

# 张拉整体机器人关键技术研究进展

崔祚<sup>1</sup>, 何景峰<sup>2</sup>

1. 贵州理工学院航天航空工程学院, 贵阳 550003

2. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001

**摘要** 回顾了张拉整体机器人的特点,总结了现阶段张拉整体机器人典型样机的研制进展,从地面移动、空间探测和仿生领域3方面概述了张拉整体机器人的应用情况。从初始构型设计、初始预应力分析及稳定性判断、外荷载作用下型态分析、动力学特性及控制方法等方面,阐述了张拉整体机器人的关键技术;探讨了未来张拉整体机器人有待于进一步深入研究的技术难题。

**关键词** 张拉整体机器人;步态控制;构型设计;找形方法

针对不同工作环境,工程师研制了轮式机器人、履带式机器人和腿式机器人等,代替人类进行未知环境探测、排爆和灾后救援等工作。上述移动机器人均为刚体结构,通过实时控制等技术完成运动轨迹的自主规划,控制精度高,但存在环境适应性差等缺陷。近年来,研究人员提出一种基于张拉整体结构(tensegrity)的新型机器人,通过施加一定的预紧力使机器人保持平衡,利用自身结构变形改变重心位置,实现运动的有效控制,并利用结构柔性吸收碰撞载荷,具有质量轻、形态可控、可折叠、承载能力强以及环境适应性好等优点。目前,张拉整体机器人得到了越来越多机器人工程师的青睐,也成为机器人领域研究的热点之一。

## 1 张拉整体机器人

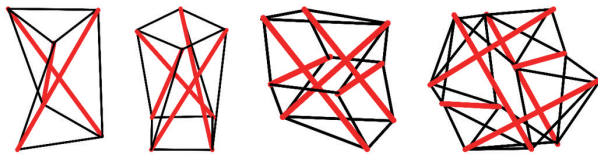
张拉整体结构是一种由受压杆件和受拉柔索相互连接而成自应力平衡的稳定空间结构,各压杆离散布置,压杆末端由拉索连接并形成空间结构<sup>[1-2]</sup>。根据压杆数目,张拉整体结构常被分为3压杆构型、4压杆构型、5压杆构型和6压杆构型等(图1)。在张拉整体结构中,拉索无法承受压力,但通过节点与一根压杆相连,充分发挥拉索强度。由于拉索的冗余分布和预应力的广泛存在,张拉整体结构在特定方向上具有刚度,能够承受一定载荷,并可通过改变结构参数和驱动方式等实现不同变形。鉴于此,工程师将张拉整体结构引入机器人设计

收稿日期:2020-10-31;修回日期:2021-09-10

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(12002097);贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2021]一般266);贵州理工学院高层次人才科研启动项目(XJGC20190956)

作者简介:崔祚,副教授,研究方向为仿生机器人和张拉整体结构,电子信箱: cuizuo@yeah.net

引用格式:崔祚,何景峰.张拉整体机器人关键技术研究进展[J].科技导报,2022,40(7):84-93;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.07.009



(a) 3压杆 (b) 4压杆 (c) 5压杆 (d) 6压杆

图1 不同构型的张拉整体结构

中,充分利用其拉索的柔性特点,通过改变拉索长

度使机器人产生所需运动,具有极高的变形能力,抗压抗震性好,能够较好适应复杂工作环境。

与传统机器人不同,张拉整体机器人具有刚性结构不具备的柔性特征,同时也解决了柔性机器人负载能力弱和速度低等问题,可实现驱动器内置,具有轻量级、可折叠和环境适应性好等优势。与传统刚性机器人和柔性机器人相比,张拉整体机器人的性能对比如表1所示。

表1 不同类型机器人性能比较

类型	自由度	材料应变	精确度	承载能力	灵活性	环境相容性	可控性	路径规划	定位检测
刚性机器人	少	小	高	高	低	无	容易	容易	容易
柔性机器人	无限多	大	低	低	高	最好	难	难	难
张拉整体机器人	多	整体可控	较低	较高	较高	较好	中等	中等	容易

相比较,张拉整体机器人具有很多优点,如质量轻,结构件多为仅承受拉力或压力的轻质杆件;能耗低,驱动器可内嵌到张拉整体结构中,只沿受载路径方向工作;承载能力强,张拉整体机器人有稳定平衡配置,即所有绳索处于拉伸状态,所有杆处于压缩状态,张力结构稳定,载荷自重比高;结构冗余性好,不同结构构型或绳索数量可设计出性能类似的机器人;不同的驱动序列可使机器人产生相同运动,驱动冗余性好;主动控制,可采用绳索驱动、杆驱动或绳-杆混合驱动等方式来控制张拉整体结构,以实现大位移、高精度控制性能;刚度可调,在不改变形状基础上,张拉整体机器人可通过

调整预应力来改变结构刚度;结构可折叠,存储和运输过程中所占空间小,缓冲减震性能较好,环境适应性好。

## 2 张拉整体机器人研究现状

近十几年,张拉整体结构开始逐渐应用到机器人领域,最初只是针对基本理论进行研究,研制了多种张拉整体机器人样机,但并未在实际应用中推广。目前,张拉整体机器人的样机构型主要包括6杆24索、3杆9索、12杆48索等(表2)。不同构型的张拉整体机器人有着不同的性能特征,对应不同

