

DOI: 10.3901/JME.2020.19.079

面向踝部康复的广义球面并联机构型综合^{*}

刘承磊 张建军 戚开诚 牛建业 李为民 郭士杰

(1. 河北工业大学机械工程学院 天津 300130;

2. 河北省机器人感知与人机融合重点实验室 天津 300130)

摘要: 针对现有踝关节康复机器人难以充分拟合踝关节复杂运动, 人机相容性较差的问题, 提出一系列与踝关节实际骨结构匹配程度更高的串联等效拟合模型。为满足踝关节串联等效拟合模型对康复机器人机构本体的功能需求, 给出一种具有串联等效拟合模型的广义球面并联机构型综合方法。首先枚举出广义球面机构的基本构件及运动副, 并依此构造出广义球面支链。继而基于螺旋理论分析单支链以及多支链组合对动平台的约束性能, 给出支链的组合条件与原则, 阐明不同支链在机构中作用的异同, 并依此归纳出位置支链和姿态支链两类广义球面基本支链。最后基于基本支链的约束特性, 根据支链组合条件, 综合出一系列适用于踝关节康复机器人本体研究的广义球面并联机构, 并通过螺旋理论证明其与踝关节串联等效拟合模型的自由度数及性质具有一致性, 为此类康复机器人本体设计提供理论依据。

关键词: 踝关节康复; 并联机构; 广义球面机构; 型综合

中图分类号: TH112

Synthesis of Generalized Spherical Parallel Manipulations for Ankle Rehabilitation

LIU Chenglei ZHANG Jianjun QI Kaicheng NIU Jianye LI Weimin GUO Shijie

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130;

2. Key Laboratory of Robot Perception and Human-Machine Fusion of Hebei Province, Tianjin 300130)

Abstract: In view of the poor human-machine compatibility of existing ankle rehabilitation robots, which makes it difficult to fully fit the complex motion of the ankle joint, a series of series equivalent fitting models with a higher degree of matching with the actual bone structure of the ankle joint are proposed. In order to meet the functional requirements of this type of equivalent fitting model on the mechanism ontology of rehabilitation robot, a configuration synthesis method of generalized spherical parallel mechanism with series equivalent fitting model is presented. First, the basic components and kinematic pairs of the generalized spherical mechanism are enumerated, and the generalized spherical limb is constructed accordingly. Then, based on the spiral theory, the constraint performance of the single limb and limb combination on the moving platform is analyzed. The combination conditions and principles of limbs are given, the role of different limbs in the mechanism is clarified, and two types of general spherical basic limbs, position limb and orientation limb, are summarized accordingly. Finally, based on the constraint characteristics of the basic limb and the combination conditions, a series of generalized spherical parallel mechanisms suitable for the study of the ankle rehabilitation robot ontology are synthesized. The screw theory proves that the number and nature of degrees of freedom of these of mechanism and the equivalent fitting model of the ankle are consistent, which provides a theoretical basis for the design of such rehabilitation robots.

Key words: ankle rehabilitation robot; parallel mechanism; generalized spherical surface mechanism; type synthesis method

0 前言

随着医疗领域与机器人领域的不断发展, 机器

人在医疗手术以及医疗康健领域的应用均展现出了蓬勃的态势。目前来说, 踝关节疾病在中老年人群中发病率越来越高, 由于意外导致的踝部损伤也出现的越来越频繁, 人们对踝部康复机器人的需求日益显著。针对此类问题, 国内外各种康复型机器人设计方案层出不穷, 美国 Rutgers 大学^[1]基于 Stewart 机构提出的 6 自由度踝关节康复机器人具有自由度

^{*} 国家重点研发计划(2016YFE0128700)、天津市自然科学基金重点基金(17JCZDJC40200)、河北省省级科技计划(E2020103001)和河北省教育厅科学研究计划重点项目(ZD2019052)资助项目。20191226 收到初稿, 20200521 收到修改稿

多、刚度大,运动拟合精度高的优点,可以有效匹配踝部康复运动,但其各支链耦合程度较强,控制系统较为复杂。DAI等^[2]将少自由度并联机构用于踝关节康复机器人本体设计,基于3-SPS/S型并联机构研发了一款踝关节康复机器人,赵铁石^[3]和刘更谦等^[4-5]提出的3-RSS/S型踝关节康复机器人以及SAGLIA等^[6-7]开发的3-UPS/U踝关节康复机器人,均推动了此类康复机器人的发展与完善。该类设计大幅度降低了机器人的构型复杂程度和控制难度,实现了将动平台的自由度集中于转动自由度上,但其动平台各向转动轴线与人体踝关节实际转动轴线偏差较大,易引起踝关节的非预期运动,可能会造成二次损伤。MATTEO等^[8]、边辉等^[9]、李剑峰等^[10]国内外学者分别基于灵巧眼机构、2-RRR/UPRR并联机构、2-UPS/RRR型混联机构等设计出一系列具有固定远程回转中心的踝关节康复机器人。该类机器人用于踝关节康复训练时,踝关节运动中心始终位于机构远程回转中心附近,大幅度提高了机器人的人机相容程度,使康复效果得到显著提升,就目前来说,国内外最为先进的即为该类机器人,相比之下其优势也显得尤为突出。

但事实上,人体踝关节是人体最为复杂的关节之一,其结构上包括了胫距关节和距下关节两部分,其运动即为两个关节的运动复合,其空间各向转动轴线空间无汇交关系,如果其康复运动为固定球心的球面运动,则必然影响其人机相容性,引起人机交互力。故针对踝关节,康复机器人领域普遍认同的球面副等效模型仍存在一定的不足或缺陷,若想要有效提高康复机器人运动与人体关节运动的匹配程度,首先要提出更为合理的人体关节机构等效模型,再在等效模型的基础上构造更为先进的康复机器人机构本体。

目前来说,国内外研究人员已在并联机构方面给出了多种较为完善的型综合方法,包括螺旋理论^[11]、位移子群^[12]和图论法^[13]等,其中以螺旋理论法最为常见。HUANG等^[14]、KONG等^[15-16]、FANG等^[17]、LI等^[18]、GAO等^[19]等均基于该方法综合出了一系列极具意义与特色的并联机构,其中不乏有适用于踝关节康复机器人本体研究的并联机构。LI等^[20]提出了一类可由固定移动副驱动的RCM并联机构。宗光华等^[21-22]对一维远程运动中心机构进行了系统的型综合。WU等^[23-25]提出一类二自由度等径球面纯滚并联转动机构。XIE等^[26]基于Grassmann线几何和Atlas法综合出一系列四自由度并联机构。KONG等^[27]对三自由度球面并联机构进行了系统的型综合。HUANG等^[28-30]提出了一

类无汇交轴线的三自由度转动并联机构。而目前来说,从踝关节真实骨结构出发,致力于提高踝部康复机器人机构本体的人机融合度的研究仍然相对缺乏。

因此,本文将结合踝关节实际结构,提出一类高匹配度踝关节串联等效拟合模型,并以满足等效模型运动需求为目标,结合枚举法与螺旋理论给出一种具有串联等效拟合模型的广义球面并联机构型综合方法。枚举出广义球面机构的基本构件、运动副以及全部支链;基于螺旋理论分析单支链以及多支链组合对动平台的约束性能以及在机构中的作用,进行支链的归纳和分类;综合出一系列符合要求的广义球面并联机构,建立其与串联等效拟合模型的关系,为此类机器人本体设计提供理论依据。

1 踝关节串联等效拟合模型的建立

1.1 踝关节的结构分析

根据人体解剖学分析,人体踝部主要由胫骨、距骨、跟骨及腓骨组成,胫骨与距骨组成胫距关节,距骨与跟骨组成距下关节,两个关节的复合运动即为踝部运动。踝部运动具有很强的复合性,无论是在人体矢状面内的背伸与跖屈运动,或是冠状面内的内翻与外翻运动,亦或者是绕人体下肢纵轴的转动,均由胫距关节和距下关节以一定关联度配合完成,如图1所示。

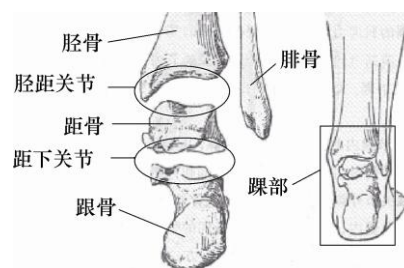


图1 人体踝关节实际结构图

三种运动的空间回转轴线空间均不固定,且并无汇交关系。目前来说,康复机器人领域普遍认同的匹配程度最高的踝关节等效模型有球关节等效模型^[9]与空间RR串联等效拟合模型^[31]两种,如图2^[9]与图3^[31]所示。相比较而言,空间RR串联等效拟合模型充分考虑了踝关节距骨对关节运动的影响,两个转动副分别拟合胫距关节和距下关节,从结构上来说,合理程度高于球关节等效模型;球关节等效模型充分考虑了踝关节的运动组成,不仅能匹配踝关节背伸跖屈与内翻外翻运动,而且可以满足绕

