

南京航空航天大学
论文集

(二〇〇五年) 第20册

机电学院

(第4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

054 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	张 臣 周儒荣 庄海军 周来水	博士生 教 授 副教授 教 授	054	基于BP神经网络的球头铣刀 铣削力建模与仿真	中国机械工程	2005. 16. 2
2	胡利刚 周儒荣 廖文和	博士生 教 授 教 授	054	人眼波前像差主观测量的原 理及实现	量子电子学报	2005. 22. 4
3	董洪伟 周儒荣	博士生 教 授	054	协同特征造型系统CFM的设计	计算机工程	2005. 15
4	徐 岩 姜澄宇 郑洪源	讲 师 教 授 讲 师	054	并行工程中下游事件启动时 刻研究	机械科学与技术	2005. 24. 1
5	徐 岩 丁秋林	讲 师 教 授	054	企业客户资源计划研究概述	工业技术经济	2005. 24. 2
6	张 臣 周来水 余湛悦 安鲁陵 周儒荣	博士生 教 授 博士生 副教授 教 授	054	基于仿真数据的数控铣削加 工多目标变参数优化	计算机辅助设计与图 形学学报	2005. 17. 5
7	孙秀慧 周来水 刘胜兰	博士生 教 授 副教授	054	基于交互的B样条曲面重建与 误差计算	机械制造与自动化	2005. 34. 2
8	汪 俊 周来水 安鲁陵 谭昌柏	博士生 教 授 副教授 博士生	054	基于网络模型的一种新的区 域分割算法	中国机械工程	2005. 16. 9
9	吴玉波 周来水	硕士生 教 授	054	能量法在C-C细分曲面N边孔 洞填充中的应用	机械制造与自动化	2005. 34. 2
10	谭昌柏 周来水 安鲁陵 周儒荣	博士生 教 授 副教授 教 授	054	逆向工程中基于BP网络的自 动特征识别器的设计与实现	计算机辅助设计与图 形学学报	2005. 17. 10
11	王志国 周来水 王小平	博士生 教 授 副教授	054	基于材料力学的变形造型新 方法	机械工程学报	2005. 41. 9
12	张得礼 周来水 神会存	博士生 教 授 博士生	054	高速数控加工速度的自适应 控制	机械科学与技术	2005. 24. 9
13	神会存 周来水	博士生 教 授	054	B样条曲线 C^2 连续混合	中国机械工程	2005. 16. 18
14	朱延娟 周来水 王 坚	博士生 教 授 博士生	054	CONTOUR EXTRACTION AND FEATURE POINT DETECTION FOR 3-D FRAGMENT REASSEMBLY	Transactions of Nanjing University of Aeronautics&Astron autics	2005. 22. 1

15	王志国 周来水 王小平	博士生 教 授 副教授	054	Direct manipulation of B-spline surfaces	Chinese Journal of Mechanical Engineering(English Edition)	2005. 18. 1
16	神会存 周来水 安鲁陵 周儒荣	博士生 教 授 副教授 教 授	054	曲面三角网格模型顶点法矢计算与交互式分割	计算机辅助设计与图形学学报	2005. 17. 5
17	张得礼 周来水	博士生 教 授	054	三轴数控铣床系统图形的实时显示	计算机辅助设计与图形学学报	2005. 17. 9
18	贺美芳 周来水 神会存	博士生 教 授 博士生	054	散乱点云数据的曲率估算及应用	南航学报	2005. 37. 4
19	赵 瑾 周来水 张 臣 余湛悦	硕士生 教 授 博士生 博士生	054	数控仿真中的实时碰撞检测算法的研究	计算机工程与应用	2005. 41. 10
20	张 臣 周来水 余湛悦 周儒荣	博士生 教 授 博士生 教 授	054	数控加工仿真中精度验证技术的研究	中国机械工程	2005. 16. 1
21	刘巍巍 周来水 庄海军 袁 园	博士生 教 授 副教授 硕士生	054	一种基于Internet的同步协同CAD/CAM系统的安全机制	华南理工大学学报(自然科学版)	2005. 33. 9
22	谭昌柏 周来水 安鲁陵 汪 俊	博士生 教 授 副教授 博士生	054	Techniques of feature extraction and optimal position in reverse engineering	Proceeding of CSCW2005	2005
23	谭昌柏 周来水 安鲁陵 彭雨哟	博士生 教 授 副教授 硕士生	054	逆向工程中基于密集数据点的轮廓线重建技术	华南理工大学学报	2005. 33. 5
24	袁 园 周来水 刘巍巍 庄海军	硕士生 教 授 博士生 副教授	054	协同CAD/CAM系统中数据的高效传输	计算机工程与应用	2005. 41. 7
25	沈建新 周振江	博士生	054	屈光性近视远视矫正的角膜消融深度计算	中国生物医学工程学报	2005. 24. 4
26	刘 洁 廖文和	讲 师 教 授	054	用C-C方法和流形方法构造G2连续的自由型曲面	计算机辅助设计与图形学学报	2005. 17. 4
27	刘 洁 廖文和	讲 师 教 授	054	用非均匀细分模式构造N边域曲面	机械科学与技术	2005. 24. 1
28	刘 洁 廖文和	讲 师 教 授	054	用能量优化法选取细分网格顶点	南航学报	2005. 37. 1
29	闫崇京 宋 燕	讲 师	054	基于产品信息模型的图框标题栏快速生成	机械制造与自动化	2005. 34. 2

30	战培志 廖文和	博士生 教授	054	企业管理中的知识共享建模 技术	华南理工大学学报 (自然科学版)	2005. 33. 7
31	曹正林 廖文和 沈建新 胡利刚	博士生 教授 博士生 博士生	054	人眼像差的数学表示及主观 式波前像差测量仪的设计与 应用	应用激光	2005. 25. 4
32	李迎光 廖文和	讲 师 教 授	054	A Platform of Mechanical CAD DATA Mining form case base	2005年6月 CAID& CD 会议	2005. 6
33	李迎光 鲁 泳 廖文和	讲 师 教 授	054	Data Description Norm and Key Techniques of Web- based Parts Library	2005第九届国际计算 机数字仪设计技术协 同会议	2005. 5
34	李迎光 石世明 周儒荣	讲 师 教 授	054	机械产品集成设计知识模型 的研究与应用	机械科学与技术	2005. 24. 1
35	张 翔 廖文和 程筱胜 戴 宁 安 涛	博士生 教授 副教授 讲 师 博士生	054	STL格式文件的拓扑重建方法 研究	机械科学与技术	2005. 24. 9
36	陈文亮	教 授	054	有限元网格的孔洞修补算法 研究	计算机学报	2005. 28. 6
37	李凡国 童国权	硕士生 教 授	054	微塑性成形中尺寸效应的研 究进展	兰州大学学报(自然 科学版)	2005. 41. 41
38	倪红海 童国权	硕士生 教 授	054	H62黄铜微成形镦粗实验研究	机械制造与自动化	2005. 34. 4
39	孙全平 廖文和 盛 亮	博士后 教 授 博士生	054	复杂多曲面高速铣3轴精加工 刀轨优化算法	计算机辅助设计与图 形学学报	2005. 17. 3
40	战培志 廖文和 张东民	博士生 教 授	054	面向大规模定制的产品快速 配置与成本计算研究	机械科学与技术	2005. 24. 3
41	武美萍 廖文和	博士生 教 授	054	面向直升机研发的数字化预 装配技术的算法及应用研究	机械科学与技术	2005. 24. 4
42	武美萍 廖文和	博士生 教 授	054	INTERNET-BASED MACHINING PARAMETER OPTIMIZATION AND MANAGEMENT SYSTEM FOR HIGH-SPEED MACHINING	南航学报(英文版)	2005. 22. 1
43	于芳芳 黄 翔 廖文和	硕士生 教 授 教 授	054	实例推理在冲模设计中的应 用	机械制造与自动化	2005. 34. 1
44	方挺立 黄 翔 李迎光	硕士生 教 授 讲 师	054	知识熔接技术在管道设计中的 应用	机械制造与自动化	2005. 34. 1
45	潘志毅 黄 翔 李迎光	硕士生 教 授 讲 师	054	自顶向下的跨层次装配建模 方法与应用	机械制造与自动化	2005. 34. 1

