



第八章 物理仿真

- 8.1 概述
- 8.2 仿真设备及实验原理
- 8.3 飞行仿真转台
- 8.4 仿真器

8.1 概述

(1) **数学仿真**：对实际系统进行抽象，并将其特性用**数学关系**加以描述而得到系统的数学模型，对数学模型进行实验的过程称为数学仿真。

数学仿真优点：方便、灵活、经济

数学仿真缺点：受限于系统建模技术，即系统数学模型不易建立。

(2)数字计算机仿真:

- 将系统数学模型用计算机程序加以实现
- 运行程序得到数学模型的解
串行仿真



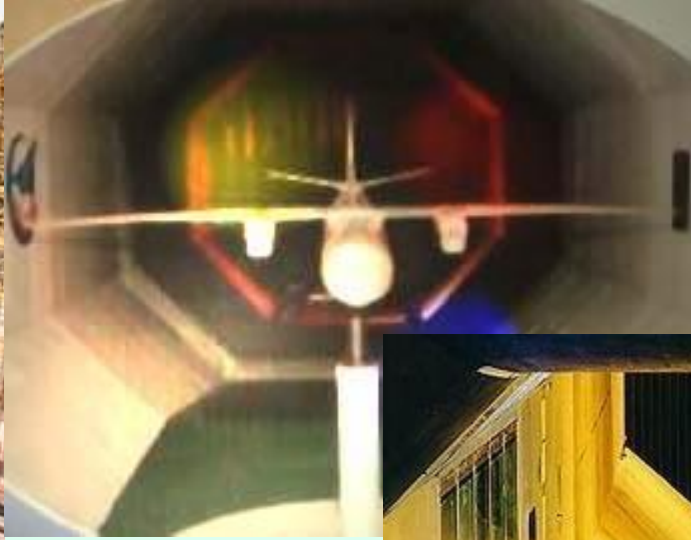
- ✓ 计算机技术的发展
 - ✓ 计算方法的发展
 - ✓ 仿真软件的发展



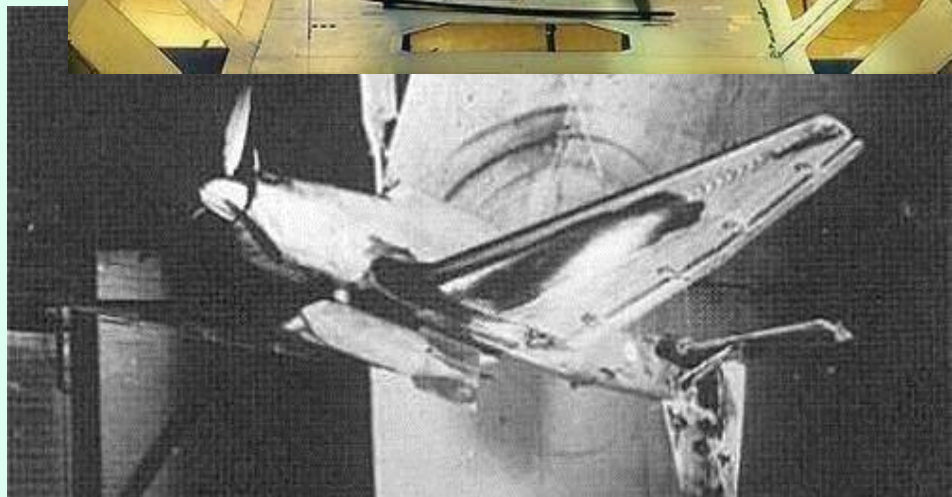
(3) **物理仿真**按照真实系统的物理性质构造系统的物理模型，并在物理模型上进行实验的过程称为物理仿真。

物理仿真的优点：直观、形象，也称为“模拟”。

物理仿真的缺点：模型改变困难，实验限制多，投资较大。



实物、缩比模型



● 汽车碰撞试验：检验汽车安全性





(4) 半实物仿真：将数学模型与物理模型甚至实物联合起来进行实验。

对系统中比较简单的部分或对其规律比较清楚的部分建立数学模型，并在计算机上加以实现。对比较复杂的部分或对规律尚不十分清楚的系统，其数学模型的建立比较困难，则采用物理模型或实物。仿真时将两者连接起来完成整个系统的实验。

当被仿真的系统中存在物理模型或实物时，必须进行实时仿真。物理仿真和半实物仿真均为实时仿真。



(5) 根据仿真时钟与实际时钟的比例关系分类

实际动态系统的时间称为**实际时钟**，
系统仿真时模型所采用的时钟称为**仿真时钟**。

实时仿真

仿真时钟与实际时钟完全一致，模型仿真的速度与实际系统运行的速度相同。

当被仿真的系统中存在物理模型或实物时，必须进行实时仿真。故**物理仿真和半物理仿真均为实时仿真**。



亚实时仿真（欠实时仿真）

仿真时钟慢于实际时钟，模型仿真的速度慢于实际系统运行的速度，也称为离线仿真。

超实时仿真

仿真时钟快于实际时钟，模型仿真的速度快于实际系统运行的速度。



(6)根据系统模型的特性分类

连续系统仿真

连续系统是指系统状态随时间连续变化的系统。

分为：集中参数系统模型，一般用常微分方程（组）描述；

分布参数系统模型，一般用偏微分方程（组）描述。

离散时间变化模型中的差分模型归为连续系统仿真范畴。

离散事件系统仿真

离散事件系统是指在某些**随机时间点**上**系统状态发生离散变化**的系统。例如：排队系统、库存系统。

与连续系统的主要区别

状态变化发生在随机时间点上, 这种引起状态变化的行为称为“**事件**”，因而这类系统是由事件驱动的；

“事件”往往发生在**随机时间点**上，亦称为随机事件，因而一般都具有**随机特性**；

系统的状态变量往往是**离散变化**的，系统的动态特性很难用人们所熟悉的数学方程形式描述，研究分析的主要目标是系统行为的**统计性能**而不是行为的点轨迹。

(7) 仿真的优点及应用

1. 优点

- 安全可靠，无破坏性/破坏性可控
- 经济效益好
- 缩短研制周期
- 可多次重复



● 2.应用/目的

在控制系统设计-使用的整个过程中，仿真技术都得到应用。

| | | | |
|--------|------------------|-----------------------|----------------------|
| 方案论证阶段 | 数学仿真 | 简化的数学模型 | 确定总体方案 |
| 设计阶段 | 数学仿真为主 物理仿真为辅 | 精确的数学模型 元部件为实物 | 确定元部件及控制策略 |
| 样机验证阶段 | 物理仿真为主 数学仿真为辅 | 控制器为实物 精确的数学模型 | 优化控制参数， 完善系统性能及功能 |
| 使用阶段 | 物理仿真为主 数学仿真为辅 | 控制器/元部件为实物 精确的数学模型 | 故障分析； 系统改进 |



一、半实物仿真实验

仿真实验是飞行控制系统工程设计研究中的重要手段。

半实物仿真是指，在地面上、实验室内创造一定的条件，复现出飞行器在空间运动的环境和状态，再把实际的飞行控制器或主要元部件，如自动驾驶仪、增稳系统、导引头、平台、捷联惯导系统、陀螺等联接起来，构成仿真回路，进行动态实验研究。



半实物仿真也称地面物理仿真。

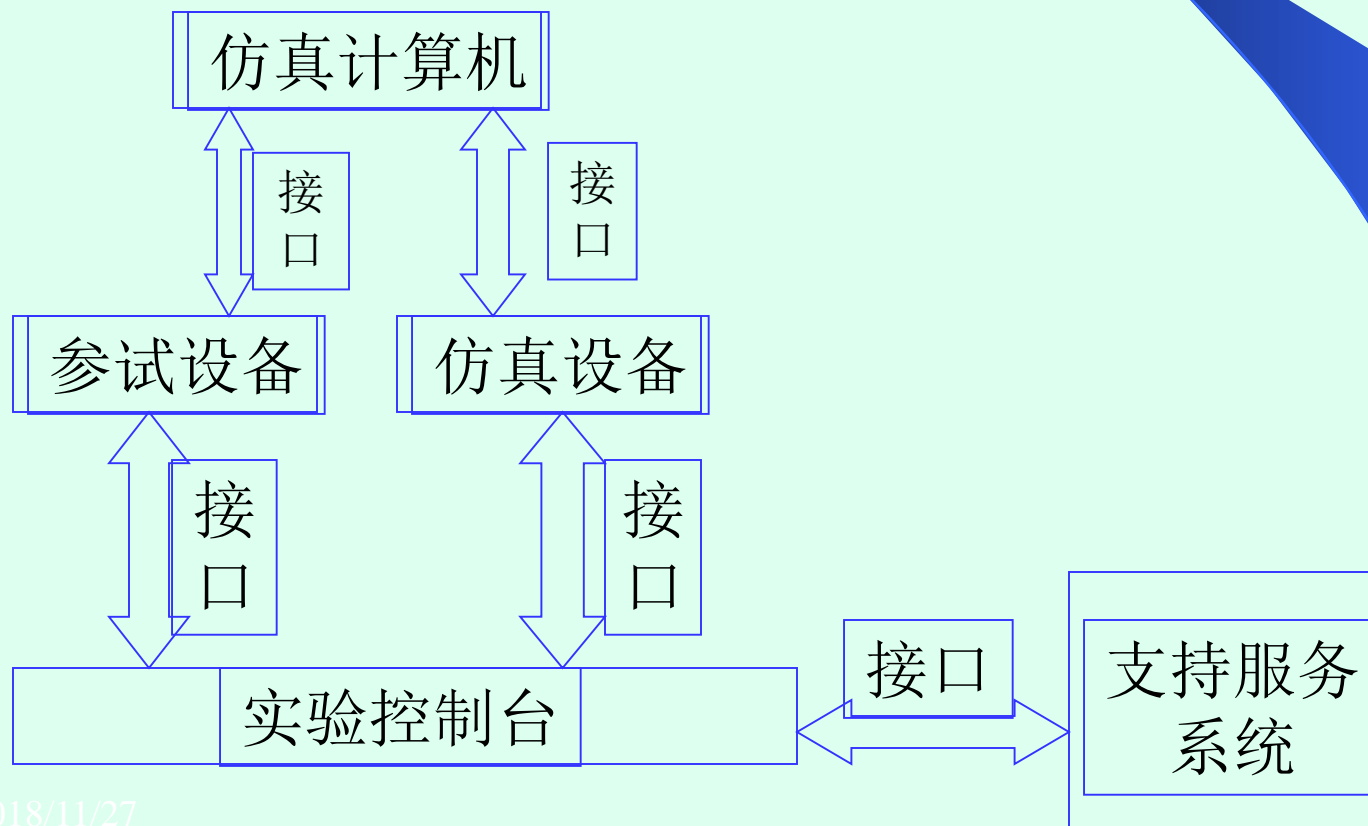
优点

实物直接参与仿真实验，可以避免难以准确建模的困难；
通过半实物仿真可以进一步校准系统的数学模型，可以检验飞行控制系统各设备的功能与性能。



二、半实物仿真系统的构成

半实物仿真系统一般包括仿真计算机、仿真设备、参试设备、各种接口设备、实验控制台和支持服务系统。





仿真计算机完成飞行器运动学和动力学方程的计算，将计算结果作为指令输出给仿真设备。

仿真设备按指令复现飞行器在空间运动的环境和状态。

参试设备即是待试验的飞行控制器或元部件，安装在仿真设备上，感知飞行器的各个状态参量并将测量结果通过接口送入仿真计算机。

实验控制台为操作者提供操作平台，完成仿真实验。

支持服务系统具有显示、记录、生成文件、打印等功能。

接口设备将上述几部分连接成一个整体。





8.2 仿真设备及实验原理

一、仿真设备

仿真设备也常被称为**模拟器**，是半实物仿真中使用数量和种类最多、也最重要的一类设备，在系统中用于模拟参试设备所处的真实环境中的某一种物理现象，其模拟或输出的信号是传感器可感知的各种物理现象和效应。

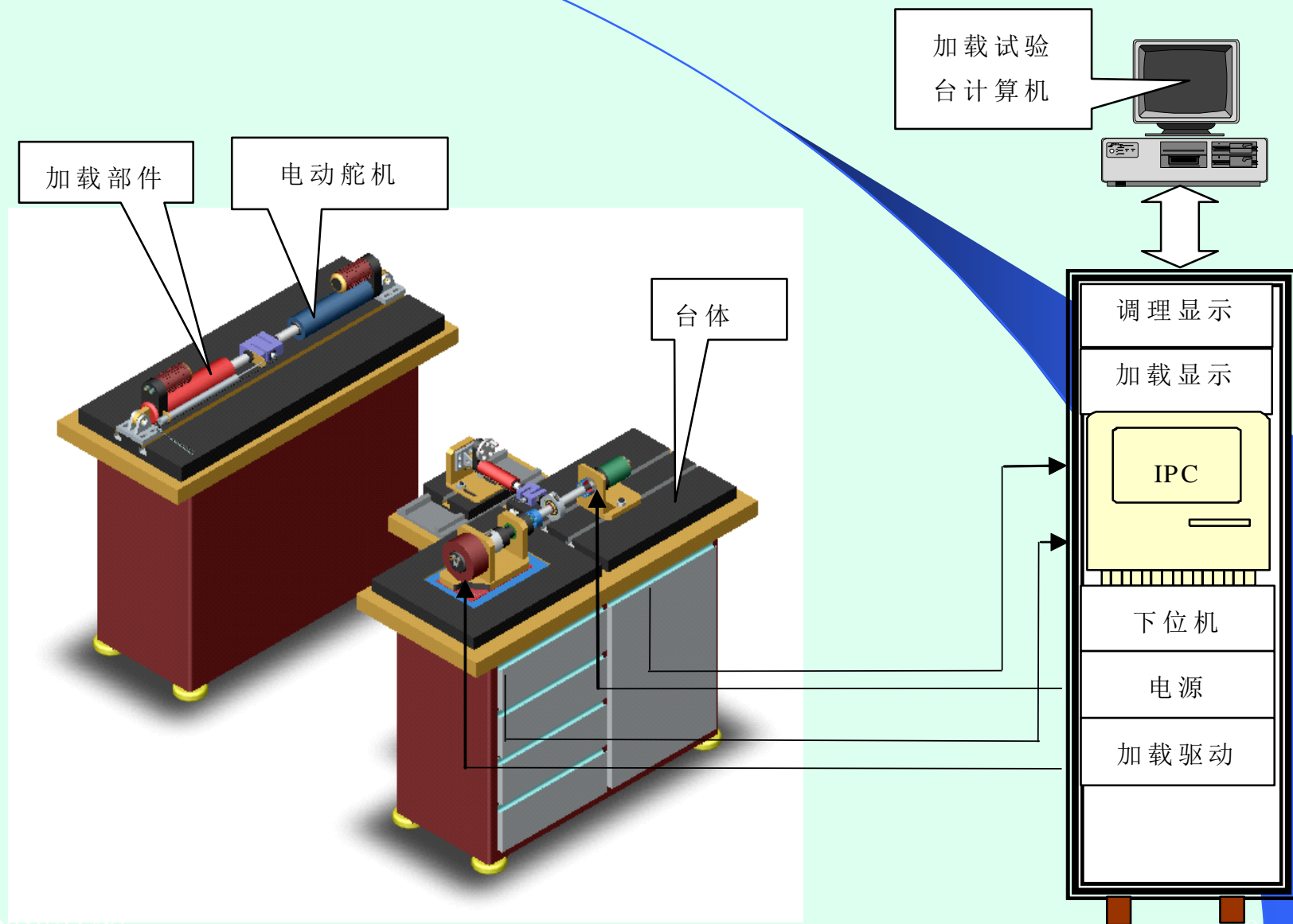
每种模拟器本身就是一个复杂的控制系统，需要花费大量的人力、物力、财力进行研制。



常用模拟器

| 模拟器名称 | 所模拟的物理现象/效应 | 对应传感器 |
|---------|----------------------------|-------------|
| 角运动模拟器 | 角度、角速度、角加速度 | 陀螺、加速度计 |
| 攻角模拟器 | 飞机迎角 | 迎角传感器 |
| 线加速度模拟器 | 线加速度 | 加速度计 |
| 负载模拟器 | 负载效应 | |
| 压力模拟器 | 空气压力/水中压力分布 | 气压传感器/水压传感器 |
| 射频模拟器 | 射频（电磁）环境 | 雷达导引头 |
| 红外模拟器 | 红外辐射的空间分布特性、光谱特性、空间运动的动态特性 | 红外敏感器 |
| 星模拟器 | 导航星的相对位置、星等及光谱 | 星敏感器 |
| 太阳模拟器 | 可见光 | 太阳敏感器 |
| 地球模拟器 | 地球的红外特性 | 地球模拟器 |

