一九八二年
（创刊号）
无锡轻工业学院学报
JOURNAL OF THE WUXI INSTITUTE OF LIGHT INDUSTRY

高速分件供送螺杆装置的理论与设计

许林成

摘　　要

本文着重阐述高速分件供送螺杆装置的有关理论与设计的一些关键性问题。其中包括：合理设计变螺距螺杆的新的分析计算方法，以及被供送物件或容器实现稳定运动的可控条件。

一、引　言

近些年来，在许多工业部门，特别是在现代包装领域内的自动机和自动线，如灌装、充填、封口、贴标、整理、检测等方面，分件供送螺杆装置有了比较广泛的应用。

借助不同类型的分件供送螺杆装置可以把规则或者不规则排列的成批物件（通常多为金属、非金属，异形、圆柱形的容器），按照所要求的排列、状态、间距、速度和方向分件逐个地供送到既定的工作部位。同时，使之相应地完成增距、减距、分流、合流、升降、起伏以及换向、翻身等动作。为了大幅度提高生产效率，正朝着连续化、高速化的方向发展。

图1所示的一种典型装置，是专为分件供送主体部分为圆柱形的容器和物件的。它的基本组成包括：尼龙螺杆，平动感应导板，进口缓冲器，不锈钢输送带，以及由上下两块金属或非金属材料制作的星形拨轮和弧形导板。

仅就高速分件供送螺杆而言，设计的关键在于，必须在满足被供送物件的外廓尺寸（主要是主体直径及有效高度）、星轮节距和生产能力等条件下，预选螺杆的内外直径及长度；合理确定螺旋线的组合形式，旋向及螺旋槽的基本参数；校核物件受螺杆及输送带的综合作用能否实现理想的平稳运动。这样，才能尽量减缓甚至消除各种冲击现象及由此引起的振动、噪声、磨损、卡塞等弊病，以确保设备高效而又可靠地运行。

由此可知，分件供送螺杆乃是构成此组合装置的最主要部件，为了妥善解决设计、制造和使用等问题，对其理论的研究就成为迫切需要的了。

二、螺旋线的组合形式及设计计算

首先要确定螺杆的外部结构形式。一般说来，前端呈截锥台形，有助于将物件顺畅地导

本文收到日期 1982 年 9 月 24 日

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

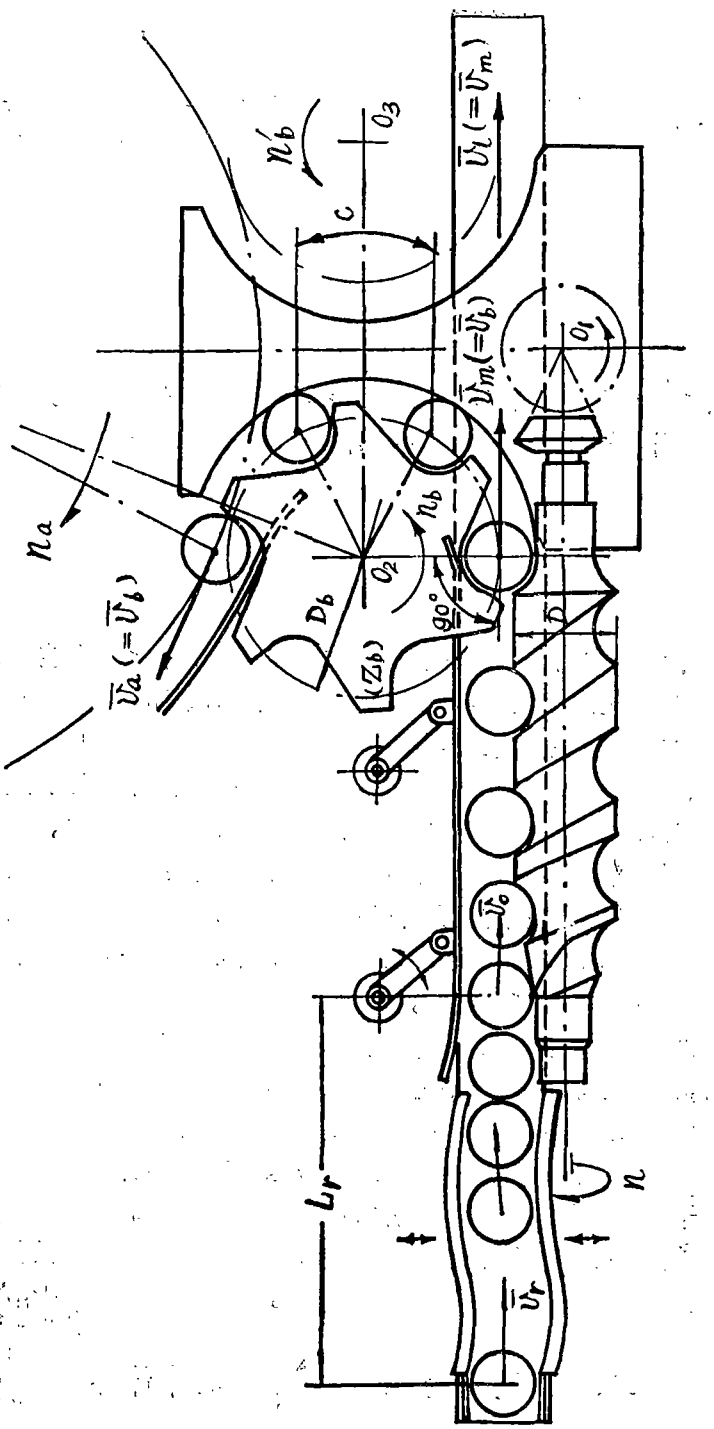


图 1

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

入螺杆的工作区段；而另一端应具有与物件等同半径的圆弧形过渡角，以便和星形拨轮同步衔接；至于中间部分则多取为正圆柱形体。

对图示的螺旋槽来说，为了平稳地导入高速运动着的物件，第一段最好采用等螺距，使它暂不产生加速度。

鉴于星形拨轮的节距通常都大于两只物件原来紧相接触时的中心距，显然，最后一段螺旋线一定是变螺距的。为改善物件的惯性运动，它应该制约物件以等加速度规律逐渐增大其间距。

实际上，对中低速分件供送螺杆（约250转/分以内），往往只需上述两段组合就行了，虽然其加速度曲线不连续，有阶跃突变，但在等加速度值不很大时，仍不致发生明显的柔性冲击。可是，当处于比较高速运转状态(约250～550转/分)时，欲取得较为紧凑的螺杆结构，就要慎重对待这个速度和加速度曲线的衔接问题了。用增添一过渡段——使加速度按正弦函数规律变化的螺旋线的办法可获得较为满意的结果。因此，设计高速变螺距螺杆，其螺旋线最好是单头的，用三段组成，并保证它们的位移、速度、加速度在各衔接点均对应相等。

