

多超声电机控制的鲁棒性参数设计

孙志峻 黄卫清

南京航空航天大学,南京,210016

摘要:结合超声电机的运行特点,运用田口参数设计法对超声电机驱动的多关节机器人的总共 18 个控制参数进行了有效调节,并获得了一组最优且具有鲁棒性的控制参数。实验研究证明,在机器人平稳运行的前提下,所获得的这组控制参数不仅适用于机器人绘制各种不同的图形,而且可以获得高的位置精度。

关键词:超声电机;参数设计;关节机器人;鲁棒性

中图分类号:TM356 **文章编号:**1004—132X(2009)19—2288—05

Robust Parameter Design for Multiple Ultrasonic Motor Control

Sun Zhijun Huang Weiqing

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

Abstract: According to the operating characteristics of ultrasonic motors, parameter design of Taguchi method was adapted to effectively regulate a total of 18 control parameters of multiple joint robot driven by ultrasonic motors. An optimal and robust set of controller parameters was obtained. Results show that, at the premise of smooth operation of the robot, the set of control parameters applies to different graphics drawn by the robot, and improves the accuracy of the positions.

Key words: ultrasonic motor; parameter design; joint robot; robustness

0 引言

超声电机(ultrasonic motors, USMs)与传统电磁电机相比有着较多的优势,如尺寸小、低速大扭矩、静音运行、不受电磁场影响等^[1]。正是由于具备这些特性,因而超声电机已在一些领域得到应用,如日本佳能公司将其用于照相机调焦驱动^[2],日本精工公司将其作为手表的振动报时和日历盘的驱动源^[3]。然而,这些应用还仅限于单个超声电机的独立控制,可以预期,随着超声电机技术的不断发展和应用领域的不断扩大,会出现多台超声电机同时被驱动的耦合控制情况,如利用超声电机不受辐射和高低温巨变的影响的特点,将其用于太空机械臂各关节的驱动。

目前,绝大多数关于超声电机驱动控制的研究还停留在针对单个超声电机的情况,现有文献提出的控制策略未必能有效地直接应用于多超声电机的耦合控制。近几年,有学者研究了在 X—Y 移动平台上 2 个超声电机的驱动控制问题^[4-5],然而,由于移动平台的 X 方向与 Y 方向是正交的,因此,驱动 X 轴与 Y 轴的超声电机控制参数是自然解耦的,也可以认为,这两个超声电机的控制与单个超声电机的控制没有本质的差别,因为它们各自的控制参数不会相互影响。

为了研究多超声电机的联动耦合控制问题,我们搭建了一个典型的超声电机驱动多关节机器人,在前期研究的基础上,运用田口参数设计法,获得了具有较好鲁棒性的控制参数,并进行了实验验证。

1 机器人结构

三关节机器人的外观如图 1 所示,它可以在工作空间的任何一个平面内画图形或写字。3 个关节均采用超声电机驱动,肩关节采用南京航空航天大学精密驱动研究所研制的 TRUM—60 型

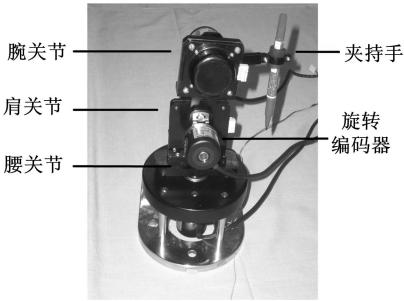


图 1 三关节机器人外观图

超声电机进行驱动,腰关节和腕关节采用 TRUM—45 型超声电机进行驱动。每一个关节配备一台旋转编码器,旋转编码器的结构选用中空型,从而省去了电机与编码器之间的联轴器,编码器每转的脉冲数是 2000。由于超声电机可以提供低速大扭矩,所以各关节与超声电机直接连

收稿日期:2008—04—21 修回日期:2009—05—31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50675098)

接,即没有采用减速齿轮,不存在齿轮传动的间隙调整机构,这使得整个机器人的结构紧凑且小巧。机器人腕关节和肩关节的活动范围均是 $\pm 90^\circ$,腰关节的活动范围是 $\pm 360^\circ$ 。

