

紅外技术应用

上海科学技术情报研究所

红 外 技 术 应 用

上海市红外技术编辑小组

*

上海科学技术出版社研究所出版

新华书店上海发行所发行

昆山新光印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 21 字数: 530,000

1975年9月第1版 1975年9月第1次印刷

印数: 1—6,200

代号: 151634·254 定价: 2.60元

(只限国内发行)

前 言

在最近二十多年中,国外在红外物理与技术方面有了很大的发展,他们首先是为了军事的需要,在保密的条件下进行了大量的研究工作。在此期间,由于半导体物理学、固体物理学、光学和低温技术的发展,使高灵敏的红外探测器件,性能优良的红外光学材料以及相干红外辐射源得以实现,促进了红外物理学(包括红外辐射与物质的相互作用研究,物体的红外辐射特性研究,红外辐射在大气中的传输特性研究等)的发展。目前,红外技术已成功地应用于军事、工农业生产、医学和科学研究等各个领域。近年来兴起的远红外光谱的研究及天体的红外观测,必将扩大和深化人们对物质世界的认识。

为加速我国红外物理与技术赶超世界先进水平的步伐,我们遵照伟大导师毛主席“洋为中用”的教导,对近年来的国外发展进行了调查研究,并选择了一些有代表性的文献,分门别类地分成数册,作为“红外物理与技术译丛”出版。已经拟定的分册有:

1. 红外技术在气象卫星中的应用
2. 红外探测器
3. 红外技术应用
4. 红外仪器与技术
5. 新型红外探测器
6. 红外光学材料
7. 红外大气传输的研究

限于我们水平,工作也不很细致,缺点和错误一定不少,恳请批评指正。

上海市红外物理与技术译丛编辑组

1975.6.

毛主席语录

2000/12/5

对于外国文化，排外主义的方针是错误的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借镜；盲目搬用的方针也是错误的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

目 录

红外技术的应用(综述)	1
诊断热图术	49
高分辨医用热图扫描器和显示系统的设计考虑	61
双波段森林火情探测系统	69
红外监视技术	83
用红外检查电解铜精炼槽里的不可见短路	88
多层片状结构和合成结构的红外检查	91
用红外控制半导体热压焊接过程	94
红外应用汇集导言	97
测定水表面温度用的机载双通道红外辐射计	104
探测固体内部裂缝用的红外显微镜	112
金属结构电热无损检测	121
疲劳裂缝和其他表面附近缺陷的红外探测	127
用红外辐射温度计对低温物体以及透明材料的非接触温度测量	133
大气污染研究和监视中的红外光谱学和红外激光器	143
连续双波段红外分析仪	160
红外计量术	172
在遥测大气污染中红外外差辐射计的使用	179
用红外辐射遥测晴空湍流	185
热象技术在空中勘察自然资源中的应用	195
卫星载地球红外摄影及其显示	204
有高速快门的火车热轴箱探测器	214
处理涂漆的远红外辐射器	218
红外在雾航中的应用	227
地面辐射和地平仪	233
低轨道三轴稳定的人造卫星地平仪	252
关于研究冰冻条件和拟定灌溉时间的热扫描	281
具有复式扫描能力的目标搜索和跟踪系统	291
近红外跟踪装置的试制	299
雷达和红外系统的应用和可能性	309
供红外导弹引信的光学系统	320
具有抗储误触发的远距离红外入侵警报器	323
10.6 微米红外通讯	326

红外技术的应用

(综述)

一、红外技术的医学应用

这里介绍诊断热图术 (Diagnostic Thermography) 或生物热图术 (Biothermography)^[1]。多数是使用被动式红外扫描成像仪器, 也有少数是使用热释电靶面摄像管或液晶^[2]。热图诊断术的基本原理是: 大多数的病理状态都表现出与正常生理状态有温度差异。这个差异, 足以影响表面皮肤的温度发生变化, 所以可利用这个变化进行病情的诊断。病体皮肤表面所发出的红外辐射由红外扫描器的光具接收, 经红外探测器将其转变成电信号。这一系列电信号由适当的显示系统(或记录装置)构成一幅病体红外辐射分布情况的图象, 即一个较大面积病体的二维辐射图象, 它反映了病体表面皮肤温度变化情况。如果通过定标并将其与正常生理状态下人体的辐射图象相比较, 便可以获得关于病理状态的信息。由于热图术是利用病体自身所发出的红外辐射来传达有关信息, 所以用热图术诊断不需要与病体接触, 不会改变病体的任何状态, 也不会像射线和同位素等检查方法对人体有害。

1950年英国 Victoria 医院外科医生 Ran Lawson 发现女子乳房癌局部皮肤要比正常部位热。1956年他利用一种原子蒸发仪企图获得一些数据, 然而他发现这是一件在技术上困难的事情。第二年他从美国巴恩斯 (Barnes) 公司获得了红外扫描仪, 证实了他的发现, 取得了重要进展。1960年 Lloyd Walliams 发表了一篇重要文章^[3]。他对 100 个可触及的乳房病变皮肤温度与对侧乳房相同区域的温度进行比较。在皮肤上方 1 厘米位置, 手持一热电偶进行检查, 发现有 57 例是恶性的, 其中 54 例用这种方法检查出来了。他证实 Lawson 的发现。他还发现静脉曲张部位有微弱的温升^[4], 1961年 5 月他用红外扫描仪拍摄了一张乳房癌的热图, 在此基础上, 于 1963 年开始使用于临床。六十年代末期的统计数字表明^[6]: 全世界大约有 75 家医院或医疗机构使用这种仪器^[5]。仅在欧洲就有 22 家厂商进行医用热图仪器的工作。大约有几百篇文章和报告是关于这方面的。

