

法。它们是二十多年来现场维护工作经验的总结，其中很多办法在《铁路信号设备雷电防护办法》中已作了明文规定，在维护工作中必须认真执行。

本书第一、三、四、五章由哈尔滨铁路局科研所何健楠编写；第二、九章由北京铁路局天津分局刘廷佐编写；第六、七章由铁道部科学研究院通信信号研究所张炳森编写；第八章由张炳森、刘廷佐合写。在编写过程中，得到了有关单位领导和同志们们的热情支持和帮助，铁道部信号防雷小组给予了许多具体的指导，并提供了大量的技术资料。在此对他们表示衷心谢意。

因作者水平有限，书中不当之处欢迎读者批评指正。

编 著 者

1985年3月于北京

内 容 简 介

本书结合铁路信号设备,对雷电防护的有关问题,进行了比较全面、系统地叙述。全书共分九章,内容包括:雷电形成及观测,雷电对铁路信号设备的侵袭,雷电防护装置,信号设备的电气绝缘,接地装置,信号设备雷电防护电路,雷电冲击试验,防雷元件测试器和信号设备雷电防护装置的维护等。

本书主要供铁路信号设备雷电防护设计、施工以及维修人员阅读,也可供其他行业从事雷电防护工作的人员参考。

铁路信号设备雷电防护

何健楠 刘廷佐 张炳森 编著

中国铁道出版社出版

责任编辑 颜绍养 封面设计 刘景山

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092毫米 $\frac{1}{16}$ 印张: 6.625 插页: 1 字数: 151 千

1986年10月 第1版 1986年10月 第1次印刷

印数: 0001—8,000册 定价: 1.20元

前 言

铁路信号设备担负着保证行车安全、提高运输效率的重要任务。而信号设备雷电防护的研究，又是一项综合性、基础性和长期性的工作。特别是随着电子技术和计算机技术的推广应用，雷电防护技术的研究，更是必不可少的课题。

我国铁路信号设备雷电防护工作，在近二十年来，开展了大量的试验研究工作，积累了较丰富的实践经验，在技术上取得了较大的进展，在这个基础上编写了本书。

本书第一章以通俗易懂的语言介绍了雷电形成的机理，同时还详细介绍了雷电观测的方法。第二章所介绍的雷电侵袭信号设备的途径，是多年来信号设备遭受雷电侵袭情况的总结与分析。第三章详细地介绍了常用的雷电防护装置的工作原理、防护性能及参数指标。第四章介绍了信号设备的电气绝缘。第五章系统地介绍了各种接地装置，土壤电阻率和接地电阻的测量方法。它们都是现场常用的，有较大的实用价值。第六章介绍了各种信号设备雷电防护电路。它是我国铁路信号雷电防护工作者，参阅了大量的国外资料并结合我国国情，研究成功的一系列信号设备雷电防护电路。这些电路在现场都得到广泛采用，并取得了良好的防护效果。第七章对雷电冲击试验的原理进行了理论分析，并且对具体试验方法作了较详细的介绍，这些内容对雷电防护研究人员较有参考价值。第八章介绍的两种防雷元件测试器，在铁路信号防雷会议上得到大家的公认。认为它们的性能较好，并建议推广使用。第九章介绍了信号设备雷电防护装置的维护办

目 录

第一章 雷电形成及观测	1
第一节 雷电的形成	1
第二节 雷电参数与雷电活动	6
第三节 雷电的观测	11
第二章 雷电对铁路信号设备的侵袭	18
第一节 雷电的侵袭	18
第二节 侵袭的途径	29
第三章 雷电防护装置	35
第一节 避雷针和架空地线	35
第二节 FS-0.22 阀式避雷器	40
第三节 放电管	44
第四节 固体放电器件	49
第五节 熔断器	60
第四章 信号设备的电气绝缘	64
第一节 概述	64
第二节 电气绝缘及绝缘配合	66
第三节 电子器件耐电能力分析	70
第五章 接地装置	77
第一节 土壤电阻率	77
第二节 接地体及接地电阻	81
第三节 土壤电阻率和接地电阻的测量	92
第四节 接地装置设计概要	99
第六章 信号设备雷电防护电路	105

