

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.05.004

多体机械系统的建模、控制与容错

杨浩 张泽君 姜斌

(南京航空航天大学自动化学院,南京,210016)

摘要:多体机械系统是近年来控制领域研究的难点。本文首先介绍了多体机械系统的结构和基本特性。其次,总结了近年来多体机械系统动力学常用的建模方法,分析了各种建模方案的优缺点。进一步介绍了近年来针对多体机械系统所采用的不同控制方法。最后,列举了容错控制在多体机械系统中的应用,并对多体机械系统控制未来的发展趋势进行了展望。

关键词:多体系统;建模理论;控制;容错控制

中图分类号:O313.7

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2017)05-0612-10

Modeling, Control and Fault Tolerance of Multibody Mechanical Systems

YANG Hao, ZHANG Zejun, JIANG Bin

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Multibody mechanical systems have been a difficult aspect in the control field in recent years. The paper firstly introduces the general structure and characteristics of multibody mechanical systems. Then, frequently used modeling methods are analyzed and compared. Advantages and drawbacks of these methods are given afterwards. Moreover, the paper gives a detailed review of recent results on different control schemes and fault-tolerant control methods applied to the multibody mechanical systems. Finally, some perspectives are provided.

Key words: multibody systems; modeling theory; control; fault-tolerant control

随着控制系统规模的日益增大和机器人技术的迅速发展,各类复杂机械系统大规模涌现,如车辆、各类航天器、机械臂、机器人及人体科学等。由于系统的自由度不断提高,越来越多的复杂系统已经不能用单一系统模型建模,因此开展多体系统的动力学建模和控制技术的研究工作具有非常重要的意义。多体系统是以一定联接方式相互关联的多个物体组成的系统,在机器人、航空、航天、机械领域中,航天器、机器人、车辆和民用机械等系统均

为最常见的多体系统^[1-3]。

1977年,多体动力学研讨会在德国慕尼黑首次召开,从那之后,关于多体动力学的国际会议层出不穷。近年来,国内外学者对多体系统的建模和控制做了深入的研究,已经涌现了丰硕的研究成果。

另一方面,由于现代精密控制系统的复杂程度越来越高,系统部件越来越多,使得被控系统发生故障的概率越来越高。在大规模的复杂系统中,一

基金项目:国家自然科学基金(61473143,61622304)资助项目;江苏省自然科学基金(BK20160035)资助项目;中央高校基本科研基金(NE2014202,NE2015002)资助项目。

收稿日期:2017-07-01;**修订日期:**2017-08-15

作者简介:杨浩,男,教授,博士生导师。研究方向:切换系统、互联系统容错控制及其航空航天应用。发表SCI检索论文50余篇,申请国家发明专利8项,其中授权5项。获得国家优秀青年科学基金项目以及江苏省杰出青年科学基金项目资助。获教育部自然科学一等奖,江苏省科技进步二等奖,中国航空学会科技进步三等奖。

通信作者:杨浩,E-mail:haoyang@nuaa.edu.cn。

引用格式:杨浩,张泽君,姜斌.多体机械系统的建模、控制与容错[J].南京航空航天大学学报,2017,49(5):612-621.
YANG Hao, ZHANG Zejun, JIANG Bin. Modeling, control and fault tolerance of multibody mechanical systems[J].
Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(5): 612-621.

且某一个子系统发生事故就有可能造成重大的财产损失。随着系统的准确性要求的不断提升,容错控制为提高系统的可靠性开辟了一条新的路径^[4-6]。容错控制的目的在于系统发生故障时,系统在达到可接受的性能指标的前提下,仍能尽可能地保持稳定。由于任何系统尤其是大规模复杂系统都会不可避免地发生故障,容错控制可以看作是保证系统安全的最后一道防线。根据系统处理故障和冗余的不同方式,目前容错控制主要有主动容错控制和被动容错控制两种方式^[7-8]。

多体系统的容错控制问题近年来也得到越来越多的关注。由于多体机械系统的种类繁多,每一类系统都有各自的特点,不同系统之间差异较大,因此容错控制方案都是针对具体的对象而提出的。目前,多体系统的容错控制技术主要应用在车辆^[9]、航天器^[10]、机器人^[11-12]、电机^[13-14]和核动力系统^[15]。

本文对多体机械系统的建模与控制研究进行了全面的梳理与总结,使读者对该方向有一个全面的了解。

1 多体机械系统的结构和特性

1.1 多体系统的结构

多体机械系统是由多个物体以铰(关节)相互联系组成的系统。在多体机械系统中,铰对连接该铰的邻接刚体施加约束,其中球铰、柱铰、万向铰和滑移铰是最常见的铰。如果一个多体系统中所有子个体都为刚体,那么该系统也可称为多刚体系统。如果有一个子系统是柔体,则称该多体系统为柔性多体系统。本文所讨论的多体机械系统均为多刚体系统。

描述一个完整的多体系统需要大量的参数,其中必须明确系统的几何分布和质量分布,外界施加在系统中的力和子系统之间的连接方式。描述几何和质量分布需要下列信息:(1)刚体数量信息;(2)系统结构信息;(3)运动约束信息;(4)铰位置信息;(5)每一个刚体的质量和转动惯量信息。

1.2 机械系统的非完整约束

多体机械系统往往受到非完整约束^[16-18],例如移动机器人系统、欠驱动航天器^[19-20]、多体航天器^[21-23]和其他一些机械系统等。在工程实践中,如果系统的运动存在对称性,那么这些对称性就会使系统存在一些守恒量如角动量,如果这些守恒量不可积,那么系统就存在非完整约束。

