

# 航空喷气发动机自动控制 设计手册

HANGKONG PENQI FADONGJI  
ZIDONG KONGZHI SHEJI SHOUCHE

下 册

国防工业出版社

# 航空喷气发动机自动控制 设计手册

下 册

《航空喷气发动机自动控制设计手册》编写组 编

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本手册共十一章，分上、下两册出版。

上册一至五章。内容包括：航空喷气发动机自动控制系统的常用数表及物理数据表，常用计算公式和常用单位换算，常用航空液体的主要技术数据，以及常用材料和常用基础标准。

下册六至十一章。内容包括：航空油泵和元件设计，自动调节系统和自动调节系统的设计，航空油泵和自动调节器的装配、试验、使用、维护和故障，以及泵和自动调节器、自动控制系统的试验设备。

本手册可供从事航空喷气发动机自动控制系统设计、制造和使用的工程技术人员以及有关高等院校的师生查阅使用，也可供从事地面和船用燃气轮机以及冲压发动机自动控制系统的有关人员参考。

### 航空喷气发动机自动控制 设计手册

下 册

《航空喷气发动机自动控制设计手册》编写组 编

\*

国防工业出版社 出版

国防工业出版社印刷厂印装 内部发行

\*

787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 51<sup>1</sup>/<sub>2</sub> 插页 2 1197 千字

1984年6月第一版 1984年6月第一次印刷 印数：0,001—2,000册

统一书号：N15034·2139 定价：10.90元

# 前 言

《航空喷气发动机自动控制设计手册》是我国第一部属于本专业的的设计手册。在编写过程中，我们力求手册具有一定的先进性、科学性和准确性。要求广泛收集国内外有关技术文献，并总结建国以来我们在科研、设计、制造、使用和教学中的经验，使手册不但为读者提供所需要的技术数据、公式和图表，而且对读者的专业工作有一定的启发和指导作用。但是，由于我国在航空发动机自动控制专业方面和世界先进水平差距较大，我们编写人员在这方面的经验和水平也有限，所以肯定不能满足读者的要求。

本手册共十一章，分上、下两册出版。一至五章为上册，主要是介绍本专业方面的常用数表和数据，常用公式和单位换算，常用材料和标准。航空液体在本专业具有比较重要地位，单独列成一章。六至十一章为下册，其中第六章介绍了在航空发动机上采用的各种主、加力燃油泵，也收集了一些典型的燃油增压泵、喷水泵和有参考价值的液压泵资料。第七章主要是介绍泵和调节器的主要元件设计。第八章是介绍目前国内外一些航空发动机自动调节系统及其分析，列举了它们的调节规律以及调节器的工作原理和特点。第九章主要是介绍了自动调节系统的设计。第十章介绍泵和调节器的装配试验和外场使用。第十一章介绍国内现有的泵和调节器的试验设备和设计。

一至三章是由南京航空学院陈铮、缪国伟、盛益谦、周仲甫、陶贵春、周碧玉编写；第四章由一一三厂聂谷成、韩德芳、一一四厂阎晓峰、李佩芳编写；第五章由一一四厂王林寿编写；第六章由西北工业大学张加桢、杨传和、六〇六所叶绪民、崔仲尧编写；第七章由北京航空学院王玉林、李培滋、王庆康、一一三厂周庆泰、徐纯礼、高先文编写；第八章由六二四所刘大卫、李桂敏、六〇六所张绍基编写；第九章由六〇六所陶如骅编写；第十章由一一三厂陈仁良、林文奎、肖德贵编写；第十一章由六二四所王戈一、郭成文、一一三厂易炳南、邱仁郁编写。

一至五章由缪国伟校；第六章由张加桢校；第七章由王庆康校；第八章由陶如骅校；第九章由张加桢校；第十章由陈仁良校；第十一章由刘大卫校。

全书主编：罗扬信、张加桢。

全书在收集资料和编写过程中，得到了许多兄弟单位和同志的大力支持和协助，而且在审定稿过程中，许多专家应邀参加了审定工作，并提出了许多宝贵意见，在此一并致谢。

由于本书系我们初次编写，水平有限，谬误之处在所难免，望读者在使用中指正。

《航空喷气发动机自动控制设计手册》编写组

1979年6月

## 目 录

第六章 油 泵	
第一节 概述 .....	1
一、航空燃油泵分类 .....	1
二、各类燃油泵特点对照 .....	2
三、对主、加力燃油泵的要求 .....	3
四、国产主要航空油泵性能 .....	3
(一) 柱塞泵 .....	3
(二) 齿轮泵 .....	3
(三) 旋板泵 .....	4
(四) 离心泵 .....	4
第二节 柱塞泵 .....	5
一、柱塞泵工作原理 .....	5
二、柱塞泵供油量计算 .....	5
三、柱塞泵参数分析 .....	6
四、柱塞泵的特性 .....	7
五、柱塞泵的功率 .....	7
六、柱塞泵运动学 .....	8
七、柱塞泵受力分析 .....	9
(一) 柱塞受力 .....	9
(二) 柱塞对斜盘的作用力 .....	11
(三) 一个柱塞对斜盘转轴的作用力矩 .....	11
(四) 全部柱塞对斜盘的总力矩 .....	12
(五) 柱塞对斜盘的平均力矩 .....	13
(六) 随动活塞杆力 .....	13
八、柱塞泵主要元件的设计计算 .....	14
(一) 柱塞头部挤压应力 .....	14
(二) 柱塞与斜盘的接触条件 .....	14
(三) 柱塞支承面单位压力计算 .....	15
(四) 转子和分油盘端面接触力计算 .....	15
(五) 分油盘窗口之间的密封带设计 .....	17
九、流体静压支承柱塞 .....	18
(一) 工作原理 .....	18
(二) 计算公式 .....	19
(三) 设计计算步骤 .....	19
(四) 保持架的设计计算 .....	20
十、柱塞泵结构参数初步确定步骤 .....	22
十一、柱塞泵的结构与材料 .....	25
(一) 转子 .....	25
(二) 柱塞 .....	27
(三) 分油盘 .....	29
(四) 斜盘组合件 .....	30
(五) 随动活塞 .....	30
(六) 随动弹簧及柱塞弹簧 .....	31
第三节 齿轮泵 .....	32
一、齿轮泵的工作原理 .....	32
二、齿轮泵的供油量计算 .....	32
三、齿轮泵的参数分析 .....	33
(一) 模数 $m$ .....	33
(二) 齿数 $Z$ .....	33
(三) 齿宽 $b$ .....	33
(四) 转速 $n$ .....	33
(五) 间隙 .....	34
四、齿轮泵的特性与供油量调节 .....	35
(一) 齿轮泵的特性 .....	35
(二) 供油量调节 .....	35
(三) 齿轮泵的传动功率 .....	36
五、齿轮泵的供油量脉动 .....	36
六、齿轮泵的困油 .....	36
七、齿轮泵的径向载荷 .....	38
八、端面间隙补偿 .....	40
(一) 衬套弹簧 .....	40
(二) 同心环形承压面衬套 .....	40
(三) 偏心环形承压面衬套 .....	41
(四) 不等油压作用的同心环形承压面衬套 .....	43
(五) 小间隙端面密封 .....	43
九、齿轮泵主要零件的设计计算 .....	43
(一) 齿轮参数设计 .....	43
(二) 齿轮轴承 .....	45
(三) 卸荷槽 .....	47
(四) 壳体 .....	48
十、齿轮泵参数确定步骤 .....	48
第四节 旋板泵 .....	51

