

一种棱镜式激光陀螺光强控制系统研究

贾惠霞¹ 张英敏² 张 琼¹ 李刚虎² 马家君¹

(¹ 西安北方捷瑞光电科技有限公司, 陕西 西安 710111)
(² 西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710065)

摘要 激光陀螺设计时均采用光强控制系统和程长控制系统。依据控制系统理论,建立了棱镜式激光陀螺光强控制系统传递函数。用实验测试的方法建立了环形激光器在光强控制系统中的等效数学模型,通过理论分析和 Matlab 仿真,能够准确评估激光陀螺光强控制系统的性能,为系统设计提供了理论依据,提高了陀螺性能和调试效率。

关键词 激光器;棱镜式激光陀螺;光强控制系统;环形激光器数学模型;传递函数;仿真

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0814001

Study on a Light-Intensity Control System of Total Reflection Prism Laser Gyros

Jia Huixia¹ Zhang Yingmin² Zhang Qiong¹ Li Ganghu² Ma Jiajun¹

(¹ Xi'an North Jierui Opto-Electronics Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710111, China)
(² School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract The light intensity control system and the cavity length control system are used in the design of the laser gyro. Transfer functions of the light intensity control system of prism laser gyros are established based on the theory of the control system. The equivalent mathematical model of the ring laser in the light intensity control system is established by experiments and tests. Based on theoretical analysis and Matlab simulation, performance of the laser gyro light intensity control system can be evaluated accurately. It offers theoretic base for system design and improves performance of the laser gyro and debugging efficiency.

Key words lasers; prism laser gyro; light intensity control system; mathematical model of ring laser; transfer function; simulation

OCIS codes 140.3370; 140.3570; 280.3420

1 引 言

棱镜式激光陀螺^[1-3]是一种基于 Sagnac 效应^[4]的敏感载体角位移和角速度的传感器,它的核心部件是环形激光器。

在激光器增益介质的轮廓内,只能有一个纵模频率运转^[5]。如果增益轮廓过高,增益损耗比过大时,相邻的纵模频率有可能进入增益轮廓而与原工作纵模同时振荡,这会使激光陀螺的信号难以检测

出来。因此要进行光强控制^[6-7],使增益损耗比为适当的常值,保证只能有一个纵模频率运转。

光强控制系统的主要任务有以下 3 点:

- 1) 通过控制高频激励源的供电电压,使激光器增益曲线稳定。
- 2) 在发生纵模跳变(跳模)时,保证跳模时间足够短。
- 3) 光强控制系统稳定工作时要消除系统静差,

收稿日期: 2014-02-11; 收到修改稿日期: 2014-03-30

基金项目: 国际科技合作专项(2012DFR70370)

作者简介: 贾惠霞(1968—),女,高级工程师,主要从事电子技术和激光陀螺控制系统等方面的研究。

E-mail: jhxia0156@sina.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

尽量减小超调量,缩短系统的调节时间。

2 光强控制原理

原子从高能级跃迁到低能级有两种机制^[8],一种是它的电子自发地从高能级 E_2 跃迁到低能级 E_1 ,相应地发出光子;第二种机制是原子受到外来光子的激励作用,原子的电子从上能级 E_2 跃迁到下能级 E_1 ,同时辐射出第二代光子。处在下能级 E_1 的原子数 N_1 小于处于上能级的 E_2 的原子数 N_2 ,即 $N_2 > N_1$ 为粒子反转状态,当 $N_2 - N_1$ 越大,激光器的增益 G 越大。由于激光在传输过程中存在损耗 γ ,要使激光器持续出光,成为相干光源,必须满足

$$N_2 > N_1, \quad G > \gamma. \quad (1)$$

激光器环路的增益曲线图如图 1 所示。

图 1 为激光器的环路增益曲线,其中 ν_0 为增益曲线中心频率,对应的 G_m 为增益曲线的极大值。 ν_A 和 ν_B 分别是可发光区域的频率下限和上限。

激光器输出的光强与 $G - \gamma$ 成正比:

$$I = I_G \left(\frac{G}{\gamma} - 1 \right), \quad (2)$$

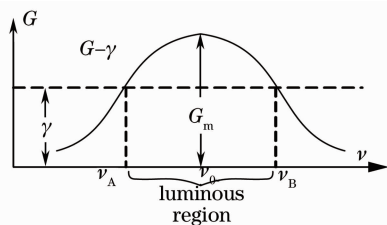


图 1 激光器环路增益曲线

Fig. 1 Curve of the laser loop gain

式中 I_G 为最大光强,即增益减损耗与激光器的实际输出光强 I 成正比关系。

光强控制回路输出电压为高频激励源的强度控制信号,实时控制高频激励信号,就能实现对激光器内 He-Ne 介质中反转粒子数的控制,进而实现增益控制以及光强控制。

3 光强控制系统传递函数分析计算

3.1 光强控制回路控制框图

光强控制回路控制框图如图 2 所示。

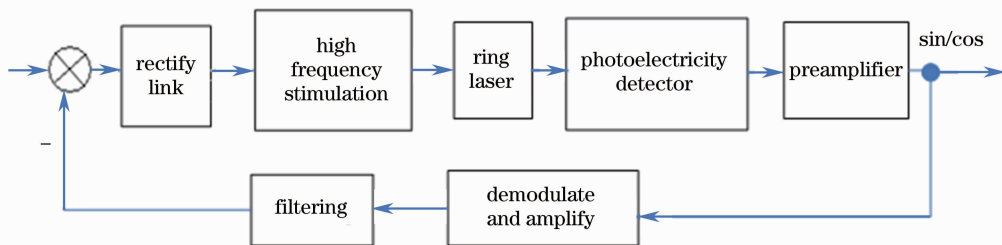


图 2 光强控制回路控制框图

Fig. 2 Block diagram of the light intensity control loop

光强控制系统前向通道包括 5 个环节,校正环节、高频激励源、激光器、光电探测器、前置放大器;反馈通道包括检波放大和滤波环节。

3.2 建立环形激光器数学模型

高频激励源、激光器输出至光电探测器这一环节的传递函数采用信号源扫频的方法测试,测试出该环节幅值和相位之间的关系,进而反推出传递函数。将扫频信号叠加到高频激励源的直流电压上,经功率放大后加到高频激励源的供电端上。在前置放大器输出端测试输出信号上调制的扫频信号幅值和相位,并将对应关系用伯德图的形式描绘出来。