表2 典型的张拉整体机器人

年份	名称	构型	驱动元件	驱动机构	性能特征	研制单位
2005	TR-3	3杆9索	直流伺服电机	索(欠驱动)	重复运动精度低,减振性能差	加州大学圣地亚哥分校 <sup>[3]</sup>
2009	—	6杆24索	形状记忆合金	索(全驱动)	电加热驱动,结构轻巧	日本立命馆大学 <sup>[4]</sup>
2011	ReCTeR	6杆24索	直流电机	索(欠驱动)	有力反馈,原理样机	NASA和根特大学 <sup>[5-6]</sup>
2012	—	6杆24索	气动人工肌肉	索(全驱动)	气源外置,绳索易发生缠绕	日本立命馆大学 <sup>[7]</sup>
2012	SUPERball	6杆24索	无刷直流电机	索(欠驱动)	有力反馈,锂电池,减振性能好	NASA等 <sup>[8-10]</sup>
2015	TT-1、T2	6杆24索	直线电机	索(全驱动)	索由直线电机替代,柔性差	加州大学伯克利分校 <sup>[11-12]</sup>
2015	TT3	6杆24索	氮气推进器、旋转电机	索(欠驱动)	可滚动和跳跃,电器件内置	加州大学伯克利分校 <sup>[13]</sup>
2015	T12-R	12杆48索	直流电机	索(欠驱动)	结构复杂,移动快速,效率高	加州大学伯克利分校 <sup>[14]</sup>

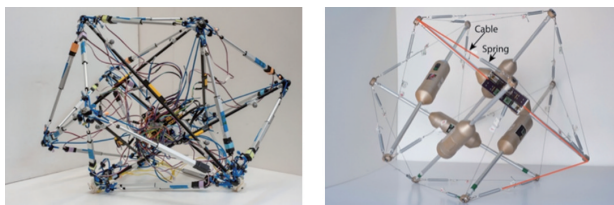
表2 典型的张拉整体机器人(续)

年份	名称	构型	驱动元件	驱动机构	性能特征	研制单位
2017	TT-4mini	6杆24索	直流电机	索(欠驱动)	爬坡能力强	加州大学伯克利分校 <sup>[15-16]</sup>
2017	—	6杆24索	振动电机	索(欠驱动)	运动方向及轨迹具有不可预测性	美国联合学院 <sup>[17]</sup>
2018	—	6杆24索	人工肌肉纤维	索(全驱动)	光驱动,运动精度及承载比高	加州大学圣地亚哥分校 <sup>[18]</sup>
2019	—	6杆24索	形状记忆合金	索(全驱动)	电流驱动,移动快速,可跳跃	韩国成均馆大学 <sup>[19]</sup>
2020	—	—	直流电机	索(全驱动)	可压缩,实现机械臂弯曲缠绕变形	大连理工大学 <sup>[20]</sup>
2020	Starfish	6杆24索	直流电机	索(全驱动)	变形复杂,三维力学响应可编程	韩国蔚山科学技术研究所 <sup>[21]</sup>

的应用场合。本文从张拉整体机器人在地面移动领域、空间探测领域和仿生领域的研究情况出发,具体分析该类型机器人的研究现状。

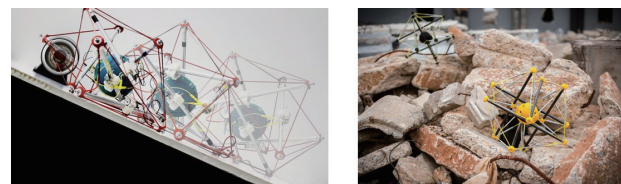
#### 1) 地面移动领域。

目前,张拉整体结构被广泛应用于地面移动机器人设计中,代表性的张拉整体机器人如 Agogino 团队<sup>[11-13]</sup>研制的6压杆张拉整体机器人 TT-1、TT-2 和 TT-3,均由电机驱动(图2)。TT-2 压杆采用玻璃纤维材料,利用24个线性驱动器的伸缩使机器人变形移动;TT-3 将电机等器件安装在“胶囊”状中空圆柱压杆内,通过增加氮气推进器使机器人产生跳跃运动,仿真结果表明最大跳跃高度可达200 m。后续 Kim 等<sup>[14]</sup>研制了12压杆的张拉整体机器人 T12-R,结构为平面对称八面体,运动轨迹为直线。相比6压杆构型机器人 TT-1、TT-2 和 TT-3,12压杆张拉整体机器人 T12-R 能量利用率更高,移动速度更快,不过结构和控制系统也更复杂。



(a) TT-2张拉整体机器人 (b) TT-3张拉整体机器人  
图2 Agogino 团队研制的 TT-2 和 TT-3 张拉整体机器人

Chen 等<sup>[15]</sup>研制了6压杆张拉整体机器人 TT-4mini,电机固定在压杆中间位置,控制器等安装在几何中心位置。如图3所示,TT-4mini 机器人采用双线缆交替驱动,可在倾斜角度24°的斜坡表面运动,运动速度比 TT-3 机器人提高较多。2019年,



(a) TT-4mini 机器人 (b) 石堆救灾现场  
图3 6杆张拉机器人斜面运动过程及灾难救援

Agogino 团队利用无人机将张拉整体机器人从180多米的高空投掷到石堆中,着陆后立即在周围崎岖地形环境中开展灾难救援,移动勘测并回传数据。相比 TT-4mini,用于救援的机器人结构冗度更高,驱动性能更好,这是张拉整体机器人首次在灾难救援现场的实际应用。

Paul 等<sup>[22]</sup>研制了3杆9索张拉整体机器人,杆件为铝管,索件为橡胶绳(图4)。该机器人在铝管顶部装有电机,通过电机控制橡胶绳长度改变结构形状,可获得60 cm/min的蠕动速度,运动速度较慢。为解决蠕动步态效率低等问题,Hirai 等<sup>[23]</sup>研制了6压杆张拉整体机器人,分析了滚动步态控制序列,并利用气动肌肉驱动获得5 m/min的连续滚动速度。后续 Rovira<sup>[24]</sup>分析了3压杆张拉整体机器人的运动方程,结果表明可通过选择驱动构件和设定步态来完成预期规划运动,实现机器人蠕动和滚动运动模式的转换。为进一步提高张拉整体机器人的运动速度,Lu 等<sup>[25]</sup>利用 Dijkstra 算法分析了张拉整体机器人的最优滚动路径;Kim 等<sup>[26]</sup>利用索驱动调整6压杆张拉整体机器人的重心位置,使其在重力作用下实现整体翻滚,以获得更快的运动速度。

