

时域反射计（TDR）在滑坡监测的应用

北京木联能工程科技有限公司

2003.6

1、引言

滑坡是一种常见的自然地质灾害，常常造成巨大的损失。为了最大限度地减少和防止滑坡带来的损失，就必须对滑坡进行监测，实现滑坡危害的早期预报，以防患于未然。就滑坡监测而言，目前常用的设备包括应变计、斜坡计、水平仪以及倾斜仪等。但在实际应用中，这些设备普遍存在的问题是需要技术人员定期到现场对数据进行人工采集，这就使得滑坡监测缺乏实时性。此外，在很多情况下，不稳定滑坡处于边远地区，人员很难到达，甚至可能存在危险，无法由人工采集数据。相比之下，基于 TDR 技术的滑坡监测系统具有突出的优点。

2、TDR 技术与滑坡监测

2.1 TDR 技术的发展

TDR 是时域反射法（time domain reflectometry）的简称，它是一种远程电子测量技术。其最早被应用于电力和通讯工业上，用于确定通信电缆和输电线路的故障与断裂（Rohrig, 1931）。自从发现 TDR 技术可以测定土壤的含水量以后，TDR 技术在农业上也有了很广泛的用途（Topp 和 Davis, 1985）。美国矿业局自 20 世纪 80 年代也开始采用 TDR 技术来进行岩体变形的测量（O'Connor 和 Dowding, 1984）及寻找长墙煤矿中的塌陷层（O'Connor, 1991, Dowding 和 Huang, 1994）。同一时期，加拿大矿物及能源技术中心（Canada Centre for Mineral and Energy Technology, CANMET）还将其用于监测金属矿的顶板冒落（Aston, et al, 1994），石化公司也用它监测靠近拉铲挖土机的滑坡（Lord, et al, 1991）。90 年代初，美国加利福尼亚运输部门进行了深入的试验，以评价 TDR 在远程及实地监测滑坡领域的应用价值（Kane 和 Beek, 1996）。研究的结果加上 TDR 技术在其他领域内的广泛应用，使得 TDR 技术受到了工程地质界的关注。在欧美等发达国家，TDR 技术已开始在滑坡监测中得到广泛应用。我国也有部分的地质专家非常关注此技术的发展。

2.2 TDR 技术监测滑坡的原理

一个完整的 TDR 滑坡监测系统，一般由 TDR 同轴电缆、电缆测试仪、数据记录仪、远程通讯设备以及数据分析软件等几部分组成，见图 1。

在使用 TDR 系统进行滑坡监测时，首先需要在滑坡的某个位置钻孔，并将 TDR 同轴电缆安放在钻孔中。然后，将 TDR 电缆与电缆测试仪相连。电缆测试仪作为信号源，发出步进电压脉冲通过电缆进行传输，同时反映从电缆中反射回来的脉冲信号。数据记录仪连接到电缆测试仪之上，它对电缆测试仪起控制作用，记录和存储从电缆中反射回来的脉冲供以后分析。此外，数据记录仪还可连接远程通讯设备，如移动电话或是短波无线电装置等，将收集的数据发送到远处。TDR 系统中还可配备多路复用器，以对多点进行同时监测。

在 TDR 滑坡监测系统中，同轴电缆是直接和滑坡产生接触的部分，可以将其看作一个特殊的传感器。同轴电缆的中心是一根金属导体，其周围为绝缘介质，绝缘介质外面有金属的导体环绕，最外层有保护层。在真空中，电能以光速传播。当在电缆中传输时，其速度会稍微减慢，即通常所称的传播速度。由于特定电缆的传播速度是已知的，电缆测试仪通过测量发送脉冲与反射脉冲之间的时延就可以确定任何电缆反射点的距离。

