

高级机械工程

机械制造行业转型

2020 年 9 月

CIMdata, Inc.
3909 Research Park Drive
Ann Arbor, MI 48108
+1 734.668.9922
www.CIMdata.com

CIMdata[®]

高级机械工程

随着机械变得越来越复杂，机械设备制造商往往难以满足客户对成本、质量、时间和功能的要求。机械应用涵盖从机床和工业生产设备到食品加工、材料加工和运输、机器人技术等众多行业。设计这些复杂设备涉及的领域之广增加了机械的复杂性：机械、液压、气动、电气、电子和软件；领域之间的交互；以及机械制造商为满足客户需求而采用的各种业务模式：按库存生产 (BTS)、按订单配置 (CTO) 和按订单设计 (ETO)。

要在整个生命周期内为产品提供完全支持，需要一个数字线程来连接从概念到退役阶段的整个生命周期中的数据。随着复杂性的增加，情况尤其如此；确保正确配置数据并保证数据完整性。凭借清晰、简洁和有效的数据，产品模拟和虚拟调试等高级业务流程可以在产品制造之前对其进行验证，从而降低物理调试带来的成本和风险，并提高机械制造商和客户的盈利能力。

简介

当今产品令人惊叹。现如今，产品的多样性、便利性、性能和成本水平都是 20 年前不可想象的，它们能以实惠的价格提供更多有用的功能。用于制造当今消费品的工业机械越发复杂，在很多方面也越发灵活多变，这为消费品的选择多样性和各种功能提供了支持。随着需求的变化，为工厂提供机械设备的公司面临的挑战变得更加复杂。¹

购买工业机械的公司在不断投入并期望获得回报。为了获得回报，他们运行的机械需要以较高的速度、质量和正常运行时间水平生产产品。为了满足这些期望和要求，工业机器正变得越来越复杂，它们会包含更多的电子和软件元素。通常使用多种业务模式来制造机械，包括按库存生产 (BTS)、按订单配置 (CTO) 和按订单设计 (ETO)。这三种模式的元素经常被用到。通过按订单配置和按订单设计生产的复杂机器很少配备相同的配置，并且会随着时间的推移在不断的使用中得以增强，因此每个机械实例都有独特的配置。工业机械领域发展的最新趋势是产品即服务 (PaaS)，即机械制造商将机械出租给用户，按照服务合同保证服务水平并提供维护和支持。

对于 PaaS 和客户自有机械而言，令人头疼的问题是，当客户订购部件实施计划内（甚至计划外）的维护时，他们希望交付和安装正确的部件，以便其独特配置的机械能够尽快恢复生产。虽然需求很容易确定，但却很难满足，因为机械制造商无法“了解”机械的当前状态，这时就需要数字映射来实时更新每个机械当前维护阶段的配置。如果交付了错误的部件，就可能导致更严重的后果，例如负面的财务影响、计划外停机、客户不满，甚至可能是最严重的安全问题。对于这些产品及其更换部件的生产商而言，导

如今，功能更强大、更复杂的产品是由更灵活、更复杂的制造系统生产的。开发支持按库存生产、按订单配置和按订单设计的机械是一项挑战，但可以通过使用新的数字企业流程和功能来简化。

¹ 本文的研究得到了 Siemens Digital Industries Software 的部分支持。

致这一结果的原因是对产品开发、制造和分销生命周期以及对整个一致且不断发展的信息流程数字线程的维护缺乏有效管理。

开发和生产产品所需的工具在学科、部署和集成方面差异很大。虽然有一些大型解决方案提供商拥有广泛而深入的产品组合，但如果机械制造商要灵活高效地生产复杂的工业机械，其无法从单一来源获取所需的所有工具。即使是同一提供商的解决方案套件，组织运营方式的差异，包括企业供应链以及人员、流程和技术方面的差异，实际上确保了多个提供商的解决方案能够得以采用——在一个异构的世界中进行产品的开发。总有用户使用同类最佳工具、独特流程和创造性工具而导致解决次优化所需的产品信息数字线程中断。

几个世纪以来，早在工业革命之前，复杂的机械就已经很普遍。工业 4.0 的发展使人们能够更轻松地获得机械使用信息，其中主要使用设计创建和模拟软件来生成描述部件形状和其他特性（例如材料和公差）的 3D 模型。但是，仅仅能够设计更复杂的机械还不足以满足当今对大规模复杂机械的定制化和更高效运行的需求。数字线程支持在产品的整个生命周期内实现产品所有领域（尤其是软件）的数字映射，在当下已是迫切所需。

