

在同步辐射装置中配置电流扭摆器的建议

阮可妃 严祖祺

(上海大学物理系, 上海 201800)

摘 要 提出了第三代同步辐射光源中的低温超导电流扭摆器(Wiggler)和室温水冷电流扭摆器的物理设计方案。文中还讨论了电流扭摆器内腔中的磁场的分布特性, 测量方法和电流扭摆器的制造技术的可行性。

关键词 同步辐射, 扭轨磁体, 超导螺线管。

在同步辐射装置(SRF)中的直线段或增强器的末端, 配置磁场多周期排布的扭摆器能产生光强极高的定向发射的软 X 射线, 甚至 X 射线, 这是第三代同步辐射装置的重要特征之一。对于建造周期数 M 较多(例如 $M = 100$)的扭摆器, 可以采用永磁混合型结构, 也可以采用近年来发展起来的超导电流(或室温电流)螺线管和组合磁芯套合结构^[1]。永磁混合型结构的优点是, 一旦建成后, 扭轨磁场不需要依靠外电流来维持; 其缺点是建造工艺比较复杂(磁极对称性排布的选择很麻烦), 磁体内腔磁场强弱不易调节, 扭轨磁场的周期 λ_w 不能缩得很短, 腔内扭轨磁场强度受到永磁材料剩磁值的限制。于是永磁型结构很难产生高强、短周期的扭轨磁场, 并需附加聚焦线圈来约束内腔电子束的离散。另外有一潜在缺点是永磁材料的剩磁 B_r 随着扭摆器运转日期的增长而衰减, 影响扭摆器的稳定性。正是由于这些问题, 近年来已开始自由电子激光器中采用超导电流扭摆器来替代永磁扭摆器。本文建议在同步辐射装置中配置超导电流扭摆器和室温水冷扭摆器。使同步辐射装置在这方面更具有特色。

1 超导电流扭摆器的基本结构

超导电流扭摆器是由超导螺线管和软磁磁极周期排布的组合磁芯套迭而成, 其总体结构如图 1 所示^[1]。

超导螺线管外形是中空圆柱体结构, 内含低温超导线圈和由液氦、液氮, 真空组成的低温杜瓦结构, 如图 2(a)所示。液氦中的低温超导线圈由 $NbSn_3$ 绕成, 超导线圈中的初始电流由外电源激发, 电流值 I 由室温可变电阻调节。达到额定值时, 启动超导短路片, 切断外电源, 自动维持恒流。通电超导线圈会在螺线管内部激起轴向磁场 B_0 。

图 1 中的带内腔的组合磁芯是由软磁磁极(1010 磁钢)和非磁性材料(AL)周期性交迭而成。该磁极组合芯中的磁极组以内腔为界分为上下两层。上层的磁极中心恰好对应于下层的

非磁性材料块的中心, 即内腔二侧的磁极组呈交错型分布, 如图 2(b) 所示。在超导线圈的轴向磁场 B_0 的激励下, 组合磁芯会在内腔中感应出空间周期分布的横向扭摆器磁场 $B_w(z) = c_1 \sin(2\pi z/\lambda_w)$ 和纵向磁场 $B_z = B_0 - D_2 \cos(4\pi z/\lambda_w)$, 扭摆器场的幅值 B_{wm} 正比于激励磁场 B_0 , 并和 g/λ_w 之值密切相关。

