

设计创新对东方明珠和 雅加达塔的贡献

江欢成

(上海现代建筑设计集团有限公司, 上海 200002)

[摘要] 东方明珠, 塔高 463.85 m, 高居亚洲之最, 世界第三, 被公认为是上海最重要的城市标志。雅加达塔, 高 558 m, 建筑面积 32 万 m², 均堪称世界之最。东方明珠的成功, 雅加达塔的中标, 在很大程度上要归功于设计创新。东方明珠设计者用一申明珠来标志上海, 用带斜撑的巨型空间框架作为主体结构, 打破了混凝土电视塔常用的单筒体结构模式, 从而获得了很好的标志性。这种结构同时很有利于抗风抗震。该塔还采用了许多高新技术, 如预应力混凝土壳、双重悬挂钢结构和攀升天线等设计, 它们巧妙而合理地解决了复杂的结构构造和高难度施工的问题。设计者在雅加达塔上, 继承和发扬东方明珠的长处, 克服它的不足, 并赋予许多新的创造。为了使新的创造建立在坚实科学基础上, 设计者为东方明珠塔进行了大量的试验研究工作。

[关键词] 创新; 电视塔; 空间框架; 斜撑; 球体; 钢桅杆; 悬挂结构

东方明珠, 塔高 463.85 m (从天然地坪算起), 仅次于多伦多 CN 塔 (553 m) 和莫斯科 Ostankino 塔 (523 m), 居亚洲第一, 世界第三 (见附图), 建筑面积 65000 m²。1991 年 7 月 30 日奠基, 施工时间 3 年零 9 个月, 于 1995 年 5 月 1 日基本建成, 剪彩开播, 至今已有 4 年历史。几年间, 它经受了 11 级台风和南黄海 5 级地震的考验, 除装在塔顶 25 根消雷针中有 2 根在地震中折断之外, 塔体本身没有丝毫损害。塔的设计能力是每天上塔平均 6000 人, 但今年春节高峰的日子, 最多的 1 天达 24000 人, 人们喜欢东方明珠, 公认它是上海最重要的城市标志。世界上很多人也都知道上海有个东方明珠, 它吸引了许多游客来到上海, 这

使塔的设计师们感到由衷的欣慰。

雅加达塔, 558 m 高, 超过世界最高的 CN 塔 5 m, 建筑面积 32 万 m², 是一个大型的综合性建筑, 是我们通过国际方案竞赛, 在 6 家第一流的设计公司较量中赢得的设计任务。从此, 我们建筑设计真正通过竞争进入了国际市场。该工程的设计已基本结束, 施工从 1998 年 1 月开始, 全部 415 根直径 1 m、入土 59 m 的砼灌注桩已经完成, 1000 m 周长的地下连续墙做了 600 m, 5 万 m² 面积, 15 m 深基坑, 有 3 万 m² 也已挖掘 7 m 深。然而, 一场灾难性的国际金融危机, 迫使该工程不得不中断。

东方明珠的成功, 雅加达塔的中标, 在很大程度上要归功于设计创新, 它贯穿在从设计构思到细

[收稿日期] 1999-06-04

[作者简介] 江欢成 (1938-), 男, 广东梅州市人, 中国工程院院士, 上海现代建筑设计集团有限公司教授级高级工程师

部构造的整个工程设计中。现代高新技术和民族文化紧密结合,建筑和结构的有机结合,使这两个设计具有了强大的生命力和竞争力。

1 设计力求创新

创新是社会进步的灵魂,它对古老的土建事业的发展尤为重要。当年我们在东方明珠现场设计室旁,竖起一块大标牌“创上海腾飞标志,树世界建筑丰碑”,以此作为设计者的座右铭,它时刻鼓励我们要在世界上一争高低。为了实现这一雄心壮志,我们在技术进步的道路上探索和奋斗了8年。

