

李楠 韦灼彬 张世云 任爱娣 著

# 海上补给高架索系统 多体动力学仿真

Multi-body Dynamics Simulation for Highline Cable  
System of Alongside Replenishment at Sea



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 海上补给高架索系统 多体动力学仿真

李楠 韦灼彬 张世云 任爱娣 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

海上补给高架索系统多体动力学仿真/李楠等著.

—北京:国防工业出版社,2017.1

ISBN 978-7-118-11201-6

I. ①海… II. ①李… III. ①海上补给—理论  
IV. ①TP36

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第000105号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 880×1230 1/32 印张 4 $\frac{3}{4}$  字数 118 千字

2017年1月第1版第1次印刷 印数 1—1500册 定价 38.00元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

当前,中国海军正在高速的发展壮大中,截至2016年1月,有各种舰船300艘,位居世界第三。在建的21世纪新型舰船共65艘,总吨位约30万吨。预计到2017年中国海军便可以在舰船数量上跃居世界第一,总吨位仅次于美国,成为世界第二。但是,截至目前,中国海军仍存在综合补给舰数量严重不足的问题。中国海军现有及在建的综合补给舰仅有12艘,而需要综合补给舰进行海上保障的水面作战舰艇有120余艘,而且这个数字还在迅猛提升,那么,每艘综合补给舰平均要为10艘水面作战舰艇提供海上保障,而美国海军现有综合补给舰34艘,需要提供保障的水面作战舰艇有150艘左右,平均每艘综合补给舰为4.41艘水面作战舰艇提供海上保障。由此可见,中国海军的海上补给能力较美国海军还有很大差距。2012年美国五角大楼的一份调查报告总结说:“中国海军的作战舰艇缺乏远程续航力,作战区域只能锁定在中国周边一些同邻国有争议的海域”。这个结论与中国海军目前的发展方向存在很大的差别。究其原因,还是中国海军缺乏综合补给舰。我国造船工业已经趋于世界水平,综合补给舰这种大吨位舰船在建造方面不存在问题。而综合补给舰的缺乏主要还是海上补给装备研制能力的薄弱。目前,中国海军海上航行横向补给装备主要依赖于进口,原因在于核心的波浪补偿技术还没有被完全掌握。本书是作者和从事海上补给装备研究的同事们长期积累的科研教学成果,重点是解决目前中国缺乏海上补给波浪补偿技术中的高架索动力学模型的问题,有了合理、准确的高架索动力学模型,波浪补偿技术的研究就去掉了一块很大的绊脚石,海上航行横向补给装置的自主研制和生产就指日可待。

全书共5章。参与撰写工作的有海军工程大学勤务学院李楠、韦灼彬、张世云等。第1章全面分析了海上航行横向补给装置的发展现

状和高架索的研究现状;第2章为基于多体动力学理论的绳索的动力学建模分析方法;第3章为以绳索多体动力学模型为基础的海上航行横向补给系统高架索的仿真方法;第4章为基于ADAMS的海上航行横向补给高架索参数化设计平台;第5章为全书总结及海上航行横向补给装置研究的未来展望。

本书的出版得到海军工程大学勤务学院领导、专家的关心和支持,在此还要感谢海军工程大学勤务学院韦灼彬教授、张世云教授、任爱娣教授、何学军副教授等专家、学者给予学术上的支持和帮助。同时要感谢邢道奇博士、魏凯博士等在学习、工作、生活方面给予的帮助。感谢杜又功、龚铭、杜干等海运补给系全体同事在工作中给予的帮助和配合。此外,撰写时作者参阅了国内外许多专家、学者的文献资料,亦谨向原著者表示谢意。

