

21. 如图 1 所示，刚性导体线框由长为 L 、质量均为 m 的两根竖杆，与长为 $2l$ 的两轻质横杆组成，且 $L \gg 2l$ 。线框通有恒定电流 I_0 ，可以绕其中心竖直轴转动。以线框中心 O 为原点、转轴为 z 轴建立直角坐标系，在 y 轴上距离 O 为 a 处，固定放置一半径远小于 a ，面积为 S 、电阻为 R 的小圆环，其平面垂直于 y 轴。在外力作用下，通电线框绕转轴以角速度 ω 匀速转动，当线框平面与 xOz 平面重合时为计时零点，圆环处的磁感应强度的 y 分量 B_y 与时间的近似关系如图 2 所示，图中 B_0 已知。

(1) 求 0 到 $\frac{\pi}{\omega}$ 时间内，流过圆环横截面的电荷量 q ；

(2) 沿 y 轴正方向看以逆时针为电流正方向，在 $0 \sim \frac{2\pi}{3\omega}$ 时间内，求圆环中的电流与时间的关系；

(3) 求圆环中电流的有效值；

(4) 当撤去外力，线框将缓慢减速，经 $\frac{\pi}{\omega}$ 时间角速度减小量为 $\Delta\omega$ ($\frac{\Delta\omega}{\omega} = 1$)，设线框与圆环的能量转换效率为 k ，求 $\Delta\omega$ 的值 (当 $0 < x < 1$ ，有 $(1-x)^2 \approx 1-2x$)。

