	加速调节器的几种原理图	118
5.15	起动调节	120
第六章 加力调节		122
6.1	加力调节的任务	122
6.2	加力调节规律的类型	125
6.3	加力调节规律和加力调节器公式	126
6.4	用于有差调节的组合和相似条件	126
6.5	无差组合和相似条件	128

6.6	适用于构成加力调节规律的组合	130
6.7	加力调节的动态	132
6.8	加力调节器线性方程系数的相似条件	135
6.9	加力调节器的几种原理图	137
第七章	压气机调节	140
7.1	压气机调节的任务	140
7.2	压气机几何形状的调节规律	143
7.3	压气机几何形状调节器公式	146
7.4	对几种调节器公式的分析	148
7.5	线性近似中的分析	150
7.6	几种压气机几何形状调节器的原理图	151
第八章	统一调节	153
8.1	统一调节的前提和任务	153
8.2	状态和加速的统一调节	154
8.3	几种调节任务的统一控制	159
8.4	现有的统一调节器	162
8.5	几种统一调节器的简图	163
第九章	可靠性 手控	167
9.1	调节可靠性的原则	167
9.2	建立可靠调节系统的条件	168
9.3	作为调节器的粗调子系统	171
9.4	精确校正系统	172
9.5	应用可靠性原则的几个例子	174
第十章	用空气传动的供油系统	180
10.1	空气传动的必要性	180
10.2	涡轮泵供油系统	182
10.3	发动机和供油系统的方程	184
10.4	稳定性和可控性	187
10.5	加速调节	190

10.6	加力调节.....	192
10.7	压气机几何形状的调节.....	193
10.8	几点补充.....	194
第十一章	涡轮喷气发动机调节的最佳系统	196
11.1	最佳系统的定义.....	196
11.2	空气式供油和调节系统（作为涡轮 喷气发动机最佳调节系统的一部分）	198
11.3	校正器和最佳系统.....	202
11.4	采用涡轮泵的几种调节系统.....	207
第十二章	研究方法	211
12.1	涡轮喷气发动机的物理模拟.....	211
12.2	涡轮喷气发动机的数学模拟.....	214
12.3	涡轮喷气发动机的动态特性.....	219
12.4	过渡过程的计算和对调节规律的评定.....	225
12.5	涡轮泵调节系统的简化计算方法.....	229
参考文献		232

绪 论

随着燃气涡轮发动机的广泛应用和其外界工作条件变化范围的扩大，使这些发动机调节系统的合理设计更加复杂化，对于航空发动机尤其是如此。

在这些情况下，惯用的调节系统设计原理已远不能保证调节的必要精度、系统的可靠性及调节质量。它们需用根据调节对象（燃气涡轮发动机）的主要特性（即其特性与外界条件之间的本质关系）所建立的原理来替换。

在外界条件变化时，作为调节对象的燃气涡轮发动机的特性如此变化：在按气动相似理论公式引出的换算坐标中，发动机特性对所有外界条件来说都是唯一的，所以调节系统的特性在外界条件变化时也应这样变化，在换算坐标中保持其特性不变。

本书讲述了设计燃气涡轮发动机调节系统时采用相似理论的实际方法。本书的任务是：研究如何创造性应用这些方法及指出燃气涡轮发动机调节系统的一般发展方向。

为了表示调节对象（发动机）的特性，采用所谓“动态特性”来作为一种便利工具。

根据发动机每个具体型号的动态特性可以求得所有可能的调节规律的解析表示，借助相似理论的公式和规则可以选择合适的调节器公式和原理图。

发动机状态调节任务的解决不取决于某种事先给定的原

理图，而是根据所提出的任务来设计所需的调节原理图。

根据所述加速调节任务的解决方法，可以选择最佳调节器，以保证发动机加速时间最短。

所研究的加力调节任务的解决方法包括所有可能的调节办法，并且能对发动机选择出最好的加力调节原理图和参数。

本书对压气机的调节问题，也进行了类似的一般性的讨论。

本书研究了把执行不同任务的调节器合并为一个调节器的各种方法。

书中论述了保证高调节可靠性系统的设计原理，这样的系统应包括有按相似规律工作的手控子系统。

作为高精度和高可靠性的调节系统的发展趋势的例子，研究了具有调节器性质的和就其物理性质来说是按相似规律工作的空气式的供油系统。再附加一个具有限定工作范围的调节器，这种系统就可以作为燃气涡轮发动机最佳调节系统的可能例子。这时，空气系统保证了调节的可靠性和自然最佳化，而调节器则保证了调节的高精度。

