

文章编号 1004 924X(2004)03 0259-06

# 激光调阻机多档测量误差的软件自适应校正

王志娟, 郭晓光, 孙继凤, 汤建华, 于前洋

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为了减小激光调阻机测量系统的多档测量误差对阻值修调精度的影响, 提出了一种基于有源单臂电桥测量原理自适应地校正激光调阻机多档测量误差的方法。通过测量和标定高精度标准电阻的测量误差, 自适应地获取校正激光调阻机多档测量误差的系列修正值, 进而用系列修正值对所有待修调电阻的阻值测量误差进行校正, 达到进一步减小系统测量误差的目的。实践证明, 在测量硬件电路保证高稳定性、微小波动性测量的前提下, 应用该方法可使测量系统的精度指标达到: 低阻区 ( $R < 100 \Omega$ ) 为  $\pm 0.5\%$ ; 中阻区为  $\pm 0.2\%$ ; 高阻区 ( $R \geq 1 \text{ M}\Omega$ ) 为  $\pm 2\%$ 。

**关键词:** 激光调阻机; 有源单臂电桥; 测量系统; 测量误差; 电阻标定

中图分类号: TN249 文献标识码: A

## Adaptive correction of multi-range measuring errors of laser resistor trimming machine

WANG Zhi-juan, GUO Xiao-guang, SUN Ji-feng, TANG Jia-hua, YU Qian-yang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

**Abstract:** An adaptive correction method based on the measuring theory of Wheatstone bridge is proposed to reduce the effect of the multi-range measuring errors of a laser resistor trimming machine on the resistance adjusting accuracy. The corrected values in series to be used for correction of multi-range measuring errors of laser resistor trimming machine are adaptively obtained by measuring and calibrating the measuring errors of high precision standard resistors, and they can be used to correct all the resistance measuring errors of resistors to be adjusted to further reduce the system measuring errors. It is proved in practice that if a measuring system has good stability and low fluctuation, the precision of measuring system could be  $\pm 0.5\%$  in low resistance ( $R < 100 \Omega$ ) zone;  $\pm 0.2\%$  in middle resistance zone;  $\pm 2\%$  in high resistance ( $R \geq 1 \text{ M}\Omega$ ) zone.

**Key words:** laser resistor trimming machine; Wheatstone bridge; measuring system; measuring error; resistor calibration

### 1 引言<sup>[1-3]</sup>

激光调阻机是高精度修调片式膜电阻阻值的设备, 它利用激光打点切割改变电阻体的导电截

面积, 从而把低于目标阻值的电阻体阻值修调到允许的误差范围内。其调阻范围一般为  $0.1 \Omega \sim 100 \text{ M}\Omega$ , 调阻精度可达到  $0.1\%$ 。

激光调阻机的工作过程为: 激光调阻机通过实时、在线、精确的阻值测量系统检测待修调电阻

收稿日期: 2003-12-15; 修订日期: 2004-01-26.

基金项目: 国家高技术产业化光电子专项项目 (No. 2002055) 和长春市科技攻关计划项目 (No. 02 130G22)

的阻值,精确控制激光在待修调电阻体上的刻蚀长度及方向,因此高精度的阻值测量系统是激光调阻机实现调阻精度的前提。本文介绍的激光调阻机多档测量误差的软件自适应校正方法通过标定高精度标准电阻的测量误差,自适应地获取校正激光调阻机多档测量误差的系列修正值,进而用系列修正值对待修调电阻的阻值测量误差进行校正,达到进一步减小系统测量误差的目的。

