

盾构机盾体的起吊和捆绑设计验算

黄惠敏

(海瑞克(广州)隧道设备有限公司 广东 广州 510760)

摘要: 基于盾构机盾体, 选用可拆卸的螺栓吊耳作为起吊和捆绑锚固点, 并以此设计其钢结构, 在钢结构的吊点处巧妙地焊接螺纹衬套, 减少应力集中, 同时提高钢结构的强度。本文运用三角函数和杠杆原理计算出盾构机盾体吊装和捆绑中链条的拉力和使用长度, 再根据标准 EN 12195-1-2010 中捆绑力的计算公式, 结合实际的工程案例, 验算其选用的螺栓吊耳的安全性。实践证明, 该新型吊耳拆装方便、使用可靠, 可节省大量的人力物力, 有着良好的经济效益, 同时也提供了一种新的设计计算思路。

关键词: 前盾; 钢结构; 吊装; 螺栓吊耳; 捆绑安全

0 引言

目前盾构工法已在城市隧道(如地铁隧道、污水排放隧道、引水/供水隧道、江河湖海底隧道, 电力/电讯/供气及共同沟工程等隧道)建造中确立了绝对的统治地位, 故有人将其称为城市隧道工法。盾构机盾体是一个圆柱体钢结构部件, 分为三部分, 即前盾、中盾和尾盾。应用于隧道、地铁等工程的盾构机一般尺寸较大, 盾体壳体直径大小根据实际工程需求确定。直径6m以上的盾构机, 其关键部件(如刀盘、前盾、中盾等)质量达到60~100t, 甚至达到几百吨。在吊装中使用到的吊耳都是焊接形式, 这样能达到较大的抗拉强度, 实现大质量部件的安全吊装, 但其使用过后需要切割且不能重复使用。在盾构机的关键部件的钢结构设计阶段, 就应该考虑到设备组装、运输的便捷和安全性。小盾构机体积及质量相对较小, 为了方便拆装和重复安装使用, 在重量高达60t的关键部件钢结构上焊接带有螺纹孔的衬套, 安装螺栓吊耳, 并将其作为起吊和运输捆绑的吊耳。本文主要目的是整理出计算思路, 结合实际工程实例, 验算盾构机关键部件前盾选用的螺栓吊耳的安全性, 以降低项目风险, 保障吊装和运输过程中的人员安全, 同时提供新的设计方案。

1 计算盾体吊装时各链条的拉力和长度

1.1 计算各链条的夹角

本文先以小盾构的盾体为例展开分析和计算, 图1

为盾体起吊时4个吊点的俯视图。4条链条分别连接4个螺栓吊耳, 吊点A、B、C、D合成一个起吊点, 设定B处BC方向为X轴, BA方向为Y轴。A、B点间距为e, 两点到盾体质心的距离为a; C、D点间距为c, 两点到盾体质心的距离为b; B点到盾体质心的距离为d, D点到盾体质心的距离为f。当4个链条集合到一个起吊点时, 起吊点将位于重物质心垂线上, 并设定垂直向上的方向为Z轴。图2为盾体正面剖视图, 起吊点到XY平面距离为h。

盾体的总质量m和质心在三维建模后可通过建模软件计算出来, 同时也可以测量出前面提到的距离a、b、c、d、e、f、h的数值。利用这些已知数值, 通过三角函数可以推算出吊点A、B、C、D处的链条与Z轴夹角的计算公式, 如下:

$$\angle A = \arccos \left[\frac{h}{\sqrt{a^2 + (e-d)^2 + h^2}} \right] \quad (1)$$

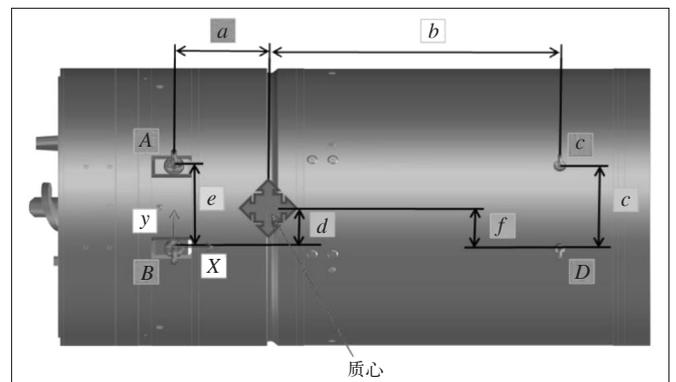


图1 盾体起吊的四个吊点俯视图

$$\angle B = \arccos\left(\frac{h}{\sqrt{a^2 + d^2 + h^2}}\right) \quad (2)$$

$$\angle C = \arccos\left[\frac{h}{\sqrt{b^2 + (c-f)^2 + h^2}}\right] \quad (3)$$

$$\angle D = \arccos\left(\frac{h}{\sqrt{b^2 + f^2 + h^2}}\right) \quad (4)$$

$$F_D = \frac{F_{Z(C, D)} \times (c-f)}{c \times \cos \angle D} \quad (9)$$

由以上计算公式可知，起吊点高度 h 越高，链条与 Z 轴夹角越小，进而所受拉力也越小。所以设计安装螺栓吊耳时，不仅要考虑盾体结构强度，还需考虑在车间装配时车间吊机起吊的高度，选用经济适用性最佳的吊耳。在车间装配起吊前期，不仅需要根据链条受到的拉力来选用不同规格的链条，还需要知道各链条长度来进行吊装准备工作，所以设计吊耳过程中还需计算出各链条的长度。继续运用三角函数得出吊点 A 、 B 、 C 、 D 处链条的实际长度的计算公式，如下：

$$L_A = \frac{h}{\sin(90^\circ - \angle A)} \quad (10)$$

$$L_B = \frac{h}{\sin(90^\circ - \angle B)} \quad (11)$$

$$L_C = \frac{h}{\sin(90^\circ - \angle C)} \quad (12)$$

$$L_D = \frac{h}{\sin(90^\circ - \angle D)} \quad (13)$$

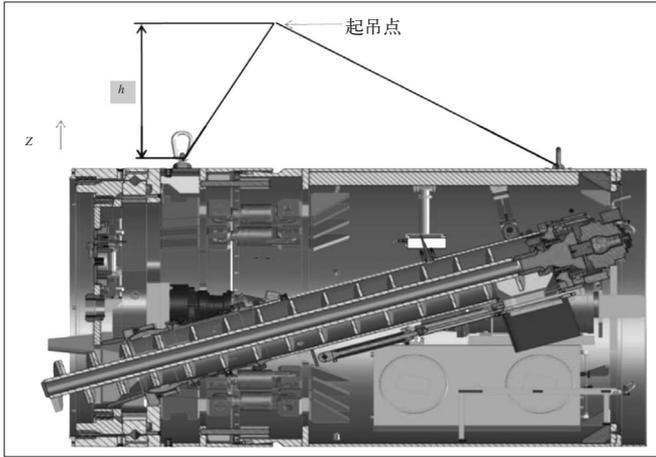


图2 盾体的正面剖视图

1.2 计算各链条的拉力和长度

利用杠杆原理，可推算得出盾体质心前后链条投影在 Z 轴的总拉力，设链条 A 和 B 在 Z 轴方向上的总力为 $F_Z(A, B)$ ，链条 C 和 D 在 Z 轴方向上的总力为 $F_Z(C, D)$ ，则：

$$\begin{cases} F_{Z(A, B)} \times a = F_{Z(C, D)} \times b \\ F_{Z(A, B)} + F_{Z(C, D)} = mg \end{cases} \quad (5)$$

式中： m - 盾体重量；

g - 重力加速度。

结合各链条与 Z 轴的夹角，计算出各个链条的拉力，则链条在吊点 A 、 B 、 C 、 D 处产生的拉力计算公式如下：

$$F_A = \frac{F_{Z(A, B)} \times d}{e \times \cos \angle A} \quad (6)$$

$$F_B = \frac{F_{Z(A, B)} \times (e-d)}{e \times \cos \angle B} \quad (7)$$

$$F_C = \frac{F_{Z(C, D)} \times f}{c \times \cos \angle C} \quad (8)$$

若以刀盘为研究对象，因其总宽度较小，则可以取消 C 、 D 两个吊点， A 、 B 两个吊点位置连线通过质心，则设定距离 $a=0$ ， $b=0$ ，吊点 A 、 B 对应的链条与 Z 轴夹角、链条拉力和长度的计算公式依旧成立。若盾体直径较小、长度较长，质心偏向前面或者后面，可将 C 、 D 两个起吊点或者 A 、 B 两个起吊点整合为一个吊点，设置距离 c 、 f 为零或者 e 、 d 为零即可。

