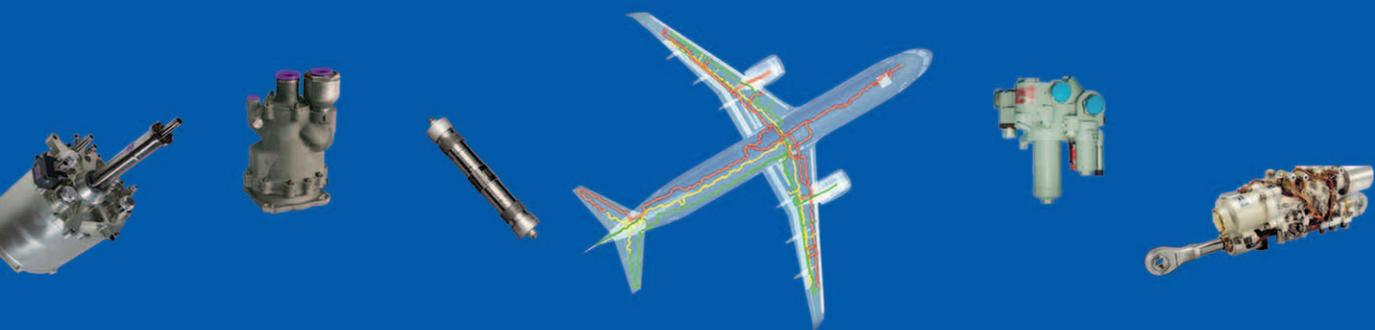


# Modern Hydraulics for Aircrafts

# 现代飞机液压技术

欧阳小平 杨华勇 郭生荣 杨上保 编著



# 现代飞机液压技术

欧阳小平 杨华勇 郭生荣 杨上保 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

## 内 容 提 要

本书共分为 10 章。第 1 章阐述了飞机液压系统的功能、组成、系统配置、发展趋势以及关键技术;第 2 章讨论了航空液压油的基本要求、分类以及 3 种典型航空液压油的特性;第 3 章分析了飞机液压增压油箱的功能、工作原理、结构特点及关键参数对其性能的影响;第 4 章阐述了航空液压泵的种类及特点,重点分析了航空柱塞泵(EDP/EMP/PTU)的基本原理及特性;第 5 章阐述了 3 种典型电液伺服阀的原理、特性及典型应用;第 6 章讨论了传统作动器以及新型作动器(EHA/EBHA/EMA)的原理和特性;第 7 章介绍了航空过滤器和蓄能器的原理、特性及其关键参数;第 8 章阐述了航空液压管路、接头、支撑等的功能、分类及设计要求;第 9 章分析了 3 种主要航空液压密封的结构、原理及其应用;第 10 章介绍了飞机液压能源系统的控制规律并分析了典型工况下的单系统流量需求。

本书注重理论与工程实践相结合,可作为高等学校机械电子工程专业及其他相关专业的教材,对从事飞机液压系统及元件设计、使用、维护等工作的工程技术人员也具有重要参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代飞机液压技术 / 欧阳小平,杨华勇,郭生荣,杨上保编著.  
—杭州:浙江大学出版社,2016.9  
ISBN 978-7-308-16214-2

I. ①现… II. ①欧阳… ②杨… ③郭… ④杨…  
III. ①飞机—液压系统 IV. ①V245.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 214734 号

## 现代飞机液压技术

欧阳小平 杨华勇 郭生荣 杨上保 编著

---

责任编辑 陈 波  
责任校对 王大根  
封面设计 俞亚彤  
出版发行 浙江大学出版社  
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)  
(网址: <http://www.zjupress.com>)  
排 版 杭州中大图文设计有限公司  
印 刷 杭州杭新印务有限公司  
开 本 787mm×1092mm 1/16  
印 张 21  
字 数 510 千  
版 次 2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-308-16214-2  
定 价 78.00 元

---

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行中心联系方式:0571-88925591; <http://zjdxcs.tmall.com>

# 序 言

在《国务院关于加快振兴装备制造业的若干意见》和《国家创新驱动发展战略纲要》战略指引下,近年来我国大力发展飞机、航空发动机等高端装备。飞机液压是保证飞机正常飞行和安全的关键系统,发展具有自主知识产权的飞机液压关键技术符合国家发展装备制造业的总体目标。

本书取材于作者科研团队所承担的国家自然科学基金项目“带 RC 压力衰减器的 11 柱塞航空柱塞泵基础研究”(51275450)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“大型飞机电液动力控制与作动系统新体系基础研究”(2014CB046403)、国家创新群体项目(51221004)、浙江大学“985 工程”建设项目的科研成果,科研团队与国内企业委托合作项目的研究成果,以及作者部分学生的学位和学术论文。另外,还参考了国内外在该领域的最新文献和著作。

本书作者是多年从事航空液压及相关技术的研究人员,对飞机液压元件及系统的设计和使用等具有丰富的经验。本书重视理论和实际相结合,力求体现如下特点:

(1) 实用性:本书尽量采用通俗的语言来阐述飞机液压系统的相关知识,并辅以图片说明,让从事飞机液压研究、使用和维护的相关专业人员能够掌握飞机液压系统的核心内容。

(2) 理论性:本书针对飞机液压系统的关键元件(如航空柱塞泵、增压油箱、伺服阀、作动器、液压密封等),均采用理论分析、计算和相关仿真相结合的方式,详细分析其特点,进一步为元件开发及优化设计提供理论支持。

(3) 前瞻性:本书的内容,既涉及传统飞机的液压系统,又有新型飞机液压系统及元件的说明,同时对未来飞机液压及其关键元件的发展也有一定的阐述。

本书共分 10 章。浙江大学欧阳小平副教授负责第 3,4,5,7 章的编著工作,浙江大学杨华勇教授负责第 1,2 章的编著工作,中国航空工业集团公司南京机电液压工程研究中心郭生荣研究员负责第 6 章的编著工作,中国航空工业集团公司中南京机电液压工程研究中心杨上保研究员负责第 10 章的编著工作,第 8 章由杨上保、欧阳小平合作完成,第 9 章由郭生荣、欧阳小平合作完成。

在本书撰写过程中,课题组研究生方旭、李磊、彭超、李锋、薛志全、尹俊亚、刘玉龙、杨金江、胡超、范伯骞、丁硕、赵天菲、张恩晓等为本书资料的整理和图片绘制等做了大量的工作,在此一并表示感谢!此外,衷心感谢浙江大学出版社有关领导和编辑人员的鼎力相助,感谢俞亚彤老师对封面的精心设计(封面部分图片来自 Eaton, Parker 等公司的产品样本)。

限于作者水平有限,书中难免有一些不当之处,恳请广大读者批评指正。

编著者

2016 年 6 月

## 目 录

<b>第 1 章 飞机液压系统概述</b> .....	1
1.1 飞行控制简介 .....	1
1.1.1 飞行原理 .....	1
1.1.2 飞行控制舵面 .....	4
1.2 飞机液压系统简介 .....	4
1.2.1 舵面控制原理 .....	5
1.2.2 液压系统配置 .....	6
1.2.3 飞机液压系统组成 .....	8
1.3 民用飞机液压系统余度配置 .....	9
1.3.1 典型双发飞机液压系统余度配置 .....	9
1.3.2 典型四发飞机液压系统余度配置 .....	12
1.3.3 典型多电飞机液压系统余度配置 .....	15
1.4 飞机液压系统发展趋势 .....	18
1.4.1 高压化技术 .....	18
1.4.2 多电技术 .....	19
1.4.3 智能泵源技术 .....	19
1.4.4 模块化技术 .....	20
1.5 液压系统关键技术 .....	21
1.5.1 高可靠性 .....	21
1.5.2 压力脉动 .....	21
1.5.3 油温控制 .....	22
参考文献 .....	23
<b>第 2 章 航空液压油</b> .....	25
2.1 航空液压油基本要求 .....	25
2.2 航空液压油分类 .....	26
2.3 航空液压油的物理性质 .....	27
2.3.1 密度 .....	27
2.3.2 可压缩性 .....	27
2.3.3 黏性 .....	28
2.4 典型航空液压油 .....	29
2.4.1 石油基 15 号航空液压油 .....	29
2.4.2 磷酸酯基型液压油 Skydrol .....	32

2.4.3	合成烃液压油	38
2.5	阻燃型液压油性能检测	39
	参考文献	41
<b>第3章</b>	<b>飞机增压油箱</b>	<b>42</b>
3.1	引气增压油箱	42
3.2	自增压油箱	43
3.2.1	工作原理	43
3.2.2	数学模型	44
3.2.3	工作特性仿真分析	46
3.2.4	试验测试	48
3.3	自增压油箱关键参数	50
3.3.1	自增压油箱容积	50
3.3.2	自增压油箱外壁尺寸	51
3.3.3	油箱外壁肋片结构	57
3.4	增压油箱排气阀	58
3.4.1	概述	58
3.4.2	排气阀分类	58
3.4.3	手动排气阀	58
3.4.4	纯机械式自动排气阀	59
3.4.5	阻尼管式自动排气阀	60
3.4.6	电控式自动排气阀	61
3.5	自增压油箱主要故障	63
3.5.1	内泄漏	63
3.5.2	油箱爆破	64
3.5.3	箱体变形	66
	参考文献	69
<b>第4章</b>	<b>航空液压泵</b>	<b>71</b>
4.1	航空液压泵概述	71
4.2	轴向柱塞泵	71
4.2.1	概述	71
4.2.2	轴向柱塞泵基本原理	77
4.2.3	变量控制方式	78
4.3	柱塞泵动态特性分析	86
4.3.1	航空柱塞泵面临的挑战	86
4.3.2	高转速旋转组件动力学特性	87
4.3.3	排量控制组件动力学特性	93
4.3.4	高转速柱塞泵流场特性分析	99
4.4	航空柱塞泵性能测试	101

