

PID 控制器增益的稳定范围研究

方 斌

(南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094)

摘 要:基于逆 Nyquist 曲线,提出了一种线性系统在 PID 控制下确定增益稳定范围的方法,为 PID 控制器增益的稳定提供了一条快速而有效的途径。由逆 Nyquist 曲线上的实部为极值的点,将 PID 增益分割成若干区间。再运用广义的 Hermite-Biehler 定理得出一个推理和二条件,通过纵向直线与逆 Nyquist 曲线的交点数,可获得系统在 PID 控制下增益稳定的区间。仿真实例验证了该方法的有效性。该方法应用简便,能有效解决 PID 控制下增益的稳定范围。

关键词:逆 Nyquist;广义 Hermite-Biehler 定理;PID 控制器;增益稳定范围

中图分类号:TP273

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2010)03-0203-04

Researches to Gain Stabilizing Regions of PID Controller

FANG Bin

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract:Based on the inverse Nyquist plot, a method is presented to ascertain the boundary of stabilizing PID gain for the linear system. This method provides a fast and the effective way for turning gain of PID controllers. According to the extreme points of the real part on the inverse Nyquist plot, the PID gain would be divided into several regions. Then an inference and two conditions can be derived from the generalization of Hermite-Biehler theorem. The stabilizing PID gain regions are obtained by the number of points, which are intersections of the inverse Nyquist curve and vertical line. The simulation examples demonstrate the validity of the proposed method. This method is simple and convenient. It can solve the problem of getting the stabilizing PID gain regions.

Key words:inverse Nyquist;generalization of Hermite-Biehler theorem;PID controller;stabilizing gain regions

0 引 言

最近几年,以 PID 控制器三个参数 (K_p, K_i, K_d) 所形成的三维空间为研究对象,确定其闭环系统稳定的范围,要比对 PID 控制器整定出一组好的参数更引人注目^[1~4]。相关文献[3~7]主要从特征多项式出发,通过对 PID 控制器三个参数的分解;在增益 K_p 固定前提下,分析 K_i-K_d 平面上稳定的范围。通过遍历 K_p ,从而确定 PID 控制器的三维稳定空间。文献[2]通过图形分析的方法,提出一种当增益穿越稳定区域边界时,确定不稳定极点数增量的表达式,给出 PID 增益参数稳定集的算法。

如何确定增益 K_p 的稳定范围,以便于计算机有效地遍历 K_p ,是目前研究 PID 控制器三维稳定空间首要解决的问题^[2,3,6,7]。笔者借助经典的频率特性和广义的 Hermite-Biehler 定理,给出一种线性系统在 PID

控制下闭环稳定的判别方法;并通过逆奈奎斯特图和有关推理,可简便地确定 PID 控制器增益的稳定范围。

1 二个稳定判据准则

为便于阐述文中所论证的方法,现对有关稳定判据进行简要介绍。

定义 1: 设

$$\delta(s) = \delta_0 + \delta_1 s + \cdots + \delta_n s^n = \delta_e(s^2) + s\delta_o(s^2)$$

为一 n 阶实多项式,其中 $\delta_e(s^2)$ 和 $s\delta_o(s^2)$ 分别为 $\delta(s)$ 关于 s 的偶次幂和奇次幂部分。令 $s = j\omega$, 则 $\delta(j\omega) = p(\omega) + jq(\omega)$, 其中: $p(\omega) = \delta_e(-\omega^2)$, $q(\omega) = \omega\delta_o(-\omega^2)$ 。记 $\omega_{e1}, \omega_{e2}, \cdots$ 是 $\delta_e(-\omega^2)$ 的非负实零点, $\omega_{o1}, \omega_{o2}, \cdots$ 是 $\delta_o(-\omega^2)$ 的非负实零点,且均按从小到大的顺序排列。

定理 1(广义 Hermite-Biehler 定理)^[8]

设 $\delta(s) = \delta_0 + \delta_1 s + \cdots + \delta_n s^n$ 为一 n 阶实多项式, l, r 分别为左半平面和右半平面的根个数。令 $\sigma(\delta) = l - r$, 则有:

收稿日期:2009-06-30;修回日期:2009-09-18

基金项目:校科研启动基金(AB41972)

