

连续波模式下超导加速器束流负载分析研究

鲁向阳, 赵夔, 向蓉, 张保澄, 陈佳洱

(北京大学重离子物理研究所, 北京 100871)

摘要: 本工作推导了超导加速器在连续波模式时, 在点电荷近似条件下, 相对论束流负载与腔的相互作用过程的解析表达。同时对北京大学超导加速器平台(PKU-SCAF)的束流负载设计进行了初步分析。计算结果表明, 当主加速器馈入功率为 10 kW 时, 最佳束流负载为 1.5 mA, 此时电子增能为 6.6 MeV, 因子为 4.5×10^3 。

关键词: 超导加速器; 连续波; 腔束相互作用

中图分类号: TL503

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2003)05-0385-04

Research on the Beam Loading in the CW Superconducting Accelerator

LU Xiang-yang, ZHAO Kui, XIANG Rong, ZHANG Bao-cheng, CHEN Jia-er

(RF Superconducting Accelerator Laboratory, Institute of Heavy Ion Physics,

Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The superconducting(SC) accelerator has high quality factor Q , and the decay time of the field excited by beam is much longer than that in normal conducting cavity. Thus, beam-induced field has far consequences for power dissipation and beam stability. In the paper, this interaction process is analyzed considering a point charge moving on axis through a cavity. Based on it, the beam loading in PKU-SCAF has been researched. With the 10 kW input power, the optimal average current in the 9-cell SC cavity of PKU-SCAF is 1.5 mA, accelerating voltage is 6.6 MV, and factor is 4.5×10^3 .

Key words: superconducting accelerator; continuous wave; interaction between the cavity and the beam

射频超导加速器目前已经成为加速器技术领域的一个重要发展方向。与室温加速器不同,超导加速器的突出优点之一是具有极低的射频损耗,馈入加速腔的射频功率基本上可以全部转变成束流功率,大大降低了对射频功率源的要求。这对于大型加速器工程尤为重要。

因为具有极低的射频损耗,射频超导加速器可在极高的加速梯度条件下实现连续波模式工作,有利于提供高平均功率束流。

另一方面,极低的射频损耗使得加速腔内的电场时间常数增大,通常比室温加速腔高 3 个数量级左右,达到 ms 量级,在这种情况下,一

收稿日期:2002-12-11;修回日期:2003-02-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(19985001,10075006)

作者简介:鲁向阳(1963—),男,四川成都人,副教授,加速器物理专业

方面功率源驱动腔内电场的建立时间较长,另一方面由束流脉冲在腔内激励出的电场衰减得较慢,从而表现出特殊的腔束相互作用关系。这是研究与建立射频超导加速器装置时需要认真细致考虑的问题。

北京大学重离子物理研究所射频超导实验室在研制 DC-SC 光阴极注入器的基础上,进一步开展北京大学超导加速器平台(PKU-SCAF)^[1]的研发工作,目的是为后续的应用研究提供高平均流强的电子束流。本工作分析 CW 模式下腔束的相互作用过程和超导加速腔内电场由暂态到稳态的变化过程,并建立射频功率与最佳束流负载之间的对应关系。

1 外部功率源驱动下超导体内的能量关系

由能量守恒定律可知,进腔功率等于腔内能量的变化与腔壁损耗之和,于是有:

$$P_{in} = \frac{dU}{dt} + \frac{0U}{Q_0} \quad (1)$$

其中: P_{in} 为进腔功率; U 为腔内储能; t 为时间; 0 为谐振频率; Q_0 为超导加速器的无载品质因素。

进腔功率与经过定向耦合器向腔传输的功率 P_f 的关系为:

$$P_{in} = \sqrt{\frac{4P_f 0U}{Q_e}} - \frac{0U}{Q_e} \quad (2)$$

其中: Q_e 为“外部”品质因素。

腔内能量变化的微分方程为:

$$\frac{d\sqrt{U}}{dt} = \frac{1}{2L} \left(\sqrt{U_0} - \sqrt{U} \right) \quad (3)$$

$$U_0 = \frac{4L P_f}{Q_e} \quad (4)$$

其中: U_0 为无束载时超导体内的稳态电场储能; L 为腔内储能的衰减时间常数, $L = Q_L / 0^{[2]}$, Q_L 为有载品质因素。

2 无束载时超导体内的稳态电场

由式(3)可得到在谐振情况下无束载时超导体内的稳态电场储能为:

$$U_0 = \frac{4}{(1 +)^2} \frac{Q_0}{P_f} \quad (5)$$

考虑到有:

$$R_a = \frac{V_c^2}{P_c} \quad (6)$$

$$Q_0 = \frac{0U}{P_c}$$

可得到稳态时腔内电压为:

$$V_0 = \frac{2\sqrt{}}{1 + } \sqrt{R_a P_f} \quad (7)$$

式(5)~(7)中: 为功率匹配因子; R_a 为腔的分路阻抗; V_c 为腔内电压; P_c 为腔壁上的损耗功率。

3 有束载时超导体内的电场

脉冲束团进入超导体后会使得超导体内的电场强度发生改变。

假定进入超导腔的电子束近似于光速。当脉冲宽度很小时,脉冲束团可近似为点电荷,此点电荷在腔中激励出来的电场电压可表示为:

$$V_q = \frac{nR_a}{2Q_0} q \exp(i n t) \quad (8)$$

其中: n 为腔的 n 阶单极模的谐振频率; q 为束团电荷量^[2,3]。

假定束团在腔内激励出的高阶模被很好地吸收,于是,腔内的电压为功率源激励的电压与束团激励的基模电压的矢量合成。为简单起见,只讨论同步谐振的情况,那么,式(8)中 V_q 的 $\exp(i 0 t)$ 在以下分析中不必考虑。

当束团进入超导体,会使腔内电压产生一幅度为 $V_q = \frac{0R_a}{2Q_0} q$ 的压降。束团离腔后,经过

外部功率源的能量补充,腔内电压将以时间常数 L 增加,令束团之间的时间间隔为 T_b 。显而易见,当 $T_b \gg L$ 时,外部功率源有足够的时间给腔补充能量,这时,腔的稳态电压为 V_0 ,加速电压 $V_{acc} = V_0 - V_q$ 。当 $T_b < L$ 时,外部功率源来不及给腔补充达到 V_0 所需的能量,因此,腔内电压随着束团数目的增加而递减。另一方面,随着腔内电压的降低,腔的壁耗也在降低,于是,当腔内电压降低到一定程度时,外部功率源在 T_b 时间内提供的能量可补偿束团获得的能量及壁耗,从而达到新的稳定工作状态。

下面对腔内电压的暂态过程进行分析。

在 t_0 时刻以前,腔在外功率源的激励下,电场达到稳态,此时的腔内电压为 V_0 。在 t_0 时刻,第 1 个束团进入,腔内电压跃变为 $V_0 - V_q$,

自 t_0 时刻起这一电压随 V_q 的衰减以时间常数 L 指数上升,稳态为 V_0 。当 $t = T_b$ 时,这一上升过程结束,于是有:

$$V_1 = V_q(1 - e^{-T_b/L}) + V_0 - V_q$$

在 $t = T_b$ 时,第2个束团进入,腔内电压越变为 $V_1 - V_q, \dots$,于是,可得到以下关系:

$$V_2 = V_q(1 - e^{-T_b/L})(2 + e^{-T_b/L}) + V_0 - 2V_q$$

...

$$V_n = V_q(1 - e^{-T_b/L})[n + (n - 1)e^{-T_b/L} +$$

$$\dots + e^{-(n-1)T_b/L}] + V_0 - nV_q =$$

$$V_0 - \frac{(1 - e^{-nT_b/L})e^{-T_b/L}}{1 - e^{-T_b/L}} V_q \quad (9)$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时,腔内电压达到稳态。对应于这一稳态,可得到腔内的电压峰值为:

$$V_{ST} = V_0 - \frac{e^{-T_b/L}}{1 - e^{-T_b/L}} V_q \quad (10)$$

此时的加速电压为:

$$V_{acc} = V_{ST} - V_q = V_0 - \frac{1}{1 - e^{-T_b/L}} V_q \quad (11)$$

图1示出腔与束流相互作用的暂态过程。考虑到 V_q 可改写为:

$$V_q = \frac{R_a T_b}{(1 + \dots)_L} I_0 \quad (12)$$

其中: $I_0 = q/T_b$ 为束流的平均流强。

于是,式(10)可改写为:

$$V_{acc} = \frac{2\sqrt{\dots}}{1 + \dots} \sqrt{R_a P_f} - \frac{1}{1 - e^{-T_b/L}} \frac{R_a T_b}{(1 + \dots)_L} I_0 \quad (13)$$

由于 $T_b \ll L$,式(9)和(12)可简化为:

$$V_{ST} = \frac{2\sqrt{\dots}}{1 + \dots} \sqrt{R_a P_f} -$$

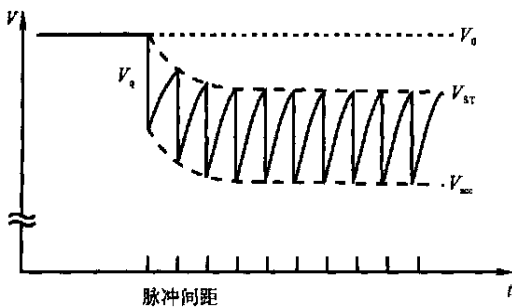


图1 腔与束流相互作用的暂态过程
Fig. 1 Temporary interaction between the cavity and the beam

$$(1 - \frac{T_b}{L}) \frac{R_a}{1 + \dots} I_0 \quad (14)$$

$$V_{acc} = \frac{2\sqrt{\dots}}{1 + \dots} \sqrt{R_a P_f} - \frac{R_a}{1 + \dots} I_0 \quad (15)$$

式(14)的结果与采用集总参数等效电路模型得到的结果是一致的,说明腔内电压和加速电压随着束流负载的增加而线性降低。在外部功率源一定的情况下,加速电压与束流负载有关,与束团脉冲的重复频率无关。比较式(14)、(15)可见:在束流负载确定的情况下,束流脉冲的重复频率越高,峰值电压与加速电压的差别越小。

4 功率匹配因子

功率匹配因子是射频加速器的重要工作参数。对于一确定的谐振腔,在给定功率和束流负载情况下,功率匹配因子是确定的。

在匹配条件(零反射)下,有:

$$= 1 + \frac{P_b}{P_c}$$

式中: P_b 为束流带走的功率。

由于 $P_b = V_c I_0$, $P_c = \frac{V_c^2}{R_a}$,则可得到:

$$= 1 + \frac{R_a I_0}{V_c} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15),得:

$$V_c = \frac{\sqrt{(R_a I_0)^2 + 4 R_a P_f} - R_a I_0}{2} \quad (17)$$

在忽略高阶项的情况下,上式可简化为:

$$V_c = \frac{P_f}{I_0} \quad (18)$$

从而得到

$$= 1 + \frac{R_a I_0^2}{P_f} \quad (19)$$

式(19)表明,对于一超导加速腔,在达到匹配时,即在定向耦合器中零反射的情况下,系统的功率匹配因子近似看作束流负载(平均流强)在腔的分路阻抗上的“功耗”与进腔功率之比。式(18)给出了加速电压与进腔功率和束流负载之间的估算关系。

5 PKU-SCAF 的束流负载设计

PKU-SCAF拟采用 TESLA 型的 9-cell 纯钨超导加速腔作为加速器主体,工作在 CW 方式下的速调管为射频功率源。北京大学重离子物

理研究所将与 DESY 合作,以 TESLA 的 9-cell 纯铌超导加速腔技术为基础,为 PKU-SCAF 研发 9-cell 纯铌超导加速腔。

根据 TESLA 的技术报告,9-cell 纯铌超导加速腔(图 2)的主要参数如下:谐振频率为 1 300 MHz,几何分路阻抗 $R/Q = 1.036 \text{ } \Omega/\text{m}$,加速梯度为 23.4 MV/m,无载品质因素 $Q_0 > 10^{10}$,当外部品质因素 $Q_{\text{ext}} = 2.5 \times 10^6$ 时,腔的带宽 FWHM 为 520 Hz。

