

控制与数据分离的工业无线传感器网络设计

张浩,杨冬,周华春

(北京交通大学 电子信息工程学院,北京 100044)

摘要:现有无线传感器网络主要工作在分布式系统下,难于管控。为了解决无线传感器网络在工业应用中所面临的挑战,基于 WirelessHart 工业无线传感器网络标准提出集中控制的思想,研究设计适合工业无线传感器网络系统控制与数据转发分离的网络架构,并且设计实现符合 WirelessHart 标准的 TDMA 时隙调度算法。文中提出的网络构架和时隙调度算法可以根据工业应用的业务需求灵活分配通信资源。从而减轻节点设备的处理压力,提高节点的灵活快速响应能力,实现可靠实时的工业无线传感器网络。

关键词:控制与数据分离;时分复用;集中控制;时隙调度

中图分类号:TP302.1

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)08-0062-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.08.013

Design of Industrial Wireless Sensor Network of Control and Data Separation

ZHANG Hao, YANG Dong, ZHOU Hua-chun

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University,
Beijing 100044, China)

Abstract: The existing wireless sensor networks mainly work in distributed systems, which is hard to control. In order to address the challenges of wireless sensor networks in industrial applications, based on WirelessHart industrial wireless sensor networks standard, the centralized control thinking is proposed, research and design a network architecture for industrial wireless sensor network system control and data forwarding separation, and the TDMA slot scheduling algorithm is designed to achieve compliance with the standard WirelessHart. Network architecture and slot scheduling algorithm proposed in this paper can flexibly allocate the communication resources according to business needs of industrial applications, thereby relieving the pressure of node processing equipment, improving flexibility and fast response capability of nodes, achieving reliable and real-time industrial wireless sensor networks.

Key words: separation of control and forwarding; TDMA; centralized control; slot scheduling

0 引言

无线传感器网络的低成本、易用和泛在感知等特征,使得工业无线通信与无线传感器网络结合成为应用发展的必然趋势^[1-3]。无线传感器网络现已大量应用于工业自动化领域,由于无线通信成本低、组网简单、使用灵活等优点,无线传感器网络将会引发工业自动化领域的深刻变革,有望成为继现场总线之后又一革命性技术^[4-5]。但是无线传感器网络和工业无线通信的结合面临着许多挑战。一方面由于无线传感器网络仍存在网络难于管理、无线传感器节点设备处理能

力低下、硬软件间依赖性大、设备利用率低、业务响应慢等问题^[6-10];另一方面,工业应用环境的复杂性以及工业通信需求的实时性和可靠性也对现有无线传感器网络提出了严苛的要求^[11-13]。

文中依托国家“973”项目“智慧协同网络理论基础研究”提出的控制与数据分离的设计思想^[14-16],将网络功能的重心由节点端转向了集中控制器一端,实现对网络的集中控制和灵活的策略变化。分析阐述了无线传感器网络中,控制与数据分离的网络平台设计。重点阐述了如何实现网络的逻辑控制,设计了新的时隙调度算法。在实现网络的集中控制后,根据业务特

收稿日期:2014-09-18

修回日期:2014-12-23

网络出版时间:2015-07-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61201204);国家“973”重点基础研究发展计划项目(2013CB329100)

作者简介:张浩(1990-),男,硕士,研究方向为工业无线传感器网络;杨冬,副教授,研究方向为工业无线传感器网络;周华春,教授,研究方向为移动互联网、网络与信息安全等。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20150721.1439.032.html>

点,动态调整网络中数据时隙的调度状态。满足不同工业应用对实时性和可靠性的需求。

1 控制与数据分离的网络平台设计

1.1 信道分离

文中设计的无线传感器网络,实现系统管理控制与数据转发的相互分离。在无线传感器网络受控系统端,所有节点设备在进行入网请求会话、离线会话、命令下发、节点状态采样会话等控制数据的交互的无线信道与网络进行的数据转发使用的无线信道不同。管理和数据的信道分离可以带来的优势是:

- (1)稳定性:为了在拥挤的 WIFI 频段,保证网络的稳定性,可以选择一个较为稳定的信道传输网络的控制数据。确保网络的稳定性。同时在其他公共频段上根据信道在资源的使用率来分配信道资源。
- (2)灵活性:在网络规模较小,节点设备较少时,对于整个网来说只需要用单 Sink 节点和单信道即可满足通信需求,可以不区分控制 and 数据的信道。但是随着网络规模的逐渐扩大,控制数据量增大时,可以分配单独的管理 Sink 节点来处理控制数据的交互,如图 1 所示。随着数据吞吐量动态调整 Data Sink 节点的数量来适应不同的业务需求。
- (3)节约信道资源:由于网络的信道资源的分配是随着网络规模的增大动态增加的,使得信道资源的需求随着网络规模而改变,有效避免了信道资源的浪费。

如图 1 所示,网络拓扑中 Manage Sink 节点对全局网络进行控制管理,Data Sink₁ 和 Data Sink₂ 节点分别来分担网络中数据传输的任务。在最多 100 个节点设备的无线传感器网络来说,信道分离的设计不仅极大程度地减轻了 Sink 节点的负担,同时更方便网络调试过程中对于无线通信数据的分析。

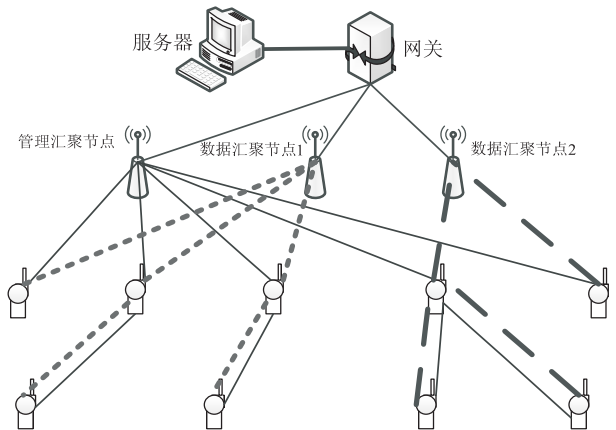


图 1 控制与数据分离的无线传感器网络设计

1.2 时隙分离

在基于 TDMA 的无线传感器网络中,时隙资源同

样非常宝贵。传统的无线传感器网络时隙调度算法往往不区分控制与数据占用的时隙。在网络中的发送时隙和接收时隙往往都是提供给控制命令和数据转发一起共用的。在传统的无线传感器网络中,节点入网之后,并没有太多的控制类型的数据交互,给网络管理增加了难度。文中设计的无线传感器网络架构,需要对网络有较强的软件自定义功能,控制数据的交互是必须的。另外,控制数据的交互直接影响整个网络集中控制器对于网络的控制。

从控制与数据分离的角度出发,文中设计的无线传感器网络在时隙调度上,实现了网络管理控制与数据转发的分离。让整个网络的数据业务需求和网络控制完全分离。系统管理的会话过程和网路服务的应用数据通信相互分离,互不影响。大大降低了网络性能受网络规模增大带来的影响。

2 网络控制管理的设计与实现

2.1 网络超帧的设计

文中假定无线传感器网络一个超帧包含 100 个时隙,将每个超帧的前 40 个时隙(0-39)作为管理时隙,后 60 个时隙(40-99)作为数据时隙。这里利用超帧的复用因子 reuse_factor 来描述管理超帧和数据超帧的区别。复用因子为 5,表示 5 个普通超帧构成了一个管理超帧,管理时隙的循环周期为 5 个普通超帧的时间,而 1 个普通超帧等于一个数据超帧,数据时隙的循环周期为 1 个普通超帧的时间,如图 2 所示。

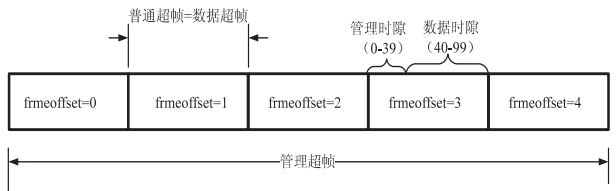


图 2 超帧设计

在传统 TDMA 协议的时隙调度中,对时隙进行添加、删除、更新等操作时,需要利用时隙偏移在超帧中定位时隙,然后对其进行相应的操作。这里针对管理时隙的复用设计,需要用到时隙偏移和超帧偏移两个坐标值来共同确定需要进行操作的时隙。

2.2 管理时隙的设计

- (1)管理时隙。
如图 3 所示,对图 2 中 5 个超帧的表示方法做了一定的修改。横向坐标代表时隙偏移(0-99),纵向坐标代表超帧偏移(0-4)。图中只列出了 100 个时隙中的前 40 个。除坐标以外,每个方格代表一个时隙,方格中的数字代表的是服务器给新入网节点分配的入网序号(0-99)。
- (2)管理共享时隙。

如图 3 所示,符号为 X 的时隙即为管理共享时隙。管理共享时隙是一个复合时隙,可用作多种数据的交互。

①当整个网络还没有任何节点入网时,网络中的(0~39)时隙默认为管理共享时隙,用作节点的入网请求交互。在管理共享时隙中是不区分上行时隙和下行时隙的。随着网络节点数的增加,网络分配的管理共享时隙逐渐减少。

②控制与数据分离无线传感器网络的集中控制的特性,服务器对网络中无线节点的控制命令也可以通过管理共享时隙下发。

③当网络中有节点离线时,离线节点的父节点在管理共享时隙向服务器发送子节点离线报告。

(3) ADV 时隙。

如图 3 中左边灰色区域,ADV 时隙分配的范围是 0~19。每一个节点入网后在管理时隙给入网节点分配一个 ADV 时隙。ADV 时隙用于节点的 ADV 广播,也可以用作网络中广播通道,每一个节点在 ADV 时隙发送自己的广播包时全网节点都会监听,此时对于网络中所有节点可以根据 ADV 数据包的等级来进行选择性的同步。

(4) 管理上行时隙。

管理上行时隙和分配的 ADV 时隙呈对称映射的关系。图 3 中右边灰色区域代表的是所分配的管理上行时隙。用于周期采样节点状态数据包的发送。

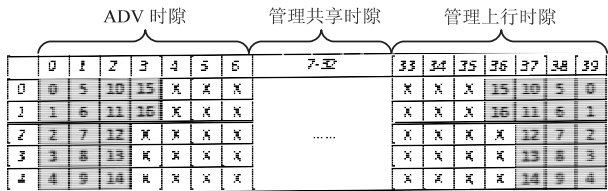


图 3 管理时隙设计

2.3 节点广播的设计

现有时分复用的无线传感器网络系统的节点的 ADV 广播含有 3 个功能：

- (1) 向网络通告当前的网络的可入网时隙信息；
- (2) 节点通过 ADV 广播,向未入网节点通告,是否可以通过自己作为代理父节点入网；
- (3) 当节点入网之后,通过广播 ADV 包,通告其父节点自己的在线状态。

在现有网络中,节点广播 ADV 时,只有该节点的父节点和子节点会监听该 ADV 广播,而网络中的其他节点并不分配响应调度监听时隙。

文中设计的控制与数据分离无线传感器网络中,将 ADV 广播的功能进行了扩展。体现在以下 3 个方面：

- (1) 任意节点广播 ADV,全网节点监听。相比现

有网络的 ADV 监听机制来说,ADV 时隙是真正意义上的广播时隙。

(2) 扩展了网络同步功能。现有 TDMA 的同步机制中,节点的同步只有通过其父节点任意数据包才能进行。文中设计的网络同步机制,每个节点都可以选择比自己树状层级高的节点 ADV 广播包进行同步。

(3) 扩展 ADV 数据内容可携带额外数据。现有系统的 ADV 时隙中,只广播 ADV 时隙内容,对于一个时隙的可用带宽来说太小,造成时隙资源的浪费。文中设计扩展 ADV 数据内容,在正常 ADV 数据部分之后可选择附加数据信息,有效提高了 ADV 时隙的带宽利用率。

图 4 为设计的 ADV 的数据包格式。ADV 数据部分包括了节点本身的信息,如当前的 ASN 号,节点角色,节点的网络跳数,拥有的子节点个数,超帧长度以及工作的信道信息。数据有效载荷中 13 个字节的的管理共享时隙位来表示全网的的管理共享时隙状态,当网络中有附加数据时会在该数据载荷后面附加其他数据信息。

0		1		2		3		4		5		6		7	
绝对时隙号									节点角色		节点层级		子节点数		
超帧长度		管理信道		数据信道		管理共享时隙位（0~4）字节									
管理共享时隙位（5~12）字节															

图 4 ADV 数据包格式

2.4 时隙调度算法的实现

基于 TDMA 的无线传感器网络中,服务器作为集中控制器需要对每一个请求入网的节点进行统一的时隙调度。但是管理超帧中的每一个普通超帧中的管理时隙都有可能不同,所以节点在每个新超帧运行时,需要动态更新当前超帧的时隙状态。最后,每当网络中有新节点成功入网之后,Sink 节点会动态更新自己的 ADV 广播中的 manage shared slot bits,网络中的所有节点需要更新相应 ADV 内容。针对网络的时隙调度以及节点端时隙与 ADV 时隙位的映射设计了相应算法。

2.4.1 服务器对入网新节点时隙分配算法

服务器端作为整个网络的集中控制器,承担着对入网节点进行时隙管理调度的任务,每当收到网络中节点的入网请求时,首先需要根据节点地址判断该节点是否已经入网。若该节点存在网络中,则丢弃该入网请求不做任何操作;若该节点是新节点时,服务器根据网络状态给新节点分配一个未使用的入网序号 seq,服务器根据入网序号 seq 和当前网络的超帧复用因子 reuse_factor 来分配该节点的 ADV 时隙和管理上行时隙。

文中用 x 表示超帧偏移, y_1 表示 ADV 时隙偏移, y_2 表示上行时隙偏移。

(1)算法设计。

$$x = \text{seq} \% \text{refuse_factor} \quad (1)$$

$$y_1 = \text{seq} / \text{refuse_factor} \quad (2)$$

$$y_1 = 39 - \text{seq} / \text{refuse_factor} = 39 - y_1 \quad (3)$$

(2)应用举例。

例:节点序号为 $\text{seq} = 27$ 的节点入网时的时隙分配, $\text{reuse_factor} = 5$, 如图5所示。

	0	1	2	3	4	5	6	7-32	33	34	35	36	37	38	39
0	0	5	10	15	20	25	X		X	25	20	15	10	5	0
1	1	6	11	16	21	26	X		X	26	21	16	11	6	1
2	2	7	12	17	22	27	X	X	27	22	17	12	7	2
3	3	8	13	18	23	X	X		X	X	23	18	13	8	3
4	4	9	14	19	24	X	X		X	X	24	19	14	9	4

图5 入网时隙调度举例

时隙分配结果 $(x, y_1, y_2) = (2, 5, 34)$, 即给序号为47的节点分配时隙为超帧偏移为2, ADV时隙偏移为5, 上行时隙为34。

2.4.2 节点ASN与时隙偏移的映射算法

在节点的运行过程中,通过节点的绝对时隙ASN和普通超帧长度Frame Length,可以得到相应的超帧偏移 x 和时隙偏移 y 。通过超帧偏移 x 可以判断当前普通超帧是否分配了ADV时隙和管理上行时隙。方便在超帧开始时进行本超帧的时隙调度。

(1)算法设计。

$$x = (\text{ASN} / \text{FRAMELENGTH}) \% \text{refuse_factor} \quad (4)$$

$$y = \text{ASN} / \text{FRAMELENGTH} \quad (5)$$

(2)应用举例。

例:当前节点的绝对时隙号 $\text{ASN} = 323$, 普通超帧长度 $\text{FRAMELENGTH} = 100$ 。由上述算法可得时隙号为323时的时隙其超帧偏移为3, 时隙偏移为23。

2.4.3 时隙状态与ADV slot bits的映射算法

在广播ADV的设计中,由于节点的ADV广播会通告网络管理共享时隙状态,用于新节点的入网。所以每当新节点入网需要针对ADV中的管理共享时隙位进行动态更新。

这里将ADV广播中的管理共享时隙位manage shared slot bits简称为时隙位slot bits。从图3可知,在管理超帧中的ADV时隙和管理上行时隙是按照对称映射的思想设计的。已知ADV时隙位置可以映射得到对应的管理上行时隙位置,反之亦可。所以管理超帧中,每个普通超帧的前20个时隙的状态即可表示整个管理时隙的调度状态。时隙位的内容对应管理时隙中的100个时隙状态。

在slot bits的设计中,利用每一个字节的8位二进制数表示8个时隙的状态,总共需要12.5个字节即100位来表示对应的ADV时隙和管理时隙的调度状态。取前12个字节和第13个字节的高4位作为slot

bits的内容。在每一个字节的二进制表示中,按照从左到右的顺序依次表示时隙位。按照图5所示的管理时隙状态,对应的slot bits如图6所示。

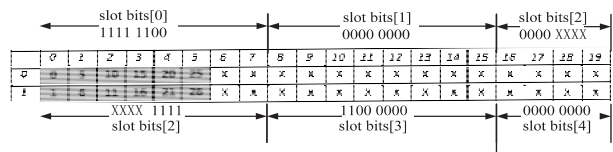


图6 slot bits设计

如图6所示,在ADV的slot bits设计中,按照字节中的位排序来代表时隙状态。例如 $\text{slot bits}[0] = 11111111$ 中的8位从左到右依次表示时隙0-7, $\text{slot bits}[1] = 11000000$ 中的8位从左到右依次表示时隙8-15。时隙位为0表示管理共享时隙可用,时隙位为1表示该时隙被网络分配给入网节点作ADV时隙,不可作为管理共享时隙。

(1)算法设计。

已知当前的新节点入网分配到的时隙坐标为 (x, y_1, y_2) , 根据这个坐标来更新对应的slot bits中对应的bit。这里提出了字节偏移 m 和位偏移 n 来对应slot bits中对应的时隙位。对应的字节偏移和位偏移公式如下:

$$m = (x * 20 + y_1) / 8 \quad (6)$$

$$n = 7 - (x * 20 + y_1) \% 8 \quad (7)$$

更新ADV中slot bits对应的结果为:

$$\text{slotbits}[m] = \text{slotbits}[m] | (1 \ll n) \quad (8)$$

当已知时隙坐标,查看ADV中slot bits对应的结果为:

$$\text{result} = 0x01 \& (\text{slotbits}[m] \gg n) \quad (9)$$

$\text{result} = 1$, 该时隙未被分配, 可以作为管理共享时隙; 相反, $\text{result} = 0$, 该时隙被分配给其他节点, 不能作为管理共享。

(2)应用举例。

例1: 当新节点入网分配的时隙为 $(x, y_1, y_2) = (0, 1, 38)$ 时, 相应的 $(m, n) = (0, 6)$ 。

设当前时隙状态为 $\text{slotbits}[0] = 10000000$;

即更新后 $\text{slotbits}[0] = \text{slotbits}[0] | (1 \ll 6) = 11000000$ 。

例2: 已知当前时隙号 $(x, y) = (2, 15)$ 时, $(m, n) = (6, 0)$, 查看对应slot bits相应位结果为: $\text{result} = 0x01 \& (\text{slotbits}[6] \ll 0)$ 。

3 结束语

文中针对无线传感器网络在工业应用中面临的挑战, 研究分析基于WirelessHart工业无线标准的无线传感器网络架构。针对无线标准提出的集中控制思想, 重新设计时分复用的无线传感器网络, 提出新的网络

时隙调度算法,在信道和时隙上分离网络控制与数据转发。文中设计了新的节点广播内容,扩展广播数据功能。但是在时隙复用设计的过程,所面临的挑战在于无线节点的单工特性,使得网络在时隙复用的过程中,必须消耗部分的时隙资源。如果节点硬件设计为双工特性时,可以进一步提高时隙利用率。文中设计控制和转发的分离使得无线传感器网络具有更强的灵活性和兼容性。

参考文献:

- [1] Industrial communication networks – Fieldbus specifications – wireless systems for industrial automation; process control and related applications (based on ISA 100.11a) [S]. IEC 62734 Ed. 1.0, 2011.
- [2] GB/T 26790.1–2011. 工业无线网络 WIA 规范第一部分: 用于过程自动化的 WIA 系统结构与通信规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [3] Farooq M O, Kunz T. Operating systems for wireless sensor networks; a survey [J]. *Sensors*, 2011, 11(6): 5900–5930.
- [4] 802.15.4e–2012–IEEE approved draft standard for local and metropolitan area networks part 15.4: Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) amendment to the MAC sub-layer [S]. 2012.
- [5] Willig A. Recent and emerging topics in wireless industrial communications; a selection [J]. *IEEE Trans on Industrial Informatics*, 2008, 4(2): 102–124.
- [6] Gungor V C, Hancke G P. Industrial wireless sensor networks: challenges, design principles, and technical approaches [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(10): 4258–4265.
- [7] 李建中, 高宏. 无线传感器网络的研究进展 [J]. *计算机研究与发展*, 2008, 45(1): 1–15.
- [8] 程卫芳, 廖湘初, 沈昌祥, 等. 一种高效节能的无线传感器网络数据聚合协议 [J]. *计算机工程与科学*, 2008, 30(3): 89–92.
- [9] 李平, 戴劲. 无线传感器网络中的节能路由算法研究 [J]. *计算机工程与科学*, 2014, 36(7): 1275–1278.
- [10] 刘云浩. 物联网导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [11] 孙利民. 无线传感器网络 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [12] Willig A, Matheus K, Wolisz A. Wireless technology in industrial networks [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2005, 93(6): 1130–1151.
- [13] 杨建东. 工业无线通讯技术在自动化中的应用与趋势 [J]. *中国仪器仪表*, 2008(3): 45–47.
- [14] 张宏科, 罗洪斌. 智慧协同网络体系基础研究 [J]. *电子学报*, 2013, 41(7): 1249–1254.
- [15] 苏伟, 陈佳, 周华春, 等. 智慧协同网络中的服务机理研究 [J]. *电子学报*, 2013, 41(7): 1255–1260.
- [16] 郜帅, 王洪超, 王凯, 等. 智慧网络组件协同机制研究 [J]. *电子学报*, 2013, 41(7): 1261–1267.
- +++++
- (上接第 61 页)
- conf on computer vision and pattern recognition. Anchorage: IEEE, 2008: 1–8.
- [7] 葛广重, 杨敏. 基于稀疏表示的单幅图像超分辨率重建 [J]. *计算机技术与发展*, 2013, 23(9): 103–106.
- [8] Li Bo, Chang Hong, Shan Shiguang, et al. Low-resolution face recognition via coupled local preserving mappings [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(1): 20–23.
- [9] Gao Xinbo, Zhang Kaibing, Tao Dacheng, et al. Joint learning for single-image super-resolution via a coupled constraint [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(2): 469–480.
- [10] 刘峰, 朱秀昌. 一种改进的多帧图像超分辨率重建算法 [J]. *南京邮电大学学报: 自然科学版*, 2007, 27(4): 19–23.
- [11] 李磊, 周鸣争. 基于 MAP 技术的图像类推超分辨重建方法 [J]. *计算机技术与发展*, 2009, 19(1): 77–80.
- [12] 王春霞, 苏红旗, 范郭亮. 图像超分辨率重建技术综述 [J]. *计算机技术与发展*, 2011, 21(5): 124–127.
- [13] 张义轮, 干宗良, 朱秀昌. 相似性约束的视频超分辨率重建 [J]. *中国图象图形学报*, 2013, 18(7): 761–767.
- [14] 张志, 叶蓬, 王润生. 基于 SIFT 特征的多帧图像超分辨率重建 [J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(11): 2373–2377.
- [15] 干宗良, 朱秀昌, 石腾, 等. 超分辨率方法和装置: 中国, CN201210053177.9 [P]. 2012–09–12.
- [16] Li Hongliang, Xu Linfeng, Liu Guanghui. Face hallucination via similarity constraints [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2013, 20(1): 19–22.
- [17] Yu H, Kin M, Qiu Guping. Learning local pixel structure for face hallucination [C] // *Proceedings of 2010 IEEE 17th international conference on image processing*. [s. l.]: IEEE, 2010: 2797–2800.

控制与数据分离的工业无线传感器网络设计

作者：[张浩](#)，[杨冬](#)，[周华春](#)，[ZHANG Hao](#)，[YANG Dong](#)，[ZHOU Hua-chun](#)
作者单位：[北京交通大学 电子信息工程学院, 北京, 100044](#)
刊名：[计算机技术与发展](#)
英文刊名：[Computer Technology and Development](#)
年，卷(期)：2015(8)

引用本文格式：[张浩](#).[杨冬](#).[周华春](#).[ZHANG Hao](#).[YANG Dong](#).[ZHOU Hua-chun](#) [控制与数据分离的工业无线传感器网络设计](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(8)