多体系统动力学及其Kane-Huston方法

报告人：何柏岩

2003.10.29

内容提要

- 多体系统概述
- 多体系统动力学的研究领域
- 多体系统动力学的几个基本问题
- Kane-Huston方法的核心内容
- 卫星帆板展开动力学仿真

1. 多体系统概述

1.1 概念

多体系统是对某类客观事物的高度抽象和概括，这类系统都具有一个共同的特点，即它们都是通过特定的关节（铰链）将诸多零（部）件－即所谓的“体”联接起来的；因此我们把多体系统定义为以一定的联接方式互相关联起来的多个物体构成的系统，这些物体可以是刚体也可以是柔体。如果多体系统中所有的体均为刚体，则称该系统为**多刚体系统**；如果多体系统含有一个以上的柔体，则称为**柔性多体系统**。

1. 多体系统概述

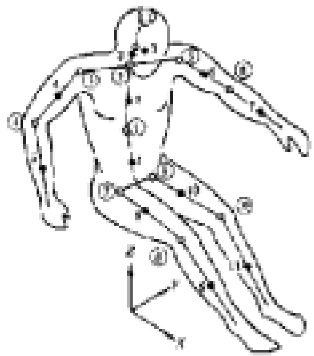
1.2 理论基础

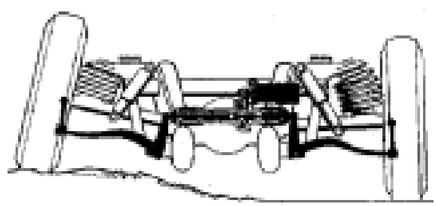
多体系统动力学是一般力学学科的一个重要分支

- 刚体动力学
- 分析力学
- 有限元理论
- 连续介质力学
- 计算力学
- 控制理论等

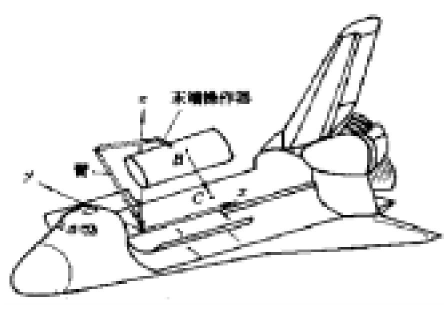
1. 多体系统概述

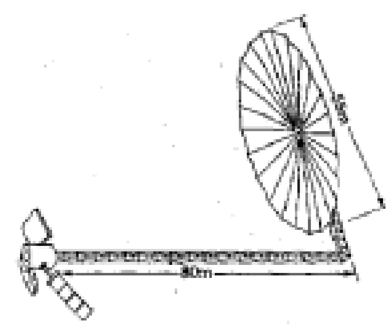
1.3 工程中的多体系统举例





1. 多体系统概述





2. 多体系统动力学的研究领域

车辆工程：

汽车碰撞过程中人体动力学响应仿真计算，
悬架系统多体系统动力学

航空航天：

卫星帆板展开动力学，操作臂动力学

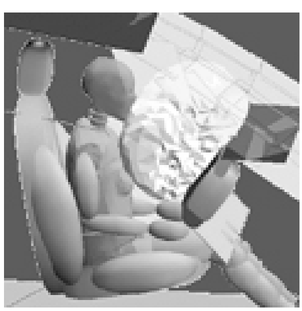
机器人：

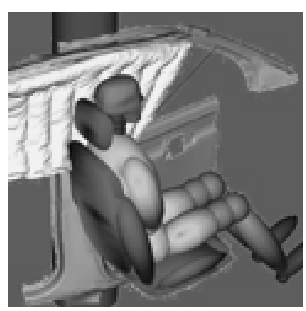
柔性机械手动力学

机械：

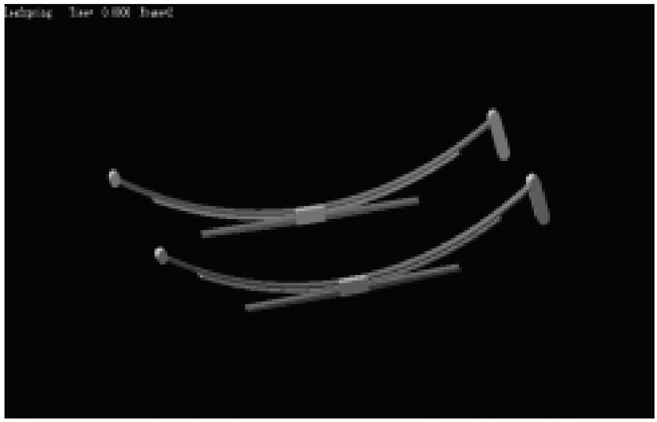
数控机床误差补偿

