

南京航空航天大学
论文集

(二〇〇五年) 第19册

机电学院

(第3分册)

南京航空航天大学科技部编

二〇〇六年三月

机电学院

053 系

序号	姓名	职 称 或学历	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
1	邵冠军 游有鹏 熊 慧	硕士生 教 授 硕士生	053	自由曲面构件的纤维铺放路线规划	南航学报	2005. 37(增刊)
2	赵 宇	讲 师	053	用田口方法推断校准仪器的测量不确定度	电子测量与仪器学报	2005. 19. 2
3	姬永清 冷 晟 周燕飞	硕士生 讲 师 教 授	053	结构相似产品单件小批生产计划方法研究	现代制造工程	2005. 1
4	冷 晟 魏孝斌 王宁生	讲 师 讲 师 教 授	053	柔性工艺路线蚁群优化单元作业调度	机械科学与技术	2005. 11
5	陆永华 赵东标 朱 荻 云乃彰	博士生 教 授 教 授 教 授	053	基于六维力的电解加工间隙检测的数值分析	中国机械工程	2005. 15. 23
6	王 希 赵东标 云乃彰	博士生 教 授 教 授	053	基于电容模型的脉冲电解、电化学光整、蚀刻加工机理分析	机械科学与技术	2005. 24. 12
7	陆永华 赵东标 朱 荻 云乃彰	博士生 教 授 教 授 教 授	053	基于流体力学的脉冲电解加工间隙在线检测的理论研究	机械科学与技术	2005. 24. 2
8	陆永华 赵东标 吕 霞	博士生 教 授 硕 士	053	Stewart型六维力传感器弹性体结构的设计	机械科学与技术	2005. 24. 7
9	马 雷 王荣本 赵东标	博士后 教 授 教 授	053	智能车辆导航控制器参数选取与鲁棒性分析	机械科学与技术	2005. 24. 2
10	马 雷 赵东标	博士后 教 授	053	移动机器人对障碍物运动轨迹预测方法的研究	机械与电子	2005. 6
11	陆永华 赵东标 朱 荻 云乃彰	博士生 教 授 教 授 教 授	053	脉冲电解加工间隙测控方法的研究进展	现代制造工程	2004. 12
12	王 希 赵东标 云乃彰	博士生 教 授 教 授	053	方坯叶片电解加工全程模糊控制	第11届全国特种加工学术会议	2005
13	王 希 赵东标 云乃彰	博士生 教 授 教 授	053	一种电解加工全程模糊控制方法	2005全国博士生学术论坛	2005
14	张茂鹏 陈蔚芳	硕士生 副教授	053	基于SolidWorks的组合夹具构件自动建模方法	华南理工大学学报	2005. 33. 2
15	钱晓明 王宁生 蒋 平	讲 师 教 授 研究员	053	一种基于事物特性表的信息编码系统	南航学报	2005. 37

16	钱晓明 王宁生 蒋 平	讲 师 教 授 研究员	053	一种基于事物特性表的产品 结构模型研究	机械科学与技术	2005. 24. 3
17	许文砚 叶文华	硕士生 教 授	053	面向MES的车间生产调度系统 的研究与实现	机械制造与自动化	2005. 34. 1
18	张小林 叶文华	硕士生 教 授	053	移动通信技术在远程数据监 控中的应用	江西科学	2005. 23. 2
19	叶爱华 叶文华	硕士生 教 授	053	DDS在跳频频率合成器中的应 用	南昌航空工业学院 学报（自然科学 版）	2005. 19. 2
20	赵明镜 叶爱华 叶文华	硕士生 硕士生 教 授	053	面向对象程序设计在工业控 制中的应用	控制工程	2005. 12. Z
21	邓洪峰 叶文华	硕士生 教 授	053	基于Delphi的串口通信的实 现	南昌航空工业学院 学报（自然科学 版）	2005. 19. 2
22	贺 芳 叶文华	硕士生 教 授	053	PLM在航空发动机制造企业的 实施策略研究	CAD/CAM与制造业 信息化	2005. Z1
23	薛建彬 Ping Ji	副教授	053	Tolerance charting for components with both angular and square shoulder features	IIE Transactions	2005. 37. 9
24	孙道恒 樊树海 胡荣华 尹寄明 喻秋涛	硕 士 博士后	053	基于QUEST的灰色质量预测仿 真系统	机械制造	2005. 43. 495
25	樊树海 楼佩煌 藏铁钢 马万太	博士后 教 授 讲 师 副教授	053	数字化工厂敏捷维修仿真平 台的构建	江苏博士后学术大 会	2005
26	樊树海 马万太 楼佩煌 胡荣华	博士后 副教授 教 授	053	自适应切削技术概述	南航学报	2005. 37. S1
27	樊树海 XiaoT.Y Lou P.H Ma W.T	博士后 教 授 教 授 副教授	053	The Simulation of Multivariate Grey Product Quality Loss Model	ICSC' 2005会议上	2005
28	樊树海 Lou P.H Ma W.T XiaoT.Y zhang L. X	博士后 教 授 副教授 教 授 副教授	053	Model building and Simulation of a FMS Dynamic Network at MCMQA	IEEE ICIT2005- IEEE International Conference on Industrial Technology	2005