人体是一个恒温体, 它要保持体内深部温度不变, 不受环境温度大幅度变化的影响。这样, 除了在热带气候环境很热之外, 皮肤温度总要比体内深部温度低。皮肤表面是通过三种方式把人体内部的热量传递到外面: 对流、蒸发和辐射。在不通风的条件下, 相对湿度不超过 50%, 环境温度 18°C; 人体大约有 45% 的热损失是通过辐射方式传递出去的^[7]。人体辐射和其他物体辐射相似, 其辐射能量与皮肤的表面温度和比辐射率有关。活皮的红外辐射光谱范围是从 3 微米到 50 微米。其中 8~14 微米波段的辐射量占该面积全部辐射量的 46%。峰值波长为 9.5 微米。关于活皮的比辐射率大多数作者认为不管皮肤颜色如何在 2.4 微米到 15 微米波段里接近于 1^[8]。也有人认为活皮的有效比辐射率变化范围较大^[9], 从 0.89 到 1.3。一般地说来人体温度是健康和疾病的指示, 局部的温度改变可以说明抗体在活动、脉管在变化。因此在身体内部发生变化的时候, 把表面温度的变化探测到并精确地画

出其轮廓,这只能是热量向外扩散的内部组织机能受到障碍而引起表面脉管变化的结果^[1]。

热图术在医学上临床应用很多,这里做一简介,有些尚不成熟,正做进一步的工作。

癌症早期诊断 乳房癌是妇女常见病症,它的治疗成功可能性取决于是否早期进行。病人治疗的理想情况是在病变形成之前就着手进行。这里热图术用于早期诊断是成功的。临床实践证明:大多数近表皮癌症部位都有温度升高,温度升高的度数是关于绝对预后之表现;注射激素后能使癌症的温度发生变化。使用热图术能在乳房癌症的病症的病变形成之前就探测到,也就是病症还未明显(或用X射线方法还不能检查出来)的时候就用热图术探测到它。在5,000个热图检查实例中,探测到35个不明显的癌症病例,它们的直径都小于3毫米,有的小于1毫米。英国目前正在几个医院里使用热图术来对早期乳房癌病症进行普查。伦敦正以每年300人的规模进行检查,发现千分之四妇女有癌症症状指示。其热图术和X光证实相互配合诊断准确率有98%以上^[5]。此外,热图术对于肺癌和头颈面孔癌的**诊断**也是有价值的,因为热图术能提供接近皮肤表面血液循环的完整情况^[13]。

动脉病症 在休息时,四肢的热图样主要由动脉血液带来的热量所决定。其热对称性在1°C之内^[14]。很明显,不论是由于痉挛还是由于闭塞而引起的动脉机能不全都能用热图术探测到。热图术可以显示出动脉阻滞程度以及药物和手术治疗的效果。颈部动脉的病症是可以引起中风的。热图术对于诊断头颈上动脉病症有很大用处。颈动脉由颈部伸进头颅,它供给同侧脑前部血液,当这些血管中血栓形成使血管变窄,减少了对脑供血。血栓裂碎向上流动到达小的脑动脉分支停留下来。这能引起视觉困难或中风。其决定因素是碎块的大小和它所达到的位置。内颈动脉的一支是眼动脉,其终止点位置在眉上部位。如果颈动脉闭塞达到50%以上则在前额上皮肤的红外辐射显著减少,约有0.5°C的温度变化^[14]。随着外科手术和麻醉技术的发展,大多数病例能够在发生中风之前进行手术。这种热图术在病人手术选择上和在治疗过程中都是有很大用途的。

静脉病症 在静脉曲张处,深部静脉和浅表静脉之间的穿通枝瓣膜损坏。它使热血以逆行的方式从深部静脉流到近皮肤表面的浅静脉里。一般的治疗效果表现在使用手术和药物成功地使其血管闭塞上。目前临床识别它们的所在部位有困难。其它方法如射线检查并不理想。Patil Williams等人使用热图术精确地显示出血管瓣膜受损部位^[15]。例如,当把腿抬高,加上止血带使浅表面静脉血排空,然后用冰冷却,当腿肚子肌肉活动的时候热血就由深静脉通过这些瓣膜损坏的穿通枝。如果拍一张热图就会在热图上出现“热点”。利用这种方法准确率可达94.5%,而临床检查仅能达到60%^[16]。此外,热图术在诊断腿部深静脉血栓形成中亦可使用。

矫形术 在这里热图术研究发展潜力很大。骨和软组织的发炎与恶性部位红外辐射增加,而初生肿瘤、囊肿和血肿时红外辐射减少。癌的肿骨性转移,在骨上的次生沉积物其红外辐射增加,它在X射线检查发现有变化之前,偶尔被热图术发现。今后这方面需要做大量的工作。热图术有可能提供一种癌症早期诊断和治疗中效果检查的手段。

关节炎 发炎的关节所出现的热度可用红外扫描器来检查,也可以用手触及来检查。然而红外扫描器能够更加精确地探测到所及面积和热变化程度。热图术还有可能鉴别各种关节炎的类型。这些对于治疗效果的估定是非常有用处的^[7]。

皮肤 热图术最成功的应用之一是它能给出烧伤深度的资料。需要植皮的深度烧伤在热图上是一片红外辐射减少的区域,它比正常部位的温度可低3°C之多^[10]。能自然长好的烧

伤区是一片红外辐射增加的面积。深度烧伤的早期探测可以很快地了解到需要植皮的面积,及时地抢救病人。同时还能掌握发炎的危险。在皮肤初期肿瘤、恶性肿瘤、以及黑色素瘤之间要做出诊断是很困难的。恶性病变的地方红外辐射增加。因此热图术在这里能提供有价值的信息。

其他 用热图术对胎盘进行定位已被试验过。除了胎盘在前腹壁以外好象不太成功,但是即使是受此限制,它使得用羊水检查进行产前研究获得更多的结果。各种其他胸部和内脏的热图检查也曾被人们试验过,虽然在皮下深部组织热变化好象是仅在病变后期才能探测到,但热图术也表明了一种实际使用的可能性。甲状线病症在中毒状态使用热图术会产生许多有益的结果,其恶性肿瘤的地方红外辐射增加、而在开始生癌和囊肿就不是这样。有一些脑瘤也可能用热图术探测到,但要求把全部头发剃光。目前这方面工作较少。热图术在神经病学上也是很有用处的。正常人对冷的反映是由于交感神经系统的反射动作引起外表面血管的收缩。在神经受到损伤部位这个活动是不能产生的。血管收缩的动作可用于研究血管控制是否正常的标志^[5]。

