双定子液压马达差动连接理论分析*

闻德生[1]　吕世君[1]　杜孝杰[1]　郭高峰[1]　筑地徹浩[2]　单福林[3]

(1. 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004; 2. 上智大学理工学部, 东京 102-8554;
3. 燕山大学机械厂, 秦皇岛 066004)

【摘要】 通过双定子液压马达结构分析,提出了双定子液压马达差动连接的方法。在此基础上,分析了不同作用数的双定子液压马达差动连接方式,推导出不同差动连接下液压马达输出转速和转矩的表达式;针对双定子液压马达排量比例系数 C 对其差动连接方式的影响,分别找出了单作用、双作用以及多作用双定子液压马达中会使液压马达差动连接出现重复或死点现象的 C 的取值,得到了重复组数和死点数,为液压马达差动连接的理论研究提供了一条新途径。

关键词: 液压马达　双定子　差动连接　理论分析

中图分类号: TH137　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2011)09-0219-06

Theoretical Analysis of Differential Connection of Double-stator Hydraulic Motor

Wen Desheng[1]　Lü Shijun[1]　Du Xiaojie[1]　Guo Gaofeng[1]　Tetsuhiro Tsukiji[2]　Shan Fulin[3]

(1. *Department of Mechanical Engineering*, *Yanshan University*, *Qinhuangdao* 066004, *China*
2. *Department of Mechanical Engineering*, *Sophia University*, *Tokyo* 102-8554, *Japan*
3. *Machinery Factory*, *Yanshan University*, *Qinhuangdao* 066004, *China*)

Abstract

From the perspective of differential cylinder, the differential connections of hydraulic motor were studied, and a differential connection method was put forward. Through the analysis of the differential connections of different-acting double-stator motors, the mathematical expressions of the motor's rotational speed and torque were obtained. As for the effect of motor displacement scale factor C on the differential connection, the values of C for the single-acting, double-acting and multi-acting double-stator motor were found out respectively. These can make the motor differential connections turn out the same results or even fail to work. The number of repeated groups and failure points was calculated. This work will offer a new way for the theoretical research of hydraulic motor differential connection.

Key words　Hydraulic motor, Double-stator, Differential connection, Theoretical analysis

引言

在液压调速技术中,节流调速、容积调速及其派生的各种调速回路占据主导地位。节流调速回路具有结构简单、工作可靠、成本低、使用维护方便、调速范围大等优点;但由于其能量损失大、效率低、发热大,故一般仅用于功率不大的场合[1~2]。容积调速没有溢流和节流损失,效率较高,但是需要一套复杂的变量机构[3~4]。近年发展起来的变频液压调速技术能从全局上提高效率,取得了一定的成果,然而应用领域还不广,成本较高[5]。在泵供流量一定的情况下,可以通过双作用单活塞杆液压缸的差动连接,实现负载的快进-工进-快退 3 种不同速度的工况要求。但普通定量液压马达却无法通过差动方法实现

收稿日期: 2011-04-14　修回日期: 2011-05-22

* 国家自然科学基金资助项目(50975246)

作者简介: 闻德生,教授,主要从事液压传动技术与新型液压元件研究,E-mail: wendesheng@ysu.edu.cn

速度调节,这一缺陷极大地限制了定量液压马达的应用范围。本文从等宽曲线双定子液压马达[6]的角度入手,探讨液压马达的差动原理和连接方式。

1 双定子液压马达工作原理

等宽曲线双定子液压马达有滑块型、单滚柱型、双滚柱型、双滚柱连杆型、力偶型、异型滑块型,其中又有单作用、双作用及多作用[7]。由于这些液压马达均具有一个转子对应两个定子的特点,所以称之为双定子液压马达。其工作原理如图 1、2 所示。

