第十三章　空间拓扑关系抽象的原理与方法

在图形简化过程中，随着空间目标图形的变化，空间目标之间的拓扑关系也会发生变化。在空间认知过程中，有时也不需要非常详细的拓扑关系描述，这时就需要对这些拓扑关系进行抽象。空间拓扑关系抽象是将详细描述的拓扑关系根据一定的要求概括为更粗粒度的拓扑关系，这种变化事实上就包含复杂程度的减少。

第一节　空间拓扑关系的一致性和等价性

一、空间目标的多重表达

在 GIS 中，同样的空间对象可以使用多种空间数据模型描述，例如，地形可以用等高线、三角网等模型表达。一个空间对象可以有多种几何表达形式，例如，同一条河流在不同比例尺的地形图上会有不同的空间抽象程度，它们的几何图形会有差别。也就是说，相同的地理对象可以用多种空间数据模型表示，例如，矢量模型和栅格模型，也可以用多种几何形状来表示，这就是空间目标的"多重表达（Multiple Representation）"，后者是空间目标的多尺度表达。需要采取多重表达的典型例子就是多比例尺的地形图系列。

空间数据库中几何图形的多重表达在 20 世纪 80 年代就开始研究了，空间数据的多重表达涉及在不同细节水平下对这些数据的维护和综合，其中，拓扑关系的变化与维护是研究者非常关心的问题，同样的空间对象在多重表达中拓扑关系最起码是等价的。

二、空间数据的一致性

在一个信息系统中，不一致性会导致不确定的行为，用户会被这些行为激怒，并且对任何的查询结果产生怀疑。由于这个系统给人一种没有效果的印象，这些沮丧的用户会放弃这个系统。因此研究 GIS 中的数据一致性是非常重要的。

一致性（consistency）可以被理解为在一个现实世界的模型中没有任何逻辑矛盾，而正确性（correctness）则是指与现实世界没有任何矛盾（Egenhofer、Clementini 和 Felice，1994）。多重表达数据库的数据一致性是指同一地理对象在多重表达版本之间保持属性特征和几何特征的逻辑连贯性和拓扑一致性。

与空间数据一致性有关的概念还有空间数据的不完备性，这种不完备性包括：不确定性（uncertainty）（由信息的缺乏所产生）、不精确性（imprecision/vagueness）（由语言表达的粒度产生）、不完整性（incompleteness）（缺少某些数据）和不一致性（有相互矛盾的事实存在）。空间数据库的完整性约束（Integrity constraints）包括：拓扑约束、语义完整性约束、用户定义的完整性约束。空间数据多重表达的一致性包括空间信息合成与综合中的一致性。空间数据一致性的不同层次包括：全部一致、部分一致、有条件的一致和不一致。

三、空间拓扑关系一致性的评价方法

完全相同的空间拓扑关系当然是一致的，但是在地图综合过程中有些变化了的拓扑关系，即使拓扑关系的类型不同，也被认为是一致的。

当所设定的任何一对同样的目标在两幅地图上有相同或等价的拓扑关系时，就认为这两

幅地图具有拓扑一致性。若拓扑关系的9交集矩阵相同，则认为是一致的，这很好理解。但是，对于有相似的拓扑关系的两幅地图而言，则需要先计算拓扑关系的相似程度、维数的相似程度和内容的相似程度，然后用它们的加权平均值来说明这两幅地图的相似程度。维数的相似程度可以用两幅地图上相同目标的维数变化的平均值来描述;内容的相似程度可以用不同时在两幅地图上的目标数来描述。对于两幅地图的拓扑关系的相似程度，则需要先确定拓扑关系描述的基本集合，例如：REL = {Disjoint, Touch, In, Contains, Equal，Cross, Overlap, Covers, CoveredBy}，这些拓扑关系同样可以用9交集来描述，但是，同一类拓扑关系会有多个9交集矩阵，因为空间目标的维数会不同，或包含了多个更详细描述的拓扑关系。计算过程如下：

1) 选择同时存在于两幅地图的两个地理目标，把它们之间的拓扑关系归类到REL中，例如，假设是In和Contains;
2) 先找到分别描述这两种拓扑关系的9交集矩阵的集合；
3) 再分别计算两个集合之间9交集矩阵之间的所有距离，用距离的最小值表达这两种拓扑关系的距离，设为*A*;
4) 计算出REL中所有拓扑关系之间的最小距离值；
5) 在REL中找到同其中任何一种拓扑关系（In或Contains）具有相同维数的两个空间目标之间的所有拓扑关系，并计算另一种拓扑关系与这些拓扑关系之间的距离最小值，设为*B*;
6) 若*A*=*B*，则可以认为，这两种拓扑关系具有基于距离的一致性。

当空间目标从2维降为1维时，拓扑一致性的评价是非常重要的。设把8种2维空间目标之间的拓扑关系转换为19种2维空间目标与1维空间目标之间的拓扑关系，为了保证多尺度数据库之间的拓扑一致性，就有4种不同的评价方法（Kang、Kimy和Liz，2004）。

1、矩阵比较（matrix-comparison）方法

若描述空间拓扑关系的两个9交集矩阵相同，则它们所表示的拓扑关系相同。但是，在线与面之间拓扑关系的交集矩阵描述中，线的补集与面的边界、内部和补集的交集始终为非空，因而只需要比较交集矩阵中其他6个交集是否相等就可以判断线与面之间拓扑关系同面与面之间拓扑关系是否一致。

2、拓扑距离（topology distance）方法

先计算两个描述拓扑关系的交集矩阵之间的距离，即对应元素之间的差值的绝对值之和，然后用这种距离值判断或表达这两个拓扑关系的一致程度。

3、矩阵合并（matrix-union）

当2维空间目标已经被降为1维空间目标时，就需要用面的边界和内部之和来定义线，那么，线与面的边界、内部和补集的交集就是3个，线与面之间的拓扑关系就可以用一个3个交集的矩阵表示，因为线的补集与面的边界、内部和补集的交集始终为非空，不需要考虑。这样，只需要比较这两个矩阵是否相等就可以确定两个拓扑关系是否一致。但是，该方法有时会因信息的丢失而无法提供最合适的关系。

4、混合方法（hybrid approaches）

为了克服“矩阵合并”的缺点，可以结合拓扑距离的概念，把矩阵合并方法中确定的等价关系按照拓扑距离排序，当然，并不是排在第一的（拓扑距离最短）就是最一致的，在实际应用中应当与具体的地图综合算子结合在一起。

四、空间拓扑关系的等价性

空间拓扑关系的等价性是指在空间数据的多重表达中两种不同抽象层次上的两个空间拓扑关系，或两种不同空间描述（表达）模型上的两个空间拓扑关系，在空间认知上能表达同一个地理空间概念。等价也可以分为数学等价和认知等价。Egenhofer 等（1992）把 9-交集模型中 4-交集相同的所有拓扑关系看成是等价的。Paiva（1998）认为 100％的相似就是等价。

等价性是一致性的一个子集，强调两个不同空间状态的空间目标或空间关系是否表达了同一个真实的地理实体或地理关系。一致性也是等价性的基础，若所描述的空间目标或空间关系本身没有准确表达真实的地理实体或地理关系，那么就无从谈等价性。

第二节　不同表达空间上局域拓扑关系的等价

在几何空间和可视化空间中两个空间目标之间的拓扑关系有时会有所不同。主要原因是：几何空间中点无大小，但是可视化空间中点被描述为一个有面积的“点状符号”；几何空间中线无宽度，但是可视化空间中线被描述为一个有确定宽度的条带状有面积的“线状符号”；几何空间中可以描述面积很小的面，但是可视化空间中面积小于分辨阈值的面无法表示，只能被描述为一个“点状符号”，或者被夸大。很明显，在矢量模型中，点无大小，线无宽度；在客观世界中，可见的空间目标都有大小和面积；在地图可视化空间或栅格模型中可见的与不可见的空间目标都必须绘制为可见的地图目标。