29	樊树海 Lou P.H Ma W.T XiaoT.Y zhang L.X	博士后 教 授 副教授 教 授 副教授	053	Simulation of the Dynamic Network at MCMQA in e- Factory	Automation 2005- the English International Conference on Automation Technology	2005
30	樊树海 马万太 楼佩煌 胡荣华	博士后 副教授 教 授	053	自适应切削技术概述	第八届切削与先进 制造技术会议	2005. 37. S1
31	马万太 樊树海 楼佩煌	副教授 博士后 教 授	053	径向跳动对球面铣刀切削力 的影响研究	中国机械工程	2005. 16. 24
32	马万太 楼佩煌	副教授 教 授	053	基于XML/OPC的ERP/MES/底层 控制集成系统研究	机械科学与技术	2005. 24. 3
33	马万太 冷 晟	副教授 讲 师	053	XML对B2B电子商务技术平台 的影响分析	商业研究	2005. 7
34	马万太 戴 勇 陈蔚芳	副教授 教 授 副教授	053	“机械制造工艺学”教学实 验仿真系统研制	现代高等教育杂志	2005. 10
35	马万太 樊树海 楼佩煌	副教授 博士后 教 授	053	一种改进的球面铣刀柔性切 削力模型	第八届切削与先进 制造技术学术会议	2005
36	孙志峻 朱剑英	副教授 教 授	053	双资源作业车间智能优化调 度	东南大学学报	2005. 35. 3
37	邢仁涛 孙志峻 黄卫清 赵淳生	硕士生 副教授 教 授 教 授	053	应用超声电机的多关节机器 人的设计与分析	振动、测试与诊断	2005. 25. 3
38	王宏涛 刘利锋 周来水 郑世杰	副教授 学 生 教 授 教 授	053	基于模态分析和BP神经网络的 复合材料脱层损伤监测研 究	中国机械工程	2005. 16. 3
39	王宏涛 杜 佶 刘胜兰 张丽艳	副教授 学 生 副教授 教 授	053	基于径向基函数的多种类型 孔洞修补算法研究	机械科学与技术	2005. 24. 6
40	王宏涛 张丽艳 李忠文 刘胜兰 周儒荣	副教授 教 授 学 生 副教授 教 授	053	基于RBF神经网络的三角网格 曲面孔洞修补	中国机械工程	2005. 16. 23
41	赵 珂 周燕飞	硕士生 教 授	053	凹板印刷Mark线在线检测系 统的研究	南昌航空工业学院 学报	2004. 18. 4
42	王 忠 周燕飞	硕士生 教 授	053	干式变压器数据采集与测控 系统中的数据传输研究	南昌航空工业学院 学报	2005. 19. 1

43	向 瑛 周燕飞	硕士生 教 授	053	基于GSM网络的干式变压器温 控数据传输系统	南昌航空工业学院 学报	2005. 19. 1
44	姬永清 冷 晟 周燕飞	硕士生 讲 师 教 授	053	结构相似产品单件小批生产 计划方法研究	现代制造工程	2005. 10
45	郑政平 周燕飞	硕士生 教 授	053	含AHP约束锥DEA模型在虚拟 企业合作伙伴选择中的应用	现代机械	2005. 1
46	冯彩红 周燕飞	硕士生 教 授	053	单件小批量生产MRP算法改进 及其应用	机械工程及其自动化	2005. 2
47	唐敦兵	教 授	053	Partnership Development between Product Customer and Tool&Die Supplier	IMechB, Journal of Engineering Manufacture	2005. 29. 4
48	李鹭扬 吴洪涛	博士生 教 授	053	并联机器人力传递性能分析	机械科学与技术	2005. 24. 10
49	李鹭扬 吴洪涛 朱剑英	博士生 教 授 教 授	053	Gough-Stewart平台高效动力 学建模研究	机械科学与技术	2005. 24. 8
50	赵 强 吴洪涛 朱剑英	博士生 教 授 教 授	053	车载起重机械吊臂工作范围 的研究	机械科学与技术	2005. 24. 12
51	赵转萍	副高	053	网络信息时代专业基础课程 教学的策略选择	南航学报	2005. 7. 1
53	张振建 赵转萍	硕士生 副高	053	基于web的电力图纸管理系统	郑州轻工业学院学 报	2005. 20. 76
54	赵转萍	副高	053	卧式二维智能测头的设计	传感器技术	2005. 24. 3
55	藏铁钢	中级	053	基于EOPN和的柔性制造控制 系统建模方法	南京航空航天大学 学报	2005. 37. 0
56	朱恒民 姬小利 王宁生	博士生 博士生 教 授	053	支持数据挖掘的知识库系统	西南交通大学学报	2005. 40. 3
57	朱恒民 刘建国 王宁生	博士生 博士生 教 授	053	基于连接属性的元规则实例 方法	控制与决策	2005. 20. 10
58	李祥全 龙文 吴义生 王宁生	博士生 博士生 博士生 教 授	053	基于多Agent和拟市场模型的 人力资源再分配系统研究	南京航空航天大学 学报	2005. 37. 1
59	李祥全 王宁生 龙文 吴义生	博士生 教 授 博士生 博士生	053	基于多Agent的人力资源再分 配系统协商算法研究	控制与决策	2005. 20. 11
60	刘文杰 郭彩芬 王宁生	博士生 博士生 教 授	053	逆向供应链生产运作研究	中国机械工程	2005. 16. 17

61	蔡宗琰 常志庆 王宁生 李亚白 郝文育	博士后 教授 博士生 博士生	053	制造企业信息集成系统的研究	计算机应用研究	2005. 22. 2
62	龙文 李祥全 吴义生 伍守纲 王宁生	博士生 博士生 博士生 博士生 教授	053	基于OWL的制药企业本体的构建及应用	计算机与应用化学	2005. 22. 9
63	刘韶涛 余金山 王宁生	博士生 教授 教授	053	软件复用的企业级系统化方法	计算机应用研究	2005. 22. 0
64	龙文 吴义生 李祥全 王宁生	博士后 博士生 博士生 教授	053	离散制造生产线管理控制系统的开发与实现	湖南科技大学学报	2005.19.62
65	朱恒民 姬小利 王宁生	博士生 博士生 教授	053	一种挖掘意外规则的方法	南京航空航天大学学报	2005. 37. 3
66	龙文 李祥全 吴义生 王宁生	博士后 博士生 博士生 教授	053	药业ERP系统的研究与开发	计算机与应用化学	2005. 22. 7
67	吕常魁 姜澄宇 王宁生	博士生 教授 教授	053	一种新的运动检测及轮廓追踪方法	武汉大学学报	2005. 30. 8
68	龙文 吴义生 李祥全 王宁生	博士后 博士生 博士生 教授	053	中药制造企业生产计划管理研究	计算机与应用化学	2005. 22. 8
69	相雨图 张银 王宁生	博士生 博士生 教授	053	基于共同进化算法的多工艺路线决策研究	机械科学与技术	2005. 24. 8
70	相雨图 李亚白 王宁生	博士生 博士生 教授	053	面向飞机装配的工艺设计与管理系统研究与开发	机械科学与技术	2005. 24. 11
71	李亚白 蔡宗琰 郝文育 王宁生	博士生 博士后 博士生 教授	053	面向服务的可重构制造执行系统研究与开发	机械科学与技术	2005. 24. 11
72	郭彩芬 王宁生	博士生 教授	053	串行生产线生产率的最优控制	机械科学与技术	2005. 24. 4
73	相兴林 赵良才 王宁生	博士生 教授 教授	053	基于CPC和动态联盟的船舶建造系统研究	中国造船	2005. 46. 2

