

第 1 章 桥梁建筑、系统论与建设程序

桥梁学科综合了基础学科(数学、物理、化学)、工程科学(理论力学、材料力学、结构力学、弹性力学、弹塑性力学、流体力学与风工程、土力学与岩土力学)及桥梁美学等。

此外,桥梁学科还包括许多应用学科,如计算机应用、虚拟现实与仿真、工程机械、工程制图、建筑材料、工程测量与地质钻探等,是一个学科综合性非常强的专业。

桥梁规划、设计、建造及运营过程,往往需要多种专业工程师,包括规划师、建筑师、结构师、建造师、工程师、预算造价师,以及天文、地理地质、环境、环保、景观等专业人士共同完成,如此方能不留遗憾,方能比较完善与圆满。

1.1 桥梁建筑学的现状

目前,作者还未看到其他著作中有称“桥梁建筑学”之说,大概是有些著作只谈桥梁美学,或只谈具体的桥梁建筑艺术的缘故吧。就笔者所见教材中的论述,大概只包括:

- (1) 桥梁发展的非常粗略的描述。
- (2) 不够系统的桥梁体系的分类。
- (3) 简单的桥梁孔跨布置原则及横断面设计等。
- (4) 零散的结构形式及构件横截面形式分类。
- (5) 虽谈及桥梁美学,甚至景观设计,但尚未建立起系统的理论。而对结构受力优越的研究、力学与美学关系的研究、桥式方案设计构思及比选的理论研究等则寥寥无几。应该说,桥梁建筑学包括桥梁美学,但美学仅仅是其中的一部分,桥梁之美只有通过结构构思与建筑设计才能得以实现,它才是桥梁建筑学的内核。

在过去,数值计算主要采用计算尺或机械式计算机进行,计算手段非常有限,因而常常需要深入理解结构的受力性能(如传力路径),在弄清承重结构体系中哪些是重要构件、哪些是次要构件的前提下,对结构提出简化图式,使其处于当时人类所能达到的数值计算能力之范围内,才能得到满意的结果,有时,往往需要作出其他方面的牺牲,例如,采用静定结构或超静定次数较少的结构等;而在方案比较阶段,还要对不同的结构体系作出选择。客观上讲,这对重视桥梁概念设计有利,但也由于当时计算手段的落后,对于大跨、非线性、复杂体系的桥梁结构受力行为研究不够,从而制约了桥梁的发展。

随着当今科技的发展,电子计算机的运算速度已很高,容量也很大,且越来越广泛地

应用于桥梁领域中，使得工程结构分析（如 MIDAS CIVIL 软件、ANSYS 软件、同济启明星软件、BIM 技术等）成为一件可以较为圆满解决的事情，从而使设计师从以前繁重的结构计算中摆脱出来，并能设计出诸如日本明石海峡大桥、丹麦大贝尔特桥、中国香港汀九大桥及青马大桥等著名桥梁建筑来。但鉴于计算机本身不能对效能差的结构体系做出有利的修改，这将导致其接受不合适的结构体系。因此，当今的设计师不能仅局限于能够使用结构分析软件，分析软件只是一种辅助实现手段，许多创造性的劳动需要设计师本人去做，只有通过对桥梁建筑技术广泛而深入的研究，才能使自己设计出的桥梁结构优越、技术可行、经济合理、美观协调，以弥补计算机的不足。

列举一个典型的例子：1963 年，著名结构设计大师林同炎设计了尼加拉瓜首都马那瓜市美洲银行大厦；1972 年 12 月 23 日，马那瓜市发生强烈地震，多座楼房倒塌，而美洲银行大厦虽处于地震震中，却承受了比设计地震作用 0.06g 大 6 倍的地震作用而未倒塌，仅墙体有很小的裂缝。原来，该建筑总体设计是由 4 个柔性筒组成，并对称地由连梁连接起来。该建筑在风荷载及设防烈度地震作用下，表现为刚性体系；当遇强烈地震时，通过连梁的屈服，4 个柔性筒彼此孤立起来，成为具有延性的结构体系，显著减弱了地震响应，防止了明显的扭转效应（由于结构对称布置）。该建筑堪称林同炎教授概念设计的代表作。

