

《红外与光电系统手册》第3卷

光 電 元 器 件

航天工业总公司第三研究院
八三五八所翻译出版

光 電 元 器 件

第 3 卷

红外与光电系统手册

一部丛书 红外及光

由军事工程设计

白重安手册

王六六
一九九六年
十月

《红外与光电系统手册》 翻译出版委员会

顾问：姚绍福 黄瑞松 承文 于士元

委员会主任：姜殿元 谷满仓 程金信 张佐成

副主任：尹怀勤 杨石珊 孙再龙 杨树谦

主编：孙再龙

责任编辑：赵雪燕 何淑珍 丰金凤 李瑾

翻 译 出 版 序 言

本书以1978年出版的“红外手册”为基础,但对它作了大量的修订、更新和补充,而且进行了重新整理和编排。因此,无论在内容上和形式上都以崭新的面貌出现。

全书共分八卷四十五章。几乎涉及到目前活跃于军事、航空航天和民用光电技术的大部分学科。有些内容是由先进的军事技术派生而来,在公开发表的文献中很少有如此大量的报道。在编排上也较好地考虑了可使用性因素。每章自成一体,避免了互相间繁琐的查阅,陈述格式由简明导言、实用公式汇编、有关数据、公式和数据使用方法实例四部分组成,非常明了、实用。

本书内容广泛充实,有较丰富的数据和参考资料,反映了美国80年代后至90年代初在此学科领域内的工程研究水平,具有先进性和很好的借鉴性,是目前红外与光电系统学科领域中最新的一本参考书和非常有用的工具书。

为及时地把这本手册推荐给我国从事红外和光电系统设计的工程技术人员,我们决定翻译出版本手册,但由于篇幅较长,翻译出版工作量巨大,故拟分两次进行。本次翻译出版的内容为第三、五、六、七卷,以后将在适当时候译全出齐。

红外和光电系统技术属于跨学科应用工程技术,所涉及的专业知识面极广。由于参加翻译、校对和审订者的专业水平和外语水平有限,在译文中难免有错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

本手册由中国科学院成都分院林祥棣院长推荐并引进,值此翻译出版之际对他表示忱谢。

孙再龙

1998年9月

红外/光电系统手册总目次

第1卷 辐射源

- 第1章 辐射理论
- 第2章 人工辐射源
- 第3章 自然辐射源
- 第4章 辐射计

第2卷 辐射的大气传输

- 第1章 大气透射
- 第2章 通过大气湍流的传输
- 第3章 空气动力学效应
- 第4章 非线性传输：热晕

第3卷 光电元器件

- 第1章 光学材料
- 第2章 光学设计
- 第3章 光机扫描应用、技术和器件
- 第4章 探测器
- 第5章 红外传感器的读出电路
- 第6章 低温制冷系统的热学与机械设计
- 第7章 图像显示技术以及在机载条件下的特殊问题
- 第8章 摄影胶卷
- 第9章 调制盘
- 第10章 激光器

第4卷 光电系统设计、分析和测试

- 第1章 光电成像系统分析基础
- 第2章 光电成像系统性能预测
- 第3章 光机系统设计
- 第4章 红外成像系统测试
- 第5章 跟踪和控制系统
- 第6章 特征预测和模拟

第5卷 被动光电系统

- 第1章 红外行扫描系统

- 第 2 章 前视红外系统
- 第 3 章 凝视传感器系统
- 第 4 章 红外搜索/跟踪系统

第 6 卷 主动光电系统

- 第 1 章 激光雷达
- 第 2 章 激光测距仪
- 第 3 章 毫米波雷达
- 第 4 章 光纤系统

第 7 卷 光电对抗系统

- 第 1 章 报警系统
- 第 2 章 伪装、抑制和屏障系统
- 第 3 章 主动红外对抗
- 第 4 章 一次性诱饵
- 第 5 章 光学及传感器保护
- 第 6 章 模糊对抗

第 8 卷 最新系统和技术

- 第 1 章 不规范成像系统
- 第 2 章 自适应光学
- 第 3 章 传感器和数据融合
- 第 4 章 自动目标识别系统
- 第 5 章 定向能系统
- 第 6 章 全息摄影
- 第 7 章 视觉耦合系统的设计考虑