多学科设计

机械设计历来由机械部件和组件驱动，现代化 CAD 工具能够很好地表示此类数据。当今机械开发人员面临的另一个问题是，动力和控制系统领域已从水车、连杆、简单凸轮和其他机械设备发展到涵盖许多其他学科。现如今，在大多数情况下，机械运行能量由电力提供，但机械内部通常由液压系统和气动系统提供动力或力传递，并结合使用大量软件驱动的电子系统来控制非常复杂和可变的过程。

电动机和电子控制设备几乎是所有现代化机械的核心，并且因其高效和可持续性而变得越来越流行。电子控制器用于管理与执行器配合使用的电机和提供反馈的传感器，以确保机械正常工作。复杂的机械使用微处理器和计算机软件来管理可能包含许多控制器和传感器的更复杂的设备。对于机械应用，大多数液压、气动、真空和电气系统均由商用现货供应 (COTS) 的组件配置而成。原理图软件用于创建逻辑设计，CAD 应用程序用于创建实体设计。

机械开发世界已经从纯手工制造、全定制、相对简单的机械发展到只有微小变化的标准机械，再到各种细节都可以定制以满足客户需求的机械。

多学科物理学提高了控制系统的适应性和精细度，使得工业机械的灵活性随之增强。然而，成功设计这些系统需要更完善的数据和流程管理，而它需要由生命周期数字线程来提供支持。

软件用于多种不同的环境。嵌入式软件在机械控制器上实时运行，直接对接和控制物理操作。台式机或边缘计算机监控机械模块和生产线，提供本地报告和分析，并通过传感器和物联网 (IoT) 向工厂或企业级应用程序提供数据。

机械设计问题

询问工程师在完成工作期间遇到的问题，症结点一般与工具、数据和流程有关。在进一步深究的过程中，他们提到了协作难点。大多数问题出现在接口或边界处，它们跨多个功能领域，如机械、电子和软件，跨多个组织领域，如工程、验证和测试、制造、安装和服务。在数据互操作性方面，每个领域中使用各种类型的软件会引发问题。在流程级别，将数据从一个领域或部门传递到下一个领域或部门会导致其他问题。当项目团队人数较多时，在正确的时间将正确的数据传输给正确的人员和工具是一项很复杂的工作。

- 由于现代化机械较为复杂、灵活，并且利用各种技术领域来满足需求，这些问题变得更加棘手。

随着更多电子控件的使用，软件的运用也随之增加，从而可以根据基于机械的传感器反馈实现精细的控制。这已成为工业机械设计期间机械数字映射中必须支持的关键部分——了解每台机械中嵌入的软件版本至关重要。

机械设计业务流程

为了最大限度提高盈利能力，许多机械制造公司都采用模块化设计策略。在最基本的层面上，模块化设计需确保模块之间的接口或连接点一致，以便可以轻松添加模块来增加功能或容量。机械或物理领域内的连接点之间需要匹配。一个模块的输入和输出需要满足与其相连的模块的要求。在电气方面，需要连接线束，电子信号和电源导线需对准。液压、气动和真空设备存在与电气和电子设备类似的问题。从软件开始，流程变得非常复杂。要确保嵌入式控制器可以作为单个跨模块单元进行管理，而无需自定义每个安装的软件，这对于顺利运行至关重要。

机械公司主要使用三种业务模式，即按库存生产、按订单设计和按订单配置，并且经常混合使用它们。在按库存生产业务中，该策略针对批量生产进行了优化，机械的设计旨在满足明确定义的需求和可预测的销量。在按订单设计流程中，机械的重要元素是从头开始自定义或设计的，旨在满足特定的客户要求。在按订单配置流程中，对通用模块和部件进行组装，旨在满足客户的要求。这三种业务模式通常被视为一个连续体，其中每种模式的元素都可以结合使用来生产各种产品。例如，可以使用按库存生产策略批量生产核心产品模块，然后使用按订单配置策略配置这些核心模块和标准组件来支持更复杂的应用。之后，对于有独特要求的客户，机械制造商会使用这些核心按库存生产和按订单配置模块配置尽可能多的产品，然后仅对特殊部分进行自定义设计。很少有机械公司只单纯使用按库存生产、按订单配置或按订单设计。为按库存生产产品添加一些可配置性是增加销售额的一种简单方法，而完全从头开始设计的成本通常太过高昂。按库存生产通常是成本最低、最可预测的方法，按订单设计是成本最高（但潜在利润率最高）和最难预测的方法，按订单配置介于两者之间。

