

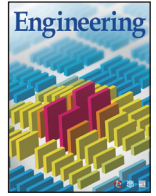


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

# Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Bridge Engineering—Feature Article

## 桥梁形态与美学

邓文中 <sup>a,b,c</sup>

<sup>a</sup> Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China

<sup>b</sup> US National Academy of Engineering, Washington, DC 20001, USA

<sup>c</sup> T.Y. Lin International Group, San Francisco, CA 94104, USA

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 2 June 2017

Revised 6 September 2017

Accepted 13 December 2017

Available online 15 March 2018

#### 关键词

形态

美学

桥梁

概念

设计

环境

### 摘要

桥梁设计的目的，是以业主所能接受的成本在保证所建造桥梁安全的前提下，确保其典雅美观并满足一切功能性需求。一处成功的桥梁设计必然是自然的、简单的、独创的，且其设计应当与周围环境相得益彰。美学并不是桥梁设计的附加属性，而是设计中应当考虑的重要因素。在概念设计阶段，我们应当兼顾桥梁的结构与美观。为此，桥梁设计工程师必须对结构理论与桥梁美学有深刻的理解。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

人类因文明的存在而与野生动物不同。例如，今天仍漫步在地球上的大象，其生活方式与它们千年前的祖先相差无几，但因为文明的存在，我们人类得以极大地改善自己的生活方式。

文明是什么？《韦氏词典》将“文明”定义为“科学与技术所带来的现代舒适和便利”。其中，便利可通过技术进步实现，然而，舒适只能通过提升我们的环境质量而得以实现，这包括我们周遭事物的形态与美。如若不能确保我们的环境质量，就不能确保我们的生活舒适度。

大约2000年前，伟大的建筑师马可·维特鲁威·波利奥曾向罗马皇帝提议：“建筑结构宜安全、实用、美观！”[1]这些要求在今天看来仍然行之有效，但我们更需要考虑经济因素。因此，我们今天的标准应当是：“建筑结构应当安全、实用、经济且美观！”

对于维特鲁威而言，由于他为皇帝工作，因此其并不需着重考虑建筑成本。但今天的建筑工程师却没有那样的奢侈体验。除此之外，我们对于一座成功桥梁、一个优良结构的定义却未曾改变。而桥梁之美也一直作为人们对成功桥梁的基本要求之一。

一座成功的桥梁应当是“安全、实用、经济且美观”的，该要求确保了桥梁的舒适与便利。

E-mail address: [mtang@tylin.com](mailto:mtang@tylin.com)

2095-8099/© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: Engineering 2018, 4(2): 267–276

引用本文: Man-Chung Tang. Forms and Aesthetics of Bridges. *Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.12.013>

## 2. 功能决定形式

一座桥梁是一条公路或是一条城市街道的组成元素，而这些公路、街道又是一座城市或一个社区整体规划的组成元素。因此，桥梁的功能并非由桥梁工程师定义。一座桥梁真正被设计与建造的原因是出于人们跨越河流或山谷或是连接两个地点的需求。该需求真正驱使着人们产生设计桥梁的目的，而该目的则最终决定了桥梁的功能。桥梁的功能建立在交通规划的基础上，并与社会经济和城市研究成果相结合。对于一座设计使用寿命已确定的桥梁，上述研究可以帮助人们预测其在交通系统中所发挥的作用。交通工程师根据预测的交通流量和设计限速确定车道的数量。当地的地形地貌与其他当地条件则决定着所需桥面的几何形状，包括长度、最小跨距、建材最高等级和最小间隙等参数。

桥梁功能一旦确定，桥梁工程师就会选择桥梁所采用的形式，以满足其给定的功能——遵循着“功能决定形式”的箴言。然而在构建桥梁形式之前，桥梁工程师还必须考虑适宜的桥梁建造材料。上述过程如图1所示。

至于美学，它是最终确定桥梁设计的另外一个因素。我们不会制造丑陋的桥梁，它会污染环境。

## 3. 桥梁形态的历史演变

全世界的所有桥梁均可分为四类：梁桥、拱桥、斜拉桥以及悬索桥。所有这些主要的桥梁类型几乎都与人类文明一样古老。部分原始形式的桥梁，均是在千百年前就被人类建造。然而，今天更复杂和多功能的桥梁形式的演变可以追溯到不同时期的各种建筑材料的引入。

从大约4000年前直到19世纪初，人们可用的建筑材料只有木材和石材。树干上的木材可以用于建造桥梁，因此，人们伐木以造桥。当面临的跨度较大时，人们则建造石墩，以便可以使用树干在墩间横跨；然而，这些

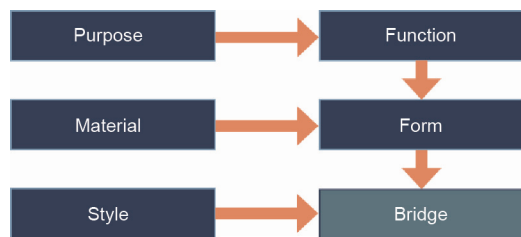


图1. 桥梁设计流程图。

桥梁并不坚固。其使用寿命与桥梁跨度均不甚理想。

石材的强度比木材的大很多，同时它的耐候性也更强。埃及和希腊所有的早期建筑均是由石材所建。由于石材不能承受由弯曲造成的高拉应力，因此这些建筑物柱子的间距非常近。此外，砖作为一种压缩材料，在随后的某些应用领域中替代了石料。