目 次

第 1 章 光学材料

- 1.1 引言 (1)
- 1.2 特性说明 (1)
- 1.3 折射材料 (8)
- 1.4 反射镜数据 (52)
- 1.5 黑体数据 (56)

第 2 章 光学设计

- 2.1 引言 (66)
- 2.2 定义 (66)
- 2.3 初级 (高斯) 光学设计 (70)
- 2.4 精确的光线追迹 (74)
- 2.5 像差 (77)
- 2.6 景深和焦深 (84)
- 2.7 渐晕和遮光 (85)
- 2.8 光学特性的测量 (86)
- 2.9 分辨率判据 (88)
- 2.10 像质判据 (89)
- 2.11 传递函数 (90)
- 2.12 光线交点曲线和点列图 (95)
- 2.13 表面缺陷与像质之间的关系 (96)

第 3 章 光机扫描应用、技术和器件

- 3.1 引言 (98)
- 3.2 扫描在红外系统中的应用 (98)
- 3.3 扫描器性能的演变 (100)
- 3.4 扫描技术 (102)
- 3.5 红外扫描系统的几个实例 (112)
- 3.6 扫描器指标 (118)
- 3.7 定义 (121)

第 4 章 探测器	
4.1 引言	(132)
4.2 热探测器理论	(140)
4.3 光子探测器的理论描述	(151)
4.4 探测器特性	(167)
4.5 商用探测器性能概述	(181)
4.6 结论	(196)
第 5 章 红外传感器的读出电路	
5.1 引言	(205)
5.2 MOSFET 基础	(207)
5.3 晶体管噪声	(208)
5.4 读出集成电路性能需求	(212)
5.5 读出集成电路前置放大器概述	(213)
5.6 读出前置放大器	(219)
5.7 信号处理	(235)
5.8 数据多路传输器	(238)
5.9 输出视频放大器	(241)
5.10 功率消耗	(243)
5.11 动态范围	(244)
5.12 串音和频率响应	(244)
5.13 设计方法	(246)
第 6 章 低温制冷系统的热学与机械设计	
6.1 引言	(247)
6.2 热设计的基本原理	(247)
6.3 低温冷源的提供	(274)
6.4 机械设计	(298)
6.5 设计负载	(312)
第 7 章 图像显示技术以及在机载条件下的特殊问题	
7.1 引言	(317)
7.2 显示系统的指标要求	(318)
7.3 显示技术	(334)
7.4 显示指标与校准	(360)
7.5 几点说明	(365)
7.6 显示设计过程	(365)

第8章 摄影胶卷

8.1 引言	(371)
8.2 保存	(371)
8.3 光谱灵敏度	(371)
8.4 使用与处理	(372)
8.5 使用技巧	(372)
8.6 对焦	(373)
8.7 曝光	(374)
8.8 航空摄影	(375)
8.9 密度与曝光	(375)
8.10 感光测定特性	(376)
8.11 过增	(377)
8.12 倒易	(377)
8.13 胶卷-滤光片组合的有效光谱带	(378)
8.14 调制传递	(379)
8.15 密度测定法	(380)
8.16 辐射测量	(380)
8.17 红外发光	(382)
8.18 红外彩色胶卷	(382)
8.19 柯达产品目录	(383)
8.20 激光图像装置	(384)

第9章 调制盘

9.1 引言	(386)
9.2 傅里叶分析	(386)
9.3 扫描孔径	(391)
9.4 调制盘系统	(393)

第10章 激光器

10.1 引言	(410)
10.2 增益介质	(415)
10.3 激光振荡动力学	(426)
10.4 光学谐振腔和高斯光束	(442)
10.5 激光器类型	(451)

第一章 光学材料

1.1 引言

对本章而言,光学材料被视为可用作窗口、透镜、棱镜以及诸如此类零件的透射材料、反射镜基底、反射镜镀层以及各种各样可用于反射体或热探测器的发黑剂。尽管类金刚石材料很重要,因为它不是可以独立应用的材料,所以本章没有将其包括在内。滤光片和薄膜这类特殊材料将在别处予以论述。

1.2 特性说明

本章叙述了与窗口、透镜、反射镜、基底、分光镜和其它光学零件应用有关的光学材料特性,还给出了材料特性的表达式和一些理论描述。

1.2.1 非吸收材料的反射和透射

本节介绍非吸收材料偏振辐射和非偏振辐射的反射和透射的表达式。振幅和功率表达式是斯涅耳定律和菲涅耳定律形式。

斯涅耳定律指出:当相对于表面法线测量时,反射角等于入射角。该定律还指出,这两束光线位于由入射光线和表面法线所确定的入射平面内。折射光线的方向由正弦定律给定,并且折射光线也位于入射平面内:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