4.5 电机泵 .....	106
4.5.1 概述 .....	106
4.5.2 高功率密度电机 .....	108
4.5.3 电机泵动态性能分析 .....	114
4.6 功率传递单元 .....	116
4.6.1 概述 .....	116
4.6.2 性能分析 .....	122
4.6.3 性能测试 .....	124
参考文献 .....	125
<b>第5章 电液伺服阀 .....</b>	<b>128</b>
5.1 电液伺服阀概述 .....	128
5.1.1 简介 .....	128
5.1.2 组成 .....	128
5.1.3 分类 .....	132
5.2 滑阀位置反馈电液伺服阀 .....	133
5.2.1 典型结构 .....	133
5.2.2 工作原理 .....	133
5.2.3 基本特性 .....	134
5.2.4 典型应用 .....	136
5.3 负载力反馈电液伺服阀 .....	137
5.3.1 典型结构 .....	137
5.3.2 工作原理 .....	138
5.3.3 基本特性 .....	138
5.3.4 典型应用 .....	141
5.4 电反馈伺服阀 .....	141
5.4.1 典型结构 .....	141
5.4.2 工作原理 .....	143
5.4.3 基本特性 .....	143
5.4.4 典型应用 .....	145
5.5 航空电液伺服阀标准 .....	146
5.5.1 重要参数 .....	146
5.5.2 测试标准 .....	148
5.6 电液伺服阀发展 .....	150
5.6.1 发展史 .....	150
5.6.2 电液伺服阀展望 .....	152
参考文献 .....	152
<b>第6章 电液作动器 .....</b>	<b>154</b>
6.1 飞机作动系统简介 .....	154

6.2	基于FBW的飞机作动器	156
6.2.1	FBW作动器原理	156
6.2.2	FBW作动器余度设计	157
6.2.3	高性能作动筒	158
6.2.4	作动器设计参数与检测标准	163
6.2.5	FBW作动器的应用	165
6.3	电动静液作动器(EHA)	166
6.3.1	EHA分类	167
6.3.2	定排量变转速型EHA	167
6.3.3	其它类型EHA	171
6.3.4	4种EHA比较	174
6.3.5	EHA的相关标准	174
6.3.6	EHA典型应用	174
6.4	电备份静液作动器	176
6.5	机电作动器	177
	参考文献	178
<b>第7章</b>	<b>液压附件</b>	<b>180</b>
7.1	航空过滤器	180
7.1.1	污染物分类	180
7.1.2	污染度要求	180
7.1.3	航空过滤器	183
7.1.4	过滤器滤芯选用及校核	186
7.1.5	过滤器关键参数	192
7.1.6	过滤器发展状况	194
7.2	航空蓄能器	198
7.2.1	功能	198
7.2.2	航空蓄能器特殊要求	199
7.2.3	航空蓄能器典型结构	199
7.2.4	蓄能器工作过程	201
7.2.5	航空蓄能器选用及安装	203
7.2.6	航空蓄能器试验规范	204
7.2.7	航空蓄能器研究现状	205
	参考文献	207
<b>第8章</b>	<b>管路系统</b>	<b>210</b>
8.1	航空液压导管	210
8.1.1	导管材料	210
8.1.2	压力壁厚及爆破压力	214
8.1.3	导管规格	215

8.1.4	弯曲半径与弯头间隔	218
8.1.5	导管成型方式及设备	219
8.1.6	导管成型工艺要求	222
8.2	航空液压软管	224
8.2.1	概述	224
8.2.2	分类	224
8.2.3	最小弯曲半径	225
8.2.4	软管安装及注意事项	225
8.3	航空液压管接头	226
8.3.1	航空管接头分类	227
8.3.2	永久式管接头	228
8.3.3	标准可分离式管接头	233
8.3.4	柱端式管接头	240
8.3.5	其他航空接头	244
8.3.6	管接头选型	246
8.4	管路支撑附件	246
8.4.1	概述	246
8.4.2	卡箍	247
8.4.3	块卡	248
8.4.4	导管支撑间隔	248
8.5	管路系统设计标准	249
8.5.1	概述	249
8.5.2	相邻系统的要求	249
8.5.3	导管安装间隔	250
8.5.4	永久式导管安装要求	252
8.5.5	管端装配	253
8.5.6	典型管路试验	253
8.6	管路振动控制技术	256
8.6.1	主动振动控制	256
8.6.2	被动振动控制	256
	参考文献	257
<b>第9章</b>	<b>航空液压密封</b>	<b>261</b>
9.1	航空液压密封简介	261
9.2	液压密封材料	261
9.2.1	密封材料要求	261
9.2.2	密封材料物化性质	262
9.2.3	常用密封材料	264
9.3	流体密封基本机理	265
9.3.1	密封流体力学	265

9.3.2	密封摩擦学 .....	270
9.4	静密封机理 .....	277
9.5	往复密封机理 .....	279
9.5.1	分类 .....	279
9.5.2	密封面与泄漏 .....	280
9.5.3	空化现象 .....	282
9.5.4	压缩率与拉伸率 .....	282
9.5.5	斯特封与格莱圈 .....	286
9.5.6	VL 密封 .....	288
9.6	旋转密封机理 .....	292
9.6.1	分类 .....	292
9.6.2	旋转轴唇形密封 .....	293
9.6.3	泛力密封 .....	295
9.6.4	旋转格莱圈 .....	295
9.6.5	泛塞密封 .....	296
9.7	机械密封机理 .....	296
9.7.1	基本结构 .....	297
9.7.2	密封原理 .....	298
	参考文献 .....	300
<b>第 10 章</b>	<b>飞机液压能源系统控制 .....</b>	<b>303</b>
10.1	能源系统逻辑功能概述 .....	303
10.1.1	飞机上电自测试功能 .....	303
10.1.2	液压元件自动控制功能 .....	303
10.2	飞机信号提取与定义 .....	305
10.3	液压系统状态逻辑 .....	306
10.3.1	左系统状态逻辑 .....	306
10.3.2	中系统状态逻辑 .....	307
10.3.3	右系统状态逻辑 .....	308
10.4	能源系统泵控逻辑 .....	308
10.4.1	系统工况划分 .....	308
10.4.2	左系统泵控逻辑 .....	309
10.4.3	中系统泵控逻辑 .....	311
10.4.4	PTU 逻辑控制 .....	313
10.5	典型工况能源系统控制 .....	315
10.5.1	逻辑控制分析软件开发 .....	315
10.5.2	典型工况能源系统分析 .....	318
	参考文献 .....	321
<b>附录</b>	<b>英文缩写注释表 .....</b>	<b>322</b>

# 第 1 章 飞机液压系统概述

由于液压系统具有功率密度大、传递距离远、易于实现自动控制等优点,在航空上获得广泛应用。对于目前常用的飞机,液压系统为飞机上的副翼、升降舵、方向舵、起落架等提供动力及控制,从而实现飞机的滚转、倾斜、偏航、爬升、降落等动作。飞机液压系统一般由多套相互独立、相互备份的液压系统组成,是一个多余度、大功率的复杂综合系统。每套液压系统有液压能源系统及其对应的不同液压用户,从而保证飞机的安全性<sup>[1]</sup>。

## 1.1 飞行控制简介

### 1.1.1 飞行原理

飞机在空中飞行时,其受力如图 1.1 所示,可以分为推力  $P$ 、阻力  $D$ 、升力  $L$  和重力  $G$ <sup>[2]</sup>。发动机产生向前的推力  $P$ ,推动飞机以一定的速度向前运动。阻力  $D$  和推力  $P$  方向相反,由气流对机翼和机身等飞机部分产生的黏性摩擦阻力、压差阻力、诱导阻力、干扰阻力等组成。重力  $G$  为地球引力方向,垂直向下,作用于飞机的重心位置。升力  $L$  由作用于机翼的空气压差产生,方向垂直向上,作用于机翼的升力中心。一般情况下,飞机 4 个力受力平衡,在空中匀速飞行。

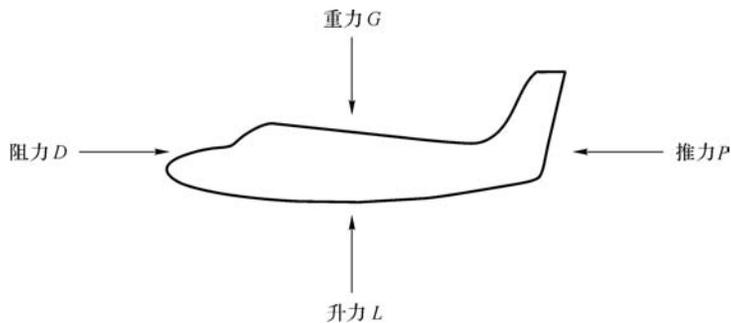


图 1.1 飞机受力分布

飞机机体轴如图 1.2 所示<sup>[3]</sup>,是 3 条相互垂直穿过飞机重心的轴,包括纵轴  $z$ 、横轴  $x$  和立轴  $y$ 。通过控制副翼、升降舵、方向舵等舵面运动来控制飞机围绕机体轴完成升降、俯仰、滚转、偏航等飞行动作<sup>[3]</sup>。

#### 1.1.1.1 升降

飞机在飞行过程中,其舵面受力情况可由伯努利方程  $p + \frac{1}{2} \rho v^2 = C$  (常数) 来解释。当

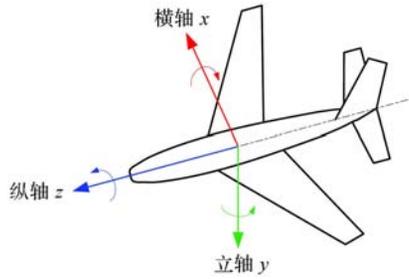


图 1.2 飞机机体轴分布

气流流过飞机翼型时,其气流情况如图 1.3 所示<sup>[4]</sup>,气流被分为上、下两部分:1)由于上表面拱起,上方气流压缩,流体截面积  $S$  变小,根据流体连续性方程  $vS=q$  (常数)可知,流速  $v_{上}$  增大导致动压  $\frac{1}{2}\rho v_{上}^2$  增加,而  $p_{上}$  减小;2)翼型下表面的情况相反,流速  $v_{下}$  减小,动压  $\frac{1}{2}\rho v_{下}^2$  减小,而  $p_{下}$  增加。最终结果导致  $p_{下} > p_{上}$ ,从而产生压力差  $\Delta p$ ,继而作用于飞机翼型上产生升力  $L$ 。

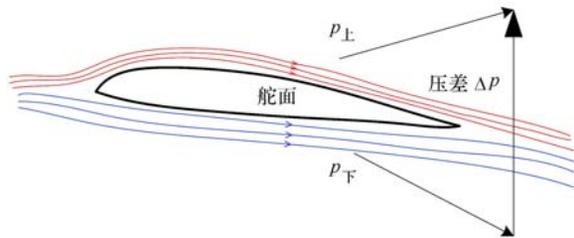


图 1.3 气流压力与翼型关系

发动机的推力增加时,飞机飞行速度提高,升力  $L$  增大,飞机爬升;而当发动机的推力减小时,飞行速度减小,升力减小,飞机下降。此外,通过改变襟翼和缝翼的打开角度,可以协助控制飞机的上升和下降。

#### 1.1.1.2 俯仰

飞机完成俯仰动作主要通过控制升降舵来完成,运动和受力情况如图 1.4 所示<sup>[4]</sup>,设定升降舵滚转角度  $\delta$  向下滚转为正,产生的力矩  $M_A$  为正。当操纵升降舵下降时,升降舵偏角  $\delta > 0$ ,此时作用于上表面的力  $F_{e上}$  小于下表面的力  $F_{e下}$ ,导致空气动力上升,形成低头力矩,俯仰力矩  $M_A > 0$ ,尾部上升,飞机呈现俯角状态。相反,当操纵升降舵上升时,升降舵偏角  $\delta < 0$ ,俯仰力矩  $M_A < 0$ ,形成仰头力矩,尾部下降,飞机呈现仰角状态<sup>[4]</sup>。

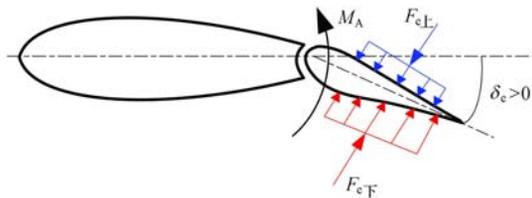


图 1.4 升降舵俯仰受力分析

## 1.1.1.3 滚转

飞机完成滚转动作主要通过控制副翼的差动滚转来实现,其运动和受力情况如图 1.5 所示<sup>[4]</sup>,设定副翼“左上右下”时滚转角度  $\delta_a$  为正,产生的滚转力矩  $L_A$  为负。当操纵左、右侧副翼滚转角  $\delta_a > 0$  时,右侧副翼向下滚转,左侧副翼向上滚转,此时右侧副翼受到合力  $F_{A右}$ ,方向向上,而左侧副翼受到合力  $F_{A左}$ ,方向向下,两力共同作用于飞机产生的滚转力矩  $L_A < 0$ ,使飞机向左滚转。相反,当操纵副翼滚转角  $\delta_a < 0$  时,右侧副翼向上滚转,左侧副翼向下滚转,此时右侧副翼受到合力  $F_{A右}$ ,方向向下,而左侧副翼受到合力  $F_{A左}$ ,方向向上,两力共同作用于飞机产生的滚转力矩  $L_A > 0$ ,使飞机向右滚转。

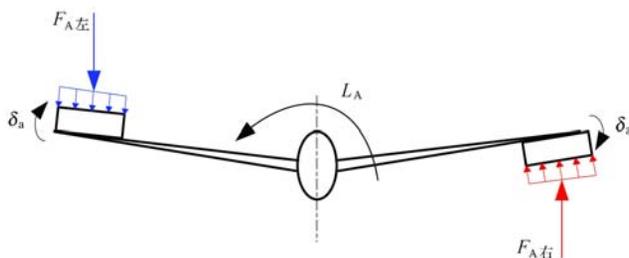


图 1.5 副翼滚转受力分析

## 1.1.1.4 偏航

飞机完成偏航动作主要通过控制方向舵来实现,其运动和受力情况如图 1.6 所示<sup>[4]</sup>,设定方向舵偏向左滚转时角度  $\delta_r$  为正,产生的偏航力矩为正。当操纵方向舵向左滚转时, $\delta_r > 0$ ,作用于方向舵左侧表面的力  $F_{r左}$  大于右侧表面的力  $F_{r右}$ ,从而导致偏航力矩  $N_A > 0$ ,尾部向右侧偏移,带动飞机完成向左侧偏航。当操纵方向舵向右滚转时, $\delta_r < 0$ ,作用于右侧表面的力大于左侧表面的力,从而导致偏航力矩  $N_A < 0$ ,尾部向左侧偏移,带动飞机完成向右侧偏航。

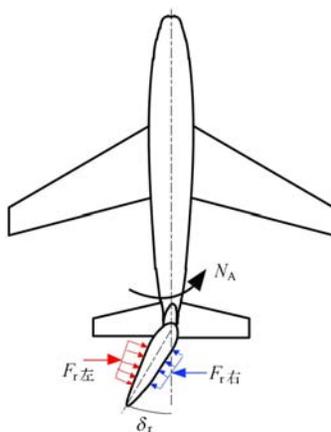


图 1.6 方向舵偏航受力分析

### 1.1.2 飞行控制舵面

飞行控制舵面主要是用来控制飞机的飞行姿态。由于飞机的用途不同,其飞行控制舵面的种类和功能也不尽相同。

#### 1.1.2.1 军用飞机飞行舵面

典型军用飞机舵面分布如图 1.7 所示<sup>[5]</sup>,包括主舵面和辅助舵面。主舵面主要包括方向舵、鸭翼和副翼,其中:方向舵位于飞机后端,主要完成飞机偏航控制;鸭翼位于飞机前端,可以用较小的翼面来达到飞机俯仰的动作控制;副翼主要完成飞机滚转控制并维持飞行稳定。辅助舵面主要包括减速板和前缘襟/缝翼。减速板主要作用是:当飞机高速运行需要减速和下降时,减速板打开,增加迎风角度,增加阻力。襟翼和缝翼主要增大飞机机翼面积,控制飞机升降<sup>[5]</sup>。

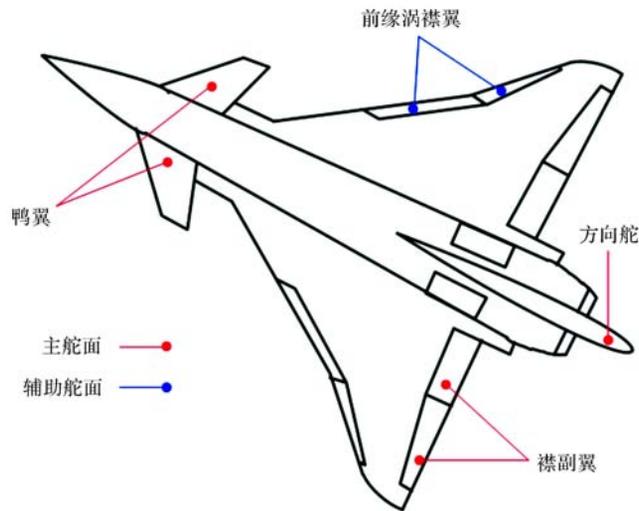


图 1.7 军用飞机舵面分布

#### 1.1.2.2 民用飞机飞行舵面

典型民用飞机飞行舵面分布如图 1.8 所示<sup>[5]</sup>,包括主舵面和辅助舵面。主舵面包括方向舵、升降舵、副翼,其中方向舵主要完成飞机偏航控制,升降舵主要完成飞机升降控制,副翼主要完成飞机滚转控制。辅助舵面包括扰流板、襟翼、缝翼和安定面等。扰流板辅助主/辅助舵面来改善飞机的控制性能,提供起飞、着陆时的增升动力,增加地面或飞行中的气动阻力。襟翼和缝翼主要增大飞机机翼面积,控制飞机升降。安定面分为水平和垂直安定面,分别用于保持飞机横向和纵向的平衡与控制。

## 1.2 飞机液压系统简介

液压系统用户遍布飞机全身,包括主飞行舵面、辅助飞行舵面、起落架和功能系统。其中:起落架主要用来承受、消耗和吸收飞机着陆与在地面运动时的撞击能量,帮助飞机完成转弯和制动;主舵面包括方向舵、升降舵、副翼,主要用于控制飞机滚转、升降、偏航;辅助舵

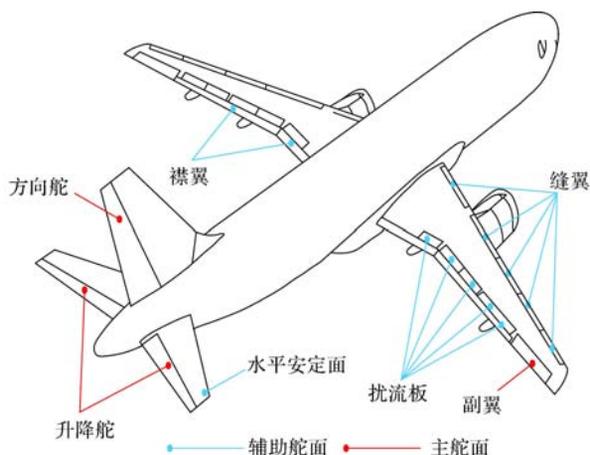


图 1.8 民用飞机飞行舵面分布

面包括扰流板、襟翼、缝翼、尾翼,用于控制飞机提升、下降、减速;功能系统主要包括手动舱门等,实现飞机上下客等基础功能。

### 1.2.1 舵面控制原理

飞机电传操纵模式下舵面控制原理图如图 1.9 所示,飞行员通过操纵驾驶舱手柄,传递运行指令给作动器控制器,飞机逻辑控制系统自动判断液压系统状态,选择液压能源系统对作动器进行能源供应。作动器控制器根据运动指令和位置反馈信号来完成作动器控制,从而控制飞机舵面运动,达到调整飞机飞行姿态的目的。

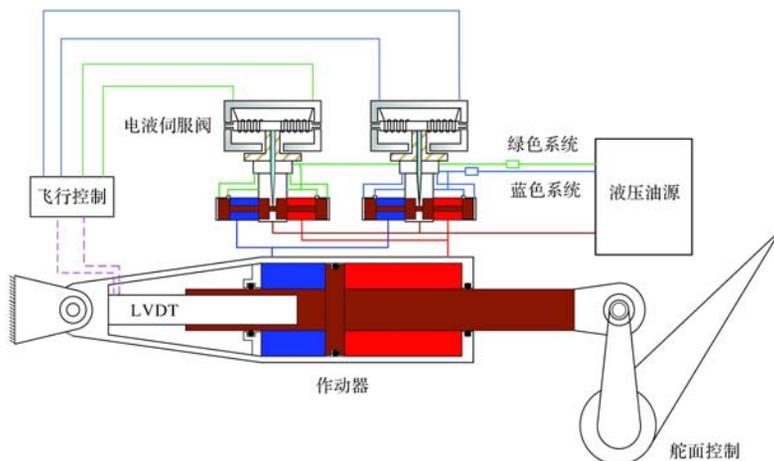


图 1.9 舵面控制原理

飞机舵机控制的核心是电液伺服控制系统,具有响应快、精度高、功率密度大等优点,其执行部分是电液伺服作动器(由电液伺服阀和液压作动筒组成)。电液伺服阀根据控制信号控制进入作动筒的高压油液,在电传操纵模式下,通过位移传感器把作动器活塞的位移作为反馈构成闭环控制系统,对输出进行精确控制,进而控制作动筒输出力,以较大功率推动飞

机舵面偏转,通过电信号控制,将液压功率转换为作动筒机械功率输出<sup>[5]</sup>。

## 1.2.2 液压系统配置

### 1.2.2.1 军用飞机液压系统配置

典型军用飞机液压系统主要由 2 套液压系统组成,相互备份,完成对副翼、升降舵、方向舵等主/辅飞行舵面的控制<sup>[6]</sup>。

典型军用飞机液压配置如图 1.10 所示<sup>[6]</sup>,可以看出其液压系统由 2 套相互独立的系统(A 和 B)组成。每套系统均由 EDP 作为系统泵源,并设置了独立的油箱。正常情况下,2 套系统同时工作,为飞行舵面提供能源。当一套系统失效时,另一套系统作为备用能源装置提供能源,保证飞机正常飞行。当 2 套系统都失效时,紧急能源装置会自动启动,为 A 系统提供液压能源。此外,2 套系统中还设置了蓄能器,当系统流量需求超过最大流量或 2 套系统失效而紧急能源装置(EPU)未启动时,会提供足够的压力来完成飞行控制<sup>[6]</sup>。

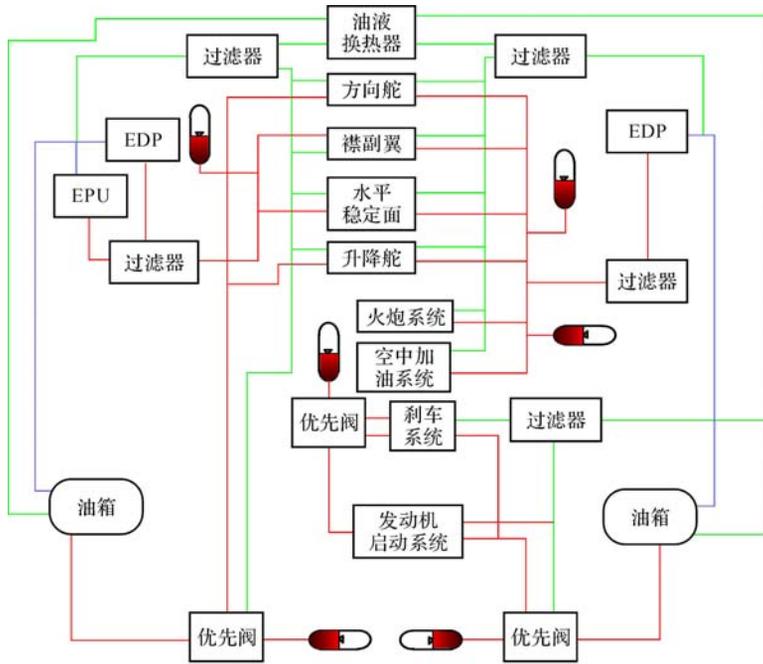


图 1.10 典型军用飞机液压配置

### 1.2.2.2 民用飞机液压系统配置

民用飞机液压系统采用了多余度设计来保证液压系统的可靠性,其液压系统由多套相互独立、相互备份的子液压系统组成<sup>[7]</sup>。图 1.11 给出了典型民用飞机液压系统的配置图<sup>[8]</sup>,可以看出该飞机液压系统由 3 套相互独立的液压系统组成,其中左、右系统为主系统,中系统为备份系统。

