

桥梁曲面实体建模的拓扑结构研究

刘寒冰, 王磊, 王延华
(吉林大学交通学院, 吉林 长春 130025)

摘要: 实体模型技术经过 30 年的发展, 取得了长足进步, 桥梁工程的几何形状是比较复杂的, 桥梁等土木工程结构中, 存在大量的施工分界面、材料分界面。针对桥梁的几何特点, 在分析当前实体模型边界表示法的翼边结构、半边结构、放射边结构的特点基础上, 提出适用土木工程结构的桥梁曲面实体建模的拓扑结构, 该结构在每一个施工阶段上, 实体模型都是一个完整的独立几何体, 且两个施工阶段间的几何模型通过定义面及面引用、边及边引用机制, 保证了拓扑和几何相容, 该模型能够支持桥梁设计、施工和养护的全周期。

关键词: 实体模型; 桥梁; CAD

中图分类号: U441

文献标识码: A

Research of Topological Structure of the Bridge Surface Solid Model

LIU Han-bing, WANG Lei, WANG Yan-hua

(The Traffic College of Jilin University, Jilin Changchun 130025, China)

Abstract: In more than 30 years the technique of solid model makes big progress. The geometric shape in bridge engineering is very complicated and there are many construction interfaces and material interfaces. Aiming at the geometric characteristic the authors put forward the topological structure of bridge surface modeling that is applicable in civil engineering after analyzing the winged-edge structure, half-edge structure and radial-edge structure in Boundary-represent (B-rep) method. In each construction phases of the structure the solid model is an absolute whole geometric body, and the geometric model in two construction phases ensure the topological and geometric coherence by defining face, face-use, edge and edge-use. The model can sustain the whole period of the design, construction and maintenance of bridge.

Key words: Solid model; Bridge; CAD

0 引言

上世纪 60 年代末, CAD 研究界提出了用计算机表示机械零件三维形体的构想, 以便在一个完整的几何模型上实现零件的质量计算、有限元分析、数控加工编程和消隐立体图的生成。经过十几年的努力探索和多种技术途径的实践验证, 这一思想终于成熟起来形成了功能强大、使用方便的应用软件, 并且代表了当代 CAD 技术的发展主流。

大型多功能建筑物和横跨大河的桥梁, 不仅要满足使用功能要求, 而且有很高的美学要求, 使它们真

正成为凝固的音乐。采用实体造型软件在计算机中构造它们的模型, 可从不同方向观察, 亦可以做成动画给用户评审。在桥梁三维全景透视图制作方面实体模型技术已有广泛应用, 在土木工程领域实体模型技术并没有成为设计全过程的几何模型核心。而从实体模型思想上看, 实体模型技术应不仅能完成透视图的建模工作还应能完成设计方案构思、草图绘制、三维建模、渲染图制作、有限元网格生成、结构验算、配筋、施工图纸绘制等工作。

实体模型技术在桥梁设计领域应用不广的原因, 作者认为有以下几点:

收稿日期: 2003-08-07

基金项目: 高等学校博士点基金资助项目 (20030183025)

作者简介: 刘寒冰 (1957—), 男, 吉林长春人, 吉林大学交通学院教授、博士生导师, 主要研究方向为道桥结构动态优化设计理论。

(1) 现今流行的实体模型软件表达混凝土工程中的材料分界面和施工分界面比较困难。以 AutoCAD 中内嵌的实体模型软件 ACIS 建立图 1 所示的分段施工矩形梁的模型为例。

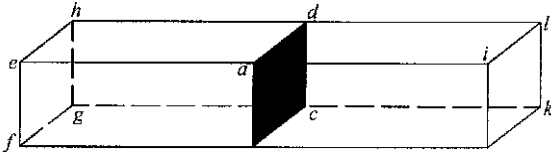


图 1 矩形梁

图中涂阴影的 $abcd$ 面是施工分界面或材料分界面。该结构采用 ACIS 软件建模时有两种方法。

- ①忽略 $abcd$ 面的存在，将面两侧视为一个整体。要想表达 $abcd$ 面，需要另外存储附加信息。
- ② $abcd$ 面两侧分别建模。此时 $abcd$ 面两侧是分别独立的体，两个体之间的关系是不明确的。在应用时 $abcd$ 面两侧体之间的协调关系需要补充附加数据。数据管理和应用都不方便。

(2) 利用实体造型软件构造好产品几何模型后，要对它进行设计修改很不方便。产品的设计是一个反复求精的过程。所以它不能提供一个灵活而富有创造性的设计环境。

(3) 桥梁结构尤其曲线桥梁结构中，涉及到一些特有的曲线如回旋线的偏置线、抛物线等及特有曲面如超高变化段上的桥梁顶面，都是一些曲面。在现有的造型系统中需要用小直线或小平面来逼近，存储量大，并失去原来的几何属性，后续工作中利用不方便。

