



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108363029 A

(43)申请公布日 2018.08.03

(21)申请号 201810437282.X

(22)申请日 2018.05.09

(71)申请人 中国科学院高能物理研究所
地址 100049 北京市石景山区玉泉路19号
乙院

(72)发明人 龙锋利 韩超 侯振华 陈斌
程建

(74)专利代理机构 北京律智知识产权代理有限公司 11438
代理人 邢雪红 王卫忠

(51)Int.Cl.
G01R 35/00(2006.01)

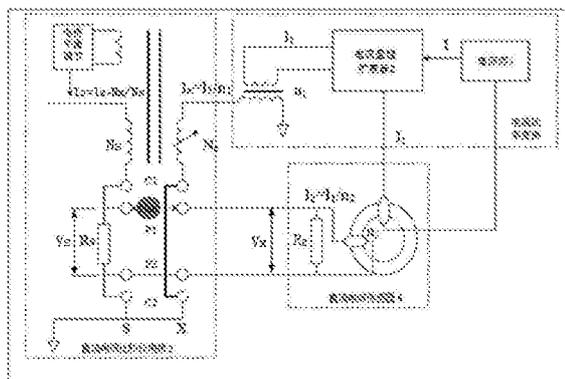
权利要求书1页 说明书6页 附图3页

(54)发明名称

直流电流传感器的校准系统和校准方法

(57)摘要

本公开提供一种直流电流传感器的校准系统和校准方法。直流电流传感器的校准系统包括：电流源，用于输出被测电流；电流量程扩展器；直流电流比较仪电桥；以及直流电流传感器；其中，所述电流量程扩展器的输入端与所述电流源电连接，所述电流量程扩展器的输出端与所述直流电流比较仪电桥的参考端电连接；以及所述直流电流传感器的输入端与所述电流源电连接，所述直流电流传感器的输出端与所述直流电流比较仪电桥的被测端电连接。利用磁通平衡原理，电桥达到平衡的过程及平衡状态时，主、从线圈电流为同时按比例互动平衡状态，测量精度不依赖于电流源和数字电压表的准确度和稳定度，满足未来加速器对于电流超高准确度的校准需求。



1. 一种直流电流传感器的校准系统,其特征在于,包括:
电流源,用于输出被测电流;
电流量程扩展器;
直流电流比较仪电桥;以及
直流电流传感器;
其中,所述电流量程扩展器的输入端与所述电流源电连接,所述电流量程扩展器的输出端与所述直流电流比较仪电桥的参考端电连接;以及
所述直流电流传感器的输入端与所述电流源电连接,所述直流电流传感器的输出端与所述直流电流比较仪电桥的被测端电连接。
2. 根据权利要求1所述的校准系统,其特征在于,所述电流源为可正负双向输出的电流源。
3. 根据权利要求1所述的校准系统,其特征在于,所述电流量程扩展器的输入电流与输出电流的比率系数范围为1000-30000。
4. 根据权利要求3所述的校准系统,其特征在于,所述电流量程扩展器的输入电流与输出电流的比率系数为3000或10000。
5. 根据权利要求4所述的校准系统,其特征在于,所述直流电流比较仪电桥的参考端电阻为0.1-10K欧姆。
6. 根据权利要求5所述的校准系统,其特征在于,所述直流电流比较仪电桥的参考端电阻为1K欧姆。
7. 根据权利要求1所述的校准系统,其特征在于,所述直流电流比较仪电桥的被测端线圈匝数与参考端线圈匝数的比率系数范围为0.1-10。
8. 根据权利要求7所述的校准系统,其特征在于,所述直流电流比较仪电桥的被测端线圈匝数与参考端线圈匝数的比率系数范围为1。
9. 一种利用根据权利要求1所述的校准系统对直流电流传感器进行校准的方法,其特征在于,包括:
通过调节所述直流电流比较仪电桥,使得所述直流电流比较仪电桥的参考端与被测端实现电位平衡;
根据电位平衡时参考端线圈匝数与被测端线圈匝数的比率系数获得参考端电阻与被测端等效电阻的比率系数,其中所述两者比率系数相同;
根据已知的参考端电阻的值与所述比率系数获得被测端等效电阻的值;以及
计算被测端等效电阻与所述直流电流传感器等效电阻的偏差值,根据偏差值得到所述直流电流传感器的准确度。
10. 根据权利要求9所述的方法,其特征在于,所述直流电流传感器等效电阻的值为所述直流电流传感器的取样电阻与所述直流电流传感器的补偿线圈匝数比值。

