

# 双螺旋步行桥

双螺旋桥是新加坡一座地标性步行桥。它是由不锈钢建造的、两个朝相反方向环绕的螺旋结构所构成的一条行人步道。其设计灵感来自于 DNA 的螺旋状几何排列方式，体现生命延续和更新成长的含义。这座长 280 米的步行桥是世界第一座双螺旋式人行桥，是一条长 3.5 公里的海滨步行大道的组成部分，连接滨海中心区、海滨区和一座大型娱乐场 / 酒店度假村。这是一座重量非常轻、几乎完全采用双相不锈钢建造的桥梁。

## 材料选择



图 1：双螺旋行人桥全景

新加坡的城市人口密集，当地规划部门非常重视高品质的城市设计，鼓励设计师采用可持续、低维护和美观宜人的建筑材料。而这对于处于炎热、潮湿、沿海工业化环境的地区来说，具有较高的挑战性，因为这样的环境对结构和建筑所用的材料都有很高的要求。不锈钢为设计师满足这些要求提供了一个良好的选择，因为不锈钢是耐腐蚀的材料，如果牌号选用得当，则是一种经久耐用的低维护解决方案。

这座桥所用的绝大部分材料，包括螺旋结构和支撑结构，均为 S31803 (1.4462) 双相不锈钢。与奥氏体不锈钢相比，双相不锈钢力学性能更佳。

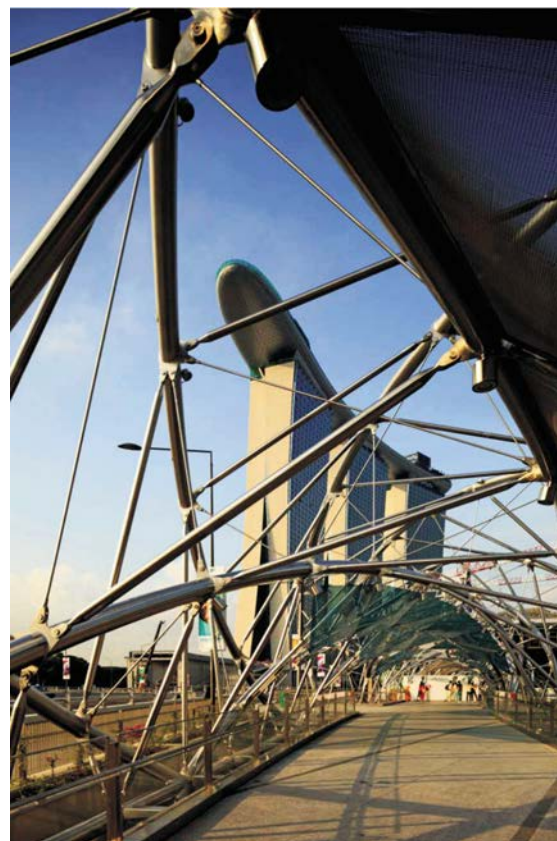


图 2：行人透过双相不锈钢构件看到的景象

双相不锈钢的 0.2%屈服强度为  $450 \text{ N/mm}^2$  的,而奥氏体不锈钢此值为  $220 \text{ N/mm}^2$ 。在设计中如果利用双相不锈钢的这种强度特性,就能设计出高效、轻重量和经济性好的结构,可实现减重(与碳钢相比)。双相不锈钢和奥氏体不锈钢一样,也有各种耐用的建筑装饰表面供选用。

对于新加坡所处的环境条件,所选的不锈钢必须具有长期的优异的耐腐蚀性。几个不锈钢牌号都可以满足这个要求,但双相不锈钢(1.4462)不但有很好的耐腐蚀性,还同时满足了其它方面的要求,包括容易买到、成本效益好、易于加工制作以及复合结构/建筑方面的要求。它还具有良好的疲劳强度以及很高的耐应力腐蚀开裂的能力。

就此双螺旋人行桥而言,双相不锈钢的成本等同于使用碳钢所可能产生的成本。所需不锈钢的数量明显低于碳钢桥所需要的数量。而且,成本分析表明,在超过 100 年的设计寿命期间,不锈钢是比碳钢成本更低的方案。成本分析考虑了初期的建造成本,包括材料、制作和安装成本并考虑了在桥梁使用寿命期内的维护成本。对于碳钢来说,由于需要重新刷漆,所以维护成本相当高,而不锈钢不需要大量的维护,所以维护成本低得多。

双相不锈钢管材和板材按照轧制表面状态交货。整个桥梁选用了不同种类的表面,一个螺旋为喷砂表面,另一个螺旋则为高度抛光的表面。

## 设计

该项目从一开始就提出了多项挑战。方案设想让人行桥的平面图呈现弧形弯曲状,以便在两面与海滨大道形成流畅完美的连接。另外,方案还设想建造一种轻量结构,与旁边外观很厚重的 6 车道车行桥形成对比。由于地处热带气候,方案还要求步行桥能够遮阳挡雨。这些因素结合起来,再加上希望创造一个地标性建筑,由此形成了这一新奇而独特的设计方案。

桥梁的设计采用 BS 5950<sup>14</sup>标准并结合了 SCI<sup>15</sup>的设计指南。设计出来的人行桥拥有 2 个螺旋形构造,它们一起作为管状桁架来承受设计载荷。这种设计方法的灵感来源于曲线式的 DNA 结构。这两个螺旋结构只在桥面板下的某一个位置相互接触。用一系列轻量支柱和支杆以及加强环使这两个螺旋形结构保持相互分开,形成一种刚性结构。这种构造方式坚固,对于曲线形的结构很适合。这座不锈钢人行桥两端是混凝土桥墩。