人体下肢纵轴的转动需求, 就符合关节运动自由度需求角度而言, 合理程度高于空间 RR 串联等效拟合模型。这两类等效模型虽各有优势, 但与踝关节实际结构相比仍存在差异, 匹配精度仍有待提高。

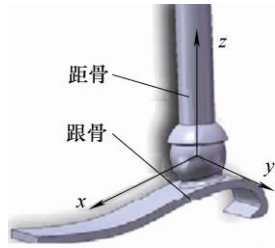


图2 球关节等效模型



图3 空间 RR 串联等效拟合模型

1.2 新型踝部等效拟合模型的提出

为提高踝部等效模型合理程度, 在上述两种等效模型的基础上, 结合踝部真实结构, 对其进行进一步研究, 提出 UR 型、 UU 型、 US 型三种新型的踝部串联等效拟合模型, 如图4所示。此类等效模型将胫距关节均等效为虎克铰, 距下关节分别等效为转动副、虎克铰以及球面副, 在考虑踝部距骨对运动影响的前提下, 充分满足了踝部的自由度要求。此三类等效模型的等效胫距和等效距下关节的相对位置固定, 故称其为“定距踝部串联等效拟合模型”。上述三种等效拟合模型与踝关节的匹配程度逐级递增, 但以其为基础设计的康复机器人的复杂程度和制造成本也逐级增加。故相对而言, UR 型、 UU 型和 US 型等效模型依次为低精度、中精度和高精度拟合模型, 分别适用踝关节的轻度、中度和高度损伤情况。

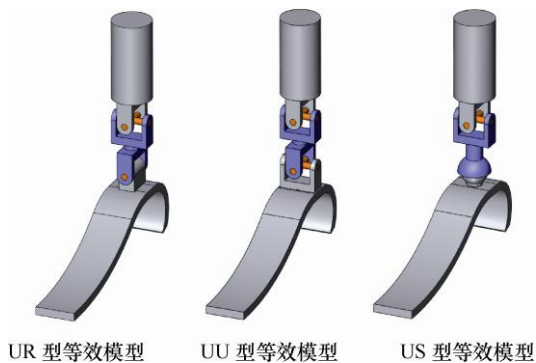


图4 定距踝关节串联等效拟合模型

为满足不同踝部尺寸患者对康复机器人的需求, 提高康复机器人的适应能力, 在定距踝部串联等效拟合模型的基础上增加了一个中间移动副, 提出 UPR 型、 UPU 型和 UPS 型串联等效拟合模型, 如图5所示。其可有效调节两关节的相对位置, 从而适应不同距骨尺寸的踝关节康复运动, 故称此三种等效模型为“变距踝部串联等效拟合模型”。

由于距骨尺寸的限制, 人体胫距关节与距下关节转动中心的距离较小, 如使用串联机构作为康复机器人机构本体, 则无法在如此微小的尺寸范围内布置足够扭矩的电动机, 难以满足康复机器人要求。为解决此问题, 提出使用并联机构拟合串联等效拟合模型机构运动, 从而提高踝部康复精度的新思路。这要求目标并联机构应具有两个回转中心, 分别匹配胫距关节与距下关节, 两个回转中心间的距离满足人体距骨尺寸要求。为此, 提出一种具有两个广义球心的广义球面并联机构型综合方法。

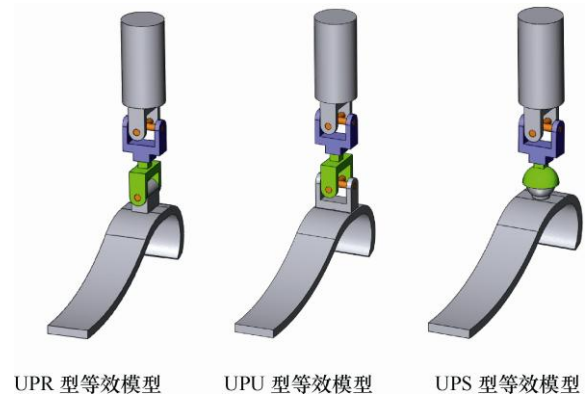


图5 变距踝关节串联等效拟合模型

2 广义球面并联机构的支链综合


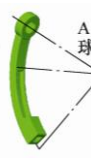


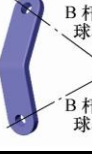
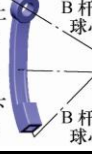
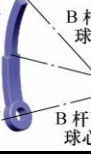
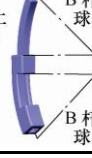
广义球面支链是构造广义球面并联机构的基础, 其包括广义球面构件及运动副, 其约束螺旋的数量及性质决定了广义球面并联机构的自由度及性质, 影响机构特性。为此, 使用枚举法构造一系列广义球面支链, 并基于螺旋理论分析其性质。

2.1 广义球面构件的类型

广义球面构件是具有“构件广义球心”的特殊构件。“构件广义球心”则是以一定要求固结在构件坐标系内的特殊定点。广义球面构件包括广义球面连杆及动、静平台。

广义球面连杆是组成广义球面支链的基本构件, 其分为 A 与 B 两类, 每一类均包括 RR 、 RP 、 PR 、 PP 四种类型。综如表1所示。

表 1 广义球面连杆构型表

	RR 型连杆	RP 型连杆	PR 型连杆	PP 型连杆
A 类连杆				
B 类连杆				

R 表示连杆上具有的转动副；P 表示连杆上具有的圆弧形移动副。如表 1 中 B 类连杆所示，B 类连杆属于二副杆，在支链连接顺序中靠近动平台与静平台的运动副分别为“B 杆上运动副”与“B 杆下运动副”，其均包括 R 副与 P 副两种类型。一个 B 类连杆有且仅有两个不重合的“构件广义球心”，即“B 杆上球心”和“B 杆下球心”，其分别位于“B 杆上运动副”与“B 杆下运动副”的 R 副转动轴线上或 P 副圆弧形导轨曲率中心处，两个“构件广义球心”之间所连的线段为“双心线”，其长度为 l 。当双心线长度为零，即“B 杆上球心”和“B 杆下球心”重合时，将此特殊的 B 类连杆定义为“A 类连杆”，重合的“构件广义球心”即为“A 杆球心”。

动、静平台均为多副连杆，均有且仅有一个“构件广义球心”，分别为“动球心”和“定球心”，其具有的所有转动副铰接孔轴线均通过各自的“构件广义球心”，所有的圆弧形移动副导轨的曲率中心均与各自的“构件广义球心”重合。如图 6 所示，其含有运动副个数由机构自由度及类型决定。

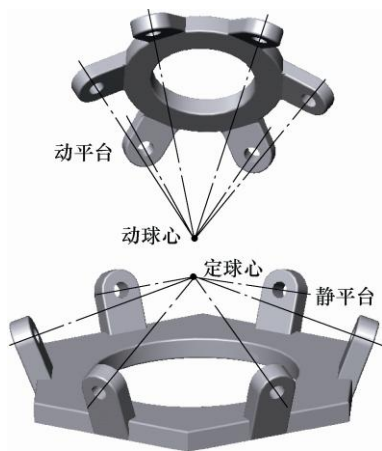


图 6 动/静平台示意图

2.2 广义球面运动副

广义球面运动副包括 A&A 型、A&B 型、B&A 型与 B&B 型运动副四种，如表 2 所示。

表 2 广义球面并联机构运动副表

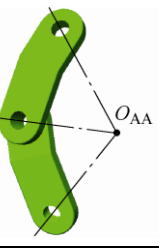
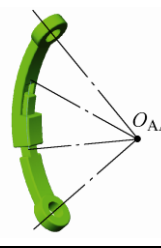
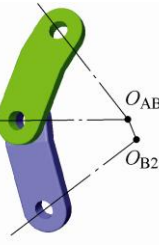
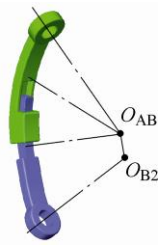
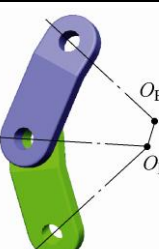
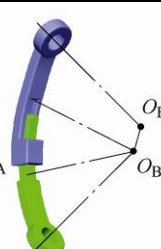
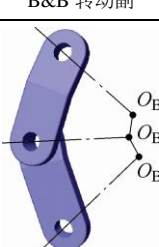
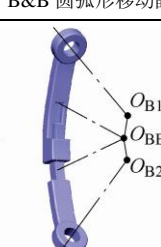
运动副	配合原则	运动副类型	
A&A 型运动副	运动副连接两个 A 类连杆，要求两个 A 杆球心必须重合。此配合成的转动副记为 A_R ，圆弧形移动副记为 A_P 。	A&A 转动副	
		A&A 圆弧形移动副	
A&B 型运动副	运动副连接 A 类连杆末端与 B 类连杆前端，要求 A 杆球心必须与 B 杆上球心重合。此配合成的转动副记为 ${}^A_B R$ ，圆弧形移动副记为 ${}^A_B P$ 。	A&B 转动副	
		A&B 圆弧形移动副	
B&A 型运动副	运动副连接 B 类连杆末端与 A 类连杆前端，要求 B 杆下球心必须与 A 杆球心重合。此配合成的转动副记为 ${}^B_A R$ ，圆弧形移动副记为 ${}^B_A P$ 。	B&A 转动副	
		B&A 圆弧形移动副	
B&B 型运动副	运动副连接两个 B 类连杆时，一个 B 类连杆的 B 杆下球心必须与另一个 B 类连杆的 B 杆上球心重合。此配合成的转动副记为 ${}^B_B R$ ，圆弧形移动副记为 ${}^B_B P$ 。	B&B 转动副	
		B&B 圆弧形移动副	