总体上,张拉整体机器人蠕动步态一般仅限于3压杆结构和4压杆结构,步态速度较低,运动平

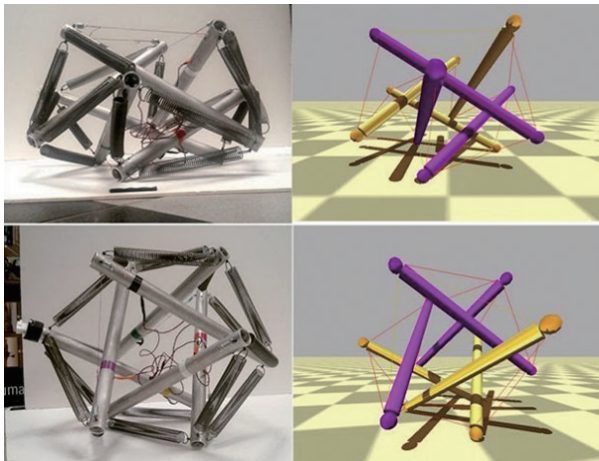


图4 Paul等研制的6压杆张拉整体机器人

稳,适用于非平整地形等复杂环境;滚动步态通常由3杆9索机器人实现,运动速度较快,适合在平整地形上运动,但运动效率低,减振性能差;6杆24索机器人为平面对称的20面体构型,具有良好的缓冲减振和移动性能,可产生滚动和蠕动2种步态,在相对平坦的地形中,滚动步态移动速度快,在斜坡等地形中采用蠕动步态,运动更加稳定,但移动效率较低。跳跃步态适用于翻越沟壑、攀爬楼梯等特殊环境,但需要性能较好的驱动器。目前,滚动步态研究集中在控制序列分析上,缺少驱动参数对变形能力和运动性能的影响分析;跳跃步态受驱动器性能限制,整体研究较少。

国内基于张拉整体结构的移动机器人研究还处于起步阶段,但近年来在基础理论和样机研制等方面取得了积极进展<sup>[27-30]</sup>。例如,哈尔滨工程大学袁野<sup>[28]</sup>利用压杆长度改变张拉整体结构重心,实现

翻滚运动;哈尔滨工业大学解一鸣<sup>[29]</sup>通过扭转绳索改变绳索长度,分析了球形张拉整体机器人的滚动原理和滚动步态;中国科学院沈阳自动化研究所杜汶娟<sup>[30]</sup>分别采用气动人工肌肉和电机驱动,研制了6杆24索张拉整体机器人样机,能够产生连续滚动步态和蠕动步态;Wei等<sup>[31]</sup>研制了柔性仿生张拉整体机械手臂,模拟了章鱼触手的收缩行为,实现各节段的可变运动模式。总体上,国内学者对张拉整体机器人的运动步态、驱动方式等进行了大量的研究,但现存的张拉整体机器人整体结构复杂,难以发挥张拉整体结构的优势,亟需对张拉整体机器人运动控制进行深入研究。

## 2) 空间探测领域。

为应对土卫六(Titan)空间探测任务,NASA研制了6压杆张拉整体机器人SUPERball,由12个无刷直流电机驱动,利用电机控制绳索长度使机器人实现翻滚<sup>[8-10]</sup>。如图5所示,折叠后的SUPERball搭载火箭进入预定轨道后直接高空投放,机器人由扁平折叠状态展开成球状,着陆后开展表面探测<sup>[12-15]</sup>。在土卫六表面,预计SUPERball着陆速度为15 m/s,可利用自身结构弹性吸收着陆撞击载荷。在NASA资助下,Caluwaerts等<sup>[4-5]</sup>研制了6压杆张拉整体机器人ReCTeR样机,该机器人在压杆端部安装了力敏传感器,反馈与地面间的相互作用力,6个直流电机驱动线性弹簧,改变拉索长度使机器人折叠、展开和滚动。此外,NASA还开发了专用仿真软件NTRT,能够仿真分析张拉整体机器人的动力学特性和运动状态。

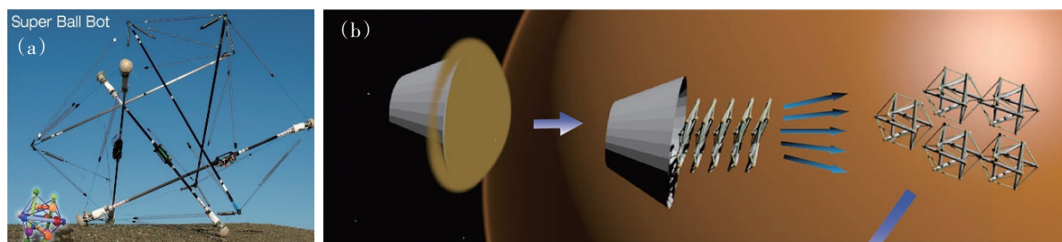


图5 张拉整体机器人SUPERball(a)及其高空投放示意(b)

以上张拉整体机器人均采用电机驱动,虽然结构设计相对成熟,但样机质量较大。为减小样机质量,工程师尝试使用多种智能材料来驱动张拉整体机器人。例如,Shibata等<sup>[3]</sup>和Hirai等<sup>[6]</sup>分别采用形

状记忆合金(SMA)和气动人工肌肉驱动张拉整体机器人;Chung等<sup>[19]</sup>开展了基于扭转预应变SMA驱动的张拉整体机器人研究,能够实现快速滚动和跳跃运动。2019年,Wang等<sup>[32]</sup>研制了采用人工肌肉复

