

---

## UG NX 的热辐射仿真与理论分析解的初步校验

---



## 目 录

1. 前言 .....	1
2. 模型问题的提出 .....	2
3. 解决方案：理论分析方法 .....	2
4. 解决方案：UG NX 热仿真 .....	5
5. 后记 .....	8
6. 参考文献 .....	8

## 1. 前言

在许多传热场合中，相对于导热和对流传热，热辐射形式的传热量占比较小，往往不受人们的重视，以致于在遇到热辐射占据重要影响的实际问题时，一些热分析工程师仍习惯性的忽略热辐射传热，从而导致较大的热仿真偏差，或多或少影响了热设计的改进与优化。我们通过多年的接触和实际试用发现，很多基于流体力学仿真起家的商用软件在导热和热辐射仿真方面提供的功能专业性不够，或者说应用场合非常受限。同时，对于热分析工程师来说，往往只需要在一定的工程精度范围内快速获得重点关心的热参数，如温度、传热量、流速等，如果在精确模拟流场上耗费过多的精力和计算资源，代价过于高昂，也难以适应工程需要。工欲善其事，必先利其器。挑选一款得心应手的可综合模拟导热、流动传热和热辐射的软件，对于热分析工程师是非常重要的。

UG NX 与老牌 I-Deas 之间如同一个人的今生与前世关系：I-Deas 是美国 SDRC 公司在 20 世纪 60 年代为美国 NASA 开发的 CAD/CAE/CAM 一体化软件，引领了 CAD 行业从参数化设计发展到变量化设计的革命，曾拥有极高的赞誉和辉煌。但 I-Deas 在脱离 NASA 后的商业化过程中，由于经营不善被美国 UGS 当时的母公司美国 EDS 收购整合，但两家约定软件名称为 NX (Next Generation, 即下一代数字化产品开发系统，涵盖了产品设计、制造和仿真的完整开发流程)，又称为 UG NX。应该说 UGS 复制和吸纳了 I-Deas 的技术核心重组成了 UG NX，但 I-Deas 仍作为独立的产品被保留了下来，归属美国 Maya HTT 公司(Maya Heat Transfer Technologies Ltd.)，但其开发基本停滞。在 2007 年，NX 和 UGS 又脱离母公司 EDS 被德国 Siemens 收购。在公司内部已将 UG NX 纳入 Siemens Simcenter，将对外统一称谓：西门子仿真中心软件平台。

虽然作为国际一流软件平台，UG NX 在中国的占有率在某种意义上并不成功，各大书店已设有 UG NX 的书籍专柜，但内容全部是介绍其在结构设计和力学分析方面的应用，截止目前，国内市面上尚无专门讲解其用于热仿真的书籍，网上相关资料也非常少，给热分析工程师带来了诸多不便与困惑。Maya HTT 公司提供有《Thermal and Flow Verification Manual》官方资料，里面介绍了许多应用 I-Deas 针对简单热物理问题进行的热仿真结果与理论分析解的对比和验证。我们可以选择相信 UG NX/Simcenter 主要在软件的用户界面上进行了大胆革新，核心算法仍

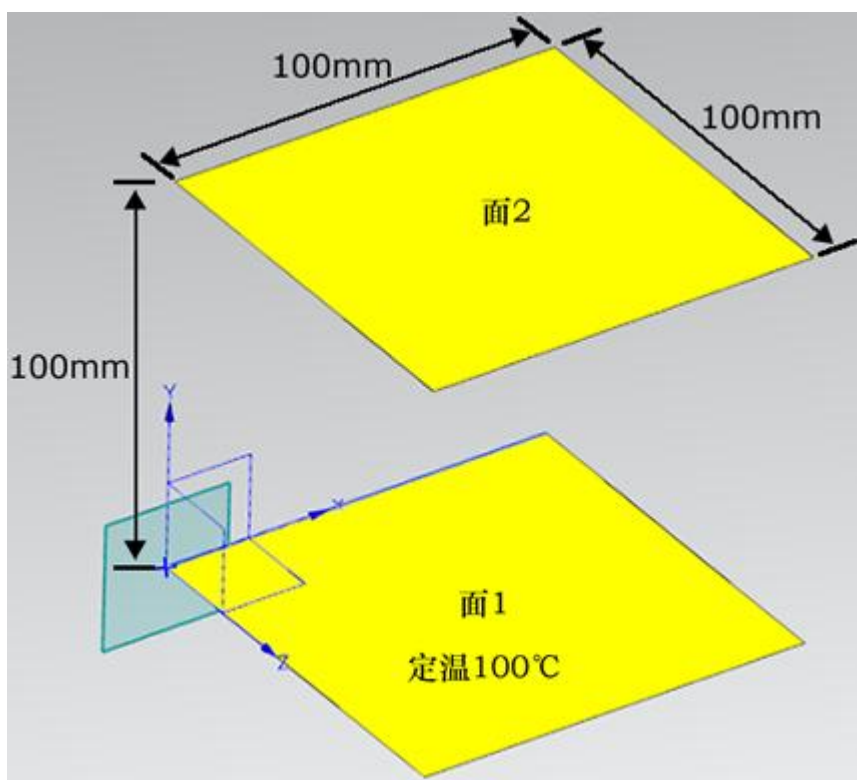
然使用与 I-Deas 一样的核心代码，或者只做了少量修正。但对于应用类软件的普通用户，我们仍然建议用户自己选择一些经典的问题，与理论分析解进行比对验证，一方面对软件功能可信度的检验，另一方面也是对自己的参数设置正确性的验证，这也是本文的初衷。

