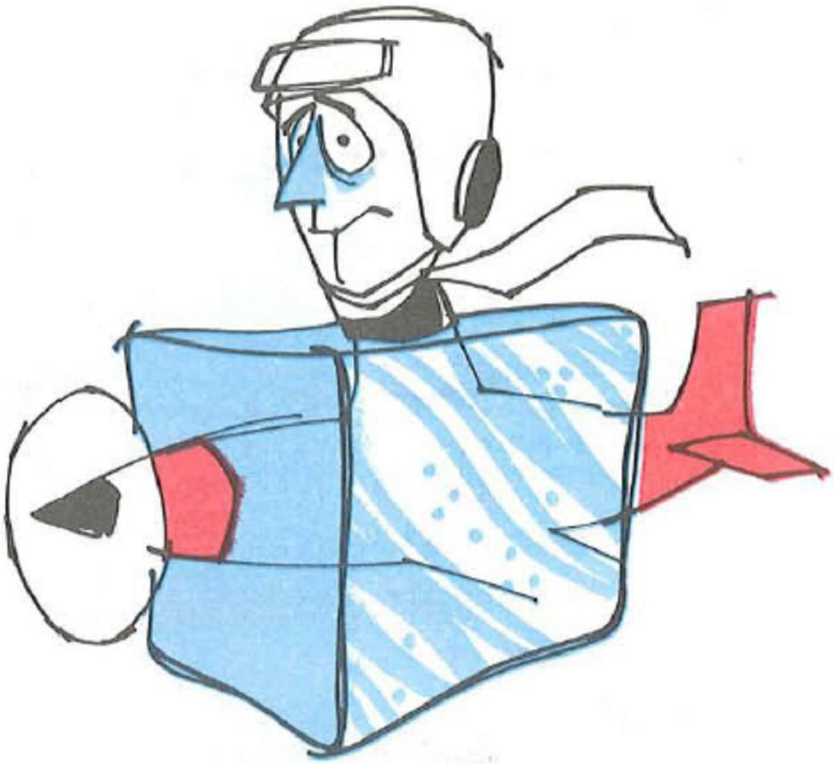


第十章 积冰

积冰是影响航空安全的主要危险天气之一。积冰是一种慢慢积累的威胁。积冰会增加飞机的重量、减小机翼的升力、降低推力、增加阻力，这四方面都降低了飞行的效率。如图 89，积冰会同时使飞机变慢、变沉。同时，积冰削弱了发动机的性能。积冰的其余几个影响包括：引起仪表的错误读数、失去无线电通讯、造成操纵面、刹车、起落架的操纵困难。

在这个章节中，我们会讨论机构积冰（structural icing）、进气道积冰（induction icing）和仪表积冰（instrument icing）的原理，以及积冰和云的关系。虽然地面积冰和霜都属于结构积冰，但是我们会分开讨论他们，因为他们对飞机的影响不同。在本章节的结尾，我们会给出一些实际操作要点。

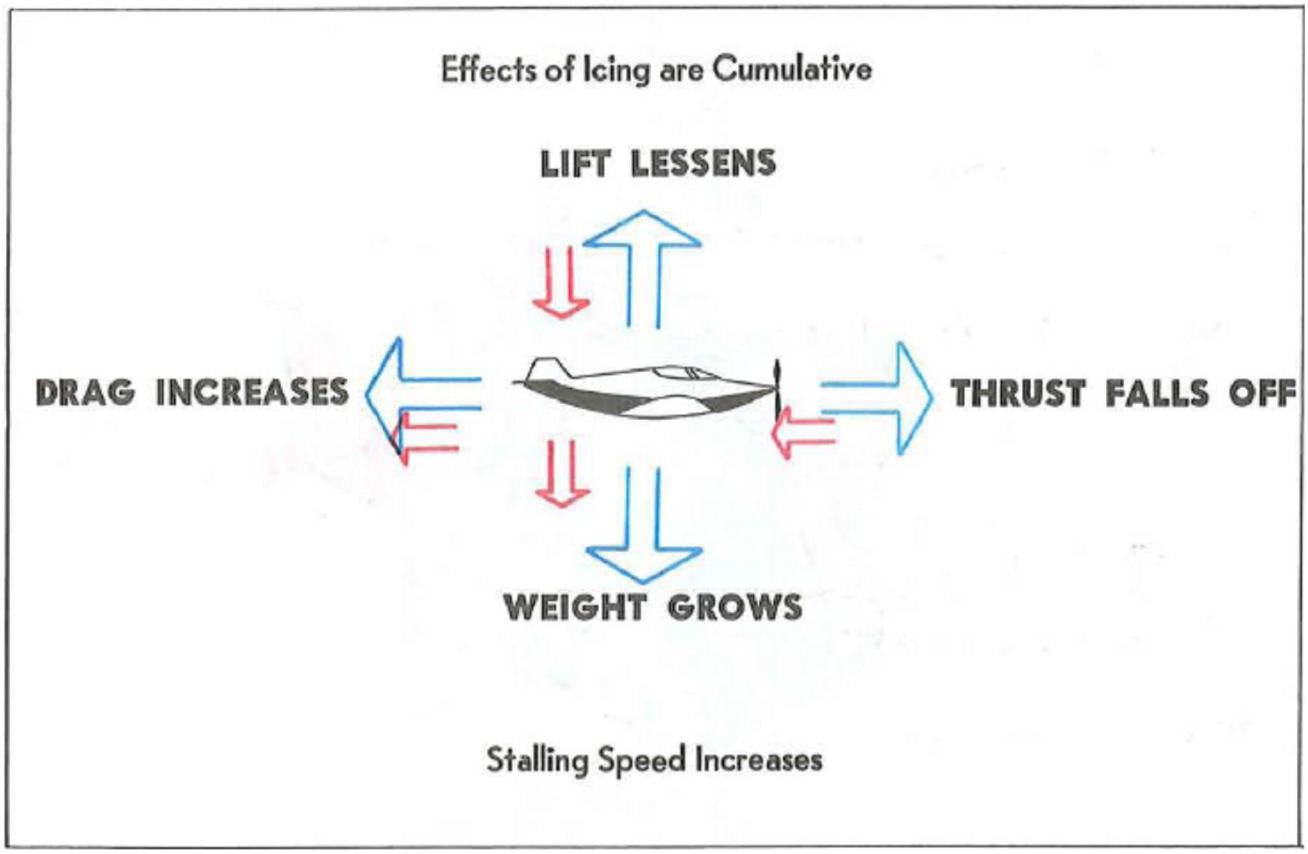


图 89

结构积冰

飞行中，结构积冰形成的必要条件有两条：

1. 飞机必须飞过可见水气（visible water），如雨或云（cloud droplets）。且
2. 水气接触到飞机上的位置的温度必须等于或低于 0 摄氏度。

注意，气动冷却（Aerodynamic cooling）可以使环境温度高于 0 摄氏度的气流变为低于 0 摄氏度的气流。

过冷水滴（supercooled water）增加了积冰的程度，也是快速积冰的条件。过冷水滴是一种不稳定的液体状态。当飞机撞到过冷水滴时，某一部分的水滴瞬间结冰。这部分结冰的水滴所释放出的潜热把剩下的水滴温度加热到冰点以上（The latent heat of fusion released by the freezing portion raises the temperature of the remaining portion to the melting point.）。气动冷却可能把剩余的水滴变成积冰。剩余水滴的积冰方式觉得了积冰的种类。结构积冰可能的类型包括：明冰（clear ice），毛冰（rime ice），以及两者的结合。每一种都有各自的特点。

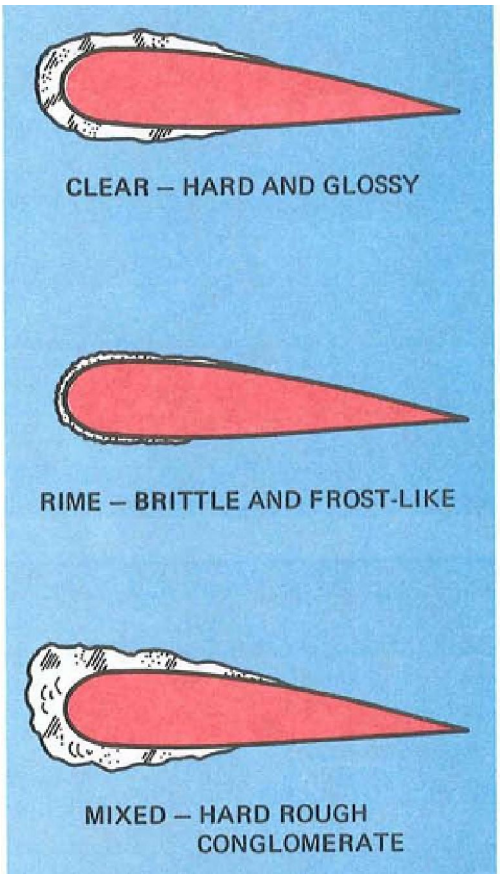
明冰

在最初的碰撞后，剩下的一部分水滴流过飞机表面，渐渐地结成一层平滑的冰，明冰就形成了。这种冰常常形成于大的水滴，比如在雨中或积状云中。

图 90 中的第一个机翼前缘上画的就是明冰。图 91 和图 92 的照片上也是明冰。明冰又硬又重，而且很坚固，用除冰设备很难去除。

毛冰

图 90



毛冰形成与小水滴，比如层云内或者毛毛雨内的水滴。水滴在碰撞后，来不及移动到飞机的其他部分就快速结冰了。毛冰中包含了很多空气，所以它们看起来是白色的，如图 90 和图 93。

明冰和毛冰的混合

明冰和毛冰的混合情况出现在水滴大小不一，水滴夹杂在雪或冰粒中的时候。混合积冰的速度很快。冰粒夹杂在明冰中，形成粗燥的堆积物，有时会在机翼前缘形成蘑菇状的混合积冰（图 90）。图 94 上的照片是在皮托管上形成的混合积冰。

积冰程度

为了标准化积冰程度，FAA、国家气象服务、军方航空气象服务、飞机运行机构达成一致，将结构积冰分成几个层度。航空气象服务（AVIATION WEATHER SERVICES AC 00-45）的 16 章给出了一个积冰程度的表格。你用这个表格可以帮助你评估积冰对飞机影响。当你遇到积冰时，也可以参考这个表格的描述向外界报告。

