

国外建筑材料与设计丛书

超越钢结构

——金属建筑新技术

steel and beyond

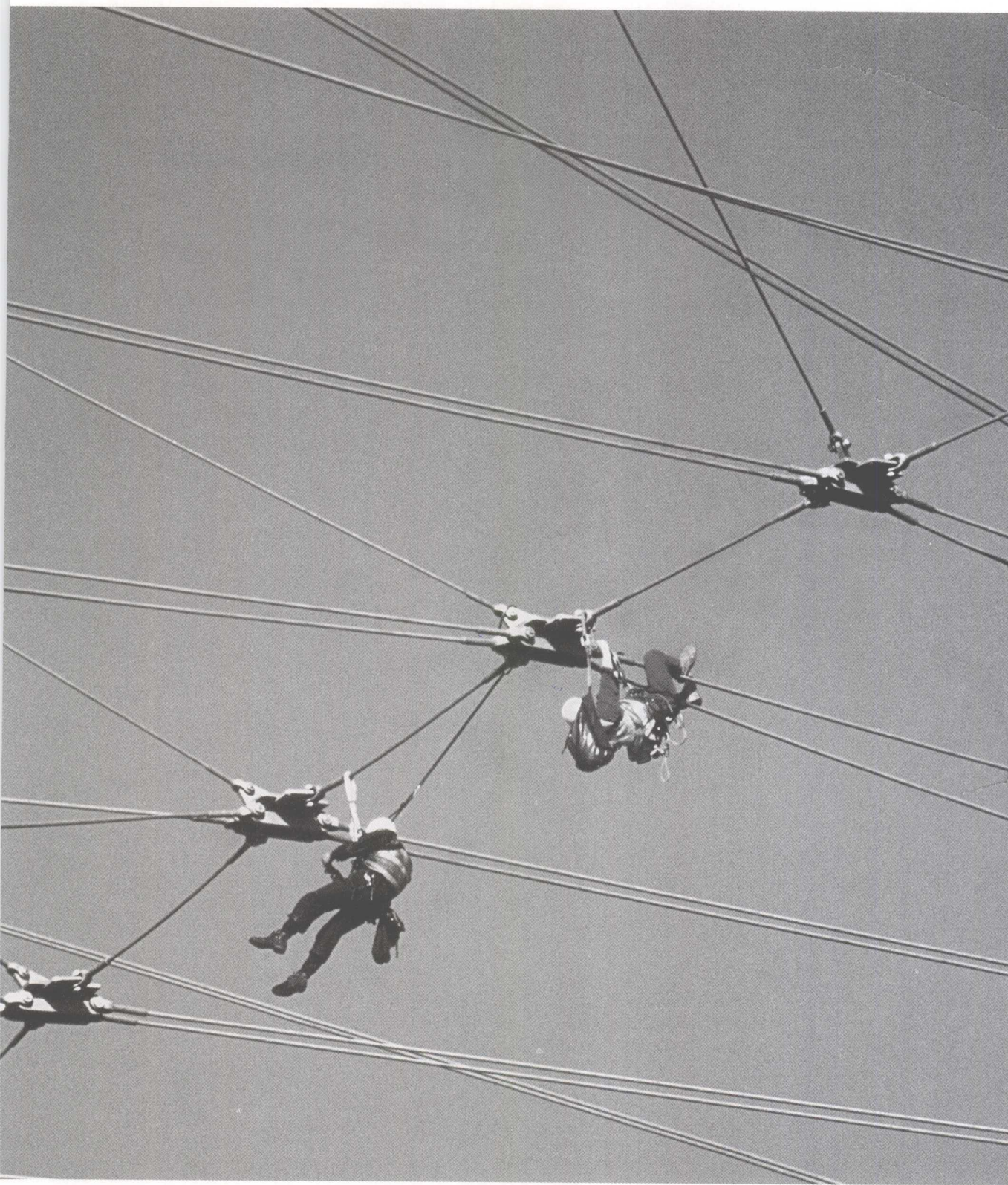
New Strategies for Metals in Architecture

[美] 安妮特·勒古耶
杜晓辉

著
译

中国建筑工业出版社

Steel and beyond



国外建筑材料与设计丛书

超越钢结构

——金属建筑新技术

[美] 安妮特·勒古耶 著
杜晓辉 译

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2006-2723号

图书在版编目 (CIP) 数据

超越钢结构——金属建筑新技术 / (美) 勒古耶著; 杜晓辉译. —北京: 中国建筑工业出版社, 2008

(国外建筑材料与设计丛书)

ISBN 978-7-112-10313-3

I. 超… II. ①勒…②杜… III. 金属结构—结构设计 IV. TU390.4

中国版本图书馆CIP数据核字 (2008) 第133516号

Steel and beyond: New Strategies for Metals in Architecture/Annette LeCuyer

Copyright © 2003 Birkhäuser Verlag AG (Verlag für Architektur),

P.O.Box 133, 4010 Basel, Switzerland

Chinese Translation Copyright © 2009 China Architecture & Building Press

All rights reserved.

本书经 Birkhäuser Verlag AG 出版社授权我社翻译出版

责任编辑: 孙 炼 率 琦

责任设计: 郑秋菊

责任校对: 李志立 关 健

国外建筑材料与设计丛书

超越钢结构

——金属建筑新技术

[美] 安妮特·勒古耶 著

杜晓辉 译

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京嘉泰利德公司制版

北京方嘉彩色印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 9 字数: 300 千字

2009年3月第一版 2009年3月第一次印刷

定价: 58.00 元

ISBN 978-7-112-10313-3

(17116)

版权所有 翻印必究

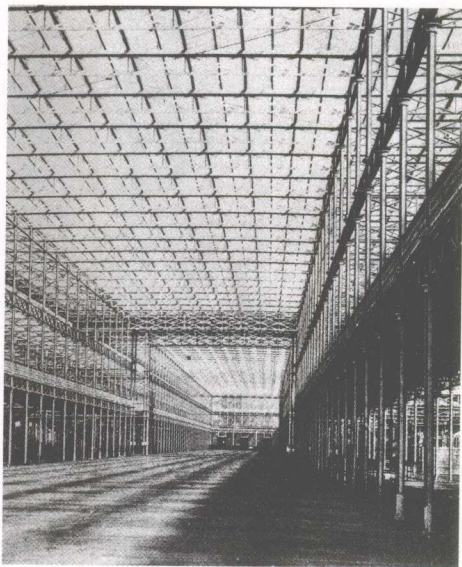
如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