2. 多体系统动力学的研究领域

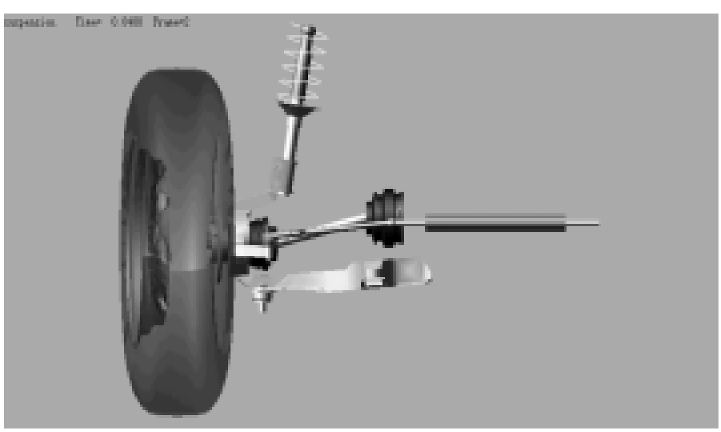




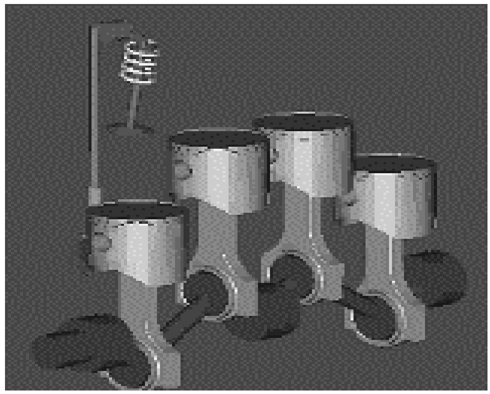
2. 多体系统动力学的研究领域



2. 多体系统动力学的研究领域



2. 多体系统动力学的研究领域



3. 多体系统动力学的基本问题

3.1 坐标系的选择问题

相对坐标法：

每个体上固结一个局部坐标系，是目前常用的方法。

绝对坐标法：

用统一的坐标系表示整个系统的状态，计算效率低，较少采用。

3. 多体系统动力学的基本问题

3.2 柔性体离散化问题

柔性体本质上是无限自由度系统，为适应计算机数值计算的要求，必须对柔性体进行离散化，常用方法有：假设模态法、有限段方法、有限元方法等。有限元法与模态分析相结合是常用的方法，该方法将系统的物理坐标变换为模态坐标，从而大大降低了系统的自由度数目。

3. 多体系统动力学的基本问题

物理（节点）坐标－模态坐标示意图

$$\boldsymbol{u} = \sum_{i=1}^{M} \boldsymbol{\Phi}_i q_i$$

3. 多体系统动力学的基本问题

3.3 建模方法的选择问题

矢量力学：

Newton-Euler(N/E)方法：隔离体分析

分析力学：

Lagrange方程：

从系统的能量角度入手建立动力学方程

Kane方程 ：兼有矢量力学和分析力学的特点

各种动力学原理与方程具有等效性

3. 多体系统动力学的基本问题

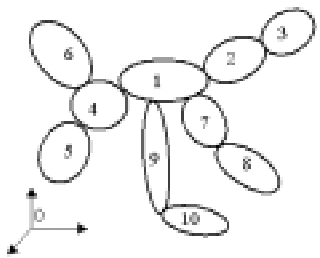
3.4 动力学方程数值算法问题

多体系统动力学方程的系数矩阵为高度非线性，其初始条件或参数的微小变化或因计算误差的积累都有可能导致仿真结果的较大偏差甚至发散。针对上述问题的理论研究至今进展不大。目前人们在仿真时还都是采用传统的数值积分方法，如四阶Runge-Kutta法、Gear法、Newmark法等。