直线加载负载模拟器

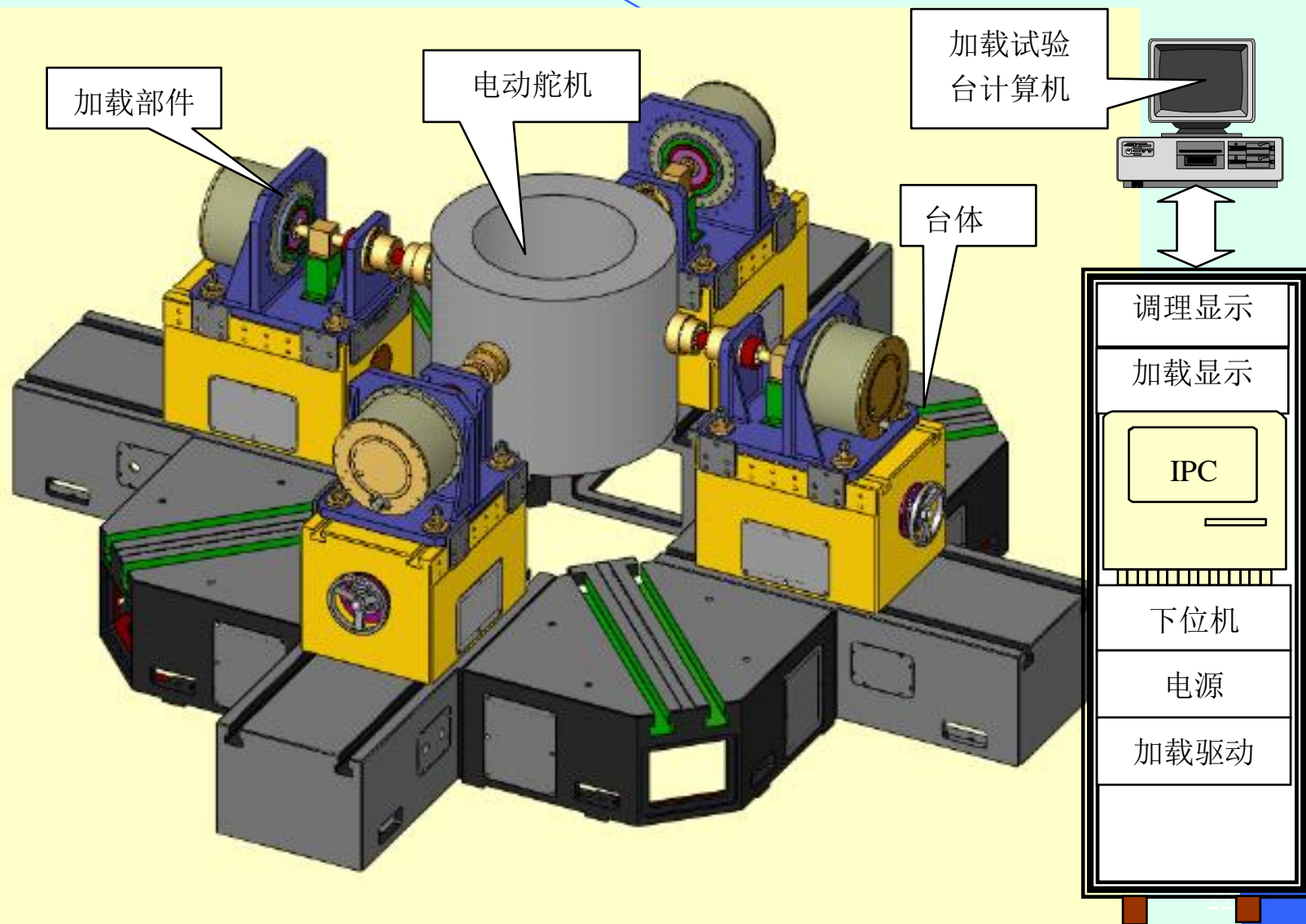


火箭发动机负载模拟器

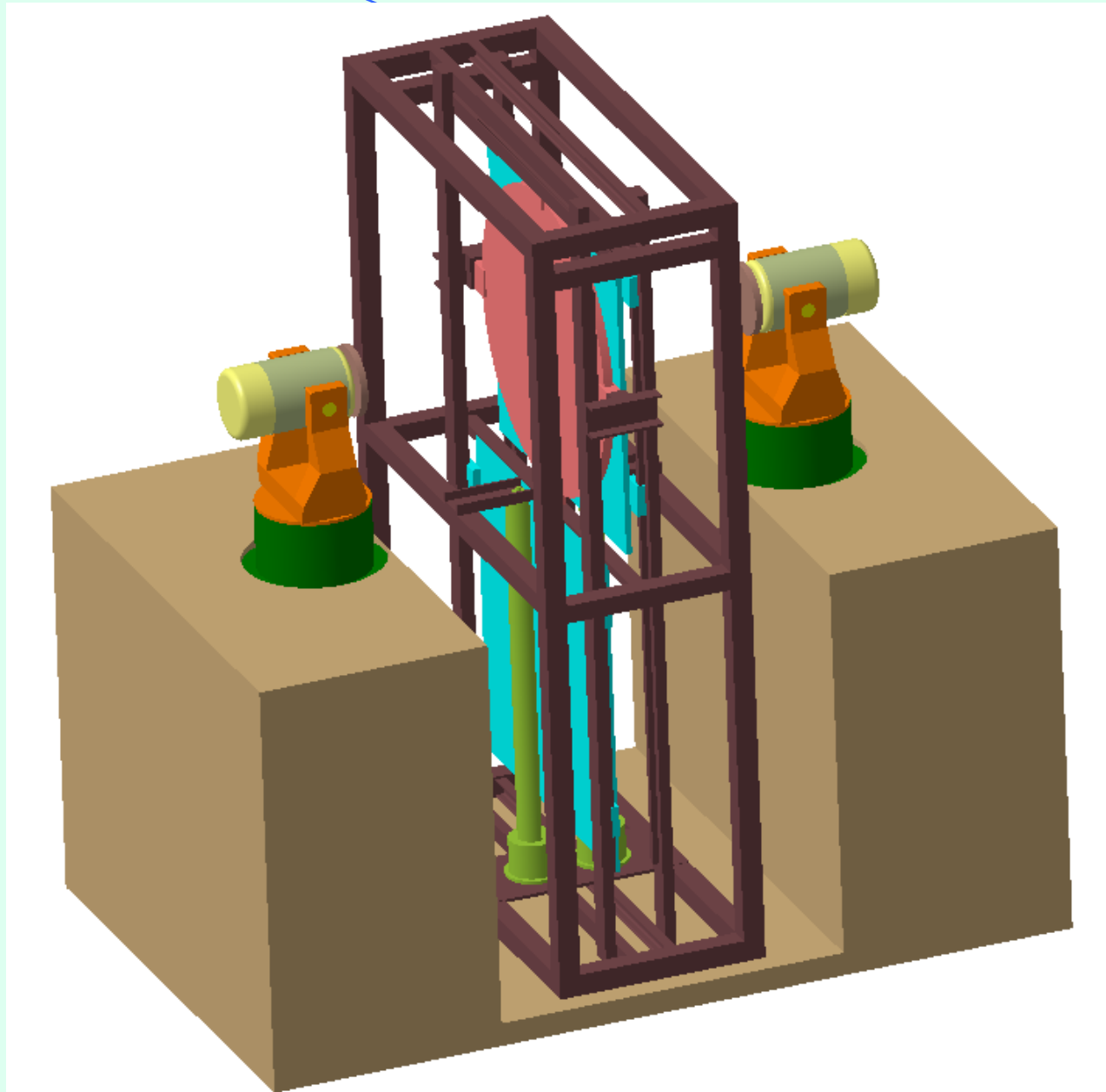
2018/11/27



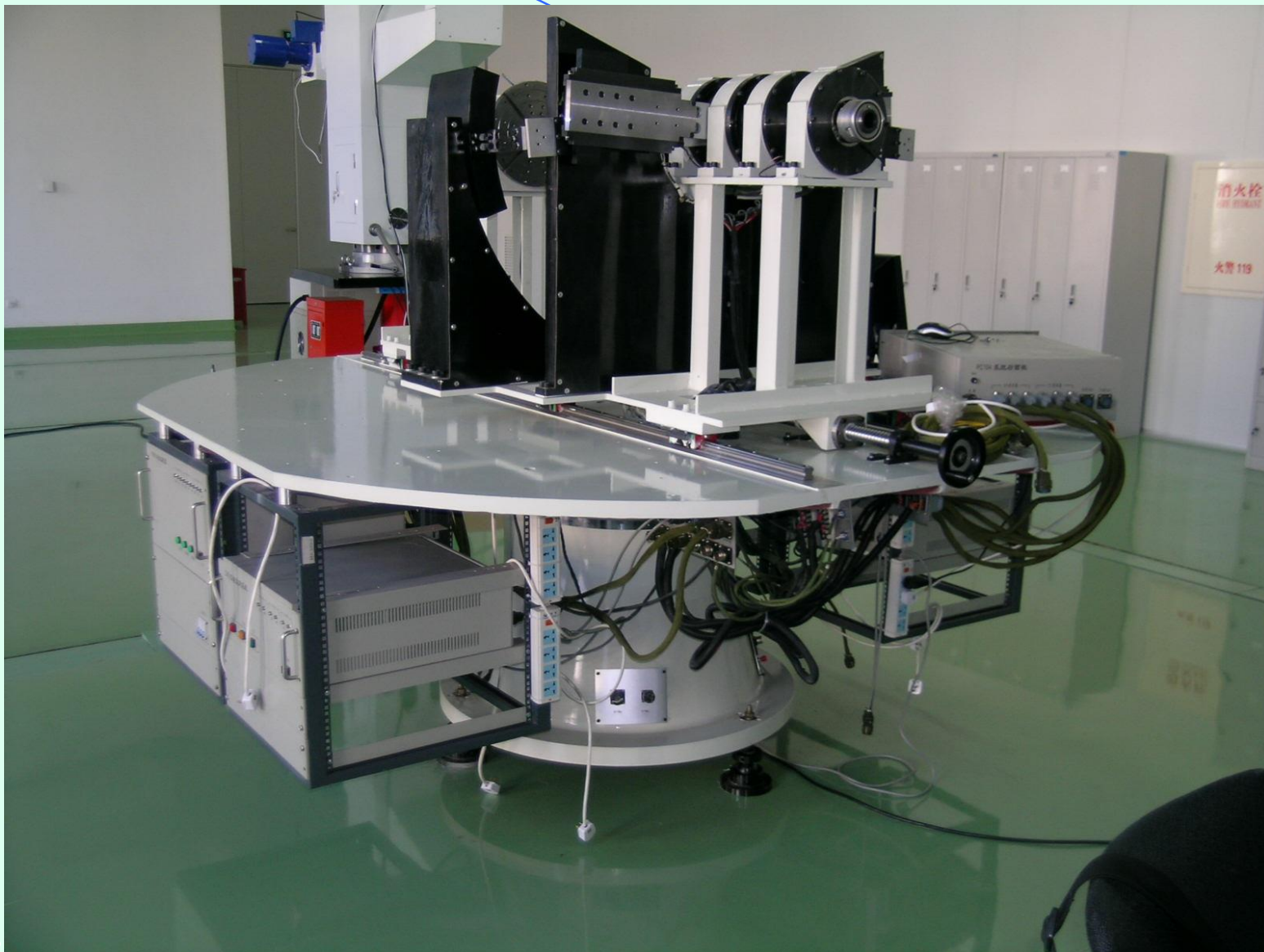
旋转加载负载模拟器



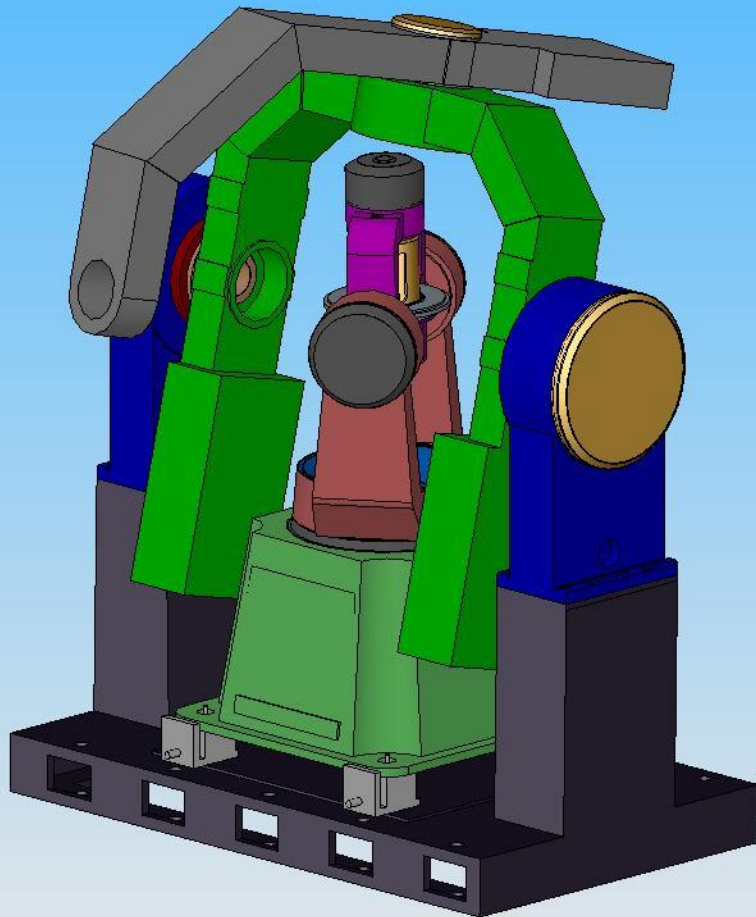
地球模拟器



地球模拟器



角运动模拟器



2018/11/27





角运动模拟器即是**飞行仿真转台**，用来模拟飞行器在空间的三个**转动自由度**。

飞行器在空间运动的状态参量都是**实际的物理量**，如角度、角速度、角加速度，而计算机输出的各运动参量都是以模拟的电压量或数字量形式给出的。必须把这些**电的参量**转换成相应的物理量，才能被控制系统的各种敏感元件，如角位置陀螺、角速度陀螺等所测量感受。三轴飞行仿真转台即是飞行器姿态运动参量的模拟变换装置。