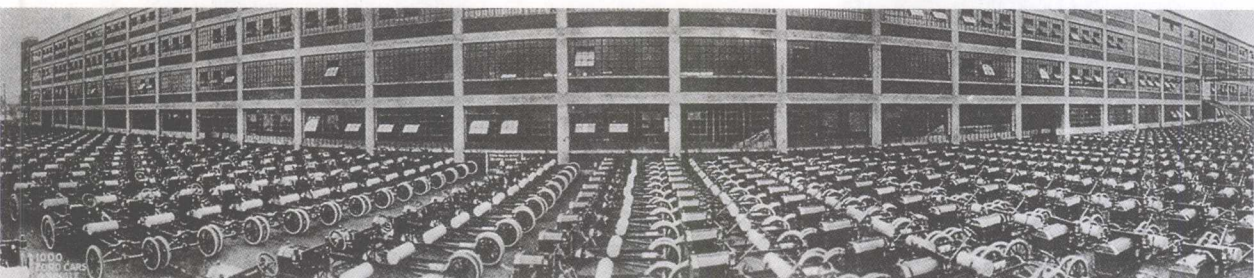
目 录

金属、机械与现代性	6
最优化	12
“伦敦眼”(2000 年)	16
伦敦千禧桥(2001 年)	22
格拉斯哥塔(2001 年)	28
盖茨黑德千禧桥(2001 年)	34
数学与材料	40
毕尔巴鄂古根海姆博物馆(1997 年)	44
英国博物馆大展苑(2000 年)	50
威尔士国家植物花园巨大的玻璃房(2000 年)	56
巴黎品红桥(2000 年)	60
秩序的可选择概念	66
开姆尼茨体育场(1995 年)	70
仙台媒体中心(2001 年)	74
西雅图中心图书馆(2003 年)	80
混合材料系统	84
菲尼克斯中心图书馆(1995 年)	88
伦敦皇家阿尔伯特赛艇码头中心(1999 年)	92
伦敦千禧年穹顶(1999 年)	98
圣奥斯特尔“伊甸园”项目(2001 年)	104
可触知的皮肤	110
西雅图体验音乐博物馆(2000 年)	114
多伦多耐候钢结构住宅(2000 年)	120
苏黎世信号塔(1999 年)	124
美国民间艺术博物馆(2001 年)	128
旧金山 Prada 塔(2004 年)	134
致谢	138
参考书目	139
插图提供	142

金属、机械与现代性



水晶宫，伦敦
约瑟夫·帕克斯顿，1851 年
为大量生产类似的建筑系统提供了范例



一天的产量，福特汽车公司，海兰公园，密歇根州，1914 年

当前，建筑业正在经历一场最快速、最激进的转变。这个转变在很大程度上是由新设计、新制作和新装配程序的开发促成的，它使得一些建筑和结构的实现成为可能，而这些甚至在 10 年前还由于技术或者经济因素的限制而没有可行性。大量产生的教条思想统治了整个 20 世纪，最终在通用钢构件上得以集中体现，同时它又受到有着巨大潜力的计算机辅助设计和制作的挑战，所有这些都对建成形式的概念和构造有着深刻的含义。

19 世纪中期，当批量生产铁、钢以及玻璃的程序被开发的时候，也发生过类似的根本性变化。建筑师在其他领域获得发展，尤其在铁路的设计和建造方面不断产生工程革新。铁路设计被作为一种不确定的、广泛无限的抽象形式进行构思，由此为钢在建筑建造上的发展奠定了基础。利用这些原则的最显著建筑是由约瑟夫·帕克斯顿于 1851 年在伦敦设计的水晶宫，约瑟夫·帕克斯顿直接与建造者携手合作的这座建筑，今天仍继续激励着建筑师和工程师们。利用一套标准部件，水晶宫在不到 8 个月的时间里就被设计和建造起来，它曾是当时所建造的最大的围合建筑。水晶宫的设计和建造被宣布为应用亚当·斯密劳动分配法则的第一个建筑，而且这个法则在很大尺度上调整了人工、材料和机械的比例。¹令人吃惊的是，与当代的建筑风气相比，建筑物不是作为形式而是作为过程被构思。

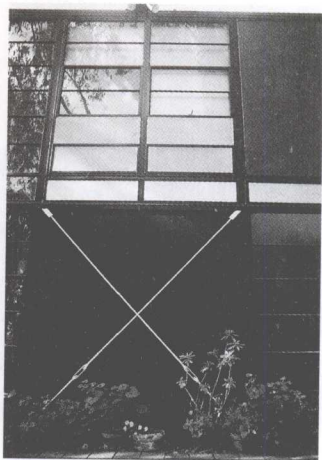
水晶宫建造过程的 10 年见证了经济型钢冶炼方法的发展。据此创造了钢框架的条件——由标准部件组成，这些标准部件由广泛分散设置的工厂大量制造并在现场迅速晾干装配，成为将要在 20 世纪盛行的体系建筑物的范例。对于钢的运用是非常重要的，不仅因为它能被生产工业的过程塑形，还因为它固有的材料属性。建筑师和工程师第一次处理这种具有巨大受拉及受压能力的强劲材料。这种材料将显著改变形式和空间的本性，促进高层和大跨度建筑的发展，把围合建筑从承担一定荷载的束缚中解放出来，迎接机械时代的到来。

机械的时代也是金属的时代。在底特律，亨利·福特的装配线将生产过程提升到一门高等艺术，利用时间精心安排数千个组成构件，创造象征 20 世纪的大量生产的钢产品和汽车。生产过程的压力使制造业脱离多层混凝土框架建筑，而将其用于大量的单层大跨度钢框架结构中。第一次世界大战推动了具有很大强度和耐久性的合金钢的发展。尽管合金钢仅仅在尺度上增加了抗压强度，但它的根本好处在于使钢的受拉能力显著增强。²像劳动分配原则一样，在材料学上的这些优点也被福特吸收，所以到 1927 年，“T 形”钢合并了 54 种不同类型的钢。³同样地，第一次世界大战后，铝的生产变得日益经济。在产品的制作方法和目的方面，生产出的金属机械工具和占主导地位的金属生活消费品极大地改变了普通人的生活。机动车辆在 1900 年是不

