

吊篮悬挂机构的力学分析

李依伦^{*,1)} 陈伟民[†]

^{*}(北京航空航天大学中法工程师学院, 北京 100191)

[†](中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

摘要 高处作业吊篮是一种高层建筑外墙装修施工的设备, 吊篮悬挂机构是架设在高层建筑顶部, 通过钢丝绳承受悬吊平台、额定载荷的钢结构架. 该文通过吊篮悬挂机构的力学分析, 基于一个非常简单的组合杆件展示了杠杆平衡、杆件强度合理设计、安全性评估等多方面内容. 这种在日常生活中随处可见的实例不仅可以作为基础力学教学的素材, 更可成为学生课程设计极好的题目: 培养学生认真观察、独立思考、综合运用相关知识分析与解决工程实际问题的能力.

关键词 材料力学, 应力分析, 安全性评估

中图分类号: O341 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-14-102

ANALYSIS OF MECHANICS CHARACTER FOR HIGH PLACE OPERATION BASKET

LI Yilun^{*,1)} CHEN Weimin[†]

^{*}(Beihang Sino-French Engineer School, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

[†](Lab. of Environmental Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China)

Abstract High-place operation basket is used to support the operations of decorating outer walls of high-rise buildings. Hanging suspension machine of the basket is a steel structure set up on the top of high building to support overhanging platform and to bear designed load through the steel wire rope. Based on the mechanical analysis of the hanging suspension machine of the basket, the issues on lever balance, rational design of the strength of member bar and safety assessment are studied for a simple model, a compound rods. This kind of popular issues in reality could be good examples for basic education of mechanics and used as project for students' design course to improve their academic abilities like deeper observation, independent thought-creation, comprehensive knowledge utilization to analyze and solve practical problems.

Key words mechanics of materials, stress analysis, safety assessment

随着城市建设的发展高层建筑愈来愈多, 在大中城市的商业区, 高层建筑已然占据主导地位. 这些建筑多采用玻璃幕墙结构, 这种外墙结构的安装、维护与日常清洗都用到一种设备——电动吊篮. 图 1 是笔者近期在学校教学楼玻璃幕墙清洗维护时拍

摄的照片, 观察工人的工作引发了我的思考: 如此沉重的结构是如何悬吊在空中的? 或者说楼顶如何固定悬吊钢索?

建筑顶层由于防水需要都有防水层, 不允许在楼顶打孔安装以避免破坏防水层; 一般在顶层也不

本文于 2014-04-08 收到.

1) 李依伦, 本科生. E-mail: litiancai@126.com

引用格式: 李依伦, 陈伟民. 吊篮悬挂机构的力学分析. 力学与实践, 2015, 37(2): 210-213

Li Yilun, Chen Weimin. Analysis of mechanics character for high place operation basket. *Mechanics in Engineering*, 2015, 37(2): 210-213

会有合适的突起物件固定钢索，况且清洗位置的变动需要多个固定点；就算顶层有足够的固定点，如此沉重的结构会不会把固定点结构破坏。

在“几思不得其解”后到顶层拍下照片(图 2)，恍然大悟，原来就是杠杆原理！仔细观察照片，发现钢架之上有钢丝绳，其作用如何值得思考，于是现场观察工人安装过程，并通过与工人交谈得知该钢丝绳需要预紧调节。带着问题查阅了相关资料^[1-5]并与专业教师进行了交流，有了以下的分析过程。通过观察、思考与分析的交错过程，发现：对于看似复杂的问题可能有非常简单的解决方案，但简单的解决方案在设计时并不简单，同样需要严谨的科学分析才能保证安全。



