

开始的) 提出如此大胆和正确的设计思路, 的确是罕见的。他采取的避免气蚀的措施有悖于一般的传统观念, 但潜孔溢洪道在法国、中国台湾和莫桑比克多个工程中的应用, 证实了它的合理性和正确性。

“锚墙”是关纳构思和成功地应用于多个工程的又一个创造性的思路, 此方法是在与自然土坡为边界的不稳定土体中用拉锚来稳定边坡上近乎垂直的护壁(图3)。之后, 锚墙被用于锚定大坝或围堰的坝面。1982年法国的康奎耶拉克坝把这一设计思路引伸, 锚杆被延长至下游坝面并用锚板锚定, 用这种方法以承受最后发生的浸没(图4)。

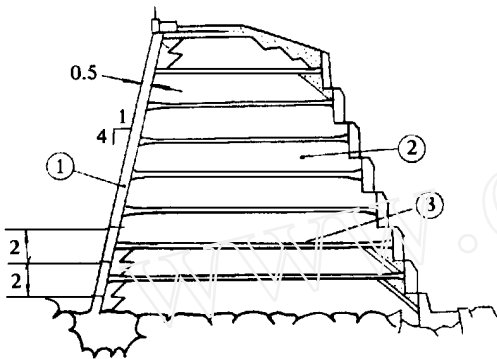


图4 法国的康奎耶拉克坝  $H = 21\text{m}$ , 上游为面板墙, 可以溢流的加固的堆石坝, 1982<sup>[1]</sup>。不透水上游面板; 加固的堆石坝; 用混凝土浇灌的T形加筋锚杆。

在现代的坝工设计和施工的技术和工艺中, 几乎到处可见关纳的丰富想象力和精巧构思留下的痕迹。1929年, 关纳提出了利用预应力大吨位钢锚索束加固重力坝的原理, 时至今日仍被普遍地应用。

1933年关纳第一次在马雷日坝安装了有78条振弦的监测系统, 其后, 振弦应变计在许多大坝的监测中广泛应用。法国的卡斯蒂永坝安装54年以来, 至今仍在运行<sup>[1]</sup>。

安德烈·关纳逝世已将近35年了, 尽管由于现代科学的迅速发展, 特别是数值方法、计算技术以及水工模型试验技术的发展, 坝工设计水平已今非昔比, 例如现时我国研制出的拱坝智能优化辅助设计系统<sup>[5]</sup>, 对拱坝设计中需要完成的各项工作(筑坝材料选用、坝轴线位置确定、坝型选择、拱坝体型设计和细部设计等)可以很快得出解答。在设计过程中, 除了设计师的创造性思维外, 全部设计都是由计算机高速、自动完成。但是, 关纳的风格, 他的创造性的设计思路和观念, 仍然在现代的坝工建设中有着深远的影响。

### 参 考 文 献

- 1 Billor ÉJ. (夏季华译). 安德烈·关纳——他的设计思路的回顾及其在今天的应用. *International Water Power & Dam Construction*, 1991, 43 (6)
- 2 A. Esthétique des barrages et des usines hydroélectriques. *Esthétique Industrielle*, 1953
- 3 A. Barrages et ouvrages annexes. *Cours d'eau et Énergie*, No. 7-9, Zurich, Switzerland, 1956
- 4 A. Murs de soutènement et murs de quai à échelle. *Le Génie Civil*, 1-15 May, 1945
- 5 朱伯芳等. 拱坝的智能优化辅助设计. *国际水力发电和坝工建设*, 1994, (3)

(本文于1995年9月18日收到)

## 身边力学的趣话

## 西方古典建筑的力与美例析

慎铁刚

(天津大学建筑系, 天津 300072)

古希腊、罗马时期, 开创了一种以石料作为建筑梁、柱等基本构件的建筑形式, 这种建筑形式经过了文艺复兴及古典主义时期的进一步发展和完善, 一直延续到了20世纪初, 即使现代仍有各种各样的表现场合, 在世界上成为一种具有历史传统的建筑体系, 这就是通常所说的西方古典建筑。本文从西方古典建

