

实验名称 波尔共振仪研究受迫振动

实验目的:

1. 观察自由振动和阻尼振动的实验现象, 掌握测量振动系统基本参数的方法。
2. 观察受迫振动时的实验特征, 研究其振幅特性和相频特性, 深入理解共振现象。

实验仪器:

ZKY-BG 波尔共振仪(含电器控制箱、振动仪和闪光灯)。

实验原理:

1. 受迫振动:

(1) 摆轮做受迫振动的运动方程:

$$J \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} = -k\theta - b \cdot \frac{d\theta}{dt} + M_0 \cos \omega t$$

引入: $\omega_0^2 = k/J$ (固有角频率), $\beta = b/2J$ (阻尼系数), $m = M_0/J$.

则: 可写成: $\frac{d^2\theta}{dt^2} + 2\beta \frac{d\theta}{dt} + \omega_0^2 \theta = m \cos \omega t$

可得: $\theta = \underbrace{\theta_1 e^{-\beta t} \cos(\omega_0 t + \alpha)}_{\text{瞬态解}} + \underbrace{\theta_2 \cos(\omega t + \varphi_0)}_{\text{稳态解}} \quad (\varphi_0: \text{摆轮和电机相位差}).$

(2) 分析稳态解: 幅频特性和相频特性

可得: $\left\{ \begin{array}{l} \text{振幅 } \theta_2 = \frac{m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}} \\ \varphi = \arctan \frac{2\beta \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} = \arctan \frac{\beta T_0^2 \omega}{\pi(T^2 - T_0^2)} \end{array} \right.$

① 自由振动: 测量摆轮的振幅 θ 和系统固有周期 T_0 的关系。

由于 k (蜗卷弹簧的弹性系数) 会随着角度的改变而发生微小的变化, 从而造成在不同振幅时摆轮系统的固有频率 ω_0 也有变化且不能忽略。因此画成图象形式, 得到拟合关系式。

② 阻尼系数 β 的确定。

阻尼通过调节阻尼线圈内直流电流大小来改变阻尼系数。

振幅、周期和阻尼系数满足: $5\beta T = \ln(\theta_0 / \theta_{n+5})$ 。

③ 受迫振动时的幅频和相频特性:

1° “强迫力周期”旋钮, 通过调节强迫力矩周期电位器来改变电机的转速, 即改变强迫外力矩的频率 ω , 从而改变电机转动周期 T 。利用频闪记录摆轮和强迫力间的相位差 φ , 得到幅频 ($\theta \sim \omega/\omega_0$) 和相频 ($\varphi \sim \omega/\omega_0$) 曲线。

2° 阻尼系数 β 也可通过图解法测量:

由 $\theta \sim \omega/\omega_0$ 图象, 当 $\theta = \frac{\theta_r}{\sqrt{2}}$ 时, 对应的横坐标为:

$\omega_+ / \omega_0, \omega_- / \omega_0$ 。得: $\beta = \frac{1}{2}(\omega_+ - \omega_-)$

实验步骤:

Step 1: 首先打开电器控制箱的开关, 在控制面板上选择“自由振荡”, 然后用手拨动摆轮使其初振幅在 $140^\circ \sim 160^\circ$ 处, 然后按“ $\square$ ”或“ Δ ”测量开启, 直到振幅小于 50° , 通过“回查”, 记录摆轮振幅和周期 T 。

Step 2: 然后选择阻尼振荡, 拨到阻尼 2 挡, 同①, 用手拨动摆轮使其初振幅在 $140^\circ \sim 160^\circ$ 处, 测量 10 T 后, 通过“回查”, 记录摆轮振幅 θ 和周期 T 。

Step 3: 选择受迫振动, 选择电机模式, 按“ Δ ”或“ $\square$ ”键使其处于开闭状态, 设置“强迫力周期”旋钮值, 使其等于 T 。通过振幅是否达到 $\max$ 。或待摆轮和电机周期稳定一致后, 通过闪光灯测量相位差是否为 90° 。判断是否为 T_0 , 找到 T_0 后, 向上向下分别测五组 (前两组周期差 $0.005s$, 后三组差 $0.01s$)。测量相位差。

实验数据表格及数据处理:

表3.1.1 自由振动下摆轮振幅 θ 与振动周期 T 的实验数据

$\theta/(^\circ)$	T/s	$\theta/(^\circ)$	T/s	$\theta/(^\circ)$	T/s
149	1.575	122 ~ 128	1.579	92 ~ 97	1.583
146 ~ 139	1.576	113 ~ 119	1.580	86 ~ 89	1.584
137 ~ 138	1.577	105 ~ 111	1.581	62 ~ 86	1.585
130 ~ 135	1.578	100 ~ 102	1.582	51 ~ 59	1.586

表3.1.2 阻尼振动时摆轮振幅 θ 的测量数据 (阻尼2挡)

摆轮振幅 $\theta/(^\circ)$ ($10T = 15.852s$)				$\ln(\theta_n/\theta_{n+5}) = 5\beta T$
θ_1	112	θ_6	66	0.06672
θ_2	101	θ_7	60	0.065705
θ_3	91	θ_8	54	0.065843
θ_4	82	θ_9	48	0.067565
θ_5	74	θ_{10}	43	0.068492
平均值				0.06687

表3.1.3 受迫振动时幅频特性和相频特性测量数据

摆轮振幅 $\theta/(^\circ)$	振动周期 T/s	T_0/s	$\frac{\omega}{\omega_0} (\frac{T_0}{T})$	相位差 $\varphi/(^\circ)$
63	1.535	1.585	1.033	150
78	1.545	1.585	1.026	144
105	1.555	1.581	1.017	135
133	1.565	1.578	1.008	116

146	1.570	1.576	1.004	104
151	1.575	1.575	1.000	90
149	1.580	1.575	0.997	80
146	1.585	1.576	0.994	71
133	1.595	1.578	0.989	55
113	1.605	1.580	0.984	49
96	1.615	1.583	0.980	36

