

气动实验  
非接触测量会议  
文选

第二分册



气动实验非接触测量会议文选  
共 三 册

---

|       |                        |
|-------|------------------------|
| 编辑出版者 | 气动实验非接触式测量<br>会议文选编辑组  |
| 印刷者   | 中国人民解放军<br>89950 部队印刷所 |

---

(内部刊物)

## 目 录

|                                    |                             |
|------------------------------------|-----------------------------|
| 测量高超音速的激光扫描干涉仪.....                | 七机部七〇一所 梁金寿 (1)             |
| 激光多普勒测速仪的研制.....                   | 清华大学工程力学系激光测速组 (6)          |
| 激光多普勒测速技术研究 .....                  | 天津大学 舒玮 王仕康 魏树华 郭晓明 (18)    |
| 激光测速及其应用 .....                     | 中国科学院力学所 杨大铮 杨家寿 李广达 (34)   |
| 用差分混频技术测量飞片和靶样品自由面速度<br>.....      | 成都 523 信箱 2 号 胡绍楼 (44)      |
| 后向散射激光多普勒测速装置 .....                | 上海激光技术研究所 孙淦生 (49)          |
| DISA 55L90 激光多普勒风速仪计数型信号处理机系统介绍    |                             |
| .....                              | 南京航空学院 许锡光 (58)             |
| 高速激光测速仪中的频率检测方法 .....              | 上海光机所 谢国梁 张立芬 (68)          |
| 激光马赫-任德尔干涉仪在激波管密度测量中的初步应用<br>..... | 89950 部队 倪虹生 王惠华 陈宏章 (74)   |
| 激光及全息术在流场显示上应用的初步实验<br>.....       | 七机部七〇一所全息照相课题组 (80)         |
| 辉光放电显低密度流场 .....                   | 89950 部队 曹威 七机部七〇一所 金瓊 (84) |
| 电子束显示低密度流场 .....                   | 七机部七〇一所 (90)                |
| 极化干涉仪 .....                        | 89950 部队 黄满钜 罗显华 贺树生 (102)  |
| 用于激光接收的热电探测器<br>.....              | 中国科学院上海硅酸盐研究所 冯锡祺           |
| .....                              | 上海东华半导体器件厂 张添立 邵黎墙 (110)    |
| 激光用于现场振动测量——激光外差测振仪<br>.....       | 浙江大学激光测振组 张仲先 执笔 (119)      |
| 用于测量低密度等离子体的三厘米微波干涉仪<br>.....      | 西南 585 所 307 室微波组 (124)     |
| 气动试验非接触测量计量标定中的一些看法 .....          | 304 所 成志尧 (131)             |
| 用激光全息照相术测量气溶胶粒子.....               | 上海激光技术研究所 (136)             |

# 测量高超音速的激光扫描干涉仪

七机部七〇一所 梁金寿

## 摘 要

本文介绍一种测量高超音速的激光扫描干涉仪的原理和方法。其测量范围：上限几乎不受限制，下限可低到1米/秒，不过一般认为此法只适合于马赫数0.5以上的速度测量，因为这种方法是直接测量与速度成正比的波长变化，所以对于低速（波长差小）的测量反而较难，这正好与电子学方法相反，可互为补充。

## 一、概 述

近十多年来，激光多普勒测速仪（LDV）是一门迅速发展的新技术，它被广泛地应用于低速流的研究；但对于2000米/秒以上的高速流的测量，则由于多普勒频移 $\Delta\nu_D$ 变得很大，难以用电子学方法来解决，原因是一般光电倍增管的频率响应为200兆赫<sup>[1]</sup>。对于1200米/秒的平均速度来说，按方程：

$$\Delta\nu_D = \frac{2V}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

最大允许角 $\theta$ 为 $1.9^\circ$ 。

公式(1)中的 $\lambda$ 为激光波长（这里用 $5145 \text{ \AA}$ ）， $\theta$ 为两入射光的交角， $V$ 为流速。

为了提高速度的测量上限，除了采取频移装置外，往往把 $\theta$ 角调得很小，但 $\theta$ 愈小，空间分辨率就愈低。

为了解决既能适应高测速量，又能保证高的空间分辨率的测速技术，1968年莫尔等人采用了激光扫描干涉仪的方法<sup>[2]</sup>，它是一种直接测量光波波长的微小变化的方法，所以速度的上限可测得很高，根据约克逊的介绍，此法可测的速度范围为 $1-10^6$ 米/秒，准确度达0.5%<sup>[3]</sup>。在文献[4]中对这种方法的评价是：这是一种既简单又经济的测高速手段，但对小的频移（低速流）不适用，而主要用于高速流动的研究。

