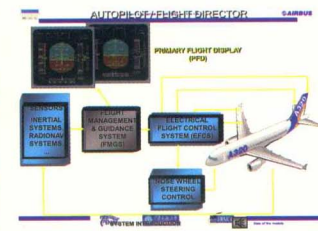




普通高等院校民航
特色专业统编教材

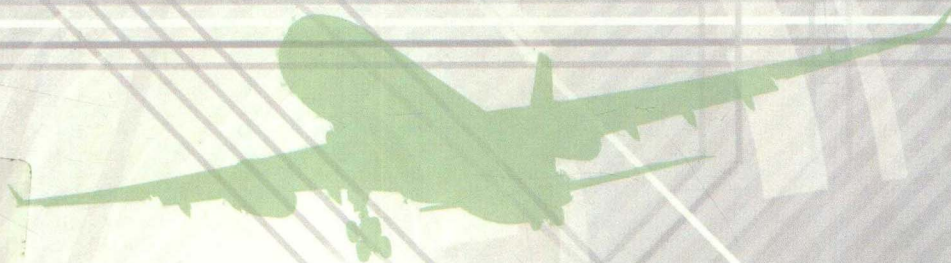
机务专业本科适用



自动飞行控制系统

Automatic Flight Control System

© 张 鹏 主编



中国民航出版社



普通高等院校民航特色专业统编教材·机务专业本科适用

自动飞行控制系统

张 鹏 主编

中国民航出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

自动飞行控制系统/张鹏主编. —北京: 中国民航出版社, 2016. 6
ISBN 978-7-5128-0359-6

I. ①自… II. ①张… III. ①自动飞行控制-飞行控制系统-高等学校-教材 IV. ①V249. 122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 114390 号

自动飞行控制系统

张 鹏 主 编

责任编辑	杨玉芹
出 版	中国民航出版社 (010) 64279457
地 址	北京市朝阳区光熙门北里甲 31 号楼 (100028)
排 版	中国民航出版社录排室
印 刷	北京华正印刷有限公司
发 行	中国民航出版社 (010) 64297307 64290477
开 本	787×1092 1/16
印 张	12. 25
字 数	305 千字
版 印 次	2016 年 7 月第 1 版 2016 年 7 月第 1 次印刷

书 号	ISBN 978-7-5128-0359-6
定 价	33. 00 元

官方微博 <http://weibo.com/phcaac>
淘宝网店铺 <https://shop142257812.taobao.com>
电子邮箱 phcaac@sina.com

出版前言

当前,我国民航事业呈现快速发展态势,人才需求旺盛,人才缺口矛盾突出。为深入实施“科教兴业”和“人才强业”战略,进一步加快民航专业人才培养,提高人才培养质量,努力为推动民航强国建设提供更加强有力的人才保障,在院校教育方面必须十分注重教学基本建设,编写民航统编教材便是其中的一项重要工作。

民航局高度重视统编教材编写工作,自2012年首次推出“空管专业统编教材”以来,其他特色专业教材也得到了系统开发,此次机务专业统编教材的编写出版就是在民航局高度重视下取得的又一成果。

本套教材在编写过程中紧密结合民航机务专业本科和高职人才培养目标的不同要求,在教材编写上各有侧重:机务专业高职教材在编写原则上贯彻以学生为主体的教学思想,理论知识以“必需”和“够用”为度,重点突出实际操作技能;机务专业本科教材在编写原则上是从培养民航高级机务维修和管理人才的目标出发,注重学生理论素养的提升,尽可能吸收民航发展的最新技术和成果。同时,为保证教材的实用性、先进性,并能反映维修过程中的技术水平,本套教材的开发、编写由来自中国民航大学、中国民航飞行学院、中国民航管理干部学院、广州民航职业技术学院、上海民航职业技术学院的机务专业教师与来自中国国际航空股份有限公司、中国东方航空股份有限公司、中国南方航空股份有限公司等企业的专业人员共同完成,使教材内容更具有针对性,更加贴近社会需要和岗位需求标准。

本套教材秉承民航特色专业统编教材的编撰宗旨,在内容、体例、规范等方面更加严谨、务实,编者多是长期从事机务专业教学和研究工作的资深教师及富有飞机维修经验的一线专业人员,书稿中的重要内容均经过行业专家审核把关。该套丛书体现了权威、创新、普适的特点,丰富、更新并完善了近年来机务专业的教材体系,既适合民航大中专院校、社会上各类机务培训机构用作教材,也可作为民航一线维修人员拓展知识、提高实操能力的培训用书。

