
Research Methods of Gun Firing Dispersion

火炮射击密集度 研究方法

李魁武 王宝元 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

火炮射击密集度 研究方法

Research Methods of Gun Firing Dispersion

李魁武 王宝元 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

火炮射击密集度研究方法/李魁武,王宝元著. —北京:
国防工业出版社,2012.5

ISBN 978-7-118-08528-0

I. ①火... II. ①李...②王... III. ①火炮—射
击精度—研究方法 IV. ①E920.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 261518 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 256 千字

2012 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 65.00 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

序

射击密集度是火炮武器型号研制中的关键指标之一,也是体现火炮武器性能优劣的关键参数。随着现代作战模式的快速变化,对火炮射击密集度性能要求越来越高,世界军事大国非常重视提高射击密集度课题研究。由于影响射击密集度因素复杂、过程随机,提高火炮射击密集度方法研究一直是火炮型号研制中的关键技术之一,射击密集度性能指标能否顺利实现也是影响火炮型号研制进程的关键制约因素。

我国较早开展了火炮射击密集度方法研究,并在火炮型号项目研制、仿真分析、试验测试中,不断积累和丰富火炮射击密集度研究方法和理论,在火炮研制中的技术攻关和故障诊断中发挥了不可替代的作用。

本书作者从火炮射击密集度基础理论、多体系统动力学分析、有限元动力学分析、射击密集度预测方法、试验模态分析、力学参数测试、射击试验振动响应测试、立靶密集度图像式测试、射击密集度诊断方法等方面较全面论述了火炮射击密集度研究方法。这些方法都是火炮科研与生产中急需的和实用的关键技术,这些技术和方法都经历了多年火炮工程实践的检验,是作者多年来创造性科技成果的汇总和总结。全书内容从火炮射击密集度研究的重点和难点出发,对密集度基础理论、动力学建模、密集度预测和故障诊断等进行了论述,有理论、有分析、有证明,是一部内容全面、非常实用的参考书,对提高我国火炮射击密集度技术水平、发展我国火炮射击密集度分析理论、推动我国火炮射击密集度研究技术进步具有积极意义。

作者多年来一直从事火炮射击密集度分析、火炮动力学理论分析和实验测试研究等工作,经过不懈的努力和深入研究,成功地解决了多个火炮型号研制过程中出现的射击密集度不达标技术难题,提出了多项火炮实验测试新原理,研制

了多项可靠实用的实验测试系统,并已在火炮射击密集度研究课题中应用,形成了一套成熟的解决火炮射击密集度理论分析和实验研究方法。将这些研究成果编著成本书,为广大工程设计人员和密集度分析研究人员提供参考和帮助。

火炮技术的发展需要射击密集度技术的进步,先进的射击密集度预测和诊断技术又为火炮技术的创新与发展及研制高性能火炮提供技术保障。

郑子平

2012年2月

前 言

火炮射击密集度是一组射弹散布围绕散布中心的密集程度,是火炮武器系统对目标命中效能的关键性战技指标,也是火炮武器系统效能和作战效能的重要基础性能参数。在现代化高新技术条件下,现代化炮兵战场上对抗的加剧,火炮武器系统的密集度具有十分重要的意义。显然,准确的炮火袭击,准确而快速地歼灭目标是对现代炮兵武器系统的最基本要求。目前,随着战争模式的变化,火炮对付的目标,其速度越来越快。要提高火炮的毁伤效果,提高其射击密集度是达到此目标的主要技术途径之一。在目标运动的未来位置,发射密集的弹丸或碎片,以此攻击运动目标。因此,与以往相比,现代战场对火炮武器系统射击密集度的要求更为突出,世界各国兵器研制部门和使用部门都在研究提高火炮武器系统射击密集度的理论和技术。

