基于 VDI2230 的动车组 T 型螺栓连接结构的柔度分析

黄福伟

青岛四方阿尔斯通铁路运输设备有限公司工程部，中国·山东 青岛 266111

摘要：通过研究普通螺栓连接结构基于 VDI2230 的柔度理论值与有限元计算值的一致性，得出利用有限元计算螺栓连接结构柔度的计算方法，然后利用有限元计算 T 型螺栓连接结构的柔度，对比两种类型螺栓连接结构的柔度值的不同。结果表明，从柔度角度考虑，T 型螺栓连接结构按照同类型普通螺栓连接结构去评估结果是偏保守的，在工程应用中是可行的。

关键词：T 型螺栓；柔度；理论值；有限元

Compliance Analysis of T-Bolt Connection Structures in EMUs Based on VDI2230

Huang Fuwei

Engineering Department of Alstom Sifang (Qingdao) Transportation LTD, China Shandong Qingdao 266111

Abstract: By investigating the consistency between the theoretical compliance values of ordinary bolt connection structures based on VDI2230 and the finite element calculation values, a method for calculating the compliance of bolt connection structures using the finite element method is derived. This method is then applied to calculate the compliance of T-bolt connection structures, and the differences in compliance values between the two types of bolt connection structures are compared. The results show that, from the perspective of flexibility, the evaluation results of T-bolt connection structures based on the same type of common bolt connection structures are relatively conservative and feasible in engineering applications.

Keywords: T-bolt; Compliance; Theoretical value; Finite element method

0 引言

动车组中大量使用 T 型螺栓，在对该类型螺栓进行强度校核时，往往依据 VDI2230[1] 进行强度校核。但 VDI2230 标准中给出的是针对于普通螺栓的校核方法，并未提到 T 型螺栓是否适用本标准。而柔度作为影响载荷引入系数的关键参数[2]，成为螺栓评估计算流程中的重要输入。故本文以 T 型螺栓为研究对象，利用有限元方法计算 T 型螺栓连接结构的柔度，对比 T 型螺栓连接结构和普通螺栓连接结构的柔度的差异。

1 理论值与有限元计算值结果对比

由于 T 型螺栓连接结构中被连接件的柔度无法使用 VDI2230 进行理论计算，故本文采取有限元计算的方法得到其柔度值。为了证明有限元计算柔度值和理论计算方法的一致性，通过建立普通螺栓的有限元模型得到其有限元值，再将有限元值与理论值进行对比，则可以验证二者的一致性。

针对图 1 所示的螺栓连接结构，建立了其有限元模型。模型关键几何参数如下：螺栓公称直径 d=10mm，螺距 P=1.5mm，螺栓头厚度 k=6.4mm，其承载面直径 d_w=14.63mm。螺杆总长 l=50mm，其中无螺纹段长度 lg=19mm。在建模中，螺纹部分的直径取值为 d_3=8.160mm。此外，两个被夹紧件的厚度均为 14mm，其中心通孔（即螺栓孔）直径为 11mm，用于与螺栓进行装配。螺栓与被连接件为钢材，各模型采用 SOLID185 单元离散[3]，为了使计算结果更精确，只计算位移的前提下，这里单元尺寸选择 1mm。

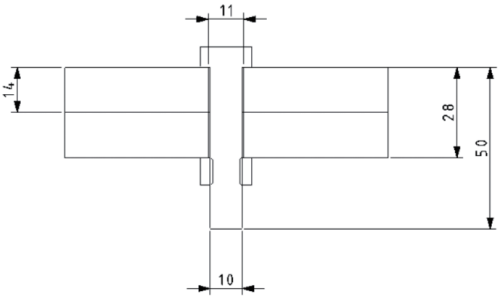


图1 螺栓连接结构

1.1 螺栓柔度计算

对螺栓柔度的分析，需考虑载荷路径上各部分的变形

差异。为此，将螺栓在载荷作用下的变形路径，以夹紧长度为界进行划分。界内的夹紧区（长度 lk）包含光杆段 l_1 和未啮合螺纹段 l_{Gew}。界外的部分，则需额外纳入两个变形补偿量：一个是代表螺栓头变形的替代长度 l_{SK}，另一个是代表螺纹旋合部变形的等效长度 l_{GM}。

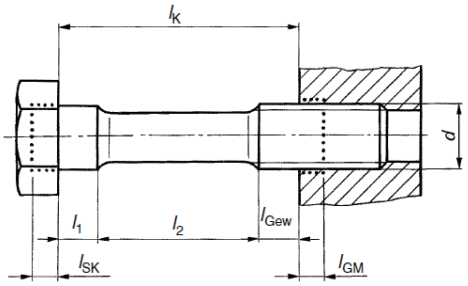


图2 连接螺栓尺寸示意

根据 VDI2230 标准，对于该六角头螺栓，其螺栓头部的变形可通过一个等效长度 l_{SK}=0.5d=5mm 来模拟。在弹性模量 E_M 为 209GPa、公称横截面积 $A_N=\pi d^2/4 \approx 78.54mm^2$ 的条件下，依据柔度计算公式（1），可求得螺栓头部柔度 :$\delta_{SK}=0.3046\times10^{-6}$mm/N。

螺栓头部柔度计算公式为：

$$\delta_{SK}=\frac{l_{sk}}{E_M A_N} \quad (1)$$

随后，计算无螺纹螺杆段（长度 $l_l = l_g = 19$ mm）的柔度。在采用相同的螺栓弹性模量 $E_S = 209$ GPa 后，通过公式（2）计算得出该段柔度 δ_1 为 1.1575×10^{-6}mm/N。

无螺纹螺杆的柔度计算公式为：

$$\delta_1=\frac{l_l}{E_S A_N} \quad (2)$$

对于负载下的未旋合螺纹段，其长度 $l_{Gem}=l_k-l_l=9$ mm。基于螺纹小径 $d_3 = 8.160$ mm（对应截面积 $Ad_3 \approx 52.30mm^2$），代入公式（3）求得其柔度 $\delta_{Gew}=0.82343\times10^{-6}$mm/N。

未旋合螺纹部分螺栓柔度是

$$\delta_{Gew}=\frac{l_l}{E_S A_{d3}} \quad (3)$$

旋合螺纹部分的柔度 δ_{GM} 由螺栓侧柔度 δ_G 与螺母侧柔度 δ_M 一起构成。给定螺栓旋合长度 l_G=5mm，螺母旋合长度 l_M=4mm，分别通过公式（4）和（5）计算，得到 $\delta_G=0.4575\times10^{-6}$mm/N，$\delta_M=0.24368\times10^{-6}$mm/N。

$$\delta_G=\frac{l_G}{E_S A_{d3}} \quad (4)$$

$$\delta_M=\frac{l_M}{E_M A_N} \quad (5)$$

最终，螺栓的总柔度 δ_S 为上述所有部分柔度之和，即 $\delta_S=\delta_{SK}+\delta_l+\delta_{Gew}+\delta_G+\delta_M=2.98671\times10^{-6}$ mm/N。

1.2 被夹紧件柔度计算

VDI 标准中用等效变形锥的柔度来代表被夹紧件的柔度，本文使用的被夹紧件的尺寸大于螺栓头的支撑面直径，变形锥完全形成。两个被夹紧件弹性模量相同 E_P=209GPa，经计算被夹紧件变形锥角度的正切值 $tan\varphi$=0.576516。被夹紧件柔度为

$$\delta_p=\frac{2ln\left[\frac{(d_w+d_h)(d_w+w\cdot l_k\cdot tan\varphi-d_h)}{(d_w-d_h)(d_w+w\cdot l_k\cdot tan\varphi+d_h)}\right]}{w\cdot E_P\cdot\pi\cdot d_h\cdot tan\varphi}=5.77\times10^{-7}\text{mm/N}$$

1.3 有限元法计算螺栓连接结构的柔度

有限元法通过构建螺栓连接的有限元模型，模拟预紧过程中的力学行为，提取螺栓头与被夹紧件在支撑区域的节点位移进而分析计算其柔度，为了避免两者变形带来的计算误差，本文采用分别建立螺栓和被夹紧件模型的方式，通过建立边界条件来分别得到螺栓和被夹紧件的柔度。

确定螺栓柔度时，如图 3 所示，约束螺栓头底部轴向自由度，在螺母上表面施加 F_M=16000N 的轴力，将螺栓的变形量除以螺栓轴力即得螺栓的柔度。图 4 所示螺栓的变形量 f_{SM}=0.04435mm，可得螺栓的柔度 $\delta_S=f_{SM}/F_M=2.771875\times10^{-6}$mm/N。

图3 螺栓柔度计算模型

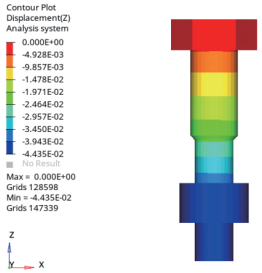


图4 螺栓轴向位移云图

确定被夹紧件柔度时，如图 5 所示，在被夹紧件底部约束轴向自由度，被夹紧件顶部施加轴向力 F=10000N，可以得到如图 6 所示两被夹紧件的变形量 f_{PM}=0.005657mm，则被夹紧件的柔度 $\delta_P=f_{PM}/F=5.5657\times10^{-7}$mm/N.

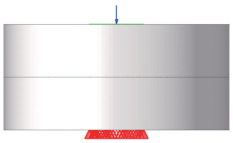


图5 被夹紧件柔度计算模型

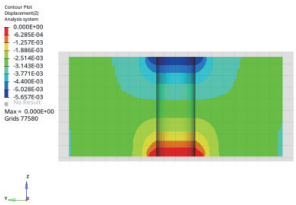


图6 被夹紧件轴向位移图

通过计算可知，采用上述有限元计算得到的螺栓连接柔度与 VDI2230 中计算得到的理论值对比，螺栓柔度相对误差为 7.19%，被夹紧件柔度相对误差为 1.96%。所以，本文提出的利用有限元计算螺栓连接结构的方法可行。

2 T 型螺栓和普通螺栓连接结构有限元计算柔度值对比

建立 T 型螺栓连接结构如图 7 所示，C 型梁采用动车上常用的尺寸，与 T 型螺栓连接处厚度为 4mm，另外一个被夹紧件厚度为 24mm，采用和普通螺栓连接结构相同的建模方式。

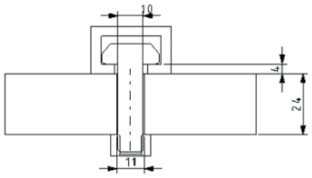
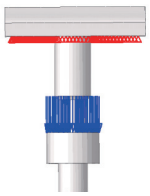


图7 T型螺栓连接结构

计算 T 型螺栓柔度时，如图 8 所示，约束 T 型螺栓下表面的轴向自由度，在螺母的 d_w 范围内施加 F_M=16000N 的轴向力，计算可得 T 型螺栓的变形量 f_{SM}=0.04158mm，结果见图 9 所示。T 型螺栓的柔度为 $\delta_S = f_{SM}/F_M = 2.59875 \times 10^{-6}$mm/N。



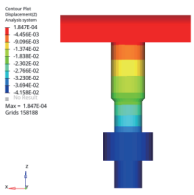


图8 T型螺栓柔度计算模型　图9 T型螺栓轴向位移云图

确定被夹紧件柔度时，如图 10 所示，在被夹紧件底部约束轴向自由度，被夹紧件顶部施加轴向力 F=100000N，可以得到如图 11 所示两被夹紧件的变形量 f_{PM}=0.04691mm，则被夹紧件的柔度 δ_P=fPM/F=4.691×10−7mm/N.

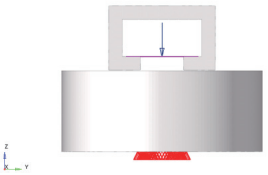


图10 被夹紧件柔度计算模型

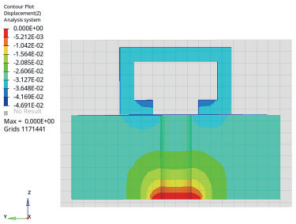


图11 被夹紧件轴向位移图

3 结语

通过上面的结果可以看出，T 型螺栓连接结构中螺栓和被夹紧件的柔度在尺寸规格都相同的情况下，小于普通螺栓和被夹紧件的柔度。单从柔度方面考虑，T 型螺栓连接结构按照同类型普通螺栓连接结构去评估结果是偏保守的，在工程应用中也是可行的。

参考文献：

[1] VDI 2230Part 1. Systematic Calculation of High Duty Bolted Joints, Joints with One Cylindrical Bolt [M]. Verein Deutscher Ingenieure , 2003.

[2] 王剑，赵俊馨. 基于 VDI 2230 标准与有限元分析螺栓连接柔度分析[J]. 机械工程与自动化，2025,54(01):101−102+106.

[3] 张红兵，杜建红. 有限元模型中螺栓载荷施加方法的研究[J]. 机械设计与制造，1996(6):32−33.

作者简介：黄福伟 (1993−)，青岛四方阿尔斯通，工程师，2019 年毕业于大连交通大学车辆工程专业，主要从事轨道车辆和设备的结构仿真工作。