

文章编号: 1672-8785(2016)04-0007-04

制冷机 PID 温度控制参数设计

刘瑶瑶^{1,2} 杨宝玉¹ 吴亦农¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083 ;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 机械制冷机是红外探测器组件的重要组成部分, 它为红外探测器提供精确、稳定的低温工作环境。机械制冷机普遍采用 PID 温度控制算法。工程应用中, PID 参数的整定大多依赖于调试者的经验, 缺少 PID 参数设计的理论分析。结合制冷机的控制模型, 根据波特图和 Nyquist 稳定判据, 分析了 PID 控制参数的频域设计方法。仿真结果表明, 该方法可靠有效, 可为机械制冷机 PID 温度控制参数的在线整定提供指导。

关键词: 制冷机; PID 控制器; 波特图; Nyquist 稳定判据

中图分类号: TB6 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.04.002

Design of PID Temperature Control Parameters for Cryocooler

LIU Yao-yao^{1,2}, YANG Bao-yu¹, WU Yi-nong¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A mechanical cryocooler is one of the important parts of an infrared detector. It provides a precise and stable low temperature operation environment for the infrared detector. In the engineering applications, the tuning of Proportion Integration Differentiation (PID) parameters is mostly dependent on the experience of engineers. Thus, the theoretical analysis of PID parameter design is lacked. The frequency-domain design method of PID control parameters is analyzed according to the Bode diagram, the Nyquist stable criterion and the control model of the cryocooler. The simulation results show that this method is reliable and effective and can provide guidance for the online tuning of PID temperature control parameters of mechanical cryocoolers.

Key words: cryocooler; PID controller; Bode diagram; Nyquist stability criterion

0 引言

在航空航天遥感领域, 机械制冷机以其体积小、重量轻和稳定性高等优点成为红外探测器组件的重要组成部分^[1,2]。机械制冷机温度控制的精确性、稳定性对高分辨率相机系统的稳定成像具有重要意义。目前, 国内外机械制

冷机的主动温度控制普遍采用比例 – 微分 – 积分 (Proportion Integration Differentiation, PID) 控制器^[3], PID 控制器结构简单, 稳定性好, 工作可靠, 调整方便, 是工业控制的主要技术之一^[4]。在机械制冷机的温度控制系统中, PID 控制参数的选取会直接影响系统的稳定性和精确

收稿日期: 2016-03-25

作者简介: 刘瑶瑶 (1988-), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要研究方向为机械制冷机的主动温度控制。

E-mail: liuyy@mail.sitp.ac.cn

性。由于 PID 控制器受比例、积分以及微分控制的共同作用，三者的控制效果相互影响，参数设计不能完全根据单项控制的作用效果进行调试。对于 PID 参数的稳定范围，设计者往往需要在调试过程中逐步摸索。因此，PID 参数的设计对设计者经验的依赖度较高。工程应用中，机械制冷机温度控制系统的运行环境复杂，要取得良好的控制品质不仅依赖设计者的设计经验，而且费时费力。针对这个问题，本文结合制冷机控制模型，分析了 PID 温度控制参数的设计方法，并进行了 Simulink 仿真。

1 PID 控制理论分析

1.1 PID 控制基本原理

PID 控制系统的原理如图 1 所示，整个系统由 PID 控制器和被控对象构成。给定值 $r(t)$ 与实际输出值 $c(t)$ 构成控制偏差： $e(t) = r(t) - c(t)$ ，PID 控制器对偏差进行比例、积分、微分运算，并通过线性组合输出控制量。PID 控制器的控制规律为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

其传递函数为

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d(s) \quad (2)$$

式中， K_p 为控制器的比例增益， K_i 为控制器的积分增益， K_d 为控制器的微分增益。

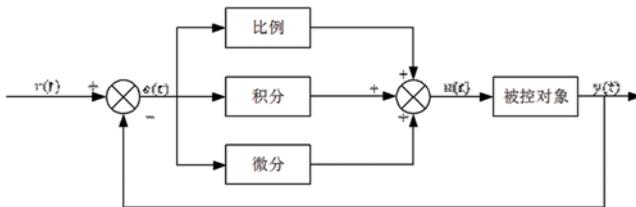


图 1 PID 控制原理框图

1.2 PID 控制基本规律 [5]

1.2.1 比例作用

比例增益 K_p 的作用是对偏差进行合理放大，控制器的稳定性、超调量和响应速度等动态指标主要取决于比例增益。比例控制的输出为

$P_{out} = K_p e(t)$ ，比例调节的输出始终取决于系统的误差。因此，比例调节的显著特点就是有差调节。当系统出现偏差时，比例调节迅速对偏差产生调节作用，使系统偏差快速减小。比例增益 K_p 越大，调节速度越快，静态偏差也越小。但比例增益过大导致调节过程出现较大的超调量，同时也会增加系统的开环增益，降低稳定性，严重时还可能导致系统不稳定。相反，若比例增益 K_p 过小，则系统对干扰信号的修正作用较弱。

