

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.03.009

# 一种基于数字电位器的自适应变送器 电流平均值测量电路设计

徐敬成<sup>1</sup>, 凌云<sup>1,2</sup>

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007;  
2. 电传动控制与智能装备湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 针对多点测量技术中普遍存在的单个参数测量变送过程中增减变送器数量导致系统需要重新调整的问题, 设计了一种自适应变送器电流平均值测量电路。该电路能自动筛选在有效范围内的输入电流通道, 通过控制各数字电位器将无效电流输入通道断开, 并调整各有效输入电流通道的电流分流比例, 将分流电流相加得到多个变送器电流的平均值。实验结果表明, 该电路具有方便灵活、响应快速、实用性强等优点。

**关键词:** 多点测量; 变送器; 数字电位器; 平均值

中图分类号: TM461.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)03-0048-05

## Design of Current Average Measurement Circuit of Self-Adaptive Transmitters Based on the Digital Potentiometer

XU Jingcheng<sup>1</sup>, LING Yun<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;  
2. Key Laboratory for Electric Drive Control and Intelligent Equipment of Hunan Province, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In view of the problem commonly found in the multi-point measurement process where the system needs to be readjusted due to the increase or decrease of transmitter number in the process of single parameter measurement, a self-adaptive transmitter current average measurement circuit has thus been designed. The circuit can automatically filter the input currents within the effective range, control the various digital potentiometers to disconnect the inactive input currents, adjust the shunt ratio of the active ones, and obtain the average value by adding these currents together. The experimental results show that this design is characterized with such advantages as convenience, flexibility, quick response and great practicability.

**Keywords:** multi-point measurement; transmitter; digital potentiometer; average value

## 0 引言

在现有的变送器信号处理技术背景下, 对于同一

参数的测量(比如设备多点平均温度的测量<sup>[1-4])</sup>, 其结果往往是多点测量值的平均值<sup>[5-8]</sup>。目前, 多点

收稿日期: 2017-12-06

基金项目: 湖南省教育厅基金资助项目(16C0473)

作者简介: 徐敬成(1991-), 男, 江苏南京人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力电子与电力传动,  
E-mail: 957944214@qq.com

通信作者: 凌云(1965-), 男, 湖南平江人, 湖南工业大学教授, 主要从事复杂工业过程建模与优化控制, 单片机及嵌入式系统应用等方面的教学与研究, E-mail: l\_yun888@126.com

平均值测量方面的研究成果,主要集中在通过优化资源配置以降低系统成本和通过改进测量方法以提高测量精度两个方面。比如采用高集成度和高精度的变送器<sup>[9]</sup>、优化变送器之间或者变送器与处理器之间的连接方式<sup>[10]</sup>、简化程序的编写<sup>[11]</sup>、改善在恶劣条件下整体测量滞后的难题、节省处理器的接口资源以降低系统整体设计成本等,这些成果的采用极大地促进了多点测量技术的发展。然而,当单个参数测量系统需要增加或者减少参数测量变送器的数量时,多点平均值测量系统将会面临需要重新设计的情况。而且主流的多点平均值计算方法往往是采用总线技术将各个变送器采集的数据送入独立的数据处理器进行集中运算,这样不仅会增加中间模块的成本,而且会增大系统设计的复杂程度,同时也会影响信号的处理速度。

针对上述问题,本文设计了一种自适应变送器电流平均值测量电路。首先,介绍了数字电位器MCP41100的结构特性;然后结合电路设计给出具体的算法,并提供了相关参数计算公式以及增减支路数量的验算方法;接下来用三路输入的实验数据进行了验证,并简述了系统的控制过程。该方法已经申请了国家发明专利<sup>[12-13]</sup>,为多点平均值测量技术提供了一种有效的实施方案。

## 1 MCP41100 数字电位器

MCP41XXX系列器件是具有256个抽头的数字电位器,该器件包含电阻阵列、滑动开关、控制单元和16位存储器,被广泛地应用于仪器仪表和精密电压或电流控制系统中。本研究选用MCP41100低功耗256抽头数字电位器。

