

大型泥水平衡盾构气泡舱初始参数的设计

宋蕴璞, 徐宝福

(同济大学 机械工程学院, 上海 200092)

摘要: 首次从吸收脉动压力的角度, 建立了大型泥水平衡盾构气泡舱的气压弹簧数学模型, 并在此模型的基础上对该气泡舱进行了动态分析, 其中详细分析并确定了对泥水平衡盾构开挖面平衡控制起关键作用的气泡舱的初始泥水液位、压缩空气的初始体积、初始压力等初始参数的确定原则、计算公式以及最佳取值范围, 为此类盾构的泥水气压平衡控制系统的设计提供了理论依据, 最终得出的“气泡舱的初始泥水液位应维持在盾构中心轴线处”的结论与实际施工结果相一致。

关键词: 大型泥水平衡盾构; 气泡舱; 初始参数; 气压弹簧; 吸振率

中图分类号: TP 272

文献标识码: A

Initial Parameters for Bubble Cabin of Large Diameter Slurry Shield

SONG Yunpu, XU Baofu

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: An analysis is first made of the dynamic behavior of the large diameter slurry shield's bubble cabin. Based on the mathematical model of gas-pressure spring according to the effect of pulsating pressure, formula to calculate the parameters such as the initial volume and initial pressure of the gases in the bubble cabin which is the key factor to the excavating face-pressure-balanced control system is achieved, and the range of these parameters is also discussed, which is the basis of the control-system design. The ultimate conclusion, initial mud level in the bubble cabin should be maintained at the shield central axis, is consistent with the actual construction.

Key words: large diameter slurry shield; bubble cabin; initial parameters; gas-pressure spring; ratio of vibration absorbed

由于开挖面巨大, 大型泥水平衡盾构一般在小型泥水平衡盾构的泥水舱的基础上增加了气泡舱, 以达到控制开挖面压力稳定的效果。由于此类盾构均源自进口, 对于此类盾构气泡舱的初始泥水液位、压缩空气的初始体积、初始压力等初始参数的确定, 国内尚未进行深入的研究, 国外也没有公开的资料可查, 只是根据多项施工经验给出盾构气泡舱的初始泥水液位应维持在盾构中心轴线处的施工要求^[1]。由于这些初始参数在很大程度上影响着对盾构开挖面平衡控制的控制效果和质量^[2-3], 如果选择不当, 极易造成开挖面失衡, 引起塌方等严重施工事故, 因此有必要对这些参数进行深入研究, 找到确定其值的理论依据和最佳的取值范围。

1 泥水气压平衡系统简析

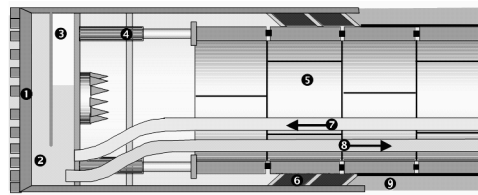
大型泥水平衡盾构的泥水气压平衡系统结构见图 1, 盾构泥水开挖室被沉浸墙分割为泥水舱和气泡舱两部分, 气泡舱内压缩空气的压力直接作用在舱内的泥水液面上。因气泡舱内的泥水液面发生上下波动引起盾构切口压力变化, 可通过打开进/排气阀改变气泡舱内压缩空气的气压值来平衡, 同时通过液位传感器, 可据气泡舱内泥水液位偏离规定值的情况来控制进、排泥管路中的进泥泵或排泥泵的转速, 使气泡舱内的泥水液位快速恢复到要求位置。

具有沉浸墙的泥水气压平衡系统, 其内部力的传递与作用原理与连通管作用原理相同, 如图 2 所示, 满足如下气液两相界面处的压力平衡方程:

$$p_{\text{axe}} = p_{\text{air}} + \rho_{\text{ni}} g(h - R) \quad (1)$$

式中: p_{axe} 为盾构切口泥水压力值, Pa; p_{air} 为气泡舱的气压力值, Pa; ρ_{ni} 为泥水舱的泥水密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; h 为泥水舱中泥水液位高度, 取泥水舱舱底亦即盾

构底径边缘为坐标原点, m ; R 为盾构半径, m .



