

一种新型差动驱动 A/B 双摆头设计

孙龙飞,房立金

(东北大学 机械工程与自动化学院,辽宁 沈阳 110819)

摘 要:设计了一种可用于五轴联动加工中心的新型差动式 A/B 轴双摆头结构. 该双摆头采用 4 台伺服电机驱动,基于差动机构的工作原理实现摆头的摆动和俯仰运动. 双摆头的驱动电机及蜗轮蜗杆减速装置均不参与摆头运动,与现有典型的双摆头结构相比,有效减少了摆头运动部件数量. 采用双电机主从消除控制方法,能有效消除摆头两个自由度的传动间隙,进而提高其运动精度. 对差动双摆头的传动、消除和结构等方面的特点进行了分析,为后续工程设计提供了理论基础.

关 键 词: A/B 双摆头;差动驱动;传动间隙;消除控制;偏置力矩

中图分类号: TH 122 文献标志码: A 文章编号: 1005 - 3026(2016)09 - 1269 - 05

Design of A Novel A/B Bi-rotary Head Based on Differential Drive

SUN Long-fei , FANG Li-jin

(School of Mechanical Engineering & Automation , Northeastern University , Shenyang 110819 , China.
Corresponding author : FANG Li-jin , E-mail : ljfang@mail. neu. edu. cn)

Abstract : A novel structure of differential A/B bi-rotary head was designed , which can be used for five-axis machine centers. The heads were driven by four servo motors. Pitching and tilting motions were achieved through controlling angle and velocity of the motors. The motors and reducers were fixed on the machine body. The structure of motion parts was more simplified than that of the typical A/B bi-rotary head. The backlash of the head was eliminated owing to the dual-motor master-slave control method being used , and the motion accuracy of the head was improved. Transmission characters , backlash eliminating method and structural characters of the head were analyzed , and the results provide an important theoretical basis for the design of A/B bi-rotary head.

Key words : A/B bi-rotary head ; differential drive ; backlash ; anti-backlash control ; bias torque

五轴联动数控机床通过控制刀具末端的位置和姿态实现空间复杂曲面零件的加工,是高端装备制造领域的关键设备. 机床的双摆头能实现 2 个旋转轴的运动,是五轴联动数控机床的核心功能部件,其性能直接影响机床的加工精度水平^[1]. 双摆头结构中具有代表性的 A/B 摆角形式由于能够满足大功率、大扭矩的切削要求,适用于以钛合金、高温合金等难加工材料为代表的大切削负载的数控加工,主要应用于飞机制造领域^[2].

在国外,A/B 双摆头经过多年的研究与发展技术相对成熟,比较典型的有意大利 RAMBAUDI 公司 RAMMATIC 系列、法国 FOREST - LINE 公司的 2T 系列、美国 CINCINNATI 的 V5 - 2000/3000 加工中心及 PARPAS 的 BF80 - TTM 加工中心均配备了 A/B 双摆头^[3]. 国内针对双摆头的研究起步较晚,带 A/B 轴的五轴加工中心只有少数国内企业具有开发能力. 沈阳机床 VMC13120U 是国内首台使用 A/B 双摆头的五轴联动加工中心. 北京航空制

造工程研究所采取合作生产方式 ,为国内飞机制造工厂提供了 6 台带 A/B 双摆角铣头的机床产品 ,但其关键技术为国外引进^[4]。文献 [5] 分析了双摆角数控铣头在多种负载作用条件下的温度传递特性。

目前 ,大部分 A/B 摆头采用伺服电机驱动 ,驱动部件跟随摆头一起运动。这部分结构随摆角增大产生的较大附加扭矩会制约摆头的驱动能力 ,摆角范围大多限制在 $\pm 30^\circ$ 。因此 ,航空企业通常需要做大量的专用工装满足航空钛合金的大角度切削要求^[6]。美国 CINCINNATI 的 V5 - 2000/3000 加工中心的摆头采用丝杠驱动 ,在一定程度简化了摆头的机械结构 ,使摆角摆动范围增大至 $\pm 40^\circ$ 。