## 2 激光调阻机测量系统及其测量误差

### 2.1 激光调阻机测量系统的工作原理<sup>[4]</sup>

激光调阻机测量系统组成及激光控制如图 1 所示。

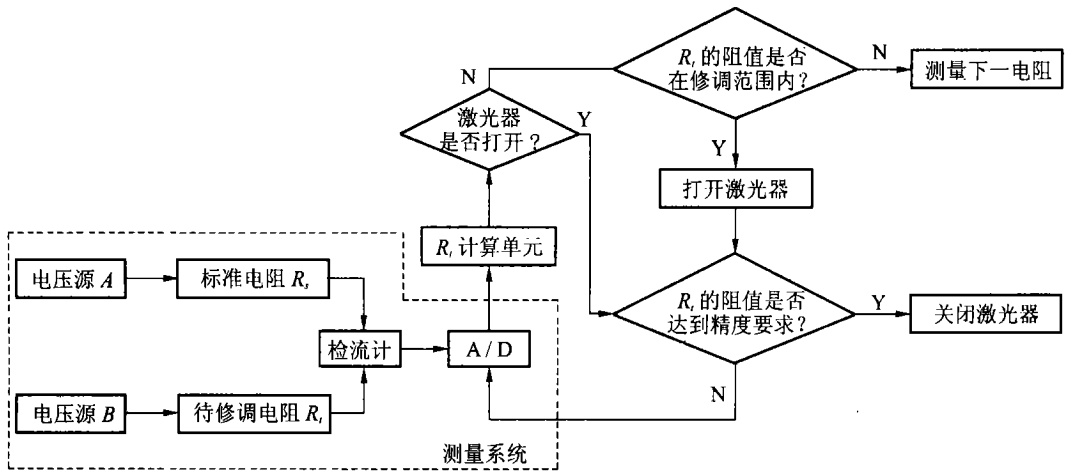


图 1 激光调阻机测量组成及激光控制图

Fig. 1 Schematic diagram of measuring system and laser control

精密电压源  $A$ 、 $B$  分别为标准电阻  $R_s$  和待修调电阻  $R_t$  提供电压,为保证用几只标准电阻即可修调所有系列电阻,要求电压源  $A$ 、 $B$  的比例精密可调,其精度为  $\pm 0.05\%$ 。选用的标准电阻的精度为  $\pm 0.05\%$ ,用一只精密标准电阻配以比例适当的电压源  $A$ 、 $B$  可以修调多种电阻,所以在  $0.1\ \Omega \sim 100\ \text{M}\Omega$  的生产范围内用  $1\ \Omega \sim 100\ \text{M}\Omega$  9 档精密标准电阻即可完成。检流计检测流经标准电阻和待修调电阻的电流差值并将其转换为电压,为精确检测不同的电流值,检流计由  $20\ \mu\text{A} \sim 200\ \text{mA}$  多个不同的量程组成,其精度为  $\pm 0.5\%$  ( $200\ \text{mA}$  量程的精度为  $\pm 1\%$ )。检流计转换所得电压经  $A/D$  变换送至  $R_t$  阻值计算单元。若  $R_t$  的阻值在可修调范围内,打开激光器对  $R_t$  进行刻蚀,否则放弃对该电阻的阻值修调。在打开激光器对  $R_t$  进行刻蚀的同时,实时、在线检测  $R_t$  的阻值,若  $R_t$  的阻值达到精度要求,则关闭激光器,否则继续刻蚀,直到  $R_t$  的阻值达到精度要求。

### 2.2 激光调阻机测量误差分析<sup>[5]</sup>

激光调阻机测量误差指测量系统测得值与真实值之间的差异。测量系统电路的精心设计及选用高性能的器件可保证测量系统的高稳定性和微小波动性,并能一定程度地提高测量精度。实际应用发现,虽精心设计测量系统电路并选用高性能的器件,测量系统的测量误差对测量精度仍有较大影响,进而对调阻精度产生不可忽视的影响。通过测量系统电路的精心设计及选用高性能的器件这两方面的改进来减小测量误差,提高测量精度是有限度的,而且成本高、周期长。所以,为保证调阻精度,需探求其他方法来减小测量误差对测量精度及调阻精度的影响。

