

# 中华人民共和国国家标准

GB/T 33655—2017/IEC 61788-14:2010

---

## 超导供电装置 超导装置供电电流 引线特性测试的一般要求

**Superconducting power devices—General requirements for characteristic tests of current leads designed for powering superconducting devices**

(IEC 61788-14:2010 Superconductivity—Part 14: Superconducting power devices—General requirements for characteristic tests of current leads designed for powering superconducting devices, IDT)

2017-05-12 发布

2017-12-01 实施

---

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局  
中国国家标准化管理委员会

发布

## 目 次

前言 .....	III
引言 .....	IV
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 原理 .....	2
5 特性测试项目 .....	2
6 特性测试方法 .....	3
7 报告 .....	8
8 注意事项 .....	8
附录 A (资料性附录) 关于第 1 章~第 8 章的补充说明 .....	9
附录 B (资料性附录) 典型电流引线 .....	10
附录 C (资料性附录) 有助于理解测试方法的解释性图表 .....	16
附录 D (资料性附录) 高温超导组件的测试项目与方法 .....	18
参考文献 .....	20

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准使用翻译法等同采用 IEC 61788-14:2010《超导电性 第 14 部分：超导供电装置 超导装置供电电流引线特性测试的一般要求》。

与本标准中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

——GB/T 13811—2003 电工术语 超导电性 (eqv IEC 60050-815:2000)

——GB/T 311.1—2012 绝缘配合 第 1 部分：定义、原则和规则 (IEC 60071-1:2006, MOD)

——GB/T 4109—2008 交流电压高于 1 000 V 的绝缘套管 (IEC 60137 Ed.6.0, MOD)

本标准由全国超导标准化技术委员会 (SAC/TC 265) 归口。

本标准起草单位：中国科学院电工研究所、天津大学、华北电力大学、中国电力科学研究院、中国科学院等离子体物理研究所。

本标准主要起草人：王秋良、信赢、王银顺、丘明、毕延芳、戴银明、崔春艳、程军胜。

## 引 言

电流引线是当前已经实际应用的超导装置,如 MRI 诊断仪器、NMR 谱仪、单晶生长设备、超导储能系统、粒子加速器(如 Tevatron、HERA、RHIC 和 LHC)、核聚变实验测试装置(如 ToreSupra、TRIAM、LHD、EAST、KSTAR、W7-X、JT-60SA 和 ITER 等)和即将投入实际应用的超导装置(如磁悬浮列车、超导限流器、超导变压器)中必不可少的组成部分。

电流引线的主要功能是为超导装置提供大电流,同时尽量降低其整体热负荷,包括从室温到低温环境的漏热以及电流引线上的焦耳热。为此,使用高温超导体作为电流引线的一部分有助于大幅度降低其整体热负荷。

另一方面,应用于超导装置上的电流引线技术依赖于每一项应用的具体要求、生产商的经验以及技术的积累。由于电流引线只是作为装置的组件使用,很难判断其兼容性、在不同装置间使用的灵活性、便利性以及整体的经济性。这将阻碍超导装置技术的发展及商业应用,值得我们关注。

因此,明确用于超导装置的电流引线的定义,并用一系列通用规则使其一般特性测试方法标准化有利于提升电流引线工业化水平。

# 超导供电装置 超导装置供电电流 引线特性测试的一般要求

## 1 范围

本标准给出了超导装置供电传统电流引线及超导电流引线特性测试的一般要求。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

IEC 60050-815:2000 国际电工术语 超导电性 [International Electrotechnical Vocabulary (IEV)—Part 815:Superconductivity]

IEC 60071-1 绝缘配合 第1部分:定义、原则和规则 (Insulation coordination—Part 1: Definitions, principles and rules)

IEC 60137 交流电压高于1 000 V的绝缘套管 (Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V)

## 3 术语和定义

IEC 60050-815:2000界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

#### 电流引线 current lead

在绝缘条件下把电流引入器件的导体,特别是把电流从室温引入低温时还要有冷却通道。  
[IEV 815-06-47]

### 3.2

#### 常规电流引线 normal conducting current lead

传统电流引线

仅由常规导体组成导电部分的电流引线。

### 3.3

#### 超导电流引线 superconducting current lead

含超导部分的电流引线。

注:超导电流引线包括从室温到某中间温度的常规导体部分,以及从中间温度到低温环境的超导体部分。在本标准中,该超导部分通常由高温超导体制成。

### 3.4

#### 非气冷式电流引线 non-gas cooled type current lead

用传导冷却方法冷却的电流引线。

### 3.5

#### 气冷式电流引线 gas-cooled type current lead

用低温气体冷却的电流引线。

注:在某些情况下,通过气体在引线内部流动,以及在其外表面气体对流的方式来实现气冷。

GB/T 33655—2017/IEC 61788-14:2010

### 3.6

#### 自冷电流引线 self-cooled current lead

蒸汽焓冷却的电流引线

利用电流引线自身热负荷气化的致冷剂来冷却的电流引线。

### 3.7

#### 漏热 heat leakage

无载流时的漏热

在无载流及无焦耳热情况下,电流引线从高温区向低温区传导的热量。

### 3.8

#### 热负荷 heat load

在载流情况下通过电流引线导入低温系统的全部热量。

### 3.9

#### 额定电流热负荷 rated current heat load

在额定载流时的热负荷。

## 4 原理

超导装置供电需通过一些组件来为室温和低温之间提供电气连接,这类组件即称为电流引线。它们处于温度梯度场中,且传输电流至低温环境内,因此是低温容器中最主要的漏热源之一。

