

doi: 10.7690/bgzdh.2022.09.005

双柱举升机振动成因分析及优化设计

秦杰¹, 王园园², 张涛¹

(1. 一汽-大众成都分公司总装车间, 成都 610100; 2. 四川航天计量研究所型号管理处, 成都 610100)

摘要: 针对双柱举升机由于设计不合理导致的振动问题, 分析其振动的成因并进行设计优化。通过基本受力、弯曲振动、扭转振动分析振动成因; 分别从立柱布局、导轮布局 2 方面优化设计双柱举升机结构。验证结果表明: 该设计可将振动控制在允许范围内, 甚至消除振动, 进而消除振动带来的经济损失以及安全问题。

关键词: 生产线; 双柱举升机; H 型钢; 方钢管; 扭转刚度

中图分类号: TP23 **文献标志码:** A

Vibration Cause Analysis and Optimization Design of Double-column Lifter

Qin Jie¹, Wang Yuanyuan², Zhang Tao¹

(1. Final Assembly Workshop of Chengdu Branch, FAW-VOLKSWAGEN, Chengdu 610100, China;

2. Model Management Department, Sichuan Aerospace Measurement and Test Research Institute, Chengdu 610100, China)

Abstract: Aiming at the vibration problem caused by unreasonable design of double-column lifter, the causes of vibration are analyzed and the design optimization is carried out. The causes of vibration were analyzed through the basic force, bending vibration and torsional vibration, and the structure of double-column lifter was optimized from the 2 aspects of column layout and guide wheel layout. The verification results show that the design can control the vibration within the allowable range, even eliminate the vibration, and then eliminate the economic losses and safety problems caused by vibration.

Keywords: production line; double-column lifter; H-beam; square steel tube; torsional stiffness

0 引言

举升机作为生产线的重要设备, 用于将装配零部件或产品输送至不同高度的平台与输送线对接。通常举升机用于输送人力难以负载的产品; 在生产线上通常也不会布局备用设备, 一旦发生故障就会导致生产线全线停线^[1]; 因此, 举升机是生产线中非常重要的节点, 需要具备极高的可靠性。

常见举升机有单柱、双柱和四柱等结构, 四柱举升机支撑点多、受力平稳、刚度高, 使用故障率较低, 但结构重量大、占地面积大, 四柱结构占用多个空间立面, 检修维护不方便, 通常用在重载输送的场合; 单柱举升机支撑点过少, 支柱受力复杂, 只适用轻载场合; 而双柱举升机较为均衡, 承载能力适中, 也方便安装布置及后续的维护保养, 在装配流水线中使用最为广泛^[2]。

1 振动成因分析

常见双柱举升机结构如图 1 所示, 由 2 根立柱作为机架支撑举升机, 由一个吊架及其附属的传送机构负责输送负载, 吊架通过导轮作用在立柱上,

由立柱提供支撑力稳定吊架的运行^[3]; 因此, 双柱举升机的双立柱既需要支撑举升机, 又需要稳定吊架, 受力复杂, 在举升机中起着关键的作用。尤其需要分析举升机的振动控制, 设计上的不合理, 将导致举升机异常振动, 如果振动失控, 将损坏输送的工件或导致工件掉落, 造成不必要的经济损失, 甚至出现安全风险^[4]。

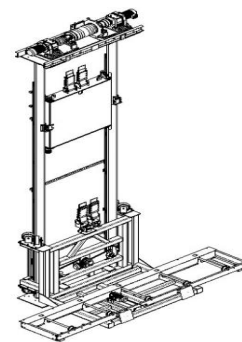


图 1 常见举升机结构

举升机通常使用型材搭建而成, 其中支撑举升机最重要的 2 根立柱通常选用 H 型钢或方钢管, 为使举升机吊框稳定升降, 立柱通常还兼具吊框导向作用^[5]。如图 2 所示, 常见的布局有 3 种结构。

收稿日期: 2022-05-01; 修回日期: 2022-06-03

作者简介: 秦杰(1983—), 男, 重庆人, 硕士, 高级工程师, 从事自动化设备设计与优化研究。E-mail:435532650@qq.com。

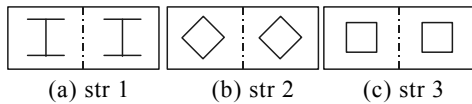


图 2 双柱举升机常见的 3 种双柱布局

1.1 基本受力分析

如图 3 所示，双柱举升机由于结构的关系 2 根立柱安装在负载的单侧，在举升过程中立柱不但要承受负载的重力，还要承受负载重力与举升力不在同一条直线上形成的弯矩，受力情况更复杂。

