

文章编号:1006-7329(2001)05-0061-06

# 联轴式缆车的自平衡原理和计算公式\*

胡小容, 许廷兴, 朱朝相

(中交第二航务工程勘察设计院, 武汉 430071)

**摘要:**即使采用单点牵引的方式,联轴式缆车在一定条件下也能自动平衡其载货偏心产生的偏心力矩。本文论述四轮联轴式缆车的自平衡原理,推导有关计算公式并分析其适用条件,为集装箱横向缆车的设计奠定理论基础。

**关键词:**斜坡码头;联轴式缆车;单点牵引;原理;计算公式

**中图分类号:**TH248

**文献标识码:**A

缆车,是内河大水位差斜坡码头货物上、下坡运输环节中常用的作业机械,按其车轮滚动方式的不同,可分为联轴式缆车和非联轴式缆车两种型式。联轴式缆车位于同侧钢轨上的每个车轮均与另一侧钢轨上的对应车轮同轴滚动,非联轴式缆车的各个车轮各自独立绕其轴滚动。从目前工程应用情况来看,设计趋于定型化、使用情况良好并获得广泛应用的是运输普通件杂和重件的缆车。这类缆车台面尺寸较小,一般采用纵向(平行斜坡道方向)长度较长的纵向缆车布置型式和单点牵引的方式,缆车载货横向偏心(载货重心偏离斜坡道中心线的距离)引起的偏心力矩(以下简称偏心矩)较小,不致影响缆车的平稳运行。因此,对这类缆车的设计,工程界主要从实用角度出发,仅关注缆车的最大轮压和总牵引力而未深究轮压和车轮摩擦力的具体分布情况,其中总牵引力有成熟的理论计算公式,最大轮压则按《港口工程荷载规范》<sup>[1]</sup>(JTJ215-98)通过实测资料统计给出的轮压不均系数进行计算;虽然在小轨距情况下采用了联轴式缆车结构,但没有深刻认识到该结构所具有的受力特点。

随着近年来集装箱运输由沿海向长江上游的迅速发展,国家西部大开发战略的全面实施以及三峡库区港口淹没复建的紧张进行,集装箱码头建设已经成为三峡库区港口淹没复建的重点。而集装箱箱体长度较长(40'箱长达12.192 m),无论从节省工程投资还是从方便营运使用角度考虑,集装箱缆车均宜采用横向缆车的布置型式。按40'集装箱的额定质量和允许载货偏心,横向缆车的偏心矩高达150~200 kN·m,由此提出了目前港口工程界极为关注的并亟需亟待解决的大轨距横向缆车在大偏心距作用下的纠偏新课题。

为妥善解决该课题,很有必要首先对缆车结构的受力特点进行深入分析。为此,本文论述单牵引联轴式缆车自动平衡偏心矩的基本原理,推导有关计算公式并分析其适用条件。鉴于横向缆车的纵向尺寸较小,一般仅布置四个车轮,故以下针对四轮缆车进行论述、推导和分析。

## 1 自平衡原理

对非联轴式缆车,每个车轮各自独立绕其滚动。根据理论力学原理,每个车轮在匀加速、纯滚动情况下的滚动方程为:

$$F_i = N_i c / r + J a_0 / r^2 \quad (i = 1 \sim 4)$$

式中: $F_i$ :第*i*个车轮受到的摩擦力; $N_i$ :第*i*个车轮的轮压; $c$ 、 $r$ 、 $J$ :依次为车轮的综合滚动摩擦系

\* 收稿日期:2001-08-30

作者简介:胡小容(1943-),男,重庆人,高级工程师,主要从事港口设计研究工作。

数、半径和转动惯量;  $a_0$ : 缆车前进的加速度。

由此可见:

1) 因载货偏心时两轨的轮压是不一致的, 所以两轨车轮受到的摩擦力也是不相等的, 但因综合滚动摩擦系数较小, 两者相差甚微;

2) 两轨车轮受到的摩擦力不相等, 对缆车中心合成的结果会有一个力矩, 该力矩的数值也很小且与偏心距的方向相同。

所以, 非联轴式缆车不能通过车轮摩擦力形成的力矩来自动平衡偏心矩。事实上, 已建码头采用的非联轴式缆车多为轨距不大的纵向缆车, 因偏心矩较小, 主要通过车轮轮缘与钢轨间的横向作用形成的抵抗力矩来平衡偏心矩。

