

高等学校教学用书

中大跨建筑结构 体系及选型

虞季森 编



中国建筑工业出版社

高等学校教学用书

中大跨建筑结构 体系及选型

虞季森 编

中国建筑工业出版社

目 录

第一章 结构及其体系的发展	1	§ 5-4 拱脚推力	174
§ 1-1 建筑的性质	1	§ 5-5 结构布置	184
§ 1-2 建筑的专业分化	4	第六章 壳体 (Shell)	198
§ 1-3 结构的空間性	7	§ 6-1 发展简况	198
§ 1-4 结构的科学性	17	§ 6-2 力学特征	199
§ 1-5 结构的艺术性	22	§ 6-3 发展的主要障碍	200
§ 1-6 建筑师与工程师	35	§ 6-4 筒壳 (Barrel shell)	202
§ 1-7 推动结构发展的主要因素	35	§ 6-5 球壳 (Domed shell)	216
§ 1-8 中、大跨结构面临的主要问题	37	§ 6-6 双曲扁壳 (Shallow Shell)	226
§ 1-9 合理用材	38	§ 6-7 鞍壳、扭壳 (Hyperbolic Para-	
§ 1-10 材尽其用	41	boloid, 简称Hypar或H.P.)	229
第二章 梁 (Beam)	47	第七章 折板 (Folded Plate)	243
§ 2-1 受力特征	47	§ 7-1 力学特征	243
§ 2-2 合理选材	48	§ 7-2 折板梁 (梁式折板)	244
§ 2-3 截面善变	53	§ 7-3 折板墙柱、折板刚架	249
§ 2-4 结构布置	58	§ 7-4 折板拱	252
§ 2-5 降低弯矩峰值	64	§ 7-5 折板壳	255
§ 2-6 预加应力	72	§ 7-6 折板穹顶、折板伞	256
§ 2-7 多跨连续	74	§ 7-7 折板结构特点	256
§ 2-8 悬挑结构	76	第八章 网壳 (Lattice Shell, Reti-	
§ 2-9 改变结构型式	102	culated shell)	257
第三章 桁架 (Truss)	106	§ 8-1 发展简况	257
§ 3-1 平面桁架 (桁架)	106	§ 8-2 筒网壳	257
§ 3-2 立体桁架	116	§ 8-3 球网壳	263
§ 3-3 空腹桁架	118	§ 8-4 扭网壳	270
§ 3-4 结构布置	120	第九章 网架 (Space truss)	272
§ 3-5 结构的格构化	127	§ 9-1 发展简况	272
第四章 刚架 (Rigzd Frame)	128	§ 9-2 交叉平面桁架	273
§ 4-1 改善梁柱弯矩	129	§ 9-3 交叉立体桁架——角锥体系	274
§ 4-2 适应梁柱弯矩	134	§ 9-4 主要尺寸	275
§ 4-3 艺术处理手法	138	§ 9-5 杆件与节点	275
§ 4-4 结构布置	140	§ 9-6 支承	277
第五章 拱 (Arch)	145	§ 9-7 平板型网架优缺点	280
§ 5-1 拱的实践	145	§ 9-8 折板型网架	283
§ 5-2 拱轴线形	160	第十章 吊挂结构 (Suspended	
§ 5-3 拱身构造	163	Structure)	285

§ 10-1	发展简况.....	285	§ 11-4	双层并列索系(双层平行索系).....	301
§ 10-2	吊挂结构特征.....	288	§ 11-5	双层辐射(轮形)索系.....	301
§ 10-3	悬吊式吊挂结构.....	289	§ 11-6	索网结构.....	305
§ 10-4	斜拉式吊挂结构.....	289	§ 11-7	索壳组合结构.....	314
第十一章	悬索结构(Suspended Cable Structure)	295	§ 11-8	索杆组合结构.....	314
§ 11-1	悬索结构特征.....	295	§ 11-9	悬索结构的优缺点.....	316
§ 11-2	单层并列索系(单层平行索系).....	296	附录	作业题.....	318
§ 11-3	单层辐射(碟形)索系.....	300	主要参考资料.....		322

第一章 结构及其体系的发展

§ 1-1 建 筑 的 性 质

几千年来建筑发展历史中无数实例都证明，任何建筑物都应具有适用、坚固、美观三要素。这就是建筑的三个最基本的性质。

一、功能性——适用

人类为达到一定目的而建造房屋，故对建筑提出功能要求。功能需要不仅提出人类活动的物质要求，同时还有与生活密切相关的社会要求。所以建筑是自然科学与社会科学相结合的产物。

功能要求并非一成不变，随社会生产的发展，人民生活水准的提高，功能要求也是逐渐由低级转向高级，不断变化的。

功能要求既然如此，建筑也就随之不断演变、改善提高、推陈出新，乃形成几千年的发展历史。

二、艺术性——美观

功能不仅具有社会与物质的内容，也应包含精神的内容；应使建筑物的室内、外空间环境能对人类精神面貌起着有益的作用。因此，要按一定的美学原则对建筑进行整体构思与设计，使之成为更丰富、完善、美观的艺术作品。

建筑作为物质存在与其他艺术作品有根本区别，即除精神功能要求外，更必须满足社会与物质功能要求。其实，建筑是精神与物质的完整统一体，具有艺术与实用的双重性。它既服从功能要求，又具有产生主观感情的美学效果。这一双重性使它与其它艺术处于完全不同的另一领域中。在其他艺术中，制约艺术创作的技术手段，不象建筑那样，具有如此重大的决定性意义。遗憾的是，从古至今，建筑评论几乎都只立足于美学与形式，而很少从技术方面去评价与理解，阐明其形式与实物间的关系。当然不能否认，对某些建筑（如纪念性建筑等）有时美学要求甚至超过物质要求。同时也得承认，某些在美学上不错的方案，也许无法建造，这种情况并不罕见。若房屋无建成的可能，其建筑艺术又何从依附呢？一个不能成为现实的建筑构思与方案，又有何价值可言呢？

二、实践性——坚固

有了物质与精神功能要求，再进一步按此要求进行构思，提出设想与蓝图。然而要把蓝图建成房屋，不仅需要工程师的努力，也是建筑师的基本职责。只有双方协同努力，才能圆满实现共同目标。

实践不是件简单容易的事。首先是建造，要受到当时当地人为条件与物质条件的限制，如材料、劳力、工艺设备、施工技术等条件，而这一切与社会的生产与生活水平密切相关。只有考虑到当时当地的客观条件，房屋才有建造成功的可能。例如穴居时代，人类最初为遮烈日、避风雨、御禽兽，只能寻找天然岩洞，因崖成室以栖身（图1-1a）。以后

