

文章编号:1003-8728(2001)06-0860-02

机器人用RV减速器的瞬心特性和受力分析

李瑞玲¹,王允地²,樊养余²,张明中³¹北京航空航天大学,北京 100083;²西北轻工业学院,咸阳 712081;³中国航天机电集团第三研究院研发中心,100074)

李瑞玲

摘要:为深入认识RV减速器的工作原理,研究了该机构的瞬心特性,并在机构组成的基础上进行了受力分析,结果表明:瞬心位置与行星轮中心的距离为一常数,瞬心的力学意义相当于一固定铰链;运动中驱动力大小分布不均匀,这是设计过程中要考虑的一个因素。

关键词:传动机构;摆线轮;行星轮;力学分析;瞬心特性;偏心差动

中图分类号:TH133.46 **文献标识码:**A

随着科学技术的发展,减速器的类型、结构等不断得到改进,RV减速器就是国际上投放市场的一种新型减速器^[1],因其具有其它机种不可比拟的许多优点,目前在机器人中应用较为广泛。据有关资料分析,今后在结构上,该减速器仍具有很强的生命力^[2]。然而,到目前为止国内关于该种减速器的设计方法和设计理论尚不成熟,存在许多需要解决的问题。本文在机构组成的基础上研究该机构的瞬心位置特性,进行受力分析,以便明确瞬心的力学意义和机构的受力特点。

1 减速器的传动原理

RV型减速器也称偏心差动式摆线针轮减速器^[3],传动原理简图如图1所示;它是由第一级的圆柱齿轮减速部分和第二级的摆线针轮减速部分复合而成的两级行星传动机构。中心轮 a_1 为输入件,行星架V(即

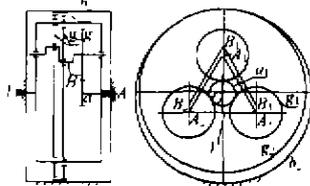


图1 RV型行星传动原理图

图中的双圆盘支撑结构)为输出件,摆线轮的曲轴H与行星轮中心轴固连,并穿过摆线轮被右边圆盘支承, N_p (=3)个行星轮均匀分布且彼此相位差为 120° ,形成了 N_p 对平行双曲柄结构。中心轮 a_1 将执行电机的旋转运动输入,经常 N_p 个行星轮 g_1 减速,行星轮带动转臂驱动摆线轮 g_2 做偏心运动,当针轮 b_2 固定时,摆线轮 g_2 一边随转臂H产生公转,一边绕自身轴线做自转,摆线轮 g_2 的绝对转速通过双圆盘支撑结构输出,支撑圆盘与摆线轮 g_2 组成平行四边形机构,故

此为等角速输出。

2 行星轮瞬心位置特性及力学意义

P是摆线轮 g_2 和针轮 b_2 的啮合节点,也是摆线轮上所有点的绝对瞬心,如图2所示。

对行星轮 $g_{1(2)}$,其与中心轮 a_1 的啮合节点 F_2 为相对瞬心,曲轴端 B_2 点是摆线轮 g_2 与行星轮 $g_{1(2)}$ 的相对瞬心,连接 OF_2 和 PB_2 相交于一点 P_2 即为曲轴 A_2B_2 的绝对瞬心,同样可作出曲轴 A_2B_2 , A_1B_1 的瞬心 P_3 , P_1 ,但曲轴 A_1B_1 的瞬心不确定,由图可知,点 F_2 为中心轮和行星轮的公共点,此点速度

$$v_{F_2} = OF_2\omega_1 = P_2F_2\omega_{g_{1(2)}} = (P_2A_2 + F_2A_2)\omega_{g_{1(2)}} \quad (1)$$

同理可得出

$$v_{F_1} = OF_1\omega_1 = P_1F_1\omega_{g_{1(1)}} = (P_1A_1 + F_1A_1)\omega_{g_{1(1)}} \quad (2)$$

$$v_{F_3} = OF_3\omega_1 = P_3F_3\omega_{g_{1(3)}} = (P_3A_3 + F_3A_3)\omega_{g_{1(3)}} \quad (3)$$

式中: ω_1 (中心轮 a_1 的角速度)为定值, OF_2 、 OF_1 和 OF_3 为中心轮半径,故 $v_{F_1} = v_{F_2} = v_{F_3}$;又同一瞬心位置 $\omega_{g_{1(1)}} = \omega_{g_{1(2)}} = \omega_{g_{1(3)}}$,且 F_2A_2 、 F_3A_3 和 F_1A_1 是行星轮半径,故可导出 $P_1A_1 = P_2A_2 = P_3A_3 =$ 定值,这就是RV型机构的瞬心位置所具有的性质。

