

影响皮带秤称量台合理位置的基本参数

□南京赛摩三埃工控设备有限公司 盛伯湛

【摘要】指出称量台的合理位置应处于传送带速度稳定且物料速度与传送带等速的区段，这与物料与传送带的运动状态休戚相关。基于力学原理分析了物料的滑动摩擦因数、传送带倾角、物料装入后的加速度、传送带的额定速度、物料自装上传送带到同传送带等速时间段内传送带的行程等基本参数对于称量台位置的影响，并做了举例说明。

【关键词】皮带秤安装；称量台位置；力学参数

文献标识码：B 文章编号：1003-1870（2023）07-0010-06

引言

该怎样恰当选择称量台位置以保障称量准确度？这是在带式输送机上配装称量台构成皮带秤或设计整机型皮带秤时必须面对的问题。

目前，可见的公开文献主要介绍的办法大多只是要求避免设置在皮带张力较大的位置，例如，远离驱动滚筒以及清扫器、犁式卸料器、挡边轮等附属设施，并远离皮带倾角突变的位置（如皮带呈凹、凸弧形拐弯处）等方面。诚然，这些因素确实会对皮带秤的称量准确性产生不利影响。然而，影响张力变化的因素十分复杂，即使对于同样型式、同样规格的皮带秤其影响程度也是十分悬殊的，而且也不属于皮带秤固有的基本工作参数。

对于如何择定称量台与物料装入点的距离，JJG650-90^[1]做了如下规定：“3.1……皮带在额定速度下1秒钟移动距离的2~5倍。”这样的叙述虽然涉及皮带秤运行状态的基本参数，然而片面和不严谨的。

皮带秤的基本特征是，它的计量对象是处于运动状态的物料，因此能否把物料的运动速度测准，是其计量结果能否准确的先决条件之一。出于技术经济方面的考量，目前大多数类型的皮带秤对于物料的运动速度是通过测量传送带的速度间接获得的。可是，皮带秤的传送带与所传输物料运行

的动力源并不相同，传送带的运行动力来自驱动电机，而物料只是堆积而非捆绑固定在传送带上的，其运行的动力依靠的是其与传送带之间的摩擦力，因此，两者的运动状态就会出现差异。只有当两者的速度达到一致成为相对静止时才能以带速作为料速。物料速度能被准确测得的前提是，测速位置应位于传送带速度稳定的区段，且物料速度与传送带等速。故而在设计带速测量位置时，不仅要将其选择在测量物料重力的区段，还应当考量到料速在该区段是否与带速相等。

本文用力学方法分析了影响物料速度和传送带速度变化的基本参数，解析了物料同传送带速度相等时两者经过的行程，对称量台应处的位置进行了详细的讨论和解答。

本文所述内容仅适用于称量台式承载器型皮带秤（包括阵列式皮带秤）。输送机式承载器型皮带秤的测重区段占据了整台机长，其装料点的位置无法与测重区段分开，故而并不适用。

1 皮带秤物料传输中应有的最小摩擦因数

1.1 物料与传送带之间摩擦力的成因

众所周知，两个相互接触的物体发生相对滑移时，各自都会受到大小相等的滑动摩擦力的作用，两者所受摩擦力的方向总是与其自身的运动方向或运动趋势的方向相反。

物料在被上传送带时的初速度与传送带当时的运行速度通常并不相等。由于惯性的缘故，两者之间存在着相对位移，于是产生滑动摩擦力。

若把物料看作质点 m ，其重力 $G=mg$ (g 为当地的重力加速度)。把皮带秤装料处及其附近足够长度的那段传送带简化成如图 1 所示的刚性斜面，斜面与地面夹角为 θ (若该处为水平段，则有 $\theta=0$)，图中传送带速度 $v_{带}$ 的箭头指向为传送带的运行方向。

若质点 m 与传送带之间的滑动摩擦因数为 μ ，

因其对传送带产生的正压力为 $P=mg \cdot \cos \theta$ ，故当发生位移时产生的滑动摩擦力 $f=\mu \cdot mg \cdot \cos \theta$ (当 $\theta=0$ 时， $f=\mu \cdot mg$)。当 m 的速度小于传送带的速度时， m 受到的摩擦力 f 与 $v_{带}$ 同向；当 m 的速度大于传送带的速度时， f 与 $v_{带}$ 反向。

