

国际科技合作项目

重型数控机床光纤传感

在线监测与热误差补偿合作研究

结题报告

汇报人： 娄 平

项目概况

主持单位: 武汉理工大学

合作单位: 英国伯明翰大学

武汉重型机床集团有限公司

资助批准号: 2015DFA70340

起止日期: 2015年4月-2018年3月

资助金额: 380万

汇报要点

- 一、研究内容与预期目标
- 二、项目实施情况
- 三、项目完成情况
- 四、研究成果
- 五、国际科技合作成果
- 六、经费使用情况

一、研究内容与预期目标

实现基于光纤光栅传感的多点、多场、分布式、
在线动态监测原理和方法的创新

实现创建机床各部件各点温度变化和热误差之间的
映射关系模型和力/热耦合累计模型的理论与技术创新

实现热误差解耦和实时补偿方法的技术创新

实现集成创新

二、项目实施情况

实施情况

- 按照任务书的**总体目标与研究内容**，合作三方精心筹划，充分讨论，确定了具体的实施及合作**方案**并组织**实施**；
- 围绕以光纤传感为监测手段，以热误差形成机理及传递规律为突破的热误差补偿的关键技术、应用及示范平台研究进行了全面部署和执行；
- 建立了良好的项目交流和协作方式，已与英国伯明翰大学进行了**6** 次互访和讨论，并联合举办国际会议**1**次，研讨会**3**次；
- 项目实施过程中，获得得国家留学基金委批准，与英国伯明翰大学进行人才联合培养**团队项目**；
- **全面完成项目的任务与技术指标。**

三、项目完成情况

光纤光栅传感技术

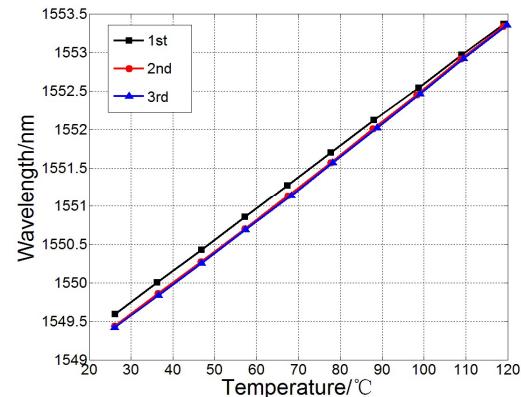
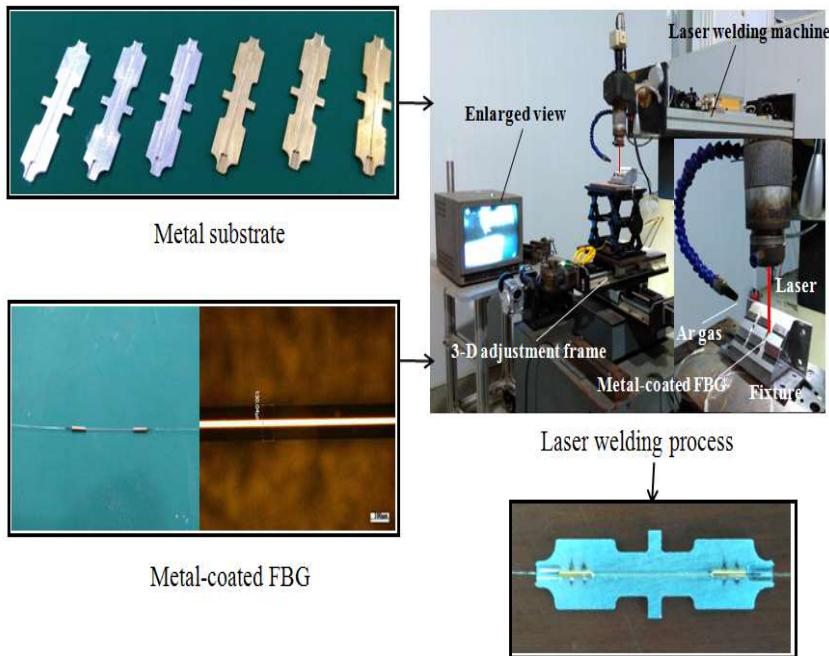
(1) 温度传感器的研制

- 利用**有限元分析方法**对光纤光栅测量机床表面温度的**热传导机制与测量误差**进行了分析与研究，为提高光纤光栅的表面测温精度提供**理论支持**。
- 为提高光纤光栅测温的**灵敏度**，采用热膨胀系数较大的金属基片对光纤光栅进行封装**增敏**，封装后灵敏度为裸光纤光栅温度灵敏度的**4倍**，同时采用**激光焊接封装**的方式代替传统的有机环氧树脂封装，提高了传感器长期工作的**可靠性**。

三、项目完成情况

光纤光栅传感技术

如下图分别为封装的温度传感器外观、封装设备以及测试结果：



线性相关系数：0.99974

线性度：0.35%

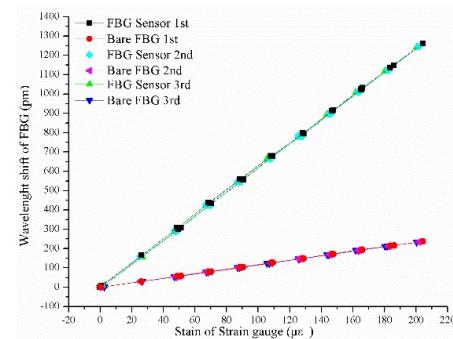
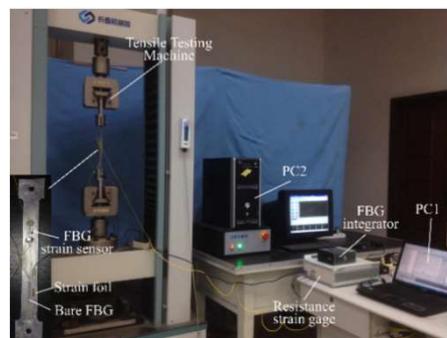
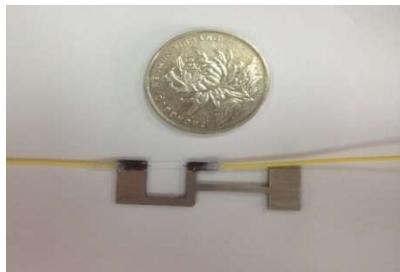
精度：0.1°C

三、项目完成情况

光纤光栅传感技术

(2) 应变传感器的研制

探究了基于光纤光栅传感的基片式应变传感器的应力传递机制，在此基础上研制了一种杠杠结构的基片封装的应变传感器，通过杠杆结构的增敏，使得其灵敏度增加了**5倍**，其线性相关系数为**0.99986**，线性度为**1.05%**，精度为**0.1613 μ e**。



三、项目完成情况

光纤光栅传感技术

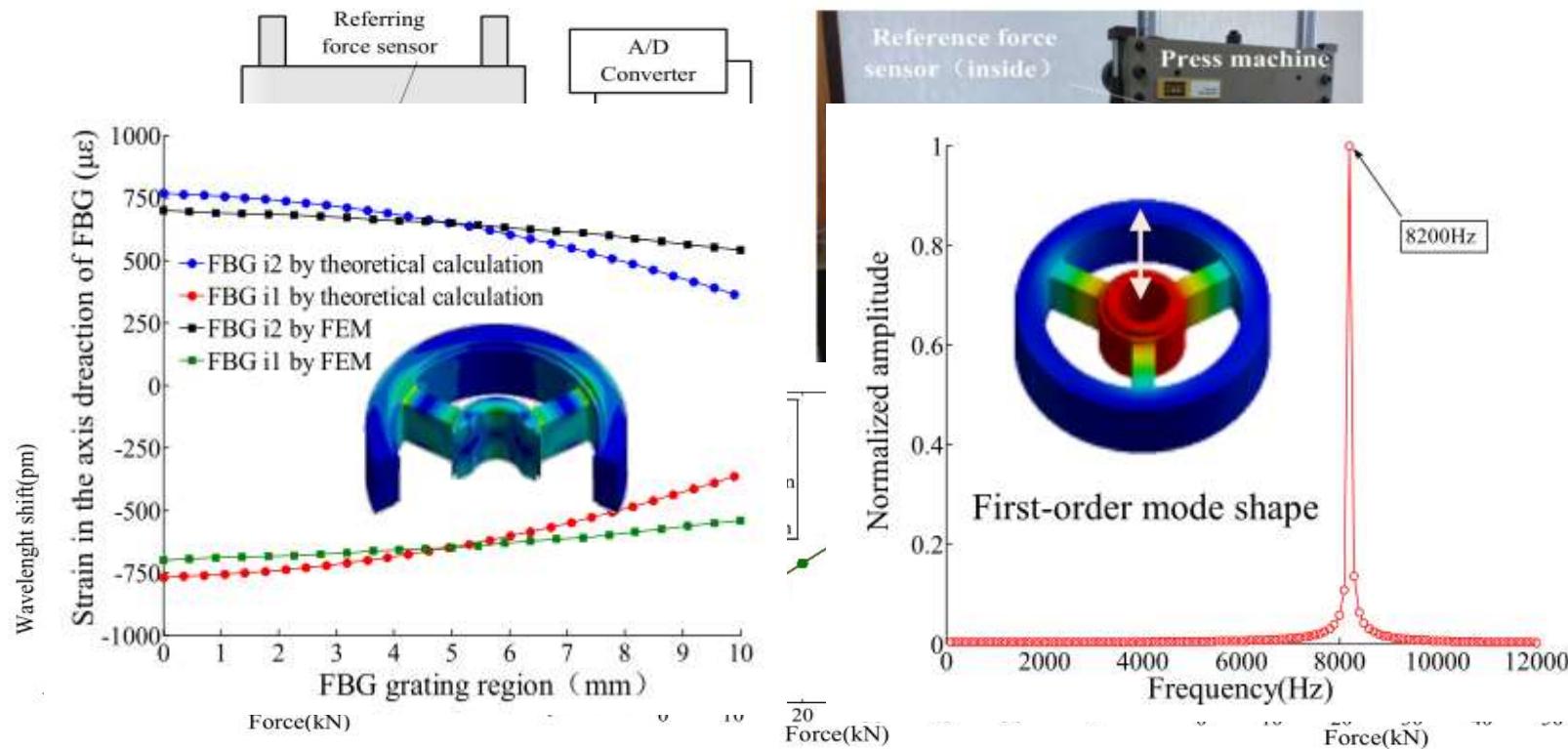
(3) 力传感器的研制

研究设计了一种基于光纤光栅传感的轮辐式力传感器用于监测机床底座各支撑座的支撑力，该光纤光栅力传感器的量程为**0-50KN**，灵敏度为**84.36pm/kN**，分辨率为**0.5‰FS**，精度为**0.25‰FS**，线性相关系数达到**0.9999985**，线性度为**0.2%**，且对温度变化不敏感。

三、项目完成情况

光纤光栅传感技术

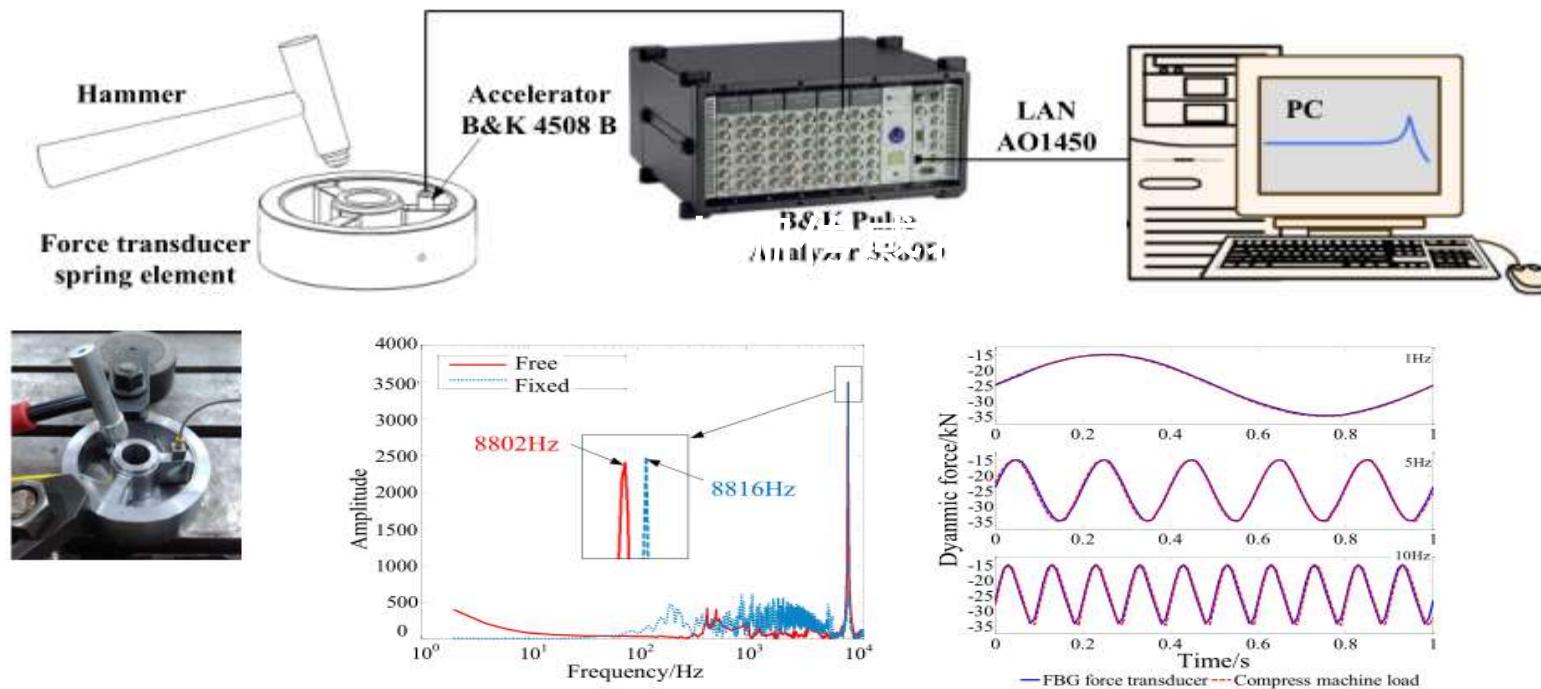
如下图分别为灵敏度标定实验装置以及重复性实验、线性拟合性实验结果：
如下图为理论分析结果：



三、项目完成情况

光纤光栅传感技术

如下图为传感器动态性能测量系统以及谐振实验、动态载荷测试结果：

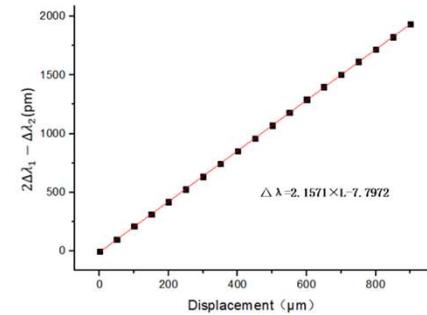
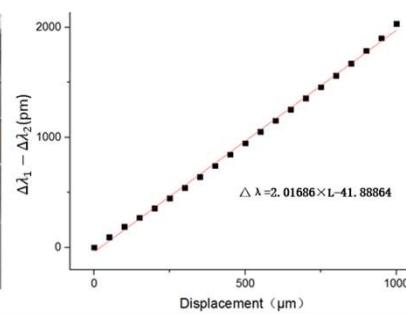
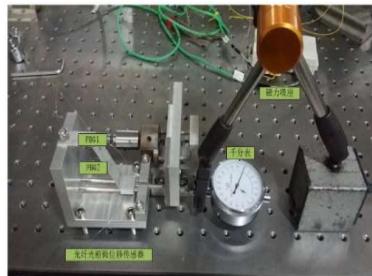


三、项目完成情况

光纤光栅传感技术

(4) 微位移传感器研制

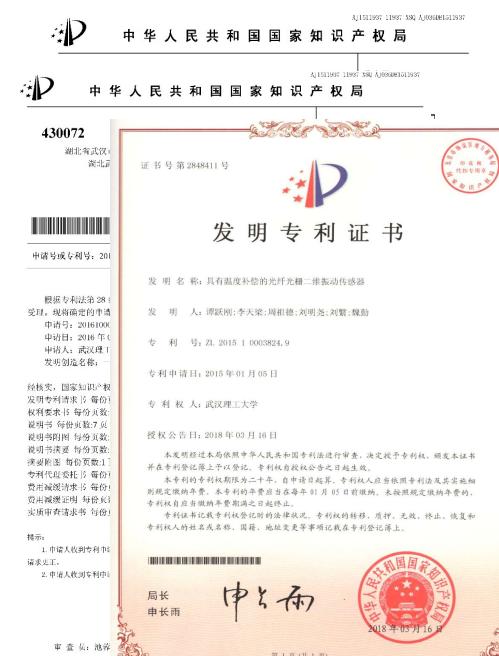
研究设计了两种结构的高精度微位移传感器，弓型式微位移传感器的位移灵敏度为**2.02pm/μm**，线性相关系数是**0.99983**，线性度为**2.92%**。半弓型式微位移传感器的位移灵敏度为**2.16pm/μm**，线性相关系数是**0.99996**，线性度为**0.4%**，测量范围**0-1mm**。



三、项目完成情况

光纤光栅传感技术

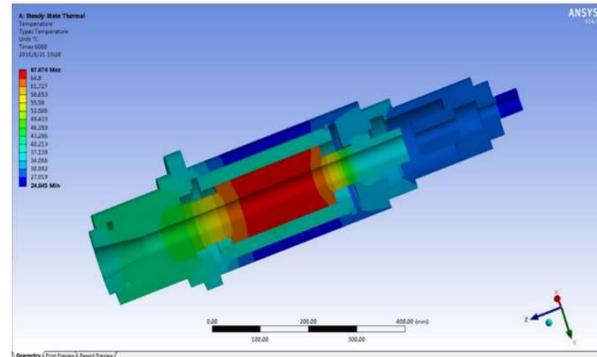
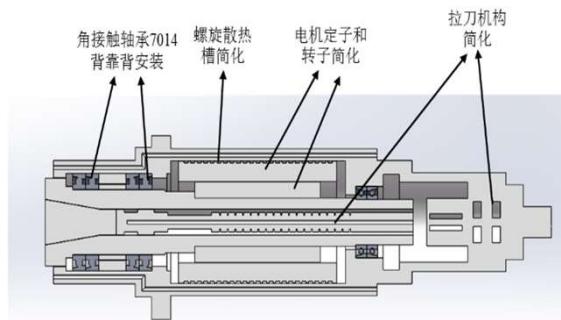
通过相关的研究，发表论文7篇（其中SCI收录5篇，EI收录1篇），申请发明专利8项（其中1项已经授权，1项已申请国际专利）。



