

基于改进型粒子群算法的扩张状态观测器*

王 坤 张立广 王 琪

(西安工业大学电子信息工程学院 西安 710021)

摘 要:为了解决自抗扰控制器核心模块的参数难以整定的问题,提出了利用改进型粒子群算法的扩张状态观测器设计方法。研究了扩张状态观测器的数学模型,分析了影响观测信号跟踪精度的因素,给出了待定参数设计方法的具体步骤。该方法选择改进后的适应度函数作为性能优化指标,增加了惯性系数的自适应性,并引入速度钳制以防止陷入局部最优。最后通过计算和仿真实验分析,验证了所提方法的正确性和鲁棒性,对解决自抗扰控制器中其他模块的待定参数整定问题具有一定的意义。

关键词:自抗扰控制;扩张状态观测器;粒子群算法;参数整定

中图分类号: TP183 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

Extended state observer based on improved particle swarm optimization algorithm

Wang Kun Zhang Liguang Wang Qi

(School of Electronic and Information, Xi'an Technology University, Xi'an 710032, China)

Abstract: In order to solve the problem that the parameters in the core module of the auto - disturbance - rejection controller are difficult to be set, this paper presents a design method of the extended state observer using the improved particle swarm optimization algorithm. In this paper, the mathematical model of the extended state observer is studied, and the factors influencing the tracking accuracy of the observed signal are analyzed. The concrete steps of the parameter design method are given. The design method chooses the appropriate fitness function as the performance optimization index, increases the self-adaptability of inertia factor, and introduces the speed clamp to prevent the local optimum. Through the theoretical calculation and simulation analysis, the results verify the correctness and the strong robustness of the designed method. With this method, the parameters of the other modules of the auto-disturbance rejection controller can be determined.

Keywords: active disturbance rejection control; extended state observer; particle swarm optimization algorithm; parameter designed

0 引 言

传统的PID控制器由于其结构简单,在控制工程中得到了很广泛的应用。但如果被控系统的参数变化范围大或系统中的非线性严重,PID控制器将很难达到预期的控制效果。中科院韩京清研究员经过多年的潜心研究,提出了一种新型的非线性控制方法——自抗扰控制。自抗扰控制是一种基于PID控制思想的非线性控制律,在不依赖于被控对象数学模型的前提下,将系统中的不确定因素与系统工作时的外部扰动合并在一起,作为系统的“总扰动”

而进行实时估计和补偿,从而将原有的不确定系统补偿成确定性系统,因此自抗扰控制技术具有较强的适应性、鲁棒性和可操作性。目前,自抗扰控制方法在航空航天、电力系统和机器人控制等领域得到了应用^[1-5],并取得了良好的控制效果,充分显示出其控制性能的优良及其广泛的应用前景。

自抗扰控制器(auto disturbance rejection controller, ADRC)是由3部分组成的,分别是跟踪-微分器(tracking differentiator, TD)、非线性扩张状态观测器(extended state observer, ESO)和状态误差的非线性控制^[6]。

收稿日期:2017-05

* 基金项目:2017年陕西省教育厅专项科研基金项目资助

这3个组成部分的输入、输出关系都是非线性的,将真正实现利用非线性特性直接控制非线性系统的突破。在很多实际应用中,针对具体的被控对象构造了相对应的自抗扰控制器,但构造的控制器中含有很多待定参数,而这些待定参数往往是在特定条件下依赖于人的经验和具体的问题凑得到的。因此,自抗扰控制器的待定参数整定的问题已成为目前自抗扰控制研究的焦点和重点。

从ADRC的组成及各模块的作用可以看出,ADRC是以ESO为核心的非线性鲁棒控制技术。ESO实质上是一种特殊的状态观测器,它不仅可以“观测”出控制对象的状态变量,而且可以估计出控制对象模型中的不确定因素和未知干扰的实时值(扩张状态)。扩张状态观测器“观测”精度的高低将直接影响自抗扰控制器品质的好坏。所以,ESO的设计在自抗扰控制器的整体设计中占有非常重要的位置。

