

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.01.018

雷达伺服变增益交叉耦合协调控制研究

张伟, 陈勇, 黄琦, 李坚, 蔡东升
(电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 针对常见的双轴跟踪雷达伺服跟踪精度以及协调控制问题, 为提高系统控制精度和协调性能, 提出一种变增益交叉耦合协调控制模式。通过对双轴雷达伺服系统建立数学模型, 在分析俯仰和水平伺服电机跟踪误差对整个雷达伺服系统精度的影响的基础上, 将系统跟踪误差推广到任意运动轮廓曲线的情况, 采用变增益交叉耦合控制算法对雷达伺服系统进行协调控制。经仿真验证, 该方法能提高系统跟踪精度, 减小系统误差。

关键词: 雷达伺服系统; 轮廓误差; 协调控制; 交叉耦合控制; 变增益

中图分类号: O241.1; TN974 **文献标志码:** A

Variable Gain Cross-Coupling and Harmony Control in Radar Servo System

Zhang Wei, Chen Yong, Huang Qi, Li Jian, Cai Dongsheng

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Dual-axis tracking radar for common servo tracking accuracy and the coordination of control, to improve control precision and coordination of performance, a coordinated control of variable gain cross-coupling model is proposed. By establishing the mathematical model of two axis servo system, based on the analysis of pitch and level of servo motor tracking error on the accuracy of radar servo system, tracking error is extended to the situation of arbitrary motion profile curve, and the cross-coupling with variable gain control algorithm is used to coordinate and control the radar servo system. The simulation results show that this method can improve the tracking accuracy and reduce system errors.

Keywords: radar servo system; contour error; coordinated control; cross-coupling control; variable gain

0 引言

在雷达跟踪系统中, 系统误差包括跟踪误差和轮廓误差。在实际生产过程中, 由于轮廓误差的影响更大, 因此, 减小轮廓误差就能够很好地减小系统误差。

Koren^[1]在 1985 年首次提出了交叉耦合控制, 在一定程度上改善了跟踪性能, 减小了轮廓误差。Middleditch 和 Puaul^[2]认为, 在轨迹不连续处, 通过控制电动机加速和减速可以减小轮廓误差, John 等则是为每个轴设计一个复杂的数字控制器来减小轮廓误差。它们均为针对单轴的控制方式, 是一种非耦合控制, 尽管能提高每一个轴的精度, 减少轮廓误差和跟踪误差, 但是各轴之间的动态性能不能够互相匹配, 另外, 跟踪曲线的非线性也给协调控制带来一定的困难。

Yeh^[3]等采用直线/圆弧的轮廓误差模型, 引入轮廓误差传递函数 (CETF), 实现基于 CETF 的单变量的交叉耦合控制 (CCC) 设计, 但是由于抗干扰能力不强、不适合高速的情况, Srinivasan 等引入了基于任务坐标的 (TCF) 的多变量 CCC 设计, 但由于计算极其复杂, 使应用受到限制。Chiu 等应用

Lyapunov 函数实现 CCC, 因为对隐函数求解的困难, 也导致其应用受到极大限制。

基于频域的 CCC 尽管存在着在大曲率方面响应速度不快的缺点, 但由于参数整定简单, 抗干扰能力强, 仍被广泛采用, 并且随着变增益的交 CCC 的出现, 极大地改变了 CCC 的控制性能。故将变增益交叉耦合控制应用在雷达伺服系统中, 以提高伺服系统的跟踪精度。

1 雷达伺服系统概述

常用的雷达伺服系统简化后可用图 1 来代替, 主要由如下几个部分组成: 雷达底座和支架、X 轴伺服电机、Y 轴伺服电机以及雷达天线。雷达底座和支架对雷达起固定和支撑作用, 雷达天线则收发无线电脉冲, 搜索目标。