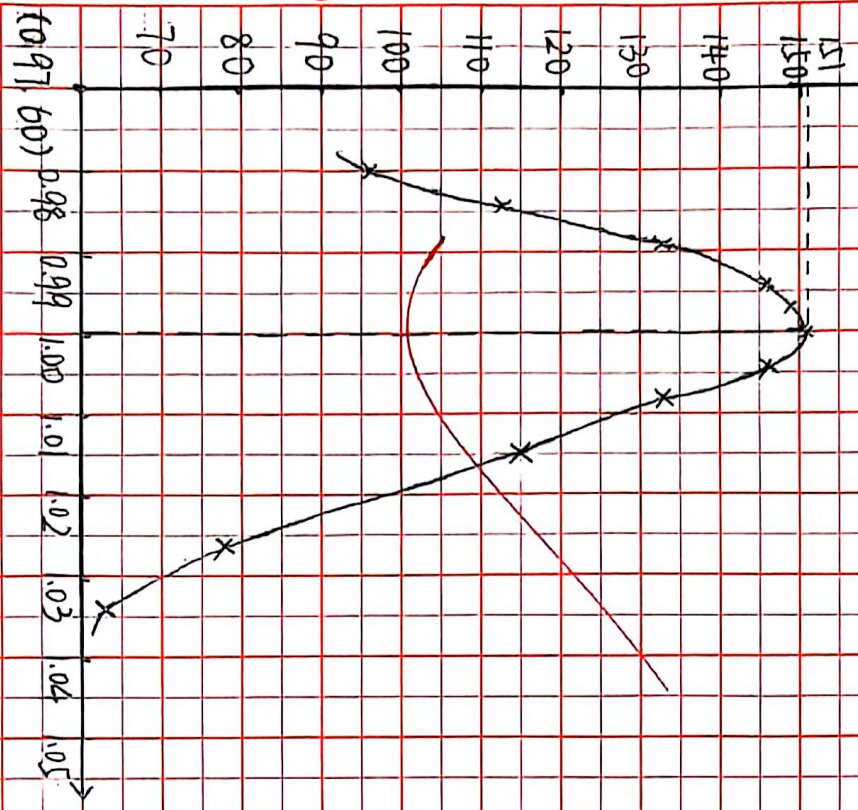
Date / /

表 3.3 受迫振动时幅频和相频

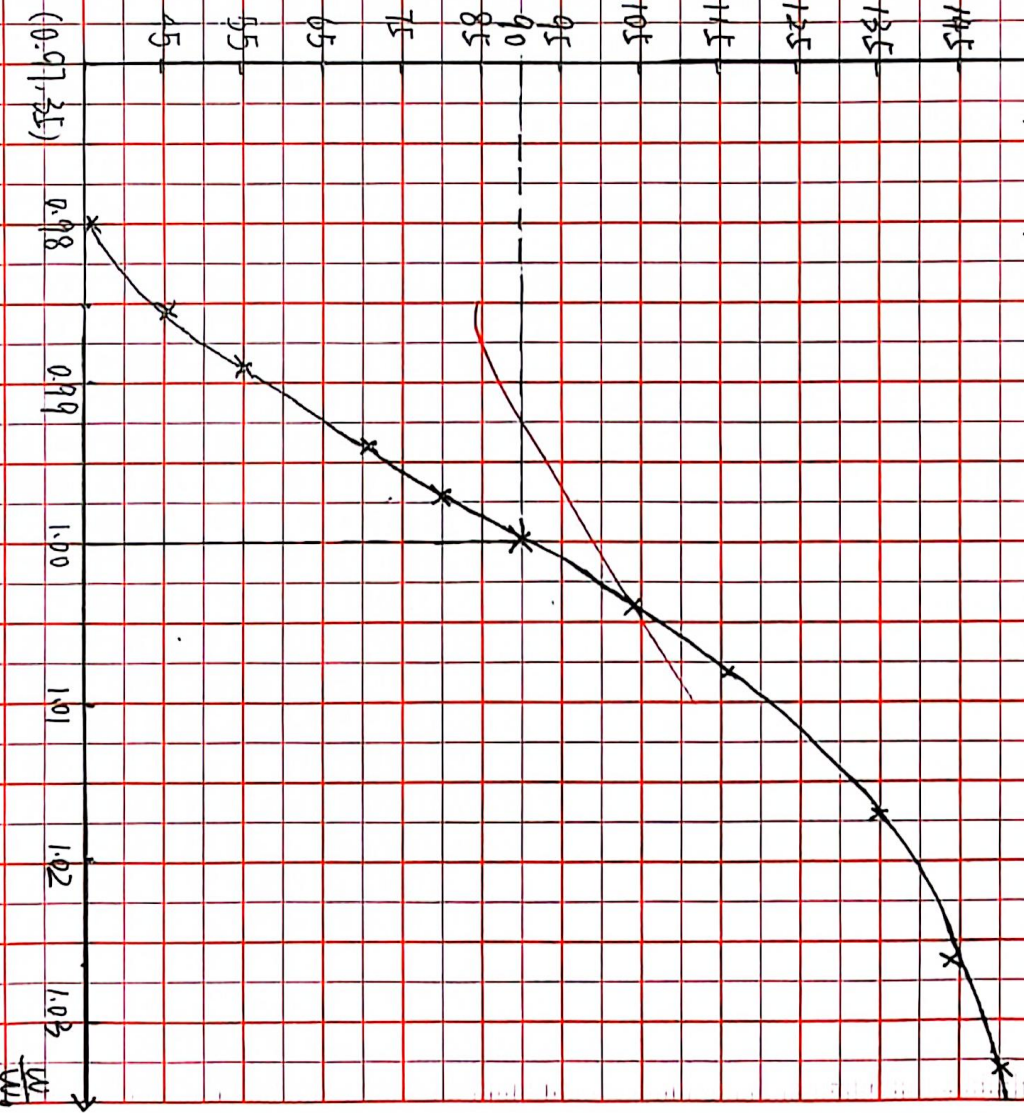
摆轮振幅 $\theta/^\circ$	振动周期 T/s	T_0/s	$\frac{\omega}{\omega_0}$	相位差 $\varphi/^\circ$
63°	1.535			150°
78°	1.545			144°
105°	1.555			135°
133°	1.565			116°
146°	1.570			104°
151°	1.575			90°
149°	1.580			80°
146°	1.585			71°
133°	1.595			55°
113°	1.605			49°
96°	1.615			36°

摆轮振幅

θ/k°



相位差 $\varphi(k^\circ)$



受迫振动时的幅频特性 ($\theta \sim \omega/\omega_0$) 曲线

受迫振动时的相频特性 ($\varphi \sim \omega/\omega_0$) 特性曲线