电子束行径扭摆器内腔时, 在 B_w 和 B_z 共同作用下作微幅摆动, 并发射电磁波, 在扭摆器中, 当电子束和

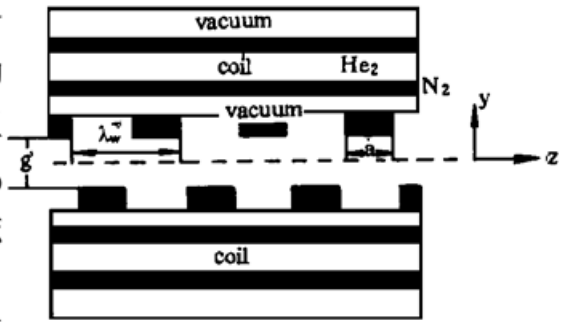


Fig. 1 Superconductor solenoid wiggler

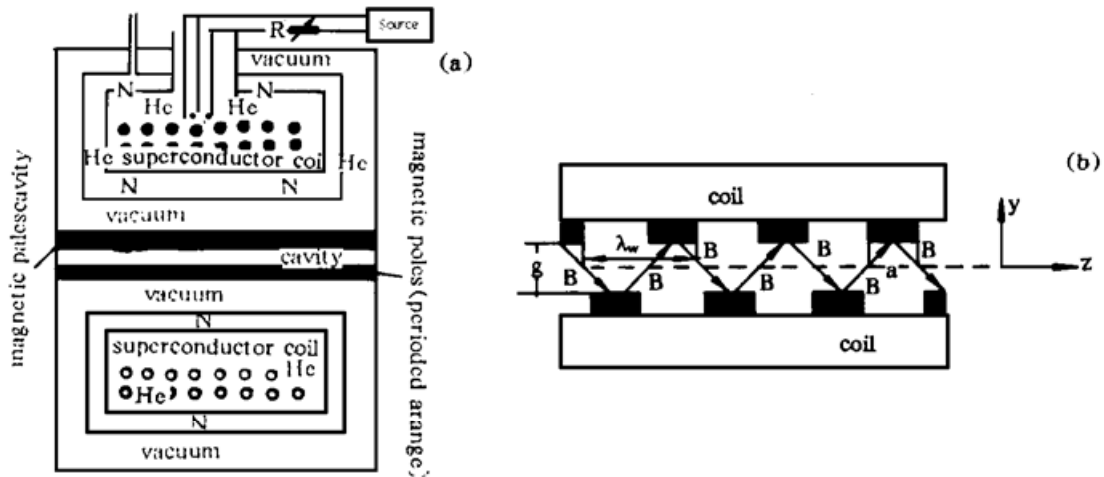


Fig. 2 (a) Superconductor coil, (b) The combined core of magnetic plate

光波的同步匹配条件满足时, 电子束行径扭摆器场的上半周期和下半周期都是处于发射光波的状态。如果扭摆器中包含的扭摆器场的周期数 M 很大(例如 $M = 125$), 那么电子束通过扭摆器时所发射的总光强是单周期中发光强度的无规位相迭加或部分相干迭加, 使总光强大大增加。这就是插入扭摆器能使同步辐射装置的发光强度增加几个数量级的原理。

2 电流扭摆器的优点

电流扭摆器特别是超导电流扭摆器的主要优点是:

- 1) 电流扭摆器的磁极组合芯结构简单。软磁磁极的饱和强度 B_s 远大于永磁的剩磁 B_r 。便于制成短周期(λ_w 小) 高场强的扭摆器, 特别是超导扭摆器能产生短波高强度的光波。
- 2) 电流扭摆器本身具有纵向磁场 B_z , 对腔中电子束有聚焦作用, 能自动约束电子沿轴运动, 防止电子束流在扭摆器中损耗。而且可能配置狭的内腔, 更有利于得到高强短周期扭摆器磁场。
- 3) 扭摆器内腔的 B_w 值可以改变线圈电流来调节。有利于调节最强光波的波长 λ 。
- 4) 图 2(b) 所示的交替型电流扭摆器, 对磁极对称性误差要求不太严格, 即便存在少量误差也是对称地影响该处全周期扭摆器场 B_w 的幅值。不会使电子束运动轨迹偏轴逸出。这样可使组合磁芯的装配工艺和磁极块的挑选工作大大简化。

当然, 超导电流扭摆器的缺点是造价较高, 并需定期灌注液氦和液氮。室温水冷电流扭摆器造价较低, 但需外电源维持, 热耗较大。但是这些缺点是可以克服的, 权衡利弊得失, 在

