

超高真空大截面差分系统的设计

薛 松 关志远

摘要: 本文提出了超高真空大截面差分系统的分析计算方法, 并对北京正负电子对撞机同步辐射X射线光刻光束线的差分抽气系统进行了计算与设计。

一、前 言

为了在两个不同的真空区域之间建立一定的压强差, 可以采用多种方法, 如阀门、玻璃观察窗、薄膜等。但是当系统对光的几何和物理的某些性能有要求时, 通常采用差分抽气的方法。差分抽气系统要求差分管道的截面积尽可能小, 以提高差分的效果。但在某些极特殊的情况下, 差分管道的截面积不可能减小, 这时差分管道和差分抽气室的出气量的影响将大大增加(特别是在超高真空的情况下), 成为不可忽视的因素, 这就给差分系统的设计带来一定的困难。在同步辐射X射线光刻光束线的设计中, 就遇到了这种情况。

在同步辐射X射线光刻光束线中, 反射镜面会因同步辐射光与残余油气相互作用引起碳化而产生污染。为了减小污染, 反射镜箱必须与贮存环、前端区一样为超高真空 (5×10^{-10} Torr), 而光刻室则要求1/3 bar的氦气压。在光刻室前设有 $18\mu\text{m}$ 的玻窗以隔离光刻室和高真空传输管道 (1×10^{-6} Torr)。为满足光学系统和光束线的使用要求, 在超高真空反射镜箱和高真空传输管道之间的压差隔离必须采用大截面差分抽气系统。

本文综合各项影响因素, 对光束线超高真空大截面差分抽气系统进行了分析计算。

二、差分系统的设计与计算

在光束线中, 从光源到反射镜中心的距离为13.5m, 从反射镜中心到曝光室掩膜的距离为19.5m, 照射到掩膜上的光斑扫描区域为 $50 \times 50\text{mm}^2$, 反射镜箱的静态极限压强为 5×10^{-10} Torr, 传输管道的静态极限压强约为 1×10^{-6} Torr。

我们设计的差分系统如图1所示。

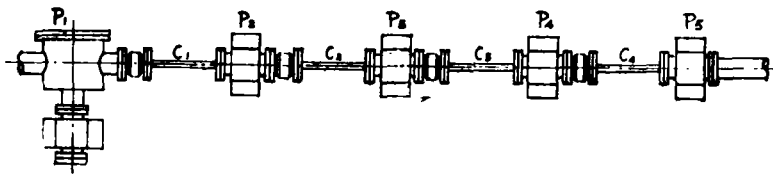


图1 同步辐射X射线光刻光束线差分系统

由光学设计给出的各段差分管道的截面（如图2）
尺寸分别为500mm。

a (mm)	99	96	91	91
b (mm)	15.5	17	19	21

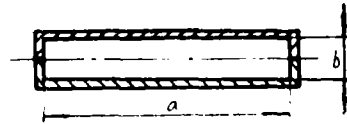


图2 差分管道截面形状、尺寸

现对该差分系统计算如下：

对于一般的差分系统，截面较小、流导较小、出气量可忽略不计，通常采用公式：

$$p' = p \frac{c}{s+c} \quad (1)$$

进行计算。

- p' ——差分后的压力 [Torr]；
- p ——差分前的压力 [Torr]；
- c ——差分管道的流导 [L/s]
- s ——泵的有效抽速 [L/s]。

