

吴程辉 朱竞翔 WU Chenghui, ZHU Jingxiang

折叠结构

肯尼亚 MCEDO 学校的结构与建造

Folding Structure

The Structure Design and Construction of MCEDO School Project in Kenya

摘要 文章介绍了肯尼亚贫民窟 MCEDO 学校项目的核心技术——折叠结构的开发与设计, 陈述了它的设计、试验、制造、运输到建造的全流程。这个创新设计结合了结构与机械设计, 能够快捷地实现遥远地区的高品质建造, 并克服工期、预算及资源等方面的诸多限制。

关键词 折叠结构; 机械; 预制轻型结构; 肯尼亚 MCEDO 学校

ABSTRACT By introducing the development and design of folding structure which is the core technology of MCEDO School project located in the slums of Kenya, the article described the entire process

including design, test, manufacture, transportation and construction. The article also discussed that through the integration of structural and mechanical design, the limit of time, budget and resource can be resolved and high quality construction in remote site can be finally realized.

KEY WORDS Folding Structure; Manufacture; Pre-fabricated Light Gauge Structure; MCEDO School Project in Kenya

中图分类号: TU244.2; TU-86(424); TU318

文献标识码: A

文章编号: 1005-684X(2015)02-0048-006

DOI:10.13717/j.cnki.ta.2015.02.010

1 启发

这是一件制作于清末民初年间的灯笼: 将纸壁折叠, 上下木盖对扣, 提手放倒, 它就可以变成一个小巧的木匣供主人随身携带。使用时将提手拉起, 纸壁随之展开, 在内部产生一个供烛火燃烧的空间, 纸成为挡风屏障也漫射开光线。使用时的便利性是欣赏这个灯笼的重点, 其中涉及的容器的机械特性——也就是折叠结构则是这件灯具优化功能、便于携带、具有美感的设计核心。

2 构想

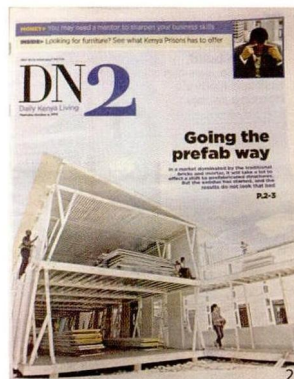
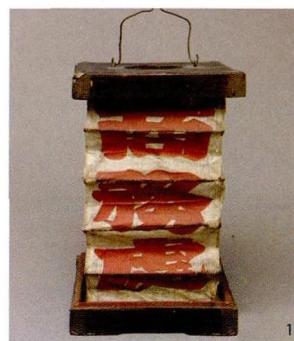
“折叠灯笼”的理念引发了香港中文大学团队近期的一个项目——肯尼亚贫民窟马萨雷儿童教育与发展组织学校 (MCEDO, Mathare Children's Education and Development Organization) 的设计构思。项目由肯尼亚中国经贸协会募资捐建并由中国驻肯尼亚大使馆协调。项目希望为当地提供总面积 500 余平方米的 10 间新教室以替换原有的简陋棚屋校舍。项目本身的预算标准来自于当地典型的土建工程基准, 没有

经费来支持土地审批、远程海运、清关以及国际旅行等额外开支。由于担负一定的外交使命, 项目从付款启动到最终交付仅有半年时间。肯尼亚当地的材料、工具、熟练技术工人等条件和中国相比差距较大, 而陌生的语言、文化环境, 使远程的建造工作充满了种种不确定性。在充分考量这些难题期间, 设计团队基于过去的工作经验, 构想了一种可折叠的轻型结构系统——它能够通过易于操作的机械变形来实现预制建筑的装箱、远程海运与现场组装, 同时也为建筑的室内环境提供了别具一格的空间品质。

3 折叠

这一系统是这样工作的: 两块标准大小的上下层楼板通过端部的四根“Y”形支柱连接, 每个支柱使用三个铰接点, 其中一个带插销。当插销被移除后, 这个基本结构单元可以拍平折叠。

折叠结构单元的想法起始于设计讨论, 并以小型卡纸模型进行了初步研究, 之后再使用电脑进行三维模型模拟, 预测构件尺寸与折叠时可能产生碰撞的位



置。“Y”形角柱中作为主要承力构件的长柱先设计为双柱，下端与下方楼板铰接，短柱下端以转轴连接于长柱中点，上端与上方楼板铰接，结构单元折叠后，短柱可嵌入双柱间隙减小单元总高度。

