

基于激光扫掠原理的人工心瓣 关闭速率实时诊断技术*

刘昌文 王仕康 刘 杰 曲修志 师朝晖

(天津大学机械学院汽车系 天津 300072)

提要 以激光扫掠法为基础, 结合计数型信号处理技术和微机高速数据采集方法, 构成了人工心瓣瞬时关闭速率的激光实时诊断系统。介绍了激光扫掠法的基本原理之后, 讨论了各主要光学部件的作用及准直透镜和圆柱光栅的位置参数对测量结果的影响, 分析了实时信号处理系统的构成及工作原理, 并给出了单叶碟型机械心瓣关闭速率的实测结果。

关键词 激光扫掠法, 实时测量, 人工心瓣关闭速率

1 引 言

机械心瓣完全关闭前 3° 范围内瓣叶的关闭速率是反映心瓣特性的一个重要参数^[1,2], 最初靠听声音和用高速摄影来了解, 现在主要使用激光扫掠方法来定量测试^[1,2]。如图 1 所示, 射向心瓣的激光束被转动的瓣叶反射, 转换成射向旋转圆柱光栅的扫掠光束, 它的扫掠速度与瓣叶转动角速度成正比, 测量透过光栅的光脉冲的频率就可得到瓣叶关闭前的运动状况。光电探测器的输出是调频和调幅的随机信号。以前处理这种信号都以记忆示波器为媒介, 先将光电信号存储起来, 然后用示波器的光标人工读取光电信号的峰-峰值时间间隔并计算出关闭速率^[1,3], 或者再将示波器记录的波形传送到计算机中, 研究者用鼠标点出光电信号峰-峰值位置, 由计算机求出关闭速率的变化过程^[2]。

已有研究结果表明, 心瓣的每一次关闭过程都有所差异^[4], 瓣膜关闭运动带有一定的随机性, 因此要正确反映瓣膜的关闭特性, 必须用心瓣关闭速率的统计结果。用记忆示波器存储光电信号, 再离线人工判别费时又费力, 又不具备实时性, 基于该处理方法很难获得心瓣关闭速率的统计特征。针对上述弱点, 我们研究了光电脉

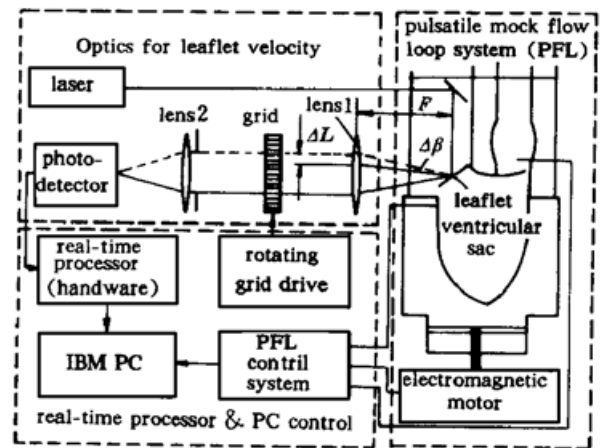


图 1 实时激光扫掠系统原理框图

Fig. 1 Schematic of the real-time LST experimental setup

* 国家自然科学基金(69278025)和天津市青年科学基金(963701211)资助项目。

收稿日期: 1998-07-13; 收到修改稿日期: 1999-02-10

冲峰-峰间距的自动测量系统,实现了每一心动周期中心瓣关闭速率曲线的实时测量和存储。

2 方法

2.1 光电信号峰-峰值间隔与心瓣关闭速率的关系

在邻近完全关闭 3° 的范围内,转动的机械心瓣瓣叶可看作是一个转动反射镜^[1]。如图1所示,射向瓣叶转动轴的 He-Ne 激光束被转动的瓣叶反射变成扫掠光束。扫掠光束经 L_1 准直后再被光栅面上的通光和阻光狭缝斩波,得到一系列光脉冲。借助接收透镜 L_2 , 光电探测器可探测到这些光脉冲,并输出一系列电脉冲信号。

以前分析激光扫掠系统时,均将其描述成 $4F$ 系统^[1~3]:透镜 L_1 和 L_2 的焦距等于 F ,它们之间的距离为 $2F$;瓣叶面上的反射光点正好位于准直透镜 L_1 的前焦平面上,旋转圆柱光栅面位于 L_1 的后焦面处,光电接收器位于 L_2 的后焦面上。由 $4F$ 系统得到的心瓣瓣叶转动角速度 ω 与光电信号的峰-峰值时间间隔 Δt 之间的关系为

$$\omega = \frac{1}{2F} \left[\frac{h}{\Delta t} - V_G \right] \quad (\text{rad/s}) \quad (1)$$

