

# 国内外加速器低温系统近况

李少鹏<sup>1)</sup> 葛锐 王国平

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

**摘要** 超导腔和超导磁体是现代加速器的重要组成部分,伴随着加速器技术的发展和更高束流能量和亮度的要求,低温超导技术在加速器中得到了广泛的应用.本文在对国内外几个典型的加速器上采用的低温超导技术进行了调研的基础上,介绍了国内外加速器低温系统的近况.

**关键词** CERN DESY KEK BNL 低温系统 超导腔 超导磁体

## 1 引言

自从1908年卡麦林·昂纳斯首次将氢气液化和1911年在研究各种材料在液氮温度下的物理性质时发现了超导电性以来,低温与超导技术开始得到了发展.19世纪中期随着强磁场超导材料NbTi和Nb<sub>3</sub>Sn的发现,强磁场超导磁体开始应用于各个领域.几乎在同一个时期由于高频超导电性的发现,人们建造了第一台超导加速器.从此低温超导技术开始在高能物理加速器上得到发展.经过近半个世纪低温与超导技术的进步,现代加速器由于更高束流能量和更高亮度的要求,加速器的建造大都采用了低温与超导技术.我国在加速器低温超导技术上虽然起步较晚,但在近几年新建和改建的加速器上也采用了低温与超导技术.本文简单介绍了国外几个典型的加速器如西欧核子中心(CERN)的LEP和LHC、德国DESY实验室的HERA和TESLA、日本KEK的TRISTAN和KEKB以及美国BNL的RHIC加速器低温系统发展状况,同时对国内中国科学院高能物理研究所(IHEP)的北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPC II)的低温系统和上海应用物理所的上海光源(SSRF)低温系统也进行了简要介绍.

## 2 国外加速器低温系统近况

### 2.1 CERN低温系统从LEP和LHC<sup>[1, 2]</sup>

欧洲核子中心CERN的加速器是世界上最大的加速器,大型正负电子对撞机LEP在1981年立项初期由于受当时加速器低温与超导技术条件的限制,其设备主要采用了常温技术,但同时LEP加速器设计提

出了27km主环将来安装超导腔和期望达到125GeV的目标,1988年LEP加速器投入运行,束流能量达到45GeV.1989年提出了LEP2安装192个超导腔和束流能量提高到87GeV的二期目标.1979年CERN开始了针对LEP加速器的超导腔技术研究,1992年8个超导腔投入LEP运行,与此同时建立了一套6kW/4.5K氦低温制冷系统.LEP加速器从1992年到1995年随着超导腔数目的不断增加,低温制冷能力也不断提高,到1995年分别在LEP的2, 6, 8号实验站新建和改建了3套12kW/4.5K低温制冷系统.1996年提出了安装272个超导腔附加原来的52个常温腔能量达到96GeV的目标,到1998年在2, 4, 6, 8号实验站建立了4套12kW/4.5K低温制冷系统.到2000年LEP结束运行,共安装了288个超导腔能量达到了104GeV,此时低温系统已升级到4×18kW/4.5K制冷能力的低温系统.如图1为LEP2低温系统布置图.

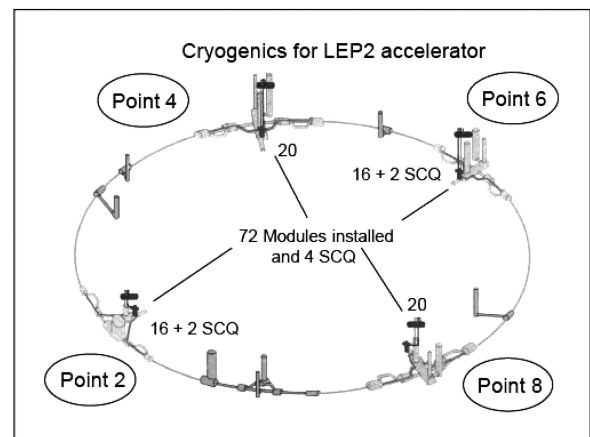


图1 LEP2低温系统布置图

2008 - 01 - 07 收稿

1) E-mail: lisp@ihep.ac.cn

1994年CERN决定在LEP上建造7TeV大型强子对撞机,由于束流能量的更大提升和LEP环的限制以及低温超导技术的提高和发展,全环27km大规模使用超导磁体是LHC项目束流能量提高的必经之路,全环超导磁体1800台采用1.8K超流氦冷却,并保留全部直线节上的288个超导腔运行,真正按照全环超导的加速器进行建设,束流将得到最大限度的提升.2000年LEP关机腾出隧道开始安装LHC设备,2006年LHC低温系统完成了 $8 \times 18 \text{ kW} / 4.5 \text{ K}$ 及 $8 \times 2.4 \text{ kW} / 1.9 \text{ K}$ 制冷能力的低温系统建设,图2为LEP2到LHC低温系统配置图.

