

人机系统 和 飞行品质

胡兆丰 主编

北京航空航天大学出版社

航
空
知
识

PDG

31.13.05

V212.13
02

人机系统和飞行品质

胡兆丰 主编

HF14/15



C0157871

北京航空航天大学出版社

(京)新登字 166 号

内 容 简 介

本书介绍了有人驾驶飞行器人机闭环特性中驾驶员控制行为的数学模型,以及衡量人机系统动态特性好坏的飞行品质的含义、要求及其与飞机设计、控制规律等的联系。书中结合飞行力学,从概念及本质上阐述了飞行品质,以及飞行品质规范的基本内容与涉及到的有关判据及准则。并以利用驾驶员结构模型研究飞行品质的两个例子作为贯穿人机系统和飞行品质两部分内容的示范。

本书可作为航空院校有关专业的研究生和高年级本科生的教材或参考书;对于研究飞行品质和飞行器人机闭环特性的工程技术人员,以及研究其它交通工具动态特性的科技工作者也是一本有益的参考书。

人 机 系 统 和 飞 行 品 质

RENJI XITONG HE FEIXING PINZHI

胡兆丰 主编

责任编辑 刘登敏 郑忠妹

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地书店经售

朝阳科普 印刷厂印装

* * *

787×1092 1/16 印张:7.5 字数:188.8千字

1994年10月第一版 1994年10月第一次印刷 印数:1000册

ISBN 7-81012-499-4/V·036 定价:4.6元

前 言

本书系根据 1989 年胡兆丰编写、北京航空航天大学印刷的同名教材,经多年教学实践,并参阅了大量的资料后,增删、修订、改写而成。北京航空学院(北京航空航天大学前身)于 1986 年秋首次开设了“人机系统和飞行品质”的新课程,供飞行力学及其它相关专业的研究生选修。

从性质上说,这是一个由多学科交叉形成的新的学科。尚无完全合适的同类书籍供直接借鉴。编写本书的目的是向读者提供有关研究有人驾驶飞行器人机闭环特性中,驾驶员控制行为的数学模型;衡量人机系统动态特性好坏的飞行品质的含义、要求及其与飞机设计、控制规律等的关联。根据这个目的,本书内容包括:建立驾驶员控制行为的数学模型及与之相关的驾驶员生理特性的介绍;有关飞行品质的涵义及飞行品质规范的介绍。作者力求根据现有文献,吸收一些新方法及新观点,以帮助读者掌握有人驾驶飞行器闭环分析、控制规律设计,以及熟悉飞行品质规范要求及目前常用的一些设计准则或判据,使其胜任飞行品质研究和加深对飞机设计中所需考虑的飞行力学方面问题的理解。

全书共分九章:第一章绪论,一般性地介绍了本书的内容;第二章人工控制的驾驶员模型化问题,大致介绍了现有各类驾驶员控制行为模型;第三章驾驶员特性的频率域识别;第四章驾驶员特性的时域识别,介绍对基于古典控制理论建立的模型识别问题;第五章驾驶员最优控制模型,着重介绍利用最优控制和最佳估计理论建立的驾驶员模型;第六章与驾驶员控制行为有关的生理学等问题,重点介绍驾驶员感觉形式、神经肌肉系统的特性和显示以及操纵机构设计方面的有关问题;第七章驾驶员结构模型,介绍从生理学角度建立的目视控制行为的驾驶员模型。至此,关于驾驶员控制行为的模型化问题在第二至第七章中作了简单的介绍。第八、九两章介绍飞行品质和飞行品质规范问题。飞行品质的介绍紧密结合飞行力学中有关稳定性和操纵特性的内容。作者仅从概念及本质上加以概括介绍,不作具体推导或分析。飞行品质规范的介绍,则侧重于规范内容及涉及到的有关准则或判据的一般性了解。最后,并以利用驾驶员结构模型研究飞行品质的两个具体举例,作为贯穿人机系统和飞行品质两部分内容的示范。

本书的编写工作由胡兆丰、宋寿峰、高仍清三人负责,初稿由胡兆丰执笔。门长华同志描绘了全书的插图,杨超同志帮助誊写了部分手稿,作者表示衷心的感谢。

由于水平所限,书中出现的一些错误和不当之处,欢迎读者批评指正。

作 者

1993 年 8 月于北京

目 次

第一章 绪 论

§ 1-1 人机系统	(1)
§ 1-2 人工控制的驾驶员数学模型	(2)
§ 1-3 飞行品质及飞行品质规范	(3)
§ 1-4 与本书有关的其它学科	(4)
复习题	(5)

第二章 人工控制的类型及驾驶员控制行为的模型化

§ 2-1 人工控制任务的分类	(6)
§ 2-2 连续闭环伺服机构模型——驾驶员的线性模型	(8)
§ 2-3 驾驶员的拟线性模型	(9)
§ 2-4 驾驶员的最优控制模型	(10)
§ 2-5 驾驶员的结构模型	(11)
复习题	(12)