自从1957年第一次使用热图术探测到乳房癌以来,至今有十几年,现在已经发展到约有十几种病理现象和生理现象可使用热图术探测。近几年研究人体辐射特性的工作逐渐增多^{[14][10][17][18][19]}。这方面的工作需要红外物理学的知识,但更多是涉及到医学和生理知识。它的实质是根据人体的生理条件和病理条件,使用人体在各种条件下红外辐射特性知识来探索利用热图术诊断新的病理和生理现象的可能性。另一个方面是热图术技术本身的工作。这包括临床诊断对于红外扫描器性能提出的特殊要求;热图术的使用技术;设计出图象清晰、判读简单方便的显示系统。近几年陆续地为医用专门设计出性能优良的红外扫描器^{[20][1]}。掌握了医用设备的临床参数性能要求^[21]。随着红外探测器和电子器件的进展使得医用红外扫描器的性能满足了临床需要。显示系统向数字化定量方向发展^{[22][23]}。热图照象机和电子计算机配合处理数据,简化了热图判断。

诊断热图术的许多重要结果都是借用为其他目的设计的红外扫描器获得的。显然这些仪器的性能指标不会完全满足医学的特殊要求。由于热图术在临床上可行的,而且有着重要用途,所以在使用实践中逐渐地掌握了各种临床病症的要求。1969年有一篇关于医用红外扫描器设计参数的专述论文^[21]。作者根据几种具有典型性的病例临床诊断中对热图仪器的要求,对温度分辨率、空间分辨率、帧幅速度,视场角和景深等四个参数以及选择显示系统的原则进行了讨论,提出最后折衷选择方案。对设计医用红外扫描器具有现实意义。从解剖学的观点看来,把生态的细节图象完整地摄取下来是很重要的因素。热图术是通过增加温度分辨率和空间分辨率更加接近于病体的外貌,因此红外扫描器具有较高的温度分辨率和空间分辨率是必要的条件,也是所希望达到的理想条件。美国密执安大学使用锗掺汞红外探测器研制一台供研究使用的红外扫描器,它的温度分辨率可达到 0.05°C ^[1],空间分辨率为1毫米。这是目前看到资料中水平最高的。总结起来,一般医用红外扫描器温度分辨率达到 0.2°C ,空间分辨率达到2毫米就能满足临床要求。应当指出:达到一定的温度分辨率不仅与探测器的等效噪声温度和前置放大器的噪声指标有关,而且还与显示系统有关。空间分辨率的最低极限是由光具和可实用的探测器光敏面尺寸所决定。帧幅时间也是影响空间分辨率的因素。实时显示必然要牺牲空间分辨率指标,但是这是使用者所希望的,一般最低要求是每秒钟一帧临床拍摄热图,能拍身体上30厘米 \times 40厘米面积便可以了。景深在

7.6~10 厘米。选择显示系统的主要原则是要不影响红外扫描器的温度分辨率、尽量增加灰白明暗程度和降低成本。

实际上,当我们使用热图进行临床诊断的时候,遇到很多困难。第一关于建立标准技术的问题。最理想是人体在一个标准的环境下冷却一定时间,该环境的温度、湿度和通风等条件都予严格控制。这在临床上并不是总能做到的。第二,获取热图最好是通过比较两个不同性能扫描器同时摄取热图,这在实施上是有困难的。第三我们对于人体在各种生理和病理状态下的红外辐射特性依然了解较少,致使我们对于热图的判读时常产生错误。

毫无疑问,随着精确轻便红外扫描器以及新设计的清晰易辨显示系统的出现,随着我们对于各种不同条件下人体红外辐射特性知识的逐渐丰富,热图质量会进一步提高,热图的判断和解释会变得更加容易。这样,热图术对人体无损检查这个优点会更加受人欢迎。今天热图术已经成为医学诊断的有效工具,并且获得广泛地承认^[27]。完全可以断言在不久的将来,红外热图术一定会做为一种普通的工具为临床诊断和估定疗效所使用。

参 考 文 献

- [1] Donald. M. Szeles, Proc. 7th Annual Biomedical Sciences Instrum. Symp., V. 6 Held May 19~22 1969, p23.
- [2] B. R. Holeman W. M. Wreathall, IERE Conf. Proc. N. 22 p329.
- [3] K. Lloyd Williams, F. J. Lloyd Williams 和 R. S. Handley (1960) The Lancet, 2, 958~959.
- [4] R. N. Lawson 和 M. S. Chughtai, Can. Med. Assoc. J88 68 (1963).
- [5] C. Maxwell Cade 和 Boris. V. Barlow, Comtemp. Phys. V11 N6 p589.
- [6] R. Bowling Barnes, Appl. Opt. September. 1968.
- [7] R. Lloyd Williams, M. D. Patil et al IERE Conf. Proc. N. 22 p429.
- [8] Hardy. J. D, American J Physical 127. 454 (1939).
- [9] K. D. Patil 和 K. Lloyd Williams, Non ionizing Radiation, June 1969.
- [10] K. D. Patil 私人通信(参见文献[7]).
- [11] Lawson 和 Cughtai, Can. Med. Assoc. J. 88. 68. (1963).
- [12] K. Lloyd Williams, Proc. of Boerheave Course for Postgraduate Medical Education, Leiden, 1968 Bibl. Radial N5 p127~129.
- [13] P. Bourtat, R. villeda, Acta Electron, V. 12 N4 1969 p305.
- [14] Wood Radiology, 83. September 1964, p540~542.
- [15] K. D. Patil, J. R. Williams 等, Brit. Med. J., Jan., 1970, 1, 195~197.
- [16] Hackett, Electronic Age, Vol 1 May 5 1970, 4~6.
- [17] Watmough 和 D liver, Nature, V. 218, June 1 1968.
- [18] D. J. Witmough. K. Oliver, Brit. J. Radiol. 42, 411~415.
- [19] W. Wiggs, NASA-CR-94963 1968.
- [20] R. Barry. Johnson, Electro-Optical System Design Conf. 1970. p221.
- [21] L. M. Marsh, EOSDC', 1969 p325~332.
- [22] J. L. Watson. P. A. Wolee 等 IERE. Conf. Proc. N22 p303.
- [23] W. G. Gore 和 B. S. Payne, IERE Conf. Proc. N22 p311.
- [24] K Tobert, IERE Conf. Proc. N22. p487.
- [25] 映象情报 V. 4 N. 7 1972 p22~27.
- [26] J. L. Watson. P. A. Welfe. A. D. Beach. IERE. Conf. Proc, N22 p309
- [27] Richard D. Hudson, Electro-Optical System Design Conf., 1971 18~22 p154~156.

