



## 联系方式

### ETG 总部

德国纽伦堡 Ostend 大街 196 号,  
90482  
电话: +49 (911) 5 40 56 20  
传真: +49 (911) 5 40 56 29  
info@ethercat.org

### ETG 北美代表处

美国华盛顿州  
电话: +1 (877) 384-3722  
传真: +1 (512) 535 1437  
j.stubbs@ethercat.org

### ETG 中国代表处

中国北京  
电话: 010 5830 1239  
传真: 010 5830 1286  
info@ethercat.org.cn

### ETG 韩国代表处

韩国首尔  
电话: +82 (2) 2107 3240  
传真: +82 (2) 2107 3969  
keyyoo@ethercat.org

### ETG 日本代表处

日本东京  
电话: +81 (45) 650 1610  
传真: +81 (45) 650 1613  
info.jp@ethercat.org

# EtherCAT®

## 中国特刊



Martin Rostan  
高速发展的 EtherCAT P2



Schwager 博士/教授  
2003-2013：实时以太网技术十年发展之路 P5



Angelo Bindi  
“空间和速度至关重要” P8



# 技术与趋势 — 应用与解决方案

2



## 高速发展的 EtherCAT

如今，EtherCAT 已经成为世界上很多工业领域的标准。EtherCAT 国际化的用户组织——EtherCAT 技术协会，由 2800 多家会员共同支持，推广和完善 EtherCAT 技术。ETG 执行总监 Martin Rostan 对 EtherCAT 和 ETG 发展进行了回顾和展望。

5



## 2003-2013：实时以太网技术十年发展之路

2003 年的汉诺威展会可被认为是基于以太网的工业通信系统向传统现场总线宣战的标志性事件。展会上共发布了 5 种实时以太网的方案。本文将概述该领域十年来的发展历程以及面向未来的展望。

8



## 空间和速度至关重要

有些人说工业通信的速度并不是真的那么重要。从与大陆公司底盘及安全部门的工业 SW 工程主管 Angelo Bindi 先生的交谈中，我们得知事实上应用对性能的需求是苛刻的。

19



## “雨之舞”——科技与艺术的完美结合

新加坡樟宜机场的“雨之舞”可能是世界上最大的动态雕塑。该作品使用了 1216 滴闪闪发亮的镀铜铝制雨滴造型，“雨滴”形成与飞舞主题相关的不同场景。EtherCAT 技术完美解决了来自 1216 根伺服轴实时同步带来的挑战。

30



## EtherCAT 助力沈阳机床实现 i5 智能机床

沈阳机床，中国最大的数控机床生产厂商，选择 EtherCAT 作为其最新的 i5 智能数控机床控制平台的内部总线，并在数控系统、伺服驱动器和 IO 设备上全面实施了 EtherCAT 主站和 EtherCAT 从站。

# 目 录

## 技术与趋势

高速发展的 EtherCAT	2
2003–2013: 实时以太网技术十年发展之路	5
EtherCAT 独特的运行机制——“On the fly” 高速传输的同时进行协议处理	7
“空间和速度至关重要”	8
功能安全 Safety over EtherCAT	11
EtherCAT 的诊断和错误定位	13
EtherCAT 技术协会	16
ETG 在中国	17

## 应用与解决方案

“雨之舞” ——科技与艺术的完美结合	19
EtherCAT 应用于电子制造业——来自 Assembléon 公司的 iFlex	22
KUKA公司 KR C4 机器人控制器采用高速、高确定性的工业以太网 EtherCAT	24
EtherCAT 以出众的性能完胜机器人复杂性	26
半导体设备制造商的完美控制网络	28
EtherCAT 助力沈阳机床实现 i5 智能数控机床	30
EtherCAT 控制先进的数控转塔冲床	32

### EtherCAT 技术协会中国代表处

地址：北京市西城区西直门外大街 1 号西环广场 T3 写字楼 1801-1803 室  
 电话：010-58301239  
 传真：010-58301286  
 邮箱：info@ethercat.org.cn

# 高速发展的 EtherCAT

十年前，EtherCAT 第一次被引入自动化世界。如今，该技术已经成为世界上很多工业领域的标准。EtherCAT 国际化的用户组织——EtherCAT 技术协会，由 2800 多家会员共同支持，推广和完善 EtherCAT 技术。ETG 的执行总监，Martin Rostan 对 EtherCAT 和 ETG 发展进行了回顾和展望。

作者：德国 VDE Verlag 公司，Ronald Heinze  
发表于：openautomation Report ([www.openautomation.de](http://www.openautomation.de))

**EtherCAT 到底是什么？现场总线还是以太网协议？**

**M.Rostan:** EtherCAT 是一个基于以太网的现场总线，并像传统的现场总线一样易于掌握，甚至用户在使用 EtherCAT 时无需深入的 IT 知识。EtherCAT 当然也是一个以太网技术，在主站端带有标准的以太网接口、标准的以太网帧、标准的以太网线缆和发送器芯片，如果需要还可以应用所有的因特网技术和协议。

**EtherCAT 原本是设计用于机器控制的总线。那么，如今其主要的应用领域有哪些？**

**M.Rostan:** 当然，EtherCAT 在机器控制的应用特别强势，但它的应用却不局限于该领域。如今，我们发现 EtherCAT 在嵌入式系统、舞台技术和娱乐表演、电厂、车辆行业、医疗设备、测试系统和各种机械工程领域都有广泛应用。

**有种说法认为：EtherCAT 仅仅在某些特殊的应用条件下是一个最快的总线。在其他情况下，其他的协议可以实现一个更快的数据传输。这是真的吗？**

**M.Rostan:** 是的。EtherCAT 仅仅是在这样的网络中是最快的总线：拥有大于三个从站的网络且平均每个从站每个循环传输少于 500 byte 数据。换言之，对于所有的现场总线的应用来讲，EtherCAT 是最快的总线。

**另一些人说：没人需要这么快的速度。你同意吗？**

**M.Rostan:** 不。很多应用都需要比传统现场总线或其他系统能提供的更好的性能。另一方面，相对慢速的



图1: EtherCAT 技术协会执行总监 Martin Rostan 先生

图片来自 EtherCAT 技术协会



图片来自德国倍福自动化有限公司

图2: EtherCAT 是速度最快的现场总线技术。

应用也可以从一个快速总线系统中获益。在一个状态转换中,更短的响应时间可以减少等待时间,这样可以增加机器或工厂的吞吐量。此外, EtherCAT并不仅仅代表很棒的性能:很多采用EtherCAT的原因是因为它使用简单,实施灵活并由这么多设备提供商支持。也有人仅因为价格便宜采用 EtherCAT。

**EtherCAT 的高速性能是实现科技自动化的关键的前提条件。EtherCAT 是否也正在成为一个测量总线呢?**

**M.Rostan:** EtherCAT 已经成为一个测量总线了! 2009年,我们在 Sensor+Test 展会的 EtherCAT 技术协会展台上展示出——我们坚持为此行业的发展添砖加瓦:很多参展商已经实施了 EtherCAT,或正在准备实施。今天, EtherCAT 是完整测量技术的一部分。

**另有一些批评家质疑市场中 EtherCAT 的应用程度?**

**M.Rostan:** 绝大多数市场研究都是基于对用户组织的调研。因为我们没有发布节点数,所以受到惩罚。比如,在最近的一个调查中,有个报告发布的 EtherCAT 全球应用的节点数比我们在一个机器人制造商所使用

的 EtherCAT 节点数还少。如果谁质疑 EtherCAT 在市场的程度,那么他可能很久没有参观过自动化展会了。各种各样的公司和产品支持 EtherCAT,这是 EtherCAT 独到之处。制造厂商实施我们的技术并不是为了取悦于我们,而是因为要满足他们的客户要求。

**那么真实的节点数是多少呢?**

**M.Rostan:** 甚至我们自己都不知道确切的数字。因为很多 EtherCAT 从站设备采用 FPGA 的方案,我们并不能通过统计芯片数得到答案。此外,你在一个 EtherCAT 主站上仅需要一个标准的以太网接口,这个接口的数量也无法计算。看看那些各种各样的设备及我们所知道的用量,估计 EtherCAT 已经成为全球排名第二的总线了。

**EtherCAT 的高稳定性是其他技术无法企及的,甚至第一个 EtherCAT ASIC 芯片都具有完全的兼容性。你是如何设计一个完全不需要有新版本的协议呢?**

**M.Rostan:** 关键性的一点当然是 EtherCAT 独特的功能运行原理,它可以提供太多的优势,因此无需对其进行改良。EtherCAT 飞速传输的同时进行数据处理——该原理是采纳于 Beckhoff 的 Lightbus 总线并将其应用在以太网技

术之上。基于此,我们设定了一个结构清晰的协议,并为无需修改的技术研发预留了足够的空间。在此我们获益于德国倍福(Beckhoff)多种现场总线协议产品的经验,因此可以避免局限,另外也可以在更高协议层继续应用之前已经建立的方案:如重要的 CANopen 协议可以在 EtherCAT 中使用。

**如今最流行的一个话题是工业 4.0, EtherCAT 如何与之匹配?**

**M.Rostan:** 工业 4.0 的核心在于将 IT 技术和自动化技术结合。EtherCAT 实际上代表了 IT 世界和生产的融合: EtherCAT 纵横拓展的持续通信是基于以太网,同时还兼具在生产自动化中要求的硬实时性,而无需复杂高深的 IT 技术。

**为什么 EtherCAT 和基于 PC 的控制能结合的如此完美?**

**M.Rostan:** 原因之一是 EtherCAT 可以无需 PC 上外加接口就可以实现硬实时通信这样一个事实,因为已经集成在 PC 上的以太网接口就足以满足要求。此外, EtherCAT 能够将高效基于 PC 控制技术的性能优势传递到机器。如果现场总线本身是一个瓶颈,那么快速 PC 的再高的性能也是无济于事的。即便在 10 年后, EtherCAT 仍然

比目前的CPU还快：通过EtherCAT我们可以全双工与100个伺服轴在100- $\mu$ s的循环时间内全部同步通信，但CPU却不能每100- $\mu$ s计算全部的设定点。

**EtherCAT协议是否可以采用无线传输？**

**M.Rostan:** 是的，我们可以采用无线将设备集成到EtherCAT系统中。但是我们并不这样做，因为采用无线传输所有数据必将迫使我们降低网络传输通道的基准的实时特性。因而可以采用无线接口将数据放在周期性数据流且不会引起延迟。

**Safety over EtherCAT (EtherCAT的安全协议) 有多开放？**

**M.Rostan:** Safety over EtherCAT是一个国际标准，并由TÜV (Technischer Überwachungsverein) 认可，该授权是免费获得的。协议也可以通过其他总线系统传输。对于实施，你可以使用经过认证的测试工具以及测试中心的支持服务，从而大大简化产品研发并加快上市流程。顺便一提，因为Safety over EtherCAT是一个非常简约的协议，它可以被快速运算。相对于其他的安全协议，这将减少堆栈运行时间，响应更快速。

**有一个很现实的问题：对于EtherCAT来说，使用标准以太网 Cat.5 或者 Cat.7 线缆真的可以吗？**

**M.Rostan:** 我们在展会展示

的Demo用的全部是廉价的Cat.5线缆。然而，从严谨的角度，我们建议在工业现场采用有适当屏蔽的线缆——标准工业以太网线缆，这是工业领域以太网的要求。这就如同你不会使用电铃线用于工业CAN网络的布线。

**EtherCAT和热连接是怎么回事？可能实现吗？**

**M.Rostan:** 是的。单独的设备甚至是整个网络段都可在运行的同时被连接或中断，同样在系统中的其他地方也是如此。当然，开启控制并正确响应功能需要在系统中进行设置。

**对于以太网协议有更多的诊断需求，那么EtherCAT的诊断是怎样的呢？**

**M.Rostan:** 全面的诊断特性在EtherCAT的研发过程中是一个主要议题。我们不仅实现了在EtherCAT系统中可靠诊断出位错误，同时还可以精确定位这些错误。这显著简化了错误查找的过程，并成为EtherCAT的另一个独特亮点。但是，EtherCAT的诊断特性并不局限于网络本身。例如，EtherCAT的拓扑结构和性能特点还允许采用简单的模拟量输入实现一个用于状态监测的震动分析，该分析与同一个系统中的控制任务平行运行。此外，即使对于伺服控制器短周期的在线诊断也是可行的。

**您怎么看千兆以太网？**

**M.Rostan:** 千兆以太网将在未来

在总线层将有一席之地，这是大势所趋。原则上EtherCAT也将运行于千兆以太网，我们也正在做这方面的尝试，但就PC的CPU性能来说控制还赶不上EtherCAT的速度，因此目前推出EtherCAT千兆以太网没有意义。在可预见的未来，EtherCAT不存在任何性能上的缺陷。

**ETG十周年：亮点是什么？**

**M.Rostan:** 2005年，我们引入Safety over EtherCAT，IEC发布该规范，并在2007年成为国际标准。2009年，ETG会员达到1000家，同年，EtherCAT一致性测试中心在德国和日本成立。2011年，EtherCAT从站接口在标准的微处理器上实现，因此有更新的实施方式可供选择。2013年，我们在中国成立了测试中心，会员数量达到2500家。

**您对EtherCAT和ETG未来十年的预期是怎样的？**

**M.Rostan:** 在未来十年，将不再有人讨论EtherCAT，因为该标准已经得到证明并由绝大多数厂商和设备支持。因为不断加速增长ETG的会员数量（至今为止每年有400多家会员的增长），我们预计世界上最大的总线组织ETG仍将持续成长。



图片来自 EtherCAT 技术协会

# 2003-2013: 实时以太网技术十年发展之路

2003年的汉诺威展会可被认为是基于以太网的工业通信系统向传统现场总线宣战的标志性事件。即便如此，有多家公司在2003年的工业以太网技术领域都有新的研发进展并试图将其统一。然而，事实上2003年的展会上共发布了5种实时以太网的方案，并指出基于以太网的方案并不可能被完全统一。本文将概述该领域十年来的发展历程以及面向未来的展望。

发表于：openautomation Report ([www.openautomation.de](http://www.openautomation.de))



图片来自 Peter Mars

在40年前的1973年，美国的Bob Metcalfe在其论文中描述了以太网的基本理念。对于多个节点在同一条线缆中访问数据时面对的问题，他的方案就是在数据冲撞后，节点需要随机等待一段时间，然后再次尝试建立一个新的链接。如今的以太网控制器仍然采用这种等待时间随机生成的方式。在2000年大家仍迷信这样的论断：“以太网并不适用于有实时要求的通信系统。”

2003年，几乎每个月都有新的解决“实时问题”的以太网方案发布，但这些方案都很难成为不同提供商都可以实施的方案。几乎所有的制造商都期望自己的方案能够完全赢得这个面向未来的市场。

2003年6月，我开创了这样一个门户网站：<http://www.real-time-ethernet.de/>。这个网站的第一版集成了在2003年汉诺威展会上发布的5种方案：CIPSync, EtherCAT, ETHERNET Powerlink, JetSYNC 以及 PROFINET。到2003年底，我惊讶的发现，实时以太网的数量已经翻倍到10种。2004年底，网站上已经有16种方案，并都附有相应的专业文章的链接表。2009年，我的列表中已经包括了29种实时方案。在2013年9月，就是在准备这篇文章的时候，我刚增加了最新的两个方案 AVB 和 White Rabbit。

从学术角度来看，对于实时问题能有这么多的解决方案是件有趣的事情。其中有的方案如同传统现场总

线一样，主站通过发送一个请求来唤起从站。有的方案采用标准总线控制器，有的则需要特殊的IC。在某些方案中，需要集成交换机才可以连接其他的设备。报文的结构也不同：有的报文仅包含一个节点的数据，而其他的方案将多个节点的数据混合在了一个报文中进行传输。虽然从科学角度去看这些方案很有趣，但是从用户的角度却不是：尽管各种不同的变种方案都（或多或少）基于以太网，但它们之间却互不兼容。

