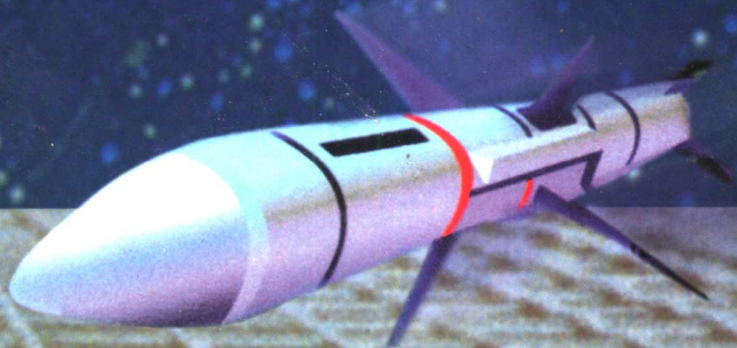


鲁棒控制理论 在倾斜转弯导弹中的应用

The Application of Robust Control Theory to
Bank-to-Turn Missile

郑建华 杨滌 著



国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

鲁棒控制理论在倾斜转弯导弹中的应用/郑建华,杨
滌著. —北京:国防工业出版社,2001.4

ISBN 7-118-02399-X

I. 鲁... II. ①郑...②杨... III. 鲁棒控制-应
用-导弹控制 IV. TJ765

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 47594 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 100044)

三河市腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 6 149 千字

2001 年 4 月第 1 版 2001 年 4 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:16.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄 宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾 铎
秘 书 长	崔士义			
委 员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘 仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

前 言

20 世纪 50 年代末,由于宇航和复杂工业控制问题的需要,提出了多变量系统设计问题。为克服直接利用古典控制方法设计多变量系统时存在的问题,20 世纪 60 年代初出现了以英国学者为代表的多变量频域设计方法和以 Wiener 滤波思想为基础,以最优线性二次调节器(LQR)和 Kalman 滤波器为中心的线性二次高斯(LQG)反馈控制系统优化设计方法,但它们共同的缺陷是设计出的控制系统鲁棒性较差。

为弥补上述设计方法的缺陷, H_{∞} 控制理论和回路传函恢复(Loop Transfer Recovery,简称 LTR)等设计理论应运而生。近十多年发展起来的 H_{∞} 控制理论和 LTR 设计理论,是目前控制系统鲁棒性设计较成功和完善的理论体系,也是近年来自动控制理论及工程应用研究领域的热门话题之一。

而倾斜转弯(Bank-to-Turn,简称 BTT)控制技术是当今世界寻的导弹研制的重大革新技术,对发展远程、高速、高精度与高机动的导弹武器系统具有重大的理论和工程应用价值。BTT 控制技术的控制特点决定了 BTT 导弹的数学模型存在运动学耦合、气动耦合、控制作用耦合和惯性耦合等多种耦合因素,因此目前侧滑转弯(Skid-to-Turn,简称 SIT)导弹广泛采用的自动驾驶仪三通道独立设计方案已远不能满足 BTT 导弹控制系统的设计要求。加之工程设计中有时希望按给定空域内的一个特征点的数学模型设计的自动驾驶仪,能够控制 BTT 导弹在该空域内沿多条弹道稳定、准确地飞行,因此要求利用多变量鲁棒设计方法设计 BTT 导弹的自动驾驶仪。

本书重点从理论和工程应用两方面深入研究 H_{∞} 控制理论和

回路传函恢复(LTR)设计理论,提出了可在较大飞行空域应用的BTT导弹自动驾驶仪设计方案,解决了 H_2 控制理论和LTR设计理论在BTT导弹控制系统设计中遇到的一些问题。它填补了鲁棒控制理论在BTT导弹中应用方面科技图书的空白,得出的结论对一般系统的鲁棒性设计具有普遍意义,在现代国防建设中具有一定的应用前景。

本书第一章和第六章由杨涤和郑建华共同编写,其它各章由郑建华编写,郑建华对全书的内容、风格等作了统编及详细审定与修改。

中国航天机电集团公司孙连举研究员对书稿进行了仔细审阅,提出了许多宝贵意见和建议,在此深表感谢!

本书在编写过程中得到了中国科学院空间科学与应用研究中心和哈尔滨工业大学同事们的大力支持。

感谢国防科技图书出版基金资助出版本书!

