

飞行器的稳定与 自动驾驶仪

[苏联] B. A. 鲍德涅尔、M. C. 科兹洛夫 著



国防工业出版社

飞行器的稳定与 自动驾驶仪

[苏联]B. A. 鲍德涅尔、M. C. 科兹洛夫 著

王行仁、王宗学等译



国防工业出版社

1965

內 容 簡 介

本书阐述了飞行器飞行自动控制系统的理論、构成原理、装置特点及其使用情况。研究了角运动、重心运动和飞行速度的自动控制理論以及半自动控制系統、各飞行阶段（傾航飞行、着陆、向地面和空中目标导引）的控制系統。

本书可作为我国航空院校航空自动器专业的教学参考书，也是从事航空自动器方面的工程技术人员有益的参考书。

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И АВТОПИЛОТЫ

В. А. Болнер, М. С. Козлов
ОБОРОНГИЗ 1961

飞行器的稳定与自动驾驶仪

王行仁、王宗学等譯

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168¹/₃₂ 印張15¹¹/₁₆ 401千字

1965年8月第一版 1965年8月第一次印刷 印数：0,001—1,800册

統一书号：15034·875 定价：（科七）2.80元

目 录

譯者序	7
原序	8
緒論	9
第一章 自动化是改善飞行器性能的手段	12
1.自动化的对象	12
2.飞行控制系统的分类	14
3.对飞行自动控制系统的要求	16
第二章 作为被控过程的飞行器的运动	18
1.概述	18
2.飞机的纵向运动及其特性	19
3.作为被控过程的飞机的纵向运动微分方程式	23
4.飞机纵向运动的稳定性	35
5.飞机的侧向运动及其特性	38
6.作为被控过程的飞机的侧向运动微分方程式	41
7.飞机侧向运动的稳定性	51
8.具有两个对称面的对象的运动方程式的特点	52
9.在飞行中作用在飞机上的干扰	53
10.关于评价作用在飞机上的扰流大气干扰的方法	57
第三章 自动驾驶仪的作用原理	62
1.概述	62
2.自动驾驶仪控制倾斜角时的作用原理	62
3.自动驾驶仪控制俯仰角时的作用原理	76
4.自动驾驶仪控制飞机航向时的作用原理	85
5.自动驾驶仪控制飞行高度时的作用原理	93
6.自动驾驶仪控制飞机重心侧向运动时的作用原理	98
第四章 飞行器角运动自动控制理论	101
1.概述	101
2.自动驾驶仪调节规律的选择	102
飞行器纵向运动自动控制理论	105

3. 飞机纵向运动自动控制系统的微分方程式	105
4. 关于研究飞行自动控制系统的的方法	112
5. 带有有差式自动驾驶仪的飞机纵向运动自动控制系统	133
6. 带有无差式自动驾驶仪的飞机纵向运动自动控制系统	143
7. 带有弹性反馈自动驾驶仪的飞机纵向运动自动控制系统	149
8. 带有自动驾驶仪的飞机在扰动气流中的行为	154
飞机侧向运动自动控制理论	158
9. 飞机侧向运动自动控制系统的微分方程式	158
10. 飞机航向角自动控制系统	162
11. 倾斜运动自动控制系统	171
12. 飞机侧向运动自动控制系统。协调控制	175
自调整式飞行自动控制系统的构成原理	191
13. 概述	191
14. 带有开环调节回路的自调整系统	192
15. 带有标准模型的自调整系统	194
16. 带有闭环整定回路的自调整系统	196
17. 极值自调整控制系统	198
第五章 飞机重心运动的自动控制理论	205
1. 概述	205
2. 关于稳定飞机重心座标准确度的要求	206
自动控制飞行高度的理论	208
3. 运动方程式	208
4. 有差式飞行高度控制系统	212
5. 无差式飞行高度控制系统	221
6. 保证在垂直平面内无限机动飞行的自动控制系统	227
自动控制飞机重心侧向运动的理论	233
7. 运动方程式	233
8. 有差式飞机重心侧向运动的控制系统	235
9. 无差式飞机重心侧向运动的控制系统	246
第六章 飞机飞行速度的自动控制理论	250
1. 概述	250
2. 航空发动机和超音速飞机的某些特性	253
3. 飞机飞行速度自动控制系统的可能方案	256
4. 飞行速度控制系统的微分方程式	257
5. 操纵发动机推力的飞行速度自动控制系统	258
6. 操纵升降舵的飞行速度自动控制系统	267
7. 飞行速度的联合控制系统	275
8. 飞机飞行速度和飞行高度的自动控制系统	280

