

第五章 倾斜传感器并不简单

作电子这一行很多年，有两三年的时间接触传感器比较多，包括各种传感器，比如温湿度、应变、拉力等等，会涉及到传感器的应用，也会有研发。我发现在诸多传感器中，有一种传感器需求量很大，而且要求很高，它就是倾斜传感器。顾名思义，它是用来测量物体的倾斜角度的，功能很单一，但是要把它作好却并非易事。我足足花费了近两年时间来研究它，最终称得上小有成果。本章，振南就对倾斜传感器及其研发历程进行详细的介绍。

1、倾斜传感器的那些基础干货

很多行业都会有倾斜测量的需求，很多人也都在研发倾斜传感器，不论是基于怎样的原理。振南开宗明义，先把我所了解的一些基础的内容告诉大家。

1.1 典型应用场景

基本上所有直接或间接对倾斜敏感的监测场景都是适用的。比如危楼、桥梁、水平结构、边坡、地基、古建筑、风电塔筒等等，如图 5.1 所示。我们可以理解为：任何物体姿态的变化，一定会引起其位置角度的变化，从这种意义上说，倾斜传感器的需求空间是巨大的。



图 5.1 倾斜传感器的一些典型应用场景

1.2 倾斜传感器的原理

倾斜测量有很多种实现原理，比如摆式、滚珠式、加速度式等。其中最常见的是滚珠式和加速度式，后者又可分为单轴、双轴，同时基于加速度计算倾角可以实现大量程、高精度和高可靠性，所以在很多要求较高的场合，加速度倾斜传感器基本都是首选。

1.2.1 滚珠式倾斜开关

很多时候我们也许并不需要知道物体倾斜的确切度数，而只是想知道它是否发生过位移。比如桌子上的箱子是否有人抱走，或者下水道井盖是否被人撬开。此时使用倾斜开关是比较合适的方案，成本低，应用简单。

倾斜开关的原理非常简单，如图 5.2 所示。



图 5.2 水银式与滚珠式倾斜开关

当倾斜开关倾斜到一定角度时，其内部的水银产生流动或金属滚珠发生滚动，将两个电极接通，开关即闭合。根据不同的倾角阈值，倾斜开关可分为不同的规格，如 5° 、 10° 、 20° 等等。

1.2.2 加速度式倾斜传感器

这类传感器较倾斜开关要复杂，它们的基本原理是对倾斜过程中重力在其各个轴上的分量进行计算，进而得到单轴或双轴的精确倾斜角度。

1) 直接输出倾角

有一些 MEMS 芯片内部已经完成了加速度到倾角的计算，它们会通过数字或模拟接口直接输出倾角结果，这使我们的开发变得比较简单，经典的芯片如图 5.3 所示(希望大家能为芯片选型提供参考)。

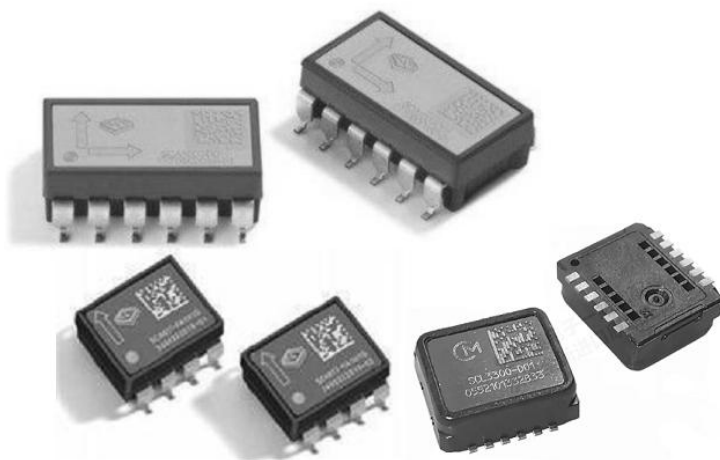


图 5.3 直接输出倾角的传感器芯片(SCA103、SCA3300 与 SCA60C)

2) 加速度计算倾角

相较于上面介绍的直接输出倾角的几款芯片，3 轴加速度计更加流行，选型空间更大，各大芯片厂商基本上都推出了自己的 MEMS 芯片，比如 ADI 的 ADXL345、ST 的 LIS3DHH、村田的 SCA3300、飞思卡尔的 MMA8451 等等。这样，开发者可以根据自己产品的精度和成本，选择合适的芯片。

3 轴加速度计可以感知 XYZ 三轴上的加速度，当其静止时，3 个轴的加速度矢量和即为重力加速度 g 。基于这样的一个基本原理，我们可以通过 3 轴加速度计算倾角，再加上一些更深层的算法、数据处理和校准方法，就可以让倾角达到很高的精度。这些就是本章着重要讲的内容。

那到底如何来计算倾角呢？其实在写这一节之前，振南考虑了很久，如何将计算倾

角的方法讲得足够通俗。我看了很多网文，讲得很专业，什么归一化、单位向量、参考向量，一下把我们拉回到了线性代数的年代，但是不够接地气。我试图用我酝酿已久的方式给大家讲解，如图 5.4。

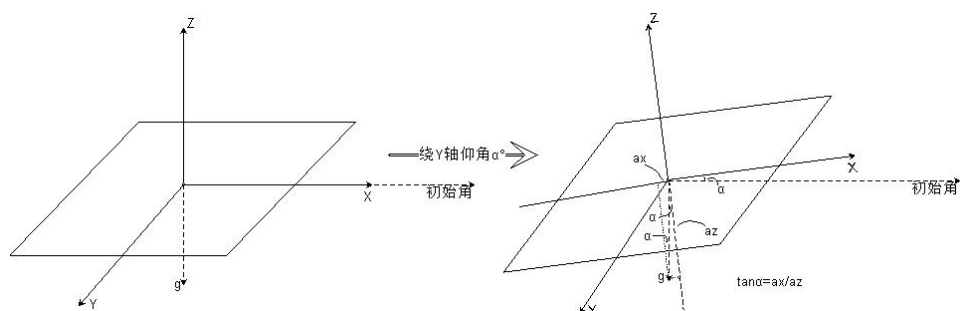


图 5.4 传感器绕 Y 轴倾斜一定角度

首先传感器水平放置，此时 Z 轴的加速度 $az=g$ 。随后我们将其绕 Y 轴倾斜一定角度 α ，此时 g 将在 X 轴上产生分量 ax ，当然 az 也会随之变化。很明显 Y 轴上不会有分量，所以 $ay=0$ ，因为传感器未绕 X 轴产生倾斜。

$$ax=g \sin(\alpha) \quad az=g \cos(\alpha) \quad \text{所以} \quad ax/az=\tan(\alpha) \quad \alpha=\arctan(ax/az)$$

同理，如果绕 X 轴倾斜一定角度 β

$$ay=g \sin(\beta) \quad az=g \cos(\beta) \quad \text{所以} \quad ay/az=\tan(\beta) \quad \beta=\arctan(ay/az)$$

α 和 β 就是由 3 轴加速度计算得到的双轴倾角。

但上面所说的只是特例，即传感器仅绕着 X 或 Y 来倾斜。如果是同时绕着 X 和 Y 倾斜呢？此时，上面的式子就需要推广了。

我们可以这样理解：传感器水平放置，先绕着 Y 轴倾斜了 α ，即 $\alpha=\arctan(ax/az')$ ；然后又绕着 X 轴倾斜了 β ，相当于将式中的 az' 又进一步在另一个方向上进行了分解，即 $az'=\sqrt{ay^2+az^2}$ 。

$$\text{所以} \quad \alpha=\arctan(ax/\sqrt{ay^2+az^2})$$

$$\text{同理} \quad \beta=\arctan(ay/\sqrt{ax^2+az^2})$$

这就是 3 轴加速度计算双轴倾角的最终的公式了，希望这种讲解方式，能够有助于大家的理解。

3) 倾角精度的提高

倾角精度的提高其实是一个系统工程，这里先从数据采集方面讲一下如何提高倾角精度。

倾角计算依赖于 3 轴加速度，因此传感器芯片的优劣直接影响倾角精度。开发者要根据精度需求，比如 $\pm 0.1^\circ$ 或 $\pm 0.01^\circ$ ，来选择不同等级的芯片，当然这也意味着不同的成本投入。有人会问不同的芯片到底差别在哪？从我的经验来说，噪声密度是一个重要指标，从宏观上可以认为它是芯片输出加速度数据的波动性或不稳定性。我们当然希望噪声密度越低越好。

通常我们并不会用单点瞬时的加速度去直接计算倾角，而是会采集一段数据，经过一些滤波算法的处理，以使数据更加稳定，最常用的就是均值滤波。振南实际用的是基于预排序的均值算法，如 5.5 所示。

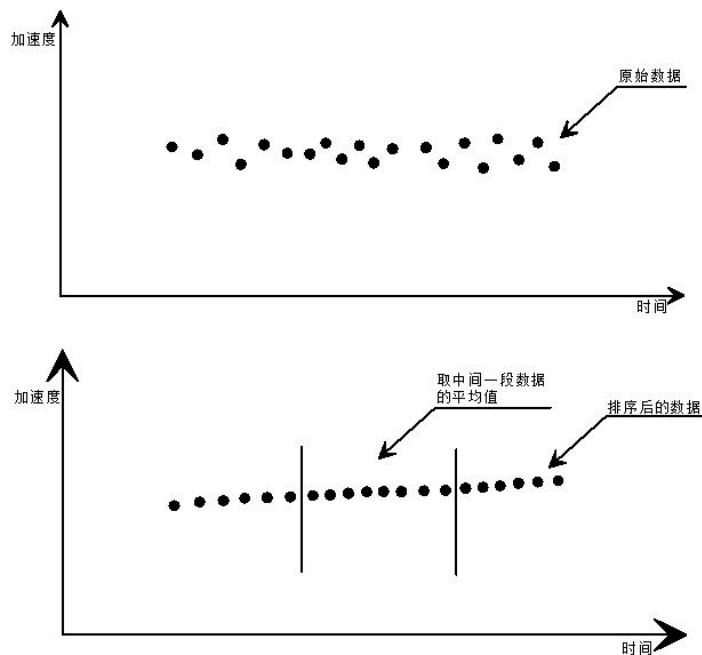


图 5.5 对采集的原始加速度数据进行排序取中段均值

到这里，关于倾斜传感器的基础知识就讲得差不多了。基于这些知识，我们起码可以研制出一个可用的传感器产品了。但是真正的挑战远不止于此，请继续往下看。

2、倾斜传感器温漂校准的基础知识

2.1 温漂产生的根源

我们知道任何物体都会或多或少的受到温度变化的影响，比如最普遍的热胀冷缩。传感器是基于物理材料制成的，所以从严格意义上来说，任何传感器都会产生温漂，即反映实际物理量的值随着温度变化而产生漂移。

关于传感器的温漂，我曾经作过一个讲座，名为《大话温补与温控》，算是把“温漂”比较通俗地进行了阐述，下面是讲座的一些核心内容。

一个例子：《调皮的尺子》。

我们用尺子去测量长度，你量得准或是不准，真值就在那里，不长不短。但是在不同的温度下，尺子的示数可能是不同的，因为尺子会热胀冷缩，如图 5.6 所示。

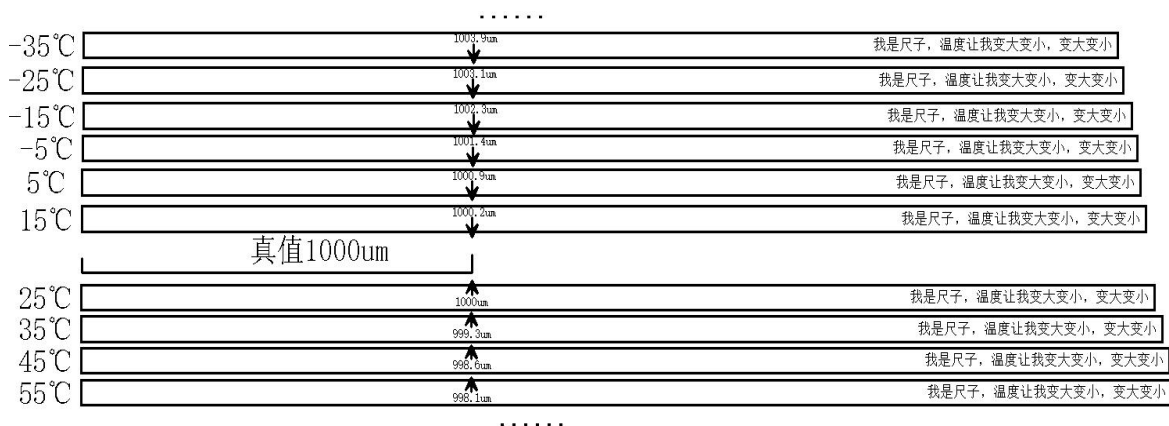


图 5.6 温度的变化使得尺子对长度测不准

也许你会说，这点温漂几乎可以忽略不计吧。确实，如果你的精度要求不高，温漂是可以无视的，但是很多应用场合下，较得就是这个真儿，差一丝都不行。比如建筑物或边坡的倾斜，其实它们的倾斜量都是非常微小的，1 年顶多倾斜 0.1° ，但是如果倾斜传感器的温漂误差就有 $0.几^{\circ}$ ，那基本上就把真值淹没了。

既然有温漂的存在，那我们如何能把物理量采准呢？

“调皮的尺子”有它的规律：每当 -25°C 时，我们用它去测量 $1000\mu\text{m}$ 的距离一定会示数 $1003.1\mu\text{m}$ 。所以，当我们看到 $1003.1\mu\text{m}$ 时，我们就知道实际是 $1000\mu\text{m}$ (-25°C) 了。

那出现一个问题： -25°C 时，测量 $2000\mu\text{m}$ 的距离，它会示数多少？ $2003.1\mu\text{m}$ ？ 2006.2 ？都不是！因为在此温度下尺子的刻度变化可能是非线性的不能依比例推算。那怎么办呢？

最笨的方法：在某一个温度下，我们记录下每个距离和与之对应的尺子示数，形成表格。以后测量的时候，拿着当前温度和尺子示数，去表里查它所对应的实际值是多少？如图 5.7 所示。

@ 5°C									
实际值	0um	1um	2um	3um	....	....	....	....	....
示数	0.12um	1.23um	2.43	3.56	....	....	....	....	....
实际值	500um	501um	....	....			
示数	509.34um	509.76							

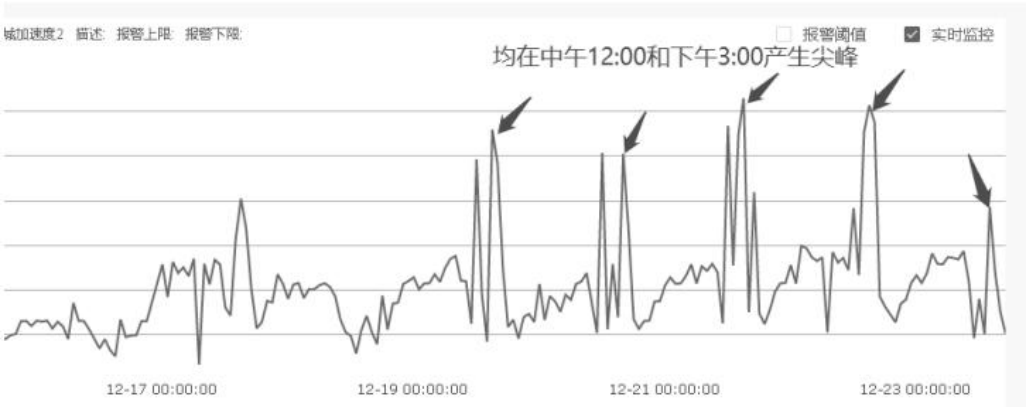
@ 25°C									
实际值	0um	1um	2um	3um	....	....	....	....	....
示数	0.14um	1.34um	2.45	3.67um	....	....	....	....	....
实际值	500um	501um	502um	....				
示数	509.34um	....	....				

图 5.7 各温度下示数与实际值的对应表

方法很简单，但是要编制这个表却不容易。

2.2 温漂的真实例子

当时，讲座讲到这里，有人问了一个问题：“就说倾斜传感器，温漂能对它产生多大的影响？举实际例子说一下。”我现场登录公司的 IoT 平台，找了几个实际项目在用的倾斜传感器，如图 5.8 所示。



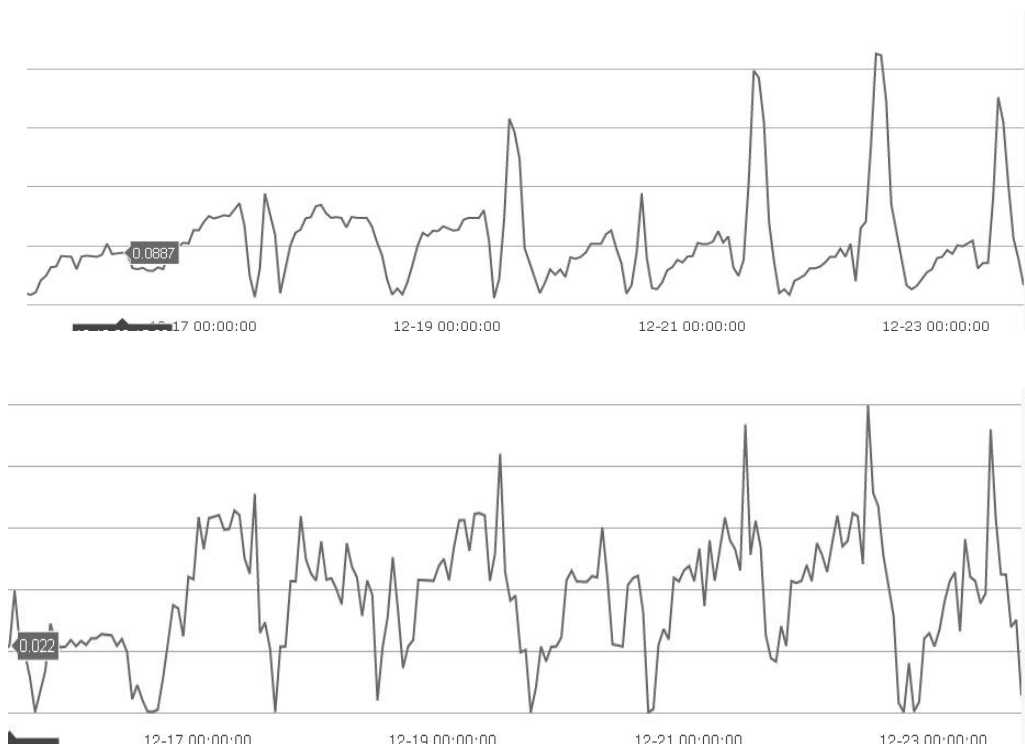


图 5.9 倾斜传感器在每天特定时间段产生尖峰

上图中的 3 个倾斜传感器都是实际安装在平地上的，用于监测边坡地灾。每天在中午都会产生尖峰，这个波动范围大约是 0.0 几 $^{\circ}$ 。难道说每天一到中午平地就会有微震？这显然是不符合逻辑的，其根本原因就是温漂。

现场有人进行了反驳，从 IoT 平台上找到了几个中午时段没有尖峰的例子。

“请给我解释一下？”

“这些传感器应该没有被太阳直晒吧？有树荫遮着？”

项目总监此时说“确实，这几处传感器都在林子里，上面有波动的传感器是直晒的。”

这下大家信服了。

项目上使用的倾斜传感器很明显是没有经过温漂校准的(也叫温度补偿，简称温补)。我们多么希望传感器不受温度等外界因素的影响，而直接输出稳定、可信、真实的示数啊！这就是我们追求的理想传感器。谁的产品越接近理想传感器，谁就越具有竞争力。

我们将上面所说的这张表内置到传感器中，使其输出依温度与原始示数查表之后的值。传感器即向所谓的理想传感器迈进了一大步。

这张表是很庞大的，靠人工编制效率极低。我们要寻求更高效的方案，最好是无人参与的、自动化的，如图 5.10 所示。

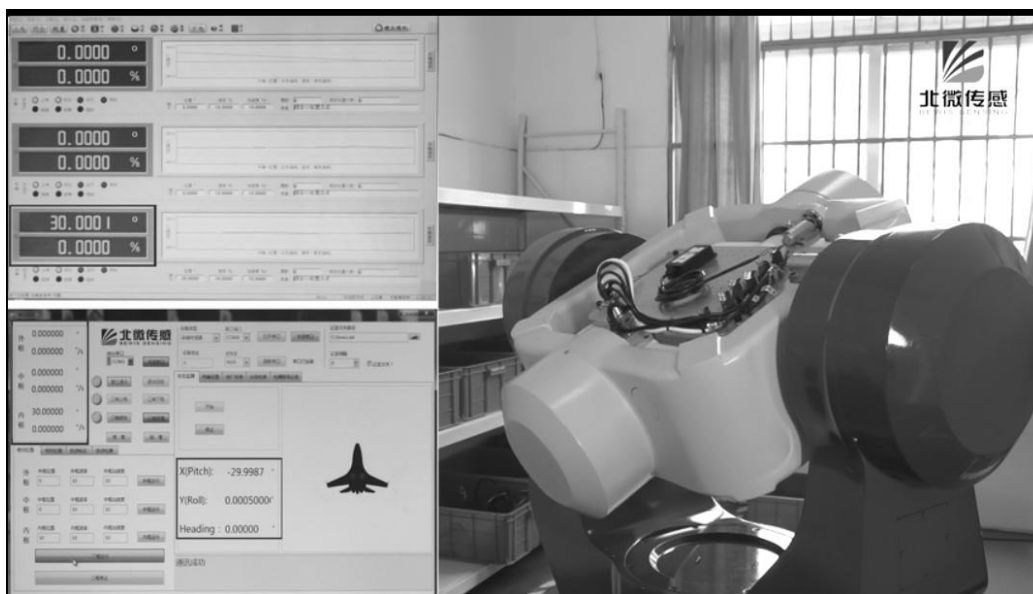


图 5.10 北微倾斜传感器的自动化校准装置

北微的这套倾角自动化校准装置是委托中航工业研制的，用我们项目总监的话说“高品质产品的背后一定需要有雄厚的工业基础，我们简直是小米加步枪。”

OK，终于引出了“倾角自动化校准装置”，振南研究倾斜传感器的近 1 年的时间，其实主要精力就在这套东西上，它是倾斜传感器达到真正意义上的高精度的核心。

3、静态温控的实现与温补装置的迭代

倾斜传感器温补校准的基本过程：将温度划分为若干区段，比如将 $-20^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ 每 10°C 划分一个区段： $-20\sim-11$ 、 $-10\sim-1$ 、 $0\sim9$通过温度控制依次将传感器温度稳到相应区段，然后将传感器从开始角以一定的步进角转至结束角，过程中记录下每一个角度以及传感器的示数，形成对应关系。依此对应关系，构建各个温度区段下倾角采集值与实际真值之间的对应表，并将此对应表固化于传感器硬件之中。这就基本实现了温补校准，如图 5.11 所示。

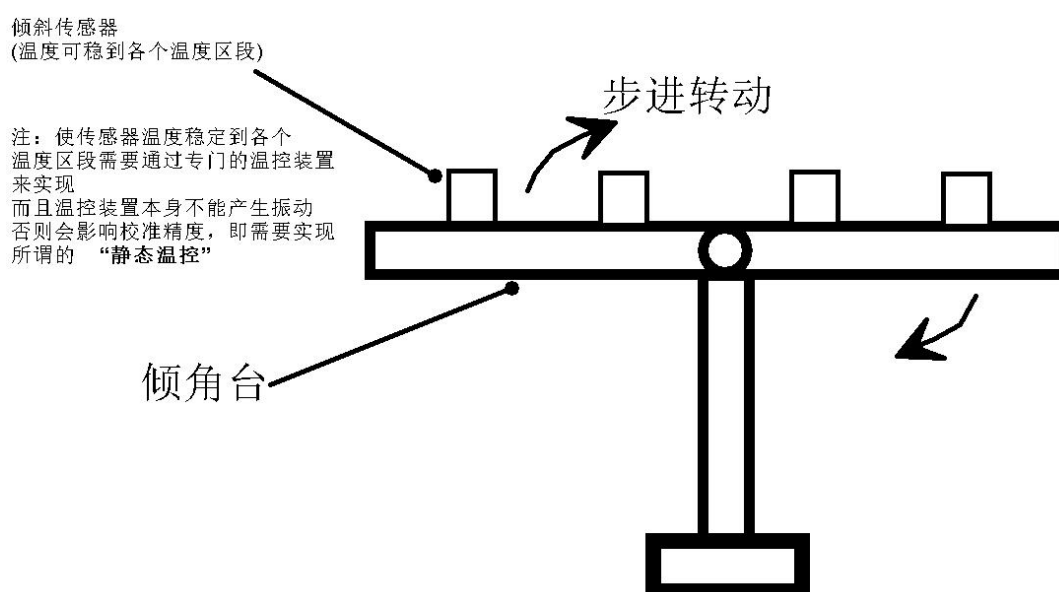


图 5.11 倾斜传感器温漂校准装置示意图

是不是已经感觉到这套东西有一些难度了。抛开步进转动产生各个角度的实现不提，我们先来说一下温度控制。

有人会说：“温度控制有必要自己作吗？你把它整体放到高低温箱里不就行了？不要重复造轮子。”作电子的应该对高低温箱都不陌生，我们经常用它作一些高低温的老化实验，确实很方便。但是我们应该注意到一般的高低温箱在工作的时候自身的震动是大的，在这样的环境中要校准高精度倾角是不可能的。所以振南在强调“静态温控”。

3.1 制冷原理

“高低温箱为什么震动那么大？静态温控很难实现吗？”我们先来了解一下高低温箱的制冷原理，其实这也是我们家里冰箱空调的工作原理，如图 5.12 所示。

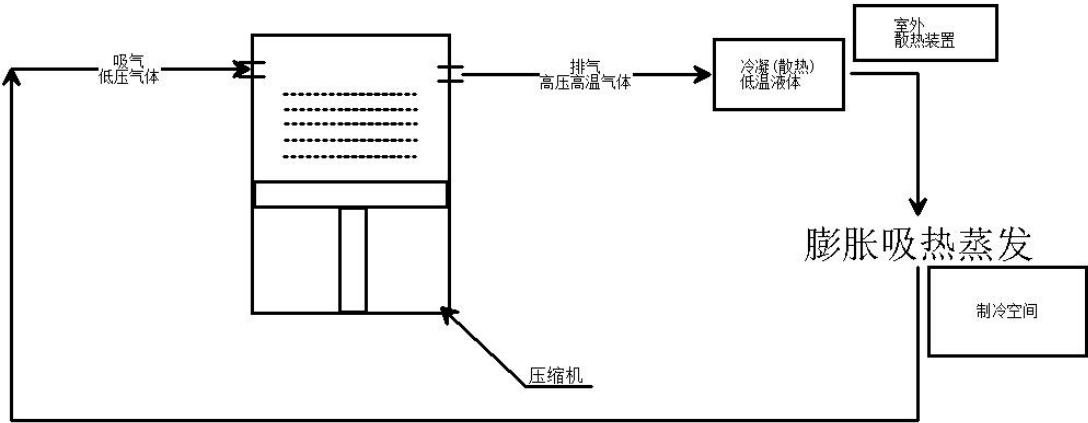


图 5.12 基于压缩机的制冷设备的工作原理

从图 5.12 中我们可以看到，压缩机是一个大家伙，它工作时动静不小，“咣咣咣”地对制冷剂做功。正是因为它这样的工作性质，我们一般把它放在室外，称为“外机”。

3.2 静态制冷

其实有专门的静态高低温箱，但是价格昂贵而且有效制冷空间比较小，不适宜作批量传感器校准，如图 5.13 所示。



图 5.13 静态高低温箱

也许真得要靠我们自己来实现静态制冷，为我们的传感器量身定作校准系统，这并不是重新造轮子，而是一件非常有挑战和创造性的工作。那什么在不产生震动的前提下，又可以实现制冷呢？

3.2.1 TEC 制冷

我们来了解 TEC 这个东西：半导体制冷器(Thermo Electric Cooler)是利用半导体材料的珀尔帖效应制成的。所谓珀尔帖效应，是指当直流电流通过两种半导体材料组成的电偶时，其一端吸热，一端放热的现象。重掺杂的 N 型和 P 型的碲化铋主要用作 TEC 的半导体材料，碲化铋元件采用电串联，并且是并行发热。TEC 包括一些 P 型和 N 型对（组），它们通过电极连在一起，并且夹在两个陶瓷电极之间；当有电流从 TEC 流过时，电流产生的热量会从 TEC 的一侧传到另一侧，在 TEC 上产生“热”侧和“冷”侧，这就是 TEC 的加热与制冷原理。



图 5.14 TEC 半导体制冷片

TEC 的主要特点：冷热面温差是一定的（温差是 TEC 的重要参数指标）。热面如果能有一定的散热(把热面降温)，那么冷面就能更冷。所以，TEC 高效制冷的根本在于热面的散热。

3.2.2 散热方案

要达到比较好的散热效果，有两种途径 1、增加散热面积 2、增加热量传递效率。

前者我们可以使用散热片，如图 5.15 所示。

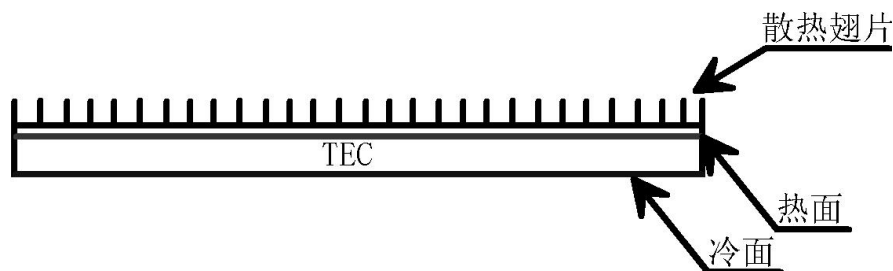


图 5.15 使用散热片增加散热面积

要注意的是 TEC 热面与散热片的贴合度，可以使用导热硅胶，如图 5.16。



图 5.16 导热硅胶可提高 TEC 热面与散热片的贴合度

后者可以使用水冷。水冷本质上还是散热片，不同在于上面所说的散热片是靠空气热交换，而水冷散热片则是靠流水或防冻液将热量带走，图 5.17 是水冷系统的主要组成和原理。

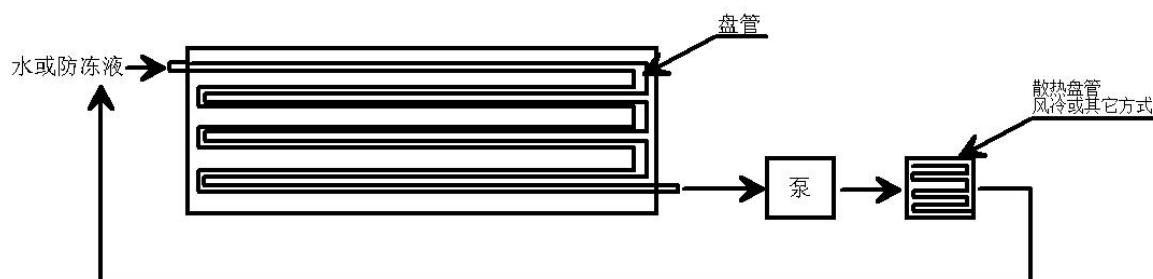


图 5.17 水冷系统的主要组成和原理

水冷可以有效提高热交换效率。实际应用中，TEC+水冷也是绝配，很多人用它给 CPU 散热，网上也有很多此类的套件，有兴趣可以淘来玩一下，更有甚者有人用它来作空调扇。

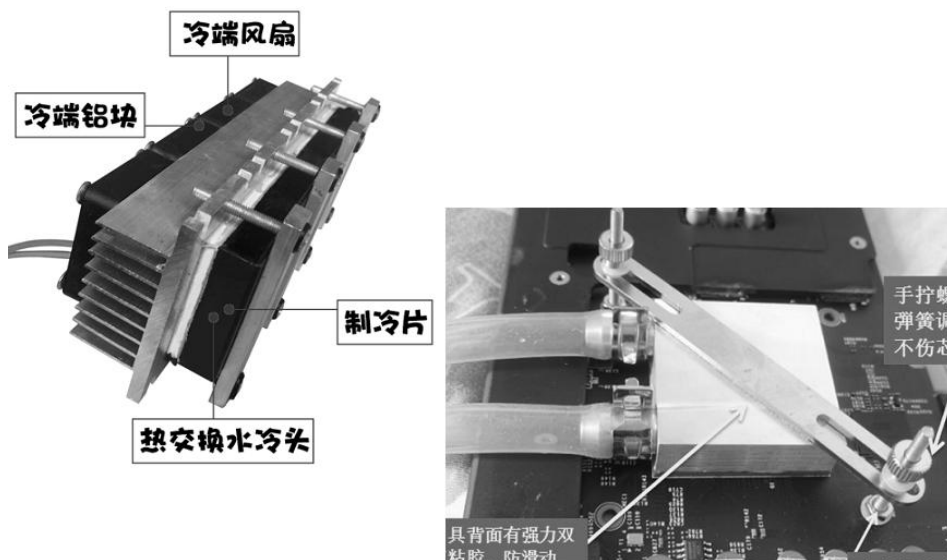


图 5.18 爱好者制作的空调扇和 CPU 散热器

3.2.3 倾角温补校准装置设计方案

OK，那我们就把 TEC+水冷应用到倾角校准之中，如图 5.19 所示。

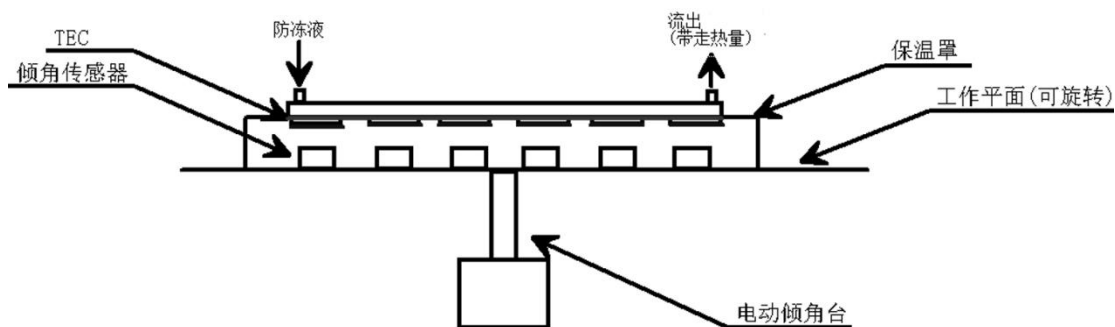


图 5.19 使用 TEC+水冷作为制冷方案的倾角温补校准装置示意图(整体保温罩)

使用图 5.19 中的方案，实际我发现保温罩里的温度似乎并没有降低多少，最低也就到 $+10^{\circ}\text{C}$ 左右(室温 25°C)。但是我们去摸 TEC 的冷面，却发现已经冰冷了，起码有 -10°C 。

这个问题让人陷入沉思：是哪的问题？

后来我发现了问题：不能用大保温罩子，里面的空气太多，而这些都是热负载。先要将空气整体拉到低温，这是比较困难的。

我作了一些改进，如图 5.20 所示。

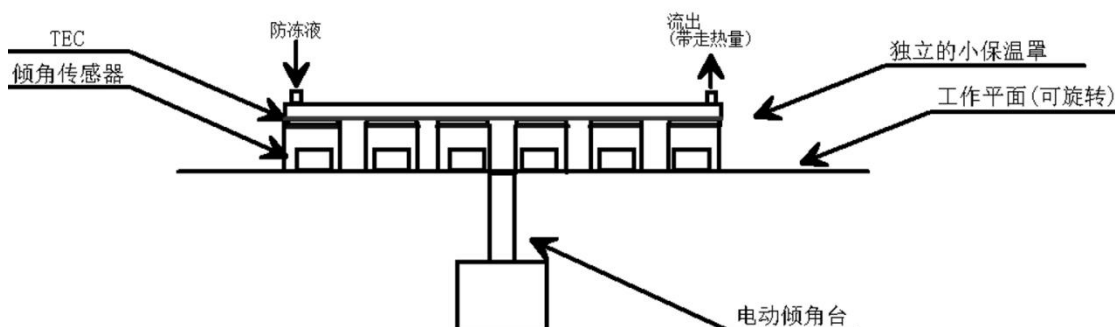


图 5.20 使用 TEC+水冷作为制冷方案的倾角温补校准装置示意图(分立保温罩)

效果有所改善，每个独立小保温罩中的温度最低可以达到+5℃左右，但仍然不够理想。我们的目标是低至-20℃。

我左思右想，考虑是哪的问题？也许是导热系数在作怪。空气阻隔了 TEC 冷面与倾角传感器之间的热量传递。(空气的导热系数是 $0.026\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)

考虑到这一点后，我又对方案进行了改进，如图 5.21。

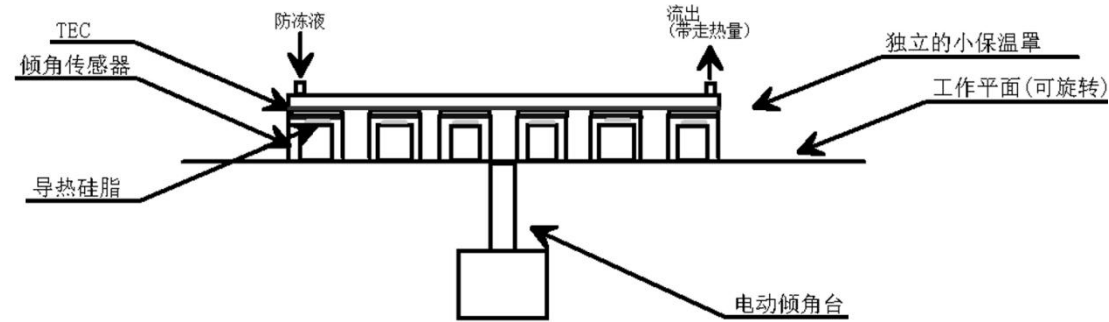


图 5.21 使用 TEC+水冷作为制冷方案的倾角温补校准装置示意图(冷面增加导热硅脂)

效果很明显，每个独立小保温罩中的温度最低可以达到-5℃左右，离我们的目标还有一段距离。

3.2.4 多级 TEC 制冷

经过进一步的研究，我又发现了 TEC 的高阶用法--叠罗汉(多层 TEC)，如图 5.22。

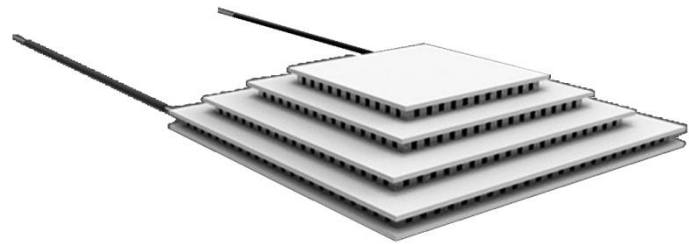


图 5.22 多级 TEC 半导体制冷模组

原理似乎也很简单：用一片更大的 TEC 来为一片小 TEC 的热面散热，依此堆叠。最终达到的效果是最小冷面与最大热面之间的温差能达到 110℃。如果大热面的散热处理好，冷面的温度可以达到-40℃。

我把倾角温补校准装置的 TEC 换成 4 级 TEC，效果很明显，每个独立小保温罩中的温度最低可以达到-20℃左右，达到了目标。

到这里，倾角温补校准装置已经有了一个阶段性的成果，但是它真的实用吗？生产总监提出了质疑：“你这套装置是不是略显复杂了？通常我们的硬件产品都是有交付压力的，这对生产效率有较高的要求。生产设备都要设计得尽量易用。不要校准一分钟，准备 3 小时，当然这有点夸张，但是我觉得你这套装置操作起来还是太麻烦了，比如那套水冷，还有保温罩应该都不好拆装。而且有些步骤很难作到一致性，比如导热硅脂的涂抹。基于非常精细的准备工作，才能完成的生产任务，一定会出各种问题。”确实，但是有什么更简单直接的静态制冷的方法呢？

3.2.5 物理制冷

围绕“简单静态制冷”这一问题，我想到了干冰。干冰是固态的二氧化碳，把二氧化碳液化成无色的液体，再在低压下迅速凝固而得到，熔点-57℃。现在干冰已经广泛应用到了

许多领域。也许，我们可以把干冰应用到倾斜传感器温补校准中。

我一开始能想到的就是把柱状干冰直接放到小保温罩里，如图 5.22 所示。

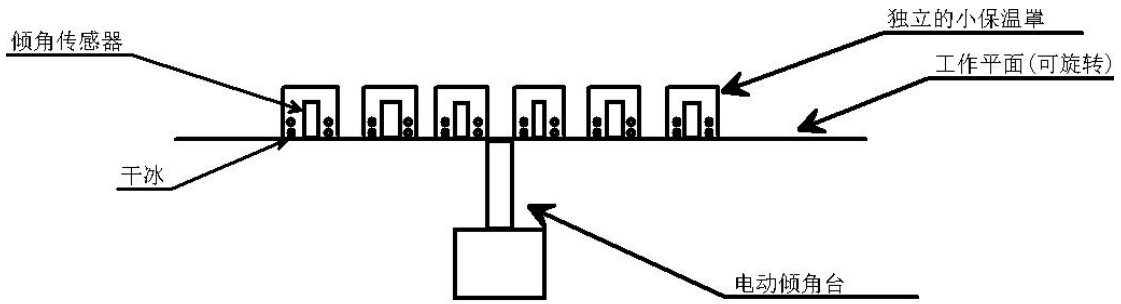


图 5.22 使用柱状干冰进行制冷的原始方案

效果还可以，温度最低到达 -15°C ，但是似乎干冰还有巨大的潜力，不要忘了它的熔点是 -57°C ！也许还是空气隔绝了干冰与传感器之间的热量传递。

我设计了这样的结构，如图 5.23。

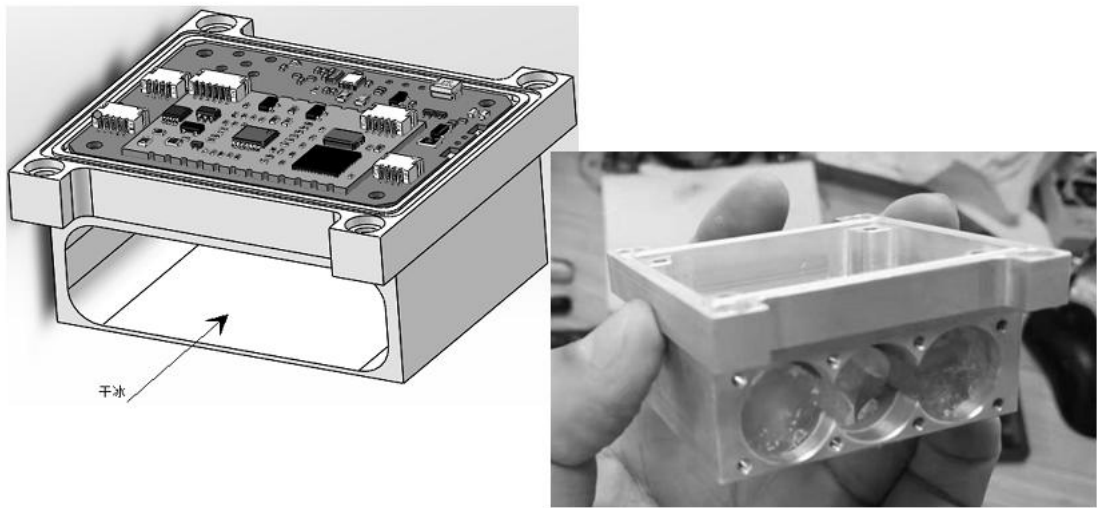


图 5.23 为了提高热量传递效率而设计的铝制结构

铝的导热系数是 230，是空气的 10000 倍。它形同一个铝锅，只是底下灶台填入的不是柴火，而是干冰，我称之为“冷灶”。铝作为良好的导热介质，基本可以实现干冰直接对传感器降温。这种方式，温度最低可达到 -40°C ！

基于这样的结构设计，倾角校准装置有了如下改进，如图 5.24。

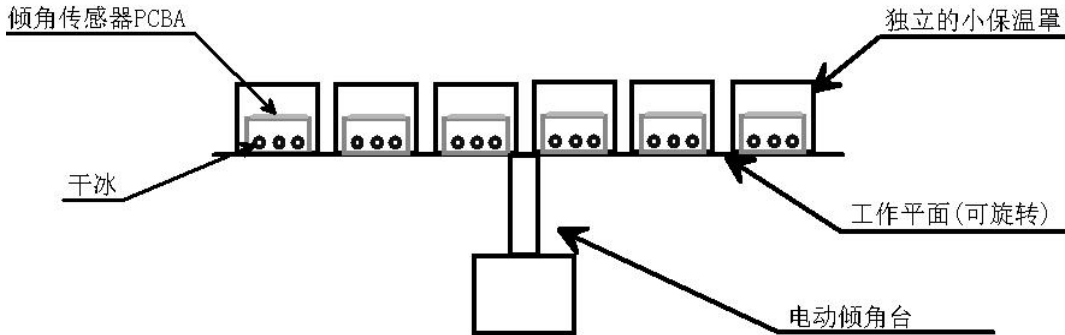


图 5.24 基于铝制结构的倾角校准装置的改进

这种方式去掉了水冷等一系列部件，也许是最简洁的方案。但是干冰并不易控制，我们要让它慢慢的维持制冷过程，而不是一下子把温度拉到很低，但是不能持久。图 5.25 是我实际采到的和期望的温度曲线。

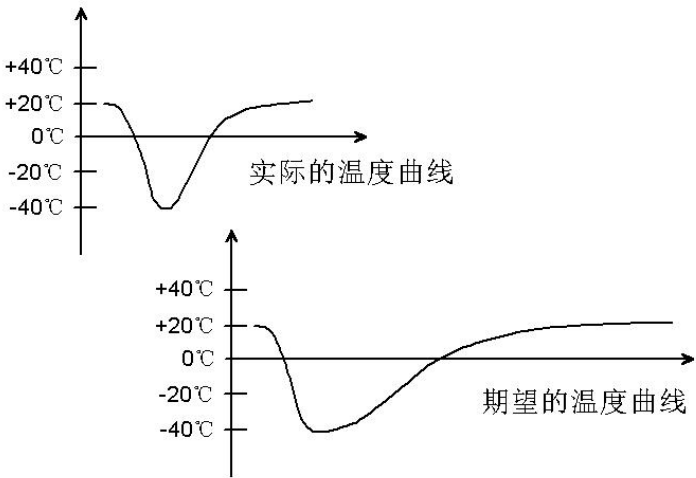


图 5.25 实际的与期望的温度曲线

我发现将干冰放入铝制结构，很快它就会消失，同时伴随的是保温罩内的温度会降到最低点，随后就是很快的升温过程。跨越低温区每个温度段的时间太短，不足以进行倾角校准。影响温度上升速度的因素有哪些？我能想到的是保温罩的材料和结构，它是阻隔内部与外部环境之间进行热量传递的屏障。

我所使用的保温材料是 XPS，即挤塑聚苯板，相关的一些选型如表 5.1。

表 5.1 保温材料的选型

材料名称	导热系数	问题
EPP 聚苯板 (常见泡沫)	0.039	使用非常广泛，成本低，耐磨性不高，容易损耗，长期影响保温性能
XPS 挤塑聚苯板	0.028	刚度大，抗压性能好，易于成型加工
橡塑保温材料	0.041	柔性材料，强度不高，主要用于管道包裹
纤维增强复合材料	0.063	该材料成本较高
复合硅酸镁铝绝热材料	0.045	市场上这类产品的应用不多
玻璃棉板 岩棉板	0.042	柔性材料，强度不高，主要用于管道包裹
酚醛板	0.032	存在着易粉化、机械强度低、脆性、无延伸性和吸水率高等弱点
无机质高分子保温	0.03	成本高
发泡聚氨酯	0.024	易粉化、尺寸稳定性较差、易磨损
气凝胶	0.02	成本高、它应该是已知导热系数第二低的材料，可用于及苛刻的隔热场景
真空绝热板	0.008	已知导热系数最低的材料，成本过高

XPS 是比较理想的材料，而且我还专门设计了配套的结构，以保证良好的保温效果，如图 5.26。

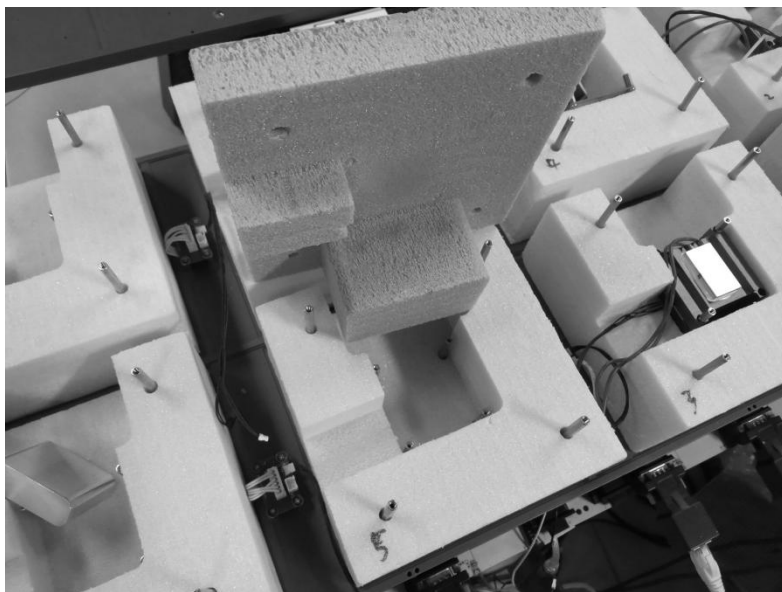


图 5.26 专门设计的保温结构

在保温方面应该没有太大的优化空间了。而且，想要完全阻隔内部与外部的热量交换是不可能的，也就是没有绝对的保温。

在干冰消耗殆尽之后，与外界进行热量交换的主要是铝制结构。此时我想到了材料的比热容。单位重量下，不同材料比热容大的，在它升高 1°C 时，所吸收的热量更多。

这样的话，我把干冰改为铝块，把塞入铝块的铝制结构一起冷冻到 -50°C ，然后再放到保温结构中，它的升温过程是不是会变慢？如图 5.27 所示。

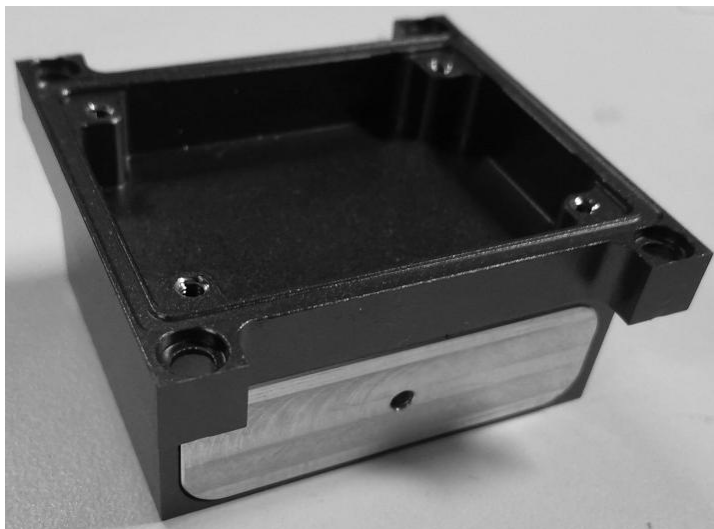


图 5.27 填入铝块的铝制结构

果然，升温变得缓慢了很多，如图 5.28 所示。

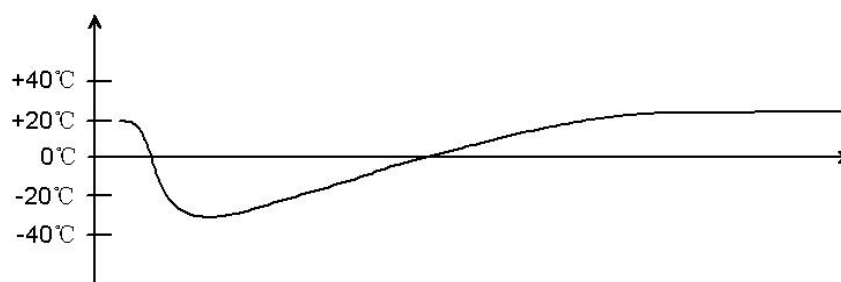


图 5.28 使用铝块后的升温曲线

要把塞入铝块的“冷灶”整体冻到 -50°C ，我使用的方法是将其埋到干冰堆中，静置半个小时。每次作实验之前，我都需要现订干冰，可以说干冰是耗材。这也许对于批量化大规模校准是一个瓶颈。其实使用铝块之后，冷冻已经成为了一个预置的步骤，完全可以脱离干冰，而使用超低温箱，如图 5.29 所示。



图 5.29 使用超低温箱来对铝块进行冷冻

3.2.6 半导体制热

上面我们使用铝块实现了低温区(室温以下)各温段的稳定维持,可以说这种方法是一种奇思妙想。接下来我们需要考虑高温区,即加热升温的实现,这个过程同样也是需要静态的。

有一种东西很有趣,我们给他通电,他就会发热,并自动恒定到一个温度,即一直维持某个温度,这就是 PTC (热敏电阻)。其实我们每天都在用 PTC,只是我们自己不知道,如图 5.30 所示。

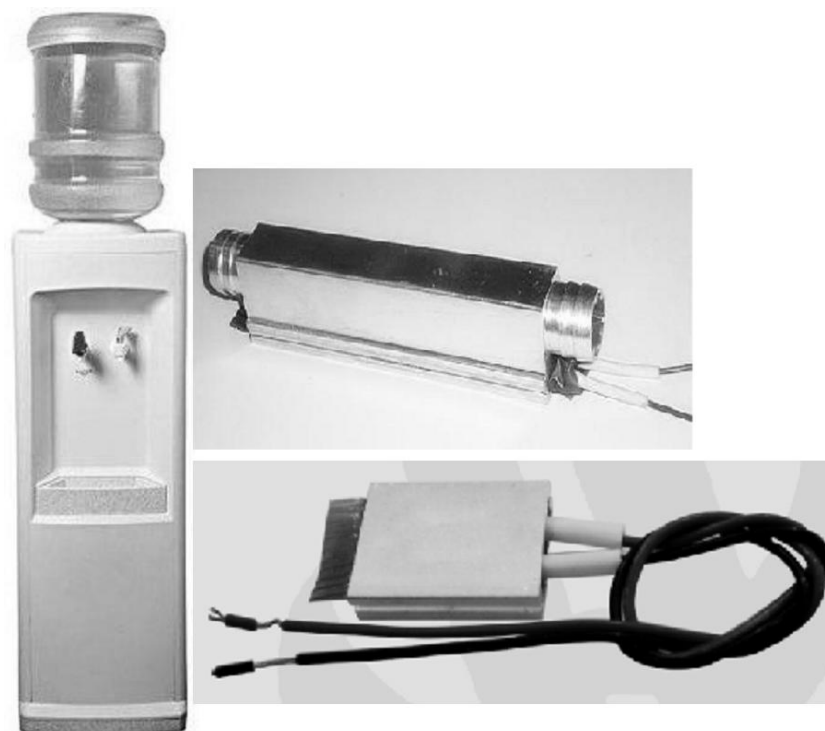


图 5.30 饮水机中的加热设备即为 PTC

我给“冷灶”加了一个盖,把 PTC 放在了盖上,如图 5.31 所示。

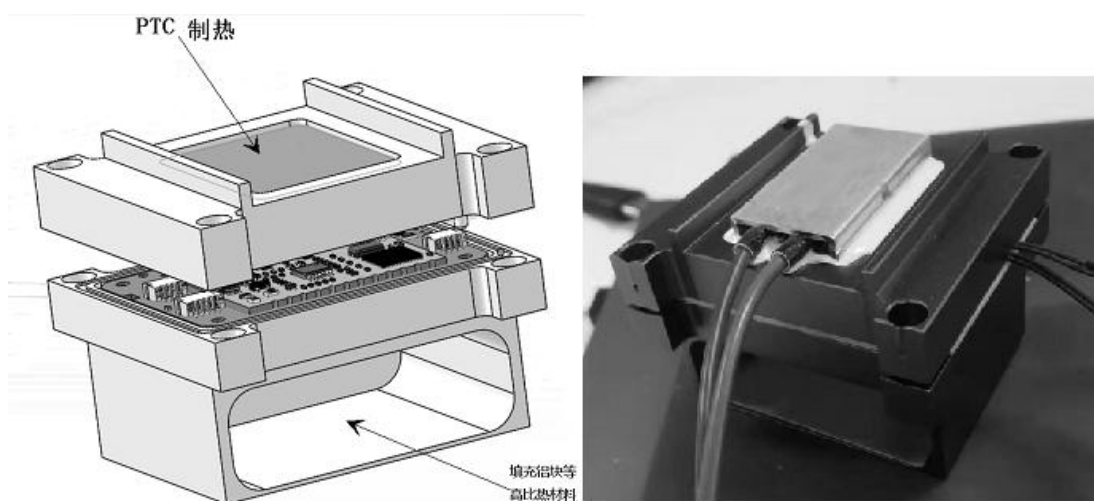


图 5.31 将 PTC 加热片放在“冷灶”的盖上

这样，在低于室温的低温段，我们让温度在被冻透的铝块的作用下自然缓慢上升，而从室温往上的高温段，我们通过控制算法适时的打开和关闭加热来主动地将温度稳定到目标范围内，整个的温度曲线如图 5.32。

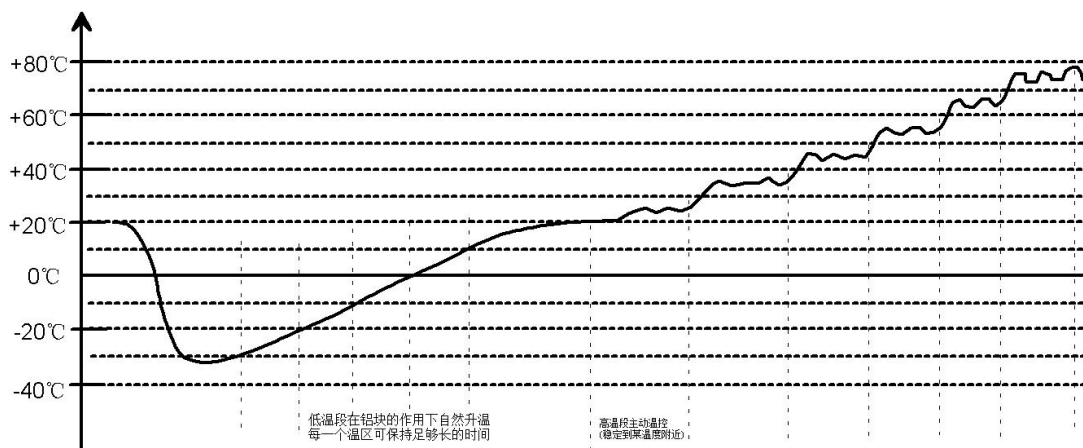


图 5.32 全温段温度曲线

3.2.7 温控策略

有人问：“你用的温度控制算法是什么？PID 吗？我看上图中在温区内温度波动还是挺大的，是否可以把温度控制作得更稳，精度更高？”实际上我并没有使用 PID 算法，因为我最多要同时控制 16 路温度，而且我对温控的速度有一定要求，即到达目标温区的速度一定要快，否则会影响批量校准的效率。其次，对于温控的精度要求并不高，目标温度上下 3°C 都可以接受。我使用了一种类似 PWM 的温控方法。

我们拿某个温区的温控来举例说明，如图 5.33。

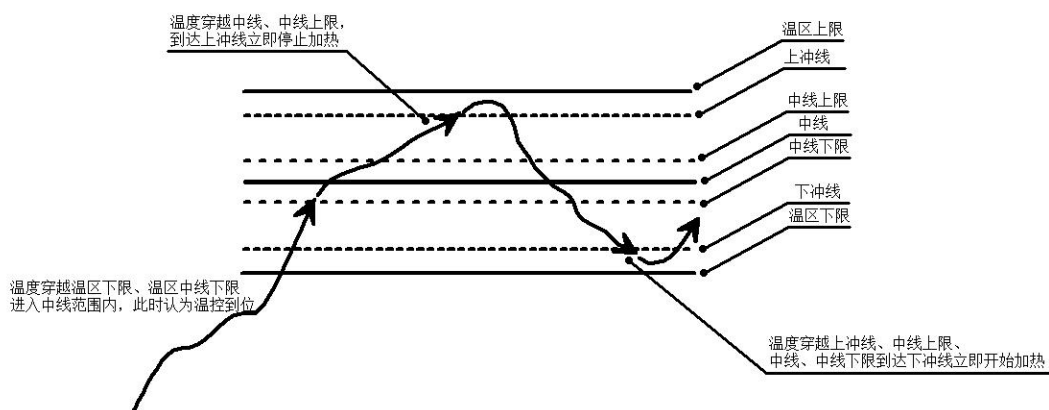


图 5.33 温控算法示意图

可以看到我们为温区划定了几条线，分别是：温区上限、上冲线、中线上限、中线、中线下限、下冲线和温区下限。当温度从其它温区升温到目标温区的中线范围内时，则认为温控到位，温控从“温度跃迁”进入“区内保温”状态。因为温度的升温是有一定惯性的，当其进入中线范围后，PTC 立即关闭，此时温度上升并不会立即停止，而是可能会穿越中线、中线上限，甚至是上冲线，最终在某个较高的位置上停止升温(这个位置我们当然希望不要超过温区上限，否则就是失温)，开始下落。等其下落至下冲线时，

PTC 立即开启，温度在经历一个较短的惯性下冲之后(这个惯性下冲我们当然也是希望不要超过温区下限)，开始回升。这种控制方式最终的效果就是温度在某一个区间上下震荡，而震荡的幅度就与上冲量和下冲量有关，我们要作的就是控制这个冲量。

通过对 PTC 进行脉冲宽度调制来使温控更加细腻，如图 5.34 所示。

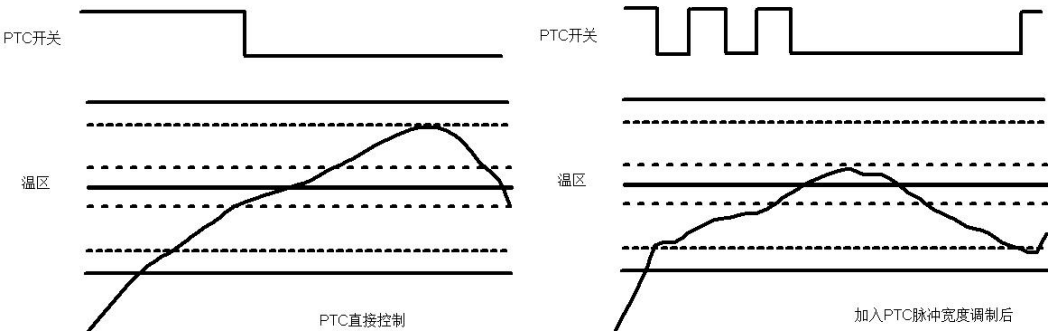


图 5.34 PTC 加入脉冲宽度调制前后效果对比

关于 PWM 大家可以参见专门的章节。总体来说，PTC 直接控制更像是在温度没有达到中线下限之前，一律火力全开，而一旦达到中线下限，立即踩急刹车。此时产生的惯性很可能让温度过冲到很高的位置，甚至超出温区上限，造成失温。而加入脉冲宽度调制后，就如同小火慢攻，再辅以一定的算法，比如当前温度若举例目标线较远时，脉宽比就大一些，甚至全开；而当温度快到接近目标线时，脉宽比逐渐减小，甚至全闭。后者会让温控变得更加细腻，收放自如，避免产生较大的过冲。其实，后者也是 PID 的核心思想。

对于每一个温区，这些线的设置、脉宽的精细调节等环节是实现温控的重点。以上控制策略主要应用于高温区，低温区基本不涉及控制。

3.2.8 多路温度的同步控制

到现在，我们已经解决了温控的问题，但上面所说的一切都是针对于一个温控单元来说的。而实际上为了批量化校准效率是不可能一次只校准一个传感器的，而是一次校准多个，也就是说我们同时要对多个温控单元进行控制，比如 16 路，如图 5.35。而且，要保证温度的一致性。

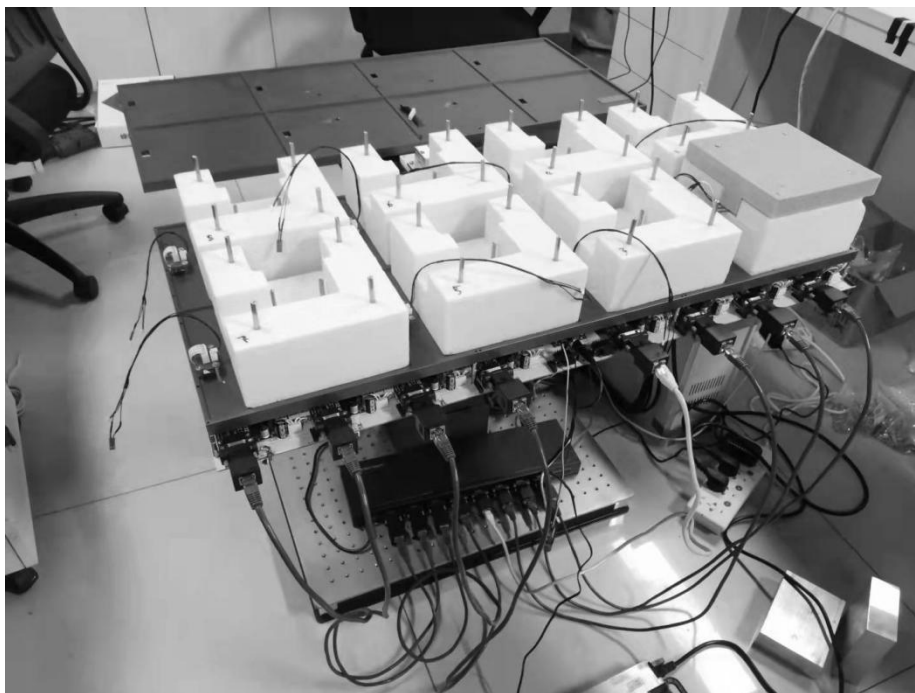


图 5.35 振南的可支持 16 个传感器同时校准的校准装置

各路温度变化的同步性(主要是低温段)主要是靠人员的操作规程来保证的：铝制结构的冷冻程度要一致，即最终的冷冻温度要齐平；安装放置完毕后保温结构闭盖时间的一致性。但尽管做到了这两个一致性，我们仍然会发现在低温段各个温控单元内的温度变化也是不同步的，因为还有一些因素我们控制不了，比如各保温结构的保温性能等。这个时候我们就需要对低温区进行同步性控制了，如图 5.36 所示。

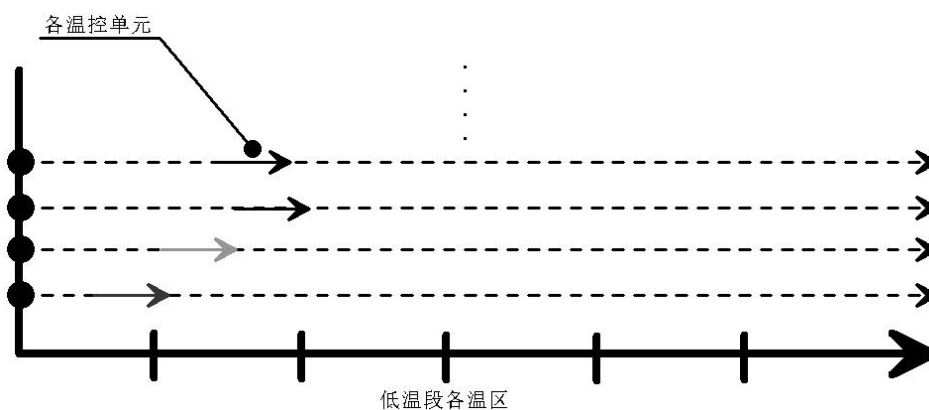
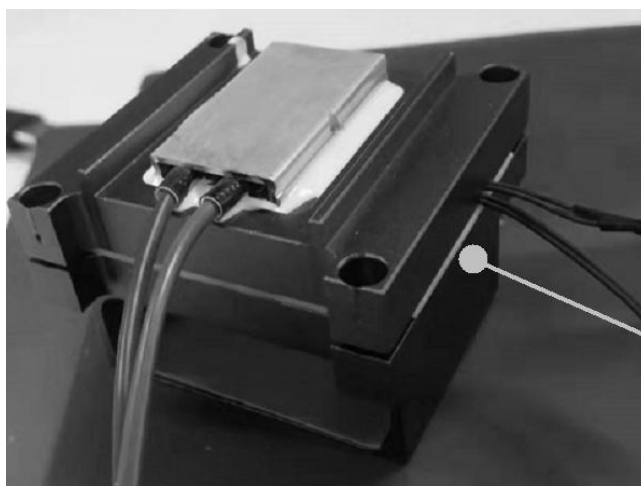


图 5.36 多路温度同步性控制基本思想

基本思想是由某路温控与目标温区的距离计算一个脉宽值，来控制 PTC 对此路温控进行加热。这样最终的效果就是各路温控会齐头并进的进入目标温区。但是这个控制要非常精细，因为在低温区一旦使用了火力，可能会造成温控升温过快或过冲太猛，最终造成失温或者在温段内经历的时间过短，导致校准失败。为了解决这一问题，我在结构上作了改进，如图 5.37 所示。



“冷灶”与铝盖之间垫了层阻热材料
增加冷热界面之间的热阻
使冷灶铝制结构加热时不至于温度上升过猛

图 5.37 在“冷灶”铝制结构与上盖之间增加一层阻热材料

这样的改进是以失败为基础的。其实在作全温段温控以及整个倾角校准装置的过程中，处处充满了失败。但是这套东西还是非常有创新意义的，所以我在一直坚持直到作完。

原来是上盖与“冷灶”结构直接接触，我发现上盖哪怕加热一点点，下面的铝块温度也会变化很大，根本无法控制。后来我在上下之间增加了一层树脂材料(导热系数 0.02，基本与空气持平)，才解决了这个问题。究其原因应该是上面的热量直接进入到了下面铝块之中。增加阻热之后热量需要通过空气和阻热材料缓缓的进入铝块中，使得温度上升平缓了很多。

有人说“为什么用树脂材料？而且既然与空气的导热系数相同，为什么不直接留出一条缝呢？”因为树脂便于作 3D 打印。不能留空气缝，因为空气中的水蒸汽会进入内部，造成 PCBA 上冷凝结露，导致短路。

4、倾角校准与数据拟合

4.1 倾角校准装置的构成

先来看一下整套校准装置的总体框图，如图 5.38 所示。

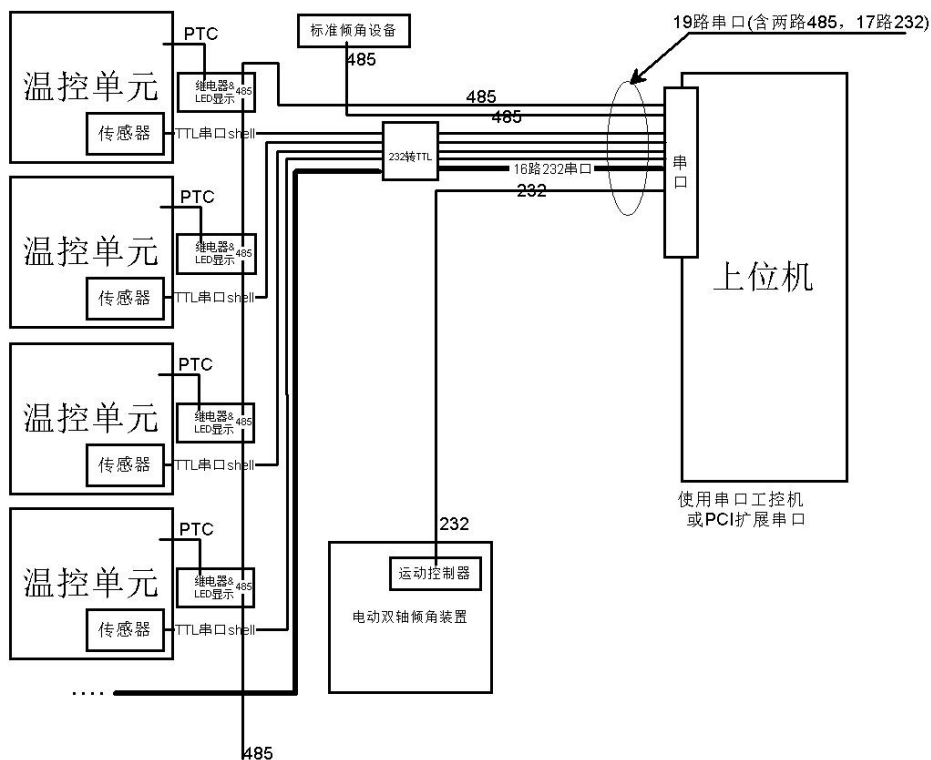


图 5.38 自动化倾角温补校准装置总体框图

上图中所包含的内容比较多，我们来梳理一下，如表 5.2。

表 5.2 自动化倾角温补校准装置构成表

构成部件	说明
上位机	运行上位机软件，配备不少于 19 路 232 串口
标准倾角设备	为校准提供倾角真值
运动控制器	控制双轴电动倾角台
温控单元	包括保温结构、铝制结构、PTC、继电器等部件的控制单元可容纳一个传感器进行校准操作

整套装置线缆比较多，从图 5.35 就可见一斑。

整个温控及校准操作都由上位机完成，振南开发的上位机软件如图 5.39 所示，献丑了。



图 5.39 自动化倾角温补校准装置上位机软件

4.2 倾角温补校准与数据拟合

倾角温补校准的前提是先将每一个温区内的标准倾角与原始倾角的一系列的双轴倾角值采到，具体流程如图 5.40 所示。

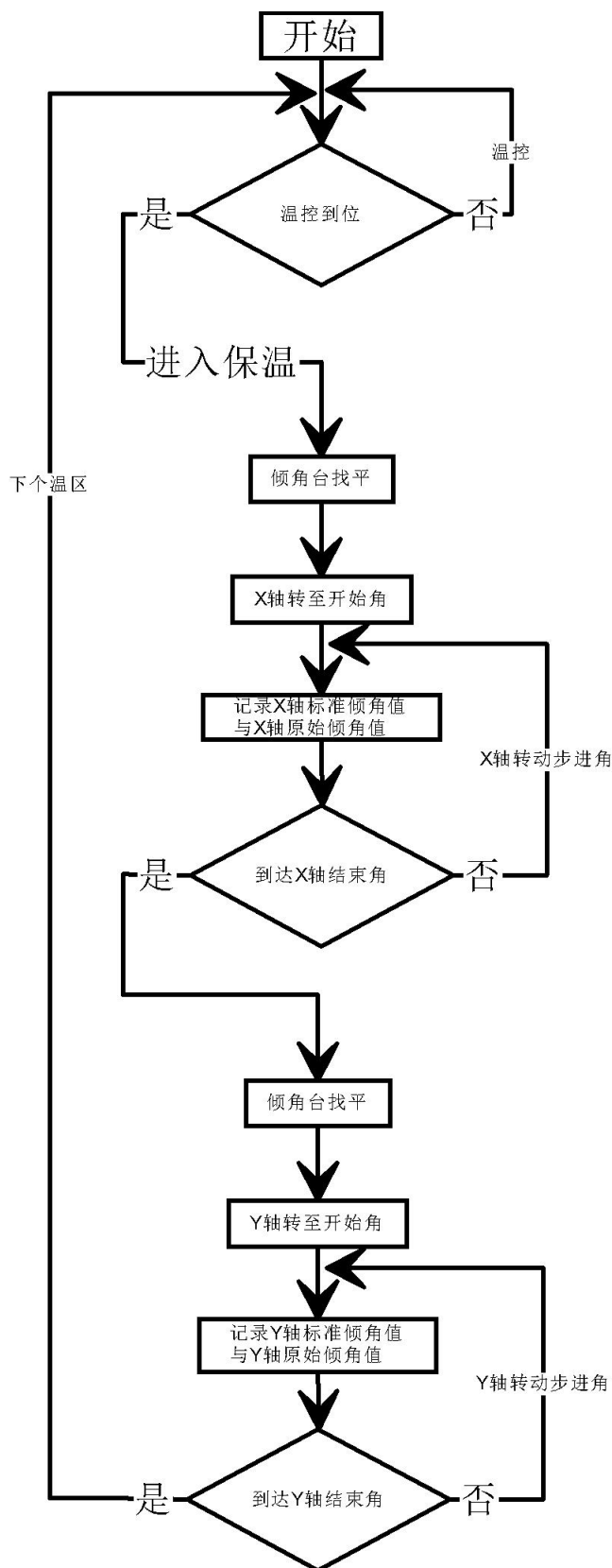


图 5.40 双轴倾角温补校准数据采集过程

我们采到的数据如图 5.41 所示(单独某个轴的数据)。

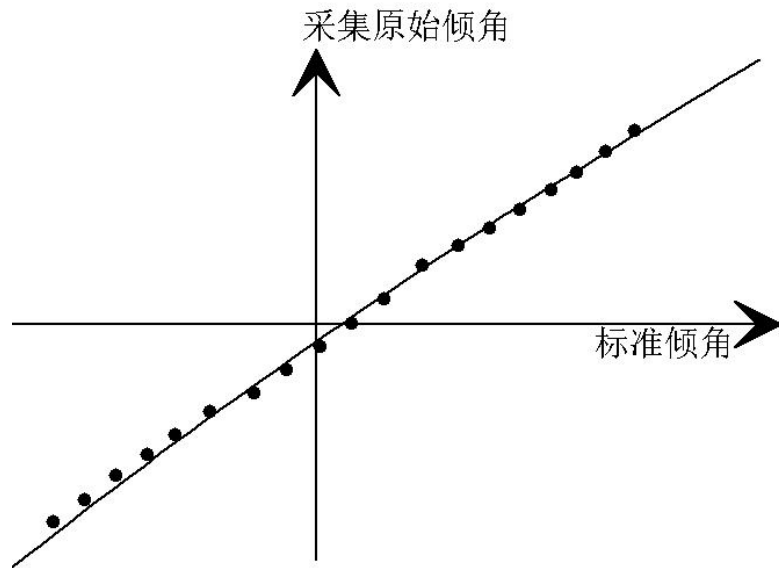


图 5.41 单独某轴的标准倾角与原始倾角值

可以看到传感器的原始倾角值与标准倾角是一一对应。在本章最前面振南讲过，校准的实质就是建立一张对应表固化到传感器中，这张表是很大的，所以我们才花了如此大的力气来作自动化温补校准装置。

有人可能会有一个疑问：“一个温度段对应于一张表，我采到一个原始倾角，就从表里查找相应的标准倾角，如图 5.42。我采到的这个原始倾角应该不会正好落在表中的原始倾角上，那么它对应的标准倾角应该怎么取呢？按比例线性的取吗？”

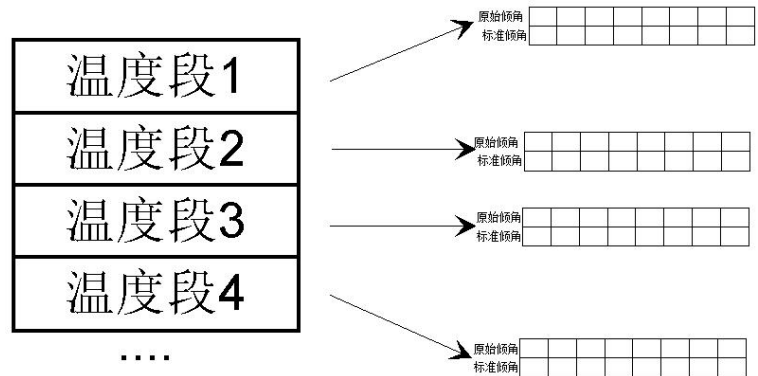


图 5.42 单独某轴的标

按比例线性取值是不合适的，更好的办法是对这些数据进行多项式拟合，这样可以构造出两点之间的数据趋势，依趋势取数将会使结果更接近于真值。

多项式我们选用 4 阶多项式，形如下式。

$$I_{\text{校准}} = aI_{\text{原始}}^4 + bI_{\text{原始}}^3 + cI_{\text{原始}}^2 + dI_{\text{原始}} + e$$

到这里，有很多人都问过一个问题：“为什么要用 4 阶多项式来进行拟合，是不是阶数越高，拟合精度越高呢？”答案是否定的，我试过用 5 阶，甚至更高阶多项式去拟合，结果反而是错误的，也许这就是所谓的过拟合。

其实多项式拟合，就是确定多项式的系数，使得倾角采样点在多项式曲线上的均方差最小。这样一个温度段的倾角对应表，就可以仅仅使用 5 个系数来表达了，这也非常适合于单片机的存储。实际计算校正后倾角的过程是：先采集温度，确定使用哪一个多项式，然后将采到的原始倾角代入到多项式中，最终得到校准后的倾角。这个倾角值应该是高精度的，而且比较稳定，不会随着温度变化而产生漂移。

4.3 分段校准的质疑

以上所描述的其实是传感器的分段校准，是行业内普遍使用的方法。它在同一个温度段内，使用固定的一个多项式来计算。

对于这种方法我们的一个博士提出了质疑：“一个温度段都只用一个固定的多项式来计算，那在这个温度区间内还是消除不了温漂，最明显的就是在两个温区接缝的地方会产生跳跃！”

我说：“确实，其实这种方法是一种工程近似，只要这个接缝处的跳跃不大，我们姑且还是可以接受的。”

跳跃大不大，那得用数据来说话，所以我作了如下的实验，如图 5.43。

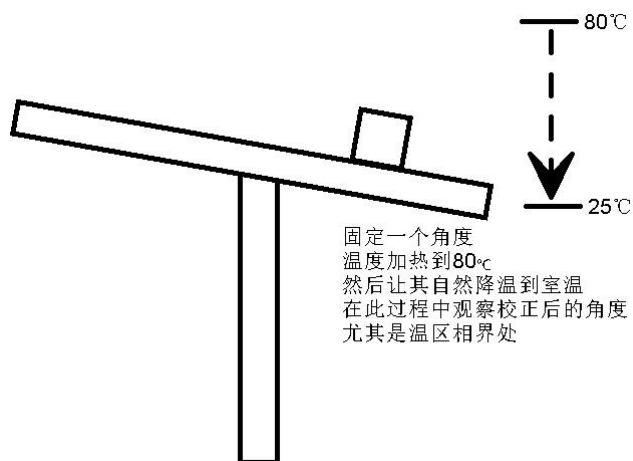


图 5.43 固定角度全温段角度采集实验

请看下面的曲线，如图 5.44。

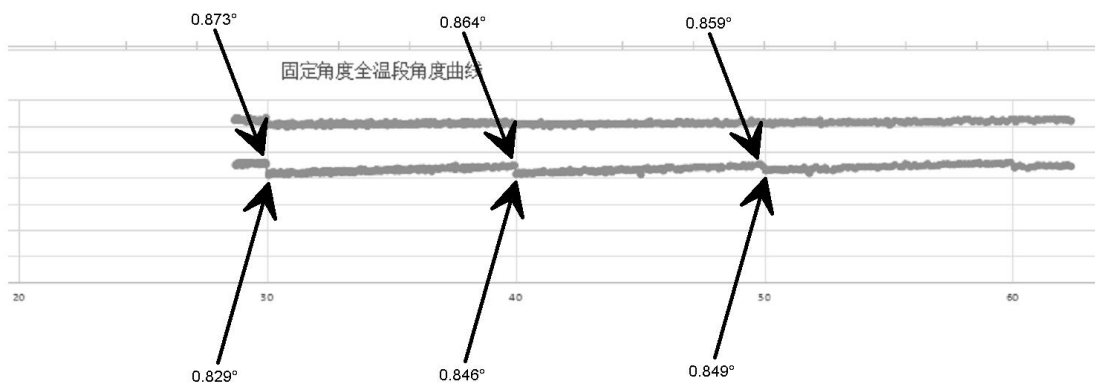


图 5.44 固定角度全温角度曲线

博士是对的，我也承认，在各温区的交界处确实会产生温度跳跃。但是这个跳跃的幅度在 $\pm 0.02^\circ$ 以内，对于一般的高精度需求是满足的。但是如果非要较这个真儿，非要求精度为 $\pm 0.01^\circ$ ，甚至 $\pm 0.005^\circ$ 或 $\pm 0.002^\circ$ ，这就不行了。

我们需要为每一个温度点构造相应的拟合多项式，但这实际上是不现实的。就算我们的温控可以精确控制在每一个温度点上，整体的校准效率也难以忍受。切实可行的作法是，从每个温区固定系数的多项式衍生出每一个温度点的多项式。应该说这种方法一定是可行的，但是这种衍生系数的算法我还没有深入研究。

博士也认为这是可行的，只是有一定的难度。他开始联合算法部的工程师在解决这个问题

题。

5、其它细节

上面振南所说的只是一些大体的原理与方法，实际上这套自动化倾角校准装置开发过程中有很多的边角细节，它们对最后的校准效果、易用性及稳定性都是至关重要的，正所谓成败在于细节。

5.1 真值的读取

校准过程中的真值，也就是标准倾角值是非常重要的。所有的采集值最终都要校准到标准倾角值上。一开始我打算用电动倾角台自身回读的角度，它是运动控制器基于电机控制相关参数计算得到的值。为了得到更高的精度，我在采购电动倾角台的时候，把步进电机换成了伺服电机，机械精度可以达到 $\pm 0.01^\circ$ (步进电机的是 $\pm 0.05^\circ$)。

伺服电机的价格是比较昂贵的，而且靠倾角台自身回读角度会有机械累计误差的问题。所以我想到一个办法：用一个经过严格校准的高精度双轴倾角传感器作为标准倾角，而且它并不需要进行温补(它将被放置于保温结构之外，仅工作在室温，)如图 5.45 所示。

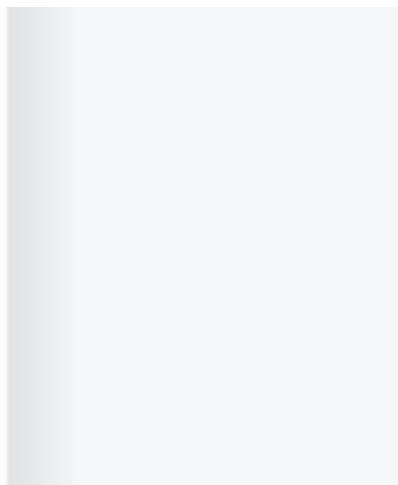


图 5.45 放置于保温结构之外的标准倾角传感器

5.2 规避震动干扰

在一个温度段中，倾角台按步进角遍历各个角度，在转动到位之后，我们读取标准倾角值和各个传感器的原始倾角值，进而作拟合。但是实际我发现拟合结果非常差，同时采到的倾角值也很不稳定。为什么明明转动到位了，但是确采不准呢？后来我才明白怎么回事：在转动到位之后，不能马上读取倾角值，而要等几秒钟。为什么？请看图 5.46。

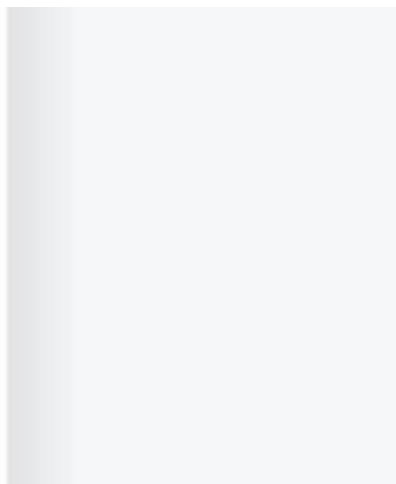


图 5.46 步进角度停止时产生的振动

5.3 克服地面不平问题

首先我们要知道这世界上没有绝对水平的平面，实际倾角校准的场地极有可能并不水平，我们不能苛求校准工作平面的水平度，而是要容忍地面不平的情况。

校准其实是对传感器的原始倾角进行校准，仔细想想，我们就会明白只需要电动倾角台预留一定的量程余量，即可容忍一定的地面不平问题。

假设当前电动倾角台的实际量程为 $\pm 38^\circ$ ，对于量程为 $\pm 30^\circ$ 的倾角传感器来说，校准工作平面有约 $\pm 5^\circ$ 的水平误差容忍度(理论上是 $\pm 8^\circ$ ，主要考虑留出富裕量)，如图 5.47。

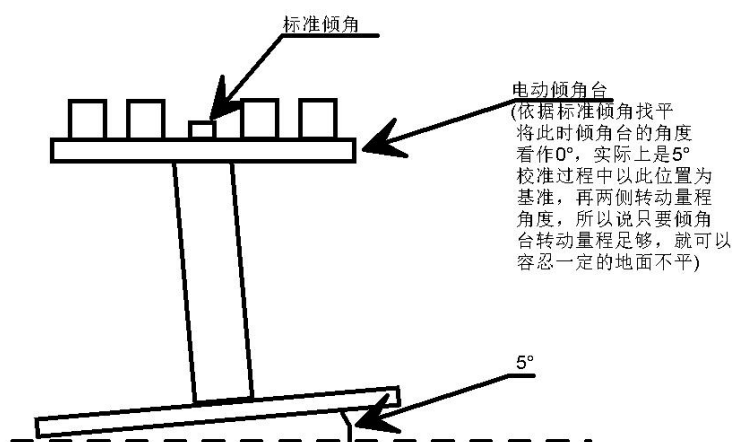


图 5.47 倾角校准时地面不平的情况

5.4 减震设计

我知道一些专业的传感器厂家，为了校准他们的 MEMS 芯片，都有专门的场地。这些场地都是单独打的地基，更有甚者把场地设在山里，远离闹市。可见对于 MEMS 相关这类传感器，比如倾角、加速度，校准时的外界震动对最终效果的影响之大。

我们不可能为倾角校准专门打地基，场地的震动条件是无法严格保障的。我们的场地大多是办公楼，可能在高层，可能紧邻道路。所以我们要想办法过滤掉这些外界震动，使其不至于太影响到校准的效果。严格来说，在这样的场地中，是不可能校准出非常高精度的倾角传感器的，我们只不过是寻求一个中庸的方案。在现有的环境下，尽可能的让校准效果更好。

要减震，校准装置一定要有一个非常重的基座，如图 5.48。

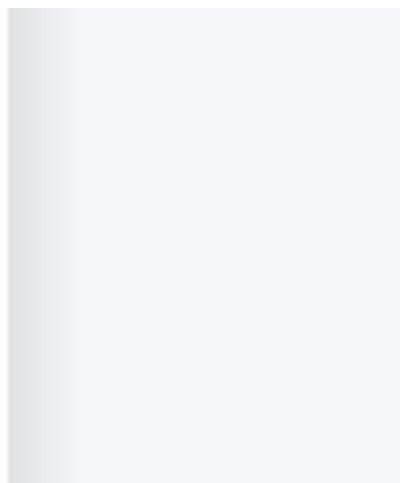


图 5.48 减震底座及全钢制的架高结构

整个基座部分重约 100 公斤，再加上底座是专业的减震装置，使得这套装置在一般的办公环境下最佳校准精度也能达到 $\pm 0.005^\circ$ 。

以上介绍的是一些主要而且关键的细节，其实还有很多细枝末节，比如标准倾角要与倾角台轴向尽可能重合，这需要专门的结构设计来实现；再比如整套装置工作平台的托盘式设计以方便扩展，等等。

这一章内容比较多，基本上一章等于其它章的两章的篇幅，其背后是振南将近两年的研发工作，希望本章所述能对大家有用，对各位的研发工作产生启发。大家应该发现了，对于倾角校准的工作其实还没有完成，振南还会继续改进，欢迎大家一起来讨论和关注。

