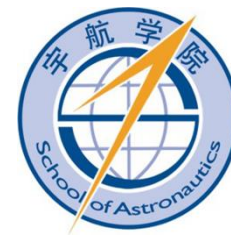
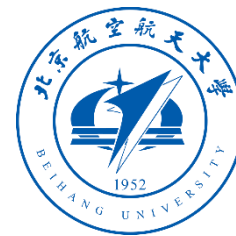


制导与控制基础



绪论

张 冉

自主系统与飞行控制实验室

北京航空航天大学宇航学院

2024 春

目 录

1. 制导与控制的**概念**
2. 制导与控制的**发展**
3. 课程的**内容**

目 录

1. 制导与控制的概念

2. 制导与控制的发展

3. 课程内容

研究对象：运载火箭

□ 长征五号：我国新一代大型液体运载火箭，具备近地轨道25吨、地球同步转移轨道14吨的运载能力

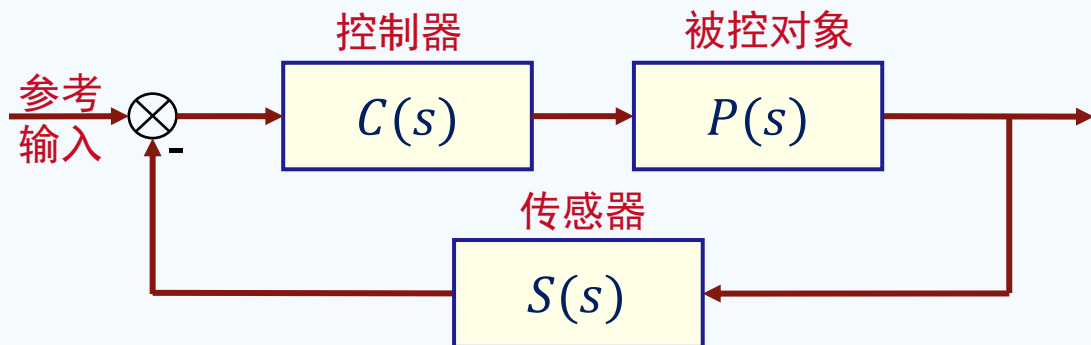


长征五号/长征五B运载火箭发射任务		
➤ 2019年12月27日	遥3运载火箭	东方红五号卫星平台首飞
➤ 2020年7月23日	遥4运载火箭	天问一号火星绕落巡任务
➤ 2020年11月24日	遥5运载火箭	嫦娥五号月球采样返回任务
➤ 2021年至2022年	遥1、2、3、4运载火箭	空间站建设任务
➤ 2023年12月15日	遥6运载火箭	遥感四十一号卫星入轨任务
➤ 2024年2月23日	遥7运载火箭	通信技术试验卫星十一号入轨任务



以长征五号运载火箭为例，如何设计飞行控制系统？

经典控制回路



□ 反馈控制

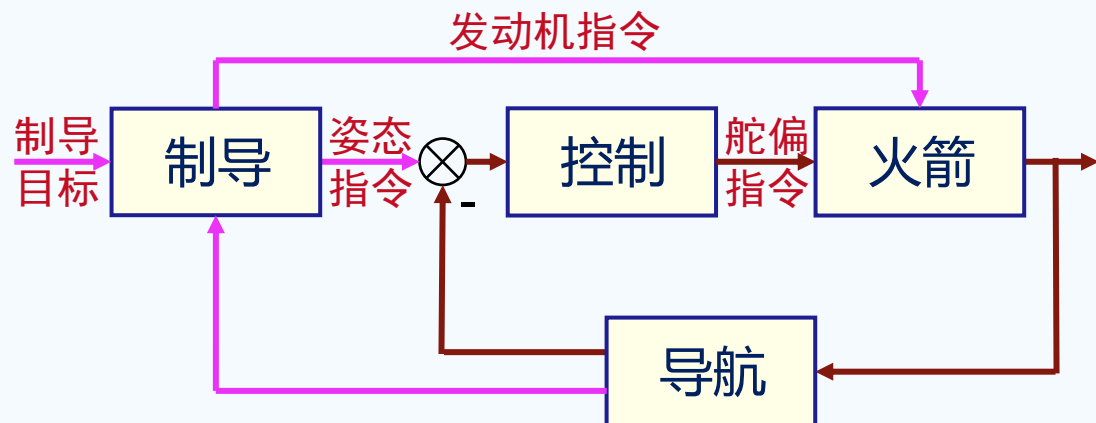
- **传感器**：提供被控对象状态信息
- **控制器**：执行参考输入（指令）

