

飞机飞行 控制系统手册

《飞机飞行控制系统手册》编委会 编



国防工业出版社

飞机飞行控制系统手册

《飞机飞行控制系统手册》编委会编

国防工业出版社

(京)新登字 106 号

图书在版编目 (CIP) 数据

飞机飞行控制系统手册/《飞机飞行控制系统手册》编委会编. —北京:国防工业出版社, 1994

ISBN 7-118-01143-6

I. 飞…

II. 飞…

III. ①飞机-飞行控制系统-手册②飞行控制系统-飞机-手册

IV. V 249.122

飞机飞行控制系统手册

《飞机飞行控制系统手册》编委会编

责任编辑 陈子玉

*

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 100044)

新华书店经售

北京市王史山胶印厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 34¼ 796 千字

1994 年 10 月第 1 版

1994 年 10 月北京第 1 次印刷

印数: 1—800 册

ISBN 7-118-01143-6/V·101 定价: 37.30 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

《飞机飞行控制系统手册》
编委会成员

主 任：吴厚道

主 编：张汝麟 童子尧 金凤瑞

执行编委：金凤瑞 童子尧

编 委：杨长春 刘锡成 刘继镛 李利春

申安玉 张 震 张新国 王敏文

李学国 岳保康 荣俊甫

责任编辑：陈子玉

前 言

近二三十年来，飞行控制技术已成为航空业中发展最迅速、最活跃的技术领域。特别是主动控制技术的飞速发展，使它成为决定现代飞机性能的主要因素之一。许多航空工业发达国家都投入大量人力、物力发展这项高新技术。近十多年来，我国的飞行控制技术研究也有了很大发展和长足的进步，单轴四余度数字式电传飞行控制系统全时全权控制增稳及放宽静安定性功能的验证试飞成功，标志着我国已在这一航空高科技领域占有了一席之地。但同世界先进水平相比，仍有较大差距。为使人们更多地了解与掌握这方面的技术信息、填补国内飞控专业工具书空白，我们组织编写了这本《飞机飞行控制系统手册》。

本书选编了国内外 97 个机型的飞行控制系统，每个系统一般依次按概述(系统类型、使用机种、研制公司和研制时间)，基本结构(系统构成、余度结构)，基本功能(控制模态、工作方式和控制律构形)，主要分系统和部件等四部分叙述。内容上，以目前正在使用的具有技术特点的代表性机型为重点；对国家规划发展机型有重要参考价值的系统，力求内容充实、数据完整、文图并茂；考虑到技术发展的继续性，对早期初始形态的飞控系统也做了典型选取和扼要介绍。

本书编写过程中，航空航天部飞行自动控制研究所飞行控制研究部给予了大力支持与合作。王非、宋翔贵、郭恩友、涂云鹤、张明礼和高德华等阅读了有关书稿，并提出了宝贵的技术修正意见；书中插图是周亚敏、郑月娣描绘的；高春芳、南忠南等参加了文稿的整理和抄写；郑淑芳、张桂兰和李瑛等参加了部分资料翻译。

