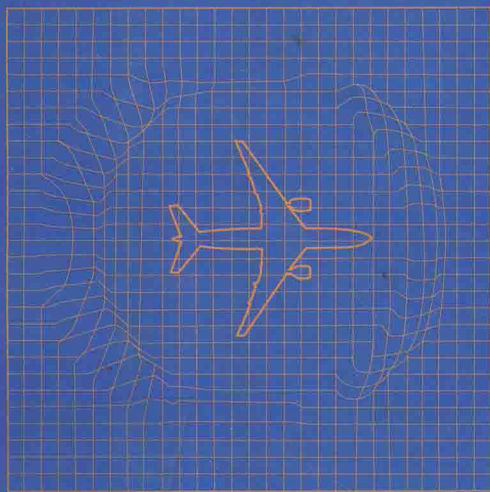


飞行器制导与控制及其 MATLAB仿真技术

毕开波 王晓东 刘智平 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

飞行器制导与控制及其 MATLAB 仿真技术

毕开波 王晓东 刘智平 编著



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

飞行器制导与控制及其 MATLAB 仿真技术 / 毕开波编
著. —北京:国防工业出版社, 2009. 4
ISBN 978 - 7 - 118 - 06204 - 5

I. 飞... II. ①毕...②王...③刘... III. 飞行控制系统 -
计算机辅助计算 - 软件包, MATLAB IV. V249 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 015978 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 7¼ 字数 214 千字
2009 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 23.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474
发行业务:(010)68472764

前 言

为适应现代高技术条件下的作战要求,世界军事强国都很重视在飞行器制导与控制领域的研究。仿真作为一种重要的研究手段,无论是在飞行器前期的控制方案预研、中段的半实物仿真,还是后期的性能验证等过程中,都发挥着积极的作用。本书是根据作者多年从事飞行器制导与控制仿真教学和科研工作积累的经验编写而成的,着重介绍飞行器制导与控制建模和仿真的基本概念与基本理论、飞行器制导与控制系统建模方法和仿真技术等,为制导与控制系统的分析、设计和研究提供理论方法和实用的技术手段,帮助读者在较短时间内全面、系统地掌握仿真基础知识和必要的仿真方法与技巧,提高仿真设计与验证能力。

本书共分七章,第1章绪论。第2章首先介绍了MATLAB基础知识和一些实用的MATLAB使用技巧,随后介绍了飞行器制导与控制仿真常用的数值算法,以龙格-库塔法为例,介绍了五种常用求解微分方程的编程方法。第3章介绍了飞行器制导与控制的基础知识,建立了一般飞行器运动方程,并基于飞行器质心、姿态动力学,建立了仿真系统的数学模型。而接下来的第4、5、6、7章是本书重点,详细介绍了飞行器控制系统、制导系统和制导控制闭环系统的有关理论和仿真方法。第4章介绍了极点配置控制系统、线性二次型最优控制系统的设计及仿真方法。第5章介绍了飞行器双环滑模控制器的设计及其仿真方法。第6章主要介绍了比例导引律的设计及其仿真方法,附带介绍了伴随方法和协方差分析技术在飞行器制导精度统计分析中应

用及其仿真方法。第7章介绍了基于 Simulink 方式的飞行器制导与控制系统的弹道仿真技术。

本书由大连舰艇学院毕开波副教授、空军工程大学王晓东博士、西安工业大学刘智平副教授编著,书稿完成后由毕开波副教授统稿审阅。由于作者对各章节内容进行相互交叉的补充、修改并统稿、定稿,因此很难清楚地写明各位作者的具体撰写内容。在本书成稿过程中,得到了很多专家教授的指导和同行学友的帮助,在此表示衷心感谢;在此同时感谢大连舰艇学院导弹与舰炮系和导弹武器教研室、空军工程大学工程学院、西安工业大学计算机学院、西北工业大学航天学院的支持。