输入：参考与实际的偏差（比较）；输出：执行机构指令

飞行任务需求

期望飞行轨迹（位置、速度）

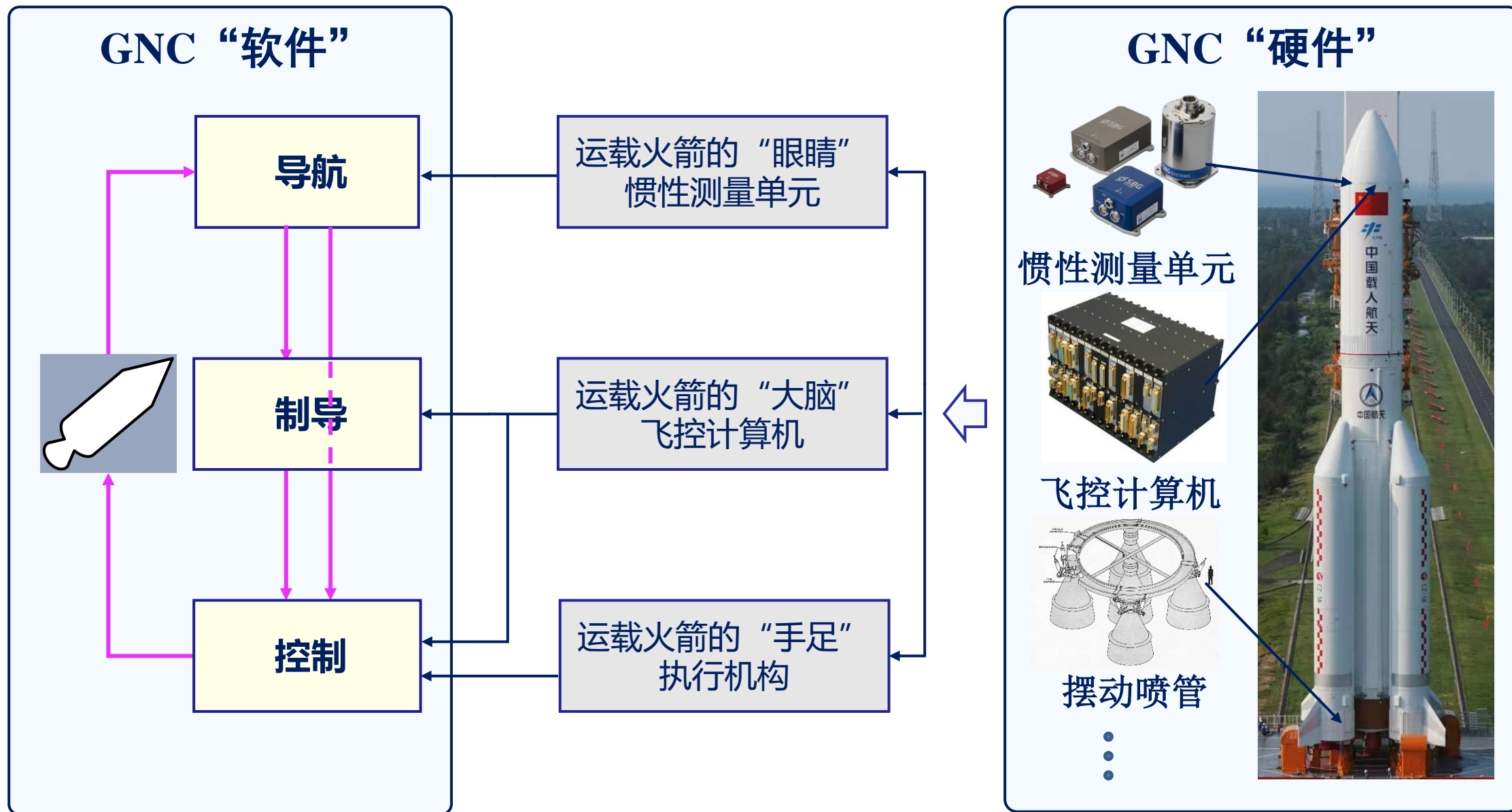
GNC回路



□ 导航、制导与控制

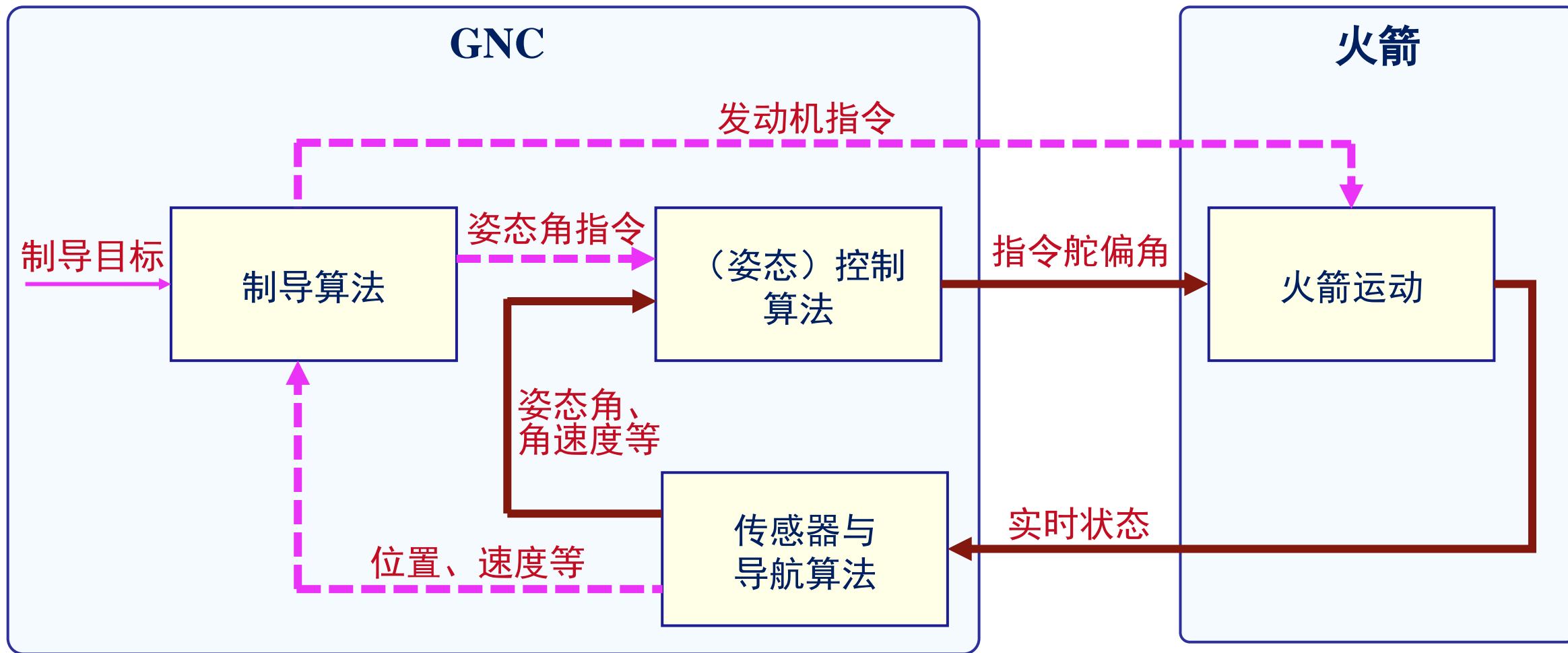
- **导航** (navigation)：提供飞行器状态信息
- **制导** (guidance)：计算飞行指令，规划加速度矢量
输入：制导目标；输出：发动机指令与姿态指令
- **控制** (control)：执行制导指令
输入：姿态偏差；输出：舵偏角指令