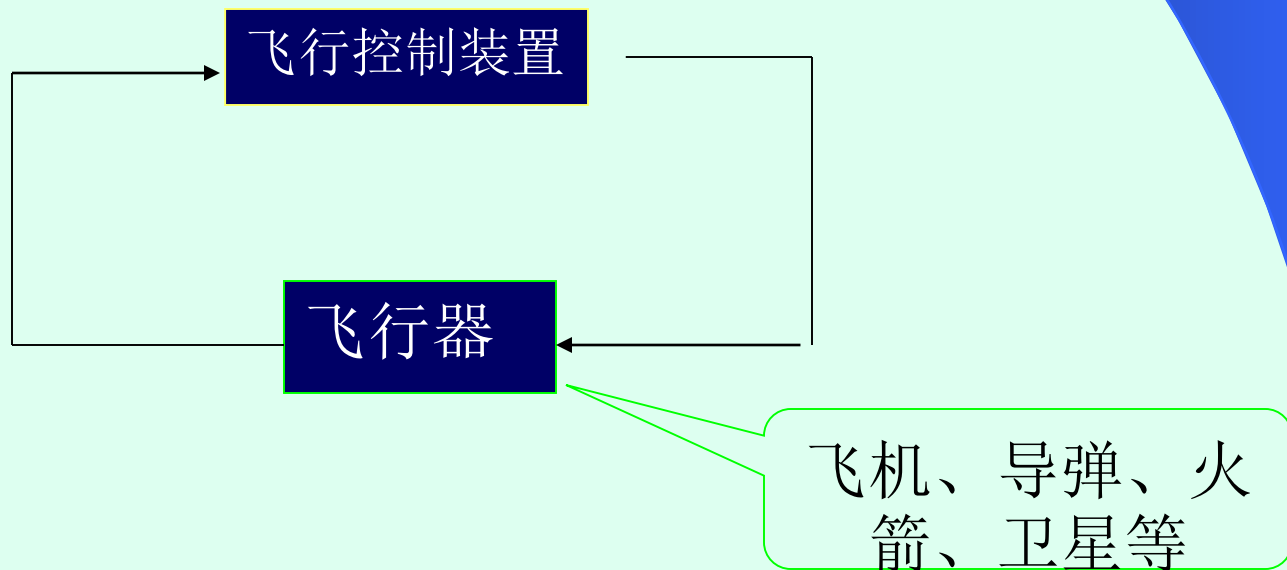


二、 仿真实验原理

飞行器在空间的飞行运动是一个**六自由度**的运动体，包括三个自由度的姿态运动和三个自由度轨迹运动。

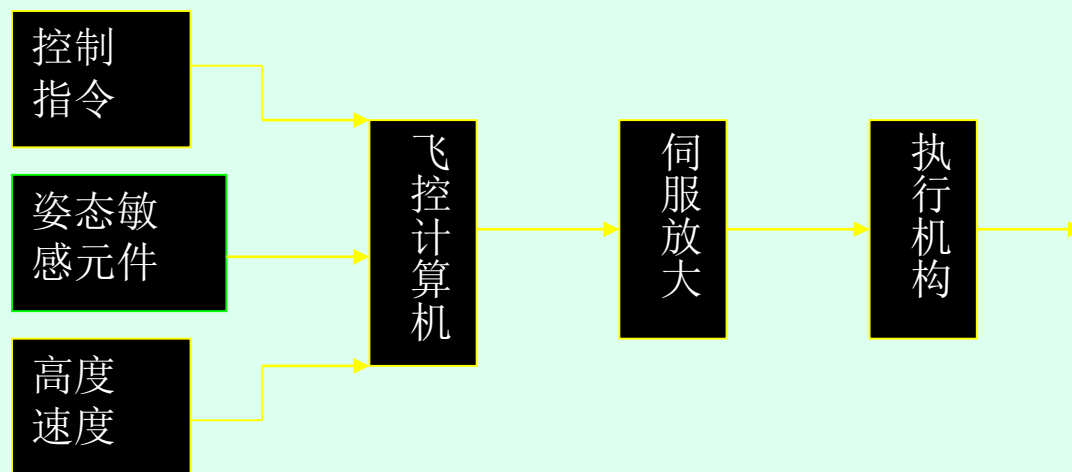
姿态运动是飞行器在力矩作用下，相对于机体坐标系的三个偏转运动，分为偏航、滚转和俯仰三种运动。表征飞行器在力矩作用下在空间的姿态变化。**轨迹运动**是飞行器在外力作用下，相对固定坐标系质心的三个平移运动，分为上下（高度）、左右（侧向平移）和前进三个自由度。

飞行器飞行控制运动，即是通过飞行控制装置（如自动驾驶仪），控制飞行器在空间的运动，它由“飞行控制装置”和“飞行器”组成的闭环自动控制系统来实现。

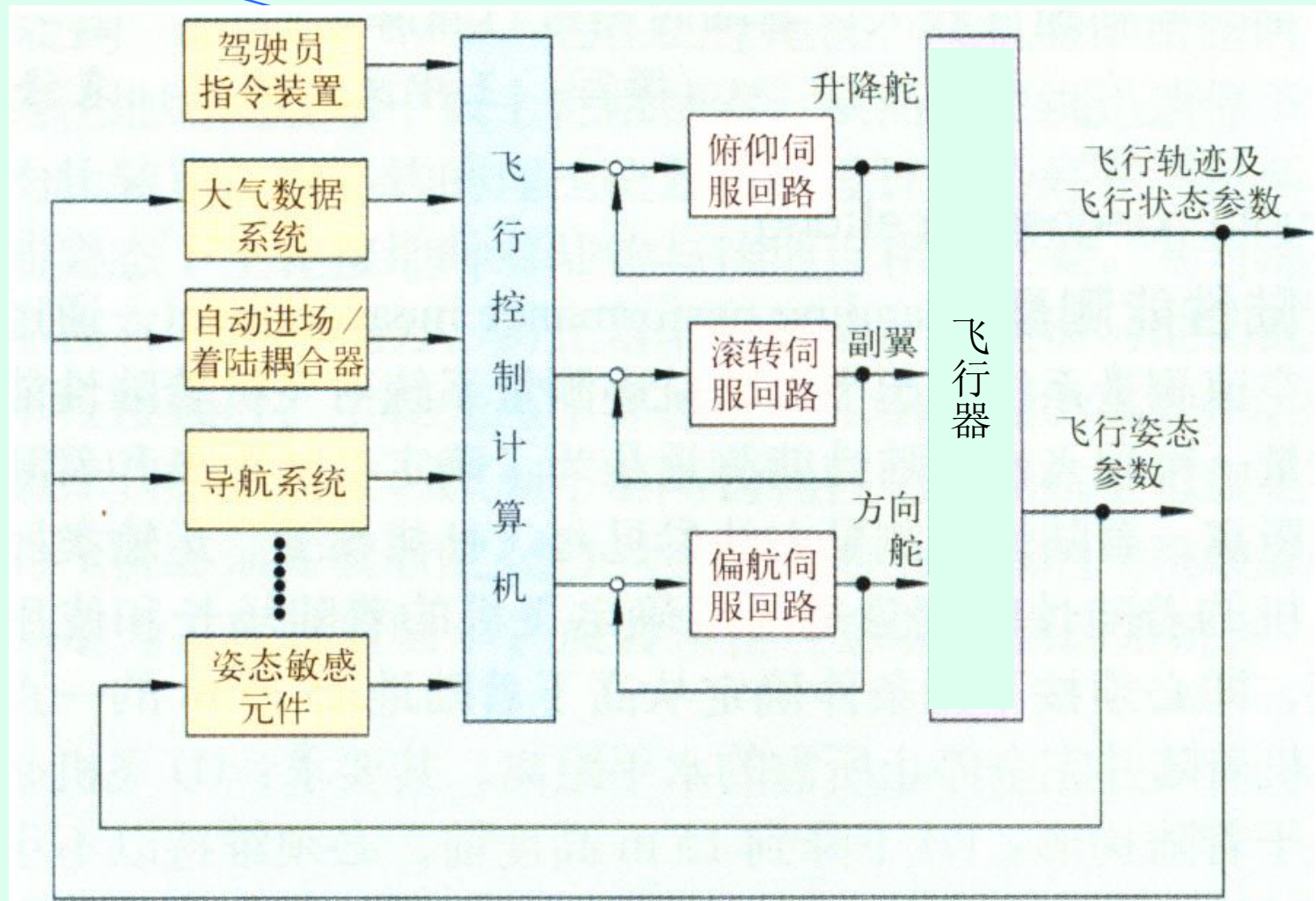




飞行器为“被控对象”，包括飞机、导弹、火箭、卫星等各种飞行器。飞行控制装置一般由敏感装置、指令装置、信号变换综合处理装置、伺服放大和执行机构等主要部分组成，如下图所示。在现代飞行控制系统中，信号的变换和综合处理装置由计算机来完成，称为飞控计算机（FCC）。



飞行器自动控制系统原理框图

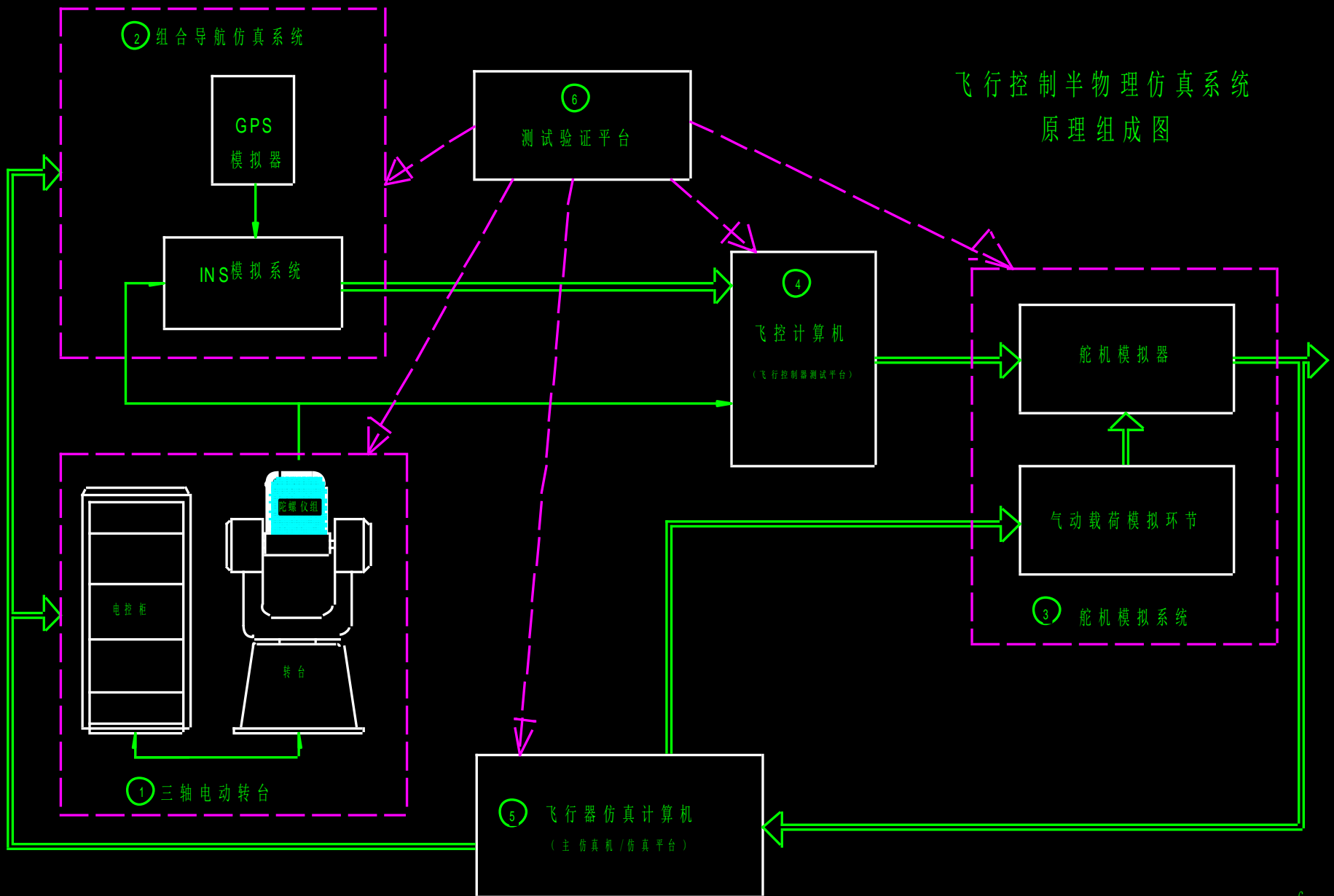


姿态自动控制；

轨迹运动控制：自动导航，自动地形跟随 / 回避等。



下页图为飞行控制系统地面半物理仿真实验的原理图，图中包括仿真计算机、飞行模拟转台、舵机模拟器、气动载荷模拟装置（仿真设备）、自动驾驶仪（即参试设备）。





从图中可以看出，飞行器地面物理仿真系统有如下特点：

- 1.系统中必须有飞行状态参数的模拟变换装置，本系统中由飞行仿真转台完成这一任务。
- 2.系统中应当包含舵机、载荷等效应的模拟装置，本系统由舵机模拟器和气动载荷模拟装置实现这一功能。
- 3.由于实物参与系统工作，所以模拟变换装置必须实时工作。



模拟变换装置的引入**不应影响**飞行控制系统本身的性能，即对变换装置本身必须有严格的技术要求，来满足仿真实验的需要。

在理想情况下，这一变换装置最好是一个

纯比例环节。





8.3 飞行仿真转台

飞行仿真转台本身是一个复杂的机电控制系统，需要花费大量的人力、物力、财力进行研制。
这个系统由机械部分和电控部分组成。



● 一、飞行仿真转台的结构原理

模拟飞行器姿态运动的转台应具有三个独立的运动框架，分别代表飞行器在空间运动的三个转动自由度。三个框架的布局与飞行器在空间运动的坐标系紧密相关，一般取机体坐标系进行研究。其关系特点是：