通过与机械加工厂技术人员开会讨论，在简化工艺与减少材料耗量的目标下，立柱被调整成钢方管单长柱与“U”形断面钢短柱的构件形态，也实现了折叠后相互严密咬合而不发生碰撞的效果。它是通过两个铰接点的精细设计实现的。

带着这些构思，团队来到机械加工厂进行结构单元的试制。为了确认构件与节点设计的有效性，团队在工厂试制了一个1:1的结构单元框架，构件以高强螺丝相连后，上侧楼板框架由电动葫芦提升至设计高度，长柱上端通过框架底部的限位装置定位，再以高强螺栓锁住，结构单元就实现了自我支撑。试制也使用0.5mm厚的镀锌压型钢板焊接在上下的楼板钢框内，提供支撑面，并浇筑了轻骨料混凝土，形成压型

钢板与薄混凝土联合工作的楼板，底面的压型钢板可被视作拉筋，但具备更好的平面刚性。薄混凝土提供了抗压层，这一轻质的楼面稳定感接近重型结构。

工厂内还进行了楼面荷载测试，通过简易水槽提供了大约400kg/m²的均布荷载，结构单元表现非常稳定，也符合预期设想。

4 叠合

加载试验的成功，意味着这一结构模块可以扩展为复杂的房屋系统。这一结构系统也允许结构单元沿两个方向扩展，而MCEDO学校由于场地限制、并需要与早期规划空间意图相衔接，仅采用双层多开间的方式向单侧方向扩展布局。设计者将结构单元进一步区分为一层单元和二层单元，并且将上下层单元的“Y”形柱镜像布置，以获得更直接的竖向结构传力路径，并利于营造上下层差异化的空间体验。为了解决屋面排水，屋顶板设计遵循相同的原则——通过一侧

短支柱折合与打开，实现运输时的躺平与建成后的起坡。

由于两层单元呈棋盘格式组合，部分一层架空地板和二层屋顶的位置将有空缺，还需要在首层结构单元间补充地板，在二层结构单元之间补充屋面。在单元扩展序列的端头，二层单元靠山墙一侧通过两组“Y”形柱与一块一层楼板相连，提供二层单元荷载向上传递的路径，构成了一个特殊组合单元。当所有单元两两相互连接后，就组成了整体性的楼屋面与支撑结构系统。由于平行布置的“Y”形柱仅提供一个方向的稳定性，与之垂直方向的结构稳定性将由连续墙板提供。

5 连接

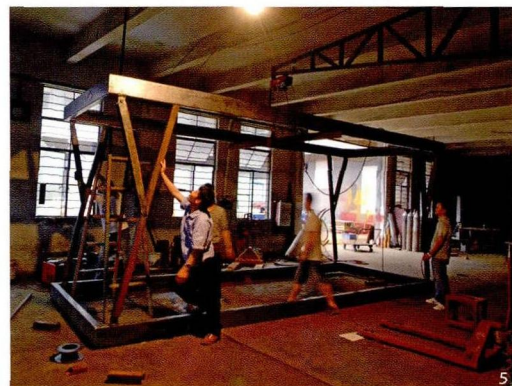
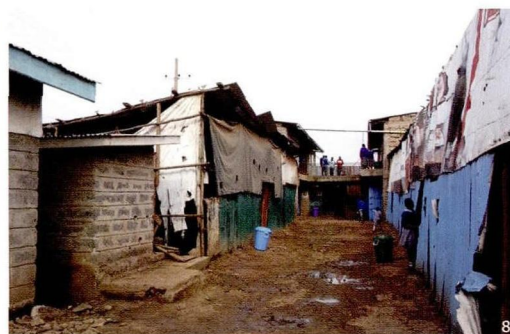
房屋结构整体性取决于连接件是否能够将分散的结构单元联为一体。其中单层板式构件需要通过高强螺栓固定在两侧相邻结构单元之间即可。



3

1. 清末民初年，裕通刘宝折叠灯笼
2. 肯尼亚新闻媒体的报道
3. 基本折叠结构单元建模
- 4~7. 结构单元框架试样照片
- 8.9. 改造前的MCEDO学校及周边环境肌理

