

AT 建筑 技艺

Architecture Technique

主管：住房和城乡建设部

主办：亚太建设科技信息研究院 中国建筑设计研究院

07-2017

总第262期/定价：32元



轨道交通与城市综合开发

RAIL TRANSIT AND URBAN MIXED-USE DEVELOPMENT

771674663174

参数化砖墙的新型建造方法研究*

An Investigation into the Construction Method of Complex Parametric Brick Wall

撰文 罗丹 徐卫国 清华大学建筑学院

摘要 由于砖自身具有标准化和单元化的特性，没

近年来，虽然利用计算机软件可以迅速生成

丰富复杂的砖墙设计方案，但是复杂砖墙的

实际建造却由于砖块的空间位置定位难、旋

转角定位难等众多问题而一直面临着艰巨

的挑战。传统的建造方法大多都面临着诸如

成本高、普适性差、工期长、施工尺寸不合

适等多方面问题，因而这些方法难以被广泛

地推广。在现有的参数化砖墙建筑方法之外，

提出了4种全新的建造方法。通过对这些复

杂砖墙建造方法的探索和创新，以及对于各

类方法实用性、多角度度的评估，进而探索更

加简易、普适、快速、精确砌筑复杂参数化

砖墙的技术手段。

关键词 砖 砌筑 参数化设计 实际建造

1 研究背景

砖作为一种廉价并广泛使用的建筑材料，

由于其具有标准化、单元化的特性，使得它非常

适宜作为复杂形体的基本构成单元。设计师可以

利用相应的参数化设计软件来进行复杂曲面、

节点构造的设计，以及对砖墙砌筑的结构进行优

化，进而生成多种具有形态创新、结构创新、性

能创新的复杂砌筑形态。本文中所涉及到的复杂

砖墙或参数化砖墙主要指在外界环境的影响下，

通过参数化软件和方法所生成的非传统砌筑形式

的砖墙，其设计中单体砖块的排列具有位置关系

多样化、旋转角度非标准的特点。

在丰富、复杂的设计方案背后，复杂参数

化砖墙的实际建造一直面临着多重挑战。传统的

砌筑方式难以解决基于参数化设计生成的复杂砖

墙在建造过程中所面对的砖块的复杂空间定位、

非标准角度旋转以及误差控制和校准等各种问

题。在过去的十年中，参数化砖墙的建造手段一

直是世界上包括苏黎世联邦理工学院和哈佛大

学在内的多个建筑高校的研究焦点之一。与此

同时，这些院校也尝试发明出若干种针对参数

化砖墙特点的建造方法。但是目前主流的建造

方法，无论是机器臂建筑法还是模板卡位法，

均在造价、普适性、技能要求等方面具有一定

程度的缺陷。

笔者在总结现有建造手段的基础上，通

过实验模拟、实际搭建、对比分析等方法对复

杂参数化砖墙的建造方式进行了进一步研究和

创新，并提出了4种全新的建造方式。在此过程

中，笔者不仅尝试探索更为简易、普适、快速、

精确地建造复杂参数化砖墙的技术手段，同时也

希望能够为其他单元化的参数化非标准形体的施

工建造提供有效的解决思路。

</

参数化砖墙的新型建造方法研究*

An Investigation into the Construction Method of Complex Parametric Brick Wall

撰文 罗丹 徐卫国 清华大学建筑学院

摘要 由于砖自身具有标准化和单元化的特性,设计非常适宜作为参数化设计的基本单元。

近年来,虽然利用计算机软件可以迅速生成丰富复杂的砖墙设计方案,但是复杂砖墙的实际建造却由于砖块的空间位置定位难、旋转角度定位难等众多问题而一直面临着巨大的挑战。传统的建造方法大多都面临着诸如成本高、普适性差、工期长、施工尺寸不合

适等多方面问题,因而这些方法难以被广泛地推广。在现有的参数化砖墙建筑方法之外,提出了4种全新的建造方法。通过对这些复杂砖墙建造方法的探索和创新,以及对于各类方法实用性、多角度评估,进而探索更加简易、快速、普适、精确的复杂参数化砖墙的技术手段。

关键词 砖 砌筑 参数化设计 实际建造

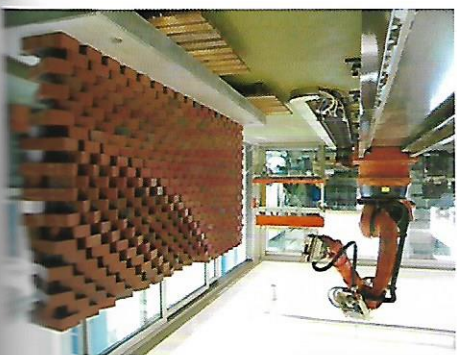
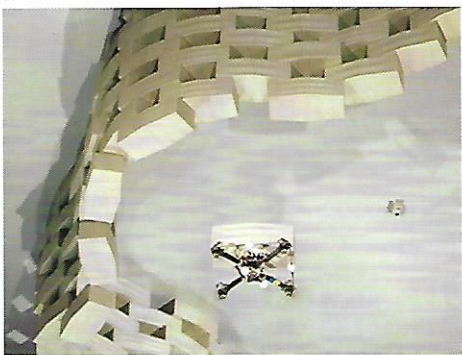
1 研究背景

砖作为一种廉价并广泛使用的建筑材料,由于其具有标准化、单元化的特性,使得它非常适宜作为复杂形体的基本构成单元。设计师可以利用相应的参数化设计软件来进行复杂曲面、

节点构造的设计,以及对砖墙砌筑的结构进行优化,进而生成多种具有形态创新、结构创新性、能创新的复杂砌筑形态。本文中所涉及到的复杂砖墙或参数化砖墙主要指在外界环境的影响下,通过参数化软件手段所生成的非传统砌筑形式的砖墙,其设计中单体砖块的排列具有位置关系多样化、旋转角度非标准的特点。

在丰富、复杂的设计方案背后,复杂参数化砖墙的实际建造一直面临着多重挑战。传统的砌筑方式难以解决基于参数化设计生成的复杂砖墙在建造过程中所面对的砖块的复杂空间定位、非标准角度旋转以及误差控制和校准等各种问题。在过去的十年中,参数化砖墙的建造手段一直是世界上包括苏黎世联邦理工学院和哈佛大学在内的多个建筑高校的研究焦点之一。与此同时,这些院校也尝试发明出若干种针对参数化砖墙特点的建造方法。但是目前主流的建造方法,无论是机器臂建筑法还是模板卡位法,均在造价、普适性、技能要求等方面具有一定程度的缺陷。

笔者在总结现有建造手段的基础上,通过实验模拟、实际搭建、对比分析等方法对复杂参数化砖墙的建造方式进行了进一步研究和创新,并提出了4种全新的建造方式。在此过程中,笔者不仅尝试探索更为简易、普适、快速、精确地建造复杂参数化砖墙的技术手段,同时也希望能够为其他单元化的参数化非标准形体的施工建造提供有效的解决思路。



2 4种创新型参数化砖墙的建造方法

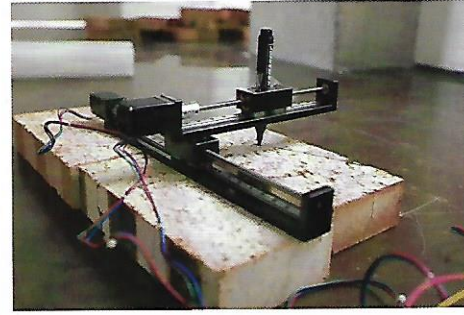
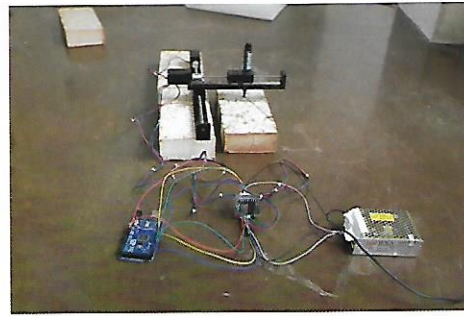
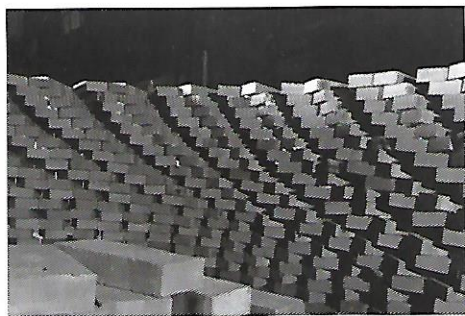
为了寻找新的更具普适性的参数化建造方法,笔者探索了以下几种全新的建造方法。

2.1 手机实时定位法

手机实时定位法是一种利用手机陀螺仪和用户可视化交互界面来进行快速角度定位的方法。在清华大学建筑学院参数化研习班中,笔者同美国哥伦比亚大学建筑教授丹·德阳(Dan Teayoung)和奥斯汀·史密斯(Austin Smith)共同指导的设计工作坊中,小组第一次实践并深化了由丹·史密斯研发的手机实时定位法。

陀螺仪是一种智能手机标配的高精度轴角运动检测装置,它可以通过角度传感器的实时监控手机的旋转角度,从而以此为基础对砖块的精确角度定位。首先,需要将各个砖块的角度提交至专门开发的可视化交互网页,后用户在这一网页便可实时读取用户手机的角度信息,并将现在的手机的实际角度和用户的目标角度在可视化界面中进行直观的对比。此,用户便可轻易地依次将砖块连回手机对应的预设角度。这种定位方式直观且快速,名学生3h左右便可迅速完成1200块砖的更替放置。

笔者通过在研习班中的实践,总结出手机实时定位法具有以下优点。
(1) 设备投入费用低,仅需要目前普及的智能手机,几乎不产生额外的设备费用。
(2) 对人员技能的门槛要求较低,不需要对建筑师进行简单的培训,而不需要人员提出任何额外的要求。使用方法简单,适合受教育程度较低的建筑工人使用。如,在该研习班上,9位没有任何参数化设计



人机建造
机械建造
实时定位法
投影标记法
数控标记法

景的同学在2h的培训之后便可做到熟练使用asshopper，并将角度信息结构化后上传至网站。

(3) 施工精度相对较高。通过使用手机高度的三轴陀螺仪进行角度定位，其在旋转角度的搭建精度远远高于卡位法，并且可以实现角度的流畅变化。该方法不仅能实现不依赖于参考物的任意角度的全局定位，还可以确定定位角度的过程中不产生误差累积。同时，于设计方案过程而言，建筑师不再需要将角数量优化至有限个特定的角度以企图实现建的可能性。

(4) 项目的可控性增强。这一建造方法依赖于传统砖墙的砌筑方法，可以充分利用传统工艺，使用常见的砖块和砂浆粘合，并且工期也接近于传统标准的直墙砌筑近似。

2 投影标记法

投影标记法指的是利用在所有砖墙体系中、下层砖块之间的叠加和对应关系，在下层砖上利用投影仪来标记上层砖块的位置，从而将砖块一层层依次定位砌筑。投影标记法是笔者为了实现2016年北京设计周装置“螺·砖”一复杂参数化曲面砖墙的搭建而进行研发产生。装置“螺·砖”的灵感和造型来源于兼具数学与美学特点的螺旋曲线和渐变纹理的海螺。为实现这一复杂参数化双曲面砖墙，搭建过程中不仅需要实现角度的定位，同时也需要实现空间位置的定位。由于工期和预算的原因，搭建

过程无法采用机器手臂和无人机，而现有的卡位法和手机实时定位法则无法满足角度和空间维度上的复杂定位，于是笔者研发了投影标记法并在一定程度上解决了以上问题。

在搭建的过程中，首先需要在场地附近较暗的空间中架设一部面向地面的投影仪，并通过调节高度使得投影仪可以将所准备的砖的图片1:1投影至平放在地面的砖块上表面。调节好投影仪位置后将其进行固定，并将砖的位置进行标记。然后，使用者可将预先存储的具有各个砖块及其上方对应的砖块关系图片依次投影在空白的红砖之上，并用马克笔在红砖上标记上面一块砖的位置及编号，用以对于上层砖的位置做定位。

整个“螺·砖”项目在3天之内、由6位同学砌筑约2 100块砖完成。虽然在本项目中使用了结构胶作为粘合剂，但是这一砌筑方法也同样适用于传统的砂浆找平的砌筑工艺。通过这3天的实践，笔者认为投影标记法具有以下优点：

(1) 设备投入费用低。投影标记法的前期投入主要为投影仪一台，较为廉价和常见，因而设备不会成为这一手段的制约点。同时此砌筑方法可以与传统的砌筑工艺相融合，能够利用现有的工人、技术和材料，不需要单独定制砖块和研发粘合剂，可以减少建造成本。

(2) 方法适用范围广。此方法可以适用于几乎所有的复杂参数化砖墙的砌筑，其对于砖块的旋转角度和空间位置没有特殊的要求，而且搭

建结果较为准确。虽然利用该方法进行砖块砌筑依然会有一定的误差，但是并不会对最终效果产生大的影响。

(3) 对施工人员的要求较低。在此项目中，不同背景和教育程度的参与者均能在经过几分钟的培训之后顺利加入标记或砌筑的过程中。

2.3 数控标记法

数控标记法本质上是投影标记法的进一步延伸和发展。在利用投影法的实际砌筑中，笔者发现需要花费大量的人力和时间来在空白砖上进行标记，并且投影的晃动、缩放问题以及人工描绘的误差问题会严重影响到墙体完成的精度。为了能够更为高效和精确地砌筑，笔者对于投影标记法进行改进而发明了数控标记法。两者的主要区别在于，数控标记法使用了两个步进电机所带动的两个螺杆系统来自动对空白砖进行标记。

在小尺度的搭建实验中，与投影标记法相比，该建造系统在以下方面进行了改进。

(1) 缩短工期效果显著。该系统相较于投影标记法在标记阶段的时间可缩短50%左右。

(2) 建造精度明显增加。投影标记法的误差主要来源于投影和人工标记产生的误差以及砌筑时产生的对位不准的误差。其中，投影和人工标记时产生的误差占绝大部分，而数控标记法相对更为精确、快速，可以有效避免人为的失误，能够显著减少误差，大大提高搭建的精度。

人素质没有过高的要求。

大大降低了该方法的使用门槛,直观简易,对工这两个数据均可在参数化建模时提取导出,这就转角度和位移变量即可,不需要额外的步骤,而

(1) 使用者只需要直接输入各个砖块的旋要有以下4点。

位。根据小尺度实验,实时参考定位法的优点主转至上层砖块的正确位置来进行上层砖块的定机进行特定的旋转,最终将上层的参考片移动旋发送至单片机芯片,进而通过单片机操作3个电用参考片组成,通过手机蓝牙将位置和旋转信息备,它由上、下两片与砖块表面尺寸一致的定位这一定位方法需要定制一个小型辅助设

时参考定位法。因此,笔者在此基础上进一步开发了实差累积。因此,笔者在此基础上进一步开发了实位,并且可以对其旋转角度全局定位,不存在误可以不需要提前标记砖块,迅速而直观地实时定累积误差。但是与之相对的,手机实时定位法却的砖块都是参考下层的砖块进行相对定位,容易出也具有一定的技术难度。同时,由于所有上层费时较多且容易产生错误,并且施工文件的导同,在砌砖的时候涉及到对砖块排序的问题,耗码做标记的过程。同时,由于各个砖块的标记不际的搭建问题,但是它仍然需要多一步将砖块编的方法在一定程度上可以较好地解决复杂墙体实备实时进行上层砖块的定位。虽然通过标记定位优点,利用手机和下层砖块的位置,通过辅助设实时参考定位法融合了以上3种建造方法的

2.4 实时参考定位法

解决问题的切入点。同时,笔者希望通过这一系列对于同一复杂形特点和需求,从中选取最为适合的建造手段。和其他很多非标准形体的建造一样,参数有效的参考。

比,为实际施工中建造方式的选择提供了切实对于7种常见砌筑方式的优、缺点进行分析和对题提供了多种解决方案。在表1中,笔者通过不同技术和角度,对常见的参数化复杂建构问4种建造方式。这些建造方法从工业机器人手的基础上,针对其缺点和限制,提出了全新的

3 结语

手段,无需定制特殊砖块或使用特殊的粘(4)该方法同样可以基于现有的砌筑法,不会产生误差累积。

(3)该方法采用旋转角度全局定位的方误差。

(2)该方法不需要预先标记和排序,大缩短了建造工期,使整体工期与普通砌筑的工期相近,并且还避免了由于标记和排序带来

建造方法	工具成本	适用砖	技术要求	精度	设计限制
1 模板卡位法搭建	百元内	普通砖	低	低,有累积误差	单曲面,角度位移仅可有一个变量,不连续变化
2 手机实时定位法	手机	普通砖	较低	中等,有累积误差	仅可定位角度,不可定位位置
3 投影标记法	投影机	普通砖	较低	中等,有累积误差	无
4 数控标记法	百元级	普通砖	中等	较高,有累积误差	无
5 实时参考定位法	百元级	普通砖	中等	较高,角度精度高,位置有累积误差	上层砖重心的投影需要落在下层砖的上表面内,不可桥接。
6 机器人手臂搭建	十万元级	定制砖	极高	高,无误差	高度受手臂尺寸限制,一层以内
7 无人机搭建	十万元级	定制砖	极高	高,无误差	10m×10m×10m空间范围内

表1 7种参数化砖墙建造方法的对比

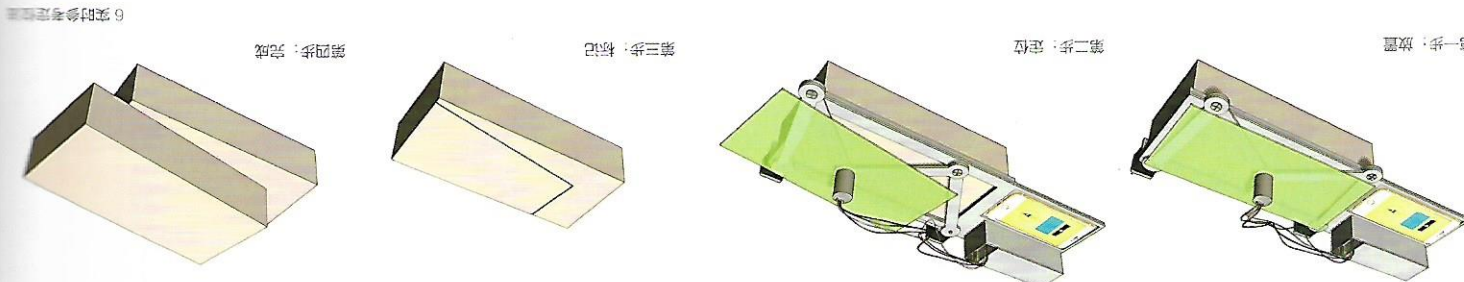


图6 实时参考定位法

*注: 此研究得到国家自然科学基金支持(编号: 51538006)。

参考文献

[1] Gramazio&Kohler,Raffaello D'Andrea, Flight assembled architecture [M]. Switzerland: Lars Muller Publishers, 2013.

[2] 孙冰颖. 砖的技术建构与空间研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2013.

[3] Fabio Gramazio, Matthias Kohler. Digital materiality in architecture[M]. Switzerland: Lars Muller, 2008.

[4] Lupashin S, Hehn M, Mueller M.W, Schoellig A.P, Sherback M, Andrea R. A platform for aerial robotics research and demonstration: the flying machine arena[J]. Mechatronics, 2014, 24 (1): 41- 54.

[5] 袁辉, 张立名. 砖的数字化建构 [J]. 世界建筑, 2014 (7): 26- 29.