限于作者水平有限,书中难免有疏漏和错误之处,真诚希望读者批评指正。

编者

2008年12月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 飞行器制导系统概述	1
1.1.1 制导系统的功用和组成	1
1.1.2 制导系统的分类	2
1.2 自动驾驶仪	8
1.2.1 单通道控制方式	10
1.2.2 双通道控制方式	10
1.2.3 三通道控制方式	11
1.3 系统仿真	11
1.3.1 系统仿真的基本概念	11
1.3.2 系统仿真技术的发展及应用	15
1.4 本书的内容安排和特色	17
第 2 章 MATLAB 基础知识及微分数值技术	19
2.1 MATLAB 简介	19
2.1.1 MATLAB 语言特点	19
2.1.2 MATLAB 的图视系统	21
2.1.3 MATLAB 的数学函数库	22
2.1.4 MATLAB 的符号计算工具包	23
2.1.5 MATLAB 与外部程序的交互	23
2.1.6 SIMULINK 交互式仿真集成环境	24
2.2 MATLAB 基础知识及使用	28
2.2.1 MATLAB 基础知识	28

2.2.2	MATLAB 使用中的希腊字符标注方法和拷图方法	48
2.3	求解微分方程组的数值技术	54
2.3.1	数值积分基本原理	54
2.3.2	基于数值积分法的连续系统仿真	57
2.3.3	微分方程的数值积分与龙格—库塔法	60
第 3 章	飞行器制导与控制的基础知识	70
3.1	飞行器建模基础知识	70
3.1.1	几种基本坐标系的定义	70
3.1.2	坐标变换	72
3.1.3	飞行器运动方程组	78
3.1.4	作用在飞行器上的力和力矩	85
3.1.5	过载和飞行器运动的关系	94
3.1.6	飞行器运动方程组的线性化	101
3.2	控制系统的分析方法	105
3.2.1	控制系统的稳定性分析	106
3.2.2	控制系统的时域分析	109
3.2.3	控制系统的频域分析	110
3.2.4	控制系统的根轨迹分析	114
第 4 章	极点配置法和最优控制设计及其仿真	118
4.1	极点配置法控制系统设计及其仿真	118
4.1.1	极点可配置条件	118
4.1.2	极点配置算法	119
4.1.3	求取状态反馈增益矩阵的方法	119
4.1.4	举例与仿真	121
4.2	线性二次型最优控制系统设计及其仿真	124
4.2.1	基本原理	124
4.2.2	最优输出跟踪	125
4.2.3	举例与仿真	125

第 5 章 双环滑模控制器设计及其仿真	128
5.1 引言	128
5.2 双环滑模控制器设计原理	129
5.3 飞行器运动方程	130
5.4 双环滑模控制器设计	130
5.4.1 外环滑模控制器设计	130
5.4.2 内环滑模控制器设计	132
5.5 成型滤波器设计	133
5.6 飞行器再入姿态仿真	134
5.7 仿真程序	136
第 6 章 飞行器导引律设计及制导精度统计分析	150
6.1 常用导引规律	150
6.1.1 相对运动方程	150
6.1.2 纯追踪法	151
6.1.3 平行接近法	154
6.1.4 比例接近法	155
6.2 导引律设计及其仿真	158
6.2.1 比例导引设计	158
6.2.2 二维比例导引拦截仿真	159
6.3 飞行器导引精度协方差统计分析	163
6.3.1 协方差分析描述函数技术基本原理	164
6.3.2 寻的回路协方差分析实例	170
6.4 统计线性化伴随方法分析技术	176
6.4.1 统计线性化伴随法	176
6.4.2 寻的回路的伴随方法分析实例	182
第 7 章 飞行器制导与控制弹道仿真	188
7.1 飞行器空间弹道仿真结构图	188
7.2 飞行器弹道数学模型和仿真	190

