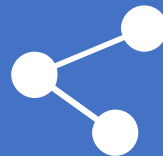


研究生核心课程

# 飞行仿真技术

自动化科学与电气工程学院





模型基本概念

1

工程技术人员建  
模过程

2

3

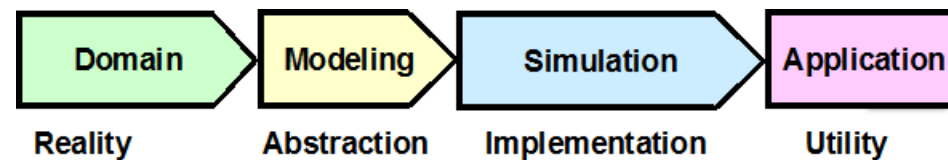
飞行仿真系统组成  
及特点

4

飞行实时仿真系统  
分类及方法



# 1 模型基本概念



□ 模型(Model)-----对实体、系统、现象、过程的物理、数学、逻辑的描述与表示

□ Model is a physical, mathematical, or otherwise logical representation of a system, entity, phenomenon, or process



## □仿真

- 仿真是建立相应的物理系统或抽象系统的 **数学模型** 在计算机上解算的过程
- 仿真是 **模型** 时间轴上执行和实现的方法

## □系统仿真技术

- 以建模理论和仿真理论及相应领域的专业技术为基础，以计算机系统、物理效应设备和仿真器为工具，利用 **数学模型** 部分实物对研究对象进行分析、设计、运行和评估的一门综合性技术
- 仿真是基于模型的活动，仿真的概念本身包含建模。但有时为了突出模型的重要性，国际上常将建模与仿真并称为“建模仿真（Modeling and Simulation, 缩写为 M&S）”。一般情况下，“仿真”和“建模仿真”具有相同的含义。（2018年）

模型是仿真的核心



# 建模过程

根据特定的研究目的,对研究对象基本功能、性能及性能指标、输入输出关系、应用环境的抽象描述

一次建模

概念模型



根据物理概念、数学定理、变化规律、测试结果或经验总结,用数学表达式、逻辑表达式、特性曲线、试验数据等描述某一系统的表现形式

数学模型



二次建模

研究对象

模型校核、验证与确认  
VV&A

仿真软件

仿真模型



根据研究对象的数学模型,选择合适的算法,把数学模型转换为一种适合在计算机上运算和试验的模型



# 概念模型

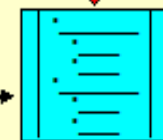
- The activity of creating abstract representation of some aspects of physical and social systems and their environments in the world around us
- A conceptual model is the collection of information which describes a simulation developer's concept about the simulation and its pieces. That information consists of assumptions, algorithms, characteristics, relationships, and data

- General steps of CM ;

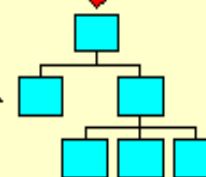
Collection and arrangement of informal requirements usually in natural language

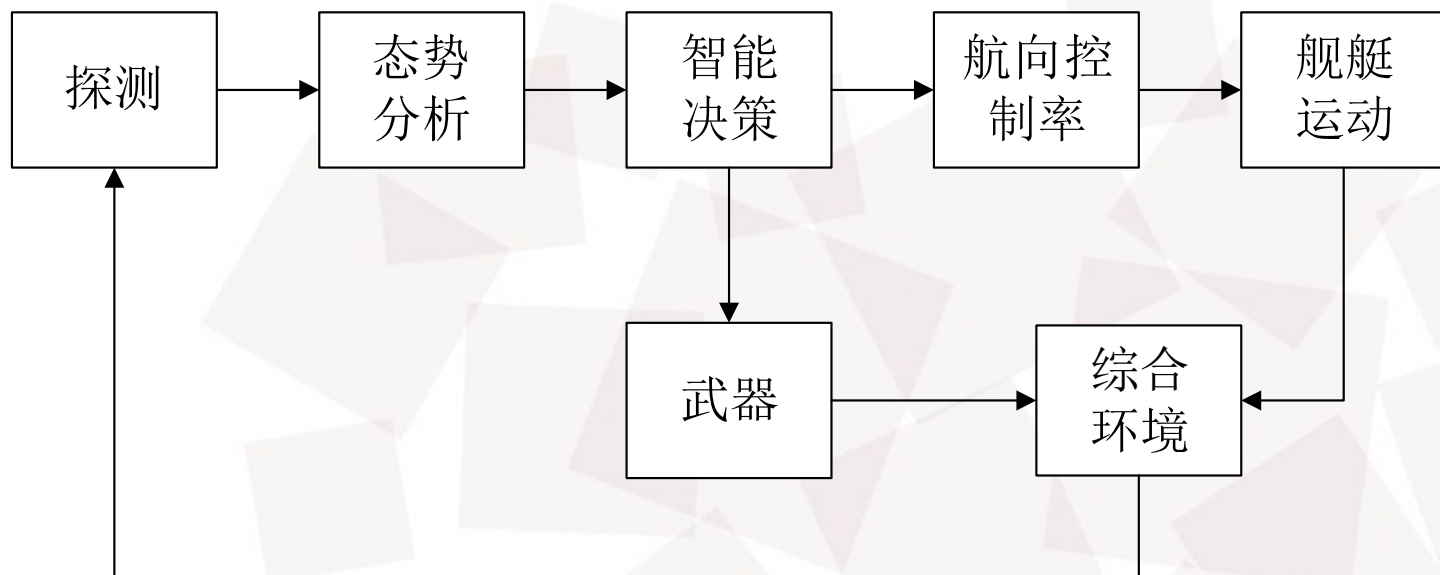


Conversion of informal requirements into formal structures



Description in a graphical or other representation methods  
(Static Obj. Diag., Dynamic Obj. Diag., etc.)





**舰艇兵力组件关系概念模型**







# 数学模型

- 采用数学语言对系统或实体内在的运动规律及与外部的作用关系进行抽象和对其本质特征进行的描述，包括用文本、框图、流程图、类视图等形式对原始系统进行概念的定义与采用数学方程等描述方式，这种描述与原系统相比能够保持运动规律、信息传递的一致性或相似性。
- 如连续系统的数学模型主要采用微分方程或微分方程组来表征；而离散系统的数学模型主要采用差分方程或差分方程组；离散事件系统用概率分布、排队论等来描述。模型的详细程度（即模型的粒度）必须与研究的目标相匹配。







# 数学模型的功用(黄俊钦)

- 简明而精确地描述了物理系统的主要特性。例如，用线性方程或非线性方程描述物体的运动曲线，从方程式可容易看出系统的输入输出关系
- 从系统的数学模型，可以很容易地看出它的功能和特点。如，用线性方程来描述热电偶的特性，用多项式来描述振筒式压力传感器的特性
- 便于研究系统的运动规律和进行特性分析。例如，根据描述动态特性的数学模型，可定量说明其运动规律和各种动态特性
- 便于研究设计方法和改善其特性的方法
- 便于计算系统的静态与动态性能指标
  - 静态指标分为分项指标和综合指标。线性系统的分项指标有线性度、重复性、迟滞。非线性系统的分项指标有符合度和重复性。综合指标为精度。
  - 时间域的动态性能指标主要有上升时间、超调量等；频率域的动态指标有幅值误差和相位误差。对系统进行动、静态误差校准时，记录数据或曲线中不可避免地带有干扰，需要利用实验数据建立数学模型，计算合理的性能指标。当系统的动态性能指标不符合要求时，可用滤波器进行动态补偿，以展宽系统的频带，改善系统的动态特性。





## □ 连续系统的数学模型---微分方程

$$y^{(n)}(t) + a_1 y^{(n-1)}(t) + \cdots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = u$$

$$y^{(n)}(t) + a_1 y^{(n-1)}(t) + \cdots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = b_0 u^{(m)} + b_1 u^{(m-1)} + \cdots + b_{m-1} \dot{u} + b_m u$$

## □ 连续系统的数学模型---传递函数

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_{m-1} s + b_m}{s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s + a_n}$$

## □ 连续系统的数学模型---状态空间

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + Bu \\ y &= CX + Du \end{aligned}$$





# 仿真模型

- 在专业领域模型的基础上根据仿真目的、研究目标、技术要求、计算机实现等约束条件下的二次建模
- 将研究对象的数学模型通过数字仿真算法转换成能在计算机上运行的数字模型，即将数学模型离散化，建立相应的递推公式，便于进行迭代运算
- 不同类型的数学模型有不同的仿真算法。如，连续系统数学模型常用的仿真算法有数值积分法、离散相似法等；离散事件系统常用的仿真算法有事件调度法、活动扫描法等
- 连续系统仿真，本质是从时间、数值两个方面对原系统进行离散化，并选择合适的数值计算方法来近似积分运算，由此得到离散模型来近似原连续模型



# 数值积分法

□ 设一阶常微分方程及其初值为

$$\dot{y} = f(t, y), \quad y(t_0) = y_0$$

□ 对其两端求积分，进行变换

$$y(t) - y(t_0) = \int_{t_0}^t f(\tau, y) d\tau$$

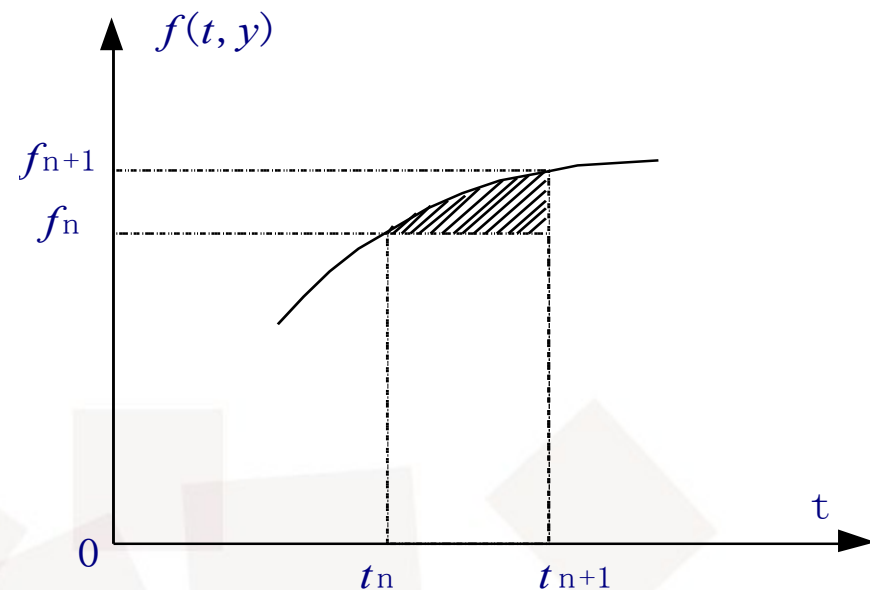
□ 令  $t = t_{n+1}$

$$y(t_{n+1}) = y(t_0) + \int_{t_0}^{t_{n+1}} f(\tau, y) d\tau$$

$$y(t_{n+1}) = y(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} f(\tau, y) d\tau + \int_{t_n}^{t_{n+1}} f(\tau, y) d\tau$$



$$y_{n+1} = y_n + Q_{n+}$$



$$y_{n+1} = y_n + h f(t_n, y_n)$$

欧拉法

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2} [f(t_n, y_n) + f(t_{n+1}, y_{n+1})]$$

改进欧拉法

$$y_{n+1}^P = y_n + h f(t_n, y_n)$$

预估校正法

$$y_{n+1}^C = y_n + \frac{h}{2} [f(t_n, y_n) + f(t_{n+1}, y_{n+1}^P)]$$





## 龙格-库塔法

### ➤ RK-2

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2}(k_1 + k_2)$$

$$k_1 = f(t_n, y_n), \quad k_2 = f(t_n + h, y_n + k_1 h)$$

### ➤ 四阶龙格-库塔法

$$y(t_{n+1}) \cong y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

$$k_1 = f(t_n, y_n)$$

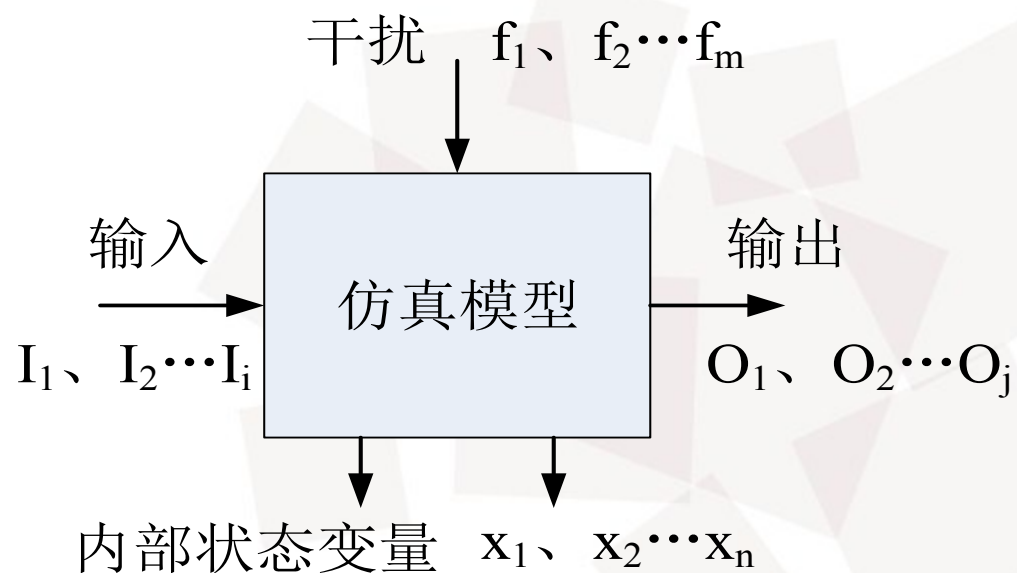
$$k_2 = f(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_1)$$

$$k_3 = f(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_2)$$

$$k_4 = f(t_n + h, y_n + hk_3)$$



# 仿真模型形式



# 建模的一般准则

- 清晰性（各分系统、各模型结构尽可能清晰）
- 切题性（切合研究目的,符合上下文背景）
- 层次性（根据研究问题的性质，要解决的问题）
- 系统性（指一些个别实体能组成更大实体的程度）
- 可重用性 (MOM, SOS)