一、栅格空间中的拓扑关系

把以栅格数据模式描述的空间简称为“栅格空间”，在栅格空间中用连续相邻的像元集来表达空间目标。一个像元的邻近像元可以分为 4-邻近和 8-邻近两种情形。栅格空间中所描述的地图为“栅格地图”，若像元值为“1”或“0”，那么该图为“单值图”，否则为“多值图”。

在单值栅格空间中任何空间目标都是由有限个像元组成，两个空间目标之间的基本拓扑关系十分简单，主要有相离、1 维相接和 0 维相接三种拓扑关系，如图 13-1 所示。复杂的空间拓扑关系是这三种简单拓扑关系的组合。

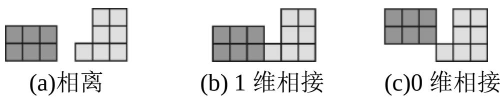


图 13-1、单值图中的拓扑关系

在多值栅格图中不同空间目标的栅格可以重合，空间拓扑关系就十分复杂。Egenhofer 等（1993）根据 9-交集模型得出的栅格空间中面状目标之间的拓扑关系有 16 种。若规定栅格线的宽度为一个像元，线不存在自交的情况，栅格线为一序列 4-邻接的像元依次连接形成的宽度为一个像元的栅格图形，其中首尾两个像元称为线的端点（边界），其余的像元称为线的内部。栅格线具有以下的特征：

- 边界和内部非空。由于栅格线有两个端点（边界），因此这就要求栅格空间中的线至少有三个像元，少于三个像元不能形成栅格线。这主要是方便描述栅格线的内部与其他集合的关系。
- 栅格线的每一个内部像元只有两个 4-邻接像元。

● 栅格线的边界像元只存在一个与其 4-邻接的内部像元。

基于 9-交集模型，在栅格空间中线与面之间有 30 种空间拓扑关系，如图 13-2 所示。

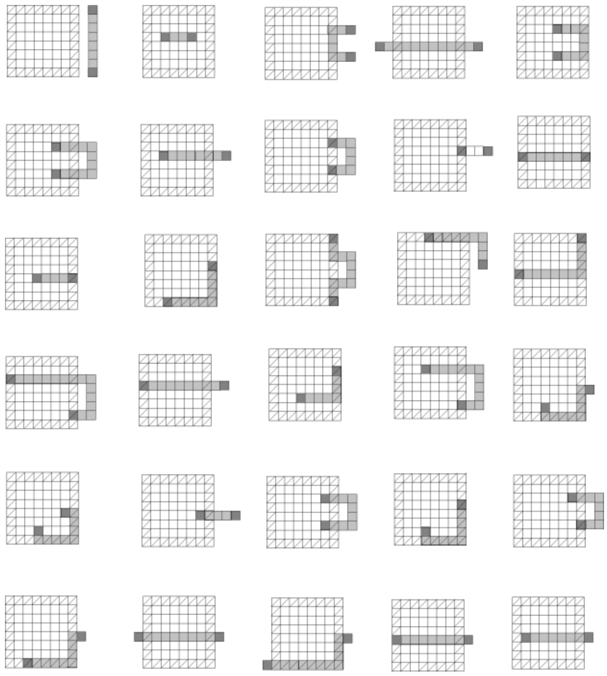


图 13-2、 基于 9-交集模型的栅格空间中线与面之间的拓扑关系

二、点与点之间局域拓扑关系的等价

矢量空间的点在现实空间中事实上大多是面积较小的面实体，但是在栅格空间和地图空间中点的表达形式会发生变化，拓扑关系在不同表达空间之间的等价关系见表 13-1，其中，“近相离”表示两个相离的点之间距离很小，或者说，距离不大于视觉可分辨的尺寸，当两个点被符号化后，这两个点状地图符号之间的拓扑关系可以是“相切或相交（定位中心不重合）”，在栅格空间中，两个离得很近的点可能会相接或重合（位于同一个栅格单元中）；“远相离”表示两个相离的点之间距离比较大。

表 13-1、不同表达空间上点与点之间局域拓扑关系的等价

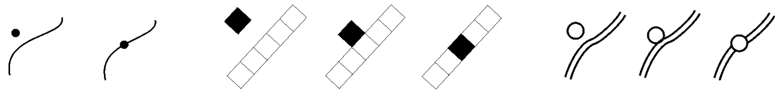
空 间	等 价 拓 扑 关 系		
矢量	远相离	近相离	重叠
栅格	相离	相接或重叠	重叠
地图	相离	相离、相切或相交	符号的定位点重叠

三、点与线之间局域拓扑关系的等价

在矢量空间中，线状目标在现实空间中大多是成条带状分布的地理实体，如道路、河流等。如图 13-3 所示，在矢量空间中，点与线之间的两种拓扑关系（相离和相交）在栅格空间和地图空间中就有不同的表达方式。

在地图制图中可以将毗邻的点状地物和线状地物表示成“相切”关系，在地图综合过程中一般将距离小于 0.2 毫米的点和线表示成相切关系（王家耀，1992），如图 13-4 所示。

不同表达空间之间点与线之间拓扑关系的等价关系如表 13-2 所示，其中，“相交”表示点在线上。



（a）矢量空间　　（b）栅格空间　　（c）地图空间

图 13-3、不同表达空间中点与线之间的拓扑关系

（a）栅格空间与矢量空间　　（b）地图空间与矢量空间

图 13-4、点与线之间相接（相切）关系与相离关系的等价

表 13-2、不同表达空间之间点与线之间局域拓扑关系的等价

空 间	等 价 拓 扑 关 系		
矢量	远相离	近相离	相交（点在线上）
栅格	相离	相接或相交	相交
地图	相离	相切或相交	符号中心点在线上

四、点与面之间局域拓扑关系的等价

点与面之间的拓扑关系在现实空间中往往表现为两个区域之间的拓扑关系，例如独立房屋与一片林地，而不是几何意义上的点与面之间的拓扑关系。在栅格空间中点与面之间拓扑关系包括：相离、外部相接、内部相接、在边界上和在内部。在不同表达空间之间点与面之间拓扑关系的等价关系如表 13-3 所示。

表 13-3、不同表达空间上点与面之间局域拓扑关系的等价

空间	等 价 拓 扑 关 系				
矢量	远相离	点在边界线上	近相离	近离边界且在内部	远离边界且在内部
栅格	相离	点在边界线上	外部相接	内部相接	在内部
地图	相离	点状符号定位点在边界上	点状符号与边界外部相切	点状符号与边界内部相切	完全在内部或点状符号定位点在面内

五、线与线之间局域拓扑关系的等价

线与线之间的拓扑关系比较复杂，在这里只讨论两条线内部之间所存在的拓扑关系，表 13-4 说明了不同空间上两条线之间局域拓扑关系的等价。

在相离关系中，同样可以分为“远相离”和“近相离”，对于矢量空间中的近相离可以在另外两个表达空间中表示为“相接（相切）”。若两条线具有不同性质，则线与线之间的重叠部分在地图空间中表现为“线状地图符号”的“跳绘”。点相接是指线内部之间的交集非空，但不是相交关系，只有一个公共点。

