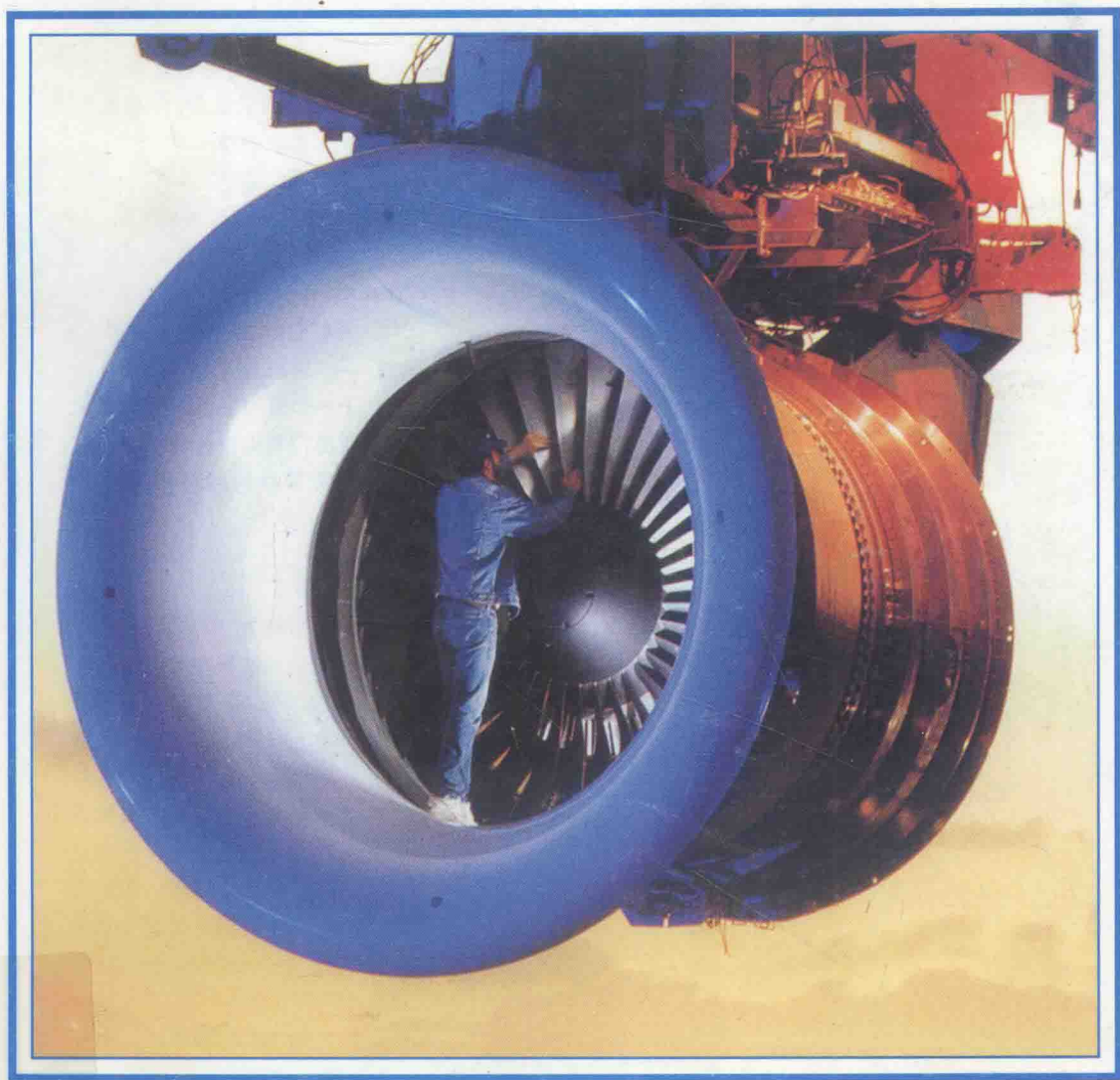


民航发动机控制

胡世民 叶志锋 张天宏 编著



航空工业出版社

民航发动机控制

胡世民 叶志锋 张天宏 编著

航空工业出版社

2000

内 容 提 要

本书根据民航飞机与发动机机务维修专业的教学要求而编写的。内容包括民航发动机控制的基本概念,民航发动机控制系统的基本元件(油泵、敏感元件及放大元件),发动机转速控制和加速控制及典型的民航发动机控制系统包括 WJ5、JT8D、JT9D-7J 和 PW4000 系列发动机控制系统。本书主要特点是理论紧密联系实际,针对性强。每章后面附有复习思考题。

本书是高等航空院校民航飞机与发动机机务维修专业教材,也可供从事飞行器、航空与航天推进系统以及其他动力装置控制工程的设计、研究、使用与维修工作人员的参考。

图书在版编目(CIP)数据

民航发动机控制/胡世民等编著. —北京:航空工业出版社,2000.1

ISBN 7-80134-587-8

I. 民… II. 胡… III. 民用飞机-航空发动机-自动控制系统 IV. V 233.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 76004 号

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

南京航空航天大学印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2000 年 1 月第 1 版

2000 年 1 月第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16 插页:4 印张:12

字数:300 千字

印数:1—800

定价:32.00 元

前 言

本书是根据民航飞机与发动机机务维修专业要求而编写的教材。

航空发动机是飞机的心脏,而发动机控制系统在发动机中占有十分重要的地位。若把发动机比喻为一个人,那么发动机控制系统就是人的心脏(燃油泵)和大脑(控制器),如果一个人的心脏和大脑出毛病,将危及正常工作和生活甚至生命。同样,发动机控制系统出现故障,将严重威胁发动机的安全运行和旅客的生命安全。维护发动机控制系统正常运行,是飞机和发动机机务维修工作人员的一项重要任务。