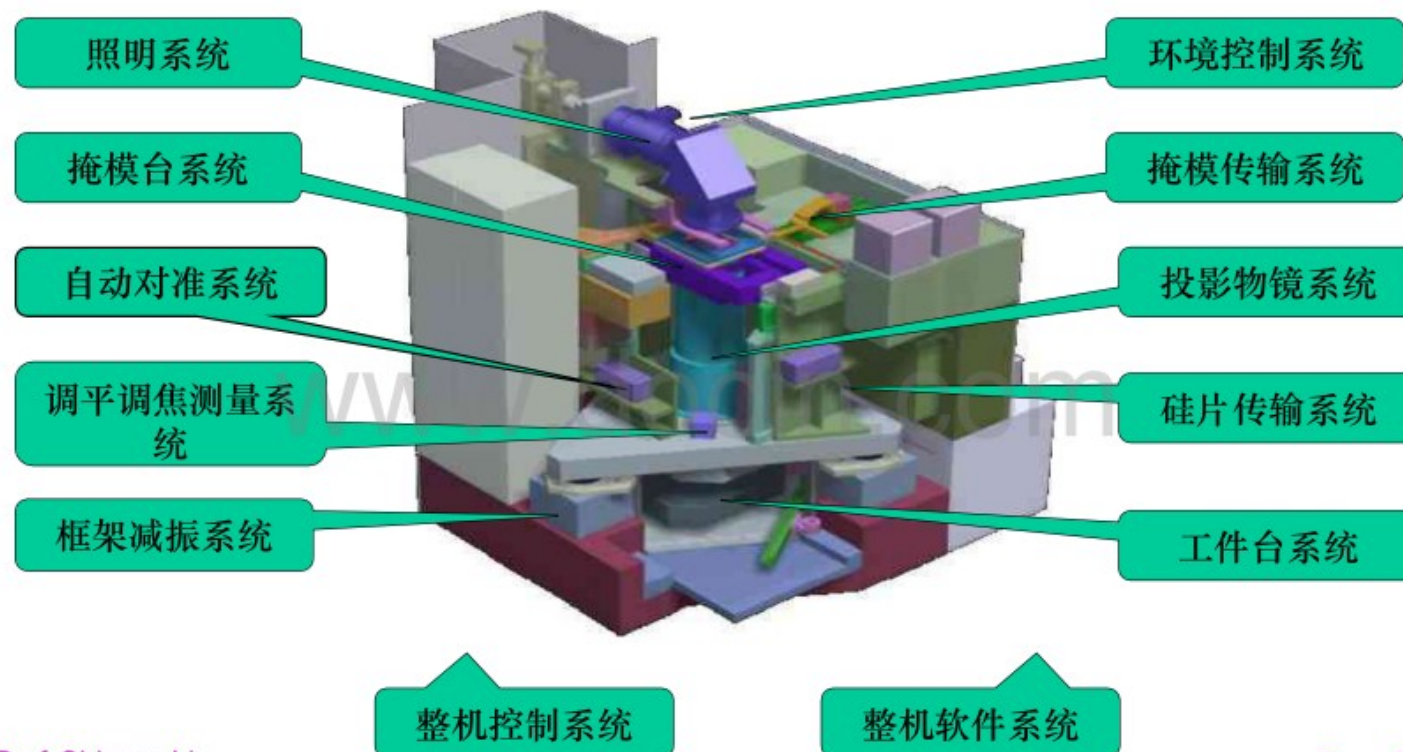


# 讨论题

## 光刻机 LITHOGRAPHY TOPIC

- 1、光刻机包括哪几部分？
- 2、设计光刻机的概念模型。

## 光刻机总体结构



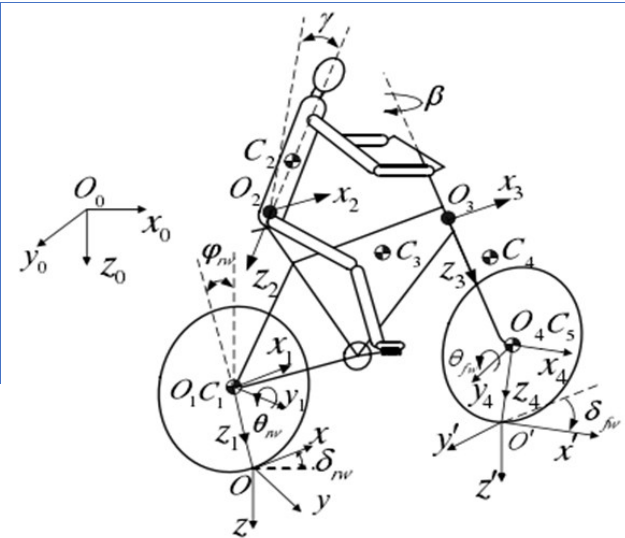


# 讨论题

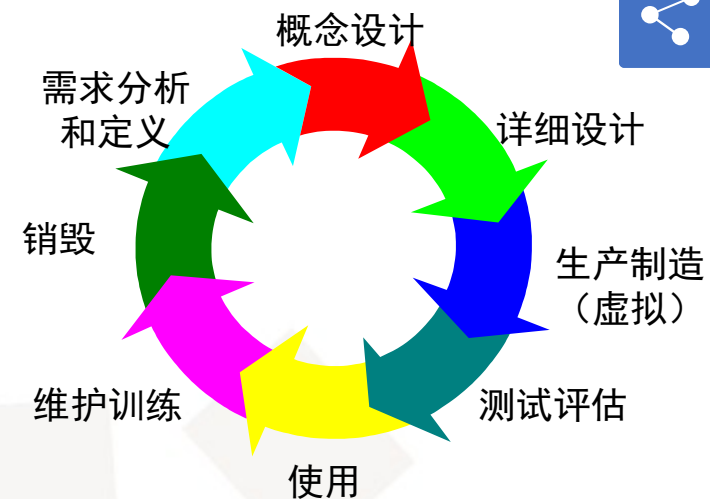
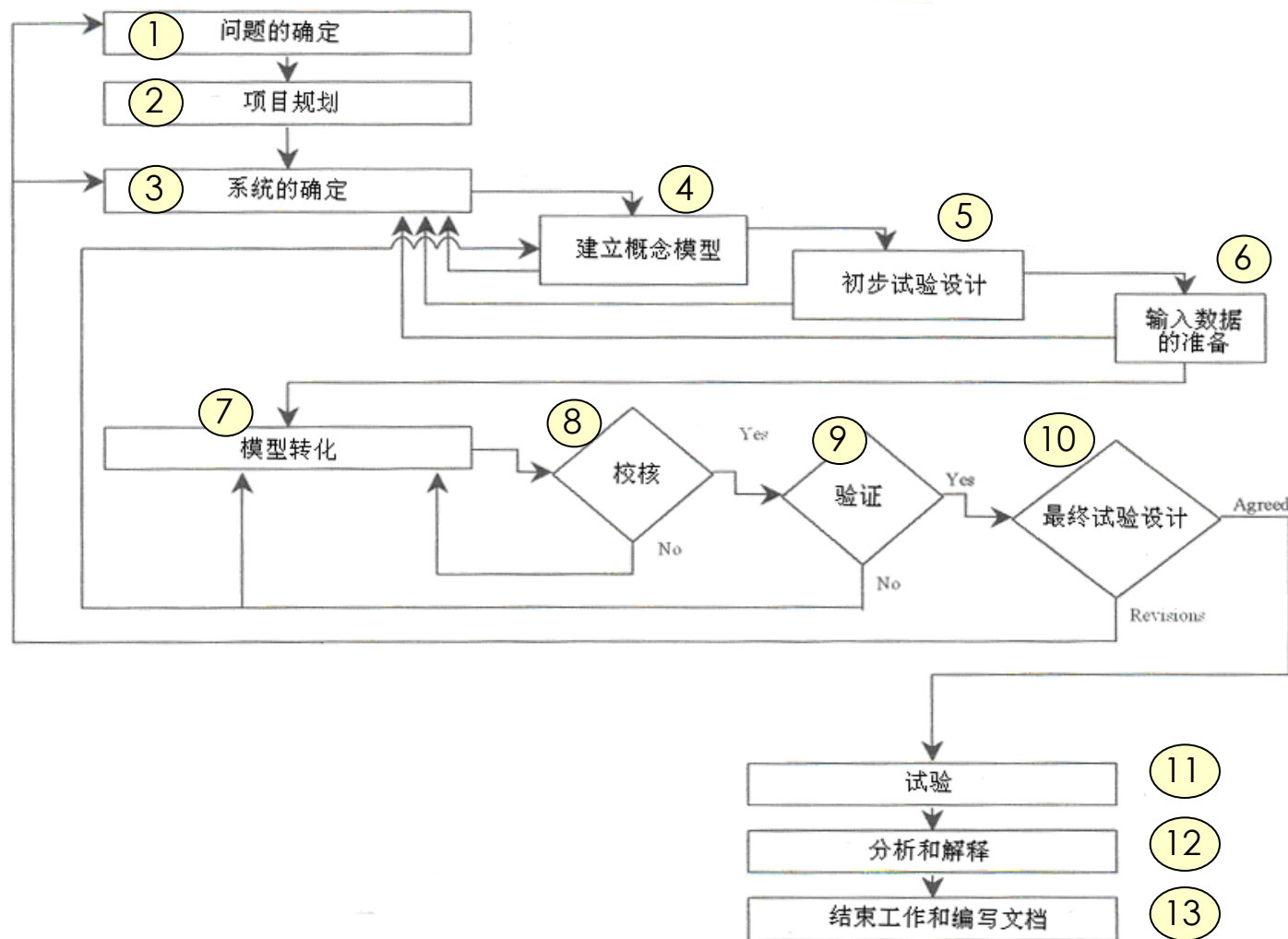
## 自行车 RESEARCH TOPIC

1、设计自行车的概念模型。

2、自行车模型包括哪几部分？



## 2 工程技术人员建模过程





# 3 飞行仿真系统组成及特点

## □飞行仿真系统组成

### ➤ 仿真计算机

核心部件。运行实体对象和仿真环境的数学模型，获得系统和环境的各种参数；支撑数学仿真系统，半实物仿真系统，人在回路仿真系统的运行。

按不同速率调度各类模型，并行技术、联网技术等。

速度、精度（字长）、存储容量、经济性

### ➤ 接口设备

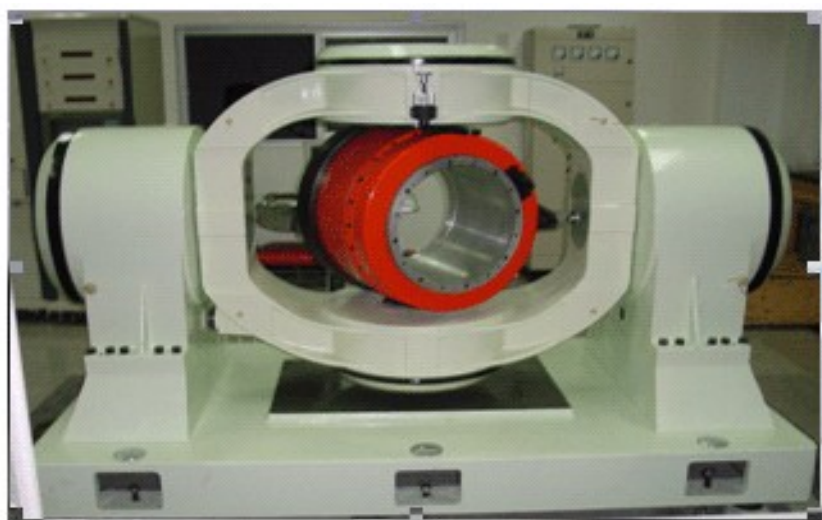
仿真计算机输出的驱动信号经接口变换后驱动相应的物理效应设备；同时将操作人员或实物系统的控制输入信号馈入仿真计算机

