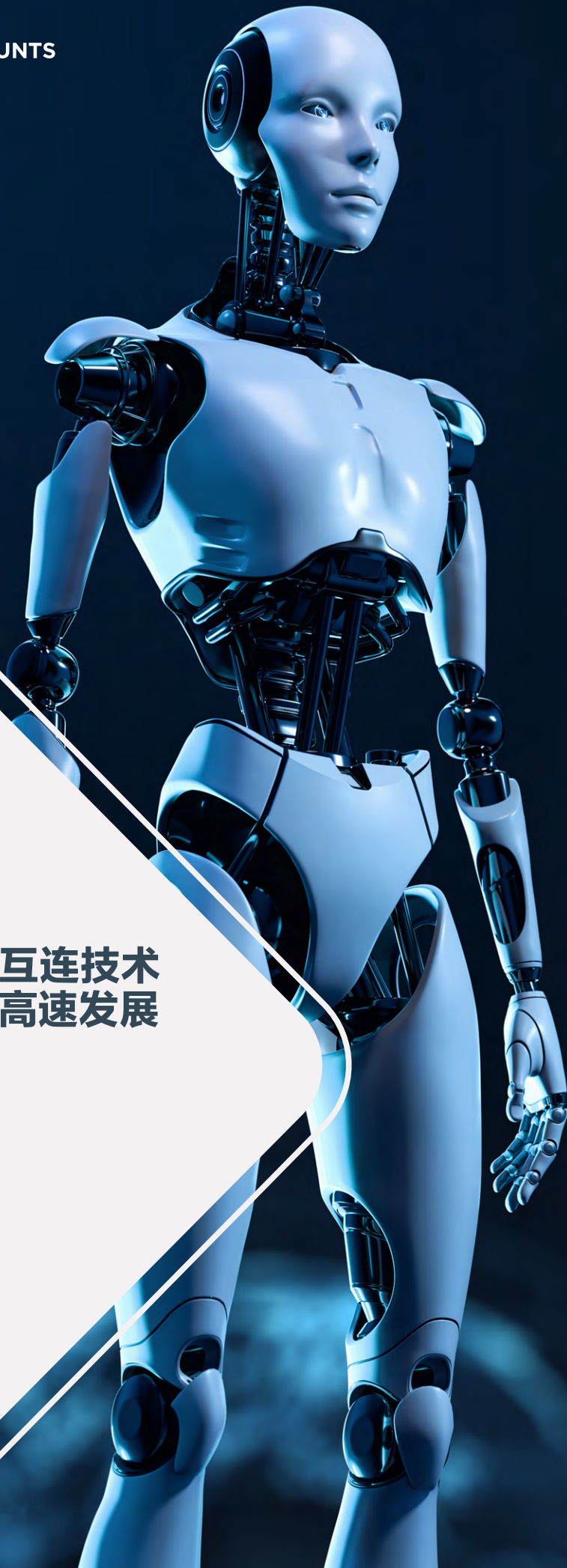


EVERY CONNECTION COUNTS



白皮书

以更高效率的电机互连技术
赋能人形机器人高速发展



人形机器人正加速向更高灵活性、更轻量化以及更接近人类运动能力的方向演进。在这一变革的核心，是低压电机系统，尤其是用于高负载关节的无框力矩电机，以及用于精细手指控制的空心杯电机。然而，电机内部的电气互连正逐渐成为关键技术瓶颈，制约着向小型化、可靠性提升及规模化制造能力的进一步发展。

TE Connectivity (TE) 通过持续跟踪行业动态、深化与电机厂商及人形机器人生产企业的协作，并推进以应用为导向的互连技术创新，积极地在布局该领域，并依托成熟的漆包线连接解决方案和深厚的电机行业经验，TE 正在将电气互连从设计约束转变为核心竞争优势，助力释放新一代人形机器人发展潜力。