这种方法还可以从干涉图象园环直径变化的方向来确定速度矢量的方向<sup>[8]</sup>。

在文献[6]中介绍了英国皇家研究中心用这种测试技术，在9吋×8吋、 $M=2$ 的风洞上测量了：

- (1) 超音速边界层流动的平均速度
- (2) 湍流度
- (3) 激波的位置和激波角

(4) 自由射流的速度剖面和湍流的测量。

他们利用超音速情况下自然形成的冰微粒作为散射质点, 因而不必外加微粒。

## 二、实验装置

如图 1 所示, 激光器的单频光束由  $M_1$  (半透射) 分为两路, 通过会聚透镜  $L_1$  和  $L_2$  经观察窗  $W_1$  交于测量点, 光束 1 的散射光和光束 2 (参考光) 经观察窗  $W_2$  一起进入

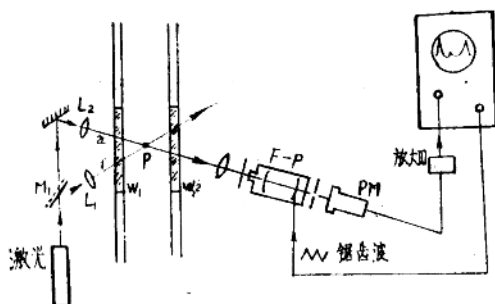


图 1 实验装置示意图

干涉仪  $F-P$ , 干涉仪是由两块相同的凹球面反射镜组成了共振腔, 其中的一块与压电陶瓷固定在一起, 在锯齿波信号驱动下, 使腔长作微小的线性变动, 其目的是为了满足不同波长的相干条件, 从而得到扫描光谱, 光谱强度由光电转换器  $PM$  变为电信号, 经放大后输入示波器, 在荧光屏上显示出频谱来。对于慢扫描过程, 亦可用其它记录器 (如磁电式示波器或电子电位差计)。

## 三、基本原理

共焦球面干涉仪是由两个曲率半径相等的凹球面反射镜组成的共振腔, 每一反射镜的曲率中心处于另一反射镜的顶点上, 因而它们的近轴焦点是重合的。

图 2 表示当波长为  $\lambda$  的入射光线与系统的轴夹角  $\theta'$  为很小时, 可忽略球差效应, 因此光线在腔内往返四次之后重合在一起, 形成多光束等厚干涉图。当  $\theta' = 0^\circ$  时, 相邻二光束的光程差  $\Delta = 4nL$ , 其中  $n$  为腔内介质的折射率,  $L$  为镜间距离, 当  $\Delta$  为波长的整数倍  $m$  时, 有最大的光强 (即出现亮条纹)<sup>[7]</sup>。即,

$$\begin{aligned}\Delta &= m\lambda = 4nL \\ m\lambda &= 4nL\end{aligned}\quad (2)$$

公式 (2) 为干涉方程,  $m$  为干涉级次。当波长由  $\lambda$  变为  $(\lambda + \Delta\lambda) = \lambda'$  时, 则此时的干涉条件为:

$$\begin{aligned}m\lambda' &= 4n'L \\ m\lambda' &= 4nL'\end{aligned}$$

或

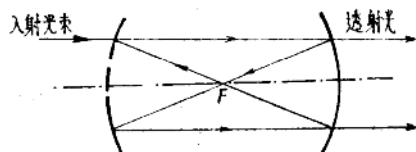


图2 共焦干涉仪光路

即稍为改变镜间距离  $L$  或折射率  $n$ ，才能使另一波长透过。例如用压电陶瓷驱动一个镜片，使镜间距离  $L$  作微小的线性变化，这样就可以对波长进行线性扫描，于是可测得波长的微小变化。波长  $\lambda$  与频率  $\nu$  的关系为：

$$\nu = \frac{C}{\lambda}$$

所以，

$$\Delta\nu = \frac{\Delta\lambda \cdot C}{\lambda^2} \quad (3)$$

其中  $C$  为光速。图3中的  $\Delta\nu$  表示自由光谱区， $\Delta\nu_D$  表示公式(1)里面的多普勒频差。

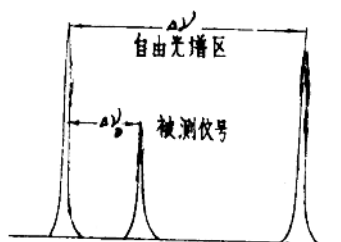


图3 干涉输出信号波形

扫描光谱之形成亦可用艾利公式<sup>[8]</sup>来表示：

$$I_T = \frac{I_0 T^2}{(1-R)^2} \left[ \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \right] \quad (4)$$

其中  $I_T$  和  $I_0$  分别为透射和入射光强度， $T$  和  $R$  分别为反射镜涂层的透射率和反射率， $\phi$  值相当于相邻二光束的相位差，

$$\phi = (2\pi/\lambda) 4nL \cos \theta' \quad (5)$$

方程(4)表示通过干涉仪的光在透镜焦平面上的光强分布表达式，当  $\frac{\phi}{2} = 0, \pi, 2\pi, \dots$  时，出现光强度极大值。即，

$$I_{\text{极大}} = \frac{I_0 T^2}{(1-R)^2} \quad (6)$$

当  $\frac{\phi}{2} = \frac{\pi}{2}, \frac{3}{2}\pi, \dots$  时，

$$I_{\text{极小}} = \frac{I_0 T^2}{(1+R)^2} \quad (7)$$

对于  $\theta' = 0$ ,  $n = 1$  的情况下,  $\frac{\phi}{2}$  就取决于  $L$ , 所以当  $L$  作线性改变时, 就会出现图 3 的扫描光谱。