三、项目完成情况

热变形机理

(1) 电主轴温度场数值分析



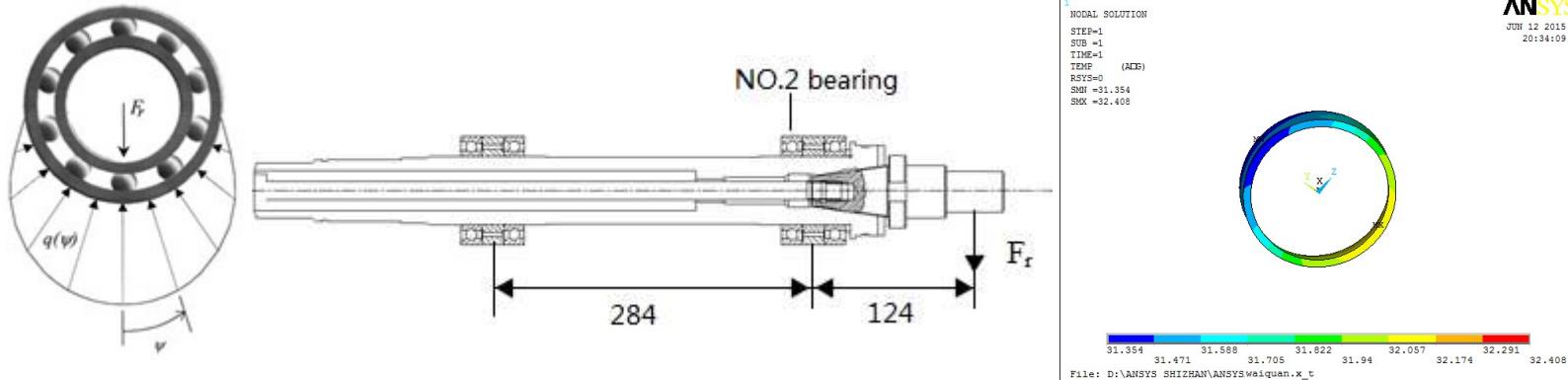
- 利用有限元对热稳态温度场进行分析可知，在电主轴的**转子部分**由于其发热量大，因此其**温度较高**；而在前后**轴承位置**温度也**较高**，说明**轴承摩擦发热**也是电主轴发热的重要一部分，但是由于前端轴承存在**油气冷却系统**，能够带走部分的热量，同时电主轴的**转子端部部分**也能够进行部分的散热，因此其**温度没有定子内部的高**。

三、项目完成情况

热变形机理

(2) 主轴支撑轴承温度场分布研究

■ 切削力作用下主轴支撑轴承温度场分布研究：



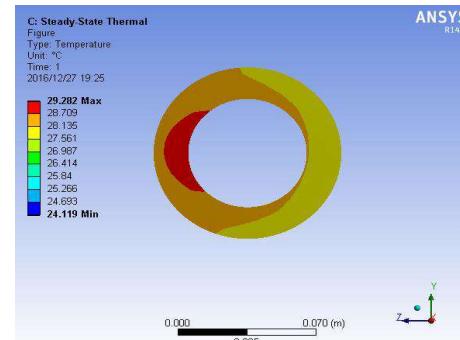
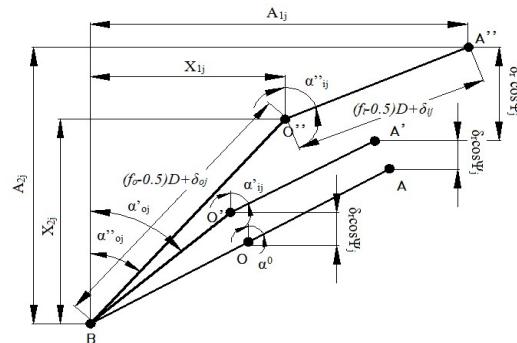
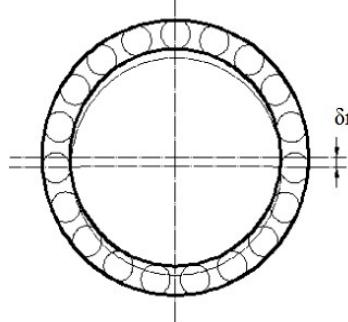
在轴承外套圈达到热平衡后，轴承外套圈温度分布不均匀，存在 **1.05°C** 的温度差，最高温度点为承载区与径向力平行的位置，非承载区温度整体低于承载区。

三、项目完成情况

热变形机理

(2) 主轴支撑轴承温度场分布研究

■ 支撑轴承安装误差对轴承温度场分布影响研究：



主轴支承结构在存在安装误差的情况下，轴承内部各滚动体与轴承套圈之间的**初始接触角**发生了变化，在一定的**预紧力**作用下，轴承各滚动体与套圈之间的**接触载荷不均匀分布**，所以轴承各滚动体与套圈之间的**自旋摩擦力矩分布不均匀**，造成轴承温度场存在明显的**温度差异**，影响**主轴热变形**。

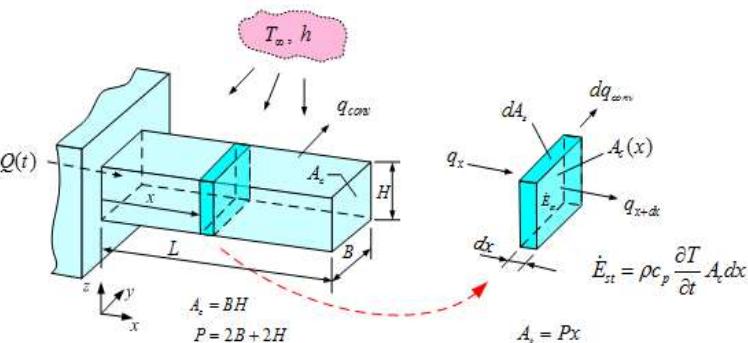
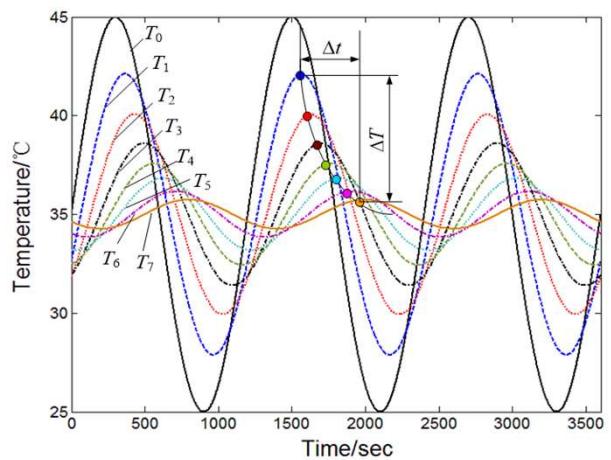
三、项目完成情况

热变形机理

(3) 梁型结构件热变形特性研究

构建动态热传导模型：

$$kA_c \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} A_c + hP(T - T_e)$$



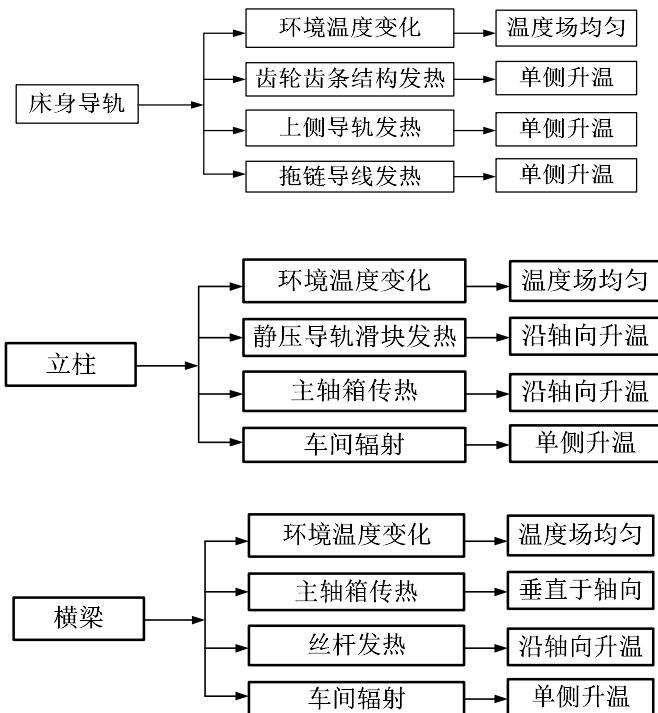
梁上不同点处的动态温度相对于左端面不仅存在相位滞后，还存在温度幅值衰减。

通过相关研究发表SCI收录论文2篇，授权发明专利1项

三、项目完成情况

热误差传递与累计模型

(1) 重型数控机床大型金属结构件力-热耦合变形特征分析



数控机床结构件的热载荷主要有**全局热载荷**（环境温度）、**局部热载荷**和**轴向分布热载荷**三种不同的基本表现形式。

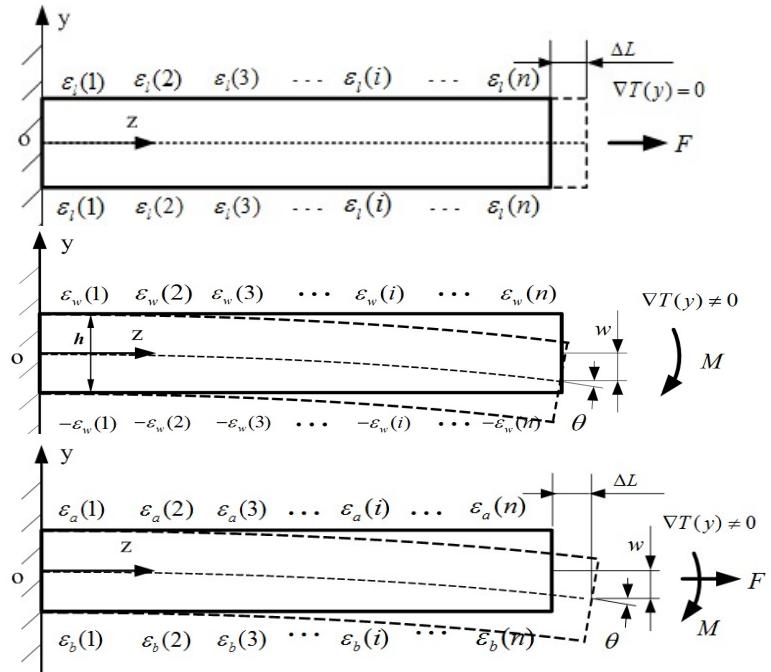
立柱结构件的热变形可以归纳为**拉伸**（或**压缩**）变形和**弯曲变形**，这与其在**力载荷**作用下产生**拉伸**（或**压缩**）变形和**弯曲变形**具有一致性。因此，立柱结构件的力-热耦合变形可以进行统一研究。

