

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.10.011

球面 4R 引纬机构运动及载荷特性研究*

江 浙¹, 周香琴^{1*}, 王琴龙²

(1. 浙江理工大学 现代纺织装备重点实验室, 浙江 杭州 310018; 2. 万利纺织机械研究院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对剑杆织机引纬机构空间球面特殊的运动特征和载荷变化等问题, 分别将空间机构运动的几何等同性和动静法的方法应用到该机构的运动函数和轴承载荷的推导中。对该球面机构中做空间运动的构件开展了输出运动特性和惯性载荷特性的分析, 建立了输出转角、动能以及惯性力矩与输入转角之间的直接表达关系, 通过将已建立的三维模型导入 Adams 软件, 利用其中的机构分析功能对引纬机构进行了动态仿真, 对比了由理论计算与仿真得到的曲线。研究结果表明, 球面 4R 机构中的两个结构参数影响其空间构型及空间连杆的运动空间, 是箱体设计的依据要素; 空间连杆的载荷可以通过公式计算。

关键词:引纬; 球面 4R 机构; 运动特性; 载荷特性

中图分类号: TH112.1; TS103

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)10-1325-05

Kinematics and loading characteristics research of spherical 4R mechanism

JIANG Zhe¹, ZHOU Xiang-qin¹, WANG Qin-long²

(1. Zhejiang Key Laboratory of Textile Equipment, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Wanli Textile Machinery Research Institute, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problems of the special kinetic characteristics and load changes of spherical space in rapier loom weft insertion mechanism, the geometric equivalence of spatial kinematics and dynamic equilibrium were investigated for deducing motion functions and bearing load. After the analysis of moving member's output kinetic characteristics and inertial load characteristics in the spherical mechanism, the direct expression relationship between output angle, kinetic energy, inertia moment and input angle was established, the 3D model established was imported into Adams software, mechanism analysis function was used to make dynamic simulation of weft insertion mechanism, and curves which were obtained by theory and simulation were compared. The results indicate that two structural parameters of spherical 4R mechanism affect the spatial configuration and motion space of spatial linkage, which is the basis elements of box design; The load of spatial linkage can be calculated by formula.

Key words: weft insertion; spherical 4R mechanism; kinematics; load characteristics

0 引 言

引纬机构是剑杆织机的重要部件之一, 它的功能是将纬纱引入由经纱所形成的梭口, 从而交织成所需的织物纹理。对此的工艺要求较为严格, 如与开口、打纬的时间配合, 以及平稳准确性、高速适应性、产品适

应性等, 这些因素直接影响到织物的质量^[1]。在现代剑杆织机的发展中, 空间球面四连杆的引纬方式越来越受到重视, Picanol、Sulzer、苏吴机械等公司均有相关型号的织机投入生产。其结构中的球面 4R 机构设计独特^[2], 通过铰链副连接增加结构紧凑性和准确性, 运转速度快, 占地体积小, 成本低。目前许多学者针对

收稿日期: 2015-05-19

基金项目: 浙江省重大科技专项资助项目(2013C01027)

作者简介: 江 浙(1990-), 男, 浙江宁波人, 主要从事织机机械机构学方面的研究。E-mail: jiang549@126.com

通信联系人: 周香琴, 女, 博士, 副教授。E-mail: zhouxiangqin@sohu.com

球面 4R 机构做了研究^[3-5], 大多是探寻剑带运动规律数学模型, 利用等效转动惯量的概念分析各构件对主轴驱动载荷的影响, 并且通过三维仿真软件验证, 较少涉及空间连杆的运动特性及载荷特性分析。国内剑杆织机厂家虽然能生产球面 4R 引纬机构, 但大多属仿制, 在机构的参数及结构设计方面的创新较少, 对机构中各构件的运动特性及载荷特性研究较少, 特别是空间连杆构件^[6-8]。