瓣叶端部 P 点的线速度为

$$V_P = \frac{R}{2F} \left[\frac{h}{\Delta t} - V_G \right] = \frac{R}{2F} \left[\frac{h}{\Delta t} - \pi DN \right] \quad (\text{m/s}) \quad (2)$$

其中 F 为透镜的焦距, h 为圆柱光栅的光栅常数, V_G 为圆柱光栅面的运动线速度, R 为瓣叶转轴到端部 P 点的距离。

实际上,光路并非 $4F$ 系统,位置调整也可能偏离理想状态,如图2所示,设瓣叶面上反射光点位于准直透镜 L_1 的前方 $(F + \Delta_1)$ 处,光栅面在 L_1 后方 $(F + \Delta_2)$ 处。心瓣关闭速率测量时, $\beta = 2\alpha$ 只在约 $\pm 3^\circ$ 范围取值,近似有 $\tan \beta = \beta$ 。由几何光学可求得扫描光束在光栅面上的运动距离与 β 角的关系为

$$L = F\beta \left[1 - \frac{\Delta_1 \cdot \Delta_2}{F^2} \right] \quad (3)$$

由(3)式可求得光束扫描速度 V_B 为

$$V_B = \frac{dL}{dt} = F \cdot \frac{d\beta}{dt} \left[1 - \frac{\Delta_1 \cdot \Delta_2}{F^2} \right] = 2F \cdot \frac{d\alpha}{dt} \left[1 - \frac{\Delta_1 \cdot \Delta_2}{F^2} \right] = 2F\omega \left[1 - \frac{\Delta_1 \cdot \Delta_2}{F^2} \right] \quad (4)$$

如圆柱光栅面的运动线速度为 V_G , 光栅条纹间距为 h , 则扫描光束相对于光栅条纹的运动速度 $V_{BG} = (V_G + V_B)$, 光束扫过光栅条纹间距的时间即透过光栅后光脉冲的时间间隔 Δt 为

$$\Delta t = \frac{h}{V_{BG}} = \frac{h}{V_G + 2F\omega \left[1 - \frac{\Delta_1 \cdot \Delta_2}{F^2} \right]} \quad (5)$$

由(5)式可得到实际情况下,心瓣瓣叶转动角速度 ω 与光电信号的峰-峰值时间间隔 Δt 之间的关系为

$$\omega = \frac{1}{2F} \left[\frac{h}{\Delta t} - V_G \right] \left/ \left[1 - \frac{\Delta_1 \cdot \Delta_2}{F^2} \right] \right. \quad (6)$$

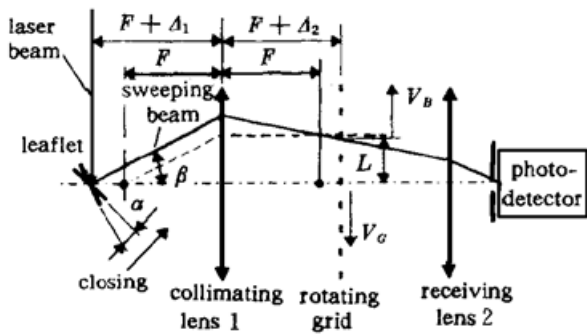


图2 关闭速率测量光学系统

Fig. 2 Optical system for leaflet velocity measurement

从以上结果可见: (6) 式中不包括接收透镜的参数, 表明接收透镜的作用只是将透过旋转光栅的光脉冲汇聚到光电探测器上, 它的焦距长短并不影响测量结果; 光路偏离理想状态带来的误差正比于反射光点偏离前焦面的距离 Δ_1 与圆柱光栅面偏离后焦面的距离 Δ_2 的乘积, 实际光路调整时, 只要保证其中一个为零, 即可消除误差, 或者两者的偏离不太大, 也能保证足够的精度, 如两者偏差不大于焦距的 1/10, 光路调整偏差带来的误差将小于 1/100, 可见激光扫掠法对光路的调整要求并不苛刻, 计算瓣叶关闭速率时可使用式(1)和式(2)。

