

漫谈雷电

郭昌明

自古以来，人类就熟悉雷电现象。大多数人通过自己的眼睛和耳朵感受到了雷电的光和声，也有人经历过一些相关的灾难。古代的人们还用雷公电母称之，以示敬畏。

人们知道雷电可以致人畜伤亡，电力和电子设施损坏，飞机毁损，矿山引爆，建筑物焚毁，甚至引起像若干年前国内黄岛油库、大兴安岭森林大火那样的极端灾害事件。全球每年大约有千余人遭雷击死亡，还有至少上百亿美元的直接经济损失。几百年来，人们对于防雷的探索没有中断过，但迄今也没能消灭雷害。“国际减灾十年”仍然把雷害列为主要的气象灾害之一。

另一方面，在人类的进化过程中，第一次获得并利用火很可能就出自雷电引起的树草着火；氮是组成蛋白质的重要元素，在生命起源过程中，没有氮的化合物是不可设想的。然而，我们也知道氮在大气中较稳定，并不活泼。可能正是雷电在局部大气中造成的瞬时高温、高压及电离作用，产生了活泼的氮氧化物。没有雷电，可能就没有今日多彩的生物圈，而只有死寂的地圈；更有甚者，地球大气中，不断产生的雷电，可以持续不断地提供植物所必需的，并且也能吸取的氮肥，从而起着不可替代的全球生态平衡作用。

因此，无论为了改善防雷，减少损失，还是为了探索雷电的奥秘，都不断激励着人们去深入了解雷电过程及其机理。

雷电发生在大气中，绝大多数的雷电活动是和大气中的云相连的。大多数的雷电又是发生在云中、云间，或云和无云的大气间，可以统称为云闪；有一小部分雷电发生在云和大地间，被称为地闪或落地雷。人们还常常提到在低空浮动的所谓球闪。但由于迄今基本上还没有可靠的观测记录，尚不具备进行科学讨论的条件。

我们将简略地介绍，迄今人们对于上述一般雷电的认识。

一、雷电的一般知识

长期的观测表明：在地球上空，每时每刻存在两千余个活跃的雷暴云；每秒钟产生百余次雷电，

其中包括一小部分的地闪。既然地闪接地了，那么就会向地面输送电荷。如果正负闪电是随机地，即正负电荷平均地有相同的机会注入大地，那么平均看大地就不会带电荷。然而，无论是直接的地表大气电场观测，还是对于地闪电流的记录，都给出了一个以向大地注入负电荷为主的结果，即以负地闪为主。全球的平均地闪电流在 -300A 左右。在雷暴云下方当然还会有很强的电场存在，即使没有雷电时，它也会造成地面尖端发生电晕放电，它大约产生 -1500A 的电流。既然全球雷电、尖端放电整体上是向地面输送负电荷，那么如果没有一个释放的渠道，或者说如果不形成回路，就没法稳定，就会发生震荡。但实际测量的结果是全球总体讲还是稳定的。人们有理由相信，由于大气中因为放射物电离及宇宙线的存在，全球没有雷雨云的大部分地区可以提供电荷的释放，或形成回路的途径。观测也证实了，晴天区始终存在一股由上自下的正电流，电流密度大约是 3pA/m^2 。根据探空电场仪的观测，随着距离地面高度的增加，电场逐渐减小，在电离层对地可达到 300kV 左右的电位。这说明，正电荷是弥漫于大气中，晴天区的总电流是 1500A 左右。一般来讲，降水也会带有一定的与雷电电流相反符号的电流。全球雷电和尖端放电与降水电流和晴天电流达到了平衡，也就是全球雷暴云、大地、全球晴天区及电离层构成了一个闭合回路。云闪则是不接地的云内放电，也就是云或大气内部的“漏电”，不直接与大地相连。地表的电荷密度是每平方米 -1.1pC/m^2 左右，对应约 -130V/m 的地表电场。全球总电荷就有大约 -550kC 。需要说明的是，上面的数量，只是一个大致、量级上的平均估计，以给出一个物理概念。事实上，不同地区，不同时刻的具体值是有明显差别的。

