

光学补偿高速摄影

高速摄影之二

乔亚天 主编

科学出版社

1984

内 容 简 介

高速摄影是科学研究和工程技术的各个领域广泛采用的一种瞬时记录技术,已得到人们的普遍重视和应用。《高速摄影》是一套关于高速摄影的专著。全套共有五个分册:(1)《高速摄影总论与间歇式高速摄影》;(2)《光学补偿高速摄影》;(3)《转镜式高速摄影》;(4)《变象管高速摄影》;(5)《特种高速摄影》。

本分册共分七章,对光学补偿高速摄影的原理、光学补偿摄影机的构造和设计理论以及应用,进行了系统而完整的叙述。

本书可供从事研究、设计、制造和应用光学补偿高速摄影机的工程技术人员和大专院校师生阅读。

光学补偿高速摄影

高速摄影之二

乔亚天 主编

责任编辑 陈德义

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

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

*

1984年4月第一版 开本:787×1092 1/32

1984年4月第一次印刷 印张:11 3/4

印数:0001—2,500 字数:256,000

统一书号:15031 554

本社书号:3425 15—4

定价:1.85元

编者说明

《光学补偿高速摄影》是《高速摄影》专著的一个分册。在国外高速摄影著作中，有关光学补偿高速摄影仅有一些一般的介绍，还不曾看到从理论到设计，进而阐述应用方面的系统而完整的著述。为弥补这方面的不足，根据我们在这类摄影机研究方面的具体实践，编写了本书。由于水平有限，错误和不妥之处在所难免，敬希读者指正。

本书在撰稿和审校过程中，曾得到有关兄弟单位的热情协助，也得到西安光学精密机械研究所有关研究室的大力支持。顾伯勋同志等曾提供了有关国内高速摄影在应用方面的许多资料、照片，并协助绘制了部分插图，在此表示谢意。

主编：乔亚天

作者：乔亚天、顾伯勋、查冠华、郑潮望

审稿：穆英

一九八〇年十二月于西安

目 录

编者说明

第一章 概论(乔亚天).....	1
参考文献.....	13
第二章 光学补偿理论(乔亚天、郑潮望).....	14
§2.1 棱镜补偿器.....	14
§2.1.1 简单棱镜补偿器.....	15
一、象点的坐标(x, y)方程.....	16
二、棱镜转角 ϕ 和折射率 n 对象移 y 的影响.....	18
三、棱镜参数计算方程组.....	23
附:国外棱镜参数计算方法.....	25
四、棱镜象差.....	37
§2.1.2 复合补偿器.....	46
一、棱镜-透镜复合补偿器.....	46
二、Schwesinger 复合补偿器.....	47
三、可变主光线角补偿器.....	50
四、输片轮内嵌棱镜补偿器.....	52
五、厚度可变补偿器和移动单光楔的双光楔 补偿器.....	55
六、Hycam 补偿器.....	57
七、双棱镜补偿器.....	58
§2.2 反射镜补偿器.....	61
§2.2.1 反射镜补偿原理.....	61
一、反射镜补偿概念.....	62
二、直入射式象点运动分析.....	64
三、斜入射式象点运动分析.....	68