第七章 自动駕駛儀的結構和原理綫路	291
1. 自动駕駛儀的結構圖	291
2. AI1-5-2M 自动駕駛儀的原理綫路和結構特点	295
3. AI1-28 自动駕駛儀的原理綫路和結構特点	323
4. AI1-15 自动駕駛儀的原理綫路和結構特点	341
5. 几种国外自动駕駛儀的原理圖和結構特点	360
第八章 程序自动控制	368
1. 程序自动控制的任務	368
2. 航向的程序变化	369
3. 相对水平面的軌迹傾角的程序变化	372
4. 飞机重心座标的程序变化	374
5. 飞行速度的程序变化	377
第九章 半自动化控制系统原理	378
1. 概述	378
2. 人作为控制系统环节的特性	379
3. 駕駛飞机的半自动化系統	382
4. 飞机人工稳定系統可能的結構圖	384
5. 飞机人工阻尼裝置的原理	389
6. 人工提高飞机稳定性的裝置的原理	393
7. 飞机的助力操纵	395
第十章 飞机向地面目标的自动导引	397
1. 飞机向地面目标自动导引的基本原理	397
2. 向地面目标导引时的单一轉弯	403
3. 当連續跟踪目标时的側向瞄准	412
第十一章 歼击机向空中目标的自动导引	416
1. 向空中目标自动导引歼击机的系統的构成原理	416
2. 远距导引时歼击机的无扰动运动的特性	430
3. 按平行接近法导引歼击机的动力学	437
第十二章 进场、着陆及起飞时飞机的自动控制	454
1. 概述	454
2. 按仪表进场的系統	455
3. 在进场着陆时自动控制的几种可能途徑	459
4. 飞机着陆时側向运动的自动控制	460
5. 飞机着陆时纵向运动的自动控制	468
6. 着陆阶段自动化的可能性	470
7. 飞机起飞的自动化	471

第十三章 飞行器的惯性控制系统	474
1. 概述	474
2. 惯性导航系统接入闭环回路的方法	477
3. 具有非阻尼惯性座标仪的控制系统	480
4. 具有用内反馈来阻尼的惯性座标仪的控制系统	482
5. 对给定轨迹有非硬性联系情况下具有惯性座标仪的控制系统	486
6. 为了阻尼和缩短周期而采用外界信息情况下的具有惯性座标仪的控制 系统	489
7. 短时工作的惯性控制系统	495
参考文献	500

譯 者 序

本书根据苏联 1961 年出版的“Стабилизация летательных аппаратов и автопилоты” (В. А. Боднер, М. С. Козлов) 一书譯出的。本书是苏联航空高等学校“飞行器稳定与自动駕駛仪”課程的教科书。

书中較全面地闡述了飞行器飞行自动控制系統的理论及构成原理, 其中着重研究了飞行器角运动的自动控制、飞行器重心軌迹运动的自动控制、飞行速度的自动控制等。此外还研究了飞行器的領航飞行、起飞着陆、向地面目标导引、向空中目标导引的自动控制, 以及有人参与操纵的半自动化控制系統, 并对参与操纵的人的特性作了分析。第七章专门讲述了苏联的和資本主义國家的典型自动駕駛仪的作用原理及构造。书中有很多地方引用了具体数据作为例子, 可供参考。