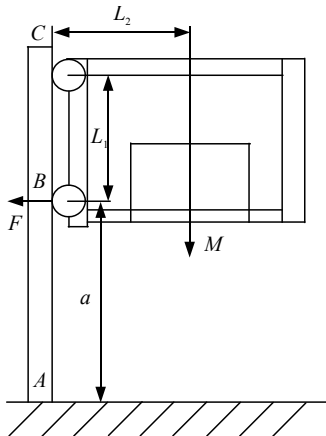


图 3 双柱举升机受力

为便于分析对比，设定负载为 M ，负载质心离举升机支柱距离为 l_2 ，举升吊架上下 2 组滚轮与皮带鼓距离为 l_1 ，这 3 组参数在 3 种构型的举升机上设为一致。由于负载离支柱有距离，所以对举升机施加了弯矩，这个弯矩会对立柱上包胶轮施加正压力 F 。由于是双立柱受力，所以每个立柱正压力 F 为：

$$F = Ml_2 / 2l_1 \quad (1)$$

负载重心离支柱越远，框架越短，正压力越大，这要求立柱需具备较好的抗弯曲变形能力。

随着吊框的升降，正压力 F 在立柱上往复移动会使双柱举升机产生周期性的振动，其振动的频率与一个工作循环相同，因工作循环是举升机的固有参数，与生产线工艺节拍保持一致；故可以认为举升机的振动频率固定不变，而振幅则由正压力 F 决定。正压力 F 越大，振幅越大，则振动越大。笔者将主要分析正压力 F 变化引起的振动幅度的变化。

1.2 弯曲振动分析

立柱受到导轮正压力，与底座距离为 a ，最大挠度在 B 点，其自由端挠度为^[6]：

$$y_B = -(Fa^2 / 6EI_y)(3l - a) \quad (2)$$

由式(1)可得：

$$y_B = -(Ml_2 a^2 / 12EI_y l_1)(3l - a) \quad (3)$$

受力点 C 处的挠度为^[6]：

$$y_C = -(Fa^3 / 3EI_y) \quad (4)$$

由式(1)可得：

$$y_C = -(Ml_2 a^3 / 6EI_y l_1) \quad (5)$$

随着吊框的升降，导轮与立柱端面的距离 l_1 在立柱上往复移动会使立柱挠度 y 出现周期性的变化，其幅度越大，振动越大。

而在图 2 所示的 3 种结构中，参数 F 和梁长度 l 及钢材 Q235 的弹性模量 E 可以设为一致，但是因型材截面形状不同，3 种结构的惯性矩不一致，因此产生的振动幅度就不一致。

为便于分析，此处以常见的输送轿车白车身举升机基本参数进行 3 种结构的对比分析。

设定负载重量为 10 000 N， l_2 设定 2 400 mm， l_1 设定 3 000 mm，此时正压力达到最大，约为 4 000 N，理想情况下每侧包胶轮需提供正压力 4 000 N，str1 选用的 H 型钢，基本参数采用对应国标 GB/T11263—2017 中的 HW 宽翼缘型 250 mm×250 mm 规格和 200 mm×200 mm 规格对比。str2 和 str3 均选用方钢管，基本参数对应国标 GB/T6728—2017，规格 200 mm×200 mm×8 mm。

H 型钢惯性矩为：

$$I_y = (BH^3 - (B-b)A^3) / 12 \quad (6)$$

方钢管惯性矩为^[7]：

$$I_y = (BH^3 - bh^3) / 12 \quad (7)$$

200 mm×200 mm 的 H 型钢 $I_y = 1\ 600\ \text{cm}^4$ ，250 mm×250 mm 的 H 型钢 $I_y = 3\ 875\ \text{cm}^4$ ，方钢管 $I_y = 3\ 566\ \text{cm}^4$ ，而在抵抗弯转变形方面， EI_y 是衡量立柱弯曲刚度的重要指标，而弹性模量 E 是常数，由材料决定，Q235 弹性模量为 $2.06 \times 10^5\ \text{MPa}$ ，由此可得到各结构的弯曲刚度如图 4 所示。

