

用 中 为 洋

毛泽东

资料 I

温度测量技术与仪表译文集

第二集

一机部热工仪表科学研究所

一九七〇年十二月

75
49

学习有两种态度。一种是教条主义的态度，不管我国情况，适用的和不适用的，一起搬来。这种态度不好。另一种态度，学习的时候用脑筋想一下，学那些和我国情况相适合的东西，即吸取对我们有益的经验，我们需要的是这样一种态度。

毛泽东

目 录

热敏电阻特性曲线的线性化.....	1
高炉热风管道中安全而少延迟的温度测量.....	15
微小表面的温度测量.....	22
数字计温学.....	33
即时温度传感器.....	38
声学测温.....	42
无功的表面测温传感器.....	54
一种称为“坦德耳”的光电物质用于不接触测温.....	55
固体同流管——温度传感器.....	60
电阻温度计特性曲线的测定方法.....	62
温度轮廓测量.....	66
一种时间比例的温度调节.....	69
温度计头子对工业温度计静、动态特性的影响.....	79
日制 DD—300 型扩散炉.....	83
超精密温度调节器.....	84
测量小目标温度的辐射高温计.....	86
采用定向良好的石墨,使感应炉操作到 3400℃.....	97
石墨的高温特性.....	110

热敏电阻特性曲线的线性化

(Linearisierung von Thermistor-Kennlinien, M. Markow, Radio Fernsehen Elektronik 1970, H. 4, 126 ~ 130)

导 言

用串联和并联线性电阻来剪切热敏电阻特性曲线是大家熟悉的并且实践已采用的方法。这种经验所得的特性曲线只有一个小范围的线性，因此在大的测量范围时就必须用校核过的刻度。而且与一只热敏电阻一起联用的电阻所给出的特性曲线如果需要线性范围较大时，也不符测量技术要求的。

这种与温度有关的元件如要应用有效，必须要满足两个条件：

1 所利用的曲线部分要与温度成指數的。

2 电流电压特性在工作范围里是线性的，就是说负载不致引起大的自热。

这些条件能容许充分利用例如二极管和晶体管 p n 过渡的漏电流来作温度测量，只要了解其适当参数。下面将只谈 T N 电阻的应用，它的电阻变化作为温度的函数以方程 (1) 给出的。

$$\frac{R_T}{R_{20}} = e^{\frac{b}{T} - \frac{b}{T_{20}}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

R_T $\triangleq$ 温度 T 时的电阻

R_{20} $\triangleq$ 在 $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ 的冷电阻

b $\triangleq$ 能量常数

T $\triangleq$ 绝对温度 $^\circ\text{K}$

T_{20} $\triangleq$ 在 $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ 的参比温度 $^\circ\text{K}$

对两种电路的线性化条件都示于图 1。

R_1 $\triangleq$ 线性串联电阻

R_1 = 线性并联电阻

R_T = TN 电阻

电阻方程式的标准化

电路的总电阻 (R_{ges}) 根据图 1 以方程式 (2) 来表示。

$$\frac{R_{ges}(T)}{R_1} = 1 + \frac{\frac{R_1}{R_1} \cdot \frac{R_T}{R_1}}{\frac{R_1}{R_1} + \frac{R_T}{R_1}} \dots\dots\dots (2a)$$

$$\frac{R_{ges}(T)}{R_1} = \frac{(1 + \frac{R_T}{R_1}) \frac{R_1}{R_1}}{1 + \frac{R_T}{R_1} + \frac{R_1}{R_1}} \dots\dots\dots (2b)$$

这些方程式可以用下列各值

$$A = e^{b/T - b/T_{20}} = \frac{R_T}{R_{20}}$$

$$B = \frac{R_{20}}{R_1}$$

$$C = \frac{R_1}{R_1}$$

$$AB = \frac{R_T}{R_1}$$

写入串联电阻 R_1 标准化形式 (3) 以便往下计算

$$\frac{R_{ges}(T)}{R_1} = 1 + \frac{ABC}{AB+C} \dots\dots\dots (3a)$$

$$\frac{R_{ges}(T)}{R_1} = \frac{(1+AB)C}{1+AB+C} \dots\dots\dots (3b)$$

线性化条件的推导

用于计算函数值的各种超经验值所用的泰勒级数将用来把方程(3)转化成完全合理的一阶函数。

$$f(T) = f(T_0) + \frac{f'(T_0)}{1!} (T - T_0) + \frac{f''(T_0)}{2!} (T - T_0)^2 + \frac{f'''(T_0)}{3!} (T - T_0)^3 + \dots + R_n$$

