结构力学

No:

Date

第一章 绪论

1、 结构

定义：

几何分类：杆系结构、板壳结构、实体结构.

结构力学.

研究对象、 任务.

2、 计算简图

结构体系的简化， 杆件的简化 、 结点的简化

(结点：铰结点， 刚结点， 组合结点)

支座的简化：可动铰支座，固定铰支座， 固定支座，定向支座，弹性支座.

荷载和约的简化 、 材料性质的简化.

3、 杆系结构的分类

桁架、拱、梁、刚架、组合结构.

No.

Date

第二章 平面体系的几何组成分析

结构：承载　　机构：不能承载

平面体系的几何组成分析 $\begin{cases} 结构 \begin{cases} 静定 \\ 超静定 \end{cases} \\ 机构 \end{cases}$

1、概念　体系的自由度 n.

刚片：自由平面刚体

约束（联系）：链杆 $S=1$，单铰 $S=2$，刚性联结：$S=3$

必要约束（非多余联系）　多余约束（多余联系）

杆件体系 $\begin{cases} 几何不变体系（结构） \begin{cases} 无多余约束（静定） \\ 有多余约束（超静定） \end{cases} \\ 几何可变体系（机构） \begin{cases} 常变体系 \\ 瞬变体系 \end{cases} \end{cases}$

平面刚片系的计算自由度：$W = 3m-2h-r$

m：刚片数 h：单铰数．r：链杆数

平面链杆系的计算自由度：$W = 2j-b-r$

j：结点数　b：链杆数　r：支撑链杆数

内部可变度　$V=W-3$

2、组成规则

三刚片规则

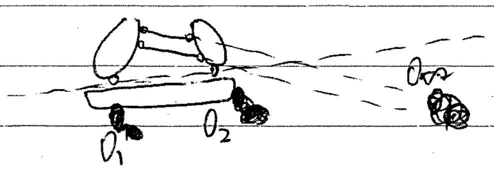
两刚片规则

二元体规则

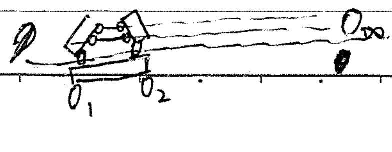
三刚片虚铰在无穷远处的讨论

(1) 一铰无穷远

$\overline{O_1O_2} \nparallel O_\infty$ — 静定

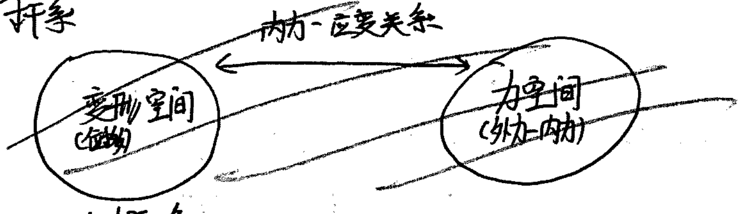


$\overline{O_1O_2} \parallel O_\infty$ — 瞬变



命题：在线性范围内，如果忽略温度的影响，杆系的变形（位移）~~唯一对应一组内力与外力~~状态与杆系所受外的力状态一一对应。

证明：



引入几个概念。

变形空间：对于一个给定的杆系（刚架、杆、桁架、组合结构），我们去掉杆系的所有支架，让其可以自由平动和转动。当然，它仍然可以是超静定的（如刚架）。~~在变形协调条件的限制下，~~这个杆系所有可能的变形构成的集合，称为这个杆系的变形空间。

力空间：对于一个给定的杆系，在静力平衡条件的限制下，它的所有可能的受力情形，以及相应的内力情形的组合构成的集合，称为这个杆系的力空间。

在线性范围内，即对杆系问题的线性假设成立的条件下，如果杆系中的材料单元的变形仅与单元的受力情况相关（即，不考虑温度影响），由材料力学，我们有如下内力-应变关系*：

$$\begin{pmatrix} \varepsilon \\ \gamma \\ \kappa \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{EA} & & \\ & \frac{k}{GA} & \\ & & \frac{1}{EI} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N \\ Q \\ M \end{pmatrix} \qquad (1)$$

