

变拓扑多体系统动力学的全局仿真¹⁾

洪嘉振 倪纯双

(上海交通大学工程力学系, 上海 200030)

摘要 对于在运动过程中系统自由度会发生改变的变拓扑复杂机械系统, 提出基本系统与当前系统的概念, 采用约束激活的思想, 实现系统拓扑结构在仿真过程中自动切换. 以笔者开发的多体系统动力学仿真软件 DAMB 为基础, 将其扩展为可进行变拓扑多体系统动力学全局仿真的软件系统. 文中以某型号火箭炮系统火箭弹发射动力学的全局仿真为例说明这种方法的可行性.

关键词 变拓扑多体系统, 发射动力学, 动力学仿真

引 言

在航天器、车辆、机器人与复杂机械系统等领域中存在大量复杂的动力学现象. 例如, 火炮系统炮弹发射过程, 机械系统的碰撞、捶击现象等等. 这些现象动力学模型的共同点是在运动过程中系统的自由度会发生突变, 称这类系统为变拓扑多体系统. PFEIFFER 在文献 [1] 中给出了多种变拓扑系统动力学的研究背景, 指出由于该系统拓扑结构的切换取决于系统运动性态, 绝大多数情况并不能预见切换时刻, 因此人为干预这种切换, 分阶段进行仿真计算是效率低且不切实际的处理方法. 考虑到多体系统动力学仿真软件系统对于任意给定拓扑的系统具有自动建模与仿真计算的功能, 那么在此基础上进行扩展, 有可能高效、连续地实现变拓扑多体系统动力学的全局仿真. 本文以笔者开发的多体系统动力学仿真软件 DAMB (Dynamic Analysis of Multibody systems)^[2] 为基础, 提出基本系统与当前系统的概念, 采用约束激活的思想, 实现系统拓扑结构的切换, 将 DAMB 扩展为可进行变拓扑多体系统动力学全局仿真的软件系统 DAMB-V. 文中将给出这种方法的原理与实现, 以某型号火箭炮系统火箭弹发射动力学的全局仿真为例说明这种方法的可行性.

1 变拓扑多体系统动力学模型及连续仿真的实现

以描述多体系统位形的坐标类型分, 其动力学的模型一般分为两大类^[3]. DAMB 软件系统采用笛卡尔坐标与欧拉四元素描述多体系统各物体的位形, 系统的数学模型为第 II 类动力学方程^[4]

$$M \ddot{x} + \Phi^T \lambda = F \quad (1)$$

$$\Phi(x, t) = 0 \quad (2)$$

对于有 N 个刚体的系统, 状态变量 $x \in R^{7N}$, 质量阵 $M \in R^{7N \times 7N}$, 力阵 $F \in R^{7N}$. 若独立的约束方程个数为 l , $\Phi \in R^l$, 拉格朗日乘子阵 $\lambda \in R^l$, Φ 为约束方程的 Jacobi 矩阵. 从这类

¹⁾ 国家教委博士点专项基金和国家自然科学基金资助项目.

1995-03-31收到第一稿, 1995-10-04收到修改稿.

动力学方程的结构可知, 当多体系统的刚体个数给定后, 系统的拓扑构型对方程的贡献主要表现在组集的约束方程 (2) .

对于变拓扑多体系统, 存在一种在运动过程中始终不变的拓扑结构, 称这种拓扑的系统为该系统的基本系统. 描述基本系统的约束方程称为基本约束方程, 记为

$$\Phi(x, t) = 0$$

令 $\Phi \in R^{l_0}$. 若该系统在运动过程中存在 s 个拓扑状态, 在某种条件下, 系统切换到状态 i ($i= 1, \dots, s$), 称此状态下的系统为该多体系统的当前系统. 描述当前系统的约束方程由两部分组成, 一是基本约束方程, 另一为与该当前系统相对应的附加约束方程, 后者记为

$$\Phi_i(x, t) = 0$$

令 $\Phi_i \in R^{l_i}$, 故当前系统的约束方程的 $\Phi = (\Phi^T, \Phi_i^T)^T, \Phi \in R^{l_0+l_i}$.

