

# 三维数字建筑的自动生成和应用技术研究

杨若瑜, 蔡士杰

(南京大学 软件新技术国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

**摘要:**提出了一种能够有效提高建筑业智能化、自动化的系统性新方法. 首先实现了二维建筑结构图的自动识别和理解, 并由此生成包含完整几何和语义信息的三维数字建筑模型; 然后在该模型的支撑下实现了钢筋、模板和混凝土合一的建筑算量、可视化的三维钢筋翻样、基于网络计划图自动生成的施工进度管理等3种智能型的应用功能. 对建筑图的识别和三维数字模型的生成方法, 以及3个应用的设计实现及其与现有做法的比较等做了完整介绍.

**关键词:**建筑图识别; 三维数字建筑; 建筑算量; 钢筋翻样; 施工管理

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2008)01-0001-08

## A system for automatic generation of 3D building models with quantitative, reinforced lofting, and construction management applications

YANG Ruo-yu, CAI Shi-jie

(State Key Laboratory of Software Novel Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** This paper proposes a systematic method for improving the intelligence and automation of architectural software. First, this method implements automatic interpretation of 2D construction drawings. Based on the analysis, a 3D-digital model with both geometrical and syntactic information is generated. Then, using this model, the following three automatic applications are run: quantity survey, 3D steel reinforced lofting and visualization, and network plan generation for construction progress management. This paper gives a thorough introduction to effective design and implementation of the above methods, and compares them with existing workflow methods.

**Keywords:** construction drawing recognition; 3D digital building; quantity survey; reinforced lofting; construction management

当前的建筑业正从过往的简单匠工的经验管理流程向运用数字和信息技术的集约型现代管理模式转变. 虽然计算机在建筑领域已经得到了广泛的应用, 但主要集中在辅助设计和绘图方面, \*.DWG文件因此成为建筑图事实上的标准电子格式. 然而, 建筑业中多道工序(审图、算量、钢筋翻样、建筑施工管理等)和设计之间相互脱节, 这些工序中的专业人员只能分别对同一套设计图进行人工的阅读理解, 获取各自所需的信息, 多次的重复读图, 造成了大量的人力、财力和时间的浪费. 此外, 基于人工读图的工作方式还有其他的缺陷. 例如, 建筑施工管理方面, 由于分工细致、施工人数多、以及分散性、移动性等特点, 基于人工读图进行成本进度计划的手工编制和管理, 不但工作强度大, 而且精确性、及时性都无法满足实时统计分析等需求, 非常不利于现代化管理手段的实施.

因此, 文中提出, 应针对“图纸蕴含的设计信息”进行智能化抽取<sup>[1-3]</sup>, 通过分析计算, 构建信息完整的三维数字建筑模型, 供各工序循环利用和修改. 下文将介绍以建筑结构电子图为基础, 通过图形识别重建三维数字建筑模型的方法, 以及基于该模型进行自动的钢筋用量计算、钢筋翻样计算和施工进度管理等方法的设计和实验. 实验证明该系列方法能

收稿日期: 2007-08-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60703080).

通讯作者: 杨若瑜. E-mail: yangry@graphics.nju.edu.cn.

够大大提高相关工作的效率和水平。

## 1 思路

目前,建筑设计阶段的突出特点就是以二维的平面图为主,以一些局部结构的详细图为辅,来表示完整的建筑物三维信息。考虑到如果要从三维建筑设计入手来整合建筑业各工序,对整个行业的改造将十分巨大。因此,文中的核心思路是维持现有二维CAD设计习惯,利用计算机理解分散的二维图形,自动重建包含多维数字信息的三维建筑物,提供给设计后各工序使用。设计原则如下:

1) 整体延续性:从设计绘图开始,每件工作只需做1次,由计算机抽取、管理、共享各种图形、规范等信息,各后续阶段工作或反馈流程中即可按需自动取用,避免重复读图、交流等浪费;

2) 智能性:将原来依靠技术人员掌握、传递、交流的信息,尽可能通过图形的自动识别理解等方法来获取,实现计算机自动完成专业工作或指导操作人员完成工作的智能化目标;

3) 实用性:在设计过程中符合相关的国家标准和行业标准,设计的功能应符合原人工处理要求;

4) 先进性:智能化功能的设计应考虑易于改进和扩充以符合业界的发展趋势。

系统总流程如图1所示。

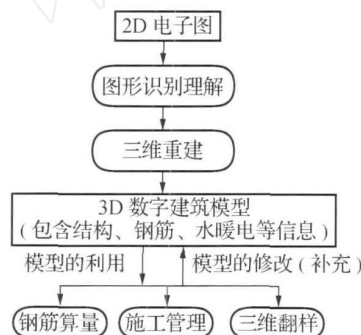


图1 三维数字建筑的生成和应用流程

Fig. 1 Flowchart of generation and application of 3D-digital-building

## 2 三维数字建筑模型的自动生成

二维的建筑设计图表示具有如下特点:分散性、层次性、多态性、示意性、缺省性、模糊性、隐含性。例如,一个建筑物所有构件的三维信息分散在可能多达数十、数百张不同的图中,很多信息通过示意图形、描述性文字及约定性规则相结合来隐含表示,有些数据必须综合周围的环境图文信息推理才能得到等等。因此,文中以人工读图的思维方式为依据,提

出了按序、定向、整体的结构图识别和三维数字建筑重建方法<sup>[4]</sup>。

### 2.1 图形识别

考虑到建筑结构的支撑性等特点,按轴网-柱(墙)-梁-板-表格的顺序进行识别,并遵循“有的放矢”的思路,按制图规则进行预搜索得到小区域后进行每个对象图形的识别。

#### 2.1.1 基于特征引导的轴网识别

1) 通过线段特征关系识别轴线和尺寸线。如轴线=轴线编号+相接线段|圆弧段,轴线编号=圆+圆内字符串,字符串=‘A~Z’|‘a~z’+{‘0~9’|‘a~z’},等等;

2) 根据连通性、方向一致性和近距离等要求,将轴线和尺寸线组成轴线尺寸线组;

3) 将各轴线尺寸线组中的轴线组成坐标系。

#### 2.1.2 基于结构规则的柱识别

1) 通过预定义字符串构成规则匹配来识别柱名、尺寸标注、钢筋标注等;

2) 通过封闭性和环境图文分析来识别柱截面,并按距离聚合匹配柱名和柱截面;

3) 识别柱截面的钢筋。按距离聚合和字符串语义分析来匹配钢筋和钢筋标注。

#### 2.1.3 基于支撑规则的梁识别

一根梁由多跨组成,跨必须有支撑,利用这一物理支撑关联,由梁名引导,先识别有2个以上的柱支撑的梁,再识别由一根柱和已识别梁支撑的梁,最后识别仅由已识别梁支撑的梁,并参照集中标注中梁的宽度描述验证平行线距离。

通过字符串构成规则识别梁钢筋标注后,按照距离聚合原则判定各标注的跨归属,最后通过命名规则自动归纳出每一跨所包含的所有钢筋信息。

#### 2.1.4 基于分割规则的板识别

楼板由梁(及墙)包围而成。在已识别柱、墙、梁之后,通过最小闭合区域的自动分割定义每一块楼板。楼板的厚度、标高等通过分析文字标注来获得。而楼板的底筋和支座筋尺寸及其分布范围则通过钢筋图形和钢筋尺寸标注共同分析和推理获得。

#### 2.1.5 基于表格项目的二维表格分析

建筑工程图中的二维表格按主项目和次项目的交叉来查阅有关数据。有3类情况:1)简单文字表:对主/次项目的识别通过关键词匹配来实现;2)复杂文字表:对项目嵌套、项目耦合或项目合并等情况,先自动复制、删除表格线,将其转换为简单表;3)图文表:通过关键词匹配区分项目,在单个表格项内再应用图形识别功能。

2.2 坐标整合和三维数字建筑模型的建立

对一个建筑工程有关的各种平面图等进行自动识别之后,进行坐标整合和模型重建.

由于多种原因,例如绘图人员只改动尺寸文字而不修正对象位置,各张图的轴网所对应的物理坐标系可能不均匀.因此在每张图的二维轴网和构件都分别识别和定位完成之后,还必须通过以下步骤来获得一个统一、均匀的三维逻辑轴网(坐标系):

- 1) 将每一二维物理轴网均匀化,即尺寸数字与标注距离全部成比例;
- 2) 将每一个均匀化后的轴网结合从表格中识别得到的标高信息,逐一安置到三维轴网中;
- 3) 在三维逻辑坐标系中对每一构件通过识别得到拉伸面和拉伸向量,并从每张图的物理轴网坐标变换到三维逻辑坐标系,则所有构件的拉伸建模完成后使用实体“并”操作就可完成整个建筑物的三维重建.例如,以柱的水平截面轮廓为拉伸面(扫成区域),柱垂直方向起、止位置间的矢量为拉伸向量(扫成路径),就完成了柱的实体建模.

基于以上方法,文中设计实现了建筑结构图识别系统 V HRecQS.图 2 为该系统进行柱三维还原的流程.图 3 和图 4 示意了该系统识别一个梁平面图的结果和相应的 2 层建筑的部分三维还原结果.

V HRecQS 系统最终输出一个数据库存储的三维数字建筑模型(3D digital building model, 3DDBM).该模型所包含的信息主要有:

- 1) 全局逻辑坐标系,其中  $XOY$  面即为楼层平面,  $Z$  方向为建筑物高度方向.参见图 4 中标示;
- 2) 建筑工程属性信息,如抗震级别,工程全局参数等(Project Info);
- 3) 钢筋位置、尺寸、种类、规格(Steel Info);
- 4) 构件三维几何轮廓(Component Info);
- 5) 每一构件和相邻构件的几何关系信息,如穿过、相交、支撑等(Neighbor Info).

3 基于 3DDBM 的自动算量

建筑算量(钢筋、混凝土、模板的用量统计)的依据是概预算规则.现有的预算软件都需要通过重新绘制图形或文字输入来提供原始数据,然后自动应用概预算规则来计算,其本质是一个“高级计算器”.而且,钢筋量和混凝土/模板量的计算往往还需要分别输入 2 套数据.文中提出,所有原始数据均可以自动从 3DDBM 中提取,经与概预算规则的匹配分析和应用,即可自动完成算量<sup>[5-6]</sup>.

首先,由需求分析人员与概预算的相关专家讨

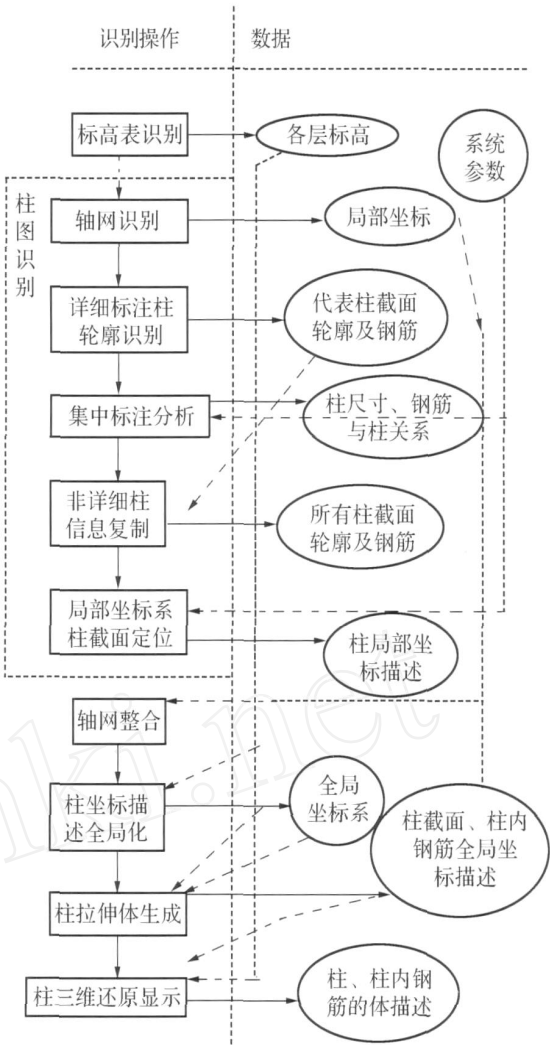


图 2 柱三维还原的识别处理过程  
Fig. 2 3D reconstruction of columns based on the recognition

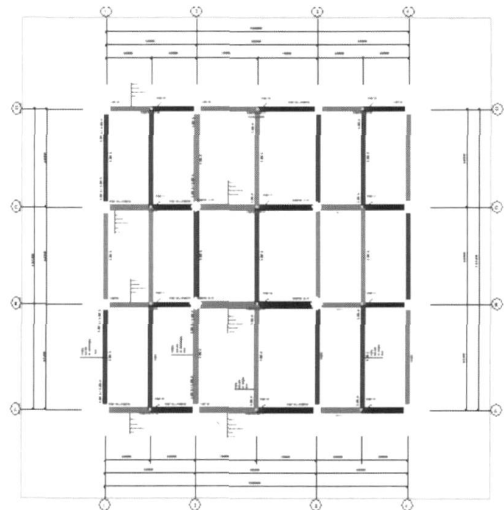


图 3 一张梁平面图的识别结果(轴网和柱、梁)  
Fig. 3 Recognition result of one beam plan drawing (grid, columns and beams)

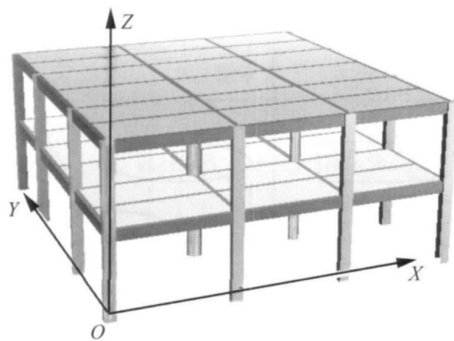


图4 与图3相应,两层建筑物的部分三维还原结果

Fig. 4 Partial 3D reconstruction result corresponding to Fig. 3

论和协商确定所有详细计算规则,并形成预定义规则库(数据库形式存储).如计算“顶层柱纵筋长度”的规则由  $H_n + 0.5 \times l_{ae}$  ( $H_n$  表示楼层高、 $l_{ae}$  表示锚固长度)表达.

然后,按如下步骤即可完成算量:

- 1) 从 ComponentInfo 中取出构件 A 的个体特征;
- 2) 根据 NeighborInfo 判断 A 构件所处的环境特征.例如与 A 相交的构件类型、几何特征、数量和搭接位置等;
- 3) 将环境特征和规则库中的环境条件相匹配,选取相应的计算规则集;
- 4) 取出 SteelInfo 中属于 A 的钢筋信息,取出 ProjectInfo 中所有统一参数信息,合并 A 的个体特征信息,代入计算规则的表达式进行计算.

文中在 VHRecQS 系统内实现了基于 3DDBM 的自动算量功能,还提供了用户可定制的公式库和适宜的报表、查询方式等.图 5 给出了该系统的一个计算结果界面.

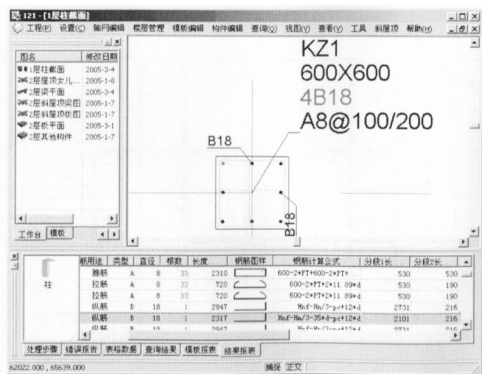


图5 柱钢筋计算结果反查界面

Fig. 5 User interface for result checking of column steel

## 4 基于 3DDBM 的钢筋自动翻样

现有的翻样软件都在参数输入和基于人工输入

的公式进行数学计算的层面,主要缺陷有:

- 1) 信息提取的智能性和延续性差:在工程量计算软件里已有的图信息,在钢筋翻样软件里不能继续使用,而需要重新输入大量重复数据;
- 2) 钢筋翻样的成果不能进行三维可视化;
- 3) 不能在三维空间中自动进行钢筋碰撞检测.

因此,文中提出,基于 3DDBM 提供的信息,可以做到全自动三维钢筋翻样.

### 4.1 基于全局坐标系的三维钢筋主体生成

3DDBM 中的全局逻辑坐标系数据为翻样提供了惟一确定的三维空间,以梁为例,步骤如下:

- 1) 从 ComponentInfo 中取出梁 A 的截面几何信息;
- 2) 从 SteelInfo 中取出 A 的钢筋信息(钢筋扫成区域为圆形,直径与钢筋直径成正比);
- 3) 根据截面尺寸、混凝土保护层厚度(从 ProjectInfo 中获得)、钢筋直径、钢筋根数等,自动生成索要钢筋,并能够计算出每一钢筋在 A 的截面局部坐标系中的精确位置;

由于梁截面为竖直面(通常垂直于 XOY 平面,有时有倾斜),如图 6 所示.需首先考虑在全局坐标系下定位梁的基准线,才能确定梁钢筋的扫成方向.梁基准线在 XOY 平面上的投影恰是梁轮廓平行线对的中线,在梁截面中为截面中点,在三维空间中为水平贯穿梁体的中心线.

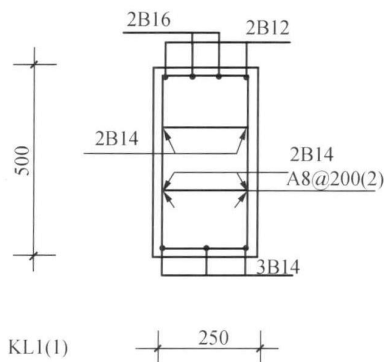


图6 梁截面和钢筋

Fig. 6 Beam section and steel

- 4) 梁基准线直接由 ComponentInfo 中梁的三维几何数据计算获得;

- 5) 在截面局部坐标系下,计算各钢筋的始末点与基准线起止端点的偏差,得到钢筋主体线;

- 6) 以主体线始点为扫成区域,以主体线方向为扫成方向,扫成路径长度由 ProjectInfo 中的跨度值、锚固长度等控制,则得到三维梁钢筋主体.

4.2 基于形体和构件关系的钢筋搭接和锚固分析

不同钢筋之间存在着上下或左右的搭接和锚固关系,如图 7 所示. 根据工程预算知识,拟定若干组自动判断搭接和锚固情况的分析原则,例如:

- 1) 柱、梁钢筋先分别按投影位置进行就近匹配;
- 2) 匹配钢筋之间的投影距离与楼板厚比值大于 1/6 的,归为钢筋在混凝土中的锚固;
- 3) 对于匹配的钢筋,在楼板中连接其下部钢筋主体的末点和上部钢筋主体的始点;
- 4) 钢筋末端在构件混凝土中锚固,且通过 ProjectInfo 中相关参数要求和构件几何尺寸,计算锚固钢筋长度,保证其在混凝土中不伸出构件外,且足够确保建筑的坚固性.

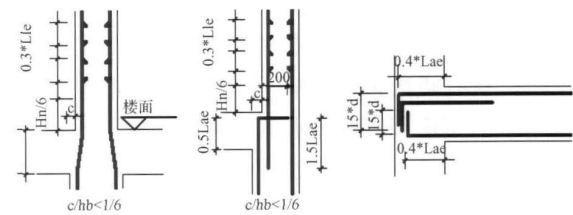


图 7 搭接和锚固的几种情况

Fig. 7 Examples of lap and anchorage

所有原则若涉及计算所需的原始数据,均可从 3DDBM 中或已计算出的三维钢筋主体信息中获得. 包括钢筋距离、钢筋上下位置关系、相邻楼板厚度、构件尺寸等等.

最终,搭接和弯锚的三维几何体可以用和钢筋主体扫成方向同/反方向及竖直向上/下作为扫成方向,扫成路径的长度则由不同接头或锚固长度控制,由此获得三维钢筋完整信息.

4.3 三维可视化和碰撞检测

根据以上方法,可生成全局三维坐标系下的一个建筑物的完整钢筋数据. 文中也将此方法在 V HRecQS 系统内部进行了实现,并完成碰撞检测和三维钢筋可视化.

为了提高可视化效率,文中将每一钢筋扫成区域统一为相同直径的圆形,然后自动绘制出钢筋骨架图,有利于一目了然地发现钢筋设计中的明显错误. 图 8 给出系统输出的全局坐标系下 2 个柱子(竖直且由下到上有尺寸改变)和一个相交的梁的钢筋翻样的三维可视化效果. 可见变截面柱钢筋搭接、梁钢筋弯锚、梁端部筋与架立筋的搭接、梁钢筋末端锚入相交的柱中等情况.

而碰撞检测则分 3 个层次进行.

- 1) 在单个构件内部,按直径和钢筋中心位置,判断平行钢筋之间是否碰撞;

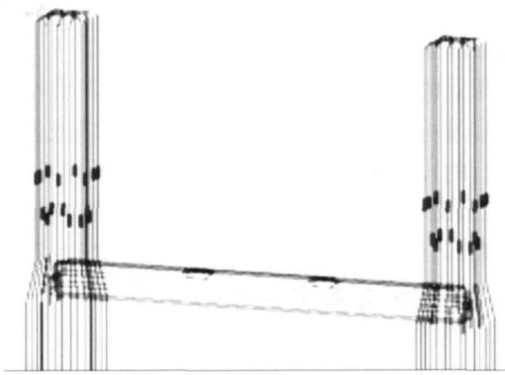


图 8 钢筋翻样总体三维外观

Fig. 8 Partial 3D visualization result of lofting

- 2) 在单个构件内部,判断搭接或弯锚的部分是否与相邻钢筋碰撞;
- 3) 在相交构件之间,按坐标划分立方体区域,然后对每个区域内的钢筋进行两两判断.

5 基于 3DDBM 的施工进度管理

施工进度管理是依据工程项目的进度要求,不断调整工作内容安排、人工分配和资源管理等,达到既符合工程要求又尽量节约成本和资源的目标.

5.1 现有管理方法

传统的管理是由项目管理人员凭经验进行施工进度编制的调整,对施工中每某一时刻的进度偏差的具体量值,往往无法准确掌握和及时控制.

也有通过网络计划图进行管理的方式. 一个工程被分解为若干项作业,作业之间存在着时间和内容等方面的相互制约或依存关系,网络计划图用图形方式表达整个工程的作业间关系,便于找出关键作业和关键路径并依此对资源进行调整和优化.

但是,由于工程规模和复杂程度越来越高以及频繁的工程变更,要求施工管理实时地作出进度计划的调整. 此时,传统的经验管理模式和手工绘制网络计划图的方式,都越来越无法满足要求.

5.2 基于 3DDBM 的网络计划图自动生成

文中提出,利用工程的初始 3DDBM,结合工程施工规律,可自动分解施工作业,并分析其先后顺序和相互链接关系,完成作业时间等参数计算,自动生成网络计划图;在工程变更后,随时通过计算机读图更新 3DDBM 中的信息,进而自动更新网络计划图,从而能够高效的完成动态、实时的项目进度等量化控制,真正体现了“四维”的施工管理模式.

5.2.1 网络计划图

网络计划图是有序有向图,由节点和箭线组成. 实箭线代表一个作业,虚箭线指明工作先后流向和

逻辑关系.在网络图上加注作业的时间参数.节点是前后作业的衔接点.

作业的逻辑关系表现为顺序施工(2 个作业必须先后进行)和平行施工(2 个作业的全部或者部分是并行的).而需要计算的时间参数主要有:1)持续时间;2)最早开始时间;3)最早完成时间;4)网络计划工期;5)最晚完成时间;6)最迟开始时间;7)作业总时差;8)作业自由时差.

5.2.2 网络计划图的自动生成

根据项目物理和功能结构进行划分,且明确各分部分项工程和工序间的约束关系,一个单位工程可以分解成几个层次(如图 9).

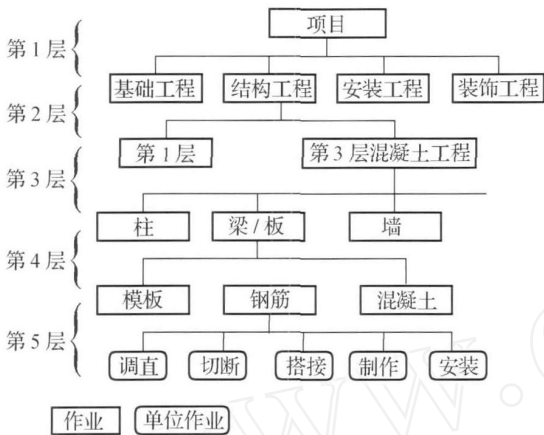


图 9 施工管理的逐层分解

Fig. 9 Decomposition of construction management

1) 逻辑约束定义

分项工程的逻辑联系是在施工过程中客观存在的制约关系,不仅有建筑物内在的组成特性,还受到资源、安全等因素影响.文中将其归纳并定义为含优先级的规则描述串记录于数据库中.

1 级约束(施工中必须满足):建筑物构件间的物理关系.建筑物从下到上分若干楼层,同一层又可以分为几个施工段等.如只有完成第 1 层的柱才能施工第 2 层的柱和第 1 层的梁、板;

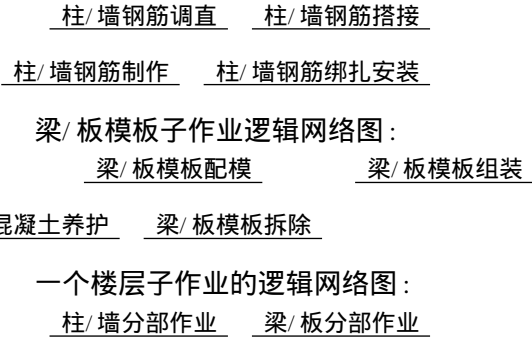
2 级约束:专业工种间的相互约束关系.包括工艺要求制约(如梁板混凝土必须达到 14 天左右才能拆除模板)、作业空间的冲突、资源使用的冲突等;

3 级约束:组织限制、路径制约等.

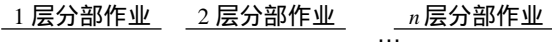
2) 子作业逻辑网络定义

每一作业由若干子作业(分部作业)按一定的逻辑顺序组成.其中的逻辑关系是由建筑物结构及施工规律所确定的.因此首先据此定义每一分项作业的逻辑网络图.例如:

柱/墙钢筋子作业逻辑网络图:



一个建筑物主体结构子作业的逻辑网络图:



3) 作业的时间计算

利用 3DDBM 中的构件规格尺寸,以及钢筋翻样中得到的钢筋数量、直径、长度、形状和绑扎部位等信息,即可得到该钢筋构件的重量、切割次数、制作工序、绑扎点数量等影响工作量的具体参数.

例如,钢筋调直子作业的时间可如下计算:

$T_1 = L \times t_m$  ( $T_1$  为构件中钢筋调直时间; $L$  为该构件钢筋总长度; $t_m$  为单位长度钢筋调直时间);

紧前工作:箍筋采购到场、圆盘机;人员:2 人一组.

再如,根据模板算量结果(包括每个构件的模板数量、位置、形状、尺寸等),可统计出各类定型复合木模板的周料成本和裁剪量,进一步可计算出所需人工数量和裁剪时间.

4) 网络计划图的最终生成

在经过基于 3DDBM 的时间计算和逻辑关系分析之后,可以自下而上地逐层自动生成项目网络计划图,其流程如图 10 所示.下面以主体的结构混凝土工程为例.

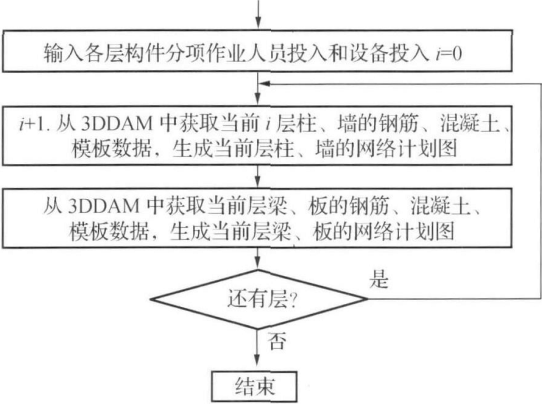


图 10 网络计划图生成流程

Fig. 10 Generation of network plan drawing

各类构件作业分别生成,根据柱实际所用的钢筋,及前述计算方法自动计算得到钢筋作业中各单元作业的实际持续时间,从而获得柱钢筋子作业

网络计划图(图 11(a)). 然后,根据柱的模板/混凝土算量结果,计算出模板/混凝土作业中每一子作业的实际持续时间,并由钢筋、模板、混凝土作业的顺序施工关系,综合得到柱构件的网络计划图,如图 11(b)所示.

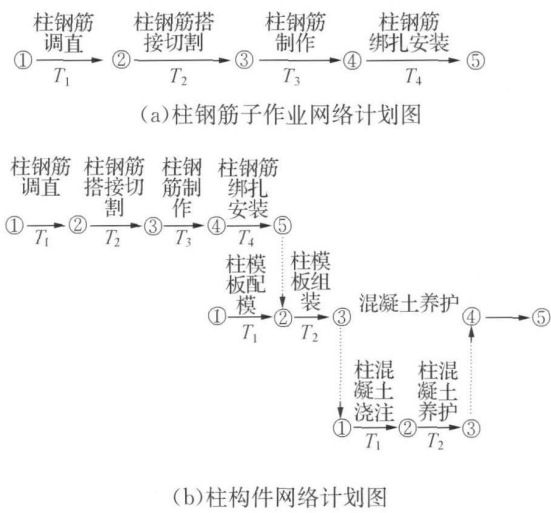


图 11 网络计划图例

Fig. 11 Examples of network plan drawing

其他类型构件(梁、板等)均可作相似处理。  
同层同类构件网络的生成. 由于同一层中施工班组往往少于同类的构件数量, 施工中可以根据人员及设备资源对构件分批、批内并行、批间串行的方法对单网络进行合并。

不同层网络的合并. 建筑是自下而上逐步施工的过程. 按已在数据库中定义的逻辑约束, 可自动将子作业网络计划图中的节点进行对应和合并. 如图 12 中可以看出, 梁板混凝土作业 2 结束后, 可进入柱墙钢筋作业. 另外, 考虑到资源的冲突, 即钢筋作业班组在完成二层施工后, 才进行三层的钢筋作业施工, 等等. 依次类推, 可获得整个建筑工程主体网络计划图。

文中设计实现了 V HRecQS 的一个子系统 AutoCPMS(图 13), 即按照上述方法读取 3DDBM 并自动绘制施工进度网络计划图, 并因此可以进行资源冲突的处理和网络计划的优化处理等.

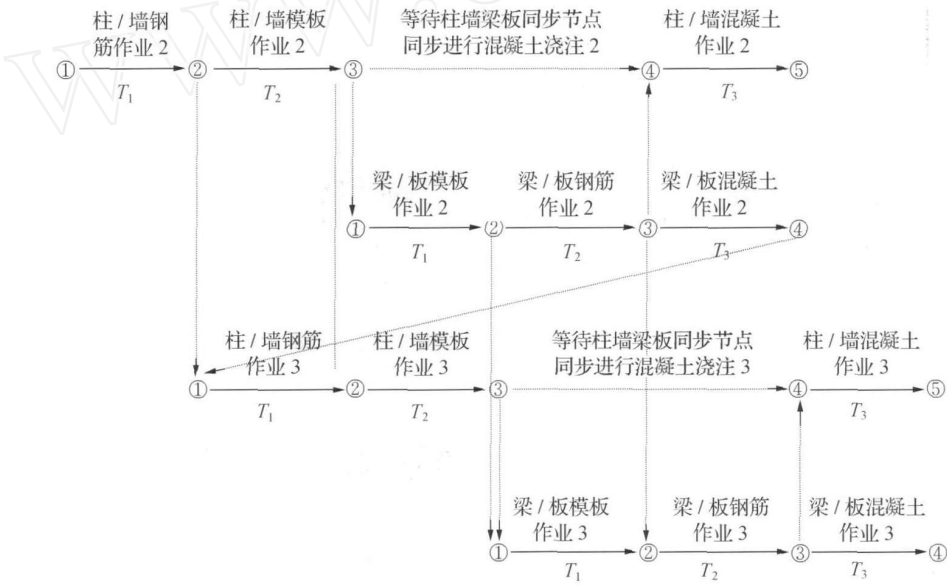


图 12 多层作业级网络计划图

Fig. 12 Network plan drawing of multi-layer projection

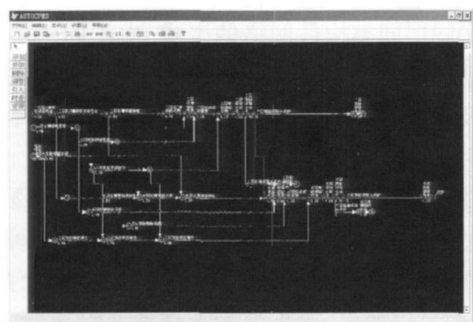


图 13 AutoCPMS 自动生成的网络计划图

Fig. 13 Network plan drawing generated by AutoCPMS

## 6 结束语

建筑业信息化从 CAD 开始,应用范围扩大到设计、算量、管理等各方面,但是建筑业本身的特殊性(相关设计专业多、施工管理分散等)造成相关技术一直没有很大的突破,而建筑业本身必然十分期待能更彻底更有效的解放业界人工劳动的软件产品.文中因此做了一些更具针对性的理论研究和应用实验.

文中设计实现了 VHRecQS 系统,完成了建筑结构图的识别和理解、3DDBM 的生成和存储(数据库).然后,在 VHRecQS 系统内进一步实现了钢筋、模板、混凝土三量合一的自动计算,以及可视化的三维钢筋自动翻样.另外,文中设计实现了 AutoCPMS 子系统,读取 VHRecQS 输出的 3DDBM 模型,完成施工进度网络计划图自动生成.对一套二维建筑设计图,一次性识别后生成三维数字建筑模型,后续多项工作即可从中“各取所需”并对模型进行自动更新和维护,最大限度的实现了信息共享,整合和简化了原本分散、低效的工作流程;尤其是可针对施工过程中的各种变更等提供实时的分析和调整,从而初步实现了四维的量化建筑施工管理.

综上所述,文中在不改变当前建筑设计习惯的前提下,提出了一种可以大幅度提高建筑业相关工作效率的系统性方法,进行了较详细的设计方案研究并予以实现.相关技术还值得继续深入的研究并可拓展到审图、建筑协同设计等方面.

## 参考文献:

[1] TOMBRE K, LAMIROY B. Graphics recognition - from re-engineering to retrieval [C]// ICDAR. Edinburgh, U K: IEEE Computer Society, 2003.

- [2] 董玉德. 工程图纸识别与理解的研究现状分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005, 28(1): 29-33.  
DONG Yude. Analysis of research status of engineering drawings recognition and interpretation [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2005, 28(1): 29-33.
- [3] KASTURI R, BOW S T. A system for interpretation of line drawings[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(10): 978-992.
- [4] 胡 筋, 杨若瑜, 曹 阳, 等. 基于图形理解的建筑结构三维重建技术[J]. 软件学报, 2002, 13(9): 1873-1880.  
HU Jia, YANG Ruoyu, CAO Yang, et al. 3D reconstruction technology for architectural structure based on graphics understanding[J]. Journal of Software, 2002, 13(9): 1873-1880.
- [5] 杨华飞, 杨若瑜, 路 通, 等. 计算机辅助建筑结构算量技术与软件[J]. 计算机辅助设计与图形学学报. 2007, 19(6): 748-756.  
YANG Huafei, YANG Ruoyu, LU Tong, et al. Computer-aided budgeting technique and software in architecture structure[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2007, 19(6): 748-756.
- [6] ZHANG J P, ANSON M, WANG Q. A new 4D management approach to construction planning and site space utilization [C]// Proceedings of 8th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. Stanford, CA, 2000.

### 作者简介:



杨若瑜,女,1977年生,副教授,博士,硕士生导师.江苏省计算机学会CAD及图形学专业委员会委员.主要研究方向为图形识别和智能决策等,在国内外重要刊物上发表论文近20篇,被SCI、EI检索多篇.



蔡士杰,男,1944年生,教授,博士生导师,江苏省计算机学会CAD及图形学专业委员会主任,《CAD及图形学学报》编委,政府特殊津贴获得者.主要研究方向为计算机图形学、CAD、UI、图形识别和理解.先后获国家教委、江苏省科技进步二等奖、高等学校自然科学二等奖等.发表学术论文百余篇,出版专著5部.