四、棱锥形反射镜中象的移动·····	70
§2.2.2 反射镜补偿器·····	71
一、外反射式补偿器·····	72
二、内反射式补偿器·····	77
§2.2.3 鼓轮-反射镜补偿器·····	81
一、鼓轮-反射镜补偿器·····	82
二、鼓轮-棱锥形反射镜补偿器·····	85
三、双反射镜补偿器·····	86
四、鼓轮-屋脊形反射镜补偿器·····	89
参考文献·····	90
第三章 快门与曝光(乔亚天)·····	91
§3.1 焦平面快门·····	92
§3.1.1 运动目标的模糊量和时间畸变·····	95
§3.1.2 运动狭缝快门·····	98
§3.1.3 圆盘快门·····	102
§3.2 孔径快门·····	105
§3.3 圆筒快门·····	113
§3.4 棱镜框快门·····	117
参考文献·····	120
第四章 机械结构(顾伯勋)·····	121
§4.1 输片片道·····	122
§4.2 导片滑轮·····	125
§4.3 收片和供片·····	129
§4.4 传动系统·····	132
§4.5 输片齿轮·····	139
§4.5.1 输片齿轮与胶片的理想啮合·····	139
§4.5.2 拉片齿轮与胶片的啮合分析·····	142
§4.5.3 制片齿轮与胶片的啮合分析·····	155
§4.6 画幅稳定性和内定标·····	164
§4.6.1 影响因素·····	165
§4.6.2 画幅稳定性的测定和提高·····	166

§4.6.3 内定标和时标	171
参考文献	173
第五章 摄影机的驱动与控制(查冠华)	174
§5.1 动力学基础	174
§5.1.1 运动方程式	174
§5.1.2 力矩和惯量的折算	176
§5.2 负载特性	178
§5.2.1 输片特性	179
§5.2.2 收片特性	179
§5.2.3 供片特性	183
§5.2.4 起动特性	183
§5.3 驱动的实现	187
§5.3.1 电机选择原则	187
§5.3.2 电磁离合器	189
§5.4 控制	190
§5.4.1 电机的控制	190
§5.4.2 拍摄频率的测量	194
§5.4.3 继电控制及其他	198
§5.5 摄影机控制系统实例	200
§5.5.1 国产 70 毫米棱镜补偿式高速摄影机控制 系统	200
§5.5.2 LBSI-1400 型高速电影摄影机控制系统	205
§5.5.3 LBS-2000 型高速电影摄影机控制系统	209
§5.5.4 GSJ-1 型高速摄影机电控制系统	214
§5.5.5 UR1200 型高速摄影机的电控制	215
§5.5.6 UR3000 型高速摄影机的电控制	217
§5.5.7 GV600 型高速摄影机的电控制	221
§5.5.8 Pentazet-35 型摄影机控制系统	222
§5.5.9 Hycam 型高速摄影机的控制系统	223
§5.5.10 Hyspeed 型高速摄影机的控制系统	224
§5.5.11 适用于 Fastax 型摄影机的控制系统	226

§5.5.12 ПK-3M 型电影摄影机控制台	227
参考文献	227
第六章 光学补偿高速摄影机 (乔亚天、郑潮璧)	228
§6.1 国产 70 毫米棱镜补偿摄影机	230
§6.2 国外 70 毫米棱镜补偿摄影机	236
§6.3 LBS-1400 型棱镜补偿摄影机	240
§6.4 LBS-2000 型棱镜补偿摄影机	241
§6.5 UR3000 型棱镜补偿摄影机	245
§6.6 GSJ-1 型 16 毫米棱镜补偿摄影机	249
§6.7 Fastax 型棱镜补偿摄影机、Nova 型棱镜补偿摄影 机和 CKC-1 型棱镜补偿摄影机	251
§6.8 Hycam 型棱镜补偿摄影机、Phototec II 型棱镜补偿 摄影机及其他	256
§6.9 16HD 型棱镜补偿摄影机	262
§6.10 窄片“时间放大镜”	274
§6.11 330 型高速摄影机 (GS-62 型)	275
§6.12 长春光机所 35 毫米反射镜补偿摄影机	277
§6.13 Pentazet-35 型 (ZL-1 型) 高速摄影机	278
§6.14 108 型反射镜补偿鼓轮摄影机	283
§6.15 MLD 型植村高速摄影机	285
§6.16 斯克风高速摄影机	286
§6.17 M-2 型和 M-3 型高速摄影机	289
参考文献	292
第七章 光学补偿高速摄影机的应用 (乔亚天)	293
§7.1 光学补偿高速摄影机在军事方面的应用	293
§7.2 光学补偿高速摄影机在工业技术方面的应用	305
§7.2.1 在钢铁工业方面的应用	306
§7.2.2 在机械工业方面的应用	307
§7.2.3 在纺织工业方面的应用	318
§7.3 光学补偿高速摄影机在农业方面的应用	325
§7.4 光学补偿高速摄影机在科学技术研究方面的应用	328