二、森林火情红外探测

森林是一项重要资源。可是它常常受到火灾的严重破坏。例如美国每年森林失火事件

达 120,000 多起^[1], 受损森林面积有新泽西州那样大^[2]。这个数字比例是惊人的。据统计, 森林火灾起因有 70~80% 是雷电^[3]。所以, 保护森林资源, 及时地灭火是非常重要的。如果在小火还未漫延开来之前就予扑灭, 那么会大大地减少损失。森林火灾的控制主要取决于准确地监视和掌握火灾情况, 及时报道出失火地点和火区漫及面积。机载红外扫描成像技术能够在森林开始起火一直到火已灭掉整个过程提供这些情报。

很早就有人利用红外技术来探测森林的早期火情^[4]。1934 年就有过一种搜索形式的红外扫描器。也有一种使用多元探测器列阵的装置。如果把它放在山顶上或高处就能监视几平方哩的森林, 只要几分钟就能完成一次一定方位角的扫描。1957 年曾有过一种使用硫化铅探测器的装置^[5], 两只探测器相互反偏置消去环境温度的影响。平时不输出信号, 只有当大火出现在视场里才有信号输出。集成电路的使用可以使用电池做电源, 太阳能源充电。这样全晶体管电路在山头或高处产生一报警信号传送给监视站。火目标对于一个携带灭火化学药剂的导弹是有强烈吸引力的。1959 年曾报道过一种这样的系统^[6], 它使用一个搜索系统能监视 20 平方哩面积的森林, 发现火情目标, 立即把一响尾蛇导弹发射出去。

自从六十年代初期, 由于机载红外扫描技术的发展, 美国森林局于 1962 年开始森林火情检查计划 (Project fireScan)。该计划的目的是研制一种机载红外扫描系统, 它能在白天和夜晚或者烟雾和大气微尘干扰的情况下探测到森林的潜在火情。要求这种方法比原来空中可见巡逻和固定了望塔相配合的方法更迅速和经济。同时该计划也要能研制出在烟雾和黑暗影响可见观察的情况下获得大火情报的装备和技术。经过五年的试验工作, 到 1967 年机载森林火情探测设备已能使用。1970 年又将扫描系统改成双波段, 除了原来 3~5 微米波段 (使用碲化镉探测器) 外, 又增加 8~14 微米波段 (锗掺杂探测器)。两波段的目标和背景信号经过电学处理, 使系统的信号和背景噪声比值 (即信噪比) 较单波段系统高一个数量级, 现场飞行试验的效果显著地改善了。1971 年过去使用这种双波段系统的试验林场开始正式使用这种装备。过去所用的了望哨所已部分拆除, 用红外机载扫描探测系统代替从前的实用方法^[8]。

机载红外扫描森林火情探测系统的作用是通过烟雾探测森林潜在火情和绘制森林火灾区红外辐射图象。如果作为一种操作使用的系统, 它要有能力在 50°C 以下的森林背景下探测到不足一平方呎面积上 600°C 的火源。过去监视森林火灾是采用在飞机上目测巡逻和了望哨所相结合的方法, 这种方法发现的火情已经是燃烧了几个小时。因为它一般是以烟做为依据, 看到烟柱后报警。在火很小的时候, 烟也很少。往往又为其他的烟雾所复盖。所以小火是无法看到的。在发现火情以后, 为了迅速合理地编订灭火行动计划, 指挥救火, 必须准确地不间断地了解火情及其发展情况。要了解火灾范围、火烧燃料和周围的地形情况, 同时还要知道火的移动速度和火区内强度分布情况。为了掌握火势发展就需要了解火区外小火的位置。如果要详细地及时地获得这些情报、用常规的可见方法即空中巡逻和了望哨地面侦察等都是困难的。有时 (如黑暗中) 甚至是不可能实现的。然而, 机载红外扫描森林探测系统所绘制的森林火情红外图象就能够提供这些详细的情报。美国森林局用这种方法于 1967 年在美国西部绘制了九十次大火的红外图象, 及时地提供情报扑灭了大火, 节约了几百万美元^[9]。

关于火源目标和背景的光谱特性可从维恩位移定律得到。我们的目的是要探测一平方呎大小的 600°C 左右正在燃烧或已经烧成灼热的燃料, 即所谓潜火。所以目标的辐射谱值

应是 2~7 微米波段。地面和森林背景的温度是在 50°C 以下,其光谱波段为 8~14 微米。在这些波段里大气透射窗口有 8~14 微米、4.5~5.3 微米、3~4.2 微米、2~2.6 微米。太阳反射谱在 2~2.6 微波段内最强。其次是 3~4.2 微米。在日间无云天气下操作应当注意去掉太阳反射的干扰。由此看来,探测火源使用在液氮温度下工作的铋化铟探测器最为理想。其次是硒化铅探测器。对于地面和森林背景辐射用 8~14 微米波段响应的探测器最为理想。在这些波段里,水和二氧化碳的分子吸收是主要的大气衰减成分。因为森林火情探测是在空气湿度变化范围很宽的环境下进行。所以大气衰减的作用在操作时必须给予适当地考虑^[7]。1962 年美国在一种叫 Beach-craft 的飞机上使用 AAS/5 型红外扫描器装备,首次飞行试验发现通过浓而重的烟雾能够探测到火源目标,而且得到了理想的红外图象。因为与火有关的烟雾粒子都很小,其直径比 0.5 微米还小^[10],所以它不影响红外辐射的传输。由于云和雾对于红外辐射是不透明的,所以在云层之上和大雾天气无法准确使用机载红外扫描装备探测森林火情。