非完整系统是指受到非完整约束的系统,代表了一大类的机械系统^[24-25]。这些系统都有一个共同的特征:受到非完整约束方程的约束,即这类方

程中至少包含一个带有微分项的、不可积的约束方程。这些非完整约束通常是由速度不可积约束引起,不能通过积分转化为系统位形空间。

一般机械系统的速度约束可表示为

$$g(\mathbf{q}) \cdot \dot{\mathbf{q}} = 0 \in \mathbf{R}^m$$

其中, $\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_n]$ 表示机械系统广义坐标向量,且 $m \leq n$ 。如果系统的速度约束不能够通过积分转化为几何约束,那么这个约束就是非完整约束。例如,汽车的4个车轮就受到非完整约束,它的前后轮只能滚动,不能侧向滑动,可实际上,汽车能以任意方向停在位形空间的任意一处,在位形空间中不受任何限制。非完整系统的实例还包括作纯滚动、无滑动运动的圆球和在冰面上滑动的冰刀等^[26]。

在对多体系统进行建模之前,必须清楚地了解系统的整体结构和系统所受到的约束类型,这样才能选择合适的方法建模。不同系统的复杂程度不一样,受到的约束类型不一样,建模方法也会有差异。

2 多体机械系统的建模

多体系统动力学建模是工程领域的迫切需要面对和解决的问题。经过三十几年的发展,多体系统动力学已经形成了多种分析和建模方法,目前常用的建模方法主要有经典力学法、Roberson-Wittenburg法(R-W法)、Kane方法和递推算法等。由于多体机械系统的多样性和差异性,这些方法都有各自的优缺点和适用范围,具体采用何种方式建模还得根据对象具体分析。

2.1 经典力学法

2.1.1 牛顿-欧拉方程

以牛顿-欧拉方程^[27-29]为代表的矢量力学方法就是应用质心动量矩定理,对多体系统中的某一个隔离体写出其动力学方程,而相邻刚体间的内力体现在动力学方程中。它的物理意义明确,对于处理单刚体或者数目少的多刚体系统方便可行。但随着多体系统的个体数目增加,各个刚体之间存在的约束愈加复杂,方程的复杂程度也因此呈指数方式增长,其计算量庞大,几乎不可能寻求其解析解^[30-31]。因此,牛顿-欧拉方程并不适用与大规模的复杂系统。

文献[32]针对串联机械臂系统,在牛顿-欧拉方程建模的基础之上,提出了一种新型的计算系统逆动力学的数值解法。针对有弹性节点的多体机械系统,该文献用牛顿-欧拉方程建模后,实现了实时反馈线性化控制。文中还指出,如果采用Lagrange方程建模,想要达到相同的实时反馈线性

化控制效果,那么系统的结构必须非常简单。

文献[33]针对一般的可变结构的多体系统,用牛顿欧拉方程建立系统动力学方程,为了简化建模过程,仅用了一个坐标系去描述整个系统的所有形态。并且将该建模方法应用于三杆机械臂系统,成功地实现了机械臂的运动仿真。

目前,市场上许多商业化的多体系统建模分析软件采用矢量力学的方法建模。由于它的计算量为 $O(N^3)$, 所以对于子系统数目多、自由度高的多体系统来说,这种建模方法没有优势。

2.1.2 Lagrange 方程和 Hamilton 系统

以 Lagrange 方程^[34-36] (式(1))为代表的分析力学方法用广义坐标来描述刚体系统的运动状态,运用 d'Alembert 原理,建立与牛顿第二定律等价的 Lagrange 方程,方程中不出现理想约束力

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, s \quad (1)$$

Hamilton 系统(式(2))由 Lagrange 方程经过 Legendre 变换演变而来,基本思想是把力学系统的动力学演化过程,归纳为某一积分作用量取驻值的动态优化问题。它的方程为一阶微分方程,比 Lagrange 方程更容易求解析解。比起牛顿-欧拉方程,这两种力学方法将多体系统看作一个整体去研究,从能量和功的角度出发,以能量的方式建模,求出整个系统的能量函数,用分析法替代传统的几何方法来研究多体系统。

$$\begin{cases} \dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i} \\ \dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial q_i} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, s \quad (2)$$

文献[37,38]分别讨论了二维平面内的闭环和开环多体系统的建模问题,在 Hamilton 方程的基础之上,用分治策略提出了一种递归建模的方法。其建模过程主要分为两个步骤,首先将多体系统以二叉树的形式展开来计算各个铰接点的速率和约束力的大小,第二步再计算系统动量关于时间的导数,从而得到系统的动力学方程。这种建模方法能够更有效地处理拓扑结构复杂的多体系统,提高了建模的精确性和速率。

文献[39]针对多体机械系统动力学仿真问题,结合了增广 Lagrange 方程和 Hamilton 原理,提出了一种新的建模思路。系统动力学方程大部分以 Lagrange 方程的形式给出,而剩下的部分则用 Hamilton 方程描述。结合 Newton-Raphson 算法,进一步说明即使多体机械系统存在奇异位形点,用该建模方法也能有效进行前向动力学仿真。