一、概述	51	(三)离心叶轮的设计	84
二、旋板泵的工作原理	51	(四)离心泵出口装置的设计	88
三、供油量计算	52	(五)离心泵进口装置的设计	90
四、旋板泵的特性与调节	53	(六)离心泵轴向力与径向力的计算和平衡	91
五、定子内表面类型	54	第六节 汽心泵	92
六、旋板泵径向液压负荷	55	一、概述	92
七、旋板泵的结构	55	二、结构特点	94
(一)旋板的安装倾角	55	三、过流部件的设计	95
(二)中心轴结构	56	(一)前置增压级	95
(三)旋板	57	(二)进口节流活门	95
(四)旋板与定子内表面的接触	57	(三)叶轮	98
(五)旋板在转子槽里的单位支承力	58	(四)蜗室(导叶)及扩散管	98
(六)旋板泵的进、出油口形状	58	(五)空载运行冷却方案	99
八、双作用式可调供油量结构	59	(六)响应速度	99
九、旋板泵的参数确定步骤	61	(七)封严装置	100
十、旋板泵主要零件材料及技术要求	62	四、汽心泵设计计算	101
第五节 离心泵	62	(一)主要参数范围	101
一、离心泵的基本原理及性能参数	63	(二)进口节流活门设计	102
(一)离心泵的组成	63	(三)叶轮主要几何参数的确定	102
(二)离心泵的基本工作原理	63	(四)蜗室及扩散器	103
(三)离心泵的出口实际压头	63	(五)温升	104
(四)离心泵的实际流量	64	五、结构设计	104
(五)离心泵的特性线	64	(一)轴承结构	104
(六)离心泵的比转速	65	(二)主要部件的材料选择	105
(七)离心泵的汽蚀和汽蚀比转速	65	(三)主要部件的紧度、间隙	105
二、现有离心泵的结构及参数分析	65	(四)转子动平衡	105
(一)燃油增压泵	67	(五)临界转速	106
(二)加力泵	67	参考资料	107
(三)喷水加力泵	67		
三、航空发动机离心泵的结构特点	67		
(一)进口装置的主要结构型式	67	<b>第七章 调节元件</b>	
(二)出口装置的主要结构型式	72	第一节 敏感元件	108
(三)前置叶轮的主要结构型式	72	一、概述	108
(四)离心叶轮的主要结构型式	74	(一)对敏感元件的要求	108
(五)诱导轮与离心叶轮的连接型式	75	(二)敏感元件的种类、用途及优缺点	108
(六)密封装置的结构型式	75	二、压力敏感元件	111
(七)轴承	76	(一)橡胶薄膜	111
四、离心泵的材料和主要间隙的选择	76	1. 对薄膜的要求	111
五、离心泵设计步骤	77	2. 结构和材料	112
(一)给定参数和选择计算参数	77	3. 薄膜静特性	114
(二)诱导轮的设计	78	4. 薄膜输出力	116
		5. 薄膜的设计步骤	117
		6. 目前燃油泵及调节器所用薄膜一览表	117