车轮作纯滚动时受到的摩擦力属于静摩擦力。静摩擦力有一个重要特性: 其最大值不超过静摩擦系数与正压力的乘积, 但其大小和方向不是恒定的, 必须通过物体应满足的力学方程综合求解。联轴式缆车正是巧妙利用了静摩擦力的这一重要特性, 通过联轴传递扭矩, 使其位于两钢轨上的车轮受到不同的摩擦力而形成抵抗力矩来平衡偏心矩, 其车轮滚动方程为:

$$F_1 = N_1c/r + Ja_0/r^2 + T_B/r$$

$$F_2 = N_2c/r + Ja_0/r^2 + T_A/r$$

$$F_3 = N_3c/r + Ja_0/r^2 - T_B/r$$

$$F_4 = N_4c/r + Ja_0/r^2 - T_A/r$$

式中:  $T_A$ : 连接轮 2、轮 4 的联轴传递的扭矩;  $T_B$ : 连接轮 1、轮 3 的联轴传递的扭矩。

与非联轴式缆车车轮受到的摩擦力进行对比可以看出:

1) 联轴式缆车四个车轮受到的总摩擦力是不变的;

2) 由于联轴传递扭矩的作用, 车轮摩擦力产生重分配, 一侧钢轨的车轮总摩擦力增加了  $(T_A + T_B)/r$ , 另一侧钢轨的车轮总摩擦力减少了  $(T_A + T_B)/r$ , 因此产生一个力偶矩  $(T_A + T_B)D/r$ ,  $D$  为钢轨间距。该力偶矩与偏心矩的方向相反, 在一定条件下完全可以抵抗偏心矩。

## 2 计算公式

一般地, 设联轴式缆车作为加速直线运动, 车轮只滚不滑; 并设每个车轮的重量均为  $G_0$ , 缆车车体和车轮的总重量为  $G$ , 载货的重量为  $G'$ , 载货在横、纵向的偏心分别为  $e_x, e_y$ , 载货横向偏心率  $\xi = e_x/a$ ; 为使公式表达简便, 不计联轴的重量并取重力加速度  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , 则缆车车体、车轮和联轴的受力情况如图 1~图 4 所示, 图中:  $a_0, r, J, c, N, F, (i=1\sim4)$  意义同前;  $S$ : 钢丝绳总的牵引力;  $N_i$ : 车身作用于第  $i$  车轮的正向力 ( $i=1\sim4$ );  $S_i$ : 车身作用于第  $i$  车轮的切向力 ( $i=1\sim4$ );  $T_i$ : 联轴传递给第  $i$  车轮的约束力矩 ( $i=1\sim4$ );  $M_R$ : 第  $i$  车轮滚动时车轮与钢轨间的摩擦力矩 ( $i=1\sim4$ );  $M_{R_0}$ : 第  $i$  车轮滚动时车轮轴与轴承间的摩擦力矩 ( $i=1\sim4$ )。

其余符号意义见图示。

根据理论力学达兰贝尔 (*D' Alembert*) 原理<sup>[2]</sup>, 作用于质点的所有主动力、约束力与所有质点的惯性力成平衡, 可得下列受力方程:

对车体:

$$\Sigma F_y = 0; S = (G + G' - 4G_0)(0.1a_0 + \sin\alpha) + S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \quad (1)$$

$$\Sigma F_x = 0; N'_1 + N'_2 + N'_3 + N'_4 = (G + G' - 4G_0)\cos\alpha \quad (2)$$

$$\Sigma M_x = 0; N'_1 + N'_3 = N'_2 + N'_4 + P_0 \quad (3)$$

$$P_0 = \frac{1}{b} [(Gh - 4G_0h + G'h')(0.1a_0 + \sin\alpha) - \Sigma M'_{R_0} - Sh_i - (Ge - 4G_0e + G'e')\cos\alpha]$$