此次机务专业统编教材的组织编写专业细分性较强,涉及面广,不足之处在所难免,诚恳地欢迎大家在教材使用过程中提出改进意见,使统编教材日臻完善。

中国民航出版社

2015年6月

前 言

随着我国国力的增强，人民生活水平的提高，民航事业蓬勃发展，飞机已逐渐成为人们日常出行的重要交通工具。

安全是民航运输的第一要务，保障飞行安全涉及民航运输系统的诸多环节，作为航空运输载体的飞机，其安全性是重中之重。自动飞行控制系统作为现代民航飞机的必备系统，不仅具备飞行控制功能，还对保障飞行安全起着至关重要的作用。对机载系统的有效维护和保障，是确保系统使用可靠性的基础。民航机务工程技术人员不仅要熟悉现代维修理论和技术，而且要掌握飞机各系统原理和分析方法。

本教材立足工程应用的特点，较为详细地阐述了自动飞行控制系统的基本功能、原理、系统设计和应用实例，主要包括飞行原理、伺服系统、系统分析、系统设计及民航现役机型典型系统实例等内容。其内容注重理论与实际相结合，既涉及系统原理、分析和设计，又紧密结合典型应用实例，为读者学习该系统相关知识和进行应用提供了有益的参考。此外，本教材对现代飞行控制技术中的光传操纵系统做了相应介绍，便于读者了解飞行控制发展的趋势和方向。本教材既可作为航空类高等院校民航机务专业高年级学生的相关课程教材，也可作为民航相关领域工程技术人员的参考资料。

本教材绪论、第3章由中国民航大学张鹏编写，第1章、第2章由中国民航大学王力编写，第4章由中国民航大学伍红英编写，第5章由中国民航大学陈艳编写。张鹏任主编，王力和伍红英任副主编，全教材由张鹏统稿及主审。本书在编写过程中，得到了中国民航大学航空自动化学院和工程技术训练中心老师们的热心帮助，在此表示真诚的谢意，并对本书参考文献的作者和单位表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在差错和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2016年5月

书中所用符号说明：

- ρ : 大气密度
- M : 马赫数
- θ : 俯仰角
- φ : 偏航角
- ϕ : 滚转角
- r : 航迹倾斜角
- x : 航迹方位角
- μ : 航迹滚转角
- α : 迎角
- β : 侧滑角
- L : 升力
- D : 阻力
- Y : 侧力
- T : 推力
- $\bar{L}$: 滚转力矩
- M : 俯仰力矩
- N : 偏航力矩
- δ_e : 升降偏转角
- δ_a : 副翼偏转角
- δ_r : 方向舵偏转角
- δ_T : 油门杆
- c : 翼弦长
- S_w : 机翼面积
- C_l : 升力系数
- C_D : 阻力系数
- C_y : 侧力系数
- C_L : 滚转力矩系数
- C_m : 俯仰力矩系数
- C_n : 偏航力矩系数
- p : 滚转角速度
- q : 俯仰角速度
- r : 偏航角速度
- u : 前进速度
- v : 偏航速度
- w : 升降速度
- V : 飞行速度

目 录

出版前言

前言

绪 论	1
0.1 飞行控制系统的定义与基本功能	1
0.2 飞行控制系统的基本原理	2
0.3 飞行控制系统的总体结构	6
0.4 飞行控制系统的发展简史	7
复习题	8
第 1 章 飞行原理	9
1.1 概述	9
1.2 空气动力学的基本知识	9
1.3 飞行器空间运动的表示、飞机操纵机构	12
1.4 飞机的稳定性和操纵性	15
1.5 纵向气动力和气动力矩	16
1.6 侧向气动力及气动力矩	29
1.7 操纵面的铰链力矩	36
1.8 刚体飞行器的运动方程	37
1.9 飞机的纵向运动	44
1.10 飞机的横侧运动	60
复习题	68
第 2 章 舵机与舵回路	69
2.1 舵机的工作原理	69
2.2 舵面负载及其对舵机工作的影响	74
2.3 舵回路的基本类型及特点	80
2.4 舵机特性对舵回路的影响	86
复习题	91
第 3 章 飞行控制系统分析	93
3.1 概述	93
3.2 飞机的姿态控制系统	96

3.3 飞机的轨迹控制系统	114
3.4 空速和马赫数的保持与控制	124
3.5 自动飞行控制系统基本性能要求	129
3.6 电/光传操纵系统.....	131
3.7 现代飞行控制技术	136
复习题.....	145
第4章 飞行控制系统设计.....	146
4.1 飞行控制系统的任务和设计目标	146
4.2 飞行控制系统的基本设计方法	147
复习题.....	160
第5章 现代飞行控制系统实例.....	162
5.1 B737-800 飞行控制系统	162
5.2 A320 电传控制系统	171
复习题.....	185
附录.....	186
参考文献.....	188

绪 论

0.1 飞行控制系统的定义与基本功能

0.1.1 定义

国家军用标准是这样定义飞行控制系统 (Flight Control System, FCS) 的: “一种飞机系统, 它包括驾驶员或其他信号源进行下述一项或多项控制所应用的飞机所有分系统和部件: 飞机航迹、姿态、空速、气动外形、乘坐品质和结构模态等的控制。通常分为人工飞行控制 (操纵) 系统和自动飞行控制系统。”

