

Application Note

汽车车身电机模块设计的霍尔传感器与磁体选型



John Miller, Patrick Simmons

Position Sensing

摘要

汽车车身电机模块为现代汽车带来了众多豪华配置。电机模块由齿轮传动系和电机组成，通常封装在共用外壳中，用于驱动带齿摆臂或皮带轮系统，进而带动机械附件（如车窗、汽车座椅或天窗）运动。本应用笔记以车窗升降器为例，说明升降器机械组件之间的相互作用，及其对升降器中用于监控电机的磁体和霍尔效应传感器的影响。

内容

1 简介.....2

2 车窗升降器说明与示例.....7

 2.1 设计要求.....8

 2.2 机械传动链 — 车窗摆臂.....9

3 用于电机监测的霍尔器件和磁体.....12

4 分析与结果.....14

5 总结.....18

6 参考资料.....18

插图清单

图 1-1. 系统方框图.....2

图 1-2. 车窗升降器.....3

图 1-3. 电路方框图.....4

图 1-4. 使用环形磁体和霍尔效应传感器监测电机.....4

图 1-5. 锁存器 B 场响应.....5

图 1-6. TMAG5111 操作.....6

图 2-1. 车窗升降器.....7

图 2-2. 齿轮传动链.....8

图 2-3. 车窗运动.....9

图 2-4. 车窗状态.....10

图 3-1. 2D 与平面锁存器实现方案.....12

图 3-2. XY 外边缘 1.....12

图 3-3. XY 外边缘 2.....12

图 3-4. XY 侧边缘 1.....12

图 3-5. XY 侧边缘 2.....12

图 3-6. ZX 外边缘 1.....12

图 3-7. ZX 外边缘 2.....12

图 3-8. ZX 侧边缘 1.....12

图 3-9. ZX 侧边缘 2.....12

图 3-10. ZY 外边缘 1.....13

图 3-11. ZY 外边缘 2.....13

图 3-12. ZY 侧边缘 1.....13

图 3-13. ZY 侧边缘 2.....13

图 4-1. 空间工作区域.....14

图 4-2. 使用四极环形磁体的仿真区域.....15

图 4-3. 仿真结果.....16

表格清单

表 2-1. 升降器要求.....	8
表 4-1. 环形磁体参数.....	14
表 4-2. 霍尔效应锁存器参数.....	14
表 4-3. 可接受传感器放置区域大小与气隙的关系.....	16
表 4-4. 每极所需带宽.....	17
表 4-5. 分辨率与磁极数的关系.....	17

商标

E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

电机驱动车窗、天窗、座椅及其他附件曾一度被视为豪华配置，如今在现代车辆中已十分常见。某些应用（如车窗升降器）仅需一个电机模块即可支持单一维度上的运动。其他应用（如可调座椅）则可能需要三个或更多独立模块来支持多个平面内的运动。

从高层次来看，汽车车身模块由三态人机界面 (HMI) 开关组成，该开关将用户的机械输入转换为电信号，再由微控制器进行处理，并启动桥式电路驱动电机旋转。旋转的电机连接至齿轮箱，齿轮箱以转速换取扭矩，从而驱动车窗运动。根据车窗由驾驶员还是乘客操作，车窗运动可以是瞬时的，仅在三态开关被触发期间发生。或者，短暂按一下便足以使车窗完全开启或关闭。后一种行为则需要额外的反馈电路模块。

图 1-1 展示了预期系统运行的高层次概览。节 2 和 节 3 进一步介绍了电机与车窗之间的机电传动链，以及控制车窗的霍尔效应反馈系统。

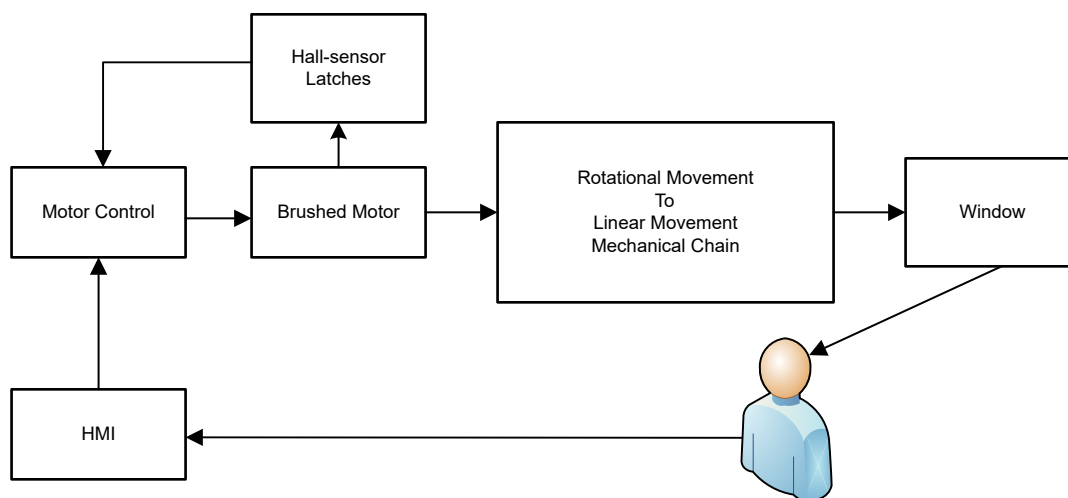


图 1-1. 系统方框图

电动车窗等电机驱动附件使用由电机模块驱动的摆臂或皮带传动执行器，而电机模块本身包含电机、齿轮传动系、外部电气连接和机械耦合件，全部集成于坚固的外壳中。本应用笔记中的示例重点介绍一种车窗升降器，其在剪式摆臂组件中使用带齿摆臂垂直移动车窗玻璃，如 图 1-2 所示。

