

氏 名 肖 愛 民

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第422号

学位授与の日付 平成11年9月30日

学位授与の要件 数物科学研究科 加速器科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Multivariate Analysis of Beam Orbit at the KEKB Injector  
Linac

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 鎌 田 進  
教 授 榎 本 收 志  
教 授 黒 川 眞 一  
教 授 高 田 耕 治  
助 教 授 小 磯 晴 代  
助 教 授 FOREST ETIENNE  
Karl L. Bane (高エネルギー加速器研究機構  
)

In this thesis, we will discuss multivariate analysis of beam orbit. The core of this work is Model-Independent Analysis (MIA) which was first introduced into accelerator physics by J. Irwin and his collaborators. This is a new method which can be used to do beam dynamic analysis in a real accelerator. It is based on the fact that the variables under study are correlated through the laws of dynamics. If we put them together and treat them as a whole then maybe we can obtain these correlations using some suitable algorithm. That is the starting point of multivariate analysis.

MIA is a method used in accelerator physics, which is based on the BPMs measurements to improve BPMs resolution and find out a realistic model for the real machine. It is a multivariate analysis method. Also, it does not rely on any particular machine model, and therefore it is called MIA.

At the beginning of this thesis, we briefly review what we can do with MIA. Trying to improve the accuracy of BPMs measurements is the first motivation for developing MIA. As we work more, we get more understanding of the method. Then we know how to use it to find out the machine model, wakefield effects, emittance dilution, etc. We are hopeful that we will be able to do more in the future with this method.

There are 4 main parts in this thesis. In section 2, we discuss the MIA method generally by introducing the Taylor expansion of the beam trajectory, removal of known time patterns, analysis by using SVD. In the last section of this part, we give a simple example to illustrate SVD analysis method.

In section 3, we review beam dynamics in linac. When the beam intensity goes up, wakefield effects become a serious part of the beam behavior. We write down the equation of motion in the presence of wakefields. From the equations, we can see that the transverse wakefields will cause an emittance dilution and the longitudinal wakefields will cause a correlated energy spread inside the bunch. We also review the emittance dilution due to filamentation. When the beam is well matched to the machine, this will not be to the main source of emittance dilution. To alleviate the emittance dilution and keep the correlated energy spread as small as possible at the end of linac, we need a technique called BNS damping and auto-phasing. All the theories introduced in this part will be used as the base of our simulation work in the next section.

In section 4, we used MIA method and our knowledge of beam dynamics in linac to do simulations. Through this work, we show how MIA works and what kind of results we can obtain from this method. We also investigate the limitations of this method through the simulations. The simulation work is based on the KEKB injector linac (Sec.A & Sec.B). First, we investigate the possible sources of beam orbit fluctuations. Then, we simulate these sources and examine their effects without wakefields. These results can be used to compare with the beam behavior when the beam current is quite low. Finally, we simulate the beam behavior with wakefields. From the results we can see the wakefield effects clearly, also the emittance dilution can be observed. At the end, we show that for different lattice structures and different beam orbits, the emittance dilution is not the same. These results can be a guide for alleviating the emittance dilution which must be carefully studied

experimentally.

In section 5, we used the MIA method on our experimental data. The results do not only confirmed the MIA method and our simulation work, but also reveal a more realistic machine model. It opens new possibilities which is the most important thing: it tells us how to improve our machine in the future.

In the last part of this thesis, we conclude on what we have achieved and give a glimpse of what can be done as a next step.

## 論文の審査結果の要旨

肖愛民さんの学位請求論文の内容は、ビーム位置モニター（BPM）で測定されたビーム軌道の変動データに対し多変量解析法を適用し、電子リニアックにおけるビーム軌道の時間的変動要因を特定するための一連の方法を開発したものである。

電子リニアックで加速されるビームの軌道位置は、様々な要因により時間的に変動している。主要な変動要因としては、電子銃で生成され電子リニアックに入射する際のビーム初期条件（位置および角度）のばらつき、ビーム路を構成する磁石強度の時間的変動、加速高周波電場の強度や位相の揺らぎ、ビーム自身が生成する電磁場（ウェイク場）の強度変動等が挙げられる。

ビーム路に多数設置されたBPMを使い、通過するパルス毎にビーム軌道を測定した一連の軌道変動のデータには、これら複数の変動要因から生じた効果が重畳している。この軌道変動データから個々の変動要因を抽出し特定することができれば、軌道変動やそれに付随するビームエミッタンス増大などのビーム性能劣化を抑制する道が拓ける。KEKBが代表する高ルミノシティコライダーや高輝度放射光源などビームアクセプタンスが比較的小さい貯蔵リングにおけるビーム入射効率の向上や、さらにX線FELやリニアークライダーで求められている高輝度電子ビームの実現のために、この様な解析方法を確立することが大いに望まれている。

本論文では、スタンフォード加速器センターで提唱された、特異値分解法（SVD）を使用するモデル非依存解析法（MIA）に体系的で明晰な記述を与えた上で、KEKB入射リニアックで実測したビーム軌道変動データに対して、以下で述べる首尾一貫した方法で、このMIA法を適用している。

まず個別具体環境下におけるMIA法の有効適用条件範囲を定量的に決定するため、KEKBリニアックで生じ得る各種ビーム軌道の変動要因を仮定したシミュレーションを行い、BPM精度と実験的に有意な観測量との関係を明らかにした。その上で、KEKB入射リニアックで測定されたビーム軌道の変動データにMIA法を適用した。ここでビーム電流が大きい時にのみ表れる軌道変動の存在を見出している。この軌道変動の原因を探索するために、KEKBで開発されたSADコードを用いて、ウェイク場の影響を考慮した電子ビーム集団運動のシミュレーションを実行した。このシミュレーション結果を測定データの解析結果と対比させることによって、ここに表れた軌道変動の原因がウェイク場の効果によることを証明している。また同じシミュレーション結果に基づいて、ウェイク場の影響で生じるこのような軌道変動には、相当量のビームエミッタンス増大が伴うことを示した。そしてこのエミッタンス増大を緩和する方策として改訂されたビームオプティクスを提案している。

本論文によって明確に体系化され有効性を証明された一連の解析手法は、今後の加速器運転の場において、構成機器の機能確認やビーム性能の向上にとって益するところが大きいと期待される。

以上の所見により、肖愛民さんの論文について、本審査委員会は全員一致により、博士學位論文として相応しい内容を備えておりさらに優秀な研究業績を挙げていると判断し、合格と判定した。