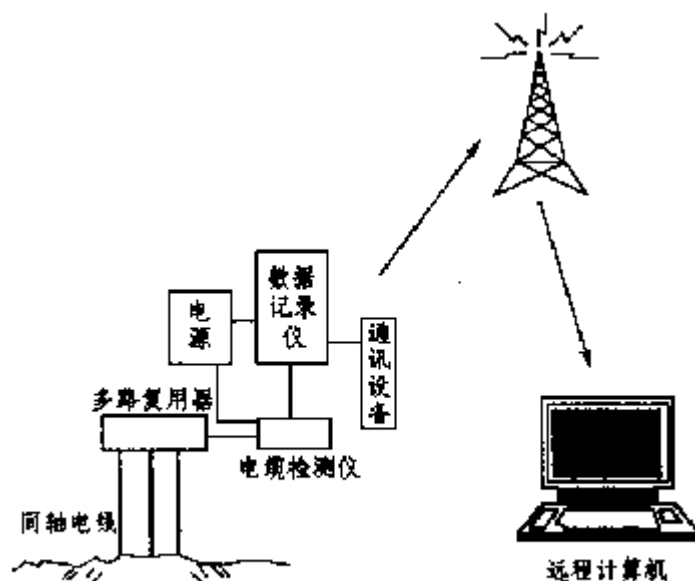


图1 TDR滑坡监测系统

另一方面，同轴电缆的特性阻抗是由自身的材料组成及结构决定的。当电缆发生形变时，内层与外层导体间的距离也发生改变，从而使得电缆的阻抗和反射的电压脉冲发生变化。在TDR系统中，如果岩体的移动使得TDR电缆变形，例如出现弯皱、扭折、渗水或是断裂，电缆的特性阻抗就会发生相应的变化，它反射出的电压脉冲的波形也将改变，见图2。

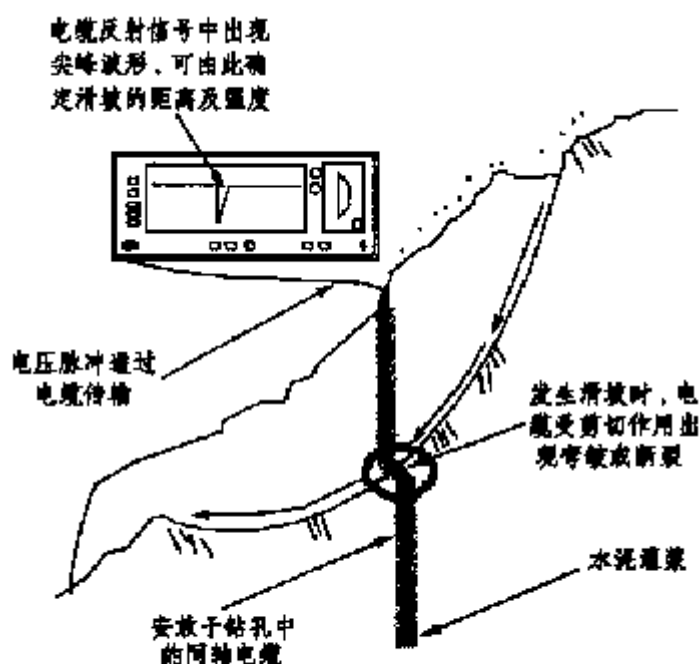


图2 连接在电缆测试仪上的TDR电缆受滑坡的影响而产生变形

电缆测试仪将反射脉冲与发射脉冲进行比较后，即可确定电缆形变点的反射特性。发送的脉冲以及从电缆变形处反射回来的脉冲之间的时延决定了损伤发生的位置；反射脉冲的波形、范围以及强度则反映了电缆变形的类型和变形程度。具体而言，比较返回脉冲与发送脉

冲即可确定反射系数。如果反射脉冲与发送脉冲相同,则反射系数为+1,表示电缆中产生了断路。相反,如果电缆短路,则所有的电能都通过大地返回,此时反射系数为-1。如果电缆发生变形,如受到剪切力或张力的作用,则它的特性阻抗会发生改变,反射系数为-1~+1。