表 2 中 O_A 、 O_{B1} 与 O_{B2} 分别表示 A 杆球心、B 杆上球心与 B 杆下球心。 O_{AA} 、 O_{AB} 、 O_{BA} 与 O_{BB} 分别表示 A 杆球心重合点、A 杆球心与 B 杆下球心重合点、B 杆下球心与 A 杆球心重合点以及 B 杆下球心与 B 杆上球心重合点。

2.3 广义球面机构的支链综合与约束性能

广义球面并联机构的基本支链是由多个 A 型连杆和 B 型连杆经排列组合后，根据配合原则通过广义球面运动副首尾相连构建成的单支链，其要求动平台和静平台仅与 A 类连杆产生直接连接关系。为避免机构产生局部自由度，单支链最多含有 6 个运动副(转动副或移动副)，最多含有 2 个 B 型连杆，3 个 A 型连杆。以下通过枚举法综合出广义球面并联机构的所有基本支链类型，综如表 3 所示。表格中支链类型仅给出了全转动副支链的具体形式，该

支链中的所有转动副 R 均可由连接原则中与其对应的圆弧形移动副 P 代替, 即 A_R 与 A_P 、 B_R 与 B_P 、 B_R 与 B_P 以及 B_R 与 B_P 相对应, 其均可相互替代。

表 3 广义球面并联机构的基本支链构型表

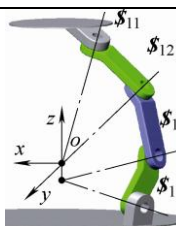
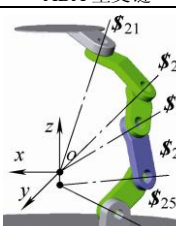
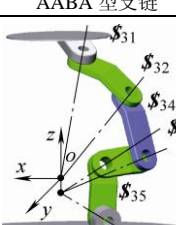
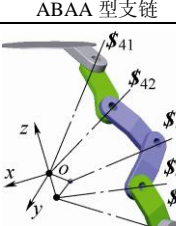
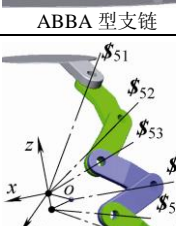
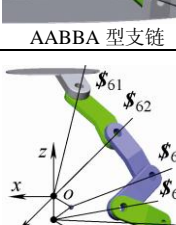
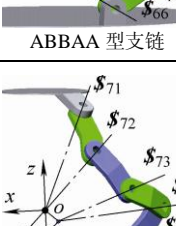
连杆分类	连杆顺序	支链类型及数量
2A1B	动-A-B-A-静	${}^A_R {}^A_R {}^B_R {}^A_R$ 型支链, 其所有 R 副均可由与其对应的 P 副替换, 共计 $2^4=16$ 种
3A1B	动-A-B-A-A-静	${}^A_R {}^A_R {}^B_R {}^A_R {}^A_R$ 型支链, 其所有 R 副均可由与其对应的 P 副替换, 共计 $2^5=32$ 种
	动-A-A-B-A-静	${}^A_R {}^A_R {}^B_R {}^B_R {}^A_R$ 型支链, 其所有 R 副均可由与其对应的 P 副替换, 共计 $2^5=32$ 种
2A2B	动-A-B-B-A-静	${}^A_R {}^B_R {}^B_R {}^B_R {}^A_R$ 型支链, 其所有 R 副均可由与其对应的 P 副替换, 共计 $2^5=32$ 种
	动-A-A-B-B-A-静	${}^A_R {}^A_R {}^B_R {}^B_R {}^B_R {}^A_R$ 型支链, 其所有 R 副均可由与其对应的 P 副替换, 共计 $2^6=64$ 种
3A2B	动-A-B-B-A-A-静	${}^A_R {}^B_R {}^B_R {}^B_R {}^A_R {}^A_R$ 型支链, 其所有 R 副均可由与其对应的 P 副替换, 共计 $2^6=64$ 种
	动-A-B-A-B-A-静	${}^A_R {}^B_R {}^A_R {}^B_R {}^B_R {}^A_R$ 型支链, 其所有 R 副均可由与其对应的 P 副替换, 共计 $2^6=64$ 种

综表 3 所述, 该机构通过枚举法共综合出 7 种类型, $16+3 \times 32+3 \times 64=394$ 条基本支链。由于支链均包含动静平台, 在之后支链描述中省略动静字样如: ABA 型支链即为“动-A-B-A-静型支链”。

将 7 种类型支链进行编号: 1 号 ABA 型支链、2 号 AABA 型支链、3 号 ABAA 型支链、4 号 ABBA 型支链、5 号 AABBA 型支链、6 号 ABBA 型支链、7 号 ABABA 型支链。基于螺旋理论, 以所有全转动副支链为例, 对其运动螺旋及约束螺旋进行分析, 确定各个支链对动平台的约束数量及性质。如表 4 所示, 支链坐标系的 z 轴与支链动、定球心连线重合, 坐标原点与动球心重合。其中 $\$j_i$ 表示 i 号支链第 j 个运动螺旋; $\$r_i$ 表示 i 号支链第 j 个约束螺旋。

上述 7 类支链中, 由于所含有的 B 类连杆数量不同, 可将其分为单 B 杆支链与双 B 杆支链两类, 单 B 杆支链包括: 动-A-B-A-静、动-A-A-B-A-静与动-A-B-A-A-静三类支链; 双 B 杆支链包括: 动-A-B-B-A-静、动-A-A-B-B-A-静、动-A-B-B-A-A-静与动-A-B-A-B-A-静四类支链。每一条广义球面支链均以 B 类连杆为界, 位于动平台与 B 类连杆之间的 A 类连杆, 由于其“A 杆球心”均与动球心重合故统称为“A 类动心连杆”; 位于 B 类连杆与静平台之间的 A 类连杆, 由于其“A 杆球心”均与定球心重合故统称为“A 类定心连杆”; 位于两个 B 类连杆之间的 A 类连杆统称为“A 类 B 间连杆”; 双 B 杆支链中靠近动平台的 B 类连杆由于其“B 杆上球心”与动球心重合, 故称其为“B 类动心连杆”, 靠近静平台的 B 类连杆由于其“B 杆下球心”与定球心重合, 故称其为“B 类定心连杆”。

