

郭正渠 编著 机械工业出版社

燃气轮机 自动控制 系统设计



本书首先介绍燃气轮机（简称燃机）自动控制系统中常用的电、液元件，燃机及其负载的动态特性，并结合实例阐述了选择燃机主控方案与控制规律的基本原则，以及系统静、动态特性的分析及设计方法。此外还简要介绍了燃机主控制系统的数字仿真与模拟，燃料伺服系统的分析与设计，以及燃机的程序及保护系统。

本书可供从事燃机自动控制系统设计、制造、调试等方面的工程技术人员阅读，也可供高等院校有关专业的学生参考。

燃气轮机自动控制系统设计

郭正渠 编著

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

·河北省永清县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ · 印张 $44^{1/2}$ · 插页 2 · 字数 1097 千字

1986 年 12 月北京第一版 · 1986 年 12 月北京第一次印刷

印数 0,001—1,160 · 定价 10.70 元

*

统一书号：15033 · 6214

前 言

燃气轮机是近几十年发展起来的一种新型动力机械。它可作为发电、舰船和机车的动力,以及拖动压缩机和泵等。燃气轮机的重要特点之一是其自动化水平高于一般动力机械。

编写《燃气轮机自动控制系统设计》一书的目的在于给从事燃气轮机自动控制的工程技术人员提供一本比较系统、实用的燃气轮机自动控制系统设计资料。因此,一方面要照顾到从事燃气轮机设计、制造、使用、维修等方面的工作人员了解燃气轮机自动控制概貌的需要,同时还要比较深入地介绍各种类型燃气轮机自动控制系统的分析、设计方法。

本书共分四篇。第一篇简要介绍燃气轮机自动控制系统中使用的电气、电子、液压元件及部件的动态特性。第二篇着重介绍各类燃气轮机及其负载的动态特性。为了分析元件及燃气轮机的动态过程,对其物理过程及有关定理均作了简要的介绍。这对于建立正确的数学模型将起重要作用。第三篇着重介绍发电、拖动压缩机用、机车及舰船用燃气轮机的几种典型主控制系统的分析与设计方法。本书重点在于结合燃气轮机控制的特点,运用基本理论阐述燃气轮机自动控制系统分析、设计的具体问题。因此对有关的自动控制理论不作详细阐述与推导。在这篇中还简要介绍了燃气轮机主控制系统的模拟与数字仿真,燃料伺服系统的分析与设计方法。第四篇简要介绍燃气轮机启动、停机程序及保护系统的设计方法。全书的重点为第二、三两篇。

在编写本书的过程中,得到各有关工厂、单位,各有关领导,以及何立人、倪维斗等同志的帮助。某些燃气轮机热力循环过程及其动态参数的算例引自章素华、谢梅蓉等同志的计算料资。本书承费开同志作了仔细的校阅及审查,逐字逐句给予修改。在此表示深切的谢意!

由于作者水平所限,本书难免有错误之处,希望读者给予指正。

作 者

1981年11月

符 号 表

A ——断面积	N_c ——功率
A ——功热当量 ($A = \frac{1}{J}$)	p ——气体或液体的压力
a ——音速	Q ——流体的体积流量
B ——燃料流量	Q_h ——热量
$B(\omega)$ ——幅频特性	R_0 ——气体常数 (或 $R = R_0 g$)
c_v ——定容比热	T ——温度 (K)
c_p ——定压比热	T ——时间常数
DSP ——数字给定点	t ——时间
D ——动阻尼系数	t_k ——振荡时间
E_0 ——电源电压	t_s ——过渡过程时间
e ——电势	t_m ——最大超调时间
F ——力	$U(\omega)$ ——实频特性
f ——燃料空气比	u ——内能
f_k ——振荡频率	$u = \frac{\Delta U}{U_0}$ ——电压的相对值
f ——通流面积	V ——电压
G ——流体的重量流量	v ——流体的流速
H_u ——发热量	$V(\omega)$ ——虚频特性
I ——电流 (有效值)	V_{cs} ——电子控制电压
i ——电流 (瞬时值)	W ——功
i ——热焓	$W(s)$ ——传递函数
i^* ——滞止焓	$W(s)$ ——传递矩阵
J ——转动惯量	x ——位移
J ——热功当量 ($J = 427 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{kcal}$)	Z ——阻抗
K ——绝热指数	α ——转角
L ——电感	$\bar{\alpha} = \frac{\Delta \alpha}{\alpha_0}$ ——转角的相对值
L_k ——压缩功	γ ——比重 (重度)
M ——力矩	δ ——膨胀比
M_T ——透平力矩	ε ——压比
M_k ——压气机力矩	ε ——误差
M_e ——燃气轮机发出的力矩	ξ ——阻尼系数
M_g ——拖动发电机所需力矩	η ——效率
N_T ——透平功率	η ——绝对粘度
N_k ——压气机功率	θ ——转角
n ——转速	$\theta = \frac{\Delta T}{T_0}$ ——绝对温度的相对值
n_s ——振荡次数	

$$\lambda_s = \frac{\Delta N_s}{N_{s0}} \text{——发电机发出功率的相对值}$$

μ —— 动粘度

μ —— 窗孔的流量系数

$$\mu = \frac{\Delta B}{B_0} \text{——燃料流量的相对值}$$

ρ —— 流体的密度 $\left(\rho = \frac{g}{\gamma} \right)$

$$p = \frac{\Delta p}{p_0} \text{——压力的相对值}$$

σ_s —— 最大超调量

ν —— 气体的比容 $\left(\nu = \frac{1}{\gamma} \right)$

Φ —— 磁通量

$$\varphi = \frac{\Delta n}{n_0} \text{——转速的相对值}$$

$\varphi(\omega)$ —— 相频特性

$$\chi = \frac{\Delta x}{x_0} \text{——位移量 } \Delta x \text{ 的相对值}$$

ψ —— 运动阻力系数

Δ —— 间隙

Δ_m —— 最大超调量

ω_f —— 转折频率

ω_n —— 固有频率

$$\mathcal{M}_s = \frac{\Delta M_s}{M_{s0}} \text{——负载力矩相对值}$$

$$\mathcal{R} = \frac{\Delta R}{R_0} \text{——电阻的相对值}$$

目 录

绪 论

§ 0-1 燃气轮机及其自动控制	1	§ 0-4 燃气轮机自动调节的任务	7
§ 0-2 燃气轮机自动控制系统的组成	3	§ 0-5 燃气轮机自动调节的动态性能	8
§ 0-3 燃气轮机主控制系统的组成	4	§ 0-6 燃气轮机自动控制系统的设计	10