本书的出版，得到航空航天部机载设备总公司阎治孝、诸葛豪等及部内各有关单位的热情支持。西北工业大学江永祥、金西岳等阅读了书稿，肖顺达审阅了全书并为本书作序。

在此，谨向为本书的编辑出版作出贡献和有益工作的部门、单位和个人，一并致以衷心谢意！

由于水平所限，缺点、错误在所难免，热忱欢迎批评指正。

《飞机飞行控制系统手册》编委会

序

飞机飞行自动控制系统已有一百多年的历史了。有趣的是，早在飞机出现之前，飞行自动控制装置就已出现（例如，1873年法国C. C. Renard无人多翼滑翔机的方向稳定器）。怪不得飞机一出现，就有人设想用自动控制器来稳定飞机。但是，一旦飞机设计与制造工程师在理论与实际上逐渐掌握带固有静稳定性的飞机的设计方法，同时飞行员也习惯人工驾驶飞机飞行时，人们在相当一段时间内对自动控制器又不那么感兴趣了。这当然也是因为当时的自动稳定器问题较多，如存在陀螺漂移，利用摆修正又极易受干扰，要求经常调整。此外更重要的是，自动控制器过份笨重，且对战斗机的机动性不利。随着长途航运事业的发展，为了减轻飞行人员的疲劳，对在客机上安装自动驾驶仪或航向稳定器的需求又增加了。在二次世界大战时有的自动驾驶仪还与轰炸瞄准具连结起来应用于轰炸机上，以改善水平轰炸时的定向瞄准精度。当时对于续航时间短、机动性大的飞机，仍然习惯于采用人工驾驶。二次世界大战后，随着飞机飞行包线日益扩大，约在1947~1948年间已发现，采用串联人工增稳系统是改善飞机飞行品质的一种十分有效的措施。这是一种半自动装置。起初仅在轰炸机上采用增稳系统及自动驾驶仪，后来在歼击机上也采用了增稳系统及自动驾驶仪。通常增稳系统为串联式的，自动驾驶仪为并联式的。前者与飞机组成的闭环形成内回路，而后者与飞机构成外回路。

然而直到60年代中期之前，所有飞行自动控制器仍然是有限权限的，而所有飞机全是具有固定稳定性的。因此自动器尽管也能改善飞行品质，但由于权限很小，只能起一个锦上添花的作用。

从40年代到60年代，自动着陆的研究与试飞取得了长足的进展。为提高自动着陆安全性，采取了余度技术，发展了可靠性技术研究。这一时期，微电子技术的发展也大大地提高了元件的可靠性。而在飞机方面，又发现单靠气动布局设计、结构与动力系统三者相综合的设计方法遭遇到许多不可逾越的矛盾。于是出现了随控布局的设计新思想。为了设计随控布局飞机，主动控制系统与电传操纵系统应运而生。60年代末一直到今天，电传操纵系统与主动控制技术一直是世界上航空界热门的课题。70年代以来，随着燃油价格的猛涨及机场起飞与进场着陆飞机密度的逐渐提高，飞行管理系统又相继发展起来并逐渐在国际航线上应用。由此可见，飞行自动控制系统是近几十年来航空领域蓬勃发展的技术之一。

我国早在十几年前就计划出版一本能反映各国飞行自动控制系统的图册，但后来不幸因故流产。而今我高兴地看见了航空航天部飞行自动控制研究所《飞机飞行控制系统手册》编委会编写的这本书。该所从事飞行自动控制系统工程设计与研究工作多年，具有丰富的理论知识与实践经验。参加这一手册编写的多是一些颇有成就的高级工程师与技术情报研究人员。他们共收集了国内外97种不同类型的飞行自动控制系统。从时间看，包括了从50年代的A11-52M到80年代最新型飞机的飞行自动控制系统。也就是说，覆

盖了近几十年蓬勃发展时期的主要型号。从所控制的飞机看，不仅包括了战斗机、运输机、直升机、轰炸机，而且还包括了靶机、无人机，甚至个别航天飞机。飞行自动控制系统中，既有单套自动驾驶仪类型，也有多余度自动驾驶仪类型，还有电传操纵系统（包括带机械备份的三、四余度系统以及纯电传操纵系统）；既有模拟式的，也有数字式的飞行自动控制器。这本技术手册对正在从事飞行自动控制系统研究和设计的科研、工程技术人员有很大的参考价值。高等学校的教师和学生可以将它作为讲课的辅助资料或毕业设计的参考资料。甚至对那些有心了解国外飞行控制发展近况的技术领导人员也是有益的。在对外开放的条件下，对引进的飞行控制系统进行消化与分析时，本手册也可提供借鉴。

我深信本手册的出版必将对我国航空飞行控制系统的发展起推动作用。

我对本书的及早出版表示衷心的祝贺！

西北工业大学教授 肖顺达

内 容 简 介

这是一部介绍国内外飞机飞行控制系统的专业技术手册，也是国内第一部内容丰富、图文并茂、实用性比较强的飞行控制专业工具书。

全书分战斗机，运输机（含旅客机），直升机，轰炸机和研究机，靶机、无人驾驶机和航天机，国内部分型号六部分叙述；书末编入了“飞机飞行控制系统一览表”、“飞控技术名词术语选编”、“飞控技术常用英语缩略语”及“英汉飞控技术常用词语对照”四个附录。

