

流量定量控制仪的应用技巧

李景友 张晓勤（青岛碱业股份有限公司， 青岛 266043）

纪 纲（上海宝科自动化仪表研究所， 上海 200940）

关键词：定量控制 非线性校正 温度补偿 提前时间 组份补偿 大小阀控制

摘 要：流量定量控制仪是几十年前就已经有的仪表，但随着仪表实现智能化，其功能也在不断增强，控制精度不断提高。应用技术也趋于复杂，而且带有技巧性。本文主要介绍应用中的技巧。

1. 引言

在生产过程和经营管理中，人们为了提高生产效率和控制精度，很多年以前就已开始使用定量控制的方法。例如用柱塞定量筒向包装瓶中定量装入规定容量的液态产品；用计量槽作为液态原料计量手段，然后加入反应器等。所定的量有的是以容积为单位，有的则以质量为单位。定量控制所完成的任务是对液体进行计量和不太复杂的逻辑控制。

随着仪表测量技术的发展和计算机技术进入控制仪表，人们对定量控制技术先后多次作了改进，从而使控制精度显著提高，逻辑保护更加完善，操作使用趋于灵活方便。下面重点讨论以单片机为基础的智能定量控制仪的主要功能和应用中的一些技巧。

2. 流量定量控制系统的组成

现代流量定量控制系统一般以流量测量仪表为基础，以电磁切断阀或气动电动切断阀为终端执行元件，以流量定量控制仪或计算机完成流量演算、累积、显示和逻辑控制。流量传感器或变送器的型号有很大的选择空间，近几年来有的单位选用科里奥利质量流量计，这当然有利于提高计量精度，但投资较高。目前大多数用户仍使用涡轮流量计，这主要是因为：

- a. 涡轮流量计有较高的测量精度，例如 0.2 级仪表能满足绝大多数使用需要。
- b. 价格便宜。大约只需相同口径科里奥利质量流量计的 1/20。
- c. 安装、使用和维修都简单、方便。
- d. 涡轮流量计的最大不足之处是轴承容易磨损。这一点对于流量定量控制来说问题并不严重，因为这种控制是间歇操作，多数定量控制系统一天只运行数小时，所以，轴承的寿命可比 24 小时连续运行工况长若干倍。

图 1 所示为以涡轮流量计为流量测量单元，以软密封电磁阀为终端控制元件，同智能定量控制仪一起组成的典型流量定量控制系统。

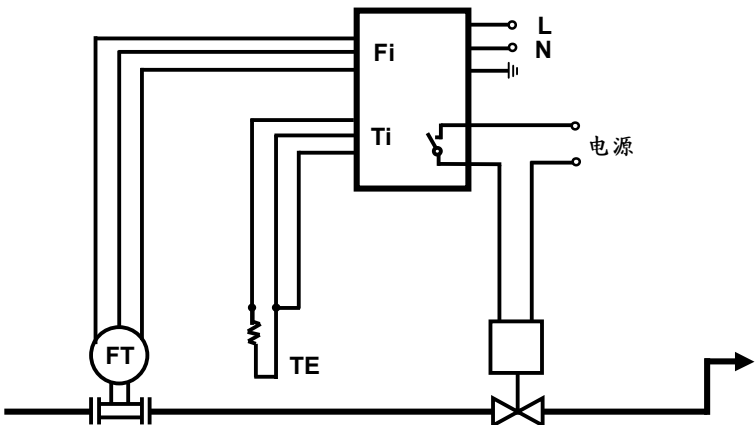


图 1 单阀流量定量控制系统

流量定量控制简单的动作过程如下：操作人员向控制器输入本次发料量设定值 Q_S （或保持上一次设定值）后“准备就绪”指示灯闪烁，就可按启动按钮，继电器闭合，电磁阀励磁打开，以预期的瞬时流量 q_v 开始发料。控制器指示瞬时流量并累积发料量 Q （或一边累积一边做 $\Delta Q = Q_S - Q$ 的运算）并显示此累积值，当 $Q = Q_S$ 时，控制器发出关阀信号，将继电器接点断开。完成本次发料。待按一下复位（RESET）按钮，即准备下一次发料。

3. 如何提高定量精度

3.1 执行器动作滞后引起的误差及其补偿

从上面的动作过程可知，执行器动作滞后必然引起控制误差，误差值约为滞后时间 τ 与瞬时流量 q_v 的乘积 τq_v ，其中滞后时间为从 CPU 发出关阀指令到切断阀关死之间的全部时间，即包括继电器的动作滞后到切断阀的动作滞后，其性质属纯滞后。

动作滞后引起的误差可从控制器的累积值显示中准确地读出。纠正这一误差最简单的方法是在控制器“提前量”窗口设置一个提前量 Q_f ，即在 $Q = Q_S - Q_f$ 时，CPU 就发出指令，关闭调节阀。

3.2 表前压力对定量精度的影响

流量定量控制系统运行时，流量计前的流体压力经常发生变化，该变化主要是由储罐中液位高度变化引起的。满罐时，储罐中的液位可能有 10m 高度，罐中料液即将发完时，可能只剩 1m 高度，由此引起的流量计前的压力变化也很显著，此压力变化引起发料瞬时流量的变化。

发料瞬时流量的变化对定量控制精度带来两个影响。

a. 瞬时流量不同，要求提前量为不同值。

从 3.1 可知，执行器动作滞后引起的误差为 τq_v ，合理的提前量 Q_f 应与此误差值相等，即

$$Q_f = \tau \cdot q_v \quad (1)$$

式中： Q_f —— 关阀提前量，l；

τ —— 纯滞后时间，s；

q_v —— 瞬时流量，l/s

因此，提前量设置为一个常数是不合理的，它应与 q_v 成正比。但是，在实际操作中经常修改提前量又是一件很麻烦的事，如果我们舍弃提前量这个概念，而采用提前时间这个方法，就可以完全不受表前压力的影响了。这个方法是简单的，但提前关断切断阀的时间间隔 Δt 需在实际的装置上具体测定，测定方法如下：

先在控制器的对应窗口设定一个数值很小的“本次发料量”，而“提前时间”设定为 0。定量控制系统“启动”后，正常发料，读出瞬时流量，当本次发料结束后，总是会发现实发量比设定值多一些。则可按式(2)计算滞后时间。

$$\tau = \frac{Q_e - Q_s}{q_v} \quad (2)$$

式中： τ —— 滞后时间，s；

Q_e —— 最终实际发料量，l；

q_v —— 瞬时流量，l/s

反复测定数次，得到滞后时间平均值 $\bar{\tau}$ ，取 $\Delta t = \bar{\tau}$ ，就可长时期使用。

b. 瞬时流量不同流量传感器流量系数也可能不同

表前压力变化引起瞬时流量的变化对定量控制精度的影响的另一个原因是流量传感器的非线性。

在经流量定量控制系统发出的料液属贸易实物时，往往此料液要连同装载运输工具一同称重，作为贸易结算依据。以不同的瞬时流量值所发的料、装的车，往往会发现误差值存在千分之几的差

异，这主要是流量传感器的非线性引起的，0.2 级的涡轮流量传感器，其各点流量系数允许偏离平均流量系数±0.2%，而 0.5 级传感器则允许偏离±0.5%。表 1 所示为一台 DN40 涡轮流量传感器试验报告中的各个试验点流量系数，以及与平均流量系数相比较的相对误差。

表 1 典型涡轮流量传感器校准记录

序号	流量 / m ³ · h ⁻¹	流量系数 / P · L ⁻¹	平均流量系数 / P · L ⁻¹	误差 / %	校正系数
1	3.02	72.85	73.07	-0.30	1.0030
2	4.55	73.01		-0.08	1.0002
3	6.02	73.12		0.07	0.9993
4	7.45	73.24		0.23	0.9977
5	8.84	73.35		0.38	0.9962
6	10.52	73.23		0.22	0.9978
7	11.97	73.11		0.05	0.9995
8	13.54	72.94		-0.18	1.0018
9	15.07	72.79		-0.38	1.0038

显然，在以 8.84 m³ / h 瞬时流量发料时，偏高 0.38%属必然之事，而若以 4.55 m³ / h 瞬时流量发料时，偏低 0.08%也属理所当然。

对流量传感器的非线性进行恰到好处的校正，最简单的方法是将该传感器的标定数据制作成校正折线，然后写到智能流量定量控制器中。仪表运行后，用查表和线性内插相结合的方法得到流量系数校正系数，进而精确地计算瞬时流量，从而完成对传感器非线性的校正。CPU 求取流量系数校正系数的程序框图如图 2 所示。

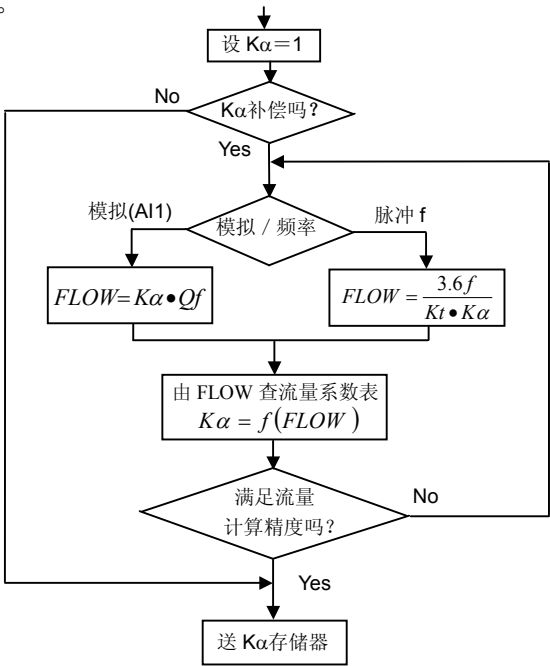


图 2 求取流量系数校正系数的程序框图

流量传感器的非线性经校正后，从简单的逻辑关系分析，似乎传感器的误差就不存在了，其实不然，因为流量传感器除了非线性误差之外，还有重复性误差、时间漂移等，但是经过上述校正后，精度等级可以提高一档是肯定的。

3.3 对液体热胀冷缩引起的误差进行补偿

绝大多数液体在常温条件下都有热胀冷缩的特性，这对于以体积流量传感器为测量元件的系统产生明显误差，即流体在工作温度条件下的总量尽管控制得很准，但换算到标准状态的总量却与预定值偏离很多。

纠正此项误差的方法是对流体温度影响进行自动补偿。最简单的补偿模型是如式(3)所示的一次

函数式。

$$K = 1 + \mu_1 (t_f - t_d) \quad (3)$$

式中：K —— 温度补偿系数；

μ_1 —— 一次温度系数， $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

t_f —— 流体工作状态温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

t_d —— 流体设计状态或参比状态温度， $^{\circ}\text{C}$

具体实施时，重要的是求取实际流体使用温度范围之内的密度随温度变化系数平均值 μ_1 。下面以常见流体酒精为例，说明 μ_1 求取方法。

表 2 所示是酒精、水混合物在不同酒精浓度条件下，密度与温度的关系^[2]。

如果常用浓度为 96%，温度变化范围为 15 ~ 25 $^{\circ}\text{C}$ ，则两个点温度对应的密度分别为 811.73 kg / m^3 和 803.08 kg / m^3 。先在酒精密度 —— 温度坐标系中将这两个点找出来，然后在其间用直线连接，按解析几何的方法，则直线的斜率即为密度随温度变化的系数 μ_1 。

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \frac{803.08 - 811.73}{25 - 15} \\ &= -0.865 \text{ kg} / \text{m}^3 / ^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

取 $t_d = 15^{\circ}\text{C}$ ， t_d 所对应的密度（参比密度） $\rho_d = 811.73 \text{ kg} / \text{m}^3$ ，连同 μ_1 数值一同经控制器面板上的操作键写入仪表，则仪表运行后就会自动进行温度补偿。

表 2 5 ~ 36 $^{\circ}\text{C}$ 酒精的密度

温度 / $^{\circ}\text{C}$	酒 精 含 量 (%)			
	100	99	96	95
5	801.99	807.05	820.27	824.24
6	801.14	806.21	819.42	823.39
7	800.30	805.36	818.58	822.54
8	799.45	804.51	817.72	821.69
9	798.60	803.66	816.87	820.84
10	797.76	802.81	816.02	819.98
11	796.91	801.96	815.17	819.13
12	796.06	801.11	814.31	818.27
13	795.21	800.25	813.45	817.42
14	794.36	799.40	812.59	816.56
15	793.51	798.54	811.73	815.70
16	792.65	797.68	810.87	814.84
17	791.80	796.83	810.01	813.97
18	790.95	795.97	809.15	813.11
19	790.09	795.11	808.25	812.25
20	789.24	794.25	807.42	811.38
21	788.38	793.39	806.55	810.51
22	787.53	792.53	805.09	809.65
23	786.67	791.67	804.82	808.78
24	785.81	790.81	803.95	807.91
25	784.95	789.95	803.08	807.03
26	784.09	789.08	802.21	806.16
27	783.23	788.22	801.34	805.29
28	782.37	787.36	800.47	804.41
29	781.51	786.49	799.60	803.54
30	780.65	785.63	798.72	802.66
31	779.78	784.77	797.85	801.78
32	778.92	783.90	796.97	800.90
33	778.05	783.04	796.10	800.02
34	777.18	782.17	795.22	799.14
35	776.31	781.20	794.34	798.26
36	775.44	780.44	793.46	797.37

在流体温度变化范围不大，流体密度随其温度变化关系偏离线性不严重的情况下，采用一次函数补偿引入的误差并不大，但若温度变化范围较大，或流体密度随其温度变化的关系偏离线性较严重，就应考虑采用较完善的补偿公式如一般二次多项式^[1]。对于涡轮流量计，补偿公式为：

$$K = 1 + \mu_1(t_f - t_d) + \mu_2(t_f - t_d)^2 = \rho_f / \rho_d \quad (4)$$

式中： μ_1 —— 一次温度系数， $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

μ_2 —— 二次温度系数， $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

ρ_f 、 ρ_d —— 分别为工作状态和设计（或参比状态）流体密度， kg./m^3

下面仍以酒精为例介绍 μ_1 和 μ_2 的求取方法。

假设流体温度最大变化范围为 $5\sim 35^{\circ}\text{C}$ ，则在表 2 中，分别取温度为 5°C 、 20°C 和 35°C 为样本点，即 $t_{f1} = 5^{\circ}\text{C}$ ， $t_{f2} = 35^{\circ}\text{C}$ ， $t_d = 20^{\circ}\text{C}$ ；这三点对应的密度分别为 $\rho_{f1} = 820.27 \text{ kg./m}^3$ ； $\rho_{f2} = 794.34 \text{ kg./m}^3$ ； $\rho_d = 807.42 \text{ kg./m}^3$ 。先以 $t_f = t_{f1}$ 、 $\rho_f = \rho_{f1}$ 、 t_d 和 ρ_d 数值代入式(4)得方程

$$1 + \mu_1(5 - 20) + \mu_2(5 - 20)^2 = \frac{820.27}{807.42} \quad (5)$$

再以 $t_f = t_{f2}$ ， $\rho_f = \rho_{f2}$ 、 t_d 和 ρ_d 数值代入式(4)得方程

$$1 + \mu_1(35 - 20) + \mu_2(35 - 20)^2 = \frac{794.34}{807.42} \quad (6)$$

将式(5)和(6)联立并解之得

$$\mu_1 = -0.10705 \times 10^{-2}$$

$$\mu_2 = -0.63301 \times 10^{-6}$$

然后将 μ_1 、 μ_2 、 t_d 和 ρ_d 数值写入流量定量控制仪的菜单中^[1]，仪表运行后，就会按式(4)自动进行温度补偿。

3.4 对流体组份的变化进行补偿

在流量定量控制系统中，有时碰到组份变化的情况，而且组份的变化引起液体密度的显著变化，如果不对这种变化进行补偿，势必引起质量总量的较大误差，轻者影响企业效益，重者影响企业声誉。

仍以酒精为例，在表 2 中， $t = 20^{\circ}\text{C}$ 时，酒精含量从 95% 升到 96%，酒精密度就减小 0.49%。在一个储罐中，料液的组份往往都是取样用化学法或仪器法测量得到的，最简单的补偿方法是测量组份的同时将参比温度条件下的液体密度一同测量出来（实际上是这样做的），然后设置到定量控制仪中，仪表运行后，即完成自动补偿。

3.5 大小阀控制

在液体人工装桶或装瓶的操作中，操作工有一条基本要领，即在即将到达控制终点时，适当减慢罐装速度，以提高控制精度。人们在自动定量控制中吸收了这一条经验，将如图 1 所示的单阀控制改进为大小阀控制。其中大阀用于快速发料，小阀用于精确定量，其连接图示于图 3。

为了使大小阀协调动作，在定量控制器中设置有“大流量发料提前量”和“小流量发料提前量”，当操作工通过面板上的按键设定好“本次操作发料量”等数据后，按一下“复位”键，系统就“准备就绪”，并有相应的灯闪烁，按一下“启动”键，就开始本次发料作业^[1]。这时“大阀控制接点” K_1 和“小阀控制接点” K_2 立即闭合，通过电磁阀的作用将大阀和小阀同时开足，液体经流量计流向受槽或其他容器。当

$$(\text{本次发料累积值}) = (\text{本次发料预定值}) - (\text{大流量发料提前量})$$

时，大阀控制接点断开，大阀关闭，并保持此状态，而小阀继续发料；当

$$(\text{本次发料累积值}) = (\text{本次发料预定值}) - (\text{小流量发料提前量})$$

时，小阀控制接点断开，小阀也关闭，从而结束本次发料。

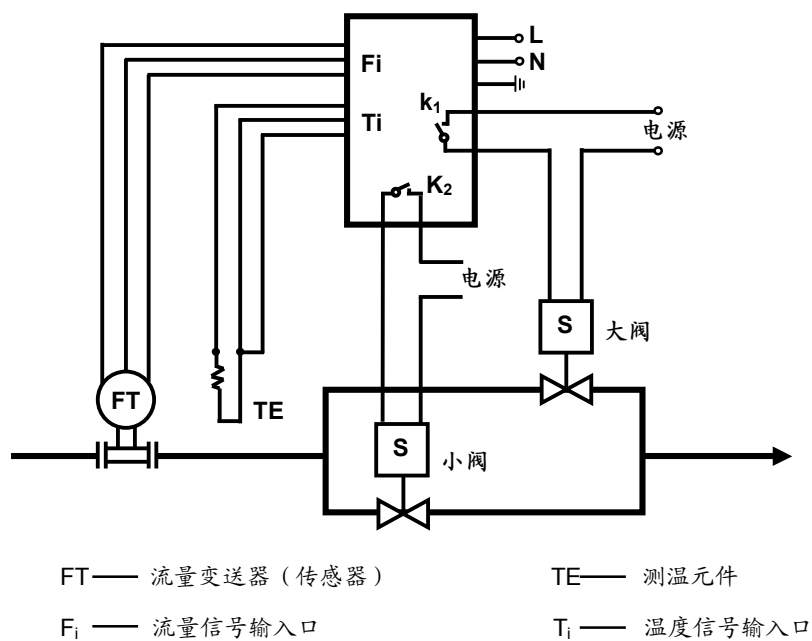


图 3 大小阀精确控制线路连接图

这种控制方法适用于操作周期较长的发料对象。其优点是定量准确，付出的代价是投资增加一些，发料时间也稍长一些。合理调试“大流量发料提前量”，可使发料时间趋于合理。

合理选择小阀的流通能力是重要的，兼顾经济性和流量传感器的范围度，一般可选其为大阀流通能力的十分之一左右。

4. 单摆式交替灌装系统

这种控制方式适用于在灌装台上对两个台位的容器进行交替灌装操作。其线路连接如图 4 所示。

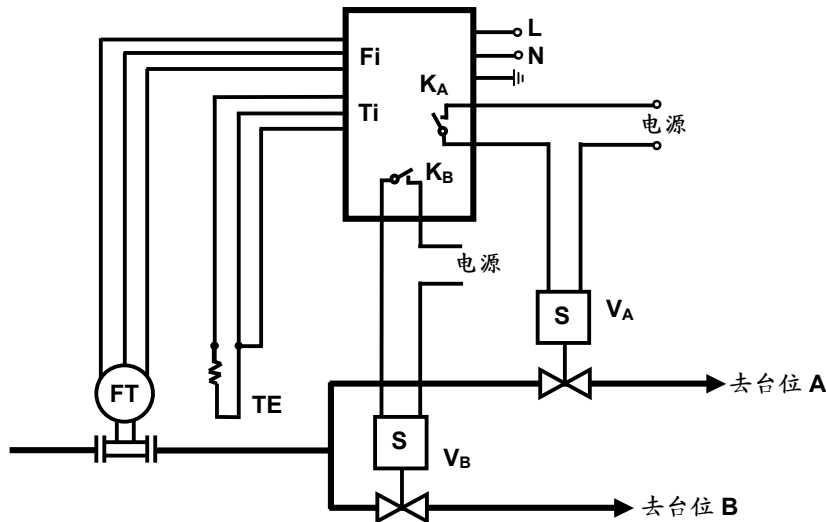


图 4 单摆式交替灌装系统

这种控制方式的软件设计与图 3 所示的大小阀控制不一样。操作人员通过面板上的按键设定好“本批操作发料次数”、“一次发料预定量”和“A 阀提前量”、“B 阀提前量”、“间歇时间”、“小流量监视值”、“小流量监视时间”等数据之后，就可按“复位”键、“启动”键开始发料，先是 A 阀开，待累积流量达到（一次发料预定量）－（提前量）时，A 阀关闭，进入间歇期，“发料次数”加 1。

间歇期结束后，自动打开 B 阀灌装。如此交替灌装，直至实际“发料次数”与预定的“本次操作发料次数”相等，才停止循环。

交替灌装的特点是接受料液的容器容积小，发一次料所需的时间也短，稍有不慎就会发生料液外溢的事件。而忘记开泵、工艺阀门切换不当的情况又难以杜绝，所以设置有“小流量监视值”和“小流量监视时间”两参数，当“A 阀控制接点”闭合（或“B 阀控制接点”闭合）后，如果定量控制器接收到的流量信号小于“小流量监视值”，就启动计时器，所计时间大于等于“小流量监视时间”后，组态就可以有两种选择，即“启动操作继续有效”和“发料操作暂停”。交替灌装时一般选“发料操作暂停”，若想继续发料操作，则可按“复位”键。因为进入小流量监视程序后，操作人员首先要处理为什么没有流量问题，往往无暇顾及台位上的操作。

为了应急，定量控制器上还应有“紧急停止”按钮。

在单摆交替灌装定量控制系统中，提高定量精度需从两方面做工作，一是分别精准测定 V_A 和 V_B 执行器的滞后时间，二是寻找滞后时间短的切断阀。据报道，在现场有防爆要求的条件下，经过改进的快速气动切断阀，滞后时间可以做到 0.2S 以内^[2]。

5. 其他逻辑控制功能

流量定量控制是以流量准确计量为基础的、逻辑控制功能丰富的复合控制系统，根据用户的使用要求可以有各式各样的逻辑控制功能，下面举几个实例。

5.1 设定值出错判别功能

有的单位管理人员为了防止操作人员误操作，要求对所设定的“本次发料预定值”进行判别，当其数值在下限值和上限值之间时，就被接受，当其数值超过此范围时，则不响应，而且相应窗口的数据显示值闪动，以示有误。为此，菜单中须有两条，分别设定下限值和上限值。

5.2 料液品质判断

南通某外资化工企业，待发料液存放在液—液分层器中，其中下层为料上层为水，要求不能将水发到下道工序。为此，用科里奥利质量流量计测量料液流量和密度，两路信号分别送到定量控制器。在分层器中，料层和水层之间有一过渡层，当料层放完后，液体密度就有显著减小，从而将阀门切断。并使面板上“累积流量值”闪动，以示终点未到。当料层增厚之后，可按面板上的“继续”按钮，完成本次发料。

5.3 阀和泵的联动

上面所说的大阀、小阀、A 阀、B 阀都应是带软密封的无泄漏阀，但有时料液密度较小，阀门不容易关死，为此有的用户提出阀与泵的联动，即开阀前先开泵，延迟一段时间后再开阀，而关阀后延迟一段时间再关泵^[3]，采用这种控制方式，在管路连接时应避免停泵后液体倒流，否则实发总量与仪表计量值将会出现差值。如果流量变送器（传感器）前的管道在停泵时出现空管，则重新开泵后，管道中的气体易使流量计空转，从而出现较大偏差^[4]。

5.4 溢料保护功能

经流量定量控制系统所发送的料液，大多是较贵重的油品和化工产品，不少属易挥发品，气味浓重，一旦溢出容器，就易污染环境。有一些还是易燃品，更要加倍注意。为此，有的系统配有溢料保护装置，当发料系统工作不正常，槽车或包装桶等容器液位高于规定值后，控制系统立即切断阀门，并发出报警信号。以保证安全。

5.5 声光报警

适量的声光报警有利于操作人员及时得到来自控制器的特定信息，如溢料报警、断料报警等，

用户对报警的要求不尽相同，在签订合同时应将此要求弄清楚，制造厂通过软件设计达到合同要求。

5.6 有流量定值调节功能的定量控制系统

在化工、制药等行业，对化学反应器或生化反应器间歇补料有时既要控制总量又要求补料期间瞬时流量均匀，要完成这一任务，最简单的方法是用一台定量控制仪和一台通用型调节器组成复合控制系统，如图 5 所示。当定量控制器面板上的“启动”键按下时，K 闭合，由流量变送器、调节器和阀组成流量定值调节系统，瞬时流量值可根据要求设定。待本次补料总量到达后，K 断开，结束补料操作。

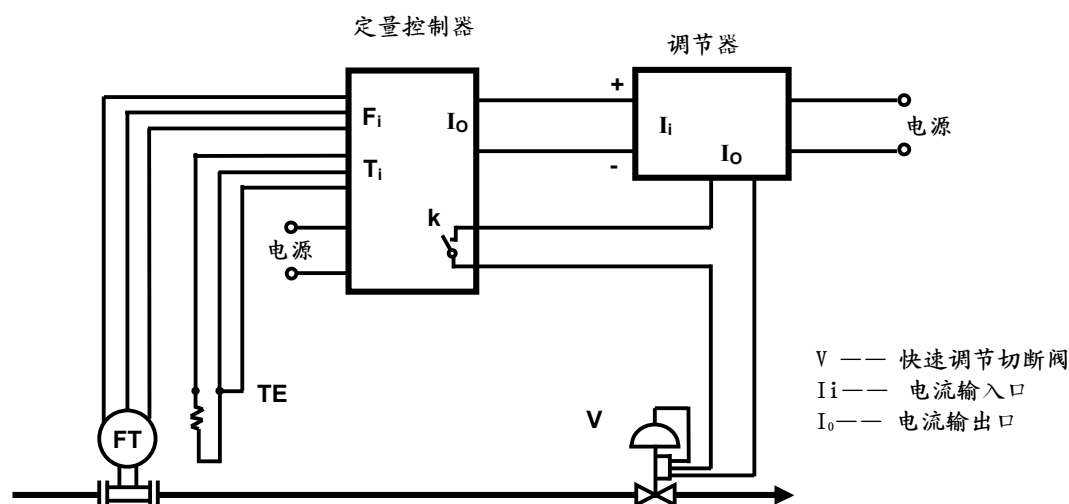


图 5 流量定值调节定量控制系统

6. 结束语

a. 流量定量控制系统是集流量测量、显示、累积和逻辑控制于一体的复合控制系统。将单阀控制改为大小阀控制，将提前量控制改为提前时间控制，引入流量传感器非线性校正，引入流体温度补偿，引入流体组份补偿等实用方法，能大大提高控制精确度。

b. 单摆交替灌装操作周期短，为了确保安全，须有特殊的逻辑控制功能。

c. 随着工艺控制要求的不同，流量定量控制会有许多发展变化。在不改变硬件结构的情况，通过软件设计，绝大多数新要求都能得到满足，非常重要工艺专业将要求讲清楚，并且规定验收试验方法。

d. 流量定量控制系统如果在易燃易爆场所使用，还必须遵守防爆规程，以确保安全。

参考文献

1. 上海宝科自动化仪表研究所. FBC 10 型批量控制器.1997
2. 于世奇等.高精度酒精定量发售自控系统的研究与设计. 自动化仪表, 1999(12): 28~31
3. 上海光华仪表厂. XSK-40 智能流量定量控制仪使用说明书
4. 李景玉. 定量装车计算机控制系统的实现. 石油化工自动化, 2001(2): 73~74