TDR 信号实际上是由 TDR 电缆的反射波组成的。如果 TDR 电缆产生变形,它的反射波中就会出现尖峰脉冲,见图 3。

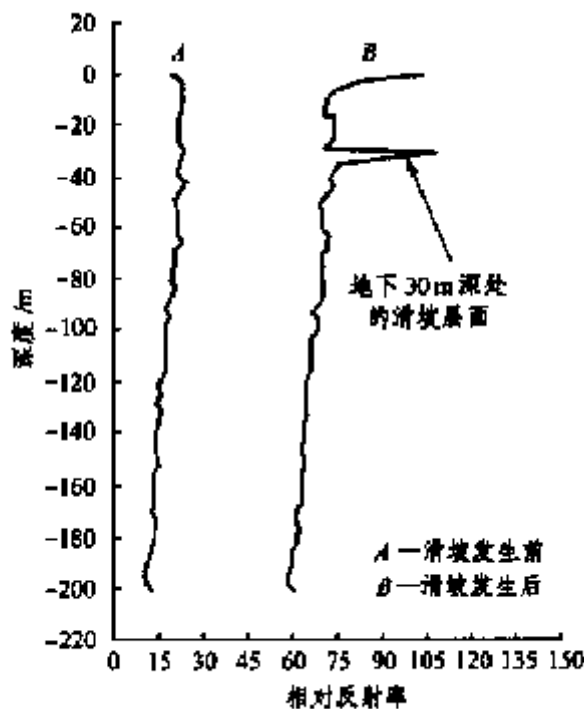


图3 TDR电缆反射的信号显示出滑坡的发展

不同的电缆变形在 TDR 信号中表现为不同的尖峰脉冲。电缆受损的严重程度可以通过尖峰脉冲的长度和幅度来反映。位于切变处的电缆反射出一个电压的尖峰信号,该信号随着剪切变形的程度而成正比例地上升。电缆即将断裂时,出现明显地尖峰信号。在断裂发生之后,则记录到永久性的反射。在张力的作用下,电缆反射的波形是类似波谷的电压信号,其长度随着电缆变形的加剧而增加。在断裂发生的当时,可以从电缆测试仪上观察到一个细小的颈缩波谷,它与剪切破坏所反射的电压波形之间可以区分开来。

为了便于监测地层地移动,TDR 系统要求以固定的时间间隔来读取电缆所反射的信号。地层的移动,例如事故地区的滑坡将使电缆产生各种形变,从而改变电缆的阻抗特性并产生相应的尖峰脉冲反射。这种改变可以用来确定剪切移动的位置。随时间而变化的电缆阻抗与地层的移动速率之间具有相关性。通过读取电缆反射波形的数据,可以监测地层地移动。随着反射波形地强度增加,可以预测某个区域地地层可能会发生断裂。

3、TDR 系统的关键部件剖析

3.1 TDR 电缆

从理论上讲,任何电缆都可以用于 TDR 测量。但是,市场上出售的各种电缆的特性各不相同,使得不同的电缆在实际使用时有较大的差异。例如,普遍的 75Ω 同轴电缆价格低廉,使用也很方便。以美国为例,大多数 TDR 系统中采取的都是 RG59/U 型的廉价电缆。这类电缆的主要问题在于它对信号的衰减比较严重(每公里直流电阻最高接近 200Ω,最低的也在 50Ω 左右),因此,不能用于较深的钻孔中。

应用于较深钻孔的电缆要求其具有很好的信号分辨率。为了达到较好的使用效果,应当

使用有包皮保护和泡沫填充的电缆。这一类型的电缆相对要昂贵一些,但特性良好且容易安装。美国一些监测深层公路滑坡的 TDR 系统采用的就是 FLC12-50J 型的 50Ω 同轴电缆。FLC12-50J 型电缆的 1km 直流电阻不足 2Ω ,可以监测位于地下很深处的地层运动。

此外,某些 TDR 系统中也可能采用无包皮电缆。此类电缆在安装前必须涂上涂层,以防止浆液对它产生不利影响。必须指定的是,将无包皮电缆涂上涂层十分花费时间,而且无包皮电缆的灵敏度也不能与有包皮保护的电缆相比。