本书可供从事飞控技术研究设计工程技术人员和空军、民航等使用部门的机务、地勤人员以及从事技术管理、决策、引进人员查用。也可供大专院校飞行控制专业师生参考。

目 录

一、战斗机飞行控制系统

1. F-4 战斗机的全天候舰上自动着陆系统	1
2. F-4 飞机的 TWEAD 飞行控制系统	7
3. F-4B/C 战斗机的飞行控制系统	10
4. F-8C 飞机的数字式电传飞行控制系统	11
5. YF-12/SR-71 飞机的自动飞行控制系统	17
6. F-15 战斗机的飞行控制系统	24
7. F-16 战斗机的电传飞行控制系统	27
8. 先进战斗机技术综合验证机 (AFTI/F-16) 的数字式飞行控制系统	38
9. F-18 飞机的数字式电传飞行控制系统	56
10. F-20 “虎鲨”飞机的电子飞行控制系统	71
11. F-101B 全天候截击机的自动飞行控制系统	75
12. F-111 飞机的自适应飞行控制系统	78
13. F-105D 飞机的自动飞行控制系统	87
14. A-7A 强击机的飞行控制系统	93
15. A-7D 飞机的数字式多模态飞行控制系统	97
16. EAP 验证机的飞行控制系统	100
17. G-3 自动驾驶仪	108
18. L-10 自动飞行控制系统	111
19. MH-97 自动飞行控制系统	115
20. MB-3 自动飞行控制系统	117
21. SAAB JA-37 飞机的低成本数字式电传飞行控制系统	121
22. X-29 前掠翼验证机的数字式电传飞行控制系统	127
23. “狂风 (TORNADO)”飞机的飞行控制系统	130
24. “幻影-2000”战斗机的飞行控制系统	140
25. “猎人”飞机的电传飞行控制系统	146
26. “美洲虎”飞机的电传飞行控制系统	147
27. 苏-20 飞机的飞行控制系统	152
28. 米格-23 飞机的飞行控制系统	154
29. Rafale 飞行控制系统	157

二、运输机飞行控制系统

1. ATR-42 飞机的故障/工作式数字式飞行控制系统	161
2. A300B “空中公共汽车”的自动飞行控制系统	166

3. A-320 飞机的飞行控制系统	172
4. C-5A 战略运输机的自动飞行控制系统	176
5. C-141 飞机的电传飞行控制系统	179
6. C-141 飞机全天候着陆系统的自动驾驶仪	182
7. DC-10 飞机的数字式导引与控制系统	185
8. FCS-111X 飞行控制系统	189
9. L-1011 “三星”飞机的自动飞行控制系统	191
10. PB-20D 自动驾驶仪	198
11. PB-75 飞行控制系统	204
12. PB-100 飞行制导系统	208
13. SEP-5 自动飞行控制系统	213
14. SP-20 自动飞行控制系统	216
15. SP-30 自动飞行控制系统	217
16. SP-50 自动飞行控制系统	221
17. SP-300 数字式自动飞行控制系统	222
18. SPZ-500C 综合飞行控制系统	227
19. 波音 YC-14 飞机的数字式光传自动飞行控制系统	234
20. 波音-767 飞机的自动飞行控制系统	235
21. “协和号”超音速客机的飞行控制系统	242
22. АП-28Д 1 自动驾驶仪	252
23. АП-28Л1 自动驾驶仪	255
24. АП-6Е 自动驾驶仪	258
25. САУ -1Т 自动飞行控制系统	260
26. ВСУ -3П 自动飞行控制系统	267

三、直升机飞行控制系统

1. AP155 自动飞行控制系统	270
2. АП-34Б 型自动驾驶仪	276
3. AN/ASW-23 自动驾驶仪	280
4. CH-47 直升机的故障/工作式增稳系统	282
5. CH-53A 直升机的自动飞行控制系统	287
6. FAS-2 直升机用自动稳定器	291
7. H-46 直升机自动飞行控制系统	291
8. S-67 直升机操纵感觉增强系统	294
9. S-70 直升机的 AN/APR-39 自动飞行控制系统	297
10. SH-3D “海王”直升机的 MK31 自动飞行控制系统	304
11. 黄蜂直升机的 MK28 自动飞行控制系统	305
12. UH-1 直升机液压射流三轴增稳系统	306
13. “海王”直升机的数字式自动稳定系统	310
14. 142、143、145 型直升机的自动驾驶仪	311
15. 112 和 125 系列自动驾驶仪	313
16. 巨型直升机的自动飞行控制系统	315

