

# 建筑科学研究报告

REPORT OF BUILDING RESEARCH

1982

No.12

## GC型工程测振仪的研制和应用

Development and Applications of Model-GC

Engineering Seismograph



中国建筑科学研究院

CHINESE ACADEMY OF BUILDING RESEARCH

## 提 要

本文概要介绍工程测振仪的研制和应用，主要内容分四部分：(1)激振系统，包括电控装置和机械式激振器；(2)拾振系统，包括磁电传感式拾振器和压电晶体加速度计；(3)放大系统——GCF-6工程测振仪放大器；(4)工程测振仪在工程实践中的应用。

工程测振仪主要特点是：能测量多种振动参数，如地面脉动、地震振动、人工地震波动、冲击振动和强迫振动等。激振器可模拟多种机器扰力(垂直、水平、扭摆、变扰力和常扰力等)作用，在不停机条件下可无级调节扰力及保持常扰力，此项是国内首创。摆式拾振器低频性好，可测位移幅值宽，灵敏度，体型轻巧，结构简单。放大器噪音低，频带宽，稳定性好，可与国内生产的测振传感器和记录仪配套使用。

## 参加研制单位及人员

中国建筑科学研究院勘察技术研究所

王钟琦 李承平 贺银裘 任纪秋

上海市建筑科学研究所 李远茂 范国珊 顾炳源

同济大学 胡雨人 方启文 邵志常 李炳生

广州地震科学研究所 张志方 牟崇元 林庆麟

无锡仪器仪表设备厂 毛文达

本文编写 李承平

主审 王钟琦

审阅 徐树滋

# 目 录

## 前 言

### 一、激振系统

- (一) ZD-1型可控硅激振器电控装置 ..... ( 3 )
- (二) 机械式激振器 ..... ( 4 )

### 二、拾振系统

- (一) 拾振器 ..... ( 7 )
- (二) 压电式加速度计 ..... ( 16 )

### 三、放大系统——GCF-6放大器

- (一) 对测振放大器的要求 ..... ( 16 )
- (二) GCF-6放大器简介 ..... ( 17 )
- (三) GCF-6放大器原理框图 ..... ( 18 )
- (四) GCF-6放大器技术指标 ..... ( 18 )
- (五) 小 结 ..... ( 18 )

### 四、工程测振仪在工程实践中的应用

- (一) 强迫振动试验 ..... ( 21 )
- (二) 软弱地基动载荷试验 ( 变形和承载力的测试 ) ..... ( 24 )
- (三) 地面脉动测试 ..... ( 26 )
- (四) 场地岩土地基波速测试 ..... ( 28 )

### 五、总 结

- 参考资料 ..... ( 29 )

# Development and Applications of Model-gc Engineering Seismograph Institute of Geotechnical Investigation

## Abstract

This paper describes the development and applications of Model-GC engineering seismograph. This newly developed apparatus contains four units, (1) vibration excitation system which includes an electrical control device and a mechanical vibrator, (2) pick-up system which comprises either an electromagnetic transducer or (3) a piezoelectric crystal accelerometer, (4) magnifying system, i.e. model GCF-6 amplifier. preliminary application of this seismograph in engineering practice is also introduced.

Major features of this apparatus are as follows,

(1) measurement of a variety of vibration parameters, such as micro-tremor, earthquake shocks, excited seismic wave, impulse and forced vibration etc.,

(2) simulation of action of a variety of mechanical forces, such as vertical, horizontal and rocking forces, and rotating with constant force,

(3) stepless speed regulation and constant force during operation. This feature is an innovation offered for the first time in China.

Model-GC engineering seismograph performs especially well for low frequency ranges with its wide range of amplitude measurement, high sensitivity, light weight and simple structure. The amplifier has low noise, wide frequency band and good stability, and can be used with other transducers and recorders of seismograph produced in China.

# GC 型工程测振仪的研制和应用

## 前 言

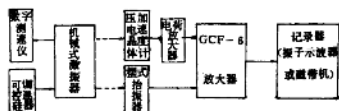
随着我国四个现代化突飞猛进的发展,在基本建设工程中普遍的遇到了一个突出的问题,即各种土建工程的抗震与防震问题(如抗机械振动、地震、抗风震等问题),需要有一整套技术较先进、性能较全面、操作简便、携带方便的测振仪器提供工程使用,这是一项急待解决的重要课题。

国家建委(76)建发 173 号文提出了研制工程测振仪的指示和要求,下达给中国科学院勘察技术研究所负责组织研制。我所从76年8月份开始进行了准备工作,经过两个多月的调查研究,进一步了解到随着我国基本建设工程任务的发展,不仅各种动力机器设备需测求地基基础的动力参数,而且很多带有特殊工艺要求的工程设施,也必须测求场地、地基或结构物在各种循环荷载或反复变形条件下的动力特性指标。近年来唐山地震以后我国地震烈度区划又进行了调整,需要抗地震设防的地区和工程项目日益增多,更为普遍地需要通过测振手段,满足上述各种抗震需要。所以,工程测振仪的研制对于勘察、设计、施工单位用以解决工程抗震、隔震及减震设计所需地基基础及上部结构物的动力参数测定或施工监测以及在这一领域里的科研、教学工作都具有重要的意义。

工程测振仪主要由四部分单机所组成——激振器(包括电控装置)、拾振器(包括机电转换和压电晶体型)、放大器、记录器。六十年代开始,我国有些单位根据各自的需要,分别研制了若干单项的测振仪器,如:65型拾振器、701型拾振器各配各的放大器不能同时配一种放大器,使用起来很不方便并且没有定型产品可以供应。各项单机均属于六十年代产品和科研成果,已远不能满足当代测振工程的要求,如原机械式激振器不能做各种振型的模拟,也不能做大、常扰力的模拟,因而不能适应现代化动力机器基础勘察设计及施工监测的需要。