这就是现今对于雷电及其环境的一般认识。它把雷暴闪电现象的发生主要局限在仅与大气层相关，而大气正电荷和大地负电荷仅是雷暴的产物。这些认识，有相当的观测及物理依据，但对其是否是个完全孤立在对流层内的物理现象仍存有疑问。

对于雷电究竟是怎么产生的问题，迄今没有令

人满意的解释。从观测及对应的一些实验结果来看，目前人们接受的观点是：先要有云，而且要有有一定高度的云，即大气中有固态和液态的水聚结；其次，这个云还得具有强烈的上升气流，导致云发展高度较高，例如可以超过海拔 10km，这样，云内的温度可以大大地低于 0℃，并往往可以远低于-10℃。其中的液、固态水成物就会产生强烈的搅动和碰擦。这时，人们往往可以发现云大体成了上正下负的一个发电机。观测还能肯定的是低纬度地区雷暴多，逐渐向高纬度地区递减；海洋雷暴少于陆地；山区多于平原。人们在实验室里模拟得到了好几种起电或分电的结果，而且已经有少量的直接入云探测结果可以用这些实验结果中的一些予以说明。不过大多数的探测结果呈现的是一幅关于云内可能的、相当复杂的电荷分布的图像。目前，还无法满意地解释。看来，真正完整认识云内的起电过程，还有相当一段路要走。也许，没有对于云内空间电荷的系统、定量及实时观测，是不会有令人满意的解释的。

通过简单的视觉和听觉的积累，人们很容易接受：雷电过程是自然界中的一种发生在大气中的超长距离大电流脉冲放电过程。观测说明：它的长度一般至少有几千米，电流峰值往往在几万安，而过程持续往往不到一秒钟，并且，维持峰值电流的时间一般仅为几十微秒，或更短。人们迄今还没法完整地在实验室里重现这个过程。

雷电的另一个特点是：虽然地球上每时每刻会发生百余次雷电，而且一般来说，它们发生在天空有雷雨云的地方。但是人们仍难以准确预测它发生的地点和时刻。它又是一种有强破坏力的放电活动，导致难以直接进行系统探测和研究。这就大大影响对它认识的进展，也导致存在许多似是而非的看法和误区的存在。迄今，人们主要还是通过遥感它的电、磁、光和声辐射来推测其过程。另外，专门的带有仪器的接地装置，当受到极有限的直接雷击时，测到的地闪对地电流的大小、波形，也提供了很有用的信息。

二、地闪过程

由于云的遮挡，云内的过程探测就更带有推测性。由于地闪与人类社会活动密切相关，尽管它远比云闪出现次数少，而且可能的物理过程会更复杂些，它还是被观测得更多，也较细致些。我们将进一步描述地闪的过程。

显然，从云到地的放电过程不可能是瞬间发生与完成的。由 20 世纪初开始发展起来的各种高速摄影、摄像技术，证实了地闪一般是一个由上向下，再由下向上的特殊超长放电过程。

