

基于 BIM 技术的地下空间曲线钢管分段排布算法

龚 健¹,包腾飞¹,陈知渊²,虞 鸿²

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 浙江省水利水电勘测设计院,浙江 杭州 310000)

摘要:针对长距离输水工程中钢管分段效率低、精度差及模型数据检查困难等问题,引入可视化程度高、信息集成能力强的建筑信息模型(BIM)技术,以 BIM 设计平台 Autodesk 的 Revit 软件及其二次开发插件 Dynamo 作为开发平台和可视化编程工具,开发了一套基于 Revit 软件的钢管自动分段、自动排布模拟、自动集成设计施工信息的分段排布算法,实现了对复杂输水路线的良好拟合。该分段排布算法能快速调整地下复杂空间曲线的钢管分段排布方案,直观地检查钢管分段的合理性和准确性,快速查询钢管编号、里程、偏差以及坡口等参数信息,实现参数微调与图元变化联动以及 BIM 模型与设计数据的交互,已成功应用于杭州市第二水源工程、嘉兴市域外配水工程等工程。
关键词:BIM 技术;地下管道工程;钢管分段排布;信息集成

中图分类号:TV672⁺.2 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2022)05-0108-07

A BIM technology-based algorithm for steel pipe segmentation arrangement of underground space curves//GONG Jian¹, BAO Tengfei¹, CHEN Zhiyuan², YU Hong² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: Aiming at the problems of steel pipe segmentation in long-distance water transfer projects, such as low efficiency, poor accuracy, and difficulty in checking model data, building information modeling (BIM) technology was introduced due to the high degree of visualization and strong information integration capabilities. Based on Revit of the design platform Autodesk and its secondary development plug-in Dynamo as development platform and visual programming tool, a set of programs based on Revit for automatic segmentation, automatic layout simulation, and automatic integration of design and construction information of steel pipes were developed, which realized a good fitting of complex water transfer routes. The proposed segmentation arrangement algorithm can adjust steel pipe segmentation plans for complex underground space curves quickly, check the rationality and accuracy of the steel pipe segmentation intuitively and query parameter information such as pipe number, mileage, deviation and groove rapidly. The linkage of parameter fine-tuning and graphic element change can be realized, together with the interaction between BIM model and design data, which has been usefully applied in the Hangzhou Second Water Source Project and the Water Resources Allocation Project Outside Jiaxing.
Key words: BIM technology; underground pipeline engineering; segmented arrangement of steel pipes; information integration

随着我国城镇化进程的加快,城镇人口密度增大,供水压力也同步增大,但饮用水质量不达标、水污染严重等水安全事故频发。为保障人民用水安全,各地纷纷采用了备用水源地的方案以期形成“双源供水”,建设了大量长距离、大流量输水工程^[1]。为保证地面交通不间断并减小对周边环境的影响,城市管线施工越来越多地采用盾构机(TBM)开挖隧洞、洞内布置输水管道的施工方式^[2]。作为传统输水管材,钢管具有供水性能好、自重轻、后期维护方便、耐久性好等优点,广泛应用于供水工程^[3]。输水隧洞轴线一般是曲率复杂的空间曲线,整个地下管道工程由大量的短直钢管沿着隧洞轴线拼接而成。为使管道成型轴线能较好地拟合输水隧洞轴线,每一根钢管的管长、坡口角度、切口位置、排布顺序等参数都必须根据空间轴线经过大量运算获得,这涉及空间坐标系的相互转化和齐次-非齐次方程的求解,实现难度较大。现阶段关于管道的研究集中于管道管径、材料选择、切割焊接

工序等方面,现有管道分段铺设方式无法根据隧洞轴线的曲率变化自适应调整分段钢管的管长^[4-7]。此外,由于地下隧洞一般空间有限,大型施工机械无法运送进入,故大口径钢管拼接施工操作难度较高,在安装过程中只可进行修口、清根和焊接等简单操作,很难实现钢管方向反转、重新切割等操作。因此,钢管的切割参数一旦求解错误,轻则导致钢管无法拼接,重则导致拼接后因缝隙较大发生漏水、塌方等工程事故。隧洞施工常常因 TBM 推进姿态控制不到位等原因调整设计线路,即必须重新进行分段排布计算。然而,现有的分段排布模拟软件都是将隧洞轴线分别投影到水平面和竖直面,逐段按平面参数和竖向参数输入整条轴线的数据,工作量大,修改烦琐,且软件输出结果为数据表格,难以可视化评价拼接效果。为此需要研究更加高效和可视化强的供水钢管分段排布方法,以期达到良好的管道安装施工效果。

近年来,建筑信息模型(BIM)技术因强大的信息化、可视化以及参数化设计等功能发展迅速,在土建行业得到广泛应用^[8-10]。BIM 以三维模型为载体,集成了项目生命周期内的全部信息,涵盖了设计、施工、运维的全过程^[11-12]。地下输水工程施工风险大、安全隐患多、建设过程不可逆、工程质量问题修复难度大,需要进行严格的检测控制施工过程,因此 BIM 可视化技术使这类无法直接观察的地下工程得到了更有效的设计和管理,大幅提高了设计人员对于钢管分段及楔形量合理性的判断和分析能力。此外,由于输水隧洞轴线在空间上呈现出长带状分布的特点,其建模过程较难,且每一段钢管模型的长度及切口位置等参数的确定均需要进行大量的运算,建模效率较低且精度不高。目前在设计阶段利用 BIM 技术进行正向设计尚处于探索阶段^[13]。为此,本文将 BIM 技术引入到地下复杂空间曲线钢管分段排布过程中,研究高效建立高精度 BIM 模型的方法,利用 BIM 技术实现钢管的自动分段和自动排布,以指导钢管的设计和安装。

1 地下复杂空间曲线钢管分段排布算法

1.1 开发平台和工具

目前 BIM 有多个平台,其中主流平台有 Autodesk、Bentley 和 Dassault,它们可以对建筑和基础设施系统实现可视化设计、记录和管理,还集成了附加组件^[14]。在土木和建筑工程中,Autodesk 平台以开发难度较低及相对经济等优点成为最流行的 BIM 设计平台。因此,本文选用 Autodesk 平台的 Revit 软件作为开发平台。

根据钢管制造的限制条件和安装的精度要求,需要对钢管的分段方式进行优化,以期达到切割余料少、轴线误差小的设计目标。而 BIM 的一大技术特点正是优化性,即能在 BIM 模型中进行设计和施工方案的优化^[15]。然而,Revit 对基于空间曲线的模型支持较弱且不支持批量的数据处理,很难约束模型的几何尺寸和空间位置,更无法创建和处理钢管分段、排布过程中复杂的几何约束条件和逻辑关系^[16-18]。因此,为提高建模速度和质量以及实现钢管分段方式的最优化,对地下复杂空间曲线钢管模型的创建及数据处理需要结合 Revit 的二次开发插件 Dynamo 进行。

Dynamo 是一个开源的可视化编程工具,通过和 Revit 直接连接获取信息。它内置了很多节点,通过将内置节点连接在一起来构建定制算法。Dynamo 还可以使用 Python 程序以脚本编程方式扩展现有的模型,既能实时观察几何体的形体变化并快速建立符合设计构思的几何体型,又可解决数据处理、逻辑判断、循环嵌套等复杂问题^[19],极大地提升了 Revit 在参数化、精细化建模领域的发展空间。针对地下复杂空间曲线钢管分段安装工程的特点,本文在 Dynamo 工作空间中进行设计建模,主要通过 Python 程序驱动 Dynamo 和 Revit 模块进行二次开发,使得设计人员快速获取高精度的最优钢管分段排布设计方案,并且通过集成各种信息的钢管分段排布 BIM 模型直观严格地把控设计参数的合理性,以提高钢管排布的效率和精度。

1.2 钢管自动分段排布算法原理

目前对钢管分段排布的研究很少,且大多局限于二维空间^[20-21],涉及复杂的矩阵计算,如坐标系的齐次变换和三维形体方程求解,无法获取切割余料少、轴线误差小的最优分段排布方案。为此,本文将钢管模型进行抽象化,提取关键设计参数,在 Dynamo 中利用各钢管模型间的关系以及设计参数、约束条件进行旋转、平移等几何运算,在避免复杂烦琐的几何代数计算的同时自动实现全局优化且高精度的钢管分段排布。

地下隧洞的施工空间比较狭小,大直径输水钢管一般采用厂家预制的方式,即需要在正向设计阶段确定各钢管的管长、坡口角度、切口位置、排布顺序等,所以没有必要对所有钢管使用相同的坐标系来确定坡口角度和切口位置,否则会大大增加设计的计算量且降低程序的运行效率。如图 1 所示,在切割时只需保证每根钢管两端的切口相对位置不变,即保证同一根钢管两端处于同一局部空间坐标系 $X_1Y_1Z_1$ 即可,同时标记坡口起切点的位置;在排

布安装时,只需将相邻两管对接坡口处的标记对齐即可完成拼接,极大程度提高了拼装效率。为在钢管某一端形成特定形式的坡口,需要将钢管的一端进行切割,即在端环面寻找某个点,再从该点向内切割一定的角度,将该点定义为该钢管该端环面的起切点。在厂家预制切割钢管时,钢管平放于水平面上,局部空间坐标系 $X_1Y_1Z_1$ 以竖直向上为 X_1 轴,以逆着拼装方向且平行于中轴线的轴为 Z_1 轴,且坐标系 $X_1Y_1Z_1$ 为右手坐标系。

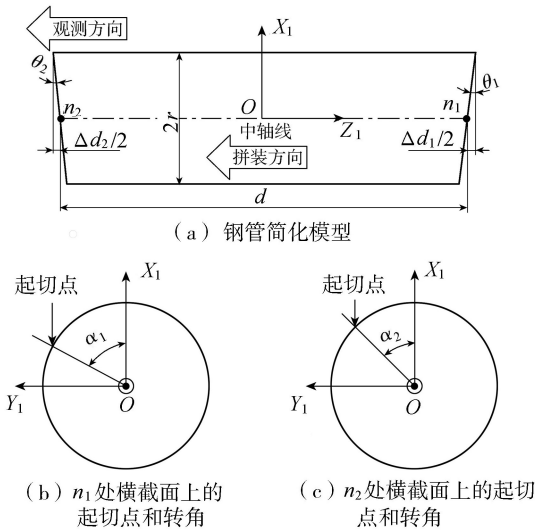


图1 钢管简化模型及起切点和转角

为方便编写参数化设计程序,需要对钢管的几何形体进行处理。将单根钢管简化为一个圆柱面(钢管的外表面),其两端圆周的半径为 r ,中轴线长 d ,前后两端楔形量分别为 Δd_1 、 Δd_2 ,坡口长度为 $\frac{\Delta d_1 + \Delta d_2}{2}$,前后两端起切点与局部坐标系 $X_1Y_1Z_1$ 的 X_1 轴之间的夹角分别为 α_1 和 α_2 ,切角分别为 θ_1 和 θ_2 ,钢管总长 a 的计算公式如式(1)所示。

$$a = d + \frac{\Delta d_1 + \Delta d_2}{2} \quad (1)$$

长距离输水管道往往长达数公里至数十公里,需要布设大量不同长度的大口径钢管。相邻钢管一般通过焊接连接成整体,而焊缝的质量高低是整个施工成败的关键。钢管接口对接时应使内管壁对齐后焊接,并且接口焊缝错边符合标准,即焊缝必须不超过管壁厚的 20% 且不大于 2 mm^[22]。显然,相邻钢管焊接时接口处形状必须一致。容易证明,相邻两管接口处的坡口角度相等时坡口形状为两个全等的椭圆,表明相邻两管在对接时坡口椭圆的长轴位于两管中轴线的角平分线上,即坡口的最里点位于两管中轴线所形成的凸角 γ ($\gamma \leq 180^\circ$) 的角平分线上,见图 2。根据起切点的定义,坡口的最外点也是钢管该端的起切点。因此,相邻两管交界处的坡口

角度 θ_0 (包含前管的 θ_2 和后管的 θ_1) 以及对应的楔形量 Δd_0 (包含前管的 Δd_2 和后管的 Δd_1) 的计算公式分别见式(2)、式(3)。

$$\theta_0 = 90 - \frac{\gamma}{2} \quad (2)$$

$$\Delta d_0 = 2r \tan \theta_0 \quad (3)$$

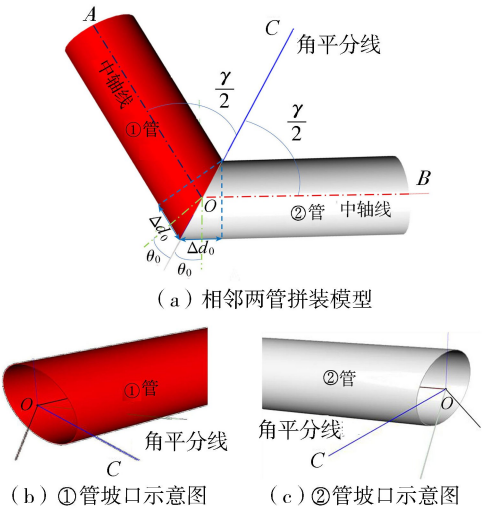


图2 相邻两管拼装模型及对接坡口示意图

一根大直径钢管主要由若干块钢板卷制压头制作而成^[23],相邻钢板则通过焊接连接在一起。假设每块钢板的长宽均相同,为充分利用每块钢板、减少余料,限制每根大直径钢管的长度只能是每块钢板长度的整数倍,将每块钢板长度定义为钢管长度模数 Δa ,并且每根钢管的两端坡口长度不超过一个限定值,将其定义为切割阈值 Δd ,如式(4)所示。为使管道沿着设计轴线布设并防止因钢管偏离设计轴线过多而出现钢管超出盾构隧洞的情况,每根钢管的中轴线偏离设计轴线的距离应该限制在某个值之内,将该值定义为轴线偏差阈值 d_{sup} ,则钢管中轴线偏离设计轴线最大距离 d_{max} 应满足式(5)的约束。

$$\frac{\Delta d_1 + \Delta d_2}{2} \leq \Delta d \quad (4)$$

$$d_{max} \leq d_{sup} \quad (5)$$

钢管排布时还要遵循以下原则:在空间曲线曲率较小时应排布较长的钢管以减少钢管数量,从而减少焊缝数量、改善输水条件和降低漏水风险;而在曲率较大时应排布较短的多根钢管以更好地拟合空间曲线。当空间曲线的曲率增大到某个值时, Δa 管长的钢管与设计轴线的偏差无法控制在 d_{sup} 之内,此时可以忽略切割阈值的要求,从 Δa 依次向下搜索偏差值不超过 d_{sup} 的管长。以上原则表明钢管全长的取值应满足式(6)的要求。

$$a \in \{0, \Delta a, 2\Delta a, \dots, i\Delta a\} \quad (i = 1, 2, \dots, i_{max}) \quad (6)$$

式中: i 为可卷制焊接成钢管的钢板数量; $i_{\max}$ 为允许焊接的最长钢管所需的钢板数量。如果管长接近0时也无法满足偏差约束条件或者存在相当数量管长接近0但满足偏差约束条件的钢管时,设计人员应该考虑这段空间曲线是否存在偏折、曲率过大或者选定的钢管分段设计参数是否合理等问题,并重新设计该段空间曲线或钢管分段参数。

1.3 钢管自动分段排布算法实现过程

隧道轴线是钢管分段排布设计的依据,其CAD图可以直接导入Revit,通过Dynamo读取将隧道轴线长度作为输入参数 t 。令钢管分段排布设计过程中相邻两管前管的中轴线长为 d_1 ,后管的中轴线长为 d_2 ,钢管最大允许长度为 $a_{\max}$,前管中轴线前端端点为 n_1 ,前管中轴线末端及后管中轴线前端端点为 n_2 ,后管中轴线末端端点为 n_3 ,前管中轴线方向(前端指向末端)为 V ,前管中轴线方向(末端指向前端)为 V_1 ,后管中轴线方向(前端指向末端)为 V_2 。根据钢管分段排布设计参数和原则,本文编写了基于Dynamo的复杂空间曲线钢管自动分段排布程序。

在程序运行过程中,上一管节计算时的输出参数 d_2, n_2, V_2, θ_2 为下一管节计算时的输入参数 d_1, n_1, V, θ_1 ,迭代参数 δ 值越小,表明精度越高,但计算效率也越低。该程序主要包含管长计算模块、偏差计算模块和转角计算模块这3个关键模块。为弥补Dynamo中默认编程语言DesignScript在逻辑判断、循环嵌套等复杂程序方面的不足,在PythonScript中分别调用Dynamo中几何运算命令计算钢管坡口切角和长度、钢管轴线与空间曲线的最大偏差以及钢管两端坡口起切点相对位置。

管长计算模块计算流程如下:①根据分段排布设计前是否已存在拼接钢管来设定模块参数,若不存在已拼接钢管,参数设定为 t, d_1, d_2, θ_1, r ;若存在已拼接钢管,则参数除 t, d_1, d_2, θ_1, r 外,还包括 V, n_1 。②不存在已拼接钢管时,首先使用Curve.StartPoint节点命令获取空间曲线的起点,将其作为 n_1 ,再通过Sphere.ByCenterPointRadius节点命令以 n_1 为球心、 d_1 为半径作球 S_1 ,最后利用Geometry.Intersect节点命令获取 S_1 和 t 的交线,将该交线沿拼装方向的末端点作为 n_2 ;当存在已拼接钢管时,使用Geometry.Translate节点命令将 n_1 沿 V 方向平移 d_1 得到 n_2 。③两种情况均以 n_2 为球心、 d_2 为半径作球 S_2 ,获取 S_2 和 t 的交线,将拼装方向的末端点作为 n_3 ;然后连接 n_1, n_2 和 n_2, n_3 ,再通过Vector.ByTwoPoints节点命令获取向量 V_1, V_2 。④最后调用Vector.AngleWithVector节点命令计算 V_1, V_2 的夹角 γ 以获取前管的切角 θ_2 (即后管的 θ_1),如

式(2)所示。这样按式(3)即可分别计算前管两端的楔形量 Δd_1 和 Δd_2 ,按式(1)即可计算前管切割前的长度,即所需的钢管总长 a 。

偏差计算模块计算流程如下:①判断 d_2 是否属于 $[a_{\max}-i\Delta a-\Delta d, a_{\max}-i\Delta a]$,其中 $i \in [0, \frac{a_{\max}}{\Delta a}-1]$ 且 i 为自然数。如果 d_2 属于以上区间,则使用Line.ByStartPointDirectionLength节点命令作一条有向线段 L_2 ,其起点为 n_2 ,方向为 V_2 ,长度为 $a_{\max}-i_0\Delta a$,其中 i_0 为该区间 i 的取值;否则 L_2 的长度取 d_2 。②在 L_2 上每隔一段微小的距离取一个点,使用Curve.PlaneAtParameter节点命令以这些点为中心、 V_2 为法向量绘制一系列平面,将各平面与 t 相交形成一系列点。③使用Geometry.DistanceTo节点命令计算该系列点与 L_2 之间的距离,并取最大值记为 $d_{\max}$ 。

转角计算模块计算流程如下:①如果 V_1 和 V_2 平行,则前管后端和后管前端的转角均设为0,即 $\alpha_2 = \alpha_1 = 0$,否则需要通过几何计算获得管道的转角。②使用Point.Add节点命令将 n_2 分别沿 V_1, V_2 平移单位距离得到2个点,并通过Point.ByCoordinates节点命令获取这两点间中点 n_4 ,将 n_2 指向 n_4 的向量记为 V_3 ,其方向由 n_2 指向坡口最里点。③使用Plane.ByOriginNormal节点命令分别以 n_2 为原点、 V_1 和 V_2 为法向量建立平面 p_1 和 p_2 ,通过Plane.ToCoordinateSystem节点命令分别建立这2个平面的局部空间直角坐标系 xyz 。④使用Curve.Project节点命令将 V_3 分别投影到平面 p_1 和 p_2 上,通过Vector.AngleAboutAxis节点命令分别计算这2个投影向量与 p_1 和 p_2 上局部坐标系 xyz 中 x 轴间的夹角,即为前管后端和后管前端的转角 α_2 和 α_1 。

钢管自动分段排布程序通过Python调用Excel的应用程序编程接口实现了将分段排布结果自动输出到Excel表格的功能,不仅避免了人工整理数据容易犯错且效率低的问题,还实现了设计全过程自动化。设计人员还可以根据工程实际铺设方向调整程序中钢管分段安装方向以及从已排钢管处重新开始分段排布设计,提高了工程适用性。

1.4 钢管分段排布检验方法

为方便设计人员直观地检验钢管分段排布结果的合理性和准确性,开发了钢管排布模拟模块,可以根据Excel中的分段成果自动生成钢管拼装的三维模型。该模块所需要的参数主要有:所有管段的前、后端中轴线端点 n_1, n_2 ,前、后端切角 θ_1, θ_2 ,前、后端转角 α_1, α_2 ,内外半径 r_{in}, r ,安装管段数 N ,具体步骤如下:

步骤1 输入计算参数,并令 $i=1$ 。

步骤2 获得第*i*根钢管的 n_{1i} 、 n_{2i} 、 θ_{1i} 、 θ_{2i} 、 α_{1i} 、 α_{2i} 。

步骤3 将 n_{1i} 、 n_{2i} 分别向中轴线外平移得到两个点 n_{10} 、 n_{01} 以获得切割余量。

步骤4 使用 Vector.ByTwoPoints 节点命令获取 n_{2i} 指向 n_{1i} 的向量 V_1 。

步骤5 使用 Plane.ByOriginNormal 节点命令分别以 n_{1i} 、 n_{2i} 为原点, V_1 为法向量建立平面 p_1 、 p_2 。

步骤6 通过 Circle.ByPlaneRadius 节点命令在 p_1 上绘制2个圆,半径分别为 r_{in} 、 r ,并使用 Solid.BySweep 节点命令将上述2个圆沿 n_{10} 指向 n_{01} 的路径扫掠形成2个底面半径分别为 r_{in} 、 r 的圆柱实体 s_1 、 s_2 。

步骤7 在 p_1 、 p_2 上分别建立2个局部坐标系 xyz ,并判断各坐标轴方向是否一致,使用 Geometry.Rotate 节点命令围绕 V_1 旋转平面,使得2个坐标系各坐标轴方向一致,且 x 轴指向全局坐标系的上方。

步骤8 将 p_1 、 p_2 及其上的局部坐标系分别围绕点 n_{1i} 、 n_{2i} 和 V_1 旋转 α_{1i} 、 α_{2i} 。

步骤9 将 p_1 、 p_2 及其上的局部坐标系分别围绕点 n_{1i} 、 n_{2i} 和各自的 y 轴旋转 θ_{1i} 、 θ_{2i} 。

步骤10 将 s_1 、 s_2 分别和 p_1 、 p_2 相交,并对4个相交体分别取外轮廓得到4条椭圆线 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 ,分别对应前端外轮廓线、前端内轮廓线、后端外轮廓线、后端内轮廓线。

步骤11 将 C_1 和 C_3 、 C_2 和 C_4 分别放样形成实体,并对两实体进行布尔减运算即可得到第*i*根钢管模型。

步骤12 令 $i=i+1$,重复以上步骤直到 $i=N$ 就可得到拼装完成的钢管模型。根据钢管安装模拟模

块获得的前管后端坡面和后管前端坡面所在的平面是否相同即可在 Dynamo 中直观地检验钢管分段配布结果的合理性和准确性,如图3所示。

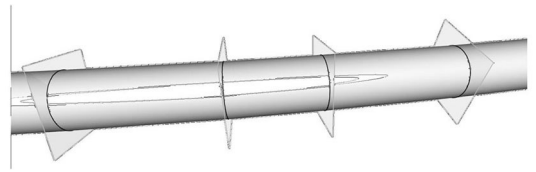


图3 钢管分段配布结果检验示意图

1.5 钢管 BIM 模型信息集成方法

为充分发挥 BIM 模型在设计 and 施工阶段的优越性,对拼装完成的三维管道模型集成设计和施工参数信息。由于 Dynamo 自带的 Revit 导入节点效率较低且是以符号的形式导入,既不能快速地调整构件属性,又不能进行修改与编辑,更难以添加工程管理所需的新属性。因此在 Dynamo 中,首先利用第三方节点包 Springs 将各段钢管转化为常规模型族,并将其导入 Revit 中,然后使用 Parameter.CreateProjectParameter 节点命令给 Revit 的常规模型创建一系列项目参数,如里程桩号、轴线偏差、钢管长度等,再通过 Excel.ReadFromFile 节点命令与 Excel 进行交互以读取输出参数,最后通过 Element.SetParameterByName 节点命令对各段管片模型的各个项目参数赋予参数值。集成参数信息的三维模型更适合指导钢管的安装和设计的工作,见图4。

2 工程应用

杭州市城北和余杭地区的供水水源以苕溪为主,水源单一且水源水质易受上游影响。保障饮用水供水安全和改善供水水质,政府确定实施杭州市



图4 集成设计和施工参数信息的钢管 BIM 模型示意图

第二水源千岛湖配水工程。

以杭州市第二水源工程中大毛坞—仁和大道供水管道工程中的一段设计曲线为例,验证基于 BIM 技术的地下复杂空间曲线钢管分段排布算法的有效性和优越性。该段盾构隧洞开挖直径 6.2 m,衬后内径 5.5 m,输水建筑物采用盾构隧洞内置钢管结构,在盾构隧洞内设置钢管。设计要求 $\Delta d=0.05\text{ m}$, $d_{\text{sup}}=0.1\text{ m}$,各根钢管总长度只能在集合 $\{(0\text{ m},3\text{ m}],6\text{ m},9\text{ m},12\text{ m}\}$ 中选取,首管前端无切口。将以上参数输入本文建立的算法程序,得到高精度的钢管分段排布方案,其中该段输水隧洞设计轴线、管道中各钢管的转角分布、短管分布以及钢管中轴线与隧道轴线间最大偏差分布如图 5 所示。

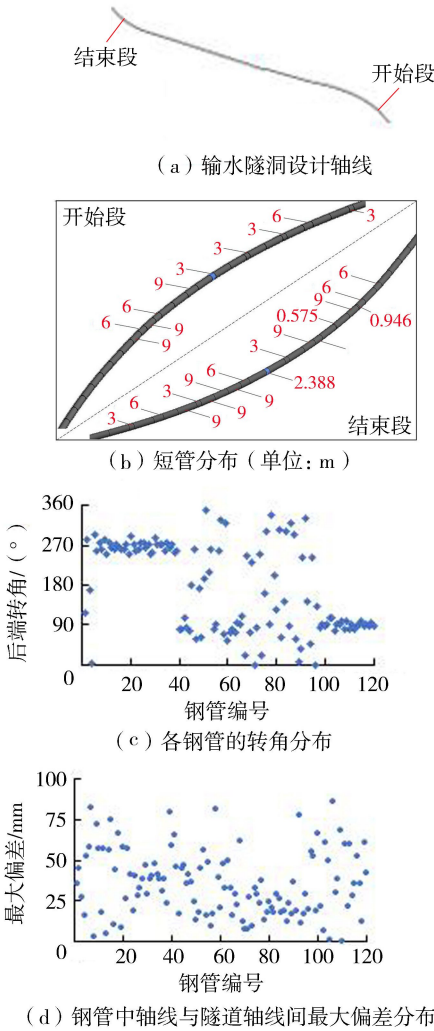


图 5 输水隧洞设计轴线和管道 BIM 模型各钢管参数分布

生成的管道模型共计有 126 根大口径钢管,其中大多是直径 12 m 的钢管,占比 78.57%,而直径 3 m 及以下的钢管只有 10 根,最大程度地减少了分段数目。拼装过程开始和结束时钢管的起切点位置分别大致分布于钢管的正右侧和正左侧,符合图 5(a)中设计曲线开始段和结束段的曲线走向;图 5(c)中数字为设计轴线开始段和结束段各钢管的

总长,可以看到所有的短管均分布在曲率较大的开始段和结束段,呈现出空间曲线曲率越大短管分布越密且管长越短的特点,符合工程实际;由图 5(a)和图 5(d)可知,管道轴线均匀地分布在设计轴线周围,而且每根管道距离设计轴线的最大偏差均小于 0.1 m。综上所述,钢管的分段方式合理,满足钢管制造和安装精度的要求。

在钢管分段排布设计初期,设计人员可以适当放宽切割阈值和最大偏差的限制,以初步评估钢管轴线和设计轴线间最大偏差的分布和切割余料量,如果最大偏差较小并且切割余料较少,则可将该约束条件下的高精度钢管分段排布方案直接作为设计方案;否则,对设计参数进行修改以得到指定约束条件下的全局最优钢管排布方案。假定在设计初期对该段设计轴线的钢管分段排布要求为切割阈值 0.5 m、偏差阈值 1 m,则各分段钢管的中轴线的中轴长、切角及钢管中轴线与隧道轴线间最大偏差情况如图 6 所示。

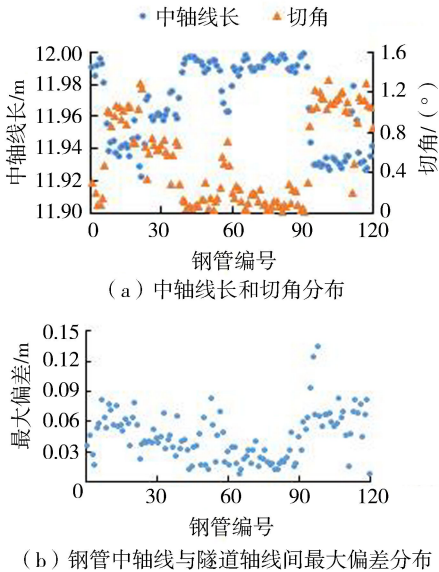


图 6 设计阶段初期管道 BIM 模型各钢管试算参数分布

图 6(a)表明在约束条件放宽的情况下,管道分段模型中钢管的最小中轴长为 11.922 m,最大切角为 1.33°,每一段钢管的全长均为 12 m;图 6(b)表明钢管中轴线和隧道轴线的最大偏差为 0.13 m。与图 5 所示的方案相比,最短管由 0.575 m(图 5(b))变为 11.922 m,避免了超短钢管的存在,提高了结构稳定性。根据钢管中轴线与隧道轴线的最大偏差,以上两种设计方案可以开挖成相同洞径的输水隧洞,但是图 6 的方案减少了钢管的分段数、分段类型和焊缝数量,提高了结构和输水系统的稳定性,因此可以作为严格约束条件下的替代方案。由此可以看出,本算法程序对于钢管分段约束条件的优化、钢管分段排布方案的比选具有较大的应用价值。

3 结 语

本文充分利用 BIM 技术在正向参数化设计中的优势,研究了基于 Revit 和 Dynamo 的地下复杂空间曲线钢管分段排布算法,开发了相应的模拟程序,不仅实现了钢管的自动合理分段和自动安装模拟,提高了建模效率与模型精度,还将三维模型与设计 and 施工参数相结合,使得设计、施工和管理人员均可以直接在 BIM 模型上查询各钢管的编号、里程等参数信息,实现了参数微调与图元变化联动,所见即所得,为管道工程后续的信息化监测管理奠定了基础。本文提出的算法和开发的软件已成功应用于杭州市第二水源工程、嘉兴市域外配水工程等工程,为工程设计、施工和钢管制作单位提供了技术支持。

参考文献:

[1] 朱晓婷. 基于徐州市骆马湖引水工程的长距离输水管材优化选型研究[D]. 扬州:扬州大学,2020.

[2] 刘凤华. 盾构隧道通用管片拟合排版与管片选型技术研究[D]. 上海:同济大学,2007.

[3] 陈陆. 长距离管道输水工程优化设计研究:以盐池县高沙窝供水工程为例[D]. 银川:宁夏大学,2016.

[4] 丰文俊. 长距离大口径输水管道设计施工方案研究[D]. 南京:东南大学,2015.

[5] 童亮. 大落差复杂地形供水管道消能方式选择及管线分段研究[J]. 西北水电, 2019 (3): 30-33. (TONG Liang. Energy dissipation mode selection and segmentation of water supply pipeline with large drops in complex terrain[J]. Northwest Hydropower, 2019 (3): 30-33. (in Chinese))

[6] 杨宝奎,朱满林,程虹,等. 水锤计算中压力管道的分段问题研究[J]. 水利水电技术, 2007, 38 (1): 53-55. (YANG Baokui, ZHU Manlin, CHENG Hong, et al. Research on sectioning of pressure pipeline system in analysis on water hammer [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38 (1): 53-55. (in Chinese))

[7] 郭磊,万庆,宋彬,等. 线简化定线图管线分段方法研究[J]. 测绘科学, 2010, 35 (5): 185-187. (GUO Lei, WAN Qing, SONG Bin, et al. Research on pipeline section design in alignment sheet based on line simplification[J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35 (5): 185-187. (in Chinese))

[8] 陈桂香,徐晨,张文萃,等. 基于 BIM 技术的通用管片精细化建模及应用[J]. 施工技术, 2019, 48 (4): 76-80. (CHEN Guixiang, XU Chen, ZHANG Wencui, et al. Application and fine modeling of general segment based on BIM technology [J]. Construction Technology, 2019, 48 (4): 76-80. (in Chinese))

[9] 刘英城,越川,梁景智. BIM 技术在电力隧道盾构施工风险源可视化应用[J]. 广东土木与建筑, 2019, 26 (4): 57-60. (LIU Yingcheng, YUE Chuan, LIANG Jingzhi. Visual application of BIM technology in power tunnel shield construction risk source[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2019, 26 (4): 57-60. (in Chinese))

[10] 黄建文,毛宇辰,王东,等. 基于 BIM 的碾压混凝土坝施工进度-成本联合管控[J]. 水利水电科技进步, 2019, 39 (5): 66-72. (HUANG Jianwen, MAO Yuchen, WANG Dong, et al. Construction schedule-cost joint control of RCC dams based on BIM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39 (5): 66-72. (in Chinese))

[11] 王培成,包腾飞,朱茜. 基于 BIM 的大坝安全监测信息管理系统开发研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37 (4): 72-75. (WANG Peicheng, BAO Tengfei, ZHU Xi. Research on development of dam safety monitoring information management system based on BIM [J]. Water Resources and Power, 2019, 37 (4): 72-75. (in Chinese))

[12] 刘东海,胡东婕,陈俊杰. 基于 BIM 的输水工程安全监测信息集成与可视化分析[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2019, 47 (4): 337-344. (LIU Donghai, HU Dongjie, CHEN Junjie. BIM-based integration and visualization for dynamic safety monitoring information of water diversion project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47 (4): 337-344. (in Chinese))

[13] 崔晓. 大直径盾构隧道 BIM 建模方法的探究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2020, 12 (6): 66-71. (CUI Xiao. Research on BIM modeling method of large diameter shield tunnel [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2020, 12 (6): 66-71. (in Chinese))

[14] JELENA N, CHRISTIAN K, JANOSCH S. An integrated platform for design and numerical analysis of shield tunnelling processes on different levels of detail [J]. Advances in Engineering Software, 2017, 112: 165-179.

[15] 叶越胜,吴佩,陈孝哲. 三维激光扫描与 BIM 技术在盾构隧道施工中的融合应用[J]. 广东土木与建筑, 2021, 28 (2): 9-12. (YE Yuesheng, WU Pei, CHEN Xiaozhe. Application of 3D laser scanning and BIM technology in the construction of shield tunnel [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2021, 28 (2): 9-12. (in Chinese))

[16] 李庶安,王喆,孔晨光,等. Dynamo 在桥梁缓和曲线段建模应用研究[J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2019, 15 (4): 165-167. (LI Shuan, WANG Zhe, KONG Chenguang, et al. Research on the application of Dynamo in the modeling of bridge transition curves [J]. Highway Traffic Technology (Application Technology Edition), 2019, 15 (4): 165-167. (in Chinese))

(下转第 126 页)

- fractal theory to analyze dam safety monitoring data [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 49 (1): 100-104. (in Chinese))
- [10] 周兰庭,柳志坤. 大坝变形实测数据的多重分形特征解析方法[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (6): 18-24. (ZHOU Lanting, LIU Zhikun. Multifractal feature analysis method for measured data of dam deformation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6): 18-24. (in Chinese))
- [11] 欧斌,吴邦彬,袁杰,等. 基于 LSTM 的混凝土坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (1): 21-26. (OU Bin, WU Bangbin, YUAN Jie, et al. LSTM-based deformation prediction model of concrete dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 21-26. (in Chinese))
- [12] 刘亚新,樊启祥,尚毅梓,等. 基于 LSTM 神经网络的水电站短期水位预测方法[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 56-60. (LIU Yaxin, FAN Qixiang, SHANG Yizi, et al. Short-term water level prediction method for hydropower station based on LSTM neural network [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 56-60. (in Chinese))
- [13] 余学祥,张华海,吕伟才,等. Kalman 滤波在 GPS 监测网中的应用[J]. 工程勘察, 2000, 28 (4): 33-35. (YU Xuexiang, ZHANG Huahai, LU Weicai, et al. Application of Kalman filter in GPS monitoring network [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2000, 28 (4): 33-35. (in Chinese))
- [14] HURST H E. Long-term storage capacity of reservoirs: an experimental study[J]. Transactions of American Society of Civil Engineers, 1951, 116: 770-808.
- [15] 陈霁霞. 基于分形及混沌理论的中国股票市场分析与预测[D]. 南京:南京财经大学, 2008.
- [16] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory [J]. Neural Computation, 1997, 9 (8): 1735-1780.
- [17] 郭张军,黄华东,屈旭东. 基于深度学习的大坝变形预测模型[J]. 水电能源科学, 2020, 38(3): 83-86. (GUO Zhangjun, HUANG Huadong, QU Xudong. Dam deformation prediction model based on deep learning [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(3): 83-86. (in Chinese))
- [18] 王井利,张春哲. 自适应卡尔曼滤波在地铁监测中的应用[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30 (2): 263-268. (WANG Jingli, ZHANG Chunzhe. Application of the adaptive Kalman filter in metro monitoring data processing [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2014, 30 (2): 263-268. (in Chinese))

(收稿日期:2021-09-12 编辑:雷燕)

(上接第 114 页)

- [17] 李永明,张恺韬,郭哲良,等. 基于 CATIA 软件的楔形盾构隧道管片参数化建模与排版[J]. 隧道建设, 2019, 39 (3): 391-397. (LI Yongming, ZHANG Kaitao, GUO Zheliang, et al. Parametric modeling and segment layout of wedge shield tunnel based on software catia [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(3): 391-397. (in Chinese))
- [18] 车冠宇,毛伟栋. Revit+Dynamo 参数化隧道模型构建体系探析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14 (4): 246-248. (CHE Guanyu, MAO Weidong. Analysis of Revit + Dynamo parametric tunnel model construction system [J]. Highway Traffic Technology, 2018, 14 (4): 246-248. (in Chinese))
- [19] 仇朝珍,贺波,葛胜锦. Dynamo 在桥梁 BIM 建模中的应用[J]. 中外公路, 2019, 39 (5): 179-182. (QIU Chaozhen, HE Bo, GE Shengjin. Application of Dynamo in bridge BIM modeling [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(5): 179-182. (in Chinese))
- [20] 邹明强. 水电站压力钢管直径与分段优化设计探讨[J]. 水利水电技术, 1996, 27 (2): 28-32. (ZHOU Mingqiang. Discussion on diameter and sectional optimal design of penstock in hydropower station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1996, 27(2): 28-32. (in Chinese))
- [21] 刘志宏,喻晓旭. 基于遗传算法的两阶段切割问题的研究[J]. 电子技术与软件工程, 2018(24): 155-156. (LIU Zhihong, YU Xiaoxu. Research on two-stage cutting problem based on genetic algorithm [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2018(24): 155-156. (in Chinese))
- [22] 朱俊辉. 大口径长距离输水钢管整体吊装沉管施工关键技术及实证研究[D]. 广州:华南理工大学, 2020.
- [23] 冯飞鸿. 输水用大直径钢管卷制工艺参数研究[J]. 科学技术创新, 2021 (10): 124-125. (FENG Feihong. Research on coiling process parameters of large diameter steel pipe for water conveyance [J]. Scientific and Technological Innovation, 2021 (10): 124-125. (in Chinese))

(收稿日期:2021-09-19 编辑:骆超)