

文章编号: 1002-0446(2004)05-0416-05

弹性装置提高机器鱼推进效率的研究*

俞经虎,竺长安,程刚,陈宏,张屹,曾议

(中国科学技术大学工程学院,安徽合肥 230027)

摘要: 以 James Lighthill 的鱼类细长体理论为基础,利用能量守恒定理、动量定理和波动理论来分析计算仿生机器鱼在推进中的效率.建立了以尾鳍弹性元件阻尼系数为参数的推进效率公式.对推进效率进行了数值仿真.通过仿真分析得出尾鳍增加弹性元件使大型水下推进器的推进效率大为提高,对将来大型水下自动航行器(AUV)的进一步研制提供了一个新的思路.

关键词: 弹性元件;仿真;模型;推进效率

中图分类号: TP24 文献标识码: B

Improvement of the Thrust Efficiency of Robotic Fish with Added Spring

YU Jing-hu, ZHU Chang-an, CHENG Gang, CHEN Hong, ZHANG Yi, ZENG Yi

(Institute of Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: On the basis of the slender body theory of James Lighthill, this paper calculates the thrust efficiency of robotic fish with the law of conservation of energy, the law of momentum and the law of wave. The equation of thrust efficiency with the parameterized spring coefficient is established and the equation is simulated. Simulation results show that the efficiency of large robotic fish can be increased greatly by adding spring. It may be a new idea for the research of large scale autonomous underwater vehicle.

Keywords: elastic component; simulation; model; thrust efficiency

1 引言 (Introduction)

鱼类运动的高效率、高机动性吸引了越来越多的研究人员开始展开对仿生机器鱼及水下自动航行器的研究.通过对鱼类游动机理的研究,人们发现鱼类的高效率除了其独特的游动流体动力学特性外,还有一个主要的原因是鱼体自身的特殊的内部组织可以大大减小鱼体在前进过程中的能量损耗,提高推进效率.

由仿生学的研究发现,那种以身体波动加尾鳍摆动方式推进的鱼类,如金枪鱼,其推进力主要来自尾鳍的平动—摆动复合运动,而尾鳍的运动是依靠两侧的肌肉.国外学者研究发现,海洋鱼类肌肉与尾鳍的连接方式非常特殊,与其他硬骨鱼类不同,金枪鱼连接肌肉与尾鳍的是弹性肌腱.生物学家通过对生物体内弹性肌腱内弹性纤维的研究发现,弹性纤维对降低生物体在运动过程中的能量损耗,提高

效率具有非常重要的作用^[1].在这种思想的启发下,本文建立了模仿鲭科加新月形尾鳍运动的鱼类的三节仿生机器鱼的驱动元件(肌肉)—弹性元件(肌腱)—运动件(尾鳍)的运动模型,并对该模型进行了效率分析.

2 推进效率计算 (Thrust efficiency calculation)

首先计算没有增加弹性装置时的仿生机器鱼效率.在无弹性装置的情况下,仿生机器鱼电机的输出功主要用于两部分的能量消耗,一部分是推动周围流体运动所需的能量消耗,一部分是克服仿生机器鱼每一节的惯性力作功所需的能量消耗.仿生机器鱼型号大小的不同、各节质量分布的不同以及运动参数的不同都将导致以上两部分能量消耗在仿生机器鱼总的能量消耗中所占比重的变化.因为弹性装置只是存储惯性力作功,因此克服惯性力作功的

* 收稿日期:2004-01-05

能量消耗在总的能量消耗中占的比重越大,增加弹性装置的意义就越大.要计算增加弹性装置后效率具体的提高幅度,必须首先要计算出克服水动力和惯性力的能量消耗.

2.1 水动力计算

由鱼类的一维稳态的运动学图像分析得到鲦科加新月形尾鳍运动的鱼类鱼体波是一个波幅由头至尾逐渐增大的行波,如图 1 所示,波上各质点在各个鱼体截面上的振动是简谐振动,即鱼体在平衡位置左右摆动,其运动方程为:

$$h(x, t) = (c_1 x + c_2 x^2) \sin(kx + \tilde{\omega}t)$$

$(c_1 x + c_2 x^2)$ 是鱼体波的包络线方程,反映了波幅由头至尾逐渐增大.如图 1 所示, U 为鱼体前进的速度.根据 James Light Hill 的“细长体理论”,在符合以下两个前提的条件下,可以将鱼体看成细长体,可以将空气动力学中的细长体理论运用于流体中的鱼体受力分析.第一是相对于鱼体的长度,鱼体各段的摆动幅度较小.第二是具有较大的雷诺数 ($Re = LU/\nu$),一般应该在 $10^4 \sim 10^8$ 之间.根据细长体理论,仿生机器鱼受到流体的力决定于以下两个方面的因素:

- (I) 仿生机器鱼机体相对于介质运动速度的变化率;
- (II) 与仿生机器鱼机体表面发生相互作用介质质量——虚质量的变化率.