消除传动间隙是提高摆头精度的关键环节 ,双蜗杆蜗轮副消隙是目前 A/B 双摆头主要采用的消隙方式 ,采用 2 套蜗轮蜗杆同轴布置的方式 ,通过在蜗杆一端加载蝶形弹簧或在两蜗杆之间加调整套等方法施加一定预载 ,使与蜗轮同轴的两齿轮同输出端的扇形齿条反向啮合提高精度 ,这种机械消隙结构在长期使用磨损后不能自动补偿间隙。双电机主动消隙控制是较为先进的电气消隙方法 ,能够克服机械消隙存在的不足并提高传动精度 ,在大型雷达、并联机床及机器人关节的高精度运动控制中得到了应用^[7-10]。该方法在双摆头中的应用较少。随着伺服电机技术的发展和成本的逐步降低 ,采用双电机主动消隙来提高数控机床的精度将成为一种可行的实现途径。

本文基于差动原理设计的 A/B 双摆头可实现摆头俯仰、摆动及俯仰与摆动的复合运动。摆头俯仰与摆动的驱动部件均不参与摆头运动 ,有效减少了摆头运动部件数量 ;此外 ,摆轴运动的同时分组采用双电机主从电气消隙控制来消除传动间隙 ,提高摆头的运动精度。

1 差动双摆头结构设计

图 1 为本文研究的基于差动原理的 A/B 双摆头整体结构 ,将摆头的安装面固定在三坐标机床轴上即可形成五轴联动的数控机床。该双摆头结构的传动部分主要由第一差动输入、第二差动输入和差动输出三部分组成 ,第一差动输入包含 2 台伺服电机及其驱动的主、从动蜗杆、蜗轮及锥齿轮 ;第二差动输入与第一差动输入关于 U 型支撑对称安装于 U 型支撑件的外侧 ;差动输出部分主要包含大、小锥齿轮及摆动摆轴 ,其传动原理如

图 2 所示。主轴部分位于 U 型支撑件外部并与摆动摆轴联接 ,两个轴的第一级驱动均采用蜗轮蜗杆副传动 ,蜗轮通过相联接的轴将扭矩传递给另一端固定的锥齿轮 ,并作用于摆轴上固定的两个锥齿轮。根据两侧蜗轮的转动实现 A 轴与 B 轴的运动 ,因此 ,通过控制 4 台伺服电机的转速和转角可以实现双摆头的摆动和俯仰运动。

图 2 表示了摆头各传动部件的布置方式。第一差动输入的空心传动轴穿过半轴 ,一端安装从动蜗轮 ,另一端安装从动锥齿轮 ,实现从动蜗轮与从动锥齿轮同步转动 ;类似地 ,实心传动轴穿过空心传动轴 ,轴两端分别安装主动蜗轮与主动锥齿轮 ,实现主动蜗轮与主动锥齿轮的同步转动。主、从动锥齿轮分别与差动输出的小、大锥齿轮啮合驱动摆头摆动摆轴并带动主轴摆动 ,实现摆头的摆动。摆头俯仰结构通过两个中空的半轴安装在 U 型支撑内部 ,并带动主轴绕半轴转动 ,实现摆头的俯仰运动。

