

延续之前关于 PBR 技术流程相关实践，现在遇到一个问题，所掌握和积累的技能知识如何在教育中发挥作用？我的一个大学同学是一家著名 CG 培训机构的创始人，他们对于 PBR 的流程培训有非常成熟的掌握和运用，所以选择进行社会实践。

目前市面上游戏模型主要的制作流程有：传统的手绘模型制作，次世代和次世代 PBR 制作。手绘模型的特点就是所有的颜色，光影关系和材质表现都是通过手绘的方式去实现。次世代的模型是基于物理渲染技术标志性就是法线贴图比起上一代游戏以大量手绘纹理为主的制作方式，现在次世代更讲究使用真实照片素材来进行绘制。这样使得游戏的画面有更好的光影效果和更加真实的画面。相对于次世代技术，次世代 PBR 用光泽度和金属度两张贴图去单独定义物品的属性以及表面的光泽让玩家有个更加明确的材质区别从而杜绝了像过去次世代技术金属和布料等其他物质分界不清楚全身油油的感觉，是新一代影视和游戏制作的技术流程，因为效果比传统做法有明显迭代进步，我认为在教学中也要紧跟行业的发展步伐，才能让培养的学生适应社会的需求。

进入企业之后，进入了一个使用实战训练培训的团队，来参加学习的学员都是有一定基础，来企业培训是为了更好提升技能。两个月的时间主要是旁听，学习企业的老师如何将 PBR 流程和技术融入课程，用例子讲解和辅导学员。在这个过程中我一边工作一边做笔记，发现问题自己回去查资料，并且和企业的同事讨论。在工作的同时，我不断思考目前关于广轻推行的工学商一体化的教学模式的改革，如果从在教学过程中融入或模拟出企业实践的方式，在企业中那种紧密的流程，环环相扣的配合，高效的做事能力以及职业文化和职业精神，是我们在教学中要灌输给学生的，以让学生在学的过程中早早的接触到企业实战的训练，所学到的知识和技能，甚至是心智模式都能适应企业工作的挑战。

这次企业实践主要是以了解一个技术为重点。在当今动漫或影视行业中，PBR 对于现代 3D 引擎十分重要，它使得实时渲染突破了被常年诟病的“塑料感”，我们有了金属、皮革、瓷器等真实的材质感。从从业者的角度看，更重要的是：它使我们可以把材质与光照解耦。也就是说一个 PBR 材质，在不同的光照环境下都应该得到正确的渲染结果，这让 3D 美术工作者可以更方便的调节对象的材质，并使得材质更具备通用性。为了比较彻底的了解这个技术。除了从工具运用面去了解如何实现，作为一名老师，不能停留在只知怎么做，而不知所以然？所以我自己查阅相关资料，从物理、数学的层面来理解其原理，然后再来学习虚幻 4 中的实现方案。

首先要理解 PBR 的原理。我们必须先明确一个事情：PBR 并不是“一项”技术，它是由一系列技术的集合，并不断改进的结果。从原理到实现方案，整体来看是很复杂的，但是如果你先把每一项技术搞明白，再看清楚它们是怎么串起来的，就容易理解多了。把所有珍珠串起来的这根金线就是“反射率方程”，它是一个特殊的渲染方程。下面我就以反射率方程为线索，讲述 PBR 背后的物理和数学原理，其中的具体方案来自虚幻 4。

一：关于能量守恒

出射光线的能量永远不能超过入射光线的能量。随着粗糙度的上升镜面反射区域的会增加，但是镜面反射的亮度却会下降。如果不管反射轮廓的大小而让每个像素的镜面反射强度都一样的话，那么粗糙的平面就会放射出过多的能量，而这样就违背了能量守恒定律。这也就是为什么正如我们看到的一样，光滑平面的镜面反射更强烈而粗糙平面的反射更昏暗。当一束光线碰撞到一个表面的时候，它就会分离成一个折射部分和一个反射部分。反射部分就是会直接反射开来而不会进入平面的那部分光线，这就是我们所说的镜面光照。而折射部分就是余下的会进入表面并被吸收的那部分光线，这也就是我们所说的漫反射光照。

