

一种机器人结构设计及运动学分析

胡艳凯¹ 付 慧²

(1 陕西国防工业职业技术学院 智能制造学院, 陕西 西安 710300)

(2 西安交通工程学院 电气工程学院, 陕西 西安 710300)

摘要 仿人机器人是机器人领域的重要组成部分,其特性分析涉及机械、电子、材料等学科。由于仿人机器人能够模仿人类行为和动作,能更好地为人类服务,已成为当前的研究热点。大部分仿人机器人搭载大量的智能软硬件,但本体设计仍然存在缺陷,尤其是仿人机器人腰部结构设计,创新性不足,制约着整体的功能发挥。基于此,设计了一种仿人机器人腰部结构,具有一定的创新性。运用旋量理论对其位姿进行计算;通过Adams和Matlab进行仿真拟合;进行了实验验证,证明了结构设计的合理性及可行性,为机器人动力学分析打下基础。

关键词 仿人机器人 腰部结构 旋量理论 Adams

A Kind of Robot Structure Design and Kinematics Analysis

Hu Yankai¹ Fu Hui²

(1 Intelligent Manufacturing Institute, Shaanxi Defence Vocational & Technical College, Xi'an 710300, China)

(2 School of Electrical Engineering, Xi'an Traffic Engineering Institute, Xi'an 710300, China)

Abstract Humanoid robots are an important part of the field of robotics, and their characteristics analysis involves disciplines such as machinery, electronics, and materials. Since humanoid robots can imitate human behaviors and actions and can better serve humans, it has become a current research hotspot most humanoid robots are equipped with a large number of intelligent software and hardware, but the body design still has defects, especially the waist structure design of humanoid robots, which is not innovative and restricts the overall function. Based on this, a kind of humanoid robot waist structure is designed, it has a certain degree of innovation. Firstly, its pose is calculated by using the spin theory. Secondly, by using the Adams and Matlab, the simulation fitting is carried out. Finally, it is verified by experiments to prove the rationality and feasibility of the structure design, it lays the foundation for robot dynamics analysis.

Key words Humanoid robot Waist structure Spin theory Adams

0 引言

机器人是一种集成了机电、机构学、材料学及仿生学等多个学科,通过设置或者控制,识别目标,完成某些特定功能的装置^[1-2]。机器人涉及医疗、国防、家庭等各个领域,逐渐成为人们生活中常见的角色^[3-5]。仿人机器人由于其强大的可塑性和“亲人性”,成为机器人研究领域的重要组成部分^[6]。

我国的许多科研机构 and 高校在机器人领域取得了不俗的成果^[7-9],但至今仍未形成一条完整的科研产业,尤其是一些高精尖的设备依然依赖于进口。随着国家出台《中国制造2025》战略计划^[10],未来

十年,机器人等高科技产业将会迎来发展的高峰期。目前,机器人本体结构搭载智能化软硬件,能够实现各种精密、复杂的指令或者姿态,这在很大程度上降低了机器人本体的稳定性,需要更加完美的本体结构平台来支撑^[11-12]。许多科研机构都聚焦在人工智能方面的改进,忽略了机器人本体结构的突破和创新,而合理的机器人本体结构既能避免繁琐的可靠性计算,还可降低机器人的控制成本,保证整体的稳定性。

1 机器人结构设计

本文中设计了一种具有躲闪避障功能的仿人型

机器人，在一定范围内能够感知来袭障碍物，并作出躲闪动作。主要的运动关节设在腰部机构，上身躯干及头部搭载感知单元，通过感知障碍，传递给控制系统，利用腰部的动作实现躲闪避障。

1.1 腰部结构设计

腰部机构具有摆动、俯仰和旋转3个自由度，3个动作分别绕空间直角坐标系3个坐标轴转动。为了保证机器人整体稳定性及突出其仿人的特性，参照身体的稳定极限^[13]和应急情况反应时间，设定了机器人的运动空间和运动极限位移角度在20°左右，运动时间为0.4~0.8 s^[14]。

