



## 人形机器人制造： 从设计到交付

人体是一个奇迹，从穿越几乎任何地形的能力，到双目视觉的敏锐度和深度，再到处理物体和使用工具时的触觉和灵活性。在建造和设计环境的过程中，人类需要充分发挥这些能力。

即使在先进的制造、仓储和其他工业场景中，这种情景也很常见。尽管自动化程度已达到很高的水平，但仍需通过人力来填补多个固定自动化系统之间的空白，而每个系统均设计用于完成某个特定目的。以人为中心的任务往往每天都有所不同，因此需要灵活自主的运动控制来衔接自动化流程，确保整体运行的持续性和性能。

问题在于，人的力量和耐力是有限的。从事这些工作的工人可能会受伤。在艰苦、有时甚至危险的工作岗位上，人员流动率往往非常高。结果可能导致劳动力出现缺口，严重影响供应和生产。

无论是在工厂还是仓库环境中，如果只是增加更多单一用途的机器，而不投资大规模的改造工作，便无法完成以人为中心的必要任务。然而，这类任务正是人形机器人的理想应用领域——它们既能消除劳动力短缺的担忧，又能将人类从繁重的工作和潜在危险中解放出来以承担更具创造力的角色。

因此，尽管过去只存在于科幻奇幻和主题公园动画当中，如今人形机器人却已成为研究和开发的重要领域。在过去短短10年里，人形机器人技术已经有了快速的发展：许多学术团队、初创公司和成熟企业都在开发人形机器人，此类机器人有望改变工作场所，同时让人们远离危险。

视觉系统、触觉和本体感觉传感器、电池功率密度、人工智能算法、处理速度和其他技术都取得了进步，而这些进步正在推动仿人能力迎来持续革命。然而，运动控制始终是重中之重。如果机器人的肢体不能对系统的感官输入和运动指令做出快速、有力、精确甚至优雅响应，那么它就无法令人满意地完成工作。在当前以人为本的机器人设计革命中，电机和电机驱动执行器的进步是核心所在。

人形机器人的运动控制挑战来自技术和商业两大方面。

**在快速发展的人形机器人领域,工程师们面临的压力在于如何快速开发出既能提供新功能又能保持经济性的设计,从而领先于潜在的竞争对手。在这种开发环境中,一切都要依靠快速设计和迭代来获得成功的原型机。但正是在原型机设计阶段,运动控制挑战的真正范围才逐渐显现出来。**

设计具有出色运动控制性能的机器人极具挑战。而设计出具有高度可制造性的产品,则让这一挑战难上加难。如果设计团队不能兼顾性能和适销性,项目就会面临风险。成功的原型机必须从一开始就同时考虑技术和商业因素。

从技术角度来看,如果运动控制产品并非专门为机器人运动控制而设计,则此类产品可能会太大、太重,不适合运动学方面的要求,即无法在人体尺度上执行类人型任务。例如,设计人员可能会倾向于指定广泛使用的电机,此类电机最初是为无人机设计的。但这种电机的设计运行转速相对较高,无法在仿人手臂和腿部关节所需的全速范围内提供稳定的转矩。

从商业角度来看,设计的可制造性和适销性早在开始阶段就至关重要。价格低廉、大致合适的电机有助于设计工程师满足紧迫的时间和预算要求。然而,如果机器人的性能未达理想标准,且价格低廉的现成电机在生产过程中没有稳定的质量和有效的技术支持,那么设计阶段的“省钱”在上市后便会沦为隐患。

另一方面,高质量的定制解决方案也会增加风险,因为这会大大增加成本,而且可能无法批量生产。

不过,这些性能和市场风险并非不可避免。技术挑战和商业挑战看似对立,但都可以通过优化开发战略来予以解决,即根据性能和可制造性要求来指定运动控制产品。



## 从系统级别的运动控制战略开始

**运动控制决策应考虑到整个系统。在人形机器人运动所需的性能水平上,电机不仅是电机本身。该部件必须针对外形、重量和高度定制的性能特征进行优化,包括能够响应人形机器人关节所需的动态加速度爆发,同时以最高效率运行。正如先前内容所述,在满足上述标准的同时,电机还必须具备商用现成解决方案的经济性和可制造性。**

要获得理想的电机规格,首先要了解并记录每个机器人关节的应用要求,包括全动态转矩和速度范围、运行中可能遇到的惯性负载范围,以及重量和安装占地面积目标。

了解每个关节的动态要求后,在关节设计的开始阶段不应指定电机,而是指定机械系统(旋转或线性执行关节)和齿轮箱结构。这些规格将决定如何对合适的电机与齿轮系统进行配对。

例如,考虑齿轮传动中顺应性和齿隙的潜在影响。对于需要在执行极其精细和高强度任务时保持平衡的人形机器人来说,哪怕是工业自动化应用中可以接受的轻微不精确性,也可能会造成问题。或者考虑一下,即使是能力最强的人形机器人,在动态世界中也会像活人一样撞到东西或摔倒。选择的齿轮传动装置需要能够承受这些不可预知的力和负载。

对齿轮传动类型的深入讨论超出了本文的范围。不过,我们可以注意到,旋转关节是人形机器人中最常见的类型,其组合方式可以复制脚踝、膝盖、臀部、肩膀、手肘、手腕等部位的运动控制。谐波减速机(又称应变波减速机)能出色满足这些旋转关节的要求。

谐波减速机具有以下优点:

- 单级高减速比,实现高功率密度和平稳的加速/减速。
- 零齿隙,实现精确定位和可靠固定。
- 紧凑的轴向外形尺寸,使机器人设计紧凑灵活。
- 在遇到冲击负载时具有可靠性和弹性。
- 提供适用于机器人关节的商用现有产品。

齿轮类型	转矩/力	齿隙	重量	效率	成本
行星减速机	中间色	负变位	中间色	正变位	正变位
谐波	正变位	正变位	正变位	负变位	负变位
摆线	正变位	中间色	负变位	中间色	负变位
滚珠螺杆	正变位	中间色	正变位	中间色	正变位

齿轮减速器类型及其相对属性

在选择谐波减速机时,请考虑外径相对较大的齿轮组能否满足您的设计要求。增大直径可以使用更大直径的电机,从而利用 D<sup>2</sup>L 规则。(D<sup>2</sup>L) 该规则指出,转矩的增加与电机叠片长度的增加成正比,或者与力矩臂直径增加的平方成正比。

换句话说,将力臂的直径增加一倍会产生四倍的转矩增加——或者,能在不损失转矩的情况下使叠片长度减少四分之三。D<sup>2</sup>L 规则提供了一种使每个接头转矩最大化的简单方法。此外,在许多设计中,减少机器人关节的轴向长度可以使机器人更加灵活,在狭小空间和接近周围物体时有更多的工作间隙。



## 实现可制造性和适销性的规模化设计

设计出合理的关节结构后,下一步就是评估该结构的组件能否扩展到机器人的全面生产,从而获得预期市场的青睐。不妨扪心自问:您的设计是否足够坚固耐用,选择的部件在从原型过渡到全规模生产时是否容易获得、功能是否优化、机械性能是否可靠。

在科尔摩根,我们见证过很多在时间或预算有限的情况下,以设计便捷性或产品定价作为主要选择标准而设计出原型的例子。当关节设计的结果是体积过大、重量过重且性能不佳时,结果就是花费更多的时间和金钱重新进行设计,甚至完全放弃项目。最糟糕的结果是,耗费巨资将设计产品化,却在市场上遭到拒绝。

我们坚信,在开始阶段采用正确设计能够带来短期和长期价值,让您凭借更好且更具盈利性的产品更快地进入市场。对于许多公司来说,这需要改变“将研发与生产分离”的思维模式。实际上,取得成功需要将研发和生产置于共同的目标、资源和流程的连续统一体中。

除了功能设计之外,卓越运营也应纳入原型机设计流程。在项目的开始阶段就应考虑设计将如何发展和扩大规模,从原型机到现场测试,再到低速率初期生产,然后到全速率生产。这样,您便可以避免延误、挫折甚至需要重新设计。

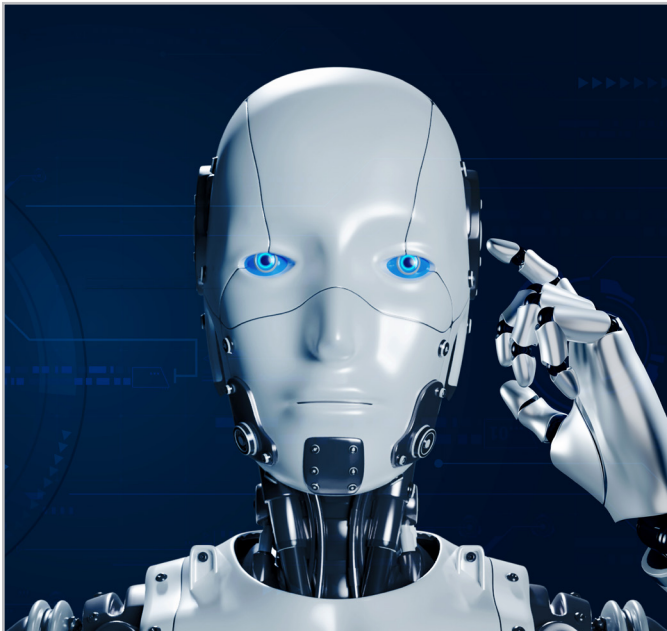
关于电机的选择、选型和配置,除了速度、转矩和功率特性外,还须考虑以下几个因素:

- 在人形机器人运行的多变环境中,齿轮系统的负载特性,以及对电机性能的要求。
- 电机、齿轮箱和接头其他部件之间的距离。
- 环境工作温度、电机的热膨胀以及任何散热措施。
- 过多热量对电机性能或附近部件(如齿轮润滑剂和反馈电子元件)的影响。
- 制造顺序,如电缆的走向、反馈装置的安装、粘合剂的分布等。

在结合可制造性设计 (DFM) 原则来设计原型机时,这些因素和许多其他因素都至关重要。无论是在自身运动控制系统的设计和制造过程中,还是与客户的工程合作中,科尔摩根始终将可制造性设计 (DFM) 铭记于心,帮助客户优化项目以实现 DFM。

我们拥有长达数百年的集体经验,曾与成千上万种客户应用开展合作,帮助优化电机以满足应用的性能需求,同时亦兼顾可制造性。我们久经考验的流程包括从初始设计、原型机设计和迭代设计,到最终设计审查和全面生产扩容方面的协作,可确保项目从头到尾都能按计划顺利进行,让客户对项目满怀信心。

此外,即使我们通过持续创新来满足不断发展的市场需求,科尔摩根仍然能够年复一年地交付具有一致规格和品质的运动控制产品。我们的目标始终是为新开发项目提供性能出色的产品,同时也确保客户能持续获得满足全面生产和售后服务需求的产品。



人形机器人领域的多家行业头部企业已亲临科尔摩根生产工厂开展自主审核,充分证明了我们的工艺、能力和产品均久经考验。每一次考察,科尔摩根的表现都超出预期。

## 采用科尔摩根无框技术

机械系统不断变化,运动产品也不尽相同。科尔摩根致力于交付广泛的机器人专用电机选择,涵盖各种尺寸,提供经济实惠的标准和定制修改,可满足每个应用场合的精确性能要求,同时避免牺牲可制造性。

科尔摩根的承诺和专长在于提供性能值得信赖的高品质电机,以及任何规模下的可靠可制造性。

例如,最重要的两大诉求是最大限度地降低功耗(因为人形机器人通常依靠电池供电自主运行)和优化转矩(因为此类机器人必须承受自身重量,同时以极高的精度执行需要人力甚至超越人力的任务)。

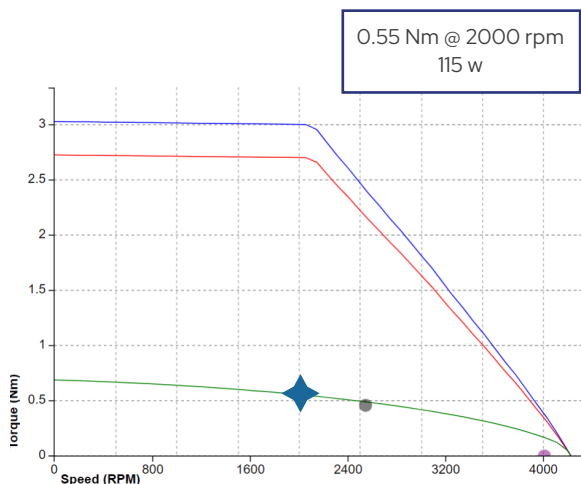
科尔摩根提供多款无框电机,专为满足机器人关节要求而设计。此类电机结构紧凑、重量轻且节能,还可微调绕组特性,在每个应用的特定转矩和速度范围内实现最高效率。

这些特性有助于机器人工程师以更小、更轻的电机提供出色的转矩,从而最大限度地减小尺寸、重量和能耗。轻型关节可实现更好的重量分布,从而提高机器人的平衡性和稳定性。轴向较小的关节可提高机械臂的灵活性,同时降低撞击结构和物体的风险。高能效率能够延长电池充电之间的运行时间。