三、项目完成情况

热误差传递与累计模型

(2) 基于应变测量的力-热耦合拉弯复合热变形

■ 基于应变测量的力-热耦合拉弯复合热变形测量原理



$$\Delta L(x) = \int_0^x \frac{\varepsilon_a(x) + \varepsilon_b(x)}{2} dx$$

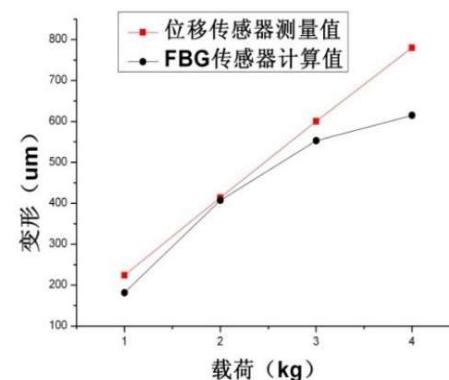
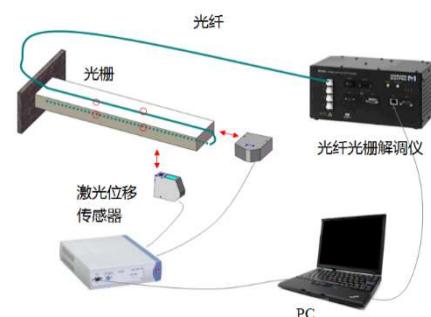
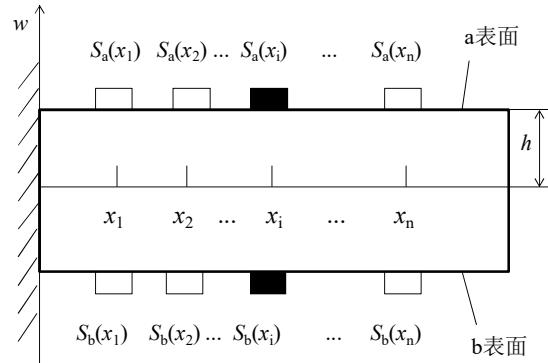
$$w(x) = \int_0^x \frac{\int [\varepsilon_a(x) - \varepsilon_b(x)] dx}{\sqrt{h^2 - \left(\int [\varepsilon_a(x) - \varepsilon_b(x)] dx\right)^2}} dx$$

三、项目完成情况

热误差传递与累计模型

(2) 基于应变测量的力-热耦合拉弯复合热变形

■ 应变测量数据的结构件力-热耦合拉弯复合变形重构方法

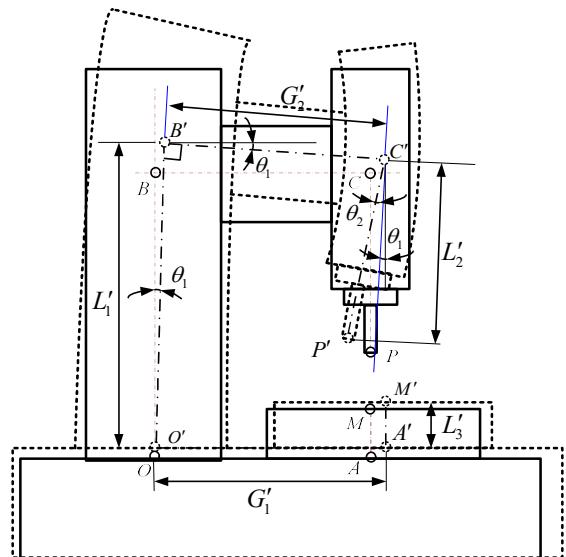


三、项目完成情况

热误差传递与累计模型

(2) 基于应变测量的力-热耦合拉弯复合热变形

■ 力-热耦合误差累计模型



$$z = L_1 - L_2 - L_3$$

$$z' = L'_1 - [G'_1 \sin \theta_1 + L'_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L'_3]$$

$$\Delta L_1 = L'_1 - L_1, \quad \Delta L_2 = L'_2 - L_2, \quad \Delta L_3 = L'_3 - L_3$$

$$\Delta G_1 = G'_1 - G_1, \quad \Delta G_2 = G'_2 - G_2$$

$$\Delta z = z' - z = \Delta L_1 - \Delta L_3 + L_2 - [(G_2 + \Delta G_2) \sin \theta_1 + (L_2 + \Delta L_2) \cos(\theta_1 + \theta_2)]$$

$$\Delta y = G_1 + \Delta G_1 - [(L_1 + \Delta L_1) \sin \theta_1 + (G_2 + \Delta G_2) \cos \theta_1 - (L_2 + \Delta L_2) \sin(\theta_1 + \theta_2)]$$

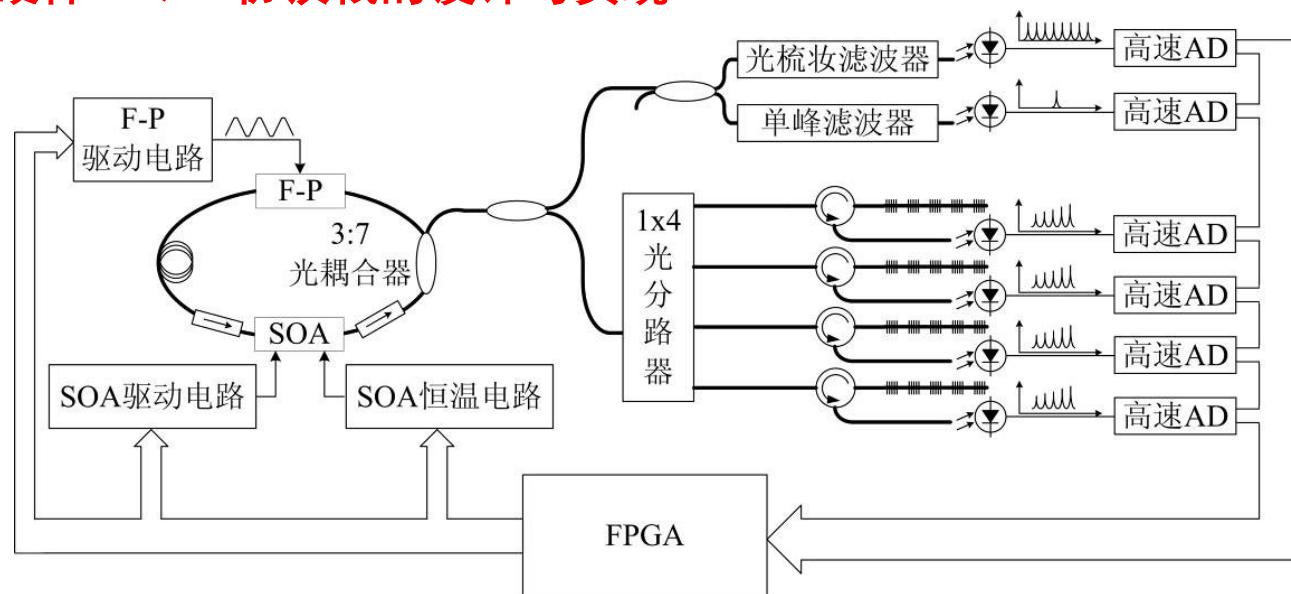
通过相关的研究发表SCI收录论文3篇

三、项目完成情况

高速解调仪表

(1) 光纤光栅解调原理与方法的研究

- 傅里叶域锁模扫频激光器理论研究与实现
- 硬件TCP/IP协议栈的设计与实现

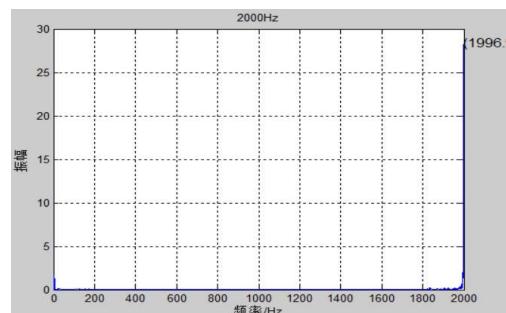
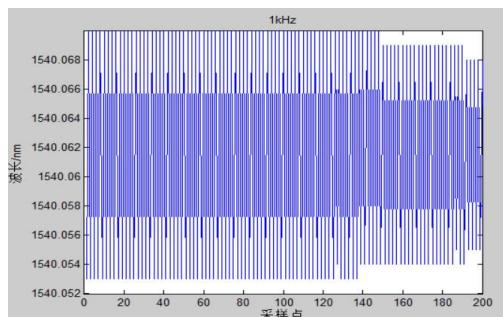


三、项目完成情况

高速解调仪表

(2) 解调仪表的设计与开发

■ 调仪性能测试



相关研究发表论文7篇
(其中SCI收录2篇, EI收录5篇)

2000 Hz振动情况下测试结果

国家光电子产品质量监督检验中心
National Optical Product Inspection Center

证书编号: [2015020501123] 日期: (2015)光电质监检字第000000000000号
报告编号: [2015020501123] 报告日期: 2015-04-15

测试报告

报告编号: [2015020501123] Certificate No. [2015020501123]

委托方名称: 武汉理工大学
受托方名称: 武汉市质检院
样品名称: 光纤光谱解调仪
制造厂名: 武汉理工大学
Model Type: DW-400Hz
No. Of Sample: 1
环境条件: 温度: 25.3°C 湿度: 49.5%
采样时间: 2015-04-15
实验室: 测量室
检测日期: 2015-04-15
检测人:
审核人:
批准人:

本报告由国家光电子产品质量监督检验中心出具。本报告由本单位(中心)存档,不得转借或涂改。
本报告仅对报告的参数负责。本报告对报告的参数负责。本报告对报告的参数负责。

报告日期: 2015-04-15

国家光电子产品质量监督检验中心
National Optical Product Inspection Center
证书编号: [2015020501123] 日期: (2015)光电质监检字第000000000000号
测试结果单
Results Of Test

测试结果如下:

序号	测试项目	技术指标	实测值	备注
1	解调频率	光纤光谱解调仪解调速度频率可达4000Hz	对400 Hz, 1200 Hz和2000 Hz解调得到见图1, 2, 3 主频带半值分贝为400.8 Hz, 1201.9 Hz和1996.9 Hz, 解调频率4000Hz。	
2	波长分辨率	光纤光谱解调仪波长分辨率1pm	1pm	见图4
3	典型波长误差	光纤光谱解调仪典型波长误差优于1pm	0.44pm	见图5
4	最大波长误差	光纤光谱解调仪最大波长误差为5pm	5pm	
5	系统分析置信度	光纤光谱解调仪系统分析置信度应优于90%	95.7%	见表1

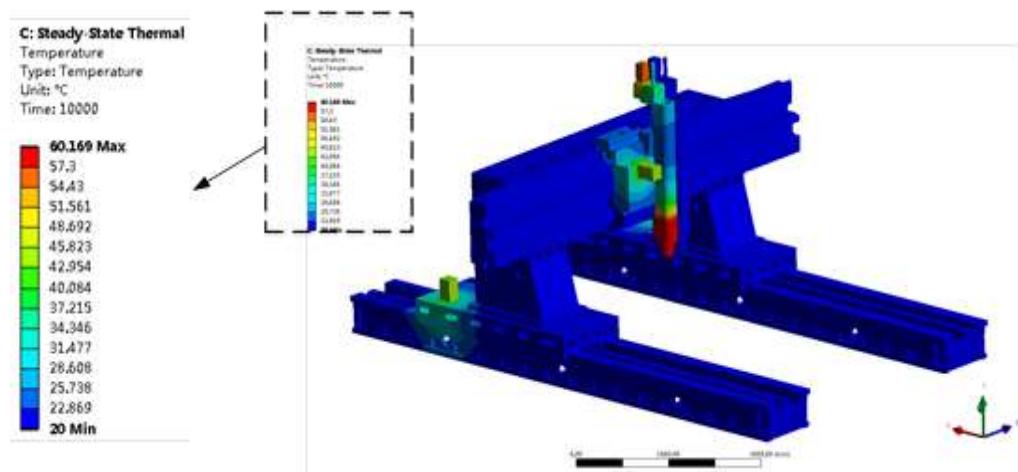
第 2 页, 共 5 页

三、项目完成情况

机床监测与热误差建模

(1) 数控机床在线监测

■ 数控机床温度场有限元分析



机床整机仿真参数设置

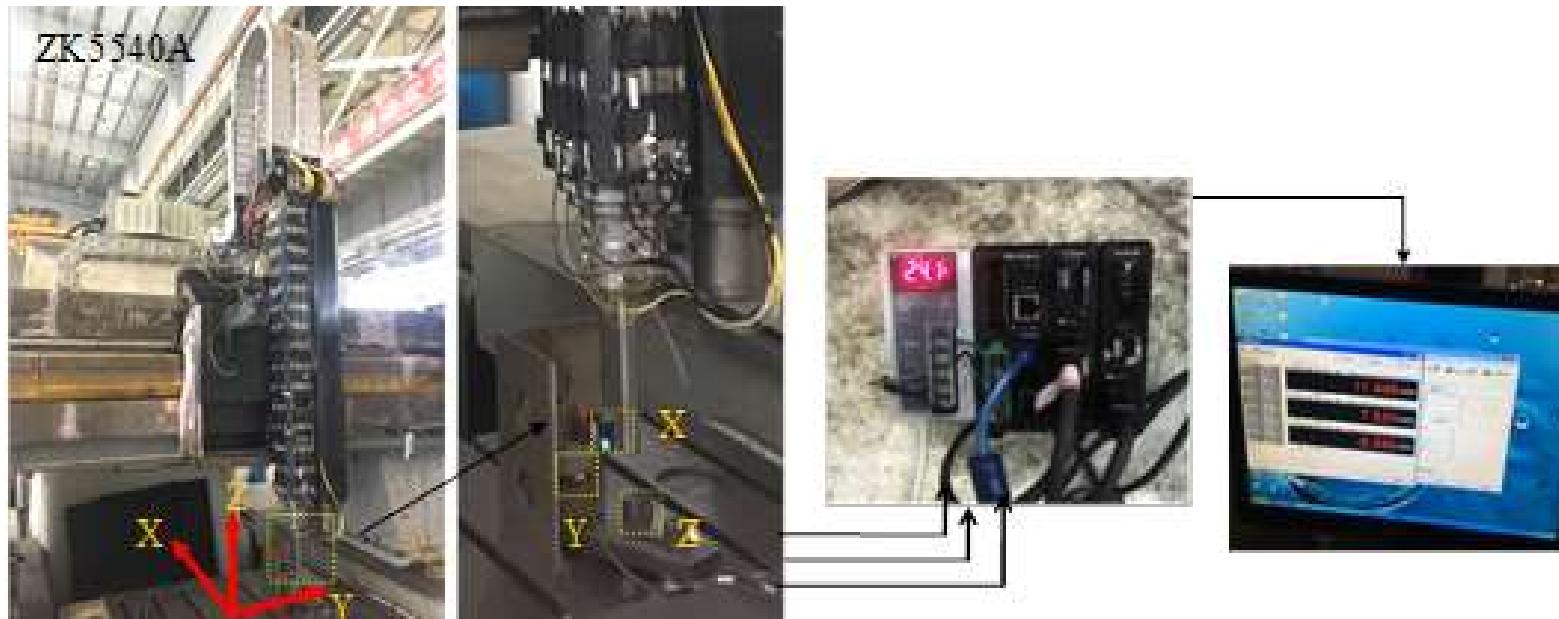
材料	密度 (kg/m ³)	导热系数 W/(m·°C)	比热 J/(kg·°C)
铸铁	7200	52	460
钢	7850	60.5	434
铜	8933	400	385
空气	1.1614	0.026	1007
水	997.4	0.604	4179
冷却油	1100	0.128	1800

三、项目完成情况

机床监测与热误差建模

(1) 数控机床在线监测

■ 数控机床热误差监测

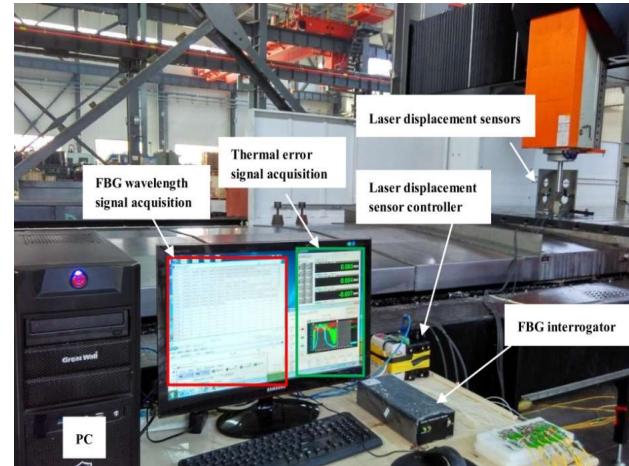
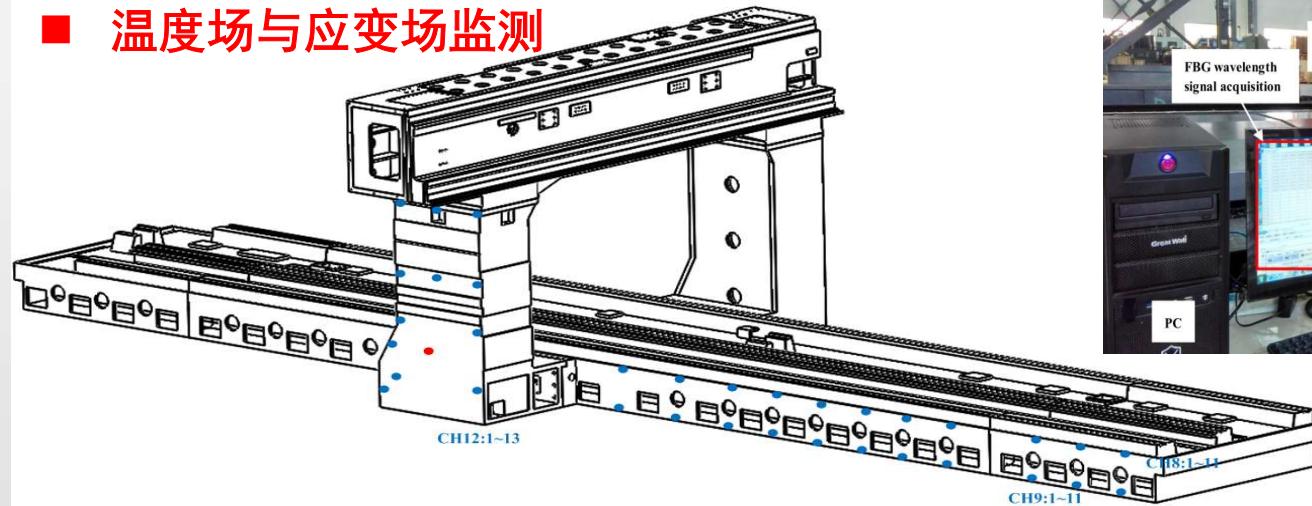


