

ICS 29.180

CCS F24

团 体 标 准

T/CI 086-2022

超导车载牵引变压器测试规范

Test Specification For Superconducting Traction
Transformers

2022-10-20 发布

2022-10-24 实施

中国国际科技促进会 发布

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草，常规试验部分参照 GB/T 25120—2010 轨道交通机车车辆牵引变压器和电抗器，涉及超导部分做了修改，更好地满足超导变压器的运行条件。

本文件为首次发布，今后将根据超导车载牵引变压器技术发展情况适时修订。

本文件由北京交通大学、株洲时代新材料科技股份有限公司、北京英纳超导有限公司、北京航空航天大学 and 北京机械设备研究所共同起草。

本文件主要起草人：方进、王进、赵斌、李晓航、李育隆、曾凡辉、刘斌、刘波、张敬因、容诚钧、赵鑫

目 次

前 言	1
目 次	2
1. 适用范围	3
2. 引用标准	3
3. 术语及定义	3
3.1 高温超导车载牵引变压器	3
3.2 制冷系统	4
3.3 超导绕组临界电流	4
3.4 超导绕组交流损耗	4
3.5 超导变压器总损耗	4
3.6 超导绕组失超	4
3.7 超导变压器保护系统	4
3.8 制冷系统额定损耗	4
3.9 超导绕组温升	5
4. 冷却系统标志	5
4.1 标志符号编码	5
4.2 符号标示	6
5. 试验	7
5.1 试验种类	7
5.2 超导车载牵引变压器试验	7

超导车载牵引变压器测试规范

1. 适用范围

本文件规定了应用于机车的高温超导车载牵引变压器术语，定义，试验项目和试验方法等要求。

本文件适用于高低压绕组均为高温超导材料的机车用车载牵引变压器。

2. 引用标准

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件。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。

GB 1094.1-2013 电力变压器第1部分：总则

GB 1094.2-2013-电力变压器第2部分：液浸式变压器的温升

GB/T 1094.18-2016 电力变压器 第18部分：频率响应测量

GB/T 14174-2012 大口径液氮容器

GB/T 21563-2018 轨道交通 机车车辆设备 冲击和振动试验

GB/T 25120-2010 轨道交通 机车车辆牵引变压器和电抗器

3. 术语及定义

GB/T 18517-2012 制冷术语、GB/T 2900.100-2017 电工术语 超导电性、GB/T 2900.36-2021 电工术语 电力牵引的定义以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 高温超导车载牵引变压器