绕机体轴的转动惯量：

$$J_{\text{横滚}} < J_{\text{俯仰}} < J_{\text{偏航}}$$

（面对称，如飞机）

或

$$J_{\text{横滚}} < J_{\text{俯仰}} = J_{\text{偏航}}$$

（轴对称，如导弹）

绕机体轴的角速度：

$$\omega_{\text{横滚}} > \omega_{\text{俯仰}} > \omega_{\text{偏航}}$$

在确定飞行仿真转台三框坐标系时，应尽量满足上述关系特点。一般有立式和卧式两种结构形式。



1.立式结构

立式结构的转台框架与飞行器机体坐标系的对应关系：

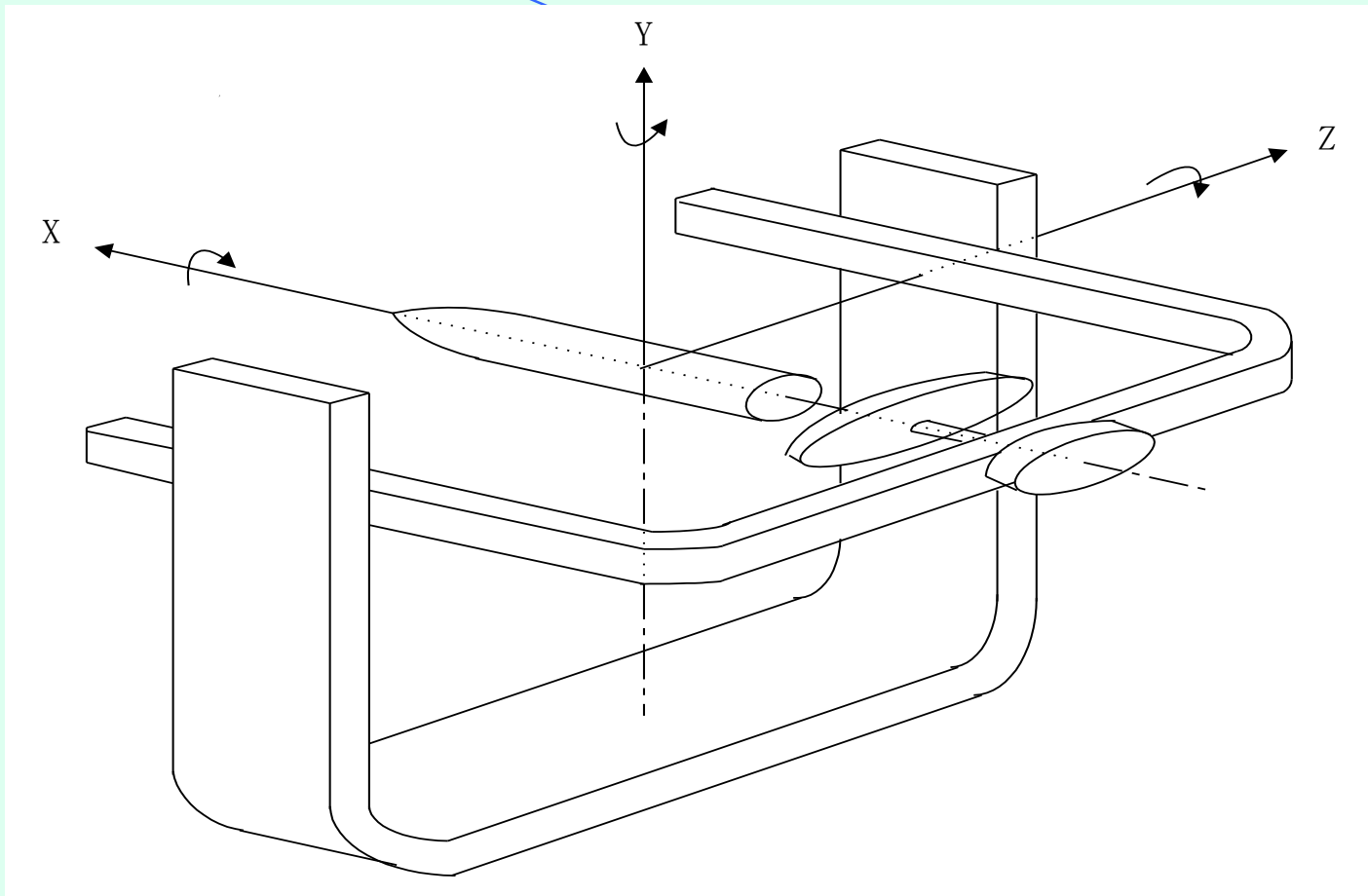
内框（X）-----飞行器的滚转轴

中框（Z）-----飞行器的俯仰轴

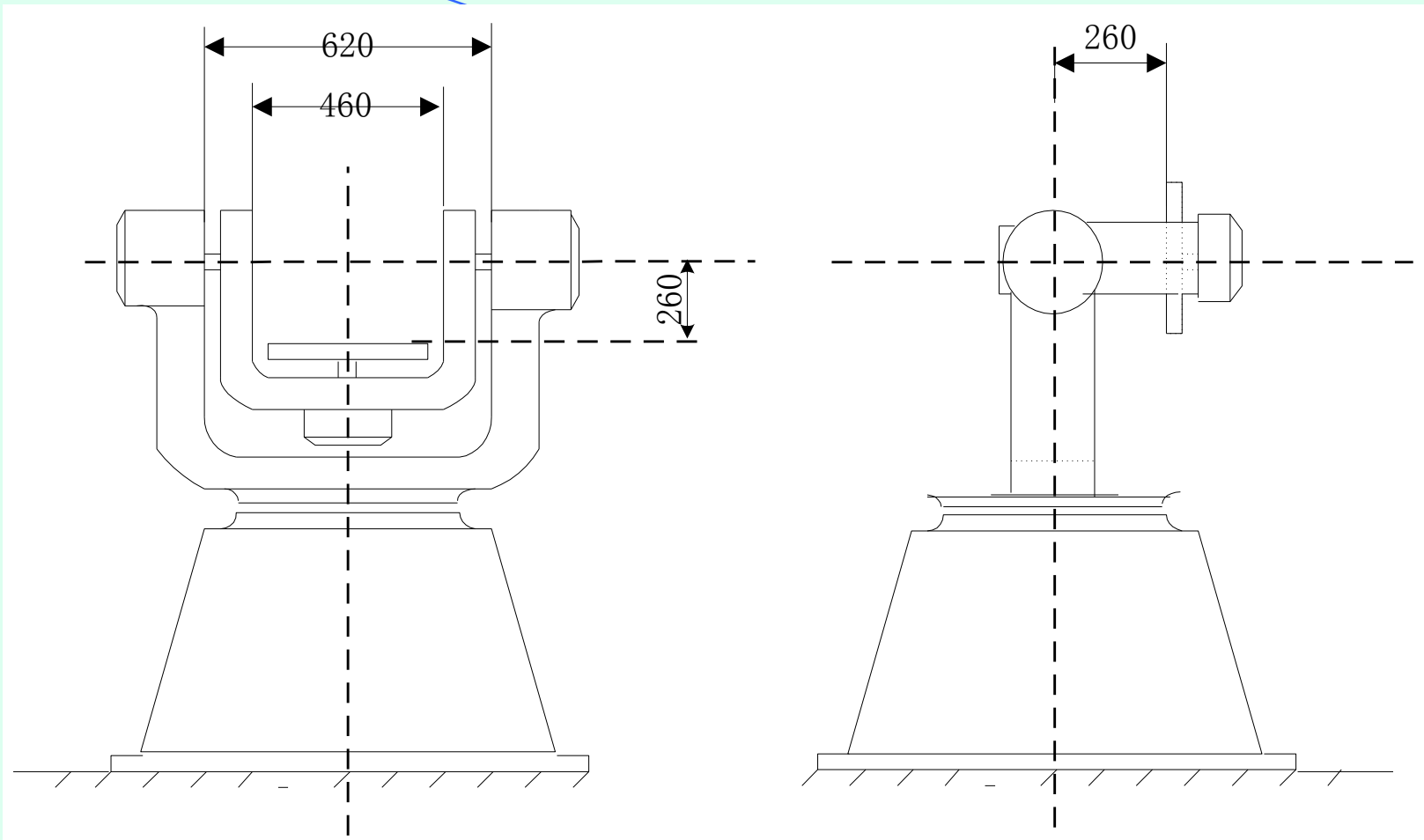
外框（Y）-----飞行器的偏航轴

因而通过对三框的控制即可由内框复现飞行器在空间的角运动。

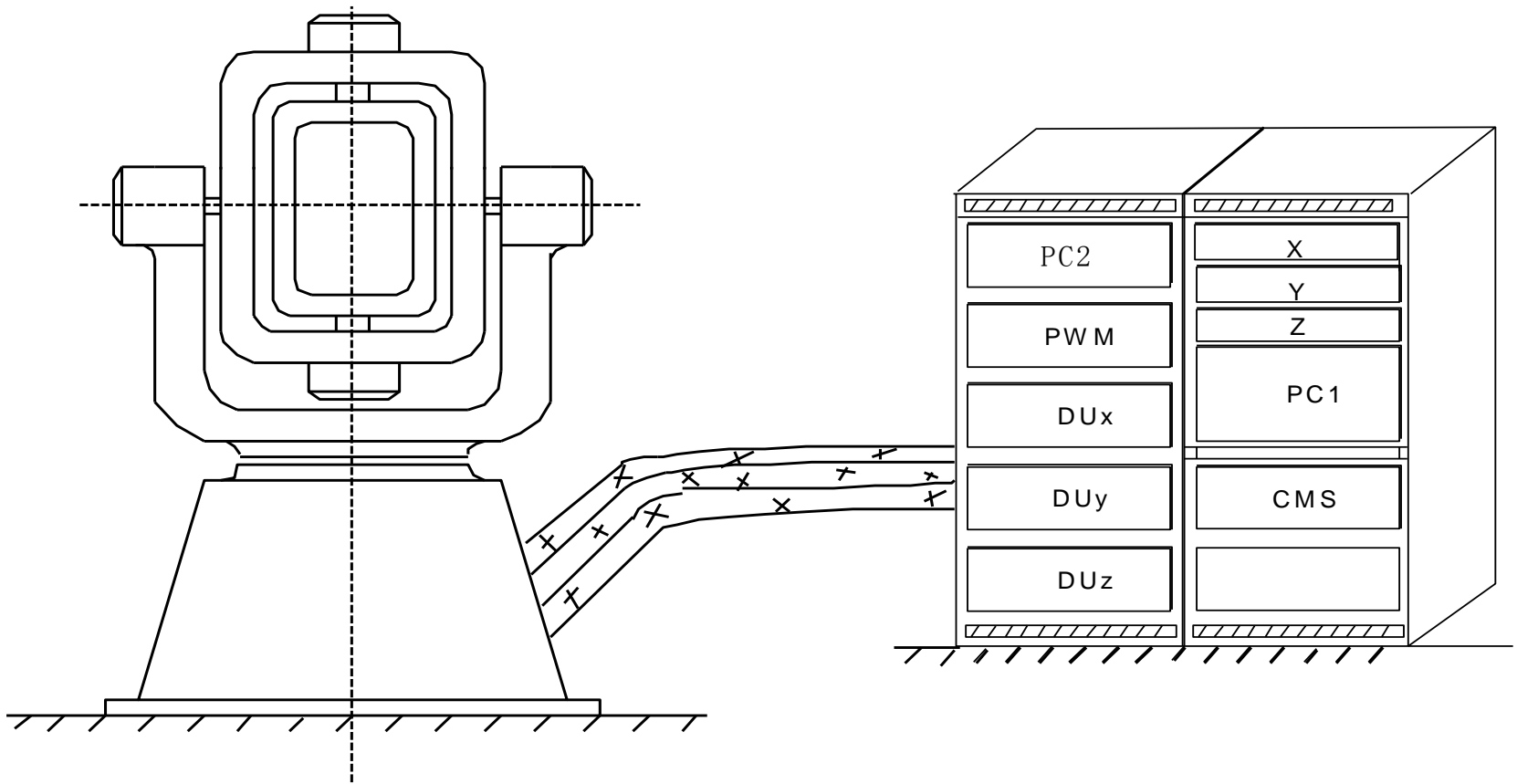
内框是负载框，参试设备应安装在内框。



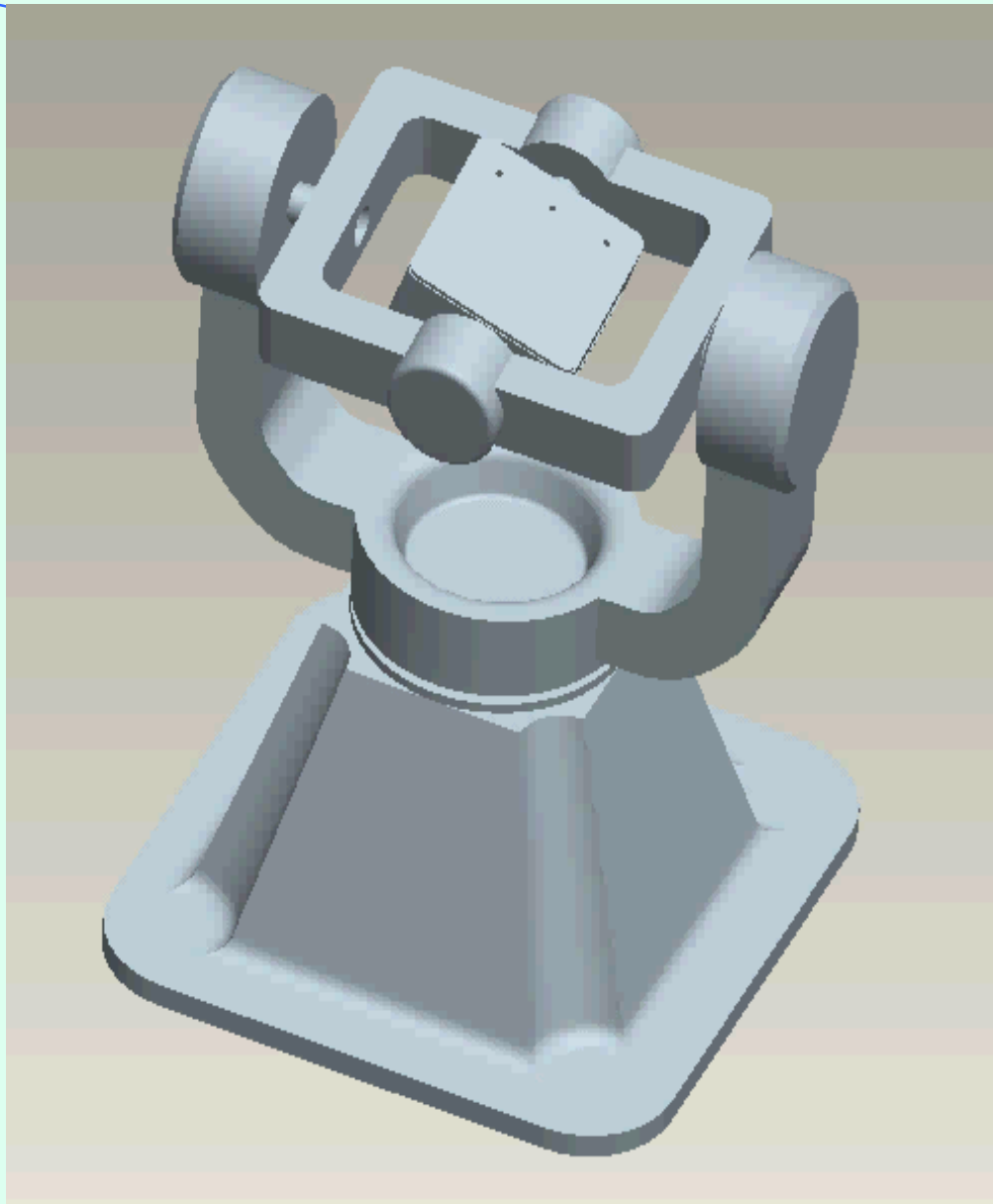
立式转台的坐标系



立式转台的结构（U-U-T型）



立式转台的结构（U-O-O型）



立式转台的结构（U-O-O型）



2.卧式结构

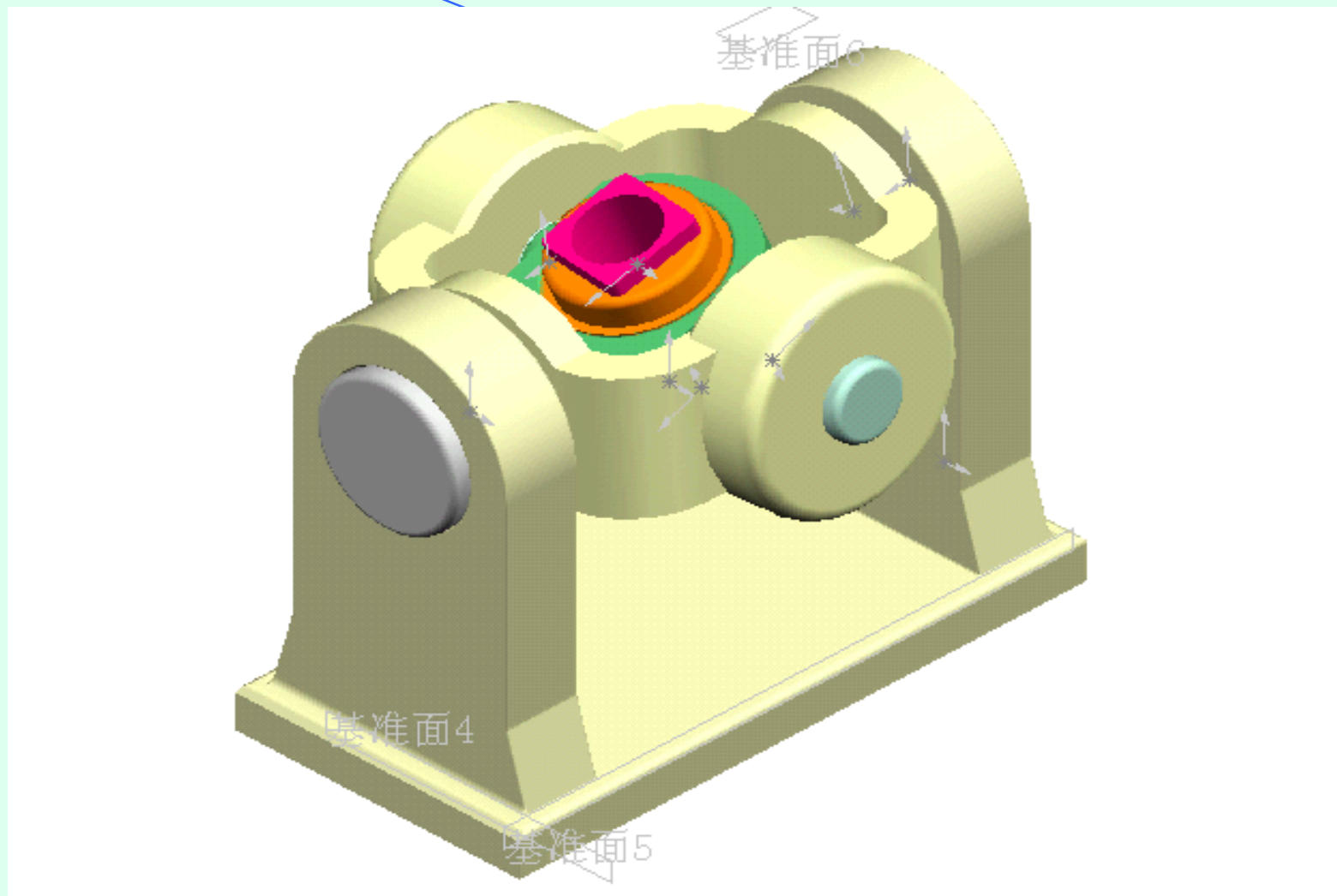
卧式结构的转台框架与飞行器机体坐标系的对应关系为：

内框----飞行器的滚转轴

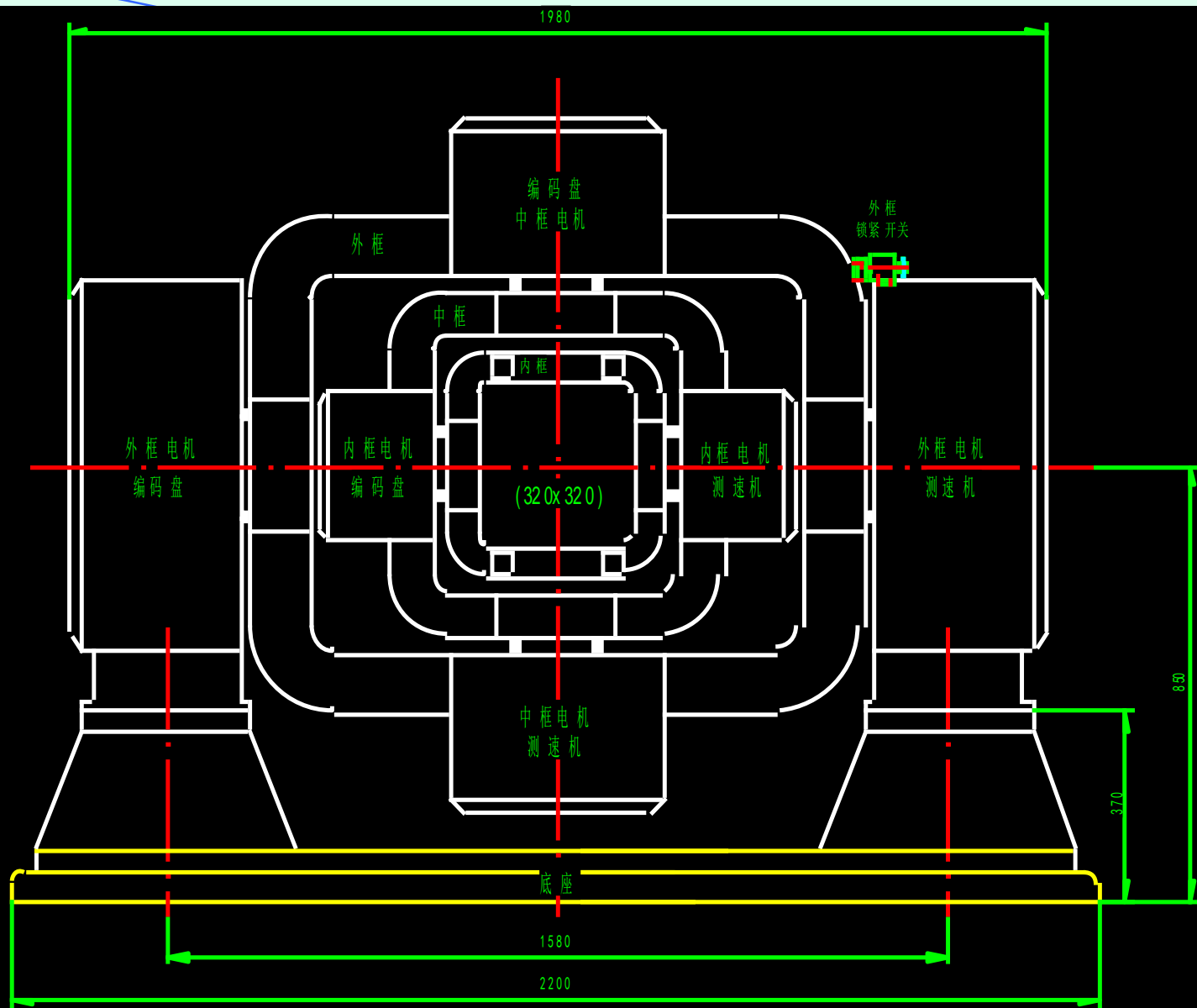
中框----飞行器的偏航轴

外框----飞行器的俯仰轴。

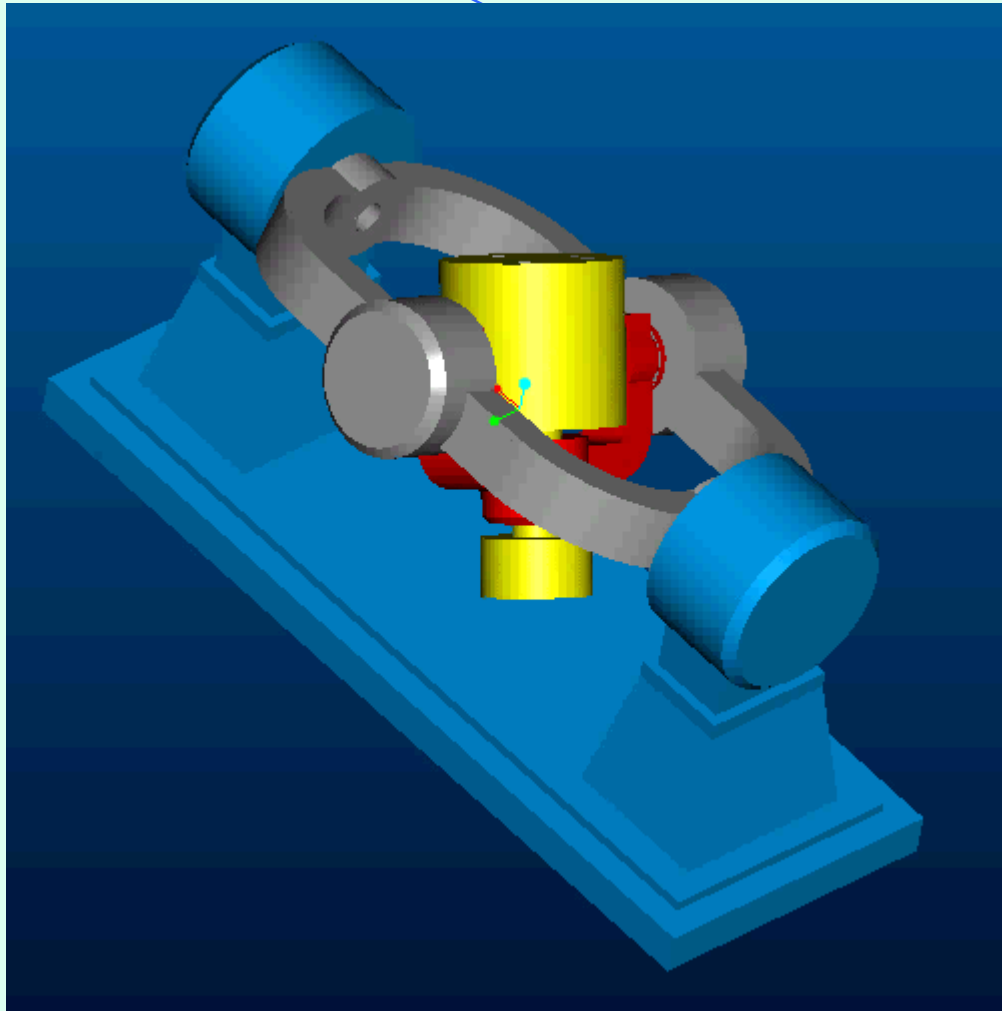
内框仍是安装设备的负载框，通过对三框的控制即可由内框复现飞行器在空间的角运动。



卧式转台的结构（O-O-O型）



卧式转台的结构（O-O-O型）



卧式转台的结构（O-U-T型）



● 二、飞行仿真转台的基本功能

转台三个框架的运动复现了飞行器三轴的角运动，每个框架由对应的飞行器动力学方程控制。

由仿真计算机给出的代表飞行器角运动参量的模拟电压量或数字量通过一套伺服系统控制转台框架运动，由此可见，转台实质上是一个电压量-机械量的变换器。



转台由机械框架和伺服系统两部分组成，对转台的功能要求主要有以下几点：

- 1.转台框架的机械运动量要能够准确复现计算机给出的相应电量。
- 2.转台的内框（即负载框）应能方便地安装参试设备。
- 3.转台框架的动、静态精度应能满足参试设备的精度要求。框架运动能够实现飞行器各种状态和各种运动功能的实验要求。



三、转台功能与性能

一般地，应根据飞行器的技术要求、性能指标、参试设备的功能要求、技术性能以及转台的使用条件、地面物理仿真实验的目的等几个方面确定转台的功能及性能指标。有的转台需要为多个型号任务做仿真实验，在确定任务书时需要统筹考虑。目前提出型号研制与仿真**一体化设计**的思想，即在型号研制开始的时候就考虑仿真设备的性能要求等问题，从而使所提出的研制任务书更**合理**。



转台的机械结构

性能及指标

其他功能



1. 转台的机械结构