除了极少数地面上的高耸物会偶发由下向上始发的地闪，绝大多数的地闪是从云开始的。人们观测到的是：当放电出云时，会向下发生长度约为 50 米的击穿放电，发出较强的光，持续几微秒。从电磁辐射测量上也可看到对应的类似脉冲。估计电流峰值在千安级。然后，发光有大约 50 微秒的减弱和停歇。进而，又发生一次类似的放电，继续以随机的形式向某一下行方向发展，通过这样一个个放电使得放电通道自持而曲折地向下延伸。而且，可以发现它还会产生许多分叉，像倒挂的、多叉的枯树枝或泥土中的树根一样逐步地伸展。这个过程，一般被称为梯级先导。大多数的向下先导是带负电荷，称为负先导。总之，当要发生地闪前，云要向下以梯级形式提供带许多分叉的自持梯级先导放电。这些分叉的头部在靠近地面时，它们之间本身可以相距 10 多千米。由于这个先导通道带有电荷（大多是负电荷），那么，当它们临近大地时就会在地表引起强的电场，以致一些地面突出物就会发生向上的反向放电。观测说明，一般下行的梯级先导在离地大约一百多米时，向上的上行引面先导就会发生。这时，先导放电过程接近了尾声，而所谓的连接过程开始了，即下行的梯级先导和上行的引面先导相向而行，相互靠近。由于一般云底离地也就是三五千米，先导过程一般有几十毫秒，那么先导向地面的运动速度为 $10^5 \sim 10^6 \text{m/s}$ 。上面这个先导过程说明，先导是云起电条件成熟到了一定程度后发生的一种自持的延伸的放电。它向下运动，只是因为大地的存在，但并不是因为地面上某一或某些特别的东西的存在才导致先导的出现。反之，由于无法去掉大地，那么也就无法消除地闪！另外，也说明了只要在大气中一定范围，例如说几百米范围里，存在有每米几百千伏的电场，就可以造成先导这样一种自持推进的放电出现。它可能始于一些尖端放电，因为电场足够强的范围达到一定大小，而最终发展为自持推进的所谓先导放电。

临近地面并有许多分叉的先导，最终会与相应的一个或几个上行先导发生接触，从而完成连接过程。这时，云地间就建立了一定的电离通道，开始

发生了强烈的向上和向下的电荷中和过程，通道电离度激增，发出强烈的光，并且可以瞬间使通道气压激增，产生冲击波，并逐渐衰减为声波。这就发生了称为回击或主放电过程。电流一般可在几微秒内达到几万安。从光谱测定结果可以推测，回击通道表面温度可达 15000℃ 以上。强电流沿通道以大约为 1/3 到 1/2 光速逐渐减小地向上传播。因此，人们能看到的地闪强放电过程，并不是从上而下的，却是从下而上的。回击进入云内后，由先导引入的通道电荷被中和，使回击进入了尾声。显然，云的起电过程和云电荷进入通道的过程，与回击相比要慢得多。此时，一次回击就结束了。从光学观测可以知道发光也慢慢减弱，表明消电离过程也因为不断地离子复合而使电离度变弱。观测显示，此后有约 30%~50% 的机会可能发生持续几十毫秒的所谓连续电流过程，使通道仍然保持一定的发光，其持续时间大约在若干毫秒到上百毫秒，电流的幅度在几十安培。其时，还可以有一些较大的脉冲电流叠加在上面。此后，通道顶部可能又积累了足够多的电荷，沿着尚残存的电离通道，再次向下推进，由于通道还可能残留有相当的电离度，往往这种先导速度更快，可以超过 10^6m/s ，达到 10^7m/s 的量级，并且没有或少有梯级，一般称为直窜先导。很可能，当直窜先导向下传播到一定的低空时，低空通道的残存电离度已很低了，会导致通道下端又变成梯级先导。由此，就会在与先前回击不同的地点发生上行先导，导致第二次回击或称继后回击，可以击中其他的地方。由云起电的激烈度决定，这样的过程重复若干次后会终止。这就完成了一次所谓的闪电过程。统计结果显示，每次闪电平均产生 3~5 次回击，记录到回击次数最多的闪电有二十多次。每次闪电大约持续几百毫秒，而每次回击间隔在几十毫秒，正好接近人眼对于光的残留效应时间区，所以人们都会感觉到闪电有闪烁性。另外，如上所述，下行先导可以引发不止一个上行先导。其中也会有一些完成连接过程而产生回击。不过由于它们在同一“棵”下行先导“树”中，一般来说，只有一个可以产生继后回击。这样，一次闪电会有多个接地点，而且，它们可以相距十余千米。肉眼感光有限，对于没有接地的先导通道，往往感觉不到，也就造成人一般还看不到全部分叉，只看到其中很少一部分的分叉。