(二)膜片及膜盒 .....	124	(七)射流式温度敏感元件 .....	167
1. 膜片、膜盒的结构及用途 .....	124	1. 工作原理 .....	167
2. 制造膜片的材料 .....	126	2. 静态特性 .....	167
3. 膜片的特性曲线 .....	126	3. 射流式温度传感器的应用 .....	168
4. 膜片设计 .....	128	(八)目前发动机燃油调节系统中所用温度敏 感元件 .....	169
5. 计算例题 .....	135	五、转速敏感元件 .....	169
(三)波纹管 .....	137	(一)机械离心式转速敏感元件 .....	170
1. 波纹管的结构及其应用 .....	137	1. 工作原理及应用 .....	170
2. 波纹管材料 .....	138	2. 静态特性 .....	170
3. 波纹管的计算 .....	139	3. 动态特性 .....	174
4. 波纹管的动态特性 .....	142	4. 结构型式及选材 .....	176
5. 环形单层金属波纹管型式、基本参数与尺寸 .....	143	5. 机械离心式转速敏感元件的设计步骤 .....	188
三、压力比敏感元件 .....	148	(二)液压离心式转速敏感元件 .....	189
(一)工作原理 .....	148	1. 工作原理 .....	189
(二)分压器的静态特性 .....	149	2. 静态特性 .....	189
(三)影响分压比的因素 .....	152	3. 动态特性 .....	190
1. 气嘴流量系数对分压比的影响 .....	152	第二节 液压放大元件 .....	191
2. 反压力 .....	152	一、定义 .....	191
3. 其它因素的影响 .....	153	二、功用 .....	191
(四)分压器的动态特性方程 .....	153	三、分类 .....	192
(五)压力比敏感元件的静态特性 .....	154	四、结构型式和控制方案 .....	193
1. 静态特性方程 .....	154	(一)分油活门元件的结构型式和控制方案 .....	193
2. 迟滞误差 .....	155	(二)喷嘴挡板元件的结构型式和控制方案 .....	194
3. 灵敏度 .....	155	(三)射流管元件的结构型式和控制方案 .....	195
4. 不灵敏带 .....	155	五、性能比较和选型要点 .....	195
(六)压力比敏感元件的动态特性 .....	155	六、放大元件的结构尺寸和性能参数 .....	196
(七)压力比敏感元件的设计计算过程 .....	156	七、静、动态特性表达式和特性线 .....	197
(八)目前燃油调节器中应用的压力比敏感元 件一览表 .....	157	(一)分油活门元件的静、动态特性表达式和 特性线 .....	197
四、温度敏感元件 .....	158	(二)分油活门元件的功率、效率和最佳 工作点 .....	199
(一)对温度敏感元件的主要技术要求 .....	158	(三)分油活门的灵敏性及提高灵敏性的 措施 .....	200
(二)温度敏感元件的类型、应用及优、缺点 .....	158	(四)喷嘴挡板元件的静、动态特性表达式和 传递函数 .....	200
(三)充填式温度敏感元件 .....	158	(五)射流管元件的静、动态特性表达式和特 性线 .....	205
1. 工作原理及分类 .....	158	八、分油活门元件的设计方法、步骤和 材料工艺问题 .....	206
2. 充气式温度敏感元件的温度压力特性 .....	159	(一)分油活门元件的一般设计方法和步骤 .....	206
3. 充蒸气式温度敏感元件 .....	161	(二)分油活门偶件的材料和加工工艺 .....	208
4. 充液式温度敏感元件 .....	162	(三)分油活门元件设计计算举例 .....	210
(四)热电式温度敏感元件 .....	162	九、喷嘴挡板元件的设计方法、步骤和 材料工艺问题 .....	211
1. 工作原理 .....	162		
2. 材料 .....	162		
3. 静态特性 .....	163		
4. 动态特性 .....	163		
(五)电阻式温度敏感元件 .....	164		
1. 工作原理及应用 .....	164		
2. 热电阻的静态特性 .....	164		
(六)双金属式温度敏感元件 .....	166		
1. 工作原理 .....	166		
2. 静态特性 .....	166		

(一)喷嘴挡板元件的一般设计方法和步骤	211	4. 弹簧的允许偏差	277
(二)喷嘴挡板元件材料和加工工艺问题	213	5. 弹簧一般技术要求	279
第三节 执行元件	215	6. 弹簧的特殊处理	280
一、执行元件概况	215	7. 弹簧的试验	280
(一)随动机的种类	215	8. 组合弹簧设计	281
(二)优缺点比较	216	9. 拉伸弹簧设计计算公式	282
(三)目前生产的典型随动机	216	10. 拉伸弹簧计算表	283
二、执行元件的计算	218	11. 扭转弹簧计算公式	285
(一)性能要求	218	12. 圆锥弹簧设计	286
(二)随动机的流量 $Q$ 和运动速度 $v$ 的计算	218	13. 片簧计算公式	288
(三)随动机的输出力、作用时间及储油量 计算	219	(三)现有附件弹簧(压缩弹簧)一览表	289
(四)随动机活塞筒内径计算	220	二、杠杆	292
(五)活塞筒壁厚的计算	222	(一)杠杆分类	292
(六)活塞杆的计算	224	(二)杠杆的结构设计	293
(七)活塞宽度的确定	225	1. 杠杆本体设计	293
(八)随动机活塞筒盖螺钉的计算	226	2. 杠杆支点设计	295
(九)随动机方程式	227	3. 杠杆触点设计	296
三、执行元件的构造和材料	229	三、花键	298
(一)典型调节器随动机的构造特点	229	(一)花键分类	298
(二)典型调节器随动机的材料和工艺	231	(二)花键结构设计	299
第四节 节流元件和其它元件	234	1. 外花键	299
一、节流元件	234	2. 内花键	299
(一)液体经小孔和缝隙的节流	234	(三)花键标准	299
(二)节流元件节流部分的结构型式	237	1. 渐开线花键连接	299
(三)燃油调节附件常用的节流元件	238	2. 三角花键连接	311
1. 层板限制器	238	3. 矩形花键连接	324
2. 燃油分配器	240	4. 端面齿花键连接	330
3. 油门开关	241	(四)现有附件花键一览表	330
4. 油嘴	255	四、小模数齿轮	334
二、其它元件	257	(一)小模数齿轮原始齿形要素	334
(一)定压活门	257	(二)齿轮模数	335
(二)等压差活门	259	(三)小模数齿轮设计	335
(三)加速活门	261	1. 齿轮常用材料	335
(四)最小压力活门	263	2. 齿轮常用材料机械性能	336
(五)油滤	264	3. 齿轮结构参数设计	336
第五节 机械元件	268	4. 齿轮计算	337
一、弹簧	268	(四)小模数齿轮零件图一般技术要求标注	349
(一)附件常用弹簧分类	268	1. 直齿圆柱齿轮	349
(二)弹簧设计	269	2. 直齿圆锥齿轮	349
1. 弹簧常用的几种材料	269	3. 齿条	350
2. 压缩弹簧设计	270	4. 蜗杆蜗轮特性数据	350
3. 压缩弹簧计算表	275	(五)齿轮传动公差	351
		1. 小模数圆柱齿轮传动公差	351
		2. 小模数圆锥齿轮传动公差	366
		3. 小模数齿条传动公差	376
		4. 小模数蜗轮、蜗杆传动公差	377
		(六)现有附件小模数圆柱齿轮、圆锥齿轮、 蜗轮蜗杆、齿条一览表	389