森林火情探测所使用的红外线扫描器最初是借用为军事目的的机载系统,它的空间分辨率和温度分辨率完全能够满足要求。1965 年以前使用 AAS/5 型红外线扫描器。1965 年起使用 HRB-Singer 设计制造的 Reconefax-XI 红外扫描器。它使用液氮致冷的铋化铟探测器。得克萨斯公司所研制的 RS-7 线扫描器也是用于这项应用的普通仪器。后来改制成双波段系统就是根据 RS-7 原型。一般地说来,空间分辨率 1~2 毫弧度,实验室定标系统温度分辨率 2°C 就能满足这项应用的具体要求。在实际操作中,由于受到大气等条件的影响,系统的有效分辨率会受到相当大的影响。操作飞行实验的飞机以螺旋桨发动机飞机为宜。从 1964 年起,美国森林局使用两种类型的飞机。Aero-Commander 500-B 型和 Canvair T-29。它的飞行高度为 15,000 呎(有时根据云层等天气条件飞行高度在 10,000~25,000 呎之间),限制飞行速度为每小时 300 哩。在扫描视场 120° 时,每小时巡逻 300 哩长 10 哩宽的森林地带。一般每次飞行 4~5 小时。

由于森林火情探测器是一项带有强烈时间性的工作,军用扫描器的显示系统不能满足底片快速冲印出来的要求。1963 年初美国初步制成使用一次成像记录片。解决了鉴定和识别火情的问题。飞行过程中,当即把红外象片从飞机上投下来,送给灭火指挥营地。也曾有一种双幅记录系统。它带有一个摆动的反射镜,使之连续地记录图象。1965 年又增加一种 MD-14 快速冲印底片的系统。探测器输出信号的强度调制一个高分辨率的阴极射线管。扫描和转动校正的同步脉冲触发一个矩形的扫描波发生器,使一个 5 吋宽的全色胶片以与飞机的速度和高度之比值成比例的速度通过阴极射线管来曝光。飞机上装有一个多普勒雷达和一个导航计算机来控制飞行的路径。在多普勒雷达上每隔一英里有一脉冲发生,把它记录在底片的边上以供识别地面位置参考。底片是以近实时地冲印出来,这是使用两步冲印器 (two-step processor) 通过热和湿化学处理完成的。底片可在曝光后两分钟内看到^[12]。为了便于事后分析方便,特别是当使用双波段系统,在飞机上装有一磁带记录仪,记录扫描象元的资料。

在绘制森林大火的红外辐射图象的时候,要求扫描器的电学处理能够在大火的中心区域调整输入信号的大幅度变化。这是从前军用扫描器所不曾遇到的问题。1963 年使用 AAS-5 线扫描器工作时,接一个对数放大器。以便掌握在遇到野火时探测器输出信号大范围地变化。1964 年使用 Reconefax XI 线扫描器,其前置放大器是直接耦合的。为了防止大

火高能量信号产生严重的电平漂移,整个系统使用一种直流储存视频放大器。

自从1967年起,在森林火情探测系统上的电子部件中增加一种叫目标鉴别器,在巡逻飞行探测野火时使用很成功。它的作用是分析表征火情特点的视频信号,选择其中的目标信号,把目标信号打印在图片的边上。这样大大地简化了图象识别。目标鉴别器把视频信号经过滤波,消除了地面信号的低频分量。通过区别脉冲信号的脉冲高度和脉冲宽度之比值来鉴别潜在火源目标。当鉴别器确认该信号是所需寻找的火源目标信号就立即驱动一触发器,产生一输出脉冲,由它报警。同时它控制一曝光装置,在底片的边缘处打一记号。将此记号与多普勒雷达和导航计算机每一哩在底片上所标记的记号相比较,便可以确定火目标的精确位置。

改变系统的增益对于现场绘制清晰的辐射图象是非常重要的。在飞行操作时,操作人员除了监视成象的轮廓以外,还要根据各种其他的条件来控制 and 调整系统的增益。实践表明,系统增益的变化使得在不同的大气条件下探测到的火目标的标记按非线性关系变化。

森林火情探测系统在飞行操作时,探测火情的能力是直接受到由于树木背景阻挡火源的限制。在树木空间背景下曾进行过大量的飞行试验,目的是了解探测火情的能力。结果表明:其中三个独立的因素起作用,它们是树木的类型、观测方位角和火点的大小。对于树木类型进行分析工作时、需掌握的原则是按着树木对于火情探测系统工作时它们阻挡火源的情况来决定。在北美有150种可以辨认的树木品种^[13],按上述原则可选择其中13种类型作为代表^[14]。在观测方位角很大的情况下,对于观测火源目标有阻挡作用的树木严重地限制了巡逻地带两边界里火情探测能力。在此情况下,需要在巡逻飞行的方法上进行修正,以补其不足。在13种有代表类型的树木中,有些是很容易探测火目标的树木。如沼松、小干松、白杨、落叶松、阿拉斯加白云杉等;另一种是很难探测到火目标的树木,如北美的硬木;其余类型的树木如栎树、恩氏云杉、白松、针橡树、橡皮树等能否探测其中火情目标取决于系统性能和操作情况。这些树木中探测到火目标的可能性很大,它需要依靠系统性能和操作人员对图象判读能力。有关观测方位角的试验也是很重要的,它直接涉及到森林火情探测的可能性和仪器扫描视场角的确定。1963年到1966年四年中,经过现场实验确定了森林叶簇遮盖的影响^[11]。试验中伪装火情是使用一平方呎的吊桶里燃烧的木炭,按着所需要的位置排列在13种树木类型的树林中^{[7][3]},飞机在离地面8,000~15,000呎高空中飞行。根据现场情况和图象分析情况的比较来分析在各种树木类型中和各种观测方位角下探测火情的能力,使用磁带记录仪记下现场扫描资料与图象底片相比较,便可以找出那些在底片上探测不到的火源目标的信号特征^[7]。结果表明:当观测方位角在0~60°之内是不会因为观测方位角选取不当而影响对火情目标的探测^[3]。

关于具体操作飞行巡逻的技术(如飞行时间的选择、飞行路径的选择和方位角的选择等)、现场实验结果的判定和对红外图象底片的判读等问题要根据具体的自然环境特点在飞行实践中摸索。除了具体操作人员的技术水平之外,更重要的是予先了解地形和天气等条件。

参 考 文 献

[1] S. N. Hirsch, Proc. 3rd "RST" Conf. p 623~648.