另外， m 除了受到地心引力 mg ，还受到其对传送带正压力 P 的反作用力 N ， G 与 N 的合力即两者的矢量和 $F_s=mg \cdot \sin \theta$ (当 $\theta=0$ 时， $F_s=0$)。 F_s 的方向沿斜面向下，是作用于物体的下滑力。

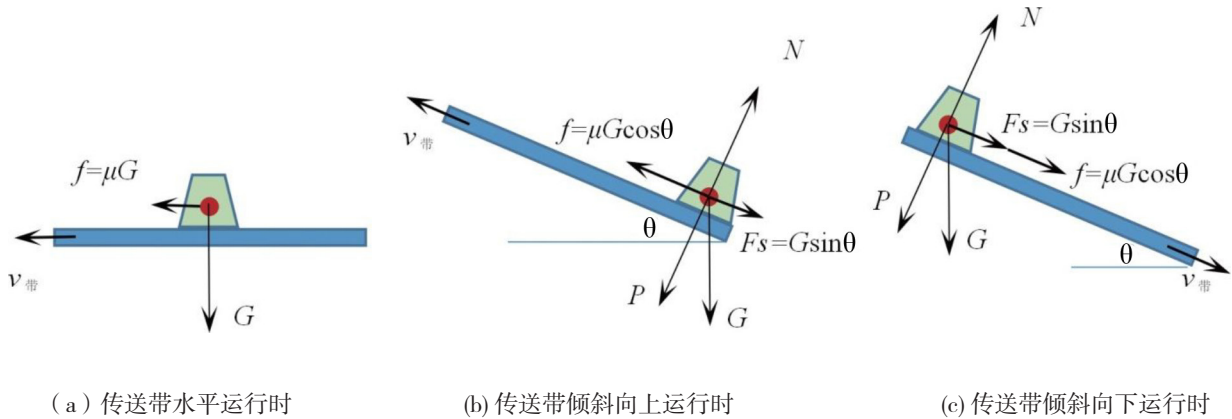


图1 下滑力与摩擦力对斜面上物体的作用

1.2 对滑动摩擦力的最小需求

由此可见，摩擦力 f 与下滑力 F_s 共为物料 m 所受的外力，两者的合力 F_{Σ} 决定了 m 运动的加速度 $a_{料}$ ，据牛顿第二定律有： $F_{\Sigma}=ma_{料}$ ，即 $a_{料}=F_{\Sigma}/m$ 。

(1) $F_s=f$ 时，有 $mg \cdot \sin \theta = \mu \cdot mg \cdot \cos \theta$ ，即 $\mu = \tan \theta$

此时 m 所受沿斜面方向的合力 $F_{\Sigma}=0$ ，于是加速度 $a_{料}=0$ ， m 将保持刚装到传送带时的初速度。通常 m 的初速度 $v_{料0}$ 远小于传送带的运行速度 $v_{带}$ ，因此 m 将无法追及传送带达到同步。

(2) $F_s>f$ 时，有 $\mu < \tan \theta$

a) 若 F_s 的方向与传送带的运行方向相反 (参见图 1(b))， $F_{\Sigma}=F_s-f>0$ ，两者的合力与 F_s 同向， $a_{料}$ 的方向也与 F_s 同向， m 就会沿斜面向下加速下滑，斜面的下方若是传送带的终点，物料就会脱离传送带。若斜面的下方是物料的装入点， m 就会打滑，并不会按传送带运行方向前进。

b) 若 F_s 的方向与传送带的运行方向相同 (参见

图 1(c))，两者的合力 F_{Σ} 也与 F_s 同向，若 m 的装入点位于斜面的上方， m 会在合力 F_s+f 的作用下加速。当 m 的速度达到与传送带等速时，两者的相对运动消失，瞬间出现滑动摩擦力 $f=0$ 的情况。由于还有与 $v_{带}$ 同向的 F_s 在起作用， m 仍会继续加速以至于超过带速，于是 f 的方向发生逆转， m 又会在合力 F_s-f 的作用下以较小的第二个加速度 $a_{料}$ 继续加速运行，而不会与传送带保持等速。

(3) $F_s<f$ 即 $\mu > \tan \theta$ 时，有 $f-F_s>0$

当传送带向前运行时，物料相对于传送带往后退，故 m 所受到的摩擦力与 $v_{带}$ 同向，又因为 $F_{\Sigma}=f-F_s>0$ ，所以其加速度 $a_{料}$ 也与 $v_{带}$ 同向， $v_{料}$ 就有可能赶上 $v_{带}$ 并保持与 $v_{带}$ 等速。因此 $\mu > \tan \theta$ 是皮带秤能正常工作的必要条件之一。