直流电流传感器的校准系统和校准方法

技术领域

[0001] 本公开涉及电流传感技术领域,具体而言,涉及一种直流电流传感器的校准系统和校准方法。

背景技术

[0002] 直流电流传感器,也就是DCCT(Direct Current Control Transducer),作为加速器高精度稳流电源普遍应用的电流采样元件,直接决定输出电流的准确性。随着加速器束流品质要求越来越高,对束流损失的严格控制,要求单台电源具备10-20ppm(parts per million,百万分之一)的极高准确度,以保证单台电源的准确电流输出及多台电源之间严格的电流同步。

[0003] 对于DCCT准确度的测量,国内加速器基本采用比对测量方法。以北京正负电子对撞机改造工程BII为例,采取的如图1所示的方法。以高精度大功率电流源作为参考源,被测DCCT的输出与标准DCCT(采购的Hi tec公司的TOPACC系列标准产品)的输出进行比对测量。整个测试系统存在如下几个问题,第一是测量所用的电流源,因为被测与标准DCCT之间的测量并不是同时进行,所以受到电流源的噪声及电流纹波的影响;第二受到高精度数字电压表的性能影响,8.5位高精度数字电压表例如FLUKE-8508A,其电压测量的准确度为5-10ppm。第三依赖于标准DCCT的准确度,由于该DCCT未进行校准,所以这种测量受到该DCCT准确度的影响。该系统是一种完全相信电流源的超高精度及标准DCCT的绝对准确度的系统,所以被测DCCT的校准结果只能保证在100ppm的量级。

[0004] 此外,现有技术中的大型强子对撞机LHC(Large Hadron Collider)所采用的方法是基于标准电流源的方法,图2为其DCCT校准系统示意图。该标准电流源通过10V参考级电压基准及1k欧姆参考电阻,产生一个10mA的电流标准。基于磁通平衡原理,通过匝比的精确控制,实现10mA电流到5A的扩展。为了保证电流测量的准确度,所有DCCT为定制产品,即DCCT定制了校准线圈(calibration winding),该校准线圈上通过超高准确度的0-5A电流,产生作为参考标准的满量程安匝数。通过磁铁平衡原理,该参考标准的安匝数等于DCCT输出端的安匝数,即得到了DCCT的理想输出。通过高精度数字万用表DVM(Digital Voltmeter),读取DCCT的输出电压值,即可得到该被测值与理想值的差,从而对DCCT进行校准。利用这种方法,电流源的精度及电流扩展的匝比准确度,影响了校准的准确性。但是与BII方法不同,这里的电流源不是大功率稳流源,而是通过参考电压和电阻标准产生的,所以测量的准确度极大提高。但是10mA的电流源设计是个极大的难点。

[0005] 因此,设计一种测量精度不依赖于电流源和数字电压表的准确度和稳定度、具有超高准确度的直流电流传感器的校准系统及方法是目前亟待解决的技术问题。

[0006] 在所述背景技术部分公开的上述信息仅用于加强对本发明的背景的理解,因此它可以包括不构成对本领域普通技术人员已知的现有技术的信息。

发明内容

[0007] 本公开的目的在于提供一种直流电流传感器的校准系统和校准方法,进而至少在一定程度上克服由于相关技术的限制和缺陷而导致的一个或者多个问题。

[0008] 本公开的其他特性和优点将通过下面的详细描述变得清晰,或者部分地通过本公开的实践而习得。

[0009] 根据本公开的第一方面,提供一种直流电流传感器的校准系统,包括:

[0010] 电流源,用于输出被测电流;

[0011] 电流量程扩展器;

[0012] 直流电流比较仪电桥;以及

[0013] 直流电流传感器;