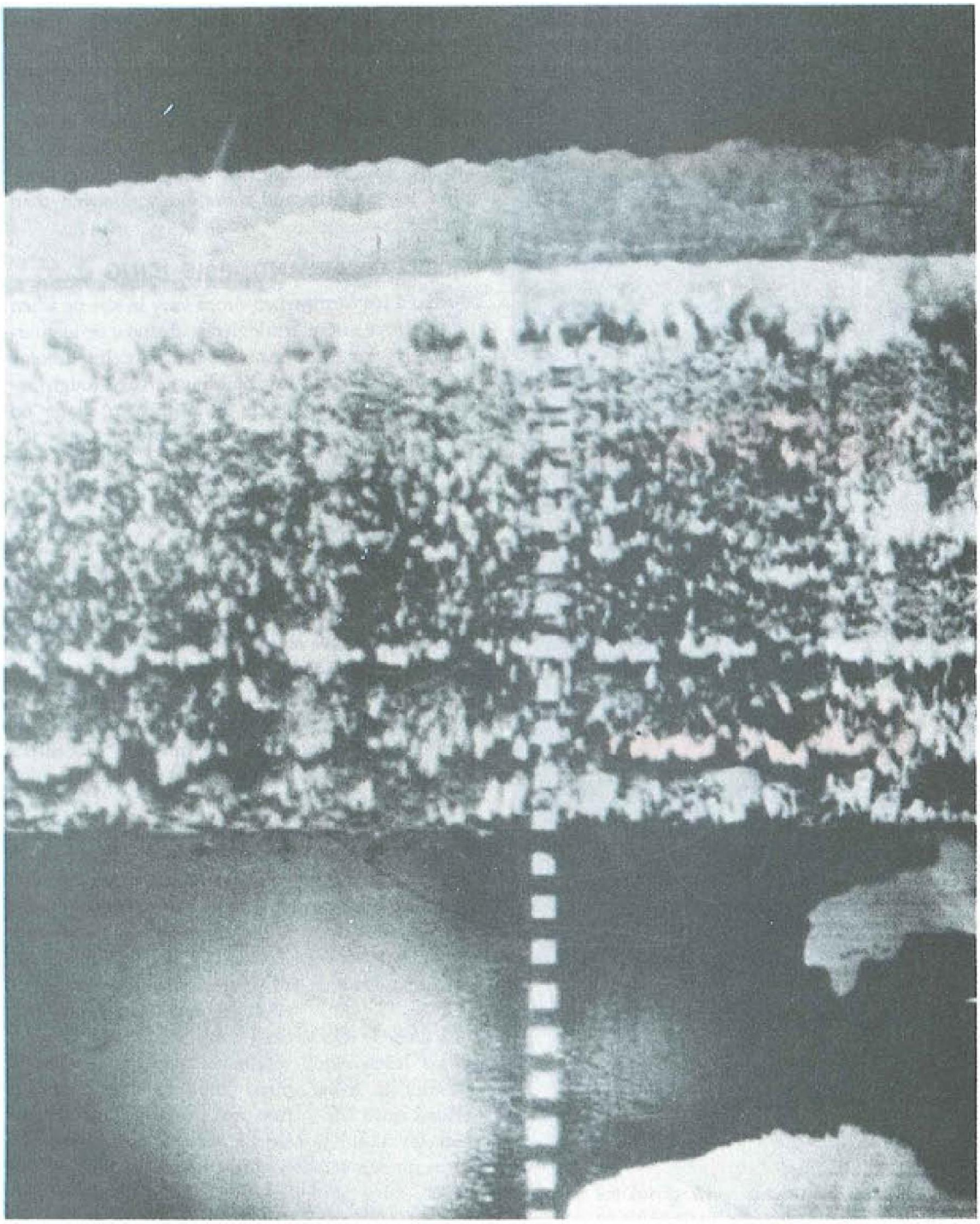


图 91

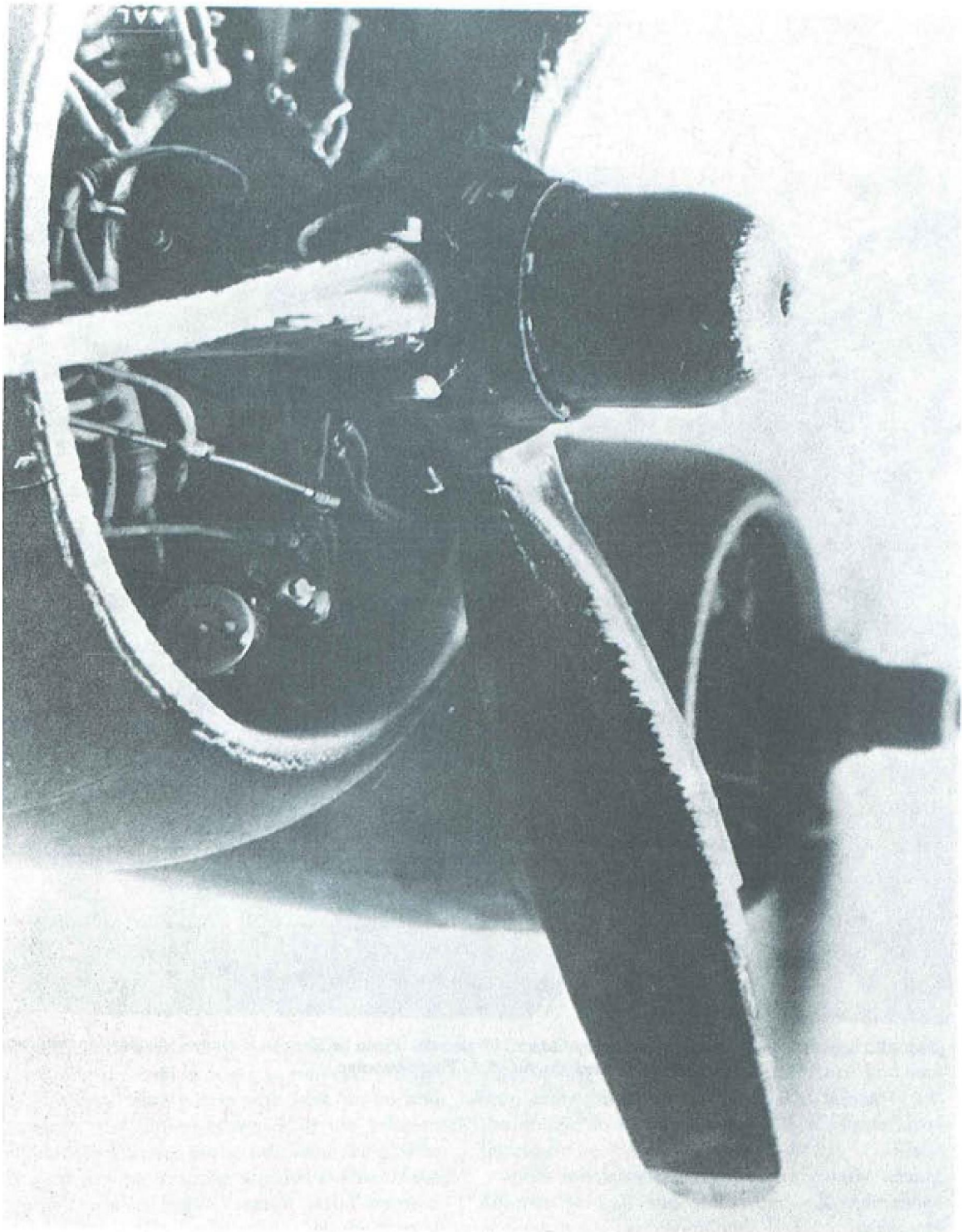


图 92

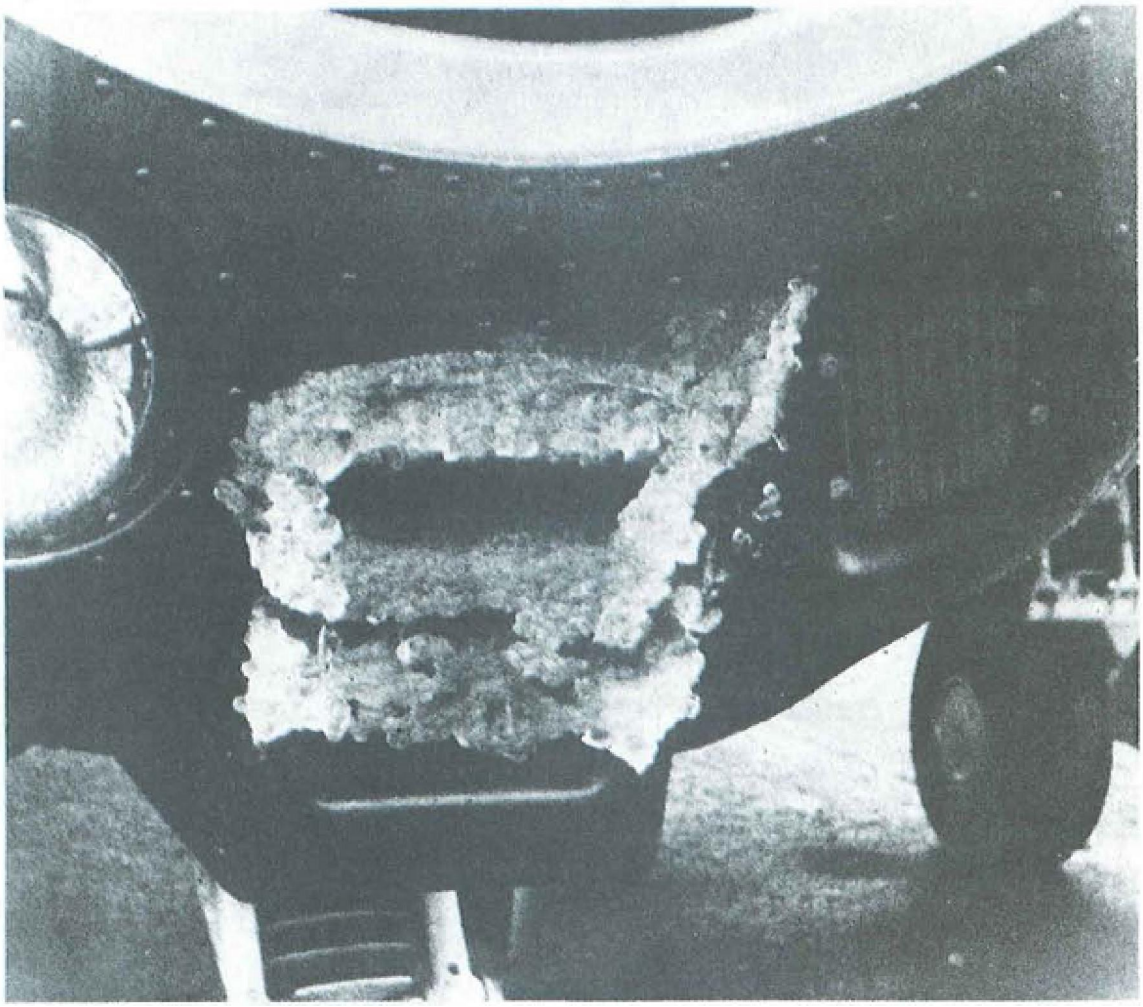


图 93

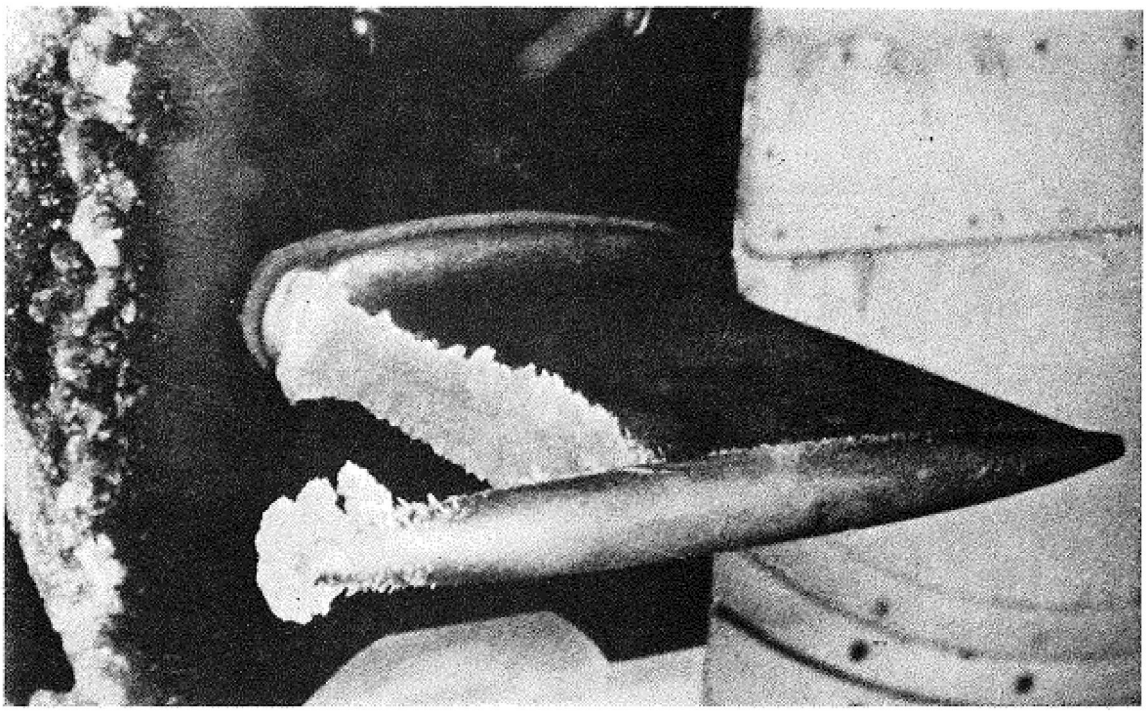


图 94

进气道积冰

积冰常常形成与引擎的进气道内，阻碍了空气进入引擎燃烧。这种积冰情况在活塞式引擎和喷气引擎上都会发生。几乎所有民航界的人都对化油器积冰（carburetor ice）很熟悉。活塞式引擎吸气行程的活塞向下运动，或者喷气引擎的压缩机，都会在进气道中形成部分真空环境。绝热膨胀降低了空气的温度。当温度低于冰点而且存在足够用来升华的水汽时，冰就形成了。在活塞式引擎中，燃油的蒸发造成了进一步的冷却。进气道积冰一定会降低引擎的性能，有时甚至会使空气流速降低到引擎无法继续工作的程度。图 95 画得就是化油器积冰。

进气道积冰在很多气象条件下都可能发生，并对不同结构的飞机有不同程度的影响。进气道积冰更多的是一个飞机工程的或操作上的问题，而不是气象学上问题。

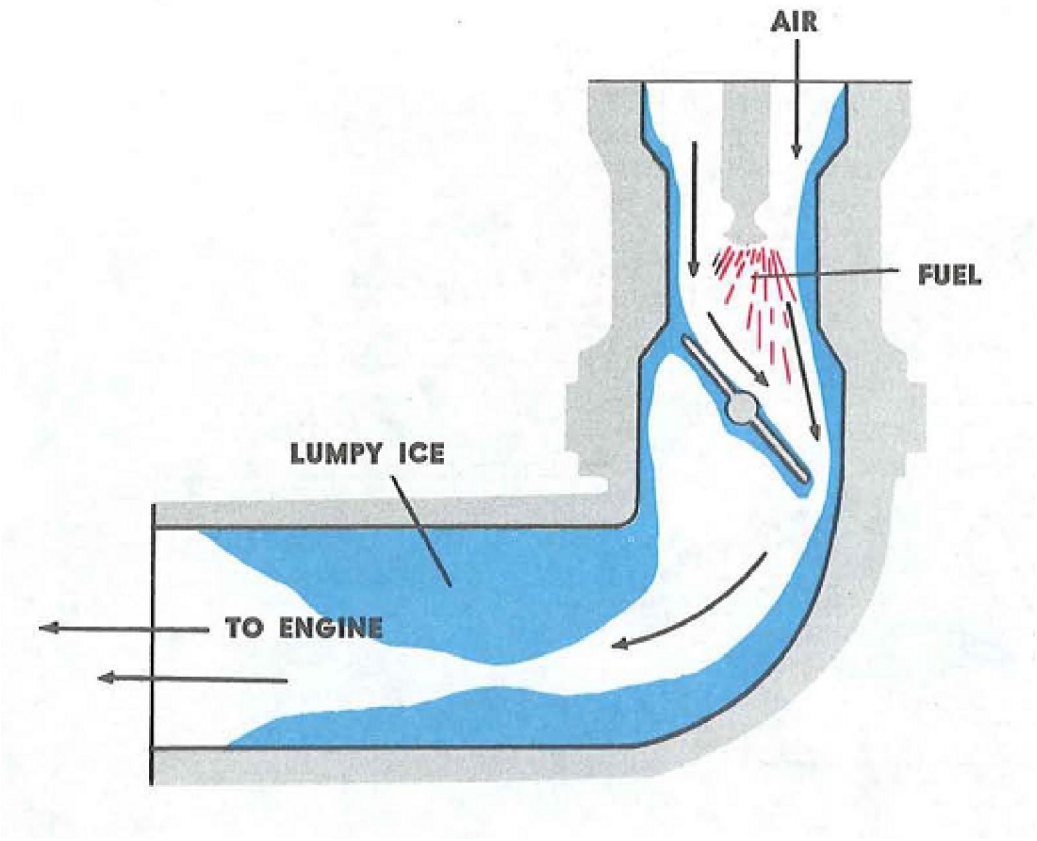


图 95

仪表积冰

如图 96，皮托管积冰会减少进入空速表的冲压空气压力，造成仪表度数不正确。大多数现代飞机还配备有外界静压口，和皮托管共同构成一个系统。如果静压口也结冰了，那就会影响到飞机上的很多仪表，包括空速、爬升率和高度表。