图 1 吊篮作业图



图 2 吊篮悬挂机构图

1 吊篮悬挂机构介绍与平衡分析

图 3 是电动吊篮的整体结构示意图，其中的悬挂机构的结构细节与简化受力图分别如图 4 的上下部分。

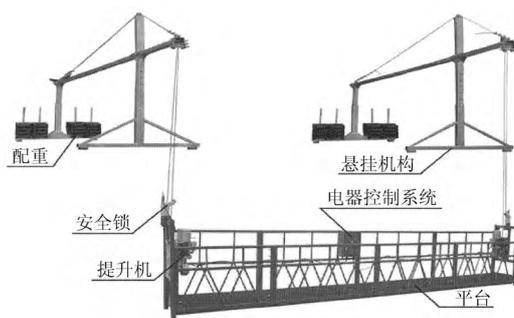


图 3 电动吊篮整体结构示意图

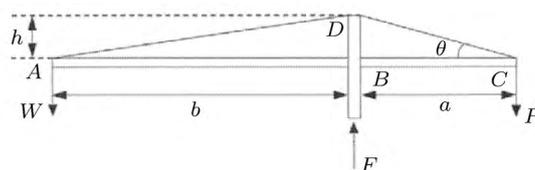


图 4 悬挂机构结构细节与受力图

由图 4 可知，吊篮自重与额定载荷之和由 2 个悬挂机构共同承担，以工程常用的 ZLP800 型电动吊篮为例，每个悬挂机构承担极限质量约 700 kg，其尺寸数据如表 1。

表 1 悬吊机构几何数据

梁横截面	80 mm×80 mm×4 mm	前梁 a	1.5 m
钢丝绳长度 l	6.0 m	后梁 b	4.2 m
上撑杆 h	0.85 m	夹角 θ	29.5°
钢丝绳直径	9 mm×4 根		

抛开结构细节，从整体上看悬挂机构就是一副杠杆机构，最小平衡配重为

$$W = \frac{Pa}{b} \doteq 2453 \text{ N} \quad (1)$$

大约 10 块 25 kg 的配重即可保证平衡。事实上，为了保证安全，工程上需要满足抗倾覆系数 K 大于 2.0 的要求，其定义为

$$K = \frac{Wb}{Pa} \quad (2)$$

所以配重块在 20 块以上，正常使用情况下楼面在配重处提供支撑作用。

2 吊篮悬挂结构应力分析

尽管杠杆平衡并不依赖于梁架结构的细节设计，但杠杆平衡的前提条件是梁架结构本身在强度上满足安全性条件，所以对梁架进行应力分析是非常必要的。另外，观察图 2 中的悬挂机构，相对于钢梁而言，其上的钢丝绳非常纤细（注意该斜拉钢

丝与悬挂吊篮的钢索并无关系),其作用如何值得思考.为此给出悬挂机构的分析简图(如图5),其中需要说明A点简化为铰支端的原因是配重重量大于杠杆平衡所需重量,相当于A点铰接于地面,这与自由端C点完全不同.

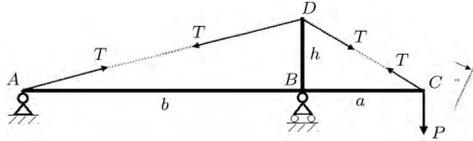


图5 悬挂机构分析简图

如果 $T = 0$ 即斜拉钢丝不存在,图中前梁根部(图中B点)主要承受弯曲应力

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W_x} = \frac{Pa}{W_x} \quad (3)$$

代入数据可得最大弯曲应力约为 350 MPa,该数据大大超过钢梁的允许使用应力.分析C点挠度

$$w = \frac{Pa^2(a+b)}{3EI} = 119 \text{ mm} \quad (4)$$

该变形已然超过梁横截面尺寸,属于大变形范畴,在实际工程中也不允许出现.

如果有钢丝绳存在 ($T \neq 0$),由于钢丝绳伸长与横梁C点挠度必须协调,则由图6(a)可得变形协调条件

$$\Delta l \sin \theta = w \quad (5)$$

其中, Δl 为钢丝绳拉伸变形, w 为C点弯曲挠度,由外伸梁与拉压变形关系

$$w = \frac{(P - T \sin \theta)a^2(a+b)}{3EI}, \quad \Delta l = \frac{Tl}{EA} \quad (6)$$

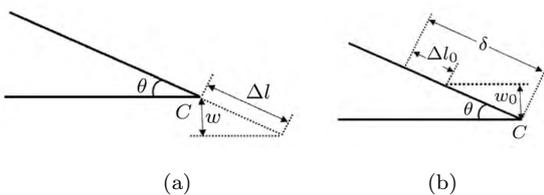


图6 变形协调图

由此可解得张力 $T = 13926 \text{ N}$,从而获得B点弯矩 $(P - T \sin \theta)a$ 与轴向压力 $T \cos \theta$, 此时

$$\sigma_{\max} = \frac{(P - T \sin \theta)a}{W_x} + \frac{T \cos \theta}{A} \doteq 11 \text{ MPa} \quad (7)$$