[0014] 其中,所述电流量程扩展器的输入端与所述电流源电连接,所述电流量程扩展器的输出端与所述直流电流比较仪电桥的参考端电连接;以及

[0015] 所述直流电流传感器的输入端与所述电流源电连接,所述直流电流传感器的输出端与所述直流电流比较仪电桥的被测端电连接。

[0016] 在本公开的一种示例性实施例中,所述电流源为可正负双向输出的电流源。

[0017] 在本公开的一种示例性实施例中,所述电流量程扩展器的输入电流与输出电流的比率系数范围为1000-30000。

[0018] 在本公开的一种示例性实施例中,所述电流量程扩展器的输入电流与输出电流的比率系数为3000或10000。

[0019] 在本公开的一种示例性实施例中,所述直流电流比较仪电桥的参考端电阻为0.1-10K欧姆。

[0020] 在本公开的一种示例性实施例中,所述直流电流比较仪电桥的参考端电阻为1K欧姆。

[0021] 在本公开的一种示例性实施例中,所述直流电流比较仪电桥的被测端线圈匝数与参考端线圈匝数的比率系数范围为0.1-10。

[0022] 在本公开的一种示例性实施例中,所述直流电流比较仪电桥的被测端线圈匝数与参考端线圈匝数的比率系数范围为1。

[0023] 根据本公开的第二方面,提供一种利用前述的校准系统对直流电流传感器进行校准的方法,包括:

[0024] 通过调节所述直流电流比较仪电桥,使得所述直流电流比较仪电桥的参考端与被测端实现电位平衡;

[0025] 根据电位平衡时参考端线圈匝数与被测端线圈匝数的比率系数获得参考端电阻与被测端等效电阻的比率系数,其中所述两者比率系数相同;

[0026] 根据已知的参考端电阻的值与所述比率系数获得被测端等效电阻的值;以及

[0027] 计算被测端等效电阻与所述直流电流传感器等效电阻的偏差值,根据偏差值得到所述直流电流传感器的准确度。

[0028] 在本公开的一种示例性实施例中,所述直流电流传感器等效电阻的值为所述直流电流传感器的取样电阻与所述直流电流传感器的补偿线圈匝数比值。

[0029] 根据本公开的一种实施例的直流电流传感器的校准系统和校准方法,利用磁通平衡原理,电桥达到平衡的过程及平衡状态时,主、从线圈电流为同时按比例互动平衡状态,

测量精度不依赖于电流源和数字电压表的准确度和稳定度,克服了传统校准方法由电流源及电压表的性能决定测量精度的局限,可以满足未来加速器对于电流也即是磁场超高准确度的校准需求。

[0030] 应当理解的是,以上的一般描述和后文的细节描述仅是示例性和解释性的,并不能限制本公开。

附图说明

[0031] 此处的附图被并入说明书中并构成本说明书的一部分,示出了符合本公开的实施例,并与说明书一起用于解释本公开的原理。显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本公开的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0032] 图1示出现有技术中北京正负电子对撞机改造工程BII的加速器电源系统的直流电流传感器所用校准方法的示意图。

[0033] 图2示出现有技术中的大型强子对撞机LHC的加速器电源系统的直流电流传感器所用校准方法的示意图。

[0034] 图3示出本公开示例性实施例中一种直流电流传感器的校准系统框图。

[0035] 图4示出本公开示例性实施例中的零磁通直流电流传感器工作原理示意图。

[0036] 图5示出本公开示例性实施例中一种直流电流传感器的校准方法的流程图。

具体实施方式

[0037] 现在将参考附图更全面地描述示例实施方式。然而,示例实施方式能够以多种形式实施,且不应被理解为限于在此阐述的范例;所描述的特征、结构或特性可以以任何合适的方式结合在一个或更多实施方式中。在下面的描述中,提供许多具体细节从而给出对本公开的实施方式的充分理解。然而,本领域技术人员将意识到,可以实践本公开的技术方案而省略所述特定细节中的一个或更多,或者可以采用其它的方法、组元、装置、步骤等。

[0038] 需要指出的是,在附图中,为了图示的清晰可能会夸大层和区域的尺寸。而且可以理解,当元件或层被称为在另一元件或层“上”时,它可以直接在其他元件上,或者可以存在中间的层。另外,可以理解,当元件或层被称为在另一元件或层“下”时,它可以直接在其他元件下,或者可以存在一个以上的中间的层或元件。另外,还可以理解,当层或元件被称为在两层或两个元件“之间”时,它可以为两层或两个元件之间唯一的层,或还可以存在一个以上的中间层或元件。通篇相似的参考标记指示相似的元件。

