



装备科技译著出版基金

[美] Tarek Dakhallah 著
王海鹏 熊伟 贾舒宜 译

多传感器数据融合系统 ——EKF及模糊决策应用分析

Analysis of Applications of Extended Kalman Filter (EKF)
and Fussy Decision to Multi-sensor Data Fusion System



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

多传感器数据融合系统

——EKF 及模糊决策应用分析

Analysis of Applications of Extended
Kalman Filter (EKF) and Fussy Decision
to Multi - sensor Data Fusion System

[美] Tarek Dakhallallah 著
王海鹏 熊伟 贾舒宜 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字：军-2015-107号

图书在版编目 (CIP) 数据

多传感器数据融合系统：EKF 及模糊决策应用分析 / (美) 塔里克·达赫拉拉 (Tarek Dakhallallah) 著；王海鹏，熊伟，贾舒宜译. —北京：国防工业出版社，2016.9

书名原文：Analysis of Applications of Extended Kalman Filter (EKF) and Fussy Decision to Multi-sensor Data Fusion System

ISBN 978-7-118-11100-2

I. ①多… II. ①塔… ②王… ③熊… ④贾… III. ①传感器-数据融合 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 230786 号

Publication of this translation in consultation with OmniScriptum GmbH & Co. KG.

本书简体中文版由 OmniScriptum GmbH & Co. KG. 授权国防工业出版社独家出版发行。
版权所有，侵权必究。

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 7¼ 字数 122 千字

2016 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 59.00 元

(本书如有印装错误，我社负责调换)

国防书店：(010) 88540777

发行邮购：(010) 88540776

发行传真：(010) 88540755

发行业务：(010) 88540717

前 言

传感器是连接被测环境与实际测量的桥梁,是环境状态精准量测中最初始和最重要的部分。不精确的传感器读数会导致冗余的环境量测,产生不恰当甚至错误的决策^[1,2]。当一个传感器不能提供必要的数据时,就需要使用传感器融合技术。传感器融合最简单的形式就是将两个或更多的传感器用某种方式结合起来,并能够取其优势,去其不足。

人们对数据融合的需求以及兴趣正在快速增长,并针对各类生活需求进行了大规模的研究。许多微处理器,先进的传感器及新技术被开发出来。这使得数据融合达到了一个新的水平,即利用多传感器改善结果。数据融合的应用范围非常广,从军事到医疗都有涉及,例如战场监视、智能武器自动目标识别、健康保养和改进的医学诊断。制造与安全也属于数据融合研究的重点,这个系统的实现需要理解基本术语、数据融合处理模型及其结构。

传感器的数据给闭环系统提供反馈。通常我们面对的是错误的或不准确的传感器,因此需要利用传感器融合技术混合两个或多个传感器从而创建一个更好的传感器。通过对单个传感器的输出进行滤波来实现传感器融合。传感器的缺点通常包括噪声水平和非统一数量级。

大多数情况下,传感器融合不过就是简单的二阶低通或高通滤波器的结果相加。这种简单的融合允许两个传感器提供输出。

多传感器数据融合的应用定义明确并有针对性。军事相关的应用涵盖了目标识别、引导无人战车、远距离感知、战场监控和自动威胁识别系统,如敌、我、中立识别系统。非军事应用包括制造过程监控、复杂机器的状态检修、工业机器人和关键医疗应用。数据融合技术来自各种各样传统的学科,包括:数字信号处理、统计估计、控制论、人工智能和经典数学方法。从历史上来看,数据融合方法的开发主要用于非民用方面。然而,近年来这些方法已经应用于生活中,并已经出现了双向技术转让。

一般来说,传感器融合信息应用广泛,如:

(1) 智能建筑。引入不同的控制系统控制照明,使照明达到最佳效果。根据灯区的地面规划安排照明区域的开关,以免当只有一小部分需要照明时,浪费了大量不必要的照明。

另外，控制照明考虑了时间因素。总的来说，利用预先确定的照明计划，自动开关每个区域的照明。

在间歇使用的空间中利用感应传感器。利用感应传感器来感应是否有人出现，从而自动控制灯的开关。

(2) 环境监测。遥感是最常见的监控手段，利用飞机或卫星，使用多传感器系统实现环境的监控。这种监控又分为两个不同的种类，都属于被动感知，即由物体或周围区域发射或反射的自然辐射是可以检测到的。在环境遥感中，当传感器调节到特定波长，反射的太阳光是最常见的可被被动传感器测量到的辐射源。收集到的感知数据量非常大，需要计算机辅助分析。

远程主动传感器发出能量，并利用被动传感器去监测和测量目标反射回来的辐射。通常使用激光雷达（LIDAR）收集一个区域的地貌信息。远程感知也便于收集危险区域的数据。

(3) 监测和工业过程控制利用感知和数据报告这一概念来管理和控制流水线。人类和机器人利用这些过滤后的感知数据，相应地采取行动。

(4) 医疗诊断是数据感知融合中最重要的应用之一。许多医疗设备使用了这一概念，如成像（MRI 系统）和外科起搏器的应用。

主要的问题是如何融合或整合异类或同类信息源。融合根据融合发生时的过程水平分为三个主要的类别，即低层次融合、中级融合、高层次融合。低层次融合，也称为数据融合，它结合了数个原始数据源并生成了一个比输入包含更多信息的原始数据。中级融合，也称为特征级融合，结合各类特征形成一个有指导意义的特征，并用来进行更多的处理。高层次融合是指决策制定层的融合。

目 录

第 1 章 数据融合	1
1.1 低层次融合	1
1.2 中级融合	1
1.3 高层次融合	2
1.4 安全	2
1.5 传感器融合	2
1.6 应用历史	3
第 2 章 传感器类型	5
2.1 传感器	5
2.2 传感器的选择	6
2.3 声呐	6
2.3.1 声呐换能器	7
2.3.2 声呐的应用	7
2.4 激光传感器	8
2.4.1 激光	8
2.4.2 激光光	9
2.4.3 激光的应用	9
2.5 射频传感器	9
2.5.1 射频传感器的应用	10
第 3 章 新的安全监控系统	11
3.1 目标动态传感	11
3.2 安全决策	12
第 4 章 传感器融合	14
4.1 相似度概念	14
4.2 迭代贝叶斯估计和最大后验概率	15
4.3 全局和局部指标	16
第 5 章 状态估计	17
5.1 卡尔曼滤波	17

5.2 扩展卡尔曼滤波	18
第6章 状态变换 (同类传感器互补)	20
第7章 决策制定 - 模糊逻辑系统	21
7.1 决策过程	21
7.2 模糊逻辑系统	21
7.3 1 - 型模糊逻辑系统	22
7.3.1 1 - 型隶属度函数及其运算	22
7.3.2 语言变量和 IF - THEN 规则	24
7.3.3 基于模糊规则的推理	24
7.4 2 - 型模糊逻辑系统	24
7.4.1 2 - 型模糊集与隶属函数	25
7.5 模糊逻辑控制	29
7.6 异构传感器的互补性	29
第8章 结果与讨论	31
8.1 卡尔曼滤波结果	31
8.1.1 两目标的仿真	31
8.1.2 三目标的仿真	36
8.2 扩展卡尔曼滤波结果	51
第9章 结论和工作展望	72
附录 A 超模糊逻辑决策在安全监视系统中的应用	74
A.1 引言	74
A.2 安全系统	74
A.3 模糊逻辑基本原理	75
A.4 超模糊	76
A.5 结果和讨论	76
附录 B 系统代码	82
参考文献	107