书中所称“飞行器”虽然包括飞机、有翼火箭、空-空導彈、地-空導彈和魚雷等, 但书中内容則側重在飞机的飞行自动控制系統方面。

本书可作为我国航空院校航空自动器专业的教学参考书, 也是从事航空自动器方面工作的工程技術人員有益的参考书。

参加本书翻譯工作的有王行仁、王宗学、朱关秀、王文舜、孟宪仲、張汝惠、王庆康、張显卿、郑振宜等同志。

原 序

航空和火箭技术的发展及其有效的应用，在頗大的程度上取决于飞行器的飞行自动控制系统的发展。本书研究飞行自动控制系统(自动駕駛仪)的理論、构成原理与結構特点。并着重研究飞行器作为控制对象时的动态特性和确定其动态特性的方法，研究了闭环飞行控制系统过渡过程的动力学和最佳傳动比的选择。同时还研究自动駕駛仪的构成原理、原理图和特点。

本书的大致結構是这样的，在讲述了自动控制的一般任务和对控制系統的要求之后，就討論飞行器作为控制对象的动态特性，以及自动駕駛仪的作用原理。然后讲述不同运动(角运动、重心运动、飞行速度)的自动控制理論，并研究了保証各飞行阶段(航綫飞行、起飞、着陆、向目标导引等)的控制系統。有专门的一章讲述了控制系統(自动駕駛仪)可能实现方案。

第一、二、四、五、六、九、十二章是由 B. A. 鲍德涅尔 (Боднер) 写的，第三、七、八、十、十一章是由 M. C. 科兹洛夫 (Козлов) 写的，而第十三章是作者合写的。

緒 論

飞行器稳定与自动驾驶仪是一門較新的学科。它研究飞行自动控制系統的理论、构成原理、結構特点、設計方法及应用。换言之，在这門学科里将研究自动控制飞行的装置、飞行器作为被控对象的动态特性、自动控制的方法以及飞行控制系統的原理图。

飞行器的飞行状态由許多相互有关的参数来表征。只有在基本参数已知并能如願变化的情况下，才能提出和保持飞行状态。飞行器的綫座标和角座标、速度、加速度等就是飞行状态的基本参数。提出飞行状态的問題在于将飞行器各个参数进行某种組合，这种組合能保証最佳的飞行条件。

当連續干扰作用时，飞行器将在变化着的外界条件下飞行，这种干扰会破坏給定的飞行状态。为了保持飞行状态不变或者使飞行状态按一定規律变化，必須操纵飞行器的操纵机构，换言之，必須实现对飞行的操纵。这种操纵可以是手动的，也可以是自动的。当手操纵时，飞行員的反应則显得不够迅速和准确。因此，近年来飞行自动控制系統在飞行器上获得了广泛的应用。这种控制系統被称为自动驾驶仪。

为了控制飞行，必須自动控制下列参数：綫座标（飞行高度、相对給定軌迹的側向偏离、飞行距离）和角座标（俯仰角、傾側角、偏航角、攻角、側滑角），綫速度，綫加速度，角速度和角加速度等等。为了单独地控制飞行状态的每一个参数，必須有本身独立的迴路，由于参数的数目很多，所以飞行自动控制系統将是多迴路的。飞行器任何一种运动（纵向运动、航向运动等等）的各个参数的控制迴路經常是联系在一起的，从而形成控制通道。控制通道的輸出是执行机构，它操纵飞行器的操纵机构。

飞行器的飞行由各个阶段組成：起飞、爬高与加速、航綫飞行、导向空中目标或地面目标、着陆等。飞行自动控制系统除了控制飞行状态的参数以外，同时还应保証完成其飞行的各个阶段。

通常飞行器操纵的自动化应该是复合的，亦即一系列相互有关的动作是自动化的，例如，收取各种信息（关于飞行状态的、关于空中外界环境的等），变换信息，拟定控制規律（根据飞行器的控制，根据飞行器向目标的导引和对飞行器运动的檢查）等。飞行器的复合自动化系統应保証其应用的最佳条件。自动控制系統的发展証明，各单个自动器組成一个复合的系統将是最正确的解决方法，它可以更进一步改善飞行器的应用。