测试过程中光强控制回路开环,测试框图如图 3 所示。

外接测试电路图如图 4 所示。

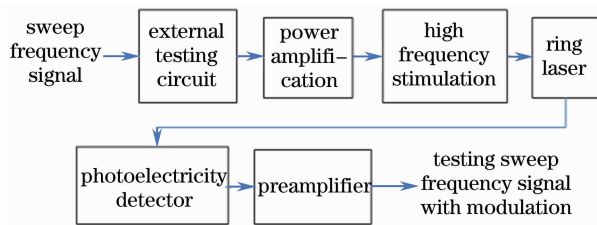


图 3 测试框图

Fig. 3 Block diagram of the test

外接测试电路的作用就是将扫频信号调制到高频激励源的供电电源上。

图 5 为激光陀螺输出的拍频信号,激光陀螺输出的拍频信号调制上扫频信号后的波形见图 6 中上面的波形,图 6 中下面的信号为扫频信号。测试数据如表 1 所示。

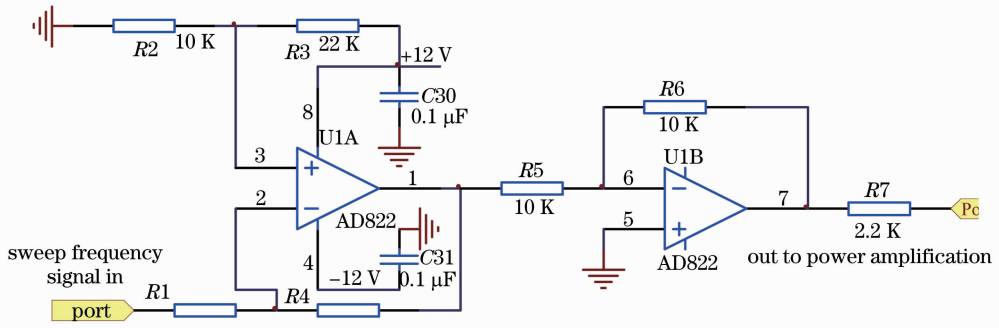


图 4 外接测试电路图

Fig. 4 External circuit diagram for the test

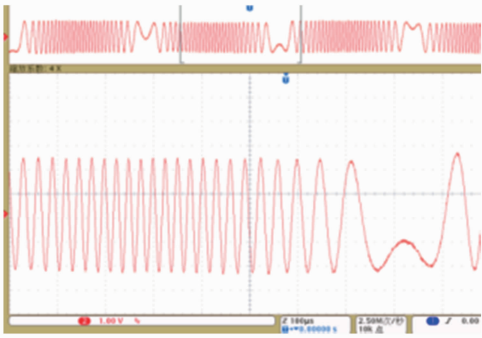


图 5 激光陀螺输出的拍频信号

Fig. 5 Beat frequency signal of the laser gyro output

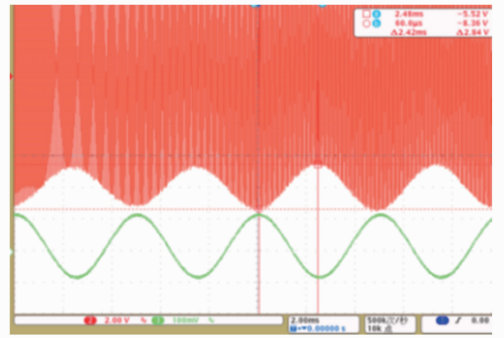


图 6 拍频信号调制上扫频信号图

Fig. 6 Beat frequency signal modulated by sweep frequency signal

表 1 棱镜式陀螺光强控制系统开环扫频测试数据

Table 1 Sweep frequency data of prism laser gyro's light intensity control system in open loop

Frequency of sweep signal /Hz	Amplitude modulation signal /V	Phase shift /($^{\circ}$)	Frequency of sweep sign /Hz	Amplitude modulation signal /V	Phase shift /($^{\circ}$)	Frequency of sweep sign /Hz	Amplitude modulation signal /V	Phase shift /($^{\circ}$)
1	1.4	185.04	130	2.2	171.76	900	2.2	131.54
10	1.5	178.56	150	2.4	160.38	1000	2.0	133.20
20	1.5	188.64	180	2.5	178.20	2000	1.5	97.92
30	1.4	190.08	190	2.6	182.63	3000	0.7	91.58
40	1.4	175.68	200	2.6	167.76	4000	0.6	85.10
50	1.4	172.44	300	2.5	177.12	5000	0.4	88.20
60	1.5	178.76	400	2.4	201.60	6000	0.3	79.27
70	1.6	162.79	500	2.2	194.40	7000	0.3	67.54
90	1.8	159.47	600	2.5	195.26	8000	0.2	71.71
100	2.4	170.28	700	2.5	139.61	9000	0.2	41.80
110	2.2	162.76	800	2.3	143.42	10000	0.2	39.24
120	2.2	163.73						

表 1 数据拟合曲线如图 7 和图 8 所示。

从拟合曲线看出, 3 dB 带宽 $f=1$ kHz, 增益 (放大倍数) K 为 6。1 kHz 时扫频信号调制波幅为 2 V, 10 kHz 时扫频信号调制波幅为 0.2 V, 衰减斜率为 $20\lg(0.2/2)=-20$ dB。