很先进的同步辐射装置上配置超导电流扭摆器或室温水冷电流扭摆器还是较佳方案。

3 电流扭摆器内腔中的磁场分析

在图 2(b) 所示的交错型组合磁芯的内腔, 不存在电流和磁极。而且磁极在 X 方向的线度 (约 100 mm) 远大于 Y 方向的腔宽 (5 mm) 也远大于沿轴向的周期 λ_w (10 mm)。于是腔内的磁场满足如下的两维拉普拉斯方程和边界条件 (磁极在非饱和状态下工作, μ 很大)^[2]。

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 B_y}{\partial y^2} &= 0, & B_z(z) &= B_z(z + \lambda_w), \\ B_z &= \begin{cases} 0, & (y = \pm g/2, z \text{ 在磁极面上}) \\ B_0/f, & (y = \pm g/2, z \text{ 在磁极之间}) \end{cases} & (1) \\ \frac{\partial B_z}{\partial z} + \frac{\partial B_y}{\partial y} &= 0, & f &= \frac{\lambda_w - a}{\lambda_w} \end{aligned}$$

由此可得腔内磁场

$$\begin{aligned} B_z &= B_0 + C_1 \sinh(2\pi y/\lambda_w) \cos(2\pi z/\lambda_w) + D_2 \cosh(4\pi y/\lambda_w) \cos(4\pi z/\lambda_w) \\ B_y &= B_w = C_1 \cosh(2\pi y/\lambda_w) \sin(2\pi z/\lambda_w), \\ C_1 &= 2B_0 \sin(f\pi) / [f\pi \sinh(\pi g/\lambda_w)], & D_2 &= -2B_0 \sin(2f\pi) / [2f\pi \cosh(2\pi g/\lambda_w)] \end{aligned}$$

在腔内轴线上 (电子束路经之处)

$$\begin{aligned} y = 0, \quad \cosh\left(\frac{2\pi y}{\lambda_w}\right)\Big|_{y=0} &= 1, & \sinh\left(\frac{2\pi y}{\lambda_w}\right)\Big|_{y=0} &= 0 \\ B_z &= B_0 + D_2 \cos\left(\frac{4\pi z}{\lambda_w}\right), & B_w &= C_1 \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda_w}\right), \end{aligned} \quad (3)$$

如果磁极工作在近饱和状态。此时磁极材料的磁导率 μ 很小。在此情况下可算出内腔轴线上的磁场^[2]。

$$B_w = \frac{2B_0 \sin(f\pi)}{\pi \sinh(\pi g/\lambda_w)} \frac{\mu - 1}{(\mu - 1)f + 1} \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda_w}\right) \quad (4)$$

由(3)式和(4)式说明扭摆器内腔轴线上的磁场随 Z 呈正弦分布。 B_w 正比于 B_0 , B_w/B_0 和结构参数 f , 及 $G = g/\lambda_w$ 之值密切相关, 其关系曲线如图 3 和图 4 所示。

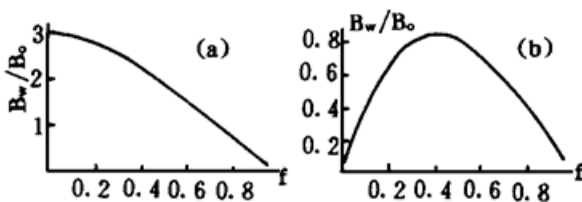


Fig. 3 (a) $\mu \rightarrow \infty$; (b) $\mu = 2.5$

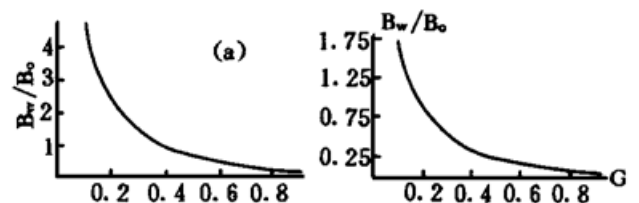


Fig. 4 (a) $\mu \rightarrow \infty$; (b) $\mu = 2.5$

从曲线图可以看出, 为了使腔内 B_w 大, 通常让磁极处于近饱和的状态下工作。 μ 较小, $B_w/B_0 \sim f$ 曲线具有极值。在设计磁极组合芯时, 通常使 f 值选在极值附近。另外从图 4 也可看出 B_w/B_0 随 g/λ_w 的减少而速上升, 设计内腔时, 宜取宽度较小的狭腔。

