DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)01-0016-05.

工控系统电流输出模块输出值修正研究

姚沛嵩，张利军，徐东升，刘 洁，吴纯治

（中国人民解放军63796部队，四川 西昌 615000）

摘 要：为解决施工现场对工控系统模拟量回路的修正问题，研究使用1张定制的EXCEL表格、1台过程检验仪和1台带有WINCC人机界面的上位机完成工业控制系统电流输出模块输出值修正的方法和流程。首先，搭建专用实验平台，仿真工控系统中直流电流信号工作电路；然后，测定电流输出模块的输出死区，记录电流输出模块输出值和执行器目标输出电流值的对应关系；最后，将计算过程输入到EXCEL表格中，求解验证修正公式。实验结果表明，根据执行器目标输出电流值修正计算出的电流输出模块输出值，能使执行器达到更高的执行精度，比较方便快捷地解决了现场调试阶段电流输出模块输出值的分析和修正。

关键词：电流输出；模拟量输出模块；函数关系；工业控制系统

中图分类号：TP273 文献标识码：A 文章编号：1003−7241(2025)01−0016−05

Research on Output Value Correction of Current Output Module in Industrial Control System

YAO Pei-song, ZHANG Li-jun, XU Dong-sheng, LIU Jie, WU Chun-zhi

(Unit 63796 of the PLA, Xichang 615000 China)

Abstract: In order to solve the problem of correcting the analog loop of the industrial control system in the construction site, the method and process of correcting the output value of the current output module of the industrial control system using a customized excel table, a process tester and a host computer with WINCC human-computer interface are studied. Firstly, a special experimental platform is built to simulate the working circuit of DC current signal in the industrial control system. Then, the output dead zone of the current output module is measured, and the corresponding relationship between the output value of the current output module and the target output current value of the actuator is recorded. Finally, the calculation process is input into the excel table, and the verification correction formula is solved. The experimental results show that the calculated output value of the current output module is corrected according to the target output current value of the actuator, which can make the actuator achieve higher execution accuracy, and more conveniently and quickly solve the analysis and correction of the output value of the current output module in the field commissioning stage.

Keywords: current output; analog output module; function relationship; industrial control system

0 引言

工控系统中程序计算得到的数值转换为执行器的实际动作，要经过电流输出模块(简称为AO模块)和执行器的转换。转换过程必然导致产生传递误差。只有保证执行器中的电流值准确达到目标值，才能确保执行器输出的动作达到最高精度。本文不考虑执行器的动作输出误差，假设执行器能毫无偏差地将AO模块输出的电流准确转换为执行动作，研究施工现场对AO模块输出电流的校正，以便在编程时输出更合理的电流模块输出值，进而提高执行器的动作精度。进一步地若要把执行器的动作误差也考虑到修正过程中，则只需建立AO模块输出值和执行器动作之间的映射关系，并配置专用的执行器动作测量设备，求解过程与本文相同。

收稿日期：2023-09-07

已有不少专家学者对AO模块的输出值与执行器回路中实际的电流值之间的函数关系进行过分析与研究。文献[1]以西门子S7−300 PLC为例，总结了工程上常用的调用西门子编程软件自带的FC2功能模块进行电流输出控制的方法。文献[2]提出了在模数及数模转换设计中提高精度的方法。文献[3]对模拟量控制技术进行了研究，并对模拟量模块输出值的处理进行了公式推导，但并未给出公式在实际工程中的验证效果。文献[4]提出基于S7−300 PLC模拟量的处理需要输出限幅、输出量格式化和输出量标准化等操作，但并未就工业现场提高精度给出详细指导。文献[5]和文献[6]采用分段处理的策略进行了研究：文献[5]采用四次分段曲线拟合的算法对温度的采集数据进行校正，利用MATLAB软件求得四条最小二乘法拟合曲线，并通过数据表格进行比对，使精度控制得到优化；文献[6]给出了分段线性化和分段变斜率2种定标

方法的处理思路，提高了非线性模拟量检测的精度和局部分辨率。这两种相似的分段处理方法在编程实现上稍复杂，不太适合工业控制现场的快速应用。文献[7]依据《GB/T 4213−2008气动调节阀》的要求设计了一种测量调节阀各类误差的测试装置，满足了出厂检验的需要，但并未提出如何在施工现场进行AO模块的输出值与调节阀开度之间的测试方法。