在这本书中将阐述自动控制系統的分析 and 綜合方法，在考虑到其使用条件限制的同时，注意了实现这种系統的技术可能性。在阐述飞行器各种运动（角运动、重心运动、飞行速度）的理論基础的同时，还研究在各个飞行阶段（航綫飞行、向地面和空中目标导引、着陆等）上述各种运动的自动控制的基本問題。

在第一章里将研究飞机自动控制系統的任务及基本构成原理。第二章将阐述飞行器作为被控过程的运动特性。給出飞行器纵向运动和側向运动的綫性化方程式，飞机的傳导函数及頻率特性，并且研究舵面偏轉及外界干扰作用下飞机的反应。因此，第二章的内容是研究自动控制系統动力学的基础。

第三章将阐述自动控制角运动和重心运动过程的物理概念。其中将說明控制系統中采用各种信号的必要性的理論根据，以及这些信号对控制过程的影响。

第四章研究飞机角运动自动控制的动力学。根据閉环控制系統的傳导函数、頻率特性和过渡函数，給出确定系統傳遞系数的方法，并且研究各傳遞系数对控制过程的影响。在这一章里还要研究自調整式的飞行自动控制系統的构成原理。

在第五章里用同样方法研究重心运动自动控制的动力学，而在第六章中研究飞行速度自动控制的动力学。現代苏联的和某些

外国的自动駕駛儀的結構图和原理图将在第七章中研究。其中也将闡述这些自动駕駛儀各通道和各个元件的作用原理及其結構特点。

第八章中研究程序控制的动力学, 給出确定程序信号的方法, 并分析完成程序飞行时的动态誤差。

有飛行員参加的半自动化控制系統的构成原理及半自动化控制的动力学将在第九章中研究。

第十章和第十一章研究将飞机导向地面和空中目标的自动导引系統的构成原理和动力学。起飞、着陆进场和着陆时飞机自动控制的构成原理及其动力学在第十二章中討論。

第十三章闡述利用慣性导航系統控制飞行器重心运动的原理, 以及慣性导航系統与飞行控制系統联合工作时的特点。

第一章 自动化是改善飞行器

性能的手段

1 自动化的对象

飞行器(飞机、有翼火箭、“空-空”型和“空-地”型导弹、鱼雷等),以及包括各种飞行器(例如,歼击机和“空-空”导弹)和其他装置在内的武器系统都是应该自动化的对象。

在这一章中将研究自动控制飞行器飞行的问题。在后面的叙述中有时用“飞机”这个术语代替“飞行器”,在这种情况下指的是所有飞机型式的飞行器。

从控制飞行器的观点来看,现代飞行器有以下主要特点:

1. 飞行高度和飞行速度的变化范围很大,这将引起飞行器的动态特性(阻尼、静稳定性)在飞行过程中很大的变化。同时在不同飞行条件下对同一种干扰要求有不同的控制作用。显然,在这些情况下要得到相同的过渡过程质量只有使控制系统的参数随外界条件而改变。换句话说,为了得到最优的过渡过程,自动控制系统应该以飞行条件为转移。这种系统称作自适应调整的自动控制系统。

2. 飞行器的动态特性(稳定性、操纵性、阻尼)并不总是满意的,用改变飞行器结构的方法来改善它,将引起气动力外形的变坏。因此提出这样一种任务,借助自动器来改善飞机的稳定性和操纵性,而不使它的气动力特性变坏。

3. 飞机在空间运动的特点是具有六个自由度。显然,为了控制这种运动必须影响作用在飞机上的力和力矩。在一般的飞机上具有四个基本的调节因素(三个控制面——升降舵、方向舵、副翼

和推力)，控制信号作用到这些因素上以实现給定的运动。显然，在这种情况下，形成四个控制通道，这些控制通道在对象中，也就是在作为动力学系统的飞机中是互相关联的。在对象中各通道之间的这种联系是不可避免的，这是由于在通常情况下，飞机的运动是一个统一的运动过程。

