

# 多闭环调速系统电压内环“最佳”设计的探讨<sup>\*</sup>

邓则名, 高军礼, 王俊峰, 王晓毛  
(广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510090)

**摘 要:** 对于电流—电压, 转速—电流—电压多闭环系统, 通过理论分析和仿真实验, 认为电压内环的工程“最佳”设计, 应选用比例或比例积分调节器进行校正, 而不宜选用积分调节器.

**关键词:** 多环系统; 电压内环; P 和 PI 调节器

**中图分类号:** TM921.02; TP276 **文献标识码:** A

## 1 系统的结构图

电流—电压双闭环调速系统结构示意图如图 1a 所示, 转速—电流—电压三闭环调速系统结构示意图如图 1b 所示. 图中 ASR、ACR、AVR、GT、TA、TVD 分别表示转速调节器、电流调节器、电压调节器、晶闸管的触发器、电流互感器和直流电压隔离变换器.  $U_n^*$ 、 $U_i^*$ 、 $U_v^*$  分别表示转速、电流、电压给定值.  $U_n$ 、 $U_i$ 、 $U_v$  分别表示转速、电流、电压反馈值. 可见, 这两种系统的内环均为电压环. 电压内环具有提高系统对电网电压波动的抗干扰能力、加快调节过程、限制整流输出电压最大值等作用, 因此这两种调速系统得到了应用.

## 2 系统动态结构图

此处仅推导与本文有关的电压环动态结构图. 由于电压反馈信号取自晶闸管整流器的输出端, 因此把整流装置的内阻  $R_r$  和电枢回路其余电阻(包括平波电抗器  $L$  电阻)  $R_a$  分开处理, 这时电枢回路电压平衡方程式为

$$U_{d0} - I_d R_r = U_d = I_d R_a + L \frac{dI_d}{dt} + E \quad (1)$$

考虑到电压  $U_d$  的变化比电动机的反电动势  $E$  的变化快得多, 故忽略  $E$  的影响, 对式(1)在零初始条件下取拉氏变换, 并令  $R = R_r + R_a$ ,  $T_l = L/R$ ,  $T_{la} = L/R_a$ ,  $L$  为电枢回路总电感, 经推导整理得

$$\frac{I_d(s)}{U_d(s)} = \frac{1/R_a}{T_{la}s + 1} \quad (2)$$

$$\frac{U_d(s)}{U_{d0}(s)} = \frac{R_a(T_{la}s + 1)}{R(T_l s + 1)} \quad (3)$$

<sup>\*</sup> 基金项目: 广东省重点学科资助项目

收稿日期: 1999-10-15; 作者简介: 邓则名(1946~), 男, 副教授.

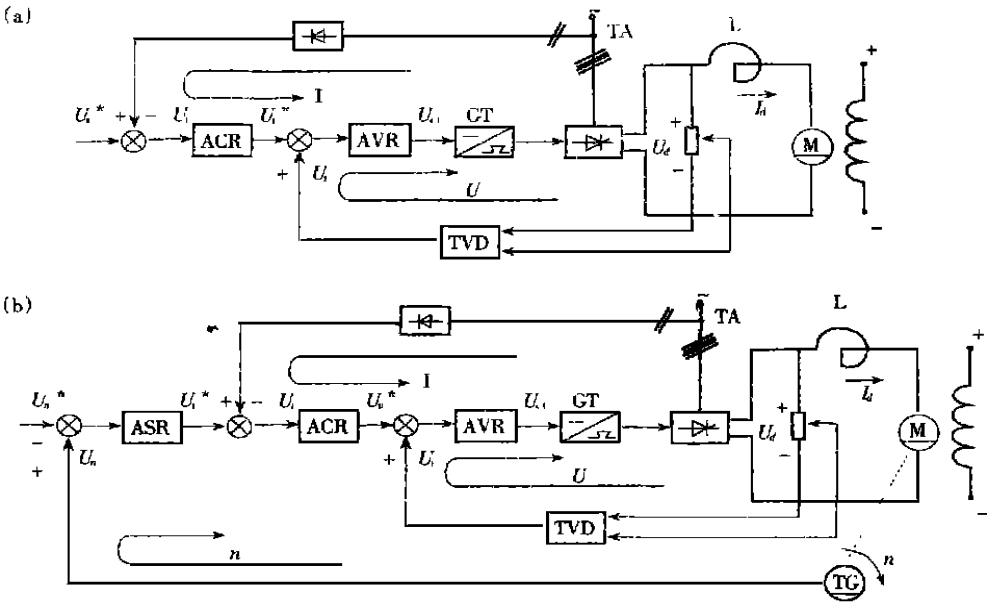


图 1 电流 - 电压双闭环(a) 和转速 - 电流 - 电压三闭环(b) 调速系统结构示意图

Fig. 1 Current-voltage double-loop timing system(a) and rotate speed-current-voltage tri-loop timing system(b) structure sketch map

