

物 理 实 验 （二）

在气垫导轨上研究阻尼振动

时间：2024 年 1 月 6 日

创作人：陆知辰

学号：10225301478

目录	1
----	---

目录

一、 摘要	2
二、 原理	2
2.1 背景知识	2
2.2 进一步计算	3
2.2.1 阻尼常数/粘性阻尼常数计算	3
2.2.2 品质因数	4
2.3 实验所需测量量	4
三、 装置器材	4
四、 内容及步骤	5
4.1 系统调节	5
4.1.1 静态调节	5
4.1.2 动态调节	5
4.2 弹簧弹力系数测量	5
4.3 振幅测量	5
五、 原始数据	6
六、 数据处理	9
6.1 数据对应关系	9
6.2 数据处理后图片展示	10
6.3 相关数据计算	13
6.4 误差分析	13
七、 实验结论	14
八、 实验讨论	15

一、 摘要

简谐振动是周期运动中最简单的运动方式。研究简谐振动是了解周期运动最简单最理想的模型。而当简谐振动中加入了和速度相关的粘性阻力的时候，振动将变为阻尼振动。

本实验通过在气垫导轨上更换弹簧与配重获得不同实验条件，通过视频记录与数据记录获得不同周期中最大振幅数据，并进行数据处理得到在最大振幅处不同弹簧弹性系数与滑块质量下的若干周期的图像。并计算不同条件下的粘性阻尼系数与品质因数。

关键词： 气垫导轨、阻尼振动、品质因数、弹性系数、粘性阻尼系数

二、 原理

2.1 背景知识

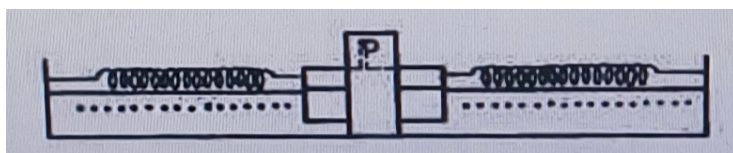


图 1: 阻尼振动原理图

本实验的阻尼谐振子由气垫导轨上的滑块和一对弹簧组成，如图 1 此时滑块除受弹簧恢复力作用外，还受到滑块与导轨之间的粘性阻力的作用。在滑块速度较小时，粘性阻力 $F_{\text{阻}}$ 和滑块的速度成正比，即

$$F_{\text{阻}} = bv = b \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

式中 b 为粘性阻尼常量。气垫导轨上由滑块和一对弹簧组成的振动系统，在弹性力 kx 和阻尼力 $F_{\text{阻}}$ 作用下，滑块的运动方程为

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx - b \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

式中 m 为滑块质量，令

$$2\delta = \frac{b}{m}, \omega_0^2 = \frac{k}{m}$$

其中 δ 为阻尼因素， ω_0 为振动系统固有频率。由此，可以得到

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + 2\delta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (3)$$

当阻力较小的时候，该方程的解为

$$x = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega_f t + \phi) \quad (4)$$

其中 $\omega_f = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ ，而阻尼振动的周期为

$$T = \frac{2\pi}{\omega_f} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}$$

由此可以得到阻尼振动主要特点

阻尼振动振幅随着时间按指数规律衰减，也就是 $A = A_0 e^{-\delta t}$ 。而衰减速度除了时间相关，还和阻尼因素相关，也就是和 $\delta = \frac{b}{2m}$ ，所以也和粘性阻尼常数 b 以及质量 m 相关。

2.2 进一步计算

2.2.1 阻尼常数/粘性阻尼常数计算

将某一时刻的振幅和一个周期之后该位置的振幅进行比值计算，将会得到

$$\Delta = \frac{A_0 e^{\delta t}}{A_0 e^{\delta(t+T)}} \quad (5)$$

再将该值取对数，将会得到

$$\Lambda = \ln \Delta = \ln \frac{A_0 e^{\delta t}}{A_0 e^{\delta(t+T)}} = -\delta T \quad (6)$$