对于较大型的电缆(直径超过 1.5cm),由于比较笨重,不便于操纵,因此, TDR 系统通常都不会采用这一类型的电缆。

TDR 电缆在使用之前,还需要进行一些处理。放入钻孔中的电缆末端需进行水平切割,用透明绝缘胶带将电缆末端封好,然后在电缆末端套上紧合的橡胶或塑料套。接头也需要用绝缘胶带紧密地缠好,防止渗水。还需要注意的是,电缆绝缘层内部和外部的导体不能产生接触,以免短路。

将 TDR 电缆安放于钻孔中后,还必须对钻孔进行灌浆处理。必须保证浆液具有足够的硬度,以使电缆在受力时能发生变形。一般来说,10%的粘土与 90%的水泥灰浆混合而成的浆液比较理想,但也可以使用 100%的水泥作为灌浆。如果电缆被安放于未灌浆或使用砂填充的钻孔中,就会导致 TDR 电缆监测性能的大幅下降。

3.2 电缆检测仪

电缆检测仪的用途非常广泛,在市场上有各种不同型号的产品。例如,一些型号适合于检测土壤含水量,一些在电子工业中有特殊的用途,另一些则不便于使用或者无法与某些电缆配合使用。适用于 TDR 系统的电缆测试仪通常是金属检测仪(metallic cable tester)。如在美国,大多数投入使用的 TDR 系统采用的都是 Tektronix 公司的 1502C/CS 系列和 Campbell Scientific 公司的 TDR100 检测仪。其中, Tektronix 1502C/CS 十分坚固,可以在恶劣环境中使用。它们都带有一个液晶显示屏,用于实时显示电缆信号。

TDR100 与 1502 系列功能类似,其主要特点是体积小、重量轻,但没有液晶显示功能。此外, TDR100 还可以直接与数据记录仪相连,不需要附加任何额外的组件。

3.3 数据记录仪

从本质上讲,数据记录仪可以看作是一台带有电压计的计算机。在 TDR 系统中,数据记录仪从电缆测试仪中读入数据,并进行存储。它与其他设备之间通过端口进行连接。控制和触发端口可进行编程设置,在特定条件下输出电压,开启外围设备(如移动电话或电缆检测仪)。其他端口可与传感器相连,测量传感器的输出电压,并运用计算机的运算功能对电压值进行变换。

3.4 多路复用器

通过多路复用器,一台电缆检测仪可同时连接多条同轴电缆。多路复用器上有多个触点,用于在各条电缆的数据通道间进行切换。电缆检测仪则顺序读取复用器传送的数据。此外,多路复用器还可级联使用,大大增加电缆接入数量。复用器级联后,一台检测仪可同时检测的电缆多达 512 条。TDR 系统中的多路复用器并无特殊要求,但必须配备接入 TDR 电缆的接口。

4、TDR 系统的优点及不足

在进行滑坡监测时, TDR 系统与水平仪、倾斜仪等传统监测仪器相比有很多优点。

(1) 价格低廉

与倾斜仪的外壳相比,电缆的价格优势十分明显。普通同轴电缆的价格仅为 5 元/米,而倾斜仪外壳的价格高达 200~300 元/米。电子设备方面的价格差距也同样很明显;每台倾斜仪的售价接近 10 万元,而新一代 TDR 电缆测试仪的价格要低得多。在实际使用时,钻孔并将两者埋入地下的费用是相同的,但倾斜仪的外壳在遇到剧烈形变时会损失昂贵的探

头，TDR 系统在这种情况下则只会损失埋于地下的那一段电缆。

(2) 检测时间短

除了在设备方面可以节约费用以外，TDR 电缆的快速数据读取功能使得可以在较短的时间内了解更多的钻孔情况，这就要以节约大量的人工。单独的一根 TDR 电缆，无论它放置有多深，都可以在不到 5min 的时间内了解其信号状况。而根据埋入深度不同，读出一个倾斜仪的数据要 30~60min 的时间。安放于同一地点的多路 TDR 电缆可以接入一个中心单元中，这样就可以同时读取所有的电缆信号数据，数据采集效率得到很大提高。