筑中以一些有名的代表性建筑为例, 从力学与美学的角度进行分析。

### 1 柱 式

西方古典建筑中, 有各种各样的柱式, 如塔什

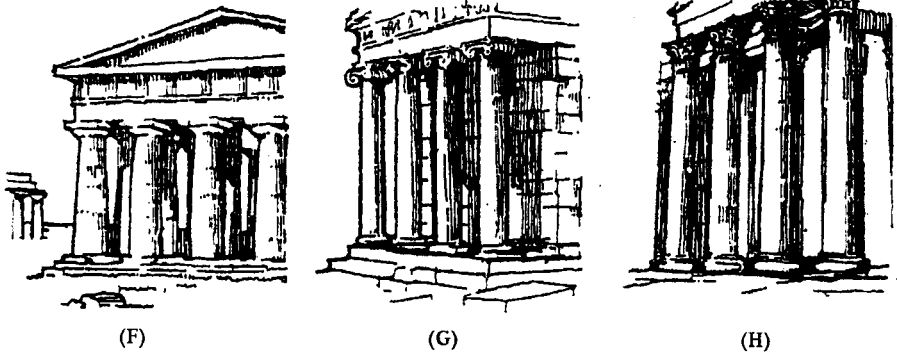
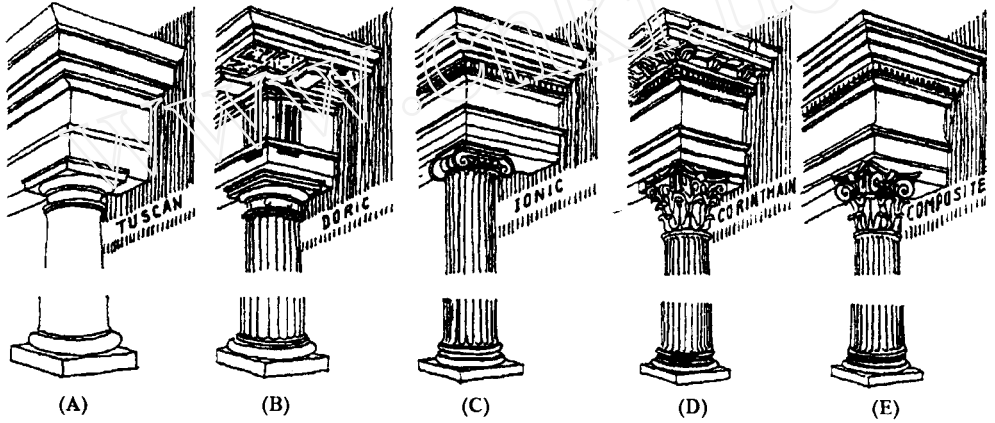
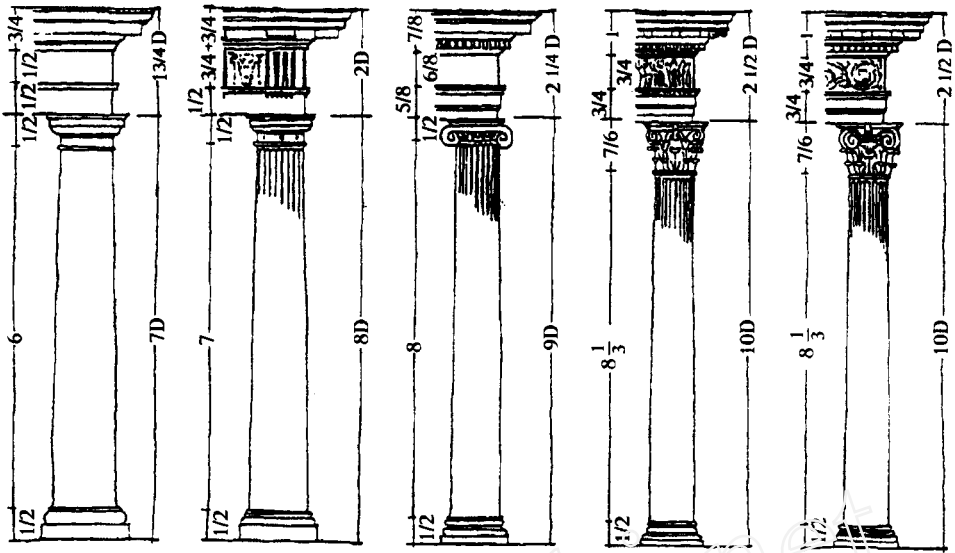


图1 (a) 柱式

(A) 塔什干柱式, (B) 陶立克柱式, (C) 爱奥尼克柱式, (D) 科林沁柱式,  
 (E) 混合型柱式, (F) 陶立克柱式组合, (G) 爱奥尼克柱式组合, (H) 科林沁柱式组合

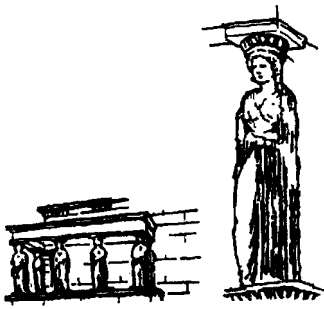


图 1 (b) 女郎柱

干柱式、陶立克柱式、爱奥尼克柱式、科林沁柱式和混合型柱式等(图 1 (a))。这些柱式均由石材构成,每一种柱式从整体到局部的艺术处理都代表了一种风格性建筑的特点。陶立克柱式表现为粗犷、刚劲,象征着男性的体态和性格。爱奥尼克柱式、科林沁柱式以及由此而发展成的混合型柱式则表现为:秀丽、柔美,象征着女性的体态和性格。在雅典卫城的伊瑞克先神庙建筑中,用女性外形作成柱子(图 1 (b)),体现了极大的艺术魅力。马克思在评价希腊艺术时说,它们“能够给我们以艺术享受,而且就某方面说还是一种规范和高不可及的范本。”

用力学的原理研究各种柱式结构,则能把人们带入艺术与科学完美结合的境界。

下面谈谈长细比:

柱是一种压杆,主要承受沿柱长度方向的轴向力。对于压杆的设计,主要考虑稳定,其关系式如下

$$A \geq \frac{N}{\varphi [\sigma]}$$

式中,  $A$  为压杆横截面积 ( $\text{cm}^2$ );  $N$  为轴向压力 ( $N$ );  $\varphi$  为折减系数,材料及与长细比有关,  $\varphi < 1$ ;  $[\sigma]$  为材料抵抗轴向力的容许应力 ( $N/\text{cm}^2$ )。显然  $\varphi$  值等于 1 时,可获得最小的横截面积,此时所用的材料也最省。考察图 1 (a) 的 5 种柱身,它们的长细比在  $6 \sim 8 \frac{1}{3}$  之间。由材料力学知,当石材的长细比  $\leq 8$  时,其  $\varphi$  值接近于 1。这说明当时的希腊和罗马人已经认识到了正确使用石材作柱的力学道理。可将上述西方的石柱与中国古代的木柱在长细比方面作一个比较,笔者在“中国古建筑的力与美探析”<sup>[1]</sup>中提到中国古代木柱的长细比在唐、宋时期一般是 9:1 或 8:1,明、清时期一般为 10:1。这样一个长细比,对于木质压杆柱,其折减系数  $\varphi > 0.9$ ,都尽量地使  $\varphi$  值接近于 1,从而可以较合理地减小柱的横截面积达到节约材料的目的。但由于东西方