图 3 中的  $\Delta v$  代表二相邻光谱级极大值的间距, 它表示在此波长范围  $\Delta\lambda$  内, 二相邻的光谱级不出现重迭, 此时的  $\Delta\lambda$  称为自由光谱区。对于球面共焦干涉仪来说, 自由光谱区为:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{4nL} = \frac{\lambda^2}{4L} \quad (\text{当 } n = 1) \quad (8)$$

或

$$\Delta v = \frac{C}{4nL} = \frac{C}{4L} \quad (\text{当 } n = 1) \quad (9)$$

对于交叉光束系统, 多普勒频移  $\Delta v_D$  为公式 (1) 所示, 由公式 (1) 和 (9) 可得:

$$\frac{\Delta v_D}{\Delta v} = \frac{8VL}{C\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \quad (10)$$

质点速度可以沿着示波器上的水平标尺的比率直接确定下来。即,

$$V = \frac{a}{b} \frac{C\lambda}{8L \cdot \sin \frac{\theta}{2}} \quad (11)$$

其中  $a$  和  $b$  分别为  $\Delta v_D$  和  $\Delta v$  在示波器上的水平标尺读数。

## 四、讨 论

从公式 (8) 或 (9) 可知, 干涉仪镜间距离  $L$  与自由光谱区成反比,  $L$  一经确定, 则自由光谱区亦随之而定, 因而可测的速度范围也就确定了, 这是因为被测的  $\Delta v_D$  值必须落在自由光谱区  $\Delta v$  的范围内, 所以对于不同的测速范围, 应选用不同的  $L$ 。而  $L$  值的确定又与所用的激光器波长有关, 它们的关系必须满足公式 (2) 的干涉方程。例如, 对于反射中心波长为  $6328 \text{ \AA}$  时, 若要获得 4000 兆赫的自由光谱区, 则  $L = 18.75$  毫米。可见这种仪器不够灵活机动。

关于可以测量的速度下限问题, 有几种不同说法, 一般认为此法只适用于马赫数 0.5 以上的速度范围。

这种测量方法要求被测对象应有足够的散射质点, 要用较大的激光器功率 (通常采用氦离子激光器), 以便提供可观测的多普勒信号。

## 附 录

几个常用的干涉仪定义:

### 1. 自由光谱区

$$FSR = \frac{C}{2KL}$$

## 2. 透过率

$$T = \frac{1}{K(1 + a/t)^2}$$

## 3. 反射精细常数

$$N = \frac{\pi}{K(1-r)}$$

## 4. 仪器带宽

$$\delta_r = \frac{FSR}{N}$$

其中

$C$ ——光速

$L$ ——反射镜间距

$K$ ——参数 (对法布里——珀罗干涉仪:  $K = 1$ ; 对共焦球面干涉仪:  $K = 2$ )

$t$ ——反射镜透过率

$a$ ——反射镜吸收、散射总合损失因子

$r$ ——反射镜反射率

$N$ ——有效精细常数

## 参 考 文 献

- [1] AIAA 6th Aerodynamic Testing Conference, 1971. 3.
- [2] M. A. Badri Narayanan, Laser Doppler Anemometry. 1974.
- [3] Physics Letter, Vol. 32 A, No. 2, P. 77, 1970.
- [4] Appl. Mech Review. 27, No. 6, 1974.
- [5] B. M. Watrasiwicz, M. J. Rudd, Laser Doppler Measurements, 1976.
- [6] Opto-Electronics, Vol. 5, No. 1, P. 91, 1973.
- [7] 激光与光学。1971年1月。
- [8] 激光参数测量。上海人民出版社, 1976年。

# 激光多普勒测速仪的研制

清华大学工程力学系 激光测速组

## 摘 要

本文介绍了 LJ-01 型激光多普勒测速仪的主要性能数据、光学系统部件的工作参数和结构布置。着重讨论了多普勒信号处理器——LJP-02 型频率跟踪器的静态特性、动态特性和脱落检测器的功能原理。