数字电位器MCP41100的内部简化电路如图1所示。

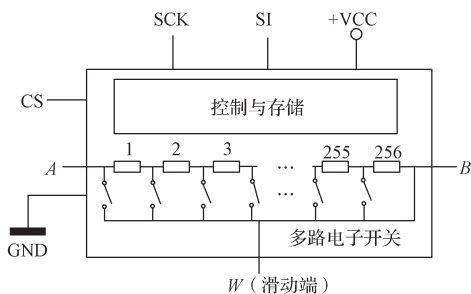


图1 MCP41100 内部简化电路图

Fig. 1 Internal simplified circuit diagram of MCP41100

图1中CS为片选控制端,SCK为时钟信号端,SI为数据信号端。将256个阻值相同的电阻串联,每只电阻的两端经过一个由MOS管构成的模拟开关

相连,作为数字电位器的抽头。这种模拟开关等效于单刀单掷开关,且在数字信号的控制下每次只能有一个模拟开关闭合,从而可以调整接入外电路的串联电阻数量。数字电位器MCP41100同时还具有关断电路的功能。

## 2 电流平均值测量电路设计

### 2.1 测量原理

本研究设计的电流平均值测量电路如图2所示,电路中有 $n$ 条数字电位器分流支路 $1\sim n$ ,其中 $n$ 为大于等于2的整数。 $I_1\sim I_n$ 为输入电流; $V_1\sim V_n$ 为取样电压; $M_1\sim M_n$ 为 $n$ 个结构与参数均相同的数字电位器,其内部电阻由可调电阻 $R_w$ 和抽头电阻 $R_0$ 构成; $R_i$ 为取样电阻,其中 $i$ 为整数,且 $1\leq i\leq n$ (即 $n$ 个输入端中的有效输入端); $R_p$ 为基准电阻。电阻 $R_a$ 的作用是降低此时变送电流输入端的输入阻抗。由于变送电流输入端为虚地端,所以电阻 $R_a$ 上没有电流流过。

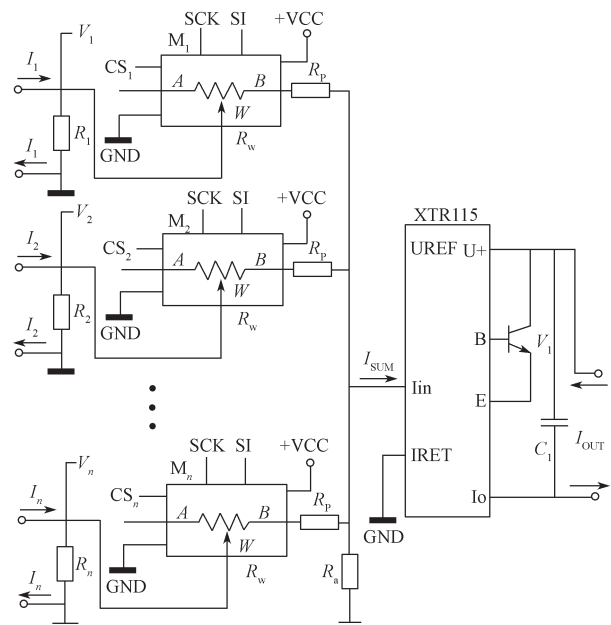


图2 电流平均值测量电路

Fig. 2 Average current measurement circuit

输入端流入检测电流后将输入电流转换成取样电压( $V/I$ 转换),进而判断在 $1\sim n$ 条支路中哪些支路电流处于 $4\sim 20$  mA的有效范围内。假设有 $p$ 条支路在此范围内, $p$ 为 $1\sim n$ 间的整数,则不在此范围内的 $n-p$ 条支路由数字电位器断开,不对其输入电流进行分流。

调整相应的数字电位器阻值,使符合要求的 $p$ 条支路通过数字电位器后的分流比例为 $1:(p-k)$ ,其中 $k$ 为电流变送放大倍数,分流输出后由于变送电流输