有了简单工具，才选定地势较高的山麓山丘挖土为穴。后来人类仿照燕鸟用泥土与枝条筑窝，修筑巢居（图1-1b）。再后，人类用树枝竹杆搭棚为舍（图1-1c、d）。随着人类思维与技艺的进步，最终用土坯、石块、砖块垒墙为屋（图1-1e~g）、烧砖砌房，开始走向人造建材的道路。这一切生动说明，只有依靠当时当地的人力与物力，才能实现房屋的建造。

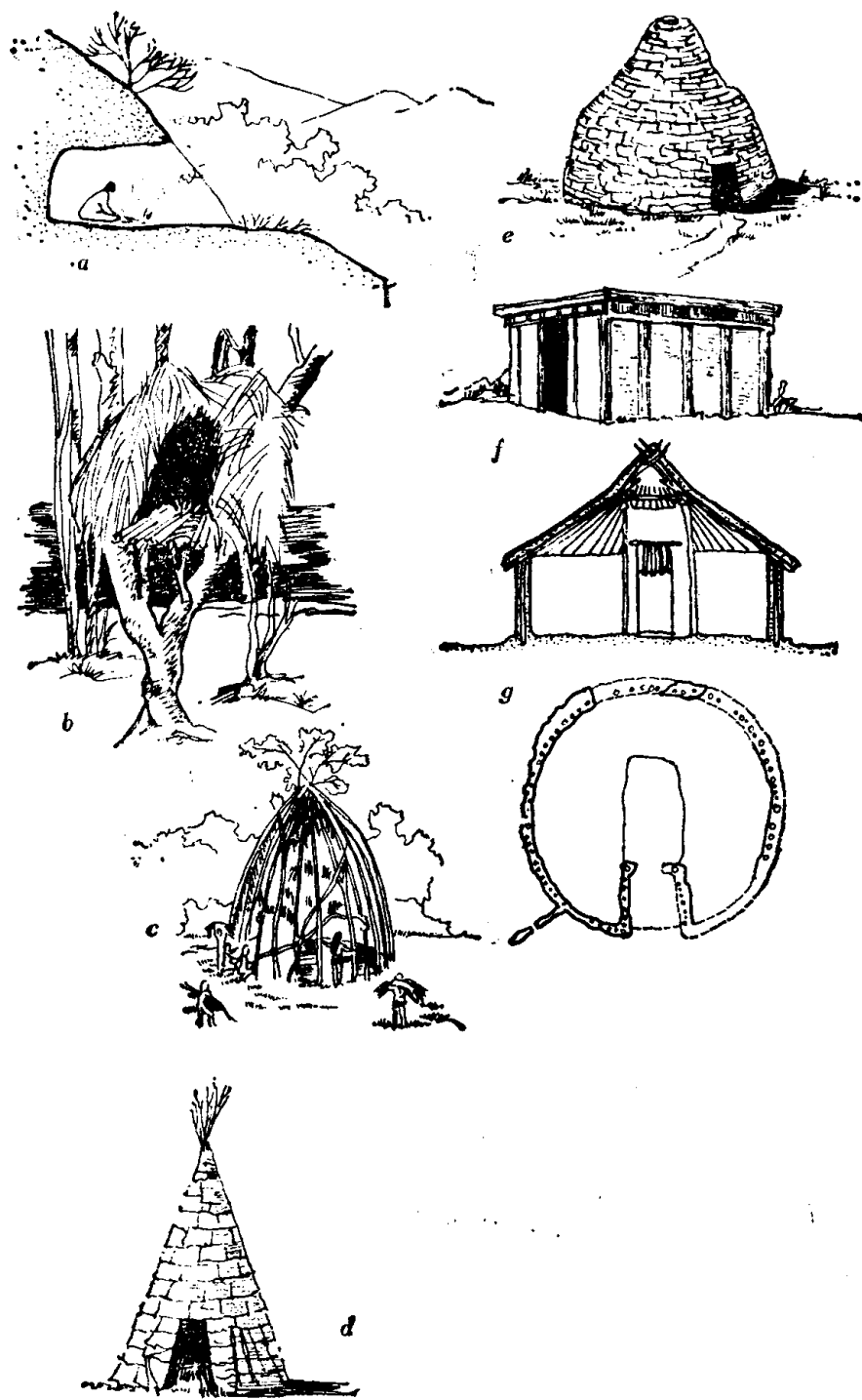


图 1-1 原始建筑

a—天然洞穴 (Cave)；b—马来亚半岛土人的巢居；c—树枝棚 (Twig hut)；d—帐篷 (Tent)；
e—蜂巢屋 (Beehive hut)；f—梁柱木屋；g—西安半坡村遗址

其次是留存。建好的房屋还要经受住当时当地自然环境，如气候和地质条件的考验。若前述的人为物质条件是人能控制的话，则建筑地点的自然环境条件至今人尚不能完全控制。除了选择建筑地址外，设计者只能使建造出来的房屋能适应自然条件的要求。例如建筑的日照、采光、防水、隔热防寒、隔声、采暖、空调、抗风雪、抗地震等，这些都需要通过建筑构造、物理、设备、结构等专业知识妥善加以解决。

总之，建筑物既要在客观世界中建造并留存下来，就只能按客观规律行事，处理设计与施工中的一切问题，切不可随心所欲，否则将自食其果。

建筑史上这方面实例不少，但最能说明建筑师将以何等努力去实现其设想方案的实例，莫过于20世纪70年代建成的澳大利亚悉尼歌剧院。该歌剧院建成后，因其建筑形式不同一般，引起了极其广泛的反响，誉毁参半。在此且不谈其造型与功能的成败，仅就其设想方案的实现作一介绍。剧场的双厅并列，有8只对称互靠壳体，另有餐厅两只壳体。一连串双曲壳体向上悬臂斜挑，姿态各异，这在丹麦建筑师伍重（Joern Utzon）获奖方案图纸上（图5-34a、b）几笔素描非常容易收到艺术效果。方案既未按正规方法制图，更未深究其实现的可能性。1957年1月，该方案在国际设计竞赛中获首奖，并为澳大利亚政府所入选后，他深感此方案的实现全有赖于结构设计与施工。为此，他专程去伦敦，登门求教于与意大利建筑师奈尔维（Nervi）同被公认为欧洲结构权威的结构工程师汤姆生（Peter Thompson 1895~，丹麦人）。后者指出，方案不同凡响，但壳体体型和结构设计与施工的经济合理性相违背，但未按常理加以拒绝，仍积极着手探索现实方案。这是他对建筑师的支持，也是原方案得以实现的重要关键。