第三章 频率域的驾驶员拟线性模型及其识别

§ 3-1 描述函数	(13)
§ 3-2 功率谱分析法	(17)
§ 3-3 McRuer 等人提出的若干驾驶员模型	(21)
§ 3-4 有关剩余的考虑及转角模型的适用范围	(24)
复习题	(26)

第四章 驾驶员拟线性模型的时域识别

§ 4-1 相关及延迟线综合	(28)
§ 4-2 用规一化正交滤波器模拟的识别	(30)
§ 4-3 最陡下降法(梯度校正)的模型参数估计	(33)
§ 4-4 主元回归算法的模型参数识别	(34)
复习题	(38)

第五章 驾驶员最优控制模型

§ 5-1 Baron-Kleinmen-Levison 的 OCM 模型	(39)
§ 5-2 OCM 的试验验证及应用	(41)
§ 5-3 对观察量及多通道控制的最优注意力分配问题	(44)
复习题	(48)

第六章 与研究驾驶员控制模型有关的若干问题

§ 6-1 感觉的形式及其在控制中的反馈	(49)
§ 6-2 神经肌肉系统特性简介	(51)

§ 6-3 追踪、预映显示及模型化问题	(59)
§ 6-4 综合及征召显示	(62)
§ 6-5 操纵手柄设计的动力学考虑	(63)
§ 6-6 驾驶员的适应能力	(63)
复习题	(65)
第七章 驾驶员结构模型	
§ 7-1 补偿任务的结构模型	(66)
§ 7-2 追踪任务的结构模型	(70)
§ 7-3 利用运动感觉的结构模型	(74)
§ 7-4 衡量完成任务难易程度的模型	(75)
复习题	(77)
第八章 飞行品质	
§ 8-1 飞行品质研究的历史	(78)
§ 8-2 纵向飞行品质	(81)
§ 8-3 横侧飞行品质	(82)
§ 8-4 大迎角非线性和惯性交感飞行品质	(83)
§ 8-5 敏捷性问题	(86)
复习题	(88)
第九章 飞行品质规范	
§ 9-1 飞行品质规范的发展史	(89)
§ 9-2 飞行员评价飞机飞行品质的标准	(89)
§ 9-3 MIL-F-8785C 简介	(91)
§ 9-4 我国的飞行品质规范	(105)
§ 9-5 用驾驶员结构模型研究飞机飞行品质	(105)
复习题	(109)
参考文献	(110)

第一章 绪 论

§ 1-1 人机系统

人机系统顾名思义就是由人和机器组成的系统。随着 20 世纪科学技术的迅猛发展,出现了各式各样的机器和工具,例如,各类机床、运输工具、自动控制装置、自行火炮,以及计算机等等。人们对机器和工具的功能要求越高,则反过来也对使用这些机器和工具的人的本身不断提出新的要求。对于机器的高速、高精度、越来越复杂的动力学特性,以及机器和人或再加上与其它系统之间的配合和相互作用等等因素的考虑,要求操作人员具备可重复的、可预示的以及按需要进行实时操作的能力。设计这类机器和工具,使其在整个使用过程中,对操作人员的能力要求不太过分,便成了工程设计中必须要考虑的问题。也只有在对某些明确的任务中(例如飞行员驾驶飞机),人们如何运行和控制机器的行为有了充分的了解后,才有可能处理这类问题。

过去,很多工程问题中对人如何运行机器的行为,常常是凭一般常识或用试凑的办法来解决的。结果有的机器设计出来后不太好使用,只好让操作者尽可能去适应设计不足之处。虽然多数情况下通过一段适应过程,操作者能使用这类机器,但是付出的代价是费力、机器性能差,条件不利时还容易出差错。因此,实践提出了有必要从设计开始时就考虑操作者特性的要求。

鉴于机器种类繁多,研究人机系统的问题提法也各不相同。本书仅限于考虑人和飞机的组合系统。这里,“人”指的就是驾驶飞机的飞行员,或笼统地称之为驾驶员;而“飞机”还包括飞机运行中的各类显示装置和操纵系统。人通过本身的感受和显示装置的指示了解飞机的运行情况,并根据任务需要,通过操纵系统改变飞机的运行情况。这种关系可以用一个简单的框图来表示,如图 1-1 所示。

在这个框图中人的输出作为飞机的输入;飞机的输出作为人的输入,构成了一个闭环系统。

对于研究人机系统的问题提法,在本书中的侧重点是放在建立合适的描述驾驶员控制行为的数学模型上,以供研究人和飞机组合系统的闭环动态特性之用。

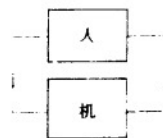


图 1-1 人机系统的简单框图

尽管将人的一般行为作数学模型化是十分困难的,例如,人的气质、想象力、创造性、情绪等等影响行为的特征,显然难以用数学模型加以描述。但是,具体到飞行员驾驶飞机完成各项飞行任务的控制行为,其数学模型化却是可能的。虽然对不同的人来说,可能有这样那样的某些行为上的细微差别,例如,某些人对某种型式的信息可能比其他人更敏感,所以反应会更灵敏。但总体来说,受任务要求的制约,人们的控制行为是有其一定的规律的。这种规律性就是人的控制行为能够加以数学模型化的基础。