4 同步辐射装置超导电流扭摆器的物理设计初探

习惯上把 $a_w = eB_w\lambda_w/2\pi mc > 1$ 的磁体称为扭摆器, 而把 $a_w < 1$ 的磁体又称为波荡器。这

两种磁极交替安置的磁体的基本结构相仿, 都能使电子束作扭轨运动, 在这里把它们统称为扭摆器, 本文着重讨论 $a_w < 1$ 的扭摆器的物理设计。参照上海同步辐射光源可行性研究报告中涉及的永磁扭摆器的基本参数, 本文提出了对应的超导电流扭摆器的物理设计方案。

4.1 同步辐射装置超导电流扭摆器设计背景

同步辐射装置中的电子束能量初估为 $E = 2.2 \text{ GeV}$ 运动电子的相对论因子

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{E}{m_0 c^2} + 1 = 4299$$

上海同步辐射光源可行性研究报告中扭摆器包含的扭轨磁场周期数 $M = 125$, 在新设计中保留这一参数。注意到超导扭摆器在制备短周期扭轨磁场中的优点。在新设计中把 λ_w 定为 1 cm , 是原来 λ_w 的 $1/4$; 腔宽 g 定为 5 mm ; 使磁体的长度比原来的缩小 4 倍, 定为 $L = 1.25 \text{ m}$; 扭摆器磁参数, $a_w = 0.5$, 按照扭摆器中电子束和光波同步匹配条件, 可以推知超导电流扭摆器中电子束发射的最强光波波长 λ 比永磁扭摆器要缩短 4 倍即

$$\lambda = \frac{1 + a_w^2}{2\gamma^2} \lambda_w = 3.382 \times 10^{-10} \text{ m} \quad (5)$$

而发射的光强不亚于永磁扭摆器。

4.2 超导电流扭摆器结构和相关的设计参数

超导电流扭摆器的总体结构如图 1 所示, 其组合磁芯如图 2(b) 所示。

组合磁芯和超导线圈设计成可脱卸结构。组合磁芯的基座是用铝铸成的含内腔的圆柱形, 相应的软磁极用饱和磁感应强度 B_s 很大的 1010 磁钢抛光制成, 并紧压进铝基座中相应空间。

注意到 $\lambda_w = 10 \text{ mm}$, $f = (\lambda_w - a)/\lambda_w = 0.4$ (极值位置) 这样磁极的尺寸取为 $90 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 共 250 块, 组合磁芯的某一横断面和纵断面如图 5 和图 6 所示。

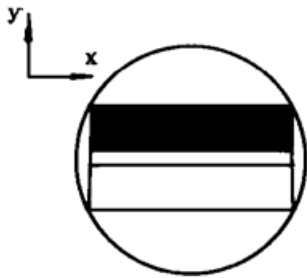


Fig. 5 Cross section of the combined core

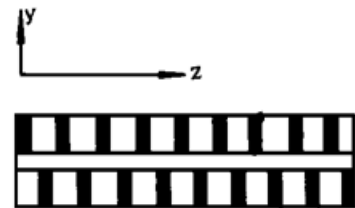


Fig. 6 Vertical section of the combined core

超导线圈采用螺线管形均匀绕制, 线材采用低温超导的 NbSn_3 。超导线圈浸在液氮之中, 并采用超低温杜瓦结构减缓液氮气化速度, 长期维持超低温环境。超导电流线圈的匝数 N 和所通电流之值 I , 由它提供的磁感应强度 B_0 来决定。 B_w 的峰值 C_1 和 B_0 有如下关系:

$$B_0 = \frac{f \pi \sinh(\pi g / \lambda_w)}{2 \sin(f \pi)} C_1 \quad (6)$$

对 $a_w = 0.5$, $\lambda_w = 10 \text{ mm}$, $B_{wm} = C_1 = 2\pi m c a_w / e \lambda_w = 0.536 \text{ T}$ 。在此条件下要求超导线圈提供的 $B_0 = 1.52 C_1 = 0.815 \text{ T}$ 。对于超导螺线管中部区域的磁场 B_0 和螺线管的安匝数 NI 有如下关系:

$$NI = B_0 L / \mu_0 = 8.1066 \times 10^5 \text{ 安匝} \quad (7)$$

如果取线圈的匝数 $N = 500$ 则线圈电流 $I = 1621.3 \text{ A}$ 。对超导线圈来说, 线圈电流无热损耗,

为了节省超导线材料,可以减少 N 值,但维持同样磁场,需要更大的初始激励电流 I 。就要看所配备的外电源能提供多大的初始激励电流值。线圈中的电流值可以通过含可变室温电阻的外电路来调控。调整到额定值时,可以启动超导短路片来维持恒流,并切断电源。

4.3 超导电流扭摆器制备技术的可行性

该磁体的超导螺线管和组合磁芯是套迭而成,可以脱卸。两者可以分别制备,从国内磁钢(软磁)的生产和铝基座精密铸造技术来看,研制组合磁芯是可行的。当然要注意内腔界面的抛光和镀铜。以及磁钢和铝基座的紧密镶嵌和磁钢的磁特性、磁块形状线度的一致性,上海市有关工厂能解决制备问题。

超导螺线管包括 NbSn_3 超导绕组,含液氦,液氮,真空的超低温杜瓦结构和液氦液氮的灌注系统。超导螺线管的结构较复杂,但不是不可克服的。国内有关冷冻机械厂在研制超低温杜瓦结构方面有经验。即使国内研制低温超导线管有困难,也可向美国有关公司订购。

超导螺线管附加设备包括超导电流调节、测量、控制电路、液氦液面监测系统、超导片短路装置等,国内也能制备。

5 同步辐射装置中室温水冷电流扭轨磁体物理设计的初探

按照本文的分析,采用水冷铜管绕组的螺线管代替超导电流螺线管的室温电流扭摆器,插入同步辐射装置的适当部位也能产生高亮度的软 X 光。其优点是造价降低,不需液氦装置;其缺点是扭摆器的总长度增加,周期 λ_w 变大,同样能量电子束产生的电磁波波长增大。并因电热损耗,绕组电流 I 值受限制。内腔的扭摆器场强 B_w 相应减少,这样会使同样的 2.2 GeV 电子束在此扭摆器中发射的最强电磁波的波长 λ 有所增加但仍落在软 X 射线波段。

5.1 同步辐射装置中室温电流扭摆器的基本结构和主要参数

室温水冷电流扭摆器中组合磁芯的结构和超导扭摆器磁体相仿,如图 2(b) 所示。但是注意到水冷室温电流螺线管所能提供的 B_0 受到限制,为了产生较强的扭轨磁场,腔宽 g 与磁场周期 λ_w 之比应该减少;但由于电子束截面不会太小,只能通过适当扩大 λ_w 来减少 g/λ_w 值。作者建议设定组合磁芯的 $\lambda_w = 4 \text{ cm}$, $M = 125$, $L = 5 \text{ m}$, 腔宽 $g = 5 \text{ mm}$, $E = 2.2 \text{ GeV}$, $a_w = 0.5$ 。磁极仍采用 1010 磁钢,尺寸为 $200 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$ 。由前所述,当磁极处于非饱和状态下, B_w/B_0 随结构参数 $f = (\lambda_w - a)/\lambda_w$ 减少而单调增加。室温电流扭摆器中,磁极正处于非饱和状态下工作, μ 值很大。因此在考虑上述参数时,设定 $f = 0.2$ 。当 2.2 GeV 的电子束通过磁芯内腔所发射的最强光波的波长

$$\lambda = (1 + a_w^2) \lambda_w / 2\gamma^2 = 13.5 \times 10^{-10} \text{ m} \quad (8)$$