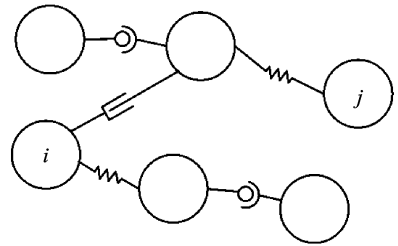
2.2 R-W 法

20 世纪 60 年代,Roberson 和 Wittenburg 将图论引入多刚体动力学,提出了分析多刚体系统的普遍动力型方程^[40-41]。R-W 法能有效地处理树结构多刚体系统,也能用刚体切割或者铰切割的方法处理非树结构系统,是一种能够分析多刚体动力学的普遍性方法。

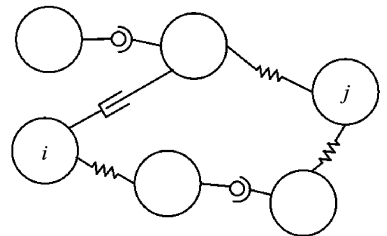
多体机械系统中,各个刚体的连接情况称作系统的结构。对多体机械系统进行拓扑结构描述,就是用数字化的形式表达系统中个体间的联接关系,使计算机能够通过数字信息知道个体间的联接情况,确定个体间的相对位置,它是多体动力学计算机算法的基础。

如图 1 所示,当任意两个刚体 i 和 j 之间只有唯一的路径存在时,则称这样的多体系统为树结构系统;反之,为非树结构系或者闭环系统。

Roberson 和 Wittenburg 提出用图论工具,即用一个有向图来表示多体系统的结构,并采用了关联矩阵和通路矩阵来描述系统的数学结构。



(a) Multibody system with tree structure



(b) Multibody system with non-tree structure

图 1 多体系统拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of multibody system

对于一个含有 $n+1$ 个刚体和 n 个铰的多刚体系统,关联矩阵 S 用来描述了系统内各个每个物体和铰的连接情况,它的行和列分别表示对应的刚体号和铰号,第 i 行和第 j 列的元素定义为

$$S_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{铰 } O_j \text{ 与刚体 } B_i \text{ 关联且以 } B_i \text{ 为起点} \\ -1 & \text{铰 } O_j \text{ 与刚体 } B_i \text{ 关联且以 } B_i \text{ 为终点} \\ 0 & \text{铰 } O_j \text{ 与刚体 } B_i \text{ 无关联} \end{cases}$$

$$i = 0, 1, \dots, n; j = 1, \dots, n$$

对于树结构系统,通路矩阵 T 用来描述多体系统内各个刚体和零刚体之间的通路情况,它的列和

行分别表示对应的刚体和铰,第 j 行和第 i 列元素定义为

$$T_{ji} = \begin{cases} 1 & O_j \text{ 铰属于 } B_0 B_i \text{ 通路且指向 } B_i \\ -1 & O_j \text{ 铰属于 } B_0 B_i \text{ 通路且背向 } B_i \\ 0 & O_j \text{ 铰不属于 } B_0 B_i \text{ 通路} \end{cases}$$

$$i, j = 1, \dots, n$$

2.3 Kane 法

Kane 方法利用具有明确物理意义的广义速率来描述多刚体系统的运动,用 d'Alembert 原理直接建立动力学方程^[42],方程中不出现理想约束力。

Kane 本人早在文献[43]中针对一类复多体航天器系统的建模问题,分析且比较了 Kane 法相对于牛顿-欧拉方程、Lagrange 法、Hamilton 原理的优势,指出对于复杂的航天器系统,用 Kane 法求解动力学模型时,对于非自由变量的选择范围最大,求解出的模型形式最简单。

文献[44]把降落伞空投系统视为多体系统,将其分解为三个部分,分别建立其动力学方程,并用 Kane 方程得到整个系统的动力学模型,得到的模型不仅维数最少,并且有利于计算。

与经典力学的方法相比,用 Kane 法建模可以避免计算动力学函数,使得计算量明显减少,并且, Kane 法对于完整系统和非完整系统同时适用,表 1 概括了 Kane 法与经典力学法的特点。与 W-R 法相比,对于任意多刚体系统, Kane 方法并不是一个通用性方法,必须针对具体的多刚体系统作具体的分析,并且对于如何选择合适的广义速率研究人员需要一定的经验和技巧。

表 1 Kane 法与经典力学方法的比较

Tab. 1 Comparison between Kane's method and classical methods

方法	牛顿-欧拉	Lagrange 法	Kane 法
计算量	$O(N^3)$	$O(N^4)$	$O(N^2)$
适用范围	刚体数少	刚体数多	刚体数多
力学范畴	矢量力学	分析力学	矢量兼分析

2.4 其他方法

目前,针对多体系统建模问题,还有许多其他办法,如笛卡尔坐标法、旋量方法、变分方法和递推算法等。

Huston-Kane 算法是 Kane 法具体的计算机程序实现^[45-46]。Huston-Kane 法只给出低序体的拓扑结构,高序体的相对方位用欧拉参数以递推的形式来描述,通过矩阵运算和矢量求导出整个系统的动力学模型,其计算量与 Kane 方法相同。文献[47]结合了 Huston-Kane 法和螺旋理论,对双臂空间机器人系统的运动学和动力学方程进行了

建模和分析。双臂空间机器人包含机械臂、天线、太阳能帆板等部件,对系统进行拓扑结构分析之后,尽管存在 13 个子系统,但 Huston-Kane 法使得整个建模过程并不复杂。