表 13-4、不同表达空间上线与线之间局域拓扑关系的等价

空间	等 价 拓 扑 关 系

矢量	远相离	相交	近相离	重叠	点相接（相切）
栅格	相离	相交	一维相接（相切）或相离	重叠	点相接（相切）
地图	相离	相交	一维相接（相切）或相离	跳绘	点相接（相切）

六、线与面之间局域拓扑关系的等价

线与面之间局域拓扑关系在不同表达空间上的等价性和线与线之间局域拓扑关系的等价性一样，只是相接关系需要分为“内相接”和“外相接”。当线的一条线段在面内部时，在地图空间上有时也需要表现为“线状地图符号”在面外部的“跳绘”，例如，在双线河内的境界线。

七、面与面之间局域拓扑关系的等价

面与面之间局域拓扑关系在不同表达空间上的等价性和线与面之间局域拓扑关系的等价性一样，但是，在地图空间上，若两个面相交就需要依据制图规范做相应的处理，例如，以一个面为主，或者面状图案相互渗透（主要出现在“范围法”上）。

八、空间目标符号化时拓扑关系的等价

在地图综合过程中，一些按照地图比例尺不能表示或者难于表示但又具有重要意义的微小地物和碎部，在综合后的地图上必须表示出来，所使用的地图表达方法就是不依比例尺的地图符号，或者夸大表示有重要空间特征（或重要语义）的碎部。很明显，这些符号或图形就占领了更多的不属于自己的地图空间，或者延伸到不属于自己的地图空间，这样，致使地图上表示的各个物体的图形之间相互靠近甚至相互压盖，使制图物体的相互关系变得模糊不清，甚至无法正确表示，对空间关系的正确描述产生了很大的影响。

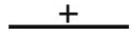
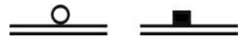
传统的地图是一种目视地图，是由不同类型的地图符号所组成的一个有序集合。由于受视觉感受能力的约束，所有符号需要有可以辨别的足够尺寸，表 13-5 是主要图形应该达到的最小尺寸。在地图符号化过程中往往会产生地图空间竞争问题。为了满足地图清晰性的要求，并准确表达地理空间关系，除了常用的点与线之间的“相切”，以及两条线重叠部分的“跳绘”方法外，还需要在线的端点处和相交处作一些特殊的变化，以便符合视觉思维的空间认知规律，拓扑关系变化规律如表 13-6 所示。

表 13-5、人眼视力能够辨别的地图符号最小尺寸

单线粗细	实线间隔	实心矩形边长	空心矩形边长	实心图形间隔	实心轮廓半径	点线轮廓面积
0.08～0.1	0.15～0.2	0.3～0.4	0.4～0.5	0.2	0.4～0.5	2.5～3.2

说明：表中长度单位为毫米；面积单位为平方毫米。

表 13-6、矢量空间目标符号化时的拓扑关系转换规则

矢量目标之间的拓扑关系		地图符号之间的拓扑关系	
点与点之间重叠		用一个点状符号	增加注释说明
点与线的端点很近		点状符号在线的端点处	
点（线）与线相离，但很近		点（线）状符号与线状符号相切	

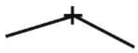
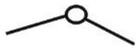
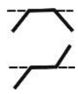
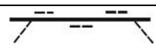
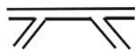
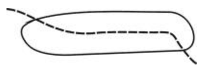
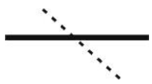
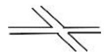
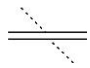
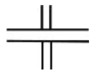
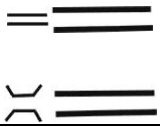
点在线上或点在面的边界上		点状符号与线状符号相接	
端点与交点（或端点）的距离很小		交点与端点重合	
线与线有（或面的边界）重叠关系		重叠部分只有等级高的线状符号	
		跳绘	
		连通	
点在面内的边缘		边界线断开，保证点定位的正确性	
线过面的中轴线穿过面		跳绘	
线内部相距很近		符号的边界相切	

表 13-6、矢量空间目标符号化时的拓扑关系转换规则（续）

点在线的端点上		相离	
相交		连通	
		相接	
立体交叉		相接	
线与线之间端点处相接		相离（街道与道路之间的关系处理）	
性质不同的面相接		相离但方向一致	

第三节　空间数据综合中拓扑关系抽象的规律与方法

在地图综合过程中，空间目标会发生变化，拓扑关系应适应这种变化，因此需要抽象原空间关系，以适应更抽象的空间模型，其中，空间拓扑关系的转换最为突出。引起空间拓扑关系发生变化的地图综合操作包括：空间目标的图形简化、空间目标的选择/删除、空间目标的降维、空间目标群的聚合、空间目标的典型化。在图形简化过程中，随着空间目标图形的变化，空间目标之间的拓扑关系也会发生变化，空间拓扑关系变得越来越简单。另外，在空间认知过程中，有时不需要非常详细的拓扑关系描述，这时就需要对这些拓扑关系进行抽象。空间拓扑关系抽象是将详细描述的拓扑关系根据一定的要求概括为更粗粒度的拓扑关系，这种变化事实上就包含复杂程度的减少。

Egenhofer 等（1994）给出了多尺度表达中区域之间拓扑关系化简的一个框架和拓扑关

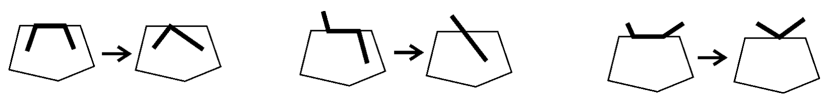
系抽象的基本方法，包括边界交集成分的删除、边界交集成分的合并、交集成分维数的减少[2]，但对抽象方法的具体实现并没有做详细的介绍。杜晓初（2005）进行了多重表达中空间拓扑关系等价性研究，用成分序列来描述空间目标之间的所有局域拓扑关系，并分析了线状目标之间、线与面之间和面状目标之间的拓扑关系等价转换。

一、单个基本局域拓扑关系的抽象

空间目标的图形简化是针对线而言，这种操作会引起线变形，而地图上的一条线不是孤立存在的，它的变形必然影响它与其周围空间目标之间的空间关系。但是，应当按照等价原则对这条线与其周围空间目标之间的空间拓扑关系进行抽象。

只有当线变形到一定的程度时空间拓扑关系才会发生变化，线与线（或面的边界）之间的拓扑关系受影响最大，图 13-5 说明了线与线之间局域拓扑关系的等价抽象（箭头表示抽象方向，箭头起始位置所在的拓扑关系是抽象前较复杂的拓扑关系，箭头所指的拓扑关系即为抽象后的拓扑关系，后文不再说明）。图 2 说明了线与面之间局域拓扑关系的等价抽象。这种变化主要表现在三种关系的变化：内部重叠式相切抽象为内部点式相切（如图 13-6（a））、重叠式相交抽象为点式相交（如图 13-6（b））、外部重叠式相切抽象为外部点式相切（如图 13-6（c）），即将“重叠”成分抽象为一个“点”。当然，其他的成分在抽象过程中则需要考虑其相邻的成分[4]。对于面与面之间局域拓扑关系的等价抽象也是如此。

图 13-5、两条线的内部之间拓扑关系的抽象



（a）　　　　　　　　　（b）　　　　　　　　　（c）

图 13-6、 线的内部与面的边界之间拓扑关系的抽象

当图形简化到一定程度时，线与线之间、线与面之间以及面与面之间的空间拓扑关系需要被抽象，线和面的边界在简化过程中除了遵循重叠部分从“1 维”到“0 维”的等价转换外，还涉及局域空间拓扑关系组合的等价转换，其中，线的端点与面（或线）之间的空间关系在图形简化过程中不应当发生变化。

