



《中国工程物理研究院科技丛书》第 002 号

光学高速摄影 测试技术

谭显祥 编著

学出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了高速摄影仪器、设备和测试技术,对转镜相机和变象管相机的原理、结构作了详细的讨论,并具体地介绍了测试炸药爆轰过程、冲击波物理和高温高压等离子体等实例。本书内容是多年的工作总结,还反映了本专业领域国内外的最新进展。

本书可供从事有关专业的科学研究人员、工程技术人员和大学师生参考。

《中国工程物理研究院科技丛书》第 002 号

光学高速摄影测试技术

谭显祥 编著

责任编辑 徐宇星 杨 岭

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1990 年 2 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1990 年 2 月第一次印刷 印张: 9 插页: 1

印数: 0001—1 320 字数: 231 000

ISBN 7-03-001515-0/I B 41

定 价: 10.50 元

《中国工程物理研究院科技丛书》出版说明

中国工程物理研究院建院三十年来,坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向,完成了国家下达的各项国防科研任务。通过完成任务,在许多专业学科领域里,不论在基础理论方面,还是在实验测试技术和工程应用技术方面,都有重要发展和创新,积累了丰富的知识和经验,造就了一大批优秀科技人材。

为了扩大科技交流与合作,促进我院事业的继承与发展,系统地总结我院三十年来在各个专业领域里集体积累起来的经验,吸收国内外最新科技成果,形成一套系列科技丛书,无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科研工作的成果,内容涉及本院过去开设过的二十几个主要学科。现在和今后开设的新学科,也将编著出书,续入本丛书中。

这套丛书将在今后几年里陆续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍,经编委会审定后,也纳入本丛书系列。

谨以此套丛书献给三十年来为我国国防现代化而献身的人们!

《中国工程物理研究院科技丛书》编审委员会

1989年1月25日

《中国工程物理研究院科技丛书》

编 审 委 员 会

主 任 俞大光

副主任 章冠人

委 员 (以姓氏笔画为序)

丁厚本 于洞庭 水鸿寿 方乃相 王铁铮

刘庆兆 汤绍源 华欣生 吴宏志 杨成龙

张永昌 张寿齐 金行星 周正朝 罗诚鉴

赵维晋 姚景华 姚礼屏 贺仁辅 高天祐

徐锡申 徐清之 董海山 谢铭勋 曾启铭

赖祖武

丛书本册责任编辑 金家华

《中国工程物理研究院科技丛书》

已出版书目

001 高能炸药及其相关物性能

董海山主编 1989年10月出版

002 光学高速摄影测试技术

谭显祥编著 1990年2月出版

序

高速摄影技术除了在国防科学研究中发挥着重要作用外,民用领域的应用,特别是在矿山开发、冶金、纺织、化工、水利、煤炭和石油开采、铁道建设以及金属切削、焊接、发动机和钟表工业等的科学研究和新产品试制工作中,应用日益广泛,并取得了令人瞩目的成果。近十多年来,随着高速摄影设备时间分辨本领的提高以及相关科学技术的发展,高速摄影应用技术发生了深刻的变化,即由传统的研究宏观高速物体的运动规律,发展到微观物质运动的探索,并特别着重光子作为信息载体的功能。光信息的探测、传输、记录和处理,结合光电转换技术、计算机应用和图象数据处理等方面的内容,形成了各种新的测试技术,丰富了光子学的研究内容。

本书根据编著者及其同事多年在爆炸物理光学高速摄影测试技术研究中的实践,并参考国内外同行的有关研究成果编写而成。全书重点是讨论测试技术问题。在第四章中,除了阐述各种常规测试方法以外,也包括新近开展起来的一些测试方法,如瞬时高温的测量、光纤传感器的应用、激光干涉测速、激光拉曼光谱技术的应用以及高压测量的高速光学方法等。这些方法既有广泛的应用前景,也需要在应用中不断发展和进一步完善。