细长体理论的核心思想就是动量定理.单位长度上的一定虚质量的流体与速度的乘积即为虚动量,而虚动量随时间的变化率即为单位长度鱼体所受到的流体力^[2].

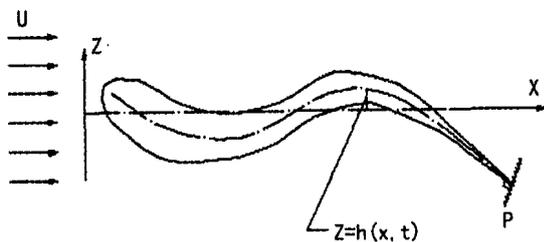


图 1 流体中鱼体的坐标系
Fig.1 The coordinate system of fish in the fluid

设单位长度虚质量流体的虚动量为 M ,根据动量定理,动量 M 对时间的导数即为作用于单位长度鱼体的侧向力:

$$R = -DM = - (U\partial/\partial x + \partial/\partial t) (m(x)w(x, t)) \quad (1)$$

$w(x, t)$ 为鱼体相对于流体的侧向运动速度:

$$w(x, t) = \partial h/\partial t + U\partial h/\partial x$$

其中 $m(x)$ 为单位长度鱼体虚质量, $m(x) = \frac{1}{4} \cdot \pi d^2 \rho \beta$, 其中 d 为截面(包括鳍)最大纵向尺度, β 是虚质量系数,它取决于截面形状.

同样利用动量定理和动能守恒定理可以求出虚质量流体的动能以及鱼体克服水动力作的功.

设整个鱼体以侧向速度 $\tilde{\omega}(x, t)$ 摆动, $\tilde{\omega}(x, t) = \partial h/\partial t$, 那么单位时间内克服水动力所需的功率:

$$P_w = \int_0^l R \partial h/\partial t dx \quad (2)$$

由于鱼体波是一个由头至尾波幅逐渐增大的行波,因此行波的一些运动方程同样适用于鱼体波运动方程,根据波动理论得到^[5]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + V \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \Rightarrow w = \tilde{\omega} \times \frac{V-U}{V} \quad (3)$$

其中 V 为鱼体波的波动速度,方向由头部至尾向后传播,刚好与鱼体前进方向相反.由仿生学观察发现一般鱼类的鱼体波向后传播的速度是鱼体前进速度的 1.2 倍左右.由式(1)~(3)得:

$$P_w = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^l (mw \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{1}{2} m\omega^2) dx + U [mw \frac{\partial h}{\partial t}]_{x=l}$$

上式右端第一项是简谐量对时间的导数(由鱼类的运动学分析得到 $z = h(x, t)$ 是一个简谐变化的量),其均值为零.因此,单位时间内鱼体对周围介质作的功为:

$$P_w = U [mw \frac{\partial h}{\partial t}]_{x=l} = [Um\omega\tilde{\omega}]_{x=l} \quad (4)$$

将鱼体波运动方程 $h(x, t) = (c_1 x + c_2 x^2) \sin(kx + \tilde{\omega}t)$ 代入(4)式得到仿生机器鱼克服水动力所需输出的功率:

$$P_w = U \times 1/4 \pi d^2 \rho \beta (c_1 l + c_2 l^2) \tilde{\omega} \cos(kl + \tilde{\omega}t) \times ((c_1 l + c_2 l^2) \tilde{\omega} \cos(kl + \tilde{\omega}t) + (c_1 l + c_2 l^2) k \cos(kl + \tilde{\omega}t)) \quad (5)$$

那么在一个运动周期内电机克服水动力做的功为:

$$W_w = 4 \int_0^{2\pi/\tilde{\omega}} U \times 1/4 \pi d^2 \rho \beta (c_1 l + c_2 l^2) \tilde{\omega} \cos(kl + \tilde{\omega}t) (c_1 l + c_2 l^2) (\tilde{\omega} \cos(kl + \tilde{\omega}t) + k \cos(kl + \tilde{\omega}t)) dt \quad (6)$$

2.2 惯性力计算

2.2.1 惯性力作的总功计算

对于大质量的仿生机器鱼或水下自动推进器(AUV)来说,电机的输出功一部分是用来克服水动

力做的功,还有一部分是用来克服惯性力做的功.而对鱼类运动来说,惯性力做的功在一个周期内是成正弦变化的.以尾鳍为例,设尾鳍摆动幅度为 H .当尾鳍侧向运动位移 $y=0$ 时,侧向运动速度最大,此时水动力最大,惯性力最小.而当侧向位移 $y=H$ 时,侧向运动速度为零,此时水动力最小,惯性力最大.在位移由 $y=0$ 向 $y=H$ 变化的 $1/4$ 周期内电机必须做负功使速度由最大变为零.反过来,在位移由 $y=H$ 向 $y=0$ 变化的 $1/4$ 周期内电机必须做正功使速度由零变为最大.这样以位移 $y=0$ 为起点,经过一个周期再回到位移 $y=0$ 的始点,电机做的功分别为负功、正功、负功、正功.如果给尾鳍加上弹性装置,将前 $1/4$ 周期电机对惯性力所做的负功存储起来,存储的这部分能量在下一个 $1/4$ 周期电机需要对尾鳍做正功的时候释放出来,这样就减少了电机的输出功,也就是提高了仿生机器鱼的效率.

已知仿生机器鱼的运动学方程为:

$$h(x, t) = (c_1 x + c_2 x^2) \sin(kx + \tilde{\omega}t)$$

由于鱼体前进速度较慢,实验研究发现在正常的巡游状态下,鱼体几乎是匀速前进的,因此前进方向的惯性力可以忽略不计.这样设 F_I 是鱼体的质量与鱼体的侧向加速度的函数.那么位置为 x_0 点的加速度为:

$$- (c_1 x_0 + c_2 x_0^2) \tilde{\omega}^2 \sin(kx_0 + \tilde{\omega}t)$$

单位长度鱼体的惯性力为:

$$- mx_0 (c_1 x_0 + c_2 x_0^2) \tilde{\omega}^2 \sin(kx_0 + \tilde{\omega}t)$$

对于 3 节仿生机器鱼来说,那么在一个运动周期内仿生机器鱼惯性力做的总功即为第 2 节和尾鳍部分惯性力做功的叠加,这一部分功需电机输出.第 1 节即头部属于被动运动,不需电机输出.因此惯性力所需电机输出功 W_{fi} 为:

$$W_{fi} = \int_{t=0}^{2\pi/\tilde{\omega}} \int_{x=0.5}^{0.8} - mx (c_1 x + c_2 x^2) \tilde{\omega}^2 \sin(kx + \tilde{\omega}t) \cos(kx + \tilde{\omega}t) dx dt \quad (7)$$

如图 2 所示,3 节仿生机器鱼由大质量的头部、头部与尾鳍的连接部分、尾鳍 3 部分组成.整个仿生机器鱼鱼体长为 0.8 m,主要参与摆动的部分是第 2 节的连接部分和尾鳍,由于鱼体的质量相对集中在头部,使得头部的摆动很小,几乎可以忽略^[4].同时头部的这种细微摆动是一种被动运动,它是由连接部分和尾鳍与流体作用力产生的扭矩导致的,不是由电机驱动产生的.因此在计算电机克服惯性力做的功时,积分表达式要从第 2 节开始直至尾鳍.

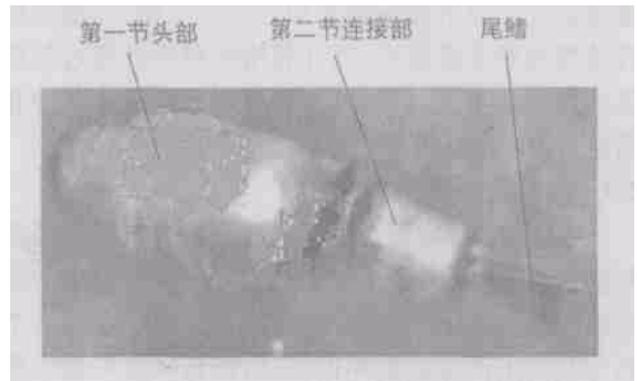


图 2 3 节机器鱼

Fig. 2 The robotic fish with three sections

2.2.2 尾鳍惯性力做的功的计算

对于模仿鲦科加新月形尾鳍鱼类的仿生机器鱼来说,驱动力主要来自尾鳍,尾鳍的摆动幅度是最大的,惯性力和惯性力做功主要来自尾鳍,所以考虑为尾鳍增加弹性装置以吸收存储惯性力做的负功,因此要计算尾鳍的惯性力做功.