C点挠度小于 0.17 mm,钢丝绳承受拉伸应力约为 55 MPa.由此可以看出,实际的主承力构件为钢丝

绳,后梁根部的最大应力下降 30 倍,且以轴向压缩应力为主;挠度下降 720 倍.造成该现象的原因在于梁的弯曲刚度相比钢丝绳的拉伸刚度是小量(二者刚度相差 700 倍),在协调变形条件下梁承受的横向载荷极小(不到 10 N).

以上的分析建立在钢丝绳与钢架结构完美连接的基础上,实际结构中的钢丝绳往往是松弛状态,加上钢丝绳拉伸方向的位移极小(以上分析中钢丝绳的拉伸变形为 0.327 mm),所以为了防止实际使用过程中钢丝绳松弛导致变形协调失效,钢丝绳需要预紧.

如果空载情况下预紧力为 T_0 ,其变形协调如图6(b)所示,则

$$w_0 = \frac{T_0 \sin \theta}{3EI} a^2(a+b), \quad \Delta l_0 = \frac{T_0 l}{EA} \quad (8)$$

$$\frac{w_0}{\sin \theta} + \Delta l_0 = \delta \quad (9)$$

δ 为空载预紧后C点的位移.预紧后再受载时,总体变形协调条件为

$$\frac{w}{\sin \theta} = \Delta l - \delta \quad (10)$$

由此获得钢丝绳张力 T 与预紧张力 T_0 之间的关系

$$T = 2.028P + T_0 \quad (11)$$

进而得到不同预紧张力条件下横梁危险点应力与钢丝绳中应力如表2.

尽管以上对钢丝绳预紧进行了详细的分析,但实际上由表2或式(11)可以看出,预紧力 T_0 在钢丝绳张力 T 中所占比例极小,改变预紧力对结构中应力的影响甚微,所以预紧力的主要作用是防止钢丝绳松弛不起作用,而不是减小结构应力.由于预紧力的大小对结构应力与安全影响有限,所以在工人操作中无需特别要求预紧精度.

表2 不同预紧张力下横梁危险点应力与钢丝绳中应力

预紧力 T_0	张力 T	梁应力 σ_{\max}^B	钢丝绳应力 σ_{\max}^T
0	13 926 N	10.45 MPa	54.73 MPa
100 N	14 026 N	12.07 MPa	55.12 MPa
200 N	14 126 N	14.66 MPa	55.51 MPa
300 N	14 226 N	17.24 MPa	55.90 MPa

另外还可对钢管构件进行压杆稳定性分析,对于以上结构,由于失稳临界载荷远大于工作状态下的压力,所以此处不再列出.

3 其他因素的影响

为了保证结构的安全使用, 还需对使用过程中有可能出现的意外载荷进行分析, 例如由于风载或者人为拖曳造成吊篮偏置, 或由于重物坠落造成动态冲击等等. 高明敏^[4]分析了由于风载与物体意外坠落时可能造成的水平载荷, 给出图 7 中 x 与 y 方向载荷大小在 1000~2000 N 之间.

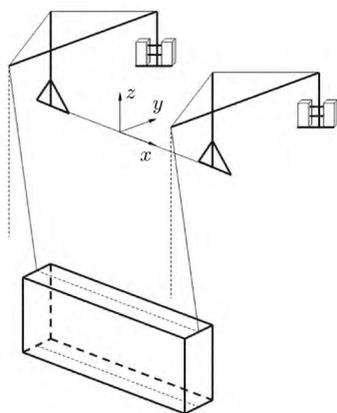


图 7 载荷偏置示意图^[4]

x 方向的偏置载荷对于强度的影响值得考虑, 主要原因是横梁在 x 方向的弯曲刚度与 z 方向一致, 但缺少了钢丝绳的“帮助”, 以 $F_x = 2000$ N 为例, 弯曲应力

$$\sigma_{\max} = \frac{F_x a}{W_z} = 102 \text{ MPa} \quad (12)$$

该数值大大超过垂直载荷造成的弯曲应力, 所以控制吊篮使用条件, 规定最大使用风速是非常必要的. 事实上, 我们可以设想对悬挂机构进行改进: 仿照垂直面内钢丝绳的设计, 在横梁水平面内对称布置预紧钢丝绳. 这样就可对抗由于风载造成的影响, 考虑到风载比垂直载荷小, 所需钢丝绳的直径和根数均可减小.