入端为虚地端,即与公共接地点等电位,所以各条数字电位器分流支路的分流电流在变送电流输入端相加后直接输出,通过电流放大变送器进行电流放大,从而实现了电流平均值的计算。

在  $n$  个电流输入端中,可选择其中的任意端接入或者在原有输入端基础上增减输入端数量。在已经接入的变送器电流环路中,当有  $p$  个电流输入端的输入电流处于正常值  $4\sim 20$  mA 范围内时,电流平均值测量电路具有自动判断有效输入和自动调整分流比例的功能,电流变送电路输出的平均值电流  $I_{OUT}$  为该  $p$  个电流输入端输入电流的平均值。

## 2.2 $V/I$ 转换方法

输入电流  $I_i$  流经取样电阻  $R_i$  转换为取样电压  $V_i$ ,单片机控制单元根据取样电压  $V_1\sim V_n$  的大小,确定输入电流  $I_1\sim I_n$  中,哪些输入电流处于  $4\sim 20$  mA 的有效范围之内。不在该范围内的输入支路,通过数字电位器断开。

具体  $V/I$  转换方法如下:

1) 若电阻电路中数字电位器  $M_i$  被断开,则

$$I_i = V_i / R_i; \quad (1)$$

2) 若电阻电路中数字电位器  $M_i$  没有被断开,则

$$I_i = (V_i \cdot k \cdot p) / [(k \cdot p - 1) \cdot R_i]。 \quad (2)$$

以上两类  $V/I$  转换适用于自适应实时电流检测。

## 2.3 数字电位器的分流比例计算

在  $n$  个电流输入端中,有  $p$  个输入端接入了变送器电流环路且输入电流在  $4\sim 20$  mA 范围之内,设  $I_{AVE}$  为  $p$  个数字电位器输入电流的平均值,由于分流输出端电流  $I_{SUM}$  为该  $p$  个输入电流值之和,则

$$I_{AVE} = I_{SUM} / p。 \quad (3)$$

电流变送器 XTR115 为电流放大变送器,用于放大微弱的信号电流。分流输出端电流  $I_{SUM}$  经 XTR115 放大  $k$  倍后再变送输出平均值电流  $I_{OUT}$ ,即

$$I_{OUT} = k \cdot I_{SUM}。 \quad (4)$$

由式(3)和(4)可得,数字电位器输入电流的平均值  $I_{AVE}$  与输出平均值电流  $I_{OUT}$  的关系为

$$I_{AVE} = I_{OUT} / (p \cdot k)。 \quad (5)$$

由此可见,数字电位器分流支路的分流比例为  $1:(p \cdot k)$ 。

当在  $n$  个电流输入端中没有输入端输入电流在  $4\sim 20$  mA 范围之内时,单片机控制单元控制所有的数字电位器  $U_1\sim U_n$  断开电阻电路,即所有数字电位器分流支路全部开路,  $I_{SUM}$  等于 0。

## 2.4 $R_i$ 和 $R_p$ 的阻值计算

设取样电阻  $R_i$  的阻值都为固定值  $R$ ,  $R$  的取值为

$50\sim 200 \Omega$ 。数字电位器分流支路  $1\sim n$  的结构与参数一致,根据数字电位器分流支路的分流比例列出电阻参数公式,为

$$\begin{cases} R_i = R, \\ R_w + R_0 + R_p = (p \cdot k - 1) \cdot R。 \end{cases} \quad (6)$$

本研究中电流变送器的放大倍数  $k=100$ 。

选择取样电阻  $R_i$  的阻值时,需要兼顾数字电位器的阻值和抽头数。本文中数字电位器  $M_1\sim M_n$  全部选择 MCP41100,其阻值为  $100 \text{ k}\Omega$ ,有 256 个抽头,则单位抽头的阻值变化为  $390.625 \Omega$ ,抽头电阻  $R_0$  的阻值为  $125 \Omega$ 。下面重点讨论数字电位器的抽头数对取样电阻  $R$  的影响。

