

BoltJoint

Xie Yu

1 介绍

BoltJoint类参考VDI 2230规范编写的6种连接类型的工程计算方法。

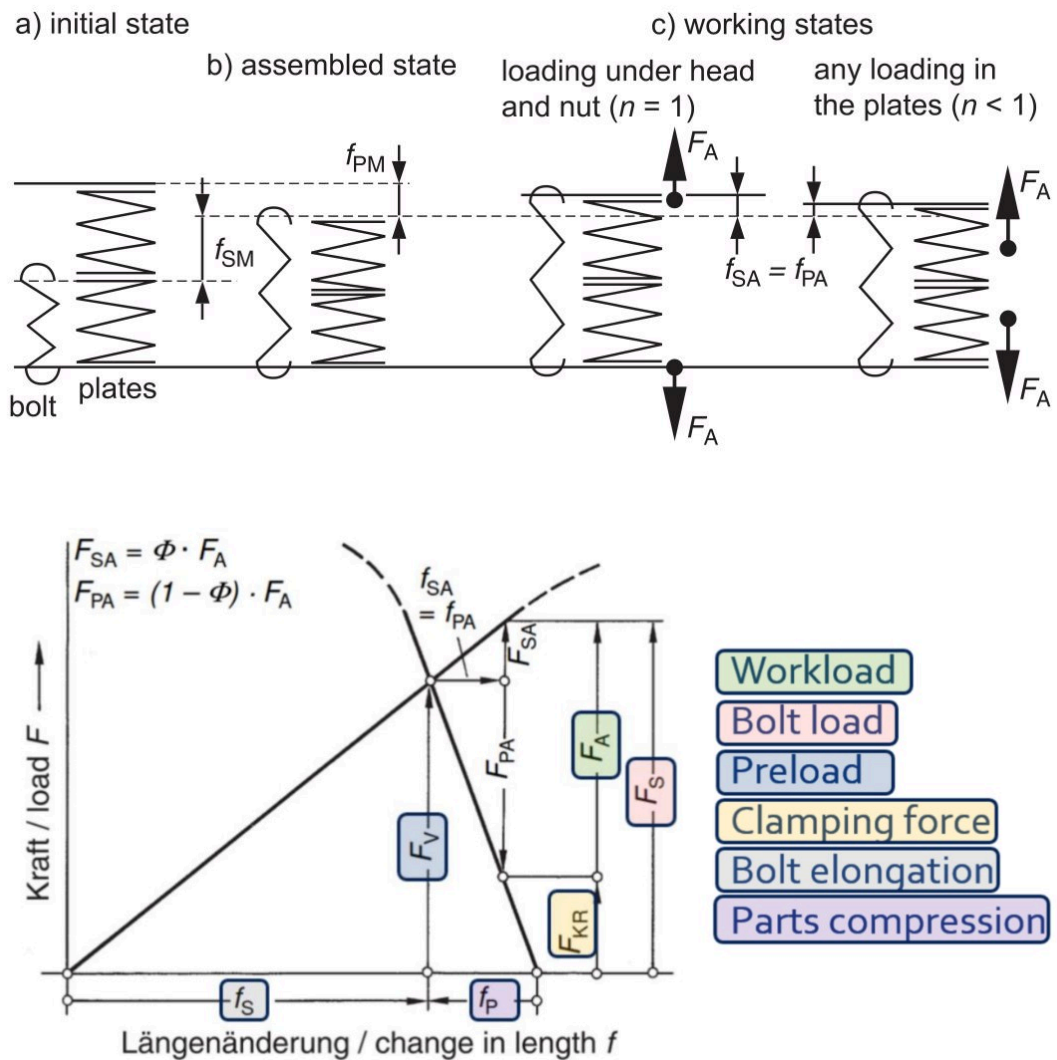
2 原理

2.1 螺栓和夹持件刚度

螺栓和夹持件可以比作两根弹簧：

- a) 初始状态下，螺栓未拧紧，螺栓和夹持件处于松弛状态；
- b) 预紧状态，螺栓拧紧，此时螺栓所受的拉力与夹持件所受的压力相等，均为 F_V
- c) 工作状态，受到总的拉力为 F_A ，螺栓和夹持件的变形相同 $f_{SA} = f_{PA}$ ，但两者所受的力不同，这跟螺栓和夹持件的柔度相关。

因此要做螺栓的受力分析和计算，本质即考虑如何用工程算法求出螺栓和夹持件的刚度之比。



VDI 2230给出了螺栓受力的公式，为两种受力状态的叠加（受拉和受弯），从这里可以看出VDI 2230工程计算并没有考虑受剪影响，因此对于一些抗剪力节点构造，比如钢结构，也需参考对应的规范进行计算。