目前,关于航空发动机控制系统的教材很缺乏,仅有的几种教材一般内容太多,且偏理论及公式推导,又缺少将理论基础和典型控制系统相结合的内容,不适合民航飞机与发动机机务维修专业的需要。

本书在编写过程中,尽量结合民航发动机控制系统的特点,注意反映目前国内外液压机械控制系统和数字电子控制系统的特点。内容力求做到由浅入深,注重基本概念,也注意学科和体系的完整性。

本书共分十一章。第一章是有关民航发动机控制的基本概念;第二章至第四章介绍航空发动机控制系统的组成元件,其中第二章介绍油泵,第三章介绍敏感元件,第四章介绍液压放大元件,这是构成发动机控制系统的基础;第五章重点讨论了发动机转速控制系统;第六章简单介绍了过渡控制系统;第七章至第十一章介绍了几种典型的发动机控制系统,其中第七章是 WJ5 发动机控制系统,第八章是 JT8D 发动机控制系统,第九章是 JT9D—7J 发动机控制系统,第十章是 PW4000 系列发动机电子控制系统,第十一章是 WZ8 发动机控制系统。发动机电子控制技术在第十章中进行了简单的介绍。

本书第一章、第五章、第六章、第八章和第九章由胡世民编写,第二章、第三章、第四章和第七章由叶志锋编写,第十章和第十一章由张天宏编写。在编写过程中,得到陈铮教授和我校民航学院有关老师的热情帮助,并提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。本书由南京航空航天大学陈铮教授主审。

由于笔者水平有限,书中难免有不妥与错误之处,诚请读者批评指正。

编著者

1999 年 12 月

目 录

主要符号

第一章 民航发动机控制的基本概念	(2)
第一节 发动机的工作状态	(2)
第二节 涡轮发动机燃油控制系统的基本要求	(2)
第三节 发动机控制系统分类	(3)
第四节 发动机开环、闭环和复合控制系统	(4)
第五节 航空发动机简化数学模型	(6)
第六节 双轴涡喷发动机的调节规律和特性	(8)
第七节 可靠性	(9)
第八节 维修性及其尺度	(11)
复习思考题(一)	(13)
第二章 泵	(14)
第一节 齿轮泵	(14)
第二节 柱塞泵	(18)
第三节 叶片泵	(21)
第四节 离心泵	(25)
第五节 汽心泵	(26)
复习思考题(二)	(28)
第三章 敏感元件	(29)
第一节 转速敏感元件	(29)
第二节 压力敏感元件	(34)
第三节 压比敏感元件	(38)
第四节 温度敏感元件	(40)
第五节 差动变压器位移传感器	(44)
复习思考题(三)	(46)
第四章 放大元件	(47)
第一节 滑阀式液压放大器	(47)
第二节 带刚性反馈的滑阀式液压放大器	(51)
第三节 带柔性反馈的滑阀式液压放大器	(52)
第四节 喷嘴挡板式液压放大器	(54)
第五节 电液伺服阀	(56)
复习思考题(四)	(59)
第五章 发动机转速控制系统	(60)
第一节 单回路转速控制系统	(60)
第二节 串级控制系统	(71)
第三节 前馈控制系统	(78)

第四节 油量调节器.....	(8 3)
第五节 比值调节系统.....	(8 7)
复习思考题(五).....	(9 0)
第六章 过渡控制系统.....	(9 1)
第一节 概述.....	(9 1)
第二节 气动式自动加速器	(9 2)
第三节 按油气比的程序加速控制.....	(9 3)
第四节 按相似参数进行加速控制.....	(9 4)
复习思考题(六).....	(9 8)
第七章 WJ5 发动机控制系统	(9 9)
第一节 控制计划.....	(9 9)
第二节 燃油系统的组成和工作.....	(9 9)
第三节 常见故障及排除方法.....	(107)
复习思考题(七).....	(109)
第八章 JT8D 发动机的燃油控制系统	(110)
第一节 控制计划.....	(111)
第二节 JFC60 燃油控制器组成.....	(112)
第三节 燃油控制器工作原理.....	(119)
第四节 JT8D-217A 与 JT8D-17A 发动机主燃油控制系统主要差别	(122)
复习思考题(八).....	(124)
第九章 JT9D-7J 发动机控制系统	(126)
第一节 概述.....	(126)
第二节 JFC68-3 燃油控制器	(127)
第三节 工作过程.....	(134)
复习思考题(九).....	(137)
第十章 PW4000 系列发动机电子控制系统	(138)
第一节 发动机概述.....	(138)
第二节 电子控制技术概述.....	(138)
第三节 燃油系统.....	(142)
第四节 全权限数字电子控制系统.....	(145)
第五节 发动机电子控制器.....	(151)
第六节 PW4000 发动机控制系统的工作	(157)
复习思考题(十).....	(167)
第十一章 WZ8 发动机燃油控制系统	(168)
第一节 发动机概述.....	(168)
第二节 燃油系统的组成及供油路线.....	(169)
第三节 燃油控制系统.....	(171)
第四节 燃油系统的维护与故障分析.....	(174)
复习思考题(十一).....	(176)
参考文献	