表 4 全转动副广义球面支链的运动及约束螺旋表

支链简图	螺旋类型	螺旋表达式
 ABA 型支链	运动螺旋	$\begin{cases} \$_{11} = (a_{111} \ a_{112} \ a_{113}; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{12} = (a_{121} \ a_{122} \ a_{123}; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{13} = (a_{131} \ a_{132} \ a_{133}; \ la_{132} - la_{131} \ 0) \\ \$_{14} = (a_{141} \ a_{142} \ a_{143}; \ la_{142} - la_{141} \ 0) \end{cases}$
	约束螺旋	$\begin{cases} \$_{11}^r = (b_{121} \ b_{122} \ 0; \ c_{121} \ c_{122} \ c_{123}) \\ \$_{12}^r = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0 \ 0) \end{cases}$
 AABA 型支链	运动螺旋	$\begin{cases} \$_{21} = (a_{211} \ a_{212} \ a_{213}; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{22} = (a_{221} \ a_{222} \ a_{223}; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{23} = (a_{231} \ a_{232} \ a_{233}; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{24} = (a_{241} \ a_{242} \ a_{243}; \ la_{242} - la_{241} \ 0) \\ \$_{25} = (a_{251} \ a_{252} \ a_{253}; \ la_{252} - la_{251} \ 0) \end{cases}$
	约束螺旋	$\begin{cases} \$_{21}^r = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0 \ 0) \end{cases}$
 ABAA 型支链	运动螺旋	$\begin{cases} \$_{31} = (a_{311} \ a_{312} \ a_{313}; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{32} = (a_{321} \ a_{322} \ a_{323}; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{33} = (a_{331} \ a_{332} \ a_{333}; \ la_{332} - la_{331} \ 0) \\ \$_{34} = (a_{341} \ a_{342} \ a_{343}; \ la_{342} - la_{341} \ 0) \\ \$_{35} = (a_{351} \ a_{352} \ a_{353}; \ la_{352} - la_{351} \ 0) \end{cases}$
	约束螺旋	$\begin{cases} \$_{31}^r = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0 \ 0) \end{cases}$
 ABBA 型支链	运动螺旋	$\begin{cases} \$_{41} = (a_{411} \ a_{412} \ a_{413}; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{42} = (a_{421} \ a_{422} \ a_{423}; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{43} = (a_{431} \ a_{432} \ a_{433}; \ a_{434} \ a_{435} \ a_{435}) \\ \$_{44} = (a_{441} \ a_{442} \ a_{443}; \ la_{442} - la_{441} \ 0) \\ \$_{45} = (a_{451} \ a_{452} \ a_{453}; \ la_{452} - la_{451} \ 0) \end{cases}$
	约束螺旋	$\begin{cases} \$_{41}^r = (b_{411} \ b_{412} \ b_{413}; \ c_{411} \ c_{412} \ c_{413}) \end{cases}$
 AABBA 型支链	运动螺旋	$\begin{cases} \$_{51} = (a_{511} \ a_{512} \ a_{513}; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{52} = (a_{521} \ a_{522} \ a_{523}; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{53} = (a_{531} \ a_{532} \ a_{533}; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{54} = (a_{541} \ a_{542} \ a_{543}; \ a_{544} \ a_{545} \ a_{545}) \\ \$_{55} = (a_{551} \ a_{552} \ a_{553}; \ la_{552} - la_{551} \ 0) \\ \$_{56} = (a_{561} \ a_{562} \ a_{563}; \ la_{562} - la_{561} \ 0) \end{cases}$
	约束螺旋	$\begin{cases} \$_{51}^r = (0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0) \end{cases}$
 ABBA 型支链	运动螺旋	$\begin{cases} \$_{61} = (a_{611} \ a_{612} \ a_{613}; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{62} = (a_{621} \ a_{622} \ a_{623}; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{63} = (a_{631} \ a_{632} \ a_{633}; \ a_{634} \ a_{635} \ a_{635}) \\ \$_{64} = (a_{641} \ a_{642} \ a_{643}; \ la_{642} - la_{641} \ 0) \\ \$_{65} = (a_{651} \ a_{652} \ a_{653}; \ la_{652} - la_{651} \ 0) \\ \$_{66} = (a_{661} \ a_{662} \ a_{663}; \ la_{662} - la_{661} \ 0) \end{cases}$
	约束螺旋	$\begin{cases} \$_{61}^r = (0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0) \end{cases}$
 ABABA 型支链	运动螺旋	$\begin{cases} \$_{71} = (a_{711} \ a_{712} \ a_{713}; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{72} = (a_{721} \ a_{722} \ a_{723}; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{73} = (a_{731} \ a_{732} \ a_{733}; \ a_{734} \ a_{735} \ a_{735}) \\ \$_{74} = (a_{741} \ a_{742} \ a_{743}; \ a_{744} \ a_{745} \ a_{745}) \\ \$_{75} = (a_{751} \ a_{752} \ a_{753}; \ la_{752} - la_{751} \ 0) \\ \$_{76} = (a_{761} \ a_{762} \ a_{763}; \ la_{762} - la_{761} \ 0) \end{cases}$
	约束螺旋	$\begin{cases} \$_{71}^r = (0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0) \end{cases}$

3 多支链组合的约束性能分析

对上述支链进行组合可得到不同自由度及自由度类型的广义球面并联机构,但广义球面支链的组合并不具有随机性,不同支链间的组合均需满足一定条件,故在构造并联机构之前应先对支链组合特性进行研究与分析,给出相应的原则。以下分别对单 B 杆支链间、双 B 杆支链间以及单 B 杆支链与双 B 杆支链间的组合条件与特性进行分析与研究。

3.1 “单 B 杆支链”组合的约束性能

单 B 杆支链间的组合相对复杂,从表 4 中可以看出,其三类支链均具有一个沿着动、定球心连线方向的约束力。当两个或两个以上该类支链组合时,其一方面:所有 B 类连杆的 B 杆下球心在所有 A 类定心连杆的约束下重合于静平台的定球心;另一方面:要求所有 B 类连杆的 B 杆上球心在所有 A 类动心连杆的约束下重合于动平台的动球心。这就需要此类支链组合中所有 B 类连杆的双心线长度 l 必须相等,此时,所有 B 类连杆的双心线完全重合,产生一个沿双心线方向的公共约束力,出现了 $n-1$ 个虚约束, n 为组合中的单 B 杆支链条数。

如表 4 所示,单 B 杆支链中, AABA 型与 ABAA 型支链均仅含有一个沿着动、定球心连线方向的约束力,而 ABA 型支链再此基础上还存在一个特殊约束力,为研究此约束力在支链组合中的性质,建立如下模型进行分析,如图 7 所示。

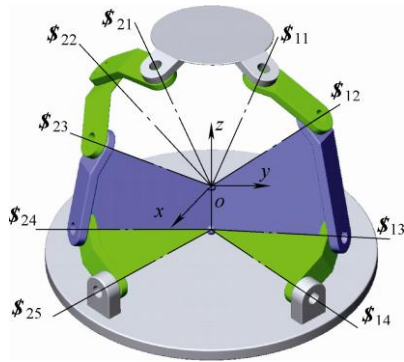


图 7 ABA 型与 AABA 型支链组合分析图

以 ABA 支链与 AABA 支链组合为例,由于两个 B 类连杆的双心线在运动过程中始终重合,两个 B 类连杆均绕重合后的双心线转动,可将两个 B 类连杆视为由转动副链接,该转动副回转轴线始终与重合双心线同轴,双心线始终通过定球心。如图 7 所示,螺旋轴 S_{13}^r 、 S_{14}^r 、 S_{24}^r 、 S_{25}^r 与重合双心线汇交于静平台定球心,故两个 B 类连杆、两个 A 类定心连杆与定平台可组成以定球心为汇交中心的球面

五杆闭环,其自由度为 2,当两个 A 类定心连杆相对于定平台的转角固定时,重合双心线的空间位姿立即确定,动球心空间位置固定。此时支链组增加了限制动球心沿着 x 、 y 轴方向的两个约束力,其约束螺旋可表示为

$$\begin{cases} S_{13}^r = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ S_{14}^r = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (1)$$

综合约束螺旋 S_{11}^r 与 S_{12}^r 可得到,当该支链组输入固定时,ABA 支链的约束螺旋为

$$\begin{cases} S_{11}^r = (b_{121} \ b_{122} \ 0; c_{121} \ c_{122} \ c_{123}) \\ S_{12}^r = (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \\ S_{13}^r = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ S_{14}^r = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (2)$$

ABA 支链中,运动螺旋与约束螺旋互易积为零。可得到如下关系

$$\begin{cases} a_{111}c_{121} + a_{112}c_{122} + a_{113}c_{123} = 0 \\ a_{121}c_{121} + a_{122}c_{122} + a_{123}c_{123} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

从式(3)中可得结论,矢量 $(c_{121}, c_{122}, c_{123})$ 同时与矢量 $(a_{111}, a_{112}, a_{113})$ 和矢量 $(a_{121}, a_{122}, a_{123})$ 垂直正交。对式(2)进行整理可以得到,当该支链组输入固定,即两个 A 类定心连杆相对静平台转角固定时,ABA 支链的约束螺旋为

$$\begin{cases} S_{11}^r = (0 \ 0 \ 0; c_{121} \ c_{122} \ c_{123}) \\ S_{12}^r = (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \\ S_{13}^r = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ S_{14}^r = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)表示该约束螺旋包括三个沿坐标轴方向的约束力与一个过动球心垂直于 ABA 支链中 A 类动心连杆两个转动副轴线所在平面的约束力偶。

同理,当该支链组输入固定时, AABA 支链的约束螺旋为

$$\begin{cases} S_{21}^r = (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \\ S_{22}^r = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ S_{23}^r = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)表示约束螺旋仅包括三个沿坐标轴方向的约束力,支链并未限制动平台绕动球心的转动。

综上所述,由于 ABA 支链与 AABA 支链的主要作用为控制动球心相对静平台的位置,故称该两条支链为“单 B 杆位置支链”。若同一机构中包含三条或三条以上该类支链,则仅允许两条支链的输入为 A 类定心连杆,即仅有两条支链的驱动电动机可以布置在静平台上。其原理为:当两条该类支链输入固定时,重合双心线位姿固定,其余单 B 杆位

置支链各自的 B 类连杆、A 类定心连杆与静平台组成球面三杆稳定结构, 位姿由重合双心线位姿确定, 无法再在其上施加驱动。故为满足踝部康复机器人使用要求, 在同一机构中该类支链数量不多于 2 条。

