「绝缘」

高气压超高电压环境下回转绝缘材料电荷分布测量设备设计

文/北京市斐克科技有限责任公司　李海霞
北京电子科技职业学院　李书田

积聚电荷的测量对于研究高压绝缘材料介电及绝缘性能方面起着相当重要的作用，目前用于绝缘体电荷表面分布测量主要用于几何形状较为简单的绝缘体上的电荷分布情况测量，针对回转体绝缘材料电荷分布测量设备的设计进行综述。设备在真空环境下使用，主要由腔室部分及四轴测量机构两部分组成。这里主要针对四轴测量机构进行了详细介绍。

随着高压输电电压等级的提高，要求绝缘材料承受的场强越来越高。研究表明在外施加电压的作用下绝缘介质内部及表面会出现空间电荷与表面电荷。目前用于绝缘体表面电荷分布测量主要采用电容极板接近的方法来测量，主要用于几何形状较为简单的绝缘体上的电荷分布情况。这种测量方法有几个特点：

1）绝缘体在真空环境中处于静止状态，测量表面多为平面。

2）测量探头可以做直线运动、二轴（直线轴）或三轴移动（直线轴）。

3）在测量过程中测量探头不能实时调整姿态。

这种测量方法局限了测量体本身的形状以及测量效果。

设计要求

被测绝缘体为盆式绝缘子，要求在实际GIS装置中，可根据给定三维曲面坐标，控制试验探头实现对曲面的等距垂直扫描动作，对盆式绝缘子内表面进行电荷分布测量。

1）绝缘体轴线必须处于水平状态，测量过程中绝缘体固定不动。

2）要求测量过程中测量探头轴线与被测量点的法矢方向一致，且探头与被测量点之间距离可控。

3）被测量点分布均匀可控以便于后续数据分析的便利和合理。

4）为便于充电，要求在非测量状态时，探头应离开测量区，并在以绝缘体轴线为轴半径120 mm以外。

5）设计采点程序，保证相邻测量点之间距离可通过参数加以控制。

具体设计要求在表1中列出：

表1　设备主要部件设计要求

序号	名称	参数/要求
1	可测量直径	不小于450 mm 定位精度±0.2 mm
2	可测量深度	不小于200 mm 定位精度±0.2 mm
3	可绕待测件轴旋转	不小于400° 定位精度±30′
4	主传感器姿态角变化	不小于75° 定位精度±45′
5	屏蔽球传送杆移动	运动范围不小于1 000 mm
6	屏蔽球传送杆旋转	旋转范围 任意
7	手掌与手指	手掌直径：100 mm 6只ϕ10 mm手指分布圆直径70 mm