7.2.1	目标模型仿真	191
7.2.2	飞行器六自由度模型仿真.....	191
7.2.3	制导回路仿真	198
7.2.4	飞行器控制系统仿真	203
7.2.5	控制力和力矩仿真	216
参考文献		221

第 1 章 绪 论

1.1 飞行器制导系统概述

1.1.1 制导系统的功用和组成

制导系统从功能上可分为导引系统和控制系统两部分,如图 1-1 所示。导引系统和控制系统执行的任务是相互联系的,有的设备属于哪个系统往往难以划分清楚。但在功能上,这两个系统所要解决的主要矛盾是不同的。控制系统主要是解决飞行器飞行的稳定性,而导引系统主要是解决飞行器对目标的命中精度问题。飞行器导引系统俗称导引头,它必须具有以下功能:一是飞行器在飞向目标的过程中,要不断地测量飞行器的实际运动与理想运动之间的偏差;二是据此偏差的大小和方向并且按照一定的导引律形成控制指令,将指令一路送给控制系统,控制改变运动状态,消除偏差,另一路控制导引头实现对目标的稳定跟踪。

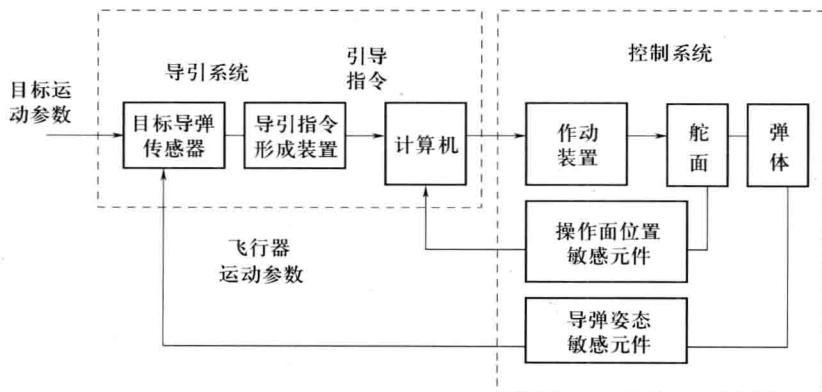


图 1-1 飞行器制导系统的基本组成

导引系统用来测定或探测飞行器相对目标或发射点的位置,按要求的弹道形成导引指令,并把导引指令送给控制系统。导引系统通常由飞行器、目标位置和运动敏感器(或观测器)及导引指令形成装置等组成。

制导系统的导引信号是靠利用某种形式的能量对目标与环境敏感的敏感元件来获得的。目前应用的主要能量有:可见光、红外、微波(厘米波和分米波)、毫米波、激光和声波等。控制系统直接操纵飞行器,迅速而准确地执行引导系统发出的引导指令,控制飞行器飞向目标。控制系统的另一项重要任务是保证飞行器在每一飞行段稳定地飞行,所以也常称为稳定回路。稳定回路系统是制导系统的重要环节,它的性质直接影响制导系统的制导准确度,弹上控制系统应既能保证飞行器飞行的稳定性,又能保证飞行器的机动性,即对飞行器有控制和稳定的作用。

制导系统的工作过程如下:飞行器发射后,目标、飞行器敏感器不断测量飞行器相对要求弹道的偏差,并将此偏差送给导引指令形成装置。导引指令形成装置将该偏差信号加以变换和计算,形成导引指令,该指令要求飞行器改变航向或速度。导引指令信号送往控制系统,经变换、放大,通过作动装置驱动操纵面偏转,改变飞行器的飞行方向,使飞行器回到要求的弹道上来;当飞行器受到干扰,姿态角发生改变时,飞行器姿态敏感元件检测出姿态偏差,并以电信号的形式送入计算机,从而操纵飞行器恢复到原来的姿态,保证飞行器稳定地沿要求的弹道飞行。操纵面位置敏感元件能感受操纵面位置,并以电信号的形式送入计算机。计算机接收导引信号、飞行器姿态运动信号和操纵面位置信号,经过比较和计算,形成控制信号,以驱动作动装置。