拱桥是罗马人和中国人最大限度地利用石材的抗压强度的巧妙发明。罗马人通过将连续的拱门连接在一起建造一个桶形拱顶，从而形成一个巨大的内部空间。罗马人运用圆顶、拱门、拱顶等元素创造了许多壮观的建筑。拥有43.3 m直径圆顶的万神殿曾长踞世界“最大的圆顶建筑”的美誉达1800年之久。罗马人利用拱型建造了许多桥梁和高架桥，其中一些今天依然存在。

铁具有比石材更大的强度和可成型性，铁链可以用于建造铁索桥，这是一种“应力带桥”，即悬索桥的早期形式。据报道，第一座主要的铁索桥诞生于公元60年左右的中国——云南省的兰津桥[2]，其主桥跨度约60 m。中国建造了许多铁索桥，其中一些我们在今天仍可以一睹其风采。中国最大跨度的铁路桥梁之一——泸定桥[2]，建成于约400年前，铁链也被用作该悬索桥的主缆；然而，这些铁索桥往往结构较小，因为与石材类似，铁缺乏较强的张力。

钢材的应用真正革命性地推动了桥梁建设的发展，因为钢材既可以承受高压也可用于压缩。19世纪中叶钢铁的大规模生产成为可能，工程师能够建造大跨度的梁桥、桁架桥以及大而细长的拱桥。通过将钢筋与混凝土相结合，我们也有了建造更多大跨度钢筋混凝土桥的能力。

高强度钢丝经冷拔工艺生产。这些高强度的钢丝使得大跨度悬索桥的建造成为可能。在高强度钢丝大规模商用之前，人们曾采用钢链与榫卯结构来建造悬索桥，但这种桥梁的跨度是有限的。

高强度钢丝的引入也极大地刺激了斜拉桥的发展。若钢缆自重导致下垂过大，则其无法发挥作用。桥梁的下垂程度是钢缆中所受张力的函数。因此，只有当钢缆在永久负载条件下能承受很大的力时，钢缆才能有效，这只有在钢缆由非常高强度的材料制成时才有可能，这样它仍然可以保留承载活载的能力。高强度钢丝还改善了预应力混凝土的经济性与多功能性。因此，许多预应力混凝土桥梁也已建成。

显然，特定材料的选用影响着桥梁形式的选择。因

此，桥梁的发展可划分为两个时期：拱桥时代和当代四种桥梁的时代。拱桥时代跨越了4000年，而当代四种桥梁时代则只有不到200年时间。

展望未来，诸如碳纤维、超高性能混凝土和纳米材料等诸多新材料可用于建造全新的桥梁形式。然而，这些材料尚未完善到可以进行大规模应用。因此，我们可以说，在过去的四五千年中，人类只发明了四种桥梁形式，如图2所示。

#### 4. 基本构件——桥梁结构的基础

尽管梁桥、桁架桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥（图3）这五种基本形式可能看起来彼此非常不同，但这些桥梁类型中的每一种却又仅由三个基本构件组成：轴向、弯度和曲度。通过重组与混合这三种基本构件，我们可以

创建不同的桥梁结构。

例如，桁架桥主要由轴向构件组成。弯度构件可能存在，但它是次要因素。斜拉桥亦是如此。然而，拱桥通过曲度的变化来承载其负荷，悬索桥的主缆也是如此。而相比之下，梁桥则主要是由弯度构件构成（图4）。

#### 5. 工程学是一门艺术，不是一门科学

工程学不是一门科学。科学的目的是发现独一无二的真理。因此，科学是死板的，因为我们不可能改变真相。科学不论对错，没有“好”或“坏”的科学。与科学家不同，工程师不是去发现，而是根据他们的主观经验和偏好去创造事物。因此，工程学是灵活的，这种灵活性使得工程师能够在一定的范围内选择甚至去创建满



图2. 钢铁的引入促进了新的桥梁形式的发展。(a) 铁没有改变桥梁形式（普里查德的煤溪谷铁桥）；(b) 高强度钢丝促进了新的桥梁类型的产生；(c) 应用高强度钢丝后，桥梁工程开启了全新的篇章。





图3. 桥梁类型。(a) 阿科斯塔桥 (梁桥); (b) 旧金山-奥克兰海湾大桥 (桁架桥); (c) Crooked River Bridge (拱桥); (d) Talmadge 纪念桥 (斜拉桥); (e) 金门大桥 (悬索桥)。

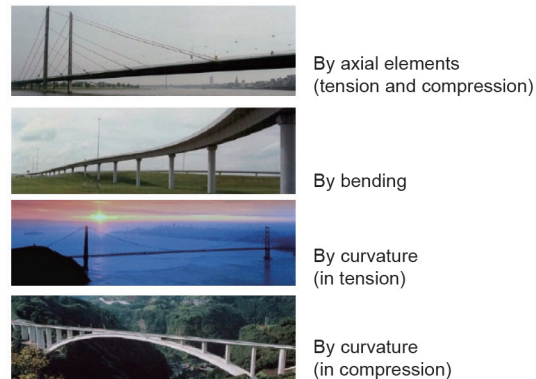
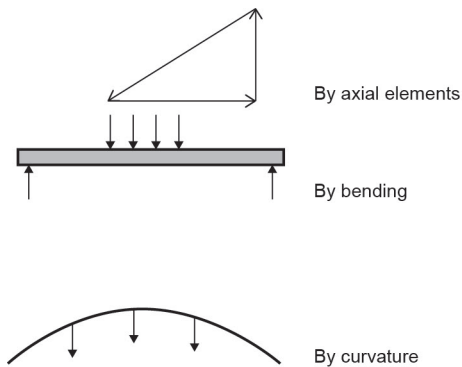


图4. 桥梁结构的基础。

足桥梁给定功能的新的结构形式。这个选择和创作过程就是一门艺术!