运载火箭的导航、制导与控制

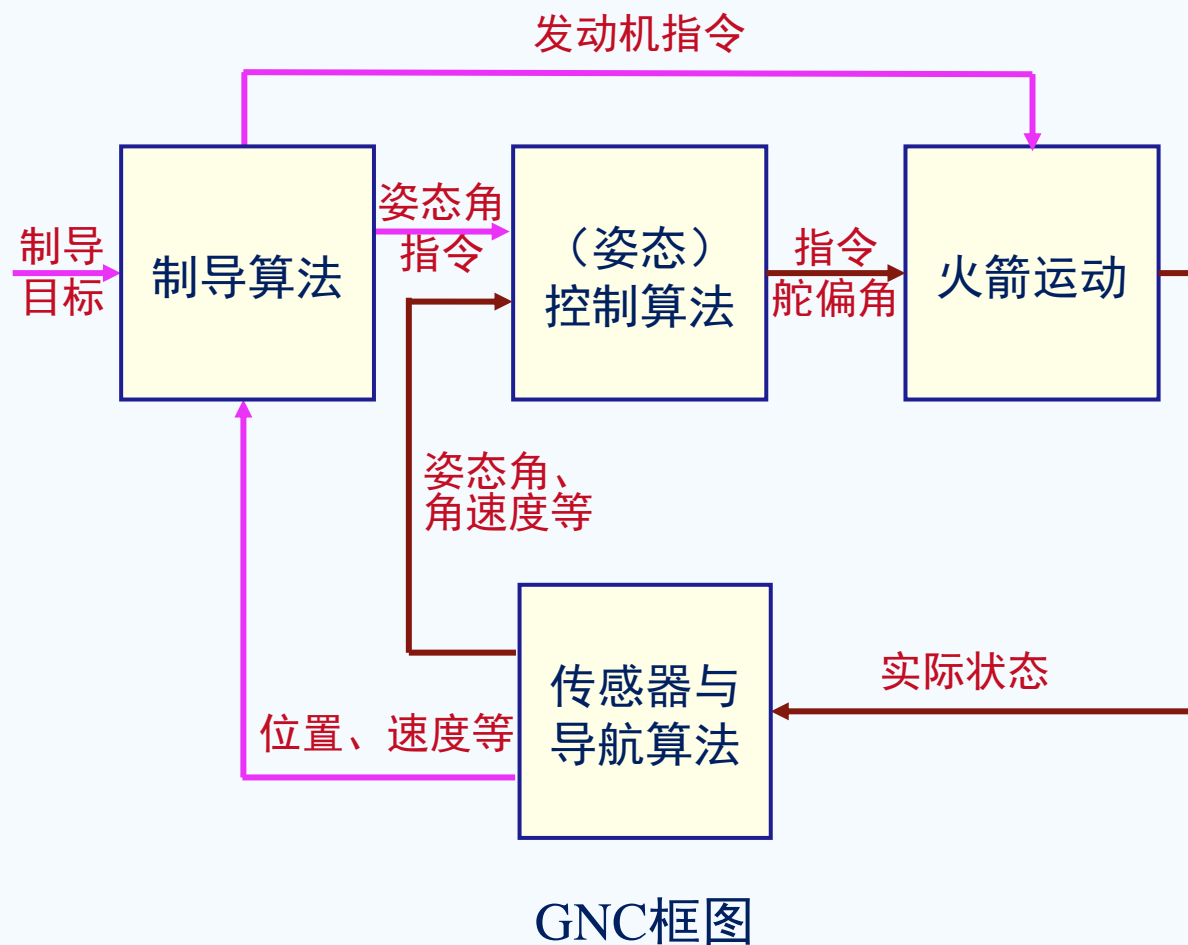


运载火箭的GNC结构（系统观）

GNC各部分相互协作，是一个具有固定结构的有机整体



制导与控制的定义



□ 制导 (Guidance)

- 制导算法通过**计算机动序列指令**，引导飞行器从当前状态转移至目标状态，使得产生的轨迹满足动力学约束和过程约束，以及具有最优的性能指标（如，最省燃料）。

□ 控制 (Control)

- 控制算法通过**执行（力和力矩的）修正动作**，稳定飞行器并调节其状态，从而跟踪制导指令；在这个过程中，系统需要具有良好的性能指标（如，响应时间、超调量和稳态误差）。

辨析：制导问题与导航问题

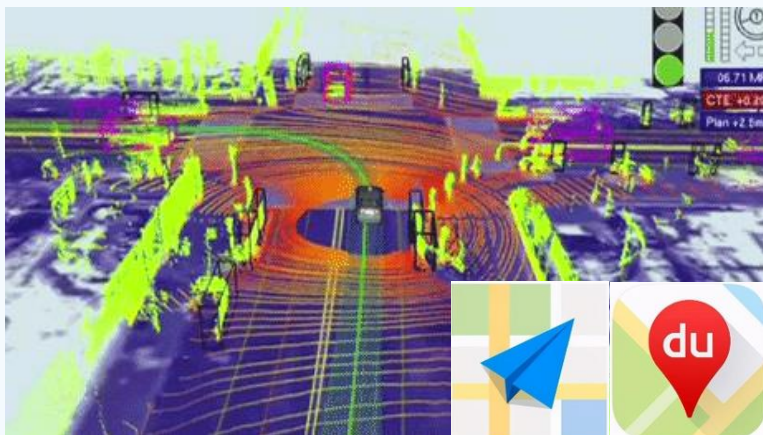
9



“在普通的**导航问题**(*Navigation Problem*)中（例如汽车的驾驶问题），因为速度较低，动力学影响小，所以**只要根据位置的偏差改变运动路线**即运动学校正，就可以使总的运动路线符合要求。但是，对于火箭这种动力学模型复杂且高速的飞行器，不能只根据运动学进行操纵，**必须要考虑系统的动力学影响**，我们把这种问题称为**制导问题**(*Guidance Problem*)。”

—— 钱学森 《Engineering Cybernetics》

汽车行驶速度60 km/h
(导航问题)



航天飞机上升段可达**27000 km/h**
(制导问题)