下文如无特别指明，所讨论内容中涉及的摩擦因数均为 $\mu > \tan \theta$ 。

从以上分析可知，物料所受摩擦力的大小主要取决于两者之间的滑动摩擦因数和传送带受载面与

地平面的夹角。倾角 θ 越大下滑力就越大，克服其作用的相应摩擦力也需更大。下表列出了物体在倾角不同的斜面上所受的下滑力、滑动摩擦力，以及能保持不下滑的状态时要求的最小滑动摩擦因数。

由下列表可知，斜面的倾角越大，斜面上物体所受的下滑力会越大，而在摩擦因数一定时，物体所受的滑动摩擦力却越小，为了使物体保持不下滑所需的最小滑动摩擦因数也就越大。

表 斜面上物体的受力状况及使其能不滑动时所需的最小滑动摩擦因数与倾角的关系

斜面倾角 θ	下滑力 $F_s = mg \cdot \sin\theta$	摩擦力 $f = \mu mg \cdot \cos\theta$	最小滑动摩擦因数 $\mu_{\min} > \tan\theta$
0°	0	μmg	0
6°	$0.105 mg$	$0.995 \mu mg$	0.105
12°	$0.208 mg$	$0.978 \mu mg$	0.213
18°	$0.309 mg$	$0.951 \mu mg$	0.325
26.5651°	$0.447 mg$	$0.894 \mu mg$	0.5
30°	$0.5 mg$	$0.866 \mu mg$	0.577
36.8699°	$0.6 mg$	$0.8 \mu mg$	0.75
45°	$0.707 mg$	$0.707 \mu mg$	1

过去有些皮带秤技术规范曾经限制皮带秤的输送机倾角大小，如 JJG650-90^[2] 之 1.2.1 条就规定，准确度等级 I、II 级秤 $\leq 6^\circ$ ，III、IV 级秤 $\leq 18^\circ$ ，同时要求倾角应保证物料在输送过程中无滚动或滑动。新版的技术标准或检定规程不再对输送机倾角做硬性规定，但对物料在输送过程中与输送带无相对运动的要求仍然保留下来。其实从上面的分析可知，与其说输送机倾角的大小必须服从准确度要求，不如说应当受称量物料摩擦因数的限制。物料摩擦因数较大的，可允许的倾角也较大。

需要指出的是，本文所述的斜面倾角 θ ，实际上不仅指皮带机机架纵梁与地平面的夹角 θ_1 ，还应包括输送带在相邻托辊之间下垂所产生的附加角 θ_2 。因此，输送带的实际倾角 θ 应为 θ_1 与 θ_2 两者的合成，即输送带的实际倾角 θ 往往大于皮带机

纵梁的倾角，因而所要求的摩擦因数也应更大。即使皮带机处于水平位置，传送带的实际倾角 θ 通常也不为零，这时仅有 $\mu_{\min} > 0$ 也不一定就能满足要求。

1.3 滑动摩擦因数的测定

据以上分析可知，物料能在斜面上不下滑须具有足够的摩擦力，因此在测定物料的摩擦因数时可以运用这一特性。具体的方法与步骤是：

(1) 置备试验器材

a) 置备摩擦因数测定装置。图 2 是其一种参考样式，图中①和②为两块适当尺寸的硬质平板，用铰链③把两者的一边连接起来，④为倾角调节装置，⑤为与拟用皮带秤所用材质相同的一块传送带，把它固定在平板①的上平面之上。