基于上述认识，参阅图1和图2探讨设计高速分件供送螺杆组合螺旋线的计算式。

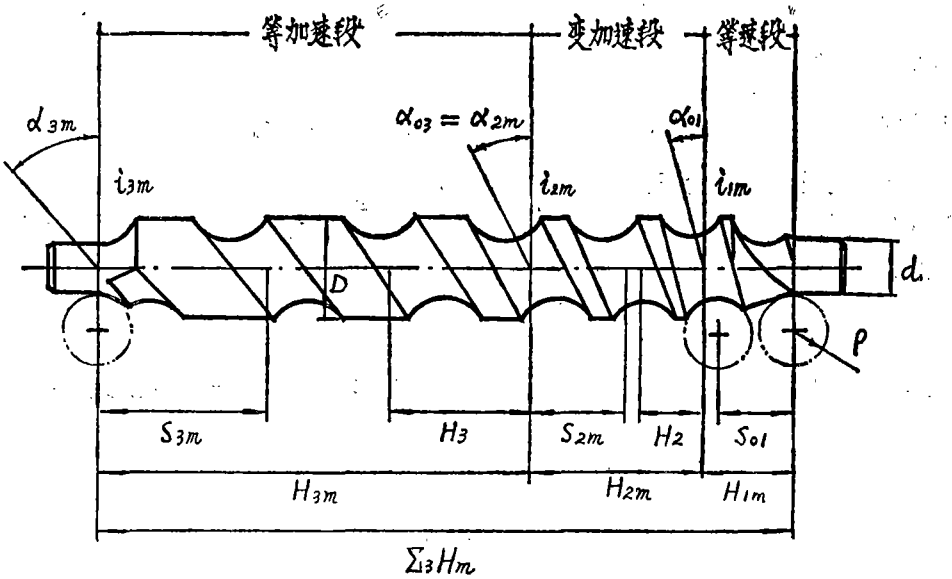


图 2

设：

ρ——被供送物件的主体半径；

D_b、V_b、C、Z_b——星形拨轮的节圆直径、周速、节距和牙数；

d_o、r_o、D、R——螺杆的内外直径和半径；

α_{01}、S_{01}、i_{1m}、H_{1m}、L_{1m}——等速段外螺旋线的螺旋角、螺距及最大螺旋圈数、轴向长度、周向展开长度；

α_{2m}、S_{2m}、i_{2m}、H_{2m}、L_{2m}——过渡段外螺旋线的最大螺旋角、螺距、螺旋圈数、轴向长度、周向展开长度；

α_{3m}、S_{3m}、i_{3m}、H_{3m}、L_{3m}——等加速段外螺旋线的最大螺旋角、螺距、螺旋圈数、轴向长度、周向展开长度；

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

n、n_b、Q——螺杆、拨轮的每秒转数及供送能力；

V_o、V_{2m}、V_{3m}——等速段、过渡段及等加速段的最大供送速度；

V_l——水平输送带的线速度。

据此可求各参数的互依变化关系。

（一）星形拨轮

若已知 Q、D_b、Z_b，则

$$C = \frac{\pi D_b}{Z_b} \tag{1}$$

$$n = Q \tag{2}$$

$$n_b = \frac{n}{Z_b} \tag{3}$$

当物件受高速输送带拖动时，若整个变螺距螺杆对它仅起一定的制挡作用，故要求

$$V_l = V_{3m} = V_b = cn \tag{4}$$

（二）螺杆等速段

通常取 $R \leqslant r_o + \rho$ 或 $R = (0.7 \sim 1.0)(r_o + \rho)$ (5)

具体确定此值请见后面的论证。

令 Δ 代表在等速段两相邻物件的平均间隙（一般约数毫来），它取决于物件外径的变化幅度。因此

$$S_{01} = 2\rho + \Delta \tag{6}$$

取 $0 \leqslant i_1 \leqslant i_{1m}$（通常 $i_{1m} = 1$），由于等速段外螺旋线的展开图形为一条斜直线，可得

$$\operatorname{tg} \alpha_{01} = \frac{S_{01}}{\pi D} \tag{7}$$

$$L_1 = \pi D i_1, \quad L_{1m} = \pi D i_{1m} \tag{8}$$

$$H_1 = S_{01} i_1, \quad H_{1m} = S_{01} i_{1m} \tag{9}$$

$$V_o = S_{01} n = \pi D n \operatorname{tg} \alpha_{01} \tag{10}$$

下面讨论物件供入初速度 V_r 的控制问题。

见图 1，在一般情况下，$V_l \geqslant V_r > V_o$。对此最好利用缓冲装置（如可调式曲板或刷板通道）减速，使之趋近于 V_o。另外，若 $V_l > V_o > V_r$，只好借助水平输送带对它的摩擦作用力继续增速，使之趋近于 V_o。供入段的输送长度 L_r 可根据运动学及动力学的基本定律得出。当供入初速度 V_r 及输送带与物件的滑动摩擦系数 f_d 均为已知值时，则

$$L_r = \frac{V_0^2 - V_r^2}{2 f_d g} \tag{11}$$

g——物件的重力加速度常数。

再求出沿螺杆全长物件与输送带的最大速差

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\Delta V_m = V_1 - V_o = (C - S_{01})n \tag{12}$$

因为ΔV_m的大小对板链工作面的磨损及振动均有很大影响，因此，C、n值不应过大。

（三）螺杆过渡段（变加速段）

当物件脱离等速段的瞬间，为避免突然过高的加速而把相应的惯性力施加到物件上引起冲击、后倾、振动等现象，以保证平稳的供送运动，此段加速度a_2最好由O按正弦函数变化规律增至最大值$\bar{a}$。令

$$a_2 = C_1 \sin\frac{\pi}{2} \cdot \frac{t_2}{t_{2m}} \tag{13}$$

$$V_2 = \int a_2 dt_2 = -C_1 \frac{2t_{2m}}{\pi} \cos\frac{\pi}{2} \cdot \frac{t_2}{t_{2m}} + C_2 \tag{14}$$

$$H_2 = \int V_2 dt_2 = -C_1 \frac{4t_{2m}^2}{\pi^2} \sin\frac{\pi}{2} \cdot \frac{t_2}{t_{2m}} + C_2 t_2 + C_3 \tag{15}$$

式中t_2、t_{2m}分别代表物件移过行程H_2、H_{2m}所需的工作时间。由边界条件得

当$t_2 = t_{2m}$时，　$C_1 = \bar{a}$

$t_2 = 0$　时，　$C_2 = V_o + \dfrac{2\bar{a}t_{2m}}{\pi}$

$C_3 = 0$

将以上系数C_1、C_2、C_3代入[15]式，解出

$$H_2 = \left(V_o + \frac{2\bar{a}t_{2m}}{\pi}\right)t_2 - \frac{4\bar{a}t_{2m}^2}{\pi^2} \sin\frac{\pi t_2}{2t_{2m}}$$

取$0 \leqslant i_2 \leqslant i_{2m}$（通常$i_{2m} = 1 \sim 2$），故有

$$t_2 = \frac{i_2}{n}, \qquad t_{2m} = \frac{i_{2m}}{n}$$

$$L_2 = \pi D i_2, \qquad L_{2m} = \pi D i_{2m} \tag{16}$$

及

$$H_2 = S_{01} i_2 + \frac{4i_{2m}^2 \bar{a}}{\pi^2 n^2}\left(\frac{\pi i_2}{2i_{2m}} - \sin\frac{\pi i_2}{2i_{2m}}\right)$$

$$= L_2 \operatorname{tg}\alpha_{01} + \frac{4i_{2m}^2 \bar{a}}{\pi^2 n^2}\left(\frac{L_2}{2Di_{2m}} - \sin\frac{L_2}{2Di_{2m}}\right) \tag{17}$$

$$H_{2m} = S_{01} i_{2m} + \frac{2(\pi - 2)\bar{a}}{\pi^2 n^2} i_{2m}^2 \tag{18}$$

此段螺旋线的展开图形实质上是由一条斜直线和一条按摆线投影规律变化的曲线相迭加而成的。

微分[17]式得

$$\frac{dH_2}{dL_2} = \operatorname{tg}\alpha_2 = \operatorname{tg}\alpha_{01} + \frac{i_{2m}\bar{a}}{\pi^2 R n^2}\left(1 - \cos\frac{\pi i_2}{2i_{2m}}\right) \tag{19}$$