74	郭彩芬 刘文杰 王宁生	博士生 博士生 教授	053 013	凸优化方法在工作站负荷优化配置中的应用	机械科学与技术	2005. 24. 3
75	张银 相雨图 王宁生 周燕飞	博士生 博士后 教授 教授	053	用DAML+OIL进行装配规划领域知识表示方法研究	机械科学与技术	2005. 24. 3
76	刘文杰 王宁生 朱恒民	博士生 教授 博士生	053	基于IPKI的新信任模型在供应链信息安全中的应用	机械科学与技术	2005. 24. 3
77	吴义生 龙文 李祥全 王宁生	博士生 博士后 博士生 教授	053	基于模糊图论的生产物流系统建模研究	应用科学学报	2005. 23. 4
78	王明强 王宁生 赵良才 朱永梅	博士生 教授 教授 研究生	053	面向协同设计的机械产品全生命周期综合评价研究	机械科学与技术	2005. 24. 10
79	马安 王宁生 刘建刚	博士生 教授 博士生	053	CAPP中基于本体论的软构体研究	机械科学与技术	2005. 24. 10
80	吕常魁 姜澄宇 王宁生	博士生 教授 教授	053	一种支持向量聚类的快速算法	华南理工大学学报	2005. 33. 1
81	周万坤 朱剑英	讲 师 教 授	053	APPLICATION OF WORKFLOW TECHNOLOGY FOR WORKSHOP SCHEDULING	哈尔滨工业大学学报(英文版)	2005.12.1
82	杨 浩 朱剑英	博士生 教授	053	MULTI-AGENT BASED DISTRIBUTED MANUFACTURING EXECUTION SYSTEM MODEL	南京航空航天大学学报(英文版)	2005. 22. 1
83	李保江 朱剑英	博士生 教授	053	弹跳机器人研究综述	机械科学与技术	2005.24.7

自由曲面构件的纤维铺放路径规划

邵冠军, 游有鹏, 熊 慧

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

摘要:针对复合材料纤维铺放工艺及其设备控制的特点,提出了复合材料构件CAE/CAM一体化纤维铺放路径优化设计方法。通过对构件模型的有限元分析,获得构件的内部应力分布,根据主应力的大小和方向合理规划出若干基准纤维铺放路径;提出了基于等距线、等分点原理的两种算法,对基准铺放路径进行均匀密化,实现整个构件曲面的纤维铺放路径规划;讨论了铺丝宽度和铺放精度的控制策略,并给出了铺放头压辊中心控制轨迹,以满足纤维铺放机械手的控制需求。

关键词:纤维铺放;铺放路径规划;纤维复合材料;有限元分析;自由曲面

中图分类号:TP273

文献标识码:A

Optimal Fiber Placement Paths for Free-Form Surface Parts

SHAO Guan-jun, YOU You-peng, XIONG Hui

(College of Mechanical and Electrical Engineering,

Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: For the control of fiber placement equipments, a method is used to produce optimal fiber placement paths for free-form surface composite parts based on CAE/CAM integration. By modeling the composite part with applied loads, the stress distribution of the part is investigated by finite element analysis with ANSYS. One or more optimal fiber placement baseline-paths can be produced, in which the tangential vector of each point matches its principal stress direction to increase the load-carrying capability of the part. Two algorithms are used to generate the rest fiber placement paths from the given fiber placement baseline-paths. The surface shaping errors resulted from placement path intervals are analyzed and a control strategy is suggested. The method is implemented based on the UG platform and an example is given.

Key words: fiber placement; placement path planning; fiber composite; finite element analysis; free-form surface

纤维复合材料构件具有高比强度、高比模量、耐烧蚀、抗侵蚀、透波、吸波、稳身及抗高速冲撞等优点,被广泛应用于航空、航天等高科技领域。纤维铺放成型是一种新型的复合材料构件自动化制造技术,成型设备、成型工艺和控制编程是它的三大支撑技术。

自动铺丝束成型作为一种新型的复合材料制造技术,不同于传统的加工方法,它不仅需要先进的铺放设备,更离不开功能强大的控制软件的支持。其中铺放控制程序是铺放系统实现多种复杂构件铺放过程自动化控制的关键技术之一,直接关系到铺放能否成功、成型后的构件性能优劣。一般纤

基金项目:江苏省自然科学基金(BK2004127)资助项目。

收稿日期:2005-08-15

作者简介:邵冠军,男,硕士研究生,1981年1月生,E-mail:shaoguanjun20@yahoo.com.n;游有鹏,男,教授,博士生导师,1960年生;熊 慧,女,硕士研究生,1978年3月生。

纤维铺放控制的编程软件应包括如下功能:首先,要设计出构件的基本造型;其次,由路径生成软件确定实际的铺层方向、边界以及具体的铺放路径,生成的铺放路径还要与仿真软件包集成,以确保描述的路径可被纤维铺放设备理解和正确执行;最后,控制信息要输入到纤维铺放设备以控制构件的铺放加工。其中,纤维铺放路径的生成最为关键,应根据曲面构件的几何形状、受力状况及强度要求等,规划、设计整个构件的纤维铺放路径。本文以自由曲面纤维铺放的控制编程为背景,结合自由曲面构件的平面铺放模式,对自由曲面的纤维铺放路径规划方法进行了系统研究。

1 纤维铺放技术及其特点

纤维铺放(Fiber placement)是在纤维缠绕和自动铺带基础上发展起来的一种全自动复合材料构件制造技术,亦称自动铺丝束成型技术(Automated tow placement)。纤维铺放成型设备由旋转的芯模和多自由度铺放头(机械手)系统组成,由计算机协调、控制整个成型过程。图1是一台七自由度自动铺丝机示意图。铺放时,成型系统可以按照结构设计所确定的铺层材料、铺层方向和铺层厚度,通过多自由度的铺放头将多种纤维预浸纱束(窄带)自动铺放在旋转的芯模表面,同时加热软化预浸纱束、压实定型后再放入固化炉加热固化成型。而对热塑性体系,可以在铺放过程中直接加热定型固结。