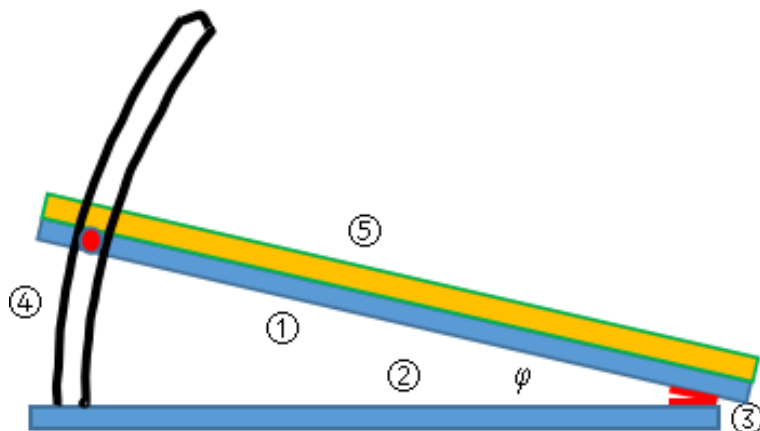


图2 摩擦因数测定装置参考示意图

b) 准备盛放预期称量物料的容器。

c) 准备水平仪、量角仪各 1 把。

(2) 试验步骤

a) 把测定装置两平板①和②之间的夹角 ϕ 调到较小的位置。

b) 把平板②置于水平的硬桌面之上。

c) 在平板①之上的传送带⑤的高端，轻轻放置适量的待测物料，保证其不下滑。

d) 用调节装置④调节试验装置两平板①和②之间的夹角，使 ϕ 缓慢增加，直至待测物料恰开始下滑即停止调节。

e) 测量此时夹角 ϕ 的角度。

f) 求得三角函数 $\tan \phi$ 的值，即为该物料与传送带之间的滑动摩擦因数 μ 。

(3) 试验样本的选择

某种物料的一些物理性质会因其来源的不同而存在差异。例如，即使同属一种预期称量的物料，其含水率会受到产地、运输和储存条件、大气湿度等因素的影响而有所不同，并使其粘滞度和润滑状态发生改变，从而影响到所测得的摩擦因数。因此，在采集物料样本时，要尽量广泛地涵盖正常工作条件下可能用到的不同含水率状态的试验物料，并进行足够多次的试验。除了对出现几率极小的偶然结果排除之外，宜在测得的各个摩擦因数之中选用较小的值，以保证最终算得的称量台位置总能满足要求。

2 影响称量台与物料装入点距离的基本参数

为了能在测量物料重力的同时准确测得物料的运行速度，测量带速的位移传感器应置于传送带速度均匀的区段，且在该区段物料速度能与传送带等速。故而皮带秤称量段应当离物料装入点足够远，以保证传送带运行到此之后其所载物料的速度能与带速保持一致。通过以下步骤，可以解得称量台与物料装入点应保持的距离。

2.1 物料同传送带达到等速前的运动状况

如果物料 m 自装到传送带起经过时间 t 后同传送带达到等速，那么物料在时间 t 内的运动状态可根据动力学和运动学原理分别列出方程式：

$F_{\Sigma} = f - F_s = ma_{\text{料}}$ ，以及 $v_{\text{料}t} = v_{\text{料}0} + a_{\text{料}}t$ ， $s_{\text{料}} = (v_{\text{料}t}^2 - v_{\text{料}0}^2) / 2a_{\text{料}}$ 来求解。

因 $f - F_s = \mu mg \cdot \cos \theta - mg \cdot \sin \theta$ ，故有 $a_{\text{料}} = (\mu \cos \theta - \sin \theta)g$ (1)

式(1)又由于料速在时间 t 末等于预定带速 (恒量 V)，即有： $v_{\text{料}t} = v_{\text{带}t} = V$

故： $t = (V - v_{\text{料}0}) / a_{\text{料}} = (V - v_{\text{料}0}) / (\mu \cos \theta - \sin \theta)g$ (2)

与 $s_{\text{料}} = (V^2 - v_{\text{料}0}^2) / 2(\mu \cos \theta - \sin \theta)g$ (3)

由于物料装入传送带时的初速度 $v_{\text{料}0}$ 基本上由装料方式决定的。皮带秤的装料方式通常有拖料或喂料两种，前者的物料经由竖直料仓直接压在传送带上，可认为物料在传送带运行方向上的初速度 $v_{\text{料}0} = 0$ 。后者的物料是由喂料装置排出后抛落在传送带上的，

在传送带运行方向上的初速度虽然可能不为零，但在一般情况下此值要比传送带的速度小得多。

当式(1)和式(2)中 $v_{料0}=0$ 时，则有：

$$t=V/(\mu \cos \theta - \sin \theta)g \quad (4)$$

$$s_{料}=V^2/2(\mu \cos \theta - \sin \theta)g \quad (5)$$

即使在 $v_{料0} \neq 0$ 时，在实际应用中也允许采用 $v_{料0}=0$ 进行近似计算。这不仅因 $v_{料0}$ 的实际抛落的方向往往是随机的，其均值也就接近于零；而且显然有 $v_{料t}^2 > (v_{料t}^2 - v_{料0}^2)$ ，因而用式(5)计算得到的 $s_{料}$ 值会比用式(3)得出要大些，能使最终结果更为保险。

