

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.12.007

大中型工业机器人手腕的设计

龚仲华¹, 龚晓雯²

(1. 常州机电职业技术学院 电气工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 国家统计局 武进调查队, 江苏 常州 213100)

摘要:为解决当前工业机器人生产制造、维修中所存在的谐波减速器及传动部件的分离和组装技术难题,将新技术和新颖功能部件应用到产品设计中,使工业机器人的装配和维修更简单和快捷;对现行工业机器人的传动系统结构及存在问题进行了分析和研究,提出了一种用于大中型垂直串联工业机器人手腕的新型结构设计方案,并对传动系统的结构进行了具体介绍;该方案将手腕传统系统设计成了可整体装拆和标准化生产、能通过法兰定位简单安装的传动组件,使手腕安装及维修时无需进行谐波减速器及传动部件的分离,传动组件装配时无需进行调整;利用实际生产制造及产品技术性能测试,对传统系统的设计进行了验证。结果表明,采用这一设计方案所制造的工业机器人手腕,不但解决了传统结构设计中存在的减速器及传动部件的安装和维修问题,延长了部件的使用寿命;而且手腕摆动轴 B、手回转轴 T 的传动精度、运动速度等指标均比传统结构手腕提高了 10%~20% 左右。

关键词:工业机器人;垂直串联;后驱手腕;设计

中图分类号:TH122;TP242.2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)12-1457-06

Design of wrist in large-middle industrial robot

GONG Zhong-hua¹, GONG Xiao-wen²

(1. School of Electrical Engineering, Changzhou Institute of Mechatronic Technology, Changzhou 213164, China;

2. Wujin Investigation Team, State Statistics Bureau, Changzhou 213100, China)

Abstract: In order to solve the technological problems of separation and assembly of harmonic drive and transmission part in the manufacture and maintenance process of industrial robot, the new technique and new functional unit were investigated. After the analysis of structure and problems in transmission part, a modular design of industrial robot wrist used in large-middle vertical series industrial robot was presented. The wrist used assembly design and standardized production parts, and when maintenance and installation, there was no need to adjust and separate the harmonic reducer and the transfer group. Transmission part was positioned by flange, any regulation needed not be carried out. The actual production and performance testing results show that the new wrist can solve the installation and maintenance issues in traditional structure and extend the tool life. And the speed and position accuracy of B and T axes are raised by 10% to 20%.

Key words: industrial robot; vertical series; rear drive wrist; design

0 引 言

工业机器人是集多学科先进技术于一体的机电一体化设备,其应用已越来越广泛。工业机器人的手腕是用来调整作业工具姿态、决定作业灵活性的关键部件,其结构将直接影响产品性能和使用维修。现代工业机器人大都采用交流伺服电机驱动,电机的转速高、

输出转矩小,而手腕的回转、摆动运动需要低速、大转矩输出,因此,传动系统必须有大比例的 RV 减速器或谐波减速器进行减速^[1-4]。部件型(component type)谐波减速器是目前使用最为广泛的减速装置,这种减速器采用的是刚轮、柔轮、谐波发生器分离型结构^[5],因此,无论是生产厂家的产品制造,还是机器人使用厂家维修时,都需要进行谐波减速器和传动零件的分离和

收稿日期:2016-07-03

作者简介:龚仲华(1962-),男,浙江嵊州人,教授,主要从事数控机床、工业机器人技术方面的研究。E-mail: gongzhonghua666@163.com

安装,其装配调试的要求非常高。特别在机器人维修时,同样需要分解谐波减速器及传动部件,并予以重新装配,这不仅增加了维修难度,且传动部件的反复装拆也将导致传动精度的下降,并影响部件的使用寿命。如何通过改进设计,使其装配、维修更简单和快捷,这不仅是机器人生产厂家普遍关心的问题,而且也是广大机器人用户的迫切要求。