科学系统地建立桥梁建筑学是当务之急，也是桥梁工程由零散、经验型走向系统、科学型的主要要求之一。

1.2 桥梁建筑学的特点

要讲桥梁建筑学的特点，或许只有将其与房屋建筑学进行对比方可显示出来。笔者以为，桥梁建筑学与房屋建筑学的异同之处也就是桥梁与房屋的异同之处。

房屋结构有如下特点：

- (1) 主要是围护结构。
- (2) 所处地形平坦，或需预先整平。
- (3) 地质变化不大。
- (4) 以受压为主。
- (5) 柱子（筒体或承重墙）等是其主要承重构件。
- (6) 恒载占总荷载的绝大多数。
- (7) 施工往往采用支架由下而上逐层建造。

而桥梁结构有如下特点：

- (1) 主要是跨越结构（外露），其跨度往往是房屋建筑所无法比拟的。
- (2) 往往跨越大河、峡谷，甚至海峡。
- (3) 其跨越的地形、地质均复杂多变。

(4) 顺桥方向常呈狭长带状。

(5) 桥跨主要承重构件以受弯剪(梁)、压(拱)或拉(索桥)为主。

(6) 活载(车辆、行人等)占相当大的比例。

(7) 施工方法多样,施工历程复杂,并可能发生复杂的体系转换。

这就决定了桥梁不同于房屋建筑的最大特点便是桥梁建筑造型首先必须满足静力平衡的要求,这种以受力为重心的建筑特点正是桥梁建筑学的特点。

作为反面例证,巴黎塞纳河上的“奥斯特利兹阿芒特桥”失败的建筑师设计图(见图 1.1)^[2]令人震惊,依笔者之见,正是由于这些曾经设计过房屋建筑的大名鼎鼎的建筑师对桥梁建筑特点缺乏了解,才酿成此果。

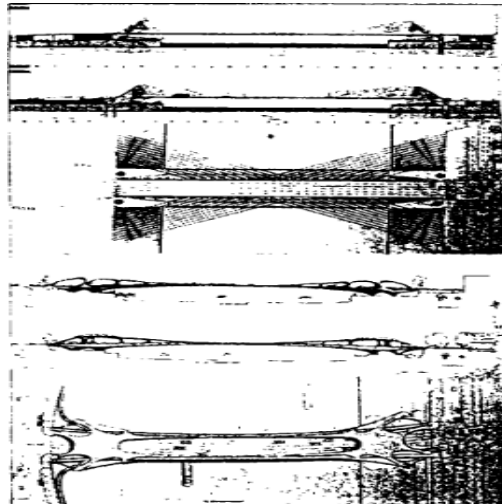


图 1.1 奥斯特利兹阿芒特桥”失败的建筑师设计图

笔者不才,撰文提出桥式设计应遵循的二十条准则、桥梁孔跨布置应遵循的二十条准则、桥梁内力粗略分析方法及有关体系转换应遵循的十条准则、桥梁景观设计等,系统地阐述对桥梁建筑学的理解。

1.3 桥梁建筑学的内容

桥梁建筑学应该不仅仅是桥梁美学,还应该包括桥梁最优受力理论,并将其放在一个非常重要的位置上,同时,也包括桥梁总体设计、方案设计与比较等。

桥梁建筑学所需的基础理论知识有:工程力学(理论力学、材料力学、结构力学)、结构设计原理、水力学及土力学、桥梁发展史、桥梁总体设计与施工方法、建筑美学等。而桥梁建筑设计是以上基础理论与建筑技艺(景观建筑设计)的有机融合。

考虑到桥梁有关基础知识已在普通的桥梁工程教科书中多有论述,而桥梁美学,甚至

景观建筑设计又有专著论述，故在此只做简要介绍，将重点放在桥式最优设计理论、桥梁孔跨布置、横断面形式选择以及方案设计与比选上，并以宁通公路泰州引江河大桥为例，简要介绍了该桥的方案构思及设计等。

1.4 桥梁与建筑

在漫长的古代和中世纪，从事建筑营造活动的工匠，既是建筑师，又是结构工程师。后来，随着建筑功能的大大增加及结构的复杂化，才出现了建筑师与结构工程师的分工。但是，桥梁就有所不同，直到现在，一位桥梁设计师既是建筑师，又是结构工程师。依笔者之见，究其原因大概有三条：