2 控制系统结构

超声电机的驱动控制方式有 3 种:①调节驱动器输出信号的电压;②调节驱动器输出信号的频率;③调节驱动器两相输出信号之间的相位差。这里采用第二种驱动控制方法,实现方式是通过改变加在驱动器中压控振荡器的直流电压来调节驱动器输出信号的频率,进而改变超声电机的速度。

基于 PC 机控制系统的超声电机驱动三关节机器人控制结构图见图 2。目前在市场上尚不能买到直接应用于超声电机的运动控制卡,这里采用固高公司通用型 GT-400-SV 运动控制卡,一方面利用其模拟量电压输出来调节电机转速,另一方面利用该卡提供的功能读出旋转编码器的脉冲值。该型控制卡具有数字滤波和脉冲 4 倍频电路,因而可以将位置反馈精度提高到每转 8000 个脉冲。

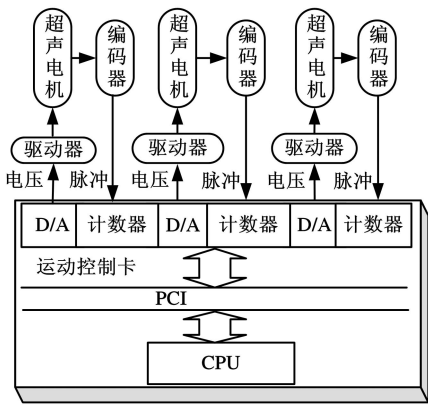


图 2 三关节机器人控制结构图

本文中超声电机驱动多关节机器人的任务是在其工作空间平面内进行画图形或写字。控制目标是:一方面要保证机器人笔尖的运动轨迹精确,另一方面要保证机器人在其运动过程中平稳。

3 控制参数鲁棒性设计

结合超声电机的运行特点,我们曾提出一种新颖的速度—位置联合反馈控制方式^[6](针对每个超声电机,实施速度反馈和位置反馈的双环 PID 控制)。采用该控制方式,不仅可以获得高的位置精度,而且可以保证机器人平稳运行。

三关节机器人由 3 个超声电机驱动,依照所提出控制形式,每个超声电机就有 6 个控制参数,

分别是 3 个速度 PID 控制参数和 3 个位置 PID 控制参数,对于整个机器人而言,需要调节 18 个控制参数。对于机器人所绘制的某种图形而言,即使有可能在手工调试中找到了机器人最佳控制参数,也不能说这些参数对绘制其他的图形也是有效的。因此,需要寻找一种方法来确定一组控制参数,使得机器人在绘制任何图形时都具有一定的鲁棒性。

运用田口参数设计法可以用较少的实验次数分析较多的参数,各参数之间没有权重,可以独立地对它们进行分析比较。采用这种调节技术不仅可以减少控制误差,也可以减少干扰对控制参数的影响。

Vlachogiannis 等^[7]首先将田口参数设计法运用于自动控制领域,但在他们的研究中,控制对象的传递函数是已知的,噪声因素均来自模型内部,如果传递函数和对象模型未知,则他们提出的方法很难被实施。Lee 等^[8]将田口参数设计法用于并联机构的参数调节中,获得了较好的控制效果。

本文中所运用的田口参数设计法及其实施步骤归纳如下:

(1)目标的确定。在田口参数设计法中,确定一个待定的目标是关键的一步。在机器人画图形的实验中,我们发现,同一个关节,其运行轨迹是否可对双环 PID 控制参数的影响十分明显。因此,这里的目标是在保证运行平稳的基础上,选择一组好的且具有鲁棒性的控制参数,使得机器人在绘制任意图形时,均能使位置误差最小。

(2)确定目标特性。田口参数设计法将目标特性分成三类:望目特性、望小特性和望大特性。本研究中,误差越小,则机器人的性能越好,因而在该机器人的实验设计方案中,它是一个望小特性问题。

(3)选择可控因素和噪声因素。测试因素的选择是田口参数设计法中非常重要的一个步骤,随心所欲地选取可控因素和噪声因素会直接导致无效的运算,一旦这些因素被确定下来,则它们的期望水准也就明确了。这里,选取 6 个控制参数作为可控因素,即位置反馈的 K_p^p 、 K_i^p 、 K_d^p 和速度反馈的 K_p^v 、 K_i^v 、 K_d^v 。在实验的初始阶段,这些控制参数是由手工方法调定的,它们的值如表 1 所示。在 Lee 等^[8]的研究中,并联机构速率被选为噪声因素,这是因为电磁电机有着很大的调速范围,然而,超声电机的调速范围相对而言要窄很多,而且在机器人绘制不同图形时,关节所需的速率是