由于作者水平所限,不妥或错误之处恳请读者指正。

作 者

1999年5月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 工程应用背景	1
1.2 H_∞ 和 LTR 控制理论的研究与发展	2
1.3 BTT 导弹自动驾驶仪的研究与发展	15
1.4 本书的主要内容和特色	17
第二章 预备知识	19
2.1 奇异值和结构奇异值	19
2.2 系统的输入/输出描述	26
2.3 H_∞ 范数及其计算	27
2.4 系统的鲁棒稳定性和鲁棒性能	32
第三章 H_∞ 控制理论	39
3.1 标准 H_∞ 控制问题	39
3.2 标准 H_∞ 控制问题的代数 Riccati 方程算法	40
3.3 混合灵敏度设计问题及其标准 H_∞ 控制问题	46
3.4 权函数选取方法	50
第四章 μ 综合设计方法	52
4.1 μ 综合设计方法	52
4.2 结构奇异值的“D-K”迭代算法	58
4.3 模型参数不确定性的“虚拟回路增益”处理方法	60
4.4 平衡截断模型降阶方法	63
第五章 LTR 设计理论	66
5.1 回路成形设计	66
5.2 目标回路设计	70
5.3 目标回路传函恢复设计	72

第六章 BTT 导弹的数学模型	78
6.1 BTT 控制技术与 BTT 导弹	78
6.2 导弹的运动学模型	81
6.3 常用的 BTT 导弹数学模型	86
6.4 全状态可测量的 BTT 导弹数学模型	88
第七章 H_{∞}/混合灵敏度自动驾驶仪设计	91
7.1 数学模型	92
7.2 H_{∞} /混合灵敏度自动驾驶仪设计	92
7.3 线性仿真结果及分析	104
第八章 μ 综合自动驾驶仪设计	110
8.1 俯仰 - 偏航通道数学模型	110
8.2 俯仰 - 偏航通道控制系统结构	111
8.3 μ 综合自动驾驶仪设计	115
8.4 控制系统性能分析	120
第九章 μ 综合/虚拟回路增益自动驾驶仪设计	126
9.1 俯仰 - 偏航通道的数学模型	126
9.2 俯仰 - 偏航通道控制系统结构	130
9.3 μ 综合/虚拟回路增益自动驾驶仪设计	133
9.4 控制系统性能分析	134
第十章 LTR 自动驾驶仪设计	140
10.1 数学模型及无静差设计模型	140
10.2 目标回路设计	141
10.3 LTR 自动驾驶仪设计及结果分析	146
第十一章 BTT 导弹全弹道 6DOF 数学仿真	153
11.1 6DOF 数学仿真描述	154
11.2 6DOF 数学仿真模型	155
11.3 H_{∞} /混合灵敏度方法设计的控制系统的仿真 结果	162
11.4 μ 综合方法设计的控制系统的仿真结果	165
附录	168

1. 特征值与特征向量	168
2. 酉空间与酉矩阵	169
3. 可稳定性与可检测性	170
参考文献	171

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background	1
1.2 Summarization of H_∞ and LTR Control Theory	2
1.3 Development of BTT Missile Autopilot Design	15
1.4 Major Contents	17
Chapter 2 Preliminaries	19
2.1 Singular Value and Structured Singular Value	19
2.2 Input/output Characterization of System	26
2.3 H_∞ Norm and Its Algorithm	27
2.4 Robust Stability and Robust Performance	32
Chapter 3 H_∞ Control Theory	39
3.1 Standard H_∞ Control Problem	39
3.2 The Algebra Riccati Equation Algorithm	40
3.3 Mixed Sensitivity Problem and Its Standard H_∞ Control Problem	46
3.4 Selecting Method of Weight Functions	50
Chapter 4 μ Synthesis Design Method	52
4.1 μ Synthesis Design Method	52
4.2 “D – K” Iterative Algorithm of Structure Singular Value	58
4.3 Interconnection Structure for Robustness Test under Parameter Variations	60
4.4 Model Reduction Algorithm with Balancing Truncation	63

Chapter 5 LTR Design Theory	66
5.1 Loop Shaping Design	66
5.2 Target Loop Design	70
5.3 Target Loop Recovery Design	72
Chapter 6 Mathematical Model of BTT Missile	78
6.1 BTT Control Technology and BTT Missile	78
6.2 Kinematic Equations of BTT Missile	81
6.3 Mathematical Model	86
6.4 Mathematical Model with All States Measurable	88
Chapter 7 H_{∞}/Mixed Sensitivity Autopilot Design	91
7.1 Mathematical Model	92
7.2 H_{∞} /Mixed Sensitivity Autopilot Design	92
7.3 Linear Simulation Results and Analysis	104
Chapter 8 μ Synthesis Autopilot Design	110
8.1 Mathematical Model of Pitch-Yaw Channel	110
8.2 The Structure of Control System	111
8.3 μ Synthesis Autopilot Design	115
8.4 Performance Analysis	120
Chapter 9 μ Synthesis/ Interconnection Structure Autopilot Design	126
9.1 Mathematical Model of Pitch-Yaw Channel	126
9.2 The Structure of Control System	130
9.3 μ Synthesis/Interconnection Structure Autopilot Design	133
9.4 Performance Analysis	134
Chapter 10 LTR Autopilot Design	140
10.1 Mathematical Model and Its Zero Tracking Error Model	140
10.2 Target Loop Design	141
10.3 LTR Autopilot Design	146