在本书中还补充研究了某些与主题有密切联系的方法问题。

第一章 调节对象（涡轮喷气发动机）的动态特性

1.1 作为调节对象的燃气涡轮喷气发动机

所有类型的燃气涡轮发动机都包括有主要组成部分——涡轮-压气机。实际上，燃气涡轮发动机的全部调节任务都归结为保证涡轮-压气机的调节。因此，不单个研究每种类型的燃气涡轮发动机，而只研究作为调节对象的装有喷管的涡轮-压气机（涡轮喷气发动机）。

图 1.1 是涡轮喷气发动机示意图；图中并表示出了燃气空气通道的特征截面。燃气和空气的压力及温度，分别用标有“特征截面”脚注的字母 $p_{\bullet}$ 和 T 来表示；空气和燃油流量分别用标有“B”或“T”脚注的字母 G 来表示。

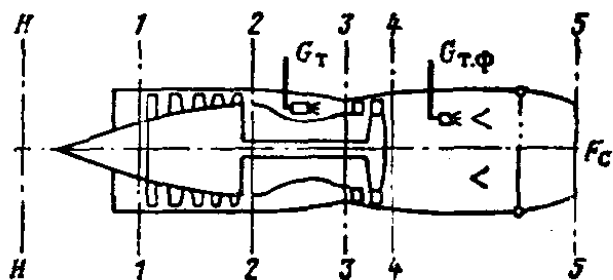


图1.1 涡轮喷气发动机示意图

作为调节对象的涡轮喷气发动机可以表示成一个环节，其输入座标为燃油流量 G_T ，而输出座标为涡轮压气机转子转

● 这里是指阻滞气流的压力和温度。

速 n 、燃气温度 T_3 以及我们感兴趣的其他参数。

为了描述这个对象的动态特性，通常写出发动机所有部件的完整方程组，将所得的方程线性化并对我们感兴趣的参数（例如转速）求解这些方程。如果在给定状态有限邻域内用线性近似的方法研究系统的运动，这样一般来说是足够的。

但是，在实际研制中最重要的不是小偏离范围的过渡过程，而是在工况大范围变化中〔如加速和节流（减速）、接通加力，等等〕发动机状况的变化过程。

为了在状态变化的所有范围内描述作为调节对象的发动机的行为，线性研究方法不大适合，因此，就有必要探讨发动机在其特性变化的所有范围内作为非线性系统时描述其动态特性的方法。这时，发动机动态特性的表达形式，可以是解析的，亦可以是图解式的。

表示动态特性的图解法首先被用于涡轮喷气发动机，并且其确定方法是由实验得来的。

1.2 涡轮喷气发动机相似规律和动态方程

建立涡轮喷气发动机动态特性可能性的设想，是以对发动机单个部件方程的结构分析为依据的。

众所周知，为了说明发动机主要部件叶片机（压气机、涡轮）的特性，所采用的最好不是物理（气动）参数，而是这些参数与外部条件参数的综合。例如，对压气机来说，用压气机出口空气压力与进口空气压力之比（ $\pi_{\kappa} = p_2/p_1$ ）就比单纯用出口压力 p_2 更具有特征性。如果试图用物理参数来表示压气机的特性，那么为了说明它，就需要无数个图（各种进口压力都有一个图）。然而，如果采用相对参数（用 π_{κ} 代

替 p_2), 那么用一个图就足够了。因此, 叶片机特性用根据气动相似理论构成的相对参数来建立。

因为涡轮喷气发动机的主要组成部件就是叶片机, 所以涡轮喷气发动机部件方程用根据气动相似理论所采用的那些相对量来表示, 而对发动机的非叶片机的那些部件来说, 将其一般方程变换成由表示叶片机方程的相对量组成的方程。