激光调阻机测量系统的测量误差主要由电压源误差、标准电阻误差、检流计误差(包括多量程的模拟电路误差、电流/电压转换误差)及  $A/D$  量化误差等造成。其中,电压源误差在保证其高稳定性和微小波动性的前提下主要体现为  $D/A$  的线性度误差。经设计调试,该误差可控制在几十  $\mu\text{V}$  级之内且能保持恒定不变,所以电压源误差可

看作恒定的系统误差; 标准电阻误差、A/D 量化误差及检流计误差中的电流/电压转换误差亦可看作恒定的系统误差。检流计误差中的多量程(20  $\mu$ A ~ 200 mA) 模拟电路误差, 对不同的电流档可看成恒定的系统误差, 但由于多量程检流计共用一个电流/电压转换电路, 因此造成系统最终的测量电压(测量系统测得值, 被送至阻值计算单元)误差在几 mV 到几百 mV 之间变化。由于检流计不同量程的模拟电路误差是不同的, 所以激光调阻机测量误差相应地由多档测量误差组成, 称为激光调阻机多档测量误差。以下通过分析阻值计算, 提出了激光调阻机多档测量误差的软件自适应校正方法。

### 3 阻值计算

在激光调阻机测量系统中, 有源单臂电桥实现对待修调电阻阻值的实时、精确测量, 其工作原理如图 2 所示。图中,  $U_a$ 、 $U_b$  为两路极性相反的独立精密电压源,  $R_s$  为标准电阻,  $R_t$  为待修调电阻, 检流计检测失衡电流  $I_0$  并将其转换为电压, 该电压经 A/D 变换得到的  $U_0$  送至阻值计算单元。

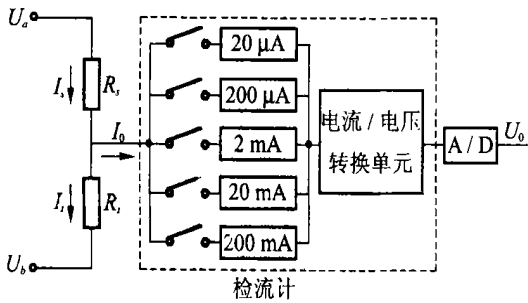


图 2 有源单臂电桥测量原理  
Fig. 2 Basic measuring theory of Wheatstone bridge

由图 2 可得:

$$I_s = U_a/R_s, I_t = U_b/R_t, I_0 = KU_0 (K \text{ 为常数}), \quad (1)$$

$$I_0 = I_s - I_t = \frac{U_a}{R_s} - \frac{U_b}{R_t}, \quad (2)$$

电桥平衡时:  $I_0 = 0, U_0 = 0$ , 由式(2)得:

$$R_t = \frac{U_b}{U_a} R_s, \quad (3)$$

电桥不平衡时:  $I_0 \neq 0, U_0 \neq 0$ , 由式(1), (2)得:

$$R_t = \frac{U_b R_s}{U_a - KU_0 R_s}, \quad (4)$$

在以上分析中,  $U_0$  为理论真实值, 而实际测量系统的测得值为  $U'_0, U'_0 \neq U_0$ 。所以公式(4)在实际应用中为:

$$R_t = \frac{U_b R_s}{U_a - KU'_0 R_s}, \quad (5)$$

由式(4)、(5)可知: 激光调阻机多档测量误差最终体现为测量系统测得的  $U'_0$  与真实值  $U_0$  之间的差异。根据激光调阻机测量系统的原理及结构可知, 多档测量误差的单个组成因素的标定及校正是困难的, 故考虑将它们作为一个整体进行校正。