(1) 桥梁的功能并不复杂，其建筑设计可由结构工程师代替。

(2) 桥梁所受荷载较房屋建筑特别大，因而，其造型大多以结构受力合理为重心进行选择，也就是说，桥梁建筑设计与结构设计联系非常紧密。

(3) 桥梁建筑设计与施工方法紧密相连，而施工方法与结构受力分析息息相关，这是桥梁工程的显著特点之一。

可见，桥梁建筑是以结构为重心的，即主要承重构件系统决定其外形。那么，桥梁建筑的艺术就是一种结构艺术。

结构艺术与建筑艺术的区别体现在前者是以传力为重心，后者则以赏心为中心。和建筑艺术相比，结构艺术在构件尺寸、建筑用途和形式三个方面有其特点：

(1) 必须充分了解工程条件包括工程自然条件（勘察）与工程设计标准。

(2) 构件尺寸相当大，需要按工程力学原理进行工程设计。

(3) 用途比较简单，即功能单一。

(4) 形式本身的设计是为了控制应力或变形，而非创造空间。

(5) 结构清晰地标明荷载的传递与构件的连接。

1.5 桥梁与系统论

美国《国家科学教育标准》对科学素质的定义是：了解和深谙进行个人决策、参与公民事务和文化事务、从事经济生产所需要的科学概念和科学过程。

桥梁的确是一系统工程。其构思与规划、勘察与设计等无不从整体出发、系统地考虑问题。因此，桥梁建筑设计与构思应该以系统论（还包括控制论、信息论、协同学、突变论与耗散结构论、辩证唯物论等）作为理想的思维方式。了解系统论，相信会对建筑设计产生潜移默化的作用；而强化系统思维能力的途径是下围棋，因为围棋是演绎系统论的沙盘。

这里，扼要介绍系统论的一般概念与原理。

既可由若干部分（要素）按一定的规律、以特定的结构形式组成有机的整体，并产生不同于各组成部分（要素）功能的特定功能，又可以将有机的整体分解为若干相互联系、相互作用的部分（要素），那么这个有机的整体被称为系统。

桥梁是一工程结构，它以有效地传递荷载来组织桥梁各构件，并产生可跨越障碍物、使交通便捷等新功能。因此，桥梁是一系统。一般桥梁系统如图 1.2 所示。

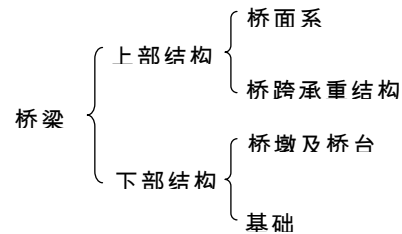


图 1.2 桥梁系统

所谓要素，是指系统内若干层次内或若干层次间相互关联、相互作用的部分、单元或成分。它是系统的基础与载体，决定着系统内部的联系、结构与功能等，因而也决定着系统的本质。

结构与功能、整体与部分是系统的重要参数。

系统论的基本原理有：

[整体性原理] 一个系统的要素，可以成为一个系统，即子系统；同样，一个系统也可看作更大系统的子系统。可见，系统与要素是相对而言的。系统各要素集合在一起，共同协作，在共同完成各自任务（笔者建议称为子目标或子功能）的基础上，实现系统目标（系统功能）。系统的功能大于各要素功能之和。它是系统论的基本原理，其科学地揭示了要素与要素、要素与整体间的关系问题。

[相关性原理] 系统的各个组成部分（可作为子系统）间是既相互依赖，又相互独立的，各自拥有各自的特定目标（笔者建议称为子目标或子功能）。子目标的实现除了依赖该子系统各要素的努力外，还必须依靠其他子系统提供支持。一个子系统在实现自己目标的过程中，又必须为其他子系统提供必要的支持或对其他子系统提出必要的制约。不但系统内部各要素间具有相关性，而且系统与外部环境也具有相关性：从关联的内容上分，有物质关联、能量关联与信息关联；从关联的确定程度上分，有肯定因果关联、统计因果关联与模糊因果关联；从关联的方向上分，有单向因果关联与双向因果关联等。

物质流与信息流是系统运转状态的重要标志之一。

[功能性原理] 任何一个系统都有自己的功能。系统为完成自己的功能而存在。系统为很好地完成自己的功能而发展着。

[层次性原理] 系统结构是由层次或要素按一定的规律进行排列组合而形成的。一个

系统可有多个子系统，一个子系统又可有多个子子系统，即孙系统等等。系统具有可再分性，同时系统也具有可集成性。

[有序性原理] 系统结构层次与诸要素在激励与协同作用下，其在系统中的位置与排列顺序（空间排列的有序性与时间排列的有序性）总是尽量地适应功能的需要，并使系统功能最大化。