压气机将有三个方程, 其中两个分别表示增压比和增温比, 第三个表示功率:

$$\begin{aligned}\frac{p_2}{p_1} &= f_1\left(\frac{G_B \sqrt{T_1}}{p_1}, \frac{n}{\sqrt{T_1}}\right) \\ \frac{T_2}{T_1} &= f_2\left(\frac{G_B \sqrt{T_1}}{p_1}, \frac{n}{\sqrt{T_1}}\right) \\ \frac{N_K}{p_1 \sqrt{T_1}} &= f_3\left(\frac{G_B \sqrt{T_1}}{p_1}, \frac{n}{\sqrt{T_1}}\right)\end{aligned}$$

将燃烧室的热容量和压力损失方程人为地写成压气机方程中已经有的相对量的形式。这样合并结果所形成的组合 $G_T/p_1 \sqrt{T_1}$, 我们称之为专门建立的新相对值。

燃烧室方程将具有下列形式:

$$\begin{aligned}G_B \frac{\sqrt{T_1}}{p_1} \left(\frac{T_3}{T_1} - \frac{T_2}{T_1} \right) &= \frac{H_u}{c_p} \frac{G_T}{p_1 \sqrt{T_1}} \\ \frac{p_3}{p_1} &= \frac{p_2}{p_1} f_5 \left(\frac{G_B \sqrt{T_1}}{p_1}, \eta_z \frac{G_T}{p_1 \sqrt{T_1}} \right)^{\bullet}\end{aligned}$$

● 假设: η_z 值或者是恒定的, 或者仅与发动机换算参数有关。

我们研究的涡轮方程，是在涡轮“堵塞”即涡轮导向器中出现超临界流动状态下的方程，即

$$\frac{G_B \sqrt{T_1}}{p_1} \frac{p_1}{p_3} \sqrt{\frac{T_3}{T_1}} = \text{const}$$

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_1} f_7\left(\frac{p_4}{p_1}; \frac{p_3}{p_1}\right)$$

$$\frac{N_\tau}{p_1 \sqrt{T_1}} \frac{p_1}{p_3} \sqrt{\frac{T_1}{T_3}} = f_8\left(\frac{n}{\sqrt{T_1}} \sqrt{\frac{T_1}{T_3}}, \frac{p_4}{p_1}; \frac{p_3}{p_1}\right)$$

不采用通常稳态计算时所用的压气机和涡轮功率平衡方程，而采用考虑到克服转子惯性所消耗的功率的方程，即

$$\frac{N_\tau}{p_1 \sqrt{T_1}} - \frac{N_\kappa}{p_1 \sqrt{T_1}} = \text{const} \cdot \frac{n}{\sqrt{T_1}} \cdot \frac{\dot{n}}{p_1}$$

可以看出，这里也同样形成新的组合 $\frac{\dot{n}}{p_1}$ ；这样作是为了将方程的其余部分写成前面方程采用过的相对量；我们认为新量 $\frac{\dot{n}}{p_1}$ 成立并称之为相对角加速度。

最后写出喷管流动方程（在超临界流动状态时）：

$$G_B \frac{\sqrt{T_1}}{p_1} \frac{p_1}{p_4} \sqrt{\frac{T_4}{T_1}} = \text{const} \cdot F_c$$

十个方程构成的方程组中包含十二个变量：

$$\frac{p_2}{p_1}; \frac{T_2}{T_1}; \frac{G_B \sqrt{T_1}}{p_1}; \frac{n}{\sqrt{T_1}}; \frac{N_\kappa}{p_1 \sqrt{T_1}}; \frac{p_3}{p_1};$$

$$\frac{T_3}{T_1}; \frac{G_\tau}{p_1 \sqrt{T_1}}; \frac{p_4}{p_1}; \frac{T_4}{T_1}; \frac{N_\tau}{p_1 \sqrt{T_1}}; \frac{\dot{n}}{p_1}$$

由此看出，这些变量中的每一个变量值是其中被取为独立变量的任何两个变量的函数。

最好根据下面考虑取 $G_r/p_1\sqrt{T_1}$ 和 $n/\sqrt{T_1}$ 作为独立变量，即其中第一个包括输入量 (G_r)，而第二个包括输出量 (n)。