五、凸轮 .....391

    (一) 凸轮分类 .....391

    (二) 凸轮结构设计 .....391

        1. 凸轮常用材料 .....391

        2. 凸轮传动部位 .....391

        3. 凸轮基圆(传动凸缘)设计 .....393

        4. 凸轮型面设计 .....393

        5. 凸轮从动件结构 .....393

六、轴承 .....395

    (一) 附件常用轴承分类 .....395

    (二) 轴承精度 .....395

    (三) 轴承的配合 .....396

    (四) 轴承的固定 .....397

    (五) 单列向心球轴承安装参考尺寸 .....398

    (六) 常用单列向心球轴承 .....399

    (七) 常用关节轴承 .....402

    (八) 钢球 .....402

        1. 钢球的精度 .....402

        2. 钢球的公称直径 .....403

        3. 钢球直径允差 .....403

        4. 钢球的标志 .....404

第六节 密封元件 .....404

一、密封件概述 .....404

    (一) 密封件的应用 .....404

    (二) 常用密封件种类 .....404

二、常用密封材料 .....407

    (一) 选材的基本原则 .....407

    (二) 常用密封材料简介 .....407

        1. 橡胶 .....407

        2. 石墨 .....407

        3. 塑料 .....407

        4. 金属材料 .....407

三、典型密封结构 .....408

    (一) O形密封圈 .....408

        1. 型式、技术要求和使用条件 .....408

        2. 材料的选择 .....409

        3. 密封结构型式、尺寸及标注方法 .....409

        4. 密封结构的尺寸公差、精度及表面光洁度 .....416

        5. 密封结构设计程序 .....417

        6. 密封圈尺寸设计 .....418

        7. 密封圈安装槽 .....422

        8. 保护圈 .....423

        9. 密封圈使用安装注意事项 .....425

        10. 螺纹连接件的密封结构 .....426

    (二) 空心金属O形圈 .....428

    (三) 合成树脂制O形圈 .....429

    (四) 橡胶皮碗 .....429

        1. 分类及使用条件 .....429

        2. 结构型式 .....430

    (五) 机械密封 .....443

        1. 概述 .....443

        2. 原理 .....443

        3. 结构特点 .....444

        4. 分类 .....444

        5. 机械密封的设计 .....445

        6. 产品现用机械密封结构 .....452

    (六) 密封垫 .....453

        1. 耐油橡胶石棉垫 .....453

        2. 密封垫子 .....454

        3. 金属密封垫圈 .....455

        4. 橡胶包覆金属密封垫片 .....455

        5. 矩形密封圈 .....456

        6. 毛毡封严圈 .....457

    (七) 其它密封方法 .....458

        1. 封严帽 .....458

        2. 密封膏 .....458

参考资料 .....460

## 第八章 自动调节系统

第一节 自动调节系统一般特征统计 .....461

一、国内、外部分产品配套统计 .....461

二、燃气涡轮发动机被调参数、调节量和调节规律统计 .....462

三、各型泵和调节器主要技术数据统计 .....466

第二节 国内、外发动机调节器介绍 .....472

一、各型主燃油调节器原理 .....472

    (一) 涡喷五甲发动机主燃油调节器 .....472

    (二) ZB-9主燃油泵调节器和FB-4燃油分配器 .....474

    (三) ZB-10A主燃油泵调节器 .....476

    (四) ZB-21主燃油泵调节器 .....478

    (五) ZB-15、ZB-28主燃油泵调节器 .....481

    (六) 1307型燃油调节器 .....484

    (七) MC-16燃油调节器 .....489

    (八) JFC-25燃油调节器 .....490

    (九) CASC燃油流量调节器 .....493

    (十) ZB-36油泵传感器和RT-9燃油调节器 .....496

    (十一) RT-11燃油调节器 .....500

    (十二) 透默■C6发动机燃油调节器 .....503

    (十三) 阿都斯特■发动机燃油调节器 .....507

二、各型加力燃油调节器原理 .....	510
(一)概述 .....	510
(二)加力燃油调节器简介 .....	510
1. ZB-11A 加力燃油调节器 .....	510
2. ZB-14加力燃油调节器和FB-5燃油分配器 .....	513
3. ZB-22 加力燃油调节器 .....	513
4. 斯贝MK202加力燃油调节器 .....	516
三、叶片调节器原理 .....	520
(一)概述 .....	520
(二)几种叶片调节器简介 .....	520
1. LT-6叶片调节器 .....	520
2. 1307燃油调节器内的叶片调节器 .....	521
3. EVC3叶片调节器 .....	522
4. 斯贝MK202 发动机叶片调节器 .....	524
四、喷口操纵与调节 .....	525
(一)概述 .....	525
(二)斯贝MK202喷口操纵机构与调节器 .....	525
五、进气道调节 .....	527
第三节 典型系统动态特性分析 .....	529
一、采用继电型非线性并联校正装置的 转速调节系统 .....	529
二、采用二次幂型非线性并联校正装置 的转速调节系统 .....	539
三、同时测量转速和压气机出口压力的 双讯路调节系统 .....	542
参考资料 .....	543

## 第九章 发动机自动控制系统的的设计

第一节 对自动调节系统的要求 .....	544
一、发动机对自动调节系统的一般 要求 .....	545
二、各类发动机要求的工作状态、调节 作用量和可能的调节参数 .....	547
(一)可调尾喷口加力式单轴涡轮喷气 发动机 .....	547
1. 发动机要求的工作状态 .....	547
2. 调节作用量 .....	547
3. 可能的调节参数 .....	548
4. 调节方式和示意图 .....	548
(二)可调尾喷口加力式双转子涡轮喷气发 动机 .....	548
1. 发动机要求的工作状态 .....	549
2. 调节作用量 .....	549
3. 可能的调节参数 .....	549
4. 调节方式及示意图 .....	549