4. 飞行器的运动可以认为由角运动和重心运动組成。如果不需要使飞机准确的按給定軌迹运动的話，則可仅限于控制（稳定）角运动。控制（其中包括稳定）角运动的必要性在于，飞机在空間相对于其重心的速度向量应具有一定的姿态。除此之外，重心运动的控制也主要是通过角运动的控制进行的。为了使飞机以最短航程和最短時間向目标运动，重心运动控制就是必要的了，此时应保証准确地与目标相遇。換句話說，重心运动的控制应保証飞机按最佳的軌迹运动。

5. 飞行中引起过载的外力和外力矩会作用到飞机上。因为飞机结构强度有限，所以作用在它上面的过载同样应该有限制。假如控制系统能有效的抵抗外干扰（陣風），同时不让飞机的控制面有剧烈的偏轉，則限制过载是可以达到的。

6. 飞机的飞行應該是經濟的，亦即保証最小的公里耗油量。当飞行状态的参数按完全一定的規律变化时，这种飞行是可能的。实现最經濟飞行的任务是一个极值問題，为了解决这个問題可采用极值自动控制系統（自調整系統的一种特殊情况）。

7. 飞机不总是按最简单的軌迹（直綫）飞行的。为了迷惑敌人常常必須按复杂的軌迹飞行。例如，飞机在与敌人歼击机或其它防空武器相遇的区域里完成按高度和按航向的各种机动飞行，可以提高飞机的有效防御能力。显然，在这种情况下，保証飞机最大生存力的飞机重心运动軌迹将是最佳的軌迹。

8. 有时飞机不是单机飞行，而是多架飞行，这样可以保証集中的火力攻击。当多架飞机飞行时形成一个編队，从控制的观点看，編队飞行应作为一个统一的动力学系統进行研究。編队飞

行只有在保持各飞机間左右和前后一定距离时才有可能。显然，在这种情形下最希望的是由长机发出控制信号来自动控制飞机的編队。編队可以由有人駕駛的飞机和无人駕駛的飞机組成，而控制飞机編队的由載人的长机实现。

由上可知，飞行的控制在于控制以下的飞行参数：角座标和綫座标，速度及加速度，以及表征飞机相对于編队中其它飞机或相对目标（空中的和地面的）运动的座标、速度及加速度。

在控制飞机运动的过程中应达到高质量的过渡过程；执行命令的准确性；对外干扰反应小；广义的运动最佳性（最小的公里耗油量、最短的飞行时间、最大航程、提高战斗生存力等）。

2 飞行控制系统的分类

控制飞机飞行的自动控制系统可以分以下几种：1) 控制飞机角运动的系统；2) 控制飞机重心在给定飞行轨迹上运动的系统；3) 借助瞄准具追击目标的控制系统；4) 飞行器自动导向目标的系统。

