# 工业自动化和控制环境下实现无线通信的新近动态和标准进展

New Trends and Standard Development of Realizing Wireless Communication in Automation and Control Environment

（上海工业自动化仪表研究所）　彭　瑜

**彭　瑜**（1938-）
男，湖南长沙人，教授级高级工程师，1960年毕业于清华大学动力系，长期从事工业过程控制系统的研究开发工作，1993年获国务院特殊津贴，现任中国自动化学会仪表与装置专业委员会常务委员，上海市自动化学会常务理事，中国仪器仪表学会专家委员会委员。

关注工业自动化一定会关注无线通信在工业广泛领域的应用前景。而无线通信涉及的技术极其广泛和复杂。其中，由于无线传感器网络是工业测量控制的基础性技术，所以才引起了众多科技工作者持久的研究开发热情。本文想就这方面的应用进展和相关标准的开发作一概述。文中引用的材料一部分来源于有关的自动化网站，一部分来源于一些国际性自动化技术协会如HART通信基金会的内部文件。当然，经过作者的消化、整理和理解，不免带有作者自己在近些年在此领域做了一些研究之后形成的看法和倾向。

## 1　无线通信在工业中的应用聚焦于无线短程网的发展

进入二十一世纪以来，无线传感器网络已成为工业发达国家科研开发的一个热点。无线传感器及其网络的发展，估计至少将会带来10%的生产效率改善和减少25%的排放或泄漏。具有足够的可靠性和自治处理能力、又能在工业环境下任何地点安装使用的智能无线传感器及其网络，将为各种生产装置配备实时共享的数据采集能力，从而为提高生产率、改善产品质量、降低成本发挥重要作用。

无线系统以电磁波作为传输介质，避免了有线系统安装成本高、维护成本高、价格不断上升、接插件的故障率高、查找接插件的故障困难等限制，提供了低成本、灵活性和使用方便等竞争优势。一些具有前向思维的企业洞察工业无线系统的巨大潜力，对此给予极大关注。而现场仪表和传感器的无线传输表现出诸如安装和维护成本低、更换方便、便于升级、减少接插件故障、移动自由且不受限制、投运快速，可以实际利用MEMS（微机电系统）技术等前所未有的优势，更成为当前最受重视的领域之一。

对于无线的工业应用，当前出现的新动态是使用高传输率、无须申请频率许可证、低价的技术。无线通信距离与具体应用（工厂自动化、过程自动化和SCADA系统）强烈相关，一般大致在150毫米至80公里。当前影响无线系统广泛应用的主要障碍是：工业环境和无线技术的状态。工业环境对无线通信的挑战有：工作环境温度由-40℃—+70℃；高湿度（当温度为40℃湿度 95%时不结露）；本质安全防爆要求；固定设备和移动设备对无线传输路径的影响（衰变、中断和发生各种各样的缺陷，诸如频散、多径时延、干扰、与频率有关的衰减，节点休眠、节点隐蔽和与安全有关的问题）等。

无线传输进入工业控制领域的趋势无可置疑。估计再过四、五年，即2010年前，从技术的角度讲大多数仪表和自动化产品都可以嵌入无线传输的功能。由于无线现场仪表的优点一定要体现在就地长期供电（如电池、太阳能电池等），也即形成数据传输无线、电源供给无线的全无线网络。从这个意义上讲，在高速控制的场合要实现足够低功耗高可靠的无线传输是相当困难的，因而至少在相当的时间内不适合应用。但是实践证明，对大多数监控和慢速控制场合，它足够可靠；也就是说可以用在将近80%的自动化和过程控制场合。在过程控制和制造自动化领域，无线传输目前主要用于设备资产管理和状态监测（维护），而基本上不考虑应用于生产运行的实时控制。如果说有所应用，也是使用于相当慢的过程中缓慢变化的参数（如温度控制和一部分流量控制）。或者是用于测量可通过无