[动态适应性原理] 系统内部诸要素的相关性及系统与外部环境的相关性都与时间密切相关，都会随时间不断地变化；系统整体具有方向性和目的性，它控制着各要素的功能，协调着各要素之间的比例关系，控制着各要素协同作用的进行；诸要素之间的协同作用是系统整体由无序状态转向有序状态的动力；当诸要素协调适应时，系统处于整体平衡状态；当诸要素不协调时，系统处于不平衡状态。

[可调控性原理] 系统是可控制的，通过负反馈控制可实现其稳定性，通过正反馈控制可适应外界环境的变化。

[最优化原理] 总可以在一定的条件下，通过有效地组织系统各要素，使得系统在某个方面（如功能、结构、过程等）实现最优。

以上各原理并不是孤立存在的，而是相互解释、相互补充的。

笔者相信，系统论与桥梁建筑设计原理是相通的，只不过前者是一般性原理，而后者是特殊性理论。

1.6 桥梁工程建设程序

【流程】 项目中各个工作（过程）按其相互间工艺关系及组织关系进行的顺序排列与安排。

1. 设计流程与制造流程的不同

- 设计具有虚拟性
- 制造具有实体性

2. 设计过程的特点

- 开放性
- 综合考虑
- 综合权衡
- 选择最优（平衡点）

3. 土木工程设计特点

- 不确定性

- 创造性
- 多专业性
- 勘测与设计的结合

桥梁工程纵向建设程序如图 1.3 所示。

预可行性研究 (项目建议书) → 可行性研究 (可行性研究报告)
 → 项目咨询评估
 → 方案设计/初步设计 → 专家论证 → (技术设计) → 施工图设计/最终设计
 → 审查与咨询
 → 施工与安装阶段 → 运营 (养护与维修) 阶段

图 1.3 桥梁工程纵向建设程序

桥梁是路网的一部分。桥梁设计于道路工程中的关系如图 1.4 所示。

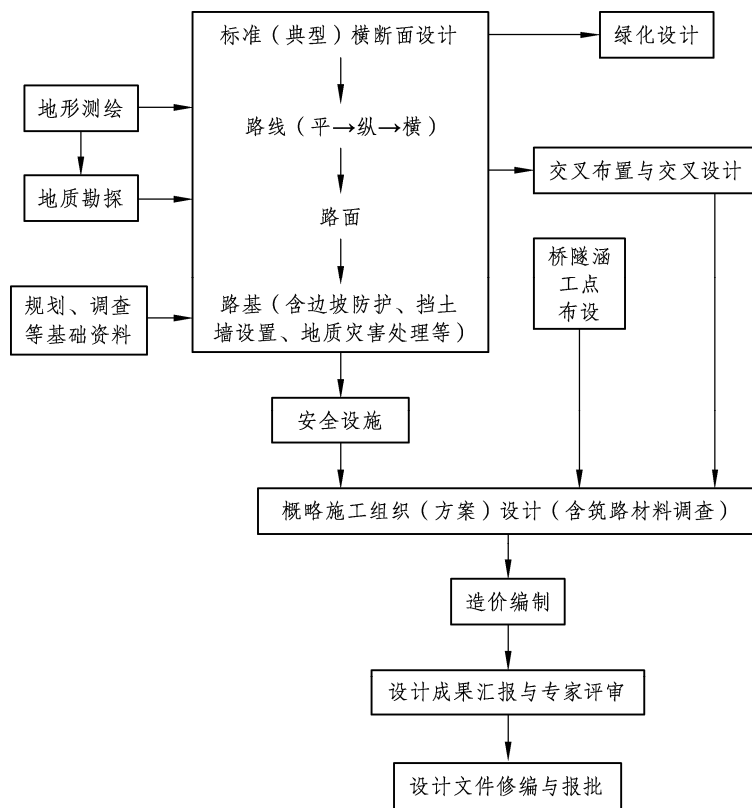


图 1.4 桥梁设计与道路工程的关系

桥梁设计团体内部分工及工作流程，可参考附录 C。

1.7 与桥梁建筑学相关的主要学科

与桥梁工程学发生关系的周边科学极为复杂，主要包括：

- 数学力学发展史、土木工程发展史与建筑发展史
- 系统论、规划与建筑学、设计学、美学
- 建筑材料与装饰材料、工程机械
- 道路工程、交通/运输工程、车辆交通特性
- 工程数学（微积分、线性代数、概率论与数理统计、泛函分析）
- 工程力学（理论力学、材料力学、结构力学、弹性力学与有限元分析、土力学、工程地质、边坡稳定与基础工程、水力学、流体力学与桥涵水文）
- 计算机科学（CAD）、结构分析与工程制图
- 大地测量与工程测量学
- 风工程学与桥梁抗风与抑振、地震工程学与桥梁抗震
- 工程控制与管理（合同、风险、质量、进度、投资、安全与环境等）
- 结构设计原理、工程经济
- 结构施工方法与施工顺序
- 地理、气象与环境保护

