

自动化丛书

光学温度变送器

〔苏联〕Г. П. 卡迪斯著 張厚民譯

上海科学技术出版社

73.86
170

自动化丛书

13

光学温度变送器

〔苏联〕I. II. 卡迪斯 著

张厚民 译 汪时雍 校

31.54

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书是“自动化丛书”之一。丛书内容包括自动学及远动学的理論,自动装置、元件和仪器的結構和应用等。丛书选题主要取自苏联及其他国家的有关資料,也包括国内編写的专题論著。本丛书由“自动化丛书編輯委员会”主編。

本书探討在自动檢測和自动調节装置中,作为光学温度变送器所采用的各种高温測量装置(輻射、亮度和比色高温計以及特殊的光学仪表)的作用原理、綫路和主要的技术特性。

本书可供从事温度自动檢測和自动調节工作、但尚缺少这方面专业知識的工程技术人員作参考。

ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

ТЕМПЕРАТУРЫ

Г. П. Катыс

Госэнергоиздат

自动化丛书(13)

光 学 温 度 变 送 器

張厚民 譯 汪时雍 校

自动化丛书編輯委员会主編

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业許可証出 092 号

大东集成联合厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印張 3 10/32 排版字数 72,000

1963年6月第1版 1963年6月第1次印刷 印數 1—5,000

統一书号 15119·1728 定价(十二) 0.40 元

原 序

目前在許多技術領域中，為了對瞬變熱狀態對象溫度作自動檢測和調節，有必要使用各種接觸式和非接觸式測溫器（變送器）以及相應的測量線路。其中，非接觸式光學溫度變送器的優點是儀表中的敏感元件不直接接觸被測介質，從而大大延長了儀表的壽命和提高工作的可靠性，所以採用這種裝置作為自動檢測和調節系統的變送器具有很大意義。由於光學溫度變送器大多採用光電一次變換器，慣性比接觸式變送器小得多，僅此一點，用來作為自動檢測和調節系統的變送器也有非常大的實際意義。

本書討論用光學溫度變送器的各種不同的高溫測量裝置，諸如輻射、亮度和比色高溫計以及它們的作用原理、線路及一些主要技術特性。書中還扼要地敘述了光學溫度變送器必不可少的有關光學高溫測量的基本問題。

本書第五章簡要地敘述測量高溫火焰和氣體介質溫度的特殊光電裝置。這些裝置的作用原理可供設計製造某些對象的溫度變送器時應用。最後一章介紹用於有瞬變溫度場的對象中的掃描光學溫度變送器。

由於篇幅所限，故將很大一部分材料加以壓縮而只作簡要的介紹。

作 者

目 录

原 序

第1章 测量瞬变温度的光电法	1
1. 引言	1
2. 一般光学测温法	2
3. 火焰和高温气体的光学测温法	2
4. 测量温度用的光电系统	5
5. 各种光电元件的特性	13
6. 瞬变温度场的某些特殊测量问题	20
第2章 辐射高温计	23
第3章 部分辐射光电高温计	31
第4章 光电亮度高温计	39
7. 亮度高温计的结构原理	39
8. $\Phi\Pi-3$ 型光电亮度高温计	45
9. ИКП 型红外亮度高温计	49
10. $\Phi\Pi-3$ 型光电亮度高温计	51
第5章 光电比色高温计	53
11. 比色高温计的结构原理	53
12. $\Pi\Pi-2M$ 型自动光电比色高温计	63
13. $\Pi\Pi-3$ 型光电比色高温计	67
第6章 测量温度用的特殊光学装置	69
14. 根据谱线饱和中心强度法工作的光学温度变送器	69
15. 根据谱线显隐法工作的光学温度变送器	74
16. 根据谱线相对强度法工作的光学温度变送器	82
第7章 扫描光学温度变送器	84
17. 温度场扫描原理	84
18. 各种扫描高温计	91
参考文献	97

