

多体系统发射动力学及其应用

芮筱亭

(南京理工大学发射动力学研究所, 南京 210094)

[摘要] 射击精度差、试验用弹量大、发射不安全是制约现代火箭、火炮武器发展的三大技术难题。武器系统精度和发射安全性取决于武器系统动力学规律,发射动力学作为研究武器系统发射过程中受力和运动规律的一门新兴综合工程学科,在国际上已成为提高火箭和火炮武器系统射击精度和发射安全性的新技术突破口,为射击精度和发射安全性设计与试验提供新理论与技术。文章研究多体系统发射动力学理论与技术及其在火箭和火炮武器射击精度和安全性设计与试验中的应用。

[关键词] 射击精度;试验用弹量;发射安全性;多体系统发射动力学;多体系统传递矩阵法

[中图分类号] TJ410.6 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)10-0076-07

1 前言

射击精度(包括射击准确度 and 射击密集度,以下简称精度)和发射安全是必须用定型试验考核的武器系统必须要满足的重要指标。精度差,试验用弹量大,膛炸、早炸、解体等发射安全性事故是长期制约火箭和火炮武器(以下简称武器)发展的三大技术难题。

理论与试验研究表明:随着机械加工和气象测试技术的大幅提高,武器加工误差和气象条件对武器精度影响的权重大幅降低了,使弹箭起始扰动成为影响火箭和火炮武器精度的主要因素,弹箭起始扰动取决于武器发射过程中武器系统动力学规律^[1-5]。

现代武器是由很多物体组成的复杂多体系统,建立发射过程武器多体系统动力学快速算法、模拟与测试手段,是武器精度和发射安全性设计与试验的迫切需要。

例如,为获得40管火箭最佳精度,就必须在40个发射管的排列组合 8×10^{47} 个方案中确定最佳射击顺序方案。用通常动力学方法,即使用目前世界

上计算速度最快为每秒两千万亿次的计算机,确定40管最佳射序,所需时间也长达若干年而不能满足多管火箭精度设计需求。这也是几乎所有的多管火箭都难以达到最佳精度状态的原因。

再如,武器精度是否满足指标要求需通过靶场射击试验鉴定。基于统计理论的多管火箭精度试验评估方法^[6],因无法利用落点坐标以外的所有其他信息,需进行高、低、常温各3组,共9组满管齐射试验,对某舰载50管火箭武器,一次试验就需耗弹450发。某远程12管火箭,1发火箭弹人民币100多万元,一次试验需耗弹108发,仅耗弹费用就超亿元,加上试验费用就更昂贵,耗资巨大。因此,国内外减少试验用弹量的呼声愈来愈高。

还如,由于缺乏发射安全性设计与检测手段,无法揭示现代武器在4000℃超高温、7000大气压超高压、1000000 m/s²超高过载、3000 m/s超高速、1000000 N超高冲击等极端发射环境下意外爆炸的机理,导致世界各国相继在武器研制、试验、军事演习和战场上频频发生膛炸、早炸、解体发射安全性事故,我国在火炮弹药研制与试验中发生了近百次膛炸、早炸、解体事故。发射不安全的灾难性后果使

[收稿日期] 2011-08-08

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划973项目(613153)

[作者简介] 芮筱亭(1956—),男,江苏镇江市人,南京理工大学教授、博士生导师,博士,研究方向为多体系统发射动力学;

E-mail: ruixt@163.net

得发射安全性成为备受国内外兵器界广泛关注的重大难题。

因武器精度和发射安全性取决于武器系统动力学规律,因此作为研究武器系统发射过程中受力和运动规律的一门新兴学科的发射动力学^[1-5],在国际上就成为提高武器系统精度和发射安全性的新技术突破口,对现代武器设计与试验发挥了非常重要的作用,成为当代国内外兵器科学与技术界关注的热点,引起了广泛的重视,有关理论与技术研究非常活跃。发射动力学研究跨度大,它涉及到内弹道学、外弹道学、中间弹道学、燃烧气体动力学、空气动力学、火炮动力学、多体系统动力学、振动理论、现代测试技术等方面的重要内容。