电流引线可分为两类:

- 常规电流引线,全部由常规导体组成。它们一般通过冷端与装置的超导母线或电气接头相连。
- 高温超导电流引线,包含有高温超导部分。必须由常规导体部分将电流从室温端传输至高温超导部分的热端,高温超导部分的温度须足够低以确保它在额定电流工作情况下保持超导态,高温超导部分的冷端一般通过超导母线与装置相连。

根据冷却方式,电流引线可以分为气冷和非气冷。同一根电流引线如果分成流体力学上分离的两部分,则这两种冷却方式可分别使用。如果超导装置是低温超导体制成的,一般通过低温超导电缆或导线与电流引线相连。

经过优化的自冷常规电流引线传导至液氦池的热负荷为  $1.1 \text{ W/kA}$ [1]~ $1.2 \text{ W/kA}$  [2]。如果使用高温超导材料,这一数值将大大降低。高温超导电流引线被广泛研究、设计和测试,且已经应用到大型系统中[3][4]。

不同系统电流引线的设计是不同的。材料的选取、冷却方式、几何结构、电气特征以及允许的低温损耗均受施加给整个系统的边界条件的强烈影响。系统在电气、低温及机械方面的技术要求包括:

- 最大工作电流、运行模式、电流变化速率、绝缘电压、电路时间常数、背景磁场;
- 致冷剂的供给条件、致冷剂入口/出口温度和压力、允许热负荷及致冷剂因故障中断后引线安全工作持续时间;
- 可用于集成机械支撑、真空绝热、流体力学及电气互连界面的空间。

注 1: 对自冷式电流引线而言大电流情况下漏热应考虑选取  $1.2 \text{ W/kA}$ 。

注 2: 本章所讨论的典型电流引线可参见附录 B。

## 5 特性测试项目

以下条款描述了电流引线在低温和常温下的性能测试,包括力学、电气及热学性能测试。假设设计电流引线时已考虑到通用性的问题,应用到实际系统中还应根据每个系统自身的约束条件进行优化。

用户可按表 1 中的特性测试项目检测电流引线是否合格,同时判断是否满足各个阶段对测试项目的要求。用户应根据本标准考虑电流引线的边界条件自行选择合适的测试项目。

表 1 电流引线特性测试项目和实施阶段

	特性测试类别	测试项目	特性测试执行阶段		
			研发 <sup>a</sup>	产品 <sup>b</sup>	交接 <sup>c</sup>
1	力学特性	结构检查		是	是
		应力/应变测试	是		
2	热学性能	无载流漏热测试	是	是	
		额定电流热负荷测试	是	是	
3	电气特性	额定载流测试	是	是	
		接触电阻测试	是		
		高电压测试	是	是	
		电压降测试	是	是	
4	流体力学特性	额定流量下压力降测试	是	是	
		密封性测试	是		
5	安全裕度特性	致冷剂故障测试	是	是	
		失超测试	是		
		最大压力测试	是	是	
注:高温超导部分的特性测试项目和方法见附录 D。					
<sup>a</sup> “研发”指电流引线系统的基础研究和产品初试阶段。 <sup>b</sup> “产品”指电流引线产品中试和批量生产阶段。 <sup>c</sup> “交接”指电流引线系统完成现场交货和安装后阶段。					

## 6 特性测试方法

本标准给出推荐的测试方法。用户也可针对特定的应用情况或边界条件选择其他测试方法。

### 6.1 结构检查

#### 6.1.1 目的

检查尺寸、所用材料、结构、装配情况以及被测试系统中容器的绝热性能和密封性。

#### 6.1.2 方法

室温下结构检查包括尺寸、所用材料、结构和装配情况等。

低温下结构检查可通过目视充装有致冷剂和/或连接制冷机的恒温器表面有无结霜来判断。对于使用带有真空绝热层的低温容器,应确保绝热层没有裂缝和/或塌陷等缺陷。

#### 6.1.3 结果

试验结果应与技术要求作比对,并形成完整的报告。

## GB/T 33655—2017/IEC 61788-14:2010

## 6.2 应力/应变测试

## 6.2.1 目的

检测电流引线在室温和低温下机械应力/应变特性。

## 6.2.2 方法

对电流引线在室温及低温下被测系统内的机械应力/应变值进行模拟计算,并且试验时机械应力/应变应被加载至超导体弹性极限范围内的最大值。

注1:最大负荷应该根据安全裕度来确定,一般为设备要求的1.1倍。

注2:测试应重复进行多次,重复次数依据电磁负荷和热负荷条件有所区别。

注3:应特别注意电流引线在由室温降至运行条件过程中内部所产生的应变。

## 6.2.3 结果

试验结果应与技术要求作比对,并形成完整的报告。

## 6.3 热学性能测试

## 6.3.1 无载流漏热测试

## 6.3.1.1 目的

测量未加载电流时的漏热,即零电流、无焦耳热产生时,电流引线从室温端到中间温度段,再从中间温度段到低温端,或者从室温端直接到低温端的热传导。

## 6.3.1.2 方法

漏热的检测方法可以采用液态致冷剂蒸发法、迫流低温气体焓变法或者小型制冷机热传导法,具体取决于电流引线的冷却方式。

## a) 液态致冷剂蒸发法

电流引线安装在一台已知背景漏热量的低温恒温器内。在该低温恒温器里电流引线的冷端用合适的致冷剂冷却,如液氮和/或液氮冷却。在低温恒温器的出口处测量气化的致冷剂流量。电流引线的漏热可以通过分析安装电流引线后致冷剂气化流量的增加量来评估。对于到中间温度段的情况也采用类似测量方法。