(3) 可遥测

TDR 系统可以与数据记录器、普通电话或便携式电话相连，将现场采集的数据发送到远端，从而方便地实现遥测。对于那些难以到达的地点，使用遥测技术可以保证技术人员即使不在现场也能实时读取数据。即便是在高速公路上安装 TDR，也不必进行交通管制。电缆可以安装在人行道下，从道路两侧就可以很安全地获得数据。远程自动系统的另一个优点是它可以同时使用另外的传感器，如进行水位观测的线振压强计、观测地表移动的电势应变计以及监测斜坡的电解气泡应变计等。包括 TDR 在内的这些传感器都可以进行编程设定，如果传感的读数超过某个预定的阈值，它们就会自动发出警告信号。

(4) 可固定在倾斜仪的套管上

即使是在必须使用传统倾斜仪的场合，TDR 电缆也可附着在倾斜仪的套管的外层，作为倾斜仪监测的补充。虽然 TDR 电缆会因为套管的存在受到影响，但电缆通常比套管持久。当探头因套管变形时间过长而失效后，TDR 电缆仍可以提供地层移动的信息。

(5) 安全性高

使用 TDR，数据的采集就可以在安全的位置进行，甚至是在办公室里通过远程数据读取设备来进行，技术人员不再需要亲自出现在危险的交通要道上，也不需要冒滑坡和岩崩的危险到不稳定的滑坡上进行数据采集。

(6) 数据提供快捷

在大多数不稳定的滑坡地区，必须弄清楚这样的问题：滑坡是否在移动？何处发生了移动？移动的速度有多快？TDR 可以快捷地提供这些数据。TDR 不需要先将数据从读数显示屏输到计算机内，然后再绘制出结果，电缆测试仪的屏幕可以直接显示电缆的信号。通过比较不同时间的电缆信息，就能够确定滑坡的地点和移动速度的改变。通过比较不同时间电缆信号中的尖峰脉冲的幅度，还可以估计滑坡形变的速率。

但与传统监测仪器相比，TDR 系统也存在不足之处。

(1) 倾斜监测

只有在受到剪切力、张力或是两者的综合作用而变形的情况下，TDR 电缆才会产生特征信号。如果电缆只是因受力而弯曲，本身并未变形，则不会有任何特征信号产生。因此，TDR 不能用于需要监测倾斜情况但不存在无剪切作用的区域。例如，护岸以及其他类似的建筑通常都采用倾斜仪来进行倾角变化监测。

(2) 滑坡移动量和移动方向

已经有一些研究将 TDR 信号中尖峰脉冲的强度与滑坡的移动量联系起来，在实验室的试验中，也已经发现尖峰脉冲强度与滑坡移动量之间有一定的相关关系。但在实地测量中，发现它们之间的相关性几乎不存在。另一方面，TDR 系统的监测原理决定了它仅能确定剪切面，无法确定滑坡移动的方向，因而需要结合其他方法加以弥补。

5、结束语

TDR 系统采用廉价的同轴电缆作为传感器，它使用与雷达类似的技术来确定滑坡的剪切面或形变区域。与传统的监测仪器相比，虽然它在某些方面存在不足，但在价格、时间、数据提供以及安全性等多方面都具有明显优点。TDR 系统的最大特点是可快速提供数字化

的监测数据并将其传送到远方，从而实现滑坡监测的智能化。除此之外，TDR 技术还可用于土壤湿度监测、水平面监测、污染监测、地基监测以及地震预报等方面。在国外，TDR 技术以其突出的优越性已逐渐得到广泛应用。