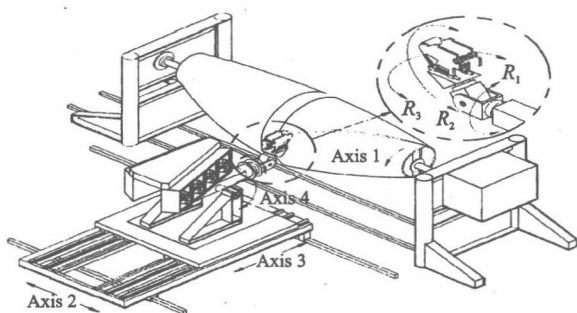


图1 七自由度自动铺丝机示意图

纤维铺放成型技术的突出优势在于:对制品的适应性更强,既可铺凸面又可铺凹面,特别适用于复杂型面复合材料构件的铺放成型;高度自动化,可以实现复合材料构件敏捷制造,迅速形成批量生产;而且产品质量稳定性、生产可靠性高。

2 自由曲面的铺放路径规划

纤维铺放路径规划的基本任务就是针对复合材料构件设计时确定的几何形状(芯模/模板)、铺

层方向和成形精度要求,并考虑铺放设备的加工参数,合理规划、设计出制造该构件的纤维铺放路径。具体任务包括:

(1)纤维铺放路径上任一点的切矢必须符合一定的铺层方向要求,以满足构件的力学性能设计;

(2)相邻两铺放路径间的距离小于铺放设备允许的最大丝束宽度,同时满足构件的成形精度要求;

(3)根据纤维铺放设备的控制要求,还需给出铺放路径上任一点的芯模表面法矢,以控制铺放头的姿态、生成铺放头压辊的中心轨迹。

纤维铺放的方向与路径对复合材料构件的性能影响很大。为充分发挥纤维材料的性能,提高构件的承载能力,纤维铺放路径规划时,理想的方法是使铺放路径上任意一点处的切线方向与复合材料构件在该点所受主应力的方向一致^[1]。然而,由于受铺放设备和铺丝宽度的影响,铺放路径不可能完全精确地沿着主应力方向,且根据文[2,3],纤维的铺放路径还必须符合构件的后续制造工艺,如构件中应力集中处的纤维铺放不能过密,否则会形成纤维堆积,反而会降低构件的应用性能。

为此,本文提出一种面向应用的复合材料构件CAE/CAM一体化纤维铺放路径优化设计方法,基本思路是,针对具体构件的实际应用,通过有限元分析,得到构件的内部应力分布(CAE);再以此为依据进行构件的铺放路径规划(CAM);根据构件的内部应力形式,手工选取曲面上的一条或几条基准纤维铺放路径,以描述构件的基本铺放方向;最后,综合考虑铺放设备、铺丝宽度和后续制造工艺的影响,生成整个构件的纤维铺放路径,形成构件的优化铺层。

2.1 基准纤维铺放路径的生成

生成基准纤维铺放路径的目的在于,以复合材料构件的受力分析为依据,按主应力方向优化设计构件的基本纤维铺放方向,以充分发挥纤维复合材料性能,为整个后续构件铺放路径的规划奠定基础。为完成自由曲面受力分析,本文利用UG建立NURBS曲面模型,利用ANSYS作为有限元分析工具。具体方法是,首先在UG里建立曲面构件的NURBS曲面模型,然后导入ANSYS中划分网格、定义材料参数、设置边界条件并求解。对于较简单的曲面也可直接在ANSYS中建模,以去除模型导入导出带来的不便。对ANSYS求解结果的分析,可在后处理器中查看主应力矢量图和等值线图。从主应力等值线图可了解构件的应力集中情况,从主

应力矢量图中可以获得构件的主应力方向。综合考虑主应力集中和主应力方向对构件承载性能的影响,利用 ANSYS 后处理器的路径操作,可手工选取出符合理想纤维铺设路径要求的若干离散点,组成一条或若干条离散的基准铺设路径。将上述基准铺设路径离散点导入 UG,利用 UG OPEN/API 对这些离散点进行样条拟合,即可生成所需的光滑的基准纤维铺设路径。图2为某曲面模型及其边界条件,图3为该曲面根据有限元分析结果选取的基准纤维铺设路径。



图2 曲面模型及其边界条件

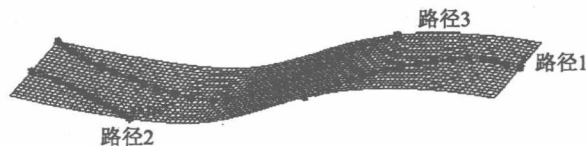


图3 选取的基准纤维铺设路径

2.2 自由曲面的纤维铺设路径的密化

为完成整个曲面构件的纤维铺设,必须对上述基准铺设路径进行密化,以生成整个曲面的铺设路径,使其既不重叠又不留缝隙地均匀铺满芯模表面。同时,纤维铺设路径的密化程度还应满足铺设设备的铺丝宽度和构件的铺放成形精度等要求。因此,纤维铺设路径的密化事实上包括芯模表面上铺丝路径均匀密化和丝束宽度、铺丝的精度监控两个方面。

针对纤维铺设路径的密化,考虑到构件为自由曲面,生成的基准纤维铺设路径为芯模表面上的一条或一组空间自由曲线,所求均匀密化铺丝路径要同时受到芯模表面和基准纤维铺设路径的约束,远比一般平面上的路径密化复杂得多。为此,本文提出了基于空间等距线和等分点的两种密化算法,分别适用于基准纤维铺设路径为一条和一组时的情形。

2.2.1 基于空间等距线的铺设路径密化

当基准纤维铺设路径仅有一条时,芯模表面上的其余铺设路径可采用空间等距线密化算法生成。即以基准纤维铺设路径为参考,依次生成相邻的纤维铺设路径,并保持相邻的纤维铺设路径上各点的侧向空间距离为一常数,该距离可根据丝束宽度、铺丝的精度指标来进行调整。

如图4所示,假设待铺设构件的芯模表面为 Σ ,曲线 $A_1A_2A_3$ 为已给出的基准纤维铺设路径,求取表面上的其余纤维铺设路径的具体算法如下:

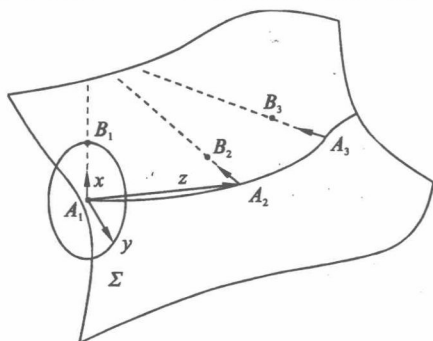


图4 空间两等距线的生成原理

(1)离散基准纤维铺设路径。在基准纤维铺设路径上取若干点 $A_1, A_2, A_3, \dots$,用这一系列的直线段 $A_1A_2, A_2A_3, \dots$ 去拟合基准纤维铺设路径。

(2)建立局部坐标系,求取等距点。如图4所示,以直线 A_1A_2 为 z 轴,参考曲线 $A_1A_2A_3$ 在点 A_1 处的法平面为 xy 平面建立局部坐标系。在该局部坐标系的 xy 平面内以点 A_1 为圆心、给定丝宽(小于铺设设备允许的最大丝宽)为半径作圆,所作圆与芯模曲面的交点即为所求的等距点 B_1 。

(3)生成空间等距线。重复(2),依次求取 $B_2, B_3, \dots$ 各点,则可得一系列与基准纤维铺设路径离散点对应的等距点。为了后续计算,再过这些路径点创建一样条曲线 $B_1B_2B_3 \dots$,即为所求的等距铺设路径。

(4)依次生成等距铺设路径。以曲线 $B_1B_2B_3 \dots$ 为参考曲线,重复上述步骤,即可得到下一条等距铺设路径;重复上述过程,直至完成整个曲面的铺设路径规划。

2.2.2 基于等分点的铺设路径密化

当芯模表面上有多条基准纤维铺设路径时,由于芯模表面上相邻两条基准铺设路径的任意性,空间等距线算法无法满足铺设路径均匀密化的要求。考虑到基准铺设路径的选取是以曲面构件的主应力方向为依据的,而表面上两相邻基准铺设路径之间各点处主应力矢量的方向往往是逐渐变化的。为了简化铺设路径的均匀密化,不妨假设相邻基准铺设路径间曲面上各点处的主应力矢量的方向变化是均匀的,因此可以采用空间等分点的算法实现相邻两基准铺设路径间纤维铺设路径的均匀密化^[4]。

等分点密化算法的原理如图5所示。设 $A_0A_1A_2A_3A_4$ 和 $B_0B_1B_2B_3B_4$ 是芯模曲面 Σ 上两条

已知的相邻的基准铺放路径,则两基准路径之间曲面上的纤维铺放路径密化算法如下:

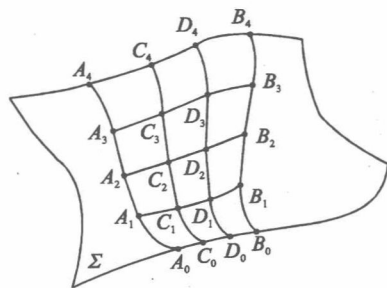


图5 两基准铺放路径的等分点路径密化原理图

(1)将两条已知的基准铺放路径等分成相同的份数。如图5,将 $A_0A_1A_2A_3A_4$, $B_0B_1B_2B_3B_4$ 分别等分成四份, A_1, A_2, A_3 及 B_1, B_2, B_3 分别为各自的等分点。

(2)求取曲面上的等分线。连接两条路径上对应的等分点,过该连线和某等分点处的曲面法矢量作等分面,与原曲面相交,所得交线即为所求。如图5中的 A_1B_1, A_2B_2, A_3B_3 。

(3)对各等分线进行等分离散,并确保任一等分线上相邻离散点间的距离不大于铺放设备允许的最大丝宽。如图5,将等分曲线 A_1B_1, A_2B_2, A_3B_3 分别进行三等分离散, $C_1, D_1; C_2, D_2; C_3, D_3$ 是它们各自的等分离散点。

(4)生成纤维铺放路径。依次过各个等分线上对应的离散点,创建多条样条曲线即为所求的均匀密化纤维铺放路径。如图5中的曲线 $C_0C_1C_2C_3C_4$ 和曲线 $D_0D_1D_2D_3D_4$ 。

2.3 铺丝宽度与成形精度监控

对最大铺丝宽度的控制在上述两种密化算法中已经考虑,如等距点密化算法(2)中的等距半径控制和等分线密化算法(3)中的离散点距离控制。它确保了均匀密化算法生成的两相邻铺放路径之间的距离不大于铺放设备所能提供的最大丝宽,否则会造成构件表面的丝束铺放间隙。

对于自由曲面构件,影响铺放成形精度的因素主要有两个:一是沿铺放路径方向的纵向成形误差,二是垂直于铺放路径方向的横向成形误差。纵向成形误差与曲面沿铺放路径方向的局部曲率和编程时对铺放路径的离散步长有关,可由路径规划后的编程软件考虑;而横向成形误差与曲面在垂直于铺放路径的法平面内的局部曲率和相邻铺放路径之间的距离有关,是铺放路径均匀密化时所必须控制的。

横向成形误差的影响因素及控制原理如图6

所示。该误差来源于在垂直于铺放路径的法平面内,铺放成形是以给定铺丝宽度为短直线逼近实际型面曲线而引起的逼近误差。其误差 e 与相邻铺放路径之间的距离 d 和曲面在法平面内该点的局部曲率 κ 之间存在如下关系

$$e = d^2 \left(\frac{1}{8\kappa} + \frac{e}{4\kappa^2} \right) \quad (1)$$

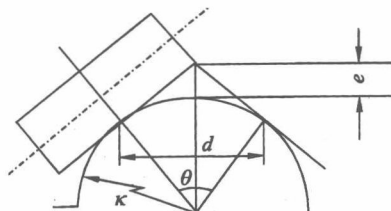


图6 横向成形误差控制原理图

考虑到 $e \ll \kappa$, e 可近似为

$$d \approx \sqrt{8\kappa e} \quad (2)$$

因此,在铺放路径密化过程中需对该逼近误差 e 进行监控,当误差超出成形精度允许范围,可根据式(3)按允许误差调整相邻铺放路径之间的距离,以确保构件的铺放成形精度。