第一篇 燃气轮机自动控制系统常用元件的动态特性

第一章 自动控制元件的动态方程式

§ 1-1 RLC 电路作为线性元件的动态 方程式	13
§ 1-2 元件的非线性及其线性化方法	14
§ 1-3 元件的原理框图	17

第二章 拉氏变换及其在研究元件 和系统动态特性中的应用

§ 2-1 拉氏变换的基本概念	19
§ 2-2 拉氏变换应用于元件的动态 过程分析	22

第三章 自动控制元件的传递函数 与频率特性

§ 3-1 传递函数	27
§ 3-2 频率特性	30
§ 3-3 元件及系统的典型环节	33
§ 3-4 元件或环节串联的对数频率特性 绘制方法	34
§ 3-5 多变量元件或系统的传递矩阵	36

第四章 RLC 网络的动态特性 分析与设计

§ 4-1 无源二端 RLC 网络的设计方法	37
§ 4-2 无源四端网络的特性	41
§ 4-3 无源四端网络的设计方法	43

第五章 半导体电路及电执行元件 的动态特性

§ 5-1 晶体管放大电路的特性分析	46
§ 5-2 使用直流运算放大器电路实现动态 调节规律	50
§ 5-3 直流电动机的动态特性	57

第六章 液压控制元件的动态特性

§ 6-1 流体流动的基本理论	67
§ 6-2 液体的稳态流动与液压元件的基本 单元——液阻与液容	72
§ 6-3 喷嘴挡板式液压放大器	78
§ 6-4 滑阀式液压放大器	83
§ 6-5 电液伺服阀	92

第七章 液压拖动元件的动态特性

§ 7-1 油泵及液压马达	106
§ 7-2 阀控燃油流量分配器	114
§ 7-3 液压油源的蓄压器	117

第八章 用实验法求取频率特性

§ 8-1 用实验法直接求取频率特性	120
§ 8-2 由阶跃输入作用下的输出过渡过程 求取频率特性	125
§ 8-3 由频率特性求取传递函数	128

第九章 脉冲过渡函数与 z 变换

§ 9-1 脉冲元件与理想开关	130
§ 9-2 z 变换和 z 反变换	131
§ 9-3 z 传递函数	134
§ 9-4 用数值法求取连续线性元件及系统的 过渡过程	136

第十章 用数值法分析非线性环节的 动态过程

§ 10-1 非线性特性	141
§ 10-2 非线性元件及系统的框图	141
§ 10-3 用数值法分析连续非线性元件及 系统的过渡过程	143
§ 10-4 断续非线性系统的过渡过程	146

第二篇 燃气轮机及其负载的动态特性

第十一章 气体流动的基本理论与 燃气轮机的热力循环

- § 11-1 热力学的基本理论149
- § 11-2 气体在绝热、无摩擦情况下的
稳态流动155
- § 11-3 气阻、气容与气惯性159
- § 11-4 燃气轮机的热力循环及其工作过程
的能量转化165
- § 11-5 燃气轮机热力循环指标与计算169

第十二章 燃气轮机-发电机组的 动态特性分析

- § 12-1 同步发电机及其负载的动态特性179
- § 12-2 单轴燃气轮机-发电机组的联合
运行特性184
- § 12-3 单轴燃气轮机简化为一阶惯性环节
的分析方法192
- § 12-4 单轴燃气轮机简化为线性微分方程
组的分析方法198
- § 12-5 按热力循环过程排列单轴燃气轮机
的动态环节217
- § 12-6 分轴燃气轮机-发电机组的联合
运行特性221
- § 12-7 分轴燃气轮机简化为两个动态环
节的分析方法223

- § 12-8 分轴燃气轮机简化为线性微分方程
组的分析方法229

- § 12-9 按热力循环过程排列分轴燃气轮机
的动态环节240

第十三章 燃气轮机-压缩机-输气 管道的动态特性分析

- § 13-1 输气管道增压站用压缩机及管道
的特性244
- § 13-2 单轴燃气轮机-压缩机-输气管道的
简化特性分析方法252
- § 13-3 单轴燃气轮机-压缩机-输气管道简
化为线性方程组的分析方法254
- § 13-4 带二级可调喷嘴的分轴燃气轮机-
压缩机组简化为线性方程组的分
析方法258
- § 13-5 按热力循环过程排列带二级可调喷
嘴的分轴燃气轮机动态环节274

第十四章 机车及舰船

燃气轮机的动态特性

- § 14-1 机车用单轴燃气轮机-直流发电机-
牵引电动机组的动态特性278
- § 14-2 机车用分轴燃气轮机的动态特性287
- § 14-3 舰船用分轴燃气轮机的动态特性293
- § 14-4 多轴燃气轮机的特性299

第三篇 燃气轮机主控制系统的分析与设计

第十五章 燃气轮机-发电机组 转速调节系统的设计

- § 15-1 燃气轮机转速调节的基本任务305
- § 15-2 转速调节系统的静特性307
- § 15-3 燃气轮机液压转速调节系统的静特
性计算举例311
- § 15-4 燃气轮机电-液转速调节系统静特
性计算举例323
- § 15-5 燃气轮机电-液转速调节系统的框
图与传递函数327
- § 15-6 燃气轮机电液转速调节系统的动
态特性333
- § 15-7 机组转速过渡过程的品质指标及
转速调节系统的参数整定338