17. 多用途山猫直升机的自动飞行控制系统	321
18. “超黄蜂”直升机的 PA112SD 自动驾驶仪	325
19. 战术飞机的制导控制系统	327

四、轰炸机和研究机的飞行控制系统

1. AH-5-2M 自动驾驶仪	331
2. B-1 轰炸机的飞行控制系统	333
3. B-1B 飞机的飞行控制系统	338
4. B-52 轰炸机的载荷减轻和模态抑制控制系统	341
5. B-58 飞机的自动飞行控制系统	344
6. HIMAT 高机动性技术研究机的自动驾驶仪	347
7. X-15 飞机的自适应飞行控制系统	349
8. X-20 飞机的飞行控制系统	357
9. X-22 变稳飞机的飞行控制系统	358

五、靶机、无人驾驶飞机及航天飞机的飞行控制系统

1. BQM-34A 火蜂靶机	363
2. BMQ-34A 和 147 型高空无人驾驶侦察机	364
3. CT-41 “独角鱼”靶机的飞行控制系统	372
4. Q-2C 火蜂靶机的飞行控制系统	372
5. 航天飞机的飞行控制系统	374

六、国内部分型号

1. 631 纵向阻尼器	383
2. 632 横侧增稳系统	386
3. 621 自动驾驶仪	391
4. 621-2 自动驾驶仪	398
5. 641 自动驾驶仪	403
6. 靶五和靶五甲自动飞行控制系统	410
7. CK-621 自动飞行控制系统	415
8. 671 变稳定性飞机飞行控制系统	420
9. ACT 验证机纵轴四余度数字电传飞行控制系统	428

七、附录

附录 1 飞机飞行控制系统一览表	437
附录 2 飞行控制系统名词术语选编	458
附录 3 飞控技术常用英语缩略语	471
附录 4 英汉飞控技术常用词语	493

一、战斗机飞行控制系统

1. F-4 战斗机的全天候舰上自动着陆系统

概 述

F-4J 飞机上装备的 AN/SPN-42 全自动全天候数字式舰上着陆系统，是由贝尔航空空间公司为美国海军研制的，开始使用于 60 年代末。

基本结构

全天候数字式自动舰上着陆系统 AN/SPN-42 的结构组成框图如图 1-1-1 所示。

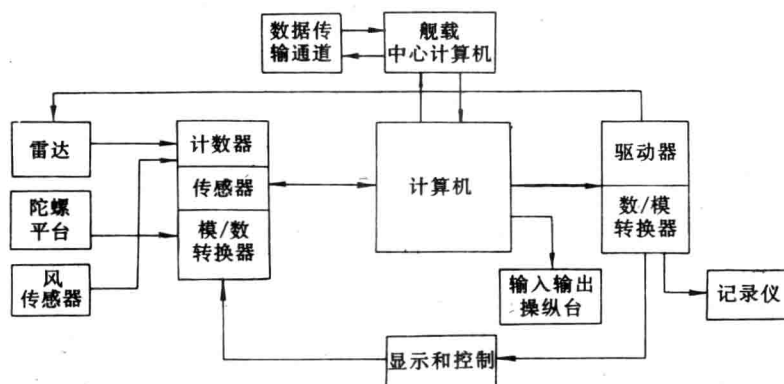


图 1-1-1 AN/SPN-42 系统的主要组成框图

AN/SPN-42 系统的组成有雷达子系统、稳定子系统、输入输出转换装置、计算机、终端显示器，以及输入输出控制台和记录仪。

基本功能

用来装备美海军 F-4 鬼怪 II 战斗机的全天候舰上着陆系统，具有完备的仪表着陆系统和信息显示系统，能完成自动着陆、半自动着陆和人工控制着陆。

F-4 飞机舰上着陆过程分为交通管制和着陆过渡，自动着陆两个阶段。

(1) 交通管制和着陆过渡阶段

交通管制 由舰上空中交通管制中心负责引导着陆机群，按照交通管制图依次安全下降进入“过渡窗口”。交通管制图的“保持锥体”是一倒立的锥体，高 12.192km，底的半径为 166.68km。尖端距舰尾 14.816~22.224km，它和母舰一起运动。和它同心的“下降锥体”半径为它的 2/3。舰上空中交通管制中心发出引导飞机的信息，经数据传输