- [2] S. N. Hirrsch, proc. of "SPIE" 14th Ann. Tech. Symp. Aug. 1969 p51.
- [3] R. A. Willson Proc. 5th "RSE" Conf. p. 465.
- [4] C. A. Barker, U. S. P No 1959 702, May 22. 1934.
- [5] B. N. Watts, U. S. P No 2794926, June 4 1957.
- [6] "Electronics", 32, 69 (March 30 1959).
- [7] S. N. Hirrsch, AD. 676327, p. 447.
- [8] S. N. Hirrsch, R. F. Kruckolerg M. Madden, Proc. 7th "RSE" conf. , p2259
- [9] R. L. Bjornsen, A. D. 676327 p459.
- [10] R. A. Willson, App. Opt. , V5 N6 June 1966, p899.
- [11] R. A. Willson, AD 647136.
- [12] S.N. Hirrsch F. H. Madden, Proc. of "SPIE" 14th Ann. Tech, Symp. , Aug. 1969. p. 53.
- [13] Committee on Forest Types, 1962, Forest cover types of North American, p67 illus. Washington Soc. Ame. Forest.
- [14] Society of American Forsters, 1964, Forestry terminology a glossary of technical terms used in forstry p88, illus Woshingtm Soc Amer. Forest.

三、利用红外技术检查电子电路和器件的可靠性

在印刷电路板、半导体器件和集成电路的设计可靠性和使用可靠性中有一共同的特点,这就是它们的温度变化与其工作条件和环境情况有关。象电流增益、饱和压降、反向击穿电压、开关时间、电阻和二次击穿电压等特性都和温度有着密切关系。可靠性的问题,例如电荷陡动,在通电流条件下金属合金结的寿命、焊接点的寿命和密封情况也都是和温度有直接关系。所以任何一电路或器件的设计都必须很好地考虑在工作条件下电路各部位(或各元件)的发热情况,也必须很好地考虑整个电路热分布的情况。根据它可以鉴定产品的可靠性,成为生产中检查产品的必要一环。根据它也可以确定电路设计的可靠性程度,从而找到一种理想的元件组成和排列的设计。例如集成电路处于工作状态下耗散电功率引起整个电路温度升高,若超过一定限度就会严重地影响电路性能和可靠性。升温作用逐渐地改变电路(或单个元件)的参数,造成性能退化,降低寿命。集成电路的发展,向着复杂和高功率方向发展更加需要了解集成电路发热规律^{[1][2]}。又如集成电路的底衬上蒸发铝是一种标准技术,其可靠性用试验操作来检查^[3]。如果某部位超过正常负载会使其金属化不良的地方迅速过热。操作测验中最热的部位经常是首先失效的地方。如果能获得它的温度梯度分布图象就会在设计中及时地认出潜在过载的地方,并予以校正。

在半导体器件制造工艺中,加热或焊接的温度是一个重要的控制条件,有时甚至是唯一的决定性条件。对集成电路失效情况研究结果表明^[4]:有17%的失效原因是管蕊贴缚(die-attach)焊接不良引起,其关键原因是管芯温度在焊接时不能真正控制在 $375 \pm 10^\circ\text{C}$ 范围之内。测量这种温度是困难的。因为无法触及,热电偶不适用。需要用无接触测量仪器来控制工艺。

当电流通过半导体结的时候,自由电子穿越禁带与空穴复合发出光子构成复合辐射。它多与波长相关。现已证明:复合辐射和通过结的电流密度有关系。测量整个结的复合辐射(或者测量一小段结的复合辐射)便可以了解结上的电流密度情况^[5]。这种信息对于集成电路的设计和画出信号流程图是很有用处的。它可以检查信号流过结时的幅度、同步和波形等情况,从而证实设计和制造是否适当。生产流水线上的工艺人员亦可以用它来检查产品。

综上所述,这方面工作需要使用的仪器特点应是,①测量仪器不与目标接触;②测量中对目标没有损坏(即不改变目标的任何状态性质)。③理想的情况是有电信息输出,便于与电子计算机配合。

红外技术的基本依据是:任何物体自身所发出的红外辐射是与该物体温度与表面特性有关系。利用光学系统把选定目标的红外辐射聚焦在红外探测器上,探测器则能把红外辐射信号转变成电信号。该电信号就是代表目标温度和表面特性的信息。因此从原则上讲红外仪器能满足上述要求。

红外仪器的几个重要参数,如使用温度范围、温度分辨率、视场大小和空间分辨率等都要根据目标的特性来确定。主要考虑目标的尺寸大小、温度变化范围(包括正常和不正常的温度范围与温差大小)和比辐射率等情况。印刷电路板的典型尺寸是几英寸。例如,有一种脉冲编码调制电路板是 9×9 (吋 \times 吋)^[6]。它需要有1毫米的空间分辨率。集成电路是在一块几十密耳的片基上制造几十个元件^[4]。因此它需要的空间分辨率是1密尔以下(即25微米以下)。从下面这两个典型例子便可知目标的温度变化范围。脉冲电路印刷电路板里晶体管发射极电阻正常工作温度 10.7°C ,而因集电极和发射极短路引起该电阻温度升高到 19.6°C 。集成电路中电子元件密集工作时各元件温度较高,可达 100°C ^[7]。不正常时比正常高几度。由此看到对于印刷电路板红外仪器在常温下的测量性能是很重要的。目标上各种不同物质的比辐射率必须很好地予以考虑,它对于测试结果会有较大的影响^[8]。

近几年为电路可靠性监视和测量的红外仪器逐渐改进,基本种类已经定型。这里介绍七种常用仪器。

辐射计和显微镜 辐射计是红外仪器中最基础的仪器,根据辐射计的光具不同,红外探测器所看到的视场可精确地对准目标上的固定面积。该面积大小是可以根据要求来选定。通常视场为 $1 \sim 2^{\circ}$ 。特殊仪器可小至 0.1° 。被测目标最小可到1毫米直径。最小可探测温差为 0.05°C ^[3]。如果辐射计的光具是一个显微系统,该仪器就变成了红外显微镜。巴诺斯(Barnes)公司制造一种红外显微镜,使用热敏电阻红外探测器,室温下工作。该仪器指标是:空间分辨率0.0007吋(0.017毫米),热分辨率在300K时有 0.5°C 。探测器响应时间1毫秒,调制频率100周^[7]。还有一种叫Barnes RM-2B型显微镜空间分辨率可达0.0003吋^[5]。