通过物理学我们可以得知，光线实际上可以被认为是一束没有耗尽就不停向前运动的能量，而光束是通过碰撞的方式来消耗能量。每一种材料都是由无数微小的粒子所组成，这些

粒子都能如下图所示一样与光线发生碰撞。这些粒子在每次的碰撞中都可以吸收光线所携带的一部分或者是全部的能量而后转变成成为热量。一般来说，并非所有能量都会被全部吸收，而光线也会继续沿着随机的方向发散，然后再和其他的粒子碰撞直至能量完全耗尽或者再次离开这个表面。而光线脱离物体表面后将会协同构成该表面的颜色。

而有一些被称为次表面散射技术的着色器技术将这个问题考虑了进去，它们显著的提升了一些诸如皮肤，大理石或者蜡质这样材质的视觉效果，不过伴随而来的则是性能下降代价。

反射光与折射光之间的这个区别使我们得到了另一条关于能量守恒的经验结论：反射光与折射光它们二者之间是互斥的关系。无论何种光线，其被材质表面所反射的能量将无法再被材质吸收。因此，诸如折射光这样的余下的进入表面之中的能量正好就是我们计算完反射之后余下的能量。

二：关于辐射度量学

辐射度量学是一种用来度量电磁场辐射的手段。有很多种辐射度量可以用来测量曲面或者某个方向上的光。我们可以把自己想象成为一个站在单位球面的中心的观察者，向着投影的方向看。这个投影轮廓的大小就是立体角。辐射通量将会计算这个由不同波长构成的函数的总面积。直接将这种对不同波长的计量作为参数输入计算机图形有一些不切实际，因此我们通常不直接使用波长的强度而是使用三原色编码，也就是 RGB 来作为辐射通量表示的简化。这套编码确实会带来一些信息上的损失，但是这对于视觉效果上的影响基本可以忽略。

辐射亮度是光照方程最终要计算量。值不随距离发射点距离的变化而变化。辐射率方程很有用，因为它把大部分我们感兴趣的物理量都包含了进去。如果我们把立体角和面积看作是无穷小的，那么我们就用辐射率来表示单束光线穿过空间中的一个点的通量。这就使我们可以计算得出作用于单个点上的单束光线的辐射率，我们实际上把立体角转变为方向向量然后把面转换为点。这样我们就能直接在我们的着色器中使用辐射率来计算单束光线对每个片段的作用了。

三：关于反射率方程：

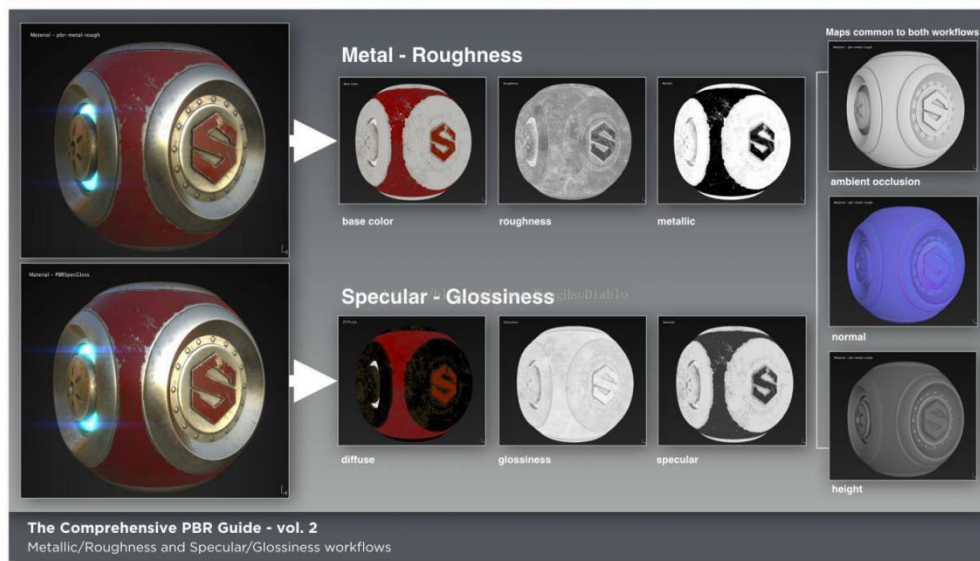
我们知道在渲染方程中， L 代表通过某个无限小的立体角在某个点上的辐射率，而立体角可以视作是入射方向向量。用 ω 表示观察方向，也就是出射方向，反射率公式计算了点在方向上被反射出来的辐射率的总和。或者换句话说：表示了从方向上观察，光线投射到点上反射出来的辐照度。基于反射率公式是围绕所有入射辐射率的总和，也就是辐照度来计算的，所以我们需要计算的就不仅仅是单一的一个方向上的入射光，而是一个以点为球心的半球领域内所有方向上的入射光。