## 2. 模型问题的提出

本文为对 UG NX 的热辐射仿真效果进行验证，设定如下的简单辐射换热问题：

已知：在一个恒温 20℃ 的理想黑体空间内，有两个平行且正对的薄板，见图 1 的面 1 和面 2，每个薄板的两侧面均为理想黑体表面，两个薄板的尺寸和热物性相同。每个薄板均假设为理想的等温体，且其中一个薄板（即面 1）为定温 100℃。

求：另一个面（即面 2）的稳态温度。



图（1）

## 3. 解决方案：理论分析方法

分析目标问题，应抽象为面 1、面 2 和黑体空间共 3 个热节点之间的热辐射换热。既然问题是求面 2 的稳态温度，第一反应是对着面 2 拿出紫金葫芦，不，是能量守恒定律，有：

$$Q_{1-2} = Q_{2-3} \quad (1)$$

式中,

$Q_{1-2}$  一面 1 到面 2 的 (净) 辐射传热量, 单位 W;

$Q_{2-3}$  一面 2 到黑体空间的 (净) 辐射传热量, 单位 W。

又根据黑体辐射的四次方定律 (即斯-玻定律), 有:

$$Q_{1-2} = A_1 \times X_{12} \times s \times (T_1^4 - T_2^4) + A_1 \times X'_{12} \times s \times (T_1^4 - T_2^4) \quad (2)$$

$$Q_{2-3} = A_2 \times X_{23} \times s \times (T_2^4 - T_3^4) + A_2 \times X'_{23} \times s \times (T_2^4 - T_3^4) \quad (3)$$

式中,

$A_1$  一面 1 的单侧面积, 单位  $m^2$ ;

$A_2$  一面 2 的单侧面积, 单位  $m^2$ ;

$X_{12}$  一面 1 的顶面到面 2 的几何角系数, 为无量纲值;

$X'_{12}$  一面 1 的底面到面 2 的几何角系数, 为无量纲值;

$X_{23}$  一面 2 的顶面到黑体空间的几何角系数, 为无量纲值;

$X'_{23}$  一面 2 的底面到黑体空间的几何角系数, 为无量纲值;

$s$  黑体辐射常数, 即  $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ;

$T_1$  一面 1 的稳态温度, 单位 K;

$T_2$  一面 2 的稳态温度, 单位 K;

$T_3$  黑体空间的温度, 单位 K。

综上, 得到:

$$\begin{aligned} A_1 \times X_{12} \times s \times (T_1^4 - T_2^4) + A_1 \times X'_{12} \times s \times (T_1^4 - T_2^4) &= A_2 \times X_{23} \times s \times (T_2^4 - T_3^4) \\ &+ A_2 \times X'_{23} \times s \times (T_2^4 - T_3^4) \end{aligned} \quad (4)$$

有必要对式 (4) 进行简化, 首先对方程两侧消去面积和黑体辐射常数, 得:

$$X_{12} \times (T_1^4 - T_2^4) + X'_{12} \times (T_1^4 - T_2^4) = X_{23} \times (T_2^4 - T_3^4) + X'_{23} \times (T_2^4 - T_3^4) \quad (5)$$