1-切削刀盘; 2-泥水舱; 3-气泡舱; 4-推进油缸; 5-管片;
6-盾尾密封; 7-进泥管路; 8-排泥管路; 9-壁后注浆。

图1 大型泥水平衡盾构泥水气压平衡系统结构

Fig.1 Structure of bubble-slurry balanced system of large slurry shield

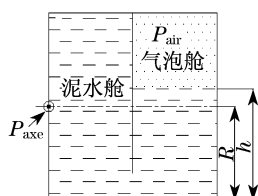


图2 大型泥水平衡盾构开挖面平衡系统

Fig.2 Balance system of excavating face for slurry shield

2 气泡舱初始参数的计算分析

2.1 气泡舱中泥水的受力平衡方程

大型泥水平衡盾构的压缩空气系统据气泡舱的气压设定值与气压实测值之差通过控制进、排气阀的开口度增减进排气量以控制气泡舱中的气压力。其中, 气泡舱的初始泥水液位 h_0 ; 气泡舱中压缩空气的初始体积 V_0 ; 初始压力 p_0 是该系统中的重要参数, 对此类盾构的开挖面平衡起至关重要的作用。

由于盾构刀盘的圆周切削运动会导致切削土体对泥水舱中的泥水压力产生周期性的脉动影响, 为分析上述初始参数就压缩空气对压力脉动吸收作用的影响, 本文取气泡舱中的泥水作为受力对象, 由于泥水的体积弹性模量数值很大, 一般为 $E_b = (1.2 \sim 20) \times 10^6 \text{ kPa}^{[4]}$, 在本系统中认为其不可压缩; 而气泡舱中的压缩空气具有压缩性, 在本系统中将其简化成气体弹簧, 用气压弹簧刚度进行描述; 由于盾构不是在极高压或极低温情况下工作, 因此认为气泡舱中的压缩空气满足理想气体条件, 在本系统中不考虑其粘滞性, 即认为该压缩空气阻尼为零, 这种假设在工程上应用有足够精确度。由此可得气泡舱中泥水的受力平衡方程为

$$p_b A = (k_a + k_b)x + (c_a + c_b)\dot{x} + m\ddot{x} \quad (2)$$

式中: p_b 为气泡舱中的泥水压力, Pa ; A 为气泡舱中

的气液接触面积, m^2 ; k_a 为气泡舱中压力气体的气压弹簧刚度, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$; k_b 为气泡舱中泥水的弹簧刚度, 与 k_a 相比可以忽略; x 为气泡舱中的泥水液位变化, m ; c_b 为气泡舱中泥水的阻尼系数, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}$; c_a 为气泡舱中压力气体的阻尼系数, 与 c_b 相比可以忽略; m 为气泡舱中的泥水质量, kg 。气泡舱中的压缩空气体积的变化与液位高度变化之间满足:

$$\frac{dV_a}{dt} = -A \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

式中: V_a 为气泡舱中的压缩空气体积。于是可得:

$$\dot{x} = -\frac{1}{A} \frac{dV_a}{dt} \quad (4)$$

$$\ddot{x} = -\frac{1}{A} \frac{d^2 V_a}{dt^2} \quad (5)$$

同时气泡舱中压缩空气体积的变化与舱中泥水流量之间满足如下关系:

$$\frac{dV_a}{dt} = -(Q_{in} + Q_{dig} - Q_{out}) = -Q_{ni} \quad (6)$$

式中: Q_{in} 为进泥泵泵入气泡舱的泥水流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; Q_{dig} 为排泥泵泵出气泡舱的泥水流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; Q_{out} 为盾构刀盘切削正面土体产生的挖掘泥流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; Q_{ni} 为进/出气泡舱泥水流量之差, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

将式(3)、(4)和(5)代入式(2)并作拉氏变换得:

$$P(s) = \frac{1}{A^2} \frac{1}{s} [ms^2 + c_b s + k_a] Q_{ni}(s) \quad (7)$$

将式(6)做拉氏变换得:

$$V_a(s) = -\frac{1}{s} Q_{ni}(s) \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)得:

$$\frac{V_a(s)}{P(s)} = -\frac{A^2}{ms^2 + c_b s + k_a} = -\frac{A^2}{k_a} \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (9)$$

式中: ω_n 为系统的无阻尼固有频率, $\omega_n = \sqrt{k_a/m}$, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; ζ 为系统的等效阻尼比, $\zeta = c_b/2\sqrt{k_a m}$ 。

