

杨金辉 徐勇钢 张庆丰 夏 杰宁波市特种设备检验研究院 宁波 315048

摘 要：在最新的起重机械安全规程要求下，依据起重机械设计规范理论，设计了一种结构合理、安全经济性价比更高、安装便捷的异型滑轮代替吊运熔融金属起重机起升钢丝绳缠绕系统中的平衡滑轮，使其满足单吊点至少采用两根独立钢丝绳的安全要求，同时降低企业生产成本，提高生产作业的安全性。

关键词：吊运熔融金属起重机；起升系统；异型滑轮；设计与应用

中图分类号:TH218 文献标识码: A 文章编号: 1001-0785 (2020) 13-0045-05

0 引言吊运熔融金属起重机主要应用于吊运高温液态金属和炽热金属，作业环境恶劣、满载率高、吊装动作复杂及安全要求高，所以其本身的设计安全系数和部件配置要求也明显高于其他同类型的起重机械[1]。在现行 GB6067.5—2014《起重机械安全规程第 5 部分：桥式和门式起重机》中详细规定了吊运熔融金属起重机设计与制造等方面的基本安全要求，其中 4.2.4 条规定了主起升机构钢丝绳应满足：1) 双吊点应当采用四根钢丝绳缠绕系统；2) 单吊点至少采用两根钢丝绳缠绕系统；

3) 钢丝绳缠绕系统中，不应当采用平衡滑轮[2]。新修订的 TSGQ7015 — 2016《起重机械定期检验规则》也明确了所有在用吊运熔融金属起重机的主起升机构（电动葫芦除外）钢丝绳系统应符合以上要求[3]，保证在一根钢丝绳断裂的情况下，另一根钢丝绳仍能支撑重物，从而避免由于钢丝绳断裂后直接造成钢包坠落倾翻事故的发生。

对比相关标准和检规未对吊运熔融金属起重机（ $Q < 75t$ ）的起升钢丝绳需要分开设置作出强制性规定，工厂中在用吊运熔融金属起重机基本按一根钢丝绳缠绕形式设计，所以新检规实施后，大多数在用吊运熔融金属起重机的起升钢丝绳缠绕系统将面临安全整改。根据检验数据统计分析，浙江省将有 1 000 余台吊运熔融金属起重机的定期检验不合格，其中宁波市约为 300 余台。根据整改费用测算，更换一台 20 t 吊运熔融金属起升小车的价格为 20 余万，如果更换整机其费用会更高，高额的整改费用势必将给企业带来巨大的经济负担，所以制定一套简捷、有效且安全可靠的整改措施是广大冶金企业急切急需的。

1 异型滑轮的设计 1.1 设计理念在用吊运熔融金属起重机整改的技术难点主要是由单吊点单根钢丝绳缠绕系统如何便捷有效转变为单吊点双根钢丝绳缠绕系统，同时考虑到双根钢丝绳缠绕系统可能存在着双侧钢丝绳受力不均、双侧钢丝绳拉伸长度不一致等因素，所以在不使用平衡滑轮的前提下如何在装置设计中充分考虑平衡的特点也尤其重要。本文在此研究背景下，提出了一种经济实用并且能够调整两根独立起升钢丝绳因长短不一而造成受力不均转动幅度过大的异型滑轮，其主要设计理念为：

1) 将原平衡滑轮处钢丝绳一分为二，两组绳头单独设置，从而满足单吊点两根钢丝绳缠绕方式，确保一侧钢丝绳发生断裂时，另一侧也能保证支撑住吊钩下的载荷；

- 2) 保证中间两侧绳头起到上下位置调整的作用，从而避免由于两根独立钢丝绳拉伸不一致或载荷的偏斜而造成两侧钢丝绳受力不均；
- 3) 装置结构及形式的设计应尽可能考虑各结构部件应力的优化，并考虑钢丝绳和装置更换、检查的便利性。