综上所述,为了使各项土建工程测振工作能够得到新的手段,以便更好地适应建筑工程现代化的需要,填补这项空白,我们根据建委下达的任务,组织了同济大学、广州地震研究所、上海建筑科学研究所和无锡仪器仪表设备厂共同研制了这套工程测振仪。

根据国内现状和参考国外情况,我们这次共研制五个单机。即:激振系统:可控硅调速器(机械式激振器可控硅变频装置)和机械式激振器(机械式激振器的传动机械装置)。测振系统:磁电传感摆式拾振器、压电换能晶体式加速度计和集成电路放大器。记录器拟选用国产 SC 系列振子示波器不再另行研制。各单机关系(见图)



工程仪测振联机框图

工程测振仪与其它测振仪器和地震仪在基本功能上同属于一个范畴,它们都是将天然地震和人工地震(或振动)所产生的各种类型波经过几种转换变成我们所需要的研究地

震、地质、结构……所需测求的物理量。由此而导出各种参数。工程测振仪不但要求所测求的物理量有较明确的定性概念，而且要求较为精确的定量数据，这就对仪器和测量方法上提出高精度量程宽的要求。

第二个方面，由于我们工程测振大部分情况下是野外作业，流动性大，因此要求仪器除满足上述要求外，还必须是体积小重量轻，便于携带和运输，牢固耐用，这样在仪器的外形尺寸和重量上要求尽量小而轻，维修简便。

第三方面要求仪器的元件和材料要选用国家定型产品即保证质量又能易于采购便于推广。经过研制人员的努力最后达到了研制计划和设想。

## 一、激 振 系 统

### (一) ZD-1型可控硅激振器电控装置

本机主要供机械式激振器作无级调速之用，稍加修改亦可用于5kW以下直流电动机调速之用。

本机要求具有低频抗力大，稳速精度高和调速比宽等较高的性能。为了尽量满足激振器技术指标与野外使用特点，调速装置是采用单相桥式半控电路及双闭环速度控制系统，晶体管锯齿波触发电路等。对直流电动机、测速发电机和激振器之间的机械传动采用同步齿形带的传动方式。克服了各部分的传动误差，提高了整机的可靠性和稳定性。

为了满足工程测量上较高的频率调节精度要求（如小于0.01 Hz的频率变化范围）。本装置采用集成稳压源作为给定信号源，用330 $\Omega$ 多圈电位器为细调的速度给定电路。

测速装置采用磁敏三极管作为磁电测速传感头经信号处理器送出信号，用TSS-2型数字测速仪作为显示仪，从而提高了频率的显示精度。如此系统损坏，面板上设有频率测量仪表作应急之用。

由于激振系统的非弹性影响，在激振力的作用下产生相位滞后，工程实测上为了测量物体的刚度，需要测出在扰力作用最大时系统相应的相位差。相位差脉冲发生器亦采用磁敏三极管作为磁电传感头。经信号处理器后送出扰力最大时信号，以作为分析之用。

为了便于观察整机的运行和控制情况，在装置面板上及后侧装有电压、电流表头可供操作者监视用。

#### 1. 电控装置的主要技术指标

频率范围：2~45Hz（电源电压不低于220V交流）；

调速比：1比20；

稳频精度：垂直、水平激振2~10Hz误差 $\leq 10\%$ ，

10~40Hz误差 $\leq 1\%$ ，

扭转激振2~40Hz误差 $\leq 1\%$ ，

测频精度：0.1%；

#### 2. 电控装置的线路简介

(1) 主回路。主回路采用单相桥式半控电路，它由两只可控硅和两只二极管，一只续流二极管组成，主回路可直接接220V电网工作，亦可接调压器工作，其作用为提高供电电压，确保电动机高速运转。由于现场电压往往是低于220V，同时考虑到线路压降及

整流效率,电枢电压甚至低于180V,特殊电动机不易购到,为此选用Z2~41型直流电动机,电枢电压为220V,转速为3000转/分。励磁绕组由单独的稳压电源供给。

(2)触发电路和给定电路。可控硅控制极的触发信号,一般要求有较陡的脉冲前沿,足够的移相范围和较好的线性度等;又由于本装置要求调速范围宽,稳速精度高,故采用晶体管锯齿波移相触发电路。

速度给定电源的稳定度将直接影响整个调速系统的稳速精度,本机选用WA724B集成稳压电源。其输出电压为25V,电压调整率 $\leq 0.1\%$ 为了提高给定调节精度,在稳压源输出端加接射极跟随器。

(3)速度与电流反馈。速度反馈采用YZD-3A直流永磁测速发电机作为转换元件,其特点是体积小,使用安装方便。为防止高速时丢转,采用同步齿形带传动,提高了可靠性。其传动比为1.5:1。电流反馈选用交流互感器作为转换元件,对主回路交流侧进行电流检测。

(4)保护措施。过压保护:交、直流保护均采用MY-31压敏元件,它是一种新型的过压保护元件,具有较好的过压保护特性;可控硅及二极管均采用RC阻容吸收保护。过流保护,快速熔断器和过流继电器。失磁保护,直流电动机励磁回路装有电流继电器,当没有励磁电流时绿灯亮,回路不能工作。

### 3. 双闭环控制系统

激振器对电控方面的要求,既要有良好的静特性,较高的调速精度,又要有较好的动特性,较理想的过渡过程。

电动机转速控制系统,采用反馈控制原理。因为该系统承受着负载扰动。一个单纯的速度控制环节,抗负载扰动和电网波动的能力较差,因此又在速度控制环内加上电枢电流控制环,这样构成的控制系统,就是所谓的双闭环速度控制系统。

双闭环速度控制系统,能有效地抵抗负载扰动,减小电网波动对电动机转速的影响。当电网波动时,使可控硅整流装置输出电压也随之波动并引起电枢电流变化。因为电流控制环有很好的频率响应特性,它的快速调节作用能及时地使电枢电流与其给定控制值相当,从而抵抗电网波动的影响;同时它有消除负载扰动的作用,因此达到了稳速效果。

激振器电控原理见图(1-1)

## (二)机械式激振器

此种激振器主要用于模拟动力设备对其基础及地基产生的动力作用,通过振动模拟试验测量地基在各种动力作用下的反应,并借以计算地基基础的动力参数。此外还可以模拟天然地震作用,以便测量地基或结构物在该地震作用下的动力反应。

### 1. 激振方式

一般动力设备基础及地基的动力作用主要有四种振型:垂直、水平、摇摆和扭摆。国内已有的激振器只能模拟垂直和水平两种形式。而本激振器则能一机模拟上述四种振型。

此外,还设计了偏心块相位变换装置,可控制不同频率下的常扰力振动。同时还设有相位的显示装置,可测被测结构物的自振频率。为了满足上述要求,结合我国已有的激振器结构形式设计了本激振器。这种机械式激振器又分为立式和卧式两种。卧式,偏心块的转动轴垂直于水平面,转动时无需克服偏心质量的重力作用,只需克服轴承处的滚动摩

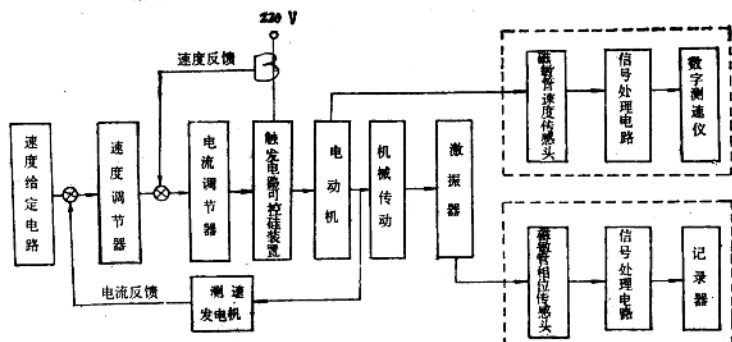


图 1-1 激振器电控原理框图

擦阻力，因而其功耗较小，但卧式只能完成水平激振或两台组合达到扭转振动，不能完成四种振型的设计要求。立式，因偏心块的转动轴水平放置，转动时必须克服偏心质量的重力作用，所以，功耗较大，而在转动的下半周时又要受到偏心质量的重力加速度影响，影响振动的均匀性。要一机具备多振型激振的能力，则必须采用立式结构。只要在结构上采取一些措施，实现空载启动，亦能相对地改善电动机的工作制度。为此本机采用了立式结构，以达到设计要求。

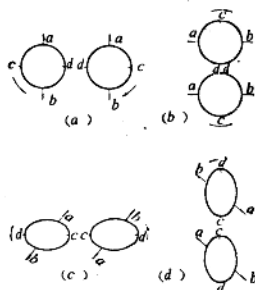


图 1-2-1

为了达到一台机器可完成垂直、水平、水平扭摆及竖向摇摆的振动，我们采用下述方案：（见图 1-2-1）

图 a 所示得到的是垂直振动，其振幅变化为正弦函数，而于 c、d 两点分别抵消了水平分量。只要将两组偏心块质量改变安装方式如图 b 所示，同时得到的是水平振动。若将两偏心轴立放，改变两轴的转动方向（同向转动）如图 c 所示，则可得到绕垂直轴的扭摆振动。此方案虽需改变转向，但能得到较为单一的振动力，满足了工程测振对振源的要求。

图 a 所示得到的是垂直振动，其振幅变化为正弦函数，而于 c、d 两点分别抵消了水平分量。只要将两组偏心块质量改变安装方式如图 b 所示，同时得到的是水平振动。若将两偏心轴立放，改变两轴的转动方向（同向转动）如图 c 所示，则可得到绕垂直轴的扭摆振动。此方案虽需改变转向，但能得到较为单一的振动力，满足了工程测振对振源的要求。

足了工程测振对振源的要求。

## 2. 激振器的结构特点

经上面分析，我们采用了立式结构，并改变安装方向以达到三向振动的目的，同时，我们认为还必须考虑以下几方面的结构：

（1）为了保证激振器具有精确的激振频率，采用了同步齿形带传动。它不但可以保证激振器和马达完全同步，不会丢转，而且体积小、质量轻、噪声小，特别适合高速运转，比采用三角带链条传动更具有优越性。

（2）为了调整偏心质量的大小，我们采用螺旋和花键结构，不必打开机壳，只需摇动手柄，即可实现激振力的无级调变。

（3）为实现扭转振动，使两偏心质量同向旋转，采用离合器结构，使小齿轮或大齿轮工作达到改变转向的目的。

(4) 润滑方式: 本机高速运转时可达3000转/分。为保证齿轮润滑和减少油损耗, 本应采取喷油循环系统。但考虑工程测振工作要求结构简单、重量轻, 以及测振要求高速运转时间不算太长等原因, 故仍采用普通油池润滑, 轴承采用干油润滑。

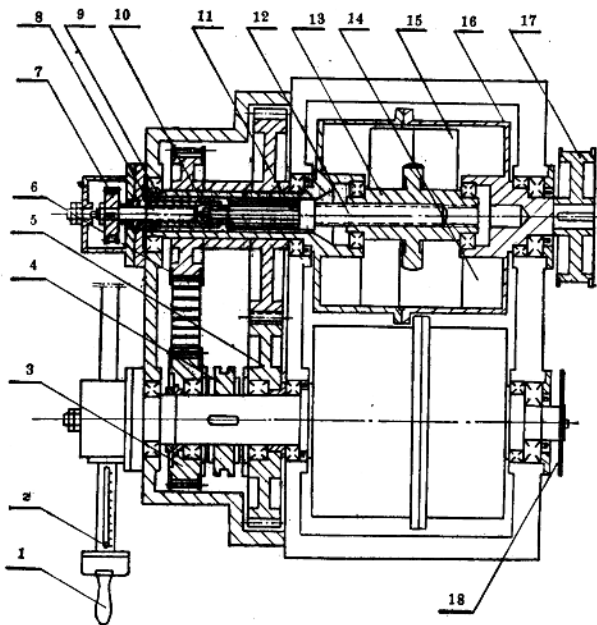


图 1-2-2 结构简图

### 3. 激振力调节 (见传动简图)

#### 4. 机械式激振器主要技术指标

- ①垂直、水平激振：  
2Hz时，0~40kg；  
10Hz时，0~1000kg；  
18Hz以上0~3000kg。

- ②10Hz以上可保持1000kg常扰力  
18Hz以上可保持3000kg常扰力

- ③扭转振动：20Hz最大扭矩510kg·M。

- ④当垂直振动于45Hz时，最大激振力20吨，因机械强度限制，不予使用。

- (3) 驱动功率：5.5kW（实际上4kW即可）激振器总重量：340kg。

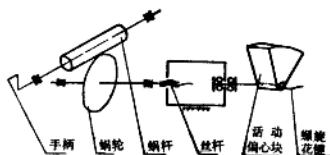


图 1-2-3 传动简图

## 5. 小结

综上所述机械式激振器可以归纳以下几个特点：(1) 只要改变安装方向，即可完成垂直、水平、扭转三种形式的激振。能较全面地模拟动力机械和天然地震时对基础及地基的动力作用，为测振提供方便，是国内首创。

(2) 偏心块的夹角通过手柄即可调整，在启动前将偏心块夹角调至180°（即偏心矩为零）。此时启动力矩最小，启动后再依所需激振力调整偏心块角度。这不仅改善电动机的工作制度而且又避免了重载启动时电流过大致使不能正常工作。

(3) 因可以无级调整激振力，所以能较理想地实现定幅扰力试验，在频率变化时，只要相对调整偏心块夹角，就能保证激振器的出力维持在一定的数值，精度较高又不必停机，使用方便。

(4) 采用同步齿轮带传动，保证了激振器与电动机完全同步，同时能准确提供振动频率，便于计算激振力的量值，也为提高调速精度创造了良好条件。

(5) 本激振器结构紧凑、轻巧、噪声小、安全可靠，而频率范围比同类产品大，出力也大。

同时装有相位差显示装置，为测定构筑物的自振频率提供了有利条件。

然而，结构紧凑也带来了一些问题：要求零件加工和组装精度高，否则会对机械的功耗有较大的影响；同时受尺寸限制，其中推力轴承8110额定转速较低，限制了扭转振动时的频率，使之不能过高。

## 6. 国内外机械式激振器性能指标对比

(见表1-2-1)：

# 二、拾 振 系 统

拾振系统由(1)拾振器(磁电传感摆式)；(2)压电换能晶体加速度计(或称：低频高灵敏度压电加速度计)。(3)集成电路放大器(附电荷放大器)；(4)记录器，采用国产sc系列光线振荡器作为配套记录器，故不另行研制。

## (一) 拾 振 器

### 1. 磁电传感摆式拾振器

(见图2-1-1a和2-1-1b)

国内外机械式激振器性能指标对比表

表 1-2-1

| 编号 | 指                      |              |                                       |                                          | 标               |                                        |             |               |                  |            |
|----|------------------------|--------------|---------------------------------------|------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------|-------------|---------------|------------------|------------|
|    | 单 位                    | 频率范围<br>(Hz) | 稳频精度                                  | 扰 力                                      |                 | 模拟振型                                   | 扰力调节<br>方 式 | 重量<br>(T)     | 电机<br>功率<br>(kW) | 备 注        |
| 1  | 一机部一院                  | 1~40         |                                       | 6000                                     | 40              | 垂直、水平                                  | 分级可调        | 0.8           | 7.5              |            |
| 2  | 五机部五院                  | 1~40         |                                       | 230                                      | 2.3             | 垂直、水平                                  | 分级可调        | 0.2           | 2.2              |            |
| 3  | 一机部二院                  | 5~15         |                                       | 4300                                     | 43              | 垂直、水平                                  | 分级可调        | 1.6           | 7.5              |            |
| 4  | 抗振所<br>(前北京地<br>震队抗震组) | 0.5~10       | 0.5~0.9Hz<br><1%<br>0.9~10Hz<br>0.1%  | 2600                                     | 310             | 数台同步<br>时水平和扭<br>摆                     | 分级可调        | 0.544<br>(单机) | 1.5              | 指标系指<br>单机 |
| 5  | 工程力学所                  | 1~12         |                                       | 1000                                     | 160             | 水 平                                    |             | 1.5           | 10               |            |
| 6  | 美 国<br>EERI            | 1~10         | 0.1%                                  | 2300                                     | 450             | 数台同步<br>时水平和扭<br>摆                     | 分级可调        | 0.6<br>(单机)   | 1.1              | 指标系指<br>单机 |
| 7  | 日 本<br>BCS-A-200       | 2~20         |                                       | 3000                                     | 800             | 数台同步<br>时水平和扭<br>摆                     | 分级可调        | 2<br>(单机)     | 3.7              | 指标系指<br>单机 |
| 8  | GC工程测<br>振仪激振器         | 2~45         | 2~10Hz<br>$\leq 1\%$<br>10~45Hz<br>1% | 1000/10Hz<br>3000/18Hz<br>20000/45<br>Hz | 40/2Hz          | 可模拟垂<br>直、水平、扭<br>摆、摇摆四<br>种振型(单<br>机) | 连续可调        | 0.34          | 5.5              | 垂直、水平      |
|    |                        | 2~20         |                                       | 510kg·m/<br>20Hz                         | 5.1kg·m/<br>2Hz |                                        | 连续可调        | 0.34          | 5.5              | 扭摆、摇摆      |

GCS77-1型拾振器是将振动参数的非电量改变为模拟量的仪表,通常也称电变转换器。该拾振器由一个单自由度振动系统所构成,包括机械系统和电磁系统两部分。它的技术性能和指标应满足工程需要(能做脉动测量,稳态振动测量等),所以必须满足被测频率0.5Hz~50Hz,被测振幅0.05 $\mu$ m~20mm,外形尺寸最大边长最好不要大于10cm等要求。拾振器与放大器在很多指标上必须匹配,如:根据拾振器技术指标要求放大器输入阻抗>2.5M $\Omega$ ,噪音<10 $\mu$ V(P-P)。实际上两者已经进行了必要的协调。GCS77-1型拾振器的电变转换器是以位移量为主,结合工程测振的要求,还须能够进行。(1)地脉动;(2)强迫振动;(3)大幅度振动三项测试。其中主要仍以土建工程上的低频量测为主。

为了达到模拟量的变换精度,拾振器的设计必须考虑以下几方面问题。

## 2. 拾振器的灵敏度

由于机械系统是采用常用的地震仪的结构形式即位移摆,经过机电变换,输出为速度量,所以要以速度灵敏度 $K_v$ 来表示。拾振器的速度灵敏度又取决于以下几个方面的因素:(1)被测位移量的最小量程;(2)电磁系统的机电变换常数 $G$ 及其动圈的输出电压 $e$ ;(3)放大器的输入阻抗和噪音电压;(4)使用的频率范围即 $\omega > \omega_0$ ;(5)机械系统的静态放大倍数 $V_0 = \frac{l_2}{l_0}$ 即指示摆长与折合摆之比;(6)扩程网络的缩小系数 $\zeta$ ;

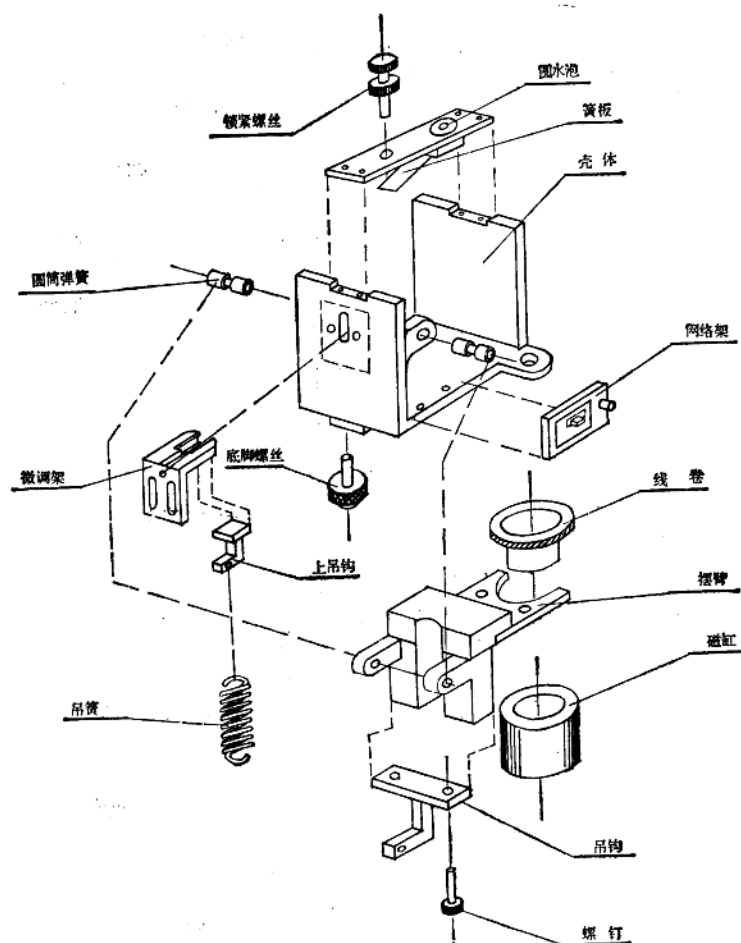


图 2-1-16 GCS-C示意图

(7) 选用的电磁阻尼力的电阻(又称中肯电阻)与动圈内阻 $R_1$ 的分压比。

摆式拾振器的速度灵敏度的确定,主要是处理各种相互矛盾和相互制约的机械系统与电磁系统的各项配合关系。我们的原则是以位移的最小量程 $0.05\mu\text{m}$ 为基准,在信噪比 $N>5$ 的情况下,首先确定小量程的速度灵敏度的 $K_x$ 值。然后以大量程的速度灵敏度的最低要求进行调整是为了照顾到在超低频的大量程的速度电压 $e$ 。

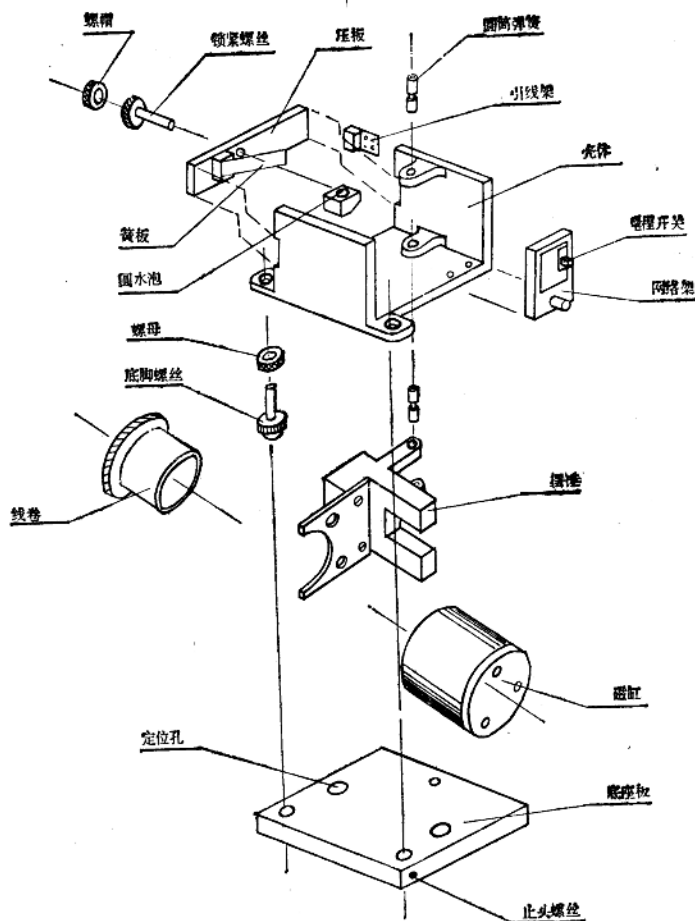


图 2-1-1b GCS-S示意图

试验证明。根据技术指标和外形尺寸不大于10cm的要求选用最佳值计算，取静态放大倍数 $V=1.71$ （即指示摆长 $l_s=5.5\text{cm}$ ，折合摆长 $l_0=3.2\text{cm}$ ）、电磁变换的气隙 $B=6000\text{GS}$ 时，小量程的速度灵敏度 $K\dot{X}=6000 \times 1.71=10200\text{mv}_0\text{s/cm}$ 才能满足技术要求（可以近似取 $K\dot{X}=10\text{v}_0\text{s/cm}$ ），提高小量程的速度灵敏度有利于提高大量程的灵敏度。从扩程反馈网络得知，灵敏度与缩小系数 $\xi$ 平方的倒数成比例。所以大量程的速度灵敏度

$K\dot{X}=400\mu\text{V}/\text{cm}/\text{s}$ , 此时最大位移 $\sim 20\text{mm}$ 。利用电磁系统中的磁路与可动圈就有利于提高速度灵敏度。

亦即小量程频率范围:  $0.7\sim 50\text{Hz}$ ; 位移 $0.05\mu\sim 0.8\text{mm}$ ; 大量程频率范围 $0.14\sim 20\text{Hz}$ , 幅值 $0.1\sim 20\text{mm}$ 。且要求 $k\dot{X}$ 的相对误差,  $\varepsilon = \frac{dk\dot{X}}{k\dot{X}} < \pm 5\%$ ; 即满足小量程 $0.7\text{Hz}\sim 50\text{Hz}$ 相对误差不大于 $\pm 5\%$ 的要求。至于频率的下限主要是由系统的固有周期 $T_0$ 或频率 $f_0$ 来确定。

大量程的速度灵敏度实际上在频段内是有限的, 电容反馈是一非线性函数, 在扩程的有效范围内可以认为是一常数。我们的设计要求在 $0.14\text{Hz}\sim 20\text{Hz}$ 内为一常数, 这样才能满足技术指标的要求。

### 3. 拾振器的线性要求

线性是指拾振器的灵敏度在某一振幅范围内为一常数。振幅的下限取决于最小工作值, 而上限取决于下面几个方面: ①摆的机械系统可动范围, 从摆的运动理论可知, 动圈在磁缸内呈弧形运动, 若允许的弧差为 $1\%$ , 则 $l_0=55\text{mm}$ , 可动量为 $0.55\text{mm}$ ; 若允许弧差为 $1.5\%$ 则可动量为 $0.82\text{mm}$ 。因为摆系统的传感, 元件为质量块所以系统的可动量范围允许误差不仅仅是单一的允许弧差。而输出的电特性取决于可动线圈。所以, 质量块影响拾振器的最大幅值, 即当弧差为 $1.5\%$ 时, 质量块的位移只有 $0.82/V_0 \approx 0.5\text{mm}$ 。而可动线圈影响到动圈的有效高度及磁缸气隙宽度 $l_0$ 。②弹性元件的线性: 弹性元件除了确定系统的固有频率外, 尚有一个应力与应变的线性问题, 即需要保证在测量范围内弹力与变形成线性, 特别是固有频率很低的情况下, 弹性元件的振幅常受线性变形的限制。

理想的弹性元件在理论上分析, 可认为静刚度和动刚度是一样的, 即 $k$ 值是一个常数并与频率无关, 实际上要实现它, 只能在不超过某一频率下才能办到。③横向效应对线性的影响, 作为摆的机械系统要求是单自由度振动体系, 特别是质量块的几何形状, 由于设计要求同样的材料, 在系统中转动惯量越大越好, 以及辅助装置的空间的局限性等原因, 因此质量块的质心宜落在转动摆臂上, 这样尽可能地简化在不超过弧差的条件下, 使其横向效应的影响为最小。我们设计的质量块形状和尺寸都要达到转动惯量的要求, 又要在各向保持平衡。否则, 因质量块的力矩不平衡会使系统产生竖向振动造成非线性误差。④电特性对线性的影响, 动圈在气隙中切割磁力线产生电信号输出, 为保证在测量范围内灵敏度是恒定的, 要求切割磁力线的匝数始终保持不变, 并保证电特性是线性。为此, 我们采用 $20\%$ 的余量, 即动圈的绕匝高度为:  $l_m = 1.2(l_1 + l_m)$ 。

$l_m$ ——被测最大振幅的 $P$ - $P$ 值,  $l_1$ ——磁极的厚度。

### 4. 拾振器相频特性

相频特性表示拾振器的机械量输入, 经变换后成电量输出发生的时间延迟。拾振器的相频特性随着频率变化, 对具有不同频率成分的复合振动, 会引起电量输出的相位畸变, 这主要涉及信号的峰值和信号波形。我们的设计是选用最佳的阻尼值, 采用 $D \approx 0.7$ , 即尽量使  $\varphi = f\left(\frac{w}{w_0}\right)$  成近似的线性。

### 5. 拾振器的技术要求

(1) 拾振方式, 分别为垂直拾振与水平拾振, 即GCS77-1Z与GC77-1S两种摆。因

此, 摆的悬挂结构也不同, 垂直摆采用直角型, 水平摆采用水平型。

(2) 量程及频响, 量程分两档即为小量程与大量程两种。

小量程为 $\pm 0.05\mu\sim\pm 0.8\text{mm}$ 。

$0.7\text{Hz}\sim 50\text{Hz}$ 。

大量程为 $\pm 0.1\text{mm}\sim 20\text{mm}$

$0.14\text{Hz}\sim 20\text{Hz}$ 。

以上均为速度输出, 积分器放在放大器中。小量程档的速度灵敏度为 $10\text{V}/\text{cm}/\text{s}$ ; 大量程采用无源反馈, 进行反馈扩程与扩带。

(3) 系统的固有周期与阻尼

根据上述讨论我们选择了系统的固有周期 $T_0\geq 1.5\text{s}$ ; 阻尼比 $D=0.7$ 。

为了使系统的固有周期达到预期范围, 我们采用了新型的弹性元件——圆筒弹簧, 有关它的性质将在下面讨论。阻尼采用电磁力阻尼。

## 6. 圆筒弹簧

(1) 结构及系统的自振周期

圆筒弹簧是新型弹性元件, 国内在拾振器结构中尚未普遍采用。因为一、工艺难度大; 二、它的性能由于时间关系尚未作彻底的研究。但它在工程测振仪拾振器(摆式)中的应用已充分表现出突出的优点。经过试验, 我们克服了很多工艺上的困难, 对其性能也有了进一步的了解, 所以我们采用了圆筒弹簧代替十字簧。其结构见图2-1-2。它是由两个彼此可转动的半轴瓦和三片正交的簧片组成。每片簧片两端嵌固在两个半轴瓦上, 将它联成一体的, 组成双十字形簧片铰, 并在两个半轴瓦上套有两个圆形套筒固定, 这样便组装成了圆筒弹簧。

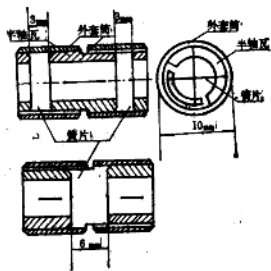


图 2-1-2 圆簧

我们对这种新元件的认识还是很肤浅的, 作为工程测振仪位移摆要求低频下限的扩展, 关键在于机械系统

弹性元件。我们做了初步分析如下: ①圆筒弹簧具有旋转中心轴, 弹性力矩较原来十字簧引起的单铰, 性能稳定; ②能承受荷载, 如使簧片在工作状态下全部受拉, 不需很多的机械结构来保证; ③在确保同心度下装配、调试方便, 弹簧装配的附加零件少。由此装配的圆簧在拾振器中所得的自振周期为:  $T\geq 1.5\text{s}$ 。

(2) 圆筒弹簧尺寸的确定及其工艺

从简谐干扰力强迫振动时质点的各共点平衡力系得知(上海交大振动测量与船舶振动原理 §1-6-1)在低频时, 外力克服弹性力; 高频时, 外力克服惯性力; 共振时, 外力克服阻尼力。这一规律在水平摆系统也是存在的。当变量转角 $\theta$ 弧度很小时, 可使其变成摆的中心位移 $X_0$ 的运动, 即 $X_0=l_0\theta$ , 式中 $l_0$ 为折合摆长。则惯性力可变换成惯性力矩, 弹性力变换成弹性力矩, 阻尼力变成阻尼力矩, 质量变换成转动惯量。

上述的变换条件 $l_0$ 为常数。作为圆簧其转动中心严格说来是变化的, 只有在转动很小时才认为是不变的。

我们设计 $X_0=0.5\text{mm}$ , 圆簧的转角为 $\pm 1^\circ 30'$ 时借以确定圆簧直径的尺寸。

关于圆簧的成型,可采用胶结成型法。为了保证成型的坚固性,半轴瓦固定端尺寸是圆弧大于半径使其在外筒套中成几何定位。同时在半轴瓦的外弧面与外套筒的内壁上刻有正反螺纹以利于固结。

## 7. 磁路

磁路系统好坏直接影响拾振器的机电转换。因此,该部分为机电变换的重要环节。如何保证其速度灵敏度大于 $10\text{V}/\text{cm}/\text{s}$ 的技术要求,有赖于磁路系统的三大件的设计。即靠永久磁铁、磁路和可动线圈来实现。也即设计一个保证磁能的最大的利用系统,以便在线圈切割磁力线时输出最大电量。

由电磁感应原理知道,关键是保证所要求的气隙磁感应强度, $B \geq 6000\text{GS}$ ,这是基本指标,然后再确定动圈。

(1) 永磁系统: 如何达到气隙中的 $B$ 值,主要考虑两个方面因素。永久磁铁的选用和磁路结构是分析的首要问题。原则是在已选定的V-3基础上使其体积尽量小,尽可能获得磁能级的最大利用率。

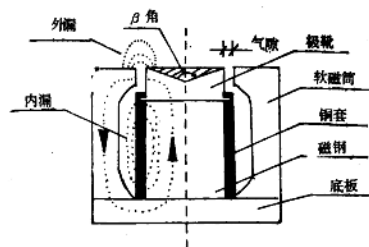


图 2-1-3 气隙磁通分布图

对于永久磁铁尺寸的选择,采用试算法,根据磁路已定以及气隙的大小来确定尺寸。

关于磁路结构,乃采用常规的静态内磁结构,它的优点是经济、漏磁小、对外磁场有屏蔽作用,使干扰不进入工作气隙。工作气隙宽度, $l_p = 2\text{mm}$ ,厚度 $l_1 = 8\text{mm}$ ,主要原因是使工作磁通恒定,以保证工作线性。(见图2-1-3)。

增大气隙厚度 $l_1$ ,将使通过线圈的 $\varphi$ 增加,即拾振器的灵敏度提高,但这样又会导致拾振器摆系统行程减小,为了解决这一矛盾,采用了 $l_1 = 4l_p$ 的厚度,即 $l_1 = 8\text{mm}$ 。

至于漏磁问题,在内磁结构中,内外漏磁正象大家所知道的磁路如何改小分流而提高磁能的利用率,我们采用了下图所示的措施。磁铁的总磁通量 $\varphi$ ,在磁路中由有用部分 $\varphi_u$ 与漏磁部分 $\varphi_l$ 组成,即 $\varphi = \varphi_u + \varphi_l$ 。实际上漏磁部分除了有外漏与内漏外,尚有磁路几何形状导致的尖端放磁,试验证明,外磁路的设计好坏,直接影响这一项。

总磁通 $\varphi = \varphi_u + \varphi_{*L} + \varphi_{*L}$ ,磁铁的磁通势 $F_m = -H_m L_m$ ,磁通量的磁导为

$$\frac{\varphi}{F} = \frac{\varphi_u}{F} + \frac{\varphi_{*L}}{F} + \frac{\varphi_{*L}}{F}.$$

上式右边为有用磁通量的磁导和漏磁的磁导,磁导的倒数即为磁阻。我们目的是尽量使后两项小,使有用的气隙磁阻在整个磁路的磁阻中占相当大的比例,希望磁通势完全作用在气隙磁阻上,也就是说磁通势仅为气隙磁阻的函数。精确计算漏磁通是困难的。所以我们采用定性方式来减少漏磁通,用实测来检验采取措施的效果。

在环状气隙中磁力线大部分是弯曲的,在气隙厚度 $l_1$ 外均有散射的漏磁磁场,我们采用 $\beta$ 角的锥形极靴帽帽以抑制散射。实验测得,采用此措施,气隙磁感应强度可提高5%左右。

我们还采用了永磁铁的定位铜套,既起磁钢的定位作用又减少内漏磁。

采取这两种措施,使总的磁感应强度提高设计指标10%,满足了拾振器的灵敏度要求  
8. 技术典型参数及与国内类似产品比较

(1) 技术典型参数

|         |                                                   |
|---------|---------------------------------------------------|
| 自振周期    | $T=1.5$ 秒                                         |
| 气隙磁感应强度 | $B=6000$ 高斯                                       |
| 线径      | $\varphi=0.02$ 毫米                                 |
| 圈数      | $n=10000$ 匝                                       |
| 线阻      | $R_s=50$ 千欧                                       |
| 转动惯量    | $J_0=1$ 克·厘米·秒 <sup>2</sup>                       |
| 折合摆长    | $l_0=3.17$ 厘米                                     |
| 指示摆长    | $l_k=5.5$ 厘米                                      |
| 速度灵敏度   | $k\dot{X}$                                        |
| 小量程     | $k\dot{X}=10$ 伏/厘米/秒 ( $\varepsilon \pm 5\%$ )    |
| 大量程     | $k\dot{X}=0.45$ 伏/厘米/秒 ( $\varepsilon \pm 10\%$ ) |
| 频率范围    |                                                   |
| 小量程     | 0.7Hz~50Hz                                        |
| 大量程     | 0.14Hz~20Hz                                       |
| 振幅(半幅)  |                                                   |
| 小量程     | 0.05 $\mu$ ~800 $\mu$                             |
| 大量程     | 100 $\mu$ ~20000 $\mu$                            |
| 外形尺寸    | 100×80×85 (mm <sup>3</sup> )                      |
| 重量      | 1.5kg                                             |

(2) GCS77-型拾振器与国内同类产品比较(见表2-1-1)

表 2-2-1

| 参 数 名 称      |           | 仪 器 型 号 |               |              |               |
|--------------|-----------|---------|---------------|--------------|---------------|
|              |           | 65型     | 701型          | 北京CD-7型      | GCS77-1型      |
|              |           | 技 术 参 数 |               |              |               |
| 机电常数(伏·秒)    |           | 23.2    |               |              | 33.82         |
| 电压灵敏度(伏·秒/米) |           | 370     | 165           | 600          | 1000          |
| 固有周期(秒)      |           | 1       | 0.85          | 0.85         | 1.5           |
| 量 程          | 小 量 程(mm) | ±0.5    | ±0.6          | ±0.9         | ±0.8          |
|              | 大 量 程(mm) | —       | ±6            | ±6           | ±20           |
| 频率 范围        | 小 量 程(Hz) | ≥1      | 1.5~100(±10%) | 1.5~20(±10%) | 0.7~50(±5%)   |
|              | 大 量 程(Hz) | —       | 0.5~10        | 0.5~10(±10%) | 0.14~20(±10%) |
| 重 量          |           | 5       | 1.5           | 1.5          | 1.5           |

9. 实验标定结果

实测是在中国计量科学院分院国家标准低频振动台上进行的。

(1) 实测曲线