### ➤ 物理效应设备

模拟复现真实世界的物理环境，形成仿真环境。其动态特性、静态特性和时间延迟都对仿真系统的置信度和精度产生影响，有严格的技术指标要求。

方案之一是采用伺服控制回路；

方案之二是在已存储好的数据库中搜索相应的数据，转换为相应的物理量。



## 三轴转台（角运动仿真器）

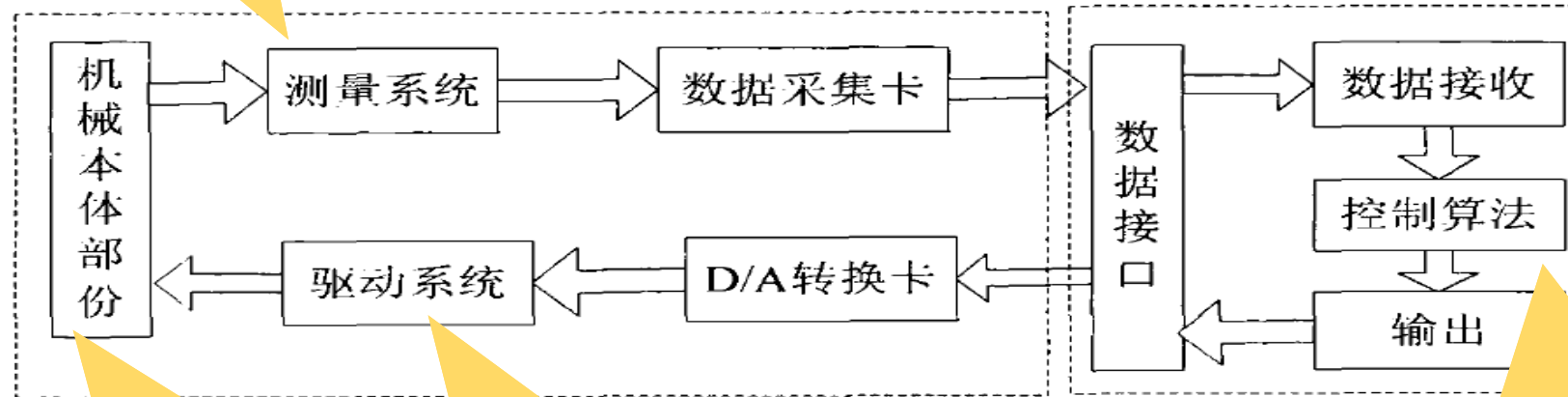
- 模拟复现弹体或机体的空间角运动
- 由伺服系统控制的框架系统组成，包括三个框架（分别为内、中、外框架）。内框架通过外框、中框和自身的转动，具有三个角运动的自由度
- 在框架上安装真实的角运动传感器，可测出与实际飞行中相同的角运动
- 三个框架的转角对应于欧拉角，也即姿态角，可以有不同的顺序。一般将外框转角对应偏航角，中框对应俯仰角，内框对应滚转角
- 在飞机飞行控制半实物仿真系统中，三轴转台模拟复现飞机姿态角运动，实时跟随由仿真计算机中飞行动力学数学模型解算出的俯仰角、倾斜角、航向角等基本指令信号，控制转台滚动、俯仰、航向轴系运动，模拟机体姿态角变化



位置传感器和测速电机，负责提供转台转轴的角度及速度信息

### 硬件功能部份

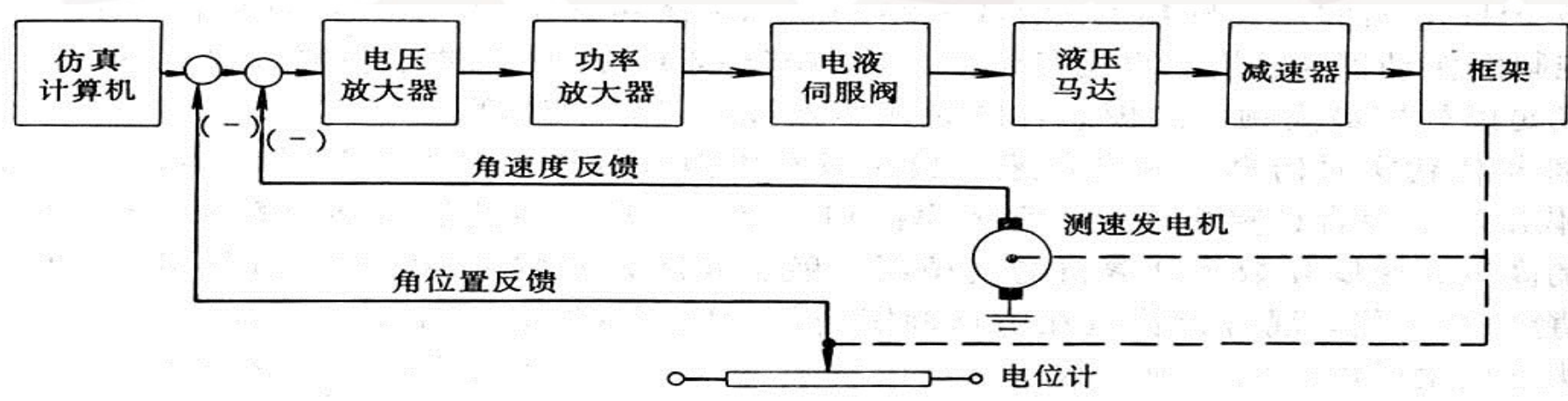
### 软件控制部份



三个框架和移动机座组成，为负载提供安装基准和实现滚动、俯仰、航向三轴系回转运动

提供动力，使转台能够驱动负载作所需的运动，完成相应的运动。有电动机和液压马达两类

根据仿真机控制指令，经控制律调节后，输出控制信号给相应框架的伺服阀，驱动伺服阀的阀芯运动，从而控制马达动作



电液伺服系统工作原理

# 目标模拟器

- 目标模拟器主要用于模拟生成目标仿真环境

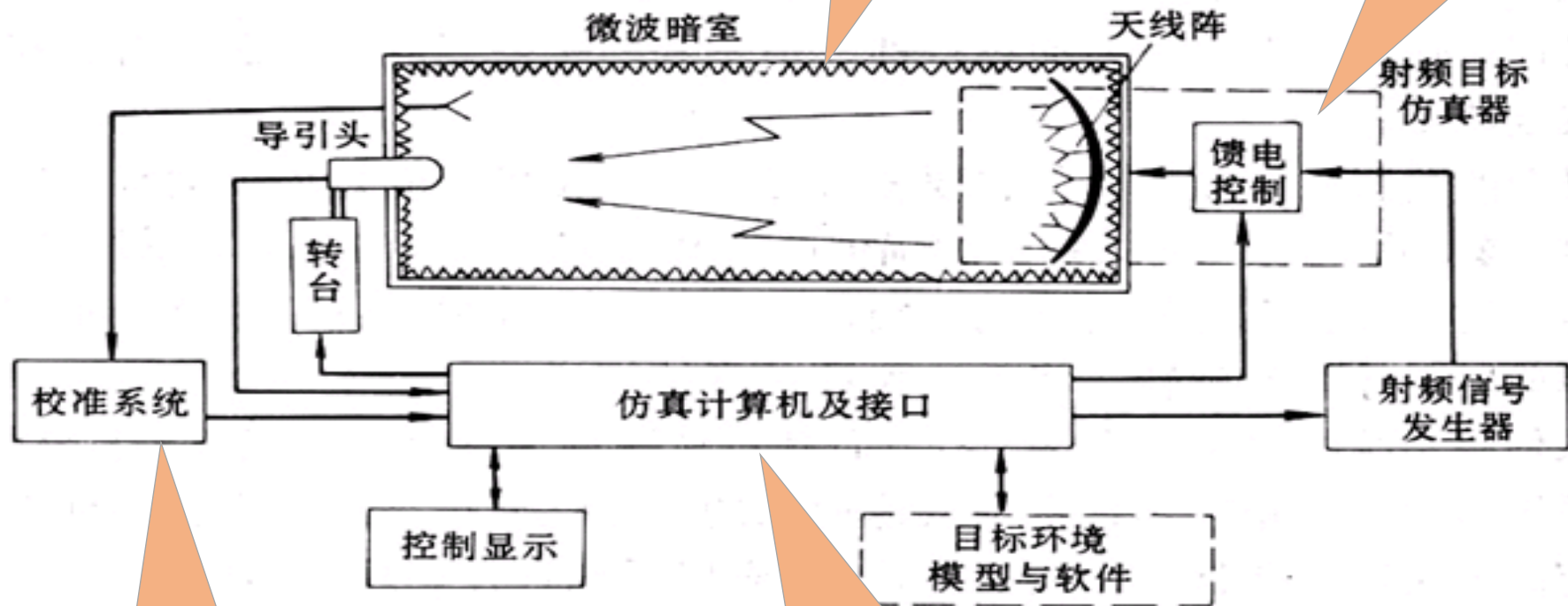
- 电磁效应仿真系统



- 光学效应仿真系统



# 天线阵列式射频仿真系统



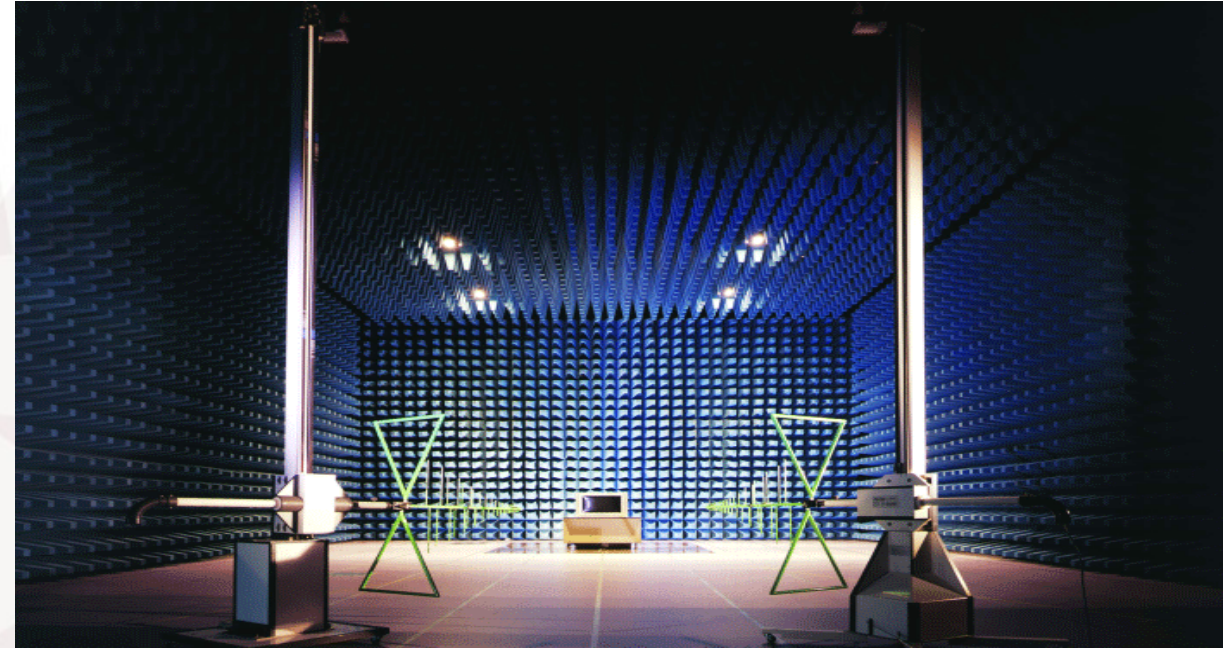
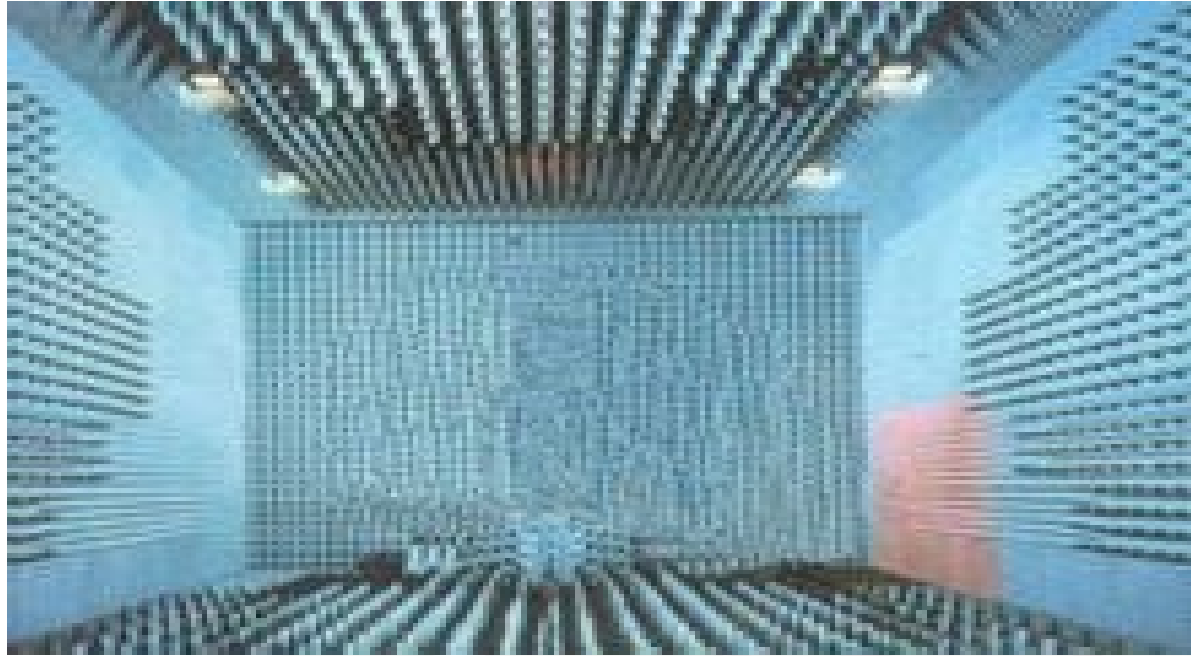
背景