若将 $\delta = \frac{b}{2m}$ 代入，则会得到

$$b = \frac{2m\Lambda}{T} \quad (7)$$

由此可以得到 δ 或者 b ，需要测量的质量以及周期以及振幅数据。

2.2.2 品质因数

一个振动系统的品质因素又称 Q 值，是一个应用极为广泛的概念，它在交流电系统及无线电电子学中是一个很常见的术语。品质因数是指振动系统的总能量 E 与在一个周期中所损耗的能量 ΔE 之比的 2π 倍，用 Q 表示，也就是

$$Q = 2\pi \frac{E}{\Delta E} \quad (8)$$

阻尼振动中，能量的损耗是由于克服阻尼力做功而造成的，其做功的功率等于阻尼力的大小 bv 乘以运动速率 v ，即等于 bv^2 。在振动时， bv^2 是一个变量，可用一个周期中的平均值作为这一周期中的平均效果。这样，一个周期中的能量损耗 ΔE 等于一个周期中克服阻尼力作的功，即

$$\Delta E = (bv^2)_{\text{平均}} T$$

而对于振动系统而言，一个周期中的平均动能等于平均势能，且均等于总能量的一半。所以可以得到

$$\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{\text{平均}} = \left(\frac{1}{2}kx^2\right)_{\text{平均}} = \frac{1}{2}E \quad (9)$$

$$(v^2)_{\text{平均}} = \frac{E}{m} \quad (10)$$

$$\Delta E = b \frac{E}{m} T \quad (11)$$

最终可以得出 $Q = \frac{\pi}{\Lambda}$

2.3 实验所需测量量

实验中所需要测量 Λ ，也就是需要得到某一位置的振幅，以及一个周期之后该位置的振幅。所以实验中选取振幅最大值的位置为观察位置进行测量观测。

并通过描点观察振幅变化和周期变化。最终计算品质因数。

三、 装置器材

气垫导轨，滑块，摄像仪器，弹簧数对，重物质量块，物理天平，米尺

四、 内容及步骤

4.1 系统调节

安装完光电门传感器后测试光电门计时功能是否正常使用再进行导轨水平调整。导轨的水平调节通过导轨一端安装的调节螺丝，用于调节导轨横向与纵向的水平。在调节水平的时候通过结合静态调节和动态调节的方式进行调节。

4.1.1 静态调节

打开气源开关，将滑块放于导轨任意位置，观察滑块是否会发生滑动。反复多次调节底部螺丝，直到滑块保持不动，或稍有移动但无一定方向性为止。应选择多个位置进行试验。

4.1.2 动态调节

原理是如果滑块已经调平，则通过导轨任意位置的速度应该相同，滑块作匀速直线运动。所以在滑块通过两个光电门的时候的速度应该是相等的。所以以一定初速度释放滑块记录滑块通过两个光电门的速度大小并作出相应的调节，最终使得滑块通过两光电门的速度相差不超过 5%。

4.2 弹簧弹力系数测量

测量弹簧原本长度，在悬挂质量块后再次测量长度，多次悬挂不同质量的重物测量弹簧的型变量，通过计算得到弹簧的弹性系数。导轨弹簧弹性系数等于两侧弹簧弹性系数的和，即 $k_{\text{总}} = k_1 + k_2$ 。

4.3 振幅测量

选择不同弹性系数的弹簧组合，在某一位置释放小车，并通过改变小车的负重改变总质量进行多次实验。

通过视频方式记录小车位置，再对视频进行在处得到数据集。

五、 原始数据

华东师范大学

物理实验报告

12.29
理 設

班 级 _____

同组者_____

姓名学号 _____

31 89 _____

日期_____

成績 121

姓名学号: _____

实验题目:

① $1.707 + 2.543$

1.707 21.629

21.629

2543 16.929

16.929

9.334 17.1.9

17.179

$$\begin{array}{r} 5.437 \\ 20.419 \\ \hline \end{array}$$

20.419

78cm / 98cm

从右 130cm 处释位

② $1.\overline{72} + 2.543 = 980002430$

从右 130cm 处释放

得地 217.929

217.929

268.04 g

X ① 1.707 + 2.543 980m/1200m 268.04g

② $1.707 + 2.543$ $9.3 \text{ cm} / 120 \text{ cm}$ 217.929

③ $1.707 + 2.543$. $98.3\text{cm}/120\text{cm}$. 242.76°

④ $1.707 + 2.543 = 98.3 \text{ cm} / 120 \text{ cm} = 268.04\%$

⑤ $1.70 + 2.543 = 98.3\text{cm} / 120\text{cm} = 230.43\text{g}$

⑥ $1.707 + 2.543$ 98.3cm/120cm 255.27g

① 5.43012543 45.5cm/20cm 25527g

① $5430 + 2.543 \quad 45.5 \text{ cm} / 20 \text{ cm} \quad 230.439$

① 5430 + 2.543 45.5cm/20cm 268.04g

图 2: 原始数据 0

弹性系数	1.707+2.543		1.707+2.543		1.707+2.543		1.707+2.543			5.43+2.543		5.43+2.543		5.43+2.543		
平衡位置 最大振幅	98.3cm	120cm	98.3cm	120cm	98.3cm	120cm	98.3cm	120cm		45.5cm	20cm	45.5cm	20cm	45.5cm	20cm	
负载重量+滑块	217.92g		242.76g		268.04g		230.43g			255.27g		230.43g		268.04g		
时间	位移	0	21.7	0	21.7	0	21.7	0	21.7		0	25.4	0	25.5	0	25.5

图 3: 原始数据 1

1.707+2.543		1.707+2.543		1.707+2.543		1.707+2.543			5.43+2.543		5.43+2.543		5.43+2.543	
98.3cm	120cm	98.3cm	120cm	98.3cm	120cm	98.3cm	120cm		45.5cm	20cm	45.5cm	20cm	45.5cm	20cm
217.92g		242.76g		268.04g		230.43g			255.27g		230.43g		268.04g	
0	21.7	0	21.7	0	21.7	0	21.7		0	25.4	0	25.5	0	25.5
3	21.5	3	21.6	3	21.5	3	21.5		3	24.9	3	25.2	3	24.7
6	20.7	6	21.5	6	20.7	6	21.1		6	23.2	6	24.3	6	22.1
9	19.1	9	21	9	19	9	19.9		9	19.8	9	21.2	9	18
12	16.6	12	19.6	12	16.7	12	18.1		12	14.9	12	16.2	12	
15	12.9	15	17.5	15	13.8	15	14.9		15		15		15	
18		18	14.6	18	10.1	18	11.3		18		18		18	
21		21	11.1	21		21			21		21		21	
24		24		24		24			24		24		24	
27		27		27		27			27		27		27	
30		30		30		30			30		30		30	
33		33		33		33			33		33		33	
36		36		36		36			36		36		36	
39		39		39		39			39		39		39	
42		42		42		42			42		42		42	
45		45		45		45			45		45		45	
48		48		48		48			48		48		48	
51		51		51		51			51		51		51	
54		54		54		54			54		54		54	
57		57		57		57			57		57		57	
60		60	6.7	60		60			60	14	60	15.8	60	
63	8.9	63	10.4	63		63			63	18.1	63	21	63	
66	12.9	66	13.7	66	8.3	66			66	22.4	66	23.4	66	18.9
69	16	69	16.4	69	11.2	69			69	24	69	24	69	22.1
72	18.1	72	18.1	72	14.6	72			72	24.1	72	22.9	72	23.9
75	19.8	75	19.7	75	16.9	75			75	22.4	75	19.5	75	24.1
78	20.5	78	20.1	78	18.7	78			78	18.9	78	14.3	78	22.5
81	20.2	81	19.8	81	19.8	81	11.5		81	14.5	81		81	19.4
84	19.1	84	18.6	84	20.1	84	15		84	9	84		84	15
87	17.2	87	16.7	87	19.7	87	17.6		87		87		87	
90	14.4	90	14.4	90	18.6	90	19.3		90		90		90	
93	11	93	10.8	93	16.9	93	20.1		93		93		93	