Chapter 11 6DOF Mathematical Simulation to

BTT Missile	153
11.1 The Characterization of 6DOF Simulation	154
11.2 Establishment of 6DOF Simulation Model	155
11.3 Control System with H_{∞} /Mixed Sensitivity Autopilot	162
11.4 Control System with μ Synthesis Autopilot	165
Appendix	168
1. Eigenvalue and Eigenvector	168
2. Unitary Space and Unitary Matrix	169
3. Stabilizable and Detectable	170
References	171

第一章 绪 论

本章主要综述鲁棒控制理论与倾斜转弯 (Bank-to-Turn, 简称 BTT) 导弹自动驾驶仪的研究与发展, 并介绍本书的主要内容及特色。

1.1 工程应用背景

采用 BTT 技术的战术导弹在机动性、稳定性、升阻比特性和与先进的冲压发动机进气口设计要求的兼容性等方面^[1], 均比现役的侧滑转弯 (Skid-to-Turn, 简称 STT) 战术导弹有显著的提高, 因而对 BTT 导弹的研究成为一段时间来国内外的热门研究课题。而 BTT 导弹研究中一项关键性技术问题是 BTT 导弹自动驾驶仪设计方法研究问题。由于 BTT 导弹在截击目标时要绕速度矢量快速滚转, 致使导弹的俯仰—偏航通道存在较强耦合, 这样传统的自动驾驶仪三通道独立设计方法已失去其合理性。加之我们希望设计的自动驾驶仪能克服大气扰动、传感器噪声等外干扰的影响, 特别是克服传统驾驶仪设计中需依据导弹飞行状态的变化多次切换驾驶仪增益这一不足, 即要求按给定空域内的一个特征点设计的驾驶仪能够控制导弹在该空域内沿多条弹道的全弹道稳定、准确地飞行。因此, 寻找一种多变量鲁棒控制方法用于 BTT 导弹自动驾驶仪设计, 成为摆在我们面前的一个重要课题。

根据近代导弹武器系统的发展需要, 本书将对多变量系统鲁棒控制理论在 BTT 导弹中的应用进行重点研究。希望能为现代导弹武器系统的研制提供一些有用的设计方法和理论依据, 为我国航天与国防事业的发展做出应有的贡献。

1.2 H_∞ 和 LTR 控制理论的研究与发展

20 世纪 30~50 年代,为适应单变量调节和随动系统的设计需要,出现了古典控制理论。古典控制理论考虑的信号仅是系统的输入、输出和偏差,控制系统的分析和设计采用的是传递函数加各种图解法(如 Nyquist 图、Bode 图、Nichols 图和根轨迹图),依据相应的稳定性准则,利用试凑法调节、设计控制器参数,设计具有一定稳定裕度和性能的系统。对一定范围的模型不确定性和外干扰信号,用古典设计方法设计的系统具有一定的鲁棒性。该方法物理意义简单明确,计算和绘图也很方便。因此,对于很大程度上仍需依靠经验和尝试的工程问题来说,该方法特别有效和受欢迎,至今沿用不衰。如大家熟悉的比例—积分—微分(PID)调节器,具有可调节控制器增益、消除控制系统偏差、增加控制系统稳定性的功能,所以 PID 调节器至今仍是空间飞行器控制系统设计普遍采用的设计方法。

因此,对单变量系统(SISO)或弱关联的多变量系统,推荐使用古典控制理论的设计方法设计控制系统。

20 世纪 50 年代末,由于宇航和复杂工业控制问题的需要,提出了多变量系统(MIMO)设计问题。由于多变量系统的相互关联性,各因素之间关系十分复杂,直接利用古典控制理论设计多变量系统有很大局限性。

因此 20 世纪 60 年代初,一批英国学者致力于将古典的 Nyquist 准则推广到多变量系统的稳定性判别中,形成了多变量频域设计方法。较有代表性的方法有:Rosenbrock 的逆奈氏阵列法(INA)、MacFarlane 的特征轨迹(CL)法、Owen 的并矢展开法和 Mayne 的序列回差法,这些设计方法对应的控制系统基本结构如图 1.1 所示。