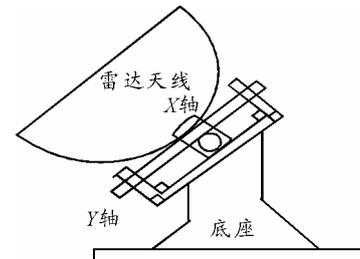


图 1 伺服雷达示意图

收稿日期: 2010-08-05; 修回日期: 2010-10-29

基金项目: 四川省杰出青年基金人才培养计划 (09ZQ026-009); 四川省应用基础项目 (2009JY0008)

作者简介: 张伟 (1985-), 男, 湖北人, 硕士, 从事伺服控制、电机控制技术、总线技术研究。

整个雷达工作是通过控制 X 轴和 Y 轴伺服电机的转动角来实现, X 轴伺服电机转过的角度为俯仰角设为 α , Y 轴电机转过的角度为水平倾角记为 β 。当连续改变俯仰角和水平倾角的时候, 雷达天线就会在伺服电机的作用下, 准确地跟随物体目标位置, 实现跟踪和监控的目的。

2 雷达系统中的变增益交叉耦合控制

2.1 变增益交叉耦合控制^[4]

在雷达伺服系统中, 俯仰和水平方向的 X 轴和 Y 轴电机不仅要跟踪各自的设定值, 还要加入彼间的位置信息。如图 2, X 轴和 Y 轴电机的设定输入为 θ_x^* 和 θ_y^* , 实际输出为 θ_x 、 θ_y , 将 X 轴误差 e_x 和 Y 轴误差 e_y 与交叉耦合增益 C_x 、 C_y 相乘做差 e_x' 、 e_y' , 经交叉耦合控制模块, 再通过 C_x 、 C_y 分配到 X 轴和 Y 轴, 这样就在单轴的跟踪中还包含整个系统的状态信息, 能有效减少系统误差。

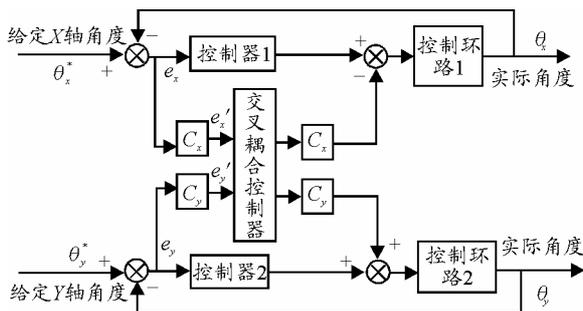


图 2 雷达伺服中的交叉耦合控制

图 2 中的跟踪系统用 ε 表示系统轮廓误差, 它与各轴的误差存在着以下关系:

$$\varepsilon = C_y E_y - C_x E_x \quad (1)$$

其中, C_x 、 C_y 称为交叉耦合增益^[5]。

在传统交叉耦合控制系统中, C_x 、 C_y 根据各个轴的特性固定在 0~1 之间。很明显, 在跟踪误差的过程中, 不同的位置设定值误差的放大倍数相同, 使得系统缺少灵活跟踪的能力, 不能较快地调整, 以满足快速性要求。

于是, 在实际应用中会根据不同的输入实时调整 C_x 、 C_y 。这时, 耦合增益分别是输入 θ_x^* 、 θ_y^* 的函数 $C_x(\theta_x^*)$ 、 $C_y(\theta_y^*)$, 它是变增益交叉耦合控制的基础, 它能够极大地改善耦合控制的性能, 使交叉耦合控制更加有利于实际应用^[6]。

2.2 不同运行轨迹的轮廓误差分析

根据系统的跟踪的轨迹不同, 笔者分直线轨迹曲线和任意曲线轨迹来推导出增益系数 C_x 、 C_y , 图 3 是在直线运动轨迹的情况, 图 4 则是任意运动轨迹的情况。