$$d' = \sqrt{\frac{e_{\max}}{e}} \times d \quad (3)$$

式中: $e_{\max}$ 为最大允许误差; d' 为该点处相邻铺放路径间的最大允许距离。

2.4 压辊中心运动轨迹的求取

在纤维铺放过程中,为避免丝束之间或丝束和芯模之间出现缝隙,成型设备采用一个压辊将加热软化的丝束压到芯模表面或底部铺层上,使铺放出的制品更加牢固。为准确控制压辊在曲面上沿规划的铺放路径运动,必须进一步获得压辊中心的运动轨迹。与铺放路径上任一点对应的压辊中心位于该点处曲面的外法线上,且与该点的距离为压辊半径,即

$$P_{r1}(u, v) = P(u, v) + (r + \delta)n(u, v) \quad (4)$$

式中: $P_{r1}(u, v)$ 为压辊中心点; $P(u, v)$ 为位于铺放路径上压辊与曲面的接触点,简称辊触点; r 为压辊半径; δ 为底部铺层厚度; $n(u, v)$ 为曲面在辊触点的外法矢。

对于参数曲面 $P(u, v)$,点 (u_s, v_t) 处的外法矢可由式(5)计算

$$n(u_s, v_t) = \frac{p_v(u_s, v) \big|_{v=v_t} \times p_u(u, v_t) \big|_{u=u_s}}{|p_v(u_s, v) \big|_{v=v_t} \times p_u(u, v_t) \big|_{u=u_s}|} \quad (5)$$

式中

$$p_u(u_s, v_t) = \left. \frac{\partial p(u, v_t)}{\partial u} \right|_{u=u_s} \quad (6)$$

$$p_v(u_s, v_t) = \left. \frac{\partial p(u_s, v)}{\partial v} \right|_{v=v_t} \quad (7)$$

分别为曲面在该点处的 u 向切矢量和 v 向切矢量。

3 算法实现

应用上述算法,可基于复合材料构件CAE优化设计纤维的铺放路径,组成构件的优化铺层。应该指出,组成复合材料构件的不同铺层其纤维铺放方向往往是不同的,因此还可根据复合材料的其他设计准则设计其他铺层的基准铺放路径,再应用本文的铺放路径密化算法完成整个铺层的铺放路径规划,进而完成整个构件不同铺层的纤维铺放路径规划。

在算法实现中,本文采用ANSYS对构件承载状态下的内部应力状态进行有限元分析,应用UG自带的UG/Open API开发工具进行二次开发,完成从构件的曲面造型、基准纤维铺放路径的样条拟合、铺放路径的均匀密化、铺丝宽度和成形精度监控、以及压辊中心运动轨迹计算等一系列算法功能,在UG平台上成功开发集成了曲面构件的纤维铺放路径规划功能,为实现自由曲面复合材料构件的纤维铺放控制奠定了基础。图7为基于UG平台运用上述算法生成的某NUBRS曲面的铺放路径的实例。

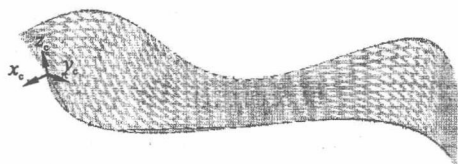


图7 NUBRS曲面纤维铺放路径规划实例

4 结束语

纤维铺放成型技术是一种新型的复合材料先进制造技术,其工艺、设备、控制编程等相关支撑技术的研究与开发是发展纤维铺放成型技术的基础。本文通过对纤维铺放工艺及其设备控制特点的分析,提出了一种自由曲面复合材料构件的纤维铺放规划算法,以构件承载状态下的内部应力状态为依据规划基准纤维铺放路径,应用等距线、等分点铺放路径均匀密化算法,完成整个构件曲面的纤维铺放路径规划,并讨论了铺放路径密化中的成形精度和铺丝宽度控制策略。本算法已基于UG平台开发了一个实用模块加以实现,为后续纤维铺放CAD/CAM系统的研究开发奠定了基础。

参考文献:

- [1] Tosh M W, Kelly D W. Fiber steering for a composite C-beam[J]. Composite Structures, 2001, 53:133~141.
- [2] Gliesche K, Hubner T; Orawetz H. Application of the tailored fibre placement (TFP) process for a local reinforcement on an "open-hole" tension plate from carbon/epoxy laminates[J]. Composites Science and Technology, 2003,63:81~88.
- [3] Li R, Kelly D, Crosky A. Strength improvement by fibre steering around a pin loaded hole[J]. Composite Structures, 2002, 57:377~383.
- [4] 熊 慧. 自动铺丝束CAM技术的研究与开发[D]. 南京:南京航空航天大学,2004.
- [5] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理B样条[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1994. 27~28.

用田口方法推断校准仪器的测量不确定度

赵宇

陈松涛

(南京航空航天大学, 南京 210016; 信息产业部电子华东区域计量站, 南京 210002)

摘要:在测量过程中存在许多可能引起测量结果的不确定度分量, 这些不确定度分量的综合效应影响, 使得测量结果的可能值按某种概率分布。在对仪器进行校准时, 给出测量结果的同时还应给出其测量不确定度。传统的计算方法是对典型点进行多次测量, 求出算术平均值和实验室标准偏差, 从而求出测量不确定度, 此法很难给出测量范围内任一点的测量不确定度。田口方法利用测量误差损失函数及测量特性的信噪比等参数来表征测量质量的优劣, 可以很好地解决测量过程中任一点的测量不确定度求解难题。本文简要介绍了田口方法的原理及其应用, 着重叙述了在已知部分测量数据的基础上如何利用田口方法推断出校准参数的估计值以及相应的测量不确定度, 并通过实例验证了其正确性和可行性。此方法的计算过程适合计算机编程, 使该方法的推广应用成为可能。

关键词:校准; 田口方法; 测量不确定度

Uncertainty of Measurement for Calibrated Instrument Deduced with Taguchi Method

Zhao Yu Chen Songtao

(Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, P.R. China)

(The East Region Electronics Calibration Center of Information Industry Ministry, Nanjing 210016, P. R. China)

Abstract: The parameters of a calibrated instrument are random variables obeying some kinds of distributions because of many uncertain factors existing. These uncertain factors make the measurement value in a range that relate to uncertainty. The measurement result and measurement uncertainty are ought to have provided when instruments are calibrated. Some of typical measuring points of parameters are selected to calibrate and arithmetical means and laboratory standard errors are asked to calculate in classical method, then the uncertainty is given according to the uncertainty synthesizing principle. It is impossible to provide calibration value and the uncertainty of anyone point in measurement range for a kind of calibration parameter with classical method. The Taguchi method shows the quality of measurement with measurement error expense function and the S/N ratio of measurement speciality. This method can solve the problem to calculate anyone uncertainty. The concept of measurement uncertainty and the principle of the Taguchi method are introduced in this paper, and it is described in detail how to use Taguchi method to deduce calibration formula and related measurement uncertainty according to some measurement data. A experiment given here has proved that this method is viable. It is possible to use The Taguchi method widely in engineering because the calculating process can carry into execution with computer.