显然，闪电通道有数十米量级的曲折是梯级的

必然结果。但如果检查得更细一点，就可以发现通道还有厘米级的曲折，这就显示出先导的复杂性。如果承认放电基本上是沿着电场方向走，可以推测空间的电场分布及通道的电荷分布是十分复杂的，也许宇宙线也在起一定的作用。实际的情况究竟如何，尚待进一步研究。

观测还说明每次雷电回击的峰值电流在很宽的范围内随机地变化，可以小低于 10kA，但也可以超过 100kA。平均在 20~30kA 左右。有观测证据说明，当下行先导所携带的电荷较高时，会在较高的高度上引发上行先导，而且往往所导致的回击电流峰值也较大，其直接的破坏也就会较大。这说明地闪的击地点实际是在下行先导近地时才能定下来。这个引发上行先导的离地距离，在工程上一般称作击距。需要注意的是，越是小的雷击电流击距越小。也就是说先导要更接近地面才能定下击地范围，不过这范围也越小了。

上面谈的主要是云下的放电情况，在 20 世纪初就有科学家预言，在云上也应该有放电现象出现。在 20 世纪后期，人们终于发现了出现在不同电离层高度的放电发光现象。由于雷暴高电场的存在，也有科学家预测过应该有电子受到强场的加速，导致与空气中粒子的碰撞，激发电离，引发电子的逃逸，X 射线和 γ 射线。这些看法在 20 世纪末已开始有观测结果予以证明。

人们还设想，大地和电离层可以被看成一个大的波导，当其间发生雷电放电时，会因传播引起谐振。20 世纪 50 年代中期，果然测到了近于理论预计雷电引起的 7 赫兹左右及其一些倍频的电磁波，被称为舒曼谐振。

自 20 世纪 60 年代开始，人类开始了从地面人工引雷的成功尝试。迄今，美、法、中、日等国已有数百次各种成功引雷的经验。现有的记录都是来自火箭拖拉长导线的引雷结果。其基本结果说明它可以部分地复制自然雷电过程，既有助于细化认识，也有助于累积系统资料，对于防雷的改善也有不可替代的促进作用。可惜的是，它还不能完全模拟自然雷电。

由上面的叙述，我们可以感到，对于雷电物理的了解，在很大程度上是描述性的，令人满意的物理解释还有待于研究的深入。人们企图用已知的物理规律来定量地描述雷电过程只取得了部分成功。

三、雷电防护

现在我们可以把注意力转向防雷。人类为减少和消灭雷害进行了千百年的争斗，但要解决这一问题还任重道远。其原因在于雷电的产生有其自己的内在规律，短期内既找不到消灭它的办法，且消灭它的一些后果也难以预料；人类也不可能把一切都围裹在金属保护壳内以免受雷害。不过，现今已经有一定的办法适当地保护孤立建构物，也有一些对付雷电所产生强电磁脉冲造成破坏的手段。由于雷电的强度变化范围极大，雷击点也会千变万化，完善的防护措施费用会很高，实际上往往只好牺牲一些防护可靠性，以减少投资。

从前面有关地闪过程的叙述，我们知道雷击中某一点的必要条件是该点会在下行先导临近时能引发上行先导。那么，要不让被保护物击中，就应该使它不会产生上行先导。可是，由于下行先导可以随机地下行，如果没有任何措施，总有可能使被保护物产生上行先导的情况发生。一般的做法是找个替代物，让这替代物比被保护物更易受雷击，从而达到保护的结果。这替代物就是俗称的“避雷针”或有关系统。在 200 多年前，由富兰克林发明的“避雷针”及其扩展的系统，仍然是建筑物的主要防雷击装置。基本上，它是由在空中的金属体构成所谓接闪器，与它相连接的引下线和接地体组成。最初，富兰克林认为，在雷暴电场的作用下接地的接闪器，因尖端放电而向空中发出电荷与雷暴电荷中和，这样就避免了雷击。但实践使他很快认识到这种装置并没有消除雷电，反而是吸引了雷电，使雷电流无害地进入了大地，从而避免了雷击建筑物造成损失。因此，其实这个系统本该被称为“引雷针”或“引雷系统”的。一个高耸的避雷针，一般来讲会比临近的较低的建筑更易产生上行先导。但任何建筑物不可能没有宽度，有可能在某种情况下，是具体的建筑物，而不是避雷针受到雷击。实际的情况是避雷针不可能百分之百地保护好被保护物，在工程上根据保护要求，对于避雷系统有不同的设计，不同的价格。建筑物上的避雷网即是常用的比较有效而投入不大的一种系统。另外，显然人们所带的手机所发出的电磁波是没法产生上行先导的，它的作用也就只是相近于一个人们常常携带的钥匙串的作用！因此，没有理由认为手机本身会增加雷击的几率。