第一节	电源系统的防护	105
第二节	架空明线及电缆系统的防护	107
第三节	轨道电路系统的防护	109
第七章	雷电冲击试验	121
第一节	冲击电压发生器	121
第二节	冲击电流发生器	148
第三节	雷电冲击试验	161
第八章	防雷元件测试器	173
第一节	FC-2 型防雷元件测试器	173
第二节	CYB-II 型防雷元件测试器	183
第九章	信号设备雷电防护装置的维护	189
第一节	雷电防护器件的维护	190
第二节	接地装置的维护	194
第三节	雷测装置的维护	196
第四节	雷害事故的调查分析及资料积累	198
附录	部分与防雷有关的图形符号	203
主要参考文献		205

第一章 雷电形成及观测

第一节 雷电的形成

雷电是怎样形成的，直到目前还没有被人们所完全认识，但是有一点较为大家所公认，就是上升的气流对雷电的形成起着重要的作用。然而，雷电形成的原因不是单一的，而是有几个原因同时发生作用，因此只有搞清雷电形成的机理，我们才能掌握雷电活动的特性与规律，才能对雷害进行更有效的防止，所以对雷电的形成进行研究具有重大的意义。

雷云的形成是空气垂直运动的结果，可是垂直运动的气流又是怎样产生的呢？假设某地区是一片森林，森林的边缘和河流之间有一片沙地。太阳以同样的热量照射在森林、河面和沙地上，而这些地段温度升高的程度是不一样的，温度上升最高、最快的是沙地，其次是森林，最低的是水。因为空气主要是从地面得到热量，所以沙地上的空气比河流和森林上的空气温度高得多。比较冷的，也就是密度比较大的空气，便从河流和森林流向沙地，把沙地的暖空气向上排挤，但是流到沙地上空的冷气流又逐渐增高温度，重新被从河流和森林上流过来的冷空气排挤而浮升起来。就这样，一次又一次地冷空气排挤着暖空气，形成不断的垂直向上运动的气流。

在夏天，森林和河流蒸发出很多的水气，这些水气和暖气流一起浮升到天空中去。它们进入比较稀薄的大气层中，就逐渐膨胀而冷却。但不是所有被带到上空去的水气都能以水

气的形态存在下去，因为空气的温度愈低，它能够包含的水气便愈少。过剩的水气开始凝结，变成了小水滴。水气凝结的时候放出来的热量又使气流变热，所以上升的气流比以前更快地继续上升。

在冷天，我们呼出来的热气一缕缕的上升，很象团团上升的云朵。大气中，气流上升的时候所发生的现象和这种热气是很相象的，只是规模大得多。开始由于它的厚度很大，太阳光不能透过，所以颜色成乌黑，这样形成的乌云称为热雷云。由热雷云产生的雷暴经常伴有暴雨，发展得很快，下得很急，时间较短促，持续时间约 $1 \sim 2$ h，具有区域性，范围较小，最大不超过 $200 \sim 300$ km长，几十公里宽。从上述可以看到，雷云的形成必须具备下列三个条件：空气中应有足够的水气；有使潮湿的空气能够上升并开始凝结为水珠的气象或地形条件；使气流能够强烈持久地上升。而雷暴却是多种多样的，上面所列举的仅是雷暴的一种，称为热雷暴。一般来说热雷暴不是雷暴中最强烈的一种。

此外，按形成的条件还有锋雷暴和地形雷暴两类。

锋雷暴本身又可分为冷锋雷暴和暖锋雷暴两种。锋雷暴是在两个大气团移动的时候，在分界面上，也就是在冷气团和暖气团相遇的锋而上发展起来的。锋雷暴能够使那个地方的天气发生急剧的变化。