Keywords: Calibration; Taguchi method; Measurement uncertainty.

1 引言

随着科学技术的发展和经济建设的需要, 工业

生产、科学实验、发明创造等都离不开各种测量手段, 对参数测量的准确性是对产品质量和科技成果可信度的直接评价, 间接地也影响到科技和经济的发展。测量的目的是直接或间接地给出所需的测量

结果,同时还应给出测量结果的不确定度。

测量不确定度是与测量结果相关联的参数,表征合理赋予的被测量之值的分散性。由于在测量过程中存在许多可能引起测量结果的不确定度分量,如被测量的定义不完整、环境条件的影响、人员读数的偏差、测量仪器的分辨力、测量标准的不确定度等,它们都会对测量结果的分散性做出贡献,也就是说由于这些不确定度因素的综合效应影响,使得测量结果的可能值按某种概率分布,测量结果可以用具有一定置信概率的一个区间来表示,这个区间的半宽度是用覆盖因子乘标准偏差得到,称扩展不确定度。

测量结果的不确定度往往是由 A 类不确定度和 B 类不确定度合成得到。在众多不确定度影响因素中,由重复性引起的测量不确定度与校准项目的所选测量点和测量过程有关,我们把它称为 A 类不确定度。A 类不确定度的计算方法往往采用统计方法,而应用统计方法的前提是在大量测量数据的基础上才能进行。B 类不确定度与测量所使用的标准器精度、分辨力、被测仪器的调节细度以及测量方法、测量环境因素等有关,一旦这些因素确定后, B 类不确定度就可求解。依据 ISO/IEC17025:1999《检测和校准实验室能力的通用要求》,校准实验室在对仪器校准后,在给出校准参数的测量数据的同时还应给出测量不确定度。不管是国家或行业发布的校准规范,还是仪器厂商提供的校准方法,对于仪器众多的校准参数,只能要求对一些典型的测量点进行校准,而在仪器的实际使用过程中,往往需要知道非典型测量点的校准值和校准的测量不确定度,如果能从这些典型测量点的校准数据推断出全量程任一点的校准情况,不仅能满足各类用户的需要,同时也大大节省了仪器校准成本。田口方法可以很好地解决了仪器校准过程中的此类难题。

2 田口方法介绍

田口方法(Taguchi Method)是由日本著名质量工程学家田口玄一博士在二十世纪六十年代提出的,此方法在评价测量方法和测量设备的优劣、开发质高、价廉的测量方法和测量设备、选择和配备适宜的测量设备以及如何实施计量检测才能使产品的质量特性波动降至最小等方面有着广泛的应用。在日本计量管理协会,由于通商产业省的大力支持,着力宣

传,极力鼓励和帮助工程技术人员在实际中加以应用,现已取得了良好的经济效益,一批批成功应用案例被汇编成专辑。目前,在日本以田口博士为代表的田口式测量质量工程学的思想和技术方法占据着主导地位。

田口方法借用了无线电信噪比(信号功率与噪声功率之比)的概念,并赋予新的含义,以此来评价测量设备和测量方法,并逐渐形成了一门新的、颇具特色的“测量质量工程学”。

在传统的计量方法中,用随机测量误差的标准差来表征测量质量的优劣,而在田口玄一博士所创建的测量质量工程学中,用测量误差损失函数及测量特性的信噪比(SN 比)等参数来加以描述。

设被测量的真值为 m , 其测量结果为 y , 函数

$$L(y) = k(y - m)^2 \quad (1)$$

为测量误差损失函数。式中 k 可由测量误差的容差 Δ 和超过容差时的损失 A 来确定:

$$k = \frac{A}{\Delta^2} \quad (2)$$

由式(1)可知,当测量误差 $y - m = 0$ 时,损失为零,而测量误差越大,损失也越大。对测量误差损失函数两边求数学期望,则有:

$$E[L(y)] = kE(y - m)^2 = k[\mu - m)^2 + \sigma^2] \quad (3)$$

由此可见,期望总损失是由系统测量误差的损失和随机测量误差的损失组成。一般说来,系统测量误差可以通过对测量设备的校准和调整加以消除,改进测量质量的关键在于尽可能减少测量的随机误差或测量不确定度。

如果令 $\mu = E(y)$ 、 $\sigma = \sqrt{V(y)}$ 分别表示测量结果 y 的期望值和标准差,则

$$\eta = \frac{1}{r^2} = \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad (4)$$

称为测量特性 y 的信噪比(SN 比)。SN 比值越大,说明测量结果的相对标准差越小,也就是说测量特性越稳健,测量结果越可靠。

3 测量不确定度求解

在测量质量工程学中,SN 比赋予了新的含义,在求解 SN 时可分静态测量和动态测量两种情形。由于静态测量时测量特性的 SN 比是对单个典型测量点而言,其求解过程可参考相关文献。本文就多

个典型测量点的情形求解校准公式和动态测量的 SN 比,从而求解测量不确定度。

3.1 校准公式的推导

设仪器某校准项目的典型测量点为 $M_1, M_2, \dots, M_k$, M 称为信号因素,对每一个典型测量点进行 r_0 次独立重复测量,测量数据见表 1。

表 1 测量数据

信号因素 M_i	j				Σ
	1	2	...	r_0	
M_1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1r_0}	T_1
M_2	y_{21}	y_{22}	...	y_{2r_0}	T_2
...					
M_k	y_{k1}	y_{k2}	...	y_{kr_0}	T_k
Σ					T

表中:

$$T_i = \sum_{j=1}^{r_0} y_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, k$$

$$T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_0} y_{ij} = \sum_{i=1}^k T_i$$