通用汽车技术中心，
沃伦，密歇根州，埃罗·沙里宁，1956年。
用批量生产的预制构件安装的幕墙



埃姆斯住宅，太平洋海崖，加利福尼亚州，查尔斯和雷·埃姆斯，1949年。实例研究8号住宅，是一系列以大量生产的钢框架组装的住宅系统中较有代表性的一例

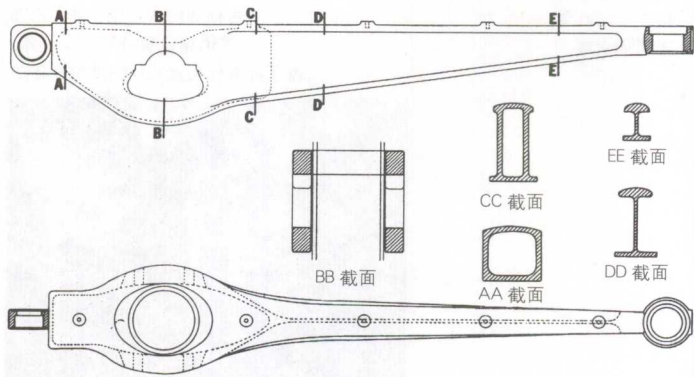


存在的，但到了1930年在美国的数量却增加至2600万；⁴此阶段不仅是航空工业的发展时期，也是金属产品例如烤箱、吸尘器、电冰箱和其他所有家庭用具剧增的时期。

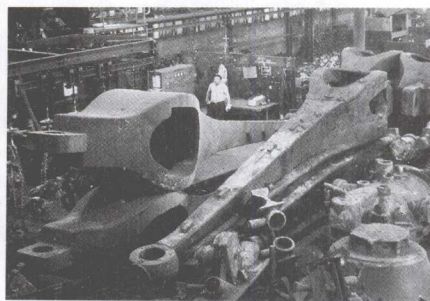
在建筑中，对于消费者的日常生活，金属与现代性有着密不可分的联系。现代主义者专心于研究产生于自由平面、普通空间的骨骼框架和幕墙，并且利用大量已建成的建筑做试验。通过密斯·凡·德·罗光滑的摩天大厦想像草图、巴克敏斯特·富勒对大量生产的铝制住宅的推销以及简·普鲁威(Jean Prouve)的加压金属结构系统和预制金属覆层系统原型可知，这些想法早在20世纪二三十年代就被探究。直到金属结构和覆层系统在美国北部集中发展后，这些想法才被人们大规模认识。在俄勒冈州波特兰市，有一座铝和玻璃共同作为表皮材料的建筑，是由皮耶特罗·贝鲁斯基(Pietro Belluschi)在1947年设计完成的，这个建筑引发了一系列美国式摩天大厦的出现。⁵与建造更高建筑的想法形成对比的是，那个时期最有意义的工程之一——低层的通用汽车技术中心于1945年被委托，并在1956年开放。由埃罗·沙里宁设计的这个研究场地代表了金属、机械和现代性的完美结合。沙里宁说，“通用汽车是金属管理和精密工业，它拥有很高的产量，所有这些因素在某种意义上都应该在代表技术中心的建筑中被表达出来，所以设计是以钢——汽车的金属为基础的。像汽车一样，建筑物在本质上作为一条生

产装配线，把大量生产构件以外的东西组合装配起来。”⁶所有场地中的建筑被构思成可扩展的柔性系统中的一部分，而这个系统由1.5m严密网格中的I形截面柱和三角形格构桁架确定。得益于建筑师和有着专门技术并对金属技艺的改革有着广泛兴趣的委托人之间的亲密合作，建筑表皮成为一个可以预制的玻璃幕墙和金属覆盖的绝缘夹心板，并且悬挂的顶棚是一个特殊设计的浇铸铝框架系统。很多从第一原则发展来的组成部分成为了标准部件的原型，而这些标准部件随后将被大量生产并推向市场。受小汽车行业的影响，这些系统的性能与其安装及外观同样重要。在通用汽车技术中心的设计中，其大部分由只有60mm厚度的外墙组成，但与400mm的砖石空心墙具有同样的热工性能，同时经过革新的顶棚系统还能够与照明系统、声响系统、喷洒系统以及空气调节系统结合起来。

同一时期，在加利福尼亚州的案例研究中，住宅被委托设计成大量生产的钢框架住宅系统的原型。尽管许多原型被建造，却没有一个被投入研究。最引人注目的实例是1949年的埃姆斯住宅(Eames House)，该住宅拥有流行的包金箔的柱截面结构、开放的网架钢托梁以及钢框架预制覆盖系统。同样，在20世纪四五十年代，密斯·凡·德·罗尤其关注标准钢部件构造性和代表性的潜力，以及结构和建筑外壳的清晰度。在美国工作的时候，他对如何提炼建筑的词汇产生了兴趣，新生的具有适应性技术的



蓬皮杜艺术中心，悬臂梁的平面和截面



蓬皮杜艺术中心，巴黎，伦佐·皮亚诺和理查德·罗杰斯，1977年。铸造中的悬臂梁铸件

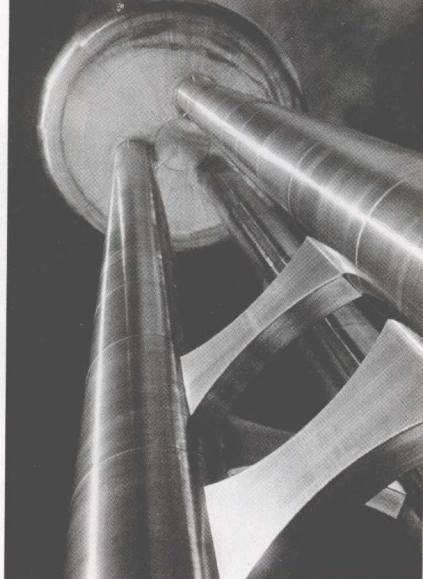
建筑行业支持了他这个想法，其中的适应性技术包括从战时企业中受到启发的钢的焊接法和铝的延展法。⁷在这种技术主导的环境中，密斯发展了I形梁和H形柱；通过一系列钢、铝以及有青铜竖框的幕墙的重复，实现了大量产品最后的精美。