三、项目完成情况

机床监测与热误差建模

(1) 数控机床在线监测

■ 温度场与应变场监测



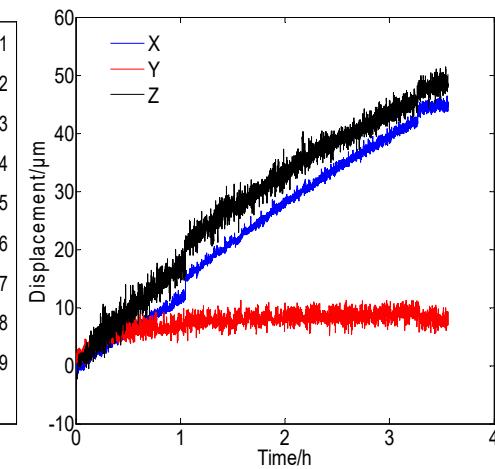
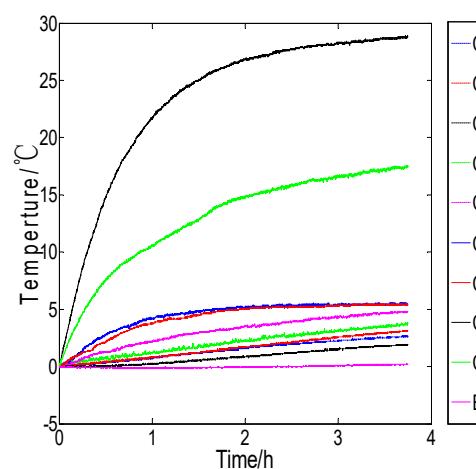
X:6200mm, Y: 3500mm, Z:950mm。在整个机床床身上共布置光纤光栅传感器321个，其中应变测点90个，主要分布在机床的大型结构件，即底座（48个），横梁（22个）和立柱（20个）上，用于监测这些大型结构件的力热复合变形；温度测点231个，主要分布于主轴箱（110个），底座（49个），导轨（10个），横梁（10个），立柱（48个）和周围环境（4个）。

三、项目完成情况

机床监测与热误差建模

(1) 数控机床在线监测

■ 数控机床热误差与温度场监测



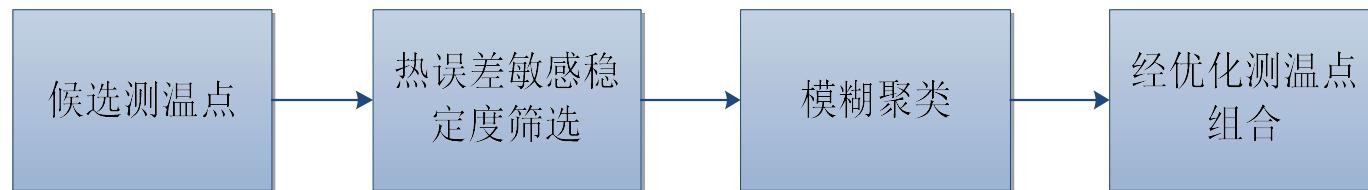
三、项目完成情况

机床监测与热误差建模

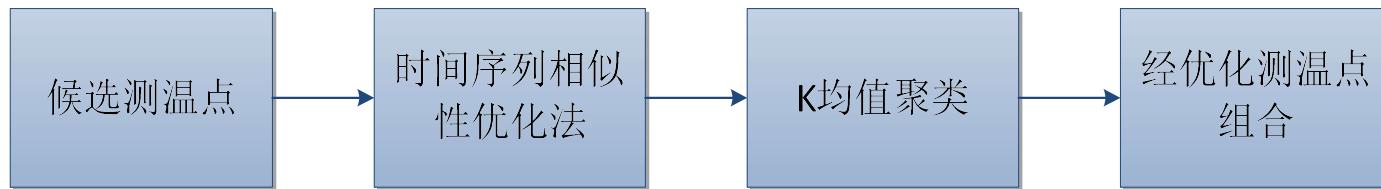
(2) 数据驱动的热误差建模方法研究

■ 关键测温点的选取方法研究

- 基于热误差敏感稳定性与模糊聚类的优化选择方法



- 基于时间序列相似分析和K-均值聚类优化选择方法



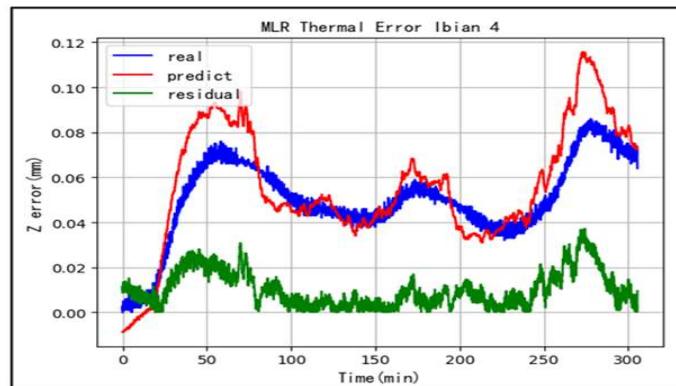
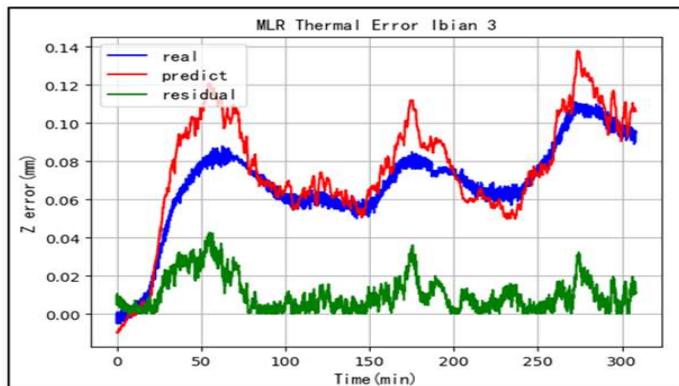
三、项目完成情况

机床监测与热误差建模

(3) 数据驱动的热误差建模方法研究

■ 常规建模方法

- 多元线性回归



指标 工况	有效准确度 (%)	R 平方 (%)	残差最大值 (mm)	残差均值 (mm)	均方差 (mm)
定转速空转	81.6%	76.7%	0.076	0.021	2.09e-04
变转速空转	81.8%	79.5%	0.066	0.019	2.13e-04
铣槽	48.9%	1.7%	0.082	0.028	5.55e-04

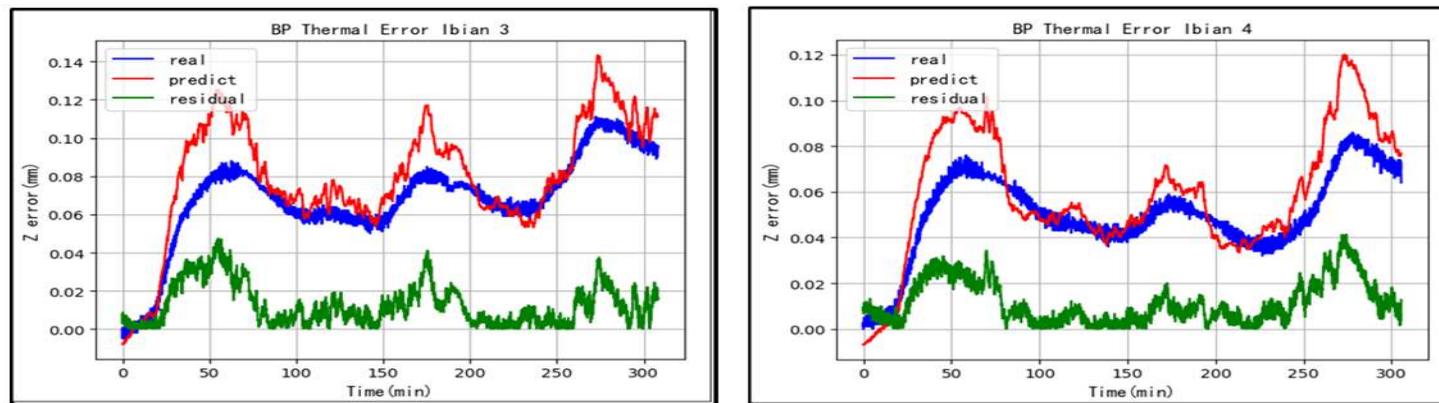
三、项目完成情况

机床监测与热误差建模

(3) 数据驱动的热误差建模方法研究

■ 常规建模方法

- BP神经网络模型



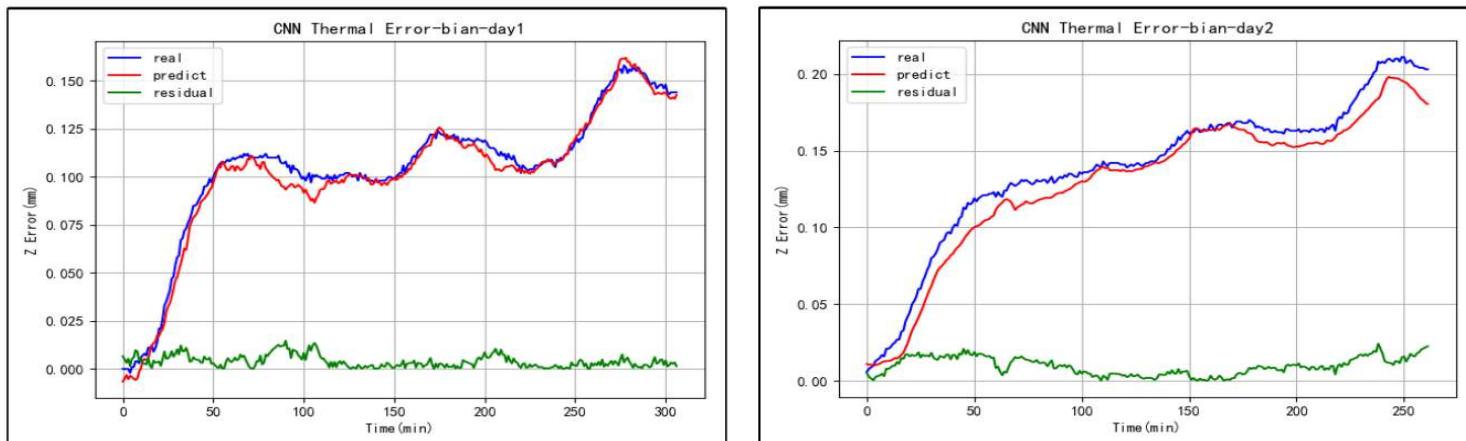
指标 工况	有效准确度 (%)	R 平方 (%)	残差最大值 (mm)	残差均值 (mm)	均方差 (mm)
定转速空转	84.4%	80.5%	0.081	0.018	2.03e-04
变转速空转	83.5%	81.6%	0.074	0.018	1.99e-04
铣槽	53.4%	15.8%	0.076	0.025	5.21e-04