合纤维驱动的6杆24索张拉整体机器人,最大载荷自重比达7.5,可在平坦硬地面、细沙地、石子路面等多种复杂地形运动,综合性能优于大多数现有机器人。上述张拉整体机器人均采用智能材料进行驱动,存在响应速度低、伸缩驱动力小和位置控制精度低等缺点,文献[33]详细论述了张拉整体机器人等在星球表面着陆巡视一体化探测方面的应用现状。

### 3) 仿生领域。

在仿生学领域中,文献[34-35]详细论述了细胞、脊柱、腿部以及人体等结构实质为一种复杂的张拉整体结构(图6)。受此启发,研究者近年逐渐将张拉整体结构应用到仿生机器人设计中。例如,Ingber<sup>[35]</sup>将张拉整体结构应用于骨骼肌肉研究中,

骨骼为压杆,肌肉为拉索,骨骼与周围肌肉共同组成张拉整体结构。在受到外部扰动后,张拉整体结构依靠肌肉自身预应力来维持稳定。Dawn等<sup>[36]</sup>利用张拉整体结构制作了“山羊”足式机器人,依靠脊柱与足端共同控制运动,是张拉整体结构在足式机器人中的首次应用。后续Sabelhaus<sup>[37]</sup>研制了基于张拉整体结构的四足机器人;Bliss等<sup>[38]</sup>和Chen等<sup>[39]</sup>利用张拉整体结构设计了摆动推进的仿生机器人;Tantaworrasilp等<sup>[40]</sup>和Friesen等<sup>[41]</sup>设计了基于张拉整体结构的仿蛇管道机器人,解决了不规则形状管道和管道拐角的适应性问题。细胞、肌肉、筋膜以及骨骼等仿生结构通过张力彼此接合并保持稳定,并以张拉整体结构发挥机能,这种结构特点必将促使张拉整体结构在未来仿生机器人领域得到广泛应用。

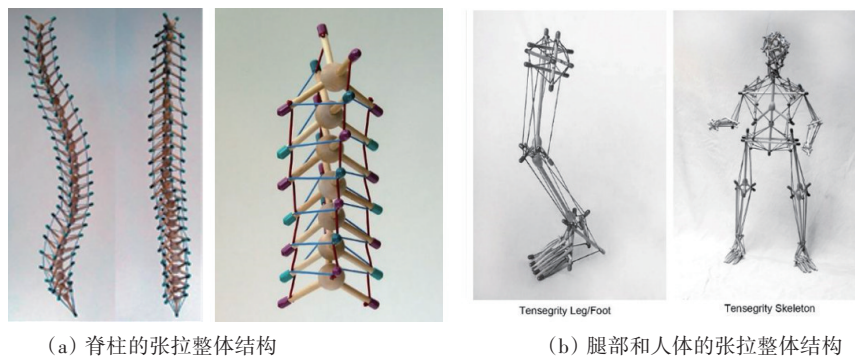


图6 张拉整体结构仿生机器人

目前,传统方法制造的张拉整体式结构较为复杂,而智能材料与张拉整体式结构的集成将为张拉整体机器人的制造提供新手段,这也是当前张拉整体机器人研究的热点之一。例如,韩国Lee等<sup>[42]</sup>使用3D打印方法,制造了由智能材料制成的能够在任何方向行走的张拉整体式结构机器人。Wen等<sup>[43]</sup>提出了一种可快速完成磁性软材料和刚性杆件一体化制造的张拉整体结构加工方法,用于加工具有压扭/拉扭、力学性能可编程等特性的张拉整体结构软体机器人,可实现翻滚、定向爬行等多种运动模式。

## 3 张拉整体机器人关键技术

寻找结构自平衡状态是张拉整体机器人研究的重要内容之一。“形”是指结构几何构型,“态”是指结构内力分布。在张拉整体机器人设计阶段,结

构的力与形是不完全确定的,所以首先要分析机器人的初始构型,然后分析初始预应力分布并判断结构稳定性。在受到外力扰动时,进一步分析张拉整体机器人的找形方法,最后对其动力学特性和控制方法进行分析。其中,张拉整体机器人找形是指在结构拓扑和边界条件确定的前提下,寻求满足机器人结构自应力平衡的几何形态,获得结构初始平衡的过程。

### 3.1 初始构型设计

目前,张拉整体机器人的初始构型设计大多是利用静力平衡方程作为依据,其弹性拉索的内力与构型有关,所以静力学分析可看作是找形问题的拓展。由于结构的冗余特性,张拉整体结构的静力学方程具有较强的非线性特性,数值方法很难求解,但可通过对平衡矩阵进行奇异值分解,从矩阵的角度求解结构外载荷响应,这也为张拉整体机器人的静力学求解提供了一种可行方案。目前,基于静力

平衡理论发展的张拉整体机器人找形方法包括几何解析法和力密度算法2类。

1) 几何解析法。几何解析法是以正多面体张拉整体机器人为主要研究对象,在多面体几何分析基础上发展的找形方法。Motro<sup>[1]</sup>和 Connolly 等<sup>[2]</sup>通过几何分析方法找到许多新的张拉整体结构构型,获得了许多由正多面体衍生而来的自平衡构型。以对称多面体结构为例,可根据拉索和压杆的长度关系,解析求解压杆的最小值。该方法虽然能准确寻找对称多面体张拉整体机器人的构型,但不适用于非对称不规则结构。

2) 力密度算法。力密度算法是一种把力和形状分析结合起来的找形方法。Vassart 等<sup>[44]</sup>首次将力密度法应用到张拉整体结构找形研究中,在给定力密度因子的条件下寻找合理的结构构型,但由于力密度因子的初始值很难确定,所以对构件长度的控制也不是很理想。虽然力密度因子本身结合了力和形状参数,但这种结合是一种线性化的假定。鉴于此,国内外学者提出了多种算法以克服线性化带来的缺陷,如 Zhang 等<sup>[45]</sup>发展了一种基于结构刚度矩阵分析的找形算法;Feng 等<sup>[46]</sup>提出了一种基于矩阵分析理论的并行找形方法,可使张拉整体结构在指定节点坐标下获得唯一构型。上述动态松弛找形方法是基于节点的,该方法对于刚度大的杆件不易收敛,Li 等<sup>[47]</sup>提出了基于任务空间的动态松弛找形方法,将刚度较大的部分看作刚性子结构,方法收敛性好。