接下来, 对角系数进行计算。对于  $X_{12}$ , 首先判断面 1 的顶面发出的光子有一

部分落入面 2，其余部分都将落入黑体空间。由于角系数的求解本身较为复杂，本文不作展开，直接使用权威资料公布的分析值。本文可查阅平行长方形表面间的角系数曲线<sup>[1]</sup>见图 (2)。可查得  $X_{12}$  取值为 0.2。

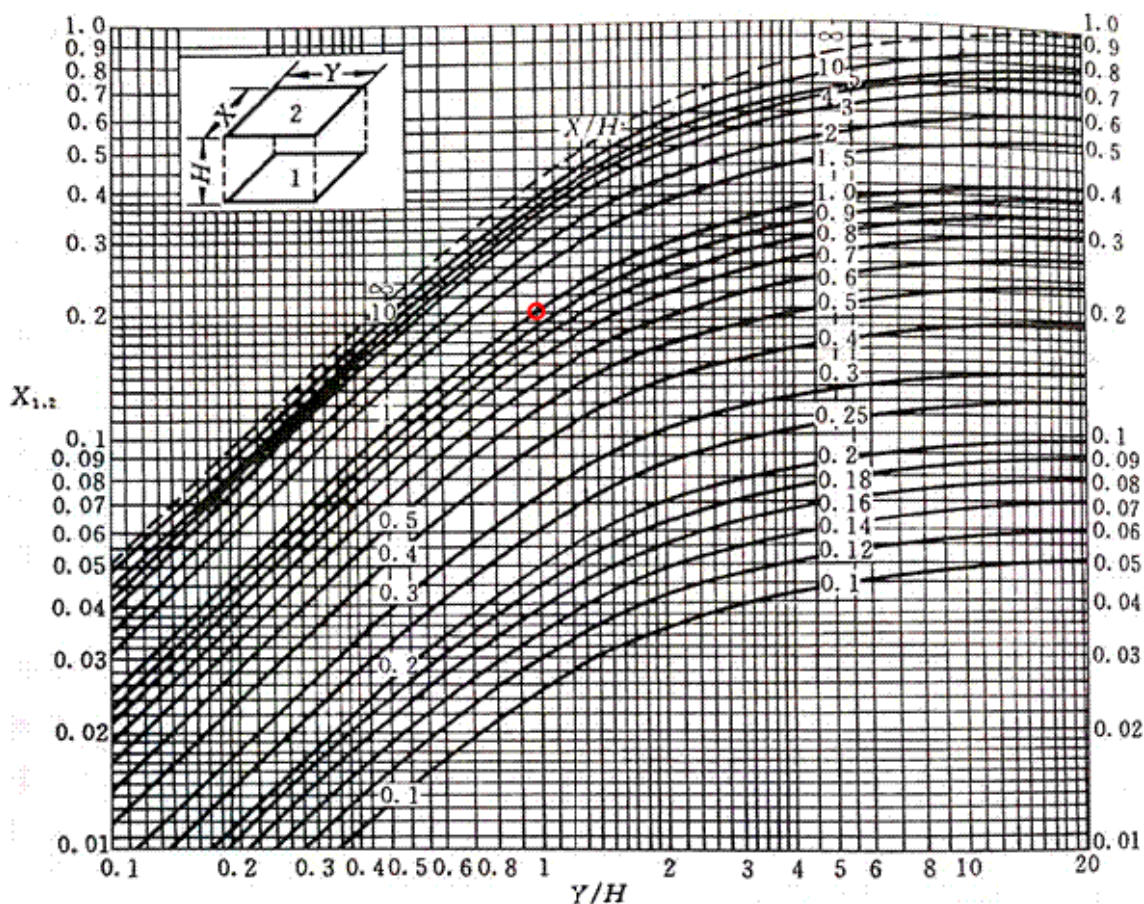


图 (2)

对于  $X'_{12}$ ，可以简单的从图形几何相对关系（互相平行平面），结合光的直线传播特点，判定面 1 的底面发出的光子不会落到面 2 上，即  $X'_{12}$  取值为 0。

对于  $X_{23}$ ，同样判定面 2 的顶面发出的光子不会落到面 1 上，而且都将落入黑体空间，即  $X_{23}$  取值为 1。

最后的重点是  $X'_{23}$  的求解，首先可以判定面 2 的底面发出的光子有一部分落入面 1，其余部分都将落入黑体空间。由于相对几何关系相同，面 2 的底面发出的光子落入面 1 的比例与面 1 的顶面发出的光子落入面 2 的比例相同。再利用角系数的完整性，可得： $X'_{23} = 1 - X_{12} = 1 - 0.2 = 0.8$ 。