1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

则 $$\mathrm{tg}\alpha_{2m}=\mathrm{tg}\alpha_{01}+\frac{i_{2m}\bar{a}}{\pi^2Rn^2} \tag{20}$$

参阅图2，设 H_{i_2}，H_{i_2-1} 各为对应于 $1\leqslant i_2\leqslant i_{2m}$ 及 i_2-1 的螺杆轴向长度。由(17)式求出限定区间内的任意螺距值

$$\begin{aligned}S_2&=H_{i_2}-H_{i_2-1}\\&=S_{01}i_2+\frac{4i_{2m}^2\bar{a}}{\pi^2n^2}\left[\frac{\pi i_2}{2i_{2m}}-\sin\frac{\pi i_2}{2i_{2m}}\right]-\\&\quad-S_{01}(i_2-1)-\frac{4i_{2m}^2\bar{a}}{\pi^2n^2}\left[\frac{\pi(i_2-1)}{2i_{2m}}-\sin\frac{\pi(i_2-1)}{2i_{2m}}\right]\\&=S_{01}-\frac{4i_{2m}\bar{a}}{\pi n^2}\left[\frac{1}{2}-\frac{2i_{2m}}{\pi}\cos\frac{\pi(2i_2-1)}{4i_{2m}}\sin\frac{\pi}{4i_{2m}}\right]\end{aligned} \tag{21}$$

将系数 C_1、C_2 代入(14)式，得

$$V_2=V_0+\frac{2i_{2m}\bar{a}}{\pi n}\left(1-\cos\frac{\pi i_2}{2i_{2m}}\right) \tag{22}$$

$$V_{2m}=V_0+\frac{2i_{2m}\bar{a}}{\pi n}=\pi Dn\,\mathrm{tg}\alpha_{2m} \tag{23}$$

以上表明，在其他条件一定时，α_2、S_2、v_2 均随 i_2 的增加而增大。当 $i_2=0$，则 $\alpha_2=\alpha_{01}$，$V_2=V_0$，$a_2=0$。证明完全符合前两段的位移、速度、加速度曲线的衔接要求。

（四）螺杆等加速段

鉴于物件的供送加速度为恒定值 $\bar{a}$，可写出

$$a_3=\bar{a} \tag{24}$$

$$V_3=\int\bar{a}dt_3=\bar{a}t_3+C_4 \tag{25}$$

$$H_3=\int v_3dt_3=\frac{\bar{a}}{2}t_3^2+C_4t_3+C_5 \tag{26}$$

式中，t_3 为物件被移过行程 H_3 所需的时间。由边界条件得知，$t_3=0$，$C_4=V_{2m}$，$C_5=0$。将此代入(26)式，解出

$$H_3=V_{2m}t_3+\frac{\bar{a}}{2}t_3^2$$

取 $0\leqslant i_3\leqslant i_{3m}$(通常 $i_{3m}=2\sim4$)，故有

$$t_3=\frac{i_3}{n}$$

$$S_{03}=\frac{V_{2m}}{n}$$

$$\mathrm{tg}\alpha_{03}=\frac{S_{03}}{\pi D} \tag{27}$$

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$L_3 = \pi D i_3, \quad L_{3m} = \pi D i_{3m} \tag{28}$$

参阅(20)式不难证明：$\alpha_{03} = \alpha_{2m}$

进而解出

$$H_3 = S_{03} i_3 + \frac{\bar{\bar{a}}}{2n^2} i_3^2 = L_3 \operatorname{tg} \alpha_{03} + \frac{\bar{\bar{a}}}{2\pi^2 D^2 n^2} L_3^2 \tag{29}$$

显然，等加速段螺旋线的展开图形是由一条斜直线和一条按抛物线规律变化的曲线相迭加而成的。

视 L_3 为自变量，微分(29)式

$$\frac{dH_3}{dL_3} = \operatorname{tg}\alpha_3 = \operatorname{tg}\alpha_{03} + \frac{\bar{\bar{a}} i_3}{\pi D n^2}$$

$$\operatorname{tg}\alpha_{3m} = \operatorname{tg}\alpha_{03} + \frac{\bar{\bar{a}} i_{3m}}{\pi D n^2} = \frac{C}{\pi D} \tag{30}$$

由此导出

$$\operatorname{tg}\alpha_3 = \operatorname{tg}\alpha_{03} + \frac{C - S_{03}}{L_{3m}} i_3 \tag{31}$$

$$\bar{a} = \frac{(C - S_{01})\pi n^2}{2i_{2m} + \pi i_{3m}} \tag{32}$$

或改写为

$$\frac{\bar{\bar{a}}}{n^2} = \frac{\pi(C - S_{01})}{2i_{2m} + \pi i_{3m}} \tag{33}$$

由此可见，$\bar{a}$ 与 n^2 成正比，与 i_{2m}、i_{3m} 成反比。

设H_{i_3}，H_{i_3-1} 各为对应于 $1 \leqslant i_3 \leqslant i_{3m}$ 及 $i_3 - 1$ 的螺杆轴向长度。由(29)式求出限定区间内的任意螺距值

$$\begin{aligned} S_3 &= H_{i_3} - H_{i_3-1} \\ &= S_{03} i_3 + \frac{\bar{\bar{a}}}{2n^2} i_3^2 - S_{03}(i_3 - 1) - \frac{\bar{\bar{a}}}{2n^2}(i_3 - 1)^2 \\ &= S_{01} + (C - S_{01}) \frac{2i_{2m} + \pi i_3 - \frac{\pi}{2}}{2i_{2m} + \pi i_{3m}} \end{aligned} \tag{34}$$

$$S_{3m} = C - \frac{\pi(C - S_{01})}{2(2i_{2m} + \pi i_{3m})} \tag{35}$$

将 C_4 代入(25)式，得

$$V_3 = V_{2m} + \frac{\bar{\bar{a}}}{n} i_3 \tag{36}$$

$$V_{3m} = V_{2m} + \frac{\bar{a}}{n} i_{3m} = \pi D n \operatorname{tg}\alpha_{3m} = Cn \tag{37}$$

十分清楚，在其他条件一定时，α_3、S_3、V_3 均随 i_3 的增加而增大，并确认 $S_{3m} < C$。若 $i_3 = 0$，则 $\alpha_3 = \alpha_{2m}$，$V_3 = V_{2m}$，$a_3 = \bar{a}$。这也完全符合后两段的位移、速度、加速度曲线的衔

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

接要求。

依(27)、(29)、(32)式解出

$$H_{3m} = S_{03} i_{3m} + \frac{\bar{a}}{2n^2} i_{3m}^2$$

$$= S_{01} i_{3m} + \frac{C - S_{01}}{i_{2m} + \frac{\pi}{2} i_{3m}} \left(i_{2m} i_{3m} + \frac{\pi}{4} i_{3m}^2 \right) \qquad (38)$$

写出高速螺杆组合螺旋线展开图形的周向及轴向全长

$$\sum_3 L_m = L_{1m} + L_{2m} + L_{3m} \qquad (39)$$

$$\sum_3 H_m = H_{1m} + H_{2m} + H_{3m} \qquad (40)$$

如前述，中低速螺杆可取 $i_{2m} = 0$、$H_{2m} = 0$，在这种情况下，除星形拨轮及等速段具有同前一样的算式以外，其余有些部分尚需做新的转化，如等加速段：