y 方向偏置载荷对强度的影响不大, 但需注意其对悬挂机构有整体的拖曳作用, 这种拖曳载荷依赖悬挂机构与楼顶之间的摩擦力平衡, 由图 4 所示的平衡分析, 楼顶地面所受总正压力约为 12000 N, 钢材与楼面的摩擦系数需大于 0.17 才能在极限状态下保证安全. 一般情况下, 钢与混凝土地面的摩擦系数大于 0.5, 所以安全应该有保障, 但对于光滑的地面或者出现有积水的情况, 摩擦系数将大大降低, 此时整体稳定问题需要考虑.

4 小结

高层建筑外墙作业吊篮是一种常见的装修施工设备, 其悬吊机构的结构看似非常简单, 但考察其安全性将涉及基础力学中的多个方面, 包括杠杆平衡、弯曲梁与拉压杆的应力分析、杆与梁组合变形协调问题、预应力问题、压杆稳定性分析以及合理设计与安全性评估等多方面内容. 同时作者通过问题的探究过程, 不仅对教科书的内容有了进一步的理解, 更为重要的是学习了如何分析与研究问题. 这种在日常生活中随处可见的实例不仅可以作为基础力学教学的素材, 更可成为学生课外设计极好的题目: 培养学生认真观察、独立思考、综合运用相关知识分析与解决工程实际问题的能力.

参 考 文 献

- 1 卢震. 高空作业施工平台力学特性研究. [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011
- 2 田申, 王定川, 谢家学. 吊篮悬挂机构的受力分析. 建筑机械化, 2013, (8): 66-68
- 3 徐艳华, 许芹祖, 段红莉等. 高处作业吊篮悬挂构架的有限元分析. 建筑机械化, 2006, (3): 36-37
- 4 高明敏. 水平载荷对吊篮悬挂机构的影响. 建筑机械化, 2007, (11): 41-44
- 5 耿青武, 吴玉厚, 张珂等. 高处作业吊篮悬挂机构强度分析. 建筑机械化, 2010, (7): 53-55

(责任编辑: 胡 漫)

(上接第 188 页)

- 11 左宇军, 李夕兵, 唐春安. 二维动静组合加载下岩石破坏的试验研究. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1809-1820
- 12 朱万成, 左宇军, 尚世明. 动态扰动触发深部巷道发生失稳破裂的数值模拟. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 915-921
- 13 潘一山, 王来贵, 章梦涛. 断层冲击地压发生的理论与实验研究. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 642-649
- 14 潘岳, 刘英, 顾善发. 矿井断层冲击地压的折迭突变模型. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 43-48
- 15 潘岳, 解金玉, 顾善发. 非均匀围压下矿井断层冲击地压的突变理论分析. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 310-314
- 16 沈新普, 泽鲁, 穆荣日. 求解层间界面反平面剪切破坏的剪切梁模型 (I)——基本特性. 应用数学和力学, 2000, 21(11): 1101-1108
- 17 刘延柱, 薛纭. 关于弹性梁的数学模型. 力学与实践, 2011, 22(1): 74-78
- 18 王省哲, 怡晓玲. 弹性力学问题复变函数解法的应用与发展. 力学与实践, 2008, 19(6): 110-113
- 19 缪协兴, 茅献彪, 周廷振. 采场老顶弹性地基梁结构分析与来压预报. 力学与实践, 1995, 17(5): 21-41
- 20 Mogi K. Study of the elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relation to earthquake phenomena, bull. *Earthquake Res Inst*, 1962, 40: 125-173

(责任编辑: 胡 漫)