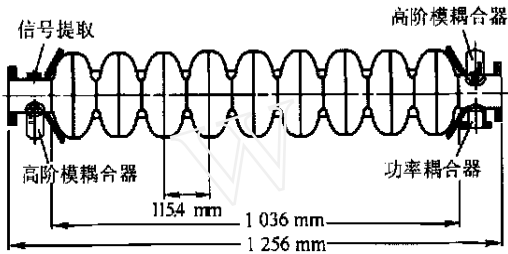


图 2 9-cell 超导加速腔示意图

Fig. 2 Schematic view of TESLA 9-cell SC cavity

PKU-SCAF 以自行研发的 DC-SC 光阴极注入器为主加速器的注入器。根据前面的分析研究,为了获得较高的射频功率利用率,并根据现有的设备条件,选择了较高的激光脉冲重复频率来驱动光阴极电子枪。激光脉冲的重复频率为 81.25 MHz,此时, T_b/L 约为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 量级。从式(14)和(15)可以看到,加速腔的稳态电压与加速电压的差很小。考虑到 Q_0/Q_{ext} ,以及 $Q_0 \gg Q_{\text{ext}}$,则式(15)可简化为:

$$V_{\text{acc}} = 2 \sqrt{\frac{R}{Q} Q_{\text{ext}} P_f} - \frac{R}{Q} Q_{\text{ext}} I_0 \quad (20)$$

图 3 示出了根据式(16)对 9-cell 腔束流负载进行计算的结果 ($R/Q = 1000$)。

从图 3 可以看到,在不同 Q_{ext} 的情况下, $V_{\text{acc}} - I_0$ 曲线的斜率不同,但它们聚集在一定的 I_0 附近。在设计束流负载时,可选择这个 I_0 作为设计值,其意义在于,当束流负载有一定波动时, V_{acc} 变化不大,从而可获得较小的束流能散度。

PKU-SCAF 工作在 CW 模式。如果给定馈入超导加速腔的功率为 10 kW,上面的计算结果表明,最佳的束流负载应该在 1.5 mA 左

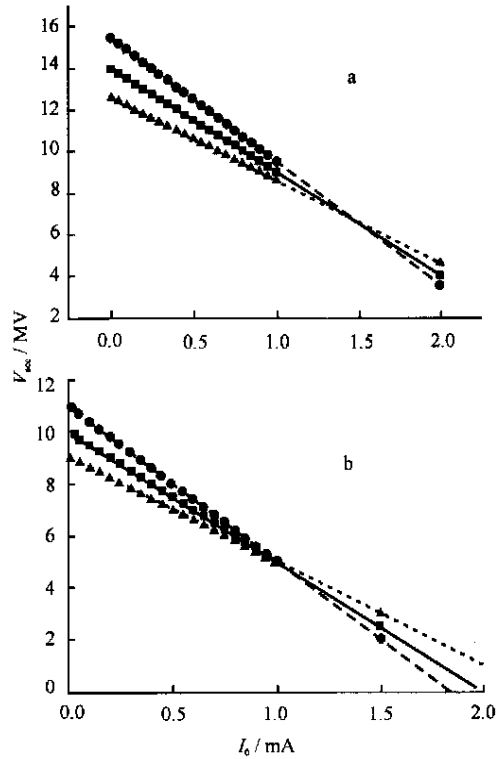


图 3 加速电压与束流负载及 Q_{ext} 的关系

Fig. 3 Accelerating voltage via the beam loading and Q_{ext}

a——给定功率 $P_f = 10 \text{ kW}$; b——给定功率 $P_f = 5 \text{ kW}$
 —— $Q_{\text{ext}} = 6 \times 10^6$; —— $Q_{\text{ext}} = 5 \times 10^6$;
 —— $Q_{\text{ext}} = 4 \times 10^6$

右。由前面的分析可以得到,在这样的条件下,加速电压约为 6.6 MV, 4.5×10^3 ($Q_0 = 2 \times 10^{10}$), $Q_{\text{ext}} = 4.4 \times 10^6$ 。

参考文献:

[1] Zhao Kui, Quan Shengwen, Hao Jiankui, et al. Peking University Superconducting Accelerator Facility for Free Electron Laser[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 2002, 483:125~128.
 [2] Padamsee H, Knobloch J, Hays T. RF Superconductivity for Accelerators[M]. New York: John Wiley & Sons, 1998. 147, 333.
 [3] Richard F, Schneider JR, Trines D, et al. TESLA Technical Design Report [R]. Germany: Deutsches Elektronen synchrotron DESY, 2001.