该测试部分为一阶惯性环节, 说明激光器在光

强控制系统中为一阶惯性环节。其传递函数 $G_1(s)$ 为

$$G_1(s) = \frac{-K}{Ts + 1}, \quad (3)$$

式中增益 $K=6$, 时间常数 $T = \frac{1}{2\pi f} = 0.00016$ s, s 为复变量。

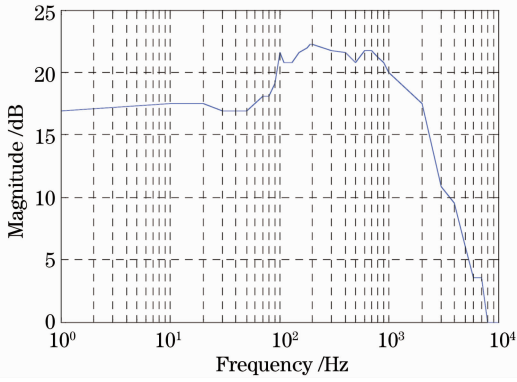


图 7 幅频特性图

Fig. 7 Magnitude frequency diagram

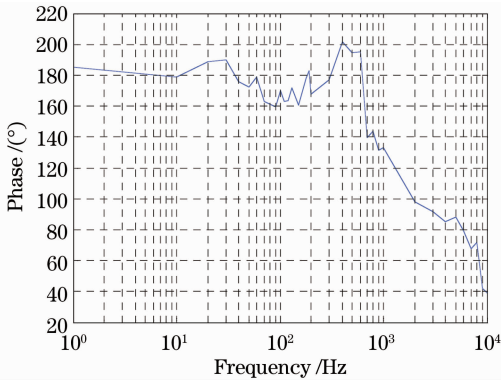


图 8 相频特性图

Fig. 8 Phase frequency diagram

3.3 前向通道传递函数

通过测试,前向通道中高频激励源、激光器至前置放大器的传递函数为(3)式。

对于光强控制系统而言,陀螺跳模可等效为阶跃信号输入,依据光强控制的主要任务,阶跃输入的情况下系统的稳态误差为零,过渡过程最短。校正环节应设计为积分校正器,保证系统最少为I型控制系统,其传递函数 $G_2(s)$ 为

$$G_2(s) = -\frac{1}{ts}, \quad (4)$$

式中积分时间常数 $t=0.0594$ s。

t 的选依据取是二阶控制系统的特性,见下文中关于(11)式的计算。

光强控制回路的前向通道中两个控制环节串联,前向通道的传递函数是两个控制环节传递函数的乘积^[9],即(3)式和(4)式相乘为前向通道的传递函数 $G(s)$,计算公式为

$$G(s) = G_1(s)G_2(s) = \frac{K}{ts(Ts+1)}. \quad (5)$$

3.4 反馈通道传递函数

反馈通道中检波放大环节传递函数为

$$H_1(s) = \frac{4}{T_1s+3}, \quad (6)$$

式中时间常数 $T_1=0.00056$ s。

检波放大环节中不但要提取光强误差信号,还要提取腔长误差信号,因此取截止频率为 284 Hz,对应 T_1 为 0.00056 s。

反馈通道中低通滤波环节传递函数为

$$H_2(s) = \frac{1}{T_2s+1}. \quad (7)$$

滤波环节一般滤除工频干扰,将截止频率设置为 48 Hz,对应(7)式中时间常数 $T_2=0.0033$ s。

光强控制回路反馈通道中的两个环节串联,传递函数是两个环节的传递函数的乘积,即(6)式和(7)式相乘为反馈通道的传递函数,计算公式为

$$H(s) = H_1(s)H_2(s) = \frac{4}{(T_1s+3)(T_2s+1)}. \quad (8)$$

3.5 光强控制回路开环传递函数

根据控制理论,开环传递函数 $G_0(s)$ 为前向通道传递函数和反馈通道传递函数的乘积,(5)式和(8)式相乘为

$$G_0(s) = \frac{4K}{ts(Ts+1)(T_1s+3)(T_2s+1)}. \quad (9)$$

化简(9)式得

$$G_0(s) = \frac{4K/t}{s[(T_1+3T+3T_2)s+3]}. \quad (10)$$

从(10)式可以看出,光强控制系统为I型控制系统。系统的稳定性和动态性能可近似用二阶系统的理论进行分析。

将 T, K, T_1, T_2 代入(10)式得

$$G_0(s) = \frac{2193.785/t}{s(s+262.7)}. \quad (11)$$

二阶系统的标准形式为

$$G_0(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s+2\zeta\omega_n)}, \quad (12)$$

式中 ω_n 为自然频率, ζ 为阻尼比。依据二阶系统特性, ζ 越小,超调量越大,上升时间越短,通常取 $\zeta=0.4\sim0.8$ 为宜。实验中选取 $\zeta=0.713$ 时,从(11)式中计算出 $\omega_n=192.18$ rad/s, $t=0.0594$ s。

