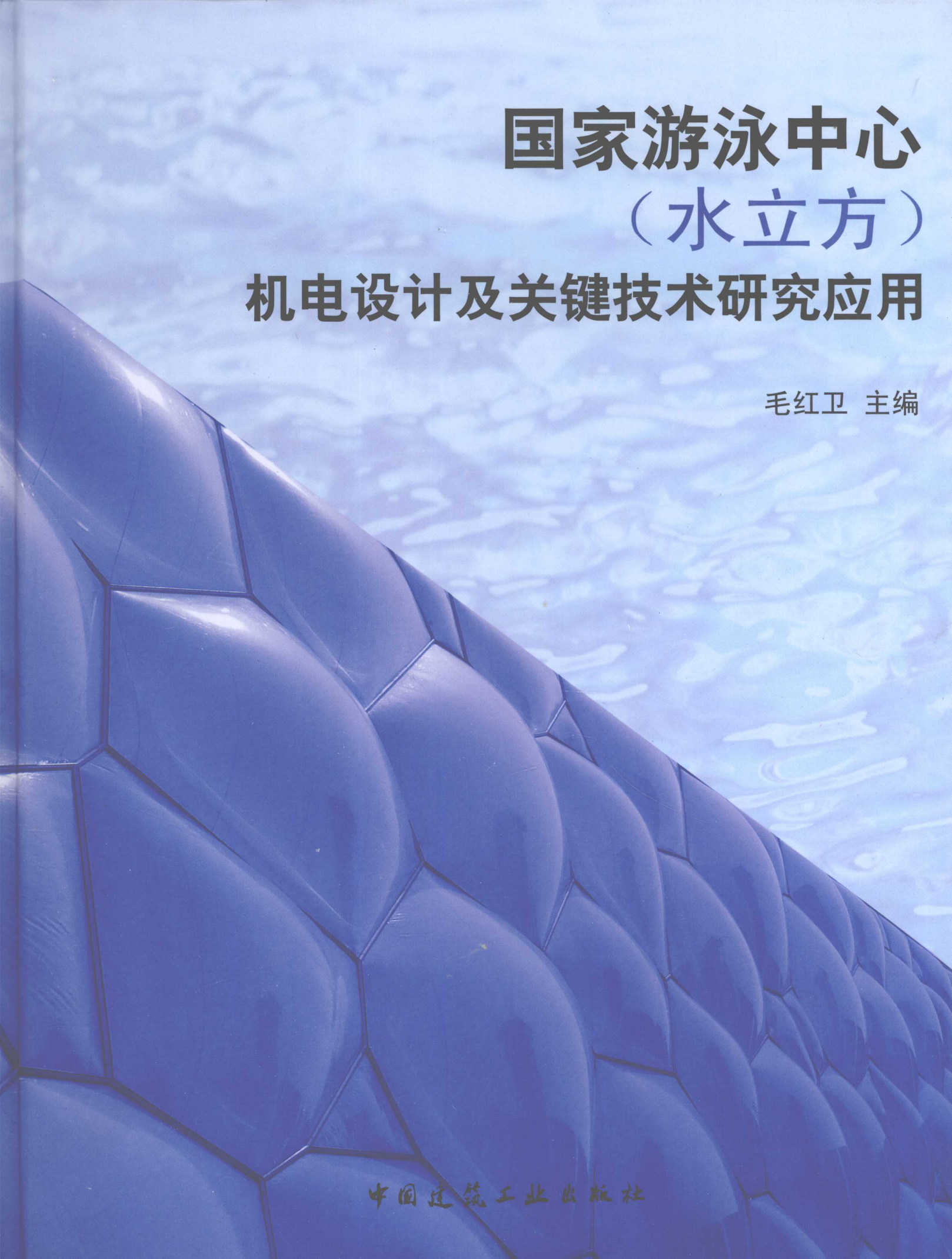


The background of the cover is a close-up, low-angle shot of the exterior of the National Aquatics Center, also known as the Water Cube. The building's facade is composed of numerous blue, faceted panels that create a textured, crystalline appearance. The lighting is soft, highlighting the geometric shapes and the overall blue color scheme. The title and subtitle are printed in a clean, sans-serif font in the upper right quadrant, while the author's name is to the right of the subtitle. The publisher's name is at the bottom center.

国家游泳中心 (水立方)

机电设计及关键技术研究应用

毛红卫 主编

中国建筑工业出版社

国家游泳中心
(水立方)
机电设计及关键技术研究应用

中建国际(深圳)设计顾问有限公司(CCDI)

毛红卫 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

国家游泳中心(水立方)机电设计及关键技术研究应用/中建国际(深圳)设计顾问有限公司(CCDI),毛红卫主编. —北京:中国建筑工业出版社,2009

ISBN 978-7-112-11284-5

I. 国… II. ①中…②毛… III. 游泳池—体育建筑—房屋建筑设备:机电设备—建筑设计—中国 IV. TU245.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 169152 号

国家游泳中心 (水立方)

机电设计及关键技术研究应用

中建国际(深圳)设计顾问有限公司(CCDI)

毛红卫 主编

*

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

北京天成排版公司制版

北京中科印刷有限公司印刷

*

开本: 880×1230 毫米 1/16 印张: 47 插页: 16 字数: 1528 千字

2009 年 11 月第一版 2009 年 11 月第一次印刷

定价: 132.00 元

ISBN 978-7-112-11284-5

(18612)

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)

内容提要

国家游泳中心(水立方)是 2008 年北京奥运会的主要比赛场馆之一。这个采用 ETFE 薄膜气枕作围护结构的建筑物,不仅造型美观动人,也是世界上首创的体育建筑,并且充分体现了“绿色奥运、科技奥运、人文奥运”的理念。但也带来了一系列的设计难题,无可借鉴,只有靠自己研究突破。本书分为上、下两篇:上篇是关于机电方面各专业的介绍,包括建筑热工及暖通空调、给水排水、建筑电气和智能化等四个部分的设计,都有许多新的手法和思路;下篇是 20 项机电关键技术的研究,是为了完成本项目的设计各专业做的研究,包括两项国家级课题、两项科技部和北京市科委立项的课题。