采用混合模式的优良机械范例是 HVAC 系统。该系统使用标准管道和控制组件进行配置，但可使用定制钣金来支持非标准建筑设计特征。按订单配置和按订单设计流程中都可使用产品配置器。借助配置器，应用工程师甚

至客户都可以输入支持所需流程的要求。这是通过一种算法来评估的，该算法了解如何配置模块和部件以实现特定结果。在定义机械架构之后，这种自动化方法就可以大大减少生产机械所需的设计和规划时间。在配置器中重复使用现有部件时，可以更轻松地预测成本和盈利能力，因为可以将先前设备的成本数据添加到配置中，从而帮助机械制造商和客户做出更好的业务决策。

机械工程公司的两大创新领域是物联网和机器学习 (ML)。物联网使用传感器来报告机械环境和性能。报告的物联网数据通常用于提高机械的运行能力，但在最先进的实施方案中，机械制造商正在使用物联网来提供基于条件的预测性维护服务。他们也在使用物联网数据来改进产品设计。作为人工智能的一种应用，ML 已受到广泛关注，并在许多问题中得以应用。设备运行优化可能是 ML 最成熟的应用。随着传感器成本的下降，它们的采用率越来越高，输出的数据也越来越多。数据处理是瓶颈，CIMdata 正在进行更多案例研究来了解机器学习如何帮助将原始物联网数据转化为可操作的信息。

借助物联网和机器学习，公司能够更高效地运行机械。同时，它们还能向机械制造商提供反馈，从而支持预测性维护并帮助改进机械设计。

配置管理

从概念上讲，配置管理 (CM) 通常被简化管理为确保 BOM 中包含正确的部件修订内容，并且发送给制造商和提供商的图纸与这些部件具有相同的修订级别。这种极其过度的简化会导致许多设计、生产和运行问题。

除了机械设计过程产生变体外，还需要支持使用机械销售配置器，按订单配置业务尤其如此。在这些情况中，配置需要识别和管理可以构建到客户可用、可销售的解决方案中的所有机械系统组合，并排除不会产生有效、可用产品的组合。

配置管理不善引发的问题

CIMdata 相信，第一次就把事情做对，要比重新做的效率高得多。在我们的咨询实践中，我们发现许多错误都会追溯到错误定义或管理不善的配置。这会引发诸如部件或软件版本错误等问题，从而导致故障或失败。在过去，大部分设计工作集中于机械方面的管理，只有当规格尺寸、装配关系或功能 (FFF) 受影响时才需要记录变更。

配置不良导致的问题比比皆是。有些问题可能会付出高昂代价——例如与安全相关的故障或无法满足法规遵从性标准。

随着当今产品及产品供应链的日益复杂、操作条件的日益多变以及非机械领域设计项目的大量增加，公司发现产品配置愈加复杂且难以了解。配置内包含更多的相互依赖关系，必须加以管理和了解。一些常见的问题如下。

监管问题

机械制造商可能面临许多不同的监管要求，这通常取决于其客户所在的行业和机械用途。对于食品加工和医疗等监管严格的行业，不仅必须控制产品的配置，还必须控制制造过程中的设备。

安全问题

许多危害，包括物理危害、电气危害、化学危害、生物危害和其他危害，都会导致工作人员或在场的人员受伤或死亡。机械具有危险性，安全始终

是至关重要的。评估机械可能发生的安全问题可能需要结合人体工程学模拟分析和机械操作分析。

成本问题

虽然客户满意度很重要，但在满足业务需求的同时让客户保持满意对成功的机械制造商而言至关重要。糟糕的配置管理会导致部件重复、产品和产品线过于复杂、库存过剩、废料更多、返工更多以及向客户运送错误的机械和维修部件。所有这些都对利润率产生重大影响。如果没有好的解决方案来支持配置管理，那么就需要更多人员来管理配置数据，从而增加成本和不可避免地增加错误次数。

采用按订单设计模式的机械制造商通常需要非常有创意的解决方案来满足特定客户的要求。这通常意味着开发创新。如果抓住机遇并积极追求，可以带来可观的利润收入。如果没有强大的配置管理，即使工程方面的工作不能获得专利，创新也会被历史遗忘而成为部落知识，必须重新创造或重新发明以寻求未来的机会。