为分析气泡舱的初始参数与吸收系统压力脉动的关系, 需首先分析计算出气压弹簧刚度 k_a 、气泡舱中的泥水质量 m 及气泡舱中泥水的阻尼系数 c_b 。

2.2 气压弹簧刚度 k_a 的分析计算

气压弹簧工作时, 其工作压力和载荷的关系可表示如下:

$$F = pA \quad (10)$$

式中: F 为气压弹簧所承受的载荷, N ; p 为气压弹簧

的工作压力, Pa; A 为气压弹簧的有效面积, 此处即为气泡舱中的气液接触面积, m^2 .

在受到外载荷作用时, 气压弹簧将发生横向和垂向的位移, 由于泥水气泡舱舱壁的约束, 使得本系统中的气压弹簧的横向位移为零, 而只有垂向位移, 将式(10)对气压弹簧的垂向位移 h 求导, 可得气压弹簧的垂向刚度, 即气泡舱的等效气压弹簧刚度:

$$k_a = \frac{\partial F}{\partial h} = \frac{\partial (pA)}{\partial h} = A \frac{\partial p}{\partial h} + p \frac{\partial A}{\partial h} \quad (11)$$

在外部压力快速变化的过程中, 认为气泡舱内气体不与外界发生热交换, 压力气体的体积和压力满足绝热过程状态方程式^[5]:

$$pV^k = p_0 V_0^k = C(\text{常数}) \quad (12)$$

式中: p 为气泡舱内泥水液位变化后压缩空气的绝对压力, Pa; V 为气泡舱内泥水液位变化后压缩空气的体积, m^3 ; k 为绝热系数, 对于空气, $k = 1.4$; p_0 为气泡舱压缩空气的初始绝对压力, Pa; V_0 为气泡舱压缩空气的初始体积, m^3 .

将式(12)代入式(11)中得:

$$k_a = p_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^k \frac{\partial A}{\partial h} + A k p_0 \frac{V_0^k}{V^{k+1}} \frac{\partial V}{\partial h} = p_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^k \frac{\partial A}{\partial h} + A^2 k p_0 \frac{V_0^k}{V^{k+1}} \quad (13)$$

由式(13)可知, 气压弹簧的刚度与压缩气体的初始工作压力和容积有关, 还与弹簧的有效面积变化率以及体积变化率有关. 由于在实际施工过程中所测得的盾构气泡舱气液接触面的波动量符合微振动的特征^[6-7], 而在微振动过程中, 认为面积和体积的变化非常微小, 可以忽略, 因此有 $\frac{\partial A}{\partial h} = 0$, $A \approx A_0$, $\frac{V_0}{V} \approx 1$, 于是可将气压弹簧刚度 k_a 简化成如下形式:

$$k_a = A_0^2 k p_0 / V_0 \quad (14)$$

式中: A_0 为初始气液接触面积, m^2 .

由于气泡舱中气体的初始体积 V_0 和初始压力 p_0 都是气泡舱的初始泥水液位 h_0 的函数, 为统一变量和方便计算, 以下将 V_0 , p_0 均表达成 h_0 的函数形式. 其中, 气泡舱中气体的初始压力 p_0 与气泡舱中的初始泥水液位高度 h_0 的函数关系为

$$p_0 = p_c - \rho_m g (h_0 - R) \quad (15)$$

式中: p_c 为盾构切口中心的绝对压力值, Pa.

气泡舱中气体的初始体积 V_0 与气泡舱中的初始泥水液位高度 h_0 的函数关系需要根据泥水盾构气泡舱的具体结构形式确定, 以圆柱形盾构的气泡

舱为例, 如图3所示.