§7.5 光学补偿高速摄影机应用技术参数的选择	341
附: 一些快速事件的速度和周期	346
§7.6 光学补偿高速摄影机与其他系统的组合应用	350
§7.6.1 光学补偿高速摄影机与纹影、阴影系统的 组合	350
§7.6.2 光学补偿高速摄影机与干涉系统的组合	354
§7.6.3 光学补偿高速摄影机与偏振系统的组合	357
§7.6.4 光学补偿高速摄影机与显微系统的组合	358
§7.6.5 光学补偿高速摄影机与光谱仪系统的组合	359
§7.6.6 光学补偿高速摄影机与光源组合的阴影记录	360
§7.6.7 利用国产 LBS-2000 型光学补偿高速摄影机 进行同步弹道摄影	362
参考文献	365

第一章 概 论

在人类生产活动和科学实验中，我们常常遇到与人类生活和技术进步休戚相关的众多快速流逝现象。我们的眼睛由于视觉暂留的限制，不可能辨识这些现象的发生、发展和消失过程，也就往往难以了解这些现象的发生机理和运动规律，以便利用和改造这些快速现象来为人类服务。人们为了认识世界、改造世界，在广泛的领域里不断地寻求一种新的方法、新的工具，来帮助我们扩展人的生理机能，以便揭示一些未知现象的奥秘。就以人们感知外界客观现象的重要器官之一的眼睛而言，人们就曾经借用不少光学的或非光学的仪器，来扩展人眼的功能。例如：应用红外技术可使人眼夜间无法看见的一些东西成为可见；用一架巨型射电望远镜可使人眼延伸到百亿光年之遥；用一架电子显微镜可使人眼看清单个原子、分子（ $\text{\AA}$ 量级）之微；应用高速摄影技术则使人眼可分辨的时间到微微秒之短暂。用高速摄影技术所获得的高速变化现象的大量的空间-时间信息，为人们研究快速现象的发生机理和运动规律提供了可信的依据。高速摄影是研究高速现象的一种强有力的手段，甚至在某些情况下（如飞行体的姿态记录、等离子体的约束时间等），它是唯一可借助的有效工具。因此，高速摄影广泛地应用于科学研究、军事和国民经济的各个部门，受到世界各国的重视。

光学补偿高速摄影机是高速摄影技术中应用最多最广的一种重要的摄影机。对于研究许多自然现象所发生的以及大

部分科学技术领域中所遇到的迅变过程，这种高速摄影机往往可以给出人们满意的信息。尽管对于有些过程的研究需要每秒几十亿幅的拍摄频率，但拍摄频率为 $10^2 \sim 10^4$ 幅/秒所提供的信息，已足够对许多迅变现象进行完全和深刻的分析。因此，光学补偿高速摄影机的应用领域十分广阔：从航天飞行到水下爆炸，从导弹发射到材料破坏，从机器制造到生物敏捷反应，它涉及到材料力学、流体力学、气动力学、冶金学、工程物理、工程技术、加工工艺、医学、生物学、仿生学、技术训练和电化教学。光学补偿高速摄影机作为一种检测工具和分析手段都是行之有效的。据 1974 年第十一届国际高速摄影会议报道，仅光学补偿高速摄影机中的棱镜补偿摄影机全世界就远远超过八千台¹⁾，是转镜式高速摄影机的 20 倍⁽¹⁾。