人工飞行控制 (操纵) 系统 (Manual Flight Control System, MFCS): “接受和传递驾驶员的人工操纵指令, 或形成和传递人工操纵指令的增强指令, 从而实施飞行控制功能的系统。它可以包括电的、机械的、液压的和气动的部件。这些部件为控制功能传递驾驶员指令。”

自动飞行控制系统 (Automatic Flight Control System, AFCS): “包括产生和传递自动控制指令的电气、机械和液压部件。它通过自动或半自动的航迹控制, 协助驾驶员工作或减轻其工作负担, 或者自动控制飞机对扰动的响应。这一类系统包括自动驾驶仪、驾驶杆或驾驶盘操纵、自动油门杆装置、结构模态控制或类似的控制器。”

由上述国家军用标准内容可以看出, 飞行控制系统是在人工与自动驾驶基础上发展起来的一种飞机系统, 一般由不同功能的分系统或部件组成, 能部分或全部地代替驾驶员, 控制飞机角运动、重心运动 (航迹运动) 和飞行速度, 改变飞机的几何形状 (结构) 与模态, 并能改善飞行品质与保障飞行安全的控制系统。

0.1.2 飞行控制系统的基本功能

1. 实现飞机的自动飞行

飞机的自动飞行控制就是利用一套专门的系统, 在无人参与操纵的条件下, 自动操纵飞机按规定的姿态和航迹飞行, 通常可实现对飞机的三轴姿态角及飞机三个方向空间位置的自动控制和稳定。例如, 对于完全无人驾驶的飞行器 (如无人机或导弹等), 其飞行可以实现完全自动控制; 对于有人驾驶的飞机 (如民用飞机或军用飞机), 虽然有人参与驾驶, 但在某些飞行阶段 (如巡航、着陆等), 驾驶员可以不直接参与操纵, 而由飞行控制系统实现对飞机飞行的自动控制, 驾驶员应完成对自动飞行指令的设置和监督自动飞行的进行, 并可以随时切断自动控制而实现人工驾驶。采用自动飞行的好处主要有以下几点:

- (1) 长距离飞行时消除驾驶员的疲劳, 减轻驾驶员的工作负担;
- (2) 在一些恶劣天气或复杂的环境下, 驾驶员难于精确控制飞机的姿态和航迹, 自

动飞行控制系统可以实现对飞机姿态和航迹的精确控制；

(3) 飞行过程中有一些飞行操纵任务，需要精确完成，如进场着陆，采用自动飞行控制则可以很好地完成这些任务。

飞行控制系统主要功能包括：姿态（俯仰和滚转）保持（改平）、航向保持、高度保持、空速保持、高度选择、航向选择、自动着陆、自动地形跟踪/回避、自动航向/交通（飞行）管理、自动模态导引，等等。

直升机飞行控制系统还有其独特的功能，如垂直升降、自动悬停、自转、自动过渡飞行、自动载荷稳定和控制吊放声呐功能等。

2. 改善飞机的性能

一般来说，飞机的性能和飞行品质是由飞机本身的气动特性和发动机特性决定的。但随着飞机飞行高度及速度的增加，飞机的自身特性将会变坏。如飞机在高空飞行时，由于空气稀薄，飞机自身的阻尼特性变坏，严重时可使飞机角运动产生严重的摆动，靠驾驶员人工操纵将会很困难。此外，有些飞机设计时，为了减小质量和阻力，提高有用升力，常将飞机设计成静不稳定。对于这种静不稳定的飞机，驾驶员难于操纵。为了解决这类问题，可以在飞机上安装不同类型的飞行控制系统，使静不稳定的飞机变成静稳定，使阻尼特性不好的飞机变好。这就是现代飞机上常用的增稳系统或阻尼器系统。这种系统也是一种自动控制系统，但它不是用来实现飞机的自动飞行控制，而是用来改善飞机的某些特性，实现所要求的飞行品质和飞行特性。这种系统虽然不能实现飞行自动控制，但仍是现代飞机飞行控制不可缺少的组成部分。

人工与自动飞行控制（操纵），是由飞机操纵系统的伺服机构对飞机操纵面（舵面）进行复合控制。

0.2 飞行控制系统的基本原理

0.2.1 自动飞行控制系统的典型子系统——自动驾驶仪

飞机的自动驾驶仪（Autopilot，简称驾驶仪）是一种典型的自动飞行控制系统，它使用无线电/雷达信号、航向和姿态角测量信号、大气数据系统的飞行参数与人工输入的指令信号，通过对俯仰、滚转和偏航的调整，自动地保持或控制飞机的姿态和飞行航迹，模仿飞行员的人工操纵，达到自动控制飞机的目的。

假设要求飞机做水平直线飞行，飞行员应如何控制飞机呢？飞机受干扰（如突风干扰）偏离原姿态，例如抬头，飞行员用眼睛观察到仪表板上地平仪的变化，由大脑作出决定，通过神经系统传递到手臂，推动驾驶杆，经传动杆系驱动升降舵面，产生相应的低头力矩，使飞机低头。飞行员从地平仪上看到飞行姿态的修正，逐步回收驾驶杆。当飞机恢复水平时，使驾驶杆回到原位，停止修正。这一过程可用如图0.1所示的框图表示。