1987年1月,我们开始作投标的准备。我们意识到,由于电视塔罕有的高度,它应该成为城市的重要标志。作为标志,它一定是出类拔萃的,经得起时间考验的作品。我们把世界上一些有影响的标志性建筑物,诸如埃菲尔铁塔,悉尼歌剧院,金门大桥等贴在墙上,作为赶超目标;作为标志,它一定要与众不同,有它独特的风格,使人们一看到它,就想起上海。我们收集了国内外尽可能多的电视塔资料,学习它们,努力超过它们。我们发现,世界上绝大多数电视塔,都是单筒体结构,仅在塔楼的形状,塔身的线条,塔座的布置上,作些小的改变。粗看起来,它们都大同小异,人们戏称为“烟囱加糖葫芦”,因而就很难成为鲜明的标志。为了突破这种传统的模式,我们动员全院许多建筑师构思了多筒结构、旋筒结构、单筒加撑结构、三筒加撑结构、人字型结构和框架结构等多种结构型式的几十个方案,并从中归纳了5个方案于1988年8月送标。1989年3月4日经上海市委讨论,这个被江泽民同志称之为“Landmark”的东方明珠便脱颖而出。设计构思的创新,为上海重要的城市标志立了头功。

1995年1月,我们被邀请参与雅加达塔设计竞赛,参赛者有美、加、日、中、印尼等五国6家设计公司,大多数都是国际一流的建筑大师,包括Kenzo Tange, SOM, Baldwin, Murphy Jahn等。华东院可算中国一流,但当时在世界上还排不上位置,我们本着在游泳中学游泳,在国际竞争中锻炼的精神参赛。幸运的是,我们竟然中了标,它应归功于我们的设计创新。在充分了解印尼文化的基础上,我们用亚洲巨人的构思来表现2亿人口的发展

中大国。现代科技和当地文化相结合,得到了印尼专家和当局的认可,它和我们用东方明珠来标志上海确有异曲同工之处。雅加达塔的中标和建造,使世界华人为之扬眉吐气。华东建筑设计院开始被世界、特别是东南亚所称道。

2 设计创新为了优化设计

创新不是目的,否则它就成为了为新而新,创新的目的是为了设计优化。而优化的设计必然要求在前人工作的基础上,做得更好些,那就要有所创新,特别是突破性的创新。

东方明珠最大的技术创新,就是用带斜撑的巨型空间框架代替传统的单筒体结构。它优化了设计,使之具有鲜明的标志性。独一无二地有别于其它混凝土电视塔,人们一看到这样的结构,就会知道它是东方明珠,它在上海。同时在结构上带来一个很大的好处,就是它具有比单筒体更好的稳定性和抗震性能。因为它有一个很大的支面,又是多次超静定结构。不致因为某根构件的损伤造成整体结构的破坏。

雅加达塔,继承和发扬东方明珠巨型空间框架的长处,却又为克服它的不足,有许多新的创造。它取消了三大斜撑,而代之以用框筒把三个竖筒捆在一起,使之更为简洁,并有别于东方明珠结构,在结构上也可以获得更好的延性;它用许多圆盘来代替东方明珠的圆球,使之施工更为方便;它把三个竖筒的直径从7 m扩大到13.2 m,以避免出现东方明珠面临的垂直交通紧张的问题;它的三个竖筒的电梯井隔墙留了许多空洞以避免出现东方明珠高速电梯的活塞效应;它的塔身上加了17层的办公大楼,更充分利用了塔身的承载能力;它的混凝土桅杆,通过圆锥壳和三竖筒相连,比东方明珠的咬接过渡,在塔身刚度方面较为和顺变化,从而减小鞭梢效应。改进之处,不胜枚举。有了这些改进,使我们完全有理由相信,雅加达塔建成之后,将比东方明珠更为漂亮,更加成功。

设计的优化,必须建立在每个工种优化的基础上。但,各个工种自身的优化,并不意味着整体的优化,有时甚至有害于整体的优化。设计人的整体设计意识,对于优化设计十分重要。建筑工程设计在建筑工种龙头的主导下,各工种相互完善,又相

互制约。优秀的设计是在各工种的优化间找到一个好的结合点。就拿东方明珠来说,发射天线的工艺设计单位,要求天线杆越小越好,使之场强均匀。但结构做不出,而且小帽缨子,造型并不佳,经讨价还价,底部做到6~8 m。其后果是四面体天线不得不改为八面体,多花了点钱,但这在整个工程中,只是一个小数目而已。拿建筑来说,建筑师希望三个筒体有点倾斜,看起来挺拔,并减小偏心的感觉,结构也欢迎这样做,刚度的变化比较和缓,但这将带来施工的巨大困难,最后还是做成等外径直筒体。拿结构来说,最省的做法确是作成一个小下大的单烟囱,然而,事实证明在结构上稍多花点钞票,获得一个崭新的城市景观,是十分值得的事。拿设备工种来说,各有自己的规范,例如设备布置一定要有足够维修的地方,操作距离还有要求。但规范只是为一般情况制定,而高空是寸金地,各工种都要自己舒服,宝贵的空间,就不能得到最有效的利用。东方明珠找到了一个较好的结合点,虽然对各工种自身来说并非十全十美,但总体效果是成功的。

3 结构创新对东方明珠的作用

电视塔是个典型的高耸结构,结构设计对它的标志性,对它的成功建设起着举足轻重的作用。东方明珠在建筑和结构的有机结合方面,取得了可喜的成果。

3.1 带斜撑巨型空间框架在混凝土电视塔上应用

带斜撑的巨型空间框架结构的标志作用和抗震优点,在上面已有所论述。超静定结构在抗震方面的优越性,还在于设计者可以按强柱弱梁,强剪弱弯,强节点弱构件的原则设计,有意识地控制塑性出现的位置和顺序,以达到增大延性,必要时丢车保帅的目的。为此,我们在东方明珠的巨型框架横梁内,设置了水平中缝。6 m高的横梁相对于9 m直径的竖直筒体,在比例上是合适的。但相对于筒体的壁厚700 mm、500 mm、350 mm则显得太大。虽然在设计中,将横梁在平面上设计成双Y型,以和筒壁有较和顺的连接,但仍有强梁弱柱之嫌。为使大震下塑性铰出现在梁上而不是在筒体上,并考虑到塔的刚度仍偏大的情况($T_1 = 6.4$ s,基底剪力/塔重=2.1%),对横梁采取了弱化措施,在

横梁中部设水平缝,一根6 m高的梁变形为2根3 m高的梁,但,保护层及最外一环钢箍仍照常通过,以使得在一般情况下,按6 m高的梁受力,刚度好,而在大震下,中缝有错动,按二个3 m高的梁计算。

3.2 巨型支撑设计

百米长的巨型支撑使高塔从结构的观点上降低了93 m,劲性配筋使施工获得成功。

与地面呈60°交角的百米长支撑和垂直筒体的中心在93 m处交汇,它不仅很好地保证了塔的整体稳定,而且使塔身控制截面的弯矩减小了40%,大大地节约了投资。然而,人们怀疑巨型支撑是否有施工的可能,差点使本方案失标,为此我们做了许多工作,提出了施工的建议以说服专家们。斜撑按我们的方案快速建成了,它不仅使本塔具有鲜明的特点,其施工质量之好,令人赞叹。许多同行问及是怎样建造的,说白了很简单,我们设计了劲性骨架作配筋,分节拼装就位,然后在它上面安装模板,浇捣砼。

3.3 300 m长的预应力筋,保证塔身不开裂

按计算分析,在百年一遇的风荷载下,筒体将出现拉应力,为此我们设计了部分预应力,控制截面拉应力不超过混凝土的抗拉强度,以保证塔身不开裂,获得较好的耐久性。所用预应力筋为设计强度 1860 N/mm²的 $7 \times 7 \phi 5$ 钢绞线,三个垂直筒体,每筒下部68束,中途切去一半,变成上部34束,桅杆部分52束。其中最长的钢绞线297 m,中间不设接头,创造了建筑施工的纪录。

3.4 高强混凝土一次泵送高度创世界纪录

为了保证塔身具有较好的延性和足够的可靠度,我们控制筒体截面的轴压比不大于0.6,采用了标号为C60、C50、C40的混凝土。C60泵送到170 m, C40一次泵送到350 m高,创造了当时世界之最。施工中,研制了早高强(3天75%强度)、慢初凝(10 h),同时又具有大塌落度(20 cm左右)特点的混凝土,解决了超高一次泵送的难题。

3.5 浅桩和薄底板的应用

高塔建筑在软土地基上,怎样保证它不至于倾斜?金茂大厦的办法是把 $\phi 900 \times 20$ 的钢管桩,打入地下79 m,以获得尽可能小的沉降,这对于当时只有2亿元概算的东方明珠来说是不能接受的。

东方明珠只打了 423 根 500 m^3 的混凝土桩，打入地下 48 m。我们走的是另一条路，允许它有较大但较均匀的沉降。我们充分估计到，塔的中央荷载大，斜撑下荷载较小，但在静荷载下是对称的。因此，我们设计了较浅的桩基，但加强箱基和斜撑，使之构成很强的基座，可以有效地调整中心和边缘的沉降差。从中心到基础边的距离 60 m，这样大的距离对于调整它的变形也很有好处。实测表明，从施工到 ± 0.00 开始，到塔建成后 3 年，基础中心的沉降为 9 cm，周边 6 cm，呈盆状变形，高塔始终保持铅垂状态。

来访者对这样高的塔，其底板厚度仅有 1.5 m 难于置信。因为它和一般高层建筑基础 2~3m 相比显得太薄了。其实诀窍只是在于合理布置结构。在和建筑设计协调并尽量不影响使用的情况下，我们在箱基内设计了环向和径向的混凝土墙，而将绝大部分桩布置在墙下，基础底板主要承受均布的水土反力。设计技巧的合理运用，为建设节约了大量资金。

3.6 60 m 大厅的抗震构造

60 m 大厅结构由 48 根拱肋组成，拱肋上下端分别支承在上、下环梁上。环梁的变形以及在风和地震作用下的整体变形，均可能造成拱肋无规则地开裂或损坏。我们将拱的上下端绝大部分钢筋布置在截面核心，而在周边布置构造用小钢筋，这样，在一般情况下，拱结构具有很好的整体性，而在严峻的情况下，上下两端较隐蔽处可能开裂，但不会脆断，保证拱是稳定的静定结构。

3.7 减轻塔楼重量对高塔设计具有特别重要意义

东方明珠塔楼高挂在 350 m、297 m 和 118 m 高空，面积近 2 万 m^2 。塔楼自筒体悬出，它的自重不仅关系到塔楼本身，还增加了筒体的负荷，尤其大大地增加了地震作用。为此，我们千方百计减轻它的重量。措施是采用壁厚仅有 6~8 mm 的矩形空腹钢管桁架，上铺压型钢板。它上面的砼厚度，最薄处仅有 4 cm，突破了规范不小于 5 cm 的要求。为此，我们进行了试验，证明它完全符合结构性能要求，在使用中也没有不良反应。

3.8 双重悬挂钢结构第一次在我国应用

东方明珠上球 9 层 1 万 m^2 是双重悬挂结构。单筒中钢环梁悬挂 12 榀钢屋架，再由钢屋架悬挂

柱子支承楼板。这里的关键技术是尽可能使构造简单，桁架和钢环梁的连结以及柱与桁架的连结，都仅使用一个销子，使施工安装非常方便，半个多小时就可安装一榀桁架。另一关键技术是充分考虑受拉的吊柱和受压的筒体间的变形差，在构件设计时给予调整，使得结构协调，并避免楼板倾斜。

3.9 预应力砼壳支承 50 m 大球

50m 直径的大球，下端和三个竖筒及三根斜撑相交，上端和三个竖筒及中筒相交，支承条件十分复杂。我们在球的底部设计了一个锥形的混凝土碗，碗底和 6 个筒体整浇在一起，碗边支承 48 根斜柱，支托桁架和楼板，解决了复杂的支承关系。在受力复杂的地方，加大安全度以覆盖一些难于预料的问题。对锥壳顶面的楼板施加法向预应力，受力直接而明确，取得了很好的效果。初步设计时，它是一个截球碗壳，在大量的内力分析之后，施工图改成为锥壳。

3.10 钢天线杆的顶升设计

钢天线杆的施工从来就是电视塔建设的难题，无论有直升飞机起吊（多伦多塔）还是用拔杆安装（北京塔）都遇到过很大的困难。考虑到这点，我们设计了顶升法施工的钢桅杆，把 110 m 长的钢桅杆，分成 11 节，在地面上组装，用 20 束钢绞线从 350 m 高空（混凝土桅杆顶）吊下，20 个机器人（计算机控制的千斤顶）沿着它攀升，同时把天线杆带上去，仅花 10 天的时间，就完成了攀升和安装。

4 技术创新需要严格的科学态度

不创新，走老路，技术就不可能进步，也就谈不上第一生产力和知识经济。技术创新意味着突破常规走前人没有走的路，必然承担着一定的风险，因而就要求技术创新具有严格的科学态度。

东方明珠的设计有一系列的技术创新。与此同时，我们也进行了一系列的科学试验和研究。

风工程试验研究 场地风特性研究，4.6 m 高的刚体模型风洞试验，节段模型（3 段）试验，1.8 m 高的气体弹性模型试验，小模型水槽模拟试验，以及多种计算模型和软件的计算分析比较。

地震工程试验研究 地震危险性分析研究，9.2 m 高的振动台模型试验，筒体恢复力特性试

验, 模型计算分析比较。

静力模型及节点模型试验研究 4.6 m 高的模型试验; 下球处及上球处三个主要竖筒和中间筒体连结节点的模型试验; 1:5 带缝和不带缝的大梁在反复荷载下的模型试验; 节点光弹性试验。

钢结构防腐试验 由两个不同的研究单位寻求 30 年不维修的防腐工艺。

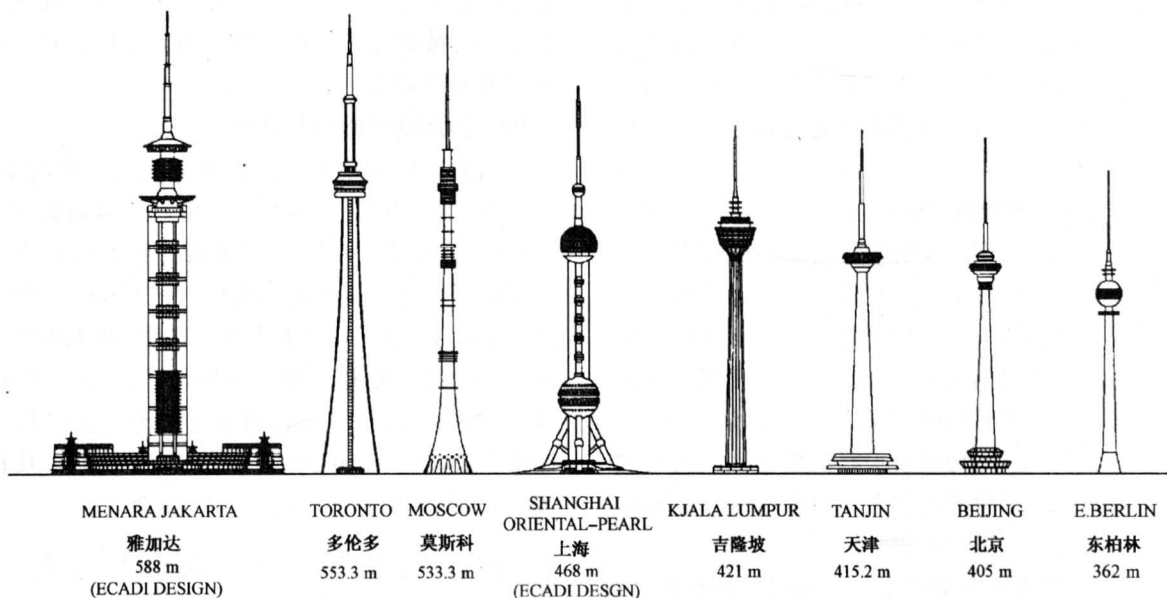
其它试验 单桩的垂直承载力和联合桩的水平承载力试验; 超薄砼面板 (4 cm) 的压型钢板楼板试验; 矩形空腹钢管桁架试验。

试验研究证实了设计, 特别是技术创新方面的可靠性、安全性。它足以抵抗上海百年一遇的大风, 在 9 级大风下人们登塔观光仍不会有不舒服的感觉。它足以抵抗超过上海设防烈度的地震。试验