线、控制则由操作人员决策而非自动的闭环控制场合，如行车、起重机。这主要基于以下两方面的考虑：无线传输的信号在接收过程中存在漏码或丢包、衰减和阻塞，以及射频干扰。

在现有的无线传输技术中，红外线传输不能绕过障碍物，应用面窄；蓝牙技术传输距离太短、功耗及成本还不够低、开发较复杂，都限制了它的推广应用；无线局域网IEEE 802.11/Wi-Fi技术就其本质而言，目前尚属于无线接入技术，要构成Mesh拓朴和自组织网络尚需时日。唯有问世3—4年的IEEE 802.15.4短程无线传输技术，才真正具备低成本、低功耗、高可靠性、组网方便简捷的综合优势，是受到普遍重视的无线短程网络，也是当前无线传感器网络的首选技术。基于IEEE 802.15.4的无线传输协议，是一种按短距离的监控和控制要求而设计的通信技术。它采用2.4GHz频道，可实现包括点对点、星型、网状等多种拓扑结构，在低信号噪声比的环境下其位误码率达到10-9，提供由芯片实现AES-128加密算法，且组网方便，功耗又低。其核心技术包括：①实现网状拓扑结构的组网技术，即自组织（ad hoc）网络技术，特别是考虑到实用情况下的路由优化。②保证在工业环境下无线信息传输的安全性和可靠性及全网自适应跳频。③在保证数据传输的质量的前提下，实现全网运行的低功耗。

无线传感器网络（WSN）是指一类为传感器、执行器和控制器之间提供冗余、容错的无线连接的嵌入式通信产品。目前WSN正处在发展阶段，远未成熟。打上WSN标签的产品除了能提供冗余、容错的无线连接外，还有远远超过传统的点对点的解决方案的特性：自组网、低功耗和低安装成本，等等。WSN具有自组织(self-organizing)和自愈(self-healing)智能，因此当WSN中的任意节点发生故障，或从网络中退出，WSN会将这个别节点从网络中隔开，并另行建立数据传输的路由，保证高度的传输可靠性。理想的WSN中每个节点都能实现低功耗，独立供电；能适应环境的变化，能以零维护保证长期稳定工作。

## 2　ISA SP100—自动化和控制环境下实现无线系统的标准

美国仪表系统和自动化学会的ISA SP100标准委员会正在加紧制定自动化和控制环境下实现无线通信系统的标准，推荐实践指南、技术报告和相关的信息。标准主要面向现场仪表和设备。着重在三方面予以规范：①运用无线技术的环境，　②无线通信设备和系统技术的生命周期，　③无线技术的应用。

SP100将在工业自动化和控制环境中的无线应用划分为监控、控制和安全应用三大类，有细分为六小类（见表1）。这种分类既考虑无线通信在实际使用条件下必须满足的要求，又体现了这些无线通信应用的时间属性。

＊ 属于监控的第5类应用，是指不产生直接操作结果的数据和消息，譬如历史数据的采集，为预防性维护而必须进行的周期性采集的数据，事件顺序记录数据的上传（这类似于文件传递，不能因通信类型而发生数据丢失，但又非像控制信号那样必须考虑时间性），其它的上装和下载。

＊ 属于监控的第4类应用，是指通过无线传输那些只在短时间内产生操作结果的数据和消息，例如基于事件的维护而必须采集的数据，为测试需要而发往现场的限界动作所产生的临时而短暂的结果，无线设备上的电压低限指示器所产生的告知更换电池的信号等等。