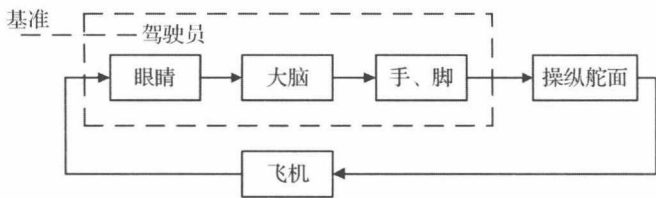


图 0.1 人工驾驶飞机的过程

驾驶仪模仿飞行员自动驾驶时，必须包括与眼、脑、手相对应的装置，并与飞机组成如图 0.2 所示的闭环控制系统。

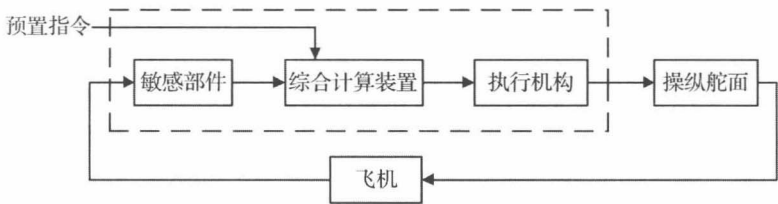


图 0.2 自动控制系统自动控制过程

自动驾驶的原理是：按偏差自动调节（闭环控制）。飞机偏离原（期望）飞行状态后，测量元件测量到实际值偏离的大小和方向，并输出相应的信号，经放大、计算后（实际测量值与目标值偏差），按偏差自动调节规律，控制执行机构操纵相应舵面，使飞机向着修正偏差、恢复原（期望）飞行状态的方向运动。当飞机回到原（期望）飞行状态时，偏差信号为零。操纵机构控制舵面回到原位，飞机重新按原（期望）状态飞行。

因此，驾驶仪中的测量元件、放大计算装置和执行机构可代替飞行员的眼睛、大脑神经系统和四肢，自动驾驶飞机。飞机自动驾驶仪一般由以下部件组成：

- （1）测量元件（反馈元件）——测量飞机运动参数，如姿态、速度、位置等。例如，垂直陀螺和航向陀螺测量俯仰角、滚转角及偏航角；速度陀螺测量角速度，现代飞机上的惯性基准系统（Inertial Reference System, IRS）可提供上述信息。其他相关系统有机载大气数据系统（Air Data System, ADS）、无线电导航系统等。
- （2）信号（计算）装置——把指令信号和各种敏感元件的输出信号处理为符合控制要求的信号。包括综合装置、微分器、限幅器及滤波器等。它又称作计算装置，在现代飞机上即为飞行控制计算机（Flight Control Computer, FCC）。
- （3）放大元件——放大上述处理后信号的元件，以满足驱动执行机构的需要。
- （4）执行机构——根据放大元件的输出信号工作，产生输出力或力矩带动舵面偏转，亦称舵机（作动器）。

0.2.2 自动飞行控制系统的执行机构——舵回路

由上文可知，驾驶仪的放大元件、执行元件（舵机）犹如驾驶员的大脑与四肢，根据控制指令，如修正飞行状态偏差的指令，控制舵面的偏转量。为了改善自动飞行控制性能，通常引入内反馈，形成如图 0.3 所示的随动系统——舵回路，又称作操纵面伺服系统（Control Surface Actuation System），自动控制舵面的偏转量。

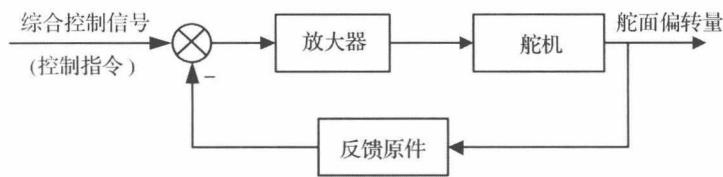


图 0.3 舵回路原理图

飞行控制系统的舵回路，是由放大元件、舵机和反馈元件等组成的闭环自动控制系统——伺服操纵系统。输入量是飞行控制指令——综合控制信号，输出量是舵机带动舵面偏转的角度或角速度。

综合控制信号由自动飞行控制系统的控制规律（简称控制律）决定。

飞行控制系统的子系统（控制器）通过舵回路控制飞机的舵面，达到飞行控制的目的。

一般说来，固定翼飞机可供驾驶仪控制的操纵面有三个：平尾（或升降舵）、副翼和方向舵；驾驶仪的舵回路一般也有三个：平尾（升降）舵回路、副翼（倾斜）舵回路和方向（航向）舵回路。