激光调阻机多档测量误差的校正可用硬件和软件方法实现。硬件方法一般通过调节可变电阻及电容实现测量误差的校正, 由于激光调阻机测量系统的精度及稳定性的需要, 测量系统不能选用可调电阻器, 而通过选用不同阻值的高精度固定电阻校正多档测量误差是比较困难的, 并且由于测量系统多量程检流模拟电路对应一个电流/电压转换电路, 调试过程中会有参数互相制约的现象, 而且在硬件调试后, 系统还会随着环境、温度的变化而变化, 环境适应性差; 用软件方法实现多档测量误差的校正, 调试容易, 环境适应性强。本文介绍一种基于有源单臂电桥测量原理, 通过高精度标准电阻的误差标定, 快速自适应地校正激光调阻机多档测量误差的软件方法。

### 4 激光调阻机多档测量误差的软件自适应校正

#### 4.1 多档测量误差的软件自适应校正原理

激光调阻机多档测量误差的软件自适应校正原理如图 3 示。

将高精度标准电阻  $R_t$  与待修调电阻  $R_t$  并

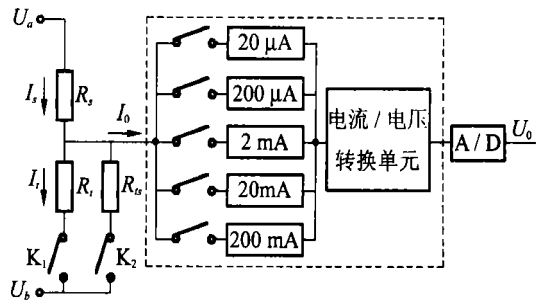


图 3 多档测量误差的自适应校正原理

Fig. 3 Adaptive revising principles of multirange measuring error

联, 实现  $R_t$  对  $R_t$  阻值测量环境的最大限度模拟。激光调阻机正常工作时, 继电器触点  $K_1$  闭合,  $K_2$  打开; 进行激光调阻机多档测量误差的自适应校正时, 继电器触点  $K_2$  闭合,  $K_1$  打开。进行自适应校正时  $U_b = U_0 R_{ts} / R_s$ , 此时电桥理论上应处于平衡状态,  $U_0 = 0$ , 待修调电阻的阻值应为其真实值。实际上, 测量误差的不可避免性导致  $U_0 \neq 0$ , 由公式 (5) 得到的待修调电阻的阻值不等于其真实值。若  $R_{ts}$  的测量值在误差允许范围内, 说明测量误差可忽略, 否则应将该测量误差考虑进待修调电阻  $R_t$  的阻值计算中,  $R_t =$

$$\frac{U_b R_s}{U_a - K R_s (U_0 - \text{测量误差校正})}$$
, 其中, 测量误差校正可通过高精度标准电阻  $R_{ts}$  的误差标定获得。

由于标准电阻  $R_s$  决定检流计量程、电压源及标准电阻的选择, 所以应依据标准电阻, 随时或定期测出激光调阻机的多档测量误差校正, 并将其考虑进相应的待修调电阻的阻值计算中, 从而实现用软件方法自适应地校正激光调阻机的测量误差。

#### 4.2 自适应校正算法的思想

选用某一特定的检流计量程对相应的高精度标准电阻进行测量, 得到电桥平衡时的电压  $U_0$ , 依此计算出  $R_{ts}$  的测量值  $R_{ts0}$ 。若  $R_{ts0}$  的测量误差超出允许值, 则需对平衡电压  $U_0$  进行自适应迭代校正, 即  $R_{ts0} < R_{ts}$  时, 令  $U_0$  增大,  $R_{ts0} > R_{ts}$  时, 令  $U_0$  减小, 直到  $R_{ts0}$  的误差在允许范围内。校正前后的  $U_0$  差值即为该量程下的测量系统的测量误差校正, 将此值考虑进使用该量程的电阻计算中, 即可达到校正该档测量误差的目的。对使用该档的非标准待修调电阻的阻值进行测量时, 由于  $R_t$  与  $U_b$  等比缩放, 由公式 (5) 可知,  $U_0$  应不变, 故用高精度标准电阻标定的误差, 对使用检流计该量程的整个测量段均适用。