根据这种思想, 描述整个系统的约束方程分为两类, 一为基本约束方程, 另一为构成不同拓扑结构的所有附加约束方程的集合, 记为 Φ_p , 称其为被动约束方程. 有 $\Phi \in \Phi_p, i= 1, \dots, s$ 当系统切换到状态 i 时, Φ_p 中的 Φ_i 部分被激活.

不同拓扑的切换取决于系统某瞬时的运动性态. 这种切换条件的自变量可能为时间、系统的运动学量或系统的受力情况. 后两种分别称运动学条件与动力学条件. 由于受力条件依赖于运动状态, 所以从某种意义上讲动力学条件是较复杂的运动学条件. 故状态 i 的切换条件可写为

$$\Psi_i(x, \dot{x}, \ddot{x}, t) > 0$$

令 $\Psi_i \in R^{m_i}, \Psi_i, (i= 1, \dots, s)$ 构成了 s 个状态的切换条件族.

DAMB 是一个具有较好用户界面的多体系统动力学计算机辅助分析软件系统^[4], 软件通过菜单要求用户输入构成系统的刚体

惯量参数、约束关系与受力情况等最基本参数和动力学仿真计算工作单. 包括系统动力学方程与约束方程组集、自由度分析、数值积分等的仿真计算全过程由计算机自动完成. 用户通

图1 DAMB-V 主框图

Fig. 1 A main chart of DAMB-V

过输出界面了解仿真结果, 此界面提供可读数据表格、曲线与动画显示等方式供用户选择. DAMB 存在物体库、受力库、约束库等三个基本库供用户选择组集动力学方程 (1) (2). 由于 DAMB 有完善的数据结构与模块结构, 尤其约束关系采用刚体偶对与约束库号的数据格式, 因此根据上述的基本原理, 该系统可较方便地扩展来处理变拓扑多体系统动力学仿真. 扩展系统 DAMB-V 其核心程序的框图如图 1 所示. 在 DAMB 的基础上主要增加了以下的内容与模块:

输入变拓扑的状态总数 s 、初始的当前拓扑号 j_0 等数据;

输入基本约束与被动约束关系;

对确定的当前拓扑的附加约束给予激活;

切换条件的搜索判断, 确定当前拓扑号 j .

当所有基本数据输入完毕后, DAMB-V 首先激活初始设定的当前系统的附加约束, 组集该系统的动力学方程进行仿真计算. 每计算一步, 对计算结果作切换条件的搜索判断, 如果所有切换条件均不满足, 则继续作下一步仿真计算; 如果搜索到某拓扑的切换条件满足, 则将该拓扑结构作为当前系统, 该拓扑的附加约束被激活, 组集该当前系统动力学方程, 继续进行仿真计算. 依此类推, 直到预定的结束时间而终止仿真计算.

2 火箭炮系统发射动力学仿真

某型号火箭炮系统由车体、回转体、俯仰体与多发火箭弹组成 (见图 2). 在发射过程中, 各弹以 0.2 s 间隔连续发射. 火箭弹的结构如图 3 所示. 从弹体点火到弹体离开炮筒分四个阶段:

- 1) 从点火开始, 在火箭的推力小于阈值 F_0 , 弹体与炮筒固结;
- 2) 推力大于阈值 F_0 弹体在炮筒作螺旋运动;
- 3) 当弹体中定心部出炮口, 弹后定心部作螺旋运动, 弹体又有偏航与俯仰运动;
- 4) 弹后定心部出炮口, 弹体与炮筒无约束关系.

可见, 即使只考虑火箭弹单发过程, 系统的拓扑会发生突变, 系统的拓扑状态数 $s=4$, 初始拓扑状态 $j_0=1$. 根据单发的物理过程将系统模化为由 5 个刚体构成的多体系统, 它们分别是车体、回转体、俯仰体、弹尾与弹体. 把火箭弹抽象为弹尾与弹体是考虑到第 3 阶