将该新型异型滑轮替代原起升钢丝绳缠绕系统中吊钩滑轮上的平衡滑轮，巧妙地实现了起升钢丝绳缠绕系统形式由单吊点单根钢丝绳转化为单吊点双根钢丝绳，整改前后起升钢丝绳缠绕系统形式对比如图 1 所示。并且异型滑轮的扇形结构受力均匀，能够自动平衡两根独立作用钢丝绳的受力不均现象，使整改后的起升钢丝绳缠绕系统满足最新标准和检规的要求，且该异型滑轮加工制造简单方便，成本低廉，安装便捷，具有很好的实施效果和推广意义。

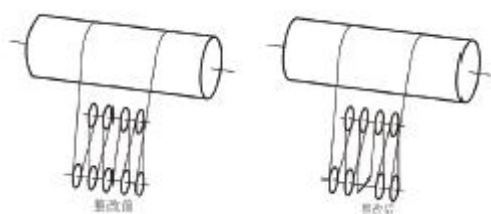
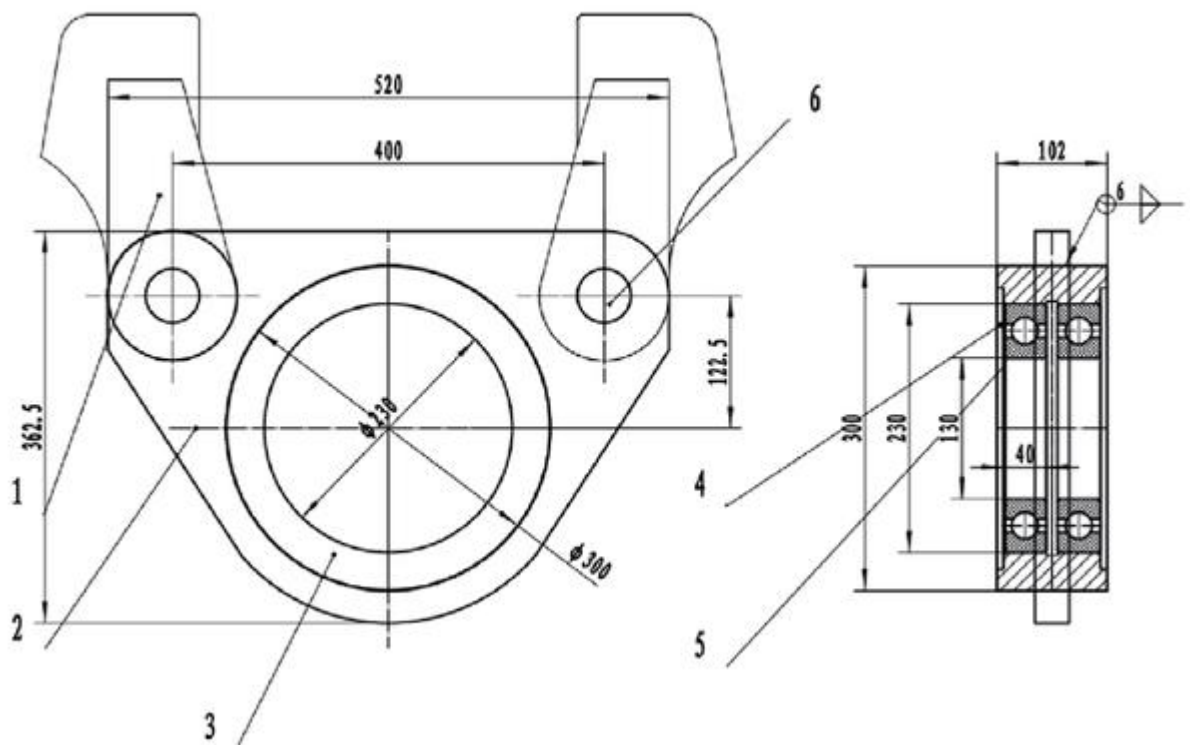


图 1 整改前后起升钢丝绳缠绕系统形式对比图

1.2 结构设计文中所述异型滑轮结构形状为扇形吊板，如图 2 所示。该装置主要由上下两部分组成：装置上部为绳头联接部分，分别在扇形吊板的上宽两侧开孔，孔的大小应与钢丝绳楔套的吊孔大小保持一致，楔套与扇形吊板的联接采用间隙配合，在两孔中间安装轴套与固定轴，并在固定轴一侧安装挡板和开口销（防止窜动）。间隙配合目的主要确保钢丝绳绳头有一定的相对转动空间，满足当扇形吊板由于两侧钢丝绳长短偏差发生转动时，其两边楔套绳头也随之转动，从而确保绳头的拉力始终保持在垂直的位置；装置下部为铰座板，上宽下窄，底部为半圆形，上部为长方形，这种结构便于三点受力的合理分配和制造工艺便利性。铰座板的材料为 Q345B，板底部的中央开孔安装轴承室钢套，钢套与铰座板采用焊接联接，钢套中再安装深沟球轴承，轴承与钢套采取过盈配合联接，轴承室内孔的直径大小则与原吊钩滑轮组轴直径大小保持一致，整个异型滑轮固定方式按照原吊钩平衡滑轮固定即可。



1. 钢丝绳绳头楔套组件 2. 铰座板 3. 轴承室 4. 挡尘板 5. 轴承 6. 楔套固定
轴图 2 异型滑轮结构图

1.3 性能分析 1) 异型滑轮不是单纯的平衡梁装置，其结构为扇形结构，它综合了圆形滑轮均匀受力和杆件平衡梁的平衡作用等因素；

2) 该滑轮转动角度较大，从而可调整两侧钢丝绳由于长短不一造成受力不均的幅度范围较大的问题；

3) 该滑轮的扇形结构设计是为了满足不同重载工况下其结构件受力的均匀性，确保在重载调整状态下，其平衡结构件不降低受力强度，而一般平衡梁倾斜至一定角度时，其杆件的垂直受力强度会大幅度降低；

4) 该滑轮安装位置较方便，位置一般固定于原吊钩滑轮组中间平衡滑轮位置处，改造时，只需拆除吊钩滑轮组上平衡滑轮后，再安装轴孔大小与原滑轮一致的异型滑轮即可。另外，异型滑轮的整体大小不会超出原吊钩滑轮组的直径范围，不会影响吊钩滑轮组的运行空间和起重机整体的提升高度。

1.4 强度校核异型滑轮装置中铰座板的大小、厚度、钢丝绳楔套大小及各开孔的大小均应根据现场起重机额定起重量和吊钩滑轮组的大小计算得出。

根据异型滑轮的结构组成进行受力分析，首先均衡板与钢丝绳的楔形接头销轴连接处存在局部应力，需验算校核；其次，把均衡板与钢丝绳楔形接头两个铰点看做支点，滑轮轴作用处看做集中载荷作用，均衡板按简支梁计算，均衡板滑轮轴作用处存在最大弯矩，并且在滑轮轴处作用的轴承座存在局部应力，需校核验算

[4]。以额定起重量 50 t 的吊运熔融金属起重机为例，相关计算如下：1) 钢丝绳楔形接头销轴处局部应力校核销轴校核

$$\tau_Q = \frac{16Q}{3\pi d^2} = \frac{16 \times 2.5 \times 10^4}{3 \times 3.14 \times 50^2} = 16.99 \text{ N/mm}^2 \leq [\tau_1] \quad (1)$$

式中:Q 为销轴所受剪力, $Q = 0.5 \times 5000 = 2.5 \times 10^4 \text{ N}$; d 为销轴直径, $d = 50 \text{ mm}$; 销轴材料为 40Cr, 许用应力 $[\tau_1] = 232 \text{ MPa}$ 。销轴孔处平均挤压应力

$$\sigma_{bs} = \frac{F}{d\delta} = \frac{5 \times 10^4}{50 \times 60} = 16.67 \text{ N/mm}^2 \leq [\sigma_{bs}] \quad (2)$$

式中: $[\sigma_{bs}]$ 为轴孔的挤压许用应力, 考虑工作受力时和销轴无相对转动, 主要用于冶金起重, 取 $[\sigma_{bs}] = \sigma_s/6 = 45.83 \text{ MPa}$ 。

2) 各危险断面最大拉应力计算图 3 中轴孔 A-A、B-B、C-C 截面为危险截面, 对危险截面的应力计算如下: A-A 截面应力为

$$\sigma_A = \frac{F\alpha}{2(2b-d)\delta} = \frac{5 \times 10^4 \times 2.2}{2 \times (2 \times 60 - 55) \times 60} = 14.1 \text{ MPa} \leq \frac{\sigma_s}{1.7} = 161.76 \text{ MPa} \quad (3)$$