因为市场对于不同组件的互联性要求比较普遍，所以自动化系统的制造商（尤其是那些做专用设备的厂商）对以上的情况并不满意。然而，这种多方案并存的状态也有积极的一

序号	名称	IEC 617854 中的文件号 (CP)	主要制造商/国家
1	CIP	2	Rockwell / USA
2	Profibus/PROFINET	3	Siemens / Germany
3	CC-Link IE	8	Mitsubishi / Japan
4	Vnet/IP	10	Yokogawa / Japan
5	Tcnet	11	Toshiba / Japan
6	EtherCAT	12	Beckhoff / Germany
7	ETHERNET Powerlink	13	B&R / Austria
8	EPA	14	SUPCON / China
9	MODBUS-RTS	15	Schneider Electric / France
10	SERCOS	16	- / Germany
11	RAPIDnet	17	Hanyang University / Korea
12	SafetyNet p	18	Pilz / Germany
13	DRIVE-CLiQ		Siemens / Germany
14	VARAN		Sigmatek / Austria
15	TTethermet		TTTech / Austria
16	RTEX		Panasonic / Japan
17	Mechatrolink III		Yaskawa Electric / Japan
18	Fast Track Switching		Harting / Germany
19	FL-net		- / Japan
20	AVB		IEEE 802.3

表1: 20种实时以太网方案

面，这导致了该领域的技术竞争，并使这些制造商都在竭尽全力成为技术领导者。从而引发了技术创新和研发并最终使用户受益。

表 1 显示了 20 种实时以太网方案（共 31 种）。前 12 个是列在 IEC 标准 617854/1/1 中对应用最有意义的方案。第 13-18 个显示了更多厂商定制的方案。第 19 个包括了早期来自日本的 FL-net 方案。有趣的是，开发这些技术的公司的全球分布情况。10 个方案来自于欧洲，其次是来自于亚洲的 8 个，而仅 1 个来自于美国。

并不是所有提到的方案都有实际的应用。EtherCAT 和 PROFINET 是使用最广泛的技术。用户尤其赞赏 EtherCAT 拥有广泛的厂商支持，来自这些厂商的设备都带有良好的兼容性和互操作性。展会上，EtherCAT 技术协会（ETG）展示了在同一个 EtherCAT 网络中来自于 24 家厂商的 35 种不同伺服轴协同工作，并宣称这是一个世界纪录。有趣的是，甚至一些非欧洲的厂商已经将 EtherCAT 定义为其系统总线。这包括美国的国家仪器和丹纳赫，日本的欧姆龙和日立。毫无疑问，EtherCAT 的开发

者将为此感到自豪。自 2004 年 11 月一个德国的主流汽车制造商协会宣布 PROFINET 作为其工业以太网方案以来，该技术已经应用于德国的汽车工业。PROFINET 系统由西门子研发，并受到广泛应用。应用 PROFINET 的公司通常希望从一个提供商那里购买到所有的控制设备，包括控制器、伺服、和通信技术。

绝大多数读者可能不清楚第 20 种技术，AVB 标准，即视频音频桥（Audio Video Bridging）。这是以推动标准以太网领域研发而闻名的 IEEE 802（Institute of Electrical and Electronics Engineers）国际工作组刚刚提出的实时方案。不仅自动化工业领域的用户，包括视频和音频传输也需要硬实时性能，IEEE 802.1 也设了一些工作组，负责研究对时间敏感的应用。专家估计，该协议将于 2015 或 2016 年完成。相应的 IC 设计将随后研发。

新标准的发展对于自动化技术的意义，不同的专家有不同的解释。有些公司的代表认为新标准的方案将减少多个实时以太网并存的意义。另有些专家则认为 AVB 的理念并不会为运动控制（最短的循环时间和最小抖

动）的应用提供足够的性能。具体行动方案的决定将在未来几年内实现。但是，制造商不会停止新协议竞争的脚步。因此，跟踪实时技术的未来发展一定是令人振奋的。



作者: Jürgen Schwager 博士/教授  
德国 Reutlingen 大学, 机电一体化工业通信系统带头人。创建了实验室网站 [www.real-time-ethernet.de](http://www.real-time-ethernet.de)。

#### 参考文献:

[1] "Informationen zur internationalen Feldbusnormenreihe" on the website of the DKE, status 25.10.2010, read 20.8.2013 <http://www.dke.de/de/Service/Nachrichten/Seiten/IEC%2061158.aspx>

[2] Peter Fröhlich, Christian Boiger, Oliver Kleineberg: Echtzeit-Ethernet – neu definiert: Deep Impact. IEE, Issue 2/2013, p. 46...49.

<http://www.all-electronics.de/texte/anzeigen/49351/Deep-Impact>

# EtherCAT 独特的运行机制——“On the fly” 高速传输的同时进行协议处理

传统的自动化网络的特点是每个节点发送小量数据，数据量通常小于一个以太网帧的有效负载。如果采用每个循环用一个帧传输单个节点数据的方式会导致较低的带宽利用率，整体网络性能效率低下。而 EtherCAT 则采用另一种方式。

作者：EtherCAT 技术协会

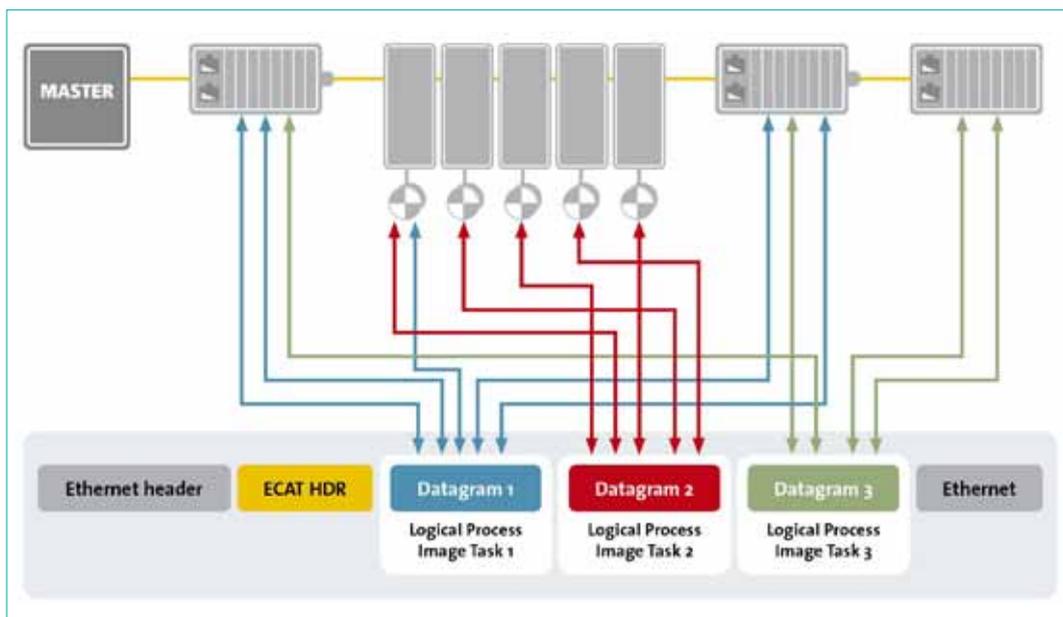


图1: EtherCAT运行机制: 报文在网络中传输的同时进行数据处理(需要交换的数据被插入到帧中)。

以太网口的硬件平台上，而无需考虑采用什么样的实时操作系统或应用软件。EtherCAT 从站设备采用一个所谓的 EtherCAT 从站控制器 (ESC) 来处理传输过程中的帧，整个的处理过程全部在硬件芯片中完成。这样使得网络的性能完全可预测并独立于从站设备的实施。

图片来自 EtherCAT 技术协会

该独特的帧处理方式就是 EtherCAT 获得更高的传输性能的原因：没有任何其他的工业以太网技术可以与 EtherCAT 的带宽利用率相媲美，因此也难以获得像 EtherCAT 这样出色的通信性能。

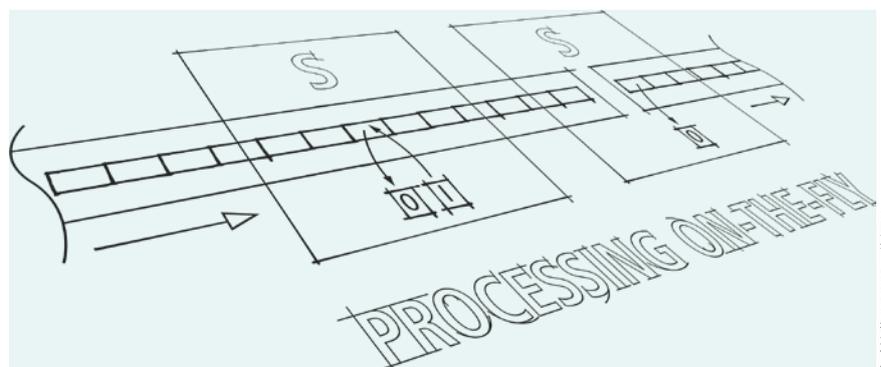
EtherCAT 独特的方式在于节点处理以太网帧的机制“On the fly”：数据帧在网络传输的同时，每个节点读取帧中寻址到该节点的数据，并将需要交换的数据写入帧。这种方式的带宽利用率很高（通常每个循环仅需一个帧），且无需采用交换机或集线器。

网络中网段或分支的最后一个节点检测到断路后，通过以太网的全双工技术将帧发送回主站。帧仅产生硬件传输延迟。报文最大的有效数据率超过 90%。因为利用了全双工特性，有效带宽利用率理论上甚至超过了 100 Mbit/s。

EtherCAT 主站是网段中唯一被允许发送 EtherCAT 帧的设备；所有其他的节点仅向下传送数据帧。这

个理念确保了实时性能且没有不确定的延迟。主站采用一个标准的以太网 MAC，无需附加的通信协处理器。这样主站就可以实施在任何带有

的工业以太网技术可以与 EtherCAT 的带宽利用率相媲美，因此也难以获得像 EtherCAT 这样出色的通信性能。



图片来自 EtherCAT 技术协会

# “空间和速度至关重要”

有些人说工业通信的速度并不是真的那么重要。从与大陆公司底盘及安全部门的工业SW工程的主管Angelo Bindi先生的交谈中，我们得知事实上应用对性能的需求是苛刻的。

作者：德国 VDE Verlag 公司，Ronald Heinze  
发表于：openautomation Report (www.openautomation.de)



图片来自 VDE Verlag 公司

图1：Angelo Bindi 大陆公司工业SW工程的主管

在大陆公司，底盘和安全部门研发和生产电子及液压刹车，以及底盘控制系统、传感器、辅助系统、气囊电子和传感系统，风挡清洗和电子空气弹簧系统。其核心能力是在创新的可扩展系统“ContiGuard”中集成有源和无源的驾驶安全功能。该部门在 20 个国家拥有 78 个分支机构。2012 年，部门约有 34000 名雇员，产生 71 亿销售额。

在德国的法兰克福，组装线被

设计为适用于大陆公司分布在全球各地的工厂。这些组装线用于生产几乎所有车型的车身电子稳定系统（ESP）及 ABS。“在这些组装线中，我们全部使用 EtherCAT，” Angelo Bindi 解释道：“同时，我们在大陆轮胎厂的同事也将 EtherCAT 作为其工业通信技术。”

实际上，组装线中的伺服技术，总线端子 IO，以及所有控制通信都采用 EtherCAT。此外，如果成

功实施了一个 EtherCAT 设备，同样也会将 EtherCAT 普及到相关的传感器。“比如，我们采用倍加福公司有 EtherCAT 接口的 RFID 系统用于色板识别（关键词跟踪和追踪）以及工具检查。我们也要求供应商尽可能提供更多带 EtherCAT 接口的组件产品，” Angelo Bindi 说道。如今，EtherCAT 已经遍布于所有大陆公司的厂房。“该趋势将持续增长，这是因为将有更多功能的 EtherCAT IO 端子模块入市”，他补充道。

“适用于全球的组装线是标准的，” Bindi 说，“不同的理念是由具体的应用决定——更高的自动化集成度或者是更多的人工工作”。在所有规格的机器理念中，EtherCAT 都是通信的标准技术。控制硬件在机器配置中自行适配。“具体的配置方案基于机器的复杂程度，” Bindi 说道，“采用了 Beckhoff 的 TwinCAT 软件，我们可以使用同一个工程工具配置所有的控制系统”。

### 升级总线系统

2003 年，大陆公司机器的总线系统面临更新。“之前，我们采用一种传统的现场总线系统，” Bindi 回忆说，“然而，那种系统对于更高的性能要求来说太慢了。此外，相对于以太网协议，原有技术的诊断是一个问题，线缆的敏感半径造成布线也非常困难。”

因此，大陆公司最终决定直接升

级到工业以太网方案。“在 EtherCAT 之前，我们已经开始采用 Beckhoff 的实时以太网 I/O 产品，” Bindi 记忆犹新，“那个时候 Beckhoff 刚刚开始推广 EtherCAT，仅有 FPGA 的方案可以提供（还没有 ASIC 芯片）。”

基于此，大陆公司稍后才使用了 EtherCAT。“EtherCAT 显然在诊断方面非常出众，” Bindi 解释道，“在早期，必须采用昂贵的现场总线测试设备进行传统总线的诊断，而如今我们可以采用通用的诊断工具。”大陆公司使用最早用在办公环境的开放源诊断工具（如免费的 Wireshark）来诊断 EtherCAT 报文。

大陆公司升级到 EtherCAT 的一个重要原因就是速度。在一个生产线中，组装单元与测试单元是混合装配的。“我们希望这两个单元的都可以获得更高的处理速度。EtherCAT 堆栈非常精简，因此端子模块可对其快速处理，” Bindi 解释说，“平均来看，每个组装单元包括了 150 个站，每个站都有 3 个伺服电机，每个伺服电机配有 50 个总线端子，其中主要都是 EtherCAT 产品。”大陆公司采用 Beckhoff 的 AX5000 驱动器；在老系统中还可以看到之前采用的 Beckhoff 的 AX2500 系列伺服驱动器。

“我们很高兴看到能有像 EtherCAT 技术协会这样的组织站在 EtherCAT 背后，” Bindi 说，“ETG 支持开放的系统，同时也针对新领域的研发需求不断完善 EtherCAT。”采用该标准，对工作人员的培训也非常简单。

为什么高速的通信系统更适用于大陆公司的组装线呢？“我们的组装线基于序列的工作流程”，自动化的专家解释道，“这意味着机器生成过程映像，然后基于其状态和条件做出下一步任务判定。这样，在一个循环中只有一个被激活的工作步骤，从而保证了所有流程的持续性”。因此，大陆公司对控制的循环时间要求苛刻，以最优化生产速度，从而获得更高生产效率。

然而，对于 Angelo Bindi 来说，如果总线的周期大于  $500\mu\text{s}$ ，就没有必要采用一个循环周期为  $500\mu\text{s}$  的控制器。简而言之，总线的传输时间必须要小于控制器的运算周期。所以，只



图2：驾驶和速度传感器：用于电机管理的速度传感器提供精确的位置曲轴及凸轮轴。

图片来自大陆公司

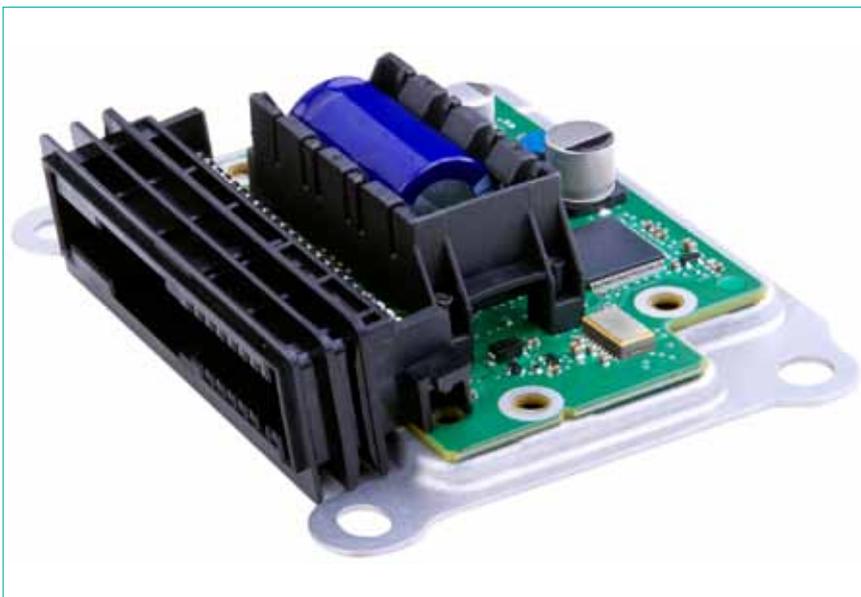


图3：集成在传感器组中的气囊控制单元

图片来自大陆公司

有更高速的总线（能够确保更短循环周期）才可以加快整个流程的处理速度。

由于采用基于 PC 的控制，因此才可通过最快速的总线得以实现更短的循环时间。一个高速总线也是驱动技术的理想方案，Bindi 认为，更高的速度能够获取更好的品质：“所以获得了更高的采样率——伺服驱动器可以运行的更快。”