针对火箭与火炮武器精度差、试验用弹量大、发射不安全三大技术难题,笔者及其合作者从基本思想提出、基本理论建立、关键技术发明到重大工程应用,创立了多体系统发射动力学理论与技术体系^[1-4],大幅提升了火箭与火炮武器精度和发射安全性设计与试验水平,解决了十多种国家高新工程武器提高精度、减少试验消耗、保证发射安全的国家急需^[1-3,7],多种武器已装备部队,产生了数十亿的经济效益和重大的军事与社会效益。

2 多体系统发射动力学理论体系

武器系统动力学快速计算方法是多体系统动力学和发射动力学研究的迫切需求。Wittenburg 方法、Schiehlen 方法、Kane 方法等多体系统动力学方法和有限元法是主要的武器系统动力学方法。但所有这些方法均需建立系统总体动力学方程,涉及的系统矩阵阶次正比于系统自由度数。众所周知,随其系统矩阵阶次的提高,多体系统动力学的计算速度成指数快速降低,因此复杂武器系统的总体动力学方程涉及矩阵阶次高从而计算速度慢,无法满足复杂武器系统动力学动态设计快速计算需要。为此,笔者及其合作者创立了多体系统发射动力学理论与技术体系,其核心之一是创立了多体系统传递矩阵法^[1,8-14]。该方法涉及的系统矩阵阶次远远低于现行所有多体系统动力学方法的系统矩阵阶次,从而使复杂多体系统动力学的计算速度比现行方法的计算速度提高千万倍以上,首次解决了复杂多刚柔体系统的振动特性、特征矢量正交性、动力学快速计算等多体系统动力学国际难题,实现了多体系统动力学分析无需系统总体动力学方程和快速计算两

大突破。为多体系统动力学和发射动力学研究提供了全新的方法,首次使多管武器精度设计和试验动力学成为现实,为武器精度和发射安全性设计与试验奠定了基础,解决了亟待解决的许多国家高新技术难题。国际力学联合会主席 Werner Schiehlen、美国工程院院士 John Herbst 等及中、俄、美、奥、波、印、德、葡 8 国数十位院士、著名科学家评价“芮方法是全新的原创性多体动力学方法,非常值得在多体系统动力学和复杂机械工程研究领域推广,引领发射动力学研究进入实用化阶段”^[1-3]。澄清了国际上争议已久的弹丸膛内逆进动现象,并给出了弹丸逆进动的条件,为高精度弹丸设计指明了参数优化设计方向,为高精度火炮设计解决了等齐膛线与渐速膛线的选择问题;回答了弹丸后效期对武器精度的影响程度问题,从而确定了提高武器精度的主攻方向;揭示了许多武器普遍存在的严重影响武器精度的“离群弹”、“弹丸落点分堆”、“同一武器系统在不同硬度地面精度差别大”、“不同装填方式精度差别大”现象的火炮空回、不同硬度地面使火炮与地面接触刚度不同等非线性射击导致弹丸起始扰动差别大从而武器精度差别大的机理。

多体系统传递矩阵法的思路是:首先“化整为零”,把复杂的多体系统“分割”成若干个元件,将各元件的力学特性用矩阵表示,就像建筑大楼的“砖块”,可事先建立好元件的传递矩阵库。再用这些砖块“拼装”成系统,建成“大楼”。对链式系统,系统的“拼装”,仅相当于这些矩阵相乘,即可获得系统的总传递方程和总传递矩阵,求解传递方程,即可求得系统动力学的时间历程。