差不多的。如前所述,控制参数与关节运行轨迹是否可导有着密切的联系。我们发现,当该机器人绘制一个圆时(图 3a),它的各关节运行轨迹均高阶可导,而当机器人绘制一段折线时(图 3b),则其各个关节运行轨迹是不可导的。所以,我们选取了这两种典型的图形作为噪声因素,这样控制参数的水平就是 2,圆和折线分别被定义为水平 1 和水平 2。对应表 1 中的控制参数,图 4 显示了画圆和折线时各个关节的角位置误差。

表 1 控制参数的初始值

关节	K_P^P	K_I^P	K_D^P	K_P^V	K_I^V	K_D^V
腰关节	0.4	0.2	0.05	0.01	0.2	0.05
肩关节	0.2	0.05	0.02	0.01	0.2	0.05
腕关节	0.1	0.05	0.01	0.05	0.2	0.01

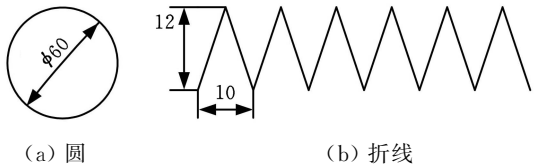
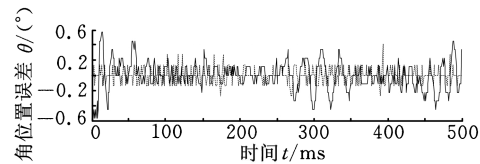
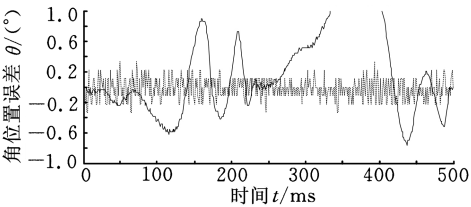


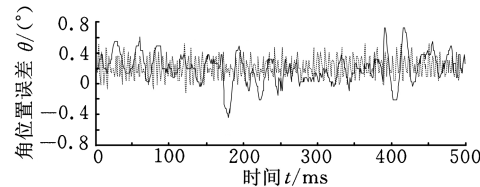
图 3 噪声因素



(a) 腰关节



(b) 肩关节



(c) 腕关节

——画圆时的角位置误差 ----画折线时的角位置误差

图 4 画圆和折线时各个关节的角位置误差

(4) 选择正交组。在全因素实验中,需要测试水平下的各种组合。而正交试验则提供了一种少量低成本的实验方法。例如用一个 $L_{27}(3^{13})$ 正交组来运行 13 个因素、3 个水平数的实验,只需要做 27 次实验。除了效率高以外,直观和易用也是正交组的优点。本文中,依据控制因素的数量,选用 $L_8(2^7)$ 正交组来进行实验。

(5) 进行实验并分析。实验的分析涉及将原

始数据转换成有意义的信噪比(η)。作为鲁棒性测试的一个工具,信噪比是进行参数优化设计的一个重要组成部分。将噪声因素作为分母,信噪比可以被看作对系统性能优劣的评价指标。在实验中如能很好地运用这个指标,就有可能找到一组控制参数,在降低机器人受所画不同图形的影响时,能使位置误差降到最小。分析时,还包括对最重要的控制参数的确认,这些控制参数对增大信噪比会起到重要的作用。本文中,望小特性下的信噪比定义如下:

$$\eta = -10 \lg \left(\frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \left(\frac{IAE_{ij}}{n} \right)^2 \right)$$

式中, IAE_{ij} 为在第 j 水准下第 i 次实验的误差绝对值的积分; n 为所有采样点的个数之和。

限于篇幅,这里只对机器人肩关节的鲁棒性参数设计进行描述。表 2 所示为在两水平下各控制参数的值,它们是在表 1 的基础上确定下来的。目前,对于表 2 中数值的选择没有普遍的准则可循,它们完全依赖于对控制系统的认识和经验。