2.2 实用的旋转圆柱光栅结构

激光扫掠系统中圆柱光栅起着两个关键的作用, (1) 斩波: 将连续扫描的光束变成光脉冲, 以便由脉冲的间隔反映瓣叶的转动瞬时角速度; (2) 鉴别瓣叶转动方向: 圆柱光栅旋转, 设定了一个基准量 V_G , 当测得的光束的相对扫描速度 $V_{BG} = h/\Delta t$ 大于 V_G 时是关闭运动, 反之是

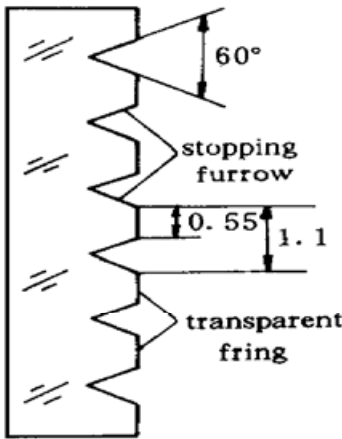


图3 实用的圆柱面光栅示意图
Fig. 3 Schematic diagram of a practical grid

反弹或开启运动。圆柱面光栅是在外径为 280 mm, 内径为 260 mm, 高为 11 mm 的有机玻璃圆柱外表面上, 一周均匀刻置 800 条三角沟槽构成, 条纹结构如图 3 所示。扫描光入射到沟槽上时, 出射光将偏离约 25°角, 不能到达接收器, 即三角沟槽构成了阻光条纹, 光栅常数 $h = 1.1$ mm。

应用中, 一方面要求光栅运动速度 V_G 要大于瓣叶反弹或开启时光束扫描的最大速度, 以保证扫描光束相对光栅条纹的运动方向不改变。另一方面要求光栅转速稳定, 以便由实测的 Δt 值代入式(1)和(2)精确计算瓣叶的转动角速度和瓣叶端部的线速度。以前采用离线信号处理的激光扫掠法中, 因记忆示波器一次记录的光电信号的长度很有限, 不能从中较精确地分析计算出光栅运动的实时速度, 对光栅转速的长期稳定性和短期稳定性均要求较高, 必须对电机的转速进行严格控制。采用本文讨论的实时信号分析技术后, 每一心动周期中光栅的运动速度也能实时测定, 只要在该较短的时间内转速不波动即可, 而这一要求, 通过适当增加光栅的转动惯量就可满足, 因此采用一般的调速方法就能满足要求。

应用中, 一方面要求光栅运动速度 V_G 要大于瓣叶反弹或开启时光束扫描的最大速度, 以保证扫描光束相对光栅条纹的运动方向不改变。另一方面要求光栅转速稳定, 以便由实测的 Δt 值代入式(1)和(2)精确计算瓣叶的转动角速度和瓣叶端部的线速度。以前采用离线信号处理的激光扫掠法中, 因记忆示波器一次记录的光电信号的长度很有限, 不能从中较精确地分析计算出光栅运动的实时速度, 对光栅转速的长期稳定性和短期稳定性均要求较高, 必须对电机的转速进行严格控制。采用本文讨论的实时信号分析技术后, 每一心动周期中光栅的运动速度也能实时测定, 只要在该较短的时间内转速不波动即可, 而这一要求, 通过适当增加光栅的转动惯量就可满足, 因此采用一般的调速方法就能满足要求。

2.3 实时信号处理技术

图 4 是典型的从硅光电二极管探测器输出的光电脉冲信号波形。瓣叶关闭速率的信息包含在脉冲峰-峰间隔时间 Δt 中。如图 5 所示, 我们先利用带通滤波放大器滤除光电信号中的高频和低频噪声, 放大有效成分之后, 使用峰值检测电路直接得到光电信号中各峰值出现的时刻 t_i , 并输出窄的正脉冲信号 P_i 。 P_i 脉冲将计数器当时的值 K_i 存入锁存器, 并触发微机系统, 让其读入 K_i 。读入 K_i 后微机等待下一个 P_{i+1} 信号的到来。

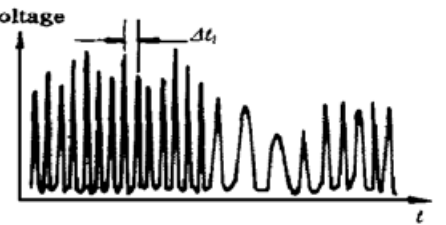


图4 典型的光电信号波形
Fig. 4 Typical LST photo signal trace

为了增强实时信号处理部分的适应性, 还设定了两个辅助参数: 有效信号的峰值阈值 v_t 和有效信号峰-峰值间隔时间的最大值 T_w 。峰值探测电路探测到一个电压峰值时, 只有当该峰值电压大于 v_t 时, 才作为真正有效的峰值, 输出 P_i 信号; 当一个 P_i 信号到来后, 如果等待下一个 P_{i+1} 信号到来的时间超过 T_w , 则认为一个心动周期中反映心瓣关闭特性的光电信号波包已结束, 瓣膜处于开启状态。显然 v_t 应大于最大的噪声信号强度,

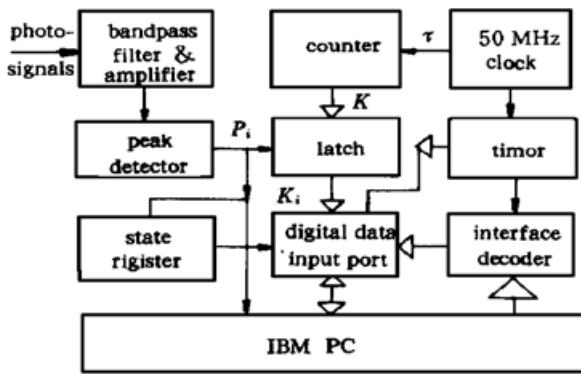


图 5 心瓣关闭速率自动测试系统硬件构成框图

Fig. 5 The block diagram of the real-time processor for LST

低于最小的有效峰值强度; T_w 取值应远大于波包中最大的有效峰-峰值间隔时间, 又远小于一个心动周期。瓣膜关闭过程中微机读取 K_i , 瓣叶开启后对关闭速率进行计算处理和显示。

设高频时钟信号的周期为 τ , 第 i 个峰-峰值间隔 Δt_i 为

$$\Delta t_i = K_{i+1}\tau - K_i\tau = (K_{i+1} - K_i)\tau = \Delta K_i \cdot \tau \quad (7)$$

心瓣关闭运动时, 瓣叶距完全关闭约 3° 位置处激光束进入探测区域, 探测器开始输出光电信号; 心瓣开启运动时, 瓣叶运动到相同的位置处, 光束离开探测区域, 光电信号结束, 因此该时间内, 光电信号中所有峰-峰值间隔 Δt_i 的平均值就是光栅转动一个

光栅间距的平均时间。设在某一次心动周期中微机读得了 I 个 Δt_i , 则光栅的实时转动速度为

$$V_G = \frac{h}{\frac{1}{I} \cdot \sum_{i=1}^I \Delta t_i} = \frac{h}{\frac{\tau}{I} \cdot \sum_{i=1}^I \Delta K_i} \quad (8)$$

将(7), (8)式代入(1)和(2), 计算出瓣叶转动的瞬时角速度 ω_i 及端部 P 点的线速度 V_{Pi} 分别为

$$\omega_i = \frac{h}{2F \cdot \tau} \left[\frac{1}{\Delta K_i} - \frac{I}{\sum_{i=1}^I \Delta K_i} \right] \quad (\text{rad/s}) \quad (9)$$

$$V_{Pi} = \frac{Rh}{2F \cdot \tau} \left[\frac{1}{\Delta K_i} - \frac{I}{\sum_{i=1}^I \Delta K_i} \right] \quad (\text{m/s}) \quad (10)$$

已有的研究表明: 心瓣关闭最后阶段几毫秒时间内的关闭速率才有实际意义^[1,2]。因此本实时测试系统中也只处理、显示和保存每一心动周期开始阶段测得的 1024 个测试数据, 它们大约持续几毫秒。显示关闭速率时, 还需求出与每一个瞬时关闭速率 ω_i 或 V_{Pi} 对应的

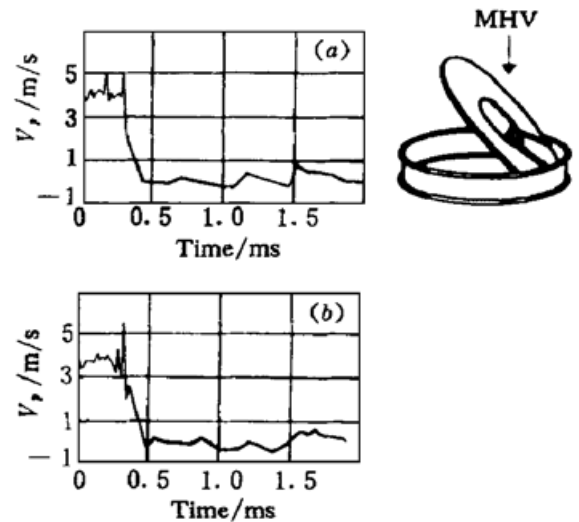
时刻为 $t_i = \sum_{j=1}^i \Delta t_j$ 。

3 实验结果

采用本文提出的机械心瓣关闭速率激光实时诊断系统, 在人工心瓣脉动流模拟实验台上进行了实测研究。模拟实验台由微机自动控制, 保证不同心率下心室、主动脉压力及血流量能模拟生理情况。实验用机械心瓣为 29 mm 的单叶碟型瓣, 瓣叶端部距转轴距离 $R = 14.5$ mm。光学系统参数: 透镜 F_1 的焦距 $F = 105$ mm; 圆柱光栅转速约 $V_G = 22$ m/s, 光学常数 $h = 1.1$ mm。信号处理部分参数: 带通滤波器带宽 1 kHz~ 0.5 MHz; 信号峰值阈值 $v_t = 200$ mV, 峰-峰值最大时间间隔 $T_w = 1$ ms, $\tau = 0.02$ μ s。实验中使用 486 微机, 在瓣叶开启后很短的时间内, 即可显示出瓣叶的关闭历程曲线, 图 6 所示是心率分别为 120 次/min 和 75 次/min 情况下, 实测得到的瓣叶关闭速率典型曲线。从实验曲线能明显地区分出关闭过程的三个阶段: (1) 瓣叶逐步趋近瓣座, 速度变化不大; (2) 瓣叶十分靠近瓣座时, 急剧地减速; (3) 瓣叶与瓣座碰撞后的反弹。该结果与美国 Miami 大学用离线方法测得的结果^[1,2]一致。

图 6 采用本文提出的机械心瓣关闭速率实时激光测量系统测得的单叶瓣关闭速率曲线
(a) 心率 120 次/min; (b) 心率 75 次/min

Fig. 6 Typical leaflet closing velocity trace of a monoleaflet type MHV got by using the real-time laser sweeping technique present in this paper
(a) heart rate 120 beats/min; (b) heart rate 75 beats/min



参 考 文 献

- 1 Guo G. X., Xu C. C., Hwang N. H. C.. Laser assessment of leaflet closing motion in prosthetic heart valve. *J. Biomedical Engineering*, 1990, **12**(6): 477~ 481
- 2 Wu Z. J., Wang Y., Hwang N. H. C.. Occluder closing behavior: a key factor in mechanical heart valve cavitation. *J. Heart Valve Disease*, 1994, **3**(suppl. 1): S25~ S33
- 3 George X. Guo, Chalie C. Xu, NED H. C. Hwang. The Closing Velocity of Baxter Duromedic heart valve prostheses. *Trans. Am Soc Int Artif Organs*, 1990, **36**(3): m529~ m532
- 4 Wang S. K., Wu Z. J., Wang Y. *et al.*. Deceleration of bileaflet MHV at closing and transient pressure reduction. *Annals of Biomedical Engineering*, 1993, **21**(suppl. 1): 21

Real-time Diagnostic of Instantaneous Closing Velocity of Mechanical Heart Valve Prosthesis Based on the Principle of Laser Sweeping

Liu Changwen Wang Shikang Liu Jie Qu Xiuzhi Shi Zhaohui
(Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract By combining a digital counting processing method and the computer sampling technique, a real-time signal processing system is realized to construct a laser sweeping technique (LST) with real-time ability to measure the instantaneous closing velocity of mechanical heart valve prosthesis. After a brief review of LST, the effect of the positions of the collimating lens and the moving grid on the measurement results is analyzed. A practical grid construction is presented, and the principle and the construction of the signal processor are discussed in detail. The statistical behavior of MHV closure can be drawn out from real-time realization of instantaneous closing velocity obtained by using the new laser diagnostic system. The system has been used for the diagnostic of leaflet closing velocity of a monoleaflet type MHV, and the experimental results are given.

Key words laser sweeping technique, real-time measurement, instantaneous closing velocity