设备配置及组成

如图1所示是设备完整外观图，设备由腔室部分及四轴测量机构两部分组成。

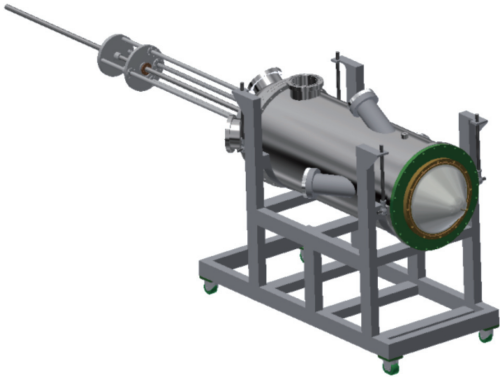

图1　回转绝缘材料电荷分布测量设备

图2为四轴测量机构结构示意图，在设备中主要进行测量任务。该机构由屏蔽球取送机构、四轴三维扫描机构、回转体待测件三部分组成。

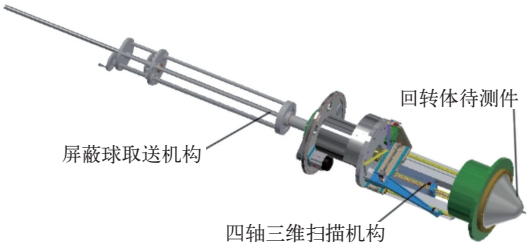

图2　四轴测量机构结构示意图

1. 屏蔽球取送机构

屏蔽球取送机构安装于后腔室的后部，用于安装和拆下屏蔽球。

屏蔽球的安装与固定：屏蔽球直径120 mm，通过锥柄及螺纹方式安装在回转体绝缘件的底部的相同规格锥形孔及螺纹孔上，以保证屏蔽球位置准确、姿态端正以及良好的接触。

屏蔽球在充电及电位测量过程所需的装卸动作通过屏蔽球取送机构实现，其设计原理主要为卸载屏蔽球和装载屏蔽球两个过程。

（1）卸载屏蔽球

如图3所示屏蔽球连接手掌（简称手掌）上装有相对固定的六根手指（简称手指），手掌在屏蔽球传送杆的驱动下可以沿测试件轴线方向移动（简称轴向移动），同时亦可以绕测试件轴线旋转（简称旋转）。屏蔽球与手掌相对的表面有六个异形孔与六根手指相对应。每个异形孔外侧均有完全一致的导向滑道，当手指做轴向移动时，手指可导入六个异形孔中，当手掌带动手指做逆时针旋转时（面对异形孔观察），手掌通过手指与屏蔽球自动锁紧，屏蔽球与回转绝缘体的螺纹（右旋）连接副被旋松，同时锥柄与锥孔的定位关系也被松开，完全松开后，屏蔽球传送杆向后移动（如图向右）将屏蔽球及前端的支撑杆（含锥柄及螺纹的部分）送至主回转体内部直径140 mm的空间，为后续的扫描测量动作的完成让出空间。

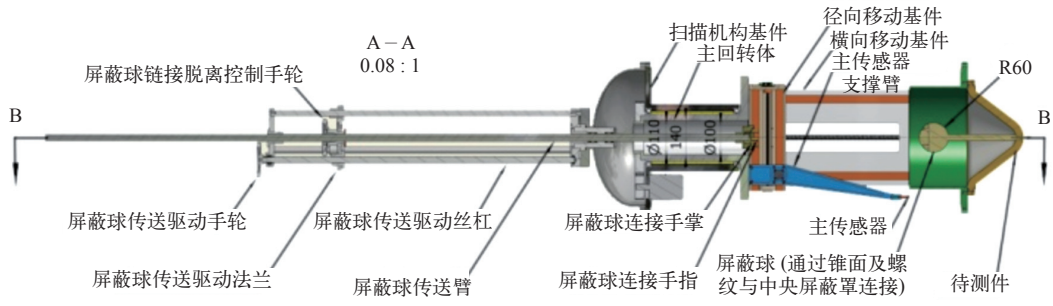

图3　四轴测量机构结构半剖图

（2）装载屏蔽球过程

当测量完成后需要重复试验或修改参数再次重复充电测量过程，则需要屏蔽球重新安装，只需要将屏蔽球传送杆向前移动当屏蔽球螺纹与回转绝缘体的螺纹孔接触后，传送杆顺时针旋转（面对异形孔观察），屏蔽球支撑杆被旋入，同时锥柄与锥孔重新配合并锁紧。此时手掌与屏蔽球之间锁紧关系自动解除，手掌手指在传送杆的作用下向后退回到主回转体内部。具体动作描述如下：

1）屏蔽球传动杆的移动，传动杆采用直径30 mm表面淬火轴承钢材料可在装配于屏蔽球连接脱离机构两端法兰上的直线导套间沿轴线移动及转

动，由于传动杆一端位于腔室内部，一端位于腔室外部，因此有两对C型密封圈，实现密封；传动杆的移动主要靠滚珠丝杠间接驱动。中间有移动法兰，移动法兰通过屏蔽球连接脱离手轮与传动杆连接。通过转动屏蔽球传送驱动手轮可使传动杆前后移动，通过转动屏蔽球连接脱离手轮可以使手掌左右转动，实现屏蔽球的装卸（即屏蔽球的连接与脱离）。