绕组采用高温超导材料，安装于电力机车或电动车组，同一频率下，利用电磁感应原理将牵引网的供电交流电压电流转化为列车牵引系统所需要的交流

电压电流的静止设备。

3.2 制冷系统

利用物理方法，将超导牵引变压器的交流损耗、系统漏热等产生的热量带走，从而使超导绕组工作温度保持在设计值的所有装置的总和。

3.3 超导绕组临界电流

超导绕组中，被认为几乎是无阻通过的最大直流电流。

注：临界电流是磁场强度，温度和应力的函数。

3.4 超导绕组交流损耗

因随时间变化的磁场或电流，复合超导体中损耗的功率。

注 1：交流损耗包括超导体的时间平均磁滞损耗、导体的耦合电流损耗和涡流损耗、结构材料的涡流损耗。

注 2：习惯上，交流损耗亦包括因外加瞬变磁场或电流，而损耗在复合超导体中的功率。

3.5 超导变压器总损耗

超导变压器总损耗是超导变压器在运行过程中产生的空载损耗，负载损耗以及制冷系统损耗总和。

3.6 超导绕组失超

超导绕组由于某种原因突然失去超导特性而进入正常态的过程。

3.7 超导变压器保护系统

超导绕组失超时，用于转移其部分存储能量，并避免失超时的内部过压，从而达到超导变压器安全稳定运行目的的装置总和。

3.8 制冷系统额定损耗

超导变压器工作在额定工作条件下，制冷系统将低温保持器中温度降低到设计值并保持恒定所产生的损耗。

3.9 超导绕组温升

超导变压器额定工作条件下，超导绕组的测量平均温度和换热器表面最低温度之差。

4. 冷却系统标志

4.1 标志符号编码

4.1.1 制冷系统符号

制冷系统符号由制冷系统冷量来源符号和系统循环方式符号组成，分别见表 1 和表 2。

表 1 常用冷量来源标志符号

冷量来源 ^注	符号
常压制冷	C
减压制冷	D
低温制冷机	M

注：常压制冷冷量来源于液态冷却介质的汽化潜热，制冷温度约为介质在常压下的沸点温度，例如采用常压下的液氮为工质制冷时，制冷温度约为 77 K。减压制冷冷量来源于液态冷却介质的汽化潜热，相较于常压制冷，需通过真空泵降低压力使得工质在更低的温度下沸腾，例如采用液氮减压制冷，压力降低至 17 kPa 时制冷温度约为 65 K。低温制冷机制冷通过工质循环获得冷量，常见的制冷机形式有 GM 制冷机、脉管制冷机等。

表 2 系统循环方式标志符号

系统循环方式 ^注	符号
开式	K
闭式	B

注：在开式系统中，冷却介质吸收热量后直接排出系统，不再回到系统中。在闭式系统中，冷却介质吸收热量后，将在制冷系统的其它装置中被冷却，之后继续输送到热源处换热。一般而言，常压及减压制冷常为开式系统，低温制冷机常为闭式系统。

4.1.2 介质符号编制

介质名称如果是单质，则和元素周期表对应元素符号一致；如果是化合物，则介质名称符号为对应的分子表达式；如果介质是混合物，则介质名称符号为对应英文缩写。几种常见的低温冷却介质及表示方法见表 3。其中相态的表示方法见表 4。

表 3 常用冷却介质标志符号

冷却介质种类	符号
氮	N
氦	He
氧	O
氢	H

表 4 常用冷却介质状态标志符号

冷却介质状态	符号
液	L
气	G
固	S

4.1.3 换热方式标志符号

换热方式标识符号见表 5。

表 5 换热方法标志符号

主要换热方式	符号
自然对流换热	Z
强迫对流换热	Q
沸腾换热	F
凝结换热	J

4.2 符号标示

超导车载变压器的标志由制冷系统符号、介质符号和换热方式符号组合而成，每组符号间用“/”分隔，第一组字母为制冷系统符号，代表制冷系统循环

方式和冷量来源，第二组字母为介质符号，代表与绕组接触的冷却介质和状态，第三组字母为换热方式符号，代表介质与绕组和冷源主要换热方式。第三组字母中的第二个字母满足如下条件时应当缺省：冷却介质作为冷源，绕组和冷源直接接触。