数据融合

1.1 低层次融合

在图像处理过程中，同一场景呈现的多个光谱带图像可以结合产生一个新的图像。理论上，这个新图像包含了不同光谱带中的所有有效信息。这样，图像处理算法就能够利用所输出的单一图像，而不是输入时的多个图像。当可用光谱带的数量非常多以至于单独地去看那些图片非常困难的时候，这一点尤其重要。这种融合需要这些可用图像的精准匹配。当不同的频带来自同一个传感器时，这种匹配必不可少，但是当使用了许多不同的传感器时，这种匹配更加复杂。当这种融合的目的在于融合不同图像的相关部分时，主要的困难就是定义什么是相关部分。

人们通常不会仅根据部分信息进行分类；他们会使用许多其他类型的信息并依靠他们较高水平的理解能力。另一方面，大多数融合算法定义“相关部分”为局部的差异或变化，但这种定义并不理想，尤其当使用了噪声频谱时。

1.2 中级融合

中级融合（也称为特征级融合）结合了不同的特征。这些特征可能来自几个原始的输入数据（不同传感器、不同时刻等）或来自相同的原始数据。还有一种情况，目标是在来自数个特征提取方法所得到的有用特征中找到众多关联特征。特征级融合的方法包括主成分分析（PCA），用于非线性相关问

题的空竹形多层感知 (MLP) 等。在图像处理过程中, 通常将计算出特征图, 以进行分割或检测的预处理。然后, 计算出诸如边、角、线和纹理参数等特征, 并形成融合特征图, 用于分割或检测。

1.3 高层次融合

高层次融合由于联合了多个专家的决策, 因此也称为决策融合。推而广之, 即使得到的是专家的置信度而非决策, 也称为决策融合。决策融合的方法包括投票法、统计法、基于模糊逻辑的方法等^[3]。

根据输入/输出特性, 融合过程分为五类: 数据输入 - 特征输出融合 (Data in - Feature out), 数据输入 - 数据输出融合 (Data in - Data out), 特征输入 - 特征输出融合 (Feature in - Feature out), 特征输入 - 决策输出融合 (Feature in - Decision out) 和决策输入 - 决策输出融合 (Decision in - Decision out)。一般而言, 认为数据输入 - 决策输出融合 (Data in - Decision out) 是第六类, 虽然我们认为这不是最有前景的方法, 但是它能在未指定分类器时, 较好地从未处理的数据中提取出相关特征^[3]。

在实际应用问题上, 所采用的融合过程通常是之前提到的三个层次的组合。融合可能发生在任何层次上, 它描述所用的输入类型的特征。正如上面已经指出的, 输入可能来自一个或多个传感器。瞬时融合中, 来自同一传感器的不同时刻的输入数据被结合起来。融合还可以通过引入降噪手段提高质量。在 (传感器或目标) 运动的情况下, 当目标可能呈现多个外貌或移动使得轮廓遮蔽时, 融合的作用甚至更大^[4]。

1.4 安 全

安全可能被定义为应对各类预期危险而准备好的保护措施等级。它是预先的安排, 是为了避免危险而在危险目标和安全目标之间创建安全缓冲 (例如, 时间缓冲或物理缓冲) 而引入的措施。

对于机密目标, 安全就是禁止未经授权的人访问被保护的信息和资产。例如: 军事设施采取措施以保护其避免有计划或可能发生的降低其有效性的事情。

1.5 传感器融合

正如所讨论到的, 存在几种方式来组合不同的数据源, 如决策、平均、

引导、贝叶斯统计和整合等。通常,决策要使用的源是基于置信度和应用的目标。平均是主要利用权重方式结合几个数据源的方法,其中权重的设计基于先前提到的置信度。用这种方法,所有的源根据其置信度的不同,促进融合的进行。引导是利用传感器网络的子群把传感器其他部分的焦点转移到场景中的其他区域。整合是利用部分传感器进行一个任务或一组任务,同时其他传感器集中于这些任务的其他部分。最后,贝叶斯方法采用概率论,来使用在一个时间序列过程中收集到的历史知识。