2）手掌手指与屏蔽球之间的锁紧或脱离均自动完成，只要按照操作方法进行即可，一般无需干涉。

2. 四轴三维扫描机构

该机构安装于主腔室和后腔室之间，在程序控制下完成主传感器在回转体待测件表面位置与姿态序列，达到获取电位数据的目的。

（1）机械结构部分

如图4所示，三维由两个旋转两个移动共四个伺服轴实现，四轴的关系为串联。依次为绕测试件轴转动的旋转轴、沿测试件轴向移动的直线轴、沿测试件径向移动的直线轴、主传感器在测试件的轴径面上的转动的旋转轴。

通过控制系统的位置指令可以使主传感器与

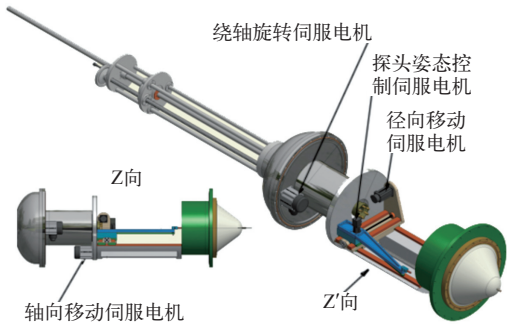

图4　四轴三维扫描机构伺服电机分布示意图

待测表面法矢方向一致且到待测量面距离恒定。可以完成待测面指定位置的点测量，也可完成指定四维轨迹连续测量。

（2）表面电荷分布测量控制系统

在回转体绝缘子表面电荷分布测量时，要求设备能够对三维曲面的等距垂直扫描动作可控；并且电荷放大器通过电容探头对表面电荷测量数据进行读取和存储实现可控；可对电容探头姿态参数进行读取和存储。

根据测量要求，可设数据采集网格间距为Δt、探头长度Λ、测量高度Ξ，其函数关系为表2所示。

表2　控制系统函数关系

通用表达式	$Y=f\ (y,\ \Lambda,\ \Xi,\ A)\ Z=g\ (z,\ \Lambda,\ \Xi,\ A)$	C1步数计算	$t\in[m,\ n)$
X轴步数计算	$N_x=\mathrm{Round}\ (2\pi z/\Delta t)$	L1步数计算	$t\in[n,\ o)$
沿曲线长度方向划分	$\Delta t\ \ t=t_0+n*\Delta t$	C2步数计算	$t\in[p,\ q)$
L0步数计算	$t\in[0,\ m)$	C3步数计算	$t\in[q,\ r)$

注：其中采集网格间距为Δt、探头长度Λ、测量高度Ξ

利用函数关系表达关系，结合GIS盆式绝缘子外形曲线进行具体系统算法分析，图5为盆式绝缘子外形曲线。

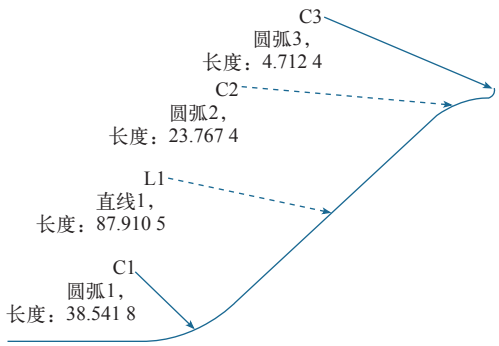

图5　待测件盆式绝缘子外形曲线

根据外形曲线形状，将曲线划分为5段，分别是L0、C1、L1、C2、C3五段线段，根据5段线段不同的曲线方程，进行算法分析。表3中详细列举其函数关系算式。

根据原始曲线的线性函数关系进行系统算法开发，结合设备的坐标方程的描述方式进行实际测量的控制程序编制，见表4，其中根据设备设计要求数据采集网格间距为$\Delta t=10$ mm、探头长度$\Lambda=90$ mm、测量高度$\Xi=5$ mm。