为此,以ESO为研究对象,在分析和研究ESO的结构及其参数对控制系统性能影响的基础上,将粒子群优化算法引入参数整定,提出了基于改进型粒子群算法的非线性扩张状态观测器的设计方法。通过对二阶、三阶系统的仿真,表明利用该方法设计的ESO具有良好的动态响应,得到的“扩张状态”观测精度较高,设计的ESO还具有较强的鲁棒性。

1 扩张状态观测器

考虑如式(1)所示的非线性不确定被控对象

$$\dot{x}^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, t) + w(t) \quad (1)$$

式中: $f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, t)$ 为未知函数, $w(t)$ 为系统的不确定外扰, $x(t)$ 是直接或间接可测量。

文献[6]中已证明可以构造如式(2)所示非线性系统作为观测系统。

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - g_1(z_1 - x(t)) \\ \dot{z}_2 = z_3 - g_2(z_1 - x(t)) \\ \vdots \\ \dot{z}_n = z_{n+1} - g_n(z_1 - x(t)) \\ \dot{z}_{n+1} = -g_{n+1}(z_1 - x(t)) \end{cases} \quad (2)$$

只要选取合适的非线性函数 $g_1(z), g_2(z), \dots, g_{n+1}(z)$,就可以使以 $x(t)$ 为输入式(2)的各状态变量分别跟踪原系统即式(1)的各状态变量,即 $z_1(t) \rightarrow x(t), z_2(t) \rightarrow \dot{x}(t), \dots, z_{n+1}(t) \rightarrow x^{(n)}(t)$ 。

在文献[6]中已证明,构造的扩张状态观测器与被控对象具体的数学表达式无关,仅与系统“总扰动”信号的变化率的变化范围有关。因此,这种观测器比一般的状态观测器要好,将对一定范围内的被控对象具有较好的适应性和鲁棒性。

已经证明在非线性扩张状态观测器中,可以令 $g_i(z) = \beta_i g(z)$,其中 $g(z)$ 是非线性函数。则构造的扩张

状态观测器,即式(2),可进一步改写为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 g(z_1 - x(t)) \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 g(z_1 - x(t)) \\ \vdots \\ \dot{z}_n = z_{n+1} - \beta_n g(z_1 - x(t)) \\ \dot{z}_{n+1} = -\beta_{n+1} g(z_1 - x(t)) \end{cases} \quad (3)$$

当 $g(z)$ 确定后,只要选取合适的系数 β_i 就可以使式(3)的各状态变量分别跟踪式(1)的各状态变量 $x(t), \dot{x}(t), \dots, x^{(n-1)}(t)$ 和“扩张状态” $x^{(n)}(t)$ 。接下来,利用负反馈和“扩张状态”的估计值对原系统进行适当的补偿,即可达到将含有未知函数的不确定系统变为确定性系统的目的。

根据非线性函数 $g(z)$ 的选取原则,可以选择式(4)所示的函数形式,

$$g(z) = fal(z, \lambda, \delta) = \begin{cases} |z|^\lambda \text{sign}(z), & |z| \geq \delta \\ \frac{z}{\delta^{1-\lambda}}, & |z| < \delta \end{cases} \quad (4)$$

至此,ESO的设计将主要集中在其数学模型中的待定系数 β_i 和 $g(z)$ 函数中的幂系数 λ 的确定上。

2 粒子群优化算法

在优化计算方面,粒子群优化算法作为一种新的优化方法,具有收敛速度快、调整参数少、运算简单、易于实现等优点^[7-9],已广泛应用于控制工程的很多领域。其算法的核心思想是模拟鸟群飞行觅食的行为,通过鸟群之间的集体协作使群体达到最优。

2.1 基本粒子群算法

粒子群优化算法是Kennedy博士与Eberhart博士于1995年提出的,算法中的每个粒子都代表了问题的一组解,所有的粒子组成群,而且群中的每个粒子都具有位置、速度和一个由适应度函数决定的适应值,粒子在解空间中根据自身和同伴的飞行经验来动态地调整自己的飞行速度和方向,从而在寻优空间中完成寻优过程。其数学表述如下^[10-11]:

设目标搜索空间为 m 维,粒子群的总粒子数为 n 。第 i 个粒子在空间中的位置向量表示为 $\mathbf{X}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}]$;飞行速度向量表示为 $\mathbf{V}_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im}]$,第 i 个粒子搜索到的历史最优位置表示为 $\mathbf{PB}_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im}]$,整个群体搜索到的最优位置表示为 \mathbf{GB} ,它是所有 $\mathbf{PB}_i (i=1, 2, \dots, n)$ 中的最优值,则每个粒子的速度和位置按下述公式进行更新:

$$\mathbf{V}_i(k+1) = \omega_n \mathbf{V}_i(k) + c_1 r_1 (\mathbf{PB}_i - \mathbf{X}_i(n)) + c_2 r_2 (\mathbf{GB} - \mathbf{X}_i(n)) \quad (5)$$

$$\mathbf{X}_i(k+1) = \mathbf{X}_i(k) + \mathbf{V}_i(k+1) \quad (6)$$

式中: n 为粒子的个数, $i=1, 2, \dots, n$ 分别表示不同的粒子。 ω_n 称为惯性系数,通常在 $[0, 1]$ 之间取值,表示使微粒保持运动惯性的能力,使其具有扩展搜索空间的趋势。 c_1 和 c_2 为实常数,称之为加速度系数,表示将每个粒子推向

个体最优解 Particle Best 和全局最优解 Global Best 的统计加速度的权重,用于调节该粒子向自身已寻找到的最优位置和同伴已寻找到的最优位置方向飞行的最大步长; r_1 和 r_2 为 $[0,1]$ 之间的随机数。

2.2 改进粒子群算法

从粒子位置和速度的更新式(5)、(6)可见,迭代主要考虑影响优化进程的3方面要素。第1分量为惯性部分,反映粒子维持自己现有速度的能力;第2分量反映了粒子在寻优中借鉴自身历史并有向其最优优点靠近的能力;第3分量反映了粒子借鉴群体寻优经验并向其全局最优位置靠近的能力。在这三部分中惯性系数 ω_n 是平衡粒子群算法全局和局部搜索能力的重要参数。 ω_n 越大,全局搜索能力越强,收敛速度越快,更容易找到全局最优点; ω_n 越小,算法局部搜索能力越强,但粒子搜索的空间较窄,陷入局部极小的可能较大。为了平衡算法的全局和局部搜索能力,本文中在基本粒子群算法的基础上,随着迭代过程的不断推进,按照式(7)调整 ω_n ,使其在开始的时候收敛速度快,搜索空间大,快速到达最优解的区域。随着迭代的深入逐步调整 ω_n ,不断提高算法的局部搜索能力,使系统在全局最优解的区域快速达到最优解。

$$\omega_n = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{Max_n} \times n \quad (7)$$

式中: ω_{\max} 、 ω_{\min} 表示惯性系数的最大、最小值, Max_n 表示最大迭代次数, n 表示当前迭代次数。

此外,为了控制粒子的全局搜索能力,引进速度钳制,使速度被限定在一个有限的范围内,迭代过程中,如果粒子的位置和速度超过设定的边界值,则取边界值。

3 基于改进型粒子群算法的 ESO

由前面所建立的扩张状态观测器的数学模型式(3)、(4)可见,模型中的待定参数 β_i 和待定函数 $g_i(z)$ 中的参数 λ 与观测器的输出量 $z_1(t), z_2(t), \dots, z_{n+1}(t)$ 之间形成了复杂的非线性映射关系,扩张状态观测器的“状态观测”精度将直接由这些待定参数决定。通过大量的仿真研究发现, $g(z)$ 函数中的幂系数 λ 对 ESO 的跟踪精度有很大的影响,尤其是“扩张状态量” $\dot{z}_{n+1}(t)$ 表达式中 $g_{n+1}(z)$ 的幂系数对扩张状态的“观测”精度影响最大^[12]。因此,结合改进型粒子群优化算法,将模型中的待定参数 β_i 及 $g_{n+1}(z)$ 函数中的幂系数 λ 组成的向量视为待优化的粒子,优化的目标就是使“观测”输出信号与“总扰动”信号之间的均方差达到最小值。