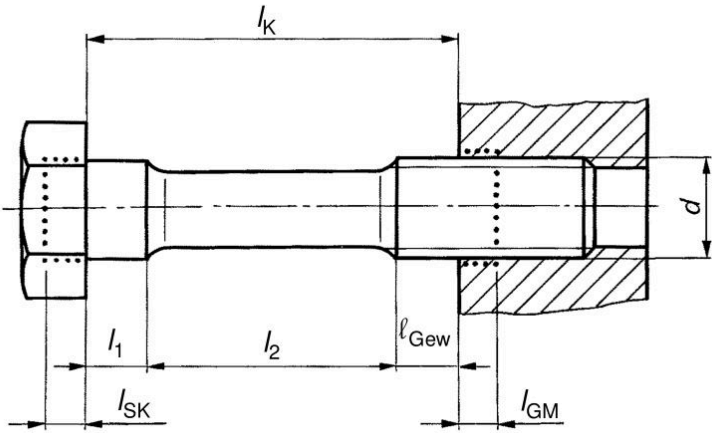
$$F_{SA} = \frac{n \cdot \delta_P \cdot (\beta_P + \beta_S) - m_M \cdot \beta_P \cdot \gamma_P}{(\delta_P + \delta_S) \cdot (\beta_P + \beta_S) - \gamma_P^2} F_A + \frac{n_M \cdot \delta_P \cdot (\beta_P + \beta_S) - m \cdot \beta_P \cdot \gamma_P}{(\delta_P + \delta_S) \cdot (\beta_P + \beta_S) - \gamma_P^2} M_B$$

螺栓柔度：

$$\delta_s = \delta_{SK} + \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_{Gew} + \delta_{GM} \tag{1}$$

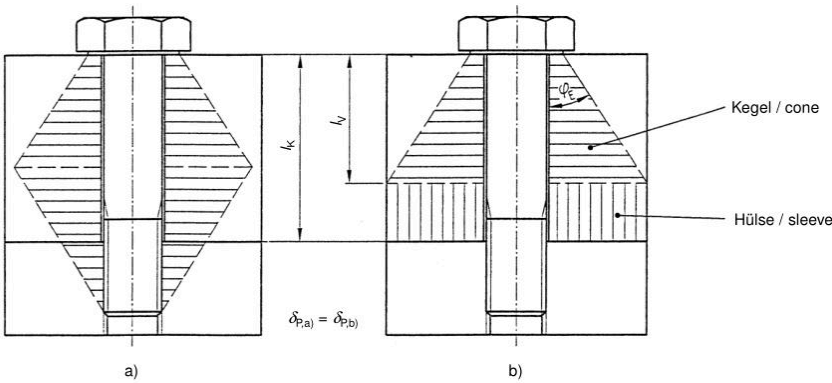
对照下图，可以看出：

δ_{SK} 为螺栓头柔度， δ_i 为螺杆无螺纹处各段柔度， δ_{Gew} 为未旋合段螺纹柔度， δ_{GM} 旋合段螺纹柔度。值得注意的是螺栓头和旋合处螺纹的柔度只取了一部分长度，这是因为螺纹咬合时只有前几个牙受力，需要对柔度进行折减。



