

# 用户自定义建模离线编程与仿真平台设计

戴 雷, 闵华松

(武汉科技大学 冶金自动化与检测技术教育部工程研究中心, 武汉 430065)

**摘要:** 目前存在的离线编程与仿真系统仍运行于单一系统或平台下, 所能加载的机器人类型限于某一种或某一公司的某种型号; 基于此提出了一个基于 Qt 框架的离线仿真和编程系统, 通过设计规划了图形库系统并定义了相应的装配文本格式, 实现了当前广泛使用的 6 旋转自由度工业机器人的用户自定义加载, 还分别对六自由度工业机器人运动学进行了分析, 并介绍了系统的总体结构, 还描述了指令编译系统; 最终以六自由度弧焊机器人 UPR100 为例, 仿真结果证明系统较好地满足了具备柔性化建模的六旋转自由度工业机器人离线编程及仿真平台的要求。

**关键词:** 自定义建模; 运动学; 离线仿真; 工业机器人

## User-defined Modeling of Industrial Robots Simulation Platform Design and Research

Dai Lei, Min Huasong

(Engineering Research Center for Metallurgical Automation and Detecting Technology of Wuhan University of Science and Technology, Ministry of Education, Wuhan 430065, China)

**Abstract:** Nowadays, the existing type of Off-line programming and simulation system is still operating in a single system or platform, the robot type they can load is limited to one or a certain type of a company. Based on this, our paper presents simulation and offline programming system based on Qt framework, graphics library system being planned and corresponding assembly text format being defined, has realized the current widespread use of rotational degree of freedom 6 user-defined load of industrial robots. Kinematics of six degrees of freedom industrial robot are analyzed and presented the overall structure of the system, but also describes the command system which compile robot command. The final simulation results of UPR100 arc welding robot prove that system better meet the general industrial robot off-line programming and simulation platform with flexible modeling.

**Keywords:** user-defined modeling; kinematics; off-line programming; industrial robots

## 0 引言

制造业中小企业面临生产成本的不断提高及优秀员工的短缺, 在生产中使用离线编程是一个不错的解决方案, 但同时商品化的离线编程系统价格一般比较昂贵, 难以在中小企业应用; 机器人公司开发的离线编程与仿真系统具有量身定制的特点, 只限所产机器人模型, 编程语言也是所产机器人的编程语言, 通用性、开放性较差且同样难于应用到嵌入式系统中; 各高校和科研院所开发的离线编程系统与目前大多数该系统一样是建立在单一的系统平台(如 Windows 或者 Linux)上, 且仅仅完成一种机器人的离线编程与仿真, 缺少通用性和柔性加载功能。

基于此, 本文设计并实现了集离线编程与仿真功能于一体, 支持依据三维模型库实现用户自定义机器人三维模型装配的离线编程与仿真系统。系统具有开放体系结构、易扩充、易维护、具有良好人机交互界面和跨平台特性等特点。结果验证了系统的有效性, 较好地满足了中小企业的生产要求。

## 1 运动学

机器人运动学直接关系到系统最终运行的效果, 因此本文先给出运动学的解决。

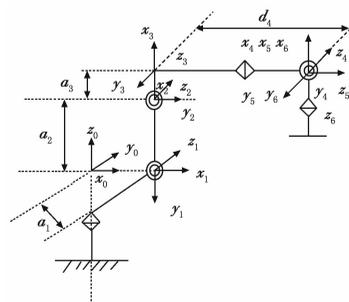


图1 UPR100 机器人坐标系分布及参数

UPR100 六自由度弧焊工业机器人有 6 个旋转副, 表 1 为 UPR100 弧焊机器人 D-H 参数表。图 1 为 UPR100 弧焊机器人简图及坐标系分布。

表 1 UPR100 弧焊机器人 D-H 参数

Axis	$d/mm$	$a/mm$		range
1	0	100		-170~170
2	0	650	0	-140~80
3	0	186		-90~150
4	650	0		-360~360
5	0	0		-110~110
6	0	0	0	-360~360

收稿日期: 2014-11-19; 修回日期: 2015-01-09。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61175094)。

作者简介: 戴雷 (1989-), 男, 湖北孝感人, 硕士研究生, 主要从事嵌入式系统及其应用方向的研究。

闵华松 (1969-), 男, 湖北孝感人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事嵌入式系统与智能机器人方向的研究。

1.1 正运动学

由坐标变换原理

$$T_i^{i+1} = Rot(Z, \theta_i) Trans(Z, d_i) Trans(X, a_i) Rot(X, \varphi_i)$$

可知:

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos \varphi_i & \sin\theta_i \sin \varphi_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos \varphi_i & -\cos\theta_i \sin \varphi_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin \varphi_i & \cos \varphi_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由上可知, 工具坐标系与基坐标系之间转换矩阵为

$$T_0^6 = T_0^1 T_1^2 T_2^3 T_3^4 T_4^5 T_5^6 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中,

$$\begin{aligned} r_{11} &= C_1(C_{23}C_4C_5C_6 + S_{23}S_5C_6 - C_{23}S_4S_6) - S_1(S_4C_5C_6 + C_4S_6) \\ r_{21} &= S_1(C_{23}C_4C_5C_6 + S_{23}S_5C_6 - C_{23}S_4S_6) + C_1(S_4C_5C_6 + C_4S_6) \\ r_{31} &= -S_{23}C_4C_5C_6 + C_{23}S_5C_6 + S_{23}S_4S_6 \\ r_{12} &= -C_1(S_{23}S_5S_6 + C_{23}C_4C_5S_6 + C_{23}S_4C_6) + S_1(S_4C_5S_6 - C_4C_6) \\ r_{22} &= -S_1(S_{23}S_5S_6 + C_{23}C_4C_5S_6 + C_{23}S_4C_6) - C_1(S_4C_5S_6 - C_4C_6) \\ r_{32} &= (S_{23}C_4C_5S_6 - C_{23}S_5S_6 + S_{23}S_4C_6) \\ r_{13} &= C_1(S_{23}C_5 - C_{23}C_4S_5) + S_1S_4S_5 \\ r_{23} &= -S_1(S_{23}C_4S_5 - S_{23}C_5) - C_1S_4S_5 \\ r_{33} &= S_{23}C_4S_5 + C_{23}C_5 \\ p_x &= C_1(a_3C_{23} + a_2C_2 + a_1 + d_4S_{23}) \\ p_y &= S_1(a_3C_{23} + a_2C_2 + a_1 + d_4S_{23}) \\ p_z &= d_4C_{23} - a_3S_{23} - a_2S_2 \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned} C_i &= \cos\theta_i & S_i &= \sin\theta_i \\ C_{23} &= \cos(\theta_2 + \theta_3) & S_{23} &= \sin(\theta_2 + \theta_3) \end{aligned}$$

1.2 逆运动学

由  $(T_0^1)^{-1} T_0^6 = T_1^6$ , 可以解得  $\theta_1, \theta_5$ ;

由  $(T_0^3)^{-1} T_0^6 = T_3^6$ , 可以解得  $\theta_2, \theta_4$ ;

由  $(T_0^4)^{-1} T_0^6 = T_4^6$ , 可以解得  $\theta_5$ ;

由  $(T_0^5)^{-1} T_0^6 = T_5^6$ , 可以解得  $\theta_6$ ;

最终解得,

$$\theta_1 = \text{Atan2}(p_y, p_x) - \text{Atan2}(0, \pm 1)$$

$$\theta_3 = \text{Atan2}(K, \pm \sqrt{a_3^2 + d_4^2 - K^2}) - \text{Atan2}(a_3, d_4)$$

$$\theta_{23} = \theta_2 + \theta_3 = \text{Atan2}(M, N)$$

其中,

$$K = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - 2a_1(p_xC_1 + p_yS_1) - d_4^2 - a_3^2 - a_2^2 + a_1^2}{2a_2}$$

$$M = -(a_2C_3 + a_3)p_z + (a_2S_3 + d_4)(C_1p_x + S_1p_y - a_1)$$

$$N = (a_2S_3 + d_4)p_z + (a_2C_3 + a_3)(C_1p_x + S_1p_y - a_1)$$

由  $\theta_2 = \theta_{23} - \theta_3$ , 由于  $\theta_1$  与  $\theta_3$  都有两个解, 因此  $\theta_2$  的值有 4 种情况。

关于  $\theta_4$ , 考虑奇异解分两种情况:

①当  $S_5 \neq 0$ , 则  $\theta_4 = \text{Atan2}[(S_1r_{13} - C_1r_{23}), -(C_1C_{23}r_{13} + S_1C_{23}r_{23} - S_{23}r_{33})]$

②当  $S_5 = 0$ , 关节 4 和关节 6 重合, 此时, 机器人处于奇异形位, 只能解出  $\theta_4$  与  $\theta_6$  的和或差, 是否为奇异形位可由式中  $\text{Atan2}$  的两个参数是否都接近零来判断, 都接近零则为奇异形位, 否则不是。处于奇异形位时一般采用前一时刻的  $\theta_4$

作为当前  $\theta_4$  的解。

$$\theta_5 = \text{Atan2}(P, Q) \quad \theta_6 = \text{Atan2}(S_6, C_6)$$

其中,

$$P = -(C_4C_1C_{23} - S_4S_1)r_{13} - (C_4S_1C_{23} + S_4C_1)$$

$$r_{23} + C_4S_{23}r_{33} \quad Q = C_1S_{23}$$

$$r_{13} + S_1S_{23}r_{23} + C_{23}r_{33}$$

$$C_6 = [C_5(C_1C_4C_{23} - S_1S_4) + C_1S_{23}S_5]r_{11} + [C_5(C_4S_1C_{23} + S_4C_1) + S_1S_5S_{23}]r_{21} + [S_5C_{23} - C_4C_5S_{23}]r_{31}$$

$$S_6 = [-C_1S_4C_{23} - S_1C_4]r_{11} + [C_1C_4 - S_1S_4C_{23}]r_{21} + S_{23}S_4r_{31}$$

2 系统设计

用户自定义 6R 工业机器人加载工业机器人离线编程与仿真系统分为三维建模, 动画仿真, 机器人程序编写, 后置处理 4 个主要部分, 并提供了 CAD 文件图形接口和通信接口。

图形接口提供当前比较流行的 3ds 格式文件读取, 并留有其他 CAD 文件格式的扩展接口, 以便将来可以读取更多的 CAD 文件格式, 并定义了机器人装配文件格式。CAD 库存各种机器人部件, 可以增加及删除其中的元素, 通过图形库用户可以选择不同的部件以实现不同的装配结果图。

动画仿真模块则提供了三维图形的绘制及仿真显示控制, 用户可以通过外设完成机器人及环境姿态控制, 视角控制, 并决定是否执行碰撞检测、是否显示运动轨迹等功能, 动画仿真模块拥有几个子模块, 依据外模块输入可以经由显示控制模块控制仿真显示模块的显示方式或结果, 本模块还可以与指令模块交互, 也可以对建模块的图形文件进行设置。动画显示效果原理就是计算好每个关机应转动多少度之后通过一个计时器, 每隔一定的时间 (例如 0.1 s) 产生中断, 直到完成一段运动。

指令模块具有文件管理功能, 可以新建或者加载机器人程序, 并最终编译为机器人可执行的或者直接利用的数据, 通过动画仿真模块的反馈验证程序是否可行性, 如若不符合加工要求则提示修改程序。后置处理模块则主要是代码优化及目标代码生成, 包括去除注释符或者无效字符, 生成控制器可以识别的代码。通信接口是通过串口或网线将经过后置处理的文本流传送到实体控制柜中, 供实体机械臂使用, 指令模块就是基于 ANTLR 实现的机器人语言词法分析, 语法分析, 语义分析, 最后经过编译生成轨迹点列表, 以供动画仿真模块使用, 并且接受来自动画仿真模块的错误判断模块提示, 对不符合要求的程序进行修改, 直到符合加工要求。对于符合要求的程序代码则可以经过后置处理生成可下载到实体控制柜使用的代码。图 2 给出了系统的详细流程。

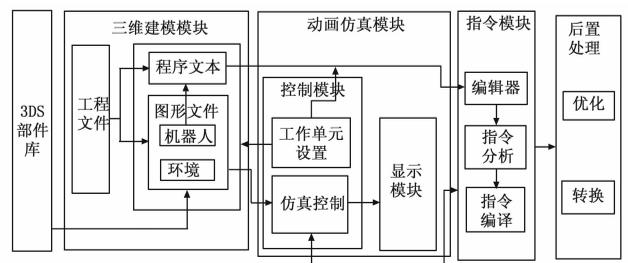


图 2 机器人离线编程系统框图

### 3 文件系统与指令解析

#### 3.1 图形库的设计

为了实现工业机器人三维模型的用户自定义的装配，系统需要建立与维护一个三维模型库，由于当前 OpenGL 建模能力较弱，模型库中元素均采用来自各种 CAD 软件设计的三维图形文件，如本系统所采用的 3DS 格式文件。对于图形库的设计，我们规划了其组织结构、元素规则与接口设计。

1) 组织结构。对于图形库的设计，必须规划其规则与接口，本系统中图形库采取分类的方式进行维护，分为底座类、腰部类、大臂类、连接法兰类、小臂类、六轴类以及工具类以更方便的实现图形库的增、删、改、查等功能。

2) 元素规则。对于图形库中的元素，我们采用文本的方式加以定义，任意元素均由三维模型文件+参数构成，这样通过图形库接口，系统三维建模模块就可以很方便的实现机器人本体三维模型并在动画仿真模块中加以显示。其中三维图形文件为 3DS 格式，3DS 文件是基于块 (chunk) 存储的，一个块的开始是 2 个字节的 ID，4 个字节的块长度信息，然后是块的主要数据。

3) 接口设计。图形接口主要由几个 API 组成，供建模模块调用，以使用和维护图形库。包括元素查找，元素增加，元素删除，元素设置，元素调用等等。

#### 3.2 工程文件系统的设计

同样为了实现三维模型的用户自定义加载，整个系统也采用文本方式实现用户自定义加载。为了读取和分析的方便，均采用文本方式保存，因此本文为系统分别定义了工程文件文本格式 (.cell)、机器人模型文件文本格式 (.rob)、环境模型文件文本格式 (.env)。通过对应单元设置对话框可修改对应文件参数，一旦设置并保存，动画仿真模块予以更新，显示最终效果，从而达到用户可自定义装配机器人，极大地提高了系统的柔性。

#### 3.3 指令解析

指令模块就是基于 ANTLR (ANother Tool for Language Recognition) 实现的机器人语言词法分析，语法分析，语义分析，最后经过编译生成轨迹点列表，以供动画仿真模块使用，并且接受来自动画仿真模块的错误判断模块提示，对不符合要求的程序进行修改，直到符合加工要求。对于符合要求的程序代码则可以经过后置处理生成可下载到实体控制柜使用的代码。从图 3 可以直观的看到指令模式的执行方式。

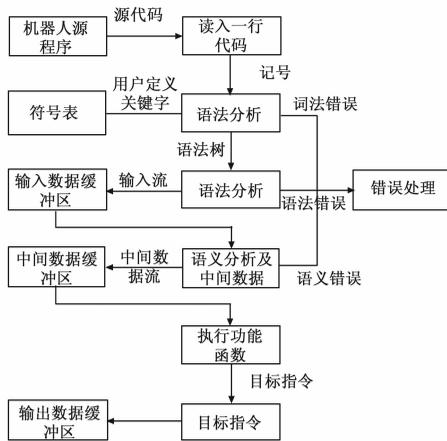


图 3 指令模块流程原理图

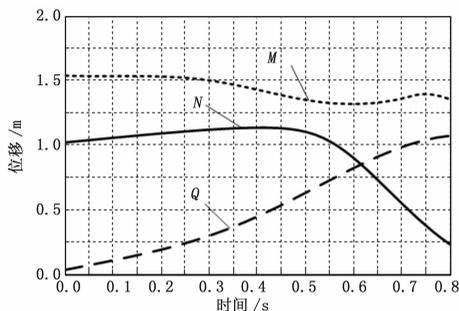


图 4 末端位移-时间变化曲线

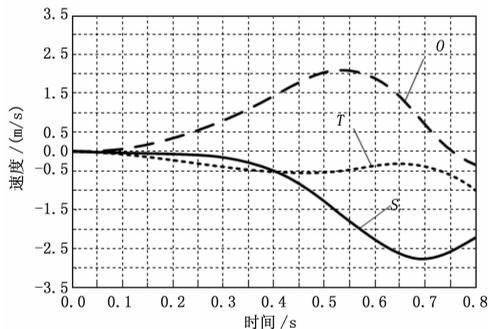


图 5 末端速度-时间变化曲线

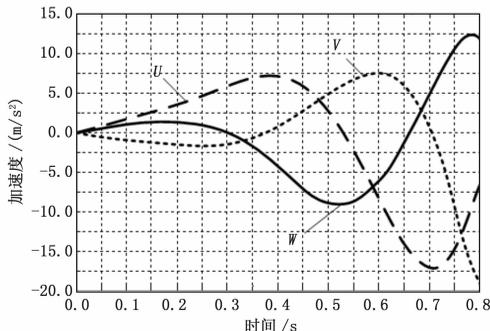


图 6 末端加速度-时间变化曲线

### 4 基于 Qt 框架的实现与验证

Qt 作为三大 GUI 应用框架之一，跨平台性是基于源代码级的，具有一次编写，随处编译的优点，其特有的信号-槽机制有效避免了传统的不安全的回调技术，因此其事件定义和响应非常方便。

这里以加载 UR100 弧焊工业机器人为例，通过读入对应装配文件并予以显示，其中设定 S, L, U, R, B, T 六关节角速度分别为 140, 150, 160, 350, 350, 520 (单位:度每秒) 为例，加速时间设为 0.8 秒，最终获得末端的位移、速度及加速度分别如图 4, 图 5, 图 6 所示，末端轨迹如图 7 所示。

图 4 中 N, Q, M 分别表示 X, Y, Z 方向上的位移。图 5 中曲线 S, T, O 分别表示机械臂在 X, Y, Z 3 个方向上的速度，图 6 曲线 W, U, V 则分别表示机械臂末端在 X, Y, Z

方向上的加速度。从图 4, 图 5, 图 6 中，三条曲线的取值均在合理范围内，曲线取值均符合机械臂技术指标，且机械臂的运动在各个方向上均平滑变化，没有发生突变现象，因此我们得出结论，仿真系统是符合加工要求的，即仿真结果是满足实

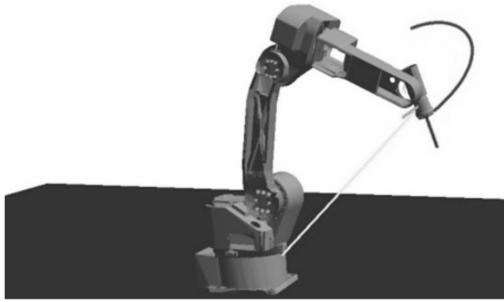


图 7 机器人末端轨迹

际工作需要的。

## 5 结论

本文通过深入研究工业机器人离线编程与仿真系统的基础上, 在 Qt 与 OpenGL 平台上设计并实现了用户自定义装配机器人离线编程与仿真系统。所提出的软件系统具有可视化的友好操作界面, 实现更具通用化的离线编程与仿真系统, 同时该系统相对传统仿真环境具有良好的跨平台特性, 支持在 PC, 手持嵌入式设备上运行。最终的测试也验证了该系统的正确性与实用性, 极大的方便了中小企业对多种机器人的离线仿真需求, 具有很大的应用潜力。

### 参考文献:

- [1] Yir K C, Haslina A, Sundararajan E. Offline Programming to Control Robot Manipulator in Virtual Kinematic Learning Tool [J]. Advanced Materials Research, 2014, 845: 740-744.

(上接第 2520 页)

码并填充后形成 UDP 负载数据, 读取源端口号、目的端口号, 计算 UDP 数据长度后, 添加 UDP 报头形成完整 UDP 数据; 根据 ARINC664 规范和表 2 中的源 IP 地址和目的 IP 地址, 形成完整 IP 报头; 根据 ARINC664 规范中 MAC 地址定义和发送通道的选择, 形成完整以太网帧头, 从而形成完整的 AFDX 数据帧并发送, 完整 AFDX 数据帧为 0x0300 0000 0000 0001 0200 0001 0120 4500 002D 0000 4000 0111 0000 0A01 0101 0A01 0201 4E20 7530 0019 0000 0000 0000 0300 0000 C65B B580 0000 0000 0001 0000 0000。

RDC2 接收到 VL1 的数据后, 进行校验确定数据帧完整性后, 按照编码的逆序进行解码, 得到此数据帧的基本信息和数据负载, 对数据负载再次进行解码得到 Label001 的数据信息, 把完整 ARINC429 数据依据 Label 存储于数据缓冲区模块 2, ARINC429 发送模块从配置信息模块读取数据, 通过发送通道 2 把 Label001 数据字发送到 LRU D, 从而完成 LRU A 到 LRU D 的通信。

RDC2 发送给 LRU D 的数据为 0xC65BB580, 与 LRU A 发送到 RDC1 的数据相同, 因此可以看出, 此实验通过应用本文提出的数据转换方法成功的完成了 LRU 之间点对点的通信, 验证了此转换方法的可行性。

通过应用分析可以看出, 在新型航电系统架构下, 通过基于虚拟链路和 ARINC429 数据标号适配关系的数据转换方法, 可以完成 LRU 之间点对点的通信功能。本实例对一条虚拟链

- [2] Cortsen J, Petersen H G. Advanced off-line simulation framework with deformation compensation for high speed machining with robot manipulators [A]. Advanced Intelligent Mechanics (AIM), 2012 IEEE/ASME International Conference on [C]. IEEE, 2012: 934-939.
- [3] Hao L, Ru L. An open 5-DOF manipulator platform and its control applications [A]. Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC), Proceedings 2013 International Conference on [C]. IEEE, 2013: 824-827.
- [4] 王 浩, 谢存禧. 开放式机器人解释器的研究 [J]. 机械设计与制造, 2010 (8): 167-168.
- [5] Cui Y, Shi P, Hua J. Kinematics analysis and simulation of a 6-dof humanoid robot manipulator [A]. Proceedings of the 2nd international Asia conference on Informatics in control, automation and robotics—Volume 2 [C]. IEEE Press, 2010: 246-249.
- [6] 李 想, 钱 欢, 付 庄, 等. 基于 QT 和 OpenGL 的机器人离线编程和仿真系统设计 [J]. 机电一体化, 2013 (4): 56-59.
- [7] Chong J W S, Ong S K, Nee A Y C, et al. Robot programming using augmented reality: An interactive method for planning collision-free paths [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009, 25 (3): 689-701.
- [8] 程永伦, 朱世强, 罗利佳, 等. 基于 Matlab 的 QJ-6R 焊接机器人运动学分析及仿真 [J]. 机电工程, 2008, 24 (11): 107-110.
- [9] Iqbal J, ul Islam R, Khan H. Modeling and Analysis of a 6 DOF Robotic Arm Manipulator [J]. Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering, 2012, 3 (6): 300-306.
- [10] 付国强, 黄攀峰, 陈凯等. 基于双目视觉的伺服控制半物理仿真系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (12): 2494-2496.

路对应一个标号的适配关系进行了验证, 可根据实际应用情况, 通过修改配置信息, 实现一条虚拟链路对应多个标号的适配关系。

## 5 结论

AFDX 和 ARINC429 总线是航空电子系统中主要的接口总线<sup>[5]</sup>, 本文对两种总线进行了介绍。并且详细介绍了机载远程数据集中器协议转换功能的整体设计和各模块功能, 在 ARINC429 规范和 ARINC664 规范基础上提出一种对于 ARINC429 和 AFDX 的数据转换方法, 并通过仿真分析验证了此协议转换方法的可行性, 为远程数据集中器整体功能仿真设计奠定了一定的基础。

### 参考文献:

- [1] 李云杰, 王 勇, 王占领, 等. AFDX 与 ARINC429 总线协议转换器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 21 (9), 2522-2524.
- [2] 尚伟林, AFDX Gateway 软件的设计与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.
- [3] A Airlines Electronic Engineering Committee. ARINC Specification 429: Mark 33 Digital information transfer system (DITS) [S/OL]. 2004.
- [4] A Airlines Electronic Engineering Committee. Aircraft data network part7: Avionics full duplex switched Ethernet network [S/OL]. 2009.
- [5] 支超有. 机载数据总线技术及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.