光学补偿高速摄影机与其他记录时胶片是静止的高速摄影机不同，它在图象记录中，胶片作连续的匀速运动。为了获得足够清晰的影象，必须借助于光学补偿器件，使被记录物体的影象随着胶片一起移动，也就是影象对于运动的胶片相对静止。光学补偿器一般有移动透镜补偿器、旋转反射镜补偿器和旋转棱镜补偿器三种。其补偿原理示于图 1.1。

透镜补偿器是安装在摄影物镜后面的圆盘或鼓轮上的一系列透镜，随着圆盘或鼓轮的旋转，使透镜的速度与胶片通过画幅框的速度相匹配，从而实现象移与胶片移动相补偿。但是透镜是沿圆弧运动的，则象将产生横向位移，并与垂直运动的胶片产生离焦，Levy 曾讨论了它的运动方程⁽²⁾。由于这种类型摄影机在每个透镜的精密调节和安装以及大量匹

1) 美国 W. Hyzer 博士 1979 年 11 月来华讲学时声称美国拥有旋转棱镜高速摄影机估计共约 10,000~15,000 台。

配透镜的一致性方面不易达到很精确，而且结构庞杂，所以采用这种补偿器的摄影机早已过时，现今已无人研制，本书不再讨论这种摄影机，读者可参阅文献〔2~4〕。

旋转反射镜补偿器是一个多面体反射镜或安装在旋转鼓轮上的一系列反射镜。当补偿器旋转时，利用每一反射镜面将前面光学系统的象反射到移动的胶片上，并使反射的象与胶片的移动速度相等，从而实现光学补偿。这种光学补偿对反射镜鼓轮材料和表面精度的要求比较严格，反射镜的调节要精密，在加工和装配上均比较复杂。

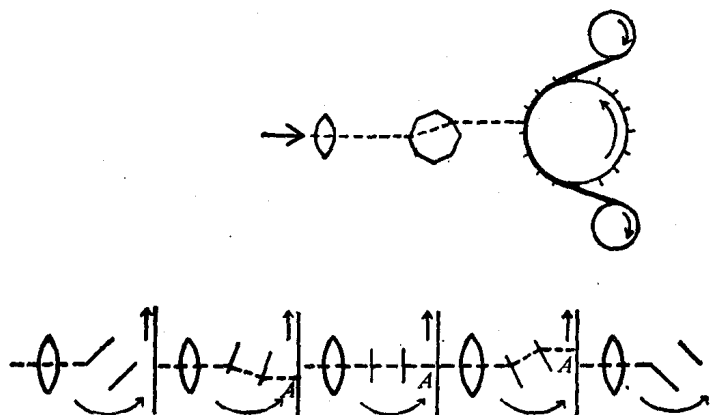


图 1.1

旋转棱镜补偿器是一个对应面平行的玻璃棱镜（棱镜面数必为偶数），当棱镜旋转时，使前面光学系统所产生的象沿胶片平面移动，象移速度与胶片移动速度相一致，实现光学补偿。棱镜补偿器是光学补偿形式中最简单、应用最广泛的一种。采用棱镜补偿器的高速摄影机在高速摄影仪器中约占80%〔6〕。目前世界上生产这种摄影机的型号约有百种之多，受到人们的欢迎。因此，本书将予以详细深入的讨论。

光学补偿高速摄影机由于记录时胶片是连续运动的，这就避免了对胶片有较大的冲击力（这种冲击力在间歇式高速摄影机中比较大，因为在记录时胶片是静止的，换幅过程中胶片是运动的——这种输片形式对胶片有较大的力冲击作用），因而可使胶片输送速度大大提高。16毫米胶片，速度可达80米/秒。采用标准画幅，获得的拍摄频率可达10,000幅/秒之上；若将画幅高度减半、四分之一或八分之一，则可获得更高的拍摄频率。但是，因为胶片运动毕竟要受到胶片强度和机械运动部件强度的限制，所以不可能获得胶片固定不动的转镜式高速摄影机所能获得的拍摄频率。尽管改变输片方式，将胶片贴附在旋转的金属鼓轮上以提高胶片速度，其最高拍摄频率由于受金属材料速度破坏极限的限制，要超过百万幅/秒，也确实困难。而且鼓轮输片却使片容量急剧地减少到约1米左右。这种鼓轮输片的光学补偿高速摄影机通常称为鼓轮摄影机，本书仅附带论及。

