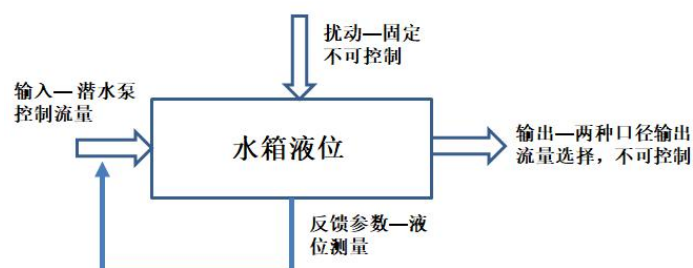


## 简易水箱液位监控系统（B 题）

### 赛题关键点分析和方案参考

#### ➤ 题目解析

根据题目任务和要求的描述，我们可以了解本题是一个基于流量控制的闭环控制系统，系统框图如下图所示。输入为潜水泵的泵水量，该泵水量可控；输出为不同口径的出水口，该出水口已经确定，不可控；反馈参数为液位读数，由比赛组委会提供的基于 FDC2214 的液位测量模块，该反馈量反应了系统控制精度；外部扰动源为固定扰动源，不可控。



由上述分析，可以看到，完成本题的关键有 3 部分内容，1) 水泵出水量控制 2) 液位测量精度控制 3) 控制算法；本解题方案侧重于介绍硬件设计方案，控制算法不做具体介绍。

- 1) 水泵出水量控制：给储水容器上水用的水泵由题目规定，水泵的参数中提到了电压工作范围、扬程、流量和功率和出水口口径；同时题目对上水时间和水位保持平衡的时间有指标要求，这表明如何**控制水泵流量**是本题的另一个关键点。
- 2) 液位测量精度控制：用于水位测量的传感器和电路已由题目指定（FDC2214 和相应的电容传感器），在题目的要求中，不管是静止液位的测量和动态平衡的液位测量都要求“检测误差不大于 2mm”，所以，如何合理应用指定的电路来**精确且快速测量水位**，是本题的一个关键点。

#### ➤ 关键问题的解决方案

##### 1、 水泵出水量控制

###### a) 水泵的基本理解参数

水泵的种类非常多，一般由电机和泵两部分组成。根据题目给定水泵的参数：电压 DC-12V（6V 即可工作）；扬程 300cm；流量 240L/H；功率 4.8W；口径 8mm。这里唯一可变的参数是电机的工作电压，表明它是一个电压控制的直流潜水泵。通常水泵的扬程，流量，都是指在它的额定工作点（功率）上的工作能力，而这个额定工作点一般也是在指定的最高

额定电压时（12V）时的功率点。因为水泵的功率参数没有说明是输入功率还是输出功率，所以我们按直流水泵参数的惯例，认为它是输出功率。假设这个水泵的效率为 75%。那么这个水泵的额定输入功率为  $4.8\text{W}/0.75 = 6.4\text{W}$ ，水泵的输入额定电流为  $6.4\text{W}/12\text{V} = 0.53\text{A}$ 。水泵工作在某个输出功率下，它的扬程和流量跟出水管差有关，出水管差就是水泵的出水口和管道的出水口之间的高度差。当出水口径指定，管差越小时，流量就越容易受到输出功率控制。因为水泵的效率基本恒定，输出功率和输入功率成正比关系；而输入功率与输入电压成正比关系，因此无论驱动水泵的电机是哪种，基本电压总是加载到转子或者定子上，而转子或者定子在工作温度变化不大的时候，其电阻（热态电阻）一般都是恒定的。因为水泵内的电机种类未知，不能贸然采用全桥或者半桥之类 PWM 驱动。

**最佳方案是设计一个电压连续可调的程控电压源来控制，因此这道题分析到这里，我们了解到硬件设计的关键部分是要设计一个连续可调的电压源。**

根据上述分析要合理控制水流量，还需要注意如下事项：（1）合理安装泵的出水管，尽可能不要挤压到软管，导致管口径变小，减少管差（泵到上端软管出水口的高度差），同时要通过实验，了解泵与上容器之间的高度差对泵水量的影响（2）设计一个电压连续可调的电压源，输出电压 5V~12V 可调，输出电流可达 600mA（比额定电流稍大，但不至于过大而损坏电机）。

