

大型塔架吊装过程分析与实例*

林赞生 方德平 陈 锐

(华侨大学土木工程系, 泉州 362011)

摘要 对大型塔架吊装全过程进行几何及力学分析, 并编制相应的计算机软件. 文中还对某炼油厂 H331, H332 火炬塔的吊装过程进行计算及现场实测, 计算结果与实测值吻合良好.

关键词 吊装过程, 塔架, 几何分析, 力学分析, 计算机软件

分类号 TU 758. 15

吊装是大型设备安装的关键环节, 要求具有较高的施工水平和经验. 对于大型塔架的安装, 为避免高空作业的种种不便、缩短工期和保证质量, 通常先在地面制作, 然后经吊装而成^[1, 2]. 大型塔架高度高、重量大, 给吊装工作带来很大困难. 因此, 根据施工条件选择安全而又可行的吊装方案就显得尤为重要. 中石化二公司采用无锚点吊推法获得成功, 并积累了丰富的经验. 在某炼油厂大型火炬塔安装期间, 受该公司委托, 我们对无锚点吊推法进行了系统的研究.

1 吊推过程几何分析

如图 1 所示. 图中 $x'o'y'$ 为固定在地面的静坐标系, xoy 为固结在塔架上的动坐标系. PD 为门架(高度 l), 是吊装的主要设备. O' 点为塔架与地面连接的铰链, A, B, C 为吊点, 其中 PA 和 PB 分别为副前挂绳和主前挂绳. 通过在 P 点的滑轮相连, PC 为后挂绳, $O'D$ 为门架的轨道和推举索. 吊装的全过程由以下四个子过程接力完成: (1) 利用塔架自重起吊门架到规定角度 β_0 . (2) 紧前挂绳开始起吊塔架直到规定角度 α_1 , 同时门架到 β_1 . (3) 紧后挂绳直到塔架到达规定角度 α_2 , 同时门架到 β_2 . (4) 紧推举索使门架沿轨道向前移动开始推举, 直到合重心过铰链.

在吊推过程中, 以塔架高度 α 为控制变量, 只要求出门架角度 β , 便可确定 P 点的静坐标为 $x'_p = l_D - l \cos \beta$, $y'_p = l \sin \beta$. 经过坐标变换, 求出 P 点动坐标为 $x_p = (l_D - l \cos \beta) \cos \alpha + l \sin \beta \sin \alpha$, $y_p = l \sin \beta \cos \alpha - (l_D - l \cos \beta) \sin \alpha - d$. 根据 $P(x_p, y_p)$, 可求出各绳索长度为 $l_A = \overline{PA} = [(x_p - x_A)^2 + (y_p - y_A)^2]^{1/2}$; $l_B = \overline{PB} = [(x_p - x_B)^2 + (y_p - y_B)^2]^{1/2}$; $l_C = \overline{PC} = [(x_p - x_C)^2 + (y_p - y_C)^2]^{1/2}$. 受力分析所需的各角度(图 1)为 $\alpha_A = \cos^{-1}[(x_p - x_A)/l_A]$; $\alpha_B = \cos^{-1}[(x_p - x_A)/l_B]$; $\alpha_C = \cos^{-1}[(x_p - x_C)/l_C]$. 其中 x_A, y_A, \dots, y_C 为吊点 A, B, C 的坐标.