对于线和面本身而言，在图形简化过程中也需要保持空间拓扑关系不变或等价性，线和面本身的空间关系抽象应当遵循的主要规则是：线不能自交，且遵循一维延展性空间特征（简称“线性”特征）；面始终是一个简单多边形。

二、 图形简化引起的线-线局域拓扑关系的抽象

1 线−线局域拓扑关系抽象的规则

在地图综合中，线与线之间的局域空间拓扑关系是描述拓扑关系的基础，按照空间关系的语义可以分类为：相离（D）、相交（I）、重叠（O）、相接（切）（T）和端点在线上（NI），如图 13-7 所示。其中，重叠和相交（或相接）可以组合，形成重叠式相交（或相接），因此，线内部之间的局域拓扑关系就有：D、I、OI、T、OT、O 和 NI。有些基本拓扑关系对于特定的地图要素则会不存在，例如，铁路不可能与大车路重叠，因此，在空间抽象过程中，必须考虑地图要素本身的特点。同时，假设：

1） 一条线不能自交；

2） 两条线之间的拓扑关系类型不能随意产生或消失。

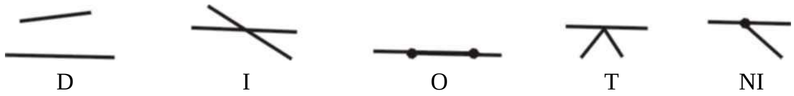


图 13-7、 空间拓扑关系的语义分类

在空间图形简化过程中，只有当线内部之间的交集为“非空”时，才需要考虑局域拓扑关系的转换、合并或删除，这种局域拓扑关系也可以被称为“交集成分”。因此，两条线内部之间的拓扑关系可用集合来描述，其基本元素是：I、OI、T、OT、O、NI。从一条线的端点开始，沿该线的延伸方向，对所有局域拓扑关系进行编码，例如，{I,I,OI,OI,I,T,OT,OT,OT}={2I,2OI,I,T,3OT}。“线段的重叠”在地理含义上表示两条线在局部范围内可以进行功能上的“互相替代”，“相接（相交）”表示两条线在某一点处可以连通。

抽象后的拓扑关系仍然可以用这种集合的方式表达。为了有效地对拓扑关系进行抽象，必须建立相应的集合映射关系规则。设图形简化前后的拓扑关系集合分别为 S 和 E，S 和 E 中的元素用 S_i 和 E_j 表示，$i=1$，…，m；$j=1$，…，n，$m\geqslant n$。下面讨论从 S 到 E 的映射规则。

1）只有相交关系的映射规则

若 m=1，S_1=I，则 n=1，E_1=I；

若 m=2，$\forall S_i$=I，则转换 S_1 和 S_2，n=1，E_1=T，如图 13-8（a）所示；

若 $m\geqslant 3$，$\forall S_i$=I，则转换 S_i 和 S_{i+1}，$n<m$，$\forall E_j$=I，如图 13-8（b）所示。

2）只有相接关系的映射规则

若 $\forall S_i$=T，m>1，则 $\forall E_j$=T，$n<m$，如图 13-9 所示。

3）只有重叠关系的映射规则

若 m=2，$\forall S_i$=O，则 E_1=O，或者 E_1=E_2=NI，如图 13-10（a）示；

若 m=1， S_1=O，则 E_1=NI，如图 13-10（b）所示 ；

很短的重叠部分可转换为一个点。若 S_i=OI，则 E_i=I；若 S_i=OT，则 E_i=T。

（a） （b）

图 13-8 只有相交关系的映射

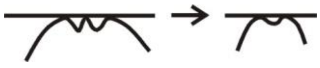


图 13-9 只有相接关系的映射

（a） （b）

图 13-10 只有重叠关系的映射

2 相邻的两个局域拓扑关系合并的规则

在图形简化过程中，空间抽象的成分应该由多变少，那么可以考虑对相邻的两个局域拓扑关系进行合并。当两个局域拓扑关系之间的所有线段长度小于特定值时，可将两个局域拓

扑关系进行合并。合并规则如下：

若 S_i=T，S_{i+1}=T，　$S\cap\{O,OT,OI\}=\phi$，则 $f(S_i,S_{i+1})\to T$；

若 S_i=T，S_{i+1}=T，　$S\cap\{O,OT,OI\}\neq\phi$，则 $f(S_i,S_{i+1})\to OT$，如图 13-11（a）所示；

若 S_i=T，S_{i+1}=I，　$S\cap\{O,OT,OI\}=\phi$，则 $f(S_i,S_{i+1})\to I$，如图 13-11（b）所示；

若 S_i=T，S_{i+1}=I，　$S\cap\{O,OT,OI\}\neq\phi$，则 $f(S_i,S_{i+1})\to OI$，如图 13-11（c）所示；

若 S_i=T，$S_{i+1}\in\{O,OT,OI\}$，则 $f(S_i,S_{i+1})\to S_{i+1}$，如图 13-11（d）、13-11（e）和 13-11（f）所示；

若 $S_i=S_{i+1}$=I，$S\cap\{O,OT,OI\}\neq\phi$，则 $f(S_i,S_{i+1})\to OT$，如图 13-12（a）所示；

若 $S_i=S_{i+1}$=I，$S\cap\{O,OT,OI\}=\phi$，则 $f(S_i,S_{i+1})\to T$，或者 $f(S_i,S_{i+1})\to D$（两个相交处已删除）；

若 S_i=I，S_{i+1}=O，则 $f(S_i,S_{i+1})\to O$，如图 13-12（b）所示；

若 S_i=I，S_{i+1}=OT，则 $f(S_i,S_{i+1})\to OI$，如图 13-12（c）所示；

若 S_i=I，S_{i+1}=OI，则 $f(S_i,S_{i+1})\to OT$，如图 13-12（d）所示；

若 S_i=O，$S_{i+1}\in\{O,OT,OI\}$，则 $f(S_i,S_{i+1})\to O$，如图 13-13 所示，或者 $f(S_i,S_{i+1})\to NI$；

若 $S_i=S_{i+1}$=OT，则 $f(S_i,S_{i+1})\to OT$，如图 13-14（a）所示；

若 S_i=OT，S_{i+1}=OI，则 $f(S_i,S_{i+1})\to OI$，如图 13-14（b）所示；

若 $S_i=S_{i+1}$=OI，则 $f(S_i,S_{i+1})\to OT/I$，如图 13-15 所示。

若 S_i=NI，$S_{i+1}\in\{T,I,NI\}$，$S\cap\{O,OT,OI\}\neq\phi$，则 $f(S_i,S_{i+1})\to O$，如图 13-16（a）、13-16（b）、13-16（c）所示；

若 S_i=NI，$S_{i+1}\in\{T,I,NI\}$，$S\cap\{O,OT,OI\}=\phi$，则 $f(S_i,S_{i+1})\to NI$，如图 13-16（d）、13-16（e）、13-16（f）所示；

若 S_i=NI，$S_{i+1}\in\{O,OT,OI\}$，则 $f(S_i,S_{i+1})\to O$，如图 13-16（g）、13-16（h）、13-16（i）所示。

表 13-7 总结了以上这些规则，说明了相邻的两个局域拓扑关系合并的规则。

表 13-7　相邻的两个局域拓扑关系合并的规则

组合情况	T	I	O	OT	OI	NI
T	T/OT	I/OI	O	OT	OI	NI/O
I		T/OT/D	O	OI	OT	NI/O
O			O/NI	O	O	O
OT				OT	OI	O
OI					OT/I	O
NI						NI/O

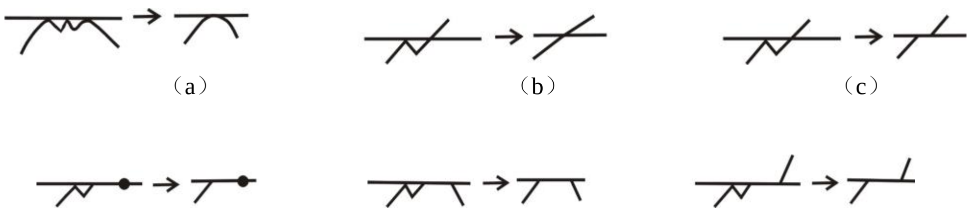

（a）　（b）　（c）
（d）　（e）　（f）

图 13-11、相接与其他拓扑关系的合并


（a）　（b）　（c）　（d）

图 13-12、相交与其他拓扑关系的合并

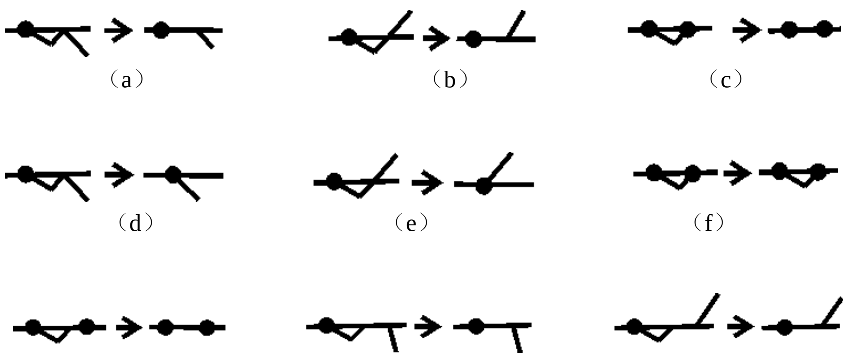
（a）（b）（c）

图 13-13、重叠与其他拓扑关系的合并

（a）（b）

图 13-14、重叠式相接与其他拓扑关系的合并

图 13-15、重叠式相交与重叠式相交的合并



（a）（b）（c）（d）（e）（f）（g）（h）（i）

图 13-16、端点在线上与其他拓扑关系的合并

3 删除局域拓扑关系的方法

局域拓扑关系的删除在图形简化中是非常主要的，但是与端点最邻近的交点尽量保持不变，依据线的语义特征，低等级的线有优先移位权，等级相同的线应当同时移位。

如图 13-17 所示，按 L_1 和 L_2 上的顺序，局域拓扑关系集合都可以表示为：{I，I，I，I，I，I，I}={7I}，但是，L_1 上的顺序是从①到⑦，L_2 上的顺序是从 1 到 7。两条相交的线在局域拓扑关系之间会形成关联区域，它们所形成的成分关联区域是从 A 到 F，其中，C 并不是一个简单的多边形，内部包含了一条线段，F 则是由多条属于不同线上的线段组成，也就是说，这些关联区域也可以是复杂的多边形。这些关联区域多边形可以直接通过线之间的交点和被分割的线段建立。这些关联区域的面积大小或重要程度决定了与此区域相关的局域拓扑关系是否被删除，依据规律，相邻的两个“相交”关系必须同时被删除。图 13-17 中的关联区域 C 不是简单多边形，不能在线简化过程中直接处理，图 13-17 中的区域 F 所涉及的交点多余 2 个，也不能直接处理。

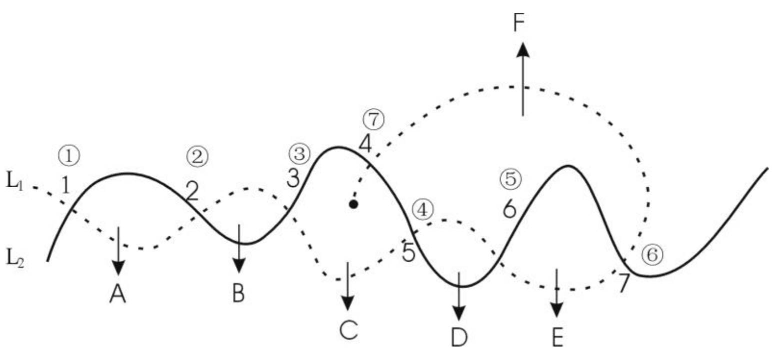
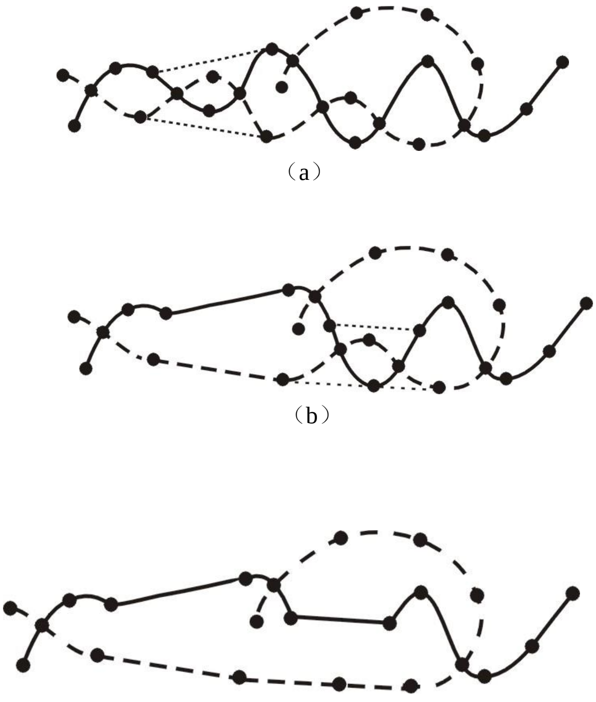


图 13-17、两条相交的线在局域拓扑关系之间形成关联区域

n 个相交关系渐进式删除的过程如下：

1) 依据两条线在空间的分布，建立关联区域（多边形）；
2) 提取关联区域中的简单多边形；
3) 计算简单多边形的重要性或面积；
4) 删除所选择的面积最小（或最不重要）的简单多边形，图 13-18 就是一种图形简化方法，该方法主要是通过删除简单多边形边界上的顶点，并以直线连接与组成该关联区域多边形的两条线的两个交点相邻的两个顶点来实现，这两个顶点不在被删除的关联区域多边形的边上，在图 13-18 图中的圆点表示描述该线的顶点或两条线的交点。但是依据不同情况，有不同的关联区域删除方法，如图 13-19 所示；删除局域拓扑关系的操作体现在 T 和 I 的删除上。对于 T 的删除，如图 13-20 所示，只需在可以移位的线上删除该顶点。
5) 重新组织线的顶点，回到第 1）步。



（a）

（b）

（c）

图 13-18、成对的相邻两个 I 的删除

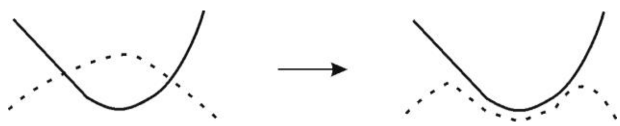
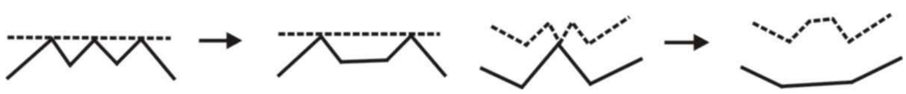


图 13-19、实线不可移动



(a) (b)

图 13-20　在可以移位的线上删除该顶点

三 图形简化引起的线-面和面-面局域拓扑关系抽象

线-面拓扑关系和面-面拓扑关系的抽象方法与线-线拓扑关系抽象的具体方法类似。但是，对于线与面之间的拓扑关系而言，除了必须保持线的端点与面之间的关系外，还必须考虑线与面之间的全域拓扑关系，例如，进入、穿过、外切等。当一条线连续穿过一个“条带”形的面时，相交成分的删除必须遵循特殊的规则。这里以双线时令河和道路为例，依据地理含义，线与面的边界不能有重叠关系，关联区域的简化只能是局部“穿过”的成对删除，因为此时的面可以被看成是一条有宽度的线，面的边界为不可移动的线，如图 13-21 所示。

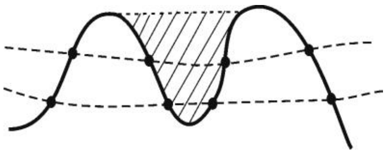


图 13-21、一条有宽度的线的拓扑关系删除

对于面与面之间的拓扑关系，只需考虑两个面状目标边界之间局域关系的抽象。由于两者的边界往往可以共线，因此，关联区域的简化就比较简单，如图 13-22 方法是用关联区域的中轴线代替原来的边界（见图 13-22（a））；另一种方法是只保留不能移位（或重要）的边界线（见图 13-22（b））。

（a）　　　　　　　　　　（b）

图 13-22、面之间拓扑关系的简化

四、空间目标降维引起的空间拓扑关系抽象

在空间数据多尺度表达中空间目标的维数可能会随着空间尺度的变化而发生变化，从而使得空间目标之间的拓扑关系也发生变化。

在空间数据库中，点、线和面在现实世界中大多数情况下都是面状空间实体。由于这些面实体具有不同的大小和形状，因此它们在空间数据库中以不同的形态出现，其中面积很小的面状实体可以用点表示，狭长的条带可以用线表示，如道路、河流等。随着空间数据的分辨率越来越低，有些面目标可以被抽象为线目标或点目标，很明显，相应的空间目标之间的拓扑关系也会发生变化。地图目标的降维表现在如下三个方面：

① 一个条带型面变成一条线

② 一个面变成一个点

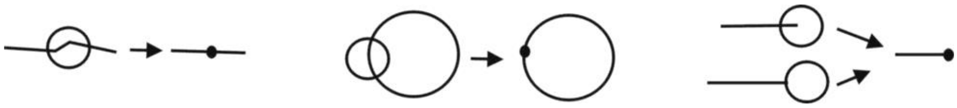
③ 一条短线段变成一个点，该种转换很少，通常该点也是有向点，例如桥梁。

当一个条带型面变成一条线时，可以直接用它的中轴线代替，也就是说，该条带与其他地图目标之间的拓扑关系必须转换为该中轴线与这些地图要素之间的拓扑关系，只需把所有的交集成分中的交点、重叠部分和面内的点投影到中轴线上，然后按照这些有关的地图目标的原始坐标串的顺序重新组织坐标数据。

当一个面状地图目标变成一个点时，原则上，该点用面的中心点表示。若该面与一条线相交，则用穿过该面的线的首末交点的连线的中点或线的端点表示该目标，如图 13-23 所示；

若该目标与一个点有关系，则它们之间的拓扑关系转换规则如图 13-24 所示。

若遇到相关的两个空间目标都需要降维时，在渐进式地图综合中只需对目标逐个进行降维就可以了。



(a)　　（b）　　(c)

图 13-23、一个面状地图目标变成一个点

图 13-24、目标与一个点有关系

五、空间目标删除/选择引起的空间拓扑关系抽象

地图目标的选取和删除会影响地图目标之间的拓扑关系，删除地图目标的直接原因是地图表达空间有限，一旦一个地图目标被删除，地图空间在相应的地方就会增加空白区，与被删除的地图目标相关的所有拓扑关系自动消失。但是，需要依据这些地图目标的地理特征和语义，重新建立它们之间的拓扑关系，常用的规则如下：

1) 若删除一个点 A，则与 A 相接的所有目标在该点处相接，例如居民地和桥梁的删除。
2) 若删除一条线 A，则以 A 为“桥梁”的目标必须相接，例如，隧道的删除。
3) 若删除一个面 A，则 A 的空间需要重新被划分到与 A 相接（或包含 A）的面状目标处，这常出现在分类图综合中。
4) 若被删除的目标与其他目标相离，则其周围的地图目标之间的关系可以不变。有时，依据目标的地理含义，即使被删除的目标与其他目标不是相离关系，也可以直接删除目标。

六、空间目标聚合引起的空间拓扑关系抽象

在地图综合中地图目标的聚合是一个非常重要的综合算子，在这里，只讨论离散地图目标群的聚合。若几个离散的空间目标 A_i（i=1,…,m）合并为一个空间目标 B，那么 B 与相关的其他空间目标 C_j（j＝1，…，n）之间的拓扑关系就需要重构，重构的基本原则如下：

1) A_i 之间的拓扑关系自动消失。
2) 若 C_j 穿过 A_i 的分布范围，则 C_j 与 B 相交，例如，铁路穿过合并的街区。
3) 若在地理含义上 C_j 与 B 必须相接，则 C_j 的端点在 B 的边界上，例如，公路与居民地轮廓图形之间的关系。
4) 若 B 退化为一个点，则必须保持 C_j 与 B 在地理含义上的相接；或 B 在 C_j 上，例如，居民地圈形符号在道路上。
5) 若线状目标 C_j 穿过了$\{A_i|i=1,\ldots,m\}$的分布范围，$\{A_i|i=1,\ldots,m\}$绝大部分位于 C_j 的某一侧，则 C_j 与 B 外相切。同时，若 B 此时退化为一个点，则 B 与 C_j 之间的距离必须小于给定的阈值。当 C_j 和$\{A_i|i=1,\ldots,m\}$之间都相离时，若存在一个 A_i 与 C_j 之间的最短距离小于给定的阈值，则 C_j 与 B 之间外相切，否则 C_j 与 B 之间相离。

第四节　空间拓扑关系类型的抽象

一、线与线之间拓扑关系的抽象

线由端点和线的开集组成，这里假设线是简单的线，即一条线有且仅有两个不重合的端点；线自身不相交。显然，线与线之间拓扑关系在等价转换后，仍需保持这些特点。与端点相关的拓扑关系只有当与端点关联的线段太短时才发生拓扑关系变化，如图 13-25（a）所示。

（a）　　　　（b）　　　　（c）

图 13-25、成分抽象的规则

在一条线的端点与另一条线的拓扑关系保持不变的前提下，两条线的内部（线的开集）之间拓扑关系在空间抽象过程中会发生变化：复杂程度减少，成分数减少。两条线的开集之间拓扑关系的基本成分是：重叠、相交和相切。若一个端点与另一成分相邻，则该端点也是一个成分。这些成分抽象时的规律如下：

1） 一条简单线的两个端点不能在抽象后重合。

2） 线简化后不能自交，如图 13-25（b）所示。

3） 端点与另一条线的拓扑关系只有在最邻近的成分不为空时，才能发生转换，端点与线之间的左右邻近关系始终不能发生变化。如图 13-25（c）所示。

4） 必须始终遵循线的一维延展性空间特征（简称：“线性特征”），只考虑成分的长度。

5） 成分维数可以从 1 维转换为 0 维。

6） 成分数量应该由多变少，要么两个成分合并为一个成分，要么表现为去掉一些意义不大的成分。

成分的减少或合并都与两个相邻的成分的类型有关。成分有 4 类：相交点、相切点、重叠和端点。这些成分中，“重叠”成分可以直接简化为一个“点”，其他的成分在空间抽象过程中就需要考虑其相邻的成分。成分本身和两个成分之间的图形在简化过程中会引起拓扑关系的变化。两个成分之间的图形在简化过程中必须遵循线的“线性特征”，用线的长度来控制拓扑关系的变化，只有当两个相邻成分之间的所有线段的长度都小于给定的阈值时，这两个成分才进行组合。对于“重叠”成分，在进行成分合并时，只考虑重叠部分的两个端点（简称“重叠点”）。相邻的两个成分在图形简化过程中的抽象规律如下：

- 第 1 类：在含有重叠成分的拓扑关系中，当重叠部分的长度小于给定的阈值时，可以转换为 0 维的相交或相切，如图 13-26（a）、（b）和（c）所示。
- 第 2 类：相交、相切、重叠这三种成分两两相邻时，相邻成分间两个线状目标的两条线段的长度都小于给定阈值时，可将这两个成分合并为一个新成分或者去掉其中的一个成分。图 13-26（d）是两个相交成分转换为一个相切成分；图 13-26（e）和（f）分别是相交与相切、相交与重叠相邻的情况，在满足同样条件下，在图 13-26（e）中去掉了相切成分，在图 13-26（f）中去掉了相交成分；图 13-26（g）是相切与重叠相邻，图 13-26（h）是重叠和重叠相邻，当相邻两成分间的两条线段的长度小于给定阈值时，在图 13-26（g）中去掉了相切成分，图 13-26（h）的两重叠合并为一个重叠。
- 第 3 类：当参考线上的端点与相交（或相切、或重叠）相邻时，若端点及其相邻

成分间两条线段的长度都小于给定阈值时，将端点与相邻的重叠点（或相切点、或相交点）合并，如图 13-26（i）、（j）和（k）所示。

- 第 4 类：当不在参考线上的端点与相交（或相切、或重叠）相邻时，若端点到相邻成分点间的线段长度小于给定阈值时，端点可移至相邻点，如图 13-26（l）、（m）和（n）所示。
- 第 5 类：一条线的端点在参考线上，且参考线的端点与该端点之间的线段小于给定阈值时，两条线的端点可重合，如图 13-26（o）所示。

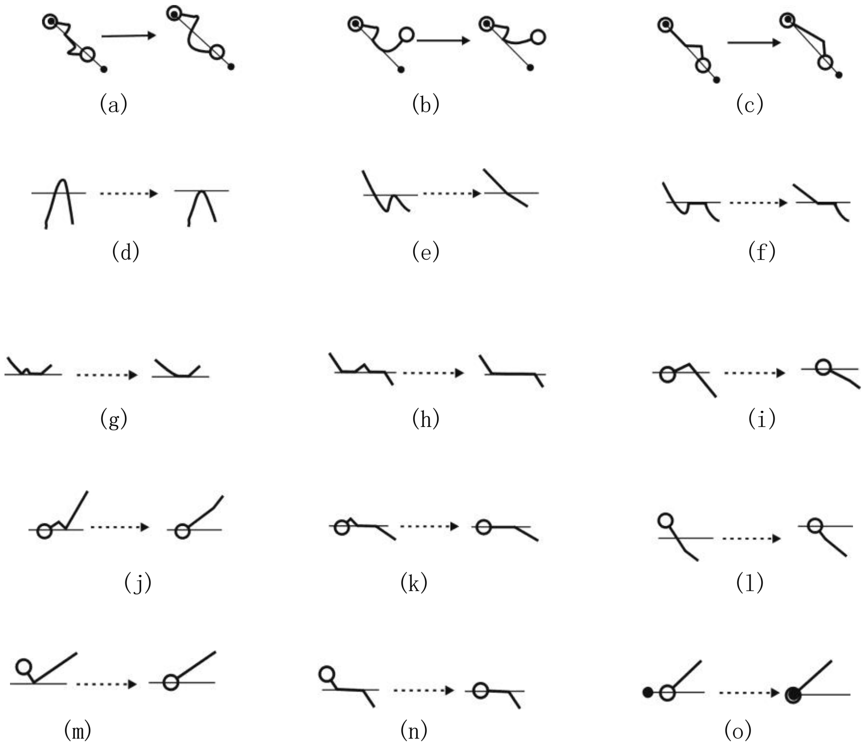


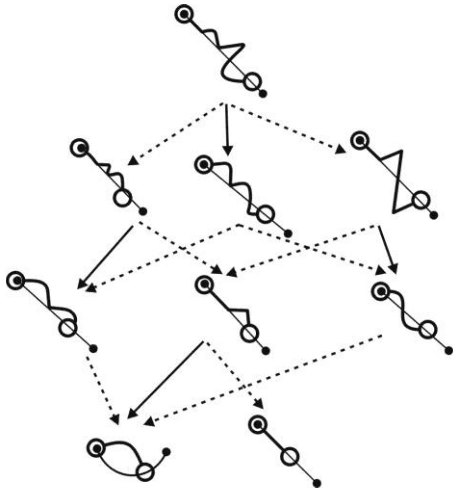
图 13-26、相邻两个成分的抽象

线状目标之间的拓扑关系类型是任意线状目标之间拓扑关系的典型代表，因此研究这些拓扑关系在空间抽象过程中的等价转换是非常有意义的。依据图 13-26 的 15 种可能的转换方法，我们分两步对线状目标之间拓扑关系在抽象过程中的转换进行分析。从拓扑关系的成分变化来看，第 1 类转换是维数减少的变化，由重叠转化为相切或相交，用“实线箭头”表示这类转换，第 2、3、4 和 5 类属于同一种性质，成分已减少或被删除，用“虚线箭头”表示，箭头起始位置所在的拓扑关系是抽象前较复杂的拓扑关系，箭头所指的拓扑关系即为抽象后的拓扑关系，如图 13-26 所示。

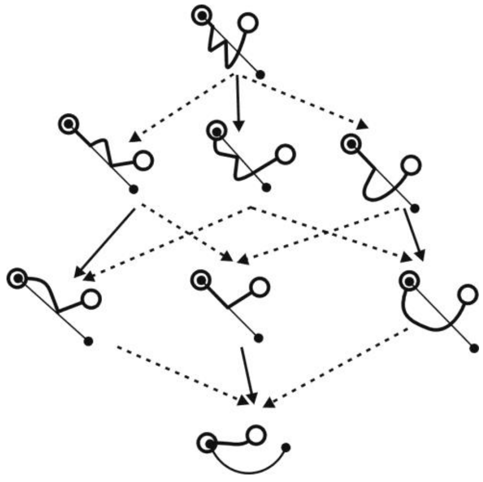
将线的端点与线之间的空间拓扑关系分为 9 种类型，在这些拓扑关系保持不变的情况下，依据成分抽象的等价转换方法，若不考虑线的左右邻域特征，可以得到线状目标间基本拓扑关系抽象的等价转换图，如图 13-27 所示，这里并没有考虑线之间的交集为空的情况。图 13-27 遵循了成分抽象的前三类转换方法。图 13-27（f）中的第 1、2 号拓扑关系类型都表示：一条线的两个端点分别在参考线的左右邻域，两条线的开集之间存在重叠和相离两种基本关系，其中第 1 类拓扑关系可以等价转换为第 3 类拓扑关系，第 2 类拓扑关系等价转换为第 4 类拓扑关系。

利用成分抽象中的第 4、5 类与端点有关的抽象方法可以绘出相应的与端点有关的拓扑关系在抽象过程中的转换图，如图 13-27 (g)所示。其他相应的拓扑关系也可以按同样转换方

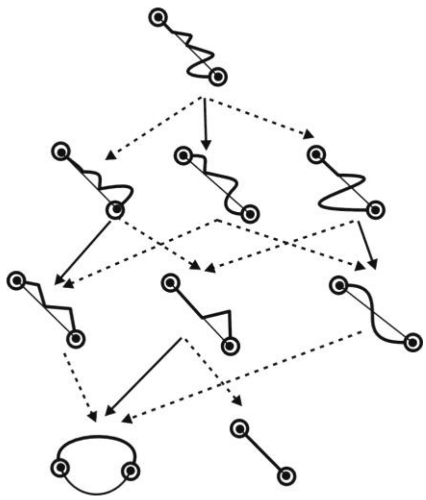
法处理。



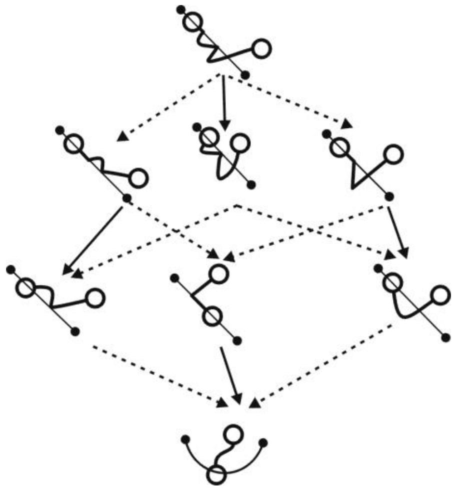
(a)



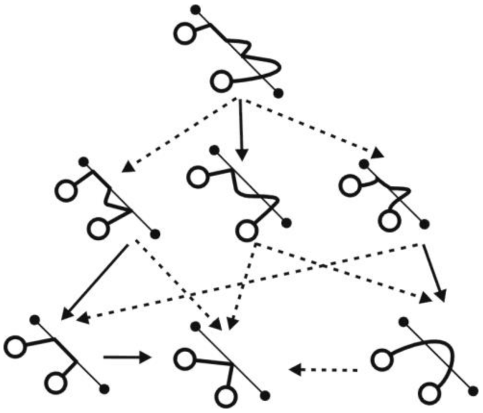
(b)

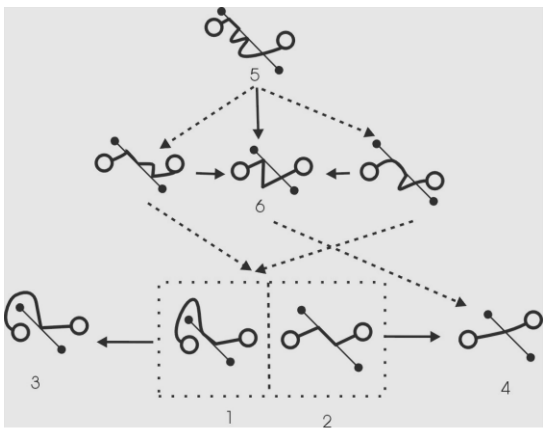


(c)

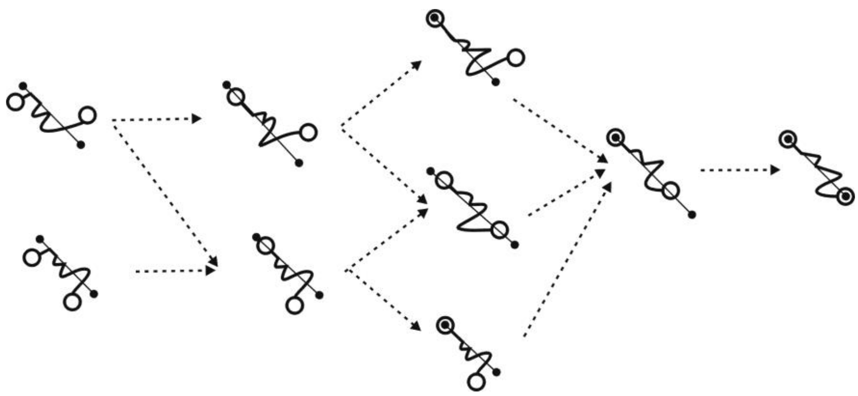


(d)

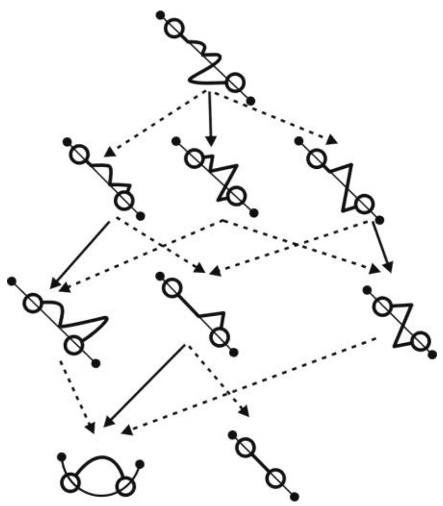




(e)　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　（f）



(g)



(h)

图 13-27、线状目标之间拓扑关系的抽象

当然，图 13-27 中的图形只表示线状目标间拓扑关系在转换前后的拓扑关系类型，不能直接把它看成是两个实际空间对象之间拓扑关系的转换，比如图 13-27（f）中第 5 号类型（重叠∩相切∩相交∩相离）转化为第 6 号类型（相离∩相切∩相交），就是在一定条件下重叠成分转换成了相切成分，但如果直接将图 13-27（f）中的图形看作是转换前后的实际的空间图形对象，就很难理解。

二、线与面之间拓扑关系的抽象

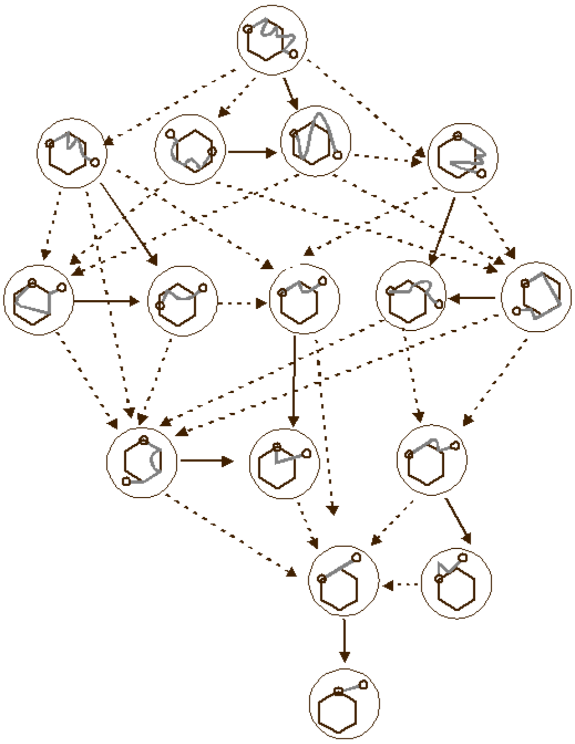
线的端点在拓扑关系表达中是非常重要的，在空间抽象过程中必须保持其与面的相对位置关系不变。在线的端点与面的拓扑关系保持不变的前提下，拓扑关系的抽象只需考虑线的内域与面之间的拓扑关系在空间抽象过程中的等价性。

线与面之间的拓扑关系在抽象过程中的转换应当考虑两个方面：

1) 从高细节层次到低细节层次的转换中成分数量应该由多变少，要么两个成分合并为一个成分，要么去掉一些意义不大的成分。
2) 成分维数可以由 1 维向 0 维转换。

依据上述规律，可以得到在图形简化过程中线与面之间拓扑关系抽象的等价转换图，如图

13-28 所示，其中“实线箭头”表示成分维数减少，“虚线箭头”表示成分减少。



(a)