

布鲁乃列斯基的佛罗伦萨

Filippo Brunelleschi's Florence

撰文 谢悦 中国建筑设计研究院



佛罗伦萨全景

走过罗马就像穿越了时光隧道，罗马帝国走向文艺复兴，从埃马努埃莱二世的意大利王国走向墨索里尼的意大利帝国；而北上来到佛罗伦萨则是一个猛子扎进了文艺复兴的星宿海。在这里你可以找到但丁、薄伽丘、乔托、达芬奇、米开朗基罗、多纳泰罗、马基雅维利……但是走在佛罗伦萨的街巷里随时抬起头都可以看到的只有一颗闪耀的巨星——布鲁乃列斯基，他的圣母百花大教堂的穹顶犹如一把大伞在佛罗伦萨的市中心撑开，它的庞大和高耸令人仰止。

佛罗伦萨这个译名是根据城市的拉丁语名字“Florentia”得来，台湾人口中的“佛罗伦斯”则译自城市的英语名称“Florence”。我们还经常听到她的另一个富于诗意的名字——“翡冷翠”，这是出自徐志摩在诗集《翡冷翠的一夜》，这个名字不仅诗意，而且发音上更贴近现代意大利语名“Firenze”，同时也更符合



佛罗伦萨地图

城市所在的托斯卡纳地区的青葱苍翠的基调。

公元前三世纪，罗马人进驻如今佛罗伦萨所在地，以自己的方式修筑大道、城墙、街市和神庙等等，逐渐地，一个古代城市的轮廓慢慢浮现出来——佛罗伦提亚（Florentia），意为“百花之城”，并以百合花作为城市的徽记，这就是日后的佛罗伦萨。罗马时代的佛罗伦萨凭借便利的道路交通、阿尔诺河的水运以及本地的传统冶铁业、羊毛纺织业，加之天生精明的佛罗伦萨商人的经营，一举成为托斯卡纳地区诸多城邦之首，盛况长达八百年。但随着北方蛮族，如哥特人（Goths）、伦巴底人（Lombards）等的频繁侵扰，佛罗伦萨古城繁华不再，随着罗马帝国的沦亡而成为逐鹿的战场。

直到公元十世纪，意大利诸城邦先后兴起，商业贸易开始蓬勃发展，佛罗伦萨也迎来了复兴的曙光。威尼斯、热那亚、比萨等意北的城邦，凭借沿海的优越地理位置，通过地中海贸易、航运，甚至武力扩张，与中东、阿拉伯直至南洋等地区进行贸易，从而建立起强大的城邦共和国。佛罗伦萨并不临海，基本属于内陆城市，但她却独辟蹊径，选择制造业为立城之本，结合商业的联动，带动早期银行业的发展，创造出惊人的财富。由于经济对手工业的倚重，手工业者取得了合法的地位。行会组织的力量不容小觑，它代表了一个行业的利益和政治立场。整个佛罗伦萨正是依靠大大小小的行会，从而实现了井然有序的管理和监督。当时唯一能影响和控制它们的是一些实业和金融基础雄厚的大家族，最著名的无疑是银行业起家的美蒂奇家族。



科西莫·美蒂奇像



圣乔瓦尼洗礼堂

作为佛罗伦萨三百多年的实际统治者，美蒂奇家族最重大的成却在于艺术和建筑，由于他们对文艺复兴的重大促进作用，被称为“文艺复兴教父”。乔凡尼·美蒂奇——佛罗伦萨美蒂奇王朝的开创者，任命布鲁乃列斯基重建圣洛伦佐大教堂；他的儿子科西莫·美蒂奇——第一位佛罗伦萨僭主，也是第一位著名的艺术赞助人，委任布鲁乃列斯基继续建造圣母百花大教堂尚未完成的伟大穹顶。科西莫的孙子就是被佛罗伦萨人称为“奢华者洛伦佐”的洛伦佐·美蒂奇，他的宫廷里聚集着波提切利、达芬奇、委罗基奥、米开朗基罗等文艺复兴最伟大的艺术家。洛伦佐的时代是意大利文艺复兴的最高潮，随着他的去世，佛罗伦萨的黄金年代也逐渐终结。

布鲁乃列斯基（Filippo Brunelleschi 1377年—1446年），一位佛罗伦萨知名公证人三个儿子中的第二个，幼时受过文学和数学教育，热爱艺术，于1398年在丝绸艺术工会注册，成为一名金匠。

1400年夏天，最严重的黑死病夺走了佛罗伦萨1/5的人口，次年布料商人工会决定为圣乔瓦尼洗礼堂铸造一对新的青铜大门，以慰天怒。圣乔瓦尼洗礼堂是整个佛罗伦萨最受尊崇的建筑之一，洗礼堂中的洗礼池是每个天主教家庭的儿童受洗的地方，但丁、马基雅维利等名人及美蒂奇家族成员均在此受洗。这座洗礼堂是公元七世纪建成的，位于圣母百花大教堂的西侧，是一座白色八角形罗曼式风格的建筑。雕塑家皮萨罗（圣母百花大教堂的总建筑师之一）曾于1330—1336年间为洗礼堂铸造了一对由20幅嵌板组成的青铜大门，用以赞颂佛罗伦萨的守护神施洗者圣约翰的一生。此后的六十余年间，在没有人做过任何翻修或美化洗礼堂的工作了。



布鲁乃列斯基像

布料商工会出资进行工程的招标。包括乔凡尼·美蒂奇在内，佛罗伦萨的艺术家、雕塑家和各领域杰出市民代表共34人组成评审委员会，包括布鲁乃列斯基在内的7名金匠和雕塑家参加了竞争。这座青铜大门的主题是旧约故事，选拔规则很简单：以亚伯拉罕将独子以撒献祭的故事为题，用34公斤青铜在一年时间内完成一幅高约43厘米、宽约33厘米的嵌板。