例：

KD/LN/ZZ 表示采用开式液氮减压制冷并采用在自然对流的液氮中浸泡的超导变压器；

BM/LN/QQ 表示采用闭式制冷机制冷并采用在强迫对流的液氮中浸泡的超导变压器

BM/LN/FJ 表示采用闭式制冷机制冷并利用液氮在绕组和冷源间构成重力热管的超导变压器；

KC/LN/F 表示直接在常压液氮中浸泡的超导变压器；

KD/LN/F 表示直接在减压沸腾液氮中浸泡的超导变压器。

5. 试验

5.1 试验种类

针对超导变压器的试验种类分为三类即例行试验，型式试验和研究性试验。

型式试验是为了验证产品能否满足技术规范的全部要求所进行的试验。

例行试验在同批生产的所有产品上进行。

研究性试验是为了获取产品性能的附加信息，对某个可选特性进行的特殊性试验。

5.2 超导车载牵引变压器试验

5.2.1 试验一览表

对于超导车载牵引变压器的测量，检查，试验一览表如表 6 所示

表 6 测试项目与试验对照表

编号	试验项目	例行试验	型式试验	研究性试验
5.2.3	初步检查	√	√	
5.2.4	绕组真空容器气密性测试	√	√	
5.2.5	超导绕组直流电流通流能力测试	√	√	
5.2.6	直流电阻测量	√	√	
5.2.7	变压比测量	√	√	
5.2.8	原边空载电流与损耗测量	√	√	
5.2.9	阻抗电压测量	√	√	
5.2.10	负载损耗测量	√	√	
5.2.11	制冷系统损耗测量	√	√	
5.2.12	总损耗测定	√	√	
5.2.13	液氮温升测量		√	
5.2.14	介电试验			
5.2.14.1	耐受感应耐压试验		√	
5.2.14.2	耐受工频耐压试验		√	
5.2.14.3	耐受全波冲击电压试验		√	
5.2.15	保护系统测试			√
5.2.16	振动与冲击测试		√	
5.2.17	噪声测量	√	√	

5.2.2 额定性能允许的误差

总损耗，部件损耗，主分接的空载电压比（额定电压比），阻抗电压和空载电流的允差按照 GB/T 25120-2010 执行。

温升的允差规定如下，对于没有制冷系统的液氮浸泡式超导变压器，温升测量结果不允许出现允差。对于利用传导方式制冷的浸泡式超导变压器温升测量结果的允差不能超过标准值 2K，对于采用对流方式制冷浸泡式超导变压器，出口处对进口处的温升不得超过 2K。

5.2.3 初步检查

初步检查的条目主要包括端子标致、电路图、极性，名牌项目以及杜瓦中的温度和压力值。

5.2.4 真空低温保持器气密性测试

测试项目为总漏率测量及日蒸发率测量，测试方案及合格标准按照 GB/T 14174-2012 执行，由于制冷管路和电流引线和测量引线从杜瓦端盖中引出，所以在在测量之前需要对所有从杜瓦引出的接头做绝热处理。

5.2.5 超导绕组直流电流通流能力测试

在超导绕组安装到铁芯之前要进行超导绕组直流电流通流能力测试，测试温度和超导变压器运行的环境温度相同，超导绕组测试电流应高于铭牌标注交流额定电流幅值的 1.4 倍，方法按照标准四引线法测量，测量时要削弱电感对测量结果的影响，一般采用的方法是线圈补偿法或阶梯升流法。每个绕组测量次数不得少于 3 次，总的测量时间间隔不得少于 2h，并记录测量平均值，测量过程中需要记录超导绕组测试环境的温度。

5.2.6 直流电阻测量

直流电阻的测量方法参照 GB/T 25120-2010 执行，直流电阻分别在常温条件下和低温条件下进行，测量前应当给定不同条件下直流电阻的参考值，测量时应当记录绕组的环境温度。

5.2.7 变压比测量

见 GB/T 25120-2010。测量变压比时应当在铭牌规定的温度条件下测量，并记录绕组的环境温度。

5.2.8 一次侧空载电流与损耗测量

见 GB/T 25120-2010。测量原边空载电流时应当在铭牌规定的温度条件下测量，并记录绕组的环境温度。

5.2.9 阻抗电压测量

绕组组合及测量方式见 GB/T 25120-2010。测量阻抗电压时应当在铭牌规定

的温度条件下测量，并记录绕组的环境温度。

阻抗变压的测量应在额定频率，近似正弦波的条件下进行，对于超导变压器，测量应该选定位额定电流的 10%，20%，30%，40%，50%，60%，70%，75%，80%，85%，90%，95%和 100%进行测量。超导变压器运行环境温度极低，不同温度下，损耗值和电流的关系需要计算分析，因此所有的测量值都以实际测量值为准。

5.2.10 负载损耗测量

见 GB/T 25120-2010。在测量变压器阻抗电压过程中同时测量负载损耗，应当在铭牌规定的温度条件下测量，并记录绕组的环境温度。

超导变压器只测量规定温度下负载损耗的实际值，不需进行修正。

5.2.11 制冷系统损耗测量

超导变压器损耗中制冷机的损耗要占总损耗的 50%以上，所以要测定制冷系统损耗。测量方法采用电压电流法，及测量制冷系统中各个设备的电压，电流及功率因数，从而计算出额定运行条件下的损耗，对于纯阻性设备也可以用推算法。

