

土建结构电算常用过程

南方地区冶金建筑电算协调研究会编

湖北省金属学会冶金建筑学术委员会



前 言

目前,分析杆件结构系统的电子计算机程序,主要用直接刚度法。尽管结构形式、荷载类型及材料特性有所不同,但分析的步骤和编制电子计算机程序的方法以及程序的构造,基本上是相同的,因此有条件做到标准化,也就是可以先将常用算法编制成常用过程供主程序调用。如果常用过程越多,编制程序的速度就越快,也越有利于提高质量。为了相互交流和避免重复劳动,我研究会于一九八〇年在广州召开的年会上协商议定,由各会员单位分工负责共同编制出各类过程,汇集成册,命名为《土建结构电算常用过程》。

本书以现行设计规范为依据,总结了本会各成员单位多年来编制土建结构电算程序的经验,使用ALGOL—60算法语言,以过程形式编写而成,读者不难根据问题的需要迅速组合出各种类型的杆系结构计算程序。因此本书对土建设计人员、程序编制人员和大专院校师生会有相当大的参考价值。

在湖北省金属学会的关怀和冶金建筑学术委员会的支持以及各会员单位领导下,经过研究会全体成员的努力,本书的初稿于一九八一年五月在武汉提交年会讨论,以后经过补充修订,又于一九八二年四月在桂林的年会上通过初审,提出修改意见。编辑组于同年在长沙集中编审,一九八三年六月,在武汉又一次集中校稿,现在终于与大家见面了。

本书共分十章,共收入有九十三个过程,第一章为矩形、T形、工字形和环形截面力学特性的计算。第二章为常截面杆、变截面杆以及加腋杆的单元刚度矩阵、坐标变换矩阵和杆端偏置矩阵的计算。第三章为常截面杆、变截面杆以及加腋杆在外荷载作用下的杆端力、简支端弯矩、剪力的计算。第四章为几种典型的结构刚度矩阵存储方式及相应的结构方程解法。第五章为几个与结构动力计算有关的过程。第六、七章为钢筋混凝土、预应力钢筋混凝土结构的构件强度、抗裂度和变形的计算。第八章为钢筋混凝土柱下单独基础强度和基础沉降的计算。第九章为钢结构构件的稳定和强度计算。第十章为一维优化处理的计算方法、荷载内力组合及用于DJS—21机宽行输出格式的过程。

本书的“过程”是用DJS—21机的语言编写的,为了便于阅读和移植使用,对于该语言

所用的符号和本书涉及的一些标准过程在附录中作了注释。

参加本书编写的单位有：武汉钢铁设计研究院，长沙有色冶金设计研究院，贵阳铝镁设计研究院，洛阳有色金属加工设计研究院，南昌有色冶金设计研究院，兰州有色冶金设计研究院，长沙黑色金属矿山设计研究院，广西壮族自治区冶金设计院，广东省冶金设计院，河南省冶金设计院，二机部第四设计院。贵州省建筑设计院也应邀参加了本书的编写工作。

本书第一、二、三章由顾泽、郝安国、周闻一、颜茂义工程师编写，第四章由颜茂义、蒋晓萌、胡振道、相仲连工程师编写，第五章由周闻一、陈善奇工程师编写，第六章由王淑芬、任贯曾、宿洪琴、顾泽、徐文元、蒋中英工程师编写，第七章由王建安工程师编写，第八章由徐文元、杜伦章、蒋富曾工程师编写，第九章由尤国华、胡振道工程师编写，第十一章由周闻一、王福民、解威、徐文元工程师编写。

全书由颜茂义、陈善奇、冯如江、周闻一、陈友谟工程师负责编辑和审校。在编辑和审校过程中，得到了贵阳铝镁设计研究院、广西壮族自治区冶金设计院、长沙有色冶金设计研究院、武汉钢铁设计研究院的大力支持，谨此表示感谢。

本书由湖北省金属学会冶金建筑学术委员会组织编辑和出版发行。

本书编辑出版过程中，承蒙湖北省金属学会的关怀资助和武汉冶金建筑研究所的热忱支持，在此一并表示感谢。

由于本会第一次编辑本书，经验不足，编者水平也有限，错误不当之处在所难免，敬希读者批评指正。

目 录

前 言

第 一 章 截面力学特性	1
1—1 矩形、T形、工字形截面力学特性(AJE 1)	1
1—2 环形截面力学特性(AJE 2)	3
第 二 章 杆系结构的单元刚度、坐标转换、杆端偏置矩阵	4
2—1 平面桁架杆件的单元刚度矩阵(KPT)	4
2—2 平面刚架杆件的单元刚度矩阵之一(KPF 1)	5
2—3 平面刚架杆件的单元刚度矩阵之二(KPF 2)	7
2—4 空间桁架杆件的单元刚度矩阵(KST)	8
2—5 空间刚架杆件的单元刚度矩阵之一(KSF 1)	10
2—6 空间刚架杆件的单元刚度矩阵之二(KSF 2)	12
2—7 变截面杆的单元刚度矩阵(KPV)	14
2—8 加腋杆的单元刚度矩阵(KPA)	16
2—9 空间桁架杆件的坐标转换矩阵(RST)	21
2—10 空间刚架杆件的坐标转换矩阵(RSF)	21
2—11 平面桁架杆件的坐标转换矩阵(RPT)	22
2—12 平面刚架杆件的坐标转换矩阵(RPF)	22
2—13 空间刚架的杆端偏置矩阵(HSP)	23
2—14 平面刚架的杆端偏置矩阵(HPL)	24
第 三 章 杆端力及简支梁跨中弯矩、剪力	26
3—1 常截面杆端力之一(FOD)	26
3—2 常截面杆端力之二(FOH)	32
3—3 简支梁跨中弯矩、剪力之一(MQD)	34
3—4 简支梁跨中弯矩、剪力之二(MQH)	38
3—5 变截面杆的杆端力(FOV)	39
3—6 加腋杆的杆端力及简支梁跨中弯矩、剪力(FMQ)	45
第 四 章 结构刚度矩阵的形成与方程组的解	56
4—1 结构刚度矩阵的形成与方程组的解之一	56
(一) 求位移编码及半带宽(NDR)	58

(二) 计算结构刚度矩阵存取地址(MXY)	58
(三) 半带消元法解方程组(TAM)	59
(四) 平方根法解方程组(TAS)	59
(五) 将单元刚度矩阵送结构刚度数组(SUK)	61
4—2 结构刚度矩阵的形成与方程组的解之二	62
(一) 计算结构刚度矩阵中对角元地址(DAD)	65
(二) 将单元刚度矩阵送结构刚度数组(SUK)	65
(三) 改进的平方根法解方程组(GYT)	66
(四) 直接消元法解方程组(GYD)	67
(五) 处理约束(RES)	68
4—3 结构刚度矩阵的形成与方程组的解之三	69
(一) 计算位移编码及结构刚度矩阵体积(YZC)	69
(二) 分块形成结构刚度数组并记鼓(XCZG)	71
(三) 大型稀疏对称正定方程组的解(BAND)	73
4—4 结构刚度矩阵的形成与方程组的解之四	77
(一) 计算结构刚度矩阵对角元地址(ZGL)	77
(二) 分块形成结构刚度数组并记鼓(XCZG1)	78
(三) 结构刚度数组的约束处理及三角化(BAND1)	80
(四) 回代求解未知数(BAND2)	82
4—5 结构刚度矩阵的形成与方程组的解之五	85
(一) 计算结构刚度矩阵对角元地址并分块(DBR)	86
(二) 分块记鼓(JG)	87
(三) 分块读鼓(DG)	88
(四) 将单元刚度矩阵送结构刚度数组, 按块三角化记鼓(ZGFJ)	88
(五) 回代求各位移分量(FBWORD)	90
4—6 结构柔度矩阵的形成	92
(一) 结构刚度数组三角化(DECOMP)	94
(二) 求结构刚度矩阵的逆矩阵(QWC)	94
第 五 章 结构振型与地震力	96
5—1 求结构自振频率及振型的同时迭代法(FMSL)	96
5—2 振型分解法计算结构振动周期和特征向量(TEMA)	100
5—3 振型分解法计算地震力(EFMA)	103
5—4 底部剪力法计算地震力(EFBS)	104
第 六 章 钢筋混凝土结构	107
6—1 混凝土的设计强度及弹性模量(CRE)	107
6—2 矩形、T形、工字形截面构件的正截面强度(CBT1)	107

6—3	环形截面构件的正截面强度(CBT 2)	114
6—4	受弯构件的斜截面抗剪强度(CBS)	118
6—5	矩形截面弯扭构件的强度(CTF)	121
6—6	双向偏心受压构件的强度(CBBC)	124
6—7	受弯构件的抗裂度及裂缝开展(CCR)	128
6—8	受弯构件的变形	131
(一)	刚度计算(CBD)	131
(二)	挠度计算(CDP)	133
第 七 章	预应力钢筋混凝土结构构件	138
7—1	轴心受拉、偏心受拉、受弯和偏心受压构件 强度及抗裂度计算(PCB)	138
第 八 章	地基与基础	167
8—1	柱下钢筋混凝土单独基础(FDN1)	162
8—2	柱下钢筋混凝土双向偏心受压基础(FDN 2)	172
8—3	矩形基础沉降(STMZ 1)	181
8—4	矩形、圆形基础沉降(STMZ 2)	189
第 九 章	钢结构	198
9—1	轴心受压和偏心受压构件的稳定系数	198
(一)	轴心受压构件(ZHYA)	198
(二)	实腹式偏心受压构件在弯矩作用平面内的稳定系数之一(PXG)	199
(三)	实腹式偏心受压构件在弯矩作用平面内的稳定系数之二(PXJ)	201
(四)	实腹式偏心受压构件在弯矩作用平面内的稳定系数之三(PXT)	202
(五)	格构式偏心受压构件在弯矩作用平面内的稳定系数(PXGE)	206
(六)	偏心受压构件在弯矩作用平面外的稳定系数(PXWA)	207
9—2	轧制普通工字钢受弯的整体稳定系数(ZTYD)	210
9—3	柱的计算长度系数	213
(一)	柱上端与横梁铰接的单阶柱(JSC 1)	213
(二)	柱上端与横梁刚接的单阶柱(JSC 2)	214
(三)	柱上端与横梁铰接的双阶柱(JSC 3)	216
(四)	柱上端与横梁刚接的双阶柱(JSC 4)	218
9—4	型钢的截面特性	219
(一)	等边角钢(DBG)	219
(二)	等边双角钢组合成T形(SDBG)	221
(三)	等边双角钢组合成十字形(SHZXG)	221
(四)	不等边角钢(PDBG)	222

(五) 不等边双角钢短肢相连成 T 形 (SPDB 1)	223
(六) 不等边双角钢长肢相连成 T 形 (SPDB 2)	224
(七) 槽钢 (ZAOG)	225
(八) 双槽钢组合成工字形 (SZG)	227
(九) 工字钢 (GONG)	228
9—5 构件的截面计算	230
(一) 轴心受力和偏心受力构件 (JMXZ 1)	230
(二) 受弯构件 (JMXZ 2)	238
9—6 附表	243
附表 1 等边角钢截面尺寸表	243
附表 2 不等边角钢截面尺寸表	244
附表 3 普通槽钢截面尺寸表	245
附表 4 普通工字钢截面尺寸表	245
第 十 章 其它	246
10—1 一维优化方法之一——前后搜索法 (OPT)	246
10—2 一维优化方法之二——黄金分割法 (OPM)	247
10—3 宽行输出格式之一 (OUTI)	249
10—4 宽行输出格式之二 (PUTI)	250
10—5 宽行输出格式之三 (LAPT)	250
10—6 宽行输出格式之四 (PUTS)	252
10—7 钢筋混凝土柱载面内力组合 (COMB1)	252
附 录 DJS—21机使用符号及本书中调用的标准过程	262

第一章 截面力学特性

1—1 矩形、T形、工字形截面力学特性(AJE1)

本过程适用于计算矩形、T形、工字形截面的面积A、抗扭惯性矩 J_x 和对截面形心主轴的惯性矩 J_y 、 J_z 。

1. 数学方法简述

(1) 矩形 (图1.1.1)

$$A = BH, \quad J_x = \frac{BH^3}{12}$$

$$J_y = \frac{HB^3}{12}$$

$$J_x = \frac{BH^3}{3} - 0.21H^4 \left(1 - \frac{H^4}{12B^4}\right)$$

在 J_x 的公式中, B表示长边, H表示短边, $\frac{B}{H} \geq 1$ 。

(2) 工字形 (图1.1.2)

$$A = BD + CH_1 + B_1K, \quad Y_1 = H - Y_2$$

$$Y_2 = \frac{1}{2A} [CH^2 + (B_1 - C)K^2 + (B - C)(2H - D)D]$$

$$J_z = \frac{1}{3} [B_1Y_2^3 + BY_1^3 - (B_1 - C)(Y_2 - K)^3 - (B - C)(Y_1 - D)^3]$$

$$J_y = \frac{1}{12} (DB^3 + H_1C^3 + KB_1^3)$$

$$J_x = \frac{1}{3} (BD^3 + H_1C^3 + B_1K^3)$$

(3) T形 (图1.1.3)

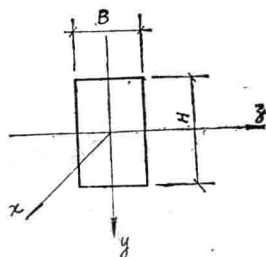


图1.1.1

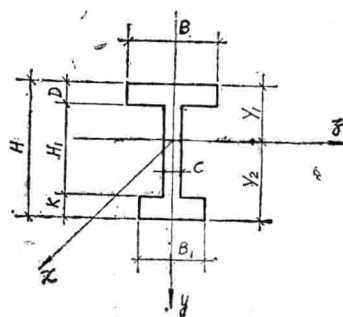


图1.1.2

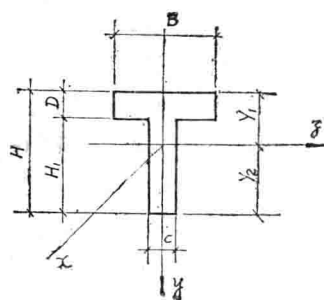


图1.1.3

$$A = BD + H_1 C, \quad Y_2 = H - Y_1$$

$$Y_1 = \frac{1}{2A} [CH^2 + (B - C)D^2]$$

$$J_z = \frac{1}{3} [CY_2^3 + BY_1^3 - (B - C)(Y_1 - D)^3]$$

$$J_y = \frac{1}{12} (DB^3 + H_1 C^3)$$

$$J_x = \frac{1}{3} (BD^3 + H_1 C^3)$$

2. 使用说明

输入参数:

TZ——截面特征:

TZ = 1 表示矩形

TZ = 2 表示工字形

TZ = 3 表示T形

BH——截面尺寸数组

TZ = 1 时:

$$BH[1] = B, \quad BH[2] = H$$

TZ = 2 时:

$$BH[1] = B, \quad BH[2] = D$$

$$BH[3] = H, \quad BH[4] = C$$

$$BH[5] = B_1, \quad BH[6] = K$$

TZ = 3 时:

$$BH[1] = B, \quad BH[2] = D$$

$$BH[3] = H_1, \quad BH[4] = C$$

输出参数:

AJ——截面面积和惯性矩数组 [1:4], 元素存放次序:

AJ[1]——截面面积A

AJ[2]——抗扭惯性矩 J_x

AJ[3]——对主轴y的惯性矩

AJ[4]——对主轴z的惯性矩

3. 过程源程序

```
PROC AJE1(TZ, BH, AJ);
```

```
  VALUE TZ, INTEG TZ, ARRAY BH, AJ;
```

```
  BEGIN REAL A, B, C, H, B1, H1, D, K, Y1, Y2, SWITCH S:=S1, S2, S3,
```

```
    GOTO S[TZ];
```

```
  S1: B:=BH[1], H:=BH[2], AJ[1]:=B×H, AJ[4]:=B×H××3/12,
```

```
    AJ[3]:=H×B××3/12; IF B LS H THEN
```

```
  BEGIN C:=B, B:=H, H:=C
```

```

END, AJ[2] := B * H ** 3 / 3 - 0.21 * H ** 4 * (1 - H ** 4 / (12 * B ** 4)),
GOTO SE,
S2: B := BH[1], D := BH[2], H1 := BH[3], C := BH[4], IF TZ = 3 THEN
BEGIN B1 := BH[4], K := 0, GOTO S3
END, B1 := BH[5], K := BH[6],
S3: H := D + H1 + K, AJ[1] := A := B * D + H1 * C + B1 * K,
Y2 := (C * H * H + (B1 - C) * K * K + (B - C) * (2 * H - D) / A * 0.5,
Y1 := H - Y2, AJ[4] := (B1 * Y2 ** 3 + B * Y1 ** 3 - (B1 - C) * (Y2 -
K) ** 3 - (B - C) * (Y1 - D) ** 3) / 3, AJ[3] := (D * B ** 3 + H1 * C ** 3 + K *
B1 ** 3) / 12, AJ[2] := (B * D ** 3 + H1 * C ** 3 + B1 * K ** 3) / 3,
SE: END,

```

2—2 环形截面力学特性(AJE2)

本过程适用于计算环形截面的面积A、抗扭惯性矩 J_x 和对截面形心轴的惯性矩 J_z 及 J_y ($J_z = J_y$)

1. 数学方法简述

$$A = 0.785(D^2 - B^2)$$

$$J_x = J_y = 0.0491(D^4 - B^4)$$

$$J_x = 0.1D^4[1 - (B/D)^4] = 2.0367J_x$$

2. 使用说明

输入参数:

B——内径

D——外径

输出参数:

AJ——截面面积和惯性矩数组 [1:4], 元素存放

次序:

AJ[1]——截面面积

AJ[2]——抗扭惯性矩 J_x

AJ[3] = AJ[4]——对形心轴的惯性矩 J_y 和 J_z

3. 过程源程序

```
PROC AJE2(B, D, AJ),
```

```
REAL B, D, ARRAY AJ,
```

```
BEGIN
```

```
AJ[1] := 0.785 * (D * D - B * B), AJ[3] := AJ[4] := 0.0491 * (D ** 4 - B ** 4),
```

```
AJ[2] := 2.0367 * AJ[3]
```

```
END,
```

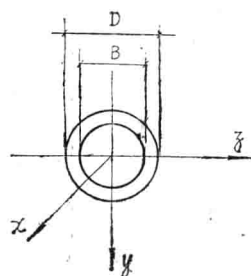


图1.1.4

第二章 杆系结构的单元刚度、坐标转换、杆端偏置矩阵

2—1 平面桁架杆件的单元刚度矩阵(KPT)

1. 数学方法简述

在杆件坐标系内，杆端位移向量为：

$$\{\delta\} = [\delta_{ix} \quad \delta_{iy} \quad \delta_{kx} \quad \delta_{ky}]^T = [R] \{\bar{\delta}\}$$

式中： $\{\bar{\delta}\} = [\delta_{i\bar{x}} \quad \delta_{i\bar{y}} \quad \delta_{k\bar{x}} \quad \delta_{k\bar{y}}]^T$

为在结构坐标系内的杆端位移向量。

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

为坐标转换矩阵。

对应于 $\{\delta\}$ 的单元刚度矩阵为：

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA}{L} & 0 & \frac{EA}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

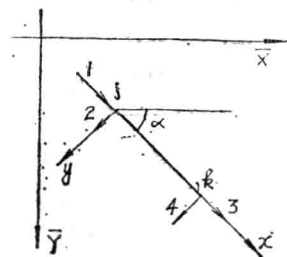


图 2.1.1

2. 使用说明

输入参数：

- A——杆件截面的面积
- E——杆件材料的弹性模量
- X——杆件的水平投影长
- Y——杆件的垂直投影长

输入参数：

- K——杆件单元刚度数组 [1:4, 1:4]

3. 过程源程序

```
PROC KPT(A, E, X, Y, K);
  REAL A, E, X, Y; ARRAY K;
  BEGIN REAL L; STOA(0, K); L:=GN2(X×X+Y×Y);
    L:=K[1, 1]:=K[3, 3]:=A×E/L; K[1, 3]:=K[3, 1]:=-L
  END;
```

2—2 平面刚架杆件的单元刚度矩阵之一(KPF1)

1. 数学方法简述

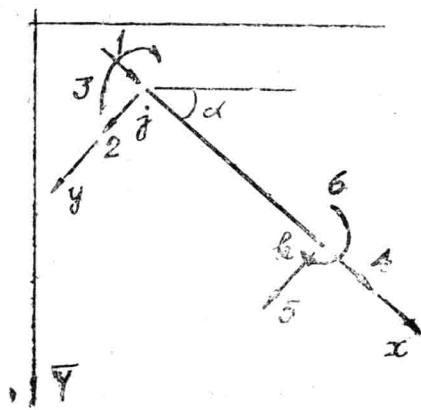
在杆件坐标系内, 杆件位移向量为:

$$\{\delta\} = [\delta_{ix} \quad \delta_{iy} \quad \theta_i \quad \delta_{kx} \quad \delta_{ky} \quad \theta_k]^T = [R] \{\bar{\delta}\}$$

$$\text{式中: } \{\bar{\delta}\} = [\delta_{i\bar{x}} \quad \delta_{i\bar{y}} \quad \theta_i \quad \delta_{k\bar{x}} \quad \delta_{k\bar{y}} \quad \theta_k]^T \quad \bar{X}$$

为在结构坐标系内的杆端位移向量。

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



为坐标转换矩阵。

对应于 $\{\delta\}$ 的单元刚度矩阵为:

图2.2.1

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EJ_z}{L^3} & \frac{6EJ_z}{L^2} & 0 & -\frac{12EJ_z}{L^3} & \frac{6EJ_z}{L^2} \\ 0 & \frac{6EJ_z}{L^2} & \frac{4EJ_z}{L} & 0 & -\frac{6EJ_z}{L^2} & \frac{2EJ_z}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EJ_z}{L^3} & -\frac{6EJ_z}{L^2} & 0 & \frac{12EJ_z}{L^3} & -\frac{6EJ_z}{L^2} \\ 0 & \frac{6EJ_z}{L^2} & \frac{2EJ_z}{L} & 0 & -\frac{6EJ_z}{L^2} & \frac{4EJ_z}{L} \end{bmatrix}$$

当杆件 j 端为铰接时, [K] 改作:

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3EJ_z}{L^3} & 0 & 0 & -\frac{3EJ_z}{L^3} & \frac{3EJ_z}{L^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3EJ_z}{L^3} & 0 & 0 & \frac{3EJ_z}{L^3} & -\frac{3EJ_z}{L^2} \\ 0 & \frac{3EJ_z}{L^2} & 0 & 0 & -\frac{3EJ_z}{L^2} & \frac{3EJ_z}{L} \end{bmatrix}$$

当 K 端为铰接时, [K] 改作:

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3EJ_z}{L^3} & \frac{3EJ_z}{L^2} & 0 & -\frac{3EJ_z}{L^3} & 0 \\ 0 & \frac{3EJ_z}{L^2} & \frac{3EJ_z}{L} & 0 & -\frac{3EJ_z}{L^2} & 0 \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3EJ_z}{L^3} & -\frac{3EJ_z}{L^2} & 0 & \frac{3EJ_z}{L^3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

当 j、k 两端均为铰接时, [K] 改作:

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2. 使用说明

输入参数:

- A——杆件截面的面积
- J——杆件截面的惯性矩
- E——杆件材料的弹性模量
- X——杆件的水平投影长
- Y——杆件的垂直投影长

TS——杆端联接特征:

k 端铰接另一端固接时为 1; j 端铰接另一端固接时为 2; 两端铰接时为 3;
两端刚接时为 4

输出参数:

K——杆件刚度数组 [1:6, 1:6]

3. 过程源程序

```
PROC KPF1(A, J, E, X, Y, TS, K);
  INTEG TS; REAL A, J, E, X, Y; ARRAY K;
BEGIN REAL L, B, C; INTEG H;
  STOA(0, K);
  L := GN2(X * X + Y * Y); B := 3 * E * J / (L * L);
  C := K[1, 1] := K[4, 4] := E * A / L;
  K[4, 1] := K[1, 4] := -C; IF TS = 3 THEN GOTO TME;
  IF TS = 4 THEN GOTO L3; H := 3 * TS; K[2, H] := K[H, 2] := B;
  K[H, 5] := K[5, H] := -B; C := K[2, 2] := K[5, 5] := B / L;
  K[2, 5] := K[5, 2] := -C; K[H, H] := B * L; GOTO TME;
L3: B := 2 * B; C := L / 3; C := K[3, 6] := K[6, 3] := C * B;
  K[3, 3] := K[6, 6] := 2 * C; K[2, 3] := K[3, 2] := K[2, 6] :=
  K[6, 2] := B; K[5, 3] := K[3, 5] := K[5, 6] := K[6, 5] := -B;
  B := K[2, 2] := K[5, 5] := 2 * B / L; K[2, 5] := K[5, 2] := -B;
TME; END;
```

2—3 平面刚架杆件的单元刚度矩阵之二(KPF2)

本过程的功能同KPF1过程,但考虑了剪切变形对刚度的影响。如使用本过程不考虑剪切变形的影响时,需令 $\mu = 0$ 。

1. 数学方法简述

杆件坐标系见KPF1图2.2.1,杆端位移向量及坐标转换矩阵见KPF1数学方法简述,对应于 $\{\delta\}$ 的单元刚度矩阵为:

$$[K] = \begin{bmatrix} C_1 & & & & & \\ & 0 & C_6 & & & \\ & 0 & C_3 & C_8 & & \\ -C_1 & 0 & 0 & C_1 & & \\ & 0 & -C_6 & -C_3 & 0 & C_6 \\ 0 & C_3 & C_{10} & 0 & -C_3 & C_8 \end{bmatrix} \quad (\text{对称})$$

$$\text{式中: } C_1 = \frac{EA}{L}; \quad C_3 = \frac{6EJ_z}{L^2(1+\phi_Y)}; \quad C_6 = \frac{12EJ_z}{L^3(1+\phi_Y)}$$

$$C_8 = \frac{(4 + \phi_y) EJ_z}{L(1 + \phi_y)}; C_{10} = \frac{(2 - \phi_y) EJ_z}{L(1 + \phi_y)}$$

$$\phi_y = \mu \frac{12 EJ_z}{GA L^2}$$

2. 使用说明

输入参数:

A J —— 截面参数数组 [1:3], 元素存放次序:

A J [1] = A; A J [2] = J_z; A J [3] = μ

μ 为剪应力分布不均匀系数, 其他符号的意义同 KPF1。

E —— 杆件材料的弹性模量

G —— 杆件材料的剪切模量

L X —— 杆件轴线在 $\bar{X}$ 方向的投影长度

L Y —— 杆件轴线在 $\bar{Y}$ 方向的投影长度

输出参数:

K —— 单元刚度数组 [1:6, 1:6]

3. 过程源程序

```
PROC KPF2 (AJ, E, G, LX, LY, K);
  VALUE E, G, LX, LY, ARRAY AJ, K, REAL E, G, LX, LY,
  BEGIN REAL L, LL, C, A, JZ, JY, FY;
    A := AJ[1]; JZ := AJ[2]; LL := LX * LX + LY * LY; L := GN2(LL);
    C := 12 * E / G / A / LL; FY := AJ[3] * C * JZ + 1;
    STOA(0, K); C := K[1, 1] := K[4, 4] := E * A / L;
    K[4, 1] := K[1, 4] := -C; K[3, 2] := K[6, 2] := K[2, 3] :=
    K[2, 6] := C := 6 * E * JZ / LL / FY; K[5, 3] := K[3, 5] := K[6, 5] :=
    K[5, 6] := -C; C := K[2, 2] := K[5, 5] := C * 2 / L; K[5, 2] := K[2, 5] :=
    -C; C := E * JZ / L / FY;
    K[6, 3] := K[3, 6] := (3 - FY) * C;
    K[3, 3] := K[6, 6] := (3 + FY) * C
  END;
```

2—4 空间桁架杆件的单元刚度矩阵(KST)

1. 数学方法简述

在杆件坐标系内, 杆端位移向量为:

$$\{\delta\} = [\delta_{ix} \quad \delta_{iy} \quad \delta_{iz} \quad \delta_{kx} \quad \delta_{ky} \quad \delta_{kz}]^T = [R] \{\bar{\delta}\}$$

$$\text{式中: } \{\bar{\delta}\} = [\delta_{i\bar{x}} \quad \delta_{i\bar{y}} \quad \delta_{i\bar{z}} \quad \delta_{k\bar{x}} \quad \delta_{k\bar{y}} \quad \delta_{k\bar{z}}]^T$$

为在结构坐标系内的杆端位移向量

$$[R] = \begin{bmatrix} C_x & C_y & C_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_x & C_y & C_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

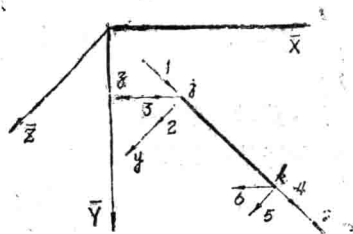


图2.4.1

为坐标转换矩阵。式中 C_x 、 C_y 、 C_z 分别为杆轴 X 对结构坐标系 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$ 轴的方向余弦。

对应于 $\{\delta\}$ 的单元刚度矩阵为：

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2. 使用说明

输入参数：

A ——杆件截面的面积

E ——杆件材料的弹性模量

X 、 Y 、 Z ——分别为杆件在 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$ 轴上的投影长

输出参数：

K ——单元刚度数组 $[1:6, 1:6]$

3. 过程源程序

```
PROC KST(A, E, X, Y, Z, K);
```

```
  ARRAY K; REAL A, E, X, Y, Z;
```

```
  BEGIN REAL L;
```

```
    STOA(0, K); L := GN2(X * X + Y * Y + Z * Z); L := K[4, 4] :=
```

```
    K[1, 1] := E * A / L; K[1, 4] := K[4, 1] := -L
```

```
  END;
```

2—5 空间刚架杆件的单元刚度矩阵之一(KSF1)

1. 数学方法简述

在杆件坐标系内，杆端位移向量为：

$$\begin{aligned} \{\delta\} &= [\delta_{ix} \quad \delta_{iy} \quad \delta_{iz} \quad \theta_{iyz} \quad \theta_{izx} \quad \theta_{ixy} \quad \delta_{kx} \quad \delta_{ky} \quad \delta_{kz} \quad \theta_{kyz} \quad \theta_{kzx} \\ &\quad \theta_{kxy}]^T \\ &= [R] \{\bar{\delta}\} \end{aligned}$$

$$\text{式中：} \{\bar{\delta}\} = [\delta_{i\bar{x}} \quad \delta_{i\bar{y}} \quad \delta_{i\bar{z}} \quad \theta_{i\bar{y}\bar{z}} \quad \theta_{i\bar{z}\bar{x}} \quad \theta_{i\bar{x}\bar{y}} \quad \delta_{k\bar{x}} \quad \delta_{k\bar{y}} \quad \delta_{k\bar{z}} \quad \theta_{k\bar{y}\bar{z}} \quad \theta_{k\bar{z}\bar{x}} \quad \theta_{k\bar{x}\bar{y}}]^T$$

为结构坐标系内的杆端位移向量，x 沿杆轴方向，y 与 z 轴分别为截面的两个形心主轴。

$$[R] = \begin{bmatrix} [\gamma] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [\gamma] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [\gamma] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [\gamma] \end{bmatrix}$$

为坐标转换矩阵，一般情况下 $[\gamma]$ 为：

$$[\gamma] = \begin{bmatrix} C_x & C_y & C_z \\ \frac{(-C_x C_y \cos \alpha - C_z \sin \alpha)}{\sqrt{1 - C_y^2}} & \sqrt{1 - C_y^2} \cos \alpha & \frac{(-C_y C_z \cos \alpha + C_x \sin \alpha)}{\sqrt{1 - C_y^2}} \\ \frac{(C_x C_y \sin \alpha - C_z \cos \alpha)}{\sqrt{1 - C_y^2}} & -\sqrt{1 - C_y^2} \sin \alpha & \frac{(C_y C_z \sin \alpha + C_x \cos \alpha)}{\sqrt{1 - C_y^2}} \end{bmatrix}$$

其中 α 为截面形心主轴 z 对水平面 ($\bar{x} \circ \bar{z}$ 平面) 的倾角，亦即当杆件绕 x 轴逆时针转动 α 角后，z 轴与水平面平行 (图 2.5.2)；其中 $C_x = \frac{X}{L}$ ， $C_y = \frac{Y}{L}$ ， $C_z = \frac{Z}{L}$ ， $L = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$ 。对于垂直放置的杆件，因为 $C_y = 1$ ，上述 $[\gamma]$ 的公式不适用，应改为：

$$[\gamma] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\cos \alpha_1 & 0 & \sin \alpha_1 \\ \sin \alpha_1 & 0 & \cos \alpha_1 \end{bmatrix}$$

式中 α_1 为截面 z 主轴与结构坐标 $\bar{x}$ 轴间的角度 (图 2.5.3)。

对应于 $\{\delta\}$ 的单元刚度矩阵为：