尽管这种革新的精神在北美的存在是短期的，但美国中世纪的现代主义思想激发了20世纪六七十年代新一代欧洲建筑师的产生。从水晶宫开始的思想颠峰可能由强调工业生产雅致性的两座建筑物加以体现：1977年建成的由伦佐·皮亚诺和理查德·罗杰斯设计的蓬皮杜艺术中心和1978年由福斯特及其合伙人联合事务所设计的森斯伯瑞（Sainsbury）中心。回忆起19世纪的认为水晶宫是工程的优秀实例而不是建筑的这一最引人注目的评论，肯尼思·弗兰姆普敦说，“20世纪末有着多种思潮，事实上，从拥有真正现代建筑形体的角度来说，水晶宫与现代派的建筑是没有角色差别的，应该不完全算是装饰精美的工程，或确切地说，在很大程度上是一个产品或工业的设计。”⁸然而，建筑物本身不像汽车和其他工业设计的产品，已经被证明对大量生产有显著的耐久抵抗作用。蓬皮杜艺术中心和森斯伯瑞中心都是一次性的建筑，并且它们的组成部分尽管已经被提炼，仍不能被投入生产。与之相反，在组成构件的水平上，大量的产品的确支配着建筑中的金属部署，这不仅导致钢截面的普遍应用，而且也

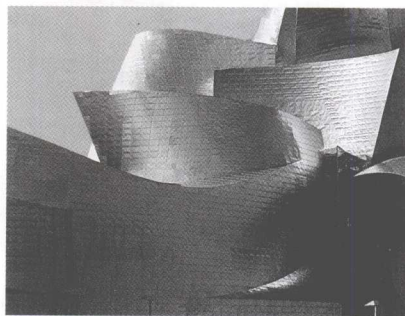
导致了像由哈芬、巴特勒和德国 Mero 等企业生产的组件的模数化系统适应于新的组件中。然而，最初自由的东西随着时间的流逝逐渐受到限制，同时标准构件的目录也为建筑师和工程师日益指定了可能的实施范围。

当蓬皮杜艺术中心作为多种学派的样本被引用时，它也代表了对工业专制思想有意义的突破。尽管一个建筑系统被明显地作为一套部件构思，作为特殊化制造的钢铸件而被设计的结构元素仍被应用在没有个性特征和普遍存在冷轧部件的位置。彼德·赖斯——蓬皮杜艺术中心的结构师，被钢铸件所吸引，准确地说是因为“……尽管被工厂制造加工，但它不是一个耐用的工业产品，而是一个人类介入很明显的地方”。⁹悬臂梁——同建筑其他各种不同的构件结合，作为一种对结构力的尝试——逐渐象征着人性精神。蓬皮杜艺术中心唤醒了19世纪潜在的金属铸件工艺，同时灌输了在20世纪发展原子能和北海油业的破碎力学理论。¹⁰如今，钢铸件被广泛应用，在很大程度上归功于对构件连接方式的日益关注。

因为体系建筑的概念是由铁路激发的，这伴随着1993年滑铁卢国际车站的建立，对于进一步削弱大量产品的联结则是一种讽刺，这座车站所处位置的复杂几何形体需要一个系统：能使每个结构柱都不同。既然传统的钢截面在当时是被限价销售的，尼古拉斯·格里姆肖和安东尼·亨特（Anthony Hunt）设计了标准地



通用汽车技术中心，
沃伦，密歇根州，埃罗·沙
里宁，1956年。
不锈钢水塔



古根海姆博物馆，毕尔巴鄂
盖里建筑事务所，1997年。
基于标准化与重复性的结构和覆层

铁结构，直接套用并调整即可适应每个特殊的本地条件。在滑铁卢国际车站设计并建造期间，计算机就已经被建筑师和工程师使用了很多年，主要是为了结构分析并能够重复和大量积累设计程序。对于滑铁卢国际车站而言，他们也习惯于尝试产制造出了经济可行的各种各样复杂的钢结构和双曲线玻璃以及金属外壳。

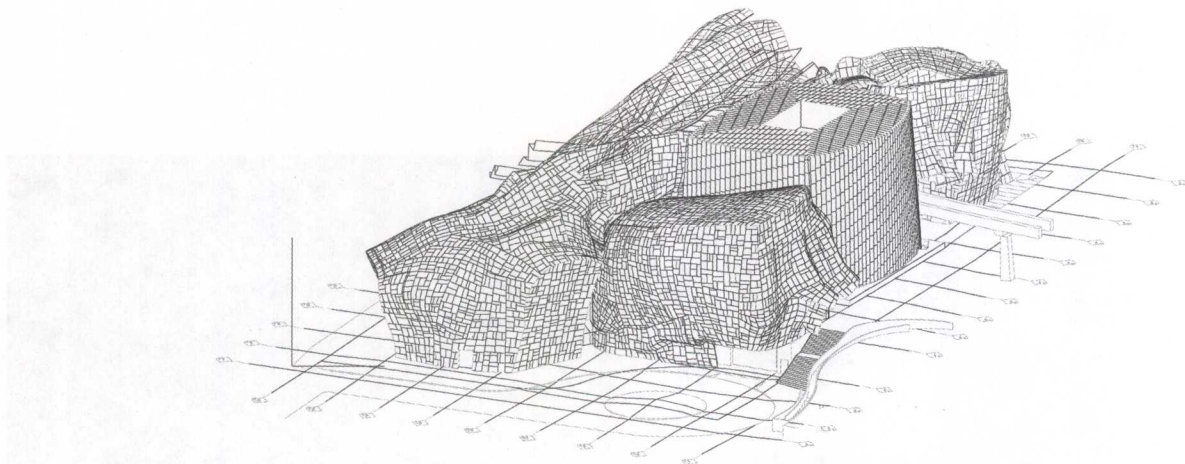
其他的发展扩大了金属作为建筑表皮的应用潜力。在早期工程中挑战了轻木框架习俗的弗兰克·盖里，随后处理了金属薄片并在根本上完成了从单调的建筑形象到再次与现代密切结合的金属形象的转变。正如蓬皮杜艺术中心的设计者使用新技术以激励旧的铸件工艺，盖里的早期材料钻研发展了传统的折合接缝屋面材料技术。他对金属的迷恋激发了综合办公室工作中的数字化设计和建造进程的全部潜力。如果现代主义是由汽车、船舶和飞机的设计和生产激励的，那么同样地，在金属结构和覆层设计上的最新进展使那些相同的产业不仅在软件方面而且在制作技术的专门知识方面都得到了好处。

