

doi: 10.7690/bgzdh.2026.04.006

弹体尾翼自动拧紧专机的结构设计

彭崇振, 舒启林, 金 洋

(沈阳理工大学机械工程学院, 沈阳 110158)

摘要: 针对弹药的需求量大而弹药生产效率低问题, 以弹体尾翼装配为例, 设计一种弹药的自动拧紧装置。系统包括尾翼和弹体的夹紧结构、尾翼的拧紧结构、拧紧力矩的控制等, 通过 PLC 远程控制, 实现弹体尾翼的自动化拧紧。结果表明: 该装置能够使弹体和尾翼进行自动化装配, 保证弹体的装配质量, 减少人工操作的误差, 提高生产效率, 为弹药自动化装配提供了新思路, 在军事装备中具有较为重要意义。

关键词: 弹体装配; 拧紧控制; 结构设计

中图分类号: TJ410.5 **文献标志码:** A

Structure Design of Special Machine for Automatically Screwing Missile Body and Tail Wing

Peng Chongzhen, Shu Qilin, Jin Feng

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110158, China)

Abstract: In order to solve the problem of huge demand and low production efficiency of ammunition, an automatic tightening device for ammunition is designed by taking the assembly of ammunition body and empennage as an example. The system includes the clamping structure of the empennage and the missile body, the tightening structure of the empennage, the control of the tightening torque, etc. The automatic tightening of the empennage of the missile body is realized through the PLC remote control. The results show that the device can make the automatic assembly of the projectile body and the empennage, ensure the assembly quality of the projectile body, reduce the error of manual operation, improve the production efficiency, and provide a new idea for the automatic assembly of ammunition, which is of great significance in military equipment.

Keywords: missile body assembly; tightening control; structure design

0 引言

弹药是 21 世纪信息化战场的一个重要成分^[1], 在战略地位上意义重大。研究弹药自动化生产技术对提升中国军事力量具有不可估量的作用。现代弹药生产主要依靠传统的人工生产, 人工操作误差难以避免, 弹药的生产效率低下, 并且不能保证装配部件拧紧力矩和拧紧角度的精确控制, 质量得不到保证, 严重影响当前我国军事力量的发展。

用自动化生产代替人工生产, 不仅能消除人为操作的误差, 提高生产效率, 保证弹体的装配质量, 而且可以大幅降低操作者的劳动强度, 并保障生产工人的安全。笔者设计一种弹体尾翼的自动拧紧结构, 利用先进的机械、控制技术和传感器技术等, 能够使弹体尾翼精确、高效地自动化^[2]装配。

1 自动拧紧结构的设计要求

1.1 弹体的结构分析

弹体的结构通常是由弹头、弹身和尾翼组成。

如图 1 所示。

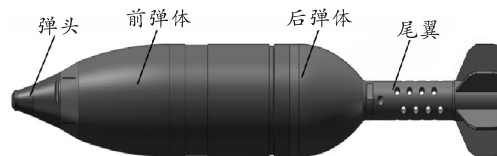


图 1 弹体结构 3 维图

弹头是装配在弹体的最前端, 里面放置引信, 目的是与攻击的目标接触产生毁伤效应。弹身是弹体的主体部分, 分为前弹体和后弹体, 主要用来容纳火药和子弹体, 并且要有足够的强度、刚度和韧性, 可以承受高速运动产生压力和冲击。尾翼是固定在弹体的后端部分, 里面放置发射药, 可以稳定弹体的飞行姿态, 控制弹体的飞行轨迹, 在弹体的飞行过程中具有重要作用。

传统的弹体装配需要人工操作来进行, 弹体的大部分装配都是靠螺纹来连接的, 主要依靠工人的经验完成装配。人工操作存在很大的误差, 生产效率低, 还具有一定的危险性。笔者设计一种自动拧

收稿日期: 2024-12-10; 修回日期: 2025-01-12

第一作者: 彭崇振(1998—), 男, 河南人, 硕士。

紧装置，利用气缸等一些辅助装置对弹体进行夹紧和定位，依靠伺服电机提供动力、扭矩传感器控制扭矩，通过 PLC 编程进行控制，实现弹体与尾翼的自动化装配。

1.2 弹体尾翼拧紧机的设计要求

在弹药和其他的军事装备中，弹体尾翼的稳定性和紧固性直接关系到整个弹药的性能和安全。因此，弹体尾翼的自动拧紧结构设计^[3]显得尤为重要。笔者将详细阐述弹体尾翼自动拧紧结构的设计要求，包括结构设计与功能、关键技术参数、安全与可靠性。

1) 结构设计与功能。设计的结构能够快速、准确地完成尾翼的拧紧操作，并且能够适应不同规格、材质的尾翼，以满足多样化军事装备的应用需求；功能操作简便，没有复杂的操作过程。

2) 关键技术参数。扭矩控制要确保拧紧过程中施加的扭矩精确稳定，防止尾翼连接过紧或过松；拧紧角度参数控制，保证弹体与尾翼的紧密结合。

3) 安全与可靠性。要确保设计的系统运行安全，以满足不同环境下使用需求；建立严格的维护与保养制度，确保系统长期稳定运行；设置故障诊断^[4]和预警系统，及时发现并处理潜在的安全隐患，保障操作者的安全。

2 自动拧紧机的机械结构设计

2.1 夹紧机构设计

夹紧机构是弹体尾翼自动拧紧结构的主要部分，分为弹体夹紧和尾翼夹紧，目的是实现弹体与尾翼的夹紧和定位。所以设计夹紧机构时，最重要的是考虑夹紧方式的选择，能够保证夹紧后的弹体与尾翼有准确的位置。

尾翼夹紧的机构主要由固定轴、气缸、夹紧工装、定位销、弹簧、导轨、滑台等辅助装置组成，如图 2 所示。

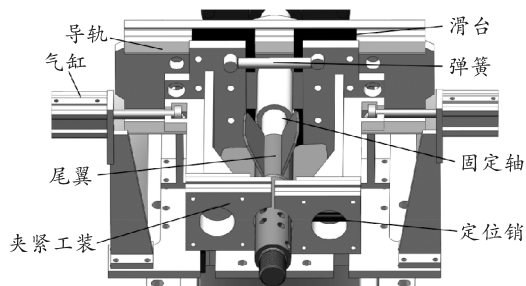


图 2 尾翼夹紧机构

尾翼是直接插入到固定轴上，尾翼末端与固定

轴端面对齐，实现尾翼的轴向固定。2 个夹紧工装由弹簧相连接，固定在滑块上，由气缸提供动力，能够快速实现夹紧工装的闭合。在夹紧工装中设置有定位销，与尾翼的定位孔相连接，实现尾翼的周向定位，既可以保证尾翼有准确的位置，又可使尾翼在拧紧过程中保持牢固连接。这样的结构设计气缸不提供夹紧力，所以尾翼的夹紧力很小，可以忽略不计，并且加紧工装中有很大的间隙，不会对尾翼叶片造成干涉，可以满足多样化的需求。

弹体的夹紧机构如图 3 所示。

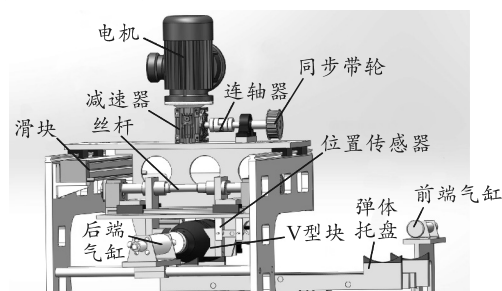


图 3 弹体夹紧机构

由图 3 可知：由 V 型块、气缸、导轨、滑块和辅助装置组成，动力机构由电机、减速器、联轴器、同步带、丝杠等组成。由电机提供动力，通过同步带传递给丝杠运动。V 型块通过连接板固定在丝杠上，并且与滑块相连接，通过丝杠运动带动 V 型块的运动，实现弹体的夹紧。弹体放在托盘上，前端设置有气缸可实现弹体的前端定位，后端与尾翼同轴处设置气缸可以实现弹体的后端定位，并且在尾翼拧紧的过程中还可以起到支撑作用。在底部设置有位置传感器，能够识别 V 型块的位置，使弹体可以快速的夹紧和定位。

2.2 弹体与尾翼的对中机构设计

弹体与尾翼自动对中机构，主要由托盘、气缸、导轨、滑块组成，如图 4 所示。

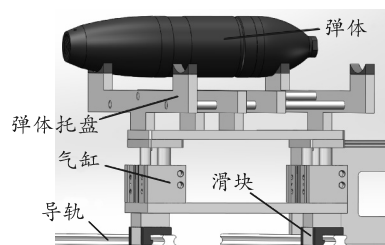


图 4 弹体与尾翼的对中机构

弹体放到托盘上，托盘下方装有气缸，可以实现弹体的上下移动。气缸固定在装有滑块和导轨的连接板上，可以随着滑块运动，实现弹体的左右移动。尾翼是在固定轴上，位置不会变动，这样利用

气缸和滑块可以实现弹体与尾翼的快速对中。

2.3 拧紧机构设计

拧紧机构是弹体与尾翼自动拧紧机的核心部分，拧紧时要满足弹体与尾翼之间具有预紧力^[5]。设计拧紧机构时需保证有足够的稳定性，在拧紧过程中不出现震动，造成拧紧偏差。

如图 5 所示。拧紧机构主要有伺服电机、减速器、梅花形联轴器、扭矩传感器、扭矩控制器等组成。

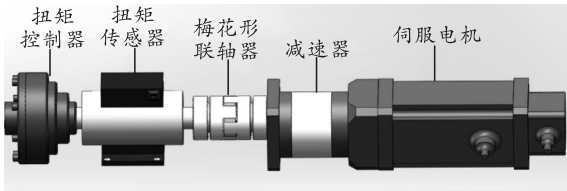


图 5 尾翼拧紧机构

用伺服电机为拧紧机构提供动力，能快速地响应由驱动器发出的指令，精准地控制拧紧的速度，提高拧紧的效率。扭矩传感器可以实时检测扭矩的状态，并做出反馈给扭矩控制器，及时对扭矩进行调整，使扭矩可以精确稳定地控制，还具有预警作用。这种结构设计直接由伺服电机传递动力，不会造成能量的消耗，提高能源的利用率。

3 自动拧紧机的控制系统设计

3.1 预紧力控制分析

弹体与尾翼的装配属于紧螺栓连接，紧螺栓连接在装配时需要预拧紧，预紧目的是使弹体与尾翼的连接牢固且紧凑，防止在负载的作用下，连接部位发生相对滑移或者出现缝隙。在装配过程中，预紧力的大小通常是由拧紧力矩的大小进行控制。控制预紧力的大小对提高弹体和尾翼的连接强度非常重要。控制预紧力的方法主要有扭矩控制、扭矩-转角控制和屈服极限控制，扭矩控制是国内外最常用的控制预紧力的方法。

螺栓拧紧时连接件形状、摩擦系数、扭矩与预紧力可以建立数学模型。但由于该数学模型比较复杂

，所以在工程上采用“扭矩系数”的方法，建立拧紧过程中扭矩与预紧力之间的函数关系，即：

$$T=kdF. \tag{1}$$

式中： F 为螺栓轴向预紧力； k 为扭矩系数； d 为螺纹的公称直径； T 为拧紧力矩。实验结果表明，扭矩系数 k 与摩擦系数、形状和螺纹尺寸有关，但对于同一个装配体，扭矩系数为常数，而公称直径为定值，这样预紧力 F 和拧紧力矩 T 呈线性关系变化，因此在螺栓拧紧时，通过对施加扭矩大小的控制，便能直接实现连接件的预紧力控制，且控制方法简单、可靠。

3.2 控制系统的方法分析

针对弹体尾翼装配的精度需求，弹体尾翼自动拧紧专机的控制系统采用扭矩-转角法进行控制^[6]，在开始拧紧时先确定极限扭矩，根据弹体尾翼的装配需求，通常情况下极限扭矩为 $150\text{ N}\cdot\text{m}$ ，尾翼处于极限状态，再旋转一个预定的角度。尾翼拧紧后是处于弹性变形区域内，尾翼的旋转角与伸长量可以建立数学模型，即：

$$Q=EA_s\Delta l/L. \tag{2}$$

式中： E 为弹性模量； A_s 为尾翼螺栓的平均截面积； Δl 为尾翼螺栓变形伸长量； L 为尾翼螺栓长度。由此看出，在弹性区域内， Δl 与尾翼螺栓的回转角度成正比，克服了螺栓摩擦力的影响，与扭矩控制法相比，拧紧后预紧力的离散性明显减少。采用扭矩转角法拧紧时，尾翼的装配工艺要求：

$$M=m_s\pm 10\%+\alpha\cdot 10\%. \tag{3}$$

式中： m_s 为起始扭矩值； α 为拧紧扭矩达到起始扭矩之后转过的角度，一般取值为 60° 、 90° 、 120° 等。这种方法可以获得较高的拧紧精度，并且可以得到较大的轴向预紧力，满足弹体与尾翼的装配需求。

3.3 拧紧系统的控制分析

3.3.1 工作原理分析

弹体尾翼自动拧紧机的控制工作原理如图 6 所示。

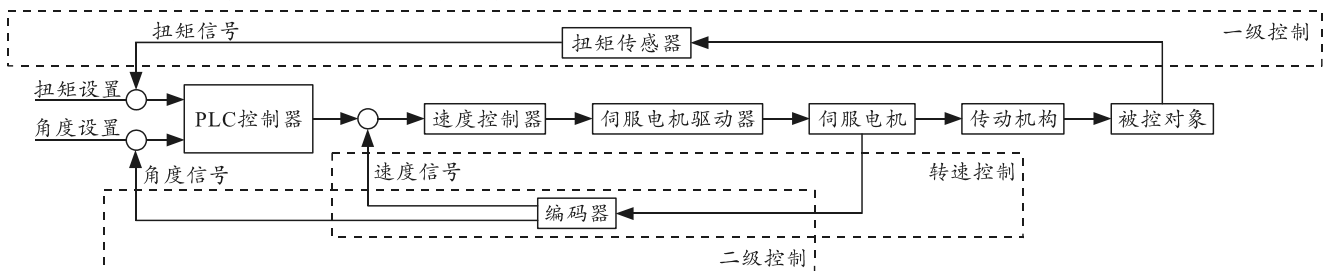


图 6 弹体尾翼自动拧紧控制系统工作原理

先对扭矩、角度设置一个定值，被控对象为尾翼^[7]。先采用扭矩控制方法，扭矩传感器对设置的

扭矩与工作工程中扭矩进行分析和处理，输出相应的信号传递给 PLC 控制器，使 PLC 发出相应的指令，并通过速度控制器传递给伺服电机驱动器控制伺服电机的运动，伺服电机通过中间传动机构控制被控对象，实现对尾翼的扭矩控制，形成一级闭环控制系统。当扭矩达到设定值后，然后采用转角方式对尾翼进行控制，编码器发出的脉冲信号和速度信号反馈给 PLC 控制器^[8]，计算出伺服电机的实时

角度值，与设定角度值进行对比，发出指令传递给速度控制器，速度控制器进行分析处理后输出相应的数字信号，通过伺服驱动器控制伺服电机运动，并通过中间传动机构控制被控对象，实现对尾翼的角度控制，形成二级闭环控制系统。

3.3.2 扭矩的控制分析

弹体尾翼自动拧紧控制系统对扭矩的检测主要是通过控制扭矩传感器来实现的，如图 7 所示。

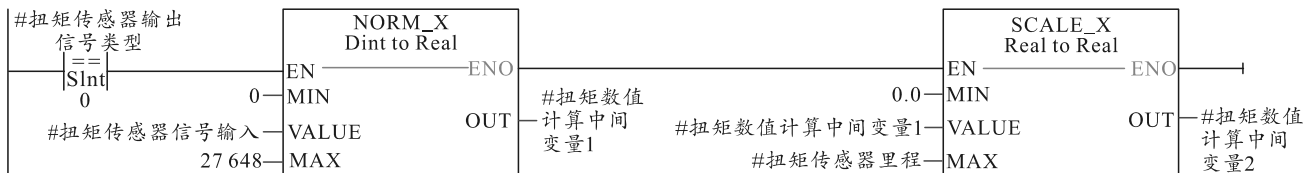


图 7 模拟量数值转化 PLC 控制程序

对采集的扭矩传感器模拟量数值进行标准化和缩放，扭矩传感器输入一个信号，经过计算输出中间变量 1，再依据扭矩传感器量程，输出中间变量 2，完成输入模拟量数值的标准化和缩放。输出的结果

要限制在扭矩的最大值和最小值之间，如图 8 所示。扭矩数值计算中间变量 2，依据扭矩输出值上限和下限进行计算，输出实时扭矩数值。并且设置上限和下限报警标志，保障操作的安全。

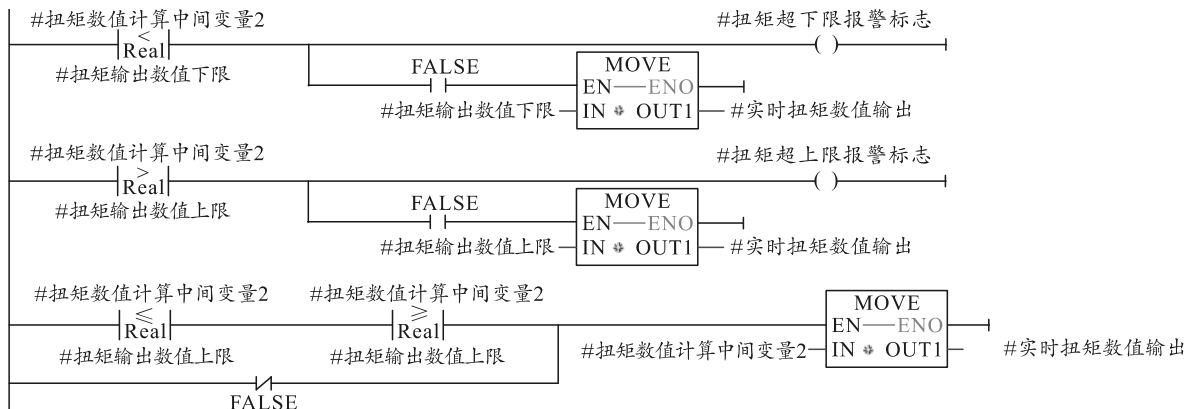


图 8 限制扭矩输出 PLC 程序

3.3.3 拧紧轴的控制分析

拧紧轴的控制主要是利用 PLC 对伺服电机的控制完成的，如图 9 所示。启动拧紧轴伺服电机，按

照拧紧的预设方向进行快速拧紧，拧紧过程中限制最大扭矩的输出，防止拧紧过程中螺纹卡死，扭矩过大发生危险。

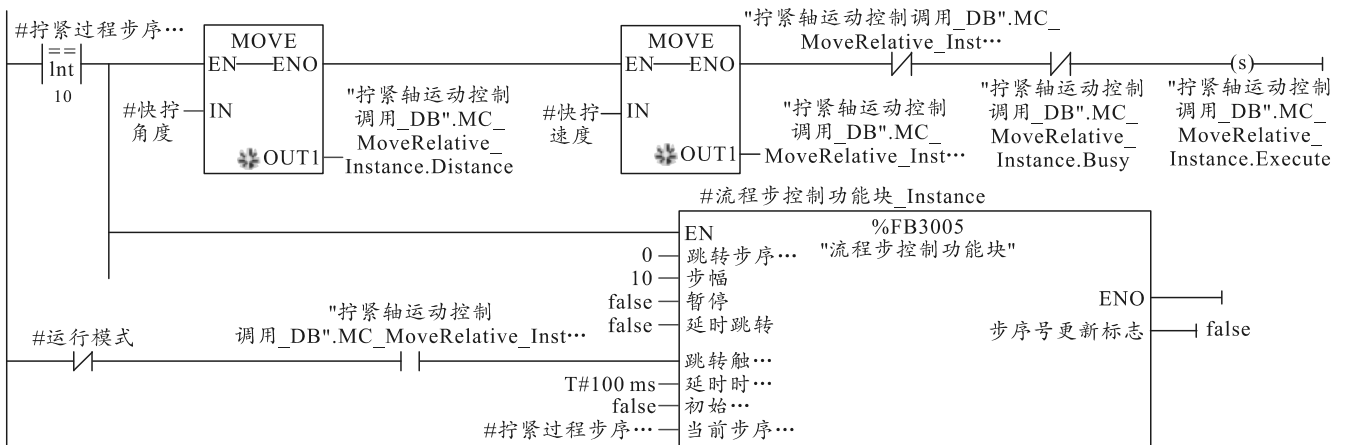


图 9 拧紧轴 PLC 控制程序

4 自动拧紧机的控制设备选型

4.1 伺服电机及驱动器选型

弹体尾翼自动拧紧专机采用 EX 系列防爆控制电动机，性能指标如表 1 所示。

表 1 EX 系列伺服电机性能指标

描述	参数选定值
电机类型	永磁同步无刷伺服电机
极数	10 极
功率范围/kW	1.75~35.00
速度范围/(r/min)	1 100~7 800
准入	IP65
防护等级	IP65
连接	螺纹孔

EX 系列永磁伺服电动机可以用于爆炸性环境中，外壳具有坚硬、防爆等特点，EX 系列伺服电机防爆等级为 II 2G EX d IIB T4，符合《军工燃烧爆炸品工程设计安全规范》的要求。EX 系列防爆伺服电机的运动素质优异和稳定，在宽速度范围内能输出高扭矩。转矩特性如图 10 所示。

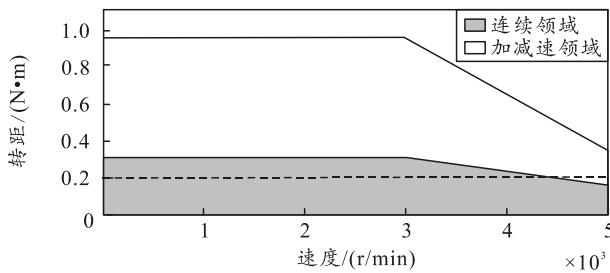


图 10 伺服电机转矩特性

驱动器选用 EX FL20-S 系列伺服驱动器，该驱动器是一款设计结构简单、功能强大、运行可靠的伺服驱动器，全闭环控制响应频率高达 1.5 kHz，内部设置有增量编码器、绝对值编码器、旋转变压器等反馈配置和 RS485/232 上位机检测口，并且配置 EtherCAT 和 Canopen 等通信卡选项。

4.2 扭矩传感器选型

笔者选用 HCNJ-F101 防爆扭矩传感器，工作原理如图 11 所示。

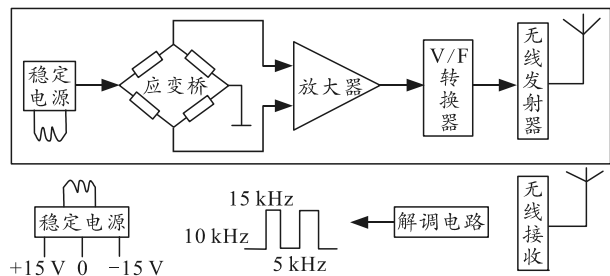


图 11 扭矩传感器工作原理

采用应变电桥测技术，在拧紧的弹性轴上贴应

变片组成应变电桥^[9]，用一组环形变压器非接触提供电源，弹性轴受扭矩微变化通过线路的放大器整形输出电信号。具有检测精度高、抗干扰性强等优点，不需要反复调零就可测量扭矩。

HCNJ-F101 防爆扭矩传感器，性能指标如表 2 所示。

表 2 HCNJ-F101 扭矩传感器性能指标

描述	参数选定值	描述	参数选定值
型号	HCNJ-101	转速量程/(r/min)	0~8 000
扭矩量程/(N·m)	0~500	转速信号/(脉冲/转)	60
供电电源/VDC	±15	精度/%	±0.05
扭矩信号/kHz	5~15		

量程选用 0~500 N·m，精度为±0.05%，防爆等级 Exia II BT4，符合《军工燃烧爆炸品工程设计安全规范》的要求，并且尾翼装配没有火药，不会出现爆炸危险。HCNJ-F101 防爆扭矩传感器可以承受 150%的载荷，具有很高的安全性与可靠性，可以长时间、高速运转，满足本文中弹体尾翼自动拧紧的工作要求。

4.3 可编程控制器选型

可编程控制器采用三菱 PLC^[10]，其内部有程序存储、逻辑运算的执行、顺序控制、计数等方面的功能，并且可以通过数字信号或模拟信号输出指令，控制各种类型的机械进行工作。三菱 FX 系列 PLC 具有高速度、高性能、功能强大、结构简单等特点，可以输入/输出 16~25 个点，能够同时控制多项任务，还可以对多个组件进行连接、模拟控制、定位控制等其他特殊功能，可以满足实际生产过程中广泛的需求。其内部配置运算器、控制器、存储器 (RAM/ROM)、用户输入/输出 (I/O) 设备接口、外设接口、扩展机、编程器、电源和其他一些电路，如图 12 所示。

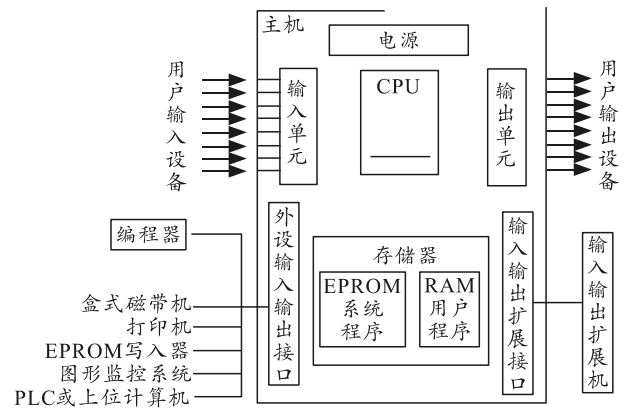


图 12 PLC 内部结构