

《近代兵器力学》丛书

自动武器机构动力学

Dynamics of Automatic Weapon Mechanisms

王宝元 李魁武 编著

31

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

自动武器机构动力学/王宝元,李魁武编著. —北京:
国防工业出版社,2003.1

(近代兵器力学丛书)

ISBN 7-118-02894-0

I.自... II.①王...②李... III.自动武器—机构
去和分析 IV.TJ03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 047891 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 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7½ 182 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:19.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列出出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

序

力学作为一门工程技术的重要基础学科,在各行各业得到了广泛应用,现已发展成为多种类别的应用力学,兵器力学就是其中之一。建国以来尤其是近二十年来,兵器工业在基础研究、预先研究以及型号研制等方面取得了突破性进展,很多科研成果达到了国内外先进水平,也积累了不少经验和教训。为了总结、升华已有的科研成果,使之形成新的、系统的兵器力学理论体系,推动今后兵器科研和设计理论的发展,跟踪国际先进水平,我们编纂出版了这套《近代兵器力学》丛书。

《近代兵器力学》丛书共 14 册,从力学角度覆盖了兵器系统的典型力学问题,总结了国内外装甲车辆、火炮与自动武器、弹道、爆炸与冲击等力学方面的成就。每一册都是由各专业领域内具有丰富实验经验和较高学术水平的专家学者进行撰著。本套丛书不仅包含了理论研究还有试验研究,重点突出了相关专业领域内的新理论、新原理和新技术的发展,基本反映了当前国内外兵器发展中应用工程力学的广度和水平,具有较高的理论水平和工程应用价值。

1998 年冬,中国工程院院士朵英贤倡议编纂本套丛书,首先得到国防科技图书出版基金委员会办公室的支持,也得到中国兵器工业第二〇二研究所的积极响应并承担组织工作。经过专家学者们两年来的辛勤劳动,《近代兵器力学》丛书正式开始出版,这是一件很有意义的事情,得到了各级领导的重视和支持,受到了广大

兵器科技工作者的欢迎；这一套丛书的出版必将从力学理论基础到工程实践应用都给现代兵器的研制提供理论的指导方向，必将对兵器研制的现代化起到积极的推动作用。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '丁世智' (Ding Shizhi), written in a cursive style.

2001年元月

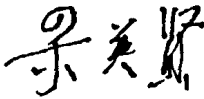
序

自从戈矛进化到火器,兵器(不论是机械、火炮、坦克、战术火箭和导弹)便以发射抛射物来毁伤目标。发射动力主要来源于火药,毁伤能量主要靠抛射物的动能或是炸药含能(直接爆炸或抛出毁伤元)。能量的转换便以内弹道、外弹道、终点弹道递次进行。兵器的载体可以不同,如陆地、战车、飞机、舰船等,这种能量转换模式却不改变。发射抛射物直到对目标的毁伤是一种大功率高瞬态的能量转换。弹丸对目标的撞击、炸药爆炸、内弹道、外弹道等则是纳秒、微秒、毫秒级的过程。发射时兵器本身也受到高强度的激励。自从经典内弹道学建立的一百多年来,随着火药力和炸药能量的提高,这种特征日益明显,并以高瞬态的力学过程映射出来,也是日益有别于其它工程领域。有人说,兵器领域是“瞬态力学大户”,此言不虚!本套《丛书》归纳了20世纪后叶兵器力学的主要成果,其中不乏我国学者的贡献。每个分册的作者都是该领域中卓有成效者。

工程实践和理论基础是兵器发展的两个巨轮,而理论基础则依赖于对工程实践的认识和提高,并用以指导后期的工程实践。20世纪60年代,我国兵器已进入自行研制,那是鄙薄技术最严重的时期,漫长的岁月,理论工作被荒芜,很多在工程中已成功的经验不能总结升华,这给兵器力学的发展带来严重后果,也给兵器发展带来不利影响。所幸的是改革开放以来,已有很大的弥补,《丛书》中相当的篇幅是这一时期的结晶。毕竟,研究瞬态力学有很大的难度,过程短暂、幅值很高、频域很宽、非线性问题多、信号采集困难、费用消耗大等因素制约着发展。即使这样,经过20多年的知识积淀及相邻学科的带动,给设计观念带来很大的变化,并运用

于产品研制。但是,也要看到这套《丛书》只是反映了兵器力学中的一部分。譬如,动态强度篇幅较少,在高速碰撞下材料的特性如何变化尚处于假设。工程中存在的“应力腐蚀”、“氢脆”、镀层强度等力学问题,须在更微观层次中进行研究。兵器中已大量应用非金属复合材料,但本构关系不甚清楚。至于用力学来描述高速破片对目标的创伤过程,目前远不成熟,等等。现在,纳米技术已进入社会,也逐步贴近兵器,那么兵器这种通过高爆能量转换和高动力发射的模式,会不会成为应用纳米技术使武器小型化的障碍?兵器力学中真有没完没了的事情,任重道远!