1 实验原理

鉴于直流4−20 mA电流信号传输距离远，抗干扰能力强的优良特性[8]，工业现场中应用的情形比使用直流0−10 V等电压信号的情形多。故本文以西门子品牌的SM332−5HD01−0AB0型号的AO模块第1通道输出直流4−20 mA电流信号，搭配1进2出电流分流器以及电动风阀执行器的情形进行说明，其它通道或者在通道后端附带有不同于本文负载的电路进行函数关系推导和修正的流程与本文类似。AO模块与执行器之间的电路形式不尽相同，其核心控制柜与现场执行器需电气隔离的防爆场合，或1个AO模块拖动2个相同执行器等电路较常见。本文以“AO模块+1进2出电流分流器+执行器”的电路形式为对象，研究对该电路中前两者的修正，第三者则假定其无误差。

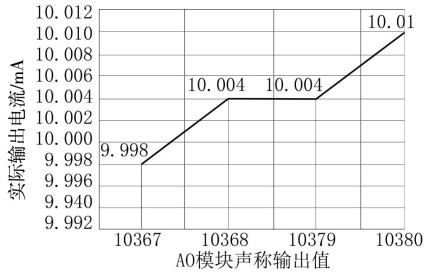

图1 AO模块电流输出的不连续性及输出值死区

AO模块及其负载组成的电路中的电流值是不连续变化的，并且存在死区，本文称之为“输出值死区”。以西门子SM332模块和其直接负载1进2出分流器MTL5544D的组成的电路为例：当AO模块输出值，即“系统字”为10 367时，AO模块及其负载电路中的电流为9.998 mA；而当AO模块输出值在[10 368，10 379]的范围内时，AO模块及其负载电路中的电流却突变为10.004 mA。这个突变的产生是因为微分非线性误差的存在[2]以及本文工况条件下的电路特性和仪表灵敏度决定的。整数值[10 368，10 379]的范围就是10.004 mA电流值对应的“输出值死区”。在死区范围内，AO模块输出值的变化对电流输出值的变化无影响。死区的存在不利于输出精度的控制，但可以起到防止执行机构频繁动作的作用。可以预见在AO模块输出各种电流值时均有机会遇到死区，并且这些死区在理论上应均匀地间隔分布，在求解函数关系时只要回避死区中的数据点，即可保证函数关系较高的准确性。AO模块输出电流的死区如图1所示。

最小二乘法的拟合精度优于拉格朗日线性插值法，并且基于最小二乘法的PLC模拟量标定精度很高[9]。因此采用最小二乘法以“执行器目标输出电流”为自变量X，“电流输出模块输出值”为因变量Y(X)，得到基于最小二乘法的函数关系式：Y(X)=aX+b(0≤Y(X)≤27 648，整数)。最终在实际工程应用中，根据执行器中的目标电流值计算得到程序应该输出的电流输出值。

2 实验平台及测量仪器

为进一步阐述本文的实验方法和流程，搭建了专用的实验平台，配置了对应测量仪器。

2.1 过程校验仪

本文使用过程校验仪FLUKE 707的电流测量功能(MEASURE模式)测量AO模块回路及执行器回路中的实际电流值。

2.2 实验平台

实验平台用于模拟工业环境，其元器件主要包括：CPU模块西门子S7−315−2DP、DI模块西门子SM321−1BL00−0AA0、DO模块西门子SM322−1BL00−0AA0、AI模块西门子SM331−7KF02−1AB0、AO模块西门子SM332−5HD01−0AB0、24 V直流电源、DI和DO分流器MTL5526、AI和AO分流器MTL5544D、ZYX−HOD−2AO−VI电流发生器0−20 mA、DC 24 V指示灯、22 kΩ和680 Ω电阻、YMER电动风阀执行器(内阻248.5 Ω)。实验平台实物见图2。



图2 实验平台实物图

2.3 上位机

上位机安装操作系统Windows 7旗舰版64位、人机界面软件WINCC V7.0、编程软件STEP7 V5.5、通讯网卡CP5611、PROFIBUS DP通讯线，用于手工仿真设置AO模块的输出值。

2.4 计算软件

本文选用工程现场常用的EXCEL作为计算软件，表格中建立计算公式并自动绘制曲线。

3 实验步骤和数据分析

3.1 PLC组态编程及人机界面设置

连接好上位机CP5611网卡，以及上位机和PLC之间的PROFIBUS DP通讯线。打开STEP7软件，组态好实验平台PLC的硬件配置，并在程序块OB1中编写程序代码。其中OB1中地址PQW304对应AO模块第1输出通道，MW100是临时变量，使用MOVE赋值指令保证MW100与PQW304数值上相等。在人机界面软件WINCC V7.0中对MW100进行人工赋值，就控制了PQW304地址的输出值，也就控制了AO模块及其所有直接负载和间接负载回路之间的电流值。

令AO模块理论输出的电流值为X_1，Y_1=MW100，则两者的函数关系为：

$$X_1=16\times MW100/27648+4=Y_1/1728+4 \quad (1)$$

式中：X_1为AO模块输出的理论电流，取[4，20]之间的实数，mA；MW100为临时变量，取[0，27 648]之间的无量纲整数；Y_1为人机界面设置的数值，取[0，27 648]之间的无量纲整数。

3.2 回避死区

调整过程校验仪FLUKE 707的工作模式为MEASURE模式(4−20 mA电流测量模式)。先将过程校验仪串联到图3所示的AO模块与AO分流器之间的直接负载电路中。

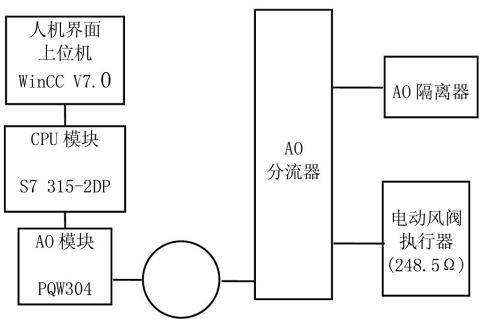

图3 AO模块输出值死区实验电路

表1 一组AO模块输出电流死区区间记录表

序号	死区区间对应的MW100整数值	AO模块输出电流I/mA
1	[8,19]	4.013
2	[3 448,3 459]	6.003
3	[6 908,6 919]	8.003
4	[10 368,10 379]	10.004
5	[13 820,13 827]	12.001
6	[17 280,17 287]	14.005
7	[20 728,20 739]	16.002
8	[24 188,24 199]	18.005
9	[27 628,27 639]	19.998

在WINCC人机界面上对MW100进行加1或减1操作，直到观察出一个过程校验仪可察觉的电流变化，记下这时的MW100设置值。这样一来就找到了离4、6、8、10、12、14、16、18、20 mA最近的一组输出电流值死区，记录上述死区区间如表1所示。求解函数关系时不采用这些死区区间的数据点，而采用表2所示的比较接近4、6、8、10、12、14、16、18、20 mA，并且能引起过程校验仪示数明显变化的选定值。一组AO模块输出电流死区区间记录见表1。执行器实际输出电流与电流输出模块输出值对应关系见表2。

表2 执行器实际输出电流与电流输出模块输出值对应关系表

序号	Y=电流输出模块输出值(整数)	X=执行器目标输出电流值/mA
1	41	4.046
2	3 480	6.042
3	6 936	8.046
4	10 396	10.051
5	13 848	12.060
6	17 311	14.074
7	20 772	16.083
8	24 225	18.083
9	27 617	20.060

3.3 记录电流输出模块输出值和执行器目标输出电流值的对应关系

将过程校验仪的测量位置改接在图3的电动风阀执行器回路中，避开表1所示的死区区间内的MW100值，在WINCC界面设置MW100的数值，分别找到离4、6、8、10、12、14、16、18、20 mA最近的执行器目标输出电流值，记录两者的对应关系，如表2所示。

3.4 求解函数关系式

使用最小二乘法推导出形如Y=aX+b的一次项函数即可对表2中的两列数值进行函数关系系数的求解。EXCEL中求解系数a、b可用如下嵌套公式：

$$a=INDEX(LINEST(known_y's,[known_x's],[const],[stats]),1) \quad (2)$$

$$b=INDEX(LINEST(known_y's,[known_x's],[const],[stats]),2) \quad (3)$$

式(2)和式(3)中，系数a代表斜率；系数b代表在Y轴上的截距；参数known_y's是关系表达式Y=aX+b中已知的Y值集合，也就是表2中“Y=电流输出模块输出值(整数)”的所有值组成的数组；参数known_x's参数是关系表达式Y=aX+b中已知的X值集合，也就是表2中“X=执行器目标输出电流(mA)”的所有值组成的数组；参数const可选，是一个逻辑值，用于指定是否将常量b强制设为0；参数stats可选，是一个逻辑值，用于指定是否返回附加回

归统计值。如果stats为FALSE或省略，则函数INDEX只返回系数a和常量b。

使用上述EXCEL嵌套公式，计算表2的数据得到函数关系式：

$$Y=1722.0639X-6921.962 \quad (4)$$

$$X=(Y+6921.962)/1722.0639 \quad (5)$$

式(4)用于已知执行器中的目标电流，修正电流输出模块的输出值，以便使电动风阀执行器中的电流更接近目标设定值。

式(5)用于已知电流输出模块编程控制的输出值，求解对应电动风阀执行器中较为真实的电流值。

3.5 误差分析

当电流输出模块输出值Y_i给定时，使用理论计算式(1)求解对应的电动风阀执行器中的理论电流为X_l，使用修正公式(5)求解对应的电动风阀执行器中的修正电流为X_z。

X_l相对于电动风阀执行器中实际的目标输出电流的误差百分比为：

$$E_l=|X_l-X|/X100\% \quad (6)$$

式中，E_l为理论误差，%；X_l为式(1)求解的理论电流值，mA；X为电动风阀执行器中实际测得的电流值，mA。

X_z相对于电动风阀执行器中实际的目标输出电流的误差百分比为：

$$E_Z=|X_z-X|/X100\% \quad (7)$$

式中，E_z为修正误差，%；X_z为式(5)求解的修正电流值，mA；X为电动风阀执行器中实际测得的电流值，mA。

式(6)和式(7)计算结果的商值N为：

$$N=E_l/E_Z \quad (8)$$

式中，N用于比较E_l和E_z的相对大小。

将表2中的实验数据代入式(6)、式(7)，得到E_l、E_Z和N，如表3。

表3 理论误差E_l和修正误差E_z计算表

Y=电流输出模块输出值(整数)	X=执行器目标输出电流/mA	X_l	E_l/%	X_z	E_Z/%	N
41	4.046	4.024	0.55	4.043	0.06	9
3 480	6.042	6.014	0.47	6.040	0.03	18
6 936	8.046	8.014	0.40	8.047	0.02	25
10 396	10.051	10.016	0.35	10.057	0.05	6
13 848	12.060	12.014	0.38	12.061	0.01	42
17 311	14.074	14.018	0.40	14.072	0.01	29
20 772	16.083	16.021	0.39	16.082	0.01	54
24 225	18.083	18.019	0.35	18.087	0.02	16
27 617	20.060	19.982	0.39	20.057	0.02	24

以电动风阀执行器中的目标输出电流为共同的横坐标值，分别以E_l和E_Z为纵坐标值，绘制出的2条误差曲线。从2条曲线的相对位置可以看出，若直接使用理论式(1)进行执行器输出电流控制，则其执行器中的电流误差是使用本文实验获得的修正式(5)进行执行器输出电流控制产生的误差值的6倍以上，甚至可达54倍。E_l远大于E_Z的原因与“AO模块+1进2出电流分流器”共同组成的电路有关，因此使用本文提供的测试方法得到的函数关系修正电流输出模块输出值，能明显地提高图3中最末端的执行器中目标电流的精度，对提高执行器的动作精度具有重要意义。

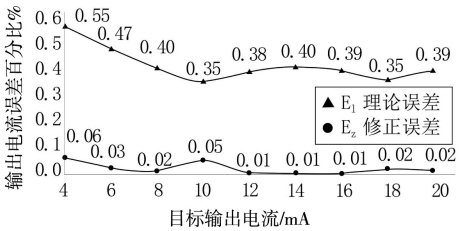

图4 理论误差和修正误差对比图

3.6 制作计算表格

将以上实验过程和变量输入EXCEL表格中，使用该计算表格即可完成电流输出模块输出值与其负载回路实际电流值的函数关系求解。

4 结束语

本文基于西门子SM332模拟量输出模块，以提高现场施工的便利性为目标，使用1张定制的EXCEL表格、1台过程检验仪和1台带有WINCC人机界面的上位机即可确定电流输出模块输出值与其负载回路实际电流值之间的函数关系。从而根据执行器回路中的目标电流数值，修正计算出电流输出模块输出值，最终使执行器达到更高的执行精度。下一步还可以对死区范围影响，以及测量仪表自身误差等因素做进一步的影响分析。本文的研究成果在某航天器发射场的工控系统施工中得到了应用，工程控制精度高，进一步表明了本文测试方法的合理性和流程的科学性。

参考文献：

[1] 杨国兵.PLC控制系统模拟量转换模块实现方法的论述[J].当代化工研究，2017(1)：121−122.

[2] 彭灿明，曾德胜，潘日明.模数及数模转换中的精度问题分析[J].电脑知识与技术，2010，6(15)：4001−4005.

[3] 田亚娟.基于S7−300 PLC模拟量控制技术分析与综述[J].自动化技术与应用，2019，38(9)：76−80.

[4] 廖常初.S7−300/400 PLC应用技术第2版[M].北京：机械工业出版社，2008，5(2011.1重印)：72.

[5] 王洪一.PLC数据采集模块的设计[D].呼和浩特：内蒙古科技大学，2013.

(下转第35页)