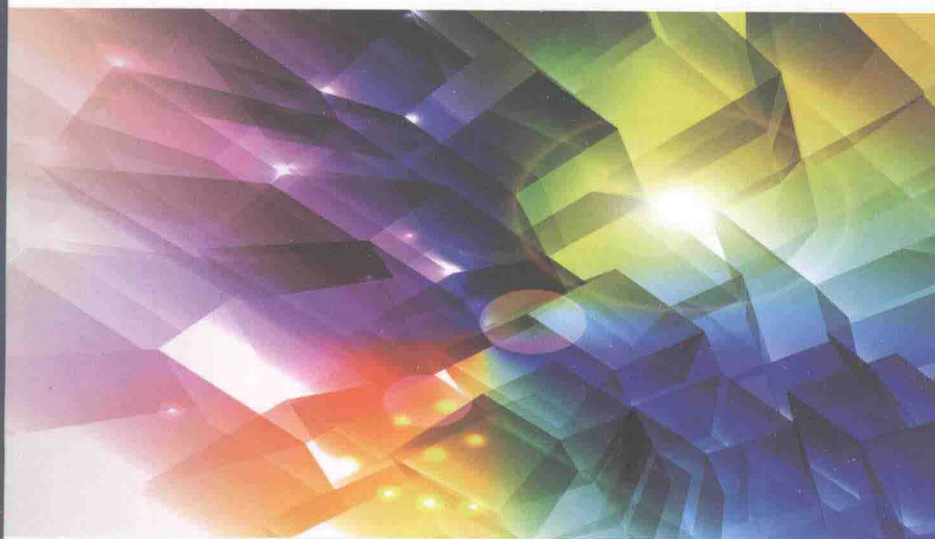




光幕阵列测试 技术与应用

Technology and Application of
Measurement of the Light Screen Array

倪晋平 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

光幕阵列测试技术与应用

倪晋平 著



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书围绕常规兵器外弹道参数领域中使用的光幕测试技术,详细介绍光幕的构建、工作原理以及光幕探测与测试中的工程技术。全书共分7章,主要叙述双光幕测试弹丸初速、多光幕阵列测试弹丸着靶坐标等参数的测量原理和设计技术,探索采用光幕阵列测试多目标的方法,最后总结光幕测试技术在常规兵器试验场的应用。书中融入了作者及作者所在团队20余年从事常规兵器外弹道试验与测试研究工作的经验和实践体会,纳入了作者及团队近年来在国内外发表的十余篇论文以及有关专利的内容。

本书对光幕测试弹丸飞行速度和着靶坐标的技术叙述详尽,测量公式的推导力求系统、深入,可供本领域的科学研究人员与工程技术人员参考,也可以作为有关专业高等学校的本科生、研究生和教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光幕阵列测试技术与应用 / 倪晋平著. —北京:国防工业出版社, 2014. 1

ISBN 978-7-118-08887-8

I. ①光… II. ①倪… III. ①外弹道试验—弹道参数—研究 IV. ①TJ012.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 265058 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17¼ 字数 391 千字

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 46.00 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

本书围绕常规兵器外弹道参数领域中使用的光幕技术,详细介绍光幕的工作原理以及光幕探测与光幕阵列测试中的关键技术,重点是测试外弹道弹丸飞行速度与着靶坐标的原理与方法。本书的大部分内容是根据作者、合作者以及作者所在团队 20 余年的科研工作写成,书中所涉及的方法和测试系统是作者及团队已在国内外期刊和会议发表的方法和成果,书中也介绍了近年在光幕技术方面的新的研究工作。

25 年前,作者有幸步入兵器试验与测试领域,当时国内第一台测速天幕靶刚开始使用,国内大部分常规兵器靶场或者试验场将采购测试仪器的重点放在进口国外仪器上,有的单位还在使用钢板靶测量弹丸速度。作者与合作者王铁岭教授及课题组的其他成员一起,研制了 JYJ-90 型天幕靶和 XGK-91-I 型光幕靶,之后,相继完成了光幕抗干扰技术、广角天幕靶、XGK-2002 型光幕靶,在国内首次提出光纤编码细分空间视场的原理,并制作出工程样机。这些研究仅限于单个光幕,包括提高其探测能力的方法以及工程化技术,随着应用的深入,发现多个光幕的组合不但能够测量弹丸飞行速度,还能测量弹丸着靶坐标,甚至弹丸飞行速度的方向角。研究方法的创新结果增强了团队拓宽光幕测试技术应用的信心,接着,在光幕阵列测量多目标问题上进行了探索。正是测量方法的创新推动了测试仪器的应用,仪器的应用又带出了新的需要解决的问题,从而又激发出新的测量方法研究要求。因此,在整个研究过程中个人与团队的密切合作是研究工作取得成效的基础。在工程化设计中安莹副教授、高芬博士负责光幕靶的结构设计,蔡荣立副教授、田会负责信号放大与处理电路设计,冯斌博士负责靶架以及遮光装置设计,宋玉贵副教授、马时亮、李海等负责数据的采集技术与测试软件的编制,还有几位老师相继参加课题组讨论与相关设计工作,课题组全体成员刻苦努力,攻克了一个又一个技术难题。经过团队成员不断的思索和追求,研究工作从测速天幕靶到光幕靶,从四光幕精度靶到六光幕阵列测试系统,光幕阵列测试技术的研究成果不断显现。