LHC低温系统在每个实验站配置2台 $18 \text{ kW} / 4.5 \text{ K}$ 制冷机及两台 $1.9 \text{ K}$ 冷箱,两台 $18 \text{ kW} / 4.5 \text{ K}$ 制冷机并联,每台制冷机的余量能够互相补充,制冷机余量能够得到最大限度的利用.LHC低温系统总的制冷量达到 $144 \text{ kW} / 4.5 \text{ K}$ ,氦气储量 $1000\text{--}1500 \text{ m}^3$ ,总的液氦量为 $93500 \text{ kg}$ 是目前世界上最大的氦低温制冷系统,2007年LHC低温系统开始降温达到 $1.8 \text{ K}$ ,CERN成为当今世界名符其实的最寒冷的地方.

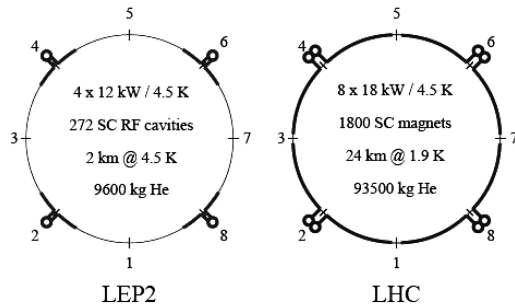


图2 从LEP2到LHC低温系统配置图

## 2.2 日本KEK低温系统从TRISTAN到KEKB<sup>[3,4]</sup>

1986年日本KEK决定在TRISTAN环上安装 $32 \times 5\text{-cell}$ 超导腔,配套开始了超导腔低温系统的建设.1988年 $4 \text{ kW} / 4.4 \text{ K}$  TRISTAN超导腔低温系统建设完成,同年在完成低温系统自身的性能测试后,首次对 $16 \times 5\text{-cell}$ 超导腔进行了降温测试和运行.1989年束流能量达到了 $30.7 \text{ GeV}$ ,同时由于投入另外的 $16 \times 5\text{-cell}$ 超导腔运行, $4 \text{ kW} / 4.4 \text{ K}$ 低温系统通过安装 $80 \text{ K}$ 膨胀机和增加压缩机将制冷能力提高到了 $6.5 \text{ kW} / 4.4 \text{ K}$ ,束流能量达到了 $32 \text{ GeV}$ .1990年TRISTAN低温系统安装了液氮循环系统以达到降低液氮消耗的目的.此外,TRISTAN 3个探测器超导螺线管磁体及4个实验站超导插入四极磁体还分别配置了一套独立的 $250 \text{ W} / 4.4 \text{ K}$ 低温制冷系统.KEKB于1998年建设完成,它抛弃了原多cell超导腔,采用了8个单cell超导阻尼腔运行,其低温系统仍然使用TRISTAN  $6.5 \text{ kW} / 4.4 \text{ K}$ 低温制冷系统只是针对单cell超导腔控

制阀箱及低温输送管路进行了修改.由于KEKB只保留了一个探测器,因此超导磁体只有一个探测器螺线管磁体和一对超导插入极磁体运行,低温系统仍然分别由原来的 $250 \text{ W} / 4.5 \text{ K}$ 低温制冷系统提供冷量.

## 2.3 德国HERA和TESLA低温系统<sup>[5]</sup>

HERA低温系统于1991年投入运行共有3台 $6 \text{ kW} / 4.5 \text{ K}$ 制冷机通过并联组成,Hera全环 $6 \text{ km}$ 共有422台超导二级磁体和224台超导四极磁体以及一套超导高频系统.如图3为Hera低温系统布局图.