ε — 轴向应变，γ — 平均剪应变，κ — 曲率

N — 轴力，Q — 剪力，M — 弯矩

k — 由于剪应力沿截面分布不均匀引起的修正系数。

E — 杨氏模量，G — 切变模量，A — 截面积，I — 截面惯性矩。

于是，杆系的内力（受力）状态与应变状态一一对应。（补充说明，一个杆系的变形状态由该杆系所有截面的位置与法方向唯一确定。对于平面问题，每个截面只用3个参数即可确定。）

（补充说明，前述一一对应关系是正确的，因为它们之间的线性变换可逆。）

以杆系的某个截面为参考面，依据杆的 $\varepsilon, \gamma, \kappa$，可以确定一根杆的变形；对于刚结点，下一根杆的端面的变形状态被确定，进而推出整根杆的变形；对桁架，铰接杆件的端面位置相同，唯一确定了杆系的变形状态。反之，杆系的变形状态唯一的确定了它的 $\varepsilon, \gamma, \kappa$。综合，杆系的应变状态与变形状态一一对应。

（见背面）

*：参考《材料力学》P47、178、218.

说明，由 $\varepsilon, \gamma, \kappa$ 计算杆系变形的关系式其实是变形谐调条件。谐调条件为：

$$\begin{cases} u_s = \varepsilon \\ v_s = \gamma + \theta \\ \theta_s = \kappa \end{cases} \qquad (2)$$

补充：原命题为了表述的简便性，省去一个限制条件，即"变形状态要合理"，准确的讲，是变形状态参数（u, v, θ 等）要连续分段可微。因为杆系不能断，不能折，所以变形参数要连续；又因为杆系只能受有限个集中荷载，所以内力的间断是有限的，从而应变的间断是有限的，从而变形只能在有限点处不可微。

用图像表述命题中说明的一一对应关系如下：

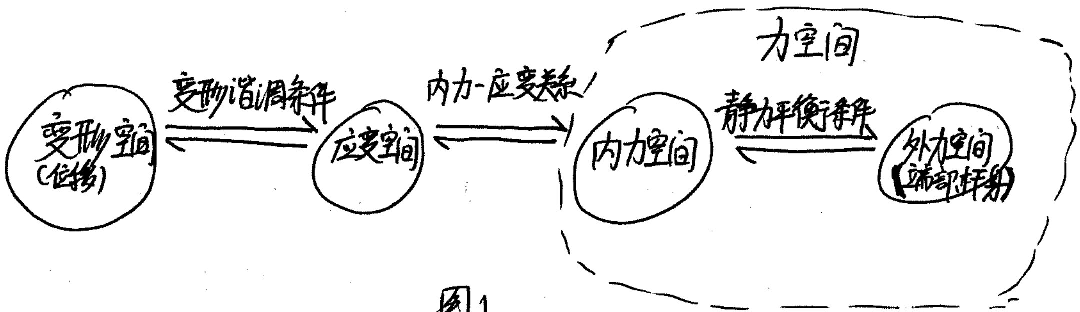


图1

补充：为了数学上的完整性，把静力平衡条件写下

$$\begin{cases} N_s = -p \\ Q_s = -q \\ M_s = -m - Q \end{cases} \qquad (3)$$

于是上图可以重新绘为

$$(u, v, \theta) \overset{(2)}{\rightleftharpoons} (\varepsilon, \gamma, \kappa) \overset{(1)}{\rightleftharpoons} (N, Q, M) \overset{(3)}{\rightleftharpoons} (p, q, m)$$

图2.

推论：在线性范围内，如果忽略温度的影响，则杆系所受的荷载与支座处的位移唯一确定了杆系的力状态与位移状态。

证明：这里与命题的差别在于，杆系的受力状态在支座处是未知的；相应的，支座处未知反力所对应的位移是已知的。

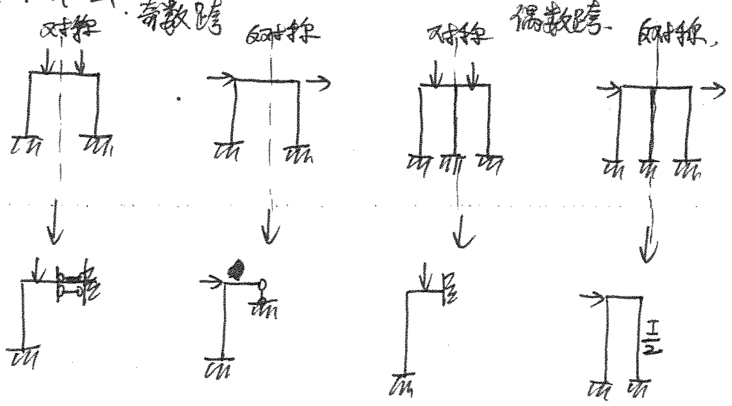
假设支座反力已知，可以确定支座限制的位移，它应该与给定值相等。于是得到了关于未知反力的，与未知反力数相同的方程。求解未知反力，可得杆系的力状态，从而可以得出杆系的位移状态。

注解：在实际问题中，我们都是应用的上述推论，来保证解的存在性与唯一性。力法中的处理方式与证明中完全一致；位移法则是利用几种简单的超静定问题的解，使用化归法，在位移状态上增加已知量（设定参数），利用荷载已知条件建立方程，得到几个位移量，利用已有结论求出杆系力状态。

对称性的利用

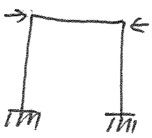
(2) 取一半计算法

原图 / 化简



降低次数　降1次.　降2次　降3次　降3次.

注：



在图示对称载荷作用下，依力法假设*，算得结构弯矩为零，只有轴力.
（实际上弯矩存在，但在略去轴力对位移贡献的情况下，弯矩也可忽略）

*：力法中假定受弯杆件的轴力、剪力对变形无贡献

No.

Date

内力计算

1、约定：

内力符号：轴力N：拉伸为正

剪力Q：绕隔离体顺时针转向为正。

弯矩M：弯矩画在受拉一侧，不标号。

} 不限制画在哪一侧。(可一致地取材料力学中的画法)。

微分关系：如果约定弯矩M以杆"下侧"受拉为正，则有

$$\begin{cases} \frac{d}{dx}Q = -q \\ \frac{d}{dx}M = Q \\ \frac{d^2}{dx^2}M = -q \end{cases}$$

2、技巧：

1° 画弯矩图时，为了图乘法判定符号方便，可以在M图旁注上"内侧"、"外侧"字样。

2° 集中力：Q值突变，等大反向跳跃；

M值转角，相对线性部分偏移量为$\frac{1}{4}Pl$；

均布荷载：$q=0$，Q值定常，M值线性；

$q\neq0$，Q值线性，M值抛物线，相对线性部分偏移量为$\frac{1}{8}ql^2$；

集中力矩：Q值定常；

M值突变，等大反向跳跃。

3° $Q=0$时，$\frac{d}{dx}M=0$，即M取极值。

4° 叠加法作图：

在所有集中荷载两侧，以及集中荷载的端点（注意，只用取一点），取控制截面；

标注控制截面内力值，用虚线直线连接各点；

Q图即为真实Q图，

对M图，$q\neq0$时叠加腹值为$\frac{1}{8}ql^2$的抛物线，即得M图。[证明见教材P20.]

力法

1、约定：

对于梁和刚架，忽略轴力和剪力对变形的贡献；

对于温度变化，温度对轴向变形的贡献不忽略；

2、技巧：关于对称性的讨论见教材 P100.

对于桁架作图乘法，可以列表计算，且这个表还会被多次用上

3、适合手算的问题：

温度变化

桁架、组合结构.

位移法

1、约定：

1° 变形简化假定：

受弯杆件忽略轴力和剪力对变形的贡献；（与力法一致）

直杆端点间距离不变。

2° 角位移以顺时针转向为正

3° 杆端：弯矩以顺时针方向为正；

结点：弯矩以逆时针方向为正。

2、定义：

固端力：由荷载引起的杆端剪力和杆端弯矩分别称为固端剪力和固端弯矩，它们统称为固端力。

线抗弯刚度（线刚度）：$i=\frac{EI}{l}$

3、转角位移方程

固支—固支：

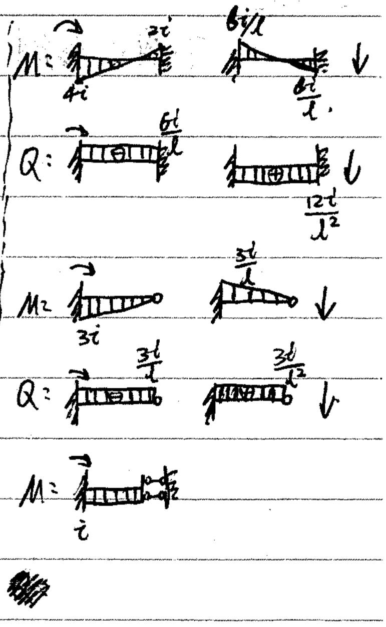
$$M_{AB}=4i\cdot\varphi_A+2i\cdot\varphi_B-\frac{6i}{l}\cdot\Delta_{AB}+M_{AB}^F$$
$$M_{BA}=4i\cdot\varphi_B+2i\cdot\varphi_A-\frac{6i}{l}\cdot\Delta_{AB}+M_{BA}^F$$
$$Q_{AB}=-\frac{6i}{l}\cdot\varphi_A-\frac{6i}{l}\cdot\varphi_B+\frac{12i}{l^2}\cdot\Delta_{AB}+Q_{AB}^F$$
$$Q_{BA}=-\frac{6i}{l}\cdot\varphi_A-\frac{6i}{l}\cdot\varphi_B+\frac{12i}{l^2}\cdot\Delta_{AB}+Q_{BA}^F$$

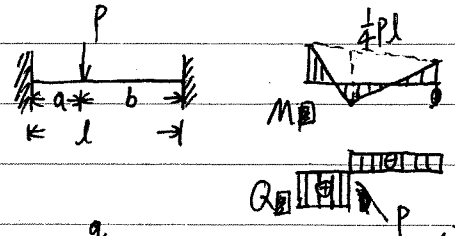
固支—铰支：

$$M_{AB}=3i\cdot\varphi_A-\frac{3i}{l}\cdot\Delta_{AB}+M_{AB}^F$$
$$Q_{AB}=-\frac{3i}{l}\cdot\varphi_A+\frac{3i}{l^2}\cdot\Delta_{AB}+Q_{AB}^F$$
$$Q_{BA}=-\frac{3i}{l}\cdot\varphi_A+\frac{3i}{l^2}\cdot\Delta_{AB}+Q_{BA}^F$$

固支—滑支：

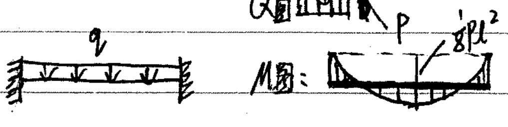
$$M_{AB}=i\cdot\varphi_A+M_{AB}^F$$
$$M_{BA}=-i\cdot\varphi_A+M_{BA}^F$$
$$Q_{AB}=Q_{AB}^F$$





$$M_{AB}=-\frac{Pab^2}{l^2},\quad M_{BA}=\frac{Pa^2b}{l^2}$$

$$Q_{AB}=\frac{Pb^2(l+2a)}{l^3},\quad Q_{BA}=-\frac{Pa^2(l+2b)}{l^3}$$



$$M_{AB}=-M_{BA}=-\frac{1}{12}ql^2$$
$$Q_{AB}=-Q_{BA}=\frac{1}{2}ql.$$

No.

Date

4、技巧

1°基本未知量的确定

每个刚结点对应一个角位移；

用铰化法确定结点线位移。(对滑支和沿杆轴的链杆可能出错)

5、适合手算的问题：

力法解答未知量过多，且对称性不好时.

6、注意

1°刚臂只限制结点转动，不限制位移！(非常重要！)

矩阵位移法

1. 一维杆单元的刚度矩阵

节点位移与节点力间关系

$$K_e d = F$$

$k_e = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{pmatrix}$，单元刚度矩阵； $d = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$，节点位移向量； $F = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix}$ 节点力向量.

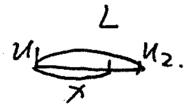
由平衡条件得 $k_e = \frac{EA}{L}\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$.

k_{ij} 的物理意义：使节点 u_j 产生单位位移所需的在 i 点上力的力 F_i.

形函数

任意一点位移 $u(x)$ 与节点位移 u_1, u_2 的关系为

$$u(x) = \frac{L-x}{L}u_1 + \frac{x}{L}u_2 = \left[1-\frac{x}{L}, \frac{x}{L}\right]\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$$



记 $u(x) = N u_e$,

$N = \left(1-\frac{x}{L}, \frac{x}{L}\right)$，形函数； $u_e = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$，节点位移向量.

应变 $\varepsilon = \frac{du}{dx} = \frac{dN}{dx}u_e = Bu_e$， 其中 $B = \frac{dN}{dx}$ （注：这里的矩阵B的计算式只适合于杆单元，也就是桁架. 对梁而言，$B = -y\frac{d^2N}{dx^2}$.）

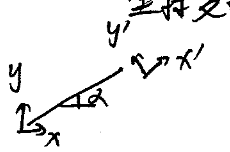
单刚计算的一般公式，

$$k_e = \int_{V_e} B^T D B \, dV \qquad D: \text{“模量张量”}.$$

对一维杆 $k_e = \int_0^L B^T E B A \, dx = EAB^T B L = \frac{EA}{L}\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$

2. 斜杆单元刚度矩阵

坐标变换：



$$\begin{cases} u_e' = Ru_e, \\ f_e' = Rf_e \end{cases} \qquad R = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & & \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & & \\ & & \cos\alpha & \sin\alpha \\ & & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

$$k_e = R^T k_e' R.$$

$\xi = \xi' R$

$k_e' u_e' = F_e'$

$k_e' R u_e = R F_e$

$(R^T k_e' R) u_e = F_e$

$k_e = R^T k_e' R$

（R是以整体坐标，到局部坐标的变换矩阵）

得斜杆单刚

$$k_e = \frac{EA}{L}\begin{bmatrix} \cos^2\alpha & \sin\alpha\cos\alpha & -\cos^2\alpha & -\sin\alpha\cos\alpha \\ \sin\alpha\cos\alpha & \sin^2\alpha & -\sin\alpha\cos\alpha & -\sin^2\alpha \\ & & \cos^2\alpha & \sin\alpha\cos\alpha \\ \text{对称} & & \sin\alpha\cos\alpha & \sin^2\alpha \end{bmatrix}$$

$$= \frac{EA}{L}\begin{bmatrix} A & -A \\ -A & A \end{bmatrix}, \quad \text{其中 } A = \begin{pmatrix} \cos^2\alpha & \cos\alpha\sin\alpha \\ \cos\alpha\sin\alpha & \sin^2\alpha \end{pmatrix}$$

注：总刚是对称矩阵，叠加过程决定了总刚的这一性质。

轴力求解： $N = \frac{EA}{L}(-\cos\alpha \quad -\sin\alpha \quad \cos\alpha \quad \sin\alpha)\, u_e$

3、梁单元刚度矩阵.

$$k_e = \frac{EI}{L}\begin{array}{c} \begin{array}{cccc} v_1 & \theta_1 & v_2 & \theta_2 \end{array} \\ \begin{bmatrix} \frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} & -\frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} \\ \frac{6}{L} & 4 & -\frac{6}{L} & 2 \\ -\frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} & \frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} \\ \frac{6}{L} & 2 & -\frac{6}{L} & 4 \end{bmatrix} \end{array} = \frac{EI}{L}\begin{bmatrix} A & B \\ B^T & C \end{bmatrix}$$

其中 $A=\begin{pmatrix} \frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} \\ \frac{6}{L} & 4 \end{pmatrix}$，$B=\begin{pmatrix} -\frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} \\ -\frac{6}{L} & 2 \end{pmatrix}$，$C=\begin{pmatrix} \frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} \\ -\frac{6}{L} & 4 \end{pmatrix}$

注：转角以逆时针为正。弯矩亦是。

4、平面固结单元刚度矩阵.

将杆单元和梁单元的刚度矩阵相叠加（分自由度组集），即得平面固结单元的刚度矩阵.

$$k_e = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & & -\frac{EA}{L} & \\ & \frac{EI}{L}A & & \frac{EI}{L}B \\ -\frac{EA}{L} & & \frac{EA}{L} & \\ & \frac{EI}{L}B^T & & \frac{EI}{L}C \end{bmatrix}$$

，其中矩阵A、B、C定义同梁单元.（注意区分面积A和矩阵A）

注意：不同的坐标系下的单刚是有区别的，这里的单刚与课本上的就是有区别的，虽然形式上一致。

平面固结单元的坐标变换矩阵（$u_e' = Ru_e$，$k_e = R^T k_e' R$）（$f_e' = Rf_e$）

$$T = \begin{bmatrix} A & & & \\ & 1 & & \\ & & A & \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

，其中 $A=\begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix}$，$\alpha$为整体坐标系到局部坐标系的角.（逆时针）.

5、~~总的结点荷载列阵~~

单元刚度方程

$$\{F\}^{e} = [k]^{e}\{\delta\}^{e}$$

其中$\{F\}^{e}$为单元杆端力列阵，$\{\delta\}^{e}$为单元杆端位移列阵，$[k]^{e}$为单元刚度矩阵.

单元刚度方程描述的是杆单元在杆身不受荷载的情况下，杆端位移与杆端力之间的确定性关系。

整体刚度方程

$$[K]\{\Delta\} = \{P\}$$

其中$\{P\}$为结点荷载列阵，$\{\Delta\}$为结点位移列阵，$[K]$为整体刚度矩阵.

整体刚度方程描述的是杆系整体在不受非结点荷载的情况下，结点位移与结点荷载之间的确定性关系。

从若干个单元刚度矩阵，利用变形协调条件和力的平衡条件，形式上通过"换码"（从局部码到整体码）和"组集"（单刚中的元素按对应位置叠加到整体刚度矩阵），得到整体刚度矩阵。代入整体的位移法基本方程（的矩阵形式），即可解出各结点位移.

这里从单元刚度方程转化为整体刚度方程的必要性在于，杆端内力是未知的，但结点荷载是已知的。

6、非结点荷载的处理

知道了杆系仅在结点荷载下结点位移和杆端内力的求法，还明显不够。真实情形下非结点荷载常常存在，现在讨论有非结点荷载的情形。

应用叠加原理（假设为：结构为由仅发生小变形的线弹性材料组成的线性系统），将原问题化为两个能给出杆端内力和结点位移的问题，然后叠加，得到实际的杆端内力和结点位移。实际的做法是，第一个情形，结构受非结点荷载，同时各结点受到特定的力，使得各结点无位移；第二种情形，结构受原先已有的结点荷载，同时受到额外的结点力，大小与第一个情形中的结点约束力相同，方向相反，称为原非结点荷载的等效结点荷载.

结点位移计算：由于第一个情形下结点无位移，所以最终的结点位移等于第二个情形下的位移。化归到结点荷载问题，则结构的整体刚度矩阵由其几何构成决定，与荷载无关，故求法不变；结构的总的结点荷载列阵 $\{P\}$ 等于原有结点荷载 $\{P_a\}$ 和非结点荷载的等效结点荷载 $\{P_e\}$ 组成，即 $\{P\}=\{P_a\}+\{P_e\}$. 利用总体刚度方程 $[K]\{\delta\}=\{P\}$，求得结点位移。

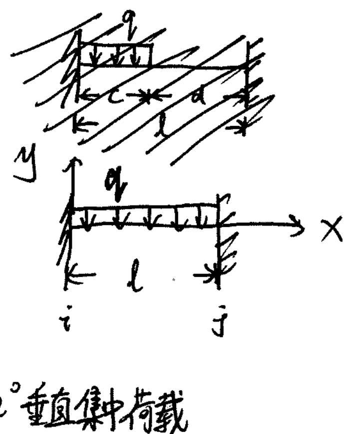
杆端内力计算：第一个情形中，杆端力为由非结点荷载引起的固端力.（固端力：由荷载引起的杆端力. [结]:P129），第二个情形中，杆端力为总的结点荷载作用下的杆端力. 即最终的杆端内力

$$\{F'\}^{e}=\{F_0'\}^{e}+[k']^{e}\{\delta'\}^{e}=\{F_0'\}^{e}+[k']^{e}[T]^{e}\{\delta\}^{e}$$

其中，$\{F_0'\}^{e}$ 为固端力，$[T]^{e}$ 为从整体坐标系到局部坐标系的坐标变换矩阵。

7、非结点荷载引起的固端力

1° 均布荷载

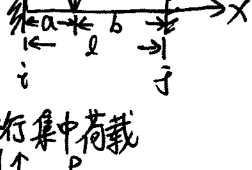


局部坐标系下单元的固端内力 $\{F_0'\}^{e}=\begin{Bmatrix}\{F_{0i}'\}^{e}\\ \{F_{0j}'\}^{e}\end{Bmatrix}$

其中，端点i,j的固端内力分别为

$$\{F_{0i}'\}^{e}=\begin{Bmatrix}X_{0i}'\\ Y_{0i}'\\ M_{0i}'\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}0\\ \frac{1}{2}ql\\ \frac{1}{12}ql^2\end{Bmatrix},\quad \{F_{0j}'\}^{e}=\begin{Bmatrix}X_{0j}'\\ Y_{0j}'\\ M_{0j}'\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}0\\ \frac{1}{2}ql\\ -\frac{1}{12}ql^2\end{Bmatrix}$$

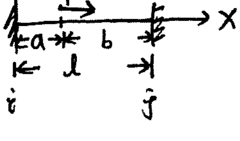
2° 垂直集中荷载



端点i,j的固端内力分别为

$$\{F_{0i}'\}^{e}=\begin{Bmatrix}X_{0i}'\\ Y_{0i}'\\ M_{0i}'\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}0\\ \frac{Pb^2(l+2a)}{l^3}\\ \frac{Pab^2}{l^2}\end{Bmatrix},\quad \{F_{0j}'\}^{e}=\begin{Bmatrix}X_{0j}'\\ Y_{0j}'\\ M_{0j}'\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}0\\ \frac{Pa^2(l+2b)}{l^3}\\ -\frac{Pa^2b}{l^2}\end{Bmatrix}$$

3° 平行集中荷载



端点i,j的固端内力分别为

$$\{F_{0i}'\}^{e}=\begin{Bmatrix}X_{0i}'\\ Y_{0i}'\\ M_{0i}'\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}-\frac{Pb}{l}\\ 0\\ 0\end{Bmatrix},\quad \{F_{0j}'\}^{e}=\begin{Bmatrix}X_{0j}'\\ Y_{0j}'\\ M_{0j}'\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}-\frac{Pa}{l}\\ 0\\ 0\end{Bmatrix}$$

8、矩阵位移法计算平面杆系结构的步骤.

1° 对各单元和结点进行编码，确定各个局部坐标系与整体坐标系。

2° 计算局部单刚 $[k']^{(e)}$

计算直杆刚度 $\frac{EA}{L}$，线抗弯刚度（线刚度）$i=\frac{EI}{L}$，以及参数块矩阵 A、B、C．

（即 $\frac{12i}{L^2}$，$\frac{6i}{L}$，$4i$，$2i$）．带入所需单刚的公式．

3° 计算坐标变换矩阵 R，组成整体单刚 $[k]^{(e)}$

$$k_e = R^T k_e' R$$

4° 组集成整体刚度矩阵 $[K]$．

关系式 ①结点～自由度；

②单元～结点；

③单元～自由度。

5° 依据固端内力公式计算各单元局部坐标系中的固端内力列阵 $\{F_0'\}^{(e)}$；

由 $\{P_0\}^{(e)} = -[R]^T\{F_0'\}^{(e)}$，计算整体坐标下各单元的等效结点荷载列阵 $\{P_0\}^{(e)}$；

组集出整体等效结点荷载列阵 $\{P_0\}$；

计算总的结点荷载列阵 $\{P\} = \{P_0\} + \{P_a\}$.

6° 依据总体刚度方程 $[K]\{\Delta\} = \{P\}$，计算结点位移列阵 $\{\Delta\}$

7° 依据 $\{F'\}^{(e)} = \{F_0'\}^{(e)} + [k']^{(e)}[R]^{(e)}\{\delta\}^{(e)}$，计算各单元杆端内力列阵 $\{F'\}^{(e)}$.

9、注意

1° 计算中，符号经常性地被搞错，尤其是漏负号。符号一错，就不指望结果正确了。所以要时刻注意符号的问题。

2° 符号约定：力方向以坐标轴方向为正，力矩与角位移也以坐标轴z轴方向为正，即以逆时针为正。