冷锋雷暴是由强大的冷空气侵入暖空气的下而，排挤了暖湿空气，并使之上升至一定高度所形成的雷云，如图1—1所示。大气中水气凝结、放电等变化均与热雷暴相同。由于冷空气往往来势凶猛，所以冷锋雷暴是雷暴中最强烈的一种，危害性较大。这种雷雨一般是在沿冷暖空气交界处（即锋面）好几百公里长的一条线上，几十公里宽的带形地区发展，移动速度可达 100 km/h左右。

暖锋雷暴是由于暖空气侵入冷空气地区，逐渐升到冷空气的上面形成淡薄的雾，然后变成象棉花般的云团，最后就逐渐发展成为大片的积云。如果天气晴朗而温和，气流上升的能力和气流中的水气含量都不很大。傍晚，照射到地面上的热量越来越少，空气的上升也就减弱。云团因失去了上升气流的支持而下降，消失在大气中，此时不形成雷云。

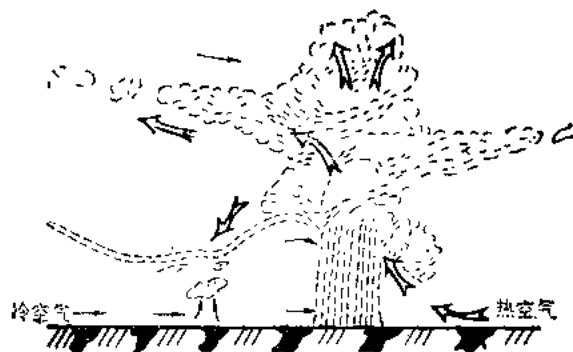


图 1—1 锋雷暴的形成

但是，当天气炎热而空气中水分又很多时，强烈的潮湿气流上升到 $2 \sim 5 \text{ km}$ 的高空，就会形成浓积云。云中水气凝结时所放出来的潜热很大，使上升气流仍然比周围空气热。积云将继续发展下去，最后变成巨大的积云。它的发展比冷锋雷暴缓和得多，一般很少发生强烈的雷雨。这种雷暴宽度较广，在 $40 \sim 60 \text{ km}$ 以上，而长度较短。

由于地形影响某些地区特别容易有雷雨，这种雷暴叫做地形雷暴。例如，滨海一带的山岳地区，近海一而的山坡上，常易有雷雨。其形成有两个因素：海风中潮气很重，吹到山坡上时，由于地形关系必须上升，因此空气中水蒸汽容易饱和，山坡吸收了太阳辐射能，而又将热传导给近山坡的

空气层，使它比远离山坡的空气热，形成一股类似烟囱的吸风力量，使气流强烈的上升，因而就形成了地形雷暴。

下面略述一下雷云中电荷是怎样产生的：由于雷云中气流的上升速度很大，可达 $20\sim 50\text{m/s}$ 。这种气流在穿过云层时，使云层中的水滴发生分裂与极化，此时水滴就带上了电荷，如图1—2(a)所示；带正电荷的水滴下降，带负电荷的水滴上升如图1—2(b)所示。一定数量的电荷聚集在一个地区时，该地区的电势上升，达到可使附近空气绝缘击穿的程度时就产生闪电。