对于任何安全系统,传感器都是其初始和重要的输入数据。由于一个单独的传感器可能会引入不确定性,有时会引入一个不精确或错误的环境状态读数,因此,多传感器的环境采集方案是克服这一问题的关键。一个广义的数据融合是通过结合多个信息源的数据得出结论。例如,当一个战士不能看到拐角或不能穿过密林地区时^[6]。

本书探讨这样一种设想:利用一组传感器捕捉每一个需要的数据,并处理这些来自于多个传感器的输入数据,最终系统可得到所关注环境的具体表现。

该系统不仅包括不同传感器的多个数据,还包括不同数据类型传感器的输入数据。每组传感器给系统提供一种类型数据,系统融合这些异类数据,从而实现传感器类型的互补。

该系统利用不同类型的输入数据作为全过程的一部分,从而得到改进的决策。这一阶段的设想是找到不同类型输入数据的互补性。通过这些互补性提供一个估计(卡尔曼滤波)来预测系统的状态。最后,把这一估计提供给决策制定(Type-2fuzzy)模块,从而得到最终的系统决策。

1.6 应用历史

目前,有许多处理这种传感器数据融合的方法。例如,采用不敏卡尔曼滤波来实现移动机器人的精确定位。该系统为移动机器人提供精确定位。它运用最优传感器融合算法编译来自不同传感器(加速度计、陀螺仪和编码器获取机器人移动信息)的数据,从而实现机器人的连续精确定位。该系统的设计是为了补偿在UKF滑移和无滑移模型状态转换过程中产生的滑动误差。由于加速度计误差因双积分而随时间不断积累,其数据只能用于UKF的滑移模型。通过比较UKF传感器融合算法与精确激光测距传感器的结果,可以看出所设计系统能精确地跟踪各种场景下的机器人运动^[2]。

另一个案例是,噪声环境下非线性系统中的传感器采用(时不变)线性

滤波和逐点非线性压缩，传感器融合展示了在得到几个这样的噪声非线性观测下，如何提取真实信号并估计传感器属性。设置中假设线性滤波和非线性压缩都是时空（时间）不变的，但并不增加被提取信号的任何先验假设。这样，可以适合于各种信息源的分布，例如天文学图像、语音信号和高光谱卫星数据，它们可能与一个或多个标准先验假设相违背。一个有效的估计算法应使传感器的估计输出和传感器真实数据之间的误差平方和最小，就像反向传播算法。该设置可以被认为是给定输出的多个单层神经网络的学习权重和未知共同输入^[5]。

传感器类型

2.1 传 感 器

传感器是检测系统的一部分，它能检测到环境中的某一特殊属性。一般来说需要检测多少种属性就需要多少种传感器。已知的传感器包括：摄像机、位移传感器、触觉传感器、声呐传感器、射频传感器等。

传感器由诸多部分组成。第一部分是接口，通过接口可以直接对观测环境或物体进行测量和检验，而不需要对其进行直接接触。第二部分是获取的物理信号必须以某种方式转换成可被观测和记录的信号。最后，传输器信号必须进行处理和调节以去除噪声，从而使得最终的量化值易于理解。

众所周知的水银体温计是一种十分简单的传感器。它持续测量周围环境的温度，玻璃管中的水银属于传感器的表面或者接口部分，其反映出的活跃能量与周边环境温度密切相关。这个传感器中的物理信号转换为水银体积的变换，即为玻璃管中体积的膨胀。温度刻度延玻璃管侧面分布，刻度密度根据水银的膨胀率进行调整。水银温度计属于无电模拟传感器，而如今大部分传感器都包括变换器部件，其负责产生一个电信号。这种信号属于模拟信号，但绝大部分将在调节过程中转换成数字信号。

近年来，出现了很多种传感器用于测量不同物理属性，例如：位移、速度、压力、声波、距离、质量、流量等。其中，大部分设备只能测量时间和空间中单一的物理量。一般来说，传感器被安置在测量环境的周围，而实现远距离的环境感知同样重要。空中或者外太空平台感知地球表面的传感器已被研发出来，它可实现全地形的远距离感知。远距离感知可以对广阔多样的