级数的展开对称地围绕中心温度 T_0 (图2)。这个图示法具有极大可能的正确度和有利的先决条件,以便用于下面会谈到的桥路里去。

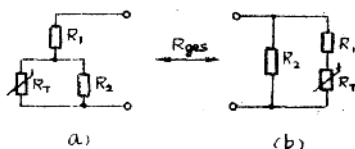


图1 线性化电路

方程(3)的微分按连锁法进行较好,因为温度有关的环节A在方程式(a)和(b)里情形恰等的。

$$A(T) = e^{\frac{b}{T} - \frac{b}{T_0}}$$

$$A'(T) = -\frac{b}{T^2} A \dots\dots\dots (4)$$

$$A''(T) = \frac{b}{T^3} (b + 2T) A \dots\dots\dots (5)$$

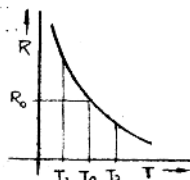


图2 带有级数展开符号和测量范围温度值的温度特性曲线

$$\frac{d(\frac{R_{ges}}{R_1})}{dT} = \frac{BC^2 A'}{(AB+C)^2} \dots\dots\dots (6a)$$

$$\frac{d^2(\frac{R_{ges}}{R_1})}{dT^2} = BC^2 \frac{(AB+C)A'' - 2B(A')^2}{(AB+C)^3} \dots\dots\dots (7a)$$

$$\frac{d(\frac{R_{ges}}{R_1})}{dT} = \frac{BC^2 A'}{(1+AB+C)^2} \dots\dots\dots (6b)$$

$$\frac{d^2(\frac{R_{ges}}{R_1})}{dT^2} = BC^2 \frac{(1+AB+C)A'' - 2B(A')^2}{(1+AB+C)^3} \dots\dots\dots (7b)$$

为使方程(3)转入完全合理的函数形式

$$\frac{R_{lin}(T)}{R_1} = \frac{R_{ges}(T_0)}{R_1} + \frac{R_{ges}'(T_0)}{R_1} (T-T_0) + W_n \dots\dots\dots (8)$$

必须消去级数的较高导数。线性条件是通过把第二个导数消零，同时首先要忽略其他导数的影响。

利用方程(4)和(5)得
$$\frac{d^2(\frac{R_{ges}}{R_1})}{dT^2} = 0$$

$$C = AB \left(\frac{2b}{b+2T} - 1 \right); \quad C = AB \left(\frac{2b}{b+2T} - 1 \right) + 1$$

如用

$$X = \frac{1}{A \left(\frac{2b}{b+2T} - 1 \right)} \quad \text{或} \quad X_0 = \frac{1}{A_0 \left(\frac{2b}{b+2T_0} - 1 \right)} \dots\dots\dots (9)$$

来缩写，则得线性条件下的电阻关系

$$C = \frac{B}{X} \quad C = \frac{B}{X} - 1 \quad \dots\dots\dots (10 a, b)$$

$$B = XC \quad B = X(C+1) \quad \dots\dots\dots (11 a, b)$$

完整写出的方程式 (8)

$$\frac{R_{lin}}{R_1} = 1 + \frac{A_0 BC}{A_0 B + C} - \frac{bA_0 BC^2}{T_0^2 (A_0 B + C)^2} (T - T_0) \quad \dots\dots\dots (12 a)$$

$$R_{lin}(T) = \frac{1 + A_0 BC}{1 + A_0 B + C} - \frac{bA_0 BC^2}{T_0^2 (1 + A_0 B + C)^2} (T - T_0) \quad \dots\dots\dots (12 b)$$

