

# Chap3 造型技术

---

- 基本概念
- 表示形体的模型
- 三维形体的表示
- 非规则对象的表示
- 层次模型

# 3.1 基本概念

---

- ☐ 造型技术
- ☐ 基本图形元素
- ☐ 几何信息与拓扑信息
- ☐ 实体
- ☐ 正则集合运算

# 基本概念——造型技术

---

□ 把研究如何在计算机中建立恰当的模型表示不同图形对象的技术称为造型技术。

□ 有两类图形对象：

规则对象：几何造型、几何模型。

不规则对象：过程式模拟。

# 基本概念——基本图形元素

---

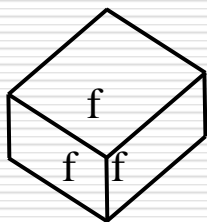
- **基本图形元素**：图素或图元、体素。
- **图素**是指可以用一定的几何参数和属性参数描述的最基本的图形输出元素。
- **段**是指具有逻辑意义的有限个图素（或体素）及其附加属性的集合。

# 基本概念——几何信息与拓扑信息

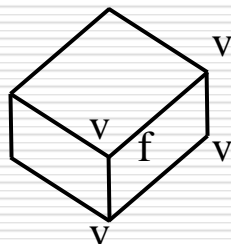
---

## □ 图形信息与非图形信息

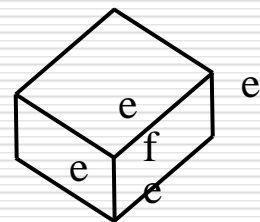
- **几何信息**：形体在欧氏空间中的位置和大小。
- **拓扑信息**：形体各分量（点、边、面）的数目及其相互间的连接关系。



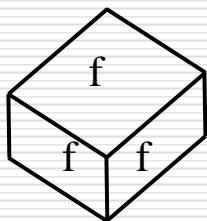
面相邻性  $f:\{f\}$



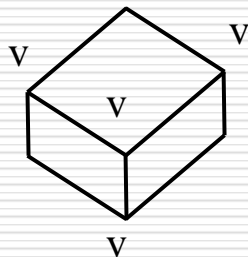
面-顶点包含性



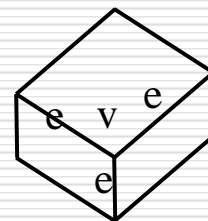
面-边包含性  $f:\{e\}$



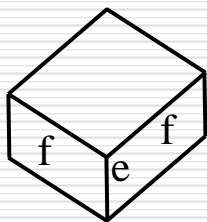
顶点-面相邻性



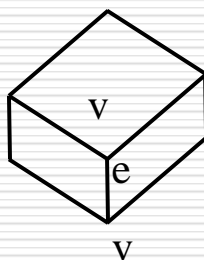
顶点相邻性



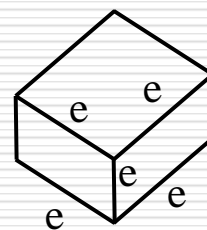
顶点-边相邻性  $v:\{e\}$



边-面相邻性  $e:\{f\}$



边-顶点包含性  $e:\{v\}$



边相邻性  $e:\{e\}$

图3.1 拓扑信息

# 基本概念——几何信息与拓扑信息

---

- **刚体运动**：不改变图形上任意两点间的距离，也不改变图形的几何性质的运动。
- **拓扑运动**：允许形体作弹性运动，即在拓扑关系中，对图形可随意地伸张扭曲。但图上各个点仍为不同的点，决不允许把不同的点合并成一个点。

# 基本概念——几何信息与拓扑信息

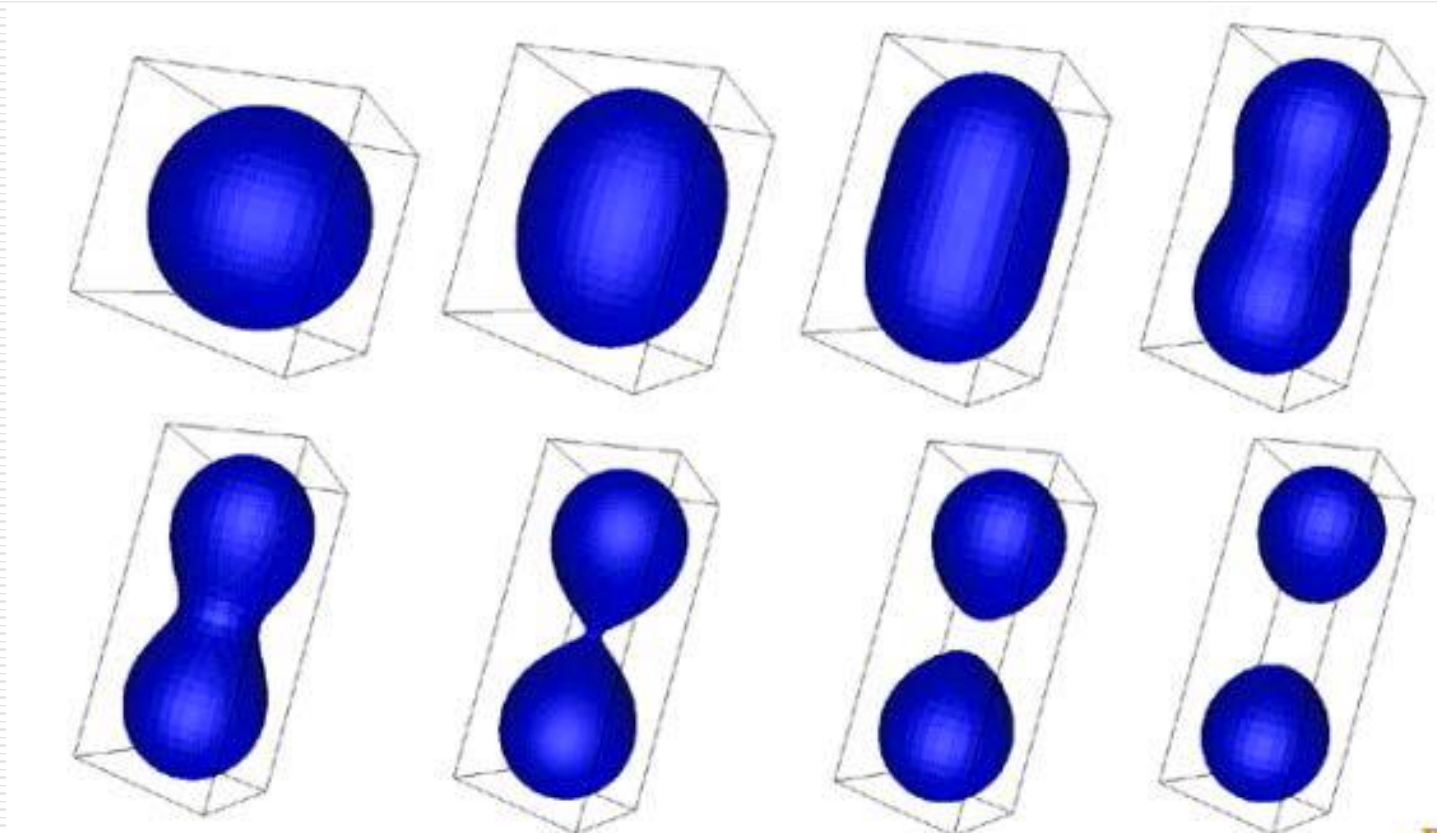
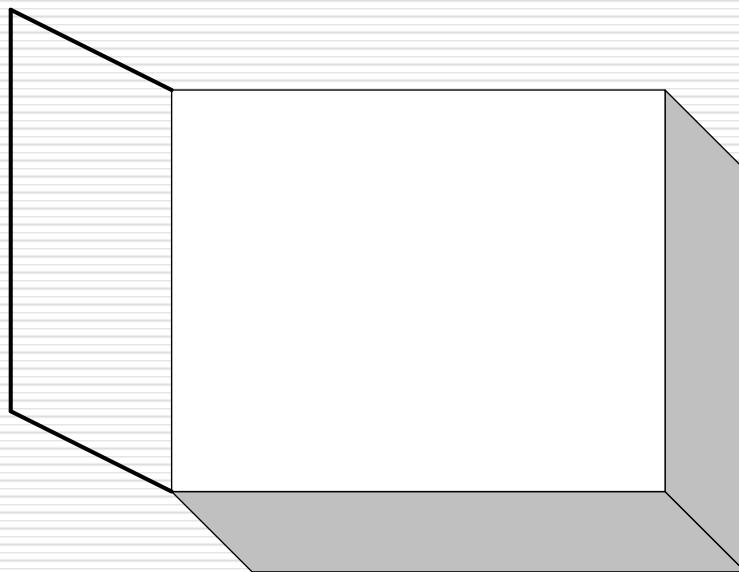


图3.2 拓扑运动



<p> <b>1</b> <b>2</b> <b>3</b> <b>4</b> <b>5</b> <b>6</b> <b>7</b> <b>8</b> <b>9</b> <b>10</b> <b>11</b> <b>12</b> <b>13</b> <b>14</b> <b>15</b> <b>16</b> <b>17</b> <b>18</b> <b>19</b> <b>20</b> <b>21</b> <b>22</b> <b>23</b> <b>24</b> <b>25</b> <b>26</b> <b>27</b> <b>28</b> <b>29</b> <b>30</b> <b>31</b> <b>32</b> <b>33</b> <b>34</b> <b>35</b> <b>36</b> <b>37</b> <b>38</b> <b>39</b> <b>40</b> <b>41</b> <b>42</b> <b>43</b> <b>44</b> <b>45</b> <b>46</b> <b>47</b> <b>48</b> <b>49</b> <b>50</b> <b>51</b> <b>52</b> <b>53</b> <b>54</b> <b>55</b> <b>56</b> <b>57</b> <b>58</b> <b>59</b> <b>60</b> <b>61</b> <b>62</b> <b>63</b> <b>64</b> <b>65</b> <b>66</b> <b>67</b> <b>68</b> <b>69</b> <b>70</b> <b>71</b> <b>72</b> <b>73</b> <b>74</b> <b>75</b> <b>76</b> <b>77</b> <b>78</b> <b>79</b> <b>80</b> <b>81</b> <b>82</b> <b>83</b> <b>84</b> <b>85</b> <b>86</b> <b>87</b> <b>88</b> <b>89</b> <b>90</b> <b>91</b> <b>92</b> <b>93</b> <b>94</b> <b>95</b> <b>96</b> <b>97</b> <b>98</b> <b>99</b> <b>100</b> <b>101</b> <b>102</b> <b>103</b> <b>104</b> <b>105</b> <b>106</b> <b>107</b> <b>108</b> <b>109</b> <b>110</b> <b>111</b> <b>112</b> <b>113</b> <b>114</b> <b>115</b> <b>116</b> <b>117</b> <b>118</b> <b>119</b> <b>120</b> <b>121</b> <b>122</b> <b>123</b> <b>124</b> <b>125</b> <b>126</b> <b>127</b> <b>128</b> <b>129</b> <b>130</b> <b>131</b> <b>132</b> <b>133</b> <b>134</b> <b>135</b> <b>136</b> <b>137</b> <b>138</b> <b>139</b> <b>140</b> <b>141</b> <b>142</b> <b>143</b> <b>144</b> <b>145</b> <b>146</b> <b>147</b> <b>148</b> <b>149</b> <b>150</b> <b>151</b> <b>152</b> <b>153</b> <b>154</b> <b>155</b> <b>156</b> <b>157</b> <b>158</b> <b>159</b> <b>160</b> <b>161</b> <b>162</b> <b>163</b> <b>164</b> <b>165</b> <b>166</b> <b>167</b> <b>168</b> <b>169</b> <b>170</b> <b>171</b> <b>172</b> <b>173</b> <b>174</b> <b>175</b> <b>176</b> <b>177</b> <b>178</b> <b>179</b> <b>180</b> <b>181</b> <b>182</b> <b>183</b> <b>184</b> <b>185</b> <b>186</b> <b>187</b> <b>188</b> <b>189</b> <b>190</b> <b>191</b> <b>192</b> <b>193</b> <b>194</b> <b>195</b> <b>196</b> <b>197</b> <b>198</b> <b>199</b> <b>200</b> <b>201</b> <b>202</b> <b>203</b> <b>204</b> <b>205</b> <b>206</b> <b>207</b> <b>208</b> <b>209</b> <b>210</b> <b>211</b> <b>212</b> <b>213</b> <b>214</b> <b>215</b> <b>216</b> <b>217</b> <b>218</b> <b>219</b> <b>220</b> <b>221</b> <b>222</b> <b>223</b> <b>224</b> <b>225</b> <b>226</b> <b>227</b> <b>228</b> <b>229</b> <b>230</b> <b>231</b> <b>232</b> <b>233</b> <b>234</b> <b>235</b> <b>236</b> <b>237</b> <b>238</b> <b>239</b> <b>240</b> <b>241</b> <b>242</b> <b>243</b> <b>244</b> <b>245</b> <b>246</b> <b>247</b> <b>248</b> <b>249</b> <b>250</b> <b>251</b> <b>252</b> <b>253</b> <b>254</b> <b>255</b> <b>256</b> <b>257</b> <b>258</b> <b>259</b> <b>260</b> <b>261</b> <b>262</b> <b>263</b> <b>264</b> <b>265</b> <b>266</b> <b>267</b> <b>268</b> <b>269</b> <b>270</b> <b>271</b> <b>272</b> <b>273</b> <b>274</b> <b>275</b> <b>276</b> <b>277</b> <b>278</b> <b>279</b> <b>280</b> <b>281</b> <b>282</b> <b>283</b> <b>284</b> <b>285</b> <b>286</b> <b>287</b> <b>288</b> <b>289</b> <b>290</b> <b>291</b> <b>292</b> <b>293</b> <b>294</b> <b>295</b> <b>296</b> <b>297</b> <b>298</b> <b>299</b> <b>300</b> <b>301</b> <b>302</b> <b>303</b> <b>304</b> <b>305</b> <b>306</b> <b>307</b> <b>308</b> <b>309</b> <b>310</b> <b>311</b> <b>312</b> <b>313</b> <b>314</b> <b>315</b> <b>316</b> <b>317</b> <b>318</b> <b>319</b> <b>320</b> <b>321</b> <b>322</b> <b>323</b> <b>324</b> <b>325</b> <b>326</b> <b>327</b> <b>328</b> <b>329</b> <b>330</b> <b>331</b> <b>332</b> <b>333</b> <b>334</b> <b>335</b> <b>336</b> <b>337</b> <b>338</b> <b>339</b> <b>340</b> <b>341</b> <b>342</b> <b>343</b> <b>344</b> <b>345</b> <b>346</b> <b>347</b> <b>348</b> <b>349</b> <b>350</b> <b>351</b> <b>352</b> <b>353</b> <b>354</b> <b>355</b> <b>356</b> <b>357</b> <b>358</b> <b>359</b> <b>360</b> <b>361</b> <b>362</b> <b>363</b> <b>364</b> <b>365</b> <b>366</b> <b>367</b> <b>368</b> <b>369</b> <b>370</b> <b>371</b> <b>372</b> <b>373</b> <b>374</b> <b>375</b> <b>376</b> <b>377</b> <b>378</b> <b>379</b> <b>380</b> <b>381</b> <b>382</b> <b>383</b> <b>384</b> <b>385</b> <b>386</b> <b>387</b> <b>388</b> <b>389</b> <b>390</b> <b>391</b> <b>392</b> <b>393</b> <b>394</b> <b>395</b> <b>396</b> <b>397</b> <b>398</b> <b>399</b> <b>400</b> <b>401</b> <b>402</b> <b>403</b> <b>404</b> <b>405</b> <b>406</b> <b>407</b> <b>408</b> <b>409</b> <b>410</b> <b>411</b> <b>412</b> <b>413</b> <b>414</b> <b>415</b> <b>416</b> <b>417</b> <b>418</b> <b>419</b> <b>420</b> <b>421</b> <b>422</b> <b>423</b> <b>424</b> <b>425</b> <b>426</b> <b>427</b> <b>428</b> <b>429</b> <b>430</b> <b>431</b> <b>432</b> <b>433</b> <b>434</b> <b>435</b> <b>436</b> <b>437</b> <b>438</b> <b>439</b> <b>440</b> <b>441</b> <b>442</b> <b>443</b> <b>444</b> <b>445</b> <b>446</b> <b>447</b> <b>448</b> <b>449</b> <b>450</b> <b>451</b> <b>452</b> <b>453</b> <b>454</b> <b>455</b> <b>456</b> <b>457</b> <b>458</b> <b>459</b> <b>460</b> <b>461</b> <b>462</b> <b>463</b> <b>464</b> <b>465</b> <b>46</b></p>
--



# 基本概念 — 实体

- **点的领域**：如果 $P$ 是点集 $S$ 的一个元素，那么点 $P$ 的以 $R$ （ $R>0$ ）为半径的领域指的是围绕点 $P$ 的半径为 $R$ 的小球（二维情况下为小圆）。
- **开集的闭包**：是指该开集与其所有边界点的集合并集，本身是一个闭集。
- **正则集**：由内部点构成的点集的闭包就是正则集，三维空间的正则集就是正则形体。

# 基本概念 — 实体

---

- 组成三维物体的点的集合可以分为两类：
  - 内点为点集中的这样一些点，它们具有完全包含于该点集的充分小的领域。
  - 边界点：不具备此性质的点集中的点。

# 基本概念——实体

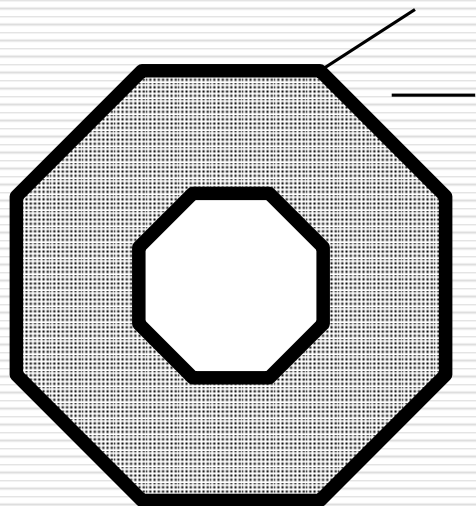
---

□ 定义点集的正则运算 $r$ 运算为:

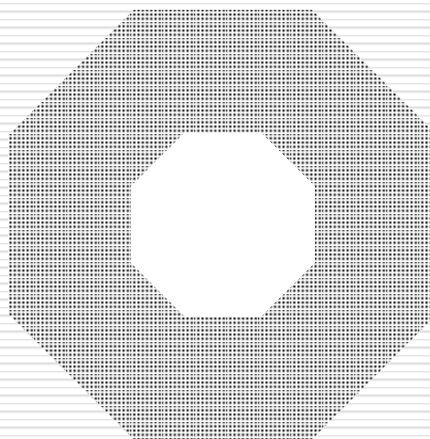
$$r \cdot A = c \cdot i \cdot A$$

□ 正则运算即为先对物体取内点再取闭包的运算。  
 $r \cdot A$ 称为 $A$ 的正则集。

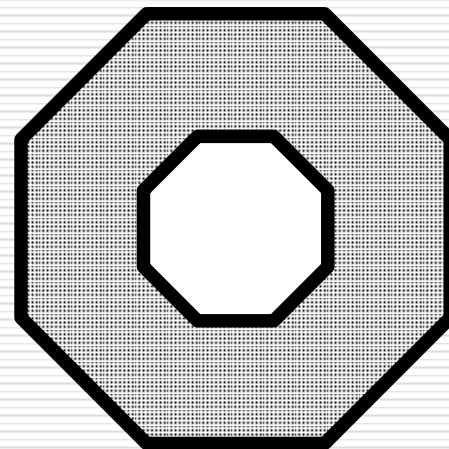
# 基本概念——实体



(a) 带有孤立点和边的二维点集A



(b) 内点集合  $i \cdot A$



(c) 正则点集  $c \cdot i \cdot A$

图3.4 实体的例子

# 基本概念——实体

---

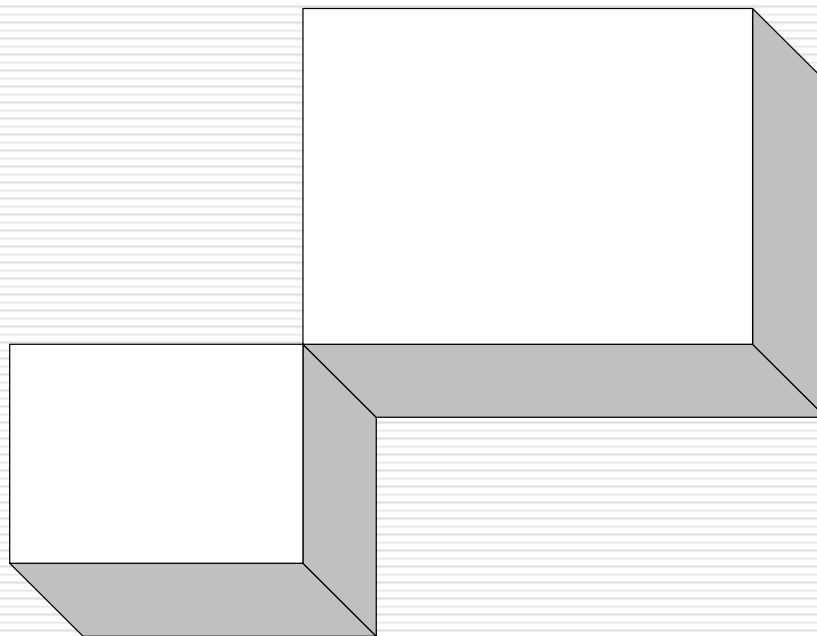
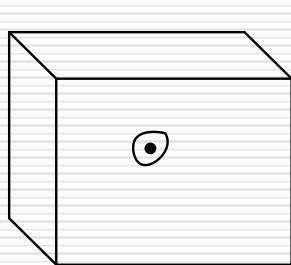


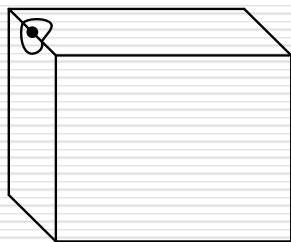
图3.5 正则形体

# 基本概念——实体

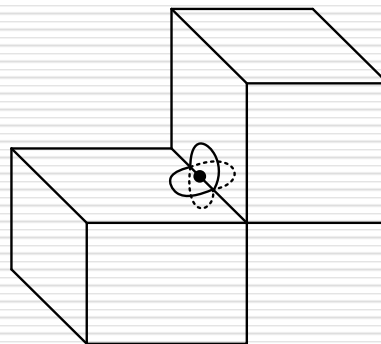
□ **二维流形**指的是对于实体表面上的任意一点，都可以找到一个围绕着它的任意小的领域，该领域与平面上的一个圆盘是拓扑等价的。



(a) 二维流形



(b) 二维流形



(c) 非二维流形

图3.6 正则形体

# 基本概念——实体

---

- 实体： 对于一个占据有限空间的正则形体，如果其表面是二维流形，则该正则形体为实体。



# 基本概念——正则集合运算

---

- 有效实体的封闭性。
- 把能够产生正则形体的集合运算称为正则集合运算。

# 基本概念——正则集合运算

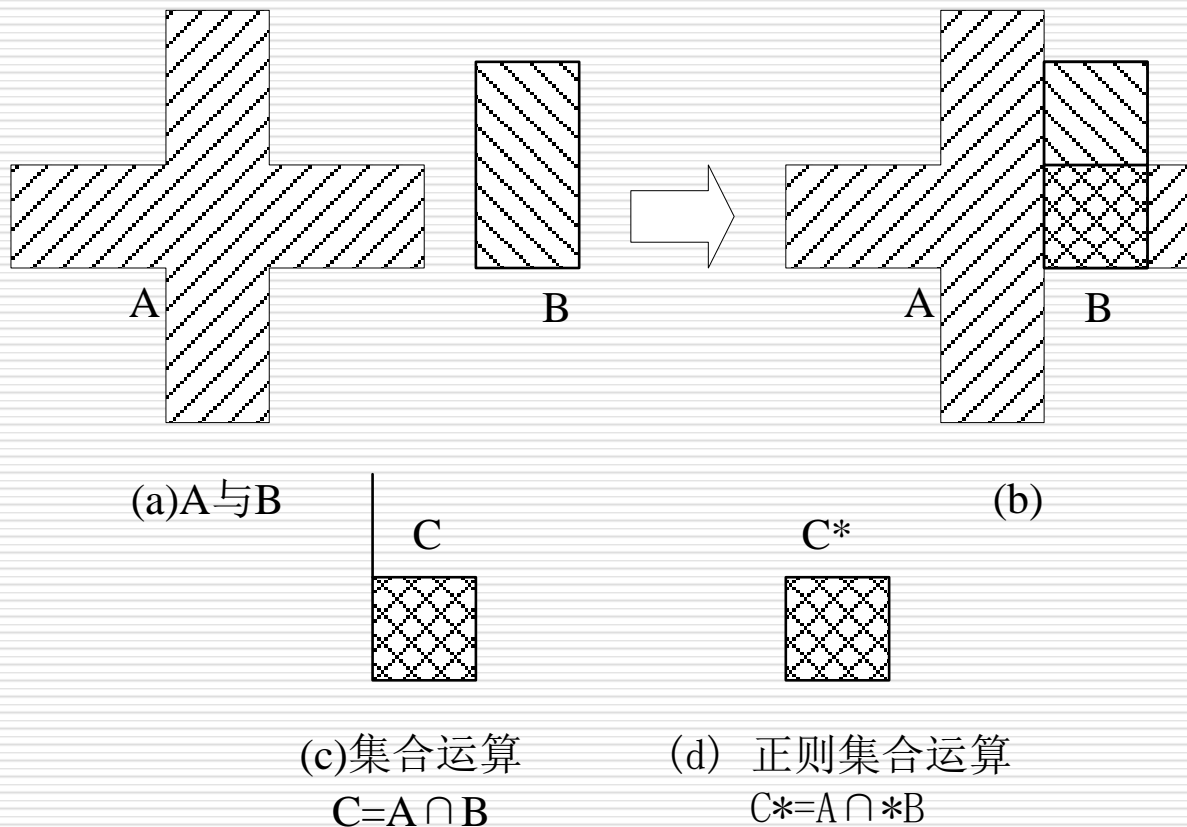


图3.7 集合运算与正则集合运算

# 基本概念——正则集合运算

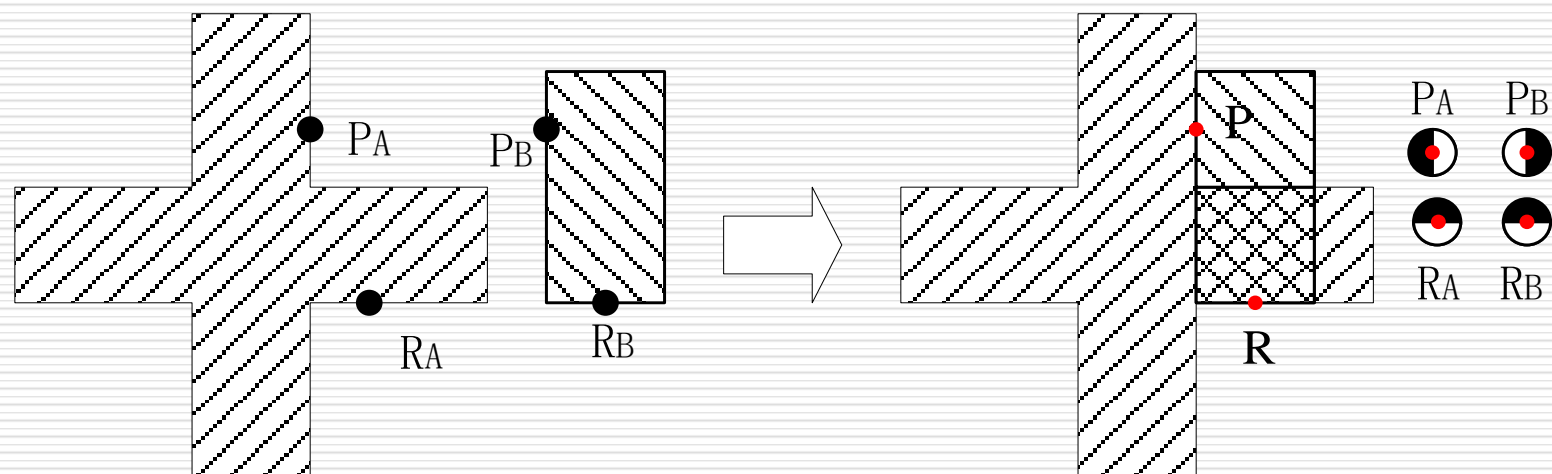


图3.8 基于点的领域概念生成正则形体

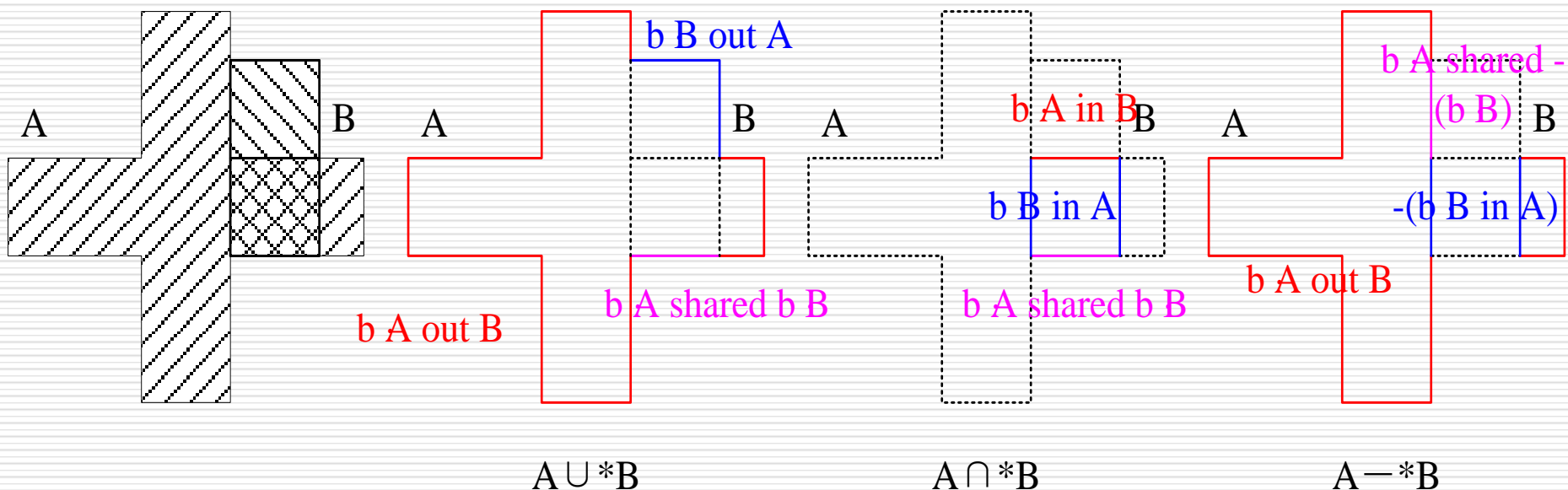


图4.8 正则集合运算 $A \cup B$ ,  $A \cap B$ ,  $A - B$ 的结果（实线表示结果形体的边界）

$$b \cdot (A \cup B) = \{b \cdot A \text{ out } B, b \cdot B \text{ out } A, b \cdot A \text{ shared } b \cdot B\}$$

$$b \cdot (A \cap B) = \{b \cdot A \text{ in } B, b \cdot B \text{ in } A, b \cdot A \text{ shared } b \cdot B\}$$

$$b \cdot (A - B) = \{b \cdot A \text{ out } B, -(b \cdot B \text{ in } A), b \cdot A \text{ shared } -(b \cdot B)\}$$

## 3.2 表示形体的模型

---

- 线框模型
- 表面模型
- 实体模型

# 线框模型 (Wireframe Model)

---

- 将形体表示成一组轮廓线的集合
- 采用顶点表和边表两个表的数据结构来表示三维物体
  - 顶点表记录各顶点的坐标值
  - 边表记录每条边所连接的两个顶点

# 线框模型

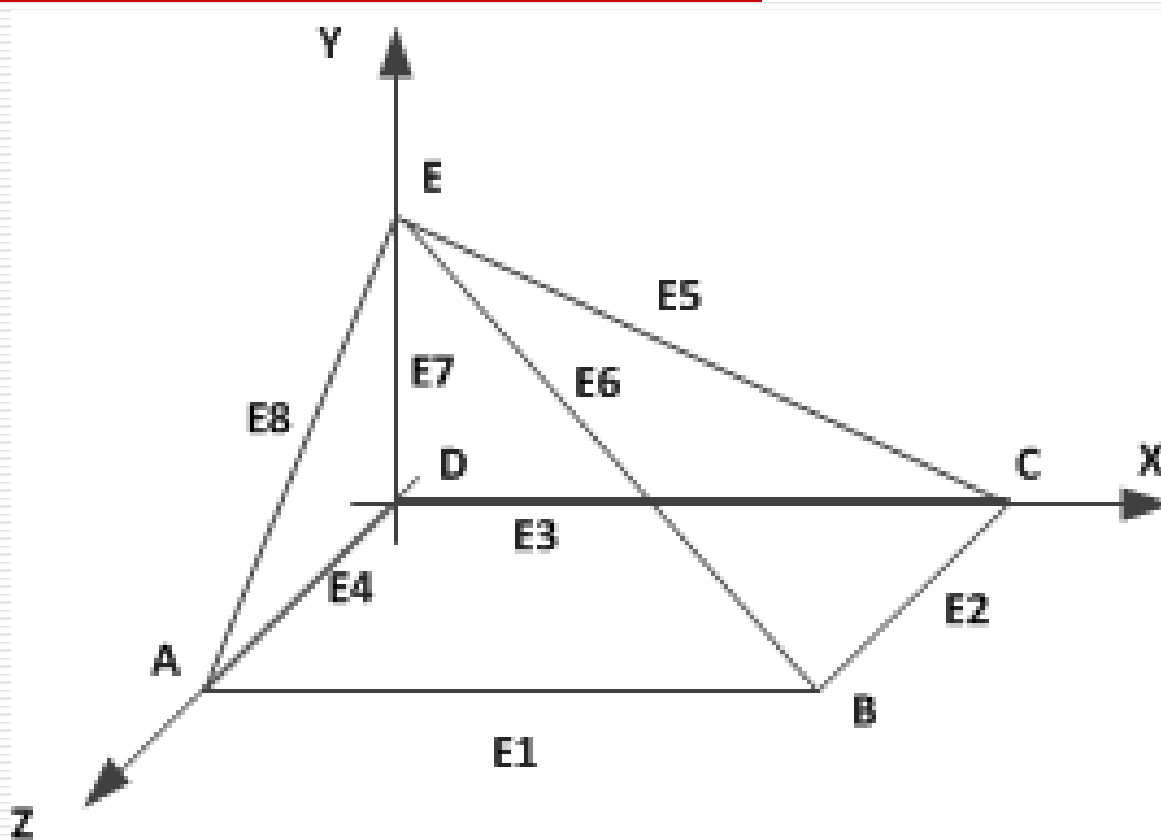


图3.9 线框模型

# 线框模型

表3.1 线框模型的顶点表和边表

顶点表	A	B	C	D	E
x坐标	0	<i>a</i>	<i>a</i>	0	0
y坐标	0	0	0	0	<i>b</i>
z坐标	<i>c</i>	<i>c</i>	0	0	0

边号	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
起点号	A	B	C	D	E	E	E	E
终点号	B	C	D	A	C	B	A	D



# 线框模型

---

- 优点：简单，处理速度快，可以产生任意视图
- 缺点
  - 缺少曲面轮廓线
  - 线框模型与形体之间不存在一一对应关系
  - 缺少面的信息，不能构成实体，有二义性

# 表面模型 (Surface Model)

---

- 将形体表示成一组表面的集合
- 通常用于构造复杂的曲面物体
- 把线框模型中的棱线包围的部分定义为面，所形成的模型便是表面模型。
- 数据结构是在顶点表和边表的基础上增加面表

# 表面模型

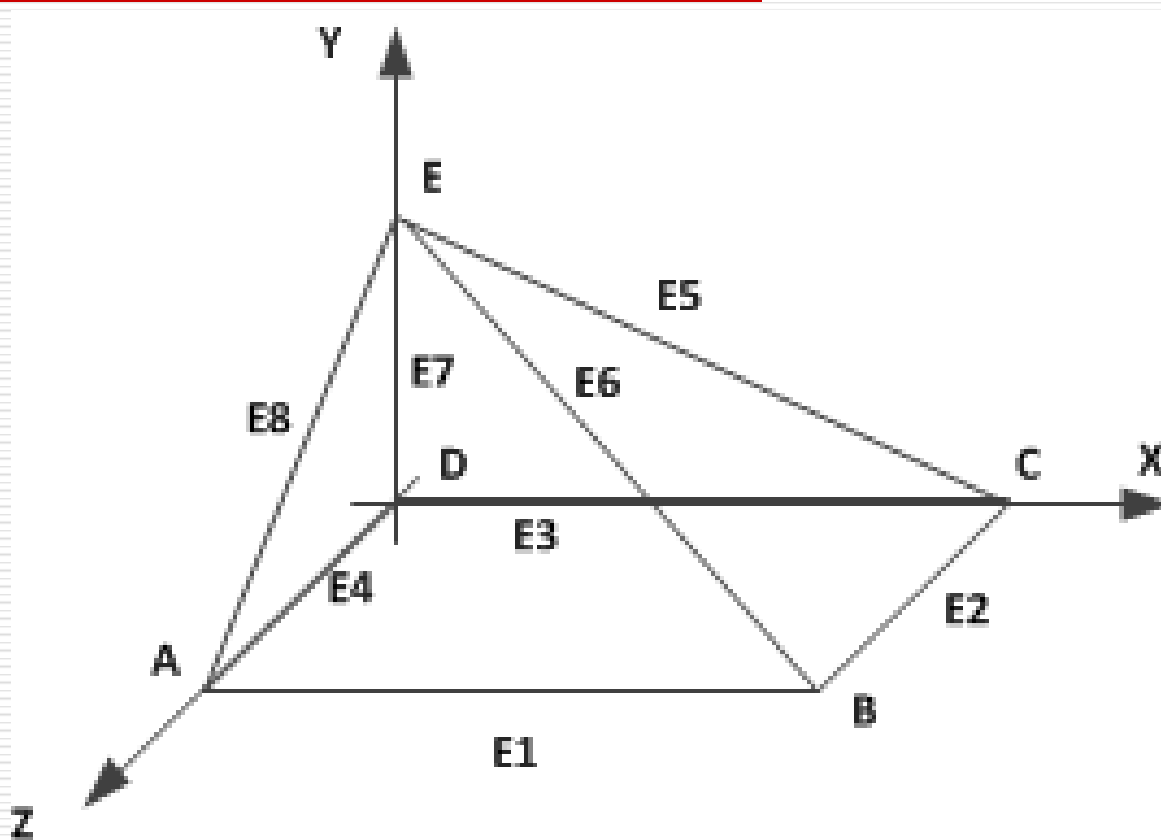


图3.10 线框模型

# 表面模型

表3.2 面表

面号	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>
边号	<i>E1</i>	<i>E1</i>	<i>E2</i>	<i>E3</i>	<i>E4</i>
	<i>E2</i>	<i>E6</i>	<i>E5</i>	<i>E5</i>	<i>E7</i>
	<i>E3</i>	<i>E8</i>	<i>E6</i>	<i>E7</i>	<i>E8</i>
	<i>E4</i>				

# 表面模型

---

## □ 优点

- 有面的信息，适合于真实感显示
- 擅长于构造复杂的曲面物体

## □ 缺点

- 模型所有的面未必形成一个封闭的边界
- 面没有定义朝向

# 实体模型 (Solid Model)

---

- 用来描述实体
- 包含了描述一个实体所需的几何信息和拓扑信息

# 总结

---

- 线框模型、表面模型和实体模型是一种广义的概念，并不反映形体在计算机内部的具体表示方式。
- 一个几何造型系统一般根据应用的要求和计算机条件采用某几种表示的混合方式。

## 3.3 三维形体的表示

---

- 构造实体几何表示
- 空间分割（**Space-partitioning**）表示
- 边界表示（**Boundary representation, B-reps**）



# 三维形体的表示

---

- 扫描表示
- 构造实体几何法
- 空间位置枚举表示
- 八叉树
- 多边形表面模型

## 3.3.1 扫描表示

---

- 扫描表示法 (**sweep representation**) 可以利用简单的运动规则生成有效实体。
- 包含两个要素
  - 一是作扫描运动的基本图形（截面）；
  - 二是扫描运动的方式。

# 扫描表示

---

## □ 广义扫描

- 任意物体沿着任意轨迹推移
- 推移过程中物体可以变形

# 扫描表示

---

## □ 优点

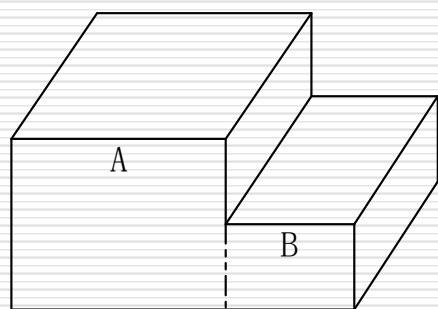
- 表示简单、直观
- 适合做图形输入手段

## □ 缺点

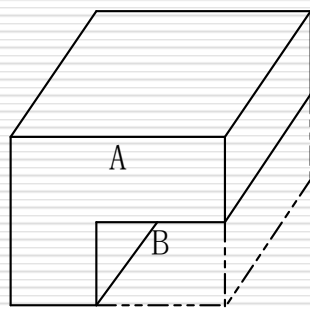
- 几何变换困难
- 对几何运算不封闭
- 形体可能出现维数不一致的问题
- 不能直接获取形体的边界信息

## 3.3.2 构造实体几何法

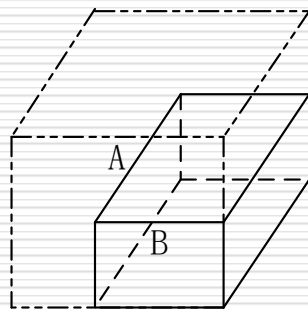
□ 构造实体几何法 (CSG, Constructive Solid Geometry) 由两个实体间的并、交或差操作生成新的实体。



(a) A, B形体的并



(b) A, B形体的差



(c) A, B形体的交

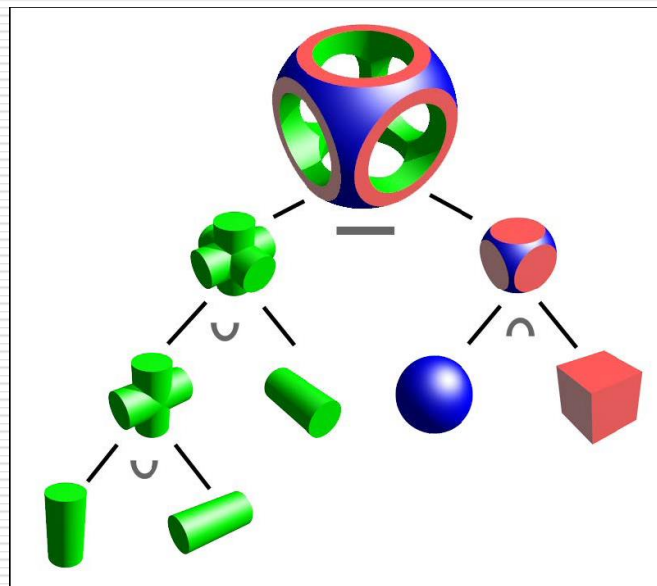


图3.11 构造实体几何法

# 构造实体几何法

---

- 在构造实体几何法中，集合运算的实现过程可以用一棵二叉树（称为**CSG**树）来描述。
- 树的叶子是基本体素或是几何变换参数；
- 树的非终端结点是施加于其子结点的正则集合算子（正则并、正则交和正则差）或几何变换的定义。

# 构造实体几何法

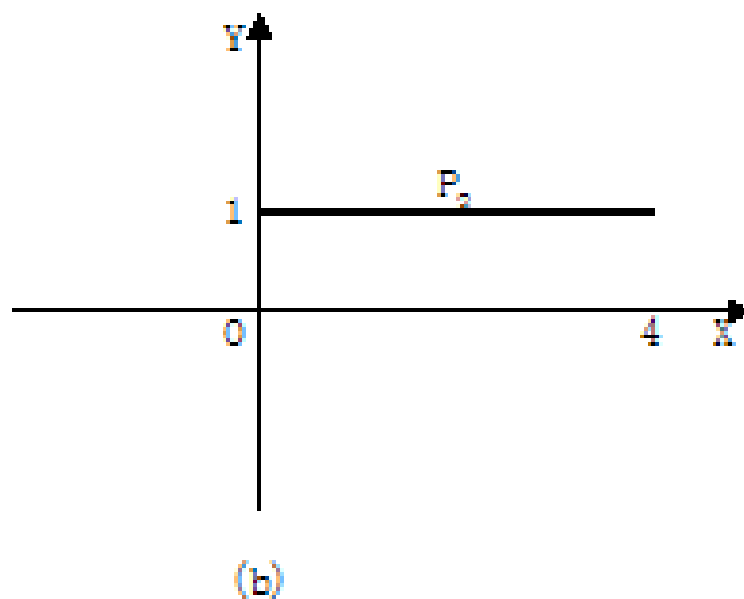
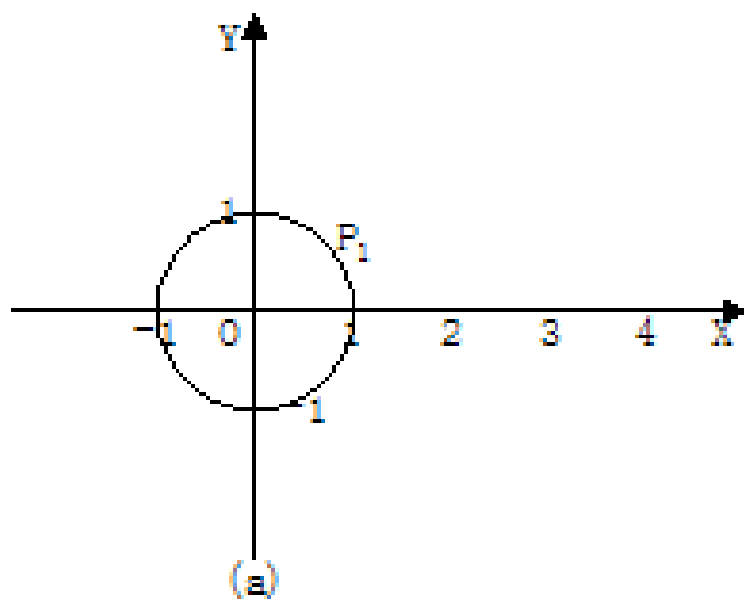
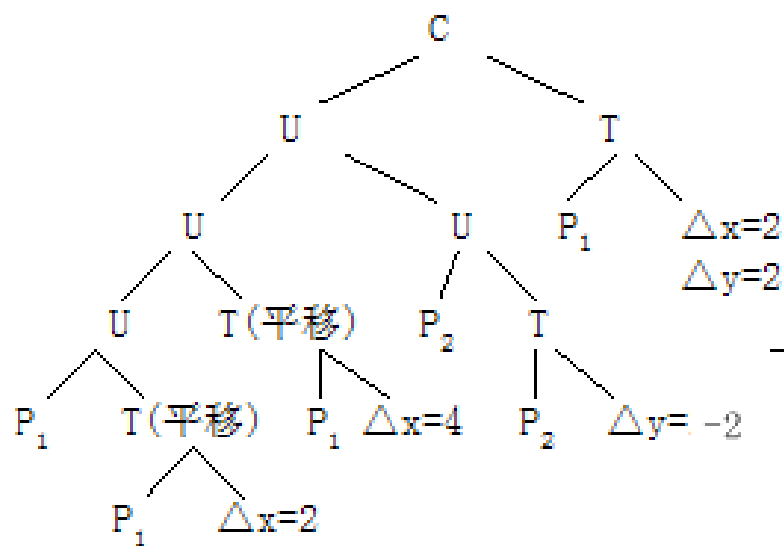
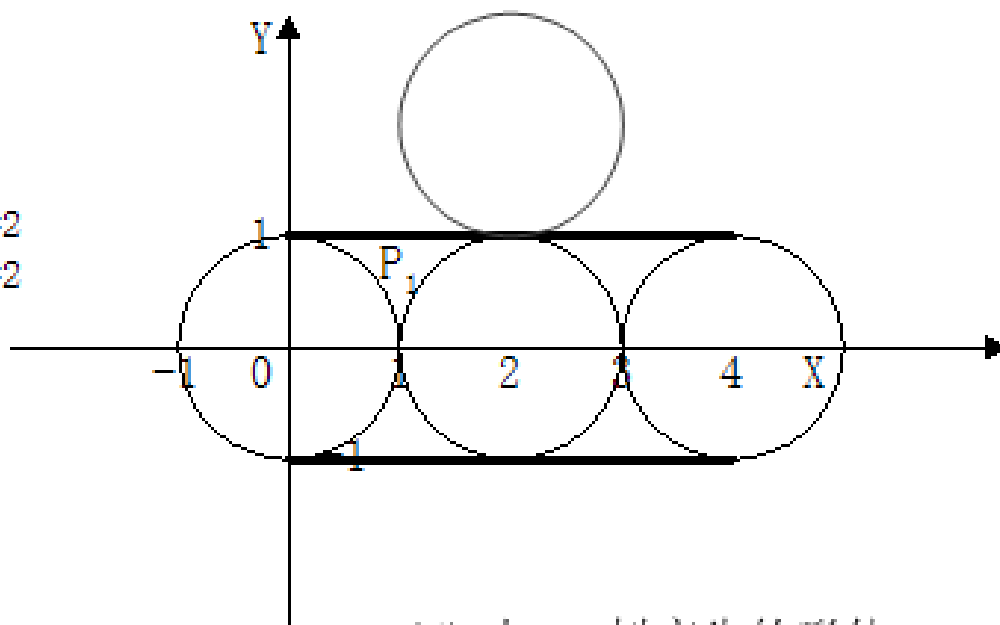


图3.12 由**CSG**树产生二维形体的实例

# 构造实体几何法



(c) CSG树



(d) 由CSG树产生的形体

图3.13 由**CSG**树产生二维形体的实例



# 构造实体几何法

---

## □ 优点

- 数据结构比较简单，数据量比较小，内部数据的管理比较容易
- 物体的有效性自动得到保证
- 比较容易修改

# 构造实体几何法

---

## □ 缺点

- 受体素的种类和对体素操作的种类的限制
- 集合运算的中间结果难以用简单的代数方程表示，求交困难。
- **CSG**树不能显式地表示形体的边界，显示与绘制**CSG**表示的形体需要较长的时间。

# 构造实体几何法

## □ 解决：光线投射算法

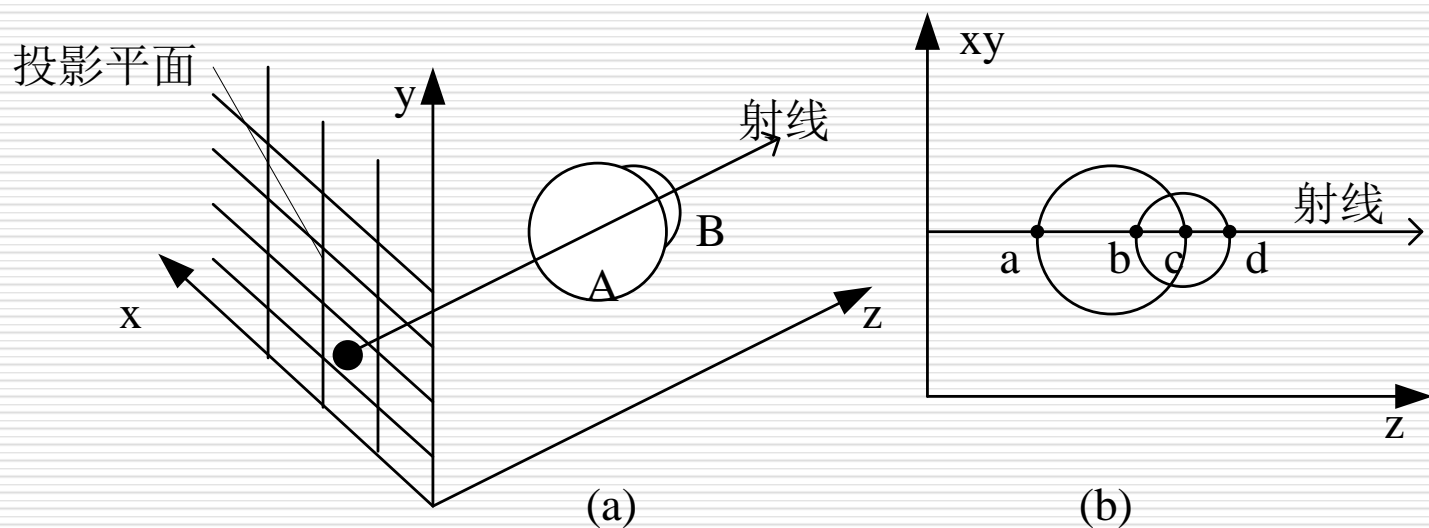


图3.14 光线投射算法

(实体 $A \cup B$ 取 $ad$ , 实体 $A \cap B$ 则取 $cb$ , 实体 $A - B$ 则取 $ab$ )

### 3.3.3 空间位置枚举表示

---

- **空间位置枚举表示法**将包含实体的空间分割为大小相同、形状规则（正方形或立方体）的体素，然后，以体素的集合来表示图形对象。
  - 二维情况，常用二维数组存放。
  - 三维情况下，常用三维数组 $p[i][j][k]$ 来存放。

# 空间位置枚举表示

---

## □ 优点

- 简单，可以表示任何物体
- 容易实现物体间的交、并、差集合运算
- 容易计算物体的整体性质，如体积等

# 空间位置枚举表示

---

## □ 缺点

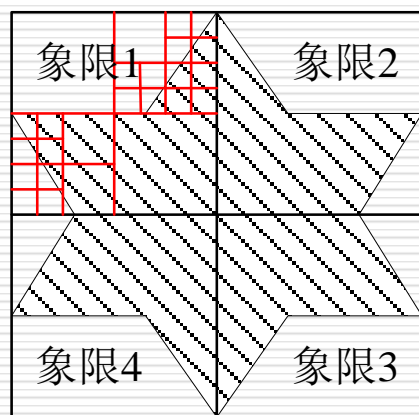
- 占用大量的存储空间
- 物体的边界面没有显式的解析表达式，不适于图形显示
- 对物体进行几何变换困难，如非90度的旋转变换
- 是物体的非精确表示

## 3.3.4 八叉树

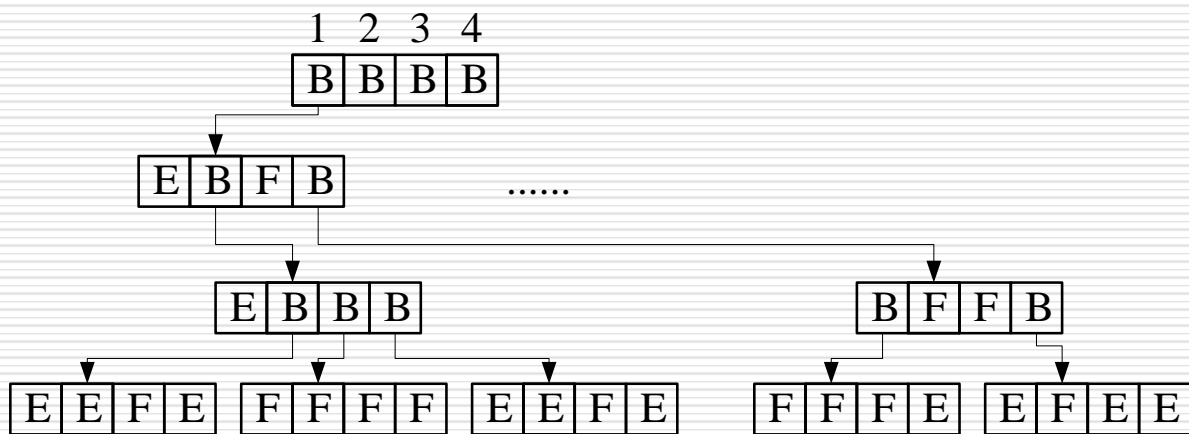
---

- 八叉树（**octrees**）又称为分层树结构，它对空间进行自适应划分，采用具有层次结构的八叉树来表示实体。

# 四叉树



(a)



(b)

图3.15 二维图的四叉树表示



# 八叉树

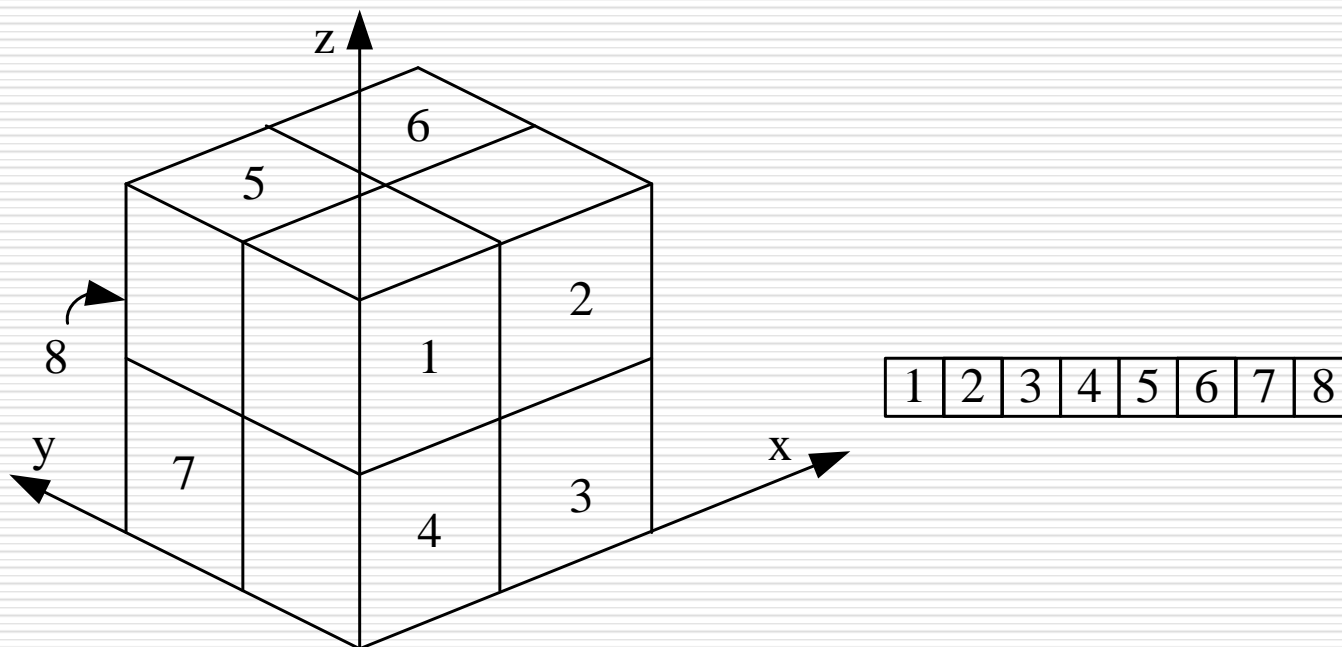


图3.16 三维空间分成八个卦限及其节点表示

# 八叉树

---

## □ 优点

- 可以表示任何物体，数据结构简单
- 简化了形体的集合运算
- 简化了隐藏线（或面）的消除，因为形体上各元素已按空间位置排成了一定的顺序
- 分析算法适合于并行处理

# 八叉树

---

## □ 缺点

- 占用大量存储。八叉树表示是以存储空间换取算法的效率
- 没有边界信息，不适于图形显示
- 对物体进行几何变换困难
- 物体的非精确表示

## 3.3.5 多边形表面模型

□ 边界表示(**B-reps**)的最普遍方式是**多边形表面模型**，它使用一组包围物体内部的平面多边形，也即平面多面体，来描述实体。

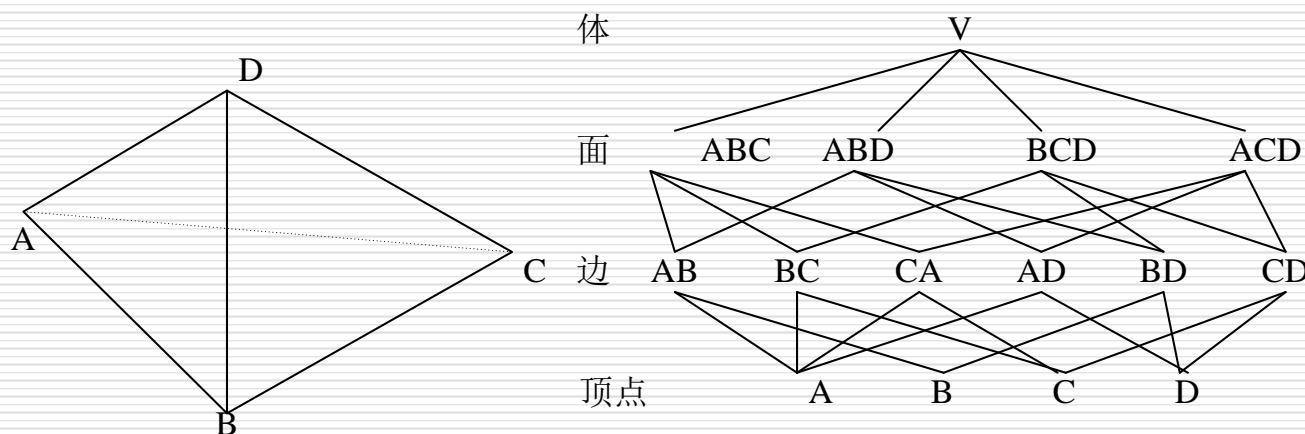


图3.17 四面体及其点、边、面的关系

# 多边形表面模型——数据结构

---

## □ 多表表示

- 建立**3**张表：顶点表、边表和多边形表来存储几何数据。
- 实体模型中，用多边形顶点坐标值以及多边形所在平面方程方式保存实体单个表面部分的空间方向信息。

# 多边形表面模型——数据结构

---

## □ 属性信息

用属性表来存储多边形面的属性，指明物体透明度及表面反射度的参数和纹理特征等等。

# 多边形表面模型——数据结构

## □ 翼边结构表示 (Winged Edges Structure)

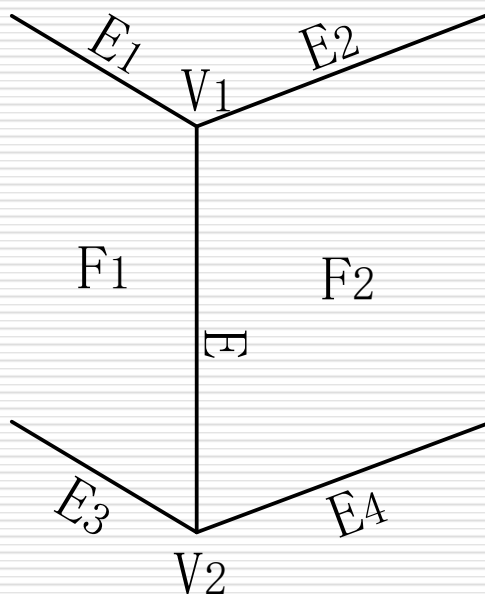


图3.18 翼边结构表示

# 多边形表面模型——数据结构

## □ 半边数据结构

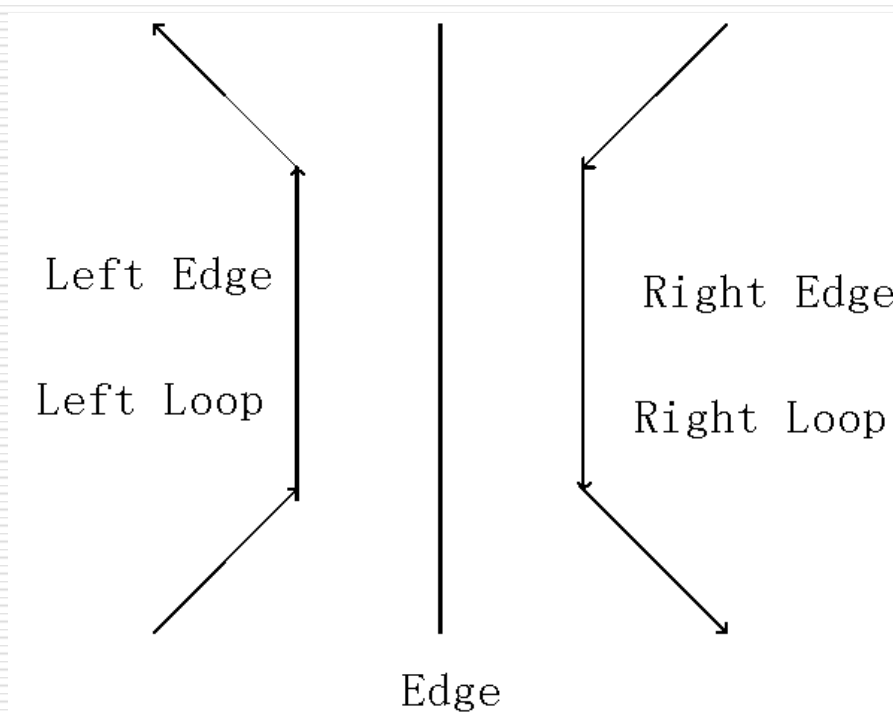


图3.19 半边结构表示



# 多边形表面模型

- ❑ 多边形网格：三维形体的边界通常用多边形网格（**polygon mesh**）的拼接来模拟。
- ❑ 例子

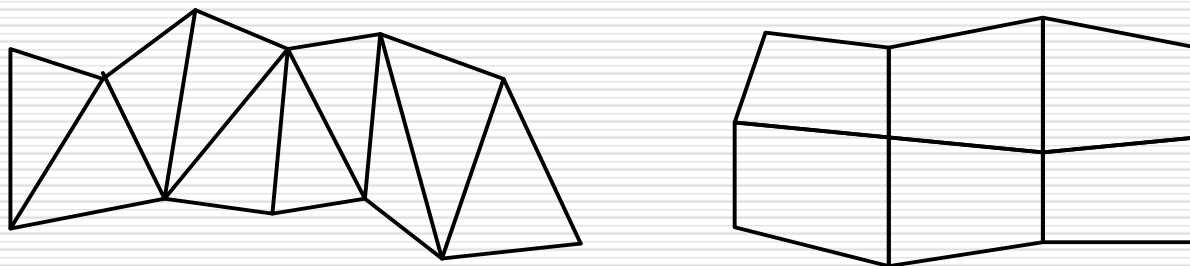


图3.20 三角形带与四边形网格

# 多边形表面模型

## □ 多边形网格优化：

复杂场景中多边形网格物体的优化方法：  
层次细节技术（LOD，  
Level of Detail）。

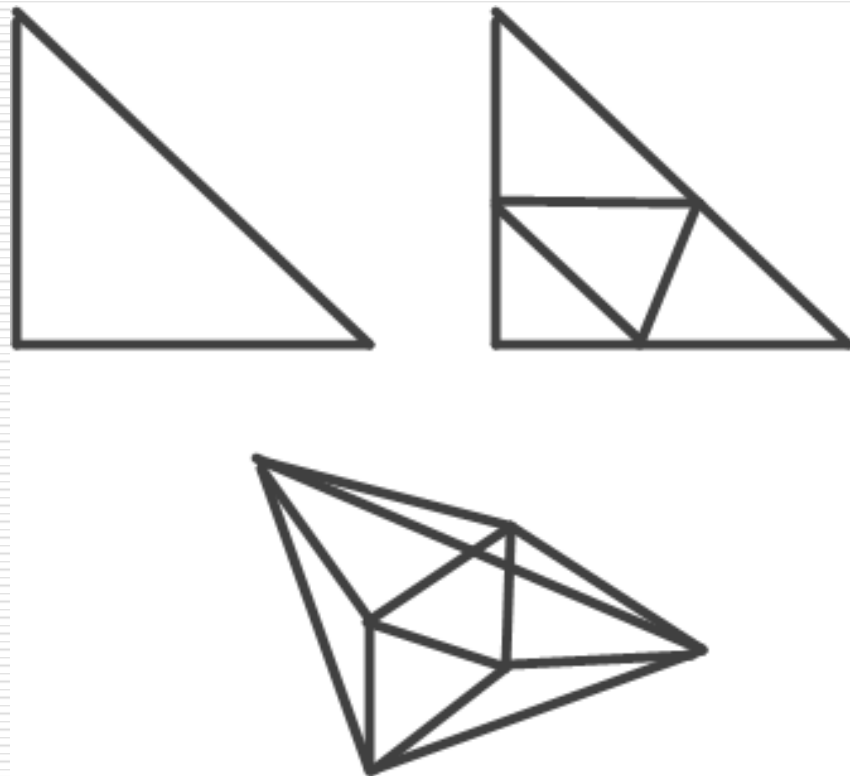


图3. 21 LOD技术

# 计算机视觉



图3.22 三维点云

# 计算机视觉

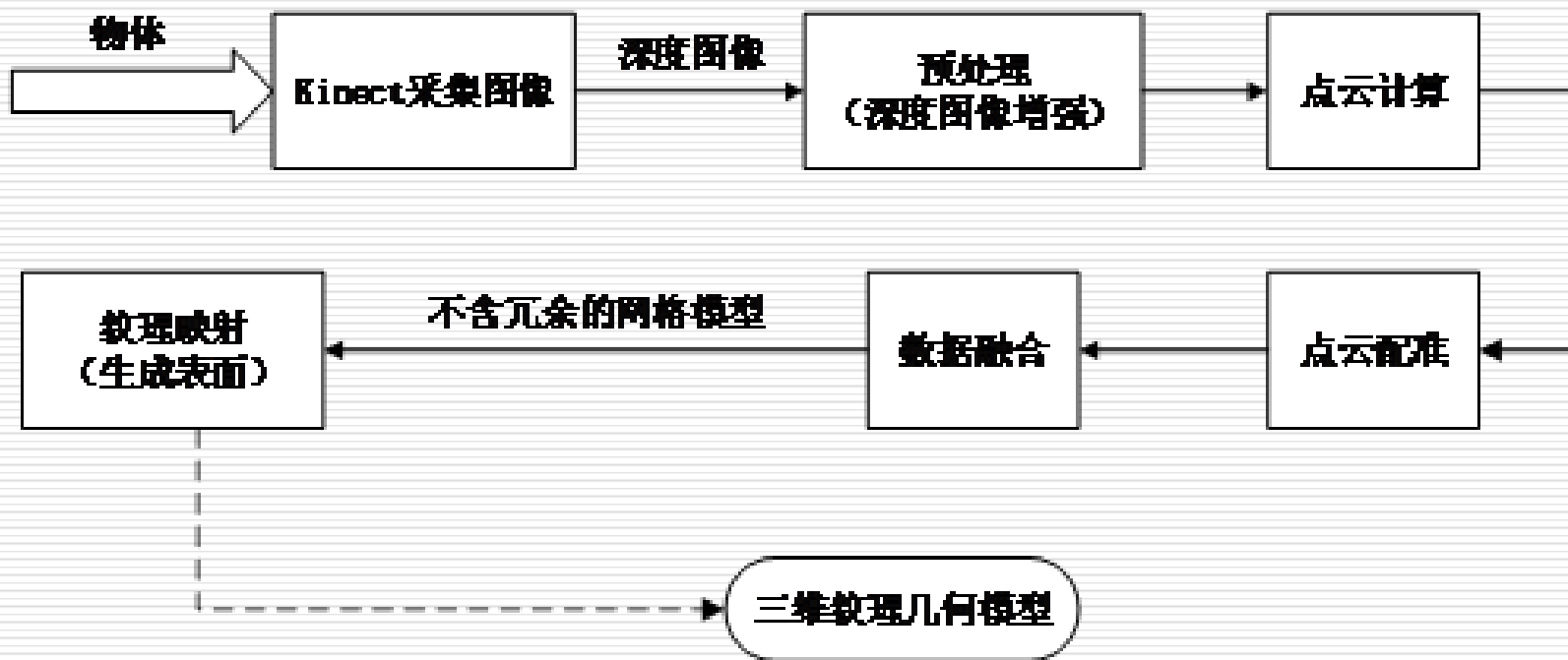


图3.23 三维重建

## 3.4 非规则对象的表示

---

- 分形几何
- 形状语法
- 微粒系统
- 基于物理的建模

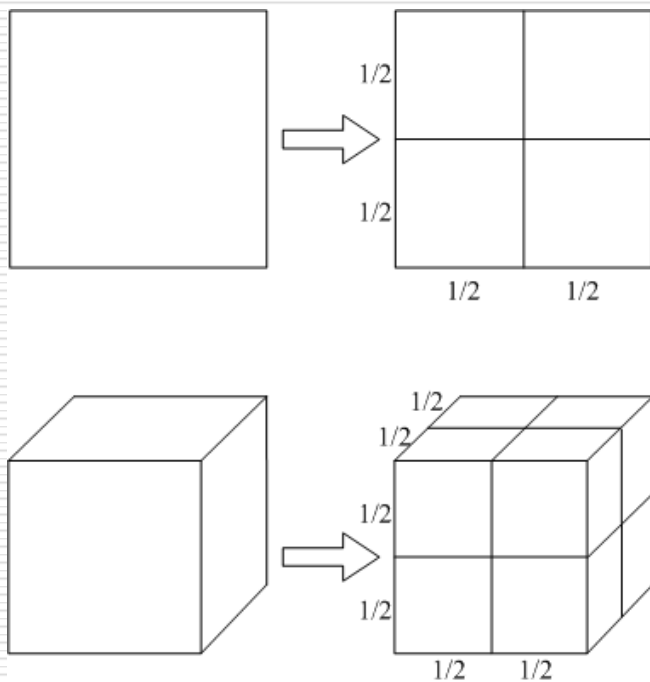
## 3.4.1 分形几何(fractal geometry)

---

- **1973年，曼德布罗特(B.B.Mandelbrot)**  
在法兰西学院讲课时，首次提出了分形和分形几何的概念
- 分形几何物体具有一个基本特征：无限的自相似性。无限的自相似性是指物体的整体和局部之间细节的无限重现。

# 分形几何

## □ 分形维数，又称分数维数



$$4 = 2^2$$

$$8 = 2^3$$

$$N = K^D$$

$$D = \lg N / \lg K$$

**K**为边长缩小倍数；

**N**为边长缩小后产生的新形体个数。

图3.24 分形维数

# 分形几何

## □ Koch雪花曲线

- 源图形通常是一条直线或一个多边形
- 将源图形中的直线段用一段折线来代替，此折线称为发生器
- 分数维  $D = \log 4 / \log 3 = 1.2619$

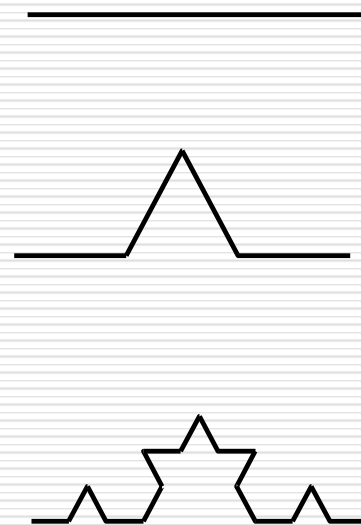


图3.25 分形维数



# 分形几何

□ 生成过程：初始生成元（**initiator**）、生成元（**generator**）。

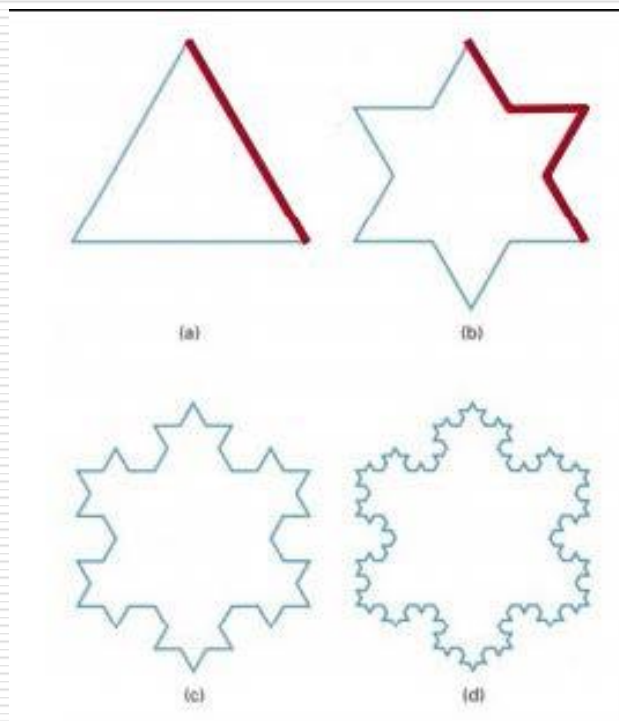
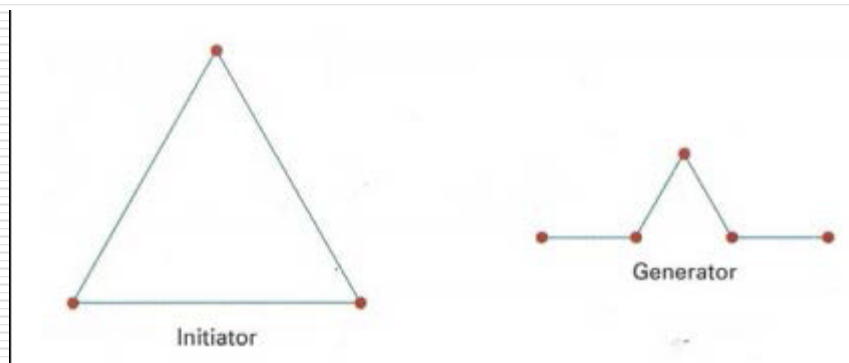


图3.26 生成过程

# L 系统

---

- 由生物学家Lindenmayer创立
- 基本思想：用文法表示植物的拓扑结构
- 常用于植物模型的建立
- 定义为三元组 $\langle V, w, P \rangle$ ，其中
  - V----字母表，表示字母集合
  - w----初始字母，初始生成元
  - P----产生式规则

# L系统

- $V: \{X, F, +, -\}$
- $w: F$
- $P: F \rightarrow FF$   
 $X \rightarrow F-[[X]+X]+F[+F]$
- 几何解释
  - $F$ : 向前画一条线
  - $+$ : 右转 $25^\circ$
  - $-$ : 左转 $25^\circ$
  - $[$ : 压栈
  - $]$ : 出栈



图3.27 蕨类（L系统）

## 基于文法的模型

字母表: **L, R**

生成规则:  **$L \rightarrow R$ ,  $R \rightarrow LR$**

初始字母: **R**

则有:  **$R \rightarrow LR \rightarrow RLR \rightarrow LRRLR \rightarrow RLRLRLR \dots$**

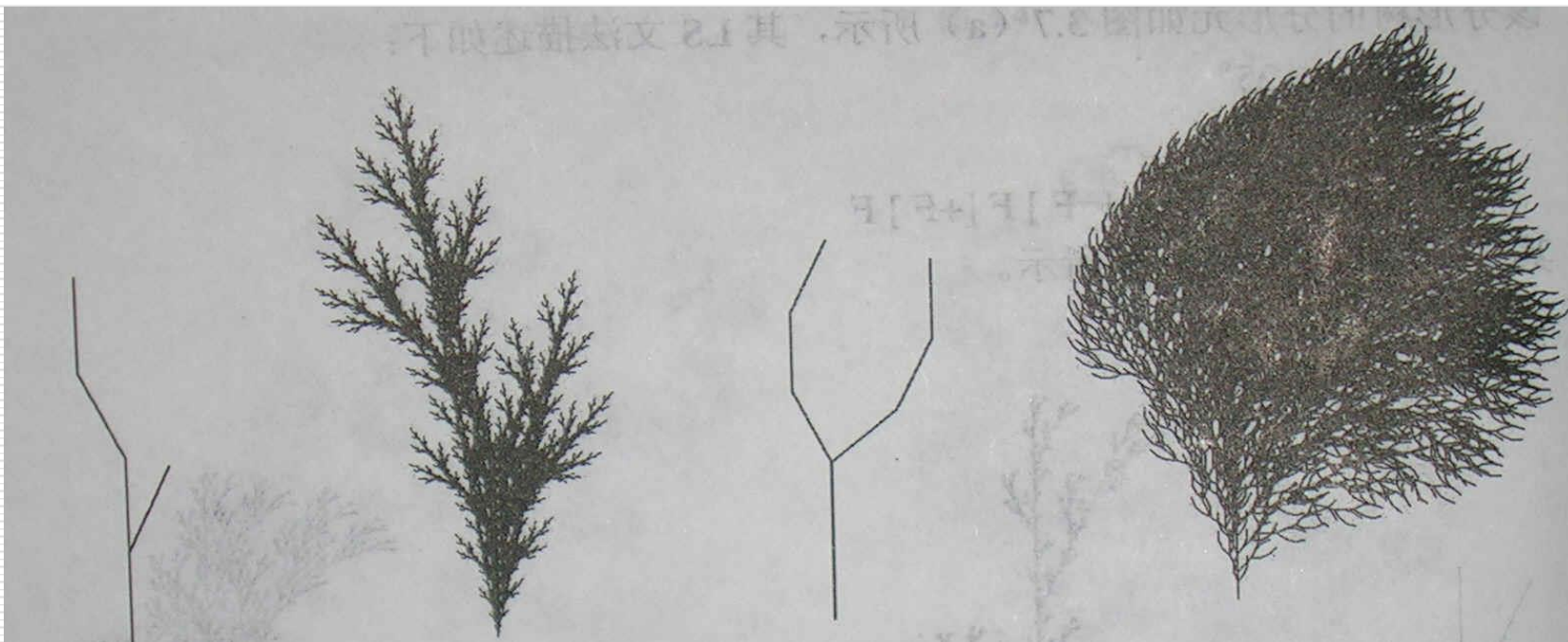


图3.28 基于文法的模型



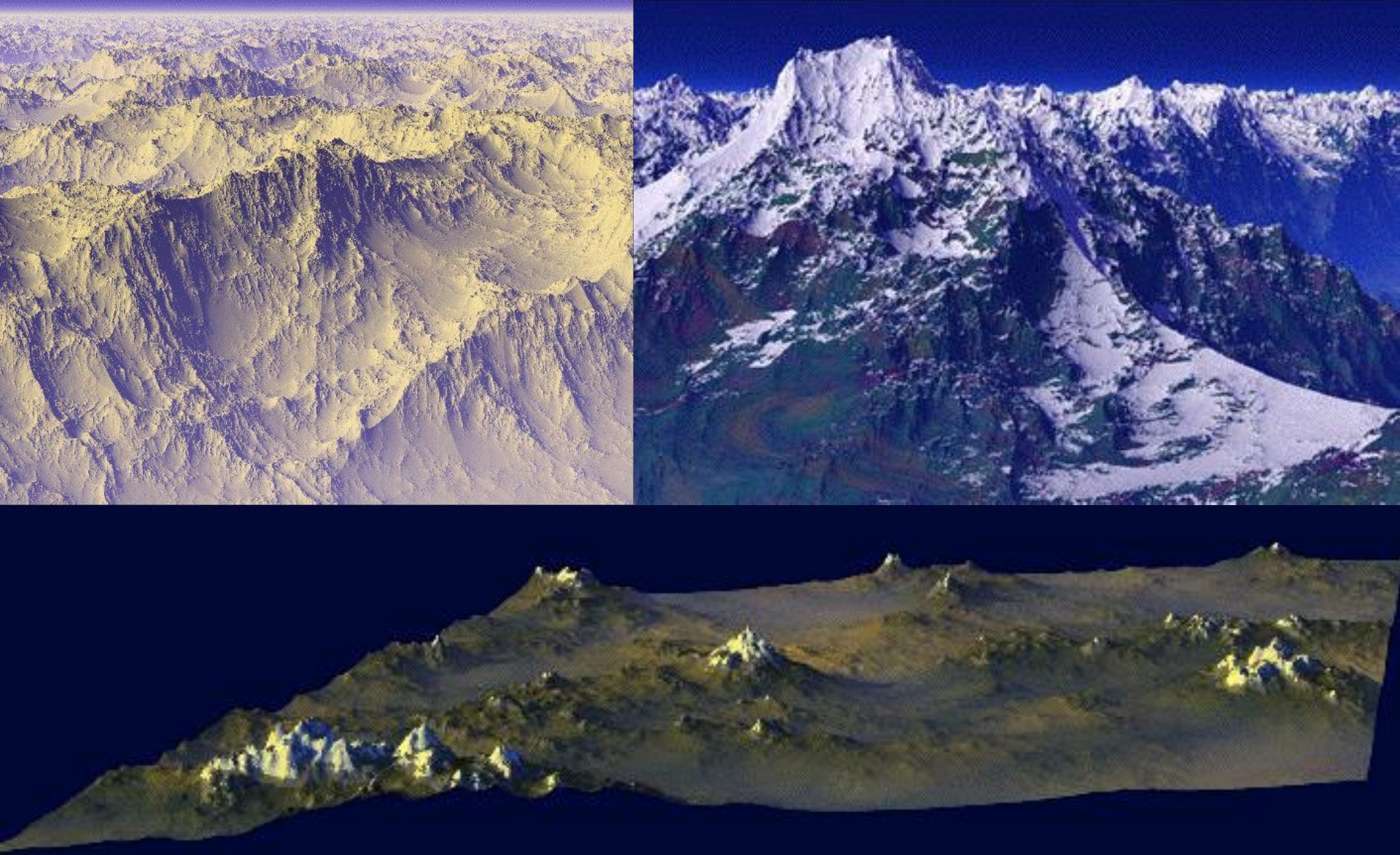


图3. 29 分形地形

<http://classes.yale.edu/fractals/panorama/art/mountainssim/romantic/romantic.html>

## 3.4.2 形状语法

---

- 形状语法（**shape grammars**）：给定一组产生式规则，形状设计者可以在从给定初始物体到最终物体结构的每一次变换中应用不同的规则。
- 产生式规则可以用具有图形运算能力的数学式或其他过程性方法结合实现。



# 形状语法

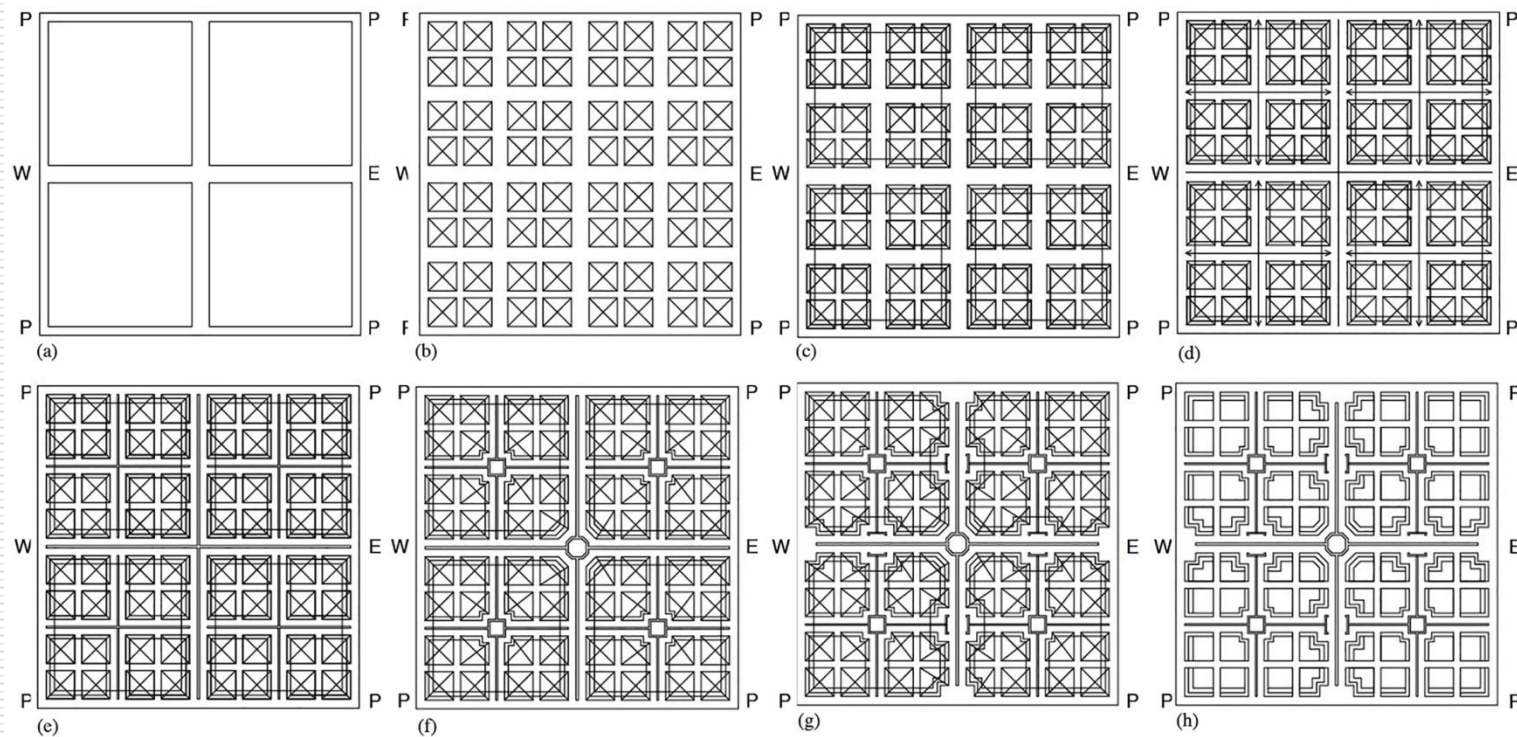
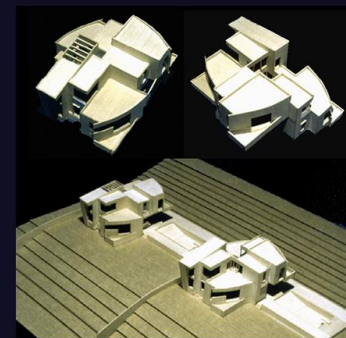


图3.30 形状语法

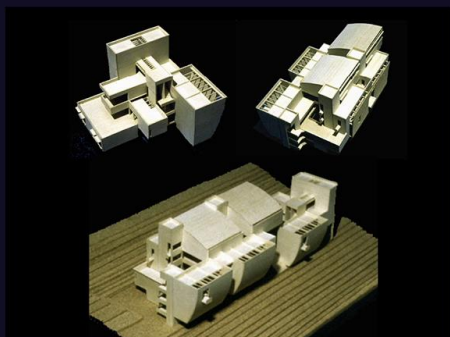
# 形状语法



Fine arts museum  
in Taipei



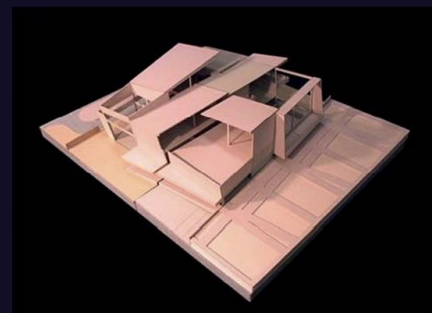
Courtyard houses  
in Malibu



Cultural history museum in LA



Museum in Italy



Elementary school in Los Angeles

图3. 31 形状语法生成的建筑模型和建筑设计



### 3.4.3 微粒系统

---

- 用于模拟自然景物或模拟其它非规则形状物体展示“流体”性质的一个方法是微粒系统（**particle systems**）。
- 这一方法尤其擅长描述随时间变化的物体。
- 微粒运动的模拟方式：随机过程模拟、运动路径模拟、力学模拟。

## 3.4.3 微粒系统

---

- ❑ 粒子发生器：生成粒子（喷头、瀑布、烟囱、枪口、排气管等）
- ❑ 通过力场描述外部作用力（重力，风等）
- ❑ 运动学描述每个粒子的运动（移动、旋转等）
- ❑ 随机模型
- ❑ 每个粒子都是一个独立的模型

## 3.4.4 基于物理的建模

- 基于物理的建模方法：描述了物体在内外力相互作用下的行为。通常用一组网格结点来逼近物体。网格结点间取为柔性连接，再考虑贯穿物体网格的力传递。

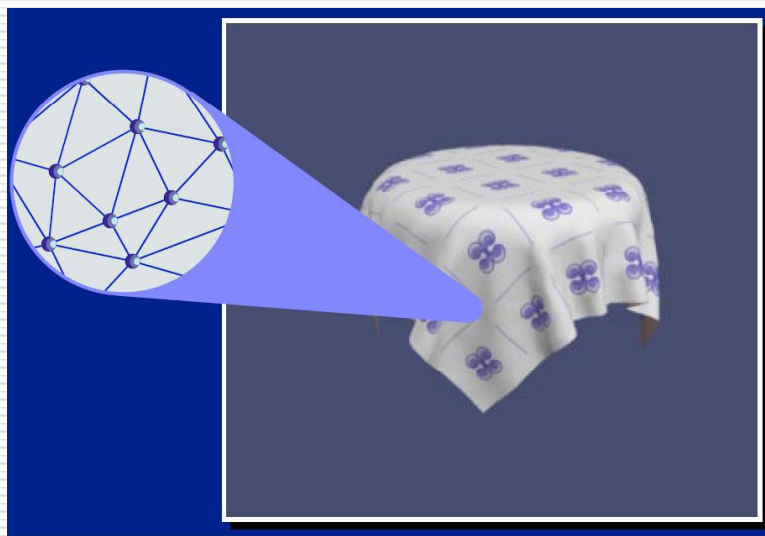


图3.32 基于物理的建模

## 3.5 层次模型

### □ 段的层次概念

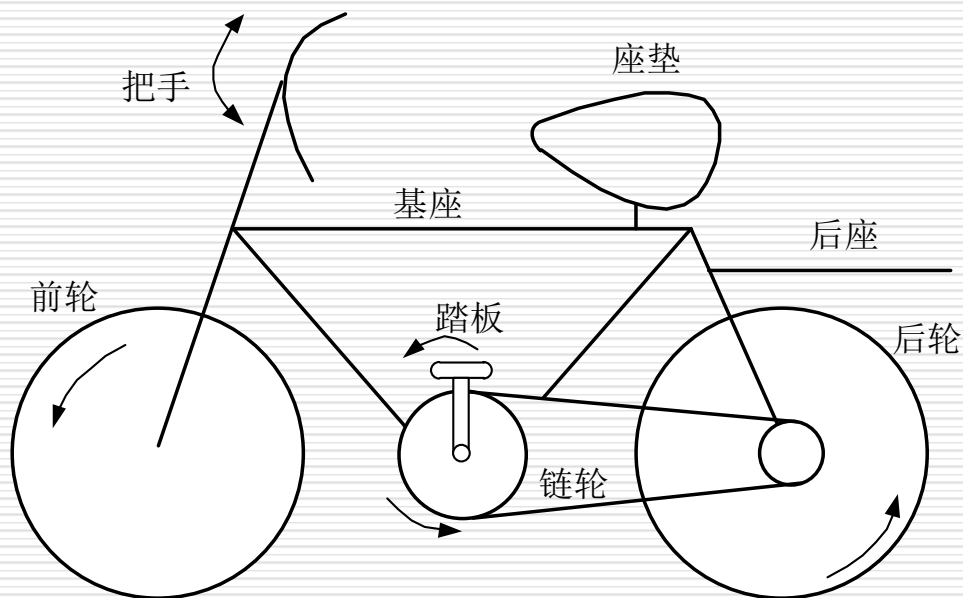
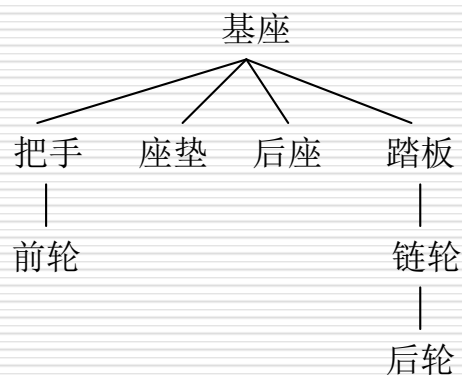


图3.33 自行车及其层次描述

# 图形的层次结构

---

- 存储简单：一个段虽然在图中各处出现，但他的几何和拓扑信息只要保存一次。
- 编辑简单：删除、移动及缩放操作都可以以段为单位。

# 层次模型的实现

---

- 系统的层次模型可以通过将一个图段嵌套到另一个图段中形成图段树来创建。不同的段和基本图形元素在各自的建模坐标系中定义。
- 图层。通过把功能相同的部分归类，并将它们绘制在同一层上，有助于图形的理解和管理。
- 一般图层不再嵌套。