对人机系统来说,人参与系统的运行,意味着人通过他的感官接受外界的信息,从中选取与任务有关的有用信息,与预定任务要求加以比较,然后根据需要决定采用一定的控制策略进行操纵,使系统的输出尽可能接近预定目标。因此,我们感兴趣的、想用数学模型描述的大体可

分为三部分:信息处理、决策与控制。

随着时代的发展,人和飞机的相互关系也在逐步发生变化。例如,自动器的大量引入,使飞行员对飞机运行的直接控制逐步演变成监视自动器的工作、管理飞控系统执行不同的指令,以及发现及处理自动器的故障等。换句话说,人的控制作用逐渐由实时控制而变成监控和指挥飞机的运行。这将使对飞行员的数学模型化有本质的改变。前者是将人的实时控制视为伺服机构;后者则视人的数学模型化犹如分时计算机,以适应多项任务的管理,以及逻辑解题以寻找失效的自动器并决策处理方案。这样,人机系统的框图就可以表示成更笼统的形式,如图1-2所示。

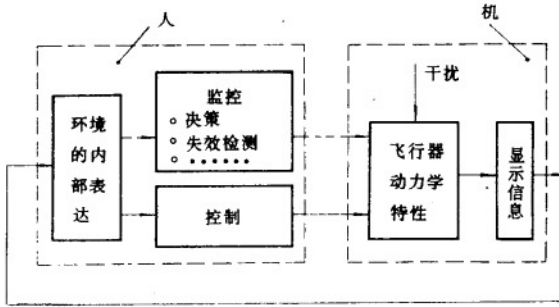


图 1-2 人机系统框图

图中人的环节中所谓“环境的内部表达”是指在人的心目中对被控对象——飞机和环境情况生成的内部映象或内模型。监控及控制则分别代表两类不同性质的驾驶职能。

本书只限于介绍驾驶员实时控制的职能。

§ 1-2 人工控制的驾驶员数学模型

描述驾驶员实时控制行为的数学模型从本质上说属于实用模型性质。因为目前我们还不能从生理学角度确切了解人的控制行为的因果机理。人的控制行为可以看成具有广泛适应能力的“黑匣子”,需要根据其输入及输出特性来识别其内在的结构形式及有关参数值。最直觉的想法是引用控制论中常见的一些环节如一阶、二阶线性环节、延迟环节等的组合,来描述飞行员的实时控制行为。这些环节中通常包含一些参数,如时间常数、阻尼比、自然频率、延迟时间等。对预定的飞行任务,通过对同一被控对象的模拟仿真和由飞行员实时控制,比较两者的响应,然后对仿真系统的参数值进行必要的调整,使实时控制效果和由驾驶员数学模型仿真的控制效果,尽可能地一致。当然这里需要事先规定一个合适的性能指标,例如,可以取被控对象输出的均方误差。一旦驾驶员数学模型中的参数调整可以给出最小均方误差值,便可认为该模型适用于研究此预定任务。如果不成,则修改环节的组合形式,从头再来。这种处理当然要求驾驶员的数学模型能适用于较多的驾驶任务,即具有一定的通用性;其次是参数值随驾驶任务的变化尽可能小,或者随驾驶任务变化的调节规律可以根据实验加以确定。这类数学模型化具体归结为去识别驾驶员传递函数(或频率特性)。然而实践发现,单纯由线性环节组合的驾驶员实

时控制的数学模型往往不能完全反映真实情况。原因是人的控制行为中还包含非线性、时变因素和采样特征(间歇现象)。然而考虑这些因素会使问题的处理十分复杂。因此,为了既简单、便于分析处理,又有一定的实用性,便提出了拟线性控制模型(QLCM)。该模型假定驾驶员的控制行为可以由线性传递函数加上随机噪声或剩余(remnant)来描述。剩余主要用来修正线性响应与真实响应之间的差异。实践表明这一模型较之线性传递函数模型更合用,处理也并不复杂。

随着现代控制理论的发展,应用最优估计和最优控制理论的基本方法,对目视信息感受和比较简单的驾驶任务,发展出包括考虑驾驶员本身生理特点,计及对目视信息的观察噪声、延迟,对信息进行必要的滤波、预测和根据任务要求按一定性能指标确定出最优控制策略,以及考虑通过四肢进行实时控制时,不可避免存在的运动噪声(motor noise)等的最优驾驶员控制模型。这类模型较之简单地通过识别驾驶员的传递函数似乎有更多的理论意义,而且可以处理相当多的实际问题。特别是它也是驾驶员监控模型中的组成部分。但是,它也有一些局限性,例如,分析计算相对复杂,还缺乏选定性能指标的普遍准则,以及对同样的指标可能有不同实现途径等。