## b) 迫流低温气体焓变法

电流引线安装在一台已知背景漏热量的低温恒温器内。温度及质量流可控的迫流冷气体(如超临界氮)用于电流引线的冷端,电流引线的漏热可以通过分析低温气体在电流引线进出口的焓变化来估算。

## c) 小型制冷机热传导法

电流引线安装在一台已知背景漏热量的低温恒温器内。电流引线的冷端与制冷机的冷头相连。电流引线的漏热可以通过分析小型制冷机冷头的热负荷值来估算。

注1:蒸发法中,一部分蒸发的冷却剂作为低温气体仍会留在低温恒温器里。由于低温气体的密度较大,因此在测量低温恒温器出口处气体流量时有必要修正致冷剂的蒸发量。

注2:在研发阶段,电流引线的漏热是通过求解沿引线方向能量平衡方程的数值解估算得到。冷端和热端的温度作为平衡方程的边界值。能量平衡方程的形式取决于电流引线的结构。对于气冷式常导电流引线,能量平衡方程可能包含热传导项、欧姆生热项以及与致冷气体的热交换项。



### 6.3.1.3 结果

试验结果应与技术要求作比对,并形成完整的报告。

### 6.3.2 额定电流热负荷测试

#### 6.3.2.1 目的

测量在额定电流下的热负荷值。

#### 6.3.2.2 方法

参照无载流情况下漏热测试的方法进行(见 6.3.1.2)。

#### 6.3.2.3 结果

试验结果应与技术要求作比对,并形成完整的报告。

### 6.4 额定载流测试

#### 6.4.1 目的

确认电流引线在额定电流和正常工况条件下的性能。

#### 6.4.2 方法

为了与设计值进行比较,应测量电流引线温度分布。测量点应至少包括三个位置,即室温端、中间温度段和低温端。应指出的是室温端的温度受诸如尺寸、母线冷却状态等边界条件的影响。

温升的测量通常采用温度计或电阻法。

在测试前,应该确认如制冷机、致冷剂液位等冷却条件。

电流引线的电流应保持在额定值直到冷却条件处于稳态。

附录 C 中的 C.1 为一个典型的额定载流测试中温度分布示例。

#### 6.4.3 结果

试验结果应与技术要求作比对,并形成完整的报告。

### 6.5 接触电阻测试

#### 6.5.1 目的

测量中间温度段高温超导部分和常规导体部分之间的接触电阻。如果需要,也应测量在低温端高温超导部分和低温超导部分之间的接触电阻。

#### 6.5.2 方法

采用“四引线法”来测量被测区域总的接触电阻。源自被测区域以外的其他部分的额外电阻应从测试结果中扣除。

注:对于载流能力小于几千安培的电流引线,电流二维分布对接触电阻的影响可以忽略。但对于较大载流能力的电流引线,有必要考虑在测试的连接区域电流二维分布的问题,通过仿真或分析对测量结果进行修正。因此,获得接触电阻的准确值是非常困难的。即使在这种情况下,引入接头中的电流二维分布的分析或仿真来修正测量结果,证实接触电阻至少低于容许值是必要的。

## GB/T 33655—2017/IEC 61788-14:2010

### 6.5.3 结果

试验结果应与技术要求作比对,并形成完整的报告。

## 6.6 电压降测试

### 6.6.1 目的

确认电流引线在额定载流下电压降与设计值一致。

### 6.6.2 方法

冷却条件应与额定载流测试相一致。

电压降测试应采用在室温端和低温端之间布置电位引线的方法。

### 6.6.3 结果

试验结果应与技术要求作比对,并形成完整的报告。

## 6.7 高电压测试

### 6.7.1 目的

确认电流引线的电压特性无异常,以免对其绝缘性能产生影响。

### 6.7.2 方法

测试之前,应使用绝缘电阻测试仪确定电流引线绝缘没有问题。在电流引线上施加一给定的试验电压,持续加载 1 min 以上。此试验电压必须依据电流引线所在的系统要求确定。

对于应用于交流设备的电流引线,试验应遵循此目标设备的耐压技术要求;具体参照 IEC 60071-1 和 IEC 60137。

注:为了保证高可靠性可能需要帕邢(Paschen)密封。帕邢密封指在低温容器出现真空泄漏的情况下,系统必须在帕邢极小值(发生在 0.1 kPa~1 kPa 气压范围内)下能承受施加的电压。典型的击穿电压与压强的关系见 C.2。为进行此测试,电流引线需安装在一个抽真空的容器内,加载测试电压后,使容器内的压强缓慢增加至常压。在整个过程中,需持续监测电流引线和地电位之间的漏电流。