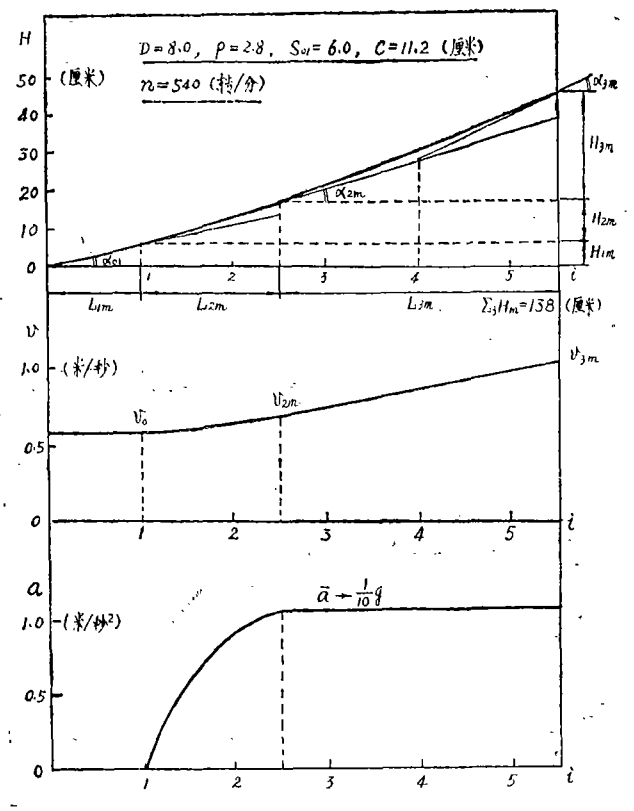


图 3

$$\alpha_{03} = \alpha_{01}$$

$$S_{3m} = C - \frac{C - S_{01}}{2 i_{3m}}$$

$$H_{3m} = \frac{i_{3m}}{2}(C + S_{01})$$

$$\bar{a} = \frac{n^2}{i_{3m}}(C - S_{01})$$

这一套计算式的整理本文省略。

绘制变螺距螺杆空间螺旋线的展开图形一般可采用两种方法。一是根据已知条件及有关解析式进行计算，然后求得一系列座标值，依此描点，即能直接连成所需之曲线。此法结果比较准确，但比较麻烦，绘制三段组合的高速螺杆螺旋线时可以采用，图 3 便属此例。二是根据已知条件先算出若干基本数据，确定作图的边界点及衔接点，再参照各段曲线特性逐一按规定画法连结而成。此法结果虽有点粗糙，但却相当简捷，对绘制二段组合的中低速螺杆螺旋线是适用的，如图 4 所示。

从螺杆的制造角度来看，通过此空间螺旋线的所有矢径，均应垂直相交于粗齿圆柱铣刀的中心轴线。所以，变螺距螺杆的外螺旋线便成为手控机械加工螺旋槽的对刀基准线；相应的内螺旋线则可作为焊接法确定螺旋槽最凹点的基准线。现在国内已有采用专用自动机床或改装的立式铣床加工尼龙分件供送螺杆。为了正确控制匀转棒料的纵向走刀量，就要借助螺旋线展开图形来绘制有关的靠模凸轮(往往还需辅以液压等放大机构)。完成此切削过程就宛

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

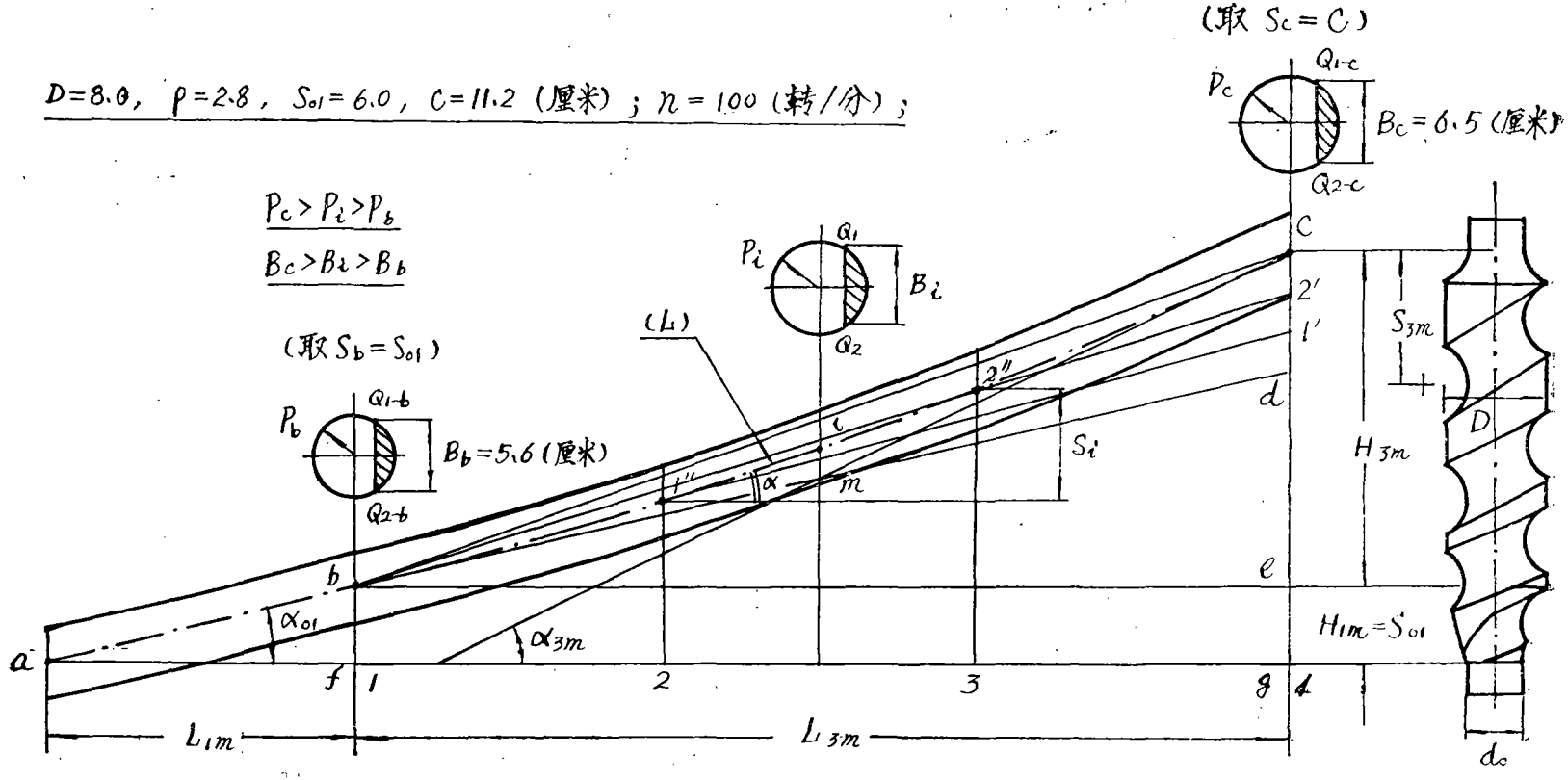


图 4

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

如让螺杆与物件进行啮合运动似的。正因为可以提高加工质量和跑合性能，故能满足高速分件供送螺杆的基本要求。至于新近发展起来的运用电子计算机自动控制变螺距杆的切削加工方法，当然更有必要以理论为指导建立所需的“数学摸型”。

三、螺旋槽的轴向剖面几何图形及参数选择

分件供送螺杆的螺旋槽主要起着推进、制挡、分隔成列物件的作用，不过这些作用会因条件变化有所差别而已。

设计螺旋槽的宗旨，是要按照被供送物件主体部位的形状、大小及预选的螺杆内外直径和螺距，来确定螺旋槽轴向剖面几何图形及其宽度。这些，对实现稳定可靠的供送运动以及检测螺杆的设计制造质量（如焊接法、切削法和模铸法）均有重要意义。另外，还为合理确定螺杆外半径R值提供了依据。