＊ 第3类开环控制是指在回路中还有人在起着作用，例如操作人员手动启动一个信号装置且注视着这个装置，远程指导开启一个安全门，操作人员执行手动调节泵/阀门等。

＊ 第2类闭环监督控制，通常并非关键部位，如不频繁的串级控制，多变量控制、优化控制所形成的设定值等。

＊ 第1类闭环调节控制，一般均为关键回路，如现场执行器的直接控制，频繁的串级控制等。

＊ 第0类恒为关键的紧急行动，包括安全联锁，紧急停车，自动消防控制等。

表1　SP100在工业自动化和控制环境中的六类无线应用

| | | |
|---|---|---|
| 安全 | 0类：紧急动作（恒为关键） | 信息时间性的重要程度 |
| 控制 | 1类：闭环调节控制（通常为关键） | |
| | 2类：闭环监督控制（经常为非关键） | |
| | 3类：开环控制（由人工控制） | |
| | 注：批量控制的3级（“单元”）和4级（“过程小单元”）由其功能决定可能是1类、2类，甚至为0类 | |
| 监测监控 | 4类：标记产生短期操作结果（例如：基于事件的维护） | |
| | 5类：记录和下载/上载不产生直接的操作结果（例如：历史数据采集、事件顺序记录SOE、预防性维护） | |

至于通过无线通信传输的报警信号，也根据具体应用场合分属以上由0类至5类。例如：0类报警是指那些具有自动响应的、致命有毒气体的泄漏检测器信号（如对污染的自动响应）；1类报警是指具有自动响应的、对流程状态会带来高度（见图1）影响的信号（如自动停止反应的停车信号）；2类报警是指对流程状态自动响应的信号（如要对某种参与反应的流体做分流处理）；3类报警是指对流程状态作手动启动的操作响应的信号（如由操作人员判断是否分流至另一并行的反应器）；4类报警是指有关设备状态的报警，以通知维护人员在短时间内到达现场；5类报警指那些有关设备状态的报警，要求维护人员采取长期维护的动作。

英国石油公司（BP）在经过相当规模和许多不同的应用场合的无线通信试验后其负责主持试验的CTO指出：实际对这些类别（不包括0类）的应用需求，大致是按以下的比例　1：2：4：10：10（见图1）。这就是说，第四、五类应用是大量的，如队状态（振动，温度/压力）监控；性能（热交换，环境状态、机械运行状态）监控。第三类应用（开环控制）也有需求。至于第二类和慢速第一类应用，将随着用户不断取得经验，在对传输延迟、信息安全和稳健性（robustness）等有更好了解之后，而逐渐有所应用　，以利于更多地引导对此类应用的要求。

SP　100　还对无线通信在工业环境下的应用就成本、兼容

性和系统的可扩可缩、性能、信息安全现场设备的就地接入，以及服务质量等作了明确规定（见表2）。

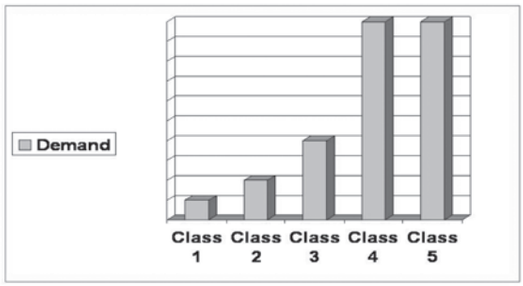


图1　实际对这些类别（不包括0类）的应用需求
（据BP的首席技术管）

表2　无线通信系统在工业环境下应用应达到的各种要求

| | |
|---|---|
| 成本 | 减少安装成本<br>减少运行维护成本<br>易于安装和维护<br>电源管理(采用电池运行) |
| 兼容性和可扩可缩 | 可互操作性/共用基础设施/共存性(与其他射频设备共存)<br>在全世界范围均能使用(不会因所在国家的法规而无法使用)<br>网络容量和网络规模可扩可缩 |
| 性能 | 通信可靠(正确传输的百分比%)<br>适于闭环控制<br>快速的报告速率<br>支持现场点对点控制 |
| 信息安全 | 网络安全<br>网格拓扑自组织(meshing)的安全性 |
| 就地现场设备接入 | |
| 服务质量(QoS)等级和使用情况 | |