表 2 肩关节在两水平下各控制参数的值

	符号	水平 1	水平 2
控制因素	K_P^P	0.15	0.25
	K_I^P	0.03	0.07
	K_D^P	0.01	0.03
	K_P^V	0.01	0.02
	K_I^V	0.12	0.25
	K_D^V	0.03	0.07
噪声因素	f	圆	折线

表 3 中的“1”和“2”分别表示水平 1 和水平 2,表 3 中有 1 列(“F”列)是空白,因为这里只有 6 个控制因素。

表 3 肩关节在正交组 $L_8(2^7)$ 下的实验结果

实验	K_P^P	K_I^P	K_D^P	K_P^V	K_I^V	F	K_D^V	IAE_{i1}	IAE_{i2}	η
1	1	1	1	1	1		1	383.4535	417.0045	1.9256
2	1	1	1	2	2		2	393.7650	294.1190	3.1595
3	1	2	2	1	1		2	370.9650	413.9360	2.0907
4	1	2	2	2	2		1	393.2465	397.4570	2.0396
5	2	1	2	1	2		2	358.9870	367.1150	2.7795
6	2	1	2	2	1		1	359.0030	278.2900	3.8441
7	2	2	1	1	2		1	350.7620	261.3825	4.1713
8	2	2	1	2	1		2	364.0125	281.5445	3.7310

如表 3 所示,实验做 8 次,每次做 2 个水平数,即每次实验中机器人要分别画圆和折线,因而总共做 16 次实验。对于参数 K_P^P 在不同水平数下的平均信噪比可计算如下:

水平 1 情况下

$$\eta = \frac{1.9256 + 3.1595 + 2.0907 + 2.0396}{4} = 2.3039$$

水平 2 情况下

$$\eta = \frac{2.7795 + 3.8441 + 4.1713 + 3.7310}{4} = 3.6314$$

依照上述算法, K_P^p 、 K_I^p 、 K_D^p 、 K_P^v 、 K_I^v 和 K_D^v 的平均信噪比均可计算出来, 其结果如图 5 所示。图 5 中, 将各控制参数不同水平数下的信噪比用线连起来, 比较这些连线的斜率, 就可以分析出哪些控制参数对信噪比有重要的影响。图 5 中, K_P^p 、 K_D^p 和 K_P^v 的斜率较大, 因而它们对信噪比的影响较强, 而 K_I^p 、 K_I^v 和 K_D^v 的斜率较小, 即它们对信噪比的影响较弱。在信噪比分析中, 信噪比越大越好, 从表 3 中可以看出, 第 7 次实验获得了最大信噪比, 这时各控制参数对应的最好水平分别是 K_P^p 对应水平 2, K_I^p 对应水平 2, K_D^p 对应水平 1, K_P^v 对应水平 1, K_I^v 对应水平 2, K_D^v 对应水平 1。

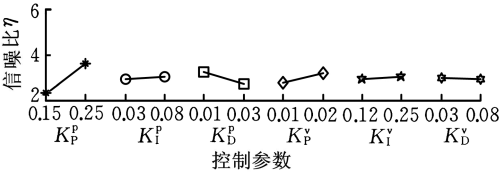


图 5 肩关节在实验阶段 1 各控制参数的平均信噪比

从图 5 可以看出, K_D^p 的水平数应该是 1, K_P^p 、 K_P^v 的水平数应为 2, 这表明提高 K_P^p 和 K_P^v 的水平数可以提高信噪比, 而降低 K_D^p 的水平数可提高信噪比。于是在实验阶段 1 的基础上, 在实验阶段 2 对控制参数的水平数进行相应调整。实验阶段 2 之后, 如果发现控制参数对信噪比依然有较强的影响, 则应该进行阶段 3 的实验。依照这种方式, 肩关节的控制参数设计在阶段 5 结束。

表 4 显示了在阶段 1 ~ 5 不同水平数下的控制参数, 其中黑体数字表明了每个阶段更为合适的水平数。图 6 显示了每个阶段的控制参量在不同水平数下的信噪比的变化情况, 在阶段 2, 信噪比对 K_P^p 的变化依然较为敏感, 而对其他控制参量已经不敏感了。所以, 只有 K_P^p 需要进一步调整, 直至所有控制变量对应信噪比均不敏感为止。