地域进行快速稳定的测量。尽管近期已出现了像激光雷达这种可以精确测量地形、地貌的远距离激光系统，但是上述的远距离测量仍是仅仅依靠传统的被动反射数据。

除了上面提到的物理属性，生物属性和化学属性也被用于识别和量化物质的存在。这些生物或者化学本质可能存在于空气中、水中或者任何表面。由于我们探寻的物体（小到细胞级或者分子级）十分微小，因此传感器需要对微小测量十分灵敏并且可以把目标从大量细胞级或分子级物体中分离出来。

2.2 传感器的选择

传感器主要用于从环境及其特征属性中收集信息，因此根据相应需求选择最佳的传感器就十分重要。通常，在选择传感器时，必须考虑下述传感器的因素：

(1) 传感器精度。当需要考虑读取数值在准确值附近的浮动变化时，就需要考虑精度因素。

(2) 传感器校准。随着时间推移，大部分测量系统会产生误差，因此校准十分重要。

(3) 价格。价格在每个项目中都是十分重要的因素，因此，选择一个物美价廉的传感器无疑更为合适。

(4) 使用环境。传感器的使用通常有环境限制，例如温度和湿度。

(5) 工作距离。传感器的工作距离是测量中的另一应用特征和重要因素。

(6) 分辨率。分辨率是传感器可以探测到的最小增长幅度。

本书中的系统利用三类传感器实现自身的目标：声呐扫描区域内的所有运动目标，激光传感器测量目标的速度，声波传感器向系统提交目标的身份信息。

2.3 声 呐

声呐主要分为两种：一种是传播传感器，通过探测声的传播变化快速获取温度、气体浓度或压力变化；另一种是距离传感器，通过探测目标反射波的传播时间和角度判断目标距离，例如测距仪和车辆占用轨道检测器。在信号理论模型和启发式方法等复杂算法的帮助下，测量分辨率和测量距离得到了提高。此外，射线和激光分辨率也得到显著提高，已经可以用于识别目标。人们已经利用压电薄膜制造出了高效、通用的传感器阵列。

声呐整体简单，并且显示界面简洁，因此它在机器人产业中得到广泛运用。这种传感器发射一个声波脉冲，然后等待目标的反射回波。传感器发射的脉冲可在电能、机械能和声能之间转换。发射脉冲和接收回波之间的时间差用于计算目标距离。声呐不是完美的，同样有自身的缺陷。由于发射的脉冲为锥形，任何在脉冲传播路径上的目标都会反射回波。此外，声呐难以区分大目标和小目标，如图 2.1 所示。这个缺陷可以通过架设多个声呐或者旋转声呐来克服。声呐通常使用 40 ~ 200kHz 的脉冲，但更常用的是 40 ~ 50kHz。

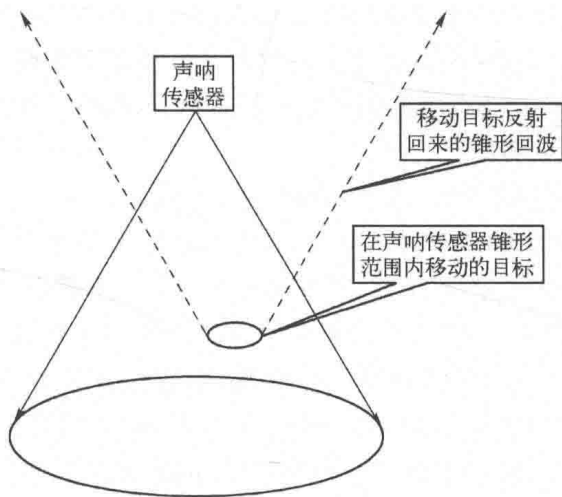


图 2.1 声呐锥形探测空间和探测目标反射回波

2.3.1 声呐换能器

发射脉冲并且感知回波的硬件部分称为换能器。换能器分为静电式和压电式两种。静电式换能器结构和电容类似。它包括两个薄板：一个固定的，一个活动的。固定薄板通常为铝制，活动薄板为镀金的聚酰亚胺薄膜。聚酰亚胺薄膜在电容结构中为绝缘体。当一个脉冲到达两个薄板时（通常为 50Hz），镀金层被吸引到后面的薄板，从而取代空气并产生声波破裂。