## 一、LJ-01 型激光多普勒测速仪的主要性能与光学系统

LJ-01 型激光多普勒测速仪是我们与银河仪表厂协作,于 1975 年初步研制完成的。后来对信号处理器又做了一些改进。全套装置见图 1 所示。

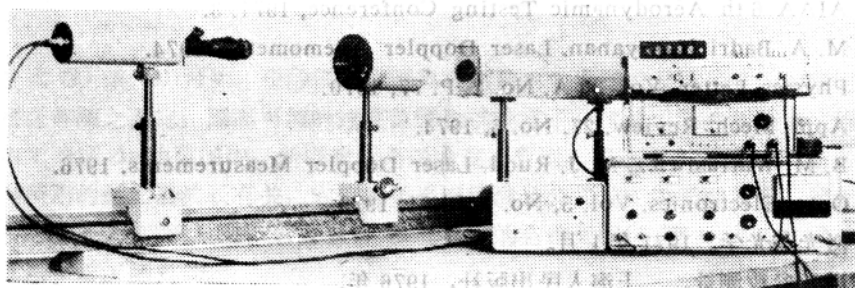


图 1 LJ-01 型激光多普勒测速仪

### 1. 仪器的主要性能数据:

- (1) 测速范围: 4 毫米/秒~220 米/秒
- (2) 流速脉动上限频率: 120 千赫
- (3) 偏离平均值的最大速度脉动:  $\pm 70\%$
- (4) 最大紊流强度: 32% 高斯信号
- (5) 输出: 模拟电压: 1.5~10 伏, 与流速成线性关系。

频率输出: 压控振荡器频率——中频频率(视量程而定) = 多普勒频率

- (6) 准确度: 模拟输出: 量程的 1%

频率输出: 读数的 0.25%

### 2. 光学系统由以下一些部件组成:

### (1) 激光器及电源

采用内腔式氦氖气体激光器。模式  $TEM_{00}$ ，功率 5 毫瓦。

高压电源配用 YJ-1 型激光电源，采用倍压整流自起动稳流电路。起动电压达 8 千伏，工作电压为 4.5 千伏。适用于腔长 700 毫米以下的氦氖激光器。

### (2) 光学单元

光学单元主要起分光 and 聚焦作用。其光路结构见图 2 所示。用六面体棱镜分光，斜方棱镜扩展光束分离。

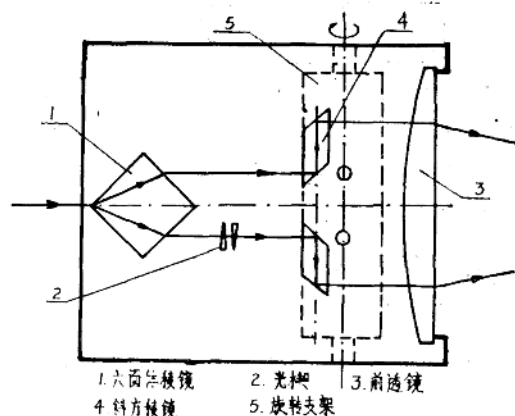


图 2 光学单元结构布置

由于选用现成的光学元件，光束分离为 26 毫米和 54 毫米两种。斜方棱镜支架可作轴向  $90^\circ$  转动，以得到两种不同的光束分离。

光学单元基本参数列于表 1 中。

表 1 光学单元的基本数据

| 透镜焦距 | 光束分离 | 测量体积<br>宽 度 | 测量体积<br>长 度 | 测量体积<br>条 纹 数 | 校正系数   | 光束半角 |
|------|------|-------------|-------------|---------------|--------|------|
| 毫 米  | 毫 米  | 毫 米         | 毫 米         |               | 米/秒/兆赫 | 度    |
| 150  | 26   | 0.15        | 0.87        | 21            | 3.66   | 4.96 |
| 150  | 54   | 0.15        | 0.43        | 42            | 1.79   | 10.2 |
| 300  | 26   | 0.3         | 3.47        | 21            | 7.32   | 2.48 |
| 300  | 54   | 0.3         | 1.67        | 43            | 3.52   | 5.15 |
| 600  | 26   | 0.6         | 13.8        | 21            | 14.6   | 1.24 |
| 600  | 54   | 0.6         | 6.7         | 43            | 7.04   | 2.58 |

根据信号处理器的多普勒频率范围为 2.25 千赫至 15 兆赫，可计算出测速范围为 4 毫米/秒至 220 米/秒。

光学单位可围绕入射光轴作  $360^\circ$  旋轴，以适应测量不同流向的需要。

光学单元可安装后向散射节段（见图 3）作后向散射模式测量。这时光接收器可放在光学单元同一侧。由于后向散射光强要比前向散射光强弱得多，所以在使用后散射模式测量时，要配用功率 15 瓦毫以上的激光器。

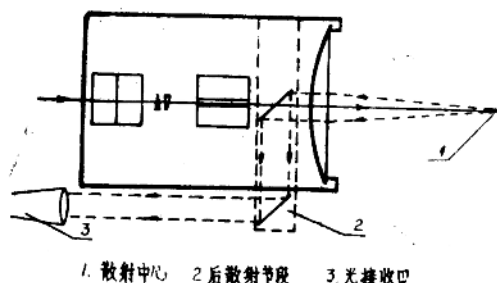


图 3 后向散射模式光路布置

两块平面光楔用来对一根光束作水平和垂直方向的微量调整，以便在实验时使两根光束在测量点完全相交。

六面体棱镜分光的优点，可以显著减小测量体的纵向尺寸，提高空间分辨率。又能在一定的输入激光功率条件下，相对地提高两根相交光束的强度达一倍之多，因而可以有效地提高信噪比。

