

文章编号:1006-7329(2000)01-0109-06

板倒法吊装塔架结构危险工况分析

109-114
23

崔碧海, 赵长荣, 郑周练

(重庆建筑大学 建筑工程学院, 重庆 400045)

TU758.15
TU279.7

摘要:塔架结构是化工装置中的重要设施,根据其特点,常采用人字桅杆扳倒法吊装。塔架在吊装过程中所承受的载荷复杂、多变。分析、计算繁重。目前工程实际中往往采用经验或静态定性分析、计算,而忽略了吊装过程中的变化情况,不能合理地采取各种措施,易导致塔架破坏、吊装失败。本文在运动分析的基础上推导出了危险工况的计算公式,为吊装工艺设计提供了依据。

关键词: 吊装; 塔架结构; 危险工况分析

中图分类号: TU745.7

文献标识码: A

塔架结构是化工装置中的重要设施,它通常是火炬放空管和烟囱的载体。它的结构形式一般是上小下大的四棱(或三棱)体空间桁架。其主要特点是:(1)高,一般在100m~200m,(2)重,一般在100t以上。(3)体积大,其下部边长通常在20m~30m。(4)强度、刚度、稳定性差。同时,由于其上的火炬放空管和烟囱如待塔架吊装就位后再安装较为困难,通常施工中往往将其组装到塔架上后整体吊装,这更增加了吊装载荷和吊装难度。实际工程中,常有塔架在吊装过程中因强度、稳定性不够而折断破坏的重大事故发生,给国家和集体造成巨大经济损失。因此塔架的吊装是化工装置安装施工中的重点和难点。

根据塔架结构的特点,常采用的吊装工艺是人字桅杆扳倒法吊装。其基本原理如图1,桅杆直

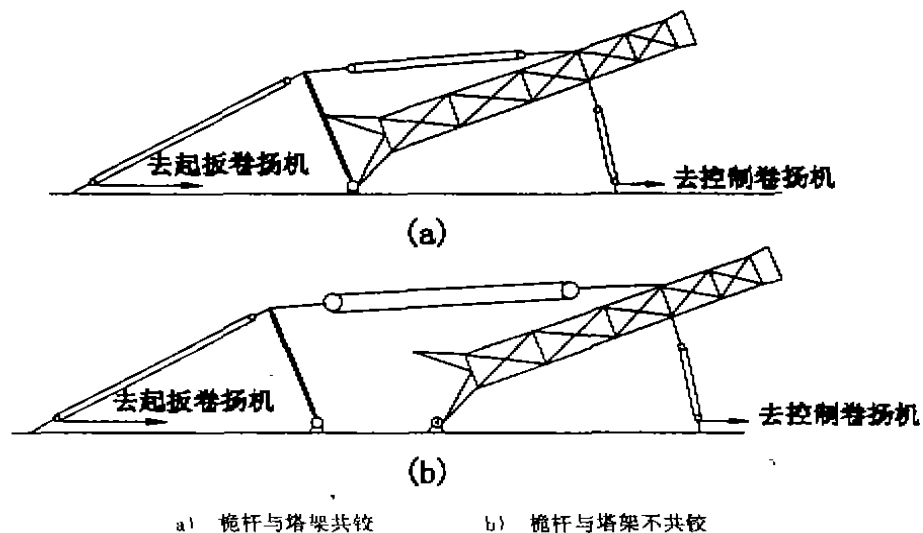


图1 扳倒法吊装示意图

立,塔架倾斜,其下部均支承于旋转铰链上,头部用滑车组相联。吊装时,用缆风绳将桅杆扳倒,在联结滑车组的作用下,塔架绕其旋转铰链旋转而直立,达到吊装目的。

根据塔架的结构、附着装置、现场布置等具体情况,该吊装工艺主要有桅杆与塔架共铰和不共

收稿日期:1999-09-30

作者简介:崔碧海(1955-),男,重庆人,重庆建筑大学讲师,主要从事建筑安装研究。

铰两种布置, 所谓共铰, 指的是桅杆和塔架支承于同一旋转铰链上。而不共铰, 指的是桅杆和塔架支承于各自的旋转铰链上, 两铰链相隔一定的距离。

采用该工艺进行吊装, 在整个运动过程中, 桅杆、塔架、联结滑车组三者相对运动关系复杂, 尤其是在塔架与桅杆不共铰时, 三者的组合形状、组合重心位置均随着塔架的旋转而发生改变, 由此而导致塔架、桅杆的受力状况也在随时发生改变, 是一个典型的时变结构。

1 塔架结构的破坏形式

吊装过程中, 最危险的是塔架, 这有两方面的原因:

1) 吊装过程中塔架仅由其中的两根主肢承受所有载荷, 其强度和稳定性均较弱。实际工程中常发生受力主肢整体失稳破坏和受力主肢在接近铰链的根部发生局部失稳破坏。

2) 塔架在吊装过程中所承受的载荷复杂、多变, 分析、计算繁复。目前工程实际中往往采用经验或静态定性分析、计算, 而忽略了吊装过程中的变化情况, 不能合理地采取各种加强措施, 易导致塔架破坏、吊装失败。

要保证吊装的顺利完成, 必须在运动分析的基础上推导出危险工况的计算公式, 并按该危险工况校核塔架结构和桅杆的强度和稳定性, 为吊装工艺设计提供依据。

2 运动分析

2.1 塔架与桅杆共铰时塔架、桅杆、联结滑车组三者角度变化关系

吊装过程中, 塔架与桅杆绕同一铰转动, 联接滑车组仅承受拉力, 且定动滑车无相对运动, 可以视为一刚性杆, 则桅杆、塔架与联结滑车组可近似看成一刚性三角体, α_0 不随塔架旋转角 φ 的变化而变化, 为固定的初始值。

2.2 塔架与桅杆不共铰时塔架、桅杆、联结滑车组三者角度变化关系

简化如图 2, 由于在起升旋转过程中, 塔架与桅杆绕不同的铰旋转, 联结滑车组也仅承受拉力, 且定动滑车无相对运动, 可以将整个装置看成一四联杆机构。随着塔架倾角 φ 的变化, 联结滑车组与塔架的夹角 α 、与桅杆的夹角 γ 均将发生变化。

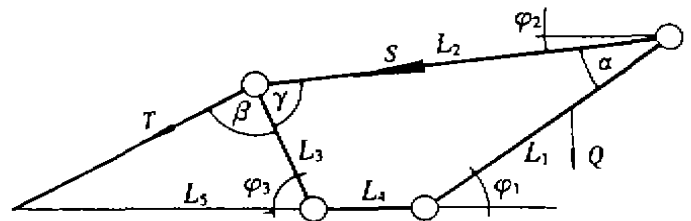
令 L_1 、 L_2 、 L_3 分别代表塔架吊点至铰支点的长度、联结滑车组的长度、桅杆吊耳点至铰支点长度, L_4 代表两铰支点的水平距离, φ_1 、 φ_2 、 φ_3 分别代表塔架、联结滑车组、桅杆与水平线的夹角 (φ_{10} 代表塔架在吊装前的初始倾角), α 代表联结滑车组与塔架的夹角 (α_0 表示在开始起扳前的初始夹角), γ 代表联结滑车组与桅杆的夹角 (γ_0 表示在开始起扳前的初始夹角)。

根据几何关系并整理有:

$$\cos \varphi_3 = \frac{-A \pm \sqrt{1+B^2-A^2}}{1+B^2} \quad (1)$$

式中:

$$A = \frac{a^2 + b^2 + L_3^2 - L_2^2}{2a L_3}$$



L_1 —塔架 L_2 —联结滑车组 L_3 —桅杆
 L_4 —两铰链间距离 L_5 —桅杆铰至起扳锚点距离

图 2 运动分析图

$$B = \frac{b}{a}$$

$$a = L_1 \cdot \cos \varphi_1 + L_4$$

$$b = L_1 \cdot \sin \varphi_1$$

(1) 式表达了在吊装旋转过程中, 塔架倾角 φ_1 与桅杆倾角 φ_3 的关系, 应用时应注意到当 $\varphi_1 = \varphi_{10}$ 时, $\varphi_3 = 90^\circ$ 。

根据余弦定理有:

$$\cos \alpha = \frac{L_1^2 + L_2^2 - L_3^2 - L_4^2 - 2 L_3 \cdot L_4 \cdot \cos \varphi_3}{2 L_1 \cdot L_2} \quad (2)$$

$$\cos \gamma = \frac{L_1^2 + L_3^2 - L_2^2 - L_4^2 - 2 L_1 \cdot L_4 \cdot \cos \varphi_1}{2 L_2 \cdot L_3} \quad (3)$$

(2) 式表达了联结滑车组与塔架的夹角 α 随桅杆倾角 φ_3 的变化而变化的关系, 结合 (1) 式, 可以换算成 α 随塔架倾角 φ_1 的变化而变化的关系。(3) 式表达了联结滑车组与桅杆的夹角 γ 随塔架倾角 φ_1 的变化而变化的关系, 结合 (1) 式, 可以换算成 γ 随桅杆倾角 φ_3 的变化而变化的关系。

3) 桅杆与起扳缆风绳夹角 β 与桅杆倾角 φ_3 的变化关系

如图 2, 令桅杆铰支点至起扳地锚的距离为 L_5 , 桅杆与起扳缆风绳的夹角为 β (β_0 代表起扳前的初始角)。根据几何关系有:

$$\beta = 90^\circ - \varphi_3 + \arcsin \left(\frac{L_5 - L_3 \cdot \cos \varphi_3}{L_3 \cdot \sin \varphi_3} \right) \quad (4)$$

3 塔架危险工况分析

塔架在起升旋转过程中, 随着塔架倾角的改变, 其最大内力也随之不断变化, 究竟塔架倾角在什么角度时, 其最大内力达到极值, 塔架处于危险工况, 本节将分两种情况加以分析。

3.1 塔架与桅杆共铰

简化装置如图 3, 根据运动分析, 塔架与联结滑车组在起升旋转过程中, 相对位置不变, 即:

$$\alpha = \alpha_0$$

(1) 轴力 N_1

令联结滑车组拉力为 s , 取塔架为隔离体。

$$s = \frac{l_1}{L_1} \cdot Q \cdot \frac{1}{\sin \alpha_0} \cdot \cos \varphi_1$$

式中: l_1 为塔架重心至铰支点距离, Q 为塔架计算重量。

则: 轴力 N_1 为:

$$N_1 = s \cdot \cos \alpha_0 + Q \cdot \sin \varphi_1 = \frac{l_1}{L_1} \cdot Q \cdot \frac{\cos \alpha_0}{\sin \alpha_0} \cdot \cos \varphi_1 + Q \cdot \sin \varphi_1$$

取其导数:

$$N_1' = \frac{l_1}{L_1} \cdot Q \cdot \frac{\cos \alpha_0}{\sin \alpha_0} \cdot \sin \varphi_1 - Q \cdot \cos \varphi_1$$

当 $N_1' = 0$ 时

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{l_1}{L_1} \cdot \operatorname{tg} \alpha_0$$

即: 塔架在起升旋转过程中, 出现最大轴力的角度为

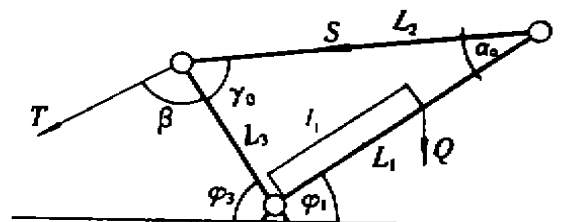


图 3 共铰时的受力分析图

$$\varphi_1 = \arctan \left(\frac{l_1}{L_1} \cdot \tan \alpha_0 \right) \quad (5)$$

(2) 弯矩 M_1 :

塔架承受的弯矩与载荷分布有关,塔架载荷较为复杂,首先,塔架是变截面空间桁架,其自重沿全长呈不均匀分布,又不一定成线性关系。其次,塔架自重以及其上的负载(如烟囱、火炬管等)均靠腹杆分段传递到受力主肢上,受力性质为分布集中力。为便于分析,并从安全的角度考虑,将所有载荷当作集中力作用在重心上。

$$M_1 = s \cdot \sin \alpha_0 \cdot (L_1 - l_1) = \frac{l_1}{L_1} \cdot Q \cdot (L_1 - l_1) \cdot \cos \varphi_1 \quad (6)$$

由(6)式可知,塔架全长上的最大弯矩随其起升旋转,是按余弦函数曲线变化,其最大值在开始起扳前的初始倾角处。随着塔架的逐渐直立,其值逐渐减小。

(3) 塔架受力主肢应力极值点:

造成塔架破坏的是由弯矩和轴力共同作用下的应力,由于最大弯矩和最大轴力出现的角度不同,则应分析清楚由弯矩和轴力共同作用下的最大应力值出现的角度。

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{M_1}{W_1} + \frac{N_1}{F_1} \\ &= \frac{\frac{l_1}{L_1} \cdot Q \cdot (L_1 - l_1)}{W_1} \cdot \cos \varphi_1 + \frac{\frac{l_1}{L_1} \cdot Q \cdot \operatorname{ctg} \alpha_0}{F_1} \cdot \cos \varphi_1 + \frac{Q}{F_1} \cdot \sin \varphi_1 \end{aligned}$$

取导数并令导数为零,可得:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{W_1 \cdot L_1}{F_1 \cdot (L_1 \cdot l_1 - l_1^2) + W_1 \cdot l_1 \cdot \operatorname{ctg} \alpha_0} \quad (7)$$

由(7)式即可求得弯矩和轴力共同作用下的应力出现最大值时的角度,吊装时应按此角度下的应力校核塔架。

3.2 塔架与桅杆不共铰

如图 2,从(1)式、(2)式、(3)式可知,由于塔架、桅杆各自绕不同的铰支点旋转,联结滑车组与塔架的夹角 α 随着塔架倾角 φ_1 的改变而改变,且关系复杂,于分析和计算均十分不便,也易出现错误。应按最危险状态简化,即按 α 为最小时简化。

分析(2)式

$$\cos \alpha = \frac{L_1^2 + L_2^2 - l_1^2 - l_2^2 - 2L_1 \cdot L_2 \cdot \cos \varphi_1}{2L_1 \cdot L_2} \quad (0^\circ < \varphi_1 < 90^\circ)$$

当 $\varphi_1 = 90^\circ$ 时, $\alpha = \alpha_0$,随着 φ_1 的增大, φ_2 减小, α 角增大,即当 $\alpha = \alpha_0$ 时,最 α 小。因此,可以近似地,偏安全地用 α_0 取代 α 进行分析和计算。这样,不共铰的状况简化成共铰的状况,对塔架校核而言,可按(5)、(6)、(7)式进行计算。

4 桅杆的危险工况分析

桅杆的危险工况主要取决于起扳缆风绳的拉力 T 、联结滑车组拉力 s 和桅杆自重 G 的综合影响,其中,由于自重 G 相对 T 和 s 要小得多,其对危险工况的影响也就相对要小得多。所以,塔架的危险工况并不一定是桅杆的危险工况。仍须分共铰和不共铰两种情况分析。同时,由于桅杆自重对危险工况的影响相对小得多,为便于分析,暂略去其影响(注意:校核桅杆稳定性时,不应略去自重的影响)。

4.1 桅杆与塔架共铰

如图 3,令起扳缆风绳的拉力为 T 。

取桅杆为隔离体, 根据力的平衡有:

$$T = S \cdot \frac{\sin \gamma_0}{\sin \beta}$$

则桅杆轴力为:

$$N = S \cdot (\operatorname{ctg} \beta \cdot \sin \gamma_0 + \cos \gamma_0) \quad (8)$$

式中:

$$s = \frac{l_1}{L_1} \cdot Q \cdot \frac{1}{\sin \alpha_0} \cdot \cos \varphi_1$$

分析:

(1) 由于桅杆与塔架共铰, γ_0 为常量, 不随桅杆倾角变化而变化。

(2) 联结滑车组拉力 S 是塔架倾角 φ_1 的函数, 亦是桅杆倾角 φ_3 的函数, 当 φ_3 减小时, φ_1 增大, $\cos \varphi_1$ 减小, S 减小。

(3) 起扳缆风绳与桅杆的夹角 β 是桅杆倾角 φ_3 的函数, 当 φ_3 减小时, β 增大, $\operatorname{ctg} \beta$ 减小。

由此可以得出结论:

桅杆轴力随其倾角的减小而减小, 最危险工况是在起扳初始状态, 即为 90° 时。应按 $= 90^\circ$ 校核桅杆。

4.2 桅杆与塔架不共铰

装置简化如图 2。取桅杆为隔离体, 可得

$$N = S \cdot (\operatorname{ctg} \beta \cdot \sin \gamma + \cos \gamma) \quad (9)$$

式中:

$$S = \frac{l_1}{L_1} \cdot Q \cdot \frac{\cos \varphi_1}{\sin \alpha}$$

由于桅杆与塔架不共铰, 由前面的运动分析可知, 随着桅杆倾角 φ_3 的变化, 塔架与联结滑车组的夹角 α 、塔架的倾角 φ_1 、联结滑车组与桅杆的夹角 γ 和起扳缆风绳与桅杆的夹角 β 均随之发生变化, 且函数关系复杂。经计算机分析, 得出轴力 N 与桅杆倾角 φ_3 的变化曲线如图 4。

由图 4 可知, 随着 φ_3 的减小, 轴力 N 也随之减小, 所以, 危险工况是起扳初始状态, 即 φ_3 为 90° 时, 桅杆受力最危险, 应按 $\varphi_3 = 90^\circ$ 校核桅杆。

值得注意的是, 实际工程中, 常将桅杆有意向前倾斜数度, 即大于 90° , 想以此减小塔架的载荷。由图 4 可知, 当 φ_3 大于 90° 时, 轴力 N 也会增大。此举不仅不能明显改善塔架载荷, 还会增大桅杆的载荷, 是不合适的。

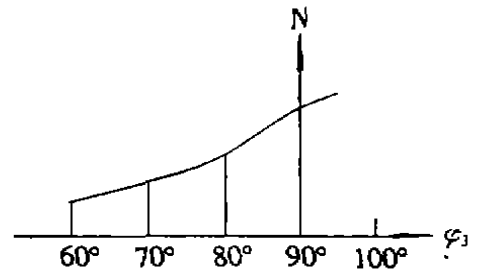


图 4 $\varphi_3 - N$ 图

5 总 结

综上所述, 桅杆扳倒法吊装塔架结构的危险工况对塔架和桅杆应分别处理:

5.1 对塔架

共铰与否, 均应按 (5)、(6)、(7) 式进行计算, 即: 塔架在起升旋转过程中, 出现最大轴力的角度为:

$$\varphi_1 = \arccos \left(\frac{l_1}{L_1} \cdot \operatorname{tg} \alpha_0 \right)$$

出现最大弯矩的角度为:

$$M_1 = \frac{l_1}{L_1} \cdot Q \cdot (L_1 - l_1) \cdot \cos \varphi_{10}$$

出现最大组合应力的角度为:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{W_1 \cdot L_1}{F_1 \cdot (L_1 \cdot l_1 - l_1^2) + W_1 \cdot l_1 \cdot \operatorname{ctg} \alpha_0}$$

5.2 对桅杆

共铰与否,其最危险工况均在起扳初始状态,即 $\alpha = 90^\circ$ 时。

设:塔架重心高度 l_1 与塔架吊装栓接点高度 L_1 之比 $= \frac{2}{3}$,塔架与联结滑车组的夹角 $\alpha_0 = 30^\circ$ (基本接近实际工艺布置),按(5)式算出塔架出现最大轴力的倾角(φ_1)为 41° 。事实上,实际工程中,塔架发生破坏的倾角多在 45° 左右。

另外值得注意的是实际布置时应保证两铰严格平行,否则,吊装中塔架将严重受扭而导致破坏。

参考文献:

- [1] 西北工业大学机械零件、机械原理教研室编. 机械设计(第二版)[M]. 北京:人民教育出版社,1979
- [2] 崔碧海. 扳倒法吊装架结构运动分析及临界计算[J]. 四川建筑,1999,(3)

Analyzing Danger Case of Lifting up Tower Structure by Way of Pulling down

CUI Bi-hai, ZHAO Chong-rong, ZHENG Zhou-lian

(Faculty of Civil Engineering, Chongqing Jianzhu University, 400045, China)

Abstract: Tower structures are important device in the chemical equipment. They were lifted up by pulled down shearlegs. Tower structures' load is complex and changeful within lifting up. It is multifarious to analyze and to compute. At present, because people always adopts experiential or static analyzing and computing, one neglects changed circumstance and can adopt irrationally kinds of measures. It leads to break down tower structures and be lost in lifting up. This paper deduces computing formulae of danger case and provides basis for design for technics of lifting up according to analyze movement.

Keywords: lift up; tower structure; analyzing danger case