测试技术研究实践表明:实验工作者对已有的设备,特别是先进设备的设计原理、技术性能和功能的了解愈透彻,就愈能充分发挥它们的作用和技术潜力。因此,本书第二章和第三章从使用观点出发,比较详细地阐明了两种最重要而又最常用的超高速摄影设备的结构原理和技术性能,并在第一章中简要介绍了其它类型高速摄影设备的工作原理。

本书经西南流体物理研究所杨成龙、马跃贤两位副研究员初

审,浙江大学董大年教授和西南流体物理研究所吴世法研究员主审,最后由中国工程物理研究院俞大光、章冠人两位研究员审定。对他们付出的辛勤劳动和提出的宝贵意见,编者表示衷心感谢。编写过程中得到了院、所领导的热情关心和鼓励。西南流体物理研究所的许多同志提供了不少资料和实验照片。向琼同志帮助绘制了大量插图。编著者谨在此一并表示诚挚的谢意。

由于编著者业务水平的限制,书中难免出现不当或差错之处,敬请批评指正。

编 著 者

1989年2月

目 录

第一章 高速摄影概论	1
1.1 导言	1
1.2 高速摄影发展简史	1
1.3 高速摄影仪器的分类及其简述	5
1.3.1 间歇式高速电影摄影机.....	5
1.3.2 光学补偿式高速相机.....	7
1.3.3 高速录象.....	11
1.3.4 鼓轮式高速相机.....	12
1.3.5 脉冲光源多幅高速相机.....	14
1.3.6 转镜式高速相机.....	15
1.3.7 网格式高速相机.....	17
1.3.8 克尔盒高速相机.....	18
1.3.9 变象管高速相机.....	21
1.3.10 高速全息摄影.....	24
1.4 高速摄影仪器类型和应用参数的选择	25
1.4.1 等待式或同步式的确定.....	26
1.4.2 分幅和扫描相机的选择.....	26
1.4.3 相机类别的选择.....	27
1.4.4 扫描速度和摄影频率的最终确定.....	28
1.4.5 胶片感光度的估算.....	29
1.4.6 附加快门的选择.....	30
参考文献.....	31
第二章 转镜式高速相机	32
2.1 转镜式高速扫描相机的光学原理	33
2.2 转镜式高速扫描相机的主要技术性能	36
2.2.1 扫描速度.....	36

2.2.2	时间分辨本领·····	41
2.2.3	对底片的相对孔径·····	44
2.2.4	成象质量·····	45
2.3	转镜式高速分幅相机及其主要技术性能 ·····	50
2.3.1	分幅相机的光学原理和光学系统的演变·····	50
2.3.2	光快门作用原理、矩形和菱形光阑的比较·····	51
2.3.3	分幅相机的主要技术指标及其质量评价·····	55
2.4	转镜式高速相机控制台工作原理 ·····	57
2.5	等待型转镜式高速相机 ·····	67
2.6	转镜式高速相机及底片系统的光度性能 ·····	74
2.6.1	扫描相机的光度性能·····	74
2.6.2	分幅相机的光度性能·····	80
2.7	底片判读和数据处理 ·····	80
2.7.1	误差传递及数据处理方法·····	80
2.7.2	底片判读和测量设备·····	83
	参考文献·····	88
第三章	高速变象管相机 ·····	89
3.1	引言 ·····	89
3.2	变象管的组成及其各部件的性能 ·····	89
3.2.1	光电阴极·····	90
3.2.2	电子光学成象系统·····	97
3.2.3	荧光屏·····	108
3.3	高速变象管的综合技术性能 ·····	111
3.3.1	时间分辨本领·····	112
3.3.2	动态范围·····	113
3.3.3	扫描速度非线性·····	114
3.3.4	最小可探测强度·····	116
3.3.5	触发延时和漂移·····	118
3.3.6	光增益·····	118
3.3.7	图象的空间分辨率和调制传递函数·····	118
3.3.8	空间畸变·····	120
3.3.9	时间畸变·····	120