### （3）光电倍增管接收器及电源

光电倍增管接收器用来接收测量体积的散射光，并实现光混频作用，得到与流速成比例的多普勒频率信号。

光接收器的结构布置见图 4。使用国产的 GDB-23 型光电倍增管。光谱响应 S-20，最大工作电压 2000 伏。

接收透镜焦距为 105 毫米。配用 150, 300, 600 毫米三种近摄镜以适应不同的接收距离。

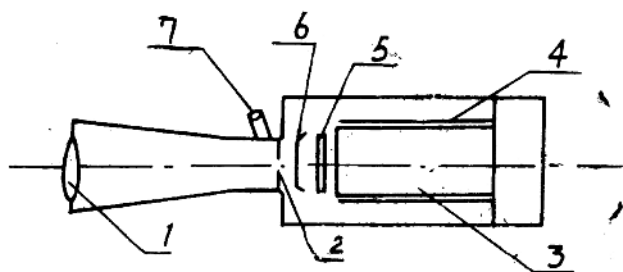


图 4 光电倍增管接收器

针孔光束用来阻挡非测量体积处的光线进入光倍管。针孔直径有  $\phi 0.1$  和  $\phi 0.15$  两种, 根据激光束直径来选用。

光倍管前装有干涉滤光片, 用来消除测量体积处环境光线的影响。

针孔光束的上方装有观察器, 可以观察针孔光束上的成象情况。依靠两个微调机构, 针孔光束能在水平和垂直方向作微量移动, 使光束方便地对准测量体积的象点。

当调整时, 为了保护光倍管, 在光束后装有挡板式开关。

光倍管外壳用坡莫合金片作电磁屏蔽。一方面避免外界磁场的影响; 另一方面, 由于考虑到使用的安全和方便, 光倍管采用负极性高压电源, 因此在光阴极和接收器外壳(地电位)之间有很高电位差。将屏蔽层接负高压(与阴极导电位)可以消除外电场对光阴极电子发射的影响。

光倍管配用 YD-1 型直流高压电源。采用倍压整流串联式稳压电路。光倍管阳极电流一般不超过 100 微安。电压调节范围由 500 伏到 1500 伏, 共 11 档, 每档间隔 100 伏。

#### (4) 光具座

光具座导轨长 1.8 米。配备滑舵 4 只, 其中两只有横向移动机构, 最大移动距离为 20 毫米。

## 二、多普勒信号处理器——LJP-02型频率跟踪器

由于流场中散射粒子的情况十分复杂, 得到的多普勒信号及频率、幅度都随时变化, 还伴随着噪音并经常出现信号的脱落。

电子频率跟踪器的发展使得有可能把流场中空间固定点的瞬时速度解调出来, 并转换成模拟量或数字量, 作进一步处理或显示。

LJD-02 型频率跟踪器实质上是一个频率压缩反馈回路。它的回路带宽可以很宽, 足以跟踪多普勒信号的瞬时频率。而经过外层以后的中频带宽可以很窄, 因而信噪比有很大提高。虽然它要求输入信号比较连续, 以免引起系统失锁, 但是, 依靠附加的脱落检测电路, 这种情况可以成功地应用于粒子浓度不太低的流动情况。

下面仅就调整中有关的几个重要问题作一些讨论和分析。

### 1. 关于跟踪器回路的静态工作特性

#### (1) 原理方框图和工作参数

LJP-02 型频率跟踪器的原理方框图见图 5。

由光电检测器送来的多普勒频率信号( $f_D$ ), 经前置放大器滤波和放大后, 进入混频器与压控振荡器频率( $f_{VCO}$ ) 外差混频。差频信号经中频放大器 A, 滤掉和频和噪音。经过限幅器 I 消除多普勒信号中的幅度脉动, 然后送到一个灵敏的鉴频器去。

鉴频器由中频放大器 B、限幅器 II 和相位比较器组成, 它的作用将中频频率( $f_{IF}$ ) 转换成电压  $u$ , 其大小正比于中频频偏移(相对于固定的中心频率  $f_{IF0}$ ), 实现频率—电压转换。此电压经基带滤波器(时间常数  $T_0$ ) 适当光滑后再进行直流放大, 得到的误

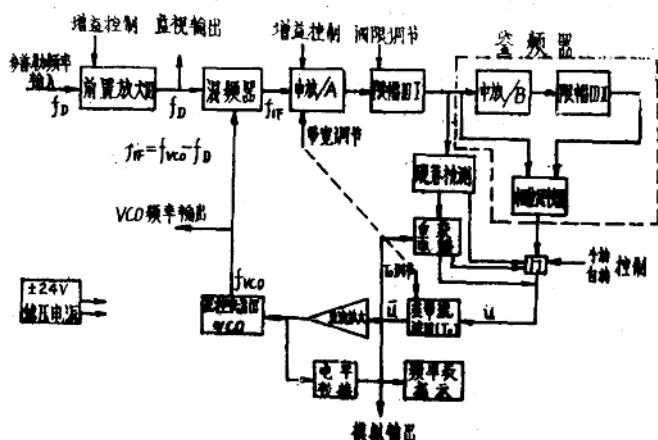


图5 LJP-02 频率跟踪器原理方框图

差电压 $V$ 反馈到压控振荡器输入端去控制压控振荡器频率 $f_{VCO}$ 。

由鉴频器输出经积分器光滑以后的直流电压围绕零电位作正或负变化, 而压控振荡器的输入电压全部工作在正电位(见图6)。因此直流放大器兼有电平转换作用, 并要求有两种输出特性, 如图7所示。