本书的内容具有开拓性和创造性,可供建筑设备设计人员、建筑设备专业研究人员及高等院校相关各专业师生参考。

* * *

责任编辑:吴文侯

责任设计:郑秋菊

责任校对:兰曼利



序

我总发自内心地感叹，生活在此刻是幸运的，因为这个时代赋予我们的机会前所未有的。2003年，我们能够与“水立方”结缘，正是这样的机遇。

拿到《国家游泳中心（水立方）机电设计及关键技术研究应用》一书的初稿，设计“水立方”时的那些记忆又涌上心头。当北京申奥成功的时候，我们也和大家一样，怀抱着一个美好的愿望，憧憬在这样一个世界性的事件里做一点力所能及的事情；当初没有想到，有一天，我们真的能够参与竞争“水立方”这样级别的项目，并且最终实现了她。真的感谢业主和中建总公司，看到了CCDI身上那种忘我的投入和创新的热情，把这样一个重大的项目交给了我们。这份信任对我们来说，无比珍贵。

从2003年中标到2008年竣工，“水立方”身上凝聚着无数人美好的愿望和心血，许许多多人在“水立方”的设计过程中竭尽自己所能，去努力实现这样一个快乐的建筑。项目组的人为了她不分昼夜地奋战在书案和现场；国外的合作设计公司在这个项目中和我们思想碰撞出了创意和点子；我们联合的公司外的专家和学者为我们提供了专业意见和帮助……几乎所有参与“水立方”设计的人都不计成本、毫无保留地贡献了自己的力量。正是这许许多多人的努力和期许，我们才克服了一个又一个难题，最终实现了“水立方”。

当水立方在鸟巢旁边静静绽放她的美丽，大家欣赏的多是她的外表和形态。但是，大家所看不见的，是她感性的外表下面，复杂而严谨的专业技术的支持。当今，世界范围内的建筑创作越来越仰仗技术的进步。众多有影响的作品都是从新技术中获得创作的资源，这已经是一个重要的行业现实，而且越来越成为主流。技术在建筑设计中贡献的价值份额在不断增长，“水立方”项目就是一个很好的例子。“水立方”设计之初，用半透明材料有条件地利用日光能源及两层皮围护结构形成空腔通风的节能措施就被确定为一个技术前提。因为在技术上找到了良好的创作动因，才成就了一个具有说服力的方案。而我们机电团队所进行的技术研究，为“水立方”的创意以及最终实现，贡献了巨大的价值。

但是在我们目前的行业中，创新和研发的能力和意识还相对薄弱，传统机制对技术创新的支持还比较缺乏。所以在“水立方”的设计中，为了实现这些技术措施，需要付出的代价是非常大的，要有承担风险的勇气和大量人力物力财力的投入。我们通过自己投入研发和联合外部专业力量等多种途径，鼓励各专业的团队协作及每个人创造性地发挥。这些努力在“水立方”项目的过程中看到了令人鼓舞的结果：我们的专业人员得到了锻炼，研发和创新能力有了明显的提升，收获了一支良好的专业队伍，更重要的是慢慢形成了一种鼓励创新的企业文化，并逐渐被大家所接受和理解。从自身角度看，建立这种能力本身就是一种投资，尽管这还是一个起步，但是至少证明，技术先导作用是可以设计单位的努力去实现的。



“水立方”的成功，是水立方团队的努力结果，也是整个社会对她的美好魅力的推动，更是中国高速城市化的时代发展大背景给予我们进步的机会。CCDI 作为国内规模化的多专业综合设计咨询机构之一，我们的理想是在这个行业中实现真正的好设计，也正尝试着利用企业组织的能量，为建设行业的科学发展以及释放中国专业人才的创造力作出一些努力。“水立方”项目的历练，给我们寻找答案提供了一些启示，也更确定了我们把鼓励创新作为企业责任的决心。

《国家游泳中心（水立方）机电设计及关键技术研究应用》一书经历了一年多的整理和撰写，是机电团队对水立方相关技术成果的一个回顾与总结，以此作为公司在这一专业方向上的知识经验积累，更希望这些研究能为行业提供一些有益的参考和借鉴。