本研究通过结构改进设计,将手腕的传动系统设计成 4 个可整体装拆与专业化生产的组件,使机器人手腕装配及维修时,无需进行减速器、传动部件的分离和调整。

1 总体设计

1.1 设计要求

垂直串联工业机器人手腕的基本结构如图 1 所示。

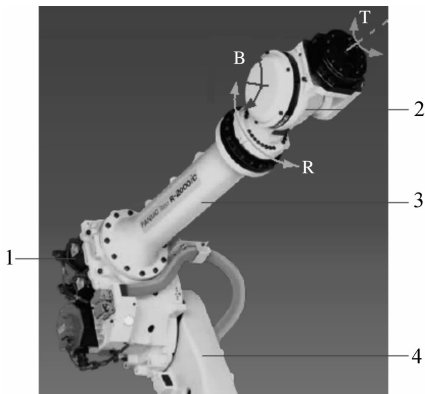


图 1 手腕的基本结构

1—驱动电机;2—手腕单元;3—上臂;4—下臂

它一般有手腕回转轴 R、腕摆动轴 B、手回转轴 T 共 3 个自由度。大中型工业机器人需要有较大的输出转矩和承载能力,R、B、T 轴驱动电机的规格大,为保证电机有足够的安装空间和良好的散热,同时,能减小上臂的体积和重量、平衡重力、降低重心、提高运动稳定性,它们通常都要将 R、B、T 轴驱动电机布置在上臂后端(后驱),然后,通过上臂内的传动轴,将驱动力传递到上臂前端的手腕单元上,再通过手腕单元实现 R、B、T 轴的回转与摆动。

现行工业机器人的上臂及手腕回转轴 R 的结构简单、设计经典、装配方便,加上传动部件的刚性好、损坏和维修的情况较少;因此,本研究的重点是分析现行手腕 B、T 轴传动系统结构设计中所存在的主要问题,并通过改进设计,提高传动系统性能、解决安装调试和

维修难题。

1.2 问题分析

经过对工业机器人的传动系统设计图及实物的结构剖析^[6-9],笔者发现,导致现行工业机器人装配要求高、调试维修困难的主要原因源自于所使用的谐波减速器结构特征。目前,绝大多数工业机器人采用的都是部件型(component type)谐波减速器,其结构与装拆示意图如图 2 所示。

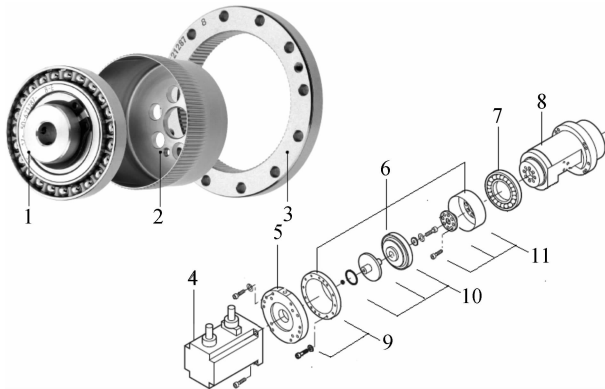


图 2 部件型谐波减速器结构与装拆示意图

1—谐波发生器;2—柔轮;3—刚轮;4—驱动电机或输入轴;5—安装座;6—谐波减速器;7—输出轴承;8—输出轴(负载);9—减速器及连接件;10—谐波发生器及连接件;11—柔轮及连接件

这种减速器的刚轮、柔轮、谐波发生器是 3 个独立的部件,它需要由机器人生产厂家自行设计和安装连接件、输出轴承等,这样不仅导致了传动系统结构复杂,而且减速器和连接件还必须在机器人装配现场组装;维修时,同样需要进行部件的逐一分离,从而带来了机器人装配调试的要求高、维修难度大等一系列问题。

因此,设计改进需要从谐波减速器的选型入手,然后通过合理设计传动系统,使手腕单元的所有传动部件成为可整体装拆、无需调整直接安装的组件,才能完全解决现行结构所存在的安装、调试、维修难题。