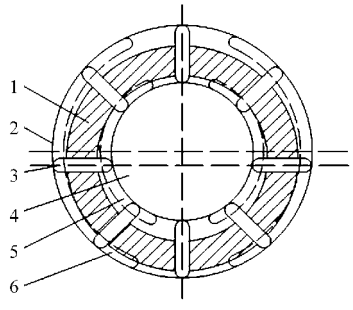

图 1 单作用双定子液压马达

Fig. 1 Single-acting double-stator hydraulic motor

1. 转子 2. 外定子 3. 滑块 4. 内定子 5. 内马达变化容积 6. 外马达变化容积

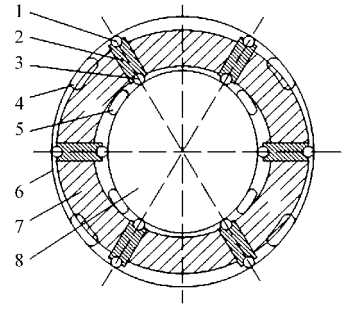

图 2 双作用双定子液压马达

Fig. 2 Double-acting double-stator hydraulic motor

1. 外滚柱 2. 连杆 3. 内滚柱 4. 外马达变化容积 5. 内马达变化容积 6. 外定子 7. 转子 8. 内定子

以单作用滑块型双定子液压马达为例阐述其工作原理:如图 1 所示,此液压马达是在一个壳体内设计了一个转子 1,2 个定子(外定子 2 和内定子 4),由转子 1、外定子 2、滑块 3、配流装置、两侧板组成一个外马达;同理,由转子 1、内定子 4、滑块 3、配流装置、两侧板又组成一个内马达,与同作用、同体积的中、低压单定子液压马达相比,在一个液压马达体内多出一个进、排油区(即多出一个内马达),可增大液压马达的输出转矩,提高比功率。单作用双定子液压马达在一个壳体内可以形成一个内马达和一个外马达,双作用双定子液压马达在一个壳体内可以形成两个内马达和两个外马达,同理,N 作用双定子液压马达在一个壳体内可以形成 N 个内马达和 N 个外马达,且内、外马达排量不同(即有效工作面积不同)。

2 双定子液压马达的差动连接原理

2.1 差动缸原理分析

双作用单活塞杆液压缸在其左右两腔都接通高压油时称为液压缸的差动连接,这时液压缸称作差动缸,如图 3 所示。液压缸的差动连接[8]可以很容易地实现活塞杆的伸出速度大于缩回速度,或伸、缩速度相等的工况要求,所以差动缸被广泛应用于各种液压系统。

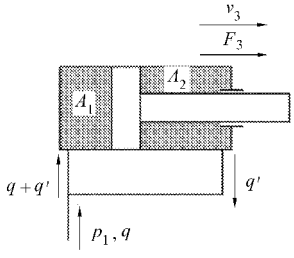

图 3 单杆活塞液压缸的连接方式

Fig. 3 Connections of single-piston hydraulic cylinder

液压缸可实现差动连接的主要原因是单活塞杆液压缸两腔的有效工作面积不等,当向有杆腔和无杆腔同时通入高压油时,活塞两端受力不等,活塞带动活塞杆向着有杆腔一侧运动,同时又将有杆腔的液压油压出,通过管路进入无杆腔,使进入无杆腔的流量增加,导致活塞运动速度高于非差动连接时仅向无杆腔供油的速度。另外,由于有杆腔通有高压油,活塞所受液压力的合力虽然与运动方向相同,但却小于单独向无杆腔通入高压油时所受到的合力,因此,输出力减小[9]。

2.2 差动液压马达的原理

传统液压马达为了实现旋转运动,高压腔与低压腔结构对称,两者的有效工作面积相等,如果向高、低压腔同时通入高压油,由于输出轴所受转矩总和为零,则液压马达无法实现旋转运动。

由于双定子液压马达的特殊结构,可以向一个液压马达壳体内的内、外两个马达同时反向通入高压油,又由于内、外两个马达的排量(有效工作面积)不同,故合力矩不为零,从而可实现差动工作。

以单作用双定子液压马达为例作简单介绍,单作用双定子液压马达有内、外两个马达且共用一个转子,外马达排量大于内马达。当向外马达的进油口和内马达的出油口(内马达与外马达同向旋转时所对应的出油口)同时供油时,外马达中的高压油作用于滑块上的力使转子有沿顺时针方向旋转的趋势,内马达中的高压油作用于滑块上的力使转子有

沿逆顺时针方向旋转的趋势。由于外马达的排量(有效工作面积)及力臂均大于内马达的排量(有效工作面积)及力臂,导致顺时针的转矩大于逆时针的转矩,所以转子会绕转子中心沿顺时针方向旋转。此时,内马达由外马达驱动旋转,实现了泵的工作原理,它将外马达排出的部分低压油吸入,再将高压油输出到外马达的进油口,加大了外马达的输入流量,增加了液压马达的旋转速度,实现了液压马达的差动。