采用光学补偿方法和连续输片形式的光学补偿高速摄影机，由于光学补偿的不完善、机械传动的误差、胶片输送速度的不均匀性以及因胶片振动而产生的光学残余象移和机械象移。致使所拍摄的画幅分辨率有所降低。但其画幅分辨率一般仍可达到30~50对线/毫米，16毫米棱镜补偿摄影机有达60对线/毫米以上的，这相当于间歇式摄影机的分辨率，远远超过其他类型高速摄影装置。同时它具有除间歇式摄影机之外的其他高速摄影装置无法比拟的强光力、大相对孔径和较大的视场。这就使它可以拍摄与我们实践活动密切相关的大多数不发光事件或弱发光事件。

光学补偿高速摄影机具有如同间歇式摄影机的很可观的片容量。它的片容量通常为30~120米，也有360米、600米

的(片盒可以替换),这是其他高速摄影装置根本无法设想的数量。转镜式高速摄影机、网格高速摄影机的片容量最多也不过 10^4 量级的画幅数。而有的高速摄影装置只可得到少数几幅,乃至单幅照片。光学补偿高速摄影机可获得如此大量的画幅,不仅记录迅变过程的时间很长,可获得大部分迅变现象的发生、发展和消失全过程的信息,而且能以普通电影的频率放映,供研究人员从容地观察分析。因此光学补偿高速摄影机又称为高速电影摄影机。

同时,光学补偿高速摄影机结构简单紧凑,操作方便,造价低(棱镜补偿高速摄影机的成本大约只有超高速摄影机的五分之一^[6])。而且形小体轻,坚实可靠。16毫米、8毫米和超8毫米棱镜补偿高速摄影机可方便地用于任何场所,包括飞机和导弹上使用,可承受激烈的振动和适应很宽的温度范围。例如:Photo-Sonics 16毫米-1B型棱镜补偿高速摄影机,具有1000幅/秒的拍摄频率,其重量只有3.6公斤(包括30米胶片夹);16毫米-1E型摄影机,带10米胶片其重量只有1.2公斤,并可承受100g重力加速度的超负荷在水下工作几个小时。

光学补偿方法早在十九世纪下叶已有研究。1894年C. F. Jenkins提出了透镜补偿专利。1905年Musger提出反射镜补偿专利。由于光学材料、优质镜头、精密机械、电子学和控制系统的的发展,依斯曼透明感光软片的工业生产,以及第一次世界大战对于高速摄影在军事上应用的刺激,二十世纪二十年代,差不多在Karolus成功地获得Kerr电光快门不久就研制出了透镜补偿高速摄影机(重四吨)和反射镜补偿高速摄影机。棱镜补偿高速摄影机于1932年问世。由贝尔电话实验室、通用马达公司、美国军用航空公司和美国海军

研制的 Eastman-ERPI2 型棱镜补偿高速摄影机采用了两面体玻璃棱镜补偿器和 16 毫米胶片，其最高拍摄频率达到 2,000 幅/秒(Eastman-1 型是间歇式摄影机)。这在当时引起了一些人们的关注和兴趣。但因受到资本主义世界经济危机的影响，就在获得专利权的贝尔电话实验室于 1934 年独自研制出 BTL 型棱镜补偿高速摄影机(该摄影机以四面棱镜代替 Eastman-2 型的二面体棱镜，使拍摄频率提高了一倍，并于 1942 年以后改称为 Fastax 型高速摄影机)之后，高速摄影技术即消声匿迹了好几年。