## b) 电压连续可调电压源的设计

说明：解题方案和思考很多，这里主要基于现场提供的 TI 芯片来进行设计。也欢迎更多的感兴趣的同学提供自己的解题思路。

现场提供的器件列表中有一颗 DC-DC 升压芯片：TPS61085。TPS61085 是一片开关频率恒定的升压芯片。输入电压范围 2.3V~6V，输出电压可调。其输出电流的能力也满足要求如下图所示。当输入电压越大，输出电流也越大，如果要达到水泵的额定工作点，设计时可选输入电压为 5V。

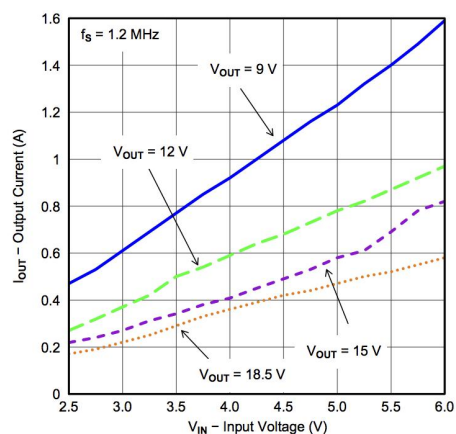
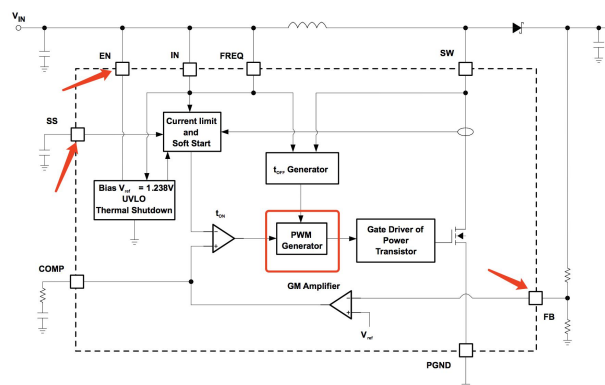


Figure 1. Maximum Load Current vs Input Voltage

该芯片，其输出电压的调节是通过调节其内部 PWM 占空比来达到，根据 TPS61085 的内部结构图，如下图所示。可以看到内部 PWM 的产生可以分别由（1）反馈电压端（FB）的电压，（2）芯片使能端（EN），（3）软启动端（SS）端来进行控制。

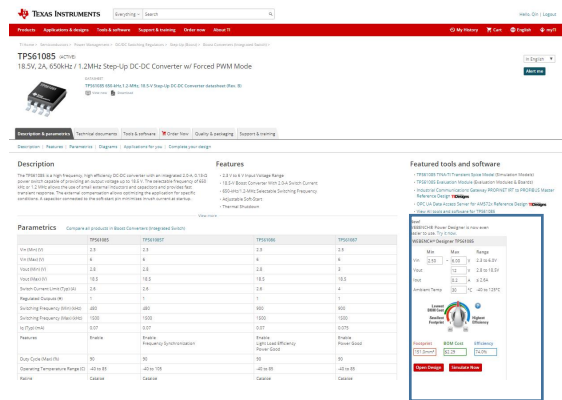


考虑到现场提供了 MSP430 单片机, 具有 PWM 产生功能, 所以最直接的方式选用 PWM 波加到 TPS61085 的使能端 (EN), 调节 PWM 波的占空比, 就可以调节输出电压的大小。

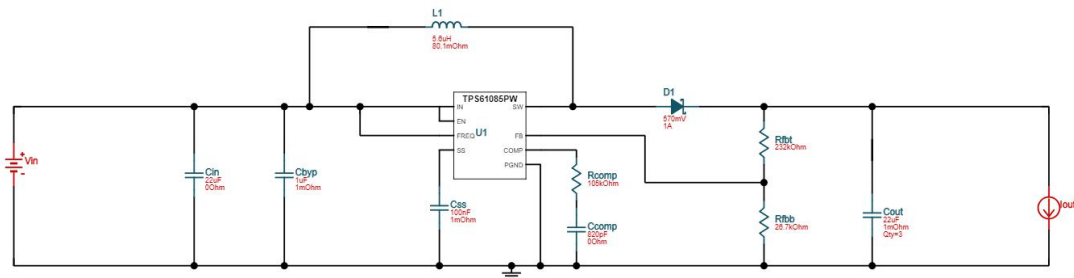
另外现场还提供了带内部 DAC 的 MSP430FR2355 Launchpad, 可以用单片机的 DAC, 来产生一个可调的直流电压, 配合运放和功率驱动管, 也可以产生连续可调的输出电压。但这时候要注意, DAC 是否可以产生负压? 如果不能, 电压就只能在一个基准值上向一个方向变化。

另外利用 PWM 波控制软启动端的调节方式与控制使能端的方式是一样的, 但 PWM 波的频率要更低, 过高的频率可能导致开关时间短于软启动时间, 芯片无法工作。

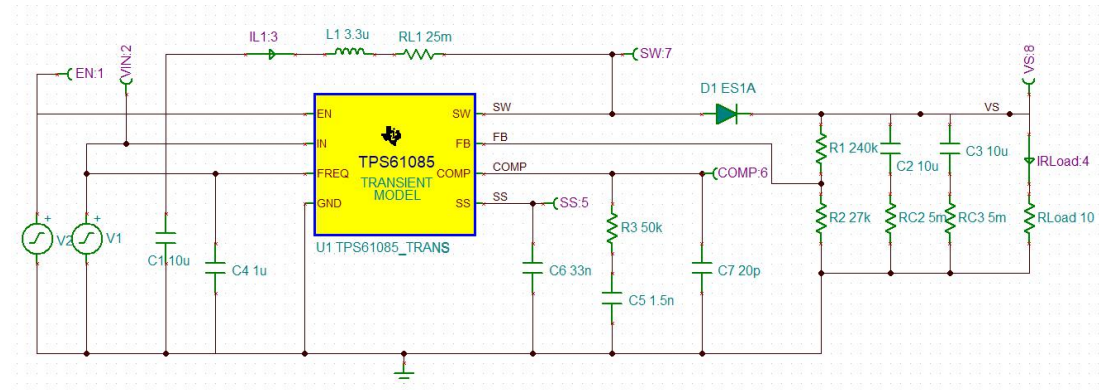
基于 TPS61085 的 Boost 电路设计图如下图所示。想进一步了解该芯片使用方法的同学可以用 Webench 进行仿真。 我们可以在 [www.ti.com](http://www.ti.com) 中找到 TPS61085, 然后点击右下角的 webench 设计界面。



基于 Webench 设计的原理图如下图所示：



从 webench 可以将设计文件以 TINA 的文件格式导出，基于 TINA 完成相应的仿真。下图为基于 TPS61085 的 TINA 仿真：

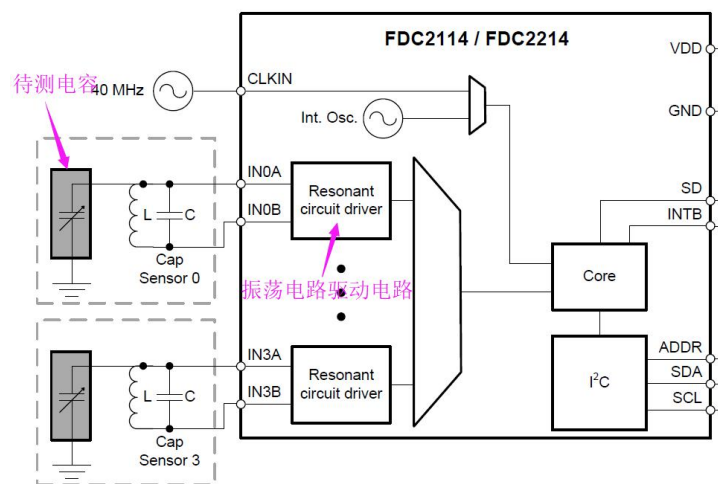


## 2、 液位测量精度控制

### a) FDC2214 电容传感器测液位基本原理分析

FDC2X1X 系列芯片是多通道电容测量芯片，主要用于接近传感和液位测量。其结构框图如下图所示，每个测量通道由待测电容、外接的电感  $L$  和电容  $C$ ，以及芯片内部的振荡电路驱动电路组成一个振荡电路。待测电容不同，则振荡频率  $f_{\text{sensor}}$  不同。实际上 FDC2214 每个通道的 AD 转换后的数值量化结果  $DATA_X$ ，体现的是这个通道参考频率  $f_{\text{REF}_X}$  和振荡频率  $f_{\text{sensor}}$  的关系：

$$f_{\text{sensor}_X} = \frac{CH_{\text{FINSEL}} * f_{\text{REF}_X} * DATA_X}{2^{28}}$$



当 $f_{\text{sensor}}$ 值确定后，通过电路设计上已知的电感值  $L$  和电容值  $C$ ，就可以得到待测电容的值。待测电容值为上图中的箭头指向的标记部分，其实它由两部分组成，一部分是偏置电容，另一部分为极板电容。

在比赛现场为参赛队提供了如下图所示的液位测量模块，包括一个 MSP430F5529 Launchpad，一个 FDC2214 模块，一根柔性电路板（测量液位电容极板）。



用于液位测量的电容极板被设计成细长条形，电容极板和大地形成电容，这个电容的值取决于极板的面积、极板与大地之间的介质、极板摆放的方式。当极板位置被固定后，电容值只取决介质。水的介电常数远大于空气的介电常数（80 倍左右），电容极板很贴近水时，它的电容值随水位明显变化。当然，人体用手去接近电容极板时，电容值也会明显变化，因为人体也是介电常数很大的介质。我们把随介质变化的电容极板产生的电容称为极板电容。另外连接电容极板到 FDC2214 管脚的引线也会与大地形成电容。这个部分电容称为偏置电容（offset）。偏置电容会随引线的长短，位置而变化。

### b) 快速精确测液位的问题

通过提供的工具，上水观测水位变化和电容值（待测电容值）的关系，很快就可以发现精确水位测量的以下几点：

- (1) 水位不变化，拉动电容极板到电路之间的引线或者人体接近电容极板，都会导致电容发生变化。

- (2) 当环境固定时（引线固定，人体或其它导体没有接近），测量水位和电容的关系，发现不呈直接的线性关系。这是因为圆桶形的塑料容器在现场提供的固定方式下，一定会被挤压变形，导致相应位置上介质的厚度不一致。
- (3) FDC2214 的响应速度非常快，没有必要担心测量速度的问题。

**c) 基于 FDC2214 的去环境干扰方法**

- (1) 观察提供的电容传感极板，会发现上面有三个通道的电容极板，两短一长，长极板是用来测量的极板，短的极板一高一低，当容器上水时，低位的短极板在水位之下，高位的短极板在水位之上。环境因素导致的电容变化问题对三个极板都会共同作用，像电路中变化的共模信号，要去掉这个共模信号的影响，可以采用相减的方法。可以认为引线变化引入的电容变化，会同时作用到短极板和长极板上。人体接近引入的变化电容会同时作用到长极板和上端的短极板上（因为上端短极板有一粗根引线和测量极板平行，而极板部分与水位无关）。通过实测数据来验证这个想法。然后在计算时通过道通数据的相减，可以大大减少环境因素引入的干扰。
- (2) 当环境因互引入的干扰被有效抑制之后，由于容器变形成的非线性关系，可以采用多点测量再做曲线拟合的方法进行标定。标定测量数据时，可以对容器变形的拐点附近多测一些数据。曲线拟合可以用多种方法，可以用 Microsoft Excel, 或者 Matlab 等其它数学工具。拟合函数的选择要根据数据特点。因为是容器变形引入的，所以用多段折线可以精确拟合。拟合之后要用实测数据再验证过，确保精度是可靠的。