尽管今天软件包在很大范围内被建筑师和工程师使用，盖里众所周知的偏好是由法国航天防卫工业发展并在20世纪80年代中期发布于世的CATIA。当时CATIA被汽车制造者狂热推崇。他的第一个运用CATIA的工程，是1992年为巴塞罗那的奥林匹克村做的钢框架镀铜雕塑，迈出了相应设计风格的适当的一步，

不久出现了毕尔巴鄂的古根海姆博物馆和西雅图的体验音乐博物馆（EMP）。毕尔巴鄂博物馆的形式激发了人们的想像力，但是它的构筑属于标准钢截面和重复性覆层模数的旧的体制。从表面说，体验音乐博物馆类似于毕尔巴鄂博物馆，但是它的生产程序是完全不同的。它属于复杂工业生产系统的新的体制，在这个系统里，每个组成部分都是不同的。它的金属结构和覆层——尽管在许多方面比较粗糙，但对于意识到从大量产品到大量定制构件的转变中潜在的数字技术是非常重要的一步。

数字技术不仅运用在建筑设计中，而且还运用在制作和装配集合中。尽管体验音乐博物馆是这个新体制的象征，它代表的只是许多被探究的革新方向中的一个。跟随福特制的足迹，数字技术促进了在材料和劳工上最优化的增加。与抑制时间和机械重组的成本以及经济规模的必然需求相反，数字加工装置的改进只使用了适度的额外成本，便生产出了独一无二的构件。从形式上来说，日益复杂的欧几里得几何形和非几何形以及不定形的建筑在经济上已完全可行。而且，数字技术正在改变这些复杂建筑的现场装配，同时被埃罗·沙里宁赞美的工业精度将变得更加精炼。作为度量单位的公差正在缩小，因为传统工具将被地球定位技术准确探测的三维空间坐标所取代。

更重要的是，软件把三维数字模型流畅地转化到二维的加工数据中，这种能力导致建筑

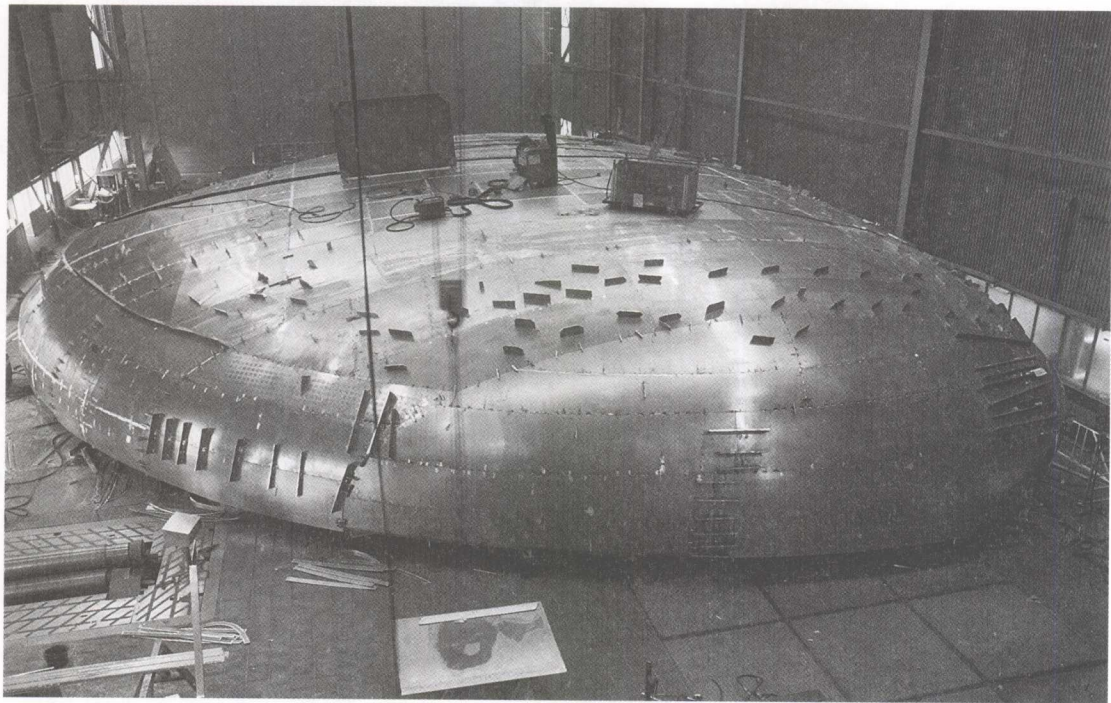


师和工程师与制造者和承包者更亲密的合作。结果就是在产品精致性上更新的要求。生产主义新的紧张正在显现，对于设计者来说，它取代了由工业的巨大压力所造成的限制，从工具的占有到工业产品的定形再到每个工程特殊的需要。更加有效更加准确的是，数字化工具为工业生产的人类创造了新的潜力。现在，使工艺和作为工业革命副产品的工业之间达到对立和谐的条件已经存在了。重申金属作为现代化标志的重要性，这些在建筑产业中的重大变化正在被设计的数字程序以及金属结构和外壳系统的安装所引导。金属对于这项新技术的接受力可能被争议，这个观点来源于金属能轻而易举地被加工、切割、折叠、栓接、焊接、挤压、浇筑、熔合以及很容易与其他金属结合。随着数字代替机械，建筑性金属正在被逐渐认可甚至更加具有通用性。在当今时代，建筑师如何更加充分地利用新型材料完美阐述自己的设计方案，是需要思考的问题，但是机械时代远没有结束……