目标和干扰，提供辐射目标及背景射频信号

校准目标辐射单元的空间位置及射频参数

实时控制射频信号发生器、射频目标仿真器、目标环境数据、监控显示设备





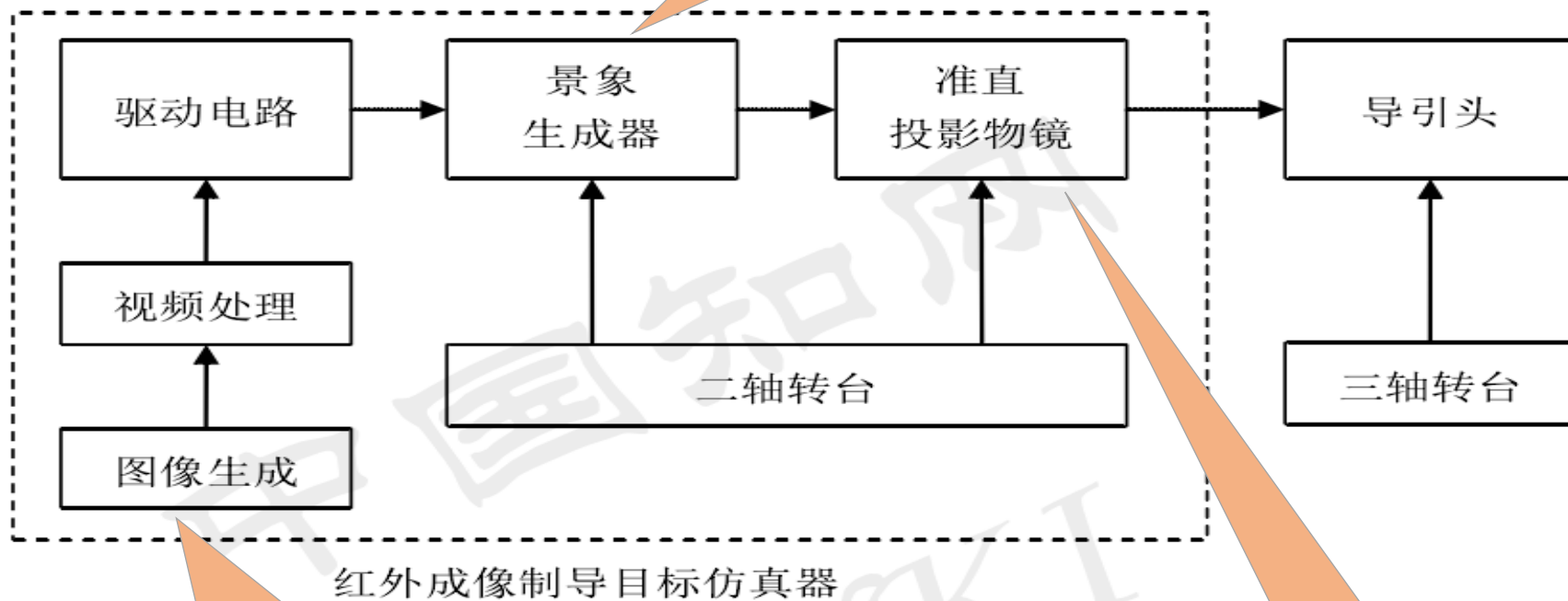
# 红外目标仿真系统

产生动态红外图像, 模拟目标和背景的几何图像、红外辐射特性、运动特性等

红外CMT

电阻阵列

激光二极管阵列投影仪

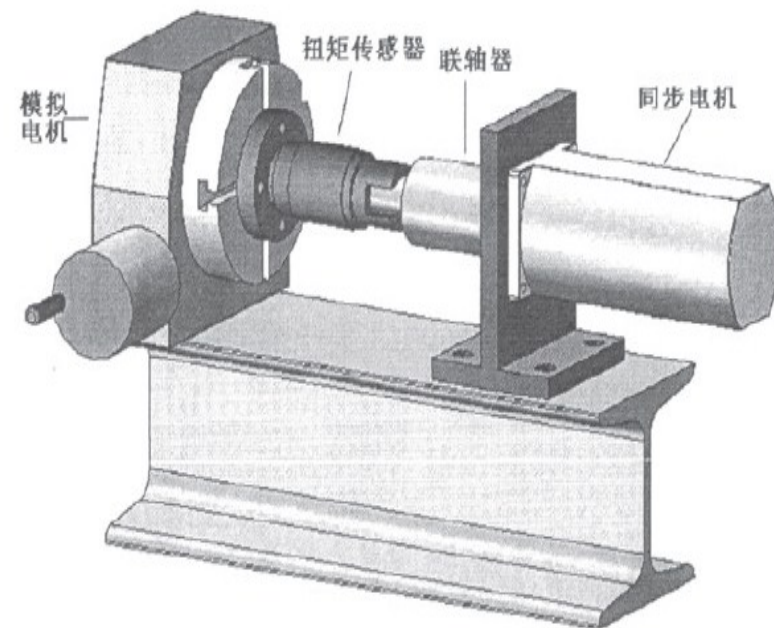


模拟目标、背景、干扰, 生成红外视频信号

成像至无穷远处

# 负载模拟器

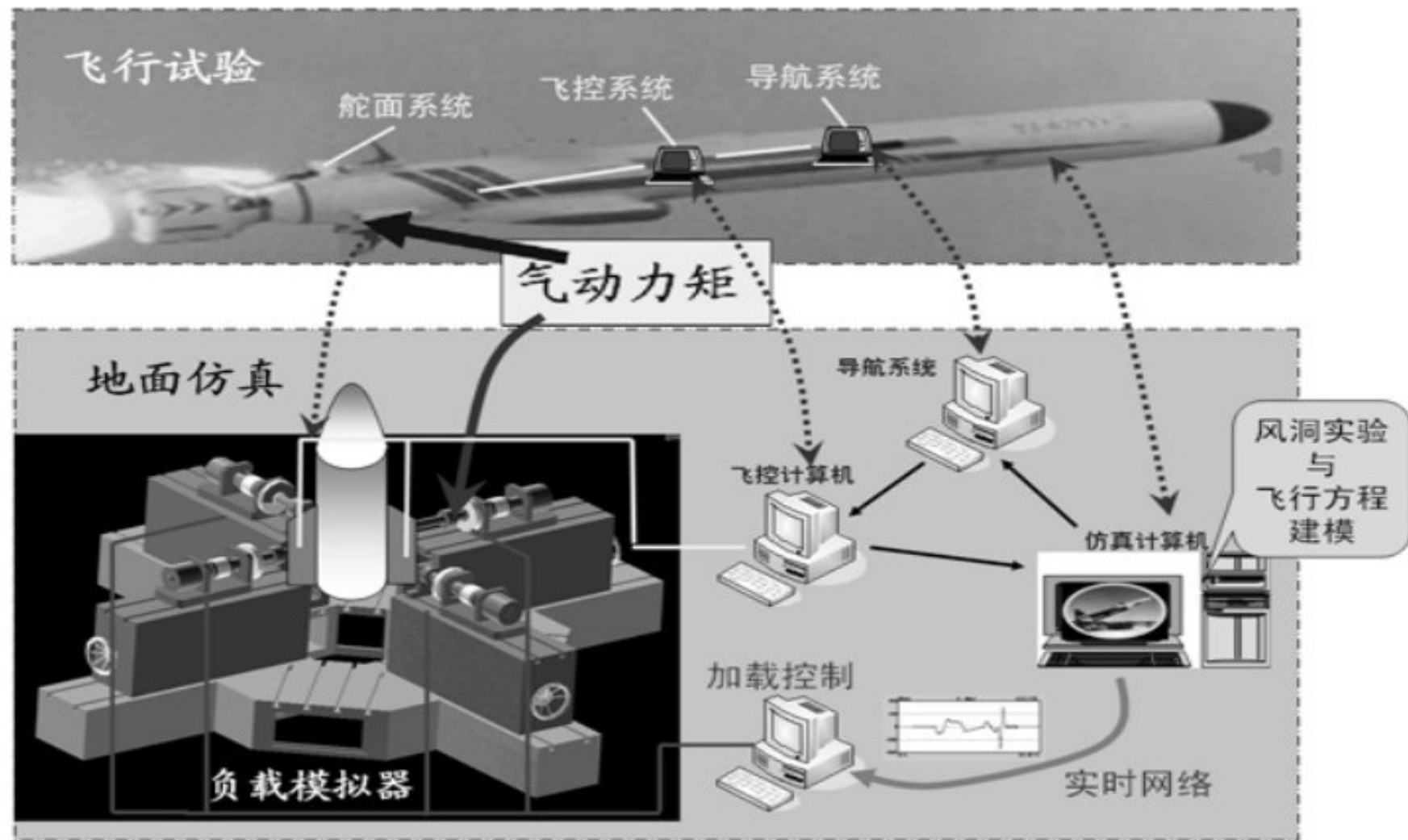
- 飞行器靠舵面偏摆校正航向，舵面受到变化的负载力矩（惯性力矩、阻尼力矩、空气动力矩）作用，负载力矩随飞行条件的变化而变化。舵机系统要能克服负载力矩的影响，使飞行器按预定轨迹飞行
- 负载模拟器是对舵机进行地面加载测试的装置，在实验室条件下模拟空中飞行时舵面的负载情况，考核舵机系统的性能
- 负载模拟器能够验证舵机性能，是进行半实物仿真的装置



电动负载模拟器

## 功能:

对飞行器的舵机位置伺服机构进行地面加载，在地面飞控系统半实物仿真试验中，模拟舵面在空中飞行过程中所受的气动力载荷情况，考核舵机系统的实际性能。

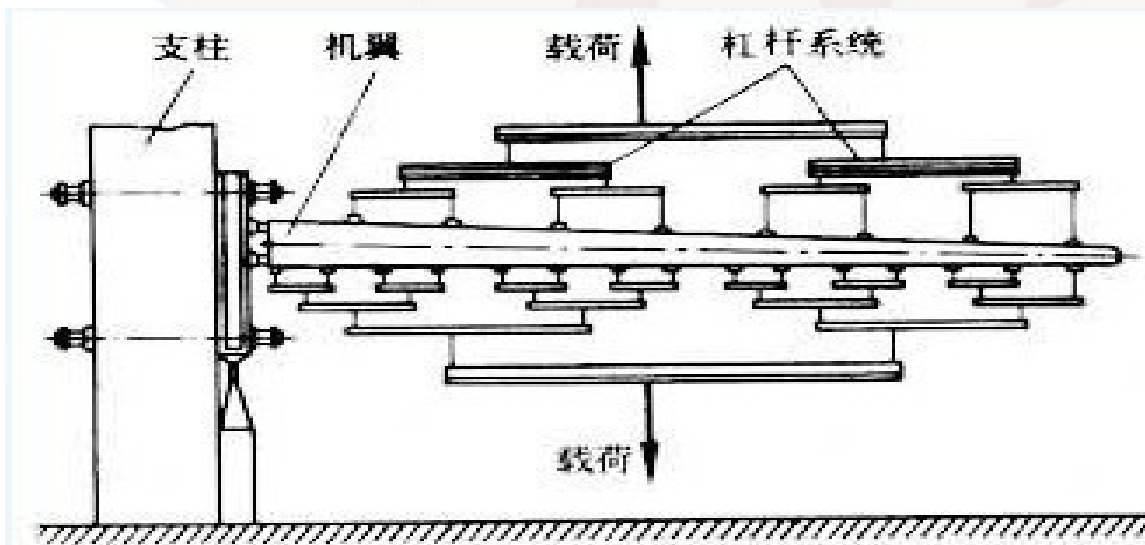




# 负载模拟器应用——静力试验

## 负载模拟器

静力试验是研究工程结构在**静载荷**作用下的强度、刚度和稳定性等静特性问题，是进行其他结构试验的基础。



利用杠杆系统将载荷逐级分层集中示意图



波音787静力实验图

# 负载模拟器应用——疲劳试验

## 负载模拟器

疲劳试验用以验证飞机或构件在**交变载荷**下的疲劳与断裂性能，其目的在于确定飞机的安全**使用寿命**。飞机全尺寸疲劳试验对于确定飞机使用寿命，了解其在使用过程的损伤发展情况具有重要意义。



EF2000飞机全尺寸疲劳试验

# 飞行仿真系统特点

飞行实时仿真系统一般都接入实物系统或有人参与。各种物理效应设备模拟生成实物系统所需的物理环境或人能感知的环境。

## □ 实物系统的接入与仿真环境的生成

## □ 实时性

### ✓ 定义

- 时间角度：实时仿真系统的逻辑推进时间和真实系统的运行时间推进一样；
- 信号反应角度：控制信号输入后，系统的时间响应特性能正确反映数学模型所描述的真实系统在同样控制信号输入时的时间响应特性