第二次世界大战爆发之后，由于研究军事武器(如火箭、原子武器等)的需要，高速电影摄影技术作为研究兵器的一种先进的测试手段，在保密的状态下获得迅速的发展。1942 年贝尔电话实验室的 20 台棱镜补偿摄影机在几十天内一售而空⁽⁸⁾，致使由实验室试制车间转入工厂成批生产。与此同时 Eastman-3 型，即后来的柯达棱镜补偿高速摄影机被研制出来并投入生产。贝尔实验室六面体棱镜补偿式 8 毫米摄影机相继问世。研究火箭发射和轨迹的 35 毫米(半幅)Fastax 型棱镜补偿摄影机也于两年后研制出来。自此以后，棱镜补偿高速摄影机因其在兵器研制、科学发展和工程技术进步方面所发挥的作用逐渐公诸于世，因而受到世界各国的广泛重视并获得迅速的发展。五十年代和六十年代，许多型号的高速摄影机都业已商品化生产。现在，美、英、法、日、中国、瑞典、东德和苏联等国家先后都研制出不同型号、不同用途的高质量棱镜补偿摄影机，有用于火箭导弹姿态记录的 70 毫米宽胶片棱镜补偿高速摄影机，也有用于弹载的小型轻便棱镜补偿摄影机和鉴定导弹命中-未命中棱镜补偿摄影机，有示波器与摄影同时记录的组合装置，也有电子闪光灯与摄影

机同步的组合系统，甚至还有将贴近聚焦微通道板象增强器与棱镜补偿器进行组合的高速摄影系统。高速摄影推动和加速了科学技术的进程，而先进的科学技术又推动和滋养了高速摄影技术的提高和发展，棱镜补偿高速摄影机已日臻于完美。反射镜补偿高速摄影机亦有相应的发展。

目前，70毫米的棱镜补偿高速摄影机只有中国的70毫米棱镜补偿高速摄影机、美国的Photo-Sonics 10B型和瑞典的Stalex HS 70A型三种。35毫米胶片的棱镜补偿高速摄影机有中国的LBS-2000型和LBS-1400型、法国Eclair的UR3000型、UR1200型、GV600型、美国Photo-Sonics 4B型、4C型和Fastax WF-5型、WF-8A型等少数几种型号。其余所有生产的棱镜补偿高速摄影机绝大部分是属于16毫米胶片摄影机，约有80种左右的型号（详见第六章表6.1）。就生产量而言，16毫米摄影机占95%以上。其原因在于研制大画幅的棱镜补偿摄影机比较复杂，而16毫米摄影机形小体轻、坚固可靠，其记录的信息量又大致可以满足一般工程技术的需要，尤其在航空、宇宙火箭、导弹载用方面和水下高速摄影方面具有独特的优点。

光学补偿摄影机在摄影速度方面，目前中国的70毫米宽胶片摄影机对于 9.5×55 毫米²画幅其拍摄频率为1,600幅/秒，瑞典的HS-70A型对于 10×57 毫米²画幅其拍摄频率为1,000幅/秒，美国的Photo-Sonics 10B型对于 57×57 毫米²画幅其拍摄频率为360幅/秒，输片速度达20米/秒。35毫米胶片的摄影机，如法国UR3000型，对于 18×23 毫米²画幅其拍摄频率为3,000幅/秒，输片速度57米/秒。美国Photo-Sonics 4B型、4C型，对于 17×24 毫米²画幅其拍摄频率为3,250幅/秒，输片速度62米/秒。中国LBS-2000型，对于