1402年评审中，布鲁乃列斯基的作品很被看好，但结果出人意料，默默无闻的年轻金匠洛伦佐·吉博蒂在评选中胜出。他的胜利主要源自精湛的青铜铸造工艺——他的嵌板使用的材料最少，铸造的最薄，同时人物形象优美高雅；而布鲁乃列斯基的作品更富表现力，他所描绘的亚伯拉罕和天使，以充满张力甚至是狂暴的姿态并列在以撒扭曲的躯体前，对角线的构图也不同于吉博蒂的成熟的哥特式风格的构图。另一方面，吉博蒂与布鲁乃列斯基的工作方式完全不同，他不断的向许多评审团里的艺术家、雕塑家广泛的征求意见，诚恳地把已经雕刻的十分精细的成品丢到一边，而依照专家的意见重新制作模型，甚至对外行评委的意见也十分重视；而布鲁乃列斯基则几乎在与世隔绝的状况下工作，在此后的40余年中，缄口不言和特立独行成了他工作的两

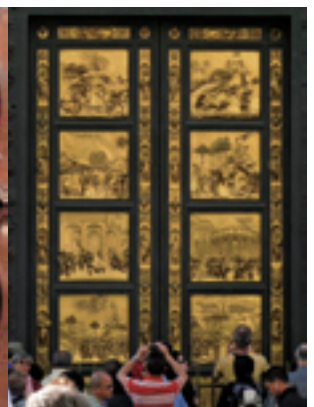
大特征。佛罗伦萨的评审团和市民们对他们两人的作品难以取舍，只好提出一个折衷方案——由吉博蒂和布鲁乃列斯基共同完成这项任务，然而布鲁乃列斯基并不同意，要求独自完成，他的要求被驳回之后，便退出了角逐。吉博蒂最终赢得这项具有历史意义的任务，此后的22年里他倾尽心血铸造了这对青铜大门，被米开朗基罗赞为“天国之门”，成为佛罗伦萨历史上最伟大的艺术品之一。而布鲁乃列斯基则基本放弃了雕塑工作，离开佛罗伦萨前往罗马，一面靠制作钟表和珠宝为生，一面致力于研究古罗马的废墟，他胸怀两大志向，一是恢复古代优秀的建筑形式，一是找到建造圣母百花大教堂穹顶的方法。

15世纪初的罗马城饱受战争、地震和黑死病的折磨，曾经人口百万的“永恒之城”已经沦落为仅仅两万人口、没有工业和贸易、破败萧条、危机四伏且乏味至极的弹丸之地。昔日的帝国广场蒿草丛生，被粪土瓦砾深埋了15米，成了畜生成群的“奶牛地”；斗兽场、庞培剧场和辉煌的神庙也成了采石场，青铜的文字和装饰早在战争中被铸成武器和大炮，或遭蛮族的劫掠；许多精美的雕像则被扔到窑中焚制成生石灰，或化为病恹恹的农作物的肥料……穿梭其间的各地游客多是朝圣者和寻宝者。

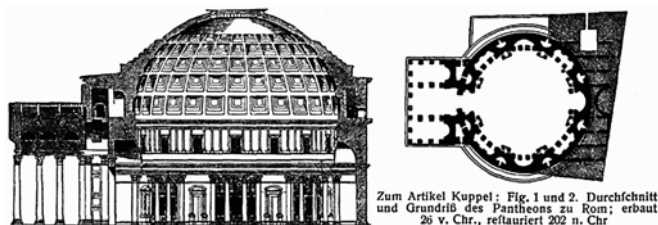
布鲁乃列斯基和他的挚友，雕塑家多纳泰罗也象其他寻宝者一样在废墟中挖掘，但他们不为古代勋章和金币。布鲁乃列斯基一边挖掘一边以密码记录——在专利和著作权诞生前，科学家们需要密码来对付不怀好意的手，我们如今熟知的达芬奇的密码绝不是独家专利。布鲁乃列斯基的记录则是他勘测的古罗马遗迹的高度和比例。他的勘测方法据猜测是利用一根直杆，以相似三角形的原理来测量建筑的高度，此外他可能还用到了镜



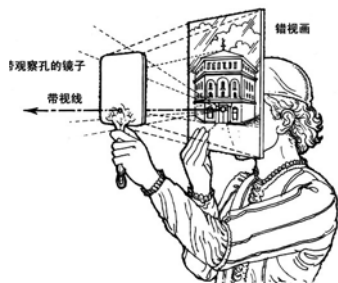
布鲁乃列斯基的以撒献祭



洗礼堂-天国之门



万神殿



透视实验



子来测量。测量者在被测物前不远处的地面上平放一面镜子，然后移动自己的位置，直到从镜子的中央看到被测物的顶端，分别量出镜子与被测物、镜子与测量者之间的距离，以及测量者的眼高，即可用相似三角形的原理算出被测物的高度。布鲁乃列斯基运用这样的方法测定了多立克、爱奥尼和科林斯等罗马人的古典柱式的精确比例。1414年，人文学者波焦·布拉乔利尼才发现了维特鲁威的《建筑十书》，该书到1486年才在罗马出版，因此布鲁乃列斯基的发现可谓是极具承前启后意义的。