### ✓ 分布式仿真系统实时性影响因素

- 计算 计算机求解速度，数学模型粒度选择，仿真模型的算法选择，程序设计
- 通讯 通讯网络构建方式，通讯协议选择，通讯包设计
- 调度 操作系统的性能，软件程序的调度策略





## 月球旅行的训练计划

### RESEARCH TOPIC

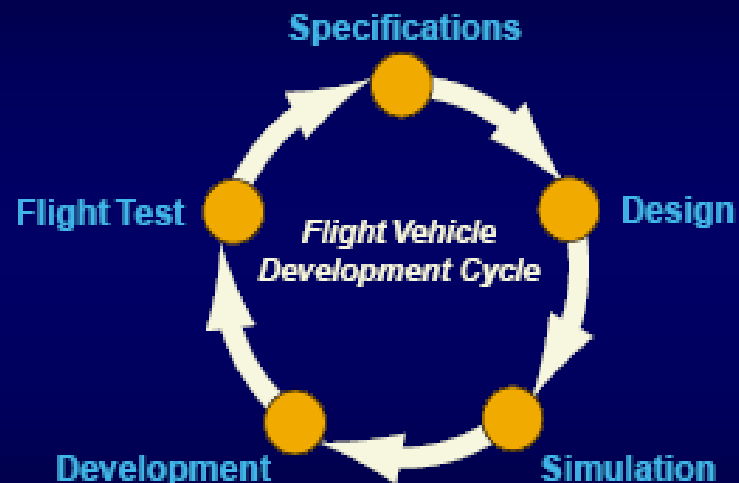
- 2018年9月SpaceX公布了自己的第一个月球旅行客户——日本企业家前泽友作。如果没有意外，他将在2023年乘坐“大型猎鹰火箭”（Big Falcon Rocket）进行一次昂贵、浪漫、危险重重的环月旅行。
- 前泽友作透露计划邀请6-8名艺术家、建筑师、设计师和其他有创意的人进行为期一周的绕月旅行。
- 2019年9月辞去公司首席执行官职务，腾出时间筹集资金和接受训练，准备绕月飞行。
- 2021年3月网上征集同游者。报名条件：通过进入太空来推进任何活动，能做一些更好、更大的事情；愿意并能够支持其他有类似抱负的宇航员。有30万人报名。
- 2021年5月，宣布将和一名助手搭乘俄罗斯12月8日发射的载人宇宙飞船前往国际空间站旅行，停留12天。两人6月开始接受为期3个月的相关培训，在莫斯科、日本JAXA、美国休斯顿的NASA训练。
- 2021年12月8日~20日,完成了国际空间站旅行计划。
- **你会报名参加前泽友作的绕月旅行吗？**
- **如果你为前泽友作的月球之旅制定飞行训练计划，结合所学知识，你的飞行计划包括几部分内容？**



## 4 飞行实时仿真系统分类及方法

- 数学仿真
- 软件在回路仿真
- 硬件在回路仿真
- 人在回路仿真
- 铁鸟仿真
- 飞行中仿真
- 卫星控制系统全物理仿真





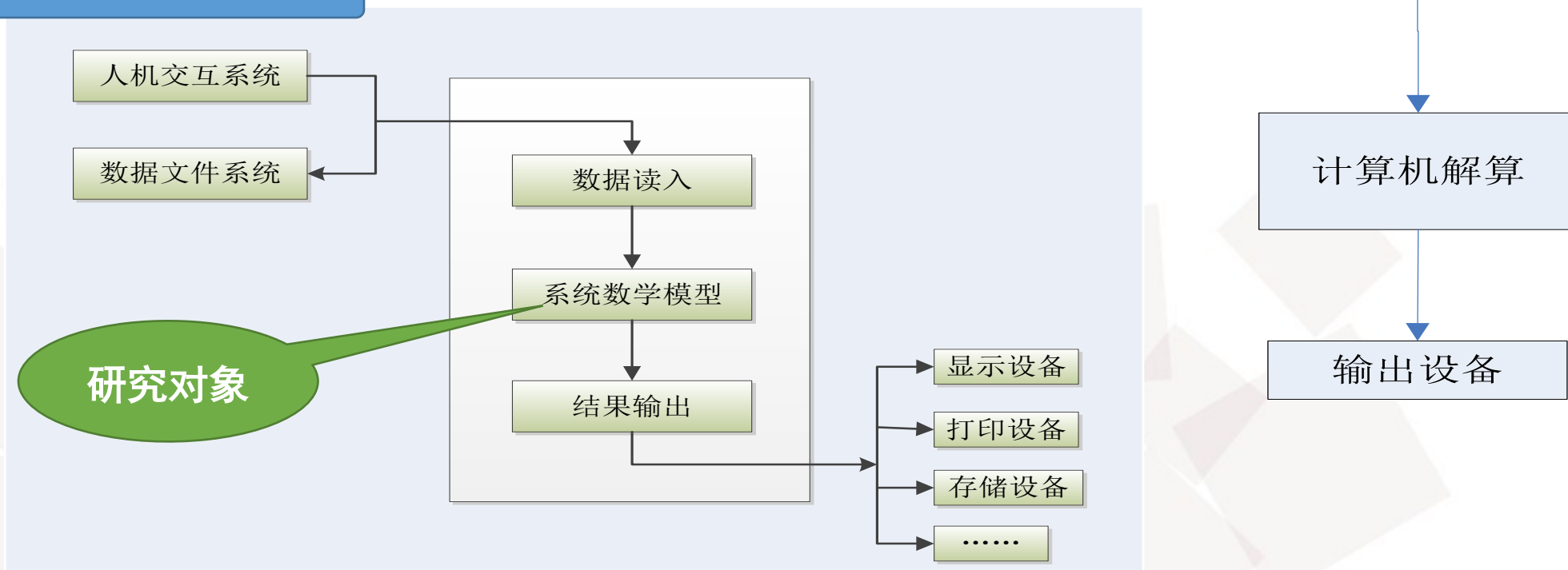
飞行器的研发过程

## 美国 AIAA 认为航空航天领域建模仿真包括以下内容

- (1) 模型在计算机上仿真；
- (2) 数学分析工具，如计算流体力学CFD；
- (3) 模拟飞行试验，如风洞试验；
- (4) 硬件在回路仿真；
- (5) 飞行员在回路仿真（带或不带硬件在回路仿真）；
- (6) 飞行中仿真；
- (7) 其他大规模地面试验。

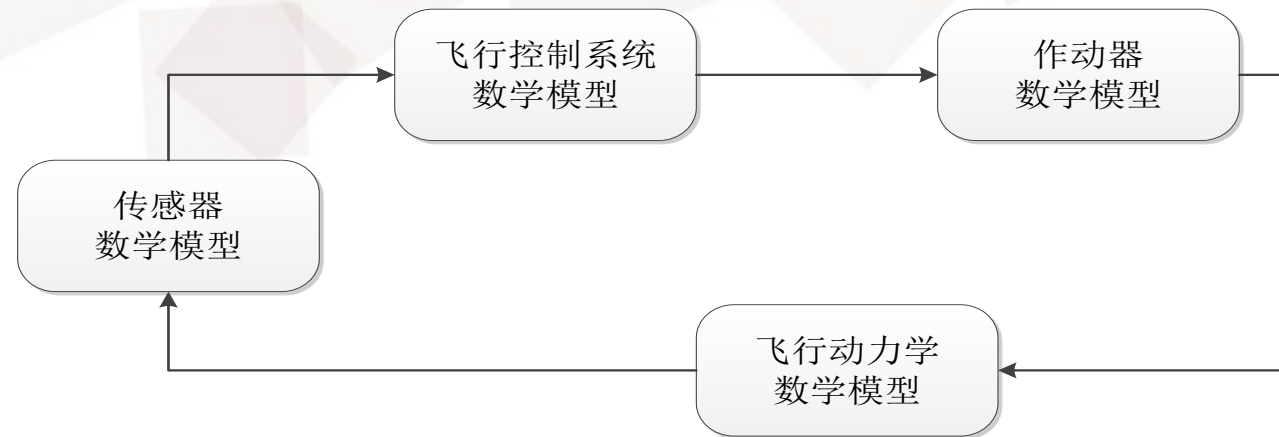
# 数学仿真

大数据时代的M&S?