表 4 肩关节在实验阶段 1 ~ 5 的控制参数数据表

实验阶段	水平	控制参数					
		K_P^p	K_I^p	K_D^p	K_P^v	K_I^v	K_D^v
阶段 1	1	0.150	0.03	0.010	0.01	0.12	0.03
	2	0.250	0.07	0.030	0.02	0.25	0.07
阶段 2	1	0.250	0.07	0.008	0.02	0.25	0.07
	2	0.300	0.08	0.010	0.03	0.30	0.08
阶段 3	1	0.300	0.07	0.010	0.03	0.25	0.07
	2	0.350	0.08	0.020	0.04	0.30	0.08
阶段 4	1	0.300	0.07	0.010	0.03	0.25	0.07
	2	0.325	0.08	0.020	0.04	0.30	0.08
阶段 5	1	0.325	0.06	0.010	0.03	0.25	0.07
	2	0.340	0.07	0.020	0.04	0.30	0.08
最终调定值		0.340	0.06	0.020	0.03	0.30	0.08

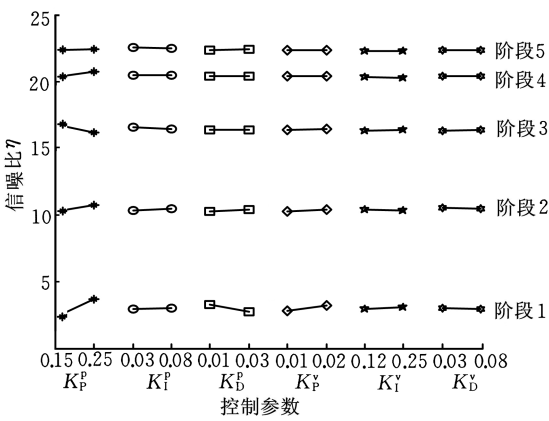
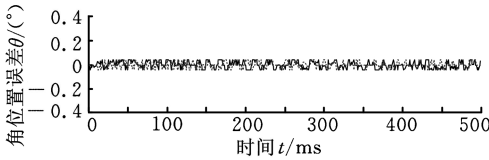


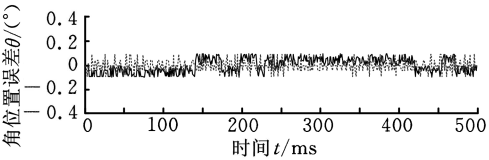
图 6 肩关节在实验阶段 1 ~ 5 各控制参数的平均信噪比

4 实验结果

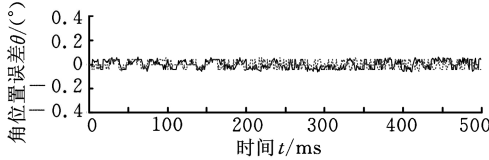
通过类似的步骤, 具有鲁棒性的腕关节和腰关节控制参数均可得到, 在获得的具有鲁棒性的控制参数控制下, 机器人绘制圆和折线的位置误差曲线如图 7 所示。与图 4 相比, 每个关节的平均位置误差分别减小了 85%、90% 和 87.5%。值得一提的是在图 4b 中, 肩关节的位置误差在这两个不同图形下的差异是很大的, 这说明采用通过手工调节获得的控制参数不具有鲁棒性, 而图 7 的各个图与图 4 对应的图相比, 不仅关节位置误差明显减少, 而且不同图形下关节位置误差值之间



(a) 腰关节



(b) 肩关节



(c) 腕关节

——画圆时的角位置误差 ----画折线时的角位置误差

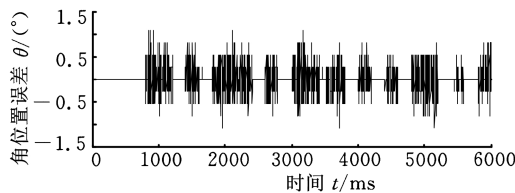
图 7 鲁棒性参数控制下机器人绘制

圆和折线时各个关节的角位置误差

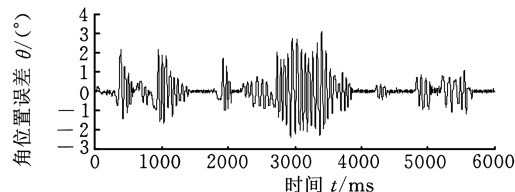
的差异很小。这说明田口参数设计法获得的控制参数具有鲁棒性, 因为在这套控制参数下, 机器人