4. Kane-Huston方法

4.1 低序体阵列(Lower Body Array)

用于描述多体系统的拓扑结构



$L^0(K)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$L^1(K)$	0	1	2	1	4	4	1	7	1	9
$L^2(K)$	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1
$L^3(K)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4. Kane-Huston方法

4.2 变换矩阵

坐标系K相对于坐标系J的方位可由变换矩阵SJK确定，其元素由下式确定

$$\boldsymbol{SJK}_{mn} = \boldsymbol{b}_{jm} \cdot \boldsymbol{b}_{kn} \qquad (m, n = 1, 2, 3)$$

坐标系K相对于惯性参考系惯性系的方位由变换矩阵确定

$$\boldsymbol{SOK} = \prod_{t=u}^{0} \boldsymbol{SSV} \qquad L^u(k) = 1, V = L^t(k), S = L(V)$$

4. Kane-Huston方法

4.3 Kane方程

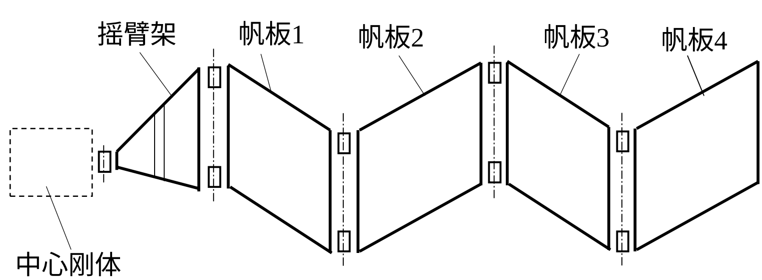
对应于每个广义速率的广义惯性力与广义主动力之和为零。

主动力和惯性力向偏速度方向投影

$$\boldsymbol{F}^{*}+\boldsymbol{F}=\boldsymbol{0}$$

5. 卫星帆板展开动力学仿真

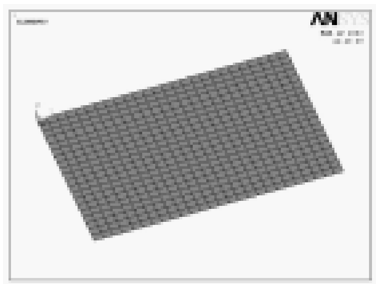
5.1 结构示意图



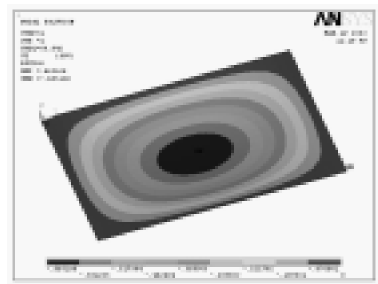
典型的柔性多体系统

5. 卫星帆板展开动力学仿真

5.2 帆板模态分析(ANSYS)

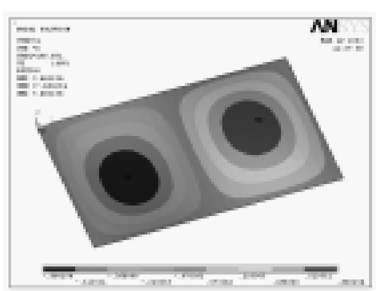


有限元网格划分

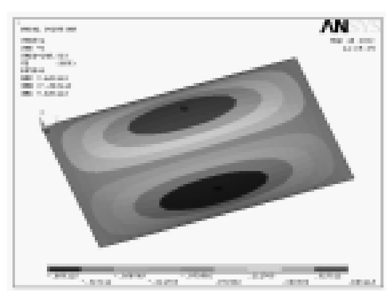


一阶模态

5. 卫星帆板展开动力学仿真



二阶模态



三阶模态

5. 卫星帆板展开动力学仿真

5.3 最终动力学方程

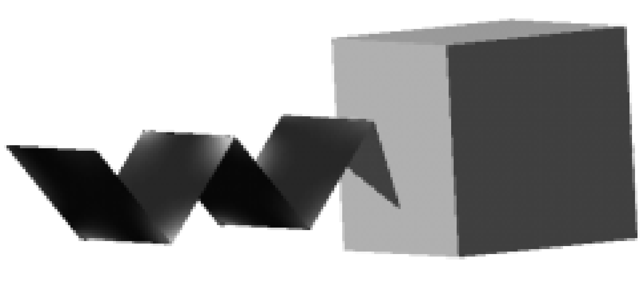
$$\tilde{M}\ddot{\tilde{q}} + \tilde{C}\dot{\tilde{q}} + \tilde{K}\tilde{q} = \tilde{Q}$$

$$\tilde{M} = \begin{bmatrix} \tilde{M}^1 & & & \\ & \tilde{M}^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \tilde{M}^n \end{bmatrix} \qquad \tilde{C} = \begin{bmatrix} \tilde{C}^1 & & & \\ & \tilde{C}^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \tilde{C}^n \end{bmatrix}$$

$$\tilde{K} = \begin{bmatrix} \tilde{K}^1 & & & \\ & \tilde{K}^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \tilde{K}^n \end{bmatrix} \qquad \tilde{Q} = \left[\tilde{Q}^1, \tilde{Q}^2, \cdots, \tilde{Q}^n\right]^{\mathrm{T}}$$

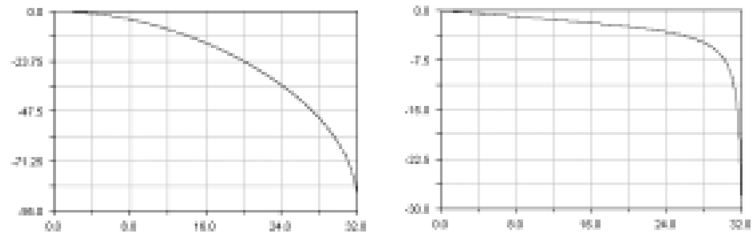
5. 卫星帆板展开动力学仿真

5.4 正在展开的卫星帆板



5. 卫星帆板展开动力学仿真

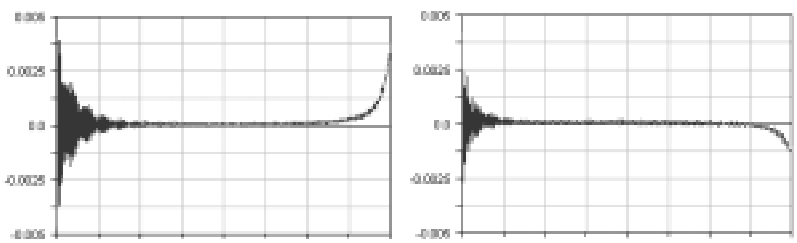
5.5 卫星帆板展开过程仿真结果



(a) 角位移　　　　(b) 角速度

摇臂架角位移、角速度曲线

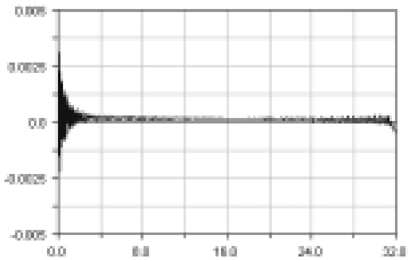
5. 卫星帆板展开动力学仿真



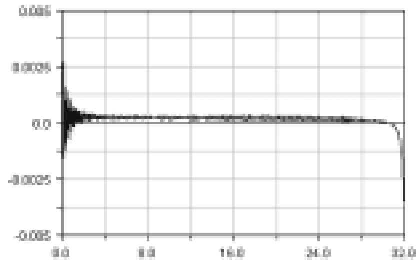
(a) 帆板1　　　　(b) 帆板2

帆板中点变形曲线

5. 卫星帆板展开动力学仿真



(c) 帆板3



(d) 帆板4

帆板中点变形曲线

谢谢！