

（一）硬核金工实习？

最早听说金工实习这门课是在一年多前，听学长说起时的描述是“每周都要早起投湖，到晚上才回来，课时到了做不完还要继续做”。选课前排课表时，给金工实习的位置是周末的整整一天，并且觉得这门课除了投湖以外还要在平时学软件画图纸，将会是耗时耗力比较多的一门课。到现在结课以后回想起来，其实并没有最早以为的那么硬核，甚至觉得是一门放飞创造力的宝藏课程。

（二）理论课

整门金工实习课程分为三个阶段：集中上理论课，集中上实践课和自由上实践课。六月底选完课，最后一门考试结束后第二天还要继续上金工实习理论课，从早上到晚，好在就在玉泉路校区上课不用投湖。理论课的具体内容包括课程安排规定介绍，机械设备介绍，钳工基础和机械制图基础等。

理论课算不上多有趣，因为我们力学系的同学在刚刚结束的设计与制造专业课中已经学过了机械制图，认识了车床铣床之类的加工器械。让我记忆犹新的倒是在早上上课前突然跑进来一位助教大喊：“哪些是工学院的同学？”然后我们十几个同学就在熙熙攘攘几十人的教室中瑟瑟发抖地举起了手。助教在黑板上写下了联系方式后说“工学院的同学有问题可以联系我”便离开了教室。当时甚至感觉因为受到了特别照顾而暖心。另外让我记忆深刻的就是反复强调的“安全”及各种规定，例如做钳工要戴手套，操作打孔机时却一定不要戴手套等。

上课休息期间老师开始统计集中上实践课的时间。集中实践课共三天，在不同的时间段进行，共有五个组别可选，七月初有一组，八月中下旬是另外四组，自然是选择跟小伙伴抱团，讨论了一下选在了八月中上集中实践课。

（三）集中实践：磨锤子

虽然挑时间的时候做好了思想准备，但是真在其他同学还在享受暑假的时候，自己就被拖到学校来上课，还是感到十分头大。

并且除了上课之外，还要早起。这三天集中实践是统一包校车接送往返，六点半出发。到雁栖湖后，在图书馆下车，要沿着石砖路走下下坡，经过学院二，二食堂，见咖啡厅左转，

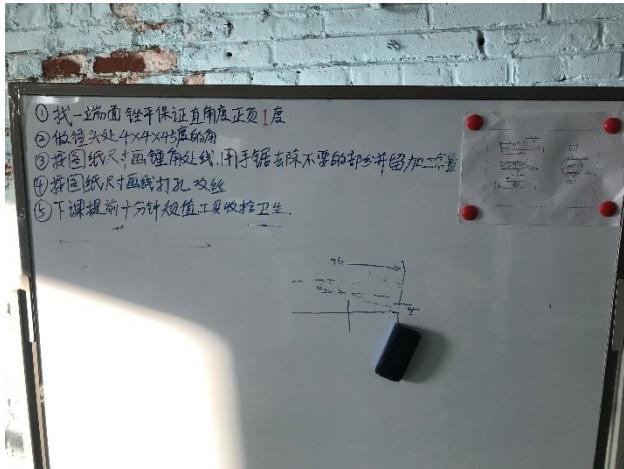
过小桥，在快递驿站处右转，就到了金工实习中心。进去放下包后先去对面的一食堂或回后面的二食堂吃早饭，大约八点四五十的时候回到加工中心。

第一天早上老师发了工作服。工作服非常工人范。其中上衣是规定“工作”时必须要穿好，拉上拉链。裤子倒随意，自己的长裤也可，但要过脚跟。另外还有一副纤维粗大的劳保手套，女生还有一顶工作帽用于罩住头发以防被旋转器械卷入。

一直以来，磨锤子都是金工实习这门课的代称，而我们现在就将开始这项任务。首先要分成两小组，一组进行钳工磨锤头，另一组用车床做锤柄，并且顺便熟悉其他设备的使用。

一天半后两组交换。我选择先进行钳工，于是被带到一块白板前，听钳工刘老师照着白板上锤头的尺寸和加工工序讲解。

锤头的加工分为四步：锉平端面，锉锤头角，划线锯割，打孔攻丝。锤子的形状比较标准，我在高中时也做过类似的锤子，估摸着应该问题不大。



等到开始做时才发现事情并不那么顺利。拿到一块长方形的铁块后，首先要用平锉锉端面使得其和另外四个侧面垂直，验证方法是拿直角尺测量，四个方向都要几乎看不出缝。原先端面有起伏，在磨的时候可以看到一层层分明的纹理逐渐变成光滑的一整片。不过无论怎么磨，磨到怎样光滑，磨完一量总是中间高两边低，或者是另一个方向又不符合要求了。这一面磨得实在怀疑人生，就倒过来去磨另一面。觉得还行，就拿去给老师看，老师拿着角尺：“你这是直角么？你看，这么大缝隙。”

继续磨。磨得无聊，看看别的同学，也碰到不少吐槽磨成中间高两边低的。不过倒是了解到只需要磨一面即可。于是努力磨了一段时间，终于得到一个比较好的结果，给老师通过了。到这时，上午已经过去了一大半。

接着第二步是把四个棱角向里磨成一个小长方形，并要用圆锉在末端过渡。这次要将铁块两端夹在台虎钳上，并且让棱角朝着正上方，以使得磨出的平面和侧面成 45 度角。在这之前还需要在预定尺寸划线，以防磨过头。

用平锉磨平面不明显，磨角倒是挺快。大致完成后拿去给老师检查。

老师：“你这是圆么？再去锉。”

于是只好继续锉，结果发现修过头了——圆形过渡凹下去了一块，于是为了过渡效果，又把平面锉下去了一点，结果看上去四个倒角平面大大小小的。再修，就不合尺寸了。只好拿去给老师检查，老师看都没看就说：

“下午再说吧，先收拾吃饭了。”

只好按照老师的要求打扫干净桌子，用毛刷把桌上的铁屑都扫到地上，再拿扫把扫干净。老师仔细检查后才给放行。

中午 12 点至 1 点 30 是午休时间，金工中心会锁门，因此只需要随身带上校园卡手机和中午打算看的东西就可以了。午饭后自由活动，一般会去咖啡厅惬意一中午，不过如果储旭同学（见上一期国科大校刊封面）在的话，则经常被他拖去教学楼学习。

下午开工后，把看起来倒角明显不对称的锤头给老师检查。

“你这怎么大大小小的……算了，继续往下做吧。”

到了划线锯割阶段，按照尺寸划线后就夹上台虎钳，拿起锯子开始切割。虽说把切割线摆得竖直，锯出来却还是斜的，并且也很难偏回去。结果越来越偏，直接切了一小块下来。于是只好再锯一次。之后大致的形状有了，但是一看侧面，边缘距离画的线还有两三毫米——不多不少，刚好要拿锉刀磨个半天，又不够再锯一次。有趣的是，在我锯之前有同学路过，吐槽说他锯完剩好几个毫米磨了半天，让我一定不要害怕锯过头而多锯一点——结果我也一样。Anyway，至少不会因为锯太过没法补救而重做。