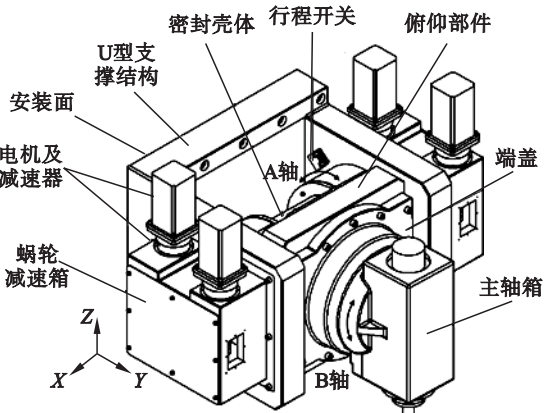


图 1 差动双摆头整体结构图
Fig. 1 Structure schematic of differential bi-rotary head

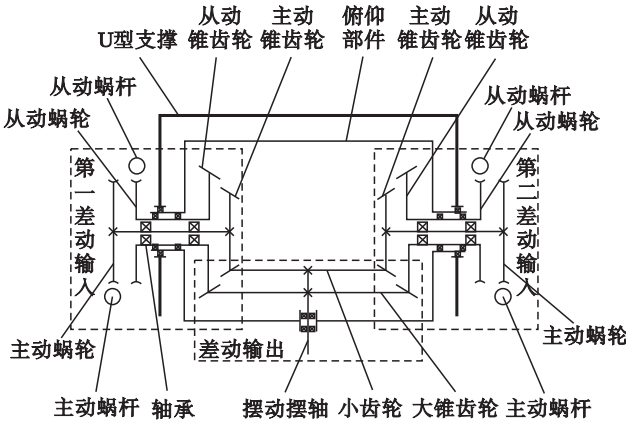


图 2 差动双摆头传动原理图
Fig. 2 Transmission principle of differential bi-rotary head

2 双摆头结构特性分析

2.1 与现有典型双摆头结构的比较

目前,北京航空工程研究所研发的带 A/B 摆头加工中心,沈阳机床 VMC13120U 及 RAMBAUDI 公司 RAMMATIC 加工中心的 A/B 摆头均采用图 3a 的结构形式^[3],这种结构具有一定的代表性.双摆头主要由俯仰驱动部分、摆动驱动部分、主轴及其支撑部件、U 型支架等组成.其中,俯仰传动部分的内部传动结构如图 3b 所示,俯仰电机通过同步带经蜗杆、蜗轮及与蜗轮同轴布置的齿轮,将扭矩传递至主轴支撑部件上固定的大齿圈,主轴及其支撑部件通过半轴安装于 U 型支架的轴孔内,由大齿圈带动主轴绕半轴转动,实现摆头俯仰运动;同样地,摆动与俯仰部分的传动方式基本相同,这里不再赘述.

图 3a 中摆头的两摆轴串联布置并且采用单轴独立驱动的方式,B 轴的摆动需要带动主轴及 A 轴的驱动部分一起运动.与图 3a 中摆头的传动原理不同,本文的双摆头采用差动驱动,通过控制电机的转速和转角实现摆轴的复合运动,摆头的电机及减速装置均固定于 U 型支撑而不参与摆头运动,有效减少了摆头运动部件数量.

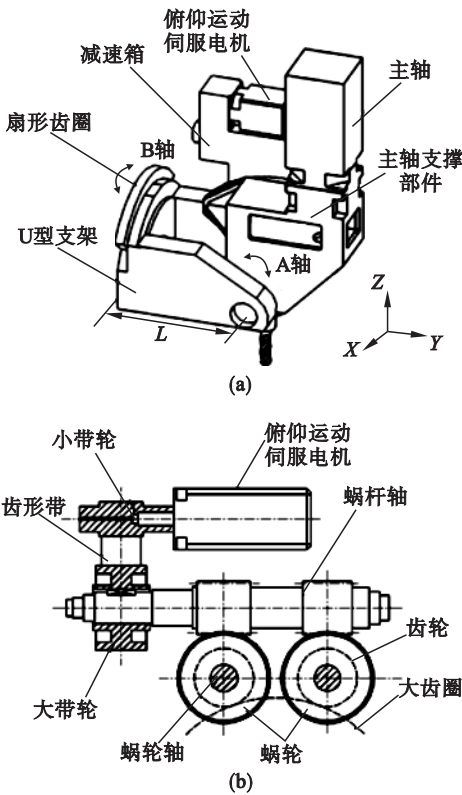


图 3 现有典型双摆头结构示意图
Fig. 3 Structure schematic of typical bi-rotary head
(a)—双摆头整体结构;(b)—俯仰运动内部传动结构.

2.2 双摆头结构特性分析

摆头运动部件数量较少有利于减少运动部件质量进而提升其动态特性.两种双摆头的运动部件比较结果如表 1 所示.差动双摆头的结构布置方式使摆头的运动部件明显少于图 3a 所示的摆头结构,当两种双摆头的结构部件材料相同、尺寸相近时,差动双摆头在运动部件质量方面会占有明显优势.此外,运动部件质量还会影响到摆头的摆角范围.

双摆头的结构设计过程中应尽可能增大摆头的摆动范围以扩大适用加工对象的范围.以图 3a 所示的双摆头为例,摆头的俯仰角度主要受到俯仰空间的限制,增加 U 型支架端面到轴孔的距离 L 有利于增加俯仰角度范围.然而,其摆动角度则受到摆动中附加扭矩的限制,双摆头摆动过程中 U 型支架上的所有部件均会跟随一起摆动,运动部件在摆动过程中由于自身质量偏载形成的附加扭矩相当于增加了摆头的负载,摆角增大导致附加扭矩的增大甚至会影响到摆头的动态特性,因此,摆动角度需要限制在一定范围内.