无线电天线上的积冰会改变天线的形状、增加阻力、引起震动，从而可能会使飞机完全失去无线电通讯。天线上的积冰程度取决于天线的形状、位置和安装方向。图 97 就是在天线立柱上的明冰。

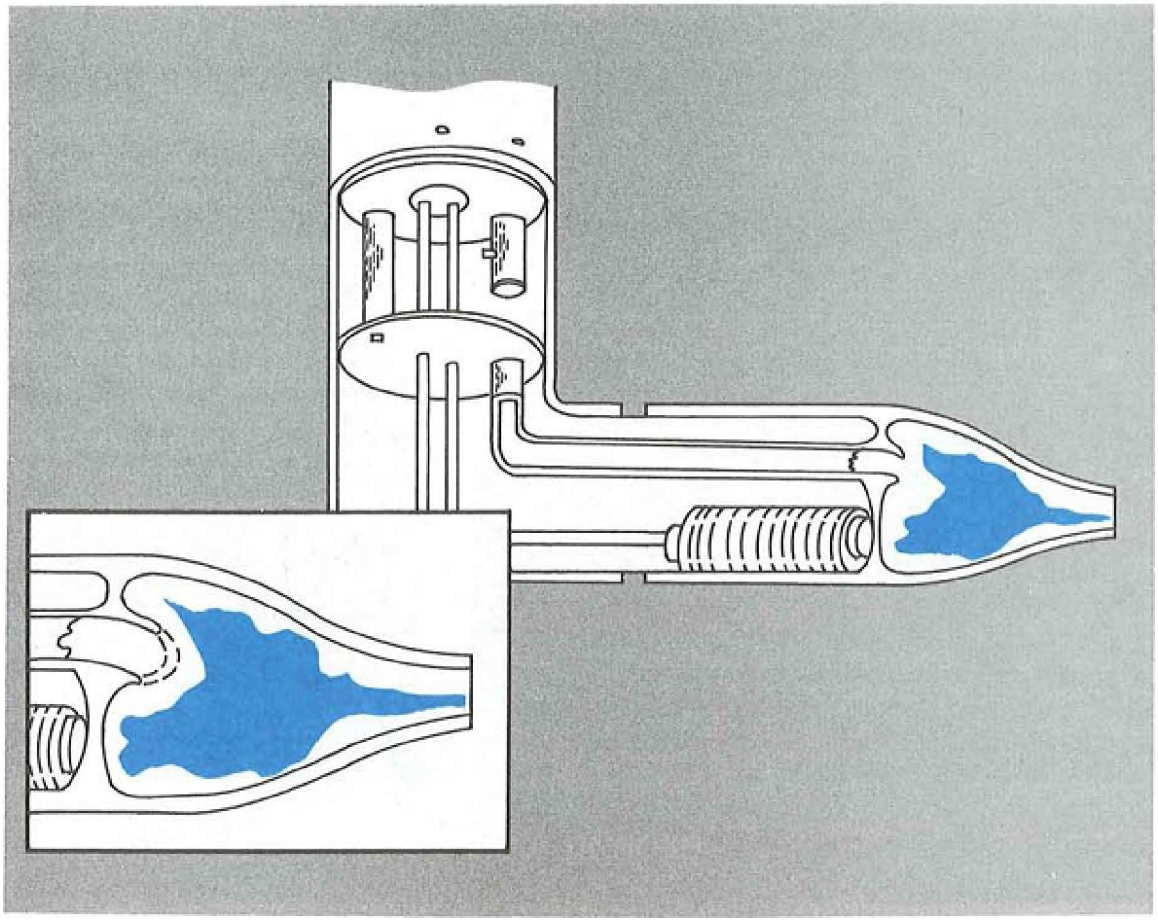


图 96

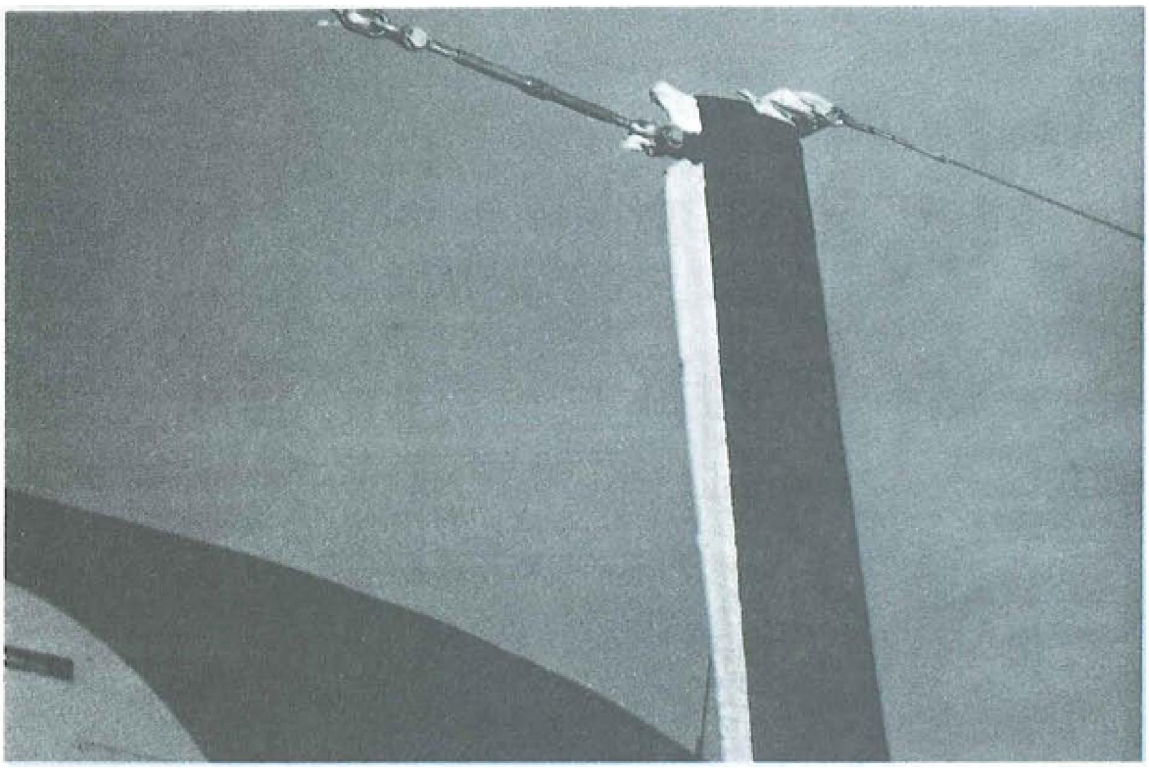


图 97

积冰和云的类型

基本上说，所有的云都是低于冰点的温度，都有积冰的可能。但是水滴的大小、水滴的分布和飞机气动效应影响着积冰的形成。有时，就算有积冰的可能，积冰也不会形成。

非常严重的积冰，通常发生于存在大量过冷水滴的环境下。相反的，较小较少的过冷水滴形成积冰的速度就慢很多。

小水滴通常出现在雾或低云中。毛毛雨或小雨就是云中存在小水滴的证据，但是很多时候，没有明显的降水迹象。最常见的低空层云积冰现象就是雾凇（rime）。

另一方面，产生连续降水的大范围层状云通常含有充沛的液态水，如高层云和雨层云。因为他们含有相对大的水滴和相对多的水滴数量。如果在冬天遇到这样的云，就会产生几千平方英里的严重积冰，阻碍你的飞行。特别是在厚实的层状云中，因为温度越高，水滴堆积得就越大。所以，最严重的积冰往往存在于，或稍稍高于零度层（freezing level），那里的温度通常和冰点差不多。在层状的云中，连续的积冰通常为零度层上 2000 至 3000 英尺厚，而且在零度层以上 5000 英尺后就很少存在积冰。

积状云中的上升气流容易形成和维持很多大水滴。雨滴的大小和降雨强度范围从阵雨到雷雨不等。当飞机进入积状云的雨水聚居区时，大水滴分裂并快速扩散到机翼前缘，形成一层水膜。如果此时温度降到冰点或更低，水膜就会快速形成一层坚固的明冰。飞行员会尽可能避开这些积状云。所以，积状云中积冰的报告很少见，也没有足够数据来计算积冰发生的概率。

积状云中的上升气流，携带着液态水上升到零度层以上很高的高度。某些罕见的情况下，你可能在雷雨云内 30000 至 40000 英尺的高度层遇到积冰，而周围的气温已经低于零下 40 摄氏度。

虽然无法判断积状云中积冰出现的垂直上限，但是由于积状云细胞使分布的特点，限制了积冰的水平分布。当然有一个例外，当你长时间飞过一个雷雨或大阵雨的边界时，积冰的水平分布就没有限制。

积冰的其他因素

除了以上几个造成积冰的因素外，还有几个原因也能造成积冰，下面说其中几个重要的。

锋面

锋面下的冬雨是快速形成积冰的主要原因。雨滴从温暖（高于冰点）的锋面上方开始下落，随后雨滴经过锋面下方的寒冷（低于冰点）的空气时变为过冷水滴。过冷水滴在接触到飞机后积冰（如图 98）。这种情况在暖锋和冷锋中都会产生。因为大量的过冷水滴存在，所以积冰会变得很严重。积冰还会存在于冷锋沿线的积雨云、飑线，或者镶嵌于暖锋的云系中。

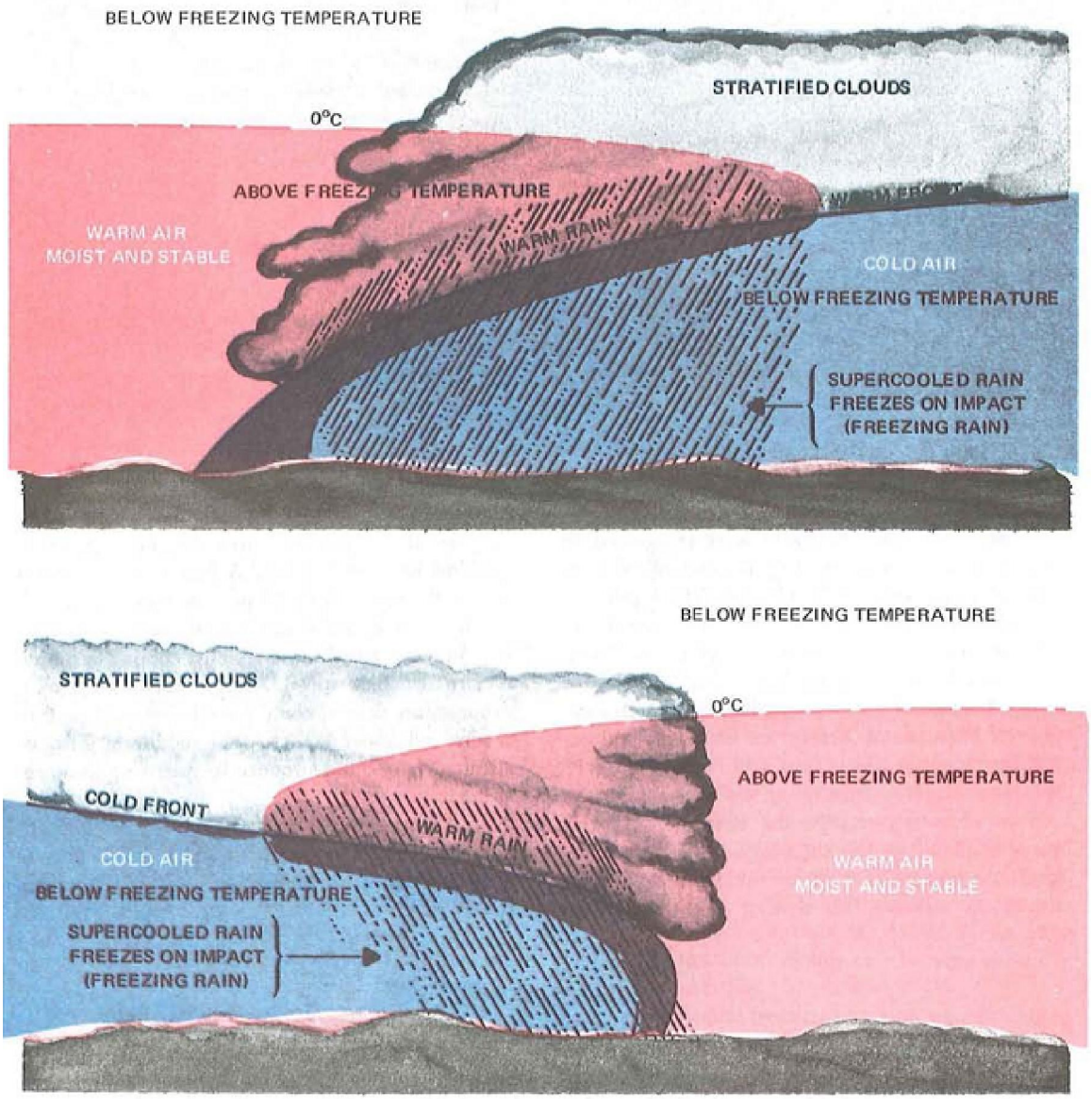


图 98

地形

空气被向上吹时是绝热冷却。当空气被冷却到冰点时，空气中的水汽就变成过冷水滴。当稳定空气被吹上山坡时，云中的水滴相对较小，因为较大的水滴变成了雨落回地面。积冰的过程相对较慢，你有足够的时间在积冰变得危险前离开这些区域。当空气不稳定时，对流云会发展出危险的积冰，就如同上一个小节“积冰和云的类型”中所说的那样。

积冰在山区较容易发生，也更危险。山区的地形造成空气在上风面快速上升，这种垂直的对流可能产生大水滴。如果正好有一个锋面天气经过山区，那么两种因素的叠加会产生超级危险的积冰区域。

每一个山区，都会有一个较易发生积冰的区域，这个区域取决于山脉和风的方向。最危险的积冰区域发生在山顶之上和山脊的上风面。而且，这个区域通常延伸到山顶之上 5000 英尺的高度，但是当积状云形成后，这个区域就会延伸到更高。