兵器试验与测试技术与光电子技术、计算机技术、控制技术以及信号处理技术等密切相关,作者及其团队 20 多年的靶场测试仪器的研制过程,其实质就是融合以上技术解决兵器外场试验中关键参数测试问题、研究测量原理、开创新方法、研制新仪器的过程。“光幕靶”是作者所在团队提出,团队对光幕的形成、测试以及应用做了大量的研究,书中虽然重点介绍光幕在外弹道参数测试中的应用,但与光幕相关的测试原理、方法和技术具有普遍意义,可以对其他相关测试领域的研究工作有所启发。

本书共分 7 章,第 1 章绪论,介绍光幕测试技术的由来和在兵器外弹道测试试验中的地位;第 2 章是光幕的实现技术;第 3 章介绍过幕时刻信息的获取方法;第 4 章介绍光幕测速原理及相关工程技术;第 5 章分析光幕阵列测量着靶坐标原理和方法;第 6 章是采用光幕阵列测量多目标的探索研究;第 7 章介绍光幕技术在常规靶场的应用。冯斌撰写了

第1章声学靶部分和第2章的靶架部分;高芬撰写了第2章柱面镜光幕实现原理;蔡荣立撰写了第3章中峰值触发电路部分,整理了第7章中光幕靶测试实验数据;马时亮撰写了第4章中测时仪的单片机程序,黄小霞整理了第4章弹丸速度修正公式;田会撰写第3章光幕靶数字滤波电路部分、第5章六光幕阵列的测量误差分析和第6章六光幕阵列测量破片部分,整理了六光幕精度靶的试验数据;董涛整理了第7章中多光幕天幕立靶测试系统的试验数据;安莹设计了第7章中四光幕安装与调校方法。

本书的初稿由作者执笔,田会和作者指导的2009级研究生卢红伟对部分稿件进行了整理和文字修改,书中纳入了作者及所在团队近年来在国内外期刊和会议发表的多篇学术论文,融入了合作者、团队以及作者指导的研究生席锋、田会、杜文斌、卢红伟等学位论文中的部分成果。

本书的出版得益于西安工业大学光电测试技术研究所全体教师的努力,特别是光幕靶、天幕靶、天幕立靶课题组全体成员在光幕测试技术方面所做的钻研和付出的心血,光电所的其他老师对光幕的工程设计和研制提出了很好的建议,在此一并感谢。同时,感谢国家自然科学基金给予的资助,项目编号:60972005。

本书的撰写得到了作者供职单位西安工业大学领导和科技处领导的大力支持和帮助,作者指导的2009级硕士研究生卢红伟和鲁倩审校了全部书稿,设计和绘制了部分图件;田会副教授审校了部分书稿;王国琿博士审校了第五章的公式推导,纠正了俯仰角的表达错误;安莹副教授校对了全部书稿;2011级硕士生肖冬整理了2.6.1节,对文中的个别字句提出了修改建议;作者指导的首届教改实验班学生荣飘阅读了全部书稿,校正了文字错误和不合适的语句表达,修改了不规范的参考文献,验算了第5章的公式,修改了错误和遗漏之处。在此,对他们的辛勤劳动和热情帮助表示衷心的感谢。

本书在写作过程中得到我的妻子姜凌彦的鼓励和支持,在此表示感谢。

本书的内容是作者及所在科研创新团队20余年科研工作的总结,有成功的经验,也有走弯路的地方,作者试图总结这些经验和已形成的研究成果,希望能对从事外弹道参数测试领域的科研工作者和测试仪器的使用者提供参考。本书可供从事兵器试验与测试技术领域的人员和工程技术人员学习参考,也可以作为仪器科学与技术学科高等学校的本科、研究生和教师参考书。