腰部结构主要依靠锥齿轮传递运动和动力，搭载电磁离合器实现运动的换向，传动比精确，传动效率高，结构原理和控制系统简单可靠。腰部机构运动简图如图1所示。

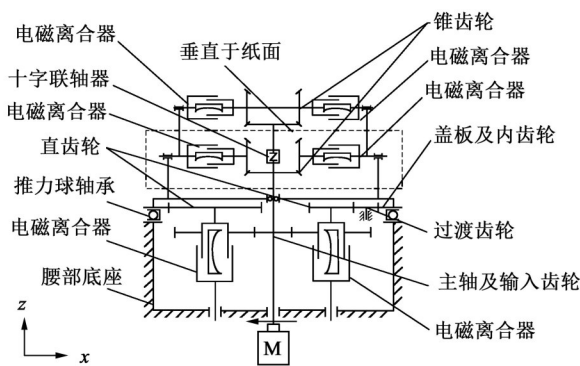


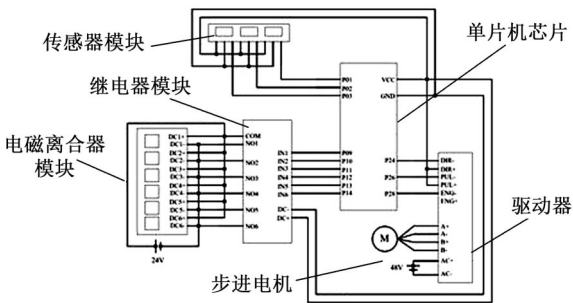
图1 机器人机构运动简图
Fig. 1 Movement diagram of the robot mechanism

该机构仅由1个电机M驱动，通过控制电机和6个电磁离合器可以实现机器人在一定范围内绕空间X轴、Y轴、Z轴的旋转，具有3个自由度。机器人反转时，需依靠过渡齿轮将运动换向，每个自由度机构由电磁离合器、齿轮及相应的转轴组成。当电磁离合器吸合时，带动转轴转动，机器人开始运动；当离合器断开时，齿轮处于空转状态，不实现运动的传递。控制不同的离合器的工作状态可以得到机器人不同的动作组合，最终实现躲避的功能。

1.2 控制系统设计

机器人上身搭载传感器，可以捕捉一定范围内

的障碍物。信号反馈传递到单片机芯片，通过控制电机的转动和电磁离合器的工作状态，实现机器人躲闪动作的完成。控制电路如图2所示。



人腰部3个关节的运动坐标系,如图4所示。

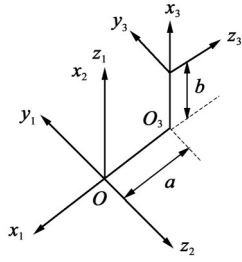


图4 旋量坐标系

Fig. 4 Spinor coordinate system

旋量理论的计算公式为

$$\mathbf{g}_{i-1,i}(\theta) = e^{\hat{\varepsilon}\theta} \mathbf{g}_{i-1,i}(0) \quad (1)$$

式中, $\mathbf{g}_{i-1,i}(0)$ 为 i 坐标系对 $i-1$ 坐标系相对于基坐标 O 的初始位姿矩阵; $\mathbf{g}_{i-1,i}(\theta)$ 为 i 坐标系对 $i-1$ 坐标系进行旋量运动后的基坐标位姿矩阵; θ 为坐标系旋转角度; $\hat{\varepsilon}$ 为运动关节的运动旋量。

各关节的运动旋量的计算式为

$$\hat{\varepsilon}_i = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{w}}_i & -\mathbf{w}_i \times \mathbf{q}_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{w}_i$ 为第 i 个关节的位置矢量; $\mathbf{q}_i$ 为第 i 个关节轴线在基坐标系 O 中任意一点的位置坐标; $\hat{\mathbf{w}}_i$ 为 $\mathbf{w}_i$ 的螺旋反对称矩阵。

