

本来这篇准备写B-2的具体设计，不过在前两篇溯源和演进中已经把飞翼构型的气动布局和控制原理都介绍过了，这篇就直接看图说话品细节。The devil is in the details - 魔鬼就藏在细节中。

整体布局

“横看成岭侧成峰，远近高低各不同”，这句诗用在B-2身上最贴切不过了，因为B-2的三个面差别是如此之大，正看一把刀，侧看一只鸟，俯看一块板。

从正面

看，机体上表面有三块隆起，分别是驾驶舱和左右进气道。飞翼中部的厚度相当大，从机腹炸弹舱门到驾驶舱顶部的高度为3.3米，机翼本体的厚度也有1.7米。进气道的隆起高度约为驾驶舱的一半，相互之间圆滑过渡，没有任何棱角或者折线。

不过B-2的翼展宽大，令整个飞翼的相对厚度非常小，从正前、前侧、侧后或者正后方看都薄如刀刃，不但雷达反射面积积极小，在很多环境下连目视特征都非常小。

> 1990年YF-23试飞期间，在跑道头等待一架同门的B-2降落

从侧面

看，B-2就显得矮胖了很多，因为机长只有21.03米，比苏-27还要短87厘米。

> 2020年3月17日，执行欧洲20-2轰炸机特遣部队任务的一架B-2在美国空军第48战斗机联队的F-15C和挪威皇家空军F-35A的护卫下飞行在冰岛上空。B-2的最大起飞重量接近后两者的6倍（170吨 vs. 30.8吨/31.7吨），侧面投影面积却显得最小。

上面这张著名的对比图让很多人认为B-2采用了仿生学设计，不过这只是气动布局上的巧合。B-2的侧面轮廓不是为了学老鹰，而是因为它部分采用了超临界翼型。

超临界机翼前缘钝圆，上表面平坦，下表面接近后缘处反凹，后缘变薄且向下弯曲，这样的构型可以推迟高亚音速飞行时机翼波阻急剧增大的现象，提高机翼的临界马赫数，减轻机翼结构重量。

> 很多时候流经B-2飞翼上表面的气流会被超临界机翼加速超过音速，在潮湿环境中产生雾化现象，旁边F-15E的机翼上表面气流就没有达到这样的速度

加上隆起的驾驶舱、鹰嘴型机头前缘和无垂尾的构型，就让B-2的侧面长成了老鹰的轮廓。

在现役所有大中型轰炸机中B-2的长度和侧面投影面积都是最小的：

正面雷达反射面积就更不用说了，下图是美国空军杂志去年发表的一幅示意图：

从顶部或腹部看，B-2终于显示出战略轰炸机的霸气，形如一只巨大的“飞来去器”。

B-52H翼展56.4米，后掠角35度，展弦比8.56，机翼面

积370米²，翼载586公斤/米²

；B-2翼

展略小为52.4米

，后掠角33度，展弦比5.78，机

翼面积却有478米²

，是B-52的1.29倍，翼载329公斤/米²

，仅为B-52的56%。飞翼构型不仅仅是最优的隐身设计，气动效率也远超普通后掠翼型。

B-2的驾驶舱、进气道等突出部件以及进气口和尾喷管等凹腔都位于上表面，下表面是完全平整光滑的一块。

在正常飞行状态下，来自地面的雷达入射波会被飞翼的前后缘遮挡，照射不到上表面反射面积较大的任何部件。

实际上B-2隐身性的一大来源就是它自身的尺寸。工作在S或者L波段的常规对空搜索雷达有可能发现战术级隐身飞机，因为它们的垂尾、平尾等部件尺寸较小，雷达波长超过某个阈值（操纵面边长小于特定频率波长的1/8）时会在这些部件上引起共振而产生强烈回波，导致雷达反射面积急剧增大。而B-2的尺度是F-22的4倍以上，对常规雷达波段天然免疫，只有专门针对它的尺寸开发的低频反隐身雷达才能起作用，而这些雷达通常探测精度较低，开发难度很大。