$$\Sigma M_y = 0; N'_3 + N'_4 = N'_1 + N'_2 + G'\cos\alpha\xi \quad (4)$$

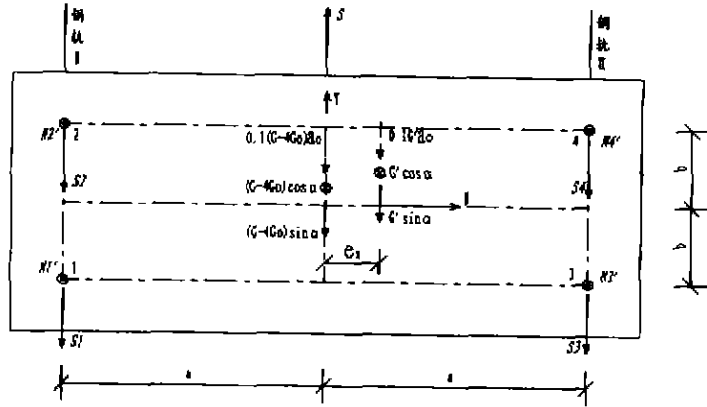


图1 车身斜平面受力图示

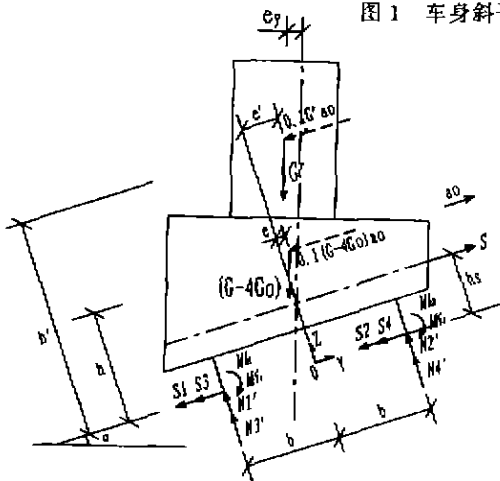


图2 车身侧面受力图示

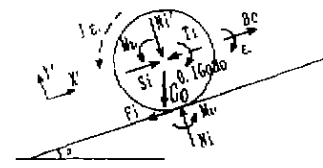


图3 车轮受力图示

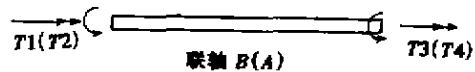


图4 联轴受力图示

$$\Sigma M_z = 0: S_1 + S_2 = S_3 + S_4 + G'(0.1a_0 + \sin\alpha)\epsilon \quad (5)$$

对车轮:

$$\Sigma F_x = 0: S_i = G_0(0.1a_0 + \sin\alpha) + F_i \quad (i = 1 \sim 4) \quad (6 \sim 9)$$

$$\Sigma F_y = 0: N_i = N'_i + G_0 \cos\alpha \quad (i = 1 \sim 4) \quad (10 \sim 13)$$

$$\Sigma M_r = 0: F_i r = M_{R_i} + M'_{R_i} + J a_0 / r - T_i \quad (i = 1 \sim 4) \quad (14 \sim 17)$$

对联轴:

$$T_1 + T_3 = 0 \quad (18)$$

$$T_2 + T_4 = 0 \quad (19)$$

缆车属于超静定结构, 以上共计 19 个方程, 但含有  $S, S_i, N_i, N'_i, F_i, T_i (i=1 \sim 4)$  总共 21 个未知量, 必须考虑变形协调条件才有唯一解。设每个车轮与缆车车体相连的弹簧的总刚度均为  $K$ , 车体偏安全地似为刚体, 并考虑缆车制造误差及钢轨安装误差的实际情况, 设三个车轮接触钢轨后第四个车轮离钢轨的“脱空”值为  $\delta$ , 则根据各连接弹簧的变形协调条件不难得到:

$$N_1 + N_4 = N_2 + N_3 + Q_0 \quad (20)$$

其中:  $Q_0 = \pm K\delta$ , 轮 2、轮 3“脱空”为正, 轮 1、轮 4“脱空”为负。

根据车轮只滚不滑的运动条件, 可知缆车前、后两根联轴受扭后产生的扭转变形是相同的。设两根联轴的抗扭刚度相同, 那么两根联轴受到的扭矩也是相同的, 所以:

$$T_1 = T_2 \quad (21)$$

联合求解上列方程, 并考虑到:

$$M_{R_i} = \beta k N_i, M'_{R_i} = 0.5 \beta \mu d N_i, \text{ 记 } c = (k + 0.5 \mu d) \beta$$