通道传送给飞机，在座舱内显示给驾驶员。通过控制飞机的飞行速度，使机群在“保持锥体”的同一高度上，均分为适当的间隔作盘旋飞行。当某架飞机被允许下降时，该机即从“保持锥体”被引导进入“下降锥体”，从 12.192km 高的水面上进入“过渡窗口”，见图 1-1-2。

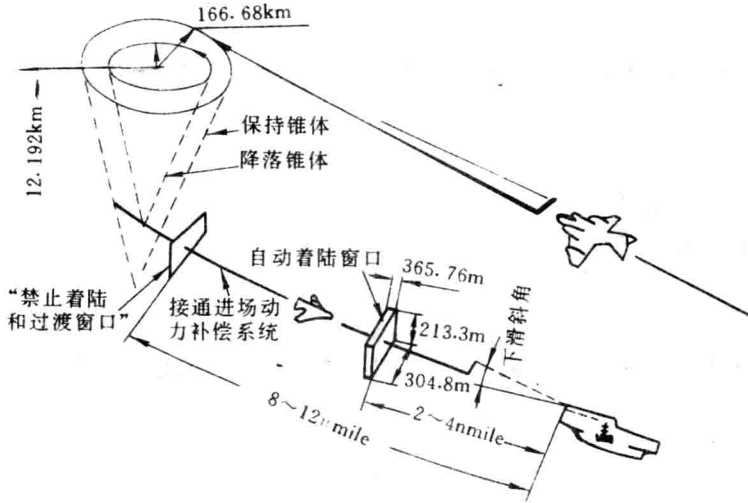


图 1-1-2 自动舰上着陆简图

“过渡窗口” 进入这个窗口后由“禁止着陆和过渡装置”来控制飞机进入“着陆窗口”。当自动着陆系统发生故障，或者飞机飞行的位置超过预置下滑斜度要求的范围时，“禁止着陆和过渡装置”发出禁止降落指令，阻止飞机着陆。

进入“过渡窗口”之后，舰上控制台发出“自动着陆，准备好”文字显示信号给驾驶员。驾驶员作好自动着陆准备并给出回答信息。

这时飞机的俯仰轴由飞行控制系统的高度保持或姿态保持状态来控制。没有外回路的俯仰控制系统，也可以采用人工控制代替自动飞行控制系统的姿态保持状态。

驾驶员还要接通进场推力控制系统 (APCS)，自动控制发动机推力，保证进场速度，见图 1-1-3。

(2) 舰上自动着陆阶段

飞机由“禁止着陆和过渡装置”引导接近“着陆窗口”，便被舰上着陆系统的跟踪雷达捕获并跟踪。这时着陆系统的计算机，根据雷达子系统送来的飞机位置参数、稳定子系统供给的舰飞行甲板的运动参数、飞机的姿态、飞行参数、飞行控制系统的工作状态等信息，计算出实际飞行轨迹与理想飞行轨迹之间的垂直和横向偏差，计算出俯仰角和倾斜角控制指令。指令和偏差信号经数据传输通道送到飞机上。垂直和横向偏差信号送给驾驶舱的显示系统，以备驾驶员监控进场。俯仰角和倾斜角指令经耦合器，分别送入自动驾驶仪的俯仰通道和倾斜通道，构成闭合回路，见图 1-1-4。