> 由12架B-2轰炸机和48架F-22战斗机组成的“全球打击特遣部队”担负美国空军的全球快速反应任务

机头

B-2的机头非常尖锐，实际上它的形状是上拱下平，但在很多角度看会觉得是下勾

的，一部分原因是下表面不对称的曲线造成的视觉错觉，另一部分则可能是让人自然联想到了鹰嘴的形状。

在所有资料中我都没看到设计师迪克·谢勒这一神来之笔的设计原理，个人猜测一是作为驾驶舱前部弧线的延伸保持隐身外形，二是为了扩大飞行员的下视视野，三是在一定飞行状态下抑制某种抬头趋势。

B-2四片式的风挡玻璃面积非常大，视野开阔。但是风挡玻璃是机头正向的大开口，形成一个凹腔式的强反射源。为了阻隔雷达照射波进入驾驶舱，同时屏蔽内部电子设备对外的电磁辐射，B-2的风挡嵌入了由极细的金丝编织成的屏蔽网，类似于我们日常见到的防蚊窗纱，只不过这是真金的。

为了不破坏隐身性能，B-2没有传统的皮托管式空速管和风向标式攻角传感器，而是在机头上下表面各布置了3组每组4具和蒙皮一体化设计的保形大气数据传感器 - “端口换能器单元 - PTU (Port Transducer Units) ”，向飞控系统提供关键飞行数据。

> 2019年8月29日在英格兰海岸上空由KC-135加油机拍下的B-2机头特写，当时这架B-2正飞往英国费尔福德空军基地进行轰炸机特遣队部署

再放大一点看细节，白色的圆圈是警示区，旁边标示着“当心高温”和“禁止插拔”，因为这些大气数据传感器对飞行安全至关重要，而且可以被加热到500度的高温以去除内部湿气，所以传感器的基座部分直接裸露出金属，和四周的复合材料蒙皮不同。

为了隐身B-2不能采用大型机常用的风挡雨刮器，而是和B-1B一样从发动机压气机引出高压气体吹除风挡上的水雾冰霜，三组传感器后面的两条开缝就是吹气口。

> 下表面的3组传感器分别位于前起落架舱门和主起落架舱前端

之所以每组都有4具传感器，是因为这是一套4余度系统，同组4具传感器测量到的数据被分别传输给4台飞控计算机。每台计算机独立计算来自6个不同部位的传感器所测得的空速、攻角、侧滑角和高度数据，4台中至少有3台计算结果相同时飞控系统才会依据这些数据向各气动控制面发出操纵命令。2008年2月23日在关岛起飞时坠毁的“堪萨斯精神”号机就是因为PTU读数错误造成的，下一篇将详细介绍。

在这些大气数据中测量最困难的是攻角和侧滑角，需要在机体不同位置测量局部静压，根据特定飞行条件下空气动压的分布相互比较后推算出外部气流的入射角。这种技术最初是为X-15高超音速研究机开发的，后来也运用在F-117和航天飞机上，当然航天飞机的目的不是为了隐身而是抵御大气层再入时的超高速和高温。

> NASA研制该系统的原始草图

机翼

B-2宽大的机翼内部是一个T字型的承力结构，内侧还得到发动机舱结构的加强，除了主翼梁采用钛合金，其余支撑结构都是复合材料。整个机翼前半部的全长几乎都是油箱（下图粉红色部分），机翼后缘也安装了油箱，总载油量75.75吨。

从特定的角度看，B-2的机翼前缘不是笔直的，这就是上一篇提到的前缘变截面设计，早期Block 10和Block 20的机翼前缘是由9段拼接成的，每段之间的连接处能看到明显的接缝，在Block 30上改为一体化前缘设计在内部连接才取消了接缝。

> 82-1071 “密西西比精神”号作为最后一架测试机时的状态，之后所有飞机都升级到Block 30作战构型

> 2019年摄于内利斯基地的90-0040“阿拉斯加精神”号，它是倒数第二架Block 10，升级为Block 30后机翼前缘已经看不到那些接缝了。机翼上表面的白线范围内是“Walkway - 可踩踏区域”，供地勤维修用，和SR-71上的红线作用一样。