图 2 火箭炮系统的结构

Fig. 2 A structure of system of rocket gun

图 3 弹体、弹尾与发射筒相对位置

Fig. 3 A position relationship among bomb body, bomb tail and gun barrel

可见, 即使只考虑火箭弹单发过程, 系统的拓扑会发生突变, 系统的拓扑状态数 $s=4$, 初始拓扑状态 $j_0=1$. 根据单发的物理过程将系统模化为由5个刚体构成的多体系统, 它们分别是车体、回转体、俯仰体、弹尾与弹体. 把火箭弹抽象为弹尾与弹体是考虑到第3阶段变拓扑的需要, 假定弹的质量集中在弹体, 弹尾质量为零. 系统各刚体间的约束关系如下表所示:

	1 stage	2 stage	3 stage	4 stage
vehicle-rotating parts	revolved joint O_1			
rotating parts-elevating parts	revolved joint O_2			
elevating parts-tail	fixed joint O_3	screw joint O_5	screw joint O_7	free joint O_9
tail-rocket missile	fixed joint O_4	fixed joint O_6	universe joint O_8	fixed joint O_{10}

由此可知, 系统的基本约束 $\Phi_0 = \{O_1, O_2\}$, 被动约束 $\Phi_1 = \{\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4\}$, 其中附加约束 $\Phi_1 = \{O_3, O_4\}$, $\Phi_2 = \{O_5, O_6\}$, $\Phi_3 = \{O_7, O_8\}$, $\Phi_4 = \{O_9, O_{10}\}$. 上述约束关系都可由DAMB的约束库中选取. 系统各刚体间作用的弹簧、阻尼, 发射过程中作用在俯仰体与弹尾间的变推力 $F(t)$, 都可通过DAMB受力库中弹簧、阻尼力元与变力元的选项输入.

图3为弹体、弹尾与俯仰体中的发射筒间相对位置的示意, 其中 C_i ($i=3, 4, 5$), 分别为发射筒参考点、弹体与弹尾的质心, r_i 为它们绝对位置矢径. 图中的坐标系为它们的连体基, d_i 分别为发射筒前沿、中定心部后沿与弹尾后沿的位置矢径. 在单发情况下, 上述四种状态切换条件可表示为

$$\Psi_2 = F - F_0 > 0$$

$$\Psi_3 = (r_4 + d_4 - r_3 - d_3) \cdot x_3 > 0$$

$$\Psi_4 = (r_5 + d_5 - r_3 - d_3) \cdot x_3 > 0$$

图4为单发情况下通过DAMB-V连续仿真得到的系统各物体相对惯性空间俯仰与回转角速度的时间历程. 由图4可见, 时间 $0 < t < 0.06$ 阶段, 弹体与俯仰体有相同的响应, 系统处于第一与第二状态. $0.06 < t < 0.12$, 弹体与俯仰体有不同的响应, 说明火箭弹中定心部出炮口, 系统处于第三状态. $t > 0.12$, 弹体与俯仰体响应有明显的差异, 此时火箭弹已全部出炮口.

图4 单发时系统俯仰角速度响应

Fig. 4 A response of pitch velocity of system

此时火箭弹已全部出炮口.

参 考 文 献

- 1 Pfeiffer F. Dynamical system with time-varying or unsteady structure, ZAMM · Z. Angew. Math. Mech, 1991, 71 (4): 6~ 22
- 2 洪嘉振, 屠锦荣, 倪纯双. 多体系统运动学动力学分析软件DAMB. 见: 洪嘉振主编. 多体系统动力学——理论、计算方法和应用. 上海: 上海交通大学出版社, 1992. 77~ 82
- 3 洪嘉振, 刘廷柱. 离散系统计算动力学现状. 力学进展, 1989, 19 (2): 205~ 210
- 4 倪纯双. 多体系统动力学分析及通用微机软件开发: [硕士论文]. 上海: 上海交通大学, 1992

GLOBAL DYNAMICS SIMULATION OF MULTIBODY SYSTEMS WITH VARIABLE TOPOLOGY

Hong Jiazhen Ni Chunshuang

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract New concepts, a basic system and a current system for a multibody system with variable topology, are proposed for the global dynamics simulation of the complex mechanical systems. By use of technology of activation of passive constraints, the exchange of topologies of a system is automatically completed in the simulation process. The software DAMB, developed by the authors is extended to simulate the whole dynamic process of a system. An example, the simulation of launching of a rocket gun system, is given in the end of the paper to prove the feasibility of the method.

Key words multibody system with variable topology, launching dynamics, dynamics simulation