文章编号：1671-7848(2008)03-0306-04

基于降维观测器的网络控制系统的容错控制

钟 戈，张庆灵
(东北大学 系统科学研究所，辽宁 沈阳 110004)

摘 要：针对被控对象是线性定常系统的网络控制系统，设传感器与控制器均为时间驱动，未能成功传输数据的传感器节点视为暂时失效，将网络控制系统建模为一类具有时变传感器'故障'的系统。此类系统相当于一个有限子系统的切换系统。借助容错控制和切换系统理论，利用 Luenberger 降维观测器估计系统状态，采用李亚普诺夫理论和线性矩阵不等式描述方法，给出了闭环系统渐近稳定的充分条件和控制器的设计方法。通过 Matlab 数值仿真算例，证明了分析方法和结果的有效性。

关 键 词：网络控制系统；降维观测器；容错控制
中图分类号：TP 273 文献标识码：A

Fault-tolerant Control of Networked Control Systems Based on Reduced-order Observer

ZHONG Ge, *ZHANG Qing-ling*
(Institute of Systems Science, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Considering a networked control system with an linear time-invariant plant, the sensors and controllers are assumed time-driven, the sensors failing to transmit data are treated to be invalidated temporarily, and the networked control system is modeled as a system with time-variant sensors fault. Such a system is a switched system with finite subsystems. With the theory of Lyapunov and linear matrix inequality formulation, the sufficient condition for the asymptotic stability of the closed-loop system is proposed based on Luenberger reduced order state observer and the design approach of the controller and observer is given. A numerical simulation example with Matlab shows that the analysis method and the results are valid and feasible.

Key words: networked control systems; reduced order observer; fault-tolerant control

1 引 言

网络控制系统诞生于 20 世纪 70 年代，相比于传统的点对点结构，有很多自身的优点，如提高系统的可靠性和灵活性、可以实现远程操作与维护、减少系统的成本和易于安装和维护等。

"容错"(Fault-tolerance)是容忍故障的简称。一般按设计特点分为被动和主动容错控制。前者是设计适当固定的结构的控制器，使系统在执行器、传感器和其他部件失效时，保障系统仍然稳定和具有令人可接受的性能，在故障发生前和发生后使用同样的控制策略；后者是在故障发生后需要重新调整控制器参数，也可能改变控制器结构[1]。

关于网络控制系统的全维状态观测器设计已有研究[2]，而对于降维观测器，目前则很少讨论。由于降维观测器维数相对较低，只需较少的积分器便可构造，因而简化了观测器和整个反馈系统结构，使其在物理实现上更方便，从而降低了成本。所以，在条件允许的情况下应该优先考虑使用。

为此，本文提出一种 Luenberger 降维状态观测器设计方案[3~5]，并证明了在传感器发生故障时系统仍然稳定。

2 问题描述

考虑网络控制系统的被控对象状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \tag{1}$$

式中，$x(t) \in \mathbf{R}^n$，为被控对象状态向量；$u(t) \in \mathbf{R}^p$，为控制输入；$y(t) \in \mathbf{R}^q$，为输出向量；A，B，C 是具有相应维数的常矩阵；(A, B) 可控，(A, C) 可观。

有关假设如下：

假设 1 传感器节点和控制器节点均采用时间驱动，周期为 T，且它们的时钟完全同步。

假设 2 传感器采样被控对象的输出，每个传感器节点的数据为单包传输，其数据包带有节点的标识。

假设 3 数据在网络上的传输时间远小于节点

收稿日期：2006-10-11； 收修定稿日期：2007-04-27
作者简介：钟 戈(1979-)，男，辽宁鞍山人，研究生，主要研究方向为网络控制系统、容错控制等；张庆灵(1956-)，男，教授，博士生导师。