在驾驶舱左侧上翼面有一个垂直朝上的大直径圆形光学窗口，周围刷着“不得踩踏”的警告，里面安装的是诺斯罗普

NAS-26天文/惯性导航系统

，它采用星图匹配式多星导航体制，跟踪三颗星的定位时间约为1分钟，姿态精度优于3”，定位精度小于350米。虽然天文导航的精度并不是最高的，但它完全自主被动工作，不依赖外部信息也不产生任何辐射信号，工作安全隐蔽，而且外界无法干扰，不受地域空间限制，和机载惯性导航系统交联可以修正后者的累积误差，达到很高的导航精度。这就是B-2不惜空间、重量代价加装大型天文/惯导系统的原因。

。

NAS-26的前身是安装在SR-71上的NAS-14V2天文导航系统，它可以自动定位、跟踪系统所储存的64颗恒星，昼夜均可正常工作，类似导航设备还广泛应用在洲际弹道导弹、潜艇和卫星上，要说缺点就是体积庞大且极其昂贵。

在B-2的前起落架舱两侧采用保型方式

安装了AN/APQ-181相控阵雷达

，雷达罩和机身蒙皮齐平，没有任何突出部件。它是休斯公司（1997年被通用汽车出售给雷神公司）专门为B-2研制的，采用无源体制工作在Ku波段，具备多达21种模式，包括地形跟踪、地形规避、加油机汇合、目标搜索/识别/跟踪、地面移动目标指示、合成孔径、武器投放、气象测绘等，甚至还具备海面搜索能力，虽然在诺斯罗普自家的AGM-137三军通用巡航导弹下马后B-2并不能携带任何反舰武器。

AN/APQ-181雷达系统总重955公斤，体积1.485立方米；每部雷达天线重260公斤，侧对前下方安装，运用了低截获概率技术，具备频率捷变和改变脉冲模式的功能，增强了雷达自身的隐身性。为了增强系统冗余度，机上安装了两套相同的雷达系统，各自包含5个“LRU -

线路可更换单元

”：天线阵列、发射机、雷达信号处理器、雷达数据处理器和接收机，除了天线外

其它部件既可以独立工作也可以互为备份同时为两部雷达工作。

2002年，雷锡昂被授予一项合同为B-2改进AN/APQ-181，将天线升级为电子相扫的有源体制，以改进系统可靠性，并消除B-2机载雷达和商业卫星系统之间可能的频率冲突（后者从07财年年开始采用预定的新频率后可能会受到来自B-2雷达系统的严重损害），整个升级工程于2010年完成。

B-2对隐身性能的追求达到了极致，连飞行防撞灯都采用了伸缩设计，正常飞行时升起突出于机翼表面，进入作战状态即缩回机翼内降低雷达反射面积，连防撞灯顶部的蒙皮都采用了和机翼前后缘角度相同的菱形设计，用平行原理减小雷达回波。

B-2的机翼后缘布置着9个气动控制面，几乎覆盖了除两个尾喷口外的全翼展宽度。

最外侧的开裂式阻力方向舵

作用最大，同时具备配平襟翼、方向舵和减速板的功能，最主要的作用还是依靠两侧的阻力差产生偏航力矩控制航向。因为机翼表面附面层的气动粘滞效应，阻力方向舵只有张开5度以上才能产生舵效，所以在正常飞行时这对阻力方向舵始终处于张开状态，以快速响应飞行状态的变化。进入作战状态后阻力方向舵必须闭合减小雷达反射信号并降低阻力，此时B-2只能依靠2台大间距发动机的推力差控制航向，无法做出剧烈机动动作。

> 2005年10月21日，常驻爱德华兹空军基地的“纽约精神”号在爱德华兹航空展上降落，在进近阶段频繁调整航向以对准跑道，左右阻力方向舵张开角度明显不同

> 触地后两侧阻力方向舵作为减速板打开到最大角度（接近180度）缩短滑跑距离

> 空中飞行时阻力方向舵保持张开5度以上

中间的二副气动面名称不同，实际作用类似，都是用于控制滚转的副翼。B-2在设

计阶段曾经在机翼下表面配置了一对开裂式襟翼，但风洞试验发现飞翼在低速大仰角起降阶段的升力非常大，完全不需要襟翼增升，于是第一架原型机就将襟翼焊死，生产型则取消了襟翼。最内侧的一对气动面相当于传统布局水平尾翼上的升降舵，控制飞机的俯仰。