Haug^[48]提出了笛卡尔方法对多刚体系统进行建模;为了提高计算效率,Bayo 和 Jalon^[49]又用完全笛卡尔坐标法描述系统的动力学方程。随着系统规模的不断增大,为了能够提高多体系统的建模效率,递推动力学算法也在不断地发展。美国科学家 Guillermo^[50]将滤波理论应用到了多体系统动力学,实现了 $O(N)$ 阶多体系统动力学的空间算子代数,突破了多体系统建模低效率的瓶颈。

3 多体机械系统的控制

针对多体系统子系统多、强耦合的特点,目前常用的控制方法主要有滑模控制、最优控制和自适应控制。针对多体系统不同的任务需求,又有一些其他非线性控制方法。

3.1 滑模控制

滑模控制^[51]是一类不连续的非线性控制,它迫使系统按照预先设计的滑模面运动,由于滑模面是自己设计的且与对象参数无关,因此具有响应快、鲁棒性强、物理建模简单等特点。

文献[52]针对欠驱动多体系统,利用跟踪位置和速度误差信号来定义滑模面,在滑模控制的基础上,设计了一种新的全状态反馈控制器,并且将其应用到了多体航天器姿态控制上,通过改变滑模面,成功地实现了多体航天器在姿态变化时依旧能够保持系统稳定。文献[53]考虑了同时受完整约束和非完整约束的多体系统,系统中除了刚体和铰之外,还有其他的耦合部件,文中用滑模控制来实现系统的几何稳定和能量约束稳定。

3.2 自适应控制

自适应控制^[54-55]是指通过在线调整控制器参数来应对系统不确定性的控制算法,它可以有效处理参数不确定。在系统存在参数不确定的条件下,设计自适应控制律能够保证系统的理想性能。因此,对于存在参数不确定的多体系统,自适应控制是一种有效的控制方案。

对于连杆机械系统,强耦合的特点使得基于模型的实时控制非常难,文献[55]对此将系统模型用简化的线性状态空间模型代替,提出了线性二次型最优控制器,而应用此控制器必须设计一个状态观测器,由于使用的是线性化的模型,控制的精确程度并不高。文献[56]在此基础上,针对平面四杆机

械系统,将PD控制器和自适应比例振动控制器叠加,设计出了一种新的控制器,并用一种基于能量的方法验证了系统的稳定性。与非自适应控制的方法相比,系统的性能有了很大的提高。

3.3 最优控制

最优控制理论^[57]目前已在航空、航天等实际工程中普遍应用,来解决能耗最小、时间最短和二次型指标最优等理论和工程问题。在多体系统中,最优控制在解决机械臂和机器人的运动规划问题和多体航天器的姿态控制问题上扮演了重要的角色。

文献[58]考虑了一类受到伺服约束的多体系统,这类系统的动力学方程通常为大于等于5阶的微分代数方程,处理这类系统往往需要很多前提假设条件。但该文从最优控制的角度考虑,对系统重新建模,放宽了伺服约束条件,并用起重机仿真实例说明,用最优控制方法能够让负载沿着指定路径到达目的地。

文献[59]针对一般的非完整多体系统模型,利用最优控制方案确定该类系统的控制输入和运动轨迹,给出了一类基于最优控制理论的非完整多体系统运动规划数值方法,并且将该算法应用到了双臂平面型空间机器人进行仿真,实现了该多体系统的运动规划。

3.4 其他控制方案

根据任务需求的不同,实际中存在着许多针对多体机械系统的非线性控制方法,如反馈线性化^[60]、鲁棒控制^[61],本节主要对常见的机器人轨迹跟踪问题和航天器姿态控制问题作简单的介绍。

(1) 机器人轨迹跟踪

机器人本质上就是一个多体系统。由于机器人系统具有强耦合性、高度非线性和不确定性的特点,要求其能够对目标轨迹实现高精度跟踪一直是一个比较困难的控制问题^[62-63]。

文献[64]研究了一类机器人系统,在带有未知参数和受到全局无界扰动的前提下,将一阶滑模控制和二阶滑模控制结合,设计了一类新的鲁棒控制器来抵消扰动和不确定性带来的影响,保证系统能在有限时间内收敛。在其后续的工作中,又采用终端滑模控制器方法抵消机器人在轨迹跟踪时奇异位形的影响^[65]。

文献[66]针对参数不确定的多变量移动机器人系统,提出了一种新的基于线性差值的轨迹跟踪控制器的设计方案。控制器由系统的离散状态空间方程得出,只要知道系统的期望状态值,便能够

求出系统的所需要的控制信号输入值。

(2) 航天器姿态控制

姿态控制一直是航天器技术研究领域的重点和难点之一^[67]。由于航天器的既定任务必须在一定的轨道上并在一定的姿态指向精度下完成,保证航天器姿态稳定对于航天任务的完成有重要的意义。当前,航天器姿态控制精度要求和可靠性要求越来越高,如果没有有效的控制策略加以保障,根本无法满足这些要求。随着近年来控制理论的发展,许多非线性控制方法被应用于航天器的姿态控制器设计中。

文献[68]讨论了带有动量轮和附属物的航天器姿态和形状控制问题,根据角动量守恒定律,采用旋转矩阵的方式,得到姿态和形状控制的一般数学模型。并且针对带有附属物的航天器,提出了判断系统可控的一般性条件。只要输入的控制量能够满足李代数秩判据,系统就能够稳定。在此基础上提出了非线性控制器来实现姿态和形状的开环控制。