由于作者水平有限,书中恐有不妥和错误,恳请读者批评指正。

作者

2016年9月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 航行横向补给装置发展简史 .....	1
1.2 高架索在海上航行横向补给装置中的地位和作用 .....	3
1.3 国内外的高架索研究现状 .....	4
1.3.1 高架索的动力学和运动学特性研究现状 .....	4
1.3.2 高架索建模方法研究现状 .....	6
1.4 多体系统动力学简介 .....	8
参考文献 .....	9
第 2 章 基于多体系统动力学理论的绳索动力学模型研究 .....	12
2.1 微元在各种坐标系下的姿态变换矩阵 .....	12
2.1.1 方向余弦坐标 .....	12
2.1.2 有限转动四元数坐标 .....	13
2.1.3 欧拉角坐标 .....	14
2.1.4 卡尔丹角坐标 .....	15
2.1.5 小结 .....	16
2.2 基于拉格朗日方程的绳索力学分析方法 .....	17
2.2.1 分析力学基本理论 .....	18
2.2.2 基于拉格朗日方程的绳索力学分析方法 .....	20
2.3 绳索多刚体系统动力学模型研究 .....	23
2.3.1 通路矩阵 $T$ .....	23
2.3.2 球铰的相对运动 .....	23
2.3.3 相邻刚体的坐标系 .....	24
2.3.4 通路矢量和通路矢量阵 .....	26
2.3.5 多刚体系统中刚体质心的速度和加速度 .....	26

2.3.6	有根树多刚体系统的动力学方程	27
2.3.7	基于多刚体系统动力学的钢索动力学模型	27
2.4	绳索刚柔混合体系统动力学模型研究	31
2.4.1	铰点单元运动学	31
2.4.2	铰运动学	32
2.4.3	运动学递推关系	33
2.4.4	动力学方程	34
2.4.5	基于刚柔混合体系统动力学的钢索动力学 方程	35
2.5	绳索多柔体系统动力学模型研究	41
2.5.1	坐标系变换	41
2.5.2	运动学关系	42
2.5.3	多柔体系统的运动学描述	43
2.5.4	基于多柔体系统动力学的高架索动力学方程	44
2.6	高架索系统的多体系统动力学模型研究	51
2.6.1	使用多体动力学建立高架索系统分析模型	51
2.6.2	切断铰的约束处理	51
2.6.3	刚体的动力学方程	53
2.6.4	铰的相对运动变换	53
2.6.5	高架索多柔体系统分析	55
	参考文献	55
<b>第3章</b>	<b>基于 ADAMS 的海上横向补给高架索仿真</b>	<b>57</b>
3.1	ADAMS 简介	58
3.2	海上横向补给装备建模	58
3.2.1	海上横向干货补给系统多体动力学模型组成	60
3.2.2	施加约束	60
3.3	高架索的多刚体系统动力学建模与仿真	61
3.3.1	高架索的多刚体动力学模型	61
3.3.2	基于 ADAMS 的高架索的多刚体动力学仿真	62
3.3.3	小结	72
3.4	高架索的刚柔混合体系统动力学建模与仿真	73

3.4.1	高架索的刚柔混合体动力学模型	73
3.4.2	基于 ADAMS 的索具的刚柔混合体动力学 仿真	74
3.4.3	小结	87
3.5	高架索的多柔体动力学仿真	88
3.5.1	高架索的多柔体动力学模型	88
3.5.2	基于 ADAMS 的索具的多柔体动力学仿真	89
3.5.3	小结	103
3.6	3 种模型仿真结果的比较	104
	参考文献	109
<b>第 4 章</b>	<b>基于 ADAMS 的海上补给高架索参数化设计平台</b>	<b>110</b>
4.1	海上横向补给高架索优化设计模型	111
4.1.1	设计变量	111
4.1.2	优化目标	111
4.1.3	约束条件	112
4.2	ADAMS 的参数化模型和参数化分析简介	112
4.2.1	ADAMS 的参数化模型	112
4.2.2	ADAMS 的参数化分析	113
4.3	基于 ADAMS 的海上补给高架索参数化设计平台	117
4.3.1	定义设计变量	117
4.3.2	参数化模型	118
4.3.3	建立优化设计模型	119
4.4	算例分析	124
	参考文献	126
<b>第 5 章</b>	<b>总结与展望</b>	<b>127</b>
5.1	全书总结	127
5.2	前景展望	128