本书目录由中譯本編者重新編排

第 1 章

測量瞬变温度的光电法

1. 引 言

目前,应用着各种不同的非接触测温装置(如光学的、超声波的、輻射的)作为非接触式温度变送器。其中,应用最广的是光学测温法。

在自动检测系统和自动调节系统中,都应用光电法来测量温度。在前一种场合下,被测温度具有高度随时间的瞬变性(尤其是在不受控的物理化学变化过程中)。因为要确定测量瞬变温度的动态精度,所以这种光电系统的动态品质就显得重要。因此,正确选择适当的测量仪表结构,并考虑各个环节的动态品质,是一项很重要的工作。然而,目前在研究制造这些仪表时,一般都不考虑测量系统的动态品质问题。这样往往会使得在测量快速变化温度时所得到的动误差,有可能与测量方法误差的大小相当,甚至超过它。

因此研究瞬变温度测量系统的动态品质非常重要,故有必要先就光学测温法^①作扼要介绍。

^① 对光学测温法将在探讨各种类型仪表(輻射、亮度、比色等)的章节中加以详述。——原注

2. 一般光学测温法

在所有测量固体温度的光学方法中，目前应用的有辐射法、亮度法和比色法。

輻 射 法

投射在敏感元件上的是被测对象的总辐射能。这种方法的精度虽不很高，但是在测量光谱能量分布不变的同一类固体的温度时，仍可以得到满意的结果，因此辐射温度变送器在自动检测和调节系统中仍被采用。

亮 度 法

投射在光电接受器上的是限制在一定光谱段的辐射，从而有可能足够精确地测量其对象在该光谱段内的辐射本领。因此亮度法比辐射法的精度要高得多。

比 色 法

两个不同狭窄光谱的辐射交替地投射到光电接受器上，按照这两个辐射能的比值来测定对象的温度。比色法的测量精度高于亮度法。此法不仅用以测量固体温度，还可以测量火焰温度。用比色法测量温度上限可达 3000°C (或更高)。

3. 火焰和高温气体的光学测温法

在解决某些技术问题时，有必要应用测量高温气体介质和各种类型火焰温度的变送器。而接触式测温法在很多场合下由于其感温元件的耐热性能不高，往往不很适用。

测量火焰温度主要采用光学变送器。测量高温气体介质

时,还可根据电磁波辐射强度的测温法。要测量不发光热气体介质和气流温度,当已知气体的组成和它的分解及电离程度时,可以采用超声波温度变送器。

对火焰和气体介质的光学测温法及其相应的仪表正在积极进行研究。根据被测火焰和高温气体介质的性质^①,光学测温法可分为两类:第一类方法用以测定在可见光范围内发射连续光谱的火焰和气体介质温度,此时用测量连续光谱的单色亮度来确定温度;第二类方法用在具有线状辐射光谱的对象,通过测量光谱线或光谱带的辐射来确定温度^[1~5]。

测量火焰和气体介质温度采用下列光学方法:(1)亮度法;(2)比色法;(3)谱线饱和中心强度法;(4)谱线显隐法^②;(5)谱线相对强度法。

各种光学方法的适用范围及所达到的精确度完全取决于被测火焰和气体介质的属性。由于气体介质和火焰辐射不仅与它们的温度有关,并与其他因素(火焰辐射系数、火舌的大小、在气体中发生的化学变化过程等)有关,因此在选用某一种光学方法测量温度之前,应预先进行对象的光谱研究。只有仔细地分析辐射介质的属性以后,才能选定某种光学方法来测量温度,这样在测量时才能得到足够的方法精度。因此,不预先研究有关对象的物理性能,不能选定测量气体介质和火焰温度的光学方法以及变送器的具体类型^[2~4]。

用光学方法测量发光火焰温度,在很多情况下所测的是

① 测量气体介质和火焰温度的光学方法,只有在进行测量的光谱范围是热辐射时才能应用。仅在此情况下,温度与辐射之间才有确定的关系。——原注

② 利用谱线(通常用钠D线)与其背景亮度比较,出现明线或暗线,或当亮度相等时,谱线即在背景中消失,这种测温方法称为谱线显隐法,或称谱线反演法,谱线反转法,详见后文。——校注