张拉整体机器人初始构型设计是通过构件几何拓扑关系、节点空间位置、构件拉压属性和构件材料属性等要素来确定,所以构型设计从本质上是已知上述若干要素,寻找到合适的其他位置要素,使机器人整个结构能够达到稳定自平衡状态。目前,国内外学者并未给出指导性的初始构型设计方法,设计理论仍然是开放性问题。通常情况下,初始构型的设计依据分为2类:一类是依据仿生学设计,如参照人体或者动物体肌肉骨骼结构所设计的张拉整体结构仿生样机(图6);另一类是同等外力下轻质化设计,涉及到受压结构、受拉结构、悬臂梁结构等,但如何证明在同等外力下张拉整体结构质量最轻仍然较为困难,特别是三维空间结构的最小

质量设计,目前仍然没有较好的解决办法。

### 3.2 初始预应力分析及结构稳定性判断

在施加预应力之前,张拉整体机器人无法依靠自身刚度维持形状,结构处于松弛状态,只有施加预应力才能成形并承受一定载荷。因此,如何合理确定初始预应力分布是解决该类问题的关键。尽管张拉整体机器人找形结果中通常包含初始内力分布情况,但本质上是一种以形状参数为主的平衡位形搜索方法,由此得到的预应力分布一般仅能保证满足平衡方程,无法综合考虑结构的稳定性、几何对称性以及预应力分布均匀性等因素。因此,初始预应力设计需要在已知结构拓扑条件和几何尺寸的前提下,以内力参数为主变量,寻求满足要求的初始预应力分布。Quirant<sup>[48]</sup>、Sanchez 等<sup>[49]</sup>利用结构的多组自应力模态,通过模拟退火算法、蚁群算法、鱼群算法等方法对自应力进行线性组合,得到了满足稳定性要求的预应力分布,但该方法并未充分考虑张拉整体结构的几何对称性。相类似的, Lee 等<sup>[50]</sup>将遗传算法引入到张拉整体结构预应力分析中;Chen 等<sup>[51]</sup>利用蚁群算法对不规则张拉整体结构进行找形分析;Li 等<sup>[52]</sup>采用蒙特卡罗找形法寻找张拉整体结构的构型;Cai 等<sup>[53]</sup>提出了基于梯度下降最优算法,并对张拉整体结构进行了初始构型研究。

上述张拉整体结构大多满足特定的几何对称条件,结构预应力分布理论上也与对称几何属性相吻合。鉴于此,Connolly 等<sup>[54]</sup>对对称位置的任一节点进行受力分析,获得汇交于节点各杆件的内力关系;Sultan 等<sup>[55]</sup>基于广义坐标和虚功原理,推导了张拉整体结构施加预应力的一般条件;Chen 等<sup>[56]</sup>应用群集理论将节点/单元力向量空间分解为具有特定对称属性的子空间,利用对称子空间的基底重新表述节点/单元力,实现平衡矩阵分块对角化,通过求解子矩阵的特征值研究自应力分布。该方法适合分析满足对称性要求的自应力模态机构,计算过程简单。但在实际应用中,由于压杆不连续,施加了预应力的张拉整体机器人可能变为不稳定结构。虽然 Maxwell 准则<sup>[57]</sup>给出了非预应力杆系结构几何稳定的必要条件,但在分析预应力结构时具有明显的局限性。为了弥补该缺陷,国内外学者对张拉整体机器人的结构稳定性开展了研究。

1) 以平衡矩阵为稳定性判据。Pellegrino 等<sup>[58]</sup>通过分析杆系结构的平衡矩阵,引入几何力判定稳定性,给出了自应力模态使机构硬化的判别式;对于自应力模态较多的结构,Chen 等<sup>[59]</sup>采用遗传算法、蚁群算法等智能优化算法,建立优化模型讨论铰接杆系的几何稳定性;对于高对称张拉整体结构,Chen 等<sup>[60]</sup>采用群集理论分析机构位移及自应力模态的对称属性,并根据对称性的阶次判定结构的可动性能。

2) 以切线刚度矩阵的正定性为判据。Connelly<sup>[61]</sup>从数学的角度解释张拉整体结构的刚度,分析了势能函数的 Hessian 矩阵对稳定性的影响。Guest<sup>[62]</sup>利用节点平衡方程,给出了切线刚度矩阵的通用解法;Zhang 等<sup>[63]</sup>以切线刚度矩阵的正定性为判据,分析了预应力张拉整体结构的稳定性。上述方法均采用切线刚度矩阵的正定性来判断结构稳定性。

张拉整体机器人平衡形态可不依赖于外部约束而存在,因此如何消除刚体位移的影响是张拉整体机器人稳定性判定的关键技术之一。根据自平衡的结构特点,稳定性可理解为能对除刚体位移外的所有位移模态提供正刚度。在张拉整体机器人中,结构刚度分为主动刚度和被动刚度,而预应力(或控制内力)可以改变刚度,这在机器人应用中至关重要。要达到结构稳定则需要刚度矩阵是正定的,被动刚度通常是正定的,而主动刚度则与预应力有关,预应力越大,刚度越大。实际上预应力的增加可能会造成某些刚度特征值逐渐变小最后变为 0 或负值,抵消被动刚度中的正刚度,整个结构就变成非正定刚度矩阵(特征值有负值),转变为不稳定结构。由于张拉整体结构节点位移模态有无穷种,抵抗不同位移模态的能力(即结构刚度)也有较大差异,因此还需深入研究张拉整体结构的刚度问题。目前研究侧重于稳定性判定,对机器人结构刚度缺乏系统分析。