顾到所得结果 (11) 转入 线性温度函数 (13) 的最终形式。

$$\frac{R_{lin}(T)}{R_1} = \frac{1 + A_0 X_0 (1 + C)}{1 + A_0 X_0} - \frac{bCA_0 X_0}{T_0^2 (1 + A_0 X_0)^2} (T - T_0) \quad \dots\dots\dots (13 a)$$

$$\frac{R_{lin}(T)}{R_1} = \frac{(1 + A_0 X_0 (1 + C))C}{(1 + C)(1 + A_0 X_0)} - \frac{bC^2 A_0 X_0}{T_0^2 (1 + C)(1 + A_0 X_0)^2} (T - T_0) \quad \dots\dots (13 b)$$

灵 敏 度

方程 (8) 由一个常数项、中心温度 T_0 时的函数值、一个与装置的灵敏度完全一致的温度关系部分和剩余项 W_n 所组成。

如采用方程 (13) 的结果，则相对灵敏度将是：

$$\frac{\Delta R_{lin}(T)}{R_{ges}(T_0)} = \frac{R_{ges}'(T_0)}{R_{ges}(T_0)} (T - T_0) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{\Delta R_{in}(T)}{R_{ges}(T_0)} = - \frac{b A_0 X_0 C}{T_0^2 (1 + A_0 X_0) (1 + A_0 X_0 (1 + C))} (T - T_0) \quad (15)$$

图1的电路里同样的电阻 R_1 和 R_2 具有同样的灵敏度。这种灵敏度的一致性也能用方程(3)来证明。

$$\frac{R_{ges}(T)}{R_1} = \frac{1 + A X_0 (1 + C)}{1 + A X_0} \quad (16a)$$

$$\frac{R_{ges}(T)}{R_1} = \frac{(1 + A X_0 (1 + C)) C}{(1 + A X_0) (1 + C)} \quad (16b)$$

$$\frac{\Delta R_{ges}(T)}{R_{ges}(T_0)} = 1 - \frac{R_{ges}(T)}{R_{ges}(T_0)}$$

$$\frac{\Delta R_{ges}(T)}{R_{ges}(T_0)} = 1 - \frac{(1 + A X_0 (1 + C)) (1 + A_0 X_0)}{(1 + A_0 X_0 (1 + C)) (1 + A X_0)} \quad (17)$$

经过变换形式后根据方程(11)总电阻的灵敏度可写成

$$\frac{\Delta R_{ges}(T)}{R_{ges}(T_0)} = - \frac{C X_0 (A - A_0)}{(1 + A X_0) (1 + A_0 X_0 (1 + C))} \quad (18)$$

结果证明两种电路的灵敏度是一致的。对方程(16)和(18)感兴趣，因为它们能反映真实温度过程。

推导最大灵敏度可用极限值观察法，因为带C的函数(15)不断增大的。

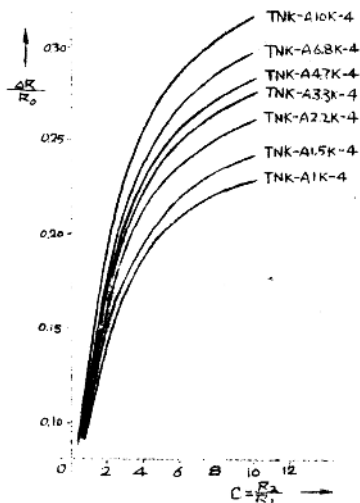
$$\frac{\Delta R_{in}(T)}{R_{ges}(T_0)} = K_1 \frac{C}{1 + A_0 X_0 (1 + C)}$$

$$C \gg A_0 X_0 ; \left(\frac{\Delta R_{in}(T)}{R_{ges}(T_0)} \right)_{\max} = \frac{K_1}{A_0 X_0}$$

$$\left(\frac{\Delta R_{in}(T)}{R_{ges}(T_0)} \right)_{\max} = - \frac{b}{T_0^2 (1 + A_0 X_0)} (T - T_0)$$

..... (19)

图3 各种TNK-A电阻
线性化电路计算的灵敏
度作为依方程
(15)电阻比C的函
数。



灵敏度向着极限值方程(19)努力, 这从图3的曲线上也可看出。如观察TNK-A-4各电阻在1~10千欧姆间的灵敏度则在 $C \leq 2$ 的范围内差别并不大。对较大的C值, 当曲线伸展时, 冷阻 R_{20} 才对灵敏度开始有些影响。