1.3 谐波减速器选择

作为解决机器人手腕安装、调试、维修难题的关键,首先需要解决谐波减速器的结构问题,使之成为可整体装拆的独立部件。由于谐波减速器是专业生产厂家提供的标准部件,本研究选择了世界著名的日本 Harmonic Drive System(哈默纳科)公司最新研发的 SHG-2UJ 系列轴输入单元型(Unit type)谐波减

速器。

SHG-2UJ 系列减速器的结构如图 3 所示^[10]。

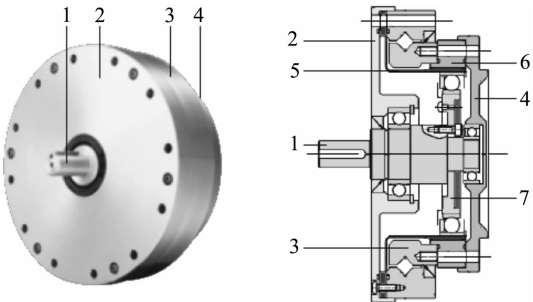


图 3 单元型减速器的结构

1—输入轴;2—前端盖;3—CRB 轴承;4—后端盖;5—柔轮;6—刚轮;7—谐波发生器

这种减速器的刚轮、柔轮、谐波发生器、输入轴、输出轴、支承轴承等部件被设计成整体安装的单元;其输入轴上加工有键槽和中心螺孔,可直接安装齿轮或皮带轮;输出轴加工有定位法兰和连接螺孔,可直接连接负载;减速器壳体 and 输出轴间采用了可同时承受径向和轴向载荷的高刚性交叉滚子轴承(cross roller bearing, CRB)进行支承;整个减速器为一个可整体装拆的独立部件。

该设计所使用的 Harmonic Drive System 单元型减速器(SHG-40-100-2UJ)和原机器人所使用的同规格部件型减速器(CSF-40-100-2A)的主要性能比较表如表 1 所示。

表 1 部件型和单元型减速器的主要性能比较表

主要技术性能	CSF-40-100-2A	SHG-40-100-2UJ
额定转矩/ $N \cdot m$	265	345
加减速转矩/ $N \cdot m$	568	738
瞬间最大转矩/ $N \cdot m$	1 080	1 400
额定输入转速(脂润滑)/ ($r \cdot min^{-1}$)	3 000	3 000
最高输入转速(脂润滑)/ ($r \cdot min^{-1}$)	4 000	4 000
传动精度(角误差)/ ($10^{-4} rad$)	5.8	2.9
最大传动间隙/($10^{-5} rad$)	3.4	3.4

由表 1 可见,利用单元型减速器替代部件型减速器,不仅可解决减速器的部件分离问题,就减速器本身而言,还可使输出转矩提高 30%,且其传动误差也只有原来的 50%。