我们设想刚性物件的圆柱体母线能对螺杆自由贯穿，而且让两轴线夹角保持垂直，两轴线间距保持定值。这样，当物件依反转法原理沿已确定的内空间螺旋线作同步的移动兼滚动时，有关母线与螺杆某轴向剖面所形成的各迹点的包络线，便是螺旋槽在该轴向剖面上的几何图形。

强调指出（详见参考文献[2]），对变螺距螺杆而言，整个空间螺旋线上各螺旋槽的轴向剖面几何图形，本身既无任何对称性，又互不相同。前后的螺距变化愈大，此差异亦愈明显。但是，为了简化设计计算，可在螺杆螺旋线展开图形上某点的左右两侧至少各量取半个螺距值，然后把此区段内（即两端点间）变螺距螺旋线近似地转化为等螺距的，就像在图4中对i点所采取的处理方法那样。

参阅图5，经螺杆和物件的轴心作一直角座标系 $x-O_1-y$。在圆柱体物件的外表面上任取一母线 $m-n$，令其与座标面的交点为 $m(l,\ k)$。于是假想该母线沿着以k为半径的转化

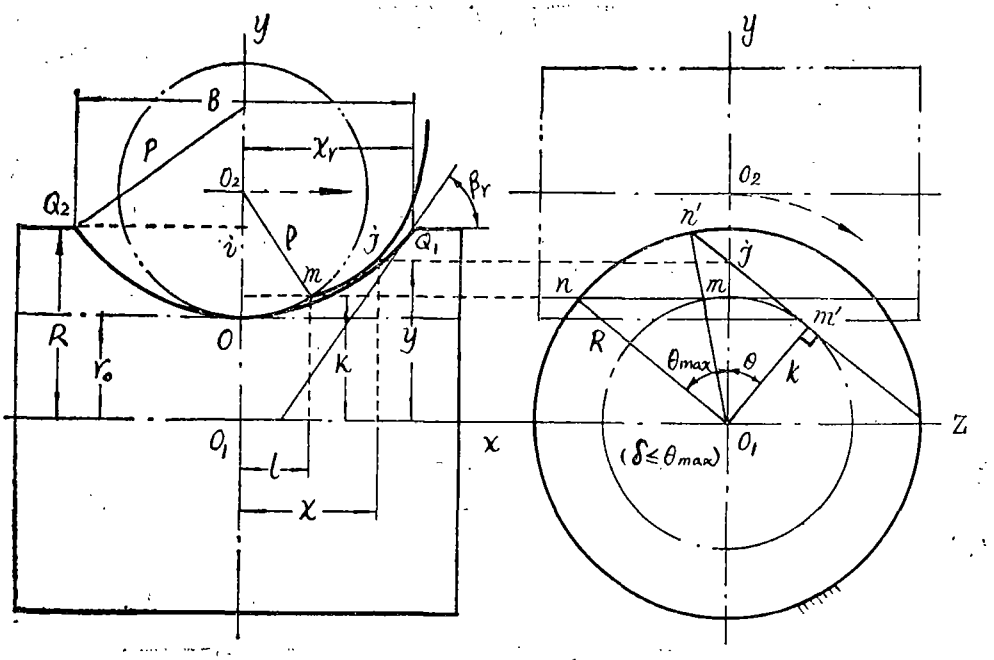


图5

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

等螺距螺旋线由初始位置匀速地移过 $1-x$ 距离，又同步地滚过 θ 角度而至一新位置 $m'-n'$。此时，它同该轴向剖面相截的迹点的座标为 $j(x, y)$。

令 i 点转化等螺距计算值为 S，则

$$y = k\sec\theta \tag{41}$$

$$\frac{\theta}{\pi} = \frac{x-1}{0.5S} \quad 或 \quad \theta = \frac{2\pi(x-1)}{S}$$

$$k = r_0 + \rho - \sqrt{\rho^2 - l^2}$$

说明对于不同的 $l\ (0 \leqslant l \leqslant \rho)$，就能得到相应不同的迹点曲线，亦即函数 $y = f(x)$。所以 l 是曲线族方程

$$F(x,y,l) = y - (r_0 + \rho - \sqrt{\rho^2 - l^2})\sec\frac{2\pi(x-l)}{S} = 0$$

的参数。

关于曲线族包络线参数方程的一般求法，有数学的专门论著，从略。在此只援引基本原理，导出偏导数 $F_l(x,y,l) = 0$，使之与 $F(x,y,l) = 0$ 联立。由此得函数 $x = f_1(l)$ 及 $y = f_2(l)$，即曲线族的切点方程或包络方程。依此便可画出所求的螺旋槽轴向剖面的几何图形。

由 $F_l(x,y,l) = 0$ 得

$$\left(\frac{l}{\sqrt{\rho^2 - l^2}} - \frac{2\pi k}{S}\mathrm{tg}\theta\right)\sec\theta = 0$$

理论上，$0 \leqslant \theta < 90°$，即 $\sec\theta > 0$，显然，

$$\mathrm{tg}\theta = \frac{Sl}{2\pi k\sqrt{\rho^2 - l^2}}$$

由于 $\sec^2\theta = 1 + \mathrm{tg}^2\theta$，代入(41)式中，导出曲线族包络线轨迹的 y 座标值

$$y = f_2(l) = \sqrt{k^2 + \frac{S^2 l^2}{4\pi^2(\rho^2 - l^2)}} \tag{42}$$

同理，以 y 值代入(41)式中，可导出曲线族包络线轨迹的 x 座标值

$$x = f_1(x) = l + \frac{S}{2\pi}\,\mathrm{arctg}\frac{Sl}{2\pi k\sqrt{\rho^2 - l^2}} = l + \frac{S\theta}{2\pi} \tag{43}$$

对(42)式而言，若取 $y_r = R$，则 m 点座标即应改写为 (l_r, k_r)，故

$$k_r = r_0 + \rho - \sqrt{\rho^2 - l_r^2} = R\cos\theta_r \tag{44}$$

但是，l_r 却以隐函数形式存在于

$$k_r^2 + \left(\frac{S}{2\pi}\right)^2 \frac{l_r^2}{\rho^2 - l_r^2} = R^2 \tag{45}$$

之中。当 ρ、r_0、R、S 均已知时，可应用试探法或者图解法求出 l_r，而其实用值的变化范围为 $0 \leqslant l_r < \rho$。

此外，还需求出螺旋槽宽度 $Q_1Q_2 = B$ 的计算式。由于可将变螺距螺旋线按所求点转化为相应的等螺距值，以致该螺旋槽轴向剖面几何图形对 y 轴具有对称性，可见

$$B = 2x_r = 2\left(l_r + \frac{S\theta_r}{2\pi}\right) \tag{46}$$

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

而且，B是随α、S的增大而增大的。如图4所示，它也是变螺距螺杆的一个重要特征。

仍利用前述的已知条件，参阅图5和图6，求出螺旋槽两边缘线与物件圆柱表面接触点（切点）a、b之矢径同水平面的上下两夹角

$$\delta = \theta_r = \arccos\frac{k_r}{R} \tag{47}$$

下面进一步探讨当ρ、r_o、S＝C选定后合理确定R的准则，以及由此引起螺旋槽向剖面几何图形的变化和对物件供送稳定性的影响。

先从最简单的情况着手分析。见图6，假定圆柱形物件与运输带的接触面间存在着速差及摩擦效应，并使前者产生加速度为a_o的前进运动，而线速度由初始的v_o坛加到v（$<v_1$），又令G、h_z、ρ_o代表物件的重量、重心高度及底面接触半径，N_d、F_d代表水平输送带对物件的法向反作用力和摩擦力，则保证物件不后倾（接触点趋于d′）的根本前提是：对物件的重心取矩，应有

$$F_d h_z < N_d \rho_o$$

其中

$$F_d = f_d G = \frac{G}{g} a_o \qquad N_d = G$$

故得

$$h_z < \frac{\rho_o}{f_d} \quad 或 \quad \rho_o > f_d h_z \tag{49}$$

据此，若取$F_d < \frac{G}{g}\bar{\bar{a}}$，亦即$a_o = f_d g < \bar{\bar{a}}$，进而把变螺距螺杆及侧向导轨的作用都考虑进去，且控制适当条件依旧保证它不后倾，那末，被供送物件与螺旋槽的接触点必偏于a处。在这种情况下，螺杆对物件能起辅助的推进作用。