研究也为改善设计提供了很多有用的依据。

雅加达塔从设计开始, 我们就十分注意科学研究工作。3 根单桩垂直承载力试验结果, 极限承载力都超过了 13000 kN, 因而, 大胆地采用了 6000 kN 的设计承载力, 较大地超过了上海规范的限值; 1:300 的气动弹性模型风洞试验, 已在加拿大西安大略大学风洞试验室完成。由于有了东方明珠的试验研究基础, 我们计算分析所得的风力矩数值和试验结果吻合得很好, 差别仅为 5.3% 左右, 这使该大学的教授、风工程权威人士 Isyumov 先生十分惊奇, 希望我们在国际学术会议上介绍; 在施工现场, 我们进行了降水试验, 从而确定地下连续墙的入土深度和它的壁厚。

所有这些, 保证了设计和技术创新的成功。



附图 世界各国主要的砼电视塔
Main concrete towers in the world

Contribution of Design Innovation to Oriental Pearl Tower & Menara Jakarta

Jiang Huancheng

(Shanghai Modern Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

[Abstract] The project Oriental Pearl Tower, 463.85 m in height, ranked the first in Asia and the third in

the world, has attracted millions' visitors and been publicly recognized as the most important landmark of Shanghai. The project Menara Jakarta, 558 m in height with total floor area of 320 000 m² is going to be the number one in the world. The pile work of Menara Jakarta has already been completed soon after construction commencement in January 1998. However, the project has to be interrupted due to the international financial crisis.

The success in both Shanghai Oriental Pearl Tower construction and the design competition of Menara Jakarta should be greatly attributed to the design innovation not only in architecture, but also in structure and other disciplines through the whole project from design concept to details. In the project of Shanghai Tower, designers used a string of pearls to symbolize Shanghai, hanging on a mega space frame with a sets of diagonal struts, which breaks out the traditional system of single tube to be commonly used for concrete TV tower. Therefore, a unique architecture was formed for the city landmark. Such kind of structure is also beneficial for wind and seismic resistance. Furthermore, a series of advanced technologies were employed in the tower, such as to use a prestressed concrete shell to support the 50m sphere, to use bi-hanging steel structure for the 45m sphere and to design the antenna pole by using climb-up method after integrated on the ground etc. All of these innovations in design ingeniously and rationally solved a lot of problems for such complicated structure, so that the difficult construction work became easy. In the project of Menara Jakarta, designers kept and developed all advantages and overcome some shortages in Shanghai Tower. Many new innovations were further made. Therefore the tower becomes simple, straight forward and elegant.

In order that the technology innovations were based on solid science, series experimental studies in seismic engineering, wind engineering and static loading had carefully been done for Shanghai Tower, and some studies had been done for Menara Jakarta.

[Key words] design innovation; TV tower; space frame; diagonal strut; sphere; steel pole; hanging structure

中国工程院化工、冶金与材料工程学部第二届学术会议

[本刊讯] 针对面向 21 世纪的我国化工及相关材料工业的可持续发展, 化工、冶金与材料学部第二次学术会议于 10 月 10 日到 13 日在清华大学召开。这是该学部重要的系列学术活动, 每 2 年召开 1 次。这次会议的主题为“讨论化工及相关材料工业节能、降耗、环保领域新一代工艺与工程学术问题”。期望在这一领域的技术创新及过程和设备的更新换代中加速原始创新思想在本学科领域内的相互借鉴, 促进新技术的实验研究、中试和工业转化。开幕式致词的有李大东、杨家庆、金涌、朱高峰、袁晴棠、侯祥麟院士。

会议得到众多院士、专家、学者及工业届人士的支持和重视。会上共宣读论文、专题报告 140 余篇, 其中大会报告 6 篇。国内著名科研院所、大学、企业等 60 余个单位的 150 余位专家、教授及许多中青年学者积极参与, 其中两院院士共 30 余位。

会议论文内容涉及化工分离技术、化学反应工程与技术、新工艺、新方法、材料与催化剂、化工设备的模拟、放大、节能、环保及其它领域的新进展。专家门交流了跨世纪化工及相关材料工业领域中节能、降耗、环境友好工艺和装置等创新的思想立论、实验研究、中试开发和处于工程推广的各类成果。使科学技术创新过程得到促进、交流和发展, 并在社会上得到更大的支持和重视。与会代表集中讨论了新的科研思路和加速高新技术产业化的问题, 提出了不少新的立项建议, 将作为向国家有关部门提供本领域技术发展预测报告咨询依据。