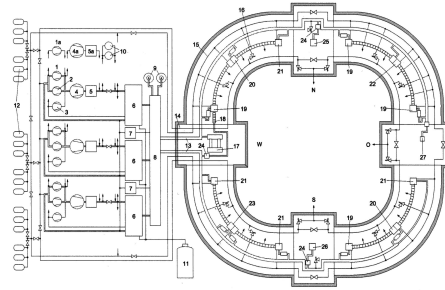


图3 HERA低温系统布局

TESLA超导直线加速器国际合作项目已经完成了9-cell超导腔及低温恒温器等关键设备的研制并在TTF测试设备上进行了束流测试.即将开始建造的X-ray自由电子激光将采用116个 $8 \times 9\text{-cell}$ 超导腔单元,更进一步的目标是 $33 \text{ km}$ 的TESLA直线对撞机,将采用21000个9-cell超导腔和800个超导磁体,同样将需要大规模配置 $2 \text{ K}$ 超流氦低温制冷系统.

## 2.4 美国BNL实验室RHIC低温系统

美国BNL实验室RHIC低温系统于1986年投入运行,总的制冷量为 $24.6 \text{ kW} / 4 \text{ K}$ .如图4为RHIC低温系统氦流动回路.RHIC重离子对撞机共有各种超导二极磁体396台,超导四极磁体492台.全环低温管线 $2750 \text{ m}$ .

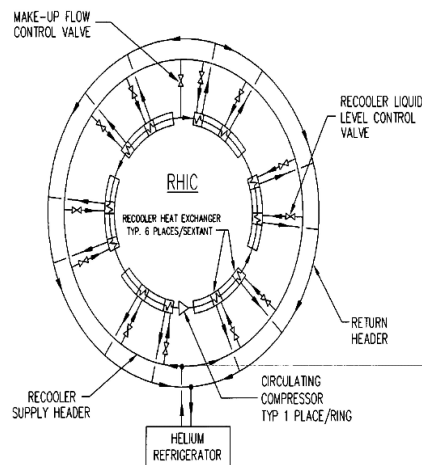


图4 RHIC低温系统冷却方案

### 3 国内加速器低温系统近况

国内加速器低温超导技术近几年发展较快,从原来的技术跟踪和实验室研究到现在较大规模的实际应用迈出了很大的一步.北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPC II)采用了当今世界流行的3种超导设备,即两台单cell超导腔、两台超导对撞区磁体和一台大型探测器超导磁体. BEPC II 低温系统由两台制冷机分别为超导腔和超导磁体提供制冷量,总的制冷能力为1kW/4.5K. BEPC II 超导腔低温系统已于2006年8月建成并投入稳定运行,积累了一年的超导腔低温系

统运行经验. BEPC II 超导磁体低温系统也于2007年6月调试完成并稳定运行提供了全部超导磁体全电流励磁测试和磁场测量. 国内正在建设的上海光源同步辐射加速器也采用了低温超导技术,3个单cell超导腔运行将配置一套600W/4.5K低温制冷系统,目前该低温系统正在建设中.

### 4 结论

经过几十年的发展,低温与超导技术已经比较成熟,在现代加速器中得到了广泛的应用.

#### 参考文献(References)

- 1 Barranco-Luque M et al. Operation of the Cryogenic System for Superconducting Cavities in LEP. CERN LHC/96-10(ACR)
- 2 Claudet S. Design, Construction, Installation and First Commissioning Results of the LHC Cryogenic System Proceedings of EPAC2006, Edinburgh, Scotland Software Product: HEPAK Version 3.40. Horizon Technologies. 25-JANUARY-2007
- 3 Hosoyama K et al. Cryogenic System for Tristan Superconducting RF Cavities. Advances in Cryogenic Engineering, Vol.37, Part A
- 4 Tsuchiya K et al. Helium Cryogenic Systems for the Superconducting Insertion Quadrupole Magnets of the Tristan Storage Ring. Advances in Cryogenic Engineering, Vol.37, Part A
- 5 Wolf S. The Cryogenic System of TESLA. TESLA Collaboration

## Recent Activities of Cryogenic System in Overseas and Domestic Accelerators

LI Shao-Peng<sup>1)</sup> GE Rui WANG Guo-Ping

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

**Abstract** The superconducting RF cavity and superconducting magnet are the key devices in modern accelerators. With the development of accelerator technology and requirement of higher beam energy and luminosity, the cryogenic and superconducting technologies are applied widely in the accelerator construction. Based on the study of several typical accelerators which adopted cryogenic and superconducting technology, this paper introduces the recent activities of cryogenic system in overseas and domestic accelerators.

**Key words** CERN, DESY, KEK, BNL, cryogenic system, superconducting RF cavity, superconducting magnet