表3给出无线系统应达到的成本分解说明。将所有这些有关成本应达到的要求概括起来，就是无线系统的成本目标 是有线系统的二分之一，并且不致增加任何维护成本。

表3　相对于有线系统来讲，无线系统应达到的成本分解说明

| 成　本 | |
|---|---|
| 安装成本 | ■安装成本远低于有线网络(至少是有线网络的1/2) |
| 运行成本 | ■仪表维护成本与有线网络相似<br>■底层结构连接的维护成本，低于有线网络 |
| 易于安装和维护 | ■增加一台无线设备的工作量,与在有线数字通信网络增加一台设备的工作量相同<br>■内在的诊断集和标准化的补纠办法,以及支持工具(如电池、RF MODEM、天线等) |
| 电源管理 | 不论是自附电源还是由其他方法供电,不管所用电池的类型,在正常条件下都至少使用3年 |

表4给出无线系统应达到的兼容性和规模可扩可缩目标。概括起来说就是无线系统的底层结构应支持不同供货商提供的无线现场设备，即采用世界通用的无线频带（如2.4GHz），每个无线网络可有100个路由中继节点，容纳1000个无线现场设备而不致干扰现有的无线设备，与支持其它无线通信协议的设备具有共存性。

表4　无线系统应达到的兼容性和规模可扩可缩分解说明

| 兼容性和规模可扩可缩 | |
|---|---|
| 可互操作性/公用底层结构 | ■支持SP 100无线应用协议的开放型无线现场设备的底层结构,可通过网关变换为现今的应用协议<br>■与工厂内其他非公用底层结构的RF共存 |
| 在世界范围均可使用 | ■尽管各国允许的使用频带不尽相同,但无线设备必须在世界各国都能使用 |
| 网络容量和可扩可缩性能 | ■每个网络容量可高达1,000个现场设备<br>■每个网络最多可有100个中继节点<br>■在所覆盖的区域内容许多个网络<br>■具有可预测的性能 |

表5把无线通信的性能要求分别用通信可靠、反应速率、适于闭环控制和在现场支持点对点的控制这4项来表述。总的来说，把这些具体的要求归结为一句话，那就是：在工业环境下采用无线通信应该做到像有线数字通信网络那样可提供和支持闭环控制。

在这里，共存性是无线通信特有的一个问题。由于在空间中可以任意传输频率不同、协议不同的各种各样的无线电波，且难以受控，所以就回避不了让它们共存于同一空间，但又要保证彼此间均能正常传输的问题。图2示出在相同2.4GHz频带的IEEE 802.11b和IEEE 802.15.4的共存性问题可以通过如下方法解决，即选用802.15.4的15#频道（正好处于802.11b的1#频道和6#频道之间）、20#频道（正好处于802.11b的6#频道和11#频道之间）、25#频道和26#频道来避开802.11b的工作频带。须知802.11b的发射功率为802.15.4的30倍。不采用这种方法恐怕很难解决。

表5　相对于有线系统来讲，无线系统应达到的性能分解说明

| 性　能 | |
|---|---|
| 通信可靠 | ■能在恶劣的工业环境下(EMI、多径、衰变等)正常工作<br>■能与现场中同时存在WiFi、RFID、对讲机、手机、寻呼机、无线远程控制和其他无线数据网络共存<br>■对数据传输的阻塞有抗拒能力<br>■单点故障不致对整个网络产生影响 |
| 报告速率 | ■最佳性能与有线数字通信相仿（与具体应用场合有关） |
| 适于闭环控制 | ■在受调度时间间隔内以极高的消息传输百分比进行传输<br>■极少发生因连续丢失消息而脱离预定模式的事件 |
| 在现场支持点对点控制 | ■可向DCS或类似控制系统发送消息；能同时向其他现场设备发送消息，以形成现场回路 |

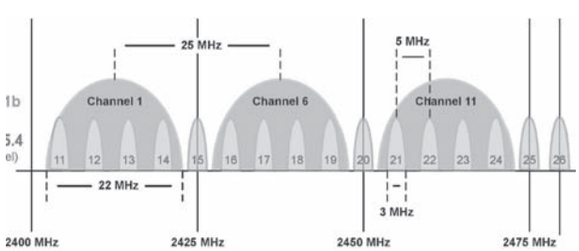


图2　IEEE 802.11b和IEEE 802.15.4的共存性概念

表6是关于无线系统的信息安全的要求。一言以蔽之，就是要保持信息安全的过程具有智能特性，以保证网络安全和消

息传送安全。表7是要保证现场设备以无线方式进行就地接入。表8是无线系统应达到的服务质量QoS分类，按所传送的信号性质分别要求服务质量为立即、按预定时间传送、可等待一定时间传送和高吞吐量数据。