(三)可调尾喷口加力式涡轮风扇发动机 .....	550
1. 发动机要求的工作状态 .....	550
2. 调节作用量 .....	550
3. 可能的调节参数 .....	551
4. 调节方式及示意图 .....	551
(四)单轴涡轮螺旋桨发动机 .....	553
1. 发动机要求的工作状态 .....	553
2. 调节作用量 .....	554
3. 可能的调节参数 .....	554
4. 调节方式及示意图 .....	554
(五)涡轮轴发动机 .....	555
1. 发动机要求的工作状态 .....	555
2. 调节作用量 .....	555
3. 可能的调节参数 .....	555
4. 调节方式及示意图 .....	555
(六)选定调节方案、调节作用量和调节参数 时需考虑的问题 .....	556

## 三、发动机对各类自动调节系统要求的 具体项目 .....

### 第二节 拟定自动调节系统的原理图 .....

#### 一、基本结构型式的选定 .....

#### 二、调节的原理性方案选定 .....

(一)状态调节 .....	563
1. 按偏差原理工作的自动调节系统 .....	563
2. 按干扰补偿原理工作的自动调节系统 .....	563
3. 按复合调节原理工作的自动调节系统 .....	563
4. 按级联原理工作的自动调节系统 .....	565
5. 自适应式控制系统 .....	565
6. 自学习控制系统 .....	566
(二)过渡态调节 .....	566
1. 按时间程序的过渡态调节 .....	566
2. 按参数程序的过渡态调节 .....	567
3. 组合方式的过渡态调节 .....	570
4. 闭式过渡态调节 .....	573
(三)统一调节 .....	574
1. 部分统一调节器 .....	574
2. 全统一调节器 .....	575

### 第三节 自动调节系统的设计计算 .....

#### 一、系统静特性设计计算 .....

(一)发动机对调节装置的主要要求 .....	576
(二)需用供油线的实现 .....	577
(三)控油活门静特性计算 .....	579

#### 二、系统动态特性的设计计算 .....

(一)线性系统的设计计算 .....	582
1. 发动机动态方程的建立 .....	582
2. 系统结构稳定的判定 .....	584

3. 线性系统的设计计算 .....	586
4. 多输入-多输出自动调节系统的设计 .....	608
5. 利用电子模拟计算机进行自动调节系统的 设计计算 .....	611
(二)自动调节系统的非线性设计计算 .....	612
第四节 自动调节系统的结构设计 .....	618
一、结构设计的原则 .....	618
二、结构设计细节 .....	619
第五节 自动调节系统管路的选择和 计算 .....	619
一、管路的基本类型 .....	619
二、管道内径的选择 .....	619
三、管路系统压力损失计算 .....	621
四、管路容积损失计算 .....	625
五、导管的振动计算 .....	625
六、液压冲击计算 .....	626
七、导管强度校核 .....	627
八、管路发热计算 .....	627
(一)典型发动机燃油调节器进口燃油允许的 最高温度 .....	627
(二)管路系统燃油温度的计算 .....	627
参考资料 .....	629

## 第十章 泵和自动调节器的装配、 试验、使用维护和故障排除

第一节 典型元件试验 .....	630
一、液压元件试验 .....	630
(一)试验条件 .....	630
(二)试验方法和要求 .....	630
1. 液压延迟器的试验 .....	630
2. 等压差活门试验 .....	631
3. 反馈活门的试验 .....	632
4. 急降活门的试验 .....	634
5. 分油活门的试验 .....	634
6. RT-15分油活门灵敏性试验 .....	635
二、机械离心式转速敏感元件试验 .....	636
(一)试验条件 .....	636
(二)试验方法及要求 .....	636
三、压力敏感元件的试验 .....	637
1. 橡胶薄膜的试验 .....	637
2. 膜盒试验 .....	638
四、固定式层板限制器的试验 .....	643
(一)试验条件 .....	643

(二)试验方法和要求 .....	643
第二节 装配 .....	645
一、装配的基本要求 .....	645
二、装配时常用辅助材料和器材 .....	645
三、装配工艺路线 .....	646
(一)装配、试验和配套程序 .....	646
(二)组合件装配的一般规律 .....	646
(三)总装分类 .....	646
四、燃油泵的装配举例 .....	647
(一)柱塞泵 .....	647
(二)齿轮泵 .....	652
(三)离心泵 .....	653
五、调节器装配举例 .....	654
(一)转速传感器 .....	654
(二)液压反馈机构(回输装置) .....	656
(三)自动加速器 .....	659
(四)燃油分配器 .....	661
(五)自动起动器 .....	661
(六)燃油最小压力限制器 .....	662
(七)油门联锁装置与恒油量调节器 .....	662
(八)气压调节器 .....	664
(九) $\pi_w$ 调节器 .....	666
(十)机械式自动调节器 .....	667
第三节 试验 .....	669
一、试验目的和分类 .....	669
二、泵和自动调节器试验的基本要求 .....	669
(一)对试验设备的基本要求 .....	669
(二)对试验工作液的要求 .....	669
(三)对试验环境的要求 .....	669
(四)操作要求 .....	669
三、运转试验 .....	670
(一)规范和要求 .....	670
(二)试验程序和注意事项 .....	670
四、调整试验 .....	670
(一)试验基本条件 .....	670
(二)油泵调整试验的方法和要求 .....	674
1. 可变量泵的调整和检查 .....	674
2. 定量油泵供油量的检查 .....	675
(三)自动调节器调整方法和要求 .....	675
1. 停车面积的调整和检查 .....	675
2. 慢车面积和慢车中点位置的确定 .....	676
3. 定压活门压力的调整 .....	676
4. 等压差活门压差的调整 .....	676