当重合双心线位姿固定时, ABAA 支链的 B 类连杆、两个 A 类定心连杆与静平台组成球面四杆机构, 如表 4 中 ABAA 型简图所示。该支链输入控制 B 类连杆绕重合双心线的转动, 从而控制动平台绕动球心的转动, 故称该支链为“单 B 杆姿态支链”。

3.2 “单、双 B 杆支链”组合的约束性能

单 B 杆支链与双 B 杆支链组合时, 以 ABA 型与 ABBA 型支链组合为例对其进行分析, 如图 8 所示, 当 ABBA 支链的 B 类动心连杆与 ABA 支链的 B 类连杆的 B 杆上球心在所有 A 类动心连杆的约束下重合于动平台的动球心, ABBA 支链的 B 类定心连杆与 ABA 支链的 B 类连杆的 B 杆下球心在所有 A 类定心连杆的约束下重合于静平台的定球心。此时, 三个 B 类连杆的双心线组成一个三角形稳定结构, ABBA 型支链的两个 B 类连杆间的转动副固结, 即两个 B 类连杆在机构运动过程中相对位置不变, 在机构学上, 等效为一个特殊的 B 类连杆, 该支链组等效于两个单 B 杆支链的组合。但相对于单 B 杆支链组, 该支链组合具有一定的误差补偿能力, 其用于踝部康复机器人机构本体中, 可在一定程度上降低单 B 杆支链组中, 对 B 杆双心线尺寸的精度要求。故该类支链组合具有一定的实用价值。

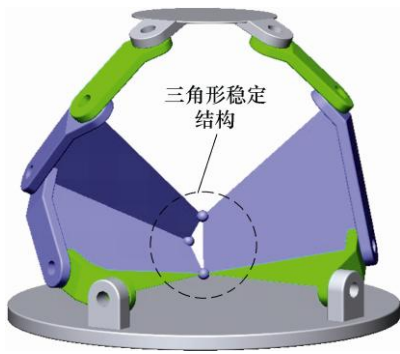


图 8 ABA 型与 ABBA 型支链组合图

3.3 “双 B 杆支链”组合的约束性能

双 B 杆支链间的组合相对简单, 从表 4 可以看出该组合不产生任何公共约束, 故分析其自由度数可使用传统的 G-K 公式。该类支链组合时, 所有支链的 B 类动心连杆的 B 杆上球心在所有 A 类动心连杆的约束下重合于动平台的动球心, 所有支链的 B 类定心连杆的 B 杆下球心在所有 A 类定心连杆的约束下重合于静平台的定球心。以 2 条 AABBA 型支链与 1 条 ABBA 支链配合为例分析其特性, 如图 9 所示。

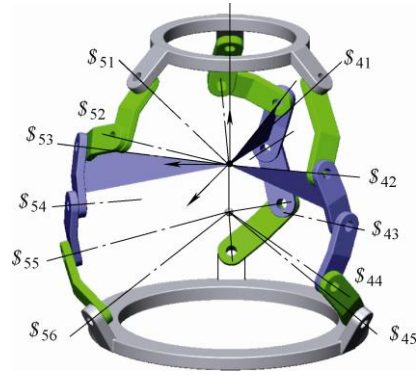


图 9 ABBA 型与 AABBA 型支链组合分析图

三条支链的 B 类动心连杆的 B 杆上球心在所有 A 类动心连杆的约束下重合于动平台的动球心, 可视为 ABBA 型支链的 B 类动心连杆分别与两条 AABBA 型链的 B 类动心连杆使用球面副链接。此时, 三条支链的所有 B 类连杆、A 类定心连杆与静平台组成以 ABBA 型支链的 B 类动心连杆为动平台的 2-SRRR/RRR 机构, 使用 G-K 自由度公式可以计算出该机构的自由度数为 3, 故三条支链的输入决定了 ABBA 型支链的 B 类动心连杆的位姿, 从而决定了动球心的位置。故将 ABBA 型支链与 AABBA 型支链称为“双 B 杆位置支链”, 其控制动球心的三个移动自由度。

当三条支链的输入固定时, 动球心位置固定, 此时 ABBA 支链增加了三个延坐标轴方向的约束力, 其约束螺旋可表示为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{42}^r = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{43}^r = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{44}^r = (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (6)$$

综合约束螺旋 \mathcal{S}_{41}^r 可得到, 当该支链组输入固定时, ABBA 支链的约束螺旋为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{41}^r = (b_{411} \ b_{412} \ b_{413}; c_{411} \ c_{412} \ c_{413}) \\ \mathcal{S}_{42}^r = (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{43}^r = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{44}^r = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (7)$$

ABBA 支链中, 运动螺旋与约束螺旋互易积为零。可得到如下关系

$$\begin{cases} a_{411}c_{411} + a_{412}c_{412} + a_{413}c_{413} = 0 \\ a_{421}c_{411} + a_{422}c_{412} + a_{423}c_{413} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

从式(8)可得结论, 矢量 $(c_{411}, c_{412}, c_{413})$ 同时与矢量 $(a_{411}, a_{412}, a_{413})$ 和矢量 $(a_{421}, a_{422}, a_{423})$ 的正交。对式(7)进行整理可以得到, 当该支链组输入固定, 即三个 A 类定心连杆相对静平台转角固定时, ABBA 支链的约束螺旋为

$$\begin{cases} \$_{41}^r = (0 \ 0 \ 0; c_{411} \ c_{412} \ c_{413}) \\ \$_{42}^r = (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{43}^r = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{44}^r = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (9)$$

式(9)表示该约束螺旋包括三个沿坐标轴方向的约束力与一个过动球心垂直于 ABBA 支链中 A 类动心连杆两个转动副轴线所在平面的约束力偶。

同理, 当该支链组输入固定时, AABBA 支链的约束螺旋为

$$\begin{cases} \$_{52}^r = (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{53}^r = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{54}^r = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (10)$$

式(10)表示约束螺旋仅包括三个沿坐标轴方向的约束力, 支链并未限制动平台绕动球心转动。

当动球心空间位置确定即动定球心连线位姿固定, ABBA 支链的两个 B 类连杆之间的转动副固结, 其原理和单 B 杆支链与双 B 杆支链组合中两个 B 类连杆间转动副固结的原理相同。此时两个 B 类连杆可视为一个 B 类连杆, 其控制动平台绕动球心的转动, 原理与 AABA 支链相同。故将 ABBA 型与 ABABA 型支链称为“双 B 杆姿态支链”。

综合第 3.1~3.3 节, 由于不同支链间组合的原理不同, 其综合出的并联机构也存在差异, 故将广义球面并联机构分为两类, 仅由单 B 杆支链构成或由单 B 杆支链与双 B 杆支链联合构成的广义球面并联机构称为“定心距广义球面并联机构”, 仅由双 B 杆支链构造而成的机构称为“变心距广义球面并联机构”。

4 广义球面并联机构综合及性能分析

广义球面并联机构为具有“定球心”和“动球心”两个广义球心的并联机构, 定球心为静平台的 A 杆球心, 动球心为动平台 A 杆球心, 两球心连线定义为广义球面并联机构的“虚杆”。此类机构大体上可以分为定双心距广义球面并联机构与变双心距广义球面并联机构。所谓“双心距”即为机构动球心与定球心之间的距离, 即虚杆长度, 其应与踝关节距骨尺寸相匹配。而当虚杆长度为零时, 此类机构变退化为球面机构, 换句话说, 球面机构为此类机构的一个特例, 故称此类机构为“广义球面并联机构”。

4.1 定双心距广义球面并联机构

定双心距广义球面并联机构的双心距为一定值。该类机构要求, 在运动过程中, 动球心始终在

以定球心为球心、双心距为半径的球面内移动, 此时动、定球心连线在空间内具有两个转动自由度, 与静平台连接处可等效为虎克铰, 该虎克铰与 UR 型、UU 型以及 US 型踝关节串联等效拟合模型的等效距距关节对应。动平台绕动球心可做单自由度、二自由度、三自由度定心转动分别对应, 分别与 UR 型、UU 型以及 US 型踝关节串联等效拟合模型的等效距下关节对应。综合第 3.1、3.2 节中的分析, 该类机构的型综合具有如下约束条件。

