

Application Note

TI DLP® 系统设计：光学模块规格



摘要

本应用手册旨在帮助产品开发人员更好地了解光学模块规格和相关系统设计注意事项。该信息有助于促进产品开发以及与光学模块制造商 (OMM) 的沟通。

本文档重点介绍了采用德州仪器 (TI) DLP 显示芯片的投影光学模块，这些模块旨在将图像投影到各种表面上，用于智能手机、平板电脑、显示投影仪、智能家居显示、数字标牌和 AR 眼镜等各种应用。

在阅读本应用手册之前，建议首先阅读 [DLP 显示技术入门应用手册](#)。

本应用手册通篇提到了 [DLP 光学设计指南](#) 演示文稿，该演示文稿综合概述了使用 DLP 产品设计光学系统的指导原则，并在整个设计过程中为客户提供支持。

请注意，投影行业中有时会使用术语 *光学引擎* 和 *光引擎*。为了保持一致性，本文档使用术语 *光学模块*。

内容

1 光学模块简介	2
1.1 DLP 显示芯片或数字微镜器件 (DMD).....	3
1.2 照明.....	3
1.3 照明光学元件.....	3
1.4 投影光学元件.....	3
1.5 闪存板.....	3
2 核心光学模块规格	4
2.1 亮度.....	4
2.2 尺寸.....	4
2.3 分辨率.....	4
2.4 照明功耗.....	5
2.5 投射比.....	5
2.6 偏移.....	5
2.7 对比度.....	6
3 附加光学模块规格	7
3.1 亮度均匀性.....	7
3.2 聚焦均匀性.....	7
3.3 颜色管理.....	8
3.4 热管理.....	9
3.5 光学变焦.....	9
3.6 焦深.....	9
4 光学模块规格示例	10
5 开始开发	11
修订历史记录.....	12

商标

IntelliBright™ is a trademark of Texas Instruments.

DLP® is a registered trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 光学模块简介