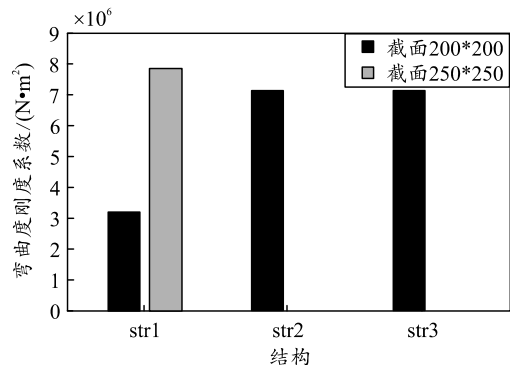


图 4 弯曲刚度系数

要得到较为接近的抗弯能力，H 型钢需要大一号牌号，此时 4 种型材的截面积分别如表 1 所示。

表 1 各结构截面面积对比

型材	截面积/cm ²
200×200str1	64.28
250×250str1	92.18
str2	56
str3	56

在此刚度下，正压力 F 随着吊架升降，受力点在 $0\sim 7.6$ m 之间往复变化；因此，最大挠度 y_B 也呈现周期性的变化，4 种结构的挠度周期变化如图 5 所示。

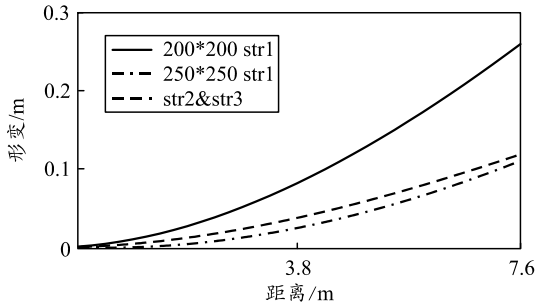


图 5 各结构弯曲形变

随着导轮逐渐升高，正压力 F 在立柱上造成的弯曲形变逐渐变大，升到最高点 7.6 m 时，200 mm×200 mm 的 H 型钢弯曲形变达 0.26 m，形变过大，250 mm×250 mm 的 H 型钢最大形变为 0.11 m，200 mm×200 mm 方钢管与其接近，为 0.12 m；为保证弯曲刚度接近，H 型钢需要选择更大尺寸的型面。此时 250 mm×250 mm 的 H 型钢截面积为 92.18 cm²，是 200 mm×200 mm 方钢管截面积 56 cm² 的 164%，即为达到较为接近的弯曲刚度，H 型钢立柱的重量是方钢管立柱的 1.64 倍，结构效率很低。

1.3 扭转振动分析

如果导轮的正压力 F 不通过立柱型材的型心还会对立柱产生扭矩，由于正压力较大，导轮正压力与型心距离较远时，扭矩对立柱产生的扭转形变不能被忽略。

如图 6 所示，str1 H 型钢由于两侧有凹槽，在凹槽内布局导轮显得比较紧凑，通常在凹槽内布局；str2 由于 45° 旋转安装，通常采用侧棱边布局导轮；str3 则多采用正面和外侧面布局导轮。

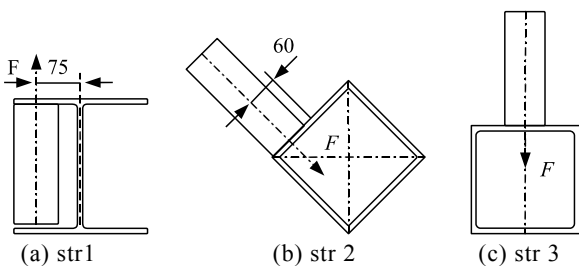


图 6 3 种结构导轮布局

根据扭转形变公式^[6]：

$$\varphi = Ta / GI_t ; \tag{8}$$

扭矩 T 由压力 F 和受力点距离型心的距离 h 决定：

$$T = Fh ; \tag{9}$$

则扭转形变为：

$$\varphi = \frac{Mhl_2 a}{2l_1 GI_t} . \tag{10}$$

随着吊框的升降，导轮与立柱端面的距离 l_1 在立柱上往复移动会使立柱扭转变形， φ 也出现周期性的变化，这将使双柱举升机产生周期性的扭转振动。在图 2 所示的 3 种结构中，参数 F 及梁长度 l 及钢材 Q235 的扭转弹性模量 G 一致，但是因型材截面形状不同，3 种结构的 I_t 不一致；因此，产生的扭转振动幅度就不一致。