高技术条件下的现代战争对火炮武器的要求之一就是高精度、远射程、高机动性。为了提高火炮射程,人们将会采取制导炮弹、增加膛压和加长身管等措施。身管的加长和膛压的增加,直接的效果是火炮结构动力学特性恶化,炮口振动响应显著增加,射击密集度性能下降。为了满足防空反导的需求,人们正谋求通过提高小口径火炮射速达到此目的。火炮射速提高后,火炮振动加剧,又制约着火炮射击密集度性能的进一步提高。因为,振动响应是影响小口径火炮射击密集度的首要因素。高机动性的实现,必然要求火炮武器重量轻。火炮重量和火炮射击密集度一直是共生的一对矛盾,一般情况下,火炮重量减轻,则其射击密集度就降低。

在火炮武器系统的研制过程中,射击密集度问题一直困扰着火炮武器系统的快速发展,射击密集度指标往往不能达到战技指标要求,需要组织技术攻关,这样既增加了研制经费又拖长了研制周期,这些是制约火炮武器发展的瓶颈问题之一。因此,研究射击密集度问题,对促进我国火炮武器科技的快速发展,显著提高火炮武器性能具有决定性意义。

射击密集度和射击准确度一起组成了射击精度,射击密集度误差是随机误差,是多种参数微小变化引起的预先无法确定的误差,而射击准确度误差是系统误差,可以修正。如果射击密集度水平高或射弹散布小,则解决射击准确度就容

易,产生的系统误差也容易修正。如果射击密集度水平很低,就不容易判断平均弹着点位置,不容易修正系统误差。因此,射击密集度是射击准确度的基础。

火炮射击密集度问题是一个系统问题,影响因素很多,既有火炮内弹道因素和外弹道因素,也有火炮发射平台因素。尽管射击密集度问题是火炮科研领域的研究热点,每年都有多篇论文发表,但由于密集度影响因素复杂,解决过程曲折、困难。因此,到目前为止,从仿真预测到故障诊断、从计算分析到试验测试来系统研究火炮射击密集度方法的论著较少。本书是根据作者多年来从事火炮结构动力学与射击密集度方法研究的科研成果,并充分融入了他人的最新成果而精心撰写的一部专著。全书共 10 章,包括概述、火炮射击密集度基础理论、多体系统动力学分析、有限元动力学分析、射击密集度预测方法、试验模态分析、力学参数测试、射击试验振动响应测试、立靶密集度图像式测试、射击密集度诊断方法。

康新中、吴三灵、魏孝达研究员级高级工程师对本书密集度研究方法的建立、测试原理的提出、以及方法工程应用等方面做出了重要贡献。董文祥、周发明、衡刚、邵小军、吴会民、朱德发、钱福彬、顾国富、王茂林、温波、霍志勤、郭旻、曾志银、刘朋科、喻华萨、宁变芳、焦明纲、张军龄、王在森、钞红晓、张鹏飞、洪丽娜、李兆伟、曹馨、王凤歌、张国栋等分别在理论分析、结构设计、测试方法研究、理论分析、试验模态分析、实验测试、数据处理有关方面付出了辛勤的劳动,为丰富本书内容做出了成绩,在此表示感谢。

西北机电工程研究所郑广平所长为本书作了序,樵军谋处长(研究员级高工)作全书保密审查。向这些支持、帮助过本书出版的所有人一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请专家和读者批评指正。

作者

2012 年 2 月

目 录

第1章 概述	1
1.1 射击密集度研究意义	1
1.2 射击密集度研究方法	2
1.3 火炮组成与特点	19
第2章 火炮射击密集度基础理论	22
2.1 射击密集度形成原因	22
2.2 射击密集度计算方法	24
2.3 射击密集度的理论计算模型	29
第3章 多体系统动力学分析	43
3.1 凯恩—休斯顿方法	44
3.2 RecurDyn 软件方法	58
第4章 有限元动力学分析	76
4.1 概述	76
4.2 有限元方法应用	80
第5章 射击密集度预测方法	85
5.1 小口径火炮	85
5.2 大口径火炮	97
第6章 试验模态分析	104
6.1 传统试验模态分析理论基础	106
6.2 工作模态分析理论基础	116
6.3 工程应用	120