(1) 此类广义球面并联机构中有且仅有两条位置支链, 控制机构动球心的两个移动自由度。

(2) 此类广义球面机构的支链中至少含有一条单 B 杆支链, 限制该类机构的双心距为一定值。

(3) 若此类机构中同时含有两条或两条以上的单 B 杆支链, 则所有单 B 杆支链中的 B 类连杆的双心线长度 l 必须相等。

在上述约束条件下, 对定双心距广义球面并联机构进行型综合, 并通过枚举法给出普遍的定双心距广义球面并联机构构型表, 如表 5 所示。符号解释如下。

(1) 由于机构中所有支链均连接动、静平台, 故以下描述中的连杆组合法表示支链类型时均省略动、静平台字样。

(2) “[连杆组合 1]”加“&”加“[连杆组合 2]”表示: 机构同时具有连杆组合 1 和连杆组合 2。

(3) “数字 x ”加“-”加“连杆组合”表示: 机构具有 x 条此种类型的支链。

(4) 机构的结构类型, 可使用广义球面并联机构的基本支链构型表, 根据需求将连杆组合替换成所需要的支链类型。

普遍定双心距广义球面并联机构构型表给出了所有符合定双心距广义球面机构要求的机构类型, 其中也包括了存在局部固化的机构, 此类机构具有较好的误差补偿性能, 可以在一定程度上降低对 B 类连杆双心线尺寸的精度要求, 但从运动学角度分析, 该类机构与其对应的无局部固化的广义球面并联机构无异。故此基础上给出典型的定双心距广义球面并联机构构型表, 如表 6 所示。

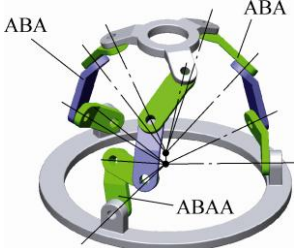
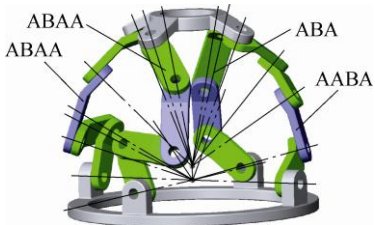
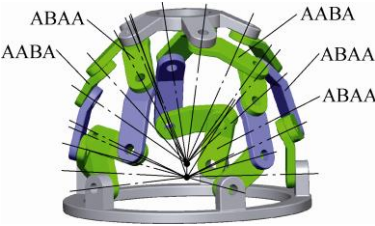
根据表 6 所示, 典型的定双心距广义球面并联机构仅由单 B 杆支链构成, 综合分析该类机构具有如下特征。

(1) 所有 B 类连杆的双心线重合, 机构产生了一个沿双心线方向的公共约束力, 机构产生了 $n-1$ 个虚约束, n 为此类机构的支链条数。重合后的双心线为始终过定球心的一个动轴, 所有 B 类连杆均绕其做同轴转动。

表 5 普遍定双心距广义球面并联机构型表

支链数 (条)	支链类型 位置 姿态 支链 支链	连杆组合表示的机构构型
2	2 0	[ABA]&[ABA]; [ABA]&[ABBA]
3	2 1	[ABBA]&[ABA]&[ABAA]; [ABA]&[ABBA]&[ABAA]; [ABA]&[ABA]&[ABBAA]; [2-ABBA]&[ABAA]; [ABA]&[ABBA]&[ABBAA]; [2-ABA]&[ABABA]; [ABA]&[ABBA]&[ABABA]; [2-ABA]&[ABAA] [ABBA]&[AABA]&[2-ABAA]; [ABA]&[AABBA]&[2-ABAA]; [ABA]&[AABA]&[ABBAA]&[ABAA]; [ABBA]&[AABBA]&[2-ABAA]; [ABBA]&[AABA]&[ABBAA]&[ABAA]; [ABA]&[AABBA]&[ABBAA]&[ABAA]; [ABA]&[AABA]&[2-ABBAA]; [ABBA]&[AABA]&[2-ABBAA]; [ABA]&[AABBA]&[2-ABBAA];
4	2 2	[ABBA]&[AABBA]&[ABAA]&[ABBAA]; [ABA]&[AABA]&[ABAA]&[ABABA]; [ABBA]&[AABA]&[ABAA]&[ABABA]; [ABA]&[AABBA]&[ABAA]&[ABABA]; [ABA]&[AABA]&[ABBAA]&[ABABA]; [ABBA]&[AABBA]&[ABAA]&[ABABA]; [ABBA]&[AABA]&[ABBAA]&[ABABA]; [ABA]&[AABBA]&[ABBAA]&[ABABA]; [ABA]&[AABA]&[2-ABABA]; [ABBA]&[AABA]&[2-ABABA]; [ABA]&[AABBA]&[2-ABABA]; [ABA]&[AABA]&[2-ABAA]; [AABBA]&[AABA]&[3-ABAA]; [2-AABA]&[2-ABAA]&[ABBAA]; [2-AABBA]&[3-ABAA]; [AABBA]&[AABA]&[ABBAA]&[2-ABAA]; [2-AABA]&[2-ABBAA]&[ABAA]; [2-AABBA]&[ABBAA]&[2-ABAA]; [AABBA]&[AABA]&[2-ABBAA]&[ABAA]; [2-AABA]&[3-ABBAA]; [2-AABA]&[2-ABAA]&[ABABA];
5	2 3	[AABBA]&[AABA]&[2-ABAA]&[ABABA]; [2-AABA]&[ABBAA]&[ABAA]&[ABABA]; [2-AABBA]&[2-ABAA]&[ABABA]; [ABBA]&[AABA]&[ABBAA]&[ABAA]&[ABABA]; [2-AABA]&[2-ABBAA]&[ABABA]; [AABA]&[AABBA]&[2-ABBAA]&[ABABA]; [2-AABBA]&[ABAA]&[ABBAA]&[ABABA]; [2-AABA]&[ABAA]&[2-ABABA]; [AABBA]&[AABA]&[ABAA]&[2-ABABA]; [2-AABA]&[ABBAA]&[2-ABABA]; [2-AABBA]&[ABAA]&[2-ABABA]; [AABA]&[AABBA]&[ABBAA]&[2-ABABA]; [AABA]&[AABBA]&[3-ABABA]; [2-AABA]&[3-ABABA]; [2-AABA]&[3-ABAA];

表 6 典型定双心距广义球面并联机构型表

支链数 (条)	机构 构型	支链类型 位置 姿态 支链 支链	典型的广义球面并联机构简图
3	2-ABA & ABAA	2 1	
4	ABA & AABA & 2-ABAA	2 2	
5	2-AABA & 3-ABAA	2 3	

(2) 静平台与两条位置支链的 B 类连杆以及该支链连接静平台的 A 类连杆组成了以定球心为汇交中心的球面五杆闭环，故两条位置支链的输入直接决定了机构动球心的两个移动自由度，重合的双心线与静平台之间可等效为虎克铰连接。

(3) 当位置支链输入确定时，重合的双心线位姿确定，每条姿态支链的 B 类连杆以及靠近静平台的两个 A 类连杆均与静平台组成以定球心为汇交中心的球面四杆闭环。

(4) 所有支链 B 类连杆与 A 类动心连杆以及动平台组成以动球心为汇交中心的球面并联机构，其自由度由支链数和支链类型决定，其中 AABA 支链不约束动平台绕动球心的转动。

综合上特性，基于螺旋理论对各类定心距广义球面并联机构自由度及类型加以分析，如表 7 所示。

表 7 中的约束螺旋 $\$_{ijk}^r$ 表示机构中第 k 条 i 号支链的第 j 个约束螺旋。

4.2 变双心距广义球面并联机构

变双心距广义球面并联机构要求其双心距为可控变量。此类机构在定双心距广义球面并联机构的基础上释放了其位于动、定球心连线上的约束力，从而消除了机构的公共约束。等效关节对应关系与定双心距广义球面并联机构相同，增加的等效移动副，提高了机器人对不同尺寸踝关节的适应能力。基于双 B 杆支链组合原理，该类机构的型综合具有如下约束条件。

- (1) 此类广义球面并联机构不含有单 B 杆支链。
- (2) 此类广义球面并联机构且仅有三条位置支链。控制机构动球心的三个移动自由度。

在上述约束条件下，对变双心距广义球面并联机构进行型综合，并通过枚举法给出变双心距广义球面并联机构构型表，如表 8 所示。以下符号意义与定双心距广义球面并联机构构型表中相同。