文献[69]针对刚体航天器,设计了自适应积分二阶滑模控制来实现姿态控制,并且保证系统在有限时间内收敛。为了消除参数不确定和外界扰动的影响,用自适应律来计算和更新控制器的增益。

4 多体机械系统容错控制

故障容错在多体系统控制和维护中具有非常重要的作用。与容错控制在一般系统中的应用不同的是,多体系统的子系统数目多,某些子系统的结构和功能往往是相同的,如连杆和关节,所以往往只要配备一个相同部件就能应对同类型的子系统发生故障。目前,针对多体系统,主要采用这种冗余备份被动容错方法和其他主动容错控制算法。本节具体讨论了故障诊断和容错控制在机器人系统、航天器系统和其他多体系统中的应用。

(1) 机器人

随着各种先进控制技术和人工智能不断应用于机器人系统,机器人系统日趋复杂,尤其是移动机器人,工作在复杂的未知环境中,很有可能发生故障。机器人的故障主要包括传感器故障、供电系统故障、电机故障、控制系统故障等。因此将容错控制应用到机器人技术中显得尤为重要。

可重构连杆机器人是由连杆模块和关节模块组成的可重构多体机械系统,关节和连杆以不同的顺序相互组合可以产生很多不同构型的机器人,只

要某一个连杆或者模块发生故障都会对整个系统的性能造成影响。由于连杆和关节的重复性和可替代性,文献[70]采用硬件冗余这种被动容错控制方法来替换发生故障的某一个环节,以冗余资源为代价换取多体系统的可靠性。而文献[71]针对此多体系统,为每一个关节模块安装力矩传感器来监测关节和模块的健康状况。当某一个部分监测到故障时,通过调节输出功率来抵消子系统故障对整个系统的影响。

文献[72]考虑了机器系统中的驱动系统发生故障的情况,设计了一种新的主动容错控制器。它的主要思想将鲁棒终端滑模控制和故障诊断技术相结合去估计执行器故障,并利用得到的故障估计信号去尽可能抵消故障的影响,使整个多体系统在性能可接受的情况下保持稳定。文献[73]针对同样的系统,设计了神经网络观测器去估计执行器故障,再设计准连续二阶滑模控制器来抵消神经网络观测器的误差使得整个机器人系统保持稳定。这个主动容错控制方法精度高,收敛快,系统也没有震荡。

(2) 航天器

对于航空航天这一类制造维修成本高的复杂多体系统,只要航天器上的个别部件发生故障都可能造成无法挽回的经济损失,尤其是长期不断执行在轨控制操作的执行机构。目前常用冗余配置理念增加系统冗余度,即用配置远超系统自由度的推力器或反作用轮,构成一类过驱动系统,同时结合主动容错控制算法,保证在轨运行的可靠性。

文献[74]针对带有附属物的多体航天器系统,在反作用轮冗余的情况下,又设计了自适应滑模容错控制器,保证整个系统在受到扰动和反作用轮发生故障的情况下能够保持稳定。

冗余备份会使整个多体航天器系统的功耗增加,而且近年来发生故障的卫星往往都只是因为个别部件发生故障,所以在多体航天器系统中,与一般的容错控制技术相比,冗余备份技术在能耗和维修制造成本上并没有优势。文献[75]把重构容错技术应用到了多体航天器系统中,当某个部件发生故障时,及时隔离,并通过在轨重构使整个航天器系统仍能继续保持工作状态完成任务。

文献[76]考虑了参数不确定且受到外界扰动的航天器系统,提出了一种姿态跟踪控制方案,能够有效地削弱外界扰动因性格像,并且即使执行器发生故障或者推力达到饱和,系统仍能够保持稳定。

(3) 其他多体系统

车辆系统是由车体、构架、轴箱和轮对组成的复杂多体系统。文献[77]考虑了四轮独立驱动电动汽车在某一个车轮电机发生故障的情况,采用了协同容错的方法,提出了一种主动故障诊断技术来估计故障,并设计了自适应容错控制器以重新分配控制量的方式来使得整个系统保持稳定。

Stewart平台是由6根支杆联接上下两个平台组成的多体系统,由于其具有6个自由度、精度高和运动灵活等特点,在运动模拟领域中有广泛应用。文献[78]针对Stewart平台,考虑了执行器发生失效故障的情况,设计了滑模容错控制器,并提出了一种自适应调节律,通过调节输出力矩来减小由滑模控制器带来的颤振现象。

5 结束语

本文对国内外多体机械系统的建模方法进行了较为全面的分析、对比和总结,同时对多体系统的控制方法和容错控制在多体系统中的应用进行了概括和介绍。在该方向上虽然已经有了不少成果,但还有大量的工作仍有待开展。本文对该方向的未来发展趋势做了进一步的展望:

(1) 大规模多体系统的动力学方程高效率求解问题仍然是一个问题。随着多体系统的结构越来越复杂,自由度越来越高,如何高效精确地求解这一类代数微分方程还需要做更深入的研究。目前,主流的多体系统动力学分析软件ADAMS^[79],对于任意不同类型的多体系统,只用绝对坐标系建模,其建模效率和求解效率参差不齐。可以与工程实际相结合,针对某些具体对象结合其自身的特点,采用合适的建模方法,开发软件,提高动力学方程求解效率。