由于作者水平和时间所限,难免有不妥或错误之处,恳请读者批评指正,不胜感谢。

作者

2012年12月

于西安工业大学

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 弹道试验中测量的基本参数	2
1.1.1 飞行速度	2
1.1.2 散布密集度	2
1.1.3 飞行姿态	3
1.1.4 跳角	3
1.1.5 射频与飞行时间	3
1.1.6 弹体旋转速度	3
1.2 弹丸飞行速度测试技术发展	3
1.2.1 弹丸速度测量技术发展概述	4
1.2.2 初速测量区截装置的发展历程	5
1.2.3 几种在靶场常用的非接触式测速装置	7
1.3 立靶密集度测试技术发展	10
1.3.1 立靶密集度靶场测试技术概述	10
1.3.2 声学立靶测量原理	12
1.3.3 双 CCD 交汇立靶测量原理	15
1.3.4 四光幕天幕立靶测量原理	17
1.3.5 激光光幕立靶测试原理	18
1.4 光幕靶测试技术发展	20
1.4.1 国外光幕靶技术发展概述	20
1.4.2 国内光幕靶技术发展综述	20
1.5 本书的内容与安排	22
参考文献	22
第2章 光幕工作原理与实现技术	25
2.1 光幕的基本原理	25
2.1.1 光幕的组成与工作原理	25
2.1.2 光幕工作数学模型	26
2.1.3 光幕的技术性能指标	27
2.1.4 光幕的分类	28
2.1.5 一个光幕设计实例	29
2.2 光幕探测信号处理电路	31
2.2.1 光幕信号处理电路流程	31

2.2.2	光电二极管信号放大电路	32
2.3	光幕靶光幕	34
2.3.1	光源	34
2.3.2	接收装置	37
2.3.3	支撑架	39
2.3.4	反射法实现的光幕	40
2.4	天幕靶光幕	42
2.4.1	概述	42
2.4.2	单镜头天幕靶	43
2.4.3	广角天幕靶	44
2.4.4	单镜头多光幕天幕靶	51
2.4.5	天幕靶配接人工光源	52
2.4.6	天幕靶探测灵敏度	56
2.4.7	天幕靶倍弹径探测灵敏度的修正	59
2.5	细分光幕	63
2.5.1	天幕靶光幕的细分	63
2.5.2	光幕靶光幕的细分	67
2.6	其他形式的光幕	68
2.6.1	安全光幕	69
2.6.2	主动工作模式光幕	70
2.7	本章小结	71
	参考文献	71
第3章	弹丸穿过光幕时刻获取技术	74
3.1	弹丸穿过光幕的物理过程	74
3.2	弹尖触发与弹底触发	77
3.2.1	触发原理	77
3.2.2	触发电路设计	78
3.2.3	试验	79
3.3	幕中触发	81
3.3.1	触发原理	81
3.3.2	触发电路设计	81
3.3.3	试验	82
3.4	峰值触发	83
3.4.1	触发原理	83
3.4.2	触发电路设计	84
3.4.3	试验	84
3.5	相关算法提取过幕时间	86
3.5.1	算法原理	86
3.5.2	算法实现	86

3.6	几种时刻提取方法比较	87
3.6.1	仿真信号设计	88
3.6.2	两个光幕厚度一致	88
3.6.3	两个光幕厚度不一致	91
3.6.4	仿真结果	92
3.7	光幕探测信号处理中抗干扰电路设计	92
3.7.1	光幕信号处理电路流程	92
3.7.2	弹形信号夹杂干扰信号分析	92
3.7.3	弹形信号特性分析	95
3.7.4	激波信号数字滤波电路	96
3.7.5	蚊虫信号数字滤波电路	97
3.7.6	封门电路	97
3.7.7	单稳电路	98
3.7.8	CPLD 电路总体设计与实现	99
3.8	本章小结	101
	参考文献	102
第4章	双光幕测试弹丸飞行速度	103
4.1	单光幕用作触发装置	103
4.2	双光幕测速原理	104
4.2.1	弹道垂直光幕的测速原理	104
4.2.2	弹道不垂直光幕的测速原理	105
4.3	双路测时仪原理	106
4.3.1	工作原理	107
4.3.2	各功能电路实现	108
4.3.3	测时仪单片机程序设计	114
4.4	测速数据的处理与修正	119
4.4.1	修正公式	119
4.4.2	修正实例	120
4.5	测速误差分析	121
4.5.1	测速系统误差传播公式	122
4.5.2	双区截测速误差分析	122
4.5.3	双光幕测速误差分析	123
4.5.4	光幕靶测速误差分析	124
4.5.5	天幕靶测速误差分析	127
4.5.6	最佳靶距选择	130
4.6	测速系统的组建与性能指标	131
4.6.1	测速系统的组成	131
4.6.2	常规靶场用光幕测速系统的技术指标	132
4.6.3	常规靶场常用的几种测速用测时装置和区截装置	132