某种虚假温度(亮度温度或比色温度),它与真实温度的差别主要决定于火焰的辐射本领。气体介质和火焰的辐射本领实际上随着具体条件而变化,因此必须对各种不同场合分别加以测定。在应用亮度法和比色法时,其测量精度取决于所用的光谱范围和火焰的特性。

用光学方法测量具有一定组成的具体火焰温度时,沿仪表光轴温度的平均化特性决定于火焰性质、所选用的测量方法和工作波长。所获得的平均光学温度既不与质量平均温度相一致,亦不与算术平均温度相一致,而且与质量平均温度比较起来更接近于最高温度^{[2]①}。当增加测量温度所采用的波长时,质量平均温度与平均光学温度之间的差别就显著减少。这就是采用红外(长波)辐射来测量火焰温度的有利根据。

采用红外测温法可向低温方面大大地扩展温度测量范围。因为随着温度的减低,辐射能极大值向长波方向偏移。此外,此法的优点是无论对发光火焰或透明火焰均同样适用。

作为测量高温气流和火焰温度的变送器,可以应用基于谱线显隐法、谱线饱和中心强度法和谱线相对强度法的特殊

① 算术平均温度

$$\bar{T}_x = \frac{\int_0^{d_0} T(x) dx}{d_0}$$

设火焰截面各点热气体的密度不同时,则有质量平均温度

$$\bar{T}_m = \frac{\int_0^{d_0} m(x) T(x) dx}{\int_0^{d_0} m(x) dx}$$

式中 d_0 ——火焰截面直径;

$T(x)$ ——表征温度分布情况(火焰截面上 x 点的温度);

$m(x)$ ——火焰截面上 x 点的热气体密度。

当火焰截面上各点热气体密度相同时,则

$$\bar{T}_m = \bar{T}_x \quad \text{参阅文献[2] 1961版。——校注}$$

裝置。

譜綫显隱法是业經詳尽地研究測量具有綫狀輻射光譜的高温火焰和气体介质的方法。用此法測量温度其上限可达 $2500 \sim 3000^{\circ}\text{C}$ 。

譜綫显隱法現有几种类型（其中包括鈉譜綫內的輻射吸收法），根据这个方法創制了能够測量瞬变高温气流和火焰的光电式仪表。

为了測量高温火焰和气体介质，采用了測量时加入火焰內的碱金属譜綫飽和中心强度的光学方法。用此法測量温度其上限可达 10000°C 。

測量几万度高温可采用譜綫相对强度法，这种方法系利用被测对象的两个确定的輻射光譜綫进行强度比較，根据两者的比值來測量对象的温度。然而采用这种方法和上面两种方法同样都应預先对被测对象进行特殊的光譜研究。

4. 測量温度用的光电系統

測量温度用的光电系統是根据所采用的測量方法，使光流經過遮光或交换作用，投射在一个或几个有光譜选择性光敏元件上的一种裝置。由此得到的电測量訊号饋送到相应的电路中去，其輸出訊号与被测温度成比例。

在根据一定光譜段的单一光流强度^①來測量温度的光电系統中，用带孔轉盘或振动片使投射来的光流变换成脉动光流（形成載波頻率）。

在根据两个（有时三个）单色光流^②測量温度的系統中，則采用着适当的光流交换器。

① 即应用亮度法的系統。——原注

② 即采用比色测温法及鈉譜綫显隱法。——原注

測量溫度可用斷續或連續兩種方式。在第一种情況下測量訊號由間斷的電脈沖組成。在第二種情況下測量訊號是可以任意小量相互區別的連續數值序列。在絕大多數測量溫度的電系統中是采用適當的光流遮光和交換方法，因此這種系統是斷續測量系統。采用斷續方式測量瞬變溫度，有可能將測量訊號與標準訊號或其他光譜組成的訊號進行周期性比較。因此某些溫度測量方法就依據幾個光流強度的斷續測量，然後組成單一的光訊號。不過在測量瞬變溫度時，用斷續測量訊號將使測量的動態精度有所降低。