如图2所示,作用在行星轮 $g_{1(2)}$ 上的力如果沿 P_2P 或 P_2O 方向,总可以完全通过摆线轮和针轮的啮合点传递到机架或中心轮的轴承机件上,而作用在行星轮上任何一方向的力可以简化成瞬心点 P_2 上的一个力和绕瞬心点转动的力矩 M ,则瞬心点上作用力可部分或全部地传到机架上,故瞬心的力学意义相当于一固定铰链,作用在其上的力对运动没有影响。

3 行星机构的受力分析

本文在假设该系统不存在弹性变形的条件下,分别对左右两套摆线轮进行受力分析,并假设不考虑轴向长度。

3.1 对右侧摆线轮及行星轮进行受力分析

(1)行星轮 $g_{1(2)}$ 、 $g_{1(3)}$ 的受力过程 行星轮 $g_{1(2)}$ 受到啮合力 F_{12}^* ,工作阻力 Q_{12}^* ,及摆线轮对其反作用力 F_{12}^* ,假定中心轮以 ω_1 逆时针转动,则各力方向如图3a所示。存在以下

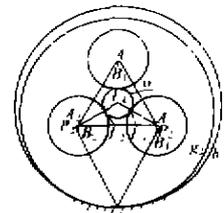


图2 瞬心位置图

收稿日期:2001-09-15

作者简介:李瑞玲(1974-),女(汉),山东,博士

的平衡方程

$$\begin{cases} \sum M_{P_2} = 0 \\ \sum F = 0 \end{cases} \quad (4)$$

即

$$\begin{cases} F_1^2(R + P_2A_2) = Q_2^2P_2A_2 + F_{r2}^2(H\cos\beta) \\ F_1^2 + F_3^2 = Q_2^2 \end{cases} \quad (5)$$

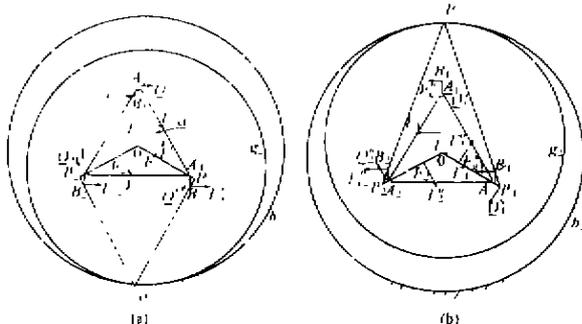


图 3 RV 型传动机构受力分析图

式中, H 为曲轴 A_1B_1 的偏心量, β 为曲轴 A_2B_2 与 P_2A_2 的夹角, F_{r2} 可分解为 F_{r2}^v, F_{r2}^h 两个分力 (F_{r2}^v 垂直于瞬心连线 OP_2, F_{r2}^h 沿瞬心连线方向, 可完全传递到机架上, 对运动没有影响) 和一个力矩 M 。

行星轮 g_{112} 的受力情况与行星轮 g_{113} 类似。

(2) 行星轮 g_{111} 的受力情况由图 4 可知, 行星轮 g_{111} 受三个相互平行的力, 根据平行力受力平衡的条件, 两边力的方向相同, 中间力的方向与前者相反, Q_1 方向确定, 即出现图 4 所示情况。

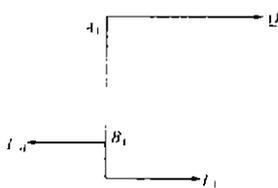


图 4 右侧行星轮 g_{111} 的受力分析图

F_1 与行星轮转动方向相反, 即中心轮 a_1 对行星轮 g_{111} 受阻碍作用。而 F_{r1} 与行星轮 g_{111} 的转动方向相同, 故曲轴此时受摆线轮驱动。

由以上分析可知:

(1) 单独右侧一套摆线轮作用时, 有确定瞬心的两行星轮 g_{112}, g_{113} 和瞬心不确定的行星轮 g_{111} 所受的中心轮作用力性质不同, 前者受驱动力, 后者受阻力。

(2) 曲轴 A_1B_1 在图示位置与摆线轮同针轮啮合的法线共线, 易出现运动不平稳现象, 但由于有确定瞬心的行星轮和框架的运动保证了曲轴 A_1B_1 的平衡状态, 使曲轴 A_1B_1 具有确定的运动。

(3) 在图示位置, 行星轮 g_{111} 在该状态附近, 有驱动力逐渐变小, 直至为零, 再反方向逐渐增加的过程变化, 所以越过平衡位置, 或从别的位置过渡到平衡位置, 出现中心轮对行星轮的啮合力变成阻力的情况。

3.2 对左侧摆线轮及行星轮的受力分析

(1) 行星轮 g_{121} 受力情况 (如图 3b)。根据平行力平衡

条件可写出

$$F_{r1}^2 + F_1^2 = Q_1^2 \quad (6)$$

F_1^2 对中心 A_1 的力矩同行星轮转向相同, 如图 5 所示, F_1^2 对 A_1 的力矩相反, 故 F_1^2 是驱动力, F_{r1}^2 是阻力, 同右侧摆线轮上的受力情况相反。

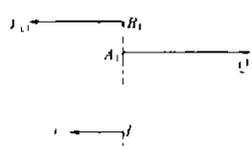


图 5 左侧行星轮 g_{121} 的受力分析图

(2) 行星轮 g_{122}, g_{123} 受力情况, 如前所述, 行星轮 g_{122} 受力仍分为三个, 受力方向如图 6 所示。如果把力 F_{r2}^2 分解成垂直瞬心连线 OA_2 的力 F_{r2}^v 和平行于 AO_2 的力 F_{r2}^h , F_{r2}^v 总可以作用于机架而对运动无影响, 故可形成三个平行力组成的平行力系, 根据平行力平衡条件可知: F_{r2}^h 与 Q_{r2}^2 方向相同, F_{r2}^v 与 Q_{r2}^2 方向相反。



图 6 左侧行星轮 g_{122} 的受力分析

故此时行星轮 g_{122} 受中心轮的阻碍作用, 曲轴 A_1B_1 (和行星轮是固联的) 受到摆线轮的驱动, 行星轮 g_{123} 受力情况同行星轮 g_{122} 类似。

由以上分析可知:

(1) 单独左侧一套摆线轮作用时, 有确定瞬心的两行星轮 g_{122}, g_{123} 和瞬心不定的行星轮 g_{121} 所受中心轮的作用力性质不同, 前者受阻力, 后者受的是驱动力, 这和右侧摆线轮正好相反。

(2) 曲轴 A_1B_1 和框架的运动是确定的, 同时保证了曲轴 A_2B_2 和 A_3B_3 具有确定的运动。

(3) 同右侧摆线轮情况相同, 曲轴 A_2B_2 曲轴 A_3B_3 在图示位置附近有驱动力逐渐减小变为零再反方向增加的变化过程。

3.3 对左、右两侧摆线轮的整体分析

由以上分析可知, 如果两构件完全是刚性的, 驱动力大小分布是不均匀的, 实际是工作时受力状况是确定状态, 由此可推知运动过程中构件局部可能会发生变形, 可采取弹性涨套或其它工艺措施来解决。根据力的迭加原理, 整体构件受力是图 3 所示左右两侧各相应力的迭加, 即

$$\begin{cases} F_1 = F_1^2 + F_1^3 \\ F_2 = F_2^2 + F_2^3 \\ F_3 = F_3^2 + F_3^3 \\ Q_1 = Q_1^2 + Q_1^3 \\ Q_2 = Q_2^2 + Q_2^3 \\ Q_3 = Q_3^2 + Q_3^3 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} Q_1 = Q_1^2 + Q_1^3 \\ Q_2 = Q_2^2 + Q_2^3 \\ Q_3 = Q_3^2 + Q_3^3 \end{cases} \quad (8)$$

4 结论

(1) RV 型减速器曲轴的瞬心位置与行星轮中心的距离为一常数, 作用于瞬心点的作用力对行星轮的运动没有影响, 瞬心的力学意义相当于一固定铰链。

(2) 运动过程中驱动力大小分布不均匀, 这是确定构件受力大小时要考虑的因素之一。

(下转第 880 页)

空间 4R 机器人, 对应于初始时刻 $x_0 = (a_0, b_0, c_0)^T$ 的关节初始位形 $q_0 = (q_{01}, q_{02}, q_{03}, q_{04})^T$ 是不确定的。因此, 我们可以以机器人末端实现预定任务的情况下, 选择最优的关节初始位形, 按照角加速度最小范数解规划机器人的关节运动规律以降低机器人末端的弹性变形运动误差。通过优化得到了机器人的最优关节初始位形 $q_{0p} = (0.145, 1.609, -1.824, 1.202)^T$ 。然后, 采用末端初始位置规划方法对机器人进行运动规划。这里我们仍然取机器人的关节初始位形 $q_0 = (q_{01}, q_{02}, q_{03}, q_{04})^T$ 作为优化变量, 只是不需满足约束 $x_0 = \varphi(q_0)$, 因此优化变量 q_0 具有更大的变化范围, 可以在 $0 - 2\pi$ 之间任意地变化。在机器人的运动过程中, 机器人的关节运动按照角加速度最小范数解进行规划, 同时要保证机器人末端的运动轨迹的大小、形状、方向与预定的相同。以这样的方法优化机器人的关节初始位置, 以此规划机器人的关节的运动, 与关节初始位形规划法相比, 能更加有效地降低机器人末端的弹性变形运动误差, 通过优化得到了对应于最优末端初始位置 $x_{0p} = (a_{0p}, b_{0p}, c_{0p})^T$ 的关节最优初始位形为 $q_{0p} = (1.930, -0.163, 0.545, 2.855)^T$ 。

表 1 两种规划法误差变化比较

	q^T	最大误差	误差平均值
优化前	(1.93, -0.163, 0.545, 2.855)	6.73 mm	4.15 mm
关节初始位形规划法	(0.145, 1.609, -1.824, 1.202)	5.52 mm	3.32 mm
末端位置规划法	(1.930, -0.163, 0.545, 2.855)	2.01 mm	1.02 mm

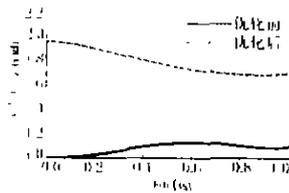


图 2 柔性机器人第一关节角度

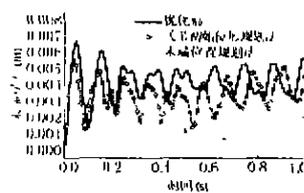


图 3 柔性机器人末端的弹性变形运动误差

机器人末端从最优初始位置开始运动 $x_{0p} = (a_{0p}, b_{0p}, c_{0p})$ 的机器人第一关节角变化规律比较见图 2。由于机器人末端的初始位置的变化, 改变了机器人的关节初始位形, 使得机器人运动过程中的关节转角、速度、加速度发生了较大变化, 正是因为机器人的运动规律的这些变化降低了机器人运动过程末端的弹性变形运动误差 (见图 3)。从图 3 和表 1 可以看出, 采用末端初始位置规划法, 机器人末端由于弹性变形运动误差的平均值由 4.15 mm 减低至 0.97 mm, 降低了约 77%, 最大误差也由优化前的 6.73 mm 降为不到 2.01 mm, 这种优化策略的减振效果是非常明显的。关节初始位形规划法使机器人末端的弹性变形误差平均值只下降了 20%, 最大误差降为 5.52 mm。

以上的数值模拟说明了, 在保证机器人末端运动轨迹的大小形状方向不变的条件下, 优化机器人末端的初始运动位置, 能更加有效地降低柔性机器人末端的弹性变形运动误差, 这一方法在实际中是易于控制、可行的。

5 结论

在空间柔性机器人运动学和动力学分析的基础上, 提出了一种有效的运动规划方法—末端初始位置规划方法。在保证机器人末端运动轨迹大小、形状、方向不变的情况下, 改变机器人末端开始运动时刻的初始位置, 使机器人的初始关节位形可变范围更大, 从而优化机器人的关节初始位形, 规划机器人关节的运动规律, 更好地降低柔性机器人末端的弹性运动误差。论文通过空间四杆机器人的数值模拟实例, 分析和验证了这方法的有效性。同时, 如果将这种方法与其他的方法进行综合运用, 将能够更加有效降低柔性机器人末端的弹性运动误差, 这对于柔性机器人的正常工作是十分有意义的。

【参考文献】

- [1] E. Bayo. Computed Torque for the Position Control of Open-Chain Flexible Robots [A]. Int. Conf. on Robotics and Automation [C]. IEEE 1988, 316~321
- [2] H. Asada, Z. Ma, H. Tokumaru. Inverse Dynamics of Flexible Robot Arms; Modeling and Computation for Trajectory Control [J]. J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1990, 112: 177~185
- [3] N. Singer, W. Seering. Using Acausal Shaping Techniques to Reduce Robot Vibration [A]. Int. Conf. on Robotics and Automation [C]. IEEE 1988, 1434~1439
- [4] L. Nguyen, I. Walker, R. DeFigueredo. Dynamic Control of Flexible Kinematically Redundant Robot Manipulators [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation 1992, 8(6): 759~767
- [5] 张绪平, 余跃庆. 冗余度柔性空间机器人的最优关节初始位形 [J]. 机械科学与技术, 1999, 18(5): 692~694
- [6] 张绪平, 余跃庆. 柔性冗余度机器人运动规划的新方法—冗余位形规划法 [J]. 机械工程学报, 2000, 36(7): 57~60
- [7] 张绪平, 余跃庆. 综合考虑关节和杆柔性的空间柔性机器人动力学分析 [J]. 机械科学与技术, 1998, 17(5): 775~778

(上接第 861 页)

【参考文献】

- [1] 日高照晃, 石田武著, 中国矿大研究生部译. 行星齿轮传动专题资料 [Z]. 1988.10
- [2] 李力行, 柯卫东, 王秀琦等. 机器人用高精度 RV 传动的研究 [J]. 大连铁道学院学报, 1999, (2): 62~67
- [3] 饶振纲. 行星传动机构设计 (第二版) [M]. 国防工业出版社, 1996