第 7 章 力学参数测试	126
7.1 火炮质量与质心测试	127
7.2 自行火炮弹性中心测试	133
7.3 炮塔转动惯量测试	140
7.4 转动部件阻尼系数测试	145
7.5 刚度系数测试	150
第 8 章 射击试验振动响应测试	153
8.1 炮口振动响应测试	154
8.2 弹丸出炮口时间测试方法	158
8.3 火炮射击稳定性测试	164
8.4 小口径火炮振动测试方案实例	169
8.5 大口径火炮振动测试方案实例	172
第 9 章 立靶密集度图像式测试	175
9.1 概述	175
9.2 工作原理与系统组成	177
9.3 照相机拍照位置对密集度测量结果的影响分析	179
9.4 软件开发	192
9.5 工程应用	194
第 10 章 射击密集度诊断方法	196
10.1 火炮 A	196
10.2 火炮 B	200
参考文献	207

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Significance of studying the gun firing dispersion	1
1.2 Methods of studying the gun firing dispersion	2
1.3 Component and characteristics of gun	19
Chapter 2 Basic principle of gun firing dispersion	22
2.1 Causation of gun firing dispersion	22
2.2 Methods of calculating the gun firing dispersion	24
2.3 Model of calculating the gun firing dispersion	29
Chapter 3 Dynamic analysis of multi – body system	43
3.1 Kane – Houston method	44
3.2 Method of the RecurDyn software	58
Chapter 4 Dynamic analysis of the finite element method	76
4.1 Introduction	76
4.2 Application of the finite element method	80
Chapter 5 The methods of predicting the gun firing dispersion	85
5.1 Small caliber gun	85
5.2 Major caliber gun	97
Chapter 6 The analysis of experimental modal	104
6.1 Analytical elementary theory of conventional testing modal	106
6.2 Analytical elementary theory of operational modal	116
6.3 Application in engineering	120

Chapter 7 Measurement methods of mechanical parameters	126
7.1 Measurement method of the gun mass and centroid	127
7.2 Measurement method of elastic center for propelled gun	133
7.3 Measurement method of the moment of inertia for turre	140
7.4 Measurement method of damping parameter for rotating parts	145
7.5 Measurement method of stiffness parameter	150
Chapter 8 Measurement methods of vibration responses for gun firing	153
8.1 Measurement methods of vibration responses for muzzle	154
8.2 Measurement methods of time as projectile leave the muzzle	158
8.3 Measurement method of stability for gun firing testing	164
8.4 Measurement example of vibration responses for small caliber gun firing	169
8.5 Measurement example of vibration responses for major caliber gun firing	172
Chapter 9 Measurement method of vertical target dispersion in image	175
9.1 Introduction	175
9.2 Principle and components	177
9.3 Analysis of the camera position effecting the results of the dispersion	179
9.4 Software development	192
9.5 Application in engineering	194
Chapter 10 Diagnosing methods for gun firing dispersion	196
10.1 Gun A	196
10.2 Gun B	200
References	207

第1章 概述

1.1 射击密集度研究意义

现代战争的主要特点之一是远程精确打击,提高火炮射击精度,或者说,提高火炮射击密集度性能是实现远程精确打击的基础保障。射击精度包括射击密集度和射击准确度,前者描述了弹丸落点的随机散布特性,后者描述了弹丸落点的系统性偏差。目前,随着战争模式的变化,火炮对付的目标,其速度越来越快,要提高火炮的毁伤效果,提高其射击密集度是达到此目标的主要技术途径之一,在目标运动的未来位置,发射密集的弹丸或碎片,以此攻击运动目标。对火炮而言,射击密集度指标是其研制、定型和交验试验中的一个关键考核内容。在大多数情况下,火炮型号研制过程中都会遇到密集度性能不能满足设计要求的现象。在这种情况下,常要组织人力、物力开展密集度攻关技术过程。有时候,由于方法得当,原因很快查明,及时提出解决措施,密集度攻关圆满成功。但有时候,由于设计思想和技术上存在缺陷,致使密集度攻关过程漫长、曲折,浪费大量的经费和时间,走过不少弯路。究其原因:①火炮发射过程过于复杂,瞬态强冲击、高压、高速和高温;②火炮动力学理论在有些方面还不完善,火炮发射有些机理人们还没有完全掌握;③分析手段和计算方法还不够先进,数学模型还没有真正反映实际火炮发射过程;④实验测试手段还不能完全满足火炮射击过程测试需要,有些发射过程还没有成熟的测试技术解决方案;最后是人们的设计观念比较落后,习惯于采用传统的设计方法,对动力学分析与实验测试重视程度不够。

火炮是一种特殊的热机^[1],火炮发射过程时间短暂,大多数发射过程只有几毫秒到几百毫秒,影响火炮射击密集度过程瞬间完成。火炮发射过程伴随着强烈的振动和冲击、强烈的冲击波、耀眼的炮口焰,炮口振动加速度有的可达几千个 g ,炮膛内火药燃烧温度有几千摄氏度。目前,尽管试验测试技术日新月异,但对于火炮有些炮口振动响应量还没有理想的测试手段,炮口振动对弹丸外弹道飞行的起始扰动机理还没有完全真正掌握。火炮系统动力学分析常采用线性数学模型,并进行一些假设和简化,虽然也能基本反映火炮运动规律,但有时候由于受分析人员知识、经验的限制,系统复杂性的现实,有些计算误差还较大。

经过人们长期的努力和工程实践,对火炮发射规律的认识有了一定的深度,火炮的性能也逐步提高。随着现代战争的需求、国际军事斗争竞争的日趋激烈,火炮性能需进一步提高,人们原有的知识、对火炮发射机理的认识就显得很不适应,火炮发射动力学理论需要进一步发展。由于火炮的复杂性,目前,火炮发射动力学理论有时对某些发射过程不能给出较满意的解释。因此,有时候人们还习惯于经验设计,习惯于采用传统的设计理念,对发射动力学解决火炮射击密集度问题的重要性重视不够,在设计过程中不能自觉地采用先进的分析手段和试验测试手段。当射击密集度不能满足战技指标要求时,原因分析和解决措施常会出现滞后性、随意性和盲目性。

发射动力学技术是解决和提高火炮射击密集度的有效途径之一,动力学分析应贯穿于火炮型号研制的全过程。在方案设计和图纸设计阶段,借助于动力学分析,完成设计方案的优选,预测火炮射击密集度性能水平;在火炮工程研制阶段,借助于动力学分析和试验,在计算机上再现故障原因,依靠试验数据快速故障定位,明确故障原因,准确提出解决方案。同时,它也是评价和检验火炮设计效果的有效途径。

因此,研究射击密集度特性,不仅对提高火炮关键性能具有重要意义,而且对型号研制、设计定型中战技指标快速实现具有积极意义。

1.2 射击密集度研究方法

火炮发射过程复杂,射击密集度影响因素多,进行射击密集度研究必须采用理论分析和试验研究相结合的技术路线。火炮发射动力学仿真分析是理论研究的重要方法,它可以预测火炮射击密集度性能,试验测试是射击密集度故障诊断的有效途径。

理论分析的价值在于它的预测性,新型火炮设计方案初步确定后,可以用设计理论预测它的未来动力学特性和主要性能,指导调整设计参数和结构方案。实验或实际使用中发现的技术问题,也可以用设计理论分析原因,寻找解决问题的办法。理论分析通常是根据对研究对象的认识程度,提出必要的基本假设,继而建立逼近实际情况的物理模型,导出相应的数学模型,最终求出数值解或分析解,从而建立或进一步发展火炮理论,达到更深刻地阐述基本规律、更合理地解释复杂现象、更有效地解决疑难问题的目的。火炮射击密集度理论反映了其工作过程中各参数之间的相互关系和相互作用,阐明了它的机理和规律。基本假设是针对具体研究对象的研究范围经过提炼而提出的,通过假设把实际的复杂情况作必要的简化,避开那些暂时难以考虑的次要因素,形成一个可行的合理提

法。当认识深化了,还可重新修正假设,使之更加逼近实际。好的假设既简化了问题,又不会导致主要特征的严重失真。所以,基本假设是理论研究的重要环节。建立物理模型和导出数学模型时需要把基本假设具体化、公式化,并继续对细节做好处理,将研究对象抽象为按一定方式连接的模块,通过基本定律、制约关系、初始和边界条件,使方程组构成定解形式。但是,通常只有少数情况可以获得分析解,多数情况需要采用适当的算法求取数值解。由于基本假设、物理模型对研究对象作了一定程度的简化,数学模型的解和实际情况必然存在差异。这时,可以参照试验数据,在一定范围内求出符合系数或重新修正模型、假设,反复改进。火炮是一个复杂的机械系统,建立其数学模型,应在实践的基础上,根据自己对火炮内在规律的理解和经验,进行简化、抽象。理论来源于实践,又高于实践,还应经得起实践检验,并且用于指导实践^[2]。

科学试验是探索未知世界的手段,是知识的源泉。试验研究可以在严格控制的环境中重复展现研究对象的动态过程,运用现代测试技术将短暂瞬变的现象记录下来,进行详细的研究分析,以寻求规律。

虽然试验研究结果来源于实际情况,但是,由于火炮的复杂性,有些动态参数无法测试,有些机理无法再现。这时,就要依靠理论模型模拟未知规律,弥补试验研究的不足。理论研究和试验研究相结合是进行火炮射击密集度研究的有效方法。

1.2.1 仿真分析

随着科学技术的发展、火炮工程实践经验的丰富,尤其是电子计算机软硬件技术的快速发展,火炮发射动力学理论日趋完善,精确快速的分析计算手段,丰富的软件技术为动力学分析提供了坚实的物质技术基础。火炮结构有限元强度与刚度分析,火炮结构有限元振动分析,火炮系统运动学与动力学分析,火炮发射全过程动力学仿真分析等是确保火炮射击密集度性能实现的技术保障和技术支撑^[3]。

ANSYS 大型通用有限元分析软件是融结构、热、流体、电磁、声学于一体^[4],其中结构分析包括线性、非线性结构静力分析、结构动力分析,它还包括模态分析、谐波响应分析、瞬态动力响应分析、谱分析、随机振动分析等。MSC/NASTRAN 是世界上功能全面、应用广泛的大型通用结构有限元分析软件,它可以解决各类结构的强度、刚度、屈曲、模态、动力学、热、非线性、声学、流体—结构耦合、气动弹性、超单元惯性释放及结构优化等问题。机械系统动力学分析软件 ADAMS 是世界上最为广泛使用的机械系统仿真软件,它可以进行系统运动学和动力学分析,包括线性和非线性问题、刚体和刚柔混合分析。DADS 是著名的机

械系统动力学和运动学分析软件,能对机械系统整体的机械特性进行仿真,它在国防和航天等领域应用广泛。RecurDyn 多体动力学仿真软件也是机械系统运动学和动力学分析的专业软件,近几年其应用也较为广泛。

在火炮方案设计阶段和结构图纸设计阶段,通过动力学分析,优化结构方案,预测系统射击精度。火炮射击精度由射击准确度和射击密集度组成,射击密集度是弹着点相对于平均弹着点的密集程度,射击准确度是平均弹着点对瞄准点的靠近程度。射击准确度是系统误差,而射击密集度是随机误差,系统误差可以修正,但随机误差不易控制。一般情况下,火炮系统射击密集度高或炮弹散布小,解决射击准确度问题就容易些,产生的系统误差也容易修正^[5]。因此,解决火炮射击精度问题,重点放在射击密集度问题上。

火炮动力学仿真可以包括三部分:

- (1) 结构刚度和强度有限元分析,结构振动有限元分析;
- (2) 机械系统运动学和动力学分析;
- (3) 发射过程动力学仿真。

进行有限元分析时,采用 ANSYS 等大型通用有限元分析软件,计算火炮部件或零件的强度和刚度,计算结构的振动响应,计算结构的固有频率和固有振型。结构强度是火炮功能实现的基本保证,应首先进行有限元强度校核。目前情况下,ANSYS 等有限元分析软件能很好地仿真火炮结构在载荷作用下的应力分布和幅值,不管结构多么复杂,其强度计算结果误差可以控制在很小的范围内。大多数情况下(内外弹道性能正常时),火炮密集度问题就是火炮结构的刚度问题,结构刚度大(或结构变形小),火炮射击密集度就高,反之,结构刚度小(或结构变形大),火炮射击密集度就低。为了满足火炮射击密集度性能要求,火炮关键部件的刚度要满足一定的要求。在过去的火炮型号研制过程中,有的在图纸加工之前,进行了刚度有限元计算,发现了刚度薄弱部位,进行了结构优化,提高了结构刚度,改善了刚度分布,最终使密集度性能顺利实现。但有时候,由于对力学计算分析的重要性认识不足,忽视了刚度分析;或者虽然进行了结构刚度有限元计算,由于没有掌握结构刚度与射击密集度的相关规律,不能发现刚度薄弱部位;或者人们对刚度有限元计算结果不够重视,使得设计缺陷在靶场试验时最终暴露出来。对于火炮,其摇架的变形在弹丸出炮口时刻的数值尽管只有 1mm 左右,这样量级的变形如果分散性较大,则会使得火炮射击密集度性能不能满足设计要求。因此,火炮结构刚度有限元计算是保证和提高其射击密集度的重要技术措施。火炮结构振动有限元计算,可以给出载荷激励下的炮口、摇架、炮架等部位的振动响应,包括振动位移、速度和加速度。通过结构有限元计算模态分析,给出结构固有频率和固有振型,为避免结构共振、引起较大振动响

应提供理论依据,使射击密集度性能达到设计要求。

采用 RecurDyn 等多体动力学分析软件进行机械系统运动学和动力学分析,根据火炮具体结构特点,将其简化为由多个刚体或刚体与柔性体组成的多体系统,进行机构运动学分析,给出各构件之间的运动学关系,也就是各构件之间的位移、速度和加速度之间的关系,进行机构协调性分析、干涉检查等;进行机构动力学分析,在激励力作用下,研究系统之间的匹配关系,计算系统的运动响应。上述多体动力学软件通用性强,操作方便。如果原始数据取值合理准确,力学模型简化恰当,其计算结果能指导系统设计。

火炮发射过程复杂特殊,其动力学仿真包括内弹道、反后坐装置、火炮振动、起始扰动、外弹道仿真及弹丸落点坐标统计等。要进行发射过程动力学仿真,像 ANSYS 等这样的商品分析软件常常不能完全满足使用要求,它没有包括火炮发射专用模块。因此,火炮发射过程动力学仿真,常由火炮动力学分析人员自行开发专用分析软件,或者在商品软件的基础上进行二次开发。经过火炮发射过程动力学仿真,可以给出各分系统之间的影响关系,各分系统的动力学特性,并预测火炮射击密集度性能,优化结构设计,评价火炮设计效果。

建立动力学模型开展火炮射击密集度分析,必须涉及结构结合面特性。结合面在火炮结构中的大量存在,从而使火炮结构或系统不再具有连续性,进而导致了问题的复杂性。结合面存在着接触刚度和接触阻尼。从火炮动力学的角度分析结合面问题,它与火炮机械结构的振动及动态特性存在着密切的联系。有两个方面的原因:①结合面刚度是火炮结构整体刚度的重要组成部分,有时成为整体刚度的薄弱环节;②对于火炮结构零件组成的机构,其大部分阻尼来源于结合面,和结构本身的阻尼相比,结合面阻尼占有绝对优势。因此,结合面动态特性的研究无论是从理论还是从实际应用上都具有十分重要的意义^[6,7]。