主 要 符 号

A——面积;热功当量;有效率
 B——涵道比
 b——长度,位移量
 C——常数
 D——直径;阻力;不可能工作时间
 d——直径
 F——推力;力
 f——油气比;函数关系;频率
 g——重力加速度
 H——飞行高度;热焓
 H_u——燃料热值
 i——减速比
 J——转动惯量
 K——常数;放大系数(增益);绝对温度
 L——长度;拉氏变换符号
 M——马赫数;扭矩;维修度
 m——质量
 N——功率
 n——转速
 P——压力
 p——微分变量
 Q——容积流量
 R——空气气体常数;半径
 角标
 a——空气
 ac——加速
 af——加力
 b——主燃烧室
 bld——压气机放气
 c——压气机;控制
 cor——换算
 cr——临界
 E——发动机
 f——燃油
 faf——加力燃油
 g——燃气
 H——高压压气机
 i——参数顺序指示符

r——半径
 S——拉氏变量
 SFC——单位耗油率
 T——绝对温度;时间常数;时间间隔
 t——温度;时间
 U——可能工作时间
 V——容积
 v——速度
 W——燃油质量流量
 X——输出量;位移量
 Y——输出量;位移量
 Z——Z 变换
 α——角度;油门杆角度
 β——桨叶角;锥体半角
 Δ——绝对增量
 δ——相对增量
 η——效率
 θ——加热比;温度比
 λ——速度系数
 μ——流量系数
 π——压比
 ρ——密度
 ω——角速度
 idle——慢车
 in——进口;输入
 K——压气机
 L——低压压气机
 max——最大
 min——最小
 θ_{pt}——最佳
 out——出口;输出
 R——参考值;给定值
 ST——起动机
 T——涡轮
 O——基准值
 *——气体滞止参数

第一章 民航发动机控制的基本概念

航空发动机控制技术发展很快,50年代航空发动机要求控制变量是主燃油流量、加力燃油流量、压气机级间放气和尾喷口面积等。60年代控制变量增加了压气机可调静子叶片。70年代由于进气系统、反推力装置甚至涡轮也要求可调,使控制变量大大增加,具有7个控制变量的发动机已投入使用,具有10个甚至更多控制变量的发动机也在研制中,若再采用常规机械液压控制技术已很难满足要求,研制和使用全功能数字电子控制(FADEC),使发动机控制技术步入高速发展时期,并将使发动机性能和控制系统的可靠性大大提高。

本章将扼要介绍发动机的工作状态、发动机燃油系统的基本要求、涡轮风扇发动机控制规律、发动机数学模型和可靠性与可维修性的若干概念。

第一节 发动机的工作状态

一、最大工作状态

发动机最大工作状态是指发动机工作时,其转速和涡轮前温度为最大值,在大多数情况下,这状态也是发动机的设计状态。

二、巡航工作状态

一般说,巡航指从慢车到最大状态之间的所有状态。它一般包括:最大巡航状态(对应于最大巡航推力的状态);最佳巡航状态(对应于最小耗油率);最小巡航状态(对应于最小巡航推力状态)。

三、慢车工作状态

这个状态是发动机能够稳定工作的最小转速状态,用于地面检查、停机线待飞、着陆及滑行等。

四、反推力工作状态

当飞机着陆时,反推力装置打开,产生与飞机滑行方向相反的推力,迅速减小发动机的正向推力,以缩短飞机着陆滑跑距离。它广泛应用于民航客机上。

第二节 涡轮发动机燃油控制系统的基本要求

一、由于飞机的所处状态不断变化,如滑跑、起飞、爬高、平飞、加速、减速、下滑、盘旋和俯冲等,将改变发动机工况和特性,偏离设计点工作,性能下降,严重时甚至无法正常工作。因此燃油控制系统必须随飞行条件的变化,不断调节发动机的供油量及可调几何参数,使性能处于最佳状态,以保证飞机与发动机安全运行。

二、过渡状态(起动、加速和减速等)工作时间应尽可能短,但又要保证发动机能够稳定可靠地工作,燃油控制系统通过调节供油量使发动机工作状态能满足这一要求。

三、在燃油输送到燃烧室中,燃油控制系统不仅供油量要精确,而且雾化要良好,以保证

燃烧效果良好。

四、燃油控制系统必须保证发动机在整个飞行包线内,不超转、不过热、不超载、不喘振和不熄火。

五、燃油控制器应具有良好的可靠性和可维修性,使用寿命长,维修费用少。

第三节 发动机控制系统分类

从不同的角度出发,发动机控制系统可按以下分类:

一、按发动机工作状态分

(一) 稳态控制系统

当飞行条件变化时,控制系统能保持发动机给定的工作状态不变,这种控制系统称为稳态控制系统。

(二) 过渡态控制系统

过渡态控制系统是控制发动机从一个工作状态能迅速、安全、可靠地过渡到另一个工作状态的控制系统。如起动控制系统、加速控制系统和减速控制系统及压气机防喘控制系统等。

二、按作用于发动机的控制量分

(一) 燃油控制系统

凡以燃油作为输入量的发动机稳态和过渡态的控制系统都属于燃油控制系统。

(二) 桨叶安装角控制系统

涡桨发动机螺旋桨的安装角是控制器的输出量,它也是发动机的输入量。

三、按所控制系统的部件分

(一) 主控制系统

对核心发动机的控制,如转速控制系统、燃气温度控制系统等。

(二) 压气机控制系统

在发动机的任何飞行条件和工作状态下控制压气机的气流流态,保证气流稳定,防止喘振。如压气机中间级放气、旋转压气机进口导向叶片或其他级整流叶片的控制系统。

四、按发动机的被控制量分

(一) 转速控制系统

(二) 温度控制系统

(三) 压比控制系统

(四) 桨叶安装角控制系统

在这几种控制系统中,转速、温度、压比和桨叶安装角为相应控制系统的被控制量。

五、按控制方式分

(一) 闭环控制系统

(二) 开环控制系统

(三) 复合控制系统

六、按控制器元件分

(一) 气动式

- (二) 机械液压式
- (三) 模拟电子式
- (四) 数字电子式

发动机除了上述各种控制系统外,还有各种限制的安全装置,如最大转速、最高温度、最大压力和最大功率等各种安全限制装置。

第四节 发动机开环、闭环和复合控制系统

在航空发动机上有开环、闭环和复合控制系统,得到广泛应用。下面以发动机转速控制系统为例说明其工作原理和特点。

一、闭环控制系统

如图 1-1(a)所示的控制系统为发动机的一种典型闭环转速控制系统。发动机通过伞齿轮 1 直接传动离心块 2,离心块的离心力轴向分力与发动机转速 n 成正比,所以这个轴向分力代表发动机实际转速的大小,而当驾驶员将油门杆 3 放在给定位置 α 时,这给调准弹簧 4 有一个起始调准弹簧力。这个调准弹簧力与油门杆角度 α 成正比,它代表发动机的希望转速。当离心块的离心力轴向分力与起始调准弹簧力相等,进入发动机的供油量等于发动机需油量时,则发动机转速稳定不变,且等于希望转速。

设飞行高度突然升高,而油门杆 3 角度 α 不变,我们研究一下发动机控制器如何控制其转速不变。

由于飞行高度升高,进入发动机空气流量将减少,涡轮所承受的负载将减少,发动机转速上升,这样离心力的轴向分力将大于调准弹簧力,调准弹簧被压缩,杠杆 5 逆时针转动,回油活门开大,回油量增加,进入发动机的油量减少,转速下降到与希望转速相等为止。

显然该转速控制系统工作原理可以用图 1-1(b)表示。由图可知,控制信号流程构成一个闭环回路,所以称为发动机转速闭环控制系统。

二、开环控制系统

图 1-2(a)表示一种简单结构的开环转速控制系统,包括控制对象(发动机)和补偿器的原理图。它由真空膜盒 1、杠杆 2、齿轮泵 3 和回油阀门 4 等构成。现以飞行高度下降为例,说明开环转速控制系统如何保持发动机转速不变。当飞行高度下降时,外界大气压力升高,使发动机进口压力也升高,进入发动机空气流量增加,负载增加,这将引起发动机转速下降。为了使发动机转速不下降,设置发动机转速补偿器。当发动机进口压力升高时,补偿器的真空膜盒 1 同时感受发动机进口压力升高,压缩真空膜盒 1,使杠杆 2 顺时针转动,回油阀门 4 下移,回油量减少,而进入发动机供油量随之增加,以补偿发动机因进气量增加而引起的转速下降,使发动机转速保持不变。

上述转速控制系统工作原理可以用图 1-2(b)方块图表示。由图可知,该转速控制系统信号流程图不构成封闭回路,所以称为开环转速控制系统。这种转速控制系统的控制原理是基于补偿原理。所谓补偿原理是根据干扰量对控制对象的影响大小,同时改变作用于被控对象的控制量,以抵消干扰量对被控制量的影响,使被控制量保持不变。这种补偿控制原理与图 1-1 所示的闭环控制原理完全不同,闭环控制是按偏差原理进行控制的。所谓偏差原理是

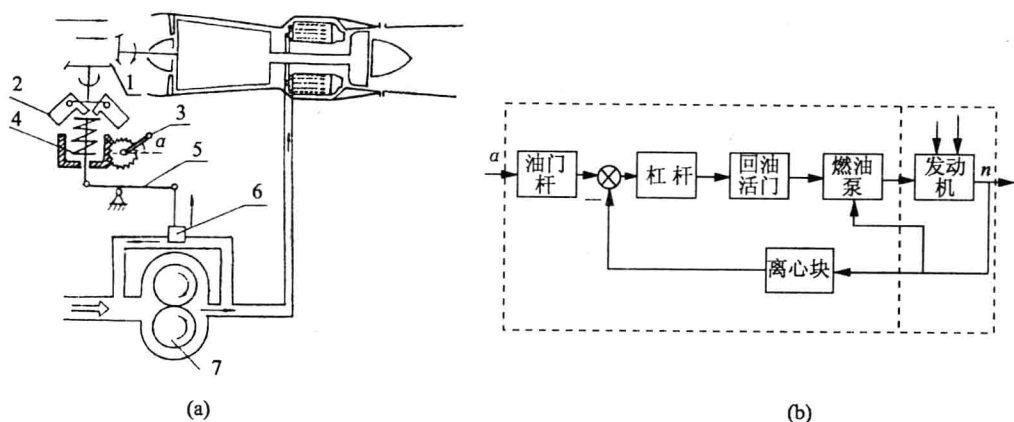


图 1-1 发动机闭环转速控制系统

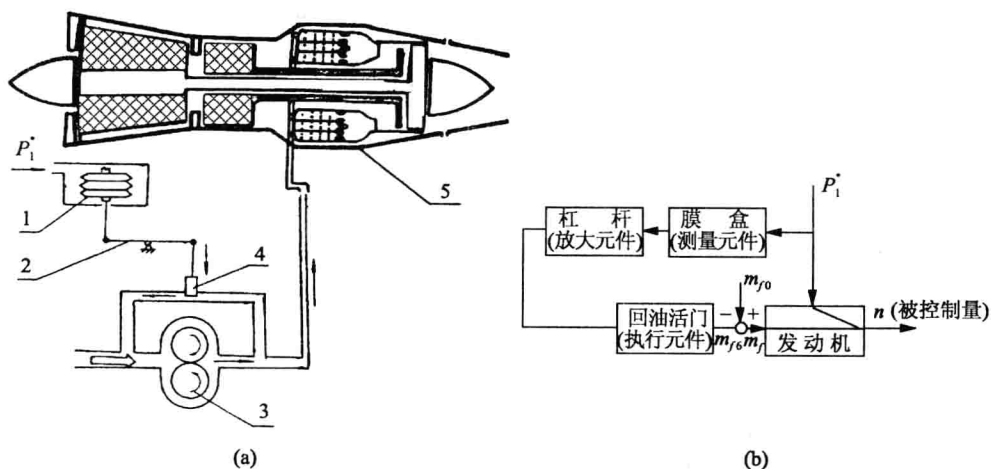


图 1-2 开环转速控制系统

根据被控制量的实际值与给定值(希望值)的偏差进行控制的原理。按一原理工作的控制系统尽管在调节过程中被控制量对给定值产生了偏差,但在调节过程结束时,这偏差变得很小,甚至为零。

三、复合控制系统

闭环控制系统虽有许多优点,如控制精度比较高,且用一个控制器可同时对所有的扰动引起的偏差起抑制作用;但也有控制不及时,超调量较大的缺点。而相反,开环控制的被控制量变化比较平稳,结构也比较简单,但由于引起被控制量变化的干扰因素很多,因而不可能对每一个干扰进行补偿,为了改善控制性能,便产生了复合控制系统的概念。所谓复合控制系统是在闭环控制系统的基础上,附加 1~2 个主要干扰的开环补偿的控制系统,如图 1-3。

在图示的复合控制系统中,当外界干扰因素变化时,一方面会引起被控制量(转速)变化,同时通过补偿器使控制量(W_f)也发生变化,以抵消外界干扰引起的转速变化,结果发动机转速变化不大(或者不变),剩下的偏差由闭环控制进行调节,这样的调节过程被控制量动

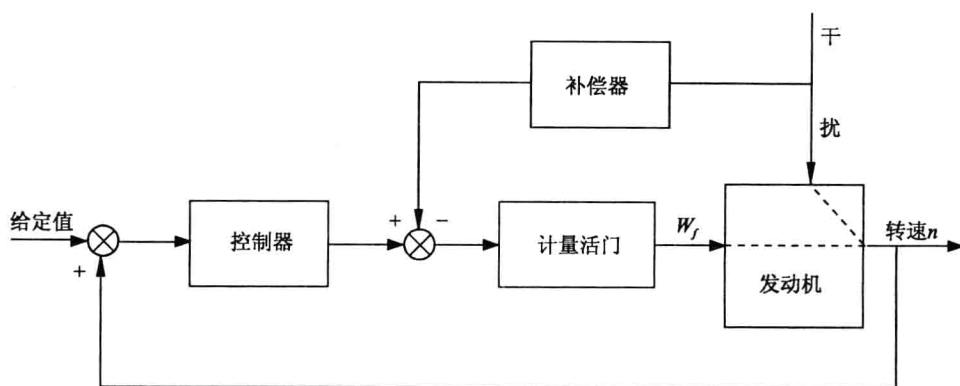


图 1-3 复合控制系统

态偏差较小,调节结束时,又能使被控制量较准确地等于给定值(希望值)。例如 JT9D 发动机控制就是采用复合控制系统。随着航空发动机性能要求不断提高,复合控制系统在航空发动机控制上应用越来越广泛。

第五节 航空发动机简化数学模型

现以单轴不加力的涡喷发动机为例说明发动机的简化数学模型。如图 1-4 所示,发动机作为控制对象,被控制量为转速 n ,控制量为供油量 W_f ,干扰量为 D 。这里所讲的简化数学模型就是要找出发动机转速 n 与供油量 W_f 和干扰量 D 的函数关系。

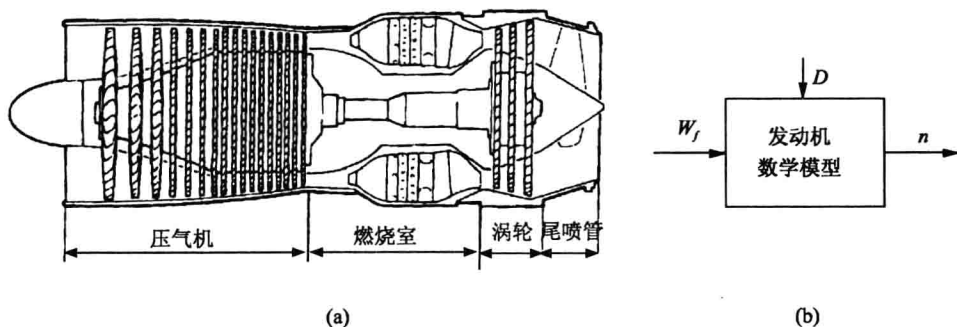


图 1-4 涡喷发动机简图

由于发动机的数学模型比较复杂,为简化分析,使数学模型能够描述发动机动态过程的基本特征,特作如下假设:

1. 认为影响发动机转速特性主要因素是转子惯性和外加力矩,而热惯性和压气机及涡轮内部容积的影响是次要的,可以忽略不计。
2. 假设输入量 W_f, D 以及输出量 n 只在稳态值附近作小偏差变化。
3. 设尾喷管面积 A_e 和飞行条件不变。
4. 假设燃油泵不是由所研究的发动机驱动。

根据牛顿第二定律,可得涡喷发动机转速 n 的运动方程为

$$\frac{2\pi J}{60} \frac{dn}{dt} = M_T - M_C \quad (1-1)$$

式中 M_T ——涡轮产生的扭矩;

M_C ——压气机消耗的扭矩。

令 $M_T - M_C = \Delta M$

ΔM ——称为剩余扭矩或加速扭矩。

在一定飞行条件下 ($p_1^* = C, T_1^* = C$), 剩余扭矩是发动机转速 n 和供油量 W_f 的函数,

即

$$\Delta M = \Delta M(n, W_f) \quad (1-2)$$

根据小偏差假设,忽略台劳级数展开项高阶无穷小项,可近似表示为

$$\Delta M(n, W_f) \approx \Delta M(n_o, W_{fo}) + \left(\frac{\partial \Delta M}{\partial n} \right)_o \Delta n + \left(\frac{\partial \Delta M}{\partial W_f} \right)_o \Delta W_f$$

当 $n = n_o, W_f = W_{fo}$ 时,表明发动机稳态,发动机加速扭矩应该等于零,则上式简化为

$$\Delta M(n, W_f) \approx \left(\frac{\partial \Delta M}{\partial n} \right)_o \Delta n + \left(\frac{\partial \Delta M}{\partial W_f} \right)_o \Delta W_f \quad (1-3)$$

将式(1-3)代入式(1-1),并经变换得

$$\frac{2\pi J}{60} \frac{dn}{dt} + \left(- \frac{\partial \Delta M}{\partial n} \right)_o \Delta n = \left(\frac{\partial \Delta M}{\partial W_f} \right)_o \Delta W_f \quad (1-4)$$

为了比较不同发动机的特性,习惯上采用相对增量表达式,即

$$\delta n = \frac{\Delta n}{n_o}; \delta W_f = \frac{\Delta W_f}{W_{fo}} \quad (1-5)$$

式中 n_o, W_{fo} ——为选取基准值。

将式(1-4)用相对量表示,同时将式(1-4)两边同除以 $\left[- \left(\frac{\partial \Delta M}{\partial n} \right)_o n_o \right]$ 得

$$T_e \frac{d\delta n}{dt} + \delta n = K_e \delta W_f \quad (1-6)$$

式中

$$T_e = \frac{\frac{2\pi J}{60}}{\left(- \frac{\partial \Delta M}{\partial n} \right)_o}, \text{称为涡喷发动机时间常数[秒]}$$

$K_e = \left(\frac{\partial \Delta M}{\partial W_f} \right)_o W_{fo} / \left[- \left(\frac{\partial \Delta M}{\partial n} \right)_o n_o \right]$ 称为涡喷发动机供油量对转速的放大系数。

设初始条件为零,对式(1-6)进行拉氏变换,得

$$T_e S n(S) + n(S) = K_e W_f(S)$$

$$n(S) = \frac{K_e}{T_e S + 1} W_f(S) \quad (1-7)$$

式中 $n(S) = \mathcal{L}[\delta n(t)];$

$W_f(S) = \mathcal{L}[\delta W_f(t)];$

$S =$ 拉氏变量;

$\mathcal{L}$ ——拉氏变换符号。

由式(1-7)可知,涡喷发动机简化数学模为一阶惯性环节。

第六节 双轴涡喷发动机的调节规律和特性

对于单轴涡喷发动机调节规律有二种,其一是转速 $n = \text{const}$; 其二是涡轮前燃气总温 $T_3^* = \text{const}$, 而在一般情况下, 单轴涡喷发动机常用调节规律为转速 $n = \text{const}$ 。

对于喷管临界面积不可调的双轴涡轮喷气发动机, 控制量只有一个, 即供油量 W_f , 可能的调节规律有三种方案:

- 一、保持低压转子转速不变, 即 $n_L = \text{const}$;
- 二、保持高压转子转速不变, 即 $n_H = \text{const}$;
- 三、保持涡轮前燃气温度不变, 即 $T_3^* = \text{const}$ 。

对于双轴涡喷发动机, 如果 T_1^* 上升, 则低压转子变“重”, 转速有下降的趋势, 而高压转子变“轻”, 转速有上升的趋势, 若采用 $n_L = \text{常数}$ 的调节规律, 则调节器起作用, 主动地多加油, 提高 T_3^* , 以保持 $n_L = \text{const}$, 而本来就有上升趋势的高压转子转速, 这时候就上升更多了。如果采用 $n_H = \text{const}$, 则相反, T_3^* 要下降一些, 而 n_L 下降更多些。如果采用 $T_3^* = \text{常数}$, 则低压转子转速下降, 而高压转子转速上升。

上述情况相当于在速度特性中, 随着飞行 M 数增加, T_1^* 上升, 如图 1-5 所示。

由于采用不同调节规律, 推力的变化规律是不同的, 显然, 采用 $n_L = \text{const}$ 的调节规律较为有利。当飞行马赫数 M 上升时, 可获得较大的推力。但这要在涡轮叶片强度所允许的条件下才是可行的。