1.4 总体结构设计

在谐波减速器确定后,需要根据手腕传动和减速器安装的要求,在不改变机器人结构和外形的前提下,通过总体结构设计,使手腕单元的所有传动部

件均成为可整体装拆、无需调整直接安装的组件,才能完全解决现行结构所存在的安装、调试、维修难题。

重新设计的手腕单元总体结构如图 4 所示。

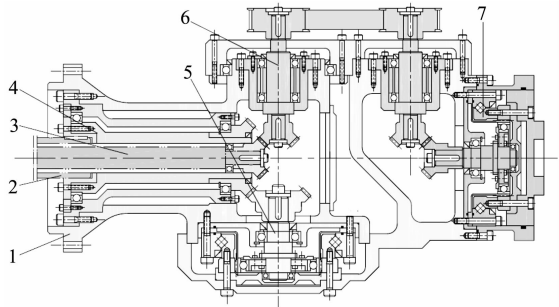


图 4 手腕单元的总体结构设计

1—连接体;2—B 输入轴;3—T 输入轴;4—B/T 传动轴组件;5—B 轴减速摆动组件;6—T 轴中间传动组件;7—T 轴减速输出组件

手腕单元由连接体、摆动体及 B/T 传动轴组件、B 轴减速摆动组件、T 轴中间传动组件、T 轴减速回转组件等部件组成,4 个传动组件均可在条件优越的环境下事先组装,或直接由专业生产厂家制造;在机器人装配或维修现场,只需要通过构件的定位孔、安装法兰进行定位和固定。因此,只要组件安装定位部件的加工精度得到保证,手腕安装及维修时,就无需进行谐波减速器、传动部件的分离和作任何调整,从而从根本上解决了现行结构所存在的问题。

图 4 中的连接体 1 是手腕单元的安装部件,它与上臂前端的 R 轴减速器输出轴连接,可带动整个手腕单元实现 R 轴回转运动。B/T 传动轴组件 4 是连接 B/T 输入轴和摆动体、变换转向的部件,它安装在连接体 1 的内腔;组件的前端以连接体内孔定位、后端通过定位法兰固定,安装、维修时组件可整体从连接体后端装卸。B 轴减速摆动组件 5 为带固定臂和辅助臂的 U 形箱体,固定臂内安装有减速器,辅助臂上安装有 B 轴辅助支承轴承;取下谐波减速器和辅助臂的连接螺钉后,即可使摆动体、连接体分离。T 轴中间传动组件 6 由 2 组同步皮带连接、结构相同的过渡轴部件组成,它们可通过定位法兰整体安装到连接体和摆动体上。T 轴减速回转组件 7 带有工具安装法兰,它安装在摆动体箱体前端,取下工具安装法兰和防护罩后便可与摆动体分离。

手腕单元的连接体、摆动体的外形以及 4 个组件

中的伞齿轮、传动轴等主要传动件的结构均可与原机器人保持一致;组件的相对安装位置,可通过调整伞齿轮的直径、同步皮带长度和带轮直径等简单方法进行灵活调整。

2 传动组件设计

2.1 B/T 传动轴组件

B/T 传动轴组件的结构设计如图 5 所示。

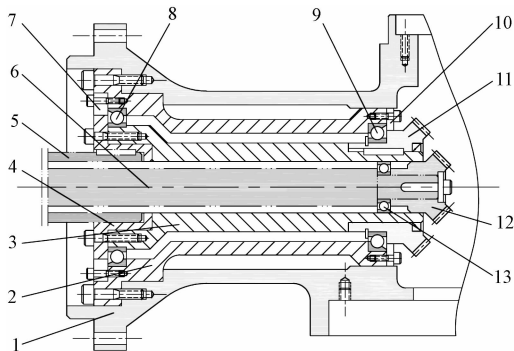


图 5 B/T 传动轴组件结构

1—连接体;2—外套;3—内套;4—连接套;5—B 输入轴;6—T 输入轴;7,10—压紧圈;8,9,13—轴承;11,12—伞齿轮

组件的主要设计特点是:它采用了中空内外套结构,通过外套 2 的设计,不仅使组件能够整体装拆,且有效解决了 B/T 传动轴前端的安装孔加工及伞齿轮的安装、调整等加工制造上的实际问题。

组件的内套用于 B/T 轴传动。B 传动轴由内套 3、连接套 4、伞齿轮 11 及连接件组成,并通过前后轴承支承 8、9 和外套内孔配合。连接套 4 一方面可通过键与 B 输入轴 5 连接,带动内套 3 及伞齿轮 11 旋转,同时也是后轴承 8 的外圈固定件;伞齿轮 11 和内套 3 利用键和锁紧螺母连为一体,前轴承 9 安装在伞齿轮上。为了使内套能同时承受径向和轴向载荷,并避免热变形引起的轴向过盈,前、后支承轴承采用的是 DB (背对背)组合的角接触球轴承。这样,当 B 输入轴旋转时,将带动伞齿轮 11 旋转,进而带动 B 轴谐波减速器的输入轴旋转,实现了 B 轴传动和转向变换的功能。