### 成本和工程优势

EtherCAT 的速度优势使得更多基于 PC 的测试技术得以在标准的控制平台上实现，从而在成本和工程方面受益。“之前我们采用独立的带 DAC 板卡的 PC 系统，” Bindi 解释道，“采用了 EtherCAT 后，我们将所有这些都集成到了自动化系统中。事实上，我们已经实施了十年科技自动化技术。” EtherCAT 端子模块提供了高速的采样率，比如，用于功率和过程监控流程。“这些集成简化了工程工作，” Bindi 表示，“工程师在熟悉的控制平台环境中工作，而无需再配置一个独立的基于 PC 的测试系统。”这就降低了硬件的使用从而为紧凑型机器节省了空间。此外，TwinSAFE 的功能安全技术也得益于 EtherCAT：“因为 EtherCAT 负责传输数据，因此安全



图片来自昵图网

数据的传输也是高速高效的。”

EtherCAT 对于大陆公司在工厂范围的网路同样非常重要，它还提供了到 MES 的通道。“一个站点建立后，轮流控制测试站点的两个组件之间大概有 100 米的距离，” Bindi 说道，“测试站点将数

据实时反馈给建立的站点。”因此，此处采用 EtherCAT 自动化协议（EtherCAT Automation Protocol）的发布/订阅功能。“MES 需要与控制层实现高速通信，从而可更快的访问品质相关的信息以方便我们进行预估，” Bindi 解释说。

“采用 EtherCAT，我们的控制提速 10-15%，从而缩短了 5% 的生产时间，” Bindi 总结道，“同时，我们可以通过减少使用硬件从而降低系统的成本。最后，工程工作简化还节省了工程时间”。



图片来自 VDE Verlag 公司

图4: Angelo Bindi: “采用了EtherCAT，我们的控制提速 10-15%，从而节约了约 5% 的生产时间”。



作者: Ronald Heinze 主编  
德国 VDE Verlag 公司

# 功能安全 Safety over EtherCAT

作者：EtherCAT 技术协会

现代通信系统不仅要实现控制数据的确定性传输，还要在相同的介质中进行安全关键控制数据的传输。EtherCAT 使用 Safety over EtherCAT 协议实现该目标，所以允许：

- 一个通信系统同时传输控制数据和安全数据；
- 可灵活地改变和扩展安全系统结构；
- 通过预先认证解决方案来简化安全应用；
- 强大的安全功能诊断能力；
- 机器设计中无缝地集成安全功能；
- 可以使用同一开发工具开发标准应用和安全应用。

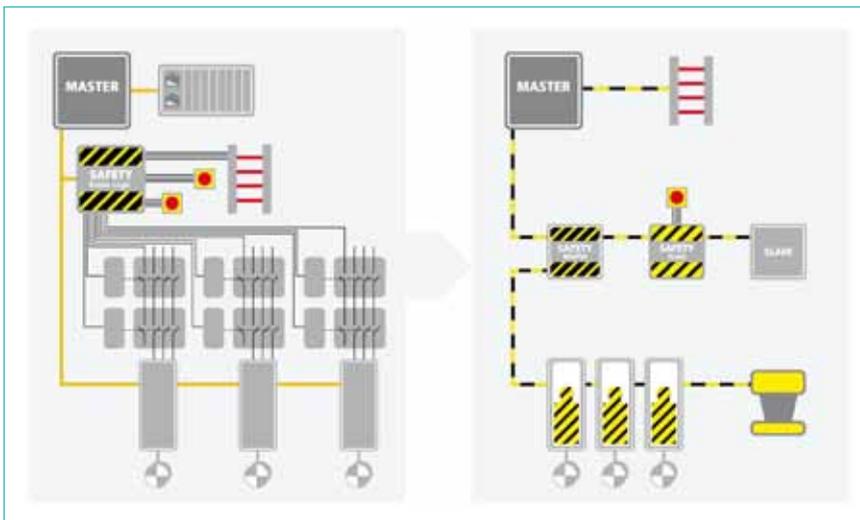


图1：与传统安全 I/O 线路相比，Safety over EtherCAT 更简单且有更灵活的构架。

EtherCAT 安全技术是基于 IEC61508 开发的，经 TÜV 认证，并以 IEC61784-3 标准化。该协议可支持功能安全等级 SIL3 的安全应用场合。

Safety over EtherCAT 中，通信系统可以被看作所谓“黑色通道”（非安全相关）的一部分。EtherCAT 作为标准的通信系统，使用单一通道同时实现标准数据和安全关键数据的传输。安全数据帧可被看做一个“安全容器”，其中包含了安全关键过程数据以及一些用于保证数据安全性的额外信息，该数据帧作为通信过程数据的一部分被传输。传输路径随意且不强限制使用 EtherCAT，FSoE 可以在其他现

场总线系统中使用。

基于这种灵活性，安全连接机器的不同部分变得更简单。安全容器通过各种控制器路由并在机器的各部分处理。因此，急停功能可以对整个机器有效，或使机器的部分目标实现安全停止——即使该部分与其他通信系统（如以太网系统）相连。

在设备中实施 FSoE 协议时，仅需要很少的资源就可以达到更高的性能并获得更短的响应时间。在机器人行业应用中，通过使用 FSoE 以 8-KHz 闭环的形式实现安全运动控制。

今天，Safety over EtherCAT 已经是最流行的安全协议之一。传统的包装机器、高动态刀具生产或者铣床都可以简单的将安全功能集成到控制架构中。不同的安全传感器，如急停按钮

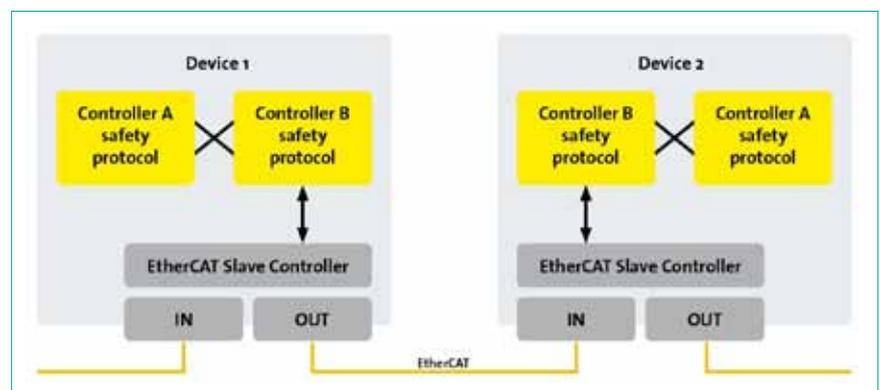
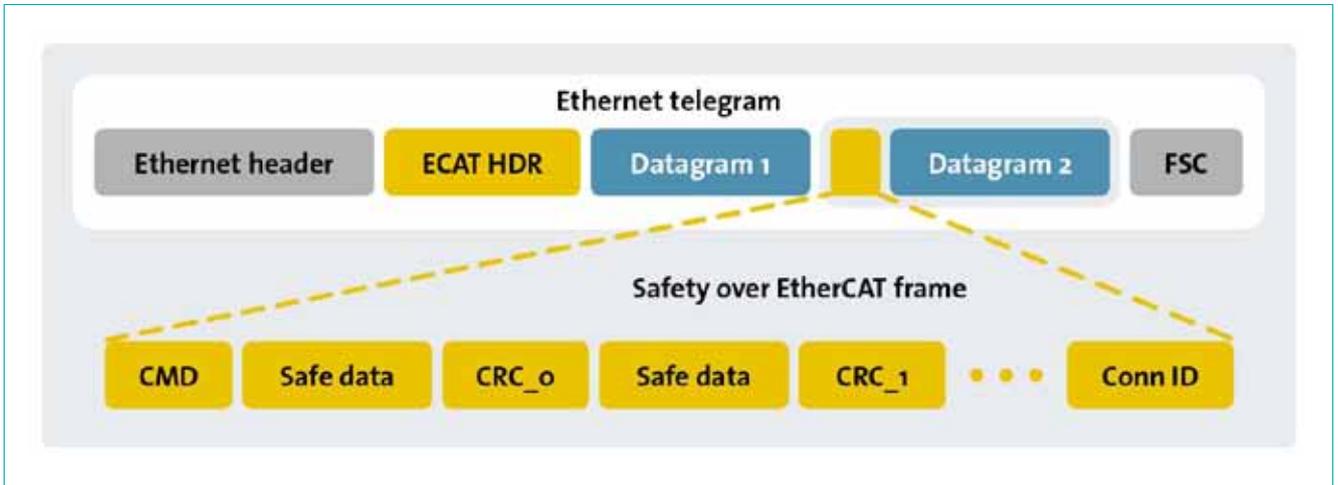


图2：黑色通道原则：可以使用标准通信接口。



图片来自 EtherCAT 技术协会

图3: 安全容器嵌入在周期性通信的过程数据中。

或光幕可以被安全的检测到，能够智能地减少危险操作，或满足机器停止安全检测的需求。驱动无需切换到无转矩模式，从而减少了机器的周期时间，这样后续的重启动可以在系统运行中进行。

此外，在环境恶劣的风力发电厂中，自动化控制系统也使用了 Safety over EtherCAT 技术。在风力发电行业，通常通过 Safety over EtherCAT 将硬线的安全系统整合到自动化硬件中。机舱中或者塔底的急停按钮能够通过一个 EtherCAT 电缆连接，无需使用很长且敏感的硬件信号进行并行通信。当然，一个超速转子或过载发电

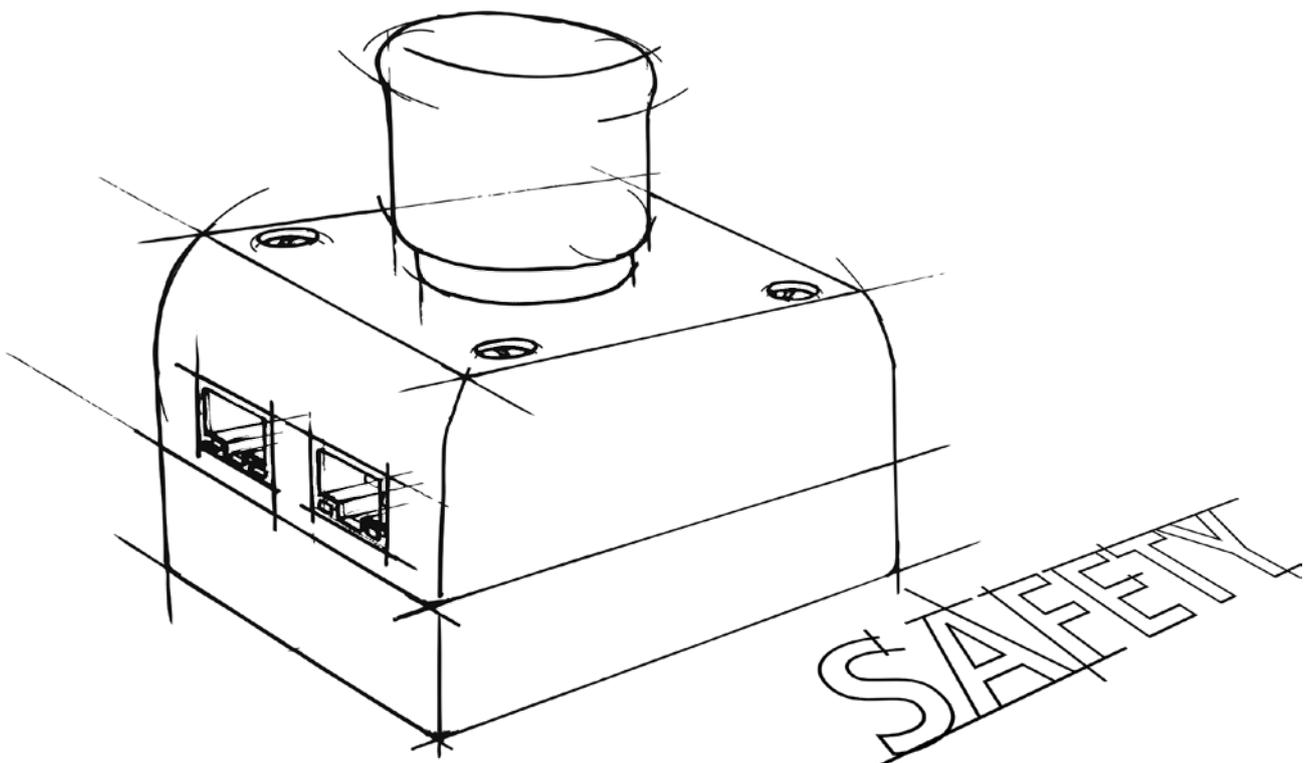
机能够在集成安全控制中被安全关联和检测所覆盖。

同样，还有其他行业也受益于 Safety over EtherCAT 技术，例如音频和舞台设备。为保证演员的安全，对舞台设备需要自动进行安全监测，包括使用绳索系统从观众头顶经过的高空摄像机，以及演员飞到空中进行动态和叹为观止的飞行表演。所有这些都都需要一个快速灵活的安全系统——如同 Safety over EtherCAT 一样。

各制造商，包括控制器提供商、传感器和驱动制造商，都提供了广泛使用 Safety over EtherCAT 接口的安全

部件，从而可以看出该技术具有较高的接受度。EtherCAT 技术协会为其会员实施和认证此类设备提供全面的支持：协会的 EtherCAT 专家在产品生命周期的所有阶段，为制造商提供技术支持。此外 ETG，还为带 Safety over EtherCAT 接口的设备提供认证工具和服务，从而显著简化了一致性认证的规范流程。

由于 Safety over EtherCAT 协议独立于传输介质，适用于集中式或分散式安全控制，因此在保证用户的设备灵活性和投资安全性前提下，提供了更广泛的选择。



图片来自 EtherCAT 技术协会

# EtherCAT 的诊断和错误定位

作者：EtherCAT 技术协会

诊断特性对于一个机器的可靠性和调试时间非常重要。除了错误检测外，错误的准确定位也不容忽视。EtherCAT 在其系统内部拥有多种不同的诊断功能。

在 EtherCAT 网络中，从设备（EtherCAT 从站控制器）通过硬件芯片中的专用实时组件，根据拓扑的顺序处理以太网帧。从站设备在现场总线标准定义的 ISO/OSI 堆栈的所有层中都有诊断机制。主站的配置工具分别从独立的从站中获取到状态信息，直接报告给用户使用的应用软件。

## 物理层的诊断

物理层包括用于网络基础设施建设的线缆和接头。每个 ESC 端口处理传输给用户相关信息，从而检测硬件级的通信。除了其他不同的错误外，如果 ESC 端口检测到链路丢失，则相关的链路丢失计数器值增加。这种情况可能由于接触不良、不足或者线缆损坏

等原因引起。通过读取相应的寄存器可精确定位来自物理介质的干扰。

另一种诊断特性是传入的数据帧的 CRC 校验（校验总和）。如果损坏的数据帧被标记毁坏，帧中包含的数据会被忽略，CRC 错误计数器值增加。后续的设备也会忽略该帧中的数据，且增加转发 CRC 错误计数器的值。CRC 错误一般是由于通信线缆过于靠近电力线缆，从而导致 EMC 干扰产生的。用户通过读取上述两个错误计数器便可以检测到可能出现 EMC 干扰通信的位置。