自动控制飞机角运动的系统保证飞机必要的转弯和机动飞行（图1.1），在这种系统中输入信号是給定的飞机角位置，而输出是它的实际角

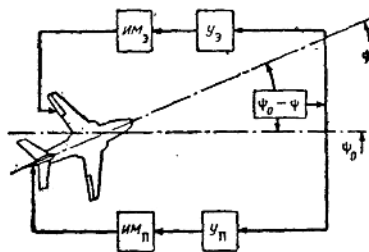


图1.1 自动控制飞机角运动的原理图。

ψ_0 和 ψ —— 航向角的给定值和实际值；

$У_3$ 和 $У_n$ —— 副翼通道和方向舵通道的放大器；

$ИМ_3$ 和 $ИМ_n$ —— 副翼通道和方向舵通道的执行机构。

位置。系统的执行机构在获得放大的指令信号时，应保持飞机以正比于该信号的角速度转动，而受大气中的常值干扰时，执行机构应使系统的反应最小。

自动控制重心运动的系统将以足够的准确度将飞机保持在給

定軌迹上飞行(图1.2)。系統輸入量是給定飞行軌迹的坐标, 而輸出

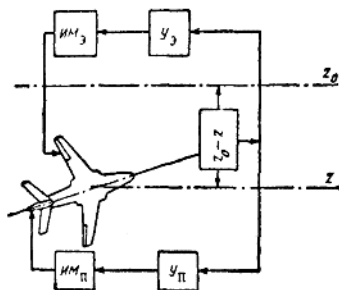


图1.2 自动控制飞机重心运动的原理图。

出是飞机在空間相对給定軌迹的位置。飞行軌迹可以由无线电波束給定或由專門的自治程序机构給定。假如飞机偏离了給定的軌迹, 則出現失調信号, 它通过控制系統使飞机回到原給定的軌迹上。

借助瞄准具追击目标

的自动控制系统与飞机角运动控制系統的区别在于給定角由瞄准具而且多半是用雷达瞄准具給出。在这个系統中, 輸入量是追击飞机和目标間联綫的方位, 而輸出量是飞机的角位置, 这个角位置的确定考虑了必須的前提角。

飞行器自动导向目标的系統将控制飞行器的机动飞行, 直到可能击中目标的距离为止(图1.3)。該系統的輸入量是目标的飞行方向, 而輸出量是追击飞行器本身的飞行方向。

通常, 控制飞行和向目标导引的系統可以是图1.4所示的結構, 其中 Q_0 , Q ——控制和导引系統的輸入量和輸出量; ψ ——飞机位置控制系統的輸入量。因此, 控制量 Q 通过角运动控制系統来实现。

正比于差值 $(Q_0 - Q)$ 的控制信号引起执行机构的位移, 此时飞机作机动飞行使控制信号 $\Delta Q = Q_0 - Q$ 值趋于最小。

組成控制系統必須有以下元件: 測量裝置 H_0 、 H_+ , 它保證

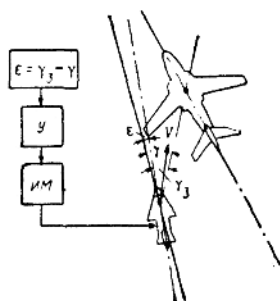


图1.3 飞行器自动导引的原理图。

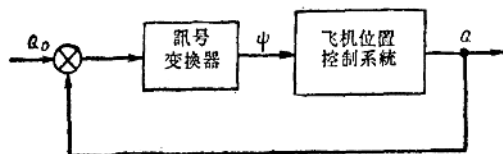


图1.4 飞行控制系统的方块图。

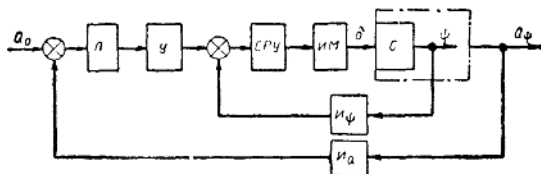


图1.5 飞行控制系统的原理图。

Π —信号变换器； Y —放大装置； $СРУ$ —解算装置； $ИМ$ —执行机构；

C —飞机； $И_\psi$ 、 $И_Q$ —测量装置； Q_0 、 Q_ψ —被调量的给定值和实际值；

δ —舵偏角； ψ —偏航角。

测量输出量 Q 和 ψ ；形成差值 $(Q_0 - Q)$ 的综合装置；信号变换器 Π ；放大装置 Y ；形成控制规律的解算装置 $СРУ$ ；执行机构 $ИМ$ (图 1.5)。在闭环控制系统中飞机也算是系统中的一个元件。

系统的动态特性决定于各组成元件的动态特性及连接各元件的方式。后面将研究闭环系统各元件(对象、灵感元件、放大器、执行机构)的动态特性，而最后将研究以不同方式连接各元件时系统本身的特性。

3 对飞行自动控制系统的要求

下面提出对飞行控制系统的一般要求。当研究某一种具体的系统时，将说明对它的详细要求。自动控制系统应该：

1) 在所有飞行状态，无论是手操纵或者自动控制时，保证改善稳定性与操纵性。为此目的，系统中应接入稳定自动器(假若这是必要的话)和阻尼装置；