根據所獲得與溫度成比例的測量訊號的函數變換作用，各種光電系統可分為如下幾類：

- (1) 直接測量溫度系統；
- (2) 按照對應於各光通量的電脈沖幅值比來測量溫度的系統；
- (3) 帶有負反饋的測量系統。

光電測量系統通常具有三個基本元件：(1) 有相應光學遮光器或交換器的光敏元件；(2) 放大轉換器；(3) 記錄儀表（往往配置繼電器輸出）。在應用輻射吸收法的系統中，還外加比較光源。從以上所舉每一元件的名稱可以知道它們的用途。

根據所採用的不同測溫方法，光學系統可以有一個或幾個光敏元件。相應的儀表結構也分為單通道或多通道。在後一種情況下，由於各通道特性上的差異，而使測量精度有所降低。

在光電系統中由光敏元件獲取的訊息通過測量電路的全部環節一直到記錄元件或繼電器。在訊息經過電路的各個元件時，引起訊號的失真，其失真程度取決於元件的動態品質。

为了評定測量系統的动态品质,当它是綫性系統时,可采用頻率法。在此情況下分析系統的动态品质就是确定它們的幅頻和相頻特性。

測量系統对輸入訊号变化的反应,或系統的过渡过程,完全决定于其幅頻特性和相頻特性曲綫的形状,亦即决定于訊号諧波的不失真通頻帶。

当被測訊号通过具有一定通頻帶的系統时,訊号的諧波分量中頻率处于系統通頻帶以外的部分大大地被削弱,在輸出訊号的頻譜中主要留下的是在通頻帶內頻率的諧波。由其他頻率成分的光譜而引起的測量訊号失真也相应地消失。在高频成分消除时,其曲綫形状亦更为平滑。

如果在測量系統輸入端加入一阶跃訊号,輸出电压一般是逐漸增高的。輸出电压达到稳定值的 63% 所經過的时间叫做电路的时间常数。

由于通頻帶的寬度有限而引起的測量訊号的失真也限定了系統所能傳遞的訊息量的范围。

系統的总頻率特性决定于一次光电轉換的动态品质、光流交換作用的方式、放大轉換器和記錄装置(或继电器)的特性。因为光学方法測量温度大多要求測量很窄的光譜段(其总輻射能很小),故从光敏元件得到的訊号亦很微弱。因而往往不得不采用放大系数很高的电子放大器。这类仪表所应用的放大器在測量快速变化温度时会引起严重的誤差,因此选用寬頻帶的放大器就很重要。

如果已知測量系統各个环节的对数頻率特性,則整个系統的总頻率特性可由各个环节对数頻率特性之和来确定。从所得到的系統幅相特性便能够确定被測瞬变量諧波成分的动态失真度所允許范围内的頻帶寬度,此时光电系統所傳遞的

訊号才能足够精确地反应温度的真实变化。

在研究光学温度变送器时，温度测量的总误差可分为方法误差和仪器误差。方法误差完全决定于所采用的测温方法。这种误差视被测辐射带的宽度、光谱带的分布区域以及在被测对象中温度与辐射之间的关系而定。一定的测温方法所具有的方法误差应认为是在理想的仪器设备条件下最低限度的可能误差。对实际仪表在方法误差上还要附加所谓仪器误差。仪器误差的大小决定于仪表的工作原理、静特性和动特性。

在测量瞬变温度场时，所谓动误差极为重要。系统的动误差决定于测量系统的通频带和被测对象规律性的频谱。如所测的是随机过程不能预先知道它的频谱，也就不能预计测量的动态精度。不过在一系列相同现象中，会遵从统计法则表现出一定的规律性。因此就有可能得出被测规律的所谓统计频谱，从而亦可以求出测量的统计动态精度。