### 6.7.3 结果

试验结果应与技术要求作比对,并形成完整的报告。

## 6.8 压力降测试

### 6.8.1 目的

测量电流引线在低温气体额定压力和额定流量下的压力降。

### 6.8.2 方法

在电流引线出入口处低温气体的压差可用压力计测量,同时还应给出电流引线出入口处的绝对压力。

### 6.8.3 结果

试验结果应与技术要求作比对,并形成完整的报告。

## 6.9 密封性测试

### 6.9.1 目的

确认电流引线和超导装置间的密封性能。

### 6.9.2 方法

对于气冷式电流引线,将其安装在低温恒温器内,开口侧密封然后通过检漏仪检验气密性。

对于非气冷式电流引线,如有要求应将电流引线安装到低温恒温器中进行测试。

### 6.9.3 结果

试验结果应与技术要求作比对,并形成完整的报告。

注:基于超导装置的运行条件和环境条件等差异,电流引线承受流体压力和气密性的设计要求也不同。密封性试验结果应与气冷或非气冷电流引线的每项技术要求逐一核对。

## 6.10 安全裕度测试

### 6.10.1 致冷剂故障测试

#### 6.10.1.1 目的

测试在致冷剂供给中断情况下电流引线的安全运行时间。

注:该测试一般用于气冷式电流引线。

#### 6.10.1.2 方法

在电流引线上安装电压抽头和一些温度计。测量电流引线随时间变化的电压降和测量点的最大温升。在额定电流下停止致冷剂供应,然后测量电压变化和最大温升。这需要在设计时通过计算和/或仿真估算出电流引线最大温升区域,并将温度计设置于该区域。

#### 6.10.1.3 结果

试验结果应与技术要求作比对,并形成完整的报告。

### 6.10.2 失超测试

#### 6.10.2.1 目的

检验电流引线的高温超导组件出现失超后的安全裕度。对于高温超导组件,正常区域传播速度很慢,特别是在低电压区,但当电压降达到某一阈值时,则会迅速增加。同时,高温超导组件温度也会迅速升高,并导致热失控。因此实际应用中,在探测到失超后,必须及时降低电流引线上的传输电流,以防止电流引线烧毁。所以对电流引线发生失超到完全热失控之间的时间间隔进行测量是十分重要的。为了探测高温超导元件是否失超,必须保证检测到的电压信号高于噪声水平。

#### 6.10.2.2 方法

根据需要,在电流引线上安装温度计、电压抽头和加热器,并对其通以额定电流。采用加热和/或停止供应致冷剂或关闭制冷机方式强制产生失超区域,并观测随后区域的扩展。测量发生失超和热失控之间的时间间隔,估算高温超导体电流引线的安全裕度。附录 C.3 给出了失超测试时电压上升与时间之间的关系。

### 6.10.2.3 结果

试验结果应与技术要求作比对,并形成完整的报告。

## 6.10.3 最大压力测试

### 6.10.3.1 目的

确认电流引线在最大压力下的完好性。电流引线的热交换器必须能够承受故障条件下的最大压力,该数值高于正常工况。

### 6.10.3.2 方法

在室温下,采用具有低露点的气体对电流引线加压,到达最大压力。通过目视检查和泄漏测试的方法检测电流引线的完好性。

注:如有必要,可在电流引线上连接压力计和应变计。为防止压缩气体的危险,应连续监控传感器输出。通常出于安全原因耐压试验往往会使用液体,比如水等。然而,有必要使用气体来进行最大耐压试验,所以制冷设备和电流引线需要防止由于残留水分导致的堵塞。

### 6.10.3.3 结果

试验结果应与技术要求作比对,并形成完整的报告。

## 7 报告

应报告以下信息:

- 电流引线简图;
- 测试条件;
- 与技术条件相比较的特性测试结果;
- 测试得到的结论。

## 8 注意事项

在特性测试之前,确保测试设计者和参与人员了解如下信息:

### a) 电气测试

明确在常温和低温下电气事故的预防措施和应对手段。

### b) 致冷剂和产生的气体

在低温测试中,应当对气体置换、致冷剂加注、低温泄漏、致冷剂人身接触、连续气化和诱导气化相关的电气事故采取预防措施和应对手段。

低温测试操作应当遵守当地的法规。

## 附录 A (资料性附录)

### 关于第 1 章～第 8 章的补充说明

#### A.1 范围

超导电流引线的适用材料,除了高温铜基氧化物超导体之外,也可以是  $MgB_2$ ,  $Nb_3Sn$ ,  $Nb-Ti$  等超导体。这取决于设计的工作温区。

#### A.2 电流引线结构

##### A.2.1 常规电流引线(传统电流引线)

此电流引线导电部分由常规导电材料制作,包括两端的连接端子或加强材料。

##### A.2.2 超导电流引线

电流引线导电部分高温区域使用常规导电材料,在中间温区和低温区采用超导材料,根据设计温度选择高温超导体或低温超导体。

注:对于温度范围可能有不一样的定义。

#### A.3 适用材料

##### A.3.1 常规导电材料

本标准中用于电流引线的常规导电材料通常有铜、铜合金、铝、铝合金。此外,常规电流引线中使用的材料可以采取多种形式,如块材、复合圆线、绞线、复合扁线、圆筒线、紧凑型绞线、复合带、层压带等。

##### A.3.2 超导材料

构成本标准所涉及的电流引线一部分的超导材料,可以是  $Nb-Ti$  超导体、 $Nb_3Sn$  化合物超导体、 $Bi$  系氧化物超导体、 $Y$  系氧化物超导体、 $MgB_2$  化合物超导体和其他超导体。此外,可以采取多种形式,如块材、复合圆线、绞线、复合扁线、紧凑型绞线、复合带、层压带等。

