

调节阀定位器基本工作原理与输出非线性误差分析

何健华

四川天华化工集团有限公司，四川 泸州 646207

[摘要]电动调节阀执行机构在工业自动控制领域有着重要的地位，它所起的作用是对调节阀的行程进行精准控制。文章首先阐述了调节阀定位器的工作原理，其中包括结构及功能介绍、工作的具体过程剖析等内容。其次着重分析了产生输出非线性误差的因素，分别从机械结构原因、摩擦力原因、传感器自身非线性原因以及气动原因四方面入手展开论述。再次探讨了非线性误差的危害，主要有精度降低、波形失真、稳定性差及可靠性不足四个方面。最后指出误差抑制与性能提升的思路，即机械结构调整、增设补偿措施、传感器线性化改进及智能化控制策略。

[关键词]调节阀定位器；非线性误差；工作原理；控制性能；误差抑制

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18613

中图分类号：TP273.5

文献标识码：A

Basic Working Principle and Output Nonlinear Error Analysis of Regulating Valve Positioner

HE Jianhua

Sichuan Tianhua Chemical Group Co., Ltd., Luzhou, Sichuan, 646207, China

Abstract: The electric control valve actuator plays an important role in the field of industrial automatic control, and its function is to precisely control the stroke of the control valve. The article first elaborates on the working principle of the regulating valve positioner, including an introduction to its structure and function, as well as an analysis of the specific process of operation. Secondly, the factors that cause output nonlinear errors were analyzed in detail, starting from four aspects: mechanical structure reasons, friction reasons, sensor nonlinearity reasons, and aerodynamic reasons. The hazards of nonlinear errors were discussed again, mainly including reduced accuracy, waveform distortion, poor stability, and insufficient reliability. Finally, the ideas for error suppression and performance improvement are pointed out, including mechanical structure adjustment, addition of compensation measures, improvement of sensor linearization, and intelligent control strategies.

Keywords: regulating valve locator; nonlinear error; working principle; control performance; error suppression

引言

调节阀是工业自动控制系统的重要组成部分，而调节阀所配置的阀门定位器也是至关重要的一环，阀门定位器的主要任务就是接受控制器发出的控制信号并准确无误的将其传达给控制阀进而对阀门的开启程度进行精确控制，所以研究调节阀定位器的工作原理及输出非线性误差对控制系统的完善有着深远的影响。

1 调节阀定位器基本工作原理

调节阀定位器是进行阀门位置控制的一种设备，通过接受控制信号带动阀门运作。调节阀定位器的工作原理主要是基于多个部分相互协作，使阀门可以准确地移动到指定位置。

1.1 定位器结构与功能概述

电控调节阀定位器结构由输入单元、控制单元、执行单元以及反馈单元四部分构成，其中输入单元负责从控制器处获取信号，控制器对信号进行解析计算得到驱动命令，执行单元依据命令驱动阀门动作，反馈单元监测阀位并将结果送入控制单元；电控调节阀定位器的作用是对阀门位置进行闭环控制，提升调节准确性和快速性，在工业场合下往往应用于要求严格流体控制的地方如化学反应装置与火力发电机等。电控调节阀定位器的构造对其功能有着

重要影响，所以认识它的组成是探究其工作机理的前提，电控调节阀定位器就是通过这几部分结构协同运作来保障阀门可以精确地响应控制信号。

1.2 工作原理详细分析

调节阀定位器的工作原理是从接受输入信号开始。当控制器给出一个电信号或者气信号传输给定位器的时候，输入单元会把信号转换成适合内部使用的信号。接着控制部分将接收到的信号跟反馈回来的信号进行对比，得出偏差量并制定相应的补偿方案。执行器一般由气动或电动驱动，其作用是依据方案输出力或者位移变化，进而带动阀杆动作。反馈装置由传感器构成，用于检测阀体的位置并将位置信号传送给控制组件。此闭环流程一直重复直至阀位达到目标值为止。简单来说，调节阀定位器的工作方式就是在不断地修正以抵消偏差，从而达到精准操控的目的^[1]。结合有关论述，调节阀定位器的工作原理是建立在负反馈的基础之上，有利于提升整个系统的稳定性及准确性。从具体解析来看，每一部分都很重要，一旦其中一个元件发生损坏就会导致整个控制流程失灵。

2 输出非线性误差来源分析

输出非线性误差是说调节阀定位器在工作过程中，其

输出相对于输入产生的偏离直线特性的差值,它产生的原因很复杂并对控制系统影响极大。

2.1 机械结构因素

机械结构本身存在的缺点是非线性误差产生的基础物理原因,调节阀定位器及其所带的阀门内部具有大量机械零件包括但不限于:连杆、凸轮、齿轮、轴承、阀杆等等,在制造与安装中不可能避免地存在尺寸偏差、位置偏差、形状偏差以及各部分间的装配间隙,机构运动时,这些间隙会引起“空程”或“回差”,即正向行程与反向行程的不重合;其次,机械零件在其受到外力作用下会发生弹性形变,在大多数情况下形变量与作用力不成严格的线性关系,特别是在材料快要达到其屈服点的时候尤为突出,如阀杆在较大的介质推力下会发生细小的弯曲进而使得执行机构位移同阀芯位移两者间的关系发生失真;再者就是长时间的工作下带来的机械磨损使得接触表面发生形貌变化,间隙变大或者出现偏磨现象从而引起可变的乃至时间相关的非线性。

2.2 摩擦力影响

摩擦力,尤其是静摩擦力和库仑摩擦力,是最具破坏性的非线性成分之一,在定位器和阀门中广泛存在,它们分布在阀杆和填料函之间,执行结构活塞和缸体之间,各导向轴承上。典型的摩擦非线性特性为:当作用力小于等于最大静摩擦力时机构处于静止状态;而一旦超过最大静摩擦力机构运动起来后,阻力又突然减小至动摩擦力水平。这种粘-滑效应使得小信号情况下系统毫无反应,在起始时刻又会带来突跃。对于低速或者微小位移调整而言,摩擦的影响就显得更加严重了,会使阀门动作呈现所谓的“爬行”或“跳动”,严重影响控制过程的连续性和准确性。更糟糕的是,摩擦力的值并不是固定的,它受接触表面状况、润滑程度、预压力、运行时间等的影响,是一个随着时间变化的非线性干扰项。传统的经典控制理论所使用的线性化模型很难刻画它的动态过程,所以在高精度运动控制系统中如何进行有效的摩擦力补偿就成为了长期以来的一个难点问题。

2.3 传感器非线性

作为反馈单元的重要组成部分,位置传感器的非线性会导致控制系统的直接和“诚实”的错觉。只要传感器输出信号呈现非线性,即使阀芯真实位移是线性的,控制系统也误以为有偏差并作出补偿,在系统层面人为创造出非线性。电位器式传感器有可能出现电阻分布不均或滑触点接触电阻不稳定的情况;LVDT传感器在零点附近可能有非线性的区域并且它的输出容易受到温度漂移的影响;磁致伸缩传感器尽管精度很高但是它的输出特性与波导材料,温度等多种环境条件相关。传感器非线性一般表现为零点漂移、灵敏度漂移,还有就是饱和非线性等等。并且传感器非线性的程度随着传感器的老化、环境温度的变化、

以及电磁干扰等情况的变化而不断变化,使得我们之前所做的标定结果慢慢失效。所以传感器本身的精度和可靠性也是制约着定位器整体线性性能的主要短板之一。

2.4 气动系统特性

而对于常用的气动调节阀定位器来说,气动回路本身固有的动态特性就是较大的一个非线性因素来源。首先是气动执行部分即膜片式或是活塞式的气压变力的关系并不是理想的线性关系,气膜的有效面积或者活塞所受摩擦力都会随着位置发生变化;其次是供气压力的变化会导致输出力的改变,虽然说定位器内部会有稳压措施但是在实际使用过程中不可能完全稳定;再次就是气体的可压缩性决定了气腔的充气排气是一个非线性的动态过程,其对应的气室时间常数也随压力容积等的不同而不同,在整个行程上定位器的反应速度也就不会相同;还有就是气流经过狭缝通道例如喷嘴挡板、放大器等时气流大小与压差之间并非线性关系,在低信号情况下尤为明显;以及气路上的细微漏气造成的不确定稳态误差。以上各点均会造成气动定位器输入输出之间的复杂的非线性动态特性,不利于快速准确的定位。

3 非线性误差对控制性能的影响

调节阀定位器输出的非线性误差也不是单独存在的,它会在控制系统中通过闭环不断传递并放大,给整个系统的控制品质带来了严重的连贯性的危害。

3.1 静态精度下降

静态精度用来评价定位器处于稳定状态时跟踪给定值的能力,而非线性误差也就意味着阀门处于不同的开启程度时其定位精确度各不一样。比如说在整个行程中的某一区间内的位置十分精准但是到了另外一段,特别是行程接近极限位置时会产生很大的偏差。这就造成了工艺变量比如流体的流量或者压强的给定值和测量值在整个变化范围内不能够很好的一一对应起来^[2]。对于那些对比例或者量有严格要求的一些化工工艺来说,在进行化学反应加料以及精馏等单元时一旦发生静态精度的这种不均匀下降的现象那么产品的质量将会不过关,产率也会受到影响,严重情况下还会造成爆炸着火之类的危险事故的发生。而静态误差的存在又使运行人员不得不用加宽控制环路的零位差或者是允许更大的偏差来应对,进而导致了整条生产线的自动控制水平下降。

3.2 动态响应畸变

理想的线性系统的不同大小或者不同的工作点下的阶跃响应应该是相似的形状,而非线性的误差会导致定位器的动态响应严重失真,在较小的设定值变动时系统会出现由于死区的存在而不反应的情况,在较大的设定值变化的情况下又会出现由于饱和或者增益的变化导致过大超调量或者震荡的现象,其响应时间、上升时间这样的动态指标不再是固定的值而是在各工作点上剧烈波动。这样不确定的动

态过程会使已经调节好的控制器参数例如 PID 参数只能适用于特定的工作条件，在工作状况发生变化后控制性能就会大幅下降。对于那些要求迅速响应的过程来讲像压力或者液位的紧急调整，动态过程的失真会导致系统调节时间增长从而不能有效的尽快消除扰动影响生产的稳定性。

3.3 控制系统稳定性风险

依照自动控制原理可知，加入非线性因素会导致控制系统的频率特性发生变化，有可能削减系统的相角和幅值裕量。一些特定形式的非线性如间隙、饱和及滞环可能会导致产生自激振荡即所谓极限环震荡，在系统处于稳态下，表现为一种长期存在、恒定幅度的周期性震荡。该种自激振荡不但降低了控制性能而且会造成机器设备的疲劳损坏。再者，对于一个非线性的系统而言可能存在多个平衡位置或者复杂的动力学特性，当满足一定条件时，即使是很小的一个干扰也可能使系统偏离稳定的平衡点乃至不稳定。而在复杂多重回路互联控制或者串级控制系统当中，一个阀门的非线性会影响到与其关联的所有其它环节，使得整个机组的稳定研究及设计变得更加困难和危险。

3.4 长期可靠性问题

非线性误差又常常伴随着零部件磨损老化等因素互相叠加，产生恶性循环的正向反馈。比如，间隙产生的非线性冲击加剧磨损，间隙变大，非线性更严重；摩擦力的不稳定变化也加重了“黏滑”的程度，造成阀杆和填料磨损乃至损坏不均。传感器的非线性随着时间推移发生漂移得不到修正，定位误差就会越来越大^[3]。种种原因叠加在一起的结果就是：调节阀定位器产品的性能随着时间推移逐步而且加快恶化，平均无故障间隔时间变短，不得不提前进行维修保养，设备全寿命周期费用上升。可靠性降低对需要连续长时间运转的现代化工厂、电厂等企业来说，也就代表着更大的意外停车检修几率以及更高的维护支出。

4 误差抑制与性能优化方向

针对调节阀定位器输出非线性误差的问题应从硬件设计改进及软件算法补偿两方面入手，寻找可行有效的方法来改善性能指标。

4.1 机械结构优化

机械结构优化是对调节阀定位器机械部分的设计进行优化从而减小误差。如使用精密机械加工件、降低运动副间隙及应用耐磨材质可提升线性度；机械结构优化还包含减轻质量与增加强度以减弱形变因素的影响等。从研究来看机械结构优化最为直观，不过代价也最大。调节阀定位器的机械结构优化必须在性能与价格之间找到合适的折衷点才能具有性价比。因而机械优化是误差控制的前提。

4.2 摩擦补偿技术

摩擦补偿的方法指的是利用算法或者硬件的方式来消除摩擦力影响。如在控制器内增加一个摩擦模型，依据

不同的运行状况来对驱动力进行调节等都属于摩擦补偿的方法。使用摩擦补偿的方式能够优化低速性能并且降低迟滞性。有关资料证明，自适应式的摩擦补偿适用于变速情况。调节阀定位器的摩擦补偿方法必须进行在线运算，这就提升了控制难度。因此，摩擦补偿是一种有效的精确定位方法。

4.3 传感器线性化处理

传感器线性化是指采用软件或者硬件手段对传感器非线性的输出进行补偿的过程。如采用查找表法或者多项式拟合法将传感器信号与实际位移进行对应等。传感器线性化的应用能大大提升反馈准确性，但仍需定时校正。据一些文献报道，数字线性化也是现代定位器常用的措施^[4]。而调节阀定位器传感器的线性化还需要配合传感器本身性能，量身定做。因此，线性化也是一种错误消除的重要举措。

4.4 智能控制算法应用

智能控制算法的应用则是采用先进的控制方式例如模糊控制器或者神经网络等对非线性误差进行控制。这类算法能够自动修正自身参数以适应系统的变动。智能控制算法应用于复杂的场合下具有良好的效果，但是较难得到实施。一些研究表明智能控制可以提升调节阀定位器的稳定性能与准确性。然而调节阀定位器中智能控制算法的应用需要有庞大的数据量以及计算量的支持，这也制约着它的推广使用。因此，智能控制是以后的发展趋势。

5 结束语

这篇文章系统地介绍了调节阀定位器的工作原理，并着重剖析了输出非线性误差产生的原因及所造成的影响并指出了误差抑制以及性能改善的研究方向。由本文研究可以发现非线性误差是由多种原因造成的并且严重影响着系统的控制品质。要想提高调节阀定位器的准确性和稳定性就要在机械机构、摩擦校正、传感元件以及智能控制等各个方面进行改进。今后随着科学技术的进步一体化、智能化将是发展方向。

【参考文献】

- [1] 戴林,王德民,马榕.基于 VALVELINK 软件开展 DVC6200 定位器在线更换的应用实践研究[J].中国设备工程,2025(23):81-83.
 - [2] 姜天枢.控制阀智能定位器的应用与维护[J].中国仪器仪表,2025(8):88-91.
 - [3] 张剑虎.智能定位器用单边式电气转换器研制[D].浙江:杭州电子科技大学,2025.
 - [4] 曹锡超.气动调节阀故障原因分析及常见故障处理对策[J].石油化工技术与经济,2024,40(6):38-42.
- 作者简介：何健华（1998—），毕业于四川化工职业技术学院，工业过程自动化专业，主要研究调节阀、变送器等方向。