综上，式（5）变为：

$$0.2 \times (T_1^4 - T_2^4) + 0 = 1 \times (T_2^4 - T_3^4) + 0.8 \times (T_2^4 - T_3^4)$$

$$0.2 \times (T_1^4 - T_2^4) = 1.8 \times (T_2^4 - T_3^4)$$

$$T_1^4 - T_2^4 = 9 \times T_2^4 - 9 \times T_3^4$$

$$T_2^4 = \frac{T_1^4 + 9 \times T_3^4}{10} \quad (6)$$

将 $T_1$ 和 $T_3$ 的值带入式（6），得：

$$T_2^4 = \frac{(273.15 + 100)^4 + 9 \times (273.15 + 20)^4}{10}$$

$$T_2^4 \approx 8585442633.759$$

$$T_2 \approx 304.397 \text{ (K)}$$

$$T_2 \approx 31.247 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

解毕。

#### 4. 解决方案：UG NX 热仿真

针对本问题模型，创建了两个厚度 2mm 的铝合金 2A12 薄板，见图（1），并对两个薄板都划分了 10 单元×10 单元的 2D 面网格。实际上，不必划分这么多单元，可以只划分为 1 个单元。这里划分为多个单元的目的是为了查看得到的温度分布是否合理（面 2 的中心温度应该最高，且呈现中心对称分布），由于铝合金的导热系数较大，在本例中的最大温差很小，不影响对热辐射平衡温度的验证。

对于本文的模型问题，在热仿真类型选择上，可以是基本热仿真模块 Simcenter Thermal/Flow 模式，也可以选择高级热仿真模块 Simcenter Electronic Systems Cooling 模式，只是后者支持的功能更多，选项设置相对多一些，对比如图（4）和图（5），这里不作展开介绍。两种模式在战术层面的主要区别在于辐射算法支持上，Simcenter Thermal/Flow 模式不支持 Monte Carlo 算法，见图（6），本文使用默认的半立方体渲染算法，见图（7）；而 Simcenter Electronic Systems Cooling 模式对两种算法都支持。需要注意的是，Simcenter Thermal/Flow 模式下的设置阶段仍能选择 Monte Carlo 算法，包括求解后的设置项显示，但在运行求解时会给出警

告信息并自动切换到半立方体渲染算法进行求解，见图（8）。不过，下面的热仿真结果表明，两种模式和两者算法都足以胜任本文的模型问题。

名称	类型	单位	关系	所有者
NX Nastran 声振	Sim	毫米	独立的	NT AUTHORITY\SYSTEM
NX Nastran 设计	Fem	毫米	独立的	NT AUTHORITY\SYSTEM
NX Nastran 设计	Sim	毫米	独立的	NT AUTHORITY\SYSTEM
Samcef	Fem	毫米	独立的	NT AUTHORITY\SYSTEM
Samcef	Sim	毫米	独立的	NT AUTHORITY\SYSTEM
Simcenter Thermal/Flow	Fem	毫米	独立的	NT AUTHORITY\SYSTEM
Simcenter Thermal/Flow	Sim	毫米	独立的	NT AUTHORITY\SYSTEM
Simcenter Electronic Systems Cooling	Fem	毫米	独立的	NT AUTHORITY\SYSTEM
Simcenter Electronic Systems Cooling	Sim	毫米	独立的	NT AUTHORITY\SYSTEM
Simcenter Space Systems Thermal	Fem	毫米	独立的	NT AUTHORITY\SYSTEM
Simcenter Space Systems Thermal	Sim	毫米	独立的	NT AUTHORITY\SYSTEM
Simcenter Multiphysics	Fem	毫米	独立的	NT AUTHORITY\SYSTEM
Simcenter Multiphysics	Sim	毫米	独立的	NT AUTHORITY\SYSTEM

图（3）



图（4）





图 (5)

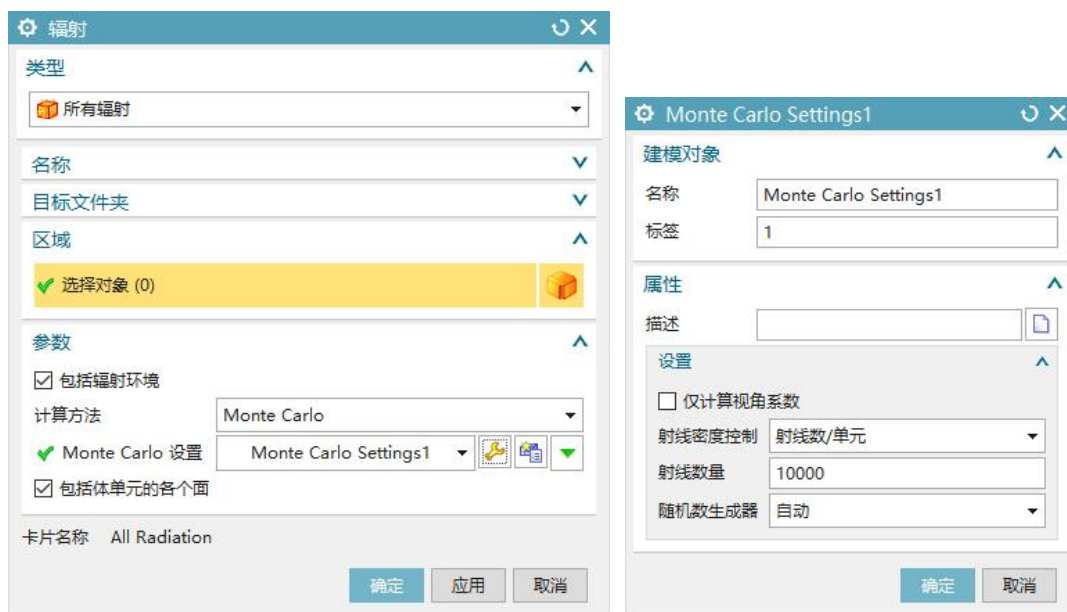


图 (6)



图 (7)

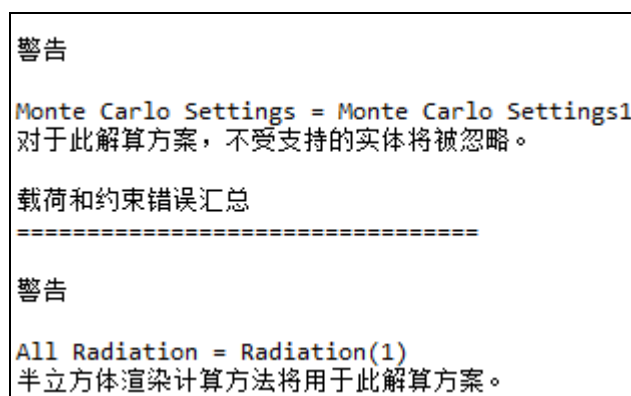


图 (8)

采用 Simcenter Thermal/Flow 模式+半立方体渲染算法（默认设置）得到的面 2 温度见图(9), 采用 Simcenter Electronic Systems Cooling 模式+Monte Carlo 算法(射线数取 10000) 得到的面 2 温度见图 (10), 两者的温度相差只有 0.1℃左右。

## 5. 后记

本文的 UG NX 热仿真结果表明，面 2 的平均温度在 31.25℃左右，该结果与理论分析值 31.247℃相符，远高于常规试验测温精度，完全可以满足一般工程需求。