自动驾驶仪的俯仰通道工作在姿态保持状态。在俯仰角指令控制下使飞机沿着最优的下滑线着陆。

通过进场动力补偿系统的自动推力控制，来控制飞机的攻角/空速。

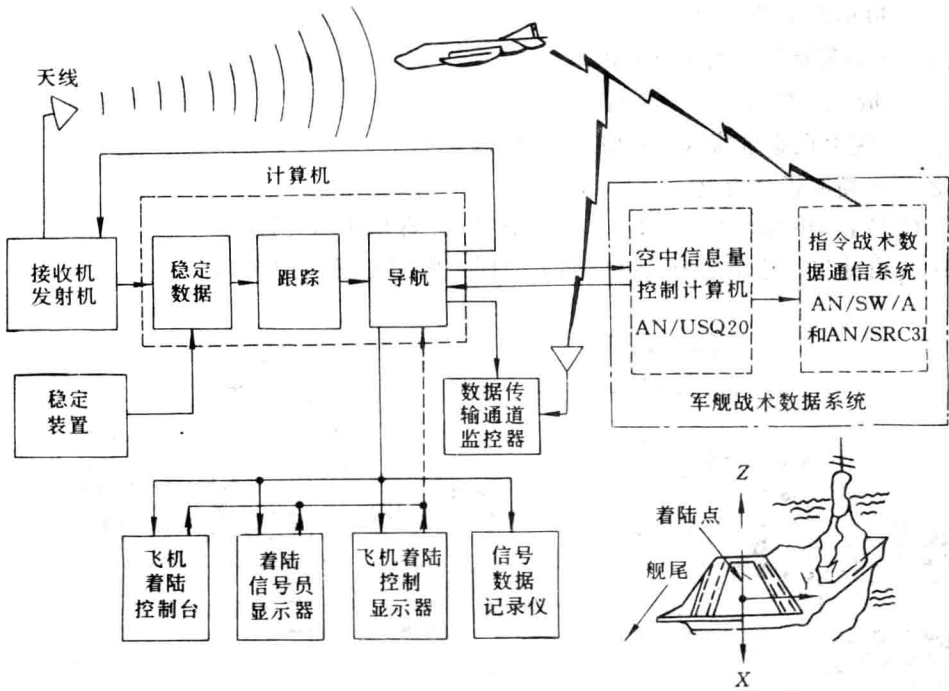


图 1-1-3 自动着陆系统方框图

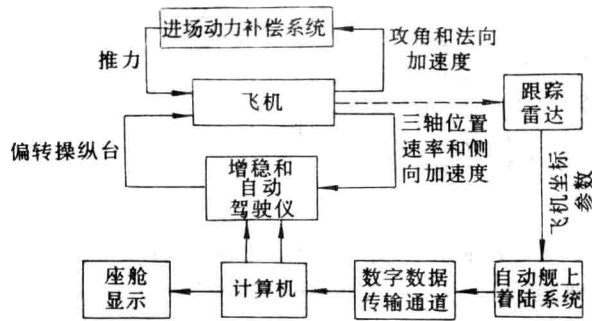


图 1-1-4 自动舰上着陆控制回路方框图

自动驾驶仪的倾斜通道受倾斜角指令控制，以修正航向偏差，从而获得准确的着陆位置。倾斜角范围为±15°。

在飞机着陆前 12s，驾驶员接通甲板运动补偿器来控制飞机的运动与甲板的运动同步，使飞机在舰上预定着陆点处满意地着陆。

甲板运动补偿器是一个相移补偿装置。用测量的预定着陆点的垂直位移和舰的俯仰角产生高度指令的增量，送到着陆系统的计算机中以增加给定高度指令来控制飞机。

相移补偿器的典型传递函数为

$$\frac{\Delta Z_c}{Z_{ss}} = \frac{1.5s^3 + 2.88s^2 + 2.15s + 1}{0.0016s^4 + 0.032s^3 + 0.24s^2 + 0.8s + 1}$$