T 传动轴就是来自上臂的 T 输入轴 6,其前支承轴承 13 直接用伞齿轮 12 锁紧,并用内套 3 的内孔进行径向固定、轴向浮动定位;伞齿轮 12 通过键和中心螺钉固定在 T 输入轴 6 上。当 T 输入轴旋转时,将带动伞齿轮 12 旋转,然后通过 T 轴中间传动组件,带动

T 轴谐波减速器输入轴旋转,以实现 T 轴传动和转向变换功能。

2.2 B 轴减速摆动组件

B 轴减速摆动组件是一个以连接体为支承、可摆动的 U 形箱体。组件的主要设计特点是:通过摆动体 1 上的可拆卸辅助臂 6,解决了摆动体的装配问题;同时,本研究还利用安装在辅助臂上的辅助支承轴承 5,为摆动提供了可靠的定位支承,提高了 B 轴性能。

B 轴减速摆动组件的结构设计如图 6 所示。

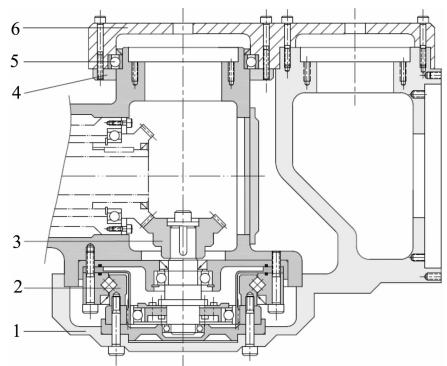


图 6 B 轴减速摆动组件结构

1—摆动体;2—谐波减速器;3—输入齿轮;4—压紧圈;5—轴承;6—辅助臂

摆动体的减速直接通过单元型谐波减速器 2 实现。减速器的壳体固定在连接体上;输入伞齿轮 3,直接利用减速器输入轴的键和中心螺孔固定;摆动体 1 通过减速器输出轴的定位法兰连接。当 B 输入轴旋转时,B/T 传动轴组件上的 B 轴伞齿轮将带动谐波减速器的输入伞齿轮 3 旋转,减速器减速后的输出轴可驱动 U 形箱体低速摆动。由于减速器壳体和输出轴间采用了可同时承受径向和轴向载荷的 CRB 轴承支承,摆动体的另一侧通过辅助臂上的轴承 5 辅助支承,故 B 轴传动可靠。

2.3 T 轴中间传动组件

T 轴中间传动组件的结构设计如图 7 所示。

它由 2 组同步皮带连接、结构相同的过渡轴部件组成,其作用是将 T 输入轴的动力传递到 T 轴减速器上。组件的设计特点是:所有传动零件均统一安装在支承座上,实现了组件整体装拆的目的。