1) 假设选择数字电位器的抽头初始位置  $m=0$ ,即电阻  $R_w=0$  时,由式(6)可得

$$\begin{cases} R_p + R_0 = 99R, \\ R_w = (p-1) \cdot 100 \cdot R。 \end{cases} \quad (7)$$

即  $R_w$  随着  $p$  的值以  $100 \cdot R$  的步进值变化。

选择  $100 \cdot R$  的步进值为数字电位器抽头数相差为  $x$  的阻值,即数字电位器以  $x$  个抽头位置步进,  $x$  为  $1\sim 256$  之间的整数值,通常取  $8\sim 32$  之间的整数,则数字电位器抽头位置  $m$  与  $p$  的关系为

$$m = (p-1) \cdot x, \quad (8)$$

取样电阻  $R_i$  的阻值为

$$R_i = 390.625 \cdot x / 100 = 3.90625x, \quad (9)$$

基准电阻  $R_p$  的阻值为

$$R_p = 99 \cdot R - R_0 = 386.71875x - 125 \Omega。 \quad (10)$$

2) 当选择数字电位器的抽头初始位置为  $m=q$ ,且  $q$  为  $(0, x)$  中的固定整数值时,有

$$\begin{cases} R_w = (p-1) \cdot 100 \cdot R + 390.625 \cdot q \Omega, \\ m = (p-1) \cdot x + q, \\ R_p = 386.71875x - 125 \Omega - 390.625 \cdot q \Omega。 \end{cases} \quad (11)$$

显然,根据上述公式,可以在一定范围内灵活设置或调整相关电阻的参数值。

## 2.5 增加或减少支路数验算

假设此时有  $p$  条支路电流在合理范围内被并联接入电路,则

$$(R_w + R_0 + R_p) / R_i = p \cdot k - 1, \quad (12)$$

$$I_{OUT} = k \cdot I_{SUM} = k \cdot I_{\Sigma} / (p \cdot k) = I_{\Sigma} / p。 \quad (13)$$

此时  $I_{OUT}$  的值为  $p$  条支路电流的平均值。

若在此基础上增加了  $y$  条支路电流,  $y$  为  $-p+1$  到最大输入端子数之间的整数,则数字电位器增加的阻值为  $y \cdot 100 \cdot R$  (即抽头位置移动了  $y \cdot 16$  的距离),则有

$$(R_w + R_0 + R_p)/R_i = (p+y)k - 1, \quad (14)$$

$$I_{OUT} = k \cdot I_{SUM} = k \cdot I_{\Sigma} / [(p+y) \cdot k] = I_{\Sigma} / (p+y). \quad (15)$$