另外，驾驶仪从信号（包括测量信号和操纵信号）的产生，经综合、放大，直到舵机带动舵面转动，这样一条传递途径也称为“通道”。一套完整的驾驶仪，一般由三个通道组成，分别称作平尾（升降舵）通道（或俯仰通道、纵向通道）、副翼通道（或倾斜通道）、方向舵通道（或航向通道）。需要说明的是，现代民航飞机的自动驾驶仪功能只有俯仰通道和倾斜通道，方向舵通道由偏航阻尼系统控制，实现协调转弯和阻尼飞机“荷兰滚”运动。

0.2.3 飞行控制系统的典型控制回路

飞行控制系统诸多功能，由一些完成各类基本功能的回路得以实现，如阻尼器（增稳系统）、姿态控制器、高度控制器和航迹控制器等。

1. 阻尼器（增稳系统）

阻尼器是由传感器、校正网络、放大器、舵机和飞机机体组成的反馈系统。若仅采用角速度陀螺作为传感器来增加对飞机角运动（短周期）振荡的阻尼，减小飞机的摆动，就称为阻尼器。若增加感受加速度信号或迎角、侧滑角信号的传感器，用以改善飞机的静稳定性，就称为增稳系统。

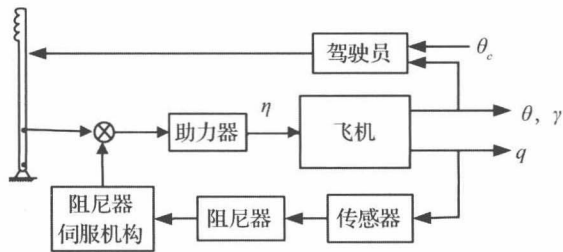


图 0.4 阻尼器与驾驶员的相互控制关系

阻尼器与驾驶员的机械操纵系统是相互独立的，控制关系如图 0.4 所示。它在使用范围内自动参与飞机操纵而又不妨碍驾驶员操纵，因此常对阻尼器权限加以限制，或者在反馈回路引入高通滤波网络，但这又同时限制了工作范围和效能。

为了实现阻尼器和驾驶员并行工

作，要把阻尼器伺服机构的机械输出再传送到操纵传动机构，使阻尼器控制指令与驾驶员操纵指令叠加复合，但要避免阻尼器控制对驾驶杆的反作用。

2. 角运动控制回路

角运动控制回路完成驾驶仪的基本功能：姿态（俯仰角和滚转倾斜角）稳定与控制。驾驶仪稳定飞机俯仰角和倾斜角的原理是类似的，按姿态偏差修正姿态偏差。

俯仰角控制的基本原理及其与阻尼器控制的相互关系如图 0.5 所示。在驾驶仪自动控制飞行姿态时，飞行员把控制权交给驾驶仪，必要时进行干预。此时，姿态控制器一般应带动驾驶杆，以便驾驶员监控它的工作情况。

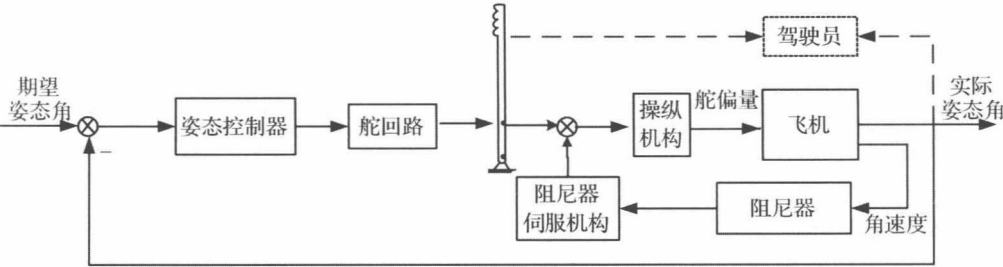


图 0.5 姿态控制原理

航向角的控制原理与姿态角控制类似，因此又把它们统称为角运动控制。但是，飞机航向与滚转角控制是紧密相关的。

3. 航迹控制回路

飞机航迹控制的问题比较复杂，一般总是根据飞机航迹运动特点，把它分为纵向、侧向两个方面进行研究。一般是在姿态（包括航向角）控制的基础上，构成航迹控制回路，航迹控制器根据实际航迹与期望航迹的偏差，生成航迹控制指令，送入姿态控制器，通过飞行航向和姿态的控制，适时地修正航迹偏差，使飞机按期望航迹飞行。航迹控制回路的一般结构如图 0.6 所示。