第 1 组过渡轴部件固定在连接体上,其伞齿轮和 B/T 传动轴组件上的 T 轴伞齿轮啮合后,可将 T 轴动力从连接体上引出;第 2 组过渡轴部件安装在摆动体

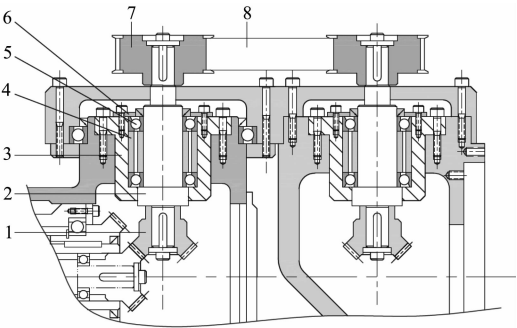


图 7 T 轴中间传动组件结构

1—伞齿轮;2—轴;3—支承座;4—隔套;5—轴承;6—压紧圈;7—同步带轮;8—同步皮带

上,它可将 T 轴动力引入到摆动体箱体内,其伞齿轮和 T 轴谐波减速器输入轴上的伞齿轮啮合后,可驱动 T 轴回转。

过渡轴部件由轴、支承座、支承轴承及连接件组成。支承座 3 加工有定位法兰,可直接安装到连接体或摆动体上;轴 2 安装在支承座内,它通过 DB 组合的角接触球轴承前后支承,以同时承受径向和轴向载荷,并避免热变形引起的轴向过盈。轴 2 的内侧安装伞齿轮 1,外侧安装同步带轮 7,伞齿轮和同步带轮均通过键和中心螺钉固定。过渡轴部件可利用支承座的定位法兰整体装拆,装配、维修时无需分离和调整。

2.4 T 轴减速输出组件

T 轴减速输出组件的结构设计如图 8 所示。

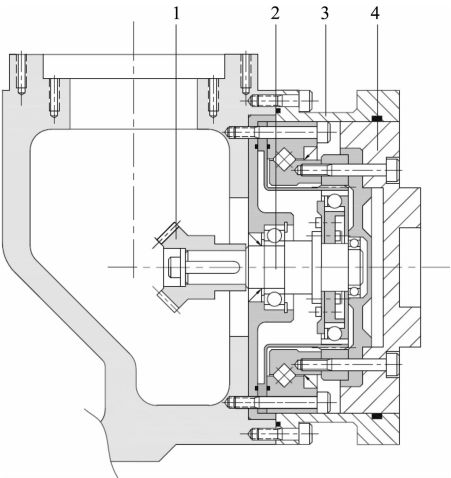


图 8 T 轴减速输出组件结构

1—输入齿轮;2—谐波减速器;3—防护罩;4—工具安装法兰

它固定在摆动体前端,用来实现 T 轴回转减速和作业工具安装。组件的装拆简单方便,除减速器外,传

动部件无其他传动间隙。

T 轴减速同样采用了单元型谐波减速器,减速器 2 的输入轴上安装伞齿轮 1,输出轴连接工具安装法兰 4,壳体固定在摆动体上,外部用防护罩 3 密封与保护。工具安装法兰 4 上设计有标准的中心孔、定位法兰和定位孔、固定螺孔,可直接安装机器人的作业工具;当减速器输入轴在伞齿轮 1 带动下旋转时,输出轴可直接驱动工具安装法兰 4 及作业工具实现 T 轴回转。

3 单元安装要求

为了保证手腕有良好的传动性能,连接体和摆动体加工时,需要保证传动组件的定位孔、安装面的加工精度。对于一般应用,组件定位孔的同轴度误差应小于 0.025 mm,定位外圆公差通常为 h7,连接体和摆动体的定位内孔公差通常为 H7;安装定位面的平行度误差应小于 0.03 mm;谐波减速器输出轴、T 轴中间传动组件传动轴等的跳动应不超过 0.03 mm。此外,摆动体加工时,还应尽可能减小 T 轴减速器定位孔轴线和 B 轴谐波减速器定位孔轴线、T 轴中间传动组件定位孔轴线的垂直度误差,以保证轴线的垂直相交。

谐波减速器壳体、输出轴应使用生产厂规定的安装螺钉连接,其他组件的固定螺钉规格应尽可能与谐波减速器安装螺钉统一。连接螺钉的拧紧扭矩推荐使用值如表 2 所示。

表 2 固定螺钉的拧紧扭矩推荐表

螺钉规格	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12
拧紧扭矩/(N·m)	2	4.5	9	15.3	37.2	73.5	128

4 测试与验证

笔者研究的根本目的是通过改进结构,有效解决现行结构机器人手腕所普遍存在的装配、维修难题,避免在生产、维修现场分解谐波减速器及传动部件,使机器人的装配、维修更为简单和快捷;故而,机器人其他部件及手腕单元安装、支承部件的结构、外形均可直接沿用现行机器人的成熟设计。鉴于此,在该手腕单元设计时,其连接体、摆动体等主要构件以及单元中的传动轴、伞齿轮、支承件等零部件的结构、外形、刚性和加工精度等参数,均参照国内外著名机器人生产厂家广为使用的成熟产品进行设计,

