

摘要

机械式液体流量计系统需要大量的时间来制作各种机械零件，因而系统评估工作颇具挑战性。本文档详细介绍了制作霍尔效应机械式流量计的主要设计考量，并总结了流量计评估的结果。另外，本文档还包含用于制作所述流量计的 PCB Gerber 文件和 3D 设计文件。

内容

1 引言.....	2
2 流量计设计.....	3
2.1 机械注意事项.....	3
2.2 磁力注意事项.....	3
2.3 霍尔效应传感器注意事项.....	4
3 流量计开发.....	6
3.1 3D 打印建议.....	6
3.2 流量计装配注意事项.....	6
3.3 流量计装配指南.....	6
4 流量计评估.....	10
4.1 流量计测试.....	10
5 误差源.....	11
5.1 机械误差.....	11
5.2 采样误差.....	12
5.3 磁误差.....	12
6 流量计 PCB.....	13
6.1 PCB 原理图.....	13
6.2 PCB 布局.....	13
7 物料清单 (BOM)	14
8 参考文献.....	14

插图清单

图 2-1. 圆柱体磁体和块状磁体.....	3
图 2-2. 多极磁体.....	3
图 2-3. 单极开关工作.....	4
图 2-4. 全极开关工作.....	4
图 2-5. 锁存器工作.....	5
图 2-6. 封装灵敏度.....	5
图 3-1. 轴安装.....	6
图 3-2. 轴承安装.....	7
图 3-3. 磁体安装.....	7
图 3-4. 叶轮安装.....	7
图 3-5. O 形环安装.....	8
图 3-6. 流量计顶部安装.....	8
图 3-7. PCB 水平安装.....	9
图 3-8. PCB 垂直安装.....	9
图 3-9. 封盖安装.....	9
图 4-1. 流速分析波形.....	10
图 5-1. 失准仿真.....	11

图 6-1. PCB 原理图.....	13
图 6-2. PCB 顶部渲染图.....	13
图 6-3. PCB 底部渲染图.....	13

表格清单

表 3-1. 流量计装配.....	6
表 7-1. 物料清单.....	14

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

机械式流量计通过监测叶轮的转速来进行流体运动速率内插计算。在具有磁体的方案中，可以通过使用霍尔效应传感器测量磁场变化来测量叶轮的转速。此方案的主要优势是能够保留机械设计的防水特性，同时还能够准确地测量转速。然后，霍尔效应器件的输出端可以连接到微控制器，以实现频率到流速的转换。

本文档中详述的流量计设计旨在提供一种价格低廉的测试系统来评估各种磁体和霍尔传感器配置。总的来说，3D 打印流量计有三种主要配置选项。此外，每种配置选项都能够评估各种霍尔传感器，包括一维 (1D) 和二维 (2D) SOT-23 器件。如需相关下载链接以及用于制作 3D 可打印机械式流量计的说明，请参阅节 3.2。

2 流量计设计

2.1 机械注意事项

机械式流量计利用液体流动来驱动旋转部件，其转速与液体的流速成比例。在制作流量计时，务必要考虑机械设计元素，因为这些特性决定了流量计的性能和精度。在设计机械式流量计时，要考虑的第一个机械特性是叶轮尺寸。叶轮尺寸可影响能够测量的最小和最大流速。可以利用流速仿真软件来评估机械系统的有效性，并可以相应地调整叶轮尺寸，从而实现所需的检测范围。

主要误差源来自于机械部件中的损耗。旋转叶轮的摩擦损耗会影响流速检测范围内的检测线性度。旋转机械部件对流体流动的干扰会造成额外的损耗。如果没有仿真软件或不进行物理流量计测试，此类损耗通常更难以评估。理想情况下，输出频率与流速成线性关系，而损耗会迫使低流速和高流速偏离线性检测范围。在一些情况下，可以使用软件调整来将流速测量中的非线性度纳入考量。

2.2 磁力注意事项

2.2.1 材质

适合在流量计中使用的磁性材质选项多种多样。务必要评估检测元件生成的磁场，以验证霍尔器件是否能够感应磁场旋转。另外，如果磁体会接触液体，还务必要选择适当的磁体材质。

2.2.2 几何

流量计实现中存在很多磁体选项。这些选项可以分为两种不同的类别：多极磁体和双极磁体。流量计可以依赖单个多极磁体，也可以使用多个双极磁体，以实现所需的传感器分辨率。磁体的形状和尺寸可能各不相同，以便满足不同的霍尔传感器要求。图 2-1 中显示了常见的双极磁体形状。

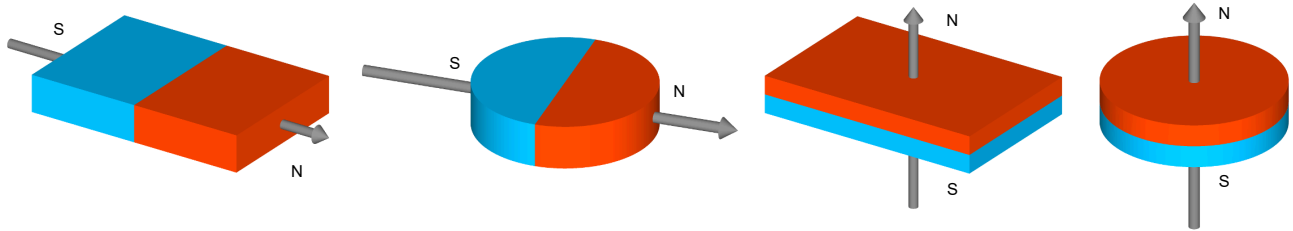


图 2-1. 圆柱体磁体和块状磁体

流量计中最常见多极磁体形式是径向磁化环形磁体。此类磁体可以具有很多单独磁体的磁极数量，同时只使用单一磁体材料（请参阅图 2-2）。

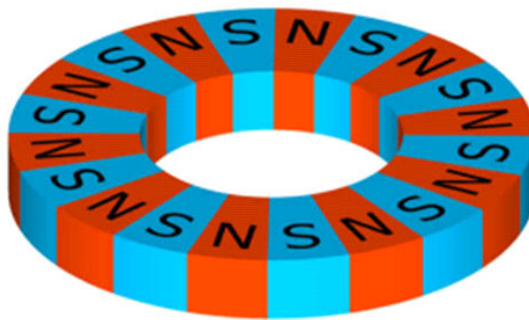


图 2-2. 多极磁体

多极环形磁体能够在空间受限的设计中实现高分辨率；不过，这类磁体通常要比其他磁体替代方案成本更高。

2.2.3 磁设计工具

磁公式及其非线性磁行为可能看起来很复杂，不过有一些工具可以显著缩短计算时间。此类工具包括 ANSYS 和 Femm，利用麦克斯韦方程通过扫描不同的设计变量来求解磁场。

2.3 霍尔效应传感器注意事项

2.3.1 器件灵敏度

选择霍尔效应传感器时，请确保该传感器对流量计中使用的磁体具有足够的灵敏度。磁体的位置和尺寸可能会显著影响霍尔效应传感器检测到的磁通密度。霍尔效应器件通常会提供多种灵敏度选项，以满足应用的具体灵敏度要求。选择霍尔效应传感器时，必须确保具有足够的磁余量，以可靠地触发磁场变化。

2.3.2 单极开关

单极开关是现有最简单的霍尔效应器件，能够在单一方向（磁体的北极或南极）上检测 B_{OP} 和 B_{RP} 。使用具有单个检测方向的传感器时，磁体方向需要摆放正确才能实现磁场检测。霍尔效应开关的常见磁体实现包括南极或北极朝向磁体交替摆放，或者单个朝向磁体相距较远，使得磁体之间的磁场强度低于 B_{RP} 阈值。在数字霍尔效应器件中， B_{OP} 和 B_{RP} 决定了器件的开关阈值。对于霍尔效应开关，此特性使得输出占空比取决于磁场阈值水平和磁体运动。通常，与采用锁存器相比，在流量计设计中实现霍尔效应开关时必须更加小心。不过，开关可以与各种磁体实现配合使用，从而进一步提高了流量计机械设计的灵活性。图 2-3 显示了单极开关的工作方式。

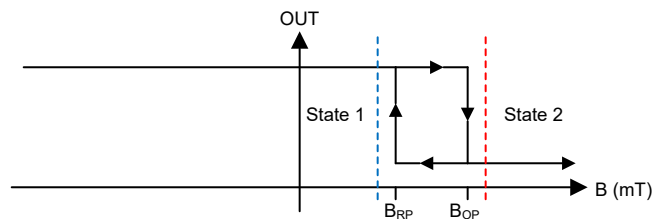


图 2-3. 单极开关工作

2.3.3 全极开关

全极开关就像是两个连接在一起但极性相反的单极开关。因此，该开关仍旧采用 B_{OP} 和 B_{RP} 工作；不过，磁场的极性不再影响传感器的输出。此实现要求磁体相距较远，使得磁体间的磁场强度低于 B_{RP} 阈值。使用全极开关时，磁体可以按照任意方向（北向或南向）摆放，而磁极都不会给传感器工作造成影响。磁体可以按照任一方向摆放，从而简化了流量计的整体机械组装。图 2-4 中显示了全极开关的工作方式。

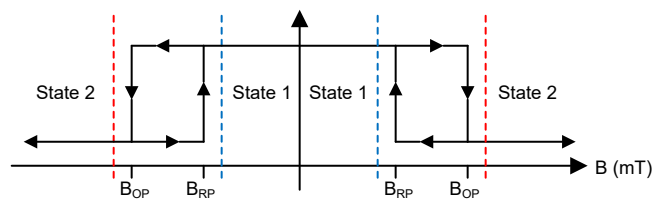


图 2-4. 全极开关工作

2.3.4 1D 锁存器

1D 霍尔效应锁存器具有与开关相似的工作特性，但存在一个独特之处，即保留之前的输出状态，直到检测到相反极性的磁极。因此，传感器必须检测变化的磁极，以便在输出上产生相应的变化。假设磁体间距相等，那么不管检测频率如何，锁存器的输出波形占空比都约为 50%。图 2-5 展示了霍尔效应锁存器的工作特性。

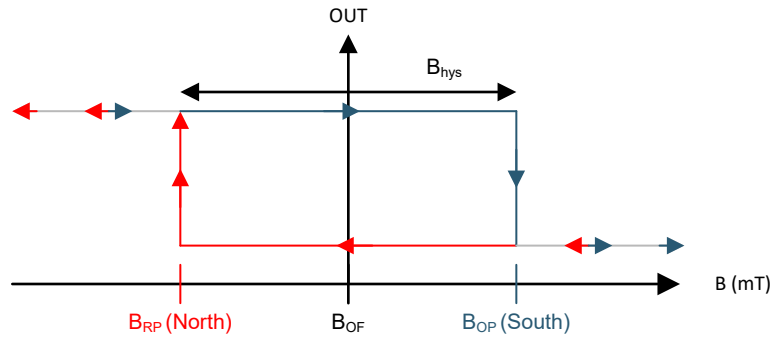


图 2-5. 锁存器工作

2.3.5 2D 集成锁存器

2D 霍尔效应锁存器采用与 1D 霍尔效应锁存器相似的工作方式，但在单个封装中集成了多个感应元件。在 [TMAG5111](#) 器件中，这一特性支持旋转感应和方向感应。由于具有多个感应元件，2D 锁存器无需额外的磁极，即可提高传感系统的分辨率。此外，2D 霍尔效应锁存器具有固有的正交特性，因此无需像 1D 霍尔效应锁存器那样精确地按照互成 90° 的方式交错放置。正交输出可以实现更准确的频率测量，以及机械式流量计中的回流检测功能。

2.3.6 带宽

与具有模拟带宽的运算放大器等器件不同，霍尔效应传感器具有数字带宽。带宽决定霍尔效应传感器能够检测的最大频率。必须考虑流量计中存在的磁极总数，以验证叶轮的最大转速是否小于器件的带宽。例如，如果流量计采用高带宽 [DRV5013](#) 霍尔效应锁存器 (30kHz) 和具有 32 个极点 (16 个北极，16 个南极) 的环形磁体，则理论上的最大典型检测速度为每秒 1875 转。使用计算得出的最大检测转速来验证最大流速并不会导致机械组件超过霍尔效应器件的检测能力。

2.3.7 封装

封装选择可影响流量计的机械设计，因为封装的尺寸和灵敏度面决定了霍尔效应传感器的位置。通过将表面贴装封装与引线式 TO-92 封装进行比较，可以非常明显地感受到该影响。图 2-6 显示了 SOT-23 和 TO-92 封装中传统及平面霍尔效应传感器的检测方向差异。此外，如果机械约束限制了霍尔传感器安装选项，可以使用平面传感器来检测封装外侧的磁场 (请参阅图 2-6)。

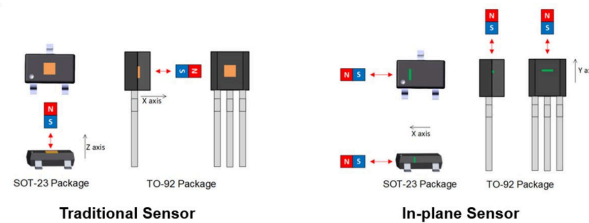


图 2-6. 封装灵敏度

2.3.8 功耗

低功耗霍尔效应器件能够通过减少有效电流消耗来延长电池供电系统的运行寿命。例如，[DRV5032](#) 低功耗霍尔效应开关具有一个采样率为 5Hz 的器件，在 1.8V 电源条件下典型电流消耗仅为 $0.54\mu\text{A}$ 。电流消耗通常与器件带宽成反比，因此有必要为目标流量监测应用平衡这两个特性。如果需要高带宽和低功耗，则可能有必要通过在外部对睡眠或使能引脚 (如果器件拥有该引脚的话) 进行周期性运行或者对器件的 V_{CC} 引脚进行周期性运行来降低平均电流消耗。

3 流量计开发

3.1 3D 打印建议

使用合适的填料打印所有 3D 打印零件，以为流量计提供合适的结构。此外，在打印悬梁时，请使用支撑材料打印所有零件，以便保持零件形状。正确摆放所有打印部件，使部件表面积最大的一面朝向打印机的打印床。这种朝向有助于提供足够的打印床附着力，并最大程度地减少生成的支撑材料。在示例模型中，所有零件均采用 ABS 塑料打印，其中填料为 60%，层高为 0.2mm 并且采用 PolyPrinter 229 上的最小支撑材料设置。

用于测试的流量计设计用在各种 3D 打印机上。由于 3D 打印机的精度各不相同，因此有些零件可能需要进行修改，从而确保尺寸适合。大多数接口表面都需要锉削或打磨，以便与其他部件良好互锁。所有塑料部件都设计为可以压合在一起。也可以根据具体的设计要求来修改 3D 打印文件。

3.2 流量计装配注意事项

去掉任何现有的支撑材料，准备好所有 3D 打印零件。由于打印机的精度各不相同，因此有些零件可能需要进行修改，从而确保尺寸适合。

表 3-1 显示了流量计设计所需的 3D 打印文件。所有文件都可以在 [机械式流量计设计文件](#) 中找到。

表 3-1. 流量计装配

参数	垂直传感器	备用垂直传感器	水平传感器
磁体兼容性	Phoenix America 环形磁铁 (G8-H-315-50-8)	¼ 英寸 × 1/16 英寸 - 圆盘磁体	¼ 英寸 × 1/16 英寸 - 圆盘磁体
流量计主体 3D 打印文件	Flow Body.STL	Flow Body.STL	Flow Body.STL
流量计叶轮 3D 打印文件	Ring Mag Impeller.STL	Alternate Mag Impeller.STL	Horizontal Mag Impeller.STL
流量计顶部 3D 打印文件	Vertical Top.STL	Vertical Top.STL	Horizontal Top.STL
流量计封盖 3D 打印文件	Vertical Cover.STL	Vertical Cover.STL	Horizontal Cover.STL

3.3 流量计装配指南

3.3.1 轴安装

首先，将直径 4mm 的不锈钢轴安装到流量计主体中。这是个压合零件，但是安装时不必用过大的力。如果无法将轴装入凹进处，请打磨安装位置的内径。图 3-1 显示了正确安装的轴和流量计主体。

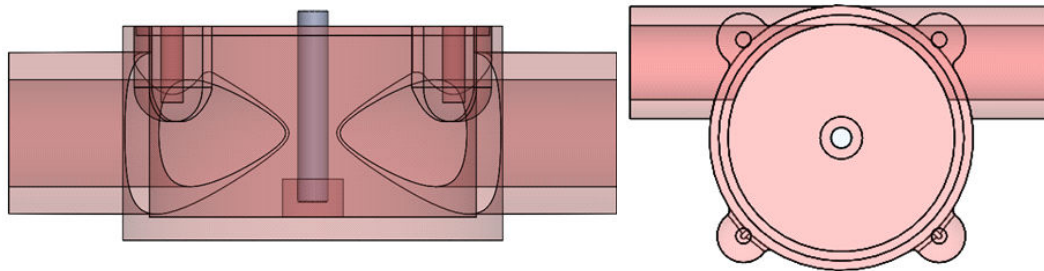


图 3-1. 轴安装

3.3.2 轴承安装

接着，将机械部件组装到流量计叶轮上。根据选定的流量计型号，磁体组装方式会有所不同，但在全部三种型号中，轴承都必须压入塑料外壳中。两个 4mm × 10mm × 4mm 轴承都要压入叶轮的内侧，其中第一个轴承靠在叶轮外壳的后侧上。另一个轴承靠在前一个轴承的后侧上。这两个轴承的位置决定了叶轮的高度，以及叶轮相对于轴的旋转方式。图 3-2 显示了正确组装的叶轮。

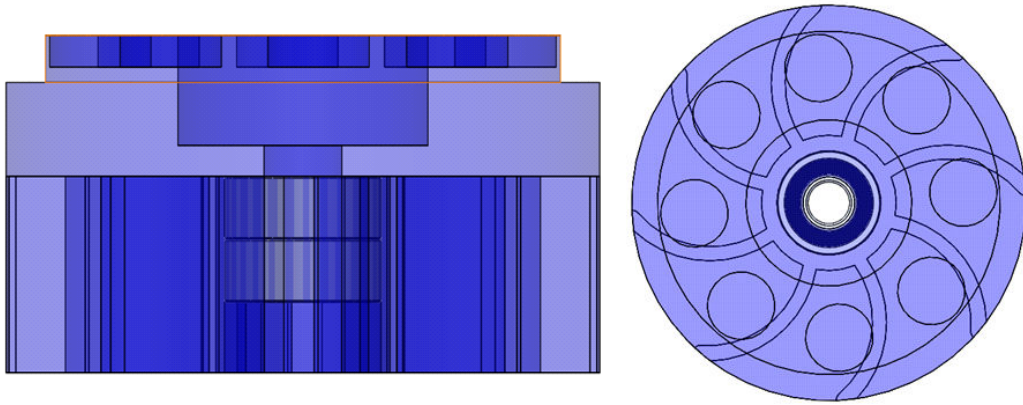


图 3-2. 轴承安装

3.3.3 磁体安装

现在，通过按压将磁体装到叶轮上。请注意，根据使用的霍尔传感器，磁极的方向可能非常重要。使用环形磁体时，磁体可以按照任意方向安装。对于采用圆盘磁体的流量计，最常见的是采用 N/S 极交替。在图 3-3 所示的示例装配中，水平叶轮上具有四个北极（红色）和四个南极（黑色）。

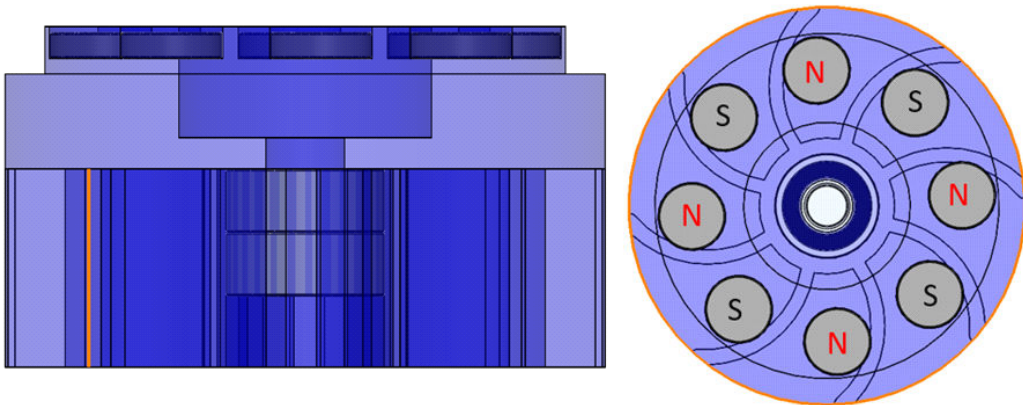


图 3-3. 磁体安装

3.3.4 叶轮安装

叶轮和流量计主体现在可以装配在一起。将叶轮安装到流量计主体的钢轴上。组装正确时，叶轮现在应该能够自由旋转。此外，底部轴承应该使叶轮固定在略高于流量计主体底部处，以便减少摩擦。如果轴承不能轻松装到轴上，则可能需要缩小轴的外径。要想缩小轴的外径，可将钢轴放入冷冻柜中充分冷却一段时间，直到可将轴承滑到轴上。图 3-4 显示了正确组装的各个部件。

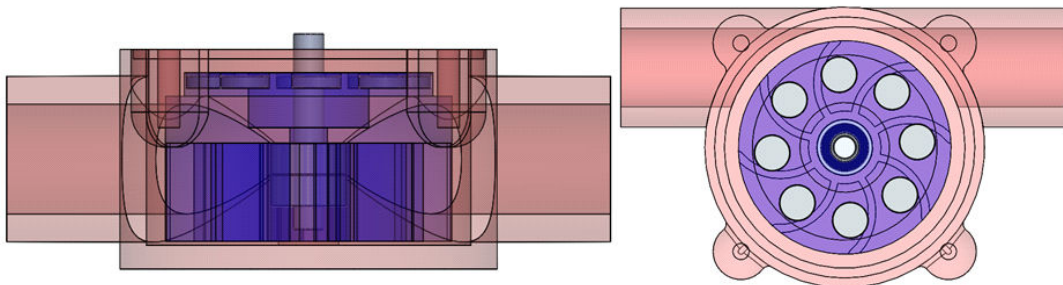


图 3-4. 叶轮安装

3.3.5 O 形环安装

根据所需流量计型号，在流量计顶部安装相应的橡胶 O 形环。O 形环会在安装时略微伸展，并应当靠在塑料零件的底边上。图 3-5 展示了 O 形环的安装情况。

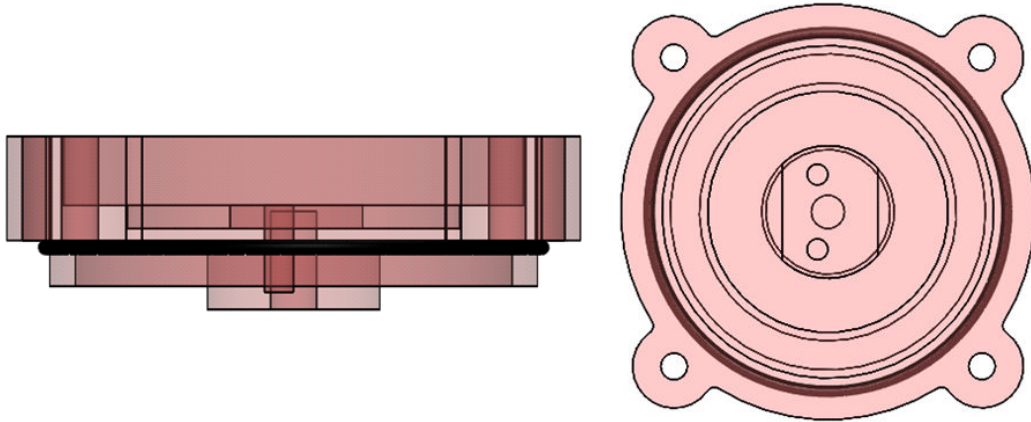


图 3-5. O 形环安装

3.3.6 流量计顶部安装

这两个部件现在可以连接在一起。尽管图 3-6 中并未显示，应在流量计主体的密封表面与流量计顶部之间添加 PTFE 防水生料带。确保 O 形环能够与流量计主体的固位沟形成密封。在拧紧到流量计主体的最后 2mm 中，应该感觉到流量计主体顶部相当紧。通过确保叶轮能够不受阻碍地旋转验证装配是否正确。图 3-6 显示了该装配。

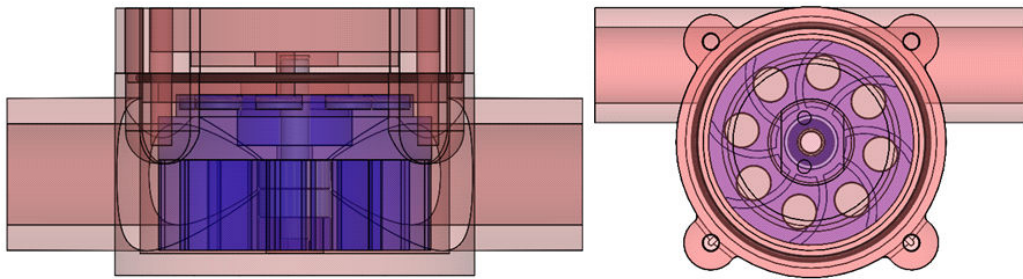


图 3-6. 流量计顶部安装

3.3.7 PCB 安装

将霍尔传感器 PCB 安装到安装位置。水平传感器安装要求将 PCB 安装在标为“Horizontal Top”的 3D 打印零件上，而垂直传感器选项要求将 PCB 安装在标为“Vertical Cover”的零件上。垂直和水平安装选项都需要使用 2-56 尼龙螺钉来将 PCB 固定在打印固定件上。图 3-7 显示了水平安装情况，而图 3-8 显示了垂直安装情况。

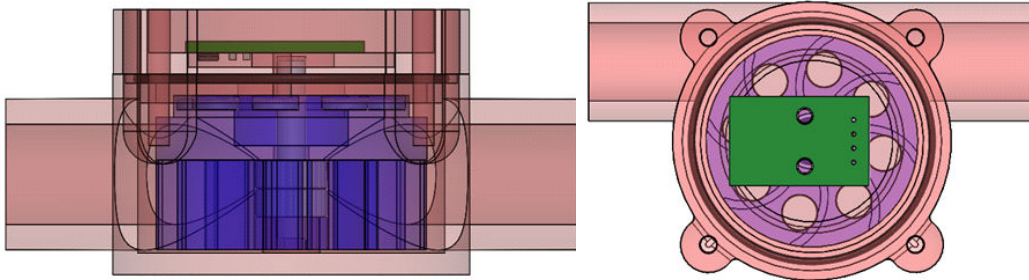


图 3-7. PCB 水平安装

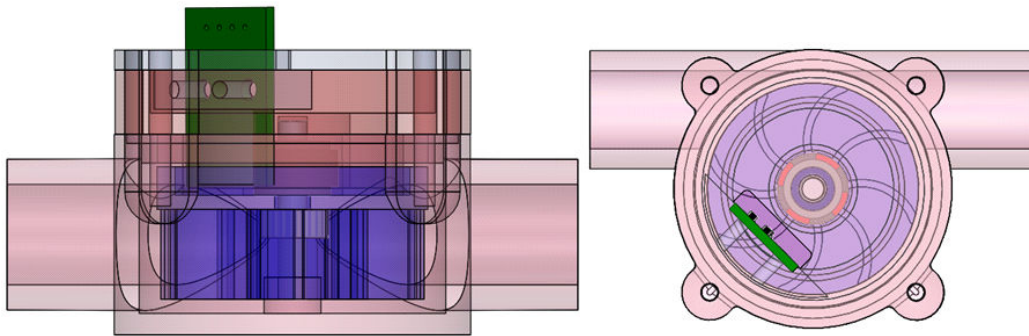


图 3-8. PCB 垂直安装

3.3.8 封盖安装

最后，安装流量计设计中使用的封盖。在垂直感应选项中，此封盖也装在 PCB 上。该封盖包含一个开槽，用于引脚插头或将线缆连接到流量计外部。此连接不必防水，因为流量计的这一级与流量计之前的各级相隔离。最后需要在外部安装孔中安装四颗螺钉。确保这四颗螺钉都能产生足够的夹压，从而防止组合接头处出现液体泄漏。使用粗螺纹硬件插入流量计主体。图 3-9 显示了水平流量计的最终组装。

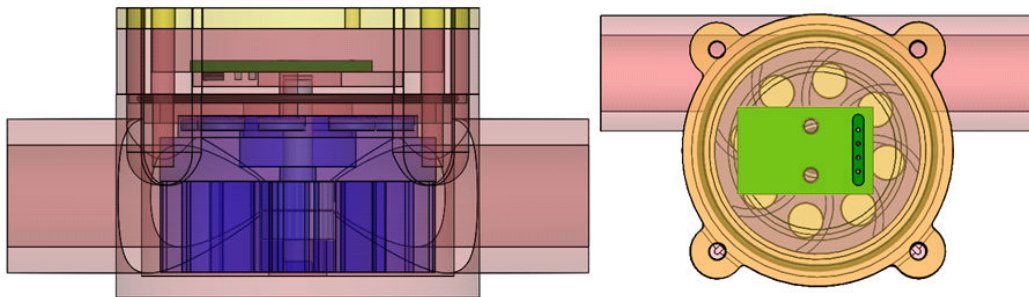


图 3-9. 封盖安装

根据具体的评估设置，在进口和出口上安装 1/2 英寸 PVC 接头。如果是将接头安装在流量计主体上，请使用 PVC 处理剂和 PVC 胶水。对于初始防水评估，请卸下检测 PCB。

4 流量计评估

4.1 流量计测试

由于测试系统限制，测试中生成的最大受控流速为 11.2L/min。待测表采用 DRV5013 霍尔传感器和四个圆盘磁体以及一个水平配置的流量计（请参阅图 4-1）。参考流速通过使用与该机械式流量计串联的工业级磁力流量计测得。流速仿真预估 3D 打印流量计能够准确地进行检测，直到流速超过 30L/min，这时会出现非线性问题。当流速小于 2L/min 时，线性度会有所下降。如果所需流速超过 3D 打印设计的建议限值，则可能需要重新调整流量计尺寸，以便获得更加准确的结果。

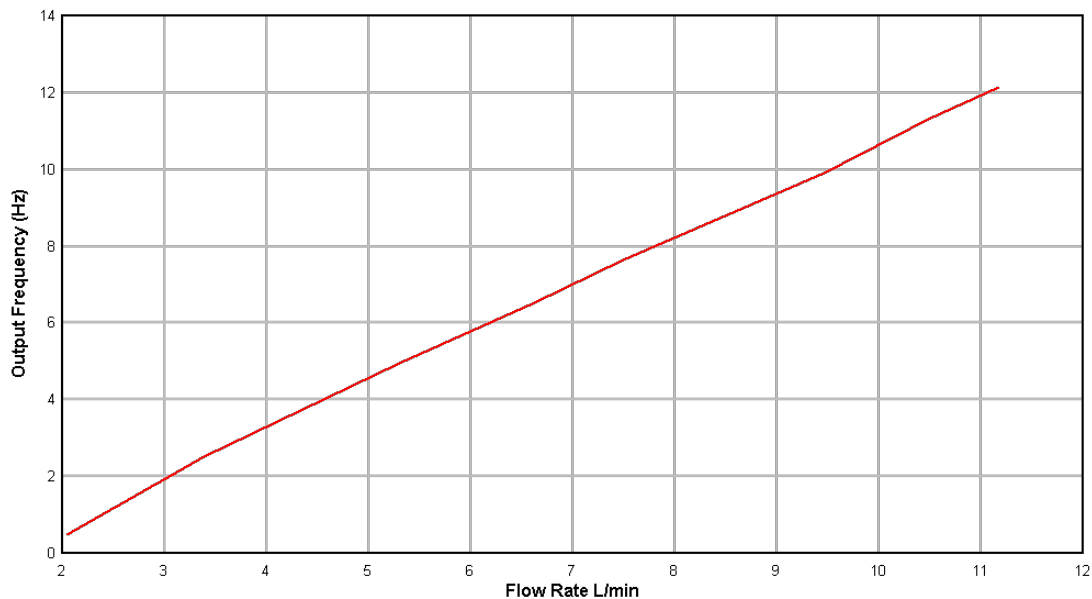


图 4-1. 流速分析波形

5 误差源

很多因素都会影响机械式流量计的精确度。这些误差因素可以按照不同的来源进行划分，即：机械误差、采样误差和磁误差。

5.1 机械误差

机械误差可以概括为流量计导致所测流速出现误差的物理特性。与旋转流量计相关的一个常见机械误差是摩擦损耗。根据流速和流量计设计，摩擦损耗有时可能是主要误差源。例如，在流速较小的情况下，轴承的摩擦损耗通常会影响到叶轮以与液体流速成比例的转速转动的能力。这个相对较大的摩擦力最后会等于水流过流量计时的推力，而这决定了最小流速。

其他机械误差可能来自于机械运动的不精确性。在流量计中，通常假定磁体间距相等并以平面方式安装在叶轮顶部。不过，装配误差可能会影响部件的位置，因而改变霍尔传感器检测到的磁场。机械式流量计的一个重要特性是叶轮相对于定位轴的旋转方式。此运动的失准可以描述为旋转部件的摆动，这会改变磁体相对于霍尔传感器的角度和距离。

图 5-1 展示了水平叶轮相对于中轴存在 0 度、±1 度、±2.5 度和 ±5 度垂直失准时时的仿真情况。该仿真模拟了 8 个直径为 1/4 英寸的 N42 圆盘磁体沿着叶轮等距分布且磁极交替时水平叶轮的机械位置。位置 0° 表示最大正失准，而 180° 表示最大负失准。仿真范围为 0° 至 180°，其中假定最大负失准与最大正失准 180 度反相。

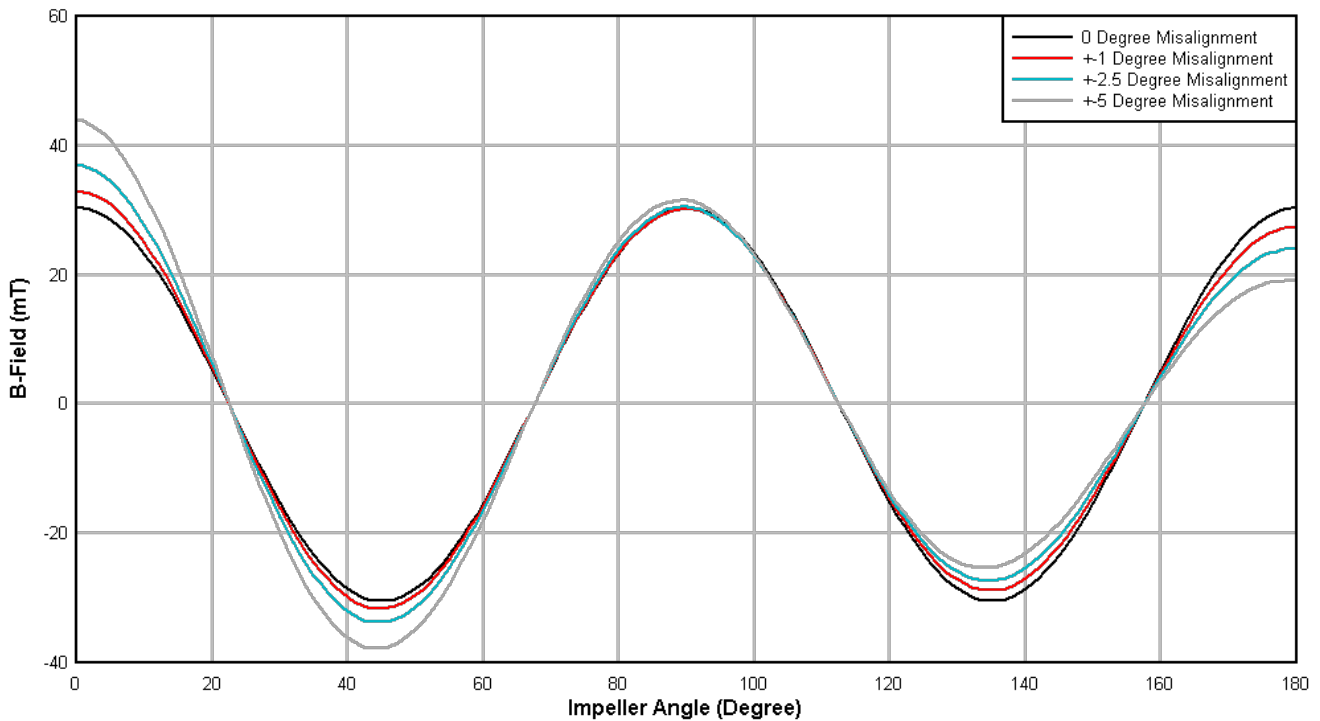


图 5-1. 失准仿真

5.2 采样误差

采样误差可以归因于流体测量的采样率不足。此误差可能来自于霍尔效应传感器或负责数据采集的器件。如果该误差来自于霍尔效应传感器，请确保器件具有足够的带宽来支持磁场的变化频率。采集频率类似于传感器采样频率，如果该频率太低，则会导致无法准确地测量频率。因此，采样率至少应该是预计最大输出频率的两倍。

5.3 磁误差

磁误差源来自于磁体构造中的物理和材料差异。此类误差通常由磁体供应商指定，或者以其他方式通过评估最大容许误差来计算得出。值得注意的是，根据所使用的霍尔效应传感器，磁误差或多或少会对传感系统产生影响。采用磁体和霍尔效应传感器的系统在设计时应考虑到容差。

另一个磁误差源是器件差异。制造差异导致典型 B_{RP} 和典型 B_{OP} 等特性会因霍尔效应器件而异。霍尔传感器数据表包含各种磁特性的最小值、典型值和最大值。在验证霍尔传感器和磁体的适用性时，需要考虑这些值。

6 流量计 PCB

6.1 PCB 原理图

请参阅图 6-1，以了解流量计原理图。C1 是本地电源去耦电容器，而 R1、R2 分别用作 OUT1 和 OUT2 上开漏霍尔传感器的上拉电阻器。传感器安装垫能够安装 1D 和 2D SOT-23 封装霍尔传感器。在使用之前，确保 PCB 上的引脚 1 标记（左上）与该器件的引脚 1 对齐。

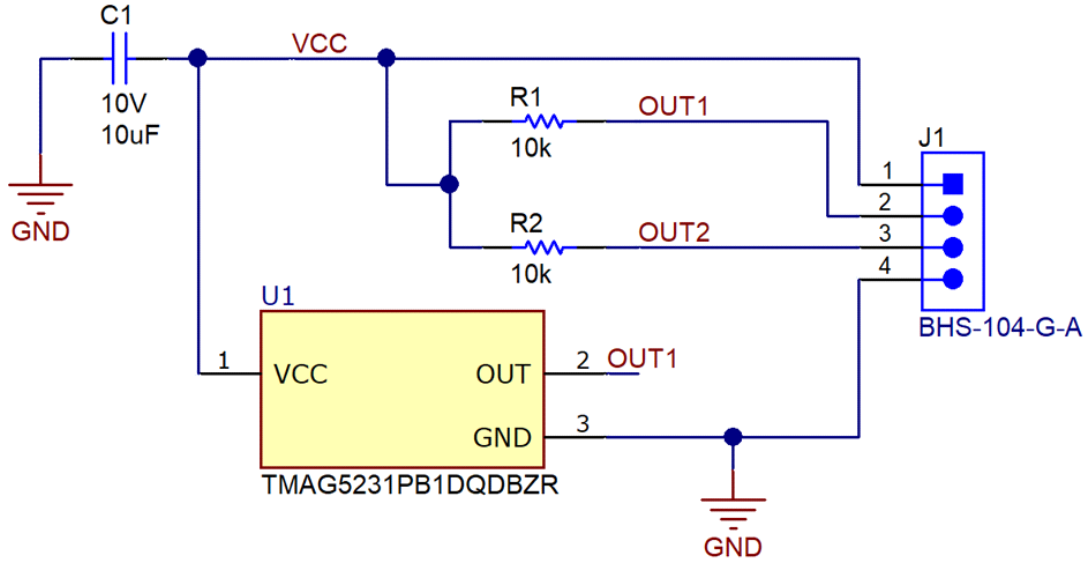


图 6-1. PCB 原理图

6.2 PCB 布局

Gerber 文件可以从本文档节 3.2 的下载文件中获得。

图 6-2 和图 6-3 分别显示了 PCB 的顶部和底部渲染图。

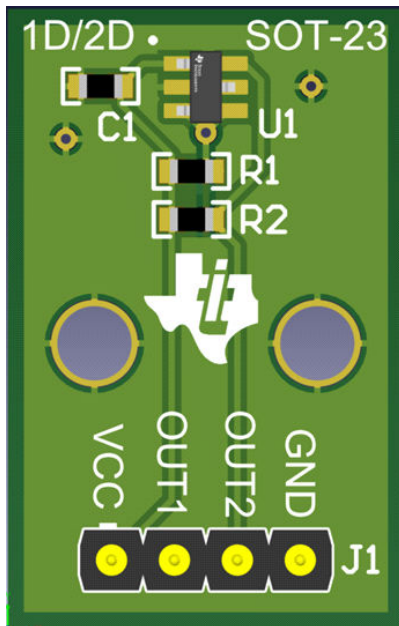


图 6-2. PCB 顶部渲染图

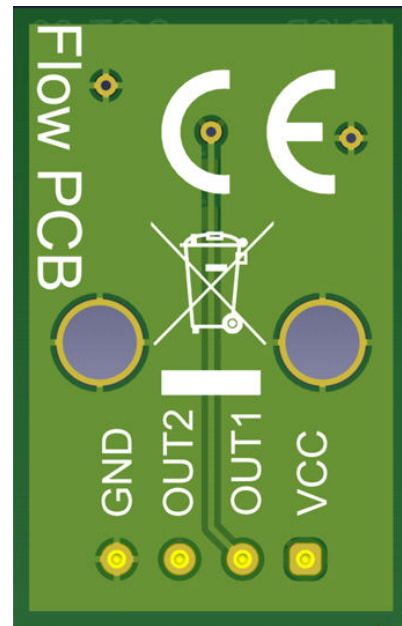


图 6-3. PCB 底部渲染图

7 物料清单 (BOM)

表 7-1 显示了 BOM。

表 7-1. 物料清单

标识符	数量	值	说明	封装	器件型号	制造商
PCB	1		流量计 PCB, 2 层电路板			
C1	1	10 μ F	10 μ F 电容器, 20%, 10V, 0603	0603	LMK107BC6106MA-T	Taiyo Yuden (太阳诱电)
R1, R2	2	10k Ω	10k 电阻器, 5%, 0.1W, 0603	0603	RC0603JR-0710KL	YAGEO (国巨)
J1	1		接头, 2.54mm, 4 \times 1, 镀金, TH	2.54mm, 4 \times 1	BHS-104-G-A	Samtec (申泰)
U1	1		DRV5013, SOT-23	SOT-23	DRV5013FAQDBZR	德州仪器 (TI)
O 形环	1		丁腈橡胶 1.5mm 宽度 O 形环 40mm ID, 43mm OD			
轴	1		4mm (直径) \times 25mm 不锈钢杆			
轴承	2		密封轴承: 4mm ID, 10mm OD, 4mm 厚度		MR104-2RS	Bearings Direct
环形磁体	1		8 极径向多极磁体, 8mm 孔径, 1/2 英寸 OD		G8-H-315-50-8	Phoenix America
圆盘磁体	8		1/4 英寸直径 \times 1/16 英寸厚度 N52 轴向磁化圆盘磁体		D41-N52	K&J Magnetics
PTFE 生料带	1		PTFE 生料带, 1/2 英寸宽		21TF19	Grainger
螺钉	4		粗纹螺钉, 3/4 英寸长 #6		32MT17	Grainger
尼龙螺钉	2		2-56 尼龙螺钉, 1/8" 长度, 盘头十字		94735A705	McMaster-Carr
流量计顶部	1		流量计顶部, 3D 打印, 2 个版本: 垂直和水平			
流量计主体	1		流量计主体, 3D 打印 ABS, 1 个版本			
叶轮	1		叶轮, 3D 打印, 3 个版本: 水平, 交替, 环形磁体			
流量计封盖	1		流量计封盖, 3D 打印, 2 个版本: 水平, 垂直			

8 参考文献

- 德州仪器 (TI), [机械式流量计设计文件](#)

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司