如此说来,这套《丛书》只是一个开头,希望这项工作能够获得延续。我更希望兵器力学研究的现状能够得到改进,使它发挥应有的推动作用。

中国工程院院士 

2000年12月

前 言

随着现代战争的发展,对自动武器系统要求越来越高,传统的自动武器设计方法已远远不能适应新形势发展的需要,自动武器系统运动学和动力学理论与方法在其设计、研制过程中的地位也就越来越重要。

长期以来,自动武器机构的力学模型常采用一个自由度或两个自由度,自动武器动力学分析是一炮一个模型。动力学分析人员将大量的时间和精力花费在繁琐的公式推导、方程式建立、计算机程序编写和传速比计算等方面。当自动武器结构或类型不同时,上述过程均需重新进行。这种分析方法,人工劳动强度大,对分析人员知识层次要求高,分析周期长。电子计算机技术的飞速发展,使自动武器系统运动学和动力学分析焕发了青春。本书着重论述一种系统方法,利用这种方法计算机能自动建立运动学和动力学数学模型,并用数值方法自动求解。它会改变传统的分析方法,即由一两个自由度力学模型发展到多个自由度模型,对个别自动武器系统的人工建模发展到对各种自动武器系统的计算机自动建模,由人工选用算法求解发展到计算机自动求解,由适用范围小的专用分析软件发展到适用范围十分宽广的大型通用分析软件。本书按自动武器机构平面系统和空间系统介绍必要的数学基础、数值方法、建模与分析方法及实例应用。

本书共分为十一章,内容为火炮自动机常见工作原理、自动武器机构运动学与动力学概述、自动武器机构运动学基本概念与数值方法、自动武器机构平面运动学、欧拉参数、自动武器机构空间运动学、火炮自动机典型机构运动学分析、自动武器机构动力学原理、自动武器机构平面动力学、自动武器机构空间动力学、火炮自

动机典型机构动力学分析。

本书第一章,第七章和第十一章由李魁武主笔;第二章至第六章,第八章至第十章由王宝元主笔,吴兴波和祝军利参与了第三章的编写工作。

本书作者非常感谢梁世瑞研究员对本书材料的形成、章节的构思和素材的组织给予了热情指导和无私的帮助。吴三灵研究员和马春茂副所长在百忙之中通读了书稿内容,提出了许多宝贵而中肯的修改意见。焦明纲、周发明、宁变芳、王在森和张军岭在例题计算、文字排版及图表处理等方面的合作,保证了书稿的顺利完成。

由于作者水平有限,错误和不妥之处在所难免,诚恳欢迎读者批评指正。

作者
2002年3月

目 录

符号表	1
第一章 火炮自动机常见工作原理	3
1.1 后坐式工作原理	3
1.2 导气式工作原理	6
1.3 转膛式工作原理	8
1.4 转管式工作原理	10
1.5 Γ III 工作原理	11
1.5.1 Γ III 自动机的工作原理和组成	12
1.5.2 Γ III 原理自动机特点	16
第二章 自动武器机构运动学与动力学概述	18
2.1 自动武器机构运动学与动力学分析	18
2.2 自动武器多体机构	19
2.3 分析方法	20
2.4 计算方法	23
第三章 自动武器机构运动学基本概念与数值方法	26
3.1 定义	26
3.1.1 运动副分类	28
3.1.2 坐标矢量	29
3.1.3 约束方程	30
3.1.4 多余约束	31
3.2 自动武器机构运动学分析方法	32
3.2.1 坐标分离法	32
3.2.2 附加驱动约束法	34
3.3 自动武器机构线性代数方程组	36

3.4	自动武器机构非线性代数方程组	38
第四章	自动武器机构平面运动学	39
4.1	坐标系	39
4.2	自动武器典型机构运动约束及其方程	41
4.2.1	转动副和移动副	42
4.2.2	复合运动副	45
4.2.3	直齿圆柱齿轮和齿条齿轮	48
4.2.4	曲线表示法	51
4.2.5	凸轮机构	54
4.2.6	点从动运动副	58
4.2.7	简化约束	59
4.2.8	驱动构件	60
4.3	自动武器机构位置、速度和加速度分析	62
4.3.1	基本元素系统组装	63
4.3.2	凸轮运动副和点从动运动副表达式推导	67
4.4	程序流程图	77
第五章	欧拉参数	79
5.1	刚体坐标系	79
5.1.1	刚体运动欧拉定理	83
5.1.2	主动与被动观点	84
5.1.3	欧拉参数	85
5.1.4	欧拉参数计算	88
5.1.5	方向余弦计算	90
5.2	欧拉参数恒等式	93
5.3	角速度概念	99
第六章	自动武器机构空间运动学	104
6.1	两矢量间的相对约束	104
6.1.1	两矢量垂直	106
6.1.2	两矢量平行	106
6.2	自动武器构件之间典型相对约束	108