##### A.3.3 辅助材料

辅助材料包括如下几类:

- 阻性材料:铝合金、银、银合金、铜、铜合金(黄铜、铍青铜等)、不锈钢及其他材料;
- 工装材料:玻璃纤维增强塑料(玻璃钢)及其他材料;
- 电气绝缘材料:玻璃钢、陶瓷、聚酰亚胺胶带及其他材料。

#### A.4 特定测试

电流引线测试项目还可能包括诸如弯曲试验、拉伸试验、振动试验以及跌落试验的力学性能测试、液体致冷剂快速冷却的耐久性试验等。这取决于用途和适用范围。

附录 B  
(资料性附录)  
典型电流引线

B.1 总则

为便于理解,本附录中给出了典型的电流引线结构示意图。由于电流引线使用的场合不同,有很多不同的构型,这些示意图只能覆盖一些有代表性的可能设计。

B.2 气冷式电流引线

B.2.1 自冷式常规电流引线

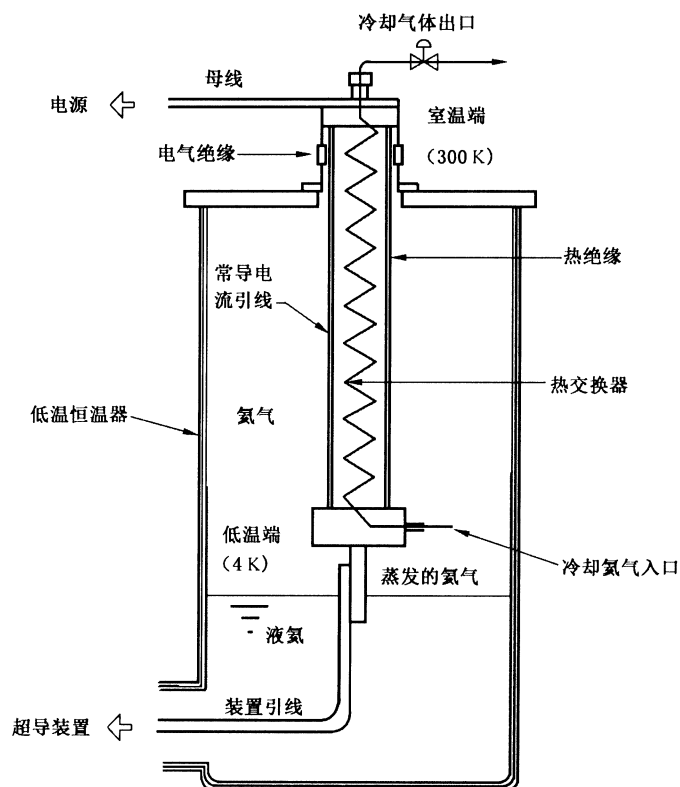


图 B.1 自冷式常规电流引线示意图

B.2.2 迫流冷却常规电流引线

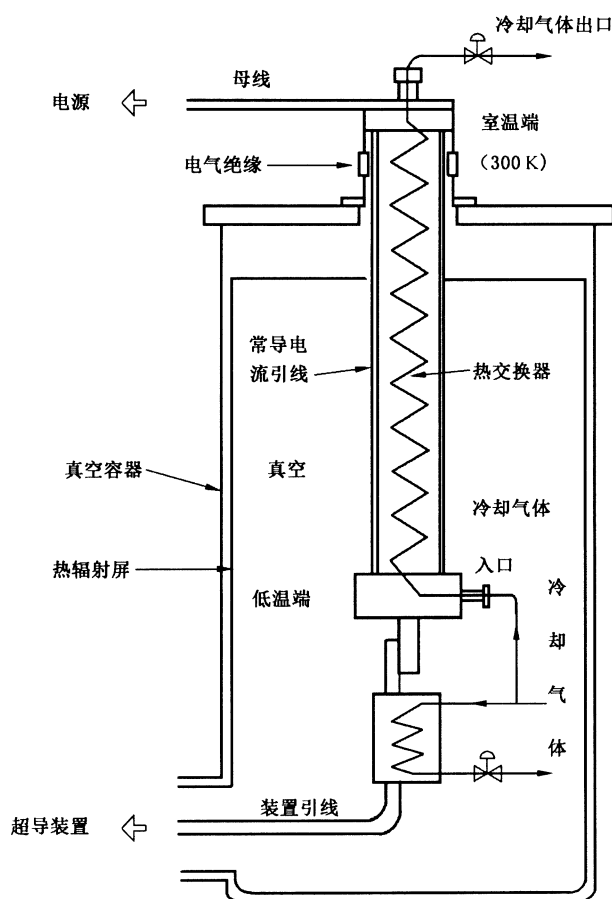


图 B.2 迫流冷却常规导电流引线示意图

B.2.3 迫流冷却常规导电部分和真空环境中高温超导体部分组成的电流引线

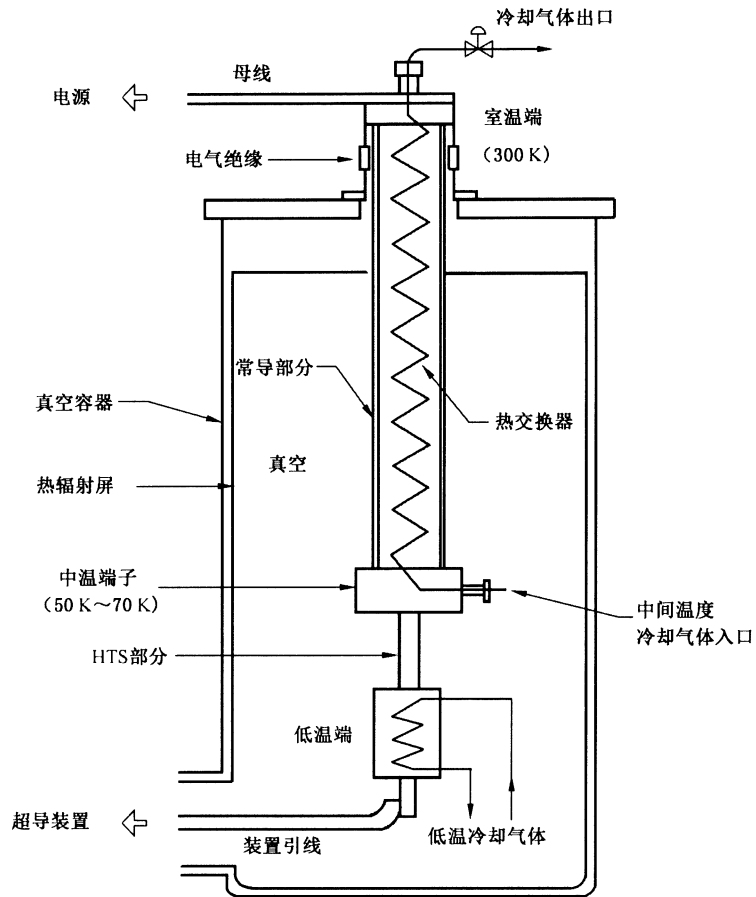


图 B.3 迫流冷却常规导电部分和真空环境中高温超导体部分组成的电流引线示意图



B.2.4 迫流冷却常规导电部分和高温超导体部分(液氮环境)组成的电流引线

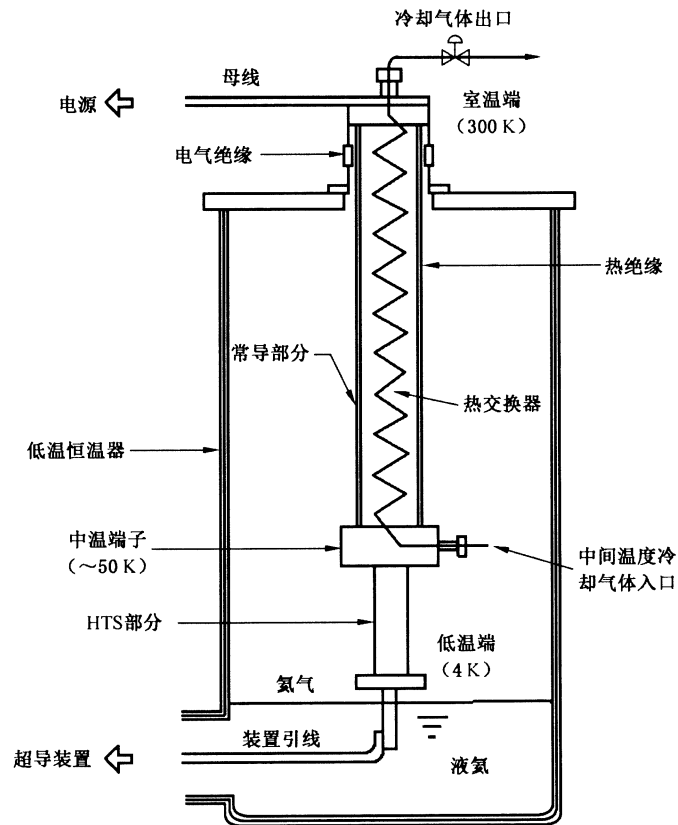