根据图4旋量坐标系所示, $\mathbf{w}_1 = [0 \ 0 \ 1]$; $\mathbf{w}_2 = [0 \ -1 \ 0]$; $\mathbf{w}_3 = [-1 \ 0 \ 0]$; $\mathbf{q}_1 = \mathbf{q}_2 = 0$; $\mathbf{q}_3 = [-a \ 0 \ b]$ 。根据已知参数, 分别计算 $e^{\hat{\varepsilon}_1\theta_1}$ 、 $e^{\hat{\varepsilon}_2\theta_2}$ 、 $e^{\hat{\varepsilon}_3\theta_3}$, 结果为

$$e^{\hat{\varepsilon}_1\theta_1} = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad e^{\hat{\varepsilon}_2\theta_2} = \begin{bmatrix} c\theta_2 & 0 & -s\theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ s\theta_2 & 0 & c\theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$e^{\hat{\varepsilon}_3\theta_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta_3 & s\theta_3 & -bc\theta_3 \\ 0 & -s\theta_3 & c\theta_3 & -b(1-c\theta_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中, $s=\sin$; $c=\cos$ 。

代入式(1)中, 可得

$$\mathbf{g}_{2,3}(\theta_3) = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $k_{11} = -s\theta_1s\theta_3 - c\theta_1s\theta_2c\theta_3$; $k_{12} = -s\theta_1c\theta_3 + c\theta_1s\theta_2s\theta_3$;

$$k_{21} = c\theta_1s\theta_3 - s\theta_1s\theta_2c\theta_3;$$

$$k_{22} = c\theta_1c\theta_3 + s\theta_1s\theta_2s\theta_3;$$

$$k_{31} = c\theta_2c\theta_3; \quad k_{32} = -c\theta_2s\theta_3; \quad k_{33} = -s\theta_2; \quad k_{14} =$$

$$-ac\theta_1c\theta_2 - b(s\theta_1s\theta_3 + c\theta_1s\theta_2c\theta_3) - bs\theta_1s\theta_3 -$$

$$bc\theta_1s\theta_2(1-c\theta_3); \quad k_{24} = -as\theta_1c\theta_2 + b(c\theta_1s\theta_3 -$$

$$s\theta_1s\theta_2c\theta_3) - bc\theta_1s\theta_3 - bs\theta_1s\theta_2(1-c\theta_3); \quad k_{34} =$$

$$-as\theta_2 + bc\theta_2c\theta_3 + bc\theta_2(1-c\theta_3); \quad k_{41} = k_{42} = k_{43} =$$

$$0; \quad k_{44} = 1。$$

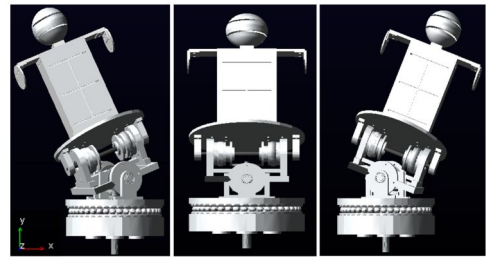
为了验证旋量理论计算, 将机器人腰部初始位姿 $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0$ 代入式(4)中, 得到 $\mathbf{g}_{2,3}(\theta_3) =$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

即机器人末端坐标系 x 、 y 、 z 轴分别与基坐标系 O 的 z 、 y 、 $-x$ 轴方向一致, 且末端坐标系的位置坐标为 $[-a \ 0 \ b]$, 与图4所示结果一致, 因此, 旋量理论计算正确。

3 机器人运动学仿真与实验

建立机器人整机的三维模型, 导入 Adams 软件^[15]进行仿真分析, 设置材料属性, 创建相应的约束和驱动, 为了能够更好地观察到机器人的动作, 添加标记点, 并利用 MainToolbox 进行仿真。机器人在不同部位受到攻击时的躲闪动作及运动轨迹如图5所示。

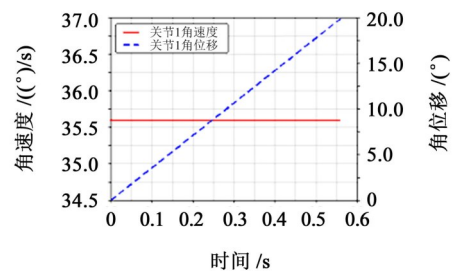


(a) $0^\circ \sim 60^\circ$ (b) $60^\circ \sim 120^\circ$ (c) $120^\circ \sim 180^\circ$