(2) 目前故障诊断和容错控制技术在多体系统中的应用并不算多,可以借鉴互联系统、多智能体系统的容错控制方法将其应用于多体系统中^[80-82]。例如当某个子系统发生故障后,可以采用协同容错的方法,综合调节其他刚体的控制器,使系统的稳定性仍然能够得到保证,或者采用独立容错的思想,调节控制器去补偿故障对某个子系统的影响。由于故障不可避免且不能预见,多体系统的子系统数目又多,某一个子系统发生故障都有可能造成不可估量的后果,因此发展多体系统的容错控制理论显得格外迫切。

(3) 目前研究的多为铰接的多体系统,而实际上多体系统内部联接方式可以以电场、磁场和流体

等其他物理场的形式,也可以是多种物理场共同作用,这样系统之间的耦合会复杂得多,系统建模和动力学方程也随之变得更为复杂,例如汽车中的活塞组机械系统^[83],在系统工作时,子系统之间既存在铰接,又有热应力和热变形。对这类强耦合系统的建模、动力学方程求解和控制研究工作可以进一步的开展。

参考文献:

- [1] SCHIEHLEN W. Research trends in multibody system dynamics [J]. *Multibody System Dynamics*, 2007, 18(1): 3-13.
- [2] SCHIEHLEN W. Multibody system dynamics: Roots and perspectives [J]. *Multibody System Dynamics*, 1997, 1(2): 149-188.
- [3] TIAN Qiang, XIAO Qianfei, SUN Yanlei, et al. Coupling dynamics of a geared multibody system supported by elasto hydro dynamic lubricated cylindrical joints [J]. *Multibody System Dynamics*, 2015, 33(3): 259-284.
- [4] BLANKE M, KINNAERT M, LUNZE J, et al. Diagnosis and fault-tolerant control [M]. Berlin: Springer, 2006.
- [5] 周东华,叶银忠. 现代故障诊断与容错控制 [M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
ZHOU Donghua, YE Yinzong. Modern fault diagnosis and fault-tolerant control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [6] 胡昌华,许化龙. 控制系统故障诊断与容错控制的分析 and 设计 [M]. 北京:国防工业出版社, 2000.
HU Changhua, XU Hualong. Fault diagnosis and fault-tolerant control analysis and design for control systems [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000.
- [7] 姜斌,冒泽慧,杨浩,等. 控制系统的故障诊断和故障调节 [M]. 北京:国防工业出版社, 2009.
JIANG Bin, MAO Zehui, YANG Hao, et al. Fault diagnosis and fault accommodation for control systems [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009.
- [8] PATTON R J. Fault-tolerant control [J]. *Encyclopedia of Systems and Control*, 2015: 422-428.
- [9] CHAMSEDDINE A, THEILLIOL D, ZHANG Y M, et al. Active fault-tolerant control system design with trajectory replanning against actuator faults and saturation: Application to a quadrotor unmanned aerial vehicle [J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2015, 29(1): 1-23.
- [10] CHEN Mou, SHI Peng, LIM C C. Adaptive neural fault-tolerant control of a 3-DOF model helicopter system [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2016, 46(2): 260-270.
- [11] PARKER L E. ALLIANCE: An architecture for fault tolerant multi-robot cooperation [J]. *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 1995, 14(2): 220-240.
- [12] SIQUEIRA A A G, TERRA M H. A fault-tolerant manipulator robot based on H₂, H_∞ and H₂/H_∞ markovian controls [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2009, 14(2): 257-263.
- [13] AGHILI F. Fault-tolerant torque control of BLDC motors [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(2): 355-363.
- [14] DWARI S, PARSAS L. Fault-tolerant control of five-phase permanent-magnet motors with trapezoidal back EMF [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(2): 476-485.
- [15] YAZIKOV M, GOLA G, BERG Ø, et al. On-line fault recognition system for the analogic channels of VVER 1000/400 nuclear reactors [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2012, 59(2): 411-418.
- [16] BLOCH A M, REYHANOGLU M, MCCLAMROCH N H. Control and stabilization of nonholonomic dynamic systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1992, 37(11): 1746-1757.
- [17] JEAN F. Control of nonholonomic systems: From sub-Riemannian geometry to motion planning [M]. New York: Springer, 2014.
- [18] KOLMANOVSKY I, MCCLAMROCH N H. Developments in nonholonomic control problems [J]. *IEEE Control Systems*, 1995, 15(6): 20-36.
- [19] KUMAR K D, ZOU A. Robust stationkeeping and reconfiguration of underactuated spacecraft formations [J]. *Acta Astronautica*, 2014, 105(2): 495-510.
- [20] HUANG Xu, YAN Ye, ZHOU Yang. Nonlinear control of underactuated spacecraft hovering [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2015, 39: 1-10.
- [21] LEE H, KIM Y. Fault-tolerant control scheme for satellite attitude control system [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2010, 4(8): 1436-1450.
- [22] GODARD, KUMAR K D, TAN B. Fault-tolerant stabilization of a tethered satellite system using offset control [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2008, 45(5): 1070-1084.
- [23] LI Junquan, KUMAR K D. Decentralized fault-tolerant control for satellite attitude synchronization [J].

- IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2012, 20(3): 572-586.
- [24] DO K D. Global inverse optimal stabilization of stochastic nonholonomic systems[J]. Systems & Control Letters, 2015, 75: 41-55.
- [25] HERVAS J R, REYHANOGLU M. Controllability and stabilizability of a class of systems with higher-order nonholonomic constraints [J]. Automatica, 2015, 54: 229-234.
- [26] BLOCH A M, REYHANOGLU M, MCCLAMROCH N H. Control and stabilization of nonholonomic dynamic systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, 37(11): 1746-1757.
- [27] PAUL B. Analytical dynamics of mechanisms—A computer oriented overview[J]. Mechanism and Machine Theory, 1975, 10(6): 481-507.
- [28] NIKRAVESH P E. Computer-aided analysis of mechanical systems[M]. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1988.
- [29] FÜHRER C, SCHWERTASSEK R. Generation and solution of multibody system equations[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 1990, 25(2/3): 127-141.
- [30] SHABANA A A. Dynamics of multibody systems [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [31] ROBERSON R E, SCHWERTASSEK R. Dynamics of multibody systems[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2012.
- [32] BUONDONNO G, DE LUCA A. A recursive Newton-Euler algorithm for robots with elastic joints and its application to control[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Hamburg, Germany:[s. n.], 2015:5526-5532.
- [33] ASLANOV V, KRUGLOV G, YUDINTSEV V. Newton-Euler equations of multibody systems with changing structures for space applications[J]. Acta Astronautica, 2011, 68(11): 2080-2087.
- [34] ORLANDEA N, CHACE M A, CALAHAN D A. A sparsity-oriented approach to the dynamic analysis and design of mechanical systems—Part 1[J]. Journal of Engineering for Industry, 1977, 99(3): 773-779.
- [35] SMITH D A, CHACE M A, RUBENS A C. The automatic generation of a mathematical model for machinery systems[J]. Journal of Engineering for Industry, 1973, 95(2): 629-635.
- [36] CHACE M A, BAYAZITOGU Y O. Development and application of a generalized d'Alembert force for multifreedom mechanical systems[J]. Journal of Engineering for Industry, 1971, 93(1): 317.
- [37] CHADAJ K, MALCZYK P, FRACZEK J. A parallel Hamiltonian formulation for forward dynamics of closed-loop multibody systems[J]. Multibody System Dynamics, 2017, 39(1/2): 51-77.
- [38] CHADAJ K, MALCZYK P, FRACZEK J. A parallel recursive Hamiltonian algorithm for forward dynamics of serial kinematic chains[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(3): 647-660.
- [39] GONZÁLEZ F, DOPICO D, PASTORINO R, et al. Behaviour of augmented Lagrangian and Hamiltonian methods for multibody dynamics in the proximity of singular configurations [J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 85(3): 1491-1508.
- [40] ROBERSON R E, WITTENBURG J. A dynamical formalism for an arbitrary number of interconnected rigid bodies, with reference to the problem of satellite attitude control[J]. Journal of Infectious Diseases, 1966, 207(9): 1359-1369.
- [41] WITTENBURG J. Dynamics of systems of rigid bodies[M]. New York: Springer-Verlag, 2013.
- [42] CENDRA H, DIAZ V A. The Lagrange-D'Alembert-Poincaré equations and integrability for the Euler's disk [J]. Regular & Chaotic Dynamics, 2007, 12(1): 56-67.
- [43] KANE T R, LEVINSON D A. Formulation of equations of motion for complex spacecraft[J]. Journal of Guidance and Control, 1980, 3(2):99-112.
- [44] ZHONG Yangwei, WANG Liangming. A method to establish the dynamic models of multibody system based on Kane's equations[C]// 2nd International Conference on Modelling, Identification and, Control. Melbourne, VIC, Australia:[s. n.], 2015.
- [45] 休斯敦, 刘又午. 多体系统动力学(上册)[M]. 天津:天津大学出版社, 1987.
- HUSTON, LIU Youwu. Dynamics of multibody systems (Volume One)[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1987.
- [46] 休斯敦, 刘又午. 多体系统动力学(下册)[M]. 天津:天津大学出版社, 1991.
- HUSTON, LIU Youwu. Dynamics of multibody systems (Volume Two)[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1987.
- [47] GE Xinfeng, JIN Jingtiao. Dynamics analyze of a dual-arm space robot system based on Kane's method [C]// International Conference on Industrial Mechatronics and Automation. Wuhan, China: [s. n.], 2010: 646-649.
- [48] HAUG E J. Computer aided kinematics and dynamics of mechanical systems[M]. Boston: Allyn and