式中

$$Z_{ss} = Z_s - 0.5 X_F \theta_s$$

θ_s —— 舰运动的俯仰角；

X_F —— 预定着陆点到舰尾的距离；

Z_s —— 舰上理想着陆点的垂直位移；

Z_{ss} —— 舰上理想着陆点的有效垂直位移；

ΔZ_c —— 高度指令增量。

F-4G 是 F-4B 的改进型。装有 AN/ASW-21 数据传输装置。

F-4G 自动飞行控制系统的纵向通道原理方框图见图 1-1-5。

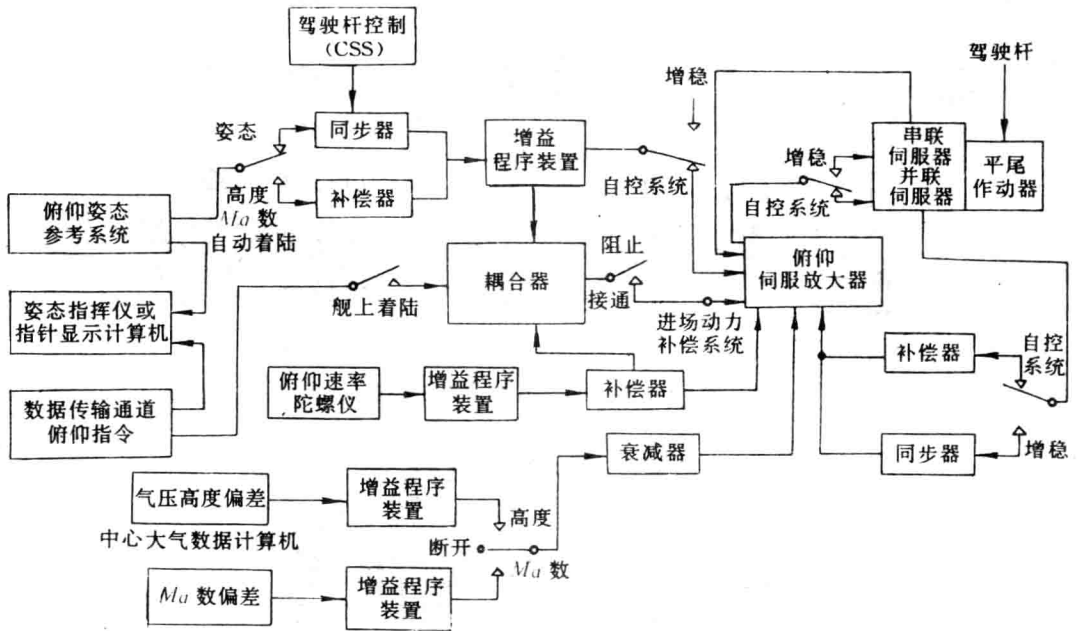


图 1-1-5 F-4G 自动飞行控制系统纵向通道原理方框图

它的工作状态有增稳、姿态保持、驾驶杆控制 (CSS)、高度保持、Ma 数保持和自动着陆。

俯仰轴的气动操纵面是全动平尾，它由液压助力器来驱动。助力器头部装有电液伺服器，它兼有正常的人工操纵和自动驾驶仪控制两种工作模式。自动驾驶仪工作时，人工操纵杆被锁住，自动驾驶仪发生故障时驾驶员能立即恢复人工操纵。

飞行控制系统的增稳工作状态，由俯仰角速度陀螺信号来控制串联伺服器的位移。其控制律简化表达式如下

$$\delta_s = q K_q f_z(\dot{q}_c) \frac{s}{1+s}$$

式中

δ_s —— 伺服器位移；

q —— 飞机俯仰角速度；

$K_q f_z(\dot{q}_c)$ —— 俯仰角速度增益，是动压的函数；

s ——拉普拉斯算子。

飞行控制系统的俯仰姿态保持状态是由液压伺服器的积分工作状态来完成。伺服器的位移方程为

$$\delta_{,s} = qK_q f_z(\dot{q}_c) \frac{s}{1+s} + \Delta\theta K_\theta f_z(\dot{q}_c)$$

式中

$\Delta\theta$ ——俯仰角的增量；

$K_\theta f_z(\dot{q}_c)$ ——姿态增益，是动压的函数。

俯仰姿态的控制，是在俯仰姿态保持状态中使用驾驶杆控制（CSS）功能而实现的。驾驶杆控制力按一定的比例关系转换为电信号去驱动俯仰姿态同步器。平尾的偏转经过具有 $\frac{2s}{1+s}$ 特性的补偿器反馈给伺服放大器。

在姿态保持回路中引入适当的大气数据信号可实现高度保持和 Ma 数保持功能，伺服器位移方法如下

$$\delta_{,s} = qK_q f_z(\dot{q}_c) \frac{s}{1+s} + \Delta\theta K_\theta f_z(\dot{q}_c) \frac{20s}{1+20s} + \Delta h K_h f_z(Ma)$$

式中

Δh ——偏离基准高度的高度偏差；

$K_h f_z(Ma)$ ——高度增益，是 Ma 数的函数；

$\Delta h K_h f_z(Ma)$ ——在 Ma 数保持中置换为 $\Delta M K_M$ 项；

ΔMa ——马赫数的偏差；

K_{Ma} —— Ma 数增益。

舰上着陆状态时，自动驾驶仪接通俯仰姿态保持回路，自动着陆系统的俯仰角指令经耦合器与自动驾驶仪接通；高度保持、 Ma 数保持和驾驶杆控制（CSS）都置于断开位置。

伺服器位移方程式为

$$\delta_{,s} = qK_q \frac{s}{1+s} + \Delta\theta K_\theta + \Delta\theta_c K_\theta$$