近些年来,由于生理学研究水平的大大提高,使人们有可能深入了解人的控制行为的若干细节,从而出现了所谓驾驶员的结构模型。这类模型较为详细地考虑了对目视信息适用的中枢神经系统(用以反映对目视信息的处理和形成控制决策)和神经肌肉系统(用以反映实现控制指令的具体执行过程)的内在结构形式和特征参数的选择方法。因此,可以视为是驾驶员传递函数模型的进一步发展。

除了以上介绍的几类驾驶员数学模型外,还有驾驶员的采样控制和非线性控制模型,计及人的间歇特性和非线性性质。模糊控制适用于描述人的逻辑解题能力,对过程控制(process control)和故障判断(fault diagnosis)等模型化问题有效。限于篇幅,这些模型不打算在本书中加以介绍。

§ 1-3 飞行品质及飞行品质规范

具体到人和飞机闭环系统的特性,往往由飞行品质要求加以评价。所谓飞行品质是指飞机的飞行动力学特性,它决定了飞行员为实现具体飞行任务时的控制难易程度即飞行员的工作负担和完成任务的精确程度。飞行品质的内容涉及面较广,不但与飞机本体的动力学特性有关,还与飞行员的工作环境,如座舱布置、温度、湿度、照明、供氧量、通讯联系和操纵机构形式等等因素有关。但就飞行力学考虑,则飞行品质主要反映飞机的稳定性和操纵性特征。习惯上分成纵向飞行品质、侧(横-航)向飞行品质,大迎角、非线性和纵横耦合的飞行品质等。对于过去所谓“经典”的飞机,其纵、侧向动态特性中往往存在一些典型模态(mode),例如,纵向的短周期模态、沉浮模态和侧向的荷兰滚模态、滚转收敛模态和螺旋模态等。飞机的飞行品质可由这些模态的特征量(时间常数、阻尼比、自然频率等)来描述。对于近代先进的飞机,由于采用复杂的控制系统,其动力学特性由高阶系统描述,往往偏离经典形式。即使飞机的动态响应中还包含典型模态,满足对它们的品质要求,有时也不能使实际的飞机飞行品质达到预期水平。更何况有时根本不存在熟知的典型模态。目前对于这类飞机的飞行品质要求,基本上仍沿用以往对“经典”飞机积累的经验 and 数据。设法用一些典型模态的传递函数再加上一个延迟环节来逼

近真实的飞机动态响应。这种处理称为高阶系统的低阶近似。相应的低阶近似系统称为等效系统。现已建立了用以衡量逼近程度的指标和拟合方法。从目前的经验来说,如果具有高阶动态响应的先进飞机不能找出相应的等效系统,则其飞行品质将不会满意。显然利用等效系统了解先进飞机的飞行品质可能只是一种权宜之计。随着飞行品质研究工作的深入,估计还会提出更合用的方法。

现在绝大多数国家为设计、使用和鉴定飞机,已颁布了一些飞行品质要求的规范(或指南)。多数是针对有人驾驶的飞机,即考虑人机系统制订的。飞行品质要求,大都以指标形式给出,但也包括一些定性要求。这类指标或要求多半根据以往飞行实践中积累起来的,认为是对人机系统评价其飞行品质的最主要的一些项目。其中有理论分析的结果;试飞、模拟仿真和征询飞行员意见归纳总结的结果。飞行品质要求的具体内容(框架、指标形式及量值等)随着航空事业的不断发展而经常修订、补充和完善。通常规范具有指令性要求的性质。使用规范时十分注意飞行员对飞机的看法。飞行员对飞行品质的评价是用统一的术语“飞行员评价尺度”(PR)描述的。目前大多数国家采用 Cooper-Harper 十分制评价尺度。每种评分都有明确的文字描述,着重说明完成任务的满意程度和工作负担,分值越低表明对飞行品质的评价越好。

我国已于 1982 年由当时的航空工业部正式颁发《军用飞机飞行品质规范(试用本)》,属指导性文件。而由空、海军申请颁发的《国家军用标准——有人驾驶飞机(固定翼)飞行品质》也已于 1987 年 6 月 1 日实施。

§ 1-4 与本书有关的其它学科

研究人机系统涉及多种学科,事实上这是一门交叉学科性质的新学科。与人机系统研究有关的学科包括:

- 1) 人体感官及肌肉骨骼的解剖学与生理学(Anatomy and physiology of sense organs and skeletal musculature)
- 2) 人体测定学(Anthropometry);
- 3) 人体活动的运动学和动力学(Kinematics and dynamics of body motion);
- 4) 体力劳动性能(Physical work performance);
- 5) 环境负荷(Environmental stresses);
- 6) 感觉和知觉行为(Sensory and perceptual behavior);
- 7) 学习和训练(Learning and training);
- 8) 促动因素(Motivation)。