1.3 根据实例计算前盾的链条信息

本文以某雨水调蓄工程 LH1.2 标改造项目为实例进行计算，管片内径由原来 3400mm 增大到 3500mm，需要新制扩径前盾。外径由原来 4155mm 增大到 4320mm，总长增大到 4573mm，前盾外壳采用 30mm 厚 Q345B 的钢板卷成，加强筋均匀分布并焊接在盾体的新旧外壳上，总重也由原来 50t 增大到 60t。在盾体新的外壳上设计吊点位置时，应尽可能对称分布；因盾体外壳为圆柱形，结构设计时将其各个零件均匀布置，使质心趋向中垂线。当吊点对称分布时，起吊时几个吊点处于同一个平面内，便不会出现偏载现象。本项目依旧采用旧的螺栓吊

耳, 现需验算所用的螺栓吊耳负载容量是否大于链条最大拉力。图3为小型盾构机前盾的螺栓吊点俯视图, 图4为小型盾构机前盾的螺旋起吊正视图, 根据所标识的尺寸, 各个吊点的距离参数可由盾体的吊装模型测量得到, 距离 $a=581\text{mm}$, $b=604\text{mm}$, $c=e=1522\text{mm}$, $d=f=761\text{mm}$ 。

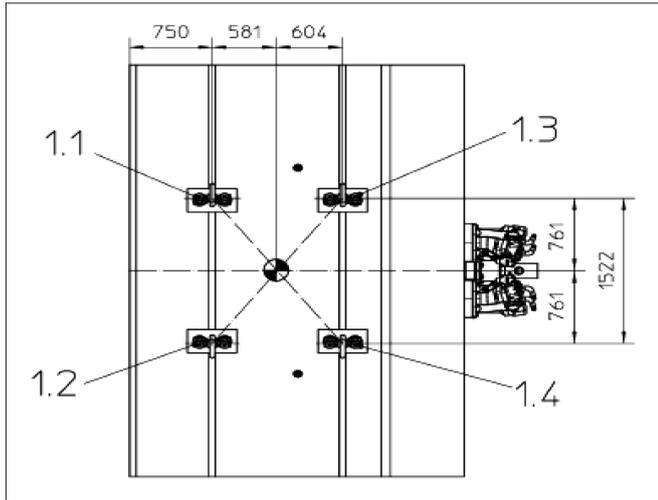


图3 小型盾构机前盾的螺栓吊点俯视图

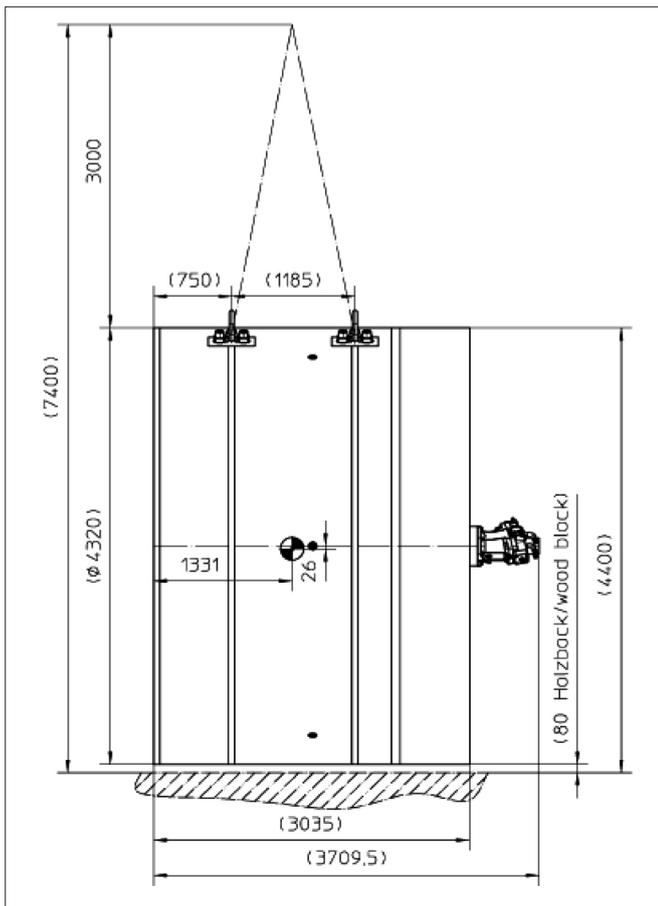
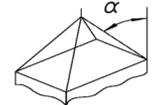