4.7	几种典型的测速系统	139
4.8	光幕测速技术展望	142
4.9	本章小结	143
	参考文献	143
第5章	光幕阵列测试弹丸着靶坐标	145
5.1	三光幕阵列测试弹丸着靶坐标	145
5.2	四光幕阵列测试弹丸着靶坐标	147
5.2.1	测试原理	147
5.2.2	测试误差分析	149
5.3	六光幕阵列测试弹丸着靶坐标	151
5.3.1	测试原理	151
5.3.2	测试误差分析	155
5.4	六光幕光幕靶的双平行结构	159
5.4.1	双平行结构 1	159
5.4.2	双平行结构 2	161
5.4.3	双平行结构 3	162
5.4.4	双平行结构 4	163
5.5	六光幕光幕靶的双 V 形结构	164
5.5.1	双 V 形结构 1	164
5.5.2	双 V 形结构 2	166
5.5.3	双 V 形结构 3	169
5.5.4	双 V 形结构 4	170
5.5.5	双 V 形结构 5	171
5.5.6	双 V 形结构 6	172
5.6	六光幕天幕靶的双 N 形结构	176
5.6.1	双 N 形结构 1	176
5.6.2	双 N 形结构 3	182
5.7	光幕阵列的其他结构形式	183
5.8	组合光幕阵列测试弹丸着靶坐标	185
5.8.1	四组合光幕阵列	186
5.8.2	一体化四组合光幕阵列	188
5.8.3	五组合光幕阵列	191
5.9	本章小结	191
	参考文献	192
第6章	光幕阵列测试多个目标飞行参数	193
6.1	六光幕阵列测试破片群飞行参数	193
6.1.1	测试系统组成	194
6.1.2	测量算法	194
6.1.3	测试方法仿真	195

6.2	七光幕阵列测试多个目标	201
6.2.1	七光幕阵列结构与测量模型	201
6.2.2	双目标测试原理	202
6.2.3	仿真验证	203
6.3	组合光幕阵列测试多个目标	206
6.3.1	测试系统组成	206
6.3.2	双目标测试原理	207
6.3.3	仿真验证	209
6.4	本章小结	212
	参考文献	212
第7章	在兵器试验与测试中的应用	213
7.1	实时测速的双光幕触发系统	213
7.1.1	触发系统工作原理	214
7.1.2	逻辑控制电路设计	215
7.1.3	试验	218
7.2	双光幕速度测试系统	220
7.2.1	系统组成	220
7.2.2	布靶与操作流程	223
7.2.3	气枪弹试验	223
7.2.4	枪弹试验	225
7.3	光幕靶测试破片速度	230
7.3.1	测量原理	230
7.3.2	光幕靶的设计	231
7.3.3	试验与结果分析	233
7.3.4	结论	234
7.4	光幕靶曳光弹速度测试系统	234
7.4.1	常规光幕靶测试曳光弹速度失效分析	235
7.4.2	测速系统组成与测量原理	236
7.4.3	测量算法	237
7.4.4	试验	239
7.4.5	结论	241
7.5	四光幕精度靶测试射击立靶密集度	241
7.5.1	测试系统组成	242
7.5.2	四光幕阵列装调方法及结构参数的测量方法	243
7.5.3	靶距已知下角度参数的辨识方法	246
7.5.4	结构参数未知下的系统标定方法	247
7.5.5	试验	249
7.5.6	结论	251
7.6	六光幕精度靶测试射击立靶密集度	251

7.6.1 测试系统组成与特点	251
7.6.2 气枪弹试验	253
7.6.3 步枪弹试验	256
7.7 六光幕阵列天幕立靶测试射击立靶密集度	257
7.8 本章小结	263
参考文献	263

第1章 绪论

兵器测试技术是兵器装备工业的基础,是兵器装备科研与生产不可缺少的一环。历史反复证明,兵器技术的每一次重大突破,往往都伴随着有关测试技术的重大进步^[1];相反,测试技术的进步,又反过来推动兵器技术的发展。在武器的设计、研制、生产、采购、验收和鉴定等环节,都需要测试技术强有力的支持,甚至在一些武器的效能作用过程中,需要实时测量某些参数,以便调节和控制武器使最终的杀伤效能达到最大化。随着高科技兵器的发展,测试技术已应用到武器系统的训练当中,操作者对武器装备熟练程度决定武器效能的发挥,保持这种熟练需要使用者进行必要的训练,只有操作者在真实或者接近真实的条件下使用武器装备,才能丰富使用经验和提高操作技能,从而在现役部队有效使用这些设备,实训装置中需要大量的测试环节,实时获取操作结果。随着武器装备的信息化,信息获取、传输和处理等信息技术大量充斥武器装备的各个环节,测试技术作为一种信息获取手段,在武器的作用、效能评估中得到了充分的应用,战争对信息化技术的需求将进一步推动测试技术的发展。

靶场试验与测试是兵器测试的重要环节,武器装备的预验收、武器系统的定型和鉴定试验都在靶场完成,靶场测试设施和试验测试手段的完善和技术水平的高低,直接影响武器装备研制的进度和效率,支撑兵器测试与试验水平的关键是测试设备和测试技术。