对人体及其各部分结构和功能的了解中与本学科紧密相关的是那些用以接受外界信息的感官(如视觉、听觉、触觉器官等),以及与执行具体控制有关的器官(如四肢等)的特征。以了解人对外界刺激的感受能力和反应特征。

人体测定学研究人体各部分的尺寸、形状、活动关节、力气等,以便对操作人员的活动空间,设备布置以及操纵力大小的限制作出合理的安排。通常这部分内容包括在人机工程学中。

人体活动的运动学和动力学有时也归入“生物力学”。为研究遥控、机器人、假肢的工程师们所关心。人体活动十分复杂,现在只有一些相当简化的运动学及动力学方程可供研究人员使用。

体力劳动性能是工业界关注的问题。劳动强度决不能超过体力能胜任的界限,否则可能引起人身事故。而且繁重的体力劳动会导致生产效率下降和危及身体健康。因此,作业的安排必需考虑从事该项作业的劳动者的实际体力情况。

因工作环境而引起的工作负荷,包括温度、湿度、噪声、照明、振动、加速度、辐射量、大气压强、供氧量等的影响。不利的环境有碍于完成任务,甚至引起工伤事故。这类因素大部分在空间医学中进行广泛的研究。

感觉与知觉行为是心理学者充分研究的课题。所谓“感觉”是指外界事物的个别性质,如硬度、颜色、冷热等在人们意识中的直接反映。而“知觉”则是随感觉而引起的反映客观物体或现象的心理过程。

学习和训练对试验研究至关重要。经过学习和训练的试验者,其响应特性趋于稳定;而未经学习和训练的试验者则往往存在一些不希望有的可变因素,使其响应特性变化不定。

促动因素可能是人的性能中最重要的一种因素。一般地说人们总有一种愿望尝试着不断创新、不断改进提高自己的工作能力。也许这正是我们生存的这个世界得以发展的主要原因之一。

至于与“飞行品质”有关的学科,则包括有空气动力学、风洞试验、试飞、发动机原理、飞机构造及强度、自动控制以及飞行力学等。对于学航空的读者来说,这些学科的性质及内容都是不言而喻的。因此,就不作进一步的解释。

复 习 题

- 1) 人的控制行为能够数学模型化的基础是什么?
- 2) 列举目前常用的各种驾驶员控制行为的实用数学模型。
- 3) 飞行品质包括哪些内容?
- 4) 飞行品质规范在生产实践中起什么作用?

第二章 人工控制的类型及驾驶员控制行为的模型化

§ 2-1 人工控制任务的分类

人工控制形式五花八门。就飞行员驾驶飞机来说,可以有单通道控制,例如,单个使用油门、升降舵、副翼、方向舵或其它操纵装置;也可以有多通道控制,例如,同时使用几个通道;或几个通道间有交连作用(如为保持协调操纵的副翼-方向舵交连)。从输入、输出关系来分,可以分为:单输入单输出,例如,油门控制其最终效果是改变航迹倾角;单输入多输出,例如,升降舵控制最终效果是因迎角改变引起飞行速度和航迹倾角的变化;多输入单输出,例如,副翼、方向舵协调操纵实现绕飞行速度矢的滚转角速度控制;多输入多输出,例如,油门及升降舵协调操纵改变飞机的迎角、飞行速度以及航迹倾角等等。此外,还有连续控制和离散控制之分。不过从人工控制任务的性质来分,则大体归纳成:补偿(compensatory)、追踪(pursuit)、预映(preview)和预识(precognitive)控制。这种区分,涉及到输入的显示形式。以单通道控制为例,加以说明。

1. 补偿控制

补偿控制用以保持原定的飞行状态。图 2-1 为执行补偿控制的人机闭环系统框图及显示装置提供给驾驶员的输入信息形式。

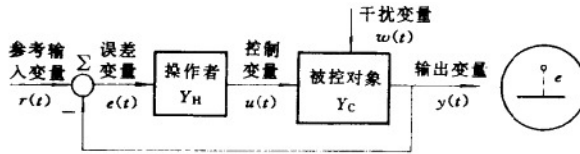


图 2-1 补偿控制系统及其显示

图中 Y_H 表示飞行员传递函数。 Y_C 为飞机传递函数。 y 为闭环系统的实际输出,为简单计只考虑单个输出,因此, Y_C 可视为对应该单输出的传递函数。 u 是飞行员的控制输出,也是激发闭环系统单输出的输入。 r 是要求的闭环系统的理想输出,图中作为指令或参考输入形式给出。由于采用单输出的负反馈,因此,提供飞行员的输入是 $e=r-y$,即误差信号。飞行员的控制任务就是要消除误差,保持理想的飞行状态。这类控制等价于单自由度的伺服控制。