图4 小型盾构机前盾的螺旋起吊正视图

起吊点越高, 链条与Z轴夹角越小, 进而所受拉力也越小, 所以根据车间条件和工地实际情况, 设定起吊点最小高度为3000mm (若包括盾体高度, 则实际总高度是7400mm), 代入以上推算出的公式, 可得各链条与Z轴的最大夹角、各链条的最大拉力和长度。具体计算得出的各链条的起吊信息如表1所示。

表1 链条的起吊信息

链条序号	链条最大拉力 / (kN 或 t)	链条最大长度 / mm	与Z轴的最大夹角 α / (°)
1.1	161kN=16.1t	3149	18
1.2	161kN=16.1t	3149	18
1.3	155kN=15.5t	3153	18
1.4	155kN=15.5t	3153	18



2 盾构机盾体对角捆绑计算

设计盾体上的捆绑吊耳时, 应避免盾体在运输过程中发生滑落倾倒等危险事故。由牛顿第一定律即惯性定律可知, 货车在加速、急刹车和转弯时需要一个加速度, 根据实际情况急刹车情况下产生的加速度、惯性力最大, 当其大于货物在货车上的摩擦力而货物没有绑带捆绑时, 便发生滑落导致事故发生。因此在设计吊耳时, 吊耳的负载容量应大于绑带拉力。根据标准 EN 12195-1-2010, 可以得知对角捆绑防止货物向前滑动时, 绑带拉力 F_R 的计算公式如下:

$$F_R = \frac{mg(C_x - \mu f_\mu C_z)}{2n(\mu f_\mu \sin \alpha + \cos \alpha \cos \beta)} \quad (14)$$

- 式中: m - 货物质量;
- μ - 摩擦系数;
- C_x - 水平加速度系数;
- C_z - 垂直加速度系数;
- f_μ - 安全系数;
- n - 对角捆绑对数;
- α - 垂直捆绑角度;
- β - 水平捆绑角度;
- g - 重力加速度^[1]。

在本项目中, 防止前盾向前滑动的捆绑方式如图5所示, 由一对对角和一对直线组合而成, 直线捆绑时水平捆绑角度为零, 代入公式(14)也适用, 则对角捆绑对数 $n=2$ 。防止前盾向后滑动的捆绑方式如图6所示, 由一对对角绑带捆绑, 则对角捆绑对数

$n=1$ 。而向前水平加速度系数 $C_x=0.8$ ，向侧边和向后的水平加速度系数都为 0.5，对防止横向滑动的作用可忽略不记。从相关指南中可知，垂直捆绑角度不宜超过 45° ，水平捆绑角度不宜小于 19° ，而捆绑货物较重时，在 $\alpha=0 \sim 30^\circ$ 和 $\beta=20^\circ \sim 45^\circ$ 范围内为最佳^[2]。将 $\mu=0.4$ ， $g=9.81\text{m/s}^2$ ， $m=60\text{t}$ ， $C_z=1$ ，

$f_\mu=1$ 代入公式，可以算出各个绑带最大拉力值，绑带信息如表 2 所示。

从计算结果得知，防止向前滑动的捆绑需要的绑带数量较多且拉力较大，所以在设计钢结构时，需提前将安装较多吊耳的一面在运输时朝后方放置。

3 螺栓吊耳的选型安全

本项目选用德国 JDT 公司的螺栓吊耳，4 个 TPB 型号的吊耳分别安装在 4 个吊点（即吊点 1.1、吊点 1.2、吊点 1.3 和吊点 1.4）上，其单个负载容量为 32t；由于吊点 2.1 和吊点 2.2 位于盾壳内、不影响掘进且不被磨损，可以采用常规的焊接式吊耳，则选用两个型号为“TAPS8-12/8t”的吊耳，其单个负载容量在倾斜角 0° 时为 12t，倾斜角 90° 时为 8t；4 个 TP 型号的吊耳分别安装在吊点 3.1、吊点 3.2、吊点 3.3 和吊点 3.4 上，其单个负载容量在倾斜角 0° 时为 15t， 90° 时为 10t。

根据表 1 和表 2，计算的最大拉力数值皆小于各选用的吊耳的负载容量，且有近两倍的安全系数，即链条负载约等于标准螺栓吊耳标识负载容量的 50%。运输捆绑时所用到的吊耳都是单链连接，吊耳单个负载容量皆能满足需求，即所选吊耳是安全可靠的。