工程也不是一门应用科学。在建造金字塔和长城时, 我们应用了什么科学呢? 科学只是工程师用来判断和解释结构行为的简单工具。除了理解科学之外, 工程师还需要掌握经济学、美学和政治学等许多其他领域的知识和技能, 才能成为成功的桥梁设计师。

在工程领域, 我们的问题总是这样的: “它可以运行吗?” 工程作品可以是好的或是坏的, 但从不分对错。

我们已经知道, 所有可能的桥梁形式仅由三个基本构件组成: 轴向、弯度和曲度。而桥梁工程的艺术在于知道如何整合这些元素, 以达到满足“安全、功能、经济和美观”特征的基本要求的最佳结构。这与烹饪类似, 厨师以某种特定的方式结合各种配料, 使此时食物的味道最佳。

然而, 在实践中, 形成一个良好的组合方案需要大量的经验和练习, 就如同在烹饪、弹钢琴或打高尔夫球

表1 世界每种类型桥梁的最大跨度

Bridge type	Name	Span (m)	Country	Year of completion
Girder	Shibanpo Yangtze River Bridge	330	China	2006
	Stolmasundet Bridge	301	Norway	1998
	Presidente Costa e Silva Bridge	300	Brazil	1974
Arch	Chaotianmen Yangtze Bridge	552	China	2009
	Lupu Bridge	550	China	2003
	New River Gorge Bridge	518	USA	1977
Suspension	Akashi Kaikyo Bridge	1991	Japan	1998
	Xihoumen Bridge	1650	China	2009
	Great Belt East Bridge	1624	Denmark	1998
Cable-stayed	Russky Bridge	1104	Russia	2012
	Sutong Yangtze River Bridge	1088	China	2008
	Stonecutters Bridge	1018	China	2009

一样。虽然基础很简单，但演奏好钢琴则需要多年的努力和练习。

此外，我们能做的事情也有限制，比如，尽管我们刻苦练习，钢琴也不可能发出人声。因此，在实践前理解这些限制至关重要。

## 6. 跨度

当我们试图建桥跨越大江或海湾时，总会不禁自问：“我们可以建造多大跨度的桥梁呢？”回顾历史可能会为我们回答这个问题提供一些帮助。表1列出了当今世界每种类型桥梁最大跨度的前三位。图5则演示了每种类型桥梁的最大跨度是如何演变的。所有这些曲线都显示出一个趋势：桥梁的最大跨度在增加。

正如我们所知，艺术发展水平随着时间的推移而不断变化，所以我们应当以谦逊的态度预测未来。新材料如复合材料等在建筑领域显示出一定发展潜力，然而，这些新材料在实际应用前需要更多的测试和实际性能记录，才能被用于大跨度的桥梁设计与施工；建造桥梁是一项重大投资，这需要我们以谨慎的原则保守处理。

鉴于目前可用的材料，高强度钢仍然是适用于大跨度结构的唯一的真正高强度材料。因此，我们的问题变成了：“钢桥的极限是什么？”

目前可用于桥梁建设的钢材均具有较高强度。在20世纪60年代后期，德国杜伊斯堡-诺伊恩坎普桥（Duisburg-Neuenkamp Bridge，一座斜拉桥，图6）采用了高强度的钢材，尤其在受压构件处集中使用。该钢具有约700 MPa的屈服强度。这座桥的表现一直很好，因此我们可以考虑将这种钢材用于未来的桥梁建造，特别是用

于受压构件的建造。今天，我们可以生产断裂强度高达2000 MPa的钢丝。基于这些钢丝的惊人强度，悬索桥的最大跨度可达10 000 m，斜拉桥的最大跨度可达5500 m，拱桥的最大跨度可达3500 m。梁桥的极限跨度没有明确的数据标准。然而，出于实际情况与经济因素考虑，可能将桥梁跨度限制在约550 m。

有能力建造一座大跨度的桥梁在技术层面并不意味着我们可以自由选择一个并不实际需要的任意长的桥梁跨度。更大的跨度通常花费更多。由于经济性是桥梁设计成功的基本考虑因素之一，所以我们必须以正确的视角来看待它。因此，我们应当将桥梁的成本作为设计的一部分。如果一座桥梁不经济，那么它将不被建造。

## 7. 价值与成本

如果桥梁的价值等于或高于其成本，那么该桥梁是经济的。桥梁的价值是多组成部分的总和，通常包括功能价值、社会价值与美学价值。

桥梁的功能价值是显而易见的。通过桥梁，用户可以减少从A点到B点所需的时间。这种便利节约了金钱和时间，能够用可计量的账面价值来表示。将桥梁对一个用户的价值乘以用户数量可以得出桥梁的功能价值。随着人们生活水平的提高，这种便利的价值也在增加。过去不经济的桥梁项目今天可能变得经济。

一座桥不仅连接地点，也连接人。很多时候，一座桥梁的建立标志着两个群体之间的统一、友谊或其他联系。这种象征意义的价值难以用数字来确定；然而，在某些情况下，它可能至关重要，甚至可能是建造该建筑的唯一原因。

回想一下这句古谚：“情人眼里出西施。”尽管对于

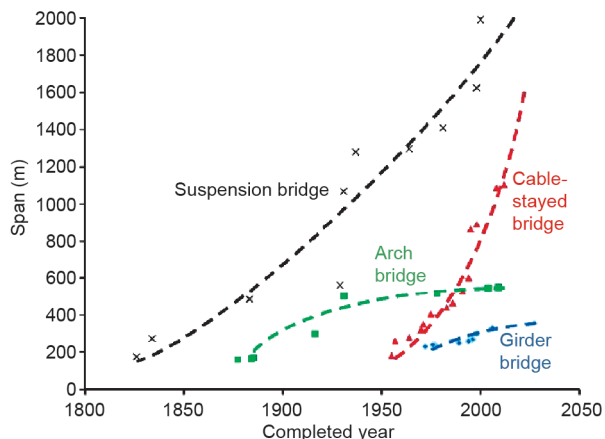


图5. 各种桥梁形式的里程碑式最大跨度值。



图6. 杜伊斯堡-诺伊恩坎普桥。



美的欣赏是非常主观的，但它仍具有巨大价值。比如，大多数人不会选择穿最便宜的衣服；除了成本的考量之外，人们选择搭配服装，因为他们想要穿得漂亮，或者至少穿着适宜。我们装饰自己的家，因为使它更美丽能增强我们对于生活的热爱。我们只是为了欣赏美丽的景色和优雅的环境便心甘情愿地踏上一段段旅途。毫无疑问，无论是有意还是无意，人们总是愿意为美学付出代价。一栋坐落于美丽社区中的有吸引力的建筑可以收取更高额的租金。因此，在商业建筑的内外设计中，美学一直是我们要考量的首要因素。

由于大多数桥梁都是以税款支付建造的，所以它们是由纳税人或公民间接支付修建而成。因此，桥梁工程师有责任了解纳税人会对桥梁设计有何期待。考虑到大多数纳税人愿意为日常生活中的美学而付款，因此，工程师向纳税人交付最廉价的桥梁是没有道理的。此外，包含美学元素并不总意味着花钱。更加重视细节也可以显著改善结构的外观。

在一场去巴黎的旅行中，人们通常会参观艾菲尔铁塔、卢浮宫及其举世闻名的绘画和雕塑、凯旋门、亚历山大三世桥及其他美丽的建筑（图7）。我们不难发现，其中一些建筑几乎没有功能价值，如凯旋门。然而，游客们和当地人都深深铭记、热爱着这些建筑，因为它们带给人们美的享受；我们并不需桥梁工程师的专业知识便可领略到塞纳河上的桥梁设计的美，可以体会到设计师在美学层面的深思熟虑。我们难以想象如若塞纳河上的所有桥梁都以最便宜的方式建造会是什么样子。由此产生的巴黎也一定不会是今天我们所知的巴黎！

显然，估计一处地标之美的确切价值是非常困难的。然而，在2012年，意大利蒙扎和布里安扎商会努力做到了这一点。他们评估了世界上最负盛名的地标，并得出结论认为艾菲尔铁塔对法国经济的价值约为5440亿美元。而由于2012年法国GDP总值为33 800亿美元，我们估得2012年艾菲尔铁塔的经济价值高达法国GDP的16%！

## 8. 桥梁之美

一处成功的桥梁设计必然是自然的、简单的、原创的，并与周围环境相得益彰（图8）。与其周围的建筑相比，桥梁通常是一个引人注目的庞然大物。因此，它应当更自然，且充分适应周围的地貌环境。其设计也应简洁而非肤浅。如果一处设计可以通过便于理解的形象向公众传达其工作原理，那么其设计就会看起来更加自然。

对于艺术品而言，唯一性是一项重要因素。同样，每座桥梁本身都应是独一无二的。每一处结构设计都与其本身的需求和特殊的环境相适应。而每座桥梁的设计都应基于其特定的条件。因此，每座桥都应当是原创的，有自己的风格、特色和设计。与画作相似，只有一座原创的桥才是有价值的。

与周围环境相和谐并不一定意味着桥梁必须迎合环境、追求完全融合。而更意味着建筑应当与环境相适宜，如果设计得当，常常会使桥梁从周围环境中脱颖而出。另外，在使用过程中，桥梁会被全视角观察，因此，仅仅从单一角度看起来不错的设计是远远不够的。

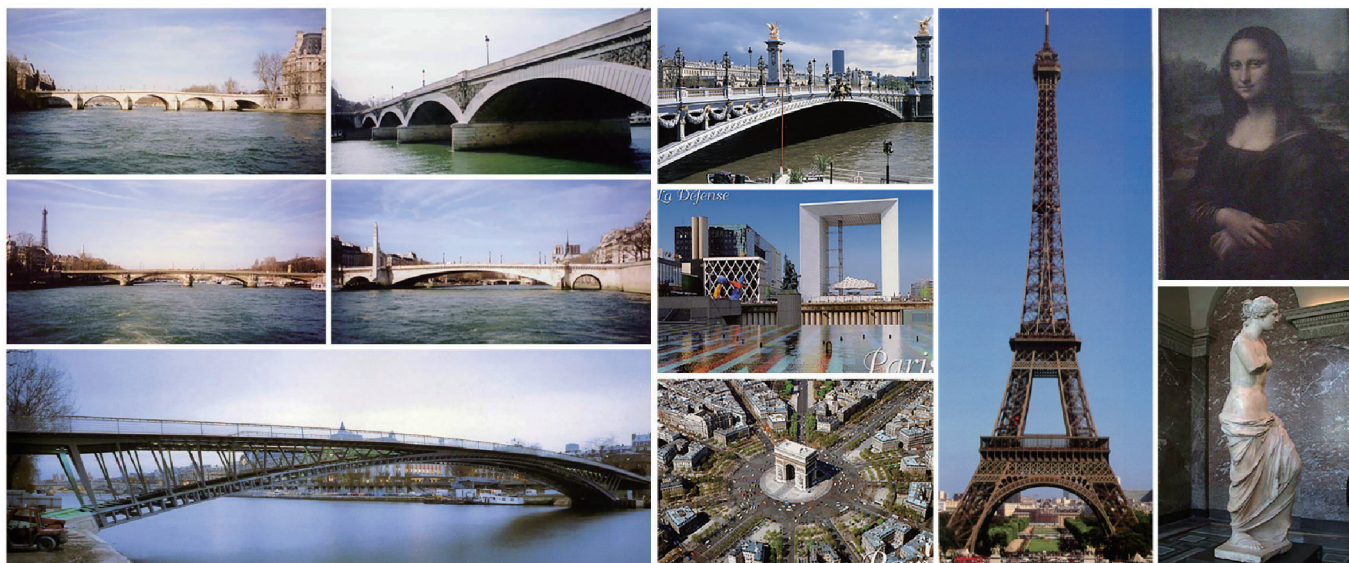


图7. 巴黎的典型地标剪影，其侧重于结构之美和其他艺术形式的美学构建，包括塞纳河上的桥梁。



图8. 一处成功的桥梁设计必然是自然的、简单的、原创的，并与周围环境相得益彰。

## 9. 桥梁美学是什么

一座桥主要由梁、桥墩、塔楼(有时会有钢缆)组成。大梁相对水平，而桥墩和塔楼通常是垂直的。一座桥通常有两个桥台，分别位于桥的两端。这都是需要我们讨论的内容。通常我们认为桥梁美学元素包括以下方面：

- 桥梁拱腹宜向上弯曲以避免外观下垂。腰梁部的曲线应当平滑。
- 悬链线、圆形和抛物线拱形等各个设计元素应各具姿态。
- 桥梁外形通常是笔直的，弯曲的桥总给人以不稳定的感觉。然而，如若对曲线精心处理，从不同的角度看，曲线的恰当应用会为桥梁创造完全不同的艺术效果。
- 对于箱梁而言，倾斜的腹板设计看起来更加轻巧，然而，当桥梁形态为曲线时，该设计的应用可能会造成复杂而混乱的线条。
- 对称的设计看起来更加稳健、传统，但不对称的设计提供了更加多变的外观。
- 观察者可能位于桥上、桥下，或从周围的任意角度看桥。从一个特定的角度去赞美桥梁设计而忽略其他角度的行为是不可取的。
- 桥墩的设计通常用以展现负载路径的交通流量。纹理设计则用来减少外观的单调性。
- 箱形梁上的长悬臂板会产生阴影，这会使梁看起来更加纤细。

当然，上面列出的几条因素只是常识性观察的产物，并不是规则。大多数工程师习惯于遵守规则；然而，尽管并非所有人都同意，但我们中的大多数还是认为美学没有规则。3000年前，希腊人为美学投入了大量

的时间。他们极其精心地设计、雕琢其建筑，帕特农神庙被许多人认为是历史上最完美的建筑。对帕特农神庙的仔细研究表明，它的每一个细节都经过仔细推敲，以弥补人眼造成的错觉。例如，帕特农神庙的所有水平线均微微向上弯曲，这样在人眼看来达到了绝对水平。石柱之间的间距也不尽相同，以呈现相同距离的人眼观察效果。为了使其显得均匀，石柱的直径也并不完全相同。尽管这些技术细节是基于常识而不是基于规则，但它们仍然受到了特别注意。

许多学者试图建立结构美学的规则，但都没有成功。例如，“黄金分割”被认为是最好看的矩形的比例，多年来一直被建筑师研究和推广。然而，即使在经过几个世纪的研究与辩论之后的今天，没有人能够确凿地说两条边的比例为 $\Phi$  ( $\Phi = 1.61803$ ) 的矩形在所有情况下是否均明显好于方形。

一般而言，美学是关于比例、平衡与和谐的问题。意大利文艺复兴时期的建筑师阿尔贝蒂 (Alberti) 将美定义为“所有部分的和谐”。当我们观察一个物体时，我们不会通过逻辑推导来确定它是否美观；相反，我们的反应是一种更为自发的反应。虽然我们人类的感知往往也随着时间而变化，但真正的美丽是超越时间与风格限制的。一座美丽的桥可以是引人注目的、大胆的，也可以是典雅的、诗意的。桥梁设计的基本思想是激发观众的情绪反应，甚至给其一种惊喜的感觉。而实现这一效果的方法则可以称之为艺术。

大自然是简约的；许多重要的自然规则都很简单。即使是物理中最重要的公式也非常简单，如 $F = m \cdot a$ 或 $E = m \cdot c^2$ 等。历史长河中，大部分时间都沉浸在大自然中的人类思维也习惯于简单。最简单的配置往往是最好的解决方案，这已在实践中被多次证明。有人说，为达到



最美的结构，最好的方法是在简化的过程中尝试去除任何可以去除的部件。显然，这需要丰富的经验以及对结构与美学的良好理解。

我们教孩子正确地行走，恰当地说话，正常地行动。仪态举止得体的人自会散发其独特的魅力，服装风格、配饰则是次要的。良好的仪态举止没有任何成本；一个身姿和仪态训练有素的人，其魅力会自然而然地散发出来。桥梁设计也是类似的道理，实际上这道理也适用于任何类型的艺术。如果我们忽略了艺术家或设计师的技能，好的或坏的绘画作品，其实际成本是基本相同的，均包括画布、颜料、画笔等成本。同样，对于美丽的与平庸的桥梁，其基本成本的差异可能也很小。事实上，一座精心设计的、更吸引人的桥梁通常更经济，因为它更加自然简单、遵循自然规律。

我们应该将桥梁设计视为一门艺术。然而，桥梁的功能不仅仅局限于艺术：桥梁的基本使命仍然是交通运输。为使桥梁看起来更加美观，人们可能会创造雕塑，但是桥梁建造的原因绝不仅仅是因为美。很明显，桥梁设计与其他艺术形式之间存在三个明显的差异。首先，一幅失败的画作或其他艺术品可能会被人们遗忘在地下室充满灰尘的角落，但一座已竣工的桥梁则将在公众视线中突兀地存在几百年。周围的环境也无法避免它的影响。其次，画家或其他艺术家会收到成功的果实作为奖励，而在我们目前的体系，桥梁工程师并没有动力去花费额外的努力去设计最好的桥梁形式——他/她的工资并不会因其设计而有怎样的提升。再次，大多数艺术家的工作形式或多或少是独立的，而工程师则在团队中工作，必须与许多相关方面打交道，包括财务人员与行政人员，他们可能会将自己的想法强加在桥梁设计与设计师身上。

努力寻找最美的桥梁设计备选方案需要耗费大量的时间与精力。但是，一旦这种做法在设计中变得日常化，额外的努力就不再显得那么重要。尽管有上述因素影响，桥梁工程师仍然有责任关注设计中的美学。不够吸引人的桥梁设计对环境来说是一种污染，并且将会持续很长一段时间。

## 10. 装饰

装饰就像化妆品：真正的美丽是不需要化妆的。最成功的桥梁可通过其结构形式充分展现自身的美丽。一些如加盖隐藏钢缆固定点的小细节并不是装饰；添加雕

塑或花盆才是。

桥梁是一个大型结构。多数情况下，桥梁本身的体量与形态已经足够引人注目，多余的装饰只会使桥梁看起来不那么令人印象深刻。然而，如果一座桥是为了象征某些历史事件或一段关系而建，比如为庆祝沙俄与法国两国间的友谊而建的巴黎的亚历山大三世大桥（Pont Alexandre III），其装饰则可以表达某种意义与形象。

一般来说，城市中的桥梁往往更适合装饰，这可使该桥梁与其周围的环境相融得更加和谐。城市中桥梁的规模也往往较小。建于自然环境中的桥应当更自然、更简单；所以装饰通常是不可取的。

## 11. 照明与美学

照明美学本身就是一门艺术：它不仅照亮了桥梁，更在夜晚赋予了桥梁活力。但是，正确区分照明与照明美学很重要。照明只是使桥梁可见；而照明美学则利用光线与结构之间的相互作用来创造特殊的美学效果与影像（图9）。

设计中，尽早考虑照明美学至关重要，这样照明中所涉及的所有物理元件都可以被恰当地融入设计中。如果一些照明元件的位置不适宜，它们在白天则可能会影响到桥梁的美观。

## 12. 谁在设计桥梁——工程师还是建筑师？

桥梁不是雕塑；除却迷人的设计之外，桥梁还必须兼顾安全性、功能性和经济性。而这些问题最好由工程师处理。把所有的桥梁美学问题留给建筑师去解决并不是一个好主意；建筑师不能将一座完整的桥概念化，因



图9. 照明美学在夜晚赋予桥梁活力。



为他们并没有接受足够的结构工程培训来使其完成这项任务。在工程师完成结构设计后再交付建筑师或许也不是个好主意，尽管许多工程师都这样做并尝试让建筑师来美化桥梁。那时，建筑师所能做的只是为桥梁添加装饰，而这些装饰可能并不适宜。

美学不是桥梁的补充，而是桥梁设计的一个组成部分。在桥梁设计的概念阶段，我们必须同时将其结构配置与美学元素考虑在内。为了完成这样的任务，桥梁工程师必须对结构理论和桥梁美学同时具有深刻的理解。不幸的是，大多数工科学校不开设美学课程。桥梁工程师必须学习美学，无论是在其受教育期之内还是之外。通常，桥梁的主要设计师必须是工程师。他/她应当将桥梁概念化并满足所有的结构与功能要求并适当考虑美观。作为折中，他/她也可以在桥梁设计的概念阶段与建筑师一起工作。

### 13. 创新

如前文所述，每座桥都是一处独特的设计。在设计中，借用现有桥梁的设计理念是可以被接受的；然而，所有的设计理念都必须以独特的方式加以应用。直接复制另一座桥梁的设计是不可取的。比如，虽然许多伟大的艺术家都画过玫瑰，但每位艺术家笔下的玫瑰都有其独特的风格。所以，每一幅玫瑰画作都是独一无二的。相反，一幅赝品几乎没有价值，因为它缺乏创造性的艺术精神。原创性与唯一性共同构成创新；然而，创新也意味着一些新的或许是非传统的元素。这些激进的设计也常常遇到阻力。

艺术家常常自己创作雕塑或绘画，但桥梁的建设涉及许多方面：业主、管理代理人、工程师、工程承包商等。工程师可能并不总是其作品的主人。正如一句俗语所言：“想要创造最美的马的委员会往往创造出了驴子。”

在这种情况下，无论是追求稳妥喜欢模仿他人前作的业主，还是经常出乎意料地同意其要求的工程师，往往都会给设计的唯一性带来阻力。一些工程师可能非常保守，倾向于重复之前已完成的作品。上述这些阻力有时是理性的，有时则不是。

由于其他人的抵制，一些伟大的设计有时会丧失实现的机会。一群工程专家否决了托马斯·特尔福德的伦敦桥设计，他们认为其设计不可能实现。幸运的是，该设计理念被用于建造苏格兰美丽的Craigellachie桥

[3]。同样，当艾菲尔铁塔的设计被首次提出时，人们谴责其设计难以实现和缺乏美感。但100年后的今天，它已成为巴黎的明珠，成为了法国建筑与智慧的骄傲。事实上，公众自艾菲尔铁塔的设计被公开以来就爱上了它。

哲学家与伟大的艺术家可以在他们领先世界几代人的精神世界中生活。他们不必寻求他人的认可，他们拥有自己的想法和理念。但另一方面，工程项目却始终包括业主和设计师两个角色。尽管桥梁工程师设计桥梁，但桥梁并不属于他们。业主代表公众，公众有权要求他们真正喜欢的东西。因此，桥梁工程师不应当仅仅为他们自己建造纪念碑。一名合格的桥梁工程师更应当竭尽全力地为公众服务。尽管如此，除却安全性、功能性和经济性的考虑，工程师不能忘却自己确保桥梁设计美观的责任。

### 14. 案例——天津大沽桥

大沽桥可作为桥梁设计项目中的典型案例（图10）。该项目位于天津市中心，是天津市重振旧城的市中心重建项目的一部分。市区重建项目的首要目标之一即是建设一个可以成为天津城市名片的地标。

该桥梁横跨的河流宽度为96 m，其设计避免了河流中桥墩的存在，最终设计的主跨为106 m。该桥承载着六条车道与两条人行道，桥面两侧各有一条路。每条人行道的最小宽度为3 m。两条车道宽3.75 m，其他四条车道宽3.5 m。除却中间的隔板、屏障和栏杆外，桥面



图10. 天津大沽桥示意图。

所需的最小宽度约为30 m。这座城市大桥的设计交通速度为 $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ，其活载水平符合中国道路城市A级车辆荷载标准[4]。

桥的两端连接着现有的街道，所以桥面的高度是固定的。未来，这座桥还可以容河上的观光船从其下穿过。这两项要求将桥梁中心线处的最大桁材深度限制在1.38 m。而在交通道的边缘，交叉斜坡处进一步减少到了1.3 m。

天津与唐山非常接近，1976年发生的一次大地震造成了极其广泛的破坏和人员伤亡。因此，大沽桥是按照中国最高防震等级设计的。不幸的是，上层土壤非常柔软，对于所有种类的桥梁来说，都无疑需要水平力进行锚固。

#### 14.1. 大沽桥的设计理念

概念设计是桥梁设计中最重要的一步。适当的概念设计可以巩固优化桥梁的结构系统，体现美学，有效地降低成本，最大限度地提升桥梁功能。它还应当系统阐述结构细节的构造方法与限制条件解决方案。每座桥梁的设计都有一定的限制。概念设计必须对其进行充分预估并为所有这些限制提供解决方案。

在确定大沽桥将被设计为一座系杆拱桥之后，其设计理念的不断丰富也不断完善着桥梁最终的设计配置(图11)，如下所示：

- 为满足河流上船只的航行需求，桥拱必须在桥面之上。
- 最小桥面宽度约为30 m，主梁深度被限制在桥中心线1.38 m处，如图11 (a) 所示。
- 拱桥应该有两个拱肋，通常，桥板的两侧各有一个拱肋。如图11 (b) 所示，两拱肋应相距32 m 以上。
- 桁材仅有1.38 m深；这不足以横跨32 m宽的桥面，所以桥梁的拱肋不可位于桥面之外。为解决上述问题，两拱可被移动到六交通车道的边缘[它们相距约24 m，如图11 (c) 所示]。
- 若两拱肋没有相互连接，为了避免其横向弯曲，它们必须被建造得非常笨重。在美学上这样的设计会令人难以接受；此外，两个垂直拱肋会使整个设计显得平淡无奇。
- 习惯上，我们会选择用支柱将两个拱肋连接在一起以使其达到稳定的状态，同时可以使桥拱更加细长，如图11(d)所示。但是，因为桥梁跨度较短，桥拱也比较小，这样的设计会增加许多纷乱的线条，在美学上也是不被接受的。
- 为减少支撑物的长度，可以向内倾斜拱肋，形成一组篮筐提手般的桥拱，如图11 (e) 所示。但是，对于相对较短的106 m跨度，篮筐提手式的设计则显得过于扁平 and 笨重。

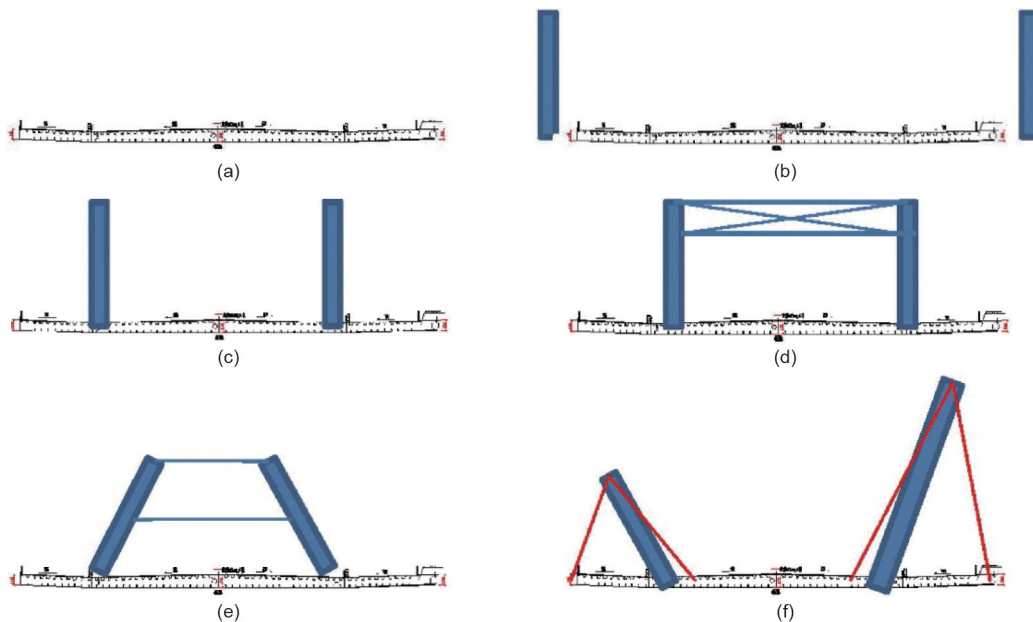


图11. 大沽桥设计理念的发展示意图。



- 与传统的横向支撑不同，三维结构系统采用两个吊架将每个拱肋连接到桥面桁架上。吊架的两个平面在竖直与水平方向上均支撑着拱肋。该设计可以有效对抗桥梁的侧向屈曲，增加稳定性。因此，拱肋可以做得很细长，如图11（f）所示。
- 现在，使用两层吊架为拱肋增稳，同时确保拱肋可以以任何需要的方式倾斜。在这项设计中，它们向外倾斜。因此，从桥面上我们可以看到非常开阔的景色。
- 周围景观非常不对称；因此，在设计中可以增加一边的桥拱高度以使其姿态更加耐人寻味。较高的桥拱倾斜度较小，因此不会向外倾斜得太远。

#### 14.2. 大沽桥的设计

我们可以把海河的发展喻为“金龙狂舞”，海河横贯整个城市，就如同龙弯曲的尾巴。大沽桥及其大拱就如同散发着光辉的太阳，与小拱所代表的月亮以及桥面边缘星星般闪烁的灯光相得益彰；所有的这些设计都发扬了龙的设计概念（图12）。

在这个基础的结构系统之中，拱肋为桥梁提供纵向刚度；桥面为桥梁提供横向刚度，并且钢缆将两者结合成为一个紧凑的系统。同时由于桥桩的支持，桥梁本身的结构非常稳定。

对于跨度为106 m的桥梁而言，拱肋的通常高约20 m。如前文所述，为了使建筑的设计更令人惊奇，这两个拱肋的高度是不相等的。小拱高19 m，大拱高39 m。为了使这座桥梁的设计更加有趣，人行道向外弯曲，为行人提供了更多驻足休息与享受周围美景的空间。



图12. 大沽桥的大拱象征着太阳，小拱象征着月亮，而桥面边缘周围的灯光象征着星星。

#### 14.3. 照明美学

共有三种不同的光源照亮了大沽桥。第一种是桥上与河流沿岸的路灯。第二种光源是位于每个吊架上的聚光灯，其稍低于桥面。每个吊架装有两个聚光灯，以便在拱肋上产生更加均匀的反射。这些灯照亮了桥拱与钢缆。第三种光源是设置于人行道边缘桥板下的一组灯。这组灯光通过下方的水面反射，其反射光线水平地穿过位于边缘板上的孔。三种光源的强度非常协调，将桥梁的结构在夜间衬托得格外优雅（图13）。

#### 15. 总结

通过利用工程的灵活性及对建筑结构的三个基本要素的正确运用，工程师应该能够创造出适合任意场景的桥梁形式。桥梁设计并不困难；其设计必须保持自然、简单、原创，同时与其地貌相得益彰。这是一位合格的桥梁工程师应当永远铭记在心的。

如果我们想要追求生活质量，我们首先应当确保环境质量。如果我们想要保证环境质量，我们则必须密切关注我们所建造的建筑物之美，包括所有的桥梁。为了这个世界上每一位公民的生活质量，我们应当保护我们生存的美丽世界。这是我们唯一的世界。



图13. 大沽桥[注：林同棧国际工程咨询（中国）有限公司提供大沽桥的设计理念 and 初步设计，天津城建设计院提供了施工方案。]

## Reference

- [1] Pollio V. The ten books on architecture. Cambridge: Harvard University Press; 1914.
- [2] Xiang H, Pan H, Zhang S, Fan L. Conspectus of bridge history in China. Shanghai: Tongji University Press; 2009. Chinese.
- [3] Cortright RS. Bridging the world. Wilsonville: Bridge Ink; 2003.
- [4] China Urban Construction Design and Research Institute. CJJ 77-98: The standard of loading for the municipal bridge design. Industry standard of the People's Republic of China. Chinese standard. Beijing: China Architecture and Building Press; 1998. Chinese.