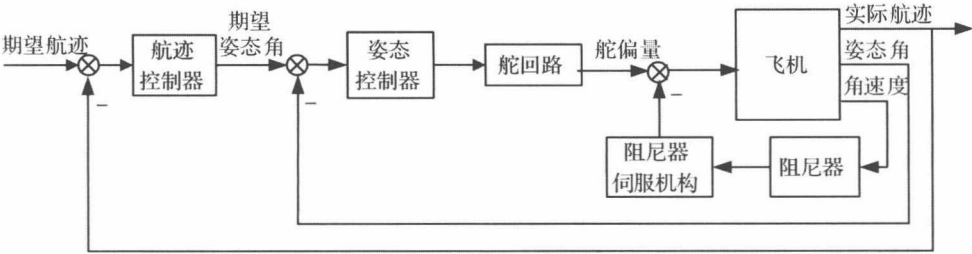


图 0.6 航迹控制原理

期望航迹可以是静态的——事先由飞行员设定，如自动导航中的计划航线，也可以是动态的——飞行中即时更改，如飞行中飞行员根据气象条件的变化随时修改飞行路线，这一功能通常利用飞行管理计算机系统的多功能控制显示组件（Multipurpose Control and Display Unit, MCDU）实现。

高度稳定就是一种典型的航迹控制问题。要稳定飞机的高度，一般由驾驶员将飞机操纵到预定高度后，接通定高功能回路，如图 0.7 所示，使高度控制回路根据飞机高度偏差信号，操纵平尾（升降舵），自动稳定飞行高度。现代民航飞机可在飞机起飞后一定高度

接通自动驾驶仪，选定相应的工作方式和目标高度，由自动驾驶仪完成爬升过程，并保持在目标高度上巡航。

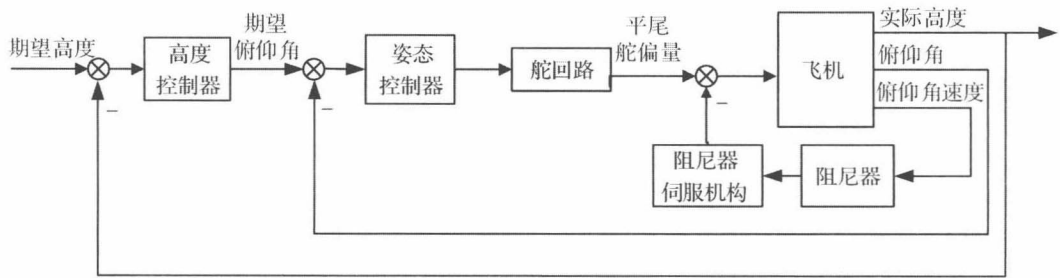


图 0.7 高度控制原理

0.3 飞行控制系统的总体结构

飞行控制系统是完成各种单一功能控制的子系统的总和。常规飞行控制系统的总体结构如图 0.8 所示，系统主要由完成三个功能任务的层次构成：最底层的任务是提高飞机运动和突风减缓的固有阻尼，即三个运动轴方向的阻尼器功能；第二层的任务是稳定飞机的姿态角——基本驾驶仪的功能（主要进行角运动控制）；第三层的任务是飞行高度、航迹和飞行速度，实现较高级的自动驾驶功能。

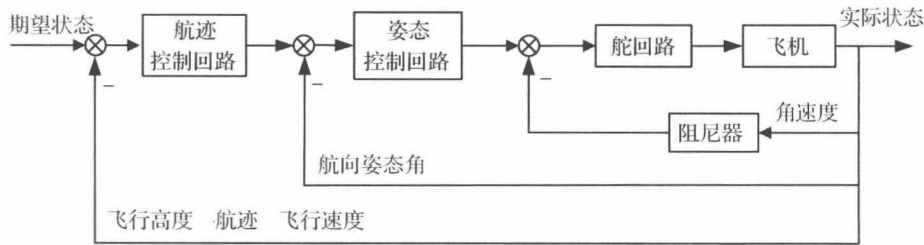


图 0.8 常规飞行控制回路

1980 年之后，飞行控制系统发生了重大变化，使用了电传操纵和各种专门控制器以构成综合控制系统。数字式飞行控制系统（Digital Flight Control System）如图 0.9 所示，它所反映的功能层次基本未变，但采用了现代控制技术。光传控制系统是未来飞行控制系统的发展趋势，将会逐步得到应用。

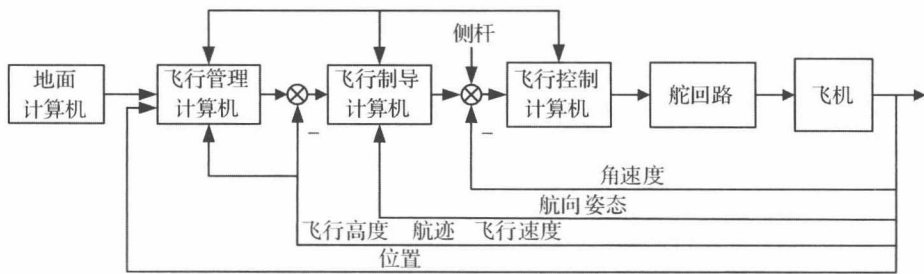


图 0.9 数字式飞行控制系统

在取消机械操纵系统后，飞行员通过内回路中“飞行控制计算机”控制飞行航迹。飞行姿态控制器和飞行航迹控制器被综合成“飞行制导计算机”，构成控制飞机纵、侧向运

动的控制回路。

用飞行管理计算机进行导航计算和飞行航线计算,构成飞机三维运动航迹控制的顶层回路。该回路与地面上的飞行安全系统、机载系统直接通信,进行数据交换,从根本上协调各回路的控制,进而根据测量的飞行位置与飞行监控所规定的飞行航迹进行比较,实现航迹优化控制和自动驾驶程序控制。