* 本文 1994-08-31 收到

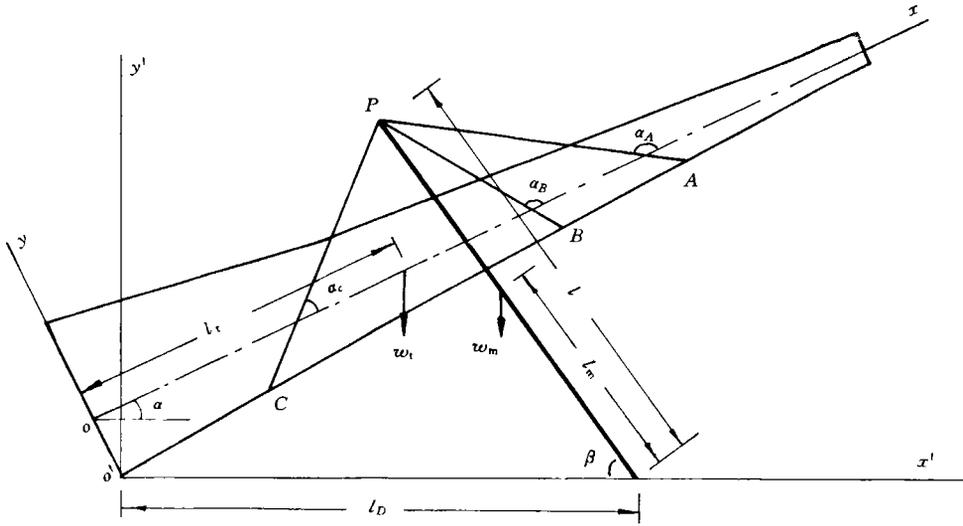


图1 吊推过程示意图

1.1 紧前挂过程

在此过程中,塔架从初始状态($\alpha = \alpha_0$)开始起吊,到规定角度 α_1 结束. 门架由初始角度 β_0 变化到 β_1 ,后挂绳长度 l_c 则保持不变. 在某一时刻塔架角度为 α ,紧前挂绳使其增加一小量 $\Delta\alpha$,此时体系可看成如图2所示三连杆机构. PC 作平面运动,速度瞬心在 E 点,因此有 $\Delta\alpha \cdot \overline{O'C}/\overline{EC} = \Delta\beta \cdot l/EP$,故

$$\Delta\beta = \frac{\Delta\alpha \cdot \overline{O'C} \cdot \overline{EP}}{\overline{EC} \cdot l} = \Delta\alpha \frac{\overline{O'C}(l - \overline{ED})}{l(\overline{O'E} - \overline{O'C})} \quad (1)$$

其中 $\overline{ED}, \overline{O'E}$ 由三角形 $O'ED$ 求得(图2). $\overline{ED} = l_D \sin\alpha / \sin(\alpha + \beta), \overline{O'E} = l_D \sin\beta / \sin(\alpha + \beta)$. 上式求得 $\Delta\beta$ 的第一次近似值 $\Delta\beta^{(1)}$,由 $\alpha = \alpha + \Delta\alpha$ 及

$$\beta^{(n+1)} = \beta^{(n)} + \Delta\beta^{(n)} \quad (2)$$

可求出新一轮后挂绳长度 $l_c^{(n+1)}$,其误差为 $\Delta l_c^{(n+1)} = l_c - l_c^{(n+1)}$. $\Delta\beta$ 的进一步近似值可由以下迭代式求得

$$\Delta\beta^{(n+1)} = k_1 \Delta l_c^{(n+1)} / l \quad (3)$$

式中 k_1 为加快迭代速度的因子,可取 $k_1 = 1.5$. 重复使用迭代式(2),(3),直到满足收敛条件为止,其收敛条件为 $\Delta l_c^{(n+1)} / l_c \leq 10^{-5}$.

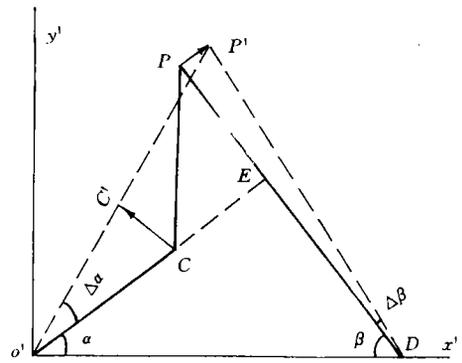


图2 紧前挂过程示意图

1.2 紧后挂过程

这一过程塔架角度由 α_1 开始增加到 α_2 ,门架角度由 β_1 变化到 β_2 . 前挂绳平均长度为

$$l_{AB} = (n_1 l_A + n_2 l_B) / (n_1 + n_2) \quad (4)$$

式中 n_1 为副前挂 PA 的根数; n_2 为主前挂 PB 的根数.