式中

$\Delta\theta_c$ ——俯仰指令信号；

K_θ ——俯仰指令增益。

F-4G 自动飞行控制系统的横滚/方向通道简化原理框图表示在图 1-1-6 上。

横滚运动由液压助力器驱动四个扰流片和两个副翼来控制。每个机翼上的单独的电液串联伺服器的输出和驾驶员驾驶杆的输出，经过差动装置综合后操纵助力器。

横滚通道可以提供增稳、航向和姿态保持功能。

横滚通道实际上是横滚姿态保持回路，它以零倾斜角为基准，使飞机保持机翼为水平。当有航向偏差信号作用时，系统以 1° 的航向偏差置换为 5° 倾斜角的比值使飞机倾斜，以控制飞机改变航向。

方向舵回路采用电液伺服器和液压助力器来偏转方向舵。

方向舵回路引入侧向加速度，以完成自动协调转弯。

$$\delta_A = K_p \cdot P + K_{\Delta\psi} \Delta\psi + K_\phi \cdot \Phi$$

$$\delta_R = K_r [f(M)] [r] \left[\frac{2s}{1+2s} \right] + K_{N_y} [f(q_c)] N_y$$

式中

- δ_A ——副翼位移；
 δ_R ——方向舵位移；
 K ——静态增益（与飞行参数无关）；
 N_y ——侧向加速度；
 P ——飞机横滚速率；
 Ma ——马赫数；
 q_c ——动压；
 $\Delta\psi$ ——航向偏差；
 Φ ——飞机倾斜角；
 r ——飞机偏航速率；
 K_r ——偏航速率增益，是 Ma 数的函数；
 K_{N_y} ——侧向加速度增益，是动压的函数。

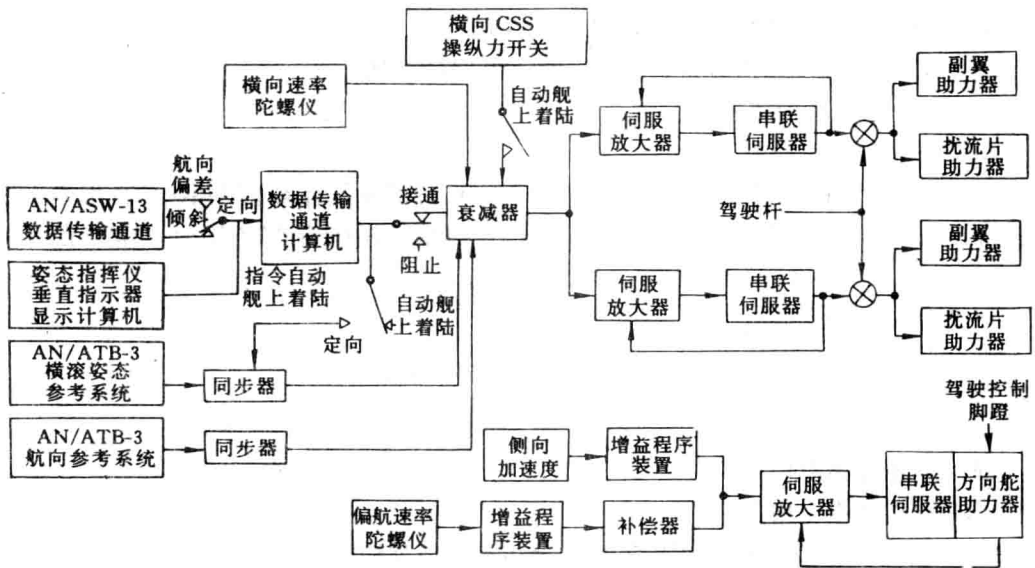


图 1-1-6 F-4G 自动飞行控制系统
横滚/方向通道功能方框图

主要分系统

(1) 雷达子系统 采用圆锥扫描跟踪雷达。工作在 K_a 频段 (33.2GHz)。以 1.22m 抛物面反射器提供 1.5° 的波束宽度。雷达的有效工作距离为 14.82km 到 91.44m。雷达扫描方位角传感器是光学轴增量编码器 (14 位分辨率)。雷达万向支架围绕俯仰轴和方向轴