1. 人形机器人中的主要电机类型

现代人形机器人通常在全身分布几十个电机。在躯干、肩部、手臂、髋部、腿部、膝盖及踝关节等高负载位置，广泛采用无框力矩电机驱动的旋转和线性执行器。

此类电机摒弃了传统含外壳与轴承的设计，可直接集成于关节模块，并与减速器、传感器及控制电子系统协同工作，实现紧凑结构及稳定的扭矩与转速输出。



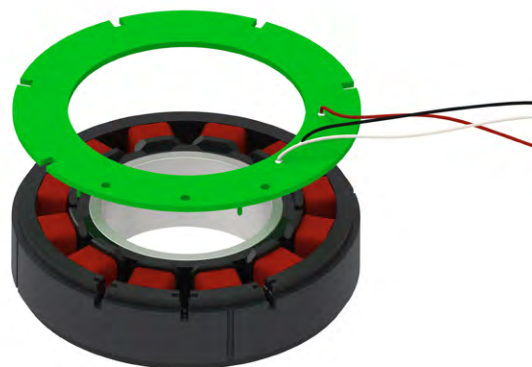
1.1 用于旋转和线性执行器的无框力矩电机

无框力矩电机通常与定子 PCB 高度集成，该 PCB 同时可集成霍尔传感器、温度传感器及电源线接头。

其典型架构包括：

- 多股漆包线绕制形成定子绕组
- 漆包线、引出线及各类传感器统一连接至定子 PCB
- 电气连接高度依赖焊接工艺

该典型架构在实现高度集成和紧凑封装的同时，可作为整体组件直接集成至执行器系统中。然而，其内部电气连接逐渐成为主要设计约束，焊接不仅增加了装配时间和人工成本，还在振动及热循环环境下带来了焊点疲劳失效的风险。为消除焊接工艺的依赖，采用基于 IDC (Insulation Displacement Contact) 技术的高自动化漆包线解决方案被认为是有效的路径。



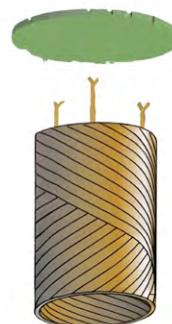
1.2 用于灵巧手中的无刷空心杯电机

在人形机器人灵巧手控制中，越来越多采用无刷空心杯电机。该类电机内部不含铁芯叠片，其超紧凑的结构设计以及极细规格的漆包线（例如 30AWG）使其能够实现平滑且高精度的运动控制，但同时也对其电气连接提出了显著挑战。

其典型架构包括：

- 超细漆包线形成绕组并通过扭绞形成多个接头
- 每个接头经镀锡处理以实现导通
- 通过焊接连接至 PCB 上

随着机器人灵巧手中空心杯电机直径的不断缩小，传统焊接的方式在极其有限的空间内变得愈发难以实现自动化与稳定控制，从而限制了生产的良品率及长期可靠性。



2. 人形机器人电机的电气互连挑战

• 小型化 vs. 规模化生产制造

随着电机向更小型化和更高集成度发展, 焊接在大规模量产中的可扩展性面临巨大挑战。每台无框力矩电机需要对十多根漆包线进行焊接, 会显著延长生产节拍, 从而推高整体制造成本。

• 动态环境下的高可靠性

人形机器人在运行过程中会经历持续的运动、振动、冲击以及温度循环等复杂工况。传统焊接的漆包线连接在此类环境下易发生开裂与疲劳失效, 从而影响系统的整体可靠性。

3. TE Connectivity 应对上述挑战的解决方案

随着人形机器人从原型阶段迈向规模化量产, OEM 在不同生产阶段实现工艺标准化方面面临更大压力。TE 的免焊漆包线连接及电气互连解决方案专为大规模工业化装配而设计, 可有效降低对高技能人工焊接的依赖, 加快产能爬坡速度, 并确保其在制造体系中的质量一致性。针对上述挑战, TE 提供的解决方案包括但不限于:

3.1 电机的内部电气连接

• 基于 IDC 技术的漆包线到PCB 连接方案



Slim Line MAG-MATE
Terminals

在无框力矩电机中, 当漆包线需要直接端接至定子 PCB 时, Slim Line MAG MATE 端子通过底部IDC与顶部press-fit压配合引脚, 如Multispring或EoN (Eye-of-the-Needle), 实现漆包线与PCB的连接, 从而以可用于批量自动化生产的无焊接方案替代多点焊接。



SIAMEZE
Tab Terminals

针对需通过单一连接器覆盖更大线径范围的应用场景, SIAMEZE端子提供了一种稳健且可靠的解决方案。同时, 其另一端的焊接端子或press-fit压配合端子可根据需求灵活定制与成形, 以实现空间受限条件下PCB的有效连接。

