



北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

3

《现代传感器与智能检测技术》 课程实验报告

基于压阻式压力传感器的相对高度测量实验

小组成员：王昊宸（1120210529）

任课老师：郑德智 教授

2024 年 5 月 4 日

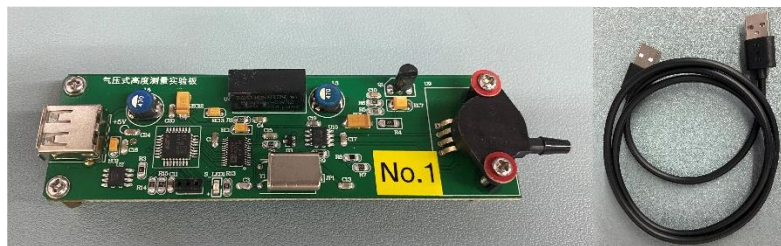
一、实验目的

- 掌握硅压阻压力传感器的基本测量原理；
- 掌握飞行器上气压式测高系统的基本原理；
- 设计绝压型硅压阻压力传感器测高系统；
- 建立大气压力与高度的数学模型；
- 分析系统误差的来源与抑制手段。

二、实验器材

2.1 实验器材整体介绍

气压式高度测量实验板、USB 连接线、上位机（笔记本电脑）以及上位机软件。（请补充整体实验器材组成，介绍实验压力测量的基本原理）



图表 1 气压高度测量实验板

实验板通过 USB 链接至电脑，通过串口调试助手读取接收端的电压和温度。由于海拔越高，气压越低，因此通过绝压传感器和环境温度信息可以进行标定，获得准确的海拔信息。

实验板的温度传感器为 DS18B20Z，传感器具有 1 线通信接口，且可以通过数据线路供电。它的测量温度范围在 -55°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 之间，并且提供了 9 位或 12 位的温度转换，转换时间分别为 93.75 毫秒和 750 毫秒。此外，DS18B20Z 还具备片上 ROM，用于存储唯一的 64 位串行码。

温度信息和压力传感器信息（经过运算放大器）将信息发送至 C8051F310/2/4 处理器，处理后将结果通过 USB 传输到电脑端口进行处理。

2.2 压阻式压力传感器（MPX2200AP）

介绍 MPX2200AP 传感器压力测量的基本原理及特点。

MPX2200AP 传感器是一款压阻式压力传感器，用于绝对气压的测量。

MPX2200AP 传感器基于压阻效应进行气压测量。当半导体材料受到外界压力作用时，其电阻值会发生变化。传感器内部集成了由半导体材料制成的压阻元件，这些元件被精确地设计和制造，以便对气压变化产生敏感的反应。当外界气压发生变化时，它会作用于传感器的感压膜片上，导致膜片产生微小的形变。这个形变会进一步传递给压阻元件，使其电阻值发生相应的变化。

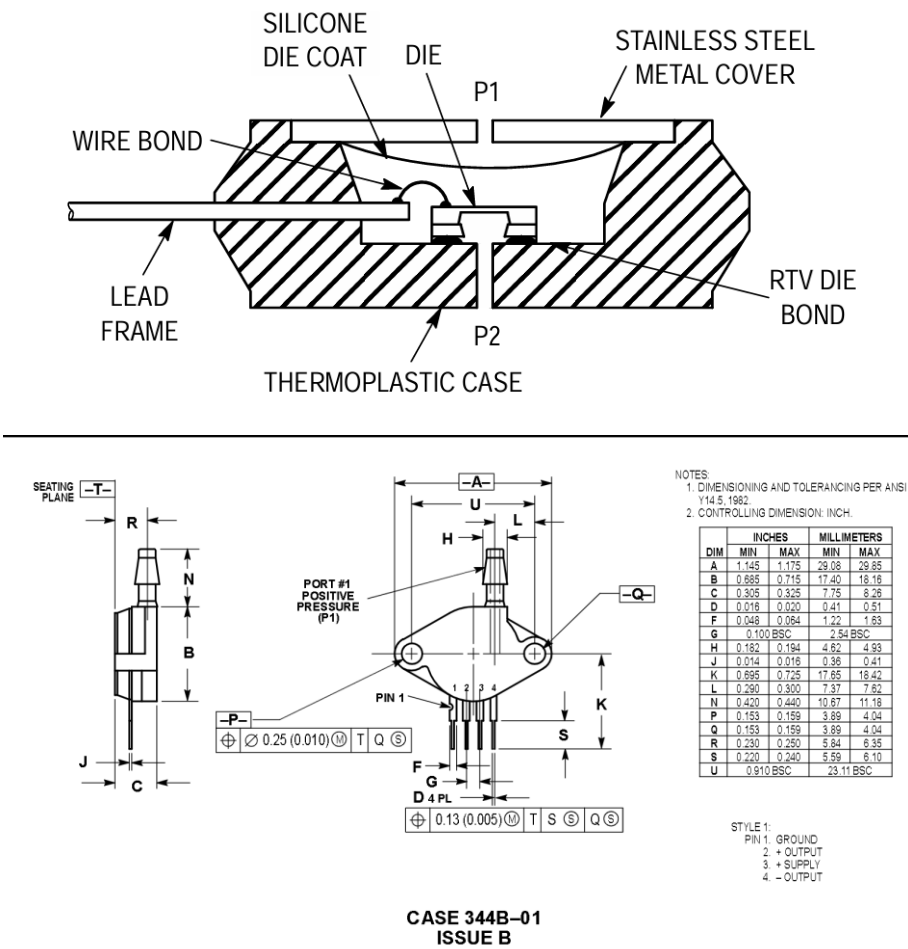


图 2 MPX2200AP 的内部结构图

传感器内部的电路会监测这些电阻值的变化，并将其转换为与气压成比例的电压或电流信号输出。MPX2200AP 有以下特点：

- 1. 精度高：根据官方文档，该传感器的精度通常可以达到 0.057mV/Kpa。

2. 测量范围宽：根据官方文档，该传感器可以测量 0-700Kpa（约 7 倍大气压）。
3. 响应速度快：响应速度仅有 1ms。
4. 线性度高： $\xi_L \approx 1\%$

2.3 温度传感器（DS18B20）

介绍 DS18B20 温度传感器测量的基本原理。

DS18B20 是比较特殊的温度传感器，它直接输出对应的温度二进制（编码后的数字信号）。DS18B20 传感器测温原理基于两种振荡器。低温度系数振荡的振荡频率受温度影响小，可以认为其产生一个固定频率的脉冲信号，该信号被送入减法计数器 1。高温系数振荡器的振荡频率随温度变化而明显改变，该振荡信号被送入减法计数器 2。

当 DS18B20 开始测量温度时，计数器 1 和温度寄存器被预置在 -55°C 所对应的一个基数值。计数器 1 对低温度系数振荡器产生的脉冲信号进行减法计数。当计数器 1 的预置值减到 0 时，温度寄存器的值将增加 1，计数器 1 的预置值重新被装入，然后计数器 1 重新开始计数。这个过程会一直循环，直到计数器 2 计数到 0，此时停止温度寄存器值的累加。最终，温度寄存器中的数值即为所测量的温度值。

此外，DS18B20 中还包含一个斜率累加器，用于补偿和修正测温过程中的非线性，其输出用于修正计数器 1 的预置值。这样的设计使得 DS18B20 能够提供高精度的温度测量，测温范围为 -55°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ ，在 -10°C 至 $+85^{\circ}\text{C}$ 范围内的固有测温误差为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

DS18B20 的这种测温原理允许它以不同的分辨率进行温度转换，包括 9 位至 12 位的可编程分辨率，对应的可分辨温度分别为 0.5°C 、 0.25°C 、 0.125°C 和 0.0625°C 。在最高分辨率 12 位时，DS18B20 最多需要 750ms 将温度值转换为数字，而在 9 位分辨率时，这个转换过程最多只需要 93.75ms。同时，DS18B20 的寄生电源设计也大大提高了该芯片的适应性，让它可以更好地封装和应用。

三、数据采集

- 实验过程采用分组方式，依据选课人数，调整组内人员，原则上每组人数不超过 4 人；分组后，每组确认人员分工，并按照分工分别独立完成

各自的负责内容，并提交一份实验报告；

- 采集教学楼一层到顶层的变化数据，每层测量采集三组数据并记录，完成原始测量数据表格；

3.1 实验板连接上位机

将实验板连接到计算机。查看设备管理器中的“端口(COM 和 LPT)”，若存在设备 Silicon Labs CP210x USB to UART Bridge，说明计算机已识别到加速度计并连接到串口，图中为连接到 COM5。

3.2 打开串口调试助手进行实验

打开“气压测高实验资料>>UartAssist-v438”将实验板连接到计算机。确认连接串口号为 COM5。



图 1 串口调试助手界面

在界面输入“ReadAll;”并发送（注意这里的分号应为英文符号）。如图所示，第一个数据为电压值、第二个数据为温度值。



图 2 通过串口调试助手发送指令



图 3 串口调试助手返回压力、温度数据

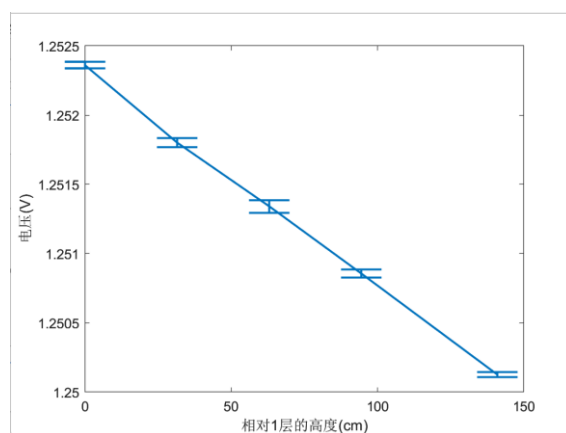
3.3 数据记录

本报告针对学校的理科教学大楼，进行气压测量。我校理科教学大楼一共 5 层，我选择理教北侧层高均匀的教学区进行测量。在测量的过程中，将气压传感器放于地面，远离窗户和空调，尽量保持在同一投影位置进行测量。

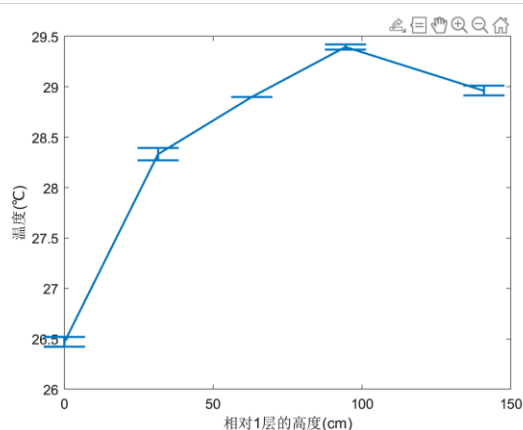
表 1 原始测量数据

第一层	第二层	第三层
<pre>clc,clear data1= [1.25233, 26.5 1.25233, 26.5 1.25238, 26.5 1.25236, 26.5 1.25238, 26.5 1.25237, 26.5 1.25236, 26.5 1.25234, 26.5 1.25239, 26.5 1.25236, 26.5 1.25232, 26.5 1.25236, 26.4 1.25238, 26.4 1.25241, 26.4 1.25238, 26.4 1.25233, 26.4</pre>	<pre>data2=[1.25174, 28.5 1.25178, 28.4 1.25182, 28.4 1.25179, 28.4 1.25179, 28.3 1.25184, 28.3 1.25187, 28.3 1.25184, 28.3 1.25182, 28.3 1.25181, 28.3 1.25180, 28.3 1.25178, 28.3 1.25175, 28.3 1.25178, 28.3 1.25180, 28.3 1.25181, 28.3</pre>	<pre>data3=[1.25142, 28.9 1.25146, 28.9 1.25137, 28.9 1.25129, 28.9 1.25135, 28.9 1.25133, 28.9 1.25135, 28.9 1.25132, 28.9 1.25132, 28.9 1.25133, 28.9 1.25135, 28.9 1.25134, 28.9 1.25131, 28.9 1.25132, 28.9 1.25127, 28.9 1.25131, 28.9</pre>
第四层	第五层	
<pre>data4=[1.25082, 29.4 1.25087, 29.4 1.25088, 29.4 1.25086, 29.4 1.25083, 29.3 1.25085, 29.4 1.25087, 29.4 1.25086, 29.4 1.25083, 29.4 1.25084, 29.4 1.25088, 29.4 1.25093, 29.4 1.25087, 29.4 1.25084, 29.4 1.25086, 29.4 1.25081, 29.4</pre>	<pre>data5=[1.25009, 28.9 1.25015, 28.9 1.25014, 28.9 1.25011, 28.9 1.25012, 28.9 1.25011, 28.9 1.25015, 29.0 1.25014, 29.0 1.25014, 29.0 1.25012, 29.0 1.25014, 29.0 1.25011, 29.0 1.25013, 29.0 1.25014, 29.0 1.25011, 29.0 1.25012, 29.0</pre>	

根据所测结果，绘制如下误差图：



图表 3 电压-高度的误差棒图



图表 4 温度-高度的误差棒图

本实验首先统计了理科教学楼的层高,通过数台阶的方式可以准确地确定层高。在理科教学楼中,每层之间有 30 个台阶,1-3 层的台阶高度为 10.5cm。而 4-5 层的台阶高度达到了 15.5cm。根据台阶的累加关系,确定每层楼的高度。

	每层海拔	每层层高
1	0	3.15
2	3.15	3.15
3	6.3	3.15
4	9.45	4.65
5	14.1	

图表 5 理论层高和每层海拔（以 1 层为海拔 0 点）

根据数据显示,气压与相对 1 层的高度几乎为线性关系,且随着楼层升高,气压逐渐减小。符合预期。

而温度随楼层的差异比较大,在本次测量中,4 层温度最高,1 层温度最低,但并没有明显线性关系。为了避免测温元件 DS18B20 的发热情况考虑,本实验报告中的数据优先采集了高层,再逐步向下楼层采集数据,并有意规避了阳光照

射和元件本身发热等问题。楼层温度主要受该楼层活动的人数和与楼外空气对流情况决定，因此本报告认为温度测量情况合理。

- 数据处理 (详见第四部分);
- 采用分组答辩方式来获得最终的实验结果，每名组员分别对自己负责的内容进行汇报，依据完成情况和质量进行评分。每组需要共同完成 1 份 PPT 即可，每名组员分别介绍工作。

四、数据处理

对采集数据进行处理分析，并与标准数据进行比对(标准数据可参考楼层高度等建筑信息)并验证高度与压力模型的关系，并分析误差来源；

4.1 建立大气压力-高度模型

根据课上所授内容以及相关资料查阅，可以得到大气压力-高度模型如下：

$$H = \frac{T_0}{\tau} \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_0} \right)^{R\tau} \right] (\text{km}) \quad (1)$$

式中， H 为高度， P_H 为 H 处的气压、 T_0 为所处环境气温、 P_0 为标准海平面气压 760 mmHg、 τ 为气温垂直递减率-0.0065°C/m、 R 为气体常数 29.27m/°C。

4.2 对数据进行平均处理

实验中由于每一层记录的数据个数不完全相同，于是取每层的前三个数据进行平均，得到此楼层的实验板输出电压值与温度值。

4.3 气压值计算

通过电压值得到所测得气压值，在课件 MPX2200AP 的介绍中我们已经得到了此模块输出电压与被测气压之间的关系，注意到在实际输出时，由于电压过小，我们添加了 AD620AR 作为运算放大器对输出信号进行放大，其放大倍数：

$$G = \frac{49.4(\text{k}\Omega)}{R_G} + 1 \quad (2)$$

实验板中所用电阻 R_G 为 820Ω ，根据式（2）可以得到放大倍数为 61 倍。因此可以得到气压表达式为：

$$P_H = P_0 + \frac{V}{0.2 \times 10^{-3} \times 61} \text{ (kPa)} \quad (3)$$

由于传感器未事先进行校准，无法得到被测压力的绝对值，取 $P_0 = 0$ ，得到相对的压力值，因此之后无法得到绝对高度，仅能得到相对高度作为结果。注意到式（1）中压力单位为汞柱高度，因此需进行单位换算，式（3）可写为：

$$P_H = \frac{V}{0.2 \times 10^{-3} \times 61 \times 0.13322} \quad (4)$$

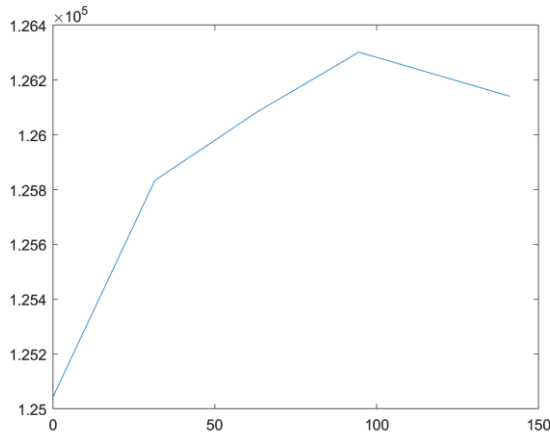
4.4 绝对高度计算

将式（4）带入式（1）。其中，温度取所有数据的平均值，并换算为开尔文温度。并将所给常数带入，得到绝对高度表达式如下：

$$H = \frac{T_0}{-0.0065} \left[1 - \left(\frac{V}{760 \times 0.2 \times 61 \times 0.13322} \right)^{29.27 \times (-0.0065)} \right] \text{ (km)} \quad (5)$$

将每一层的数据代入，可得计算得到楼层高度，并完成如下表格。其中高度差为两层楼直接的高度。

对于式(5)，本报告保持怀疑态度，在 P_H 和 760mmHg 的比值中，似乎少乘了 10^{-3} 。若将数据带入式(5)，可以看到温度对高度的影响远大于气压对高度的影响。这与实际严重不符。



图表 6 将数据带入式(5)得到的结果，明显高度和温度的相关性很高

因此，我认为应该将式(5)修改为：

$$H = \frac{T_0}{-0.0065} \left[1 - \left(\frac{V}{760 \times 0.2 \times 61 \times 0.13322 \times 10^{-3}} \right)^{29.27 \times (-0.0065)} \right] (\text{m}) \quad (6)$$

同时在式(6)中,我认为最终得到H的单位应该是m,原因如下:普遍认为在海拔提高100m,气压下降约1.1kPa,而将1.1kPa带入式(1)右侧有(取气温为295K,即气温为20℃):

$$\frac{T_0}{\tau} \left[1 - \left(\frac{P_0 - 1.1 \text{kPa}}{P_0} \right)^{R\tau} \right] = \frac{T_0}{\tau} \left[1 - \left(\frac{101.325 - 1.1}{101.325} \right)^{R\tau} \right] = 94.3496 \quad (7)$$

其单位根据常识应为“米”,故我修改了最终的单位,将km改为m。

同时,为验证式(6),我使用气象学中较为常用的大气静力方程进行验证:

在等温层中,气压随高度的变化可以近似为:

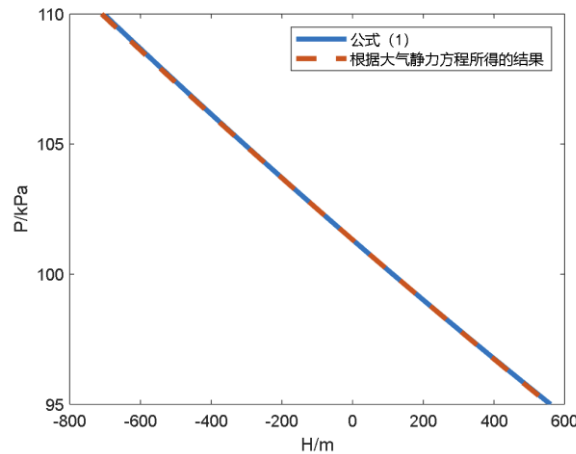
$$P_H = P_0 \exp \left(-\frac{gH}{RT_0} \right) (\text{kPa}) \quad (8)$$

因此可以求解出高度H为:

$$H = -\frac{RT_0}{g} \ln \left(\frac{P_H}{P_0} \right) (\text{m}) \quad (9)$$

其中 $R = 287.05 \text{J}/(\text{Kg K})$ 为干空气气体常数。

在气压为110kPa–95kPa的范围内,我通过数值仿真验证了式(1)和式(9)的统一性,如图所示:



图表 7 公式 1 和公式 9 的统一性验证

可以看到两线基本重合,因此式(1)合理。

将数据带入式(6)进行处理,得到以下表格。

表 2 高度计算数据

层数	平均电压 /V	平均气压 /KPa	绝对高度/m	高度差/m
1	1.2524	102.653	-114.171	3.2274
2	1.2518	102.607	-110.943	3.0413
3	1.2513	102.569	-107.902	3.2398
4	1.2509	102.529	-104.662	5.3001
5	1.2501	102.469	-99.3619	

4.5 与标准数据进行对比

请查阅教学楼的相关资料，将被测层高与标准高度值进行比较，分析结果是否合理。

4.6 误差分析

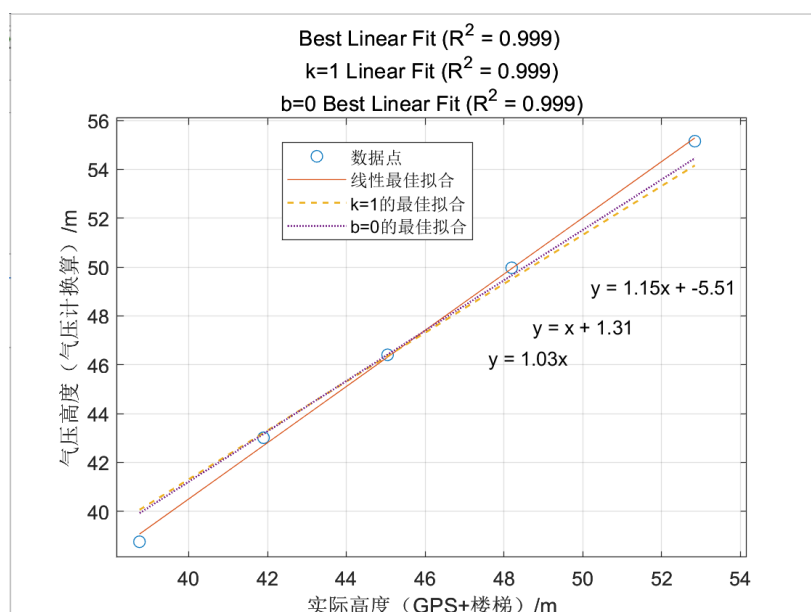
➤ 相对高度转换为绝对海拔：

表 2 中的气压全部大于了 101.325kPa，且海拔低于海平面，这不符合客观事实。影响海拔零点的因素主要有 2 个：

1. 式(3)中的 $P_0 \neq 0$
2. 由 USB 接口或者 R_g 影响导致式(2)的电压-气压换算系数有改变

首先确定绝对海拔：通过“北斗伴”软件，确定理教 1 层的实际绝对高度为 38.75m 左右，接近北京平原地区海拔 20-60m 的事实，因此暂且认为“北斗伴”的海拔数据准确。

针对因素 1，因此根据 1 层绝对海拔 38.75m 反求 $P_0 \approx -1.7743kPa$ 。补充 P_0 的大小，重新带入数据可以得到：



图表 8 通过修改 P_0 得到的新绝对高度

引入 P_0 的拟合结果如图 7 所示。理想情况下，实际高度和气压高度应该为 $y = x$ 的直线，因此本报告使用了 3 种拟合方法：

1. 最佳线性拟合(k 和 b 都任取)
2. $k=1$ 的固定斜率拟合
3. $b=0$ 的固定截距拟合。

对于 3 种拟合方式，对应的 R^2 均接近 1，拟合效果都很好。

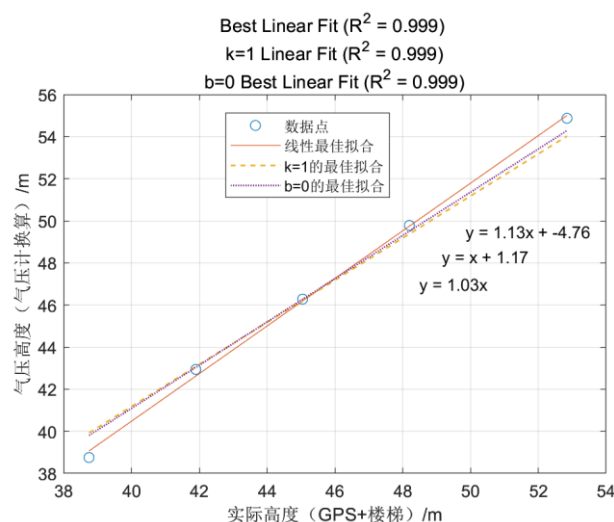
	每层海拔	每层层高
1	38.7527	4.2572
2	43.0099	3.3968
3	46.4067	3.5603
4	49.967	5.1821
5	55.1491	

图表 9 引入 P_0 得到的最终数据

针对因素 2，可能电压转换过程中 USB 接口或者芯片的放大倍数发生了改变，因此修改电压-气压换算系数的大小也可以让一层的高度达到实际的 38.75m。在本报告的该假设中，假定：

$$P_H = \frac{V}{0.2 \times 10^{-3} \times 62.0729} (\text{kPa})$$

得到以下结果：



图表 10 改变电压-气压换算系数大小实现的拟合

对比拟合的结果，可以看到图 9 的 3 条拟合曲线在 R^2 均接近 1 的情况下，都比图 7 中的 3 条曲线更靠近 $y = x$ 。因此，我所拿到的板子的电压-气压换算系数的问题大于假设 $P_0 = 0$ 的影响。得到的结果为：

	每层海拔	每层层高
1	38.7527	4.1877
2	42.9404	3.3394
3	46.2798	3.4998
4	49.7796	5.0914
5	54.871	

图表 11 改变电压-气压换算系数得到的最终结果

但是经过绝对高度转换的两组数据（图表 9 和图表 11）得到的层高，均比修正前（表 2）距离实际（图表 5）情况更远。且 1 层层高和 4 层层高偏移尤其明显。结合 1 层和 5 层温度的特殊变化（见“温度变化的主要原因”），我认为应该添加和温度相关的补偿项才能更好的拟合实际情况，但是由于测量时的温度信息不可复现，故没有进行实验验证。

➤ 分析温度变化的主要原因：

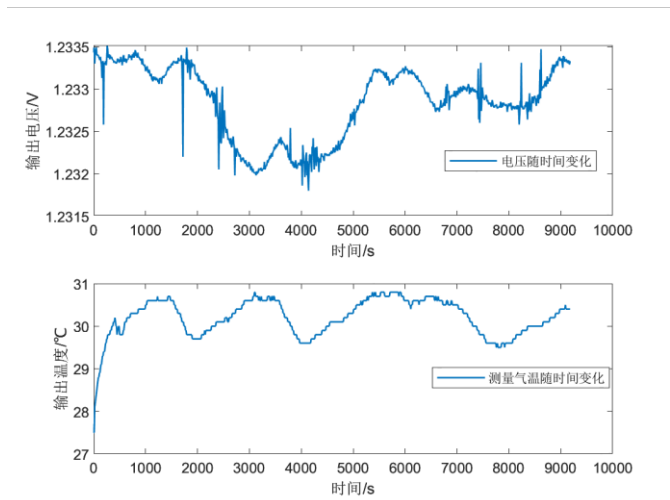
温度变化主要由图表 2 所展示。由于我在教学楼采集的温度数据，每层的温度主要受到：开窗通风情况、空调情况和人数影响。理科教学楼 5 层整体人数较少，因此温度低于预期。同时由于 1 层阳光较少，且通风状况极好，因此温度明显低于预期。

整体来说，海拔越高温度越高。我认为主要由空气对流引起的。

➤ 分析气压测高法得到的测量值与标准值存在差异的原因。

1. 实验仪器误差，温度读数和气压读数都不稳定。在测试的过程中，重新打开端口都会导致数据有较大的波动。其中气压波动较为明显（见图表 3 和图表 4）。尽管在实际测量中，我只取了示数稳定后的 16 个点，但是仍有较大的波动。

同时，我记录了 5 月 10 日理教 5 层连续 150min（每 10s 记录一次）的温度和气压（电压）数据，在没有外界干扰的情况下，实验仪器也表现出明显不稳定的情况。其中气压的不稳定情况更加明显，且幅度较大，会直接影响最终的测量结果。



图表 12 长时间测量结果

2. 高度-气压转换公式不完全正确，没有考虑到湿度等因素。在教学楼环境中，层和层之间的湿度差异较大，可能会影响气压的测量。

五、实验结论

1.教学楼层高

	1-2层	2-3层	3-4层	4-5层
推算层高/m	3.2274	3.0413	3.2398	5.3001
实际层高/m	3.15	3.15	3.15	4.65
误差/m	-0.0774	0.1087	-0.0898	-0.6501
误差比例	-2.46%	3.45%	-2.85%	-13.98%

图表 13 教学楼层高的误差和相对误差

根据图表 12 可以得到，整体测量效果较好，最大误差仅有 14%。

2.误差来源

通过验证，可以确定我所拿到的板子的电压-气压换算系数的问题大于气压传感器未校准的影响，导致绝对海拔低于 0m。