

柔性机械臂动力学奇异性 渐近行为的比较研究¹⁾

郭雪梅 王国利 张宪民

(汕头大学工学院 汕头 515063)

摘要 通过对柔性机械臂动力学系统的零极点及其模态参量渐近行为的解析分析,讨论了模态截取和零点截取有限维近似模型动力学奇异性关于阶次的渐近行为,并进行了比较研究.此外,还就截取模型的高阶项对逆动力学计算力矩病态行为的影响进行了数值比较分析.

关键词 柔性机械臂,动力学奇异性,逆动力学.

ASYMPTOTIC BEHAVIOR OF DYNAMIC SINGULARITY OF FLEXIBLE MANIPULATORS: A COMPARATIVE STUDY

GUO Xuemei WANG Guoli ZHANG Xianmin

(Engineering College, Shantou University, Shantou 515063)

Abstract Based on analytical analysis for the asymptotic expressions of the poles, zeros and modal parameters of a flexible manipulator, the asymptotic behavior of the dynamic singularity is discussed analytically for both zero-truncated and modal truncated approximation models, and the comparison is carried out as well. An numerically comparative study for the inverse dynamics is made to illustrate the effects of high order terms of the truncated models on the ill-posed behavior of the calculated torque.

Key words Flexible manipulator, dynamic singularity, inverse dynamics.

1 引言

非并置控制方式下柔性机械臂动力学是奇异的,采用前馈控制策略^[1]和反馈控制策略^[2]时,动力学奇异性都会导致控制力矩异常饱和,引发带宽受限问题,这将限制柔性机械臂高速运动控制的实现.文[3]的研究结果表明,柔性机械臂动力学奇异性会导致逆系统的频域响应在高程趋于病态,末端运动轨迹中含有的高频成分将激励起逆动力学的病态行为,由此得到的计算力矩将含有病态高频成分,计算力矩中出现的局部高频脉冲尖

1) 国家自然科学基金(59975056)及广东省自然科学基金(970379)资助课题.

收稿日期 1997-11-07 收修改稿日期 1998-06-24

峰将使驱动器饱和. 本文将进一步考察柔性机械臂动力学奇异性关于阶次的渐近行为, 这对改善控制带宽受限的研究具有重要的理论指导意义.

柔性机械臂逆动力学的动态特性直接依赖于动力学系统的零点分布. 常规模态截取有限维近似模型的零点分布, 特别是高阶复零点的出现, 与无穷维模型的理想零点分布有较大的误差. 因此, 开展模态截取与零点截取有限维近似模型的动力学奇异性比较研究, 对探索基于零点截取近似模型求解逆动力学是十分必要的. 本文将基于零极点及模态参量渐近行为的解析分析, 定量地考察模态截取与零点截取近似模型动力学奇异性的渐进行为, 并通过实例分析比较高阶零点和高阶模态对逆动力学计算力矩病态行为的影响.

2 有限维近似动力学模型

考虑图1所示的平面单连杆柔性机械臂, 连杆为一弹性变形仅限于平面内的均匀梁, 其长为 l , 线密度为 ρ , E 为杨氏模量, I 为截面转动惯量. 连杆末端连接着质量为 M_t 的质点型负载, 另一端紧固在旋转惯量为 J_h 的法兰盘上. 采用连杆的纯位移来描述连杆的刚性运动与弹性变形的复合结果, 即

$$z(t, x) = x\theta(t) + w(t, x), \quad (1)$$

其中 $\theta(t)$ 为关节旋转角, $w(t, x)$ 为连杆在旋转坐标系 oxy 中的变形. 忽略连杆剪切弹性和截面旋转惯性对弹性变形的影响, 以及连杆材料的结构阻尼, 根据 Euler-Bernoulli 梁理论, 可得下述运动方程

$$\rho \ddot{z}(t, x) + EI D^4 z(t, x) = 0, \quad t \geq 0, 0 \leq x \leq l, \quad (2a)$$

$$J_h \ddot{\theta}(t) - EI D^2 z(t, 0) = \tau(t), t \geq 0, \quad (2b)$$

边界条件为

$$z(t, 0) = 0, \mathbf{D}z(t, 0) = \theta(t), \quad (2c)$$

$$M_t \ddot{z}(t, l) = EI D^3 z(t, l), EI D^2 z(t, l) = 0, \quad (2d)$$

其中 τ 为驱动器作用力矩, 此处及后文使用的微分符号诠释为 $\mathbf{D}f = \partial f / \partial x$ 和 $\dot{f} = \partial f / \partial t$.

2.1 零点截取有限维近似模型

将驱动力矩 $\tau(t)$ 作为控制输入, 末端位移 $z(t, l)$ 作为输出, 对式 (2a) ~ (2d) 作 Laplace 变换, 可得到控制系统如下封闭形式的传递函数

$$G(s) = \frac{l^2 P(\beta)}{EI Q(\beta)}, \quad \beta^4 = \frac{l^4 \rho}{EI} (-s^2), \quad (3)$$

其中

$$P(\beta) = -2(\sin\beta + \sinh\beta),$$

$$Q(\beta) = (\sin\beta \cosh\beta - \cos\beta \sinh\beta) + 2 \frac{M_t \beta}{\rho l} \sin\beta \sinh\beta +$$

$$\frac{J_h M_t \beta^4}{\rho l^4} (\cos\beta \sinh\beta - \sin\beta \cosh\beta) + \frac{J_h \beta^3}{\rho l^3} (1 + \cos\beta \cosh\beta).$$

利用 Mittag-Leffler 定律^[4]可得到无穷乘积展开形式的传递函数

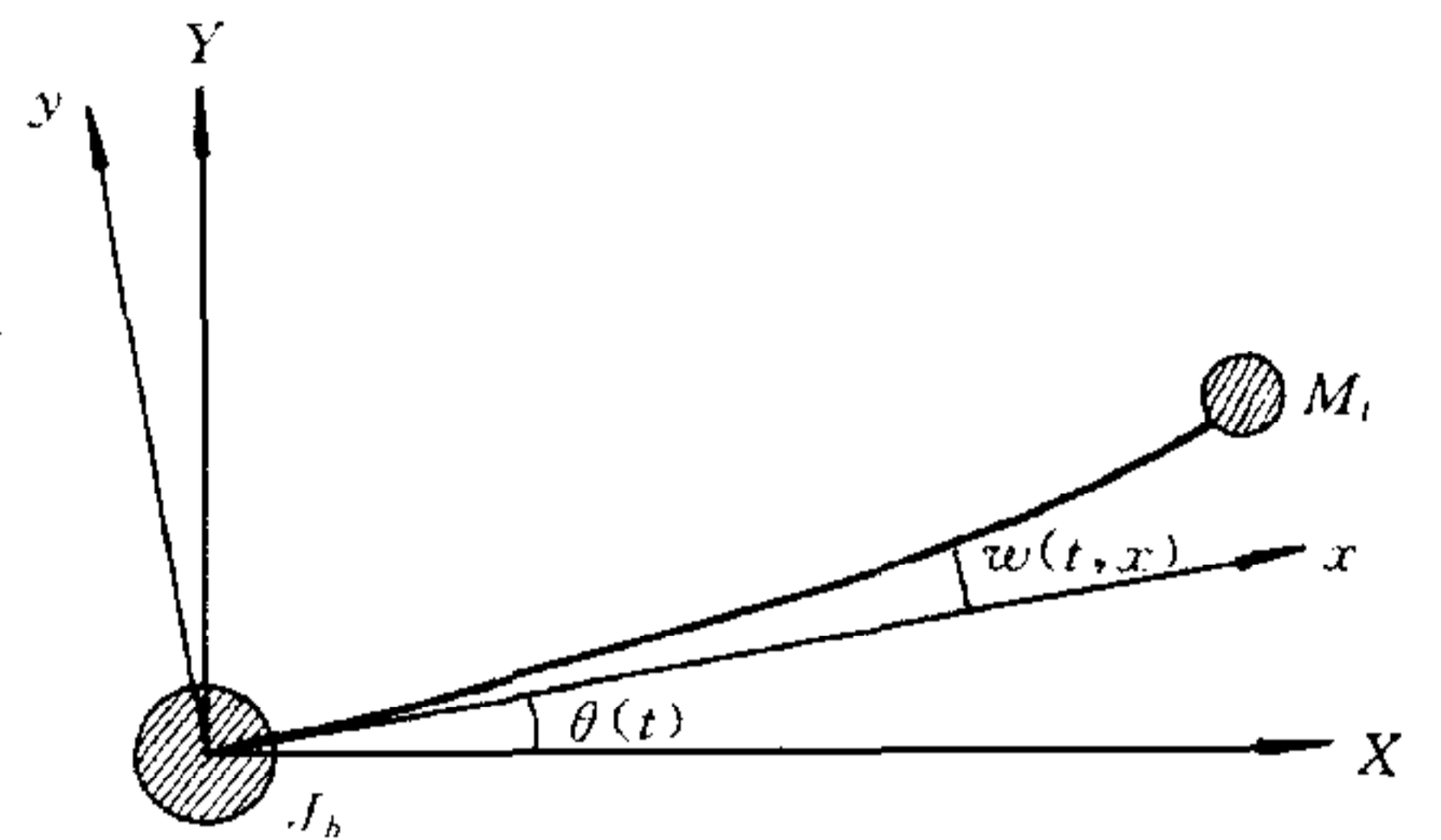


图1 平面单连杆弹性机械臂的俯视图

$$G(s) = \frac{l}{J_0 s^2} \prod_{n=1}^{\infty} \frac{1 - s^2 p_n^{-2}}{1 + s^2 \lambda_n^{-1}},$$

其中 $J_0 = \left(\frac{1}{3} \rho l^3 + M_t l^2 + J_h \right)$ 为系统关于 o 的极转动惯量, $p_n^2 = 4b_n^4 EI (l^4 \rho)^{-1}$, $b_n > 0$ 满足方程

$$\tanh b_n = -\tan b_n, \quad 0 < b_1 < b_2 < \dots < b_n < \dots < \infty, \quad (5)$$

$\lambda_n = d_n^4 EI (l^4 \rho)^{-1}$, d_n 为本征方程 $Q(d_n) = 0$ 的解, 且 $0 < d_1 < \dots < d_n < \dots < \infty$. 保留式(4)中的 N 阶部分乘积项, 得到 $G(s)$ 的第 N 阶零点截取有限维近似模型

$$G_Z^N(s) = \alpha_Z^N s^{-2} \prod_{n=1}^N g_n(s^2), \quad g_n(\mu) = \frac{\mu - p_n^2}{\mu + \lambda_n}, \quad \alpha_Z^N = (-1)^N \frac{l}{J_0} \prod_{n=1}^N \frac{\lambda_n}{p_n^2}. \quad (6)$$

观察式(6)可知, $G_Z^N(s)$ 保持了 $G(s)$ 的前 N 对主导零点, 这些实零点正是柔性机械臂作为耗散结构所具有的能量非传播特征^[5].

2.2 模态截取有限维近似模型

将运动方程(2a)~(2d)等价地表示成 Hilbert 空间 W 上的抽象发展方程

$$\ddot{u}(t) + Au(t) = \Omega \tau(t), \quad t > 0. \quad (7)$$

上式中 $\Omega = [0, 0, J_n^{-1}]^T$; $u(t) = [z(t, x), z(t, l), \theta(t)]^T \in W$, $W = L^2(0, l) \times R^2$; 嵌入内积为

$$\langle u, v \rangle_H = \int_0^l \rho u_1 v_1 dx + M_t u_2 v_2 + J_h u_3 v_3, \quad u, v \in W;$$

A 为弹性算子, 定义为

$$Au = \left[\frac{EI}{\rho} \mathbf{D}^4 u_1, \frac{EI}{M_t} \mathbf{D}^3 u_2, -\frac{EI}{J_h} \mathbf{D}^2 u_1(0) \right]^T,$$

定义域

$$D(A) = \left\{ u \in W \left| \begin{array}{l} \mathbf{D}^2 u_1 \in H^2(0, l), u_1(0) = 0 \\ \mathbf{D} u_1(0) = u_3, u_1(l) = u_2, \mathbf{D}^2 u_1(l) = 0 \end{array} \right. \right\}$$

为 H 中的稠密子空间, $H^m(0, l)$ 为 $(0, l)$ 上的 m 阶 Sobolev 空间; A 为 W 上具有纯点谱的闭算子^[6], $\{\lambda_n\}_{n=0}^{\infty}$ 为 A 的本征值; 规范正交本征向量 $\{\Phi^n(x) = [\phi_n(x), \varphi_n, \psi_n]^T\}_{n=0}^{\infty}$ 形成 W 的完备正交基; $u(t)$ 在 W 上按模态可展成 $u(t) = \sum_{n=0}^{\infty} u^n(t) \Phi^n$, 对每个 $n \geq 0$, u_n 满足方程

$$\ddot{u}^n(t) + \lambda_n u^n(t) = \psi_n \tau(t). \quad (8)$$

对式(8)作 Laplace 变换, 得到从力矩 $\tau(t)$ 到末端位移 $z(t, l)$ 的传递函数

$$G(s) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \sigma_n}{s^2 + \lambda_n}, \quad \sigma_n = (-1)^n \varphi_n \psi_n. \quad (9)$$

保留式(9)中的前 $N+1$ 项, 得到 $G(s)$ 的第 N 阶模态截取有限维近似模型

$$G_M^N(s) = \sum_{n=0}^N \frac{(-1)^n \sigma_n}{s^2 + \lambda_n}. \quad (10)$$

对比式(6), 可将式(10)进一步写成乘积展开形式

$$G_M^N(s) = \alpha_M^N s^{-2} \prod_{n=1}^N \tilde{g}_n(s^2), \quad \tilde{g}_n(\mu) = \frac{\mu - \tilde{p}_n^2}{\mu + \lambda_n}, \quad \alpha_M^N = \sum_{n=0}^N (-1)^n \sigma_n. \quad (11)$$

从模态截取和零点截取方式知道, $\{\tilde{p}_n, -\tilde{p}_n\}_{n=1}^N$ 由模态参数集 $\{\phi_n, \varphi_n, \lambda_n\}_{n=1}^N$ 确定, 与阶次 N 相关, 而 $\{p_n, -p_n\}_{n=1}^N$ 与模态参数和阶次 N 均无关. 对于较大的 n , \tilde{p}_n 将成为复数, 与

p_n 的物理意义向背. 为了保留近似动力学模型零点的物理意义, 以下讨论合理地约定:

(A1) $G_M^N(s)$ 无复零点, 即 $\tilde{p}_n^2 > 0, n=1, 2, \dots, N$.

文中的下标中“Z”和“M”分别用于标识零点截取和模态截取近似模型的相关描述变量.

3 动力学奇异性渐近行为分析

3.1 零极点的渐近性质

当 n 较大时, 由于 $\tanh b_n \approx 1$, 故 $b_n > 0$ 近似满足方程 $\tan b_n = -1$, 因而 b_n 可渐近表示成

$$b_n \approx (n + 3/4)\pi, \quad (12)$$

同样, 对于较大 n , 由于 $(d_n^{-4} \exp(-d_n))Q(d_n) \approx (\cos d_n - \sin d_n)J_h M_t (2\rho l^4)^{-1}$, 故 $d_n > 0$ 近似满足方程 $\cos d_n - \sin d_n = 0$, 因而 d_n 可渐近表示为

$$d_n \approx (n + 1/4)\pi. \quad (13)$$

综上所述, 对于较大的 n , p_n^2 和 λ_n 具有如下渐近表达式

$$p_n^2 \approx \frac{4EI}{l^4 \rho} (n + 3/4)^4 \pi^4, \quad \lambda_n \approx \frac{EI}{l^4 \rho} (n + 1/4)^4 \pi^4. \quad (14)$$

3.2 模态参数的渐近性质

将本征向量无量纲化, 即 $\xi = x/l, \phi_n(\xi) = \phi_n(x)/l$. 依算子 A 的定义, $\phi_n(\xi)$ 满足特征方程

$$\mathbf{D}^4 \phi_n = d_n^4 \phi_n, \quad 0 \leq \xi \leq 1, \quad (15a)$$

边界条件为

$$\phi_n(0) = 0, \quad \mathbf{D}^2 \phi_n(0) = -\frac{J_h}{\rho l^3} d_n^4 \mathbf{D} \phi_n(0), \quad (15b)$$

$$\mathbf{D}^3 \phi_n(1) = -\frac{M_t}{\rho l} d_n^4 \phi_n(1), \quad \mathbf{D}^2 \phi_n(1) = 0. \quad (15c)$$

方程(15a)~(15c)解的一般形式表示为

$$\phi_n(\xi) = F_1 \sin(d_n \xi) + F_2 \sinh(d_n \xi) + F_3 \cos(d_n \xi) + F_4 \cosh(d_n \xi). \quad (16)$$

经过繁杂的估计, 对于较大的 n , 模态参量可渐近表示为

$$\varphi_n \approx (-1)^n \sqrt{2} l (F_1 - F_2), \quad \psi_n \approx \frac{\rho l^3}{J_h} ((n + 1/4)\pi)^{-2} F_3. \quad (17)$$

利用正规化约束条件可得到系数 F_1, F_2, F_3 的渐近估计

$$F_1 \approx F_3 \approx -F_2 \approx F = (8M_t l^2 + \rho l^3)^{-1/2}. \quad (18)$$

将式(18)带入到式(17)中得到

$$\varphi_n \approx (-1)^n 2 \sqrt{2} l F, \quad \psi_n \approx \frac{\rho l^3}{J_h} ((n + 1/4)\pi)^{-2} F. \quad (19)$$

基于上述分析, 本文后续讨论合理地约定: (A2) 对每个 $n \geq 0, \sigma_n > 0$, 且关于 n 严格递减.

3.3 动力学系统增益的渐近性质

以下考察系统增益 α_M^N 和 α_Z^N 关于阶次的渐近行为, 有如下重要事实.

定理1. 系统增益 α_M^N 和 α_Z^N 可分别渐近表示为

$$\alpha_M^N \approx (-1)^N F_M \epsilon_M^N ((N + 5/4)\pi)^{-2}, \quad F_M = 2\sqrt{2} \rho l^4 F^2 J_h^{-1}, \quad 0 \leq \epsilon_M^N \leq 1, \quad (20)$$

$$\alpha_Z^N = (-1)^N F_Z \epsilon_Z^N (1/4)^N, \quad F_Z = l J_0^{-1} \prod_{n=1}^{N_0} (d_n b_n^{-1})^4, \quad 0 \leq \epsilon_Z^N \leq 1, \quad (21)$$

其中 $0 < N_0 \leq N$, N_0 与较大的 N 无关.

证明. 将 $\Omega = [0, 0, J_h^{-1}]^T$ 在空间 W 上进行模态展开得到 $\Omega = \sum_{n=0}^{\infty} \psi_n \Phi^n$, 展开式第 2 分量为 $\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \sigma_n = 0$. 利用(A2)及收敛交错级数余项估计性质, 可将 α_M^N 写成

$$\alpha_M^N = - \sum_{n=N+1}^{\infty} (-1)^n \sigma_n = (-1)^{N+2} \epsilon_M^N \sigma_{N+1}, \quad (22)$$

其中 $0 \leq \epsilon_M^N \leq 1$. 结合式(19)可得到渐近估计式(20).

由式(12)和(13)可知, 存在 N_0 使得 $n > N_0$ 时, $d_n < b_n$. 对于较大的 N , α_Z^N 可重新写成

$$\alpha_Z^N = (-1)^N \frac{l}{J_0} \prod_{n=1}^{N_0} \left(\frac{d_n}{b_n}\right)^4 \prod_{n=N_0+1}^N \left(\frac{d_n}{b_n}\right)^4 (1/4)^N, \quad (23)$$

在式(23)中, 令 $\epsilon_Z^N = \prod_{n=N_0+1}^N (d_n/b_n)^4$, 即得到式(21). 证毕.

上述结果表明, 零点截取和模态截取近似动力学系统增益随阶次 N 递增而衰减于零, 衰减率分别为 $O((1/4)^N)$ 和 $O(N^{-2})$.

3.4 动力学奇异性的频域响应特征

本节将通过考察逆系统的病态行为, 比较分析动力学奇异性的频域响应特征. $G_Z^N(s)$ 和 $G_M^N(s)$ 的逆系统分别为 $H_Z^N(s) = (s^2 G_Z^N(s))^{-1}$ 和 $H_M^N(s) = (s^2 G_M^N(s))^{-1}$. 为了保证系统的稳定性, 需将 $H_Z^N(s)$ 和 $H_M^N(s)$ 视为稳定的非因果系统, 二者均应理解为双边 Laplace 变换作用在逆系统上的结果, 其中复平面中的虚轴属于收敛域^[7], 逆系统的频域响应具有如下特征.

定理2. 当 $|\omega| \in [\sqrt{\lambda_{N-1}}, \sqrt{\lambda_N}]$ 时, 有

$$|H_Z^N(j\omega)| \leq |H_Z^{N-1}(j\omega)|, \quad |H_M^N(j\omega)| \leq |H_M^{N-1}(j\omega)|; \quad (24)$$

当 $|\omega| > \sqrt{\lambda_N}$ 时, $H_Z^N(j\omega)$ 和 $H_M^N(j\omega)$ 分别单调趋于 $(\alpha_Z^N)^{-1}$ 和 $(\alpha_M^N)^{-1}$.

证明. 对每个 $n \geq 1$, $g_n(-\mu)$ 在 $[0, \infty)$ 上关于 μ 是严格单调递减的. 当 $\mu > \lambda_N$ 时, 容易验证项 $\left(\prod_{n=1}^N g_n(-\mu)\right)^{-1}$ 关于 μ 单调递增趋向于 1, 亦即当 $|\omega| > \sqrt{\lambda_N}$ 时, $H_Z^N(j\omega)$ 单调趋于 $(\alpha_Z^N)^{-1}$. 利用(A1)同理可证, $H_M^N(j\omega)$ 单调趋于 $(\alpha_M^N)^{-1}$. 又当 $|\omega| \in [\sqrt{\lambda_{N-1}}, \sqrt{\lambda_N}]$ 时, 对于模态截取逆动力学模型, 利用(A2)及式(22)知

$$|H_M^N(j\omega)/H_M^{N-1}(j\omega)| = |1 + (-1)^N \sigma_N \omega^2 (\omega^2 - \lambda_N)^{-1} H_M^{N-1}(j\omega)|^{-1} \leq 1, \quad (25)$$

对于零点截取逆动力学模型, 依定义有

$$|H_Z^N(j\omega)/H_Z^{N-1}(j\omega)| = \lambda_N p_N^{-2} |g_N(-\omega^2)|^{-1} \leq 1. \quad (26)$$

利用式(25)和(26)可推得式(24)成立. 证毕.

综上所述, 两种不同截取方式下建立的近似动力学模型, 动力学奇异性的频域响应行

为均表现为,随着截取阶次增加,稳定逆系统在高频区段趋于病态,其中高阶项对频域响应高频成分的影响快速增强,而对低频成分的贡献逐渐减弱;逆系统频域响应高频病态成分与系统增益成正比,因而逆系统的病态行为由系统增益关于截取阶次的渐近阶决定.

4 逆动力学实例分析

本节将考察高阶零点和高阶模态对逆动力学计算力矩病态行为的影响.仿真中柔性机械臂原型采用如下基本参数:

$$l = 1.27\text{m}, E = 7.11 \times 10^{10}\text{N/m}^2,$$

$$I = 6.775 \times 10^{-11}\text{m}^4$$

$$\rho = 0.2190\text{kg/m}, J_h = 0.03\text{kg}\cdot\text{m}^2,$$

$$M_l = 0.031\text{kg}.$$

用第10阶零点截取近似模型 $G_Z^{10}(s)$ 仿真柔性机械臂系统,表1中列出了 λ_n 和 p_n^2 以及模态参量 φ_n 和 ψ_n 的计算值,

表1 柔性机械臂系统零极点及模态参量

n	λ_n	p_n^2	φ_n	ψ_n
0	0		2.6510	2.0874
1	4.5731e+2	1.0853e+3	-1.9866	4.7642
2	3.6481e+3	3.0903e+4	2.1716	2.3099
3	2.6268e+4	1.8844e+5	-1.8462	0.8130
4	1.0333e+5	6.5159e+5	1.5200	0.4047
5	2.8937e+5	1.6774e+6	-1.2819	0.2411
6	6.5856e+5	3.6018e+6	1.1051	0.1597
7	1.3048e+6	6.8401e+6	-0.9697	0.1135
8	2.3418e+6	1.1887e+7	0.8631	0.0847
9	3.9031e+6	1.9314e+7	-0.7772	0.0666
10	6.1416e+6	2.9776e+7	0.7073	0.0700

显然(A2)成立.图2给出了动力学增益 α_Z^N 和 α_M^N 关于阶次 N 的渐近变化情况.图3和图4分别比较了第4阶零点截取和模态截取近似模型的零点分布状况和频域响应的渐近行为.从图3中知道模态截取近似模型第3、第4对高阶零点为共轭复数对,与 $G(s)$ 相应的零点有较大差异.同时注意到, $G_Z^4(s)$ 和 $G_M^4(s)$ 的频域响应行为在 $\omega < \sqrt{\lambda_4}$ 频段差异甚微,而在 $\omega > \sqrt{\lambda_4}$ 频段差异明显出现并单调递增.以上数值计算结果与本文前述的分析结果吻合.

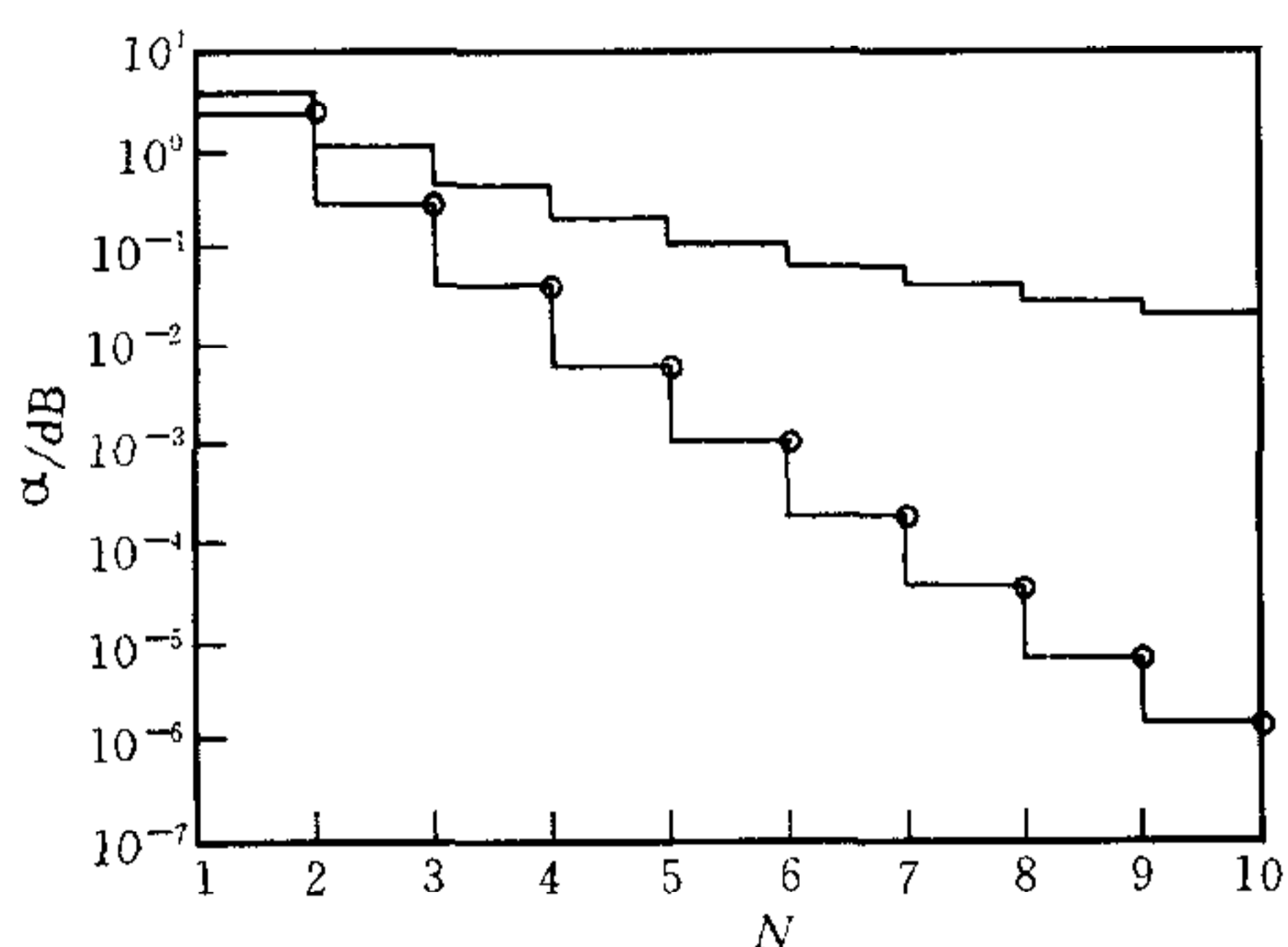


图2 增益绝对值关于截取阶次的渐近行为
——模态截取, o——零点截取

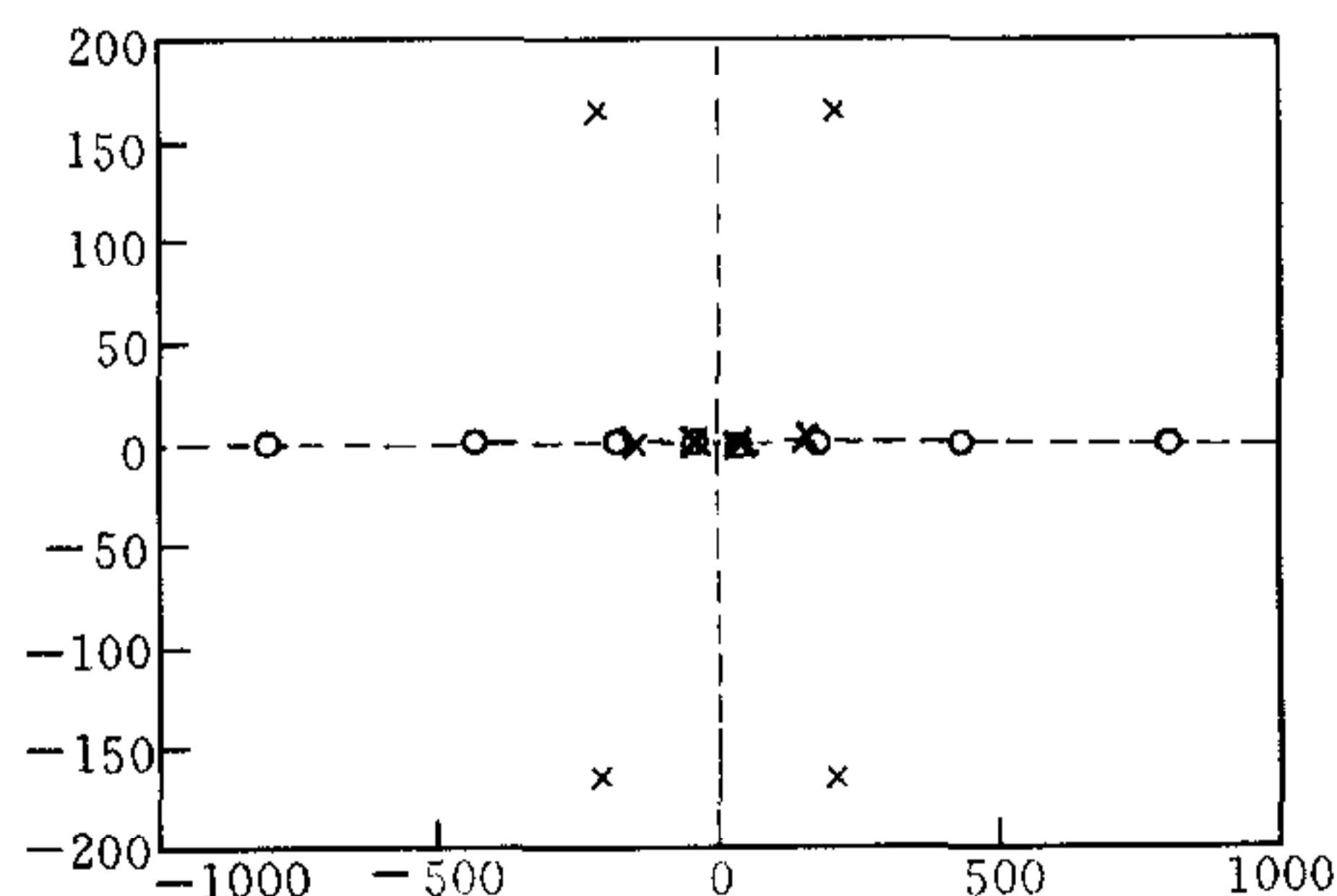


图3 前4阶零点分布

×——模态截取, o——零点截取

基于性质(A1)的要求,以下分别以第2阶零点截取和模态截取近似模型为例,比较高阶零点和高阶模态对逆动力学计算力矩病态行为的影响.此时, $(\alpha_Z^2)^{-1} = 3.5425$, $(\alpha_M^2)^{-1} = 0.9215$,且

$$H_Z^2(s) = \frac{-103.264}{s + 175.794} + \frac{3.6734}{s + 32.531} + \frac{103.264}{s - 175.794} - \frac{3.6734}{s - 32.531},$$

$$H_M^2(s) = \frac{-80.073}{s + 87.513} + \frac{16.897}{s + 33.329} + \frac{80.073}{s - 87.513} - \frac{16.897}{s - 33.329}$$

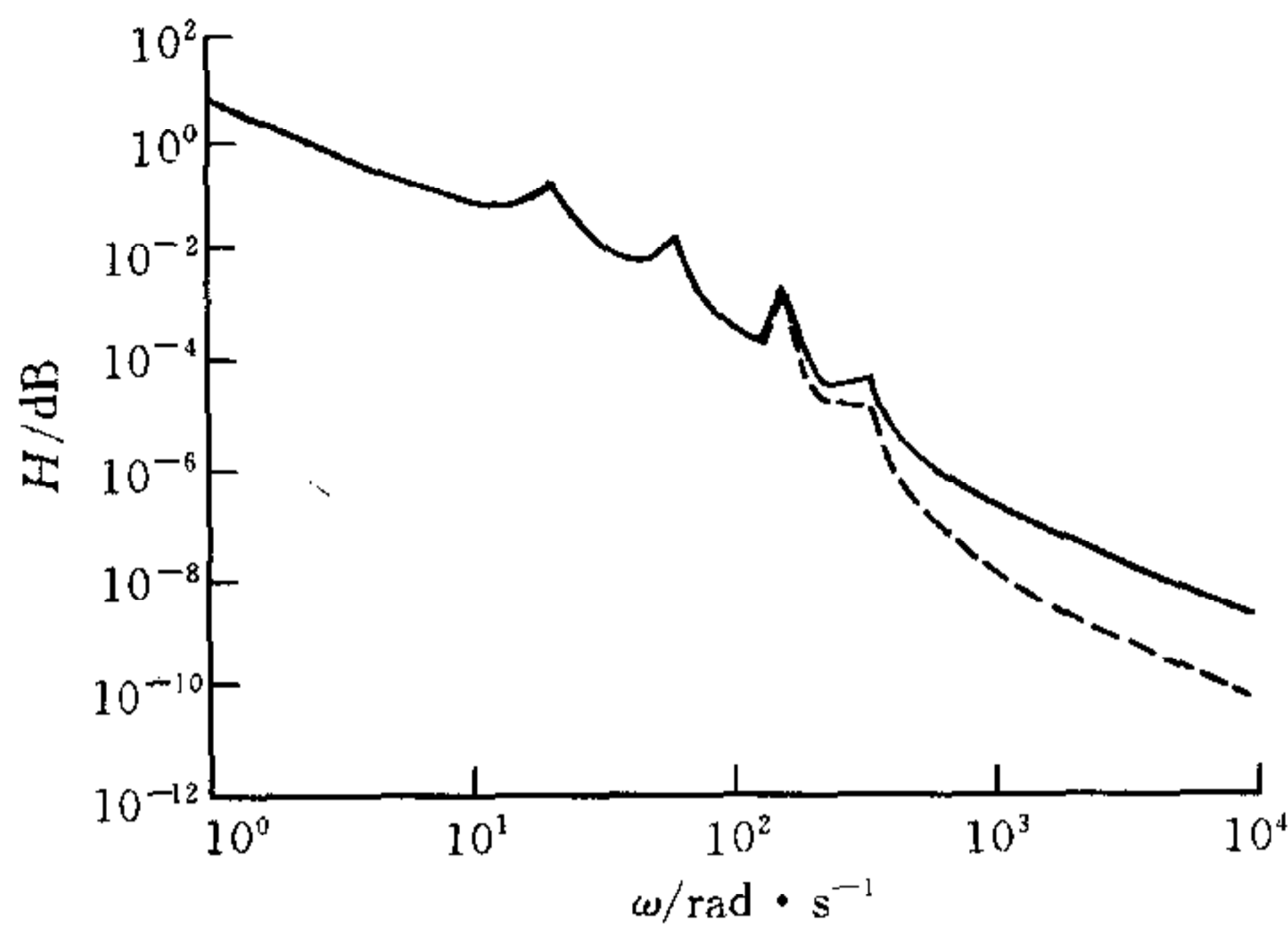


图4 频域响应曲线

--- 零点截取, — 模态截取

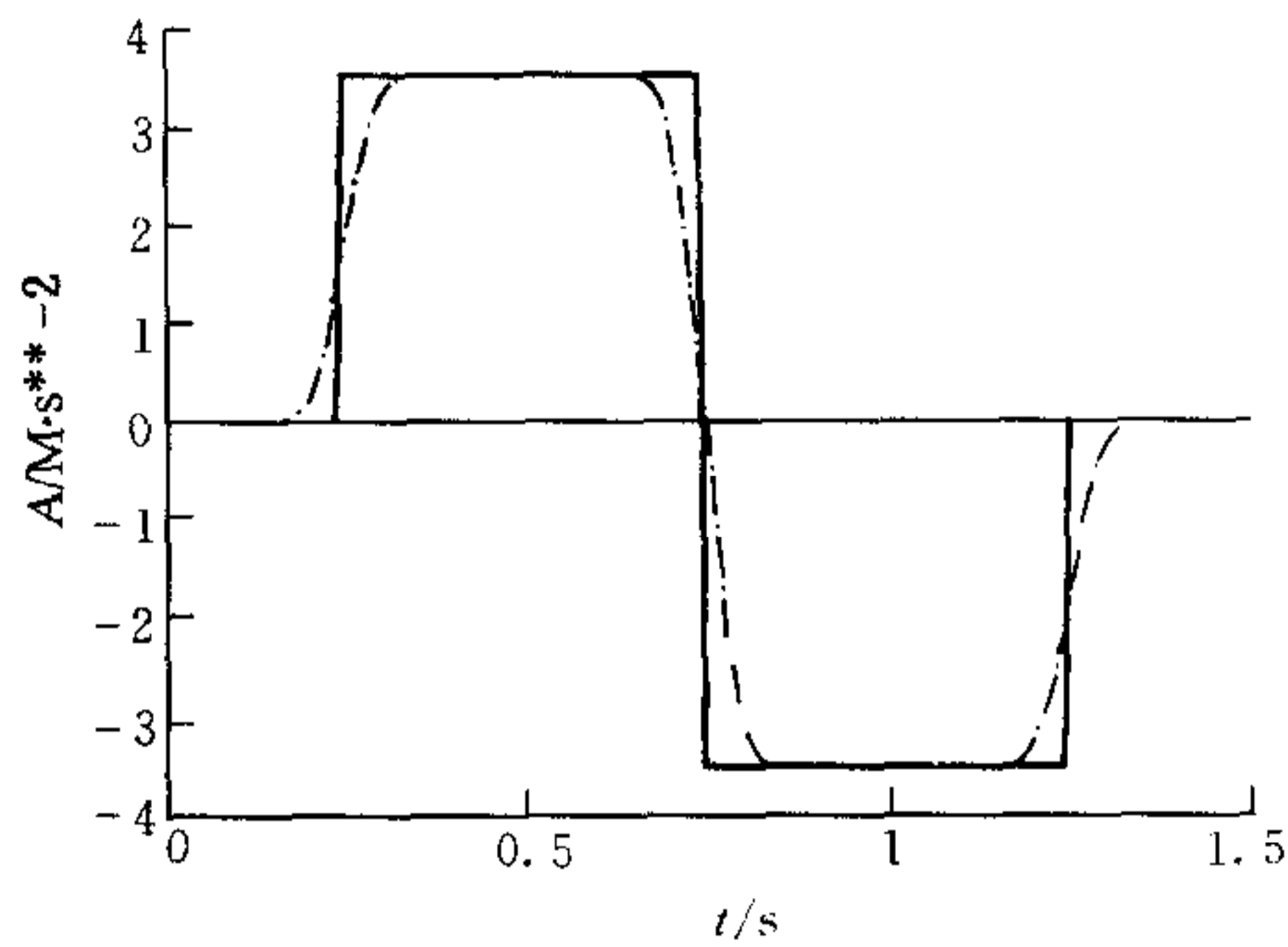


图5 末端加速度参考曲线

— Bang-Bang, ····· 正则化

图5给出了正则化处理后的 Bang-Bang 型加速度曲线^[3],图6比较了第2阶零点截取和模态截取逆动力学求解得到的计算力矩. 尽管正则化滤波已经将 Bang-Bang 曲线中 $\omega > 0.5(\sqrt{\lambda_1} + \sqrt{\lambda_2})$ 频段的高频成分去除,但相对模态截取逆动力学计算力矩,零点截取逆动力学计算力矩中仍然在 Bang-Bang 曲线的间断点处出现了较高幅值的脉冲尖峰,导致计算力矩饱和. 以上数值仿真结果充分印证了上一节的分析结论.

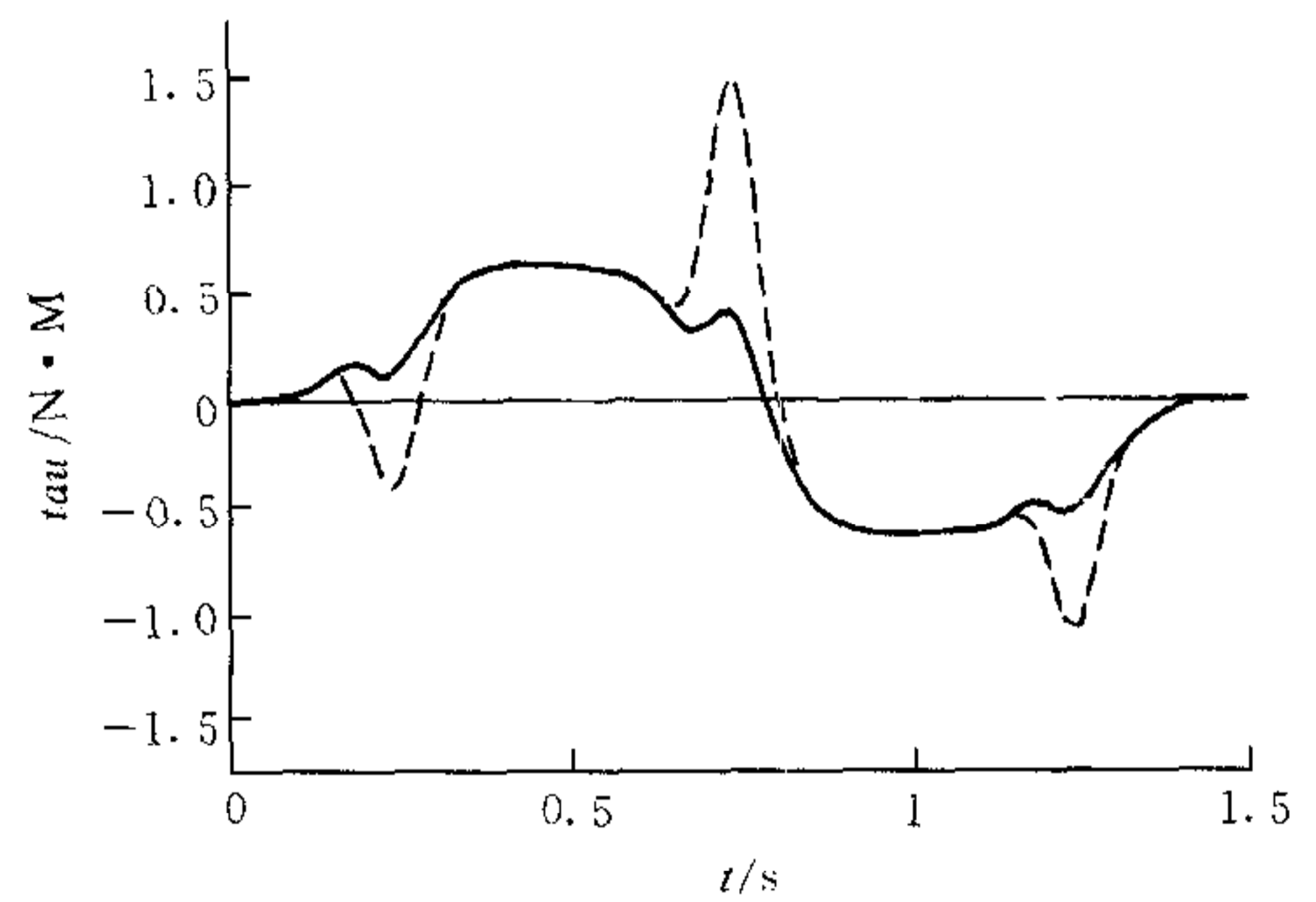


图6 计算力矩曲线

--- 零点截取, — 模态截取

5 结论

本文针对单连杆柔性机械臂的模态截取和零点截取动力学奇异性渐近行为的分析结果表明,模态截取和零点截取动力学系统增益关于阶次 N 的渐近阶分别为 $O(N^2)$ 和 $O((1/4)^N)$,高阶零点和高阶模态对逆动力学频域响应在高频段病态行为的影响由相应系统增益的渐近阶决定.

高阶零点和高阶模态对动力学奇异性影响的解析分析提供了对控制带宽受限问题的定量认识,这对进一步研究减轻动力学奇异性影响或放松带宽限制的策略具有理论指导意义.

参 考 文 献

- 1 Bayo E, Paden B. On trajectory generation for flexible robots. *J. Robotics Systems*, 1987, 4(2):229~235
- 2 Wang D, Vidyasagar M. Transfer function for a single flexible link. *Int. J. Robotics Research*, 1991, 10(5):540~549
- 3 Wang Guoli, Lu Guizhang. Well-posedness of inverse dynamics of flexible robot arms. *Int. J. Robotics and Automation*, 1996, 11(4):175~182

- 4 Goodson R E. Distributed system simulation using infinite product expansions. *Simulation*, 1970, DEC:255~262
- 5 Miu D K. Physical interpretation of transfer function zeros for simple control systems with mechanical flexibility. *ASME J. Dyna. Sys., Meas., and Contr.*, 1991, **113**(9):419~424
- 6 Sakawa, Y *et al.* Modelling and feedback control of a flexible arm. *J. Robotic Systems*, 1985, 2:453~472
- 7 Balth Pol V D, Bremmer H. Operational calculus based on the two-sided Laplace transform. Cambridge: University Press, 1955

郭雪梅 1964年7月出生.1987年毕业于清华大学机械系,1990年于天津智能机械研究所获工学硕士学位.现任教于汕头大学工学院,从事机器人学及其应用技术的研究工作.

王国利 1965年4月出生.1992年于南开大学计算机系获工学博士学位.现任教于汕头大学工学院,从事智能机器人及虚拟现实技术的研究工作.

张宪民 1964年12月出生.1994年在西北工业大学作博士后研究.现任教于汕头大学工学院,从事柔性机构动力学及振动控制方面的研究工作.

中国自动化学会2000年学术活动计划

序号	项目名称	主要内容	时间	人数	会期(天)	地点	联系人	备注
1	全国第四届机电一体化学术交流会	交流机电一体化新技术与发展	10月	100	3	待定	章以钧、肖秀珍 北京德外校场口一号 邮编:100011 电话:62024309	由制造技术专业委员会主办
2	全国CAD技术应用交流会	交流推广CAD技术的应用与发展经验	9月	100	3	待定	同上	同上
3	全国高等院校机电自动化及机器人第四届学术年会	交流、推广机器人及相关技术在生产过程中的应用	3季度	60	3	西安	同上	同上
4	电气自动化2000年学术年会	电气自动化专业委员会例行学术年会	10月	170	5	秦皇岛	刘凤英 天津市二号桥电传所 邮编:300180 电话:(022)24962354	由电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合举办
5	全国流程工业管理控制一体化系统学术交流会	交流国内外流程工业管理控制一体化系统发展现状与经验,流程工业CIMS系统设计与实施的案例分析,工业企业网络设计与建设等	3季度	100	2	北京	黄奇琦 北京927信箱1分箱 邮编:100080 电话:62311294	由计算机应用专业委员会和中国计算机学会、中国电子学会联合举办