扭摆器内腔中的 $B_{wm} = 2\pi m c a_w / e \lambda_w = 0.134 \text{ T}$ 。要求电流螺线管提供的轴向磁场

$$B_0 = \frac{f \pi \sinh(\pi g / \lambda_w)}{2 \sin(f \pi)} B_{wm} = 0.02885 \text{ T} \quad (9)$$

5.2 室温水冷螺线管的设计及其主要参数

本项目中已考虑 $\lambda_w = 0.04 \text{ m}$, $M = 125$, $L = 5 \text{ m}$, 由长直螺线管的磁强和安匝数 NI 之间的关系式,可算得螺线管安匝数

$$NI = B_0 L / \mu_0 = 114790 \text{ 安匝} \quad (10)$$

若取 $N = 1500$, 则 $I = 76.53 \text{ A}$ 。本项目中的螺线管采用通水铜管绕成,现设铜管的内外直径分别为 $d_1 = 7 \text{ mm}$, $d_2 = 10 \text{ mm}$ 。当铜管绕组通过电流 $I = 76.53 \text{ A}$ 时其热损耗功率和电

阻分别为

$$P = I^2 R, \quad (11)$$

$$R = 4\rho N(h + Nd_2^2/L)/(d_2^2 - d_1^2) \quad (12)$$

若铜的电阻率 $\rho = 1.6 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ 、 $N = 1500$ 、螺管内腔直径 $h = 0.2 \text{ m}$ 、螺管长度 $L = 5 \text{ m}$ 、铜管外直径 $d_2 = 10 \text{ mm}$ 、内直径 $d_1 = 7 \text{ mm}$ ，则 $R = 0.4329 \Omega$ ， $P = I^2 R = 2.5354 \text{ kW}$ ，铜管绕组所产生的热量是通过水冷系统来耗散的。在热平衡时，绕组产生的电热功率应该等于升温水流带走的功率。若设绕组入口处的水温是 $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ (室温)，绕组出口处的水温度是 $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ，那么，在每秒钟，水带走的热量

$$\frac{dQ_1}{dt} = C(T - T_0) \frac{dm}{dt}. \quad (13)$$

其中 dm/dt 为铜管绕组中水的流量(g/s)， $C = 1 \text{ Cal/g}^\circ\text{C}$ 是水的比热。

单位时间中铜管绕组中产生的热量

$$dQ_2/dt = P/J, \quad (14)$$

$J = 4.18 \text{ J/Cal}$ 是热功当量。

在热平衡时 $dQ_1/dt = dQ_2/dt$ ，于是水的流量

$$\frac{dm}{dt} = \frac{P}{CJ(T - T_0)} = 15.16 \text{ g/s}, \quad (15)$$

注意到铜管内直径和水的密度 $D = 1 \text{ g/cm}^3$ ，可得水的流速

$$v = \frac{dm}{dt} / D \frac{\pi d_1^2}{4} = 0.394 \text{ m/s} \quad (16)$$

这种流速在水冷系统中很容易得到。因此水冷电流扭摆器在这里是可行的。

5.3 室温水冷电流扭摆器的制备技术的可行性

这种扭摆器的组合磁芯长度达 5 m 。制备难度相应增加。非磁性材料基座采用铜材代铝，并注意内腔的准直和平整度；1010 磁钢的尺寸也有较大扩展。

室温水冷螺线管，因其匝数增加到 1500 匝(每层 500 匝、共 3 层)铜管绕制技术相对复杂些。流速为 0.4 m/s 的水冷系统是容易制成的。螺线管的电流供电源(40 V、80 A)需要制备。

6 扭摆器内腔磁场分布的测量系统

6.1 超导螺线管和室温水冷螺线管的轴向磁场 B_0 的测量

采用备有霍尔(Hole)探头的高斯计来测量。目的是测量 $B_0(z) \sim z$ 的曲线，探测出轴向场 B_0 在螺线管内的均匀分布区范围以及均匀区的 B_0 值。

6.2 插入组合磁芯后，测量磁芯内部横向扭轨磁场 $B_w(z)$ 随 z 周期变化关系

本文建议采用如图 7 所示的脉冲电流装置来测量。其测量原理简述如下。

当穿越磁芯内腔的金属弦线通以脉冲电流时，由于磁场对电流的作用力，会使通电金属弦中各线元发生机械振动。注意到金属线中的机械振动传播速度($v = \sqrt{T/\rho}$)远小于金属线中电流传播速度(光速)，可以认为脉冲电讯号，同时到达腔内金属弦线的各个线元。由于弦线各线元所在处的 $B_w(z)$ 值是不同的，于是各线元所受的磁场力是不同的，并正比于线元所在处的 $B_w(z)$ 。由于磁场力引起的各线元的横向动量增量也应正比于 $B_w(z)$ 之值，这样各线

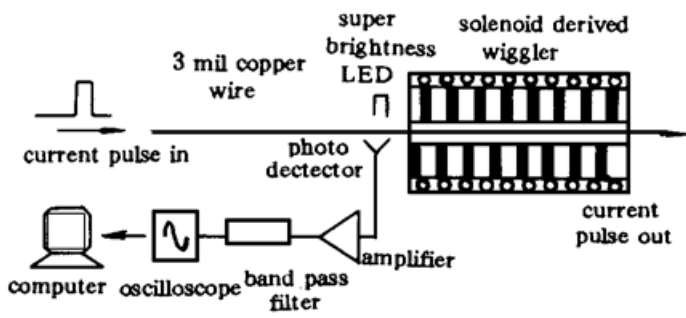


Fig. 7 Wiggler field measurement by using the pulsed wire technique

元产生的动量脉冲讯号其幅值是不同的。这种动量脉冲会在弦线上沿着正、反两个方向向外传而形成机械波。其传布速度由金属弦线的密度 ρ 和张力 T 共同决定。在图 7 所示的 $B_w(z)$ 测量装置中, 利用光电探测器测量弦线上某点的位移随时间变化的关系, 可以推算出腔内金属弦线各处的动量增量随 z 的分布和 $B_w(z)$ 随 z 的分布曲线。腔中 $B_w(z)$ 的最大值(振幅)可用精细霍尔探头和高斯计来定。

6.3 扭轨磁场测量系统的技术难度

有关 B_0 和 B_w 幅值测量所用的霍尔探头和高斯计的配置是容易实施的。国内生产的霍尔探头可以做得很小, 能测腔内各微区的磁场 $B_w(z)$ 。脉冲电流线测量装置包含脉冲电流源(4 μs , 4A)定向细束光发射管, 光讯号接收器、放大器、示波器和微型计算机。这些部件可以自己装配, 当然在测量系统调试方面存在一定的技术难度。

参 考 文 献

- [1] 严祖祺, 阮可妃, 吴 焱, 远红外自由电子激光器和螺线管电流扭轨磁体. 光学学报, 1995, 15(3) : 385~ 391
- [2] 阮可妃, 严祖祺等, 室温脉冲螺旋 Wiggler 磁体和大电流脉冲电源研究. 量子电子学, 1995, 12(3) : 331~ 340
- [3] C. A. Brau, *Free-Electron Lasers*. San Diego (U. S. A.) Academic Press, Inc. 1990 : 11

The Proposal of Setting Solenoid Wiggler at Synchrotron Radiation Facility

Ruan Kefei Yan Zuqi

(The Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 201800)

(Received 12 September 1996)

Abstract The physical design of superconductive solenoid wiggler and room temperature water cooling solenoid wiggler at the 3th generation synchrotron radiation source is presented. The magnetic field distrabution and the measurement of magnetic field in the narrow cavity of wiggler are discussed. The manufacture technical feasibility is analysed.

Key words synchrotron, wiggler (or undulator), superconductive solenoid.