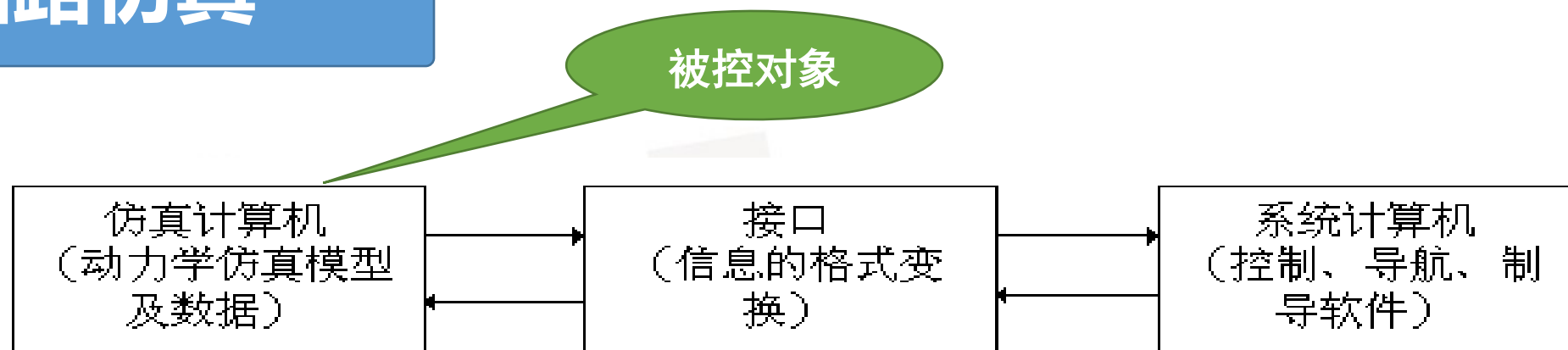


1、适用于研究开发、方案论证和设计阶段

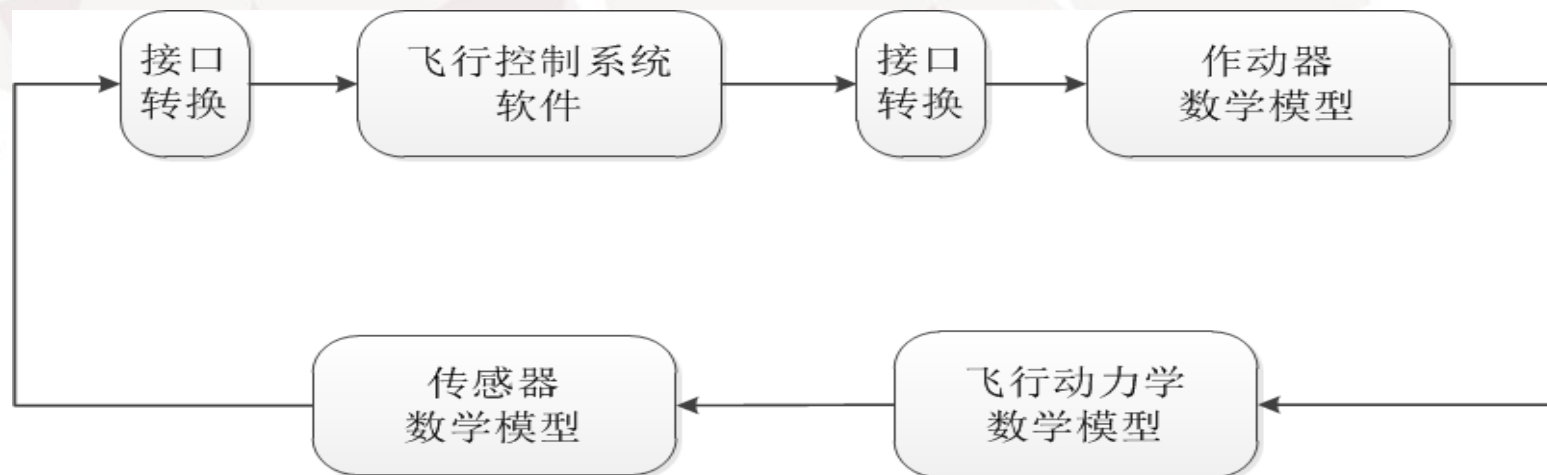
2、可以实时运行也可以非实时运行



# 软件在回路仿真

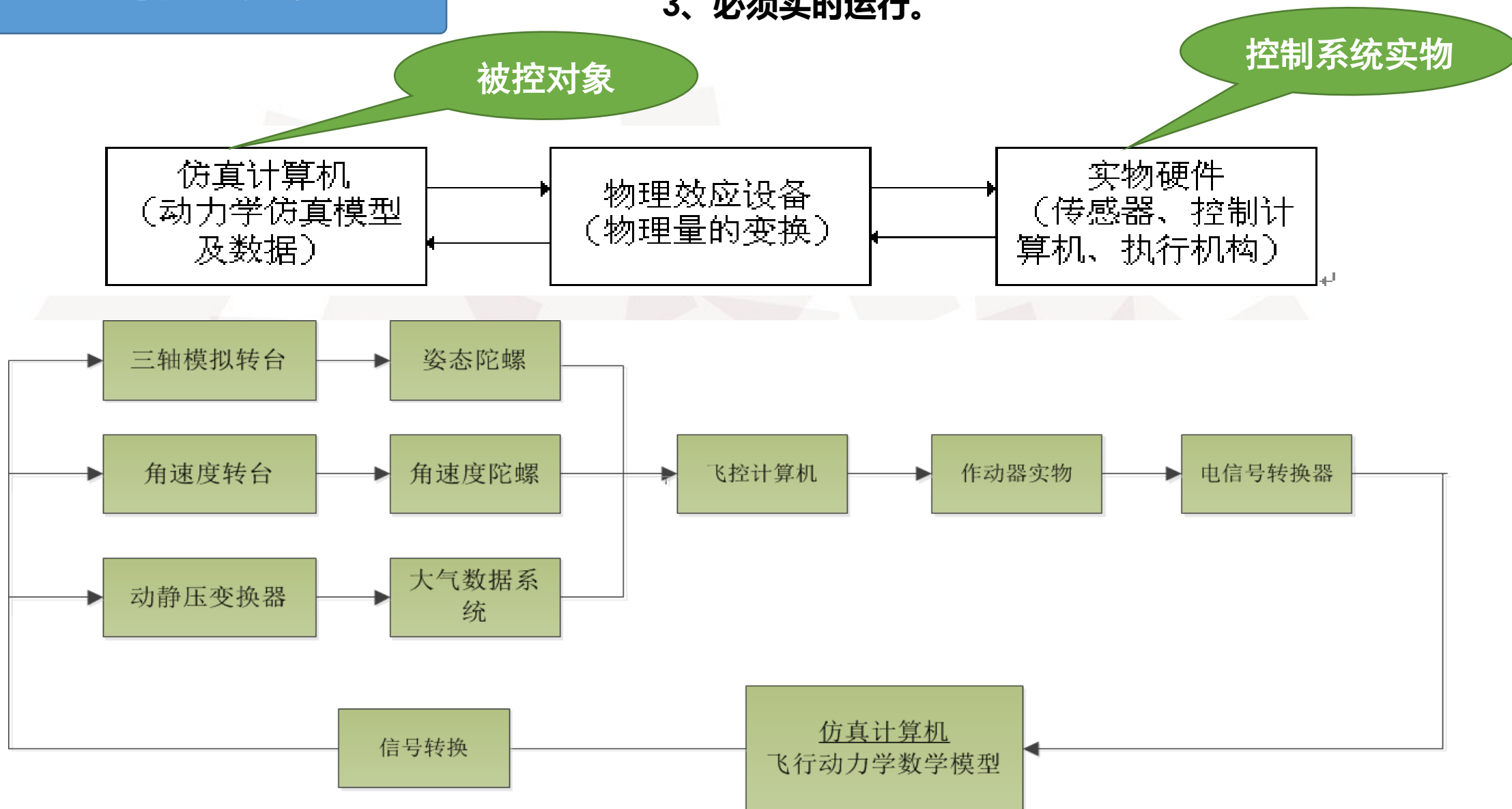


- 1、软件特点；
- 2、必须与应用对象结合；
- 3、必须实时运行。



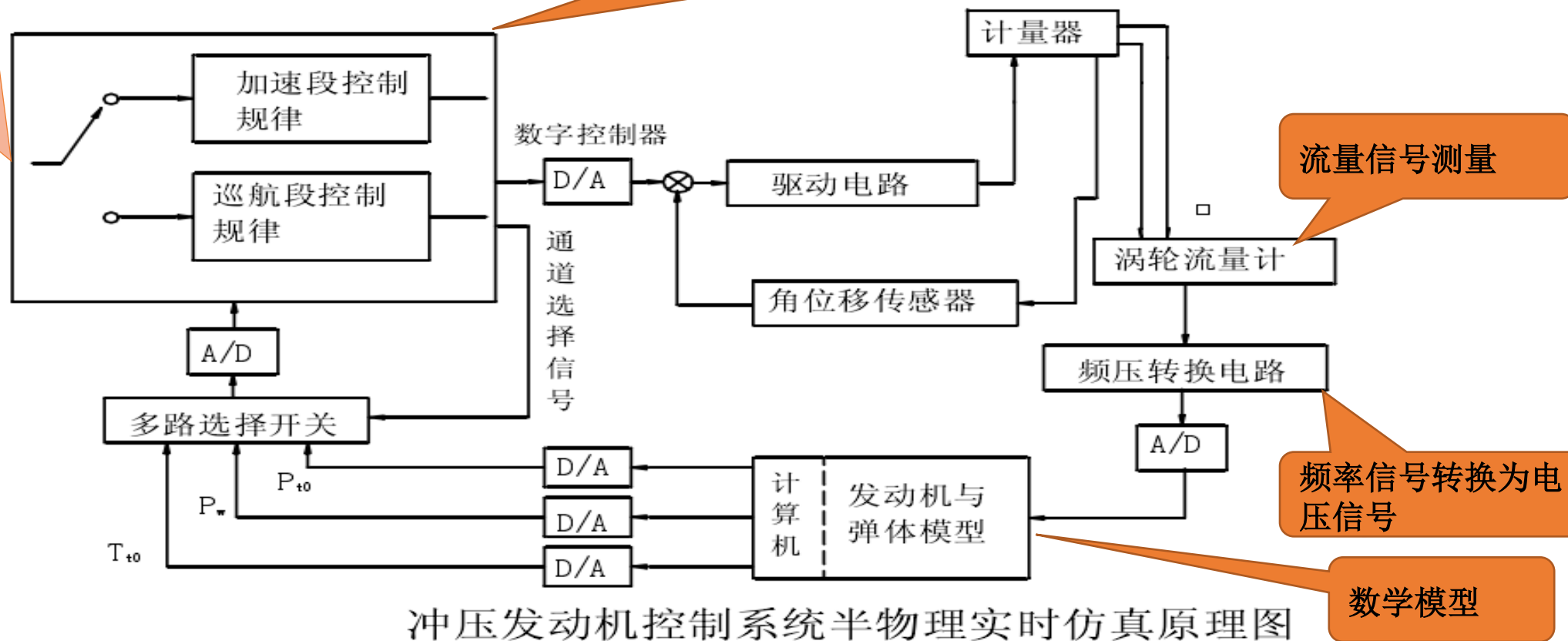
# 硬件在回路仿真

- 1、部分实物接入回路；
- 2、有相应的模拟生成传感器测量环境的物理效应设备；
- 3、必须实时运行。



### 控制算法:

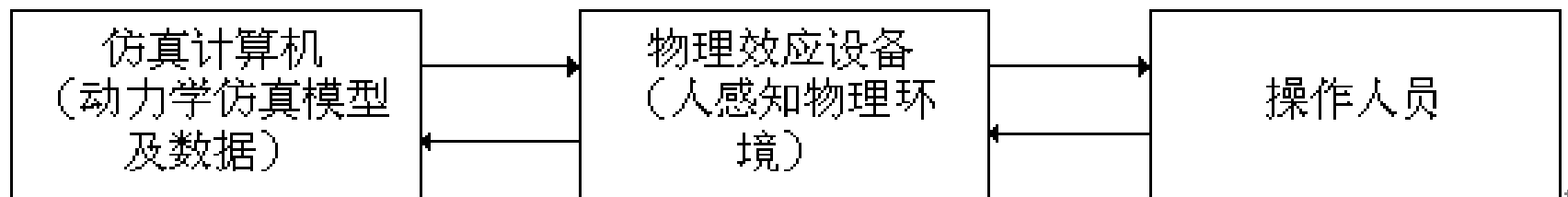
1. 控制器上电启动, 执行初始化程序, 发出控制信号
2. 发动机采集供油量信号, 供油量符合要求时发动机进入正常工作状态
3. 控制器计算飞行马赫数, 与巡航装订马赫数比较: 小于装订马赫数, 执行加速段模块, 按加速段理论供油量公式计算供油量; 大于装订马赫数, 执行巡航段控制模块



- (1) 试验中除了发动机以及弹体模型用仿真模型替代外, 其它部分均为研制的实际部件, 整个系统近乎于真实系统;
- (2) 研究控制系统中各组合件接口特性和工作匹配性;
- (3) 研究燃油调节器的动、静态特性;
- (4) 研究发动机控制规律和控制算法, 实现控制器的快速原型设计;
- (5) 检测产品控制器的硬件、控制时序及软件性能等。

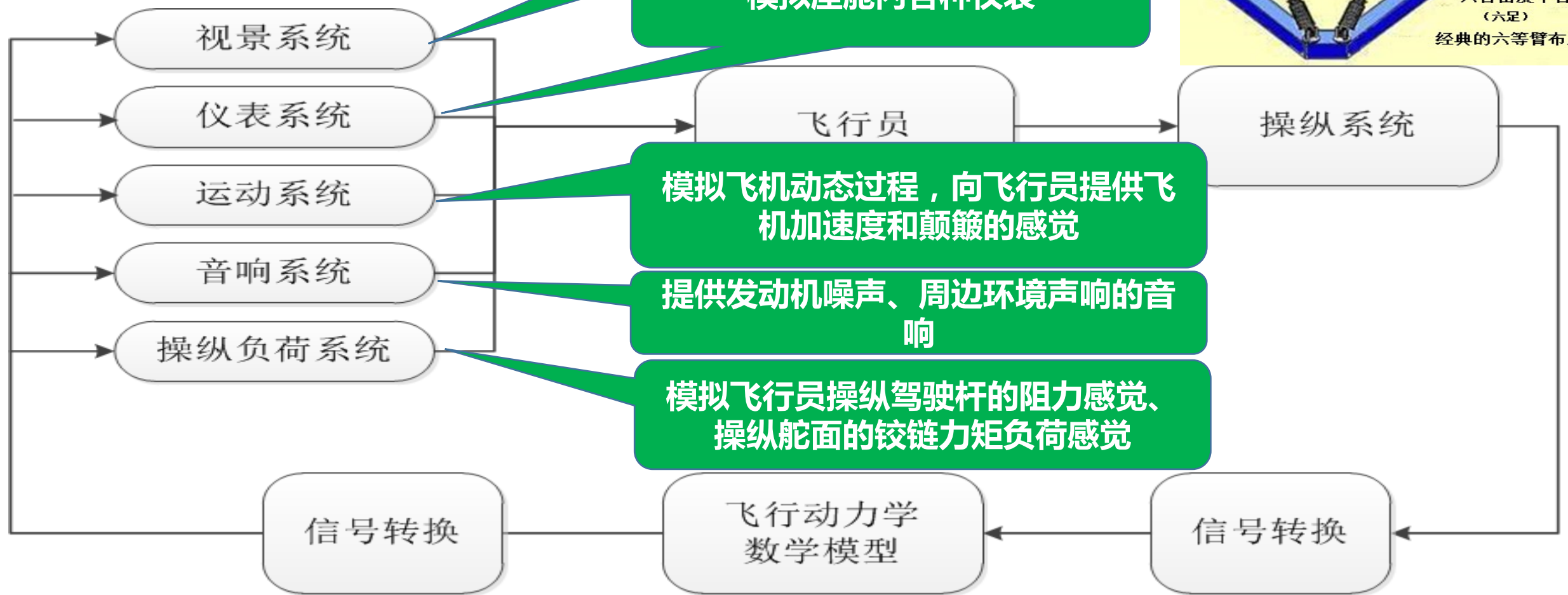


# 人在回路仿真



- 1、操作人员、飞行员或宇航员在系统回路；
- 2、有模拟生成人的感觉环境的各种物理效应设备；
- 3、必须实时运行。

# 典型人在回路仿真系统



# 铁鸟仿真



- 铁鸟是一个 1:1 模仿真飞机外形的钢结构框架，所有相关机载系统部件安装在上面，是地面飞行仿真设备，可用于新的飞行控制概念和系统的研究试验，也可模拟进行飞控系统、液压系统、电气系统、作动器的故障试验，与模拟座舱结合可以进行闭环试验。
- 铁鸟仿真系统包含除飞机蒙皮外壳之外的飞机所有部件，与真飞机一样在机体规定位置安装了飞机电气机械真实硬件设备，可以进行飞机分系统试验，如液压系统、操纵系统等。



# 铁鸟仿真



- 现代电传操纵系统铁鸟仿真包括硬件在回路仿真、软件在回路仿真、人在回路仿真，这时仿真计算机中只有飞行动力学和发动机的数学模型软件。
- 铁鸟仿真系统是飞机设计和试验的重要工具，例如由于飞控系统增益过高使操纵面偏转速率达到最大值而引起的极限振荡测试，操纵面作动器的时间延迟引起飞控系统不稳定的测试等。