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 航行横向补给装置发展简史

航行横向补给<sup>[1-4]</sup>是海上物资、装备补给和人员换乘的重要手段之一。航行横向补给装置是美海军在第一次世界大战期间首先研制成功并率先在“莫米”号油船上使用的,输油量可达 90~135t/h。1925 年发明了近距离加油法,使加油作业的两船横向距离缩短到 18~30m。第二次世界大战中,美海军又在这个基础上加以创新,提出了跨索加油法,并采用直径为 150mm 的大口径管使输油量提高到 450~600t/h。战后,美海军推出了一种油船内加油法,这种方法除了具有跨索法的优点外,还因其能在加油时使跨索和软管绞车牵引索都由油船上的一台绞车控制,建立了补给索具同步收、放这一重要概念。奠定了现代补给装置的基础。干货补给是 1944 年 12 月由美海军驻珍珠港的舰队官员和部分水手长们发明了一种“单索工具”加以解决的。这种“单索工具”每次传送质量 1500kg,补给量为 16t/h。随后出现了通索法和高架索法,同时还发明了全都用人力牵引的在船与船之间传送人员的“马尼拉索法”。自 20 世纪 50 年代以来,随着舰载武器的发展,实现导弹在海上安全补给成为推动补给技术进步、革新系统的直接动因。近几十年来,美国海军的横向补给系统主要发展了 3 代,包括平衡重块传送系统、高速自动传送系统、标准横向补给系统。此外,加拿大海军在美海军的标准横向补给系统基础上研制成功了两用标准横向补给系统。该系统采用高架索法,通过变换索具,在一个补给站先后顺序实现干、液货补给,即将原来的干、液货专业补给站合二为一。加拿大海军的“保护者”(AOR509)和“供应者”(AOR510)号补给舰上采用这种两用标准横向补给系统。1973 年,英国海军和 GEC 公司联合研制了一种

“带测量索的受控张力系统,即“MK-II型受控张力系统”。该系统可单用,也可干、液货并用。其特点是在改进通索的基础上多装了一条测量索,用以测量高架索的分离速度,然后驱动绞车。它能改善恒张力系统固有振荡,由于系统采用超前控制,故可提高补给海况和控制精度。

中国海军航行横向补给装置的发展也经历了3代。第一代是“718型航行横向补给装置”,主要包括“HHY-150/70型航行横向液货补给装置”和“718型航行横向干货补给装置”,主要装备在718型综合补给舰上,可实现在4级海况下的干、液货补给。这套装置由中国自主研发,采用机械重锤式波浪补偿法,使用的高架索直径22mm,高架索恒张力25kN;第二代是俄罗斯标准航行横向补给装置,包括“B2-400型航行横向液货补给装置”“B2-400M型航行横向液货补给装置”“B1-1.0型航行横向干货补给装置”和“B1-2.0型航行横向干货补给装置”,主要装备于903型和905型综合补给舰,可实现5级海况下干、液货补给。这套装置为俄罗斯引进,采用液压绞车波浪补偿法,使用的高架索直径25.5mm,高架索恒张力50kN(收)/90kN(放);第三代是北约标准航行横向装置,包括“海上液货补给系统(FAS)”和“干货补给系统(RAS)”,主要装备于903A型综合补给舰,可实现5级海况下干、液货补给。这套装置为北约引进,与美国海军第三代海上航行横向补给装置相同,采用气动式作动筒波浪补偿法,使用的高架索直径24mm,高架索恒张力70kN。

海上补给技术随着海上补给装备的进步也在不断发展。Miller、Hammett<sup>[5]</sup>阐述了第二次世界大战以来航行补给系统取得的三方面重要发展。主要包括高速性、可承受两船之间的相对运动、民船改装技术。Chislett<sup>[6]</sup>提出英国皇家海军可以采用超大油轮为小型船只进行航行液体燃料补给,避免了不必要的、昂贵的停泊设备。Michell、Strong<sup>[7]</sup>叙述了英国皇家海军海上航行补给系统的新发展,可在六级海况进行航行补给。

航行横向补给装置已经经历了一个多世纪的发展历史,尽管横向补给装置已经基本成熟,但各国海军对航行横向补给技术的研究却从未停止。美国海军为进一步提高未来航行横向补给装置水平,已经开始研制重型航行补给装置,对补给过程中的包括船舶水动力学、张力索