实际上最好不用相对值，而用与其成比例的其它值，例如，不用 $\frac{n}{\sqrt{T_1}}$ ，而用比它大 $\sqrt{T_0}$ 倍的值 ($T_0 = 288^\circ\text{K}$ ——按国际标准大气，标准地面空气温度)，即

$$n\sqrt{\frac{T_0}{T_1}} = \frac{n}{\sqrt{T_1/T_0}}$$

不用 $p_2/p_1 = \pi_\kappa$ 值，最好用比它大 p_0 倍的值 (p_0 ——标准地面大气压力，等于 760 毫米水银柱)，即

$$p_2\frac{p_0}{p_1} = \frac{p_2}{p_1/p_0}$$

用符号 p 和 T (没有脚注) 表示新相对值 p_1/p_0 和 T_1/T_0 。这样可将前面所写的量改写为

$$\frac{n}{\sqrt{T_1/T_0}} = \frac{n}{\sqrt{T}} \text{ 和 } \frac{p_2}{p_1/p_0} = \frac{p_2}{p}$$

或简单写成

$$\frac{n}{\sqrt{T}} = n_0 \text{ 和 } \frac{p_2}{p} = p_{20}$$

我们称这些数值为换算转速和换算压气机出口压力，而脚注“0”为换算脚注。换算量之所以比相对量方便，是因为在标准地面条件下， $n_0 \equiv n$ 和 $p_{20} \equiv p_2$ ，即换算量等于物

理量。

与所研究的两个换算量相类似，发动机部件方程中包括的所有其它相对量，都应用以下换算量来代替：压气机出口

温度 $T_{20} = \frac{T_2}{T}$ ；空气流量 $G_{B0} = G_B \frac{\sqrt{T}}{p}$ ；压气机功率

$N_{K0} = \frac{N_K}{p \sqrt{T}}$ ；燃气温度 $T_{30} = T_3 / T$ ；燃油流量 G_{T0}

$= \frac{G_T}{p \sqrt{T}}$ ；加速度 $\dot{n}_0 = \dot{n} / p$ ，等等。

建立了新的术语之后，前面对部件方程组和其解法所作的结论就很清楚了：发动机任何一个换算参数（在一般情况下用 x_{i0} 来表示）都是两个自变量（ n_0 和 G_{T0} ）的函数。

1.3 涡轮喷气发动机的动态特性

发动机所有换算量（参数）与换算转速和换算燃油流量的关系，都可以对每一个 x_i 参数在横座标为 n_0 、纵座标为 G_{T0} 的座标上以 x_{i0} 的等值曲线族的形式图解表示出来。这种曲线图称为涡轮喷气发动机的动态特性曲线。

在涡轮喷气发动机动态特性上首先标有换算加速度的等值曲线族（或叫加速度曲线族） $\dot{n}_0 = \text{const}$ 。这种曲线族对确定发动机转速变化来说是必需的。但是，因为转速是动态特性的横座标，所以加速度曲线族对确定和计算我们感兴趣的发动机所有其它参数随时间变化来说，也是必要的。

除加速度曲线族外，在发动机动态特性曲线上还绘有：等温线族 $T_{30} = \text{const}$ （在计算过渡过程时为辨别发动机过热危险状态用的）；压气机出口气流压力的等压线族 $p_{20} = \text{const}$

(这一曲线族之所以需要是因为 p_2 值在许多调节器中作为信号引入, 在计算过渡过程时必须知道它); 空气流量等值线族 (发动机参数与进气道参数匹配时需要) 以及必须有的喘振边界。

根据本章开始所述的假设 (涡轮导向器中超临界流动状态), 喘振边界可以由压气机特性转到发动机动态特性图上。实际上, 压气机喘振边界上的任意一点都由一对参数来决定, 例如, 由 $n/\sqrt{T_1}$ 和 $\pi_k = p_2/p_1$ 参数值 (即与 n_0 和 p_{20} 成比例的量) 来决定。因为在发动机动态特性上有 p_{20} 曲线族, 而 n_0 又是其横座标, 因而所提到的点可以移动, 也就是说, 整个喘振边界都可以移动。