设 3 节仿生机器鱼的连接部分的摆动幅度为 H ,尾鳍的最大摆角为 θ_{\max} ,连接部分与尾鳍摆动的相位差为 φ ,尾鳍的运动是由平动运动和摆动运动复合而成,平动运动可以描述为:

$$y = H \sin \tilde{\omega}t$$

其中 H 为 3 节仿生机器鱼中连接部分的摆动幅度,也就是尾鳍前缘的摆动幅度.

尾鳍摆动运动可以描述为:

$$\theta = \theta_{\max} \sin(\tilde{\omega}t + \varphi)$$

考虑到尾鳍的摆动运动很小,相对于尾鳍的平动运动,肌肉的输出功率很小,可以忽略不计.因此可以将尾鳍的运动简化为只有一个平动的运动.

因此在加弹性装置的时候,只考虑平动运动,只在平动方向增加弹性装置以存储平动运动的惯性能.而在尾鳍摆动自由度方向没有加弹性元件.

设尾鳍的质量为 m_t ,那么尾鳍的惯性力 F_I 是尾鳍的质量与尾鳍的加速度的函数.

$$F_I = m_t \ddot{y}(x, t) = - m_t H \tilde{\omega}^2 \sin \tilde{\omega}t \quad (8)$$

因此电机克服尾鳍惯性力的输出功率 P_I 为:

$$P_I = F_I \dot{y}(x, t) = - m_t H^2 \tilde{\omega}^3 \sin \tilde{\omega}t \cos \tilde{\omega}t \quad (9)$$

那么在一个运动周期内尾鳍的惯性力做的功为:

$$W_I = 4 \int_0^{2\pi/\tilde{\omega}} - m_t H^2 \tilde{\omega}^3 \sin \tilde{\omega}t \cos \tilde{\omega}t dt \quad (10)$$

2.3 弹簧应变能计算

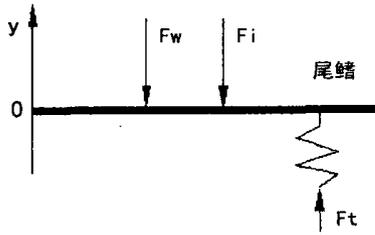


图 3 尾鳍弹性装置

Fig. 3 The added spring of the tail fin

由图 3 可以得到,弹簧的弹性应变是由尾鳍受到的水动力与尾鳍的惯性力的合力产生的,设弹簧的弹性系数为 K_T ,弹簧的应变为 S_T ,因此:

$$K_T S_T = - (F_I + F_W) \Rightarrow S_T = - (F_I + F_W) / K_T$$

由尾鳍受到的水动力与尾鳍的惯性力的合力产生的弹簧应变能 E 为:

$$E = \frac{1}{2} K_T S_T^2 = \frac{1}{2} (F_I + F_T)^2 / K_T$$

那么弹簧应变能的变化率 \dot{E} 为:

$$\dot{E} = (F_I + F_T)(\dot{F}_I + \dot{F}_T) / K_T \quad (11)$$

其中 F_T 为尾鳍受到的流体的水动力.根据仿生学的观察测量结果,仿生机器鱼(仿鲹科加新月形尾鳍鱼类)尾鳍设计长度为鱼体全长的 1/4.根据细长体理论得到的单位长度鱼体受到的流体力的公式,可以得到尾鳍受到的合力为单位长度鱼体受到的力在尾鳍长度上的积分.

$$F_T = - \int_0^{l/4} (U \partial / \partial x + \partial / \partial t) (m(\partial h / \partial t + U \partial h / \partial x)) dx$$

将尾鳍简化后的运动方程 $h(x, t) = H \sin(kx + \tilde{\omega}t)$

代入上式得到:

$$F_T = - (H\tilde{\omega}^2 + 2HUk\tilde{\omega} + HU^2k^2) \cos(kl/4 + \tilde{\omega}t) / k \quad (12)$$

将(8)、(12)式代入(11)式得到:

$$\begin{aligned} \dot{E} = & (-mH\tilde{\omega}^2 \sin \tilde{\omega}t - (H\tilde{\omega}^2 + 2HUk\tilde{\omega} + HU^2k^2) \\ & \cos(kl/4 + \tilde{\omega}t) / k) (-mH\tilde{\omega}^3 \cos \tilde{\omega}t + \tilde{\omega}(H\tilde{\omega}^2 \\ & + 2HUk\tilde{\omega} + HU^2k^2) \sin(kl/4 + \tilde{\omega}t) / k) / K_T \end{aligned}$$

那么在一个运动周期内电机克服弹簧应变能变化率做的功为:

$$W_T = 4 \int_0^{2\pi/\tilde{\omega}} \dot{E} dt \quad (13)$$

$$\begin{aligned} Ratio = & [(U \times 1/4 \pi \tilde{\omega}^2 \rho \beta (c_1 l + c_2 l^2)^2 \tilde{\omega} \cos(kl + \tilde{\omega}t) (\tilde{\omega} \cos(kl + \tilde{\omega}t) + k \cos(kl + \tilde{\omega}t)) \\ & + \int_{t=0}^{2\pi} \int_{x=0.5}^{0.8} -mx(c_1 x + c_2 x^2)^2 \tilde{\omega}^3 \sin(kx + \tilde{\omega}t) \cos(kx + \tilde{\omega}t) dx dt] \end{aligned}$$

2.4 效率计算

由以上分析计算得到在没有弹性装置的情况下电机一个周期内的输出功为克服水动力做的功 W_W 与克服总的惯性力做的功 W_{fi} 之和,即为 $W_W + W_{fi}$.而在加了弹性装置的情况下电机一个周期内的输出功为克服水动力做的功 W_W 、克服总的惯性力做的功 W_{fi} 与弹簧存储的应变能的变化率 W_T 三者之和,即为 $W_W + W_{fi} + W_T$.

仿生机器鱼的推进效率等于推进的有效功与电机的输出功的比值,而有效功即为推进力 T 与推进速度 U 的乘积.不管有没有增加弹性装置,尾鳍的摆动轨迹都是一样的,所以尾鳍与流体相互作用产生的水动力是一样的,也就是说鱼体受到的推力 T 是相同的,同样鱼体前进速度 U 也是相同的.因此尾鳍增加弹性装置前后仿生机器鱼做的有效功是相同的.而由上面的推导得到电机在尾鳍没有增加弹性装置的情况下一个周期内的输出总功为 $W_W + W_{fi}$,仿生机器鱼的推进效率为 $\eta = \int_{t=0}^{2\pi} UT / (W_W + W_{fi})$.电机在尾鳍增加了弹性装置的情况下一个周期内的输出总功为 $W_W + W_{fi} + W_T$,仿生机器鱼的推进效率为:

$$\eta = \int_{t=0}^{2\pi} UT / (W_W + W_{fi} + W_T)$$

这样尾鳍增加弹性装置后机器鱼的推进效率与尾鳍没有增加弹性装置时的机器鱼的推进效率的比值为:

$$Ratio = (W_W + W_{fi}) / (W_W + W_{fi} + W_T) \quad (14)$$

3 推进效率仿真 (Thrust efficiency simulation)

根据以上的分析计算得到了电机克服水动力所需功率 P_W (式 5)、电机克服水动力一个周期内所需做的功 W_W (式 6)、电机克服总的惯性力所需做的功 W_{fi} (式 7)、电机克服尾鳍惯性力所需的功率 P_I (式 9)、电机克服尾鳍惯性力一个周期内所需做的功 W_I (式 10)、弹性应变能的变化率 \dot{E} (式 11)、一个运动周期内电机克服弹簧应变能变化率做的功 W_T (式 13).根据以上的计算结果并将它们代入增加弹性装置前后的效率比值式(14)得到如下的结果.

$$\begin{aligned} & / [(U \times 1/4 \pi d^2 \rho (c_1 l + c_2 l^2)^2 \tilde{\omega} \cos(kl + \tilde{\omega}t) (\tilde{\omega} \cos(kl + \tilde{\omega}t) + k \cos(kl + \tilde{\omega}t)) \\ & + \int_{t=0}^{2\pi} \int_{x=0.5}^{0.8} - mx (c_1 x + c_2 x^2)^2 \tilde{\omega}^3 \sin(kx + \tilde{\omega}t) \cos(kx + \tilde{\omega}t) dx dt \\ & + (- mH\tilde{\omega}^2 \sin \tilde{\omega}t - (H\tilde{\omega}^2 + 2 HUK\tilde{\omega} + HU^2 k^2) \cos(kl/4 + \tilde{\omega}t) / k) \cdot \\ & (- mH\tilde{\omega}^3 \cos \tilde{\omega}t + \tilde{\omega} (H\tilde{\omega}^2 + 2 HUK\tilde{\omega} + HU^2 k^2) \sin(kl/4 + \tilde{\omega}t) / k_T) \end{aligned}$$

上式即为增加弹性装置后效率提高的百分比。在对提高幅度进行仿真之前,首先对一些参数进行说明和设定。

以下仿真参数都以三节仿生机器鱼的实验结果为准,如图4所示。



图4 三节机器鱼实验图像分析

Fig.4 Experimental image analysis of the three-sectioned robotic fish

三节仿生机器鱼实验图像分析的结果为:

仿生机器鱼鱼体前进的速度: $U = 0.4 \text{ m/s}$

仿生机器鱼连接部分摆动的幅度即尾鳍前缘摆动幅度: $H = 100 \text{ mm}$

仿生机器鱼鱼体摆动的频率: $\tilde{\omega} = 2 \text{ Hz}$

仿生机器鱼鱼体的长度: $l = 800 \text{ mm}$

仿生机器鱼鱼体波的波数: $k = 1$

鱼体波的包络线系数: $c_1 = 0.002 \quad c_2 = 0.0002$

鱼体摆动的频率: $\tilde{\omega} = 2\pi$

(14),得到效率提高的值随弹性系数 K_T 变化的曲线如图5.由图5可以看出,弹簧弹性系数有一个最佳值,此时,弹簧吸收了所有的尾鳍惯性力做的负功,在惯性力做正功的周期再进行完全释放.而当弹性系数小到一定程度,弹簧不仅不能提高仿生机器鱼的推进效率,相反还会降低推进效率.弹性系数大于或小于最优值时,弹簧并不能完全吸收惯性力做的负功,尚有一部分负功存在,效率提高幅度有限.改变上面的仿真参数,最佳的弹性系数 K_T 的值也将会随之改变,每一组运动参数对应一个最优的弹性系数 K_T .

4 结论 (Conclusion)

本文通过仿真实验分析,提出了通过在尾部增加弹性装置来提高仿生机器鱼推进效率的方法,并通过实验与仿真相结合求解了弹性装置的最佳弹性系数.通过仿真实验研究发现弹性装置提高仿生机器鱼推进效率的幅度除了跟弹性装置的弹性系数有关外,还跟尾鳍的惯性力做的功与仿生机器鱼受到的水动力做的功的比值有关.对于小型的仿生机器鱼来说,相对于流体的水动力做的功,惯性力很小,这样尾鳍增加弹性装置的意义就有限.当惯性力做的功相对于水动力做的功较大时,也就是对于大型的水下航行器来说,增加弹性装置就非常有意义.通过效率分析,惯性力是影响仿生机器鱼效率的一个

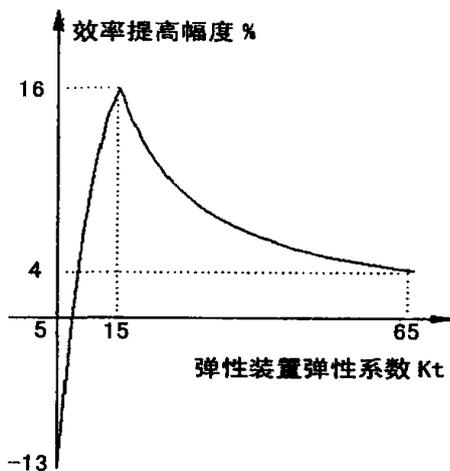


图5 效率提高幅度曲线

Fig.5 Curve of the increased efficiency value

在这些参数不变的基础上,以弹簧的弹性系数 K_T 为变量,将上面的这些参数值代入效率比值式