式中: b 为铰孔中心至左边缘距离, $b = 60 \text{ mm}$; α 为应力集中系数, 取 $\alpha = 2.2$ 。验算通过。B-B 截面应力为

$$\begin{aligned} \sigma_B &= \frac{F(h_1^2 + 0.25d^2)}{2d\delta(h_1^2 - 0.25d^2)} = \frac{5 \times 10^4 \times (60^2 + 0.25 \times 55^2)}{2 \times 55 \times 60 \times (60^2 - 0.25 \times 55^2)} \\ &= 11.59 \text{ MPa} \leq \frac{\sigma_s}{1.7} = 161.76 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: h_1 为铰孔中心至上边缘距离, $h_1 = 60 \text{ mm}$ 。验算通过。C-C 截面处为直接危险截面, 其截面应力为

$$\begin{aligned} \sigma_C &= \frac{2F(h_2^2 + 0.25d_1^2)}{2d_1\delta_0(h_2^2 - 0.25d_1^2)} \\ &= \frac{2 \times 5 \times 10^4 \times (180^2 + 0.25 \times 230^2)}{2 \times 230 \times 102 \times (180^2 - 0.25 \times 230^2)} = 5.07 \text{ MPa} \leq \frac{\sigma_s}{1.7} = 161.76 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: δ_0 为轴承孔厚度, $\delta_0 = 102 \text{ mm}$; d_1 为轴承孔直径, $d_1 = 230 \text{ mm}$ 。验算通过。