3.4	象增强器	121
3.5	扫描变象管相机图象数据处理系统	129
3.5.1	时间分析器的主要功能和组成	130
3.5.2	增强硅靶摄像管	132
3.5.3	电视监视器及其图象输出	133
3.6	应用举例	135
3.6.1	激光脉冲波形测量	135
3.6.2	时间分辨光谱波形的测量	138
3.6.3	辐射图象的传输和记录	140
3.6.4	激光驱动冲击波实验研究	142
	参考文献	146
第四章	爆炸物理实验研究中的光学高速摄影测试技术	147
4.1	炸药爆轰速度的测量	148
4.2	波形测量技术	151
4.2.1	单狭缝测波形	152
4.2.2	平行多狭缝测波形	152
4.2.3	交叉狭缝测波形	155
4.3	冲击波速度、自由面速度及飞片速度的测量	161
4.3.1	单波结构的冲击波速度和自由面速度的测量	162
4.3.2	水箱法测冲击波速度	164
4.3.3	倾斜反射镜法测冲击波速度和自由面速度	166
4.3.4	棱镜法测自由面速度和冲击波速度	167
4.3.5	影象法测自由面速度	170
4.3.6	飞片速度的测量	172
4.4	激光干涉测速技术	173
4.4.1	多普勒频移	173
4.4.2	激光位移干涉仪	175
4.4.3	法布里-珀罗标准具激光速度干涉仪	178
4.4.4	任意反射表面速度干涉仪	184
4.4.5	VISAR 和标准具激光速度干涉仪的比较	192
4.5	瞬时高温的测量	192
4.5.1	温度辐射定律	194

4.5.2	温度辐射定律的应用——光测高温学	197
4.5.3	瞬时热辐射体的温度测量	201
4.6	光纤传感器的应用	210
4.6.1	光纤的基本结构型式	211
4.6.2	光纤的传输特性	213
4.6.3	爆炸物理实验中应用的一些光纤传感器	218
4.7	高速阴影、纹影技术	221
4.7.1	阴影法	222
4.7.2	纹影法	226
4.7.3	高速阴影、纹影技术	228
4.8	高速莫尔条纹技术	235
4.8.1	莫尔条纹的形成及其在二维应力-应变测量中的应用	235
4.8.2	三维形变的测量——面外莫尔条纹技术	240
4.9	高速光弹性技术	248
4.9.1	光弹性法的光学原理	249
4.9.2	动态光弹性技术	253
4.10	拉曼散射光谱技术	258
4.10.1	拉曼散射	258
4.10.2	拉曼光谱技术在爆炸力学研究领域中的应用	261
4.10.3	相干反斯托克斯拉曼散射光谱 (CARS)	264
4.11	静压和动高压的光谱测量	267
4.11.1	金刚石砧压力室中高压的测量	267
4.11.2	动高压的测量	269
	参考文献	271
	结束语	274

第一章 高速摄影概论

1.1 引言

人眼的视觉暂留，限制了人们观察和分析高速运动过程的能力，因而发展了各种类型的高速摄影仪器。早期，人们称这种仪器为时间放大镜。通过它，把快速过程记录在胶片上，然后再慢速放映记录胶片，重现被摄过程，相当于把时间尺度放大，恰如显微镜把细小物体放大一样。

如果我们把视觉暂留时间当作人眼对时间的极限分辨能力，即时间分辨本领，则它约等于 0.1s 。现代最精密的高速摄影仪器，已可分辨 10^{-13}s ，从而使人眼的时间分辨本领提高了 12 个数量级。

高速摄影是研究高速运动过程的一种行之有效的方法。它与一般摄影最根本的区别，就在于它有高的时间分辨本领，能跟踪快速变化过程的发生和发展，并记录下来。自然界中，许多物理、化学、生物变化过程都是很快的，如高速机械运动、炮弹的飞行过程、电弧、电火花、爆炸、物质的分解和化合、植物的光合作用等等。对它们进行观察和研究，无疑必须借助高速摄影方法，以获得它们的一维、二维或三维空间位置随时间的变化，或获得它们某些物理状态参数随时间的变化规律。因而高速摄影学是研究宏观物体或微观物质运动规律的科学。

1.2 高速摄影发展简史

1851 年，珂罗酊湿板问世，感光度大幅度提高。英国人 Fox-Talbot, W. H. 曾用持续期很短的电火花，首次拍到了旋转报纸的清晰照片，开创了有目的的高速摄影活动，并取得了高速摄

影的第一个专利。1893年，爱迪生在总结前人经验基础上，制成了每秒能拍摄四十至六十幅的电影摄影机。同年，英国人 Boys 大体完成了转镜扫描相机的设想，其设计原理沿用至今。1894年，透镜补偿原理获得专利。1905年，反射镜补偿原理获得专利。大致在1920年便研制出了透镜补偿和反射镜补偿高速相机。1929年，由于气动实验研究的需要，Cranz, C. 和 Schardin, H. 利用持续期为微秒量级的多个电火花光源照明，一次拍摄了多幅图象。这种相机结构，最近由于电火花光源的改进和脉冲激光光源的使用，重又时兴起来。1932年，棱镜补偿式相机在美国问世。1939年，美国人 Miller, C. D. 提出了转镜式分幅相机原理，并于1946年取得了等待式分幅高速相机专利，为现代转镜式分幅相机奠定了基础。1944年，美国 Los Alamos 科学实验室出于爆轰学、爆炸力学和其它研究领域的需要，制成了第一台同步式转镜分幅相机。大约在1949年，苏联设计的 CФР 型转镜式扫描、分幅相机问世。

如上所述，高速摄影技术的发展，虽然在二次世界大战前，就已经解决了许多设备的设计原理问题。但是，重大的进展主要还是在二次世界大战之后。本世纪40年代至60年代是光机式高速摄影设备广泛研究并努力发展应用技术的年代。目前，这类设备的原理没有大的变化。人们除了继续在寻求提高时间分辨本领的新途径外，还在探索新的记录介质，以扩展光谱记录范围；大力发展使用技术，以充分发挥现有设备的潜力；尽量提高空间分辨率，进一步改善成象质量。

本世纪50年代至今是变象管高速相机大力发展的年代。50年代中期至60年代初期，解决了亚纳秒时间分辨的变象管高速摄影问题。60年代中期，锁模激光器出现后，实现皮秒激光核聚变的前景令人向往，可见光和X光皮秒光电成象技术便提到议事日程。70年代是皮秒时间分辨变象管相机蓬勃发展的时代。当前，激光脉冲的半高宽已压缩到数飞秒量级，因而迫切需要进一步提高高速摄影设备的时间分辨本领。

高速摄影领域的国际学术交流活动,始于 1952 年.到 1988 年为止,已开过 18 次会议. 60 年代末期,由于高速摄影设备时间分辨本领的提高以及应用技术深入到微观物理、化学过程的研究、光与物质的相互作用等方面,因此,在 1970 年召开的第 9 届国际高速摄影会议上,人们首次提出“光子学”(Photonics)一词,并从 1978 年第 13 届国际会议起,正式将会议名称改为“国际高速摄影与光子学会议”.光子学是把光子当作信息载体,研究光信息的探测、传输、记录、处理和显示的科学.特别在研究光与物质的相互作用时,光子所载信息,反映了物质分子结构的变化和物质的微观性态.光子学所涉及的一系列近代科学技术问题的解决,几乎都要借助于高时间分辨本领的高速摄影仪器.这也就是为什么把高速摄影和光子学联系在一起的重要原因.

我国的高速摄影事业,虽然本世纪 30 年代已开始,并有国外高速摄影专家来华工作,但是解放前并没有留下多少活动的痕迹. 1958 年,西北光学仪器厂等单位开始了转镜式高速相机的研制工作,并于 1962 年研制出合格产品交付使用,填补了我国在这科学技术领域的空白.同年,我国主要从事高速摄影研究工作的西安光学精密机械研究所(以下简称西安光机所)成立,开创了我国高速摄影设备按照使用要求独立发展的新局面. 60 年代,我国主要围绕各种光机式相机的研制和应用,开展了一系列卓有成效的工作. 70 年代末期至 80 年代,变象管相机和光子学测试技术得到了迅速的发展.到 1987 年国内召开第 5 届高速摄影和光子学会议时,所反映的主要情况是:

1. 多数光学机械高速摄影设备,已接近或达到国际先进水平,有些还具有我国自己的特色.如 70mm 棱镜补偿式相机具有频率高、象质好等特点,在第 14 届国际高速摄影与光子学会议上曾受到国外同行的好评. 16mm 棱镜补偿相机较国外同类相机启动电流小,图象清晰. 35mm 棱镜补偿相机由于片道设计的改进,大大降低了运转时的断片几率.间歇式高速电影摄影机的摄影频率已接近国际最高水平,且具有良好的画幅稳定性.网格式相机中

的关键器件自聚焦光纤网格透镜板的研制成功。转镜式高速相机中的电机-摩擦增速驱动机构,铍镜透平的研制,以微处理机为核心的控制设备等等,都是很有特色的研究成果。

2. 光电成象设备方面: 研制成时间分辨本领为 5ps 的可见光扫描变象管相机,并带有二维自动数据读出系统,时间分辨为 50ps 的软 X 光扫描相机交付使用,并提出了 X 光皮秒分幅相机的电子光学设计方案。对皮秒同步扫描变象管和飞秒扫描变象管进行了电子光学设计和样机试制。

3. 与国外合作,获得了脉宽为 19fs 的超短光脉冲,是至今不用压缩技术获得的最短光脉冲。

4. 序列激光脉冲已实现单脉冲宽度 5ns,重复频率 1MHz。同时研制了重复频率 10MHz、脉宽 2ns 的序列脉冲电光调制器。

5. 闪光 X 光设备: 研制了电子束能量为 7MeV 的强流相对论电子束加速器,并用于透视摄影。为了进一步改善光束质量,正在研制 6MeV 直线感应加速器。也发展了多种能量较低的通用型闪光 X 光设备和研制了电感贮能闪光 X 光机。

6. 研制成多功能多脉冲激光全息相机。

7. 研制成摄影频率 200f/s (幅/秒) 的高速录相设备。

8. 测试技术的研究,面向实际,解决了其它专业许多疑难问题,并推动了测试技术本身的发展。以“直接线性变换”原理为基础的高速立体摄影,在土岩爆破中,测量飞石的空间座标精度达厘米量级;基于多普勒频移的激光干涉测速技术,在爆轰学和内弹道学研究中取得了好的结果,干涉测速的时间分辨本领达 1ns;用瞬时多道比色测温仪,测量了固体和液体炸药的爆温;用高速实时全息干涉法定量测量了三维温度场;高速莫尔条纹技术在脉冲载荷下三维形变测量和物体机械振动研究中获得了初步应用;动态白光散斑技术和动光弹结合,已用于主应力的分离;使用超短光脉冲作光源和图象放大系统,提高了高速纹影技术的时间分辨本领和空间分辨率;图象增强和复原处理在流场显示和辐射摄影中获得了愈来愈广泛的应用;光纤传感器与高时间分辨本领的扫描相机

结合,扩展了扫描相机的功能;微光高速电影摄影技术的研究为拍摄低照度高速目标提供了手段。

9. 高速摄影底片判读和数据处理已愈来愈受到重视。研制了软件功能丰富的判读仪,并对各种数据平滑方法进行了分析和比较。

10. 高速摄影技术应用单位愈来愈多,特别是民用部门,利用它解决各自专业领域的难题,收到了显著的效果。

我国高速摄影和光子学研究工作,一直提倡研制和应用密切配合,理论联系实际。在 30 多年的发展历程中,走过了从仿制到研制,从单一品种到基本齐全,从军用推广到民用,从国内走向国际这一过程。形成了一支有较好素质的设备研制、应用技术研究专业队伍。在国际学术交往中,我国曾参加了第 7,13,14,15,16 届国际会议,并于 1988 年 8 月承办了第 18 届国际会议。这次会议有百多名国外代表参加。会上,我国发表的论文篇数占会议论文总数二分之一以上。1981 年,国际电影电视工程师协会把 Photo-Sonics 金质奖章授予我国杰出学者龚祖同教授,以表彰他在发展国际高速摄影和光子学的巨大贡献。

1.3 高速摄影仪器的分类及其简述^[1]

高速摄影仪器的分类,目前尚无统一标准。为了叙述方便起见,按照时间分辨本领的高低,将它分成以下几类。

1.3.1 间歇式高速电影摄影机

间歇式高速电影摄影机是在普通电影摄影机的基础上发展起来的。一般认为:使用 135 胶片的相机,如果摄影频率在 100f/s 以上,即称为高速相机。图 1.1 为间歇式高速电影摄影机的结构原理。被摄物体 1 经物镜 2 和叶子板快门 3 成象在胶片 4 上。链轮 9 由马达驱动,并使胶片在供片轮 7 和导轮 10、收片轮 8 和导轮 10 之间连续运动。随后胶片进入导片槽 5。间歇机构 6 使胶片在导片槽中间歇运动。即当图象曝光时,胶片静止,与间歇机构

同步的叶子板快门上的通孔 11 开放光路，图象曝光。通孔 11 转

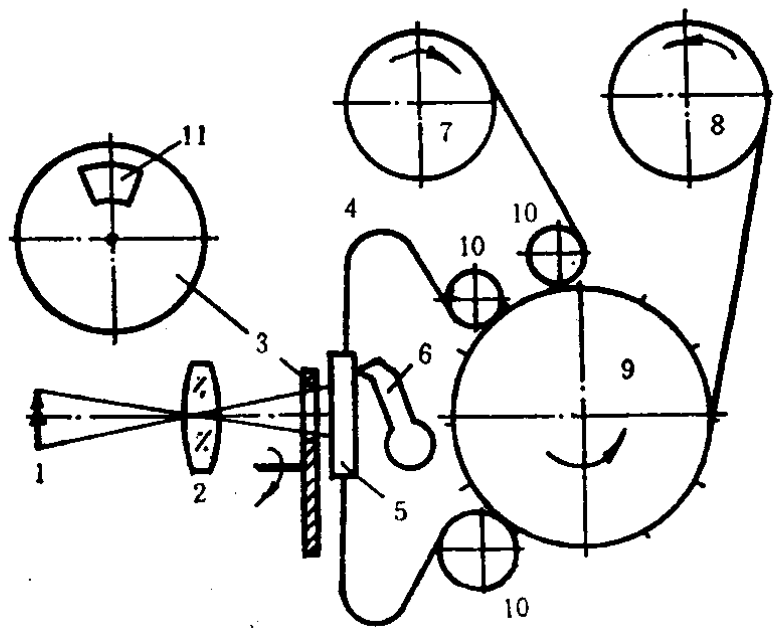


图 1.1 间歇式高速电影摄影机结构原理

过以后，光路关闭，间歇机构立即使胶片移动一个图象幅面。如此周而复始，获得一系列图象。可见，间歇机构、快门机构、连续输片机构和成象光学系统，即为间歇式高速电影摄影机的主要组成部分。

由于拍摄过程中，胶片作间歇运动，要承受很大的动力载荷，因此，输片速度不能太高。对 35mm 胶片只有 6~8m/s 左右，相应的最高摄影频率约为 360f/s。若使用 16mm 胶片，最高摄影频率已达 1000f/s。使用 70mm 胶片的相机，为 110f/s 左右。为了改善胶片受力状况，人们正在研究各种间歇机构，例如差相滑轮机构和滚环机构等，以便获得更高的摄影频率。间歇式高速电影摄影机的主要优点是：摄影光学系统的光力强；成象质量好（动态摄影分辨率在 30 lp/mm 以上）；画幅稳定性高；相机结构简单；片容量大（一般为 150m 左右，按 360f/s 拍摄，总记录时间也在 20s 以上）。当使用超 8mm 胶片时，摄影机可以做得很小，在卫星试验和火箭橇试验中，可以安装到实验装置上，实地拍摄所观察的对象，然后回收底片，分析结果。