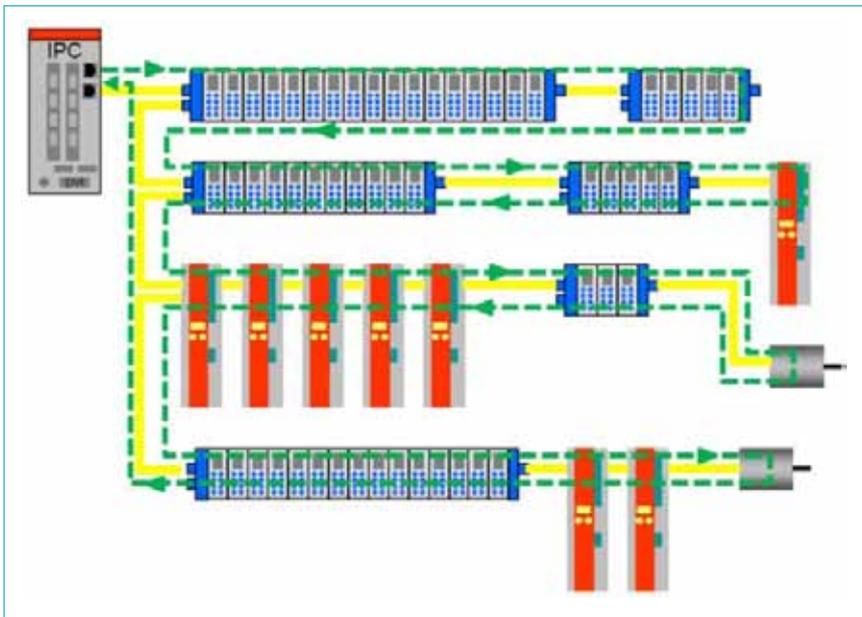


图1：以太网数据帧通过ESC（EtherCAT从站控制器）进行逻辑传输。

图片来自 EtherCAT 技术协会

## 数据链路层的诊断

数据链路层保证了 EtherCAT 数据帧和网络中 EtherCAT 参与者之间的数据交换。该数据交换可以是非周期性或周期性的。周期性数据交换还会被用于多个分布式参与者的周期同步控制。在从站设备中，中断或看门狗监测数据交换和同步。

在数据链路层中工作计数器是一个强有力的诊断机制。该计数器随着读或写命令一同传输。如果每个从站成功的进行了数据交换，则计数器增加。主站通过对比实际的和预计的计数器值，便可以检测到在同一周期中所有从站的数据是否被正确处理，还是有个别报文尚未传输。该工作计数器通知不同的可能产生的错误，例如，由于链接丢失或者内部硬件中断而导致一个从站不能进行数据交换的情况。对于过程数据配置或通信时序的参数化问题也可以使用这种检测方式。工作计数器错误可被传输到一个上层应用中（例如 PLC 程序），因此工程师可以在软件中编译一个合适的响应。

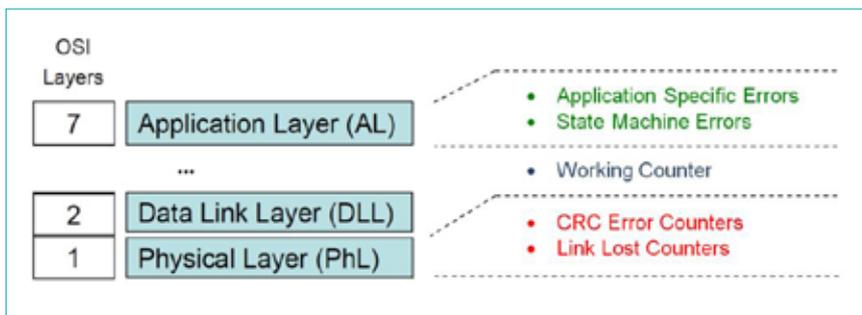
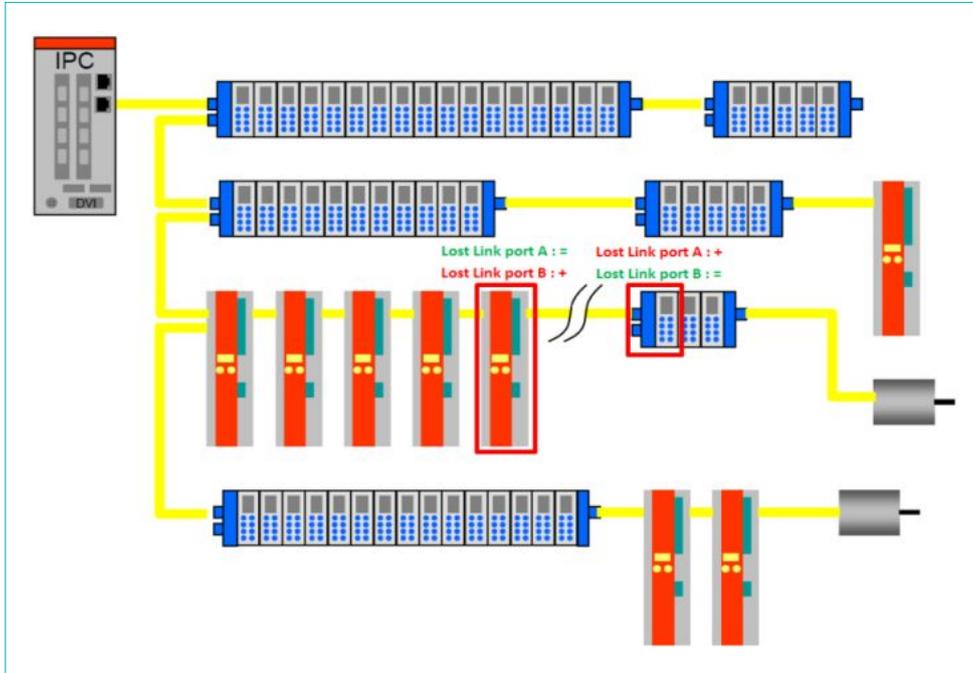


图2：EtherCAT 可以在系统内部的 IOS/OSI 堆栈的所有层实现诊断。

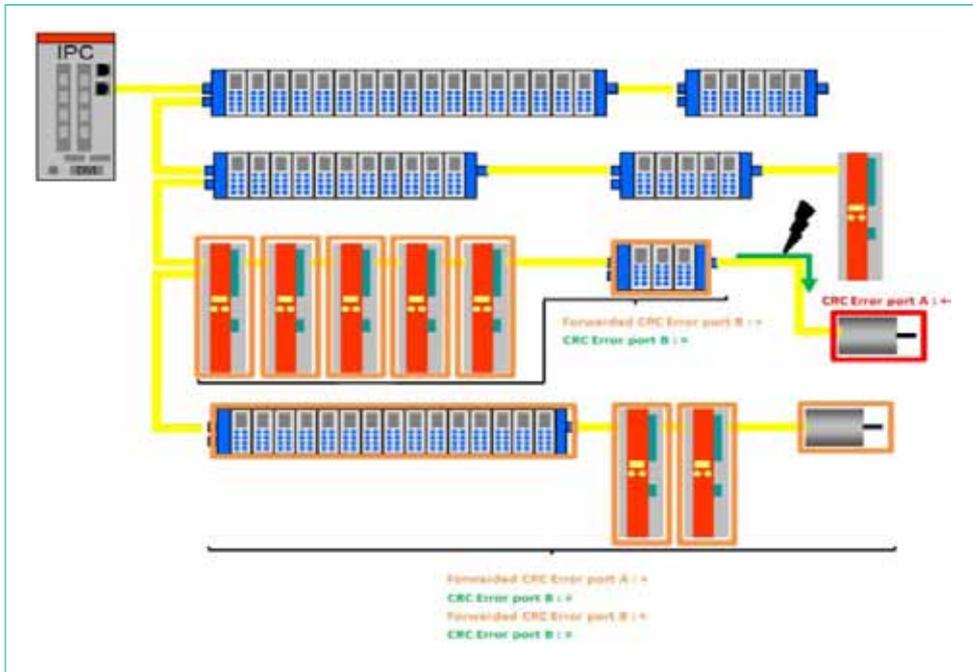
图片来自 EtherCAT 技术协会

对于高精度同步的应用，可以在 EtherCAT 网络中采用分布时钟（DC）机制。对于这种数据链路层功能也有



图片来自 EtherCAT 技术协会

图3: 通过读取链路丢失计数器可以准确定位硬件级别的错误。



图片来自 EtherCAT 技术协会

图4: 每个端口对传入数据帧进行CRC校验,并在必要的情况下增加错误计数器数值。

不同的诊断机制。每个从站包括一个系统时间差值寄存器，寄存器的值是每个从站的本地时间和全局时间的差值。主站通过读取使用分布时钟的所有从站的这个寄存器的值，从而监控网络的同步的精确性，并在出现违规操作时通知用户。

因为 EtherCAT 使用标准以太网帧，所有网络状态可以用免费的软件

(如Wireshark) 进行监控状态。这种方式下，EtherCAT 整个数据帧及其所有报文都能被报告，显示和分析。

### 应用层的诊断

每个从站的应用层实施了独立的功能，如：读取温度信号，控制气动伺服阀或者驱动电机。在此，EtherCAT 状态机提供重要的诊断信息来组织主站和从站之间的行为。

每个状态对应几个通信功能。主站请求状态改变，从站则确认或者拒绝状态改变。如果在初始化阶段出现配置错误或内部运行时出错，从站会拒绝状态转换或内部改变到低级别状态中，并设定一个错误位和提供一个错误代码。比如，当过程数据在主站和从站的配置不同时，从站会拒绝状态改变至 Safe operational 并提供错误代码“无效的输入配置”。又例如，当从站

超过一定时间没有接收到有效过程数据时，该从站则将状态转换到 **Safe operational**，并报告错误“过程数据看门狗”。主站通过一个广播命令周期性地读取应用层状态从而监控整个网络状态。

除了通过 **EtherCAT** 状态机进行核心的诊断功能外，**EtherCAT** 设备还可以报告特殊的内部应用错误。这

些取决于从站的个别功能：可以是一个模拟量输入端子的过电压，超过驱动的最大转矩限制或者一个内部的超温报警。**CAN application protocol over EtherCAT (CoE)** 是一个标准的用于非周期参数访问的 **EtherCAT** 协议，该协议定义了诊断历史对象（类似于错误寄存器）。在这些对象设备中可以记录并保存多达 250 个应用的特定诊断信息，主站读取信息并报告给用户。

## 总结

**EtherCAT** 通信的所有层中都有独特的 **EtherCAT** 诊断功能，因此它提供了一个完整且详尽的网络状态概览。这些功能已经包含在 **EtherCAT** 协议中，主站需要很少的额外命令就可以实现。**EtherCAT** 诊断机制可以在硬件中实施或在 **EtherCAT** 基础规范中定义：因此所有类似的 **EtherCAT** 设备都保证了其全部相关功能。

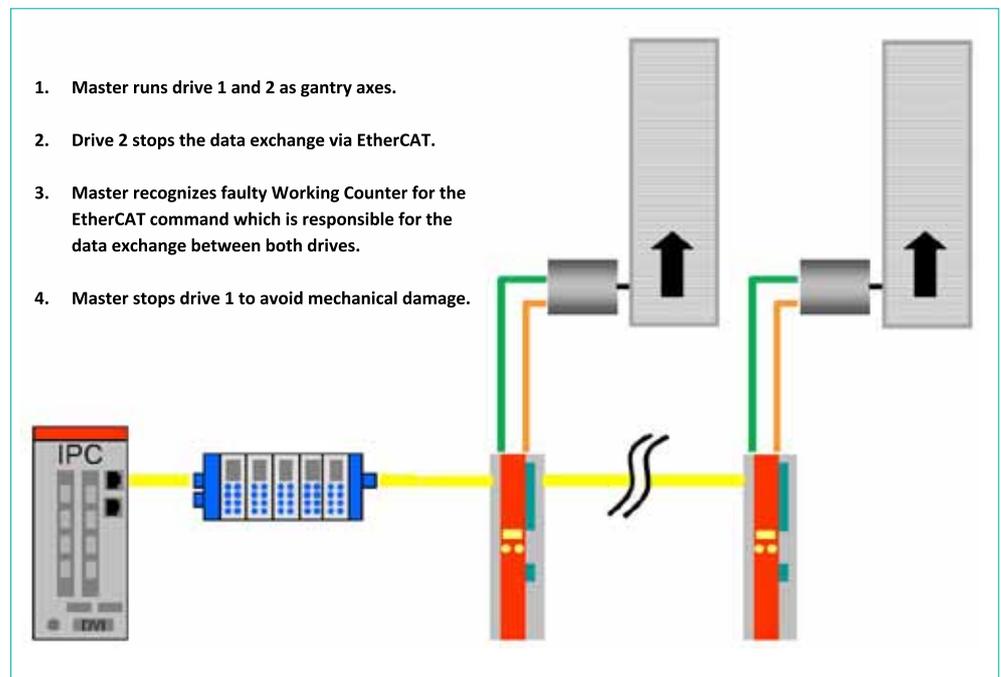


图5: EtherCAT主站可以通过工作计数器轻松且周期同步的检测错误。

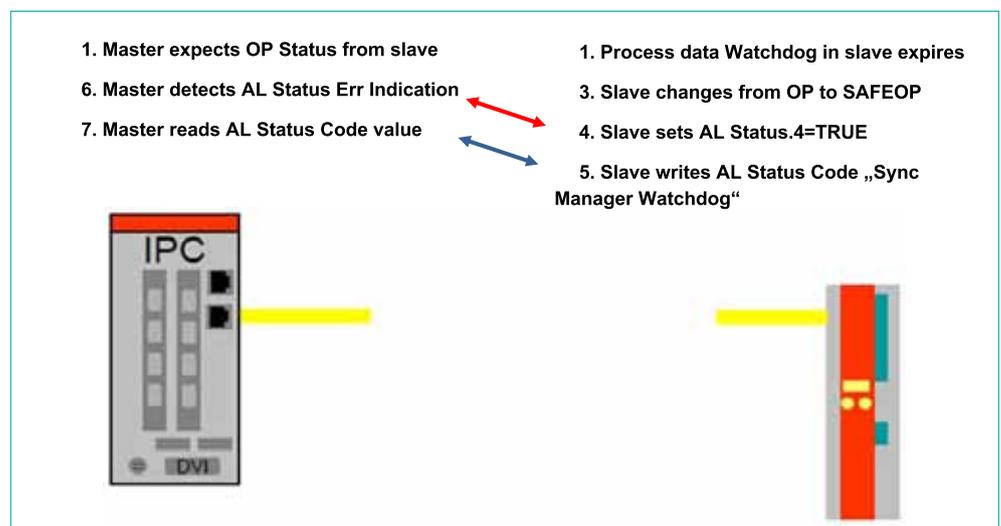


图6: EtherCAT在应用层的诊断。

# EtherCAT 技术协会

作者：EtherCAT 技术协会

EtherCAT 技术协会成立于 2003 年，旨在支持全球使用 EtherCAT 技术的用户，目前已经发展为全球最大的工业以太网和现场总线组织。ETG 分布在北美、中国、德国、日本和韩国的团队确保了对全球的机器制造商、设备生产商、系统集成商和技术提供商在技术实施前、实施中和实施后的技术支持。在 ETG 内部设立的不同技术工作组中，ETG 的专家组织实施不同层面的技术工作，包括设备行规的定制，实施指导的编写等。ETG 也通过组织全球性的论坛和培训，以及参加展览会等方式宣传推广。此外，ETG 还发行产品指南，ETG 联合展台，并组织赞助商在 EtherCAT 的论坛上宣传其 EtherCAT 产品。

## 兼容性和一致性

ETG 每年在北美、亚洲和欧洲组织 EtherCAT 兼容性测试活动。在这些活动中，EtherCAT 设备开发者相聚在一起并测试其产品，以确保产品的兼容性。通过官方的一致性测试工具，每个设备厂商都可以在产品上市前自行测试 EtherCAT 产品的一致性。位于德国、中国、日本和北美的测试中心可以为成功通过了官方测试的厂商颁发测试证书。

## 国际标准化

EtherCAT 技术协会是 IEC 的官方合作伙伴。EtherCAT 和 Safety over EtherCAT 都是 IEC 标准（IEC 61158 和 IEC 61784）。这两个标准不仅包括了底层协议层，也包括了应用层和设备行规（如驱动的设备行规）。此外，SEMI™（Semiconductor Equipment and Materials International，半导体设备和材料国际组织）接受 EtherCAT 作为半导体生产工业的通信标准（E54.20）。ETG 半导体技

术工作组负责定义该行业专用设备行规和实施指南。EtherCAT 协议目前有英文版、中文版、日文版和韩文版。

## ETG 团队

ETG 总部位于德国纽伦堡。来自德国、中国、北美、日本和韩国的 25 名国际化团队成员共同在全球推广工业以太网标准 EtherCAT 并支持本地的会员公司进行实施和应用。



图1: ETG 全球团队：来自于德国，中国，北美，日本和韩国的 25 名成员。

图片来自 EtherCAT 技术协会

# ETG 在中国

作者：EtherCAT 技术协会

为了更好的在中国推广 EtherCAT 技术并服务于会员公司，EtherCAT 技术协会于 2007 年在北京设立了 EtherCAT 技术协会中国代表处。负责 EtherCAT 技术在中国的市场推广和 EtherCAT 协议的技术支持以及实施指导。

ETG 中国代表处在中国积极扩展 EtherCAT 市场并组织各种市场活动，包括组织 ETG 会员携其 EtherCAT 产品参加各大自动化展上的 ETG 联合展台，组织工业以太网交流会，从而将工业以太网和 EtherCAT 的全景信息呈现给广大用户。此外，为加速 ETG 会员的实施进度，ETG 中国提供专门的针对研发者的 EtherCAT 协议、EtherCAT 主站研发和从站研发的培训课程。

目前，EtherCAT 技术协会的中国区会员近 400 家。他们是来自数控领域、运动控制系统、机床、金属加工、木材加工、塑料机械、机器人、电力系统、楼宇自动化、航空航天、半导体制造、风电和光伏等行业领先的本土企业以及各大院校及科研机构。这些会员积极研究和实施着 EtherCAT 技术。

在国内，自动化控制领域正在生成更大的 EtherCAT 技术市场，来自国内外的产品提供商源源不断地将其 EtherCAT 产品推入市场，使最终用户对 EtherCAT 产品的选择也更加丰富。一方面使用户通过集成或研发 EtherCAT 产品提高了设备的性能，增强了功能，另一方面因为更多的采购选择也降低了设备成本。

基于 EtherCAT 在国内应用和实施的情况，EtherCAT 技术协会自 2013 年起启动了 EtherCAT 国际化的推进工作并已经取得阶段性进展。预计在 2014 年秋，EtherCAT 将通过中国国家标准 GB/T 审批并在北京发布。

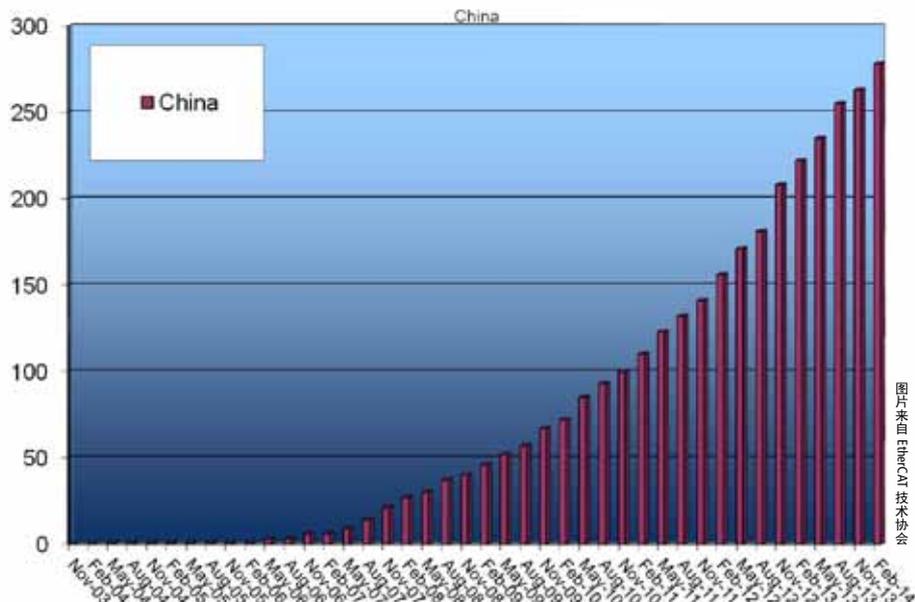


图1: ETG 中国会员的增长。

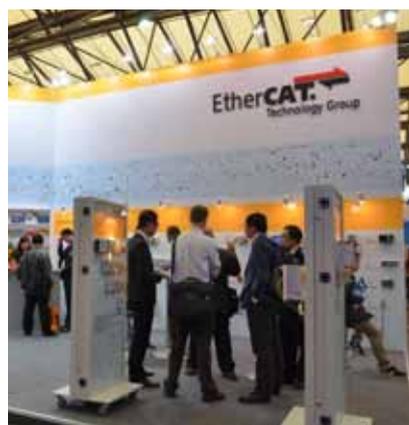


图2: ETG 联合展台。

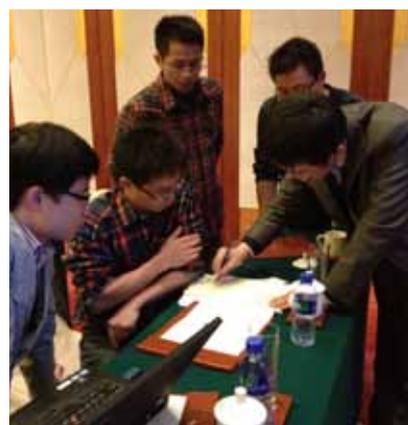


图3: EtherCAT 技术培训。



图4: ETG 中国路演活动。

## ETG 中国区会员



新加坡樟宜机场：EtherCAT 实现 1216 根伺服轴的同时运动

# “雨之舞” ——科技与艺术的完美结合

作者：德国倍福自动化有限公司

新加坡樟宜机场的“雨之舞”可能是世界上最大的动态雕塑。该作品的艺术理念和编舞的算法设计由柏林的 Art+Com AG 公司创作。为了达到热带雨的效果，该作品使用了1216滴闪闪发亮的镀铜铝制雨滴造型。这些“雨滴”通过细钢丝从天花板上悬垂下来，每滴“雨滴”都由一台小型伺服电机驱动。在这个时长为15分钟的表演秀中，“雨滴”形成与飞舞主题相关的不同场景。动力装置专家 MKT AG 公司负责整个“雨之舞”的技术实现，包括软件。基于高性能，高实时性，拓扑结构的灵活性等特点，EtherCAT 技术完美解决了来自 1216 根伺服轴实时同步带来的挑战。



图片来自新加坡樟宜机场集团

图1：该作品由两个相邻的区域组成，共75平方米，有608个“雨滴”造型，这些“雨滴”在7.3米高的空中可以升降自如。

## 新加坡樟宜机场集团

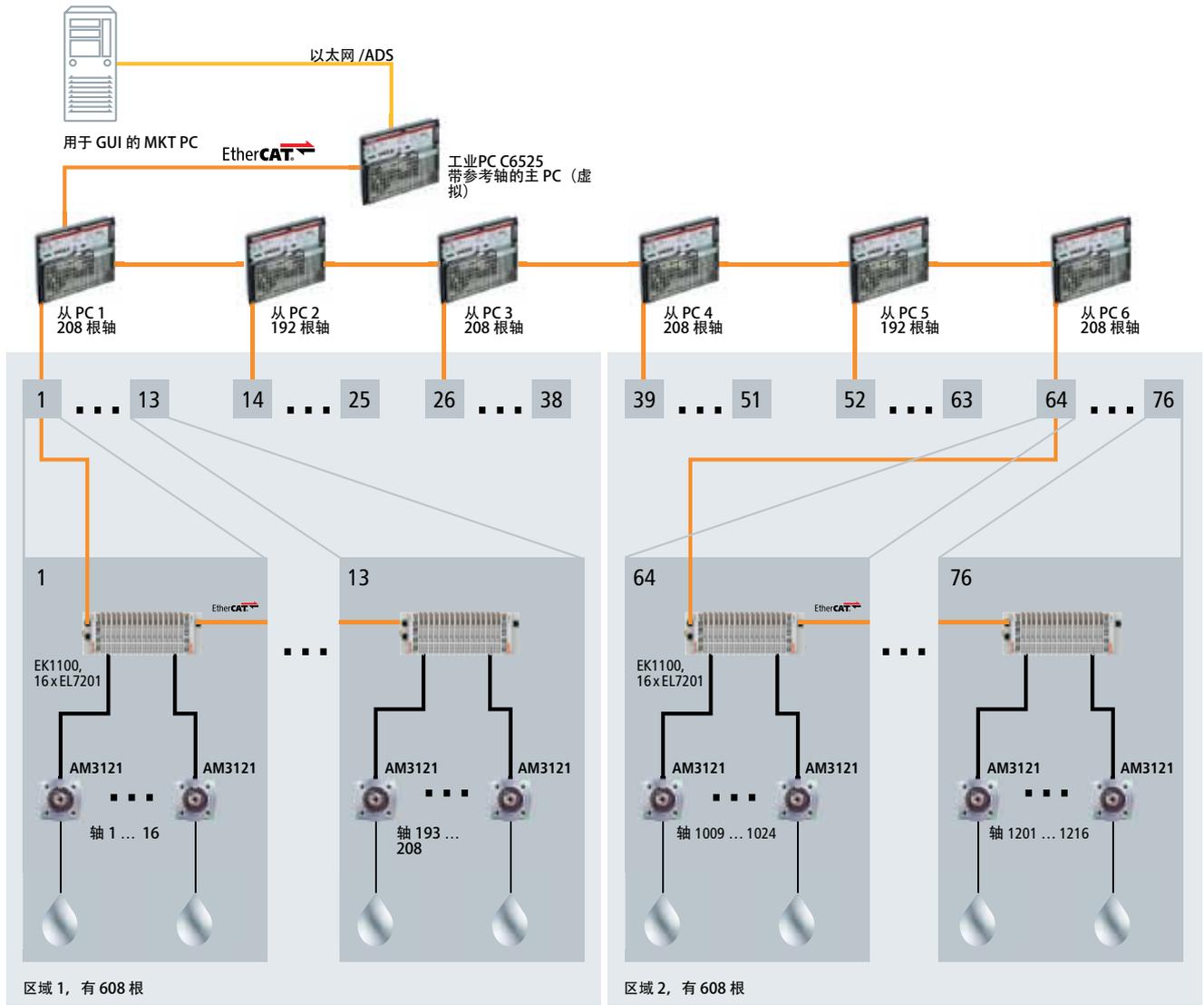
新加坡樟宜机场集团（CAG）成立于2009年6月16日。作为樟宜机场的行政管理公司，新加坡樟宜机场集团主要负责机场的营运和管理、空中交通枢纽功能的不断完善、商业活动和提供紧急服务。2011年，机场的

客流量达4,

600万人次。作为登机大厅现代化的一部分，CAG投资了一副动态雕塑：表现了热带雨效果的作品“雨之舞”是向新加坡这个热带城市的致敬。

新加坡樟宜机场第一航站楼的旅

客和机场访客进入这个现代化的登机大厅时，他们都会因这个动态雕塑“雨之舞”而驻足。“一千多滴‘雨滴’的和谐互动也象征着机场的工作人员，他们日复一日地确保来到樟宜机场的旅客和访客能感到惊喜并对机场留下美好回忆。”樟宜机场集团的



图片来自德国倍福自动化有限公司

图2：运行 TwinCAT NC PTP 自动化软件的 Beckhoff C6525 工业 PC 负责 1216 根轴的中央控制。与 MKT 公司的 GUI 计算机通过 ADS 进行通信。C6525 充当主站并将位置数据分配给六台从站 PC，每台从站 PC 配有 192 或 208 根轴，参考主动轴来确保所有轴的同步性。EtherCAT 实时通信直达驱动器。

机场运营副主任 Yeo Kia Thye 说。

该作品由两个相邻的区域组成，共 75 平方米，有 608 个“雨滴”，这些“雨滴”在 7.3 米高的空中自如升降。这个与众不同的空间布置艺术理念来自柏林的 Art+Com 公司。德国奥而兴（靠近慕尼黑）的 MKT AG 公司负责整个项目和编程的技术实施。专营动力装置的 MKTAG 公司在控制系统的编程和实施期间得到了 Beckhoff 公司（德国倍福）的支持。“在‘雨之舞’中，我们实现了迄今为止该类艺术作品中最尖端的项目，”MKT AG 总监 Axel Haschkamp 说：“本项目花费了 2,000 多工程小时。最具有挑战性的是将重达 30 吨的完全预装设备运输到新加坡。”

由于需要精确驱动 1,216 根轴，所以“雨之舞”对控制的要求非常高。除此之外，项目还要求高度的可用性、组件的紧凑型设计以及组件无需编址即可被轻松更换。“我们的客户，樟宜机场，提出的最重要的要求之一就是系统必须全天候 24 小时运行。即使个别轴出现故障，‘雨之舞’必须继续进行。”同样是 MKT 总监的 Peter Haschkamp 补充说。

### 如何同步控制 1,216 根轴？

“1,216 根轴的同步驱动是本项目的绝对亮点之一，”Beckhoff 慕尼黑办事处的销售人员 Raphik Shahmirian 强调说。Raphik Shahmirian 与 MKT 公司密切合作，参与了“雨之舞”的技术实现。除此之外，还必须满足“雨滴”

在顺序运动中的动力学、精确度和速度方面的高要求。“雨滴”以 1.5 m/s 的速度和 1.4 m/s<sup>2</sup> 的加速度运动。运动必须是充满动态的，但是同时又必须平滑、没有震动。MKT 在带紧凑型伺服驱动技术的基于 PC 和 EtherCAT 的 Beckhoff 控制平台中找到了适合本任务的解决方案。

C6525 工业 PC 作为中央 PC 负责控制。其通过 TwinCAT ADS 与 MKT 的专用 GUI 计算机通信。同时，PC 作为 EtherCAT 主站，并通过 TwinCAT NC PTP 集中控制 1,216 根轴。通过 TwinCAT 凸轮表函数，主 PC 将位置数据分配给六台从 PC，每台从 PC 分配有 192 或 208 根轴，并参考主动轴确保所有轴的同步性。EtherCAT 实时通信直达每一



图片来自 MKT AG 公司

图3: 在 Beckhoff 的产品中, MKT 公司找到了与机场航站楼天花板狭小安装空间完美匹配的紧凑型驱动解决方案: EtherCAT 端子模块, 与其无缝集成安装的伺服端子模块和 AM3121 紧凑型伺服电机。

个轴。

MKT 的 GUI 计算机用于可视化, 用表格的形式以 200 ms 的间隔显示每滴雨滴的位置数据。这相当于每秒五幅图片。可能只有通过 TwinCAT NC PTP 中的插补法才能实现肉眼看到的这种流畅感。这里, 使用 2-ms-NC 任务中的样条算法计算每滴“雨滴”的 100 个中间位置。这些计算在每台分配有本地轴的从 PC 上进行。

只有通过使用 EtherCAT 和 TwinCAT NC PTP 才能实现像 3-D 电影般的雨滴

同步运动的艺术效果。主站保持所有轴相互同步; 从 PC 每 2 ms 计算一次轴的位置并通过 EtherCAT 将轴的位置与伺服驱动器实时通信。

### 宽度仅为 12 mm 的模块化紧凑型伺服驱动单元

每根轴的运动精度在  $\pm 1$  mm, 运动路径总长 7.6 m。两滴“雨滴”间的最大偏差为 0.25 mm。每滴雨滴通过 EtherCAT 伺服电机端子模块 EL7201 和 AM3121 型伺服电机进行控制。“在与 EtherCAT 端子模块排无缝集成的伺服端子模块中, 我们找到了与机场航站楼天花板有限安装空间完美配合的超紧凑型解决方案,” Peter Haschkamp 强调说。此外, 伺服驱动技术也提供了动态优势并实现了流型转变。

### 模块化控制器简化了调试工作

“模块化的控制解决方案和单独轴的简易更换对我们来说很重要。这使得部分调试成为了可能; 比如, 我们能够在软件、硬件和机械装置上并行工作, 这使得我们能在短暂的时间段内完成本项目,” Peter Haschkamp 强调说。有了 TwinCAT NC PTP, 就有可能“调试”整个表演秀, 可像电影一样快进和倒带。这大大地简化了 MKT 的调试工作。如果单独的序列段未能 100% 令人满意, 那么 MKT 的工程师可以不断地重复这个过程。正如 Peter Haschkamp 所强调的一个巨大的优势: “使用其它的解决方案是不可能完成这项任务的, 因为你每次必须从一开始便不断地启动表演秀直到达到你想要的位置, 这非常耗时。”

与过去 MKT 通过分散式硬件控制器实现的类似动态雕塑相比, “雨

之舞”则是通过中央 PC 和软件采用 EtherCAT 通信实现控制的。在早前的控制解决方案中, MKT 将凸轮表函数本地存储在驱动器中, 而现在凸轮表函数则由软件执行。这样, 中央 PC 管理位置数据, 并通过 EtherCAT 将其实时发送到轴。

MKT 选择 Beckhoff 作为合作伙伴的另一个重要原因是因为 Beckhoff 在全球的地位。Beckhoff 不仅能够让来自德国威尔公司总部的专家陪同和支持项目。终端客户还能得到新加坡 Beckhoff 子公司的现场支持和服务。

### 关于 MKT AG 公司

位于德国奥尔兴的 MKT AG 公司从事贸易展览、活动、博物馆和展示厅的独特展品和动态作品的设计、开发和实施, 已有 30 多年的经验。其客户不仅包括艺术和文化事业单位, 而且还包括知名的工业公司和服务供应商。MKT 致力于最先进的技术、互动和严谨的设计。

### 关于 ART+COM 公司

位于德国柏林的 ART+COM AG 在空间设计方面选择了新的道路。与媒体设计师、媒体艺术家、IT 开发人员、技术人员、编程人员、通信和产品设计师、科学家、工程师和项目经理合作, 公司研究了计算机媒体的创造和技术可能性并将其投入到艺术设施的实践中。在翻新新加坡机场第 1 航站楼期间, 新加坡樟宜机场集团委托 ART+COM 设计一套奢华的设施。目标是为登机大厅营造出凸显个性、让人沉思的时刻, 与忙碌的旅行气氛形成对比。



图片来自 MKT AG 公司

图4: 最具有挑战性的是将重达 30 吨的完全预装设备运输到现有建筑中。

# EtherCAT 应用于电子制造业——来自 Assembléon 公司的 iFlex

荷兰的 Assembléon 公司是全球最大的电子工业贴片机制造商之一。Assembléon 公司为电子制造商推出了代表创新、智能、灵活的 SMT 方案——基于 EtherCAT 的 iFlex。

发表于：openautomation Report (www.openautomation.de)



图片来自 Assembléon 公司

图1：用于装配线上多种元器件集成的最佳方案——来自 Assembléon 公司的 iFlex T2。

电子制造工业对于贴片机的需求日益增强，尤其对于多种元器件高度集成的应用。设备制造商 Assembléon 公司研发的新机型 iFlex，可提高这种应用至少 30% 产能。这是因为 Assembléon 公司高效的单检/单贴技术，iFlex 可产出高质量电路板，并保证远小于 10 DPM 的故障检出率，成为业界创造一次通过产品的最高水准。iFlex 内置的灵活性使制造商可

以配置生产任何数量和种类的高性能 PCB 板。iFlex 通过一个专为 iFlex 开发的专用 EtherCAT 控制器进行控制。

### 共同茁壮成长——iFlex 的控制架构

iFlex 设备的理念要求全新的控制架构，公司为此研发了 EtherCAT 专用控制器。其目的是研发一个满足 iFlex 要求的开放的、基于 EtherCAT 的运动控制单元。研发中，在一个复杂的

产品中集成了很多不同的技术，包括 RTOS、EtherCAT 主站和从站、运动控制软件等。

对于该控制理念的实施，Assembléon 与以色列 ACS 公司合作，该公司的特点是运动控制器的控制硬件和软件的研发。通过改进现有控制器，很快实现了专为 iFlex 的控制理念研发的全新控制器 SPiiPlusSC，这是一个创新

的、基于 EtherCAT 的控制平台。

### 幕后——iFlex的内部

iFlex 集成了来自多家提供商提供的 40 个轴和多个 I/O:

- 4 个 XY 机器人，配备强大的直线伺服电机；
- 8 个贴片头（每个机器人 2 个），每个头配备 2 个（低功率）伺服电机；
- 2 个用于 PCB 传输的输送道，该模块中的每个轴都由步进电机驱动。

iFlex 中所有的模块都由不同的电机驱动，因此该系统非常复杂。与贴片头驱动机器人的直线电机或低功率电机不同，低功率的步进电机要求不同的控制硬件。

iFlex 的中央控制器是一台四核 PC。一个 CPU 核用于实时软件运算：包括通信（EtherCAT 主站功能），运动控制任务和轴的同步，以及苛求时间的应用（64 线程）。其他的三个核则用于处理非实时任务。

### 高性能通信——EtherCAT 助力 iFlex

对于 iFlex 中分布式控制硬件和中央控制器之前的通信，则需要一个高速的，可以提供足够带宽的，满足 40 个轴通信的串行网络。Assembléon 决定采用业界领先的，以性能和实时性著称的 EtherCAT 通信网络。

在 iFlex 系统中的驱动器和 EtherCAT

主站的通信是通过 CiA402 驱动设备行规，在 CSP（Continuous Cyclic Position 连续循环位置）运行模式下实现的。采用 EtherCAT 的分布时钟机制实现了整个网络中 40 个轴的同步。

使用 Beckhoff（德国倍福）提供的 EtherCAT 研发工具，可以专为 iFlex 开发 2 个 EtherCAT 从站：一个用于专用传感器的 IO 设备，一个用于贴片头的轴的运动设备（所谓的 DHD），该设备由荷兰 Prodirve 公司研发。DHD 带有两个 CAN 网关，以便集成贴片头系统中的专用视觉传感器。

### 挑战获得成功

因为所有运动，CAN 和 IO 数据到 P D O 的映射，将从站集成到 EtherCAT 网络的工作非常轻松。尽管如此，Assembléon 在集成的时候也遇到过困难，但多亏有 EtherCAT 的强大功能，使其顺利越过障碍。

其中一个挑战就是因为主站不同的硬件和软件的延迟，EtherCAT 报文产生抖动。这导致了在发送给 DHD 新的位置数据时产生延迟，最终使轴运动延迟。EtherCAT 从站控制器（ESC）提供了用于分析所有流程的全部必要数据，方便测算该抖动。因此，Assembléon 公司将测试功能加入到 DHD 中，它以 20 纳秒的精度测试报文末尾到同步中断（SYNCO Interrupt）的时间，并映射到过程数据。据此可

以长时间监测每个 EtherCAT 循环的抖动并随之调整，从而获得稳定可靠的数据交换。

最初，机器在启动和运行时偶尔发生 EtherCAT 帧丢失和 CRC 报错。同样，ESC 的分析数据能够帮助其解决该问题。通过监测链接状态和 CRC 注册，可以监测到出错信息并对其精确定位。由于是不充分的机械链接导致帧丢失，所以通过更换接头和线缆即可轻松解决问题。CRC 报错则是因为干扰，为此可以采用更好的 CAT6 线缆。

### 总结

即便使用 EtherCAT 获得高达 2KHz 的通信周期，也仅使用了其 25% 的带宽资源。这对于 iFlex 控制 40 个轴和 IO 及传感器数据来说，确保在未来同时更新设备所需要的足够资源。

### 关于 Assembléon 公司

Assembléon 公司是电子制造行业全球领先的贴片制造商，为全球市场提供设备的设计和和生产。总部在荷兰 Veldhofen，Assembléon 的销售和支持网络分布世界。该公司由 Royal Philips Electronics 创建。



作者：Rik van der Burg 机器控制经理  
荷兰 Assembléon 公司



图片来源 Assembléon 公司

# KUKA 公司 KR C4 机器人控制器采用高速、高确定性的工业以太网 EtherCAT

在 1996 年 KUKA 机器人公司是全球首个引入基于 Windows PC 机器人控制器的机器人制造商。第一代控制器的成功激励了其广泛采用基于 Windows 的技术及基于 PC 技术，以带来更高的处理器性能。将 IT 产品移植到自动化应用需要高度创新，同时使实现更高性价比成为可能。当新一代机器人控制器计划制定后，除了 Windows 和 PC 以外，显然 KUKA 需要从 IT 界移植另一项成熟技术：基于以太网的、稳定的通信技术。机器人控制通信要求高性能、高速且具有良好的时间确定性的总线系统。因此，在 2010 年，KUKA 采用 EtherCAT 作为其 KR C4 机器人系列控制器的系统总线，通过开放的标准实现顶级的性能。

发表于：openautomation Report (www.openautomation.de)



图片来自 KUKA 机器人公司

图1：在 Meiller 公司电梯门制造的应用中，两台 KUKA 机器人“KUKA KR QUANTEC K”被用于处理所有的生产流程：凸焊、点焊、装卸、冲压、传输和码放准备装配的门扉。

为了在自动化系统中集成机器人，一个标准的现场总线常被用于 IO 层、底层单元及系统层的机器人控制器的通信。通常这样的现场总线由客户选定，而机器人控制必须可以连接到现有工业技术中。

同样在机器人控制器中，不同组件（如何驱动器、位置变送器）之间的数据传输复杂，因此必需实施一种能满足更高实时要求的控制任务。

此外，内部设备必须进行安全技术和控制设施的数据交换。在之前的 KR C4 控制器中，KUKA 采用了多种通信技术，因此必须使用各种不同的接头和线缆。当研发新的 KUKA 控制器时，我们重新审议了继续使用新的基于以太网的技术——满足实时性和安全需求，同时具备 IT 技术特性。以太网具备采用同样一根线缆传输多种不同协议的特点，从而可显著减少系统中采用的线缆数量。

KUKA 的另一个研发目标是减少不同通信技术的数量，并要求现场总线及内部总线尽可能保持一致。同时，尽量避免专利技术，而采用被广泛认可的开放的工业标准。此外，使用配备有智能软件功能的高速现代多核 PC 来取代性能受限的硬件。越少的硬件意味着更高的平均故障间隔时间及更低的开发工作量、更低的单位成本及物流成本。其研发目标是硬件设备减少三分之一，而接头和线缆的成本甚

至可以降低 50%。

## 与现场总线层的通信：软件堆栈还是网关？

由于 PC 中集成了以太网硬件，与 PROFINET 或 EtherNet/IP 这些基于以太网的现场总线的连接在软件中完全得以实现，而无需后期的专用硬件支持。与传统现场总线（如 PROFIBUS 或者 DeviceNet）通过 EtherCAT 通信网关连接，无需接口卡。

## 内部及与传感器，执行器及 IO 的定位通信：以太网和 EtherCAT

除了标准的以太网，完整的内部通信以及与底层 IO 层都通过 EtherCAT 通信。因此，KR C4 机器人控制器在保持之前的总线布局下仅采用 2 种不同的通信协议（线缆、接头和以太网控制芯片）。

机器内部方面，在建立连接或在 RoboTeam 中时间同步多个机器人控制器，亦或连接一个工程笔记本电脑时，则采用标准的以太网来寻址 SmartPad KUKA 控制面板。

除了标准的以太网外，使用 EtherCAT 作为通信技术成为一种必然。这是因为标准的以太网技术并不能满足对实时能力和安全协议的要求。而 EtherCAT 作为一个内部驱动总线，被用于寻址机器人内部的安全设备，以及 SmartPad 中安全相关的控制组件。此外，机器为寻址本地 IO 模块、网关或传统现场总线集成了一个 EtherCAT 主站接口。

## 为何选用 EtherCAT？

与其他实时性以太网技术相比，选用 EtherCAT 作为实时性和安全通信技术的原因是 EtherCAT 有更多优势支持 KUKA 实现研发目标。EtherCAT 不需要特殊的主站硬件，仅从站端需要。在主站，一个标准的以太网控制器即可完全满足硬件要求，对 KR C4 来说很多主站都是在 PC 中实施的。此外，线缆和接头也是标准的以太网。

EtherCAT 独特的“on the fly”的数据处理方式（帧进行飞速传输的同时，从站进行数据处理）可以实现大数据吞吐量并使以太网数据有效率接近 100%。因此，这就可以将原来在硬件设备中实现的很多功能转移到控制 PC 的软件中实现。

EtherCAT 的安全协议 Safety over EtherCAT (FSoE) 可以通过 EtherCAT 或以太网进行通信。KR C4 的基于 PC 的中央安全控制器也运行在专用的软件中，与所有安全相关的设备（如本地安全模块及 SmartPad 的）

除了 PROFINET 和 EtherNet/IP 现场总线外，EtherCAT 是全球接受最广泛的工业以太网通信技术，且 EtherCAT 拥有最大的供应商和用户组织。市场上众多的 EtherCAT 从站设备可满足多种不同的新工业方案。而另一个优势是：从最初发布时至今，EtherCAT 标准、协议和 ASIC 芯片从未被改变，从而保持了非常好的稳定性。

国际组织 EtherCAT 技术协会宣传、支持和推广 EtherCAT 技术。

2010 年采用了 EtherCAT 的 KUKA 控制器成功实现了在所有机器人中的应用。除了 KR C4 机器人控制器外，新的 KR AGILUS 机器人和 LBR iiwa 轻型机器人配备的紧凑型控制器也基于 EtherCAT 技术实现。总之，在 KUKA 机器人控制器计划中，仍将集成 EtherCAT 作为一项基础技术实施。



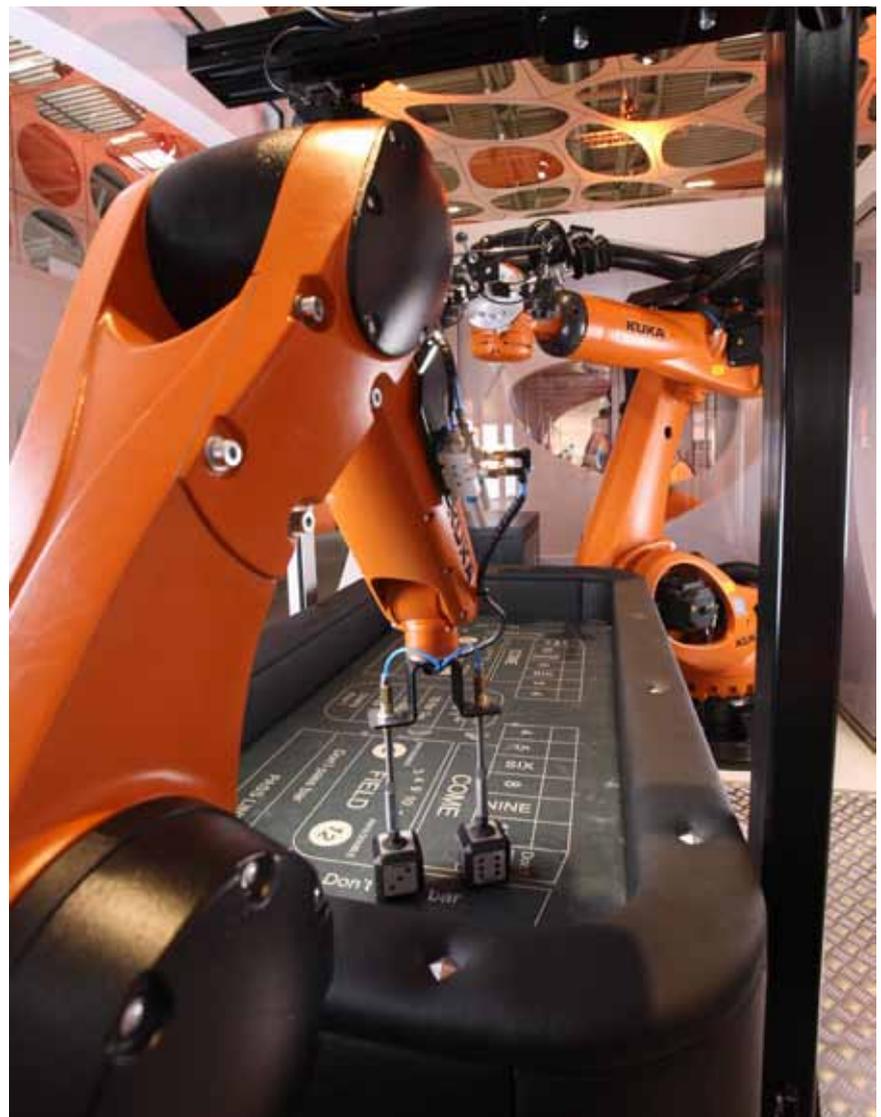
作者：Bernd Fiebiger, 高级研发系统工程师

德国 KUKA 机器人公司



作者：Heinrich Munz, 高级研发系统工程师

德国 KUKA 机器人公司



图片来自 KUKA 机器人公司

图2：全面集成视觉系统的“KUKA.VisionTech”机器人也可被灵活安装在非结构环境中。

# EtherCAT 以出众的性能完胜机器人复杂性

来自英国领先的机器人公司 Shadow 机器人采用 EtherCAT 解决了很多问题，并实现了一个功能强大、开放的方案、用于实施真正创新的应用。

发表于：openautomation Report (www.openautomation.de)



图1: Dexterous 机器人手集成了多达 129 个传感器。

英国 Shadow Robot 公司拥有很多高端产品，包括 Dexterous 机器人手，这是一台拟人操作机器人手，带有 20 个自由度，机器人手采用了 129 个传感器来提供细节遥测，从而生成操作控制系统或提供细节的外部环境情况。

同每个关节的位置感一样，该机器人手带有对每个执行器的力感、指尖触感、温度和电机电流，以及电压感。所有从 100Hz 到 1kHz 的数据通过一个高带宽的 EtherCAT 接口对用户开放。该机器人手提供给用户独特的功能：包括接近人手的功能并可以作为替代人手的电子操作工具使用，也可以被集成到机器人的系统中。

EtherCAT 的实施使我们改变了机器人的设计、研发和性能，这也正是 Shadow 公司为最新的正在积极商业化的 RoNex 方案所寻找的技术。RoNex 是一个基于 EtherCAT 芯片组的“机器人神经系统”，能提供高速、低延迟的模块化方法将执行器、传感器及 I2C 和 SPI 总线连接到 ROS（机器人操作系统）软件控制系统。同时，RoNex 将现代计算机应用到了传感器执行器领域。

Shadow 公司总经理 Rich Walker 阐述了板上元器件的历史：“在 10 到 15 年前，我们决定采用分布式电子器件，并需要一种可以支持我们设想的那种性能的通信系统。最初我们的设计采用了 CANbus，这种技术使用简单，可扩展且实现了我们需要的分布式架构。然而，它仍有缺点。在 CANbus 达到其性能极限时，对布局和时间非常敏感。当速度达到极限时，就开始遇到与 PC 连接的问题，并且

图片来自 Shadow 机器人公司

需要在分布各处的硬件中嵌入控制软件，导致了长时间的循环周期等各种问题。”

“我们需要一个更快、更可靠稳定的网络架构”，Walker 解释说，“这种需求引导我们走向 EtherCAT。美国的一家机器人领导企业 Willow Garage 采用 EtherCAT 开发了开放的机器人操作系统 ROS，我们希望自己的设备也与其兼容。我们在 ROS 的研究也导向 EtherCAT，如他们所说，这是一个历史必然。”

他继续说道：“因为 EtherCAT 的通信是在两个芯片中的，因此建立这种通信非常简单。更快的速度、时间确定性、可扩展且拓扑选择无限都非常符合我们的需求。这成为一个很棒的方案。我们可以从主站控制它，它提供了更好的性能和至关重要的时间确定性通信。数据的有效使用率也超过了 CANbus，因此可以连接更多的节点且性能不受限。我们开始研发新的硬件并将 Dextrous 机器人手改用 EtherCAT 通信；随即就看到了在速度和控制方面的改善。”

Shadow 公司也参与很多研发项目，其中包括 STIFF-FLOP（坚固、可控、灵活且可学习的外科手术操作器）。由伦敦大学国王学院牵头，作为欧洲第七个框架项目，有 12 个合作伙伴参与，研究将机器人应用到医疗过程中。“在该项目中，我们

的角色是集成工作，” Walker 告诉我们，“12 个合作伙伴的输出将被一个适宜的控制方案集成在一起。我们从第一天起设计项目时就考虑了集成功能，因此在研发最初就设计一种可以集成硬件和软件的方法。在面对各种不同的且有效的互联，数量众多的 IO 时，我们需要考虑可扩展性、通信和速度。简而言之，我们需要一个通用的机器人架构。”

“Willow Garage 已经研发了 ROS 且将引入了一个非常好的机器人架构，”他详尽阐述道，“他们还软件建立了一个分布式设施，并创建了对所有兼容性软件系统的穹顶，系统可以在 Ubuntu（Linux 的一个版本）上运行。在这个项目中，我们研发了一个 EtherCAT 方案，所有的硬件可以集成到 ROS 中。”

“我们意识到需要一个方案可以使底层的设备与 ROS 通信，” Walker 解释说，“虽应建立一个底层系统，但实施并不容易。ROS 的底层需要很长时间与硬件通信。因此我们做的就是发现问题并解决它。我们曾设计一个 EtherCAT 系统，可以将所有的硬件分布式布局同时全部插入到 ROS 系统中。该方案采用在 EtherCAT 中的例行配置功能寻找每一个硬件——基本上是 EtherCAT 帮我们和合作伙伴完成了所有的硬件工作。”

基于 EtherCAT 的 RoNeX 模式的

例行配置功能就如同一个即插即用的 USB 鼠标。“你的 PC 识别了鼠标及其基本功能，但是还需点击鼠标。RoNeX 识别组件为一个电机，提供基本的功能，并允许用户稍后调整其他参数。”

RoNeX 采用一个标准的 Beckhoff（德国倍福）EtherCAT 芯片，可链接任何需要 IO 的微处理器系统。“该架构足够灵活，我们可以采用同样的模块为机器人设计创建多个不同的 IO 节点。这些模块包括直线电机、步进电机、精确的模拟量和数字量 IO，或者是用户需求的放置在执行器端的专用组合。”

“通过 EtherCAT 实现的分布式元器件方案在 EMI 方面也更有优势，” Walker 耐心解释道，“这是因为更少的布线工作。当告诉那些使用了 ROS 的用户我们基于 RoNeX 和 EtherCAT 所做的工作时，他们通常问‘我们何时可以使用？’我们还开发了可以轻松使用在无电子组件的人工方案；机械工程师确实可以采用 RoNeX 作为项目开发最初阶段的辅助。”

Shadow 公司是技术前沿的最好代表，他们需要与机器人方案提供的功能所匹配的网络性能。采用 EtherCAT 研发 RoNeX，Shadow 公司成功研发了一套简化设计和研发工作的系统，同时提供了令人难以置信的操作性能。EtherCAT 的数据利用率、确定性及灵活的拓扑，加之其可提供很多工业标准控制器的接口，使其成为高速、高精度，面向未来的应用方案。

### 关于 Shadow 机器人公司

创立于 1987 年并组建于 1997 年，Shadow 机器人公司专注于研发前沿机器人。此后该公司的 20 名研发和生产工程师为其带来欣欣向荣的商机，公司在伦敦、布雷斯特及上海设立分支机构并在全球销售。公司也是技术实现者，开发新的理念并为客户或研究院所实现其理念，同时还提供商业创立和支持服务。



作者：Mark Fletcher  
自由编辑/媒体顾问



图2：RoNeX 组板集成了 RJ45 接头。

图片来自 Shadow 机器人公司

# 半导体设备制造商的完美控制网络

每个网络有限的节点数量、较低的波特率、受限的 I/O 性能、低带宽、非确定性的命令和 I/O 时间——10 年前的半导体工业就已经面对这样一种挑战，并寻找一种能满足之前的控制系统要求的新的通信系统。

发表于：openautomation Report (www.openautomation.de)

### 介绍

2003 年春天，我受邀参加一个新的网络技术的介绍会，而我和我的同事对于该技术知之甚少。那就是 EtherCAT 技术——由一家德国公司 Beckhoff（德国倍福）研发的基于以太网的网络技术。年轻而充满活力的讲演者就是后来倍福的技术市场总监 Martin Rostan 先生。该技术很可能是下一代半导体设备高端过程控制的最好的候选技术，因此吸引了我的眼球。

很多年来半导体设备制造商或采用基于微处理器的控制器直连 I/O 的方式，或采用工业通信网络（如，LonWorks, Seriplex, DeviceNet, SDS 或者其他基于 CAN 的网络）实现过程控制。这些方式的弊端逐渐显现：每个网络有限的节点数量、较低的波特率、受限的 I/O 性能、低带宽、非确定性的命令和 I/O 时间。除了过程控制面临的挑战，设备上应用的多种运动控制方案也面临问题。典型的运动轴的性能区间从低性能步进电机驱动轴到真空机器人的高动态伺服轴。很多应用要求多轴之间以及轴与系统中的控制信号间协同工作。当市场上很多定制的运动方案和 I/O 方案都因普遍应用而方便采购时，这种控制器和运动控制软件却非常昂贵。对于运动控制提供商来说，将每个运动控制软件的授权费用按照轴数销售是不可能的。

### EtherCAT——适用于半导体工业的技术

EtherCAT 技术架构大有前景。但是，在 2003 年的介绍会上，讲演团队收到了来自听众的诸多问题和疑虑。当时该技术还处于婴儿期，很低的市场接受率及有限的应用经验。介绍会上充斥着各种提问：可靠性和 EMI 数据如何？有没有像 ODVA 的 SEMI SiG 那样的设备行规？有没有设备交互性的保障？现场

的问题多于答案。然而，在持续的几周内，我们对该技术进行了更详细的评估。坚固的技术架构，高速的通信，理论上无限的 I/O 空间，对运动控制的支持和智能设备要求的时间确定性的命令和响应——该单一协议满足了所有的需求。我的团队为此感到兴奋，我们认为终于找到了一个非常可靠的备选技术，来满足半导体设备的过程控制中隐约出现的高端需求。也许这个技术甚至可以在未来用于高端的过程和运动控制。基于对该技术的详尽评估，应用材料公司决定签署一份成为 EtherCAT 技术协会创始会员的

协议，全力支持 EtherCAT 技术的研发并给予该技术生根发芽发挥潜力的机会。

### 技术和经济方面的挑战

技术推广的势头迅猛。EtherCAT 作为 TwinCAT PLC 软件包的扩展被全球诸多客户和行业评估并接受。久而久之，随着逐年越来越多的设备实施了 EtherCAT 接口，该技术获得了成熟且具有良好基础的自动化方案的所有必要特征。同时，在半导体工业界降低设备成本的压力越来越大。设备不



图1：得益于 EtherCAT 技术的半导体晶圆处理系统

图片来自应用材料公司

仅要求更快的速度和更高的精确度，而且还要求尽可能低的成本。多个运动控制器，软件授权，每个 I/O 点的成本，网络拓扑结构和互联成本都成为寻找一种更高的解决方案所关注的细节问题。

通常，旧技术受限于在传统的控制方案和构架的基础上降低成本。摩尔定律主导半导体工业。半导体晶圆上的单元的最为微小的尺寸缩小都会对过程控制产生更加严格的要求。对虚拟传感器，基于模块的控制，高速过程控制的原型机制造是现今高端应用的实际而基础的需求。所以半导体设备应用迎来了第一个可以使用这个新网络控制技术并得益于此的机会。我们选用一个太阳能晶圆制造设备作为尝试 EtherCAT 的第一个设备。我们获得了很积极的结果：高可靠性的网络和快速刷新时间。出色的网络时间确定性对系统循环时间和整个的数据吞吐量有很大帮助。由客户跟踪的主要系统参数显示的性能指标都远远好于预期。几乎同时，EtherCAT 技术被认可为 SEMI E54 标准网络。这为该技术在半导体行业的发展开辟了道路。

### 全球认可的标准

为了使 EtherCAT 技术稳固立足于晶圆制造设备领域，为过程控制专用设备 and 组件（如，射频发生器、真空控制器、节流阀、压力计量仪、智能直流电源、流量控制器等）创建设备行规是基本需求。建立这样的设备行规并获得工业界广泛认可将有效促进设备提供商和设备 OEM 厂商更加轻松的合作，并确保来自不同厂商的设备的互联性。同时该行规也将支持在软件中所谓的 HAL (Hardware Abstraction Layer) 样本，该样本是一种在设备控制软件中简化处理设备 and 组件的方法。应用材料公司作为最大的半导体设备领导厂商，帮助在 ETG 内部组件了一个专门的工作组——SEMI TWG (半导体技术工作组)，由专家 Dan Judd 领导。SEMI 工作组的会议取得了巨大成功，来自于行业主流供应商和 OEM 厂商的 70 个代表出席了会议。在短短的两年内，SEMI 工作组从一个仅为半导体设备创建通用设备行规的工作组，发展成为创建并向 ETG 提交基于该行业需求的任何专用设备行规的工作组。

基于 SEMI 工作组的努力，越来越

越多的半导体设备提供商积极接受了 EtherCAT 网络。来自于美国、日本、东南亚和欧洲的代表努力撰写设备行规并催促其供应商设计设备。之前我提到过运动控制应用对半导体设备至关重要。对于最终用户的主要不同就是晶圆定位的精确度和精准的重复性、震动和晶圆滑动控制（粒子控制）、设备晶圆产量等。设备中有多种运动控制方案——真空和大气机器人、XY 或 XYZ 平台、顶杆、指数测定仪、晶圆定向平台、晶圆扫描机械装置。这些方案曾经分为低端和高端两种独立的运动控制，各采用不同的运动控制方案有效实施。低端的方案采用基本网络的运动驱动，通过低速的、不确定性网络（10-50 ms 的周期）实现。而高端方案则需要驱动带有动态和运动学的复杂机器人，采用高性能的闭环伺服驱动器（几千赫）实现。每个网络都采用运动架构，以及为专用网络采用具有最佳性价比的控制器/伺服器，但这样的性能或不能满足要求，或跨网的成本过高。然而，EtherCAT 具有很好的可扩展性，高速传输，因此可以采用一个 EtherCAT 网络高效实现这两种不同的方案。此外，可以轻松将超采样 I/O 及其他设备添加到运动控制网络，以完全协同或同步运动控制及过程控制，且成本合理。例如，有些现场应用利用分布时钟功能在 1 微秒内成功同步运动轴和 I/O 点的传输。

### 适应未来

半导体晶圆制造流程的复杂性随着摩尔定律而稳步增加。晶圆的尺寸也从多年前的 51 mm 增加到不久前提出的 450mm，从而更经济的利用晶圆规格生产芯片。下一代晶圆的最小单元结构的尺寸将为 7nm 技术节点 (technology node)，更大尺寸的晶圆将对同一性和过程控制的精确性有更高要求。半导体设备 OEM 厂商在积极地研发更加复杂的过程控制技术——多区加热，多区气体注入，采用虚拟的合成传感器基于模型的控制也是行业感兴趣的议题之一。这些复杂的过程控制将大大获益于 EtherCAT 技术。

EtherCAT 的架构提供了现代多核 PC 架构的大数据量处理性能的最佳融合。此外，高性能时间确定的控制和网络的确定性架构在久经考验的以太网技术之上，且成本合理。半导

体设备提供商成功的另一个至关重要的标准就是应用投放到市场所需的时间。应用和过程的证实以及最佳方法研发的周期成为设备供应商在市场上成功或者失败的要害。在研发设备和过程的早期，快速的原型机实现工具和建模软件包变得越来越受欢迎。过去对原型机软件的应用受限于原型机代码到生产环境的低效转换。另一个受限因素就是对前文提到过的对专用网络和专用的半导体设备的支持欠缺。幸运的是，工业界对 EtherCAT 的需求完全一致并由主流的建模和快速原型机方案提供商支持。主流厂商如国家仪器、Mathworks 和德国倍福 (Beckhoff) 都提供基于 EtherCAT 的方案：CompactRIO、xPC Target 和 TwinCAT/Simulink。这些基于 EtherCAT 且可扩展的环境都可应用在控制逻辑的快速研发以及后续的无缝实时代码自动生成，或在本地软件环境中的应用生产研发。在这些应用中，对 EtherCAT 的支持方便了过程和应用研发工程师通过 EtherCAT 网络采用自己的命令和组态接口集成运动、压力、温度和 IO 控制器，这些命令和组态接口在之后将应用于生产环境中。

### 结论

作为总结，我想说，如同其他领先的技术，EtherCAT 将会持续研发，以面对未来可能出现的挑战（如 100Mb 以太网芯片的终结，相关兼容性问题等）。然而，在我看来，除了一些特殊的必须采用专门 DSP 或 FPGA 处理的应用以外，EtherCAT 技术的性能完全可以胜任我们其他所有的应用。

### 关于应用材料公司

应用材料公司是全球领先的为半导体、平板显示器和太阳能光伏工业提供制造方案的公司。它的技术实现了很多创新：如智能手机，更加经济且民用化平板显示 TV 和太阳能板。



作者：  
Dmitry Dzilno 应用控制工程，高级总监  
美国 Santa Clara 市应用材料公司

# EtherCAT 助力沈阳机床 实现 i5 智能数控机床

作者：EtherCAT 技术协会

沈阳机床，中国最大的数控机床生产厂商，选择 EtherCAT 作为其最新的 i5 智能数控机床控制平台的内部总线，并在其数控系统、伺服驱动器和 IO 设备上全面实施了 EtherCAT 主站和 EtherCAT 从站。

## 沈阳机床

沈阳机床（集团）有限公司拥有中国规模最大的综合性机床制造厂和国家级数控机床开发制造基地，其工艺手段、装备实力达到国际先进水平，主导产品 300 多种，规格千余种，市场覆盖全国，并出口 80 多个国家和地区，机床产销量多年来始终居国内同行业首位。

沈阳机床（集团）设计研究院有限公司上海分公司（以下简称上海研究院是）沈阳机床（集团）有限公司的子公司。自 2007 年成立以来，上海研究院一直在运动控制及云制造领域进行探索设计和大胆创新，致力于面向机床行业的运动控制技术 & 云制造技术的产品研发和技术储备，为客户及相关行业带来切实的利益和创新的动力。

迄今为止，上海研究院针对沈阳机床集团所涵盖的业务领域内研发了一系列的产品，包括数控系统、HSHA 系列伺服驱动器及 WIS 车间信息系统等产品。



图片来自沈阳机床

图1: i5 智能数控机床。

## i5 智能数控机床采用 EtherCAT 通信

在中国数控机床展（CCMT）2014 上，沈阳机床自主研发的 i5 智能数控机床整体亮相，具有特征编程、图形诊断、机床实时监控、远程诊断、三维仿真、STEP 编程等智能化功能，能够更好满足市场的发展需求，为用户提供个性化的解决方案。预计“十二五”规划末期，i5 智能机床

数控机床将实现订单 1 万台。

i5 实现了 5 大功能：Industry、Information、Internet、Integrate、Intelligent，即工业化、信息化、网络化、智能化、集成化的有效集成。

i5 控制平台由三类设备组成：NC 控制器，HSHA 系列伺服驱动器

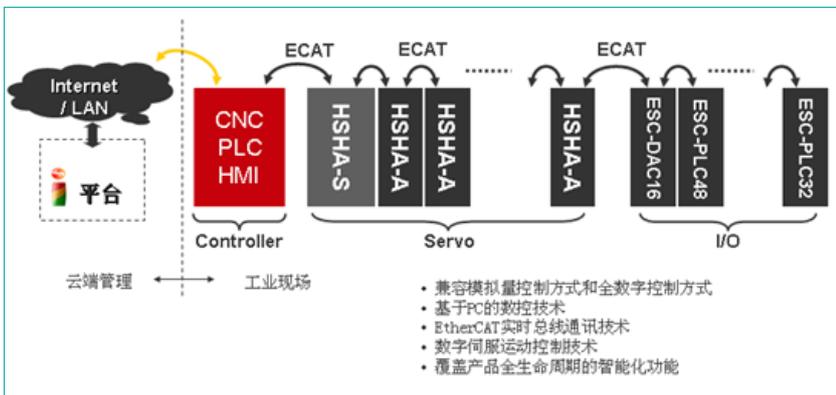


图2: i5 平台架构图。注：在此图中 EtherCAT 缩写为 ECAT。

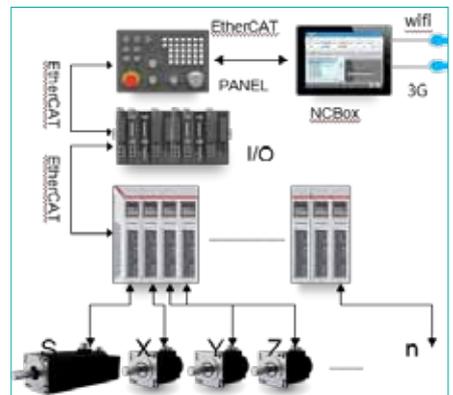


图3: i5 机床的数控系统架构。

图片来自沈阳机床

图片来自沈阳机床

和 I/O 设备，沈阳机床上海研究院负责整个控制平台的研发和实施。

i5 控制平台采用基于 PC 的理念，并搭载了由德国倍福（Beckhoff）研发开放的先进的实时工业以太网技术 EtherCAT（Ethernet for Control Automation Technology），使用 EtherCAT 通信总线建立了数控系统与外部伺服驱动器，IO 和操作面板之间的高速实时数据交换通信。i5 数控系统使用公司自主开发的使用 EtherCAT 通信的高性能伺服驱动器和通用 IO 操作单元，以全部国产化的价格为用户提供高档总线式控制解决方案。

### 为何选用 EtherCAT？

除了设备本身功能的实施，在研发初期，沈阳机床上海研究院对总线选择做出了预言和评估。因为 i5 平台要求通过以太网进行云端管理，而基于以太网技术的物理层使得车间信息化的成本变得可以接受，现场设备间的互联变得很简单。因此，将目标锁定了工业以太网的通信技术。

而对于 i5 来说，虽然数控算法是最核心的技术。但是因为设计高端运动控制，因此对总线的要求也甚为苛刻。快速的传输时间，更高的同步性是对总线最核心的要求。沈阳机床对此的要求主要体现在同步性方面，因为基础的过程数据对通信要求尽可能高的同步性和更低的延迟性能，从而足以满足基本大类的数控机床运动控制和过程控制的需求，无需担心总线性能会对数控造成的影响。而 EtherCAT 除了众所周知的“on the fly”通信机制获得的几乎最快的通信时间外，其分布式时钟机制可以为所有的从站提供抖动约 50ns 的同步硬件时钟，从而保证多轴轨迹插补控制时各进给轴动作的一致性，大大降低了加工的轮廓误差；而且，从站支持同步输出的特性，简化了实时从站的电路设计和代码编写，加快了开发速度，缩短了产品上市时间。该机制直接集成在协议中，方便实施和应用。

因为 i5 中有很多算法的 know how 开发，而 EtherCAT 支持的邮箱协议使得面向复杂应用和互联的高级功能开发的过程变得相对容易，使用 EtherCAT 邮箱通信可以随时传输伺服驱动器的所有参数，并且支持标准



图4：i5 的数控面板——EtherCAT 主站。



图5：HSHA 系列伺服驱动器——EtherCAT 从站。

Ethernet 数据帧的传输，实现标准 IT 的应用，便于与上层管理软件的集成。

与其他很多正在升级的行业一样，数控系统供应商在研发可以提供高性能加工的功能的同时，还希望能降低研发成本。EtherCAT 通信不需要交换机、路由器等有源基础设施组件，也不需要复杂的 IT 知识。在数控系统上无需专用的昂贵的通信卡，而只需要一个标准的以太网端口即可实现数据通信。而在外部设备从站上只需要价格低廉的 ASIC 芯片，或者可以把实现 EtherCAT 从站链路层的 IP 核集成到本来也需要的 FPGA 上。i5 数控系统为了综合低的成本和开发的方便，在伺服驱动器上使用了倍福公司的 ASIC 芯片，而在 IO 操作站上使用了 FPGA IP 核；使其在使用 EtherCAT 技术后，几乎没有增加任何硬件成本，性能就得以大大提升。

面对复杂的数控系统使用现场，用户对于设备现场可使用性的要求非常高——高精灵活加工；极高效；极可靠。而 EtherCAT 完全满足了这些要求：使用 EtherCAT 通信替代传统的模

拟量控制方式，取消了模拟量受到干扰和衰减的现象，极大提高了数控系统的可靠性。尤其在中国目前的工厂条件下，用户要求设备应用现场对环境温湿度容限极高，中国南方夏季高温高湿环境下无环控可直接运行；生产现场对电源/电磁环境无需额外提供任何保障。

### 总结

EtherCAT 为机床的最终用户带来的最终效益显而易见，这是沈阳机床源于采用基于 PC 和 EtherCAT 控制方式所获益的：

#### 机床性能的提升从而节约时间：

可以将插补周期从 4ms 缩短到 0.5ms，大大提高了数控系统的加工速度和精度；快速的通信系统也使得数控系统的 PLC 响应时间缩短为原来的十分之一，提高了外部设备的响应性，缩短了加工时间；

**降低生产的时间和成本：**传统的模拟量控制方式下，每个伺服驱动器都需要由数控系统发出模拟量控制信号，并反馈编码器信号，这就需要在数控系统上为每个伺服驱动器设置一个接线端子和相应的电缆。由于电缆都不是标准定义的，因此需要生产厂家投入大量的人力物力进行生产。而现在从数控系统到伺服系统和其他外设都使用标准的以太网线缆，可以直接从专业厂家采购，降低了生产时间和成本；

**机床使用方便：**EtherCAT 灵活方便灵活的拓扑结构，易于配置和诊断。一个 EtherCAT 网络最多可支持 65,535 个设备，而不受在拓扑结构中放置位置的限制，可以很方便地连接 i5 数控系统需要的伺服驱动器、IO 操作单元、操作面板、光栅尺、编码器、各种传感器等，使其真正成为“智能的大脑”。从站设备也不需要专门的拨码开关进行地址配置，协议诊断可以定位到出错的设备。



图6：I/O 设备——EtherCAT 从站。

# EtherCAT 控制先进的数控转塔冲床

作者：德国倍福自动化有限公司



图片来自江苏金方圆数控机床有限公司

图1：用于金属加工的 DMT-200 型双电伺服数控转塔冲床，由于采用了 Beckhoff TwinCAT CNC，整个 CNC 应用都用软件实现，设备效率提高了 20%。

全新的 DMT-200 型双电伺服数控转塔冲床是倍福中国与江苏金方圆数控机床有限公司的又一个成功的合作开发的范例。金方圆首次决定在这台设备上使用纯软件 CNC 控制解决方案。与先前使用的解决方案相比，使用 EtherCAT 和 TwinCAT CNC 后，DMT 冲床的加工性能提升了将近 20%。

江苏金方圆数控机床有限公司坐落于中国历史文化名城扬州，是国内最大的数控产品生产厂家，除了转塔冲床之外，其产品线还涵盖了数控折弯机、数控激光切割机及成套金属板材加工机械。金方圆数控转塔冲床主要分为 ET、VT 和 DMT 三个系列，这三个系列的最大的区别在于冲压头的不同，其它 CNC 轴控制和定位操作基本一致。ET 使用气动冲头，VT 使用传统的液压冲头，而 DMT 则使用最节能的伺服电机来带动冲头动作。

## 通用的 PC 控制平台

每台冲床都配备了一台功能强

大的 Beckhoff C6640 工业 PC、CP6902 触摸屏式操作面板、TwinCAT 自动化软件、EtherCAT I/O 和 the AX5000 系列 EtherCAT 伺服驱动器。“我们给 DMT 配备了 TwinCAT CNC 软件，它的加工速度超过了此前的任何一台金方圆的数控机床。”金方圆的 DMT 项目经理李强如此说道。目前 DMT-200 机型 25 mm 步距的冲压速度达

到 500 次/分钟，冲压力达到 50 吨。

金方圆使用 Beckhoff 基于 PC 的控制技术已经有多年历史，DMT-200 CNC 转塔冲床目前使用的 CNC 控制器也是首次完全基于 TwinCAT CNC 软件。DMT 的加工步骤全部由 CNC 的 G 代码来描述。TwinCAT CNC 包括 PLC、运动控制和 CNC 控制，应用于冲激复合生产线



图片来自江苏金方圆数控机床有限公司

图2：除了转塔冲床之外，江苏金方圆的产品还涵盖了数控折弯机、数控激光切割机以及成套金属板材加工机械。

以及上下料物流设备等。得益于 PC 的高性能，所有自动化功能都可以使用一台 PC 上实现。从而大大简化了主控部分的硬件配置，节约空间，降低系统成本。

“由于 PC 控制系统具有良好的开放性，使得我们的设备开发商能够把自己特有的工艺经验融入到控制系统中。因此，我们能够为我们的设备打造个性化的软件和设备，提高市场竞争能力。”项目经理李强解释说道。

## 灵活自如的操作界面

TwinCAT TcHmiPro 是 Beckhoff 为人机操作界面提供的一个基于 .NET 的开放式平台。操作界面由 C# 语言编写，非常完美地将 ADS 通信、自动化功能、手动操作、配方管理和变量监控整合到一个平台中。金方圆还对其 HMI 界面进行了扩展，添加了加工图形模拟、刀具数据库和冲孔实时显示等功能。

## EtherCAT 显著提升设备效率

“Beckhoff 凭借其控制系统的

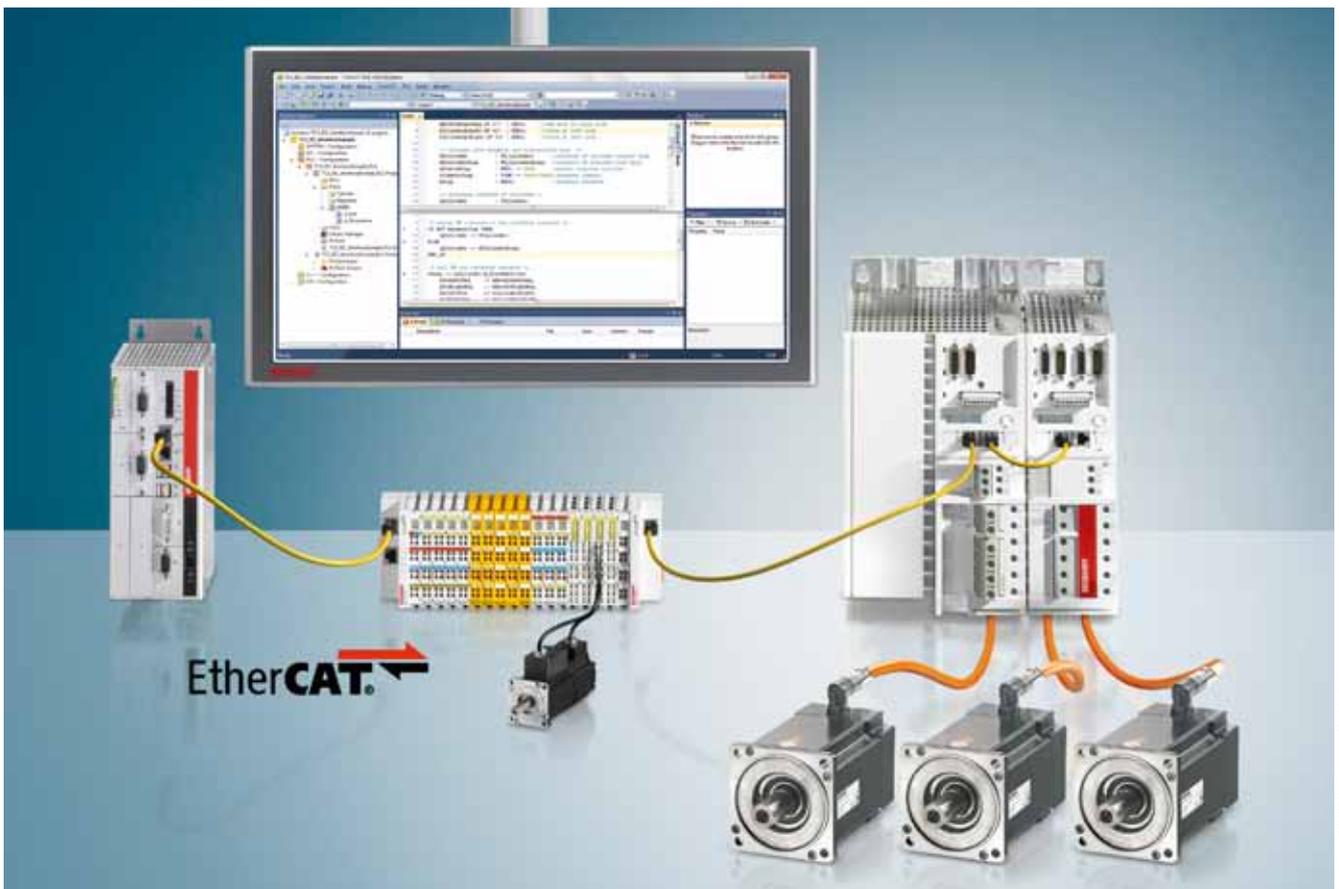


图片来自江苏金方圆数控机床有限公司

图3: 适合控制柜安装的 Beckhoff 触摸屏式控制面板 CP6902 可以方便地操作和监控转塔冲床。

开放性、易用性及可以根据我们的需要开发 CNC 内核赢得了我们的信任。”金方圆 DMT 项目软件开发工程师杨慧宇说道：“正因为 EtherCAT 和 TwinCAT CNC 的使用以及为客户定制开发内核的能力，使得 DMT 冲床的加工效率同我们之前使用的解决方案相比提高了 20%。”TwinCAT

系统支持所有的主流总线协议，如 EtherCAT、SERCOS、CANopen 等等。“这种开放的总线系统使得 DMT 能够非常方便地与整个生产线上的其它设备通信，为客户在以后建立柔性生产线提供了非常方便的支持。”杨慧宇继续解释道。



图片来自江苏金方圆数控机床有限公司

图4: 金方圆数控机床采用了 Beckhoff 公司全系列 EtherCAT 控制系统。