- § 15-8 单轴燃气轮机电液转速调节系统
的设计343

- § 15-9 单轴燃气轮机液压调速系统的
动态特性分析346

第十六章 并入电网运行的燃气轮 机-发电机组自动调节系统的 分析与设计

- § 16-1 燃气轮机-发电机组并入电网运行
和数字给定电路352
- § 16-2 机组并入电网运行时转速调节系统
的动态特性分析357
- § 16-3 燃气轮机-发电机组的工频调节
系统363
- § 16-4 燃气轮机-发电机组工频调节系统

的动态特性分析举例	367
-----------------	-----

第十七章 燃气轮机-发电机组主 控制系统的分析与设计

§ 17-1 多通道低选的主控制系统	371
§ 17-2 启动控制回路的工作原理	375
§ 17-3 启动控制回路的特性分析 计算举例	381
§ 17-4 温度控制系统的组成与工作原理	386
§ 17-5 测量排气温度的修正	388
§ 17-6 温度控制回路静特性的计算分析	397
§ 17-7 单轴燃气轮机温度控制系统各环节 的传递函数	401
§ 17-8 单轴燃气轮机温度控制系统的动特 性分析举例	407
§ 17-9 发电用分轴燃气轮机的控制特点与 主控系统实例	410
§ 17-10 航机改装发电用机组的控制方案	415

第十八章 输气管道压缩机用燃气 轮机主控制系统的分析与设计

§ 18-1 燃气轮机-压缩机组调速范围 的确定	419
§ 18-2 单轴燃气轮机-压缩机组的主控制 系统的选择	423
§ 18-3 单轴燃气轮机-压缩机组主控制系 统的分析设计举例	426
§ 18-4 带有二级可调喷嘴的分轴燃气轮机 的控制方案	435
§ 18-5 带有二级可调喷嘴的分轴燃气轮机 主控制系统动态特性的分析	440
§ 18-6 带有二级可调喷嘴的分轴燃气轮机 主控制系统的设计	453

第十九章 机车与舰船用燃气轮机 主控制系统的分析与设计

§ 19-1 机车用单轴燃气轮机控制的特点与 控制方案	460
§ 19-2 机车用单轴燃气轮机控制系统的静 特性计算举例	467
§ 19-3 机车用单轴燃气轮机控制系统的动 态特性分析	474
§ 19-4 机车分轴燃气轮机控制系统特性的 分析与设计	478
§ 19-5 舰船燃气轮机的控制要求与特点	490

§ 19-6 舰艇燃气轮机推进控制系统方案	494
§ 19-7 轮船的燃气轮机推进控制系统 方案	502
§ 19-8 舰船分轴燃气轮机控制系统的特性 分析	506

第二十章 回热机组及燃气轮机-汽轮 机联合循环控制系统的方案与特性分析

§ 20-1 回热机组中的回热器方程	517
§ 20-2 回热机组的控制方案及动态特性	524
§ 20-3 燃气轮机-汽轮机联合循环装置及 其控制	533
§ 20-4 联合循环机组的控制要求与 控制方案	535
§ 20-5 联合循环装置负载分配控制系统的 特性分析和设计方法	538
§ 20-6 联合循环装置的动态模型	540

第二十一章 自动控制元件及 系统的仿真

§ 21-1 相似理论与仿真	552
§ 21-2 线性元件的模拟	553
§ 21-3 单变量非线性函数的模拟	555
§ 21-4 双变量非线性函数的模拟	561
§ 21-5 系统模拟的基本方法	564
§ 21-6 用数字计算机计算系统的频率特性, 选择系统的有关参数	569
§ 21-7 线性系统的数字仿真	582
§ 21-8 非线性系统的数字仿真及数字-模 拟联合仿真实验	596

第二十二章 液体燃料电液伺 服系统的分析与设计

§ 22-1 带燃油分配器的电液伺服系统的工 作原理	599
§ 22-2 液体燃料伺服系统各环节的静态及 动态特性	601
§ 22-3 液体燃料伺服系统的动态特性分析 与设计	612

第二十三章 气体燃料电液 伺服系统的分析

§ 23-1 气体燃料伺服系统的工作原理	616
§ 23-2 气体燃料控制阀伺服回路的特性参 数及各环节的动态方程式	618
§ 23-3 气体燃料控制阀伺服回路的动态特	

性分析	630	§ 23-4 双燃料切换电路的工作原理	636
-----------	-----	---------------------------	-----

第四篇 燃气轮机启停程序及保护系统的设计

第二十四章 程序单元电路

与启停程序设计

§ 24-1 逻辑代数的常用基本运算法则	639
§ 24-2 逻辑电路的符号	641
§ 24-3 半导体逻辑单元电路	644
§ 24-4 燃气轮机的程序控制系统设计 简介	651
§ 24-5 燃气轮机启动程序控制框图 设计举例	652
§ 24-6 燃气轮机的停机程序控制框图 设计举例	660

第二十五章 燃气轮机的程序

控制接线图设计

§ 25-1 程序控制接线图的标示方法	662
§ 25-2 燃气轮机程序控制接线图的	

设计举例	665
------------	-----

第二十六章 燃气轮机的保护系统

§ 26-1 超速保护回路	670
§ 26-2 超温保护回路	673
§ 26-3 火焰检测回路	676
§ 26-4 振动保护回路	678
§ 26-5 燃气轮机机组保护系统框图与主 保护电路	683

第二十七章 燃气轮机自动控制的发展

§ 27-1 使用控制计算机完成燃气轮机启 停程序、监控的原则方案	691
§ 27-2 使用微处理机进行故障预报	697
§ 27-3 数字式燃气轮机主控制系统的 原则方案	698