事实上，在接下去的半个下午和第二天的半个早上，在磨余量的同时我一直在思考如果当初我要是多锯一点，就算重来会不会比现在都快。终于，斜面边缘和划线平齐，斜面表面锉得光滑，斜面顶端连接处也过渡顺滑，通过了老师的严格检查。

最后是打孔攻丝环节。打孔前需要划线冲眼，就是在预定位置打个小凹陷。打孔时需要注意的是，得把手套摘下来操作，否则可能会卷进毛线，进而发生事故。利用垫片把铁块固定在钻台上的台虎钳上，然后在还没开启前下拉手柄让钻头轻轻接触表面，观察是否对齐孔位。如果没对准，就前后调整铁块位置或左右调整台虎钳位置。对准后，放开手柄，戴上护目镜，开启电源，左手持冷却液，右手施力下压手



柄，在钻头下钻的同时喷冷却液。下钻时会产生小碎屑和长长的卷曲的大铁屑，如果干扰到加工就得先把钻头退出来，甚至要先关掉后拿掉绕在钻头上的铁屑重新开启。在钻的同时还要注意一下进度，凭感觉或是看刻度线，到了快钻透的时候，放慢速度。当钻头突破了最后一层，不再发出切削的噪声，右手上的阻力一松，整个人都舒服了。当然，还要小心翼翼地将钻头退出来。

打孔一次通过，老师让我把台子上洒得到处都是的冷却液和铁屑清理干净，然后老师在另一台打孔机上给孔倒了角。紧接着就是最后一步攻丝，需要将铁块固定在台虎钳上，拿相应大小的丝锥扳手旋进孔中。丝锥扳手的两个握杆和装夹的丝锥呈T型，而在攻丝时需要一边旋转一边两手向下施加较大的近似相等的力，控制不好就容易产生左右歪斜。如果歪了，那么就得重做，前面的工夫全白费。在我小心翼翼的操作之下，还好没有发生明显意外，不过却是累得够呛。因为丝锥的阻力极大，握紧两个握杆直接转还转不动，得靠人走来施力，转一下还得停下来低头看看T字有没有歪。不过，虽然没有明显异常，攻出来的螺纹到底有没有歪，得等装上轴才知道。

刚好一天半快结束，拿着锤头回座位休息，一看手上都磨起了一个大泡。想了想，几个耗时间的步骤全都是在拿锉刀磨，还真是“磨”锤子呢。更神奇的是，看手环记录发现磨锤子还“燃烧脂肪”！



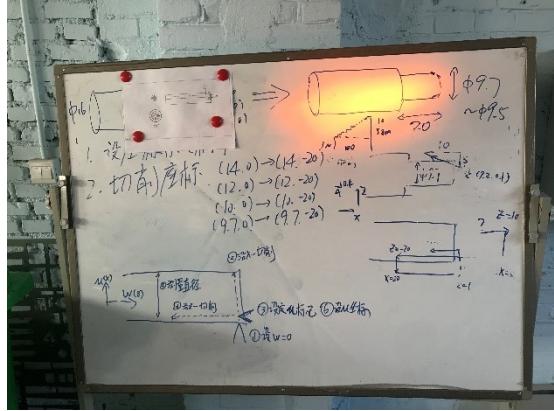
(四) 集中实践 II：车轴

集中实践课的后一半，相比起来就十分养生了。中午时意外收到了工学院助教送来的咖啡和薯片，惹得其他同学一阵羡慕。下午，张老师带着大家认识车间中各种大型设备，讲解使用注意事项。

“大家有手机的拿出来录像”，见大家都举起了手机，老师便一边操作设备一边一本正经地开始介绍：“数控车床开机步骤，第一步确认急停开关处于打开状态……”想来这一段话老师已经介绍了无数遍，早已烂熟于心了。在这之后，我们需要学习使用车床车轴用作锤柄。张老师



亲自车了一根轴示范了全流程。流程大体分为三步，把铝棒装夹上后，首先利用目测对齐，并径向、轴向分别车一刀，把车床数控系统的坐标定位到铝棒上，顺便使其表面平整。例如，在移动刀具的时候目测刀具快要从径向碰到轴，就关上车床门，设置此时轴向坐标为零，让主轴带着工件开始旋转，启动冷却液，缓慢手摇控制刀头沿径向向内。在接触到工件时，如果一切正确，会听到悦耳的切削声。沿径向切到里面然后再退出来，停下旋转和冷却液，打开车门一看就得到了泛着径向放射的金属光泽条纹的圆面。此时，轴向坐标零点就确定在这个面上了。换一个方向同理确定径向零点，但是最后要拿游标卡尺卡一下轴的直径，然后将其输入系统作为径向坐标。



车床有一个一下子不太好理解的点是它显示的径向坐标是实际尺寸的两倍。因此在第二步削减直径时，如从 12 毫米切到 10 毫米，其实只需要刀具径向往里移动 1 毫米，但在车床显示屏上读数变化了 2 毫米。这个设计其实是为了方便以直径进行加工，因为轴一般只谈直径，之前在设置径向坐标的时候输入的也是直径数，采用这个设计就能实现显示屏上径向坐标是多少，轴的直径就是多少，而无需被半径和直径的关系困扰。

最后一步是利用车床中已经有的程序，车一个斜倒角。这需要两个方向同时运动，我们使用的手摇模式就不行了。不过程序切的速度非常快，不像我们不敢摇得太快怕车床出问题。



在加工的时候还发生了一些有趣的事。不知是哪个同学车的时候，大家围在旁边看，正打开车床门瞧着刀具位置的时候，有一个同学没注意地上的装夹开关，踩到了脚踏板，结果轴就晃动了——于是之前设的坐标零点就全乱了，得重来一遍。

加工完之后，铝棒一端得到了光滑闪亮的细棒，就可以拿去套丝了。所谓套丝，也称套外螺纹，就是向细棒上攻削出螺纹。所用到工具是板牙扳手，其外形和丝锥扳手差不多，不过它在中间具有圆柱形孔，其内表面上有刀口。将轴固定在台虎钳上，把板牙中间的孔套在轴上，然后在转的时候用力下压即可。和攻丝类似，套丝也很费劲且容易歪。但是套丝歪了

不要紧，重做一根轴也就一小时不到的事儿。

套丝需要钳工的工作台。我们想去套丝时，被老师赶了回来——等另一组同学钳工弄得差不多了再说。不过我趁老师没注意，去一个空位上完成了套丝。迫不及待地旋进锤头——完美！果然没有攻歪。

第二天，张老师带我们认识铣床和线切割设备。照例是让大家拿出手机，然后开始标准发言：

“数控铣床开机步骤，……”

下午，则是“线切割路径转换过程，……”

于是我们认识了车床、铣床和线切割三台设备的操作方法。不过，设备上的按钮众多，令人眼花缭乱，一下根本难以记住。难怪老师最后还打趣说：“就算你们录了视频，我以后也得要讲很多遍呢。”

中午时分，老师把大家引到展览柜前，一件一件介绍里面的作品以及用到的工艺。这些作品都是前几届来金工实习的同学留下的优秀作业，有做静物的如鸟，钟楼，大炮等，也有做具有机械传动结构如带齿轮的摆钟。通过研究这些作品制作的思路，同学们获得了不少灵感。

三天的集中实践，到此就完成了所有任务。回到玉泉路，我们终于可以重获自由，继续过暑假了！



（五）车间中的设备们

结束集中实践，开学之后，就是自由实践阶段。自由实践需要同学们以不超过四人组成小组，自主设计并完成作品。总体而言，完成作品需要经过确定目标，设计图纸，现场加工等阶段。其中现场加工，需要自行预约前往雁栖湖，在老师的指导下使用设备。另一方面，自由实践还有课时要求。早上都是六点半的班车投湖，晚上若是坐 15:40 的班车回玉泉路，则算 6 学时；若呆到下班时间五点后自己回去，则算 8 学时。每位同学至少需要完成 48 学时。

在分享我们小组的经历之前，先介绍一下金工车间的各种设备及相关的趣事。

钳工工作台。工作台是平整的石桌，配有固定的台虎钳。桌上可能有直角尺、砂纸等工具。

具，抽屉里有一套锉刀：平锉、圆锉、半圆锉等，锯子锯条，毛刷，锤子等工具。工作台不仅是钳工磨锤子，也是之后修正，清理，组装零件的地方。最初一人一个工位时，工具都还能回到原来的位置，不过后来就乱了——一拉开抽屉，全是半圆锉，找个平锉得翻好几个位置的抽屉。



车床。车床是零件高速旋转，刀头平动来切削的设备，一般用来加工轴类零件。如之前所说，车床通过轴向、径向两个方向来控制刀头的运动。在启动后，我们需要通过手摇来控制刀头的运动。所谓手摇，就是拨开关来选运动轴，然后转转盘控制位置。操作时，最紧张的时候就是刚刚接触到零件和要变换方向的时候。前者，看着位置读数慢慢到零，然后立刻听见切削的声音，一听没有异常，就可以放心继续切削了。后者，切到零件深处时，要沿径向退出来。拨到 X 轴，然后就要面临“生死抉择”：顺时针转，还是逆时针转？方向一错，刀头就往里运动，就会直接打刀发生事故（虽然真打刀了也不需要赔，但毕竟不想造成无谓的损失）。不过，老师教过一招：转盘上有正负号，无论哪个方向，负方向永远是进刀。即便如此，在沿正方向转的时候还是不免心里犯嘀咕，诸如“我的记忆会不会被篡改”之类。下定决心转了一下之后，突然听到声音变大，心中一惊，不知是怎么回事，是继续往外还是回里面？一大群可怕后果闪过脑海。好在声音逐渐又小下去了，才松了一口气。熟悉车床之后，觉得手摇实在无趣，就想学习 G 代码编程。不过想了想如果程序编错了，后果比手摇还可怕，就一直没去研究。

铣床。铣床是刀头旋转，零件固定的加工设备，有多种刀头可选，可以完成多种任务，但我们一般拿来铣平面。操作方式和车床类似，不过它的刀头在三个轴方向都能运动。铣平面时，刀头要选用圆柱形底面上有刀刃的型号，从正上方轻轻接触待铣平面，设置坐标，然后把刀头移开，下降到预定深度，最后在 XY 水平方向来回运动即可。铣床铣过的平面没有锈迹，顺滑泛光，在此之后才可以拿去激光雕刻。铣床在三个方向都有塑料玻璃能看到里面的情况。工作时，可以看见里面牛奶四溅纷飞——由于冷却液呈白色，被同学们戏称为牛奶。而车床只能看到里面的废冷却液池，由于带点棕色被戏称为雀巢咖啡。



线切割。我最初听说这个名字时，还以为是用棉线切割。其实是通过钼丝电火花放电切割。操作简单功能强大是它的突出优势。无论设计的形状如何复杂，只要是二维，导入图纸简单操作后就能进行切割，并且切割厚度最多有两百毫米，精度则能达到0.18毫米，钼丝粗细的量级。不过其也有明显的缺点。它只能切铁质等导电性较好的零件（其实小的铝零件也可，其他材料需要自己购买），并且切割速度极慢，最快一分钟走十个毫米不到，切个零件都要等上大半小时乃至半天。线切割附带的强力磁铁脾气很大，它是用来吸住零件防止切完后零件直接掉下去的。要费老大劲，才能把它从支架或者另一块磁铁上扳下来，往零件上放的时候，啪，就迅速地吸了上去，并溅你一脸冷却液（切到一半时零件上有一层冷却液）。



加工中心。加工中心是基于铣床改进的设备，具有极强的加工能力，但是应该没有同学会操作。只见过老师在帮同学设计雕刻图案，然后放到加工中心里去运行。加工完拿出零件一看，只能让人惊叹机器的鬼斧神工。

锯床。在角落里不起眼的小设备，用起来却十分方便。要把轴锯短，不用架到台虎钳上自己锯，把轴夹到锯床上确定好位置，打开电源开关，它的锯条就开始运动。把固定锯条的支架放下，运动的锯条就会在重力作用下自动切割零件，几秒钟就能切好。不过由于不好固定，不能切太短的零件。



3D 打印机，顾名思义设计好 3D 模型就能打印出来。不过由于它在小房间里（或是由于上学期设计与制造课已经玩过了），我一直都没有想起来用它来设计。除此之外，还有金属 3D 打印机，不过它运行条件十分苛刻，光准备就要准备一天，我们是根本没法用的。

钻台，是用来钻孔的。钻孔时，最令人头疼的就是准确定位。经常性的情形是，把钻头下放，正面看一下对准了，到侧面看一下歪了，于是调一下位置；回到正面一看，歪了，于是再调一下位置；去侧面一看，还是歪的……如此往复，直到实在心累不想再对准，就大致选了个比较准的位置开始钻，钻完一看——孔果然歪了。

激光切割，是人气最高的设备。和线切割类似，它也是输入一个二维设计图纸就能开始切割，但是切割的速度极快，基本几秒钟就能切完。不过它切割的材料都是2mm厚或其他薄铝板，要想成最终作品，还得依靠其他零件或者相互拼插完成。当然，极快的切割速度会使得零件的温度很高。当切完以后，如果没戴手套就兴致冲冲地拿起零件看，就会烫烫烫烫烫。激光切割也会出一些bug，例如切完后零件可能卡在板子上下不来，或者是掉进缝里得重切。另外，切割出来的零件边缘似乎有因高温而卷曲的金属碎屑，需要用锉刀锉干净。



激光雕刻，或称激光打标机，也是高人气设备。把表面光洁的零件放在台上，导入图片——什么图片都行，然后就可以在零件表面上雕出相应的图案，不过只是有深浅对比，没有彩色。我后来想用激光雕刻时，设备连着的电脑坏掉了，到最后结束也未能用上激光雕刻。

划线台，是一块放在矮架子上的乌黑透亮，光滑深邃的长方体大理石。老师说表面的平整度会影响划线的精度，因此不要敲打它，要小心爱护。划线的工具是一个立式游标卡尺，固定在稳当的可移动的基座上。卡尺的读数，就是水平划刀距离大理石面的高度。把零件靠在大理石上的可移动的带槽的铁块上，固定好划刀，拿着整个游标卡尺移动让划刀在零件表面上划过，就划好了一条线。不过，这样只能画水平线，要想画竖直线，得把零件竖过来。要画斜线，就只能拿普通的划针去桌上简单划了。



除此之外，还有电火花成型机、磨床、磨砂轮等很少用的设备，就不特别介绍了。

(六) 小组作业：如何确定风铃尺寸？

小组作业的第一步是定题。几个同学一边聚餐，一边在网上查各种现成的模型，同时也提出了不少想法。我觉得拼插的静态模型有些无聊，想做个动态的作品。第二，老师说做和学校有关的纪念品有加分。和学校相关，就想到在校徽上做文章。第三，又想起之前做过校徽里面的六星会转的表情包，想实现一下。第四，看到之前展示柜里的作品都是放在玻璃板上的，就想做一个不是放而是挂起来的玩意儿。于是，脑海中就出现了一个挂钩，挂着校徽的外环，里面星星在转，星星为什么会转呢？大概是有风吧，有风……那不就是风铃嘛！

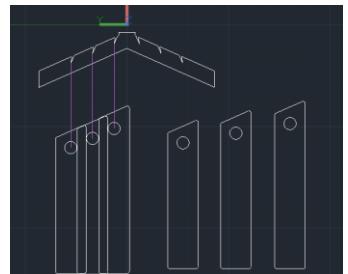
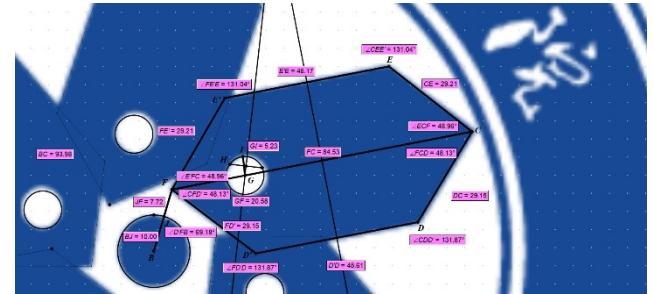
大家似乎没有别的特别强烈的想法，于是我们真的就开始做风铃。风铃只有上面一个装饰可不行，还得挂能发声的风铃片。挂风铃片又该怎么设计？随便给位置，总觉得不太满足，得找点什么对应一下。想了想，既然是和学校相关的设计，那么除了校徽，最经常用到的元素大概就是玉泉路礼堂正面了。而礼堂正面又刚好几根柱子支撑的结构——就让风铃片模仿成礼堂的样子吧！上面刚好可以再做一个礼堂的斜“屋顶”，用来挂风铃片。

确定大致形状后就要确定尺寸了。遇到的第一个问题是，校徽是个图片，怎么确定它的尺寸？首先研究校徽的结构，发现无非是圆、六边形等基本图形的组合，因此是可以用几何参数表达的。然后，我原先用软件做边缘检测，试图通过获取顶点坐标来计算，效果不佳。由于工作量不大，最后我干脆就打开了几何画板开始抠图测量。同理，对礼堂的柱子和屋顶也进行类似的操作（感谢余方晨学长之前拍摄的照片）。

这样就得到了所要设计结构的长度参数，下一步就是根据这些几何关系去 CAD 绘图。在此之前，发生了一个小插曲。和大家讨论时，发现大家理解中的“会转的校徽”，是绕着竖直轴转，而非在校徽平面内转。不过我觉得这样也挺有意思，也更具有挑战性，就按照这个想法继续做了。

虽说 CAD 从小到大都在看着我爸用，但是上手画还没有怎么试过。好在之前有几何画板和玩 Rhino 的基础，在摸爬滚打中也就这么画了出来，并且还做了个 3D 实体图——样子非常像棒棒糖。具体大小的确定则是根据我之前一次去金工中心时观察提供的原料的尺寸而定。至于下面挂的房顶和风铃片，则是到中期才画上。风铃片的高度经过特别设计，使得悬挂位置合适时其底部高度保持一致，顶部也成一条斜线。

基本图纸画好，前期的准备工作就完成了。对于这个设计，小组同学们还有很多想法，例如校徽上的字怎么办？怎么样把它吊起



来？能不能设计一个精细的结构，让六角星转一圈会碰到一个挡板，使得其发出清脆的声音？六角星能不能设计成某种类似叶片的结构，使得其容易被吹动？风铃片上做什么花纹？还是用能小铁管？事实上，等到开始做才发现，很多有趣的细节忒难做，后来就直接放弃了。

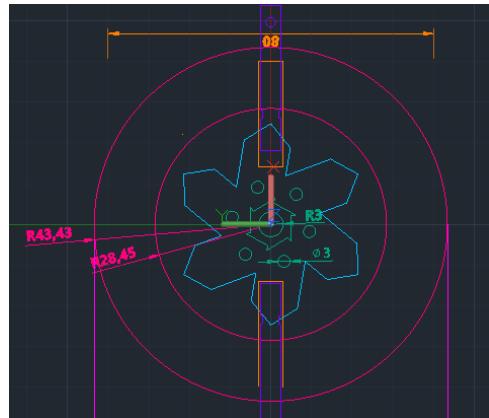
(七) 圆环与星星：线切割与打孔

九月份一直繁事缠身，只去了一次打探情况。到了十月份，想想按照一个周末去一天 6 学时的频率大概要两周一次，而我已经咕了一个月，又看着空间其他同学已经去了好几次，不禁感到有些焦急。国庆回来，逢运动会周五放假，恰巧我那一周没有很多作业，就打算直接去个三天。

给老师看过设计，就遇到了大问题：贯穿整个零件的旋转轴太长太细了。钻头越细，长度越短，根本打不了这么长的孔，甚至连一半都打不到。怎么办呢？老师说：“其实不用一整根轴吧，可不可以分成两段，上面插一根轴，下面再插一根？”我们想了想，确实没有别的更好的方案。于是修改了设计图。不过这样一来，最中间的小圆柱就没有东西支撑。本想改成用铣床铣类似形状的浮雕，奈何铣刀最小直径三毫米，精度不够，最后干脆就直接不要，让最中间空着了。

另一个问题是在思考如何加工时遇到的。既然要打垂直方向的孔，那么就得选比较厚的原料，如此就不可能用激光切割，进而这样复杂的外形就只能用线切割。那么，是先打孔再线切割，还是先线切割再打孔？按照我最初天真的想法，当然是先打孔，然后一口气切出圆环和六角星。即使现在需要拆分成两段轴，也只要对着打两个孔即可。

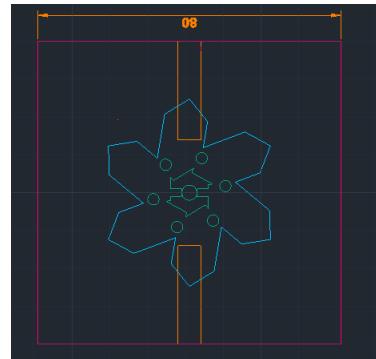
然而，当我们拿线切割切出一块 1 毫米厚的铁板，打完孔后问老师切下去如何切割时，却发现了这么一个事实。线切割的路径是连续的，它只能切外形。要想切一个圆环，要么在切的时候让其在圆环径向上往里切一刀，让它能切到里面的小圆，但这样圆环上会留下一个小缝。要么在里面打孔，切完外面的圆后把丝抽出来，机器移到中间孔的位置，再把丝穿上，再从里面切一个圆，最后类似操作把丝再移出来。这样不会留缝，但操作十分复



杂，对孔定位的精度也要求较高。

如此我一次切两个的计划就落了空，因为就算破坏圆环往里切，里面的星星中间还有孔，要是再往里切就太难看了。讨论了一下，我们意识到圆环和星星可以分开来做。既然手上这块板子已经打完了孔，那就做星星吧，圆环结构相对简单，后面还好做。

单独把这块板子拿来做星星，为了确定具体尺寸，又画了一张图。如图上橙色线是切出来的方形外框和打好的孔。星星上有六个小孔，打算用打孔搞定。为此，还把星星大小进行了缩放使得孔的尺寸符合钻头的尺寸。当然，相应地大圆环也作了对应比例的缩放。除此之外，为了把丝穿到中间切出里面的形状，最中间也需要一个孔。



打孔环节十分令人头大。总共需要七个孔，就是十四个坐标，一一在图上量出来记下来，然后拿去划线台划线。每个数都要调节游标卡尺读数，画出一条线后再把板子转 90 度，画另一个方向的线。读数读得眼花，终于画完了十四条线，拿起来一看，板子上密密麻麻布着像棋盘的线，到底哪两条相交线的交点才是需要的？我们一边推测辨认一边拿样冲冲眼，最后一看七个眼确实符合形状，才松一口气。然而如前所述，钻台打孔很难对准。打完孔一看，基本每个孔都没有被划出的线平分——中心有偏移。

打完孔拿去线切割，由于需要中途停止穿丝，老师帮我们做了和一般切割不一样的程序设置。先切中心。老师帮我们抽钼丝，并叮嘱我们录视频，下次可要我们自己做。抽完丝后，移动机器到中间小孔位置，再穿上钼丝，切出内轮廓，之后机器自动暂停，老师再把钼丝抽走，按继续，机器会自动运动到外部轮廓的起割点并暂停。此时再穿上丝，继续运行即可。这样的设计不需要人手动移动到下一个切割的起始点位，就保证了位置精度。但是抽丝穿丝有非常多的步骤，仅靠视频也无法完全理解，因此到最后我们也没有自己抽过丝。



星星外形切到一半，我看着却觉得越来越不对。已经切出的轮廓中，之前打的孔完全不在预定位置上，甚至差一点就要被切掉。切完后一看，没有一个孔在预想的位置上。难道是我图纸上测量孔的位置量错了？还是划线时划错了？每个数字我都校对过好几次，就算错也不应该全错。难道是上下反了？我把图纸旋转了 180 度，却发现这是个完全对称的图形。思索良久，突然意识到，会不会是划线打孔是一面，拿去线切割时是另一面？这样，相当于六

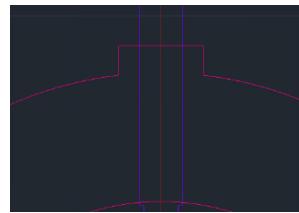
个孔被水平镜像。去图纸上做了一下，果然和实际相符。直到现在，我的图纸上还留着镜像之后的歪校徽——不知道大家有没有在上面的图中注意到？

当然，好消息也有。切完后的星星两个孔仍然很完整。图纸上看孔和切割边界很接近，实际上并没有切破，倒也是比较幸运。接下去，我们找了另一块料做圆环。

“这个圆环受不受力？受力不大的话就直接往里切一刀好了，不会很明显，又方便，受力也不会影响多少，铁的强度是很大的。”

认识到抽丝穿丝的麻烦，也抱着试试的心态，我们就从了老师选第一种方案，在圆环三点钟方向上设置了一条小缝。最后确实如老师所说，虽然圆环上有缝，但不明显，用手拉圆环也没有明显变化。

切圆环时，我们计划先切再打孔。为了克服曲面不好定位打孔的问题，我在切割图纸上做了一些手脚。在圆环顶部打孔位置，将圆弧改成一个方形凸起，这样就有了一个打孔平面。打完孔后，如果不想要，用锉刀锉掉即可。



圆环很顺利地做完了。下一步，只需要做两根轴穿进去，上半部分就完成了。然而做轴的时候遇到了麻烦。打的孔直径 6 毫米，做 6 毫米的轴塞进去肯定太紧，于是打算做 5 毫米的轴。结果在车床上车轴的时候，发现粗细到七八毫米时就产生了奇怪的不稳定性，中途打开车床门一看发现轴已经歪了。

既然自己车不出这么细的轴，那干脆就直接找成品轴。同学在淘宝上的五金店发现了五毫米甚至更细的螺杆，由此还解决了固定问题——如果仅仅是轴，穿上之后吊起来，零件就全往下滑掉了。先前设想过用设计与制造课上学过的平键连接，或是在轴中间留下凸出来的一块，或是直接套牛皮筋，都比较麻烦。直接螺杆加螺母，就十分方便了。

虽然车不出轴，但是把比较细的轴直接拿锉刀锉得更细还是 OK 的。随手捡了块废料做了一下，确实能让星星套在圆环里面转圈。到此时，三天金工已经结束。除了上面的这些工作外，还完成了线切割做屋顶等工作。下一次，计划买到轴以后再来。



(八) 台风铃的组装与装饰

谁也没想到，大家一路从十月初咕到了十一月底。月底我在买轴前先去了一次。张老师

来关心作业进度，得知需要细轴时，建议我用线切割切一根。这是十分新奇的想法，因为线切割一般用来切平板类零件。但仔细一想，轴虽然是个回转体，但把它立起来，也就是个高一点的圆柱体。而且线切割能最多能切两百毫米厚的零件，对几十毫米长的轴绰绰有余。不仅如此，张老师还以小铝块为原料，解释说切的东西小，铝块也行，颠覆了我之前对线切割只能切铁质等导电性较好零件的认知。最后切出来的轴确实符合要求，但由于零件需要固定，还是打算用螺杆。

那一天后来我又学了激光切割，很快就上手把几个风铃片切了。解锁了这一项技能以后，我就开始切各种自己想设计的玩意儿，此为支线剧情，之后再提。

在买螺杆的时候，发现还有吊环卖，可以穿在螺杆上，这正好又解决了如何悬挂的问题，果断加入购物车。拿到手的螺杆都是一米长，在后一周拿去金工车间切割成合适的长度。由于之前切割的屋顶太薄，掉到地上弯了，就又重新设计切了一个。

此时，就可以进行组装：上方螺杆依次串螺母吊环圆环螺母星星，下方螺杆依次串星星螺母圆环屋顶螺母，把吊环拎起来，果然很稳当，并且中间的星星确实能自如的转动。不过由于星星是铁质的，要靠近用力吹才能吹动，因此又被我戏称为肺活量检测器。后来发现，星星转动时有时会带动轴转，使得螺母松掉。直到我在支线剧情中学到卡簧的用处并安上一个才解决。

问了问同组同学，因为之前没注意正反，想不想重做一个星星。不过估计大家想到打七个孔，线切割穿丝十分麻烦，并且现在不仔细看也看不出来错位，就都不想再做了。那么接下来只剩一些美化工作。由于最开始我们用料没有铣表面就拿去切，圆环和星星表面都有些锈迹并且黯淡无光。要想激光雕刻，得先有光洁的表面。我把圆环拿给老师问问能不能铣，老师迟疑了一会说可以一试，于是放到铣床上，按照标准步骤铣。铣第一面时十分顺利，翻过来铣第二面到一半时，圆环在铣床高速转动的刀头作用下居然飞了出去！好在铣床里面的空间很大，圆环没飞多远就落在了一旁，想来是曲面不太好夹紧的缘故。重新夹好后顺利铣完第二面，不过由于发生了意外，这一面上仍然有坑坑洼洼的地方。星星则形状过于不规则，没法用铣床铣了。老师建议我用砂纸打磨，虽然累人，效果倒也不错。

接着要处理圆环上的文字。最早的设想是激光雕刻，可是后来机器坏了未能用上。张老师建议可以找刘老师用加工中心进行“物理上的”雕刻，但是需要找老师设计图案的3D模型。校徽字多且复杂，大家懒得做，于是也就作罢。再之后接触了喷漆，我们设想做一个镂空校徽字的遮罩，放在圆环上，然后喷漆，把遮罩拿下来就是往圆环上印字的效果了。我尝

试激光打印遮罩，结果发现就算用最粗的字体，笔画粗细也就两毫米，根本不够激光切割的精度。此时我意识到，由于精度问题，以车间内可用的设备技术，想要完全复刻校徽的文字是不可能的。于是我想：

“虽然我们是按照校徽设计，但是这并不意味着要拘泥于原型，死抠细节。应当依照实际情况，适当发挥，设计真正可行的方案。”

那么，我们为什么一定要把所有字都写上去呢？于是我决定只做 UCAS 四个字，并且也不用做遮罩，直接激光切割字母粘上去即可。此时，字符的粗细就足够切割的精度。之后发现有些不协调，就又切割了 2019 四个字。

切完字符后，关于外形轮廓的工作就全部完成了。带着一堆零件回到寝室，开始全部组装。圆环星星的组装已经很熟练，然后用金属胶水把八个字母数字粘到对应位置。接着需要用细毛线把风铃片挂到屋顶的槽里。还记得最早设计的时候风铃片是可以顶部底部对齐的么？到这可苦了我了——需要让串在风铃片上的毛线具有相同的长度。毛线打死结本就十分困难，还需要控制打结锁死时长度一样。没有天赋的我研究了一个小时，也只成功了一对。不过之后借助用胶水把交点粘在一起，倒是找到了一个控制绳结位置的方法。

前后两三个小时，终于得到了未上色的成品，不过已经可以拿来玩儿了。把它吊起来，发现它的影子真有礼堂的风范，风铃片的特意设计和打结的辛苦工作没有白费。不过风铃片之间碰撞声音过于清脆，甚至有些吵，只好捏紧铝片不让它振动。至于星星，由于是铁质的比较沉，正常吹仍然很难吹动。吊起来以后我拿硬质盖板扇起大风，吹得我桌上杂物乱飞，但除了让风铃整体晃动外也没什么效果。我突发奇想，那吹风机可不可以呢？跑去厕所试了一下，星星转得非常欢快，效果拔群，体验极佳！后来一查，吹风机的出口风速可能有台风风速，所以我又给它一个名字“台风铃”。

后来才意识到，其实可以用 3D 打印做星星，由于做出来是塑料材质，就会很轻巧容易



转动。

由于风铃片上原本也计划激光雕刻图案，但雕刻用不了，只好改做喷漆。前一天同学尝试喷漆，效果棒极了，因此我决定第二天也去喷漆，顺便把作品上交。然而时运不济，染色那天木板不见了，只好拿泡沫塑料板代替，结果颜色沾得到处都是，后来才找到木板。喷漆这操作，要么一次成功，要么就是在循环翻面补缺陷，因此最后的效果一般，但是在拍照圣地拍的照片，也还是挺好看的。



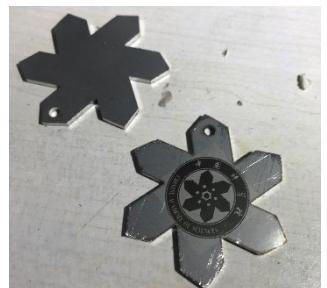
还有一个小插曲，车间给的蓝色喷漆颜色太浅，我们又新买了一瓶深蓝色喷漆，结果在我最后一次去的时候才送到，我自然是用不上了。

回顾整个小组作业的过程，有实现了转动结构的欣喜，也有未能做得很精致的遗憾。不过，毕竟是头一次设计作品并亲手加工，仍记得老师说“失败了浪费零件不要紧，没有什么设计能一次成功，自己多尝试一下”。在金工实习一路从零开始的摸爬滚打中，无论成功与否，积累的经验宝贵无价。



(九) 支线剧情：钥匙扣，手里剑和趁热打铁

其实金工中心是很自由的，除了做小组作业外，自习也可，自己做别的东西玩也可。而且只要不是恶意浪费，原材料都是免费取用。十一月底我学了激光切割，刚好风铃暂时又没有更多的工作要做，于是我就打算做些小玩意，例如钥匙扣，有了外形，再画个洞，激光切割一两秒就能切好。



我打算仿照网友的创意做个爱豆 LOGO 的钥匙扣，不过 LOGO 形状复杂，无法分析其中基本元素。尝试使用栅格转矢量软件后发现效果不佳，于是就把图片拖到 CAD 里，直接用样条曲线目测拟合。画完图，也是送进激光切割，一下就切好了。最后用锉刀去毛刺，用砂纸打磨，就可以挂在书包上了。其他同学也有做游戏里的武器，或者是又用激光雕刻做母校图案的。



不过，让校徽在其平面内转动的想法一直萦绕在我心

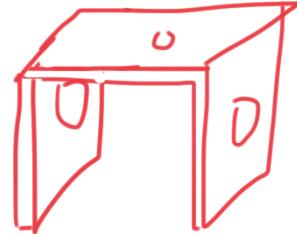
头。趁着无事，我打算先用激光切割做一个。与风铃不同，校徽星星在水平面内转动，则轴是垂直圆环放置的，因此星星的厚度就可以很薄，不需要用线切割切又厚又沉的铁；轴孔也可以设计很粗，不用费力做特别细的轴了。

把之前校徽的图纸拷贝一下，改了改，最中间加上直径为 10 毫米的孔（方便加工轴），就可拿去激光切割了。不过在切割前，看着中规中矩的星星，总觉得有些死板缺乏动感。这时想起果壳良品之前做过的一个校徽图案的变体，把六边形给“掰弯”了，有了旋转的方向感，于是我也尝试了一下。把六边形的边改成曲线，然后拖着顶点往一个方向拉伸——最后就成了手里剑的形状，又像是风火轮，看起来十分霸气，觉得挺不错。当时还没有考虑圆环整体又怎么固定，支架怎么做，因此为了将来可能的固定措施，在圆环上又加了一个洞。



后来，打算和风铃用类似的方法悬挂，即用吊环吊起来，但是这就需要一个把水平轴转为垂直轴的转接件。这个形状倒是不难想，我在手机上用手指头粗糙地画了一个，就去找老师：

“张老师，这个样子零件怎么做呀？这里是两个孔用来穿 10 毫米轴，上面是另一个孔，有没有能掰弯金属片的方法……”



老师：“没懂。”

我：“……”

其实也挺正常，就凭几句话说说，不确定性太大了。最好的方法就是画出零件图，标出尺寸给老师看。不过，这个零件确实不复杂，我又解释了两遍老师也明白了。

老师：“你去确定一下厚度要多少吧，铝块够的话就打两个孔，拿去线切割切一下好了。”

然后老师有些事就忙去了。我一想到要线切割，就觉得十分麻烦和耗时间，因为这个零件展平了用激光切割就能做，真的不能掰弯么？我灵光一闪，激光切割切出来的零件不是很烫么？那我干脆就来个“趁热打铁”。为了定位和减小阻力，我还在掰的位置上设计了细槽。

激光切割一完成，我戴着手套快速地拿出零件，用力掰。左一半真的顺利地被掰弯了，但右一半，掰到一半的时候零件凉了，于是变得特别硬，掰不动了。这可如何是好？我回头看见钳工作台上的台虎钳，便生一计，直接把它放到台虎钳上夹紧。果然还是机械的力量大，右一半一下就弯了过来。再用不同角度夹，细微修整，这一个转接件就完成了。老师忙完回来见了说：“这倒是有趣



的方法”。

事实上，最后这个连接件并没有用上，因为——想要挂起来，直接用圆盘上那个洞悬挂不就可以了么？因此后来就重新设计了圆盘，不过这个连接件的制作过程挺有趣，因此还是记录下来。

(十) 结构艺术：齿轮，D型轴和卡簧

校徽星星可以在圆盘上转了之后，就开始计划新的元素。经常想到的是在背后装齿轮，但又想不出该做加速还是减速，应该怎么手动控制齿轮等问题。正当我想着齿轮看着手里的作品时，又灵光一闪：这个手里剑一样的形状，好像就能当齿轮用唉！而且上面刚好有另一个孔，如果我做一个小一些的“手里剑”装上去，他们能不能咬合呢？说干就干，把现有的手里剑校徽图形复制到上方的孔，调节缩放比例，使得其在图纸上看起来能咬合，还用旋转工具模拟了转动情况。打印出来一看，真的可行！而且发现这个齿轮组有很有趣的性质（当时没存图，只好找了喷漆喷毁之后的零件重新搭了一下）。



首先大齿轮带小齿轮转，大齿轮转一圈小齿轮也转一圈，所以平均角速度其实一样，这和传统齿轮传递线速度不同。然后，大齿轮在转动时，每 60 度中只有 30 度把小齿轮推动了 60 度，另外 30 度在空转。就是说，大齿轮匀速转时小齿轮会转一下停一下。而小齿轮带大齿轮转，则会一直空转。另外，小齿轮处于特定位置时会出现死点，即大齿轮和小齿轮会卡死无法转动。在正转时很少会出现死点，倒转时转一两圈就会出现。

为了让齿轮的性质更直观，就打算在反面做指针。指针也是简单设计一下，激光切割即可。然而接下来就遇到了万年老问题：怎么把零件固定在轴上？

刚好那时在买风铃用的螺杆，于是我打算在这里也应用，一并买了 10 毫米的螺杆、螺帽垫片等。结果一番组装后，又遇到了问题。要想让手里剑校徽和另一面的指针同步转动，就得用螺帽死死地把它们紧固在轴上。但是在转的时候，螺帽也会受到扰动而发生相对转动，紧固就失效了。另一方面，指针和校徽最好靠近圆盘，否则重心位置不好控制，轴会上下晃动，使得齿轮咬合不紧。但是它们紧贴着圆盘又不行，摩擦比较严重。

又去向张老师寻求帮助。老师建议我试一试 D 型轴。虽然之前没有听说过，但是这个名

字十分形象，即在轴圆形截面的基础上，用线切割再切一刀变成 D 型截面。相应地，把需要同步转动的手里剑和指针中间的孔也设计成 D 型孔，不需要转动只起支撑作用的圆盘中间的孔仍然保持圆形。D 型轴穿过圆孔，可以自由转动；穿过 D 型孔，则会精确地带动零件同步转动。

如果是用 D 型轴，那就得抛弃螺杆重新做一根，在老师的指导下很快就完成了。相应地也去做了一套 D 型孔的零件，穿上 D 型轴后发现，确定能稳定同步转动。不过此时仍然存在老问题：怎么把零件固定在轴上？

老师果然见多识广，建议我用激光切割切一个 U 型字母卡在轴上，作为卡簧。

“卡皇？什么卡黄？”其实我当时甚至以为是某种打牌术语。

“是弹簧的簧，你去百度搜一下就知道了。”

打开手机一搜，就见到了卡簧的描述“起着阻止轴上零件轴向运动的作用”。这正是我想要的！再一看其原理，就是利用弹性夹紧在轴上，挡住零件滑动，和我之前设想过用牛皮筋在轴上缠两圈原理差不多。而老师的意思则是要我用激光切割自制一个 U 型片，其口子略小于轴，用锤子把它砸在轴上，就能扣死。

设计卡簧的过程经历了不少波折。U 型的半径、粗细，直端长度，末端角度等都是可变量。改好一个设计，就拿去激光切割切一个样品，放到轴上，孔太大会自己掉出来；太细会容易前后摆动。不过运气还行，失败了六七次后终于得到了效果不错的卡簧设计。卡簧的效果不仅优于螺母，还比一厘米厚的螺母要薄的多，更为轻巧，并且还能当垫片垫在指针和圆盘之间，减小摩擦。这真是天才的设计！不过当然要感谢老师提出的好想法。



理论上，此时就能按照卡簧手里剑卡簧圆盘卡簧指针卡簧的顺序组装了。但是还打算往圆盘上激光雕刻刻度、名字等，就暂缓组装，等回去设计好了图案，下一次来雕刻完后再进行最终组装。

（十一）雕刻不成修电脑，喷漆却成千古恨

天有不测风云，带着精心设计的图案来到车间，却得知激光雕刻电脑坏了，得重装系统。刚好我会一些技术，结果就——我竟然在金工实习帮老师修电脑！发现 C 盘似乎有损坏，就打算在另外几个盘中选一个作系统盘。想到 D 盘应该有软件，就在 EF 盘中随机选了一个盘。然而大家都没有料到，激光雕刻的配套软件正是在那个盘中！后来在网上找软件又花了好久，

下完软件却提示需要硬件保护卡，这就没办法了。

事实上，直到最后激光雕刻也没有修好。原来打算雕刻的都没法做，老师建议可以试试喷漆。喷漆操作不难，把零件放在木板上，摇一摇喷漆罐，压下压嘴就可开始喷漆。但是想要喷得好需要一些水平。另外，喷漆也需要耐心等喷漆干。由于我在喷漆的时候无事可干，时不时就去翻一翻看看情况如何，一定程度上也导致了喷漆粘上手印等问题。

给圆盘上白色漆，手里剑和指针上蓝色漆，完成后拿去组装。



结果组装时又发现喷漆带来了一些问题。首先是台虎钳夹持的时候把漆弄脏了，只好最后再去补一下漆；其次是喷了漆之后，发现转动阻力变得非常大，显然是由于漆与漆之间的摩擦远大于金属之间摩擦。没有太好的办法，只能用力多转转手里剑和指针，让中间接触部分的漆被刮掉或磨掉一些。

补完漆之后我的支线剧情就算打通了——成功完成了一个会转的校徽，并且还把它当齿轮来用。不过真正的收获不仅是这一个作品。在制作它的过程中，自己提出了不少想法，也学到了 D 型轴等不少有用的结构。仍旧是老师的那句话，“自己多尝试一下”。



(十二) 番外

这一段记录一些与金工实习主线支线无关的趣事。

拍照圣地。金工中心休息室的窗台是砖红色的，配上窗外的草地和小路，午后两三斜阳光形成光与影的协奏，根本不用特意选角度，什么作品往那儿一放都能拍得很好看。于是大家都爱把成品放在这里拍照，不过我做完得晚，拍的时候外面已经是白雪地了。

说起雪地，其实雪地也是拍照圣地，角度选取合适的时



候会营造出天地茫茫的氛围。中后期来金工实习的时候，恰巧北京初下大雪，雁栖湖的雪又比玉泉路要大得多，对我们这些好久没见过没玩过雪的同学来说，虽



然来雁栖湖金工实习比较辛苦，但是顺便玩雪着实不亏。

锤子过不了安检。如果有同学没赶上班车，得自己坐地铁或者坐火车回去，那么就要小心了——学期初有同学坐火车的时候因为带着锤子而被安检拦了下来，锤子险些被没收走。如果被收走了，那么就得重磨一把锤子。对于其他零件，则也有可能存在类似的情况，不过经亲身试验带激光切割的钥匙扣过地铁安检没问题。

住国会。至少在我去金工实习的时候，晚上可以付钱住在国会，相当于宾馆。这样，不仅可以呆到五点，多算2个学时，而且还不需要班车一路颠簸回去，第二天再早起一路颠簸过来。由于这样连着两三天或者整个周末都在雁栖湖，我就会和同学说：“这周去雁栖湖度假了。”国会的价格不便宜，不过可以叫上小伙伴一起住平摊。B座标间加两张床可睡四个人，一人只需要一百多，晚上大家还可以一起逛雁栖湖校区，看夜景，或是呆在房间里学习or享受免费wifi联机打游戏。

不过住国会第二天需要八点半就到。坐校车来时，八点二十才到雁栖湖，然后早饭后八点四五十才到车间开始工作。住国会时，我也照着类似时间行动，结果在车间门口被刘老师截住了。

“看看这都几点了？知不知道几点上课？”

其实我真忘了几点上课，因为之前坐校车来时都是八点四五十才到车间，以为那个才是上课时间。

“他们是坐校车来的，可以允许晚一点，我们是八点半就上课了。你们昨晚不是住在这儿么？早上起不来？”

无论如何，赶紧先认错。

“完全可以记你们迟到，这次就警告你们一下，下次别迟到了。”

最后一次临走时，老师说：“你后面还来吗？”

我：“如果不出意外的话……应该是最后一次了。”

老师：“哎，我还想你多来几次呢。课时够了也不要紧，有空都能来。”

其实我确实还挺想来玩儿的，还有许多机器都没有使用过。只不过各种期末作业都压了下来，实在无暇抽身。这次后来没有发生任何意外，我一学期的金工实习也就这么结束了。

别人的金工实习与我的金工实习。别人的金工实习我不知道，我的金工实习除了在车间操作设备以外，还包括自己加戏做了个个人作业，逛淘宝买零件，车间修电脑，雁栖湖度假，玩雪……当然还有写新闻稿。

致谢。感谢金工实习张老师和刘老师的指导，感谢助教的老师的关心，感谢开课学院的支持，感谢同组同学的努力，感谢包雨晨、蒋薇宁、司英明、高云聪同学提供图片，感谢徐浩清学长提供写新闻稿的机会，当然也要感谢自己没有把这么一门有趣的课划过去。