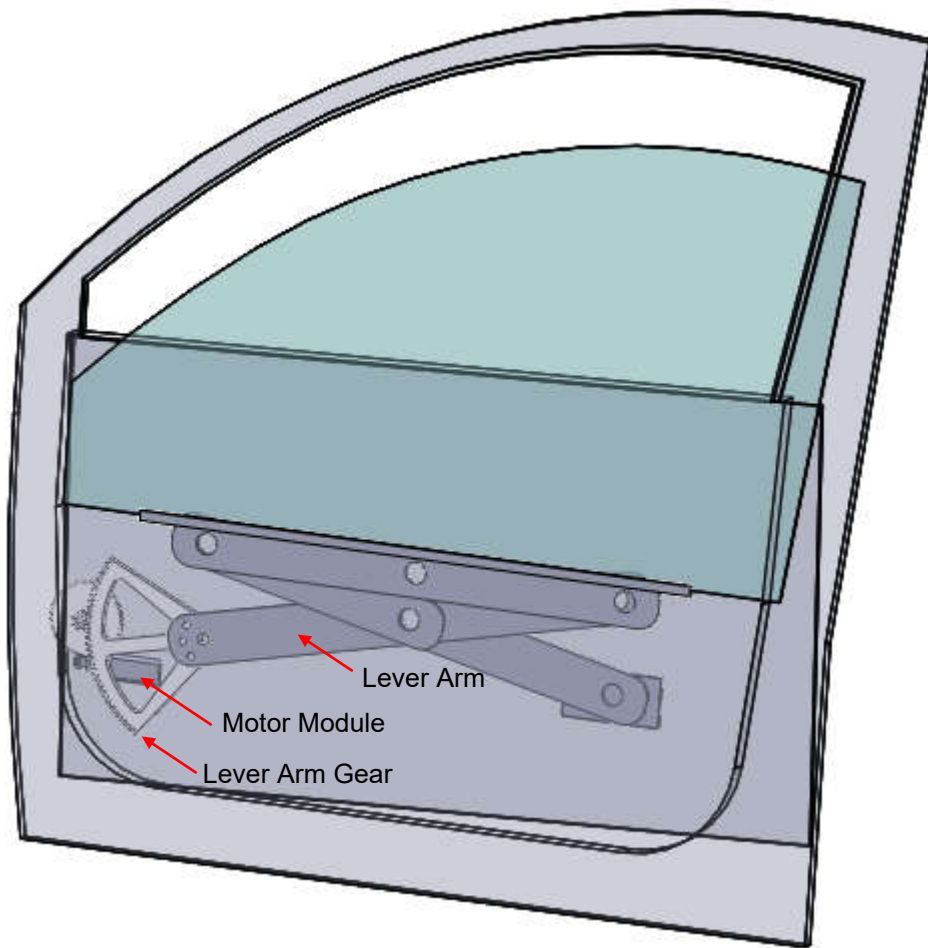


图 1-2. 车窗升降器

最常见的电机选择是低成本有刷直流电机，与无刷电机不同，该电机没有内置传感器。因此，需要某种外部监控手段来估算电机的位置、转速和方向。例如，监控车窗位置可告知系统车窗关闭了 25%、50% 还是 100%。监控车窗还可使控制系统在期望的开闭速度要求与电机效率之间取得平衡。无论哪种情况，估算车窗位置、速度和方向的最佳方式都是直接监测电机的旋转和方向。

估算电机位置、方向和转速的一种方法是监测电机的供电电压、电流或两者，然后对电机旋转时产生的纹波过零次数进行计数。虽然这看似是一种可行的方法，但其估算基于间接指标——电源纹波，并不直接监测电机的实际转动和附件的物理运动。电气连接不良、元件老化或 EMI 引起的过多纹波可能导致方向、速度和位置的估算不可靠。

直接监测旋转电机的一种高效且准确的方法是在电机轴上安装多极环形磁体，并使用霍尔效应传感器和锁存器监测轴旋转时的磁场变化，如 图 1-3 所示。虽然这种方法需要使用磁体，但其优点在于可直接监测旋转的电机轴，并准确估算电机的位置、转速和方向。

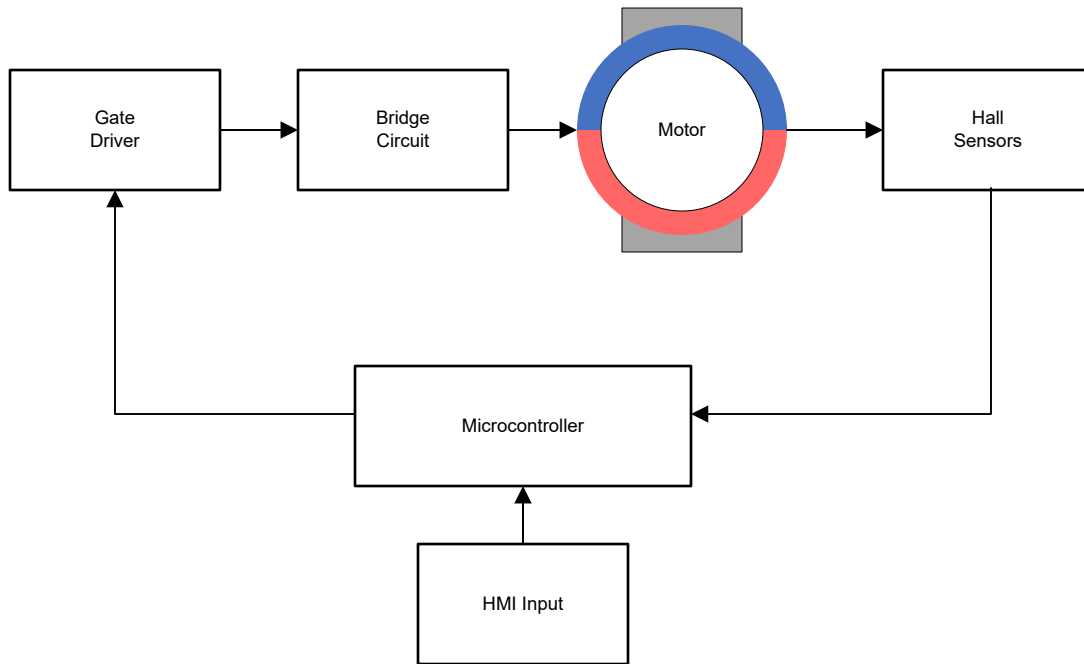


图 1-3. 电路方框图

图 1-4 更详细地展示了电机监控器件以及升降机齿轮传动系的前级。旋转电机轴上的多极环形磁体由安装在附近 PC 板上的霍尔效应传感器进行监测。当旋转的环形磁体经历南北极性的连续变化时，霍尔传感器会根据时变磁场输出相应信号。

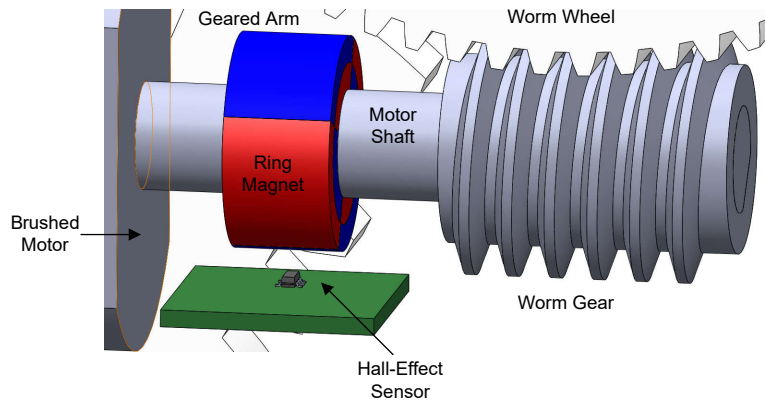


图 1-4. 使用环形磁体和霍尔效应传感器监测电机

推荐用于此应用的霍尔传感器为锁存器，其输出行为如 图 1-5 所示。这些器件具有高或低二进制输出，其输出状态取决于检测到的磁场相对于器件内部阈值的关系。这些阈值通常关于零 (0mT) 对称，其中 B_{OP} 触发对应于穿过器件霍尔元件的正向北极磁场， B_{RP} 触发对应于穿过器件霍尔元件的正向南极磁场。