参考文献	700
------------	-----

绪 论

§ 0-1 燃气轮机及其自动控制

在航空涡轮发动机发展之后，按其基本工作原理发展了燃气轮机，成为一种新型的动力机械。

为了分析燃气轮机的自动控制问题，首先简要地介绍一下燃气轮机的工作原理、发展概况及其自动化概况。

（一）燃气轮机的基本工作原理

燃气轮机的类型很多，现仅以单轴简单循环的燃气轮机为例，说明其工作原理。燃气轮机由压气机、燃烧室和透平三大部件组成。图 0-1 为简单循环的燃气轮机工作原理图。

由图 0-1 可以看出：压气机 C 从大气吸入空气，经过轴流式压气机各级，把空气压缩到较高的压力。同时，空气的温度也随着上升。压气机 C 由透平 T 带动，因此压气机是透平的负载。被压缩的高压空气送入燃烧室，与喷入燃烧室的燃料 μ 混合，并经过燃烧成为高温、高压燃气。高温高压的燃气流入透平 T 膨胀做功，推动透平转动，并带动压气机及外负载，如发电机等，使之高速旋转。这样就把天然气或柴油等气体或液体燃料的化学能，部分转化为机械能。

透平排出的燃气，其温度及压力虽已大大降低，但为了充分利用这部分余热，可将余气引入回热器，再排入大气。回热器利用余热加热蒸气可以组成燃气轮机-汽轮机联合循环机组。

透平发出的机械能有 2/3 左右用来带动压气机，其余的机械能则通过输出轴带动外负载。

为了保证燃气轮机组正常工作，机组中还有很多辅机系统：如启动系统、润滑油系统、液压控制用油系统、燃料系统、冷却水系统等。为使机组各系统有效地工作，燃气轮机组中都有较为完善的自动控制系统，对各辅机系统及主机进行控制及保护。

（二）燃气轮机发展简况

航空工业中的涡轮喷气发动机、涡轮发动机及涡轮发动机，从其工作原理来看，可以作为燃气轮机的一大类别。涡轮发动机首先在航空工业中取代活塞发动机，得到了广泛的应用。到四十年代初，涡轮发动机作为动力机械应用于地面。1939 年瑞士制造成功世界上第一台电站发电用燃气轮机。五十年代中期，燃气轮机作为新兴的动力机械得到广泛的使用和推广。燃气轮机的发展与发达的资本主义国家广泛使用石油和天然气作为主要能源相联系着。使用石油和天然气作为能源比较方便，投资收效快。据不完全统计，1957 年非航空用

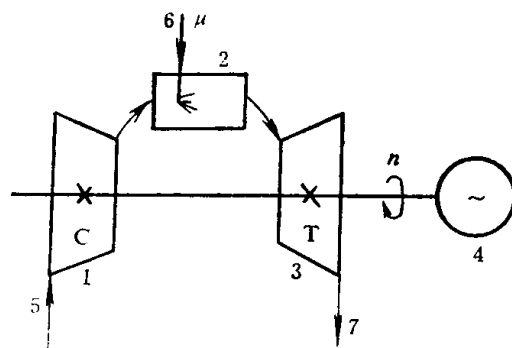


图 0-1 简单循环燃气轮机的工作原理图

1—压气机 C 2—燃烧室 3—透平 T 4—发电机（外负载）
5—空气进气 6—燃料量 μ
7—排气

燃气轮机只有 300 万 kW, 1964 年为 950 万 kW, 到 1974 年则增加到 13100 万 kW。近十年内增长 13 倍以上。目前约有 20 个国家, 100 多家工厂从事燃气轮机的设计、研究和制造, 燃气轮机的品种、型号有 800 种左右。

燃气轮机的使用领域很广, 遍及发电、天然气和原油输送、铁路机车、舰船等各方面。

燃气轮机-发电机组可以组装成快装机组, 占地面积为汽轮机电站的 $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{3}$ 。机组可在 10~20min 内由冷态启动、加速到带满负载。

燃气轮机作为高原铁路的机车动力也是比较理想的, 其效率高于柴油机车。近十几年来舰艇和商船上逐渐用燃气轮机代替汽轮机, 或改为联合循环机组。燃气轮机作为舰艇的加速机组是十分理想的, 可以充分发挥它的启动加速快的优点。这样就大大提高了舰艇的机动性。

当然, 在燃气轮机的发展过程中也存在着不少矛盾, 如高温材料, 部分负载工况下热效率不高等。由于克服了这些矛盾, 近二十年来燃气轮机发展较快。但是近年来随着石油能源的逐渐短缺, 各石油输出国不断提高石油的价格, 燃气轮机的发展又遇到了新的矛盾, 燃气轮机装置的热效率必须进一步提高, 才能与汽轮机装置、往复式内燃机械竞争。此外, 还可采用蒸-燃联合循环机组, 发展使用其他能源的燃气轮机, 如煤的气化和在高温气冷原子反应堆中采用封闭式氦气燃气轮机等项技术。国外煤的气化技术已初步解决, 使用煤气的燃气轮机-汽轮机联合循环装置总效率可达 38~40%。

总之, 燃气轮机作为一种新型动力机械出现, 并发展应用于各种领域是有其客观必然性与规律性的, 决不会由于石油、天然气的短缺而阻滞燃气轮机的使用。只要人们努力认识它, 通过科学实验解决其发展中存在的技术问题, 经过一些曲折, 燃气轮机仍会有新的发展。

我国在五十年代很快建立起了汽轮机和航空发动机制造业。1958 年以后, 我国几个大型汽轮机制造厂即着手研制民用燃气轮机。先后研制成功十多种类型燃气轮机, 应用于发电站、列车电站、船舶移动电站, 以及机车等。七十年代, 我国也引进不少国外的各型燃气轮机组。目前, 我国石油供应也很紧张, 需要节约石油, 燃气轮机的需要量暂时下降。

但是, 燃气轮机有其独特的优点: 体积小, 重量轻, 启动快, 运行维护方便, 自动化水平高, 少用或不用水冷, 适用多种燃料等。因此在四个现代化的多种需要中会发挥其特点, 而得到发展。

我国研制燃气轮机的水平与世界工业发达国家相比还有一定差距。我们相信, 在燃气轮机研制方面经过努力, 一定会逐步赶上先进水平。

(三) 燃气轮机自动化水平简况

燃气轮机作为新型动力机械出现时, 其自动化水平就高于一般动力机械。现代燃气轮机有三方面的标志: 压气机的压比高、效率高; 透平的焓降大、初温高; 机组的自动化水平高。燃气轮机自动化水平基本上可以达到按动启动按钮之后, 即自行启动带负载。启动过程及工作过程中发生故障时, 可以自动报警、停机。燃气轮机的主控制回路可保证机组的各项参数正常, 如带发电机的燃气轮机转速回路可保证燃气轮机转速恒定等等。燃气轮机组的正常操作维护人员只需 1~2 人。船用燃气轮机可实现无人机房, 只需在舰桥上进行控制, 在中心控制室有人巡视即可。这样高的自动化水平是一般动力机械所不容易作到的。因此“自动

化水平高”已成为现代燃气轮机所特有的标志之一。

§ 0-2 燃气轮机自动控制系统的组成

燃气轮机的自动控制是以燃气轮机作为控制对象进行自动控制的技术。燃气轮机自动控制系统是指燃气轮机的自动控制设备及由某些部件组成的自动控制分系统的总称。自动控制设备包括控制盘，液压的、电动的控制设备及机构。按自动控制功能来划分，燃气轮机自动控制系统由三大部分组成：程序控制系统，保护系统和主控制及调节系统。此外，还有电源系统。

(一) 燃气轮机程序控制系统

燃气轮机程序控制系统是联系机组的主机、辅机、各辅助系统和自动控制系统各部分协调动作的开环控制系统。程序控制系统可完成以下功能：

- (1) 正常启动程序；
- (2) 紧急启动程序；
- (3) 并机、并网；
- (4) 自动带负载；
- (5) 正常停机程序；
- (6) 紧急故障停机程序；
- (7) 启动过程故障停机程序；
- (8) 故障保护程序；
- (9) 进入正常过程控制与调节的程序。

程序控制的原则是：

- (1) 条件程序；
- (2) 时间程序；
- (3) 条件、时间程序相结合。

进行程序控制的手段有五大类：

- (1) 测量信号传感器；
- (2) 控制电器；
- (3) 逻辑电路单元；
- (4) 电力拖动控制电器设备；
- (5) 电磁阀门。

测量信号传感器包括限位开关、压力接点开关、温度接点开关等。

控制电器包括手动按钮、控制选择开关、带灯继电器、小型状态指示牌、灯光通告牌、电铃等。

逻辑电路单元包括各种与非、或非逻辑电路、继电器驱动器、延时电路单元、二进制计数器、二进制可逆计数器等。这些逻辑电路可以使用组件，也可以使用晶体管逻辑单元电路。Ⅰ型燃气轮机控制盘中使用的通用Ⅱ型程序逻辑单元电路比较成熟，使用范围很广。它的重要特点是逻辑电平范围广，抗干扰能力强。各种信号电平转换单元可以抗外界各种干扰。这种程序逻辑单元电路卡件同样适用于燃气轮机的程序控制。它运行可靠，程序动作准

确，通用性强。

电力拖动控制电气设备包括各种交直流电动机的拖动控制电器开关柜。

电磁阀门包括控制各种辅助系统所用的阀门，如液压油管路、控制油管路、冷却水管路、燃油燃气管路等。这些电磁阀门装在各种辅机管路中，可以执行程序动作，控制这些管路系统的工作状态。

（二）燃气轮机保护系统

燃气轮机的保护系统是一个完全独立的系统。它有自己的检测元件、放大元件与执行电路。保护系统是多通道检测，并判断故障情况的多重保护系统。保护的步骤分为故障报警及遮断停机两项。

在控制盘的上部有 30、40 或 60 个灯光通告牌，专门作为故障报警之用。检测到故障后，经过逻辑单元电路控制灯光通告牌闪亮，同时报警铃响。铃声可以手动停止，但此时灯光闪亮会变为稳亮，需待故障状态排除后，按手动复位按钮，才会熄灭。

遮断停机是在燃气轮机发生超速、超温、过振动或熄火等故障状态，并高于某一允许值时，发出信号，通过泄油电磁阀迅速泄掉控制油。于是，截止阀自动关闭，切断燃油或燃气，使机组迅速停机。遮断停机还包括燃机有关部位发生异常情况，发生不允许机组再运行下去的故障，如滑油压力低、滑油温度过高等。

多重保护的功能还反映在保护系统本身。当保护系统出现故障时也会发出报警，引起监视人员的注意。

（三）燃气轮机主控制及调节系统

燃气轮机主控制和调节系统是对燃气轮机工作过程的状态进行控制和调节的系统。它是对燃气轮机工作过程中某个参量实现恒值闭环自动调节的系统，是自动控制的重要部分。过去的燃气轮机只有保持转速恒定的液压式调节系统，它的转速检测元件为离心式飞锤或转速信号泵。与磁性测速头相比较，这些检测方法的测量迟后较大，而且信号不易综合。但油压执行机构有很多优点：时间常数较小，带动负载的能力大等。

目前使用电液调节系统的燃气轮机很多。它有明显的优点：动作快，灵敏度高，控制精度高，信号运算及综合方便。本书主要介绍电液主控制系统。

§ 0-3 燃气轮机主控制系统的组成

燃气轮机主控制系统要根据工作过程控制的要求来组成。主控制系统的基本设计思想有两种：一种是多通道低选，另一种是多回路作用叠加。

这两种设计思想虽然不同，但他们都应用于模拟式主控制系统中。当然，只有在测量、运算部分均为电信号时才可能应用这样的设计思想。单纯的液压式控制系统只能以单参量调节为主，兼有一些叠加的修正回路。这种系统很难实现多通道低选的设计思想。

这一节将简要地介绍两种设计思想，但着重介绍应用较广的多通道低选方案。

（一）多通道低选的燃气轮机主控制系统

对应燃气轮机不同的工况，希望采用不同的控制方法。为此，分别组成几个不同的控制回路。启动时，使用启动的开路控制回路按时间及条件控制送入机组的燃料量。启动完成后，机组转速应保持恒定，这时使用转速恒值调节回路。这对于发电用燃机是很重要的技术

要求。燃机排气温度达到某一定值后，通过温度控制回路压低燃料量，以保证燃机不致于超温。当然，还可以使用其他控制回路。这些控制回路都有各自的控制任务，有自己的检测元件、放大和反馈机构。它们有一定的独立性。但是，这些回路都控制着燃油量，这就出现了几个回路协调工作的问题。为了使这些回路协调工作，可采用多通道低选的设计思想。

多通道低选门电路简图如图 0-2 所示。三个通道经过低选门电路得到燃油量控制电压信号 V_{CE} 值，用此电压控制燃油量 B 。

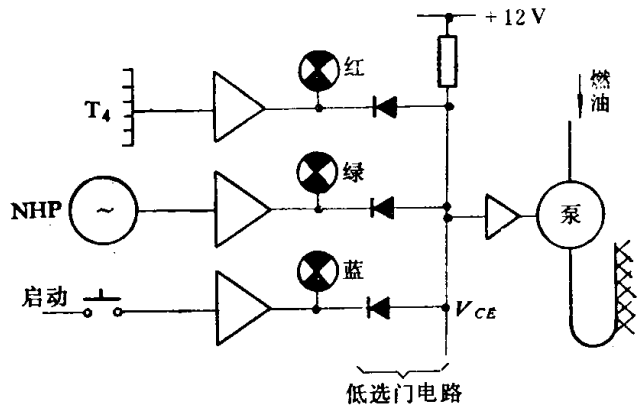


图0-2 多通道低选门电路简图

$$B = K(V_{CE} - 4)n \quad (0-1)$$

V_{CE} 电压值控制柱塞式燃油泵的斜盘角度，即控制燃油泵的柱塞行程。 V_{CE} 值大，燃油量 B 亦大。 $V_{CE} = 4$ 时（ $2V_{CE} = 1V$ ， $V_{CE} = 4$ 即为 $2V$ ），燃油泵的斜盘开始动作，使柱塞行程由 0 开始加大。当单轴燃机转速为恒定值 n_0 时，喷油量 B 与 $(V_{CE} - 4)$ 成比例。在启动过程中，机组转速不断变化，燃油量又与转速 n 成比例。因此，总的说来，燃油量 B 与 $(V_{CE} - 4)n$ 成正比例关系。

三条回路的信号均控制 V_{CE} 值，究竟使用哪条回路的信号进行控制？其原则是：选取几条通道输出值中的最小值进行控制。这就是“多通道低选”设计思想的由来。比如，正常情况下使用转速回路控制，其 V_{CE} 值较温度控制回路 V_{CE} 值低。如果一旦温度超过某一限制值，这时温度控制回路输出值会低于转速回路，而改用温度控制回路控制燃料，使燃料量压低一些，排气温度不致过高。因此低选原则是最保险的，也是合理的。

低选电路很容易实现，如图 0-3 所示，可用二极管低选门电路，其工作原理如下：

设 $E_0 = +12V$ ， $U_A = 6V$ ， $U_B = U_C = 7V$ 。这时二极管 D_A 导通， V_{CE} 值为 $6.3V$ 。此值低于 U_B 及 U_C ，则二极管 D_B 、 D_C 处于反向工作情况，必然为截止状态， U_B 及 U_C 对 V_{CE} 值没有影响。因此 V_{CE} 值必为 U_A 、 U_B 、 U_C 三者最低的电压值。实际上， V_{CE} 值与输入最低电压值之间差一个二极管压降 $0.3 \sim 0.4V$ ，故 V_{CE} 值应略高于三者最低的电压值。

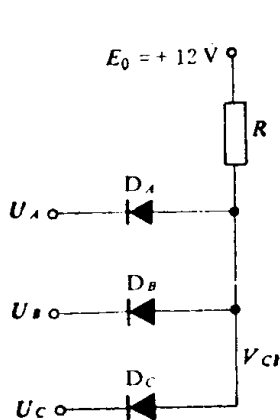


图0-3 二极管低选门电路

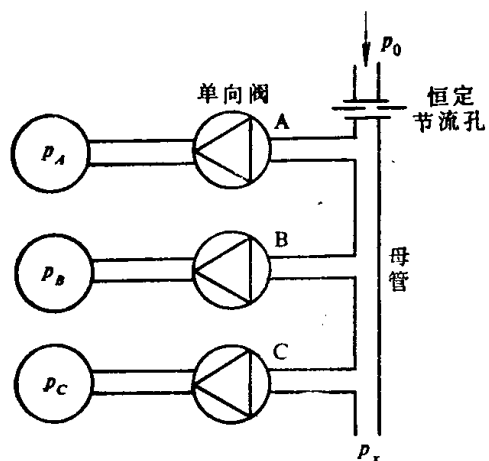


图0-4 气体管路中压力的低选

低选门电路的功能可用气体管路系统来模拟,如图 0-4 所示。气源压力 $p_0 = 12 \text{ kgf/cm}^2$, 经过恒定节流孔到达输出母管, 其压力为 p_x 。由母管经三个单向阀接通三个管道, 其压力各为 p_A 、 p_B 、 p_C 。母管送出压力 p_x 只能是 p_A 、 p_B 、 p_C 三个压力中的最低者。如 $p_A = 6 \text{ kgf/cm}^2$, $p_B = p_C = 7 \text{ kgf/cm}^2$, 则 $p_x \approx 6 \text{ kgf/cm}^2$, 单向阀 A 打开, 气体经阀 A 泄走。这时 $p_x < p_B$ (或 p_C), 则单向阀 B、C 不能打开, 气体不会通过阀 B、C 泄出。

由此可知, 几个通道的输出电压信号均汇总到低选门电路, 而在同一时间内能够起控制作用的只是几个电压信号中的最小值, 此值称为 V_{cE} 控制值。为了鉴别起控制作用的通道, 每个回路的输出端均装有指示灯。启动控制回路为蓝灯, 转速回路为绿灯, 温度控制回路为红灯, 如图 0-2 所示。哪个通道指示灯亮, 就表示哪个通道的输出电压信号起控制作用。

现在对单轴发电的燃气轮机组主控系统几个控制回路的作用加以说明:

(1) 启动控制回路。它只在机组启动过程中起作用。它按事先排好的时间-条件程序发出 V_{cE} 电压信号, 控制给油量。启动时的条件程序有机组转速及燃气温度。待机组转速由 0 升高到 $95\% n_0$ 即认为启动完成, 转为转速回路控制。

(2) 转速调节回路。它在机组正常运行工况下起转速调节作用。机组转速到达 $95\% n_0$ 时, 程序控制系统发出信号, 转速回路投入。转速调节回路按给定转速在各种负载情况下均保持转速为恒定。这是一个闭环调节回路。

(3) 温度控制回路。它在正常运行工况下只起监控作用, 在燃气轮机排气温度超过某个限制值以后, 输出电压信号低于转速回路输出电压值时, 主控回路才自动低选到温度控制回路, 限制喷油量, 使排气温度限制在给定值范围内。因此温度控制回路是一个监控回路。

根据以上分析可知, 多通道低选电路是一个比较合乎客观规律的控制电路, 其中有一个回路经常处于控制状态, 其余回路则处于监控状态。因此可将机组的运行状态限定在一定范围以内, 各项控制措施均有明确的回路加以保证。在工作过程中每个通道各负其责, 分工明确。在任何时间内只有一个回路起作用, 因此系统的设计、分析、调试均很方便。

低选电路作用简单, 容易理解。因此多通道低选电路作为一个基本的控制电路在模拟式控制系统中得到了广泛的应用。

(二) 多回路作用叠加的燃气轮机控制系统

燃气轮机主控制系统的几个控制回路功能应该能够转换。除了使用多回路低选的方法之外, 也可以使用多回路作用叠加的方法, 即在同一个时间多个回路同时起作用, 组合成所希望的功能。现以舰用燃气轮机的低转速工况说明其工作原理。舰用燃气轮机的燃油量主要由手动功率手柄给定, 实质上是一个手动开环系统。在负载干扰下它不能保持动力透平转速为恒定值。负载加大, 动力透平转速必然降低。为此, 加入一个低转速调节回路, 适当修正燃油量。当然, 这个修正回路的作用是有限的。负载如有大的波动, 它不能严格保持动力透平的转速不变, 而只是在负载于较小范围内波动时, 保证转速不要低于最小允许值。至于负载减小, 转速增高也不严加控制。叠加作用控制原理为: 利用开环手动控制燃油量, 同时使用闭环转速调节修正燃油量。

多回路作用叠加控制不能严格保证某种工况, 若用多个回路的作用保证某一种工况, 会使系统的可靠性降低, 即一旦某个回路作用失效就会改变工作状态。此外, 这种系统的设计、分析计算、调试均较复杂。因此, 这样的控制思想不一定可取。但是, 控制系统是逐步发展起来的, 在原有基础上增加一些修正回路, 往往会使控制的精度得到某些提高, 很多实用的

控制系统都加入各种修正回路。这种情况在航空发动机的机械液压调节器上是很常见的。但是相对地说,模拟式电子控制系统中使用修正回路则较少。

§ 0-4 燃气轮机自动调节的任务

这一节主要介绍调节、自动调节、自动调节系统的组成及反馈的基本概念和燃气轮机自动调节的基本任务。

(一) 调节与自动调节

在日常生活中经常会遇到“调节”这个概念。如图 0-5 所示,如果人们希望保持水箱中的水位高度在一定范围以内,于是人就用眼睛来看水位的高低。这个行为就是用一个基准值来比较,检测实际水位与基准值的差异,然后分析判断,得知实际水位是高于基准,还是低于基准水位。如果水位高了,人的大脑就命令手去操作进水阀门,将阀门关小一些,使水位下降。如果水位低了,人的大脑就命令手去开大阀门,使水位上升。这样的过程就是一个完整的调节过程。但是在这个调节过程中,人必须主动参予。人与进水阀门、水箱及水位标尺组成了一个闭环的反馈系统。由于有人参予,因此这个过程只能称为调节过程,而不能称为自动调节过程。

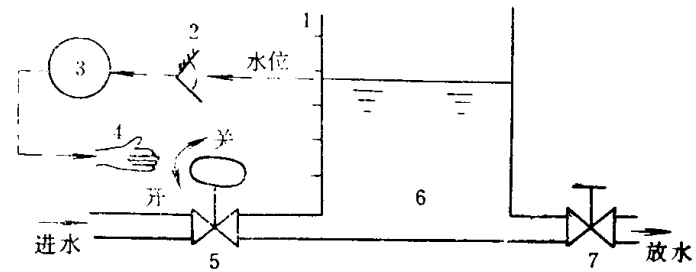


图0-5 水箱的水位调节

1—水位标尺 2—眼睛 3—大脑 4—手 5—进水阀门 6—水箱 7—放水阀门

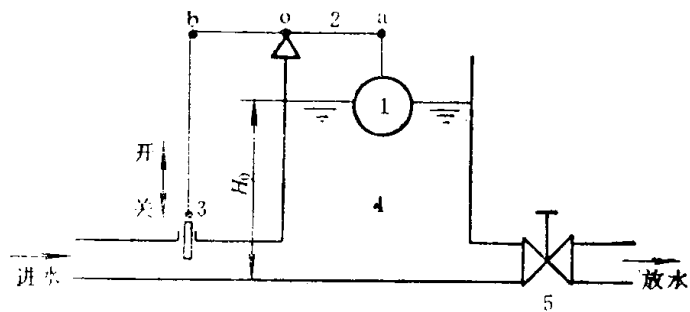


图0-6 水箱的水位自动调节

1—浮子 2—杠杆 3—进水阀门 4—水箱 5—放水阀门

所谓自动调节过程,是指使用自动调节设备来完成上述调节任务的过程,而人退出这个闭环反馈系统之外,如图 0-6 所示。水位自动调节设备由浮子 1、杠杆 2 和执行调节动作的进水阀门 3 组成。水位高时浮子上升,杠杆左端向下关小进水阀门,进水量减少,使水位降低。相反,则进水阀门开大,水位上升。因此水位可自动保持在高度 H_0 处。

(二) 自动调节系统的组成

自动调节系统按其各组成环节的功能可以分为:

(1) 检测元件。图 0-6 中检测水位的元件为浮子 1。

(2) 比较、放大元件。图 0-6 中比较元件为杠杆 2。杠杆的实际转动角度与水平位置相比较,完成比较元件的功能。放大元件仍为杠杆 2,由于杠杆的两肩一定, b 点位移量与 a 点位移量成比例,这个线性比例关系就起到放大作用。

(3) 执行、调节元件。图 0-6 中进水阀门 3 为执行及调节元件。由于放大元件并没有引入外加能源,故执行元件及调节元件均为进水阀门。

任何完善的自动调节系统均应具备以上五种元件。当然,调节对象——水箱亦应包括在

这个闭环回路之中，才能组成完整的闭环反馈系统。

(三) 自动调节的任务

根据以上举例，说明了自动调节的过程与自动调节系统的组成环节后，可以了解到自动调节的任务之一是“保持某个过程的某个特定参量为恒定值”。保持燃气轮机工作过程中某个参量为恒定值是自动调节的基本任务。应该指出，燃气轮机在工作过程中要承受各种外界干扰，如大气温度、压力、负载等变化。因此所谓保持某个参量为恒定值，是指自动调节系统要克服各种外界干扰，以保持工作过程中某个参量为恒定值。比如，拖动发电机的单轴燃气轮机要保持输出轴转速为恒定值；拖动风机或压缩机的分轴燃气轮机要保持压缩站出口气体的压力为恒定值；机车用燃气轮机要保证输出的轴功率为恒定值。不同种类的燃气轮机，如单轴、分轴、多轴、带回热器等等，随其用途不同有着不同的调节要求，本书各有关章节将详细介绍。

§ 0-5 燃气轮机自动调节的动态性能

(一) 自动调节系统的静态特性与动态特性

某个控制对象的工作过程在一定工作条件下呈现稳态特性。例如，希望水箱的水位保持高度为 H_0 ，不论用水端需要流量为何值，都希望水位为 H_0 ，或保持在 $H_0 \pm \Delta H_0$ 范围以内。单轴燃气轮机带发电机工作时，希望不论所带负载为何值，其转速均保持不变，如图 0-7 所示。该图中所示特性称为 $n = f(M)$ 的稳态特性关系，或称为静态特性。

在燃气轮机工作过程中，其负载经常变化，外界条件如大气压力、温度等亦经常变化，这些干扰都对燃气轮机的运行产生影响，若没有使用自动调节，则需要操作人员经常监视，并进行手动调节。

在使用自动调节系统之后，调节装置与调节对象组成一个闭环回路。每个环节的动态过程不同，闭环系统是否能够稳定工作就成为很重要的问题。如使用转速调节系统的单轴燃气轮机-发电机组，在突然甩掉全部负载的情况下，转速的升高是否在规定范围之内？过渡过程时间是否过长？这就是我们关心的动态特性问题。

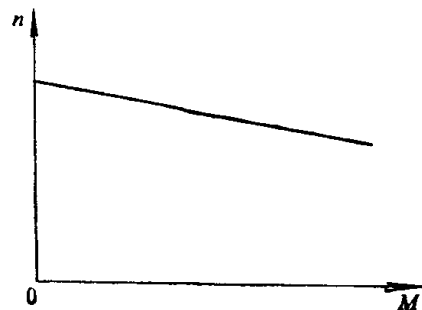


图0-7 单轴燃气轮机
 $n = f(M)$ 特性

为什么组成闭环系统后，就必须注意动态性能呢？我们首先注意到，闭环系统中各环节都有迟后特性。检测转速的磁性测头、放大器、电液伺服机构等都要经过某些延迟以后才能动作，改变喷油量。燃气轮机本身的工作过程就是一个很复杂的热过程，喷油量变化以后，不能立即引起燃气压力与温度的变化，也有延迟现象。燃气压力、温度改变后，引起透平发出力矩的变化更有延迟。透平转速变化要克服惯性力矩，必须考虑其惯性时间常数。由此看出，闭环回路中各环节都有惯性与延迟，可能在检测到机组转速上升，应该减油时，会由于转速不能及时降下来，机组负载又加大，必须加油。这样，由于自动调节系统各环节动态过程配合不恰当，如需要加油时，实际在减油，需要减油时，实际在加油，很可能使系统产生不稳定现象，甚至不能正常工作。因此，必须重视系统的动态特性。

(二) 自动调节系统的动态特性指标