1.2.2 积分作用

积分作用对被控系统的误差进行累积，与系统的稳态精度密切相关。积分控制的输出为 $I_{out} = K_i \int_0^t e(t) dt$ ，只要误差存在，积分项的作用就会不断加强。直到被控系统的误差为零，控制作用才变成一个不会增加的常数。此时控制器的输出可以停留在任何数值上。积分控制可以有效地减小甚至消除纯比例控制产生的静差。与比例控制相比，积分调节的显著特点是无差调节。增大积分增益能够减小静差，缩短调节时间，但会产生较大的超调量，系统的稳定性随之降低。

1.2.3 微分作用

微分作用与偏差的变化趋势（变化速度）成正比，能够预测误差的变化趋势，具有超前的控制作用，能够改善系统的响应速度和稳定性。微分控制的输出为 $D_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt}$ ，它能预测误差的变化趋势在误差变大之前对控制量预先进行纠正。因此，微分作用可以改善系统的动态响应特性。适当强度的微分作用可以有效地减小系统的超调量和调节时间，加快系统的跟踪速度。但是，微分作用也可以看做一个高通滤波器，对噪声干扰具有放大作用，为保证系统的抗干扰性能，微分增益不能过大。

2 制冷机 PID 温度控制参数的设计

2.1 PID 控制参数设计方法

理论分析和实验结果表明，制冷机的温度控制模型可以用一阶时滞系统近似，其传递函数为 $\frac{k}{Ts+1}e^{-\tau s}$ ，其中 k 表示被控对象的开环增益， T 表示被控对象的时间常数，在温控点附近可近似为定值， τ 表示被控对象的纯滞后时

间。模型中的各个参数可以通过实验方法计算得出。

制冷机 PID 温度控制参数的设计首先需要保证系统的稳定性。系统的稳定性可通过其开环频率响应判断。因此可基于经典控制理论的波特图和 Nyquist 稳定判据设计 PID 参数。

利用波特图分析闭环系统稳定性的 Nyquist 稳定判据表述如下^[6]：

闭环系统稳定的充要条件是，在开环对数幅频特性 $20 \log |G(j\omega)H(j\omega)|$ 不为负值的所有频段内，相频特性 $G(j\omega)H(j\omega)$ 与 $-\pi$ 线的正、负穿越次数差应等于 $P/2$ ，其中 P 是在开环传递函数全部极点中位于 S 平面右半部分的开环极点数目。若控制系统的开环传递函数的全部极点都位于 S 平面左半部分 ($P=0$)，上述正、负穿越次数差应等于 0，或不存在任何穿越。

将制冷机一阶时滞控制模型与 PID 控制器相结合，得出制冷机温度控制系统的开环传递函数为

$$G(s)C(s) = \frac{k(K_d s^2 + K_p s + K_i)}{s(Ts + 1)} e^{-\tau s} \quad (3)$$

该开环系统的频率特性如下：

$$G(j\omega)C(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} \quad (4)$$

式中，

$$A(\omega) = \frac{k\sqrt{(K_i - K_d\omega^2)^2 + (K_p\omega)^2}}{\omega\sqrt{T^2\omega^2 + 1}} \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi(\omega) = -\pi - \arctan \frac{K_i - K_d\omega^2}{K_p\omega} - \tau\omega - \arctan T\omega, \\ \qquad \qquad \qquad \frac{1}{k} < K_p < 0 \\ \varphi(\omega) = -\arctan \frac{K_i - K_d\omega^2}{K_p\omega} - \tau\omega - \arctan T\omega, K_p > 0 \end{array} \right. \quad (6)$$

控制器设计的最低要求是 $\tau = 0$ 时闭环系统稳定。根据 Routh 判据，有 $K_p > -1/k$ ， $K_i > 0$ 。进一步当 $\tau \neq 0$ 时，根据 Nyquist 稳定判据，则有 $K_d \in (-T/k, T/k)$ 。由于制冷机温度控制系统的开环传递函数在 S 平面右半平面不存在零点，根据 Nyquist 稳定判据可知，闭环系统稳定的充要条件是：当 $A(\omega) = 1$ 时， $\varphi(\omega) + \pi > 0$ 。

考虑 $A(\omega_g) = 1$ ， $\varphi(\omega_g) + \pi = 0$ 的边界情况，得：

$$\left\{ \begin{array}{l} K_p = (T\omega_g \sin \tau\omega_g - \cos \tau\omega_g)/k \\ K_i = (T\omega_g^2 \cos \tau\omega_g + \omega_g \sin \tau\omega_g)/k + K_d\omega_g^2 \end{array} \right. \quad (7)$$