3. 回转体待测件

回转体待测件安装在主腔室的前端，如图6所示。

测试件设计有子口用于与测量系统同轴，以减小测试设备的复杂程度，进而提高设备的可靠性。保证测量系统回转轴与被测试件回转轴重合。

表3　曲线函数关系式

线段	线性描述	参数方程（t表示长度）
L0（直线）	起点：(0，0)， 终点：(50，0)， 长度：50	X∈[0，360] $Y=0$ $Z=t$ $A=0$ t∈[0，50）
C1（圆）	圆心：(50，60)， 半径：$R_1=60$， 起点：0°， 终点：36.804 682°， 长度：38.541 8	X∈[0，360] $y=60-60\times\cos(A)$ $z=50+60\times\sin(A)$ $A=[(t-50)/(2\times60\times\pi)]\times360$ t∈[50，88.541 8）
L1（直线）	起点：(85.945 3，11.959 1)， 终点：(156.333 7，64.625 2)， 长度：87.910 5	X∈[0，360] $y=11.959\ 1+(t-50-38.541\ 8)\times\sin(36.804\ 682)$ $z=85.945\ 3+(t-50-38.541\ 8)\times\cos(36.804\ 682)$ $A=36.804\ 682$ t∈[88.541 8，176.4523）
C2（圆）	圆心：(178.5，35)， 半径：$R_1=37$， 起点：36.804 682°， 终点：0°， 长度：23.767 4	X∈[0，360] $y=35+37\times\cos(A)$ $z=178.5+37\times\sin(A)$ $A=[(t-50-38.541\ 8-87.910\ 5)/(2\times37\times\pi)]\times360$ t∈[176.452 3，200.219 7）
C3（圆）	圆心：(178.5，75)， 半径：$R_1=3$， 起点：0°， 终点：90°， 长度：4.712 4	X∈[0，360] $y=75+3\times\cos(A)$ $z=178.5+3\times\sin(A)$ $A=[(t-50-38.541\ 8-87.910\ 5-23.767\ 4)/(2\times37\times\pi)]\times360$ t∈[200.219 7，204.932 1）
总长度	50+38.541 8+87.910 5+23.767 4+4.712 4 =204.932 1	t∈[0，204.932 1]

坐标系说明：盆轴的旋转轴定义为X轴；盆轴为直线轴Y轴；盆的径向为直线轴Z轴；探头旋转轴为A。

表4　设备坐标方程描述

通用表达式	$Y=y+(\Lambda+\Xi)\times\cos(A)$ $Z=z-(\Lambda+\Xi)\times\sin(A)$
X轴步数计算	$N_x=\mathrm{Round}(2\pi z/\Delta t)$
沿曲线长度方向划分	Δt $t=t_0+n\Delta t$
L0步数计算	t∈[0，50）
C1步数计算	t∈[50，88.5418）
L1步数计算	t∈[88.5418，176.4523）
C2步数计算	t∈[176.4523，200.2197）
C3步数计算	t∈[200.2197，204.9321）

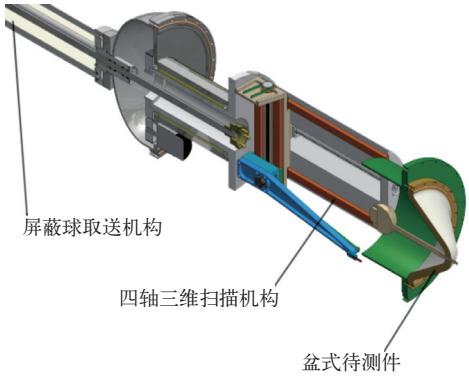

图6　四轴测量机构结构剖视图

结束语

在整套设备设计过程中，四轴三维扫面机构为技术核心，由机械和控制两个部分组成。其中机械部分两直线轴和两个旋转轴以及通信动力电缆引导机构构成。而在实现机械运动的基础上，要配套有控制系统对探针实现扫描采点控制。引入数控系统RTCP功能实现测量探头轴线与被测量点的法矢方向一致，并利用网格化设计采点位置。从而解决回转体绝缘子高气压、高电压环境下电荷分布的测量难题。**EA**

（收稿日期：2017.06.09）

（编辑：白文亭）