由于粒子群优化算法与基于导数信息进行优化的方法相比,对于适应度函数的形式基本上是无限制的,因此为了提高观测器的观测精度,综合考虑系统的快速性、稳定性,在均方差指标的基础上,在适应度函数中计入误差绝对值。一方面,克服了在过渡过程中 $e(t)$ 时正时负的缺点,另外考虑时间 t ,使得过渡过程中后期出现的误差基本上能消除^[13-15]。综上所述,在本文中选择的适应度函数的

表达式为

$$J = \int_0^t \tau |e(\tau)| d\tau \quad (8)$$

综合以上分析,给出 ESO 中待定参数确定的算法流程。流程如图 1 所示。

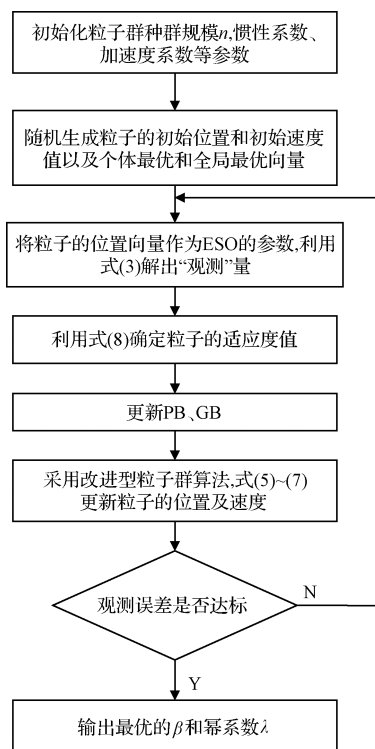


图 1 ESO 参数整定算法流程

4 仿真结果与分析

为了验证所提出的待定参数整定方法的正确性,以控制工程中常用的二阶、三阶系统为例,根据基于改进型粒子群算法确定 ESO 待定参数的算法步骤,求解出了 ESO 数学模型中的 4 个未知参数。具体仿真结果如下。

1) 二阶系统

$$\ddot{x} = f(x, \dot{x}, t) + w(t)$$

式中: $f(x, \dot{x}, t) = -x^2 - 0.5\dot{x} - \sin(\dot{x})$, 外部扰动 $w(t) = 0.2\text{sign}(\sin(t))$, 系统初始状态 $x(0)=0, \dot{x}(0)=0$ 。

在仿真中,取粒子种群数为 20,迭代次数为 50,最大惯性系数 ω_{\max} 取为 1.1,最小惯性系数 ω_{\min} 取为 0.4,惯性系数按照式(7)逐步减小,加速度系数 c_1 和 c_2 取为 1.45,根据 ESO 参数整定的算法,最终得到 ESO 中的 4 个参数分别为:

$$\beta_1 = 0.6466;$$

$$\beta_2 = 11.987;$$

$$\beta_3 = 9.998;$$

$$\lambda = 0.17;$$

仿真曲线如图 2 所示。从图 2 中 ESO 的输出曲线跟

踪实际信号的效果可以看出,一方面,观测器能高精度的给出被控系统状态中的状态变量;另一方面,观测器输出的“观测”信号跟踪实际“总扰动”信号的跟踪误差达到 2.0387×10^{-6} ,实现了观测不确定系统中未知函数和未知扰动的目的。

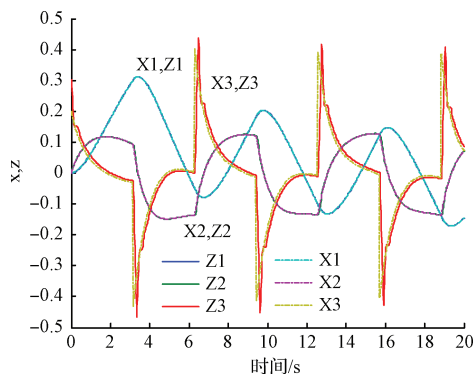


图2 二阶系统观测器仿真曲线

为了验证参数设计方法的有效性以及由该算法所得到的待定参数的鲁棒性,将优化后的参数直接代入另一个二阶系统中。验证系统取为 $f(x, \dot{x}, t) = -(\sin(\dot{x}))^2 - |\dot{x}|x$, 仿真曲线如图3所示,ESO输出信号的跟踪误差达到 6.4716×10^{-5} 。