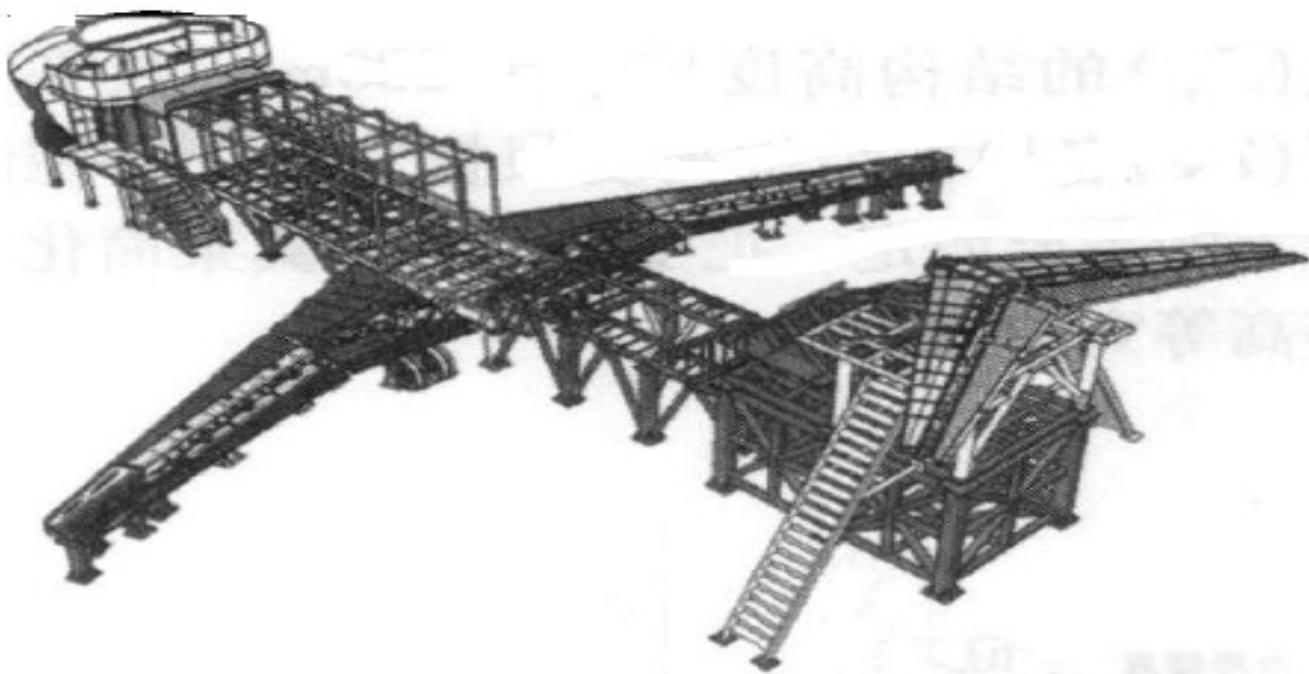
- ❑ 铁鸟试验台全称“飞控液压系统综合试验台架”，是飞机系统综合、优化设计、适航取证和交付运营、持续适航必不可少的关键试验设施。所有飞机在首飞前，都要在地面进行铁鸟试验，一方面确认系统的功能，另一方面暴露设计中可能存在的问题。把所有问题留在地面是铁鸟的使命
- ❑ 大客铁鸟在建造上采用下沉式设计，前后分别布置了两个深约2米、用来放置起落架的“坑”，这样整个铁鸟的高度可以降低2米。减轻了设计难度，增加了试验可操作性
- ❑ 铁鸟骨架是由一根根立柱、一段段横梁搭起来的大铁架子，上面是模拟机舱，下面是系统真实部件
- ❑ 大客铁鸟采取模块化设计，与生产数据发放工作高度并行，大客机体结构设计定型一部分，铁鸟台架就设计生产一部分，将设计更改成本降至最低
- ❑ C919铁鸟试验台安装了驾驶舱视景系统，使铁鸟上进行飞行员在环试验成为可能

大客铁鸟试验台





# 某支线飞机铁鸟台



- 支线飞机铁鸟主要考核支线飞机在空载、加载、故障等不同设计状态下，飞控、液压、供配电等系统的功能、性能是否符合设计指标和适航要求，为支线飞机的试飞提供依据
- 安装全尺寸试验件
- 台架有足够的强度、刚度
- 在加载的情况下，对飞机控制面、增升装置、起落架等，进行操纵、起落架收放试验和前轮转弯试验
- 驾驶舱安装全部飞控、液压显示器、指示器、操纵装置和航电系统主要部件（仪表、开关、信号装置等），供驾驶员地面操作练习用；安装简易视景系统
- 飞行控制面安装飞机真件，模拟气动力载荷。作动器、驱动装置的活动间隙能局部模拟飞机结构和飞机的弹性变形

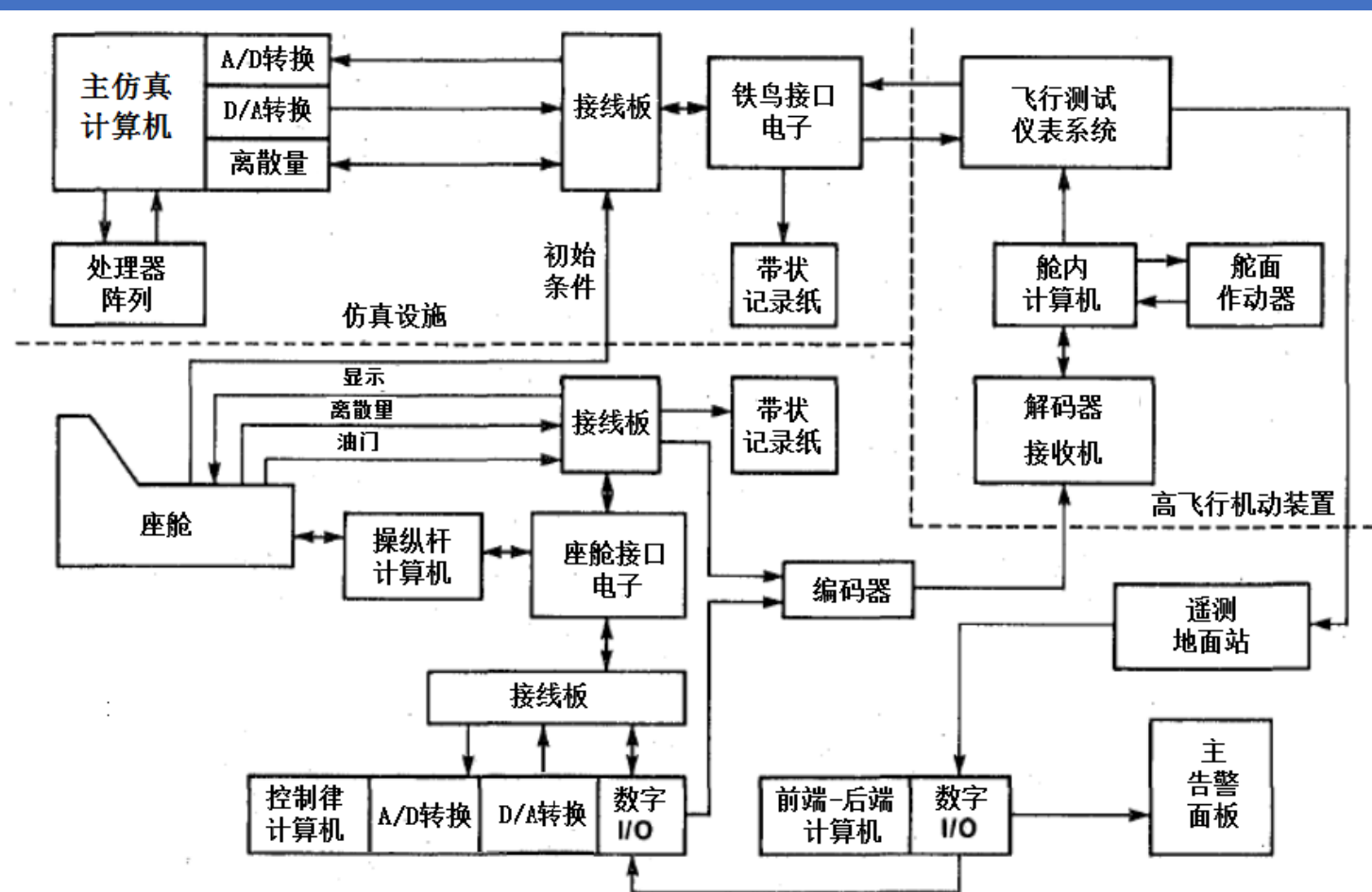






# 讨论题

## 铁鸟仿真系统原理分析



- 此铁鸟仿真系统的构成
- 各分系统的功能
- 各分系统之间的信号传输关系

# 飞行中仿真

- 各种地面飞行仿真系统不能完全代替试飞，因为仿真模型和数据不可能完全精确。
- 地面仿真形成的虚拟空中飞行环境给飞行员的视觉、动感、听觉、操纵负荷力都不如真实飞行感觉，有必要进行飞行中仿真。
- 地面仿真系统对飞行品质的初步验证是一种很好的工具，但不能充分精确提供视觉和运动感觉，对于巡航飞行是可接受的，但对于精确着陆这种地面仿真系统不具有足够的可信度。
- 仿真可以支持试飞，但不能完全代替飞行动力学的试飞。
- 飞行中仿真器是某种型号飞机，通过计算机软件实现模型跟踪或响应反馈，改变飞行动力学特性，用于仿真另一种型号飞机的飞行性能和操纵品质，这种试验飞机也称为变稳飞机。



## □飞机试飞仿真主要目的

- (1) 试飞计划制定；
- (2) 飞行包线扩展、确定与验证；
- (3) 飞机机动性测试；
- (4) 飞控系统软件校核与验证；
- (5) 飞机故障模式及其效应测试；
- (6) 极限环振荡；
- (7) 试飞员训练。