1.8 桥梁设计与设计科学的交叉

与设计科学发生交叉的科学主要包括：

设计现象学：设计史、设计分类学、设计经济学

设计心理学：设计思维、创造心理学

设计行为学：设计方法学、设计能力研究、设计程序与组织管理、设计建模

设计美学：设计技巧、设计艺术、设计审美、形态艺术

设计哲学：设计逻辑学、设计伦理学、设计价值论、设计辩证法

设计教育学

设计的评价体系主要包括：

设计的科学性评价体系：

功能体系——保护功能、力量功能、生存功能、发展功能

材料体系——天然材料、人工材料、合成材料

结构体系——位差结构、转动结构、滑动结构、机械结构

设计的适用性评价体系：

技术体系——手工技术、机械化技术、自动化技术

价值体系——原料价值、劳力价值、营销价值、智能价值

安全体系——操作安全、环境安全、运转中的安全、使用中的安全

设计的艺术性评价体系：

审美体系——造型美、色彩美、肌理美

人机体系——人体尺度、心理尺度、文化尺度

1.9 建筑师与结构工程师的分工与协作

科学是研究和发现自然和人类社会固有的规律；工程是以综合的学科知识为基础，实现或完成人类设定的某项实际功能；而建筑艺术实现的则是建筑的统一美、比例美、平衡美、和谐美、韵律美和协调美等。

科学不能被创新，只能被发现；工程则可以创新，可以根据不同的条件和要求灵活处理，寻求最合适的解决方案；建筑艺术也应遵循一般的准则，但针对不同的对象甚或不同的时期，可能会有所差异，不能固守成规。建筑艺术切忌单纯追求新奇、怪异，要做到“感性和理性的统一，客观和主观的统一，形式和内容的统一”。

当今的部分建筑师以艺术家、美学家自居，缺少对技术真正的理解，并无技术构思创新的灵感，缺乏与工程师广泛而真诚的合作，其建筑设计往往流于表面化，难以逃脱美学范畴，进而阻碍了建筑上的创新。

相反，有的结构工程师却“重视内在的东西、轻视外在的东西”，偏重于对技术本身和内在组织关系的思考，容易陷入烦琐的计算及复杂的细部处理过程中，并将涉及自然、社会和人的心理感受等建筑问题简单地归结为单向的技术问题，成为某种程度上的“唯技术论者”。

对于技术与艺术的关系问题，著名的结构工程师、建筑师奈尔维在《建筑的技术与艺术》一书中讲道：

一个技术上完善的作品，
有可能在艺术效果上很差；
但是，无论是古代还是现代，
桥梁建筑的结构构思与设计技巧，
却没有一个美学上公认的杰出杰作，
在技术上却不是优秀的。

这里，奈尔维太看重艺术了，而忽视了技术的重要性，因为，满足功能的结构不可能不美。作为反面教材，文献[2]已证明了一切。

另外，当前中国建筑作品乏善可陈的现象确与“重视艺术，轻视技术”的观念紧密联系，例如如同迷宫般的室内流线组织。对于奈尔维的这一观点，笔者当然不敢苟同。

与“重艺术、轻技术”的建筑师相反，“重技术、轻艺术”的工程师们却走向了另一个极端，如中国许多大城市里十字路口处修建的四通八达的螃蟹式人行天桥，其遮天蔽日之态、横行霸道之姿，对城市空间造成了无理侵占，不论是对行人、还是行车，都让人产生压抑的感觉。另外，不协调的孔跨布置、过分压缩桥孔、与环境格格不入的桥式选择等随处可见。

追求怪异桥型也成为有些投资方的要求之一。

著名的结构设计大师林同炎说：“从科学出发做设计，达到艺术的目的。”笔者以为，林大师道出了技术与艺术关系的真谛。事实上，建筑学确是介于技术与艺术之间的学科。虽然建筑师偏重于艺术方面，而工程师偏重于技术方面；虽然有的建筑偏重于技术，而有的建筑却偏重于艺术。但评价一座建筑时，采取双重标准（即技术与艺术）是始终存在的，也是客观的、合理的。这就要求建筑师与工程师之间密切配合，要求建筑师充分重视技术的作用。