为了计算某些面积的值，或者像是在半球领域的问题中计算某一个体积的时候我们会需要用积分运算的值等于一个函数曲线的面积，它的计算结果要么是解析解要么就是数值解。由于渲染方程和反射率方程都没有解析解，我们将会用离散的方法来求得这个积分的数值解。通过利用来对所有离散部分进行缩放，其和最后就等于积分函数的总面积或者总体积。这个用来对每个离散步长进行缩放的可以认为就是反射率方程中的。反射率方程概括了在半球领域内，碰撞到了点上的所有入射方向上的光线的辐射率，并受到的约束，然后返回观察方向上反射光的。

正如我们所熟悉的那样，入射光辐射率可以由光源处获得，此外还可以利用一个环境贴图来测算所有入射方向上的辐射率。现在已经有很好的几种 BRDF 都能近似的得出物体表面对于光的反应，但是几乎所有实时渲染管线使用的都是一种被称为 Cook-Torrance BRDF 模型。Cook-Torrance BRDF 兼有漫反射和镜。

通过我对 PBR 底层原理逻辑的探究，得出了关于能量守恒、辐射度量学和反射率方程为主要算法的原理，接下来才能理解 PBR 并不是真正的物理计算渲染，这样计算量对于 UE4 即时渲染根本不现实，它是利用一些数学和物理学的原理去模拟物理的计算。通过这个基本

原则我们才能去理解为什么 PBR 的流程和技术是这样设计的。在企业的实践过程中，我发现了 PBR 有两种工作流，一种是基于金属度的，一种是基于镜面反射的，如下图所示。



对应的 UE4 引用 Enlighten 光照引擎之后，带来的两种新的 Shader，Standard 和 Standard（Specular Setup）

第一种是金属和粗糙度的工作流：（不易出错，省内存，但是白边现象更明显）。它包含四个贴图信息：（a）base color：包含信息：绝缘体，反射颜色。金属，反射率。最亮色不应超越 240RGB。最暗色应在 30-50RGB 之间。base color 不要包含其他光照信息，比如 ambient occlusion。金属反射率应该在 70%-100%之间。也就是 RGB 180-255 油漆和氧化的部分应该按照绝缘体处理。（b）metallic map: (Grayscale-Linear)：描述哪些区域是金属，那些是绝缘体。1 表示纯金属。0 表示绝缘体。如果 metallic map 的灰度值低于 235，那么对应的 basecolor 的反射率也应该降低一些。（c）roughness map: (Grayscale-Linear) 描述表面引起光纤漫反射的不规则程度。这将改变光纤的方向，但是不会改变光线的强度。光滑表面会有小而亮的高光，而粗糙表面将会出现大而暗淡的高光。在这个灰度图里面，0 代表光滑表面，而 1 代表粗糙表面。（d）roughness map 是一个法线贴图，它会告诉你这个表面模拟表面的凹凸起伏效果。而公用的贴图为环境光吸收，法线和高度贴图。

第二种是 镜面反射和光滑度的工作流：为何镜面反射工作流容易出错呢，因为 Specular 包含了全部的绝缘体 F0 信息，1.0 的 Diffuse 和 1.0 的 Specular 将会使得反射折射能量大于输入能量，这违背了能量守恒定律。也就是说在绘制贴图时，你无法预览结果。它包含四个贴图信息：（a）diffuse：包含 albedo color，但是不包含任何反射率信息。纯金属为黑色，因为纯金属没有颜色，油漆和锈迹是需要带有颜色的。基础颜色应不包含光照信息，除了 micro-occlusion。（b）specular：灰度值，表示非金属 F0,RGB 值，表示金属吸收的不同波长的光线。这种贴图允许使用不同的 F0 值来表现非金属。（c）glossiness：与 Roughness 相反，0 代表粗糙表面，而 1 代表光滑表面。（d）Normal Map:不论 PBR 还是非 PBR，NormalMap 都是用来模拟表面细节，同时还会影响 Roughness 和 Glossiness 映射。