图 3: 穿行于桥上看到的景象,可看到遮挡板  
(照片来源: Arup)



图 4: 两个朝相反方向环绕的螺旋构造的复杂外观  
(照片来源: Arup)



图 5: 连接部分包括焊接和螺栓连接  
(照片来源: Arup)

这座长 280 米的行人桥由 3 个 65 米长的桥跨和 2 个 45 米长的端跨构成。如果所用螺旋钢结构从两端拉直,则长度可达 2.25 公里。主螺旋和次螺旋沿相反方向螺旋延伸,其总直径分别为 10.8 米和 9.4 米,约 3 层楼高。外层螺旋由 6 根(直径为 273 毫米的)钢管构成,这些钢管等距布置。内层螺旋由 5 根直径同为 273 毫米的钢管构成。跨设在河流之上的这座桥梁由重量超轻的锥形不锈钢支柱来支撑,支柱内浇灌了混凝土。这些支柱呈倒三角架形,支撑桥梁使其高于每个桩帽。这座人行桥的总重量均 1700 吨。

设计方案的最后一个部分是一系列卵形悬臂结构的观景台,每个观景台能容纳约 100 个人,这些观景台在海湾一侧伸出桥外,便于观看水上赛事。桥板也采用 1.4462 不锈钢建造,并在设计上进一步优化了行人对这座桥的体验,让人们体会到这是一处新的城市景观,是新加坡旧主城区与新城之间的重要纽带。

### 照 明

由于本桥的设计灵感来自于 DNA 结构,因此建筑照明特色也应当强调各类造型和曲线。所以,螺旋结构上安装了一系列动态闪烁的多彩发光二极管(LED)照明灯。位于外侧的照明灯突显了规模宏大的结构曲线,而另一些分散布置的照明灯阵列照亮了内部的玻璃顶篷和钢网,形成了一张动态变化的灯膜。内螺旋采用白色照明灯来为行人照亮道路。这些照明灯与不锈钢部件的金属表面和色彩相互配合,效果尤佳。

### 分 析

为了探究可能的方案,设计团队采用内部专用结构优化软件完成了大量数值分析工作。这些研究工作使设计团队得以发现连接这两个螺旋结构的方法。而且还确保了钢结构型材在支撑桥板、遮蔽顶篷和灯具方面发挥出最大的能力。在确定材料之前,甚至在最终确定设计方案之前,设计团队采用三维软件对人行桥进行了完整的建模,以便使其形状和几何相容性得到形象化的呈现,并呈现了行人在桥上的体验。还进行了非线性分析以评估不同载荷状况下的响应,并分析了诸如振动这样的可靠性要求。

为了考察桥梁结构在失去一个螺旋构造或支撑构架时(由于事故或故意破坏)将发生的变化<sup>[9]</sup>,进行结构整体稳固性的研究也十分重要。



图 6: 人行桥细节示意图  
(照片来源:Arup)

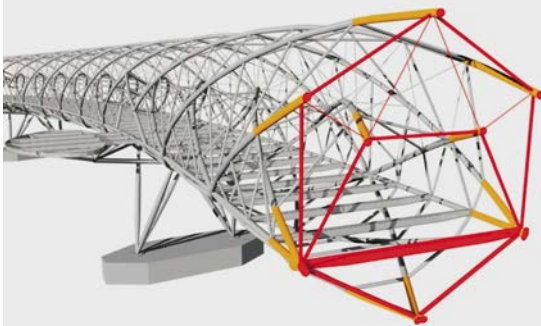


图 7: 用于作用力分析的三维模型  
(照片来源:Arup)

## 制作和安装

钢材由欧洲供货商发运至新加坡，然后在马来西亚 Johor 的一个车间进行加工。桥梁的主要部件，诸如卡箍、板梁、支柱和观景台都采用板材和管材进行加工制造。桥梁部件按照最大运输尺寸进行加工，并考虑了新加坡的道路运输限制。这些部件的平均长度为 11 米。为了尽量减少延误以及尽早发现任何问题，在部件发运至现场之前，在制作车间进行了桥段的试装配。

这些发自欧洲的不锈钢材料包括深度定制的管材和板材，用于满足项目严格的产品和物流要求。安装期间的主要难题是保持一段 50 米宽的水运通道，以及在水运船舶上方保持安全的净空。为了便于这座永久性桥梁的建造，还架设了一条跨越水道的临时性钢结构桥。螺旋人行桥的安装工作从较低的桥板开始，最后完成桥梁最高处的建造。其中包括现场焊接的主螺旋和次螺旋结构的安装，以及轻型支撑杆和拉杆的安装，这些支撑杆和拉杆将两个螺旋构造用销钉固定连接在一起。不同部件之间的连接作业是最大的安装难题，进行经常性的监督和核查是必不可少的。



图 8: 竣工后投入使用的步行桥  
(照片来源: Mah Guan Pang)

本案例信息由 Arup 友情提供

## 参考资料和文献

- [1] BS 5950-1:2000 Structural use of steelwork in building. Code of practice for design. Rolled and welded sections.
- [2] Structural Design of Stainless Steel, SCI, 2001.
- [3] Carfrae T. and See L-M. The Helix Footbridge. Proceedings of the Conference on Structural Marvels, Singapore 2010.

结构用不锈钢网上信息中心:  
[www.stainlessconstruction.com](http://www.stainlessconstruction.com)

## 采购详情

客户: 新加坡城市发展局  
设计者: Cox Group (考克斯集团)和 Architects 61(六一建筑设计公司)

土木和结构  
工程师: Arup (奥雅纳)  
主承包商: Sato Kogyo Pte Ltd (佐藤工程公司)和 TTJ 设计工程公司

本系列结构用不锈钢案例研究由 Team Stainless 赞助