式中:  $k$ : 车轮与钢轨间的滚动摩擦系数;  $\mu$ : 轴承摩擦系数;  $d$ : 车轮轴承内径;  $\beta$ : 附加阻力系数。

可得:

$$\left\{ \begin{array}{l} S = (G + G')(0.1a_0 + \sin\alpha + \cos\alpha c/r) + 4J_{a_0}/r^2 \\ N_1 = \frac{1}{4}G\cos\alpha + \frac{1}{4}G'\cos\alpha(1 - \xi) + (P_0 + Q_0)/4 \\ N_2 = \frac{1}{4}G\cos\alpha + \frac{1}{4}G'\cos\alpha(1 - \xi) - (P_0 + Q_0)/4 \\ N_3 = \frac{1}{4}G\cos\alpha + \frac{1}{4}G'\cos\alpha(1 + \xi) + (P_0 - Q_0)/4 \\ N_4 = \frac{1}{4}G\cos\alpha + \frac{1}{4}G'\cos\alpha(1 + \xi) - (P_0 - Q_0)/4 \end{array} \right. \quad (22)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = \frac{1}{4}(G + G')\cos\alpha c/r + \frac{1}{4}G'(0.1a_0 + \sin\alpha)\xi + J_{a_0}/r^2 + \frac{1}{4}(P_0 + Q_0)c/r \\ F_2 = \frac{1}{4}(G + G')\cos\alpha c/r + \frac{1}{4}G'(0.1a_0 + \sin\alpha)\xi + J_{a_0}/r^2 - \frac{1}{4}(P_0 + Q_0)c/r \\ F_3 = \frac{1}{4}(G + G')\cos\alpha c/r - \frac{1}{4}G'(0.1a_0 + \sin\alpha)\xi + J_{a_0}/r^2 + \frac{1}{4}(P_0 - Q_0)c/r \\ F_4 = \frac{1}{4}(G + G')\cos\alpha c/r - \frac{1}{4}G'(0.1a_0 + \sin\alpha)\xi + J_{a_0}/r^2 - \frac{1}{4}(P_0 - Q_0)c/r \\ T(= T_3 = T_4 = -T_1 = -T_2) = \frac{1}{4}G'(0.1a_0 + \sin\alpha - \cos\alpha c/r)\xi r \end{array} \right. \quad (23)$$

联轴受扭后产生扭转变形, 缆车相应产生偏转, 其偏转角  $\theta$  为:

$$\theta = \text{arctg}(Tr/G_p I_p) \quad (24)$$

其中,  $G_p, I_p$  为联轴的剪切弹性模量和极惯性矩。

式(22)、(23)及(24)即为联轴式缆车匀加速上行、下轮只滚不滑时的有关计算公式; 当缆车下行时, 只需将公式中的  $a_0$  换成  $-a_0$ ,  $c$  换成  $-c$  即可。顺便指出, 非联轴式缆车的轮压计算公式同式(22), 车轮受到的摩擦力则由公式  $F_i = N_i c/r + J_{a_0}/r^2$  ( $r=1 \sim 4$ ) 直接计算。

### 3 适用条件

由上列公式可见: 缆车加速上行时, 惯性力加剧了载货偏心的后果, 车轮受到的摩擦力比缆车下行时大, 且摩擦力较大的一侧车轮所受到的轮压反而较小, 故缆车加速上行是缆车运行的最不利情况, 以下按此最不利情况分析公式的适用条件。为叙述方便, 取  $\xi$  为正, 即载货横向偏于钢轨 I (轮 3、轮 4), 且考虑最不利情况组合: 载货纵向偏于后轮 (轮 1、轮 3), 缆车制造及钢轨安装误差引起车轮 2“脱空”, 即  $P_0, Q_0$  为止。

车轮作纯滚动时,  $F_i, N_i$  必须满足:

$$K_f |F_i| \leq f N_i \quad (i = 1 \sim 4)$$

式中:  $f$ : 车轮与钢轨间的静摩擦系数;  $K_f$ : 安全系数。

由式(22)和(23)并略去相对微小量  $J_{a_0}/r^2$ , 则有(轮 2 为控制情况):

$$G \geq \varphi G' + (P_0 + Q_0)\sec\alpha \quad (25)$$

$$\varphi = -1 + [K_f \xi (0.1a_0 \sec\alpha + \tan\alpha) + f \xi] / (f - K_f c/r)$$