激光调阻机测量误差的软件自适应校正过程如图 4 所示, 图中曲线为校正过程中测量误差在测量误差校正函数作用下的变化趋势。若测量误差过大或小于 0, 利用误差校正函数使测量误差绝对值减小, 最终使测量误差趋于 0。

#### 4.3 自适应校正算法的实现

变量说明如下:  $i$ : 标准电阻  $R_s$  数目,  $i = 1$

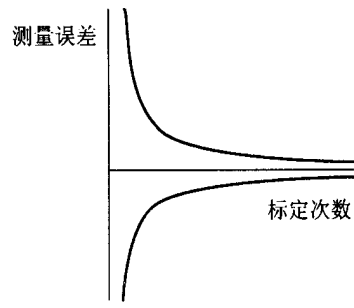


图 4 激光调阻机测量误差与迭代次数关系图

Fig. 4 Relationship between measuring error and standardizing times

, 2, ... 9;  $R_s[i]$ : 第  $i$  个标准电阻阻值,  $R_s[i] < R_s[i+1]$  ( $i > 0$ );  $R_t$ : 待修调电阻阻值;  $R_{ts}[i]$ : 第  $i$  个高精度标准电阻的真实阻值;  $R_{ts0}[i]$ :  $R_{ts}[i]$  的实测值;  $\text{measure\_sys\_err}[i]$ : 第  $i$  档测量误差校正, 初始设定  $\text{measure\_sys\_err}[i] = 0$  mV;  $R_{ts\_err}[i]$ :  $R_{ts}[i]$  的测量误差;  $\text{Err}[i]$ :  $R_{ts}[i]$  的测量误差允许值。测量误差校正函数选用分段函数, 不同的测量误差选用不同的校正迭代步长,  $\text{err}_j$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) 为测量误差值;  $\text{step}_k$  ( $k = 1, 2, \dots, 8$ ) 为校正迭代步长;  $\text{err}_1 < \text{err}_2 < \text{err}_3 < \text{err}_4$ ;  $\text{step}_i \neq \text{step}(i+4)$ ,  $1 \leq i \leq 4$ ; Num: 标定迭代次数上限, 限定标定次数, 避免系统不收敛, 使得程序陷入死循环。

/\* \* \* 激光调阻机多档测量误差校正值的获取 \* \* \* /

for( $i = 1$ ;  $i < 10$ ;  $i++$ )

{ for(int num = 0; num < Num; num++)  
{ Measure:

$$R_{ts0}[i] = \frac{U_b R_s[i]}{U_a - K R_s[i] (U_0 - \text{measure\_sys\_err}[i])}$$

$$R_{ts\_err}[i] = \frac{R_{ts0}[i] - R_{ts}[i]}{R_{ts}[i]} \times 100\%$$

if( $R_{ts\_err}[i] > \text{err}[i]$ )

{ if( $R_{ts\_err}[i] < \text{err}_1$ )

$\text{measure\_sys\_err}[i] += \text{step}_1$ ; goto Measure;

else if( $R_{ts\_err}[i] < \text{err}_2$ )

$\text{measure\_sys\_err}[i] += \text{step}_2$ ; goto Measure;

else if( $R_{ts\_err}[i] < \text{err}_3$ )

$\text{measure\_sys\_err}[i] += \text{step}_3$ ; goto Measure;

else

$\text{measure\_sys\_err}[i] += \text{step}_4$ ; goto Measure;

```

}
else if( Rt_s_err < 0)
{ if( Rt_s_err > - err1)
measure_sys_err[ i ] - = step5; goto Measure;
else if( Rt_s_err > - err2)
measure_sys_err[ i ] - = step6; goto Measure;
else if( Rt_s_err > - err3)
measure_sys_err[ i ] - = step7; goto Measure;
else
measure_sys_err[ i ] - = step8; goto Measure;
}
else break;
}
}
/* * * 激光调阻机多档测量误差的校正 * * * /
if( Rs[ i- 1 ] < Rt < Rs[ i ])
Rt =  $\frac{U_b R_s[ i ]}{U_a - K R_s[ i ] ( U'_{0-} - \text{measure\_sys\_err}[ i ] )}$ 