> 在关岛安德森空军基地排队起飞的B-1、B-52和B-2，前两者都放下了面积巨大的襟翼，而B-2的气动控制面都是收起的

位于尾椎中线上的“海狸尾”在整个飞行过程中都处于激活状态，随时对阵风扰动做出自动补偿。它也具备控制俯仰的功能，在起降时通常只使用离重心和中轴线更近的“海狸尾”而不是它两侧的升降舵。

> 从B-2起降的照片中都可以看到除了“海狸尾”外三副副翼均没有放下

B-2的飞翼构型在低空会产生相当强大的地面效应，在飞机和地面之间形成一层空气垫，令起飞过程轻盈快捷，降落却相当困难，按B-2飞行员的说法“它更喜欢留在空中而不愿意落地”。所以B-2飞行员在降落的时候采用的是类似舰载机航母着舰的受控下坠式大角度下滑轨迹，动作比常规大型飞机粗暴。

很多人认为飞翼构型先天机动性不佳，实际上在全数字式先进飞控系统和9个气动控制面的配合下，静不稳定的B-2机动性相当好，盘旋、滚转都非常灵活。

进气道、发动机、尾喷管

B-2的进气道为固定式扁圆形亚音速进气道，唇口作尖齿修形，中间由一道纵壁分隔分别为每侧的两台发动机供气。进气道前下方开有一条缝隙，也采用锯齿边缘，这条缝隙既可以吸除附面层，也引入冷却空气用于降低发动机舱温度，减少红外辐射信号特征。

进气道的弯曲程度非常大，深入飞翼内部的发动机舱，从进气口完全看不到发动机的风扇。不过这样“扭曲”的流场也造成低速飞行时进气量不足，降低发动机推力，解决方法就是在进气道顶部增加了4个进气门，低速飞行时向后开启增大进气量，形如小动物的2只耳朵。

> 进气门也采用菱形外形减少反射面积

B-2安装了4台F118-GE-100双转子涡扇发动机，它是F110发动机（用于F-14/F-15 E/F-16，核心机来自B-1的F101）的无加力版，为B-2特别研制，由单级高压涡轮驱动9级高压压气机，2级低压涡轮驱动3级风扇，最大推力8.6吨，推重比5.94。它最大的优点不是推力大而是极高的可靠性，保证了B-2动辄40小时以上的洲际飞行能力。该型发动机的另一个用户是U-2S，型号是略微降低推力的衍生型号F118-GE-101。

比进气道更复杂的是它的尾喷管，B-2采用和F-117类似的口风琴式扁平尾喷管，位置从机翼后缘向前缩进了3.5米，地面雷达从下方完全无法直接照射到，即使从正后方看也只有窄窄的一条缝，比F-22的三元喷管更激进，以推力损失为代价获得最好的雷达隐身性能。

为了大幅降低红外辐射特征，从进气道下方引入的冷空气在尾喷口内和喷流混合；尾喷口上唇和机翼后缘都采用倒V字型，利用引射原理在尾喷口外部两侧形成涡流，加速周围冷空气和炽热喷流混合，再次降低排气温度；尾喷管后面的机翼上表面蒙皮采用不锈钢丝编制的热屏蔽层，扩大热扩散面积。

这些措施令B-2的尾部雷达和红外特征比B-1B这类常规构型的大型作战飞机要大为降低。

起落架与炸弹舱

B-2的三个起落架舱门都有双重作用，单片的前起落架舱门向前开启作为减速板；面积庞大的主起落架舱门则在起降时放下作为垂直安定面。

为了尽量减少机体表面的开口，大部分维护开口和界面都被集成在起落架舱门和炸弹舱门内，地勤人员站在地面就可以操作。

B-2在机体中部设有2个炸弹舱，深度很大，采用模块化结构可以选装一具“AARL - 先进旋转发射架”或者2部炸弹挂架。

> B-2底部3D渲染图，从左到右分别为主起落架舱、发动机舱和炸弹舱

> 2003年3月22日，怀特曼基地第509飞机维护中队的地勤人员正使用MHU-83C/E挂弹车将GBU-32 JDAM联合攻击弹药吊装到B-2的旋转挂架上，这架B-2即将跨过半个地球前往伊拉克参加“伊拉克自由”行动。