18×22 毫米²画幅其拍摄频率为 2,000 幅/秒, 输片速度 38 米/秒。16 毫米摄影机, 如美国 Hycam 型摄影机, 对于标准画幅 7.4×10.4 毫米², 拍摄频率为 11,000 幅/秒, 输片速度 84 米/秒, 日本 Himac 的 16HD 型, 对于标准画幅, 拍摄频率为 8,000 幅/秒, 输片速度约 60 米/秒。近二十年来, 输片速度一直没有大的进展, (用缩小画幅高度的办法并不能增加总的记录信息量), 这主要是因为当输片速度很高时, 高速运动物体和胶片的强度受到限制, 而且高速运动会带来画幅的极大不稳定性。尽管涤纶片基的出现, 使承受抗拉强度由三醋酸片基的 13.2 公斤/毫米增加到 30 公斤/毫米以上, 其输片速度仍然未获得大的提高。有人预计^[1], 在近期内, 补偿摄影机在对于标准画幅的拍摄频率方面不会有惊人的突破。

光学棱镜补偿摄影机在象质方面是令人满意的。近些年来, 画幅分辨率提高了大约一倍。如日本 16HD 型, 由于改进了传动系统, 即应用一个齿轮输片和一个齿轮配准, 在配准齿轮上大大减小了胶片的机械象移, 使画幅分辨率达到了 60 对线/毫米^[7,8]。而美国 Hycam 摄影机由于采用输片齿轮、棱镜和叶子板三者共轴, 消除了一般传动齿轮带来的机械象移, 而且棱镜补偿器的象差很小, 使画幅分辨率达到 80 对线/毫米^[9]。经英国加以改进的 Hyspeed 型摄影机据其研制者 John. Hadland 公司声称, 它应用柯达具有 100~120 对线/毫米的胶片, 画幅分辨率可达 90 对线/毫米^[10], 通常可保证 70 对线/毫米。

此外, 在摄影机的控制系统中, 频率可调, 对于 16 毫米摄影机, 大多数电控制精度可达到 5,000 幅/秒 ± 5%, 精度更高的可控制到 ± 1~2%。设有物镜系列、快门系列及其他多种附件, 使一机多用, 在机体小型化、操作方便及可靠性等

方面近几年来均有较大改进。作为小型化,法国试制了一种超 8 毫米摄影机“ACPRI”,它在 1 米胶片上可记录多达 236 个画幅,它的运动机构可使拍摄频率达到 25,000 幅/秒。它采用的胶片为单排齿孔的 MFA 型柯达片,可得到 80 对线/毫米的分辨率。它的画幅面积约为 16 毫米标准画幅的 $1/3$,即 24 毫米^2 。由于分辨率的提高,补偿了画幅尺寸减小带来的信息量降低。它可以等价于一台具有 40 对线/毫米的 16 毫米光学补偿摄影机。为了拍摄亮度比较弱的快速事件,法国已有人将贴近聚焦微通道板象增强器引入到棱镜补偿摄影机中^[11]。利用 10^3 量级的光增益来拍摄原来需要辅助照明的目标,其拍摄频率达到 10,000 幅/秒。由于千倍以上的光增益,无须顾虑感光不足问题,可以缩短快门的曝光时间,从而减少象移,提高象质。微通道板在摄影机中亦可作为电子快门使用(其开关时间可短到 1 毫微秒)。同时通过监视微通道板的电压可以调节增益,这就使每一幅照片的照度有可能得到人为的控制。但是,加微通道板象增强器的棱镜补偿摄影装置,其画幅分辨率不会很高,这主要受到象增强器分辨率的影响。如:LEP. C61T 型微通道薄膜象增强器有效面积是 $30 \times 40 \text{ 毫米}^2$,最大增益 10^4 ,分辨率在对比为 4% 时为 25 对线/毫米,这已算是较好的器件。这种引入象增强器的装置有益于在高拍摄频率下记录弱光目标,但画幅分辨率的降低乃是其必然付出的代价。目前象增强器并不是价格低廉的器件,它使摄影机费用增加。这种装置的系统简图示于图 1.2。棱镜补偿摄影机还可与其他光学装置组合,实现更广泛用途的摄影记录。例如:将阴影装置或干涉装置和棱镜补偿摄影机组合起来,可以记录较大速度变化的气流 的阴影图形。这种记录透明介质折射率变化的方法可以用来研究快速