3 高精度武器系统设计技术

减小弹箭起始扰动已成为提高武器精度的捷径。笔者及其合作者基于多体系统发射动力学理论与技术,发明了小起始扰动高精度火炮武器设计方法^[15,16],适用于低成本大幅提高自行火炮、坦克炮、车载炮、牵引炮等各种火炮武器精度;发明了小起始扰动高精度多管火箭设计方法^[17,18],低成本大幅提高了多种多管火箭武器精度;发明了大口径武器弹箭起始扰动测试装置^[19],填补了国内野外靶场条件下大口径武器弹箭起始扰动直接测试技术空白,为高精度武器系统设计提供了试验手段,完成了我国至今所有的大口径弹箭起始扰动测试试验;提高了火箭和火炮武器精度。

图1为某自行火炮发射动力学模型,图2为某自行火炮炮口铅垂位移仿真与试验结果,图3为大口径弹箭起始扰动测试装置。图4为应用小起始扰动高精度多管火箭设计方法获得的某新型机载高精度多管火箭射序设计方案,出于技术保密原因,图中

部分射序略。使该新型机载多管火箭精度提高2.7倍,如表1所示;使某车载多管火箭精度提高了4倍,达到国际先进水平。以低成本大幅提升了7种武器的精度。

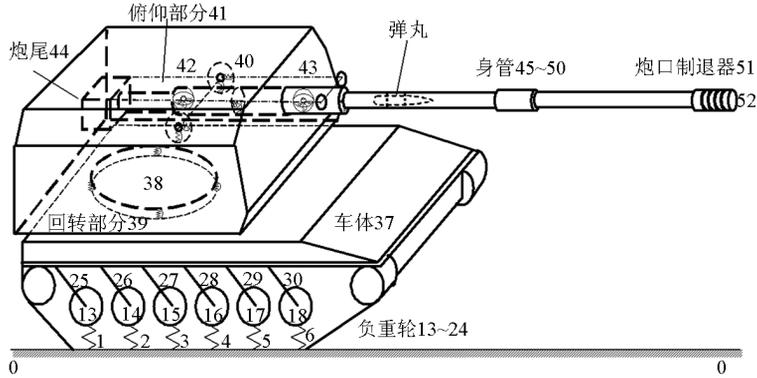


图1 某自行火炮发射动力学模型

Fig. 1 Launch dynamics model of a self propelled artillery

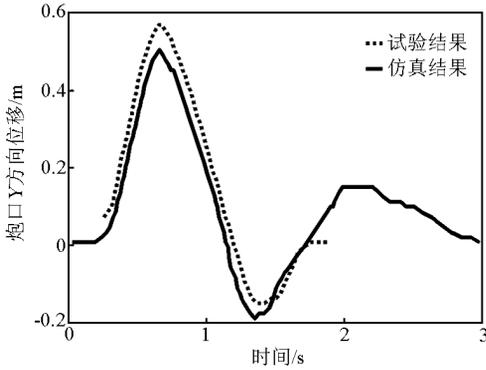


图2 某自行火炮炮口铅垂位移仿真与试验结果

Fig. 2 Simulation and test results of vertical displacement of muzzle for a self-propelled artillery

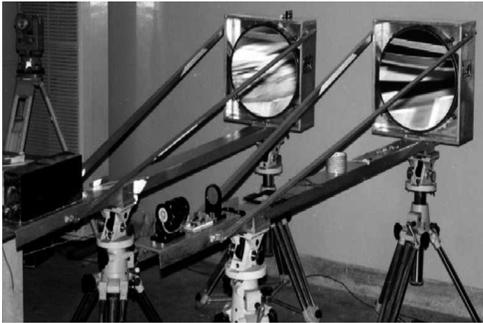


图3 大口径弹箭起始扰动测试装置

Fig. 3 Initial disturbance test device of large-caliber rocket and projectile

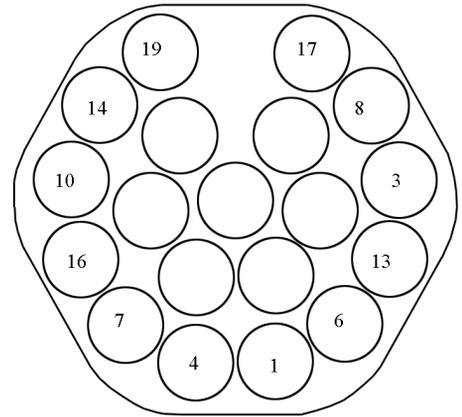


图4 某机载高精度多管火箭射序设计方案

Fig. 4 Design project to optimize fire order for a high-precision airborne multi-barrel rocket