虽然单个吊耳负载容量满足需求，但是盾体在起吊时，会将 3 个或者 4 个吊点集成为一个起吊点，这时需要进一步考虑吊点的对称性。根据相关标准，如果链条彼此之间的最大角度偏差为 15° ，链条负载小于标准螺栓吊耳标识负载容量的 80%，所有链条倾斜角度都不小于 15° ，则认为负载是对称分布的。通常盾体的实际质心与理论值有偏差，造成各个起吊点的实际 h 值有偏差，但如果在盾体起吊稳定后，其三、四个吊点之间连线在 XY 平面的夹角在 15° 以内（高度差），则可以认为负载仍然是对称的情况^[3]。从表 1 链条的起吊信息中可以得知，彼此之间最大角度偏差几乎为零，4 个吊点设计在 XY 平面内，高度差接近平行，说明本文设计的盾体钢结构上的带螺纹孔衬套的位置是合理的，且 4 个起吊点满足对称负载的条件。本文设计能够保证盾体在吊运过程中有足够的稳定性，以免发生事故。

4 安装螺栓吊耳的注意事项

组装螺栓吊耳时，必须遵守以下规定：

(下转第 24 页)

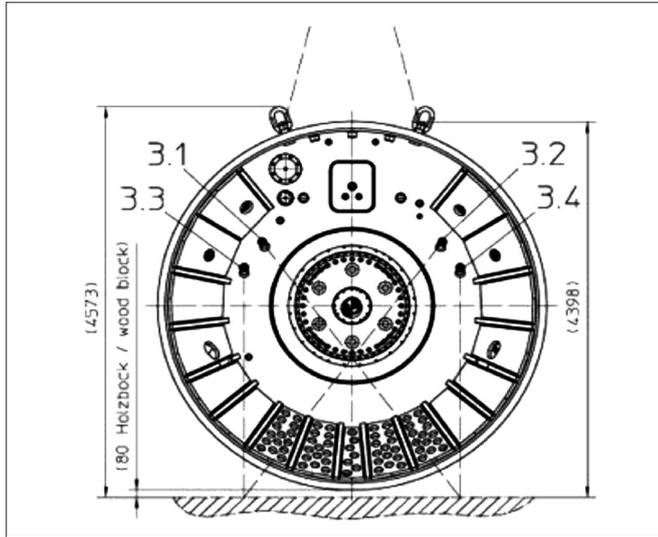


图 5 防止前盾向前滑动的捆绑方式

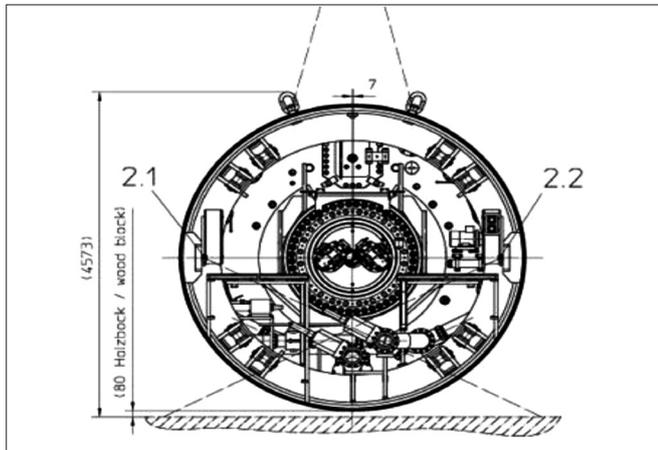


图 6 防止前盾向后滑动的捆绑方式

表 2 捆绑信息

捆绑点	绑带最大拉力 / (kN 或者 t)	捆绑方向	捆绑角度: $\alpha=0 \sim 30^\circ$, $\beta=20^\circ \sim 45^\circ$
2.1	42kN=4.2t	交叉	$\mu \geq 0.4$
2.2	42kN=4.2t	交叉	
3.1	85kN=8.5t	交叉	
3.2	85kN=8.5t	交叉	
3.3	60kN=6t	直线	
3.4	60kN=6t	直线	

航、自主路径规划、自主避障和地图构建。定位导航软件对接收的各类传感器的数据进行过滤和融合处理,结合配套的软件接口应用,高效准确地输出无人牵引车的位置信息和周围环境信息,进而实现无人牵引车的自动导航功能。控制系统对无人牵引车进行自主控制,依靠远程监控平台实时监测无人牵引车的运动状态,实现对飞机起落架的检测识别、对飞机起落架位置的计算、与飞机起落架的精准对接、远程控制无人牵引车等功能。整个作业过程实现智能化和无人化,真正实现了降低机务人员工作强度的目标。

参考文献:

[1] 王岳飞. 飞机牵引车夹持举升机构性能分析 [D]. 天津: 中

国民航大学, 2014.