### 3.3 外荷载作用下形态分析

作为一种柔性空间体系,张拉整体机器人对外部扰动十分敏感,随机外部荷载可能导致结构形态偏离初始形态,影响机器人正常工作。现有分析方

法一般只针对无边界约束的自支承体系,结构仅在预应力作用下达到自平衡态,无法保证结构能够抵抗各类型外荷载作用。对于张拉整体机器人,外荷载作用可能使结构形状发生非线性变化,变形后的结构可能伴随机构位移,故研究张拉整体机器人在外荷载作用下的形态分析方法是非常必要的,主要有以下 3 种方法。

1) 非线性矩阵位移法。以矩阵位移法为基础,将结构切线刚度矩阵修正为可逆矩阵,然后利用几何刚度矩阵分析初始内力的刚化效应。根据这一原理,Kebiche 等<sup>[64]</sup>利用全拉格朗日公式的非线性有限元方法,分析了结构变形轨迹。此外,还可应用基于 Newton-Raphson 迭代法、荷载增量法或位移增量法的几何非线性有限元法等来研究结构受载后的平衡形态。

2) 动力松弛法。动力松弛法是一种几何非线性结构分析方法,通过引入虚拟质量和虚拟阻尼,将静力问题转化为拟动力问题,利用伪瞬态分析方法求解结构的刚度方程,运算速度快、计算收敛性好。Motro<sup>[65]</sup>最早将动力松弛法推广至张拉整体结构找形研究中,认为张拉整体结构从初始自应力平衡状态到后期未知状态均满足基本运动方程。动力松弛法适合分析几何非线性的张拉整体机器人,当结构节点目数较少时,动态松弛法计算收敛较快,但收敛速度会随节点数增加而明显降低。

3) 线性力法。通过添加“几何力”向量,对结构的平衡矩阵进行修正,使其满足行满秩条件,然后计算张拉整体机器人的结构形态。当结构存在强非线性时,可利用增量非线性力法(NFM)分析结构变形全过程。该方法通过对结构平衡矩阵进行不断修正并分解奇异值,不但能跟踪到屈曲平衡路径,精确到达奇异点,而且能够跟踪运动路径,获得机器人运动参数。线性力法建立的平衡矩阵为非对称的长方阵,奇异值分解计算量大,但该结构平衡矩阵的分解可以反映结构体系的静动定性质、自应力模态和机构位移模态等多种信息。

### 3.4 动力学特性及控制方法

对张拉整体机器人初期研究主要集中在静力学分析,重点在找形方法及稳定性的基础研究上,

后期研究逐渐转向动力学及运动控制方面,代表性研究包括利用微分代数方程(DAE)和常微分方程(ODE)建立的动力学模型。例如, Murakami<sup>[66]</sup>推导出了张拉整体机器人最小非线性动力学模型,并分析了预应力和模型特性;赵建英<sup>[67]</sup>建立了带有约束(如某些节点固定或者地面滑动等)的向量形式最小动力学模型。目前,在动力学建模过程中,杆是长度不变的刚体,这就相当于一个代数约束,动力学模型则变为由微分方程和代数方程组成的混合动力学方程,难于求解。为了便于求解,将杆长不变的代数方程进行微分,将其转化为微分方程,然后整个动力学不存在代数方程,但微分方程所求解的数值解有时会破坏杆长不变的约束条件,所以常采用增加额外的阻尼项来保证收敛。

对于张拉整体机器人,传统的基于改变构件有效长度的驱动策略需要控制很多的绳索,而采用滑动绳索驱动不仅可克服这一缺点,且已有研究表明滑动绳索的引入可减小系统在驱动过程中的能量消耗。目前,张拉整体结构数值分析多为静力或动力响应分析,而基于“张拉整体”概念设计的连续型机器人控制更是罕有文献报道。2020年,彭海军团队<sup>[20]</sup>针对张拉整体连续型机械臂轨迹跟踪控制问题,提出了一种绳索驱动的保辛瞬时最优控制方法。总体上,针对张拉整体机器人多自由度、多模态弹性结构特点,现阶段研究者多采用智能控制方法来控制机器人基本运动,如遗传算法、协同进化算法、深度强化学习方法、神经控制和中枢模式发生器(CPG)节律控制等。

## 4 结论

张拉整体机器人还需要更加完善的理论与实验研究,未来亟需解决的主要问题包括以下4方面。

1) 张拉整体机器人初始形态设计与参数优化。机器人初始结构形态及找形方法等缺少深入研究,特别是几何不规则、多自应力模态等复杂结构,理论成果少。同时,缺少以特定几何构型为机器人基础结构的找形分析方法,缺少结构最优参数的理论分析方法。

2) 滚动步态和蠕动步态控制。由于张拉整体

机器人重心位置高,地面接触面积小,虽然使用多个驱动器可产生快速滚动运动,但目前仍然采用穷举法分析控制序列,试验耗时耗力,缺少寻找合理控制序列的方法,缺乏滚动步态控制以及运动轨迹跟踪等方面研究。此外,还缺乏针对蠕动步态的有效控制方法,使机器人产生稳定蠕动步态,避免产生滚动。

3) 缓冲减振技术研究。在复杂地形中运动时,张拉整体机器人利用自身弹性缓和冲击,运动灵活,具有良好的越障性。但当环境存在较大外部载荷干扰时,如何有效吸收冲击能量并维持结构稳定,如何根据地面环境自主调整结构型态,这些方面目前还缺少足够研究。

4) 多系统分布式协同控制。单个张拉整体机器人作业能力有限,为提高工作任务可靠性和作业范围,有必要开展多机器人的分布式工作,综合利用人工智能算法等手段,解决多张拉整体机器人的系统协同驱动问题,使工作任务顺利完成。