确定机械结构时要充分考虑参试设备的特性，如其重量、尺寸、安装形式等等。有些设备（如导引头）有**视场角**要求，则台体的框架不能阻挡其视线；有些设备安装时，要求其某个特殊点与转台的**回转中心**重合，或要求某个轴线与转台的内框（即负载框）**回转轴**重合；有些仿真实验要将多个设备安装在同一个转台上；有些实验要求框架能够连续旋转。



确定坐标系----立式 / 卧式

视场角要求----俯仰方向 / 偏航方向

框架结构----全框 / 半框 / 圆盘 / 圆筒

框架转动范围----连续旋转 / 不连续旋转

负载安装空间

轴系回转精度 / 不相交度 / 不垂直度



2. 性能及指标

转台的性能指标包括静态和动态两部分。

静态指标主要有

位置精度 / 位置重复度 / 位置分辨率

最大速度 / 最低平滑角速度 / 速度精度

动态指标主要有：

频率特性 / 最大角加速度 / 动态跟踪精度

近来由于捷联惯导系统的使用，对转台的性能指标又增加了跟踪速度信号的要求，所以还有一项**工作模式**的指标

位置状态 / 速度状态/加速度状态

速度状态是指输入信号为角速度，安装在转台上的敏感元件测量的是角速度信号。速度状态的性能指标主要是动态指标，即**跟踪速度信号**时的通频带和动态跟踪精度。

对于飞行仿真转台来说，更重要的是动态指标。



3. 其他功能

实时显示数据/曲线

安全保护措施

与仿真计算机通讯

操作的方便性

电磁兼容性

可靠性、可维护性



● 频率特性指标的确定

在转台研制任务书中，国内通常采用“平坦段”来描述频率特性指标，即频率特性的幅值变化不超过 $\pm 10\%$ 、相位变化不超过 $\pm 10^\circ$ 的频率范围满足一定的要求。

一般伺服系统应具有足够宽的频带，这样在这一频带范围内可将系统视为一个近似的比例环节。从控制理论可知，若转台的频带大于飞控系统的频带**5倍以上**，即可将转台视为一个比例环节。

所谓系统通频带指标是指相移为 -90° 或幅值为 -3dB 时的频率值，对于典型的二阶系统，平坦段的带宽要比系统通频带指标低8~10倍。



例

某型飞行器的飞控系统频带为**1Hz**，转台的平坦段为**5Hz**。由于转台系统是复杂的高阶系统，故按平坦段的带宽要比通频带低5倍计算，则转台的频带为**25Hz**，比飞控系统的频带高20倍以上，在仿真实验时完全可以忽略转台系统的动态影响，将其视为纯比例环节。



● 最大角加速度的确定

转台的角加速度性能必须满足飞行器的角运动加速度性能要求。

飞行器的角加速度大小由飞行器本身的结构参数和气动参数、操纵性能来确定。



- 最大速度及最低平滑角速度的确定

转台各框的最大速度一定要大于飞行器对应轴的转动角速度，并要留有余地。

转台的最低平滑角速度标志着转台的速度灵敏度，该指标一定要高于参试的角速度敏感元件的灵敏度才能满足仿真实验的要求。目前较好的速率陀螺的灵敏度为 $0.001\text{度/s} \sim 0.01\text{度/s}$ 。



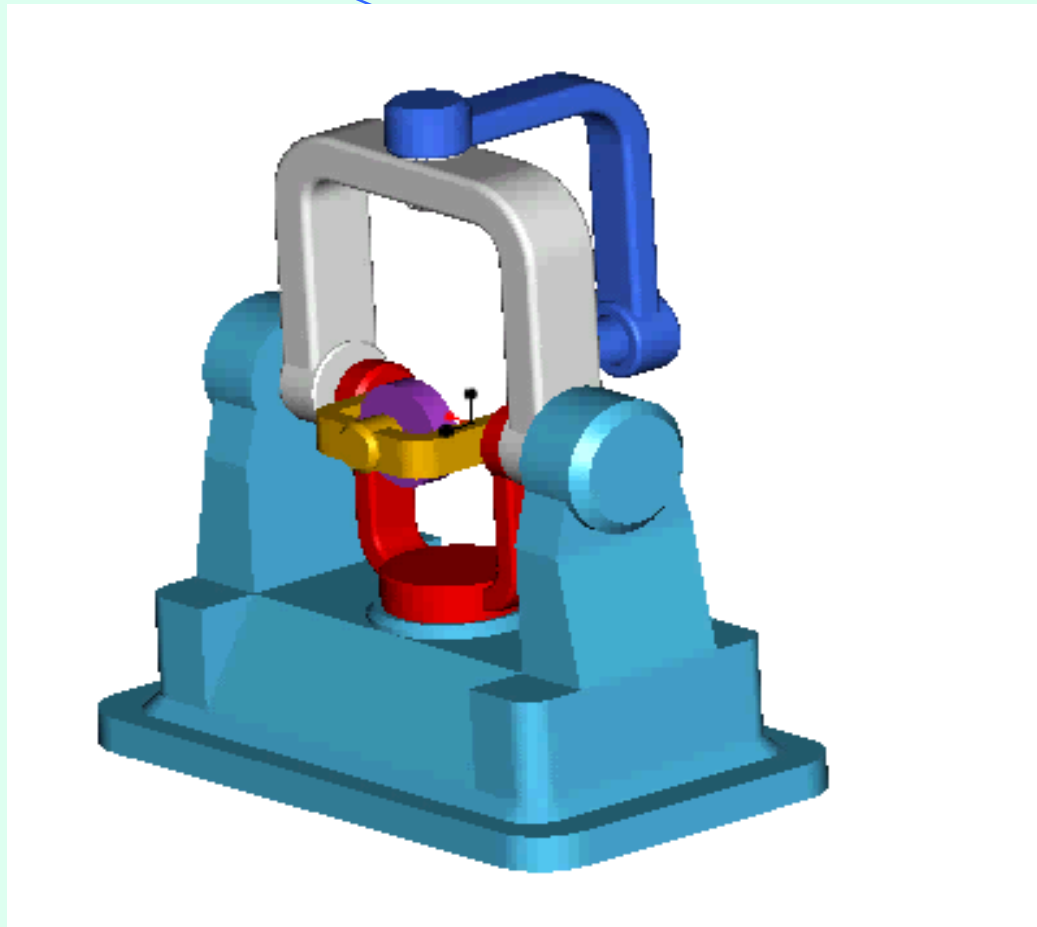
● 位置精度等指标的确定

仅从飞行仿真来看，对位置精度等指标并无特别严格的要求，但在某些仿真实验中，如射频寻的仿真中，由于安装导引头的转台不仅做制导仿真，还要参与天线阵的标定，则对位置精度的要求较高。另外，用于捷联惯导系统半实物仿真的转台，对其精度要求也较高。

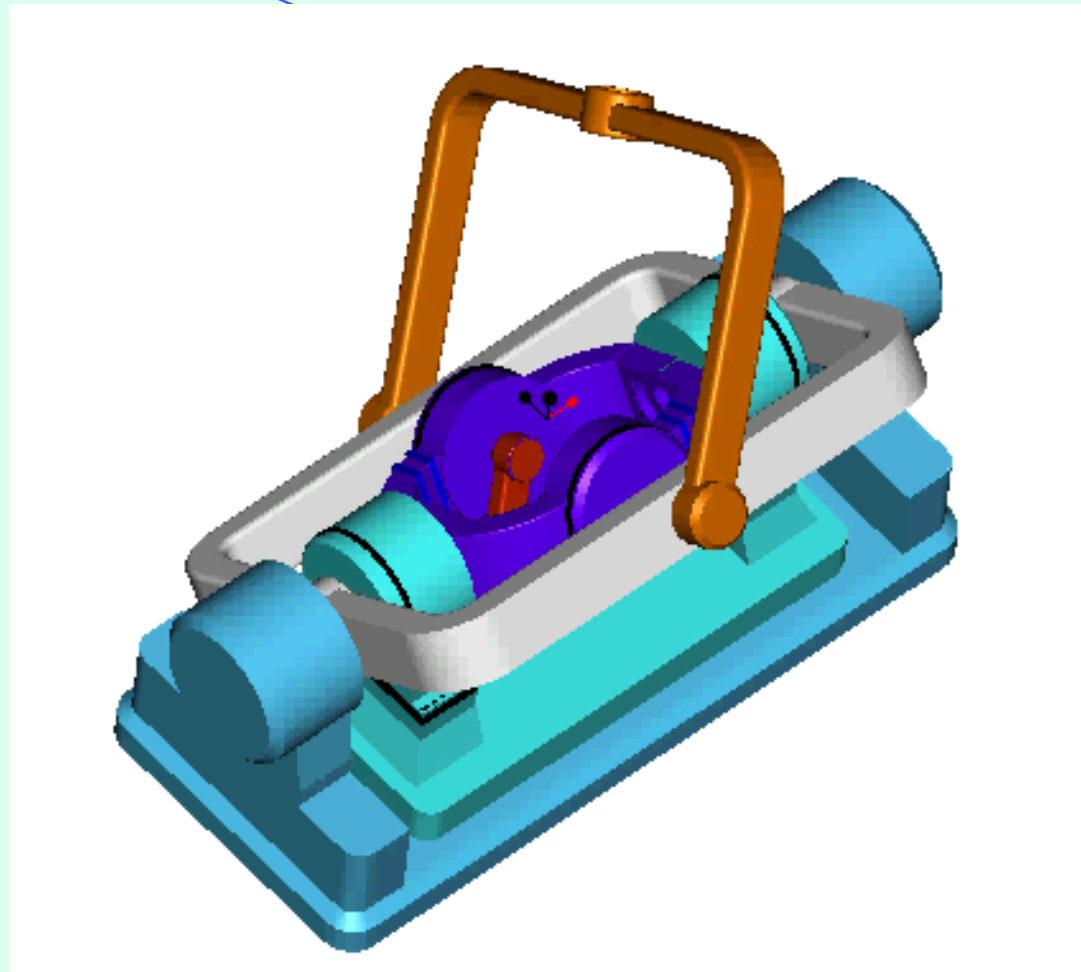
由于测角元件的精度提高，仿真转台的位置指标已可达到角秒级。目前一般仿真转台的位置精度均要求在0.01度 ~0.001度，分辨率：0.005度~0.0001度，重复度与位置精度相当，或略高于位置精度。

四、转台的发展趋势

- 动态性能提高：加速度、频带、动态跟踪精度
- 精度性能提高：位置精度、速度精度
- 多用途：仿真、测试
- 多轴（自由度）转台：五轴、六轴、九轴
- 自动化程度提高
- 采用新技术：材料、元部件、控制理论与方法

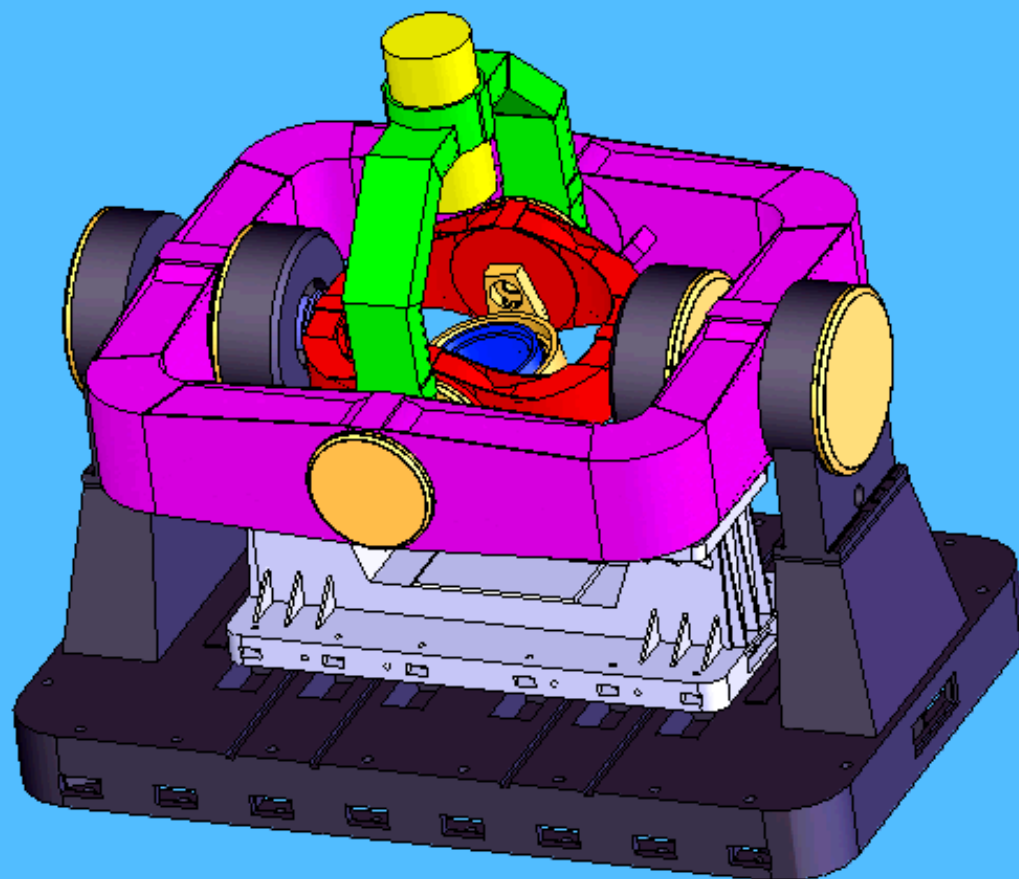


五轴台结构（立式）



五轴台结构（卧式）

五轴台

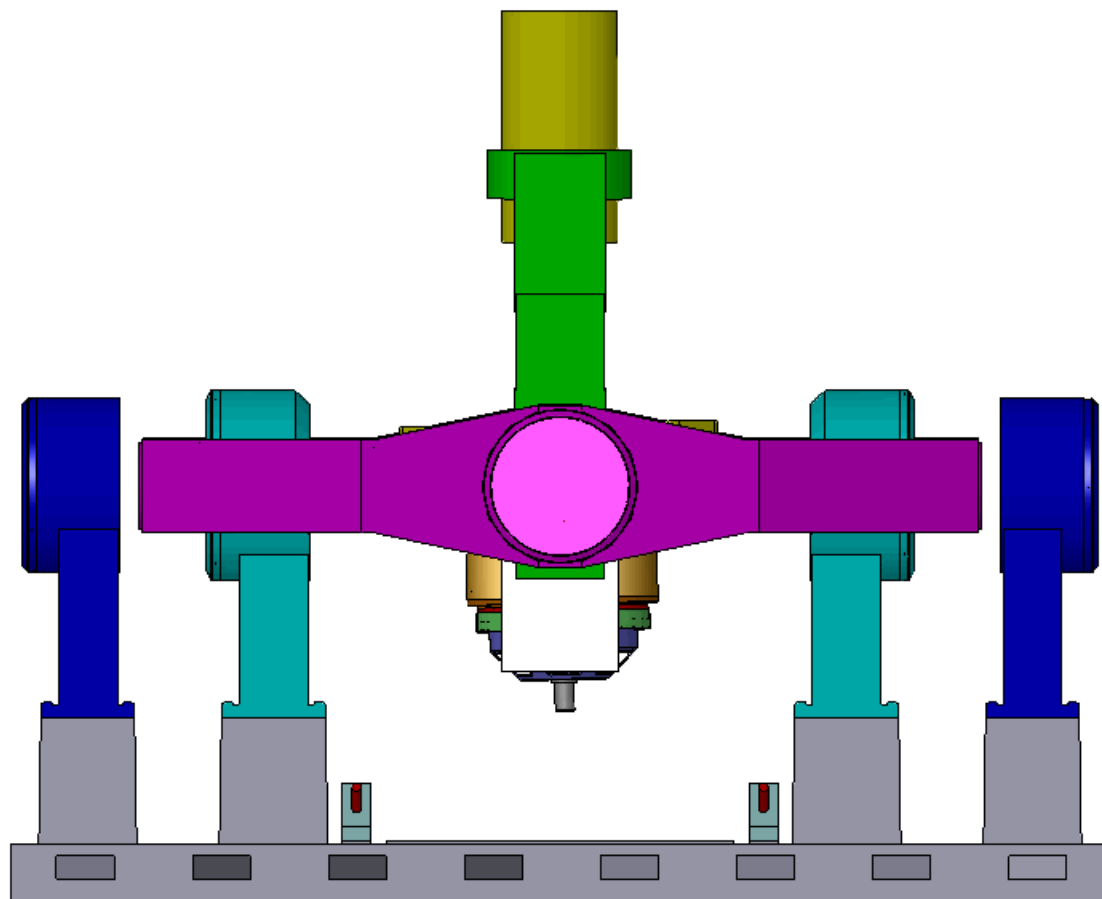


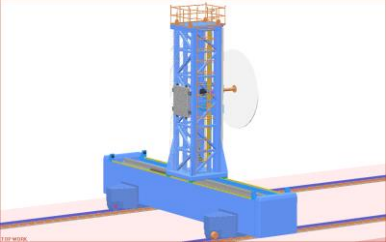
自定义

2018/11/27

62

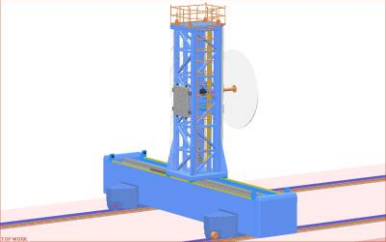
五轴台



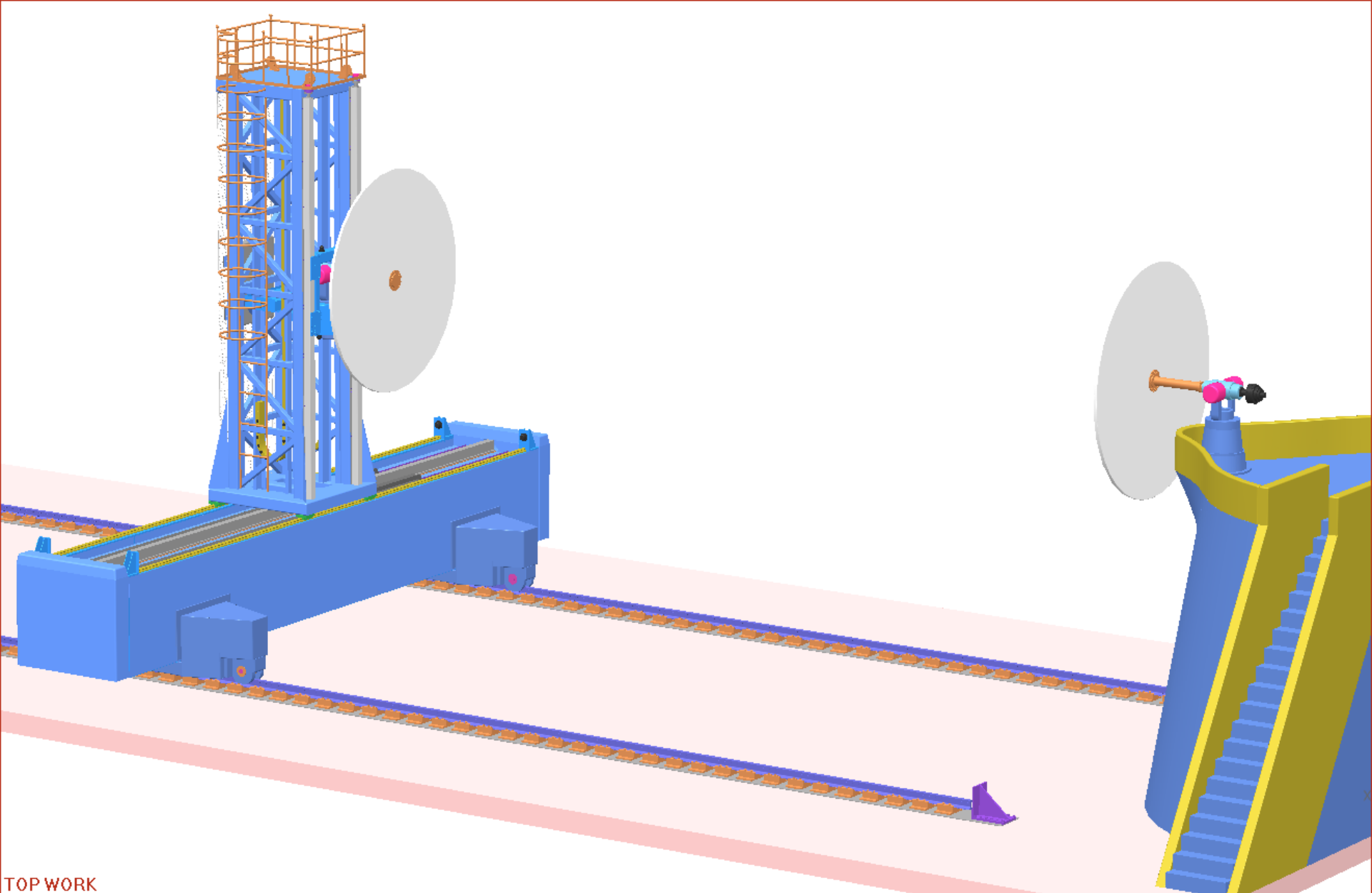


五、交会对接运动模拟器

交会对接运动模拟器 (RVDMMS) 为一个9自由度运动系统，是用来实现飞船交会对接制导导航控制 (GNC) 分系统半物理仿真试验的重要设备。该模拟器用于仿真飞船交会对接过程中，追踪飞行器和目标飞行器，从相距35m或60m开始到相互碰撞前为止，这一时间段内它们的相对运动。



交会对接运动模拟器由目标运动模拟器和追踪运动模拟器两部分组成，具有三个平移运动和六个转动运动自由度。目标运动模拟器为固定于地面上的三轴转台，具有三个转动自由度。追踪运动模拟器是一个六自由度模拟器，它由三维平移运动的行车和安装在行车上的三轴转台组成，具有三个平动自由度和三个转动自由度。

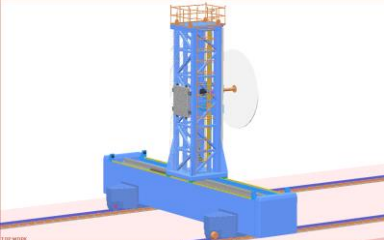


TOP WORK

2018/11/27

RVDMS运动模拟器布局图





5.1 追踪运动模拟器

追踪运动模拟器由三维平移运动模拟器和安装其上的三轴追踪转台组成。

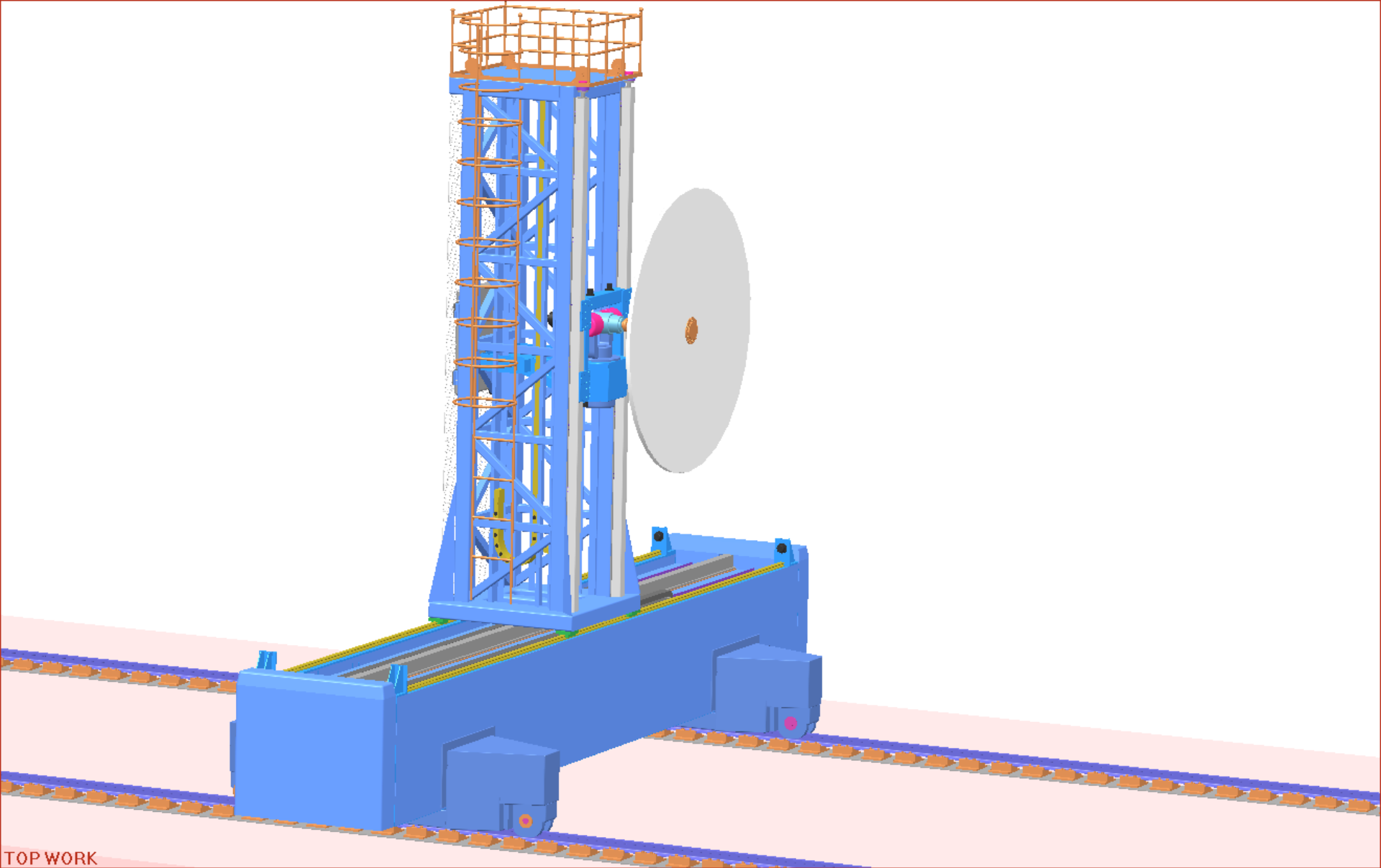
1. 三维平移运动模拟器

★ 上下平移机构:

由垂直钢架（竖梁）和上下驱动机构组成。垂直钢架为桁架结构，上下驱动采用双滚珠丝杠方式，带动负载车沿上下轨道移动。

★ **横向平移机构:**由横向桥架和横向驱动机构组成。横向桥架为箱形梁结构，固定在纵向走行梁上。横向驱动采用滚珠丝杠驱动形式，带动竖梁沿横向轨道移动。

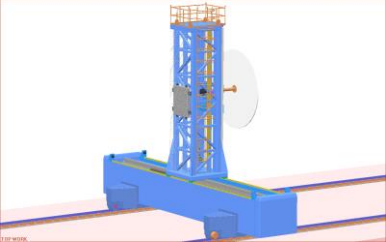
★ **纵向平移机构** 由纵向钢轨和纵向行走梁组成，钢轨铺设在地面路基上，纵向行走梁通过双轮驱动，沿轨道行走。



TOP WORK

三维平移运动模拟器

2018/11/27

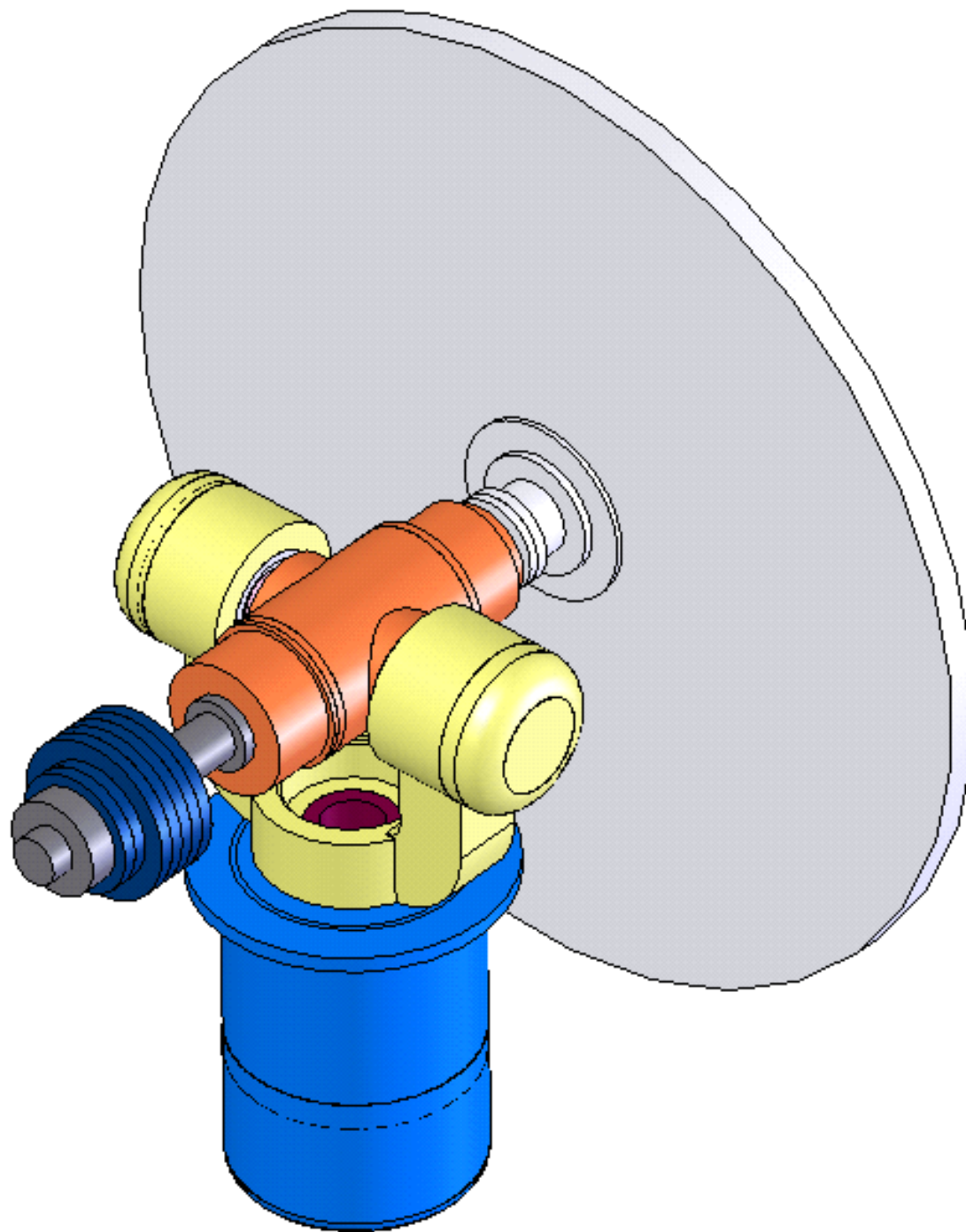
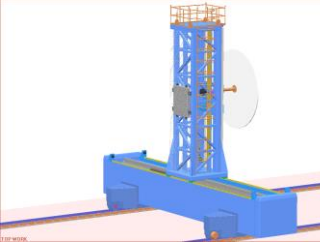


2 三轴追踪转台

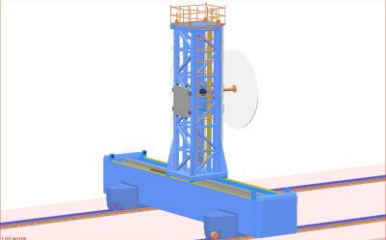
追踪转台采用“U-O-I”型立式结构（图3.3）。外框为“U”型半框结构，其转轴竖直安装；中框为“O”型圆桶形结构，

为优化结构设计，中框已与内框转轴壳体融为一体；内框为一根“I”转动轴，负载盘和配重盘的两个延长轴分别固定在该转轴的两端。

内、中、外三框转轴互相垂直，空间交于一点，外框轴竖直安放，构成直角坐标系。追踪转台安装在台车上，其外框轴与拖动台车的钢丝绳中线完全重合。

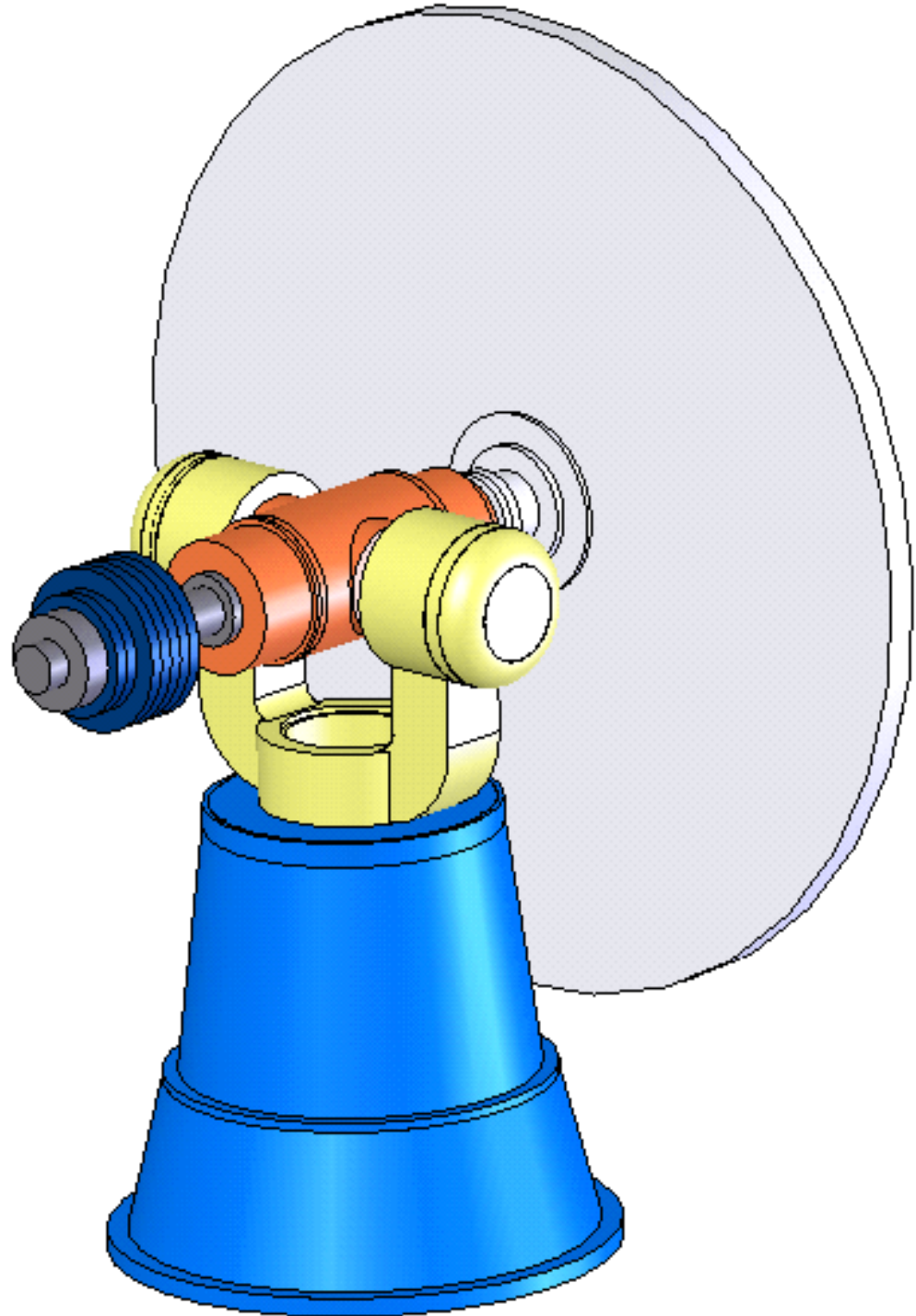


追踪转台

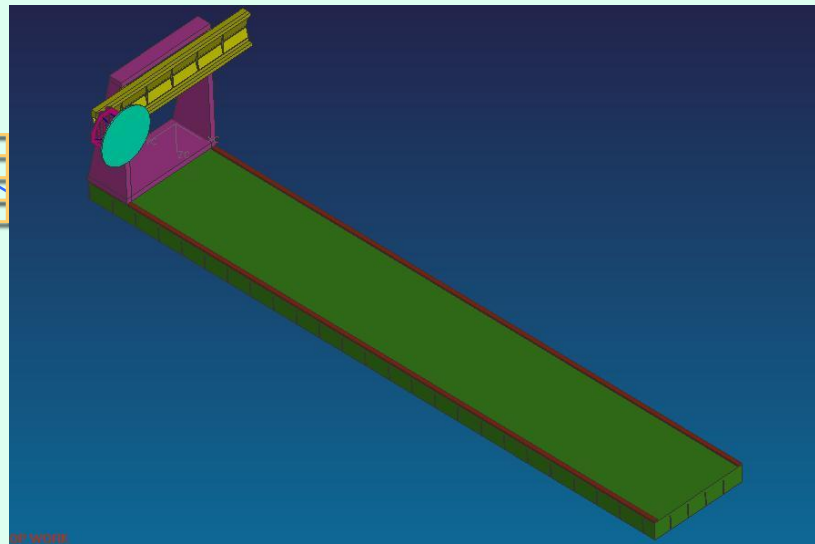


5.2 目标运动模拟器

目标运动模拟器是一个固定于地面上的三轴转台，其结构形式与追踪转台基本相同，由内，中，外三框和台体底座四部分组成。

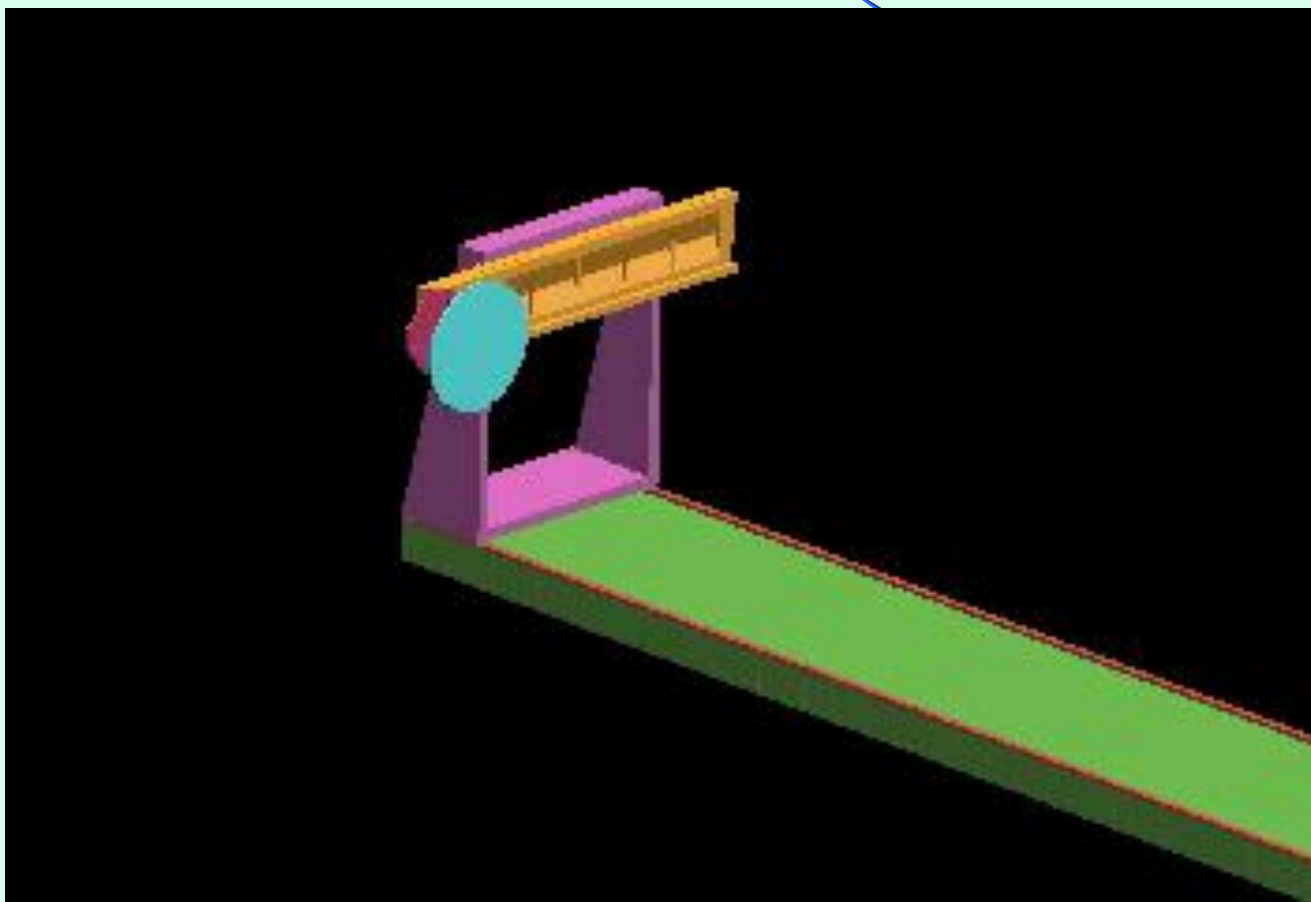


5.3 交会对接原理

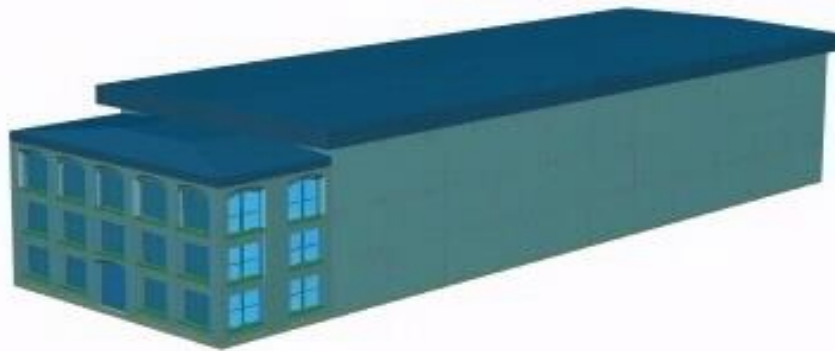


- 对接运动模拟器是在三自由度平动台上加装一个六自由度并联运动台成为九自由度模拟器，具有三个冗余平动自由度。
- 平动运动台可实现大位移三维平动，并联运动台可实现小范围内局部平动调整运动和三维转动运动的精调。
- 并联设备采用6-SPS并联机构，具有承载能力大，刚度重量比大的特点。