在实践中灵敏度常以电阻变化的形式给定而电阻比C却是个寻求之值。解方程(15)来求C得到结果

$$C = - \frac{\frac{\Delta R}{R_0} T_0^2 (1 + A_0 X_0)^2}{\frac{\Delta R}{R_0} T_0^2 (1 + A_0 X_0) A_0 X_0 + b A_0 X_0 (T - T_0)} \dots (20)$$

通过第三和更高阶以得线性偏差

据线性条件最重要的问题是温度曲线 (16) 从线性曲线 (13) 的偏差。由于两函数在 T_0 点交叉，比较一下灵敏度 (15) 和 (18) 已够，因此线性偏差可定为：

$$\frac{\Delta R_{ges}(T)}{\Delta R_{lin}(T)} = \left(\frac{A}{A_0} - 1 \right) \frac{1 + A_0 X_0}{1 + A X_0} \cdot \frac{T_0^2}{b(T - T_0)} \dots (21)$$

值得注意的是相对线性偏差与线性电阻 R_1 和 R_2 无关，只以 TN 电阻的型号数据采定。这样线性条件 (10) 和 (11) 的应用范围供测量任务就可估定，如果最终范围的误差预先给定的话。

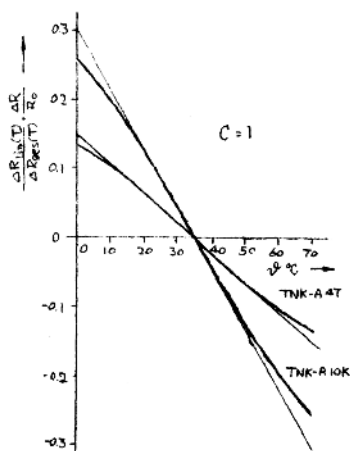
检查函数 (21) 包括它的极限值

$$f(A) = K_1 \frac{A - A_0}{1 + A X_0}$$

$$f(A) = 0 = \frac{K_2}{1 + A X_0}$$

指出，存在一个中断点和 $A \geq A_0$ 函数的不断增长。这意味着热敏电阻的灵敏度愈小，它的特性曲线愈平，从而更接近于线性曲线。两只具有不同能量常数 b 的热敏电阻的线性偏差示于图 4。为了看得更清楚，线性偏差方程 (21) 曾乘以线性灵敏度。线性偏差值通过画入可供比较的线性函数后显得更清楚并且证实了所得结果。方程 (15) 和 (18) 的图示法获得相同的理解。这里利用了方程 (21) 因为它与 C 无关。

图4 计算的线性偏差与线性灵敏度的比较



电路方案的选定

象已指出的，同量的电路（图1）灵敏度和线性偏差都一致的。

为了在已给定的任务情况下，选用最良好的电路方案，得把温度 T_0 时的内阻 R_0 、象在方程（13）里作为不变项包含在内的列出来。这些电阻的商

$$\frac{R_{lin}(T_0)_a}{R_{lin}(T_0)_b} = \frac{1+C}{C} \dots\dots\dots (22)$$

表示出在同样电阻 R_1 和 R_2 、在电路方式 a 和 b 间、电阻 R_0 的差别。

这三个表示值

$$C \ll 1 \quad R_{lin}(T_0)_a \gg R_{lin}(T_0)_b$$

$$C = 1 \quad R_{lin}(T_0)_a = 2R_{lin}(T_0)_b$$

$$C \gg 1 \quad R_{lin}(T_0)_a = R_{lin}(T_0)_b$$

同样象方程（22）上能看出的，电路（图1a）在大多实用场合比电路（图1b）较为高阻的。

特殊场合

在结束理论研究之前还提出两个特殊场合谈一谈。这是关于图 1a 和图 1b 两电路在 $R_2 \rightarrow \infty$ 和 $R_1 = 0$ 的条件下，一只带线性电阻的 T N 电阻不论串联或并联电路都一样（图 5）。

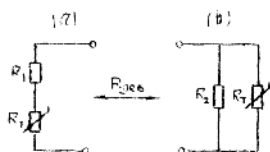


图 5 简化的线性化电路

$$\frac{R_{ges}}{R_1} = 1 + AB; \quad \frac{R_{ges}}{R_2} = \frac{AD}{1 + AD} \quad \dots\dots\dots (23a, b)$$

$$\text{以 } D = \frac{R_{20}}{R_2}$$

$$\frac{b+2T}{b-2T} = AB \quad \frac{b+2T}{b-2T} = AD \quad \dots\dots\dots (24a, b)$$