2. 追踪控制

追踪控制用以使飞行状态按指令要求变化。图 2-2 为这类控制的框图和显示装置提供给飞行员的输入信息形式。

图中 Y_H 及 Y_{H_0} 分别对应参考(指令)输入 r 及以系统输出 y 作为输入的飞行员传递函

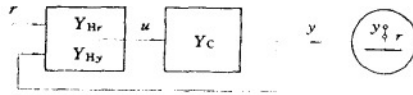


图 2-2 追踪控制系统及其显示

数。飞行员通过显示,可以同时了解 r 及 y 的变化,其控制任务是使 y 尽可能与 r 重合。这类控制的飞行员数学模型相当两自由度输入系统。这两个自由度可以直接是 r 及 y ,也可以是 r 与 $e(=r-y)$ 。这类系统等价于二自由度的伺服控制。

3. 预映控制

图 2-3 为预映控制的框图和显示装置提供给飞行员的输入信息形式。

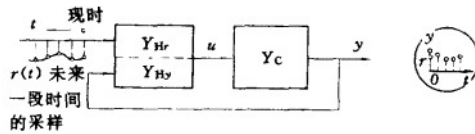


图 2-3 预映控制系统及其显示

这类控制与追踪控制类似。不同之处是 r 的显示中给出预示未来一段有限时间内的采样信息。实际上相当引进输入信息的微分项,可以提高控制速度,改善控制效果。

4. 预识控制

预识控制是指飞行员对任务的性质有一个统计的了解,这些信息有助于具体的控制效果。这类控制的框图如图 2-4 所示,其显示与追踪系统相同。

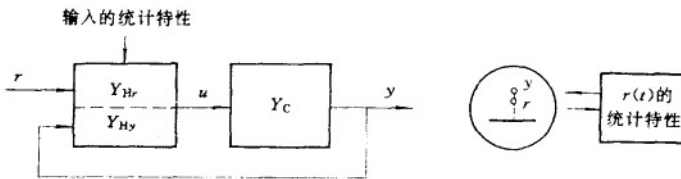


图 2-4 预识控制框图及其显示

飞行员除了从显示中获得当时的输入、输出信息外,根据对输入信息的统计知识,可以判断其后输入的大致规律。例如,输入的幅值限制不会超过某值,或某种形式的输入往往紧接另一种形式的输入等等。因此,或多或少有一套类似程序的控制策略。但是与程序控制不同之处是并非事先规划,而是根据具体情况临时决策。“预识”一词在这种较广泛的场合下使用时,含

有“统计了解”的意义。实际飞行任务确实也有一些事先规划好的步骤,例如起飞、着陆等。飞行员的控制事实上按程序控制方式进行。除了一些受外界扰动影响而施加的微小修正外,基本上属于预识控制类型。这里“预识”一词就不再是统计意义上的了解,而是对任务的实际了解了。

§ 2-2 连续闭环伺服机构模型——驾驶员的线性模型

对分析和模型化问题来说,最简单的人工控制任务是一维连续补偿控制即单自由度的伺服控制(参阅图 2-1)。实际情况中此一闭环系统还存在干扰作用。在本模型化处理中,干扰作用假定只存在于被控对象 Y_c 环节中。这类干扰可能是确定型的,但常常具有随机性质。例如,考虑大气紊流对飞机飞行的影响(即所谓飞机对大气紊流的响应),大气紊流的干扰作用就具有随机性,只能用统计的观点加以考虑。

本模型化问题中驾驶员特性可以用线性模型表示。从直觉上,驾驶员的线性模型至少应包括下列三项性质:

1. 反应时间延迟(reaction time delay)

试验表明,人有一个不可控制的最小反应延迟时间 t_r ,生理学上称之为不应期(refraction period),其值约为 0.15s。此一延迟包括了神经突触延迟(neural synaptic delay)、神经传导时间、神经中枢信息处理时间和作出可测反应的延迟时间等。随刺激频率的提高,延迟相位线性增加,在驾驶员的线性模型中以一延迟环节表征,即 $\exp(-st_r)$ 。由于 $\exp(-st_r) \approx (2-st_r)/(2+st_r)$,存在右半平面的零点,因此,可以预期驾驶员的控制模型具有非最小相位系统的特征。

2. 增益

任何反馈系统为获得合理的快速响应,要求前向回路即开环增益 $K = |Y_H Y_c|$ 在稳定性允许的条件下尽可能地大。增益通常是无因次值,在低频段的变动范围大致为 2~20。

3. 神经肌肉滞后(neuromuscular lag)

当肌肉接收到来自大脑决策的脉冲动作指令时,由于自身的惯性、粘性以及肌纤维的异步(asynchrony)收缩,将呈现指数响应特征,因此,可用一个一阶环节 $1/(1+t_n s)$ 表征。时间常数 t_n 为 0.1~0.2s。