赵小钧

CCDI 总经理

水立方中方总设计师



项目介绍及设计回顾

1. 项目介绍

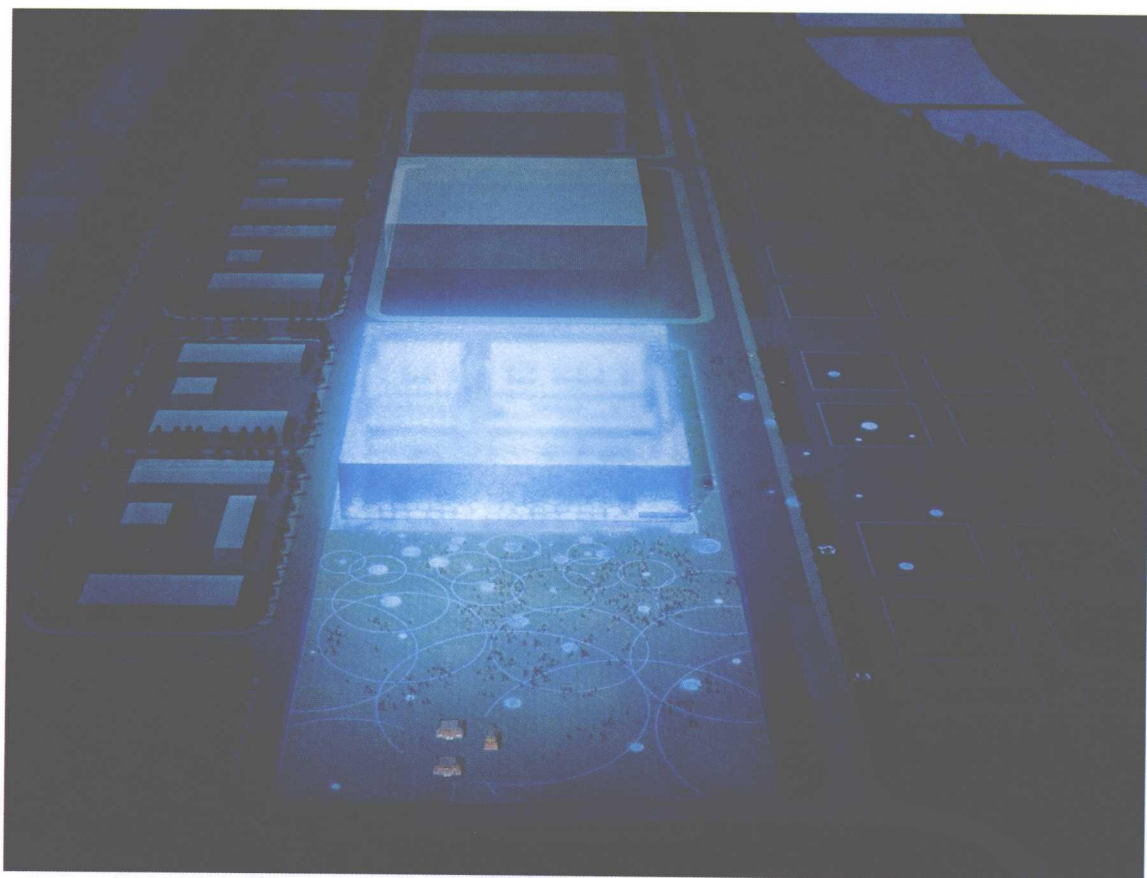
国家游泳中心, 又名“水立方”, 是2008年北京奥运会的主要比赛场馆之一, 位于北京奥林匹克公园内, 北邻成府路, 东邻景观路, 南接北顶娘娘庙和北四环, 西邻景观西路。建筑平面是 $177\text{m} \times 177\text{m}$ 的正方形, 四周环绕 $4 \sim 8\text{m}$ 的护城河, 建筑基底面积 31449m^2 , 建筑高度 31m , 赛时规模为 64732m^2 (其中地上 29134m^2 , 地下 35598m^2 , 不含地下车库), 赛后总面积 79837m^2 (其中地上 44239m^2 , 地下 35598m^2 , 不含地下车库)。

正方形平面被划分为三个主要的池厅, 分别为奥林匹克比赛大厅、热身池大厅和嬉水大厅, 之间用ETFE泡泡墙形成的线性空间分隔。比赛大厅内包括观众座席、游泳池、跳水池以及各类附属用房, 为奥运会期间主要使用空间。热身池大厅内包括热身池、多功能泳池, 上方另预留赛后溜冰场。嬉水大厅是赛后为公众提供的水上综合娱乐场所, 包括冲浪、滑水、漂流、戏水、喷泉等多种设施。在东南主入口的上方, 为前来感受、体验、触摸泡泡的游客提供了一个极具梦幻色彩的空间——“泡泡吧”。

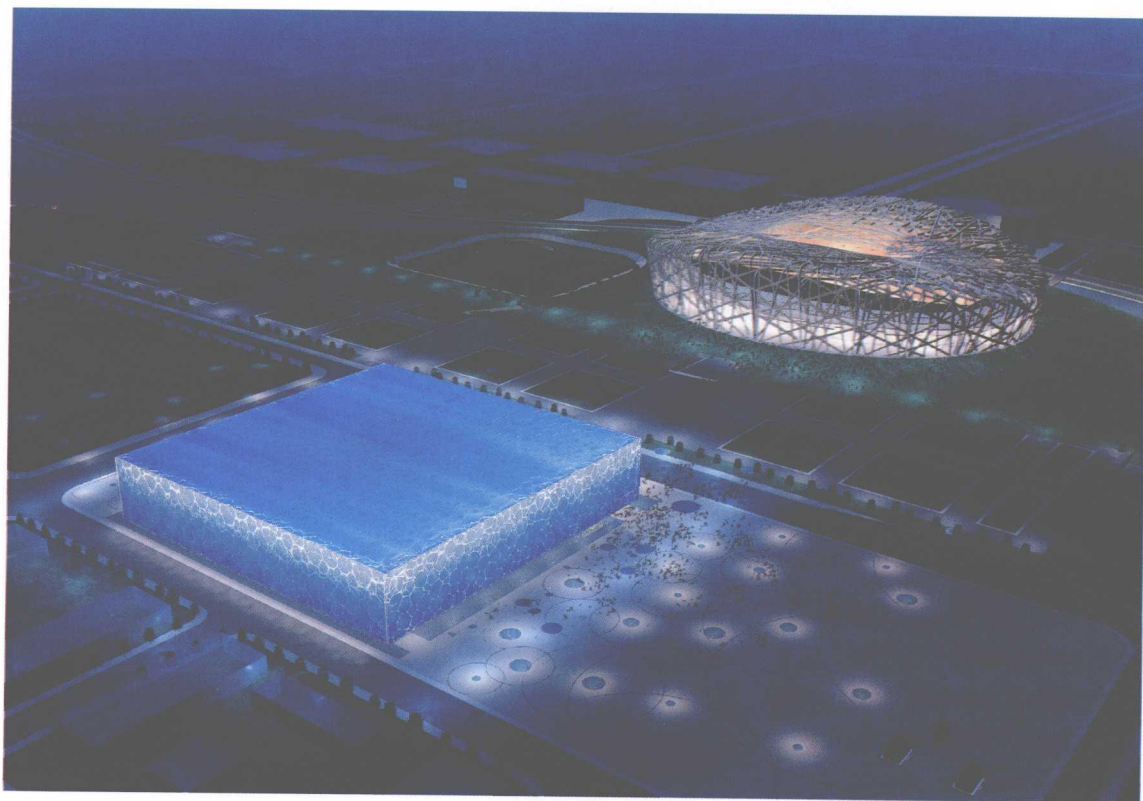
国家游泳中心不但要为2008年奥运会的游泳、跳水、水球、花样游泳比赛提供一流竞赛场地, 在赛后, 还需满足集专业体育训练/竞赛、全民健身、商业、娱乐、办公等于一体的复杂而多样的功能要求。基于不同的使用功能和布局, 设计同时考虑赛时比赛使用和赛后运营使用两种模式, 以永久运营使用的构想结合赛时要求进行建筑布局。