- Bacon, 1989.
- [49] DE JALON J G, BAYO E. Kinematic and dynamic simulation of multibody systems; The real-time challenge[M]. New York; Springer Science & Business Media, 2012.
- [50] RODRIGUEZ G, JAIN A, KREUTZ-DELGADO K. Spatial operator algebra for multibody system dynamics[J]. *Journal of the Astronautical Sciences*, 1992, 40(1): 27-50.
- [51] UTKIN V I. Sliding mode control design principles and applications to electric drives[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1993, 40(1): 23-36.
- [52] ASHRAFIUON H, ERWIN R S. Sliding mode control of underactuated multibody systems and its application to shape change control[J]. *International Journal of Control*, 2008, 81(12): 1849-1858.
- [53] BENEDIKT M, STETTINGER G, HORN M. Sliding mode control for constraint stabilization in multibody system dynamic analysis[C]// *Control Applications (CCA)*. Juan Les Antibes, France: [s. n.], 2014: 1557-1562.
- [54] ASTROM K J, WITTENMARK B. Adaptive control[M]. USA: Addison-Wesley, 1989.
- [55] NARENDRA K S, ANNASWAMY A M. Robust adaptive control[C]// *American Control Conference*. [S. l.]: IEEE, 2009, 160(1): 333-335.
- [56] TREVISANI A, VALCHER M E. An energy-based adaptive control design technique for multibody-mechanisms with flexible links [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2005, 10(5): 571-580.
- [57] ATHANS M, FALB P L. Optimal control; An introduction to the theory and ITs applications[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1966.
- [58] ALTMANN R, HEILAND J. Simulation of multibody systems with servo constraints through optimal control[J]. *Multibody System Dynamics*, 2017, 40(1): 75-98.
- [59] 戈新生, 陈立群, 刘延柱. 一类多体系统的非完整运动规划最优控制[J]. *工程力学*, 2006, 23(3): 63-68.
GE Xinsheng, CHEN Liqun, LIU Yanzhu. Non-holonomic motion planning optimal control for a class of multibody systems[J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(3): 63-68.
- [60] MARUYAMA S D. Feedback linearization for stabilization of a class of mobile, multibody systems[C]// *49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. [S. l.]: IEEE, 2010, 58(8): 3590-3595.
- [61] DULLERUD G E, PAGANINI F. A course in robust control theory; A convex approach[M]. New York; Springer Science & Business Media, 2013.
- [62] DUMLU A, ERENTURK K. Trajectory tracking control for a 3-DOF parallel manipulator using fractional-order control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(7): 3417-3426.
- [63] KAMALAPURKAR R, DINH H, BHASIN S, et al. Approximate optimal trajectory tracking for continuous-time nonlinear systems[J]. *Automatica*, 2015, 51: 40-48.
- [64] GALICKI M. Finite-time control of robotic manipulators[J]. *Automatica*, 2015, 51: 49-54.
- [65] GALICKI M. Finite-time trajectory tracking control in a task space of robotic manipulators[J]. *Automatica*, 2016, 67: 165-170.
- [66] SCAGLIA G, SERRANO E, ROSALES A, et al. Linear interpolation based controller design for trajectory tracking under uncertainties; Application to mobile robots[J]. *Control Engineering Practice*, 2015, 45: 123-132.
- [67] MARKLEY F L, CRASSIDIS J L. Fundamentals of spacecraft attitude determination and control[M]. New York: Springer, 2014.
- [68] RUI C, KOLMANOVSKY I V, MCCLAMROCH N H. Nonlinear attitude and shape control of spacecraft with articulated appendages and reaction wheels[J]. *Automatic Control IEEE Transactions on*, 2000, 45(8): 1455-1469.
- [69] TIWARI P M, JANARDHANAN S, UN NABI M. Rigid spacecraft attitude control using adaptive integral second order sliding mode[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2015, 42: 50-57.
- [70] PAREDIS C J J, KHOSLA P K. Designing fault-tolerant manipulators; How many degrees of freedom? [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1996, 15(6): 611-628.
- [71] YUAN Jun, LIU Guanjun, WU Bin. Power efficiency estimation-based health monitoring and fault detection of modular and reconfigurable robot[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(10): 4880-4887.
- [72] VAN M, GE S S, REN H. Finite time fault tolerant control for robot manipulators using time delay estimation and continuous nonsingular fast terminal sliding mode control[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(7): 1681-1693.
- [73] VAN M, KANG H J. Robust fault-tolerant control for uncertain robot manipulators based on adaptive quasi-continuous high-order sliding mode and neural network[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical*

- Engineering Science, 2015, 229(8): 1425-1446.
- [74] HU Qinglei. Robust adaptive sliding-mode fault-tolerant control with L2-gain performance for flexible spacecraft using redundant reaction wheels[J]. IET Control Theory & Applications, 2010, 4(6): 1055-1070.
- [75] PETRICK D, ESPINOSA D, RIPLEY R, et al. Adapting the reconfigurable spacecube processing system for multiple mission applications[C]// Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: [s. n.], 2014: 1-20.
- [76] CAI Wenchuan, LIAO Xiaohong, SONG Y D. Indirect robust adaptive fault-tolerant control for attitude tracking of spacecraft[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2008, 31(5): 1456.
- [77] WANG Rongrong, WANG Junmin. Fault-tolerant control with active fault diagnosis for four-wheel independently driven electric ground vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(9): 4276-4287.
- [78] MENG Qiang, ZHANG Tao, GAO Xiang, et al. Adaptive sliding mode fault-tolerant control of the uncertain stewart platform based on offline multibody dynamics[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(3): 882-894.
- [79] RYAN R R. Adams-multibody system analysis software[J]. Multibody Systems Handbook, 1990: 361-402.
- [80] YANG Hao, JIANG Bin, Staroswiecki M, et al. Fault recoverability and fault tolerant control for a class of interconnected nonlinear systems[J]. Automatica, 2015, 54: 49-55.
- [81] YANG Hao, STAROSWIECKI M, JIANG Bin, et al. Fault tolerant cooperative control for a class of nonlinear multi-agent systems[J]. Systems & Control Letters, 2011, 60(4): 271-277.
- [82] 杨浩, 姜斌, 周东华. 互联系系统容错控制的研究回顾与展望[J]. 自动化学报, 2017, 43(1): 9-19.
- YANG Hao, JIANG Bin, ZHOU Donghua. Results and perspective of fault tolerant control for interconnected systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(1): 9-19.
- [83] DHAR A, AGARWAL A K, SAXENA V. Measurement of dynamic lubricating oil film thickness between piston ring and liner in a motored engine[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2009, 149(1): 7-15.