目录

1. 制导与控制的概念

2. 制导与控制的发展

3. 课程内容

运载火箭制导与控制的发展路线图

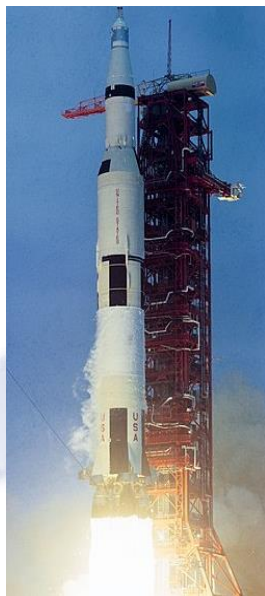
制导与控制
复杂度

第一阶段



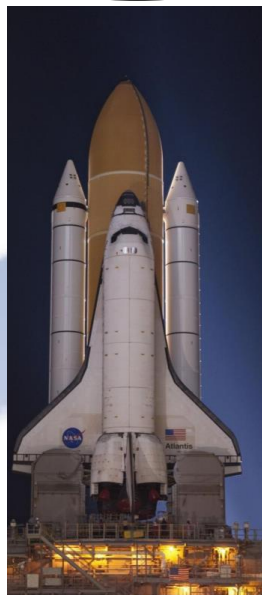
1940s

第二阶段



1960s

第三阶段



1980s

第四阶段



2000s

第五阶段



2020s

时间

第一阶段 火箭的制导与控制设计需求



V-2火箭（德国）

□ 典型运载火箭的基本情况

- V-2：一体成型液体火箭（弹体弹头不分开）
- 执行机构：燃气舵、空气舵
- 传感器：角度陀螺、加速度计
- 计算设备：模拟计算机

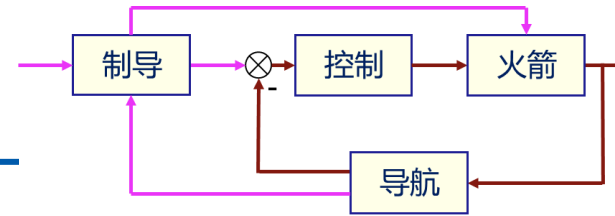
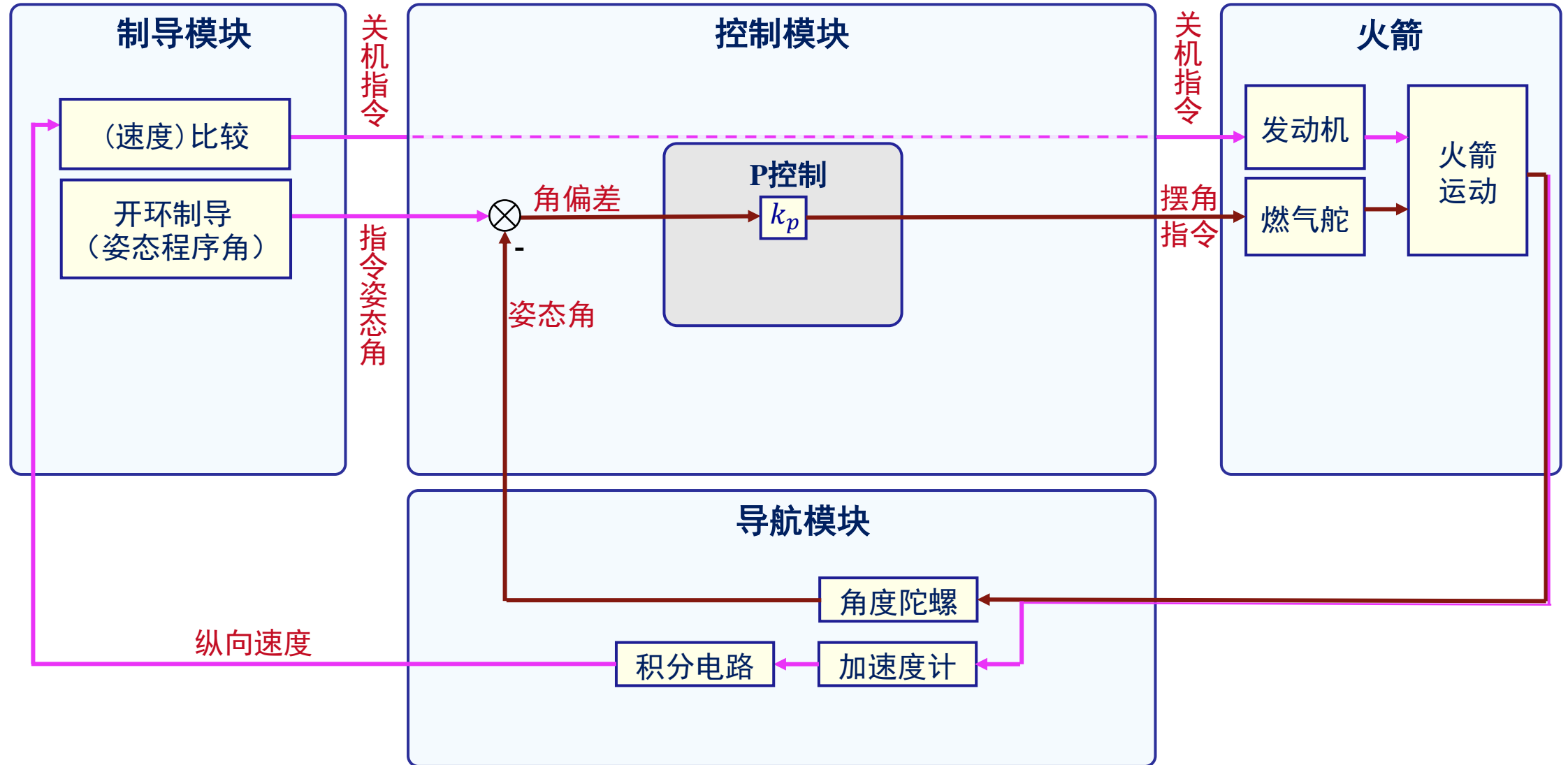
□ 飞行控制任务