表6　相对于有线系统来讲，无线系统应达到的信息安全分解说明

| 信　息　安　全 | |
|---|---|
| 网络安全 | ■无线网络对故意攻击或人为差错有安全防护<br>①设备均提供识别码<br>②通信关系授权<br>③自动密钥管理<br>④对可能发生的攻击进行推断、记录和报告 |
| 消息传送安全 | ■通过对消息的检查防止恶意攻击或消息发送系统出错<br>⑤由要求消息的源节点进行检查<br>⑥原封不动和不加修改<br>⑦在QoS等级内按数据包的顺序传送，对同一数据包不重发<br>⑧传送的及时性根据应用的需要<br>■通信有防止窃听保护<br>⑨对所传送的消息作适当的保密处理，使之好像是随机数据<br>■QoS服务质量(如立即传送、按预定时间传送、等待一定时间) |

表7　相对于有线系统来讲，无线系统应达到的就地接入说明

| 现　场　设　备　就　地　接　入 | |
|---|---|
| 现场设备就地接入 | ■在正常条件下用手持式PDA接入任意现场设备的能力和通过控制系统作代理服务器方式的接入能力<br>注:在以代理服务器方式接入，要强制保证安全并可计算，同时对常驻设备的信息作快速拷贝时每次均保持一致<br>■在投用调试的情况下用手持式PDA接入任意现场设备的能力，或在紧急情况下不能利用控制系统作代理服务器方式接入而又要作预组态时接入<br>注:在其他时间必须禁止使用这一特性，在投用调试结束后如果还使用，应作为潜在的安全危险加以记录 |

表8　无线系统应达到的服务质量QoS分类

| 服　务　质　量　QoS | |
|---|---|
| 服务质量QoS分类 | ①立即(如紧急消息,高中断级报警)<br>②按预定时间传送(如周期性闭环控制模块)<br>③等待一定时间可得到(如监控数据,低中断级报警)<br>④高吞吐量数据(如历史数据上传、组态数据库下载、代码下载) |

## 3　正在制定中的SP100.和11SP 100.14

除上所述而外，SP 100标委会还成立了专注于低功率无线传感器设备的标准化的SP100.14工作组和专注于高带宽无线基础设备和骨干网的标准化的SP100.11工作组。2006年9月份前曾广泛向全世界征求上述标准的草案。先后提出草案的有：AnalogDevices, Adaptive Instruments, ANI, Apprion, Certicom, Crossbow, Dust Networks, Emerson, GE Global Reseach, Machine Talker, Nanotron, Newtrax, OMNEX, Oak Ridge National Laboratories, Sensicast, Siemens, ST, Texas Instruments, Honeywell,和日本横河 等。我国的中国科学院沈阳自动化所也提出过方案。由于在这么多草案中有许多非常相近，于是相同或相近的方案便组成了一个小组。大致形成了4个小组，分别由几个主流供应商牵头。

WNSIA（Wireless Networks for Secure Industrial Applications, 安全工业应用的无线网络）组。其方案是基于802.11 Mesh路由的主干网和以星形拓扑为路由通信的无线传感器的组合，这两种通信均采用TDMA（时分多路存取）调度方案。在其方案中无线传感器采用了专用的射频协议，特别是在2.4GHz采用窄带跳频，遭到有关共存性和可互操作性的质疑。WNSIA以Honeywell为主，参加的有： E+H，日本横河，Flowserve, Omnex Cortrols。