表7 定双心距广义球面并联机构自由度明细表




机构类型	机构约束螺旋	机构自由度	位置支链输入固定条件下 机构约束螺旋	位置支链输入固定条件下 机构自由度类型	自由度类型 移动 转动	串联等效模型
2-ABA & ABAA	$\begin{cases} \mathcal{S}_{11}^r = (b_{1211} \ b_{1221} \ 0; \ c_{1211} \ c_{1221} \ c_{1231}) \\ \mathcal{S}_{12}^r = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{21}^r = (b_{1212} \ b_{1222} \ 0; \ c_{1212} \ c_{1222} \ c_{1232}) \\ \mathcal{S}_{22}^r = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{21}^r = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0 \ 0) \end{cases}$ 其中独立螺旋个数为3	3	$\begin{cases} \mathcal{S}_{11}^r = (000; c_{1211} \ c_{1221} \ c_{1231}) \\ \mathcal{S}_{12}^r = (000; c_{1212} \ c_{1222} \ c_{1232}) \\ \mathcal{S}_{21}^r = (001; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{22}^r = (100; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{23}^r = (010; 0 \ 0 \ 0) \end{cases}$	\mathcal{S}_{11}^r 与 \mathcal{S}_{12}^r 为两个独立的通过动球心的约束力偶, 并分别为垂直于一号 ABA 支链与二号 ABAA 支链的 A 类动心连杆两转动副轴线所在平面。该运动为绕动球心的 1 自由度转动。	2 1	 UR* 型
ABA & AABA & 2-ABAA	$\begin{cases} \mathcal{S}_{11}^r = (b_{1211} \ b_{1221} \ 0; \ c_{1211} \ c_{1221} \ c_{1231}) \\ \mathcal{S}_{12}^r = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{21}^r = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{311}^r = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{312}^r = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0 \ 0) \end{cases}$ 其中独立螺旋个数为2	4	$\begin{cases} \mathcal{S}_{11}^r = (000; c_{1211} \ c_{1221} \ c_{1231}) \\ \mathcal{S}_{12}^r = (001; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{21}^r = (100; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{23}^r = (010; 0 \ 0 \ 0) \end{cases}$	\mathcal{S}_{11}^r 为通过动球心的约束力偶, 其垂直于 ABA 支链的 A 类动心连杆两转动副所在平面。该运动为绕动球心的 2 自由度转动。	2 2	 UU 型
2-AABA & 3-ABAA	$\begin{cases} \mathcal{S}_{211}^r = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{212}^r = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{311}^r = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{312}^r = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{313}^r = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0 \ 0) \end{cases}$ 其中独立螺旋个数为1	5	$\begin{cases} \mathcal{S}_{21}^r = (001; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{22}^r = (100; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{23}^r = (010; 0 \ 0 \ 0) \end{cases}$	该运动为绕动球心的 3 自由度转动。	2 3	 US 型

表8 变双心距广义球面并联机构构型表

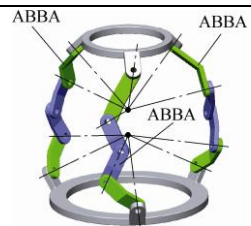
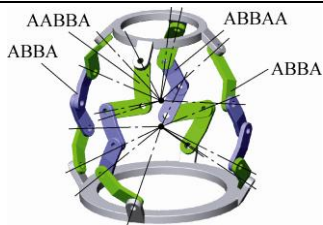
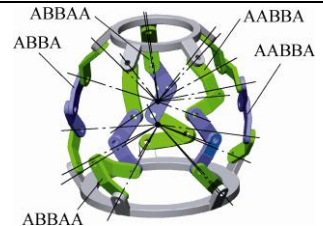
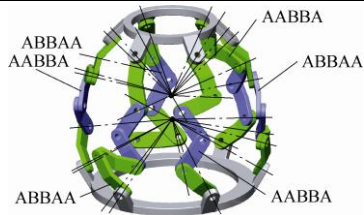
支链数/条	支链类型 位移 姿态 支链 支链	连杆组合表示的机构构型
3	3 0	[3-ABBA];
4	3 1	[AABBA]&[2-ABBA]&[ABBA]; [AABBA]&[2-ABBA]&[ABABA]; [2-AABBA]&[ABBA]&[2-ABBA];
5	3 2	[2-AABBA]&[ABBA]&[ABBA]&[ABABA]; [2-AABBA]&[ABBA]&[2-ABBA]; [3-AABBA]&[3-ABBA];
6	3 3	[3-AABBA]&[2-ABBA]&[ABABA]; [3-AABBA]&[ABBA]&[2-ABBA]; [3-AABBA]&[3-ABBA];

表8给出了普遍的变心距广义球面并联机构, 由于 ABABA 型支链经拓扑变形, 可转化为传统六自由度支链如(空间 6R 支链)不具有典型意义。故排除含有 ABABA 型支链的机构, 给出典型的变双心距广义球面并联机构构型表, 如表9所示。

表9所示, 典型的变双心距广义球面并联机构中的位置支链包括 AABBA 型与 ABBA 型两种, 姿态支链为 AABBA 支链。综合分析该类机构具有如下特征。

(1) 机构中所有 B 类定心连杆的 B 杆下球心在所有 A 类定心连杆的约束下重合于机构的“定球心”; 所有的 B 类动心连杆的 B 杆上球心在所有 A 类动心连杆的约束下重合于机构的“动球心”。变双心距广义球面机构相对定心距广义球面并联机构释

表9 定双心距广义球面并联机构构型表

自由度	机构 构型	支链类型 位置 姿态 支链 支链	广义球面并联机构简图(全转动副)
3	3-ABBA	3 0	
4	AABBA & 2-ABBA & ABBAA	3 1	
5	2-AABBA & ABBA & 2-ABBAA	3 2	
6	3-AABBA & 3-ABBAA	3 3	

放了双心线方向上的公共约束力, 其自由度计算满足传统的 G-K 公式。

(2) 三条位置支链输入直接决定了机构动球心的三个移动自由度, 动、定球心连线与静平台之间可等效为虎克铰连接, 两球心之间距离为可控变量, 即可等效为移动副。

(3) 当三条位置支链输入给定时, 姿态支链的两个 B 类连杆相互固结, 等效为一个 B 类连杆。此时, 每条姿态支链的两个固结的 B 类连杆以及两个

A 类定心连杆均与静平台组成以定球心为汇交中心的球面四杆子闭环, 其自由度为 1。

(4) 双心距固定时, 所有支链相互固结的两个 B 类连杆以及 A 类动心连杆与动平台组成以动球心为汇交中心的球面并联机构, 其中 AABBA 支链不约束动平台绕动球心的转动。

综合以上特性, 基于螺旋理论对各类定双心距广义球面并联机构的自由度及类型加以分析, 并给出等效模型表, 如表 10 所示。

表 10 变双心距广义球面并联机构自由度明细表

机构构型	机构的 G-K 自由度公式	机构自由度	位置支链输入固定条件下 机构约束螺旋	位置支链输入固定条件下 机构自由度类型	自由度类型		串联等效模型
					移动	转动	
AABBA & 2-ABBA & ABBAA	$F = 6 \times 19 - 5 \times 22 = 4$	4	$\begin{cases} \mathcal{S}_{411}^r = (000; c_{411} \ c_{412} \ c_{413}) \\ \mathcal{S}_{412}^r = (000; c_{4112} \ c_{4122} \ c_{4132}) \\ \mathcal{S}_{42}^r = (001; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{43}^r = (100; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{44}^r = (010; 0 \ 0 \ 0) \end{cases}$	\mathcal{S}_{411}^r 与 \mathcal{S}_{412}^r 为两个独立的通过动球心的约束力偶, 并分别为垂直于一号 ABBA 支链与二号 ABBA 支链的 A 类动心连杆两转动副轴线所在平面。其运动为绕动球心的 1 自由度转动。	3	1	UPR* 型
2-AABBA & ABBA & 2-ABBAA	$F = 6 \times 25 - 5 \times 29 = 5$	5	$\begin{cases} \mathcal{S}_{41}^r = (000; c_{411} \ c_{412} \ c_{413}) \\ \mathcal{S}_{42}^r = (001; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{43}^r = (100; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{44}^r = (010; 0 \ 0 \ 0) \end{cases}$	\mathcal{S}_{41}^r 为通过动球心的约束力偶, 其垂直于 ABBA 支链的 A 类动心连杆两转动副所在平面。其运动为绕动球心的 2 自由度转动。	3	2	UPU 型
3-AABBA & 3-ABBAA	$F = 6 \times 31 - 5 \times 36 = 6$	6	$\begin{cases} \mathcal{S}_{52}^r = (001; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{53}^r = (100; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{54}^r = (010; 0 \ 0 \ 0) \end{cases}$	该运动为绕动球心的 2 自由度转动。	3	3	UPS 型

综上所述, 四、五自由度定心距以及五、六自由度变心距广义球面并联机构分别对应的 UU 型、US 型、UPU 型与 UPS 型串联等效拟合模型与踝关节的 UU 型、US 型、UPU 型与 UPS 型串联等效拟合模型具有完全对应关系, 而三自由度定心距与四自由度变心距广义球面并联机构对应的 UR* 和 UPR* 型串联等效拟合模型虽然与踝关节的 UR 和 UPR 型串联等效拟合模型相比存在差异, 但并不影响其在踝关节康复机器人领域所具有的应用价值, 该类机构最重要的评价标准为与踝关节运动规律的相容程度, 故针对该类机构的分析与优化均具有重要研究意义。

该类机构从微观上拟合人体踝部运动, 充分契合人体踝部真实运动情况, 其定球心与动球心分别

与踝部胫距关节和距下关节运动中心重合, 虚杆相对静平台的转角以及动平台相对虚杆的转角分别对应踝部胫距关节运动与距下关节运动。一定程度上提高了康复机器人机构本体的人机相容程度, 提高了拟合精度及合理性。