将上述性质综合得到的驾驶员直觉模型,表成频率特性呈下列形式:

$$Y_H(j\omega) = \frac{K \exp(-t_r j\omega)}{1 + t_n j\omega} \quad (2-1)$$

1965 年 McRuer 等人对被控对象 $Y_c(j\omega) = 1/j\omega$ 用此直觉模型就一维连续补偿控制任务作了试验,结果如图 2-5 所示。图中虚线表示 $|Y_c|$ 及 $\angle Y_c$,它与测量数据的差值必须用 Y_H 的特性拟合。拟合结果表明本情况中 Y_H 中不必包含一阶环节。采用 $t_r = 0.15s$,可以使 $Y_H Y_c$ 的相角特性在频率较高的区域段基本吻合。增益 K 只影响幅值而不变相角。选用 $K = 6$,可使 $|Y_H Y_c|$ 与试验结果基本吻合。由此,通过试验得出本情况中 $Y_H(j\omega) = 6 \exp(-0.15j\omega)$ 。对于一阶环节不出现的部分解释,可能是因为被控对象属积分环节,对此,驾驶员的输出 u 与被控对象的输

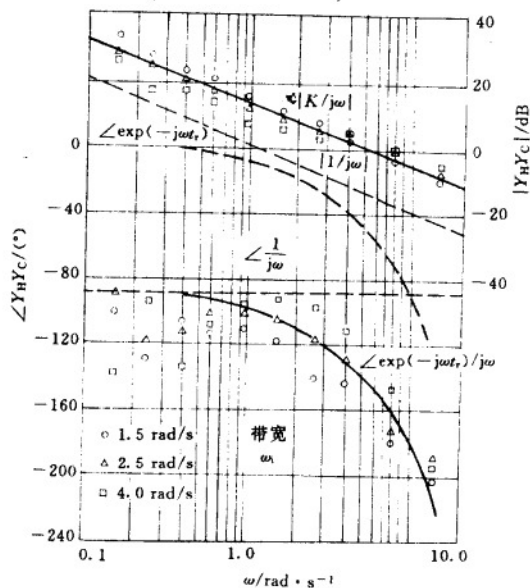


图 2-5 McRuer 等人对直觉模型的鉴定及数据拟合

出 y 有如下关系: $u(1/s) = y$ 或 $u = sy$, 即飞行员的输出与被控对象输出的变化率有关。驾驶员采用与 y 的微分成正比的控制, 从而相当引入一个超前项抵消了神经肌肉的滞后作用。因此, 即使模型中不包括一阶环节, 仍能得到比较满意的拟合结果。至于低频段相角的差异, 则有证据表明来自神经肌肉系统的延迟, 在低于转角频率 ω_n 的较低频段内其影响不容忽视。以后还会看到, 对于其它形式的含有“滞后”元件的被控对象, 驾驶员都会采用类似的控制策略。

本试验中开环传递函数 $Y_H Y_C$ 的转角频率是 4.5 rad/s , 相位裕量为 40° , 增益裕量是 5 dB (对应 $\angle Y_H Y_C = 180^\circ$), 相当 1.5 。如果 K 增大超过 1.5 倍即由 6 增加到 9 以上时, 将导致闭环系统不稳。

从这个试验来看, 被控对象为积分环节时, 凭直觉建立的驾驶员线性模型是适用的。对于其它形式的被控对象, 直觉模型可能过分简单, 这点在第四章中再作进一步的介绍。

§ 2-3 驾驶员的拟线性模型

(Quasi-Linear Control Model, QLCM)

上节所述的驾驶员线性模型固然简单, 可以套用发展成熟的线性系统理论进行分析、综合。但是即使不谈对于不同的被控对象和不同的飞行任务, 飞行员的数学模型具体参数值及形式会有所不同, 就是同一被控对象对象和飞行任务, 飞行员的实际控制方式也与线性模型不完全相同。为了更合理地表达驾驶员的数学模型而又便于处理, 采用了一种折衷的办法。对上述线性模型作如下的修正假定: ①驾驶员本身存在一个相当随机噪声或剩余 (remnant) 发生器的

生理机理,以表征线性响应和真实响应之间的差别;②只要飞行任务和被控对象不变,描述飞行员控制行为模型的参数也不变。这一包括剩余作用的驾驶员控制行为模型就称为拟线性模型。框图如图 2-6 所示。拟线性模型包括两部分即线性传递函数(严格讲应为描述函数,见第三章) Y_H 及剩余 n 。对于给定的飞行任务和被控对象,由剩余均方误差最小的指标确定线性传递函数。需要指出的是拟线性模型中的线性传递函数本质上是随飞行任务和被控对象而变的,这正是拟线性模型的特点,也正好能反映飞行员的实际控制行为。但只要飞行任务及被控对象在一定范围内变动时,传递函数形式及参数值变动不大则就有明显的实用价值。为此,在以下的两章中将要着重介绍拟线性模型的识别问题。

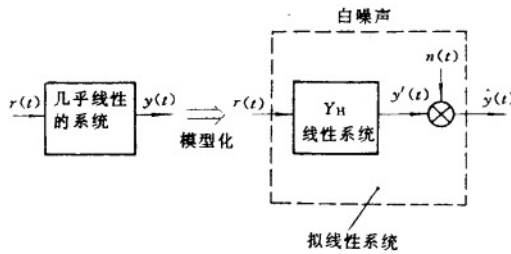


图 2-6 飞行员拟线性模型框图

§ 2-4 驾驶员的最优控制模型

(Optimal Control Model, OCM)