[0039] 本公开提供一种直流电流传感器即DCCT的校准系统和校准方法,基于直流电流比较仪电桥及高准确度电流量程扩展器的方法,将针对高精度电流传感器校准的精度提高到优于2ppm的水平。DCCT用于测量电流,实现大电流到小电流的转换,并通过采样电阻实现了大电流到低电压的转换,此时其可以等效为一个电阻。将DCCT等效为电阻,是该方法的理论基础。目前对于DCCT校准的准确度需求已经高达ppm量级,对测量方法和手段提出严苛挑战。根据磁通平衡原理,电桥主、从回路电流分别通过对应的绕组。当电桥达到平衡时,电阻比值=电流反比=绕组匝数比值。此方法避免了直接测量法中电流源的精度及电压测量准确度水平的限制,直接使用绕组匝数比获得被测电阻比,目前国内外的技术比率测量准确

度可以高达 10^{-8} 量级水平。再加上电流量程扩展器的精度优于1ppm,系统总校准不确定度水平优于2ppm水平。此方法实现了DCCT的超高精度校准。

[0040] 下面结合附图对本公开的直流电流传感器即DCCT的校准系统和校准方法进行具体说明,其中,图3示出本公开示例性实施例中一种直流电流传感器的校准系统框图;图4示出本公开示例性实施例中的零磁通直流电流传感器工作原理示意图;图5示出本公开示例性实施例中一种直流电流传感器的校准方法的流程图。

[0041] 首先结合图3-4就直流电流传感器即DCCT的校准系统进行详细说明。

[0042] 图3示出本公开示例性实施例中一种直流电流传感器的校准系统框图;图4示出本公开示例性实施例中的零磁通直流电流传感器工作原理示意图。如图3所示,直流电流传感器的校准系统包括:电流源1,用于输出被测电流;电流量程扩展器2;直流电流比较仪电桥3;以及直流电流传感器4;其中,所述电流量程扩展器2的输入端与所述电流源1电连接,所述电流量程扩展器2的输出端与所述直流电流比较仪电桥3的参考端电连接;以及所述直流电流传感器4的输入端与所述电流源1电连接,所述直流电流传感器4的输出端与所述直流电流比较仪电桥3的被测端电连接。

[0043] 具体来说,为了实现对高精度DCCT的精密校准,以实现对电流源输出电流的准确控制,本公开提出了一种基于直流电流比较仪电桥和电流量程扩展器的精密校准校准系统和方法,DCCT校准后的精度优于2ppm。

[0044] 根据对DCCT特性的分析,将其等效为电阻。通过磁通平衡原理的自动测阻电桥,实现对该等效电阻的精确测量,从而得到DCCT输出的准确度信息。同时考虑DCCT的特性,虽可等效为电阻,但并不是真正的电阻,其测量需要通过几百甚至千安培量级的电流,所以需要考察电流的准确量程扩展,再次通过磁通平衡原理,实现匝比的准确度控制,从而实现大电流到小电流的精确比例转换,以得到电桥的匹配输入的小电流。该校准系统的框图如图3所示,可正负双向输出的大功率电流源1,其输出电流 I 分别作为被测DCCT的被测电流 I_1 ,并将该电流接至电流量程扩展器2。此处量程扩展器2的作用,实现电流的准确比例缩小。在DCCT所需的被测电流范围内,经过量程扩展器2实现准确比例的缩小,将大电流比率至电流比较仪电桥3的最优工作电流。该量程扩展器2的输出电流接入电桥作为被测端X的等效电流 I_x 。DCCT输出端接至电桥被测端X。电桥内部通过电流比较仪线圈调节,使得参考端S与被测端X实现电位平衡(在图3中, N_{an} 表示电桥平衡检测),获得被测端电阻 R_x 与参考端电阻 R_s 的比值,进而计算被测端等效电阻值。计算机软件将控制全部系统工作并显示测量结果。其中 C_1 、 P_1 、 P_2 和 C_2 为参考端电阻 R_s 的接线端钮。

[0045] 基于本系统测量原理,系统电桥达到平衡的过程及平衡状态时,主、从电流即参考端电流 I_s 、被测端电流 I_x 为同时按比例互动平衡状态。系统精度不依赖电流准确度和稳定度。此特点为本系统独特优势。同时为了克服热电势等的影响,电流源必须具备独立一体式换向结构,有效实现大电流整体一次性换向且要求电流换向稳定可靠。

[0046] 下面,将对本示例实施方式中直流电流传感器的校准系统的各个部分及各相关数值的计算或取值范围的选择等进行更详细的说明。

[0047] 1) DCCT等效电阻计算

[0048] 对于DCCT实现大电流到小电流的变换,加上取样电阻(Burden Resistor) R_B ,即实现了大电流到低电压的变换。图4是基于零磁铁平衡的DCCT工作原理图,其中T1-T3分别为

由三级构成的补偿绕组(线圈)的铁芯,DCCT补偿绕组电流即DCCT输出端电流 $I_2 = I_1/n_2$,其中 n_2 为DCCT补偿绕组匝数, I_1 为被测电流。以200A/10V DCCT为例,当补偿绕组匝数 $n_2 = 500$ 匝, $R_B = 10V / (200A/500) = 25 \Omega$;若补偿绕组匝数 $n_2 = 1000$ 匝,则 $R_B = 10V / (200A/1000) = 50 \Omega$ 。尽管 n_2 和 R_B 因DCCT设计不同而不同,但是 R_B/n_2 的比例对于某一个固定型号的DCCT来说是固定的,即DCCT的等效电阻是固定的。例如200A/10V DCCT等效电阻 $R_B/n_2 = 1/20 \Omega$;100A/10V DCCT其等效电阻为 $R_B/n_2 = 1/10 \Omega$ 。该校准方法即得到了与该等效电阻的偏差值,根据偏差值得到DCCT的准确度。从而可根据得到DCCT的准确度对DCCT进行校准。

[0049] 2) 电流源选择

[0050] 根据DCCT的量程选择电流源1的最大输出电流,例如要测量1000A DCCT,则需要选择大于1000A输出的电流源,电流源1的稳定性和准确度对该系统测量精度无影响。

[0051] 3) 标准电阻 R_s 选择

[0052] 加速器磁铁电源应用的DCCT,其满量程输出电压为10V。当电桥平衡时,被测端电压 $V_x =$ 参考端电压 V_s ,即 V_s 最大值为10V。根据电桥最佳的工作电流一般为mA或者uA级别,及国际上阻值及稳定性优异的标准电阻为10R/100R/1k欧姆,将 $R_s = 1k$ 欧姆是一个较佳选择。

[0053] 4) 量程扩展器电流比率系数 n_1 计算

[0054] 量程扩展器2实现大电流到小电流的准确电流比率变换。因为DCCT所需的电流如图3中所示 I_1 ,要求为几百甚至几千安培,而DCC电桥的所能允许的被测端电流 I_x 一般不能超过几百mA,所以必须通过量程扩展器进行电流准确比率的缩小。以校准300A的DCCT为例,来计算量程扩展器的比率系数。第一步,如果电桥允许的最大工作电流为300mA,则为了保证电桥能够正常工作,该比率系数 n_1 要求不能小于 $300A/300mA = 1000$ 。第二步,根据 R_s 选择为1k欧姆, I_s 最大为10mA。DCC电桥的比率范围即 N_x/N_s 一般为0.1:1~10:1,当电桥平衡时 $N_x * I_x = N_s * I_s$,则 I_x 要求不能大于100mA。所以该比率系数要求不能小于 $300A/100mA = 3000$ 。第三步,为了得到更佳的测量准确度,DCC电桥有一个最佳工作范围,即 $N_x/N_s = 1$ 或者在该值附近。以 $N_x/N_s = 1$ 为例,则该系数最佳值为 $300A/10mA = 30000$ 。考虑电桥不同 N_x/N_s 下的测量精度,及量程扩展器的复杂程度,以校准300A DCCT为例,10000左右的电流缩比是一个较佳的选择。

[0055] 一般都需要多级量程扩展才能实现上述电流的比率缩小。例如第一级量程扩展器实现1000倍比率,将300A电流缩比至0.3A;该电流进入第二级量程扩展,实现10倍比率的缩小,将电流缩小至 I_x 为30mA。

[0056] 5) 电桥及量程扩展器精度要求

[0057] 为了实现高精度校准,要求直流电流比较仪电桥3即DCC电桥0.1:1~10:1范围内的精度优于0.1ppm,目前商用电桥很容易达到该精度要求。对于量程扩展器的电流比率精度,要求优于1ppm,目前商用的量程扩展器也可完全达到此要求。对于标准电阻 R_s ,只需要有较高的温度稳定性即可,该电阻的准确值将直接影响测量的精度,但是电阻的准确度可以非常容易通过计量院的标定达到优于0.5ppm的水平。

[0058] 下面结合图5就利用前述的校准系统对直流电流传感器进行校准的方法进行详细说明。

[0059] 图5示出本公开示例性实施例中一种直流电流传感器的校准方法的流程图。

[0060] 在S502,通过调节所述直流电流比较仪电桥,使得所述直流电流比较仪电桥的参考端与被测端实现电位平衡。

[0061] 在S504,根据电位平衡时参考端线圈匝数与被测端线圈匝数的比率系数获得参考端电阻与被测端等效电阻的比率系数,其中所述两者比率系数相同。

[0062] 在S506,根据已知的参考端电阻的值与所述比率系数获得被测端等效电阻的值。

[0063] 在S508,计算被测端等效电阻与所述直流电流传感器等效电阻的偏差值,根据偏差值得到所述直流电流传感器的准确度。

[0064] 此外,上述校准方法中直流电流传感器的校准系统的各个部分的相关数值的计算或取值范围的选择等已经在前述的校准系统的实施例中进行了详细的说明,因此此处不再赘述。而且,尽管在附图中以特定顺序描述了本公开中方法的各个步骤,但是,这并非要求或者暗示必须按照该特定顺序来执行这些步骤,或是必须执行全部所示的步骤才能实现期望的结果。附加的或备选的,可以省略某些步骤,将多个步骤合并为一个步骤执行,以及/或者将一个步骤分解为多个步骤执行等。

[0065] 综上所述,根据本公开的一种实施例的直流电流传感器的校准系统和校准方法,利用磁通平衡原理,电桥达到平衡的过程及平衡状态时,主、从线圈电流为同时按比例互动平衡状态,测量精度不依赖于电流源和数字电压表的准确度和稳定度,克服了传统校准方法由电流源及电压表的性能决定测量精度的局限,可以满足未来加速器对于电流也即是磁场超高准确度的校准需求。

[0066] 本领域技术人员在考虑说明书及实践这里公开的发明后,将容易想到本发明的其它实施方案。本申请旨在涵盖本发明的任何变型、用途或者适应性变化,这些变型、用途或者适应性变化遵循本发明的一般性原理并包括本发明未公开的本技术领域中的公知常识或惯用技术手段。说明书和实施例仅被视为示例性的,本发明的真正范围和精神由下面的权利要求指出。

[0067] 应当理解的是,本发明并不局限于上面已经描述并在附图中示出的精确结构,并且可以在不脱离其范围进行各种修改和改变。本发明的范围仅由所附的权利要求来限制。

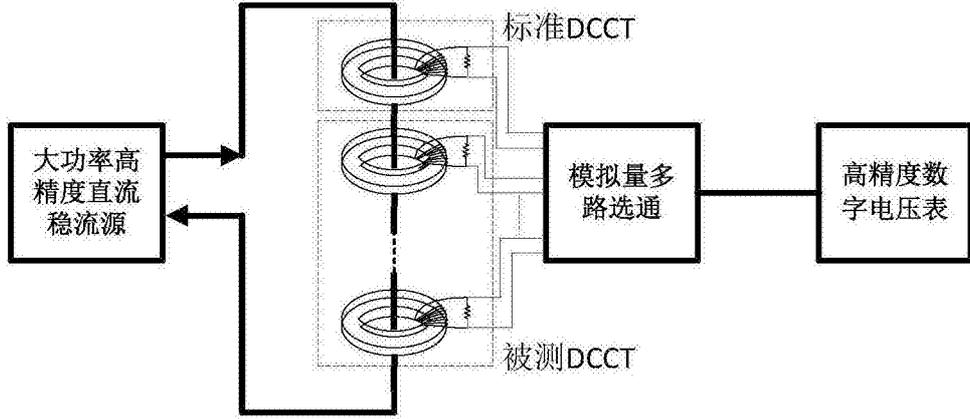


图1

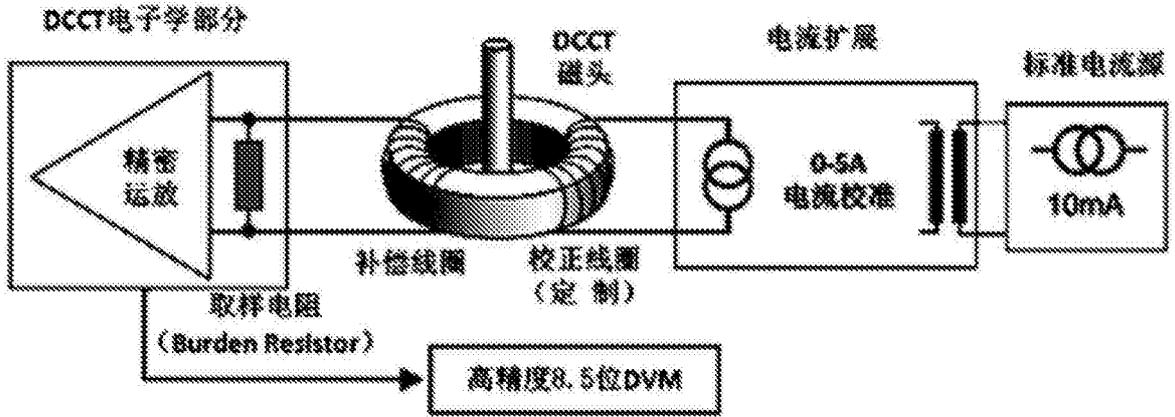


图2

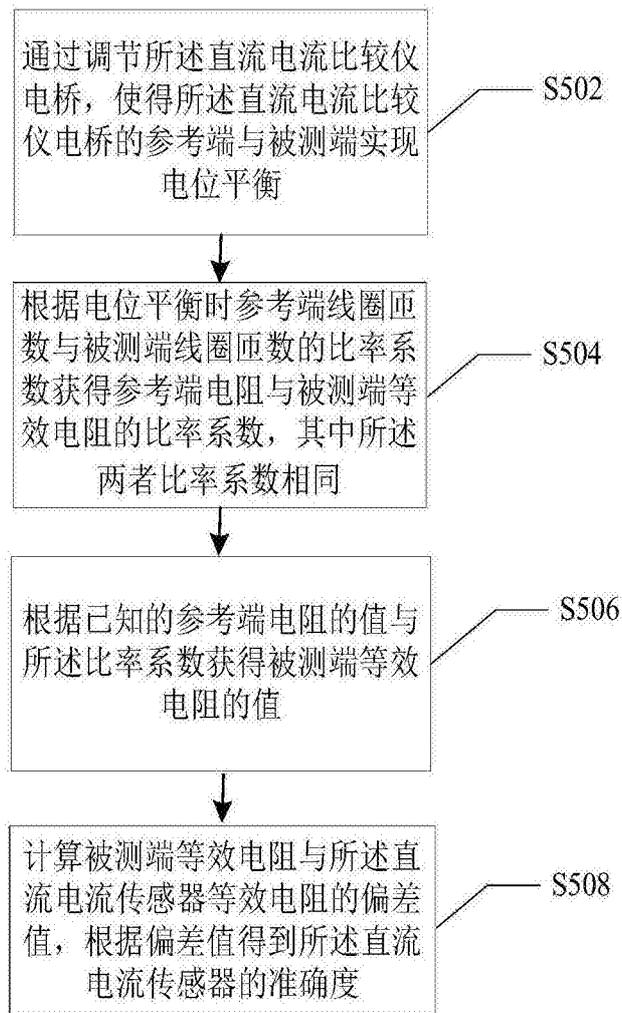


图5