6.2.1	球面副、万向节和转动副	108
6.2.2	圆柱副、移动副和螺旋副	112
6.2.3	复合运动副	115
6.2.4	简单约束	119
6.3	自动武器机构位置、速度和加速度分析	119
6.3.1	简化雅可比矩阵和简化矢量 γ	120
6.3.2	凸轮机构运动学约束方程雅可比矩阵和 矢量 γ	123
第七章	火炮自动机典型机构运动学分析	129
7.1	建模和分析技术	130
7.2	抽壳加速机构运动学分析	131
7.2.1	模型	132
7.2.2	装配	134
7.2.3	驱动件的确定	135
7.2.4	分析	135
7.3	23 航炮传动机构运动分析	136
7.3.1	模型	137
7.3.2	装配	139
7.3.3	驱动件的确定	139
7.3.4	分析	139
7.4	23 航炮加速机构运动分析	140
7.4.1	模型	141
7.4.2	装配	142
7.4.3	驱动件的确定	143
7.4.4	分析	143
7.5	纵动式旋转闭锁式炮闩开闩机构运动分析	143
7.5.1	模型	144
7.5.2	装配	145
7.5.3	驱动件的确定	146
7.5.4	分析	146

7.6 转管炮炮箱曲线槽约束下的机心运动分析	147
7.6.1 模型	148
7.6.2 装配	150
7.6.3 驱动件的确定	150
7.6.4 分析	150
第八章 自动武器机构动力学原理	152
8.1 刚体动力学	152
8.1.1 力矩和力偶	153
8.1.2 转动方程	156
8.1.3 惯量张量	158
8.1.4 自由刚体	160
8.2 多刚体系统动力学	162
8.2.1 自由多刚体系统	162
8.2.2 约束多刚体系统	163
8.2.3 约束反力	164
8.3 平面运动约束	166
第九章 自动武器机构平面动力学	169
9.1 运动方程	169
9.2 力矢量	171
9.2.1 重力	171
9.2.2 单个力或力矩	172
9.2.3 平动激励器	173
9.2.4 平动弹簧	174
9.2.5 平动阻尼器	175
9.2.6 转动弹簧	177
9.2.7 转动阻尼器	178
9.3 约束反力	178
9.3.1 转动副	178
9.3.2 转动-转动副	180
9.3.3 移动副	182

9.4	平面运动方程系统	184
9.5	程序流程图	184
9.5.1	运动方程求解	185
9.5.2	动力学分析程序流程图	186
第十章	自动武器机构空间动力学	188
10.1	力矢量	188
10.1.1	力矩变换	188
10.2	自由刚体运动方程	190
10.3	约束刚体运动方程	192
10.4	系统方程组	193
10.4.1	自由刚体	193
10.4.2	约束刚体	196
10.5	运动方程组转化	198
第十一章	火炮自动机典型机构动力学分析	200
11.1	建模与分析技术	200
11.2	抽壳加速机构动力学分析	200
11.2.1	动力学模型	200
11.2.2	分析	203
11.3	23 航炮传动机构动力学分析	204
11.3.1	动力学模型	204
11.3.2	分析	205
11.4	23 航炮加速机构动力学分析	206
11.4.1	动力学模型	206
11.4.2	分析	208
11.5	导气式自动机动力学计算	209
11.5.1	动力学模型	209
11.5.2	分析	210
	参考文献	213

Contents

Symbol Table	1
Chapter One Typical working principles for gun automat	3
1.1 Recoiling working principle	3
1.2 Gas operated working principle	6
1.3 Working principle with revolving chamber	8
1.4 Working principle with revolving barrel	10
1.5 Γ III working principle	11
1.5.1 Working principle and composition of Γ III principle automat	12
1.5.2 Characteristics of Γ III principle automat	16
Chapter Two Summary of Kinematics and Dynamics of Mechanisms for Automatic Weapons	18
2.1 Kinematics and dynamics analysis of mechanisms for automatic weapons	18
2.2 Multibody mechanisms of automatic weapons	19
2.3 Analysis methods	20
2.4 Numerical methods	23
Chapter Three Basic Concepts and Numerical Methods of Mechanism Kinematics for Automatic Weapons	26
3.1 Definitions	26
3.1.1 Classification of kinematic pairs	28
3.1.2 Vector of coordinates	29

3.1.3	Constraint equations	30
3.1.4	Redundant constraints	31
3.2	Analysis methods of mechanism kinematics for automatic weapons	32
3.2.1	Coordinate partitioning method	32
3.2.2	Method of appended driving constraints	34
3.3	Linear algebraic equations of mechanisms for automatic weapons	36
3.4	Nonlinear algebraic equations of mechanisms for automatic weapons	38
Chapter Four Planar Kinematics of Mechanisms for		
	Automatic Weapons	39
4.1	Coordinate systems	39
4.2	Kinematic constraints and its equations of typical mechanisms for automatic weapons	41
4.2.1	Revolute and translational joints	42
4.2.2	Composite joints	45
4.2.3	Spur gears and rack and pinion	48
4.2.4	Curve representation	51
4.2.5	Cam – followers	54
4.2.6	Point – followers	58
4.2.7	Simplified constraints	59
4.2.8	Driving links	60
4.3	Position, velocity and acceleration analysis of mechanisms for automatic weapons	62
4.3.1	Systematic generation of some basic elements	63
4.3.2	Constraint expressions of cam and point – followers	67
4.4	Flow diagram of program	77