无论是何种结合面,均属于“柔性结合”。当结合面受到外加复杂动载作用时,结合面间会产生多自由度、有阻尼的微幅振动(即变化的微小相对位移或转动),从而使结合面有可能表现出既有弹性又有阻尼,既储存能量又消耗能量的“柔性结合”的本质及特性。结合面的这种特性将对火炮结构整体的动态性能产生显著影响,表现为使火炮结构的整体刚度降低、阻尼增加,从而导致结构固有频率降低,振动形态复杂化。因此研究火炮结构整体动力特性时,必须考虑结合面及其动态特性的影响。尤其是在现代火炮设计中,要建立能够确切地模拟火炮结构动态特性的动力学模型,关键就在于能否获得合理的结合面力学模型及其动力学参数。可以说,作为火炮结构系统中固有的一种结构形式,结合面问题已成为火炮结构动力学研究中极为重要的内容之一。

人们对火炮结构结合面力学模型研究经历了多刚体模型、多柔体模型以及

有限元模型,火炮结构结合面主要包括后坐部分与导轨、起落部分高低齿弧与齿轮、回转部分座圈之间等。由不同的结合面组成了火炮结构力学模型,建立火炮结构动力学模型主要有三种途径:①采用多刚体动力学理论,根据火炮的力学特性,通过一定的假设把火炮看成是由若干个刚体、弹簧和阻尼器构成的多刚体多自由度系统,建立运动微分方程,描述火炮系统射击时的受力和运动规律;②采用多柔体动力学理论,将火炮看成是由若干个弹性体与刚性体组成的多柔体动力学系统,建立动力学方程组,描述火炮的动力学行为;③根据结构动力学理论,采用有限元法,把火炮分成有限个梁单元、板单元和实体单元等,用这些单元构成的动态有限元模型来代替实际结构,研究这些单元组合体的动力学特性也就是相当于研究了火炮的发射动力学行为。

1) 结合面定义

火炮结构,为满足功能、性能和加工的要求以及操作的方便,一般都不是一个连续的整体,而是由各种零件按照一定的具体要求组合起来的。称零件、组件、部件之间相互接触的表面为“机械结合面”,简称“结合面”。

结合面可以分为三类,即固定结合面、半固定结合面和运动结合面。固定结合面是最为普遍的一种结合面,它主要起固定连接和支撑的作用,如螺栓连接等。运动结合面是指相互连接的两个零部件之间在工作状态时存在宏观相互运动的结合面,如导轨、座圈、高低齿弧等结合面。而半固定结合面则是指有时固定有时又会出现相对运动的结合面,如摩擦离合器的连接与接触等。

2) 多刚体动力学模型

火炮射击时的多刚体动力学模型应用分析力学理论,采用不同的方法可建立不同表达形式的多刚体动力学模型,应用较多的有拉格朗日法、凯恩—休斯顿法等。采用拉格朗日法,文献[8]将火炮简化为3自由度和5自由度模型,假设火炮射击时只作射面内的平面运动,火炮由3个刚体组成,即后坐部分、起落部分和炮架部分。后坐部分通过反后坐装置与炮架弹性连接,射击时沿摇架导轨后坐复进运动,考虑了后坐部分与起落部分之间的装配间隙。起落部分可绕耳轴转动,相对转角是由于高低机和平衡机的弹性变形造成的。全炮可绕驻锄支点转动、水平移动和垂直移动。文献[9]以自行火炮为研究对象,假设炮身、摇架、炮塔和车体等主要部件为刚体,土壤为弹塑性体。认为车体由悬挂支撑,作6自由度刚体运动。炮塔通过座圈与车体相连,炮塔相对于车体有绕座圈回转轴的转动与炮塔相对车体的俯仰和左右摆动,有3个转动自由度。摇架通过高低机、平衡机与炮塔相连,两者相对运动主要表现为绕耳轴相对炮塔的转动。炮身通过导轨与摇架相连,两者相对运动主要表现为沿导轨直线的后坐复进运动。

火炮系统的发射动力学情况十分复杂,国内外都曾做了大量研究工作对发