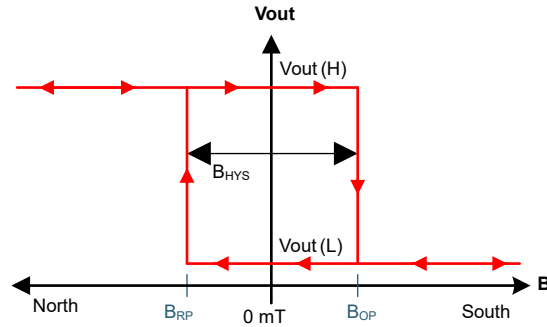


图 1-5. 锁存器 B 场响应

图 1-6 展示了磁场极性交替如何使霍尔传感器的输出随电机轴旋转而变化。磁场每次极性翻转都会引起霍尔元件输出状态的变化，而每两次极性翻转则在单霍尔元件锁存器的输出端产生一个脉冲。对于具有正交霍尔元件的器件，借助额外的逻辑电路，每当一个磁极经过霍尔传感器时均可获得一个输出脉冲。旋转的电机轴和磁体产生一系列脉冲，微控制器可对这些脉冲进行监测和计数，以实现定制化反馈控制。有关更多详细信息，请参阅

[TMAG511x 2D 锁存器优势](#)应用笔记。

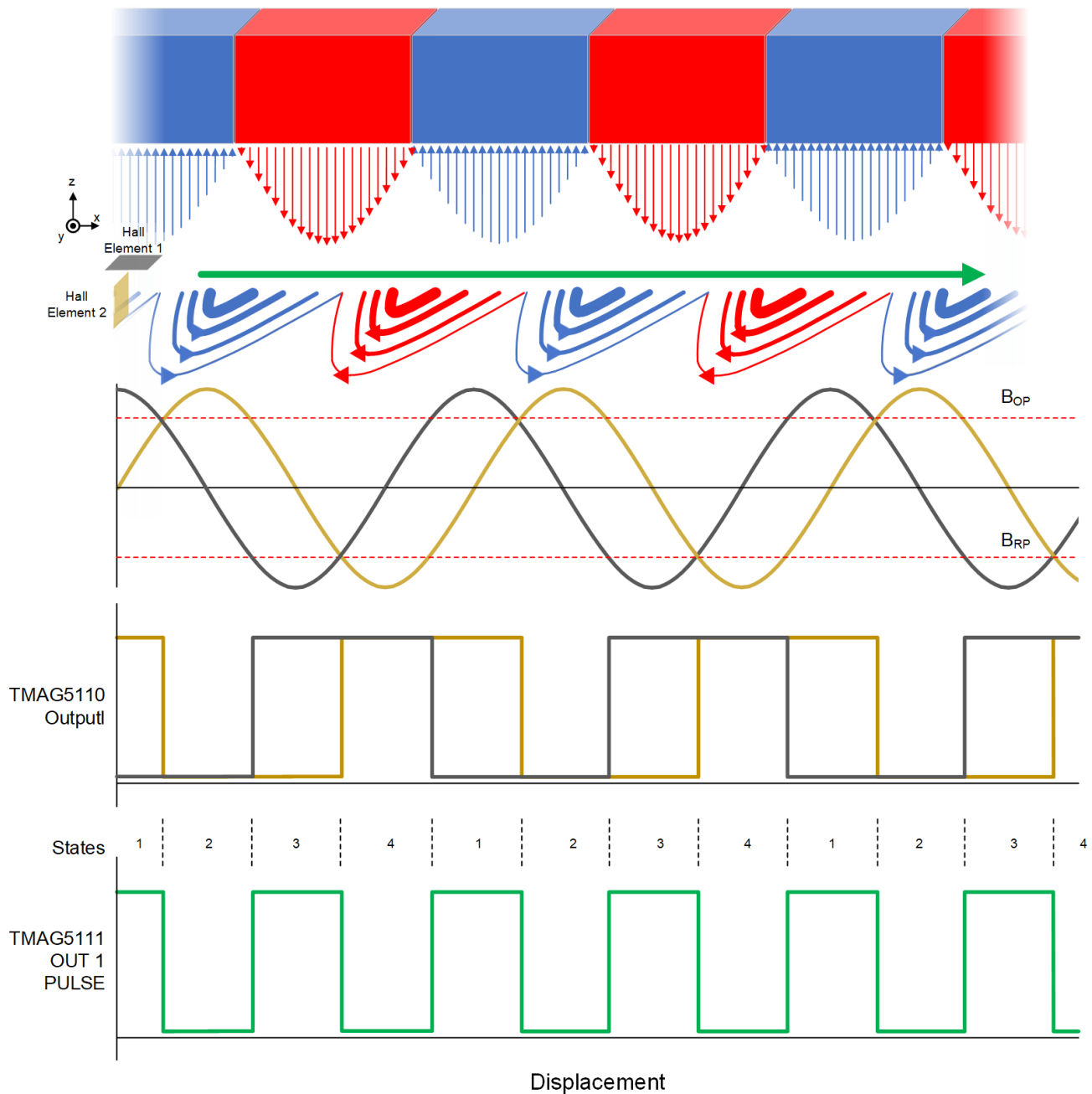


图 1-6. TMAG5111 操作

本应用笔记旨在探讨机械组件（摆臂、齿轮等）对磁体和霍尔传感器选型的影响，而这些磁体和霍尔传感器又用于跟踪车窗、天窗或座椅的位置、速度和方向。本文其余部分分为若干章节。节 2 对基于摆臂的车窗升降器进行了高层次描述，并给出了本文示例中使用的一些基本参数。节 2.2 介绍了车窗升降器的机械部件（摆臂、齿轮等），这些部件构成机电信号链的一部分。节 3 概述了霍尔效应锁存器及其对本应用影响最大的参数。分析与结果一节提供了反映基本要求的磁体和霍尔传感器仿真结果，并就磁体和霍尔器件的设计与选型给出了一些建议。

2 车窗升降器说明与示例

虽然汽车电机模块可在许多不同应用中提供运动驱动，但本文档重点介绍车窗升降器，其通过带齿摆臂驱动车窗玻璃上下垂直移动。图 2-1 所示为车门中车窗与升降器的概念示意图。驱动升降器的电机模块位于升降器示意图的左下方，可带动带齿摆臂的末端运动。车门右下侧另一摆臂的末端则绕一滑动支点运动。当电机模块的小齿轮转动时，会带动带齿摆臂运动，使整个剪式机构整体上升或下降——即关闭或打开车窗。

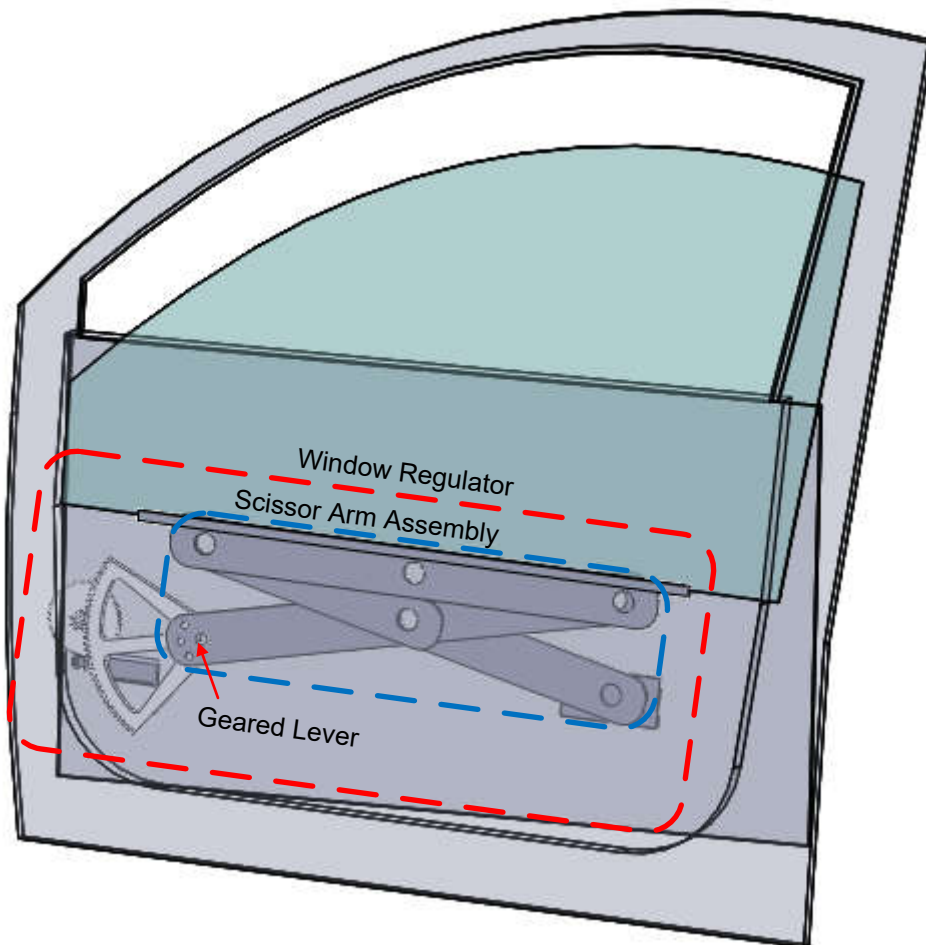


图 2-1. 车窗升降器

电机模块由有刷直流电机以及多个齿轮组成，包括小齿轮、蜗轮和蜗杆。图 2-2 展示了模块的小齿轮如何驱动带齿摆臂式升降器。小齿轮与蜗轮（位于电机模块内部）共用一根轴，该蜗轮则由电机轴上的蜗杆驱动。

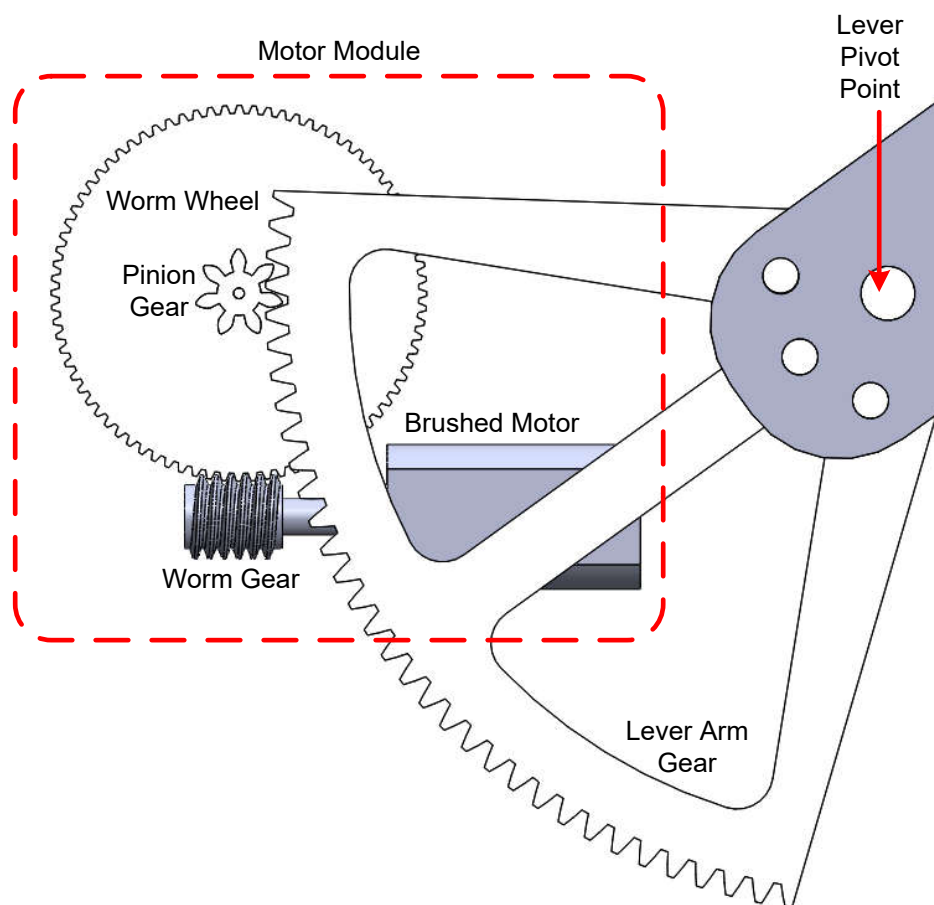


图 2-2. 齿轮传动链

2.1 设计要求

车窗操作的基本动作包括开启和关闭，而作为本设计的基础，需要掌握车窗的位置和运动情况。“[升降器要求](#)”表列出了一些取自一款常见车型的车窗行程距离和开闭时间参数。本文档所示的示例即基于这些要求进行开发。

[节 4](#) 展示了这些参数最终如何影响用于监控电机的磁体和霍尔传感器的选型。系统空间限制、材料和机械扭矩也是重要因素，但本应用笔记不予考虑。

表 2-1. 升降器要求

规格	值
车窗全行程范围	18in = 457mm
从完全开启到完全关闭所需时间	4s

2.2 机械传动链 — 车窗摆臂

对机械特性的全面论述超出了本文的范围。但是，有必要了解关键机械规格对磁体、霍尔传感器和电机的影响，并掌握器件配对和设计裕度。通过建立机械组件模型（齿轮传动系与车窗摆臂耦合），我们将确定支持车窗开闭速度所需的电机转速，以及车窗位置的分辨率（精度）。我们还将确定满足机械要求所需的霍尔传感器带宽。

机械传动链的第一级是车窗摆臂。在此方案中，车窗运动关于摆臂齿轮的 x 轴对称。例如，假设摆臂长度为 12in (304.8mm)，计算旋转角度。摆臂末端沿弧线运动，车窗垂直行程一半所对应的角度可通过 [方程式 1](#) 求得。

$$\text{lever terminal angle} = \arcsin\left(\frac{\frac{\text{Full Window Displacement}}{2}}{\text{lever length}}\right) = \arcsin\left(\frac{\frac{457 \text{ mm}}{2}}{304 \text{ mm}}\right) = 48^\circ \quad (1)$$

尽管摆臂方程中存在非线性函数，但车窗升降器的运动却出人意料地接近线性。[图 2-3](#) 中的图表展示了示例升降器的车窗近线性运动与齿轮旋转圈数之间的关系。

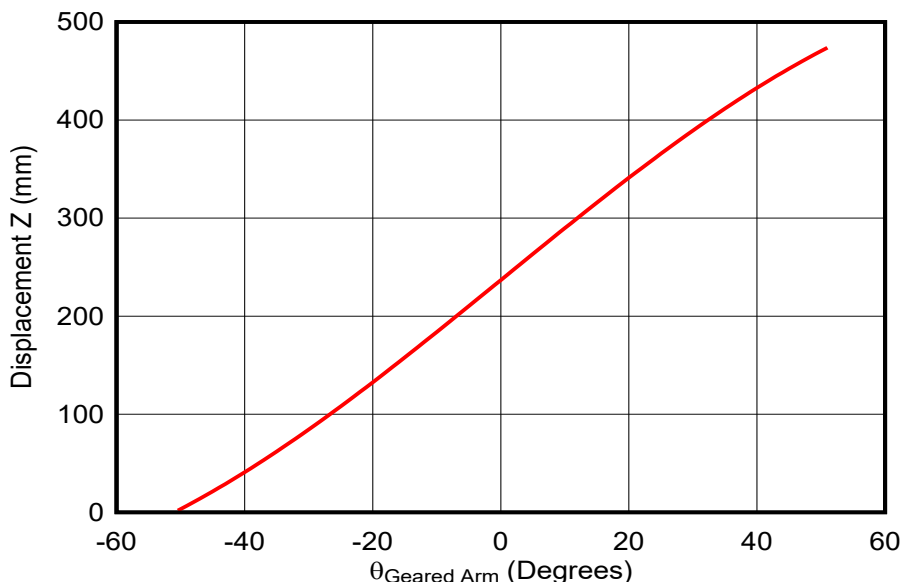


图 2-3. 车窗运动

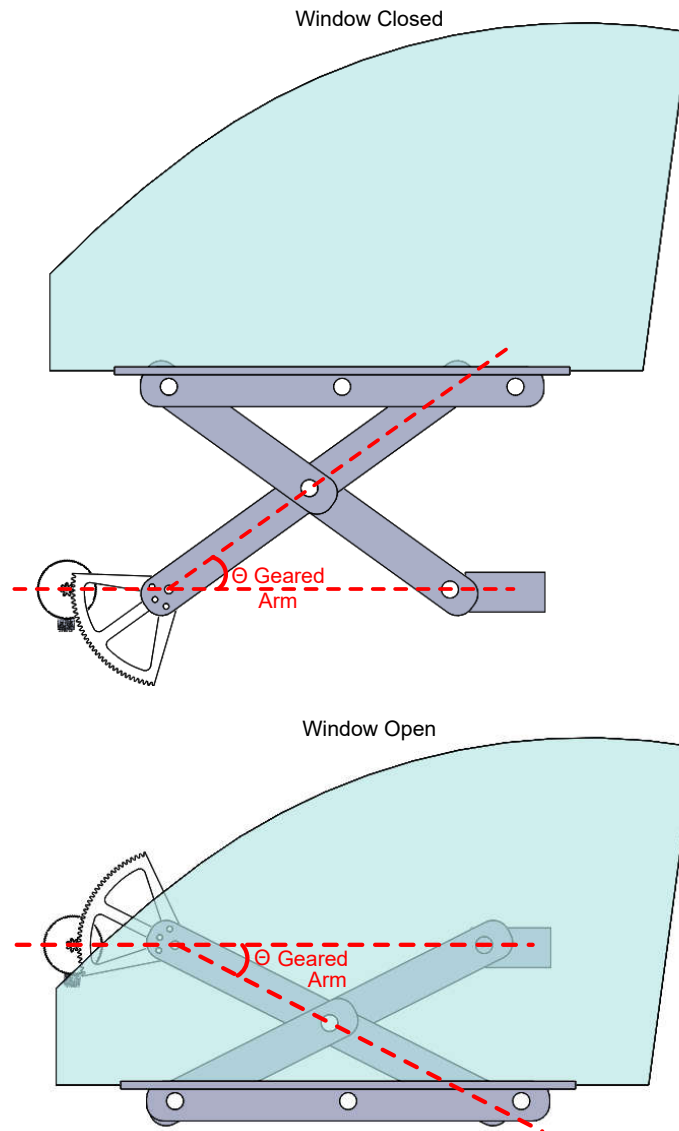


图 2-4. 车窗状态

为基于一款常见车型的车窗升降器构建示例，假设升降器的机械要求等效于摆臂上使用的 120 齿正齿轮。根据 [节 2.2](#) 中计算的角度，带齿车窗摆臂只需要整个正齿轮的一部分。换言之，摆臂齿轮不会进行完整的 360 度旋转，因此该齿轮不需要完整的 120 齿。回顾 [方程式 1](#)，其对应的是车窗总行程一半的旋转量，由此定义了摆臂齿轮的部分旋转。现在可以计算车窗摆臂齿轮的最小齿数 N_{GL} 。

$$\frac{2 \times 48^\circ}{360^\circ} = \frac{N_{GL} \text{ teeth}}{120 \text{ teeth}} \quad (2)$$

$$N_{GL} = 120^\circ \times \frac{2 \times 48^\circ}{360^\circ} = 32 \text{ teeth} \quad (3)$$

下一步是考虑齿轮传动系中的各个节点，然后建立整体模型。齿轮模型结合车窗开闭时间，有助于理解电机的转速要求，进而确定磁体选型和霍尔传感器。

齿轮传动系中的各个节点使用示例中的齿轮参数。32 齿的摆臂齿轮与 7 齿的小齿轮啮合。摆臂升降车窗时小齿轮的旋转圈数可通过 [方程式 4](#) 求得。

$$\text{pinion rotations} = \left(\frac{\text{lever gear teeth}}{\frac{\text{pinion teeth}}{\text{pinion rotation}}} \right) = \left(\frac{32 \text{ teeth}}{7 \frac{\text{teeth}}{\text{rotation}}} \right) = 4.57 \text{ rotations} \quad (4)$$

小齿轮与蜗轮（位于电机模块内部）共用同一根轴，因此蜗轮与小齿轮以相同转速旋转。

$$\text{pinion rotations} = \text{worm wheel rotations} \quad (5)$$

蜗轮由电机轴上的蜗杆驱动。蜗杆被视为 1 齿齿轮，即电机轴每旋转一圈使用 1 个齿。蜗杆的优点在于以转速换取扭矩，这意味着无需电机持续供电即可将车窗保持在某一位置，或防止有人试图强行拉下车窗。

$$\text{worm gear rotations} = \left(\text{worm wheel rotations} \times \frac{\text{worm wheel teeth}}{\text{worm gear teeth}} \right) = 4.57 \text{ rotations} \times \frac{80 \text{ teeth}}{1 \text{ tooth}} = 365.7 \text{ rotations} \quad (6)$$

$$\text{worm gear rotations} = \text{motor shaft revolutions} \quad (7)$$

至此，已详细介绍了齿轮传动系中的各个节点。现在可以计算总传动比（从电机到摆臂齿轮），从而确定电机转速。从电机开始，沿蜗杆、蜗轮、小齿轮，最终到带齿摆臂所构成的机械路径依次计算：

$$R_{REG} = \left(\frac{N_{GL}}{N_{PG}} \right) \times \left(\frac{N_{WW}}{N_{WG}} \right) \quad (8)$$

其中

- N_{GL} = 带齿摆臂上的齿数
- N_{PG} = 电机模块外部小齿轮上的齿数
- N_{WW} = (内部) 蜗轮齿数
- N_{WG} = 驱动蜗轮的 (内部) 蜗杆齿数 = 1

带齿摆臂（具有 N_{GL} 个齿）的“旋转一周”表示车窗从完全关闭到完全打开，或反之亦然，如 [图 2-4](#) 所示。因此，总传动比 R_{REG} 可理解为开启或关闭车窗所需的电机转数。

支持车窗从完全关闭到完全打开（或反之）所需的电机转速可通过 [方程式 9](#) 求得。

$$S_M = \frac{R_{REG}}{T_{WIN}} \quad (9)$$

其中

- T_{WIN} = 车窗开启或关闭的周期

该示例将在[分析与结果](#)一节中进一步展开。

3 用于电机监测的霍尔器件和磁体

到目前为止，本应用笔记重点介绍了系统的机械传动链如何将电机的旋转运动转换为车窗的垂直运动。下一步是考察用于监测电机转速的磁体和霍尔传感器，如前面图 1-4 所示，该图展示了电机轴上的多极环形磁体以及位于磁体正下方的霍尔传感器。随着磁体旋转，产生的时变磁场由霍尔效应锁存器进行监测。有关磁体选型的更多信息，请参阅“TI E2E™ 常见问题解答 [TMAG5170：磁体选型如何影响霍尔效应角度测量？](#)”及参考文献列表中列出的参考资料。

监测电机转速和方向需要两个适当放置的霍尔效应锁存器。有关更多信息，请参阅 [TMAG511x 2D 锁存器优势](#) 应用笔记。调整霍尔效应锁存器的方向和间距，使磁体产生的磁通密度足以在磁体旋转时触发锁存阈值。此外，还需合理安排锁存器两个传感器的间距，使其锁存行为之间产生延迟。图 3-1 展示了一种可能的环形磁体 - 器件配置，其中可使用 2D 锁存器或双平面锁存器。两个器件中的红色方框标示了此应用所需的两个感应霍尔元件。其他可考虑的磁体 - 器件方向列于图 3-2 至图 3-13；不过，[TMAG511x 2D 锁存器优势](#) 应用笔记中讨论了双平面方案可能不适用于某些配置。

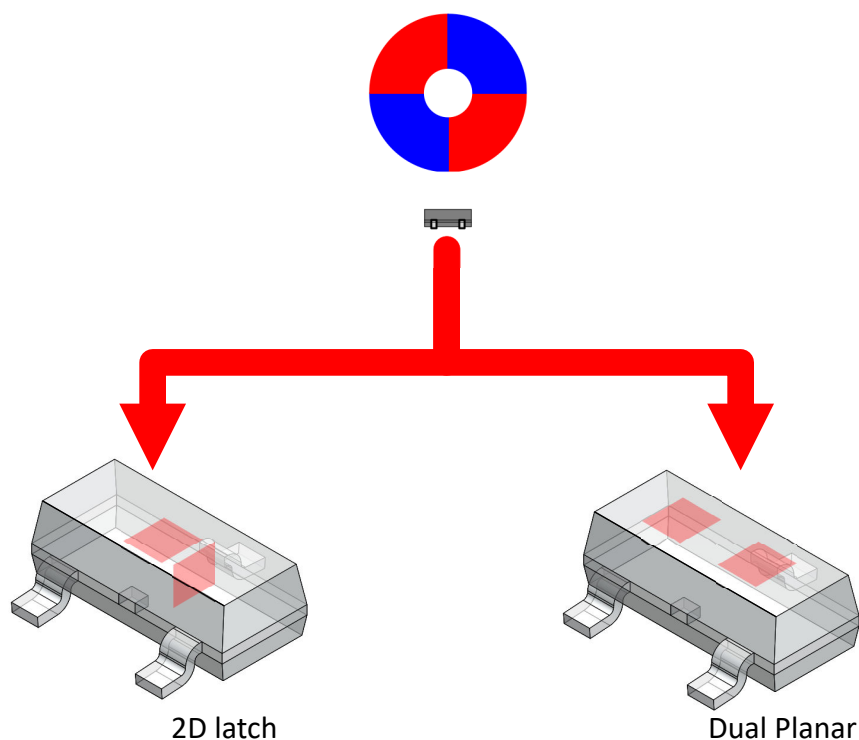


图 3-1. 2D 与平面锁存器实现方案

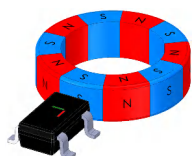


图 3-2. XY 外边缘 1

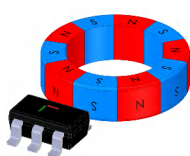


图 3-3. XY 外边缘 2

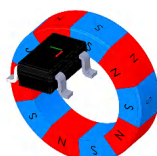


图 3-4. XY 侧边缘 1

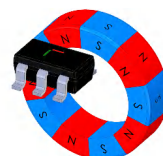


图 3-5. XY 侧边缘 2



图 3-6. ZX 外边缘 1



图 3-7. ZX 外边缘 2



图 3-8. ZX 侧边缘 1

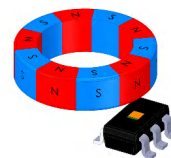


图 3-9. ZX 侧边缘 2



图 3-10. ZY 外边缘 1



图 3-11. ZY 外边缘 2

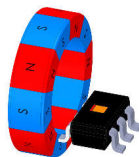


图 3-12. ZY 侧边缘 1

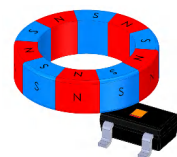


图 3-13. ZY 侧边缘 2

选定最佳锁存方向后，还需确定合适的磁体与传感器间距。如[简介](#)中所述，当磁场高于工作阈值 (B_{OP}) 时，锁存器输出有效低电平；当磁场低于释放阈值 (B_{RP}) 时，锁存器输出高电平。两个阈值之间由迟滞 (B_{HYS}) 隔开，可防止噪声在阈值处引起反复切换，并保持最近一次越过阈值后的状态。

磁体与传感器间距的约束主要取决于磁体在霍尔传感器处产生的磁场强度。影响磁场强度的关键磁体参数包括剩磁（单位为毫特斯拉： mT ）、磁极数量以及物理尺寸（外半径、内半径和厚度）。其他需要考虑的磁体特性包括材料、温度特性和机械完整性，这些超出了本文档的讨论范围。有关磁体选型及相关参考资料的讨论，请参阅 TI E2E™ 常见问题解答[磁体选型如何影响霍尔效应角度测量？](#)

确定传感器的可行位置后，还需验证传感器具有足够的系统带宽。电机转速和磁极数量决定了霍尔传感器所检测磁场的变化率（例如频率）。一般而言，霍尔传感器的带宽必须高于每秒磁极数的两倍，如[方程式 10](#) 所示。

$$Hall\ Sensor\ BW\ (Hz) \geq (Motor\ Speed\ (RPM)/60) \times (2 \times \# \text{ Magnet Poles}) \quad (10)$$

4 分析与结果

首先分析传感器相对于环形磁体的方向和间距。对于此设计，按照 表 4-1 和 表 4-2 所述的磁体和器件在 图 3-6 所示的配置下进行了评估。

表 4-1. 环形磁体参数

参数	值
磁极数量	4
磁体类型	铁氧体 (C8B)
剩磁 (B_r)	410mT
Inner Diameter	0.325in
Outer Diameter	0.615in
高度	0.39in

表 4-2. 霍尔效应锁存器参数

参数	值
器件类型	2D 锁存器，速度和方向输出
器件	TMAG5111
灵敏度轴	ZX 或 ZY
电源电压范围	2.5V 至 38V
静态电流（典型值）	6mA
B_{OP} 最大值	2.6mT
B_{RP} 最小值	-2.6mT

为进行分析，考虑一个位于磁体径向表面指定距离（例如气隙）处的平面。此平面对应于安装霍尔锁存器的 PCB 位置。受 PCB、外壳、板载元件或制造和组装公差等电路板约束的影响，器件可能从磁体中心正下方偏移一定的 x 或 y 距离，如 图 4-1 所示。

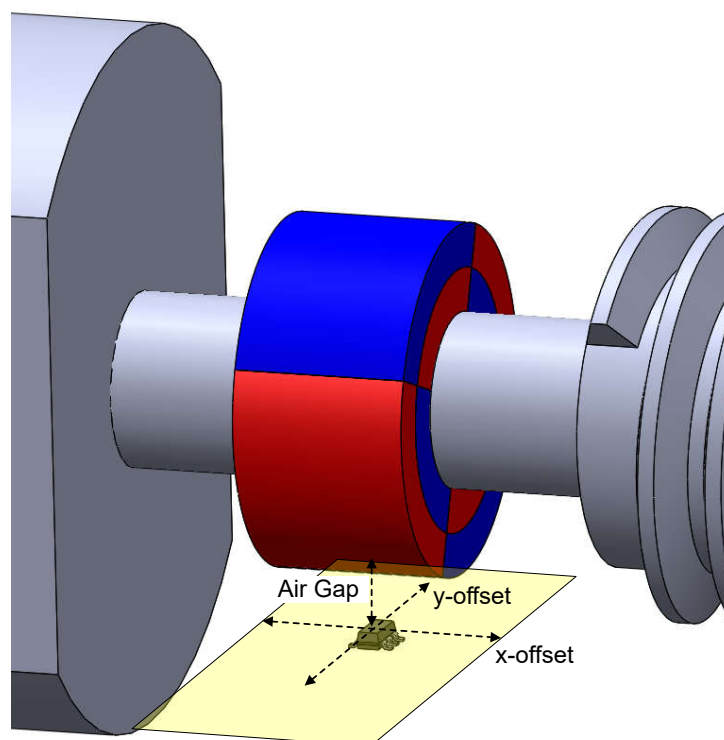


图 4-1. 空间工作区域

对环形磁体的径向扫描以及磁体下方平面上产生的磁场进行了仿真。将这些计算值与霍尔传感器选定的 B_{OP} 和 B_{RP} 阈值进行比较，即可估算出一组能使霍尔锁存器正常工作的 PCB 位置。分析以磁体中心正下方点为基准，按 5° 间隔进行考察。所得区域如 图 4-2 所示。在该区域之外，感应到的磁场不足以触发锁存器。

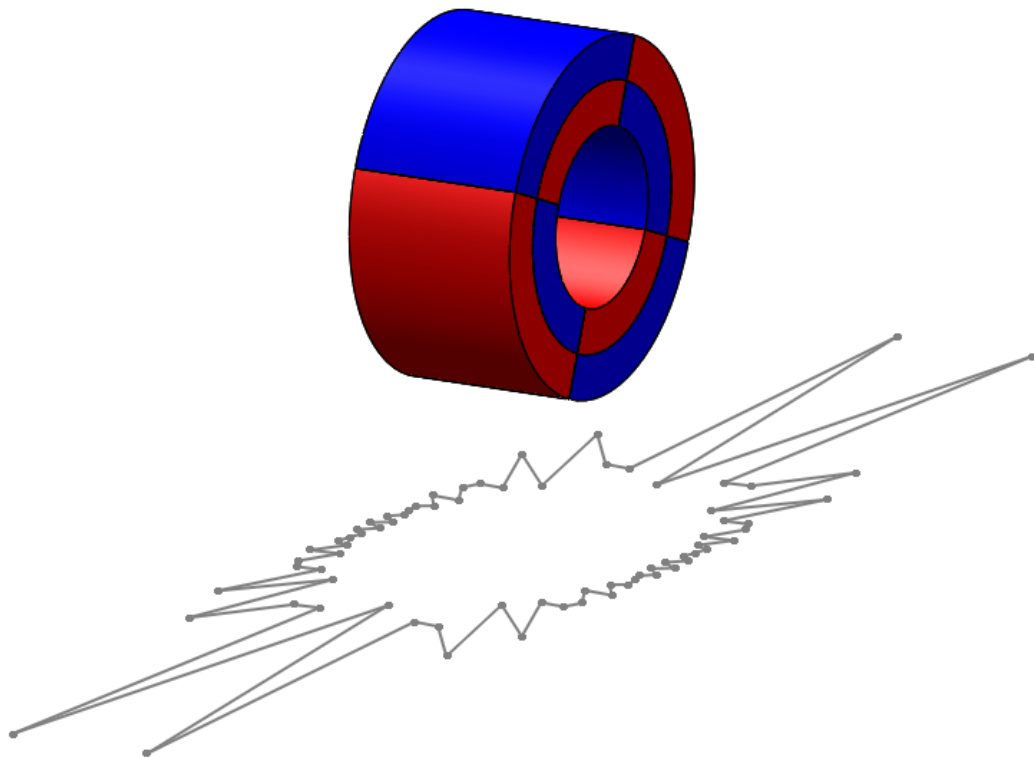


图 4-2. 使用四极环形磁体的仿真区域

仿真区域的形状和相对大小随气隙距离（对于给定磁体）和锁存触发阈值的变化而变化。对于该磁体，观察到典型气隙为 6mm，容差为 $\pm 3\text{mm}$ ，如 图 4-3 所示。图 4-3 中的图表显示，相对于磁体轮廓而言存在一个较大的区域，即使制造公差较为宽松，也能支持所需的传感器和锁存器行为。不过，预计该区域的面积会随磁体与器件之间气隙的增大而减小。为衡量区域大小随气隙距离的变化关系，表 4-3 汇总了各仿真区域面积的近似值，以及相对于 3mm 气隙面积的减小百分比。