图 B.4 迫流冷却常规导电部分和高温超导体部分(液氮环境)组成的电流引线示意图

B.2.5 由液氮/氮气/氦气冷却常规导电部分和自洽式蒸发冷却高温超导体部分组成的电流引线

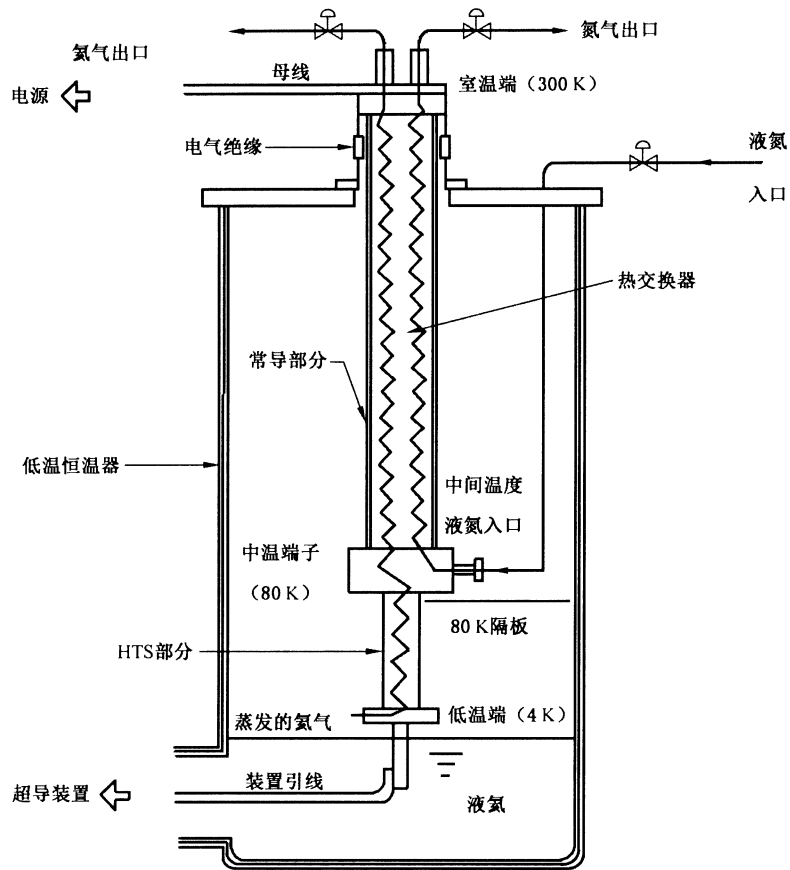


图 B.5 由液氮/氮气/氦气冷却常规导电部分和自洽式蒸发冷却高温超导体部分组成的电流引线示意图

## B.3 非气冷式电流引线

## B.3.1 传导方式冷却的由常导部分和高温超导体部分组成的电流引线

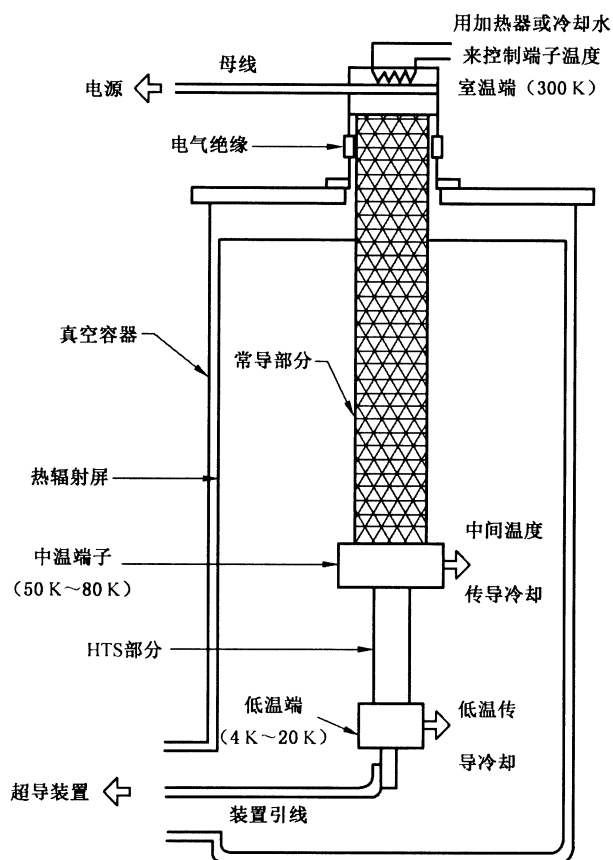


图 B.6 由传导方式冷却的常导部分和高温超导体部分组成的电流引线示意图

附录 C  
(资料性附录)