[2] 徐峰, 赵宇. 无杆飞机牵引车设计技术分析 [J]. 科技创新与应用, 2018(10): 94-95.

[3] 韩文兴. 舰载机牵引系统稳定性及控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.

[4] 沈圳. 飞机无杆牵引安全技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.

[5] 贾浩. 基于 Cartographer 算法的 SLAM 与导航机器人设计 [D]. 济南: 山东大学, 2019.

[6] 杨颖, 王立勇, 孙鹏, 等. 动态环境下激光雷达地图构建 [J]. 计算机工程与设计, 2023, 44(7): 2125-2131.

作者简介: 姚永鑫 (1989.09-), 男, 汉族, 甘肃庆阳人, 本科, 工程师, 研究方向: 智能机械结构及系统设计。

(上接第 19 页)

(1) 应使用扳手拧紧, 直到与轴承表面齐平, 拧紧力矩值应符合要求。

(2) 必须检查螺钉尺寸、螺纹尺寸和拧入长度是否正确。

(3) 处理盲孔时, 螺纹深度至少为拧入螺纹长度的 1.1 倍; 对于钢材, 最小拧入长度为 1.2 倍的螺栓直径^[4]。

(4) 处理通孔时, 钻孔直径为螺钉的标称螺纹尺寸 + 1mm; 且在任何情况下都不得使用非公制螺纹。

5 盾体钢结构的螺纹尺寸

在起吊点 1.1 处选用 M56 螺栓吊耳, 则最小拧入长度为 $1.2 \times 56 = 67.2\text{mm}$, 盲孔深度至少为 74mm, 而盾体外壳采用 30mm 厚的钢板卷制而成, 直接加工螺纹明显不够, 则需要增加螺纹衬套; 而中心至构件边缘距离最小为 $1.5 \times$ 螺栓直径^[5], 即 $1.5 \times 56 = 84\text{mm}$ 。综合考虑后, 选用材料直径为 180mm、长度为 140mm 的 Q345B 热轧圆棒, 加工深度为 95mm、螺栓公称直径为 56mm 的螺纹, 然后倒角周边焊接在外壳上。同理可设计出捆绑处的螺纹衬套尺寸。此处螺纹衬套不仅保证了螺栓吊耳的使用性能, 还提高了钢结构的强度, 减小螺纹孔造成的应力集中的影响。

6 结语

本文通过盾体三维建模, 在其钢结构上设计各个吊点, 在起吊点处焊接螺纹嵌套以便安装螺栓吊耳,

不仅有利于装配和施工前后重复拆卸使用, 还提高了钢结构的强度, 大大减少了螺纹孔处应力集中的影响。计算结果证明, 起吊点接近质心位置且对称设计, 可以增大链条和螺栓吊耳的使用安全倍数。而在盾体运输捆绑中, 前后放置方向对其钢结构设计极其重要。计算结果也验证了盾构机关键部件选用的螺栓吊耳是合理可靠的, 确保了盾构机装配和验收后的运输安全, 为盾构施工奠定了良好的基础。同时, 本文提供了一种新的超大重物的起吊和运输捆绑的设计思路, 节省材料、方便安装, 降低了钢结构的制造成本, 缩短了施工工期。

参考文献:

[1] 欧洲标准化委员会. 道路车辆负载限制·安全·第 1 部分: 计算获得力量: EN 12195-1-2010[S]. 2014: 22.

[2] 国际道路运输 安全货物系固指南 [Z].

[3] 欧洲标准化委员会. 起重用短扁节链条 安全性 第 6 部分: 吊链: EN 818-6-2000[S]. 2000: 14.

[4] 罗兰·葛麦陵. 简明机械手册: 中文版第 3 版 [M]. 杨祖群, 译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2019: 216.

[5] 夏志斌, 姚谏. 钢结构设计——方法与例题 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 327.

作者简介: 黄惠敏 (1987.08-), 女, 汉族, 广东湛江人, 本科, 工程师, 研究方向: 盾构机钢结构设计。