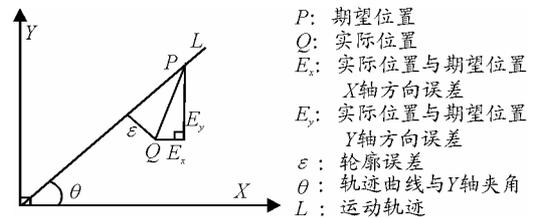


图 3 线性轨迹系统的轮廓

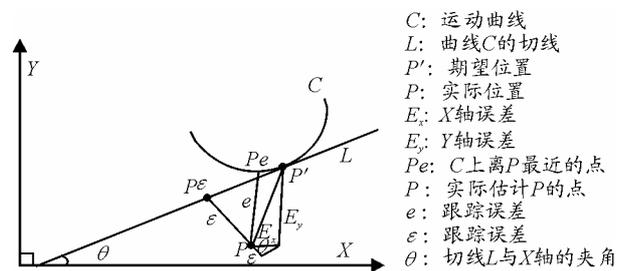


图 4 任意运动轨迹系统的轮廓

如果系统的运动轨迹是线性的, 如图 3, 系统运行轨迹直线 L, 对于目标位置 $P(x_0, y_0)$, 系统到达的实际位置 $Q(x_1, y_1)$, 线段 PQ 是目标与实际位置的之间的误差 ε , 误差在 X 轴、Y 轴方向的投影分别是 E_x 、 E_y , 直线 L 与 X 轴的夹角 θ :

$$\varepsilon = E_y \cos \theta - E_x \sin \theta \quad (2)$$

通过与式 (1) 比较得到

$$C_x = \sin \theta \quad C_y = \cos \theta \quad (3)$$

对应任意轮廓的曲线 C 上的一点 P' , 笔者过 P' 作曲线 C 的切线, 交 X 轴的夹角为 θ 。曲线 C 称为轮廓曲线, C 上面的点就是笔者期望的目标点, 但实际位置总是有偏差, 实际位置为 P。笔者用 P 到切线的距离 ε 表示轮廓误差, 从 P 到 C 上的最近的点 P_e 的距离 e 称为跟踪误差, PP' 为实际总误差。笔者使用交叉耦合控制减小轮廓误差 ε , ε' 为 ε 的延长线末端平行于切线 $P'P_e$, 通过分解, 可以得到:

$$\varepsilon + \varepsilon' = E_y \cos \theta \quad (4)$$

利用三角形的知识

$$\varepsilon' = E_x \sin \theta \quad (5)$$

将式 (4) 减去式 (5) 得:

$$\varepsilon = E_y \cos \theta - E_x \sin \theta \quad (6)$$

式 (6) 与式 (1) 比较后得到:

$$C_x = \sin \theta \quad C_y = \cos \theta \quad (7)$$

通过以上分析, 雷达伺服系统的 X 轴和 Y 轴的交叉耦合增益取 $C_x = \sin \theta$, $C_y = \cos \theta$, 以下分析都是建立在此基础上。

2.3 雷达伺服系统的轮廓误差模型

雷达天线在空间运行的轨迹可以用三维立体球面来表示, 如图 5, 以雷达伺服的轴心为中心点 O 做三维坐标系 XYZ, X 轴对应于 X 方向伺服电机, Y 轴对应于 Y 轴方向伺服电机。球面上的任意点 A 与 X 轴的夹角 (俯仰角) 为 α , 与 Y 轴的夹角 (水平倾角) β , A 点到圆心 O 的距离为 R, 于是 A 点可以用三维坐标表示为 $(R \cos \alpha, R \sin \alpha \cos \beta, R \sin \alpha \sin \beta)$ 。