但对于本系统，差分管道的截面积很大，材料的出气量必须加以考虑。而不能简单地用公式（1）进行计算。

如图3所示，设各级差分管道的气载全部流向真空度较高一侧。由气体流量方程，得：

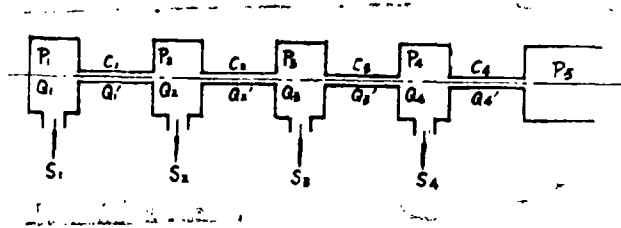


图3 差分系统结构简图

$$(p_5 - p_4)c_4 + Q_4 + Q_4' - (p_4 - p_3)c_3 = p_4 s_4 \quad (2)$$

$$(p_4 - p_3)c_3 + Q_3 + Q_3' - (p_3 - p_2)c_2 = p_3 s_3 \quad (3)$$

$$(p_3 - p_2)c_2 + Q_2 + Q_2' - (p_2 - p_1)c_1 = p_2 s_2 \quad (4)$$

$$(p_2 - p_1)c_1 + Q_1 + Q_1' = p_1 s_1 \quad (5)$$

式中： p_1, p_2, p_3, p_4 ——各差分抽气室的压力 [Torr]；

Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 ——各级差分抽气室的出气量 [Torr·L/s]；

Q_1', Q_2', Q_3', Q_4' ——各差分管道的出气量 [Torr·L/s]；

c_1, c_2, c_3, c_4 ——各差分管道的流导 [L/s]；

s_1, s_2, s_3, s_4 ——各差分抽气室泵的有效抽速 [L/s]；

p_5 ——差分前的压力 [Torr]。

整理后，得：

$$p_4 = \frac{p_5 c_4 + Q_4 + Q_4' + p_5 c_3}{s_4 + c_4 + c_3} \quad (6)$$

$$p_3 = \frac{p_4 c_3 + Q_3 + Q_3' + p_2 c_2}{s_3 + c_3 + c_2} \quad (7)$$

$$p_2 = \frac{p_3 c_2 + Q_2 + Q_2' + p_1 c_1}{s_2 + c_2 + c_1} \quad (8)$$

$$p_1 = \frac{p_2 c_1 + Q_1 + Q_1'}{s_1 + c_1} \quad (9)$$

将公式 (6)、(7)、(8)、(9) 与公式 (1) 相比较可以发现公式 (1) 中忽略了分管道和差分抽气室的放气量, 同时也忽略了下一级的差分抽气作用, 故当真空度较高和截面较大时就显得非常粗略。

在进行本系统的具体设计计算时, 考虑到 $p_3 c_3 \ll p_5 c_4$ 、 $p_2 c_2 \ll p_4 c_3$ 、 $p_1 c_1 \ll p_3 c_2$, 又由于采用了国内某厂专门研制的穿心式三极溅射离子泵, Q_2 、 Q_3 、 Q_4 均为零, 故公式 (6)、(7)、(8)、(9) 可简化为:

$$p_4 = \frac{p_5 c_4 + Q_4'}{s_4 + c_4 + c_3} \quad (10)$$

$$p_3 = \frac{p_4 c_3 + Q_3'}{s_3 + c_3 + c_2} \quad (11)$$

$$p_2 = \frac{p_3 c_2 + Q_2'}{s_2 + c_2 + c_1} \quad (12)$$

$$p_1 = \frac{p_2 c_1 + Q_1' + Q_1}{s_1 + c_1} \quad (13)$$

由公式:

$$c = 30.9k \frac{a^2 b^2}{(a+b)L} \quad (\text{对 } 20^\circ\text{C 空气}) \quad (14)$$

其中:

$$k = \frac{3}{8} \frac{1+r}{r^2} \left\{ r \ln(r + \sqrt{1+r^2}) + r^2 \ln \frac{1 + \sqrt{1+r^2}}{r} + \frac{1}{3} [1 + r^3 - \sqrt{(1+r^2)^3}] \right\}$$

$$r = \frac{b}{a}$$

得:

$$c_1 = 17.08 \text{ L/s}$$

$$c_2 = 19.17 \text{ L/s}$$

$$c_3 = 22.47 \text{ L/s}$$

$$c_4 = 25.55 \text{ L/s}$$

分管道及反射镜箱采用不锈钢板材 0 Cr18Ni 9 焊接而成, 经过电解抛光、化学清洗、加热烘烤的超高真空处理工艺后, 出气率为 $10^{-12} \sim 10^{-14} \text{ Torr} \cdot \text{L/s} \cdot \text{cm}^2$ 。计算时取 $q = 1 \times 10^{-12} \text{ Torr} \cdot \text{L/s} \cdot \text{cm}^2$ 。反射镜 ($240 \times 110 \text{ mm}^2$) 经加热烘烤 200°C , 其出气率取 $q' = 1 \times 10^{-10} \text{ Torr} \cdot \text{L/s} \cdot \text{cm}^2$ 。

算得:

$$Q_1 = 3.20 \times 10^{-8} \text{ Torr} \cdot \text{L/s}$$

$$Q_1' = 2.30 \times 10^{-10} \text{ Torr} \cdot \text{L/s}$$

$$Q_2' = 2.26 \times 10^{-10} \text{Torr} \cdot \text{L/s}$$

$$Q_3' = 2.26 \times 10^{-10} \text{Torr} \cdot \text{L/s}$$

$$Q_4' = 2.24 \times 10^{-10} \text{Torr} \cdot \text{L/s}$$

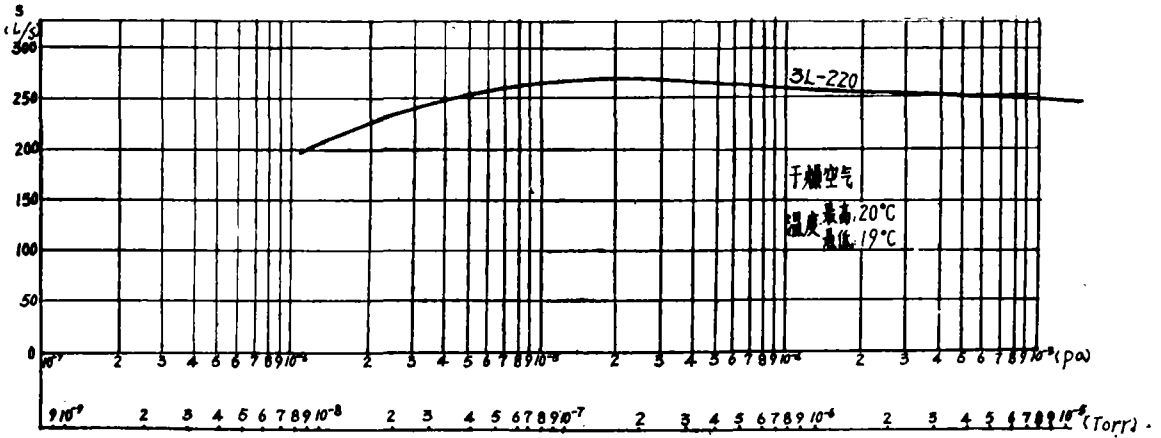


图4 3L-220溅射离子泵抽气曲线

对应不同的真空度，离子泵的抽速也将发生变化，由泵的抽速曲线（如图4），可得不同压力时离子泵的抽气速率。当在 10^{-10} Torr范围内时，真空室放出的气体主要是氢，特别是很好去气以后，百分之九十九的残余气体变成为氢，离子泵对氢的抽速为对空气抽速的2.5~3倍。

最后计算出差分后的压强为：

$$p_4 = 8.03 \times 10^{-8} \text{Torr}$$

$$p_3 = 7.63 \times 10^{-9} \text{Torr}$$

$$p_2 = 1.26 \times 10^{-9} \text{Torr}$$

$$p_1 = 4.59 \times 10^{-10} \text{Torr}$$

p_1 已满足设计要求。

三、计算方法比较

在上述的计算过程中采用了简化的方法，下面再与精确计算的结果进行比较：

将（2）、（3）、（4）、（5）整理得：

$$(s_1 + c_1) p_1 - c_1 p_2 = Q_1 + Q_1'$$

$$-c_1 p_1 + (s_2 + c_2 + c_1) p_2 - c_2 p_3 = Q_2 + Q_2'$$

$$-c_2 p_2 + (s_3 + c_3 + c_2) p_3 - c_3 p_4 = Q_3 + Q_3'$$

$$-c_3 p_3 + (s_4 + c_4 + c_3) p_4 = Q_4 + Q_4'$$

用矩阵解此非齐次线性方程组，即：

$$\begin{pmatrix} s_1 + c_1 & -c_1 & 0 & 0 \\ -c_1 & s_2 + c_2 + c_1 & -c_2 & 0 \\ 0 & -c_2 & s_3 + c_3 + c_2 & -c_3 \\ 0 & 0 & -c_3 & s_4 + c_4 + c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} Q_1 + Q_1' \\ Q_2 + Q_2' \\ Q_3 + Q_3' \\ Q_4 + Q_4' + c_4 p_5 \end{pmatrix} \quad (15)$$

经矩阵变换并将数据代入，最后解得：

$$p_4 = 8.00 \times 10^{-8} \text{Torr}$$

$$p_3 = 7.50 \times 10^{-9} \text{Torr}$$

$$p_2 = 1.25 \times 10^{-10} \text{Torr}$$

$$p_1 = 4.58 \times 10^{-10} \text{Torr}$$

与简化后所得的结果几乎完全相同，用公式 (10)、(11)、(12)、(13) 所得结果的相对误差为 0.22%。

如果用公式 (1) 计算，则可得 $p_1 = 1.82 \times 10^{-10} \text{Torr}$ ，其相对误差为 60.18%。

四、实验结果

本光束线现场安装实验调试后，当高真空传输管道真空度为 10^{-6}Torr 时，超高真空系统在无光照时（即静态条件下）的真空度仍保持为 $4.7 \times 10^{-10} \text{Torr} \sim 7 \times 10^{-10} \text{Torr}$ ，当系统通光进行工作时真空度为 $5 \times 10^{-10} \text{Torr} \sim 7 \times 10^{-9} \text{Torr}$ 。当高真空传输管道为 10^{-6}Torr 时，超高真空区仍保持好的 10^{-10}Torr 。该光束线目前已通过国家验收。

五、结论

在大截面的差分抽气系统中，其前几级在真空度较低时，差分管道和差分抽气室的出气量对系统的差分效果没有大的影响。当系统进入超高真空后，出气量与管道中气体的流量相比几乎相当，这时如果忽略系统出气量的影响，就会使计算结果产生很大误差，因此在计算时必须对系统的出气量予以充分的考虑。本文所提出的分析计算方法，有助于超高真空大截面差分系统的设计应用，并已被实践所证明。

参 考 文 献

- [1] 刘玉魁,《真空系统设计原理》,新时代出版社,1988。
- [2] John F. O' Hanlon, A User's Guide to Vacuum Technology, John Wiley & Sons, Inc.,1980
- [3] 张国孝,真空,1980. 1。
- [4] 骆定祚,《实用真空技术》,湖南科技出版社,1983。
- [5] 穆永阁译,《辐射物理装置中的超高真空技术》,原子能出版社,1984。

Design of the UHV Large Cross Section Differential Pumping System

Xue Song Guan Zhiyuan

Abstract

This paper presents a method of analysis and calculation for the UHV large section differential pumping system. A differential pumping system for the SR X-ray lithography beamline of BEPC (Beijing Electron Positron Collider) is calculated and designed.