

高能加速器中的低温超导技术

李家才

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

高能物理与低温物理本是两个独立的研究领域,在各自的能量区域里并没有重叠.然而低温制冷和低温超导技术在高能物理和高能加速器中,显示了相当高的应用价值.70年代末和80年代在加速器领域最重要的突破之一,就是已经成功地把超导技术应用在加速器中.各种各样的低温超导设备在加速器中的应用,降低了加速器的造价,产生了相当大的经济价值,推动了高能加速器的研究与发展.

七八十年代建造加速器,在提高能量方面的主要限制是常规磁铁的能量消耗和容纳磁铁的大型地下隧道的造价.如果常规的磁铁改用超导磁铁,不但大大缩小了隧道尺寸,而且磁铁的功率要求也降低了,从而在加速器的造价上获得了相当大的利益.

90年代计划中的大型环形对撞机都是超导型的,如美国原计划建造的超导超级对撞机(SSC)和欧洲建设中的大型强子对撞机(LHC),都普遍采用了低温超导技术.世界上大型粒子加速器装置使用超导技术现状如表1.

高能加速器中的低温超导设备除超导磁铁外,超导高频腔(产生高梯度的高频电场,对粒子束进行加速)的应用也非常普遍.CERN的大型正

负电子对撞机(LEP)提高束流能量(91GeV到172GeV)使用了176个超导高频腔.去年夏天,LEP2(束流能量提高后改称LEP2)在161GeV能量上运行期间,物

理学家在他们的四大实验装置上,首次品尝到了W粒子的滋味.在未来的计划中,LEP2上的120个普通腔中的34个将被32个超导腔所取代,使得单束束流能量将达到94GeV.

超导高频腔的高加速梯度和高负载能力,尤其对加速连续束流更具吸引力.如连续电子束加速装置(CEBAF)使用的超导高频腔,每米加速电场为1.3MV,电子能量为4GeV,束流占空系数100%.利用这台高能强流连续电子束加速器装置,能以外科手术般的准确性探测核内夸克的短程特性.

超导腔技术如此受到加速器专家们的青睐,一个潜在的优点是一个超导腔系统能提供相当于几个常规腔系统的电压,这一点很重要,因为一些机器最严重的束流不稳定性主要是由高频腔的高次模阻抗引起.减少腔的数量可以相对降低不稳定性增长率,反馈系统的功率要求也将下降.就单腔而言,它有更高的 Q_0 值,更小的 R/Q ,由于腔体上束流通道孔径能做得较大,所以不仅仅有更简单的几何形状,同时也大大降低了大多数高次模 R/Q .另一个主要原因,超导腔的高频损耗非常低,相对铜腔来说其损耗因子要降低 10^3 .尤其在长脉冲(毫秒)或高填充因子的机器上,超导腔更受到青睐.

为了满足物理和应用研究对先进设备的要求,加速器的研究和发展在技术上不断取得突破,80年代最重要的突破之一就是成功地把超导材料应用在加速器中.射频超导已是一门成熟的技术.它被大量地应用于电子加速以及重离子的聚束和加速.

90年代,在 高能段的较低能区上建造的各种粒子工厂和先进光源也都不同程度地利用了超导磁铁和超导腔技术.新近设计建造的这类加速器包括日本KEK B粒子工厂,合肥光源,上海同步辐射装置,以及设计中的北京 τ -c粒子工厂等,都在不同规模上使用了超导技术.

表1 国际上大型超导加速器主要参数

加速器名称	粒子类型	长度(km)	磁场(T)	能量(TeV)
TEVATRON	p pp	6.3	4.4	0.9 $2 \times 1.00^{1)}$
HERA	e^- p	6.4	0.18/4.7	0.03/0.82
UNK	p pp	20.0	5.0	3.0 $2 \times 3.00^{2)}$
SSC	pp	86.0	6.6	2×20.0
LHC	pp	26.7	10.0	2×7.7
RHIC	heavy ions	3.8	3.45	
			电场(MV/m)	
CEBAF	e^-	1.7	1.3	0.004
LEP200	$e^- e^+$	26.7	5.0	2×0.1
TESLA ³⁾	$e^- e^+$	28.0	25.0	2×0.25

1) 更低运行温度下的升级, 2) 2×3 TeV双环设计, 3) 早期研究阶段