针对以上问题，我们研制了混凝土桥梁曲面实体建模系统，期望该系统能够满足桥梁设计中有限元网格剖分、结构分析、强度验算、尺寸修改、干涉检查、配筋设计、施工图绘制、工程量统计等工作对几何模型的要求。

1 研究现状

从上世纪 70 年代以来，大体上有 6 类完整的表示实体模型方法——单元分解法、空间枚举法、射线表示法、半空间表示法、构造实体几何 CSG 法 (Constructive Solid Geometry) 和边界表示法 B-rep (Boundary representation)。仅后 2 种方法能正确地表达机械零件的实体模型，而未经近似处理，所以得到工业界的认同。CSG 表示复杂形状的实体模型是通过二叉树形式，内部结点是并、交和差的布尔操作。而外结点是用半空间拓扑结构表示的基本规则体。边界表示 B-rep 法是由一组构成实体边界的面来描述实体模型。

桥梁结构的形状相对复杂，用构造实体几何 CSG 方法表示工作量很大，我们在桥梁曲面模型系统中采用边界表示法。边界表示法的拓扑结构比较著名的有翼边结构、半边结构和放射边结构。翼边结构^[1]首先由美国斯坦福大学计算机科学系的 B. G. Baumgart 提出。翼边结构图如图 2 所示。

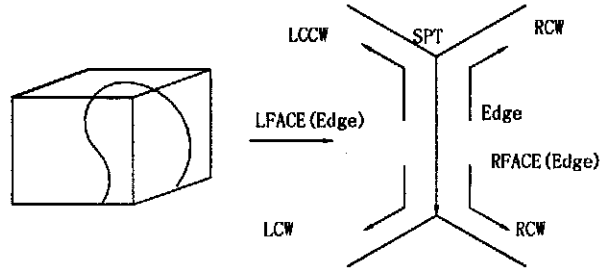


图 2 翼边结构

半边结构^[2]首先由芬兰赫尔辛基技术大学的 Martti Mantyla 教授所采用，半边结构如图 3 所示。

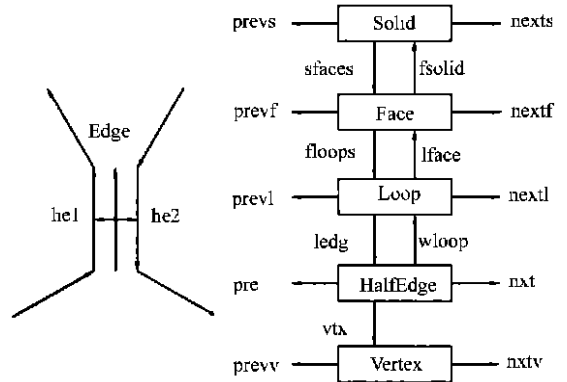


图 3 半边结构

放射边结构^[3]由 Kevin Weiler 提出，放射边结构如图 4 所示。

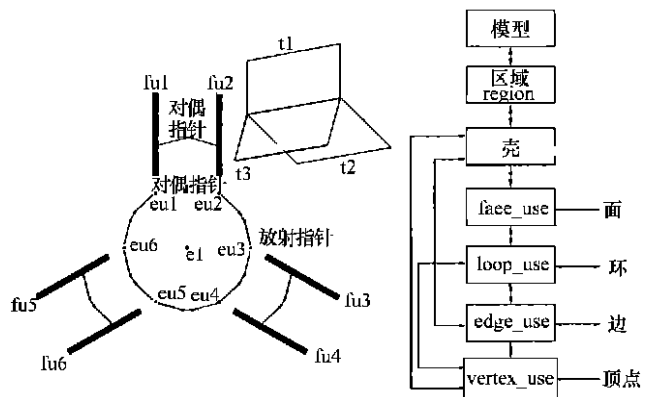


图 4 放射边结构及 weiler 构想的非流行模型

翼边结构较适合于全剖切运算与集合运算，而半边结构既能适合欧拉运算也适合全剖分运算与集合运算。虽然它们能较好地表示正则物体，但用于描述维数不一致的非正则物体，实现起来困难重重，表达材料

分界面、施工分界面情况也很困难。放射边结构既能适合全剖分运算、集合运算又能适合欧拉运算,同时还允许构造的物体中有悬面、悬边、悬点等奇异情况存在。在表达材料分界面、施工分界面情况亦很方便。但在放射边结构中缺少表达施工阶段的一层结构。

2 桥梁实体造型系统的拓扑结构研究

在分析翼边、半边、放射边结构基础上,桥梁实体造型系统采用图 5 所示拓扑结构。

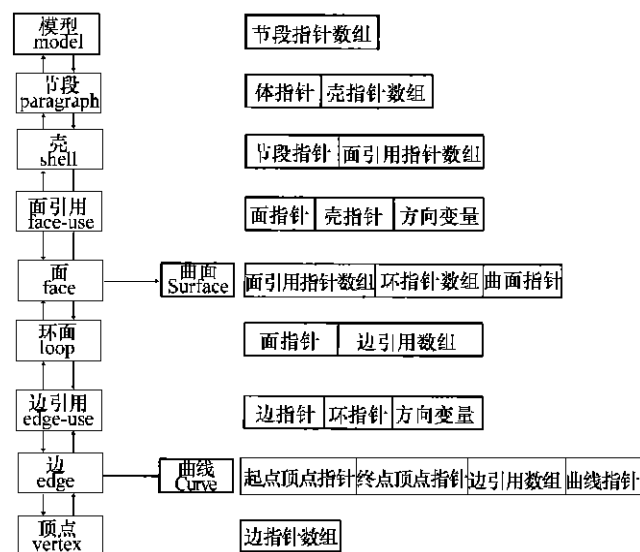


图 5 桥梁实体模型的数据结构

图 5 中双箭头表示 1 对多指针,单箭头表示 1 对 1 指针。1 对多指针用变长指针数组存储,单箭头用普通指针存储,形成了一个层次结构。

该结构中的一个物体只有一个模型即 model。每个模型中可能存在一个节段或多个节段(paragraph),每个 paragraph 对应于一个施工阶段。在模型(model)中用变长指针数组存储节段指针。

节段(paragraph)数据结构中存储体指针和壳指针数组。每一节段可以有一个壳或多个壳。如果是一个壳则其必为外壳,如果有多个壳则有一个外壳和几个内壳。每个节段构成一个完整的正则几何体,安排这样的结构可以使在每一个施工阶段下方便完成工程量统计、施工图纸绘制工作。

壳(shell)结构中存储节段指针和面引用指针数组。面引用指针数组中的全部面构成一个封闭的表面。面引用(face-use)结构存储面指针、壳指针和方向变量。面指针是由面引用指向其所附着的面结构。方向变量是一个布尔变量,当值为 true 时面引用与面方向一致,当为 false 时,面引用与面方向相反。面引用的方向均指向物体内部。

面(face)结构中面引用指针数组存储面引用指针。每一个面内存储全部附着在其上的面引用指针。通过该数组可方便地判断哪一个面引用和另一个面引用几种尺寸与位置相同、方向相反。如果一个施工分界面被表达为一个 face,在其面引用指针数组中有两个元素,这两面引用方向相反即 face-use 中方向变量一个是 true,另一个为 false,面指针指向同一个 face。而在流行面中仅包含有一个面引用(face-use)。face 中的环(loop)指针数组存储在该面中包含的环指针。如果仅有一个环其必为外环;如果其有多个环则其有一个外环和多个内环。face 中的曲面指针指向该面的几何定义。

环(loop)结构中存储面指针和边引用指针数组。边引用指针数组按照各条边的次序依次存储环上各条边的引用。环的方向与边引用的方向相同,均为前进方向右侧是模型的内侧。边引用(edge-use)结构中存储父边指针和环指针及方向变量。方向变量为布尔变量如果值为 true,则边引用与父边方向相同;值为 false,则边引用与父边相反。

边(edge)结构中存储起点顶点指针、终点顶点指针、边引用指针数组。起点顶点指针、终点顶点指向边起、终顶点。边引用指针数组通过该数组记录了一个物体中,一个边引用与哪几个边引用正好长度、位置相同而方向相反或相同这一拓扑信息。在正则物体中该边引用指针数组适好有两个成员,该两个成员长度、位置相同而方向相反。在非正则物体中该指针数组成员数量是不确定的。边中的曲线指针指向边的几何定义。

顶点(vertex)结构存储边指针数组。边指针数组存储该顶点是哪些边的顶点,通过该数组可方便的知道该顶点有哪几个邻边,并可进一步推得有几个邻面。

图 6 为桥梁实体模型的拓扑结构。

该拓扑模型通过面向对象编程的方法实现,利用继承和多态机制提高程序的可重用性并降低程序的冗余度。

首先定义一个实体类 entity 作为拓扑模型中各元素的公共父类。在其中定义了个实体类中共有的属性和操作。而 Vertex、Edge、Edge-use、Loop、Face、Face-use、Shell、Paragraph 和 Model 类都从 entity 类来继承类的关系图如图 7 所示。

而数据成员之间的联接关系由类成员中的指针变量和指针变量数组来实现。指针变量来描述一对一的关系,指针变量数来描述一对多的关系。从任一个类

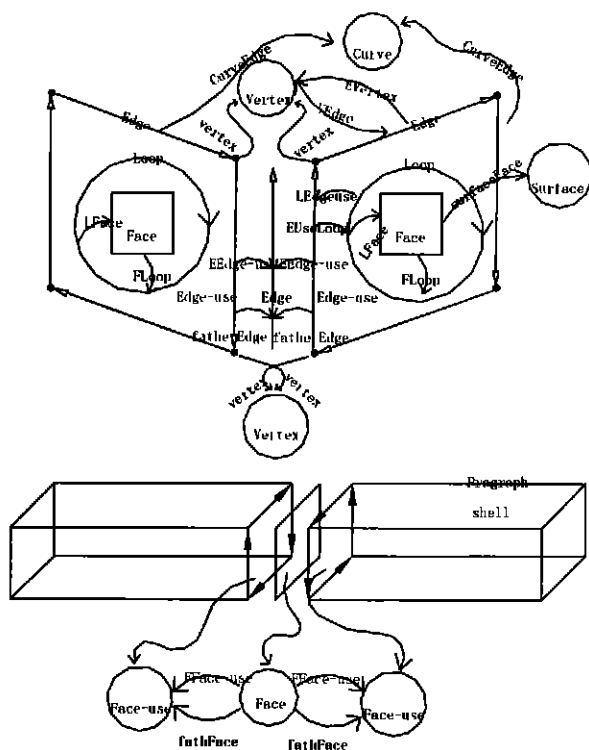


图 6 桥梁实体模型的拓扑结构

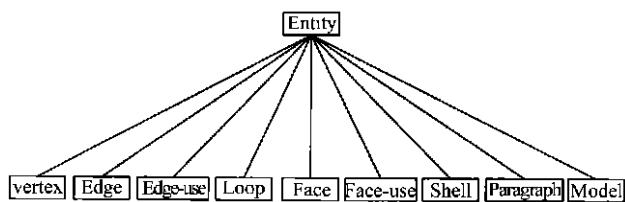


图 7 实体类的继承关系

对象出发可完成该对象包含对象的查找和遍历及其上级对象的查找在对象的定义中定义了实体模型所需的查找、布尔运算、欧拉操作、几何操作等算子。在各个类共有的操作算子都在其上一层的类中定义了虚函数（或纯虚函数）来发挥面向对象编程中的多态机制的威力。

(上接第 57 页)

主梁其它没有损伤单元的曲率模态振型没有显著差异; 曲率模态振型对多处损伤部位敏感, 各处损伤部位之间不相互影响, 符合实际检测需要。

参考文献:

[1] 高怀涛, 王君杰. 桥梁检测和状态评估研究与应用 [J]. 世界

实体模型软件是 CAD 软件的一部分。其软件采用了 AutoCAD 内嵌的方法实现编程上采用 ObjectARX 接口在 AcDbEntity 类中继承一个模型类 AdskModel 类在该类的数据成员中有一个体 (model) 对象并在 AdskModel 对象中重载了存储操作、编辑操作、显示操作 (如 dwgInFields、dwgOutFields、dxfInFields、dxfOutFields、worldDraw) 等函数。充分利用了 AutoCAD 等各种资源。

3 算例

吉林九站松花江公路大桥是一座三孔预应力混凝土连续梁,采用桥梁曲面建模系统绘制的立体模型图如图 8 所示。



图 8 松花江公路大桥立体模型图

4 结语

实体模型可以作为质量计算、有限元分析、结构配筋、验算、消隐立体图生成、施工图纸绘制共有的几何数据源。本研究中采用的实体模型数据结构可以方便地表达桥梁材料分界面、施工分界面等信息,并能适应曲线、变截面桥梁的建模。

参考文献:

- [1] 范玉青, 冯秀娟, 周建华. CAD 软件设计 [M]. 北京航空航天大学出版社, 1994.
- [2] Mantyla M. An Introduction to Solid Modeling [J]. Computer Science Press, 1998
- [3] Weiler K. The Radial Edge Structure: An Topological Representation for Non-manifold Geometric Boundary Modeling for Product Engineering [D]. Elsevier, 1988.

地震工程, 2000, 16 (2): 57—64.

- [2] 李德葆, 陆秋海. 实验模态分析及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] 张德文, 魏阜旋. 模型修正与破损诊断 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [4] 禹丹江. 桥梁损伤识别的动态方法研究 [D]. 郑州: 郑州大学硕士学位论文, 2002.