此时  $I_{OUT}$  的值调整为  $p+y$  条支路电流的平均值。

由此可见, 该电路可以根据实际输入的有效工作的变送器电流支路数的增减, 采用数字电位器自动调整各数字电位器分流支路的分流比例。

另外, 需要说明的是, 本文为了论述方便, 将每条支路的固定电阻做了统一规定, 读者还可以根据实际情况自行构建更为复杂的设计方案, 对此本文不再详细论述。

### 3 控制流程

图2中的数字电位器用于通断输入支路和控制其内部电阻值的大小, 该控制由单片机实现, 控制系统框图如图3所示。

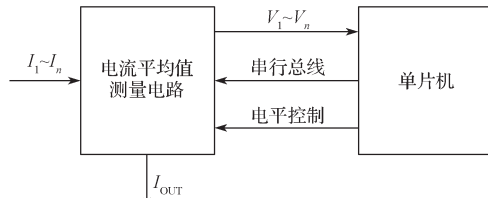


图3 控制系统框图

Fig. 3 Control system block diagram

图3中, 单片机主要用来检测并判断输入电流值是否在给定范围内, 以及调整数字电位器的阻值, 其控制流程如图4所示。

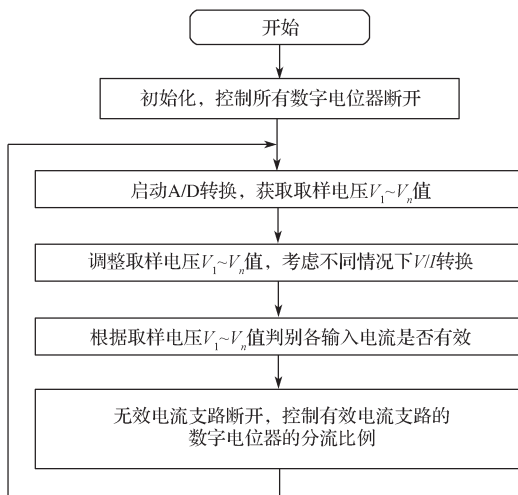


图4 单片机控制流程图

Fig. 4 Flow chart of single chip computer control

### 4 实验验证

针对上述电路设计原理, 本文制作了一个三路输入的电流平均值测量电路来进行验证。单片机选择了MSP430G2553开发板, 电流变送器选择XTR115,

其理论放大倍数为  $k=100$ , 实验中测得其实际放大倍数为 99.2。

采用3个数字电位器MCP41100, 分别编号为  $M_1$ 、 $M_2$  和  $M_3$ , 选择  $100 \cdot R$  的步进值为相差16个抽头的阻值, 抽头初始位置  $m=0$ , 其内部电阻由可调电阻  $R_w$  和抽头电阻  $R_0$  构成, 实际测得  $M_1 \sim M_3$  的抽头电阻  $R_0$  分别为 124.8, 123.2, 124.1  $\Omega$ 。

为了增加测量数据的精确性,  $R_i$  和  $R_p$  均采用精度为1%的金属膜电阻, 另外准备了电阻率为  $0.48 \pm 0.03$  的康铜6J40来调整电阻值。

理论上取样电阻  $R_i$  的阻值为 62.5  $\Omega$ , 实验中  $R_i$  由 62  $\Omega$  的金属膜电阻串联一段 0.5  $\Omega$  的康铜丝构成。

根据式(10)计算得对应的三路基准电阻  $R_p$  分别为 6 012.7, 6 014.3, 6 013.4  $\Omega$ , 实验中  $R_p$  均由 5.9, 11  $\Omega$  金属膜电阻和康铜丝电阻串联构成。

三路有效输入实验结果见表1。其中  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  分别为3个输入端子的输入电流,  $I_A$  为其平均值,  $I_{OUT}$  为电流平均值测量电路的输出值。

表1 三路有效输入实验结果

Table 1 Experimental results of three-way effective inputs mA

$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_A$	$I_{OUT}$
6.1	6.3	5.9	6.1	6.1
10.4	10.7	10.1	10.4	10.4
15.2	15.5	14.9	15.2	15.2
18.4	18.9	18.1	18.5	18.4

当设置  $I_3$  电流为 1 mA 时, 由于不在 4~20 mA 范围内, 此时单片机控制数字电位器断开第3条输入支路, 只有  $I_1$  和  $I_2$  二路有效输入电流, 二路有效输入实验结果见表2。

表2 二路有效输入实验结果

Table 2 Experimental results of two-way effective inputs mA

$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_A$	$I_{OUT}$
6.1	6.3	1	6.2	6.2
10.4	10.7	1	7.0	7.0
15.2	15.5	1	15.4	15.3
18.4	18.9	1	12.4	12.4

由表2所示实验数据可以看出, 该电路的仿真结果与平均值计算结果基本一致, 因此该电路设计方案可行, 且数据准确, 是一种较为理想的自适应多点平均值测量方案。

### 5 结语

所提出的电流平均值测量电路能够判断输入电流大小是否在仪器仪表信号电流(4~20 mA)的有效范围之内, 并且能够直接得出多路有效输入电流的平均值, 输入端子数量可以是最大输入端子数之内的任

意值,且可以任意选择输入端接入或者增减输入端子数量输入。电路具有方便灵活、响应快速、实用性强等优点,适用于多点测量平均值领域<sup>[14]</sup>输出巡回测量和监控的场合。