季节

积冰可能在一年中的任何一个季节发生。但是对于美国这种温和的气候地区，积冰更多地发生在冬季。在冬季，零度层比其他季节更靠近地面，造成低空发生积冰的空间减少。气旋天气在冬季更常见，伴随气旋的云分布更广。两极地区的积冰情况在春秋季是最严重的。因为冬季北极地区的空气实在太冷了，无法使水汽聚集在一起，也就无法形成积冰。而且极地地区的云都是层状云，由冰晶构成。

地面积冰

霜、冰粒、冻雨、雪都可能在停留的飞机上堆积。你必须在起飞前去除飞机上的所有积冰。因为积冰会降低飞机的效率。当飞机滑行过水潭，起落架溅起的水花，或者螺旋桨喷出的水滴遇到飞机后，也可能造成积冰。积冰可能堆积在轮舱、刹车和襟翼铰链上，影响它们的正常工作。如果在跑道或滑行道上积冰，还会影响飞机的牵引或飞机的刹车。

霜

长久以来，霜都被民航界认为是危害航空安全的东西。有经验的飞行员会在起飞前把机翼上的霜去除干净。霜形成于晴朗的，小风或无风，靠近地面的区域。这种天气对飞行来说是完美的。因此，霜的危险有时会被忽视。机翼上的薄金属材料，尤其是最单薄的表面，特别容易形成霜。图 99 就是机翼上形成霜的照片。

虽然霜不会直接改变机翼的气动外形，但是它使机翼表面变毛糙。毛糙的表面破坏了平滑的气流，使气流速度减慢。气流减慢造成了机翼上气流分离提前，从而造成机翼失去升力。一层厚实的霜会提高百分之 5 至百分之 10 的失速速度。即使机翼上存在少量的霜也会使飞机在起飞速度下无法起飞。还有另一种可能情况，当飞机起飞后，由于霜提高了失速速度，当前空速与失速速度的余量变小，造成飞机一旦转弯或遇到中等强度阵风，飞机就开始失速或完全失速。

飞行中结霜是一个更复杂的问题。霜形成到多少程度，只能靠推测。飞行中结霜是比较罕见的。

图 99

总结

只有你看到了的才是积冰。积冰和颠簸一样，程度和长度各不同。预报可以描绘出可能发生积冰的区域，但是不能预报出确切积冰的地点。你在计划你的飞行路线前，应该考虑避开那些你无法处置的积冰区域。而且在航路飞行时，你应该时刻准备着避开或逃离积冰发生的区域。

以下几点需要牢记：

1. 起飞前，检查你的计划航路积冰预报。检查飞行员报告。如果可以的话，和飞过同航路的飞行员聊聊。
2. 如果你的飞机没有防冰除冰设备，你必须避开积冰区域。飞行时必须目视到可见水汽（云或降水），避开环境为 0 摄氏度或以下的区域，避免结构积冰。
3. 起飞前去除机翼上的冰和霜。
4. 在寒冷天气时，尽量避免在泥、水或雪浆的道面上滑行或起飞。如果你已经在这些区域滑行了，那么在起飞前一定要检查操纵面的运动情况。
5. 当你在积冰区域爬升时，以一个比正常速度稍大的速度爬升，避免失速。
6. 在积冰没有积累到太大的时候，使用除冰或防冰设备。如果这些设备变得不太有效了，那么尽快改变航迹或高度，尽快离开积冰区。
7. 如果你的静压口或皮托管没有安装防冰设备，那么注意你的速度表、爬升率表和高度表的读数可能出现错误。
8. 在层状云中飞行时，如果你想缓解积冰的情况，你可以改变高度层，改变到零摄氏度以上的区域，或者低于零下 10 摄氏度的高度层。
9. 如果你在锋面的冻雨区内飞行，你可以爬升或下降到一个更暖的区域。在更高的高度层上，气温通常高于零摄氏度。如果你想爬升，请赶早，因为积冰会增加飞机的重量。如果你想下降，请确认下面区域的温度和地形。
10. 无论如何，避免积状云。明冰可能在高于零度层的任何地方出现。常见的快速积冰出现在环境温度 0 摄氏度到零下 15 摄氏度的区域中。
11. 在飞机覆盖了厚实的积冰后，避免机动飞行。因为积冰已经使你的飞机失去了部分气动性能。
12. 当积冰时，带着点油门近进（When "iced up", fly your landing approach with power.）。

地面上的人无法实际观察到积冰情况。他只能通过飞行员了解积冰的存在与否。帮助你的飞行员朋友和气象服务单位，当你遇到积冰的时候，发出飞行员报告。当预报存在积冰，却没有积冰的时候，你也应该发出报告。你可以使用“航空气象服务”第 16 章节的表格来帮助你分辨积冰的强弱程度。

第十一章　雷暴

时不时，你在飞行时遇到雷暴，并做出艰难的决策。在本章的内容中，我们将看看雷暴在何时何地最容易发生，解释是什么创造了雷暴，一窥雷暴的内部，分析雷暴中正在发生什么，对飞机有什么影响。这一章节还向你解释了如何使用气象雷达，并且给出在雷暴天气中飞行的建议。

何时何地

在一些热带地区，雷暴整年都会发生。在中纬度地区，雷雨最常见于春季、夏季和秋季。北极地区在夏季偶尔发生雷雨。

图 100 显示了美国本土相邻的 48 个州每年的平均雷雨次数。你可以注意到，中南部和东南部的州发生的概率很高。从图 101 至图 104 可以看出，雷暴发生的天数随季节的变化很大。通常雷暴在 7 月和 8 月发生的概率最高，在 12 月和 1 月的概率最低。

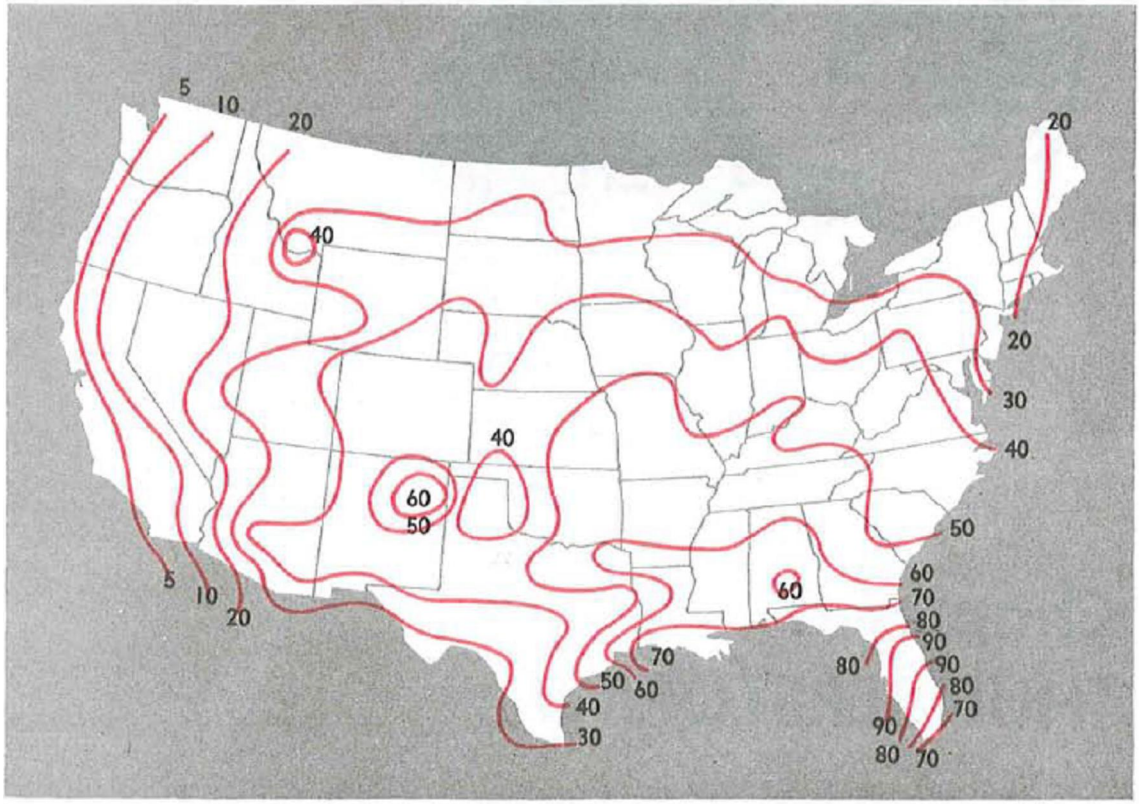

5
10
20
40
20
20
30
40
40
60
50
50
60
60
70
80
90
90
80
80
70
90
80
70
5
10
20
70
50
60
40
30

图 100

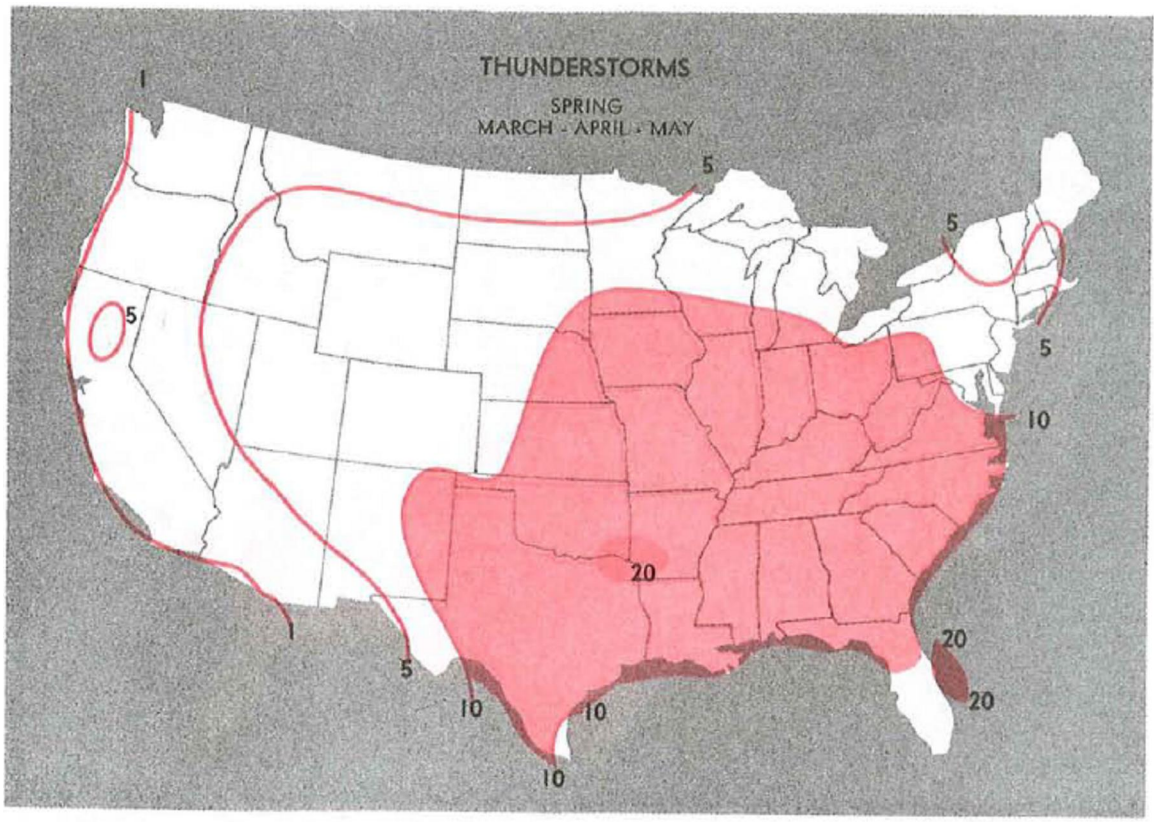

THUNDERSTORMS
SPRING
MARCH - APRIL - MAY
1
5
5
5
5
10
20
1
5
10
10
10
20
20

图 101

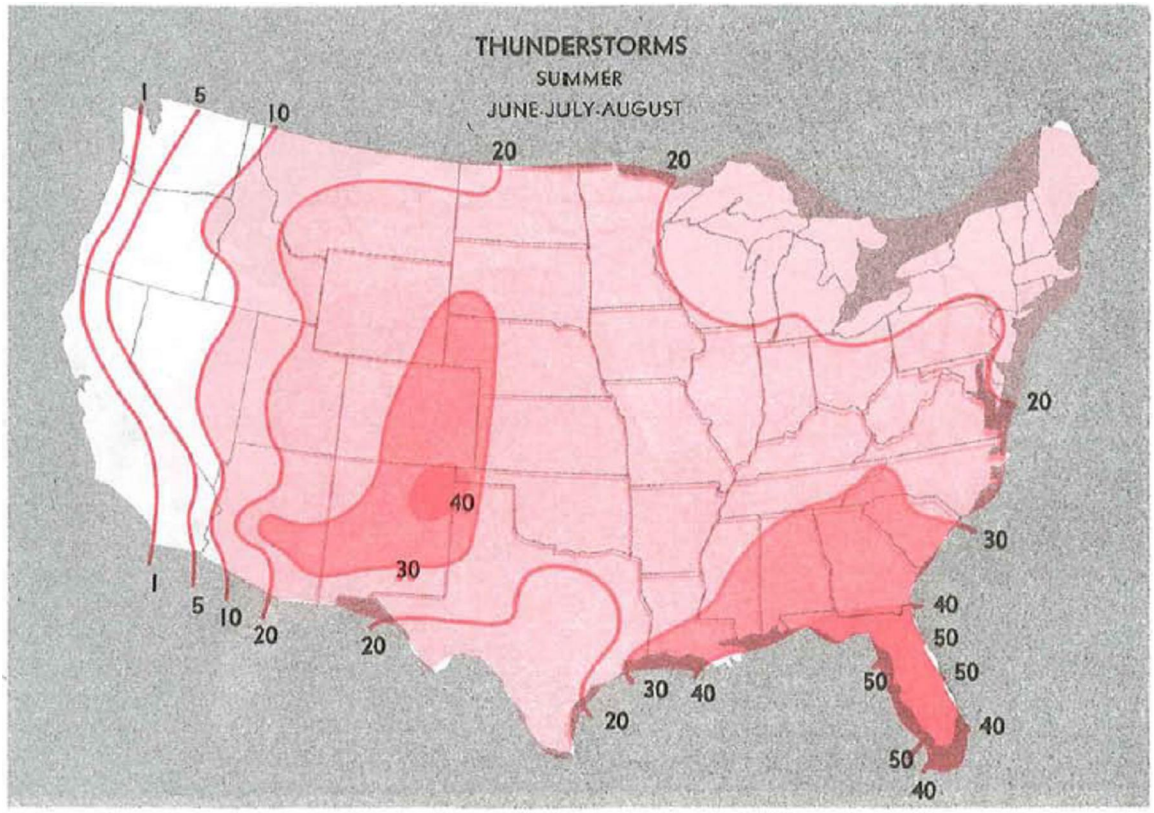

THUNDERSTORMS
SUMMER
JUNE-JULY-AUGUST
1
5
10
20
20
20
40
30
30
1
5
10
20
20
20
30
40
50
50
50
40
50
40

图 102

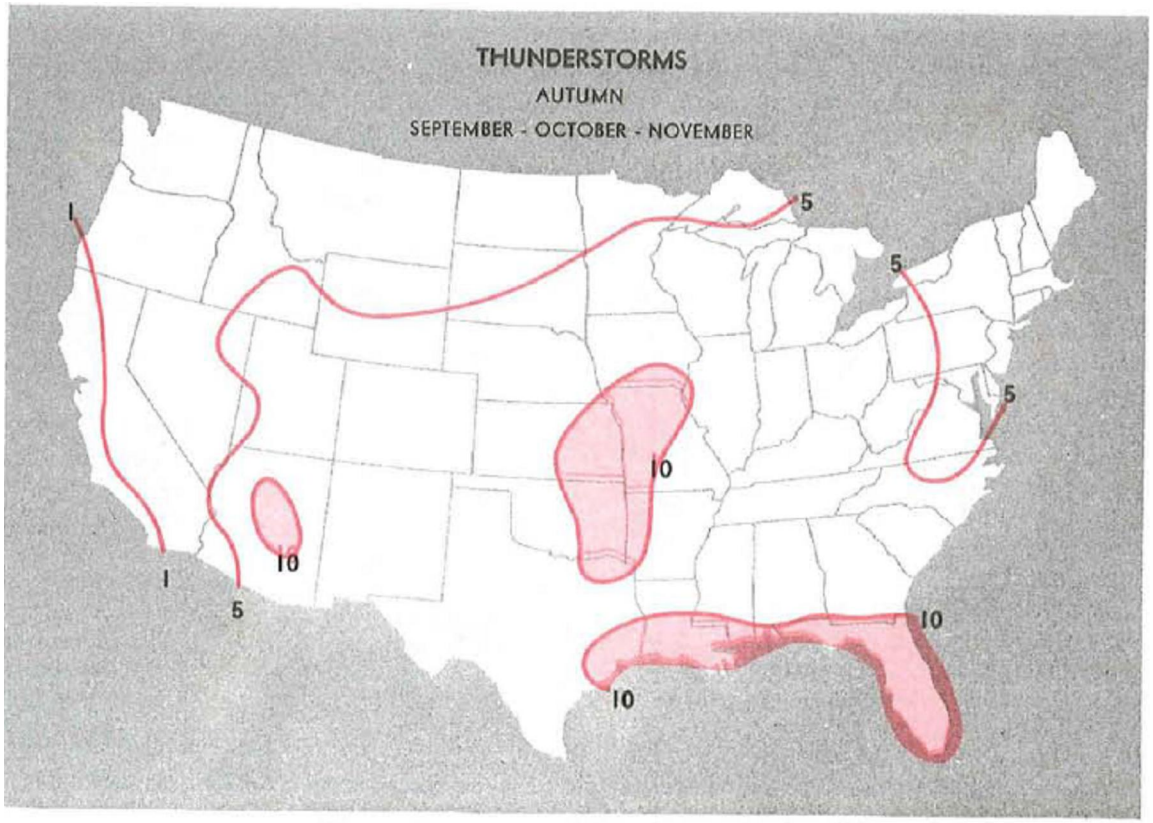

THUNDERSTORMS
AUTUMN
SEPTEMBER - OCTOBER - NOVEMBER
1
5
5
5
10
10
1
5
10
10

图 103

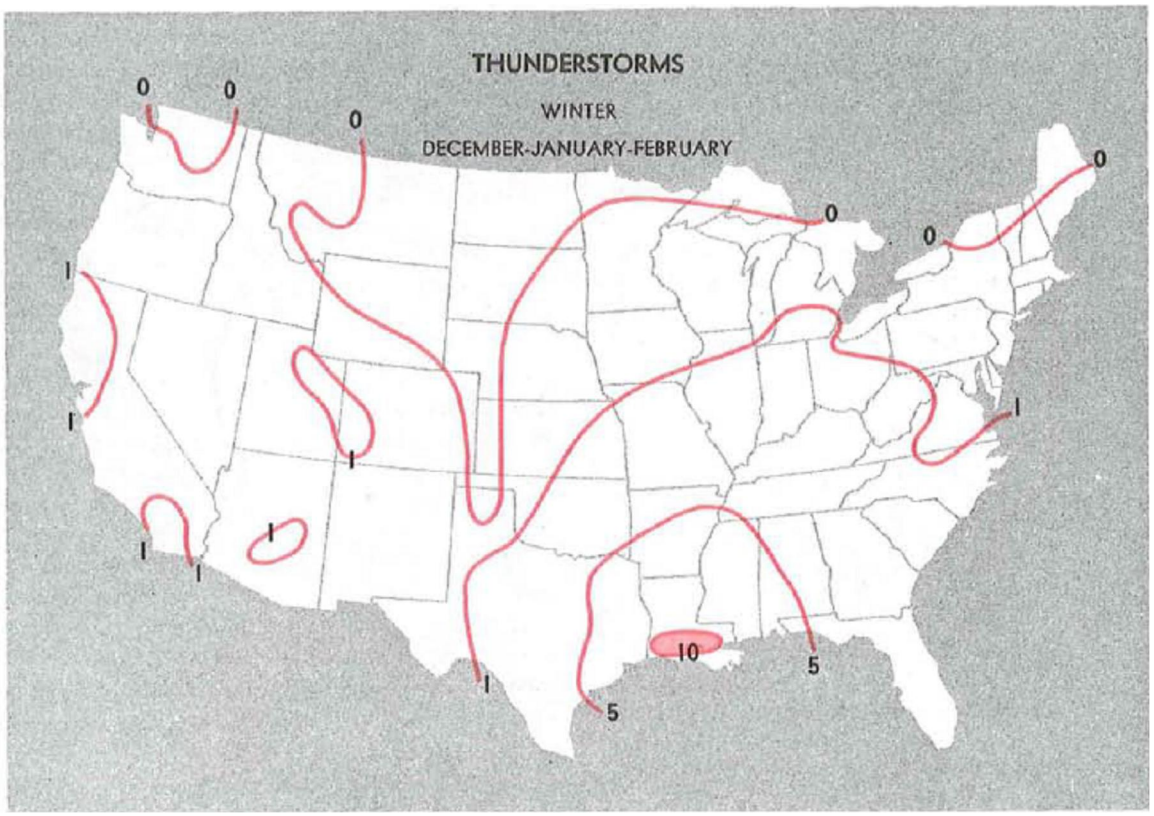


图 104

雷暴不简单（They Don't Just Happen）

为了要形成一个雷暴，空气必须：

1. 足够多的水气
2. 不稳定的值减率
3. 初始的上升动力，推动雷暴的起始运动

我们在第五章说过水汽，在第六章说过稳定性。那么上升动力呢？地面受热、交汇的风、上升的地形、锋面天气或者以上的任何组合都可以造成上升的动力。

很多年来，雷雨已经是很多研究的目标。形象地说，让我们来看看雷雨的内心。

内部结构

向上的运动创造了最初的上升气流。上升气流的冷却形成凝结并形成积云。凝结过程放出的潜热抵消了部分的冷却过程，增加了云内的上升动力。这种上升的动力越来越快，并且带动更多水汽进入云内。没多久，这种上升的过程就可以自己维持了。所有的雷暴的生命周期都遵循：最初发展阶段、成熟阶段、消散阶段。

生命周期

雷暴会经历生命中的三个周期：积累期（Cumulus Stage）、成熟期（Mature Stage）和消散期（Dissipating Stage）。但是，事实上我们可能明确分清这三个阶段的时间段。不同阶段的过渡是微妙的，不是突然的。而且，一个雷暴可能由多个不同时期的小雷暴体组成。

积累期

虽然大多数积云没有成长为雷暴，但是每个雷暴都是由积云开始的。积累期的主要特点是一股上升气流（图105A）。上升气流从靠近地面的高度一致延伸到云顶，强度不断变化。积云“长高”的速度可能超过每分钟 3000 英

尺，所以，建议不要爬升并飞跃正在快速积累的积云。

在积累期的开始时，水滴是很小的。但是随着云的增大，水滴变大成雨滴。上升气流带着水滴到达零度层，造成积冰的危险。当雨滴变得太重时便开始下落。寒冷的雨水拉扯着空气形成向下的气流。向下气流和向上气流同时存在。这时，这个雷暴已经达到成熟期。

成熟期

降水的开始代表了云内的下沉气流已经形成，雷暴已经进入了成熟期。下沉气流阻碍了压缩加热（compressional heating），而且下沉气流比周围环境中的空气温度更低。因此，下沉气流可以不断加速，可能超过每分钟 2500 英尺。下沉气流在地面向外扩散（图 105B），造成地面的强风、阵风、气温急剧下降和气压快速上升。这种地面风被称为“犁风（plow wind）”，它的前缘被称为“初阵风（first gust）”。

同时，上升气流达到最大值，速度可能超过每分钟 6000 英尺。上升气流和下沉气流靠得很近，造成强大的垂直风切变和严重的颠簸环境。所有雷暴引起的危害，都在它的成熟期达到鼎盛。

消散期

消散期的雷暴特点是下沉气流（图 105C），而且雷暴会很快消亡。当降水停止，下沉气流减小后，就意味着消散期结束了。当所有的雷暴体的消散期都结束后，只留下无害的云的残骸。

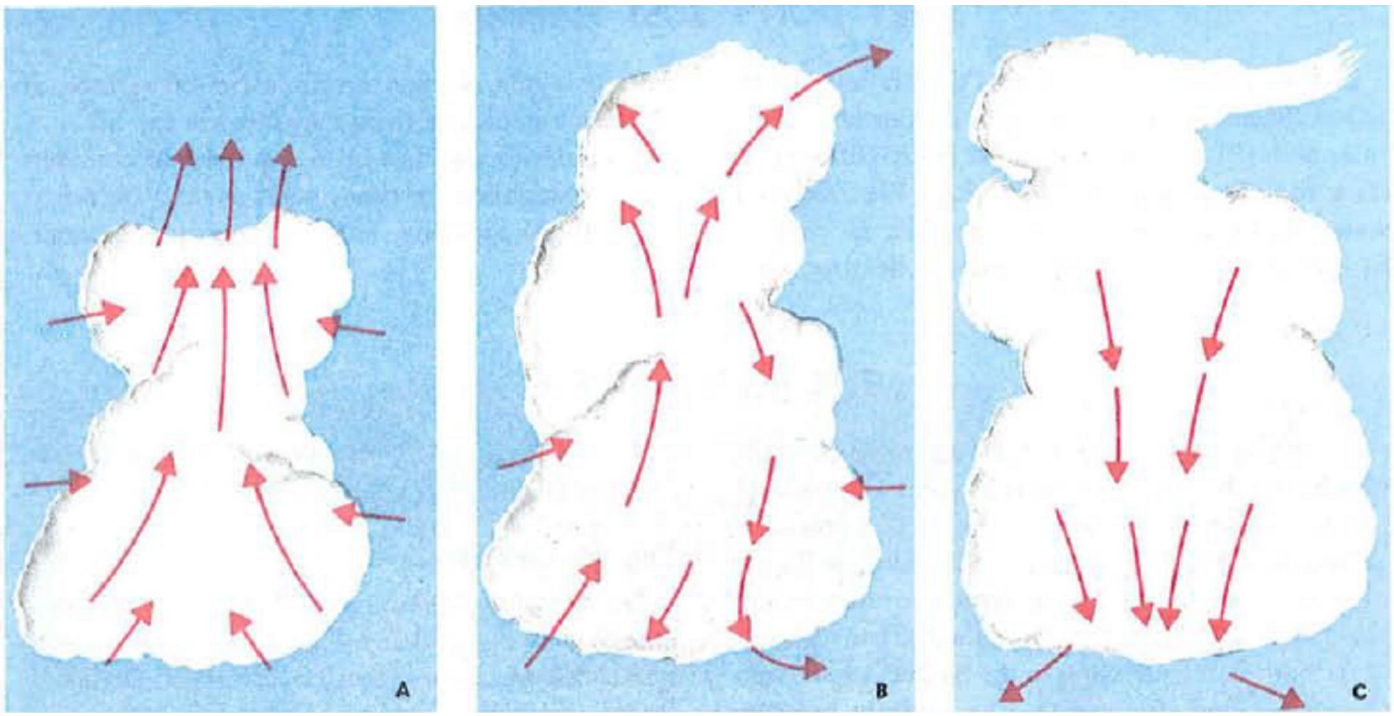


图 105

雷雨有多大？

单独的雷暴大约直径 5 英里之 30 英里之间。在潮湿的环境中，云底大约几百英尺；在更干燥的地区，云底大约 10000 英尺或更高。云顶通常为 25000 至 45000 英尺高，但有时超过 65000 英尺。

难对付的和更难对付的（Rough And Rougher）

成熟期的长短决定了雷暴的破坏程度。有些雷暴在不稳定的空气中随机产生，持续一到两小时，产生中度阵风和降雨。即便如此，这种雷暴的危险程度已经到无法穿越了。它被称为气团型雷暴（air mass）。另一种雷暴，呈线状排列，持续几小时，倾泻大雨甚至冰雹，产生大阵风甚至龙卷风。它被称为稳定型雷暴（steady state）。这种雷暴比气团型雷暴更难对付，而且明确反对能飞入其中。

气团型雷暴

气团雷暴常常由地面升温引起。当雷暴达到成熟期时，降雨从上升气流内部落下，或者在上升气流边缘即刻落

下（When the storm reaches the mature stage, rain falls through or immediately beside the updraft.）。降水造成了摩擦阻力，减小了上升气流，并把上升气流反转为下降气流。这种雷暴是“自毁”的。下降气流和寒冷的降水冷却了雷暴的下半部分和所覆盖的地面。所以，它切断了水汽的流入，雷暴就切断了自身的能量来源，最后死掉了。这种“自杀”雷暴的生命周期大约为 20 分钟至一个半小时。

因为气团雷暴通常是地面受热的产物，所以它们通常在中午或下午达到最大强度和出现概率。在近海处，它们通常在夜晚的后几小时达到最大，因为地面温度最冷，冷空气从陆地吹向相对温暖的水面。

稳定型雷暴

稳定型雷暴通常和天气系统有关。锋面、收敛的风（converging wind）、高空低气压，造成的上升运动孕育了这中雷暴，常常形成飑线。午后的热量对他们有加剧作用。

在稳定型雷暴内，降水出现在上升气流外（如图 106），从而可以让上升气流持续不断。所以稳定型雷暴的成熟期比气团雷暴的更强，持续时间更长。因此得名“稳定型”。稳定型雷暴可以持续好几个小时。

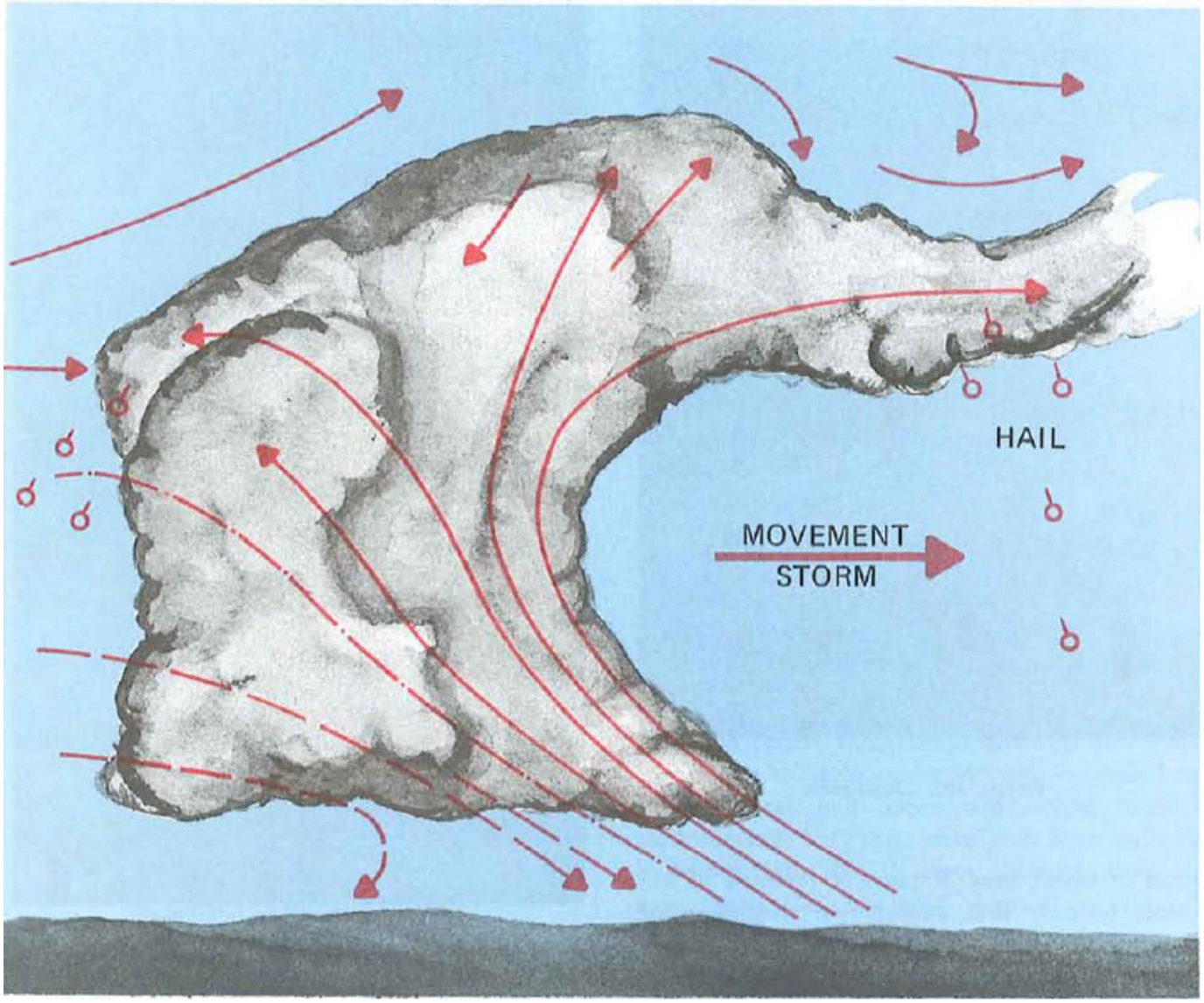


图 106

雷暴的危害

雷暴就像是一个包含了所有已知危险天气的大箩筐。虽然危险天气可能有多种组合，但是我们可以逐个分析它们。

龙卷风

由于最狂暴、最具活力的雷暴会把空气吸入它的云底，如果进入的空气带有一点点初始的旋转运动的话，那么常常会发展成极度浓缩的漩涡，从地面一直延伸到云中。气象学家预计在漩涡中的最大风速超过 200 节。漩涡内的气压相当低。强风聚集着尘土和各种碎片，低气压产生一个漏斗形的云，从积雨云底部延伸下来。如果漏斗没有延伸到地面，它就叫“漏斗云”（图 109）。如果漏斗延伸到地面，它就叫“龙卷风”（图 107）。如果漏斗延伸在水面上，它就叫“水龙卷风（water spout）”（图 108）。

龙卷风可以形成与孤立的雷暴中，但是更多的时候，它们形成于稳定型雷暴，这些雷暴又伴随于冷锋或飑线。如果报告或预报存在龙卷风，代表这个区域的大气状况非常容易产生剧烈的颠簸。

如果飞机进入龙卷风内的话，几乎都会受到结构损伤。由于那些漩涡隐藏在云中，如果飞行员不经意间飞入了严重的雷暴区内，它就可能碰上隐藏的漩涡。

根据观测报告，龙卷风家族可以作为各类云的附属物存在，可能在雷电或降水区域的几英里之外产生。所以，只要某块云和严重的雷暴沾一点边，都存在发生龙卷风的可能性。

通常，乳状积雨云（cumulonimbus mamma）与猛烈的雷暴或龙卷风有关（图 110）。乳状积雨云的底边呈现出圆形、不规则的口袋或花边（irregular pockets or festoons）的形状，它代表了空中存在严重的颠簸。地面民航气象观测站会特地报告这种乳状积雨云或其他特别危险的云。

龙卷风最常发生在洛基山东部的大平原上。悲剧的是，如图 111 所示，几乎每个州都会发生龙卷风。

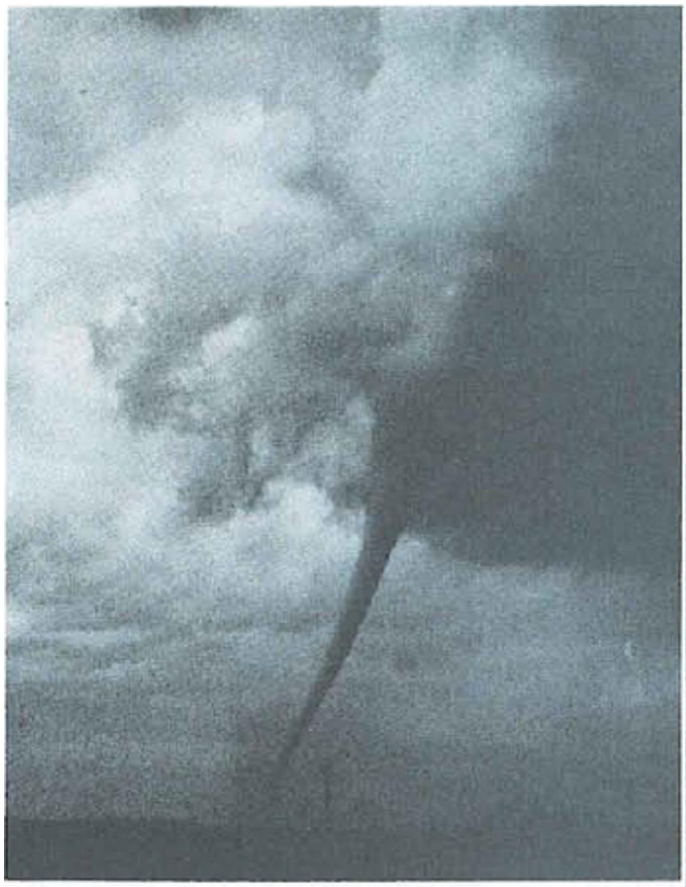


图 107

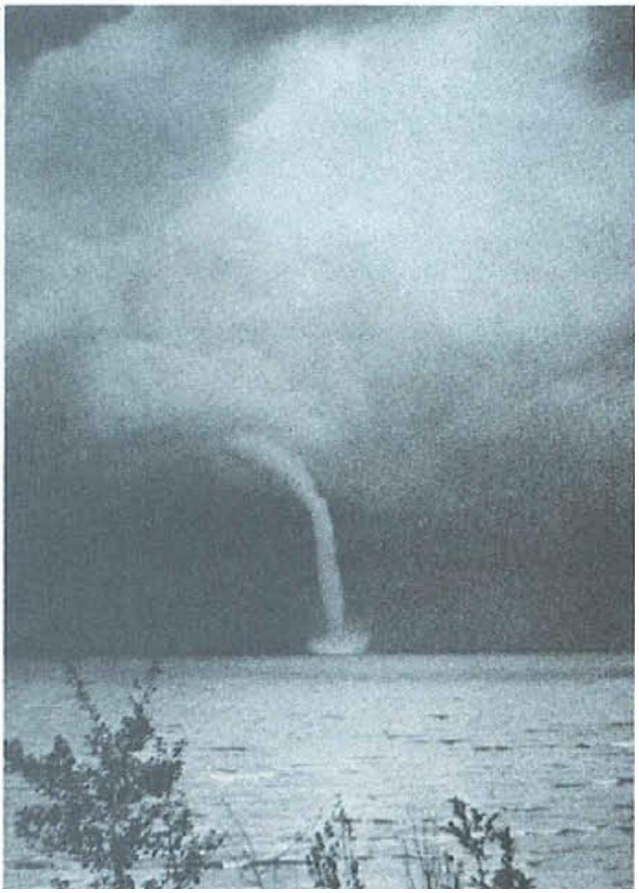


图 108

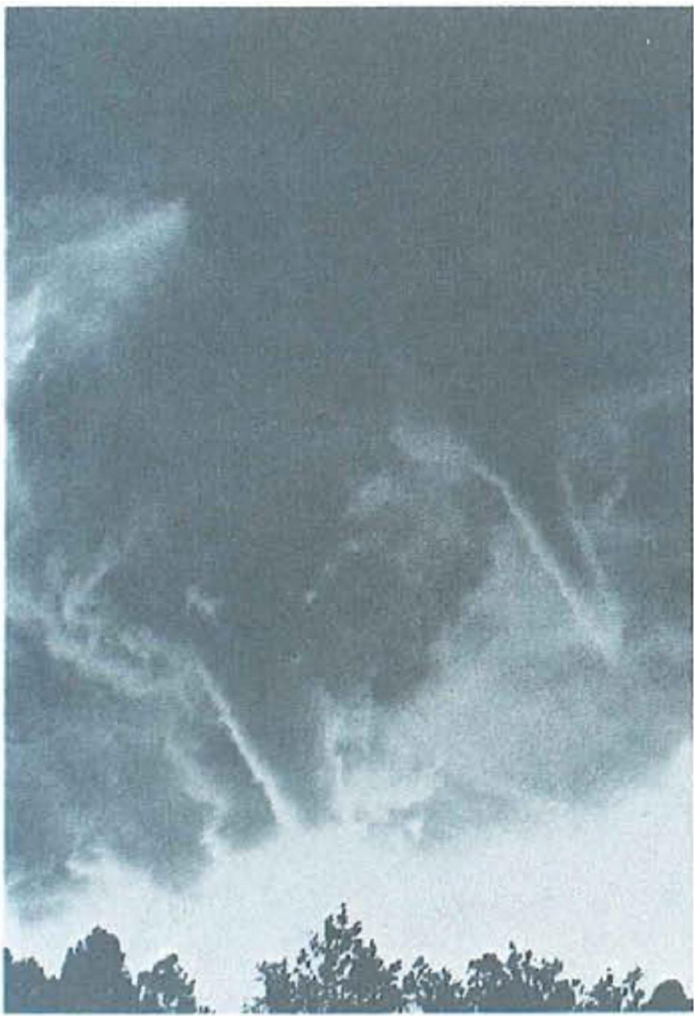


图 109

图 110 图片来自网络

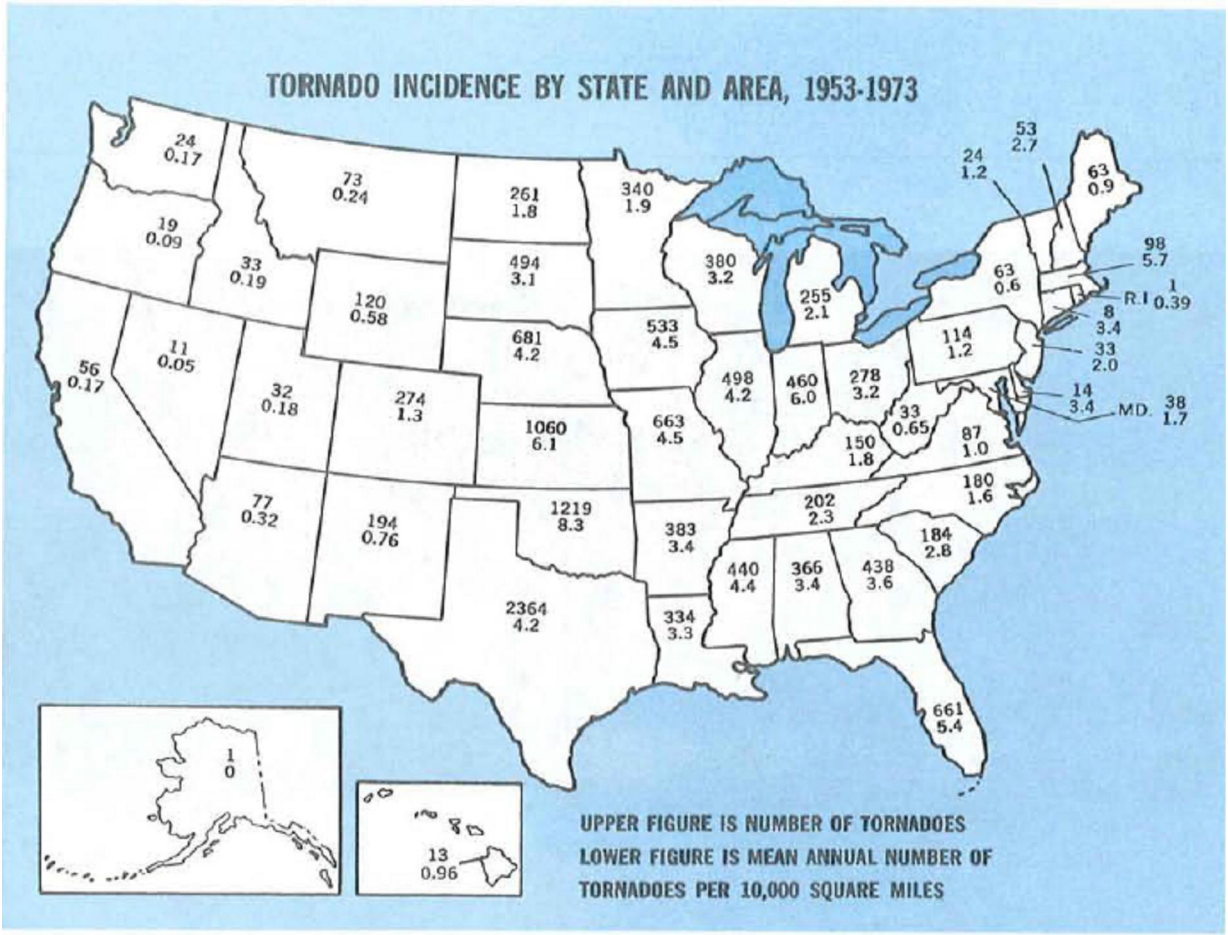


图 111

飑线

飑线就是一个非锋面的，长条的雷暴带。它通常产生于冷锋前潮湿不稳定的空气中，但是它也可能在远离任意锋面的不稳定空气中产生。飑线可能太长，不可能绕道而行；也可能太宽或太剧烈，不可能穿越。飑线中通常包含严重的稳定型雷暴，并存在一种最强烈的危险天气。它通常快速形成，在午后或黑夜的前几个小时达到最大强度。图 112 就是一个向前移动中的飑线。

颠簸

所有的雷暴中都存在危险的颠簸。在一个狂暴的雷暴中，颠簸会造成机身结构的损伤。最强烈的颠簸发生在上升气流和下降气流形成风切变的地方。在雷暴云至外水平距离 20 英里，之上几千英尺的范围内都会出现颠簸。低空颠簸的发生在犁风（plow wind）和周围环境空气造成的风切变区域。通常，雷暴前缘的一排“滚轴云（roll cloud）”标识出了风切变的漩涡。滚轴云通常伴随着冷锋或飑线雷暴，它们是严重颠簸的标志。初阵风（first gust）迅速甚至剧烈地改变了雷暴前的地面风向风速。图 113 给出了一个雷暴区域和雷暴到达前的剖面图。

在雷暴中保持一定的高度几乎是不可能的，同时，机动飞行会大大增加飞机的负荷（stresses）。如果飞机保持一个固定的姿态（constant attitude），并允许飞机进入“随波逐流（ride the wave）”的状态，飞机负荷就会最小。目前，我们还没有找到对付雷暴的“弱点（soft spots）”。

积冰

雷暴内的上升气流把充足的液态水带上了零度层；水滴变得过冷。气流继续上升，当上升气流中的温度降到零下 15 摄氏度后，剩下的水滴升华成了冰晶。在这个高度之上，过冷水滴的含量就开始下降了。

过冷水滴在撞击到飞机后结冰（见第十章）。明冰在零度层之上任意高度发生。但是在高高度，积冰可能是毛冰或毛冰和明冰的混合。由于充沛的过冷水滴的存在，在 0 摄氏度至零下 15 摄氏度的范围内，明冰积冰的速度很快，而且可能在一系列雷暴体内多次发生。因此，雷暴积冰会非常危险。

冰雹

积冰和颠簸相比，算得上是最危险的雷暴灾害了。当零度层之上的过冷水滴开始结冰，其他的过冷水滴也依附着它开始结冰。所以冰雹越变越大，有时变大成一个巨大的冰球。延伸高度较高的雷暴会带来巨大的冰雹。有时冰雹在雷暴中心以外的一段距离落下。有些冰雹可能在雷暴以外数英里的晴朗区域被发现。

当冰雹落下时，经过温暖的区域。它们就会融化，可能在地面的变成雨滴。所以，地面下雨并不代表上空没有冰雹。你必须时刻堤防着雷暴发生冰雹，特别是当你穿过大型积雨云的“砧体”下方时。直径比 1.5 英寸大的冰雹可以在几秒钟内对飞机结构造成严重破坏。图 114 就是一架遭受雷暴冰雹袭击后的飞机照片。

低云和低能见度

在雷暴云内的能见度通常为零。在雷暴云和地面之间，能见度和云底高通常会因为降水或沙尘受到阻碍。能见度或云底高之一受限和它们同时受限是相同的结果，而且，当能见度和云底高的限制与雷暴的其他危险天气相叠加，就会使飞行的风险倍增。这般情况下，精密仪表飞行几乎是不可能完成的事情。

对高度表的影响

通常在雷暴来临前，气压会迅速下降；当初阵风和寒冷的下降气流到来或开始下大雨后，气压又会快速上升；雷暴移开后，气压恢复正常。气压的变化周期可能在 15 分钟内发生。所以，如果你的气压表拨正值不正确，指示高度可能发生超过 100 英尺的误差。

雷暴放电

雷暴产生的电对飞机少有大影响，但也可能造成破坏，对机组也是一种烦恼。闪电就是最壮观的放电现象。

闪电

闪电可能会击穿飞机的外壳、破坏通讯设备和导航设备。闪电也被怀疑会点燃燃油蒸汽，造成爆炸。但是，由于雷击造成的严重事故很少见。近距离靠近闪电会使飞行员暂时失明，失去依靠仪表或目视导航的能力。靠近闪电还会使磁罗盘造成永久的误差。即使较远距离的闪电，也能干扰低频和中频的无线电通讯。

闪电的几个重点：

1. 闪电越频繁，雷暴越猛烈。
2. 闪电频率增加，雷暴强度增加。
3. 闪电减少，雷暴接近消散期。
4. 夜里，远处延地平线大块的频繁闪电，代表那块区域可能有飑线。

降水静电

降水静电（precipitation static）是一种持续的、严重的无线电接收噪音。它是由于金属尖端或飞机边缘的电晕放电（corona discharge）产生的。它经常在雷暴附近产生。当飞机飞越云、降水或固态的小颗粒（冰、沙或尘埃）聚集区时，飞机会积累静电。电荷在向别的物体转移或向空气放电时，就会对低频通讯造成噪音。

电晕放电会发出微弱的光，在晚上可以看见。虽然它们看上去很诡异，但是无害。当地中海的水手们看到桅杆顶上有毛茸茸的放电现象时，就称之为“圣艾尔摩之火（St. Elmo's fire）”。

图 112 图片来自网络

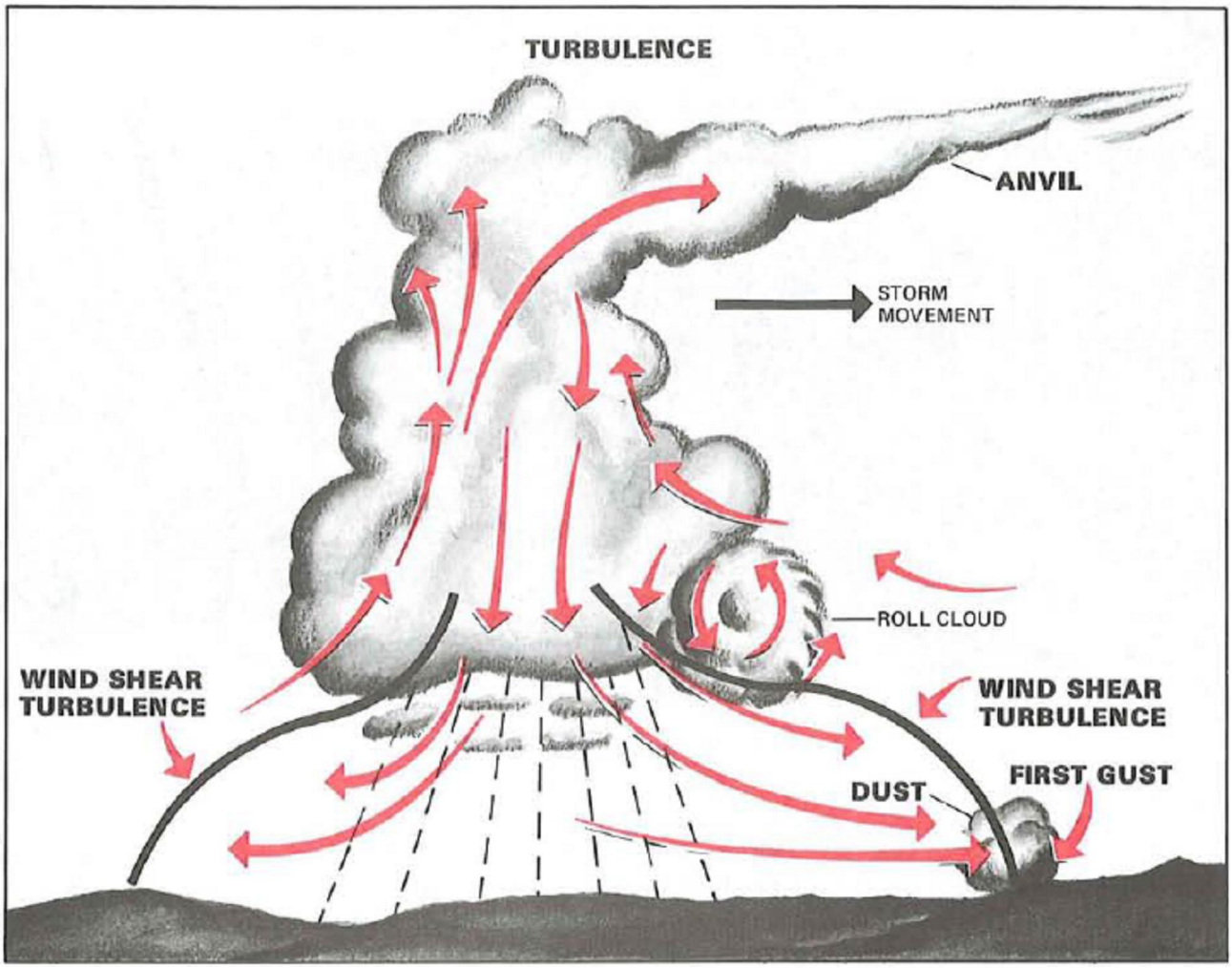

TURBULENCE
ANVIL
STORM
MOVEMENT
ROLL CLOUD
WIND SHEAR
TURBULENCE
WIND SHEAR
TURBULENCE
FIRST GUST
DUST

图 113

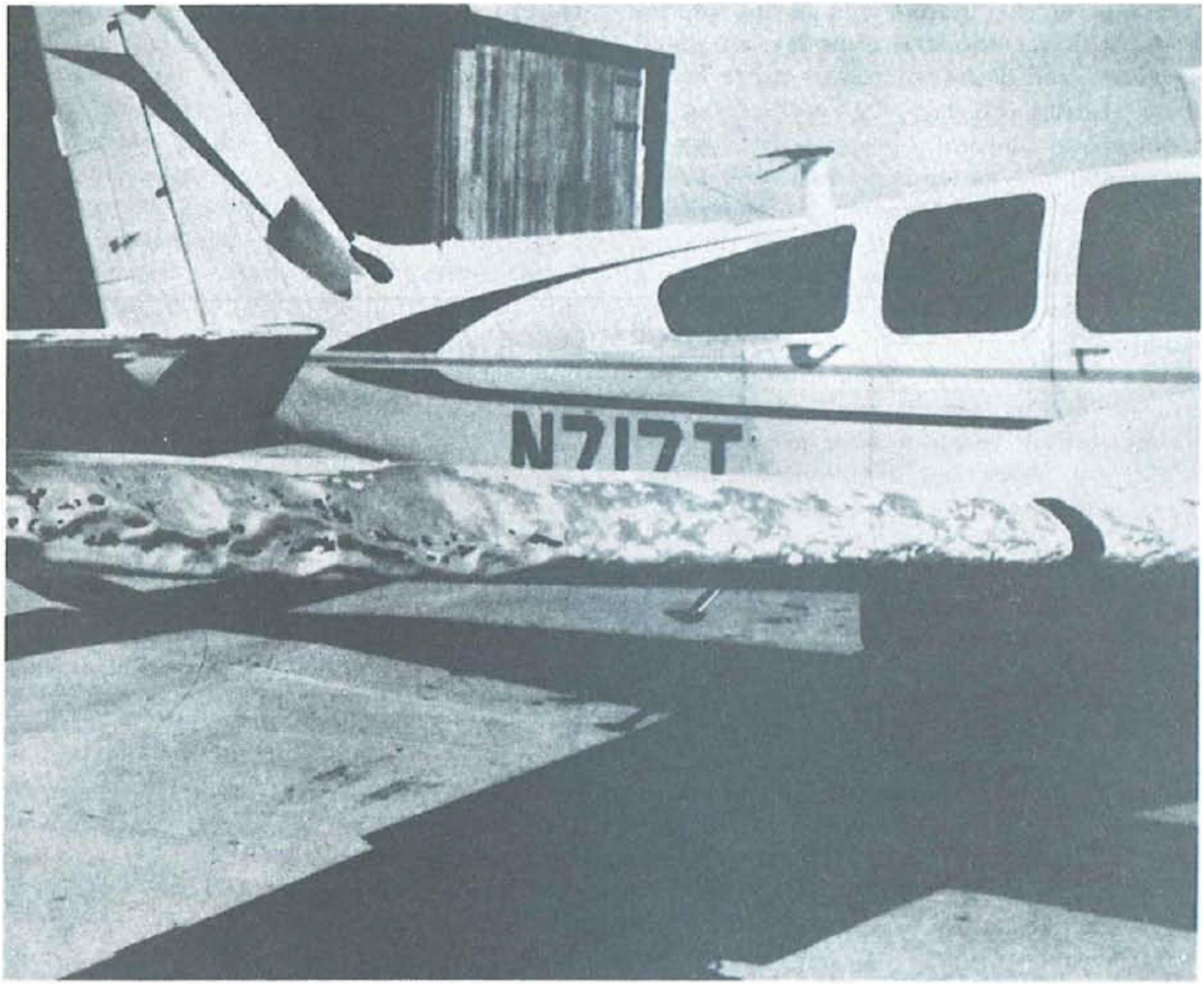


图 114

雷暴和雷达

气象雷达可以检测降水中的水滴。雷达的回波（echo）强度取决于水滴的大小和数量。水滴越大，回波越强；水滴越多，回波越强。由水滴大小所产生的回波强度，要比水滴数量产生的回波要强。

气象学家已经证明，水滴大小几乎和降雨的强度成正比。因为雷暴中存在最强的降雨，所以雷暴的回波也是最强的。冰雹的外层包裹着一层水，它们看起来就像是巨大的水滴，所以它们的回波最强。阵雨的回波比较弱，毛毛雨和雪的回波是最弱的。图 115 是一个地面雷达回波图。

由于最强的回波代表着雷暴，所以回波最强的地方就代表着最危险的地方。雷达所提供的信息不但可以用于地面飞行前计划，也能用于在空中避开危险天气。

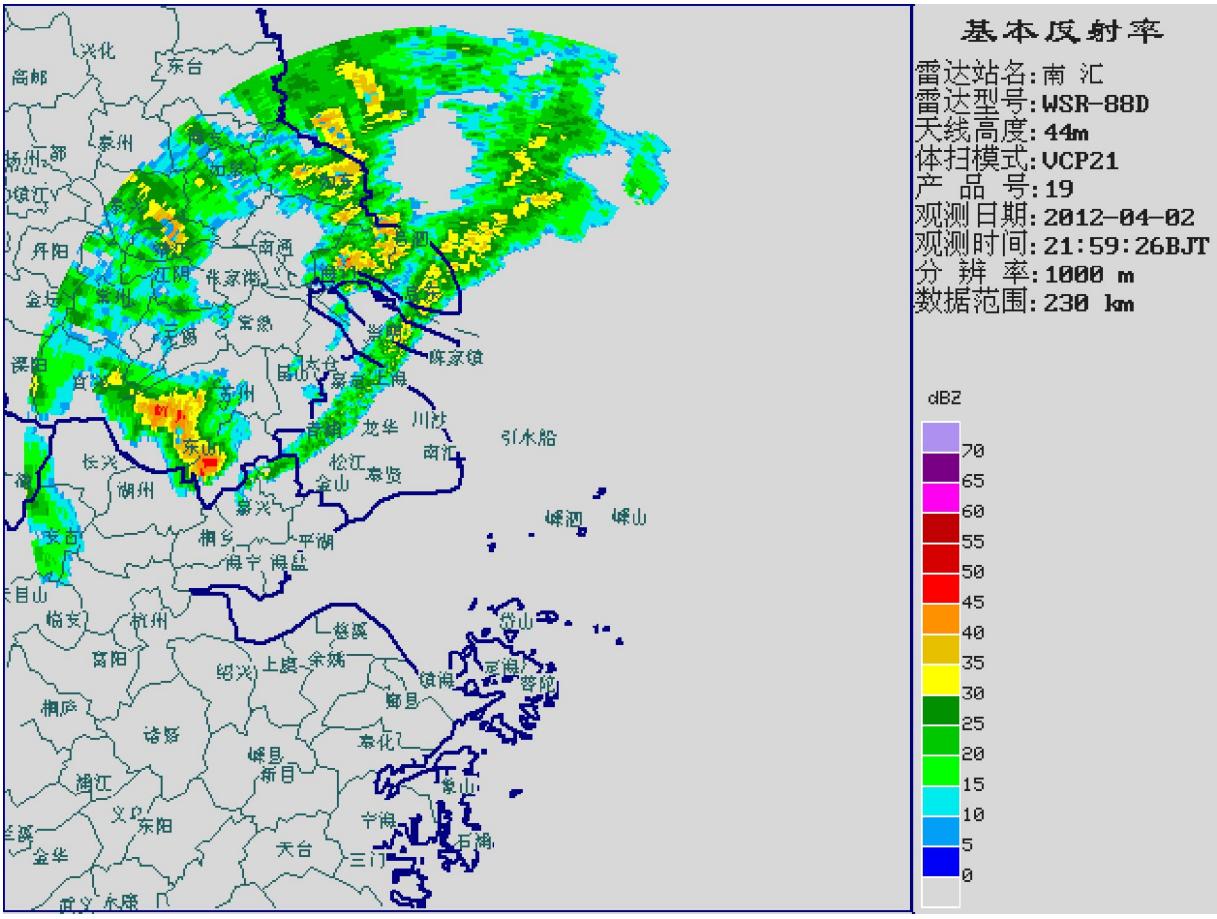


图 115 图片来自工作

因为雷暴出现得很快、消失得很快、移动得很快，所以不要自作聪明把飞行计划的航路穿过回波中间的空隙。地面雷达的作用只是用来区别被回波覆盖的区域和“干净”的区域。你必须在飞行时用目视或机载雷达绕过每个雷暴。

机载气象雷达的作用只能用来避开危险天气，并不是用来穿越危险天气的。是否能够如一片雷达回波区域，取决于回波的强度、回波之间的间隔、以及你和飞机的能力。记住，气象雷达只能检测降水水滴，不能检测到云中的细小水滴。所以雷达图不能保证在云或雾中满足目视飞行气象条件。你的雷达图可能看上去很“干净”，但是这不能保证你可以从雷暴之间穿过，并始终保持目视雷暴位置。

最强的回波就是最强的雷暴。注意，离雷暴云几英里之外就可能出现冰雹，20 英里之外就可能出现危险的颠簸。始终和最强的回波区域保持 20 英里的距离。回波和回波之间至少保持 40 英里的间隔后你才能穿过去。如果回波的强度减弱了，你就可以相应地减小所保持的距离。图 116 显示的是使用机载雷达避开雷雨的图片

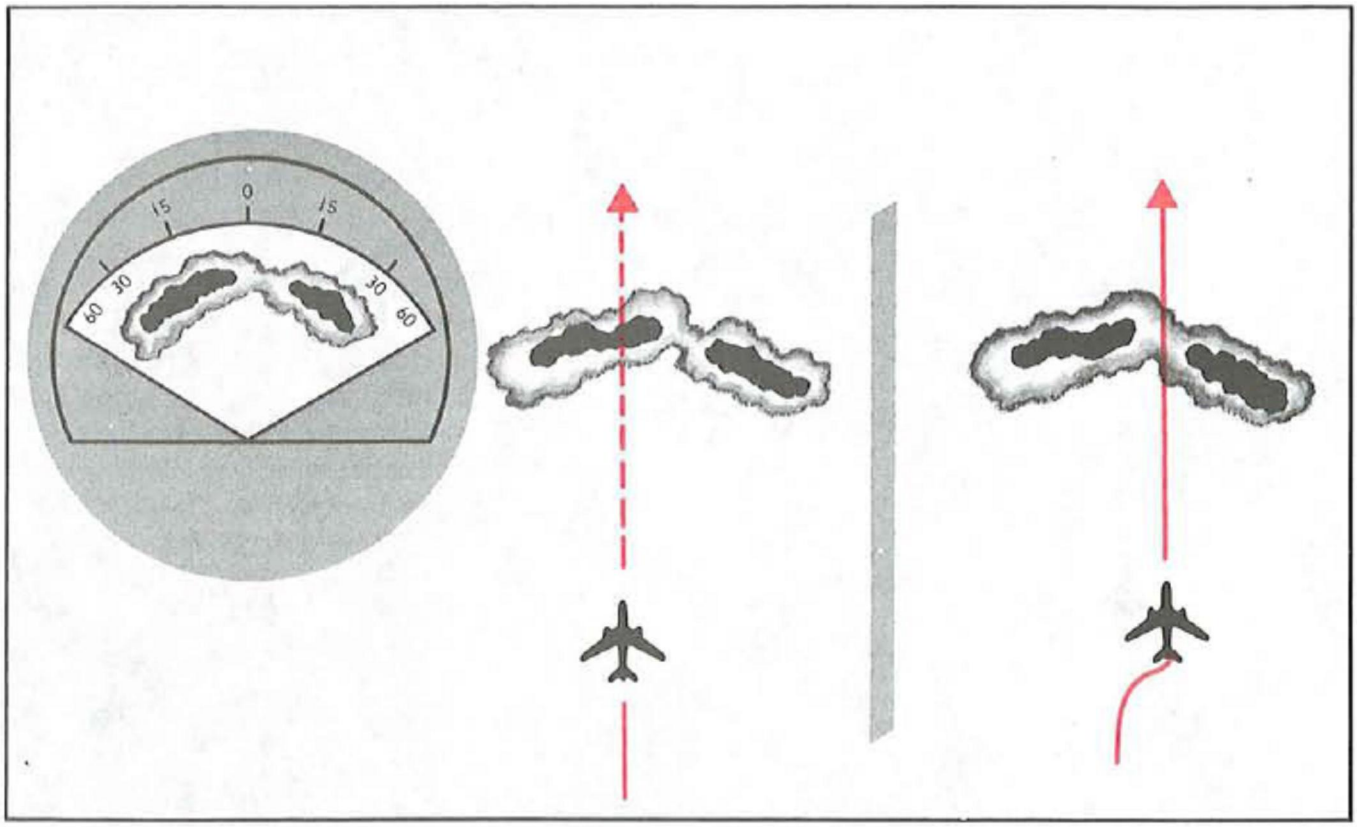


图 116

雷暴飞行的注意事项

首先，牢牢记住：永远不要轻视任何一个雷暴，即使雷暴的雷达回波看上去很弱。避开任何雷暴是最好的选择。以下是几点关于雷暴天气飞行的注意事项：

1. 不要在逼近的雷暴区域前起飞或着陆。突然的风切变或者低空颠簸都会使你失去对飞机的控制。
2. 不要试着从雷暴下穿过。即使你能看到雷暴的另一边，也不要穿越。雷暴下方的颠簸是灾难性的。
3. 不论雷暴是目视可见，还是雷达的回波，不要在雷暴覆盖面积超过六分之十的区域尝试绕飞雷暴（circumnavigate）。
4. 如果你没有装备机载雷达，你要飞入分散的（scattered）镶嵌的（embedded）雷暴。分散的雷暴通常可以目视绕飞。
5. 在任何认为是严重的或雷达回波强烈的雷暴周围保持 20 英里的距离。特别是在积雨云的砧型云顶之下需要特别注意。
6. 在已知或预报雷暴云上方飞行时，按云顶风速每 10 节增加 1000 英尺的高度保持间距。不过这样做多半会超过你的飞机升限。
7. 明显而频繁的闪电表明雷暴很剧烈。
8. 如果目视看到或雷达回波显示，雷暴的顶部超过 35000 英尺，都应该认为雷暴是剧烈的。

如果你不得不穿越一个雷暴，在进入雷暴前请做好以下准备：

1. 系紧安全带和肩带（如果你有的话），固定好任何活动物体。
2. 计划并保持一个穿越雷暴的最短路径。
3. 为了避免严重的积冰，从零度层以下或零下 15 摄氏度以上的高度层穿越。
4. 打开皮托管加温、化油器或进气道加温。任何高度都可能存在积冰，并造成发动机功率快速下降，或者失去空速指示。
5. 按照飞机飞行手册中指定的颠簸穿越速度飞行，保持发动机推力。穿越颠簸时减小空速可以减轻颠簸对飞机结构的影响。

6. 把驾驶室内的灯关强度开到最大，防止闪电造成的暂时性失明。
7. 如果你正在使用自动驾驶，那么断开高度保持和速度保持模式。它们在接通情况下会增加飞机的机动动作，增加飞机的负荷。
8. 如果你正在使用气象雷达，那么时不时地上下调整一下雷达天线。向上发射雷达波可以侦测可能出现在航路上的冰雹。向下发射雷达波可以侦测正在发展的雷暴。这些雷暴可能会影响到你的飞行高度层。

以下是在穿越雷暴区过程中的一些建议：

1. 看着你的仪表，看着外面会增加短时间失明的风险。
2. 不要改变油门，保持较小的颠簸穿越速度。
3. 保持一个稳定的姿态，让飞机随波逐流（ride the waves）。如果你想操纵飞机保持固定的高度，只会增加飞机的负荷。
4. 如果已经进入了雷暴区，那就一路向前，不要回头。笔直向前多半是最快脱离雷暴的唯一选择。而且，操纵飞机转弯调头会增加飞机的负荷。