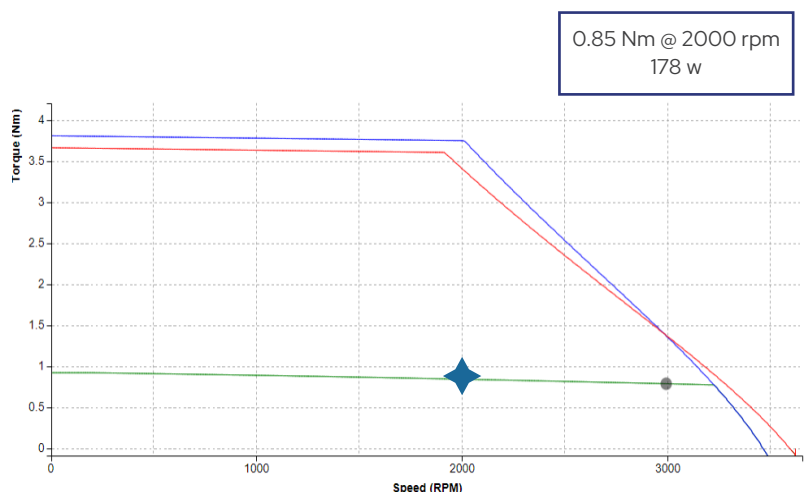
以科尔摩根 TBM2G 系列无框伺服电机为例,这款电机专为满足机器人关节的外形、能耗和性能要求而设计。其设计旨在符合标准谐波减速机的尺寸、转矩和速度要求,可实现紧凑、精确的机器人关节,同时避免因指定定制减速机而产生的额外开支。

TBM2G 电机利用 D<sup>2</sup>L 规则,在轻质、轴向紧凑的关节中提供出色性能。这一设计还允许采用大通孔,可容纳穿过机械臂关节的接线和其他组件。这款电机可与各种编码器配合使用,甚至可以配备不会增加电机长度的集成式霍尔传感器。

由于温升极低,TBM2G 电机可以靠近温度敏感组件运行,而不会影响性能。例如,F 级绝缘电机的最高绕组温度为 155°C,而在靠近编码器和减速机部件的位置,额定温度为 140°C。但 TBM2G 电机可在不超过 85°C 的情况下提供卓越的性能,大大提高了机器人关节的可靠性和使用寿命。



环境温度为 25°C 且最高绕组温度为 85°C 时,常规电机的性能



环境温度为 25°C 且最高绕组温度为 85°C 时,TBM2G 电机的性能

科尔摩根官网提供多种自助式在线设计工具,其中包含功能强大的性能曲线生成器,可用于创建图表中显示的电机分析。如您所见,TBM2G 电机在绕组温度为 85°C 时仍能提供卓越的性能。为了达到类似的性能,几乎所有其他现有的无框伺服电机都必须在更高的温度下运行,通常最高绕组温度可达 155°C。

这对于紧密集成的机器人关节来说是个大问题。当绕组温度升至 85°C 以上时,齿轮润滑剂会迅速变质,电子反馈装置也会变得不可靠。反之,如果电机的理想性能设计温度为 155°C,而最高绕组温度为 85°C,那么该电机的性能便会大打折扣。TBM2G 是一款出色的无框伺服电机,可在机器人关节的实际温度限制范围内提供卓越性能。

此外,TBM2G 伺服电机还让机器人设计人员能够为每个关节调整电机尺寸。与常规伺服电机通常提供的 2 种或 3 种框架尺寸不同,TBM2G 电机有 7 种框架尺寸可供选择,每种尺寸各配有 3 种堆叠长度,并设有一系列标准选项,力求满足理想的应用需求。不同绕组的选择优化了各种总线电压下的电机性能,包括非常适合电池供电人形机器人应用的绕组。

TBM2G 系列按照极高的质量标准制造,具有将人形机器人从原型机制作到全面生产所需的可制造性、交付和支持,可以在世界任何地方进行任何批量的生产。

## 您的运动控制合作伙伴至关重要

科尔摩根致力于实现卓越的机器人技术,而 TBM2G 无框伺服电机系列只是其中一个示例。我们的 TBM 和 RBE 无框电机以及其他多款产品能够满足一系列广泛的运动控制要求,适用于多样化且快速发展的人形机器人和其他机器人设计领域。

同样重要的是,科尔摩根工程团队拥有丰富的机器人技术经验。我们可以帮助协作设计出色的运动控制解决方案,实现机器人的独特功能。凭借我们的精益制造、可重复的流程和质量控制,我们能够助您一臂之力,从原型机制造快速过渡到全速生产,每次都按时交付您的运动控制系统。我们将提供本地化的长期支持,以在机器人的整个生命周期内维持产品交付,管理成本,同时根据需要扩大生产规模。

**联系我们,与科尔摩根机器人专家  
讨论您的需求和目标。**

## 关于科尔摩根

作为 Regal Rexnord 旗下品牌,科尔摩根在运动控制领域拥有 100 多年的经验,致力于提供高性能且可靠的电机、驱动器、AGV 控制解决方案和自动化平台,享誉业界。我们提供的突破性解决方案在性能、可靠性和易用性方面更胜一筹,为机器制造商提供无可争议的市场优势。