已知触发器 - 晶闸管整流器的传递函数  $K_s / (T_s s + 1)$ , 电压反馈环节的传递函数为  $\gamma / (T_{0v} s + 1)$ , 于是可得到电压内环动态结构图(图 2a). 式中和图中的  $U_{d0}$  为晶闸管整流器空载时的输出电压,  $K_s$  为触发器 - 整流器放大系数,  $T_s$  为晶闸管平均失控时间(对于三相桥式全控整流电路  $T_s = 0.0017$  s),  $\gamma$  为电压反馈系数,  $T_{0v}$  为电压反馈环节滤波滞后时间常数,  $U_{ci}$  为触发器输入控制电压.

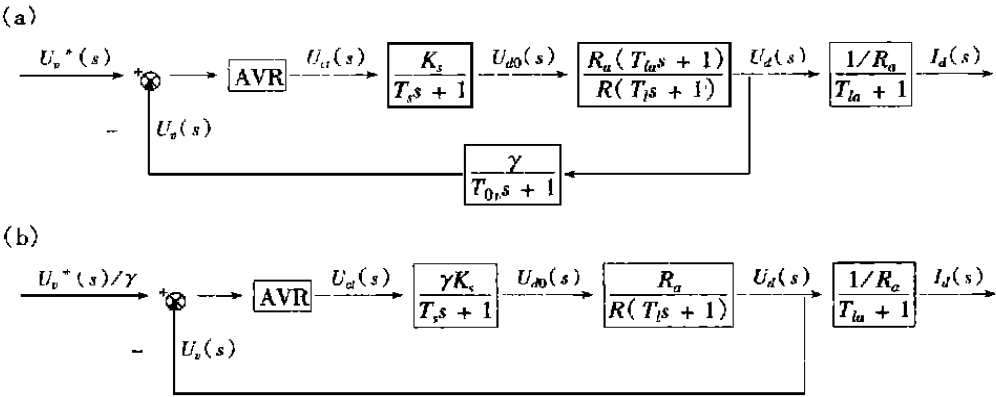


图 2 电压内环动态结构图及其简化图

Fig. 2 Voltage inter-loop dynamic structure map and its simplified map

### 3 电压内环的“最佳”设计

多闭环调速系统工程“最佳”设计, 是从内环到外环逐环进行处理与设计的, 上述两种

系统应首先从电压内环开始设计. 为了简便清楚些, 假设在电压反馈回路中已用微分超前网络抵消了滤波滞后作用的影响, 即设计微分超前时间常数刚好等于滤波时间常数, 这样电压反馈环节变成一个放大系数为  $\gamma$  的比例环节. 并假设在电压调节器给定输入回路中设置滤波环节, 补偿了动态结构图中微分超前因子  $(T_{la}s+1)$ . 这两种假定在工程上是常用的也不难实现. 于是可得到电压内环简化的动态结构图 (图 2b).

从图 2b 可见, 电压内环为一个小惯性和一个大惯性环节相串联的双惯性型系统. 从工程“最佳”设计原理出发, 如果把电压内环校正为典型 I 型 (二阶) 系统, 则应选用比例积分 (PI) 调节器; 如果  $T_l \gg T_s$ , 可把大惯性环节  $1/(T_{ls}+1)$  当作近似的积分环节  $1/T_{ls}$ , 则应选用比例 (P) 调节器. 显然, 以往文献上一般选用积分 (I) 调节器是不合理的.

电压调节器工程“最佳”参数计算如下:

当电压调节器 AVR 选用放大系数为  $K_{pv}$  的比例调节器时, 电压环放大倍数

$$K_v = \frac{K_p K_s \gamma R_a}{RT_l} = \frac{1}{2T_s} \quad (4)$$

$$K_{pv} = \frac{TR}{2TK_s \gamma R_a} \quad (5)$$

当 AVR 选用 PI 调节器时, 其传递函数为  $K_{pv}(\tau_v s+1)/\tau_v$ ,  $\tau_v$  为积分时间常数. 根据惯性补偿原理, 使  $(\tau_v s+1)$  抵消图 2b 分母中因子  $(T_s+1)$ , 故设

$$\tau_v = T_l \quad (6)$$

电压环放大倍数  $K_v$  为

$$K_v = \frac{K_p K_s \gamma R_a}{\tau_v R} = \frac{1}{2T_s} \quad (7)$$

$$K_{pv} = \frac{\tau_v R}{2TK_s \gamma R_a} = \frac{TR}{2TK_s \gamma R_a} \quad (8)$$

可见式 (5) 和式 (8) 相同, 即不论选用 P 或 PI 调节器, 调节器的放大倍数  $K_{pv}$  相同. 其它参数计算从略.