地下二层主要为池底、车库、设备用房等。地下一层及以上分为三个主要的池厅, 分别为奥林匹克比赛大厅, 热身池大厅和嬉水大厅。热身池大厅上方预留赛后多功能室内运动场, 可以根据需要设置成3片网球场或2片篮球场或1片溜冰场。各层另设相关附属空间和设施。主要比赛层位于地下一层; 主要观众层位于首层和二层。建筑主体为单层, 附属部分地上局部四层, 地下二层。地下二层设六级人防, 战时为物资库, 平时为车库。奥运会赛时计17000个座位, 其中钢结构临时看台11000席, 残疾人座位34席。停车位413辆, 其中地上108辆, 地下305辆。

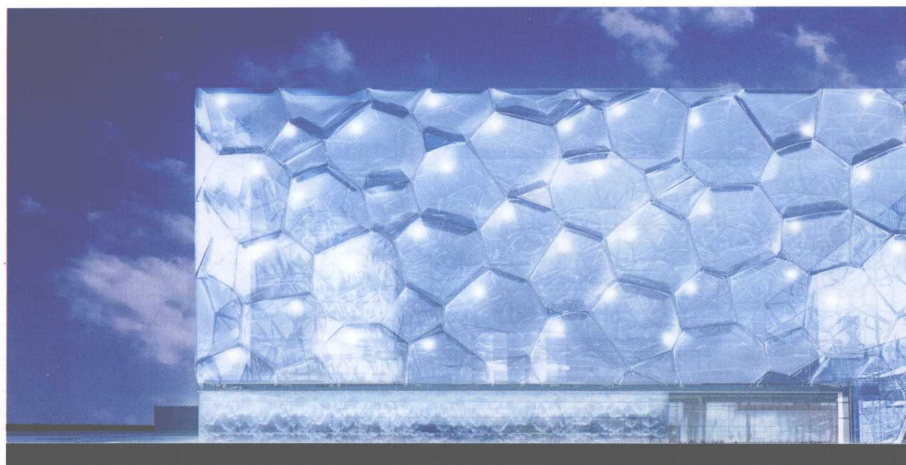
永久场馆的部分为赛后的使用而设计。奥运会16天的短时间内需要巨大的峰值容量, 包括人员、机电负荷。设计的场馆满足永久的使用需要, 而通过临时设施来满足赛事临时的高峰容量。使用临时看台扩容观众容量; 使用临时的发电机组满足高峰用电量; 使用永久空间安置比赛所需的大量辅助功能空间。大量的临时设施为奥运会服务, 如临时售票、购物等地点; 17000个座位中将有11000个采用临时结构, 赛后只保留6000个永久座位。在被拆除的临时座椅部位, 赛后将加建两栋内部小楼, 用来满足商业、办公、娱乐以及俱乐部等空间需求。赛时的观众集散厅在赛后将改造成为室内商业步行街。通过对赛时赛后功能转换的充分考虑, 为“水立方”事先设定了七大运营板块。这样既满足了举办最高级别的国际赛事的要求, 也优化了投资和场地的收益。