5. 慢车油量的调整 .....677

6. 机械离心式转速调节器的调整 .....677

7. 执行机构运动速度的调整 and 检查 .....678

8. 燃油分配器性能的调整 .....680

9. 自动加速器的调整 .....681

10. 自动起动器的调整 .....683

11. 气压调节器(高度速度调节器)的调整 .....684

12. 油门开关节流特性的调整 .....686

13.  $\pi_w$  调节器性能的调整 .....688

14. 温度调节器特性的调整 .....688

15. 最小压力活门性能的调整 .....688

16. 断油活门性能的调整 and 检查 .....689

17. 卸荷(安全)活门性能的调整 .....689

18. 最大转速限制器性能的调整 .....690

19. 最大功率限制器性能的调整 .....690

20. 温度限制器性能的调整 .....691

21. 发动机防喘振自动调节器的调整 .....691

(四) 泵和自动调节器的密封性试验 .....691

五、长期试验 .....692

(一) 长期试验程序 .....692

(二) 长期试验规程 .....692

(三) 长期试验后质量评定 .....696

第四节 使用与维护 .....698

一、燃油附件的启封和油封 .....698

(一) 启封 .....698

(二) 油封 .....698

二、燃油附件在发动机上的安装 .....698

三、燃油附件在发动机上的调整 .....699

(一) 注意事项 .....699

(二) 涡喷五甲、乙、丙、丁发动机燃油附件的调整 .....699

(三) 涡喷五发动机燃油附件的调整 .....701

(四) 涡喷六发动机燃油附件的调整 .....703

(五) 涡喷七发动机燃油附件的调整 .....706

(六) 涡喷八发动机燃油附件的调整 .....709

(七) 涡桨五发动机燃油附件的调整 .....710

(八) 涡桨六发动机燃油附件的调整 .....712

第五节 故障及其排除方法 .....715

一、故障性质的分类与造成故障的原因 .....715

二、排除故障的要求、步骤和方法 .....716

(一) 要求 .....716

(二) 步骤 .....716

(三) 方法 .....716

三、故障及排除方法举例 .....717

(一) 外场故障 .....717

(二) 内厂故障 .....718

四、附件结构和选材不当而引起的故障

    举例 .....719

参考资料 .....720

## 第十一章 泵、自动调节器和自动控制系统的试验设备

第一节 试验设备的概况和典型系统 .....721

一、燃油泵-自动调节器静态性能试验器 .....721

二、环境模拟试验器 .....725

三、增压泵(离心式)试验器 .....726

四、叶片调节器试验器 .....727

五、液压元件试验器 .....728

六、气动元件试验器 .....729

七、离心块元件试验器 .....730

八、生产工艺辅助试验器 .....730

九、燃油泵-自动调节器动态特性试验器(发动机模拟器) .....732

第二节 试验器性能参数的确定和方案设计 .....735

一、性能参数的确定 .....735

二、燃油系统设计 .....736

三、传动方案设计 .....737

第三节 试验设备内主要部件的选择和计算 .....738

一、阀 .....738

(一) 阀的分类 .....738

(二) 阀的应用 .....739

    1. 压力控制阀 .....739

    2. 流量控制阀 .....744

    3. 方向控制阀 .....746

(三) 阀的选择 .....754

二、滤油器 .....755

(一) 滤油器过滤面积的计算 .....755

(二) 滤芯的品种和规格 .....757

    1. 金属丝编织方孔网 .....757

    2. 金属丝编织特种滤网 .....758

    3. 国内其它方格式金属网规格 .....759

4. 粉末金属烧结滤芯 .....759

5. 纸质滤芯 .....762

6. 磁质滤芯 .....763

(三) 滤油器的产品规格 .....763

三、油箱 .....767

(一) 油箱的要求 .....767

(二) 油箱的储油量计算 .....767

(三) 油箱散热面积的计算 .....768

(四) 试验设备常用油箱的种类及规格 .....768

1. 开式油箱 .....768

2. 闭式油箱 .....770

四、散热器 .....772

(一) 散热器的要求 .....772

(二) 散热器的热计算 .....772

(三) 试验设备常用散热器种类及规格 .....773

1. 管式散热器 .....773

2. 板式散热器 .....776

3. 空气散热器 .....778

第四节 测试设备 .....780

一、流量测量 .....780

二、压力测量 .....781

三、温度测量 .....781

四、转速测量 .....782

五、功率、位移测量 .....783

1. PY<sub>1</sub> 型数字转矩转速测量仪 .....783

2. PY<sub>2</sub> 型数字位移表 .....783

3. FY83 型感应直线位移转换器 .....784

六、二次仪表及记录仪器 .....784

七、模拟计算机及超低频动态分析  
仪器 .....785

1. DMJ-3A型模拟式电子计算机 .....785

2. HMJ系列混合模拟计算机 .....786

3. M-6 型电子模拟计算机 .....787

4. BT-6 型超低频频率特性测试仪 .....788

第五节 导管和导管连接件 .....788

一、导管 .....788

(一) 金属导管 .....788

(二) 不锈钢金属软管 .....789

(三) 军工用钢丝编织胶管 .....790

(四) 带接头的钢丝编织胶管 .....790

(五) 军工用棉线编织胶管 .....790

(六) 带接头的棉线编织胶管 .....791

(七) 真空胶管 .....791

二、导管连接件 .....791

(一) 常用连接件类型 .....791

(二) 扩口式管路连接件 .....795

(三) 球面式管路连接件 .....797

(四) 直通管接头卡套连接式组合件 .....800

(五) 锯齿形橡胶软管连接 .....807

参考资料 .....808

# 第六章 油 泵

## 第一节 概 述

油泵是一种将机械能转化为油液压力能的机械。其功用是向发动机供应带压力的燃料,如煤油、汽油、柴油等;供应润滑油,以及满足特种需要的其它液体,如水、酒精等。其中,供应燃料的泵职能最重要,结构复杂,性能要求高。

