

文章编号 1004-924X(2007)05-0730-05

球面三自由度机器人的力矩输入均衡性能分析与设计

李研彪, 金振林

(燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:对球面三自由度机器人力矩输入均衡性能进行了分析,给出了其机构设计。分析了球面三自由度机器人的输入力矩与输出力矩之间的关系,定义了力矩输入均衡性能评价指标和全域力矩输入均衡性能评价指标。在满足全域性能较好的情况下,应用空间模型技术选取了一组合理的机器人结构尺寸参数,同时考虑加工与装配工艺性,设计了一种球面三自由度机器人,该机器人可用作腰关节、腕关节和精密工作台等。

关键词:球面 3-DOF 机器人;性能评价指标;参数设计

中图分类号:TP242.2 **文献标识码:**A

Analysis and design of input torque of spherical 3-DOF manipulator

LI Yan-biao, JIN Zhen-lin

(College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, 066004, China)

Abstract: The torque balance equations of a spherical 3-DOF manipulator was derived in closed forms by analyzing the relationship of its input and output torques, then the torque input stability evaluation index and the global torque input stability evaluation index were defined and discussed based on the torque balance equation in detail. Finally, using the physical model technique, the parameters of the spherical 3-DOF manipulator were optimized based upon the global torque input stability evaluation index. Moreover, the integrated design scheme of spherical 3-DOF manipulator was confirmed to provide theoretical base for the applications of the spherical 3-DOF manipulator when satisfied the assembly conditions. Experimental results show that the spherical 3-DOF manipulator can be used as the waist, wrist and the precision platform to meet the requirements for high stiffness, high accuracy and good technological efficiency.

Key words: spherical 3-DOF manipulator; performance evaluation index; parameter optimization

1 引言

自机器人问世以来,机器人机构的研究已经取得了很大的进展,得到了国内外学者的青睐。

其中,球面三自由度机器人是一种应用范围很广的机器人^[1-3],可用作腰关节、腕关节和精密工作台等。因此,对这种机器人的分析和设计有着重要的应用价值。

机器人的输入力和力矩的分析一直是机器人

设计的关键技术,它关系到机器人的使用性能、加工精度以及使用寿命等,对机器人的输入力进行分析,具有实际应用价值。

本文讨论了球面三自由度机器人的输入力矩与输出力矩之间的关系,定义了球面三自由度机器人的力矩输入均衡性能评价指标和全域力矩输入均衡性能评价指标,基于全域性能指标,应用空间模型技术对该机器人进行了参数的选取,同时考虑其加工与装配工艺性,设计了一种球面三自由度机器人,为这种机器人的研制奠定了基础。

2 球面三自由度机器人的结构布局

图 1 所示为球面三自由度机器人的机构简图,各分支都是由三个转动低副串联的杆,且三个分支的九个回转副的轴线汇交于同一点,称为机构的转动中心,由点 O 表示。其中, OC_i 、 OD_i 、 OU_i ($i=1,2,3$) 分别为各转动副的轴线方向,三个运动支链的九个转动副的轴线汇交于空间一点,该交点称为机构的转动中心,由点 O 表示,从而,这种并联机构的所有可动构件上的任意一点,都被约束在机构中心至该点的球面上。假设这种机构的球面半径为 1。

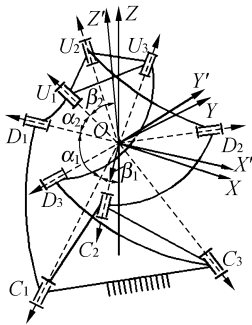


图 1 球面三自由度机器人的机构简图

Fig.1 Structure of spherical 3-DOF manipulator

球面三自由度机器人主要有四个结构参数,它们分别为 α_1 、 α_2 、 β_1 和 β_2 ,大致的取值范围分别为: $0^\circ \leq \alpha_1 \leq 180^\circ$, $0^\circ \leq \alpha_2 \leq 180^\circ$, $0^\circ \leq \beta_1 \leq 90^\circ$, $0^\circ \leq \beta_2 \leq 90^\circ$ 。

如图 1 所示,建立固定坐标系 $\{Q\}$: $O-XYZ$ 建立在固定平台(即下平台)上,坐标系 $\{Q\}$ 的 Z 轴垂直于下平台且过球心 O 点,方向垂直向上,如图 1 所示;坐标系 $\{Q\}$ 的 X 轴与 Z 轴和 C_1 所确

