

机械运动和动力参数测量

3.1 概 述

机械系统的运动和动力参数反映了机械系统的工作性能。为了认识、改进和提高机械系统的工作性能,必须测试和分析机械系统的运动和动力参数。由于机械系统正向着高速、重载、高精度的方向发展,因此对机械零部件的运动、动力性能也提出了更高的要求。机械的运动、动力性能能否达到预定的功能要求,构件能否实现预定的运动轨迹或预定的运动规律,都需要通过实验来检验和分析。

3.1.1 机械运动参数的测量

机械系统构件的运动参数包括线位移、速度、加速度、角位移、角速度、转速、角加速度等,它们是分析机械系统运动和承载能力必不可少的参数。通过对这些参数的测试,可以验证理论分析的正确性,评价设计方案的合理性,并为进一步改进机械系统提供依据。

1. 机械位移测量

在工程技术领域里经常需要测量机械位移。机械位移包括线位移和角位移。位移是指构件上某一点在一定方向上的位置变动。位移是向量,具有大小和方向。测量时应使测量方向与位移方向一致,这样才能真实地测量出位移量的大小。

测量位移的方法很多,表 3-1 列出了机械位移测量常用的方法及其主要性能。

表 3-1 机械位移测量常用的方法

类 型	测 量 范 围	精 确 度	线 性 度	特 点
电阻式				
滑线式 线位移	1~300mm	0.1%	±0.1%	分辨力较高,可用于静、动态测量,机械结构不牢固 分辨力低、电噪声大,机械结构牢固
角位移	0°~360°	0.1%	±0.1%	
变阻器 线位移	1~1000mm	0.5%	±0.5%	
角位移	0~60 周	0.5%	±0.5%	
应变片式				
非粘贴式	±0.15%应变	0.1%	±0.1%	不牢固 牢固、需要温度补偿和高绝缘电阻
粘贴式	±0.3%应变	2%~3%		
半导体式	±0.25%应变	2%~3%	满刻度±20%	输出大、对温度敏感

续表

类 型	测 量 范 围	精 确 度	线 性 度	特 点
电容式 变面积 变极距	0.001~100mm 0.001~10mm	0.005% 0.1%	±1%	易受温度、湿度变化的影响,测量范围小,线性范围也小,分辨力很高
电感式 自感变间隙式 螺管式 特大型 差动变压器	±0.2mm 0.5~2mm 200~300mm ±(0.08~75)mm	1% ±0.5%	±3% 0.15%~1% ±0.5%	限于微小位移测量 方便可靠、动态特性差 分辨力很高,有干扰磁场时需屏蔽
电涡流式	0~100mm	±(1~3)%	<3%	分辨力很高,受被测物体材质、形状、加工质量影响
同步机	360°	±(0.1°~0.7°)	±0.05	对温度、湿度不敏感,可在 120r/min 转速下工作
微动同步器 旋转变压器	±10° ±60°		±0.05% ±0.1%	非线性误差与电压比及测量范围有关
感应同步器 直线式	0.001~10 ⁴ mm	2.5μm/250mm		模拟和数字混合测量系统数显,直线式分辨力可达 1μm
旋转式	0~360°	0.5"		
光栅 长光栅 圆光栅	0.001~10 ⁴ mm 0~360°	3μm/m 0.5"		工作方式与感应同步器相同,直线式分辨力可达 0.1~1μm
磁栅 长磁栅 圆磁栅	0.001~1000mm 0~360°	5μm/m 1"		测量工作速度可达 12m/min
轴角编码器 绝对式 增量式	0~360° 0~360°	10 ⁻⁶ /r 10 ⁻³ /r		分辨率高,可靠性好
霍尔元件 线性型 开关型	±5mm >2m	0.5%	1% 1%	结构简单、动态特性好,分辨率可达 1μm,对温度敏感、量程大
激光	2m			分辨力 0.2μm
光纤	0.5~5mm	1%~3%	0.5%~1%	体积小、灵敏度高,抗干扰;量程有限,制造工艺要求高
光电	±1mm			高精度、高可靠性、非接触测量,分辨力可达 1μm;缺点是安装不便