2.2 物料同传送带等速前传送带的运动状况

装料时传送带的运动状态一般可分为：①传送带处于匀速运行状态；②皮带机刚启动，传送带由静止开始匀加速运行，直至达到一定的速度后再匀速运行；③皮带机刚关闭，传送带由匀速状态开始匀减速运行，直至停止。

传送带的运动状态不同时，求得的结果也会有所不同。下面将对各种可能出现的情况分别讨论。

(1) 装料时传送带匀速

在此状态下 $v_{带t}=v_{带0}=V$ (定速)，

$$\text{于是有：} s_{带}=v_{带t}t=Vt \quad (6)$$

$$\text{把式(2)代入，可得：} s_{带}=Vt=(V^2-V \cdot v_{料0})/(\mu \cos \theta - \sin \theta)g \quad (7)$$

$$\text{当} v_{料0}=0 \text{时代入式(4)，则得：} s_{带}=Vt=V^2/(\mu \cos \theta - \sin \theta)g \quad (8)$$

比较式(8)与式(5)，可知此时 $s_{带}=2s_{料}$ ，即物料同传送带等速时，传送带通过的行程是物料所通过行程的两倍。

(2) 由静止开始匀加速运行，到达定速后转为匀速

因皮带机启动伊始，传送带与物料均处于静止状态，即 $v_{带0}=v_{料0}=0$ 。在传送带尚未达到定速 V 的阶段，传送带与物料均以匀加速运行，但因 $a_{带} > a_{料}$ ，故传送带比物料先达到定速，然后转变为以 V 恒速运行。假如，带速在经历时间 t_1 之后达到 V ，但此时料速尚未与带速相等，故继续匀加速运行，在经过时间 t_2 之后，方同传送带等速，也就是 $t=t_1+t_2$ 。

$$\text{故：} v_{带t}=v_{带t_1}=V=a_{带}t_1, \quad \frac{1}{2}a_{带}V_1t^2=\frac{1}{2}Vt_1, \quad s_{带2}=Vt_2;$$

于是有：

$$s_{带}=s_{带1}+s_{带2}=\frac{1}{2}Vt_1+Vt_2=V(\frac{1}{2}t_1+t_2) \quad (9)$$

显然， $V(\frac{1}{2}t_1+t_2) < V(t_1+t_2)=Vt$ ，即由式(9)求出的值小于由式(6)求出的值。也就是说，在传送带刚启动时装入的物料(状态(2))的速度达到同传送带等速时，传送带通过的行程短于物料在传送带已匀速运行时装入情况下(状态(1))的传送带行程。

(3) 由定速转为匀减速，直至停止运行

在此种状况下，物料与传送带的速度也已相等。由于皮带机制动，传送带产生 $a_{带}'$ 大小的负加速度，由匀速转为匀减速运动，速度逐渐减慢直至经历时间 t' 后停止，而物料的运动状态随其此时所处的位置有所不同。

a) 物料刚装上传送带。在此初始阶段，物料由较低的初速度起做匀加速运动，而传送带由原定速开始降速，设在时刻 t 末两者达到相等的速度 V' ，然后两者同步减速。

$$\text{因此可知有：} v_{料t}=v_{料0}+a_{料}t=V'$$

$$\text{从而推得：} t=(V'-v_{料0})/a_{料}=(V'-v_{料0})/(\mu \cos \theta - \sin \theta)g \quad (10)$$

$$\text{或在} v_{料0}=0 \text{时：} t=V'/a_{料}=V'/(\mu \cos \theta - \sin \theta)g \quad (11)$$

$$\text{且知有：} s_{带}=(V^2-V'^2)/2a_{带}' \quad (12)$$

$$\text{并由} v_{带t}=V-a_{带}'t=V' \text{推得} a_{带}'=V-V'/t, \text{代入式(12)，}$$

$$\text{于是，} s_{带}=(V^2-V'^2)/2(V-V'/t)=(V+V')t/2 \quad (13)$$

将式(13)与式(6)比较：由于 $V > V'$ ，故 $(V+V')t/2 < Vt$ 。就是说，物料在传送带减速状态下装入跟传送带匀速时装入相比，物料从装入起到同传送带等速的这段时间内，传送带所经过的行程，前者短于后者。

b) 物料装入传送带时，传送带已经降速，但两者尚未达到等速。由于此时传送带的速度已低于 V ，故而物料从装入起到同传送带等速的这段时间内，传送带所经过的行程短于式(13)，当然更短于式(16)。

c) 物料也已通过称量段，其速度与称量无关，这里不再深入讨论。

2.3 称量台与物料装入点距离的择定

对于皮带秤称量台与物料装入点的距离, JJG650-90 规定为:“皮带在额定速度下 1 秒钟移动距离的 2~5 倍。”然而,物料自装入起到达同传送带等速时,传送带通过的行程不仅跟传送带的额定速度有关,而且跟物料的加速度有关,也就是跟摩擦因数与传送带倾角有关。因此,相关的基本参数不止只有传送带的额定速度一个。