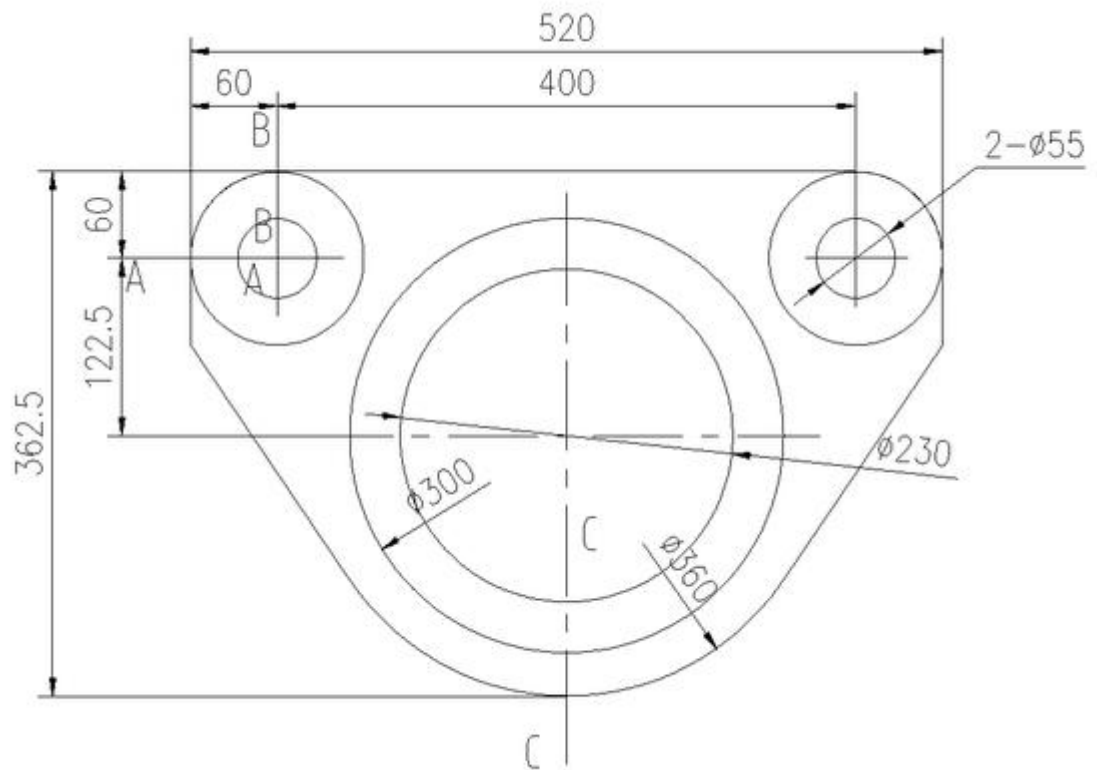


图 3 异型滑轮危险断面分析

3) 均衡板最大弯矩处应力计算均衡板截面图如图 4 所示, 轴孔平均挤压应力为

$$\sigma_{bs} = \frac{2F}{d\delta} = \frac{2 \times 5 \times 10^4}{230 \times 102} = 4.26 \text{ N/mm}^2 \leq [\sigma_{bs}] \quad (6)$$

滑轮轴处均衡板的最大弯曲应力为

$$\sigma = \frac{M}{W_x} = \frac{10\,000}{1\,254.14} = 8 \text{ MPa} \leq \frac{\sigma_s}{2.5} = \frac{275}{2.5} = 110 \text{ MPa} \quad (7)$$

式中: M 为跨中弯矩, $M = F l / 2 = 100\,000 \text{ N} \cdot \text{m}$; W_x 为均衡板中间截面抗弯弯矩, 验算通过。

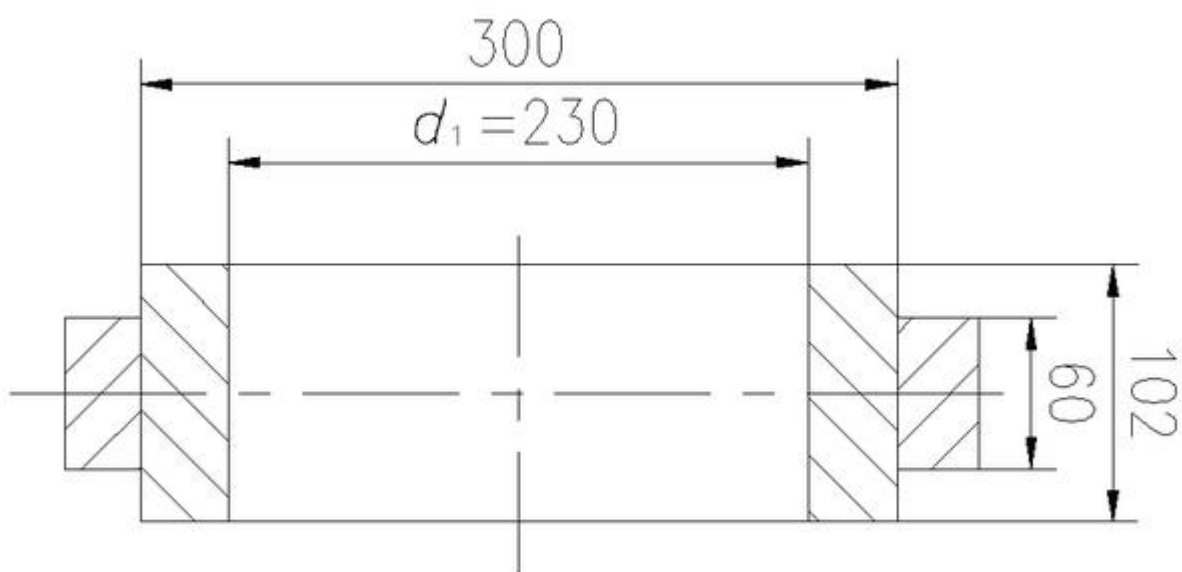


图 4 均衡板截面图

2 异型滑轮的制造及安装 2.1 制造工序通过对所设计的异型平衡滑轮各组件强度校核通过后，其制造工序流程如图 5 所示：



图 5 异型滑轮制造工序

2.2 安装工序对于已经投入使用的吊运熔融金属起重机吊钩组更换异形平衡滑轮的安装步骤为：1) 拆除卷筒上的钢丝绳压板，使钢丝绳和起重机分离；2) 将钢丝绳从吊钩组中抽出后整体拆分原吊钩组；3) 拆分吊钩组后取出中间定滑轮并安装上配套的异形滑轮；4) 安装好另外的滑轮及滑轮罩等部件使吊钩组复原；