• 漆包线到引线的连接方案

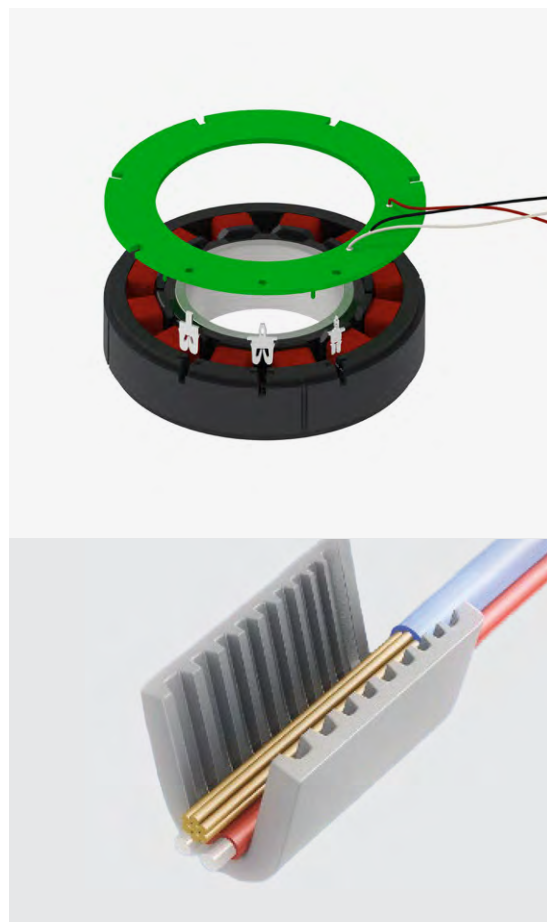


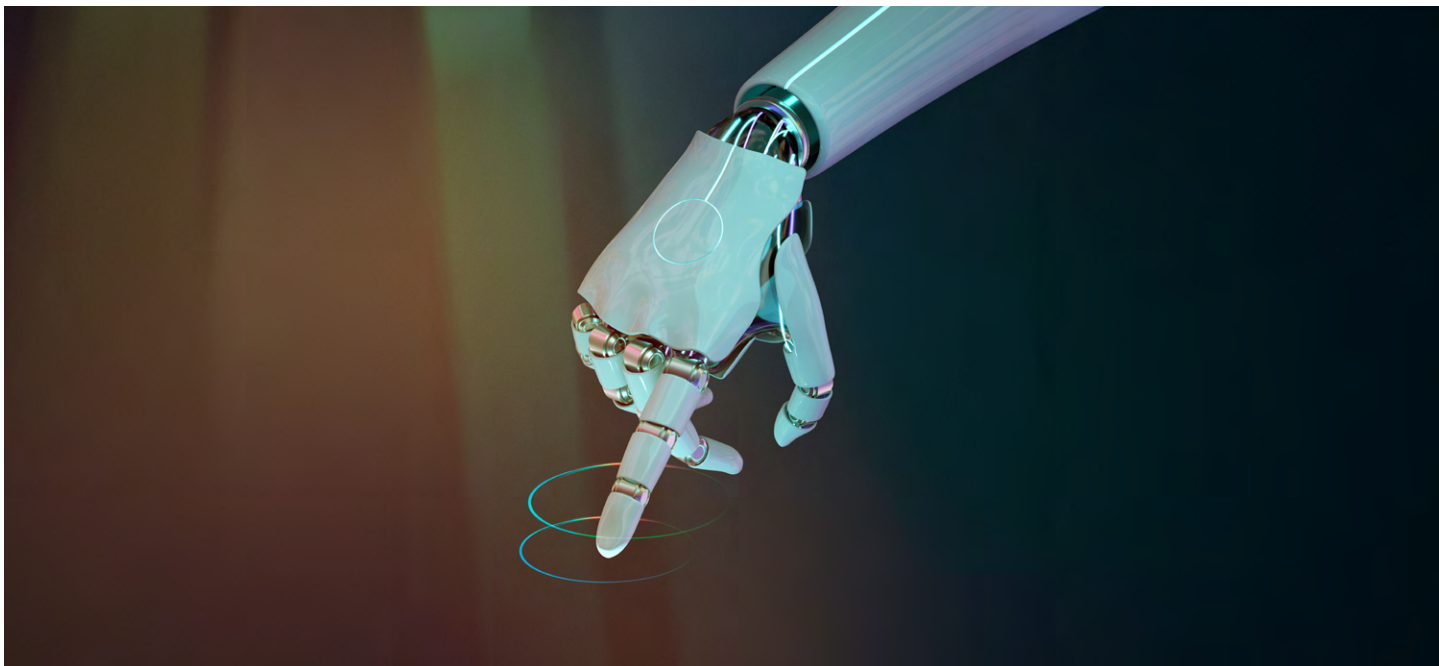
AMPLIVAR
Splices

针对不要求漆包线直接端接至PCB的架构, AMPLIVAR端子可提供可靠的漆包线与引线压接连接方案, 在降低焊接点数量的同时, 有效支持空间受限电机的紧凑化设计。

• 面向未来空心杯电机的解决方案

尽管空心杯电机对微型化提出了极致要求, TE仍在持续探索漆包线连接的一体化解决方案, 通过融合压接端子与press-fit等技术, 以支持面向未来的无焊、高自动化、高产能的生产模式。





3.2 电机的外部电气连接

- 电机的电源与信号互连解决方案

除电机内部连接外, TE 还提供丰富的产品组合以支持人形机器人电机架构中的外部电源与信号互连需求。该组合包括用于电力传输的 EP3.96 和 PDL (Power Double Lock) 连接器, 以及用于信号传输的 SG1.5、SG1.25 和 FPC (Flexible Printed Circuit) 连接器。此外, 还可提供将供电与信号集成于单一连接器中的混合连接器解决方案, 以进一步简化系统设计。

3.3 TE 的在线成本计算工具促进去焊接化转型

如果您在漆包线应用中仍采用传统的焊接工艺, TE 提供在线的成本节省计算工具, 可帮助用户评估在采用其专为漆包线应用设计的端子和接头解决方案组合后, 所带来的潜在年度成本优化空间。该工具仅需输入少量参数即可快速生成结果, 包括月产量、单机连接点数量以及平均人工成本等主要变量。

更多信息请参考以下链接: [Magnet Wire Savings Calculator | TE Connectivity](#)

注: 信息仅作参考, 不具有法律效力

4. 结论—驱动人形机器人产业高速发展

从概念阶段到量产为导向的设计落地, TE Connectivity 持续与人形机器人产业链伙伴协同创新, 在无框力矩电机、空心杯电机及新一代执行器架构等领域开展紧密合作, 以全面提升电机系统性能、可靠性和制造效率。通过这一持续布局和投入, TE 不仅能够提前洞察新兴市场机遇, 还可持续支持不断演进的设计挑战, 并提供具备可扩展性及可规模化部署的互连解决方案, 为人形机器人未来发展提供坚实支撑。

如您希望就具体电机需求、电气互连挑战及未来人形机器人发展展开深入讨论, 欢迎联系您的 TE Connectivity 代表, 或访问 www.te.com, 了解 TE 如何为您的下一代人形机器人设计提供支持。



John Marsh
产品研发副总工程师



Trevis L Benchhoff
工程高级总监



Tim Ding
产品研发高级经理



Ashish Ainapure
系统架构工程经理



Jimmy Zhang
产品研发经理



Charlie Fei
系统架构高级工程师

联系我们

我们致力于为您提供便捷高效的技术支持。欢迎访问 te.com/support，与产品专家在线沟通，获取相关解决方案。

TE Connectivity
互联生活解决方案

te.com

TE Connectivity (logo)、EVERY CONNECTION COUNTS是商标。本文中提到的其他产品名称、标识和公司名称可能是其各自所有者的商标。

尽管TE已尽力确保本文件中信息的准确性，但不保证其无错误，也不做出有关信息的准确性、正确性、可靠性或最新性的任何其他陈述、保证或担保。TE保留对此处包含的信息进行任何变更的权利，恕不另行通知。TE Connectivity仅承担其针对本产品的标准销售条款和条件中所述的义务，在任何情况下，对于因销售、转售、使用或误用本产品而产生的任何附带、间接或后果性损害，TE Connectivity均不承担责任。TE明确否认对此处所含信息的任何默示保证，包括但不限于对适销性或适用于特定目的的默示保证。所包含的尺寸、规格或信息仅供参考，如有更改，恕不另行通知。有关最新的尺寸、规格和信息，请咨询TE。TE Connectivity 的产品用户应自行进行评估，以确定每种此类产品是否适合特定应用。

© 2026 TE Connectivity. 版权所有

06-26