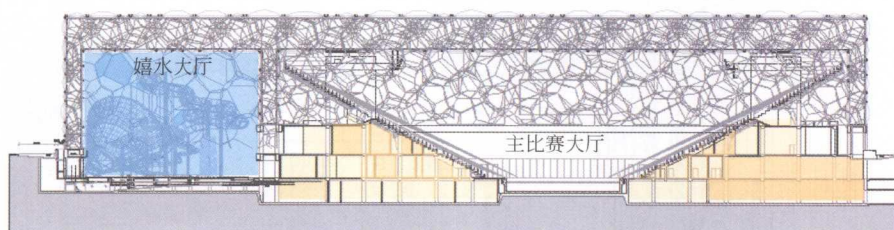
水立方模型效果图



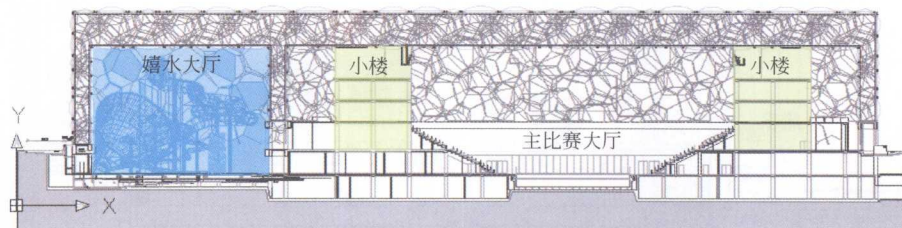
夜晚的水立方



ETFE 透明膜外围护体系



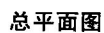
赛时模式

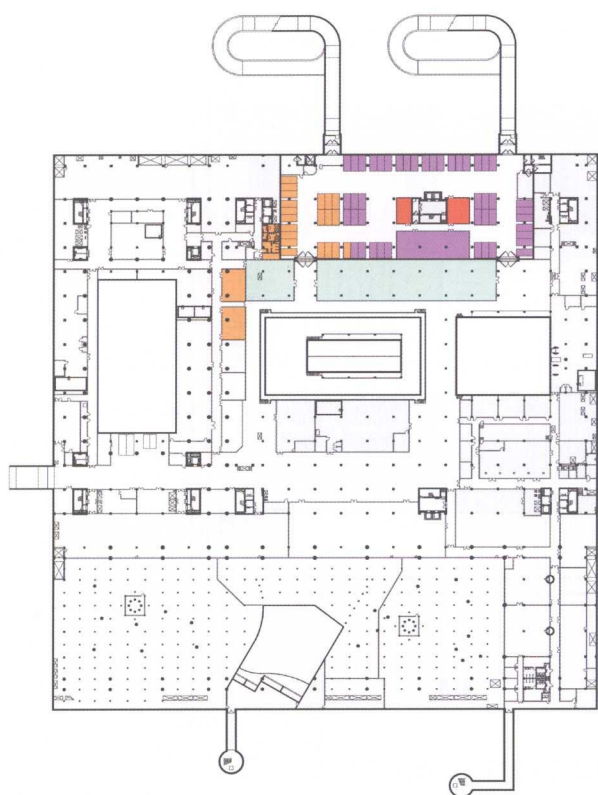


赛后模式

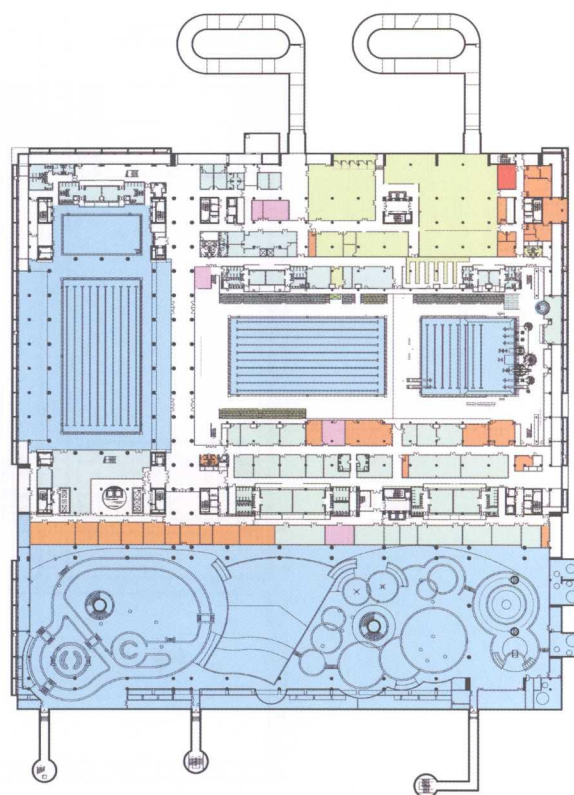


室内商业步行街效果图

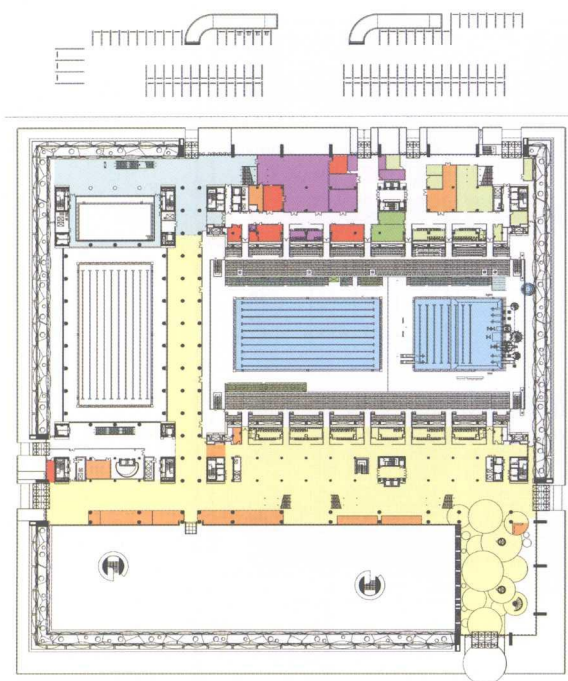




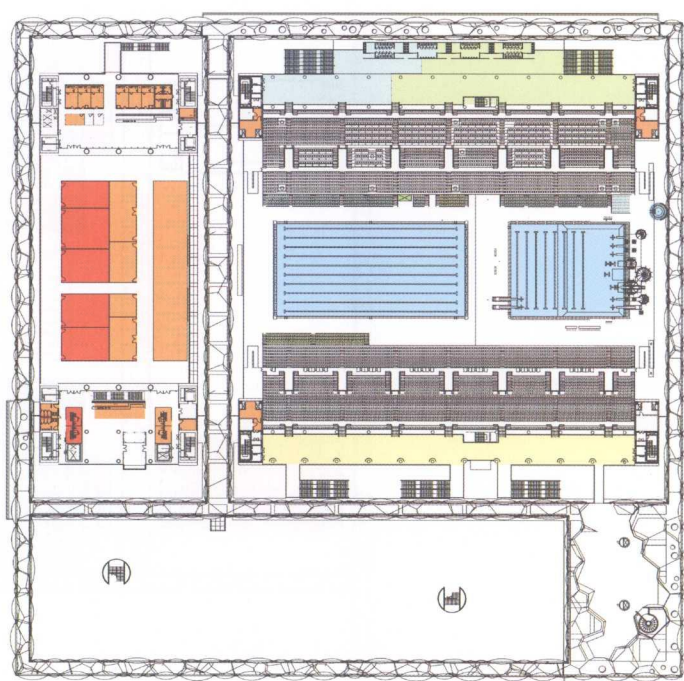
地下二层平面图



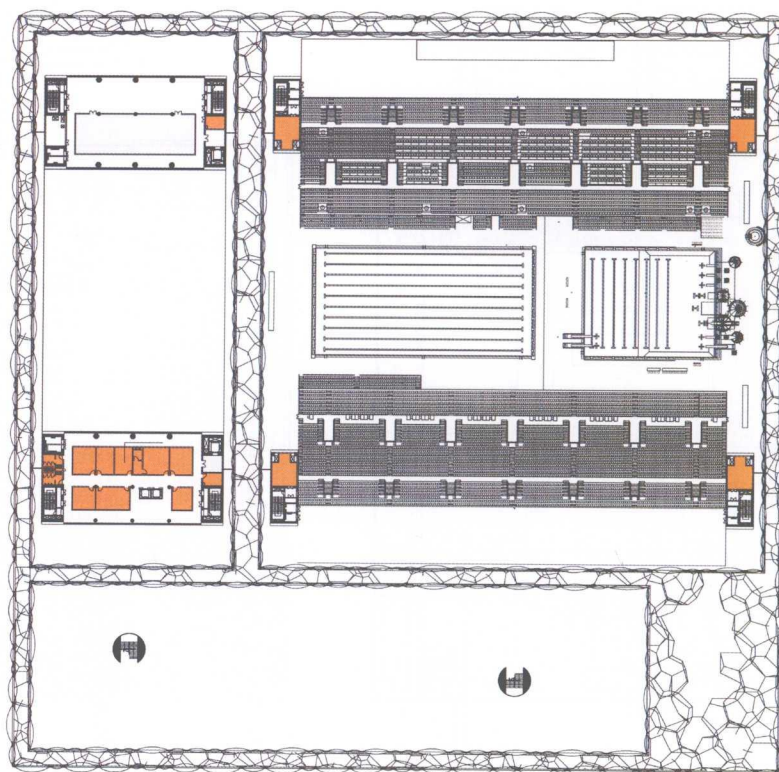
地下一层平面图



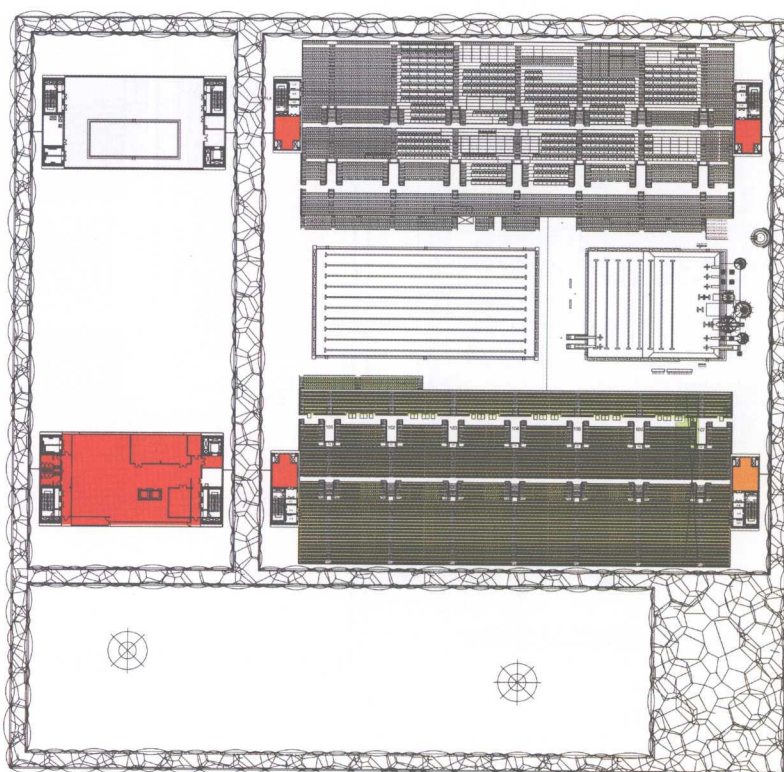
一层平面图



二层平面图



三层平面图



四层平面图



2. 设计回顾

大型室内游泳馆的机电工程设计，一直是国内建筑机电设计探索的领域；对于有 17000 座位的奥林匹克室内游泳馆，更是国内机电工程设计界的一次新接触，机电设计各专业，包括给排水、暖通空调、电气、智能化等专业都面临巨大挑战，从奥组委的技术要求、国际泳联的规定、转播商的要求、北京市政府“三大理念”的落实、超大空间室内泳池机电工程设计，都是国内建筑机电设计没有经历过的，因此，针对本项目，在中建总公司领导下，中建国际(深圳)设计顾问有限公司(CCDI)，联合了有悉尼奥运会游泳馆设计经验的澳大利亚 PTW(悉尼)建筑师事务所，和澳大利亚 ARUP(悉尼)工程顾问公司组成设计联合体，共同工作，完成任务。