光电测试技术是靶场测试技术的一部分,光电测试设备与电测、雷测、遥测等多种手段组合构了当前靶场试验测试的基本体系。光电测量技术明显的特点就是非接触、高精度、无损伤和良好的电磁兼容特性,深受兵器试验行业试验人员的喜爱。高速摄影机、弹道相机、光电经纬仪、光电立靶、天幕靶、光幕靶等光电测试设备,是兵器试验场的主力测试设备,在过去和未来都是获取关键参数的主要手段。随着基础工业水平的提高和元器件技术的发展,一些原来无法测量的参数现在变得可能,相反,基于现有的元器件技术,如何实现兵器关键参数的测量,是测试技术需要研究的问题。

光幕测试技术作为光电测试技术的一个分支,已经实现了外弹道多个参数的测量,如天幕靶和光幕靶测量弹丸速度、四光幕精度靶测量射击密集度、广角天幕靶测量千米飞行时间等。天幕靶和光幕靶测速系统是国内弹丸初速测试的主力设备,采用4个光幕构建四光幕精度靶,可以在测试弹丸速度的同时,还可以测试弹丸的着靶坐标,在四光幕精度靶中再增加两个光幕,在测试弹丸速度与着靶坐标的同时,还可以测试飞行方向。多光幕阵列测试技术的发展,使光幕测试多目标的飞行参数成为可能,光幕测试技术在外弹道的应用得到拓宽。随着工业技术和科学技术的发展,巧妙地运用光幕测试技术还会实现更多的兵器参数的测试,获取更多以前无法测量的参数,有力推动兵器测试与试验技术向“实时化”“非接触”“自动化”等方向迈进,从而提升我国国防工业的基础水平。

1.1 弹道试验中测量的基本参数

弹丸由发射到毁伤目标的全弹道过程包括:火药的点燃与燃烧,燃气的流动与排出,弹丸的位移、旋转以及摆动,弹丸的爆炸与撞击^[2]。围绕外弹道实验开展的试验项目有^[2-4]:膛压与初速的测定,跳角与立靶密集度的测量,射程与地面密集度的测定,偏流试验,直射距离的测定,空中炸点及飞行时间的测定,膛口噪声的测定,破片性能试验,爆破威力试验,穿甲、破甲性能试验等。内外弹道的试验涉及弹丸的飞行速度、飞行姿态、气动特性、飞行稳定性和散布等,随着兵器技术的发展,还会产生新的特种参数的测试需求。弹道实验中的这些物理现象瞬间发生,变化过程极短,不可重复;表征这些物理现象变化规律的基本参量,如压力、温度、速度、加速度、位移、能量等,都具有很高的量值,即具有高温、高压、高速、高能以及瞬时和一次性的特征^[2],其对测试技术有独特的要求。下面介绍几种可以使用光电方法测量的外弹道参数。

1.1.1 飞行速度

弹丸在发射中的飞行速度^[2,3],是衡量枪弹质量的重要指标。在外弹道测试中,弹丸的初速是研究弹丸在空气中的飞行规律的原始数据,也是计算射表的原始数据^[4]。初速的大小是衡量火炮、弹丸和火药装药的综合性能和火炮威力的主要参量之一,它关系到射程大小、火炮结构强度、弹体结构强度、引信受力作用、射击精度等问题。弹丸初速测量结果的精确性和统一性,对火炮兵器的生产、研究、发展和应用产生直接的影响。

弹丸速度是指弹丸飞行过程中,在某一弹道点所具有的瞬时速度,如弹丸的运动速度(包括初始速度和靶位速度)、对目标的撞击速度等。由于直接测量弹丸的瞬时速度很困难,一般都是采用间接测量方法,首先测量与速度有关的其他物理量,然后再计算并换算为弹丸在某一点的速度和初速^[5-8]。最常用的是利用各种非接触原理的区截装置(如线圈靶、天幕靶、光幕靶等)和电子测时仪法、多普勒雷达测速法及各种高速摄影法(狭缝照相、高速分幅照相、激光脉冲照相及X光脉冲照相)等。

在爆破威力评估及毁伤试验中,通常需要测试战斗部破片的飞行速度和散布,由于其体积小、速度快、方向不确定,给测试带来很大的难度。

1.1.2 散布密集度

射击精度试验中测量弹丸的散布密集度^[2,4],射击精度测试系统是轻武器测试中非常重要的组成部分,是研究轻武器射击精度、评价武器系统效能的关键试验设备。射击精度包括射击准确度和射击密集度、即武器散布中间偏差和散布程度。射击准确度可以理解为“接近真值的程度”,指散布中心对瞄准点的偏离程度,以诸元精度的大小来衡量,因此射击准确度也叫诸元精度。射击密集度可以理解为“相互接近的程度”,是指弹着点对散布中心的离散程度,可以用散布误差的大小来衡量,所以也称为散布程度。