受力控制、高海况下重载高速货物自动传送控制等关键技术开展研究。而我国海军海上航行横向补给装置的发展相对滞后,装备主要依靠引进,还没有一个完善的知识、技术体系。

## 1.2 高架索在海上航行横向补给装置中的地位和作用

随着国家海洋权益的拓展,海军战略由近海防御向远海防卫的转型,特别是航母编队的成型以及亚丁湾护航的常态化,我国海军遂行远洋任务越来越繁重,这对海军海上补给能力的要求越来越高。新时期海军主战装备将逐渐向大型化、综合化和远程化发展。研制新型的舰艇海上航行补给装置,提高海军海上综合保障能力,提升海军的持续和再生作战能力是海军建设发展的必然趋势。海上横向补给是海军进行海上补给的主要方式之一。目前海军列装的海上横向补给装备均为引进装备,由于非我国自主研制生产,所以存在装备维修、零配件更新、人员培训、型号更新换代、标准化等诸多问题。为了适应海军后勤装备现代化的发展,海上横向补给装备的自主化研制生产迫在眉睫。海上航行补给的核心技术是波浪补偿技术,关键是如何控制好高架索。高架索作为横向补给装备的重要组成部分,是补给船和受补给船之间联系的桥梁,担负着承载或直接作为传输通道的作用。补给物资能否顺利从补给船运至受补给船,完全取决于高架索是否能安全承载。波浪补偿技术的研究突破口应为高架索模型的研究,只有具备了合理、准确的高架索模型作为研究对象,接下来才能对高架索控制方法进行研究。因此,建立合理、准确的高架索动力学模型将成为海上补给装备自主研制过程中首先要解决的问题。

本书运用多体系统动力学理论对海上补给高架索进行动力学和运动学分析。将高架索看作由无数可实现弹性形变的柔性体基元组成,基元之间由具备 3 自由度的铰连接进行运动约束,以此建立高架索的柔性多体系统模型。将船体对高架索两端的拉力、地球引力和风力作为外部载荷输入高架索多体系统。使用连体基和方向余弦阵将各基元关联起来,并采用分析力学中的拉格朗日方程,建立整个高架索柔性多体系统的动力学模型。最后,使用多体系统动力学仿真计算软件

ADAMS 对海上补给高架索系统的多体动力学模型进行仿真计算,从而实现高架索的动力学和运动学分析。

## 1.3 国内外的高架索研究现状

### 1.3.1 高架索的动力学和运动学特性研究现状

钢丝绳作为高强度且柔软性好的空间螺旋结构制品,被广泛用于机械、建筑、通信和航空航天等领域。工程中的钢丝绳呈现出较复杂的动力学特性。例如,受外部流体激励时的高频颤动现象;弹性绳的性能指标;提升钢丝绳的动张力振动;绳索的空间复杂运动等。海上横向补给高架索根据其结构,属于钢丝绳的一种。因此,高架索也应具备钢丝绳的这些动力学特性。

#### 1. 钢丝绳的高频振动特性研究

钢丝绳高频振动特性的研究主要针对不同载荷工况进行的,如单点简谐激励、流体作用<sup>[8,9]</sup>等钢丝绳的振动情况。Mote<sup>[10]</sup>建立了任意垂度、端部支撑非水平情形下进行绳索的三维动力学模型;金栋平等<sup>[11]</sup>使用模态缩聚和两变量摄动法研究了横向流体激励下的绳索振动特性,得出结论:以某状态运动的绳索突然受到外部流体激励时,会出现高频振动现象。同时,在微重力作用下,绳索的振动周期相对较长;吴天行<sup>[12]</sup>对海上补给恒张力索道系统的振动特性进行了分析,并用离散和简化方法计算了索道系统的固有频率,研究表明系统固有频率随载荷位置的变化而变化,在索道跨距间相当大的范围内,其固有频率基本相同,若船舶某一横振荡运动频率与系统固有频率接近时,载荷会在索道跨距较大范围内产生很大振动;余建星<sup>[13,14]</sup>等通过对补给过程中关键参数进行计算,分析了两种极限工况下货物悬挂点的垂向运动幅值。

#### 2. 钢丝绳的弹性性能研究

钢丝绳在工作时,会受到轴线方向上的张力以及层叠状况下的径向压力,在这两种力的作用下,钢丝绳会发生形变。在文献[15-17]中,提供了一些钢丝绳弹性性能的测量方法。江汉大学的左治江