动画模拟



整个系统动画模拟



8.4 仿真器

1. 概述
2. 应用范围
3. 基本组成
4. 飞行仿真器

1 概述

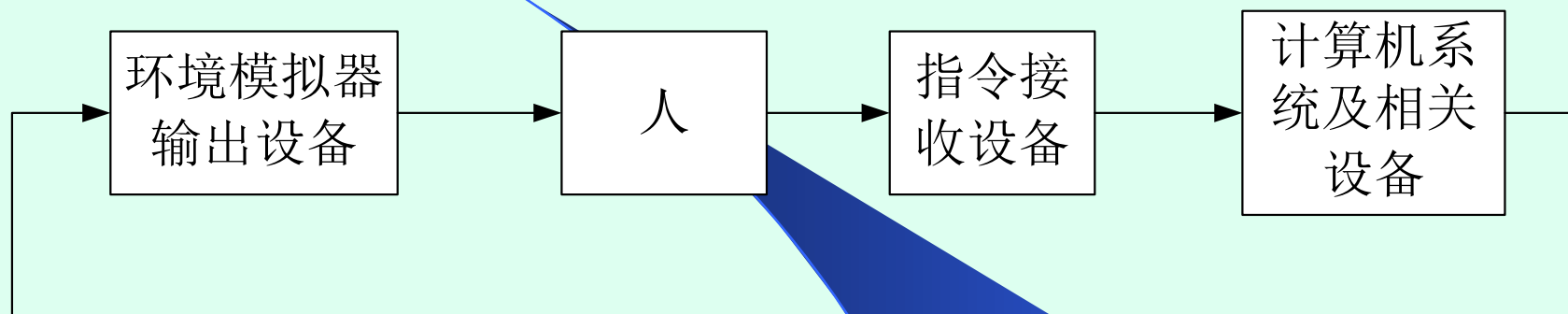
仿真器是一种有人在回路中的物理仿真系统。它利用计算机不断计算对系统及环境的运动方程，通过运动系统、视景系统、音响系统及仪表系统将它复现出来，给被训者一种真实的感觉。

仿真器是一种以计算机为核心的声、光、机电系统。

2. 应用范围

- 1) 飞行仿真器（航天器和航空器）
- 2) 汽车仿真器
- 3) 船舶仿真器
- 4) 核电站仿真器

3 基本组成

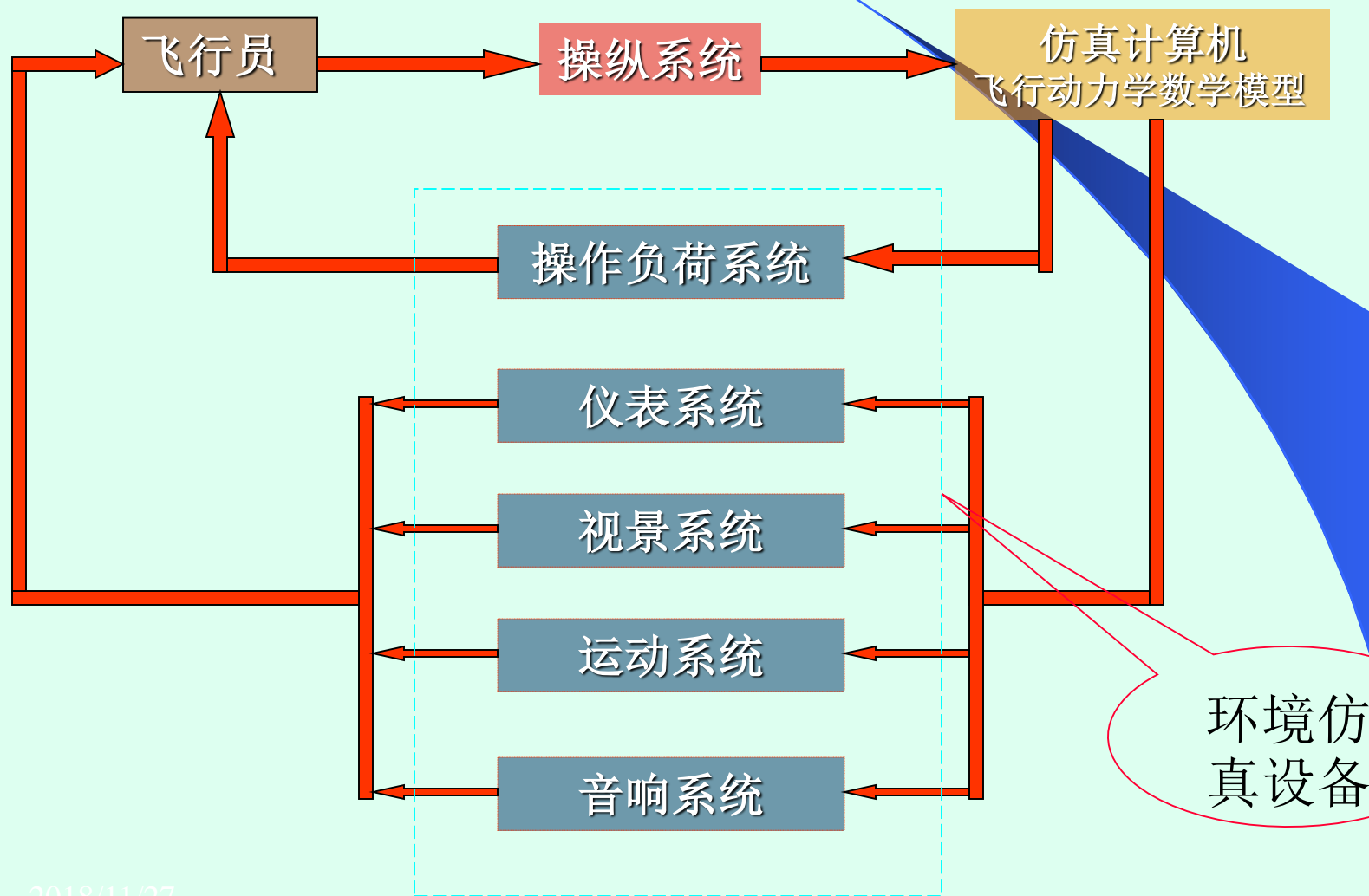


仿真器的基本组成

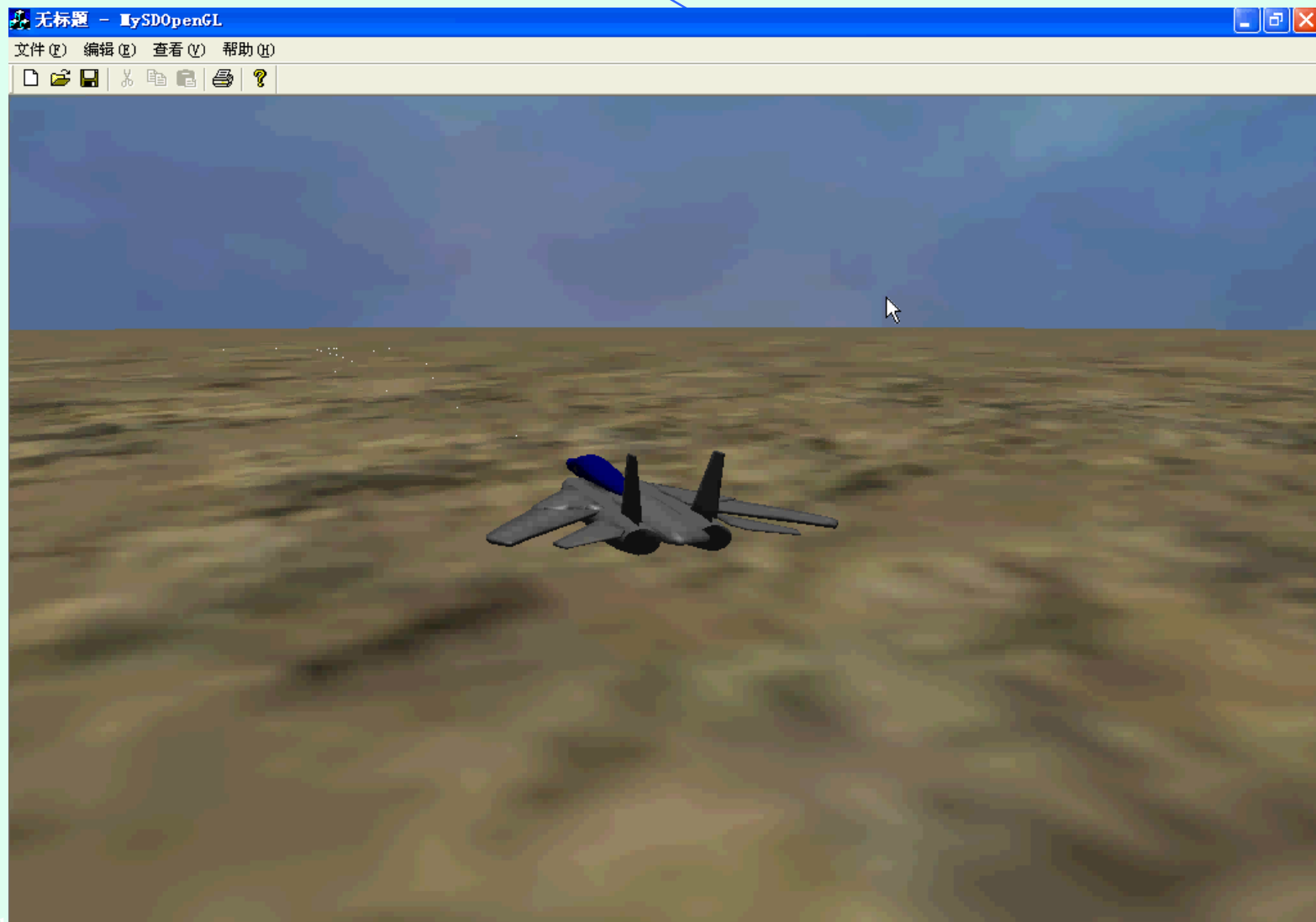
4 飞行仿真器

- 1) 构成：主要由活动驾驶室及视景系统所组成，驾驶室中设有与真实飞机完全相同的仪表及操纵杆。
- 2) 原理：主要通过飞行员（航天员）发出指令，通过计算机视景系统发生运动，实现声、光、机电系统发生联合动作，给人以一种真实感觉。

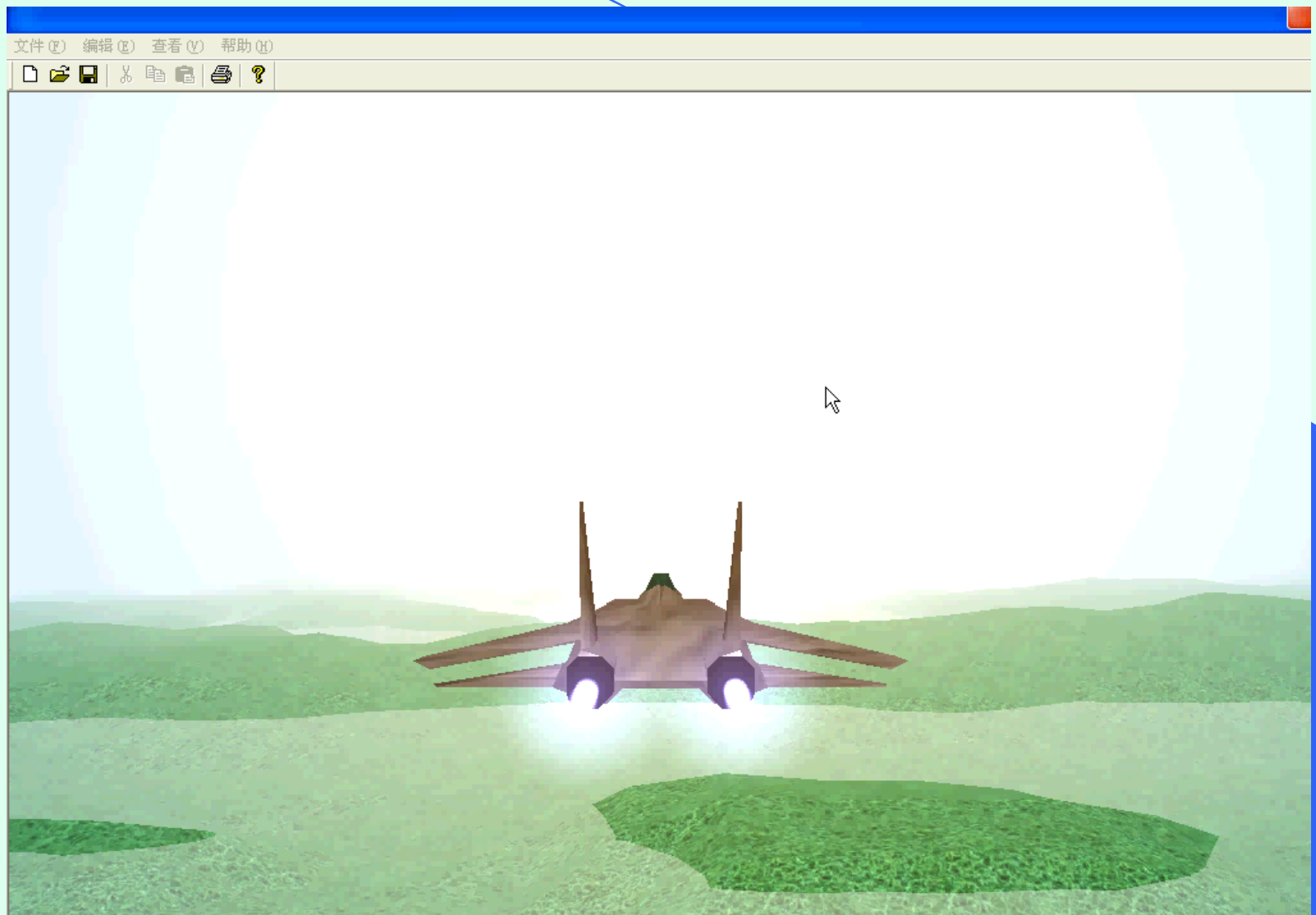
3) 原理框图



例1 战斗机视景模拟



例2 轰炸机视景模拟



例3 导弹视景模拟



例4 雨点视景模拟