下标代表两种介质。两反射波振幅由下面的公式给出:

$$\tilde{r}_s = |r_s| e^{j\delta} = \frac{E_s^{rl}}{E_s^{inc}} = -\frac{\sin(\theta_1 - \theta_3)}{\sin(\theta_1 + \theta_3)} e^{j\delta} \quad (1.1)$$

$$\tilde{r}_p = |r_p| e^{j\delta} = \frac{E_p^{rl}}{E_p^{inc}} = \frac{\tan(\theta_1 - \theta_3)}{\tan(\theta_1 + \theta_3)} e^{j\delta} \quad (1.2)$$

式中 $j = \sqrt{-1}$; $r = \tilde{E}_r / \tilde{E}_i$; $\delta = \frac{2\pi nd}{\lambda}$ 。

下标 1 表示入射介质和入射角;下标 2 表示折射光线;下标 3 表示反射光线。相移 δ 为 2π 与光程 nd 的乘积再除以波长 λ 。光程是折射率 n 乘以实际路程 d 。

在两种偏振情况下,折射(透射)光波与入射光波之比为:

$$\tilde{t}_s = |t_s| e^{j\delta} = \frac{2 \sin \theta_2 \cos \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} e^{j\delta} \quad (1.3)$$

$$\tilde{t}_p = |t_p| e^{j\delta} = \frac{2 \sin \theta_2 \cos \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2) \cos(\theta_1 - \theta_2)} e^{j\delta} \quad (1.4)$$

还可以将四种振幅之比以仅取决于折射率和入射角的形式整理如下:

$$\tilde{r}_s = \frac{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{1/2} - n_1 \sin \theta_1}{(n_2^2 - n_1^2)^{1/2} - n_1 \sin \theta_1 \cos \theta_1} \quad (1.5)$$

$$\tilde{t}_s = \frac{2 n_1 \sin \theta_1}{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{1/2} + n_1 \sin \theta_1} \quad (1.6)$$

$$\tilde{r}_p = \frac{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{1/2} \sin \theta_1 - n_1 \sin \theta_1 \cos \theta_1}{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{1/2} - n_1 \sin \theta_1 \cos \theta_1} \quad (1.7)$$

$$\tilde{t}_p = \frac{2 n_1 n_2 \sin \theta_1}{n_1 \sin \theta_1 + (n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{1/2}} \quad (1.8)$$

1.2.2 吸收

用比尔定律来描述辐射的吸收:相同厚度的吸收材料吸收同等程度的入射功率,可写为:

$$\frac{d\Phi}{\Phi} = -\alpha(\lambda) dx \quad (1.9)$$

左边是吸收功率部分,负号表示损失的作用过程, α 是比例常数, dx 是微分厚度,吸收是波长的函数。在大多数实用场合, α 是在有限的、窄光谱通带范围内用实验的方法得出的,其解是著名的吸收指数定律:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha x} \quad (1.10)$$

偏巧, α 的应用有两种不同的但关系密切的形式。 α 在方程式中的第一个意义是损失在材料中的功率比,称作吸收率或吸收比。第二个用途, α 在指数里是吸收系数。材料中的路程长度通常由一些直角坐标或者 r 或者 s 或者 d 等量表示。样品的内透过比定义为在第二表面的与在第一表面的光辐射通量之比。这就是补充的吸收定律:

$$\tau_i = 1 - e^{-\alpha x} \simeq \alpha x \quad (1.11)$$

通常用厘米倒数(cm^{-1})单位表示吸收系数,但如果 x 使用倒数单位也可以用其它单位表示吸收系数,例如,如果 x 用 km 表示,则 α 可表示为 dB/km;如果 x 以大气 atm cm 表示,则 α 可