5) 将原先拆除的一根钢丝绳分成两根一样长的钢丝绳；6) 将两根钢丝绳分别绕过卷筒、定滑轮、和吊钩组滑轮最后固定在异形滑轮两端的钢丝绳绳头楔套组件中；7) 安装完毕后检查各紧固件是否紧固可靠，异形滑轮两端是否保持相对平衡。若两端未平衡应进行调整以保证异形滑轮受力均匀。

本文选取 3 倍率异形滑轮吊钩组实物图为例，其最终安装更换后的吊钩组实物图如图 6 所示。



图 6 3 倍率异形滑轮钢丝绳起升系统吊钩组

3 应用实例 3.1 实例背景某铸造厂一台在用吊运熔融金属起重机的型号为 QDY50-21A7S, 设备额定起重量为 50 t; 跨度为 21 m; 起升高度 9 m; 起升倍率为 5。其起升机构绕绳方式为平衡滑轮位于吊钩组的中间滑轮位置，且是单吊点单根钢丝绳缠绕系统，不符合参考文献[2]、[3] 中相关规定要求，存在由于起升钢丝绳的突然断裂，导致重物急剧下坠的安全隐患。

3.2 实例应用分析根据最新起重机械定期检规要求，该起重机遇到了定期检验不合格、停止使用的局面，这对企业的正常生产运行造成巨大的困难。该类起重机

必须进行相应整改,才能达到要求,如整机重新设计制造,存在周期长、投入成本大等不利因素。因此从吊钩组入手选用异形滑轮来代替动滑轮组中的中间滑轮其结构,如图 7 所示,5 倍率异型滑轮钢丝绳起升系统。整改完成的起升机构钢丝绳缠绕系统,符合相关安全技术规范中提出的单吊点两根独立钢丝绳的要求,确保吊运熔融金属的起重机在作业过程中,即使一侧钢丝绳发生断裂,另一侧也能支持住吊钩下的载荷,避免事故的发生,同时也满足了不能使用平衡滑轮这一要求。顺利通过检验机构的监督检验。在各项载荷试验时未出现两根钢丝绳受力不均、异型滑轮受力变形等不利现象。通过改变吊钩组平衡滑轮为异型滑轮这个整改方法大大缩短了整改时间也降低了企业的整改费用。



图 7 5 倍率异型滑轮钢丝绳起升系统

4 结论 1) 本文所设计的异形滑轮与两根独立起升钢丝绳绳头的楔套联接采用插销形式,便于钢丝绳的更换,而独特的扇形结构使平衡滑轮受力更为均匀,扇形结构与吊钩滑轮轴采用的深沟球轴承联接能自动平衡两个独立钢丝绳由于长短不一而引起的受力不均,使两根钢丝绳受力一致。从而解决了原钢丝绳缠绕系统形式由单吊点单钢丝绳向单吊点双钢丝绳系统的转变和两根钢丝绳受力动态平衡性这两大吊点整改技术难点。

2) 异形滑轮制造安装方便、安全可靠,只需替换原吊钩滑轮组中的平衡滑轮,不需对小车架进行额外的整改,故可方便快捷满足在用吊运熔融起重机械的整改工作,在确保符合安全技术要求的条件下,大幅度地降低了整改费用,减少了企业成本。根据一台额定起重量为 50 t 吊运熔融起重机的整改费用测算,如更换整个小车费用约为 35 万,如增加钢丝绳缠绕圈数(高度允许)+加装小车架平衡梁+更换吊钩滑轮组约为 15 万,而加装异形滑轮装置只需 2 万左右。

3) 对部分吨位的新制造吊运熔融起重机提供了设计优化手段,如原设计为 3、5 倍率的起升钢丝绳缠绕方式,可不必改为 4 和 6 倍率,从而减少钢丝绳和卷筒的长度,有利小车架及整机的布局。

参考文献[1] 胡静波, 吴祥生, 周前飞. 对 2016 版检规中吊运熔融金属起重机检验项目的探讨[J]. 中国特种设备安, 2017 (1): 12-15.[2] GB 6067.5—2014 起重机械安全规程第 5 部分: 桥式和门式起重机[S].[3] TSGQ 7015—2016 起重机械定期检验规则[S].[4] 徐灏. 机械设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社,1991.