#### 参考文献:

- [1] 马梅,胡经国.基于AVR的多点温度监控系统设计[J].中国农机化学报,2013,34(2):117-120.  
MA Mei, HU Jingguo. Design of the Multi-Point Temperature Monitoring System Based on AVR[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(2): 117-120.
- [2] 孙毅刚,何进,李岐.基于LabVIEW的多通道温度监测系统的设计[J].现代电子技术,2017,40(8):183-186.  
SUN Yigang, HE Jin, LI Qi. Design of Multi-Channel Temperature Monitoring System Based on LabVIEW[J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(8): 183-186.
- [3] 周小凤,肖俊生,韩兴军.便携式智能多点温差测量仪的研究[J].仪表技术与传感器,2013(12):27-28.  
ZHOU Xiaofeng, XIAO Junsheng, HAN Xingjun. Research of Portable Intelligent Multipoint Temperature Difference Measurement Instrument[J]. Instrument Technique and Sensor, 2013(12): 27-28.
- [4] 唐菲.无线多点测温系统的设计与实现[D].南京:南京理工大学,2014.  
TANG Fei. The Design and Implementation of Wireless Multi-Point Temperature Measurement System[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [5] 黄擎,王志远.基于多点电流测量的输电线路故障定位方法的研究与分析[J].电气技术,2016,17(1):104-107.  
HUANG Qing, WANG Zhiyuan. Research and Analysis of Fault Location Method for Transmission Line Based on Multi Point Current Measurement[J]. Electrical Technology, 2016, 17(1): 104-107.
- [6] 范新桥.基于多点电流测量的输电线路故障定位方法研究[D].北京:华北电力大学,2012.  
FAN Xinqiao. Study on Fault Location Schemes for Transmission Lines Based on Multiple Current Measurements[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [7] GAO Y, RAMIREZ B C, HOFF S J. Omnidirectional Thermal Anemometer for Low Airspeed and Multi-Point Measurement Applications[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 439-450.
- [8] MAS D, FERRER B, ACEVEDO P, et al. Methods and Algorithms for Video-Based Multi-Point Frequency Measuring and Mapping[J]. Measurement, 2016, 85: 164-174.
- [9] 方景辉,温镇.分布式光伏就地自适应电压控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(23):49-55.  
FANG Jinghui, WEN Zhen. Research on Local Adaptive Voltage Control Strategy Based on Distributed PV[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 49-55.
- [10] FULVIO G D, FRONTONI E, MANCINI A, et al. Multi-Point Stereovision System for Contactless Dimensional Measurements[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2016, 81(2): 273-284.
- [11] 李浩,黄蕾,李向军.基于多点测量的传感器稀疏阵列设计方法研究[J].仪表技术与传感器,2016(3):52-54.  
LI Hao, HUANG Lei, LI Xiangjun. Research on Multi-Point Measurement Based Sparse Sensor Array Design Method[J]. Instrument Technique and Sensor, 2016(3): 52-54.
- [12] 凌云,孔玲爽,袁川来,等.一种自适应变送器电流平均值装置及控制方法:CN201510001154.7[P].2015-06-17.  
LING Yun, KONG Lingshuang, YUAN Chuanlai, et al. Design of an Self-Adaptation Transmitter Current Average Value Device and Its Control Method: CN201510001154.7[P]. 2015-06-17.
- [13] 凌云,陈刚,曾红兵.一种自适应变送器电流平均值装置:CN201520001898.4[P].2015-05-20.  
LING Yun, CHEN Gang, ZENG Hongbing. Design of an Adaptive Transmitter Current Average Value Device: CN201520001898.4[P]. 2015-05-20.
- [14] 林娜,臧倩,安佰福.实用新型多点测量仪[J].内燃机与配件,2012(12):17.  
LIN Na, ZANG Qian, AN Baifu. Utility Model Multi-Point Measuring Instrument[J]. Internal Combustion Engine and Parts, 2012(12): 17.

(责任编辑:廖友媛)