光学模块 (请参阅图 1-1 和图 1-2) 是 DLP 显示系统的核心子系统。投影光学模块包含五个主要硬件元件：

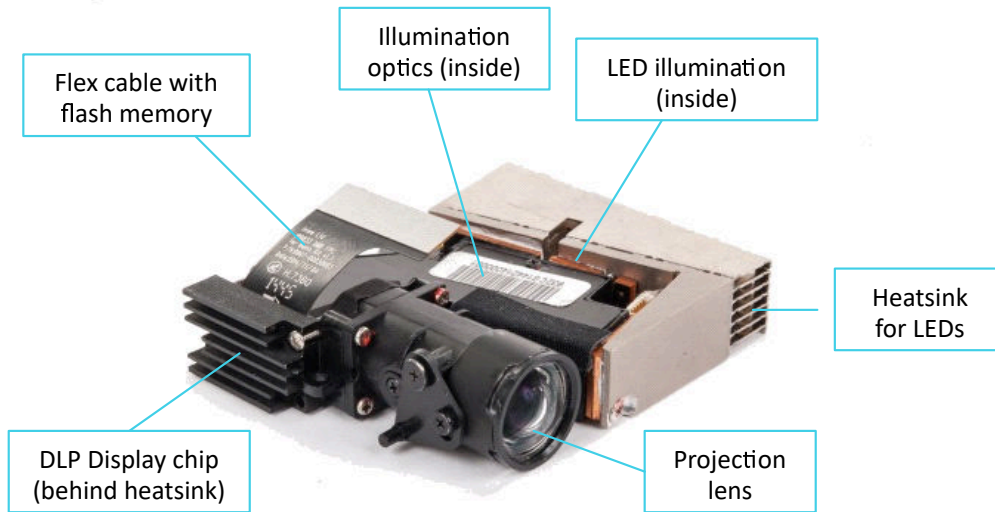


图 1-1. 示例性 DLP2010 投影光学模块 - 尺寸：44 × 48 × 14mm³

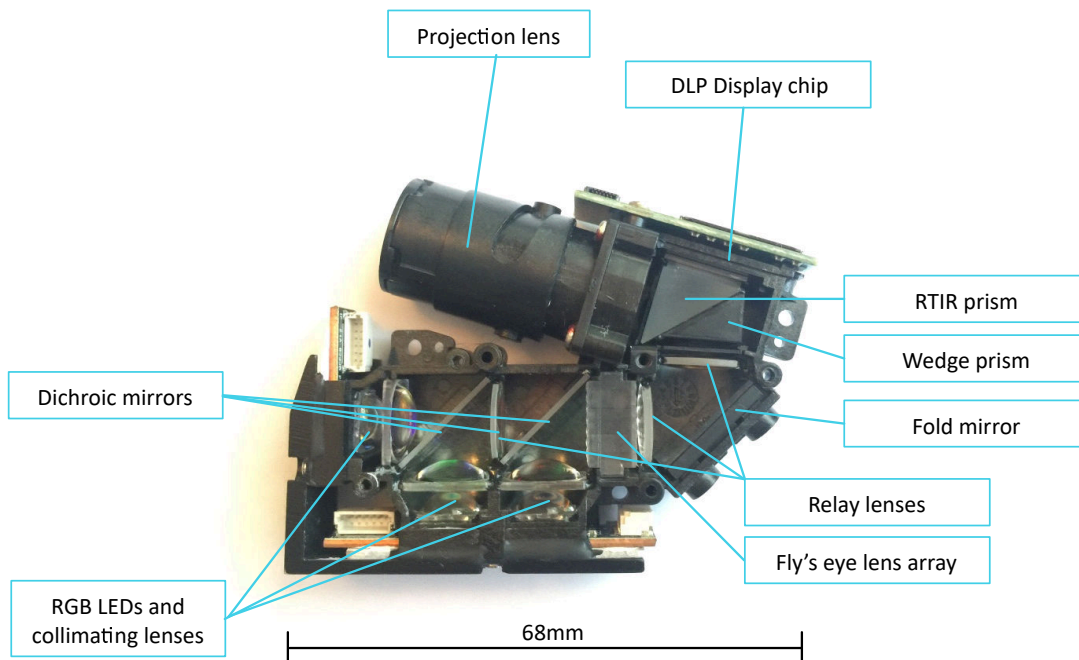


图 1-2. Display 投影光学模块中的光学元件 - 尺寸：68 × 57 × 15mm³

1.1 DLP 显示芯片或数字微镜器件 (DMD)

一种具有多达数百万个微镜的微机电系统 (MEMS) 器件，当与色序照明同步调节时，这些微镜可以快速开关以生成具有不同颜色和强度的投影像素。有关 DMD 的光学属性的更多详细信息，请参阅 [DLP 光学设计指南](#) 演示文稿的幻灯片 12 - 27。

1.2 照明

DLP 技术与所有可见光光源 (如 HID 灯、RGB LED、直接激光、激光/LED 混合光源和激光荧光体照明) 兼容。DLP 显示投影光学模块使用 RGB LED 照明是因为其体积小且亮度效率高，而激光荧光照明则用于在紧凑型光学设计中实现更高的亮度水平。此外，还采用直接激光照明在光学模块中实现更宽的色域和更高的对比度。

光学模块制造商根据系统要求帮助选择合适的照明类型。有关光源照明器及其对光学系统影响的更多详细信息，请参阅 [DLP 光学设计指南](#) 演示文稿的幻灯片 31 - 45。

1.3 照明光学元件

透镜、光束混合光学元件 (例如蝇眼或光隧道)、折叠镜、棱镜和二向色镜等照明光学元件会收集来自光源的光，并以适当的角度将光线引导到 DMD 上。有关照明光学元件的详细信息及其对光学系统的影响，请参阅 [DLP 光学设计指南](#) 演示文稿的幻灯片 28 - 73。