式中， ω_g 为系统的截止频率^[7]。

观察公式(7)发现，可以先分析比例增益 K_p 的取值范围，再根据 K_p 的取值确定 K_i 与 K_d 的值域。 K_p 的取值与 $T\omega_g \sin \tau\omega_g - \cos \tau\omega_g$ 的取值域有关，其最大值 K_{pmax} 为方程 $(T\omega \sin \tau\omega - \cos \tau\omega)/k$ 在区间 $\tau\omega \in (0, 3\pi/2)$ 上的最大值；当 K_p 的取值确定时，只要根据公式求出满足 $\varphi(\omega_g) + \pi > 0$ 的截止频率 ω_g 的取值范围，即可根据公式(7)确定 K_i, K_d 的值域。

2.2 设计仿真结果

根据上述方法计算可得出：

(1) K_p 的值域为： $K_p \in (-1/k, K_{pmax})$ ，
 $K_{pmax} = (T\omega_1 \sin \tau\omega_1 - \cos \tau\omega_1)/k$ ，其中 $\tau\omega_1 \in (\pi/2, \pi)$ 是方程 $\tan(\tau\omega) = -\frac{T}{T+\tau}(\tau\omega)$ 在区间 $\tau\omega \in (0, 3\pi/2)$ 上的根。

(2) 若设 ω_x ， ω_y 是直线 $kK_p = T\omega \sin \tau\omega - \cos \tau\omega$ 在区间 $\tau\omega \in (0, 3\pi/2)$ 上的两个根，且 $\omega_x < \omega_y$ ， $\tau\omega \in (0, \pi/2)$ ； ω_m 是方程 $\tau\omega + \arctan T\omega = \pi$ 在 $(\pi/2, \pi)$ 上的根，则可使闭环系统稳定的 K_i 与 K_d 值域为：

当 $-1/k < K_p < 1/k$ 时， K_i 与 K_d 的值域为：直线 $K_i = K_d\omega_x^2 + (T\omega_x^2 \cos \tau\omega_x + \omega_x \sin \tau\omega_x)/k$ ， $K_i = 0$ ， $K_d = \pm T/k$ 围成的封闭区域。特殊情况 $K_p = 1/k$ 时， K_i 与 K_d 的值域变为直角三角形。

当 $1 < kK_p < -\sec \omega_m$ 时， K_i 与 K_d 的值域为：直线 $K_i = K_d\omega_x^2 + (T\omega_x^2 \cos \tau\omega_x + \omega_x \sin \tau\omega_x)/k$ ，直线 $K_i = K_d\omega_y^2 + (T\omega_y^2 \cos \tau\omega_y + \omega_y \sin \tau\omega_y)/k$ 与 $K_i = 0$ ， $K_d = T/k$ 围成的封闭区域。

当 $kK_p > -\sec \omega_m$ 时， K_i 与 K_d 的值域为：直线 $K_i = K_d\omega_x^2 + (T\omega_x^2 \cos \tau\omega_x + \omega_x \sin \tau\omega_x)/k$ ，直线 $K_i = K_d\omega_y^2 + (T\omega_y^2 \cos \tau\omega_y + \omega_y \sin \tau\omega_y)/k$ 与 $K_i = 0$ ， $K_d = T/k$ 围成的封闭区域。

对一阶时滞系统 $C(s) = \frac{k}{Ts+1}e^{-\tau s}$ 取参数 $T = 3, K = 2, \tau = 0.5$, 根据上述方法可以求出 K_p 的值域为 $K_p \in (-0.5, 5.69)$, 同时求得 $-\sec \tau \omega_m = 5.04$ 。

当 $-0.5 < K_p \leq 0.5$ 时, 分别取 $K_p = 0.1, K_p = 0.3, K_p = 0.5$ 得出 K_p 取不同值时 K_i 与 K_d 的值域如图 2 所示。当 $0.5 < K_p \leq 5.04$ 时, 分别取 $K_p = 1.5, K_p = 3.0, K_p = 4.5$, 得出 K_p 取不同值时 K_i 与 K_d 的值域如图 3 所示。当 $5.04 < K_p < 5.69$ 时, 分别取 $K_p = 5.2, K_p = 5.4, K_p = 5.6$, 得出 K_p 取不同值时 K_i 与 K_d 的值域如图 4 所示。