定的平面相垂直,方向如图 1 所示;坐标系 $\{Q\}$ 的 Y 轴在 Z 轴和 C_1 所确定的平面内,方向由右手螺旋法则确定。运动坐标系 $\{P\}$: $O-X'Y'Z'$ 建立在运动平台(即上平台)上,坐标系 $\{P\}$ 的 Z' 轴垂直于上平台且过球心 O 点,方向垂直向上,如图 1 所示;坐标系 $\{P\}$ 的 X' 轴与 Z' 轴和 U_1 所确定的平面相垂直,方向如图 1 所示;坐标系 $\{P\}$ 的 Y' 轴在 Z' 轴和 U_1 所确定的平面内,方向由右手螺旋法则确定。在初始姿态时, Z 轴与 Z' 轴重合,且 Z 轴、 U_1 轴和 C_1 轴在同一平面内,这样, X 轴与 X' 轴、 Y 轴与 Y' 轴也是重合的。因此,在初始姿态下,固定坐标系 $\{Q\}$ 和运动坐标系 $\{P\}$ 是重合的。

3 力矩传递平衡方程

由于这种机器人是由多个环节组合起来的整体,所以它受力后的变形是很复杂的,为了简化计算并考虑其结构特点,本文假设动平台、静平台和各分支均为刚性构件。设 τ 是球面三自由度机器人的关节驱动力矩矢量, M 是球面三自由度机器人所对应的末端执行器所受的外力矩矢量。

以面的法向矢量为中间量,则 M 与 $\tau_i C_i$ ($i=1,2,3$) 在方向 $(U_i \times D_i)$ 上的投影必然相等,其中, τ_i ($i=1,2,3$) 为各分支的输入力矩大小,即

$$M \cdot (U_i \times D_i) = \tau_i C_i \cdot (U_i \times D_i), \quad (1)$$

其中,向量 C_i 、 D_i 和 U_i ($i=1,2,3$) 分别为沿 OC_i 、 OD_i 、 OU_i ($i=1,2,3$) 方向的单位矢量。经综合整理,得

$$P_1 \cdot M = Q_1 \cdot \tau, \quad (2)$$

式中, $P_1 = \begin{bmatrix} (U_1 \times D_1)^T \\ (U_2 \times D_2)^T \\ (U_3 \times D_3)^T \end{bmatrix}$, $Q_1 = \text{diag}((U_1 \times D_1)^T \cdot$

$$C_1 (U_2 \times D_2)^T \cdot C_2 (U_3 \times D_3)^T \cdot C_3),$$

$$\tau = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3]^T。$$

综合式(1)~(2),可得如下方程式

$$M = G \cdot \tau, \quad (3)$$

式中, $G = P_1^{-1} \cdot Q_1$, G 为这种机器人的力矩雅可比矩阵。式(3)可改写成如下形式

$$\tau = G^{-1} \cdot M, \quad (4)$$

4 力矩输入性能评价指标的定义

当这种机器人不在奇异位姿时,球面三自由

度机器人的力矩雅可比矩阵 \mathbf{G} 的秩为 3, 即这种机器人的输入力矩和输出力矩的传递关系取决于 \mathbf{G} , 传递矩阵 \mathbf{G} 为正定矩阵, 由矩阵分析理论, \mathbf{G} 和 \mathbf{G}^{-1} 均有奇异性分解, 也就是存在正交阵 $\mathbf{\Gamma}_M \in R^{3 \times 3}$ 和 $\mathbf{\Omega}_M \in R^{3 \times 3}$ 使

$$\mathbf{G}^{-1} = \mathbf{\Gamma}_M \cdot \mathbf{\Lambda}_M \cdot \mathbf{\Omega}_M^T, \quad (5)$$

$$\text{式中, } \mathbf{\Lambda}_M = \begin{bmatrix} \sigma_{1M} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{2M} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{3M} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Q}_M = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}。$$

其中, σ_{1M} 、 σ_{2M} 和 σ_{3M} 分别为 \mathbf{G}^{-1} 的三个奇异值, 且 $\sigma_{1M} \leq \sigma_{2M} \leq \sigma_{3M}$ 。设输出力矩 \mathbf{M} 为单位矩阵, 即

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{M}^T = \mathbf{1}, \quad (6)$$

当这种机器人不在奇异位姿时, 综合式(4)~(6), 可得到以下方程

$$\tau_1'^2 / \sigma_{1M}^2 + \tau_2'^2 / \sigma_{2M}^2 + \tau_3'^2 / \sigma_{3M}^2 = 1, \quad (7)$$

式中, $\tau_1' = c_{11}\tau_1 + c_{21}\tau_2 + c_{31}\tau_3$, $\tau_2' = c_{12}\tau_1 + c_{22}\tau_2 + c_{32}\tau_3$, $\tau_3' = c_{13}\tau_1 + c_{23}\tau_2 + c_{33}\tau_3$ 。

由矩阵知识可知, 上式表示空间的一个椭球^[5-6], σ_{1M} 、 σ_{2M} 和 σ_{3M} 分别为该椭球的三个轴长, 也就是说, 当输出力矩 \mathbf{M} 为单位向量时, 输入力矩 $\boldsymbol{\tau}$ 位于空间的一个椭球上, 该椭球称为力矩传递椭球。当 $\sigma_{1M} = \sigma_{2M} = \sigma_{3M}$ 时, 输入力矩 $\boldsymbol{\tau}$ 位于空间的一个圆球上, 表示三个输入力矩 $\boldsymbol{\tau}$ 的大小相等, 在整个工作空间内, 力矩雅可比矩阵 \mathbf{G} 随动平台姿态的变化在不断的变化, 则三个输入力矩之间的差值也发生变化。当三个输入力矩之间的差值越大时, 机器人的使用性能越不好, 将会缩短机器人的使用寿命。为了能够合理的判别机器人的力矩输入性能的优劣情况, 定义力矩输入均衡性能评价指标

$$K_M = (\sigma_{3M} - \sigma_{1M}) / \sigma_{3M}, \quad (8)$$

式中, K_M 值为一无量纲值, 它表示输入力矩最大值与最小值之间的差值关系, 当 K_M 越小, σ_{1M} 、 σ_{2M} 和 σ_{3M} 的值越接近, 三个输入力矩之间的变化幅度越小, 机器人的使用性能越好, 机器人的运行越趋于稳定, 将会延长机器人的使用寿命。

在整个工作空间内, 不同的动平台姿态对应不同的 K_M 值, 因此, 本文将以全域性能评价指标为研究对象^[7], 对这种并联机构进行参数设计。首先, 定义 K_M 在机器人工作空间内的平均值为

这种并联机构的全域力矩输入均衡性能评价指标

$$\eta = \frac{\int_V K_M dV}{\int_V dV}, \quad (9)$$

式中, V 为球面三自由度机器人的工作空间。可见, η 的值越小, 这种机器人的运行越趋于稳定。

5 基于全域力矩输入均衡性能评价指标的参数设计

5.1 空间模型的建立

空间模型理论用有限的空间图形表示机构所有可能的尺寸组合, 并在有限的空间图形中研究机构尺寸与其性能的关系, 为实现机构尺寸的优化设计提供了新方法^[8]。这种球面三自由度机器人主要有四个结构参数, 它们分别为 α_1 、 α_2 、 β_1 和 β_2 。当这种机器人的四个主要结构参数满足结构约束条件, 且令这种球面机构的半径为单位 1 以及 β_1 为定值时, 得到这种机器人的空间模型, 模

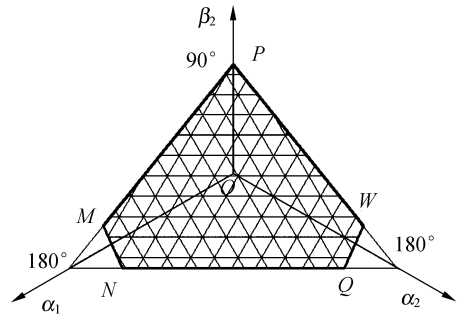


图 2 球面三自由度机器人的空间模型

Fig. 2 Space model of spherical 3-DOF manipulator

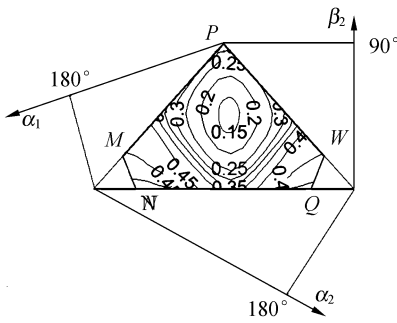
型由多边形 $PMNQW$ 组成, 如图 2 所示。将多边形 $PMNQW$ 映射到二维 $O-xy$ 平面, 坐标映射关系为

$$\begin{cases} x = 2\alpha_2 / \sqrt{3} + \beta_2 / \sqrt{3} \\ y = \beta_2 \end{cases}, \quad (10)$$

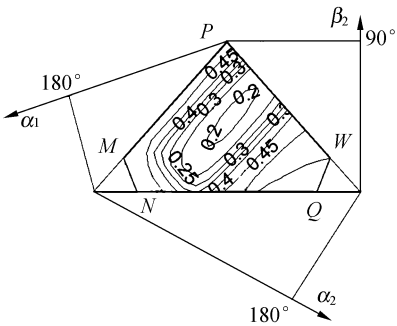
5.2 结构参数的选取

综合式(1)~(10), 借助 Matlab 软件, 绘制了 η 在几何空间模型内的性能图谱, 如图 3 所示。图 3 列出了 β_1 给定时, 这种球面三自由度机器人的全域力矩输入均衡性能评价指标 η 在几何空间模型内的性能图谱, 通过分析得知, 当 $\beta_1 = 60^\circ$, β_2

$= 50^\circ, \alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$ 时,全域力矩输入均衡性能评价指标较小($\eta = 0.2568$)。



(a) $\beta_1 = 60^\circ$



(b) $\beta_1 = 90^\circ$

图 3 全域力矩输入均衡性能评价指标的性能图谱

Fig. 3 Evaluation index of global torque input stability

6 样机设计

当 $\beta_1 = 60^\circ, \beta_2 = 50^\circ, \alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$ 时,全域力矩输入均衡性能评价指标较好,同时考虑加工与

参考文献:

[1] 楚中毅, 崔晶, 孙立宁, 等. 双重驱动 2-DOF 平面并联机器人系统的研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 456-462.
 CHU ZH Y, CUI J, SUN L N, et al.. Research of a novel dual-driven 2-DOF planar parallel robot[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 456-462. (in Chinese)

[2] 刘品宽, 孙立宁, 曲东升, 等. 新型二维纳米级微动工作台的动力学分析[J]. 光学精密工程, 2002, 10(2): 143-147.
 LIU P K, SUN L N, QU D SH, et al.. Dynamic analysis on a novel nanopositioning stage driven by PZT[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(2): 143-147. (in Chinese)

[3] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
 HUANG ZH, KONG L F, FANG Y F. *Theory of Parallel Robotic Mechanisms and Control*[M]. Beijing: Mechanical Press, 1997. (in Chinese)

装配工艺性,设计了一种球面三自由度机器人,如图 4 所示。这种机器人的特点是:九个转动副均采用双面支撑,而且连接三个分支的九个转动副的参考中心分布在三个不同半径的同心球面上,以减小连杆之间的干涉,增大工作空间;三条运动支链的加工精度与装配精度要具有统一性,以保证三条运动支链的转动中心的相交性。

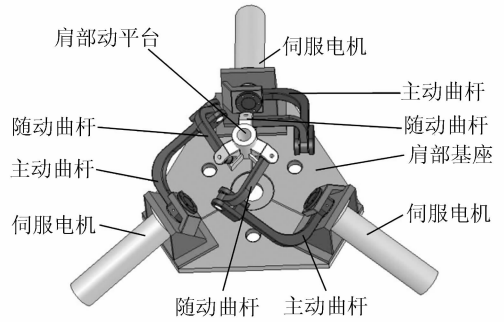


图 4 一种球面三自由度机器人

Fig. 4 Spherical 3-DOF manipulator

7 结 论

(1)分析了球面三自由度机器人的力矩传递性能,定义了力矩输入均衡性能评价指标和全域力矩输入均衡性能评价指标;

(2)基于全域性能评价指标,并应用空间模型理论,为这种球面三自由度机器人选取了一组合理的结构几何参数,同时考虑其加工与装配工艺性,设计了一种球面三自由度机器人,为这种机器人的研制奠定了基础。

- [4] GOSSELIN C M, LEMIEUX S G, MERLET J P. A new architecture of planar three-degrees-of-freedom parallel manipulator[C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1996: 3738-3743.
- [5] 熊有伦. 机器人学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
XIONG Y L. *Robotics*[M]. Beijing: China Mechanical Press, 1993. (in Chinese)
- [6] LI J F, WANG X H, FEI R Y, *et al.*. Performance analysis and kinematics design of pure translational parallel mechanism with vertical guide-ways[J]. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2006, 19(2): 300-306.
- [7] 金振林, 高峰. 6-SPS 球平台并联机器人及其局部力和运动传递性能分析[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9(1): 63-66.
JIN ZH L, GAO F. A novel 6-SPS spherical platform parallel robotic mechanism and analysis of its local properties of force and motion transmission[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(1): 63-66. (in Chinese)
- [8] 张立杰, 刘颖, 黄真. 平面 2 自由度驱动冗余并联机器人的性能分析[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(7): 181-185.
ZHANG L J, LIU Y, HUANG ZH. Analysis of performance of planar 2-DOF parallel manipulator with acuation redundancy[J]. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2006, 42(7): 181-185. (in Chinese)

作者简介:李研彪(1978—),男,河北保定人,燕山大学机械工程学院研究生,申请专利 3 项,发表论文 5 篇。E-mail: lyb781003@yahoo.com.cn;

金振林(1962—),男,辽宁抚顺人,燕山大学机械工程学院教授,从事并联机器人理论与应用技术方面的研究,获得中国发明专利 6 项,发表论文 30 余篇,获河北省科技发明一、二等奖各 1 项。