用于测量温度的光电系统的动态品质大多取决于所采用的光学遮光器和交换器的特性，因此分析研究它们的动态特性是一项重要任务。

在这种光电系统中所采用的光学装置可分为下列三类：

(1) 用以遮擋光流和在光敏元件上造成电脉冲序列的光学遮光器，其电脉冲的幅值对应于同一光流在各个瞬间的强度。

(2) 用以将被分出的两个光流交替地投射在光敏元件上的光学交换器。此时在光敏元件上形成的电脉冲序列，其脉冲幅值分别对应于具有不同光谱区的两个光流的辐射强度，或对应于由不同辐射源射来的同一光谱区的两个光流强度。第一种情况是在不同光谱区内按照测量辐射强度比值的原理

工作的綫路，第二種情況是按照光通量負反饋工作的補償式綫路。

(3) 用以將同一種光譜組成但強度不同的三個光流交替地投射在光敏元件上的光學交換器。在此情況下光敏元件上形成脈沖組序列構成的電訊號。每組由三個脈沖組成，其幅值分別對應於三個被分出的光流強度。這種光學交換器應用在按照輻射吸收法工作的系統中。

單一光流的遮光可以利用轉盤遮光器或振動片。在根據單一光流測量溫度的系統中（應用亮度法原理），遮光作用是在測量訊號中造成載波頻率。這樣有可能利用隨時間穩定性能良好的諧振放大器。然而，在測量系統中造成載波頻率的更好方法是以交流電壓來供給光敏元件。此時可使載波頻率大大提高並從而提高整個系統的動態品質。

來自不同光源的同一光譜區的两个光流投射在一個光敏元件上的光交換，一般採用轉盤遮光器或振動片。在這種裝置中，一束光流是來自被測對象，而另一束是來自光通量負反饋的熾熱燈泡。這種系統是按照補償原理工作的，因而可以消除系統中由於元件參數的變化對測量結果的影響。不過補償式測量綫路比較複雜。

處於不同光譜區的两个光流投射在一個光敏元件上的光交換法（到光交換器上的兩光流的幾何方向一致），可以採用裝有濾色片的轉盤交換器或採用鑲有濾色片的振動片。只有當光流是處於不同光譜區的情形下，這種光電裝置才能依它們的強度加以區分。

對於處於不同光譜區的两个分開光流投射在一個光敏元件上的光交換，如令每束光流各自通過固定的濾色片時，可以採用下列裝置（圖1）：(1)轉盤遮光器；(2)振動片；(3)雙光電

子束电磁交换器；(4)其他各种光电式光流交换器（鍺紅外輻射調制器，凱爾盒^①旋轉偏光體和其他快速光門）。

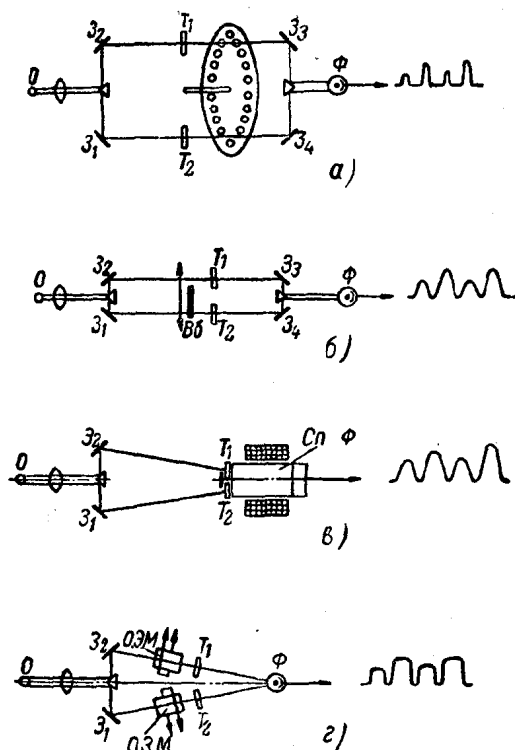


图1 照射在同一光敏元件上两个光流(处于不同光谱区的)光学交换器图

0—测量对象； 3—反光鏡； T—滤色片； Φ —光电元件； Cn. Φ —电磁交换的特殊光电元件； 0.3.M.—光电調制器； B6—振动物片

① 凱爾盒是一种使光束产生偏光，并以电場控制其旋轉面，从而周期地通断光束的装置。——校注

以上列举的不同光谱区的两个光流(重合的以及分开的)光学交换器多用于单通道比色高温计中。对于两个分开光流的交换(经过固定滤色片),可采用各种能够交替切换投射到光电元件上两束光线的光调制器或遮光器。作为光学交换器还可应用凯尔盒或锗红外辐射调制器,它可利用电控制讯号无惯性地对光流进行调制。用两个凯尔盒或两个锗调制器可以使两个分开光流交替地照射在一个光敏元件上(图 1*e*)。