str1 的布局方式虽然紧凑，但是正压力 F 不可能通过立柱型材的型心，不可避免会产生扭矩，str2 的布局如果不注意优化会产生扭矩，而 str3 的布局则很容易使正压力 F 通过型心消除扭矩，为便于分析比较，设定 str2 的导轮在方钢管边缘产生最大扭矩。型材分别选用弯曲刚度接近的 HW 宽翼缘型 250 mm×250 mm H 型钢和 200 mm×200 mm×8 mm 方钢管。

str1 和 str2 承受扭矩大小接近，扭转模量 G 以及立柱长度 l 都一样，决定 str1 和 str2 扭转形变大小的关键参数是扭转系数 I_t ，设定包胶轮的位置在型材凹槽内，基本与凹槽外沿齐平，包胶轮宽 100 mm，受力点距型材几何中心 75 mm，该立柱截面此时承受扭矩 300 N·m。包胶轮宽 80 mm，受力点距型材几何中心 60 mm，该立柱截面此时承受扭矩约为 340 N·m。在 GB/T6728-2017 标准中可以查到方钢管的扭转系数是 5 815 cm⁴。国标 GB/T11263-2017 中并没有给出 H 型钢的扭转系数，由于 H 型钢只有腹板对抗扭力，根据下式可以估算出 H 型钢扭转系数约为 450 cm⁴。

$$I_t = \int_A \rho^2 dA . \tag{11}$$

扭转模量 G 由材料决定，H 型钢及钢管材料都是 Q235，模量为 7.9×10^4 MPa，设定 str2 扭转形变程度为 100%，各结构扭转形变情况由表 2 和图 7 所示。

表 2 扭转形变参数对比

结构	扭转刚度	扭矩/(N·m)	变形百分比/%
str1	0.35×10^4	300	1 160
str2	4.65×10^4	340	100
str3	4.65×10^4	0	0

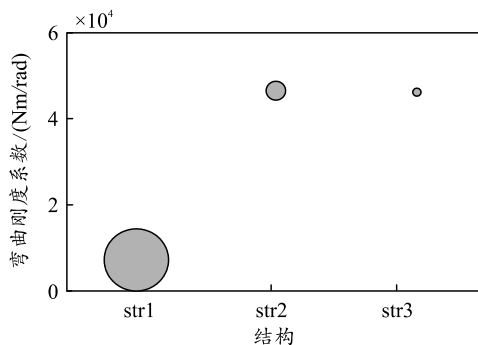


图 7 扭转刚度-形变气泡

由上图可以看出，因为 str1 扭转刚度较低，抵抗扭转变形的能力很弱，str1 和 str2 的扭转变形相差 11.6 倍。str3 扭转刚度与 str2 一样，但由于包胶轮对方钢管施加扭矩，不产生扭转变形，即使考虑安装调试过程中产生的偏差，扭矩也很小，扭转变形可以忽略。

在此刚度下，正压力 F 随着吊架升降，受力点在 $0 \sim 7.6 \text{ m}$ 之间往复变化；因此，最大扭转变形也呈现周期性的变化，3 种结构的周期变化如图 8 所示。

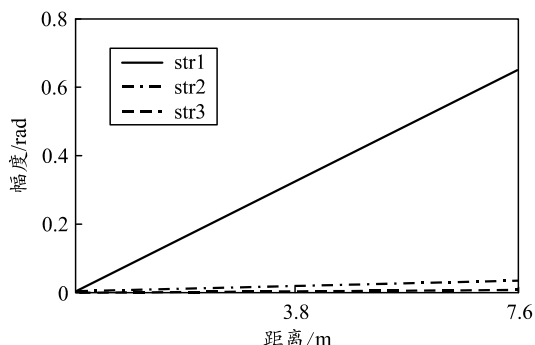


图 8 各结构扭转变形

随着导轮逐渐升高，正压力 F 在立柱上造成的扭转变形逐渐变大，升到最高点 7.6 m 时，str1 最大扭转角度为 0.65 rad ，str2 为 0.04 rad ，str3 为 0 rad ；str1 的 H 型钢型材既存在扭转刚度低的缺陷，又存在较大扭转力矩，导致扭转变形明显大于 str2 和 str3 结构；因此，在设备运转过程中，str1 结构的举升机运行产生的扭转振动将明显高于 str2 和 str3 结构。

2 双柱举升机结构优化设计

2.1 立柱布局优化设计

从上面的分析可以看出，虽然布局 and 形变的幅度不同，但是施加在立柱上的正压力 F 是使立柱在弯曲和扭转方向形变的原因，随着举升机的上下运动，立柱的形变也随周期性变化，进而引起举升机振动。虽然可通过合理的选择立柱截面与导轮布局

减小形变幅度降低振动，但无法消除振动产生的源头。立柱是悬臂梁结构，顶部缺乏支撑，如果对顶部加以支撑，则立柱的受力变形情况会优化很多。固连到钢结构的举升机如图 9 所示。

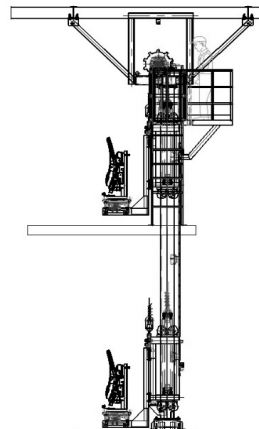


图 9 固连到钢结构的举升机

立柱固定在地基上，形成悬臂梁结构，受力情况如图 10 所示，此时 C 点受力最复杂，该处扭矩为 T ，弯矩为 $F \times a$ 。

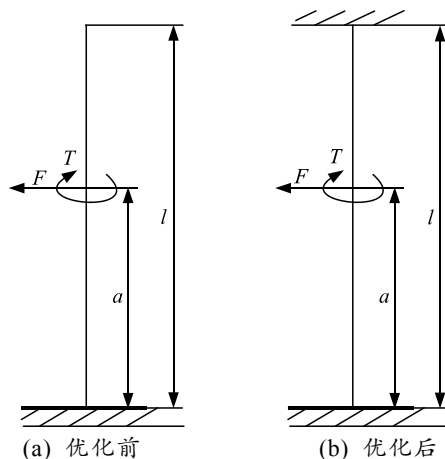


图 10 优化前后受力对比

则可得受力点 C 处的挠度为：

$$y_{C1} = -Fa^3/3EI; \tag{12}$$

扭转变形则为：

$$\varphi_{C1} = Tl/GI_t. \tag{13}$$

根据式(9)、(13)优化前 C 点扭转变形为：

$$\varphi_{C1} = Fhl/GI_t. \tag{14}$$

从简化分析得到，立柱作为一种悬臂梁结构受力刚度较差，变形较大，如果在立柱顶端给予支撑，通常是将立柱顶端与厂房结构固联，则可以形成图 10(b)的两端固定梁结构，此时受力点 C 挠度为：

$$y_{C2} = (Fa^3(l-a)^3)/(3EI^3); \tag{15}$$

扭转变形则为：

$$\varphi_{C2}=T_a l / G I_T; \tag{16}$$

此时扭矩 T_a 为:

$$T_a=(1-a/l)T. \tag{17}$$

根据式(12)、(16)、(17), 则扭转变形为:

$$\varphi_{C2}=((l-a)Fh)/(G I_T). \tag{18}$$

将双柱举升机顶端固联后, 弯曲变形降到了原来的 $(1-a/l)^3$, 扭转变形降到了 $1-a/l$, 变形幅度得到了极大降低; 因此, 在选择双柱举升机时, 在立柱底部良好安装的同时, 应将立柱顶端也固联在厂房钢结构上, 此举可大幅提升双柱举升机的刚度, 有效降低双柱举升机的运行振动, 固定立柱的顶端前后弯曲变形的对比如图 11 所示。

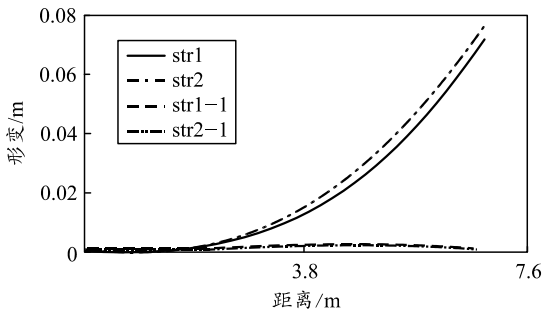


图 11 2 种结构优化前后弯曲变形对比

通过顶端固定, 各结构的弯曲变形都得到了明显改善, 最大形变由 7.6 m 的最高点转移到了立柱的中间, 2 种结构 C 点最大变形量都从 0.07 m 降到了 0.003 m, 顶部支撑对弯曲变形的改善非常明显。继续对比 2 种结构的扭转变形, 变型幅度如图 12 所示。