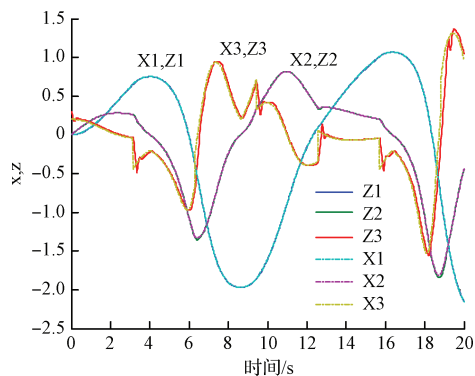


图3 二阶验证系统观测器仿真曲线

由图3可见,在相同结构、相同参数的条件下,用同一“扩张状态观测器”仍能很好地完成对其他同阶系统的状态量及“扩张状态量”的观测。可见独立于系统模型的扩张状态观测器是存在的。

2) 三阶系统

$$\ddot{x} = f(x, \dot{x}, \ddot{x}, t) + w(t)$$

式中: $f(x, \dot{x}, \ddot{x}, t) = -0.5\ddot{x}|\ddot{x}| - (1-x^2)\dot{x}$, 外部扰动 $w(t) = 0.2\text{sign}(\sin(t))$, 系统初始状态 $x(0)=0, \dot{x}(0)=0, \ddot{x}(0)=0$ 。

在仿真中,取粒子种群数为35,迭代次数为60,最大惯性系数 ω_{\max} 取为0.9,最小惯性系数 ω_{\min} 取为0.4,惯性系数仍按照式(7)逐步调整,加速度系数 c_1 和 c_2 取为2.0,根据ESO参数整定的算法,最终得到ESO中的5个参数

分别为:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 0.3246; \\ \beta_2 &= 39.8858; \\ \beta_3 &= 312.122; \\ \beta_4 &= 5.051 \\ \lambda &= 0.1; \end{aligned}$$

观测器输出的“观测”信号跟踪实际信号的跟踪误差达到 5.6286×10^{-10} ,仿真曲线如图4所示。

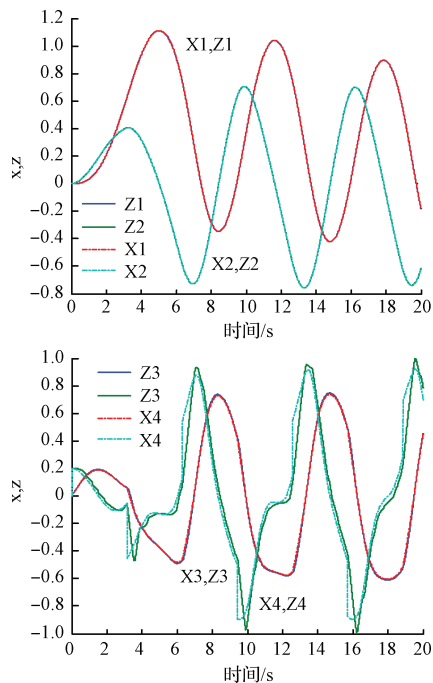


图4 三阶系统观测器仿真曲线

同样,为了验证参数设计方法的有效性及鲁棒性,将优化后的参数直接代入另一个三阶系统中,验证系统取为:

$$f(x, \dot{x}, \ddot{x}, t) = -0.5x\dot{x} - \dot{x} - 0.2\dot{x}^2 - (1-\ddot{x})^2\ddot{x}$$

仿真曲线如图5所示,验证系统中ESO输出信号跟踪误差为 7.3237×10^{-11} 。

对比仿真图4、5可见,利用文中提出的算法设计的扩张状态观测器能达到“观测”系统中“总扰动”信号的目的,“观测”精度很高,为反馈补偿奠定了坚实的基础。另一方面,用相同结构相同参数的“扩张状态观测器”仍能很好地完成对其他同阶系统的状态量及“扩张状态量”的观测。可见文中所设计的扩张状态观测器具有较好的鲁棒性。

5 结论

在对非线性扩张状态观测器和改进型粒子群算法深入研究的基础上,提出了基于改进型粒子群优化算法的扩张状态观测器中待定参数的设计方法。通过对工程中常见的一阶、二阶控制系统的仿真实验,结果表明,该算法简单、有效、可行,利用该方法设计的扩张状态观测器不仅具

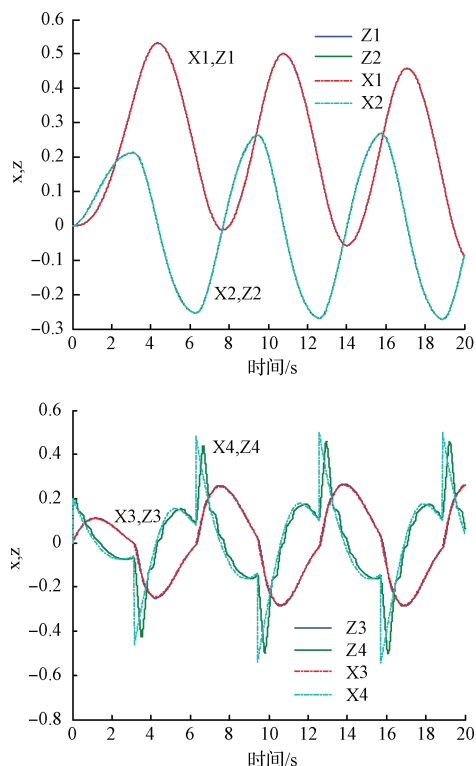


图5 三阶系统观测器仿真曲线

有良好的“观测”效果,信号跟踪精度达 10^{-5} ,而且利用该方法设计的扩张状态观测器具有较强的通用性。

参 考 文 献

[1] 赖爱芳,郭毓,郑丽君. 航天器姿态机动及稳定的自抗扰控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(3): 401-407.
 [2] 廉明,韩振宇,富宏亚. 自抗扰技术在卫星姿态模拟系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 616-622.
 [3] 吴忠,黄丽雅,魏孔明,等. 航天器姿态自抗扰控制[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1617-1622.

[4] LU K F, XIA Y Q, YANG D. Controller design for rigid spacecraft attitude tracking with actuator saturation[J]. Information Sciences, 2013, 220(220): 343-366.
 [5] WANG C, XIA Y, FU M, et al. Application of active disturbance rejection control in tank gun control system[C]. IEEE, International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, 2014: 13-18.
 [6] 韩京清. 自抗扰控制技术—估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
 [7] 李玉军,汤晓君,刘君华. 粒子群优化算法在改善传感器稳定性中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 1756-1762.
 [8] 魏媛媛,姚金杰. 基于自适应粒子群算法的目标位置测量方法[J]. 电子测量技术, 2010, 29(12): 17-19.
 [9] 尹晖,熊治国. 基于 PSO 的自抗扰飞行控制率参数优化方法[J]. 空军工程大学学报, 2013, 14(3): 19-22.
 [10] 梁艳春,吴春国,时小虎,等. 群智能优化算法理论及应用[M]. 北京:科学出版社, 2009.
 [11] 张松兰. 基于自适应粒子群的模拟电路故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(6): 901-906.
 [12] 王坤,蔡远利. 基于神经网络的扩张状态观测器[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(8): 1099-1102.
 [13] 项国波. 时滞系统优化控制[M]. 北京:中国电力出版社, 2009.
 [14] 朱红萍,罗隆福. 基于 ITAE 指标的 PID 控制器参数优化设计[J]. 电气自动化, 2009, 31(6): 37-39.
 [15] 陈自卫,石雄. 基于遗传算子的粒子群算法在战场频率分配中的应用[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(3): 73-76.

作 者 简 介

王坤, 1976 年出生, 讲师, 硕士, 主要研究方向为神经网络与智能控制算法的研究。
 E-mail: wangk@xatu.edu.cn