国家游泳中心的机电工程设计，面临很多难题，其中一些是全世界均未涉及的前沿课题。“水立方”最大特点之一就是其外围护结构采用了 ETFE 膜结构，“水立方”独特的建筑艺术效果及建筑师所想表达的“水”的主题都是通过 ETFE 充气气枕膜结构展现的，尤其是夜晚，当“水立方”的立面景观灯亮起时，气枕膜结构所表达出的艺术效果，更是让观者赞叹不已。采用 ETFE 膜作为围护结构的建筑物，目前在中国还只有“水立方”一个，从世界范围看，有些建筑物也是用 ETFE 膜作为围护结构的，但它们往往是一些对室内环境参数要求不高的阳光房，如英国伊甸园；或者仅仅是把 ETFE 膜作为建筑装饰外表皮材料，如德国的安联球场。而将 ETFE 膜作为围护结构材料，用于一座对室内环境参数有严格要求的大型公共建筑，尤其是大型室内游泳馆，世界上没有。国家游泳中心屋盖的上、下表面以及墙体的内、外表面覆盖有 3000 多个形状各异的 ETFE 充气枕，总面积超过 10 万 m^2 ，是目前世界上覆盖面积最大、技术难度最高、构造最复杂的 ETFE 充气膜结构；游泳中心采用的 ETFE 气枕是多层 ETFE、中间充气的枕形结构，该结构形式在国际上也是首例；由此导致的对机电工程各专业设计的影响，以及有关该围护结构室内关键技术的研究，即 ETFE 气枕围护结构的声学、光学及热工性能等许多关键技术研究，均属于世界级水平的课题，设计者必须对其进行认真的实验研究与深入的理论分析，来解决“水立方”围护结构设计难题，实现“水立方”绿色节能；另外，“水立方”ETFE 双层气枕围护结构以及空间多面体刚架钢结构体系，由于膜材及气枕的特殊光学特性和复杂多变的内部安装空间，对照明方式选用、光源和灯具选择以及系统集成化控制等，提出了难题和挑战，没有任何先例可循；同时，“水立方”的泳池水质标准如何确定，奥运会泳池水循环处理工艺如何设计，大空间暖通空调如何才能在提供室内舒适环境的同时又环保节能，高标准的大型游泳馆体育照明设计，数字技术应用等，都是国内机电设备专业遇到的新课题。