经过罗马考察的积累，布鲁乃列斯基还重新发现了早先为希腊、罗马人所知而在欧洲中世纪被湮没的直线透视结构原理。他已经知道了在同一个平面上所画的平行线全都聚于一个单一灭点的概念，以及观测者与被观测物体之间的距离与物象的大小之间关系的原理，找到了用平面图和剖面图加以辅助线画出透视图的简单实用的方法。这种用二维图画准确地重呈三维空间或实物的手段，不仅使建筑设计成为可能，而且在更多领域拓展

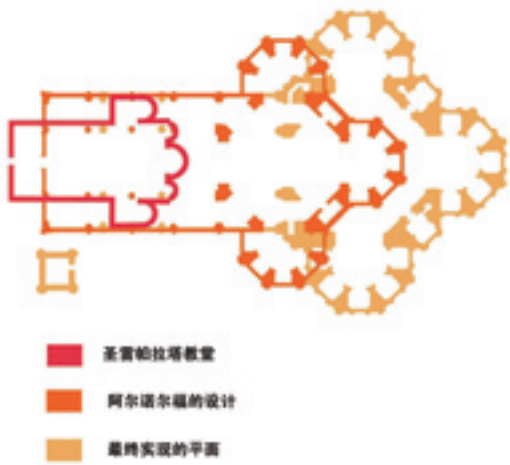
了人类的思维。

布鲁乃列斯基还曾经用亲自绘制的圣乔瓦尼洗礼堂的错视图融合实景，进行了一场近乎视觉魔术的实验，为多年以后的光学仪器（投影仪、全景画和西洋镜等）及反射艺术方面的实验开创了先河。

布鲁乃列斯基对罗马人建造穹顶的技术青睐有加。公元64年，罗马城大火，城中建筑大半化为灰烬。皇帝尼禄便下令拓宽道路、控制给水，并且限制易燃建材的使用。自此罗马人开始在建筑中使用一项新发明——火山灰混凝土。这种被罗马人称为“白榴火山混凝土”的新型建材，如同现代水泥一样，以化学的方式与水结合，即便在水下也能迅速凝结，远非以生石灰、沙子和水来调制，需等水分蒸发后方能凝结的传统灰泥可以比拟。自此，混凝土在拱门和穹顶中被更广泛和富于创意的使用起来。

布鲁乃列斯基最感兴趣的当属哈德良皇帝重修的万神殿，它硕大无朋的穹顶的顶点高度和直径均达到惊人的43.3米，在它建成后的1300年间一直是人类建造的最大的穹顶。所有建造穹顶的建筑师都无法回避的静力学问题，万神殿的建筑师同样也需要解决：庞大的穹顶自身的巨大重量及其所带来的巨大的侧推力和环箍效应。砖石及混凝土的承压能力对付穹顶的重量并不是什么难题，但穹顶对下方砖石的侧推力不容小觑，半球穹顶如果直接坐在地面上，则侧推力可以由大地承受，而万神殿的半球穹顶坐落在22.5米高处，侧推力要靠下方的墙体承受，所以穹顶的基部，即水平应力最大处混凝土墙体的厚度达到了6.2米。墙体的厚度随高度递减，墙顶厚度只有60厘米，同时穹顶中心开有“天眼”，另外穹顶上部的混凝土骨料采用更轻的浮石，甚至是中空的双耳陶瓶（罗马人用它来储存橄榄油或葡萄酒），这些措施都减轻了穹顶的总负荷；而穹顶内以花格镶板装饰，不仅美观，而且进一步减轻了负荷。布鲁乃列斯基从中看到了建成圣母百花教堂穹顶的希望。但万神殿的穹顶也不够完美，因为沿穹顶的内部仍有一连串闪电状裂纹，这些裂纹的产生正是由于砖石、混凝土的抗拉强度不足以克服巨大的环箍应力，导致拉裂。因此解决环箍应力的问题就成为建造稳固的穹顶不可或缺的前提。

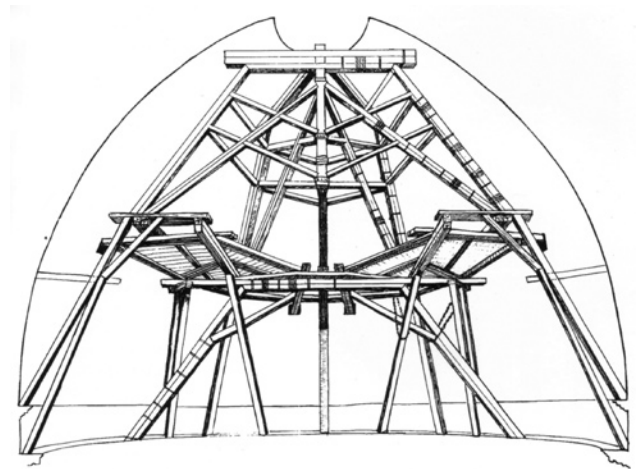
布鲁乃列斯基在罗马期间进行了大量的考察和研究工作，为日后的探索者开辟了先河。罗马的形象也不再因牵连异教而遭到唾弃，反而因建筑、雕塑和学术上的成就而备受尊崇。阿尔伯蒂、费拉雷特、弗朗西斯、乔



大教堂演变的平面



布氏关于五分之一穹顶的草图



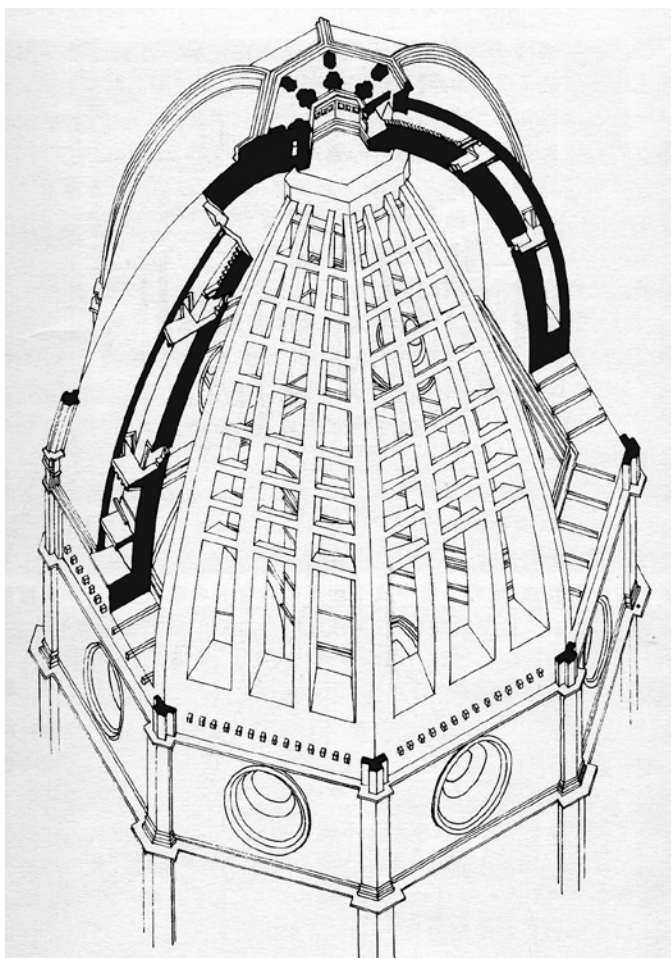
拱鹰架

吉奥和米开朗基罗等伟大的建筑师都曾追随布鲁乃列斯基的足迹长途跋涉到罗马，从壮观的古罗马废墟中汲取营养。

布鲁乃列斯基于1417年回到佛罗伦萨定居。佛罗伦萨最辉煌的建筑计划、意在取代古老颓败的圣雷帕拉塔教堂而建的圣母百花大教堂的工程仍举步维艰。实际上大教堂于1296年就已经奠基，但不幸的是，总设计师兼总工程师迪坎比奥在工程破土后不久就去世了。他后继的建设者们雄心勃勃地踏上了征途，为了大教堂的建设，他们夷平了包括圣雷帕拉塔在内的两座古老教堂，迁出周围的居民，为圣母百花大教堂前开辟一块场地，那些埋葬在老教堂附近的陈尸也得为工程让路。1339年，工程处甚至降低了教堂南侧的路面高度，目的仅是为了途经的路人能对日后建成的大教堂的雄浑挺拔有更鲜明的印象。更大的不幸发生在1347年秋，热那亚的船队海外归航，带来了黑死病，随后的一年里，佛罗伦萨4/5的人口接连丧生，劳动力急剧短缺。到了1355年整个大教堂也只有正面和中殿的墙垣成形。教堂内部历经风雨，破败如同废墟。经过十年时间，佛罗伦萨逐渐恢复元气。到1366年大教堂的中殿终于封顶。但迪坎比奥的穹顶模型却告失踪。当时的总设计师乔瓦尼制作了新的穹顶模型，这是一个非常传统的哥特式的设计，轻薄的墙壁、高大的窗户，外缘附有扶壁以支撑圆顶的重量。这个设计不得人心，因为扶壁结构在意大利建筑师眼里是丑陋的建筑风格，文艺复兴的作家们常常津津乐道于那些粗陋的德国哥特人早期如何在欧洲各处兴建拙陋而不合比例的建筑物；另外佛罗伦萨人尤其厌恶扶壁结构，是因为这是他们的老对手米兰人、法国人和德国人常用的风格。佛罗伦萨杰出的石匠费奥拉万提设计制

作了一个不靠扶壁支撑的穹顶的模型。这件高约5米、长约9米的模型如同神龛般供奉在初露雏形的大教堂内，大教堂的建筑师和执事们每年都要按着圣经起誓，以表明自己将按照模型来建造教堂的决心。而苦心孤诣的木匠和石匠们，进出教堂经过模型时，也无不苦思一个理想的建造办法。

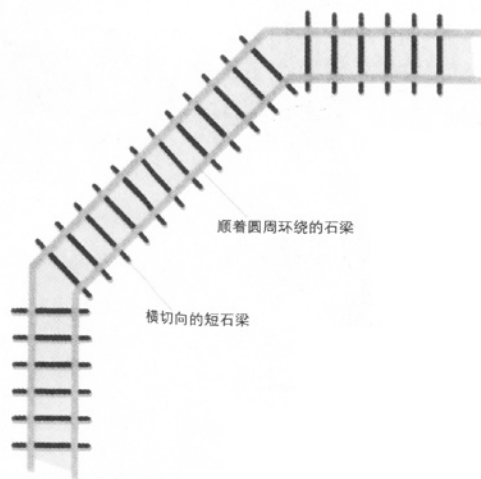
1417年，圣母百花大教堂艺术保管室与羊毛工会议事会联合召开一次全国性的建筑师和工程师会议，讨论在教堂中殿上方升起穹顶的方法。几乎所有与会者的办法都需要建造支撑穹顶重量的全尺度“拱鹰架”，因为这是在建造拱门时的惯常做法：建好两侧柱墩，搭起木架支起拱形模板，在上面从两侧向上砌筑砖石，最后在顶端塞进拱心石。然而教堂的穹顶不仅跨度巨大，而且建在60米以上，建造全尺度“拱鹰架”几乎是不可能完成的任务。甚至有人提出荒谬的馊主意：在穹顶下堆沙，里面掺上铜钱，建成穹顶后，想得钱的人会蜂拥而至，挖空下部的沙子。唯独布鲁乃列斯基一个人提出完全不需要那样庞大的“拱鹰架”或者沙堆就可以把穹顶



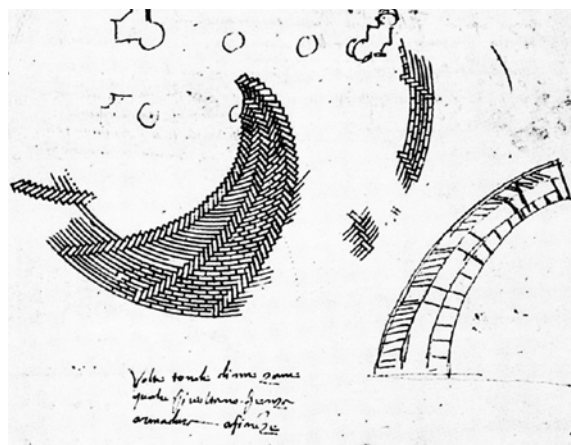
穹顶及鼓座轴侧结构图

升上去。固执的执事羞辱他是疯子，他详细地解释了自己的方法，却仍不能说服理事会把任务交给他。瓦萨里的传记里记载了那个关于鸡蛋的著名传说：布鲁乃列斯基提出谁能在光滑的大理石平板上把鸡蛋立起来，就让谁建造穹顶。所有人都做不到，轮到布鲁乃列斯基，他从容地把鸡蛋的一头在石板上一磕，鸡蛋就直立在了石板上。1418年理事会终于决定把这项任务交给布鲁乃列斯基来完成。此后的十八年布鲁乃列斯基为修建这个前无古人的巨大穹顶而殚精竭虑。

对万神殿的考察使布鲁乃列斯基意识到在没有中心支撑结构的情况下建造一个巨大的穹顶是完全可能的。在对废墟的考察中，他也证实了万神殿的穹顶的建造，一定是通过在水平面上浇筑混凝土环，形成多个同心的混凝土层，下层凝固后再浇筑上层，由此也可以解释穹顶的顶端产生的巨大洞口。但是布鲁乃列斯基不可能复制万神殿的穹顶，因为万神殿的穹顶把巨大的侧推力分解在下方6米多厚的墙体里，而圣母百花的穹顶下方没有可能建造这样厚重的墙体，同时羊毛工会又明令禁止使



第一道砂岩链结构示意图



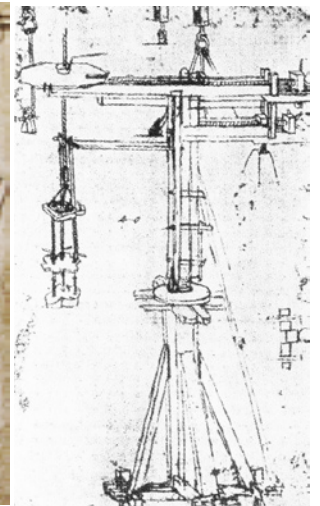
布氏关于鱼骨构造的草图

用扶壁。象万神殿那样用大量混凝土浇筑而成的穹顶明显太过沉重，即便最轻型的混凝土形式的穹顶也不大可能树立在圣母百花大教堂的下部结构之上。

布鲁乃列斯基于是首先加大穹顶的矢高，即改半圆拱顶为尖拱顶，大大减小了穹顶的侧推力。半圆拱顶的曲度半径只有跨度的一半，而布鲁乃列斯基设计的1/5尖拱顶曲度半径达到跨度的4/5，拱脚侧推力与拱的矢高成反比，1/5尖拱的矢高大约是半圆拱矢高的1.5倍，因此1/5尖拱的水平推力只相当半圆拱的2/3。布鲁乃列斯基的哥特式建筑的肋拱方面的经验，也使他能运用与万神殿不同的方式来建造圣母百花的穹顶。他首先在八边形鼓座每个角上建造一根主肋，在每条边上另设两根次肋，一共24根肋汇聚在拱顶洞口处，形成能够自我支撑并且可以铺展穹顶表面材料的骨架；同时水平方向上，从起拱处到顶部洞口，10道层层递减的“链”，承受了绝大部分的水平力，其中两道是由巨大的栎木连接而成，增加了结构的柔性。布鲁乃列斯基也注意到“这种尖拱的曲线总是产生向上的挤压力，当顶部载荷了一个采光亭的



塔奎拉绘制的由一匹马驱动的牛力吊车 牛力吊车上部第二组滑轮示意图



达芬奇所绘城堡吊车

重量时，上下两方面的力相互结合，以使结构更加坚固持久。”另外，不同于万神殿内部以优雅的深凹的方格来减少穹顶的重量；布鲁乃列斯基将穹顶设计成内外两层，以此减少穹顶的重量。这种内外两层壳体结构的做法，对以后的穹顶建造产生深远的影响：到米开朗基罗建造圣彼得大教堂的穹顶时，不仅是双层壳体，而且内外两层壳体的曲度都不一致了，内层穹顶为半球型，外层的矢高加大，使穹顶的外观更宏伟。

虽然布鲁乃列斯基做了精妙的设计，但在漫长的施工过程中还有数不清的实际问题需要他来解决。

传统的拱门或穹顶都需要建造全尺度的脚手架——“拱鹰架”，怎样把它升高到需要支撑的位置，又怎样拆除呢？中世纪匠人通常的做法是将中心鹰架的支柱放在装满沙子的大酒桶中升起，拆除的时候，拔出酒桶的塞子，让沙子慢慢流出，从而逐渐降低鹰架的高度。然而要把鹰架升高到60米，需要的木材量太过惊人，木材的运输、加工所需的时间、资金和劳动力，都不是理事会所能负担。所以布鲁乃列斯基必须用其他办法代替全尺度整体施工脚手架。

在穹顶起拱前后1/5高度内，砖石的倾角不大于 30° ，灰泥未干前，可以靠摩擦力固定，所以只需直接砌筑即可。而上面的4/5则必须采取固定措施，布鲁乃列斯基采取了“攀爬式的鹰架”，即将支撑砖石和作为工作平台的木架分段搭建，支撑在建成的部分上。穹顶实际上是以一系列由大到小的八边形的环叠合而成，而每个环在灰泥凝结后本身就是一个有效抵抗向外张力的

稳定结构体，因此鹰架就可以随穹顶的升高而安全稳固地向上攀升。

为了把大量沉重的砂岩、大理石和砖块等建筑材料运送到数十米高空，并依照设计精确地安装在制定的位置，是建造圣母百花大教堂穹顶急需解决的重大难题之一。1418年工程处就对起重机械进行了招标，但始终没有满意的设计，于是工程处决定使用传统的人力驱动的踏轮（原理类似中国的脚踏水车，但规模更大、传动装置更复杂）。布鲁乃列斯基迅速回应了这个草率的不求上进的决定，他立刻亲自动手设计了一台牛力吊车，这是一台尺寸、动力和设计复杂程度上都极为惊人的起重设备。那些直径达到1.5米以上的，巨大榆木制成的鼓轮、齿轮自不在话下，就是那些超长坚韧的缆索就足以令人咋舌。其中一条有史以来最长最重的主缆长达183米，重逾450公斤，是从当时绳索制造技艺最精纯的造船重镇，也是佛罗伦萨的老对手——比萨定制的。这座吊车由一副5米高的木制机架构成，上面附接着数支成 90° 角的轴杆，通过几个大小不一的齿轮彼此绕转。牛在套上舵柄后，就可以通过拉动舵柄转动垂直轴，进而带动整座机器。垂直轴杆上装有一上一下两个齿轮，通过它们分别与一个中轴水平的大齿轮咬合，一根带有螺纹的大型螺杆可以使齿轮换挡。主轴逆时针转动时，水平轴心齿轮与上齿轮咬合转动，可以提升重物；与下齿轮咬合转动时，可以放下吊篮，这种可逆齿轮的设计，避免了升降转换时需要卸掉牛轭，调转牛头的麻烦，大大提高了效率，而且也更符合牲口的脾性。穹顶施工的



圣母百花大教堂-穹顶

十余年中，这座牛力吊车每天起降五十余次，把总重近32 000吨的砖石、灰泥等建筑材料提升到空中。布鲁乃列斯基的机械设计方面的才能，大概来自他早年做金匠时制作那些结构复杂的机械钟表的经历。

1422年，布鲁乃列斯基又设计建造了另一座名为“城堡”的吊车，从达芬奇绘制的城堡图解中，可以看出它与现在吊车十分类似。一名操作员站在“城堡”顶端的小平台上通过操作水平螺杆，使重物在水平吊臂的下方移动；另一名操作员则通过调整吊臂另一端的平衡锤，来保持“城堡”的平衡。另外城堡的吊臂下方还有一根水平旋臂，用来防止载重物的绳索剧烈晃动。最后当石块到达安放位置的正上方时，工人通过调整松紧螺旋扣，就可以把它慢慢降下来。

灵活的“城堡”与力大无比的牛力吊车是一对绝配，它们完好无损的一直使用到布鲁乃列斯基死后很长的一段时间，并且参与了穹顶工程最后的建造计划——在采光亭顶部安装一颗直径2.4米的青铜球。雕塑家韦罗基奥得到了这项工程的委任，并用“城堡”来完成了他的建造计划。当时韦罗基奥的工坊中有个名叫达芬奇的学徒，为这座机器绘制了素描图解，手稿流传至今，我

们得以看到布鲁乃列斯基的伟大创造。

有了这些重型机械，布鲁乃列斯基才得以实现穹顶中的10道庞大的砂岩链和木链。位于鼓座基部的第一道砂岩链，是最大的一道，也是唯一能从外部捕捉到其结构的蛛丝马迹的一道链。这道链的设计相当复杂：首先由水平环绕八角形鼓座的石梁构成内外两道同心的环，在其上垂直方向间隔约1米铺设横向短石梁支撑。想使这些石梁充分发挥作用，需使它们彼此紧密连接，这就依靠楔形铁夹来实现，为了防止铁夹生锈导致石材爆破，铁夹的表面还涂了一层铅。上层的石梁更为复杂，它们还需要以一定的角度向内倾斜。

除了砂岩链外，布鲁乃列斯基还设计了两道木链，第一道木链设计在前四道石链之上。木链由经过特殊干燥的6米长、30厘米宽的圆木制作，以特制的橡木夹板夹住，在接合部以铁螺栓固定，再用铁皮条缠绕其外，以免圆木被螺栓撑裂。由于木材的抗拉强度极佳，木链作为整个穹顶框架体系的重要组成部分，不仅可以有效地控制环箍应力，作为柔性材料，在抗震时也起到重要作用。

圣母百花大教堂的穹顶坐落在一个八边形的鼓座



圣母百花大教堂-采光亭



大教堂耳室顶部



圣母百花大教堂-穹顶



圣母百花大教堂

上，施工时由八队石匠各自负责其中的一个面，那么要让24根大小肋拱和内外16面墙最终在顶部安全汇合，就必须要进行精确地测量和计算。那些肋拱的长度都超过了30米，哪怕其中一根少有偏离，都将导致穹顶无法结合。施工中布鲁乃列斯基是怎样控制它们各自的曲度呢？

建造哥特式大教堂的石匠采取的做法，是在平坦的地板上覆盖一层熟石膏，在上面画出与肋拱实际大小相同的几何设计图，并以此制作木模板；采石场的工人再根据模板，把肋拱所需的石材加工成型。1420年夏，布鲁乃列斯基派人夷平了阿诺河下游大片的土地，在沙地上勾画出巨大的设计图，8根主肋拱的模板据此以松木包裹铁皮制作出来。

控制肋拱的曲度并不是唯一的难题，砌筑穹顶的砖块并不是水平层叠的，它们与水平面的夹角随高度的增加逐渐加大，最后几层甚至以 60° 向内倾斜，因此布鲁乃列斯基必须设法引导和控制这种逐渐增加的斜度，同时还需控制砖石在水平同心圆中放射点的位置。15世纪末问世的《佛罗伦萨史》中猜测，布鲁乃列斯基精确定位了穹顶的中心点，并据此拉展一条“建筑绳”直达砖石的内缘，将穹顶水平环绕一周；随着砖石越砌越高，穹顶的半径由21米缩减至3米左右，绳索也随着升高和缩短，由此来精密地控制砖石的斜度和在圆周上的放射位置。但这种猜测看起来也并不可靠，比如怎样把“建筑绳”固定在圆心上并不断升高，最后达到92米的高度？从地面支起桅杆么？这恐怕无从实现。21米长的笨重绳索拉展开来，怎样避免因松弛而导致的测量误差？

这些都因为布鲁乃列斯基秘不示人的工作方式，而成为难解的谜团，令后人猜测不已。

建造穹顶的上部即14.4米以上部分时，为减轻重量，使用更轻的砖块代替砂岩。布鲁乃列斯基为这些砖块设计了各种特别的木模，有长方形砖、三角形砖、鸢尾砖、有凸缘的砖，以及配合八角形结构而造的特殊砖块，尺寸之复杂、设计所需的模板之多，以致于用来画设计图的羊皮纸都耗尽了。砌筑穹顶的砖块多达400万块，砖块的质量也都得到布鲁乃列斯基的亲自控制。砌筑用的灰泥也十分重要，中世纪使用的灰泥不像古罗马的“白榴火山混凝土”那样以化学的方式迅速凝固，它的凝结分两个阶段，先是水分挥发，灰泥失去塑性，再是吸收大气中的二氧化碳，把灰泥中的氢氧化钙转化为碳酸钙，过程十分缓慢，那些向内倾斜的砖块将很容易塌落。20世纪70年代的一项矿物学实验表明，圣母百花大教堂穹顶使用的灰泥中含有碳酸钠，不管布鲁乃列斯基是否是有目的地掺入这种矿物质，碳酸钠无疑对加速灰泥的凝固十分有效。另外，布鲁乃列斯基采取了一种被称作是“鱼骨形构造”的砌筑方法，抵消了导致砖块向内崩落的力量。这些夹在水平砖环中向上突起的砖块具有“夹钳”的功效。这些直立的砖块每隔1米左右便会隔断水平砖环，使之分成较短的小节。这样每个小节中的几块砖便可通过两块直立砖保持定位，建造时灰泥未干的小节会通过直立的砖块与下层灰泥已经凝固完成的数层砖环连接起来，保持自身的稳定。

1435年，布鲁乃列斯基终于铺下了最后一条砂岩链，作为穹顶顶端的收口圆环，接着穹顶的外表面被砌上赤红



帕奇小教堂穹顶外视图

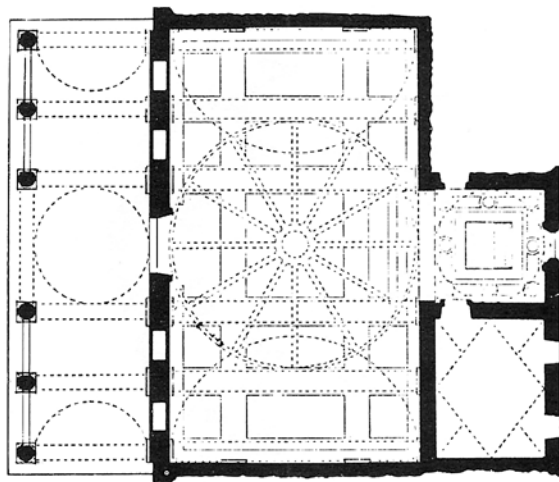
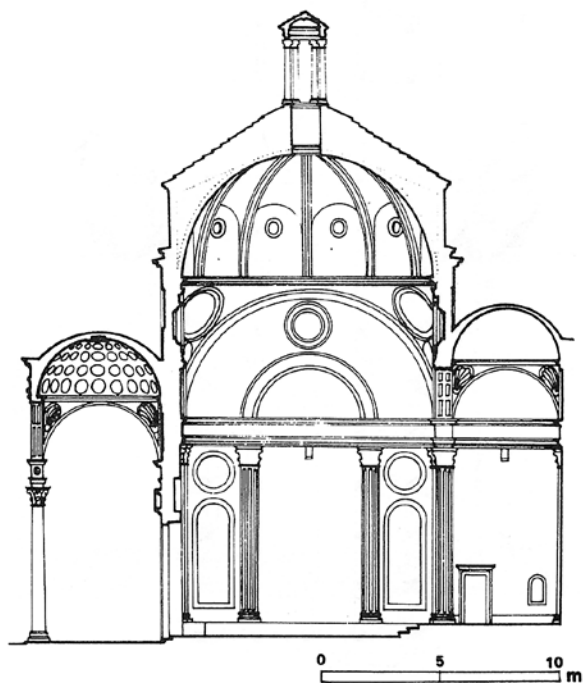


帕奇小教堂穹顶内视图

的陶瓦，这项工程至少需要两年时间，但佛罗伦萨人急不可耐地开始庆祝，1436年的3月25日天使报喜节时，在圣母百花大教堂新落成的辉煌壮丽的穹顶下举办了盛大的献祭仪式。教皇尤金尼亚四世、7位红衣主教、37位主教、包括科西莫·美蒂奇在内的佛罗伦萨政府官员，数万兴奋的佛罗伦萨市民，共同见证了布鲁乃列斯基的伟大创造，这一天无疑是他生命中最璀璨的时刻。

1436年夏，布鲁乃列斯基又得到建设穹顶上部的采光亭的任务。这时由于教堂已经投入使用，“城堡”和牛力吊车都已经拆除了，布鲁乃列斯基又在穹顶的顶部建造了一座由人力即可驱动、一次可以起吊2吨重的石块的新吊车。由于建造采光亭的白色大理石严重短缺，工程进展十分缓慢。其间1439年布鲁乃列斯基又开始建造教堂的耳室，到1445年即告竣工。次年3月，佛罗伦萨新任红衣主教才刚刚在献祭礼中为采光亭铺下第一块白色大理石。4月15日布鲁乃列斯基便溘然长逝了。采光亭直到1450年才告竣工。16世纪意大利著名画家、美术史家乔其奥·瓦萨里（曾为布鲁乃列斯基做传）在穹顶内壁绘制了辉煌壮丽的天顶画《末日的审判》。教堂的外立面到1587年仍未完成，为完成这一工程，举办了多次竞赛招标，约三个世纪后才于1871年选中建筑师埃米利奥·德法布里的方案，用的是卡拉拉的白色大理石、普拉托的绿色大理石和玛雷玛的粉红色大理石拼贴出绚烂的图案，1887年圣母百花大教堂终告竣工。

布鲁乃列斯基后半生的大部分精力都献给了大教堂的穹顶，但同时他仍进行了其他一些工程，在佛罗伦萨还可以见到其它许多的作品。



帕奇小教堂平剖面图



帕奇小教堂门廊小穹顶

音诺琴蒂医院，即我们的建筑史中所称的育婴堂（Ospedale degli Innocenti 1419–1445），这是1419年，布鲁乃列斯基从罗马回来后接到的第一个委任。育婴堂的正面门廊优雅纤细，显示出一种清新的古典风格：以科林斯柱头、壁柱及浮雕等古典细部精致处理的墙面，几何比例，模数结构等。光线充足的敞廊灰空间成为阿奴齐亚广场的延伸。位于圣母百花大教堂西北的圣洛伦佐大教堂也是布鲁乃列斯基的作品，是1419年他接受乔凡尼·美蒂奇的委托所做的设计，但由于工程进展缓慢，他生前只监督建造完成了旧圣器室（不包括装饰），在他死后大教堂的建设没有完全遵照他的设计。旧圣器室（Sagrestia Vecchia 1421–1440）（是为了区别16世纪米开朗基罗所做的另一个圣器室）由一个方形主空间构成，方形空间的上部是穹顶，从室内看穹顶是半球形，而其外观则是由鼓座和圆锥形屋顶组成。这样的形式在后来的帕奇小教堂（Pazzi Chapel 1441–1460）又一次完美地再现。帕奇小教堂位于圣十字大教堂的南侧，是美蒂奇家族的死敌帕奇家族的家庙。它的主空间与旧圣器室十分类似，一样纤巧细腻的



育婴堂敞廊装饰

穹顶，光线从鼓座的小圆窗内均匀地照射进来，白色的穹顶被照得如同透明了一般。但帕奇小教堂的平面更加对称，门口有个十分精美的门廊，门廊的正中是一个色彩艳丽、装饰精美的小穹顶，两侧是花格装饰的筒形拱券，与育婴堂简朴的门廊形成鲜明的对比。阿尔诺河南岸，皮蒂宫的西北的圣灵教堂（Santo Spirito di Firenze 1441–1481）也是布鲁乃列斯基的作品，这是他的除洛伦佐大教堂之外的另一座拉丁十字教堂，从它简单和谐的平面中可知“……他看出古代建筑的对称，以及他们的音乐性比例”，这为后来人提供了巴西利卡式教堂的标准模式。

布鲁乃列斯基死后，佛罗伦萨议会下令他可以享有被安葬在圣母百花大教堂内的殊荣。1446年5月15日，布鲁乃列斯基在大教堂内下葬。1972年，勘探大教堂的考古家在大教南侧廊的地下，找到布鲁乃列斯基简陋的墓穴。这位伟大的建筑师只有一块简单的大理石墓碑，上面一句简单的评语：“天才的佛罗伦萨发明家菲利普·布鲁乃列斯基长眠于此。”

参考文献

- [1] 罗斯·金 著,陈亮译.圆顶的故事(Brunelleschi's Dome:The story of the great Cathedral in Florence).上海:上海社会科学出版社, 2003.
- [2] 乔治·瓦萨里 著,刘明毅译.著名画家、雕塑家、建筑家传(Lives of Most Eminent Painters, Sculptors and Architects).北京:中国人民大学出版社, 2005.
- [3] 彼得·默里 著,王贵祥译.文艺复兴建筑.北京:中国建筑工业出版社, 1999.