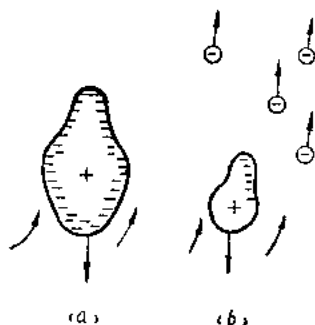


图1—2 雷云中水滴分裂带电的过程

关于雷云的放电及放电的过程，如图1—3，(甲)为雷云的放电过程，(乙)为放电过程中雷电流变化情况。

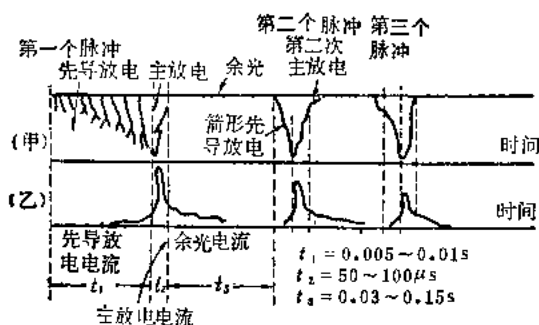


图1—3 雷云的放电过程

从图中可以看到，在一般情况下，放电是从云开始向地面发展的。当云中某一部分的电荷密度足够大，以致于使得

附近的电场强度达到空气的击穿强度 ($2500 \sim 3000 \text{ kV/m}$) 时, 该处就产生了强烈的碰撞游离, 形成了导电的通路, 这种预放电叫做阶段式先驱放电 (或放电先导)。它的平均速度为 $100 \sim 1000 \text{ km/s}$ 。由于雷云不是一个良好的导体而相当于有很大内电阻, 所以它向下发展时是不连续的, 每经 50 m 就停歇一次。每次间歇约为 $30 \sim 90 \mu\text{s}$, 以后再继续前进。整个先导阶段时间约 $0.005 \sim 0.1 \text{ s}$, 总平均速度为 $100 \sim 200 \text{ km/s}$, 相当于先导阶段的雷电流是很小的。每当先导通路向前跃进一次, 则电流就脉动一次。

当先导放电发展到离地面约为 100 m 时, 从地面就发出迎面先导, 两者接近时就开始了雷电放电的主放电阶段。这时地面的不同极性电荷与先导通道中的电荷产生强烈的中和, 发出耀眼的光和震耳的声。主放电阶段的迎面先导, 从地面沿着先导放电的通路向雷云升起, 主放电速度可达 $15000 \sim 140000 \text{ km/s}$, 离地面愈高速度愈小。主放电的时间约为 $50 \sim 100 \mu\text{s}$, 而主放电的电流可达 $100 \sim 200 \text{ kA}$, 是雷电流中最主要的部分。

主放电完成以后, 云中的剩余电荷沿着导电的通道开始流向大地, 这一阶段称为放电的余辉阶段。相应的电流大约为 $100 \sim 1000 \text{ A}$, 持续时间为 $0.03 \sim 0.15 \text{ s}$ 。余辉阶段以后, 整个脉冲放电过程就结束。

第一次放电完成后可能发生第二次放电。第二次放电的先导仍沿第一次先导的路径由云向地面发展, 由于沿途导电性能很好, 阻力很小, 所以是继续不断地前进, 不象第一次先导的逐级前进。它的速度约为 2000 km/s 。第二次先导到达地而后, 就由地面向上开始第二次主放电, 然后又是余辉阶段。

第二次及其以后各次的主放电一般都比第一次小, 电流

不超过30kA。大约有50%的雷云放电具有重复放电性质，最少时曾出现过几十个脉冲，平均每次约3~4个脉冲。

雷云放电为何呈现多重性呢？一般认为，由于云中具有旋涡气流存在，在云中就产生了一些个别的电荷聚集中心，如图1—4所示。在某一瞬间，当某一聚集中心的电场强度，达到空气击穿强度时，放电就由这个中心开始。当这个中心的先导放电达到地面并且形成主放电后，该聚集中心的电荷为大地电荷所中和，该中心电位变为零。已经放电的中心和邻近的中心之间电位差增大，两者之间也可能发生放电。当由邻近中心发生的放电到达第一次放电的路径之后，放电便以连续不断的，象箭一般的先导形式沿该路径向地发展，然后又形成第二次主放电等。

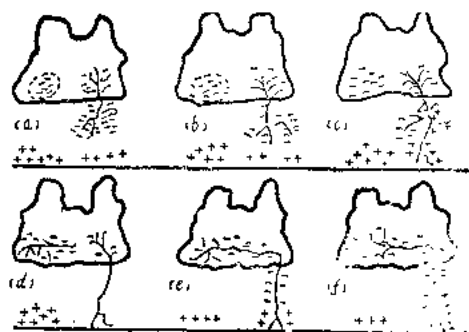


图1—4 由带负电的云向地发展的多重雷电的各个阶段

第二节 雷电参数与雷电活动

雷电参数是表示雷电基本特性的数量指标，是雷电防护的基础资料。

为了进行雷电防护的工程设计，分析研究雷害事故寻求

其规律，所以必须了解与掌握雷电参数，如雷电流的幅值、陡度、极性、波形、雷电频度和落雷密度等。因为每次的雷电参数都随具体条件而不同，所以对雷电参数只能用统计的方法加以研究讨论。

大气过电压的闪电现象，常使人们联想到高电压。自云到地面的闪电，其电压可达几亿伏。这个电压很难准确测量，同时也不可能将信号电气设备的绝缘同这个电压相比，因为并不是这个电压的全部都加在电气设备的绝缘上。对我们有直接作用而又有可能测量的数据，是雷电流及其变化的速度。

雷电流变化范围很大，雷电流幅值越大雷电压就越高，信号电气设备就容易被击穿。

雷电流陡度，是单位时间内增长的电流值 di/dt 。信号设备或器件上的感应电压与电流在单位时间内变化的速度有关。例如，一个电感量为 L 的信号器件上流过以 di/dt 变化的电流，则在其上面的感应电压为 $U_L = L \frac{di}{dt}$ 。如果雷电流陡度 di/dt 很大时，在器件上将会出现很大的感应电压，信号设备的绝缘就有被击穿的危险。

由于雷电流及其变化率是可以直接测量的，而雷电压的幅值却受到信号电气设备绝缘能力的限制。由此可见，雷电流及其变化率是信号电气设备雷电防护设计的基础。只要有了雷电流及其变化率就能估计出防雷装置的保护作用以及侵入信号电气设备的大气过电压的危险作用。

我国电力系统的雷电流概率曲线，如图 1—5。我国某铁路线上信号设备的雷电流概率曲线，如图 1—6。在图中横坐标的百分数是表示雷电流幅值超过纵坐标上所示数值的概率。概率曲线对信号防雷工作是很有价值的。

因为雷电流的极性是由雷云的极性而定，由于大多数雷云是负极性的，所以雷电流的极性多数也是负极性的。

雷电流的波形是雷电流值和时间的关系曲线。它是用电子示波器观测记录下来的。雷电流波形变化很大，为了研究、设计和制造雷电防护装置；为了进行电气设备的绝缘冲击特性试验，必须规定一个标准波形。各国的标准波形差异很大，而且要经常修订。我国规定的雷电流波的典型波形，如图 1—7 所示。

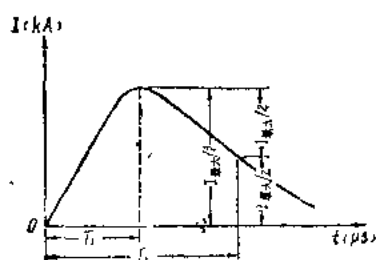


图 1—7 雷电流波的典型波形

雷电流从 0 上升到峰值的时间称为波头长，用 T_1 表示，从 0 到波形下降到峰值的一半时间，称为波长，用 T_2 表示。雷电流的波头和波长变化范围很大，通常波头长度在 $0.5 \sim 10 \mu s$ 范围内变化，波长长度在 $20 \sim 500 \mu s$ 范围内变化。一般情况下，直击雷的电流波长较短，感应雷的电流波长较长。

雷电频度在不同地区是不同的，它是表明雷电发生次数

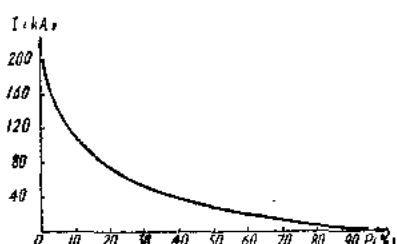


图 1—5 电力系统雷电流概率曲线

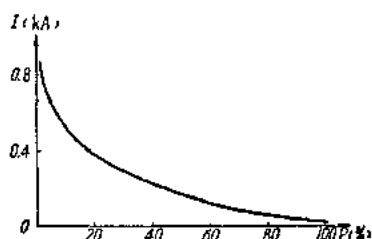


图 1—6 信号设备雷电流概率曲线

的特性指标。为了使观测统计的记录能够相比较，需要有统一的表示雷电频度的标准，常用的有雷电日、雷电小时等。雷电日是最简单、最常用的，只要在某一天内曾发生过雷雨或听到过雷声，而不论雷延续了多长时间都作为一个雷电日来统计。全年雷电日数的总和叫做年雷电日数，通常所称雷电日就是指年雷电日数。

雷电小时也是常用的，只要在某一小时内发生过雷雨或听到过雷声，而不论雷在这一小时内延续了多久都作为一个雷电小时来统计。某一地区一年中雷电小时的总和叫做年雷电小时数，通常所称雷电小时数就是指年雷电小时数。

上述的数字统计方法都是相对的，都没有一个能直接衡量在该地区某一年中每单位面积内有几次落地雷，或其中有几次击中信号电气设备。但是，它们与雷电击中信号电气设备的概率，按多年统计分析是有一定联系的。一般用雷电日数统计比较方便，资料容易取得，因此雷电日数可以作为雷电防护工程设计中的雷电频度的参考参数。

为了说明某地区一年中单位面积落雷的多少，这里又引入了一个落雷密度的概念。落雷密度是单位面积的雷击次数，即每一雷电日，在一平方公里范围内的落雷次数。我国电力部门采用的落雷密度 $\gamma=0.015$ 次（千米²·雷电日）。

我国铁路沿线的雷电日分布，见图1—8。铁路沿线的雷电活动可以长江为分界，长江以北的铁路沿线雷电日数相差不甚悬殊，多集中在夏季而春季较少。

华北、山东半岛以及东北铁路各线的雷电日数相差不多，为20~45；陇海线东段的雷电日数为20~30；西段至乌鲁木齐的西北铁路沿线，其雷电日数由20递减到10以下。

青藏高原铁路，除茶卡、格尔木一带外其雷电日数为10以下；从格尔木到拉萨一带其雷电日数在70左右。

长江以南的铁路沿线雷电日数差别较大，分布季节较长，除冬季较少外其他三季均有雷暴发生。

由宝（鸡）成（都）线至西南铁路各线其雷电日数增加较快，由20左右剧增到100；从郑州沿京广线南下的南方铁路各线其雷电日数由23剧增到100左右。

南方沿海一带铁路各线的雷电日数分布，大致与京广线相似。

台湾省铁路沿线的雷电日数分布，因受特殊地形和太平洋热带气候的影响较大为23~54；西部为45~54；东部为20~30。

由于雷电活动的区域性较强，特别是在山区，即使两个距离很近的地方，其雷电活动亦是不同的。因此在确定某一地区的每年雷电日数时，应以当地气象台的资料为依据。有了雷电日数，便可估计信号线路等电气设备每年遭受直击雷的雷击次数和感应雷的次数。

综合上述，在选择信号线路的经路和安装电气设备时，应注意调查当地雷电活动情况，以便躲开雷击选择区。

根据观察、实验和总结运行经验的结果，地形、地貌和地质条件是影响雷击选择性的主要因素。下列的几种地方往往是选择性的雷击区：

（1）雷暴走廊，如山区风口处、顺风的河谷和峡谷等。

（2）山的向阳坡和向风坡以及起伏陡峭地形的边缘。

（3）山上山下的土壤电阻率相差不多的山顶处；山上的土壤电阻率远高于山下时的山脚处；山地中土壤电阻率较低的处所。

（4）临湖或临海一面的山坡上良好的导电层附近。

（5）平地上土壤电阻率突变的交界面及其附近的低土

壤电阻率地带。

(6) 局部的低土壤电阻率地带，如大片岩石地区中的局部冲击层地带等。

(7) 沿小河渠地带，矿泉或地下水水位较高处，接近地面的地下潜水层及流砂地带等。

(8) 地下埋藏有盐矿、煤矿以及其他金属矿的地带。

第三节 雷电的观测

通过观测可以掌握雷电的特性和规律以及各种参数。在雷电观测工作中，观测的对象各有不同：气象部门要了解雷暴的形成及其雷暴的活动规律；航空部门最关心的是飞机在雷云飞行中的安全问题；然而本书所涉及到的雷电观测，主要是为了探索铁路信号雷电防护工作。

雷电观测工作在铁路信号雷电防护工作中是十分重要的。观测结果是选择雷电防护器件、防护电路以及制定铁路信号雷电防护方式的主要依据；信号雷电防护技术中的绝缘配合必须在考虑雷电参数的基础上进行设计；铁路信号系统防护指标，必须依据当地雷电活动情况（雷电流的幅值及其概率等参数）确定。此外，对铁路信号雷害事故的分析、雷电参数也是一个很重要的参考资料，以便通过分析制定技术方案，达到减少信号雷害事故的目的。

雷电观测工作，可以根据气象部门记录的雷电日，统计出每年雷季的起迄日期和雷电日的数值及其分布状况。也可以对每一地区在雷季中记录雷电日数，到年末作一次统计，即可得到该地区的年雷电日数，为了使数据可靠，上述记录到年末可与该地区气象台核对一次，并且最好取5~10年的平均值，作为年雷电日数。

用磁钢记录器来测量雷电参数，也是雷电观测工作的内

容之一。磁钢记录器是记录雷电流的幅值和极性用的，它是由具有较高剩磁物质制成的。其种类有：60Si2Mn型、塑料管型、刀片芯型以及铁粉型等。

用磁钢记录器测量雷电流原理如下：当一条导线中通有电流时，以导线为中心形成一个同心圆的磁场，如果在这磁场中放置磁钢记录器，它就会被磁化。利用这个原理将磁钢记录器放在通过雷电流的导体附近，如图1—9所示。当导线中有电流通过时，磁钢记录器就被磁化，而得到一定的剩磁强度。这个剩磁强度与雷电流的强弱有一定的关系，测出剩磁强度，就能判断出通过导线的雷电流幅值。

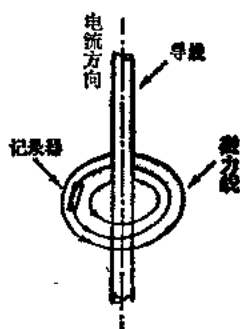


图1—9 磁钢记录器雷测原理

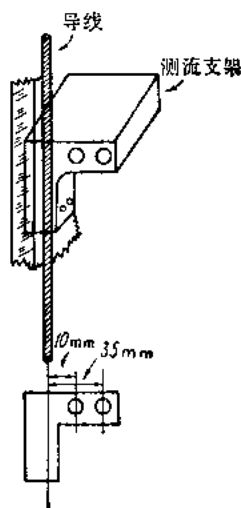


图1—10 雷测支架的安装

下面将磁钢记录器的安装、检磁和退磁分别叙述如下：

一、磁钢记录器的安装要求

1. 测量雷电流时，必须把磁钢记录器放入已安装好的测流支架中。为了不破坏雷电流所形成的磁场分布，排除支架的干扰，测流支架必须用非磁性材料。

2. 测流支架的尺寸要根据测量电流的范围，磁钢记录