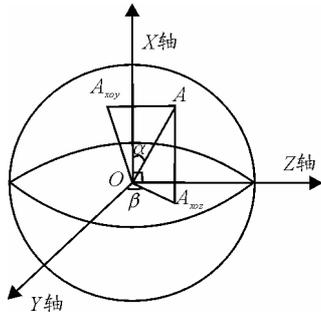


图 5 雷达天线运行轨迹图

如果将 A 点投影到平面 XOY 和 XOZ 上, 可以得到在不同的平面上坐标, 比如投影到 YOZ 平面上坐标为 $(R \sin \alpha \cos \beta, R \sin \alpha \sin \beta)$, 由于需要对 X、Y 轴进行控制, 所以投影到 XOY 平面上, 点 $A_{xoy}(R \cos \alpha, R \sin \alpha \cos \beta)$ 。参照图 4, 将 $A_{xoy}(R \cos \alpha, R \sin \alpha \cos \beta)$ 对应为点 P', 雷达运动轨迹在 XOY 面上的轨迹对应为曲线 C。过 P' 作曲线 C 的切线, 与 X 轴的夹角为 θ 。

切线 P'P'_e 在 P' 点处的斜率为:

$$K = \tan \theta = y'(x) \quad (8)$$

P' 点在 X 轴和 Y 轴上的位置分别为:

$$x = R \cos \alpha, \quad y = R \sin \alpha \cos \beta$$

对于某一个特定雷达, 轨迹到中心位置 O 的距离为常数 R, 令 $R=1$ 以简化运算, 从而:

$$x = \cos \alpha, \quad y = \sin \alpha \cos \beta \quad (9)$$

由于

$$\begin{aligned} \tan \theta &= -\frac{dy}{dx} = \frac{(\sin \alpha \cos \beta)'}{(\cos \alpha)'} \\ &= \frac{(\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta)}{-\sin \alpha} \\ &= \frac{\cos(\alpha + \beta)}{-\sin \alpha} \end{aligned} \quad (10)$$

于是

$$\begin{aligned} \theta &= \arctan\left(\frac{\cos(\alpha + \beta)}{-\sin \alpha}\right) \\ &= -\arctan\left(\frac{\cos(\alpha + \beta)}{\sin \alpha}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

根据式 (7) 则有:

$$\begin{aligned} C_x = \sin \theta &= -\sin \left[\arctan\left(\frac{\cos(\alpha + \beta)}{\sin \alpha}\right) \right] \\ C_y = \cos \theta &= \cos \left[\arctan\left(\frac{\cos(\alpha + \beta)}{\sin \alpha}\right) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

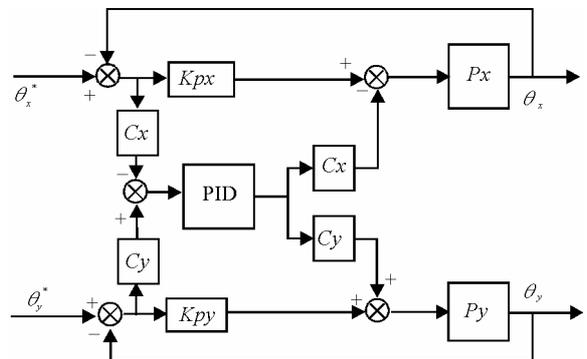
将式 (12) 代入式 (6) 得到:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= E_y \cos \left[\arctan\left(\frac{\cos(\alpha + \beta)}{\sin \alpha}\right) \right] - \\ &E_x \sin \left[\arctan\left(\frac{\cos(\alpha + \beta)}{-\sin \alpha}\right) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

3 试验结果与分析

3.1 系统试验

雷达伺服电机位置控制仿真试验按照图 6 的交叉耦合控制结构建立, 耦合增益系数, 按照式 (12) 来取值。为了验证变增益交叉耦合控制系统的跟踪效果, 在 MATLAB Simulink 环境中进行效果仿真, 程序图如图 7, 仿真结果见图 8。



K_{px} : X轴位置环增益 θ_x^* : X轴期望位置
 K_{py} : Y轴位置环增益 θ_x : X轴实际位置
 C_x : X轴误差分配系数 θ_y^* : Y轴期望位置
 C_y : Y轴误差分配系数 θ_y : Y轴实际位置