图5 机器人 $0^\circ \sim 60^\circ$ 、 $60^\circ \sim 120^\circ$ 和 $120^\circ \sim 180^\circ$ 躲闪动作

Fig. 5 Robot dodge action at $0^\circ \sim 60^\circ$, $60^\circ \sim 120^\circ$ and $120^\circ \sim 180^\circ$

图5中, 从左至右依次为机器人在感觉到障碍物时在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 、 $60^\circ \sim 120^\circ$ 和 $120^\circ \sim 180^\circ$ 3个部位的躲闪运动动作和运动轨迹。为重点描述3个关节处的运动学分析, 分别在3个运动关节中心添加标记点(Marker Point), 结果如图6所示。图6中, 实线表示关节角速度, 虚线表示关节角位移。



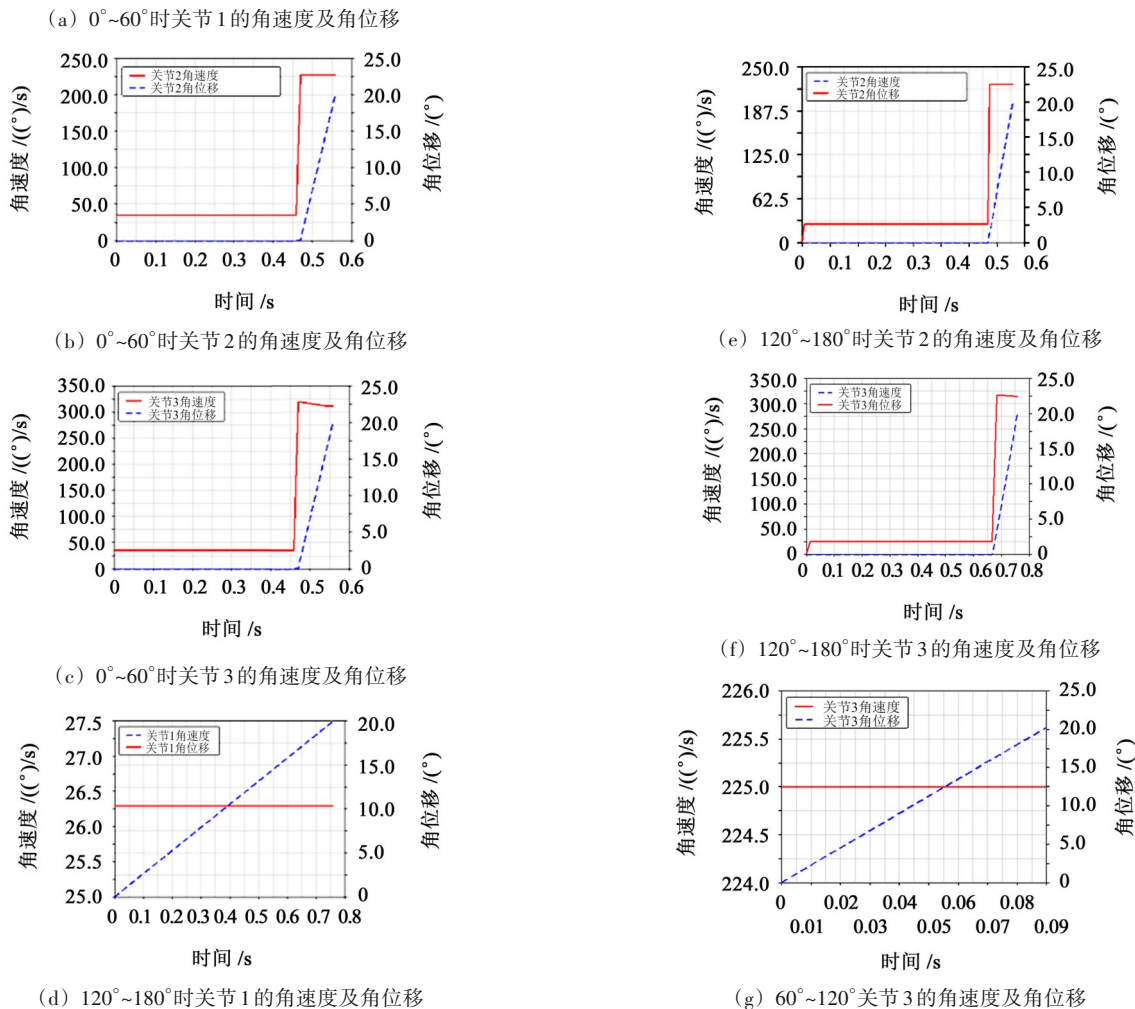


图6 机器人各关节转速和角位移

Fig. 6 Rotation speed and angular displacement of each joint of the robot

根据机器人设计可知,机器人在 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 、 $120^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 部位在受到攻击时,关节1分别出现正转和反转,匀速运动,运动时间分别为0.56 s和0.76 s,位移分别为 19.93° 和 19.98° ,如图6(a)、图6(d)所示。关节2出现左摆和右摆,运动参数相同,因此,运动曲线一致,如图6(b)、图6(e)所示,运动时间和位移分别为0.09 s和 20.25° 。其中,图6(b)中 $0\sim 0.47$ s和图6(e)中 $0\sim 0.67$ s时,机器人的实际运动为关节1的运动; $0.47\sim 0.56$ s和 $0.67\sim 0.76$ s之间时,机器人的实际运动由关节1和关节2合成所得。关节3的运动均为后仰,因此运动曲线也一致,如图6(c)、图6(f)所示。图6(c)中 $0\sim 0.47$ s和图6(f)中 $0\sim 0.67$ s时,机器人的实际运动仅为关节1的运动; $0.47\sim 0.56$ s和 $0.67\sim 0.76$ s之间时,机器人的实际运动由3个关节运动合成。图6(g)所示为机器人 $60^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 部位的躲闪运动参数曲线,此时只有关节3的后仰运动,运动时间和位移分别为225 s和 20.25° 。

综上所述,机器人的运动仿真结果和原始设计基本吻合,从而验证了机器人结构设计的合理性。

4 实验测量

实验验证采用非接触式测量,测速仪频率为6次/s,即每秒钟可测得6次数据。计算机同步记录测量数据。调节机器人躯干及头部的传感器,当障碍物距离15 cm时触发传感器。考虑到机器人做出躲闪动作的时间及安全系数,当障碍物位于机器人 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 、 $120^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 部位时,速度应低于0.02 m/s;当障碍物位于机器人 $60^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 部位时,速度应低于0.17 m/s。机器人开始完成躲闪动作,分别对机器人转动、摆动和俯仰3个运动关节进行测量,结果如图7所示。将每秒测得的数据取平均值,经过10次测量的测量结果如表2所示。

测量关节转速时,由于机器人运动时间较短,采取了多次测量的方式,测量时间为设定的躲闪时间,每次能够采集1~4个数据样本。计算每次测量的均值结果如表2所示。

依据前文设定的机器人运动可知,左右摆动关节和前后俯仰关节的运动速度相等,理论值均为37.5 r/min。从表2中也可得到这两个关节的实际

运动速度基本相等。正、反转动的速度接近理论值 5.9 r/min 和 4.4 r/min。

表2 机器人左右部位关节转速

Tab. 2 Rotating speeds of the left and right joints of the robot

实验次数	0°~60°躲闪动作关节 转速/(r/min)			120°~180°躲闪动作关节 转速/(r/min)		
	关节1	关节2	关节3	关节1	关节2	关节3
1	6.15	35.67	31.68	4.76	33.50	41.68
2	5.07	41.33	35.84	4.67	39.52	37.14
3	5.60	30.83	33.01	4.63	37.73	37.68
4	6.62	34.91	41.18	3.90	41.56	33.34
5	6.40	31.45	39.51	3.89	42.53	44.51
6	5.13	40.14	40.01	4.58	41.52	41.84
7	6.32	31.85	33.18	4.56	37.50	44.34
8	5.27	31.44	30.84	3.91	33.83	40.51
9	5.27	37.73	38.01	4.59	33.91	33.68
10	5.29	37.50	37.44	4.72	38.01	37.84



图7 机器人运动学实验

Fig. 7 Robot kinematics experiment

当机器人中间部分(60°~120°)受到障碍物攻击时,只有关节3运动。实验测得的数据如表3所示。

表3 机器人中间部位关节速度

Tab. 3 Joint speed of the middle part of the robot

实验次数	60°~120°躲闪动作 关节3转速/(r/min)	实验次数	60°~120°躲闪动作 关节3转速/(r/min)
1	37.16	6	37.67
2	41.51	7	41.18
3	33.68	8	44.01
4	37.18	9	38.84
5	37.34	10	37.34

通过实验数据与理论数据进行对比,实验结果与理论数值基本一致,但仍然存在一定偏差。误差统计结果如表4所示。

表4 测量值与理论值误差统计

Tab. 4 Error statistics of measured value and theoretical value

类别	0°~60°部分			120°~180°部分			60°~120°部分
	关节1	关节2	关节3	关节1	关节2	关节3	关节3
转速误差/%	9.64	9.48	8.45	7.53	7.23	9.13	5.47

误差产生原因:

(1) 机器人由标准件和非标准件装配而成,零

件的加工制造存在误差,标准件与非标准件在进行装配时,也存在一定的配合误差。最终会影响机器人的实际运动。

(2) 当机器人开始运动时,各关节的运动速度忽然增大,会产生抖动现象,影响了机器人的运动速度;同时,采用PLC开环控制,出现误差时不能进行反馈。

综上所述,机器人在实际完成避障动作的过程中,存在一定的误差,但基本符合机器人的初始设计,没有影响到机器人躲闪避障功能,因此,不会影响最终的躲闪效果。

5 结论

(1) 设计了一种单驱动3自由度的自动避障机器人。运用旋量理论进行运动学分析,并验证了理论计算的正确性,为下一步进行机器人的轨迹规划做好了准备。

(2) 通过Adams仿真和实验对比,由于装配和运动传动存在误差,机器人的实际运动与理论数值存在偏差,但是不影响机器人完成躲闪避障动作。

(3) 考虑到传感器信号传递耗时和机械装置的启动耗时,当障碍物位于机器人0°~60°、120°~180°部位时,速度应低于0.02 m/s;当障碍物位于机器人60°~120°部位时,速度应低于0.17 m/s,机器人能够做出完整有效的躲闪动作。

参 考 文 献

- [1] 郑勐,胡艳凯,李恒,等.仿人机器人的腰部结构设计及动力学分析[J].机械传动,2019,43(2):68-73.
ZHENG Meng, HU Yankai, LI Heng, et al. The waist structure design and dynamic analysis of humanoid robot[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(2): 68-73.
- [2] 孟庆杰,杨海波.工业机器人控制系统发展趋势研究——评《工业机器人控制技术》[J].材料保护,2020,53(5):159.
MENG Qingjie, YANG Haibo. Research on the development trend of industrial robot control system—comment on "industrial robot control technology"[J]. Material Protection, 2020, 53(5): 159.
- [3] 颜云辉,徐靖,陆志国,等.仿人服务机器人发展与研究现状[J].机器人,2017,39(4):551-564.
YAN Yunhui, XU Jing, LU Zhiguo, et al. The development and research status of humanoid service robots[J]. Robot, 2017, 39(4): 551-564.
- [4] 赵京,张自强,郑强,等.机器人安全性研究现状及发展趋势[J].北京航空航天大学学报,2018,44(7):1347-1358.
ZHAO Jing, ZHANG Ziqiang, ZHENG Qiang, et al. Research status and development trend of robot safety[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(7): 1347-1358.
- [5] 胡艳凯.仿人型机器人结构综述[J].南方农机,2020,51(17):65-67.
HU Yankai. Overview of humanoid robot structure[J]. Southern Agri-