红外监测系统^[9] 这是一个红外扫描器,敏感目标每个电子元件所耗散的热辐射。信号经过处理在示波器上显示其线迹。也能将此信号换成数字资料信息,通过电传打字机打印出。实用温度范围是从环境温度到 300°C 。热分辨率为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ (相对于黑体比辐射率)。空间分辨率为0.05吋。计算机处理扫描元。记忆装置能记下全部256个目标单元的信息。

热焊监视仪^[9] 这是一个连续测量的红外探测系统,能无接触实时测量。例如在片基焊到底衬时测量半导体小片所发出的红外辐射。系统也适于其它焊接的温度控制。温度范围(黑体比辐射率下 $200 \sim 1,000^{\circ}\text{C}$ 。精确度1%。探测器响应时间为一毫秒。系统使用一根单光学纤维。其典型数据长为14吋,直径为0.006吋。光学纤维“看”在目标上,把目标的红外辐射传导到探测器上。甚至于可以把光学纤维放在暗藏的地方直视目标。温度显示用三个可调节的阈值(它由所需温度确定)。测量信号可以在示波器上读出一输出信号的幅值。也可以接到控制仪器上去控制工艺过程。

半导体结分析仪^[5] 这是一种测量半导体结所发出的 1.1 微米波长复合辐射的红外探测仪器。其中使用了光学纤维“看”在径向大小在 0.002 吋到 0.4 吋之间的结上。它可以以一定的空间分辨率来绘制结和片基的热图样。这种装置使用无接触的方法对于片基和电路进行电学研究。红外探测器输出信号经放大和处理、消除噪声，在一个数字表上显示。指示出复合辐射功率。探测器分谱范围为 0.4~1.2 微米、响应率为 1.4×10^8 伏/瓦(1.0 微米处)，时间常数为 4~20 秒。满刻度量程精确度为 $\pm 5\%$ ^[9]。

飞歌红外绘图仪 亦称热绘图仪。这是最早进入市场的红外显微系统。它有三个部分即辐射计、样品座和控制器部件。目标的聚焦和瞄准通过普通显微镜目镜来调节。样品座上的标尺为精确地控制 x 、 y 、两轴运动所用。扫描有手动和马达带动两种。红外探测器是液氮致冷 (77 K) 光电导碲化铟。液氮杜瓦瓶一次灌足可连续工作 8 小时。系统空间分辨率 0.0003 吋。热分辨率在 300K 时 0.5°C ，探测器时间响应 1 微秒，调制频率 10 千赫^[7]。后来，飞歌福特公司又在此基础上研制一种彩色门限系统。它把目标的表面温度变化通过对表面红外辐射信号的处理以彩色电视方法显示。每种颜色代表一特定的温度范围。

NASA 快扫描高分辨显微镜^{[4][7]} 这是一种对固定目标，由光学系统自身扫描的显微成像系统。全部设备包括两个独立的单元。其一包括探测器、光学系统、红外信号放大器、线扫描和帧幅扫描同步脉冲发生器和维持杜瓦瓶真空的离子泵。另一单元包括门限探测器(或门限鉴别器)、两个示波器和四通道磁带记录仪。其指标如下：空间分辨率 20 微米，温度分辨率在 300K 时 1°C 、帧幅构成是每幅 100 线或更高、扫描速度最高为每秒 100 线，探测器时间响应 1 微秒。光学放大率 7.6 倍、景深 ± 20 微米。敏感红外波段 6~12 微米。

在研究电路(或器件)可靠性中有了基本仪器是必要的，但若充分地发挥这些仪器的性能还必须掌握一系列方法。这些方法的基本原则无非是使电路处在这样的状态下，我们所需要的电路性质(自身缺陷和可靠性等)能够有红外迹象表现出来。首先，可以使电路在正常工作状态下，使用红外仪器获得其温度热信息，从而判断该电路是否正常可靠。其次还可以在电路通电开始后各种不同的时间里获取电路的温度热信息。第三，加上使电路过载(电流或电压过载)但又不会使正常电路损坏的工作条件。

关于红外技术在保证电路可靠性中的具体应用很多，这里试举两例，然后简要地指出其具体范围。美国 Raytheon 公司的一种半自动红外扫描试验装置，对于已经经过电学检查 744 的个脉冲编码调制印刷电路板进行红外测验，发现有 3.1% 是异常电路。例如电路缺少箝位二极管，电阻阻值不符等。它的工作系数值要比正常差 n 倍^[6]。1971 年有一份报告^[9]，他们把红外技术成功地应用于改善大规模集成电路的设计和制造工艺。其中大约 40% 以上各种失效起因能够用红外仪器探测出来(或控制)。研究结果表明：红外技术在圆片衬底焊接检查、半导体结电流无接触测量和引线焊接过程的控制等三方面效果最为显著。

概括起来，可有五项应用。

(1) 电路可靠性的估定 电路或者元件在通电操作中，每个部分和每个单元都是在一定的热强度水平上行执其机能的，根据它的程度就可以予以整个电路失效速度和元件寿命。那些失效速度最快和寿命最短的元件用红外仪器指出来就可以掌握电路元件工作情况，便于随时校正。

(2) **电路设计鉴定** 电路设计中必须计算各种电路和电路中每个元件在通电之后发热的强度。使用红外仪器就可以在在实践中予以证实。同时有些未能估计到的热过程情况也能在实践中发现。这样根据红外资料所提供的热过程的信息就能够提出一个合理的设计安排。

(3) **制造工艺过程的控制** 半导体器件制造从单晶生长到最后测验,要经过很多道工序,只要其中一道工序偏离控制条件就会影响器件质量。实际上这也往往是难免的。在这些加工过程中有很多是通过升温办法实现的,也有些是在处理中自身热辐射产生了变化。这就为我们使用红外仪器来检查、监视和控制工艺过程提供了可能性。例如单晶拉制过程中、单晶的直径可以自动控制,它是通过红外监视仪连续地测定凝固潜热的释放量来控制

的。

(4) **失效分析** 红外探测技术能够有效地探测到电路可靠性发生危险的程度。当器件或电路工作在最严格的工作条件下其热图样产生异常。从而获得失效机制的详情。一般地说来,当器件工作在比正常工作条件下的电流和电压数值更大的时候,其热图样的异常表现更为突出。

(5) **电路和产品的鉴别** 对大中型集成电路产品进行100%的检查,这不论是从经济上还是从技术上都有可能实现的,也是有必要的。这种检查是在引线焊接之后进行。根据扫描图样把有潜在危险以及失效产品挑出来。这是常规电学检查所不能胜任的。还要考虑检查的成本问题。普通集成电路或器件进行100%产品检查太昂贵了。

用红外技术检查电路可靠性的工作开始于六十年代初^{[11][10]}。十几年来电子器件自身的发展使红外技术和红外仪器大大地向前迈进了。中规模和大规模集成电路封装密度高,元件尺寸小,不仅使工艺复杂而且还大大地提高了器件的功率耗散水平。这就更加需要红外技术。过去这方面工作所获得结果是可喜的。但仅是开端,今后还会做更多的工作。

参 考 文 献

- [1] Microelectronics and Reliability, V. 6 1967, p307~315.
- [2] J. W. Hively, Electro Technology, Jan 1969.
- [3] Edward. L. Gentile, Insulation/Circuits, September 1971, p91.
- [4] W. M Berger, 等 N70~25761, p2. 14.
- [5] R. Vanzetti, IEEE. V IEOL-18, 1971, N1, p47.
- [6] Philip. J. Klass, Aviation Week and Space Technology, May 20 1968.
- [7] Loen, Haniter, SCP and Solid state Technolgy, March 1967.
- [8] Appl. Opt. ,V. 7 N. 9 p1797.
- [9] NASA-CR-119921.
- [10] R. vanzetti, Aviation Week and Space Technology, Dec. 3 1962, p85.
- [11] R. vanzetti, Aviation Week and Space Technology, May 4 1964, p82.

四、水面温度红外测量

地球表面的四分之三是由水复盖。水面温度首先影响地面、大气和水面之间的能量交换。这种能量交换在地球周围的天气形成和地热平衡中起着重要的作用^{[1][2]}。显然,为了能够有效地估价大范围和小范围海面温度对环境的影响,如果有一种快速简便的方法获得

海面温度资料那是非常理想的。目前可供实用的红外仪器能够在飞机上使用,而且在大面积水面上做短时间的飞行试验又非常方便,所以有关海洋、河流和湖泊的表面温度详细资料已经能够得到。从这些资料可系统地阐述出关于热平衡和天气形成的机制。

和地面辐射特性不同、海面温度范围是从 -2°C 到 35°C 。水表面温度的辐射很好地遵从普朗克定律。只有水面上一薄层水完全吸收红外辐射。在 $4\sim 12.5$ 微米波段里,垂直于水面方向上的比辐射率是0.98。其反射率为0.02。当与水面成 60° 角时海面的比辐射率是从0.928(平静海面)到0.937(粗糙的热海面);其反射率是从0.037(粗糙的热海面,湿空气)到0.49(平静海面、干冷空气)^[3]。水面的红外辐射特征基本上是与300K黑体辐射相似,表面辐射峰值波长是9.6微米。辐射的主要波段为 $8\sim 13$ 微米。这正好是红外大气传输窗口,采用锐截止介质滤光片消除其他波段大气衰减的影响是比较合适的。

水面温度测量使用红外辐射计,它由两部分构成:光学头部和电子学处理系统。前者收集水面的红外辐射能量,产生一个与水面辐射和黑体辐射之差值成比例的电信号。这个黑体装在仪器内部,其温度可精确地控制。电子学处理系统再把这个信号变成直流信号显示在板面电表上,以绝对温度单位定标读出。还可以用磁带记录仪或条状记录纸来记录。为了提高水表温度测量的精度,研制出一组合适的辐射计仪器参数是这项应用的最基本条件。关于辐射计视场大小、探测器灵敏度要求、调制频率,放大器带通等性能指标的折衷选择曾有专门文章讨论^[7]。苏修曾研制过一种机载双通道红外辐射计在黑海、波罗的海和白海进行海面温度测量。它使用两只热敏电阻红外探测器,调频为35赫兹^[8]。目前各国水面温度测量不少是采用美国巴诺斯公司出品的PRT-5型轻便辐射计^{[4][5][6]}。

海表温度测量所获得的信息主要用于以下几方面:

(1) **弯流的勘测和跟踪** 由墨西哥弯向北流的海流称为弯流^[9]。它的北壁做为日常的基地由美国海军海图局跟踪。如果能弄清楚弯流的流程就可以帮助绘制海图的人回答关于弯流的一系列基本问题:弯流的流速;引起弯流流程的控制、弯流位置的预报等。还可以了解弯流对于海岸状态中许多深海现象的作用。因为这里各种海洋生物繁殖率最高,所以研究它是有价值的。美国海军海图局使用一精确的红外辐射计装在飞机上对弯流海域进行海表温度测量。把从机载仪器获得的资料和船只浮标所获得的资料编纂在一起绘成美国东海岸海面的平均温度图。在这个图上可以清楚地识别出弯流的位置^[11]。

(2) **海洋生物的遥测** 温度是限制海洋鱼类生存的主要因素。如果海水温度变化很大或者变化持续时间很久,那就要影响鱼类品种的连续繁殖和自身生存。如果从飞机上勘测出海面的热图样,确定温度的变化情况,这对于海洋生物研究是非常有价值的。美国Sandy Hook海洋实验室于1962年起使用红外温度计对海面温度图样进行大规模的勘察^[10],勘察的海面每月变化一次。现在已经扩展到沿整个美国东海岸(从马萨诸塞州的Copocod一直到佛罗里达的Miami)。使用海表测温飞行做为“生物警戒”的一部分,用它来记录鲨鱼、鲸鱼、龟和其它动物出现的情况。New South Wales海岸外澳州渔民发现金枪鱼最喜欢生活在 $16.7\sim 20^{\circ}\text{C}$ 的水里。在此温度范围内并且海表温度存在着不连续分布的地方总会发现金枪鱼^[11]。

(3) **探测热污染水域** 水面温度测量的应用中有一个重要用途是探测“热污染”水域。鱼类的迁移受到海水温度影响,任何较大的非自然的热(或冷)源都会带来严重的损害。大