绘制出的两种具有代表性的图形均可获得令人满意的控制效果。

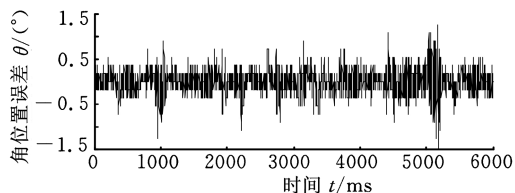
图 8 和图 9 分别对比显示了机器人在手工调试获得的控制参数和田口参数设计法获得的参数下写英文字母“NUAA”时各关节的角位置误差。



(a) 腰关节

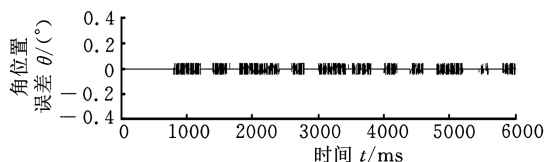


(b) 肩关节

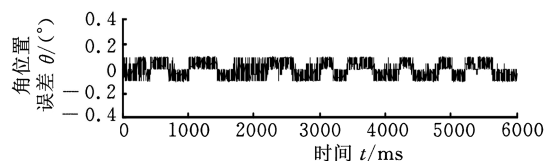


(c) 腕关节

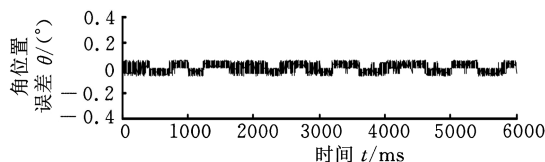
图 8 手工调试获得的
参数下各关节的角位置误差



(a) 腰关节



(b) 肩关节



(c) 腕关节

——画圆时的角位置误差 ----画折线时的角位置误差

图 9 田口参数设计法获得的
参数下各关节的角位置误差

比较这两组图,可以发现采用由田口参数设计法获得的参数进行控制,能获得很好的控制效果。

5 总结

本文以超声电机驱动的三关节机器人为研究对象,采用田口参数设计法,以机器人关节运行轨迹是否可导作为噪声因素的选择基础,以 IAE 为信号噪声比的衡量指标,设计了获得鲁棒性参数的实验方法。研究结果证明,采用该设计方法获得的参数不仅适用于机器人绘制各种不同的图形,而且各关节的位置精度也能得到大幅提高。

参考文献:

- [1] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] Maeno T. Recent Progress of Ultrasonic Motors in Japan[C]//The 1st International Workshop on Ultrasonic Motors and Actuators, Yokohama, Japan, 2005, 15-17.
- [3] Iion A, Suzuki K, Kasuga M, et al. Development of a Self-oscillating Ultrasonic Micro-motor and Its Application to a Watch[J]. Ultrasonics, 2000, 38(1): 54-59.
- [4] Lin F J, Wai R J, Huang P K. Two-axis Motion Control System Using Wavelet Neural Network for Ultrasonic Motor Drives[J]. Electric Power Applications, 2004, 151(5): 613-621.
- [5] Shen P H, Lin F J. Intelligent Backstepping Sliding-mode Control Using RBFN for Two-axis Motion Control System[J]. Electric Power Applications, 2005, 152(5): 1321-1342.
- [6] 孙志峻, 邢仁涛, 黄卫清. 超声电机驱动多关节机器人位置精确控制[J]. 应用科学学报, 2007, 25(5): 493-499.
- [7] Vlachogiannis J G, Roy R K. Robust PID Controllers by Taguchi's Method[J]. The TQM Magazine, 2005, 17(5): 456-466.
- [8] Lee Kiha, Kim Jongwon. Controller Gain Tuning of a Simultaneous Multi-axis PID Control System Using the Taguchi Method[J]. Control Engineering Practice, 2000, 8: 949-958.

(编辑 卢湘帆)

作者简介: 孙志峻, 男, 1970 年生。南京航空航天大学机电学院副教授。研究方向为机电一体化。获省部级科技进步三等奖 1 项。发表论文 20 余篇。黄卫清, 男, 1965 年生。南京航空航天大学航空宇航学院教授。