前面我们已经知道，雷电流的峰值有大小，它

使击距有大有小。对于既定的一个避雷系统而言，雷电流峰值越小，雷电就越有可能打不到避雷系统上。对于一个高耸的建筑物，小的雷可能避开上面的接闪器而打在它的腰部，即所谓发生有害的侧击。为防止和减少侧击的可能，对于高建筑物，人们在引下线的不同高度引出一些吸引可能侧击的副接闪器，以减少可能的侧击损失。对于高压输电线的所谓绕击的发生，也是同一道理。一定大小以上的雷电流可以击中高压线上面专门架设的接地避雷线，而不击中高压线本身。但对于较小电流接地避雷线却无能为力，它们会绕过避雷线而击中下面的高压线。要减少绕击的可能性，只有增加对于避雷线的投入。

雷电流流过引下线到达接地系统，并通过它进入大地。我们希望雷电流能无害地进入大地。然而，由于它的幅值可以很大，它的时间变化率也可很大。而接地系统的接地电阻是有限的，不可能为零，加上避雷系统本身有电感，导致引下线上可以在瞬间达到很高的对地电压。这个电压可以对邻近物体（包括人员）造成击穿，形成所谓的反击。为防止反击形成的破坏，人们对于接地系统的接地点附近，要求有一个安全距离，禁止人员靠近，禁止存在有可能受损的物品。事实上，在雷暴天气下，人们在树下或简易棚下受到的雷击，大多就是这种情况。当树木遭雷击时，该树电位剧变，而人站在地面上，仍处在地电位，就会受到所谓的反击。另外，雷电流进入大地时，必然会在地表两点间形成电压降，在人畜肢端的着地点间引起的所谓跨步电压也会伤害人畜。因此，在工程上对于接地系统的入地点附近也规定有一定距离的禁入区，以保证安全。

为了使上述危害效应降低，而又不使投资过大，人们往往要规定一个最大允许的接地电阻值。不过，这还是会在高电阻率区造成投资的激增；而且，接地电阻本身又是个变化的数值，往往是逐渐变大的，这是个难以进行后续改进的地下工程。接地系统也就成了避雷系统的瓶颈。

目前，工程上没有新的进展。但是如上所述，似乎一切是因为接地电阻难以变小引起的。其实，有两方面可以供我们考虑。第一，接地电阻的存在，会造成对于周围物体的反击，那么如果我们能够使周围物体的电位也同步升高，反击就可以消灭了。所以事实上，如果有对周围物体的等电位措施，也就不会有反击了。这是在实际防雷中应该加以利用

的。其次，工程上实际测得的接地电阻，根本不是真实的雷击大地时的情况，工程上用一个系数来解决。但实际上，雷击大地时，会发生地表的击穿，它与大地本身的电导率没多大关系，也就是与工程接地电阻没什么关系。因此，很可能所有的限定和降低工程接地电阻的努力其实并没多大作用。

有人设想，既然雷电流大以及雷电流变化快是引起上述损坏的元凶，那么如果能够使雷电流上升变慢，峰值变小，其破坏作用不就可以大大减少或消除了吗？因此，市场上就出现了一些号称可以抑制电流的装置，据说装在避雷针系统上就可以达到目的。事实上，我们从前面介绍的地闪过程，已经了解了雷击电流是连接过程向回击过程过渡后的必然产物，它产生在连接点上大气中，并不是在避雷系统内。其大电流和高电压波向上下传播，其高电压会使任何人工可能做到的尺度的阻抗被击穿。避雷系统的任何添加装置也没法不被击穿的！企图人为地加以阻止是徒劳的！长期的观测实践也证明了雷电的这一特点。

另外一种企图是利用各种所谓的放电型接闪器，或者各种“消雷器”在雷暴临近时会放电中和雷暴电荷，这样雷电也就产生不了了。但理论与实验均证明任何人工装置在雷暴电场下，不可能比自然的尖端放电产生更多的电荷。雷电本身就是已有的大地尖端放电下发生的。用人工的只能产生很小尖端电流的装置来替代已有的大量的自然尖端又能有什么作用呢！

又有人提出，并且也已投入市场的所谓“提前放电型”避雷针，它是在接闪器下串联一个装置，据说可以在下行先导临近时比同高度的避雷针更早地发出上行先导，这样就增加了避雷针的有效高度或作用范围。理论和实验同样证明了它的无效性。实际上，这种装置忽略了许多实际的物理过程，在此仅举两点。第一，即使可以在一般避雷针不具备放电条件时，它可以产生流光放电，但它必然还是要进入自然的，不具备持续发展条件的较小的电场，这样它就会自然熄灭了，没法产生自持进展的先导。第二，实际上，在自然下行先导发生时，每一次梯级就已经有一个先行的脉冲场存在，人工再加一个是画蛇添足了！！

有人认为，无论如何，在雷电通路上电阻大就会电流小，也就是雷电可以用一个电压源来描述。实际上，我们分析一下整个回路可以知道，雷电回

路可能更近于一个高内阻的回路，即它近于一个电流源。实际的人工加阻，还会因被击穿而达不到加阻的目的。迄今也没有任何记录表明在低电阻率地区，雷电流会比高电阻率地区大。

总之，对于建筑物的防雷尚无经济、可行的方法。目前一些所谓的新型的装置其实都是一些误导，没有实际效果。这些装置之所以还有市场，就是因为没法完全可靠地达到百分之百防雷，也因雷击的随机性难以预测以及它的极小概率性，在短时间内，难以实际判断建筑物防雷装置的有效性。其实，大多数地方即便没任何防雷措施，也可能几十年不遭雷击的。

雷电造成的直接经济损失一般会很大，也会因击中电力、电子系统而扩大到很大的范围。但相对来说，其放电形成的电磁辐射即所谓的雷电电磁脉冲（LEMP）的非接触作用可以影响更大的范围。由于任何电力、电子系统都会有地方暴露在大气中，既会感应其需要的信号，也会不可避免地感应雷电过程发出的电磁脉冲。雷电放电的尺度从毫米级到千米级。辐射谱从极低频到微波段都有。因此，对于离不开电的现代社会，可以说它是个无孔不入的破坏源。实际上，军事上的电磁脉冲弹技术，即是一种核爆炸中强化电磁脉冲量以达到仅破坏敌方设施的一种手段。

迄今，已有许多适应不同情况的非线性元件，它们可以工作在不同场合，适应不同频段。在被保护系统所感应电磁场超过一定值后，系统中的防雷元件阻抗会发生突变，或者将雷电的能量引入大地，或者用自行消耗雷电能量来保护系统不受损。由于雷电可以发生在任何地方，并且，各种防雷元件本身的局限性，难以做到既防雷又不影响被保护系统的正常工作，并且投入也总是有限的。所以雷害还是到处存在，在可预见的将来也没有消除因为雷电电磁脉冲引起的雷害的可能。

看来，人类对于雷电的各种探索还要继续下去，也还要与雷害共存下去。

作者简介

郭昌明，1939年生于上海，1960年毕业于北京清华大学电机系。曾任研究员，博导，国际大气电学委员会委员，中科院兰州高原大气物理研究所所长和上海台风研究所所长。
Email: chmguo39@yahoo.cn