1.4 投影光学元件

投影光学元件收集由 DMD 反射的光，然后将其投射并聚焦到与最终光学元件相隔一定距离的表面上。有关投影光学元件的更多详细信息，请参阅 [DLP 光学设计指南](#) 演示文稿的幻灯片 65 - 73。

1.5 闪存板

闪存板是一个小型板，通常连接到模块或连接 DMD 和 DLP 控制器的柔性电缆。特定于光学模块的 DLP 图像处理设置存储在闪存中，由 DLP 控制器在系统配置期间使用。

TI 制造和销售 DLP 芯片组，其中包括 DMD、控制器 IC 和电源管理 IC (PMIC)。在这三个元件中，只有 DMD 包含在光学模块中 (控制器和 PMIC 集成在附近的印刷电路板或 PCB 上)。

TI 提供了可支持不同类型光学模块的 DMD 产品系列 (查看和比较 [DLP 显示和投影芯片组](#))。光学模块由第三方公司设计和制造 (请参阅 [图 1-3](#))。客户可以从光学模块制造商 (OMM) 处采购已存在且经过装备的光学模块，以缩短设计时间并加快产品上市步伐。或者，可以由 OMM 使用更多的时间和资源来设计定制光学模块。光学模块生态系统非常强大，全球范围内的 OMM 可以大量提供各种光学模块。

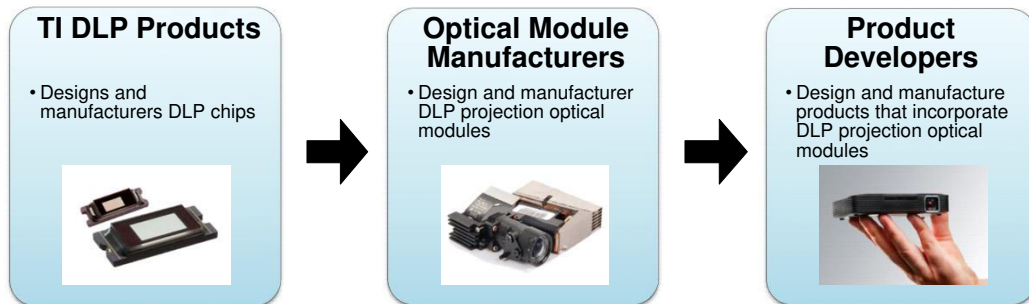


图 1-3. 从 TI DLP 芯片到产品的供应链

2 核心光学模块规格

以下投影光学模块规格很重要，适用于大多数应用。

2.1 亮度

光学模块的亮度以流明为单位测量，表示当光源处于峰值输出并显示白图像（所有 DLP 微镜都处于打开位置）时，投影透镜发出的光量。在明亮的环境光照下，较高亮度的模块能够在投影内容与背景投影表面之间产生更大的亮度差异，从而投影出更清晰的图像。

亮度较高时，通常需要进行利弊权衡，例如模块尺寸增大和功耗增加。然而，DLP 技术的高光学效率可以更大程度地减少这些权衡，从而在更小、更节能的光学模块中实现更高的亮度。

光学模块的亮度随着白点（例如，白光三原色红、绿和蓝光的相对比例）的调节而变化。为了最准确地衡量性能，应使用目标白点指定亮度。例如，D65 (6500K) 是行业标准。

若要详细了解亮度规格及其对系统权衡的影响，请阅读 [DLP 光学设计指南](#) 演示文稿和 [亮度要求和权衡应用手册](#)。

2.2 尺寸

DLP 显示投影光学模块的尺寸各不相同（请参阅图 2-1），适用于各种应用。DLP 光学模块的尺寸主要取决于 DMD 尺寸（请参阅图 2-2）、光学设计和照明尺寸。通常，光学模块的尺寸随亮度能力的增加而增加。模块可能包括散热器，通常在 DMD 上安装一个，在每个 LED 上安装另一个。散热器的尺寸主要由光学模块中的功耗和照明效率决定。

性能要求和光学设计布局会影响光学模块的尺寸和形状。可以折叠光线（即通过镜片来回反射）来减小特定尺寸（如深度或高度）。此外，投影透镜尺寸受投射比和图像偏移的影响：较小的投射比和较高的偏移通常会导致模块变得更大。有关投影透镜注意事项的更多信息，请参阅 [DLP 光学设计指南](#) 演示文稿的幻灯片 65 - 73。

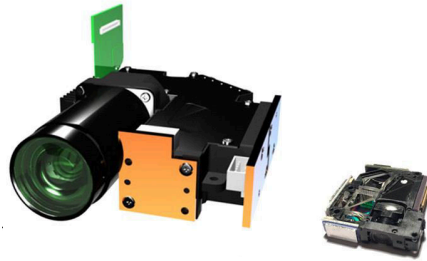


图 2-1. 75mm DLP4501 光学模块（左）与 25mm DLP2010 光学模块（右）的对比



图 2-2. 0.2 英寸 DLP2010 对角线 DMD 与 0.45 英寸 DLP4501 对角线 DMD 的对比

2.3 分辨率

光学模块的分辨率由系统中使用的 DMD 决定。虽然更高分辨率的光学模块系统需要在尺寸和成本方面作出权衡，但 DLP 技术的持续发展有助于在紧凑且经济实惠的光学解决方案中实现更高的分辨率。

一个示例是使用 XPR（扩展像素分辨率）技术来提高分辨率。XPR 使用光学系统中所用 DMD 的高速功能来促进高级像素偏移，从而提高图像分辨率。有关分辨率提高功能及其对光学系统影响的详细信息，请参阅 [DLP 光学设计指南](#) 演示文稿的幻灯片 74 - 76。

2.4 照明功耗

DLP 显示投影系统的功耗主要由光学模块中的光源决定，通常以瓦特为单位进行测量。

对于采用 RGB LED 进行照明的光学模块，功耗规格包括全部 3 个 LED (红色、绿色和蓝色)。可以将 LED 驱动至 LED 制造商指定的最大电流和温度。LED 的总功耗取决于 LED 驱动电流以及每种颜色的占空比。

通道 4 蓝色泵浦 LED 用于增强绿色 LED 的输出，可在不增加其他通道功耗的情况下实现更高的亮度。通道 4 蓝色泵浦 LED 必须与绿色 LED 同步，实现适当的颜色混合，从而在保持颜色精度的同时进行亮度调整。同步还可以提高效率、减少闪烁，并有助于降低总体功耗，从而减少能源成本。

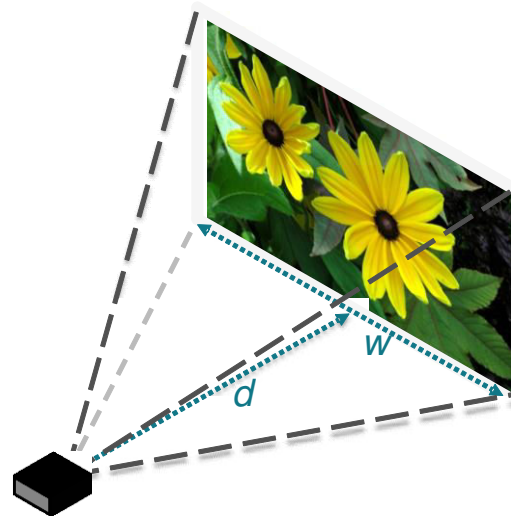
DLP 光学设计指南演示文稿的幻灯片 32 - 45 详细讨论了光学模块中各种光源的额外示例及其对亮度、色彩表现和效率的影响。

2.5 投射比

投射比 (请参阅图 2-3) 描述的是光学模块在相对于投影表面给定距离处产生的投影图像的大小。投射比定义为 D (最终光学元件到投影表面的距离) 与 W (投影图像的宽度) 之比。例如：

- 投射比为 1.4 的光学模块将在 24" 距离处投射 17" 宽的投影图像
- 投射比为 0.3 的超短投射光学模块将在 24" 距离处投射 80" 宽的投影图像

较小的投射比需要较大的投影透镜和镜片，因此会增加光学模块的尺寸。有关投射比的更多信息，请参阅 DLP 光学设计指南演示文稿的幻灯片 69。



$$\text{Throw ratio} = \frac{(d)\text{distance from projection lens to the image}}{(w)\text{horizontal width of the image}}$$

图 2-3. 投射比

2.6 偏移

偏移描述了投射光离开投影透镜后的路径。0% 的偏移意味着光线在离开投影透镜后均匀分布在透镜轴上方和下方。100% 偏移意味着使图像顶部与透镜轴对齐，使图像底部与投影透镜轴重合。100% 或更高的偏移 (例如，向上倾斜) 最常见，用于避免将投影图像的底部发送到放置产品的表面。然而，某些应用倾向于 0% 偏移，从而可实现更薄的光学模块。有关镜头偏移的更多信息，请参阅 DLP 光学设计指南演示文稿的幻灯片 70。

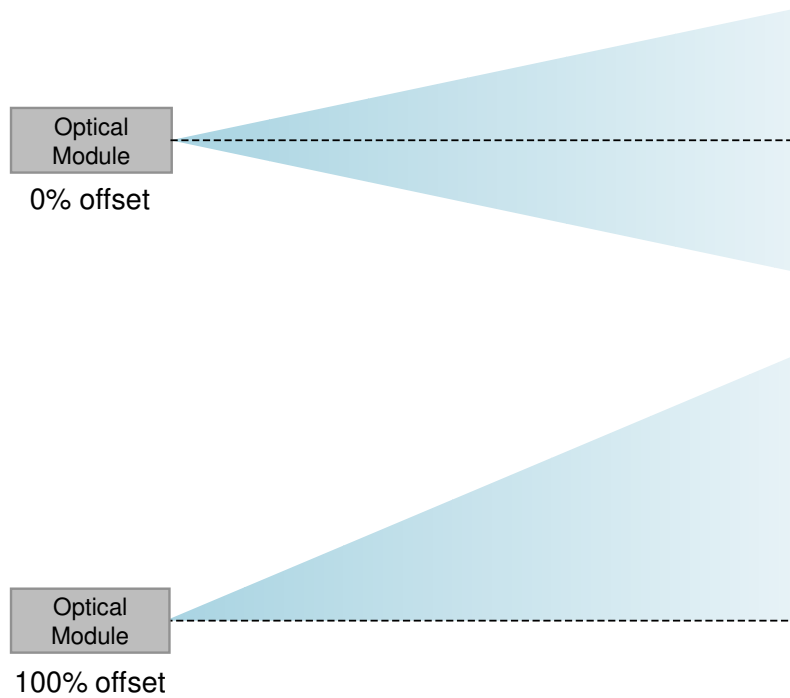


图 2-4. 0% 偏移和 100% 偏移

2.7 对比度

测量投影系统对比度主要有两种方法：全开/全关 (FOFO) 和棋盘图案，例如 IEC 61947 对比度标准 (ANSI 对比度)。光学模块制造商更常使用 FOFO 对比度。

FOFO 对比度测量全白投影图像与全黑投影图像之间的亮度比。棋盘图案法使用 4×4 黑白矩形阵列测量对比度。这两种方法都将测量值标准化为 $x:1$ 比率。

在测量对比度时，FOFO 受 DMD 固有对比度比率的影响，该对比度取决于照明和投影光学特性和设计（例如波长、 $F/\#$ 、照明角度等）。棋盘图案受 DMD 固有对比度和投影光学元件对比度性能的影响。FOFO 具有比棋盘图案更高的对比度比率。此外，当显示视频内容时，棋盘对比度是指明光学模块真实对比度性能的更准确指标。

提高光学模块中对比度比率的一种有效方法是减少杂散光。虽然关态光通常会从投影透镜引导出去，但有效地管理这种光对于防止光重新进入系统至关重要。由于杂散光进入 DMD 有源阵列视场内的投影透镜光瞳，尤其是在微镜处于关断状态时，会导致对比度下降和图像伪影。DLP 投影仪中杂散光的主要成因包括：光学元件和机械结构的光散射、不匹配的照明或投影透镜光瞳配置以及 DMD 镜结构的光散射。

对比度较高的光学模块生成更鲜艳、更绚丽多彩的投影图像，而对比度较低的光学模块看起来颜色暗淡（请参阅图 2-5）。有关光学系统中的对比度和杂散光缓解方法的更多详细信息，请参阅 [DLP 光学设计指南](#) 演示文稿的幻灯片 24 - 27（对比度）和 84 - 98（杂散光缓解）。



图 2-5. 高对比度投影图像 (上方) 和低对比度投影图像 (下方) 模拟

3 附加光学模块规格

以下规格虽然并不总是必需的，但在某些应用中可能至关重要。

3.1 亮度均匀性

亮度均匀性描述的是投影图像不同区域的亮度水平变化。为了测量亮度均匀性，先投影全白图像，然后在图像中按 3×3 阵列排列的九个等间距点处测量照度（以勒克斯为单位）。然后通过以下公式计算亮度均匀性：

$$\text{Brightness uniformity} = \left[\frac{(\text{lux of the dimmest point})}{\text{average lux}} \right] \div \left[\frac{(\text{lux of brightest point})}{\text{average lux}} \right] \quad (1)$$

100% 的亮度均匀性是指在一个完全均匀的投影白色图像上，每个点具有相同的亮度水平。在 DLP 显示投影光学模块中，由于光学元件性能变化、尺寸限制和光学失准，亮度均匀性范围通常为 70% 至 90%。

也可以有意识地在投影透镜中引入渐晕来节省成本。但是，这种方法通常会牺牲光学性能的均匀性和效率。虽然渐晕可以降低生产成本，但在投影透镜的整体设计和应用中必须仔细考虑由此造成的光分布和图像质量下降。

亮度均匀性的重要性取决于应用和所投影的图像内容。例如，虽然在普通电影或电视节目，低亮度均匀性更容易被忽视，但在高对比度或细腻的图像中，这种不均匀性就会变得非常明显。

3.2 聚焦均匀性

理想的投影光学模块具有出色的聚焦均匀性，这意味着整个图像都在焦点上。如果光学模块存在聚焦不均匀的问题，则图像在至少一个位置（通常是边缘或拐角）上明显没有聚焦。利用具有更高 $F/\#$ 的光学模块可提高焦深并使整个投影图像上的对焦更加均匀。在光学模块中，使投影光学元件与 DMD 正确对齐对于防止出现问题（例如视轴）至关重要。这些问题由光学元件性能的变化或光学失准引起。要了解有关聚焦均匀性及其对光学系统影响的更多信息，请参阅 [DLP 光学设计指南](#) 演示文稿。

3.3 颜色管理

显示系统的色域指明显示系统生成的颜色范围，由三种加色法原色定义：红色、绿色和蓝色。在采用 LED 照明的光学模块中，色域范围通过系统中各个 LED 的颜色和使用的滤镜来确定。传统上，色域在 1931 CIE 色度空间中绘制。

大多数光学模块投影仪符合以下色域标准之一：Rec.709 (也称为 BT.709)、DCI-P3 和 Rec.2020 (也称为 BT.2020)。REC.709 是 HDTV 的标准，REC.2020 是超高清 (UHD) 的标准，DCI-P3 是数字影院中使用的标准。虽然这些色域之间存在明显的重叠，但每个色域都在可见光谱内定义了一个不同的区域。值得注意的是，Rec.2020 色域覆盖可见光谱的最大部分，包括 Rec.709 和 DCI-P3 (请参阅图 3-1)。