l_{AB} 应保持不变. 在某一时刻塔架角度 α ,紧后挂绳使 α 增加一小量 $\Delta\alpha$,求 $\Delta\beta$ 的方法与前类似(见图3), $\Delta\beta$ 的第一次近似值为

$$\Delta\beta^{(1)} = -\Delta\alpha \frac{(l - \overline{ED}) \cdot \overline{O'A}}{l(\overline{O'A} - \overline{ED})} \tag{5}$$

由 $\alpha + \Delta\alpha$ 以及新一轮 β 值,即

$$\beta^{(n+1)} = \beta^{(n)} + \Delta\beta^{(n)}, \tag{6}$$

可求出新一轮前挂平均长度 $l_{AB}^{(n+1)}$,其误差为 $\Delta l_{AB}^{(n+1)} = l_{AB} - l_{AB}^{(n+1)}$. $\Delta\beta$ 的进一步近似值为

$$\Delta\beta^{(n+1)} = k_2 \Delta l_{AB}^{(n+1)} / l, \tag{7}$$

式中 k_2 与 k_1 一样,为加快迭代速度的因子,取 $k_2 = 0.3$. 重复使用迭代式(6),(7),直到满足收敛条件($\Delta l_{AB} / l_{AB} \leq 10^{-5}$)为止.

1.3 推举过程

紧后挂结束时,塔架角度 $\alpha = \alpha_2$. 此时推举开始,直到塔架和门架的合重心过铰链为止. 该过程通过紧推举索使门架沿地面轨道向前移动,即通过使 l_D 减小来实现. l_A, l_B 及 l_C 保持不变,也就是说, P 点相对于塔架不动,因此可视为与塔架形成一整体(图 4), α' 可先求出.

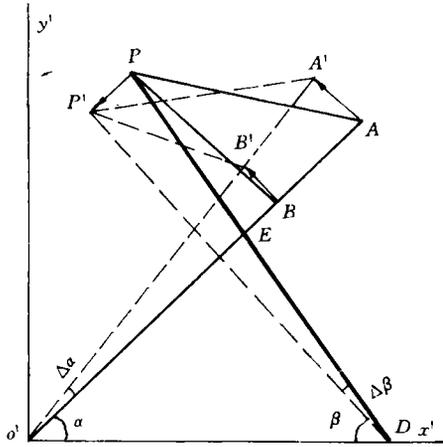


图 3 紧后挂过程示意图

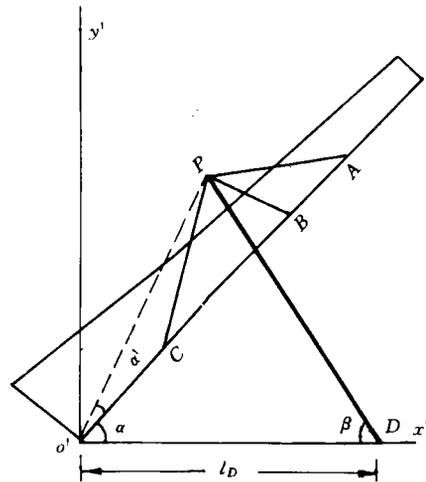


图 4 推举过程示意图

推举过程的某一时刻塔架角度 α ,在三角形 $O'PD$ 中,利用正弦定理可得 $\sin\beta = \overline{O'P} \sin(\alpha + \alpha') / l, l_D = l \cos\beta + \overline{O'P} \cos(\alpha + \alpha')$.

应当指出,以上几何分析均针对双前吊点(吊点 A, B)的情况. 实际上,为使塔架受力更均匀,通常采用多前吊点(吊点 $1, 2, \dots, m$)的做法(参见图 6). 此时,只要在紧后挂过程中,把式(4)改为

$$l_{AB} = \frac{n_1 l_1 + n_2 l_2 + \dots + n_m l_m}{(n_1 + n_2 + \dots + n_m)} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i l_i}{\sum_{i=1}^m n_i}, \tag{8}$$

式中 l_i 为与吊点 i 对应的前挂绳长度; n_i 为与吊点 i 对应的前挂绳根数. 其余算式仍然成立.

2 吊推过程受力分析

2.1 双前挂情况

塔架及门架受力如图 5 所示. 塔架重量及重心高为 w_1 及 l_1 ,门架重量及重心高为 w_m 及

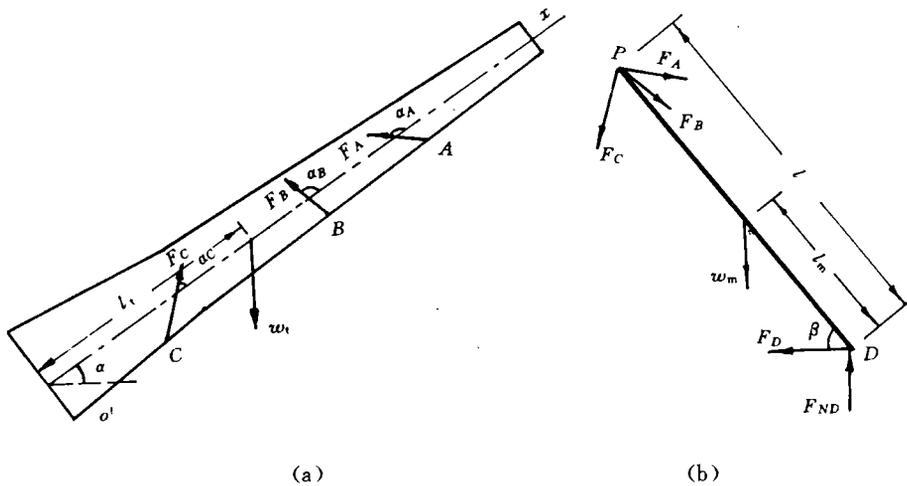


图5 受力分析

l_m . 分别对 O' 点及 D 点求矩可得

$$\left. \begin{aligned} &F_A \sin \alpha_A x_A + F_B \sin \alpha_B x_B + F_C \sin \alpha_C x_C - [F_A \cos \alpha_A (d + y_A) + \\ &F_B \cos \alpha_B (d + y_B) + F_C \cos \alpha_C (d + y_C)] = w_t (l_t - dtg \alpha) \cos \alpha, \\ &[F_A \sin (\beta + \alpha + \alpha_A) + F_B \sin (\beta + \alpha + \alpha_B) + \\ &F_C \sin (\beta + \alpha + \alpha_C)] l + w_m l_m \cos \beta = 0, \\ &F_A : F_B = n_1 : n_2, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由以上3个方程可解出各绳索拉力 F_A, F_B, F_C , 进而利用门架的其它平衡条件(图5b), 可得地压力及推索拉力为

$$F_{ND} = w_m + F_A \sin (\alpha + \alpha_A) + F_B \sin (\alpha + \alpha_B) + F_C \sin (\alpha + \alpha_C), \quad (10)$$

$$F_D = - [F_A \cos (\alpha + \alpha_A) + F_B \cos (\alpha + \alpha_B) + F_C \cos (\alpha + \alpha_C)] \pm F_{ND} \cdot f, \quad (11)$$

式中 f 为地面摩擦系数, 且 f 推举过程取正号, 其余取负号. 门架最大轴压力为

$$F_m = F_D \cos \beta + F_{ND} \sin \beta.$$

2.2 多前挂情况

受力图如图6所示. 则式(9)~(11)变为

$$\left. \begin{aligned} &\sum_{i=1}^m F_i \sin \alpha_i x_i + F_c \sin \alpha_c x_c - \sum_{i=1}^m F_i \cos \alpha_i (d + y_i) \\ &- F_c \cos \alpha_c (d + y_c) = w_t (l_t - dtg \alpha) \cos \alpha, \\ &\sum_{i=1}^m F_i \sin (\beta + \alpha + \alpha_i) l + F_c \sin (\beta + \alpha + \alpha_c) l + w_m l_m \cos \beta = 0, \\ &F_1 : F_2 : \dots : F_m = n_1 : n_2 : \dots : n_m, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$F_{ND} = w_m + \sum_{i=1}^m F_i \sin (\alpha + \alpha_i) + F_c \sin (\alpha + \alpha_c), \quad (13)$$

$$F_D = - [\sum_{i=1}^m F_i \cos (\alpha + \alpha_i) + F_c \cos (\alpha + \alpha_c)] \pm F_{ND} \cdot f, \quad (14)$$

2.3 起门架过程

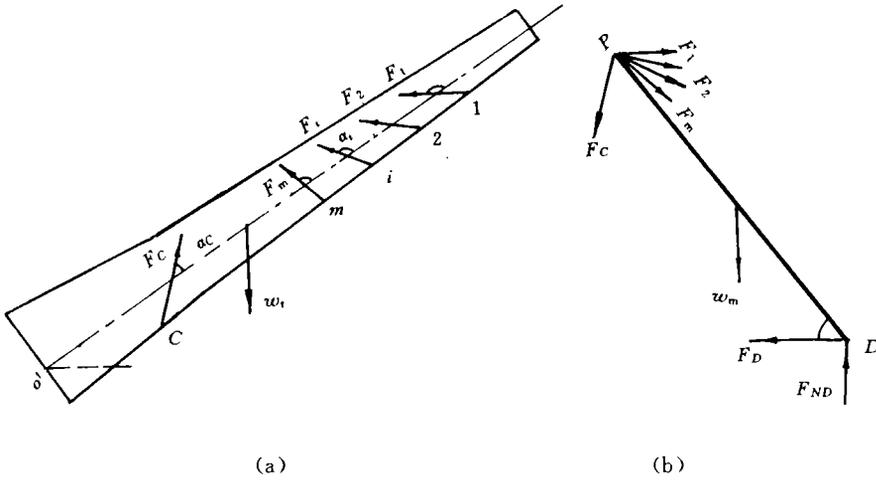


图 6 多前吊点受力图

此过程首先用起重设备将门架吊到一定高度,然后紧前索使门架达到规定角度 β_0 . 考虑到多前吊点的一般情况,计算与前面类似,故得塔架角度 $\alpha = \alpha_0$,后挂拉力 $F_C = 0$. 前挂各绳索拉力由以下方程求解,即

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m F_i \sin(\beta + \alpha_0 + \alpha_i) l + w_m l_m \sin \beta = 0, \\ F_1 : F_2 : \dots : F_m = n_1 : n_2 : \dots : n_m, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

计算过程中 ($\beta \leq \beta_0$), 应随时校核塔架的自重是否足以吊起门架, 即应满足下式: $\sum_{i=1}^m [F_i \sin \alpha_i x_i - F_i \cos \alpha_i (d + y_i)] - w_i (l_i - dtg \alpha) \cos \alpha < 0$. 如果该式不成立, 应调整门架站位 L_D , 直到满足为止. 塔架在吊推过程中按空间桁架计算^[3].

3 实例

在进行吊推法计算之前, 应预先研究确定吊推方案, 即应确定门架初始站位 L_D 和初角度 β_0 , 以及紧后挂开始和结束时塔架角度 α_1 和 α_2 .

本文算例取自某炼油厂 H331 及 H332 火炬的吊装, 各计算参数如下(符号参见图 1).

门架: $w_m = 50.75 \text{ t}$, $L_m = 31.77 \text{ m}$, $l = 54.00 \text{ m}$.

H331: $w_i = 199.7 \text{ t}$, $L_i = 43.30 \text{ m}$, $d = 8.487 \text{ m}$, $x_A = 75.00 \text{ m}$, $y_A = -2.078 \text{ m}$, $x_B = 60.00 \text{ m}$, $y_B = -2.944 \text{ m}$, $x_C = 15.00 \text{ m}$, $y_C = -6.582 \text{ m}$, $n_1 = 7$, $n_2 = 9$, $f = 0.01$, $L_D = 55.00 \text{ m}$, $\beta_0 = 65^\circ$, $\alpha_0 = -3^\circ$, $\alpha_1 = 21^\circ$, $\alpha_2 = 34^\circ$.

H332: $w_i = 177.6 \text{ t}$, $L_i = 38.85 \text{ m}$, $d = 7.217 \text{ m}$, $x_A = 65.00 \text{ m}$, $y_A = -2.078 \text{ m}$, $x_B = 57.50 \text{ m}$, $y_B = -2.511 \text{ m}$, $x_C = 10.00 \text{ m}$, $y_C = -5.947 \text{ m}$, $n_1 = 7$, $n_2 = 9$, $f = 0.01$, $L_D = 49.50 \text{ m}$, $\beta_0 = 64^\circ$, $\alpha_0 = -3^\circ$, $\alpha_1 = 21^\circ$, $\alpha_2 = 32^\circ$.

计算结果列于表 1 和表 2. 从表中可看出, 计算结果与实测值吻合良好.

表1 H331火炬计算结果及部分实测值

$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$		F_B/kN	F_C/kN	F_D/kN	F_m/kN		备注
	计算值	实测值				计算值	实测值	
-3	65.00	65.0	868.6	267.9	808.9	2148	2133	开始起吊
10	69.29	69.2	740.5	470.7	627.8	2106	2095	
21	72.01	72.1	660.4	544.4	498.1	1858	1836	紧前挂过程结束
34	50.33	50.0	758.9	1002.1	1017.0	1791	1768	紧后挂过程结束
45	55.68	55.3	559.5	1153.0	833.7	1675	1669	
60	59.08	58.6	287.7	982.9	610.5	1399	1400	
76	55.73	55.2	128.2	0.0	49.9	298.9	325	合重心过铰链

表2 H332火炬计算结果及部分实测值

$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$		F_B/kN	F_C/kN	F_D/kN	F_m/kN		备注
	计算值	实测值				计算值	实测值	
-3	64.00	64.0	859.8	245.1	827.9	2120	2101	开始起吊
10	66.96	67.5	740.3	442.4	693.3	2009	1983	
21	68.96	69.5	651.3	525.1	581.7	1860	1839	紧前挂过程结束
32	49.75	49.0	716.6	838.3	1062.6	1842	1830	紧后挂过程结束
45	53.50	52.7	514.2	1073.0	929.0	1767	1751	
60	53.16	52.2	229.7	941.6	740.4	1440	1450	
76	47.48	46.0	136.4	0.0	79.1	304.6	332	合重心过铰链

参 考 文 献

- 1 《建筑施工手册》编写组编. 建筑施工手册(中). 北京:中国建筑工业出版社,1981.291~297
- 2 江正荣,朱国梁. 简明施工手册. 北京:中国建筑工业出版社,1979.527~533
- 3 李为镒,马文华,周纯铮等. 杆件结构计算原理及应用程序. 上海:上海科学技术出版社,1982.399~422

Analysis of the Hoisting Process of Large-Scale Tower Frames and Examples

Lin Zansheng Fang Deping Chen Guang

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract An analysis, geometrically and mechanically, is made on the whole hoisting process of large-scale tower frames; and the corresponding computer software is programmed. The hoisting processes of torch towers H331 and H332 of an oil refinery are calculated and observed in site. The results from calculation are in good agreement with those from site observation.

Keywords hoisting process, tower frame, geometrical analysis, mechanical analysis, computer software