文化的差异,西方古典柱式的长细比与中国古建筑中的木柱又不尽相同,前者比后者更为粗壮。

图 1 (b) 示出的女子形体柱中的女子右腿膝盖稍微弯曲,给人的感觉似乎上部的重量仅落在她的左腿上。这就极为巧妙地将女性象征秀美的人体美学观点和仅用一条腿即可轻盈地支撑上部巨大的重量的力学感受完美地统一起来。这种力与美的完美结合会使人产生更多的联想:击鼓抗金的梁红玉、女扮男装的花木兰、挂帅征西的穆桂英……女性形体柱的长细比,模仿了真人的身体比例,从德国施特拉茨于 1901 年出版的《世界各民族女性人体》专著中可以得知近代希腊和罗马女性的身材比例数据,如果以前后腰径为 1.0,则年青女子的身高平均值约在 7.6~8.4。这个比例,与象征女性柔美的爱奥尼克柱式、科林沁柱式的长细比例非常接近。这样一来,不但用女性形象作柱可以使人从美学上有更高的享受,而且从力学的角度来分析也是非常合理的。由此推知,古希腊人和罗马人对于石材柱的力学性能已经有了相当深入的认识。

这里需要稍作说明的是,不论上面所研究的柱身是由整根石料做成,还是分成若干个圆柱体叠成,对于轴心受压柱来说,考虑压杆的整体稳定性时,结论都是相同的。这就类似于现代钢筋混凝土圆柱,尽管施工中需在柱的适当高度设置施工缝分段浇筑,但是设计中并不考虑这些施工缝的影响。

## 2 帕提农神庙

帕提农神庙是古希腊陶立克柱式建筑的最高成就(图 2 (a))。它建在雅典卫城的最高处,是一座围廊式建筑,神庙东西两端各列陶立克柱式 8 根,南北两侧各有柱 17 根,立在三级台阶之上。柱廊内侧是走道,走道宽约 3m,从东端主入口穿过走道进入主殿,此殿内供奉雅典娜神象。

神庙平面呈矩形,周围的陶立克柱式高约 10.4m,底径约 1.9m,柱顶直径约 1.4m。绕柱表面有 20 道竖向凹槽,刚劲雄浑。柱顶有放大的正方形石板,上面放置石梁,石梁粗犷无华,梁上部有三陇板间沿水平排列,三陇板再上为檐口,全部用石料制成(图 2 (b))。帕提农神庙建于公元前 447~公元前 432 年,它是古希腊建筑史上最具有审美学的神庙之一。可惜在 1687 年毁于土耳其与威尼斯战争的炮火之中,现今只剩下 30 多根陶立克石柱和断壁残垣。在如血的夕阳照射之下,石柱更令游人悲歌感叹岁月之沧桑,然而更给人以力度和美的享受。