表1 某机载多管火箭不同设计方案精度的对比

Table 1 Firing precision of the comparison of different design options for an airborne multi-barrel rocket

原方案精度	1/88
优化方案精度	1/245

4 非满管射击武器精度试验技术

笔者及其合作者基于多体系统发射动力学理论与技术,建立了多管火箭发射动力学理论、仿真系统与试验方法^[3],发明了多管火箭等起始扰动非满管射击试验方法^[20],在国际上率先获得了严格的用非

满管射击替代满管齐射的多管火箭精度试验技术,解决了多管火箭精度试验用弹量巨大这一各国亟须解决的难题,解决了 10 项国家高新工程项目多管火箭武器定型试验急需,使某远程多管火箭增程弹、某末敏弹、某子母弹、某破障车、某破障增程弹、某机载多管火箭、某舰载多管火箭、某多管火箭、某轮式火箭等 10 种武器精度定型试验,达到减少试验用弹量 50%~86% 的国际领先水平。

非满管射击武器精度试验技术的原理是:以多体系统发射动力学理论为基础,以发射动力学仿真系统为核心,以随机整数规划为工具,以满管齐射和非满管发射两个系统的精度相同为约束条件,以试验用弹量最少为目标,以调整装填方式、射序和射击时间间隔为手段,通过大量计算、优化,并用统计方法检验两种方案的精度估计值无显著差异,最终确定与满管齐射方式系统精度相同的非满管发射方式。

图 5 为某多管火箭武器系统发射动力学模型,图 6 为多管火箭等起始扰动非满管射击试验方法流程图。

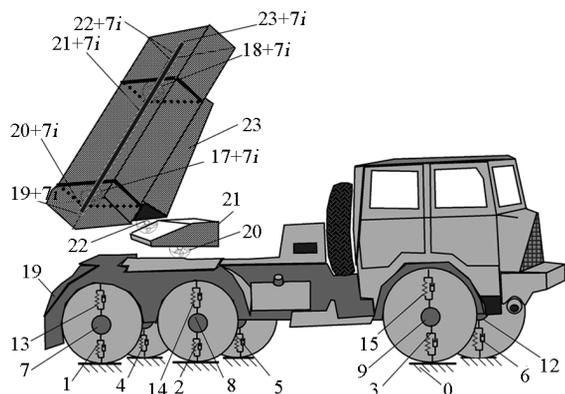


图 5 某多管火箭发射动力学模型

Fig. 5 Launch dynamics model of a multi-barrel rocket

5 发射安全性设计与试验技术

发射安全性主要包括发射装药发射安全性、炸药装药发射安全性、引信发射安全性、弹丸发射安全性。只有具有对武器系统动态特性与其结构参数之间关系定量描述的能力,具有对发射动力学规律准确计算和试验的手段,才可能建立发射安全性判据,保证武器发射安全。笔者及其合作者基于多体系统发射动力学理论与技术,立足于对武器系统发射动力学规律的精确描述,建立了发射装药、炸药装药、引信、弹丸发射安全性评估技术^[21~24],用于解决各

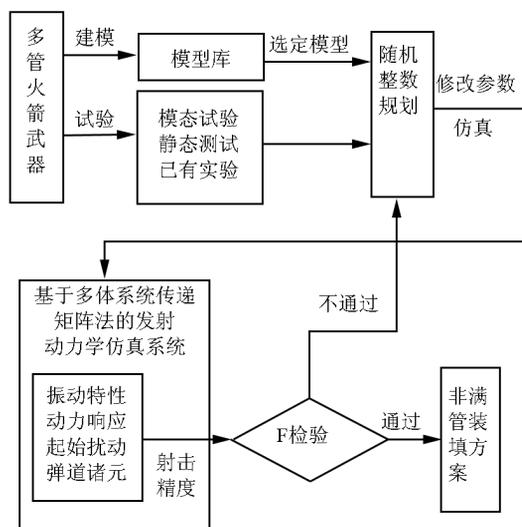


图 6 多管火箭等起始扰动非满管射击试验方法流程图

Fig. 6 Flow chart of equal initial disturbance test method of non-full pipe firing for multi-barrel rocket

种武器的膛炸、早炸、解体发射安全性故障诊断^[2,7],保证了 8 种武器的发射安全。

5.1 基于发射环境的发射装药发射安全性评估技术

笔者及其合作者发明了基于多体系统发射动力学原理的发射装药膛内燃烧与力学环境试验装置、发射装药动态挤压破碎试验装置、发射装药动态活度试验装置及相应的测试技术^[25~29],建立了基于发射装药起始动态活度比的发射装药发射安全性评估技术^[21],填补了基于发射装药起始动态活度比的发射装药发射安全性定量评估和检测技术国内空白,解决了发射装药发射安全性评估难题^[7]。图 7 为发射装药膛内燃烧与力学环境试验装置,图 8 为发射装药动态挤压破碎试验装置。

5.2 基于发射环境的炸药发射安全性评估技术

炸药装药发射安全性评估的核心,是要较真实地模拟炸药装药的缺陷和炸药装药发射环境,从而模拟炸药装药加载过程及其爆炸概率。笔者及其合作者应用多体系统发射动力学理论与技术,发明了膛压发生器式炸药装药发射安全性试验装置^[22],为揭示炸药装药中空气绝热压缩升温使炸药装药自燃引起膛炸机理提供了技术手段^[7]。

5.3 基于发射环境的引信早炸故障定位技术

笔者及其合作者基于多体系统发射动力学理论与技术,发明了高速旋转弹丸三自由度角运动模拟



图7 发射装药膛内燃烧与力学环境试验装置

Fig.7 Test device for measuring the burning and mechanics situation of propellant charge in bore



图8 发射装药动态挤压破碎试验装置

Fig.8 Test device for simulating the compression and fracture of propellant charge dynamically

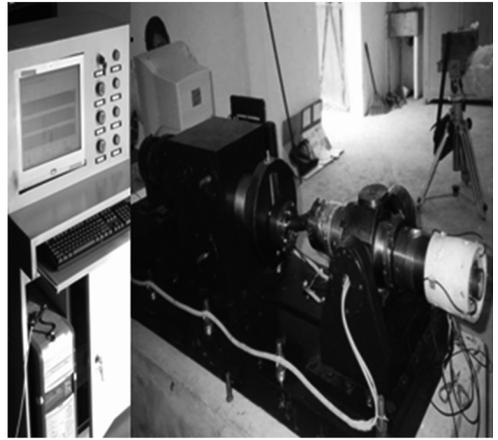


图9 高速旋转弹丸三自由度角运动模拟试验装置

Fig.9 Test device for simulating the angular movement of projectile with high rotation speed and 3 degrees of freedom

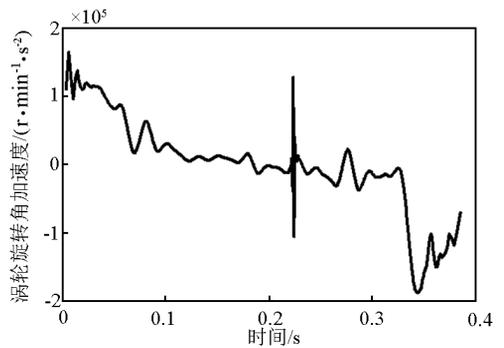


图10 涡轮旋转角加速度随时间变化曲线

Fig.10 Curve of turbo spin angular acceleration with time

试验装置和控制系统,建立了基于发射环境的引信早炸故障定位技术^[23,24],在国内第一次获得了高速旋转弹丸自转、章动、进动弹道环境下引信机构运动曲线,完成了我国至今为止所有的高速旋转弹丸三自由度角运动弹道环境下引信系统运动试验,图9为高速旋转弹丸三自由度角运动模拟试验装置^[7]。试验获得了第一条发射环境下涡轮引信击针拔离盲孔时涡轮角加速度突变试验曲线,如图10所示,再现了引信早炸现象,揭示了某引信转子在击针拔离盲孔后迅速旋转到位使击针接触雷管的早炸机理以及其他引信的早炸机理,为引信设计改进提供了决定性的手段和依据,提出了引信改进设计方案,消除了该引信早炸现象^[7]。

5.4 基于发射环境的末制导炮弹解体定位技术

笔者及其合作者基于多体系统发射动力学理论与技术,发明了末制导炮弹密封试验方法^[30]、末制导炮弹预应力试验方法^[31]、末制导炮弹强度试验方法^[32],建立了基于发射环境的末制导炮弹解体定位技术,揭示了发射过程中末制导炮弹发动机漏气引燃推进剂和推进剂应力超限自燃的解体机理,提出了发动机改进设计方案,消除了末制导炮弹解体现象^[2]。图11为某末制导炮弹发动机密封试验结果,再现了发动机漏气引燃推进剂现象。

6 结语

针对现代火箭和火炮武器的精度差、试验用弹量大、发射不安全三大技术难题,建立了多体系统发射动力学理论与技术体系,提高了火箭和火炮武器



图 11 发动机堵头上的硫酸铜粉末变蓝

Fig. 11 Copper sulfate powder on engine block head change into blue

精度、减小了试验消耗、保证了武器发射安全。

参考文献

[1] 芮筱亭, 负来峰, 陆毓琪. 多系统传递矩阵法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

[2] 芮筱亭, 刘怡昕, 于海龙. 坦克自行火炮发射动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

[3] 芮筱亭, 陆毓琪, 王国平, 等. 多管火箭发射动力学仿真与试验测试方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

[4] 芮筱亭. 多系统发射动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

[5] 芮筱亭, 杨启仁. 弹丸发射过程理论[M]. 南京: 东南大学出版社, 1991.

[6] GJB349.13A-97, 火箭炮定型试验规程[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1997.

[7] 芮筱亭, 负来峰, 王国平, 等. 弹药发射安全性导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

[8] Rui X T, Rong B, Wang G P, et al. Discrete time transfer matrix method for dynamics analysis of complex weapon systems[J]. Science China, 2011, 54(5): 1061-1071.

[9] Rui X T, He B, Lu Y Q, et al. Discrete time transfer matrix method for multibody system dynamics[J]. Multibody System Dynamics, 2005, 14(4): 317-344.

[10] Rui X T, He B, Rong B, et al. Discrete time transfer matrix method for dynamics of multi-rigid-flexible-body system moving in plane[J]. Journal of Multi-body Dynamics, 2009, 23(K1): 23-42.

[11] Rui X T, Wang G P, Lu Y Q. Transfer matrix method for linear multibody system[J]. Multibody System Dynamics, 2008, 19(3): 179-207.

[12] Rui X T, Schiehlen Werner. Multibody system dynamics; Preface[J]. Multibody System Dynamics, 2007, 11(18): 485-492.

[13] Rui X T, Rong B, He B, et al. Discrete time transfer matrix method of multi-rigid-flexible-body system (keynote)[C]// International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics 2007. USA: Science Press Inc, USA; 2007: 2244-2250.

[14] Rui X T, He B, et al. Discrete time transfer matrix method for coupling rigid-flexible multibody system[C]// The Second International Conference on Dynamics Vibration and Control, Beijing, China, 2006.

[15] 芮筱亭, 于海龙, 王国平, 等. 中国发明专利: 201010047223.5 [P]. 2010.

[16] 芮筱亭, 于海龙, 杨富锋, 等. 中国发明专利: 201010047225.4 [P]. 2010.

[17] 芮筱亭, 王国平, 戎保, 等. 中国发明专利: 201010047232.4 [P]. 2010.

[18] 芮筱亭, 王国平, 姚志军, 等. 中国发明专利: 201010047231.X [P]. 2010.

[19] 芮筱亭, 刘世平, 顾金良, 等. 中国发明专利: ZL200510128244.9 [P]. 2008.

[20] 芮筱亭, 王国平, 负来峰, 等. 中国发明专利: ZL200510128242.X [P]. 2008.

[21] 芮筱亭, 王国平, 负来峰, 等. 中国发明专利: ZL200610120857.2 [P]. 2008.

[22] 芮筱亭, 王国平, 负来峰, 等. 中国发明专利: ZL200810076409.6 [P]. 2009.

[23] 芮筱亭, 王国平, 马宏伟, 等. 中国发明专利: ZL200510128239.8 [P]. 2008.

[24] 芮筱亭, 顾金良, 魏伟波, 等. 中国发明专利: ZL200510128243.4 [P]. 2008.

[25] 芮筱亭, 负来峰, 王浩, 等. 中国发明专利: ZL200510128241.5 [P]. 2008.

[26] 芮筱亭, 负来峰, 陈涛, 等. 中国发明专利: ZL200810076411.3 [P]. 2009.

[27] 芮筱亭, 负来峰, 王国平, 等. 中国发明专利: ZL200810076410.9 [P]. 2009.

[28] 芮筱亭, 王国平, 负来峰, 等. 中国发明专利: ZL200810076408.1 [P]. 2009.

[29] 芮筱亭, 陈涛, 王国平, 等. 中国发明专利: 200910123655.7 [P]. 2009.

[30] 芮筱亭, 陈涛, 于海龙, 等. 中国发明专利: ZL200910120297.4 [P]. 2010.

[31] 芮筱亭, 于海龙, 杨富锋, 等. 中国发明专利: ZL200910120301.7 [P]. 2010.

[32] 芮筱亭, 陈涛, 于海龙, 等. 中国发明专利: ZL200910120299.3 [P]. 2010.

Launch dynamics of multibody system and its applications

Rui Xiaoting

(Institute of Launch Dynamics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

[**Abstract**] Bad firing precision, huge consumption of projectiles in test and launch unsafety are the three difficult technology problems constraining the development of modern rockets and gun weapons. Firing precision and the launch safety of weapon system depend on dynamics style of weapon system. As a engineering subject of multi-disciplinary approach studying the motion styles of weapon system and the force acting on it during launch process, launch dynamics has been a new technological breakthrough in improving firing precision and launch safety of rockets and gun weapon system in the world, provided new theory and technology for design and test of firing precision and launch safety. In this paper, theory and technology of launch dynamics of multibody system and its applications in design and test of firing precision and safety for rockets and gun weapons are studied.

[**Key words**] firing precision; consumption of projectile in test; launch safety; launch dynamics of multibody system; transfer matrix method of multibody system

(上接 39 页)

Review on the marine radioactive-pollution monitoring and assessment technology

Chen Liqi^{1,2}, He Jianhua^{1,2,3}, Lin Wuhui^{1,2,4},
Yu Wen^{1,2}, Men Wu^{1,2}

(1. Key Lab of Global Change and Marine-Atmospheric Chemistry, State Oceanic Administration(SOA), Xiamen, Fujian 361005, China; 2. Third institute of Oceanography, SOA, Xiamen, Fujian 361005, China; 3. College of Oceanography and Environment Science, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China; 4. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[**Abstract**] To review the marine radioactive-pollution monitoring and assessment technology, the sources and components of marine radioactivity were introduced; the development on the methods of marine radioactivity analysis and the technology of monitoring network were appreciated, and the possibility and importance on building the methodologies of non-human species radiation protection and assessment were discussed, including the assessment of marine radioactive-pollution. Some advice for developing marine radio-monitoring technology in China was proposed at last.

[**Key words**] radioactive-pollution; monitoring technology and network; assessment; ocean