1.1.2 制导系统的分类

制导系统通常是按照导引系统的特点来分类的,即按照产生导引信号的来源来分类。通常分为4大类:自主式制导系统、遥控式制导系统、自动寻的式制导系统和复合制导系统。

1.1.2.1 自主制导系统

自主式制导主要指飞行器起飞后,控制飞行器飞行的导引信号的产生,不依赖于目标和制导站,而仅由飞行器本身安装的测量仪器来测量地球或宇宙间的物理特性,从而决定飞行器的飞行航迹,即不需接受外界信

息就能实现对飞行器飞行控制的制导。飞行器发射前,预先确定了飞行器的弹道。飞行器发射后,飞行器上制导系统的敏感元件不断测量预定的参数,如飞行器的加速度、飞行器的姿态、天体位置、地貌特征等。这些参数在弹上经适当处理,与在预定的弹道运动时的参数进行比较,一旦出现偏差,便产生导引指令使飞行器飞向预定的目标。

为了确定飞行器的位置,在飞行器上必须安装位置测量系统。例如根据物体的惯性,测量飞行器的运动加速度来确定飞行器飞行航迹的惯性导航系统、根据宇宙空间某些星体与地球的相对位置来进行导引的天文导航系统、根据预先安排好的方案控制飞行器飞行的方案制导系统、根据目标附近的地形特点导引飞行器飞向目标的地图匹配制导系统等。为此该系统需要在飞行器起飞前,把目标的位置、飞行器飞行控制方法等预先编成程序存入弹内。全程自主式制导仅适用于地地飞行器攻击地面固定目标。常见的自主式制导有惯性制导、捷联惯性导航、图像匹配制导、导航星全球定位 GPS 制导和多普勒导航等。仍在应用的有方案制导系统、惯导系统、地形匹配制导系统、天文制导系统以及多普勒制导系统等。

自主式制导的特点是它不与目标或制导站发生联系,因此隐蔽性好,不易受到干扰,飞行器的射程远,制导精度也较高。此外,这种系统制导的飞行器,一旦发射出去,就不能再改变其预定的航迹,所以只能攻击固定目标或将飞行器引向预定区域。单用自主式制导系统的飞行器不能攻击活动目标,一般用做攻击活动目标的初制导。自主制导系统一般用于弹道导弹、巡航导弹和某些战术导弹(如地空导弹)的初始飞行段。

1.1.2.2 自动寻的制导系统

自寻的制导依靠弹上的设备直接感受目标辐射或反射的能量(如无线电波、红外线、可见光等)来测量目标和飞行器的相对位置并形成导引信号,控制飞行器自动飞向目标。飞行器发射后,弹上的制导系统接收来自目标的能量,角度敏感器觉察出飞行器接近目标时的方向偏差,弹上计算机依照偏差形成导引指令,使飞行器飞向目标。

自动寻的制导可使飞行器攻击高速目标,制导精度较高,而且飞行器与指挥站间没有直接联系,能发射后不管,但由于它靠来自目标的能量来检测飞行器的飞行偏差,因此,作用距离有限,且易受外界的干扰。

其主要特点是通过弹上的导引系统(导引头或寻的器)接收或感受

目标辐射或反射的能量,自动跟踪目标,实现对目标的定位、捕捉和跟踪并形成引导指令,导引制导武器飞向目标。在制导过程中,弹上寻的系统需要不断地观测目标,形成控制信号,修正航向、进行目标选择和命中点选择。飞行器发射后,观测和跟踪目标,形成控制指令和自动驾驶飞行器飞行,都是飞行器上寻的系统独立完成的。自动寻的制导方式应用最广泛,发展最快。为了使自寻的系统正常工作,首先必须能准确地从目标背景中发现目标,为此要求目标本身的物理特征与其背景或周围其他物体的特征有所不同,即要求它具有对背景足够的能量对比性。用目标辐射的红外线使飞行器飞向目标的自寻的系统称为红外线自寻的系统。具有红外辐射(热辐射)源的目标很多,如军舰、飞机(特别是喷气式的)、坦克、冶金工厂,在大气层中高速飞行的飞行器的头部也具有足够大的热辐射。这种系统的作用距离取决于目标辐射(或反射)面的面积和温度、接收装置的灵敏度和气象条件。有些目标与周围背景不同,它能辐射本身固有的光线,或是反射太阳、月亮的或人工照明的光线。利用可见光的自寻的系统,其作用距离取决于目标或背景的对比特性、昼夜时间和气候条件。有些目标是强大的声源,如从飞机喷气式发动机或电动机以及军舰的工作机械等发出的声音,利用接受声波原理构成的自寻的系统称为声学自寻的系统。这种系统的缺点是,当其被用在射击空中目标的飞行器上时,因为声波的传输速度慢,使飞行器不会命中空中目标,而是导向目标后面的某一点。此外,高速飞行的飞行器本身产生的噪声,会对系统的工作造成干扰。雷达寻的系统是广泛应用的自寻的系统,因为很多军事上的重要目标本身就是电磁能的辐射源,如雷达站、无线电干扰站、导航站等。

根据飞行器所利用能量的能源所在位置不同,弹上安装的导引系统可分为主动寻的制导、半主动寻的制导和被动寻的制导三种类型。

1. 主动式自动寻的系统

主动式自动寻的系统是依靠弹上的制导设备向空间辐射能量,遇到目标反射回来,又被弹上所接收,利用接收的目标回波能量获取目标信息,再形成导引信号,控制飞行器导向目标。

主动式自动寻的制导系统常用的是主动雷达自动寻的系统。它主要由角度自动跟踪系统组成。角度自动跟踪系统用来搜索、捕捉目标,在捕

捉到目标后,自动测出目标对天线的角误差信号,并按一定的导引规律形成导引信号。导引信号一路控制天线消除这个误差,另一路经自动驾驶仪控制飞行器完成目标在距离上的自动搜索、自动选择和自动跟踪,以消除多目标干扰,提高电子对抗能力。主动式自动寻的制导系统的突出优点是飞行器可发射后不管,便于制导站机动;但其缺点是弹上设备复杂,易受干扰,而且受功率限制,作用距离近。由于单脉冲雷达自动寻的制导系统测角精度较高,抗角度欺骗干扰能力强,目前反舰导弹采用的较多。随着科学技术的发展和其在战术运用上的突出优点,防空导弹也将会采用。

2. 半主动式自动寻的制导系统

半主动式自动寻的制导系统是由制导站向空间辐射能量,弹上制导设备接收经目标反射的能量,以此获取目标信息,然后形成导引信号,控制飞行器导向目标。由于其照射源在制导站,其照射功率可以较大,制导距离远。弹上导引头没有发射设备,其结构简单、轻便。其最大缺点是易受干扰和制导站机动受限。目前广泛应用于地(舰)空导弹。照射目标的能源不在飞行器上,弹上只有接收装置,能量发生装置设在飞行器以外的制导站或其他位置。因此它的功率可以很大,半主动式寻的制导系统的作用距离比主动式要大。

3. 被动式自动寻的制导系统

被动式自动寻的系统,飞行器本身不辐射能量,也不需要别的照射源把能量照射到目标上去,飞行器上的接收装置接收由目标辐射出的红外线或无线电波获取目标信息,以此形成导引指令,控制飞行器导向目标。

这种制导系统必须建立在目标有某种能量辐射,并且达到一定功率的基础上,因而对目标的依赖性太大,易受目标欺骗。电视、红外系统受环境条件制约严重,它们本身又不具备测距能力,所以必须与雷达、激光制导配合使用。但其本身隐蔽性好,还可发射后不管。弹上设备简单、质量小,所以在攻击各种活动目标的飞行器上均有应用。目前常用的有被动雷达、电视和红外几种方式。

采用雷达被动式自动寻的系统的飞行器,弹上接收设备接收目标发射的雷达波,完成对目标的角度自动跟踪和距离自动跟踪,也称反辐射导弹。它设有记忆功能,当飞行器已对目标实施跟踪后,即使目标停止发

射,飞行器也能依靠记忆功能跟踪目标。

采用电视被动式自动寻的系统的飞行器,根据其跟踪方式有多种分类方法。按敏感元件的不同分为可见光、红外光和微光电视跟踪系统;依从视场中提取目标位置信息的方法不同,还可分为点跟踪系统和面积相关跟踪系统。点跟踪实际上跟踪的是目标上的某个点,而面积相关跟踪则是利用目标所在区域的特性来实现跟踪的。

自寻的系统的制导设备全部在弹上,具有发射后不管的特点,可攻击高速目标,制导精度较高。但由于它靠来自目标辐射或反射的能量来测定飞行器的飞行偏差,作用距离有限,抗干扰能力差。一般用于空空、地空、空地导弹和某些弹药导弹,用于巡航导弹的末飞行段,以提高末段制导精度。寻的制导按感受的能量(波长)可分为(微波)雷达寻的制导、红外寻的制导、毫米波寻的制导、电视寻的制导、激光寻的制导等类型。在复合制导技术中,寻的制导常用于末(段)制导,以提高命中精度。

1.1.2.3 遥控制导系统

由飞行器以外的指挥站向飞行器发出导引信息的制导系统,称为遥控制导系统。这里所说的导引信息,可能是导引指令或飞行器的位置信息。

遥控制导系统含地面制导站和弹上制导设备两部分。地面制导站含目标、飞行器观测跟踪设备、制导中心计算机和指令发射设备等。飞行器上制导设备有指令接收系统和控制系统等。这种制导方法广泛应用于防空导弹中。这种制导系统中,导引信息是由设在飞行器外部的制导站发出的,制导站可以设在地面、舰面或空中。它测量目标和飞行器的相对位置,通过计算机装置形成导引信号,然后发送给飞行器,控制飞行器飞向目标。它的特点是:主要设备在制导站,弹上设备简单;制导站作用距离远,制导精度高;但必须连续对飞行器进行制导,制导站的机动能力受限。它适用于近、中程导弹的制导或作为远程导弹的中继制导。攻击活动目标,多用于舰空导弹。遥控制导分为无线电指令制导和波束制导两类。

波束制导也叫驾束制导,是无线电指令制导的特例。它也包括地面制导站和弹上设备两部分。地面制导站向飞行器发送的不是导引指令而是雷达波束,飞行器在波束内飞行,弹上制导系统感知飞行器偏离波束中

心的方向和距离并产生相应的引导指令,控制飞行器飞向目标。由于这种制导方式在飞行器攻击过程中照射雷达始终要参与工作,易受敌方攻击,所以该种制导方法目前应用较少。

驾束制导和遥控指令制导虽然都由飞行器以外的指挥站导引,但前者指挥站的波束指向,只给出飞行器的位置信息,至于导引指令,则由飞行在波束中的飞行器检测其在波束中的偏差来形成。而遥控指令制导系统的导引指令,则由指挥站根据飞行器、目标的信息,检测出飞行器与给定弹道的位置偏差,并形成导引指令,该指令送往飞行器,以操纵飞行器飞向目标。

遥控制导系统与自动寻的制导系统的区别也是明显的。前者,在飞行器发射后,指挥站必须对目标(遥控指令制导中还包括飞行器)进行观测,并通过其遥控信道向飞行器不断发出导引信息(或导引指令)。后者,在飞行器发射后,只由弹上制导设备通过其目标信道对目标进行观测,并形成导引指令。原则上,飞行器一经发射,指挥站不再与它发生联系。因此,遥控制导系统的制导设备分装在指挥站和弹上,自动寻的制导设备基本都装在飞行器上。

遥控制导的制导精度较高,作用距离可以比自动寻的制导稍远些,弹上制导设备较简单,但其制导精度随飞行器与指挥站的距离增大而降低,由于它要使用两个以上的信息,因此,容易受外界干扰。遥控制导系统多用于地空导弹和一些空空、空地导弹,有些战术巡航导弹也用遥控指令制导来修正其航向。

1.1.2.4 复合制导系统

复合制导也叫综合制导或组合制导。以上制导系统各有优、缺点,当要求较高时,根据目标特性和要完成的任务,可把各种制导系统以不同的方式组合起来,以取长补短,进一步提高制导系统的性能。例如,飞行器飞行初段用自主式制导,将其引导到要求的区域;中段用遥控指令制导,以较精确地把飞行器引导到目标附近;末段用自动寻的式制导。这不仅增大了制导系统的作用距离,更重要的是提高了制导精度。当然,还可用自主+自动寻的、遥控+自动寻的等组合制导系统。复合制导多用于远程制导武器,如各类巡航导弹、反舰导弹等,工作波段的复合使用多用于寻的段的制导,由于它具有很强的抗干扰和目标识别能力,目前备受重

视,并得到了飞速发展。

1.2 自动驾驶仪

飞行器控制的目的是将其引向目标或使其按给定的弹道飞行。为实现这一目的,除了要求飞行器具有一定的飞行速度外,还要求在运动过程中以一定的方式改变飞行速度向量方向。飞行器速度向量的大小和方向的改变是借助飞行控制系统来实现的,而控制系统主要是指自动驾驶仪。自动驾驶仪的功能是控制和稳定飞行器的飞行。所谓控制是指自动驾驶仪按控制指令的要求操纵舵面偏转或改变推力向量方向,改变飞行器的姿态,使飞行器沿基准弹道飞行。这种工作状态,称为自动驾驶仪的控制工作状态。所谓稳定是指自动驾驶仪消除因干扰引起的飞行器姿态的变化,使飞行器的飞行方向不受扰动的影响。这种工作状态,称为自动驾驶仪的稳定工作状态。稳定是在飞行器受到干扰的条件下保持其姿态不变,而控制是通过改变飞行器的姿态,使飞行器准确地沿着基准弹道飞行。从改变和保持姿态这一点来说,飞行器的稳定和控制是矛盾的;从保证飞行器沿基准弹道飞行这一点来说,它们又是一致的。

自动驾驶仪一般由惯性器件、控制电路和舵机系统组成,它通常通过操纵飞行器的空气动力控制面或推力向量控制飞行器的姿态运动。常用的惯性器件有自由陀螺仪、测速陀螺仪和线加速度计等,分别用于测量飞行器的姿态角、姿态角速度和线加速度等。控制电路由数字电路和(或)模拟电路组成,用于实现信号的综合运算传递、变换、放大和自动驾驶仪工作状态的转换等功能。舵机系统的功能是根据控制信号去控制相应空气动力控制面的运动或改变推力向量的方向。

一般地说,自动驾驶仪中控制飞行器在俯仰平面内运动的部分,称为俯仰通道;控制飞行器在偏航平面内运动的部分,称为偏航通道;控制飞行器绕飞行器纵轴转动运动的部分,则称为滚转通道。它们与飞行器构成的闭合回路,分别称为俯仰稳定回路、偏航稳定回路和滚转稳定回路。

由于自动驾驶仪要稳定和控制在飞行器的俯仰运动、偏航运动和滚动运动,所以通常将自动驾驶仪设计成三个独立的稳定回路,也叫三个通道——俯仰通道、偏航通道和滚动(倾斜)通道。每个通道稳定和控制在