- 到达指定位置
- 稳定姿态
- 跟踪射前规划的姿态指令

质量	直径	长度
13 t	1.65 m	14 m

V-2的制导与控制

□ 第一个具有完整的制导与控制功能的飞行控制系统（“内/外双回路”）



第二阶段 运载火箭的制导与控制设计需求



土星五号（美国）

质量	直径	长度
3039 t	10.1 m	110.6 m

□ 典型运载火箭的基本情况

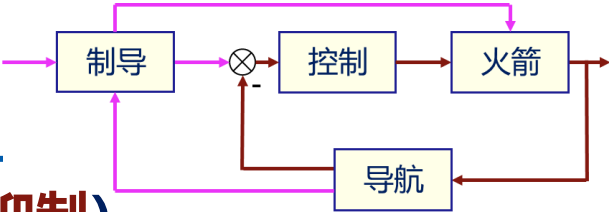
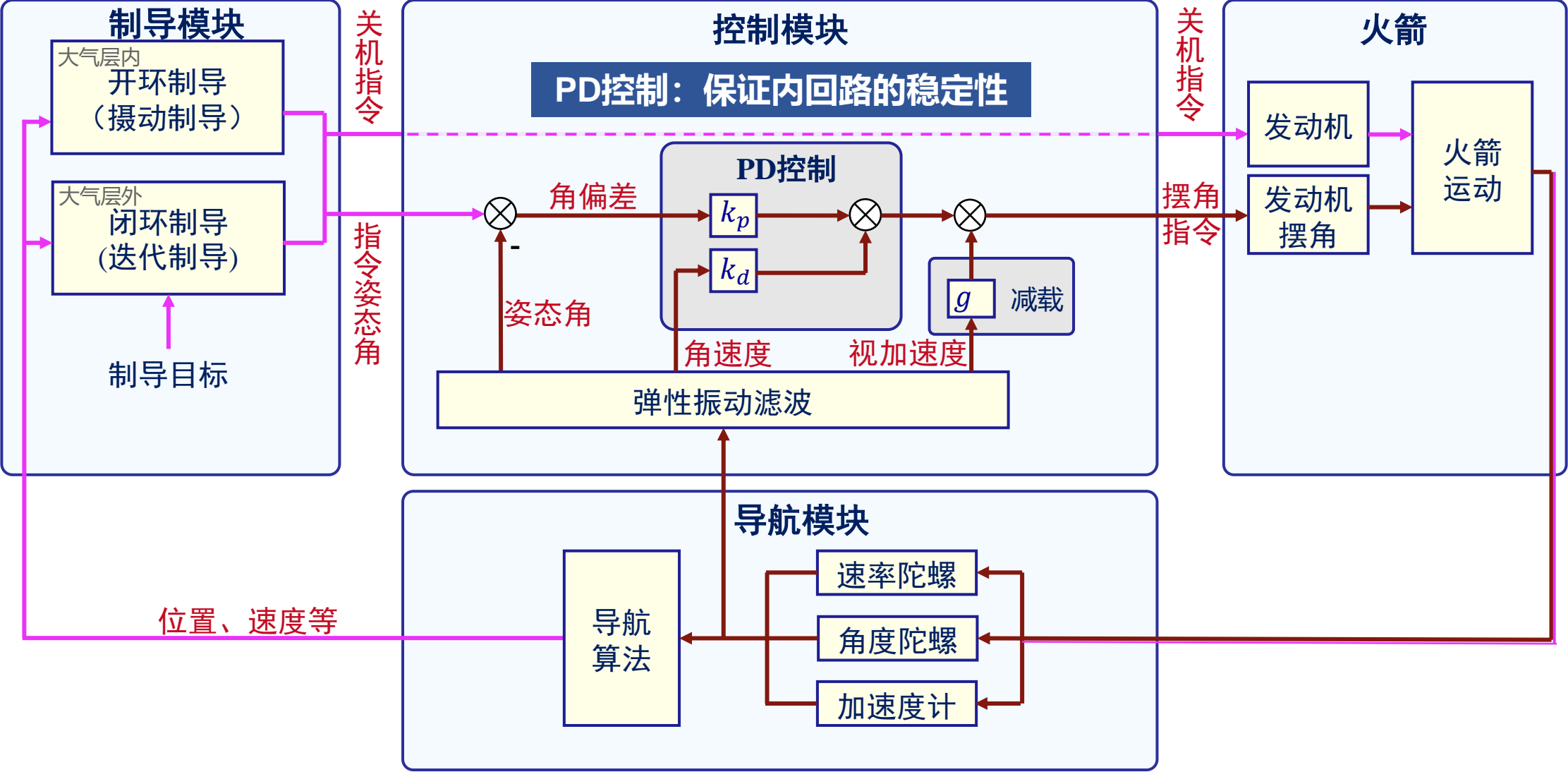
- 土星五号：三级液体运载火箭
- 执行机构：发动机摆动（推力矢量）
- 传感器：角度陀螺、速率陀螺、加速度计
- 计算设备：数字计算机