表 3-1 中的电容式位移传感器、电感式位移传感器和电阻位移传感器,一般用于小位移的测量(几微米至几毫米)。差动变压器式传感器用于中等位移的测量(几毫米至 100 毫米左右),这种传感器在工业测量中应用得最多。电位器式传感器适用于较大范围位移的测

量,但精度不高。

2. 速度的测量

速度量分为线速度、转速和角速度,其测量方法如下:

1) 线速度的测量

(1) 测量位移 s 和时间 t ,然后通过求导得到速度:

$$v = ds/dt \tag{3-1}$$

(2) 利用速度和某些物理量成比例的关系,通过该物理参数来获得速度值。例如对于由磁钢、线圈和衔铁组成的磁电式变换器,当衔铁在活动构件带动下运动时,衔铁和磁钢之间的间隙发生变化,利用线圈中感应电动势与磁隙的变化速度成正比的关系,通过测量感应电动势便可得到活动构件的运动速度。

(3) 通过加速度或位移的测量,利用积分电路或微分电路求得对时间的积分或微分,由此得到运动速度。

2) 转速的测量

测量转速的方法很多,按转速转换方式的不同,常用的转速测量方法归类于表 3-2。

表 3-2 常用转速的测量方法

形 式		测 量 方 法	适 用 范 围	特 点	备 注
计 数 式	机械式	通过齿轮转动数字轮	中、低速	简单、价廉	与秒表并用,也可在机构中加入计时仪
	光电式	利用来自被测旋转体上光线,使光电管产生脉冲	中、高速,最高可测 25000r/min	无扭矩损失,简单	数字式转速计
	电磁式	利用磁电转换器将转速变换成电脉冲	中、高速		数字式转速计
模 拟 式	机械式	利用离心力与转速二次方成正比的关系	中、低速	简单	陀螺测速仪
	发电机式	利用电机的直流或交流电压与转速成正比的关系	最 高 可 测 10000r/min	可远距离指示	测速发电机
	电容式	利用电容充放电回路产生与转速成正比的电流	中、高速	简单,可远距离指示	
同 步 式	机械式	转动带槽的圆盘,目测与旋转体同步的转速	中速	无扭矩损失	
	闪光式	利用已知频率的闪光测出与旋转体同步的频率	中、高速	无扭矩损失	闪光测速仪

3. 加速度的测量

构件的加速度直接影响机械系统的运动性能和动力性能,因此常将加速度作为运动参数测量的主要内容之一。构件的加速度可分为线加速度和角加速度。测量构件加速度的方法很多。例如可通过测量构件的位移或速度,然后通过微分电路获得加速度值。也可通过

直接用加速度传感器把运动构件的加速度转换成电量,然后再进行检测。

3.1.2 机械动力参数的测量

机械动力参数包括构件的质心位置,构件绕质心的转动惯量,作用在构件上的力、力矩等,它们都是分析机械系统时的重要参数。通过对动力参数的测量,可以确定设计方案是否合理、能否实现预定的设计目标,并可验证理论分析是否正确。

1. 构件质心位置的测量

1) 支点法

支点法可用来确定几何形状对称的构件轴线上的质心 S 。如图 3-1 所示,通过移动支撑刀口的位置,使构件 BC 平衡时的位置为质心的位置。

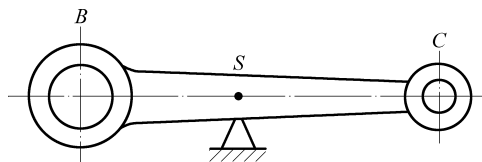


图 3-1 质心位置的测量

2) 挂线法

挂线法通常用于形状比较复杂的零件。如图 3-2 所示,分别在 A 、 C 两点处挂线,可得垂线 AB 、 CD ,两条垂线的交点 S 即为此构件的质心。

3) 天平法

若零件的形状较复杂,很难用上述两种方法来测量构件的质心位置,可使用天平法。如图 3-3 所示,先把构件 AB 放在天平上,再通过添加砝码 G_g ,使天平处于水平状态,可得下面两个方程:

$$G_A + G_B = G, \quad G_g + G_B = G_A$$

因 $G_A a = G_B b$, $b + a = L$, 由此得

$$a = L(1 - G_g/G)/2, \quad b = L(1 + G_g/G)/2。$$

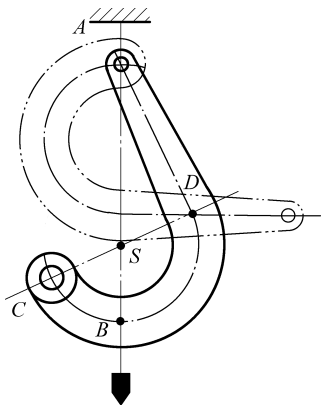


图 3-2 用挂线法测质心

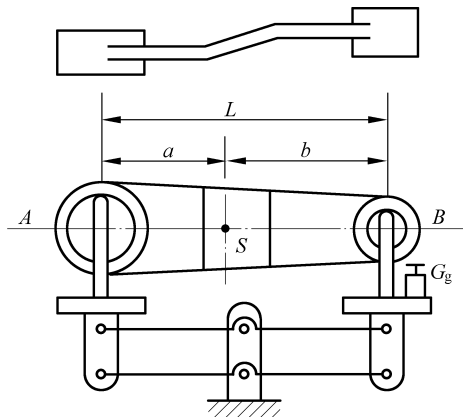


图 3-3 用天平法测质心

2. 构件转动惯量的测量

由于构件转动惯量的大小会直接影响构件的惯性力矩和机械系统动力响应时间的长短,因此,它是一个很重要的动力学参数。测量构件转动惯量的方法很多,下面介绍两种

方法:

1) 轴颈支承法

采用轴颈支承法测定构件转动惯量的原理如图 3-4 所示。

在这种测量方法中,构件的摆动周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J_O}{GA \left[1 + \frac{Rr}{(R-r)A} \right]}} \quad (3-2)$$

式中, J_O 为构件相对于支承接触点 O 的转动惯量; A 为构件重心 S 至支承接触点 O 的距离; G 为构件总质量; r 为轴颈的半径; R 为轴孔的半径。

由式(3-2)得

$$J_O = \frac{T^2}{4\pi^2} GA \left[1 + \frac{Rr}{(R-r)A} \right] \quad (3-3)$$

则可得构件绕质心的转动惯量为

$$J_S = J_O - \frac{G}{g} A^2 \quad (3-4)$$

式中, g 为重力加速度, 9.8m/s^2 。

2) 飞轮转动惯量的测定方法

测定飞轮转动惯量的实验装置示意图如图 3-5 所示。飞轮 B 安装于轴 O 上,电动机通过带轮和离合器 C 及 D 使飞轮以等角速度 ω 回转。若突然拉开离合器 C ,则飞轮 B 的角速度 ω 将逐渐降低,直至停止运转。其动能方程式为

$$A_{M_g} - A_{M_C} = E - E_0 \quad (3-5)$$

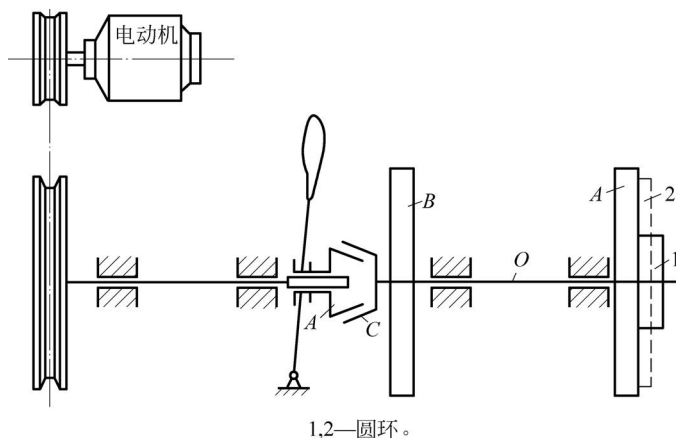


图 3-5 测定飞轮转动惯量的装置示意图

当松开离合器 C 时,机械的动能 $E_0 = \frac{J\omega^2}{2}$,而完全停止运转时,机械的动能 $E = 0$,此时轴 O 的角位移为 φ_1 ,而驱动力矩 M_g 为零,故 $A_{M_g} = 0$;阻力矩 M_C 为 M_T (略去空气阻力不计),故 $A_{M_C} = M_T \varphi_1$,因此式(3-5)为

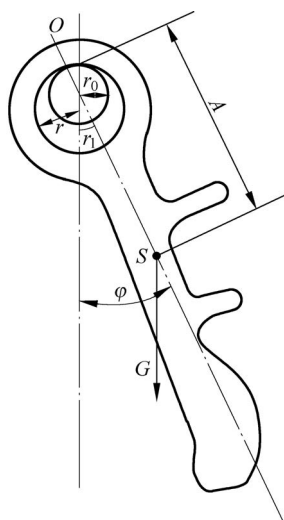


图 3-4 用轴颈支承法
测量构件的转动惯量

$$-M_T \varphi_1 = -\frac{J\omega^2}{2} \quad (3-6)$$

若设角速度为常数,则

$$\varphi_1 = \frac{\omega t_1}{2} \quad (3-7)$$

又 $J = J_B + J_0 + J_1$, 则

$$(J_B + J_0 + J_1)\omega = M_T t_1 \quad (3-8)$$

式中, J_B 为飞轮 B 的转动惯量; J_1 为圆环 1 的转动惯量; J_0 为除去飞轮 B 及圆环 1 后, 其他固连于轴 O 上的全部零件的转动惯量; t_1 为松开离合器到完全停止运转时所需的时间。

现将圆环 1 换上同样重量的圆环 2, 其转动惯量为 J_2 。先合上离合器, 在轴 O 达到等角速度 ω 后再松开离合器, 轴 O 将逐渐减速直至完全停止, 所需时间为 t_2 , 同样可得

$$(J_B + J_0 + J_2)\omega = M_T t_2 \quad (3-9)$$

则飞轮的转动惯量为

$$J_B = \frac{J_2 t_1 - J_1 t_2}{t_2 - t_1} - J_0 \quad (3-10)$$

式中, J_0 的值可用上述同样的方法求得

$$J_0 = \frac{J_2 T_1 - J_1 T_2}{T_2 - T_1} \quad (3-11)$$

式中, T_1, T_2 分别为装置圆环 1 和圆环 2 时轴 O 从角速度 ω 到完全停止回转所需的时间。

圆环 1 和圆环 2 的转动惯量可由式(3-12)、式(3-13)计算:

$$J_1 = \frac{G_1}{8g}(D_1^2 + r_1^2) \quad (3-12)$$

$$J_2 = \frac{G_2}{8g}(D_2^2 + r_2^2) \quad (3-13)$$

式中, D_1, D_2 分别为圆环 1 和圆环 2 的外径; r_1 和 r_2 分别为圆环 1 和圆环 2 的内径; g 为重力加速度。

3. 构件上作用力的测量

力的测量方法主要有直接比较法和间接比较法两种。

1) 直接比较法

直接比较法是与基准量直接比较的方法。它是将被测力直接或通过杠杆系统与标准质量的重力进行平衡的方法。这种方法基于静态重力或力矩平衡, 适用于静态测量。

2) 间接比较法

间接比较法测量时, 首先将被测力通过各种传感器转换为电量, 然后再与基准量进行比较。这种方法根据系统的特性可用于静态或动态力的测量。常用的测力传感器主要有应变式力传感器、差动变压器式力传感器、压磁式力传感器、压电式力传感器等。

4. 构件上扭矩的测量

测量构件上扭矩的方法很多,大多数测量方法的依据是测量两截面之间的相对扭转角或扭转应力。通常采用的传感器有感应式扭矩传感器、光电式扭矩传感器和电阻应变式传感器、压磁式扭矩传感器等。

3.2 机组运转及飞轮调节实验



机组运转
及飞轮调
节实验

3.2.1 实验目的

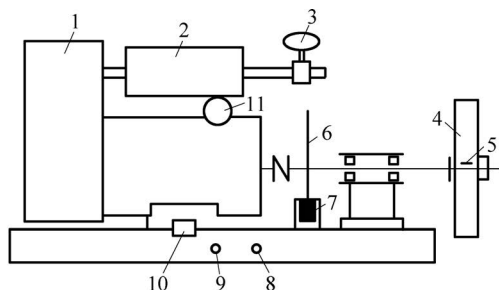
- (1) 熟悉机组运转工作阻力的测试方法。
- (2) 理解机组稳定运转时速度出现周期性波动的原因。
- (3) 掌握机器周期性速度波动的调节方法和设计指标。
- (4) 掌握飞轮的设计方法。
- (5) 能够熟练利用实验数据计算飞轮的等效惯量。

3.2.2 实验系统

1. 实验系统框图

如图 3-6 所示,机组运转及飞轮调节实验系统由以下部分组成:

- (1) 0~0.7 MPa 小型空气压缩机组(DS-Ⅱ型飞轮实验台)。
- (2) 主轴同步脉冲信号传感器(已安装在 DS-Ⅱ型飞轮实验台上)。
- (3) MPX700 系列无补偿半导体压力传感器(已安装在 DS-Ⅱ型飞轮实验台上)。
- (4) 实验数据采集控制器(DS-Ⅱ动力学实验仪)。
- (5) 计算机及相关实验软件。



1—空气压缩机; 2—储气罐; 3—排气阀口; 4—飞轮; 5—平键;
6—分度盘; 7—同步脉冲信号传感器; 8—同步脉冲信号传感器输出;
9—压力传感器输出; 10—动力开关; 11—压力表。

图 3-6 实验系统框图

2. DS-II 型动力学实验台

如图 3-6 所示,DS-II 型动力学实验台由空压机组、飞轮、传动轴、机座、压力传感器、主轴同步脉冲信号传感器等组成。压力传感器已经安装在空气压缩机的压缩腔内,9 为其输出接口。同步脉冲发生器的分度盘 6(光栅盘)固装在空气压缩机的主轴上,与主轴曲柄位置保持固定的同步关系,8 为同步脉冲信号传感器的输出口。开机时,改变储气罐压缩空气出口阀门 3 开度,就可以改变储气罐 2 中的空气压强,因而也改变了机组的负载,压强值可由储气罐上的压力表 11 直接读出。根据实验要求,飞轮 4 可以随时从传动轴上拆下或装上,拆下时应注意保管好轴上的平键 5,在安装飞轮时应注意放入平键,并且将轴端面固定螺母拧紧。

本实验台采用的压力传感器的结构及接线如图 3-7 所示,其敏感元件为半导体敏感器材(膜片),压敏部分采用一个 X 形电阻四端网络结构,替代由四个电阻组成的电桥结构。在气压的作用下,膜片产生变形,从而改变电桥的电阻值,输出与压强相对应的电压信号。为了让用户使用方便,该传感器的内部电路已经将电压放大与传感器热补偿电路集成在一起,常温情况下,在 5V 供电电压时,相对于 $0 \sim 700\text{MPa}$ 空气压强的输出电压为 $0.2 \sim 4.5\text{V}$ 。

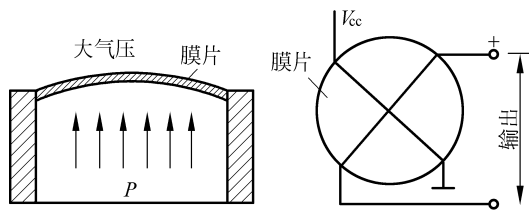


图 3-7 压力传感器原理图

实验数据采集控制器(DS-II 型动力学实验仪)的机箱背后有两个调节压力传感器零点和增益的旋钮(调节螺钉),此参数已调好,一般不需要重调。

主轴同步脉冲信号传感器将空气压缩机主轴(曲柄)的位置传送给实验数据采集系统。在安装实验台时,已经将同步位置安装调整好,不需要重新调整。

3. DS-II 型动力学实验仪

DS-II 型动力学实验仪内部由单片机控制完成气缸压力和同步数据的采集和处理,同时将采集的数据传送到计算机进行处理,其面板如图 3-8 所示。打开电源,指示灯亮,表示仪器已经通电。复位键是用来对仪器进行复位的。如果发现仪器工作不正常或者与计算机的通信有问题,可以通过按复位键来消除。仪器背面如图 3-9 所示,有两个 5 芯航空插头,分别标明压强输入和转速输入,将动力学实验台的相应插头插入插座即可。标明“放大”字样的调节螺钉是用于调节压力传感器输出信号增益的。一般当空气压缩机储气罐达到最大压力时(参见“系统标定”)应控制压力传感器输出电压低于 4.8V ,一般取 4.5V 左右。输出电压可通过“压力输入”插座上方的端子来测量。设备出厂时已调好,一般不要对这两个调节螺钉进行调节,以免使系统标定产生混乱。背面还有两个通

信接口,一个是标准的 9 针 RS232 接口,用于仪器与计算机直接连接,另一个是多机通信接口,用于将仪器与多机通信转换器连接,通过多机通信转换器再接入计算机。这两个接口中的任一个均可与计算机通信。

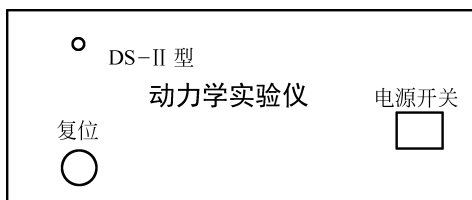


图 3-8 DS-II 型动力学实验仪面板

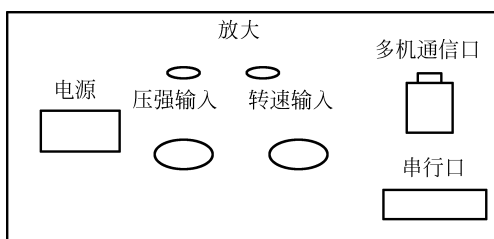


图 3-9 DS-II 型动力学实验仪背面

3.2.3 实验原理

飞轮设计的基本问题是根据机器实际所需的平均速度 ω 和许可的不均匀系数 δ 来确定飞轮的转动惯量 J 。当设计飞轮时,因为研究的范围是在稳定运动时期的任一个运动循环内,我们假定在循环开始和循环结束时系统的状态是一样的,对回转机械来说,也就是在循环开始和结束时它们的速度是一样的,这时驱动力提供的能量全部用来克服工作阻力(不计摩擦等阻力)所做的功,在这样的前提下,我们就可以用盈亏功的方法来计算机械系统所需要的飞轮惯量。具体来说,就是计算一个运动周期中驱动力矩所做的盈功和阻力矩所做的亏功,最大盈功和最小亏功的差就是系统的最大能量变化,用这个能量变化就可以计算机械系统所需的飞轮惯量。

3.2.4 实验操作步骤

1. 连接 RS232 通信线

本实验必须通过计算机来完成。将计算机 RS232 串行口通过标准的通信线连接至 DS-II 型动力学实验仪背面的 RS232 接口。

2. 启动机械教学综合实验系统

将实验系统的实验数据采集控制器(DS-II 型动力学实验仪)背面的 RS232 串行口与计

算机的串行口(COM1 或 COM2)直接连接,在系统主界面(图 3-10)右上角串口选择框中选择相应的计算机串口号(COM1 或 COM2)。在主界面左边的实验项目框中单击“飞轮”按钮,在主界面中就会启动“飞轮实验系统”应用程序,如图 3-11 所示。