“水立方”室内关键技术的研究，是要对一个新型建筑围护结构形式提供一套完整的声、光、热及环保节能解决方案，“水立方”的景观照明研究，涉及国家 863 攻关计划中的课题“半导体照明规模化系统集成技术研究”，其他机电各专业的课题研究，是要对超大规模室内泳池机电工程设计提供设计指导，CCDI 作为“水立方”建筑设计的最终责任承担单位，任务艰巨。我们与国际优秀设计顾问公司合作，努力学习先进技术，包括与澳大利亚泳池水处理顾问 Stevenson & Associates 合作设计，随着初步设计的深入，所遇到的工程设计中的关键技术在国内外无任何规范、规程可依据和遵循，在这种情况下，CCDI 联合国内科研团队开展科研攻关，解决这些世界级的难题。我们联合的团队包括清华大学建筑科学技术系、中国建筑科学研究院物理所、同济大学太平洋节能中心、北京清华城市规划设计研究院声学设计研



究所, 中国建筑科学研究院防火所, 中国电子科技集团公司第十三研究所, 同济大学建筑与城市规划学院, 北京工业大学建筑与城规学院, 还有北京奥组委、北京市水利科学研究所, 广电部设计院, 北京热力集团设计院, 上海广茂达灯光景观工程有限公司, 北京泰宁科创科技公司, 北京恒动科技发展有限公司, 长江三峡技术经济发展有限公司, 中建一局集团建设发展有限公司, 以及业主单位北京市国有资产经营有限责任公司等, 我们的工作还得到科技部、北京市科委等单位的支持, 以及很多专家的帮助, 包括蔡敬琅、江亿、林海燕、潘云钢、李引擎、李晋奎、石惠斌、李炳华、傅文华、吴德绳、赵建平、陈怀民、郝洛西、唐德超、张耀根、朱晓东、李农、赵志雄、王洪世、李云峰、刘星、陈春雷等等, 事实证明, 没有中、外各方的合作支持, 不可能按进度高质量地完成“水立方”项目的设计。

国家游泳中心的机电工程设计从 2003 年的方案中标起, 到 2008 年奥运会结束, 历时长达 5 年, 设计联合体的机电设计人员为这个项目付出了艰辛的努力, CCDI 更是前后投入了超过 50 人的机电设计团队, 设计人员包括暖通专业技术总负责人毛红卫、专业负责人毛红卫、平川, 给排水专业技术总负责人郑大华、专业负责人赵书义、张海宇, 电气专业技术总负责人李兴林、专业负责人王霓、董青, 智能化专业技术总负责人李兴林、专业负责人李志涛, 项目管理组黄宽政、蔺国强, 设计人员还有唐晓健、匡嘉智、魏志东、彭洲、刘乃平、苏振宇、王宏越、杨杰、张朔、梁雪梅、黄艳、王微微、林一平、满孝新、曾建龙、陈刚、丁丽娟、娄玺明、张霞、张海宇、周斌、梁幸、黄永刚、王立敏、李兰秀、王鑫、于家宁、徐力钧、张文武、许皖、康增全、邹政达、原红波、孙宝莹、郝秀云、汪嘉懿、吴生庭、庄光发、刘文捷、刘宇辉、陈英、封小燕等, 以及悉尼 ARUP 的 Kenneth Ma 带领的机电设计团队, 他们为这个项目的成功也起了重要作用。

本书汇集了“水立方”机电工程设计的两大内容, 上篇是机电设备各专业的的设计阐述, 包括建筑热工及暖通空调设计、给水排水设计、建筑电气设计、智能化设计; 下篇是水立方机电关键技术研究, 是为了完成本项目的设计各专业所做的研究, 包括“水立方”室内环境关键技术两大科研成果, 一个是由科技部资助的科技部课题(课题编号: 2004BA904B02)——“国家游泳中心(简称水立方)结构及室内环境关键技术研究”课题之“建筑全年运行能耗模拟分析”研究报告, 第二个研究是北京市科委支持的“奥运场馆室内环境设计关键技术研究”——分课题二“国家游泳中心“水立方”室内环境系统关键技术研究”(课题编号: H030630210690 附 2)。以及北京市科委的“奥运场馆 LED 照明——LED 在国家游泳中心建筑物景观照明上的应用研究”(课题编号: D0606004040191), 和科技部的“半导体照明规模化系统集成技术研究——国家游泳中心大规模 LED 建筑物景观照明工程研究”(课题编号: 2006AA03A167)等。这些课题的研究, 为重新确定中国泳池水质标准奠定了基础, 确保了“水立方”成为一座绿色环保节能的建筑物, 实现了建筑师幻想的夜晚“水立方”照明效果, 构思了最先进的场地智能化系统, 成功地在奥运会期间圆满完成并转播了紧张激烈的体育赛事表演。

国家游泳中心的机电系统, 成功地通过了奥运测试赛及奥运会的检验, 体现了“绿色奥运、科技奥运、人文奥运”的理念, 并为“快速泳池”的实现做出了贡献。“水立方”的设计, 得到了社会很高的评价, 我倍感大家对我们设计者的宠爱, 在此, 我要感谢各界对我们的支持, 感谢建筑师们提供了这么好一个舞台, 感谢设计联合体的同事们的辛勤努力, 更要感谢几年来在幕后一直支持着我的同事们努力工作的家人们, 谢谢大家!