与此相反，者取$F_d > \frac{G}{g}\bar{\bar{a}}$，亦即$a_o = f_d g > \bar{\bar{a}}$，那末，被供送物件与螺旋槽的接触点必偏于b处。在这种情况下，螺杆对物件能起制挡作用。

理论和实践都表明，采用后一种方案，加之取$a < \frac{1}{10} g$，益处较多，也最为常见。因为它能供送高低不等的物件；根据所选的f_d确定适当的a_o，会有助于减轻非金属螺杆的受力强度和磨损速率。另一方面，设法增强金属输送带工作表面的耐磨性能却是容易办到的，因而取$V_1 = V_{3m}$就足够了。

至此，除明确了物件与螺旋槽的作用力点以外，还能通过简化条件大体确定该合力作用线的方向。

圆柱形物件同螺旋槽完全啮合之际，两者只保持空间的线接触，如图中a—O—b表示的那样。实质上它是一段同物件中心轴线相斜交的平面截口，即椭圆曲线。所以，经过该段接触线的所有法向作用力，包括图8中的$\bar{P}_n$在内，必在相互平行的平面上且同竖轴O_2垂直相交。若暂不考虑这高付机构内部的滑动摩擦效应，而取$R_{bx} = P_x$，$R_{by} = P_y$，则可求b点（或a点）的侧压比

$$\xi_r = \frac{P_y}{P_x} = \frac{bc}{co_2} = ctg\gamma \tag{49}$$

同时把它作为衡量其工作性能的一个参考尺度。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

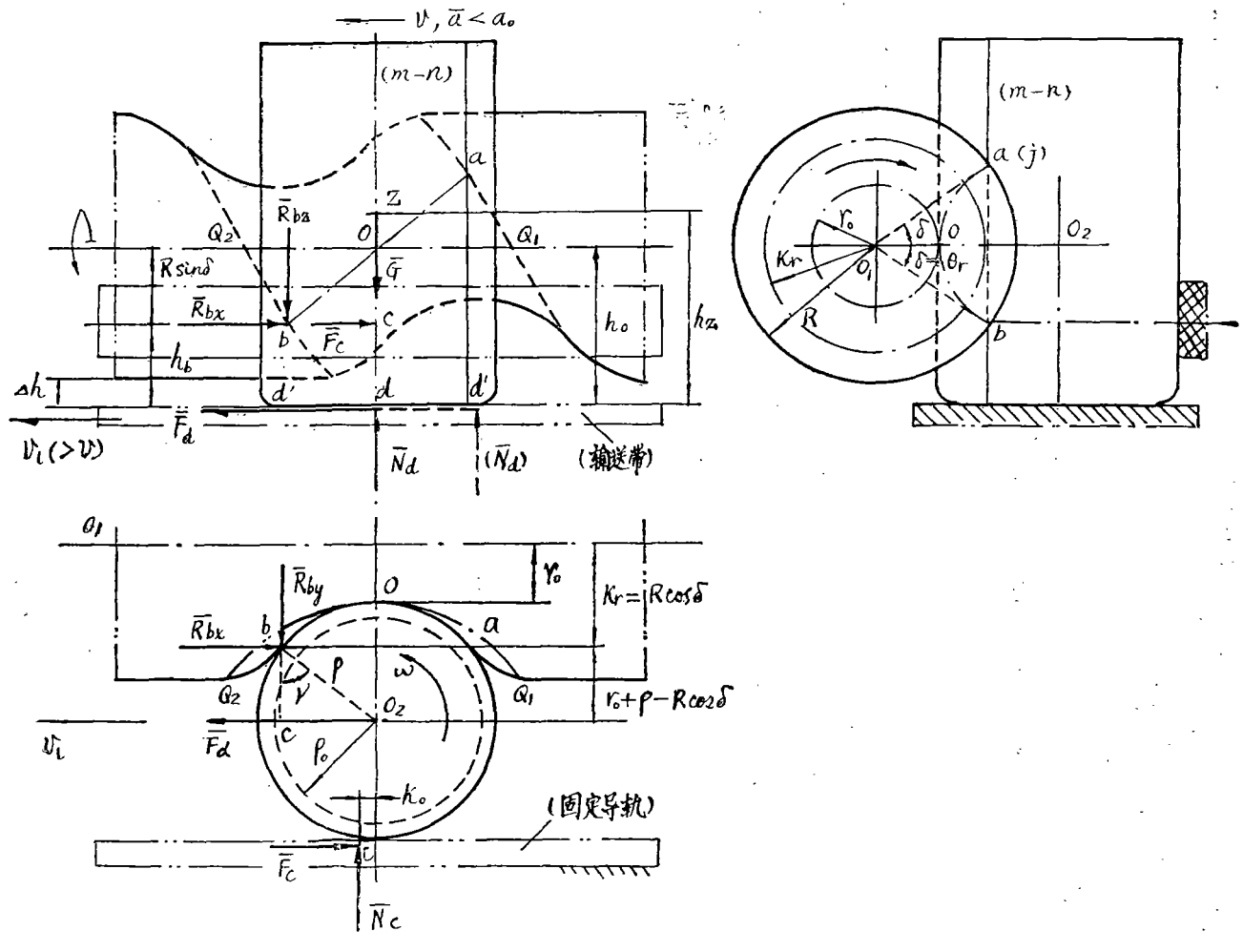


图 6

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由于 $bc = r_o + \rho - R\cos\delta$

$$co_2 = \sqrt{bo_2^2 - bc^2} = \sqrt{\rho^2 - (r_o + \rho - R\cos\delta)^2}$$

解出
$$\xi_r = \frac{r_o + \rho - R\cos\delta}{\sqrt{\rho^2 - (r_o + \rho - R\cos\delta)^2}} = \sqrt{\left(\frac{\rho}{l_r}\right)^2 - 1} \qquad (50)$$

或写作
$$l_r = \frac{\rho}{\sqrt{1 + \xi_r^2}} \qquad (51)$$

小结：

对供送圆柱形物件来说，决定螺旋槽轴向剖面几何图形及其大小的基本因素是ρ、r_o、R和S。ρ是给定值，r_o可依轴等零件的结构尺寸估出，S则变动于S_{01}与C之间，因此，有待进一步研究确定的，只剩R了。