假定测量值 y 与被测量典型值 M 的关系为

$$y = \alpha + \beta M \quad (5)$$

根据最小二乘法原理可以计算:

$$\hat{\beta} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^k (M_i - \bar{M}) T_i \quad (6)$$

$$\hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta} \cdot \bar{M} \quad (7)$$

$$\text{式中: } \bar{M} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k M_i,$$

$$r = r_0 \sum_{i=1}^k (M_i - \bar{M})^2,$$

$$\bar{y} = \frac{T}{kr_0}$$

因此可以推导出任一测量点 M 的估计值为

$$\hat{y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta} \cdot M \quad (8)$$

3.2 A 类标准不确定度的计算

在求得公式(5)的 α, β 估计值后,可以进一步求得测量值的不确定度,从而可得到 A 类标准不确定度。

由表 1 数据可求得数据的总波动平方和 S_T 和相应的自由度 f_T

$$S_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_0} (y_{ij} - \bar{y})^2, \quad f_T = kr_0 - 1$$

而由回归引起的波动平方 S_β 和相应的自由度 f_β 分

别为

$$S_\beta = \frac{1}{r} \left[\sum_{i=1}^k (M_i - \bar{M}) T_i \right]^2, \quad f_\beta = 1$$

从而求得 σ^2 和 β^2 的估计值

$$\hat{\sigma}^2 = V_e = \frac{S_T - S_\beta}{f_T - f_\beta} \quad (9)$$

$$\hat{\beta}^2 = (\hat{\beta})^2 - \frac{V_e}{r} = \frac{1}{r} (S_\beta - V_e) \quad (10)$$

应用田口方法的 SN 比公式可求得 η 估计值

$$\hat{\eta} = \frac{\hat{\beta}^2}{\hat{\sigma}^2} = \frac{\frac{1}{r} (S_\beta - V_e)}{V_e} \quad (11)$$

则 M 的 A 类标准不确定度为

$$u_r(\hat{M}) = \frac{1}{\sqrt{\eta}} \quad (12)$$

3.3 测量不确定度的求解

合成标准不确定度可由 A 类标准不确定度和 B 类标准不确定度合成得到

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \\ = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + \dots + u_{Bn}^2} \quad (13)$$

合成不确定度乘以一定置信概率下的覆盖因子 k_p , 就得到所求的扩展不确定度值。

$$U = k_p \cdot u_c \quad (14)$$

4 应用举例

用测量接收机 HP8902A 对合成信号源 Fluke2022D 的调幅度进行校准,在相同条件下重复测量 8 次,选取 6 个典型测量点,测量数据如表 2。

经计算得到校准公式为 $\hat{y} = 0.22 + 1.01x$ 。在已知校准公式的基础上,可求得 SN 比为 $u_r(\hat{M}) = \frac{1}{\sqrt{\eta}} = 0.0013$, A 类标准不确定度为 $u_A = 0.0013$, A 类

自由度为 $v_A = f_T - f_\beta = kr_0 - 2 = 118$ 。

假设 B 类标准不确定度只考虑 HP8902A 的调幅测量不确定度、显示分辨率以及 Fluke2022Dr 调节细度等因素。已知 HP8902A 的调幅不确定度为 1%, 显示分辨率为 0.01, Fluke2022D 的调节细度为 0.1, 由参考文献可知 HP8902A 调幅不确定度、显示分辨率分别服从正态分布和均匀分布, Fluke2022D 的调节细度服从均匀分布, 则 B 类不确定度为

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + \dots + u_{Bn}^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1\%}{3}\right)^2 + \left(\frac{0.01}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

B 类自由度为 $v_B = \infty$ 。合成不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

$$= \sqrt{(0.0013)^2 + \left(\frac{1\%}{3} \hat{\gamma}\right)^2 + \left(\frac{0.01}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

有效自由度 $v_{eff} = \infty$ 。由置信概率、有效自由度查 t 分布表,可得到覆盖因子。当置信概率 $p = 95\%$,覆盖因子为 $k_p = 2658$ 。任一给定调幅度的测量不确定

度

$$U = k_p \sqrt{(0.0013)^2 + \left(\frac{1\%}{3} \hat{\gamma}\right)^2 + \left(\frac{0.01}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

选取任一点对其进行验证,如当 $AM = 45\%$ 时,可求得校准估计值为 45.7% ,测量不确定度为 0.4% ,在此点的校准数据估计区间为 $[45.3\%, 46.1\%]$,经过 HP8902A 实测得到校准数据为 45.8% ,校准估计值与实测值一致。

表 2 测量数据(单位为 %)

i	M Y _i	10	30	50	70	90	99
1		10.22	30.57	50.9	71.2	91.3	100.2
2		10.21	30.52	50.8	71.0	91.1	100.0
3		10.22	30.57	59.9	71.2	91.3	100.2
4		10.22	30.51	50.8	71.0	91.1	100.0
5		10.22	30.58	50.9	71.2	91.3	100.2
6		10.22	30.52	50.8	71.0	91.1	100.0
7		10.22	30.56	50.9	71.1	91.3	100.2
8		10.22	30.52	50.8	71.0	91.1	100.0

5 结 语

田口方法在评价测量方法和测量设备的优劣等方面已得到了广泛应用。本文利用田口方法推断仪器校准结果及测量不确定度,通用实际应用,验证了其正确性和合理性。此方法不仅可以用户的需求推断出被校项目任一点的校准估计值,并给出其测量不确定度,同时可以大大节省校准成本,缩短校准时间。田口方法的计算过程适合计算机编程,使该方法的推广应用成为可能。

参考文献:

- [1] 韩之俊,测量质量工程学,北京:中国计量出版社,2000.

- [2] 田口玄一著,缪以德译,计量管理设计手册,上海:上海翻译出版公司,1989.
- [3] 叶德培编译,测量不确定度,国防科工委标准计量局,1994.
- [4] 李慎安编著,测量结果不确定度的估计与表达,北京:中国计量出版社,1997.
- [5] JJF1059 - 1999,测量不确定度评定与表示.
- [6] GJB3756 - 99,测量不确定度的表示及评定.

作者简介:



赵 宇

赵 宇:女,1970 年出生。南京航空航天大学讲师,从事“自动控制理论”、“测试计量技术”等教学研究工作,科研方向为光电检测技术、工业自动控制等。