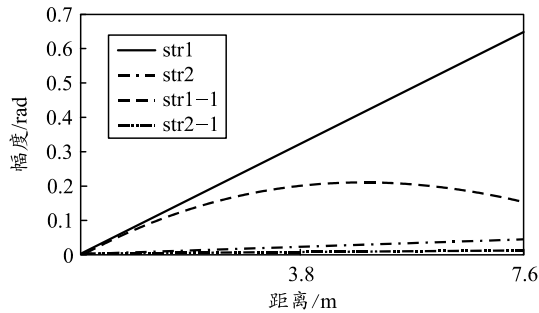


图 12 2 种结构优化前后扭转变形对比

顶端固定后, 扭转变形也得到了明显的好转, str2 扭转角度由 0.04 降为 0.01, str1 由 0.65 下降为 0.16。其中 str1 扭转变形改善非常明显, 但是由于其本身扭转刚度低, 扭矩大, 其扭转变形仍然远高于 str2 优化前的水平, 其运行时的扭转振动也高于 str2 优化前水平, 有必要进一步优化。

2.2 导轮布局优化设计

从式(14)可以看出: 扭转振动的扭矩大小是由

压力 F 和受力点距离型心的距离 h 决定; 压力 F 无法消除, 但是合理的布局能够减小 h , 通过让压力 F 受力点通过型心, 可以完全消除扭矩。尤其是针对构型 1, 其 H 型钢抵抗扭转变形的能力差, 更应该精心布局导轮, 降低直至消除扭矩。因此, 利用 H 型钢凹槽布局导轮并不合理, 而应该借鉴 str3 的导轮布局方式, 将导轮外置, 如图 13 所示, 此时 h 为 0, 由正压力 F 产生的扭矩 T 为 0, 举升机也不会产生扭转振动。

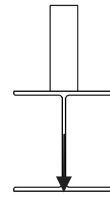


图 13 改进的 str1

3 种 str1 的扭转变形如图 14 所示。

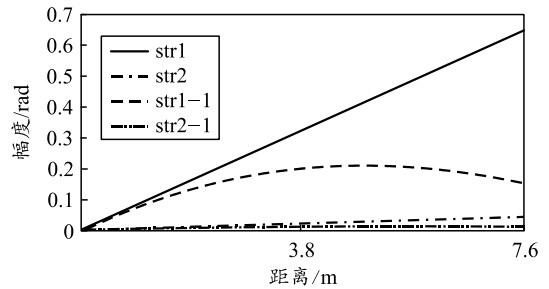


图 14 str1 优化前后扭转变形对比

经过消除扭矩的优化以后, str1 结构的扭转变形也降低为 0, 取得了较好的优化效果, 扭转振动得到了消除。

3 优化验证

某轿车厂总装车间安装有笔者所述的 3 种结构的双柱举升机, 其中 str1 和 str2 结构的双柱举升机用于白车身的输送, str3 的双柱举升机用于底盘总成的输送。输送底盘总成的 str3 结构的举升机是优化后的结构, 其双立柱与厂房钢结构固连。在运行过程中, 该结构的举升机布局合理, 升降运行平稳, 具有较高的可靠性。3 种结构对输送工件的影响如图 15 所示。

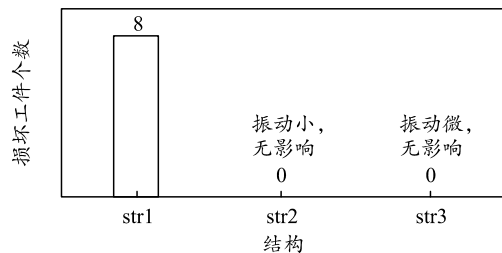


图 15 3 种结构对输送工件的影响

用于输送白车身的 str1 和 str2 结构的 2 种举升机呈现出截然不同的表现。str1 结构的举升机在升降中振动较大，振动引起了白车身引擎盖支杆的松动，严重时支杆会脱落，导致引擎盖掉落损坏，平均每个月因此损坏引擎盖 8 个；str2 结构的举升机在运行中存在微小振动，配重铁块偶尔会因振动出现轻微异响，但升降平稳，没有出现损坏白车身的情况。