等<sup>[18]</sup>给出了钢丝绳轴向拉力和径向压力与轴向弹性模量、正交弹性模量及泊松比之间的关系。

### 3. 钢丝绳的动张力振动特性研究

钢丝绳的轴向张力在突然发生激增或骤减时,会引起钢丝绳的弹性振动,这种振动的特性由钢丝绳的动张力特性决定。文献[19]中提出了钢丝绳的动张力计算方法,并以此方法计算出了各种加速度情况下钢丝绳的动张力值。在此方法的指导下,通过有效地限制钢丝绳的运动速度,可降低和消除由于钢丝绳轴向张力的变化引起的弹性振动。何学军、张良欣等<sup>[20]</sup>分析了集中载荷(由货物自重引起的静载荷)运动、位置和高架索两端的高度差对高架索接收端张力的影响。

### 4. 钢丝绳的运动学特性研究

绳索由于其运动规律不遵从刚体动力学规律,所以,只能将其作为柔性体进行动力学分析。目前,动力学分析方法主要分为矢量力学方法和分析力学方法两大类。矢量力学是在笛卡儿坐标系、角坐标系、欧拉坐标系等几种常用坐标系的基础上进行分析的。如果分析对象是刚体,则可以使用经典的方程和坐标变换矩阵进行分析,方便快捷。但是,当分析对象是绳索这种柔性体时,矢量力学在使用时就要增加大量的坐标系和坐标变换矩阵,不仅增加了计算量和计算难度,也降低了计算精度。可以使用分析力学来处理。分析力学可以在任意曲面坐标系下取广义坐标,并在广义坐标上建立方程进行分析。广义坐标的选取可以根据问题的需要,以方便计算为原则,最大限度地降低计算量和计算难度,提高计算精度。矢量力学在进行分析时,其理论基础是牛顿力学,利用分析对象的平衡力系与其速度、加速度之间的关系进行分析;分析力学的理论基础是虚功原理,利用分析对象所受外力所做的功和对象的能与其速度、加速度之间的关系进行分析。在柔性体力学分析中,由于柔性体的坐标系很难选取,所以普遍使用广义坐标。而在广义坐标下,牛顿力学使用存在较大困难。如果使用分析对象所受外力所做的功和对象的能作为问题求解的基础,分析起来就比较方便。文献[21]提供了一种基于分析力学的绳索系统运动学特性分析方法。赵小兵<sup>[22]</sup>、薛红军<sup>[23]</sup>分别对横向补给系统作业过程中,不同载荷比情况下货物的垂直位置和距离水平线最小距离、高架索张力和由张力波

引起的高架索振动进行了仿真分析;杨军等<sup>[24]</sup>应用面向对象的建模方法,研究了横向干货补给过程中,各阶段高架索所涉及的物理行为模型,对高架索形态进行仿真。

### 1.3.2 高架索建模方法研究现状

海上补给高架索作为高强度且柔软性好的空间螺旋结构制品,它既不属于刚体,也不是标准的柔性体,拉伸时为弹簧,放松时不对其他物体产生力的作用。通常是将其视为连续弹性体。因此,高架索基本上是柔性体,抗弯曲能力很小,在约束条件下高架索受外力时,沿绳索方向发生弹性变形,而沿法线方向运动却不受绳索的弹性限制,易出现大变形情况,必须考虑几何非线性。所以,高架索的动力学运动方程为强非线性的偏微分方程,直接求解需要很大的计算量。为了准确求解高架索的运动方程,需要建立合理的高架索动力学模型。由于高架索属于钢丝绳,高架索模型可以借鉴钢丝绳模型。目前,为了能够反映钢丝绳类结构的动力学模型,建模方法主要有静力学平面非线性方法、质量弹簧系统方法、有限元方法、多体动力学方法。