如果使用多个传感器，可以将传感器安放在同一地点同一角度。如果所有传感器都探测到一个目标，就可以很容易判断出目标的位置。通常，声呐提供 1 ~ 30 英尺（1 英尺 = 0.3048m）的探测范围和 40 英尺的探测宽度。

2.3.2 声呐的应用

在应用方面，声呐用于向系统提供探测区域内所有目标的数目。声呐使用中的更多技术细节将在第 3 章进行介绍。

2.4 激光传感器

2.4.1 激光

激光在日常生活中扮演着重要的角色。它用于系统、机械和技术的各个方面。它出现于各个地方，例如小型磁盘播放器、眼部手术、牙齿钻孔、高速金属切割机和测量系统等。什么是激光？什么造成了激光与普通灯光的不同？尤其是什么使激光相比于其他光更为重要？激光的种类有哪些？

激光器是一个可以控制通电原子发射光子的路径的设备。“laser”这个词是 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的缩写，这也简略地描述了激光是如何工作的。

尽管激光的种类有很多，但它们都有一个共同的特点。在激光中，激光介质使得原子进入激发态。通常，非常强烈的闪光或者放电抽运激光介质，从而产生大量激发态原子（具有高能电子的原子）。大量的激发态原子对激光的有效工作意义重大。一般来说，原子可以激发到高于基态 2~3 倍能级，并影响粒子数反转的程度。粒子数反转是指激发态的原子多于基态的原子。一旦激光介质达到所需要的能级，就会产生大量带有处于激发能级电子的原子。这些激发电子比其他电子蕴含更多的能量。正像电子吸收大量的能量达到激发态，它也会释放获得的能量。如图 2.2 所示，电子很容易释放能量恢复原状态。释放的能量转换为光子的形式（能量的光形态）。辐射光子的独特波长（颜色）取决于光子释放时电子的能量状态。拥有相同状态的两个原子将会释放同一波长的光子。

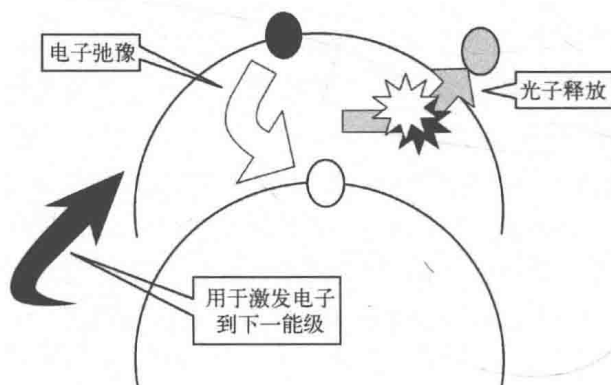


图 2.2 当电子受到激发后移动到下一个能级，
在释放获得的能量后回到相同能级

2.4.2 激光光

激光光不同于一般的光，具有以下特征：

(1) 释放的光是单色的，具有一个确定的波长（一个特殊颜色）。光的波长是当电子跃迁到低能级或轨道时所释放的能量决定的。

(2) 释放的光一致有序，所有光子同步运动。光子会以波阵面的形式及时发射。

(3) 激光光具有极强的方向性。激光光波束很窄并且非常集中。换句话说，一个有规律的闪光灯所释放的光是发散的并且弱的。

(4) 实际上，需要通过受激发射才能产生以上三种特征。这种受激发射在普通光中无法实现。普通光中的所有原子是无序地释放光子，而在受激发射中，光子的释放是有序的。

任何原子释放的光子都拥有一个确定的波长，这是由激发态到正常态或基态之间的能量差所决定的。如果光子遇到另一个拥有相同激发态电子的原子，同样会发生受激发射。第一个光子会激发或诱发原子发射，使得接下来发射的光子与输入的光子在相同的频率和方向上振动。