用 Simulink 搭建系统仿真模型, 取图 2~4 中的边界参数 A_1 、 A_2 和 A_3 进行仿真, 系统的阶跃响应如图 5 所示。

取系统稳定区域内的参数 B_1 、 B_2 和 B_3 进行仿真, 系统的阶跃响应如图 6 所示。

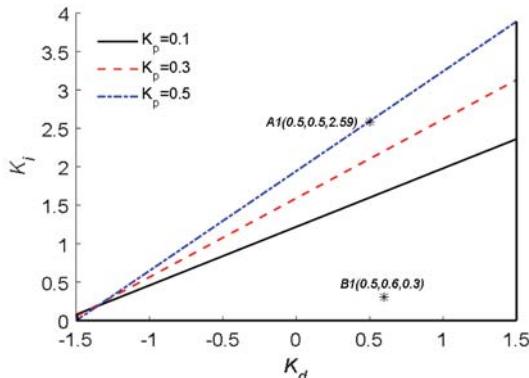


图 2 $-0.5 < K_p \leq 0.5$ 时 K_i 与 K_d 的值域

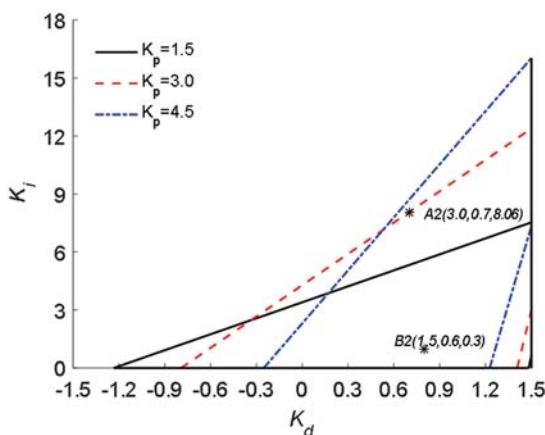


图 3 $0.5 < K_p \leq 5.04$ 时 K_i 与 K_d 的值域

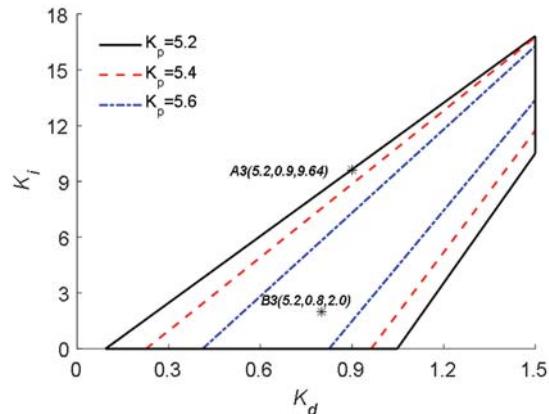


图 4 $5.04 < K_p < 5.69$ 时 K_i 与 K_d 的值域

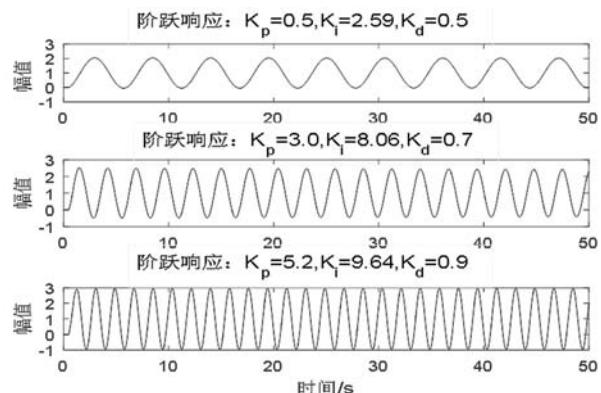


图 5 边界参数 A_1 、 A_2 和 A_3 的阶跃响应

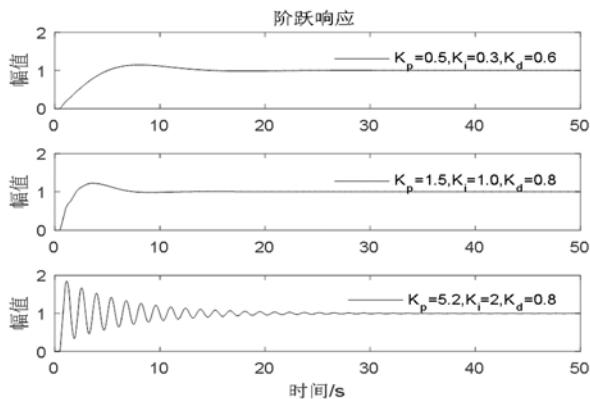


图 6 稳定参数 B_1 、 B_2 和 B_3 的阶跃响应

仿真结果表明, 根据 3.1 中的方法设计的 PID 参数可以使系统保持稳定。从图 6 可以看出, 当 K_p 在不同范围内取值时, 系统的超调量、调节时间及稳定程度有所不同。参数取值越接近值域内部, 系统的稳定性越高。在制冷机 PID 控制参数的设计过程中, 根据 PID 的控制规律选取稳定范围内的参数, 即可获得符合设计要求的 PID 控制器。

(下转第 48 页)