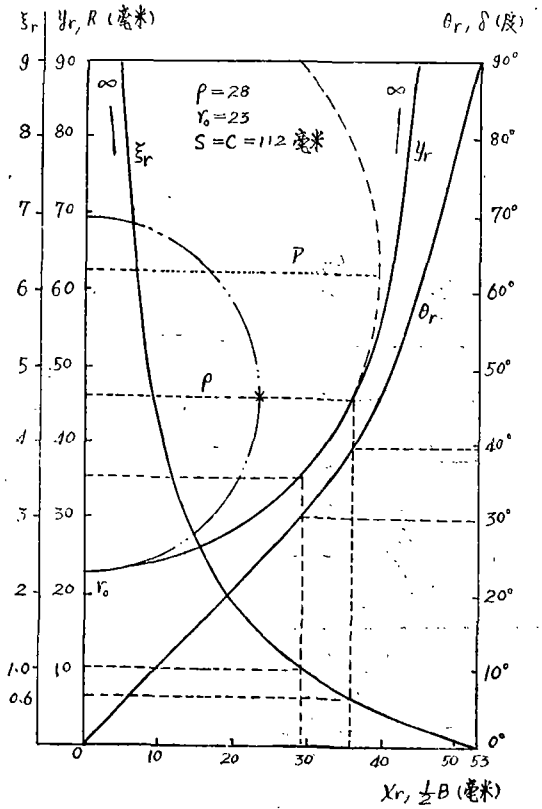


图7

图7中的三条函数曲线$y_r = f(x_r)$，$\theta_r = \phi(x_r)$及$\xi_r = \Psi(x_r)$是按已知的ρ、r_o、S=C各特定值，借(45)、(46)、(47)、(50)等式进行逐一地计算、描点而绘制出来的。通过此典型实例可知，y_r(R)愈大，则x_r(B)、θ_r(δ)亦随之增大，而ξ_r却随之减小。反之亦然。计算还表明，若增加S，B、δ、ξ_r都将增大。

设计时务必合理选择ξ_r。在其他条件相同或相近时，为了防止螺杆与供送物件之间产生过大的侧向压强以致造成严重磨损、卡塞甚至破坏，必须尽量选取适当偏低一些的侧压比。但是，当$R > r_o + \rho$，$y_r = f(x_r)$曲线变陡，$\xi_r = \Psi(x_r)$曲线变缓，这样一来，ξ_r稍有减小，就会使R显著增大。而R过大是没有必要的，因为会造成体形笨重、加工麻烦和材料浪费。所以，一般取$\xi_r = 0.6 \sim 1.0$，相应地取$R = (0.7 \sim 1.0)(r_o + \rho)$为宜。

针对这种情况，螺旋槽轴向剖面几何图形也能较准确地用半径为P的圆弧所代替。由图5，令槽深$\Delta R = R - r_o$，得

$$P^2 = (P - \Delta R)^2 + \frac{B^2}{4}$$

即
$$P = \frac{1}{2\Delta R}\left(\frac{B^2}{4} + \Delta R^2\right) \qquad (52)$$

欲求作螺杆螺旋线上某点的螺旋槽轴向剖面几何图形，可采取如下步骤：先选定ρ、r_o、S(有时取S=C)，接着预选ξ_r，再按有关式子依次算出l_r、x_r、y_r。经校核认为符合$R \leqslant r_o + \rho$，便可根据r_o、R、B画半径为P的圆弧Q_1OQ_2。

最后求出

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\gamma = \text{arc ctg}\,\xi_r \qquad (49')$$

以待对物件进行受力分析和校核供送稳定性时用。

四、物件的供送布局及稳态控制

对于由右旋变螺距螺杆、水平输送带和固定侧向导轨所组成的“下压式”布局，为达到正确控制被供送物件时稳定运动以及校核其受压强度等目的，必须剖析物件产生等加速运动时的受力状况。

见图 6 和图 8 。分析的前提仍然是 $V_1 > V$，$a_o > \bar{a}$，$h_z < \frac{\rho_o}{f_d}$。仅就某特定的啮合位置而言，物件的圆柱体在与螺旋槽的接触点 b，与固定侧向导轨的接触点 c，与水平输送带的接触点 d，作用着一空间力系，即正压力 $\overline{P_n}$、$\overline{N_c}$、$\overline{N_d}$、和摩擦力 $\overline{F_\tau}$、$\overline{F_c}$、$\overline{F_d}$（相应的滑动摩擦系数各为 f_b、f_c、f_d）。其中，

总合力 $\overline{R_b} = \overline{P_n} + \overline{F_\tau}$

法向力 $\overline{P_n} = \overline{P_x} + \overline{P_y}$

$P_x = P_n \sin\gamma, \quad P_y = \xi_r P_x = \xi_r P_n \sin\gamma$

切向力 $\overline{F_\tau} = \overline{F_x} + \overline{F_u}$

$\overline{F_u} = \overline{F_{uy}} + \overline{F_{uz}}$

$$F_\tau = f_b P_n = \frac{f_b}{\sin\gamma} P_x = f_z P_x$$

$f_z = \frac{f_b}{\sin\gamma}$，称为转化滑动摩擦系数。进而写出

$F_x = F_\tau \sin\alpha = f_z P_x \sin\alpha$

$F_u = F_\tau \cos\alpha = f_z P_x \cos\alpha$

$F_{uy} = F_u \sin\delta = f_z P_x \cos\alpha \cdot \sin\delta$

$F_{uz} = F_u \cos\delta = f_z P_x \cos\alpha \cdot \cos\delta$

将 $\overline{R_b}$ 沿空间直角座标方向分解为 $\overline{R_{bx}}$、$\overline{R_{by}}$、$\overline{R_{bz}}$，即取