图 4: 原始数据 2

8.3cm	120cm	98.3cm	120cm	98.3cm	120cm	98.3cm	120cm	45.5cm	20cm	45.5cm	20cm	45.5cm	20cm
217.92q		242.76q		268.04q		290.43q		255.27q		230.42q		268.04q	
0	21.7	0	21.7	0	21.7	0	21.7	0	25.4	0	25.5	0	25.5
3	21.5	2	21.6	2	21.5	2	21.5	2	24.9	2	25.2	2	24.7
6	20.7	6	21.5	6	20.7	6	21.1	6	23.2	6	24.3	6	22.1
9	19.1	9	21	9	19	9	19.9	9	19.8	9	21.2	9	18
12	16.6	12	19.6	12	16.7	12	18.1	12	14.9	12	16.2	12	
15	12.9	15	17.5	15	13.8	15	14.9	15		15		15	
18		18	14.6	18	10.1	18	11.3	18		18		18	
21		21	11.1	21		21		21		21		21	
24		24		24		24		24		24		24	
27		27		27		27		27		27		27	
30		30		30		30		30		30		30	
33		33		33		33		33		33		33	
36		36		36		36		36		36		36	
39		39		39		39		39		39		39	
42		42		42		42		42		42		42	
45		45		45		45		45		45		45	
48		48		48		48		48		48		48	
51		51		51		51		51		51		51	
54		54		54		54		54		54		54	
57		57		57		57		57		57		57	
60		60	6.7	60		60		60	14	60	15.8	60	
63	8.9	63	10.4	63		63		63	18.1	63	21	63	
66	12.9	66	13.7	66	8.3	66		66	22.4	66	23.4	66	18.9
69	16	69	16.4	69	11.2	69		69	24	69	24	69	22.1
72	18.1	72	18.1	72	14.6	72		72	24.1	72	22.9	72	23.9
75	19.8	75	19.7	75	16.9	75		75	22.4	75	19.5	75	24.1
78	20.5	78	20.1	78	18.7	78		78	18.9	78	14.2	78	22.5
81	20.2	81	19.8	81	19.8	81	11.5	81	14.5	81		81	19.4
84	19.1	84	18.6	84	20.1	84	15	84	9	84		84	15
87	17.2	87	16.7	87	19.7	87	17.6	87		87		87	
90	14.4	90	14.4	90	18.6	90	19.3	90		90		90	
93	11	93	10.8	93	16.9	93	20.1	93		93		93	
96	6.8	96	7.1	96	14.4	96	20.1	96		96		96	
99		99		99	11.2	99	19.2	99		99		99	
102		102		102	7.8	102	17.6	102		102		102	
105		105		105		105	14.9	105		105		105	
108		108		108		108	11.7	108		108		108	
111		111		111		111		111		111		111	
114		114		114		114		114		114		114	
117		117		117		117		117		117		117	
120		120		120		120		120		120		120	
123		123		123		123		123		123	11.3	123	
126		126		126		126		126		126	16.4	126	
129		129		129		129		129		129	21.5	129	
132		132		132		132		132	13.5	132	23.2	132	
135		135		135		135		135	17.5	135	23	135	
138	6.6	138	5.9	138		138		138	21.4	138	21.1	138	
141	10.1	141	9.6	141		141		141	23.3	141	17.4	141	14.5
144	13.6	144	12.7	144		144		144	23.4	144	12.5	144	18.8
147	16	147	15.1	147		147		147	21.9	147		147	21.9
150	18	150	17.2	150		150		150	18.5	150		150	22.4
153	19.1	153	18.5	153		153		153	13.9	153		153	23.3
156	19.4	156	19	156		156	10.2	156	8.1	156		156	21.5
159	18.7	159	18.8	159		159	13.6	159		159		159	18.4
162	17.2	162	17.8	162		162	15.1	162		162		162	13.9
165	15.1	165	16	165	8.6	165	17.9	165		165		165	
168	12.5	168	13.7	168	12	168	19.1	168		168		168	
171	8.4	171	10.8	171	14.6	171	19.4	171		171		171	
174		174	7.1	174	16.1	174	18.9	174		174		174	
177		177	3	177	17.7	177	17.4	177		177		177	
180		180		180	18.4	180	15.3	180		180		180	
183		183		183	18.7	183	12.1	183		183		183	
186		186		186	18.2	186	9	186		186		186	
189		189		189	17.2	189		189		189		189	
192		192		192	15.5	192		192		192	17.5	192	
195		195		195	12	195		195		195	21.1	195	
198		198		198	10.1	198		198		198	22.5	198	
201		201		201	7	201		201		201	22.3	201	
204		204		204		204		204	12.9	204	20.2	204	
207		207		207		207		207	17.5	207	16.8	207	
210		210		210		210		210	20.9	210	11.6	210	
213		213		213		213		213	22.7	213		213	16
216	7.6	216	5.3	216		216		216	22.8	216		216	19.5
219	11.2	219	8.4	219		219		219	21.2	219		219	22
222	14.1	222	12	222		222		222	18.1	222		222	22.8
225	16.5	225	14.2	225		225		225	13.3	225		225	22
228	17.9	228	16.3	228		228		228		228		228	19.7
231	18.6	231	17.6	231		231		231		231		231	16.1
234	18.5	234	18.1	234		234		234		234		234	11.3
237	17.5	237	17.8	237		237		237		237		237	
240	15.7	240	17	240		240		240		240		240	
243	13.2	243	15.4	243		243	4.9	243		243		243	
246	11.3	246	13.1	246		246	9	246		246		246	
249	7.6	249	10.2	249		249	12.1	249		249		249	
252		252	7	252		252	14.7	252		252		252	
255		255	2.3	255		255	16.8	255		255		255	
258		258		258		258	18.1	258		258	17.6	258	
261		261		261	5.4	261	18.6	261		261	20.7	261	
264		264		264	8.4	264	18.4	264		264	21.9	264	
267		267		267	11.4	267	17.2	267		267	21.4	267	
270		270		270	13.9	270	15.4	270		270	19.4	270	
273		273		273	15.7	273	12.9	273		273	15.8	273	
276		276		276	16.8	276	10.1	276		276	10.9	276	
279		279		279	17.5	279	6.3	279	13.7	279		279	
282		282		282	17.5	282	2.8	282	18.2	282		282	
285		285		285	16.7	285		285	20.9	285		285	17.2
288		288		288	15.5	288		288	22.2	288		288	20.4
291		291		291	13.6	291		291	21.8	291		291	21.9
294		294	4.6	294	11.2	294		294	19.9	294		294	22
297		297	7.8	297	8.3	297		297	16.4	297		297	20.5
300		300	10.8	300	2.1	300		300	12	300		300	17.7