60 年代末 Baron、Kleinman 和 Levison 利用现代最优估计和控制理论来描述驾驶员的控制行为。随后 Kleinman 等人发展和完善了这一被称为驾驶员的最优控制模型(OCM)的算法,使控制行为的模型化问题有了重大的进展。

建立 OCM 的基本假设是驾驶员的控制行为可以相当程度地用最优控制系统模拟复现出来。这个最优控制系统在有不同的系统输入和噪声存在的条件下,可按某一给定的二次型性能指标为最小的方式下运行。这个假设是在一系列拟线性模型成功地预示驾驶员控制行为的基础上建立的。假设认为,一个训练有素的上进心强的驾驶员,在他(她)固有的身心限制条件和控制任务的要求下,其控制行为会尽可能按最优的方式完成。由此,这个驾驶员模型中必然包含有可以最佳补偿驾驶员固有限制的元件,从而一定程度描述了驾驶员的适应能力。此外,这一模型中自然应包含有驾驶员的一些基本特性,例如有效时间延迟和神经肌肉延迟等。

图 2-7 是驾驶员最优控制模型的框图。此模型从性质上讲由两种类型的环节组成:其一是反映驾驶员固有的生理限制,例如,有效时间延迟、剩余由观察噪声及运动噪声表征和某些神经肌肉系统的特性,这些是无法优化的;其二是反映驾驶员的适应能力,例如,信息处理和决策(由 Kalman 滤波、预测及线性反馈增益形式表征)则是可以优化的。由于直接借助现代控制理论的理论分析和算法,使驾驶员最优控制模型成为有相当理论依据的驾驶员控制行为数学描述的最好方法之一。其突出的优点就是这个模型具有模块式结构。它允许进一步添加一些运算,来确定诸如驾驶员的工作负担,驾驶员的学习过程以及扩展到处理监控和决策模型

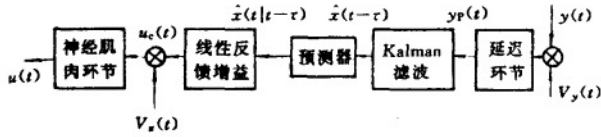


图 2-7 驾驶员最优控制模型框图

等。自然这个模型本身也存在一些缺点。有关驾驶员的最优控制模型的详细介绍将在第五章中给出。

§ 2-5 驾驶员的结构模型 (structural model)

在驾驶员结构模型出现之前,人们只能从整体(即系统)上了解飞行员的动态特性。随着测试技术的提高,现在已有可能从分立部件(即子系统)的水平上获得测试结果,从而得到子系统特性与系统特性之间的内在联系。图 2-8 给出视觉显示的飞行员结构模型框图。

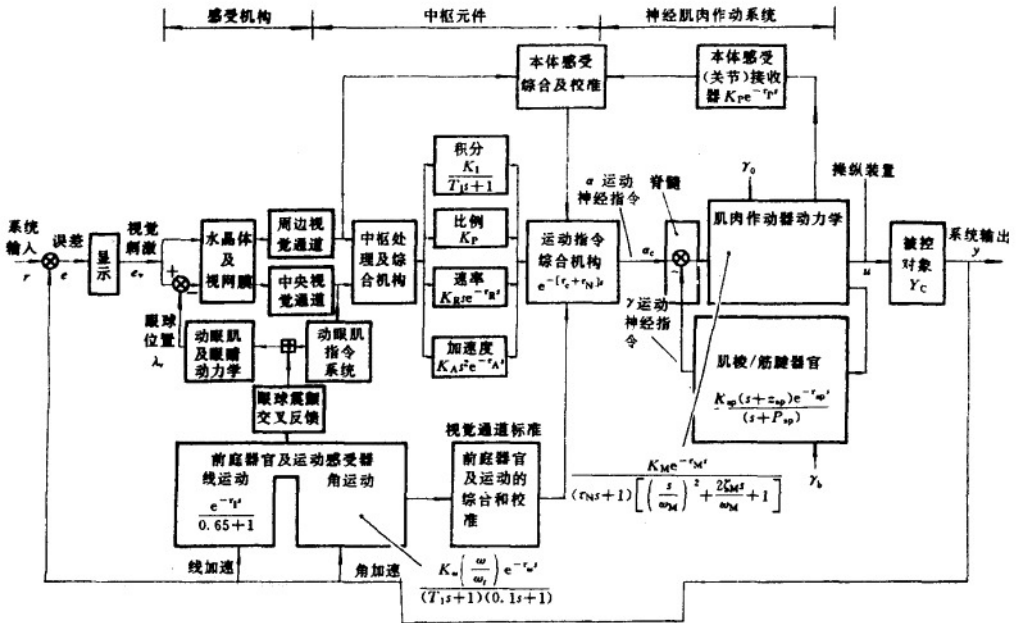


图 2-8 驾驶员结构模型框图