DLP 显示投影光学模块生成可变白点和色温。每个光学模块均由光学模块制造商进行调节，并在最终产品中以各种模式 (例如冷、正常、暖) 进行编程。¹

有关光学系统中颜色管理的更多信息，请参阅 DLP 光学设计指南演示文稿的幻灯片 77 - 83。

备注

光学模块的亮度规格因白点而异。如果颜色精度是最终产品的关键要求，则建议指定目标白点，例如光源 D65

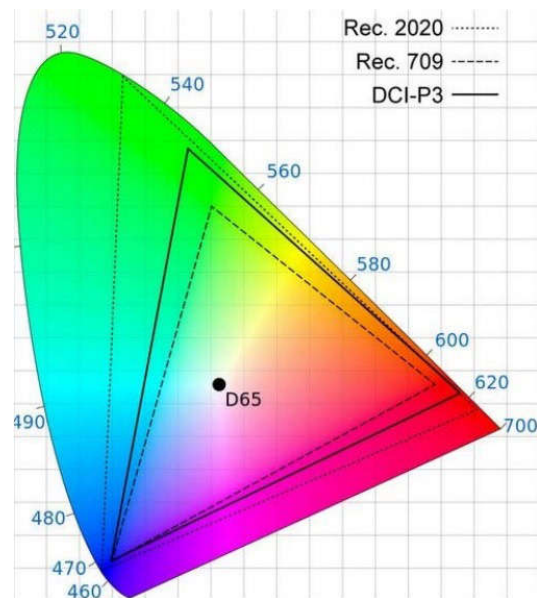


图 3-1. 色域

¹ “ISO 11664-2:2007(E)/CIE S 014-2/E:2006”，国际照明委员会，http://cie.co.at/index.php?i_ca_id=484

3.4 热管理

由光学模块制造商提供的散热器解决方案（例如均热片或平面铜翅片散热器）旨在满足目标亮度规格，同时考虑到 DMD 上的最大热负载（[请参阅数据表](#)）、最大可用照明驱动电流和光源的最低效率（壁式插座）等限制。根据光学模块制造商提供的散热器解决方案，机械系统工程师确定将 DMD 和光源保持在各自建议的工作温度范围内所需的相应被动冷却或主动冷却（例如风扇）量。虽然主动冷却解决方案可能会增加功耗和噪声，但在散热方面更高效。

如果某个应用不需要光学模块所能提供的最大亮度，则可以对系统电子设备进行编程，从而以较低的功耗和亮度水平运行光学模块。在这种情况下，可以通过降低气流要求并与光学模块制造商协作来减小散热器尺寸，从而减小产品尺寸。

3.5 光学变焦

利用光学变焦，光学模块可以通过对投影透镜元件的机械重新定位来调整其投射比。光学变焦常见于 DLP 显示投影仪（例如主流、企业和教育用途），并且可以集成到光学模块中。

3.6 焦深

投影透镜达到最佳焦距的距离称为**焦平面**。尽管这个平面上的焦点最为精确，但在焦平面的前后一定范围内的焦点仍然是可接受的。可接受聚焦的距离范围称为**焦深**。

DLP 显示投影光学模块必须精确地聚焦在目标投影表面，通过调节投影透镜来实现这一点。可以手动完成此调节，通过步进电机以数字方式完成调节，也可以将外部自动对焦系统（例如摄像头或深度检测系统）与步进电机结合使用来自动调节。

备注

手动对焦光学模块最为常见，虽然自动对焦选项会增加成本，但它们简化了产品设置，并提高了易用性。

4 光学模块规格示例

光学模块规格分为两类：核心规格和附加规格。核心规格对于定义模块的性能和特性至关重要。附加规格不太常用，但对于特定应用而言至关重要。在确定光学模块要求时，务必仔细考虑所有可能的规格。了解投影系统的最终用途对于确定光学模块所需的规格至关重要。表 4-1 是一个示例，说明了产品开发人员为了更好地定义 DLP 显示投影光学模块所需的规格而要考虑的问题类型。