延迟变更的成本

众所周知，产品每进入产品生命周期的一个阶段，变更的成本就会以数量级增加。设计阶段的变更成本为 1,000 美元，制造阶段的变更成本为 10,000 美元，服务阶段的变更成本则为 100,000 美元。

一旦产品制造开始，早期的开发成本相比于原材料和工具的投入则微乎其微。有场地变更就更加严重，因为这涉及前往机械所在地的旅行成本、审核机械当前运行状态所需的时间成本、发现可更换或维修的部件和子系统所需的时间成本，将部件和设备运送到所需位置以及执行维修的成本。此外，在产品生命周期后期进行变更会影响交付时间，损害客户信任度，并可能对回头客业务产生负面影响。

众所周知，产品每进入产品生命周期的一个阶段，变更的成本就会以数量级增加。

虚拟调试

机械调试过程在许多行业司空见惯。制造出机械及其所有控件的物理版本，然后手动测试系统以确保系统根据规格工作，这是以往机械的调试过程。这一过程耗时且成本高昂。而且几乎总是在开发后期才发现缺陷，通常已接近最后期限且即将触发惩罚条款。在完整制造物理机械之前，虚拟调试使用产品模型、模拟和物理组件来验证机械的运行方式以及控制方式。之后，相同的虚拟物理模型还可用于培训操作员。

早期的虚拟调试实施侧重于物理适配性和功能。然而，近年来，该技术已经扩展到支持结合硬件在环 (HiL)、软件在环 (SiL) 和人工在环 (HiTL) 的验证与确认 (V&V)。

除了验证与确认，虚拟调试还支持前期培训和远程培训，此功能对当前因 COVID-19 而在家办公十分有用。操作员和技术人员可以使用物理控件来驱动虚拟机或使用虚拟控件来驱动物理机，从而在虚拟或混合虚拟和真实环境中测试软件和控制概念。这种灵活性便于在机械准备生产之前及早测试各种想法、改进产品和完成培训，这样在机械生产准备就绪时，能够提高启动速度和效率。

安装和调试问题

机械安装通常复杂且成本高昂。机械常常庞大、沉重且运输成本高，往往必须在现场组装，需要专家（装配工）来定位设备，并需要许多专家（电工、机械师等）来组装和测试。这是第一次组装整机，意外经常发生。模块不配套，接口无法连接。安装团队压力重重，设计部门争先恐后验证设计问题并制定修复和变通方法。这一情况经常使人处于高压状态，引发诸多焦虑。

除了机械装配之外，电气和电子功能也会引发另一个层面的问题。传感器和控制器必须管理现实世界的物理问题，包括原材料不一致、传感器信号问题和时序问题。由于操作员可能只接受过粗略的培训，因此基本设置和操作更加耗时，延迟了机械的生产性使用。

软件是难题，因为通常不会将其与硬件和电子定义并行管理，而且软件集成通常发生在机械开发生命周期的后期。此外，机械的生命周期通常以年甚至数十年为单位，因此必须始终管理和记录软件更新。代码经过多年的修改和扩展，必须对其进行测试以确保它没有错误。

在虚拟调试环境中，软件是配置的一部分。因此，多领域配置管理功能必须将嵌入式软件作为构建阶段配置的一部分，并通过维护阶段配置跟踪字段更新。添加物联网后，机械可以“打电话回家”或远程访问以向机械制造商报告状态，机械制造商则可以经常在线发送代码更新。

借助虚拟调试，可以在产品开发生命周期的更早阶段以较短时间完成测试，并避免运行具有潜在破坏性或难以执行的测试。虚拟调试还可以借助现有的硬件组件和人工来进一步验证和了解如何调试真实机械。

管理数字线程：

为了提高效益和效率，工业公司和 PLM 解决方案提供商正在合作为产品创建完整的数字化表示。这体现在产品配置及整个生命周期相关信息的完整端到端虚拟表示中。这种表示方法也称为数字线程，它支持创建和维护产品的数字映射。数字映射是对系统的基于物理学的描述，它源自系统生命周期中权威来源的数据、模型和信息的生成、管理和应用。数字映射不能仅仅是一个描述性模型或相关数字信息的集合（例如，SysML 模型）。它是包含所有行为的一个完整的物理描述。

为保持强大的端到端数字线程，所需的基本结构包括 EBOM（设计阶段）、MBOM（规划阶段）、MBOM（构建阶段）和 SBOM（维护阶段）。当公司具有这些不同的 BOM 时，就可以建立一个强大的数字线程来维护数字和物理映射集所需的数据。

可追溯性

产品信息的可追溯性是影响成本、质量和上市时间的一项基本功能。一个产品从设计到制造再到运行，总会有一些问题需要解决。当需要了解某个特定项目的 MBOM、EBOM、工艺清单 (BOP) 和相关文档之间的相互依赖关系时，启用可追溯性就会使这个过程变得简单易懂。有关现场某个特定组件的问题可能与它的制造方式有关（例如，质量控制是否存在任何问题）或了解组件何时磨损到超出公差范围。

物联网是许多机械最新采用的技术之一，它为机械制造商提供了两种基本数字线程功能。物联网有助于改进产品性能监控和支持。与人工智能或机器学习结合使用时，操作数据可用于支持基于条件的预测性维护。此外，操作数据还可为机械制造商提供推动需求的洞察力，从而改进产品的下一个版本——实现产品生命周期闭环。随着公司开始采用物联网等新技术，对可追溯性和影响分析的需求进一步增加。

影响分析

从创新的角度而言，影响分析可能是数字线程实现的最有用的功能。对于大多数公司，变更影响分析的过程困难重重，因为数据在数字线程中没有完全连接。这就迫使变更团队通过手动搜索来识别问题并降低风险，整个过程既耗时又易出错。创建数字线程并建立全面的数字映射之后，变更过程的速度和质量显著提高。人们会更加确信他们的决策准确且不会产生意外后果。

数字线程和数字映射是用于管理机械从概念到退役的产品生命周期的关键组件。数字线程必须持续反映整个生命周期中的信息和流程——更新数字映射并在所有关键接合点维护其与机械物理映射的关系。

西门子高级机械工程解决方案

一直以来，CIMdata 都对西门子为机械行业发展所做的贡献深表感动。西门子在技术获取方面投入巨大，且将许多软件团队和产品整合在其数字工业部门。图 1 中显示的 TIA Portal 利用全面的数字映射并支持虚拟调试。Siemens Xcelerator 产品组合提供各种工具来创建描述产品的模型，用于机

械、液压和气动系统的 NX；用于定义电气和电子系统的 Capital；用于管理软件开发的 Polarion；以及 Teamcenter，它将编写工具及其数据融入开发流程形成全面的数字线程。它可以集成 Simatic 控制器模型，从而为控制系统模拟提供支持。Simcenter 支持进行所有物理领域必要的模拟来预测机械性能。

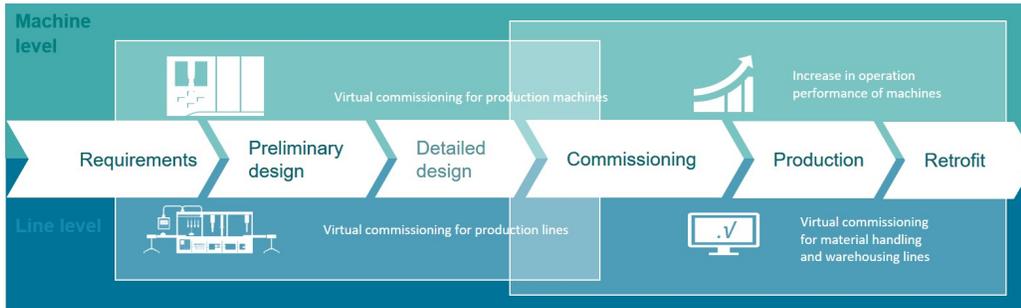


图 1—Siemens TIA Portal 支持虚拟调试等功能

Machine level	机械级别
Line level	业务线级别
Requirements	需求
Preliminary design	初步设计
Detailed design	详细设计
Commissioning	调试
Production	生产
Retrofit	改造
Virtual commissioning for production machines	生产机械的虚拟调试
Virtual commissioning for production lines	生产线的虚拟调试
Increase in operation performance of machines	机械运行性能提高
Virtual commissioning for material handling and warehousing lines	物料搬运和仓储业务线的虚拟调试

西门子高级机械工程解决方案整合了所有适当的产品组合技术来支持所有机械制造商所需的三项功能——多学科设计、配置管理和虚拟调试。它的商业效益在于减少了功能和工作计划的不确定性，提高了质量及客户满意度，并为机械制造商和客户提高了可预测的盈利能力。

总结

我们生活在一个神奇的世界，但它的建立离不开优秀的创意和辛勤的付出。包括食品在内的大多数实物商品都产自工厂复杂的机械生产线。经济发展带来的竞争迫使产品制造商不断改进，而大多数生产的改进源自机械和信息技术的运用实施。机械设备制造商常常难以满足客户对成本、质量、时间和功能的要求。

与当今世界大多数事物一样，功能越强，就越复杂，采用新的经营方式是保持竞争力的不二法宝。复杂的机械可以由数以千计的商用部件和定制部件组成。确保产品能够按要求准时运行的同时准确跟踪所有这些部件的运行情况，是一件难上加难和令人生畏的事。

PLM 解决方案是帮助机械设备制造商持续改进的核心技术要素。最新一代的技术现在可以实现几十年来承诺的可操作的数字映射战略。借助数字映射，工程师能够在机械制造之前准确预测机械的性能。该技术支持所有关键的机械领域，包括机械、电气、电子和软件。此外，领域孤岛已被打破，每个领域都可以在所有其他领域的环境中各司其职，降低风险和返工的可能性，进而降低成本、缩短时间和提高质量。

在先进机械技术领域，Siemens AG 既是行业领先的提供商，也是主导用户。除了核心的多学科设计和配置管理支持外，西门子还为端到端虚拟调试提供支持。TIA Portal 支持精确模拟控制器和软件，从而实现对虚拟调试的支持。所有这些功能结合起来可提高效率，这样就有更多时间用于创新，确保客户感到满意且机械制造商获得盈利和成功。机械制造商应了解西门子最新高级机械工程解决方案，采用该解决方案将实现数字化转型并帮助提高客户满意度，确保业务获得成功。

有关更多信息，请咨询 Siemens Digital Industries Software，网址为：
[siemens.com/plm/advancedmachinery](https://www.siemens.com/plm/advancedmachinery)

关于 CIMdata

CIMdata 是一家独立的行业领先的全球性公司，通过应用产品生命周期管理 (PLM) 解决方案，为企业提供战略管理咨询服务，最大限度地提高企业设计与交付创新产品和服务的能力。自成立三十多年以来，CIMdata 提供了世界级的 PLM 解决方案知识、专业技术和最佳实践方法。这些解决方案将业务流程和各种支持 PLM 的技术结合在一起。

CIMdata 与行业组织以及技术和服务的提供商合作，在全球经济中寻求竞争优势。CIMdata 帮助行业组织建立有效的 PLM 战略，协助确定需求和选择 PLM 技术，帮助组织优化其运营结构和流程以实施解决方案，并协助部署这些解决方案。对于 PLM 解决方案提供商，CIMdata 可帮助定义业务和市场策略，提供全球市场信息和分析，为内部销售和营销团队提供教育

与当今世界大多数事物一样，功能越强，就越复杂，采用新的经营方式是保持竞争力的不二法宝。

和支持，以及在业务和产品计划的各个阶段提供全面支持，以使其在市场中发挥最佳效用。

除咨询外，CIMdata 还进行研究，提供专注于 PLM 的订阅服务并制作一些商业出版物。该公司还通过全球 PLM 认证计划、研讨会和会议提供行业知识教育。CIMdata 通过位于北美、欧洲和亚太地区的办事处为世界各地的客户提供服务。

欲了解 CIMdata 服务的更多信息，请访问我们的网站 www.CIMdata.com 或通过以下方式联系 CIMdata：3909 Research Park Drive, Ann Arbor, MI 48108, USA。电话：+1 734.668.9922。传真：+1 734.668.1957；或 Oogststraat 20, 6004 CV Weert, The Netherlands。电话：+31 (0) 495.533.666。

本文件为 © 2020 by CIMdata, Inc. 版权所有，并受到美国和国际版权法和公约的保护。未经 CIMdata 书面许可，不得复印，复制，将其存储在检索系统中，不得以任何形式传播，在公共或私人网站或公告板上发布或分许可给第三方。不得遮盖或删除本文中的版权信息。CIMdata® 是 CIMdata, Inc. 的注册商标。本文中提及的产品和公司的所有商标和注册商标均受保护。
本文件是基于据信为可靠的信息和来源而编写的。本文件应按“原样”使用。CIMdata 对数据、主题、内容的质量或及时性不做任何保证或陈述，也不对这些准确性承担任何责任。