Emerson/Dust 组提出的是基于Dust的网格拓扑时间同步协议TSMP（Time Synchronized Mesh Protocol）的全网格无线传感器解决方案。该协议工作于IEEE 802.15.4 的2.4GHz物理层，并规定所有的通信均纳入TDMA的时间槽。通信调度集中控制，所以任意一种环境变化或传感器就地的变化，都要求进行新的调度计算，并由网络协调服务器向所有节点传播。本方案是所有提出的方案中唯一的全网格结构的方案，完全不用星形、树形或簇状树形拓扑。

Sensicast/STG/GE 方案与前述Dust的方案基本相同，差异仅仅在于将集中计算的工作分散由各个路由节点去完成。系统组建为簇状树形拓扑，每个路由节点以树形拓扑与网络协调器节点（也起网关作用）通信。终端节点与路由节点以星形拓扑通信，时间槽由路由节点分散指定。GE 把公司的信息安全模型揉进了这个提案，并不要求在使用时为依附于任何已提出的信息安全标准付许可证费用。

Siemens 方案提出星形拓扑的性能与网格拓扑的多样性和灵活性结合起来。由于方案不够具体，尚不得而知如何解决两种拓扑的性能如何能够在一个网络中协调统一。

上述4种方案有以下共同点：IEEE 802.15.4 的2.4GHz物理层和MAC层；自适应跳频（AdaptiveFrequency Hopping, AFH）；几乎所有方案都包括TDMA 单元；同时包含 TDMA和CSMA/CA时，折衷出现在IEEE 802.15.4 的MAC层，用GTS（有保证的时间槽）来支持AFH，在预先规定的时间槽通信后提供一个短争用周期；尚未出现占优势的安全和授权结构，有明显技术品质的建议需要取得IP 的许可证，而无需许可的技术又不能覆盖安全授权的所有特征。

## 4　无线短程网的工业应用获得重大突破

在积极制定工业自动化环境下无线网络标准的同时，开发和完善满足SP 100要求的无线短程网的协议及其在实用条件下的验证工作也一直在大力地推进着。事实上，早在SP100标准工作启动之前，ABB 公司在2003年就开始了在无线网络运用于开环控制和闭环控制的工厂试验；BP 公司也从2004年起在化工产品铁路槽车的远程信息处理、大型运油船引擎的振动温度等参数的监控、油气管线的腐蚀检测、润滑油供应链、液化天然气罐远程监控、油气管线侵入者检测报警、液化天然气容器

跟踪以及炼油过程的无线测量平台等多个不同的应用场合进行了许多工业实验。Emerson Process Management 在2006年第四季度宣布，在历经三年对多种无线传输技术的评估和工业应用实验后，正式决定采用Dust Networks的网格拓扑时间同步协议TSMP技术，作为其工厂智能无线现场网络和解决方案。这一创新的自组织无线网络技术的采用，使它的著名品牌Rosemountú伤勘渌推骸蚪TMTM智能设备管理程序和预测维护套件实现了无线通信的能力，并完全与DeltaVTM 和Ovationū腫CS 产品系列或其它传统主机构成无缝连接。图3示出该公司的三级无线网络架构：现场网络（IEEE 802.15.4 和无线HART）、控制网络（IEEE 802.11和IEEE 802.16，即WiMax）和工厂局域网（IEEE 802.11和IEEE 802.16）。