毛红卫

国家游泳中心设计联合体机电部主任, 机电总工程师

编著组成员

主 编：毛红卫

编写成员：李兴林 郑大华 平 川 梁雪梅
张海宇 陈 钢 董 青 邹政达
孙宝莹 原洪波 李志涛 刘文捷
刘宇辉 郑 方 张 欣

主编单位

中建国际(深圳)设计顾问有限公司(CCDI)





一、工程大事记

- 2003 年 8 月 “水立方”创意中标国家游泳中心设计竞赛
- 2003 年 9 月 27 日 国家游泳中心 50% 初步设计完成
- 2003 年 10 月 可行性研究报告审查
- 2003 年 11 月 12 日 通过初步设计审查
- 2003 年 12 月 24 日 桩基开工
- 2004 年 1 月 钢结构科研立项
- 2004 年 1 月 ETFE 供应商和施工承包商进行原型测试商务谈判
- 2004 年 1 月 16 日 国家游泳中心消防专家论证会
- 2004 年 2 月 11 日 通过由北京市发改委组织的国家游泳中心建筑合理用能评估专家论证会
- 2004 年 2 月 24 日 北京市科委国家游泳中心“水立方”室内环境系统关键技术研究科研立项
- 2004 年 4 月 施工图审查通过
- 2004 年 5 月 27 日 国家游泳中心施工图消防审查通过
- 2004 年 7 月 28 日 通过全国抗震超限审查委员会的超限审查
- 2004 年 8 月 进行第一次和第二次 ETFE 单元气枕原型测试
- 2004 年 9 月 混凝土结构主体工程开始施工
- 2004 年 12 月 完成 ETFE 幕墙装配体系技术规程
- 2004 年 12 月 22 日 通过北京市科委组织的对该工程的钢结构科研成果鉴定
- 2004 年 12 月 30 日 钢结构最终施工图纸交付审查通过
- 2005 年 3 月 科技部批准国家游泳中心结构及室内环境关键技术研究课题
- 2005 年 3 月 ETFE 第一阶段视觉测试
- 2005 年 4 月 22 日 ETFE 气枕原型测试
- 2005 年 5 月 混凝土工程竣工
- 2005 年 5 月 ETFE 第二阶段视觉测试
- 2005 年 7 月 ETFE 第三阶段视觉测试
- 2005 年 9 月 12 日 钢结构子结构试验
- 2005 年 12 月 混凝土结构验收
- 2005 年 12 月 健康监测、室内声学科研立项
- 2006 年 1 月 15 日 ETFE 气枕 500m² 试安装
- 2006 年 4 月 4 日 国家游泳中心 ETFE 围护结构建筑效果及物理性能解决方案专家会
- 2006 年 4 月 10 日 钢结构封顶
- 2006 年 6 月 16 日 钢结构卸载完成
- 2006 年 7 月 国家游泳中心室内声学专家论证



- 2006 年 8 月 1 日 ETFE 正式安装
- 2006 年 8 月 5 日 北京市科委奥运场馆 LED 照明科研立项
- 2006 年 11 月 5 日 科技部国家游泳中心半导体照明规模化系统集成技术研究科研立项
- 2006 年 12 月 国家游泳中心钢结构验收通过
- 2006 年 12 月 26 日 外立面、外墙面封闭
- 2007 年 1 月 室内工程正式开始
- 2007 年 5 月 室外工程正式开始
- 2007 年 5 月 16 日 “国家游泳中心新型多面体空间刚架结构施工技术研究”通过专家鉴定
- 2007 年 7 月 内立面、顶棚 ETFE 气枕全部安装完毕
- 2007 年 12 月 室内装饰工程竣工，室外工程竣工
- 2008 年 1 月 国家游泳中心通过消防验收
- 2008 年 1 月 26 日 国家游泳中心竣工
- 2008 年 1 月 28 日 国家游泳中心竣工移交仪式

二、水立方破纪录情况统计

在“水立方”举行的奥运会游泳比赛，成了诞生世界纪录最多的场所。8 天的比赛，有 17 人 5 队 24 次刷新 21 项世界纪录。其中男子 9 人 3 队 13 次破 11 项、女子 8 人 2 队 11 次破 10 项游泳世界纪录。美国选手这次贡献了 10 项世界纪录，澳大利亚运动员 5 次破世界纪录，欧亚非运动员也先后 9 次改写了 8 项世界纪录。美国游泳“超人”菲尔普斯，成为破世界纪录最多者。他不仅力夺 8 金，而且在所参加的 8 项比赛中，7 次刷新世界纪录。

8 月 10 日(3)

★WR 游泳－男子 4×100 米自由泳接力 00:03:12.230 内森·阿德里安 马特·格雷弗斯 怀尔德曼·托布里 卡伦·琼斯 美国

WR 游泳－女子 400 米个人混合泳 00:04:29.450 斯蒂芬妮·赖斯 澳大利亚

WR 游泳－男子 400 米个人混合泳 00:04:03.840 菲尔普斯 美国

8 月 11 日(5)

★WR 游泳－男子 4×100 米自由泳接力 00:03:08.240 贾森·莱扎克 菲尔普斯 韦伯·盖尔 卡伦·琼斯 美国

WR 游泳－男子 100 米蛙泳 00:00:58.910 北岛康介 日本

WR 游泳－女子 100 米仰泳 00:00:58.770 柯丝蒂·考文垂 津巴布韦

▲WR 游泳－女子 200 米自由泳 00:01:55.450 费代丽卡·佩莱格里尼 意大利

◆WR 游泳－男子 100 米自由泳 00:00:47.240 埃蒙·沙利文 澳大利亚