图中 $K(s)$ 、 $H(s)$ 均为要设计的控制器, $G(s)$ 为被控对象。目的是设计控制器 $K(s)$ 和 $H(s)$,使闭环控制系统满足一定的性

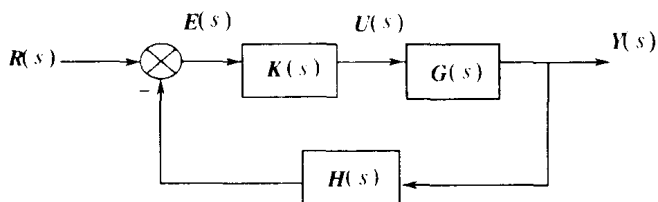


图 1.1 多变量控制系统频域设计方法方块图

能要求。

多变量频域设计方法的理论基础主要是 Rosenbrock 所发展的多项式矩阵理论,以及为研究系统的弱关联性而建立的“对角占优”矩阵理论。这些方法的共同点在于首先把设计模型“对角化”,然后用单变量方法设计。仍采用古典控制理论的试凑方法,但在有人—机交互的条件下,可用计算机辅助设计。INA 方法已在飞机、汽车的发动机控制和许多化工对象的控制中得到应用,文献[2]给出了用 INA 方法设计的 BTT 导弹自动驾驶仪。

但对强关联的多变量系统,由于系统变量间存在耦合性和方向性等完全不同于单变量系统的特性,不能简单地通过解耦使系统成为弱关联就能真正解决。下面给出用 INA 方法设计的例子^[3]。

设被控对象的传递函数为

$$\mathbf{G}(s) = \frac{1}{(s+1)(s+2)} \begin{bmatrix} -47s+2 & -56s \\ 42s & 50s+2 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

通过引入 $\mathbf{V} = \begin{bmatrix} 7 & 8 \\ 6 & 7 \end{bmatrix}$, $\mathbf{V}^{-1} = \begin{bmatrix} 7 & -8 \\ -6 & 7 \end{bmatrix}$ 使 $\mathbf{G}(s)$ “对角占优”,即

$$\hat{\mathbf{G}} = \mathbf{V}\mathbf{G}\mathbf{V}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s+1} & 0 \\ 0 & \frac{2}{s+2} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

可见 $\hat{\mathbf{G}}$ 已完全解耦,因此可按古典控制理论的方法设计 $\hat{\mathbf{G}}$ 的每

个对角元素。取 $H(s) = I$, 由于 $\hat{G}$ 的对角元素对应的两个单变量系统均稳定, 可取控制器

$$\hat{K} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

此时闭环控制系统稳定。不难看出, 此时每个对角元素对应的反馈控制系统均有无穷大的幅值裕度和 90° 的相位裕度。这时系统的 $K(s)$ 为

$$K(s) = UU^{-1} = I \quad (1.4)$$

但利用多变量控制系统的分析工具——奇异值来分析闭环反馈控制系统的稳定性时, 则得到完全不同的结论。图 1.2 为多变量控制系统的逆回差矩阵 $[I + (GK)^{-1}]$ 的奇异值曲线, 图中最小奇异值 $\sigma[I + (GK)^{-1}]$ 在 $\omega = 2 \text{ rad/s}$ 处约为 0.1, 说明当乘型模型不确定性 $l_m(j2) > 0.1$ (约 10% 的增益变化和约 6° 的相位变化) 时闭环系统即出现不稳定。

因此, 对 INA 设计方法来说, 即使设计的每个单变量控制系统都有很好的稳定裕度, 但整个闭环控制系统的稳定性有可能很差。

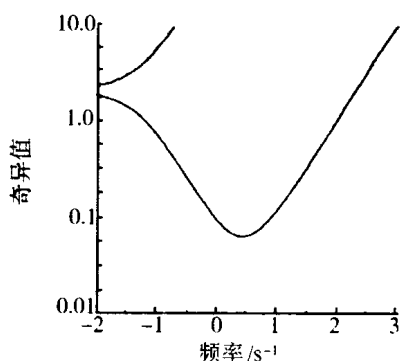


图 1.2 逆回差矩阵 $[I + (GK)^{-1}]$ 的奇异值曲线

也在 20 世纪 60 年代初, 由于数字计算机的应用和动态系统优化设计理论的迅猛发展, 出现了以 Wiener 滤波思想为基础, 以