制冷系统损耗测量应该选定额定电流的 0%，10%，20%，30%，40%，50%，60%，70%，75%，80%，85%，90%，95%和 100%进行测量。测量时超导绕组始终保持在额定工作温度条件下，制冷系统所产生的的损耗，该损耗主要包括真空泵和加热器损耗，测量时要记录超导绕组运行的环境温度。

5.2.12 总损耗

超导变压器总损耗是超导变压器在运行过程中产生的铁芯损耗（5.2.8），负载损耗（5.2.10）以及制冷系统损耗（5.2.11）总和。

求总损耗时铁芯损耗（5.2.7），负载损耗（5.2.9）以及制冷系统损耗必须为同一温度下的测量值，其中负载损耗以及制冷系统损耗为超导绕组同一运行条件下（相同电流，相同温度，相同的电磁环境等）测量值，负载损耗和同时记录计算总损耗时超导绕组的环境温度以及测量负载损耗时绕组的输入电流。

5.2.13 液氮温升测量

液氮温升测量时超导变压器需工作在额定容量下。

试验中，冷却系统应正常运行。由于超导绕组在直流运行条件下无损耗，交流运行条件下会产生交流损耗，损耗随温度尚无统一换算方式，温升测量的试验方法采用“背靠背法”，这种方法是选用两台变压器并联连接，其中一台是被试超导变压器，对被试变压器施加额定电压励磁。通过两台变压器不同的电压比，或采用另外输入电压的方法使被试变压器绕组内流过额定电流。

测试方法见 GB1094.2-2013，测试中要分别记录高压绕组和低压绕组的温升，由于超导变压器在液氮条件下，所以低温保持器中各部件的温升不得超过2K。

5.2.14 介电试验

介电试验包括耐受感应电压试验，耐受工频电压试验和耐受全波雷电冲击电压试验。

介电试验电压和绕组接线要求见 GB/T 25120-2010。

5.2.14.1 耐受感应电压试验

见 GB/T 25120-2010，应当在铭牌规定的温度条件下测量，并记录测试时超导绕组的环境温度。

5.2.14.2 耐受工频电压试验

见 GB/T 25120-2010，应当在铭牌规定的温度条件下测量，并记录测试时超导绕组的环境温度。

5.2.14.3 耐受全波雷电冲击电压试验

见 GB/T 25120-2010，应当在铭牌规定的温度条件下测量，并记录测试时超导绕组的环境温度。由于超导变压器没有变压器油箱结构，需要对低温保持器中各部件金属件接地。其他接线方式见 GB/T 25120-2010。

5.2.15 振动与冲击试验

见 GB/T 21563-2018。

振动冲击以后除了应当进行 GB/T 25120-2010 规定的条目外，还应当进行以下试验：

绕组真空容器气密性测试

超导绕组临界电流测试

5.2.16 超导变压器保护系统测试

超导变压器如果系统发生短路需要对线路立即切断，切断时间不应超过额定运行单个周期的 $1/4$ ，即 $1/(4 \times f)$ ，电流超过额定电流 1.3 倍时，保护系统需要动作，确保整个系统的安全运行。保护电路应由两部分组成，一部分为切断部分，一部分为释能部分。

测试方法如下：采用直接短路法，将副边短路运行，电流提升至额定电流的 1.3 倍，保护开关是否动作，同时检测释能系统中电流波形，应当在铭牌规定的温度条件下测量，并记录绕组的环境温度。保护系统测试不得少于 5 次，记录好保护开关动作时间和释能电路的电流波形。

此部分为研究性试验，判定合格的标准为，电流超过额定电流的 1.3 时保护开关动作，同时释能电路中的电流波形逐步衰减到 0。

5.2.17 噪声测试

噪音测试按照 GB/T1094.10-2016 执行。