炸弹舱门的前后缘都有锯齿，开启时前部还会放下两片多孔扰流板产生涡流，协助弹药顺利分离。

在作战状态中炸弹舱门开启的短瞬间是B-2最脆弱的时刻，因为此时机体表面的隐身外形遭到破坏，炸弹舱内部没有涂敷隐身涂层，两个巨大的凹腔也会产生强烈的雷达回波，只有赶快投下炸弹开溜为上了。

B-2的载弹量非常惊人，官方公布的数据是大于18吨，低于B-52H的31.5吨和B-1B的23吨。采用旋转挂架时B-2可以携带16枚1吨级的GBU-31 JDAM GPS制导炸弹、JSOW联合防区外攻击弹药、JASSM空射隐身巡航导弹或者B61/B83核航弹。采用常规的BRU-61/A智能气动挂架可以携带80枚226公斤的GBU-38 JDAM或者216枚113公斤的SDB小直径炸弹。

> 2017年B-2装弹准备打击利比亚ISIS，一个弹舱内挂满了40枚GBU-38

实际上从挂架和挂点来算B-2可以挂载320枚SDB（80具BRU-61/A挂架每具挂载4枚SDB），但是此时加上挂架的总重将达到53吨，超过载荷极限3倍；大部分资料中提到的216枚SDB加54具挂架总重也有35.8吨，可见挂载潜力远远不止18吨。

> 1994年B-2进行大载弹量投掷测试

另外一个体现B-2载弹量的例子是可以携带“炸弹之母”。2007年美国空军就宣布将为B-2集成可以穿透60米钢筋混凝土层的GBU-57

MOP超级钻地炸弹

，2019年5月20日，空军官方第一次发布了高清晰度的视频，显示一架B-2以极短的间隔从2个弹舱中各投掷了一枚MOP。而一枚MOP弹长6.2米，重达14.9吨，从视频看炸弹离机后B-2甚至能保持平飞姿态没有什么起伏，这充分说明B-2的最大载弹量至少在30吨以上（甚至很可能是美国3型战略轰炸机中载弹量最大的），飞控系统对于飞行重量变化的控制能力也非常强悍。虽然B-52测试过MOP的投放，但实战中B-2是这种地下掩体粉碎机的唯一载机。

“幽灵”还是“精神”？

B-2在80年代中期规划采购132架，后削减到75架。冷战结束后B-2原始规划的作战任务几乎不复存在，迫于预算压力，老布什于1992年宣布将产量压缩到20架。1996年克林顿政府又耗资5亿将已于1993年退役的首架测试机AV-1号升级到Block 30标准，使最终具备完整作战能力的B-2数量定格在21架。1995年诺斯罗普曾向空军建议增产20架，飞离价格为5.66亿美元。

但是B-2的贵不仅仅是采购费用，1996年美国政府问责局公布了B-2的单机运营成本，达到B-1B的3倍（960万美元/年）和B-52H的4倍（680万美元/年）。1997年9月时B-2每个飞行小时需要119小时的地面维护，B-52和B-1B分别是53小时和60小时，每架B-2每个月的维护费用接近340万美元。B-2在暴雨时无法作战，因为雨水会损害隐身涂层。它的地形跟踪/地形规避雷达很难区分雨水和其它障碍物，导致

子系统在雨天无法使用，这一问题到1997年通过升级软件得到修复。

美国政府问责局在1997年测算整个B-2机队的采购总价为154.8亿美元，平均单价7.37亿美元，计入备件和软件支撑费用后上升到9.29亿美元。当时预计到2004年全项目开支将达到447.5亿美元，包括设计、采购、基础设施、备件和售后服务，分摊到21架上的单价达到空前绝后的21.3亿美元，比2艘洛杉矶级核潜艇还贵。到2010年每飞行小时成本攀升到13.5万美元，两倍于B-52和B-1。