操纵机构由控制各操纵面的子系统组成,如图 0.8 和图 0.9 所示,每一子系统均设置了一个进行飞行控制的自动执行机构——舵回路。

现代民用运输机飞行制导与控制系统的总体结构,一般如图 0.10 所示。

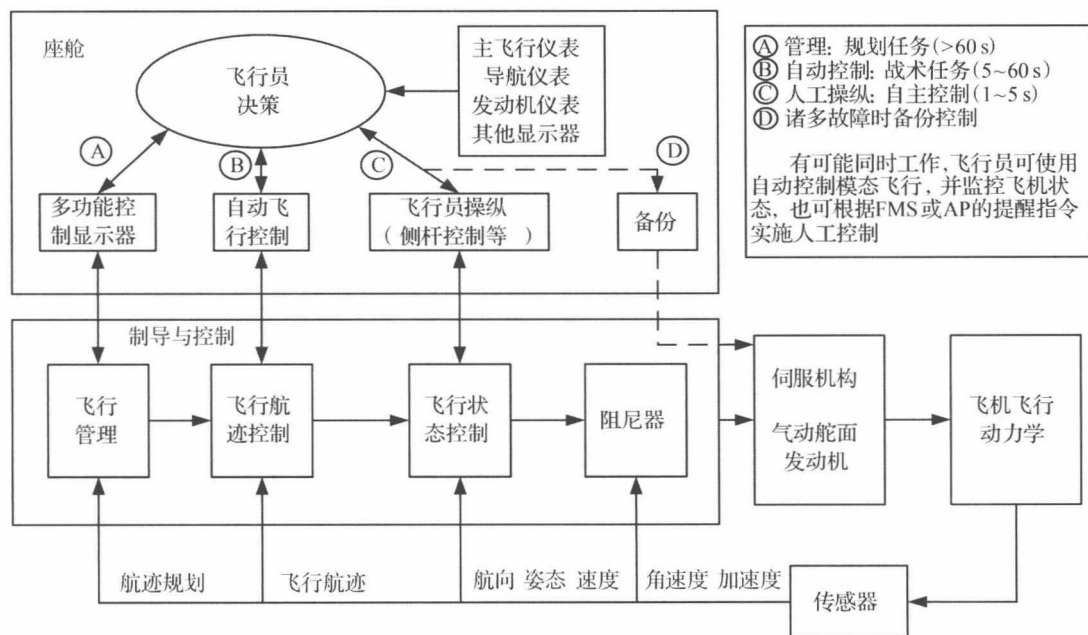


图 0.10 某现代民用运输机飞行制导与控制系统的总体结构图

0.4 飞行控制系统的发展简史

自 1903 年美国莱特兄弟成功地实现人类首次有人驾驶飞机飞行以来,飞行控制系统与飞行控制技术经历了百余年的飞速发展历程,从早期的拉杆、摇臂或钢索、滑轮等组成的简单机械式飞行控制机构,到液压助力机械式飞行控制机构,直至现代飞机的数字式光/电传飞行控制系统。

1912 年,美国的斯派雷(Sperry)公司开发研制了第一台驾驶仪——电动陀螺稳定装置,开创了自动飞行控制的先河。该装置由两个双自由度陀螺、磁离合器以及用空气涡轮驱动的执行机构组成,用以保持飞机稳定平飞。

第二次世界大战期间,随着飞机设计技术与飞机性能的提高,飞行包线的扩展,美国制造了功能完善的电气式 C-1 驾驶仪(苏联的仿制品为 A II-5),其敏感元件是电动陀螺,采用电子管放大器和电动舵机。

第二次世界大战之后,飞机飞行速度已经可以超过 2 倍声速,飞机外形的变化与升限提高,飞机自身稳定性恶化,使得驾驶员很难驾驭飞机的飞行,人工不易完成复杂的飞行

控制使命,要求在机上安装驾驶仪,利用助力器参与飞机舵面的控制,以改善飞机的稳定性。之后,飞机驾驶仪逐渐与机上其他装置耦合以控制航迹(如定高和自动下滑等),既能稳定飞机,又能全面地进行飞行控制,直至全自动盲降着陆。

20世纪50年代以前,驾驶仪主要用于运输机和轰炸机的简单飞行控制。20世纪60年代驾驶仪功能得到扩展,发展成为自动飞行控制系统,典型产品如美国的PB-20D。

之后,数字计算机和仿真技术的迅速发展,促进了控制理论与制导技术在机载数字计算机的运用,进而使飞行控制技术得到了迅速发展,产生了随控布局飞行器设计的新思想,在设计飞机之初就考虑自动控制,达到气动布局、飞机结构设计、发动机设计以及自动控制四方面的协调配合,设计出性能更好的飞行器。例如,飞机自身可设计成静不稳定的(配平的迎角减小,并可减小平尾,从而减小了阻力),飞机的稳定性由自动飞行控制系统来保证。例如,F-16飞机使用了“放宽静稳定性”和“全电传控制”;F-111飞机使用了高权限的电子控制;“协和”号民用飞机使用了带有机电备份的局部电传系统。当时,自动飞行控制系统已成为飞机不可缺少的组成部分,系统是否可靠直接关系到飞机的存亡。20世纪80年代以后,飞行控制系统经历了由模拟式系统向数字式系统的过渡,采用主动控制技术(Active Control Technology, ACT)的电传飞行控制系统(Fly-by-wire System, FBWS)也进入实用阶段,完成了“四轴侧杆控制”、“综合飞行/推进控制系统”、“光传操纵系统在飞机上的验证”等工作;20世纪90年代又验证了“先进数字/光学控制系统”(Advance Digital/Optical Control System, ADOCS)、“先进座舱管理系统”、“结构载荷限制”等多项主动控制技术。

现代民航运输机的典型机型B737NG系列和A320系列飞机的自动飞行控制系统是典型的数字式飞行控制系统。总体而言,B737NG系列属于常规飞控系统,A320系列属于电传飞控系统。

含有主动控制功能的电传飞行控制技术的应用,使飞行控制系统成为保证飞机性能、任务能力和飞行安全的关键系统。飞机飞行控制系统的功能不断增强,交联关系更加复杂,与推进系统和导航系统不断集成与综合,并且随着机载电子技术、控制技术等的提高,这样的综合还将不断发展与提高。今后的飞机飞行控制系统必将向着数字化、综合化的方向不断发展。

我国飞行控制技术研究及飞行控制系统的发展也经历了从常规机械操纵,到驾驶仪、增稳与控制增稳、自动着陆、带机械备份的电传控制与不带机械备份的全时全权限数字电传系统的研发过程。新中国成立后,我国首先在轰炸机上装备了A II-5驾驶仪,在1966年自行研制了轰5飞机上使用的KJ-3系列驾驶仪(621自动驾驶仪),之后又在直升机和战斗机上研发、使用了功能更多、结构更好的驾驶仪(飞行控制系统),现在各种新型的飞行控制系统已经在新型飞机上陆续投入使用,这不仅提高了飞机飞行控制的自动化水平,而且也对航空技术保障人才提出了更高的要求。

复习题

1. 简述自动飞行控制系统有哪些基本功能。
2. 说明自动驾驶仪的基本工作原理。
3. 简述自动飞行控制系统有哪些典型控制回路,各有什么功能。

第1章 飞行原理

1.1 概述

飞机控制系统的核心问题是研究由控制系统和飞行器组成的闭合回路的静、动态性能，为此必须建立控制系统和飞行器的数学模型，其形式可以是微分方程、传递函数或状态空间表达式等。飞机控制系统的被控对象是飞行器，为了更好地控制它，必须深入了解它的运动特性。飞行原理是研究飞行器运动规律的学科，属于应用力学范畴。本章主要讨论在大气中飞行的固定翼飞机的运动特性，并简要介绍有关空气动力学的基本知识。

1.2 空气动力学的基本知识

1.2.1 流场

1. 流场的描述

可流动的介质称为流体，流体所占据的空间为流场。流场的数学描述为连续函数，即把流场中的流动速度、加速度以及流体状态参数（密度 ρ 、压强 p 、温度 T 等）表示成几何位置和时间的函数。

空气并非连续介质，因为空气分子间有自由行程。但这微小的自由行程与飞行器的几何尺寸比较起来，完全可视为无限小，而且我们所研究的气流速度、加速度、密度、压强、温度等物理量，是统计意义上的气体分子群参数，而不是单个分子行为的描述。因此，当我们说流场中某点的流速和状态参数时，是指以该点为中心的一个很小领域中的分子群，称为流体微团。

2. 流线

流场中存在一类曲线，在某个瞬间，曲线上每点的切线与当地的流速方向一致，这类曲线称为流线。因此，在稳定的层流中，流体微团不会穿过流线，流线也不会相交。

3. 流管

由于流体微团不会穿过流线，我们可以想象许多条流线围成管状，管内的流体只在管内流动而不流出，管外的流体也不会流入，此管称为流管，如图 1.1 所示。

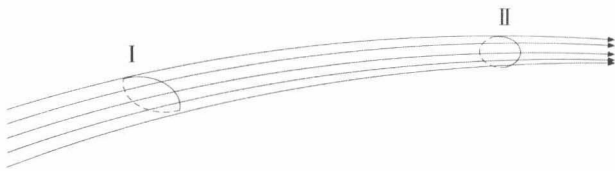


图 1.1 流管中的流动情况