## □飞行中仿真两种类型

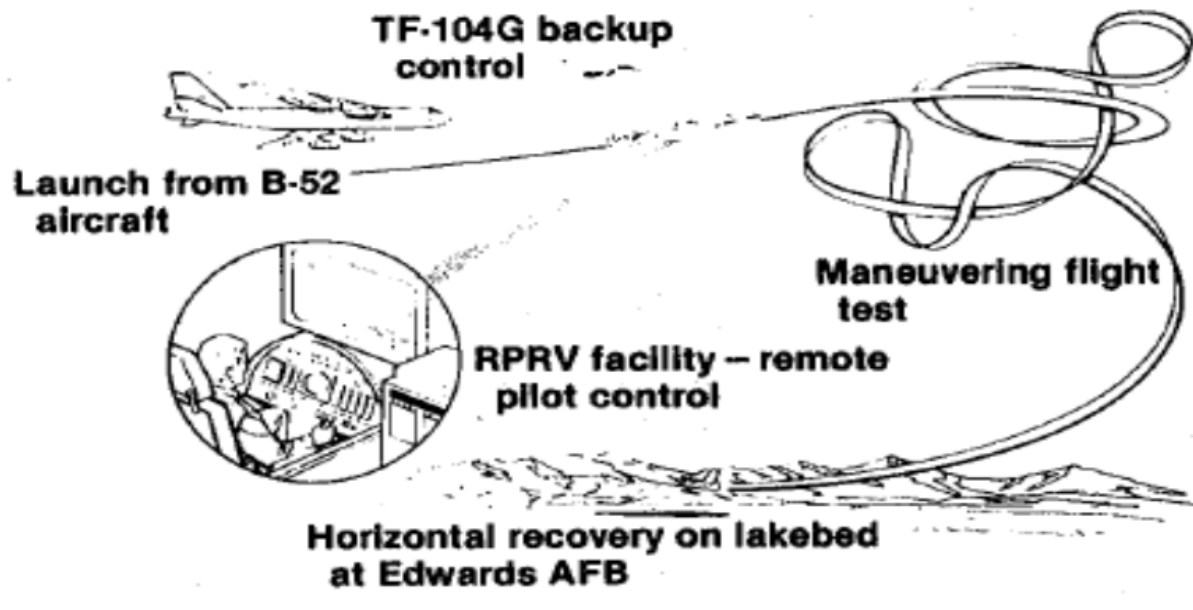
### ➤ 飞机动态仿真

- 检验飞机的动态响应，修改仿真飞机的动态特性，去接近设想飞机的动态特性（自然频率、阻尼比）
- 仿真飞机可以飞出另一种飞机的动态特性，变稳飞机接受各种飞控系统

### ➤ 飞机性能仿真

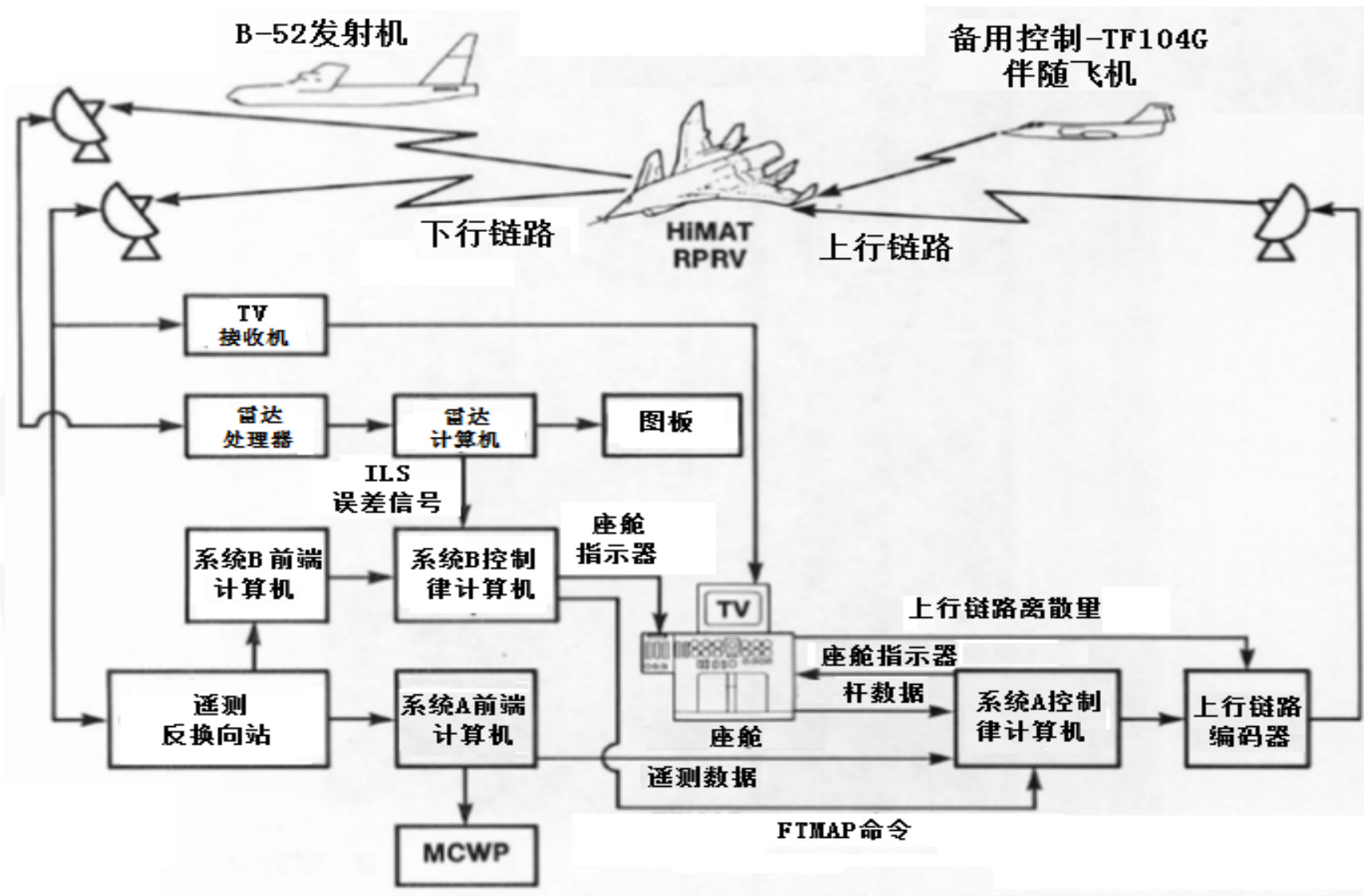
- 例如增大减速板改变升阻比
- 通用性较差，受仿真飞机性能限制





美国NASA Ames 研究中心高机动飞机技术

- 主要研究九十年代战斗机设计中可能采用的新技术，改善飞机机动性能。目的是省钱省时地完成危险性大、试飞员尚难承担的新技术试飞任务
- 要求飞机在12000米、M1.4条件下至少做3分钟的3g持续转弯的研究飞行
- 在9000米、M0.9条件下能做8g过载的持续转弯动作（同等条件下F-16能达到的机动过载为4.5g）
- 达到全尺寸战斗机的推重比和空载指标，以验证全尺寸战斗机的机动性能
- HiMAT飞行器由B-52飞机搭载，在约13700米高空、M0.7速度发射



HiMAT控制系统装置系统结构



# 卫星控制系统全物理仿真

- 卫星控制系统全物理仿真是采用气浮台模拟卫星本体作为控制对象，控制系统采用卫星控制系统实物所进行的仿真试验。气浮台依靠压缩空气在气浮轴承与轴承座之间形成的气膜，使试验载荷浮起。实现近似无摩擦的相对运动条件，以模拟卫星在外层空间所受干扰力矩很小的力学环境。
- 卫星全物理仿真系统组成
  - 卫星动力学由气浮台模拟；
  - 控制系统采用部分或全部实物部件组成，并置于气浮台上，组成与卫星控制系统相同的仿真回路，使用星上实际的控制规律，实际的运行软件，完成对气浮台的姿态控制；
  - 执行机构产生的控制力矩直接作用在气浮台上；
  - 姿态敏感器安装在气浮台上，实时测量卫星姿态和位置，并将数据发送到星载计算机。
- 卫星系统内部通过CAN总线和串口通讯，并通过无线信号进行星上与地面站之间的遥测遥控通讯



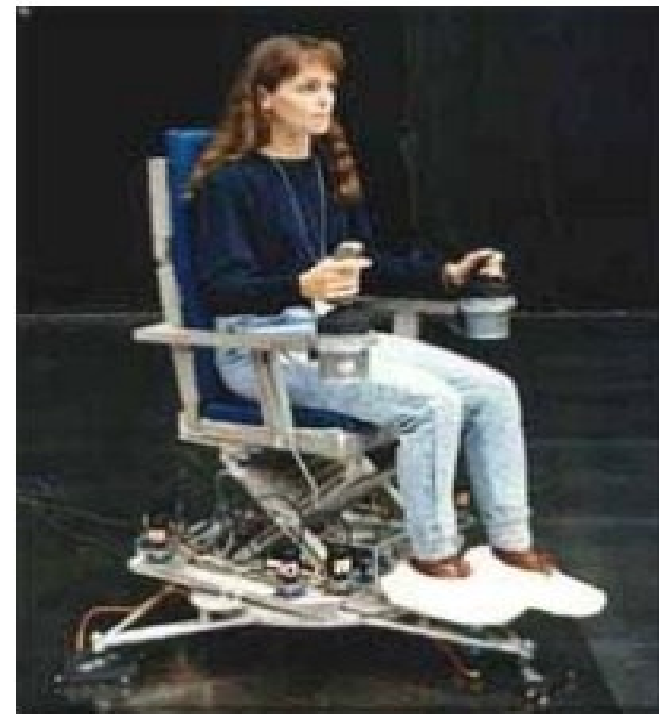




# 卫星控制系统全物理仿真

- 应用于航天模拟的气浮台主要分为平面气浮，球形气浮和混合型气浮
- 平面气浮台由光滑平台、支撑气足、供气系统等部分组成
  - 供气系统提供的压缩空气通过特别设计的气足喷向光滑平台，在气足与光滑平台之间形成气垫，气足上安装载荷平台，气足产生的支撑力承载试验载荷的全部质量，以抵消重力对载荷运动的影响。
  - 实现水平方向X、Y轴的平移运动和偏航旋转共三个自由度的运动



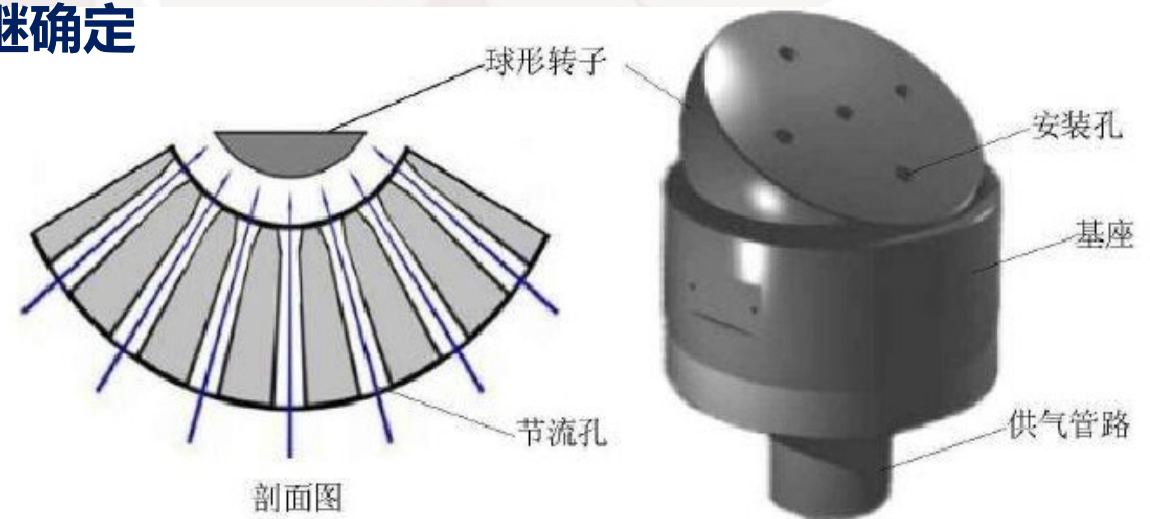


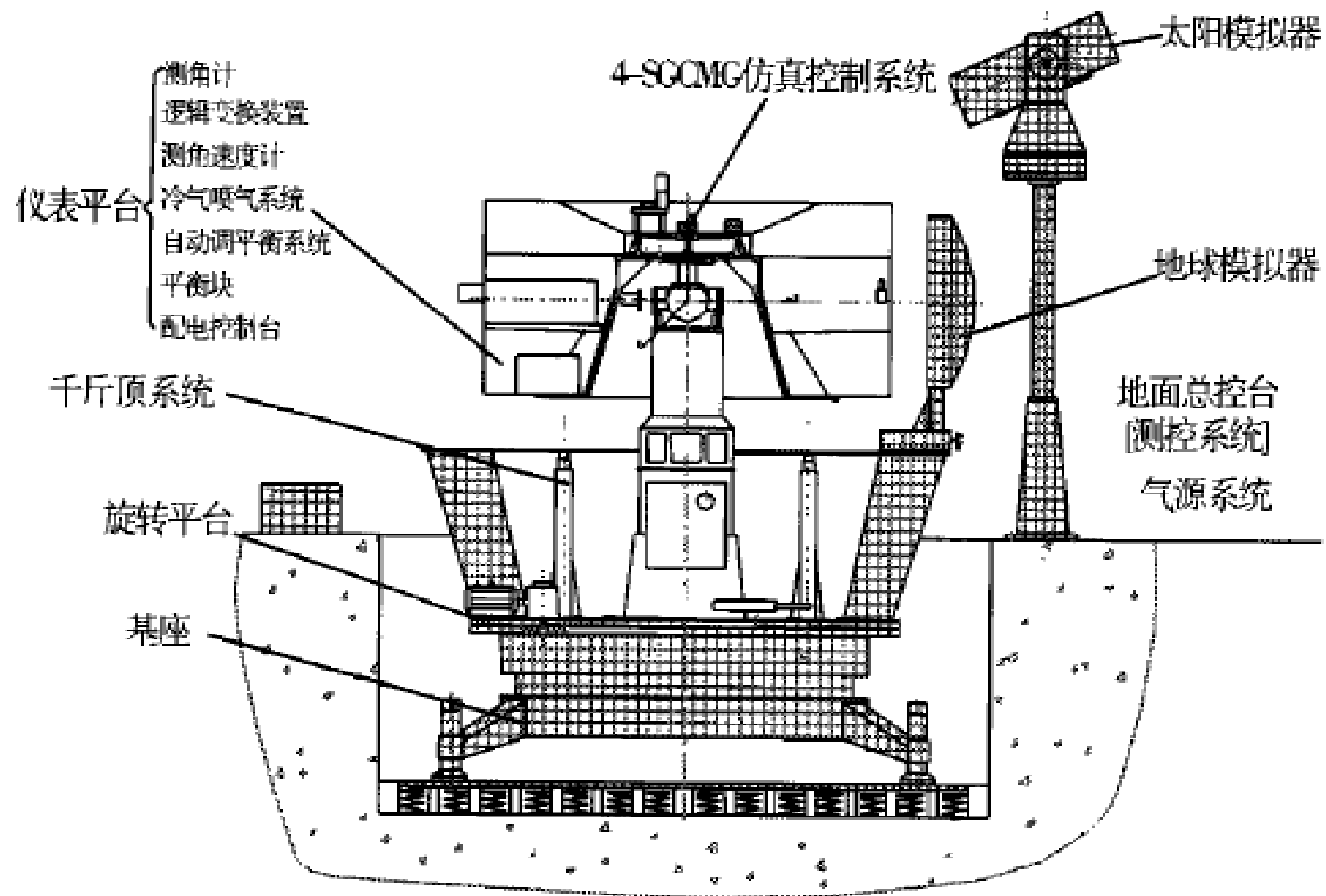
NASA 约翰逊航天中心的精度气浮台和体验座椅

## ●球形气浮台通过气浮轴承的极薄气膜构成稳定低阻尼状态来实现

- 半球形气浮轴承是气浮台的关键部件，由半球形轴承转子和球窝形基座组成。球形转子上安装实验平台
- 高压气体通过基座上的节流孔喷出，在球窝与球形转子之间形成一层薄薄的气膜，支撑半球形轴承转子，使之与其上安装的实验平台能够一同在三个轴上进行低阻尼的自由旋转，模拟太空中的零重力，低阻尼的力学环境
- 通过对尺寸、气压和间隙的设计和调整，气浮轴承所能负载的载荷重量可达数吨
- 强承载能力，自由的转动范围，微小的摩擦阻力使得以它为基础的三轴气浮台成为航天器姿态控制研究的最佳设备之一
- 同时，气浮轴承的性能也是气浮实验平台的最大限制，一旦选定了气浮轴承，实验平台的最大转动范围以及最大承载重量也就相继确定

半球形气浮轴承原理





北京控制工程研究所单框架控制力矩陀螺三轴气浮台



# 致谢感恩

---

THANKS TO