如图 16 所示，由于振动对白车身伤害较大，因此需要对 str1 结构的双柱举升机进行优化。通过第 1 节的分析发现 str1 抗扭转刚度不足的问题；因此，通过在 H 型钢内侧凹槽焊接横向肋板的方式提升了 str1 立柱的抗扭刚度，此次优化后损坏的引擎盖数量有所减少，每月平均损坏工件数量降到了 5 件，但仍有引擎盖在持续损坏。

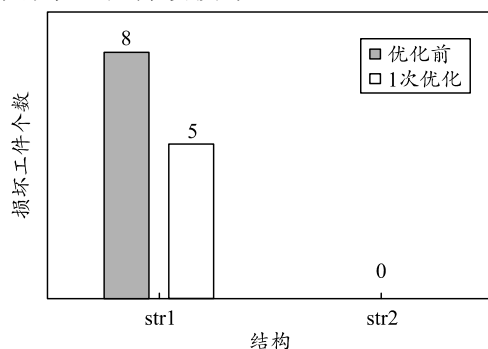


图 16 第 1 次优化前后对比

通过第一轮优化发现，打补丁的提升抗扭转刚度并不能彻底解决振动造成的引擎盖损坏问题。通过第 2 章的分析发现，将立柱与厂房钢结构固连可大幅降低举升机升降的振动，优化导轮布局更能从根本上降低振动的产生，通过第 2 轮优化，举升机的振动得到了根本性的控制，损坏工件的数量降到了 0，工件跌落的安全风险也得以消除。

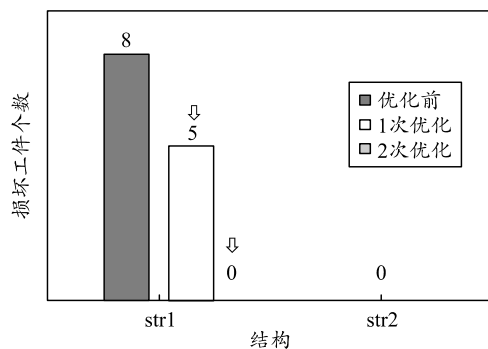


图 17 优化前后对比

4 结束语

双柱举升机的振动强弱直接决定举升机能否平稳高效地输送工件，需在设计时优先考虑。在立柱型材选择上，H 型钢抗弯曲变形能力结构效率差，同样的弯曲刚度下结构重量高出 1.64 倍；在导轮布局方面，导轮正压力与型心的距离越小越好，能直接施加在型材的型心上为最佳，此时可以避免型材受到扭矩，有效避免扭转变形的产生；在存在扭转力矩的情况下，方钢管扭转刚度高、变形小、振动小，弯曲刚度接近的 H 型钢扭转刚度只有方钢管的 7.5%，扭转变形将引起严重振动，存在重大设计风险；因此，双柱举升机立柱应尽量避免选择 H 型钢，优先选择方钢管。

对于已选用 H 型钢立柱的举升机，直接更换立柱存在工程投资大、工期长的问题，通过局部优化的方式也可以解决运行振动大的问题。首先应该对举升机立柱的顶端增加支撑，通常是将立柱与厂房钢结构固连；其次，优化导轮布局，导轮应布局在肋板正前方并居中，消除扭转变形。

实际使用结果验证了笔者的分析，尤其是 H 型钢扭转刚度太差，简单增加肋板的补强方式无法消除 str1 结构的固有缺陷，需要依据第 2 节的方式从加强支撑以及消除扭矩的方向去改造举升机，消除其振动缺陷。

参考文献：

- [1] FENG S, LIANG Y, CHEN J, et al. Research on the change of traction force of elevator after decoration[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2030(1): 23-28.
- [2] MASLENNIKOV V A, KANEN M H F. Rationale for the necessity of technical inspection lines for motor vehicles in residential areas[J]. Vestnik MGSU, 2016(1): 161-169.
- [3] 金鑫, STEFAN S, 许剑锋. 浅谈输送举升机阻挡优化设计及高空安全性[J]. 中国设备工程, 2017(13): 60-61.
- [4] 吴英坤. 液压传动式双柱举升机抖动故障的解决方案[J]. 汽车保养与维修, 2020(8): 73-75.
- [5] 黄火辉. 关于汽车举升机的设计与研究[J]. 机电产品开发与创新, 2017, 30(1): 50-52.
- [6] 单辉祖. 材料力学 I[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 58-68.
- [7] 秦大同, 谢里阳. 现代机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.