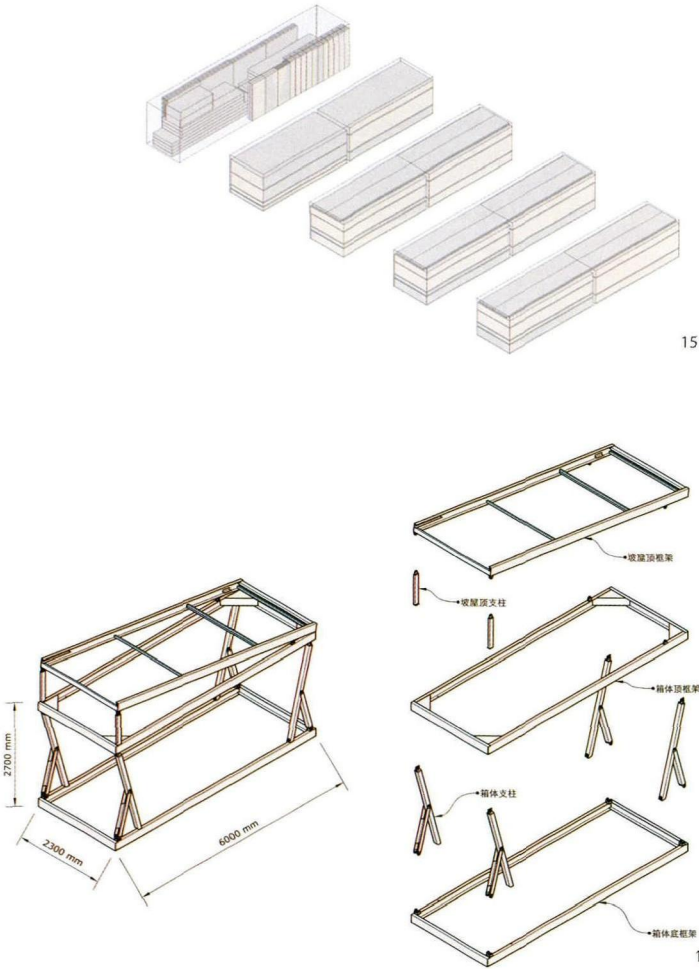
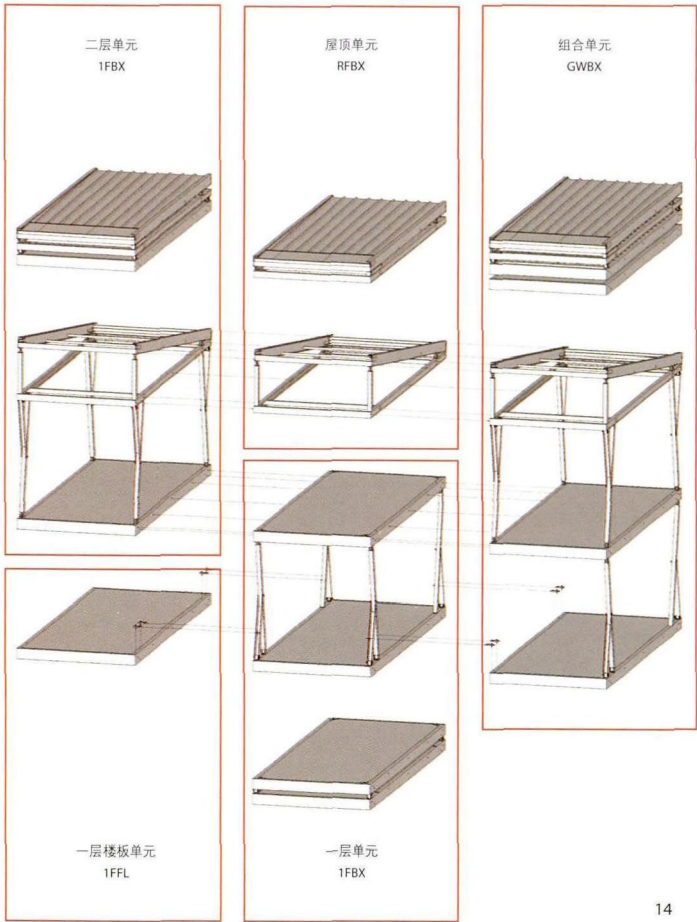
1. A folding lantern produced around the late Qing Dynasty and the early Republic of China
2. Coverage from Kenyan newspaper
3. Modeling of basic folding structure unit
- 4~7. Photos of structure unit mockup
- 8.9. MCEDO school and its surroundings before reconstruction





10. 集装箱装箱海运
11~13. 吊装推演模型图示及现场构件卸货
14. 五种结构单元变体模式图
15. 五个集装箱的构件装箱计划
16. 结构单元框架试样设计图
17~20. 现场吊装

10. Carrying vessel by shipping company
11~13. Hoisting rehearsal model and unloading of building components on site
14. Diagram of five variants of structure unit
15. Components packing plan with five shipping containers
16. Design of framework mockup of structure unit
17~20. The lifting and assembling work on site





主要立面的板材逐个插入上下楼板之间。安装时先在上下梁上用自攻螺丝安装卡槽，再将板材滑入卡槽之间。山墙面墙板则安装在结构外缘。为了安装方便快捷，墙、窗、门板材只有两种宽度（950mm 和 400mm）。易于学习与操作的安装流程作为设计原则，也延续在围护结构构件和其他构件的设计中，它们包括气窗、遮阳百叶、遮阳板、栏杆、内墙板、吊顶，每种构件安装时只需 1~2 人，当地工人熟悉流程后就可以独立地将一类构件安装完毕。

6 收纳

由于跨国运输依赖集装箱海运，集装箱尺寸参数与运输成本的调查分析会对结构单元尺寸有一定影响：结构单元的宽度由集装箱净宽 2.35m 减去允许范围内的误差而界定，长度则为 6m，于是 40ft（约 12.192m）集装箱长度方向可以放置两件。结构单元打包后多层叠放，塞满了集装箱的净高。

5 种结构单元依照项目所需数量生产完成后，各自具有不同的自重和折叠高度，需要按照集装箱净高和载重进行特定的组合打包，以提升运输和施工效率。此外构件上下叠放的次序由于关系到现场吊装时的取用顺序，也需要事先做精细的计划。针对这一系列问题的统筹，最终运输计划调用 5 个集装箱，实现所有的建筑构件以十分紧凑的方式收纳在集装箱内，每箱货物净重约为 17t~20t，使得集装箱的容量和载重都达到了最经济的状态。

7 拼装

所有集装箱由一艘法籍货轮承运，2014 年 6 月 30 日从深圳赤湾码头出发，期间在新加坡进行停留转运，在 7 月 29 日抵达了肯尼亚蒙巴萨港。

清关提货后，货物被转运至工地现场。接下来是建造过程最核心的部分结构吊装。结构安装必须依靠吊车进行，由于当地的吊车租用费用高昂，是国内租车费用的 3 倍，并且吊车驶入被建筑包围的狭小场地后，工作空间十分有限，而特定起重重量下都有一定工作半径，所以整个吊装过程需要预先精密计划。这项工作通过模型模拟的方式做了安排，并将流程记录下来，用于与吊装作业人员沟通。

整个吊装过程中，除了吊车司机与两名吊装工以外，所有的安装工人均是从贫民窟临时招募而来的，有不少人甚至连螺栓安装过程中最常用的飞轮套筒扳手都未曾见过。安装计划被设计分解为几个简单、重复的工作步骤。主体一共包含 42 次楼屋面板起吊定位和 27 次结构单元展开固定。当结构单元由吊车起吊至设计位置固定，吊钩将楼板或屋面拉起后，四名黑人工人各自负责一个角柱的螺栓固定。工人通过最初两三个结构单元的安装，熟悉了工具和操作流程，培养起协同工作的默契。结构单元的安装时间由最初的 2 小时缩短到半个小时以内。所有吊装工作最终在 5 个工作日内完成。

由于板材尺寸、重量设计也考虑了徒手工作的操作性，所有构件都可以由 1~2 名学生举起和转移。校长鼓励高年级的学生在下课后进入工地，帮助腾挪整理板材和清理施工现场。

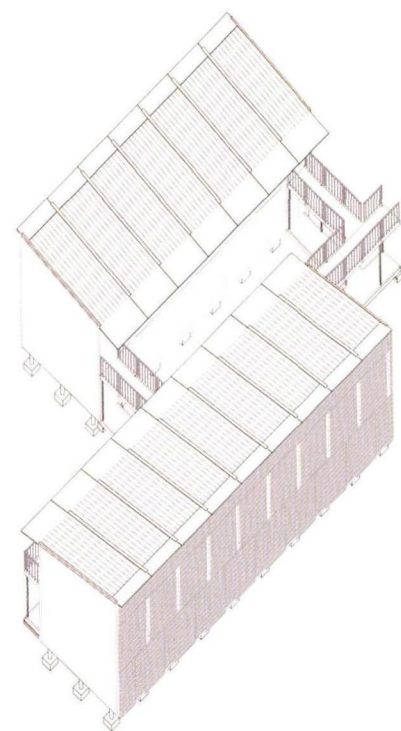
8 表达

建筑落成后，吸引了许多附近的居民甚至区议员前来参观的“Y”形立柱被维护掩盖了，更多人开始赞赏建筑外表呈现的整洁品质。一些受邀访问现场的国际机构，包括在内罗毕有过长期工作经验来自加拿大的国际学校、来自美国的非政府组织以及来自荷兰

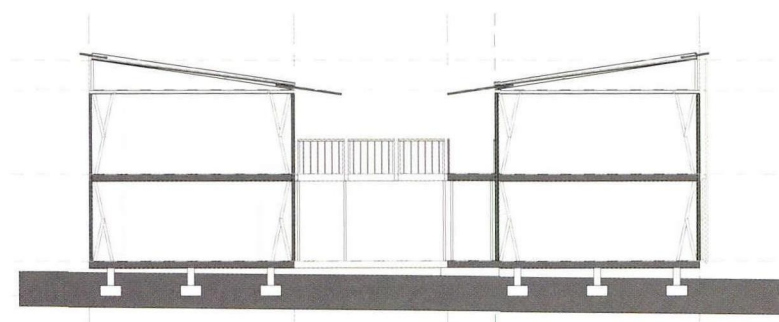


- 1 教室
- 2 庭院
- 3 走廊
- 4 原有建筑物
- 5 其他建筑物

26



28



27

21~25.29. 吊装完成的结构骨架与建成后的室内、室外
26. 首层平面图
27. 剖面图
28. 由折叠结构建造的两栋教学楼轴测图

21~25.29. Framework after lifted up , interior and exterior views
26. 1st floor plan
27. Section
28. Isometric view of two teaching buildings supported by folding structure



的规划设计机构，都对建造工作的高效与高品质给予肯定，学校突然间成了当地一个景点。当人们进入室内，会发现光线从通高的窗扇中进入空间，照亮了成排的“Y”形支柱。黑板墙两侧是两块半透明玻璃，使临近教室的结构隐约显现，强化了结构的序列表达。首层天花板是闪亮的压型钢板漫反射进入的光线，而二层的天花板则由细密的金属杆件过滤高窗的光线，顶棚的不同形态与上下层的翻转置放的支柱一起帮助实现了空间的差异。

9 结构与机械

MCEDO 学校项目的核心是折叠结构。它的开发与设计涉及结构与机械两方面的知识，当然还有对它们关系的认识。结构与机械表面上有很多的不同。前者静止，具有生命长久的特性，也往往是更大整体——例如聚落的一个部分；后者则以运动为特征，本身需要是一个整体，有时会因为磨损以及新式样的出现而被淘汰。工业革命之前，制造机械的艺术与建造房屋的艺术联系得较为密切，例如菲利波·伯鲁乃列斯基（Filippo Brunelleschi）或者里奥纳多·达·芬奇（Leonardo da Vinci）的跨领域工作。工业革命急速地推进了机械的发展，使它至今仍是工业领域的主角。在现代美学观念广为传播以及技术手段充分发展之后，结构与机械互相补充的可能性变得很大。在结构中体现对机械加工工艺的赞美、具有可变部位的结构、那些游走于城市不同部位的移动结构，都反映着崭新的可能。而 MCEDO 学校项目无疑属于利用机械特性快捷建造、拆卸的“结构类型”。

设计结构与机械的组织方式也有区别。机械的制造涉及各类极为专业的知识，在短暂的职业教育中很难全部精通，机械设计的特点也不需要设计师这样做，因为只要控制好组件的功能以及成本之间的联系，工

作就可以顺利开展了。因此，协作对于机械设计极为重要。虽然协作对建筑设计者也越来越重要，但建筑/结构设计师的领头人物仍需通晓从施工组织、成本控制到材料性能、结构形式等各方面的知识，在这个基础上他才有可能将它们融合进更大的一个整体或者做出创新。个人的作用可以非常突出，这也是为什么一些重要工程的成就能够归于个人。虽然机械设计与结构工作所处理的问题不同，但二者发现问题以及解决问题的逻辑却是相似的，都是在高度约束的条件下寻找自由。这为跨越专业界限进行工作提供了可能，而工期、预算及资源等方面的诸多限制无疑是专业嫁接的最好理由。

从社会心理的角度看，结构象征着生活、传统、沉静和保护的需要，机械则代表了工作、变革、运动以及对挑战的热爱。前者能够帮助用户获得保护与尊严，而後者的介入使得建造活动变得安全高效，又充满诗意与期待。这两者的关联受启发于古代的器具，构想于香港的实验室，试验于深圳的加工厂，最终结合在内罗毕贫民学校结构的折叠与收放之中。

参考文献：

- [1] 朱竞翔. 约束与自由——来自现代运动结构先驱的启示 [D]. 东南大学：博士学位论文，1999.

作者单位：香港中文大学建筑学院

作者简介：吴程辉，男，香港中文大学建筑学院
研究助理

朱竞翔，男，香港中文大学建筑学院
副教授

收稿日期：2015-01-15