典型涡轮喷气发动机动态特性示于图 1.2。在动态特性上标出的加速度曲线族是方程 $\dot{n}_0 = f(n_0, G_{T0})$ 的图解表示, 它在特性的所有变化范围内和所有飞行条件下用输入为 G_{T0} 、输出为 n_0 的环节来表示发动机。

另一方面, 方程

$$\dot{n}_0 = f(n_0, G_{T0})$$

是一阶非线性微分方程, 其解 (即方程可求积分) 只有在始点和终点条件 $n_{0\text{НАЧ}}$ 和 $n_{0\text{КОН}}$ 明确后, 而最主要的是在积分路线确定后, 亦即动态特性横座标和纵座标间的关系 (或其曲线族的参数和座标之间的关系) 明确后, 才能获得。

实际上, 联立解加速度动态特性方程 $\dot{n}_0 = f(n_0, G_{T0})$ 和积分路线 (轨迹) 方程 $G_{T0} = \varphi(n_0)$, 并将 G_{T0} 由第二方程代入第一方程● 得:

● 原文误为: 并将 G_{T0} 由第一方程代入第二方程。——译者

$$\dot{n}_0 = f[n_0, \varphi(n_0)]$$

即一阶非线性微分方程，其中有 $n_0 = f(t_0)$ 解（如给定其始点和终点，则过程的换算转速曲线图是完全确定的）。

积分路线完全一样的过渡过程是相似过程，确切地讲，只是这些过程包含在相同始点（ $n_{0\text{нач}}$ ）和相同终点（ $n_{0\text{кон}}$ ）的相似稳态之间的这一段是相似的。

图 1.3 所示为沿同样轨迹（积分路线） $ABBF$ 变化的两个过程在动态特性曲线平面上的曲线图。但是这里整个过程 ABB 与过程 BBF 不相似，因为这两个过程的始点（ A 和 B ）和终点（ B 和 F ）状态是不一样的。只有在这两个过程的共同段（ BB ）上过程才是相似的。

对于各种相似过渡过程来说，换算转速曲线（即换算转速和换算时间的关系）是完全重合的（尽管物理转速曲线可能不同）。过程的换算时间 t_0 等于物理时间除以时间换算系

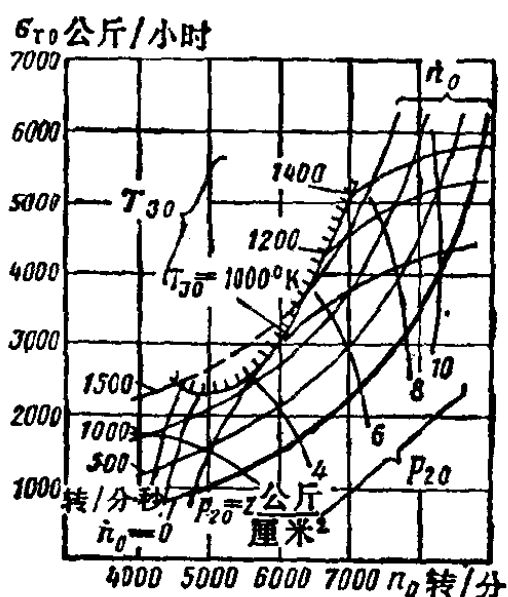


图 1.2 典型涡轮喷气发动机的动态特性曲线

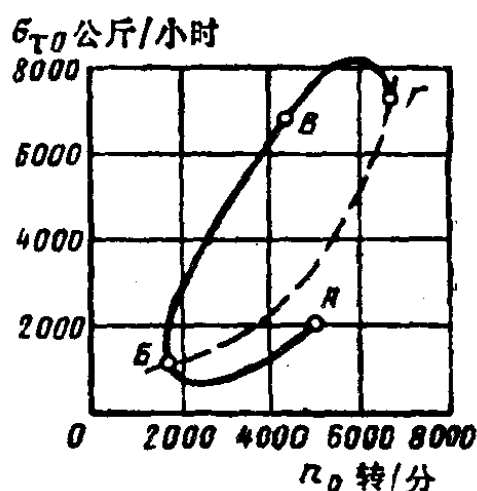


图 1.3 类似和相似过渡过程（虚线表示稳定状态）