除此之外，还有另外两张贴图信息供表现效果而选用，（e）Ambient OcclusionAO:环境遮蔽塞，表示有多少环境光，可以被表面上的一个点吸收。AO 应该只影响 Diffuse 部分，而不应阻塞 Specular 部分。（f）Height Map: 高度图也就是置换贴图，通过黑白灰信息来表现表面真实的凹凸起伏，配合 normal 表现细节的凹凸起伏，用于视差映射，通过增加可见的

深度感来提高渲染的真实性。

工作流程上面，由于使用了新的技术，导致工作流程和使用软件也发生了变化。下图是我根据在企业实践中，以及回忆以前使用的传统流程做了总结对比。

传统的手绘模型制作流程：在应用范围方面，广泛应用于广告、影视、工业设计、建筑设计、三维动画、多媒体制作、游戏、以及工程可视化等领域。制作低模，模型主要是由面数组成，高中低模型依据面数多少而定，角色低模一般是二千到三千五左右，最高一万左右，面数主要使用四边面，三角面可以合理使用。主要是在贴图制作上用了 **bodypaint**，对于表现细节的法线贴图无法涉及，输出贴图也只是基础颜色、高光和凹凸贴图等传统的模拟式渲染工艺。

PBR 的制作流程：使用的工具变多，流程也被拉长了。由于表现表面凹凸细节的需要，多了 **Zbrush** 软件的运用。但是 **Zbrush** 使用之后要把模型进行拓扑低模才能正常使用。然后多了道烘焙的工序将 **Zbrush** 制作的高模信息变成贴图给低模用，最后使用了 **substance painter** 这个软件，最大的特点就是完全根据 **PBR** 的工艺特点来设计，最后输出了上面说提到的基础四张贴图：基础颜色、金属度、粗糙度和法线贴图，外加 **AO** 和高度图，输出后和 **UE4** 等软件无缝连接。

下图是传统手绘模型制作流程和 **PBR** 的制作流程的效果对比，可以看出 **PBR** 表现质感更加真实细腻，体积感和质感强。



下面是一些 **PBR** 工作流程和相关的工作界面：

UV： "UV"可理解为立体模型的“皮肤”，所有的模型的贴图的绘制都是在拆分 **UV** 后的模型上完成，这就是我们常说的 **UV** 贴图。传统的手绘贴图的 **UV** 尺寸一般用到 **256** 和 **1024** 贴图，次世代模型因为资源较多一般会用 **1024** 或者 **2048** 的贴图。常用的拆分 **UV** 软件有：

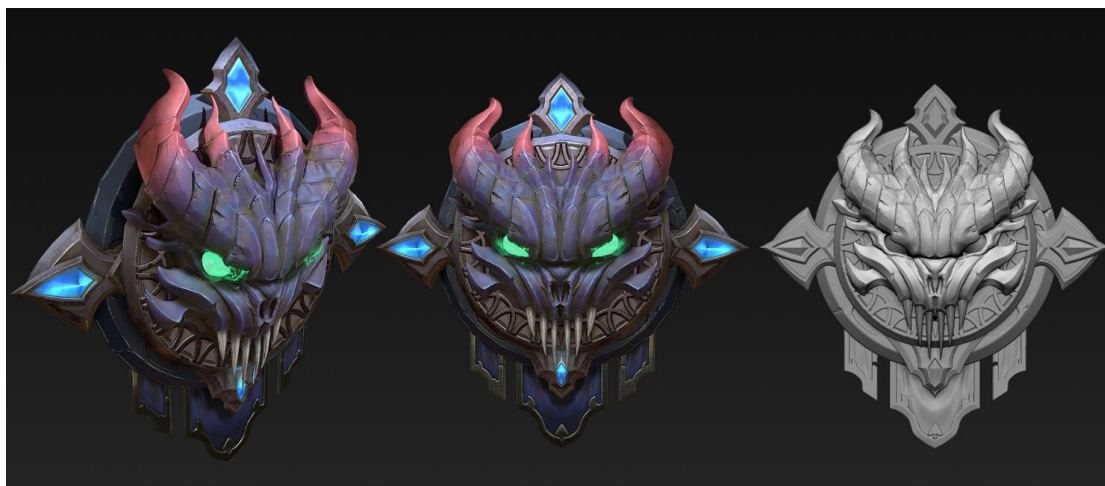
3DMAX, MAYA, Unfold3D

次世代流程制作： 常见次世代角色项目流程是低模——中模——高模或者中模——高模
Zbrush 软件：

制作效果图：

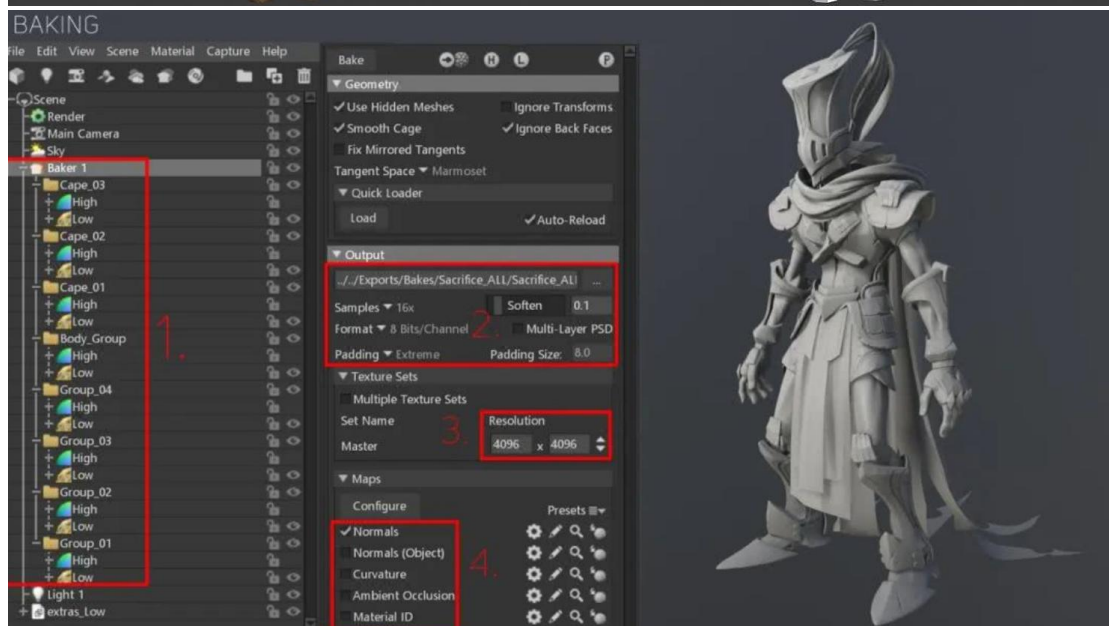


常见次世代模型根据项目风格不同一般分为：写实，半写实，卡通，手办风等等而我们模型中的布料或者衣服一般可以通过 ZB 的高模雕刻或者布料运算软件去实现常常用到的软件就是 Marvelous Designer。但是 MD 比较适应于写实或者半写实的项目中，因为 MD 运算出来的布料的褶皱比较真实而且会有其他的一些随机性的纹理不太适合卡通风和手办风等这些褶皱相当单一和规矩的项目
卡通风或者手办风褶皱参考：



TopoGun: 高模拓补成低模(因为一个游戏能承载的资源是有限制的，根据项目不同会有不同的需求也是为了顾及到市面上大部分的设备能够流畅的运行需要把高达几百万或者上千万面数的模型调整到一个合理的范围)

低模+UV 效果图:



烘焙：主要使用 xnormal,八猴。烘焙的作用就是把高模上的细节投射到拓扑后的低模上从而用一个 1 万多的面数或者几千面的模型去体现上百万面数高模的细节

经过这两个月的企业实践，我总结下企业 PBR 教育流程：

- (1) 先用极其简单的例子分析功能，让学生对其有深刻了解。
- (2) 再一个综合例子将所讲功能串联起来。
- (3) 鼓励学生自己根据学到的东西进行创作，学以致用。

两个月的企业实践，可以说是收获满满的，不仅掌握了 PBR 技术和流程，还对企业的培训理念和方法有更深入的理解和体会。我将在接下来的相关课程里，努力把企业所收获的经验，包括使用软件和工作流程融入到教学里，为高职教育的工学商实践添砖加瓦。