## 参考文献(References)

- [1] Motro R. Tensegrity structural systems for the future[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006: 1-257.
- [2] Connelly R, Back A. Mathematics and tensegrity[J]. American Scientist, 1998, 86(2): 142-151.
- [3] Shibata M, Hirai S. Rolling locomotion of deformable tensegrity structure[J]. Mobile Robotics, 2009, 19(6): 479-486.
- [4] Caluwaerts K, Despraz J, Iscen A, et al. Design and control of compliant tensegrity robots through simulation and hardware validation[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2014, 11(98): 1-14.
- [5] Caluwaerts K. Design and computational aspects of compliant tensegrity robots[D]. Ghent: Ghent University, 2014: 127-158.
- [6] Hirai S, Imuta R. Dynamic modeling of tensegrity robots rolling over the ground[C]//The 5th International Conference on Computational Methods (ICCM2014). Cambridge: Scien Tech Publisher, 2014: 272-280.
- [7] Bruce J. Design, building, and testing of SUPERball: A tensegrity robot to enable space exploration[D]. Santa Cruz: UC Santa Cruz, 2016: 33-46.
- [8] Sabelhaus A P, Bruce J, Caluwaerts, et al. System design and locomotion of SUPERball, an untethered tensegrity robot[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Seattle: IEEE Publisher, 2015: 2867-2873.
- [9] Iscen A, Caluwaerts K, Bruce J, et al. Learning tensegrity locomotion using open-loop control signals and coevolu-

- tionary algorithms[J]. *Artificial Life*, 2015, 21(2): 119–140.
- [10] Sunspiral V, Gorospe G, Bruce J, et al. Tensegrity based probes for planetary exploration: Entry, descent and landing (EDL) and surface mobility analysis[C]//The 10th International planetary probe workshop (IPPW). San Jose: The Planetary Science Program, 2013: 1–13.
- [11] Kim K, Agogino A K, Agogino A M. Emergent form-finding for center of mass control of ball-shaped tensegrity robots[C]//International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. Istanbul: International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2015: 1–17.
- [12] Kim K, Agogino A K, Toghyan A, et al. Robust learning of tensegrity robot control for locomotion through form-finding[C]//2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Hamburg: IEEE Publisher, 2015: 5824–5831.
- [13] Chen L H, Kim K, Tang E, et al. Soft spherical tensegrity robot design using rod-centered actuation and control [J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2017, 9(2): 1–9.
- [14] Kim K. On the locomotion of spherical tensegrity robots [D]. Berkeley: University of California, 2016: 9–22.
- [15] Chen L H, Cera B, Zhu E L, et al. Inclined surface locomotion strategies for spherical tensegrity robots[C]//2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vancouver: IEEE Publisher, 2017: 4976–4981.
- [16] Kinjo T, Aoki T. Realization of jumping motion for walking robot with spherical outer shell[C]//The 4th International Conference on Design Engineering and Science (ICDES 2017). Ghent: IOP science, 2017: 242–249.
- [17] Rieffel J, Mouret J B. Adaptive and resilient soft tensegrity robots[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(3): 1–12.
- [18] McBride M K, Martinez A M, Cox L, et al. A readily programmable, fully reversible shape-switching material[J]. *Science Advances*, 2018, 4(8): 1–7.
- [19] Chung Y S, Lee J H, Jang J H, et al. Jumping tensegrity robot based on torsionally prestrained SMA springs[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(43): 40793–40799.
- [20] 李冰玉, 阚子云, 彭海军, 等. 基于张拉整体结构的连续型弯曲机械臂设计与研究[J]. *机器人*, 2020, 42(6): 686–696.
- [21] Lee H, Jang Y, Choe J K, et al. 3D-printed programmable tensegrity for soft robotics[J]. *Science Robotics*, 2020 (5): eaay9024.
- [22] Paul C, Francisco J, Valero-Cuevas, et al. Design and control of tensegrity robots for locomotion[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22: 944–957.
- [23] Hirai S, Koizumi Y, Shibata M, et al. Active shaping of a tensegrity robot via pre-pressure[C]//2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Wollongong: IEEE Publisher, 2013: 19–25.
- [24] Rovira A G, Tur J M M. Control and simulation of a tensegrity-based mobile robot[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2009, 57(5): 526–535.
- [25] Lu Y, Xu X, Luo Y. Path planning for rolling locomotion of polyhedral tensegrity robots based on dijkstra algorithm[J]. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 2019, 60(4): 273–286.
- [26] Kim K, Agogino A K, Agogino A M. Rolling locomotion of cable-driven soft spherical tensegrity robots[J]. *Soft Robot*, 2020, 7(3): 346–361.
- [27] 李团结, 车明奎. 张拉整体结构外力与形变间关系分析及实验验证[J]. *西安电子科技大学学报*, 2017, 44(1): 24–28.
- [28] 袁野. 球形张拉整体机器人研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [29] 解一鸣. 球形张拉整体机器人滚动分析与控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 58–66.
- [30] 杜汶娟. 基于张拉整体的可变结构体机器人移动步态研究[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2017.
- [31] Wei D W, Gao T, Mo X J, et al. Flexible bio-tensegrity manipulator with multi-degree of freedom and variable structure[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020(33): 3.
- [32] Wang Z J, Li K, He Q G, et al. A light-powered ultralight tensegrity robot with high deformability and load capacity[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(7): 1–8.
- [33] 路达, 刘金国, 高海波. 星球表面着陆巡视一体化探测机器人研究进展[J]. *航空学报*, 2021, 42(1): 100–116.
- [34] Levin S M. Biotensegrity: The structural basis of life[M]. Scotland: Handspring Publishing, 2019: 56–85.
- [35] Ingber D E, Tensegrity I. Cell structure and hierarchical systems biology[J]. *Journal of Cell Science*, 2003, 116(7): 1157–1173.
- [36] Dawn H S, Sunspiral V, Teodorescu M. Morphological design for controlled tensegrity quadruped locomotion [C]//The 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. Piscataway: IEEE, 2016: 4714–4719.
- [37] Sabelhaus A P. Tensegrity spines for quadruped robots [D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2019.
- [38] Bliss T, Iwasaki T, Bart-Smith H. Central pattern generator control of a tensegrity swimmer[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18: 586–597.
- [39] Chen B, Jiang H. Swimming performance of a tensegrity robotic fish[J]. *Soft Robot*, 2019, 6(4): 520–531.
- [40] Tantaworasilp A, Richardson R C. Metamorphic tensegrity structure for pipe inspection[C]//In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Tokyo: IOP Publishing, 2020, 715(1): 012087.
- [41] Friesen J, Pogue A, Bewley T, et al. DuCTT: A tensegrity robot for exploring duct systems[C]//2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE Publisher, 2014: 4222–4228.
- [42] Lee H, Jang Y, Choe J, et al. 3D-printed programmable tensegrity for soft robotics[J]. *Science Robotics*, 2020, 5(45): eaay9024.
- [43] Wen L, Pan F, Ding X. Tensegrity metamaterials for soft robotics[J]. *Science Robotics*, 2020, 5(45): eabd9158.
- [44] Vassart N, Motro R. Multiparametered form-finding method: Application to tensegrity systems[J]. *International Journal of Space Structures*, 1999, 14(2): 147–154.
- [45] Zhang L Y, Li Y, Cao Y P, et al. Stiffness matrix-based form-finding method of tensegrity structures[J]. *Engineering Structures*, 2014, 58(7): 36–48.