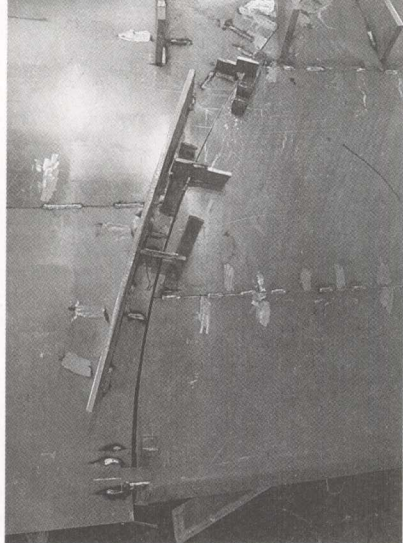
体验音乐博物馆，西雅图，盖里建筑事务所，2000年。
每一个结构和镀层构件都是不同的

1. John McKean. *Crystal Palace* (London: Phaidon Press, 1994) p. 21.
2. James Miller, editor. *The Buckminster Fuller Reader* (Middlesex, England: Penguin Books Ltd., 1970) p. 198.
3. Ibid., p. 196.
4. Richard Guy Wilson. "The Industrialist as Artist," in *Raymond Loewy* (Berlin: International Design Center, and Munich: Prestel Verlag, 1990) p. 68.
5. William H. Jordy. *American Buildings and Their Architects* (Garden City: Anchor Books, 1976) p. 233.
6. Eero Saarinen. *Eero Saarinen on His Work* (New Haven: Yale University Press, 1962) p. 30.
7. Phyllis Lambert, editor. *Mies in America* (New York: Harry N. Abrams, Inc. 2001) p. 200.
8. Kenneth Frampton. *Modern Architecture: A Critical History* (London: Thames and Hudson Ltd., 1992) p. 302.
9. Peter Rice. *An Engineer Imagines* (London: Artemis, London, 1994) p. 34.
10. Ibid., p. 33.

最 优 化



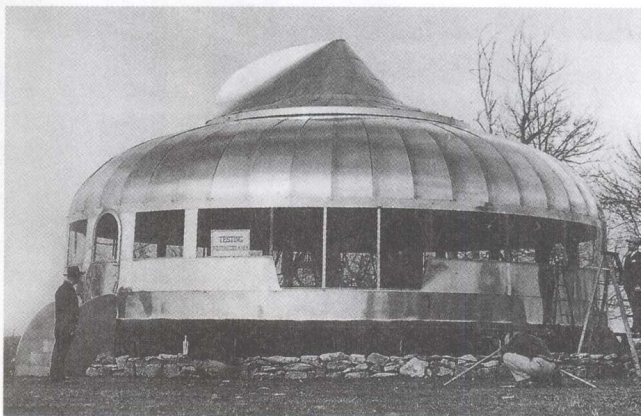
媒体中心，伦敦。
未来系统，1999年。
铝制半硬壳建筑



媒体中心，铝制半硬壳的连接处

最大限度利用资源的住宅原型，威奇塔市 (Wichite)，堪萨斯州，理查德·巴克敏斯特·富勒，1941～1946 年。

铝合金骨架和铝合金板外饰面原型，从中心柱上撑起，并且从来没有进行过大量的商业生产



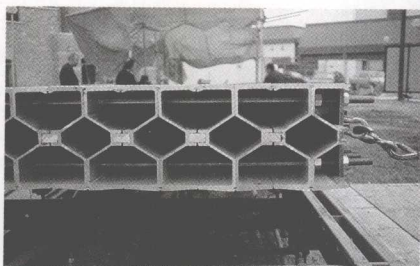
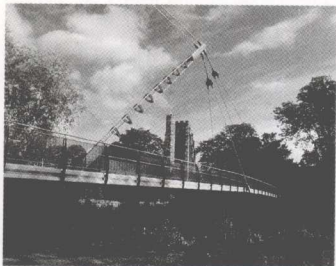
外形轻盈是 20 世纪建筑设计中上的一个首要原则，这种轻盈度通过自由组合框架结构与追求极致效果的幕墙来取得。工程师罗伯特·勒·瑞卡雷斯 (Robert Le Ricolais) 把这种结构上的目标概括为：“无限大的跨度，零重量”。¹然而对于围护系统来说，最终的目标是它的透明度。除了建筑美学的目标之外，耗费材料最小化的观念是用最少的材料作最多的事情，接近“几乎什么也没有的建筑结构”²——被当作是追求工业效益最大化的根据。

巴克敏斯特·富勒坚持不懈地研究铝合金的兴趣是建立在铝合金轻质高强度性能基础上的。他的问题“你的建筑有多重？”将建筑塑造轻盈的责任等同于保护环境的责任，最终确立了他所希望的在建筑结构和面板上广泛采用铝合金的发展阶段。然而他最大限度利用资源的住宅（第二次世界大战之后建立的原型）从来没有被投入商业建设，并且，当铝合金在围合建筑系统被广泛应用的时候，在著名的建筑实例当中，仍然没有人使用他提倡的这种结构。与富勒提倡的这种轻盈持久的建筑体系理论相悖的是，相对于钢来说生产铝合金对环境造成的有害影响还是较大的，人们要求较大的铝合金构件达到像钢那样的功能这一事实已经阻碍了铝合金构件的广泛应用。虽然有这些利弊关系，但是在最近完成的工程当中仍旧尝试了铝合金在建筑结构上的应用。由未来体系 (Future Systems) 设计并在 1999 年完成的伦敦劳德板

球场的纳特威媒体中心 (The Natwest Media Center)，完全由铝制半硬壳焊接完成。完整的结构和外形都是用数字模拟，CNC 切割，由一个擅长制造赛艇的造船厂组装的。建筑师威尔金森·艾尔 (Wilkinson Eyre) 于 1999 年在肯特郡梅德斯通设计的 Lockmeadow 人行桥就明显地将焦点集中在通过减少结构来达到外形最小化上。纤细的轻质骨架和桥的覆板被组合在一个单一-预制铝合金的可以连续互锁并快速拉紧的压型板上，这一系统后来使建筑师获得了专利权。

其他金属在建筑结构当中的应用同样是有限的。霍普金斯建筑师事务所在 1992 年建成的位于伦敦的布莱肯住宅凸窗中，就发展应用了铝合金青铜的结构铸件。在 2000 栋 Portcullis 住宅中，又进一步扩大到完整的结构和维护系统，其正立面和屋顶是用 25mm 厚的板、定制的成型构件以及铸件焊接并组装而成的；用连续的片状材料做成的这些板和构件使得建筑构成的截面保持了变化的连续性。虽然是技术创新，但是这种系统较高的成本可能会阻止这个系统较大规模的生产和在其他工程当中的广泛应用。

众所周知钢铁的强度、硬度和广泛用途，所以钢铁在建筑领域当中一直是建筑结构最主要的材料。高强合金的发展极大地推动了金属最优化使用的进程，高强合金正逐渐在建筑和更有效的结构当中发展使用。利用法兹勒汗关



Lockmeadow 人行桥，梅德斯通，英国，威尔金森·艾尔建筑事务所，1999 年。
相互咬合的铝合金压型板既是结构又是面板

于成束管的观点，例如，位于芝加哥的 1974 年设计的西尔斯大楼，保持了好多年作为全球最高建筑的纪录。在第 110 层，它的金属结构的重量恰好是 $33\text{lb}/\text{m}^2$ ($16\text{kg}/\text{m}^2$)，比在 43 年前建造的 102 层高的帝国大厦中的金属结构重量少了 40%。³ 同样地，像格拉斯哥风塔这样的高层建筑，优化利用金属结构来抵挡相当大的风压还是必要的，即使具有不同的结果。格拉斯哥风塔像船帆一样随着风而转动，极大地减少了风压和旋转张力。

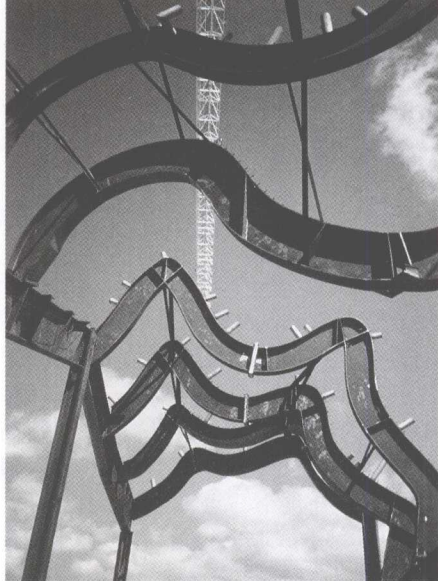
在寻求建筑轻盈的过程中，公众更认可巴克敏斯特·富勒关于可拉伸性而非可压缩结构的提倡，而不仅仅关注于他对于铝合金的狂热。与压缩强度相比，金属在拉伸状态下强度—重量比率的优越性在过去 30 年可拉伸结构的发展中得到反映。在金属结构当中被强调的作为材料最优化形式的张力在英国庆祝千禧年的设计中被采用，在那个设计中，文化和形象上的轻盈预示了未来乐观的前景。在拉伸结构中，随着像凯夫拉尔一样的缆索材料的出现，金属的优势正在受到一定程度的冲击。然而，虽然凯夫拉尔缆索材料具有比钢铁较好的强度—重量比率，但是它在处理压力荷载方面缺乏柔韧性。尽管它比钢铁成本低，但仅仅是用在特定的环境中，比如由福斯特设计的巴塞罗那塔，在那里吊索被用来消除交通传输的障碍。更具重要意义的、令人惊奇的是实验室里关于蜘蛛丝的发明。这种自然聚合体具备很好的弹性，它可

以吸收折断同样直径的钢线所需的 100 倍的能量，⁴ 并且如果这种方法能发展为大规模的生产，它会因此具备缆索和钢筋网片的潜力。

虽然建筑师和工程师仍然致力于寻求建筑外形的轻盈，但是这种类似于追求工业效率指标的想法正在面临多方面的挑战。随着对可持续性的逐渐关注，为了达到建筑外形轻盈而广泛应用高强材料的情况正在接受越来越严格的审查。通过强调生产这些材料的额外能源和这些能源的再生问题的研究，最优化的概念从纯粹的结构功能扩大为一个更为复杂的标准范围。⁵ 甚至在 20 世纪早期，亨利·福特就已经了解了在材料和人工之间的一种效率平衡。材料的性能通过生产得到最佳化，人工的性能通过产品装配线得到优化。同样地，当代建筑实践的发展通过减少材料、技术和人工的数量而显示出不断的推动力。在这种情形中，数字设计和生产的方法在本质上不是传奇故事，而仅仅是在这种进展上的最新循环。

过去的 30 年中，举个例子，在材料和人力成本花费比率上，英国的钢铁工业发生了重要的变化。过量的生产使得市场充满着更为激烈的竞争；甚至在通货膨胀的情况下，钢铁工业的原材料价格增长了将近 50%，然而人工成本却增长了三倍。现在，每吨钢铁的成本——在 20 世纪 70 年代早期大概相当于 100 个人工小时——现在仅仅相当于 33 个人工小时。⁶ 虽然这些数据在每个国家都有所不同，但是在发

体验音乐博物馆, 西雅图
盖里建筑事务所, 2000 年。
专门定制的、由金属板生产的可变化的结构肋梁



达国家人工费较高, 这一点大体是相同的。在过去 20 年中, 随着钢铁生产厂家广泛应用 CNC 切割技术、钻孔技术和焊接技术, 以及随之发生的劳动力需求的减少, 按绝对价值计算降低了英国标准钢架结构建筑的成本。一个英国生产商引证了关于招标结构钢的一个 40 层塔楼的范例, 这个塔楼的建设由于不利的经济条件而被耽误了。当在 1999 年经济繁荣时期再次招标时, 钢铁承包商非常放心地在原招标价格的基础上降低了 10%, 甚至没有作任何由于物价上涨原因的调整。⁷

结构钢在材料和人工成本之间变化的比率, 最终向建筑师、工程师和生产商们一贯的固有思维发起了挑战。最小的重量不再意味着最低消耗成本或工业效益的最大化。取代了以前那种在柱子接合位置拼接较重梁断面的方法, 现在最有效的方法是整体使用较重的梁, 这样就消除了焊接的人工成本。比如, 在英国博物馆的大展苑, 尽管看起来更浪费材料, 但是用 150mm 厚的钢板经 CNC 切割成隐蔽的构架(被设计用来抵抗角落的冲击力), 相对于生产它们的成本来说还是更为经济的。因为这种策略消除了焊接厚钢板过程中产生的内应力, 并且在技术上也是一种比较好的解决方法。在盖特谢德千禧桥(Gateshead Millennium Bridge)中, 指定在箱形断面中使用厚钢板以减少人工数量与劳动强度。同样地, 当管状钢材断面的价格(按吨米定价而不是以重量定价)以每吨来换算到

成本的时候, 价格的差异显示了每种尺寸范围中最轻的构架其实是花费更高的。⁸ 那么, 较重的构件可以是更有效的花费成本的构件。在每个这样的实例当中, 作为最大效益和最低耗费的指标, 较重结构钢的应用使建筑外形不再轻盈——这种观点仍存在于设计师和制造商所使用的多数的软件中。

既然金属板是结构钢中最便宜的一种形式, 那么 CNC 切割和机器人焊接就意味着在某些特定的领域, 用金属板生产定制的外形可能和用冷轧构件生产一样经济。这便意味着新的尝试: 在某些不均匀的和变化的构件断面, 与普通的荷载条件相比, 用金属板厚度更有利于处理特殊局部, 这种逻辑产生了一种新的观念转换, 即体现在从毕尔巴鄂古根海姆博物馆的标准宽翼缘结构构件到体验音乐博物馆中因为特定功能而制作的可变化高度的梁肋。伴随着特制的结构钢外形经济可行性的出现, 普遍应用的断面成本正在面临挑战。

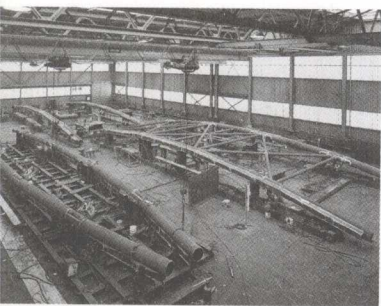
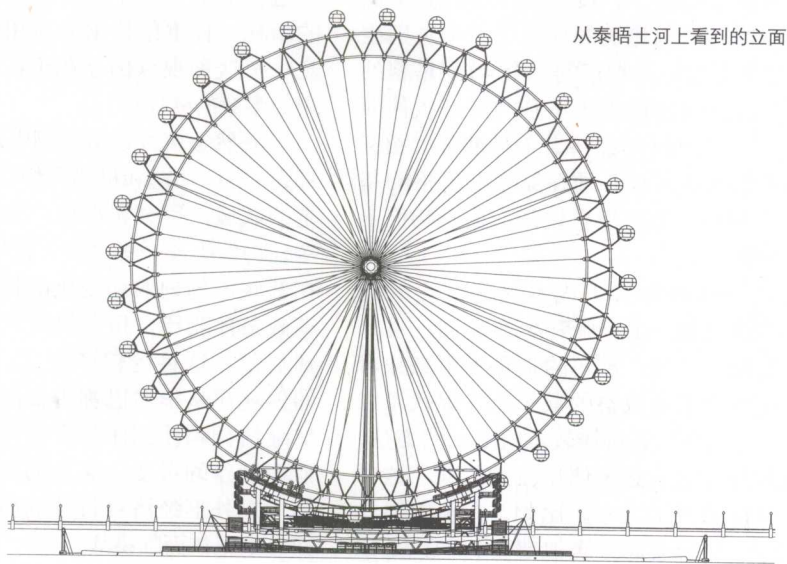
1. Françoise Fromonot. Marc Mimram: Solferino Bridge Paris (Basel: Birkhauser, 2001) p. 17 referring to Marc Mimram. *Structures et formes - Une étude appliquée à l'œuvre de Robert le Ricolais* (Paris: Dunod, 1983).
2. Kenneth Frampton. *Studies in Tectonic Culture* (Cambridge: The MIT Press, 1995) p. 203.
3. William Marlin. "Sears Tower: The Mail Order Approach to Urban Form," *Architectural Forum* (January-February 1974) p. 28.
4. *Exploring Materials* (London: Ove Arup Partnership, 1992) p. 22.
5. P.R. Head. "Construction materials and technology: a look at the future," *Civil Engineering* (July 2001) p. 115.
6. Interview with Peter Miller, Watson Steel Ltd., 22 January 2002.
7. Ibid.
8. Peter Miller and Iain Hill. "The Economic Design of Tubular Steel Structures: A Fabricator's View," seminar presentation at the Institute of Structural Engineers, London, February 2002.

“伦敦眼”(2000年)

直径135m的“伦敦眼”是世界上最大的观景摩天轮，也是伦敦排名第四的超高层建筑。尽管尺度巨大，但是它最引人注目的一点是建筑的壮观精美。由马克斯·巴菲尔德(Marks Barfield)建筑事务所和结构工程师简·维尔尼克(Arup的前身)设计，摩天轮看起来闪闪发光，并且每个节点都是难以置信地精细。“伦敦眼”与自行车轮一样，利用同样的结构原理工作运转，带有一个轮缘，并且这个轮缘被从中心轴每个终端放射的缆索辐条约束压缩着。该建筑仅仅支撑在河岸的一边，悬在泰晤士河上，依靠安装在轮缘上的玻璃外壳提供良好的视觉景观。随着轮子的转动，参观者有种悬浮

在世界顶部的感觉。

“伦敦眼”的最初想法起源于1993年为庆祝千禧年建造一个纪念碑的创意竞赛，这个竞赛是一个没有胜利者的竞赛；最终于1995年英国国庆的时候，摩天轮被战略性地安放在伦敦的中心位置。竞选方案里包括一个压紧的坚固臂肢，后来的设计研究开发了多个重复的臂肢配置。幸运的是，这些臂肢在最后一轮方案策划中被遗漏了，所以全部建筑只依靠那些细长拉紧的轮辐。轮缘和缆索系统被先前的张力固定住，使得缆索在轮子自重或者风荷载的背风面的影响下都不会松缓。为了抵制车轮连续弯曲的趋势，建筑师优化设计了轮缘和轮轴的几何形体，以便在最小的重量下获得最大的刚度。



轮缘托架的预制装配



工人在越过河面的临时支撑结构上水平地
装配摩天轮和金字塔形建筑物支撑结构