$\overline{R_b} = \overline{R_{bx}} + \overline{R_{by}} + \overline{R_{bz}}$

$R_{bx} = P_x + F_x = (1 + f_z \sin\alpha) P_x = A P_x$

$A = 1 + f_z \sin\alpha \qquad (53)$

$R_{by} = P_y - F_{uy} = (\xi_r - f_z \cos\alpha \cdot \sin\delta) P_x = B P_x$

$B = \xi_r - f_z \cos\alpha \cdot \sin\delta \qquad (54)$

$R_{bz} = F_{uz} = C P_x$

$C = f_z \cos\alpha \cdot \cos\delta \qquad (55)$

其余各力 $N_c = R_{by} = B P_x \qquad (56)$

$F_c = f_c N_c = f_c B P_x \qquad (57)$

$N_d = G + R_{bz} = G + C P_x \qquad (58)$

$F_d = f_d N_d = f_d (G + C P_x) \qquad (59)$

参阅图 6，以被供送物件为示力体建立方程

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

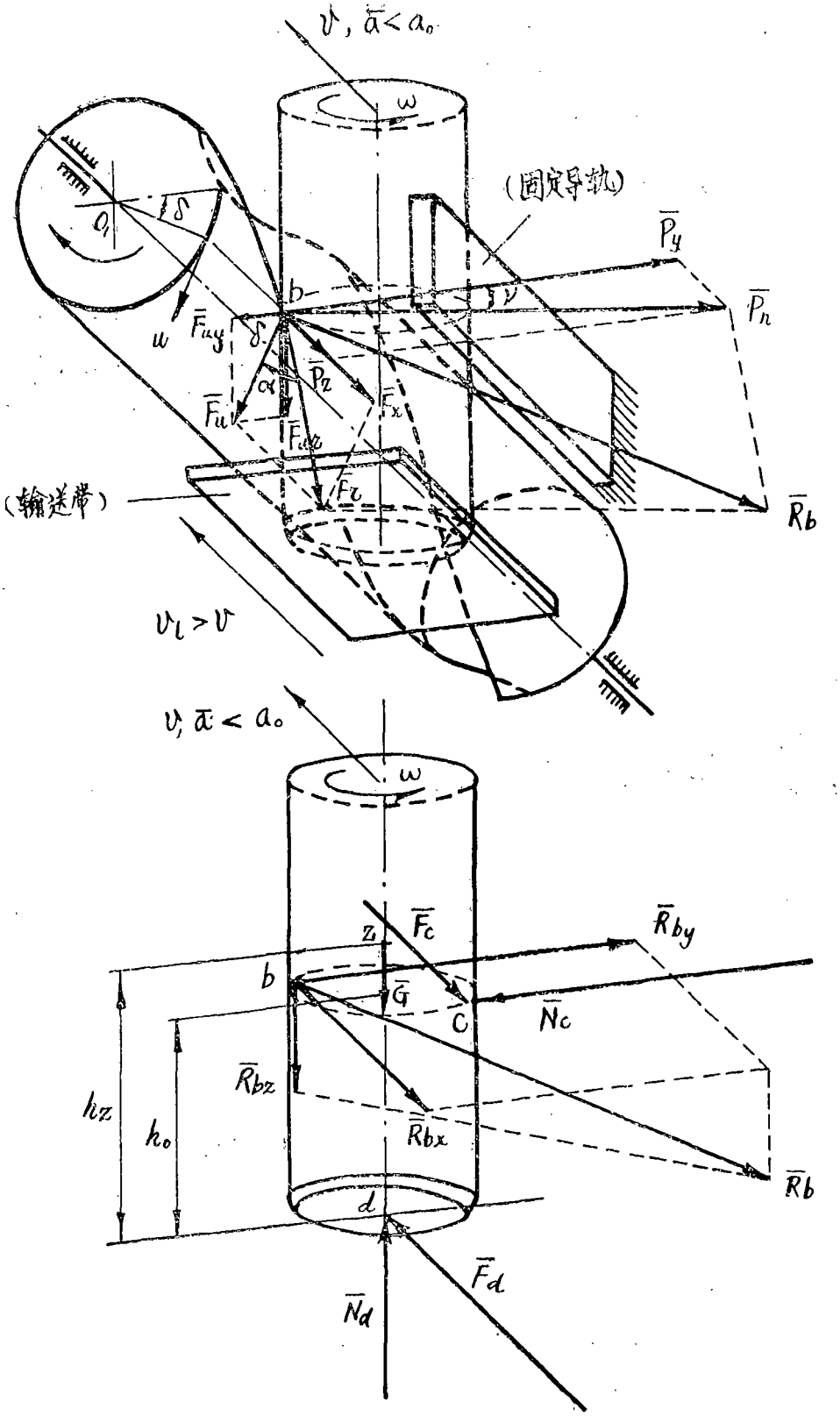


图 8

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$F_d - R_{bx} - F_c = \frac{G}{g}\bar{a}$$

代入有关值，经整理得

$$P_x = \frac{G(f_d g - \bar{a})}{g(A + f_c B - f_d C)} \tag{60}$$

但在供送过程中，欲保证物件不往左右偏斜，应力求作用力 $\overline{R}_c = \overline{N}_c + \overline{F}_c$ 与 $\overline{R}_{bx}$ 及 $\overline{R}_{by}$ 共一水平面。同时，为保证物件不往后倾(即不绕 d′ 点产生顺时针偏转)，务使

$$N_d\rho_o + (R_{bx} + F_c)(h_z - h_o + R\sin\delta) + R_{bz}\rho\sin\gamma > F_d h_z$$

解出

$$h_o < h_z + R\sin\delta + \frac{1}{A + f_c B}\left[\frac{G}{P_x}(\rho_o - f_d h_z) + C(\rho_o + \rho\sin\gamma - f_d h_z)\right]$$

故知螺杆中心轴线距水平输送带的最大许用高度

$$h_{omax} = h_z + R\sin\delta + \frac{1}{A + f_c B}\left[\frac{G}{P_x}(\rho_o - f_d h_z) + C(\rho_o + P\sin\gamma - f_d h_z)\right] \tag{61}$$

另一方面，有时也需校核被供送物件不往前倾 (即不绕 d″ 点产生逆时针偏转)，其条件为

$$N_d\rho_o + F_d h_z > (R_{bx} + F_c)(h_z - h_o + R\sin\delta) + R_{bz}\rho\sin\gamma$$

解出

$$h_o > h_z + R\sin\delta - \frac{1}{A + f_c B}\left[\frac{G}{\rho_x}(\rho_o + f_d h_z) - C(\rho\sin\gamma - \rho_o - f_d h_z)\right]$$

故知螺杆中心轴线距水平输送带的最小许用高度

$$h_{omin} = h_z + R\sin\delta - \frac{1}{A + f_c B}\left[\frac{G}{P_x}(\rho_o + f_d h_z) - C(\rho\sin\gamma - \rho_o - f_d h_z)\right] \tag{62}$$

总之，在给定前提下，要求螺杆的配置高度应控制在

$$h_{omin} < h_o < h_{omax}$$

及

$$h_o = R + \Delta h \tag{63}$$

螺杆下沿与工作台面(或输送带)的间隙 $\Delta h = 10$ 毫米左右。

在保证实现物件稳定运动的基础上，还需探求产生滑动兼滚动的控制条件。实际上，实现这种运动形式是具有如下优点的。

第一，较之纯滑动前进阻力小，结果被供送物件与其他工作构件的相互作用力也小。与此相应，磨损和动力消耗都会小一些。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

第二，物件一旦滚动起来，就可同螺杆和导轨达到比较均匀的接触，有助于克服卡塞等故障，使供送更加平稳可靠。但对供送盛装液体的广口容器来说，却应该注意防止溢溅等现象发生。

下面着手建立有关的力学方程。

满足滑动的条件，已由(60)式所确定，无需赘述。

满足滚动的条件，为简化分析计算，可以认为物件是接近等角速度 ω 旋转的，因而取

$$F_d\rho + R_{by}\rho\sin\gamma - R_{bx}\rho(1+\cos\gamma) \geqslant N_e k_e$$

其中 $k_e = f_g\rho$，k_e、f_g 各为物件对固定侧向导轨的滚动摩擦系数的线性值和等效滚动摩擦系数，由实验测定。

代入有关值，得

$$P_x \leqslant \frac{f_d G}{A(1+\cos\gamma) + B(f_g - \sin\gamma) - f_d C} \tag{64}$$

联立(60)和(64)两式，列出

$$\frac{f_d G}{A(1+\cos\gamma) + B(f_g - \sin\gamma) - f_d C} \geqslant \frac{f_d g - \bar{a}}{g(A + f_e B - f_d C)}$$

则

$$f_e \geqslant \frac{f_d g - \bar{a}}{f_d g B}[A(1+\cos\gamma) + B(f_g - \sin\gamma) - f_d C]$$

$$- \frac{A - f_d C}{B} = M \tag{65}$$

这表明：若 $f_e \geqslant M$，被供送物件就能实现滑动兼滚动的前进运动；否则，就只能实现纯滑动。

既然 f_e 是随变螺距螺杆若干参数的变化而变化的，那么，应该找出有代表性的部位（如等速段及等加速段的前后两端点）求出对应的 f_e 值，从而为合理设计侧向导轨，包括选择其工作表面的材料，提供必要的依据。

参 考 文 献

[1] 杉浦東逸：タイミング・スクリュー

(日)，食品機械装置，1976 年，第 8、9 期。

[2] 许林成：分件供送螺杆的理论与设计，

轻工业包装机械，1978 年，(总)第 19 期，西安轻工业机械科学研究所主编。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

The Theory and Design of The High Speed Timing Screw

Xu Lin-eheng

Abstract

This paper discusses emphatically the key problems with the theory and design of the high speed timing screw. There are new analytical and calculating methods of the varying pitch screw for rational design as well as control condition of transported containers or workpieces in stable motion.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net