用其倒数表示。幂的自变量必须是无量纲的。

有时用消光系数表示吸收,它是复折射率的虚部:

$$\tilde{n} = n - j\kappa \quad (1.12)$$

式中 κ ——消光系数。它与吸收系数的关系是:

$$\alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda} \quad (1.13)$$

这些定义可以有二种或多种解释,其中一个解释可参见 1.2.4 节。

1.2.3 吸收样品的透射、反射、吸收和发射

一个平面平行平板,其反射、吸收和透射特性的有效值是在该样品内部多次反射的结果。如果 ρ 表示单面菲涅耳反射系数, τ 表示内透射系数,则可以证明其有效透射比或外透射比和有效反射比,由以下公式给出:

$$\tau_{\infty} = \frac{(1 - \rho)^2 \tau}{1 - \rho^2 \tau^2} \quad (1.14)$$

$$\rho_{\infty} = \rho + \frac{\rho\tau(1 - \rho)^2 \tau}{1 - \rho^2 \tau^2} \quad (1.15)$$

有效吸收率等于有效发射率,由下式给出:

$$\epsilon_{\infty} = \alpha_{\infty} = \frac{(1 - \rho)(1 - \tau)}{1 - \rho\tau} \quad (1.16)$$

1.2.4 折射率

折射率定义为真空中的光速与介质中的光速之比。它与材料折射率的实部有关,并且包括反射镜给出 -1 值的特殊情况。折射率也被定义为复数,这里,可认为实部表示相位滞后,光的迟滞,而虚部表示光的衰减。

通常将复折射率定义为:

$$\tilde{n} = n - j\kappa \quad (1.17)$$

还可以定义为:

$$\tilde{n} = n(1 - j\kappa) \quad (1.18)$$

其明显差别与在消光项中是否存在折射率有关。

折射率不仅是波长和温度的函数,而且是其它不太重要参数的函数,折射率随波长的变化

称为色散。Herzberger 和 Sellmeier 分别给出了两类主要的色散方程：

$$n^2 = A + \frac{B}{\lambda^2 - 0.028} + \frac{C}{(\lambda^2 - 0.028)^2} + D\lambda^2 + E\lambda^4 \quad (1.19)$$

$$n^2 - 1 = \sum \frac{K_i \lambda_i^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2} \quad (1.20)$$

式中 A, B, C, D, E, K_i 和 λ_i 是常数。它们的数值在理论上恰恰与材料的不同吸收带有关,但通常是根据实验得出的。

有时将折射率随温度的变化称为热折射系数,并且以 dn/dT 表示。通常它的值大约为每度百万分之几,并且是波长和温度两者的函数,该系数不是常量。

1.2.5 热性能

尽管材料的所有物理特性几乎都与温度有关,但有些特性比其它一些特性对温度更为敏感。本节将对下述特性参数做出描述和定义:熔化和软化温度、比热、热容、热容量、热导率、热导以及热膨胀。

熔化温度是指晶体从固体熔化为液体时的温度,它也被称为熔解温度或熔融温度。在非常精细的工作中,是把凝固温度与熔化温度区分开的。

转变温度是指玻璃可能退火的温度。玻璃, DIN52324 依据热膨胀系数定义了转变温度。在接近绝对零点的低温状态下,相对膨胀曲线有一个小的轻微的曲率。在接近室温的较高温度时,曲线线性上升。在温度上升过程中,曲线逐渐变为具有很大斜率的另一个线性区域。将这两个线性膨胀区域的外延交点定义为转变温度 T_g 。转变温度与 ASTM C336-1 定义的退火温度大约相差 10°C 。

因为可以把玻璃看作是一种过冷液体,它从液相到固相没有急剧的变化(反之亦然),所以软化温度的定义必定是有些随意的。软化温度高于转变点,它是塑性变形开始出现的温度。在 ASTM C338-73 中对软化温度做了定义。

比热是表述一定量的热量使已知质量的物体温度升高程度的量度。材料的比热是该材料的热容与水的比热之比。热容是使单位质量的物质温度升高 1°C 所需的热量。在英制单位系统中,规定其单位为 $\text{Btu lb}^{-1}\text{F}^{-1}$ 。在标准国际单位制中其单位是 $\text{Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$ 。一个可供选择的办法是以卡路里确定热量,在这种情况下,必须把卡和大卡(千卡)区别开。热容量是热容乘以材料的质量,热容量与热容之间的关系和电容量与电容之间的关系一样。正如大多数物理量一样,热容随温度变化。对许多应用来说,它或许是二级效应。