如果选用积分 (I) 调节器进行校正, 那么, 在图 2a 中只有当  $T_l = T_{la}$  时, 即  $(T_{ls}+1)/(T_{ls}+1) \approx 1$  时才能成立, 而实际上  $T_l$  和  $T_{la}$  通常不相等, 有时两者差别还较大, 显然选用积分调节器是不合理的. 如果选用积分调节器, 这时

$$K_v = \frac{K_s \gamma R_a}{\tau_v R} = \frac{1}{2T_s} \quad (9)$$

$$\tau_v = \frac{2TK_s \gamma R_a}{R} \quad (10)$$

## 4 电流环和转速环的工程“最佳”设计

把电压内环进行处理和工程“最佳”设计后, 在此基础上则可对电流环进行处理和工程“最佳”设计, 设计思路与处理方法与电压内环的相同. 如果电压内环采用积分调节器进行校正, 那么就会影响电流环进而影响到转速环参数设计的合理性和系统的动态性能. 本文不讨论电流环和转速环的具体设计.

## 5 仿真实验及结论

采用 MATLAB 语言对图 2 所示电压内环进行仿真 (仿真阶跃输入的输出动态响应). 仿

真时,图2中有关参数为(实验室中一个实际系统): $\gamma=0.037$ ,  $K_s=30$ ,  $T_s=0.0017\text{ s}$ ,  $R_a=0.25\ \Omega$ ,  $R=1\ \Omega$ ,  $T_l=0.03\text{ s}$ .根据上面分析和处理,分3种情况进行仿真实验.

采用比例调节器时的仿真实验.把上述数据代入式(5)求得比例调节器放大倍数 $K_{pv}=31.8$ .把所有已知数据代入图2b方框图中,响应曲线如图3的曲线1所示.

采用比例积分调节器时的仿真实验.把上面给出的数据代入式(8)求得 $K_{pv}=31.8$ ,并把所有数据代入图2b中进行仿真实验,实验结果见图3中曲线2.

采用积分调节器时的仿真实验.把按式(10)求得的 $\tau_v$ 和其它参数代入图2a方框中,并把电压反馈传递函数移至电压内环主通道上,仿真结果见图3的曲线3.

从图3可见,采用P或PI调节器时电压内环的动态响应几乎完全相同.采用I调节器时电压内环动态响应性能比前两种情况差.因此,对于图1所示的系统,应选用P或PI调节器,而不宜选用I调节器.

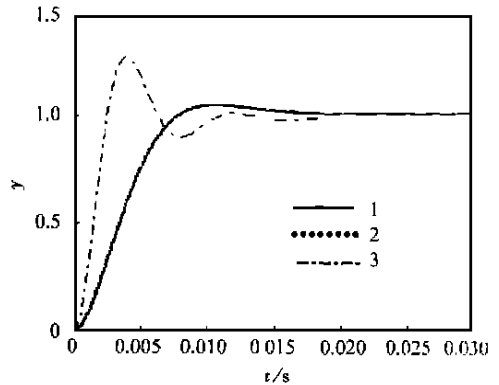


图3 阶跃输入时电压内环的输出动态响应曲线  
Fig.3 Voltage inter-loop output dynamic response curve in step input

参考文献:

- [1] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统 M. 第二版. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [2] 倪忠远. 直流调速系统 M. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [3] 彭志瑾. 电气传动与调速系统 M. 北京: 北京理工大学出版社, 1988.

## Study on the Optimal Design of Voltage Inter-Loop in Multi-Loop Tuning Velocity System

DENG Ze-ming<sup>\*</sup>, GAO Jun-li, WANG Jun-feng, WANG Xiao-mao

**Abstract:** By the theoretical analysis and the simulation, it is concluded that the proportional or proportion-integral regulator should be used in the engineering optimal design of voltage inter-loop in current-voltage and velocity-current-voltage multi-loop system, instead of using integration regulator.

**Keywords:** multi-loop system; voltage inter-loop; P & PI regulator

<sup>\*</sup> Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou, 510090, China