原方案并非完全没有考虑结构问题，也曾猜算了壳体厚度，壳顶100mm，壳底500mm。然而在结构选型和施工手段两重要问题上都失误不小。

首先是原方案10只壳体的壳形各异，既不利于现浇，更不利于预制，既欠考虑施工手段，又没把握住经济后果。在双方长期研讨后，Utzon在61年修正了原方案。他先选取一个直径75m的圆球面，在其上割划出大小不同的三角瓣，作为10个壳体的曲面，以统一各壳面大圆线的曲率半径，使拱肋曲线一致，以利预制。

其次，也是更重要的问题，是错误估计了壳体的受力状况，选择了不利的结构型式——壳体。众所周知，壳体的所有优越性都来自其一个基本的受力特性，即壳以凸向外荷的曲面板的薄膜应力来抗衡并传递外荷。若外荷指向壳体凹面，或让壳体竖向悬挑承受弯矩，这都不能充分发挥壳体结构的优势。风载一般属附加荷载，对一般平放的壳体由于其流线型，风荷不大，且风吸力常小于壳体自重。但悉尼歌剧院的壳体是一面敞口并斜向悬挑的，当风从敞口方向吹来时，虽有大玻璃幕墙，却仍成了招风的因素。这么大的风荷，作用在壳体的敞口面，会产生很大的倾覆力矩，又缺乏壳体（薄而轻）自重来稳定，唯一办法是把壳体设计得又厚又重，并能抵抗悬臂弯矩产生的拉力。但这厚重的斜挑壳体自重所产生的弯矩，当风从壳体非敞口方向吹来时，不仅不起稳定作用，相反还增加倾覆力矩。若把壳体斜度稍加改变，则能减少其自重弯矩，但建筑师认为这会因之失去壳体明快飘扬的观感，又未予同意。

最初，Thompson曾按几种结构方案做模型试验，其中有抛物线型壳体、带肋壳体和上下相距1.2m的双层壳体，但经三年努力没有成功，才不得不放弃壳体方案。可见原方案不仅壳厚100~500mm猜算错了，而且让壳体去承受若大的弯矩，是选错了结构型式。

该工程自1959年地下结构动工，但直到1963年上部结构的选型才获得解决。最后决定采用预制的Y形与T形截面钢筋混凝土落地三铰拱肋的结构方案（图5-34c~e）。挺立的拱肋由大到小顺序成对并列拼接呈壳状，就位成型后用后张法施加预应力，使之形成整体，又能防止受拉开裂。拱肋上铺预制扇形混凝土板，用人工合成的结构胶粘接。其外表面贴白瓷砖。拱肋边缘很厚（图5-34e），显得笨重。与原方案壳体素描的印象迥然不同。所以方案的构思必须考虑其实现的可能性，否则必事与愿违。

由以上分析可见，建筑既是自然科学与社会科学相结合的产物，又具有物质与精神的双重性。科学、社会学与艺术三者完美结合，才能构成完整的建筑物。随着社会生产、生活、文化、教育、科技的迅猛发展，这三者的关系日益紧密，现在已经出现了三者互相渗透的趋势。艺术性与社会性越多地建立在科学的基础上，就越揭示出更高的理想。科学技术越多地建立在艺术的基础上，就越具有更美的力量。三者如何融合协调构成整体统一的建筑物，始终是备受关心、大有文章可做的课题。

§ 1-2 建筑的专业分化

在建筑工程建设的组织形式上，有两类主要的体制，身兼全责的工程技术主持人和多专业分工合作的工程技术主持班子。

一、身兼全责的工程技术主持人——经验时代

在古埃及，主持工程者号呼“王家工程总管”，据有很高权位，却并非技术负责人。古希腊的文化与技术比较先进。雅典卫城内的帕提农（Parthenon）神庙工程（公元前448~432年）由伊克提那斯（Ictinus）、卡里克拉特斯（Callicrates）和雕刻家菲狄雅斯（Pheidias）负责。古罗马著名工程的监造人是政府委派的检查官，并无工程知识，仅依靠来自希腊的技术人员或受过专业训练的奴隶来修建工程。

在欧洲，直到中世纪仍然称管理工程 and 解决技术问题的负责人为“师傅”。他不仅要考虑建筑的使用要求、造型宏伟壮观、美化与艺术处理，还要在施工过程中决定结构尺寸、指挥安装模板，若因坍塌还须进行返工，君士坦丁堡的圣索菲亚大教堂（公元532—537年）工程由两名西亚人安提莫（Anthemius of Tralles）和伊苏道录（Isidorus of Miletus）负责。在12世纪下半叶哥特式建筑形成一整套兼有艺术性与创造性的结构体系之前，还处于逐步积累经验过程中。当时科学尚不发达，结构无法预先计算，全靠工匠在实践中摸索。那时，建筑工匠已进一步专业化，石匠、木匠、铁匠、抹灰匠、彩画匠、玻璃匠等分工很细，专业技术因而很精。但在追求建筑的高大空间与轻巧体型愿望下，拱跨过大或柱墩过小，会导致坍塌事故。12世纪中叶建筑事故不断发生。在新愿望促使下，工匠们感到过去因袭前例或借助于分析建筑画面比例以预期安全都靠不住了。于是从专业工匠中逐渐产生了专业的建筑家或工程家。到12世纪中叶以后，主持教堂工程的僧侣们也感到再也不能自以为是了，不得不把工程技术决定权交给工匠的主要负责人——建筑家或工程家。

从哥特式建筑时代直到16世纪下半叶文艺复兴末期，工程技术主持人多是建筑家或工程家。这两者毫无区别，都由艺术家充任而非科学家。他们设计建筑并不探究力学与材料

性能，因他们认为这些都是当时自然科学界的事。他们仅利用数学工具探索图案比例谐调。然而在他们中间也有两种倾向。顽固坚持艺术观点而摒弃科学观点者，最关心的是建筑外观比例尺度，把艺术性置于首位，把科学只用在处理图法则上。

然而，既重视艺术又重视结构的范例也很多。最杰出的是15世纪上半叶文艺复兴发源地之一意大利佛罗伦萨主教堂中，内圆直径42.21m的八角形大圆顶拱结构（详见图5-50及其说明）。工匠出身、兼长于建筑理论与数学的意大利建筑家布鲁诺赖斯基（Filippo Brunellesco, 1377~1446）在15世纪初曾去罗马，学习研究作为中世纪建筑根源的古罗马建筑及其拱券技术，潜心钻研探索达几年之久。罗马万神庙及其它古建筑，深深影响他未来的建筑设计。自从他接受佛罗伦萨主教堂圆顶工程委任后，废寝忘食、制作模型、研讨探索，制定详细的结构与施工方案。他兼取古罗马与哥特式两种结构之长，采用尖拱式八叉肋形空间拱结构，为前所未有的创新，乃是令人惊讶的奇迹。当圆顶建成（1420~1434年）之际，立即激起了一片欢呼的反响，其结构构造之精致、规模与技术水平均远超古罗马、拜占庭与哥特式建筑之上。不仅是当时最大穹顶之一，也被公认为意大利文艺复兴建筑的第一个作品，它标志着意大利文艺复兴建筑史的开始。无疑地也已成为建筑史上最伟大的建筑与结构完美融合杰作之一。

由于过分重视艺术而在结构上失败的最突出例子是有名的建筑家伯拉孟特（Bramante）督造的罗马圣彼得大教堂中支承圆顶的石墩。

意大利文艺复兴最伟大的纪念碑是罗马的圣彼得大教堂（图5-51），它集16世纪意大利建筑、结构与施工的最高成就。该工程从公元1506~1612年，共经八次工程委任的更迭，先后由十一位罗马最优秀的建筑家相继主持下，历百余年之久才建成的。1506年第一次委任伯拉孟特为工程主持人，按其自己的方案施工。但由于过分重视艺术而导致多次在结构上失败。下届接任者不得不把支承大圆顶的石墩尺寸放大、并加固基础。他由此而得“事故大师”之诨称。他与佛罗伦萨主教堂大圆顶工程主持人建筑家布鲁赖斯基相比，非但不如前辈，反而大大倒退了。

在不断进步的历史过程中，有倒退的，但更多的建筑家是前进的。就在这同一工程的主持人中，最著名的当推意大利画家、雕刻家、建筑家米开朗琪罗（Michelangelo, 1474~1564）。1546年第五次委任当时72岁的他为圣彼得教堂的工程主持人。他恢复了希腊十字平面，简化四角布局，重新设计半圆形后殿及其外围小室，又大大加强支承圆顶的四个柱墩，设计净跨达41.91m的大圆顶，并实地指挥施工。不幸，1564年在他死前工程仅完成到鼓座，他留下圆顶与采光塔的模型。第六次委任的工程主持人泡达（Porta）和封丹纳（Fontana）大体按该模型建成圆顶。所以现存建筑主要部分的杰出面貌，应归功于他精湛的设计才华。

上述各例都清楚说明，那时的工程技术主持人都是艺术家，无论称其为建筑家或工程师，都是一人身兼全责：建筑、结构、营造（当时尚无设备专业）。无论他重视或轻视结构技术，其职责所在，他必须对工程的设计与建造负完全责任。

自文艺复兴开始，建筑家的作品都具有个人特殊风格。凡著名建筑物，其设计者都可从其风格辨认出来。

文艺复兴晚期最伟大建筑家意大利人帕拉第奥（Palladio, 1518~1580）在维晋察（Vicenza）城设计建造凉廊时，在拱券下刻上自己姓名，并附加“建筑师（Architetto）”

头衔。由此，“建筑师”一词第一次被公认，并从此沿用至今。“建筑师”一词的希腊与拉丁原文，都是系分两半，前半意为“主持人”，后半意为“木工”。

二、专业分化——科学时代

“工程师”称号的出现比“建筑师”要早。

在我国战国时期（公元前475~221年），鲁公输般曾“为楚设机，将以攻宋”（《国策宋策》）。公元前32~22年间，古罗马任建筑工程家官职的维特鲁威（Vitruvii）所写《建筑十书》的末章几乎有一半论述攻守器械。可见自古以来，无论在东方或西方，建筑工程家就为军事服务。

12世纪起，西方把“巧人（Genie）”一词用于掌握军事攻守技术者。12世纪下半叶，建筑工匠进一步专业化，产生了建筑家或工程家。

“工程师（Engineer）”一词在英、法、意、德等国原指军事武器和碉堡督造者。15世纪，建桥开运河者也自称工程师。15世纪后，其意义更加扩大。

现代的“土木工程师（Civil Engineer）”一词始自法王路易十四时代，称军事城塞工程主持者为Ingenieur Civil，该词来自法语“巧人”。当时他们既为军界也为民界服务。但即在那时，结构型式制定者仍不自以为工程师，而只是自然科学家。

自15世纪建筑被视为纯艺术后，第一次把建筑艺术与技术作为两门专业的，是意大利建筑家阿尔伯蒂（Alberti，1404~1472）所著《厦经》十卷。该书中，他分述设计理论与结构构造。他认为构图属于视觉领域，故属形而上学，是精神性的，也就可以制约结构。他认为结构虽决定建筑骨架，但究竟属物质性，应退居于次要地位，甚至可复以装饰作为伪装。这种唯心观点给文艺复兴建筑哲学以致命危害。

18世纪下半叶，1764~1790年建成巴黎万神庙（Pantheon）。建筑设计人为苏弗劳（J.G.Soufflot，1709~1780）。施工过程中由结构理论家朗德赖（J.B.Rondelet，1743~1829）负责检查安全问题。他通过石料加压试验和结构计算，断定圆顶下的承重石礅强度不足，于是立即加固。他坚持建筑必须和结构合并考虑，因为工程技术在很大程度上影响建筑风格。他所著《营造术》中就是把力学、艺术、建筑、工程作为一个整体论述的。鉴于该工程的经验与教训，1811年巴黎兴建麦仓的铁板圆顶时，就由伯朗杰（Bellonger）负责建筑设计，由布鲁奈（Brunet）作结构计算。以往专凭观察实验，现在改以理论、数学为依据，双方明确分工，此乃第一次。

受工业革命的影响，建筑与结构的分工加深了。

建筑专业不仅包括建筑、构造、艺术，还扩展到城规、园林、古建、物理（声、光、热等）。

结构专业也扩展成三方面：专攻力学与结构理论的研究者，对工程起指导与参考作用；参加实际建设的施工者，给理论提供实践证明；结构工程的设计者，在理论与实践的反复过程中，不断改进、提高、创新，以适应日趋复杂的功能与艺术要求。

后起之秀的设备专业更是包罗广泛，从水（给水、排水、暖气）、电（照明、动力）、空调、乃至一切与自动化（如电梯等）配套的设备、应有尽有。由于建筑不仅仅提供使用空间，还要求其环境适用，企图控制开辟出来的物质环境，所以设备与建筑设计的成败关系极大，其投资比重也越来越大。在美国1954年设备投资比重占总投资约40%，到1963年为54.5%。而高层钢筋混凝土框架结构比重为30%，高层钢框架结构为5~15%。

一幢建筑中建筑、结构、设备三成分的比重，要随其功能要求而定，各类建筑物很不一样。并且在几千年的发展历史中，即使是同一类建筑，其比重也在不断变化。人类建房之初没有设备，而近现代建筑中，设备成分的比重却越来越大。然而结构成分始终不缺席，结构与建筑永远共存共亡。

建筑的专业分化，源于其三个基本性质（功能性、艺术性、实践性），但问题不在专业分化本身，而在于建筑、结构、设备三方如何适应专业分化，即在把构思设想转为现实建筑过程中，三方该如何协调融合成一体，为同一目标努力创新。在这问题上，增强三方面的相互了解，使之具备更多的共同语言，是大有益处的。为此，有必要从结构角度阐述建筑与结构间的相互关系，以期双方沟通思想，增进谅解，才能齐心协力，共同创新。

§ 1-3 结 构 的 空 间 性

结构虽立足于建筑三要素中的坚固，但对建筑的功能（适用）与艺术性（美观）也同时产生不容忽视的直接影响。下面就这三方面分节加以阐述。在此先讲结构的空間性。

人类建房的目的不仅需要有一个外壳（墙与屋顶）以遮避风霜雨雪、防御猛兽走兽，更为获得一个内部空间以从事生产或生活活动。所以开辟空间是建筑的基本主题。根据使用需要对活动空间提出特定的功能要求，例如活动场所的宽阔、高低、封闭或开敞、物质环境需求、交通联系、服务供应等等。

符合功能要求的使用空间是由结构骨架开辟出来的，为人们清晰可见的结构空间，是实现所需活动空间不可缺少的唯一手段。建筑师在构思的整个过程中，不仅应想到结构具有的空间性，而且还要考虑并决定用什么结构型式来构成所需活动空间。一个好的建筑设计要通过适宜的结构型式来开辟活动空间，才具备付诸实现的可能性。结构空间是否满足功能要求？其适合程度如何？这些都是建筑与结构专业双方所关心的共同问题。

结构空间既是活动空间存在的物质基础，必然受到当时当地人力、物力与工艺水平的限制。采用什么材料作结构与围护层？用材料作成什么样的基本构件？用这些基本构件去搭出什么样的空间形式？这些都是结构专业要考虑的主题。也可以说，材料、构件、形式，是结构空间使用价值的决定因素。下面要结合实际结构对这三者作进一步分析。

用天然或人工材料制作的体（厚实笨重的墙等）、面（板、壳、膜等）、杆（梁、柱、拱、索等）是构成房屋结构的三种基本构件（Element）。用这三种构件可以构成各种类型的结构，并可归纳为实体结构、骨架结构和面系结构等三种基本的类型。

一、实体结构（Solid Structures）

建房者利用耐压的土、石、砖、混凝土等筑成三个方向尺度大致同级的厚实笨重的实体元件，它既能承重，又起围护作用。用实体元件围蔽成建筑空间，谓之实体结构。是一种最为直觉得醒目的结构型式，能见之于建筑历史的各阶段。

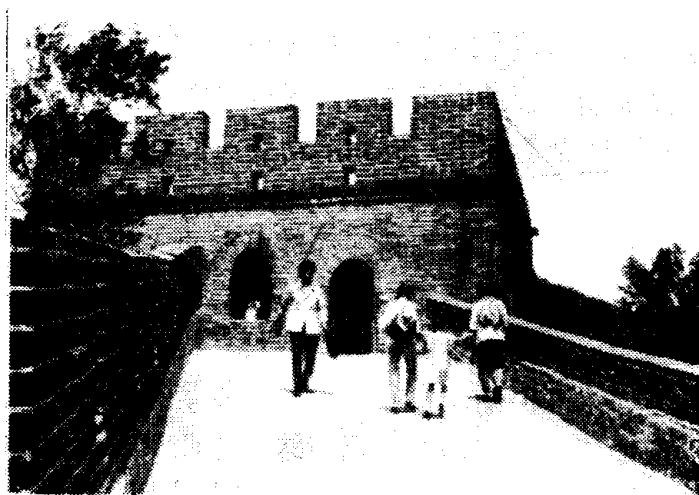
最原始、最典型的实体结构是穴居时代的洞穴（Cave，图1-1a），只为栖身，不求美观。后来人类用石块垒砌成蜂巢屋（图1-1e），厚实笨重，也只能视为实体结构。

公元前27～26世纪建造的古埃及著名的吉萨金字塔群，是人工建造，体型最大的实体结构典型例子（图1-2a）。

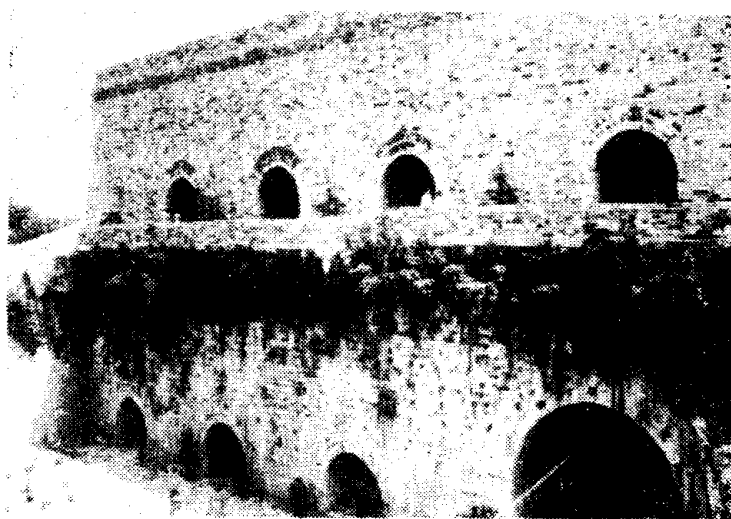
公元前约1185年在迈西尼（Mycenae）卫城附近的迈西尼国王之墓阿脱雷斯宝库



(a)



(b)



(c)

图 1-2 实体结构

a) 古埃及吉萨金字塔群; b) 北京八达岭长城; c) 南京中华门城堡藏兵洞

(图5-4d)就是在岩石中凿出来的两个墓室。大墓室作了衬砌,净直径14.5m,上有叠涩穹顶,小墓室为正方形平面,未作衬砌。

公元前2世纪到公元9世纪,印度北部开凿石窟有1200多个,其中最著名的是公元前1世纪在卡尔里(Karli)的支提(Chaitya),宽14.2m,高13.7m,深37.8m,是佛教举行宗教仪式的场所。

自东汉佛教由印度传入我国中原地区后,作为佛教活动场所的石窟寺也随之在各地开凿建成。自东汉至明清近1400年历史的石窟建筑,是我国古代洞窟实体建筑的一个重要组成部分。在我国辽阔大地上,至今仍保存着数百处石窟群,其中尤以甘肃敦煌的莫高窟、永靖的炳灵寺石窟、天水的麦积山石窟、山西大同的云岗石窟、河南洛阳的龙门石窟最为著名。

我国太行山以西,遍及河南、山西、陕西、甘肃等省的黄土高原,黄土层层堆积,最深竟达二百米,经千万年的风雨侵蚀、流水冲刷,形成无数地沟、峭壁。黄土节理垂直,二、三十米高的土崖峭壁仍能矗立,有利于在其中开挖窑洞。窑洞是种古老的住宅建筑(图5-2d),具有造价经济,构造简单、施工方便、冬暖夏凉等优点,故沿用至今,现仍大量兴建新的窑洞。

世界奇迹之一的我国万里长城,其主体是城墙,以岩石为基础,随山脊起伏。墙身高大坚实,外砌整齐条石或特大城砖,内筑夯土,乃是实体结构。自山西以东到山海关一段,城墙底宽平均6m,顶宽5m,高达6.6m。在关口和险要处,每隔三、五百米,设置敌楼、墙台、烽火台等建筑。敌楼是高出城墙的高大建筑,下层住人,上层有射击和瞭望用的垛口及燃火设施。墙内有券门石梯以供守兵上下(图1-2b)。

南京城垣是明太祖朱元璋听取了谋臣朱升“高筑墙,广积粮,缓称王”的建议而建的(1366~1386年)。城围长达33.676km,城墙底宽14.5m,顶宽4.9m,高达14~21m,古朴壮观,乃我国第一大城,在世界上亦首屈一指。当初建城共13个城门,其中规模最大、最雄伟的城堡是中华门。中华门城堡是个实体结构,其中有能屯兵三个的27个藏兵洞,是我国古城堡中罕见的独特建筑,在世界城垣建筑史上也占有重要地位(图1-2c)。

结构的内部空间(Space Volume)与外形(Form, Appearance)之间存在一个中间物——边界层。实体结构的边界层是个厚实笨重的实体元件。它有两个面,一个面朝向外界,其外表面决定实体结构的外形,另一个面朝向内室,决定使用空间的景观。正由于实体元件的尺度很大,以致实体结构的外形与内室各自完全独立,其整个建筑的外形可以脱离内室的功能需求而任意塑造。其内室是如此隐含,以致根本无法从外形来判断、识别其内室的形状。

西方古代圆顶,选择当时最好的耐压材料砖、石、混凝土(古罗马以火山灰作天然水泥),采用当时惯用的施工方法建造。当时尚无力学理论,全凭工匠、建筑家、工程师们的实践经验用半圆球顶围蔽空间。但全凭经验建成的圆顶,厚度大得惊人。以罗马圣彼得教堂大圆顶为例,净直径41.91m,圆顶底部厚2.74m,厚跨比为1/15.3,而鸡蛋壳的厚径比为1/100,现代半球壳的厚跨比为1/1200。古代圆顶厚度比真正实体元件尺度小得多,但仍感到很厚实笨重,只能归入实体结构。罗马圣彼得教堂大圆顶(图5-51d),其内、外面的曲率并不同心,外貌与内景的景观各异。其特殊之处在于圆顶上部是双层的,圆顶基座处厚2.74m,均在12m高处开始分内外两层,内层厚1.5m,外层厚1m,随着高度上

升，内外层间空腔逐渐增大。可见它离实体结构又远了一步。

现代承重墙结构以砖、石的内、外墙体为承重元件，配以各种材料（钢、木、砖、石、混凝土、钢筋混凝土）的楼层屋盖，故亦称砖混结构。其墙体厚度比古代圆顶厚度又收小一步，但比板壳厚度仍大得多，也只能算作实体结构，但又非真正的实体结构。砖外墙厚度在240~490mm之间，根据各地冬季保暖要求决定。等厚的外墙使外形与内表完全一致，外形不再能任意塑造。

现代的地铁车站，为战备用的防空洞、山洞或地下工厂、地下电站，以及某些大城市向地下发展的地下街道、商店、车库等，这些都是实体结构，只要求内部空间，无外形要求。

实体结构中压力分布较均匀，属理想状态，但其实体体积与所辟空间体积之比值是所有结构类型中最高的。无论在耗料与用工，还是结构自重与劳动强度等方面，也都是最高的。不过上述不利因素在一定程度上常为当地廉价的材料与劳动力所抵消。

二、骨架结构（Skeleton Structure，杆件结构）

骨架结构的内部畅通开阔，与承重墙结构截然不同。

组成骨架结构的元件是长度远大于其截面尺寸的细长杆件。如梁、柱、拉杆、压杆等。它们是承重元件，不起围护作用。由围护材料形成的边界层，仅是层表皮，不承重，

故骨架结构的外形与内室完全等同一致。骨架无限定空间边界的作用；它可以在围护表层之内，也可以完全暴露在围护表层之外。当无围护表层时，就成为视觉空间。

骨架结构的内部空间虽存在骨架，但其空间互相贯通，具有更大的灵活性，建筑平面布置受骨架约束很小。

骨架结构也极其古老，最原始的是巢居、棚居与帐篷（图1-1b~d）；稍后，则以木梁柱为骨架，以土、砖为外墙（图1-1f、



图 1-3 中国、内蒙古蒙古包

g）。现代我国的蒙古包（图1-3）是用现代材料建造的帐篷。

尼罗河两岸缺少好木料，古埃及人民在长期实践中，建造了大量石梁柱结构。最为著名也是规模最大的建筑是卡纳克（Karnak）阿蒙神庙和鲁克索（Luxor）阿蒙神庙。前者在公元前1350~1330年建造的大殿（Hypostyle Hall，图2-2）是巨大典型的、以石墙柱承重的石梁板结构。其室内净宽97.54m，梁48.77m，净面积是巴黎圣母院面积的3/4，却有16×9，共134根石柱。为保证梁的强度安全，柱距无法过大，其最大梁长约6.6m，致使柱间净距只有柱直径的1~1.5倍。因而石柱粗壮、密集如林，室内空间阻塞，气氛压抑、沉闷、且带有神秘感。

希腊早期的建筑是木构架，后因其易腐与易燃，改用石材。先用石材做柱子，起初用

整块石料，后改用分段砌筑，每段中心设置梢子。最后才用整根石材做梁，这在技术是最难的。最著名的是帕提农神庙（图2-3）。用大理石建造的梁柱结构，极其宏伟、庄重、美丽，为西方建筑传统的起点，且在数世纪内被奉为典范。其 8×17 列柱，柱高10.43m，底径1.905m，柱距最大约4.2m。古希腊最大的神庙是公元前356年建造的以弗所的阿提密斯（Artemis）庙（图2-4）。其台基平面为 $55.10 \times 109.20\text{m}$ ，正面的前16根柱高16.46m，石梁最大跨达8.6m左右。

耐压而不耐拉的石材宜砌拱、筑柱，而不宜做梁。木材既耐压又耐拉、更比石材轻，是当时梁柱结构的典型好材料。我国盛产木材，是世界上采用木结构最早的国家之一。我国木梁柱结构的主要型式是木构架，其中抬梁式木构架很大程度上能适应当时人类提出的空间功能要求，所以应用最广。木构架在商代（公元前1200年）已初步完备，后来又不断改进完善，形成了一套完整的标准做法（法式）与定型构件。与石梁柱相比，木梁柱截面小、跨度大，室内开阔、分隔灵活、使用方便。山西应县佛宫寺释迦塔（图1-4）建于公元1056年（辽代，是现存最古的木塔，通称应县木塔。塔的平面呈八角形，底层直径30.27m。该楼阁式木塔高达67.3m，共9层，其中4个暗层、5个明层。底层为垂檐，共有6层檐。其体型虽庞大，但由于各层屋檐向外挑出平生与走廊，以及攒尖塔顶与铁刹，不仅无笨重之感，反而雄壮华美。塔身采用内外双环柱网，形成双层套筒式木构架，既扩大了中心部分空间，又大大增加塔身刚度。它是个重叠九层、梁柱斗拱齐备的完整木构架。各层柱子叠接，上层外柱向内错约半个柱径。各层柱子都向中心略有内倾，构成收分。后来，金代又在暗层内增加许多梁柱斜撑，使四个暗层成为加固刚环，更加强塔身整体刚度。因而建塔900多年，历经多次强地震，至今仍完整屹立。

古罗马不仅用砖、石材料，还利用碎石、浮石作骨料、火山灰（天然水泥）作粘结料，筑成混凝土，这些耐压材料不宜做紧，而宜于做拱券。古罗马人为开辟比古埃及、古希腊更高大的空间，摒弃了梁柱结构，改用拱柱结构。其筒拱与大拱结构见图5-9，十字拱柱结构见图5-10。最为著名的建筑物是大斗兽场（图5-45），卡瑞卡拉浴场（图5-27）和万神庙（图5-46）。万神庙跨达43.5m，圆顶净高离地也是43.5m，是古罗马穹顶技术的最高代表作，也是建筑史上最早、最大的大跨结构，其跨度直到19世纪末才被突破。拱柱结构形成了与梁柱结构完全不同的建筑风格，其空间处理与结构型式乃亘古未见。罗马建筑不仅是帝国全境内的典范，直到19世纪中叶仍被奉为西方建筑的正统形式，它在技术与艺术两方面，首次攀登历史高峰。

罗马风建筑的肋形拱（图5-12）比古罗马十字拱又前进了一步。中世纪工匠们集中了散见于各地的肋形拱、尖拱和飞券等技术，配套成龙并加以发展，形成了一整套富有独创性的结构体系——哥特式建筑的拱柱结构。其结构条理井然，构件严循传力路线，表明了人类对客观规律的深刻认识。其辉煌成就，可与古罗马建筑比美，甚至远超其上。19世纪末西班牙籍建筑师高迪（A. Gaudi, 1852~1929）全力热衷于中世纪建筑，其作品通常采用石材，且大都与哥特式建筑拱柱结构相仿，但以顺应拱顶压力方向的倾斜支撑，取代了哥特式的竖柱与飞券。其典型作品是1914年的巴塞罗那市的Colonia Güell教堂（图1-5）。

19世纪中叶，铁材用在建筑上引起了革命性变化。在多层建筑中摒弃承重墙结构而转向铸铁或熟铁的梁柱骨架结构。个别也有采用铁材拱柱结构的。著名的实例是1851年伦敦

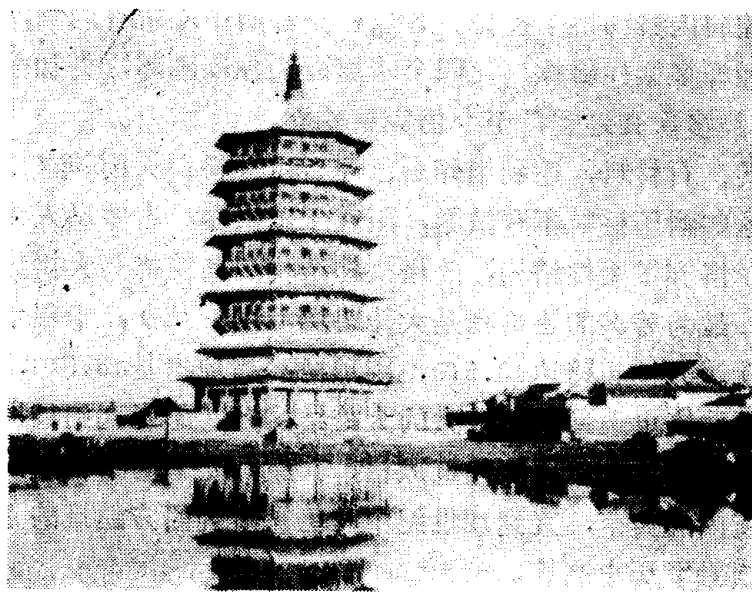
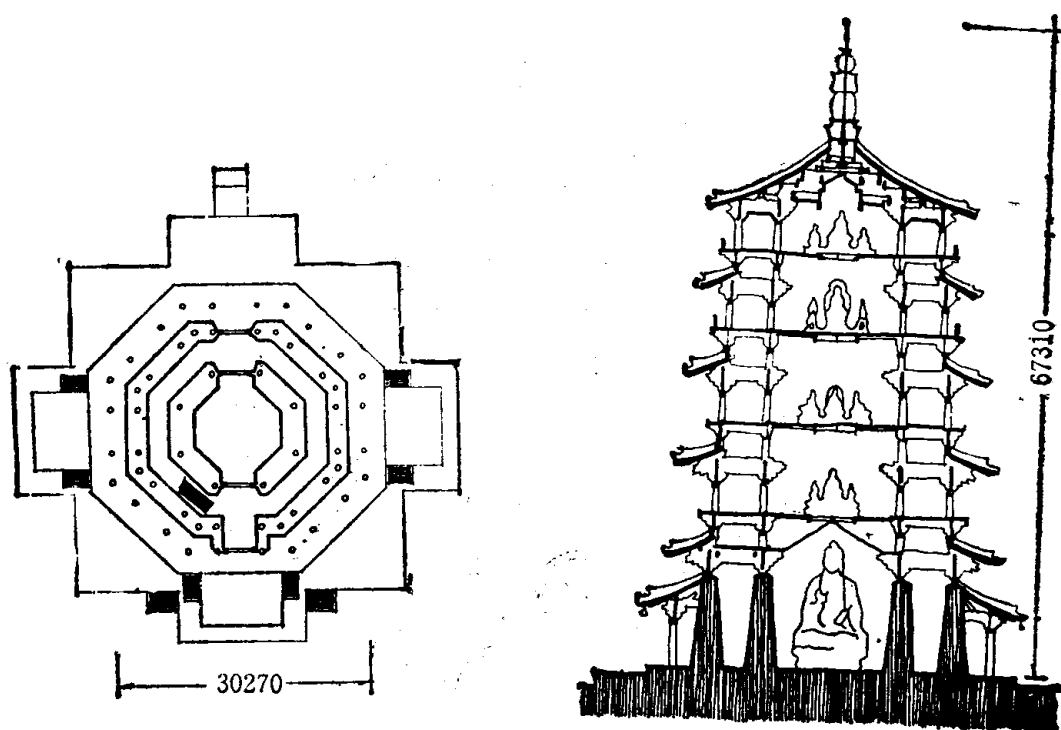


