

线性系统理论

课程编号：03112301

课程中文名称：线性系统理论

课程英文名称：Linear System Theory

课程性质：学科理论核心课程

开课对象：控制科学与工程学科硕士生、直博生、电子信息专业硕士

开课学期：秋季

学分/学时：3/48

先修课程：线性代数（矩阵理论）、微分方程、自动控制原理

建议后续课程：鲁棒控制、非线性控制等

课程负责人：郝飞 执笔人：郝飞 核准院长：王磊

授课教师：郝飞、刘杨

一、课程的性质、目的和任务

课程性质：线性系统理论是控制科学与工程学科的核心课程。线性系统理论以状态空间模型为基础，主要讲授线性系统理论基本概念、介绍线性系统分析与控制综合的基本方法和理论。要求学生掌握有关线性系统的状态空间描述、传递函数矩阵描述实现、可控可观性概念及代数判据和几何判据、稳定性、极点配置、反馈镇定、解耦、跟踪、状态观测器综合设计等基础知识。

目的和任务：通过本课程的理论学习，使学生系统掌握线性系统理论的基本概念、基本原理以及典型的系统分析和综合设计方法，同时加强学生在系统理论基础方面的基本训练，培养学生的逻辑推理能力和科研创新能力，提高学生运用系统分析和设计基本方法来解决科研中所遇问题的意识和能力。

二、课程内容、基本要求及学时分配

该课程是控制科学与工程学科理论核心课，课程主要讲授线性系统基本概念、系统分析与控制综合的基本方法。以实际工程为背景，夯实基础为前提，培养学生的逻辑推理能力和科研创新能力，为后续学习其他控制类课程打下基础。

讲授内容共 48 学时，具体细节安排如下：

第一章 绪论与线性系统基本概念（6 学时）

1.1 课程简介。

1.2 线性系统研究背景及意义的简介：线性系统的主要内容；线性系统的发展过程。

1.3 预备知识介绍：系统的定义；系统的线性性、系统的因果性、时不变性、系统的响应，线性系统的描述方法等。

基本要求：理解线性系统的主要内容及线性系统的发展过程。掌握系统的线性性、系统的因果性、时不变性、以及这些概念的等价描述；系统的响应，线性系统的描述方法。

教学重点：线性系统、基本概念。

教学难点：线性系统不同概念及算子等价关系。

第二章 线性系统的可控性、可观性及其判别（10 学时）

2.1 可控性和可观性的定义

2.2 连续时间线性时不变系统的可控性判据

2.3 连续时间线性时不变系统的可观性判据

2.4 连续时间线性时变系统的可控性和可观性判据

2.5 包括代数判据、几何判据

2.6 对偶性

2.7 连续时间线性系统的结构分解

基本要求：理解线性系统可控性、可观测性概念。掌握线性系统可控性、可观测性概念及其判别方法（代数判据、几何判据）；可控性与对偶系统的可观测性等价性，以及系统的结构分解。

教学重点：线性时不变系统的可控、可观概念及其判据、结构分解。

教学难点：对偶原理，时变系统的可控、可观的判据。线性时不变系统的几何判据。

第三章 线性系统的可控、可观标准型及状态空间实现（8 学时）

3.1 可控标准形和可观标准形：单输入单输出情形

3.2 可控标准形和可观标准形：多输入多输出情形

3.3 状态空间实现及最小实现

基本要求：理解线性系统可控性、可观测性标准型概念及对状态反馈控制和状态观测器设计的意义。掌握线性系统可控性、可观测性标准型的变换方法；掌握状态空间实现及最小实现方法。

教学重点：线性时不变系统的单输入单输出情况下的可控和可观标准形，单变量、多变量可控可观测性实现、Hankel 矩阵实现。

教学难点：可控和可观标准形变换矩阵的求取，特别是多输入多输出系统的可控和可观标准形的变换矩阵。状态空间实现及最小实现。

第四章 线性系统状态反馈综合 (12 学时)

4.1 状态反馈极点配置：单输入情形、多输入情形

4.2 状态反馈镇定

4.3 状态反馈解耦：动态解耦、静态解耦

4.4 无静差跟踪（包括跟踪控制、扰动抑制、输出调节问题）

基本要求：了解线性系统状态反馈极点配置、镇定、解耦、跟踪、扰动抑制、输出调节等控制问题提法。掌握线性系统状态反馈极点配置、镇定、解耦、无静差跟踪等控制问题状态反馈综合设计方法；掌握状态空间实现及最小实现方法。

教学重点：状态反馈极点配置、解耦、无静差跟踪。

教学难点：多输出系统的极点配置，状态反馈状态解耦，跟踪问题。

第五章 输出反馈、观测器和动态补偿器 (6 学时)

5.1 输出反馈极点配置

5.2 全维状态观测器（全维状态观测器、降维状态观测器）

5.3 基于观测器的状态反馈控制系统的特性

5.4 动态输出反馈

基本要求：了解线性系统输出反馈极点配置及动态输出反馈。掌握线性系统全维状态观测器、降维状态观测器等设计方法及基于观测器观测状态的反馈控制系统特性。

教学重点：输出反馈极点配置，全维状态观测器设计，降维状态观测器设计，基于状态观测器的反馈控制器设计。

教学难点：输出反馈极点配置充分性条件，降维状态观测器设计，基于观测器状态反馈系统特性。

第六章 系统稳定性分析 (8 学时)

6.1 系统内稳定性

系统平衡点及系统运动的李亚普诺夫意义下稳定性概念

李亚普诺夫稳定性判别方法的主要定理、及扩展定理

线性系统稳定性基于状态转移矩阵判据

6.2 系统外部稳定性：

有界输入有界状态稳定性、有界输入有界输出稳定性概念及判据

基本要求：理解 Lyapunov 各种稳定性概念及关系。掌握判据各种稳定性概念及判据。

教学重点：Lyapunov 各种稳定性概念及其判据；外部稳定性 BIBS、BIBO 概念及判据，包括

时域判据和频率域判据；内部稳定性和外部稳定性的关系；线性系统的稳定性判据。

教学难点：李亚普诺夫稳定性判别中 Lyapunov 函数的构造，连续线性时变系统的稳定判据，外部稳定性概念及时域判据和频率域判据。

三、教学方法

在教学过程中，采用启发式、交互式教学方法，注意知识背景的介绍，从工程实际或常见物理系统出发引出抽象概念，通过向学生提出问题来引导学生思考，并提出自己的设想和看法，然后由教师给予总结和提高。

由于课程中包含大量复杂的公式和证明，利用多媒体教学课件为主，课堂板书为辅的教学形式，不但增加了教学信息，而且关键核心证明通过板书可与学生进行深度交流互动，使学生理解分析证明思路。

从实际工程问题触发，理论知识与工程实例有机地联系起来。适当地引入控制领域最新成果与方法，给学生布置一些思考性问题，引导学生积极思考，激发学生的学习兴趣和创新思维。重视在教学过程中贯穿对学生的专业知识素养、逻辑推理能力、科研创新能力以及运用综合理论知识解决实际问题能力的培养，以便提高学生的国际竞争力。

四、课内外教学环节及基本要求

主要以课堂授课为主，结合国内外在控制理论方向的最新发展加以补充，着重强调线性系统基本概念与主要方法，并尽可能地用实际工程问题或实例仿真进行解释说明。对每章节内容，留有相应的作业以巩固学所学知识，寻求理论结果在实际系统分析与控制综合中的应用。要求学生掌握线性系统分析与控制综合的基本概念与主要方法，以便培养学生的严格的逻辑推理能力和科研创新能力，提高学生运用系统分析和设计基本方法来解决科研中实际问题的意识和能力。

五、考核方式及成绩评定

- 1) 平时考查（30%），并结合期末考核（70%）。
- 2) 平时考查包括：学生考勤、习题考查。
- 3) 期末考核：闭卷考试。

六、教材和参考资料

教材：

- [1] 程鹏，线性系统理论，北京航空航天大学讲义，2004。
- [2] 郑大钟，线性系统理论（第2版），清华大学出版社，2005。

[3] 王高雄等, 常微分方程 (第 4 版), 高等教育出版社, 2020。

[4] 黄琳, 稳定性与鲁棒性的理论基础。科学出版社, 2003。

[5] 高为炳, 运动稳定性, 高等教育出版社, 1988。