表 1 双摆头运动部件比较
Table 1 Comparison of motion parts of bi-rotary head

典型双摆头结构	本文差动双摆头结构
扇形齿圈、U 型支架、俯仰电机、带轮、俯仰蜗杆轴、双蜗轮及同轴齿轮、大齿圈、减速箱体、主轴及其支撑部件	主轴及其支撑部件、差动输出大、小锥齿轮

本文的差动双摆头主轴位于 U 型支撑外部,双摆头的摆动不受空间的限制,并且摆头的驱动电机及减速装置均固定于 U 型支撑不参与摆头运动,摆头在摆动过程中无附加扭矩,因此,差动双摆头可以实现较大的摆动角度范围,俯仰运动伴随着差动输出锥齿轮、主轴及其支撑部件的运动,较少的运动部件有利于减少运动部件的整体质量进而减小附加扭矩值.增加 U 型支撑安装端面到轴孔的距离有利于增大俯仰角度范围,但该距离增大的同时也会增加切削力相对于俯仰轴产生的负载扭矩,因此,在摆头的设计过程中需要综合考虑摆动范围与附加扭矩之间的关系.

3 双摆头传动特性分析

图 4 所示为双摆头结构的传动原理图.双摆头包含两组主动锥齿轮,一组为锥齿轮 G_1 和 G_2 ,与被动锥齿轮 G_1 啮合;另一组为锥齿轮 G_3 和

G_4 与被动锥齿轮 G_{II} 啮合,被动锥齿轮 G_I 与 G_{II} 共同将扭矩作用至摆头转轴,带动摆头支撑件做俯仰运动及摆动.图中 T_r 、 T_b 分别为摆头的摆动扭矩和俯仰扭矩; θ_r 、 θ_b 分别为摆角和俯仰角; T_{mi} 为电机输出扭矩; θ_{mi} 为电机转角 $i=1\sim 4$.

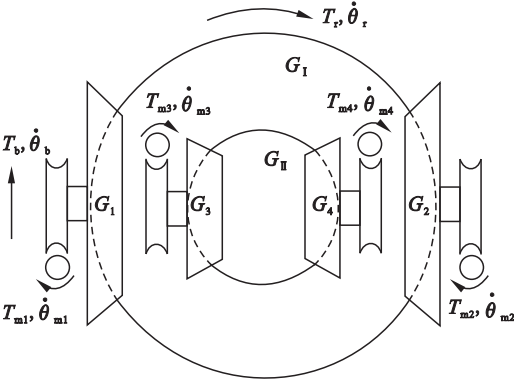


图 4 差动双摆头传动关系简图
Fig. 4 Transmission schematic of differential bi-rotary head

差动双摆头通过控制电机的转速与转角实现摆动、俯仰及摆动与俯仰的复合运动,设定图 4 中所示的力矩和转速方向为正向,以第一差动输入正向驱动为例,分析摆头在图 5 中的典型工作状态下载力、速度的传递关系.

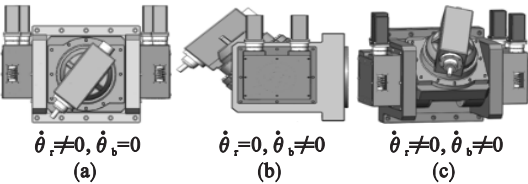


图 5 差动双摆头典型工作状态
Fig. 5 Typical working states of differential bi-rotary head
(a)—单轴摆动;(b)—单轴俯仰运动;(c)—复合运动.

3.1 单轴摆动状态

差动双摆头单轴摆动(图 5a 所示)需要满足关系 $\dot{\theta}_{m1} = \dot{\theta}_{m3} = -\dot{\theta}_{m2} = -\dot{\theta}_{m4}$ 且 $\theta_{m1} = \theta_{m3} = -\theta_{m2} = -\theta_{m4}$,该状态摆头的速度关系为

$$\dot{\theta}_r = \frac{1}{2 \cdot u_1 \cdot u_2 \cdot u_3} (\dot{\theta}_{m1} - \dot{\theta}_{m2}) = \frac{\dot{\theta}_{m1}}{u_1 \cdot u_2 \cdot u_3} \quad (1)$$

式中 μ_1 μ_2 μ_3 分别为锥齿轮、蜗轮蜗杆和减速器传动比.

摆头的驱动力矩满足 $T_{m1} = T_{m3} = -T_{m2} = -T_{m4}$,摆动过程的摆角扭矩为

$$T_r = u (T_{m1} \times \eta_1 + T_{m3} \times \eta_3 - T_{m2} \times \eta_2 - T_{m4} \times \eta_4) \approx 4 \cdot u \cdot T_{m1} \times \eta_1 \quad (2)$$

式中 $u = u_1 \cdot u_2 \cdot u_3$; η_i 为传动效率 $i=1\sim 4$,文中假设传动效率近似相等.

3.2 单轴俯仰运动状态

差动双摆头单轴俯仰(图 5b 所示)需要满足关系 $\dot{\theta}_{m1} = \dot{\theta}_{m3} = \dot{\theta}_{m2} = \dot{\theta}_{m4}$ 且 $\theta_{m1} = \theta_{m3} = \theta_{m2} = \theta_{m4}$,该状态摆头的速度关系为

$$\dot{\theta}_b = \frac{1}{2 \cdot u_1 \cdot u_2 \cdot u_3} (\dot{\theta}_{m1} + \dot{\theta}_{m2}) = \frac{\dot{\theta}_{m1}}{u_1 \cdot u_2 \cdot u_3} \quad (3)$$

摆头的驱动力矩满足 $T_{m1} = T_{m3} = T_{m2} = T_{m4}$,俯仰过程的摆角扭矩为

$$T_b = u (T_{m1} \times \eta_1 + T_{m3} \times \eta_3 + T_{m2} \times \eta_2 + T_{m4} \times \eta_4) \approx 4 \cdot u \cdot T_{m1} \times \eta_1 \quad (4)$$

3.3 摆动与俯仰复合运动状态

差动双摆头单轴俯仰(图 5c 所示)需要满足关系 $|\dot{\theta}_{m1} = \dot{\theta}_{m3}| \neq |\dot{\theta}_{m2} = \dot{\theta}_{m4}|$ 或 $|\theta_{m1} = \theta_{m3}| \neq |\theta_{m2} = \theta_{m4}|$,该状态摆头的速度关系为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\theta}_r &= \frac{1}{2 \cdot u_1 \cdot u_2 \cdot u_3} (\dot{\theta}_{m1} - \dot{\theta}_{m2}), \\ \dot{\theta}_b &= \frac{1}{2 \cdot u_1 \cdot u_2 \cdot u_3} (\dot{\theta}_{m1} + \dot{\theta}_{m2}). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

双摆头的摆动与俯仰摆角扭矩分别为

$$\left. \begin{aligned} T_r &= u (T_{m1} \times \eta_1 + T_{m3} \times \eta_3 - T_{m2} \times \eta_2 - T_{m4} \times \eta_4), \\ T_b &= u (T_{m1} \times \eta_1 + T_{m3} \times \eta_3 + T_{m2} \times \eta_2 + T_{m4} \times \eta_4) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由式(1)(3)(5)可知,差动双摆头单轴运动的输出转速相当于单组电机转速经减速装置后得到,双摆头做等速复合运动的输出转速相当于单组电机输出转速的一半经减速装置后得到.因此,双摆头做等速复合运动的转速输出能力是单轴运动的一半.

由式(2)(4)(6)可知,差动双摆头单轴运动的摆角扭矩由 4 台伺服电机提供,摆动和俯仰等扭矩输出时,摆角扭矩仅由单组差动输入的 2 台电机提供.因此,双摆头做等扭矩复合运动的力矩输出能力是单轴运动的一半.

综合上述分析,等速与等扭矩复合运动差动双摆头的极限工作状态,伺服电机的转速及扭矩等参数应以满足该极限状态为依据进行选取.

4 双摆头消除特性分析

差动双摆头采用更为先进的电气消除方式来代替传统的机械消除.通过采用双电机主动控制加载偏置力矩的方式消除传动间隙,提高摆头运动精度.摆头的第一差动输入与第二差动输入分组采用双电机主从控制,使每组中的主动锥齿轮与被动锥齿轮间形成偏置力矩,使差动输入锥齿轮反向啮合于差动输出锥齿轮,消除传动间隙.在

消除控制状态下,摆头内锥齿轮间的力矩作用关系为

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= T_2 = T + \Delta T \\ T_3 &= T_4 = T - \Delta T \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 T_i 为锥齿轮扭矩 $i=1 \sim 4$; T 为锥齿轮同步控制下的扭矩控制量。

下面结合几种典型的双摆头工作状态,分析双摆头的力矩作用关系：

1) 静止状态:双摆头锥齿轮力矩 $T_1 = T_2 = \Delta T$, $T_3 = T_4 = -\Delta T$, 因此, $T_r = T_b = 0$, 双摆头保持静止状态并消除了系统的静态间隙；

2) 摆动状态:双摆头锥齿轮驱动力矩逐渐增大, $T_1 = T_2 = T + \Delta T$, $T_3 = T_4 = T - \Delta T$, 因此, $T_r = 4T$, $T_b = 0$, 如图 6a 所示；

3) 俯仰状态:双摆头锥齿轮驱动力矩 $T_1 = T_2 = T + \Delta T$, $T_3 = T_4 = -(T - \Delta T)$, 因此, $T_r = 0$, $T_b = 4T$, 如图 6b 所示；

4) 等扭矩复合运动状态:以双摆头单侧驱动为例,锥齿轮的驱动力矩分别为 $T_1 = T + \Delta T$, $T_3 = T - \Delta T$, $T_2 = -\Delta T$, $T_4 = \Delta T$, 因此, $T_r = T_b = 2T$, 如图 6c 所示。

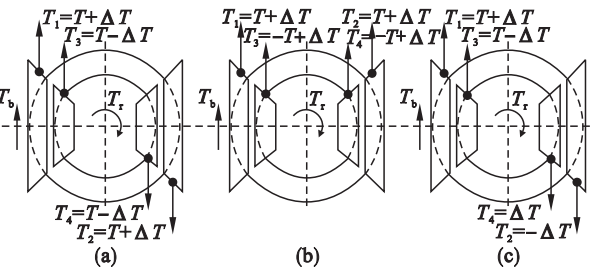


图 6 差动双摆头力矩输出图

Fig. 6 Torque output characters of differential bi-rotary head

(a)— $T_r = 4T$, $T_b = 0$; (b)— $T_r = 0$, $T_b = 4T$;
(c)— $T_r = 2T$, $T_b = 2T$ 。

5 结 论

1) 提出了基于差动原理的 A/B 双摆头结构,可以实现俯仰、摆动、俯仰与摆动的复合运动,并可实现主动的消除控制。摆头的驱动电机及减速装置均固定于 U 型支撑而不参与摆头运动,可有效减少摆头运动部件的数量。

2) 分析了差动双摆头几种典型工作状态以及极限工作状态的转速与转矩输出特性,分析结果为双摆头的设计和电机参数选取提供了理论依

据。

3) 给出了差动双摆头双电机主动消除控制的原理和实现方法。

参考文献：

[1] Yang J X ,Altintas Y. A generalized on-line estimation and control of five-axis contouring errors of CNC machine tools [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* , 2015 88 9-23.

[2] Xie F G ,Liu X J ,Wang L P ,et al. Optimal design and development of a decoupled A/B-axis tool head with parallel kinematic[J]. *Advances in Mechanical Engineering* 2010 2 (2) :1-14.

[3] 王卫朝,李初晔. A/B 双摆角数控万能铣头摆角力矩的计算研究[J]. *制造技术与机床* 2011 (4) :40-44.
(Wang Wei-chao ,Li Chu-ye. Research on calculating drive torque of milling head with A/B rotating axis [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool* ,2011 (4) : 40-44.)

[4] 姜超. 直驱式 A/B 摆角万能铣头的设计与研制[D]. 北京:北京航空航天大学 2014.
(Jiang Chao. Direct-drive double pendulum angle milling head design and manufacture [D]. Beijing : Beihang University 2014.)

[5] Hu S W ,Yang Q D ,Peng B Y ,et al. Direct-drive bi-rotary milling head variable load thermal characteristics analysis [C]//Conference on Modelling ,Identification and Control. Hong Kong 2012 270-276.

[6] 刘峰,高长才. 展望未来机床服务航空工业[J]. *航空制造技术* 2014 (11) 56-59.
(Liu Feng ,Gao Chang-cai. Look forward for future machine tool ,service for aviation industry [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology* 2014 (11) 56-59.)

[7] Reedman A V C ,Bouazza-Marouf K. An actively constrained two degree-of-freedom manipulator for passive deployment applications[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part 1: Journal of Systems and Control Engineering* 2004 218(12) 63-74.

[8] Gawronski W. Control and pointing challenges of large antennas and telescopes[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology* 2007 15(2) 276-289.

[9] Robertz S G ,Halt L ,Kelkar S ,et al. Precise robot motions using dual motor control [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Anchorage ,2010 : 5613-5620.

[10] Veres J ,Cserey G ,Szederkényi G. Bio-inspired backlash reduction of a low-cost robotic joint using closed-loop-commutated stepper motors[J]. *Robotica* ,2013 ,31 (5) : 786-796.