## 6. 参考文献

[1] 《传热学》 杨世铭 陶文铨 著 高等教育出版社。

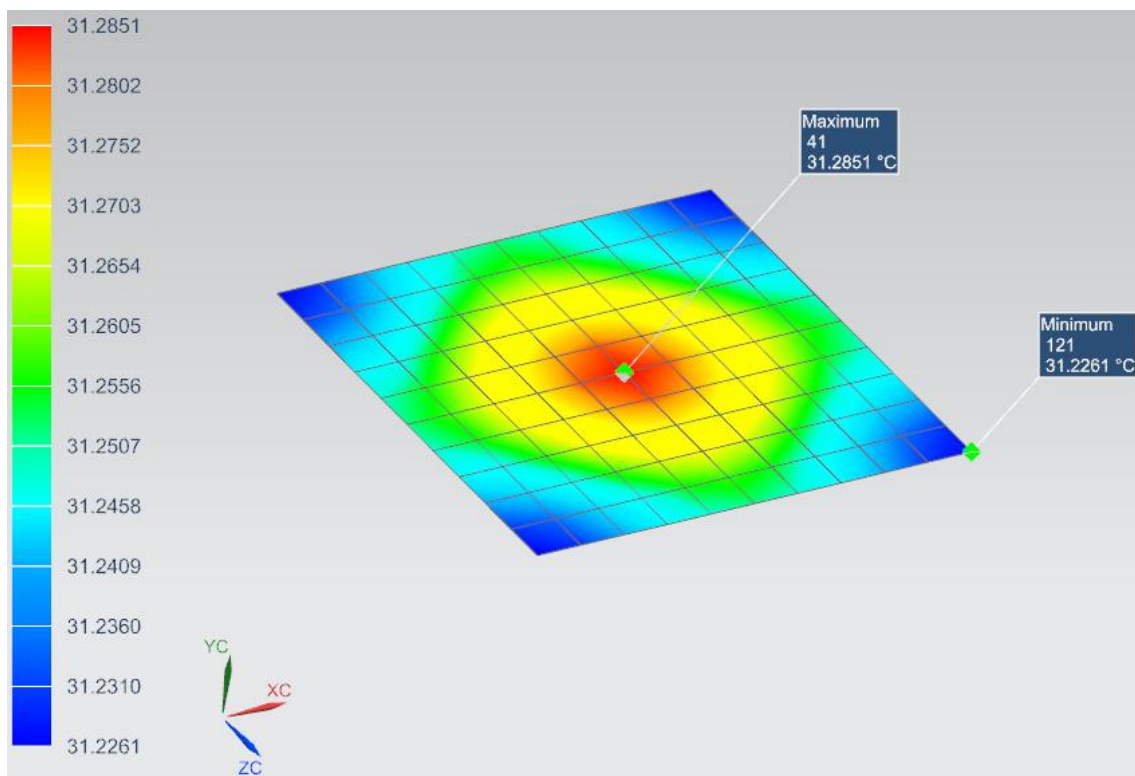


图 (9)

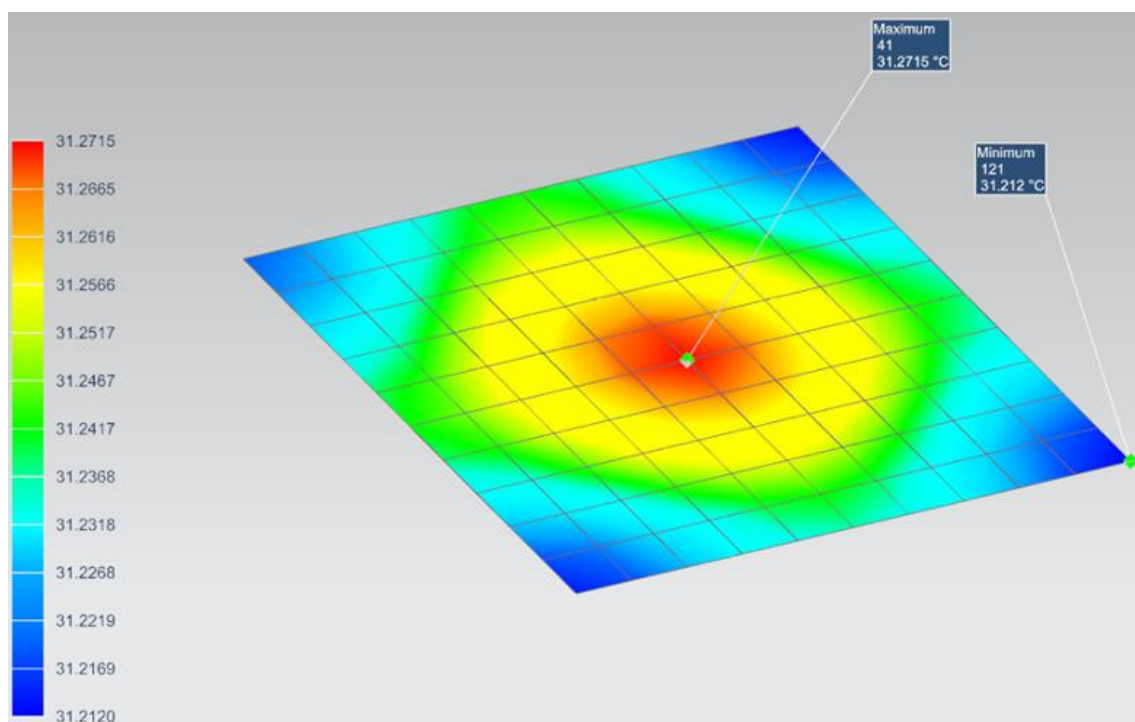


图 (10)