三、项目完成情况

机床监测与热误差建模

(3) 数据驱动的热误差建模方法研究

■ 基于大规模温度测点的卷积神经网络建模



指标 工况	有效准确度 (%)	R 平方 (%)	残差最大值 (mm)	残差均值 (mm)	均方差 (mm)
定转速空转	93.5%	98.1%	0.090	0.0071	1.49e-04
变转速空转	92.6%	94.7%	0.030	0.0009	4.50e-05
铣槽	72.5%	94.2%	0.024	0.0095	4.19e-05

三、项目完成情况

机床监测与热误差建模

(3) 数据驱动的热误差建模方法研究

■ 模型比较

模型 \ 指标		有效准确度 (%)	R 平方 (%)	残差最大值 (mm)	残差均值 (mm)	均方差 (mm)
MLR	定转速	90.4%	97.5%	0.211	0.007	4.94e-05
	变转速	90.1%	92.9%	0.039	0.003	5.82e-05
	铣槽	60.3%	80.3%	0.039	0.0012	1.12e-04
BP	定转速	91.4%	97.8%	0.100	0.007	4.14e-05
	变转速	90.7%	94.5%	0.033	0.001	5.52e-05
	铣槽	70.2%	89.3%	0.034	0.001	8.67e-05
CNN	定转速	93.5%	98.1%	0.090	0.0071	1.49e-04
	变转速	92.6%	94.7%	0.030	0.0009	4.50e-05
	铣槽	72.5%	94.2%	0.024	0.0095	4.19e-05

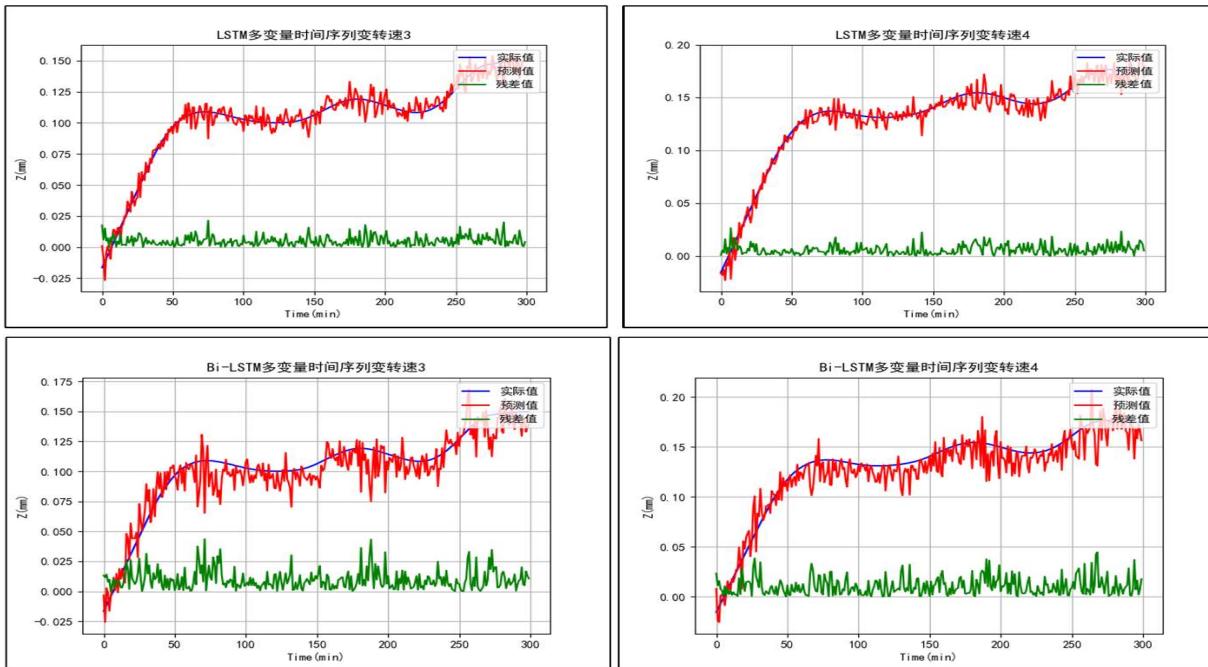
三、项目完成情况

机床监测与热误差建模

(3) 数据驱动的热误差建模方法研究

■ 无温度场监测数据的热误差预测模型的研究

- 基于长短基记忆网络与双向长短基记忆网络的预测模型



三、项目完成情况

机床监测与热误差建模

(3) 数据驱动的热误差建模方法研究

■ 无温度场监测数据的热误差预测模型的研究

- 基于长短基记忆网络与双向长短基记忆网络的预测模型

LST-Bi-LSTM 对比

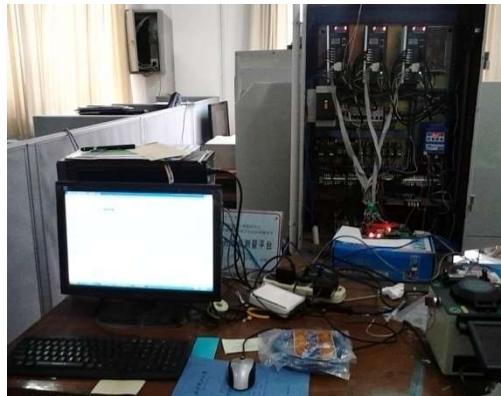
模型 \ 指标	有效准确度 (%)	R 平方 (%)	残差最大值 (mm)	残差均值 (mm)	均方差 (mm)
LSTM	定转速	91.83%	94.4%	0.048	0.009
	变转速	92.12%	97.7%	0.033	0.006
	铣槽	86.66%	91.9%	0.063	0.011
Bi-LSTM	定转速	87.66%	90.79%	0.065	0.012
	变转速	89.24%	92.41%	0.067	0.010
	铣槽	83.84%	95.36%	0.025	0.004

通过相关的研究发表论文18篇（其中SCI收录5篇，EI收录10篇），申请发明专利1项。

三、项目完成情况

嵌入式实时补偿系统

(1) 基于反馈脉冲叠加法的热误差补偿系统



设计开发了一种反馈截断法的基于ARM与FPGA的嵌入式数控机床热误差补偿装置

三、项目完成情况

嵌入式实时补偿系统

(2) 基于G代码动态修正法的热误差补偿系统

■ 补偿原理

G代码开始，选择增量模式

系统宏变量#1191作为标志位，
置7时表示开始接收补偿值

从系统宏变量#1190中取出X、
Y、Z轴的补偿值

补偿值的单位从毫米变换为
微米

使用直线进给的方式进行补
偿

单次补偿结束标志位

```
1 %00001;静态循环补偿
2 G54 ;选择坐标系
3 G91 ;选择增量模式
4 WHILE [TRUE]
5
6 #1191=7;开始补偿的标志
7 G04X2;暂停2s, 等待补偿器传递补偿值
8
9 M90
10 #1=[[#1190&128]/128]*[-2]+1*[#1190&127]
11 #2=[[#1190&32768]/32768]*[-2]+1*[#1190&32512]/256]
12 #3=[[#1190&8388608]/8388608]*[-2]+1*[#1190&8323072]/65536]
13 #4=#1/1000 ;单位变换, 从mm变成um
14 #5=#2/1000
15 #6=#3/1000
16
17 G01 X[#4] Y[#5] Z[#6] F30;补偿代码
18
19 #1191=0;补偿完毕标志
20 G04X2;暂停2s, 等待X寄存器清零
21
22 ENDW
23 M30
```