46	余晶 黄翔	硕士生 教授	054	特征尺寸自动标注方法的研究及实现	机械制造与自动化	2005. 34.
47	许蓄 居荣华 胡建 廖文和	硕士生 教授 博士生 教授	054	知识工程在食品包装机械设计领域中的应用研究	包装与食品机械	2005. 23. 4
48	许蓄 居荣华 胡建 廖文和	硕士生 教授 博士生 教授	054	知识驱动的产品创新设计系统的研究	包装与食品机械	2005. 23. 5
49	程筱胜 俞青	副教授 副教授	054	TOOTH CROWN DEFORMABLE DESIGN BASED ON DIRECT MANIPULATION OF FFD	南航学报（英文版）	2005. 22. 4
50	郭宇 廖文和 程筱胜	讲师 教授 副教授	054	TRIZ理论与理工科大学生创新能力培养	南航学报（社会科学版）	2005. 7. 3
51	郭宇 廖文和 程筱胜	讲师 教授 副教授	054	基于SimOpt的链段设计仿真优化研究	机械科学与技术	2005. 24. 9
52	郭宇 程筱胜 廖文和	讲师 副教授 教授	054	基于虚拟环境的制造系统仿真优化平台研究	计算机辅助设计与图形学学报	2005. 17. 10
53	戴宁 廖文和 陈春美	博士生 教授 硕士生	054	STL数据拓扑快速重建关键算法的研究	计算机辅助设计与图形学学报	2005. 17. 11
54	戴宁 程筱胜 俞青 廖文和	博士生 教授 副教授 教授	054	基于DFFD的牙齿修复冠约束设计方法的研究	东南大学学报(医学版)	2005. 24. 1
55	戴宁 廖文和	博士生 教授	054	基于DFFD的概念设计研究	机械科学与技术	2005. 24. 7
56	安鲁陵 周来水 王玉国 周儒荣	副教授 教授 博士生 教授	054	型腔边界拐角精加工刀轨生成算法的研究	中国机械工程	2005. 16. 24
57	安鲁陵 汪炜 周来水 翟洪军 刘绍琼	副教授 副教授 教授 博士生 硕士生	054	FOUR-AXIS WIRE-EDM SIMULATION OF COMPLICATED MODELS	南航学报（英文版）	2005. 22. 4
58	安鲁陵	副教授	054	合理规划、建设环境和改进专业课程教学	Proceeding of 2005 CMES Annual Conference	2005
59	安鲁陵 许斌	副教授 硕士生	054	复合材料纤维铺放自动编程技术研究	工程设计学报	2005. 12. 2
60	张寅飞 安鲁陵	硕士生 副教授	054	散乱测量数据多层次B样条逼近曲面拟合算法	机械制造与自动化	2005. 34. 2

61	王小平 张维中 张丽艳 周儒荣	副教授 博士生 教 授 教 授	054	Constrution of G continuous curves on surface with planar cubic Bezier curve	机械工程学报（英文 版）	2005. 18. 2
62	余国庆 鲁世红	硕士生 副教授	054	基于有限元分析的铝合金板 料弯曲回弹的影响因素研究	机械科学与技术	2005.24.9
63	余国庆 鲁世红	硕士生 副教授	054	基于有限元分析的二轴柔性 滚弯过程影响因素的研究	机械科学与技术	2005. 24. 1
64	周晚林	副教授	054	智能板动荷载监测的压电单 元模态法	振动与冲击	2005. 24. 5
65	刘长毅 张格伟 廖文和 李振林	副教授 博士生 教 授 博士生	054	基于Web服务的可快速定制 CAPP框架	计算机集成制造系统	2005. 11. 4
66	胡文伟 刘长毅	硕士生 副教授	054	基于特征的零件信息模型在 CAD/CAPP集成中的应用	制造业自动化	2005. 27 （增刊）
67	刘长毅	副教授	054	基于Web的组件化CAPP应用系 统的开发	机电产品开发与创新	2005. 18 （增刊）
68	陈明和 高 霖 薛玉雷 左敦稳 王 珉	副教授 教 授 硕士生 教 授 教 授	054	板料应力成形极限判据的有 限元分析程序	南航学报	2005. 37. st pp1
69	陈明和 谢优华 芮玉龙 左敦稳 王 珉	副教授 工程师 硕士生 教 授 教 授	054	Al-6Mg-0. 2Sc合金高应变速 率超塑成形性能	中国有色金属学报	2005. 15. 1
70	陈明和 高 霖 王 辉 左敦稳 王 珉	副教授 教 授 博士生 教 授 教 授	054	板料成形极限应力图及其应 用研究进展	中国机械工程	2005. 16. 1
71	陈明和 高 霖 朱知寿 左敦稳 王 珉	副教授 教 授 研究员 教 授 教 授	054	基于模糊神经网络的升温超 塑性成形工艺参数优化	南航学报	2005. 37. 4
72	陈明和 谢兰生 朱知寿 左敦稳 王 珉	副教授 副教授 研究员 教 授 教 授	054	计算机模拟与预测方法在材 料科学研究中的应用	机械工程材料	2005. 29. 6
73	陈明和 茆汉湖 朱知寿	副教授 硕士生 研究员	054	热成形过程微观组织模拟研 究进展	塑性工程学报	2005. 12. 2

74	薛善良 廖文和 叶文华	博士后 教授 教授	054	产品并行开发过程建模研究	机械科学与技术	2005. 24. :
75	平雪良 周儒荣 党耀国	博士生 教授 教授	054	未知自由曲面三坐标测量新方法	机械科学与技术	2005. 4
76	平雪良 周儒荣 刘胜兰	博士生 教授 讲师	054	Study on Generation in Grey System Theory	Journal of Systems Engineering and Electronics	2005. 2
77	平雪良 周儒荣 刘胜兰	博士生 教授 讲师	054	Two-dimensional Data Sequences and its Grey Generation	0-7803-8566-7/04, IEEE	2005
78	杜 佶 张丽艳 王宏涛 刘胜兰	硕士生 教授 副教授 副教授	054	基于径向基函数的三角网络曲面孔洞修补算法	计算机辅助设计与图形学学报	2005. 17. 9
79	段福宽 张丽艳	硕士生 教授	054	飞机燃油系统油量计算与误差分析	南航学报	2005. 37. 6

基于 BP 神经网络的球头铣刀铣削力建模与仿真

张 臣 周儒荣 庄海军 周来水

南京航空航天大学, 南京, 210016

摘要:将 BP 神经网络的理论和算法应用于球头刀具铣削力建模的研究中。采用 LM 算法建立了铣削力预测的神经网络模型,模型中考虑了影响铣削力的加工参数,选取铣削力试验数据对神经网络模型进行训练,用训练好的神经网络模型对铣削力进行仿真。仿真结果表明,用 BP 神经网络方法建立的铣削力模型能够对铣削力进行准确的预测。

关键词:铣削力;BP 神经网络;仿真;球头铣刀

中图分类号:TP391

文章编号:1004 - 132 X(2005)20 - 1791 - 04

Simulation and Modeling of Milling Forces for Ball - end Milling Cutter Based on BP Neural Network

Zhang Chen Zhou Rurong Zhuang Haijun Zhou Laishui

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

Abstract: The theory and the algorithm of BP neural network were applied in the research of the modeling of milling forces of ball - end cutter. First, the neural network model was established for predicting milling forces by using the LM algorithm considering the effective factors of milling forces, and then the established neural network model was trained more times by choosing a large amount of experimental data of milling forces. Finally, the trained neural network model was used to simulate the milling forces. Results of simulation on milling forces show that the milling force model using the BP neural network method can predict milling forces exactly.

Key words: milling force; BP neural network; simulation; ball - end milling cutter

0 引言

建立铣削力模型,合理控制铣削加工中零件的加工误差、刀具磨损、刀具断裂和机床振动,对于优化加工参数,保证零件加工质量具有重要的意义。铣削力建模常用的方法有分析方法、试验方法、机械方法和数值方法 4 种^[1]。文献[2~8]采用分析方法或者试验方法对球头刀具铣削力建模进行了研究。建立的模型在一定的限制范围内能对球头刀具铣削加工过程中产生的铣削力进行正确仿真和预测,但是很难在模型中涵盖影响铣削力的各个因素,同时模型不具有通用性,难于表征各种加工条件下铣削力的变化情况。

人工神经网络理论的提出与发展为研究非线性系统提供了一种有力的工具,在数控铣削加工物理仿真中的应用也越来越受到重视^[9~11]。本文运用 BP 神经网络方法对球头刀具铣削加工中

铣削力建模进行了研究,建立了球头刀具铣削力预测模型。

1 铣削力建模

1.1 建模过程分析

在球头刀具铣削力建模过程中采用 3 层 BP 神经网络完成铣削力函数关系的映射,选取对铣削力产生明显影响并与铣削力有密切相关性的因素作为输入层向量,据此选择的输入层训练参数分别为切削液、工件材料硬度、刀具材料硬度、刀具直径、切削速度、每齿进给量、径向切削深度、刀具转角、刀具刃数、轴向切削深度、刀具磨损量、刀具类型、刀具螺旋角和进给方向角等。输入层参数用向量表示为

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_{14})$$

输出层采用 3 个神经元,对应铣削加工中瞬时铣削力的 x 、 y 和 z 方向分力,用向量表示为

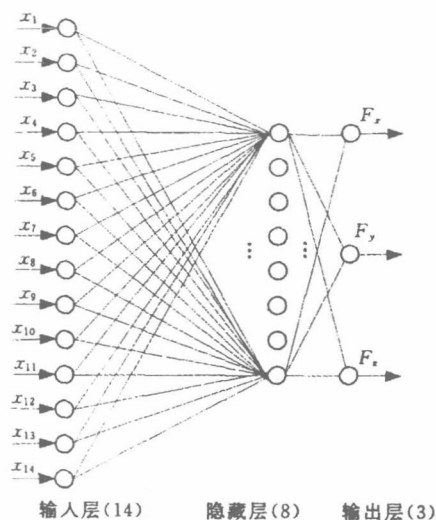
$$Y = (F_x, F_y, F_z)$$

隐藏层采用 8 个神经元,各层之间神经元实现全连接,而每层各神经元之间无连接,各神经元采用 Sigmoid 作为激活函数,建立的网络拓扑结

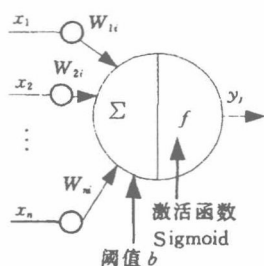
收稿日期:2004 - 11 - 22

基金项目:国家重点科技攻关专题项目(96 - A01 - 01 - 05);江苏省重大科技攻关项目(G98017 - 3);教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目(教人司[2002]123 号)

构如图1所示。



(a) 神经网络拓扑结构



(b) 隐藏层节点局部放大图

图1 预测铣削力的神经网络拓扑结构

用LM(Levenberg-marquardt)逼近的BP算法对网络进行学习^[12,13],算法步骤如下:

(1) 给出训练误差允许值 ε 、 β , 初始化权值向量 W^0 为较小的随机非零值, 并令 $k = 0$, $\mu = \mu_0$, 给定 N 个输入/输出样本;

(2) 计算网络输出以及误差指标函数 $E(W^k)$;

(3) 计算雅可比矩阵 $J(W)$, 按照式(1)计算 ΔW

新的权值向量可根据以下规则求得:

$$W^{k+1} = W^k + \Delta W \quad (1)$$

对于高斯-牛顿法, 学习规则为

$$\Delta W = -[\nabla^2 E(W)]^{-1} \nabla E(W) \quad (2)$$

由于LM算法是对高斯-牛顿法的改进, 其学习规则为

$$\Delta W = -[J^T(W) J(W) + \mu I]^{-1} J(W) e(W) \quad (3)$$

式中, μ 为比例因子; $e(W)$ 为误差矢量; I 为单位方阵。

(4) 如果 $E(W^k) < \varepsilon$, 则转(6); 否则, 以式(1)计算 W^{k+1} , 计算误差指标 $E(W^{k+1})$;

(5) 若 $E(W^{k+1}) < E(W^k)$, 则 $k = k + 1$, $\mu = \mu \beta$, 转(2); 否则 $\mu = \mu \beta$, 转(3);

(6) 迭代结束。

1.2 训练样本数据的选取

为了获取学习样本数据, 选用新的高速钢球头铣刀, 对铝合金LY12在不同的轴向切削深度、径向切削深度、进给方向、每齿进给量和主轴转速等参数组合下, 分别在无切削液和有切削液的情况下进行50组铣削试验。测力仪的采样频率选用1000 Hz, 获得铣削力数据后, 对每组试验中取一个周期采样的60个数据(对应60个不同的刀具转角)作为输入数据, 共获得3000组训练数据。因考虑到BP网络对输入数据要求为0~1之间的数据, 所以要对所选择的各项训练参数进行归一化处理, 其归一化方法如下:

$$y = \frac{x - a}{b - a} \quad (4)$$

$$x \in [a, b]$$

式中, x, y 为归一化处理后的结果。

其中, 以新的刀具(磨损量为零)磨损量和刀具磨钝之间的磨损量作为最小值和最大值对刀具磨损量进行归一化处理。材料加工性能以难加工材料和易加工材料作为材料加工性能的极值, 本文建立铣削力的神经网络模型是以加工材料硬度作为材料加工性能的评价指标。

2 网络训练与试验验证

对神经网络进行训练的过程实际上是一个函数逼近过程, 也就是对神经网络内部的神经元之间相互作用的连接权值不断修改的过程。取误差允许值 $\varepsilon = 0.001$, $\mu_0 = 0.01$, $\beta = 10$, 初始化网络权值向量 W^0 , 在上述50组铣削试验的3000个训练数据中取其中的90%作为训练网络的样本, 10%的数据作为测试样本。训练网络达到误差控制精度要求后, 对训练样本的网络输出与铣削力试验值在 x, y 和 z 向的铣削力分量的比较如图2所示。图中的直线为两者最佳的结合线, 如果数据点全部落在这条结合线上, 说明网络预测的准确度是100%。从图中可以看出, 数据点都在最佳结合线上或者附近, 表明采用本文的网络拓扑结构是合适的。

从获得的50组铣削试验中取出1组, 采用训练好的铣削力神经网络模型在表1所示的加工参数下进行仿真。 x, y 和 z 方向的铣削力分量在一个铣削力周期中仿真结果值和试验值的对比变化如图3~图5所示。铣削力最大值的试验和仿真的误差比较见表2, 在图中铣削力的试验值和仿真值在量值 and 变化趋势上吻合得较好, 最大误差所在的数据点基本是在铣削力变化周期的波峰和

波谷附近。

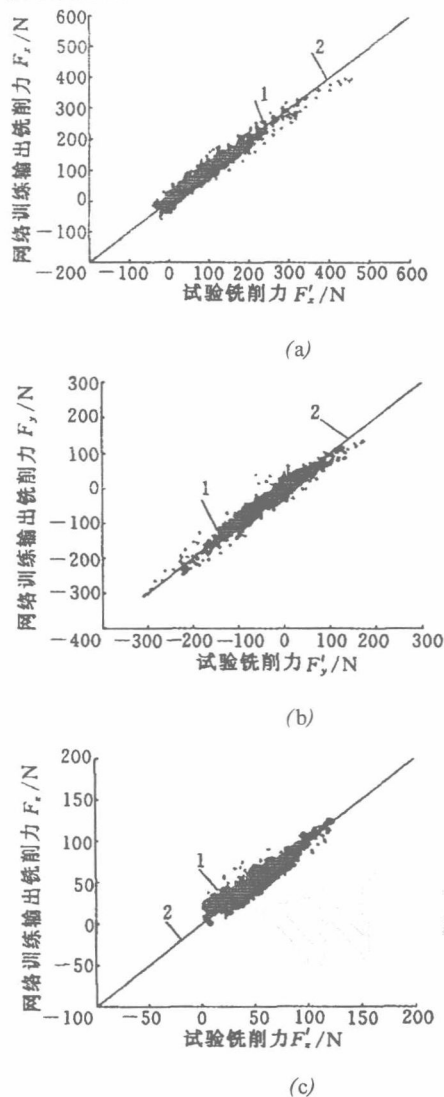


图2 网络训练数据点的试验数据与仿真数据对比
表1 铣削力仿真加工参数

切削深度 (mm)	主轴转速 (r/min)	每齿进给 量(mm)	切削宽度 (mm)	进给方向	刀具转角 (°)
3.2	1000	0.06	9.3	y轴 水平进给	0~360
刀具直径 (mm)	螺旋角 (°)	工件材料	刀具材料	切削液	刀具刃数
10	30	L Y12	高速钢	不使用	2

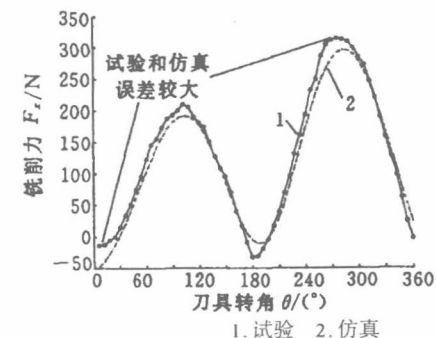


图3 x方向铣削力试验值与仿真值的比较

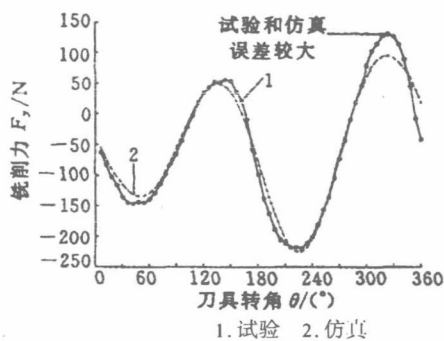


图4 y方向铣削力试验值与仿真值的比较

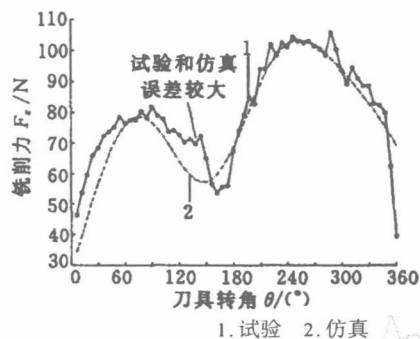


图5 z方向铣削力试验值与仿真值的比较

表2 试验和仿真的最大铣削力的比较

方向	试验值(N)	仿真值(N)	误差(N)	相对误差(%)
x	316.406	297.940	18.465	5.836
y	122.813	97.576	25.236	20.548
z	105.957	103.407	2.549	2.406

再从50组的铣削力试验中取出6组试验数据,加工参数见表3。采用上述铣削力神经网络模型分别进行仿真,铣削力的仿真值和试验值在量值和变化趋势上也吻合得很好。刀具偏心和刀具变形对铣削力的影响通过铣削力曲线的同一周期的两个波峰和波谷的量值的不同表现出来。铣削力最大值的试验和仿真的误差比较如表4,可以看出最大铣削力试验值和仿真值的误差量值大多在20N之内,相对误差大多在10%以内。

表3 铣削力仿真验证加工参数

序号	切削深度 (mm)	切削宽度 (mm)	每齿进给 (mm)	主轴转速 (r/min)	刀具直径 (mm)
1	1.5	7.1	0.1	1000	10
2	2.4	8.5	0.09	1000	10
3	2.4	8.5	0.12	1000	10
4	3.2	9.3	0.12	1000	10
5	3.5	9.5	0.12	1000	10
6	1.5	7.1	0.06	1000	10

3 仿真结果分析

从上述几组铣削力试验值和仿真值的对比以及图3~图5铣削力的变化可以看出,采用训练好的铣削力神经网络模型仿真得到的铣削力波形曲线和铣削力试验获得的波形曲线,不论在波形上还是在铣削力的变化趋势上都表现得很一致,预测的最大误差结果在10%以内。采用BP神经

网络方法建立的铣削力预测模型,可以根据提供
表4 不同加工条件下试验和仿真的最大铣削力的比较

序号	方向	试验值(N)	仿真值(N)	误差(N)	相对误差 (%)
1	x	228.02	248.77	- 20.75	- 9.09
	y	113.28	105.39	7.88	6.95
	z	93.26	105.83	- 12.57	- 13.48
2	x	340.33	334.06	6.26	1.84
	y	140.13	118.54	21.59	15.40
	z	121.09	115.26	5.83	4.81
3	x	408.20	421.68	- 13.47	- 3.30
	y	158.20	157.78	0.41	0.26
	z	123.53	135.68	- 12.14	- 9.83
4	x	437.50	413.64	23.85	5.45
	y	162.10	145.33	16.77	10.34
	z	121.09	131.13	- 10.04	- 8.29
5	x	523.43	485.57	37.86	7.23
	y	194.33	179.38	14.95	7.69
	z	133.30	147.11	- 13.81	- 10.36
6	x	173.82	174.32	- 0.49	- 0.28
	y	83.01	71.07	11.93	14.37
	z	78.61	79.78	- 1.17	- 1.49

的实际铣削状态数据训练神经网络,从而提供对应的实际铣削状态的最佳神经网络连接权值,仿真后可以得到符合实际铣削状态的铣削力,从而很好地映射实际的铣削加工条件,包括刀具偏心和刀具变形的影响,适应于各种加工材料类型和刀具类型。本文的BP神经网络方法是一种通用形式较好的铣削力建模方法,克服了传统方法中必须同时考虑刀具偏心、刀具变形对铣削力的影响才能建立准确的铣削力模型的缺点。

4 结论

将神经网络技术应用到球头刀具数控铣削加工中,建立了预测铣削力的BP神经网络模型。对比常用的4种铣削力建模方法,BP神经网络方法考虑了影响瞬时铣削力的各加工参数,克服了非线性规划方法识别铣削力系数难以保证识别算法稳定性和收敛性的问题。刀具偏心和刀具变形对铣削力产生的影响可以通过网络结构参数映射到实际加工的铣削力预测值中。实际的验证对比结果也表明,采用BP神经网络方法对铣削力进行建模和仿真是可行的。

参考文献:

- [1] Ehmann K F, Kapoor S G, Devor R E, et al. Machining Process Modelling: a Review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1997, 119(4): 655~663
- [2] Sim C, Yang M. The Prediction of the Cutting Force in Ball - end Milling With a Flexible Cutter. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1993, 33(2): 267~284

- [3] Feng H S, Menq C H. The Prediction of Cutting Forces in the Ball end Milling Process Model — I. Formulation and Model Building Procedure. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1994, 34(5): 697~710
- [4] Feng H S, Menq C H. The Prediction of Cutting Forces in the Ball end Milling Process — II. Cut Geometry Analysis and Model Verification. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1994, 34(5): 711~719
- [5] Altintas Y, Lee P. Mechanics and Dynamics of Ball end Milling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Transactions of the ASME, 1998, 120(4): 684~692
- [6] Lee P, Altintas Y. Prediction of Ball end Milling Forces from Orthogonal Cutting Data. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1996, 36(5): 1059~1072
- [7] Kim G M, Cho P J, Chu C N. Cutting Force Prediction of Sculptured Surface Ball - end Milling Using Z - map. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2000, 40(2): 277~291
- [8] Laozoglu I. Sculpture Surface Machining: a Generalized Model of Ball - end Milling Force System. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, 43(5): 453~462
- [9] Szecei T. Cutting Force Modeling Using Artificial Neural Networks. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 92 - 93: 344~349
- [10] Liu Y, Wang C. Neural Network Based Adaptive Control and Optimization in the Milling Process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1999, 15(11): 791~795
- [11] Tandon V, Mounayri H. A Novel Artificial Neural Networks Force Model for end Milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001, 18(10): 693~700
- [12] 司捷, 周贵安. 基于梯度监督学习的理论与应用 (I) — 基本算法. *清华大学学报 (自然科学版)*, 1997, 37(7): 71~73
- [13] 赵弘, 周瑞祥, 林廷圻. 基于 Levenberg - Marquardt 算法的神经网络监督控制. *西安交通大学学报*, 2002, 36(5): 523~527 (编辑 周本盛)

作者简介: 张臣, 男, 1976年生。南京航空航天大学机电学院航空宇航制造工程系博士研究生。主要研究方向为 CAD/CAM 及仿真验证。发表论文3篇。周儒荣, 男, 1935年生。南京航空航天大学机电学院航空宇航制造工程系教授、博士研究生导师。庄海军, 男, 1970年生。南京航空航天大学机电学院航空宇航制造工程系副教授。周来水, 男, 1962年生。南京航空航天大学机电学院航空宇航制造工程系教授、博士研究生导师。

人眼波前像差主观测量的原理及实现

胡利刚, 周儒荣, 廖文和

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 研究了一种用于测量人眼波前像差的新型主观式波前像差仪, 给出了工作原理和实现方案。采用先进的三光路设计方法实现光学系统的设计, 采用多线程、视频捕捉、图像处理、单片机及步进电机的控制等关键技术, 实现了瞳孔的三维实时自动跟踪。该像差仪能测量出人眼的全部七阶像差, 采用 Zernike 多项式、二维和三维波前像差图对人眼像差进行了描述, 给出了计算各项波前像差的均方根 (RMS) 的公式。通过对 57 人 (110 只眼) 的进行三次临床测量, 采用 SPSS 统计软件对测量得到的各阶波前像差的 RMS 逐级递减值进行两两比较, 无差异性 ($P > 0.05$), 结果表明该像差仪测量的重复性好, 准确性高。

关键词: 自适应光学; 主观式; 像差仪; 三光路; 自动跟踪; 像差

中图分类号: R778 **文献标识码:** A

1 引言

像差 (aberration) 存在于所有光学系统, 人眼是一种极其复杂的光学系统, 它同样存在像差。这些像差影响视网膜的成像质量, 使得物体上一点在视网膜的对应点上不是一个理想的像点, 而是一个发散的光斑, 其结果是整个视网膜像对比下降, 视觉模糊。产生人眼像差的原因是由于角膜和晶状体表面的局部不规则, 角膜和晶状体的不同轴, 或是由于角膜和晶状体的内含物质不均匀以致折射率有局部偏差等因素造成的。

近年随着屈光手术如 RK、PRK 和 LASIK 的广泛应用, 虽然屈光矫正后明视力已经达到了 20/20, 但是带来了很大的球差、彗差及其他的高阶像差。目前已有屈光手术导致眼波阵面像差增加的报道^[1~6]。为了探索引起人眼视觉质量下降的原因以及能实现波前像差引导的人眼角膜的个性化切削手术来矫正人眼像差, 一些公司依据波前像差理论研制了波前像差仪 (aberrometer) 和像差镜 (aberrroscope)。目前, 这些像差仪 (镜) 都是基于光线追踪技术 (ray tracing)^[7], 双程技术^[8]、哈特曼波前传感器测量技术^[9]以及利用空间分辨折射仪的心理物理方法^[10], 例如: Alcon 公司的 LADARWave、Bausch & Lomb 公司的 Zyoptix、Nidek 公司的 OPD-Scan、Visx 公司的 WaveScan 和 WaveLight 公司的 Allegretto 等。

本文所述的主观式人眼像差仪 (WFA1000) 是由苏州六六视觉科技股份有限公司、美国新英格兰视觉学院的 He JC 教授和我们联合开发的, 它采用的是 He JC^[10] 等的主观空间分辨折射仪的心理物理方法。

2 工作原理

WFA1000 人眼像差仪为主观式测量仪器, 采取独立光点投射到人眼底视网膜的视觉细胞上, 受测者进行主观判断完成测量点移回理想点的过程, 对 37 个每一入射瞳孔的光线做逐点测量, 在人眼瞳孔面上获取所有波像差的数据。这 37 个测量光点互相独立, 互不干扰。工作原理如图 1 所示。测量 37 点入射角改变量, 并根据入射角改变量, 用 Zernike 函数来计算分析得出整体像差分布以及 35 项成分的大小。它可以标准测量出人眼的低阶及高阶像差的全部信息, 给出 Zernike 多项式求解出的每一阶像差的均方根值 (RMS), 形象准确地给出包括近视、远视、散光、斜视、球差、彗差和高阶像差的多种人眼像差。同时给出每一点的测量数据以及波像差的二维图和三维图。其具体过程为: 主观式波前像差测量系统包括光线追踪光路和光迹登记光路, 光线追踪光路从阵列光源开始, 经光学系统成像并通过与眼底共轭的透光视标后聚

基金项目: 江苏省“十五”高技术研究项目 (BG2002012)、 “十五” 国家计委产业化项目 (计产业 [2002]31329)

收稿日期: 2004-05-08; 修改日期: 2004-06-11

E-mail: hlgnuaa@hotmail.com

焦在瞳孔面上,由计算机控制设备通过光源驱动电路随机性点亮阵列光源中的某一单位光源,这时,光线将只从瞳孔面上某一特定点进入人眼。由于固定的透光视标与眼底共轭,人眼此时所见到的透光视标像则是由所有通过瞳孔该特定点的光线形成。若此时计算机控制设备控制另一单位光源发光,此时的眼底视标像则由从瞳孔另一特定点进入人眼的光线所形成。若人眼准确聚焦,且无像差影响,视标像将维持不动,即从不同瞳孔进入人眼光线的光迹维持不变。但因入眼像差的影响,视标像将移动至另一眼底位置,即光迹将变化。而且,其变化量与该瞳孔处的像差成正比。此时,该像差的影响可由被测者看到,但无法定量测定。测定像差的任务则由光迹登记光路完成。在光迹登记光路中,一液晶显示屏被成像在被测者的眼底,这样被测者能同时看到光线追迹光路中的透光视标和光迹登记光路中显示屏上的视标。然后,被测者可通过移动移动控制装置使显示屏视标与固定透光视标重合,并在程序控制下经过移动控制装置将透视光标的位置通过显示屏视标而记录下来,从而完成光迹登记。由此,由像差引起的透光视标像位移被转换成显示屏上视标的位移量而得到测定。然后,根据这些测定量得出视角改变量后,通过数值计算方法计算出二维波像差分布以及多项分立像差成份,达到测量人眼像差的目的。

3 主观式波前像差仪结构

主观式波前像差仪主要由光学系统、瞳孔自动跟踪系统、计算机控制系统三个部分组成。

3.1 光学系统

光学系统是由一系列透镜、分光镜、反光镜、LED阵列板、计算机显示屏、视力表分划板、十字分划板(透光视标)、同心圆环分划板、电子眼 CCD、红外发光二极管、鼠标器、计算机及发光二极管驱动电路组成,其光路图如图2所示。光路控制系统是像差仪中很关键的一项技术,主要采用了先进的三光路设计,包括光线追迹光路、光迹登记光路和瞳孔监视光路。

Fig.2 Schematic diagram of optical path control system

M1~M12 are viewfinders; M3 is cold viewfinder; L1~L6 are lens; B is spectroscope; P1 is circle divisional structural place; P2 is cross divisional structural plane; P3 is visual acuity chart divisional structural plane

亮度 $<500 \text{ cd/m}^2$,其排列方式如图3所示。该阵列光源连接于计算机控制设备上,该光路中设有与眼底共轭的固定的透光视标,该透光视标在阵列光源中的随机选择一单位光源的发光照射下通过相应的光学元件成像于人眼的眼底。

光迹登记光路为参考光路,光路通道如图2所示,其发光源为与眼底共轭的液晶显示屏,该显示屏上的视标成像于人眼眼底,该显示屏的视标与计算机控制设备上的鼠标器连接,该光路和光线追迹光路在到达人眼前重合。其中光迹登记光路在与光线追迹光路重合之前设有的视力表光标是和眼底共轭的。

瞳孔监视光路的光路通道如图2所示,该监视光路设有在人眼附近设置的红外光源,为红外发光二极管,其有效亮度在 300 cd/m^2 。该光路上还设有同心圆环分划板,连接于计算机控制的电子眼 CCD,同心圆环分划板和 CCD 的感光面与瞳孔面共轭,使得在显示屏上能

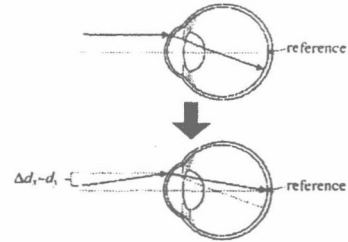


Fig.1 Principle of subjective wavefront aberrometer

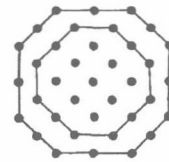
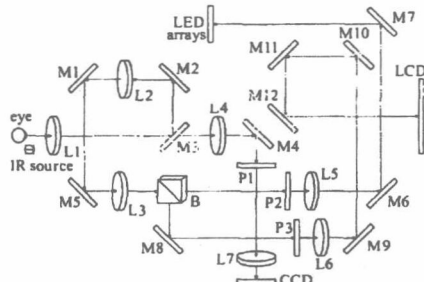


Fig.3 Schematic diagram of diode array

同时显示瞳孔和同心圆分划板像,从而更有利于瞳孔位置与仪器光路的共轴控制。

该光路控制系统通过分离光线追迹和光迹登记,测量精度的控制由光迹登记光路完成,而亮度控制由光线追迹光路完成,从而,在不影响测量精度的前提下,保证了足够的亮度。

3.2 瞳孔自动跟踪系统

在测量过程中,由于人眼不是一个固定体,眼球会不自主的颤动,同时人的头部也有可能移动,他们的位移将造成测量不准确,测量结果就不能反映病人的实际的像差情况。由于像差的精度要求很高,因此高速自动跟踪技术显得尤为重要。

根据前面瞳孔监视光路的设计,在显示屏上能同时显示瞳孔和同心圆分划板像,因此可以首先预设一光学中心作为基准,采用高精度 CCD(30 帧/秒)作为视频采集源,在测量过程中,在软件上首先采用 Visual C++ 6.0 中的 VFW 库函数,通过面阵 CCD 和图像采集卡进行视频捕捉和视频显示,在视频窗口中以窗口左上角为坐标原点,同时以视频窗口中心(仪器光学中心)作为参考基准中心,再通过多线程编程方法,在视频捕捉的同时在另一线程中将捕捉到的每一帧图像转变为灰度图,计算灰度直方图,采用最大方差阈值法对灰度图进行图像分割,提取瞳孔和四个红外光源边界,计算人眼瞳孔中心、瞳孔半径和红外光源半径,之后计算瞳孔中心与预设的基准中心之间的偏移量,以及对红外光源半径大小的判断,最后通过计算机串口操作,传输指令给单片机,驱动步进电机,引导测量平台进行相应方向的移动,与人眼瞳孔保持同步,从而实现人眼瞳孔的三维自动跟踪。其流程图如图 4 所示,瞳孔自动跟踪示意图如图 5 所示。

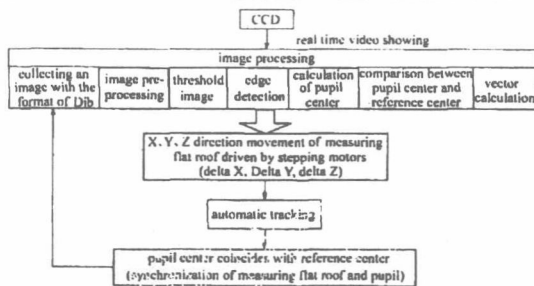


Fig.4 Flow chart of automatic tracking

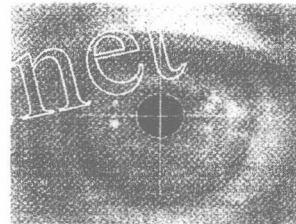


Fig.5 Schematic diagram of automatic tracking

3.3 计算机控制系统

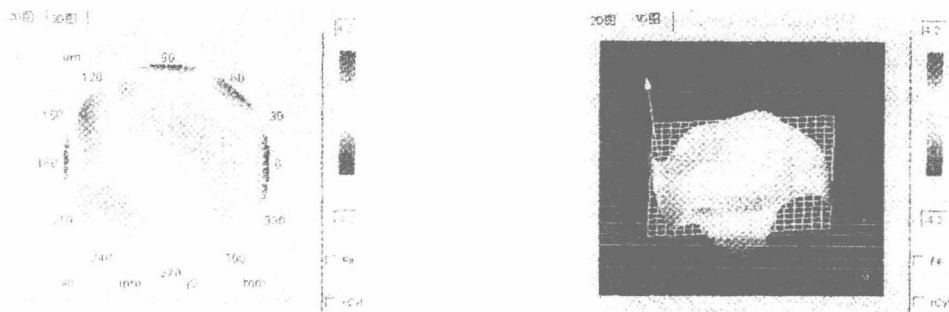
计算机控制系统主要由计算机、单片机、步进电机和测量平台组成。其中涉及阵列板上发光二极管的点亮顺序控制和测量平台的前后、上下、左右方向的移动控制。发光二极管的点亮顺序控制通过计算机 COM1 口实现,其中包括发光二极管的点亮和关闭。像差仪测量平台的三维移动控制是采用计算机 COM2 口与单片机进行串口通信,进行读写操作。针对三个步进电机,在计算机中需要设置它们的速度和方向。速度通过位移量进行判断,分为四个等级,位移量大,速度快;位移量小,速度慢。方向为正负两个方向。速度和方向在计算机中通过软件设置,其他由单片机控制。其中单片机采用 MCS-51 型 8031 系列,步进电机为 110BF003,反应式,步距角为 0.75° ,最大静转矩为 7.84 N·m,工作方式为三相六拍,细分数为 $N=5$ 。当步进电机每走一细分步时,测量平台移动 0.01 mm。

4 数据处理

本像差仪能实现 37 点和 21 点的测量,分别对应大、小瞳孔的测量,具体测量点的分布如图 3 所示,红线内的点为 21 点,程序可以实现 37 点和 21 点的自动切换。本像差仪能测量出 20~35 项像差,对人眼波前像差采用以下两种描述方法^[11]。

第一种称为波前像差图。该图将人眼波前像差按其瞳孔面上不同部位引起的位相差直接在二维图上标出。从一个点光源发出的光线可向各个方向传播,从一点到另外一点的光线行经路线称为光路路径长度(OPL:optical path length)。如果每条光线的 OPL 是相等的,则不存在光程差(OPD:Optical path difference)。在一个完美的光学系统中,OPD 等于 0。而在一个有像差的光学系统中,经过瞳孔不同位置

的光线与经过瞳孔中心的光线相比较,是存在光程差的^[12],可以用伪彩色将这种差异表达出来,即是波前像差图。图6为某眼的二维和三维伪彩色波前像差图。



(a) Two-dimensional wave-front aberration map

(b) Two-dimensional wave-front aberration map

Fig.6 2D and 3D wave-front aberration maps

另一种描述方法是波前像差分解成 Zernike 函数项表示

$$W(x, y) = a_0 + \sum_k a_k \cdot Z_k(x, y), \quad (1)$$

式中 a_0 为平均波面, a_k 为 k 项 Zernike 多项式系数, Z_k 为 k 项 Zernike 多项式。

根据波前像差偏离理想的位置, 总体均方根波前像差 W^2 可由以下公式计算:

$$W^2 = \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^2 (C_n Z_n)^2 + \frac{1}{\pi} \sum_{n=3}^5 (C_n Z_n)^2 + \frac{1}{\pi} \sum_{n=6}^9 (C_n Z_n)^2 + \frac{1}{\pi} \sum_{n=10}^{14} (C_n Z_n)^2 + \frac{1}{\pi} \sum_{n=15}^{20} (C_n Z_n)^2 + \frac{1}{\pi} \sum_{n=21}^{27} (C_n Z_n)^2 + \frac{1}{\pi} \sum_{n=28}^{35} (C_n Z_n)^2, \quad (2)$$

式中 C_n 是 Zernike 系数, Z_n 是偏差因素, 式中七项表达式分别表示第 1~7 阶的偏差总和, 其中 1~2 阶为球-柱径偏差, 3~7 阶为高阶像差。第 1~7 阶像差的均方根 (RMS) 波前像差总和为

$$\text{RMS} = \sqrt{\sum_{n,m} C_{n,m}^2}, \quad (3)$$

其中 C_n^m 为 Zernike 系数, n 为半径依赖性成分, m 为方位角依赖性成分^[13,14]。

同样利用上式也可以求任意阶的波前像差, 例如第三阶的波前像差为

$$\text{RMS}_3 = \sqrt{C_3^{-32} + C_3^{-12} + C_3^{12} + C_3^{32}}.$$

Zernike 函数为一正交函数序列, 其中有些波前像差项 (函数项) 对应于几何光学的波前像差项。如第一项表示 X 轴的倾斜, 第二项表示 Y 轴的倾斜, 第三项表示 $0^\circ(90^\circ)$ 方向上的散光, 第四项表示离焦, 第五项表示 45° 方向的散光, 第七项表示 X 轴上的三阶彗差, 第八项表示 Y 轴上的三阶彗差, 第十二项表示三阶球差, 其余各项均超出了常规的光学像差的研究范围。图 7 为某眼的 7 阶 35 项的 Zernike 系数。

具体计算人眼波前像差的方法如下:

根据前面所述的工作原理可知, 由像差引起的透光视标像位移被转换成显示屏上视标的位移量, 而透光视标像位移量与该瞳孔处的像差成正比, 因此显示屏上视标的位移量 ($\Delta x, \Delta y$) 也与该瞳孔处的像差 $W(x, y)$ 成正比。

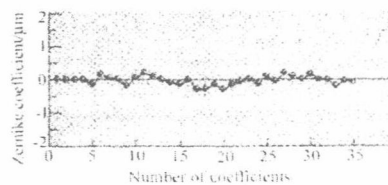


Fig.7 Zernike coefficients of an eye

$$\begin{aligned}\partial W(x,y)/\partial x &= \Delta x/f, \\ \partial W(x,y)/\partial y &= \Delta y/f,\end{aligned}\quad (4)$$

其中 f 为透镜焦距。由 (1) 式和 (4) 式可解得 a_k ，之后由 (1) 式可得 $W(x,y)$ 。

人眼像差仪球面与柱面的屈光度精度为 0.01D，柱面的轴度精度为 1° ，泽尼克像差精度为 $0.1\ \mu\text{m}$ ，可测瞳孔直径 $\geq 4.5\ \text{mm}$ 。球面屈光度的测量范围是 -15D 到 $+15\text{D}$ ，在 $0.00\text{D} \sim \pm 10.00\text{D}$ 范围内时允差为 $\pm 0.25\text{D}$ ，绝对值大于 10.00D 时允差为 $\pm 0.50\text{D}$ 。柱面屈光度的测量范围是 -6D 到 $+6\text{D}$ ，柱面的轴度测量范围是 $0^\circ \sim 180^\circ$ ，柱面屈光度的允差与球面屈光度相同，柱面的轴度的允差为：柱面屈光度在 $0.25\text{D} \sim 0.50\text{D}$ 时为 $\pm 10^\circ$ ；在 $0.50\text{D} \sim 3.00\text{D}$ 时 $\pm 5^\circ$ ；在 $> 3.00\text{D}$ 时为 $\pm 3^\circ$ 。泽尼克像差测量范围是 $-20\ \mu\text{m}$ 到 $+20\ \mu\text{m}$ ， $0.00\ \mu\text{m} \sim \pm 5.00\ \mu\text{m}$ 内的允差为 $\pm 0.50\ \mu\text{m}$ ，绝对值大于 $5.00\ \mu\text{m}$ 时允差为 $\pm 1.00\ \mu\text{m}$ 。

5 临床结果及结论

本仪器由天津眼科医院、天津市眼科研究所和徐州眼病防治研究所、徐州市第一医院眼科做了临床试验并出具了临床试用报告。临床实验中对没有眼科疾病的青年人 57 人 110 眼（可能有近视或远视）进行暗室下 WFA1000 像差检查，每个患者双眼每眼检查三次，每次检查分别为 A、B、C 组。每组进行自身对照。通过随机、对照、随访研究对该设备检查的重复性、准确性、稳定性可以作出良好的对比。

采用 SPSS 统计软件 (10.0 版) 对验证者检查的三次结果的 RMS2 RMS7 值以及 S2 S7 级像差 (采用 (3) 式计算) 的 RMS 逐级递减值进行统计分析，两两比较结果如表 1 所示。

上述结果值每项统计均大于 0.05，表明数据组之间无差异性，重复性和准确性良好。

结论：本文所述的 WFA1000 型人眼像差仪是光学、机械、电路和计算机的有效结合体，机械结构简单，操作方便。能有效测量人眼 20~35 项 Zernike 像差，测量精度达到 $0.1\ \mu\text{m}$ 。同时给出了 Zernike 函数

Table 1 The P values of wave-front aberrations' RMS

Label	P values (1 st to 2 nd)	P values (2 nd to 3 rd)	P values (1 st to 3 rd)
RMS2	0.65	0.16	0.31
RMS3	0.78	0.59	0.86
RMS4	0.90	0.11	0.43
RMS5	0.41	0.48	0.98
RMS6	0.13	0.21	0.61
RMS7	0.93	0.49	0.41
RMS2 ~ S7	0.64	0.16	0.55
RMS3 ~ S7	0.65	0.40	0.70
RMS4 ~ S7	0.59	0.31	0.66
RMS5 ~ S7	0.42	0.38	0.85
RMS6 ~ S7	0.45	0.41	0.62
RMS7	0.93	0.49	0.41
Results	>0.05	>0.05	>0.05

项、二维和三维波前像差图的描述方法，为人眼像差的研究提供了直观的图形和详细的数据。通过临床应用，表明该像差仪的测量重复性好，准确性高。

参考文献:

- [1] Seiler T, Kaemmerer M, Mierdel P, et al. Ocular optical aberrations after photorefractive keratectomy for myopia and myopic astigmatism [J]. *Arch Ophthalmol*, 2000, 118: 17-21.
- [2] Olive KM, Hemenger RP, Corbett MC, et al. Comparison of corneal aberrations induced by photorefractive keratectomy [J]. *J. Refract Surg*, 1997, 13: 246-254.
- [3] Liang J, Williams D R. Aberrations and retinal image quality of the normal human eye [J]. *J. Optical Society of America*, 1997, 14: 2873-2883.