图 1-4 1056 (辽) 山西应县佛宫寺释迦塔

海德公园的首次国际博览会中的水晶宫 (图1-6a)，只用铁材与玻璃两种材料建房。建筑形象轻巧透明，备受社会高度赞赏。1854年水晶宫被拆移到英国的 Sydenham，略加修改，重新装配。把原来台阶形的中央通廊改成筒形拱顶，与原来纵向拱顶一起组成交叉拱顶 (图1-6b)。另一例是1889年巴黎国际博览会机械馆 (图4-10a)，是座前所未有的114.91 m大跨结构，刷新了世界纪录，位居19世纪三大建筑 (另两个水晶宫与埃菲尔铁塔) 之首。它第一次在建筑中采用三铰刚架，展示出一项新的结构理论——三铰原理，同时取得了极其宽大的，透明、轻盈、具有悬浮感的展厅。以后多、高层建筑采用钢或钢筋混凝土

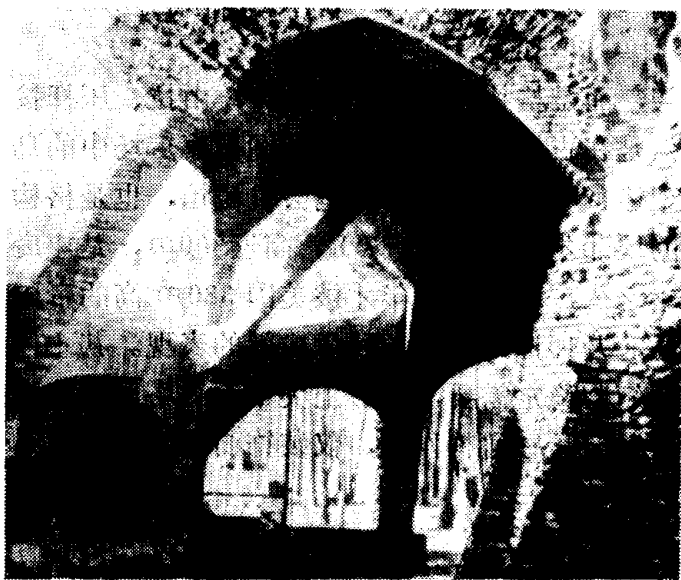


图 1-5 砖石骨架结构
(1914, 西班牙巴塞罗那港Colonia Güell教堂)

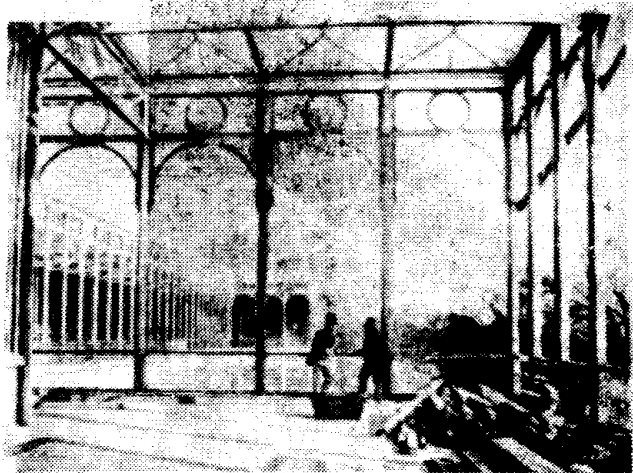
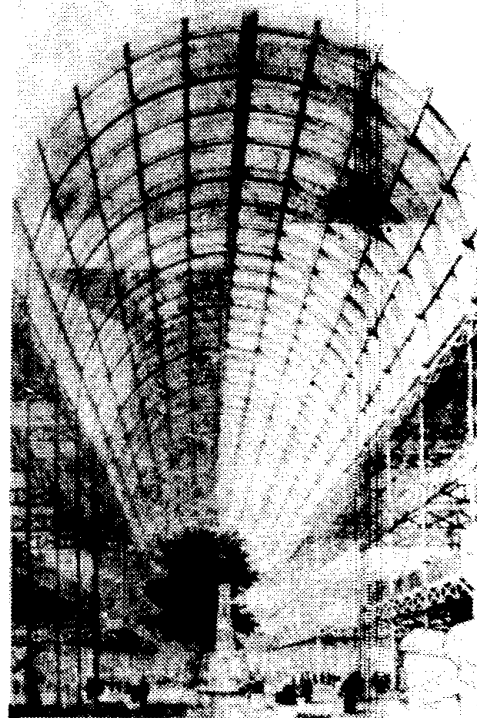
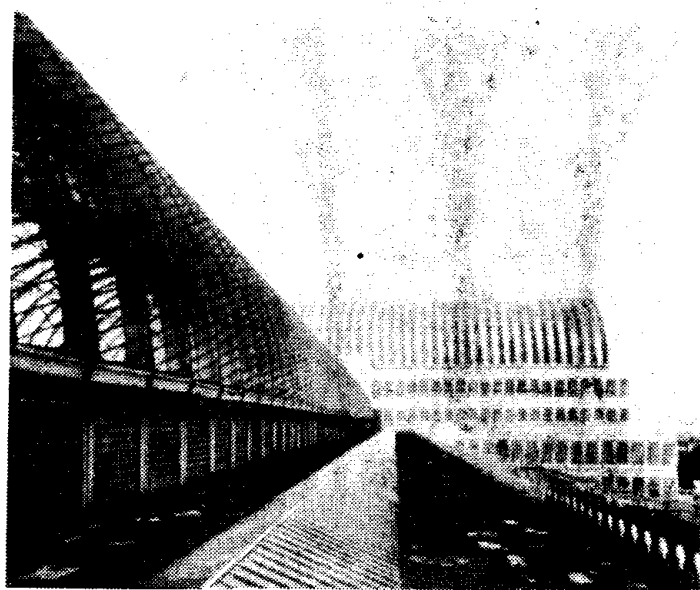


图 1-6 水晶宫