热膨胀是度量材料由于温度变化而引起体积变化的一种方法。通常以线性热膨胀的形式描述。本例中,线性描述的是几何形状——一维的。线性膨胀随温度的变化几乎从不是线性的(即一条直线),体膨胀量恰好是线性膨胀的 3 倍。线性膨胀的定义是温度变化 1°C 时样品长度的变化除以样品的长度,因此,单位是度的倒数,最好选用开氏或摄氏度表示。表中的数值是基于下述简单的公式得到的:

$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} = A + BT + CT^2 \quad (1.21)$$

或许需要用高次项,但通常情况下,常数、线性和二次项就足够了(注意:这就使线性和线性膨胀系数表示的可能性增加)。

热导率是材料传热容易程度的一种衡量手段。热量流动的速率与横截面积和温差成正比,与物体长度成反比。比例常数是热导率 k :

$$q = \frac{kA}{l} \Delta T \quad (1.22)$$

热导率是温度的函数,而常数值仅仅是近似值。

其单位是单位时间、单位横截面积每度能量乘以长度,因此,在国际单位制术语中是 Wm^{-1} 。热导是热导率乘以样品面积再除以其长度,它类似于电导与电导率的关系。

1.2.6 德拜温度

德拜温度使红外光学材料的许多重要特性规范化,并由下式定义:

$$\theta_D = \frac{h\nu_D}{k} \quad (1.23)$$

式中 k ——玻耳兹曼常数。

1.2.7 硬度

某些材料比其它材料硬度高,因此在应用中,更难以抛光、刻线、研磨。测量硬度的方法有若干种,莫氏硬度严格地基于材料的相互刻划,其硬度范围是从 1~10,而两个数之间没有相同的硬度等级,表 1.1 给出莫氏硬度标度。

大多数更为精确的测定硬度的方法是基于将专门规定的压头压进材料中。所采用的度量是压痕的面积或长度,其单位通常是千克每平方毫米($kg\ mm^{-2}$)。一般地(有时是必要的),要对施加到压头上的载荷做出规定。

压头的类型有维氏、布氏和努氏三种。维氏硬度是将以千克为单位的载荷除以锥形压头产生的压痕面积,这种压头对面角度为 136° ,对棱间角度为 146° 。布氏硬度是以千克为单位的载荷除以球形压头产生的曲面面积。努氏硬度值是用与维氏压头几乎完全一样的压头获得的,而压痕面积一般是以平方毫米表示。有些测量方法随外加载荷而变化,尤其是在有裂纹、冷变形或应力消除发生的情况下。

表 1.1 莫氏硬度标度

1	云母	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
2	石膏	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
3	方解石	$CaCO_3$
4	氟石	CaF_2
5	磷灰石	$Ca_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$
6	正长石	$KAlSi_3O_8$
7	石英	SiO_2
8	黄玉	$Al_2SiO_5(OH, F)_2$
9	刚玉	Al_2O_3
10	金刚石	C

1.2.8 溶解度

有些红外材料极易溶于水,而另一些红外材料几乎不被水侵蚀,几乎所有的红外材料都在某种程度上受到酸或碱的侵蚀。这里引用的溶解度是用100ml水中溶解的材料的质量来表示的。由于水的密度是 1g ml^{-1} ,所以它是溶解度百分之一的近似值。如果不加说明,溶解度是在规定的温度或接近室温情况下的。可以把溶解度看作是材料的自然时效能力的量度,而确实不是抗雨蚀能力的量度。例如,把一个氯化钠(NaCl)窗口放置在密执安州,如果在高湿情况下不溶解的话,一夜时间就会损坏。同样的窗口放在亚利桑那州,正常天气下会保持完好。

着色保护剂往往用于可见光区,而在红外应用方面则没有意义或失去作用。

1.2.9 散射

反射镜、透镜和窗口都不同程度地存在散射,散射的程度可以用双向反射率和透射率来描述,这已逐渐被称为双向反射分布函数(BRDF)或双向透射分布函数(BTDF)。描述两者或其中之一术语是双向散射分布函数(BSDF),常常将它标绘为散射角正弦函数减去镜面反射角正弦函数的函数,常用 $\beta - \beta_0$ 或 $\delta\beta$ 表示。因为大多数材料的取值基本上与入射角无关,这样便得到精确归一化的分布函数。