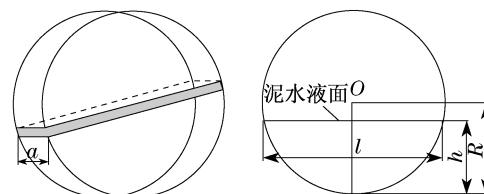


图3 圆柱形气泡舱

Fig.3 Cylindrical bubble cabin

由图可得气液的初始接触面积为

$$A_0 = al = a [2 \sqrt{R^2 - (R - h)^2}] = 2a \sqrt{2Rh - h^2} \quad (16)$$

式中: a 为气泡舱中泥水液面的轴向宽度, m; l 为气泡舱中泥水液面的径向宽度, m; R 为气泡舱半径, 近似为盾构半径, m; h 为气泡舱中泥水液位的高度, m. 气体的初始体积 V_0 与气泡舱中的初始泥水液位高度 h_0 的函数关系式为

$$V_0 = \int_0^{h_0} A_0 dh = A'_{mr} a = a \left[\pi R^2 - R^2 \arccos \frac{R - h_0}{R} + (R - h_0) \sqrt{2Rh_0 - h_0^2} \right] \quad (17)$$

式中: A'_{mr} 为气泡舱中泥水的径向面积, m^2 .

将式(15), (16)和式(17)代入式(14)后, 气泡舱的等效气压弹簧刚度 k_a 也可以表达成气泡舱中的泥水的初始液位 h_0 的函数:

$$k_a = \frac{4ak(2Rh_0 - h_0^2)[p_c - \rho_m g(h_0 - R)]}{\pi R^2 - R^2 \arccos \frac{R - h_0}{R} + (R - h_0) \sqrt{2Rh_0 - h_0^2}} \quad (18)$$

由于关系式(18)较复杂, 故用图形直观地表示. 以 $\phi 15.43$ m (气泡舱内径为 $\phi 15$ m) 的泥水平衡盾构为例, 通过计算, 在 Matlab 中采用图像的方式显示该泥水平衡盾构气泡舱的等效气压弹簧刚度值 k_a 随气泡舱中泥水的初始液位 h_0 的变化曲线, 如图4所示, 算式中固定的结构参数为 $a = 1.2$ m, $R = 7.5$ m, $\rho_m = 1250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $p_c = 6 \times 10^5$ Pa.

由图可知, 随着气泡舱中泥水液位的下降, 气泡舱中压力气体的体积将逐渐增加, 气泡舱的等效气压刚度也随之变小, 系统气压弹簧的缓冲作用增强, 但当 h_0 下降到盾构轴线以下后, 气压弹簧刚度下降缓慢; 而当泥水液位上升时, 气泡舱中压力气体的体

积将减少,气泡舱的等效气压刚度也将随之变大,但当液位高度超过一定值(对于 $\phi 15.43$ m 泥水平衡盾构,此值为10 m)时,气压刚度急速增加,使得其缓冲作用大大降低.

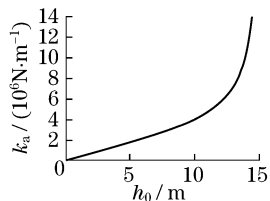


图4 气泡舱的等效气压弹簧刚度与泥水初始液位的关系
Fig.4 Relationship between the initial slurry level and the stiffness of the compressed air in the bubble cabin

2.3 气泡舱中泥水质量的计算

在满足条件的泥水液位的微振动过程中,认为 $m \approx m_0$,得泥水气泡舱中初始泥水质量计算式为

$$m_0 = \rho_{ni} V_{ni0} = \rho_{ni} (V_c - V_0) \quad (19)$$

同样将泥水气泡舱中的初始泥水质量转化为泥水气泡舱中的初始液位 h_0 的函数:

$$m_0 = \alpha \rho_{ni} \left[R^2 \arccos \frac{R - h_0}{R} - (R - h_0) \sqrt{2Rh_0 - h_0^2} \right] \quad (20)$$

式中: m_0 为泥水气泡舱中的初始泥水质量,kg; V_c 为泥水气泡舱总体积, m^3 ; V_{ni0} 为泥水气泡舱中的泥水初始体积, m^3 .

2.4 气泡舱中泥水阻尼系数 c_b 的分析计算

$$c_b = \mu_{ni} e^{\alpha p} A' / d = \nu_0 \rho_{ni} e^{\alpha p} A' / d \quad (21)$$

式中: μ_{ni} 为泥水的动力黏度, $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$; A' 为泥水与舱壁的接触面积, m^2 ; d 为泥水中心与舱壁的相对运动距离,m; ν_0 为泥水运动黏度, $m^2 \cdot s^{-1}$; α 为液体黏压系数, $\alpha = (0.002 \sim 0.003) \times 10^{-5} Pa^{-1}$.

在系统压力不高且变化不大时,压力对液体粘度的影响可以忽略不计.泥水与舱壁的接触面积 A' 需要根据泥水平衡盾构气泡舱的具体结构形式确定,对于圆柱形气泡舱室,有:

$$A' = 2R^2 \arccos \frac{R - h_0}{R} - 2(R - h_0) \cdot \sqrt{2Rh_0 - h_0^2} + 2aR \arccos \frac{R - h_0}{R} - 2R \arccos \frac{R - h_0}{R} (R + a) - 2(R - h_0) \sqrt{2Rh_0 - h_0^2} \quad (22)$$

将式(22)代入式(21)中后得:

$$c_b = 2\nu_0 \rho_{ni} \left[2 \arccos \frac{R - h_0}{R} (R + a) - \frac{2(R - h_0)}{R} \sqrt{2Rh_0 - h_0^2} \right] \quad (23)$$

由式(23)可知,当泥水平衡盾构的结构型式、尺寸以及所用泥水的组成确定以后,泥水平衡盾构气泡舱中泥水的阻尼系数 c_b 只与气泡舱中的初始泥水液位高度有关.通过计算,在Matlab中采用图像的方式显示泥水平衡盾构随着气泡舱中的泥水的初始液位 h_0 的变化,气泡舱中泥水的阻尼系数 c_b 的变化曲线,如图5所示.算式中 $\nu_0 = 35 mm^2 \cdot s^{-1}$,其他固定的结构参数与前述求取气泡舱的等效气压弹簧刚度 k_a 时相同.

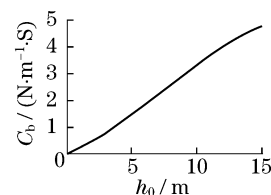


图5 气泡舱泥水的阻尼系数与泥水初始液位的关系
Fig.5 Relationship between the initial slurry level and the damping of the slurry in the bubble cabin

由图可知,随气泡舱中泥水液位上升,气泡舱中压力气体体积将减少,气泡舱中的泥水阻尼系数 c_b 将随之变大,图中显示 c_b 与 h_0 接近线性比例关系.

3 气泡舱中的压缩空气对压力脉动的传递率分析

在计算出气泡舱的气压弹簧刚度 k_a 、气泡舱中泥水质量 m 以及气泡舱中泥水的阻尼系数 c_b 的表达式后,可以将它们分别代入式(9)中 ω_n 与 ζ 的表达式,求出系统的无阻尼固有频率以及系统的等效阻尼比.考虑气泡舱压缩空气吸收压力脉动的作用时,可以采用系统对振动的传递率 $T(\zeta, Z)$ 作为衡量标准,当 T 小于1时,表明系统对于压力脉动具有吸收作用, T 值越小,吸收效果越好.

系统对振动的传递率 $T(\zeta, Z)$ 的表达式为

$$T(\zeta, Z) = \frac{\sqrt{1 + (2\zeta Z)^2}}{\sqrt{(1 - Z^2)^2 + (2\zeta Z)^2}} \quad (24)$$

式中, Z 为频率比, $Z = \omega / \omega_n$, ω 为干扰载荷的频率.

据式(9)所得泥水气压平衡系统的无阻尼固有频率 $\omega_n = \sqrt{k_a/m}$ 和系统等效阻尼比 $\zeta = c_b/2\sqrt{k_a m}$ 同样都可表示成气泡舱中泥水初始液位 h_0 的函数,将该 ω_n 和 ζ 代入式(24)可得系统对振动的传递率 $T(\zeta, Z)$ 关于气泡舱中泥水初始液位 h_0 的函数,由于表达式繁复,此处用函数图形直观地表示,同样以 $\phi 15.43$ m 泥水平衡盾构为例,图6即为该泥水平衡盾构气泡舱对压力脉动的传递率 $T(\zeta, Z)$ 随频率比和泥水的初始液位 h_0 变化的趋势图。

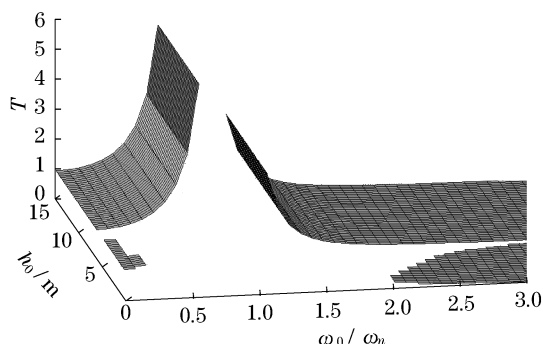


图6 隔振效果与气泡舱泥水初始液位的关系

Fig.5 Relationship between the initial slurry level and the effect of vibration-isolating

由该图可以看出在 $Z = \omega/\omega_n = 1$ 的共振区,由于系统的等效阻尼比较小,不论初始液位 h_0 取何值,系统都无法达到减振效果,而在正常工作区,即 $2 < Z = \omega/\omega_n < 10$ 时,气泡舱具有减振效果,此时气泡舱中泥水的初始液位 h_0 值越小,减振效果越明显,当 $h_0 \leq 10$ m 时,减振效果良好,此时气泡舱对振动的传递率 $T \leq 0.5$,随 h_0 进一步降低至 $h_0 \leq 7.5$ m 以下时,减振效果提高缓慢.故对于 $\phi 15.43$ m 泥水平衡盾构,在进行泥水气压平衡控制时,应尽量使系统在正常工作区工作,同时保证气泡舱中泥水的初始液位值 $h_0 \leq 10$ m,以获得良好的减振效果。

因此根据上述泥水平衡盾构气泡舱对压力脉动的传递率可知,泥水平衡盾构气泡舱的初始液位值 h_0 越小(即压力气体的初始体积 V_0 越大),则气泡舱吸收外部压力的效果越好,当初始液位从零逐渐增大至盾构半径值时,其对外部压力的吸收效果逐渐减弱,但变化缓慢;当初始液位继续增大直至超过盾构半径一定数值 Δh 以后,气泡舱对外部压力的吸收效果迅速降低,由此可以确定气泡舱中泥水液位的初始值应保持在 $h_0 \leq R + \Delta h$ 的范围,具体的 Δh 值可以根据系统所要求的吸振率由式(24)计算得出.而气泡舱中压缩气体的初始压力 p_0 、初始体

积 V_0 则可将所计算出的气泡舱的初始液位值 h_0 分别代入式(15)和式(17)中求出,在此不再赘述。

4 结论

(1) 随着气泡舱中泥水液位的上升,气泡舱的等效气压刚度将随之缓慢增大,当液位高度超过盾构中心轴线时,气压刚度急速增加。

(2) 随气泡舱中泥水液位上升,气泡舱中的泥水阻尼系数 c_b 将增大, c_b 与 h_0 接近线性比例关系。

(3) 泥水平衡盾构气泡舱的初始液位值 h_0 从零逐渐增大至盾构半径值时,其对外部压力的吸收效果逐渐减弱,但变化缓慢;当初始液位继续增大直至超过盾构半径一定数值 Δh 后,气泡舱对外部压力的吸收效果迅速降低, Δh 值可以根据实际系统所要求的吸振率由式(24)计算得出,并由此可继续根据式(15), (17)确定初始压力 p_0 、初始体积 V_0 的取值范围。

(4) 本文以 $\phi 15.43$ m 泥水平衡盾构为实例的计算结果与国外资料所给出的“气泡舱的初始泥水液位应维持在盾构中心轴线处”的施工要求相一致。

参考文献:

- [1] Chambon P, Corte J F. Shallow tunnels in cohesionless soil: stability of tunnel face[J]. Journal of Geotechnical Engineering, American Society Civil Engineers, 1994(120):1148.
- [2] Davis E H, Gunn M J, Mair R J. The stability of shallow tunnel sand underground openings in cohesive material [J]. Geotechnical, 1998(30):397.
- [3] GE Xuewu. Response of a shield-driven tunnel to deep excavations in soft clay[D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology. School of Engineering, 2002.
- [4] 张利平. 液压传动与控制[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
ZHANG Liping. Hydraulic drive and control [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005.
- [5] 吴振顺. 气压传动与控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1995.
WU Zhenshun. Pneumatic transmission and control[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1995.
- [6] 李建藩. 气压传动系统动力学[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1991.
LI Jianfan. Pneumatic transmission dynamics[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1991.
- [7] 成大先. 机械设计手册(第5卷)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
CHENG Daxian. Handbook of mechanical design (vol. 5) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.