对于激光来说，另一个关键影响是激光介质的两端反射镜。拥有特定波长和相位的光子会沿着激光受激介质在两端反射镜之间来回运动。在这个过程中，它们激发其他电子跃迁到低能态，并激发产生更多相同波长和相位的光子。最后，产生级联效应，从而得到越来越多的具有相同波长和相位的光子。

2.4.3 激光的应用

激光传感器发射已知频率的光并且接收反射回来的光。反射回来的光通过一个装置来计算相位的改变量。反射光和发射光之间的相位差与光传播的距离成比例。当发射光传播的距离比波长长时，相位转换模块将无法判断经过了几个波长，从而无法判断传播距离。

位置传感器和位移传感器利用了不同的测量方法。经过多年的发展，这些方法已被普遍使用，其中现在最常用的位移测量标准之一就是激光传感器。

在本项研究中，选用 CSI430 传感器，为 100 英尺远的目标提供精确的速度测量。

2.5 射频传感器

射频系统现已在美国广泛应用，并且射频设备不断小型化。

射频识别是利用无线电波传递附属属于某个目标的电子标签（射频标签）数据，通过一个阅读器达到跟踪和识别目标的目的。一些射频标签可在几米或视线外被阅读器读取。大容量的读取能力可以实现多个标签的近并行读取。

相比于人工系统和始用于 20 世纪 70 年代的条形码系统，射频在识别目标上无疑更为出众和有效。而且，无源射频标签无须靠近读取设备就可被识别，如图 2.3 所示，使用时无需像条形码那样向读取设备出示射频标签。换句话说，阅读设备不需要在“视线”内“看到”射频标签。在护套里、纸箱里、盒子里或其他容器里的标签都可以被识别，射频标签一次可被识别上百个，而条形码一次只能识别一个^[10]。

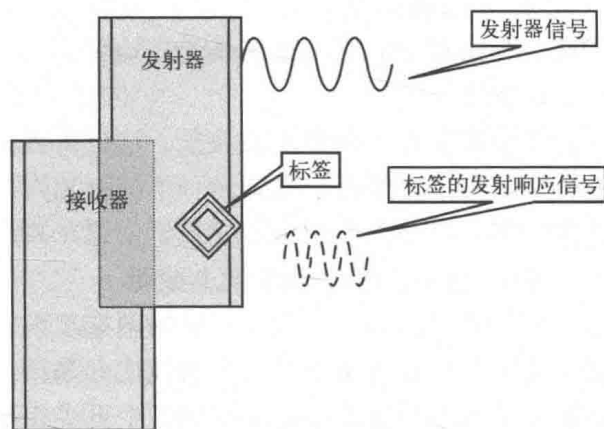


图 2.3 在 RFID 系统中使用的无线电频率传感器显示了如何将 RFID 发射器和接收器一起工作

射频系统可通过几种方法实现。最核心的思想是把螺旋天线蚀刻在薄铝片上并贴到一张纸上，从而形成一个标签。天线中包含一个小的二极管或 RC 电路，它们可以在接收到无线信号后使标签发射一个应答信号。当拆解标签时，会产生一个强的射频脉冲（远大于发射门限）毁坏标签，并且二极管或 RC 回路会被烧毁。一个烧毁的标签无法发射信号，因此扫描器将不再发出警报。

2.5.1 射频传感器的应用

射频传感器将向系统提供移动目标独一无二的身份识别信息，并被用于后续的决策过程中。