根据供油原理,油泵可分成两大类。

**容积式泵** 它是依靠抽吸零件作相对运动时,不断改变零件间的容积进行抽油、挤油的。出口的液体根据外界流动阻力建立压力,其压力大小理论上和供油量无关。这类泵目前在航空发动机上应用最广,如柱塞泵、齿轮泵、旋板泵等。

**叶轮式泵** 它是根据叶轮的旋转运动,使液体增加动能和压力能,然后在专门的扩压器中再将一部分动能转化为压力能。这类泵有离心泵、轴流泵、螺桨泵等。

根据油泵抽吸零件一个周期运动(一转或一个往复)所产生的供油量是否可变,油泵可分成:

**定量容积泵** 当出口压力一定,泵抽吸零件一个周期运动始终产生恒定的供油量。

**变量容积泵** 当出口压力一定,抽吸零件每一周期运动可有不同的供油量。

**定量叶轮泵** 当出口压力一定,叶轮每转产生的供油量不变。

**变量叶轮泵** 当出口压力一定,叶轮每转有不同的供油量。

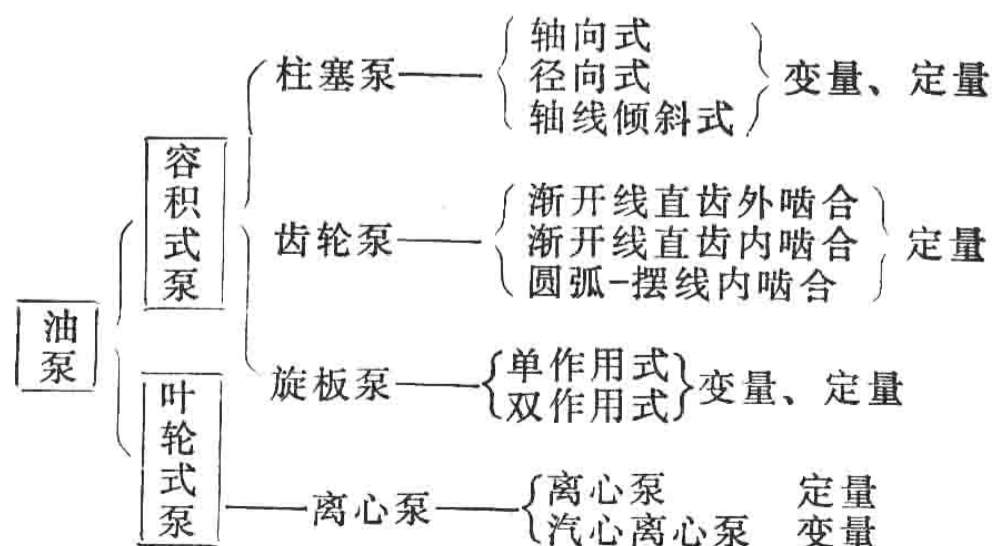
每一种类型的泵,根据其结构特点又有不同的类别。

目前航空发动机主、加力燃油供应中用得最多的是柱塞倾斜布置的变量柱塞泵,其次是渐开线直齿外啮合齿轮泵。

定量和变量离心泵通常用作大供油量加力泵。

低压燃油的供应,如起动供油、辅助增压、滑油、酒精的供应常用单作用式定量旋板泵、齿轮泵、离心泵。

### 一、航空燃油泵分类



## 二、各类燃油泵特点对照 (表6-1)

表6-1 燃油泵特点对照

油泵类型	柱塞泵	齿轮泵	旋板泵	离心泵	离心泵	汽心泵
比重量 (泵重/功率)	最大	次之 (约为柱塞泵的1/2)	再次之	最小 (供油量越大越突出)	类似离心泵	类似离心泵
转速不变时的供油量可调节性	变斜盘角度可调节性好, 油量从零到最大值, 甚至可为负值	靠旁路回油, 可调节性好, 功率损失大, 燃油温升高	变定子与转子的偏心距, 可调节性好	靠旁路回油或出口节流, 可调节性不好, 损失大, 温升高	变进口节流, 可调节性好	变进口节流, 可调节性好
低转速下压力情况	压力与流量独立, 低转速时, 可得高的压力	同 柱 塞 泵	同 柱 塞 泵	压力与转速平方成正比, 低转速时压力很低	同 离 心 泵	同 离 心 泵
结构复杂程度	复 杂	较 简 单	较 复 杂	最 简 单	简 单	单
加工要求与成本	高	次 之	高	不 高	较 不 高	高
抗燃油污染能力	不 强	较 不 强	类似齿轮泵	强	强	强
目前航空应用的供油量范围	2600~12500升/小时	350~20000升/小时	可超过柱塞泵与齿轮泵	50000~60000升/小时或更高	50000~60000升/小时或更高	50000~60000升/小时或更高
出口压力范围	80~140公斤/厘米 <sup>2</sup>	60~100公斤/厘米 <sup>2</sup>	60~110公斤/厘米 <sup>2</sup>	~70公斤/厘米 <sup>2</sup>	~90公斤/厘米 <sup>2</sup>	~90公斤/厘米 <sup>2</sup>
适用范围	中低推力级的燃气轮机主、加力泵	同 柱 塞 泵	可用于更高推力级发动机的主、加力泵	大供油量加力泵	大供油量加力泵	大供油量加力泵
发展前途	在中低推力级发动机上可能逐渐为齿轮泵、旋板泵代替	节流比不大的中、低推力级发动机主、加力泵	大推重比、大节流比以及大流量的发动机主泵	节流比不大的加力泵	大推重比、大节流比、大流量发动机加力泵	大推重比、大节流比、大流量发动机加力泵

### 三、对主、加力燃油泵的要求

- 1) 小的比重量 (泵重量/泵功率);
- 2) 额定压力下的高效率 (目前主燃油泵额定压力范围: 供应双路喷嘴, 柱塞泵80~140公斤/厘米<sup>2</sup>, 齿轮泵50~70公斤/厘米<sup>2</sup>; 供应甩油盘或蒸发式喷嘴在10公斤/厘米<sup>2</sup>上下);
- 3) 结构简单, 安全可靠, 有高的寿命 (歼击机800~1000小时; 运输机3000小时以上);
- 4) 供油量在转速不变的情况下, 可以方便、合理地进行调节 (目前油量调节比可达100:1、150:1或更高);
- 5) 燃油经油泵后温升要小;
- 6) 抗燃油污染能力强 (对油中的硬质颗粒、纤维杂质、化学成分不敏感);
- 7) 有一定抽吸能力, 抗气蚀能力强;
- 8) 有一定的环境适应能力 (如高、低温, 振动, 腐蚀性蒸气, 低压, 大惯性力等), 目前燃油工作温度最高可达200°C以上, 最低-50~-60°C。