为了在高速飞行时性能良好, 对于歼击机的发动机, 大都采用 $n_L = \text{const}$ 的调节规律。但注意到, 随着飞行 M 数增加, n_H 增加过多, 为强度所不允许, 为此对 n_H 应加以限制, 以保证安全可靠工作。

当 T_1^* 下降时, 低压转子变“轻”, 转速有上升的趋势, 而高压转子变“重”, 转速有下降的趋势。采用 $n_L = \text{const}$ 的调节规律, 则调节器起作用, 主动地减油, 使 T_3^* 下降, 才能保持 $n_L = \text{const}$, 而这时候, 本来就下降的高压转子转速下降得更多了。如果采用 $n_H = \text{const}$, 则相反, 调节器要主动加油, T_3^* 要上升, 而 n_L 上升得更多一些。如果采用 $T_3^* = \text{const}$, 则低压转子转速上升, 而高压转子转速下降。

上述情况相当于在高度特性中, 随着飞行高度增加, T_1^* 下降, 由于采用的调节规律不同, 推力变化的规律也不同, 如图 1-6 所示。显然, 采用 $n_H = \text{常数}$ 的规律较为有利, 随着飞行高度升高, 相对于 $n_L = \text{常数}$ 的调节规律还获得有较大的推力。但这也要在涡轮叶片强度所允许的条件下才是可行的。

为了改善高度特性, 一般的民航机和军用运输机的发动机大都采用 $n_H = \text{const}$ 的调节规律, 例如 JT8D-217A 双转子涡扇发动机(装于 MD-82 客机上)、JT8D-17A 双转子涡扇发动机(装于 B737-200 型客机)、JT9D-7J 双转子涡扇发动机(装于 B747SP 客机上)、JT9D-7R4E 双转子涡扇发动机(装于 B767、A310 客飞机上)等民用双转子发动机的调节规律均采用 $n_H = \text{const}$, 但注意到, 随着飞行高度的增加, 使 n_L 的增加过多, 为强度所不允许, 同样也应采用 n_L 限制器。

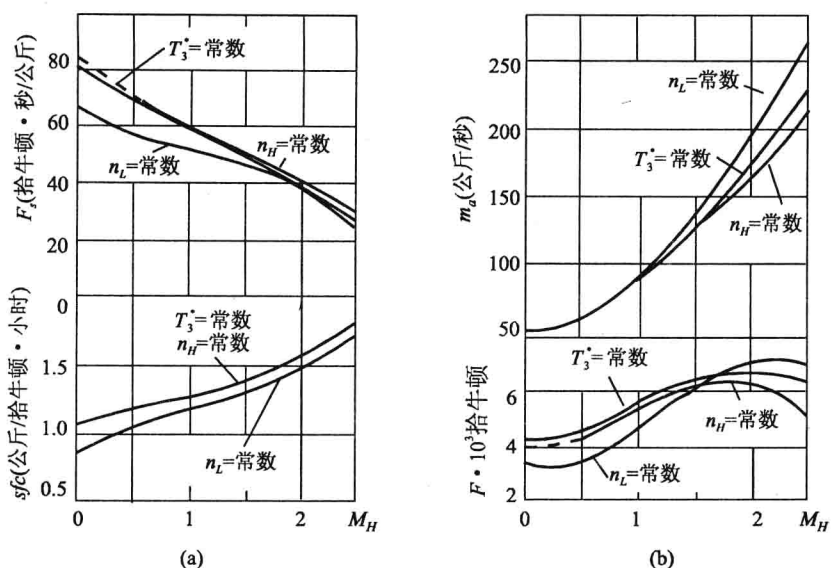
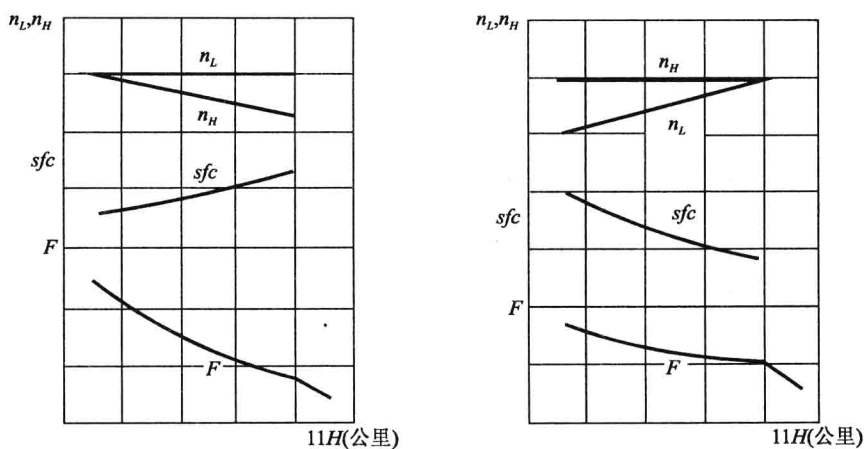


图 1-5 双轴涡喷发动机速度特性



(a) $n_L = \text{常数}$; (b) $n_H = \text{常数}$ 。

图 1-6 双轴涡喷发动机高度特性

对于 $T_3^* = \text{const}$ 的调节特性, 介于 $n_L = \text{const}$ 和 $n_H = \text{const}$ 两者特性之间, 但由于 T_3^* 测量较难实现, 一般不采用。

第七节 可靠性

可靠性(reliability)