其结构经典、设计合理;传动系统的理论计算、结构仿真等内容,直接通过 Harmonic Drive System SOFTWARE Ver MT 等工程设计软件进行^[11],在此不再进行介绍。

手腕单元的最终性能,已通过产品的实际性能测试进行验证。对承载能力 80 kg、水平作业半径2 230 mm、垂直作业半径 3 750 mm 的中型机器人,在采用传统结构手腕和改用该手腕单元机器人时的 B、T 轴实测数据对照表(不同机器人的测试结果稍有不同)如表 3、表 4 所示。

表 3 改进前后的 B、T 轴最大回转速度比较表

	实测最大回转速度/(°·s ⁻¹)	
	改进前	改进后
B 轴	175	200
T 轴	255	300

表 4 改进前后的 B、T 轴定位精度比较表

	实测定位精度/rad	
	改进前	改进后
B 轴	6.2×10 ⁻⁴	5.6×10 ⁻⁴
T 轴	7.0×10 ⁻⁴	6.4×10 ⁻⁴

由表 3、表 4 可见,由于减速器输出转矩和传动精度的提高,加上传动部件装配环境的改善与装配精度的提高,使用改进设计手腕单元的 B、T 轴运动速度大致可提高 15%~20%;定位精度大致可提高 5%~10%。需要说明的是:由于机器人的承载能力、作业范围及腰回转、上下臂摆动轴的速度、精度等技术参数,与机器人本体的其他部件设计密切相关,因此,即使采用本手腕单元,原则上也不能改变除 B、T 轴外的机器人其他技术参数。

5 结束语

本研究介绍了一种用于大中型垂直串联工业机器人的手腕设计方案,提供了手腕单元及内部组件的具体结构。结果表明,采用这一设计方案后,手腕单元的

传动系统部件可整体装拆,手腕安装及维修时无需进行谐波减速器、传动部件的分离。传动组件设计时均采用了安装法兰定位方式,组件装拆时无需进行调整。

实际产品生产与性能测试表明,采用本设计方案制造的工业机器人手腕,不但解决了传统结构所存在的减速器及传动部件的安装维修问题,延长了部件的使用寿命,而且手腕摆动轴 B、手回转轴 T 的传动精度、运动速度等指标均可比传统结构手腕提高 10%~20% 左右。

参考文献(References):

[1] 龚仲华. 工业机器人从入门到应用[M]. 北京:机械工业出版社,2016.

[2] 焊接学会. 焊接机器人实用手册[M]. 北京:机械工业出版社,2014.

[3] 刘永安,余天荣. 工业机器人的应用研究[J]. 机电工程技术,2014,43(2):52-53,104.

[4] 孙汉卿. 多关节机器人原理与维修[M]. 北京:国防工业出版社,2013.

[5] HarmonicDrive. 精密控制用减速器综合样本[M]. 东京: Harmonic Drive System, Ltd, 2015.

[6] 安 川. MOTOMAN-MH6 机器人使用说明书[M]. 上海:安川电机(中国)有限公司,2009.

[7] 安 川. MOTOMAN-MA1400 机器人使用说明书[M]. 上海:安川电机(中国)有限公司,2009.

[8] ABB Robotics. IRB2600 Industrial Robot Operating Manual [M]. 上海:ABB Engineering Ltd., 2010.

[9] FANUC. Robot R-2000iC series Operating Manual[M]. 上海:FANUC Corporation, 2014.

[10] HarmonicDrive. GHG/SHF 系列单元型减速器样本[M]. 东京:Harmonic Drive System, Ltd., 2015.

[11] HarmonicDrive. 型号选择程序操作说明书[M]. 东京: Harmonic Drive System, Ltd., 2015.

[编辑:李 辉]

本文引用格式: