

转向架外侧定位抗侧滚扭杆结构强度评估方法*

陆 军^{1,2} 金希红^{1,2} 罗征志³

(1. 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室, 420001, 株洲;

2. 中车株洲电力机车有限公司, 420001, 株洲; 3. 西南交通大学机械工程学院, 610031, 成都)

摘 要 [目的] 为了对轨道交通列车外侧支撑抗侧滚装置扭杆轴的扭转刚度和扭杆轴强度进行求解, 提出一种引入变形协调条件的扭杆轴解析分析方法。[方法] 以外侧支撑抗侧滚扭杆装置的 1/2 扭杆轴为例, 根据其受力状态和载荷分布, 利用结构的对称性及承担反对称工作载荷的特点, 引入结构变形协调条件, 求解一次超静定系统的未知力和力矩, 获得扭杆轴的剪力和弯矩分布, 并推导出抗侧滚扭杆装置扭转刚度和强度的计算公式。以 52CrMoV4 弹簧钢制造的外侧支撑抗侧滚扭杆装置为例, 对比分析了外侧支撑扭杆轴的解析解法计算结果和有限元模型的计算结果。[结果及结论] 所提解析解法能够较为便捷地确定扭杆轴不同截面位置的工作应力水平和应力状态, 为确定扭杆轴的截面几何参数、不同危险截面的等效应力计算方法和扭杆轴的疲劳失效机理分析提供了理论基础。与有限元法相比, 所提解析法具有计算原理简单、计算速度快等优点。

关键词 轨道交通; 转向架; 抗侧滚扭杆; 外侧支撑

中图分类号 U279.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.002

Evaluation Method of Bogie Outer Positioning Anti-rolling Torsion Bar Structural Strength

LU Jun^{1,2}, JIN Xihong^{1,2}, LUO Zhengzhi³

(1. The State Key Laboratory of Heavy Duty AC Drive Electric Locomotive Systems Integration, 420001, Zhuzhou, China; 2. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., 420001, Zhuzhou, China; 3. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

Abstract [Objective] In order to solve the TBS (torsion bar shaft) torsional stiffness and strength for the outer support anti-rolling device in railway vehicles, an analytical method of introducing the TBS deformation coordination conditions is proposed. [Method] Taking 1/2 TBS for the outer support anti-rolling device as an example, based on its stress state and load distribution, the structural symmetry and the characteristics of bearing anti-symmetric working loads are used to introduce structural deformation coordination conditions for solving the

unknown forces and moments of a primary statically indeterminate system, obtaining the shear force and bending moment distribution of the TBS, and deriving calculation formulas for the torsional stiffness and strength of the anti-rolling torsion bar device. Using the outer support anti-rolling torsion bar device made of 52CrMoV4 spring steel as an example, a comparative analysis is conducted between the analytical solution calculation results and the finite element model calculation results of the outer support TBS. [Result & Conclusion] The proposed analytical solution method can conveniently determine the stress levels and stress states at different TBS cross-sectional positions, providing a theoretical basis for determining the TBS cross-sectional geometric parameters, the equivalent stress calculation method of different critical cross-sections, and the analysis of TBS fatigue failure mechanism. Compared with the finite element method, the proposed analytical method features simple calculation principle and fast calculation speed.

Key words rail transit; bogie; anti-rolling torsion bar; outer support

当轨道交通列车通过曲线线路时, 离心加速度会导致车体产生侧滚运动, 进而降低旅客的乘坐舒适性。在载客轨道交通列车的二系悬挂系统上配置抗侧滚扭杆结构, 能够显著改善车体的侧滚状况。因此, 抗侧滚扭杆装置在轨道交通列车转向架二系悬挂结构设计中获得了广泛应用。为了控制轨道交通列车车体的侧滚运动, 在保证抗侧滚扭杆结构强度足够的条件下, 需合理设计抗侧滚扭杆结构的扭转刚度, 以确保载客列车具有良好的乘坐舒适性及结构安全可靠^[1]。

目前, 已有文献研究主要集中于内侧支撑扭杆轴的受力分析和强度计算, 对于扭杆轴外侧支撑抗侧滚扭杆轴的受力状态分析与强度计算方面鲜有研究。文献[1-2]采用有限元法对内侧支撑扭杆轴的受力进行了研究。对于圆截面的扭杆轴, 采用有

* 国家重点实验室开放课题项目(2021ZJKF13121410000100)

限元法分析时需建立抗侧滚扭杆装置的有限元模型,且由于扭杆轴与扭臂、扭杆轴在转向架或车体上的支撑位置需采用非线性过盈配合连接,其存在建模效率低、非线性接触计算难以收敛和计算周期长等缺点。本文针对外侧支撑抗侧滚扭杆装置上扭杆轴的扭转刚度和强度求解问题,利用结构变形协调条件对扭杆轴进行一次超静定系统求解,并得出扭杆轴的剪力和弯矩分布情况,进而推导出抗侧滚扭杆装置扭杆轴的扭转刚度和强度的解析解,对所得解析解和有限元计算结果进行对比分析。本文所提扭杆结构强度评估方法具有简单、快速、有效等特点,能够降低设计分析周期和设计成本,为转向架外侧定位抗侧滚扭杆结构评估提供一种高效、准确的计算方法。

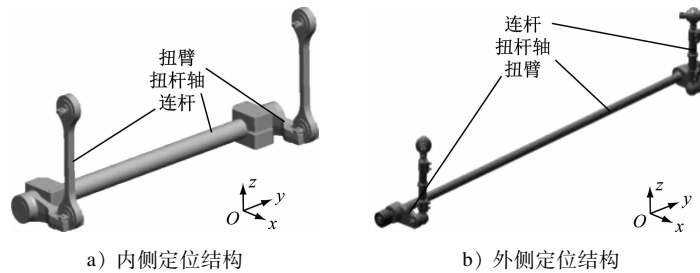


图1 不同抗侧滚扭杆装置安装方式示意图

Fig. 1 Installation diagram of different anti-rolling torsion bar devices

在外侧支撑抗侧滚扭杆装置中,系统承担反对称垂向力 F_1 。由于整体结构为对称性结构,可取 1/2 结构进行受力分析。假定扭杆轴端部支撑点 A 作用未知垂向力 F_2 和未知力矩 M ,在对称点 C 的未知垂向力为 F_3 。外侧支撑抗侧滚扭杆装置的扭杆轴和扭臂结构受力分析示意图如图 2 所示。

1.1 扭杆轴受力分析

由平面任意力系的力矩平衡原则,可以得到扭杆轴力平衡方程式,则有:

$$F_1(L_1 - L) = F_3L_1 + M \quad (1)$$

扭杆轴承受的垂向力满足:

$$F_1 = F_2 + F_3 \quad (2)$$

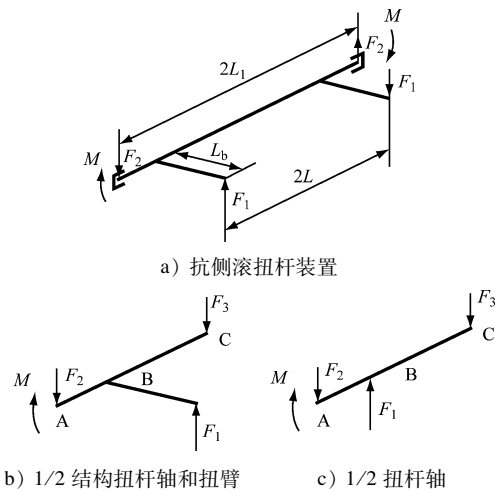
在 F_1 作用下,扭杆轴承受的 y 向扭矩 M_y 满足:

$$M_y = F_1L_b \quad (3)$$

在式(1)和式(2)中共有 3 个未知物理量,为了求解未知物理量 F_2 、 M 和 F_3 ,需引入变形协调条件。扭杆轴在 A 点的 z 向线位移和绕 x 轴的角位移为 0, C 点的 z 向线位移为 0。

1 计算方法

轨道交通列车转向架的抗侧滚扭杆装置包括扭臂、扭杆轴、连杆、弹性支撑和弹性节点等。扭杆轴与扭臂通过过盈配合或花键连接。根据不同的扭杆轴支撑定位方式,抗侧滚扭杆装置可分为内侧支撑和外侧支撑。不同抗侧滚扭杆装置安装方式示意图如图 1 所示,其中: x 轴方向为列车运行方向; y 轴方向(扭杆轴轴向)为列车横向; z 轴方向为列车垂向。内侧定位结构为静定系统,文献[1]给出了此类抗侧滚扭杆装置扭杆轴的详细受力分析,以及扭杆轴的刚度、强度计算方法。外侧定位结构为超静定系统,端部支撑座约束了扭杆轴沿 x 轴和 z 轴的线位移、绕 x 轴和 z 轴的角位移。



注: L 为 F_1 的 1/2 跨距; L_1 为 F_2 的 1/2 跨距;B 点为扭臂与扭杆轴交点; L_b 为连杆与扭杆轴连接中心距。

图2 外侧支撑抗侧滚扭杆装置的扭杆轴和扭臂受力分析示意图

Fig. 2 Stress analysis diagram of torsion bar shaft and torsion arm of outer-support anti-rolling torsion bar device

根据超静定结构力法求解原理,扭杆轴结构对称点 C 的变形协调条件 Δ_C 满足:

$$\Delta_C = S_{F_1} + F_3 S_{F_{3,d}} = 0 \quad (4)$$

式中:

S_{F_1} ——在 F_1 作用下,扭杆轴 C 点的 z 向位移;

$S_{F_{3,d}}$ ——在单位力 $F_{3,d}$ ($F_{3,d} = 1$) 作用下,扭杆轴 C 点的 z 向位移。

根据虚功原理和单位载荷法, S_{F_1} 和 $S_{F_{3,d}}$ 可以表示为:

$$S_{F_1} = \int_0^{L_1} \frac{M_x M_{x1}}{EI_x} dS_y + \int_0^{L_1} \frac{10QQ_1}{9GA} dS_y \quad (5)$$

$$S_{F_{3,d}} = \int_0^{L_1} \frac{M_{x1}^2}{EI_x} dS_y + \int_0^{L_1} \frac{10Q_1^2}{9GA} dS_y \quad (6)$$

式中:

M_x, M_{x1} ——在 F_1 和 $F_{3,d}$ 作用下的弯矩;

Q, Q_1 ——在 F_1 和 $F_{3,d}$ 作用下的剪力;

E ——材料弹性模量;

G ——材料剪切模量;

I_x ——扭杆轴的截面惯性矩;

A ——扭杆轴截面面积;

S_y ——计算截面到扭杆轴 A 点的横向距离。

固定约束支撑点 A, 在 F_1 和 $F_{3,d}$ 作用下, 扭杆轴的剪力和弯矩示意图如图 3 所示。

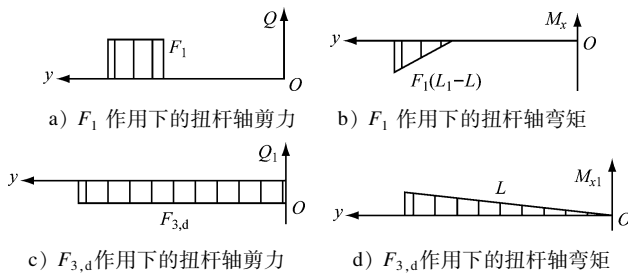


图3 F_1 和 $F_{3,d}$ 单独作用下的扭杆轴剪力和弯矩示意图

Fig. 3 Diagram of torsion bar shaft shear and bending moment under separate forces of F_1 and $F_{3,d}$

在 F_1 作用下, Q 和 M_x 满足:

$$Q = \begin{cases} 0, & S_y \leq L \\ F_1, & L < S_y \leq L_1 \end{cases} \quad (7)$$

$$M_x = \begin{cases} 0, & S_y \leq L \\ F_1(S_y - L), & L < S_y \leq L_1 \end{cases} \quad (8)$$

在 $F_{3,d}$ 作用下, Q_1 和 M_{x1} 满足:

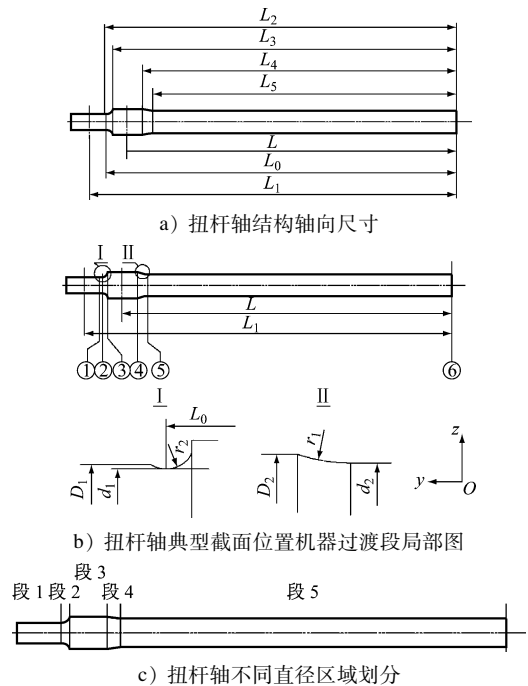
$$Q_1 = 1 \quad (9)$$

$$M_{x1} = S_y, \quad L \leq S_y \leq L_1 \quad (10)$$

联立式(4)一式(10)即可求得扭杆轴对称面 C 点的 F_3 , 然后代入式(1)和式(2), 可求得扭杆轴支撑点 A 的 F_2 和 M_0 。

1.2 变截面圆柱截面面积和体惯性矩计算

外侧支撑抗侧滚扭杆装置中, 扭杆轴 1/2 结构和截面区域划分示意图如图 4 所示。扭杆轴主要为圆柱体, 过渡区为圆弧过渡。根据扭杆轴截面几何尺寸的不同, 1/2 扭杆轴可以划分为五部分: 圆柱段 1 (以下简称“段 1”)、支撑座外侧弧状过渡段 2 (以下简称“段 2”)、圆柱段 3 (以下简称“段 3”)、支撑座内侧弧状过渡段 4 (以下简称“段 4”) 和支撑圆柱段 5 (以下简称“段 5”)。其中: 段 1、段 3 和段 5 为等截面圆柱体; 段 2 和段 4 为变截面圆柱体。选取典型截面①—截面⑥ (见图 4 b)) 进行重点分析, 其中, 截面⑥为扭杆轴长度中点位置截面。



注: L_0 为段 2 圆心位置的横向距离之半; L_2, L_3, L_4 和 L_5 为截面②~⑤处圆心位置的横向距离之半; D_1, D_2, d_1, d_2 分别为段 1、段 3 和段 5 的直径; d_1 为段 2 的最小直径; r_1, r_2 分别为段 2 和段 4 过渡圆弧半径。

图 4 扭杆轴 1/2 结构和截面区域划分示意图

Fig. 4 Diagram of torsion bar shaft 1/2 structure and section area division

对于图 4 b) 中扭杆轴过渡区域 I 和过渡区域 II, 该区域任意截面直径 d_i 的计算公式为^[1]:

$$d_i = \begin{cases} D_1 - 2[r_1 - \sqrt{r_1^2 - (L_0 - S_y)^2}], & L_0 < S_y \leq L_2 \\ d_1 + 2[r_1 - \sqrt{r_1^2 - (S_y - L_0)^2}], & L_3 < S_y \leq L_0 \\ D_2 - 2[r_2 - \sqrt{r_2^2 - (L_4 - S_y)^2}], & L_5 < S_y \leq L_4 \end{cases} \quad (11)$$

此时, A 、 I_x 和极惯性矩 I_p 可以表示为:

$$A = \frac{\pi d_i^2}{4} \quad (12)$$

$$I_x = \frac{\pi d_i^4}{64} \quad (13)$$

$$I_p = \frac{\pi d_i^4}{32} \quad (14)$$

1.3 1/2 扭杆轴未知力求解

将式(7)一式(9)代入式(4)一式(6)即可求得 F_3 , 则有:

$$F_3 = \frac{F_1 \left[\int_L^{L_1} \frac{(S_y - L_2) S_y}{EI_x} dS_y + \int_L^{L_1} \frac{10}{9GA} dS_y \right]}{\int_0^{L_1} \frac{y^2}{EI_x} dS_y + \int_0^{L_1} \frac{10}{9GA} dS_y} \quad (15)$$

由于段2和段4为变截面圆柱体, 式(15)积分函数为积分变量 S_y 的4阶多项式。根据高斯数值积分原理, 采用3点高斯数值积分求解式(15), 可以得到 F_3 的积分值。将求得的 F_3 代入式(1)和式(2), 可以得到 F_2 和 M 。扭杆轴的 Q 、 M_x 和 M_y 分布示意图如图5所示。

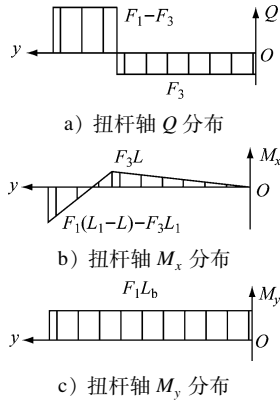


图5 扭杆轴的 Q 、 M_x 和 M_y 分布示意图

Fig. 5 Distribution diagram of torsion bar shafts Q , M_x and M_y

1.4 抗侧滚扭杆装置变形和扭转刚度计算

根据文献[1], 在单位载荷 $F_{1,d}$ 作用下, 扭杆轴 B 点的垂向位移 S_z 为:

$$S_z = \int_0^{L_1} \frac{M_x M_{xF_1}}{EI_x} dS_y + \int_0^{L_1} \frac{10 Q_1 Q_{F_1}}{9GA} dS_y \quad (16)$$

式中:

M_{xF_1} —— $F_{1,d}$ 作用下扭杆轴的弯矩;

Q_{F_1} —— $F_{1,d}$ 作用下扭杆轴的剪力。

扭杆轴 B 点的角位移 θ 可以表示为:

$$\theta = \int_0^L \frac{M_y M_{yF_1} S_y}{GI_p} dS_y \quad (17)$$

式中:

M_{yF_1} ——在 $F_{1,d}$ 作用下扭杆轴的扭矩。

扭杆轴在 F_1 和 $F_{1,d}$ 各自作用下的剪力、弯矩和扭矩的变化规律相同, 且在这两种载荷作用下的剪力或弯矩之比在数值上等于 F_1 。扭杆轴所受扭矩基本保持不变, 由此, 式(16)和式(17)可以改写为:

$$S_z = F_1 \int_0^{L_1} \frac{M_x^2}{EI_x} dS_y + F_1 \int_0^{L_1} \frac{10 Q_1^2}{9GA} dS_y \quad (18)$$

$$\theta = F_1 \int_0^{L_1} \frac{M_y^2 S_y}{GI_p} dS_y \quad (19)$$

式中:

M_{y1} ——在载荷 F_1 作用下扭杆轴的扭矩。

至此, 运用高斯数值积分方法可以求得在 F_1 作用下, 扭杆轴上 B 点的垂向位移和角位移。

扭杆轴的扭转刚度 $k_{\theta z}$ 为:

$$k_{\theta z} = \frac{M_y}{2\theta} \quad (20)$$

根据式(16)和式(17)可以得出扭杆轴 B 点的垂向位移和扭转角位移, 求得连杆与扭臂连接中心相对于扭杆轴轴线的垂向位移 S 为:

$$S = \theta L_b + S_z \quad (21)$$

在抗侧滚扭杆装置中, 扭杆轴的刚度远小于扭臂和连杆结构的刚度, 故在计算其扭转刚度时, 忽略扭臂和连杆变形对扭杆轴扭转刚度的影响, 抗侧滚扭杆装置的扭转刚度 k_{θ} 为:

$$k_{\theta} = \frac{2F_1 L^2}{S} \quad (22)$$

1.5 危险截面确定与应力计算

1.5.1 典型危险截面确定

根据 EN 13103-1: 2017 *Railway applications-wheel sets and bogies-part 1: design method for axles with external journals*, 以及扭杆轴的几何形状和受力状态, 扭杆轴上存在6个典型危险截面(见图4)。其中: 截面①、截面③和截面④为过盈配合起始位置截面; 截面②和截面⑤为应力集中效应截面; 截面⑥为纯扭转截面。

1.5.2 应力计算方法

分析图5可知, 扭杆轴的应力状态为弯曲应力和扭转剪切应力的组合, 其结构形式和应力状态与转向架车轴相似。因此, 可以根据 EN 13103-1: 2017 *Railway applications-wheel sets and bogies-part*

1: *design method for axles with external journals* 和文献[1]给出的方法进行扭杆轴应力计算和强度验证。

扭杆轴上任意截面的合成力矩 M_R 可以表示为:

$$M_R = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad (23)$$

轴截面上弯曲正应力 σ_n 和剪切应力 τ 可以表示为:

$$\sigma_n = \frac{32M_x}{\pi d^3} \quad (24)$$

$$\tau = \frac{16M_y}{\pi d^3} \quad (25)$$

式中:

d ——应力集中区域圆柱截面直径。

扭杆轴上任意截面处的名义应力 σ 可以表示为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_n^2 + 4\tau^2} = \frac{32}{\pi d^3} \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad (26)$$

由于扭杆轴结构的圆弧过渡区域存在应力集中效应,该区域的结构应力 σ_K 可以表示为:

$$\sigma_K = \frac{32KM_R}{\pi d^3} \quad (27)$$

式中:

K ——扭杆轴计算截面的应力集中系数。

K 可以表示为:

$$K = J + 1 \quad (28)$$

其中:

$$J = \frac{(4 - \beta)(\beta - 1)}{5(10\alpha)^{(2.5\alpha + 1.5 - 0.5\beta)}}$$

$$\alpha = r/d$$

$$\beta = D/d$$

式中:

r ——应力集中区过渡圆弧半径;

D ——相对应的圆柱截面直径。

1.6 强度验证方法

扭杆轴的强度验证包括极限载荷作用下的静强度验证和正常运行载荷作用下的疲劳强度验证。

1.6.1 静强度验证准则

采用塑性材料制造扭杆轴,在极限载荷作用下,在最大等效应力 σ_{\max} 和最大剪应力 τ_{\max} 作用下,保证其不发生塑性变形的条件为:

$$\begin{cases} \sigma_{\max} \leq \sigma_s \\ \tau_{\max} \leq \tau_s \end{cases} \quad (29)$$

式中:

σ_s ——扭杆轴材料的屈服极限强度;

τ_s ——扭杆轴材料的剪切极限强度。

1.6.2 疲劳强度验证准则

正常运行载荷工况下,在 σ 和 τ 均为对称循环条件下,扭杆轴不产生疲劳破坏必须满足的条件为:

$$\begin{cases} \sigma \leq \sigma_{-1} \\ \tau \leq \tau_{-1} \end{cases} \quad (30)$$

式中:

σ_{-1} ——扭杆轴结构的对称循环疲劳强度极限;

τ_{-1} ——扭杆轴结构的对称循环剪切疲劳强度极限。

2 算例验证

2.1 计算条件

以 52CrMoV4 弹簧钢制造的外侧支撑抗侧滚扭杆装置为例,其承担的极限工作载荷为 60.0 kN,正常运行承担的疲劳载荷为 35.0 kN。采用有限元法和本文所提计算方法(以下简称“解析法”)对外侧定位抗侧滚扭杆装置的扭杆轴进行变形和应力分析。

2.2 不同截面的许用应力确定

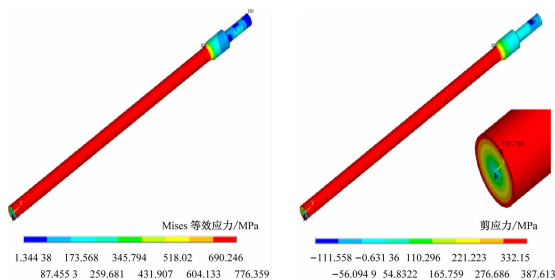
由于 EN 13906-1: 2013 *Cylindrical helical springs made from round wire and bar-calculation and design, part 1: compression springs* 标准中未给出 52CrMoV4 弹簧钢过盈配合区域疲劳强度评估的许用应力,可根据 FKM(机械制造研究理事会)指南方法确定其许用应力^[3]。

静强度分析时,扭杆轴材料的屈服强度极限 σ_b 为 1 300 MPa(许用应力 $[\sigma_b] \geq 1 450$ MPa),剪切屈服极限 σ_s 为 750 MPa。

疲劳强度分析时,非过盈配合区域的 σ_{-1} 为 700 MPa,非过盈配合区域的 τ_{-1} 为 314 MPa;过盈配合区域的对称循环疲劳极限 σ_{-1p} 为 230 MPa,过盈配合区域的对称循环剪切疲劳极限 τ_{-1p} 为 110 MPa。

2.3 计算结果与分析

使用八节点六面体实体单元对 1/2 扭杆结构进行有限元建模,过盈配合使用非线性接触对其进行模拟。极限载荷下,Mises 等效应力和剪应力分布云图如图 6 所示。由图 6 可知:扭杆轴 Mises 等效应力最大值为 776.36 MPa,剪应力最大值为 387.61 MPa。疲劳载荷下,Mises 等效应力和剪应力分布云图如图 7 所示。由图 7 可知:扭杆轴的 Mises 等效



a) Mises 等效应力

b) 剪应力

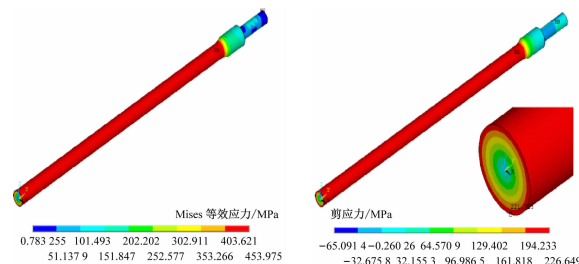
图 6 极限载荷下的 Mises 等效应力和剪应力分布云图

Fig. 6 Nephogram of Mises equivalent stress and shear stress distribution under extreme load

应力最大值为 453.98 MPa,剪应力最大值为 226.65 MPa。由图 6 和图 7 可知:最大应力在靠近扭臂安装座内侧的扭杆轴圆弧过渡区域。

在 6 个典型危险截面处,将解析法和有限元法

计算所得结果进行对比分析。不同计算方法及载荷工况下的扭杆轴 Mises 等效应力和剪应力如表 1 所示;不同计算方法及载荷工况下的垂向位移和扭转刚度如表 2 所示;不同计算方法及载荷工况下 A 点和 C 点的力与弯矩如表 3 所示。



a) Mises 等效应力

b) 剪应力

图 7 疲劳载荷下的 Mises 等效应力和剪应力分布云图

Fig. 7 Nephogram of Mises equivalent stress and shear stress distribution under fatigue load

表 1 不同计算方法及载荷工况下 6 个危险截面的扭杆轴 Mises 等效应力和剪应力

Tab. 1 Torsion bar shaft Mises equivalent stress and shear force on 6 critical sections under different calculation methods and load working conditions

载荷类别	危险截面	Mises 等效应力/MPa		Mises 等效应力 相对误差/%	剪应力/MPa		剪应力 相对误差/%
		有限元法	解析法		有限元法	解析法	
极限载荷	①	11.14	9.02	19.03	1.28	0	—
	②	36.36	38.72	-6.49	0.85	0	—
	③	273.54	310.96	-13.68	2.05	0	—
	④	313.77	318.36	-1.46	146.24	154.74	-5.81
	⑤	776.36	750.39	3.35	387.61	373.75	3.58
	⑥	758.38	747.50	1.43	378.80	373.75	1.33
疲劳载荷	①	6.40	5.26	17.81	0.07	0	—
	②	21.86	22.58	-3.29	0.43	0	—
	③	165.79	181.39	-9.41	1.21	0	—
	④	186.89	181.28	3.00	85.27	90.27	-5.86
	⑤	453.98	437.73	3.58	226.65	218.02	3.81
	⑥	443.32	436.02	1.65	221.72	218.02	1.67

表 2 不同计算方法及载荷工况下的垂向位移和扭转刚度

Tab. 2 Vertical displacement and torsional stiffness under different calculation methods and load working conditions

计算方法	极限载荷工况		疲劳载荷工况	
	扭转刚度/ (kNm/rad)	S_z /mm	扭转刚度/ (kNm/rad)	S_z /mm
有限元法	4.83	37.52	4.81	21.96
解析法	4.84	37.48	4.83	21.90

分析表 1 可知:极限载荷作用下,扭杆轴上 6 个

危险截面处的 Mises 等效应力和剪应力均小于其屈服极限和剪切屈服极限;疲劳载荷作用下,非过盈配合区的等效应力和剪应力均小于其对应结构的 σ_{-1} 和 τ_{-1} ;过盈配合区的 Mises 等效应力和剪应力均小于过盈区的 σ_{-1p} 和 τ_{-1p} 。由此可见,该扭杆轴的疲劳强度达到设计要求。此外,在非过盈配合区,采用解析法与有限元法得到的 Mises 等效应力和剪应力的相对误差均小于 6%。在截面③的过盈配合区域,采用不同计算方法得出的 Mises 等效应力的相对误差较大,解析法的计算结果大于有限元

表3 不同计算方法及载荷工况下A点和C点的力与弯矩

Tab.3 Force and bending moment at points A and C under different calculation methods and load working conditions

计算方法	极限载荷工况			疲劳载荷工况		
	F_3/N	F_2/N	$M/(Nm)$	F_3/N	F_2/N	$M/(Nm)$
有限元法	816.52	59 183.48	4 375.70	476.30	34 523.70	2 556.30
解析法	815.49	59 184.51	4 383.55	475.70	34 524.30	2 557.07

法所得结果,分析结果偏于安全。

分析表2可知:采用解析法与有限元法计算得到的抗侧滚扭杆装置扭转刚度和扭杆轴垂向位移的相对误差绝对值均小于1%。由此可见,解析法具备准确性和可靠性。

分析表3可知:采用解析法与有限元法得出的力和力矩的相对误差绝对值均小于1%。

3 结语

1) 基于材料力学原理、外侧支撑抗侧滚扭杆装置结构的对称性及承担载荷的反对称特性,以抗侧滚扭杆装置1/2结构为研究对象,采用力法原理,引入结构变形协调条件,求解一次超静定系统的未知力和力矩,获得扭杆轴的剪力、弯矩和扭矩的分布情况,推导出抗侧滚扭杆装置扭转刚度和强度的计算公式。

2) 基于扭杆轴的剪力、弯矩和扭矩分布,通过解析法得到扭杆轴不同截面位置的工作应力水平和应力状态,为确定扭杆轴的截面几何参数、不同危险截面的等效应力计算方法和扭杆轴的疲劳失效提供了一种较为便捷的计算方法。

3) 与有限元法相比,本文所提计算方法具有计算原理简单、扭杆轴受力状态清晰,易于在数据处理软件中实现参数化等特点。采用所提计算方法

获得的计算结果具有计算精度高、计算速度快等优点,可以显著提高轨道交通列车扭杆轴的设计效率,降低设计分析成本。

参考文献

- [1] 段金兰,袁文辉. 轨道车辆转向架抗侧滚扭杆系统刚度和强度分析的工程方法[J]. 现代制造工程, 2019(7): 49.
DUAN Jinlan, YUAN Wenhui. Project method of stiffness and strength analysis about anti-rolling torsion bar system of rail vehicle bogie[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(7): 49.
- [2] 杜方孟,霍艳霞,汤腾,等. 地铁车辆用新型整体式抗侧滚扭杆装置研制[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(9): 142.
DU Fangmeng, HUO Yanxia, TANG Teng, et al. Research and manufacture of integral anti-roll torsion bar device for metro vehicle [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(9): 142.
- [3] Herausgeber FKM (Forschungskuratorium Maschinenbau). Analytical strength assessment of components in mechanical engineering [M]. 7th ed. Frankfurt: Herausgeber FKM, 2020:38.

· 收稿日期:2022-12-28 修回日期:2023-05-29 出版日期:2024-07-10
Received:2022-12-28 Revised:2023-05-29 Published:2024-07-10
· 第一作者:陆军,高级工程师,010200022353@crregc.cc
通信作者:罗征志,讲师,zhzhluo@swjtu.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第8页)

- [8] 魏纲,徐日庆,屠玮. 顶管施工引起的土体扰动理论分析及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 476.
WEI Gang, XU Riqing, TU Wei. Testing study and analysis on soil disturbance induced by pipe jacking construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 476.
- [9] 刘鹏. 城市地铁隧道沉降预测及变形分析[D]. 西安:西安科技大学, 2019: 35.
LIU Peng. Settlement prediction and deformation analysis of urban shield tunnel[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Tech-

nology, 2019: 35.

· 收稿日期:2022-10-31 修回日期:2023-10-16 出版日期:2024-07-10
Received:2022-10-31 Revised:2023-10-16 Published:2024-07-10
· 通信作者:王超,博士研究生,wangchao214801069@yeah.net
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license