□ 飞行控制任务

- 高精度入轨
- 姿态稳定、姿态指令跟踪
- 抑制弹性振动
- 减小载荷对箭体结构的影响

土星五号的制导与控制

□ 运载火箭制导控制的基础算法（摄动制导、闭环制导、PD控制、减载、弹性抑制）



第三阶段 运载火箭的制导与控制设计需求



航天飞机（美国）

质量	直径	长度
2030 t	8.7 m	56.1 m

□ 典型运载火箭的基本情况

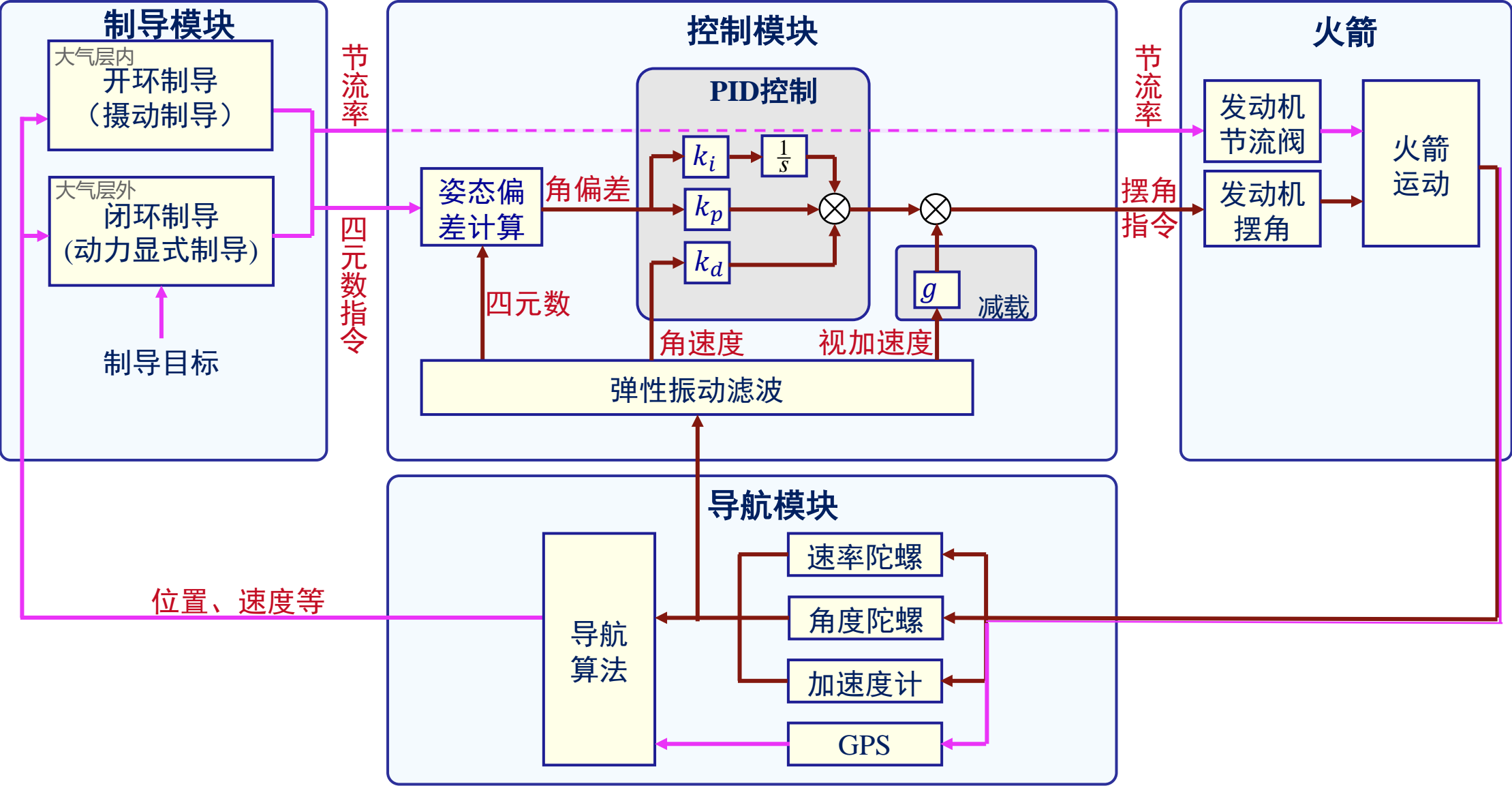
- 航天飞机：轨道飞行器、一对固体助推器、外储箱
- 执行机构：发动机摆动（推力矢量）、空气舵
- 传感器：角度陀螺、速率陀螺、加速度计、GPS
- 计算设备：数字计算机

□ 飞行控制任务

- 高精度入轨、变轨、离轨
- 姿态稳定、姿态指令跟踪
- 抑制弹性振动
- 减小载荷对箭体结构的影响

航天飞机的制导与控制

在上一代基础上增加的功能：PD控制 变为 PID控制



第四阶段 运载火箭的制导与控制设计需求



战神一号（美国）

质量	直径	长度
未知	5.5 m	94 m

□ 典型运载火箭的基本情况

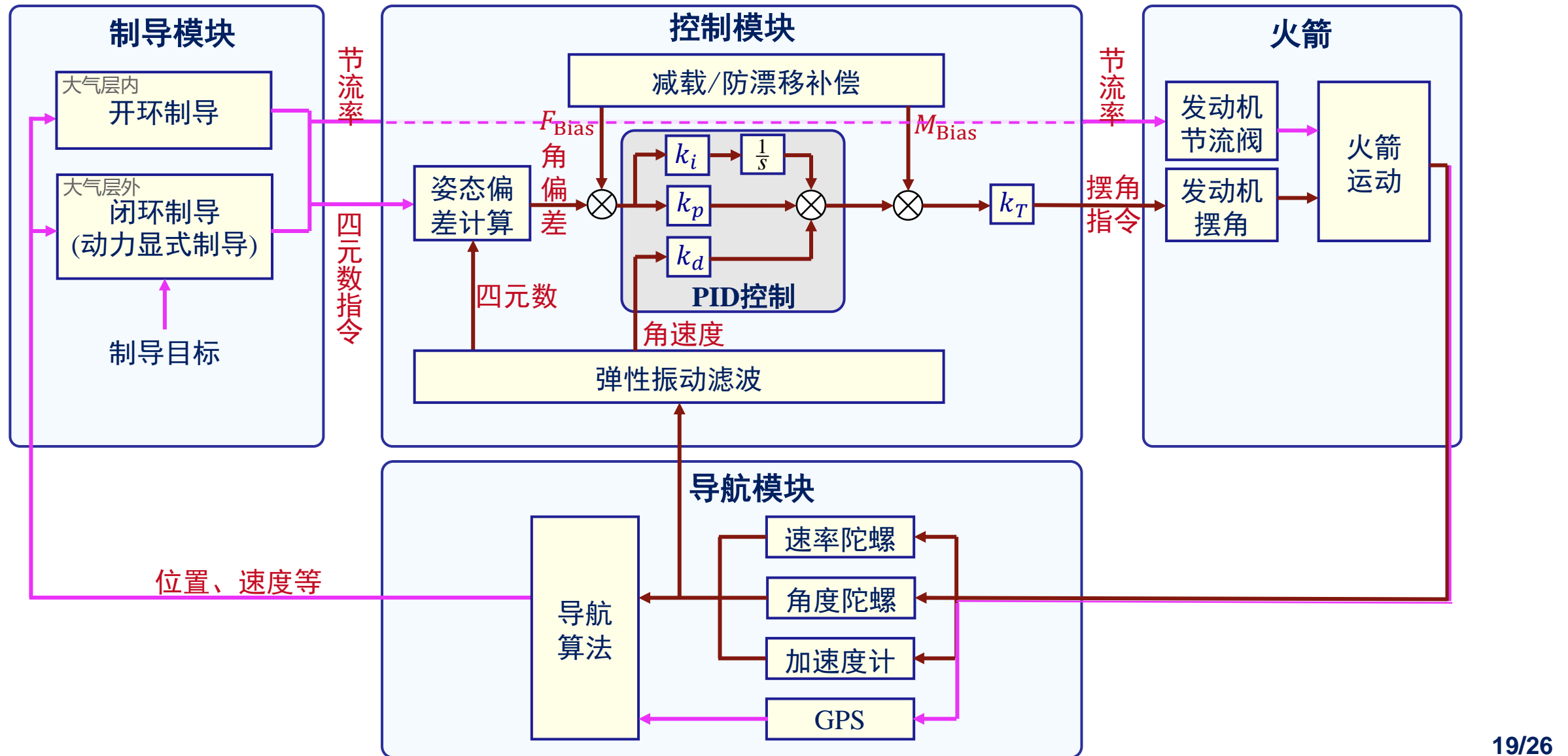
- 战神一号：两级火箭，第一级为固体火箭，第二级为液体火箭
- 执行机构：发动机摆动（推力矢量）、反作用控制系统
- 传感器：角度陀螺、速率陀螺、加速度计、GPS
- 计算设备：数字计算机

□ 飞行控制任务

- 高精度入轨
- 姿态稳定、姿态指令跟踪
- 抑制弹性振动
- 减小载荷对箭体结构的影响
- 减小发射时位置漂移

战神一号的制导与控制

□ 在上一代基础上增加的功能：减载 变为 主动抗扰（减载/防漂移补偿）



第五阶段 运载火箭的制导与控制设计需求



空间发射系统（美国）

质量	直径	长度
2951 t	8.4 m	120 m

□ 典型运载火箭的基本情况

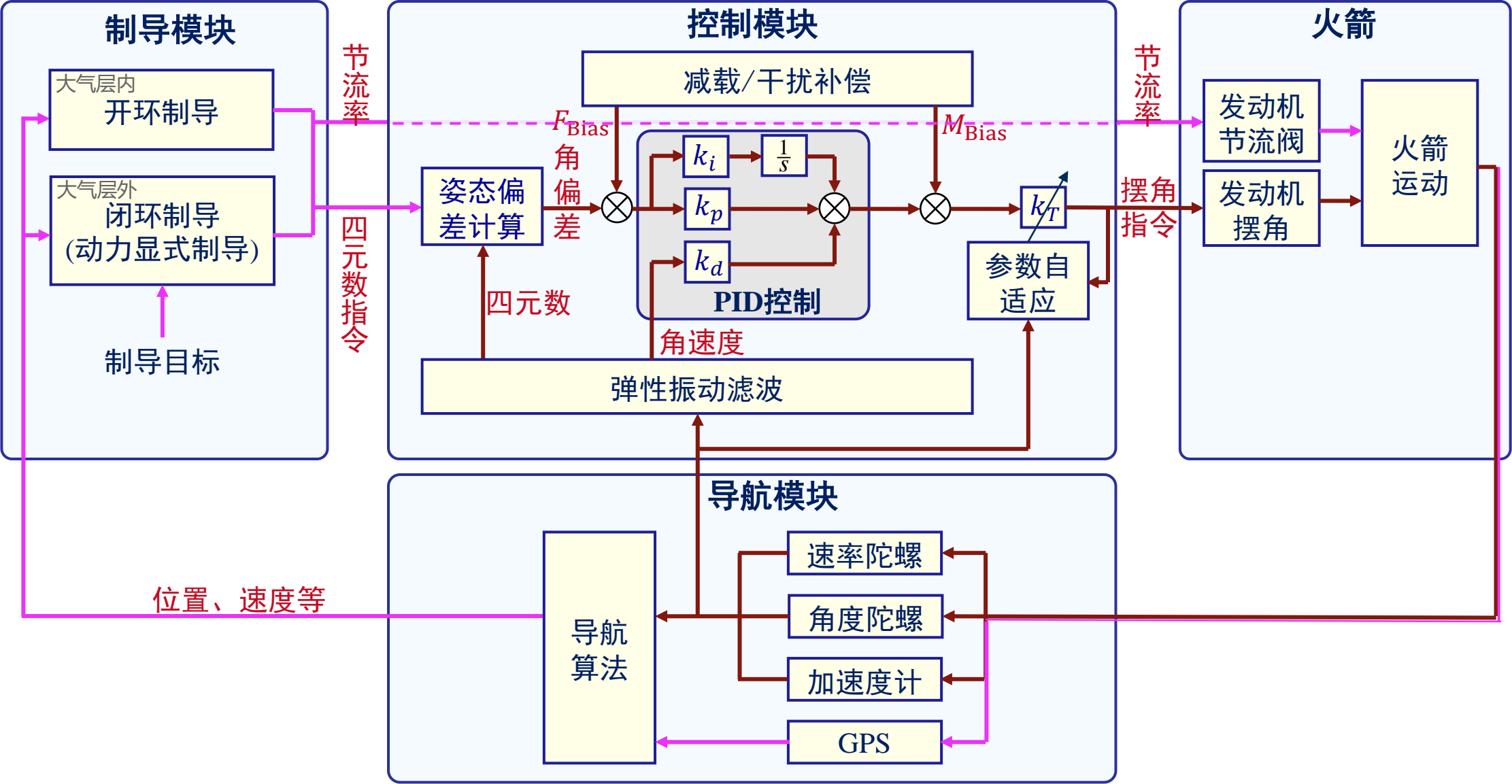
- 空间发射系统：两级液体火箭+固体助推器
- 执行机构：发动机摆动（推力矢量）
- 传感器：角度陀螺、速率陀螺、加速度计、GPS
- 计算设备：数字计算机

□ 飞行控制任务

- 高精度入轨
- 姿态稳定、姿态指令跟踪
- 抑制弹性振动
- 减小载荷对箭体结构的影响
- 补偿各类干扰对控制的不利影响
- 充分发挥运载火箭物理能力

空间发射系统的制导与控制

在上一代基础上增加的功能：干扰观测器（减载/干扰补偿）+ 控制参数自适应



制导与控制的发展（小结）

1. 制导与控制的“内-外回路”基本结构保持不变，随着火箭构型变化与飞行控制需求增长，功能以“模块化”方式相应地更新与添加（add-on）

2. 制导是计算控制指令，引导火箭完成飞行任务

制导算法通过计算机动序列指令，引导飞行器从当前状态转移至目标状态，使得产生的轨迹满足动力学约束和过程约束，以及具有最优的性能指标（如，最省燃料）

3. 控制是执行物理动作，核心是确保“（姿态）内回路”稳定性

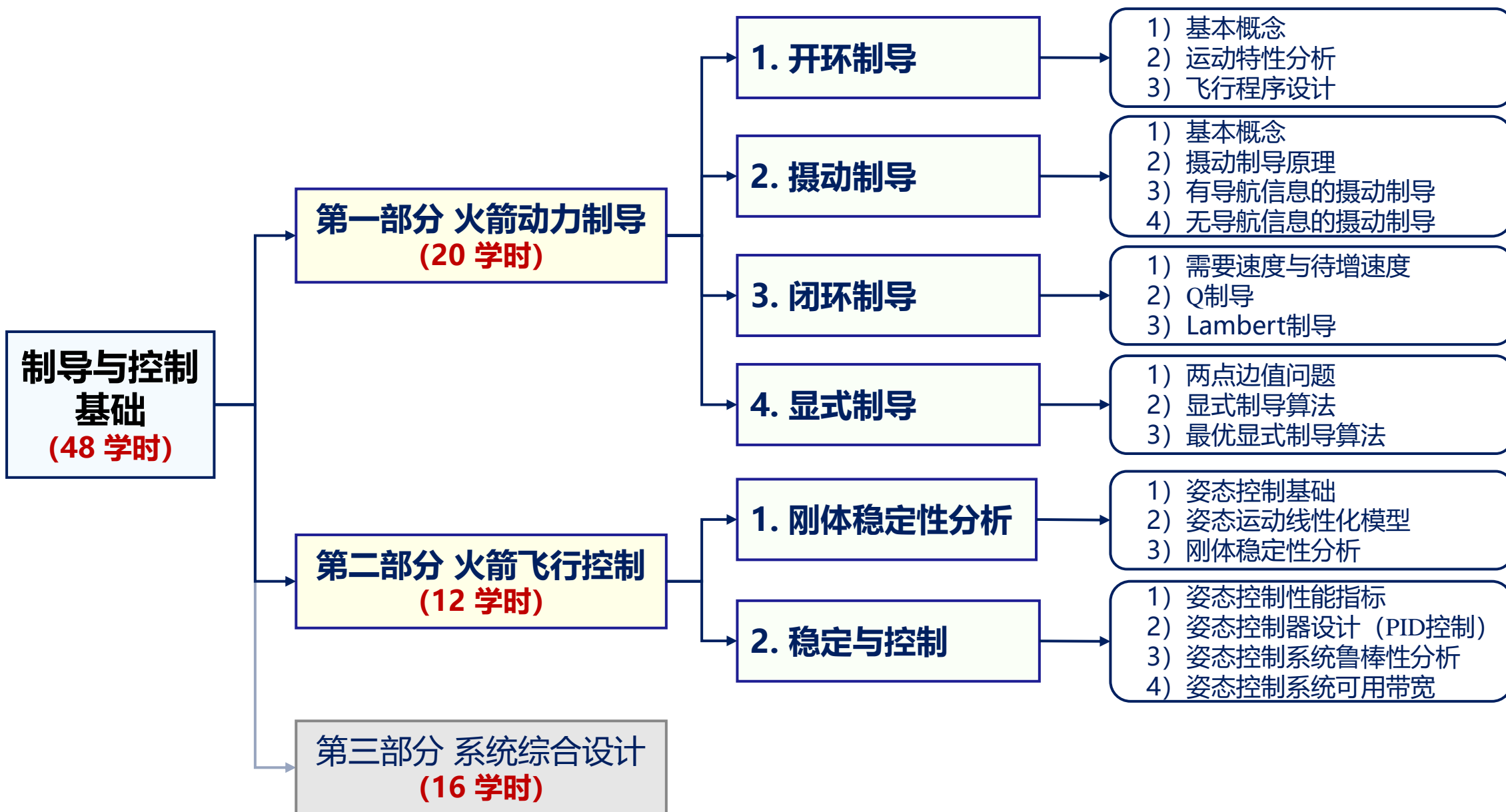
控制算法通过执行（力和力矩的）修正动作，稳定飞行器并调节其状态，从而跟踪制导指令；在这个过程中，系统需要具有良好的性能指标（如，响应时间、超调量和稳态误差）

4. 飞行任务需要导航、制导与控制协同完成

目 录

1. 制导与控制的概念
2. 制导与控制的发展
- 3. 课程内容**

课程内容



其他

一、考核方式

1. 作业：总成绩的**20%**
2. 考勤：总成绩的**10%**
3. 期末考试（闭卷）：总成绩的**70%**

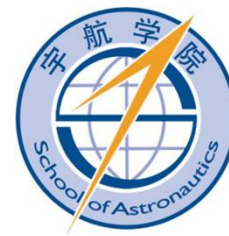
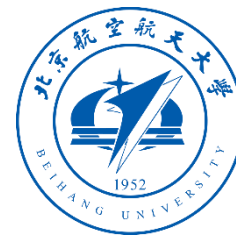
二、联系方式

张冉（老师）：15810535541 国实 d座 823

张坤（老师）：15210541276 国实 d座 822

安琪（助教）：18810196836 国实 d座

制导与控制基础



绪论

张 冉

自主系统与飞行控制实验室

北京航空航天大学宇航学院

2024 春