#### 1. 高架索静力学平面非线性模型发展现状

何学军、张良欣等<sup>[25-28]</sup>为体现集中质量对高架索系统特性的影响,在动力学方程中引入 Direc 函数,这种建模方法将高架索抽象为一类具有移动集中质量、复杂边界激励作用的倾斜悬索,综合借鉴两端固支的水平或倾斜的悬索、考虑支撑运动的悬索、具有轴向运动以及具有集中质量或集中载荷等连续系统的非线性动力学建立了海上航行横向干货补给系统高架索的非耦合的面内横向振动和非平面振动的初等动力学模型。

#### 2. 高架索质量—弹簧模型发展现状

质量—弹簧系统方法<sup>[29]</sup>原理简单、易于实现,并且算法复杂度低。将高架索划分为若干质量点,通过振动力学计算,求出各点的几何位置和受力情况,再通过曲线拟合的方法将各质量点连接在一起。文献[30]将质量弹簧建模法应用到虚拟外科手术;Selle 等<sup>[31]</sup>则采用质量—弹簧建模法实现了头发的模拟;曾亮等<sup>[32]</sup>采用质量—弹簧建模法实现了多处局部破碎现象的模拟,取得了较好的效果。但是,这种方

法假设条件过多,得到的分析结果无法完全接近实际情况,也无法直接在工程实践中应用。

### 3. 高架索有限元模型发展现状

有限元法是求解偏微分方程的重要方法,相关研究成果可在文献[33,34]体现。有限元方法具有物理逼真度高的优势,然而其计算复杂度很高,难以满足许多实际应用中的实时交互需求。应用有限元法时必须有足够的约束条件,且不能发生刚体运动。

### 4. 高架索多体动力学模型发展现状

绳索属于柔性细长体,可采用 Huston 在多体动力学理论中提出的柔性体有线段法<sup>[35,36]</sup>进行建模。这种方法将绳索离散成一系列铰接刚性绳索段组成一系列铰接刚性绳索段组成的多体系统,即用一系列具有不同几何物理参数的刚性绳索段近似无限自由度绳索,应用多体理论求解<sup>[37]</sup>。有限段方法的有效性在于它可以近似模拟绳索的轮廓形状,保持原有系统的质量分布特性,并采用多体系统中的刚体接触模型,求解高架索与绞车驱动轮之间的接触关系。对于钢丝绳的弹性特性,李晓平等<sup>[38]</sup>在绳段间引进弹簧阻尼,并将多体动力学和弹性力学相关理论结合起来,提出了采用铰接弹性段组成的多体模型,对弹性的处理效果类似于考虑了几何非线性的杆单元有限元法,可以处理绳索大范围的运动响应。

对海上补给高架索的研究主要集中在控制理论及装备研究、材料研究、力学研究等几个方面。高架索的力学分析又是其他研究的基础,所以,高架索的力学研究又是研究中的重点。目前,对海上补给高架索的模型研究主要集中在基于刚体力学理论的静力学高架索模型研究,此项研究只停留在二维平面的静力学分析,由于高架索属于柔性体结构,比较可行的方法就是使用有限元方法和质点—弹簧法,但这两种方法没有将钢索作为具有质量分布的实体考虑,存在两个问题。其一是假设多,它将高架索假设为仅受拉力的柔性非线性模型,这一点不符合钢索的动力学实际,高架索作为钢索,由于两端均随船体摇摆,所以高架索的受力单元必受到扭矩和弯矩作用。其二是这种研究方法目前只停留在二维平面的静力学分析,得到的分析结果无法完全接近实际情况,也无法直接在工程实践中应用。新兴的多体动力学在研究柔性体

时具有一定优势,其不仅具备有限元分析方法的优点,同时也突破了质点—弹簧模型的空间局限。目前多体动力学在柔性多体动力学模型<sup>[39,40]</sup>已经取得了一定进展,但还没有将钢索作为多柔体系统考虑过。

本书旨在从多体系统动力学这一全新视角,将海上补给高架索作为机构,对其进行动力学和运动学分析,使高架索力学研究从静力学拓展到动力学,从二维平面空间研究拓展到三维立体空间研究,使分析结果更接近真实、更便于在实际工程中使用。

## 1.4 多体系统动力学简介

海上补给高架索具有较大柔性,可以承受较大的拉力,但抗弯能力很弱。为了能够反映高架索的柔性和动态特性,可将高架索视为一段段刚(柔)体通过柔性连接副连接起来,组成多体动力学模型,然后使用多体系统动力学进行求解。