三、项目完成情况

嵌入式实时补偿系统

(2) 基于G代码动态修正法的热误差补偿系统

■ 嵌入式补偿器的设计与开发

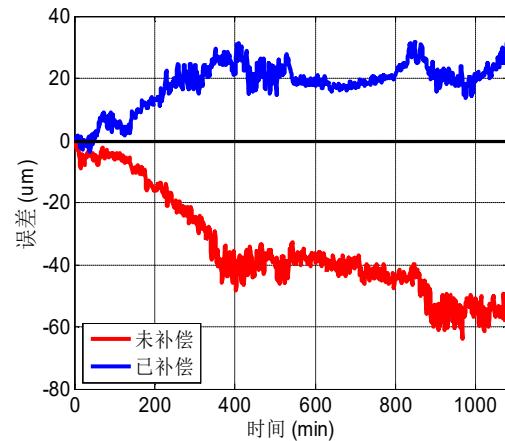


三、项目完成情况

嵌入式实时补偿系统

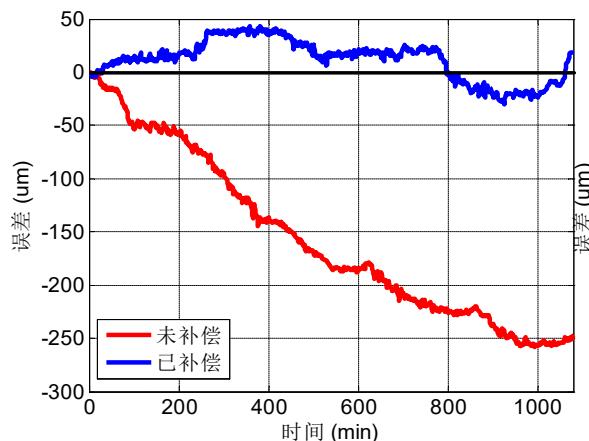
(2) 基于G代码动态修正法的热误差补偿系统

■ 嵌入式补偿器的设计与开发



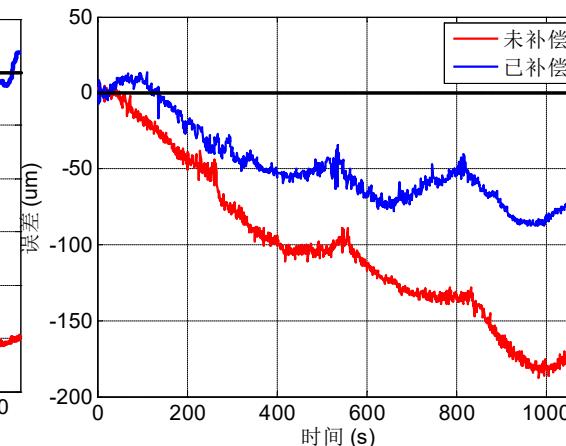
条件	平均值	最大值	均方差
未补偿	34.6	63.9	0.27
已补偿	18.2	32.6	0.053

$$\frac{63.9-32.6}{63.9} \times 100\% \approx 49.0\%$$



条件	平均值	最大值	均方差
未补偿	156.9	258	6
已补偿	12	43.3	0.35

$$\frac{258-43.3}{258} \times 100\% \approx 83.2\%$$



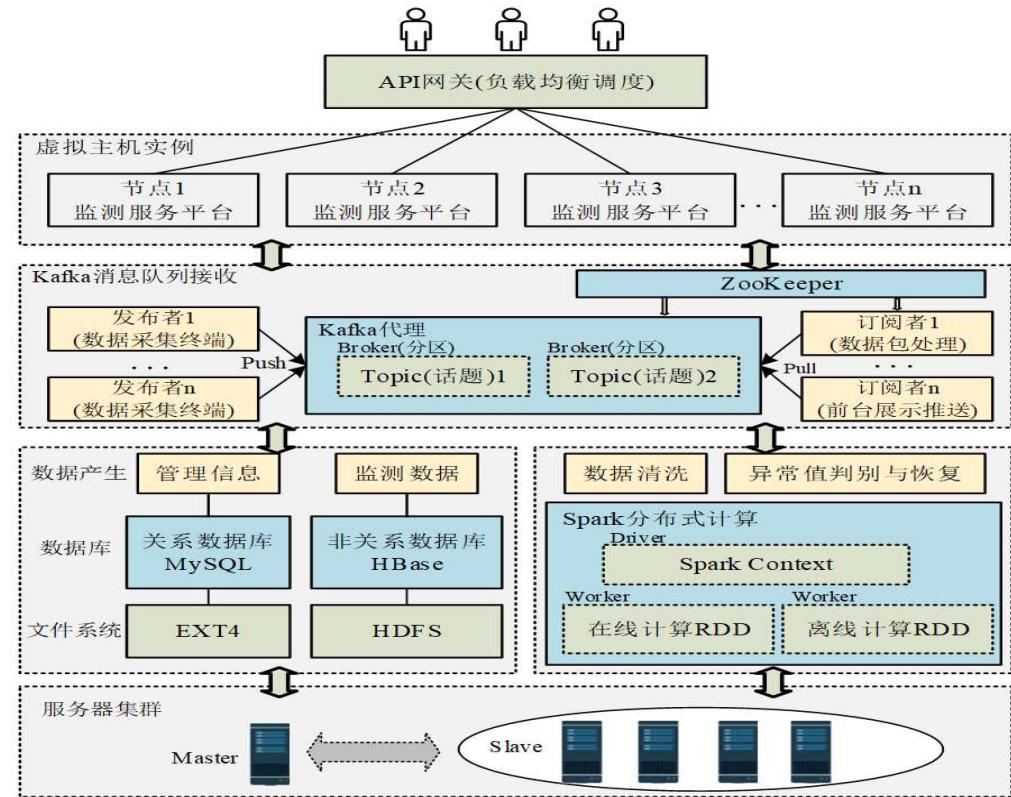
条件	平均值	最大值	均方差
未补偿	97.3	183.3	2.9
已补偿	45.9	87.7	0.8

$$\frac{183.3-87.7}{183.3} \times 100\% \approx 52.2\%$$

三、项目完成情况

云服务平台

(1) 基于HADOOP+SPARK云服务平台的构建



三、项目完成情况

云服务平台

(2) 云服务平台的设计与开发



三、项目完成情况

云服务平台

(2) 云服务平台的设计与开发



通过相关研究，共发表论文9篇（EI收录7篇），申请发明专利5项（其中2项授权），或软件著作权6项。

四、研究的成果

全面完成任务

- 实现任务书所规定的各项技术指标与成果要求
- 发表学术论文45篇（其中SCI检索17篇，EI检索26篇）；
- 出版专著2本；
- 申请国内发明专利14项(其中4项已经授权)，
申请国际发明专利1项；
- 获得登记计算机软件著作权6项；
- 举办国际会议1次， 学术研讨会3次；
- 培养硕士20人， 博士6人；

五、国际科技合作成果

合作成果



Pham教授访问武汉
重型机床集团有限
公司



周祖德教授一行访
问伯明翰大学



课题组成员与外籍
专家研讨



Pham教授在武汉理工
工做主题演讲



周祖德教授被授予伯
明翰大学名誉博士，
2018年当选俄罗斯工
程院院士



Wenjun Xu, PhD

Professor

School of Information Engineering

Wuhan University of Technology

Wuhan, China

徐文君教授获SME

杰出青年制造工程

Xu received his doctorate and both his master's and bachelor's degrees from Wuhan University of Technology in 2010, 2007 and 2004 respectively. He was a visiting scholar at the Manufacturing Informatics Research Group, Manufacturing Centre at Cardiff University. His research is focused on manufacturing informatics, sustainable manufacturing, human-robot collaborative manufacturing and so on. Xu has published more than 20 journal papers and 30 conference papers. He is an associate editor of "Journal of Manufacturing Science and Engineering" (ASME, Taylor & Francis) (since 2014), and served as a co-chair of IEEE ICNSC 2018 and a session co-organizer of ASME MSEC 2017. Xu received the Distinguished Young Investigator Award from the IEEE SMC Society Technical Committee on Enterprise Information Systems in 2017 and the Best Paper Award at the 12th International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing in 2016. SME Member Since 2013

获国家留基委首批资助与伯明翰大学进行人才联合培养团队项目

五、国际科技合作成果

联合举办国际会议

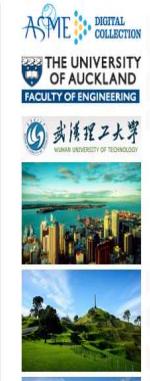
The website features a logo with "ifIoT&AI" and "2015 Wuhan" inside a green oval, set against a background of cherry blossoms. The main title is "2015 International Forum of IoT and Applications". Below it is the date "26-27 November 2015, Wuhan, China". A navigation bar includes links for HOME, CALL FOR PAPERS, SUBMISSION, REGISTRATION, CONFERENCE PROGRAM, CONFERENCE COMMITTEES, INVITED SPEAKERS, VENUE, HOTEL, VISA, and ABOUT WUHAN. A "Contact Us" section provides email and phone numbers, and a "Sponsors" section includes the Wuhan University of Technology logo.

The website has a red header with "ICIDM International Conference on Innovative Design and Manufacturing". It shows a photo of a person in a dynamic pose and the conference dates "January 24-26, 2016" and location "Auckland, New Zealand". The Auckland skyline at sunset is visible. A navigation bar at the bottom includes Home, Note, Important dates, Committee, Final submission, Keynotes, Registration, Venue, and Tour.

Welcome to ICIDM 2016

International Conference on Innovative Design and Manufacturing (ICIDM) is the premium conference in design, manufacturing, and innovation. It was created in 2011 by merging two leading conferences: ICMA and ISDM. The series of International Conferences on Manufacturing Automation (ICMA) have a long history starting from 1992 at The University of Hong Kong. The purpose of this conference aims at providing a forum for exchange of ideas between researchers in the areas of engineering automation with a view to fostering a better link between industry and academia. International Symposium on Digital Manufacturing (ISDM) was established by Wuhan University of Technology in 2006. This conference provides researchers, educators, and engineers with a chance to disseminate their latest research results and accomplishments about applications of information technologies in manufacturing.

- [Industry Forum on Additive Manufacturing – what are the high-value opportunities for companies in New Zealand](#) will be held at the conference during January 24-26, 2016.



并将于2016年7月11-13日在伯明翰大学召开国合项目的研讨会

六、经费使用情况

课题总经费预算

科目类别	专项经费 (万元)	自筹经费 (万元)	专项经费到款 (万元)
直接经费	345	400	
间接经费	35 (其中绩效费15)	0.00	380 (按比例划拨 到武汉重型机床集 团有限公司57万)
合计	380	400	
总经费		780	

结 束 语

通过三年的合作研究，课题研究进展顺利。围绕重型数控机床光纤传感在线监测与热误差补偿的新方法、新技术的研究，以及关键技术的突破，取得了一系列优秀、标志性的研究成果，同时在人才引进与培养方面也取得了可喜的成果，按质、按量圆满完成项目计划书中的任务。



敬请各位专家批评指正！

非常感谢！