本研究试图通过数值分析的方法, 针对剑杆织机引纬机构中的球面 4R 机构 4 个轴线方向的运动进行解析, 利用几何等同性的概念和方向余弦法取代等效转换, 省去不必要的计算。从运动学和动力学两方面, 对叉形连杆的进行详细分析, 为球面 4R 引纬机构设计与改进提供论据。

1 GTM 剑杆织机引纬机构介绍

剑杆织机引纬驱动机构的机构简图如图 1 所示。驱动轴带动旋转臂 1 作圆周转动, 带动与旋转臂 1 相连的叉形连杆 2 做空间运动, 叉形连杆 2 的运动可看做是两种摆动的叠加, 即绕 CD 轴线的往复摆动, 和绕 O 轴线的往复摆动。十字节 3 通过两端轴承与叉形连杆 2 连接。旋转臂 1、叉形连杆 2、十字节 3、箱体 0 形成的 4 个转动副轴线交于一点 O, 形成一个球面 4R 机构; 十字节 3、H 形连杆 4、扇形齿轮 5、箱体 0 形成平面四杆机构。通过改变扇形齿轮槽中铰接点 G 的位置, 可实现剑头动程的调节, 该点上移时, 剑杆动程减小; 反之, 剑杆动程增加, 从而控制剑杆织机的织造幅宽。扇形齿轮 5 与传剑轴 6 啮合传动, 起到剑头运动动程的放大作用。固定在传剑轴上的剑轮带动剑带与剑头做直线往复运动, 实现引纬运动。

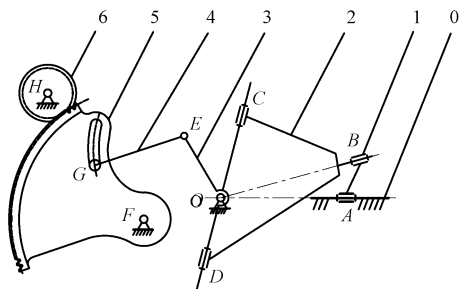


图 1 GTM 剑杆织机引纬驱动机构简图

0—箱体; 1—旋转臂; 2—叉形连杆; 3—十字节; 4—H 形连杆; 5—扇形齿轮; 6—传剑轴

2 球面 4R 机构运动函数的推导

球面 4R 机构简图如图 2 所示。将坐标系原点定

在 4 个转动副轴线交点 O, 建立 OXYZ 坐标系。在 4R 机构的各杆上, 固结有相应的坐标系。设旋转臂 1 与箱体的相对运动轴线为 Z₀ 轴, 以此类推建立 Z₁、Z₂、Z₃ 轴, 如图 2 所示。X₃ 为 Z₂ 和 Z₃ 两轴的公垂线, 以此类推建立 X₀、X₁、X₂ 轴。驱动轴逆时针方向旋转为正, 图 2 位置旋转 180° 后, Z₀、Z₁、Z₂ 处于同一平面时, 设定为初始位置。

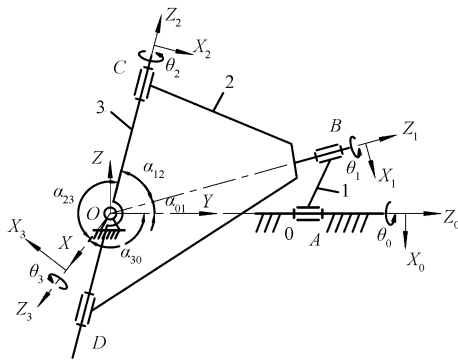


图 2 球面 4R 机构简图

0—机架; 1—旋转臂; 2—叉形连杆; 3—十字节

为了直接建立输出转角 θ_2 和输入转角 θ_0 的关系式, 可假想将机构拆分为浮动链 2—3 和连架链 0—1。由机构运动的几何等同性理论^[9]可知, 从连架链计算拆分的两轴线夹角方向余弦必定与从浮动链计算的结果相同, 即:

$$(0, 0, 1) [C_{12}] [C_{23}] (0, 0, 1)^T = (0, 0, 1) [C_{30}] [C_{01}] (0, 0, 1)^T$$

由此可得:

$$-\cos\theta_3 \sin\alpha_{12} \sin\alpha_{23} + \cos\alpha_{12} \cos\alpha_{23} = -\cos\theta_1 \sin\alpha_{30} \sin\alpha_{01} + \cos\alpha_{30} \cos\alpha_{01}$$

式中: $\alpha_{01}, \alpha_{12}, \alpha_{23}, \alpha_{30}$ —Z₀ 与 Z₁, Z₁ 与 Z₂, Z₂ 与 Z₃, Z₃ 与 Z₀ 的夹角。笔者所研究的机构中, $\alpha_{23} = \alpha_{30} = 90^\circ$, 化简整理, 得:

$$\theta_2 = \arcsin \frac{\sin\theta_0 \sin\alpha_{01}}{\sin\alpha_{12}} \quad (1)$$

式(1)为球面 4R 引纬机构的运动函数方程, 其中 α_{01}, α_{12} —结构参数(在该机构中 $\alpha_{01} = 33^\circ, \alpha_{12} = 57^\circ$)。令 $\eta = f(\theta_0) - f(0^\circ)$, 即表示相对于初始位置的运动关系。

3 函数特性研究

3.1 函数单调性

对于函数 $\eta = f(\theta_0) - f(0^\circ)$, 由于 $\dot{\eta} = \dot{\theta}_2$ 可对式(1)求一阶导数并整理后得到:

$$\frac{d\theta_2}{d\theta_0} = \frac{\cos\theta_0}{\xi} \quad (2)$$

其中: $\xi = \sqrt{\left(\frac{\sin\alpha_{12}}{\sin\alpha_{01}}\right)^2 - \sin^2\theta_0}$

由于有文献已经证实^[10],机构的存在条件为 $\alpha_{01} < \alpha_{12} < \pi - \alpha_{01}$, 则 $\sin\alpha_{01} < \sin\alpha_{12}$, 所以 $1/\xi > 0$, 当 θ_0 在 $[(2k+1/2)\pi, (2k+3/2)\pi)$ 时, $d\theta_2/d\theta_0 < 0$, 单调递减; 当 θ_0 在 $[(2k+3/2)\pi, (2k+5/2)\pi)$ 时, $d\theta_2/d\theta_0 \geq 0$, 单调递增, $k=0, 1, 2, 3, \dots$

3.2 极值

从式(2)可知, 当 $\theta_0 = (k+1/2)\pi$ 时, $d\theta_2/d\theta_0 = 0$, 函数存在极值, 把 $\theta_0 = (k+1/2)\pi$ 代入式(1)求解, 并整理得:

$$\theta_2 = \arcsin\left(\pm \frac{\sin\alpha_{01}}{\sin\alpha_{12}}\right)$$

由此得到极差为:

$$\theta_{2\max} - \theta_{2\min} = 2\arcsin \frac{\sin\alpha_{01}}{\sin\alpha_{12}} \quad (3)$$

本研究设定 $\alpha_{12} = 57^\circ$, α_{01} 取不同的数值, α_{01} 对极值影响如图 3 所示; 设定 $\alpha_{01} = 33^\circ$, α_{12} 取不同的数值, α_{12} 对极值影响如图 4 所示, 分析其对极值的影响。

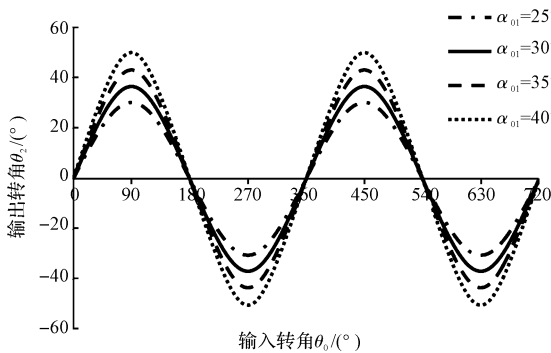


图 3 α_{01} 对极值影响

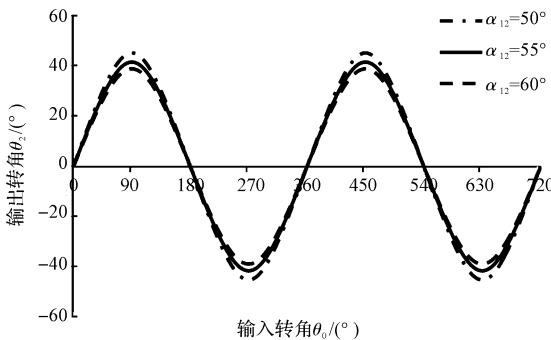


图 4 α_{12} 对极值影响

同样可得^[10]:

$$\theta_{3\max} - \theta_{3\min} = 2\alpha_{01} \quad (4)$$

以上两个极值分别表示叉形连杆绕图 1 中 CD 轴线的往复摆动, 和绕 O 轴线的往复摆动的运动空间范围, 它们的范围就是球面 4R 机构的空间构型, 不同型号的剑杆织机有不同的结构参数 α_{01}, α_{12} 。从图 3 可以看出: 随着 α_{12} 的增大, 极限角度变大, 且在 0° 附近的斜率变大; 在图 4 中, 随着 α_{01} 的增大, 极限角度变小, 且在 0° 附近的斜率变小, 综合以上两图发现 α_{01} 的变动导致极限角范围的变化较于 α_{12} 更为明显。由 (3, 4) 可以有效地分析机构的运动空间, 为箱体结构设计提供依据。

3.3 中心对称性

对于式(1), 易证 $f(\theta_0) = -f(2\pi - \theta_0)$, $f(\theta_0) = f(\pi - \theta_0)$, 则由公式得到的曲线关于点 $(180^\circ, 0)$ 中心对称, 并且关于轴线 $\theta_0 = 90^\circ$ 对称。由此可知, 叉形连杆绕图 1 中 CD 轴线的往复摆动是对称的, 叉形连杆与十字节可以考虑对称设计。

4 载荷特性分析

4.1 动能计算

该引纬机构叉形连杆的动能计算式为:

$$E = 1/2 J_2 \omega_2^2 + 1/2 J_3 \omega_3^2 \quad (5)$$

式中: J_2, J_3 —绕 Z_2, Z_3 的转动惯量, J_2 可利用 Pro/E 中的实体物性计算直接获得, $\omega_2 = \dot{\theta}_2, \omega_3 = \dot{\theta}_3$ 。

当 Z_2 与 Z_0 垂直时, 此刻叉形连杆对 Z_3 的转动惯量记为 $J_3^* = \sum m_i \cdot r_i^2$, 所以得到任意时刻该转动惯量表达式:

$$J_3 = \sum m_i r_i^2 \cos^2\theta_2 = \frac{J_3^*}{4} (\sin 2\theta_2 + 2\theta_2) \quad (6)$$

由此可得动能表达式:

$$E = \frac{J_2}{2} \dot{\theta}_2^2 + \frac{J_3^*}{8} (\sin 2\theta_2 + 2\theta_2) \dot{\theta}_3^2 \quad (7)$$

式中: J_3^* —可用 Pro/E 中的实体物性计算直接获得; $\dot{\theta}_3, \dot{\theta}_2, \theta_2$ —关于输入转角 θ_0 的函数。因此, 式(6, 7) 只受单因子影响, 该构件的动能得以直接表达, 省去了间接计算的麻烦, 为研究 4R 机构提供了方便。

4.2 惯性力矩计算

叉形连杆的惯性力矩可以理解为分别绕 Z_2 和 Z_3 轴旋转的两个惯性力矩, 其中, 绕 Z_2 轴的惯性力矩为 $M_2 = J_2 \alpha_2$, 其中, $\alpha_2 = \dot{\omega}_2$ 。假设当 Z_2 与 Z_0 垂直时, 此刻质心到旋转中心轴的距离为一定值, 则绕 Z_3 轴的惯性力矩为 $M_3 = J_3 \alpha_3$, 其中: $\alpha_3 = \dot{\omega}_3$ 。惯性力矩分解为坐标系三方向 $M_x = J_3 \alpha_3, M_y = J_2 \alpha_2 \sin\theta_3, M_z =$

$J_2\alpha_2\cos\theta_3$ 。其中： $\alpha_2, \alpha_3, J_2, \theta_3$ —关于 θ_0 的函数，因此，惯性力矩同样受单因子影响。

4.3 重要轴承力计算

本研究对叉形连杆 2 受力分析，建立坐标系，轴承 B 为滚针轴承， F_{b1}, F_{b2} 是两个相互垂直的径向力， F_{b2} 位于 OAB 平面。轴承 C、D 为圆锥滚子轴承，其轴向力 F_3 沿 CD 方向，径向力 F_{c2} 位于 β 平面， F_{c1} 与 F_{c2}, F_3 两两垂直。 F_{d1}, F_{d2} 的方向以此类推，叉形连杆受力分析图如图 5 所示。4R 机构相关符号说明如表 1 所示。列出平衡方程：

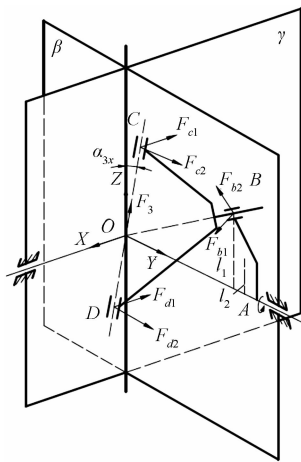


图 5 叉形连杆受力分析图

表 1 4R 机构相关符号说明

符号	说明
l_1	B 到 OA 的距离
l_2	旋转臂质心到 OA 的距离
m_1	旋转臂质量
m_2	叉形连杆质量
M_q	输出力矩
α_{3x}	CD 杆以 Z 轴为始边在 yOz 平面内的角位移

$$\sum M_A = F_{b1}l_1 + m_1gl_2\sin\theta_0 + M_q = 0$$

$$\sum F_x = -F_{c1} - F_{d1} + F_{b1x} + F_{b2x} - m_2a_x = 0$$

$$\sum F_y = F_{c2}\cos\alpha_{3x} + F_{d2}\cos\alpha_{3x} + F_3\sin\alpha_{3x} - F_{b2y} - m_2a_y = 0$$

$$\sum F_z = -F_{c2}\sin\alpha_{3x} - F_{d2}\sin\alpha_{3x} + F_3\cos\alpha_{3x} - F_{b1z} + F_{b2z} - m_2g - m_2a_z = 0$$

$$\sum M_{x0} = -F_{c2}l_{OC} + F_{d2}l_{OD} + F_{b2y}l_{Bz} - F_{b1z}l_{By} + F_{b2z}l_{By} - m_2g|z_C - z_0| - M_x = 0$$

$$\sum M_{y0} = -F_{c1}l_{OC} + F_{d1}l_{OD} + F_{d1x}l_{Bz} + F_{b1z}l_{Bx} + F_{b2x}l_{Bz} - F_{b2z}l_{Bx} + m_2g(x_C - x_0) - M_y = 0$$

$$\sum M_{z0} = F_{c1}l_{OC}\sin\alpha_{3x} - F_{d1}l_{OD}\sin\alpha_{3x} - F_{b1x}l_{By} -$$

$$F_{b2x}l_{By} - F_{b2y}l_{Bx} - M_z = 0 \tag{8}$$

式中： $F_{b1x} = -F_{b1}\cos\theta_0, F_{b1z} = -F_{b1}\sin\theta_0, F_{b2x} = -F_{b2}\cos\alpha_{01}\sin\theta_0, F_{b2y} = -F_{b2}\sin\alpha_{01}, F_{b2z} = -F_{b2}\cos\alpha_{01}\cos\theta_0, l_{Bx} = l_{OB}\sin\alpha_{01}|\sin\theta_0|, l_{By} = l_{OB}\cos\alpha_{01}, l_{Bz} = l_{OB}\sin\alpha_{01}|\cos\theta_0|; a_x, a_y, a_z$ —坐标轴方向加速度，直接利用 Adams 中的测量功能，可以测量这些值，其他尺寸及质量数值可由实际机构测得。

通过联立求解便能得到 B、C、D 三处轴承力。在实际生产应用过程中，B 处轴承磨损较为严重，本研究着重分析该处受力变化。利用 Matlab 软件计算得到受力变化曲线，与 Adams 动力学仿真结果进行对比，设定电机转速为 710 r/min，转动方向与图 2 中 θ_0 方向相同，运行时间为 0.169 s。 F_{b1} 受力分析如图 6 所示、 F_{b2} 受力分析如图 7 所示。

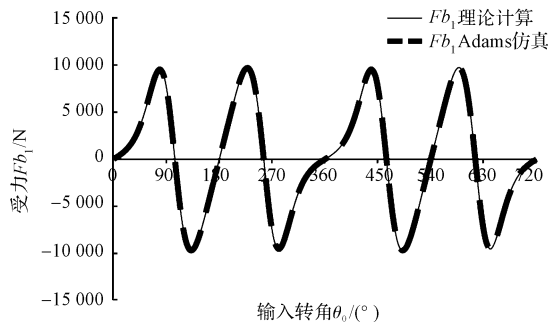


图 6 F_{b1} 受力分析

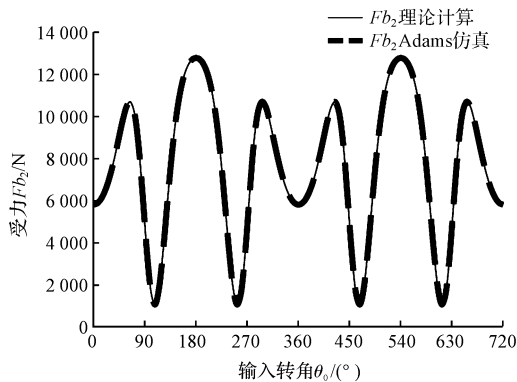


图 7 F_{b2} 受力分析

由图 6、图 7 可以看出，Adams 仿真与理论计算的结果相吻合，验证了公式推导的正确性，同时公式编程的优点在于，将各处载荷参数化，可对单一因素的影响进行分析。

结果显示，B 处轴承最大合力约为 16 400 N，受力方向的周期变化易导致轴承损坏，同样可以得到其他各处轴承受力变化曲线的特性；700 r/min ~ 800 r/min 的转速在剑杆织机中属于高速运转；该 GTM 型剑杆织机的门幅可扩至 5 m 以上，考虑以上影响因素，选用合适的轴承应用于空间球面 4R 机构中颇为重要。

5 结束语

本研究针对剑杆织机引纬机构中的空间 4R 机构,从运动学和动力学两方面进行较完整地分析,使得其中做空间运动的叉形连杆的动能和惯性力矩有直接的理论表达式,对重要轴承处的轴向力、径向力进行计算,并利用 Adams 软件仿真进行验证,方便轴承的选用,为今后学者深入研究球面 4R 机构的运动、载荷等特性提供依据。同时发现 α_{01} , α_{12} 为该机构中极其重要的两个结构参数,影响球面 4R 机构的空间构型,且 α_{01} 对其影响程度较大,设计时可着重考虑,叉形连杆的两个分解摆动的极值表示了机构空间运动范围,有助于某些型号织机引纬部分中叉形连杆与十字节的配合设计,预防干涉;另外引纬机构箱体的造型也与其有关,通过控制箱体的体积有利于合理安排剑杆织机的占地空间。

参考文献 (References):

[1] 徐永康. 空间四连杆引纬机构优化及动力学仿真[D]. 杭

州:浙江理工大学机械与自动控制学院,2012.

- [2] 程起时,胡善义. 空间四连杆传动的剑杆引纬机构[J]. 丝绸,2001(9):24-25.
- [3] 周香琴,张雷. 剑杆织机空间连杆引纬机构载荷特性研究[J]. 中国机械工程,2013,24(14):1881-1885.
- [4] 何士龙,王世恩. 球面 4R 机构的输入输出方程研究[J]. 科技情报开发与经济,2011,21(2):191-192.
- [5] DAMIEN C, JORGE A. The computation of all 4R serial spherical wrists with an isotropic architecture[J]. **Journal of Mechanical Design**,2003,125(2):275-280.
- [6] 张雷,余克龙,陈少钟,等. 基于 ANSYS 和 ADAMS 空间四连杆引纬机构的柔性动力学仿真[J]. 纺织学报,2013,34(5):116-120.
- [7] 张国柱,王惠刚. RSSR 空间四连杆机构的设计应用[J]. 纺织机械,2007(5):37-40.
- [8] 徐永康,张雷. 基于 Matlab 空间四连杆引纬机构运动仿真[J]. 轻工机械,2012,30(3):17-21.
- [9] 张启先. 空间机构的分析与综合(上)[M]. 北京:机械工业出版社,1984.
- [10] 周香琴. 球面 4R 机构运动特性研究及其应用探索[J]. 中国机械工程,2011,22(2):153-158.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

江浙,周香琴,王琴龙. 球面 4R 引纬机构运动及载荷特性研究[J]. 机电工程,2015,32(10):1325-1329.

JIANG Zhe, ZHOU Xiang-qin, WANG Qin-long. Kinematics and loading characteristics research of spherical 4R mechanism[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015,32(10):1325-1329.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1314 页)

参考文献 (References):

- [1] 潘路平. 全自动组织脱水机的研制[D]. 天津:天津大学精密仪器系,2009.
- [2] MATSUNAGA N. A New Method of Temperature Control for the Uniform Heating[C]//The 29th Annual Conference of the IEEE, Roanoke,2003:2097-2102.
- [3] NANNO I, HASHIDA S, MATSUNAGA N, KAWAJI S. Experimental Study on Uniform Heating Control based on Temperature Difference Model [C]//Mechatronics, ICM 2007 4th IEEE International Conference. Kumamoto; [s. m.],2007:1-6.
- [4] NANNO I, HASHIDA S, MATSUNAGA N, KAWAJI S. Experimental Study on Uniform Temperature Control for Two-Dimensional Heating Plate Control [C]//Control, Automation and Systems, ICCAS International Conference. Seoul; [s. m.],2007:1450-1455.
- [5] 何文斌,曾攀,张磊,等. 基于有限元的 400 MN 大型

模锻压力机温度场分析[J]. 机械工程学报,2015,51(2):30-36.

- [6] 李金国,蒋宁,高增梁,等. 反应成型模具耦合温度场数值模拟与试验研究[J]. 机械工程学报,2014,50(8):73-80.
- [7] 赵秀红,刘宝林. 一种新型多温区恒温箱均温性的数值模拟与实验验证[J]. 制冷学报,2015,36(2):27-33.
- [8] 包胜华,沈金美,王淑芬. Agilent 34972A 在温度传感器检测系统中的应用[J]. 机电工程,2011,28(6):683-686.
- [9] HETTEGGER M, STREIBL B, BIRO O, NEUDORFER H. Identifying heat transfer coefficients on the end-winding of an electrical machine by measurements and simulations[J]. **Proc. ICEM**,2010,39(1):1-5.
- [10] 闫伟,张浩,陆剑锋,等. 直喷式柴油机燃烧系统的均匀试验设计研究[J]. 机械工程学报,2005,41(1):212-215.
- [11] 刘文胜,鲍玉彬,孙雷,等. 基于遗传算法回归分析技术研究[J]. 计算机工程与应用,2004(21):94-97.

[编辑:李辉]