夹心式电化学机械光整装置振动分析

山东理工大学机械工程学院 (255012) 邢彦锋 张 明

电化学机械光整加工是由电化学加工与机械珩磨（或研磨）加工组合而成的复合加工技术，可以对各类匀质、导电材料制成的零件进行表面光整加工。在电化学机械光整加工中，主要靠电化学阳极溶解去除零件表面的金属，机械珩磨是为了去除零件表面微观高点在电化学反应中产生的钝化膜，更好地加速这些微观高点处金属的溶解过程，其表层金属去除量小、可控性好，加工效率远高于机械珩磨，有望成为对精磨表面进行进一步精密光整的有效方法。

电化学机械光整加工可采取夹心式电化学机械光整装置，能够对杆类零件光整加工。由于电化学机械光整加工只是改变零件的表面粗糙度，并不能改变零件的形状尺寸特征，当所加工的杆类零件偏心时，会引起夹心式电化学机械光整装置的振动，对零件的加工不均匀，可能对一部分加工较多，而另一部分加工较少，甚至有些完全加工不上，这样所加工出的零件就难以符合生产的要求，因此必须对夹心式电化学机械光整装置的振动进行分析，找到解决工件偏心所引起的加工不均的方法。

1. 夹心式电化学机械光整装置振动分析

夹心式电化学机械光整装置的振动属于强迫振动，它就是系统由外界持续激励所产生的振动。一般的对振动系统外界激励为激振力，而夹心式电化学机械光整装置的外界激振源为由于偏心而引起的位移激振，即位移的变化而导致的夹心式电化学机械光整装置的振动。

夹心式电化学机械光整装置弹簧的弹性系数设为 k，工具头的质量设为 m，工件半径为 r，其偏心距为 e，系统的预紧力 kx_0，机床的角速度为 ω。由于是位移激励，故可根据位移的变化，计算力的变化。

(1) 夹心式电化学机械光整装置振动位移相位特例分析　假设工具头与工件开始接触的位置相对于工件旋转中心的距离为 $r-e$ 时，此时振动系统模型如图 1。

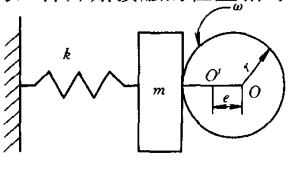

图 1

根据牛顿第二定律，振动系统的方程为：

$$m\ddot{x} + kx = F \tag{1}$$

工件的运动方程为：

$$x(t) = e(1 - \cos\omega t) + x_0 \tag{2}$$

把式 (2) 代入式 (1) 可求得力的大小：

$$F = me(\omega^2 - \omega_n^2)\cos\omega t + k(e + x_0) \tag{3}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

从式 (3) 可以看出以下几点：

①当工件旋转的角速度等于振动系统的固有频率时，力的大小不再变化，把预紧力调到合适大小可满足加工的要求。

②力 F 随着偏心距 e 的变化而变化，当偏心距越大时，力的幅度变化也就越大。

③当工件的角速度大于振动系统的固有频率，即 $\omega > \omega_n$ 时，当工件旋转到 $(2k+1)\pi$ ($k=0$, 1, …) 的位置时，所受的力就越小，如果 $x_0 > e\left(\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 - 2\right)$ 时，力 F 恒大于零，即工件与工具头始终接触，可以进行机械珩磨。反之，如果 $x_0 \leqslant e\left(\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 - 2\right)$ 时，必有一段不相接触。由于 x_0 恒大于零，如果 $\frac{\omega}{\omega_n} \leqslant \sqrt{2}$，即 x_0 恒大于 $e\left(\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 - 2\right)$，此时力 F 恒大于零。只有当 $\frac{\omega}{\omega_n} > \sqrt{2}$ 并且 $x_0 \leqslant e\left(\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 - 2\right)$ 时，工件和工具头之间在加工时才有一段不相接触。

④当工件的角速度小于振动系统的固有频率，即 $\omega < \omega_n$ 时，力 F 的最小值为 $me\omega^2 + kx_0$，恒大于零。

(2) 夹心式电化学机械光整装置振动位移任意相位分析　由于工件的旋转，工具头和工件的开始接触位置一般不可能如图 1 所示，当初于任意位置时，此时振动系统的模型如图 2 所示。

振动系统的位移激励方程为：

$$x(t) = e(\cos\theta - \cos(\omega t + \theta)) + x_0 \tag{4}$$

式中 θ——偏心距同水平方向的夹角

带入式（1）并化简得：

$$F = me(\omega^2 - \omega_n^2)\cos(\omega t + \theta) + ke\cos\theta + kx_0 \quad (5)$$

对式（5）进行分析：

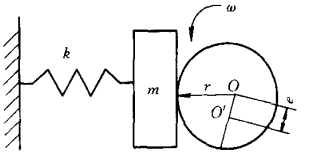

图 2

①当工件旋转的角速度等于振动系统的固有频率，即 $\omega = \omega_n$ 时，力的大小不再变化，只要把力 $ke\cos\theta + kx_0$ 调到合适大小既可满足加工的要求。

②力 F 随着偏心距 e 的变化而变化，当偏心距增大时，力的幅度变化也就增大。

③当工件旋转的角速度大于振动系统的固有频率时，当 $\omega t + \theta$ 为 $(2k+1)\pi$（$k = 0, 1, \cdots$）时，所受的力是最小，如果 $x_0 > e\left(\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 - 1 - \cos\theta\right)$ 时，力 F 恒大于零，即工件与工具头始终接触，可以进行机械珩磨。反之，如果 $x_0 \leqslant e\left(\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 - 1 - \cos\theta\right)$ 时，必有一段不相接触。由于 x_0 恒大于零，如果 $\frac{\omega}{\omega_n} \leqslant \sqrt{1+\cos\theta}$，即 x_0 恒大于 $e\left(\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 - 1 - \cos\theta\right)$，此时力 F 恒大于零。只有当 $\frac{\omega}{\omega_n} > \sqrt{1+\cos\theta}$ 并且 $x_0 \leqslant e\left(\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 - 1 - \cos\theta\right)$ 时，工件和工具头之间在加工时才有一段不相接触。如果令取极限值 1，则和式（3）所讨论的③相同。

④当工件旋转的角速度小于振动系统的固有频率时，当 $\omega t + \theta$ 为 $2k\pi$（$k = 0, 1, \cdots$）时，所受的力最小。如果 $x_0 > e\left(1 - \cos\theta - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)$，则力 F 恒大于零，工具头对工件可以持续进行机械珩磨。而如果 $x_0 \leqslant e\left(1 - \cos\theta - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)$ 时，则工件和工具头必然有一段不相接触，难以达到加工的效果。此时令 $\cos\theta$ 取极限值 -1，则如果 $x_0 > e\left(2 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)$，而力 F 在任何情况下均恒大于零，工具头对工件可以持续进行机械珩磨。反之，如果 $x_0 \leqslant e\left(2 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)$ 时，工件和工具头必然有一段不相接触，难以达到加工的效果。

2. 试验结果

根据以上所分析的情况，对夹心式电化学机械加工进行了定性定量分析：

（1）当机床主轴为 92r/min 时，所加工的工件不但表面粗糙度值高，而且在偏心部分加工不着的部分为整个工件圆周长的 1/3 以上，当调整机床主轴的转速为 740r/min 时，这时工件的表面粗糙度值大大降低，此时在偏心部分加工不到的部分只占整个工件圆周长的 1/9 左右。当机床主轴的转速继续提高到 1 350r/min 时，此时工件的表面粗糙度与前者相差不大，但是在偏心部分加工不到的部分占整个工件圆周长的 1/4 以上。

（2）在偏心量和机床主轴转速都一定的情况下，逐步增加振动系统的预紧力，当 x_0 为 0.4mm 时，在工件偏心位置其整个圆周大约有 1/3 左右不能被加工；当 x_0 为 0.8mm 时，在工件偏心位置其整个圆周有 1/9 不能被加工；当 x_0 增加到 1.6mm 时，在工件偏心位置其整个圆周完全可以加工，但是其表面明显有刮伤的痕迹，表示此时预紧力过大。

（3）在工件未有偏心的位置，无论如何调整主轴转速和预紧力，对工件的整个圆周均可以进行珩磨，加工效果很好。

3. 减小作用力幅值大小的办法及结论

（1）根据以上分析和试验结果，可使机床的主轴旋转的角速度接近于振动系统的固有频率。可有两种办法，第一，调节机床主轴的角速度，使之满足等于振动系统固有频率的要求。第二，当工件的表面粗糙度要求一定的主轴转速时，应调节振动系统的弹簧刚度和工具头的重量，使之满足要求。

（2）减小工件的偏心距，当偏心距越小，力的变化就越小，越符合加工的要求。

（3）提高振动系统的预紧力，由以上结果分析可知，预紧力越大，力恒大于零的比例也就越大。但是，随着预紧力的增大，有可能刮伤工件，要把预紧力调到一个适当的范围内。

通过对夹心式机械光整装置振动系统的分析，了解了工件偏心时机床主轴角速度、振动系统固有频率、偏心距等各方面对零件加工的影响。对影响加工的各个因素分别做调整，使之符合产品加工的要求。

（收稿日期：20030822）