3.6 光强控制回路闭环传递函数

光强控制回路闭环传递函数 $G_c(s)$ 标准式为

$$G_c(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)}. \quad (13)$$

将(5)式和(8)式代入(13)式中得

$$G_c(s) = \frac{\frac{K}{ts(Ts+1)}}{1 + \frac{4K}{ts(Ts+1)(T_1s+3)(T_2s+1)}}, \quad (14)$$

将 T, K, T_1, T_2, t 代入(14)式,化简得

$$G_c(s) \approx \frac{0.000111s^2 + 0.093s + 18}{0.000949s^2 + 0.1782s + 24} \quad (15)$$

4 光强控制系统性能仿真

用 Matlab^[10] 软件对光强控制系统的传递函数进行仿真,对(15)式和(11)式仿真的伯德图如图 9 所示。

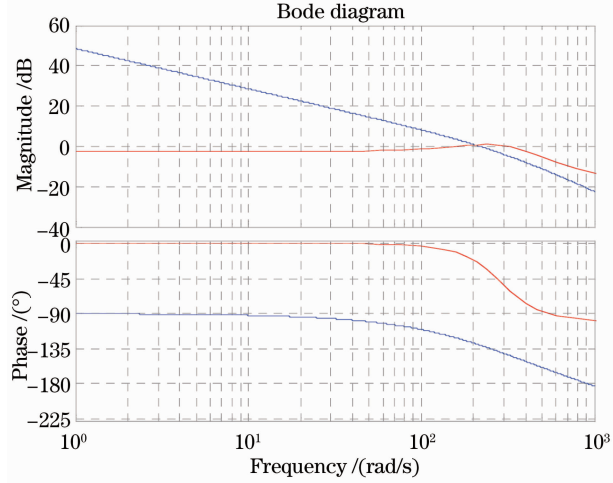


图 9 光强控制回路开环和闭环伯德图
Fig. 9 Bode diagram of open and closed light intensity control loop

上图中蓝线和红线分别是 $K=12$ 时的开环、闭环伯德图。

不同增益下的闭环单位阶跃响应图如图 10 所示。

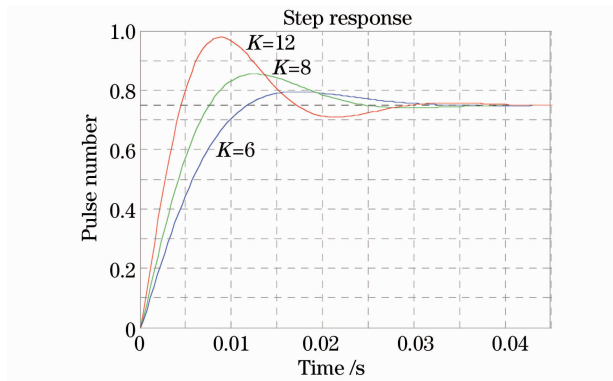


图 10 $K=6, 8, 12$ 时的单位阶跃响应曲线
Fig. 10 Unit-step response curves for $K=6, 8, 12$

从图 10 可以看出 K 在 $6 \sim 12$ 之间、对应 ζ 在 $0.6 \sim 0.8$ 之间时,阶跃响应较好,超调适量,上升时间、调整时间短,保证陀螺跳模时间足够短。

依据控制理论稳定裕度计算公式,计算出开环传递函数在不同增益下的相角裕度和幅值裕度,计

算数据参如表 2 所示。

表 2 不同增益下的系统裕度
Table 2 System margin of different gains

K	Gain crossover /Hz	Phase margin /($^{\circ}$)	Phase crossover /Hz	Gain margin /dB
6	124.52	65.19	922.81	22.53
8	158.91	59.17	922.81	16.90
12	218.26	49.90	922.81	11.27