式(25)即为缆车作纯滚动时其自重应满足的条件, 由此可见:

1) 理论上讲, 只要缆车自重  $G$  足够大, 联轴式缆车完全可以自动平衡偏心矩并沿钢轨滚动前进而不产生滑动;

2) 车轮与钢轨间的静摩擦系数( $f$ )、载货偏心率( $\xi$ )、斜坡坡度( $\alpha$ )和综合滚动摩擦系数( $c/r$ )是影响缆车自动平衡偏心矩所需最小自重的重要因素。 $f$  越小,  $\xi$ 、 $\alpha$  和  $c/r$  越大, 缆车自动平衡偏心矩所需的最小自重就越大, 由表 1 可见各种因素对缆车最小自重的影响程度;

3) 缆车最小自重还与  $P_0$ 、 $Q_0$  有关, 即与缆车四个车轮轮压的均匀程度有关。对集装箱缆车, 根据缆车可能的制造误差、钢轨安装允许误差及缆车载货的允许纵向偏心,  $P_0$  一般可控制在  $6t$  以内,  $Q_0$  一般可控制在  $4t$  以内,  $(P_0+Q_0)\text{seca}$  一般可控制在  $10t$  左右。

表 1 系数  $\varphi_i$  计算表 ( $K_f=1.1, a_0=0.25 \text{ m/s}^2, e_x=1.2 \text{ m}$ )

轨距	坡度	0.10			0.12			0.15		
		0.035	0.025	0.015	0.035	0.025	0.015	0.035	0.025	0.015
9.5 m	1:2	1.80	1.37	1.06	1.17	0.91	0.71	0.66	0.51	0.38
	1:2.5	1.34	0.98	0.72	0.83	0.61	0.44	0.40	0.28	0.17
	1:3	1.04	0.73	0.50	0.60	0.41	0.26	0.24	0.13	0.03
	1:3.5	0.82	0.54	0.34	0.43	0.26	0.13	0.12	0.02	/
12 m	1:2	1.21	0.88	0.63	0.72	0.52	0.35	0.31	0.19	0.09
	1:2.5	0.85	0.57	0.36	0.45	0.27	0.14	0.11	0.01	/
	1:3	0.61	0.37	0.19	0.27	0.11	/	/	/	/
	1:3.5	0.44	0.22	0.06	0.14	/	/	/	/	/

若缆车自重不满足式(25), 则车轮 2 首先产生瞬时滑动, 此时两联轴的变形协调方程式(21)不成立, 但有:

$$F_2 = fN_2 \tag{21'}$$

轮 2 产生瞬时滑动后, 若其余 3 个车轮的静摩擦力还没有达到各自的最大值, 则缆车仍然可以只滚不滑地运行。在此情况下, 式(1)~(20)仍然成立, 与式(21)联合求解, 可知式(22)仍然成立, 式(23)、(24)、(25)变为:

$$\begin{cases} F_1 = \frac{1}{2}(G + G')\cos\alpha c/r + \frac{1}{2}G'(0.1a_0 + \sin\alpha)\xi + 2Ja_0/r^2 - F_2 \\ F_2 = fN_2 \\ F_3 = -\frac{1}{2}G'(0.1a_0 + \sin\alpha)\xi + \frac{P_0}{2}c/r + F_2 \\ F_4 = \frac{1}{2}(G + G')\cos\alpha c/r - \frac{P_0}{2}c/r + 2Ja_0/r^2 - F_2 \\ T_A (= T_4 = -T_2) = F_2 r - N_2 c - Ja_0/r \\ T_B (= T_3 = -T_1) = \frac{1}{2}G'(0.1a_0 + \sin\alpha + \cos\alpha c/r)\xi r - F_2 r + N_2 c + Ja_0/r \end{cases} \tag{26}$$

$$\theta = \arctg(T_B r / G_p I_p) \tag{27}$$

$$\begin{cases} G \geq \varphi_1 G' \\ G \geq \varphi_2 G' + [Q_0 - (K_f c / r f) P_0] \text{seca} \end{cases} \tag{28}$$