工程中有许多复杂系统都是由具有一定独立性的部件组成。按照部件之间组成方式的不同,这些复杂系统可以划分为结构和机构。部件之间没有明显的相对运动,因而系统具有相对稳定的几何形状,这样的系统称为结构,如建筑、桥梁;部件之间做可以明显相对运动的系统称为机构。这些复杂机构的运动、变形以及力的传递规律就是多体系统动力学的研究对象。只不过在多体系统动力学中将具有一定运动学独立性的部件称为物体,而多体系统定义为由多个物体通过运动副连接的机械系统。多体系统动力学是研究多体系统(一般由若干个柔性和刚性物体相互连接所组成)运动规律的科学。

多体系统动力学分析涵盖建模和求解两个阶段,其中建模包括从几何模型形成物理建模、由物理模型形成数学模型的数学建模两个过程。求解阶段需要根据求解类型(运动学/动力学、静平衡、特征值分析等)选择相应的求解器进行数值运算和求解。

自20世纪60年代以来,国内外在多体系统动力学方面有影响的活动如下:国际上,自1977年国际理论和应用力学学会(IUTAM)在德国慕尼黑召开了第一次多刚体系统动力学讨论会<sup>[41]</sup>后,1983年北大



西洋公约组织与美国国家科学基金委(NATO-NSF-ARD)联合主持在美国爱阿华州召开了“机械系统动力学计算机分析与优化讲习会”<sup>[42]</sup>;1985年IUTAM与国际机器及机构理论联合会(IFTOMM)联合在意大利 Udine 又举行了一次国际多体系统动力学讨论会,这次会议总结了该领域的进展<sup>[43]</sup>;1989年由德国斯图加特大学主持对当时比较先进的大型软件进行测试,编辑出版了《多体系统手册》<sup>[44]</sup>。在国内,由中国力学学会一般力学专业委员会主持1986年在北京召开“多刚体系统动力学”研讨会,1988年在长春召开“柔性多体系统动力学研讨会”,1992年在上海召开“全国多体系统动力学——理论、计算方法与应用学术会议”<sup>[45]</sup>,1996年由中国力学学会一般力学专业委员会与中国空间学会空间机械委员会联合在山东长岛召开了“全国多体系统动力学与控制学术会议”<sup>[46]</sup>。国内出版了多种有关多体系统动力学方面的教材和著作<sup>[47-51]</sup>。

## 参 考 文 献

- [1] 丁晶,潘英. 国外海军后勤装备现状及发展趋势[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [2] 余建星,顾鹏. 海上干货补给技术[J]. 海洋技术,2005,24(3):103-110.
- [3] 邓凯,李红涛,余建星. 高架索航行补给中船舶在波浪中的运动性能研究[J]. 船舶力学,2009,13(2):217-225.
- [4] 侯红涛. 海上补给仿真训练系统模型框架设计与实现[D]. 长沙:国防科技大学,2006.
- [5] Miller Marvin O,Hammett John W. Underway replenishment;keep it sample but effective[J]. Naval Engineers,1986,98(1):67-73.
- [6] Chislett H W J. Replenishment at sea[J]. Naval Architect,1972,3(5):321-339.
- [7] Michell K J,Strong D J. Replenishment at sea[J]. Naval Engineers,1970,82(4):52-62.
- [8] Mavrakos S A,Chatjigeorgiou J. Dynamic behaviour of deep water mooring lines with submerged buoys. Computers&Structures,1997;64(1-4):819-835.
- [9] Chang W K,Pilipchuk V,Ibrahim R A. Fluid flow-induced nonlinear vibration of suspended cables. nonlinear Dynamics,1997,14(4):377-406.
- [10] PerKins N,Mote C D Jr. Three-dimensional vibration of travelling elastic cables. Journal of Sound and Vibration,1987,114(2):325-340.
- [11] 金栋平,胡海岩. 横向流体激励下绳索的动力学分析[J]. 振动工程学报,2000,13(3):55-59.
- [12] 吴天行,王为德. 海上补给恒张力索道—载荷系统的振动特性分析和计算[J]. 舰船科