结果立即写了进去。可以看出直至比阻抗比 B 和 D 是在同样线性化条件下 (24)。由于方程 (23a) 微分后对 B 并无解答，所以线性化条件 (24a) 是从电导算的。这样就可看出，即便简单的串联并联同样适用于线性化的。用所获结果 (23) 和 (24) 能类似地对灵敏度、线性和总电阻进行观察。这些属于次要不予考虑。容易看到的是灵敏度只能是一个固定值，总电阻则与适当的电路方式，串联或并联有关的。

例子

用迄今所得结果设计一个医用测温装置。作为参数给定了一个测量范围 $20 \dots 50^\circ\text{C}$ 附带一个条件，就是在体温范围内精度要最高。线性刻度的实现保证了读数精度不变，并达到了与水银温度计类似的情形。

一只 T N 电阻装在作为微分放大器一部分的惠斯登电桥里。外边温度的补偿是通过装在共同组元里的晶体管。对许多测量问题适用的

电桥回路(图6)利用一只可变电阻分支供掌握测值。

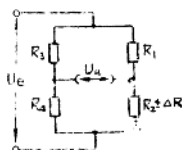


图6 计算电阻变化用的桥路

输出值 U_a 是输入值 Δa 的一个非线性函数。对桥路最佳设计所感兴趣的是在尽大控制范围 δR_2 时的电阻比 a 和线性误差 δU_a 。这种相互关系可用方程(25)表示。

$$a = \frac{2\delta U_a}{\delta R_2 - (2 + \delta R_2)\delta U_a} \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2} = a \quad \frac{\Delta U_a}{U_a} = \delta U_a$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_1} = \Delta a \quad \frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta R_2}{R_1} = \delta R_2$$

这些值的意义和方程(25)的适用性规定符合于文献〔4〕的假定。用 δU_a 作为参数的函数 $a = f(\delta R_2)$ 表示于图7, 并介绍了设计桥路所需的数值。

作为适应标准2(导言一节)的TN电阻和几何尺寸 选用了TNK-4型。

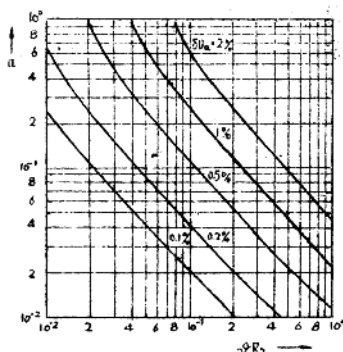


图7 方程(25)的图示法,
 $a = f(\delta R_2)$ δU_a 作为参
数

专对 TNK-4 电阻的选择标准提出下列几点：

- 1 如要线性偏差小，尽量选用低阻值（图 4）；
- 2 阻值 R_0 和电路方案要配合测量任务；
- 3 要注意灵敏度变化与电阻比 C 的关系（图 3）。

通过接入一只零点指示仪和所要求的标准体温 $\vartheta = 37^\circ\text{C}$ 得出一个校核温度 $\vartheta_V = 35^\circ\text{C}$ ，这是和中心温度 ϑ_0 一样的。在 ϑ_0 时把电桥平衡好，控制范围则对称地环绕着这个温度。

实际证明线性条件 (10) 和 (11) 的正确性，需要在大公差基础上测出热敏电阻的各数据。所得各值如下：

$$\text{TNK-A4.7K/20-20-4}$$

$$b = 5.27 \cdot 10^3 \cdot ^\circ\text{K}$$

$$R_{20} = 5.12 \cdot 10^3 \text{ 欧}$$

由于 $C < 1$ 所以用了图 1 b 的电路，以便放大器得到尽可能低阻的源。对以极小温度偏差设计的放大器要得满刻度指示，需要一个温度变化 $\delta R_2 \approx 7.5 \cdot 10^{-2}$ 。为使电桥线性误差不致影响总误差太大，通过图 7 把这些数值固定下来