竞争发送权所花费的时间。

假设 4　网络诱导时延小于采样周期。

由于网络诱导时延的影响，即使传感器数据成功传输到控制器节点，控制器也只能在下个计算时刻利用该数据计算控制量，而未能成功传输的传感器节点的数据为 0。则有如下的关系成立：

$$\bar{y}_i=\begin{cases}y_i(k), & \text{第 } i \text{ 个传感器正常},\\ \alpha\times y_i(k-1), & \text{第 } i \text{ 个传感器部分失效},\\ 0, & \text{第 } i \text{ 个传感器完全失效},\end{cases}$$
$$i=1,\cdots,m \tag{2}$$

式中，$\bar{y}(k)=[\bar{y}_1(k),\cdots,\bar{y}_m(k)]^{\mathrm{T}}$，为控制器的输入。

引入矩阵 $L(k)=\mathrm{diag}(l_1(k),\cdots,l_m(k))$ 描述"故障"情况，其中，

$$l_i(k)=\begin{cases}y_i(k)=1, & \text{第 } i \text{ 个传感器正常},\\ y_i(k)=\alpha, & \text{第 } i \text{ 个传感器部分失效},\\ y_i(k)=0, & \text{第 } i \text{ 个传感器完全失效},\end{cases}$$
$$(i=1,\cdots,n)$$

将被控对象按传感器的周期离散化，得：

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}(k+1)=\bar{\boldsymbol{A}}(k)+\bar{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{u}(k)\\ \boldsymbol{y}(k)=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(k)\end{cases} \tag{3}$$

式中，$\bar{A}=\exp(AT)$；$\bar{B}=\int_0^T\exp(A\tau)\,\mathrm{d}\tau B$。

因此,可得包含网络的广义被控对象的离散化时间模型为

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}(k+1)=\bar{\boldsymbol{A}}(k)+\bar{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{u}(k)\\ \bar{\boldsymbol{y}}(k)=\bar{\boldsymbol{L}}\boldsymbol{x}(k-1)\end{cases} \tag{4}$$

式中，$\bar{y}(k)=L(k-1)Cx(k-1)$；$\bar{L}=L(k-1)C$。

3　容错控制器的设计

由式(4)知，广义被控对象的输出具有一步时延，为此可构造状态观测器，利用观测器的一步预测功能，估计本周期的被控对象状态，以削弱时延对系统的影响[6,7]。以前的研究中都是构造全维观测器，而本文采用的是 Luenberger 降维观测器。

引理 1[4]　如果存在矩阵 $T\in\mathbf{R}^{(n-g)\times n}$，使 $\mathrm{rank}\begin{bmatrix}C\\T\end{bmatrix}=n$，且满足：

①$TA-FT=GC$，

②$H=TB$，

③$Q_1C+Q_2T=I$，

④F 特征值都在单位圆内，则存在 Luenberger 降维观测器，其方程为

$$\begin{cases}z(k+1)=Fz(k)+G\bar{y}(k)+Hu(k)\\ \hat{x}(k)=Q_1\bar{y}(k)+Q_2\bar{y}(k)\end{cases} \tag{5}$$

式中，$z\in\mathbf{R}^{n-q}$。

本文采用上述降维状态观测器实现状态反馈，控制律 $u(k)=K\hat{x}(k)$，即式(5)为

$$\begin{cases}z(k+1)=M_1z(k)+M_2\bar{L}x(k-1)\\ x(k+1)=\bar{A}x(k)+\bar{B}KQ_1\bar{L}x(k-1)+\bar{B}KQ_2z(k)\end{cases} \tag{6}$$

式中，$M_1=F+HKQ_2$；$M_2=G+HKQ_1$。

引理 2(Schur 补)　给定常数矩阵 A，P，Q，其中，$Q=Q^{\mathrm{T}}$，$P=P^{\mathrm{T}}>0$，则 $A^{\mathrm{T}}PA+Q<0$ 成立，当且仅当：

$$\begin{pmatrix}-P^{-1} & A\\ A^{\mathrm{T}} & Q\end{pmatrix}<0 \text{ 或 }\begin{bmatrix}Q & A^{\mathrm{T}}\\ A & -P^{-1}\end{bmatrix}<0$$

定理 1　对于 $L(k)\in\Omega$(Ω 为 $L(k)$ 可能取值的有限离散集)，若存在共同的对称正定阵 P，S，R，使得下面的矩阵不等式成立：

$$\begin{pmatrix}R-P & 0 & 0 & \bar{A}^{\mathrm{T}} & 0\\ 0 & -S & 0 & Q_2^{\mathrm{T}}K^{\mathrm{T}}\bar{B}^{\mathrm{T}} & M_1^{\mathrm{T}}\\ 0 & 0 & -R & \bar{L}^{\mathrm{T}}Q_1^{\mathrm{T}}K^{\mathrm{T}}\bar{B}^{\mathrm{T}} & \bar{L}^{\mathrm{T}}M_2^{\mathrm{T}}\\ \bar{A} & \bar{B}KQ_2 & \bar{B}KQ_1\bar{L} & -P^{-1} & 0\\ 0 & M_1 & M_2\bar{L} & 0 & -S^{-1}\end{pmatrix}<0 \tag{7}$$

则闭环系统式(6)是渐近稳定的。

证明　选择相应维数的对称正定矩阵 P，S 和 R，令李亚普诺夫泛函 $V(k)$ 为

$$V(k)=x^{\mathrm{T}}(k)Px(k)+z^{\mathrm{T}}(k)Sz(k)+x^{\mathrm{T}}(k-1)Px(k-1)$$

求差分：

$$\Delta V(k)=V(k+1)-V(k)=x^{\mathrm{T}}(k+1)Px(k+1)+z^{\mathrm{T}}(k+1)Sz(k+1)+x^{\mathrm{T}}(k)Rx(k)-x^{\mathrm{T}}(k)Px(k)-z^{\mathrm{T}}(k)Sz(k)-x^{\mathrm{T}}(k-1)Rx(k-1)=$$

$$\begin{pmatrix}x(k)\\ z(k)\\ x(k-1)\end{pmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{pmatrix}\bar{A}^{\mathrm{T}}P\bar{A}+R-P & \bar{A}^{\mathrm{T}}P\bar{B}KQ_2 & \bar{A}^{\mathrm{T}}P\bar{B}KQ\bar{L}\\ Q_2^{\mathrm{T}}K^{\mathrm{T}}\bar{B}^{\mathrm{T}}P\bar{A} & Q_2^{\mathrm{T}}K^{\mathrm{T}}\bar{B}^{\mathrm{T}}P\bar{B}KQ_2+M_1^{\mathrm{T}}SM_1-S & (Q_2^{\mathrm{T}}K^{\mathrm{T}}\bar{B}^{\mathrm{T}}P\bar{B}KQ_1+M_1^{\mathrm{T}}SM_2)\bar{L}\\ \bar{L}^{\mathrm{T}}Q_1^{\mathrm{T}}K^{\mathrm{T}}\bar{B}^{\mathrm{T}}P\bar{A} & \bar{L}^{\mathrm{T}}(Q_1^{\mathrm{T}}K^{\mathrm{T}}\bar{B}^{\mathrm{T}}P\bar{B}KQ_2+M_2^{\mathrm{T}}SM_1) & \bar{L}^{\mathrm{T}}(Q_1^{\mathrm{T}}K^{\mathrm{T}}\bar{B}^{\mathrm{T}}P\bar{B}KQ_1+M_1^{\mathrm{T}}SM_2)\bar{L}-R\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x(k)\\ z(k)\\ x(k-1)\end{pmatrix}$$

根据李亚普诺夫稳定性理论，若 $\Delta V(k)<0$，则系统渐近稳定，即等价于：

$$\begin{pmatrix}\bar{A}^{\mathrm{T}}P\bar{A}+R-P & \bar{A}^{\mathrm{T}}P\bar{B}KQ_2 & \bar{A}^{\mathrm{T}}P\bar{B}KQ\bar{L}\\ Q_2^{\mathrm{T}}K^{\mathrm{T}}\bar{B}^{\mathrm{T}}P\bar{A} & Q_2^{\mathrm{T}}K^{\mathrm{T}}\bar{B}^{\mathrm{T}}P\bar{B}KQ_2+M_1^{\mathrm{T}}SM_1-S & (Q_2^{\mathrm{T}}K^{\mathrm{T}}\bar{B}^{\mathrm{T}}P\bar{B}KQ_1+M_1^{\mathrm{T}}SM_2)\bar{L}\\ \bar{L}^{\mathrm{T}}Q_1^{\mathrm{T}}K^{\mathrm{T}}\bar{B}^{\mathrm{T}}P\bar{A} & \bar{L}^{\mathrm{T}}(Q_1^{\mathrm{T}}K^{\mathrm{T}}\bar{B}^{\mathrm{T}}P\bar{B}KQ_2+M_2^{\mathrm{T}}SM_1) & \bar{L}(Q_1^{\mathrm{T}}K^{\mathrm{T}}\bar{B}^{\mathrm{T}}P\bar{B}KQ_1+M_1^{\mathrm{T}}SM_2)\bar{L}-R\end{pmatrix}<0 \tag{8}$$

式(8)可写为

$$\begin{pmatrix}\bar{A}^{T}\\ Q_2^{T}K^{T}\bar{B}^{T}\\ \bar{L}^{T}Q_1^{T}K^{T}\bar{B}^{T}\end{pmatrix}P\left(\bar{A}\quad \bar{B}KQ_2\quad \bar{B}KQ_1\bar{L}\right)+$$

$$\begin{pmatrix}R-P & 0 & 0\\ 0 & M_1^{T}SM_1-S & M_1^{T}SM_2\bar{L}\\ 0 & \bar{L}^{T}M_2^{T}SM_1 & \bar{L}^{T}M_2^{T}SM_2\bar{L}-R\end{pmatrix}<0$$

根据引理，上式即为

$$\begin{pmatrix}R-P & 0 & 0 & \bar{A}^{T}\\ 0 & M_1^{T}SM_1-S & M_1^{T}SM_2\bar{L} & Q_2^{T}K^{T}\bar{B}^{T}\\ 0 & \bar{L}^{T}M_2^{T}SM_1 & \bar{L}^{T}M_2^{T}SM_2\bar{L}-R & \bar{L}^{T}Q_1^{T}K^{T}\bar{B}^{T}\\ \bar{A} & \bar{B}KQ_2 & \bar{B}KQ_1\bar{L} & -P^{-1}\end{pmatrix}<0 \tag{9}$$

上式又可写为

$$\begin{pmatrix}0\\ M^{T}\\ \bar{L}^{T}M_2^{T}\\ 0\end{pmatrix}S\left(0\quad M_1\quad M_2\bar{L}\quad 0\right)+$$

$$\begin{pmatrix}R-P & 0 & 0 & \bar{A}^{T}\\ 0 & -S & \bar{L} & Q_2^{T}K^{T}\bar{B}^{T}\\ 0 & 0 & -R & \bar{L}^{T}Q_1^{T}K^{T}\bar{B}^{T}\\ \bar{A} & \bar{B}KQ_2 & \bar{B}KQ_1\bar{L} & -P^{-1}\end{pmatrix}<0 \tag{10}$$

再次应用引理 2，可得出式(7)成立，即可得 $\Delta V(k)<0$，因此系统渐近稳定，定理证毕。

由此，归结出控制器的设计方法如下：

①根据经验取降维观测器的参数 F，G，根据引理 1 给的观测器的存在条件，利用 Matlab7.1 求出 T，H，Q_1，Q_2。②在 L 有故障的情况下，用 Matlab7.1 的 LMI 工具箱找到可行的 P，S，R。③如果找到了，则转④ ;否则转①。④F,G,H,Q_1,Q_2,K,P,S,R 即是所求。

4 仿真算例

设被控对象的状态方程为

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=\begin{pmatrix}1 & -2 & -2\\ 0 & 1 & 1\\ 1 & 0 & -1\end{pmatrix}x(t)+\begin{pmatrix}2 & -1\\ 0 & 2\\ 1 & 1\end{pmatrix}u(t)\\ y(t)=\begin{pmatrix}1 & 1 & 0\\ 2 & -1 & 1\end{pmatrix}x(t)\end{cases}$$

取采样周期 $T=100$ ms，将系统离散化，得：

$$\begin{cases}x(k+1)=\begin{pmatrix}1.0945 & -0.2203 & -0.2100\\ 0.0052 & 1.1048 & 0.0998\\ 0.0998 & -0.0103 & 0.8948\end{pmatrix}x(k)+\\ \qquad\begin{pmatrix}0.1993 & -0.1365\\ 0.0053 & 0.2151\\ 0.1048 & 0.0892\end{pmatrix}u(k)\\ y(k)=\begin{pmatrix}1 & 1 & 0\\ 2 & -1 & 1\end{pmatrix}x(k)\end{cases}$$

取降维观测器的极点为 0.5，即 $F=0.5$，取 $G=[0.5\quad 0.5]$，解得：

$T=[-2.1465\quad -0.8195\quad -2.2007]$

$H=[-0.6629\quad 0.0795]$

$$Q_1=\begin{pmatrix}0.5725 & 0.4172\\ 0.4275 & -0.4172\\ -0.7176 & -0.2516\end{pmatrix},Q_2=\begin{pmatrix}0.1896\\ -0.1896\\ -0.5687\end{pmatrix}$$

1）当传感器 1 失效时，也即 $L=\begin{pmatrix}0 & 0\\ 0 & 1\end{pmatrix}$ 时，得到 $t_{\min}=-0.3206<0$，根据文献(8)可知，此时系统存在可行解，得到：

$$K=\begin{pmatrix}-1.1730 & -2.3085 & -0.8199\\ 0.9356 & 0.5684 & -0.2802\end{pmatrix}$$

$$P=\begin{pmatrix}5.2208 & -0.1796 & -0.0767\\ -0.1796 & 5.2347 & 0.0910\\ -0.0767 & 0.0910 & 4.9525\end{pmatrix}$$

$$R=\begin{pmatrix}2.3361 & -0.0113 & 0.0250\\ -0.0113 & 2.3040 & -0.0153\\ 0.0250 & -0.0153 & 2.3191\end{pmatrix}$$

$S=2.8105$

此时系统的输出响应曲线，如图 1 所示。

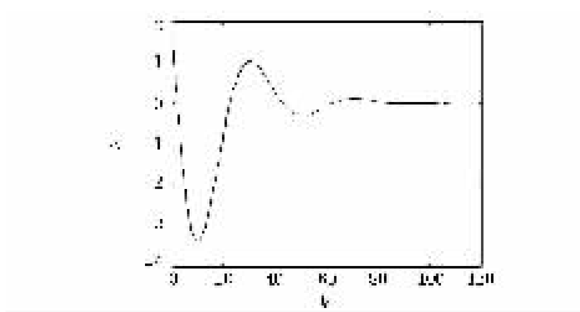

图 1 传感器 1 失效时的个别输出曲线

Fig.1 The output curve when sensor 1 is invalid

2）当传感器 2 失效时，也即传感器故障矩阵 $L=\begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & 0\end{pmatrix}$ 时，得到全局最优 $t_{\min}=-0.3136<0$。

此时系统输出响应曲线，如图 2 所示。

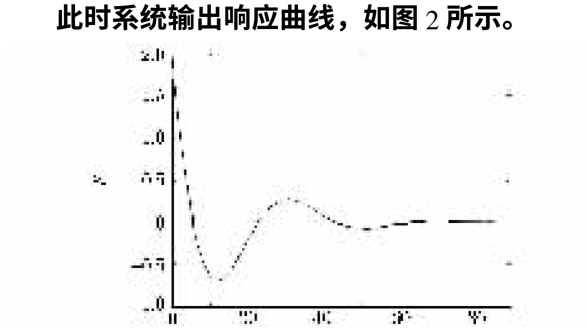

图 2 传感器 2 失效时的个别输出曲线

Fig.2 The output curve when sensor 2 is invalid

此时可得：

$$K=\begin{pmatrix}2.9449 & -1.7412 & 0.3647\\ 0.7249 & -0.4631 & 0.0098\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix}4.969\,9 & -0.155\,1 & -0.097\,4\\ -0.155\,1 & 5.012\,6 & 0.102\,5\\ -0.097\,4 & 0.102\,5 & 4.714\,8\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix}2.166\,5 & 0.020\,1 & 0.005\,9\\ 0.020\,1 & 2.163\,9 & -0.006\,2\\ 0.005\,9 & -0.006\,2 & 2.171\,1\end{pmatrix}$$

$S=2.638\,3$

3）当两个传感器部分失效时，即 $L=\begin{pmatrix}0.5 & 0\\ 0 & 0.5\end{pmatrix}$，此时得到 $t_{\min}=-0.312\,5<0$。

$$\boldsymbol{K}=\begin{pmatrix}0.577\,7 & -0.558\,0 & -0.818\,9\\ 0.180\,7 & -0.189\,5 & -0.283\,3\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix}4.988\,0 & -0.164\,3 & -0.090\,2\\ -0.164\,3 & 5.009\,4 & 0.102\,4\\ -0.090\,2 & 0.102\,4 & 4.723\,7\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix}2.183\,2 & 0.009\,9 & 0.013\,5\\ 0.009\,9 & 2.157\,7 & -0.006\,2\\ 0.013\,5 & -0.006\,2 & 2.177\,6\end{pmatrix}$$

$S=2.643\,2$

4）特殊的，当传感器全部失效时，即 $L=\begin{pmatrix}0 & 0\\ 0 & 0\end{pmatrix}$ 时，此时可得 $t_{\min}=-0.317\,9<0$，也就是仍然可以找到适当的控制器 $\boldsymbol{K}$，$\boldsymbol{P}$，$\boldsymbol{R}$，$\boldsymbol{S}$，使得系统稳定。在这种情况下通过 Matlab7.1，求得：

$$\boldsymbol{K}=\begin{pmatrix}-0.657\,4 & 0.442\,8 & -1.564\,4\\ -0.143\,8 & -0.143\,8 & -0.259\,2\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix}4.935\,8 & -0.165\,2 & -0.097\,8\\ -0.165\,2 & 4.978\,7 & 0.102\,9\\ -0.097\,8 & 0.102\,9 & 4.689\,1\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix}2.140\,6 & 0.009\,9 & 0.005\,9\\ 0.009\,9 & 2.138\,0 & -0.006\,2\\ 0.005\,9 & -0.006\,2 & 2.155\,4\end{pmatrix}$$

$S=2.619\,1$

5　结　语

本文针对传感器和控制器都是时钟驱动的网络控制系统，在时延不大于一个采样周期的情况下，利用 Lyapunov 理论和 LMI 方法，推导出了在传感器故障的情况下保证闭环系统稳定的充分条件，并给出了控制器 K 的设计方法。Matlab 数值仿真算例说明了分析方法和结果的有效性。由于 Lueberger 观测器采用了降维设计，所以结构简单、直接、便于实现，具有重要的应用意义。

参考文献(References)：

[1] 王福利，张颖伟. 容错控制[M]. 沈阳：东北大学出版社，2003. (Wang Fuli, Zhang Yingwei. Fault-tolerant control[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2003.)

[2] 樊卫华，蔡骅，陈庆伟，等. MIMO 网络控制系统的容错控制[J]. 系统工程与电子技术，2005，27(5)：879-882. (Fan Weihua, Cai Hua, Chen Qingwei, *et al*. Fault-tolerant control of MIMO NCS[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(5): 879-882.)

[3] Luenberger D G. Observing the state of a linear system[J]. IEEE Trans Military Electronics, 1964, MIL-8(1): 74-80.

[4] 刘志东，刘丽华. 利用降维状态观测器离散系统的鲁棒容错控制[J]. 电机与控制学报，2003，7(4)：314-316. (Liu Zhidong, Liu Lihua. Robust fault-tolerant control for linear discrete state feedback systems with a reduced order observer[J]. Electric Machines and Control, 2003, 7(4): 314-316.)

[5] Barmish B R, Galimidi A R. Robustness of Luenberger observers: linear systems stabilized via non-linear control[J]. Automatica, 1986, 22(1): 413-423.

[6] Trinh H, Aldeen M. A reduced-order state observer for large-scale discrete-time systems[J]. Computers Elect Engng, 1991, 23(5): 301-309.

[7] Sundarapandian V. Reduced order observer design for nonlinear systems[J]. Applied Mathematics Letters, 2006, 19(9): 936-941.

[8] 俞立. 鲁棒控制—线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京：清华大学出版社，2002. (Yu Li. Robust control-method of linear matrix inequality[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)

(上接第 305 页)

从图 10 中可以看出，最大超调量为 6 V，调整时间约为 400 ms，调整时间稍微长些，原因是为避免在开机启动时负载上产生大的冲击电流，将控制芯片的软启动时间设置的比较长(时间为 360 ms)，从第一个电压过冲后，输出电压很快就衰减到 60 V；输出电压稳定在 60 V 后，就不再变化。从图 11 可以看出，负载发生变化时系统的动态响应时间为 8 ms 左右，说明了系统动态响应的快速性；此外，给定电压 U_{REF} 为 2.5 V 时，对应的理论输出电压为 60 V。图 10，图 11 为给定为 2.5 V 时的输出电压，说明系统的稳态误差为零。

5　结　语

本文通过建立 FB-ZVZCS 变换器的小信号模型，推导出了系统的开环传递函数，设计了针对 5 kW 系统的极点-零点补偿器，并给出了极点-零点补偿器设计的原则。仿真结果和实验结果表明，基于 FB-ZVZCS 变换器的小信号模型设计的补偿器，在保证系统稳定性的基础上，可以提高系统的动态响应速度和控制精度。

参考文献(References)：

[1] 张占松，蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京：电子工业出版社，2004. (Zhang Zhansong, Cai Xuansan. The principle and design of switching power supply[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.)

[2] 王聪. 软开关功率变换器及其应用[M]. 北京：科学出版社，2000. (Wang Cong. The soft switch power converter and application[M]. Beijing: Science Press, 2000.)

[3] Choi H S, Kim J W, Lee J H, *et al*. Modeling, analysis and design of 10 kW parallel module zero-voltage zero-current switched full bridge PWM converter[C]. New Orleans, USA: IEEE APEC, 2000.

[4] 李红平，詹晓东. 采用峰值电流模式的全桥移相控制 DC/DC 变换器[J]. 电力电子技术，2000，2(1)：29. (Li Hongping, Zhan Xiaodong. A peak-current mode full-bridge phase-shifted PWM controlled DC/DC converter[J]. Power Electronics, 2000, 2(1): 29.)

[5] Brown M. Power supply cookbook[M]. 徐德鸿，沈旭，译. 北京：机械工业出版社，2004. (Brown M. Power supply cookbook[M]. Translated by Xu Dehong, Shen Xu. Beijing: Machinery Industry Publishing House, 2004.)