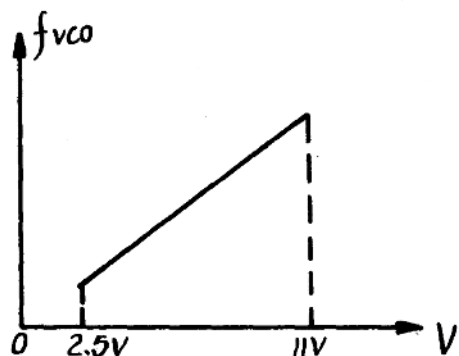


图 6 压控振荡器特性

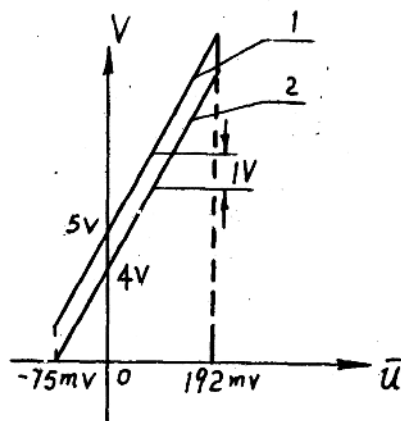


图 7 直流放大器特性

为了使直流放大器两种输出电压之间保持恒定为 1 伏之差, 采用两个二极管串联的正向恒压特性(见图 8)。调节分压电阻  $R$  可以精确地达到压控输入和模拟输出之间差 1 伏。

频率测量范围为 2.25 千赫~15 兆赫。分成七个具有一定重迭范围的量程, 每个量程的动态范围为 6:7:1。各个量程的多普勒频率、中频、VCO 频率和模拟输出的电压-频率转换系数列于表 2 中。

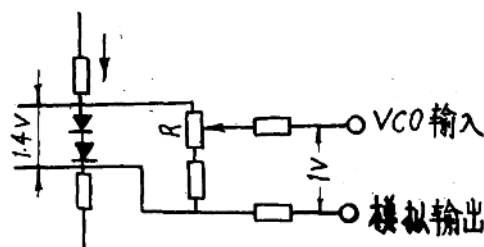


图 8 串联二极管恒压电路

表 2 多普勒频率、VCO 频率、中频频率和模拟输出电压—频率转换系数

| 量 程 | $f_D$        | $f_{IF0}$ | $f_{VCO}$     | K (模拟输出) |
|-----|--------------|-----------|---------------|----------|
| 1   | 2.25~15 千赫   | 1.5 千赫    | 3.75~16.5 千赫  | 1.5 千赫/伏 |
| 2   | 7.5~50 千赫    | 5 千赫      | 12.5~55 千赫    | 5 千赫/伏   |
| 3   | 22.5~150 千赫  | 15 千赫     | 37.5~165 千赫   | 15 千赫/伏  |
| 4   | 75~500 千赫    | 50 千赫     | 125~550 千赫    | 50 千赫/伏  |
| 6   | 0.225~1.5 兆赫 | 150 千赫    | 0.375~1.65 兆赫 | 150 千赫/伏 |
| 6   | 0.75~5 兆赫    | 500 千赫    | 1.25~5.5 兆赫   | 500 千赫/伏 |
| 7   | 2.25~15 兆赫   | 1.5 兆赫    | 3.75~16.5 兆赫  | 1.5 兆赫/伏 |

## (2) 回路静特性和静态精度

跟踪回路的静特性主要由混频器、鉴频器、直流放大器和 VCO 等决定。

假设在静态工作区域内这些环节都具有线性特性，我们可以用图解法来表示各环节特性的配合关系。

由图 9 可以看到，由于回路是一个有差调节系统，在各个量程，中频  $f_{IF}$  不是恒定的。根据设计要求，准确的中频  $f_{IF0}$  对应于多普勒频率  $f_{D0}$ 。这时，两个中频放大器处于谐振状态，相位比较器输出为 0 伏，而直流放大器的模拟输出为 4 伏（VCO 输入为 5 伏）。当多普勒频率高于或低于  $f_{D0}$  时，中频  $f_{IF}$  相应地低于或高于  $f_{IF0}$ 。（见图 10）。

中频偏差的大小与回路的开环增益成反比。只要保证足够大的开环增益，就能使中频最大偏差  $(f_{IF} - f_{IF0})_{max}$  小于允许误差。由实际线路估算得到的开环增益  $L \approx 500$ 。测试结果频率输出能满足 0.25% 的准确度。

至于模拟输出的静态准确度，主要取决于 VCO 的线性特性。此外，VCO 的温度特性和二极管电平转换器的动态内阻也有一定影响。要求二极管工作电流在 10~20 毫安时，串联压降偏差  $\Delta V < 50$  毫伏（见图 11）。

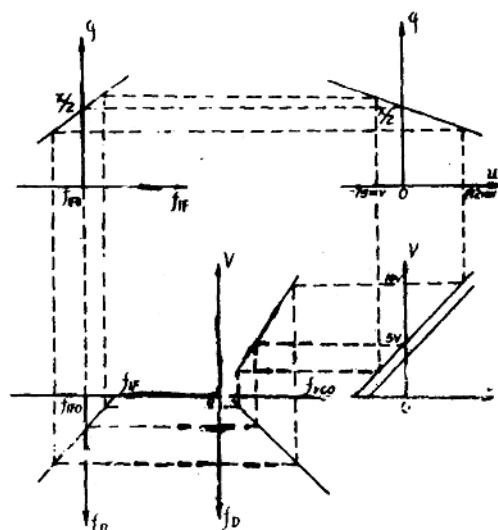


图9 跟踪回路静特性的图解表示

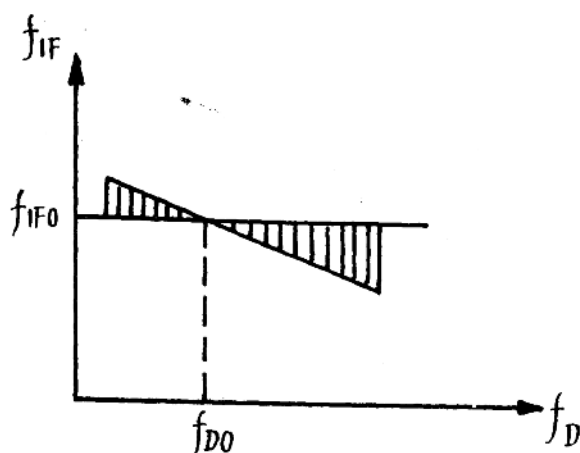


图10 中频与多普勒频率关系

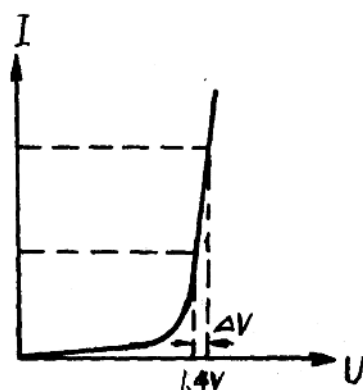


图11 串联二极管正向特性

## 2. 关于动态特性

跟踪器的动态特性就是跟踪多普勒频率变化的能力。通常用解调一个调频波的能力来度量。根据流速测量的具体特点，采用小信号工作制（调制系数为0.05）和大信号工作制（调制系数 $>0.1$ ）两种工作状态。

### (1) 小信号和大信号频率极限

在小信号工作制时，系统各个环节的传递特性可以认为是线性的，因此可以用线性调节理论来处理。

根据计算，当调制系统为0.05时，调制信号的3dB极限频宽由下式确定：

$$F_{CO} = 0.1 f_A, \quad f_A \text{ 为中放 } A \text{ 带宽。}$$

由此, 可得到各量程在不同中频带宽时的极限频宽 (见图 3)。

表 3 小信号工作制 3dB 频率极限

| 中频带宽<br>% | 15 千赫 | 50 千赫 | 150 千赫 | 500 千赫 | 1.5 兆赫 | 5 兆赫   | 15 兆赫  |
|-----------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 8         | 120 赫 | 400 赫 | 1.2 千赫 | 4 千赫   | 12 千赫  | 40 千赫  | 120 千赫 |
| 2         | 30 赫  | 100 赫 | 300 赫  | 1 千赫   | 3 千赫   | 10 千赫  | 30 千赫  |
| 0.5       | 7.5 赫 | 25 赫  | 75 赫   | 250 赫  | 750 赫  | 2.5 千赫 | 7.5 千赫 |

在大信号工作制时, 线性理论已不能适用。调制信号的频率极限由相位比较器进入饱和状态来确定。

正弦调制的多普勒频率可用下式表示:

$$f = f_D (1 + K \sin \omega_K t)$$

式中,  $f_D$  为平均多普勒频率,  $K$  为调制系数,  $\omega_K$  为调制角频率 (即信号频率)。

多普勒频率的最大变化率:

$$\left. \frac{df}{dt} \right|_{\max} = f_D K \omega_K$$

如果用 VCO 输入电压的变化率  $R_T$  来代替  $\left. \frac{df}{dt} \right|_{\max}$ , 则可得:

$$R_T = \frac{dV}{dt} = \frac{df}{dt} \bigg|_{\max} / K_{VCO} = \frac{f_D \cdot K \omega_K}{K_{VCO}} = \frac{2\pi f_D K f_K}{K_{VCO}}$$