作者简介:方 斌(1966-),男,教授,博士,研究方向为控制理论与控制工程。

$$\Delta_0^{+\infty}(\angle \delta(j\omega)) = \frac{\pi}{2} \sigma(\delta)$$

其中 $\Delta_0^{+\infty}(\angle \delta(j\omega)) = \int_0^{+\infty} \angle \delta(j\omega) d\omega$ 。

设系统开环传递函数为 $G(s)$, 其逆函数为 $\overline{G}(s) = 1/G(s)$ 。

定理 2(逆 Nyquist 稳定判据)^[9]

Nyquist 稳定判据也可以采用逆 Nyquist 图使用。判据表述如下: 如果 s 沿 Nyquist 路径 D 形围线变化一周时, $\overline{G}(s)$ 逆时针方向包围 $(-1, j0)$ 点的周数减去 $\overline{G}(s)$ 逆时针方向包围原点的周数等于 $G(s)$ 在右半平面的极点数 p , 则闭环系统是稳定的。

系统在比例控制下, 将逆 Nyquist 稳定判据中 $(-1, j0)$ 点用 $(-K_p, j0)$ 点代替, 应用逆 Nyquist 稳定判据可获得增益 K_p 的稳定范围。但在 P、I、D 同时控制时, 就不能简单地用 PID 控制器的频率特性替代 $(-1, j0)$ 点来进行有关稳定的判断。用逆 Nyquist 曲线判断系统的稳定性, 为文中的出发点。

2 逆 Nyquist 图与负的 PID 频率特性

设被控对象为:

$$G(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{b_q s^q + b_{q-1} s^{q-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_{n_1} s^{n_1} + a_{n_1-1} s^{n_1-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1)$$

其中 $n_1 \geq q$ 。

$$\text{PID 控制器为: } C(s) = K_p + K_d s + \frac{K_i}{s} \quad (2)$$

$$\text{系统特征方程为: } 1 + C(s)G(s) = 0 \quad (3)$$

特征方程的维数为: $n = n_1 + 1$

仿照逆 Nyquist 稳定判据处理方法, 将(3)式改写为:

$$\overline{G}(s) = -C(s)$$

$$\text{令 } s = j\omega, \varphi(\omega) = \angle \overline{G}(j\omega), H(j\omega) = Q(j\omega)P(-j\omega)$$

$$\text{有: } \overline{G}(j\omega) = -C(j\omega) \quad (4)$$

(4) 式左侧为:

$$\overline{G}(j\omega) = \frac{Q(j\omega)}{P(j\omega)} = \frac{H(j\omega)}{|P(j\omega)|^2} = \frac{\text{Re}(H(j\omega)) + j\text{Im}(H(j\omega))}{|P(j\omega)|^2} \quad (5)$$

(5) 式也可写成下式:

$$\overline{G}(j\omega) = |\overline{G}(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)} = |\overline{G}(j\omega)| \cos(\varphi(\omega)) + j |\overline{G}(j\omega)| \sin(\varphi(\omega))$$

当 $n_1 > q$ 时, 一定存在某个 $\overline{\omega}$, 当 $\omega > \overline{\omega}$ 时 $|\overline{G}(j\omega)|$ 为单调增加的。因而在绘制逆 Nyquist 图时仅需给出 $(0, \overline{\omega})$ 段。

$$(4) \text{ 式右侧为: } -C(j\omega) = K_p + j\left(\frac{K_i}{\omega} - K_d \omega\right) \quad (6)$$

由(4)式得:

$$\frac{\text{Re}(H(j\omega))}{|P(j\omega)|^2} = \frac{|H(j\omega)|}{|P(j\omega)|^2} \cos(\varphi(\omega)) = -K_p \quad (7)$$

$$\frac{\text{Im}(H(j\omega))}{|P(j\omega)|^2} = \frac{|H(j\omega)|}{|P(j\omega)|^2} \sin(\varphi(\omega)) = \frac{K_i}{\omega} - K_d \omega \quad (8)$$

3 多项式奇、偶分解

将(3)式写成如下多项式:

$$sQ(s) + (K_i + K_d s^2 + K_p s)P(s) = 0 \quad (9)$$

$$\text{令 } \delta(s) = sQ(s) + (K_i + K_d s^2 + K_p s)P(s)$$

(9) 式左右乘以 $P(-s)$ 得:

$$sQ(s)P(-s) + (K_i + K_d s^2 + K_p s)P(s)P(-s) = 0$$

$$\text{令 } v(s) = sQ(s)P(-s) + (K_i + K_d s^2 + K_p s)P(s)P(-s) \quad (10)$$

多项式 $v(s)$ 的维数为: $n + q$

令 $s = j\omega, H(j\omega) = Q(j\omega)P(-j\omega)$, 有:

$$[(K_i - K_d \omega^2) |P(j\omega)|^2 - \omega \text{Im}(H(j\omega))] + j\omega [\text{Re}(H(j\omega)) + K_p |P(j\omega)|^2] = 0 \quad (11)$$

将(11)式按定义 1 可写成如下形式:

$$\delta_e(-\omega^2) + j\omega \delta_o(-\omega^2) = 0$$

比较(4)、(11)二式, 可知(7)、(8)式的零点分别为 $\delta_o(-\omega^2)$ 和 $\delta_e(-\omega^2)$ 的零点。

4 基于逆 Nyquist 图 PID 控制下稳定分析

4.1 稳定的条件

设 $P(s)$ 在左半平面和右半平面的零点个数分别为 l_1, r_1 , 多项式 $\delta(s)$ 在左半平面和右半平面的零点个数分别为 l, r , 利用定理 1 有:

$$\Delta_0^\infty(\angle v(j\omega)) = \frac{\pi}{2} \sigma(v) = \frac{\pi}{2} ((l + r_1) - (r + l_1)) \quad (12)$$

若系统在 PID 控制下稳定, 即 $l = n, r = 0$

此时(12)式应为:

$$\Delta_0^\infty(\angle v(j\omega)) = \frac{\pi}{2} \sigma(v) = \frac{\pi}{2} (n - (l_1 - r_1)) \quad (13)$$

(13) 式反映系统在 PID 控制下稳定时, ω 从 $0 \rightarrow +\infty$ 角度 $\angle v(j\omega)$ 的变化量为 $\frac{\pi}{2} (n - (l_1 - r_1))$ 。根据定理 1 和文献[8]作如下推理:

推理 1: 为保证 $\angle v(j\omega)$ 变化量为 $\frac{\pi}{2} (n - (l_1 - r_1))$

$r_1)$), (10) 式 $v(s)$ 的 $\delta_o(-\omega^2)$ 至少有 m_1 个非负有限实零点 $0 = \omega_{o1} < \omega_{o2} < \dots < \omega_{om_1}$; 同时 $\delta_o(-\omega^2)$ 必须有 m_2 个非负有限实零点 $\omega_{e1} < \omega_{e2} < \dots < \omega_{em_2}$, $m_1 - 1 \leq m_2 \leq m_1$, 且 ω_{ei} 与 ω_{oj} 交错。其中:

$$m_1 = \begin{cases} \frac{(n - (l_1 - r_1))}{2} & n + q \text{ 为偶数} \\ \frac{(n - (l_1 - r_1)) + 1}{2} & n + q \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (14)$$

n 为偶数时, $\omega_{om_1+1} = +\infty$, n 为奇数时, $\omega_{em_2+1} = +\infty$ 。 $\delta_o(-\omega^2)$ 、 $\delta_e(-\omega^2)$ 的零点可分别从(7)、(8)式获得。从逆 Nyquist 曲线和负的 PID 频率特性曲线相交情况, 可确定(7)、(8)式的解。

由于只需判别 $\delta_e(-\omega^2)$ 和 $\delta_o(-\omega^2)$ 的非负实零点, 因此在绘制逆 Nyquist 曲线仅需画出 ω 为正部分。

4.2 增益固定时负的 PID 频率特性

根据 $-C(j\omega)$ 与逆 Nyquist 曲线, 确定 $\delta_e(-\omega^2)$ 和 $\delta_o(-\omega^2)$ 的非负实零点是否简单有效, 直接影响该方法的应用。从(6)式可知, 在增益 K_p 固定条件下, $-C(j\omega)$ 为一条纵向直线; 显然(7)式的解, 即为该直线与逆 Nyquist 曲线的交点, 交点数可方便地从逆 Nyquist 曲线上获取。

令(6)式右侧虚部为零可得: $\omega_r = \sqrt{K_i/K_d}$

对(6)式右侧虚部求导并令为零, 有:

$$-\frac{K_i}{\omega^2} - K_d = 0, \omega_m = \sqrt{\frac{-K_i}{K_d}}$$

负的 PID 频率特性 $-C(j\omega)$ 总结如下:

(1) 在 $K_i K_d > 0$, $-C(j\omega)$ 的虚部具有单调性, 与实轴交点为 ω_r ;

(2) 在 $K_i K_d < 0$, $-C(j\omega)$ 的虚部具有极值, 极值点位于 ω_m , $-C(j\omega)$ 在实轴上部或下部的一条直线;

(3) 在 $K_i = 0$ 或 $K_d = 0$, $-C(j\omega)$ 为从实轴开始或从实轴终止的一条射线。

根据 K_i 和 K_d 正负或零, $-C(j\omega)$ 曲线分 8 种情况, 具体如图 1 所示。

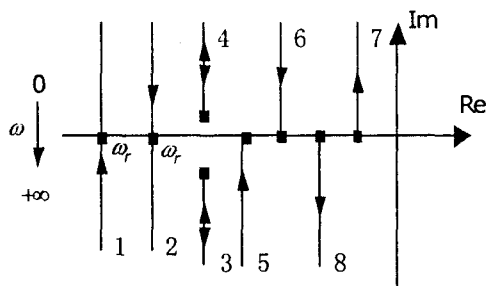


图 1 负的 PID 频率特性

图中曲线:

1 为 $K_i < 0, K_d < 0$; 2 为 $K_i > 0, K_d > 0$;

3 为 $K_i < 0, K_d > 0$; 4 为 $K_i > 0, K_d < 0$;

5 为 $K_i < 0, K_d = 0$; 6 为 $K_i > 0, K_d = 0$;

7 为 $K_i = 0, K_d < 0$; 8 为 $K_i = 0, K_d > 0$ 。

其中曲线 3 和 4, $-C(j\omega)$ 的虚部存在极值 ω_m , 其它曲线的虚部随 ω 增大而单调增加或减小。

4.3 逆 Nyquist 曲线上稳定的条件

推理 1 中可从逆 Nyquist 曲线与纵向直线的交点数确定。逆 Nyquist 曲线横坐标为极值的点是一类关键点, 该点所对应的 PID 增益设为 K_{pi} , $i = 1, 2, \dots, M_3$, 且从小到大排列, K_{pi} 将增益分成若干区间, 每个区间内逆 Nyquist 曲线与纵向直线的交点数是不变的。

根据上文推理 1, 可得如下 2 个条件:

条件 1: 系统在 PID 控制下, 任取 $-K_p$ 且 $K_{pi} < K_p < K_{pi+1}$ 。在逆 Nyquist 曲线平面上, K_p 所对应的 $-C(j\omega)$ 与逆 Nyquist 曲线至少有 m_1 个交点, 则在 PID 控制下, K_p 在该区间 $(K_{pi} K_{pi+1})$ 是稳定的, 否则该区间一定不稳定。

满足条件 1, 是系统在 PID 控制下稳定的必要条件; 但运用条件 1 可快速确定 K_p 的稳定范围。

条件 2: 存在稳定范围 $(K_{pi} K_{pi+1})$ 的充分条件是在满足条件 1 条件下, 同时存在某些 K_i, K_d 使(8)式有 m_2 个非负实零点, 并且与(7)式的 m_1 个非负实零点满足交错特性。

在逆 Nyquist 曲线上, 运用 $-C(j\omega)$ 的特性作一些简单分析并结合条件 1 可方便确定 K_p 的稳定范围。关于某一 K_p 下, K_i, K_d 的稳定范围也可在该图获得一些有用的结论, 限于篇幅在此略。

5 实 例

例 1: 文献[6]例如下:

$$G(s) = \frac{s^3 - 4s^2 + s + 2}{s^5 + 8s^4 + 32s^3 + 46s^2 + 46s + 17}$$

有 $n = 6, q = 3, l_1 = 1, r_1 = 2; m_1 = 4$; 例 1 的逆 Nyquist 曲线如图 2 所示, 图 2 中 A 点为起始点, B、C 点分别为 $\text{Re}(\overline{G}(j\omega))$ 局部最小和最大的点; 在图中画一条纵向直线 L1(L2) 作为 $-C(j\omega)$ 曲线, 该直线与横轴交点为 d, 其横坐标即为 $-K_p$ 。A、B 和 C 点将 K_p 分割为 $(-19.1 - 8.5)$ 、 $(-8.5 4.2)$ 和 $(4.2 + \infty)$ 三个区域。

通过左右移动纵向直线可知, 在 B 点左侧, $-C(j\omega)$ 曲线与逆 Nyquist 曲线交点数为 1, 不满足条件 1; 在 $(-19.1 - 8.5)$ 区间虽有 2 个交点, 但其对应的 $m_1 = 3 < 4$; 因而 K_p 在 $(-19.1 - 8.5)$ 和 $(4.2 + \infty)$ 区域是不稳定的; 当该直线 L1 在 A、B 点之间移动时均有 3 个交点, 交点为 E(e)、F(f) 和 G(g), 满足条件 1 (另外 1 个交点为 0); 其中大写字母 E、F 和 G 表示在逆

Nyquist 曲线上的点,小写字母 e、f 和 g 表示在 $-C(j\omega)$ 曲线的点。

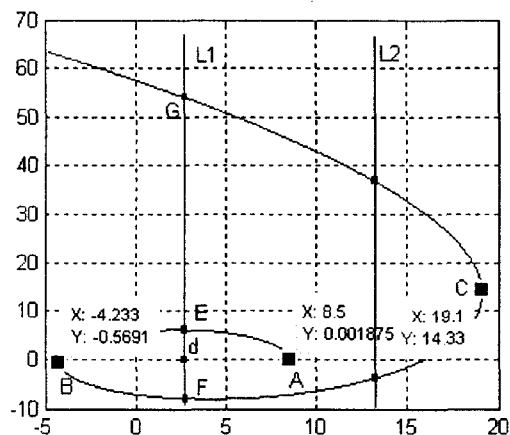


图 2 例 1 的逆 Nyquist 曲线

根据条件 1 可知 K_p 的稳定范围为 $(-8.5 \ 4.2)$, 注意该条件仅为必要条件。实际上,此时也存在相应的 K_i 和 K_d 满足条件 2。

下面分析条件 2, 用 ω 的相应下标表示这些点的频率,显然有 $\omega_A < \omega_E < \omega_B < \omega_F < \omega_G$; $\omega_E \neq \omega_e$, $\omega_F \neq \omega_f$, $\omega_G \neq \omega_g$ (系统处于临界稳定时有 $\omega_E = \omega_e$, $\omega_F = \omega_f$, $\omega_G = \omega_g$)。不妨假设 $-C(j\omega)$ 直线是图 1(b) 情况, 此时 $-C(j\omega)$ 虚部随 ω 增大而减小, 通过适当选取 K_i 和 K_d , 使下不等式成立:

$$K_i/\omega_G - K_d\omega_G > \text{Im}(\bar{G}(j\omega_G)) \quad K_i/\omega_E - K_d\omega_E < \text{Im}(\bar{G}(j\omega_E)) \quad K_i/\omega_F - K_d\omega_F > \text{Im}(\bar{G}(j\omega_F))$$

$$K_i > 0, K_d > 0$$

上述不等式给出了 K_i 、 K_d 的稳定范围。可保证 (8) 式左边和右边的频率特性有 3 个交点 e、h 和 p, 见图 3, 且 $\omega_A < \omega_e < \omega_E < \omega_h < \omega_F < \omega_p < \omega_G$; 图 3 中曲线 1 为逆 Nyquist 曲线的虚部, 曲线 2 为 $-C(j\omega)$ 的虚部。因而 K_p 的稳定范围就为 $(-8.5 \ 4.2)$ 。

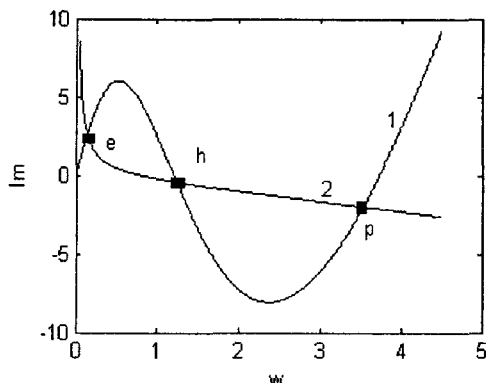


图 3 对象和 PID 的虚频特性

例 2: 文献[9] 例如下:

$$G(s) = \frac{s^3 + 3s^2 + 9}{s^4 + 2s^3 + 3s^2 + 7s + 14}$$

有 $n = 5, q = 3, l_1 = 1, r_1 = 2; m_1 = 3$; 其逆 Nyquist 曲线如图 4 所示, 图 4 中 A 点为起始点, B 点为 $\text{Re}(\bar{G}(j\omega))$ 最大的点; C、D 点为左侧局部极值点。在图中分别画出三条纵向直线作为 $-C(j\omega)$ 曲线, 直线的横坐标即为 $-K_p$ 。A、B、C 和 D 点将 K_p 分割为 $(-\infty - 1.9)$ 、 $(-1.9 - 1.6)$ 、 $(-1.6 \ 0.3)$ 、 $(0.3 \ 0.5)$ 和 $(0.5 + \infty)$ 五个区域。区域 $(0.5 + \infty)$ 内 $\bar{G}(j\omega)$ 为单调向上的。

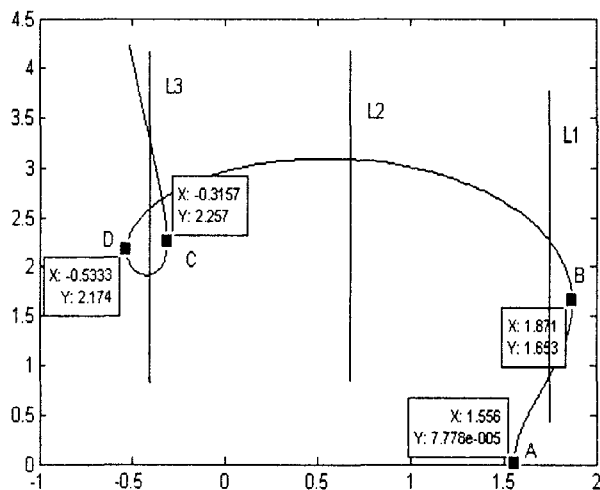


图 4 例 2 的逆 Nyquist 曲线

直线 L1 在 A 点和 B 点之间左右移动可知, 直线 L1 与逆 Nyquist 曲线交点数为 2, 满足条件 1; K_p 在 $(-1.9 - 1.6)$ 区间是稳定的。

直线 L2 在 A 点和 C 点之间左右移动可知, 直线 L2 与逆 Nyquist 曲线交点数为 1, 不满足条件 1; K_p 在 $(-1.6 \ 0.3)$ 区间是不稳定的。

直线 L3 在 C 点和 D 点之间左右移动可知, 直线 L3 与逆 Nyquist 曲线交点数为 2 或 3, 满足条件 1, 注意当直线 $-C(j\omega)$ 为图 1 中(d) 时, 交点数可能为 2; K_p 在 $(0.3 \ 0.5)$ 区间是稳定的。

根据条件 1, 可知 K_p 的稳定范围为 $(-1.9 - 1.6) \cup (0.3 \ 0.5)$, 注意该条件仅为必要条件。实际上, 此时也存在相应的 K_i 和 K_d 满足条件 2。

6 结束语

对于线性系统, 首先绘制其逆 Nyquist 曲线, 该曲线的实部为极值的点, 将 K_p 分割成若干区间; 其次利用条件 1, 对每个 K_p 区间观察图 1 中纵向直线与逆 Nyquist 曲线的交点数; 可得出系统在 PID 控制下 K_p 稳定的区间。该方法基于逆 Nyquist 曲线, 其判断过程不需要过多的理论计算, 便于推广到实际应用。另外, 利用条件 2, 可确定在 K_p 一定下, K_i 、 K_d 的稳定范围, 进而可给出 PID 控制器的三维稳定范围。

(下转第 210 页)

```
//调用 DLLMain, 参数为 DLL_PROCESS_ATTACH
end.
```

2.3 相关问题分析

相关问题分析如下:

(1) 两级监控。

注入的目标进程一般选择系统进程如 csrss、system、Winlogon 等, 这样安全性更高, 即便注入的 DLL 模块被发现, 系统进程也不允许被关闭。但有时要选择 explorer 进程, explorer 是一个重要用户进程, 用于管理 Windows 图形壳, 包括开始菜单、任务栏、桌面和文件管理。删除该进程会导致 Windows 图形界面无法使用。注入 explorer 进程的优点是监控程序可以启动具有图形界面的程序; 缺点是 explorer 进程被结束后, 可以重新在任务管理器中运行 explorer, 系统恢复正常, 但是先前注入的监控程序就不存在了。解决的办法可以采用两级监控: 第一级监控程序模块注入到系统进程, 负责监控第二级监控程序模块是否已经注入到 explorer 进程, 若没有则将其注入到 explorer 进程; 第二级监控程序负责监控具体任务。采用两级监控可以使监控系统更安全、功能更强。

(2) 应对安全检测技术。

远程线程注入过程需要在目标进程中创建远程线程, 该行为可以被某些安全检测软件检测到。若不能通过许可, 注入就被禁止。利用异步过程调用 (Asynchronous Procedure Call, APC) 机制实现远程线程注入, 该技术未对内核对象等系统敏感信息进行修改 (未挂钩系统服务函数、修改服务函数执行路径), 因此其能有效对抗系统一致性检测、EPA 执行路径分析、挂钩检测等检测技术。相比于常规的远程线程注入, 该技术未采用跨进程创建线程的常规方案, 从而能有效地避开安全测试软件的常规行为检测 (针对跨进程创建

线程的可疑行为的检测)。

3 结束语

将监控程序编译成 DLL 文件, 通过远程线程注入技术将其注入到系统进程, 可以有效地对监控系统起到隐藏和保护的作用。文中研究方法应用到了学校机房管理中, 用来监控机房管理客户端程序的运行。通过注册表自动启动完成注入, 配合硬盘保护卡使用, 取得了良好的效果。

参考文献:

- [1] 王建华, 张焕生, 侯丽坤. Windows 核心编程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [2] 肖道举, 左 佳, 陈晓苏. 进程隐藏的相关问题研究 [J]. 微处理机, 2008(2): 78-80.
- [3] 何 志, 范明钰, 罗彬杰. 基于远程线程注入的进程隐藏技术研究 [J]. 计算机应用, 2008, 28(6): 92-94.
- [4] 李元良, 黄 强. 远程线程注入技术的实现 [J]. 矿业研究与开发, 2006, 26(3): 77-78.
- [5] 曹 蕾, 李光明, 傅 蓉, 等. Delphi 7 程序设计与上机指导 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
- [6] 龙启明, 刘 斌, 程 捷. Delphi 高级编程范例 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [7] 崔 甲, 李毅超, 梁 晓, 等. 基于 Windows 平台的键盘记录技术的研究 [J]. 网络安全技术与应用, 2007(9): 79-81.
- [8] Cicotti P, Taufer M, Chien A A. DGMonitor: A Performance Monitoring Tool for Sandbox-Based Desktop Grid Platforms [J]. The Journal of Supercomputing, 2005, 34: 113-133.
- [9] Rashidzadeh R, Ahmadi M, Miller W C. On-chip measurement of waveforms in mixed-signal circuits using a segmented subsampling technique [J]. Analog Integr Circ Sig Process, 2007, 50: 105-113.

(上接第 206 页)

参考文献:

- [1] Bajcinca N. Design of robust PID controllers using decoupling at singular frequencies [J]. Automatica, 2006, 42: 1943-1949.
- [2] Saeki M. Properties of Stabilizing PID Gain Set in Parameter Space [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2007, 52(9): 1710-1715.
- [3] Ho M T, Datta A, Bhattacharyya S P. A linear Programming Characterization of All Stabilizing PID Controllers [C]//Proc of American Control Conf. Albuquerque: [s. n.], 1997: 3922-3928.
- [4] Keel L H, Bhattacharyya S P. PID Controller Synthesis Free of Analytical Models [C]//Proceedings of the 16th IFAC World Congress. Prague, Czech Republic: [s. n.], 2005.
- [5] Silva G J, Datta A, Bhattacharyya S P. New Results on the Synthesis of PID Controllers [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2002, 47(2): 241-252.
- [6] Soylemeza M T, Munro N, Baki H. Fast calculation of stabilizing PID controllers [J]. Automatica, 2003, 39: 121-126.
- [7] Bajcinca N, Hulin T. Menge aller robust stabilisierenden PID-Regler: Methodik und Software (Teil I) [J]. Methoden, 2005, 53(11): 556-564.
- [8] Ho Ming-Tzu, Datta A, Bhattacharyya S P. Generalizations of the Hermite-Biehler theorem [J]. Linear Algebra and its Applications, 1999, 302-303: 135-153.
- [9] 吴 麒. 自动控制原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.