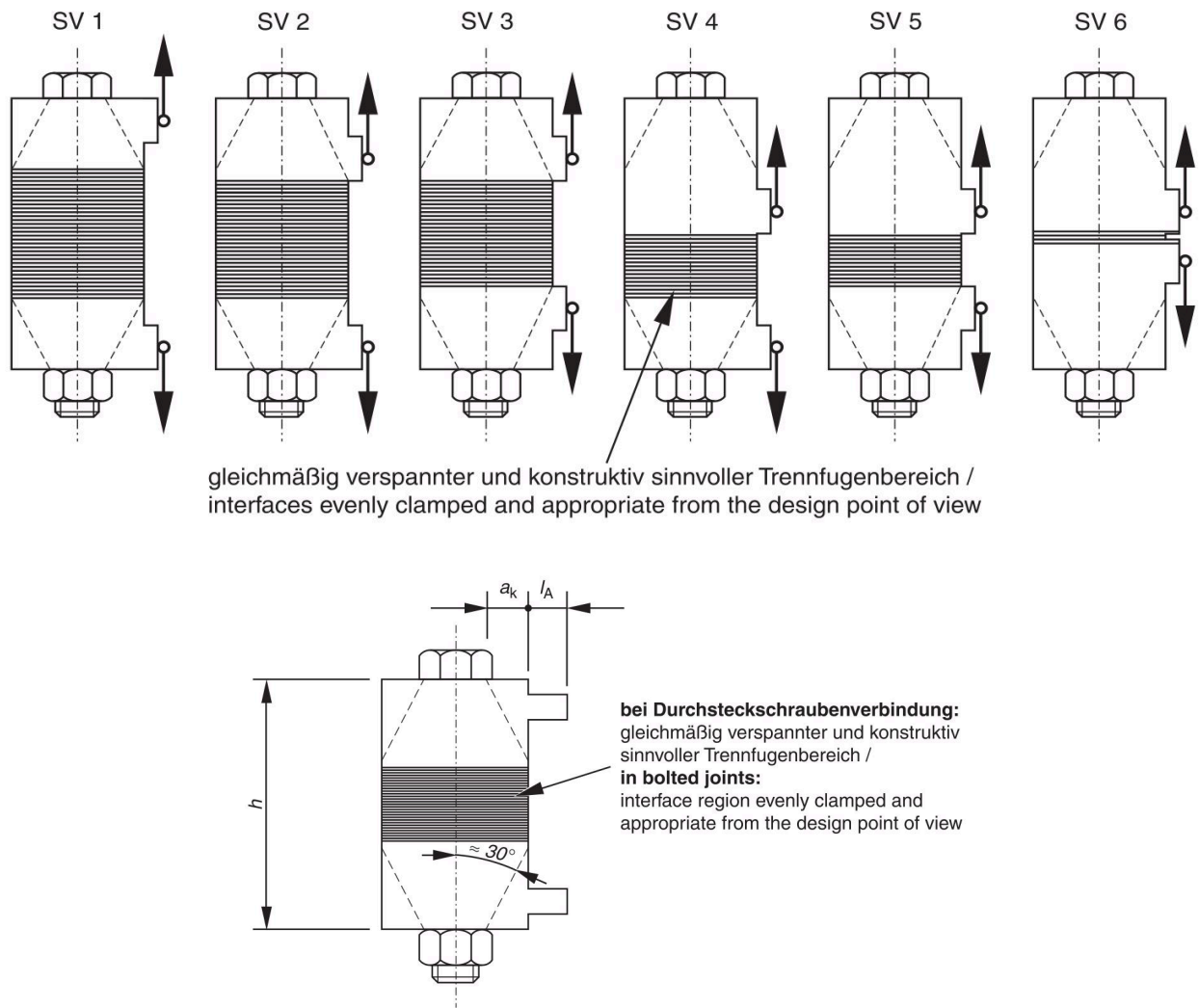
夹持件柔度：

对于夹持件的柔度，我们需要引入应力锥的概念，可以看到应力呈现一个锥形向下分布，因此我们只要求锥体的刚度即可，VDI做了大量的试验，并拟合了巨量的公式，对不同情况下的锥体柔度进行拟合和计算，此处不再赘述，可以查看对应的规范。



2.2 载荷引入系数

为了考虑偏心弯曲情况下，螺栓节点会发生变形，会影响载荷分配，VDI 2230 引入了载荷引入系数 n 来考虑加载点位置的影响，总共考虑了如下6种节点的影响。



使用时首先选择对应的节点，计算 l_A 和 a_k 值，带入下表进行插值求解。VDI 2230附录C介绍了载荷系数的工程求解方法，但具体过程非常繁琐，应用起来不是很方便。

l_A/h	0,00				0,10				0,20				$\geq 0,30$			
a_k/h	0,00	0,10	0,30	$\geq 0,50$	0,00	0,10	0,30	$\geq 0,50$	0,00	0,10	0,30	$\geq 0,50$	0,00	0,10	0,30	$\geq 0,50$
SV 1	0,70	0,55	0,30	0,13	0,52	0,41	0,22	0,10	0,34	0,28	0,16	0,07	0,16	0,14	0,12	0,04
SV 2	0,57	0,46	0,30	0,13	0,44	0,36	0,21	0,10	0,30	0,25	0,16	0,07	0,16	0,14	0,12	0,04
SV 3	0,44	0,37	0,26	0,12	0,35	0,30	0,20	0,09	0,26	0,23	0,15	0,07	0,16	0,14	0,12	0,04
SV 4	0,42	0,34	0,25	0,12	0,33	0,27	0,16	0,08	0,23	0,19	0,12	0,06	0,14	0,13	0,10	0,03
SV 5	0,30	0,25	0,22	0,10	0,24	0,21	0,15	0,07	0,19	0,17	0,12	0,06	0,14	0,13	0,10	0,03
SV 6	0,15	0,14	0,14	0,07	0,13	0,12	0,10	0,06	0,11	0,11	0,09	0,06	0,10	0,10	0,08	0,03

2.3 安全系数

得到各部件的柔度和载荷引入系数，就可以计算螺栓和夹持件的应力。

首先计算载荷系数：

$$\Phi_n = n \frac{\delta_p + \delta_{pzu}}{\delta_s + \delta_p} \quad (2)$$

式中， δ_p 为夹持件的柔度， δ_{pzu} 为回弹补偿的柔度

螺栓受到的力为：

$$F_s = F_V + \Phi F_A \quad (3)$$

式中， F_V 为预紧力， F_A 为工作状态下受到的轴向拉力。

螺栓受到的拉力为：

$$\sigma_z = F_s / A_s \quad (4)$$

螺栓受到的等效应力为：

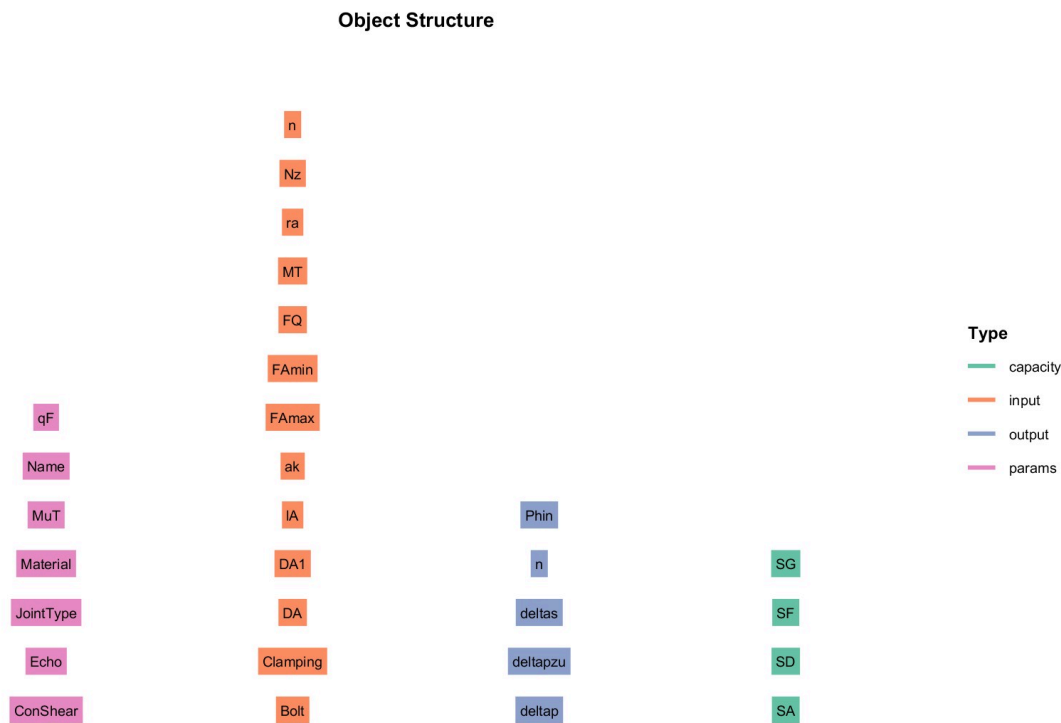
$$\sigma_{red,B} = \sqrt{\sigma_z^2 + 3(k_\tau \tau)^2} \quad (5)$$

式中， k_τ 为剪力的折减系数， τ 为螺栓受到的剪力。

极限的安全系数为：

$$SF = \frac{R_p}{\sigma_{red,B}} \quad (6)$$

3 类结构



输入 input:

- n : 载荷导入系数
- Nz : 循环次数
- ra : 摩擦半径
- MT : 扭矩
- FQ : 剪力
- FAmin : 最小轴向力

- F_{Amax} : 最大轴向力
- a_k : 连接体距离
- l_A : 连接体长度
- D_A : 外径
- D_{A1} : 外径 (考虑周围环境的支撑效应)
- Clamping : 夹持件厚度和材料
- Bolt : 螺栓类

参数 params:

- q_F : 载荷传递分界面
- Name : 名称
- μ_T : 夹持件的摩擦系数
- JointType : 连接类型
- ConShear : 考虑剪力

输出 output :

- Phin: 载荷比
- n : 载荷导入系数
- deltas : 螺纹外径
- deltap_{zu} : 螺纹中径
- deltap : 螺纹小径

能力 capability :

- S_G : 滑移安全系数
- S_F : 屈服安全系数
- S_D : 疲劳安全系数
- S_A : 剪切安全系数

3.1 BoltJoint with axial force (VDI2230 example1 Flag=1)

```

1  inputStruct1.d=12;
2  inputStruct1.l=60;
3  inputStruct1.lk=42;
4  inputStruct1.dh=13.5;
5  paramsStruct1.ThreadType=1;
6  paramsStruct1.alphaA=1.8;
7  paramsStruct1.MuG=0.1;
8  paramsStruct1.MuK=0.1;
9  paramsStruct1.Nut=0;
10 paramsStruct1.NutWasher=0;
11 paramsStruct1.Washer=0;
12 M12Bolt= bolt.Bolt(paramsStruct1, inputStruct1);
13 M12Bolt= M12Bolt.solve();
14 Plot2D(M12Bolt);
15 Plot3D(M12Bolt);
16 disp(M12Bolt.output.deltas)
17
18 inputStruct2.Bolt=M12Bolt;
19 inputStruct2.DA=40;
```

```

20 inputStruct2.DA1=40;
21 inputStruct2.FAmax=24900;
22 % inputStruct2.DA=40;
23 % inputStruct2.DA1=40;
24 inputStruct2.Clamping=[42,1];
25 inputStruct2.lA=4.2;
26 paramsStruct2.JointType='SV4';
27 BoltJoint=bolt.BoltJoint(paramsStruct2, inputStruct2);
28 BoltJoint= BoltJoint.solve();
29 disp(BoltJoint.output.deltap)
30 PlotCapacity(BoltJoint)

```

3.1.1 螺栓柔度对比

我们拿kisssoft与Buffalo bolt计算的螺栓柔度进行对比，

不包含垫片和螺母：

首先不考虑螺母和垫片，选择M12螺栓，长度为60mm, 夹持长度为42mm, 螺栓孔直径为13.5mm。Kisssoft设置如下所示：

螺栓数据		
螺栓类型	内六角圆柱头螺栓 DIN EN ISO 4762:2004	
名义直径 d	12.0000	mm
螺栓长度 l	60.0000	mm
强度等级	10.9	

螺母/盲孔数据		
连接类型	盲孔（旋合连接）	
沉孔深度 t _s	0.0000	mm
材料类型	调质钢	
材料	C45 (1), 非合金, 调质, VDI 2230 (2015)	
表面粗糙度	N8 Rz=16 (铣削)	
粗糙度 R _z	16.0000	µm

无外力情况下的垫圈/膨胀套	
<input type="checkbox"/>	螺栓头下方的垫圈
<input type="checkbox"/>	螺栓头下方的膨胀套

几何

基础几何形状

圆柱

外径

D_A

80.0000

mm

外径 (周围环境的支撑效应)

D_A'

80.0000

mm

孔

标准

ISO 273:1979/DIN EN 20273:1992 中

直径

d_h

13.5000

mm

头部上的倒角

c_K

0.0000

mm

螺母倒角

c_M

0.0000

mm

部件定义

	材料类型	材料	粗糙度	Rz [μm]	层厚 [mm]
1	调质钢	C45 (1), 非合金, 调质, VDI 2230 (2015)	N7 Rz=8.0 (使用金刚石车削)	8.0000	42.0000

夹紧长度 (没有垫圈或者膨胀套)

l_K

42.0000

mm

点击计算，查看螺栓柔度：

螺栓回弹性 (mm/N)

[δS]

2.947595e-06

可以看到输出的结果和kisssoft保持一致

2.9484e-06

垫片影响：

接着我们考虑螺栓头下增加垫片，理论上因为螺栓的夹持长度增加，螺栓会变柔，柔度系数增大。在Kisssoft中勾选以下选项：

无外力情况下的垫圈/膨胀套

☒ 螺栓头下方的垫圈

☐ 螺栓头下方的膨胀套

输出的螺栓柔度：

螺栓回弹性 (mm/N)

[δS]

3.107537e-06

在Baffalo中打开垫片选项：

```
1 | paramsStruct1.Washer=1;
```

输出结果依然一致，可以看到整体螺栓的柔度增加。

3.1084e-06

在很多情况下，遇到螺栓计算的极限或疲劳问题时，增加螺栓的夹持长度，即增大螺栓柔度，有助于螺栓降载荷。

3.1.2 夹持件柔度对比

夹持件的柔度会影响载荷分配，螺栓应力锥的范围是计算柔度的关键

$D_A=80$ mm:

在Kisssoft中将 D_A 和 D_A' 设置为80mm，观察输出的夹持件柔度,夹持件的柔度为3.020825e-7 mm/N。

几何

基础几何形状

圆柱

外径

D_A

80.0000

mm

外径（周围环境的支撑效应）

D_A'

80.0000

mm

直径 (mm)	[DA']	80.00
直径 (mm)	[DA]	80.00
极限直径 (mm)	[DA.Gr]	72.33
锥角 (°)	[φ]	33.26
法兰回弹性 (mm/N)	[δP]	3.020825e-07
板回弹性补偿量 (mm/N)	[δPzu]	1.699713e-07

```
1 inputStruct2.Bolt=M12Bolt;
2 inputStruct2.DA=80;
3 inputStruct2.DA1=80;
4 inputStruct2.FAmax=24900;
5 % inputStruct2.DA=40;
6 % inputStruct2.DA1=40;
7 inputStruct2.Clamping=[42,1];
8 inputStruct2.lA=4.2;
9 paramsStruct2.JointType='SV4';
10 BoltJoint=bolt.BoltJoint(paramsStruct2, inputStruct2);
11 BoltJoint= BoltJoint.solve();
12 disp(BoltJoint.output.deltap)
13 disp(BoltJoint.output.SF)
14 disp(BoltJoint.output.SD)
```

输入以上代码，Baffalo输出的结果为：

3.0208e-07

DA=40 mm:

在Kissoft更改将 D_A 和 D_A' 为40mm，此时外径减小，柔度增加到3.963215e-7 mm/N

主体的等效外径:		
直径 (mm)	[DA']	40.00
直径 (mm)	[DA]	40.00
极限直径 (mm)	[DA.Gr]	61.09
锥角 (°)	[φ]	27.57
法兰回弹性 (mm/N)	[δP]	3.963215e-07
板回弹性补偿量 (mm/N)	[δPzu]	1.699713e-07

Baffalo输出结果为：

3.9632e-07

两者结果一致。

3.1.3 安全系数对比

按照下图设置载荷，最大轴力为24900N,连接类型为SV4, l_A 设置为4.2mm。

工作数据

配置

纵向力作用下的螺栓连接（单个螺栓）

最小轴向力

$F_{A,min}$

0.0000

N

最大轴向力

$F_{A,max}$

24900.0000

N

载荷循环数

N_z

1000000.0000

必要的夹紧力

F_{KQ}

1000.0000

N

用于密封功能的夹紧力

F_{KF}

0.0000

N

温度

装配温度

20.0000

° C

螺栓工作温度

20.0000

° C

零件工作温度

20.0000

° C

偏心负荷/夹紧时的距离

载荷导入

a

0.0000

mm

螺栓轴线

s_{sym}

0.0000

mm

分裂点的边缘距离

u

0.0000

mm

载荷导入

载荷导入系数

n

0.3300

连接类型

SV 4

连接体的长度

l_A

4.2000

mm

连接体的距离

a_k

0.0000

mm

同时将嵌入量造成的预紧力损失关掉，这里会考虑表面粗糙度带来的预紧力损失，个人觉得考虑这个有点矫枉过正，德国人有点太严谨了，这个参数本身的影响也比较小。

工作数据

配置

屈服极限的利用率

达到的最大拧紧扭矩

$M_A (F_M)$

109.3223

Nm

已达到的平均拧紧扭矩

$M_A (F_{M,0})$

88.8243

Nm

达到的最小拧紧扭矩

$M_A (F_M / \alpha)$

68.3264

Nm

允许装配预紧力

$F_{M,zul}$

64904.2936

N

最低屈服极限的利用率

v

90.0000

%

嵌入量

f_z

0.0000

mm

附加嵌入量

f'_z

0.0000

mm

预紧力损失

F_z

0.0000

N

拧紧方法

方法

扭矩扳手（估算摩擦系数）

基准值

最小

拧紧系数

α_A

1.6000

摩擦系数

在螺纹中（最小/最大）

μ_G

0.1000

0.1000

在螺母支承面中（最小/最大）

μ_M

0.1000

0.1000

算出来的SF为1.15

屈服极限

[SF]

1.15

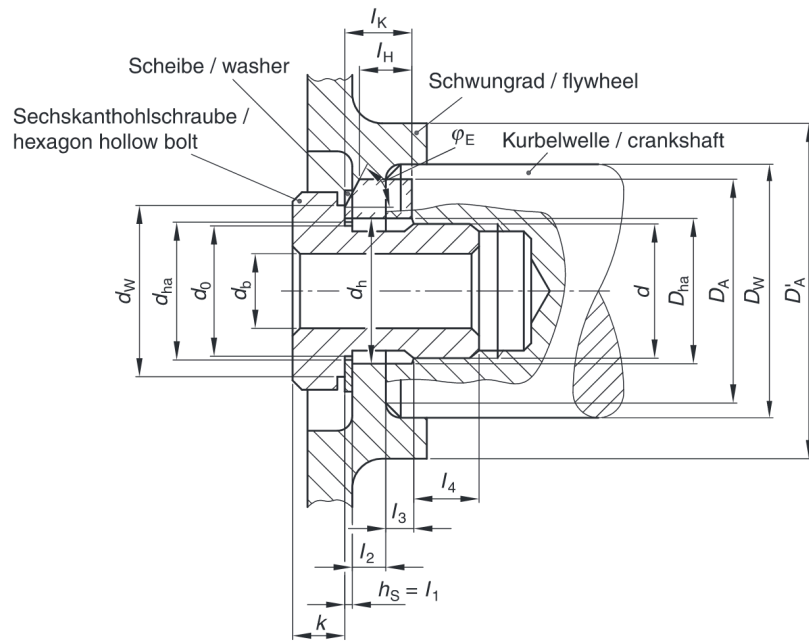
Baffalo的结果为：

1.1455

两者基本一致。

3.2 BoltJoint with shearing force (VDI2230 example3 Flag=2)

VDI2230第三个例子是一个飞轮螺栓拧紧计算，需要注意的是螺栓是空心的，空心螺栓与实心螺栓的截面积和拧紧所需的力矩不一样，需要对公式进行修正。



为了方便对比，本人对案例进行了修改，采用kisssoft对matlab结果进行校验。

3.2.1 螺栓建模

在螺栓建模方面，引入空心螺栓，同时针对螺栓力矩计算进行修正。

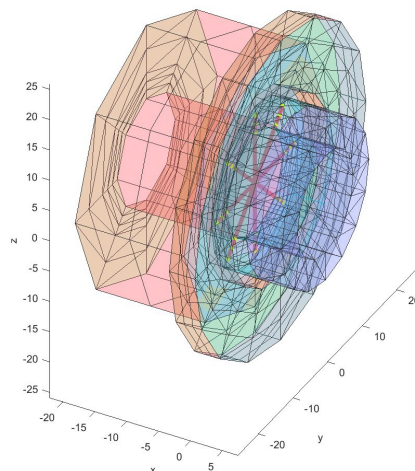
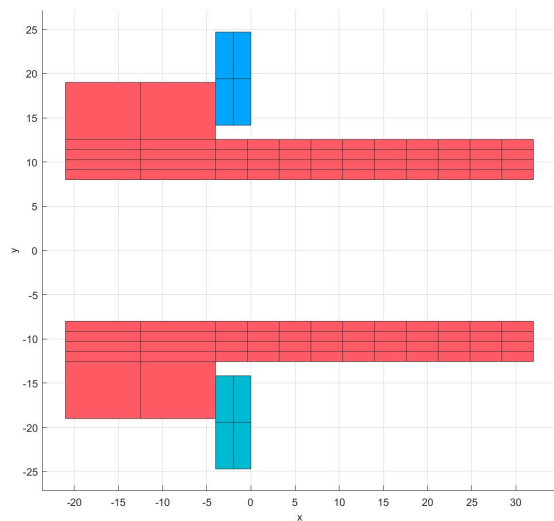
如下为修正后的预紧下螺栓的轴向力，引入了内径 d_0 的影响。

$$F_{Mzul} = A_0 \cdot \frac{\nu \cdot R_{p0,2min}}{\sqrt{1+3 \left[\frac{3}{2} \frac{d_2 \cdot (d_0^2 - d_b^2)}{(d_0^3 - d_b^3)} \left(\frac{P}{\pi \cdot d_2} + 1,155 \mu_{Gmin} \right) \right]^2}}$$

```

1  inputStruct1.d=27;
2  inputStruct1.l=36;
3  inputStruct1.lk=7;
4  inputStruct1.dh=29;
5  inputStruct1.d0=16;
6  paramsStruct1.ThreadType=2;
7  paramsStruct1.alphaA=1.6;
8  paramsStruct1.MuG=0.1;
9  paramsStruct1.MuK=0.1;
10 paramsStruct1.Nut=0;
11 paramsStruct1.NutWasher=0;
12 paramsStruct1.Washer=1;
13 paramsStruct1.BoltType=0;
14 paramsStruct1.Strength='8.8';
15 M27Bolt= bolt.Bolt(paramsStruct1, inputStruct1);
16 M27Bolt= M27Bolt.solve();
17 Plot2D(M27Bolt);
18 Plot3D(M27Bolt);

```



目前我还不能够自由的定义螺栓形态，在kisssoft中的螺栓截面定义需要做一些改正以方便对比，将自定义螺杆处的直径改为螺纹中径25.1236.

常规

名称

""

螺栓头直径 d_k

44.0000 mm

头部支承面的外径 d_w

36.0000 mm

头部支承面的内径 d_a

28.0000 mm

孔径（空心螺栓） d_i

16.0000 mm

开口度 s

40.0000 mm

螺栓头高度 i

10.0000 mm

螺纹

标准

细牙螺纹

名称

M27x2

导程 P

2.0000 mm

螺纹长度 b

20.0000 mm

齿面夹角 α

60.0000 °

系数 d_2

0.6495

系数 d_3

1.2269

螺栓杆

	T_d [mm]	T_l [mm]
1	25.1235	1.5000
2	25.1236	14.5000
3	27.0000	0.0000

+

-

x

OK

Cancel

同时把嵌入两改为0mm, 此时计算得到的最大预紧力为169kN

工作数据			
配置		屈服极限的利用率	
达到的最大拧紧扭矩	$M_A (F_{td})$	576.4884	Nm
已达到的平均拧紧扭矩	$M_A (F_{Mz})$	468.3968	Nm
达到的最小拧紧扭矩	$M_A (F_M/\alpha)$	360.3053	Nm
允许装配预紧力	F_{Mzul}	169190.9161	N
最低屈服极限的利用率	v	90.0000	%
拧紧方法			
方法	自行输入	拧紧系数	α_A 1.6000
摩擦系数			
在螺纹中 (最小/最大)	μ_g	0.1000 0.1000	在螺母支承面中 (最小/最大) μ_M 0.1000 0.1000
在头部支承...小/最大)	μ_K	0.1000 0.1000	

3.3 螺栓节点计算

```

1 S=RMaterial('Basic');
2 Mat=GetMat(S,38);
3 inputStruct2.Bolt=M27Bolt;
4 inputStruct2.DA=48;
5 inputStruct2.DA1=72;
6 inputStruct2.FAmax=0;
7 inputStruct2.FAmin=0;
8 inputStruct2.Clamping=[7,1];
9 inputStruct2.MT=110000;
10 inputStruct2.ra=19.5;
11 paramsStruct2.MuT=0.1;
12 paramsStruct2.Material=Mat;
13 paramsStruct2.JointType='SV1';
14 BoltJoint=bolt.BoltJoint(paramsStruct2, inputStruct2);
15 BoltJoint= BoltJoint.solve();
16 disp(BoltJoint.capacity.SF)
17 disp(BoltJoint.capacity.SG)
18 PlotCapacity(BoltJoint)

```

计算得到的安全系数如下：

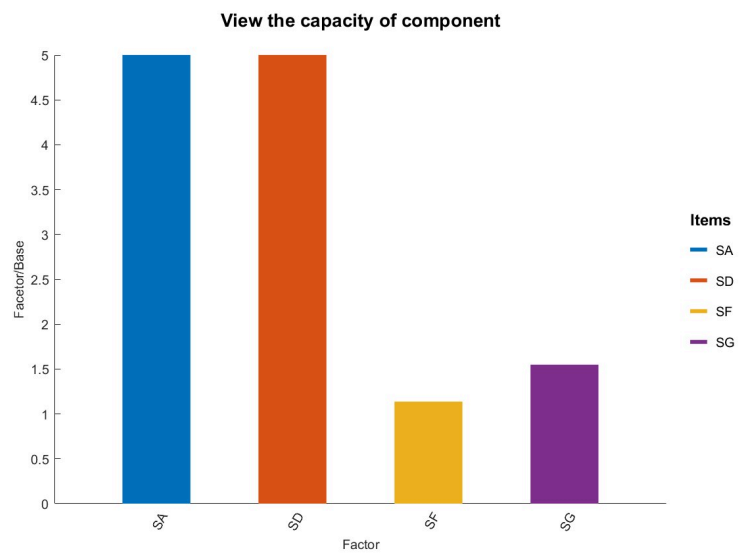
SF:

1.1373

SG:

1.8582

绘制节点安全系数，注意此图中系数会除以实现定义的阈值，比如VDI2230中建议 $SG > 1.2$,该图中的 $SG/1.1=1.55$



4 参考文献

[1] VDI2230_blat_1_2015

[2] VDI2230_blat_2_2014