



# 基于虚拟仪器的数控插补原理实验仿真教学系统的开发

关泽飘

(广东海洋大学 机械与能源工程学院, 阳江 529500)

**摘要:** 数控插补原理是数控系统及原理与数控技术的教学重点, 也是教学难点。针对目前高校缺乏数控插补原理实验教学设备的现状, 基于 LabVIEW 虚拟仪器开发平台, 开发了数控插补原理实验仿真教学系统, 可以实现逐点比较法和数字积分法在第一象限的直线插补和圆弧插补运算, 并动态实时显示插补的轨迹及理论直线或圆弧曲线, 满足了实验教学及培训的需求。

**关键词:** 虚拟仪器; 逐点比较法; 数字积分法; 插补; 仿真

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230466

## Development of an Experimental Simulation Teaching System of NC Interpolation Principle Based on Virtual Instrument

GUAN Zepiao

(School of Machinery and Energy Engineering, Guangdong Ocean University, Yangjiang 529500, China)

**Abstract:** The principle of numerical control (NC) interpolation is the teaching focal point as well as the teaching difficult of the "NC System and Principle" and "NC Technology". For the current status of lacking experimental teaching equipment of NC interpolation principle in colleges and universities, based on the LabVIEW virtual instrument development platform, an experimental simulation teaching system of NC interpolation principle is developed. This system can achieve linear interpolation and circular interpolation computing by the point-to-point comparison method and the digital integral method in the first quadrant, and dynamically display the trajectory of the interpolation and theoretical straight line or circular arc curve in real time, which meets the needs of experimental teaching and training.

**Key words:** virtual instrument; point-to-point comparison method; digital integral method; interpolation; simulation

当前, 我国各高校机械、机电和材控等相关专业均设有数控原理及系统或数控技术等专业必修课或专业选修课。数控插补原理既是上述课程的基础, 也是教学的重点和难点, 故数控插补实验一般作为必修实验项目。已有不少高校采用计算机仿真的方法开发了数控插补原理的实验教学软件, 如文献 [1] 开发了基于 Delphi 的数控插补仿真教学软件; 文献 [2] 开发了基于可视化程序设计语言 (visual basic, VB) 的数控插补轨迹仿真教学软件; 文献 [3] 开发了极平面内任意直线插补算法的轨迹仿真软件; 文献 [4] 使用斯沃数控插补软件

用于数控技术的课程教学; 文献 [5] 开发了基于 Visual C++ 数控插补的动态控制程序。此外, 还有一些高校对数控插补算法进行优化研究或者开发了数控插补的硬件系统, 如文献 [6] 实现了基于嵌入式面向对象编程语言 C++ (embedded visual C++, EVC) 的逐点比较法的圆弧插补设计<sup>[6]</sup>; 文献 [7] 实现了基于现场可编程逻辑门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 的逐点比较法的直线插补算法设计; 文献 [8] 开发了空间直线插补三轴联动控制系统; 文献 [9] 对参数化算法和数字积分插补算法进行了比较研究; 文献 [10] 开发了基

收稿日期: 2023-10-04; 修回日期: 2023-12-10

作者简介: 关泽飘 (1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事数控技术、智能制造方面的研究。E-mail: 15815252176@163.com

于 FPGA 的数控系统圆弧插补控制模块；文献 [11] 开发了基于 ARM 的嵌入式可编程逻辑控制器 (programmable logic controller, PLC) 直线插补运动控制方法和指令；文献 [12] 提出了一种提高机械加工精度的数控插补优化算法。综上所述，数控插补既可以通过软件实现，也可以通过硬件实现，前者优点是成本低且实现比较灵活，后者优点是真实直观，但成本高。为了解决数控插补原理实验教学的需求，区别于以往的开发平台，本研究采用了 LabVIEW 虚拟仪器开发技术，对数控插补原理的实验仿真教学系统进行开发。

### 1 数控插补原理概述

数控插补算法主要有逐点比较法、数字积分法、数据采样法等。掌握逐点比较法、数字积分法的插补原理对学习其他数控插补原理具有重要的参考价值。掌握逐点比较法、数字积分法在第一象限的插补原理则是掌握上述两种方法在其他象限进行数控插补的重要基础。

#### 1.1 逐点比较法

逐点比较法采用代数迭代的方法，刀具每走一步都要将加工点的瞬时坐标与理论轨迹作比较，对偏差进行判断，再走下一步。若加工点走到图形的外面，则下一步就要向图形里面走，若加工点走到图形的里面，则下一步要向图形的外面走，以缩小偏差。周而复始，直至插补结束。逐点比较法插补过程每进给一步都要经过 4 个节拍，依次是偏差判别、坐标进给、新偏差计算、终点判别<sup>[13]</sup>。这种插补方法运算直观、输出脉冲均匀、调节方便。

#### 1.2 数字积分法

数字积分法是用数字积分的方法计算刀具沿

坐标轴的移动量，从而使刀具沿着给定的曲线运动。实现数字积分插补运算的装置称为数字积分器或数字微分器<sup>[13]</sup>。数字积分法具有运算速度快、脉冲分配均匀、容易实现空间直线插补的优点；缺点是不便于速度调节，插补精度需要采取一定措施才能满足。

## 2 系统设计及实现

### 2.1 系统功能

本仿真教学系统的作用是要满足实验教学的需求，其主要功能包括以下 7 点：

- 1) 插补类型既可以选择逐点比较法，也可以选择数字积分法；
- 2) 以第一象限为例，既可以选择直线插补，也可以选择圆弧插补；
- 3) 可以动态实时显示插补的运算过程、插补轨迹及理论直线或圆弧曲线，且在同一个图中可以对插补轨迹与理论图形进行比较；
- 4) 可以根据需求对图形坐标系的坐标进行缩放，比较不同坐标系行程的轨迹；
- 5) 可以分别采用逐点比较法和数字积分法对同一个给定的理论图形进行插补，以比较两种插补方法插补轨迹的异同；
- 6) 可以实现单步执行或连续执行插补；
- 7) 系统易于后续进行功能扩展和升级。

### 2.2 系统设计

由于不同的象限进行插补的偏差计算和坐标进给方向不同，因此需要区分不同象限的插补。本系统设计以第一象限的插补原理为例，其他象限的插补设计及实现可以在后续开发中以第一象限的插补设计和实现为例进行适当修改即可完成。本系统设计框图如图 1 所示。

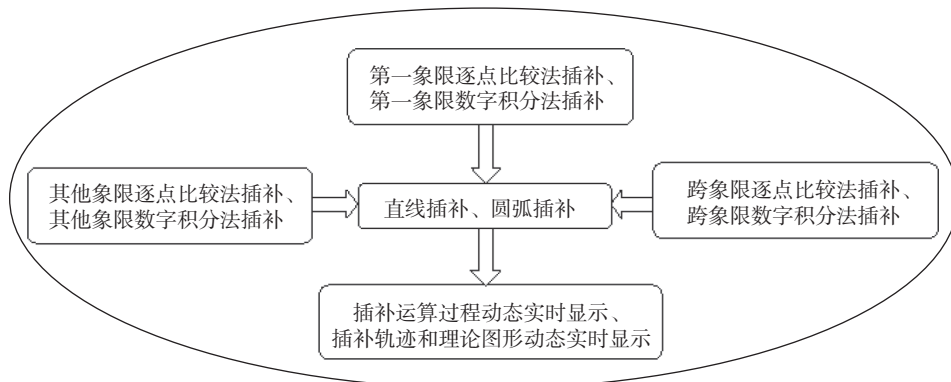


图 1 数控插补原理仿真教学系统设计框图

本系统的设计采用虚拟仪器开发平台 LabVIEW 实现。LabVIEW 是一种真正意义上的图形化编程语言，编程简单、形象生动、易于理解和掌握<sup>[14]</sup>。系统设计分为前面板设计和程序设计，前面板用于计算机与用户进行交互，程序用于实现系统的功能。下面以第一象限逐点比较法逆圆弧插补的设计为例进行介绍。

在前面板界面中，设计了数值输入控件和系统输出控件，其中数值输入控件用于用户输入逆圆弧插补的起点和终点坐标，系统输出控件包括表格控件和 Express XY 图控件，表格控件用于动态实时显示逆圆弧插补过程中的“脉冲个数”“偏差判别”“坐标进给方向”“偏差计算”“坐标修正”“终点判别”数据，Express XY 图控件用于同步动态实时显示插补的轨迹。

程序设计的难点主要有两点：一是如何同步且分别在表格控件动态实时显示插补运算过程和 Express XY 图上动态实时显示插补轨迹；二是如何在 Express XY 图上显示完插补轨迹后再接着动态实时显示理论圆弧曲线。这是因为 Express XY 图虽然具有优异的动态描点功能，但不具有直接生成理论圆弧曲线的功能，因此需要编程解决如何显示出理论圆弧曲线的问题。

为了实现同步性，程序控制使用了 While 循环结构，每插补进给一个点，就同时在表格控件输出该插补点的运算数据和在 Express XY 图上输出显示该插补点的轨迹。为了实现插补运算数据和轨迹点显示的动态性，插补点之间设计了合适

的延时，该程序设计时采用层叠式顺序结构在每相邻两个插补点之间设计了 2 s 的延时，延时时间可以根据需要设置，同时使用了字符串连接、数组创建和数组插入等操作。

为了解决在 Express XY 图上动态实时显示理论圆弧曲线问题，采用了如下思路。用反正弦函数计算插补起点和终点的弧度，并把弧度转化为角度，设起点的角度为  $A^\circ$ 、终点的角度为  $B^\circ$ ，由此计算出终点与起点的角度差为  $B^\circ - A^\circ = N^\circ$ 。由于圆弧由其上的点构成，这时可以通过正弦函数和算出来的角度范围  $A^\circ \sim B^\circ$ ，将该圆弧上的所有点的坐标计算出来，并动态实时显示在 Express XY 图上。程序设计时采用 While 循环结构进行控制，如果以单位  $1^\circ$  为相邻两点的角度间隔，从  $A^\circ \sim B^\circ$  共有  $N+1$  个点，把  $N+1$  作为 While 循环结构控制结束的条件。由于点数少，输出显示的理论圆弧曲线点看起来是断续的，视觉效果比较差，为了解决这个问题，可对圆弧上的点作密化处理，如可取  $0.1^\circ$  为相邻两点的角度间隔，这时从  $A^\circ \sim B^\circ$  共有  $10N+1$  个点，点数增加 9 倍，输出显示的理论圆弧曲线点看起来是连续的，视觉效果很好。理论圆弧曲线点密化处理前后的视觉效果如图 2 所示。

第一象限逐点比较法直线插补、第一象限数字积分法直线插补及第一象限数字积分法逆圆弧插补的界面设计和程序实现的思路与上述第一象限逐点比较法逆圆弧插补的界面设计和程序实现的思路大同小异，不再赘述。

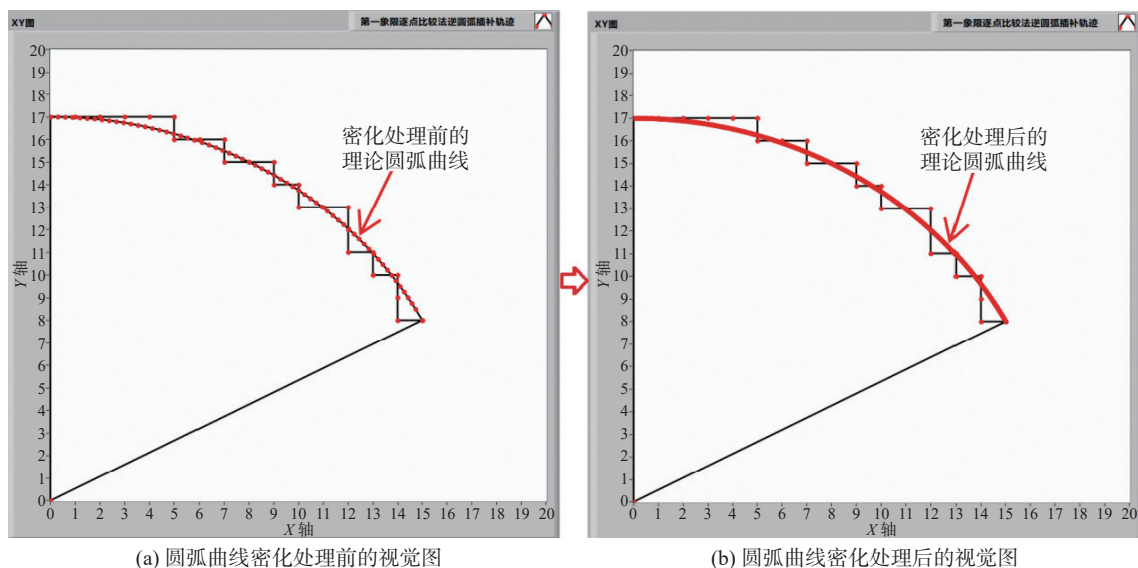


图 2 理论圆弧曲线点密化处理前后的视图

### 2.3 仿真验证

#### 2.3.1 直线插补仿真验证

例 1: 第一象限直线 OA, 起点为坐标原点, 终点横坐标 $x_a=9$  mm, 终点纵坐标 $y_a=7$  mm, 分别采用逐点比较法和数字积分法进行插补计算, 并画出插补轨迹图。

在仿真系统中分别选择第一象限逐点比较法直线插补界面和第一象限数字积分法直线插补界面, 输入终点坐标、寄存器位数等数据, 运行仿真系统, 得到逐点比较法直线插补及数字积分法直线插补的运算数据和轨迹分别如图 3 和图 4 所

示, 可以动态实时显示两种插补方法的运算过程和插补轨迹。图中的红色圆点为每次进给插补时的点, 图中的折线为插补的轨迹, 图中的直线为理论直线, 这样在同一个图中, 可以直观地比较插补轨迹与理论图形的区别。此外, 通过比较图 3 与图 4, 也可以比较两种插补方法的插补轨迹的区别, 即当逐点比较法在每一步沿着 X 轴或者 Y 轴单独进给时, 不能走出斜线(当控制两轴进给时也可走出斜线), 而数字积分法在每一步插补进给时, 既可以沿着 X 轴或者 Y 轴单独进给, 也可以同时沿着两轴联动进给, 它的轨迹能走出斜线。

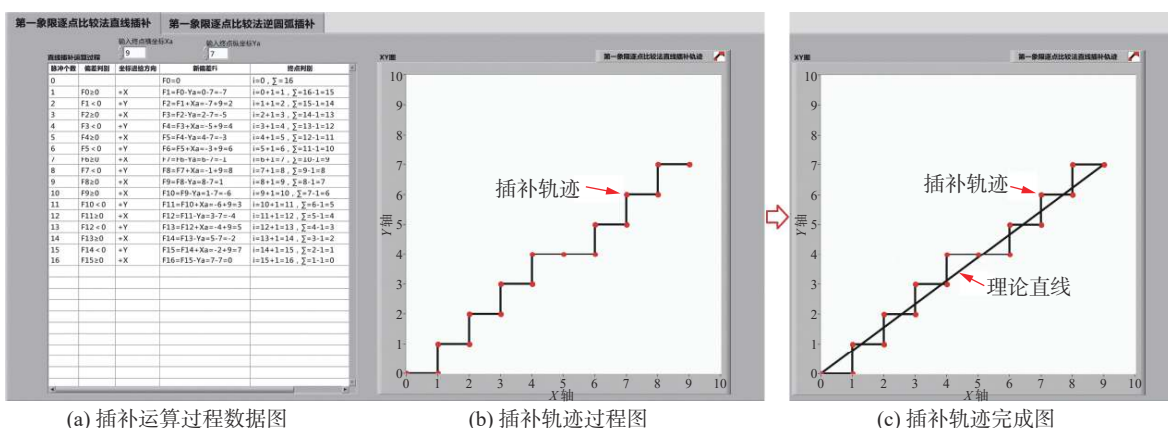


图 3 第一象限逐点比较法直线插补运算数据和轨迹图

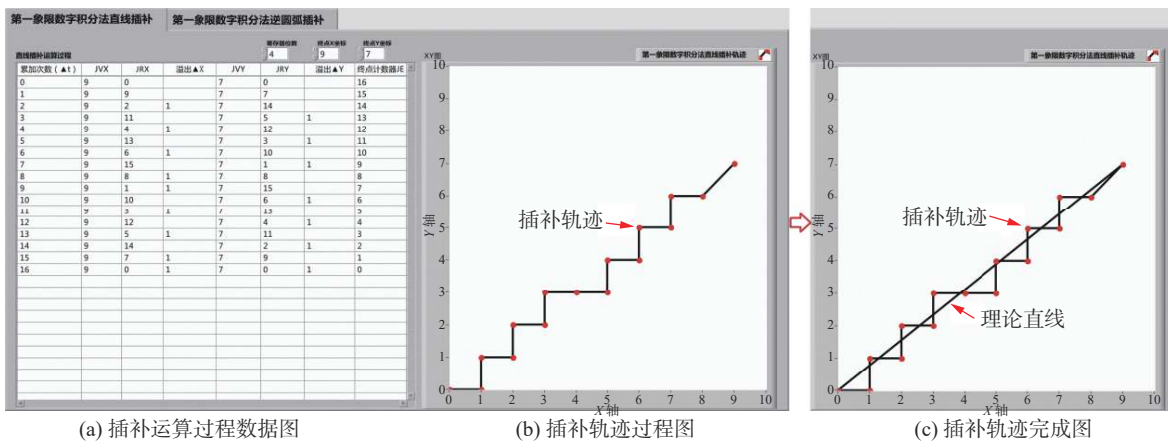


图 4 第一象限数字积分法直线插补运算数据和轨迹图

#### 2.3.2 逆圆弧插补仿真验证

例 2: 设将要加工的零件轮廓为第一象限逆圆弧 SE, 圆心在坐标原点, 起点为 S(12, 5), 终点为 E(0, 13), 分别采用逐点比较法和数字积分法进行插补计算, 并画出插补轨迹图。

在仿真系统中分别选择第一象限逐点比较法逆圆弧插补界面和第一象限数字积分法逆圆弧插

补界面, 输入起点坐标、终点坐标、寄存器位数等数据, 运行仿真系统, 得到逐点比较法逆圆弧插补及数字积分法逆圆弧插补的运算数据和轨迹分别如图 5 和图 6 所示, 可以动态实时显示两种插补方法的运算过程和插补轨迹。图中的红色圆点为每次插补进给时的点, 图中的折线为插补的轨迹, 图中的圆弧为理论圆弧曲线, 这样在同一

个图中，可以直观地比较插补轨迹与理论图形的区别。对比图 5 与图 6 可以发现，除了插补运算数据不同外，插补轨迹也有非常明显的差异。在该例中，采用逐点比较法的插补轨迹点在理论圆弧曲线的内外侧分布比较均匀，而采用数字积分法的插补轨迹点几乎分布在理论圆弧曲线的外

侧，插补的精度也相对较低。应当指出的是，虽然两个图中显示完成插补的次数相同，但是并不代表采用其他例子进行插补时也是如此。上述分析都是针对该例进行的，并不适用其他例子，每个例子采用两种方法进行插补的特点比较都应当结合例子本身进行具体分析。

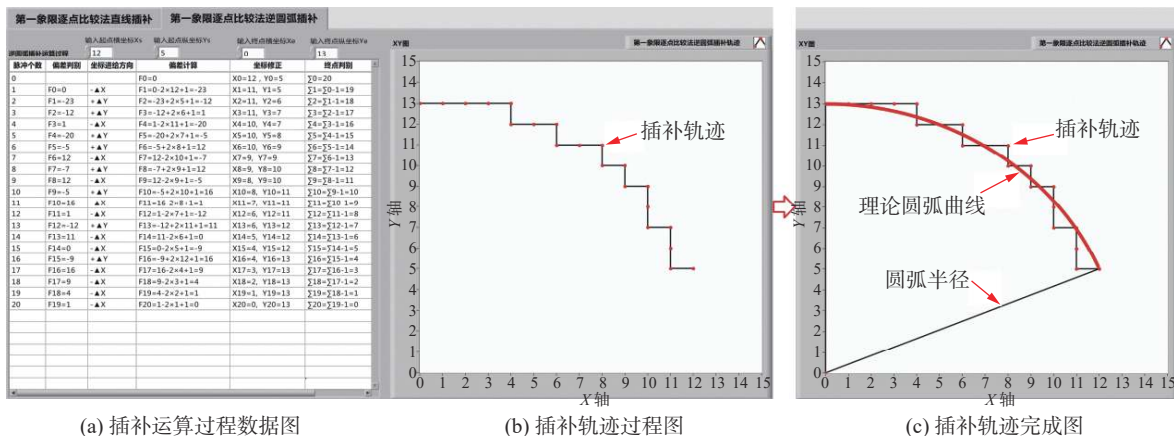


图 5 第一象限逐点比较法逆圆弧插补运算数据和轨迹图

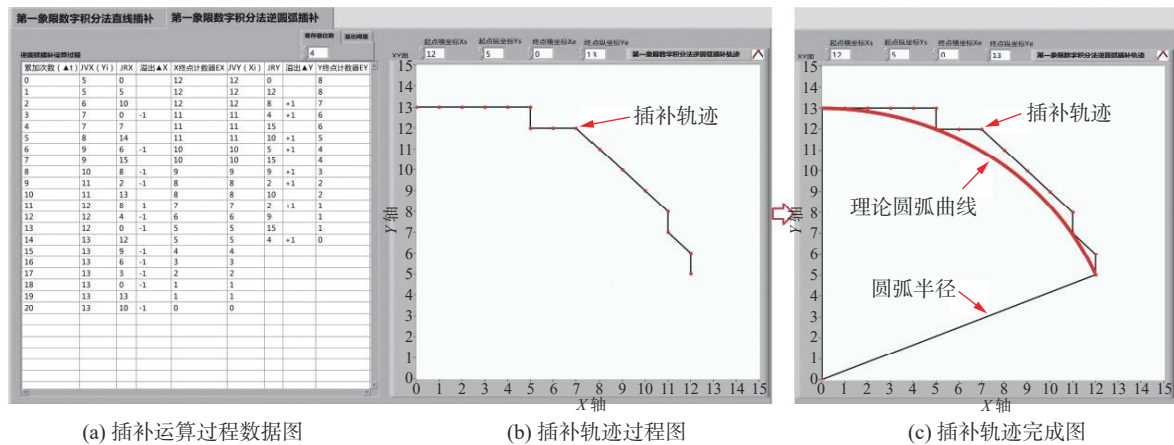


图 6 第一象限数字积分法逆圆弧插补运算数据和轨迹图

### 2.4 后续研究

本研究基于虚拟仪器开发平台 LabVIEW，实现了逐点比较法和数字积分法在第一象限的直线插补及逆圆弧插补，且通过实例进行了仿真验证，效果良好，证明了开发设计方法的正确性。对于上述两种插补方法在其他象限及跨象限的直线插补和圆弧插补的开发设计，同样可以参考第一象限的系统设计方法进行后续的开发。此外，该系统后续也可以通过与运动控制模块的结合开发以实现控制硬件插补的功能。

### 3 结束语

本研究采用虚拟仪器开发技术，开发的数控插补原理仿真教学系统界面简洁、友好、可视性强，可满足高校数控插补原理实验辅助教学的需求，增强了教学的交互性、实践性和趣味性，提高了学生或者接受培训人员的学习积极性，让学习者更加直观地理解枯燥的理论，取得了良好的教学效果。

### 参考文献

[1] 司马中文, 赵玉刚, 张海云. 基于 Delphi 的数控插补仿

- 真教学软件开发[J]. *机床与液压*, 2013, 41(14): 21-23.
- [2] 王兴, 吴明明, 张芹, 等. 基于 VB 的数控插补轨迹仿真教学软件设计[J]. *时代农机*, 2016, 43(11): 54-56.
- [3] 来旭辉, 许燕, 周建平. 极平面内任意直线插补算法的研究与轨迹仿真[J]. *机床与液压*, 2018, 46(2): 1-5.
- [4] 张佳丽, 高鹏, 刘海平, 等. 数控插补仿真软件在《数控技术》课程中的应用研究[J]. *中国设备工程*, 2021(22): 225-226.
- [5] 李冬冬, 吴黎明. 基于 Visual C++ 数控插补的动态控制分析与实现[J]. *计算机时代*, 2010(2): 49-50.
- [6] 陈涛. 基于 EVC 的逐点比较法圆弧插补实现[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2010(6): 82-84.
- [7] 周德芳, 管旗. 基于 FPGA 的逐点比较法直线插补算法设计与实现[J]. *化工自动化及仪表*, 2018, 45(10): 802-805.
- [8] 周佳明, 张宏. 空间直线插补三轴联动控制系统的设计[J]. *宜宾学院学报*, 2022, 22(6): 46-53.
- [9] 刘进闯, 张融, 洪宇, 等. 参数化插补算法与数字积分插补算法的比较研究[J]. *机床与液压*, 2019, 47(19): 62-66.
- [10] 沈孟锋, 羊荣金, 陈敏捷, 等. 基于 FPGA 的数控系统圆弧插补控制模块化设计[J]. *机床与液压*, 2021, 49(8): 88-92.
- [11] 刘青林, 王庭有. 基于 ARM 的嵌入式 PLC 直线插补运动控制方法及指令实现[J]. *化工自动化及仪表*, 2023, 50(1): 95-98.
- [12] LEE C Y, HWANG S H, MIN B K. Simulation-based optimization of CNC interpolator parameters for machining accuracy improvement[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119(5): 3757-3770.
- [13] 吴晓苏. 数控原理与系统[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [14] 胡乾苗. LabVIEW 虚拟仪器设计与应用[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2019.

编辑 王燕

## (上接第 50 页)

- [3] 杨学博. 激光雷达波形模拟模型与量化研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院空天信息创新研究院), 2022.
- [4] KURTTI S, KOSTAMOVAARA J. Laser radar receiver channel with timing detector based on front end unipolar-to-bipolar pulse shaping[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2009, 44(3): 835-847.
- [5] PEREZ S, GARCIA E, LAMELA H. AMCW laser rangefinder for machine vision using two modulation frequencies for wide measurement range and high resolution[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1999, 3626.
- [6] ZHENG R T, WU G H. Constant fraction discriminator in pulsed time-of-flight laser ranging[J]. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2012, 5(2): 5.
- [7] FENG Z H, LIU E H. High-accuracy TDC for laser range finder[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(12): 2665-2671.
- [8] KOSTAMOVAARA J, NISSINEN J, KURTTI S, et al. On the minimization of timing walk in industrial pulsed time-of-flight laser radars[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2009, 7356(4): 2838-2847.
- [9] 李杰, 赵毅强, 叶茂, 等. 机载激光测深雷达中大动态范围信号的多通道处理技术(英文)[J]. *光子学报*, 2018, 47(3): 126-132.
- [10] JIANG Y J, LIU R Q, ZHU J G. Integrated multi-channel receiver for a pulsed time-of-flight laser radar[C]//International Society for Optics and Photonics. [S.l.]: IEEE press, 2015.
- [11] ZHANG H, CHEN B L, YUAN P. Research on minitype high peak and narrow width pulsed driver circuit of LD[C]//The 2004 47th Midwest Symposium on Circuits and Systems. Hiroshima: IEEE press, 2004.
- [12] WANG Q, SOHN H, CHENG J. Development of a mixed pixel filter for improved dimension estimation using AMCW laser scanner[J]. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2016, 119: 246-258.
- [13] STEINVALL O, CARLSSON T. Range accuracy and resolution for laser radars[C]//Society of Photo-Optical Instrumentation. [S.l.]: [s.n.], 2005.
- [14] LODHA S K, FITZPATRICK D M, HELMBOLD D P. Aerial lidar data classification using expectation-maximization[C]//Conference on Vision Geometry XV. CA, USA: [s.n.], 2007.
- [15] LAI J C, WANG C Y, WEI Y, et al. Research on the ranging statistical distribution of laser radar with a constant fraction discriminator[J]. *IET Optoelectronics*, 2018, 12(2): 114-117.
- [16] 吴佩璇. 微波与激光雷达联合目标检测及关联分析[D]. 长沙: 国防科技大学, 2022.

编辑 张俊