$$\delta R_2 = 7.5 \cdot 10^{-2} ; a = 10^{-1} ; \delta U_a = 0.35 \%$$

这样得到电桥电阻比为

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} = 10$$

从图 7 也能看到，在电阻比 $a = 1$ 时，误差已能达 2%。

根据这些数据就可计算所有参数。第一个计算过程得：

$$A_0 = 0.4165 \text{ 以 } \frac{\Delta R}{R_0} = 7.5 \cdot 10^{-2} \quad C = 0.485 \quad R_2 = 531 \Omega$$

$$A_0 X_0 = 1.263$$

$$B = 4.415 \quad E_1 = 1160 \Omega$$

$$X_0 = 3.03$$

R_1 根据电阻系列选用下一个整数的 E 12，这样比例就变成：

$$R_1 = 1200 \, \Omega \quad B = 4.266$$

$$R_2 = 490 \, \Omega \quad C = 0.409$$

相对线性偏差计算所得结果为：

$$\vartheta_1 = 20^\circ\text{C}; \quad 1 - \frac{\Delta R_{ges}(T_1)}{\Delta R_{lin}(T_1)} = -5.6\%$$

$$\vartheta_2 = 50^\circ\text{C}; \quad 1 - \frac{\Delta R_{ges}(T_2)}{\Delta R_{lin}(T_2)} = -5.1\%$$

这些值必须通过热敏电阻指数曲线移动，

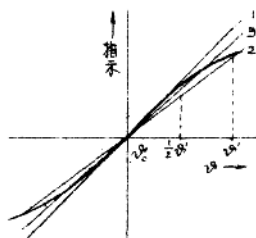


图 8 指示精度与校核温度的关系

对精度的观察必须与灵敏度调整一起来看。一条给定的测量曲线（图 8）并有三条直线通过它，可资说明。

直线与温度曲线的交点给出温度，在这温度上，从测量装置零点平衡出发，在 ϑ_0 处调好灵敏度。

1 直线是切点 ϑ_0 上的正切，用方程 (21) 所算线性偏差是依这

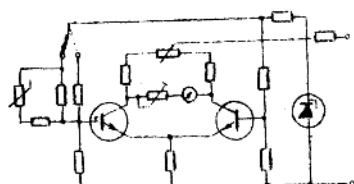


图 9 测量电路

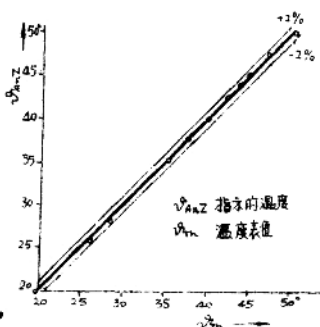


图 10 测量曲线

曲线的。

2 校核工作是在最终范围里进行的。误差远为微小，因为曲率是向外增长的。这图示法是与用图 9 电路所绘曲线（图 10）相符的，这在测量点位置上已可看出。

3. 本场合满足了测量任务的要求。最大精度将在范围

$$-\frac{1}{2} \vartheta' \leq \vartheta \leq \frac{1}{2} \vartheta'$$

里达到，在最终范围内误差重又增大。

最后对采用桥路和有关电路（图 1）的优点提出如下：

1 电桥输出电压 U_a 只含有有效信号。

2 环绕中心温度进行电桥的对称控制，能得到一个比较高的精度。

3. 在 T_0 上进行电桥零点平衡同时就可用来进行校核工作。

在工业电路里采用线性化时，如果没有公差范围较小的热敏电阻可供应用时，建议用文献〔1〕的措施来缩小公差。这样就得补充改变 T_N 电阻在导言一节里条件 1 所提出的偏转，象已举例的。

参 考 文 献

〔1〕 Beuthner, K.: Über die Aufstellung von Diagrammen zur grafischen Ermittlung der Konstanten Zusatzwiderstände von Thermistor-Widerstands kombinationen Hermsdorf Technische Mitteilungen 1967, H. 20, 640~644.

〔2〕 Birr, H.: Vorteile und Grenzen der Temperaturmessung mit Halbleiterwiderständen. Zeitschrift M.S.R. 1962, H. 5, 215-221.

〔3〕 Bronstein, I. N. 等: Taschenbuch der Mathematik, BG Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig 1960.