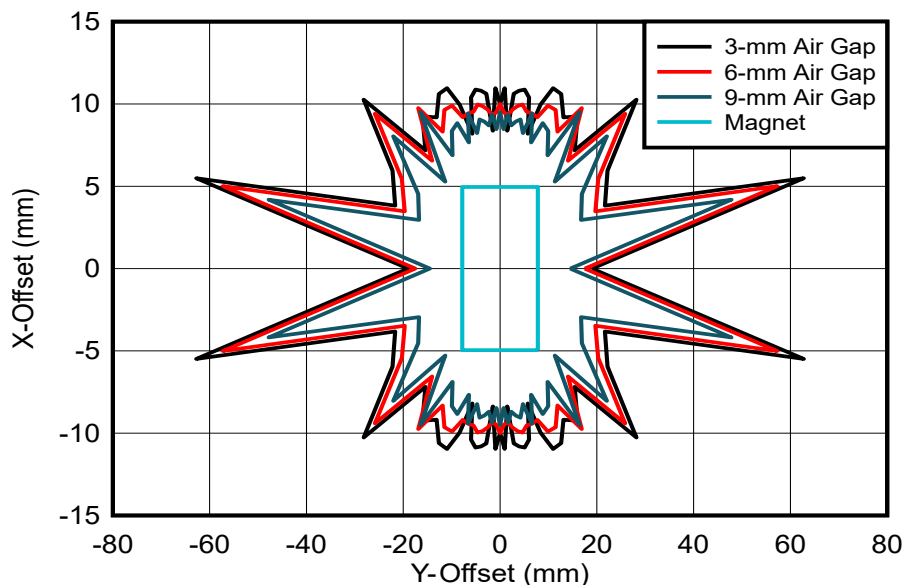


图 4-3. 仿真结果

表 4-3. 可接受传感器放置区域大小与气隙的关系

气隙 (mm)	面积 (mm ²)	相对于 3mm 气隙的减小百分比
3	1463	0
6	1250	-14.6
9	922	-37.0

在确认霍尔锁存器能够在预期方向和位置下正确监测磁体后，接下来确定所需的带宽。利用机械模型和磁极数量，估算所需的电机转速和霍尔传感器带宽。

方程式 8 可用于计算完全开启或关闭车窗所需的电机总转数 (R_{REG})。根据前述升降器示例为公式中的参数赋值，计算得到总转数为 365.7 圈。

其中

- N_{GL} = 车窗摆臂齿轮齿数 = 32
- N_{PG} = 小齿轮齿数 = 7
- N_{WW} = 蜗轮齿数 = 80
- N_{WG} = 蜗杆齿数 = 1

$$R_{REG} = \frac{32/7}{80/1} = 365.7 \quad (11)$$

将升降器要求中提供的值代入 方程式 9，计算所需的电机转速 S_M ：

$$S_M = \frac{365.7 \text{ rotations}}{4 \text{ s}} = 91.4 \frac{\text{revolutions}}{\text{second}} = 5485.7 \text{ rpm} \quad (12)$$

实际验证：驱动带齿摆臂的小齿轮转速为 $(N_{GL}/N_{PG})/T_{WIN}$ ，即 $4.57/4 = 1.14 \text{ revs/s} = 68.6 \text{ rpm}$ ，这与一些常见车窗电机模块的数值一致。

将 方程式 12 中计算得到的电机转速与磁极数以及器件的脉冲-磁极比相结合，即可得出磁体输入信号带宽。对于 TMAG5111，每经过一个磁极产生 1 个脉冲。对于 TMAG5110，每对磁极在每个输出端产生 1 个脉冲，从而将所需带宽减半

$$\frac{\text{motor revolutions (rotations)}}{\text{window movement duration (s)}} \times \frac{\text{poles}}{\text{rotation}} \times \frac{\text{pulse}}{\text{poles}} = \text{magnetic input signal BW} \quad (13)$$

表 4-4. 每极所需带宽

磁极数	所需霍尔传感器带宽 (Hz)
2	183
4	366
6	549
8	731
10	914

估算的霍尔传感器带宽与现有器件相比如何？三款车规级、低成本、低功耗霍尔锁存器 (TMAG5110-Q1、TMAG5111-Q1 和 DRV5015-Q1) 的典型带宽为 40kHz，而另一款锁存器 DRV5011 支持 30kHz。因此，在前述电机转速和实际磁极数条件下，该设计完全处于现有霍尔锁存器的带宽范围之内。

另一个需要考虑的因素是基于监测电机转速来估算车窗位置的分辨率与磁极数量之间的关系。方程式 14 展示了系统要求与磁极数量之间的关系。表 4-5 展示了来自方程式 14 的一些数值结果。对于 TMAG5111，每经过一个磁极有 2 个状态 (1 个脉冲)。对于 TMAG5110，每对磁极有 4 个状态 (2 个偏移脉冲)。如果考虑使用双平面器件，则对应于旋转距离的输出每对磁极有 2 个状态，因此其分辨率为 TMAG511x 器件的一半。

$$\begin{aligned} \text{window displacement resolution} &= \frac{\text{full window range}}{\text{worm gear rotations} \times \frac{\text{poles}}{\text{ring magnet}} \times \frac{\text{device states}}{\text{magnet poles}}} \\ &= \frac{457 \text{ mm}}{4.57 \text{ rotations} \times \frac{\text{poles}}{\text{ring magnet}} \times \frac{\text{device states}}{\text{magnet poles}}} \end{aligned} \quad (14)$$

表 4-5. 分辨率与磁极数的关系

磁极数量	双平面分辨率 (mm)	2D 分辨率 (mm)
2	0.625	0.312
4	0.312	0.156
6	0.208	0.104
8	0.156	0.0781
10	0.125	0.0625
12	0.104	0.0521
14	0.0893	0.0446
16	0.0781	0.0391
18	0.0694	0.0347
20	0.0625	0.0312

表 4-5 显示车窗步长分辨率低于 1mm。虽然初始设计要求未指定步长，但可假定该步长低于用户的平均感知水平。平均视觉感知约为 60Hz，相当于 $1/60\text{Hz} = 0.016\text{s}$ 的周期，每个视觉步长至少为 $457\text{mm}/4\text{s} \times 0.016 = 1.828\text{mm}$ 。然而，若考虑约 0.17s 的用户反应时间，则最小步长为 19.4mm，对应 4s 的开闭持续时间。因此，我们四极磁体 0.15mm 的分辨率远低于所需值。

根据这些发现，本初步设计迭代在可接受放置区域相对较大、带宽足够低、分辨率足够低等方面具有相当大的防故障裕度。此时可以开始制作原型。然而，这样的裕度表明有机会从更高层次重新审视系统，确定修改传动比、电机转速或选用不同磁体是否能带来实质性的成本节约或效率提升。对于霍尔效应反馈级，较小的磁体可以降低成本，因为磁极较少的磁体价格更低。

5 总结

电机模块的设计需要系统工程师、机械工程师和电气工程师通力协作。期望的用户体验决定系统要求，进而推动机械实现方案。在机械实现方案的基础上，可以设计合适的电子反馈系统来监控系统运行并确保其正常工作。TMAG511x 等霍尔效应锁存器与合适的磁体配合使用，可为此类反馈系统提供灵活且稳健的解决方案。

6 参考资料

- 德州仪器 (TI), [TMAG5110-Q1 霍尔效应在汽车车窗和天窗电机模块中发挥了什么作用?](#)
- 德州仪器 (TI), [为霍尔效应传感器选择磁体时应考虑哪些因素?](#)
- 德州仪器 (TI), [TMAG511x 2D 锁存器优势应用笔记](#)
- 德州仪器 (TI), [磁体选型如何影响霍尔效应角度测量?](#)

重要通知和免责声明

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月