美国 Campbellscientific 公司 TDR100 时域反射计



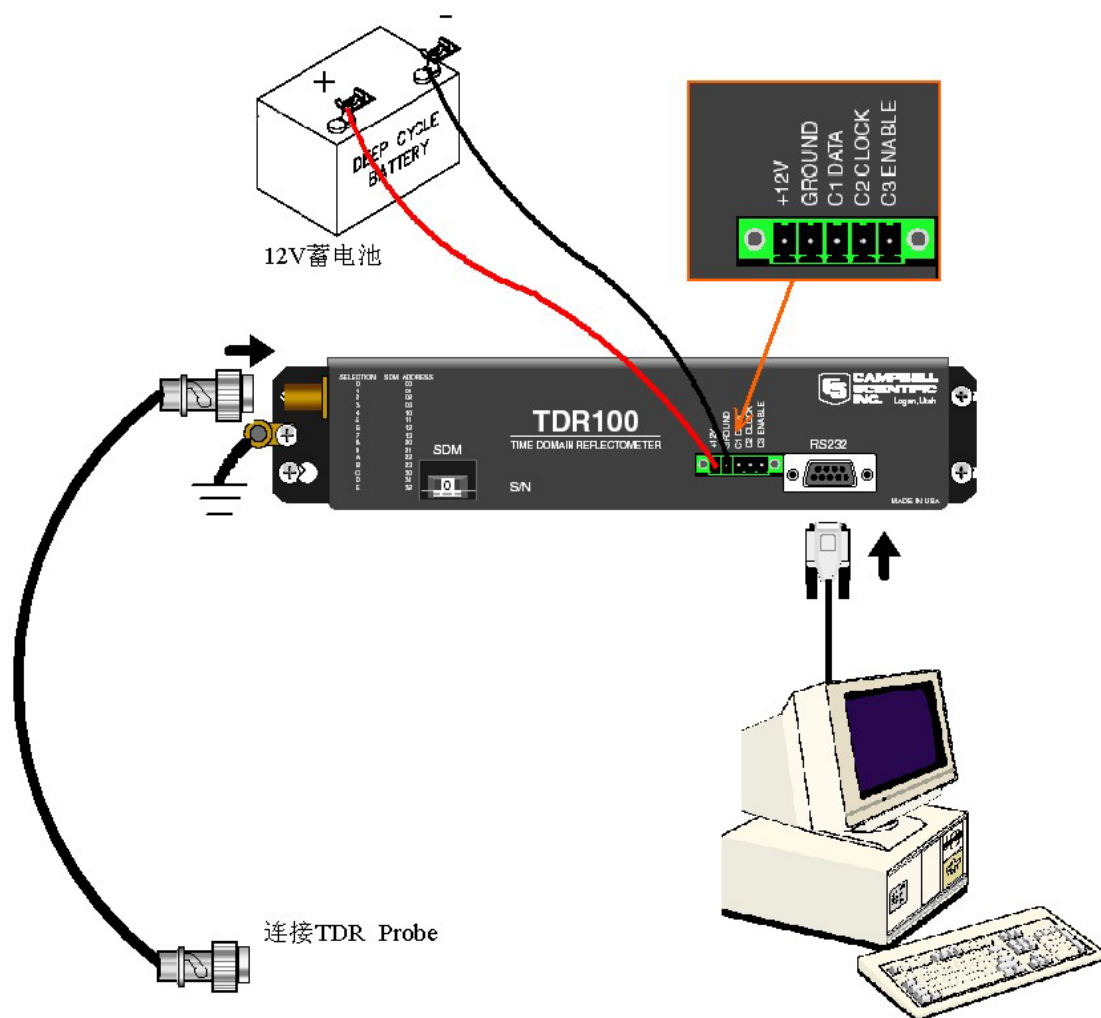
TDR100 技术指标

脉冲发生器输出:	250 mV into 50 ohms	
输出阻抗:	50 欧姆 $\pm 1\%$	
脉冲发生器和取样电路组合的时间响应:	≤ 300 皮秒	
脉冲发生器偏差:	前10毫微秒内 $\pm 5\%$, 后10毫微秒 $\pm 0.5\%$	
脉宽:	14 微秒	
计时分辨率:	12.2 皮秒	
波形取样:	波形值20 to 2048 超过所选择的长度	
	<u>距离 ($V_p = 1$)</u>	<u>时间 (单行线)</u>
范围:	-2 to 2100 m	0 to 7 微秒
分辨率:	1.8 mm	6.1 皮秒
波形平均值:	1到128	
静电放电保护:	内部箝位电路	
耗用电流:	测量270mA; 睡眠模式20mA; 待命模式2mA	
电源:	任意12V (9.6 V to 16 V), 最大300mA	
温度范围:	-40° to 55°C	
尺寸:	21 cm $\times$ 11 cm $\times$ 5.5 cm (8.3" $\times$ 4.3" $\times$ 2.2")	
重量:	700 g (1.5 lbs)	