5 结论

(1) 在分析人体踝部实际结构的基础上, 提出了 UR 型、UU 型、US 型、UPR 型、UPU 型以及 UPS 型共六种新型的人体踝部串联等效拟合模型, 从微观结构上充分匹配了踝部胫距关节和距下关节的复合运动, 提高了等效模型的人机相容性, 为踝关节康复机器人机构本体的研究提供了新方向。

(2) 为满足新型串联等效拟合模型的功能需求, 结合枚举法与螺旋理论, 提出了一种广义球面并联机构型综合方法, 构造出了广义球面机构的基本构件、运动副以及支链, 并分析出支链的运动螺旋与约束螺旋。

(3) 基于螺旋理论分析出了多支链组合对动平台的约束性质, 分三种情况给出了广义球面支链完整的组合条件与原则。阐明不同支链在机构中作用的异同, 将其归纳为位置支链和姿态支链两类。

(4) 综合出了一系列具有串联等效拟合模型的广义球面并联机构, 筛选出了适用于踝部康复机器人本体研究的三、四、五自由度定心距及四、五、六自由度变心距广义球面并联机构, 经分析证明了该类机构自由度及类型与新型踝关节串联等效拟合模型的一致性。

参 考 文 献

- [1] BOIAN R F, BOUZIT M, BURDEA G C, et al. Dual Stewart platform mobility simulator[J]. Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc., 2004, 2(7): 4848-4851.
- [2] DAI J S, ZHAO T S, NESTER C. Sprained ankle physiotherapy based mechanism synthesis and stiffness analysis of a robotic rehabilitation device[J]. Autonomous Robots, 2004, 16(2): 207-218.
- [3] 于海波, 赵铁石, 李仕华, 等. 空间 3-SPS/S 对顶双锥机构的运动学分析[J]. 机械设计, 2017, 24(2): 11-14.
|YU Haibo, ZHAO Tieshi, LI Shihua, et al. Kinematics analysis on the spatial 3-SPS/S opposing vertexes double pyramid mechanism[J]. Journal of Machine Design, 2017, 24(2): 11-14.
- [4] LIU G Q, GAO J L, YUE H, et al. Design and kinematics simulation of parallel robots for ankle rehabilitation[C]// IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Luoyang, Henan, China: IEEE, 2006: 1109-1113.
- [5] 张小俊, 刘更谦, 张明路. 一种踝关节康复机器人的控制系统设计[J]. 微计算机信息, 2009, 25(8): 259-260, 284.
ZHANG Xiaojun, LIU Gengqian, ZHANG Minglu. Design of the control system of an ankle rehabilitation robot[J]. Microcomputer Information, 2009, 25(8): 259-260, 284.
- [6] SAGLIA J A, TSAGARAKIS N G, DAI J S, et al. A high-performance redundantly actuated parallel mechanism for ankle rehabilitation[J]. International Journal of Robotics Research, 2009, 28(9): 1216-1227.
- [7] SAGLIA J A, TSAGARAKIS N G, DAI J S, et al. Control strategies for patient-assisted training using the ankle rehabilitation robot (ARBOT)[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(6): 1799-1808.
- [8] MALOSIO M, NEGRI S P, PEDROCCHI N, et al. A spherical parallel three degrees-of-freedom robot for ankle-foot neuro-rehabilitation[C]// Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Milan, Italy: IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2012: 3356-3359.
- [9] 边辉, 刘艳辉, 梁志成, 等. 并联 2-RRR/UPRR 踝关节康复机器人机构及其运动学[J]. 机器人, 2010, 32(1): 6-12.
BIAN Hui, LIU Yanhui, LIANG Zhicheng, et al. A novel 2-RRR/UPRR robot mechanism for ankle rehabilitation and its kinematics[J]. Robot, 2010, 32(1): 6-12.
- [10] 李剑锋, 张凯, 张雷雨, 等. 并联踝康复机器人的设计与运动性能评价[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 29-39.
LI Jianfeng, ZHANG Kai, ZHANG Leiyu, et al. Design and kinematic performance evaluation of parallel ankle rehabilitation robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(9): 29-39.
- [11] HUANG Z, LI Q C. General methodology for type synthesis of lower-mobility symmetrical parallel manipulators and several novel manipulators[J]. International Journal of Robotics Research, 2002, 21(2): 131-146.
- [12] HERVE J M. The lie group of rigid body displacements, a fundamental tool for mechanism design[J]. Mechanism and Machine Theory, 1999, 34(5): 719-730.
- [13] LU Y, WANG Y, DING L. Type synthesis of four-degree-of-freedom parallel mechanisms using valid arrays and topological graphs with digits[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2014, 228(16): 3039-3053.
- [14] HUANG Z, LI Q C. Type synthesis of symmetrical lower mobility parallel mechanisms using the constraint-synthesis method[J]. Int. J. Rob. Res., 2003, 22(1): 59-82.
- [15] KONG X W, GOSSELIN C M. Type synthesis of 3T1R 4-DOF parallel manipulators based on screw theory[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(2): 181-190.
- [16] KONG X, GOSSELIN C M, RICHARD P L. Type synthesis of parallel mechanisms with multiple operation

- modes[J]. Journal of Mechanical Design, 2007, 129(6): 595-601.
- [17] FANG Y F, TSAI L W. Structure synthesis of a class of 4-degree of freedom and 5-degree of freedom parallel manipulators with identical limb structures[J]. International Journal of Robotics Research, 2002, 21(9): 799-810.
- [18] LI Q C, HERVE J M. Parallel mechanisms with bifurcation of schoenflies motion[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(1): 158-164.
- [19] GAO F, LI W M, ZHAO X C, et al. New kinematic structures for 2-,3-,4-,and 5-dof parallel manipulator designs[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(11): 1395-1411.
- [20] LI Q C, HERVE J M, HUANG P C. Type synthesis of a special family of remote center-of-motion parallel manipulators with fixed linear actuators for minimally invasive surgery[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2017, 9(3): 031012.
- [21] 宗光华, 裴旭, 于靖军, 等. 双平行四杆型远程运动中心机构的设计[J]. 机械工程学报, 2007, 43(12): 103-108. ZONG Guanghua, PEI Xu, YU Jingjun, et al. Design of double parallelogram remote-center-of-motion mechanisms[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(12): 103-108.
- [22] 裴旭, 于靖军, 毕树生, 等. 一维远程运动中心机构的型综合[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 144-148. PEI Xu, YU Jingjun, BI Shusheng, et al. Type synthesis for one-dimensional remote-center-of-motion mechanisms[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 144-148.
- [23] WU K, YU J J, ZONG G H, et al. A family of rotational parallel manipulators with equal-diameter spherical pure rotation[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2013, 6(1): 011008.
- [24] DONG X, YU J J, CHEN B, et al. Geometric approach for kinematic analysis of a class of 2-DOF rotational parallel manipulators[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(2): 241-247.
- [25] 陈斌, 宗光华, 于靖军, 等. 一种 2-DOF 类球面并联转台的动力学建模及分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(13): 24-31.
- CHEN Bin, ZONG Guanghua, YU Jingjun, et al. Dynamic modeling and analysis of 2-DOF quasi-sphere parallel platform[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(13): 24-31.
- [26] XIE F G, LI T, LIU X J. Type synthesis of 4-DOF parallel kinematic mechanisms based on Grassmann line geometry and atlas method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(6): 1073-1081.
- [27] KONG X, GOSSELIN C M. Type synthesis of 3-DOF spherical parallel manipulators based on screw theory[J]. Journal of Mechanical Design, 2004, 126(1): 101-108.
- [28] HUANG Z, CHEN Ziming, Liu Jingfang, et al. A 3DOF rotational parallel manipulator without intersecting axes[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2011, 3(2): 021014.
- [29] 陈子明, 黄坤, 张杨. 一种无汇交轴线对称三转动并联机构的运动分析[J]. 中国机械工程, 2016, 27(9): 1215-1222. CHEN Ziming, HUANG Kun, ZHANG Yang. Kinematics analysis of a 3-DOF symmetrical rotational parallel mechanism without intersecting axes[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(9): 1215-1222.
- [30] 陈子明, 陈谊超, 杨凤霞, 等. 两种三自由度并联角台机构的转动空间分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 48-56. CHEN Ziming, CHEN Yichao, YANG Fengxia, et al. Rotation workspace analysis of two 3-DOF cubic parallel mechanisms[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(5): 48-56.
- [31] DUL J, JOHNSON G E. A kinematic model of the human ankle[J]. Journal of Biomedical Engineering, 1985, 7(2): 137-143.

作者简介: 刘承磊, 男, 1995 年出生, 博士研究生。主要研究方向为并联机器人。

E-mail: 15620196305@163.com

张建军(通信作者), 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人机构学、并联机器人、外骨骼机器人。

E-mail: zhjjun@hebut.edu.cn