近年来为了实现光流的交换,研究了一种相应的光电子束电磁交换器(图 1*f*)。在这种交换器中,辐射能连续地投射在特制光电管的阴极上。在光电阴极前面装有两块滤色片,使在半边阴极上投射着一种光谱成分的辐射能,在另一半边阴极上投射着另一种光谱成分的辐射能。套在光电管上的线圈以交变磁场交替地将光电阴极两半部的电子束射到阳极上,此时在光电管电路中便可以形成调幅的电讯号。

光谱区相同而强度不同的三个光流投射在一个光电元件上的光学交换,可采用任何两个连串的但作用频率不同的遮光器。为此可应用两个转盘遮光器、两个凯尔盒或两个旋转偏光片等等(图 2)。这种交换器可用于辐射吸收法的光电系统中,真实温度由测量三个量来确定:比较光源的亮度、火焰的亮度和通过火焰后比较光源的亮度。在这种装置中通常采用两个连串配置的转盘。在有一种测量系统的设计中,其转盘交换器的参数如下(图 2*a*)。由火焰背后的比较光源射来的辐射能,被置于比较光源与火焰之间的小孔转盘 A_1 以频率为 300 赫周期地转换。而由火焰投射在光敏元件上的辐射能是用有切口的第二个圆盘 A_2 以频率为 60 赫进行周期性转换。两个转盘遮光器装在同一根轴上以相同转速旋转。照射在同一光敏元件上的不同光流的转换是靠圆盘上不同数量和不同

形状的孔来实现的。光电倍增管可相应地接受由两个轉盘遮光器經過两次調制的单色光通量。在这一类系統所采用的某些交換器中，为使比較光源的輻射能直接通向光电元件而应用两个光学通道(图 26)。比較光源借反光鏡系統而分成两束光流。两束光流的光路是等效的，它們之間不同之处是一束光流通过火焰区域。同軸旋轉的轉盘遮光器使通过两个光路的光流交替地照射在光电倍增管上。轉盘遮光器上孔的形状、大小及其相互間的位置应使三种輻射可以周期地投射在光电倍增管上。此时在測量訊号中周期地形成由三个脉冲組成的脉冲組。

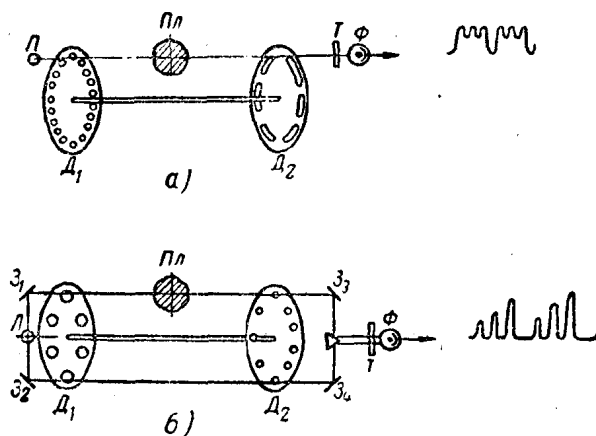


图 2 照射在同一光敏元件上三个光流交換器图①

I—灯泡；II—火焰；T—滤色片；3—反光鏡；Φ—光敏元件；A—小孔圓盘

这类仪表的动态品质取决于对輻射所采用的轉換頻率。

① 当有火焰时，图 2a 系統只能測量两路光流；没有火焰时才能測量比較光源的亮度。參閱图 33e。——校注