### 四、国产主要航空油泵性能

#### (一) 柱塞泵 (表6-2)

表6-2 航空柱塞燃油泵性能统计表

序号	产品型号	用途	最大供油量 (升/小时)	最大出口压力 (公斤/厘米 <sup>2</sup> )	最大转速 (转/分)	进口压力 (公斤/厘米 <sup>2</sup> )
1	ZB-2C	涡喷五甲主油泵	≥2350	99	3200	0.3~1.1
2	ZB-3C	涡喷五甲主油泵	≥2350	99	3200	0.3~1.1
3	ZB-9	涡喷五主油泵	4440 <sup>+100</sup>	80	2900	1.1~1.5
4	ZB-10A	涡喷六主油泵	4180 <sup>+200</sup>	80	3565±30	1.6~2.6
5	ZB-11A	涡喷六加力油泵	3700 <sup>+40</sup> <sub>-80</sub>	90	3565±30	1.6~2.6
6	ZB-14	涡喷五加力油泵	4176 <sup>+348</sup>	110	5000	1.1~1.5
7	ZB-15	涡喷八主油泵	7200 <sup>+200</sup>	90	4465±20	1.8~3.0
8	ZB-21	涡喷七主油泵	7000 <sup>+200</sup>	80	4250	2.4~2.8
9	ZB-22	涡喷七加力油泵	10500-100	90	4600	2.4~2.8
10	ZB-28	涡喷八主油泵	8300 <sup>+100</sup>	90	4465±20	1.8~3.0
11	ZB-36B ZB-36	涡浆五、涡轴六主油泵	>1200	90	3470	0.6~3.0
12	GD-119	民用斯贝主油泵	7180	112.4~126.3	3130	1.96~3.51
13	P1001	斯贝MK202主油泵	12500	77	2930	4.93~5.63

#### (二) 齿轮泵 (表6-3)

表6-3 航空齿轮泵性能统计表

序号	产品型号	用途	供油量 (升/小时)	出口压力 (公斤/厘米 <sup>2</sup> )	转速 (转/分)	进口压力 (公斤/厘米 <sup>2</sup> )
1	CB-1	起动油泵	330	2.4~2.5	3000	
2	CB-7	PД-10主油泵	2700	55	5400	0.1~0.5
3	CB-21	歼五液压泵	1170	65, 150	2520	> 2.5
4	CB-29	飞机液压泵	> 420	80~130	2500	
5	CB-33	涡喷八起动机油泵	100~300	18	5000	0.06~1.2
6	CB-34	直五、轰五液压泵	1800	150	2500	0.6
7	CB-55	涡浆六主油泵	>3000	55	4800	> 1.5
8	CB-63	797发动机主油泵	550	6~8	3200	



## (三) 旋板泵 (表6-4)

表6-4 航空旋板泵性能统计表

序号	产品型号	用途	转速 (转/分)	出口压力 (公斤/厘米 <sup>2</sup> )	供油量 (升/小时)	进口压力	
1	XB-4	直升机起动润滑泵	电机驱动8200	0.7	1200		
				3.5	90		
2	XB-10	活塞式M11ΦP汽油泵	1400	0.25~0.3	90~120	真空度大于 250(毫米汞柱)	
			300	0.1~0.215	19~30		
3	XB-11	活塞五汽油泵	2200	0.24~0.28	390~410	真空度大于 250(毫米汞柱)	
			2100	0.24~0.28	320~340		
			400	0.16~0.22	23~40		
4	XB-15	活塞发动机汽油泵		0	不小于 400	吸油高度 1 米水柱	
				2200	0.5		不小于 175
					1		不小于10
5	XB-17	涡喷发动机起动煤油泵	3750(Ⅱ-150 电机驱动1:4)	进、出口开关全开	不小于 210	0.7(绝对) (公斤/厘米 <sup>2</sup> )	
				2.45	<18		
6	XB-24	涡喷五甲起动汽油泵	2750	0.2	2800	真空度 300 (毫米汞柱)	
7	XB-34	涡浆五增压泵					
8	XB-36	涡浆六增压泵	2000	减压活门关闭	4200	0.23~0.8 (绝对) (公斤/厘米 <sup>2</sup> )	
			2280	2.5 <sup>+0.5</sup>	>3000		
			2280	>3	0		

## (四) 离心泵 (表6-5)

表6-5 航空离心泵性能统计表

序号	产品型号	用途	转速(转/分)	出口压力 (公斤/厘米 <sup>2</sup> )	供油量 (升/小时)	进口压力
1	LB-3	增压泵	7200	0.6	4000	相对压力300~400油柱
2	LB-4	增压泵	7200	0.7	2100	相对压力300~600油柱
3	LB-6	涡喷五增压泵	8000	1.1	6000	相对压力400~500油柱
4	LB-7	涡喷五增压泵	6100	0.6	4200	相对压力400~600油柱
5	LB-9	涡喷六中介泵	9000	1.6~2.4	9500	0.4~2.0(绝对)
6	LB-16	涡喷七中介泵	8900	2.9~3.7	18500	0.4~2.0(绝对)
7	LB-24	涡喷八中介泵	8100	2.2~3.0	17000	1.0~2.5(绝对)
8	F-32	×增压泵	10000	4.2	12000	0.4~2.0(绝对)
9	F-15	×增压泵	9140	5.0	45000	0.4~2.0(绝对)
10	JP-19	喷水泵	12200	17~19	7700	
11	528	J 79加力泵	20600	61	25000	