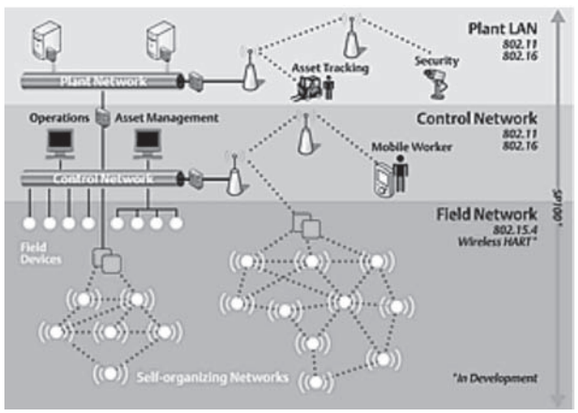


图3　Emerson Process Management的三级无线网络架构

Emerson的智能无线解决方案是世界上第一个将自组织网络技术用于工业应用的示范工程。过去三年中，在北美和欧洲几个现场试验的结果证实，其数据传输的可靠性在99%以上，而安装成本比同等的有线方案要低90%。该无线系统的规模可大可小，最小为5个节点，而最多可达100,000个。按支持符合SP100规定的第1至第5类应用设计，目前已经过现场实际考验的应用为第3至第5类，即开环控制类和监控类。Emerson 公司的 SmartPowerTM创新，保证无线设备所用电池寿命因实际应用场合不同可达5至15年。在信息安全方面，Emerson宣称使用了加密、授权、验证、抗感染和密钥管理等技术 ，并经第三方安全专家的认可，足以保证稳妥可靠的信息安全。该系统可以用在各种流程制造业，包括炼油、石化、化工、制浆和造纸以及水和废水处理等，也可用在石油和天然气采集、输油或输气管线及生产平台的远程监控。

此外，Emerson还与设备制造商、用户和工业协会组织一起，积极支持SP100的标准和HART通信基金会有关无线HART规范制定。并承诺一旦这些标准正式发布后，所推出的无线系统可以非常方便地升级，使之完全符合标准。

由图4中的例子我们便可明白，为什么自组织无线网络的可靠性大于99%：若通道AB的传输可靠性为65%、通道AC的传输可靠性为40%、通道AD的传输可靠性为85%，尽管全都低于99%，但是在任何需要的时刻，由A发至网关的数据通道会以大于99%的概率加以传输。

这里还要指出，网格拓扑时间同步协议TSMP解决了网络所有的构成节点共享发送、接收和休眠的精确时间同步。在对电池功耗有严格要求的场合（如无线传感器网络WSN），这是十分关键的。只有全部节点的同步唤醒和同步休眠，才能实现电池的长寿命。TSMP与其它WSN所用的信标策略不同，它考虑到信标策略会要求侦听窗口长时间投入工作，从而消耗电池的功率，所以不在每个数据帧的起始处设一同步信标，代之以TSMP节点保持一个精确的时间读出，还要通过与相邻节点交换补偿信息来保证同步。这个补偿值与标准的ACK确认消息一起传送，因此没有额外的时间和功率开销。这一共同的时间读出信号保证网络具备了许多优点：带宽可预先配置，确保了极可靠的发送和自干扰为零；发送节点在每次发送时可有效地改变频率，而接收节点可保持锁步；以可预见和有条理的方法来调节带宽的增减，以适应数据流的突增或突减。

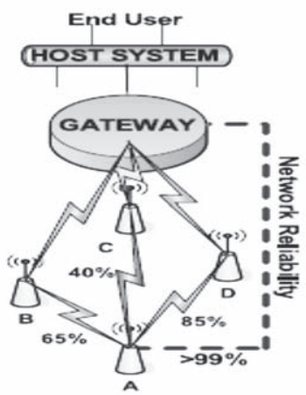


图4　自组织无线网络的可靠性分析

重要的是TSMP节点只有3种工作状态：1）向相邻节点发送消息；2）侦听处在发送状态的相邻节点；3）与嵌入的传感器或处理器构成接口。对其它的所有时间而言，该节点处于休眠状态，功耗极低。我们知道，无线设备的功率有95%是在发射和接收时耗掉的。TSMP毫无例外地而且是主动地让网络中所有的节点（包括那些为相邻节点作消息传递接力的节点，即所谓的路由节点）的占空比都只有1%，这就是解决网络的所有节点全部由电池供电，并且还能达到长寿命的实际方法。

## 5　后　记

鉴于篇幅所限，无法将无线HART规范的进展详细列入，至于这几年相当火热的ZigBee为什么不争取作为SP100.11和SP100.14标准的一个竞争者，这也许说明ZigBee联盟的自知之明。显然，对于工业应用来讲ZigBee规范还有缺陷。