



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116127551 A

(43) 申请公布日 2023.05.16

(21) 申请号 202211390712.X

G06Q 50/08 (2012.01)

(22) 申请日 2022.11.07

G06F 111/10 (2020.01)

(71) 申请人 中交第二公路勘察设计研究院有限公司

地址 430056 湖北省武汉市经济技术开发区创业路18号

(72) 发明人 白宇 陈中治 王欣南 黄炎
刘东升 胡燕 胡玉龙 郭鹏

(74) 专利代理机构 武汉宇晨专利事务所(普通合伙) 42001

专利代理师 陈晓宁 王敏锋

(51) Int. Cl.

G06F 30/13 (2020.01)

G06F 30/20 (2020.01)

G06Q 10/10 (2023.01)

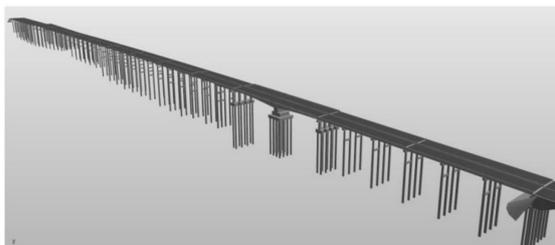
权利要求书3页 说明书11页 附图5页

(54) 发明名称

一种基于数字孪生多维模型的桥梁施工进度精细化管控方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于数字孪生多维模型的桥梁施工进度精细化管控方法,包括以下步骤:从物理实体的角度分析桥梁组成,结合精细化管控目标,建立桥梁设施的物理实体分解结构;构建桥梁数字孪生几何模型;进一步构建桥梁数字孪生物理模型;进一步构建桥梁数字孪生行为模型;进一步构建桥梁数字孪生规则模型;利用桥梁数字孪生多维度模型进行施工进度精细化管控。本发明从几何、物理、行为及规则四个维度提出了用于桥梁施工进度管控的数字孪生模型建立方法,并在规则模型的维度创新性提出基于“时间”与“构件数”的施工进度延迟天数计算方法,切实提高了桥梁施工进度全过程管控的精细化程度。



1. 一种基于数字孪生多维模型的桥梁施工进度精细化管控方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1、从物理实体的角度分析桥梁组成,结合精细化管控目标,建立桥梁设施的物理实体分解结构;

步骤2、构建桥梁数字孪生几何模型;

步骤3、进一步构建桥梁数字孪生物理模型;

步骤4、进一步构建桥梁数字孪生行为模型;

步骤5、进一步构建桥梁数字孪生规则模型;

步骤6、利用桥梁数字孪生多维度模型进行施工进度精细化管控。

2. 根据权利要求1所述的基于数字孪生多维模型的桥梁施工进度精细化管控方法,其特征在于,在所述步骤1中,围绕桥梁设施物理实体对象,根据桥梁施工进度精细化管控需要,分为桥梁设施、子设施及构件三个层级划分桥梁的组成,建立桥梁设施物理实体的分解结构,并进一步针对构件层级的对象开展数字孪生多维模型创建。

3. 根据权利要求1所述的基于数字孪生多维模型的桥梁施工进度精细化管控方法,其特征在于,在所述步骤2中,构建桥梁数字孪生几何模型来表达物理实体对象的几何外观特点,为后续的物理、行为及规则模型数据提供基础信息载体,具体方法如下:

步骤2.1、利用AutoCAD、Revit、Tekla软件对步骤1中划分得到的构件对象进行几何模型创建;

步骤2.2、为构件对象几何模型添加标识信息,该标识信息是唯一的、计算机可读的;

步骤2.3、根据构件对象的空间位置及桥梁设施物理实体的分解结构,利用标识信息构建桥梁构件、子设施、设施的多层次几何模型组装关系。

4. 根据权利要求1所述的基于数字孪生多维模型的桥梁施工进度精细化管控方法,其特征在于,在所述步骤3中,构建桥梁数字孪生物理模型来表达物理实体对象本身固有属性或物理特征,是在几何模型基础上进一步描述功能、业务及物理性质,提高数字孪生模型与物理实体的一致性,具体方法如下:

步骤3.1、为桥梁构件模型添加语义信息,明确模型物理功能;

步骤3.2、为桥梁构件模型添加工作分解结构信息,明确施工工序及工法;

步骤3.3、利用构件对象几何模型计算体积值,补充其物理属性信息。

5. 根据权利要求1所述的基于数字孪生多维模型的桥梁施工进度精细化管控方法,其特征在于,在所述步骤4中,构建桥梁数字孪生行为模型来表达物理实体对象的客观运行规律,进一步添加施工进度计划、动作行为信息,确保数字孪生模型在行为逻辑上与物理实体保持一致,具体方法如下:

步骤4.1、根据模型的语义信息,首先为某一类构件对象,添加整体施工“计划开始时间”及“计划结束时间”信息;

步骤4.2、然后根据几何模型与物理模型中的组装关系、工作分解结构信息,自动计算某一类构件对象下各构件的施工“计划开始时间”及“计划结束时间”信息;

步骤4.3、基于现实物理世界行为逻辑,为桥梁墩柱、桩基浇筑类的构件行为模型规定“上下生长”动作,为桥梁预制梁安装类的构件行为模型规定“吊装移动”动作,为桥梁现浇箱梁沿线浇筑类的构件模型规定“沿线生长”动作。

步骤4.4、根据施工进度管理的业务需求,为处于不同施工状态或施工进度滞后等构件规定其行为动作,例如渲染外观颜色或对构件进行隐藏。

6.根据权利要求1所述的基于数字孪生多维模型的桥梁施工进度精细化管控方法,其特征在于,在所述步骤5中,构建桥梁数字孪生规则模型是在前述多维模型基础上,构建规则算法以实现基于数字孪生模型对现实物理世界运行规律进行分析及预测,进一步根据施工进度精细化管控的需要,基于“时间”与“构件数”两种维度的数据,建立施工进度管控算法,计算实际施工延迟天数,支持桥梁施工进度的预测与管控,具体方法如下:

步骤5.1、根据施工进度的计划数据,获取某类型构件的计划起始时间,根据当前时间,计算计划进度:

$$P_{计划} = \frac{T_t - T_1}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

式中: $P_{计划}$:计划进度(%); T_t :当前时间; T_1 :某类型构件计划开始时间; T_2 :某类型构件计划结束时间;

步骤5.2、根据实际施工进度数据,统计某类型构件已完成的构件数量,根据该类型构件总数量,计算实际施工进度:

$$P_{实际} = \frac{N_t}{N_{类型}} \quad (2)$$

式中: $P_{实际}$:实际进度(%); N_t :已完成构件数; $N_{类型}$:类型构件总数量;

步骤5.3、利用构件体积值在其类型构件总体积中的占比,对实际施工进度进行修正,计算修正系数:

$$\alpha = \frac{v_{构件}}{n_{构件}} \times \frac{N_{类型}}{V_{类型}} \quad (3)$$

式中: α :实际施工进度修正系数; $v_{构件}$:构件体积值; $V_{类型}$:类型构件总体积值; $n_{构件}$:构件数量; $N_{类型}$:类型构件总数量;

步骤5.4、根据计划施工进度与实际施工进度,实时计算延迟时间:

$$\Delta T = (P_{实际} * \alpha - P_{计划}) * (T_2 - T_1) \quad (4)$$

式中: ΔT :施工进度延迟时间,其余符号同前。

7.根据权利要求1所述的基于数字孪生多维模型的桥梁施工进度精细化管控方法,其特征在于,在所述步骤6中,利用桥梁数字孪生多维模型进行施工全过程的进度精细化管控,具体包括:施工进度计划仿真与优化、实际施工进度可视化、施工进度精细化管控与预警。

8.根据权利要求7所述的基于数字孪生多维模型的桥梁施工进度精细化管控方法,其特征在于,所述施工进度计划仿真与优化具体方法如下:

步骤6.11、编制初始的施工进度计划数据,利用标识信息关联计划数据与数字孪生几何模型,按照行为模型规定的行为动作逻辑驱动几何模型动态仿真,实现施工进度计划数据的可视化;

步骤6.12、根据可视化仿真成果,提出进度计划的优化需求,修改施工进度计划数据,重复步骤6.11,直至得到最优的施工进度计划数据。

9.根据权利要求7所述的基于数字孪生多维模型的桥梁施工进度精细化管控方法,其

特征在于,所述实际施工进度可视化具体方法如下:

步骤6.21、在施工过程中,通过人工填报、视频监控方式,获取各构件对象施工的“实际开始时间”、“实际结束时间”数据;

步骤6.22、根据标识信息关联构件对象的几何模型,并按行为模型规定的颜色渲染、构件隐藏动作对实际施工进度进行可视化展示。

10.根据权利要求7所述的基于数字孪生多维模型的桥梁施工进度精细化管控方法,其特征在于,所述施工进度精细化管控与预警具体方法如下:

步骤6.31、在施工过程中,通过人工填报、视频监控方式,获取各构件对象施工状态包括正在施工中、完成施工、未施工,根据规则模型中的计算方法,计算延迟时间 ΔT ,当 $\Delta T > 0$ 时为施工延迟,当 $\Delta T < 0$ 时为施工提前;

步骤6.32、当 ΔT 大于施工延迟阈值时,发出施工进度预警。

一种基于数字孪生多维模型的桥梁施工进度精细化管控方法

技术领域

[0001] 本发明涉及桥梁施工进度管控领域,特别涉及一种基于数字孪生多维模型的桥梁施工进度精细化管控方法。

技术背景

[0002] 施工进度是项目管理三大目标之一,在桥梁施工过程中必须不断掌握计划的实施状况,并将实际情况与计划进行对比分析,必要时采取有效措施,使项目进度按预定的目标进行,确保目标实现。目前,由于桥梁工程施工进度计划编制及施工过程所受现场影响因素较多,实际施工顺序与计划施工顺序往往存在较大差异,缺少施工进度精细化管控方法;数字孪生技术在工程建设领域的应用尚处于起步阶段,目前多借助BIM技术来提高方案可视化程度及多方沟通效率,但当前所建模型较多针对于几何信息及非几何信息两种维度,建模过程对基于业务需求的算法模型涉及较少,且模型中数据耦合程度过高,数据利用效率低,由于缺少统一的数字化表达数据结构,在计划编制阶段到施工阶段的数据传递过程中往往出现信息丢失,数据流转不畅等问题。

发明内容

[0003] 为解决目前存在的技术问题,本发明的目的在于提供了一种基于数字孪生多维模型的桥梁施工进度精细化管控方法,不仅可实现基于数字孪生多维度模型的桥梁施工进度精细化管控,而且为数字孪生技术在工程建设全生命周期的建模及应用方法提供了参考,推动了数字孪生技术在工程建设中的切实落地应用。

[0004] 为了实现上述目的,本发明采取的技术方案如下:一种基于数字孪生多维模型的桥梁施工进度精细化管控方法,包括以下步骤:

[0005] S1、从物理实体的角度分析桥梁组成,结合精细化管控目标,建立桥梁设施的物理实体分解结构;

[0006] S2、构建桥梁数字孪生几何模型;

[0007] S3、进一步构建桥梁数字孪生物理模型;

[0008] S4、进一步构建桥梁数字孪生行为模型;

[0009] S5、进一步构建桥梁数字孪生规则模型;

[0010] S6、利用桥梁数字孪生多维度模型进行施工进度精细化管控。

[0011] 可选地,在所述步骤S1中,围绕桥梁设施物理实体对象,根据桥梁施工进度精细化管控需要,分为桥梁设施、子设施及构件三个层级划分桥梁的组成,建立桥梁设施物理实体的分解结构,并进一步针对构件层级的对象开展数字孪生多维模型创建。

[0012] 可选地,在所述步骤S2中,构建桥梁数字孪生几何模型来表达物理实体对象的几何外观特点,为后续的物理、行为及规则模型数据提供基础信息载体,具体方法如下:

[0013] (1) 利用常见如AutoCAD、Revit、Tekla等软件对步骤S1中划分得到的构件对象进行几何模型创建;

[0014] (2)为构件对象几何模型添加标识信息,该标识信息是唯一的、计算机可读的;

[0015] (3)根据构件对象的空间位置及桥梁设施物理实体的分解结构,利用标识信息构建桥梁构件、子设施、设施的多层次几何模型组装关系。

[0016] 可选地,在所述步骤S3中,构建桥梁数字孪生物理模型来表达物理实体对象本身固有属性或物理特征,是在几何模型基础上进一步描述功能、业务及物理性质等,提高数字孪生模型与物理实体的一致性,具体方法如下:

[0017] (1)为桥梁构件模型添加语义信息(分类编码),明确模型物理功能;

[0018] (2)为桥梁构件模型添加工作分解结构信息(如WBS编码),明确施工工序及工法;

[0019] (3)利用构件对象几何模型计算体积值,补充其物理属性信息。

[0020] 可选地,在所述步骤S4中,构建桥梁数字孪生行为模型来表达物理实体客观运行规律,进一步添加施工进度计划、动作行为等信息,确保数字孪生模型在行为逻辑上与物理实体保持一致,具体方法如下:

[0021] (1)根据模型的语义信息,首先为某一类构件对象,添加整体施工“计划开始时间”及“计划结束时间”信息;

[0022] (2)然后根据几何模型与物理模型中的组装关系、工作分解结构信息,自动计算某一类构件对象下各构件的施工“计划开始时间”及“计划结束时间”信息;

[0023] (3)基于现实物理世界行为逻辑,为桥梁墩柱、桩基等上下浇筑类构件的行为模型规定“上下生长”动作,为桥梁预制梁等安装类构件的行为模型规定“吊装移动”动作,为桥梁箱梁等沿线浇筑构件的行为模型规定“沿线生长”动作等等。

[0024] (4)根据施工进度管理的业务需求,为处于不同施工状态的构件或施工进度滞后规定其行为动作,例如渲染外观颜色或对构件进行隐藏。

[0025] 可选地,在所述步骤S5中,构建桥梁数字孪生规则模型是在前述多维模型基础上,构建规则算法以实现基于数字孪生模型对现实物理世界运行规律进行分析及预测,进一步根据施工进度精细化管控的需要,基于“时间”与“构件数”两种维度的数据,建立施工进度管控算法,计算实际施工延迟天数,支持桥梁施工进度的预测与管控,具体方法如下:

[0026] (1)根据施工进度计划数据,获取某类型构件的计划起始时间,根据当前时间,计算计划进度:

$$[0027] \quad P_{\text{计划}} = \frac{T_t - T_1}{T_2 - T_1} \quad (\text{式 1})$$

[0028] 式中: $P_{\text{计划}}$:计划进度(%); T_t :当前时间; T_1 :某类型构件计划开始时间; T_2 :某类型构件计划结束时间;

[0029] (2)根据实际施工进度数据,统计某类型构件已完成的构件数量,根据该类型构件总数量,计算实际施工进度:

$$[0030] \quad P_{\text{实际}} = \frac{N_t}{N_{\text{类型}}} \quad (\text{式 2})$$

[0031] 式中: $P_{\text{实际}}$:实际进度(%); N_t :已完成构件数; $N_{\text{类型}}$:类型构件总数量;

[0032] (3)利用构件体积值在其类型构件总体积中的占比,对实际施工进度进行修正,计算修正系数:

$$[0033] \quad \alpha = \frac{v_{\text{构件}}}{n_{\text{构件}}} \times \frac{N_{\text{类型}}}{V_{\text{类型}}} \quad (\text{式3})$$

[0034] 式中： α ：实际施工进度修正系数， $v_{\text{构件}}$ ：构件体积值； $V_{\text{类型}}$ ：类型构件总体积值； $n_{\text{构件}}$ ：构件数量； $N_{\text{类型}}$ ：类型构件总数量；

[0035] (4)根据计划施工进度与实际施工进度，实时计算延迟时间：

$$[0036] \quad \Delta T = (P_{\text{实际}} * \alpha - P_{\text{计划}}) * (T_2 - T_1) \quad (\text{式4})$$

[0037] 式中： ΔT ：施工进度延迟时间，其余符号同前。

[0038] 可选地，在所述步骤S6中，利用桥梁数字孪生多维模型进行施工全过程的进度精细化管控，具体包括：施工进度计划仿真与优化、实际施工进度可视化、施工进度精细化管控与预警。

[0039] 进一步地，施工进度计划仿真与优化具体方法如下：

[0040] (1)基于初始编制的施工进度计划数据，利用标识信息关联计划数据与数字孪生几何模型，并按照行为模型规定的行为动作逻辑驱动几何模型动态仿真，实现施工进度计划数据的可视化；

[0041] (2)根据可视化仿真成果，提出进度计划的优化需求，修改施工进度计划数据，重复步骤(1)，直至得到最优的施工进度计划数据。

[0042] 其中，实际施工进度可视化具体方法如下：

[0043] (1)在施工过程中，通过人工填报、视频监控等方式，获取各构件对象施工的“实际开始时间”、“实际结束时间”数据；

[0044] (2)根据标识信息关联实际施工进度数据与几何模型，并按行为模型规定的颜色渲染、几何模型有无等对实际施工进度进行可视化展示。

[0045] 进一步地，施工进度精细化管控与预警具体方法如下：

[0046] (1)在施工过程中，通过人工填报、视频监控等方式，获取各构件对象的施工状态包括正在施工中、完成施工、未施工，根据规则模型中的计算方法，计算延迟时间 ΔT ，当 $\Delta T > 0$ 时为施工延迟，当 $\Delta T < 0$ 时为施工提前。

[0047] (2)当 ΔT 大于施工延迟阈值时，发出施工进度预警。

[0048] 由上，步骤S1中，兼顾了桥梁实际物理实体组成与施工进度精细化管控需求，建立桥梁数字孪生模型的基本架构。围绕着物理实体这一核心，按照设施、子设施及构件三个层次对桥梁结构进行逐层拆解，将构件对象作为建模基本单元，降低了数字孪生建模的复杂度；将数字孪生模型建模的应用场景限定为施工进度精细化管控，避免了数字孪生技术广泛外延带来的技术难度，确保方法易用性；

[0049] 步骤S2中，充分利用了目前BIM技术在几何造型方面的丰硕成果，实现构件对象在几何方面的高精度建模，仅仅为几何模型添加唯一、可读的标识信息，能保证在几何模型可被识别的基础上，大幅降低目前因数据传递造成的信息丢失概率，确保其作为数字孪生信息载体的稳定性；此外，借助空间位置及桥梁设施物理实体的分解结构，实现了构件对象的多层次组织，能进一步形成子设施、设施层级的几何模型，实现了几何模型多层次弹性表达，满足数字孪生模型多场景应用。

[0050] 步骤S3中，建立数字孪生物理模型，包括语义编码、WBS编码及物理性质三方面信息，在几何模型的基础上表达物理实体在物理功能、施工工序工法及基本物理指标方面的

特征,补充完善了数字孪生后续维度建模及应用过程中所需的数据,本方法所提物理模型的三方面信息也可进一步根据编码映射等常规方法,扩充得到BIM、施工建管系统等信息,方法具有普适性。

[0051] 步骤S4中,建立数字孪生行为模型,包括施工进度计划、动作行为等信息,是对物理实体在现实物理世界中运行逻辑的表达。目前桥梁施工进度计划编制受限于实际施工过程中多因素的影响,因此进度计划多以分部或分项工程维度进行编制,较少涉及对单一构件定义其计划起止时间,本方法根据构件分类,首先对某一类对象进行施工进度计划起止时间的定义,然后根据物理模型中的类型数量及WBS携带的工艺工法信息,算得每个构件的施工进度起止时间,发明所提方法符合目前施工进度计划的编制习惯;构件对象中的动作行为规定也让后续的仿真模拟更符合物理实体对象的客观运行规律。

[0052] 步骤S5中,建立数字孪生规则模型,是对前述数字孪生多维模型的综合应用,通过对物理实体对象的高精度数字映射,规则模型可实现业务分析及预测。所提方法充分考虑了目前桥梁工程的实际施工顺序与计划施工顺序存在较大差异的现状背景,为提高施工进度管控精细化程度,以实际物理实体对象为核心,基于数字孪生多维模型,设计基于“时间”与“构件数”两种维度数据的实际施工延迟天数算法,算法所需数据完全利用现有进度管理模式产生,未因技术应用而增加额外工作负担。具体的,施工进度计划采用时间倒排法编制,利用时间维度数据计算,作为进度管控的基准值;实际施工进度数据来源于施工过程,基于数字孪生技术多源数据采集、实时传输与解析技术方案,可快速获取物理实体对象实际施工状态,利用构件数维度数据计算实际施工进度,作为进度管控的实际值,对比实际值与基准值算得延迟数据;进一步结合类型划分的细度,提出实际施工进度修正算法,确保当即使采用较为粗略的类型划分时,也能够得到相对准确的进度延迟数据,该方法避免了采用单一时间或构件数维度数据计算时,带来的结果不准确及改变目前工作方式而增加额外负担等缺点,为数字孪生技术在施工进度精细化管控的应用提供了切实可行的解决方案。

[0053] 步骤S6中,首次提出了基于数字孪生技术的几何、物理、行为、规则多维模型融合的桥梁施工进度精细化管控方法,涵盖了施工进度管理全过程,具体包括施工进度计划仿真与优化、实际施工进度可视化、施工进度精细化管控与预警。其中,在施工进度计划编制过程中,通过数字孪生多维模型的应用,可实现构件级的施工进度计划的快速可视化,在三维虚拟场景中优化施工进度计划;实际施工过程中,通过人工填报或视频监控等方式,采集得到实际施工状态,构建了与实际施工场景高度一致的虚拟场景;进一步,通过规则模型创建,计算施工进度延迟天数,当延迟超过阈值时,发出预警,利用数字孪生分析、预测能力服务桥梁施工过程中的精细化管控。

[0054] 与现有技术相比,本发明具有如下有益效果:

[0055] (1) 与目前的BIM技术相比,数字孪生多维模型创建的架构实现了桥梁施工进度冗余数据的有效解耦,提高了物理实体对象数字化表达的深度与标准化程度。首先从几何、物理、行为及规则四个维度进行建模,是对信息按类型进行解耦与维度固化,相比于BIM技术,不仅增加了模型中信息的丰富程度,同时数字孪生多维模型更加强调对算法模型的建立,也提高了数据的应用深度与效率;其次将几何模型与其他模型分开处理,避免重复几何建模,不仅能够高效应对多业务场景下数据频繁变动的特点,而且鉴于多维模型均以物理实体为核心,也支持根据不同业务需要来灵活选择并耦合各维度模型。

[0056] (2) 基于桥梁设施的组成关系建立了客观的物理实体对象分解结构,解决了目前由于工程分解结构不一致而造成的全生命周期数据流转不畅,信息丢失、模型复用率低等问题。数字孪生技术是以客观存在的物理实体对象为核心,并能够利用多维度模型承载全周期建设中的工序、工法等非物理实体对象的数字信息,大大降低了目前的建模难度;统一的分解结构还实现以构件为基本单元,对子设施、设施的多层级弹性组装建模。

[0057] (3) 采用数字孪生技术的同时,充分考虑了目前桥梁施工进度管理工作方式,借助于数字孪生多维度模型的技术优势弥补目前工作方式中数据利用率低的问题,切实提高现有工作效率及数据价值。数字孪生多维度建模过程中强调算法建模,支持通过本维度数据衍生计算其他维度的信息,如利用几何模型计算得到物理模型中的体积数据,利用物理模型计算得到构件级进度计划起止时间数据等。

[0058] (4) 本方法创新性地利用施工中的“时间”与“构件数”两个不同维度计算施工进度延迟数据,并建立数字孪生规则模型,定量评估实际施工进度与施工进度计划间的差距。与现有技术相比,避免单一采用“时间”或“构件数”计算带来的计算不准或与目前工作模式不符的问题;进一步利用数字孪生物理模型的性质数据(体积),提出施工进度修正算法,确保即使采用较为粗略的类型划分粒度时,也能够得到相对准确的进度延迟数据,提高了桥梁施工进度精细化管控数字孪生规则模型的准确性与适用性。

附图说明

[0059] 此处所说明的附图用来提供对本申请的进一步理解,构成本申请的一部分,本申请的示意性实施例及其说明用于解释本申请,并不构成对本申请的不当限定。在附图中:

[0060] 图1为数字孪生几何模型示意图;

[0061] 图2为构件模型施工行为动作示意图;

[0062] 图3为构件颜色渲染行为动作示意图;

[0063] 图4为实际施工进度精细化管控示意图;

[0064] 图5为施工进度计划仿真示意图;

[0065] 图6为施工进度基本数据统计分析示意图;

[0066] 图7为实际施工进度数据采集示意图;

[0067] 图8为本发明方法流程框图。

具体实施方式

[0068] 为了便于本领域普通技术人员理解和实施本发明,下面结合附图及实施示例对本发明作进一步的详细描述,应当理解,此处所描述的实施例仅用于说明和解释本发明,并不用于限定本发明。

[0069] 一种基于数字孪生多维模型的桥梁施工进度精细化管控方法,如图8所示,包括以下步骤:

[0070] S1、围绕桥梁设施物理实体对象,根据桥梁施工的顺序及进度管控需要,分桥梁设施、子设施及构件三个层级对桥梁的组成进行划分,建立桥梁设施物理实体分解结构,如表1所示,得到构件层级的物理实体对象,并作为后续数字孪生多维度模型创建的基础。

[0071] 表1桥梁设施物理实体分解结构

设施	子设施	构件	备注
[0072] 桥梁结构	桩基	桩基	
	下部结构	承台	
		底系梁	
		墩柱	
		中系梁	
		肋板	
		墩帽	
		盖梁	
		台帽	
		背墙	
		耳墙	
		挡块	
		支座垫石	
		支座	
		箱梁 (安装)	内边梁
	中梁		含端横梁
	外边梁		含端横梁
	跨中横梁		
	湿接缝		
	现浇箱梁	现浇箱梁	
	桥面系	桥面连续	
		桥面铺装	含桥面凿毛、防水层
		伸缩缝	
	护栏与搭板	内侧护栏	
		外侧护栏	
		搭板	
	转体结构	防护桩	
		桩基	
		墩柱	
		承台	
挡块			
盖梁			
支座垫石			
[0073]		现浇节段	
		转体安装	
		转体	
		支座	
		伸缩缝	
		桥面铺装	含桥面凿毛、防水层

[0074] S2、利用常见如AutoCAD、Revit、Tekla等软件对构件级对象创建桥梁数字孪生几何模型,如图1所示;添加几何模型标识信息,该标识信息是唯一、计算机可读;根据构件对象的空间位置及桥梁物理实体分解结构,利用标识信息将构件-子设施-设施三级的关联关系赋予几何模型,如表2所示,例如XLZTDQ_LEFT_DOT_D01_ZJ,可解析为桥梁设施(XLZTDQ)、空间位置(LEFT)、子设施(DOT)、构件对象(D01_ZJ)。

[0075] 表2几何模型标识信息与层级关系

子设施	构件	标识信息	层级关系解析示意
桩基	桩基	XLZTDQ_LEFT_DOT_D01_ZJ	桥梁设施-左幅-0号台-第1根桩基
桩基	桩基	XLZTDQ_LEFT_DOT_D02_ZJ	桥梁设施-左幅-0号台-第2根桩基
...

下部构造	墩柱	XLZTDQ_LEFT_D16DZ_D1_DZ	桥梁设施-左幅-16号墩-第1根墩柱
下部构造	墩柱	XLZTDQ_LEFT_D17DZ_D2_DZ	桥梁设施-左幅-17号墩-第2根墩柱
...
箱梁安装	内边梁	XLZTDQ_LEFT_D1K0_D1XL_NBL	桥梁设施-左幅-第1孔-第1个箱梁-内边梁
箱梁安装	内边梁	XLZTDQ_LEFT_D1K0_D2XL_NBL	桥梁设施-左幅-第1孔-第2个箱梁-内边梁
...
转体结构	现浇节段	XLZTDQ_D7K0_D1JD_ZT_XJJD	桥梁设施-第7孔-第1节段-转体现浇节段
转体结构	现浇节段	XLZTDQ_D8K0_D1JD_ZT_XJJD	桥梁设施-第8孔-第1节段-转体现浇节段

[0077] S3、建立数字孪生物理模型,包括语义编码、WBS编码及物理性质三方面信息,如表3所示。

[0078] 表3构件物理模型数据一览表

子设施	构件	WBS 编码	语义编码	构件体积值
桩基	桩基	400-75-01-01	ZJ	-
下部结构	承台	400-75-01-02	CT	361.3
	底系梁		DXL	661.0
	墩柱	400-75-02-01	DZ	4580.9
	中系梁	400-75-02-02	ZXL	398.6
	肋板	400-75-02-03	LB	157.6
	墩帽	400-75-02-04	DM	174.8

[0079]

[0080]

	盖梁		GL	2040.8
	台帽		TM	36.6
	背墙	400-75-02-05	BQ	36.6
	耳墙		EQ	36.6
	挡块	400-75-02-06	DK	106.1
	支座垫石	400-75-02-07	ZZDS	52.3
	支座	400-75-04-05	ZZ	23.3
箱梁(安装)	内边梁	400-75-03-01	NBL	2139.2
	中梁		400-75-06-04	ZL
	外边梁		WBL	2139.2
	跨中横梁	400-75-03-05	KZHL	85.2
	湿接缝	400-75-03-06	SJF	781.1
现浇箱梁	现浇箱梁	400-75-03-03	XJXL	-
桥面系	桥面连续	400-75-04-01	XJC	2082.0
	桥面铺装	400-75-04-02	QMPZ	3652.0
		400-75-04-03		
400-75-04-04				
伸缩缝	400-75-04-08	SSF	60.0	
护栏与搭板	内侧护栏	400-75-04-06	NCHL	1156.6
	外侧护栏		WCHL	1156.6
	搭板	400-75-04-07	DB	272.3
转体结构	防护桩	400-75-02-08	ZT_FHZ	3307.2
	桩基		ZT_ZJ	1468.5
	墩柱		ZT_DZ	743.2
	承台		ZT_CT	686.6
	挡块		ZT_DK	200.0
	盖梁		ZT_GL	200.0
	支座垫石		ZT_ZZDS	75.4
	现浇节段	400-75-03-08	ZT_XJJD	2.6
	转体安装		ZT_ZTAZ	5.0
	转体		ZT_ZT	4673.1
支座	400-75-04-05	ZT_ZZ	100.0	

[0081] S4、建立数字孪生行为模型,包括施工进度计划、动作行为等方面的信息,表达物理实体在现实物理世界中的运行逻辑。建立每个构件对象的施工“计划开始时间”及“计划结束时间”信息,如表4所示;根据现实世界的行为逻辑,为桥梁墩柱、桩基等上下浇筑类的构件模型规定行为动作为“上下生长”,如图2所示,为桥梁预制梁等安装类的构件模型规定行为动作为“吊装移动”,为桥梁箱梁等沿着路线走向浇筑的构件模型规定行为动作为“沿线生长”,根据施工进度管理业务需求,为构件施工进度滞后的构件规定行为动作为颜色渲染为红色,如图3所示。

[0082] 表4构件对象行为模型数据一览表

标识信息	WBS 编码	计划 开始时间	计划 结束时间	动作行为	类型	构件
XLZTDQ_LEFT_D0T_D01_ZJ	400-75-01-01-01	2019/2/1	2019/2/7	上下生长	桩基	桩基
XLZTDQ_LEFT_D0T_D02_ZJ	400-75-01-01-01	2019/2/2	2019/2/8	上下生长	桩基	桩基
...
XLZTDQ_LEFT_D16DZ_D1_DZ	400-75-02-01-50	2019/09/19	2019/09/26	上下生长	下部构造	墩柱
XLZTDQ_LEFT_D17DZ_D2_DZ	400-75-02-01-51	2019/09/19	2019/09/26	上下生长	下部构造	墩柱
...
XLZTDQ_LEFT_D1KO_D1XL_N BL	400-75-03-01-01	2019/11/1	2019/11/15	吊装移动	箱梁安装	内边梁
XLZTDQ_LEFT_D1KO_D2XL_N BL	400-75-03-01-02	2019/11/1	2019/11/15	吊装移动	箱梁安装	内边梁
...
XLZTDQ_D7KO_D1JD_ZT_XJJD	400-75-03-08-01	2019/12/15	2020/2/19	沿线生长	转体结构	现浇节段
XLZTDQ_D8KO_D1JD_ZT_XJJD	400-75-03-07-01	2019/12/15	2020/2/19	沿线生长	转体结构	现浇节段

[0083] S5、建立数字孪生规则模型，考虑目前桥梁工程的实际施工顺序与计划施工顺序存在较大差异的背景条件，为提高施工进度管控精细化程度，根据数字孪生技术特点，以实际物理构件对象为核心，设计基于“时间”与“构件数”两种维度数据的实际施工延迟天数算法，并对延迟天数进行修正。

[0084] (1) 根据优化后的施工进度计划，读取当前时间，代入进度计划计算公式中，算得当前施工进度计划进度百分比；

[0085] (2) 根据实际施工进度数据来源，解析各构件对象的施工状态，当为施工中、完成施工时，计为已完成构件数，代入实际施工进度计算公式中，算得当前实际施工进度百分比；

[0086] (3) 解析物理模型中构件体积值，对各类型构件进行实际施工进度修正系数计算，将原类型构件数量进行修正得到调整后构件数，如表5所示，修正当前实际施工进度百分比。

[0087] 表5实际施工进度修正系数表

类型	构件	原构件数量	构件体积值	调整系数 α	调整后构件数
桩基	桩基	191	-	1.0000	191.00
下部构造	承台	4	361.3	15.3419	61.37
	肋板	11	157.6	2.4335	26.77

[0090]		台帽	4	36.6	1.5520	6.21
		耳墙	4	36.6	1.5520	6.21
		背墙	4	36.6	1.5520	6.21
		挡块	58	106.1	0.3107	18.02
		底系梁	76	661.0	1.4773	112.27
		墩柱	169	4580.9	4.6040	778.08
		中系梁	48	398.6	1.4105	67.70
		盖梁	54	2040.8	6.4192	346.63
		墩帽	6	174.8	4.9484	29.69
		支座垫石	517	52.3	0.0172	8.88
		支座	517	23.3	0.0077	3.96
	箱梁(安装)	内边梁	56	2139.2	1.8169	101.74
		中梁	113	4316.6	1.8169	205.31
		外边梁	56	2139.2	1.8169	101.74
		跨中横梁	56	85.2	0.0724	4.05
		湿接缝	169	781.1	0.2198	37.15
	现浇箱梁	现浇箱梁	8	-	1.0000	8.00
	桥面系	现浇层	60	2082.0	1.0541	63.24
		桥面铺装	88	3652.0	1.2606	110.93
		伸缩缝	28	60.0	0.0651	1.82
	护栏与搭板	内侧护栏	84	1156.6	0.9160	76.94
		外侧护栏	84	1156.6	0.9160	76.94
		搭板	4	272.3	4.5287	18.11
	转体结构	桩基	32	3307.2	1.2714	40.68
		防护桩	4	1468.5	4.5163	18.07
		承台	2	743.2	4.5716	9.14
		墩柱	9	686.6	0.9384	8.45
		转体安装	20	200.0	0.1230	2.46
		盖梁	2	200.0	1.2302	2.46
		挡块	2	75.4	0.4639	0.93
		支座垫石	25	2.6	0.0013	0.03
		支座	25	5.0	0.0025	0.06
		现浇节段	8	4673.1	7.1860	57.49
		转体	12	100.0	0.1025	1.23

[0091] (4) 利用某一类型修正后的实际施工进度百分比减去计划施工进度百分比,与该类型计划起终时间相乘后得到延迟天数,如图4所示。

[0092] S6、提出了基于数字孪生技术的几何、物理、行为、规则多维度模型融合的桥梁施工进度精细化管控方法,涵盖了施工进度管理的全过程,具体包括施工进度计划仿真与优化、实际施工进度可视化、施工进度精细化管控与预警。

[0093] (1) 在初始的施工进度计划中添加与几何模型一致的标记信息,解析施工进度计划数据,关联几何模型,并按照行为逻辑进行动态演示,如图5所示,根据数据可绘制施工进度横道图,根据几何与物理模型数据进行数据的分析与统计,如图6所示,实现施工进度计划仿真与优化。

[0094] (2) 根据实际施工进度数据,获取构件实际施工起止时间,关联几何模型,并按行为逻辑进行仿真,将实际施工过程利用几何模型进行记录,并实现实际施工进度数据可视化,如图7所示。

[0095] (3) 基于步骤S5提出的计算方法,在几何、物理及行为模型的基础上,实现实际施工进度的计算,如图4所示,利用延迟或提前天数,实现施工进度的精细化管控与预警。

[0096] 本发明所述方法,在某高速公路上跨铁路特大桥的施工进度管控中进行了应用,根据特大桥的组成内容及进度管控具体需求,首先对桥梁进行结构的分解,分别得到桥梁

设施-子设施-构件对象,并进一步按数字孪生多维建模架构,分别建立了全桥高精度几何模型、物理模型、行为模型及规则模型,实现对该桥物理实体的全方位表达;其次在建模过程中虽然从多维度分别进行建模,但通过算法建模建立了多维数据间关系,融通数字孪生多维度模型间数据,提高数字孪生模型对多应用场景的适应能力及对物理实体对象的高保真表征;再次始终以桥梁物理实体为核心,建立了全业务过程统一的分解结构,解决了以往施工过程关于工序、工法等无建模对象而无法处理的难题,同时该分解结构也使数字孪生模型的表达更具层次性,为目前基于分部工程的施工进度数据提供了信息承载支持;最后在规则模型中建立进度延迟算法,充分利用几何、物理、行为模型中的信息数据,利用各维度模型中的算法补充应用过程中所需的数据,整个方法未因新技术的应用而对现有工作方式增加额外的数据处理或补充工作,切实提高了目前的工作效率;在该项目实施过程中,实现了对转体施工进度滞后的预警,降低了建设方因进度管理业务而需实地踏勘的频率,降低管理难度提高了管理效能。

[0097] 应当理解的是,上述针对较佳实施例的描述较为详细,并不能因此而认为是对本发明专利保护范围的限制,本领域的普通技术人员在本发明的启示下,在不脱离本发明权利要求所保护的范围情况下,还可以做出替换或变形,均落入本发明的保护范围之内,本发明的请求保护范围应以所附权利要求为准。

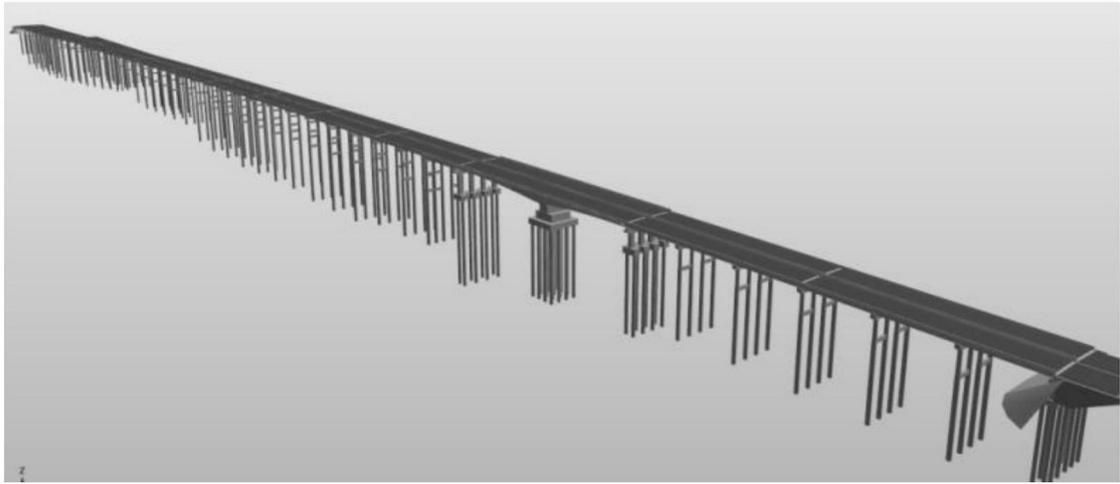


图1



图2

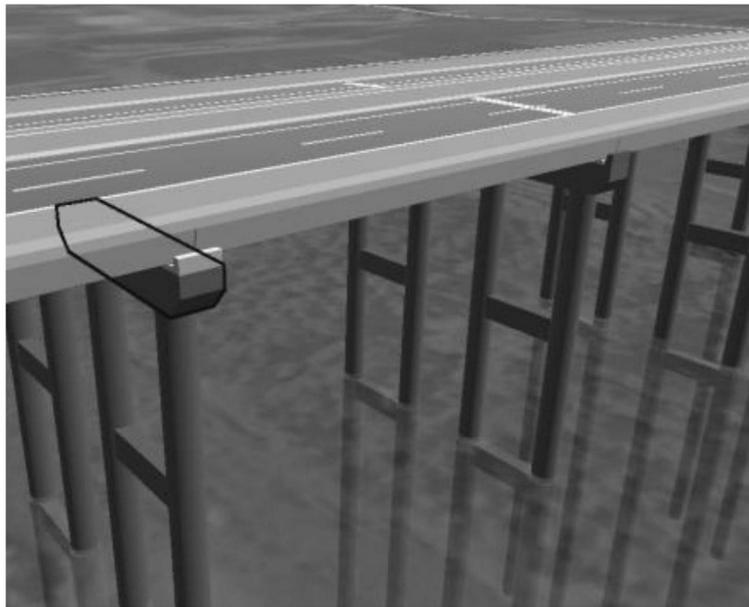


图3



图4

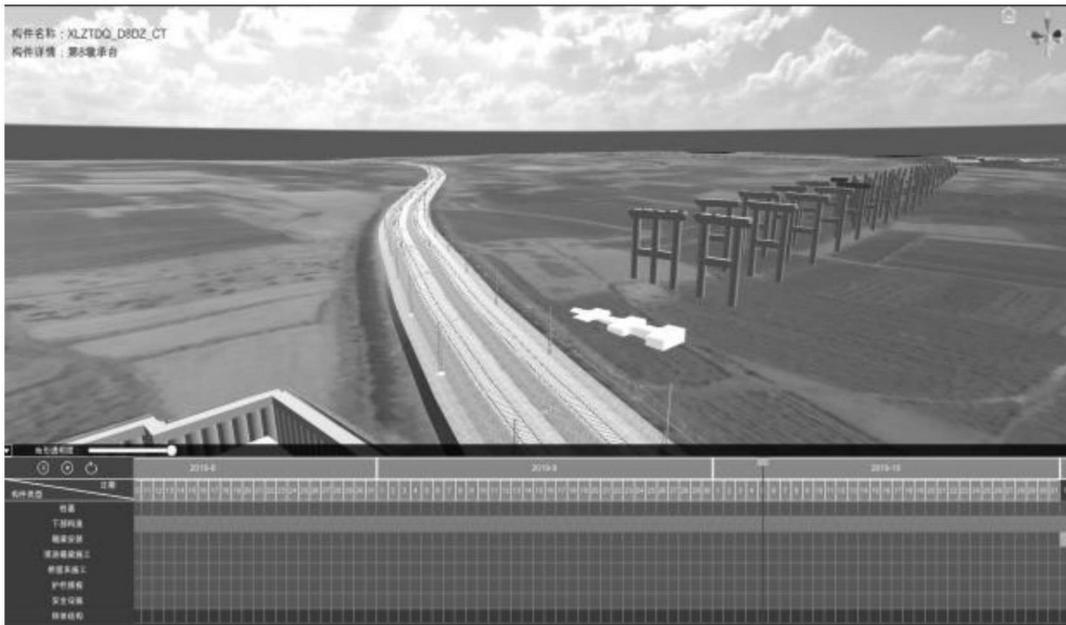


图5

构件类型	构件总数 (个)	计划时长 (天)
桩基	191	168
下部构造	1472	469
箱梁安装	450	252
现浇箱梁施工	8	124
桥面系施工	166	140
护栏搭板	176	131
安全设施	2	7
转体结构	130	497

图6



图7

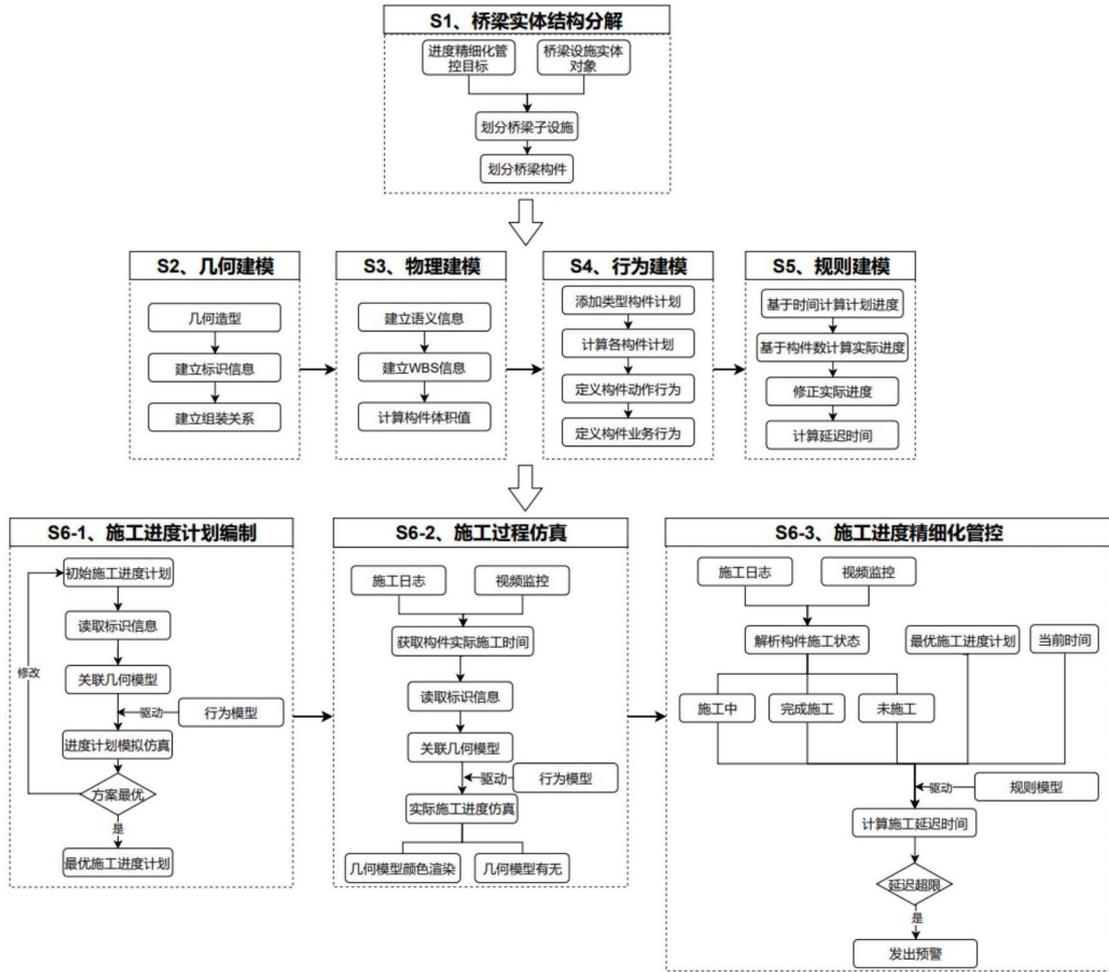


图8