人工监测

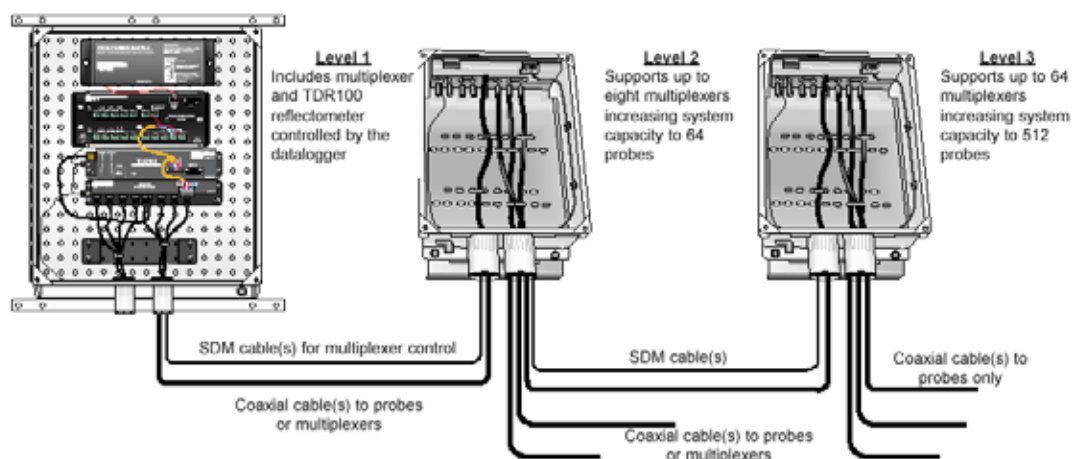
用于人工观测的 TDR100 配置

序号	名 称 及 型 号	单位	数量
1	TDR100 时域反射计,含 PCTDR 软件及 RS232 接口	台	1
2.1	FLC12-50J 0.5 英寸 TDR 埋入式专用电缆	米	用户自定
2.2	FLC12-50J 0.5 英寸 TDR 埋入式专用电缆接头	个	8
3.1	0.5 英寸 N 型电缆接头(供连接埋入式专用电缆接头)	个	1
3.2	RG59 连接用电缆(两端连接 3.1 和 3.3 电缆接头)	米	用户自定
3.3	RG59 BNC(M)电缆接头(供连接 TDR100 时域反射计)	个	1
	可选		
4	PSC-121250A 12 伏 6-24 AH 电池充电器	个	1



用于人工监测的 TDR 系统接线示意图

自动化监测

用于自动化监测的 **TDR100** 配置

序号	名 称 及 型 号	单位	数量
1	TDR100 时域反射计含 PCTDR 软件及 RS232 接口	台	1
2	SDMX50SP 8 通道 50 欧姆 TDR 接线装置	个	1
3	FLC12-50J 0.5 英寸 TDR 埋入式专用电缆	米	用户自定, 最多可配 8 根
4	COAX-NCON and COAX-NFADP 0.5 英寸 N 型专用电缆接头	对	8
5	RG59 COAX 接线装置连接用电缆	米	用户自定
6	COAX-BNC (M) 上述 RG59 电缆接头	个	16
7	798-A-TDR Handi-Logger 数据采集系统 (可接两个接线箱)	台	1
8	PC208W 上述数据采集系统的配套软件	套	1
	可选		
1.1	TDR100ENC (同第 1 项但将第 1 项和第 2 项置于箱体, 供远程自动数据采集用)	台	1