有助于理解测试方法的解释性图表

C.1 总则

本附录中的图表有助于理解测试方法。包括在额定载流测试中引线温度分布,帕邢气密性测试中压力与击穿电压的关系,高温超导电流引线失超测试中电压升高随时间的变化关系。

C.2 额定载流测试中温度分布

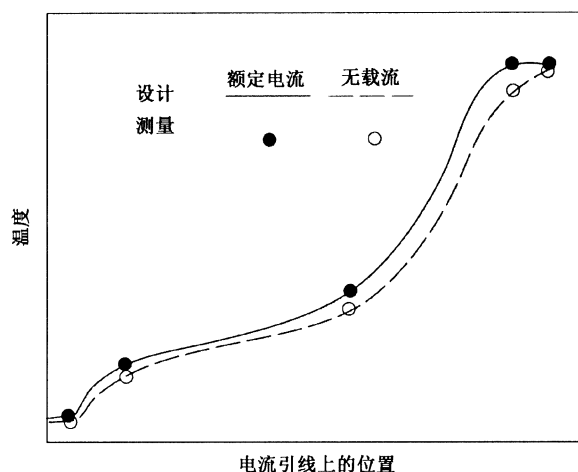


图 C.1 额定载流测试中温度分布示意图

C.3 击穿电压与帕邢气密性测试中压力的关系

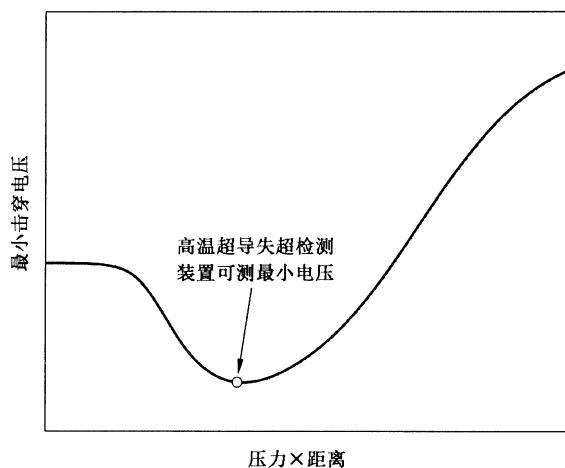
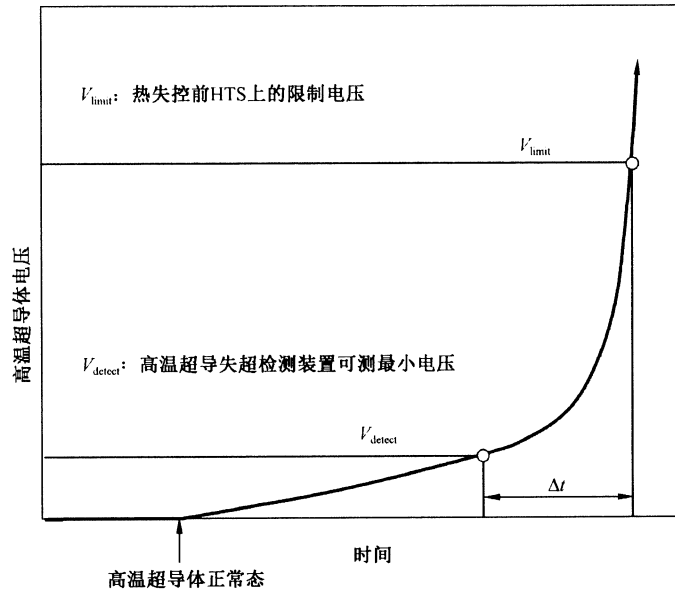


图 C.2 击穿电压与帕邢气密性测试中压力的关系示意图

C.4 高温超导电流引线失超测试中电压升高随时间的变化关系



注： $\Delta t$  是电压从  $V_{\text{detect}}$  升高到  $V_{\text{limit}}$  的时间间隔，对应着 6.10.2 提到的电流引线的安全裕度。

图 C.3 高温超导电流引线失超测试中电压升高随时间的变化关系示意图

## 附录 D

(资料性附录)

## 高温超导组件的测试项目与方法

## D.1 范围

本标准描述了整个电流引线各项测试内容和方法的一般特征。然而,可能一些制造商只生产高温超导部件,再由其他制造商或用户将其组装成完整的电流引线。所以本附录只针对高温超导组件的测试项目和方法的一些最重要事项加以特殊说明。

## D.2 高温超导组件特性测试项目

表 D.1 所示为高温超导组件的特性测试内容,用户可按表 D.1 中的特性测试项目检测电流引线是否合格,同时判断是否满足各个阶段对测试项目的要求。

表 D.1 高温超导组件特性测试项目

	特性测试分类	测试项目	特性测试执行阶段		
			研发 <sup>a</sup>	产品 <sup>b</sup>	接收 <sup>c</sup>
1	力学特性	结构检查(6.1)		是	是
		应力/应变特性测试(D.4.1)	是		
2	热学特性	无载流漏热测试(6.3.1)	是		
3	电气特性	额定载流测试(6.4)	是	是	
4	安全裕度特性	失超测试(6.10.2)	是		
<sup>a</sup> “研发”指高温超导组件的基础研究和试制阶段。 <sup>b</sup> “产品”指高温超导组件研发完成后或批量生产阶段。 <sup>c</sup> “接收”指电流引线系统的制造商或设计者的测试。					

## D.3 一般测试方法

每项特性测试方法可参照本标准第 6 章。只须把对超导部分的特性测试项目与方法应用到所要测试的高温超导组件,冷却条件,电气绝缘,机械支撑等部分可以简化。

## D.4 特定的测试方法

## D.4.1 目的-应力/应变特性测试

测试在室温及低温下机械和热学的应力/应变对高温超导组件的影响。

#### D.4.2 方法

在室温及低温下对高温超导组件的机械应力/应变值进行模拟计算,试验时机械应力/应变应被加载至超导体弹性极限范围内的最大值。

注 1: 最大负荷应该根据安全裕度来确定,一般为设计要求的 1.1 倍。

注 2: 测试应重复进行多次,重复次数依据电磁负荷和热负荷条件有所区别。

注 3: 在使用银包套 Bi 系氧化物高温超导体时,只要能合格通过室温下达到 1.1 倍弹性极限的多次重复拉伸试验,它的电学性能实际上是可以得到保证的。所采用的拉伸极限应充分低于通过试验得到的这种超导材料的 0.2% 应力应变模量或所在地的相关规定。

#### D.4.3 结果

试验结果应与技术要求作比对,并形成完整的报告。

参 考 文 献

- [1] WILSON, MN., *Superconducting Magnets*. Oxford University Press, Oxford, 1983, pp. 256-272.
- [2] LOCK, JM., *Cryogenics*, 1969, vol.9, pp. 438-442.
- [3] BALLARINO, A., Current Leads for the LHC Magnet System. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2002, vol. 12 pp.1275-1280.
- [4] BALLARINO, A., HTS current leads for the LHC magnet powering system. *Physica C*, 2002, 372-376 pp. 1413-1418.
- [5] IEC 61788-3:2006, *Superconductivity—Part 3: Critical current measurement—DC critical current of Ag-and/or Ag alloy-sheathed Bi-2212 and Bi-2223 oxide superconductors*
- [6] IEC 61788-10: 2006, *Superconductivity—Part 10: Critical temperature measurement—Critical temperature of composite superconductors by a resistance method*
-