在靶场试验中,常用天幕立靶、光幕立靶、线阵 CCD 交汇立靶等测试系统测得每发射击弹丸的着靶坐标,然后根据相关的计算公式,便很容易计算出该组射击的射击精度。

1.1.3 飞行姿态

弹丸的飞行姿态是指弹丸在自由飞行时弹轴的空间方位,通常用俯仰角和方位角或章动角和进动角来描述。运动姿态及空间坐标参数关系到弹丸的飞行稳定性、射击精度以及终点效应的评价。弹道靶道是测量与研究弹丸自由飞行运动和气动力学特性的极为重要的手段,常用的设备有高速摄影机、弹道照相机、电影经纬仪、弹道测量雷达及全弹道遥测系统等。

任意瞬间弹轴与弹道切线(速度矢量线)之间的夹角,对旋转弹体称为章动角,对尾翼弹称为攻角。章动角(攻角)是分析弹体飞行稳定性和正确性的参数。章动角是由弹轴与发射器轴线不重合,弹的质量偏心,火药气体的合力或空气阻力的合力未通过弹体质心以及发射时炮身跳动等原因所致。研究章动角大小及其变化规律,可以分析弹体加工误差所引起质量分布不对称性、弹炮间隙、炮口压力变化、枪炮震动、转速改变等对射弹散布的影响^[4]。常用的方法有高速狭缝摄影法和线阵 CCD 交汇摄影法等。

1.1.4 跳角

跳角是射前炮膛轴线方向与弹丸出膛时实际飞行方向之间的夹角,跳角的铅垂分量叫定起角,它影响射程。横向跳角造成方向偏差。跳角值和跳角散布不仅取决于火炮构造特征和动力特征,还取决于弹的不平衡性和上定心部的直径^[5]。

1.1.5 射频与飞行时间

射频是武器的连发频率,一般是指在一分钟内武器射出的弹丸个数,单位为发/分钟,英文为 RPM (Round Per Minute)。现代兵器的射频越快,因此,对射频的测试提出更高的要求。

飞行时间是指弹丸从发射到飞行到弹道某位置的总时间,一般常规试验中仅测试 1km 或 2km 飞行时间。

1.1.6 弹体旋转速度

由于飞行稳定性和提高射击精度的需要,要求弹体在飞行中做高速或低速旋转运动。弹体围绕弹轴的转动对弹的运动规律和性能有很大的影响,因此需要测量该参数。

1.2 弹丸飞行速度测试技术发展

弹丸飞行速度的测量是武器系统各种运动参数测试中一项至关重要的内容,它是衡量火炮特性、弹药特性和弹道特性的一个重要指标,也为射表编制和内弹道研究提供必需的数据。在武器系统的研制、定型、生产、验收以及弹道学理论研究中都离不开弹丸飞行速度的测量^[2]。根据测量弹道不同区域的速度,所采用方法各不相同。常规兵器的靶场试验测试,指测量炮口或枪口初速,还有测量终点弹道速度的设备以及全弹道雷达跟踪弹丸在全弹道的速度。弹丸速度测试技术的发展,从一个侧面反映了兵器技术的发展,也反映出国内靶场的建设水平。

1.2.1 弹丸速度测量技术发展概述

对弹丸速度的测量与弹道学的研究密不可分。1742 年英国试验弹道学家罗宾斯 (Benjamin Robins) 发明弹道摆^[6], 第一次提供了弹丸速度测量方法。弹道摆的发明, 使弹道学家们对空气阻力的研究更加科学, 并对弹丸膛内的运动过程有了初步的认识。到了 19 世纪中期, 由于火炮发射技术的进步, 弹丸速度不断增加, 迫切需要精确测定弹丸速度的方法。这样, 在客观上促使人们对弹丸速度测量方法进行研究。在此期间发明了机械测时仪 (1842 年) 和布朗节测速仪 (1868 年~1869 年)。布朗节测速仪的发明, 大大地提高了弹丸速度的测量精度, 使人们精确测定了空气阻力与弹丸速度的关系。在国内一些靶场, 追溯测速装置还可以找到布朗节测速仪。在 20 世纪初期, 电子技术的广泛兴起, 测速手段得到不断改善。1923 年, 在美国阿伯汀靶场采用螺线管、测时仪和快速记忆示波器对弹丸的飞行速度进行了测量。在 20 世纪 40 年代初期, 多普勒技术开始应用于弹丸速度测量。特别是 20 世纪 90 年代, 国际上出现了全弹道雷达, 不仅能测速, 还能测定弹丸的飞行轨迹。纵观现有的测速方法和装置, 目前可以分为两类方法: 一种方法是测量弹丸飞过一段已知距离的时间, 然后用距离除以时间求得已知距离的平均速度; 另一种方法是应用多普勒雷达技术。多普勒雷达测速仪向运动目标发出一束无线电波, 电波遇到目标反射回到测速仪。测速仪的输出是一个交变电流信号, 其频率是发射波频率和接受波频率之差。如果目标相对测速仪是静止的, 发射和接受的频率相等, 则频差为零。然而在目标相对测速仪之间相对运动时, 则反射信号将产生频率偏移, 这个频差 (也叫多普勒频移) 直接与测速仪到目标的距离的变化率成正比即与径向速度成正比。利用这一原理制造了各种测速雷达, 用于炮弹速度的测量。

在 20 世纪 70 年代, 国内常规靶场大都采用接触式的区截装置如网靶和钢板靶测速。接触式测量精度低, 并带有危险性。线圈靶的发明, 因其属于非接触式测量而在国内靶场广泛使用。在 20 世纪 70 年代末, 随着天幕靶技术的发展, 光电原理的非接触式测速仪器逐步进入靶场测试领域。后来由于钢板靶使用的钢板停产, 加之线圈靶靶面小和抗干扰性差的缺点, 测速仪器逐渐被天幕靶和光幕靶替代。截至 21 世纪初期, 国内靶场使用的测速仪器主要是基于非接触式原理的天幕靶、光幕靶和线圈靶。

随着电子技术和计算机技术的发展, 双区截测速系统中使用的电子测时仪, 由最初的晶体管测时仪, 如 DCS-453 型电子测时仪, 发展到集成电路测时仪, 如 HG-202 型电子测时仪。随着单片机和 CPLD (Complex Programmable Logic Device) 技术的发展, 单片机控制的测时仪产生了, 如 XG-2002 型电子测时仪, 该类测时仪不仅能测试时间, 还能根据输入的靶距实时计算出当发弹丸的速度, 并可以与计算机通信, 将测量结果传输至中央计算机, 由中央计算机进行最终的测量结果处理。将计算机引入测速系统, 由计算机自动完成复杂的速度修正和数据表格报表, 不需要人工参与, 测量结果可以方便地存储、显示和打印, 大大提高了测速精度, 简化了操作步骤, 降低了人员工作量, 大幅度提高了可靠性。一些基于计算机的测速系统层出不穷, 如虚拟仪器测速系统^[9]、计算机采集数据测速系统^[10,11]等。计算机测速系统使弹丸测速实现了实时化、全自动化、多参数化以及多目标化。如奥地利 HPI 公司研制的 B214 多参数测试系统, 在计算机控制下, 同时完成膛压、初速、射频和射击密集度的测量。西安工业大学研制的 V-Star、(顿号)V-ma 速度

分析软件也有同样的功能,而且操作软件中文化,数据的修正和报表格式根据国内企业的实际编制。西安工业大学研制的 XGK - 05 型天幕立靶测量系统,在测量弹丸射击密集度的同时,还可以测量出速度以及速度飞行方向的空间角度,真正实现了一套系统完成多个参数的测量。西安工业大学研制的 XGK - 2006 型六光幕光幕靶,在完成速度、坐标和速度飞行空间角度测量的情况下,还可以实现多个破片的测量,实现了一套仪器同时测量多个目标飞行参数的功能。

计算机的使用和互联网的发展加速了企业生产信息化的进程,使靶场测试走向网络化,可以在一个靶道实现同一发弹丸多个参数的同时测量,还能在多个靶道同时开展试验。测试数据在网络上传送,可以在一个企业内部共享或者在同一型号武器研制的不同企业共享。靶场测试信息化技术的发展,会大幅度降低企业运营成本,结合现代的虚拟试验技术,大大降低武器试验和检验的成本。随着信息化和网络化技术的发展,靶场测试技术水平必将得到更大的发展。

1.2.2 初速测量区截装置的发展历程

不同的测速装置采用不同的测速原理,同一装置测速方法也多种多样,但常规靶场测速系统大部分采用区截装置配合测时仪的方法,区截装置一般是线圈靶或天幕靶或光幕靶。弹丸速度测量从原理上可分为瞬时速度测量和平均速度测量。瞬时速度测量是用照相的方法拍摄超音速弹丸在空中飞行时的弹头激波,并测量出弹头波的半角,根据弹头波的分布规律,确定出弹丸在弹道上某一点的速度值。平均速度测量首先测量弹道上某一段的长度,然后测出弹丸通过该段弹道所需的时间。利用平均速度公式,即可计算出弹丸在该段弹道上的平均速度。下面就靶场应用的主流测速装置,介绍区截测速装置的发展过程。

区截测速系统的组成如图 1.2.1 所示。系统由两个区截装置和一台测时仪组成。所谓的测速区截装置,即常说的测速靶。将区截装置放置于预定弹道,其探测平面垂直预定弹道。区截装置相当于在弹道上截取了一段距离,故称为区截装置,两个区截装置分别称为 I 靶和 II 靶。当弹丸通过时, I 靶和 II 靶分别产生让测时仪计数启动和停止的信号,测时仪记录了弹丸在这段弹道上的飞行时间 $t_2 - t_1$,依据时间和弹道距离 S 就可以计算弹丸在 BC 段上的平均飞行速度 v ,也即是中点位置 D 点的瞬时速度 v_D 。

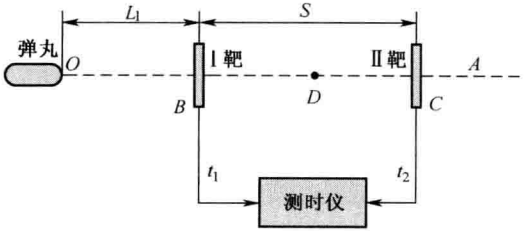


图 1.2.1 区截装置测速示意图

$$v = v_D = \frac{S}{t_2 - t_1} \tag{1.2.1}$$

区截装置是平均速度测量系统中的关键设备,当弹丸通过时,需要它及时、准确地产

生过靶信号,以便启动和停止计时装置,如果两个靶信号不一致(包括波形形状、幅值大小、延迟时间等),将使测量的靶距与弹丸实际飞行的弹道段不符,从而使计时装置记录的时间不对应,引起测量误差。用于测试弹丸飞行速度的常用区截装置有线圈靶、铜丝靶、锡箔靶及钢板靶、光幕靶、天幕靶等。在区截装置测速系统中的测时仪,原理相对简单,就是测试和记录两个过靶信号之间的时间。

在布朗节测速仪之后,国内靶场采用接触式的通断靶区截装置测速,主要有网靶和箔靶^[12]。它利用弹丸飞过时的机械作用,闭合或断开装置中电路的方法来产生电脉冲信号,以此作为启动或停止测时仪计时的靶信号。

网靶是最早使用的接触式区截装置,用电绝缘材料制成框架,在靶架左右两边按一定的间距排列绕线柱,射击前将金属丝绕在框架的绕线柱上。测量时,网靶置于一定距离的弹道段上,将金属丝通电。当弹丸飞过时,金属丝被切断,电位产生上升跳变。这个电位的突变即是网靶产生的靶信号。由于网靶在制作时不可能完全一样,同时,也很难保证弹丸穿过靶面的相对位置相同,电路的参数不同等都给测量带来误差。

箔靶由一层绝缘纸板和贴在两面的铝箔组成,以铝箔作为两个电极。弹丸穿过时,金属弹丸使两箔片瞬间导通产生突跳脉冲,即为靶信号。

网靶和箔靶是接触式测量装置,因此每次测试都会损坏靶面,在下一次测试前需要修复靶面。这使得测量的重复性不高,增加了测试的工作量,在进行对比测量时很不方便。因而接触式测量装置逐步被非接触式测量装置所代替。

线圈靶是最早出现的非接触式测速区截装置,以电磁感应的原理工作,与以前相比有了很大的进步。用漆包线绕制具有一定匝数的线包,当弹丸通过线圈靶时,由于弹体是铁磁性物质,引起线圈中全磁通的变化产生感应电动势。感应电动势即线圈靶输出的靶信号。信号的大小与弹丸通过靶时的速度、线圈靶的参数和弹丸的半径有关。与接触式测量装置相比,线圈靶的优点在于靶不与弹丸接触,不影响弹丸的飞行运动;可以连续重复使用,测量方便、迅速。但是由于是利用电磁感应原理测量,所以不能测量非金属材质的弹丸;易受到外界电磁场的干扰,稳定性和可靠性较差;对不同的弹丸需要换用不同口径的线圈。

由于上述区截装置的不足,以及速度测试要求的提高,后来相继出现了采用光电转换原理^[12-14]做成的非接触式测量光电靶——天幕靶和光幕靶。

20 世纪 70 年代末,我国第一代测速天幕靶——GD-79 型水平天幕靶研制成功^[1]。天幕靶是由光电器件和光学系统形成的无形靶面构成的非接触型区截装置,它的工作原理是:光电传感器响应天幕内光通量的变化,将其转变为微弱的电信号,经过电压增益至约为 70dB 的交流电放大后,进入电压比较器,当其幅值高于预定的基准时,电压比较器翻转,产生触发脉冲。天幕靶的光学结构决定了在其视场内形成一道无形光幕,炮弹穿过光幕时,由于引起射到天幕靶敏感器件上的光通量的变化,该变化的时刻对应弹丸穿过光幕的时刻,两个天幕靶与一台测时仪配合便可自动测量弹丸飞过两个天幕靶间的速度。参与国内第一代天幕靶研制的单位有兵器 203 研究所、长春理工大学以及西安工业学院(TMB-1 型水平天幕靶)。第一代天幕靶基本上是借鉴奥地利 AVL 公司的天幕靶,外形较大、质量大,野外使用消耗体力较大。比如,长春光机学院设计的广角天幕靶现在靶场已不使用。1989 年,科研人员为了使天幕靶使用更方便,在 GD-79 型天幕靶和 TMB-1 型天幕靶的基础上,设计