一、可靠性: 表示系统、机器、零件性能稳定程度

二、分类: 可以分为广义可靠性与狭义可靠性

广义可靠性与狭义可靠性的关系: 因为产品的寿命总是有限的, 所以总有一天会产生故

障,那么发生故障时,有扔掉或修复再使用两种处理形式。把前者叫一次性产品,后者称为可修件。如简单说,一次性使用的,可靠性是狭义的或称初期可靠性;能够修理的产品的可靠性是广义的可靠性。但考虑修理后再使用的时候,除了不发生故障的狭义可靠性外,还要考虑维修难易程度。即必须考虑维修性,还要考虑维修难易程度。即必须考虑维修性,即使发生故障那也是不得已的,但只要能尽快修复就可以。因此,广义可靠性可以写成:

可靠性(狭义)+维修性

或者说:“可修理的产品,在使用中不发生故障,如产生故障,也容易修复,具有能够继续使用的性质”。

三、可靠性度量

为了度量一个产品的可靠性,常用以下四种尺度来度量:

(一) 可靠度(reliability)[无量纲]

所谓可靠度:指系统、机器、零件等,在规定条件下的工作期间内完成规定性能的概率。例如美国阿波罗计划的可靠度为 99.999999%,因为有九个 9,所以称 99 可靠度,这也是目前世界上大系统能达到的最高可靠度。

例 1,设有二台某种发动机燃油控制器分别工作到 20000 小时,40000 小时后发生故障,试求这二台燃油控制器工作 10000 小时,30000 小时和 40000 小时的可靠度 R。

$$\text{答: } R(10000) = \frac{2}{2} = 100\%$$

$$R(30000) = \frac{1}{2} = 50\%$$

$$R(40000) = \frac{0}{2} = 0\%$$

(二) 平均无故障时间(MTBF)[小时]

作为可靠性的尺度,经常也用时间来表示。而作为主要代表是 MTBF 和 MTTF 两者,它们都称平均寿命。两者既有相似之处,也有不同点。

MTBF(为 mean time between failures 的简写),即平均无故障时间。用 MTBF 表示产品可靠性已在国际上广泛使用。

如果明确了 MTBF,就预先知道产品能使用多长时间或使用多长时间需要修理,这是很方便的。例如已知 JT9D 发动机燃油控制器的 MTBF=40000 小时,这种控制器使用 40000 小时之后应停止使用,要继续使用应翻修。

例 2,设某发动机燃油控制器工作 14000 小时,出了故障经修理又用 12000 小时,又出故障再修理好又用 10000 小时,试求该燃油控制器的平均无故障时间 MTBF。

$$\text{答: } MTBF = \frac{14000 + 12000 + 10000}{3} = 12\ 000 \text{ 小时}$$

(三) MTTF(mean time to failure):指不能修理的系统、机器、零件等至发生故障为止的工作时间的平均值。

由于 MTTF 的对象是“不能修理的产品”,即用一次就扔掉的产品,因此零件和材料就成为主要对象。

例 3,设有燃油控制器的橡胶密封三个,分别能工作 8000、9000、10000 小时,试求这批密封圈的 MTTF。

$$\text{答: } MTTF = (x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n) / r$$

式中 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ——到各次发生故障的工作时间;
 r —故障发生的次数。

故 $MTTF = (8000 + 9000 + 10000) / 3 = 9000$ 小时

(四) 故障率(failure rate)

所谓故障率是指能工作到某个时间的系统、机器、零件等,在连续单位时间内发生故障的比例。故障率作为可靠性的尺度用比例来测定的代表。

故障率实际上有两种:一是平均故障率;另一种是瞬时故障率。

$$\text{平均故障率} = \frac{\text{工作期间的总故障数}}{\text{总的工作时间}} \quad (1-8)$$

而瞬时故障率指的短期“故障率”或“少时间”的故障率。

第八节 维修性及其尺度

一、维修性(maintenance):为保持可靠性对可以修理的系统、机器、零件等进行处理。

这里,所谓保持可靠性意味着没有故障仍能继续工作的特性。维修的对象:是指可以修理的产品,如飞机、发动机、燃油控制器等。处理指的是点检、检查、检修、调整、修理、替换等。

二、分类

维修性主要可以分为预防维修 PM 和故障维修 CM:

(一)PM(preventive maintenance):根据已定程序,进行有计划的检查、试验、再调试等,为了防止使用中发生的故障,防患于未然而进行的维修。

PM 是为了防止事故发生而做的处理,月检、年检、定期检查都是 PM 的范围。客机每一次起落,都要对飞机、发动机、燃油控制器以及其他设备进行检查,就是预防事故发生及维修的典型实例。

(二)CM(corrective maintenance):事故发生后进行维修,即故障维修 CM。

这里,还应该指出维修三要素的概念:所谓维修三要素:1. 产品是否容易进行维修及设计;2. 进行维修的工程师技能如何;3. 支撑维修的备件和设备如何。应记住维修三要素,实际上是服务体制,也是个重要的开发项目。因为维修的焦点,实际上是快速修复,是个速度问题。

(三) 维修性的尺度

维修性指的是备有可修性的系统、机器、零件等所表示的维修难易程序或性质。

为了测定维修性可以采用平均修复时间 MTTR 和维修度。

1. MTTR(mean time to repair):需要事后维修的时间平均值,可以用以下公式表示:

$$MTTR = \frac{\text{总的维修时间}}{\text{总的维修件数}} \quad (1-9)$$

例 4,设有若干台燃油控制器在某个时间维修时间与件数关系如下: