

关于工业自动化中闭环与PID控制系统的综合报告

第一章：控制系统基础简报

1.1 执行摘要

本简报旨在全面概述现代工业自动化中的控制系统。核心要点在于，闭环控制系统通过实时反馈机制，极大地提升了自动化流程的精确度和适应性。其中，比例-积分-微分（PID）控制器作为应用最广泛的反馈控制设计，构成了大多数工业控制应用的基础。通过持续比较系统实际输出（过程变量）与期望目标（设定点）之间的差异，PID控制器能够动态调整操作，从而有效抑制干扰、消除稳态误差并优化系统响应。实时运动反馈与高速工业网络的结合，进一步将这些控制原理转化为可实现的亚微米级精度、更高的生产效率、预测性维护能力以及人机协作的安全性，最终构成了当今智能制造系统智能、高效和可靠的基石。

1.2 控制系统简介

要理解自动化流程，首先必须认识其背后的大脑——控制系统。无论是简单的温度调节还是复杂的多轴机器人运动，控制系统都负责解释指令、监测状态并执行纠正措施，以确保流程按照预期精确运行。因此，深入理解控制系统的基本原理，对于设计、实施和维护高效、可靠的自动化解决方案具有至关重要的战略意义。

1.2.1 定义二分法：开环控制 vs. 闭环控制

控制系统可从根本上分为两种类型：开环控制和闭环控制。它们的主要区别在于是否使用反馈来影响控制动作。下表对两者进行了详细比较：

开环控制 (非反馈控制)	闭环控制 (反馈控制)
定义： 控制器的控制动作独立于“过程输出”或“受控过程变量”。	定义： 控制器的控制动作依赖于过程输出，通过反馈进行调整。
工作原理： 系统仅按预先设定的方式运行，不监测实际结果。	工作原理： 系统持续监测输出，并将其与设定点比较，利用差值（误差）来调整控制动作，从而实现自我纠正。
示例： 一个仅由定时器控制的中央供暖锅炉。它会在设定的时间内持续供热，而不管建筑物的实际温度如何。	示例： 一个带有恒温器的锅炉。恒温器监测建筑温度，并将信号反馈给控制器，以确保温度维持在设定值。



主要优点： • 简单性： 设计和操作直接，易于理解和实施。 • 稳定性： 由于没有反馈回路，不受反馈信号中潜在干扰的影响。 • 成本效益： 结构简单，构建和维护成本通常更低。 • 速度： 无需处理反馈信息，响应速度通常更快。	主要优点： • 精确性： 通过持续纠正误差，能够实现更高的控制精度。 • 适应性： 能够适应操作环境的变化和过程扰动。 • 自动化： 具有自我调节特性，减少了人工干预的需求。 • 干扰抑制： 能有效抵消外部干扰（如负载变化）对系统的影响。 • 稳定性保证： 即使在模型不确定或参数变化的情况下，也能保证性能，甚至可以稳定不稳定的过程。
--	--

现在，我们将深入探讨闭环系统的内部机制，以了解其强大的自我调节能力是如何实现的。

1.3 闭环系统的架构

要充分理解闭环控制的强大功能，必须首先了解其核心组件以及构成“闭环”的信息流。正是这些组件的协同工作，使得系统能够进行自我监测和修正。

1.3.1 核心组件与信号流

一个典型的闭环系统由以下几个关键部分组成，它们通过一个连续的信息循环路径连接在一起：

- 1. **设定点 (Setpoint, SP) 或参考输入 (r(t)):**
 - **定义与功能：** 这是系统的期望值或目标状态。例如，恒温器上设定的温度或巡航控制系统设定的车速。
- 2. **过程变量 (Process Variable, PV) 或系统输出 (y(t)):**
 - **定义与功能：** 这是被控制系统的实际测量值。例如，房间的实际温度或车辆的实际速度。
- 3. **传感器 (Sensor):**
 - **定义与功能：** 测量过程变量并提供反馈的设备。例如，温度计、编码器或压力传感器。
- 4. **控制器 (Controller):**
 - **定义与功能：** 系统的决策中心。它计算设定点 (SP) 和过程变量 (PV) 之间的差异 (误差)，并根据预设的算法 (如PID) 确定必要的纠正措施。
- 5. **误差信号 (Error Signal, e(t)):**



- **定义与功能：** 设定点与过程变量之间的计算差值 ($e(t) = SP - PV$)。该信号是控制器采取行动的依据。

6. 执行器 / 最终控制元件 (Actuator / Final Control Element):

- **定义与功能：** 执行控制器命令以影响过程的机械装置。例如，调节流量的阀门、驱动机械臂的电机或加热炉的加热元件。

7. 反馈回路 (Feedback Loop):

- **定义与功能：** 将系统输出 (由传感器测量) 信息传回控制器进行比较的信息路径。这个路径“关闭”了循环，使系统能够自我校正。

1.3.2 数学表示：闭环传递函数

为了分析线性时不变 (LTI) 系统，工程师们使用传递函数来描述系统的动态行为。闭环传递函数表示系统输出与参考输入之间的关系。该函数 $H(s)$ 的通用表达式为：

$$H(s) = Y(s) / R(s) = P(s)C(s) / (1 + P(s)C(s)F(s))$$

其中：

- $Y(s)$ 是系统输出。
- $R(s)$ 是参考输入 (设定点)。
- $P(s)$ 是被控系统 (或称“被控对象”) 的传递函数。
- $C(s)$ 是控制器的传递函数。
- $F(s)$ 是传感器 (反馈路径) 的传递函数。

这个表达式的意义在于，它揭示了系统的整体响应特性。特别地，当开环增益 $|P(s)C(s)|$ 远大于1时，分母 $1 + P(s)C(s)F(s)$ 近似于 $P(s)C(s)F(s)$ 。如果传感器传递函数 $F(s)$ 近似为1，则整个闭环传递函数 $H(s)$ 近似为1。这意味着输出 $Y(s)$ 将非常精确地跟踪参考输入 $R(s)$ ，这正是闭环控制的主要目标。

在这些系统中，最常见也是最重要的控制器类型就是PID控制器。

1.4 PID控制器：工业自动化的中流砥柱

比例-积分-微分 (PID) 控制器是应用最广泛的反馈控制设计，因其在无数工业应用中的有效性和多功能性而备受推崇。从简单的温度调节到复杂的运动控制，PID控制器凭借其稳健的算法，成为现代自动化系统的核心。



1.4.1 解构三个控制项

PID算法的核心在于其三个独立的控制项，每个项都基于误差信号 $e(t)$ 的不同方面来产生控制作用。

- **比例 (P) 项**
 - 该项对**当前的**误差做出响应。控制器的输出与当前误差的大小成正比。例如，在车辆的巡航控制中，车速与设定速度的差距越大，比例项产生的油门调整就越大。然而，单独使用比例控制通常会导致系统在达到稳定状态时，仍然存在一个微小的、持续的误差，即“稳态误差”，因为需要一个非零的误差来产生控制输出。
- **积分 (I) 项**
 - 该项考虑**过去的**累积误差。它将误差随时间进行积分，旨在消除纯比例控制所留下的稳态误差。只要误差存在，积分项就会持续增长，从而驱动系统输出，直到误差被完全消除。例如，当机械臂因负载而无法达到目标位置时，积分项会随着时间的推移不断增加作用力，直至其到达准确位置。但积分作用过强可能导致系统响应超出设定点，即“过冲”。
- **微分 (D) 项**
 - 该项通过评估误差的变化率来预测**未来的**误差趋势。它提供了一种阻尼效应，能够减小积分项可能引起的过冲，并提高系统的稳定性。例如，当机械臂快速接近目标位置时，误差在迅速减小，微分项会预见性地减小作用力，防止其冲过头。因此，它也被称为“预期性控制”。

1.4.2 PID控制函数

PID控制器的输出 $u(t)$ 是这三个项的加权和，其标准数学表达式为：

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i * \int e(\tau) d\tau + K_d * de(t)/dt$$

其中：

- K_p 是比例增益系数。
- K_i 是积分增益系数。
- K_d 是微分增益系数。
- $e(t)$ 是误差信号 (SP - PV)。

1.4.3 回路整定的关键作用



为了使PID控制器达到最佳性能，必须仔细调整 K_p 、 K_i 和 K_d 这三个参数，这个过程被称为“回路整定”。整定的目标是在快速响应、最小过冲和高稳定性等多个（有时相互冲突的）目标之间取得平衡。存在多种整定方法，如经典的齐格勒-尼科尔斯（Ziegler-Nichols）方法，但无论采用何种方法，其核心挑战都是根据特定过程的动态特性找到最优的参数组合。

PID控制的理论概念通过实际应用，对现代工业产生了深远而切实的影响。

1.5 现实世界的影响与现代应用

闭环PID控制的原理通过实时运动反馈等先进技术，在现代工业环境中得以实现，并带来了革命性的变化。

1.5.1 实现精确、高效与安全

将闭环系统与实时反馈相结合，带来了以下显著优势：

- **增强的精确性：** 在CNC加工、半导体制造和机器人技术等领域，能够实现亚微米级的位置精度、稳定的轨迹控制以及最小化的伺服系统过冲和振荡。
- **提升的效率与生产力：** 自适应控制算法能够根据实时数据动态调整参数，从而缩短循环时间并减少能源消耗。例如，智能伺服驱动器可以在空闲阶段降低电机扭矩。
- **预测性维护：** 通过持续监测振动、背隙或热漂移等性能指标，系统可以检测到磨损或错位的早期迹象，从而预测组件故障，最大限度地减少意外停机时间。
- **灵活性与适应性：** 系统能够自动适应生产过程中的变化，如切换产品型号或处理不同尺寸的包装，而无需人工干预。
- **协作系统的安全性：** 实时反馈使协作机器人（cobots）和自主引导车（AGVs）能够通过力限制行为（如柔性触摸和顺应性运动）安全地与人类在同一空间工作。

1.5.2 工业网络的作用

为了充分利用实时反馈的潜力，工业网络解决方案（如EtherCAT、PROFINET）变得不可或缺。这些高速通信协议确保了传感器、驱动器、控制器和监控系统之间的确定性数据交换。它们实现了以下关键功能：

- 运动组件与PLC之间的低延迟通信。
- 多轴协调的确定性同步。
- 用于MES和SCADA集成的无缝数据共享。



总而言之，由PID算法驱动、并由现代传感器和网络技术赋能的闭环控制系统，共同构成了现代工业自动化稳健、智能的基础。

第二章：控制系统学习指南

2.1 简介

本章旨在为学生和专业人士提供一个实用的工具，用于复习和巩固前一章简报文件中介绍的核心概念。通过问答、案例分析和术语解释，您可以检验并加深对控制系统理论与实践的理解。

2.2 测验：简答题

请用2-3句话回答以下问题，以检验您对关键概念的理解。

1. 请使用源文中提到的锅炉类比，区分开环控制和闭环控制。
2. 根据维基百科文章，闭环控制器相比于开环控制器有哪些六个主要优势？
3. 在控制回路中，定义设定点（SP）、过程变量（PV）和误差（e）这三个术语。
4. 在PID控制器中，积分（I）项的具体作用是什么？它可能会引入什么潜在问题？
5. 解释“前馈”控制的概念，以及它如何与闭环控制同时使用。
6. 根据原文，控制器的实现方式是如何从早期的气动设备演变为现代PLC和DCS平台的？
7. 什么是“实时运动反馈”？通常使用哪些类型的传感器来捕捉它？
8. 列出文本中提到的PID控制器的三种不同工业应用（例如，温度、流量、压力控制）。
9. 什么是“积分饱和”（integral windup）？请描述一种解决此问题的方法。
10. 微分（D）项的主要缺点是什么？在实践中通常如何处理这个问题？

2.3 答案解析

1. 开环控制就像一个仅由定时器控制的锅炉，它在固定的时间内供热，而不管建筑的实际温度如何。闭环控制则像一个带有恒温器的锅炉，恒温器会监测实际温度，并将信号反馈给控制器，以动态调整供热，从而将温度维持在设定值。



2. 闭环控制器的六个主要优势是：干扰抑制、即使模型不确定也能保证性能、可以稳定不稳定的过程、降低对参数变化的敏感性、改善参考跟踪性能以及改进对随机波动的校正能力。
3. ****设定点 (SP) **是系统的期望值或目标值。 **过程变量 (PV) **是被控制系统的实际测量值。 **误差 (e) **是设定点与过程变量之间的差值 ($e = SP - PV$) ， 控制器根据此差值进行调节。**
4. 积分 (I) 项的作用是考虑过去的累积误差，以消除纯比例控制后残留的稳态误差。它可能引入的潜在问题是，由于累积效应，可能会导致系统响应超过设定点，即产生“过冲”。
5. **“前馈”控制是一种开环控制形式，其中控制动作独立于过程输出。它可以与闭环 (反馈) 控制同时使用，以进一步改善参考跟踪性能，通过预先补偿已知的干扰来提高系统响应速度。**
6. **控制器的实现从20世纪30年代的宽带气动控制器 (如“Stabilog”) 开始，到50年代随着高增益电子放大器的出现而普及的电子PID控制器。如今，大多数工业PID控制是通过PLC (可编程逻辑控制器) 和DCS (分布式控制系统) 中的计算机软件来实现的，这些平台能够进行集中控制和更快的数据处理。**
7. **“实时运动反馈”是指在系统运动时，对其位置、速度和扭矩等变量进行连续监测和报告。常用于捕捉这些反馈的传感器包括编码器、旋转变压器和称重传感器。**
8. **PID控制器在工业中用于控制多种过程变量，包括：用于食品生产和化工过程的**温度**控制；用于管道和炼油作业的**流量**控制；以及用于化工厂中维持储罐和容器液位的**液位**控制。**
9. **“积分饱和”是指在设定点发生较大变化后，积分项累积了一个超过调节变量最大值的误差，导致系统严重过冲。一种解决方法是为积分项设定预定边界，防止其累积超过此范围，或者在过程变量进入可控区域前禁用积分功能。**
10. **微分 (D) 项的主要缺点是它会放大测量或过程中的高频噪声，可能导致输出发生剧烈变化。在实践中，通常通过对测量值使用低通滤波器来滤除高频噪声分量来管理此问题。**

2.4 论述题

以下问题需要对源文件中的信息进行更深入的综合。本部分不提供答案。



1. 分析反馈控制的历史演变，从17世纪的离心调速器到现代数字PID控制器。讨论推动这一演变的关键理论见解和技术进步（例如，气动放大器、电子技术、微处理器）。
2. 评估PID控制器中的比例（P）、积分（I）和微分（D）项。解释每个项对整体控制动作的独特贡献，它解决了什么问题，以及如果整定不当可能带来的潜在缺点。使用车辆巡航控制等实际例子来说明您的观点。
3. 讨论将实时运动反馈和工业网络集成到闭环控制系统中所带来的变革性影响。这种协同作用如何提升现代应用（如机器人技术、自动化装配和预测性维护）的精度、效率和安全性？
4. 比较和对比开环与闭环控制系统的优缺点。虽然闭环系统提供了卓越的准确性和适应性，但请描述一些开环系统的简单性和成本效益使其成为更合适选择的具体场景或应用。
5. 解释“回路整定”的概念及其对系统稳定性和最佳性能的至关重要性。以齐格勒-尼科尔斯方法为例，描述整定PID控制器所涉及的一般过程和挑战。

2.5 关键术语词汇表

- **无扰动操作 (Bumpless Operation)**
 - PID控制器的一种功能，用于重新计算积分累加项，以在参数更改期间保持一致的过程输出。
- **级联控制 (Cascade Control)**
 - 一种控制策略，其中两个PID控制器协同工作，一个控制器（外环）的输出作为另一个控制器（内环）的设定点，以提高动态性能。
- **闭环控制器 (Closed-Loop Controller / Feedback Controller)**
 - 一种包含反馈的控制回路，利用过程输出的信息来调整其控制动作，以将过程变量维持在期望的设定点。
- **闭环传递函数 (Closed-Loop Transfer Function)**
 - 描述闭环系统输出与参考输入之间关系的数学表达式，用于分析系统的动态行为和稳定性。
- **控制回路整定 (Control Loop Tuning)**



- 调整控制器参数（如P、I、D增益）以获得期望的控制响应和最佳性能的过程。
- **DCS (分布式控制系统 - Distributed Control System)**
 - 一种计算机化的控制系统，包含多个自主控制器，用于操作和控制许多控制回路，通常用于大型工业过程。
- **微分 (D) 项 (Derivative (D) Term)**
 - PID控制器的一部分，根据误差的变化率预测未来的误差趋势，以提供阻尼效果并提高稳定性。
- **扰动 (Disturbance)**
 - 除操纵变量外，影响过程并导致过程变量偏离设定点的任何输入或变化。
- **前馈控制 (Feedforward Control)**
 - 一种开环控制形式，其中控制动作独立于过程输出，常与反馈控制结合使用以改善系统对已知扰动的响应。
- **积分 (I) 项 (Integral (I) Term)**
 - PID控制器的一部分，通过累积过去的误差来消除稳态误差，确保过程变量最终达到设定点。
- **积分饱和 (Integral Windup)**
 - 当积分项累积的误差超过执行器的最大能力时发生的一种情况，会导致系统严重过冲。
- **开环控制器 (Open-Loop Controller / Non-Feedback Controller)**
 - 一种控制系统，其控制动作独立于过程输出，仅按预先设定的方式运行。
- **PID控制器 (Proportional-Integral-Derivative Controller)**
 - 一种广泛使用的反馈控制回路机制，它连续计算误差值，并根据比例、积分和微分项的和来施加校正。
- **PLC (可编程逻辑控制器 - Programmable Logic Controller)**
 - 一种用于工业自动化过程的数字计算机，现代PID控制常在其软件中实现。



- **过程变量 (Process Variable, PV)**
 - 被控制系统的实际测量值（例如实际温度、压力或速度）。
- **比例 (P) 项 (Proportional (P) Term)**
 - PID控制器的一部分，其输出与当前的误差值成正比，提供即时校正。
- **实时运动反馈 (Real-Time Motion Feedback)**
 - 在系统运动时，对其位置、速度和扭矩等变量进行连续监测和报告的过程，用于闭环控制。
- **设定点 (Setpoint, SP)**
 - 控制系统的期望值或目标值。
- **稳态误差 (Steady-State Error)**
 - 当系统达到稳定后，过程变量与设定点之间持续存在的差异，通常由纯比例控制器产生。
- **齐格勒–尼科尔斯方法 (Ziegler–Nichols Method)**
 - 一种启发式的PID控制器整定方法，通过确定系统的极限增益和振荡周期来计算P、I、D参数。

第三章：常见问题解答 (FAQs)

3.1 简介

本章提供了一个快速参考指南，旨在回答关于控制系统和工业自动化中最常见的十个问题。这些解答直接综合了源文件中的信息，以帮助您快速澄清关键概念。

3.2 十大问题与解答

1. **根本区别**在于是否使用反馈。**开环控制系统**的控制动作独立于其输出；它按照预设的程序运行，不关心实际结果。例如，一个定时洗衣机。而**闭环控制系统**则包含一个反馈回路，它会持续监测系统输出（过程变量），将其与期望目标（设定点）进行比较，并根据差值（误差）来调整控制动作，从而实现自我校正。例如，一个带恒温器的空调系统。



2. **PID控制器之所以成为工业应用中最常用的类型**，有几个原因。首先，它们是一种历史悠久且经过充分验证的控制技术，理论和应用可追溯至20世纪20年代。其次，PID控制器非常通用，可用于控制各种过程变量，如温度、压力、流量和速度。最后，尽管其背后的理论可能很复杂，但其基本概念直观，并且在许多应用中，即使没有精确的系统模型，也能通过“整定”来获得可接受的性能。
3. **纯比例（P-only）控制器在运行时需要一个非零的误差来产生控制输出**，这导致系统在稳定后通常会存在一个持续的偏差，称为**稳态误差**。PID控制器中的**积分（I）项**通过累积过去的误差来解决这个问题。只要存在误差，积分项就会持续增加控制作用，直到误差被完全消除，从而确保过程变量最终能够精确达到设定点。
4. **是的，可以。**在这种系统中，开环控制通常被称为****前馈（feedforward）**控制**。前馈控制利用对系统的了解，在扰动影响过程输出之前就主动进行补偿。它与闭环（反馈）控制同时使用，可以进一步改善系统的参考跟踪性能和响应速度，而反馈控制则负责校正任何剩余的误差。
5. **使用实时运动反馈的主要好处包括：**
 - **提高精度**：实现亚微米级的位置控制和稳定的机器人轨迹。
 - **提升效率**：通过自适应控制减少循环时间和能耗。
 - **实现预测性维护**：通过持续监测性能指标来预测设备故障。
 - **增强灵活性**：使系统能够自动适应不同的产品或负载。
 - **确保安全**：在协作机器人（cobots）等应用中，能够实现安全的力限制行为，使其能与人类协同工作。
6. **“回路整定”是调整PID控制器中比例（P）、积分（I）和微分（D）三个参数的过程**，这对系统的性能至关重要。如果参数选择不当，控制系统可能会变得不稳定，产生持续振荡甚至失控。一个经过精心整定的控制器能够在快速响应、最小化过冲和高稳定性之间达到最佳平衡，确保系统在各种工况下都能高效、可靠地运行。
7. **PID控制器的主要局限性包括：**
 - **线性度问题**：它们在控制非线性系统（如非线性阀门）时性能会下降。
 - **对变化的适应性差**：它们是参数恒定的系统，无法对变化的过程参数（如设备预热后）做出反应。



- **微分项对噪声敏感：** 微分（D）项会放大测量中的高频噪声，可能导致输出剧烈波动。
 - **性能折衷：** 在响应速度和稳定性之间往往需要做出妥协。
8. 计算机和微处理器的出现彻底改变了PID控制的实现。早期的PID控制器是机械或气动设备，后来演变为分立的电子模拟控制器。随着1971年微处理器的发明和计算机硬件成本的大幅下降，PID控制算法得以在**可编程逻辑控制器（PLCs）和分布式控制系统（DCSs）**中以软件形式实现。这使得集中控制多个回路成为可能，实现了更快的数据处理、更复杂的控制策略以及与上层监控系统（如HMI、SCADA）的无缝集成。
9. **级联控制**是一种使用两个PID控制器协同工作的控制策略，其中一个控制器（外环）的输出作为另一个控制器（内环）的设定点。这种结构通常用于控制响应时间差异较大的系统。例如，在控制一个大型加热水槽的温度时，外环控制器测量水体温度（响应慢），其输出不是直接控制加热器，而是设定加热器本身的温度目标。内环控制器则快速地控制加热器温度（响应快），以达到外环设定的目标。这样可以提高控制的响应速度和整体性能。
10. 由于微分（D）项会放大高频测量噪声，现代自动化系统通常采取以下方法来处理这个问题：
- **使用低通滤波器：** 在计算微分之前，对测量信号进行滤波，以去除高频噪声成分。这是最常见的做法。
 - **关闭微分项：** 在许多噪声较大的应用中，可以直接禁用微分作用，将控制器作为一个PI控制器来使用，这通常能在牺牲一些响应速度的情况下获得更稳定的控制。
 - **对过程变量求导：** 商业控制器通常选择对过程变量（PV）而非误差（e）求导。这样，当设定点发生阶跃变化时，不会在输出中产生剧烈的尖峰脉冲。