表 4-1. 用例注意事项

用例注意事项	受影响的光学模块规格
产品尺寸和投影系统的可用空间	尺寸、功耗、热管理解决方案
周围照明环境	亮度、图像大小、DLP IntelliBright™ 算法
电池供电操作或插入电源插座	亮度
与投影表面的距离和图像尺寸目标	投射比
视频内容类型（例如电影、标牌、PowerPoint 演示文稿等）	分辨率、亮度、对比度、颜色管理
投影表面形状（平坦或弯曲）	焦深
光学模块与投影表面之间的定位（距离、角度、位置）	投射比、梯形校正、偏移
工作环境温度	热管理解决方案
允许的最大物料清单成本	亮度、分辨率、投射比

开发人员可以使用表 4-2 来加快与 DLP 显示投影光学模块制造商的沟通。光学模块制造商列出了目标和边界规格，以便有效确定合适的选项。在考虑实际限制因素的情况下，目标规格应为理想规格，而边界规格应定义最小或最大可接受规格。

表 4-2. 示例性光学模块规格表

规格	示例
说明	提供对应用和“必备”光学模块规格/功能的简要描述。
亮度（流明）	> 30 流明
分辨率（x × y 像素）	854 × 480
大小（以 mm 为单位的 x-y-z 尺寸） - 如果某个尺寸具有更高的优先级，则要记录下来	25mm × 25mm × 6mm (尽可能减小厚度)
功耗（瓦特）	< 1.5W
投射比	1.0:1.5
偏移（通常为 0% 或 100-120%）	100%
可选规格	
亮度均匀性	> 70%
对比度（全开、全关）	> 500:1
对比度（棋盘）	> 200:1
光学变焦（根据需要进行记录，或者不需要记录）	不需要
长焦深（根据需要进行记录，或者不需要记录）	不需要
对焦方法（例如手动、使用电机、自动对焦）	使用电机

5 开始开发

执行以下步骤以采用 DLP 显示技术开始进行产品开发：

1. 了解有关 DLP 显示技术的更多信息：
 - 浏览[入门资源](#)
 - 了解 DLP 显示技术实现的各种[应用](#)
 - 阅读 [TI DLP 显示技术入门应用手册](#)
 - 阅读 [DLP 光学设计指南](#)，获取有关使用 DLP 产品开发光学系统的指导
 - 浏览[产品和数据表](#)
 - 体验 [DLP 投射比和亮度计算器](#)
 - 阅读其他[技术文档](#)
2. 通过易于使用的[评估模块 \(EVM\)](#) 评估 DLP 显示技术。
3. 下载 DLP 显示产品[参考设计](#)以加快产品开发速度，包括原理图、布局文件、物料清单和测试报告。
4. 浏览 [TI 的 E2E 社区](#)，搜索解决方案、寻求帮助、分享知识并与同行工程师和 TI 专家一同解决问题。
5. 使用 [DLP 产品第三方搜索工具](#)查找光学模块和设计支持。

修订历史记录

Changes from Revision B (September 2021) to Revision C (October 2024)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1
• 通篇添加了 <i>DLP 光学设计指南</i> 演示文稿超链接.....	1
• 通篇将 <i>Pico</i> 更改为 <i>显示</i>	1
• 更新了节 1.2 中的文本.....	3
• 更新了节 2.1、节 2.2、节 2.3、节 2.5、节 2.6 和节 2.7 中的文本.....	4
• 在节 2.4 中为通道四蓝色泵浦 LED 添加了光源示例.....	5
• 在节 2.7 中添加了有关杂散光缓解和提高对比度的信息.....	6
• 更新了节 3.2、节 3.3、节 3.4 和节 3.6 中的文本.....	7
• 在节 3.1 中添加了有关投影透镜渐晕的说明.....	7
• 在节 3.2 中添加了有关投影透镜与 DMD 之间失准的说明.....	7
• 更新了图 3-1 以包括 Rec.2020、DCI-P3 和直接激光.....	8
• 添加了表 4-1	10
• 更新了节 4 中的表 4-2	10

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司