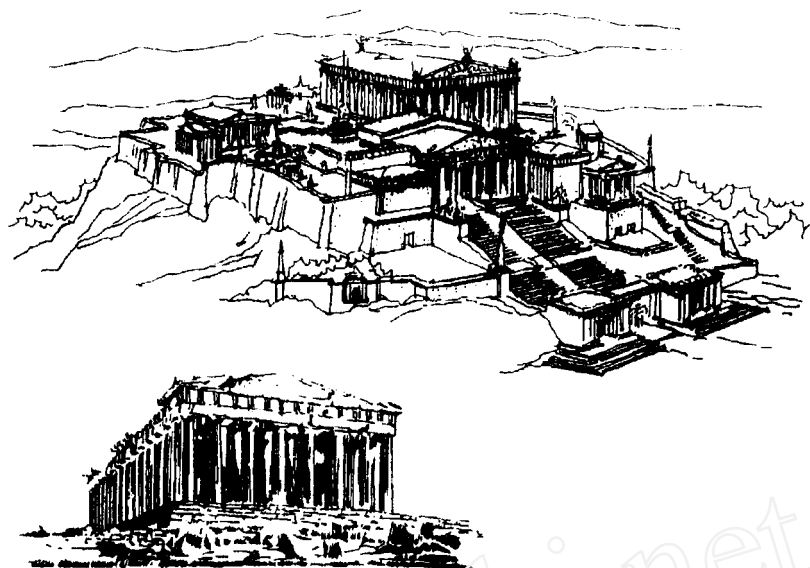


图 2 (a) 上图为雅典卫城西方古典建筑群中的帕提农神庙 (最高处为帕提农神庙);  
下图为帕提农神庙雄姿

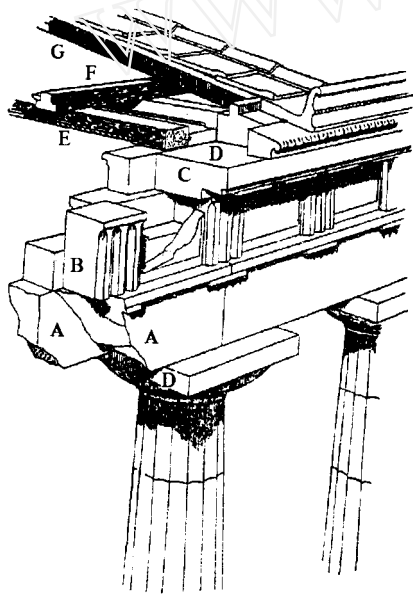


图 2 (b) 屋顶

A 额枋, 由两块石料并列组成, B 三陇板, 两块三陇板之间是陇板壁, C 檐口, D 柱头顶板, E 木檩, F 木龙骨, G 木椽子

神庙的柱身高约 10.5 m, 平均直径 1.67 m, 全柱总重量约为 230 kN (23 吨), 要制成如此大型的整根石柱有两个困难, 一是难以找到合适的石料, 加工不便; 二是运输和安装定位难以解决。古希腊人成功地解决了这些困难。他们将柱分成 5 段, 石料加工成 5 个圆鼓型, 每个圆鼓的底平面中央凿一个凸, 顶平面中央凿一个凹, 既利于安装时定位, 又可以使柱身在石鼓的结合平面内增加抵抗一定的水平剪力, 比如地震力。但是每段石鼓仍有 54.7 kN (5/47 吨), 安装和运输仍然是一件难事。我推测古希腊人为了运输石鼓将会采用滚动的方式进行, 这种运输方式比任何一种其它移动方式要高明得多。这种形与力的巧妙运用令我们现代人叹为观止, 它与中国古代劳动人民运输故宫城内的巨型石块采用在路上铺水成冰的方法有异曲同工之妙。

柱的安装定位仍可以用滚动的方法, 只是要随柱的不断加高而做成几种不同坡度或长度的斜面, 当然也可能采用杠杆或滑轮。总之, 鼓型石柱段取得了形与力的完美结合。

## 2.2 屋顶

从图 2 (b) 注意到屋顶上的木质檩条、龙骨和椽子。为了说明以下的问题, 我们先将石料、木材的一组力学数据列表

下面谈谈力学在帕提农神庙建筑上的应用

### 2.1 柱身

表 石料、木材的抗拉、抗压强度

	抗拉强度 (N/mm <sup>2</sup> )	抗压强度 (N/mm <sup>2</sup> )
花岗石	3	120~ 260
山毛榉	129 (顺纹)	48 (顺纹)

注: 以上抗拉、抗压强度指极限强度

由表知, 花岗石材抗压强度较好, 但抗拉强度较差, 而山毛榉木正好与花岗石相反。作为房屋的构件, 柱是一种受压为主的构件, 所以用花岗石作柱是非常合理的选择, 可谓物尽其用。但是作为受弯为主的檩条、龙骨和椽子, 选用石料就难以满足要求, 原因主要是:

(1) 石料系脆硬性材料, 难以加工成横截面较细的檩条、龙骨或椽子; (2) 石料由于抗拉强度较低, 难以充当受弯构件。再研究上表, 山毛榉木料的拉、压强度, 正好与花岗石的压、拉强度接近, 因此可以推论, 用花岗石和山毛榉木做成的相同几何尺寸的受弯构件, 其承受外力的能力大体上相同。但是用山毛榉木做成的受弯构件, 比如檩条、龙骨、椽子等却同时具有比花岗石料所不具备的三大优点, 其一, 质轻, 既可以减轻屋面的重量, 又使安装定位比较容易; 其二, 加工方便; 其三, 可以更好地加强房屋的整体性能。我们要着重说明一下原因之三, 因为神庙建筑的墙、柱和檐口等均为石料砌筑, 但石料房屋的致命弱点是较为松散, 故房屋的整体性能乃是它的一个重要力学指标。为了解决这一问题, 古希腊人使用的木质檩条、龙骨和椽子正好恰如其份地使问题得到了十分完满的解决。木质檩条、龙骨和椽子纵横交错地组成了屋顶的水平方向的格网, 显然格网本身的整体性是很好的, 在与周围的石檐相交处的联结有 2 个因素可以保证较为牢固, 一是在木檩端部做成齿状糟, 上面压上石块, 另外是加上木楔子, 使木檩与石块结合紧密一些。就这样, 借助木檩、龙骨和木椽子, 加强了整栋建筑的整体性能。特别是, 木质格网构件在更多的时候以拉应力杆件的场合出现, 保证了房屋的整体性, 这就更好地发挥了材料的力学性能。

即使用现代观点建造的各种钢桁架或木桁架屋顶, 在这些桁架之间也仍然需要设置若干水平向布置的拉杆。由此我们可以认识到古希腊人在建筑力学上的智慧是十分理性的了。

### 3 万神庙

万神庙是古罗马城中心供奉众神的地方, 建造于公元 120~ 124 年间, 万神庙的平面为圆形, 大厅

上屋顶为覆穹状 (图 3)。万神庙大厅内部充分体现了西方古典建筑的和谐、严谨气氛, 正如伟大诗人拜伦所描述的那样: 简单、朴素、严肃、崇高。万神庙的穹顶几乎覆盖绝大部分的建筑平面, 穹顶直径达 43 m, 是古代世界上最大的穹顶。穹顶正中有直径 8.92 m 的圆洞, 阳光可以透过它射入圆形大厅, 使得供奉众神的殿内既有神秘、阴森的黑暗, 又有阳光普照下的开朗、光明的气氛。

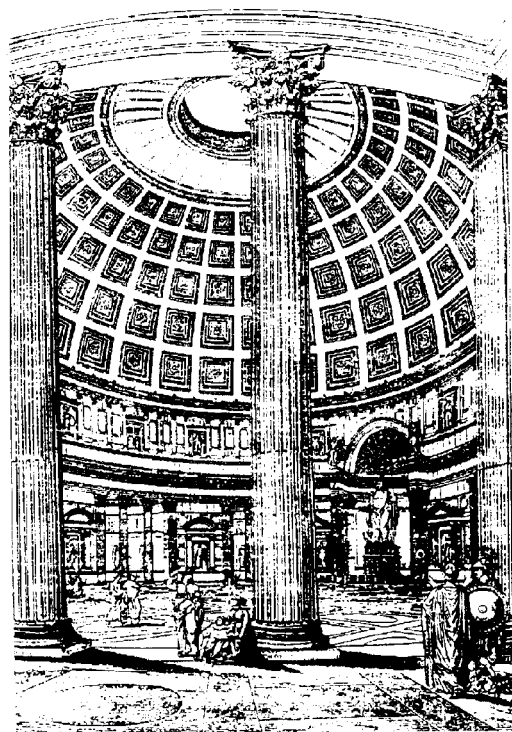


图 3 万神庙

万神庙的正面有柱廊, 柱式为科林沁风格。柱廊共有三排柱, 前排 8 根柱, 第二、三排各 4 根, 柱高 12.5 m, 底径约 1.43 m。朝拜者在进入圆形大厅之前, 先经过正面的柱廊, 由于柱廊那雄浑而又秀丽的柱式风格, 各柱整齐、威武的排列, 使得柱廊的气氛十分庄严而又神秘。在这种气氛之诱导下再进入圆穹顶的圆形大厅, 精神和感受得到了进一步的升华。

我们在赞叹万神庙取得的高度建筑艺术的同时, 不难体会到它的艺术成功的背后, 力学的成功为其建筑艺术美奠定了坚实的基础。

巨大的穹顶, 直径达 43 m, 在现代的钢结构和

钢筋混凝土结构没有出现以前，它是世界上跨度最大的一个空间结构。穹顶由强度并不能与现代混凝土相提并论的火山灰质混凝土（有人估计其标号大致在 75# 以下）浇成。有趣的是作为混凝土填充骨料的石块，在下面的硬而且重，在上面的则软而且轻，因此穹顶上部的混凝土容重只有下部的容重的 2/3，这种随结构内力分布规律来减轻结构自重的方法令我们对古罗马人的力学知识由衷地折服。穹顶的几何尺寸如下：底部与支持它的墙体等厚为 6.2m，向上逐渐减薄，穹顶处约厚 1.5m。用力学的观点对这种几何尺寸作如下的解释：穹顶在结构上属于拱券，在自重和雪冰等竖向荷载作用下，穹顶的内力中，弯矩和剪力较小，轴向压力起控制作用，所以在当时无钢筋混凝土理论和实践的条件下，依靠素混凝土这种抗压强度较高的材料得以建造这项伟大的建筑工程。拱卷结构的基底部位将对支持它的基础产生水平推力，这种推力在现代钢筋混凝土结构中一般设置一道封闭的钢筋混凝土水平圆弧形梁来承担，从而将拱卷的水平向推力化成了圆弧梁的轴向拉力来平衡掉。但是当时并无这种理论和材料，不过古罗马人已认识到了这种水平推力的客观存在，所以采取了加大底部穹顶厚度的办法来抵抗这种水平推力的作用。这种方法，一方面依靠厚重的穹底自重来获得巨大的难以移动感，另一方面厚的截面意味着横截面积的加大，也可在截面内产生较大的抗拉能力从而可以弥补因素混凝土抗拉强度较小所

造成的不足（图 4）。穹顶中央处开出一个 8.9m 的圆洞，它的功能有 2 个，一是阳光可以射入大殿，增加神庙的崇高、光明和神秘色彩，二是可以调节音质，减少穹形室内声音过长的混响时间，改善语言的清晰度。巨大跨度的穹顶是力学上的杰作，它保证了万神庙建筑各种使用功能的实现，也使万神庙的室内装饰和美感取得极大的成功。在这里，力学和美学是如此的密不可分，以致难以得出是鸡生蛋还是蛋生鸡的结论。

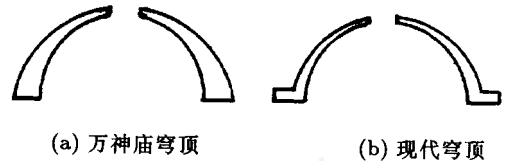


图 4 穹顶剖面

参 考 文 献

- 1 慎铁刚 中国古代建筑的力与美探析. 力学与实践, 1996, 18 (3)
- 2 田学哲主编 建筑初步. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982, 7
- 3 慎铁刚编 建筑力学与结构. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992, 6
- 4 中国大百科全书 建筑卷, 北京: 中国大百科全书出版社, 1988, 4

(本文于 1995 年 11 月 12 日收到)

“国家教委第三届高等学校优秀教材  
获奖书目”中有关力学的部分

书 名	著译者	出版社
一等奖 流体力学 (上、下册)	周光堃、严宗毅等	高等教育出版社
力学 (上、下册)	郑永令、贾启民	复旦大学出版社
大气动力学 (上、下册)	刘式适、刘式达	北京大学出版社
工程流体力学	陈卓如	高等教育出版社
结构力学	杨仲候、胡维俊等	高等教育出版社
材料力学 (上、下册)	孙训方等	高等教育出版社
分析动力学 (上、下册)	陈文良、洪嘉振等	上海交通大学出版社
气体动力学	童秉纲、孔祥言等	高等教育出版社

(下转第 80 页)