对于一个均方根粗糙度小于入射光波长的光滑表面,其色散表达式为:

$$\rho_b = k^3 F(\theta) \cos\theta_i \cos\theta_s W(p, q) \quad (1.24)$$

式中 ρ_b ——双向反射率;

k —— $2\pi/\lambda$;

$F(\theta)$ ——几何因子(后面将详细讨论);

$W(p, q)$ ——作为弧度空间频率 p 和 q 函数表面高度分布的功率频谱。

不同偏振的光学因子各不相同,这里将一起给出。此处 s 表示垂直于入射平面偏振; p 表示平行于入射平面偏振,两者分别表示发射源和接受器各自的偏振状态。入射角为 θ_i ,入射平面内的散射角是 θ_s ,入射平面外的散射角是 φ :

$$F_{ss} = \cos^2 \varphi \quad (1.25)$$

$$F_{pp} = \frac{\cos \varphi | \cos \varphi - \sin \theta_i \sin \theta_s |^2}{| \cos \theta_i \cos \theta_s |^2} \quad (1.26)$$

$$F_{sp} = \frac{\sin^2 \varphi}{\cos^2 \theta_s} \quad (1.27)$$

$$F_{ps} = \frac{\sin^2 \varphi}{\cos^2 \theta_i} \quad (1.28)$$

表面高度的频谱通常具有以下形式:

$$W(u) = \frac{\sigma^2 \delta}{\pi(1 + u^2 \delta^2)} \quad (1.29)$$

式中 σ ——均方根表面高度；

δ ——自相关长度；

u ——径向空间频率($u^2 = p^2 + q^2$)。

该渐近双对数坐标图是一条到点 $u = 1/\delta$ 的水平直线, 其后是一条斜率为 -2 的直线, 它与单时间常量环路 Bode 图非常相似。

双向反射率的最大值只受到散射光束分布的限制, 而且比单向反射率大许多数量级。对于一个各向完全同性的反射镜, 其值为半球反射率 ρ_h 除以 π 。

1.2.10 弹性模量

大部分弹性模量是通过应力和应变定义的。应力是单位面积上的力, 即压强。如果力垂直于物体, 则应力是拉伸或压缩的。如果力平行于表面, 则应力就是剪切力。膨胀应变可以通过长度的变化除以长度的平均值或初始长度来描述。切应变是两个平行平面位移之差除以二者的距离。体积模量有时用 k 表示, 它是压应力除以体积应变(即体积的相应变化)。杨氏模量 E 是张应力除以线性应变。剪切弹性模量或刚度是切应力除以切应变。泊松比是横向应变除以线性膨胀应变, 即一个方向的伸长与另一个方向上的收缩之比。

1.2.11 密度和比重

材料的密度是其单位体积的质量, 可以用英制或米制单位表示, 或表示为比重。比重是材料的密度与 4°C 时水的密度之比。材料的比重往往附带有参考温度。在米制中, 由于水的密度近似为 1 g cm^{-3} , 因此密度与比重有相同的数值。在英制中, 水的比重是 62.4 lb ft^{-3} 。

1.2.12 工程模量

胡克定律指出, 对于小的变形来说, 作用于固体上的应力与其内部存在的应变成正比。各个方向上的应力分量是应变分量的线性函数, 其比例常数称作刚性常数或弹性系数, 通常用符号 c_{ij} 表示, 其值为 $1 \sim 6$ 。对于立方晶系, 有三个独立的 c , 这里 $i = j = 1, 2, 4$ 。对于四方晶系, 有五个独立系数, 此处 $i = j = 11, 12, 13, 33$ 和 44 。对于六方晶系, 存在六个独立系数, $11, 12, 13, 14, 33$ 和 44 。弹性柔量常数是反比的系数, 用 s 表示, 并且具有相同的一组下标。

有若干种重要的工程模量, 这些工程模量包括杨氏模量、切变模量、刚度模量、体积模量和泊松比。

杨氏模量定义为应力与应变之比, 这里, 应力是作用在与力垂直的单位面积上的力, 而应变是在力的方向上长度的部分变化, 刚度模量是切应力与切应变之比:

$$H_R = \frac{F/A}{dl/l} \quad (1.30)$$

这里, 切应力是平行于力的作用方向的单位面积上的力, 而切应变是以弧度为单位的剪切角:

$$H_R = \frac{F_{\parallel}/A}{\theta} \quad (1.31)$$