如此高昂的成本加上性能上的缺陷令所有试图扩大机队的努力都在国会遭到失败，连参联会和空军高层都强烈建议不要再投资采购任何B-2，以免削弱现有机队的作战能力。

21架B-2共分4个子型号，分别是前6架试验机、第7到第16架Block 10、第17到第19架Block 20和最后两架Block 30。Block 10仅具备部分作战能力，只能携带无制导的MK-84常规炸弹和B83核航弹，无法投掷常规精确制导弹药，主要用于训练；Block 20可以发射GPS制导精确弹药和CBU-87/B集束炸弹；1997年服役的“宾夕法尼亚精神”号是第一架Block 30构型，雷达工作模式数量翻倍，增加了地形跟踪能力，可以投掷JDAM和JSOW，安装了之前未装的防御航电系统，实现了完全作战能力。从1995年7月开始到2000年6月，全部测试机、Block 10和Block 20都升级到了Block 30标准。

所有B-2都以“Spirit of”命名，和它的官方绰号“Spirit - 幽灵”一致。其中19架都采用了美国的州名，比如AV-7号“Spirit of Texas”，AV-15号“Spirit of Alaska”，这显示出B-2在美军战略资产中的分量，过去只有海军的战列舰和核潜艇采用州名命名。

> 冰天雪地中的“阿拉斯加精神”号

唯二的例外是上面提到的第一架也是最后一架AV-1号“Spirit of America”（也就是1988年11月22日B-2首次露面时被偷拍那架）和AV-19号“Spirit of Kitty Hawk”。2000年7月14日出席AV-1命名入役仪式的时任美国空军空战司令部司令John Jumper上将解释：“Spirit of America”不仅代表空军官兵，也代表了全体美国人民。

而AV-19号用“Kitty Hawk - 小鹰”代替了北卡罗莱纳州，向航空先驱莱特兄弟致敬。位于北卡的小鹰镇正是莱特兄弟花费了4年时间进行航空飞行试验并完成历史性首飞的地点，在人类航空史上具有开创性意义。已经退役的“小鹰”号航母同样是为了纪念莱特兄弟而命名的。

> 2003年9月17日，“小鹰精神”号飞抵关岛参加安德森空军基地参加“龙的王冠49”演习

看到这肯定有读者会说我把B-2的机名翻译错了，应该叫某某幽灵号。对于这个Spirit应该怎么翻译我认为是值得推敲的，因为英文单词spirit有多种含义，包括精神、灵魂、神灵、幽灵等。绝大多数中文都把B-2的名称翻译为某某幽灵号，作为隐身轰炸机它隐藏身形、神出鬼没，这个翻译也十分贴切。

不过从美国官方对B-2各架飞机命名时的解释来看，我认为某某精神号似乎更能反应他们命名的本意。比如在波音官网上介绍B-2项目的页面是这样写的：在生产高峰的1991年，B-2是波音最大的军机项目，雇佣了约1万人.....1993年12月17日，第4架生产型B-2在西雅图被命名为“Spirit of Washington”，以向为B-2工程做出巨大贡献的华盛顿州人民致敬。上面提到的最后一架生产型被命名为“Spirit of America”以代表全体美国人民，这同样是一种敬礼，翻译成“美国精神”号比“美国幽灵”号更准确。

另一架著名的Spirit飞机就是林德伯格首次单人飞跃大西洋所驾驶的“Spirit of St. Louis”，中文都毫无疑问地翻译为“圣路易斯精神”号，因为它代表了航空事业早期的开拓精神。

B-2传承的正是老诺斯罗普对飞翼构型孜孜以求的探索精神。

下一篇应该是B-2系列的最后一篇，参观极少曝光的B-2驾驶舱内部，以飞行员的视角体会驾驭B-2的飞行感受，介绍B-2的老巢怀特曼空军基地、B-2不同寻常的作战部署情况以及“堪萨斯精神”号坠机的原因。