式中,

$R_T$  为扫描速率 单位: 伏/秒

$f_K$  为调制信号频率 单位: 赫

上式就是扫描速率与信号频率之间的关系式。在一定的调制系数下, 提高信号频率使相位比较器进入饱和状态时的  $f_K$  或  $R_T$ , 算为大信号时极限信号频率  $f_{K\max}$  或极限扫描速率  $R_{T\max}$ 。这时, 调解信号将呈现三角波。再继续增大信号频率, 就会引起失锁。

设计数据给出了  $K=0.1$  时的最大扫描率和  $K=0.4$  时的最大信号频率 (见表 4、表 5), 作为检验跟踪大信号动态特性的指标。

表 4  $K=0.1$  时最大扫描速率

| 中频带宽<br>% | 15 千赫         | 50 千赫         | 150 千赫        | 500 千赫       | 1.5 兆赫       | 5 兆赫        | 15 兆赫        |
|-----------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| 8         | 0.14 伏/<br>毫秒 | 0.46 伏/<br>毫秒 | 1.4 伏/<br>毫秒  | 4.6 伏/<br>毫秒 | 14 伏/<br>毫秒  | 46 伏/<br>毫秒 | 140 伏/<br>毫秒 |
| 0.5       | 9 伏/<br>毫秒    | 0.03 伏/<br>毫秒 | 0.09 伏/<br>毫秒 | 0.3 伏/<br>毫秒 | 0.9 伏/<br>毫秒 | 3 伏/<br>毫秒  | 9 伏/<br>毫秒   |

表 5  $K=0.4$  时大信号频率极限

| 中频带宽<br>% | 15 千赫 | 50 千赫  | 150 千赫 | 500 千赫 | 1.5 兆赫 | 5 兆赫   | 15 兆赫 |
|-----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 8         | 12 赫  | 39 赫   | 120 赫  | 390 赫  | 1.2 千赫 | 3.9 千赫 | 12 千赫 |
| 2         | 3 赫   | 9.75 赫 | 30 赫   | 97.5 赫 | 300 赫  | 975 赫  | 3 千赫  |
| 0.5       | —     | 2.44 赫 | 7.5 赫  | 24.4 赫 | 75 赫   | 244 赫  | 750 赫 |

### (2) 影响动态特性的因素

跟踪器是一个三惯量的调节系统，回路的动态特性主要决定于中放A、中放B和基带滤波器的时间常数 $T_A$ 、 $T_B$ 和 $T_0$ 。回路的开环增益也是重要的因素，但主要取决于静态准确度。在开环增益一定的条件下，动态性能就只和 $T_A$ 、 $T_B$ 和 $T_0$ 有关了。

$T_A$  和  $T_B$  决定于  $Q_A$  和  $Q_B$  (分别为中放 A 和中放 B 的回路  $Q$  值)。根据设计要求  $Q_A$  最大为 25,  $Q_B = 2.5$ 。我们要求电感线圈的空载  $Q > 100$ 。在调整时, 只要适当配以中放 A 的带电阻就可以满足  $Q$  值的要求。

对基带滤波器积分元件，要仔细挑选。电容的容量太大会降低动态频率极限，太小则基带滤波作用减小，模拟输出中二倍中频信号幅度增大。由于动态响应的要求，信波应限制在 100 毫伏（有效值）以内。

此外,中放A和混频级的增益对动态性能也有影响。混频中放级的总增益应控制在14 dB以内(相当于5倍)。增益过高会使中放输出波形失真,破坏限幅器I的正常工作,进而导致脱落检测器动作,反过来又干扰跟踪器的跟踪。

### 3. 关于脱落检测和重获电路

在实际使用中要使跟踪器正常工作,脱落检测器是不可缺少的重要环节。

### (1) 脱落检测器的功能

所谓信号“脱落”，严格来说指的是这样几种情况(见图12)：

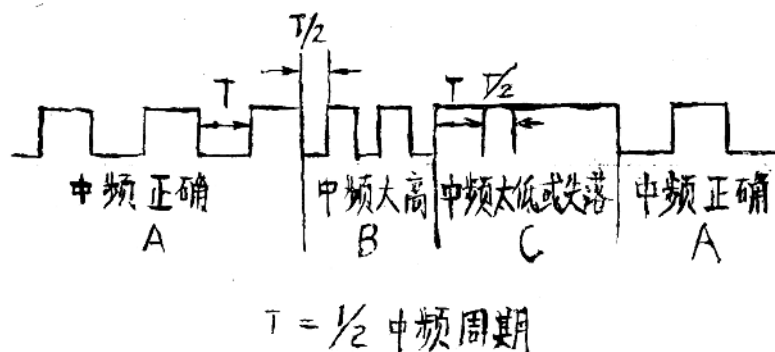


图 12 限幅器 I 的输出信号