左、右系统泵源由 EDP 和 EMP 组成,EDP 作为系统主泵,EMP 作为系统辅助泵源,当发动机或系统 EDP 出现故障时,EMP 开启给系统供压。此外,左、右系统之间装有 PTU,它由 2 个机械耦合液压单元组成,可以在左系统和右系统之间传输动力。PTU 的 2 个液压单元可以根据功率传递的方向选择作泵或马达使用,使故障系统的工作压力接近正常工作压

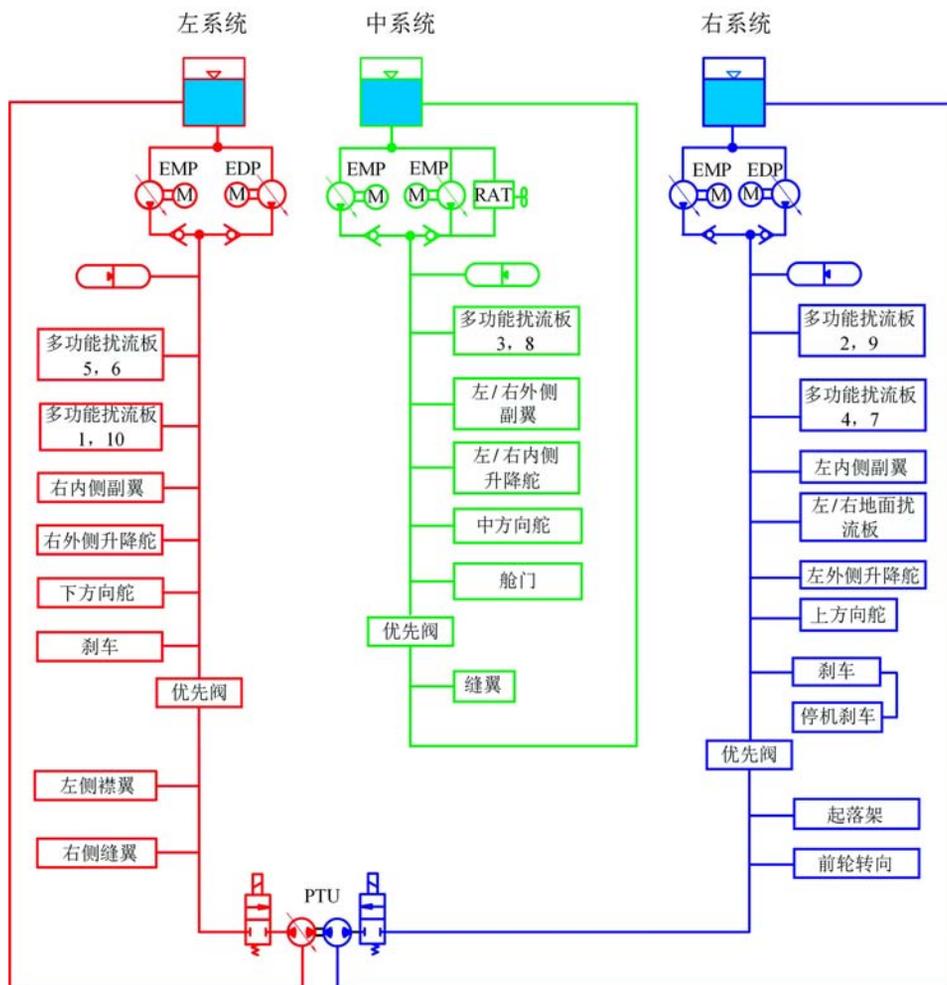


图 1.11 某型飞机液压系统原理

力。PTU 在系统无故障工作状态和正常的压力波动下不会启动；若液压系统出现故障，当系统压力降到 PTU 的开启阈值时，PTU 选择阀自动启动，由正常系统的马达带动故障系统的泵向故障液压系统的用户提供动力。

中系统作为备用系统，其泵源由 2 个 EMP 和 1 个 RAT 组成。当主系统任一发动机或 EDP 失效时，蓝系统的 EMP 就开启对飞机供压，从而保证飞机的正常工作。正常情况下 RAT 处于收回状态并通过机构锁定，当飞行速度大于 185.2 km/h (100 节) 时，系统若发生双发失效或者电源失效，RAT 作为飞机的唯一动力源为飞控系统提供动力，通过恒速马达/发电机 (CSM/G) 产生电量作为应急电源，并带动恒压变量泵作为系统的泵源<sup>[8]</sup>。

图 1.12 给出了典型民用飞机液压系统的分布情况，可以看出，3 套液压系统用户遍布整个飞机，包括控制飞机滚转、仰俯、偏航的副翼，升降舵，方向舵等舵面和控制飞机提升、下降、减速的扰流板，尾翼，襟翼，缝翼等舵面。特别针对起落架、方向舵、升降舵等关键执行机构的液压系统进行了余度分配，确保飞机在 2 套液压系统失效的极限工况下仍能进行正常工作<sup>[9-10]</sup>。