```

表 1 多档测量误差校正前后的测量误差

Tab. 1 Measuring errors before & after revising multirange measuring errors

高精度 标准电阻 ( ±0.05% )	校正前 测量误差 ( % )	校正后测量 误差 ( 立即 ) ( % )	校正后测量误差 ( 一段时间后 ) ( % )
1 Ω	- 0.004	0.03	0.21
10 Ω	5.665	0.139	0.47
100 Ω	28.69	- 0.0172	0.18
1 kΩ	0.17	0.118	0.19
10 kΩ	0.497	0.03	0.018
100 kΩ	0.16	0.147	0.18
1 MΩ	1.56	0.192	0.19
10 MΩ	6.52	0.622	1.25
100 MΩ	57.66	- 0.849	1.633

测量误差校正函数的选取不是惟一的, 还可选取  $a/x$ 、 $a/x^2$  ( $a$ 、 $b$  为常数,  $x$  为迭代次数) 等作为测量误差校正函数, 它们的区别仅为在获取激光调阻机多档测量误差校正时, 测量误差的收敛速度不同。正负方向的测量误差的迭代步长不同, 可避免标定过程中出现等幅振荡。

为保证测量系统的测量精度, 当环境、温度发生变化或高精度标准电阻的定期检测显示测量误差超出允许范围, 则需校正激光调阻机的多档测量误差。

### 5 应用

激光调阻机多档测量误差校正前后的测量误差比较见表 1。校正后的测量精度优于校正前的测量精度, 且校正后的测量误差随时间有微小变化(见表 1 第 4 列数据)。

### 6 结论

激光调阻机多档测量误差的自适应校正方法原理简单, 实现容易, 环境适应性强。应用长春光华微电子设备工程有限公司生产的激光调阻机后, 在测量硬件电路保证高稳定性、微小波动性测量的前提下, 测量系统的测量精度指标可达到: 低阻区 ( $R < 100 \Omega$ ):  $\pm 0.5\%_q$ , 中阻区:  $\pm 0.2\%_q$ , 高阻区 ( $R \geq 1M\Omega$ ):  $\pm 2\%_o$ 。

### 参考文献:

[ 1 ] 王家金. 激光加工技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 1992.  
WANG J J. *Laser processing technology* [M]. Beijing: China Metric Press, 1992. ( in Chinese )

[ 2 ] CABLE A L. Technology review of high speed, thick film laser trimming[J]. *SPIE*, 1986, 611: 2 7.

[ 3 ] RAMIREZ J. Characterization, evaluation and comparison of laser trimmed film resistors[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1987, SG-22(6): 1177-1189.

[ 4 ] 黄永平. 激光调阻机快速实时在线检测系统的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002.  
HUANG Y P. *Study and design on real-time online measurement and control system of laser resistor trim machine* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002. ( in Chinese )

[ 5 ] 吴家骐, 杨东英, 钱晋武. 空间曲率检测中的标定误差分析及标定方法[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(1): 166-170.

WU J Q, YANG D Y, QIAN J W. Calibration error analysis and way of calibration for spatial curvature measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(1): 166-170. (in Chinese)

[6] 黄永平等. 有源单臂电桥在激光调阻中的测量原理及实现[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(4): 394-397.

HUANG Y P. Measurement theory and implementation method of source Wheatstone bridge in laser high speed resistance trim [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(4): 394-397. (in Chinese)

作者简介: 王志娟(1977-), 女, 青海西宁人, 2000年毕业于吉林大学机械科学与工程学院, 现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生, 主要研究方向为激光加工、智能故障诊断等。