第四章：自动化与控制系统时间轴

4.1 简介

本时间轴追溯了自动化发展的关键历史里程碑，从早期的机械装置到现代控制系统的基础理论和技术。它展示了人类如何一步步地将重复性劳动和复杂决策交给机器，从而塑造了我们今天的工业和社会。



4.2 自动化历史的关键里程碑

- **公元前1世纪：** 水车开始普及，被古希腊和罗马人用于将谷物磨成面粉。这可以被视为利用可再生能源驱动机械过程的“半自动化”的开端。
- **7-9世纪：** 有记录以来最早的实用风车由波斯人开发，用于磨谷和执行其他机械任务，扩展了自动化在无水流地区地区的可用性。
- **17世纪：** 克里斯蒂安·惠更斯发明了离心调速器，用于调节风车磨石之间的间隙，这是反馈控制的早期形式。
- **17-18世纪：** 工业革命开始，蒸汽机的发明和应用催生了大规模生产的工业化工厂。
- **1785年：** 奥利弗·埃文斯开发了第一个完全自动化的工业流程：一个自动面粉厂，实现了无需任何人工干预的连续生产。
- **1868年：** 詹姆斯·克拉克·麦克斯韦发表了其著名论文《论调速器》(On Governors)，为理解控制稳定性提供了第一个理论和数学基础 (部分资料记为1867年)。
- **约1868年：** 怀特黑德鱼雷采用了一种摆锤和静水压力计相结合的机制，这是使用微分控制来抑制振荡和提高稳定性的早期例子。
- **1911年：** 埃尔默·斯佩里开发了一种用于船舶自动转向的早期PID型控制器，尽管他的工作更多基于直觉而非数学理论。
- **约20世纪20年代：** 工厂电气化进程加速，使生产率提高了约30%，并催生了对仪表和控制器的日益增长的需求。
- **1922年：** 俄裔美国工程师尼古拉斯·米诺尔斯基通过分析船只舵手的操作行为，首次为我们现在所知的PID控制制定了正式的控制法则。
- **20世纪30年代：** 宽带气动控制器（如福克斯波罗公司的“Stabilog”）被发明出来，并在工业控制应用中得到迅速采用。
- **20世纪40年代：** 第一个实用的工业PID控制器出现。约翰·G·齐格勒和纳撒尼尔·B·尼科尔斯引入了他们极具影响力的启发式整定方法。
- **20世纪50年代：** 随着高增益电子放大器变得廉价可靠，电子PID控制器开始流行。
- **1969年：** 维克多·沙因曼发明了“斯坦福臂”，这是一个6轴全电动机器人，为复杂的机器人装配和焊接铺平了道路。



- **1971年**：微处理器的发明导致计算机硬件价格大幅下降，使得数字控制在制造业中迅速发展。

第五章：参考文献

5.1 简介

本报告的编写参考了以下资料来源。

5.2 格式化引文

1. Wikipedia contributors. "Closed-loop controller." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved October 27, 2024, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Closed-loop_controller&oldid=1302267658
2. Orth, Steve. "Closing The Loop: How Real-Time Motion Feedback is Reshaping Industrial Automation." *Power & Motion*. July 14, 2023.
3. Ragno, Maddie. "Understanding Open-Loop and Closed-Loop Control Systems: Features, Examples, and Applications." *RT Engineering Corporation Blog*. August 9, 2023.
4. Mortenson, Ted. "PID Controller Applications in Industry." *RealPars*. June 4, 2023.
5. Wikipedia contributors. "Proportional–integral–derivative controller." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved October 27, 2024, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Proportional–integral–derivative_controller&oldid=1303854417
6. Bong, Nathan. "The Evolution of Automation." *Progressive Automations Blog*. April 26, 2022.

本文件可能包含不准确的信息；请认真核实其内容。更多信息请访问 PowerBroadcasts.com。