其中:  $\varphi_1$  同前,  $\varphi_2 = -1 + K_f \xi (0.1a_0 \text{seca} + \text{tga}) / f$

此时轮 2 瞬时滑动的滑移量  $\Delta = (T_B - T_A)Lr / G_p I_p$ ,  $L$  为联轴的长度。

取  $G_1 = \varphi_1 G' + (P_0 + Q_0)\text{seca}$

$G_2 = \max\{\varphi_1 G', \varphi_2 G' + [Q_0 - (K_f c / r f) P_0]\text{seca}\}$

则综上所述可得:

- 1) 当  $G \geq G_1$  时, 缆车可以自动平衡偏心矩并作纯滚动运行;
- 2) 当  $G_2 \leq G < G_1$  时, 缆车仍然可以自动平衡偏心矩并作纯滚动运动, 但轮压最小的车轮将产生瞬时滑动, 其滑移量一般很小;
- 3) 当  $G < G_2$  时, 缆车不能自动平衡偏心矩, 轮压较小一侧的两个车轮(或全部车轮)将产生滑

动,缆车会产生歪斜。

#### 4 结论与建议

1) 本文论述了联轴式缆车的自平衡原理,并结合缆车制造及钢轨安装误差的实际情况推导出有关计算公式并分析其适用条件,奠定了集装箱横向缆车设计的理论基础。理论分析认为:缆车的轮压分布,总牵引力和总摩擦力与车轮是否联轴无关;由于联轴传递扭矩的作用,联轴式缆车的车轮摩擦力与非联轴式缆车相比产生重新分配,形成一个抵抗偏心矩的力偶矩。

2) 当  $G \geq G_1$  时,联轴式缆车作纯滚动运动而无滑动;当  $G_2 \leq G < G_1$  时,联轴式缆车可作纯滚动运行但会产生瞬时滑动,其瞬时滑移量一般很小;两种条件下缆车均能自动平衡偏心矩。故联轴式缆车最小自重按  $G \geq G_1$  控制是较为安全的;对集装箱横向缆车而言,  $G_1$  一般比  $G_2$  大 10t 左右,如果考虑到缆车自重太大会对码头港工结构投资及营运费产生较大影响,其最小自重也可按  $G \geq G_2$  控制。

3) 集装箱联轴式横向缆车的设计,首先需要解决好大轨距情况下车轮同轴在构造处理上的一系列实际问题,其次应注意下述问题:①对缆车制造及钢轨安装提出严格要求,前、后车轮应合理布置,以缩小车轮轮压的差别;②从缆车车体结构设计来说,钢轨间距应大小适宜,但为了克服偏心矩,钢轨间距应越大越好,结合集装箱缆车所需要的台面尺寸,建议当斜坡码头坡度较大时钢轨间距采用 12 m;③联轴承受的扭矩一般很小,联轴设计主要受刚度条件控制,建议尽量加大联轴的抗扭刚度,以减小联轴扭转变形引起的缆车偏转率;④尽量加大车轮直径并采取有效的工程措施提高车轮轴与轴承之间的润滑程度,以减小滚动摩擦的影响;⑤车轮与钢轨间的摩擦系数是联轴式缆车设计中一个至关重要的计算指标,建议对静摩擦系数及提高静摩擦系数的措施进行深入的试验研究。

#### 参考文献:

- [1] JTJ 215-98,港口工程荷载规范[S].  
 [2] 哈尔滨工业大学理论力学教研组编.理论力学[M].北京:高等教育出版社,1998.

### Self-balance Principles and Formulae for Axle-linked Cable-car

HU Xiao-rong, XU Ting-xing, ZHU Chao-xiang

(The 2nd Harbor Engineering Investigation and Design Institute, China Communications, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Even if pulled by single wire rope, the axle-linked cable-car can under some conditions automatically balance the eccentric moment caused by the carried loads. This paper expounds the self-balance principles of the four-wheel axle-linked cable car, deduces the associated formulae and analyzes the conditions for its application, laying a theoretic foundation for the design of transverse container cable car.

**Keywords:** sloping wharf; axle-linked cable car; single traction; principle; formula