为了证明理论分析的正确性,分别对单作用、双作用双定子液压马达各种不同的连接方式进行了原理性试验。试验中通过调节电磁换向阀的通断,实现了液压马达各种连接方式之间的自由切换,同时证明了差动连接原理的可行性。图 4 是试验系统照片,其中左侧系统的执行元件为单作用双定子液压马达,右侧系统的执行元件为双作用双定子液压马达。

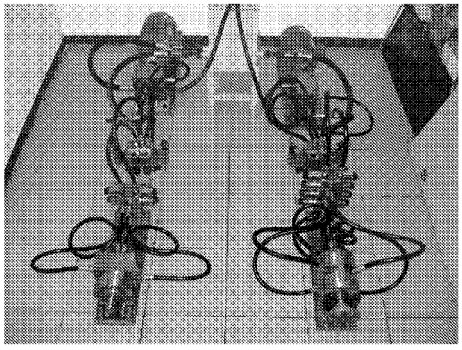

图 4　双定子液压马达差动连接原理试验

Fig. 4　Principle test of differential connections of double-stator hydraulic motor

3　单作用双定子液压马达差动连接后的速度和转矩

为便于分析,设内、外马达的进出口压差均为 Δp, 液压马达总的输入流量为一定值 q。设内马达的排量为 V_1,外马达的排量为 V_2。由马达的结构可知 $V_2 > V_1$,设

$$\frac{V_2}{V_1} = C \tag{1}$$

式中　C——外马达与内马达的排量比例系数

当只有内马达工作时,如图 5a 所示,输出转速和转矩分别为

$$n_1 = \frac{q}{V_1} \tag{2}$$

$$T_1 = \frac{\Delta p V_1}{2\pi} \tag{3}$$

当只有外马达工作时,如图 5b 所示,输出转速和转矩分别为

$$n_2 = \frac{q}{V_2} \tag{4}$$

$$T_2 = \frac{\Delta p V_2}{2\pi} \tag{5}$$

差动连接时,如图 5c 所示,液压马达的输出转速和转矩分别为

$$n_3 = \frac{q}{V_2 - V_1} \tag{6}$$

$$T_3 = \frac{\Delta p (V_2 - V_1)}{2\pi} = T_2 - T_1 \tag{7}$$

由式(1) ~ (7)可得

$$n_3 = \frac{1}{C-1} n_1 \tag{8}$$

$$T_3 = (C-1) T_1 \tag{9}$$

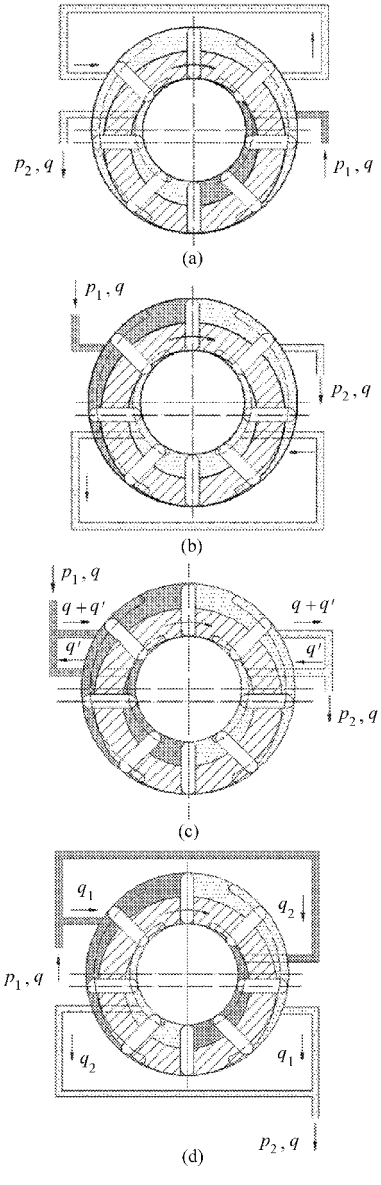

图 5　单作用双定子液压马达的连接方式

Fig. 5　Connections of single-acting double-stator hydraulic motor

(a) 单独向内马达供油　(b) 单独向外马达供油

(c) 内外马达差动连接　(d) 内外马达同向供油

低速大扭矩时,如图 5d 所示,液压马达的输出转速和转矩分别为

$$n_4 = \frac{q}{V_2 + V_1} = \frac{1}{C+1} n_1 \tag{10}$$

$$T_4 = \frac{\Delta p (V_2 + V_1)}{2\pi} = (C+1) T_1 \tag{11}$$

通过以上分析可知,在供油流量一定的情况下,单作用双定子定量液压马达不采用差动连接可以对外输出 3 种转速[10~11],实现差动连接后可对外输出第 4 种转速,而传统定量液压马达只能对外输出一种转速。反向旋转同理。这将大大增加定量液压马达在实际工况中输出转速和转矩的调节范围。

4 多作用双定子液压马达的差动连接方式

显而易见,单作用双定子液压马达的差动连接方式只有一种,但由于多作用双定子液压马达在一个壳体内形成了两组不同排量的液压马达(一组为外马达,个数与作用数相同;一组为内马达,个数与作用数相同),合理选择一些内马达和一些外马达,使内外马达反向连接,即可形成多种差动连接方式。所以,为了更好地了解多作用双定子液压马达的输出特性,对其差动连接方式进行探讨。

不考虑双定子液压马达的排量比例系数 C 对其输出转速和转矩的影响,通过内外马达的排列组合,得出液压马达的各种差动连接方式,并通过计算得出其输出转速和转矩表达式。为简化程序,以表 1、2 的形式给出。

通过以上分析及表 1、2 中的数据可以得出,不考虑液压马达的排量比例系数 C 的影响,单作用、双作用、三作用双定子液压马达的差动连接方式分别为 1、4、9 种。依次类推,可知 N 作用的双定子液压马达,其差动连接方式数量有 $n = N^2$ 种。所以,双定子液压马达仅通过改变差动连接方式即可输出多种转速和转矩。

表 1 双作用双定子液压马达的差动连接方式

Tab. 1 Differential connections of double-acting multi-stator hydraulic motor

序号	外马达数	内马达数	输出转速	输出转矩
1	1	1	$\frac{1}{C-1}n_1$	$(C-1)T_1$
2	1	2	$\frac{1}{C-2}n_1$	$(C-2)T_1$
3	2	1	$\frac{1}{2C-1}n_1$	$(2C-1)T_1$
4	2	2	$\frac{1}{2(C-1)}n_1$	$2(C-1)T_1$

5 液压马达排量比例系数 C 对其差动连接方式的影响

由以上分析可知,多作用双定子液压马达通过

表 2 三作用双定子液压马达的差动连接方式

Tab. 2 Differential connections of triple-acting multi-stator hydraulic motor

序号	外马达数	内马达数	输出转速	输出转矩
1	1	1	$\frac{1}{C-1}n_1$	$(C-1)T_1$
2	1	2	$\frac{1}{C-2}n_1$	$(C-2)T_1$
3	1	3	$\frac{1}{C-3}n_1$	$(C-3)T_1$
4	2	1	$\frac{1}{2C-1}n_1$	$(2C-1)T_1$
5	2	2	$\frac{1}{2(C-1)}n_1$	$2(C-1)T_1$
6	2	3	$\frac{1}{2C-3}n_1$	$(2C-3)T_1$
7	3	1	$\frac{1}{3C-1}n_1$	$(3C-1)T_1$
8	3	2	$\frac{1}{3C-2}n_1$	$(3C-2)T_1$
9	3	3	$\frac{1}{3(C-1)}n_1$	$3(C-1)T_1$

注:以上连接均为差动连接,即内外马达旋转趋势反向。n_1 表示双作用、三作用双定子液压马达在给定流量下 1 个内马达工作时的转速;T_1 表示双作用、三作用双定子液压马达 1 个内马达在给定流量下工作时的转矩。

不同的差动连接方式可以得到多组不同的转速和转矩输出,理论上液压马达的排量比例系数 C 可以取大于 1 的任意实数,但通过分析不难发现,对于给定作用数的双定子液压马达,当排量比例系数选取到某些特殊值时,以上分析所得的组合中就会出现相同的或使液压马达输出转速和转矩为零(死点)的情况。造成 C 的取值使液压马达实际输出转速和转矩范围的减小。以三作用双定子液压马达为例介绍其中的一组重复现象和一种死点。

如图 6 所示,为三作用双定子液压马达的两种差动连接方式。图中元件的符号表示意义见文献[12~13]。

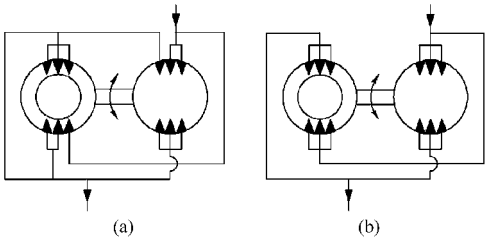

图 6 马达输出相同的两种差动连接方式

Fig. 6 Two differential connections with the same output

(a) 2 个外马达与 1 个内马达差动连接

(b) 3 个外马达和 3 个内马达差动连接

当液压马达排量比例系数 C 取 2 时,即 $\frac{V_2}{V_1} = 2$ 时,由表 2 数据可知图 6a 所示的液压马达的输出转

速和转矩分别为

$$n_{21}=\frac{1}{2C-1}n_1=\frac{1}{3}n_1 \tag{12}$$

$$T_{21}=(2C-1)T_1=3T_1 \tag{13}$$

式中　n_{21}——2 个外马达和 1 个内马达组合形成的差动转速

T_{21}——2 个外马达和 1 个内马达组合形成的差动转矩

由图 6b 所示的液压马达的输出转速和转矩分别为

$$n_{33}=\frac{1}{3C-3}n_1=\frac{1}{3}n_1 \tag{14}$$

$$T_{33}=(3C-3)T_1=3T_1 \tag{15}$$

式中　n_{33}——3 个外马达和 3 个内马达组合形成的差动转速

T_{33}——3 个外马达和 3 个内马达组合形成的差动转矩

显然，$n_{21}=n_{33}$，$T_{21}=T_{33}$，所以，当马达排量比例系数 C 取 2 时，此两种差动连接方式的马达输出转速和转矩相同。

如图 7 所示，为三作用双定子液压马达的一种差动连接方式。由表 2 数据可知，当液压马达排量比例系数 C 取 2 时，液压马达的输出转矩为 $T_{12}=(C-2)T_1=0$，内、外马达转矩抵消，液压马达无转速和转矩输出。所以当 C 取 2 时此种连接方式不能实现液压马达的差动。因此，称此种连接方式在 C 取 2 时会出现死点。

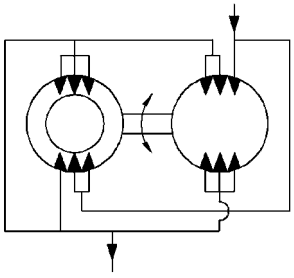

图 7　1 个外马达与 2 个内马达反向连接

Fig. 7　Differential connection with one inner motor and one outer motor

通过分析找出了双作用、三作用、四作用双定子液压马达中会出现重复或死点现象的特殊值，并计算出了其重复组数和死点数，如表 3 所示。同理可计算出 N 作用的结果（略）。

表 3　考虑 C 值影响的双定子液压马达差动连接方式

Tab. 3　Differential connections of double-stator hydraulic motor considering the affect of C

马达	C 值	重复组数	死点数	有效差动连接组数
双作用	2	0	1	3
三作用	3/2	0	1	8
	2	2	1	6
	3	0	1	8
四作用	4/3	0	1	15
	3/2	1	1	14
	2	6	2	8
	3	3	1	12
	4	0	1	15

通过表 1、2 可知，液压马达排量比例系数 C 可以影响液压马达的输出转矩和转速；通过表 3 可知，液压马达排量比例系数 C 还可以影响液压马达的有效差动连接数。因此，液压马达排量比例系数 C 既是液压马达设计时的一个重要参数，又是液压马达差动连接选择时所必须考虑的一个重要参数。

6　结论

（1）由于双定子液压马达的特殊结构，通过内、外马达反向连接的不同组合可以很容易地实现马达的各种差动连接方式。

（2）对于多作用的双定子液压马达，通过在不同差动连接方式之间的切换，可以使液压马达满足多级调速和调扭矩的工况要求。

（3）液压马达排量比例系数 C 在取某些特殊值时，会使马达的差动连接出现重复和死点现象。所以，该系数是双定子液压马达设计和使用时需要注意的一个重要参数。

参　考　文　献

1　张利平，周兰午，刘芬，等. 定量泵液压系统节能方法研究[J]. 中国机械工程，2001，12（增刊）：36～38.
Zhang Liping, Zhou Wulan, Liu Fen, et al. Analysis of energy-saving ways for fixed delivery pump hydraulic system[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(Supp.): 36～38. (in Chinese)

2　Durmus Kaya, Alptekin Yagmur E, Suleyman Yigit K, et al. Energy efficiency in pumps[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(6): 1 662～1 673.

3　彭天好，徐兵，杨华勇. 变频液压技术的发展及研究综述[J]. 浙江大学学报：工学版，2004，38(2)：215～221.
Peng Tianhao, Xu Bing, Yang Huayong. Development and research overview on variable frequency hydraulic technology [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2004, 38(2): 215～221. (in Chinese)

4　王彬，周华，杨华勇. 轴向柱塞泵平面配流副润滑特征参数实时测量[J]. 农业机械学报，2009，40(9)：209～213.
Wang Bin, Zhou Hua, Yang Huayong. Measurement on lubrication characteristic parameters of plane port pair in axial piston

pumps[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9):209 ~ 213. (in Chinese)

5 Xu Bing, Yang Jian, Yang Huayong. Comparison of energy-saving on the speed control of the VVVF hydraulic elevator with and without the pressure accumulator[J]. Mechatronics, 2005,15(10):1 159 ~ 1 174.

6 闻德生,吕世君,刘晓晨, 等. 等宽双定子泵和马达的原理研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(11):1 840 ~ 1 844.
Wen Desheng, Lü Shijun, Liu Xiaochen, et al. Theoretic research on variable displacement of equal-width double-stators pump and motor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008,40(11):1 840 ~ 1 844. (in Chinese)

7 燕山大学. 等宽曲线双定子滚柱泵:中国, 02144406.4 [P]. 2003 - 03 - 19.

8 侯清泉,赵存友. 液压缸差动连接时压力的分析研究与仿真[J]. 煤矿机械,2008,29(1):47 ~ 48.
Hou Qingquan, Zhao Cunyou. Pressure research and simulation of differential cylinder [J]. Coal Mine Machinery, 2008, 29(1):47 ~ 48. (in Chinese)

9 王积伟,章宏甲,黄谊. 液压传动[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社,2007:180 ~ 185.

10 闻德生,张勇,王志力,等. 三作用多泵多马达输出转速和转矩的理论分析[J]. 西安交通大学学报,2011,45(3):81 ~ 85.
Wen Desheng, Zhang Yong,Wang Zhili, et al. Rotating speed and torque of triple-acting multi-pump and multi-motor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011,45(3):81 ~ 85. (in Chinese)

11 Wen D S,Wang Z L,Gao J,et al. Output speed and flow of double-acting double-stator multi-pumps and multi-motors [J]. Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering, 2011,12(4):301 ~ 309.

12 闻德生,高俊,王志力,等. 双作用多泵多马达传动中马达输出转矩分析[J]. 中国机械工程,2010,21(23):2 836 ~ 2 838.
Wen Desheng, Gao Jun, Wang Zhili, et al. Output torque of double-acting multi-pump and multi-motor[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010,21(23):2 836 ~ 2 838. (in Chinese)

13 Wen Desheng. Theoretical analysis of output speed of multi-pump and multi-motor driving system[J]. Science China: Technological Sciences, 2011,54(4): 992 ~ 997.

(上接第 206 页)

13 Herve J M. Uncoupled actuation of pan-tilt wrists [J]. IEEE Transactons on Robotics, 2006, 22(1):56 ~ 64.

14 金振林,曹舜,高峰. 新型机器人肩关节及其运动学分析[J]. 中国机械工程,2009, 20(14):1 639 ~ 1 641.
Jin Zhenlin,Cao Shun, Gao Feng. Design and kinematics analysis of a novel robot shoulder joint[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(14):1 639 ~ 1 641. (in Chinese)

15 崔冰艳,金振林. 农业机器人新型肘关节的静力学性能分析[J]. 农业工程学报,2011,27(3):122 ~ 125.
Cui Bingyan, Jin Zhenlin. Analysis of statics performance for a novel elbow joint of agricultural robot[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(3):122 ~ 125. (in Chinese)

16 张帆,杨建国,李蓓智,等. 一种全局各向同性的三自由度转动并联机构[J]. 中国机械工程,2008, 19 (13):1 552 ~ 1 555.
Zhang Fan, Yang Jianguo, Li Beizhi, et al. An full-isotropic spherical three-DOF parallel mechanism [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(13):1 552 ~ 1 555. (in Chinese)

17 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京:清华大学出版社,2000:37 ~ 42.