图 5: 原始数据 3

由于数据过长，所以只截取了部分数据进行展示。

六、 数据处理

6.1 数据对应关系

实验中使用的弹簧及其质量如表 1所示。

表 1: 弹簧弹性系数及该系数弹簧的质量对应关系示意图

弹簧的弹性系数	弹簧质量 (克)
1.707	21.62
2.543	16.92
8.834	17.17
5.430	20.41

实验得到的数据可视化处理后得到的图像和对应关系如表 2所示。

表 2: 系列序号以及实验条件

系列序号	所使用弹簧	质量 (克)
1	1.707+2.543	217.92
2	1.707+2.543	242.76
3	1.707+2.543	268.04
4	1.707+2.543	230.43
5	5.430+2.543	255.27
6	5.430+2.543	230.43
7	5.430+2.543	268.04

6.2 数据处理后图片展示

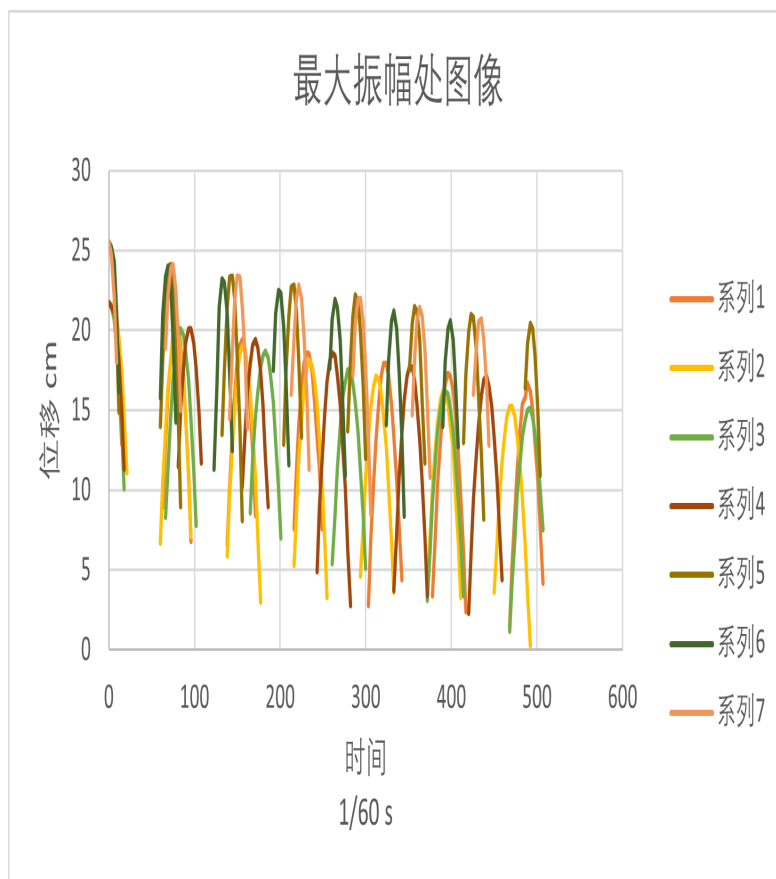


图 6: 处理后图像 (全)

以下图片展示的是相同振幅释放后，相同弹簧弹性系数的条件下不同滑块质量的结果：

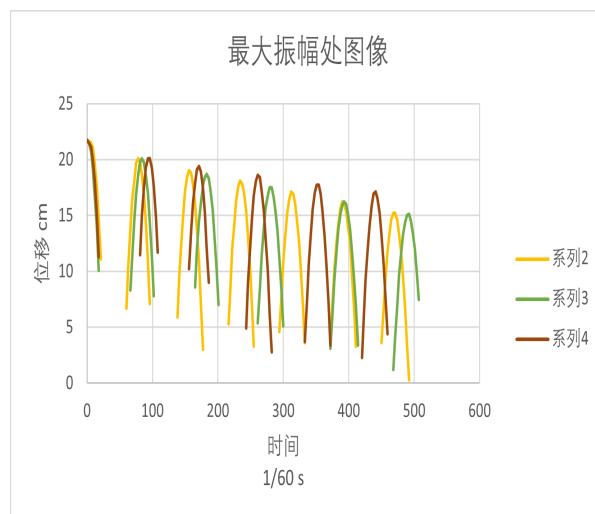


图 7: 数据图像 1

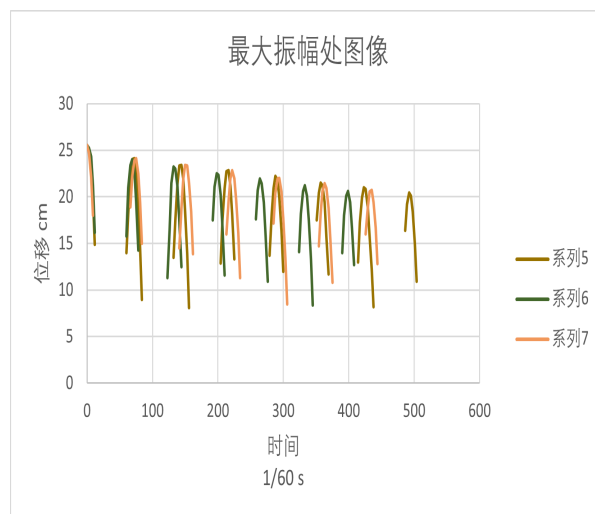


图 8: 数据图像 2

以下图片展示的是不同弹簧弹性系数的条件下相同滑块质量的结果：

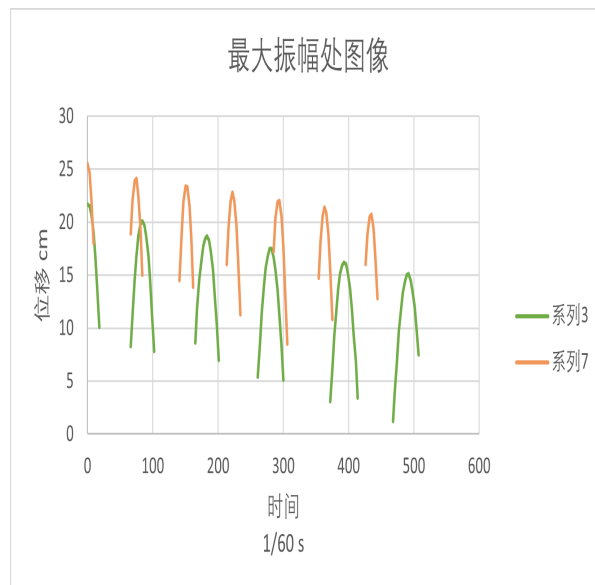


图 9: 数据图像 3

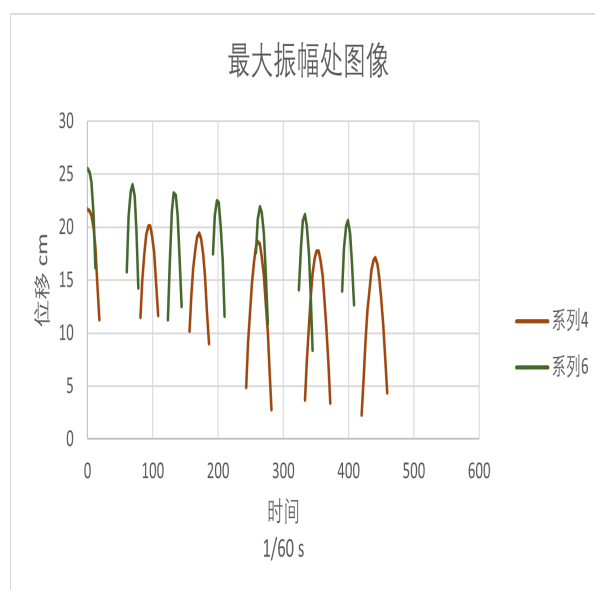


图 10: 数据图像 4

6.3 相关数据计算

进行计算后可以得到实验所需要的相关值的大小，如表 3所示。

表 3: 系列以及相关实验值计算

系列序号	b	Δ	Q
1	17.22	0.0395	60.39
2	26.75	0.0551	43.86
3	29.33	0.0547	41.02
4	21.07	0.0457	43.86
5	22.90	0.0449	60.04
6	24.29	0.0527	51.82
7	21.86	0.0408	60.04

6.4 误差分析

表 4: 误差分析

系列序号	振幅（米）	质量（千克）
1	0.00067	0.00582
2	0.00067	0.00582
3	0.00067	0.00582
4	0.00067	0.00582
5	0.00067	0.00582
6	0.00067	0.00582
7	0.00067	0.00582

七、 实验结论

最终实验可以得出阻尼振动中周期随着质量增加而增加，振幅随着时间增加而减小。如图 11和图 12所示。

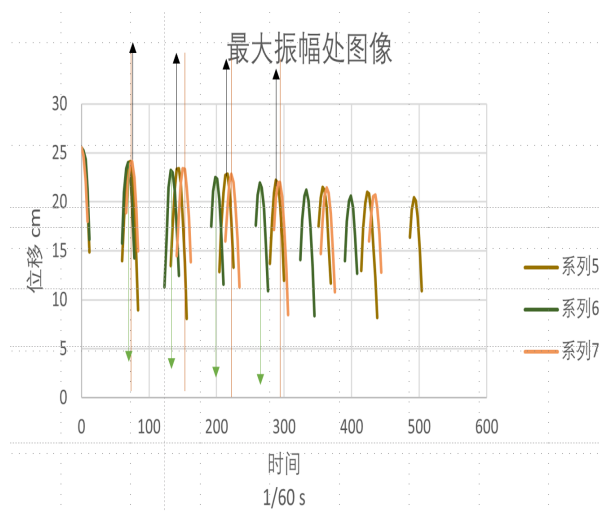


图 11: 图像 1

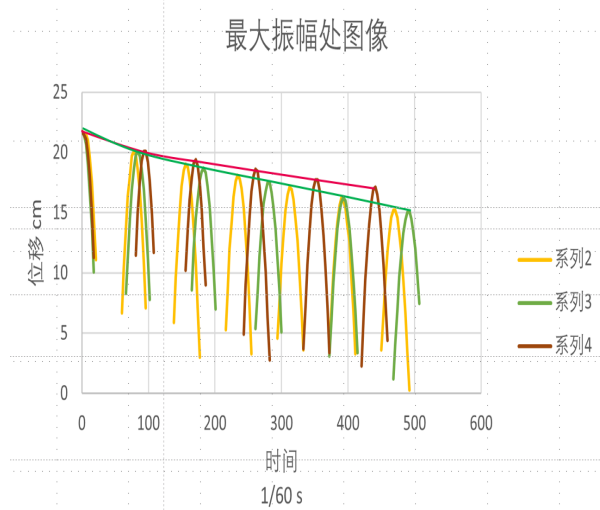


图 12: 图像 2

同时计算得到了实验中所使用设备条件下的品质因数与阻尼系数。
实验能够定性表现出阻尼振动和滑块质量与弹簧弹性系数的关系。

八、 实验讨论

实验中有很多容易导致误差的地方。比如弹簧在振动的时候可能会左右晃动导致即便没有阻尼也不是简谐振动。而且气垫导轨不同位置的喷气力度不同也导致饰演的误差。

之前拿这套相同的设备进行过简谐振动的实验，通过这次实验会感觉上一次实验的误差非常大，而事实上是之前实验中的确也遇到了误差过大的问题。所以这次实验或许也算是解释之前实验中误差分析中解释的“可能由于不是理想的简谐振动”的补充。