图 6 雷达伺服系统的交叉耦合控制

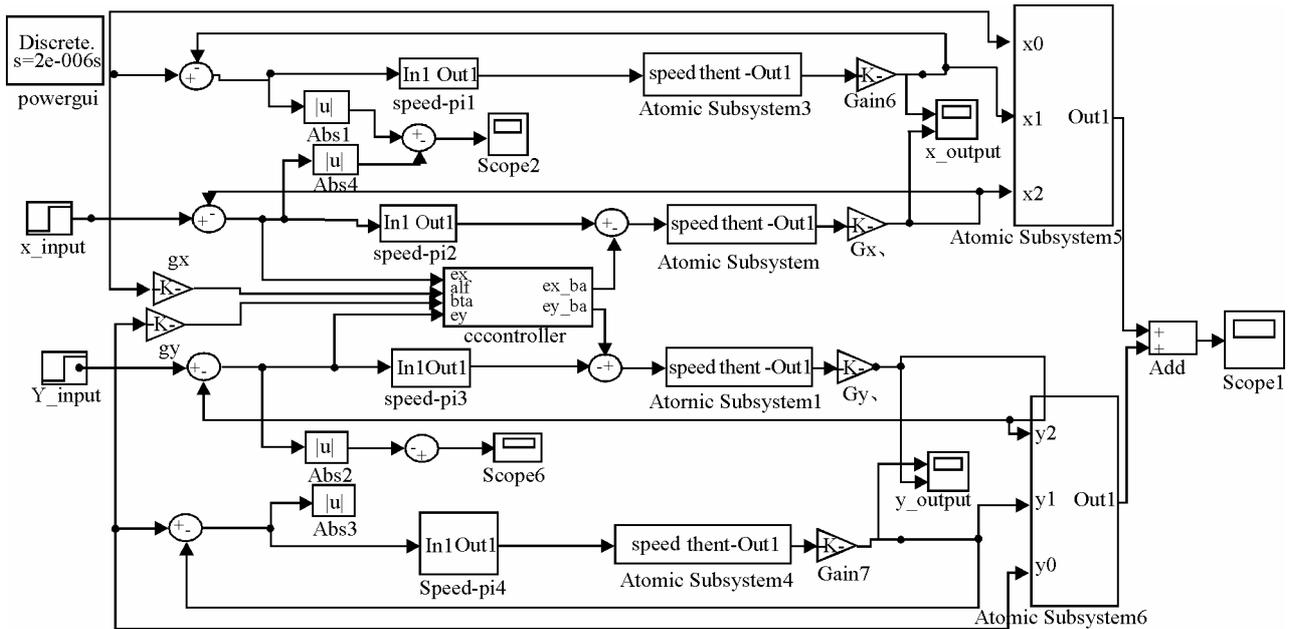


图 7 系统仿真程序框图

电机采用永磁同步电机, 参数如下:

X 轴电机参数:

$$T_N = 6 \text{ Nm}, U_N = 300 \text{ Vdc}, P_N = 4,$$

$$R_s = 0.63 \text{ ohm}, L_d = L_q = 2.075 \text{ mH}$$

磁通 0.086 27 Wb, 额定转速 4 000 r/min

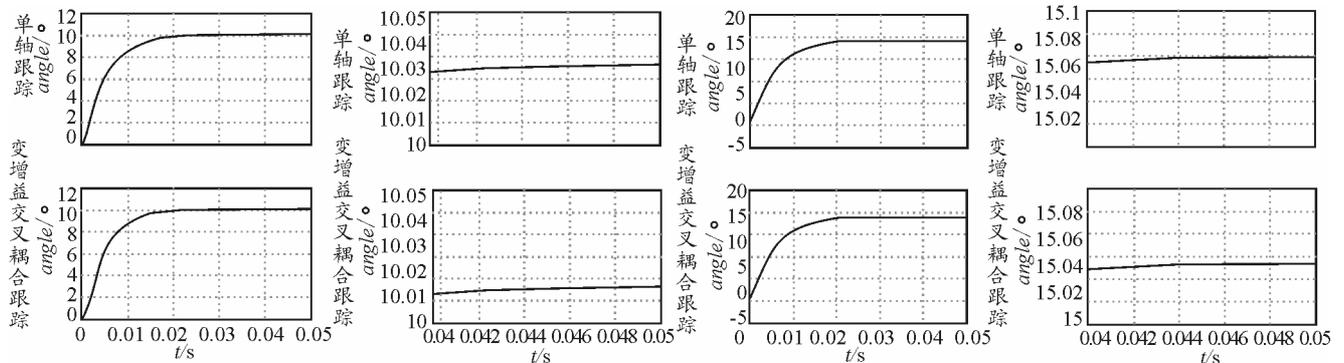
X 轴电机参数:

$$T_N = 8 \text{ Nm}, U_N = 300 \text{ Vdc}, P_N = 4,$$

$$R_s = 0.958 5 \text{ ohm}, L_d = L_q = 5.025 \text{ mH}$$

磁通 0.182 7 Wb, 额定转速 2 000 r/min

X 轴执行电机对应 x 输入, Y 轴执行电机对应 y 轴输入, 输入采用角度值。在 $x=10, y=15$ 时仿真结果如图 8(a)、(b)、(c)、(d)。



(a) X 轴响应曲线图

(b) X 轴响应曲线局部放大图

(c) Y 轴响应曲线图

(d) Y 轴响应曲线局部放大图

图 8 单轴跟踪与变增益交叉耦合控制跟踪效果

对比图 8(a)、(b), X 轴在单轴跟踪时稳态误差为 -0.03° , 而在交叉耦合控制时为 -0.015° ; 对比图 8(c)、(d), Y 轴在单轴跟踪时稳态误差为 -0.067° ; 而在交叉耦合控制时为 -0.042° 。笔者发现, X 轴和 Y 轴误差在变增益交叉耦合时比单轴跟踪时明显要小, 系统误差获得改善。系统误差由 X、Y 的误差共同引起, 根据式 (13) 计算单轴和交叉耦合控制的系统轮廓误差分别为: $\varepsilon_1 = -0.071^\circ, \varepsilon_2 = -0.044^\circ$, 由于 $|\varepsilon_2| < |\varepsilon_1|$, 因此, 交叉耦合控制可以有效减少

系统误差。

3.2 试验结果分析

取 4 个不同的位置点试验, 结果记录在表 1 中。设单轴跟踪稳态轮廓误差为 ε_1 , 变增益交叉耦合跟踪稳态轮廓误差 ε_2 , 根据表 1 中的试验数据, 对比跟踪稳态轮廓的绝对值 $|\varepsilon_1| > |\varepsilon_2|$, 变增益交叉耦合跟踪时轮廓误差更小, 有效地改善了系统跟踪性能。这和前面的理论分析一致。

(下转第 65 页)

IEICE TRANS. INF. & SYST, 2000, E83-D(7): 1583-1591.

[2] 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1997: 121.

[3] 张红源, 陈自力. 图像匹配经典算法及其改进方法研究[J]. 兵工自动化, 2008, 27(9): 91-94.

[4] Shi J. and Tomasi C. Good features to track[C]. In Proc. of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1994: 593-600.

[5] Hiroki Sugano, Ryusuke Miyamoto. Parallel Implementation of Good Feature Extraction for Tracking

on the Cell Processor with OpenCV Interface[C]. In Proc. of Fifth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal, 2009: 1326-1329.

[6] D. I. Barnea, H F Silverman. A Class of Algorithms for Fast Digital Registration[J]. IEEE Transactions on Computers C-21, 1972: 179-186.

[7] 沈晓芳, 向建勇, 董维科. 基于图像边缘特征的SSDA算法[J]. 电子科技, 2009, 22(3): 16-18.

[8] 孙立功, 饶文碧, 阎保定. 基于改进SSDA的彩色目标识别方法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(28): 73-74.

(上接第 43 页)

3 结论

综上所述, 维修过程逻辑网是一个有唯一起始点和结束点的状态机 Petri 网, 其中任意的状态都是可达的, 不会发生死锁现象, 从而保证了维修过程模型的合理性。当建立了维修过程逻辑网模型, 并已证明其正确性之后, 就可以把维修过程逻辑网模型转换为维修过程 Petri 网模型。

主要过程为:

- 1) 按照维修过程逻辑网模型的结构建立有色 Petri 网的基本结构;
- 2) 分析应该设置哪些颜色和函数;
- 3) 进行仿真分析。主要借用相关的 Petri 网仿真工具进行仿真分析。

参考文献:

[1] 郝建平, 等. 虚拟维修仿真实理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[2] 蒋双双, 刘鹏远, 张锡恩. 一种基于 Petri 网的虚拟维修过程建模方法[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(11): 2488-2491.

[3] 曲长征, 陶凤和, 张柳, 等. 基于赋时有色 Petri 网的维修过程模型[J]. 计算机仿真, 2006, 23(4): 8-10.

[4] 曲长征, 郝建平, 刘继民. 考虑资源约束的复杂维修任务时间预计模型[J]. 军械工程学院学报, 2009, 21(3): 6-10.

[5] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

[6] 王胜德, 黄进. 基于优先级时间有色 Petri 网的装备维修过程模型研究[J]. 国防技术基础, 2006(9): 32-35.

[7] 马麟, 吕川. Petri 网在维修工作分析中的应用研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(3): 249-253.

[8] 赵吉昌, 李星新, 田成龙, 等. 基于 NGRAIN 的装备虚拟维修训练研究与实现[J]. 四川兵工学报, 2009(9): 25-27.

(上接第 59 页)

表 1 2 种控制策略下跟踪效果

输入位置 (X轴输入/°, Y轴输入/°)		输入位置1 (12, 6)	输入位置2 (15, 15)	输入位置3 (20, 25)	输入位置4 (32, 36)
单轴跟踪稳态误差	X轴输出/°	-0.003 5	-0.045 1	-0.064 5	-0.330 1
	Y轴输出/°	-0.014 2	-0.066 7	-0.162	-0.480 2
耦合跟踪稳态误差	X轴输出/°	-0.001 1	-0.022 1	-0.048 3	-0.399 7
	Y轴输出/°	-0.000 9	-0.044 7	-0.140 8	-0.279 5
跟踪稳态轮廓误差 ϵ	单轴跟踪/°	-0.001 2	-0.077	-0.174 1	-0.125 3
	CCC跟踪/°	-0.000 8	-0.005 3	-0.144 7	-0.111 5

4 结论

在对雷达伺服数学建模的仿真的基础上, 运用运动轮廓误差的分析方法对跟踪效果进行比较。在试验中应用变增益交叉耦合情况下的轮廓误差比单轴跟踪时明显要小, 表明变增益交叉耦合控制能有效提高雷达伺服系统的精度, 减小系统误差。

参考文献:

[1] Feng.L, Koren.Y, Borenstein.J. Cross-coupling motion controller for mobile robots [J]. Control Systems Magazine, IEEE, 1993, 13(6): 35-43.

[2] Srinivasan.K, Fosdick.R. Multivariable analysis and controller design for coordinated multi-axial motion

control[R]. Proceedings of the American Control Conference, 1988, 88(3): 95-101.

[3] Hsu, Pau-Lo, Yeh, Syh-Shiuh. Precision control and compensation of servomotors and machine tools via the disturbance observer[J]. Mechatronic/IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 420-429.

[4] Su.Ke-Han, Cheng.Ming-Yang. Contouring accuracy improvement using cross-coupled control and position error compensator[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 10(48): 1444-1453.

[5] Zhao, Guo-Yong, et.al. High-precision cross-coupled control approach based on NURBS curve interpolator[J]. Dalian Ligong Daxue Xuebao/Journal of Dalian University of Technology, 2008, 48(2): 210-214.

[6] 张今朝, 刘国海. 多电机同步系统的多模型辨识[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 138-142.