- [46] Feng X, Guo S. A novel method of determining the sole configuration of tensegrity structures[J]. *Mechanics Research Communications*, 2015, 69: 66–78.
- [47] Li X, Kong W, He J. A task-space form-finding algorithm for tensegrity robots[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 100578–100585.
- [48] Quirant J. Self-stressed systems comprising elements with unilateral rigidity: Self-stress states, mechanisms and tension setting[J]. *International Journal of Space Structures*, 2007, 22(4): 203–214.
- [49] Sanchez R, Maurin B, Kazi-Aoual M N, et al. Self-stress states identification and localization in modular tensegrity grids[J]. *International Journal of Space Structures*, 2007, 22(4): 215–224.
- [50] Lee S, Lee J. Form-finding of tensegrity structures with arbitrary strut and cable members[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, 85(8): 55–62.
- [51] Chen Y, Feng J, Wu Y. Novel form-finding of tensegrity structures using ant colony systems[J]. *Journal of Mechanisms & Robotics*, 2012, 4(3): 310011–310017.
- [52] Li Y, Feng X Q, Cao Y P, et al. A Monte Carlo form-finding method for large scale regular and irregular tensegrity structures[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2010, 47(14/15): 1888–1898.
- [53] Cai J, Feng J. Form-finding of tensegrity structures using an optimization method[J]. *Engineering Structures*, 2015, 104: 126–132.
- [54] Connelly R, Back A. Mathematics and tensegrity[J]. *American Scientist*, 1998, 86(2): 142–151.
- [55] Sultan C, Corless M, Skelton R E. The prestressability problem of tensegrity structures: Some analytical solutions[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2001, 38(30/31): 5223–5252.
- [56] Chen Y, Feng J, Ma R, et al. Efficient symmetry method for calculating integral prestress modes of statically indeterminate cable-strut structures[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141(10): 4014240–4014250.
- [57] Calladine C R. Buckminster Fuller's tensegrity" structures and Clerk Maxwell's rules for the construction of stiff frames[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1978, 14(2): 161–172.
- [58] Pellegrino S, Caladine C R. Matrix analysis of statically and kinematically indeterminate frameworks[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1986, 22(4): 409–428.
- [59] Chen Y, Feng J, Wu Y. Prestress stability of pin-jointed assemblies using ant colony systems[J]. *Mechanics Research Communications*, 2012, 41: 30–36.
- [60] Chen Y, Guest S D, Fowler P W, et al. Two-orbit switch-pitch structures[J]. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 2012, 53(3): 157–162.
- [61] Connelly R. Tensegrity structures: Why are 'they stable?' [C]// *Rigidity Theory and Applications*. New York: Kluwer/Plenum Publishers, 1999: 47–54.
- [62] Guest S D. The stiffness of prestressed frameworks: A unifying approach[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, 43(3/4): 842–854.
- [63] Zhang J Y, Ohsaki M. Stability conditions for tensegrity structures[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44(11/12): 3875–3886.
- [64] Kebiche K, Kazi-Aoual M N, Motro R. Geometrical non-linear analysis of tensegrity systems[J]. *Engineering Structures*, 1999, 21(9): 864–876.
- [65] Motro R. Tensegrity systems and geodesic domes[J]. *International Journal of Space Structures*, 1990, 5: 341–351.
- [66] Murakami H. Static and dynamic analyses of tensegrity structures, part II. quasi-static analysis[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2001, 38(20): 3615–3629.
- [67] 赵建英. 两级张拉整体结构动力学与运动控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

## Research state and key technology analysis of tensegrity robots

CUI Zuo<sup>1</sup>, HE Jingfeng<sup>2</sup>

1. Department of Aerospace Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China

2. School of Mechatronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

**Abstract** According to the latest researches of tensegrity robot, the characteristics of tensegrity robot are reviewed comprehensively and briefly, and the developments of typical prototypes are summarized. Furthermore, applications of tensegrity robot are introduced from three aspects of ground movement, space exploration and bionic field. On this basis, the key technologies are illustrated concerning initial configuration design, initial prestress analysis and structure stability judgment, morphology determination under external load, dynamic characteristics, and control methods. As last, technical problems of tensegrity robot to be studied in the future are discussed.

**Keywords** tensegrity robot; gait control; configuration design; form-finding method ●



(责任编辑 傅雪)