那么,该如何确定称量台的合理位置呢?经前面两节的分析可知:

(1)物料与传送带等速时,物料通过的行程小于传送带的行程,即 $s_{料} < s_{带}$ 。因此,把称量台的位置设在与物料装入点相距,相当于传送带行程的距离 $s_{带}$ 是适当的。

(2) $s_{带}$ 的实际值会随物料装入时的传送带运动状态有所不同。为了能在任何状态下称量台位置都能符合要求,应当挑选其中的最大值,即由式(6)求得值 $s_{带} = Vt$ 。其中 V 是额定带速,但 t 的值未必一定是 $2 \sim 5s$ 。

(3)物料自装入起到达同传送带等速这个过程所经历的时间 t ,由物料当时的运动状态所决定。而物料无论是在何种状态下装上传送带的,在还没有达到同传送带等速之前的状态都是匀加速运动。其加速度 $a_{料}$ 的大小由摩擦因数 μ 与传送带倾角 θ 所决定[见式(1)]。传送带倾角可通过测量皮带机纵梁的倾角以及传送带垂度得到。摩擦因数可通过查阅相关资料或者试验测定获得。当有所不便时,也可将 μ 值估计得略微小些,因当 μ 值取得越小,算得的 $a_{料}$ 也越小,从而 t 值就越大。因此,在传送带的额定速度一定时,用较大的 t 值求 $s_{带}$,对于实现物料与传送带等速将更有保障。但要注意,要是摩擦因数的实际值不大于 $\tan \theta$,皮带秤是不能正常计量的(见§ 1.2),因此必须取 $\mu > \tan \theta$ 。

举例:

【已知】皮带秤托辊间距为1.2m,传送带倾角 $\theta = 18^\circ$,物料由位于下方的装料处向上传送,物料与传送带的滑动摩擦因数 $\mu = 0.38$,传送带的运行速

度 $v_{带} = 3\text{m/s}$,物料装入传送带时的初速度 $v_{料0} = 0$,重力加速度按 $g = 9.8\text{m/s}^2$ 计。问:称量台应设在距离装料处至少多远的位置?

【分析与解】因物料由位于倾斜传送带的下方向上传送,滑动摩擦力 f 沿斜面向上,而下滑力 F_s 沿斜面向下,物料所受合外力 $F_{\Sigma} = f - F_s$ 。由牛顿第二定律 $F_{\Sigma} = ma_{料}$ 可得物料的加速度 $a_{料} = (f - F_s)/m = (\mu \cos \theta - \sin \theta)g = (0.38 \times \cos 18^\circ - \sin 18^\circ) \times 9.8$

$$= (0.38 \times 0.951 - 0.309) \times 9.8 = 0.51\text{m/s}^2$$

因时间 t 末物料同传送带额定带速相等,故有 $V = a_{料}t$ 。于是可求得 $t = V/a_{料} = 3/0.51 = 5.88\text{s}$,即称量台应至少距离传送带 5.88 s 内的行程。也就是 $s_{带} = Vt = 3 \times 5.88 = 17.65\text{m}$,可取 15 个托辊间距。

【答】称量台的首只称重托辊应离开落料点至少 15 个托辊间距。

3 结语

称量台的合理位置应设在物料速度与传送带等速且传送带速度稳定的区段。因此,关键在于找到物料自装上传送带到同传送带等速为止的这个时间段内传送带的行程。而这取决于传送带的额定速度,以及物料装上传送带后且未达到同传送带等速前的加速度。而物料的加速度又取决于它与传送带之间的滑动摩擦因数,以及传送带装料段的倾角等基本参数。

参考文献

- [1] 中国计量科学研究院:电子皮带秤试行检定规程 JJG650-90[S] p.3.
- [2] 中国计量科学研究院:电子皮带秤试行检定规程 JJG650-90[S] p.1.

作者简介

盛伯湛,大学学历,高级工程师,冶金自动化专业,研究方向为电子衡器耐久性提升技术的研究、皮带秤误差理论革新和高等级秤开发。