从仿真和计算结果看出增益 K 在 $6 \sim 12$ 之间时控制系统阶跃响应好,稳定裕度大。

5 实际应用及测试

将生产现场陀螺增益 K 调在 $6 \sim 12$ 这个范围内,或者通过调整积分校正环节的时间常数,使阻尼系数在一个合理的区间时,陀螺的精度有明显的改善。图 11 和图 12 分别为光强控制系统改进前和改进后的陀螺测试曲线,可以看出按照本文研究的光强控制系统参数调试陀螺时,陀螺的精度有明显的改善。同时陀螺在变温时脉冲数变化平稳,跳模跳数现象明显改善。

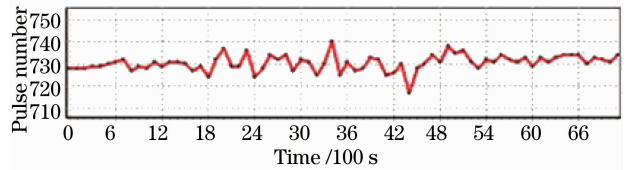


图 11 改进前陀螺测试曲线
Fig. 11 Test curve before the improvement

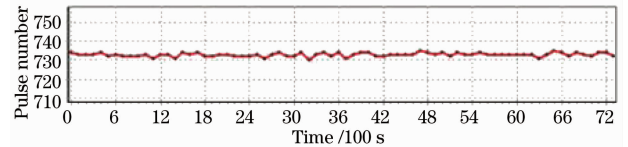


图 12 改进后陀螺测试曲线
Fig. 12 Test curve after the improvement

6 结 论

用测试的方法建立了环形激光器在光强控制系统中的数学模型,用自动控制理论分析了陀螺光强控制系统性能,对棱镜式激光陀螺光强控制系统有了全面清楚的认识。得出了光强控制控制系统为 I 型控制系统,系统稳态性能和动态性能可近似用二阶系统理论设计,研究了陀螺控制系统主要参数选取方法。对陀螺的调试和陀螺光强控制系统的改进提供了理论依据。

参 考 文 献

- 1 Liu Jianning, Jiang Junbiao, Shi Shunxiang, *et al.*. Analysis of total reflection prism ring laser's output characteristic and gyroscope's accuracy [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102002.
刘健宁, 蒋军彪, 石顺祥, 等. 全反射棱镜式环形激光器合光输出及陀螺精度特性分析[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102002.
- 2 Liu Jianning, Jiang Junbiao, Lian Tianhong, *et al.*. Intensity distribution properties of output light in total reflection prisms laser gyro with cavity stresses [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1102003.
刘健宁, 蒋军彪, 连天虹, 等. 谐振腔应力对全反射棱镜式激光陀螺输出光强分布特性影响[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102003.
- 3 Jin Shilong, Long Xingwu, Wang Fei, *et al.*. Technology research for ring laser gyro to overcome the environmental temperature variation [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(3): 409-414.
金世龙, 龙兴武, 王 飞, 等. 激光陀螺克服高、低温冲击的技术研究[J]. 光学学报, 2006, 26(3): 409-414.
- 4 E J Post. Sagnac effect [J]. Review of Modern Physics, 1967, 39(2): 475-493.
- 5 Jiang Yanan. Ring Laser Gyro [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985. 72-83.
- 6 Ma Yanghua, Zhang Ziguang, Han Zonghu. Investigation of optimal mode suppression ratio of laser gyro ring resonator [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0402007.
马仰华, 张自国, 韩宗虎. 激光陀螺环形谐振腔抑制比优化控制研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0402007.
- 7 Li Zhe. Design of control system for all-digital ring laser gyro [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(5): 051402.
李 哲. 全数字化激光陀螺控制系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(5): 051402.
- 8 Gao Bolong, Li Shutang. Laser Gyro [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1984. 6-26.
高伯龙, 李树棠. 激光陀螺[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1984. 6-26.
- 9 Hu Shousong. Principles of Automatic Control [M]. Beijing: Science Press, 1994. 21-237.
胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 1994. 21-237.
- 10 Katsuhiko Oogata. Matlab for Control Engineers [M]. Wang Shimi, Wang Jun, Trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012. 63-209.
Katsuhiko Oogata. 控制理论 Matlab 教程[M]. 王诗宓, 王 俊, 译. 北京: 电子工业出版社, 2012. 63-209.

栏目编辑: 殷建芳